第 7 章 生物指标在环境重建中的应用

7.1 化石生物指标研究的基本原理和方法

湖泊古生态研究的主要目的是重建湖泊及其流域过去生态环境的变化过程，揭示其演化的规律和原因（Birks et al., 1985; Smol et al., 2001）。作为古湖沼学研究的重要内容，古生态研究的主要对象是湖泊沉积物中生物化石，如植物、湖泊藻类、浮游与底栖动物等，这些生物化石以其难以降解和溶蚀的几丁质、硅质、文石、方解石等壳体和骨骼成分，可以保存在沉积物中（Smol et al., 2000）。因此，生物指标作为古生态环境研究的重要手段，提供了过去长期变化的再现，为解决当今面临的关键生态问题提供参照。与沉积物的物理、化学指标类似，湖泊生物化石也分为外源和内源两类指标（Smol, 2002）。前者有孢粉、陆生植物残体、炭屑、植硅石、气孔器等，可以指示流域生态景观的变化；后者包括湖泊硅藻、金藻、介形类、摇蚊幼虫、枝角类、水生植物、鱼类骨骼残体等化石，通过沉积地层中化石分析和种类组合的垂向分布，能够反映湖泊及其流域过去生态系统的变化。对一个特定的湖泊-流域而言，其生态环境的变化不仅受区域自然气候的影响，而且受流域人类活动的影响，因此保存在沉积物中的生物化石蕴涵了气候、人类活动、湖泊及其流域相互作用的信息，其重要性逐渐被愈来愈多的古湖沼学证据所揭示，并在过去全球变化研究中扮演着重要角色。

利用沉积物生物化石开展古生态研究大致经历了 4 个主要发展阶段：①19 世纪，主要是对泥炭沉积物中的孢粉、硅藻等进行化石属种分类和组合的定性描述（Faegri et al., 1975；Battarbee et al., 2001），与现代生态学研究的起步阶段比较一致（Birks et al., 1985）。植物化石研究历史略早于孢粉，但早期主要针对第三系老地层开展一些古植被的恢复和重建工作（Birks, 2002）。②20 世纪初期，人们开始对生物化石（孢粉）进行基于计数统计和百分比的定量描述（Birks et al., 1985），同时开始将湖泊生物化石（如硅藻）用于水污染和环境变化的示踪（Battarbee et al., 2001）。③20 世纪中期，古生物指标被用于古生态解释中，并将之用于解释个体生态学、环境等针对性的问题。④最近 30 年来，古生态研究取得了突飞猛进的发展，各种生物化石如炭屑、鱼类、金藻等实验室提取手段和分析技术日趋成熟，加之沉积岩芯提取技术、年代测定技术的发展和提高、数值分析和转换函数手段的应用，生物化石指标被广泛用于气候变化、人类活动、湖泊酸化和富营养化等古生态环境变化和过程机制的研究中（Stoermer et al., 1999; Battarbee et al., 2001；Smol et al., 2001）。

在一定的区域范围内，每个生物群落和属种都有比较确定的生境要求（Birks et al., 1985; ter Braak et al., 1989; Birks, 1998），可以利用个体生态特征和生物化石组合来进行古生态的解释，进而推导当时的环境条件。古生态的研究离不开对现代生态学知识的掌握和了解，它遵循一个重要的逻辑假设，即所谓的均变假说，认为现代过程和自然规律与过去一样；现代生物和生态学过程在历史和更长地质时期也同样经历过（Birks et al., 1980）。换句话说，影响现代生物丰度和分布的环境因子可以作为推断控制古生物丰度以及分布变化的环境因子。第四纪是与人类活动紧密联系的一个地质时段，而且生物化石与现代生物在形态和生态特征上几乎一致。与现代生态研究类似，古生态是研究过去某个时期的生命过程，以及生物与它们所处的环境之间的关系。但过去的生态系统是无法直接观测的，加之生物残体经历了搬运、埋葬、成岩和再沉积等作用过程，保存在沉积物中的生物化石与现实的生态环境的观测有一定差异，因此在实际研究中，生物化石的研究既有生态学的内容，又属于地质学的范畴，是

研究一定时间尺度上的生态环境的变化。Birks et al.（1980）详细描述了古生态学和现代生态学的关系。

与其它地学研究一样，湖泊古生态研究，必须围绕提出的科学问题来设计研究目标、研究区和研究时段，确定合适的研究点，包括选择具体的湖泊和采样位置。湖泊的选择主要考虑其在研究区内是否具有代表性、湖泊沉积物的特征、沉积物中是否具有丰富的生物化石信息量等。具体的采样点位置则需要根据详细的野外调查分析来确定，例如，通过全湖的水深测量，可以了解湖底地形；通过常规水化学和物理指标的测试，可以了解湖泊生物生长发育的水环境状况；通过系列断面钻孔沉积物理化指标的初步分析和比较，可以获得整个湖泊沉积物的分布和沉积速率分布的特点；利用浅层剖面仪进行断面沉积层序调查等工作，可以对湖泊沉积物的连续性、代表性和是否存在沉积物扰动作出初步分析。通常认为，在湖中心附近的沉积物生物化石组合最具代表性，但对一个湖盆而言，不同部位多钻孔的分析和比较可能获得更全面的古生态和环境变化的信息（Smol, 2002）。对于深水湖盆，钻孔点的选择应避免陡坡部位，以防垮塌作用和再搬运过程对沉积序列造成的扰动；对浅水湖泊，合适的钻孔点应选择在平缓的中央部位，尽可能地避免和减少风浪和底栖动物对沉积物-水界面的干扰（Smol, 2002）。但针对一些特定的生物指标的分析（如植物化石、摇蚊幼虫等），近岸带浅水区的沉积物往往能够提供更多的水生动植物的相关信息（Birks, 2002）。

针对不同研究时段，借助各种采样设备，可以提取相应的沉积岩芯。为了从多个钻孔中挑选合适的沉积柱作为主孔进行详细研究，必须先对多个沉积钻孔进行不同层位少量化石生物样品的预分析（Birks et al., 1980）。目前针对不同门类的生物有机体，均建立了系列的标准实验室分析技术和流程（Berglund, 1986）。化石样品在处理后，根据不同生物化石的分析要求，将提取的生物化石放置在显微镜载玻片上或载物盒中，制成标本，在显微镜下鉴定和统计。生物化石的鉴定应依据权威的分类标准、图版资料和现生的生物标本，需要统计足够的数量进行百分比和浓度计算。例如孢粉和硅藻的记数一般在 300～500 粒左右比较合适。为了便于分析，可以用图表来表示生物化石谱的组成。一些排序分析方法如聚类分析、对应分析等（Hill et al., 1980; ter Braak, 1987; ter Braak et al., 1988）可以用于辅助生物组合带的划分。此外，化石数据解释离不开时间框架，因此精确的年代测定和年代序列的建立是基础。

对化石数据的解释是一个逻辑推理的过程，一般基于以下几个问题开展：①研究区存在什么样的生物群落？②群落由哪些属种组成？时空分布如何？③生物群落反映的过去环境是如何变化的？根据化石数据的分析，首先必须对数据进行定性和定量表达，包括沉积地层中包含的生物属种及其在地层中的丰度变化、通量变化、组合变化等描述。然后根据这些信息重建研究区湖泊和流域过去生物种群的变化，推导古生态和古环境演化。

利用生物化石开展古生态与古环境研究的原理和步骤见图 7.1。

图 7.1 生物化石分析和研究的基本步骤

现代生态调查，包括个体生态和群落生态特征等内容，对古生态研究具有重要意义。例如，通过流域现代花粉调查，可以了解现代花粉产量与植被的关系、花粉的代表性以及花粉的散布、搬运、沉降和保存的规律等（Birks et al., 1985）；通过一定区域多个样点的调查，可以获得不同生境条件下生物的分布规律、生物与环境因子之间的关系（ter Braak, 1987）；通过湖泊藻类、浮游和底栖生物的监测，可以了解湖泊生物与环境之间的关系、生物的年际和年内变化特征、湖泊环境的季节变化和湖水季节分层等对个体生物和生物种群的影响（Bradbury, 1988; Hausmann et al., 2007）。这些工作，可为古生态的解释和环境的推导提供

非常有价值的生态学依据。

利用生物化石组合重建古生态和古环境可以通过以下三种途径来实现：①古-今生物数据的比较方法。该方法假设特定的生物和生境关系不随时间而变化。数理统计分析手段如类比法等可用于帮助识别生物化石组合的现代相似体，尤其是当化石数据比较复杂的情况下，这种方法更为有效。②化石数据的梯度分析方法。即利用间接的排序分析手段，如主成分分析（PCA）和降维对应分析（DCA）等手段（ter Braak et al., 1998），通过样点和属种在坐标轴上的排列情况，依据属种的生态信息，提取影响生物分布的潜在环境梯度，获得环境变化过程。③多代用指标判识方法。在古生态恢复的同时，通过物理和地球化学指标的结合分析，可以获得生态演化的环境特征，包括气候、水文、流域侵蚀、营养盐以及人类活动干扰等。此外，多指标的综合分析还可以为过去生物种群演替的机理解释提供依据。例如，针对湖泊生物对环境的敏感性，可以将沉积参数大致分为两组，即湖泊生物化石数据和反映气候和流域环境变化的数据，通过多变量的直接梯度分析手段，如典型对应分析（CCA）和冗余分析（RDA），进行两组参数之间的关系分析，获得化石种群变化和湖泊生态变化的可能原因和机制（ter Braak, 1987）。

利用现代过程和化石数据的比较来推导过去环境的变化，近年来已向定量化研究发展，如转换函数方法（ter Braak et al., 1989）。该方法假设生物属种与环境因子之间的关系不随时间而变化，可以将现代生物与环境因子的函数关系应用到化石生物数据中，进行古环境的定量重建。目前，现代生物与环境数据库已在全球许多地区被建立，且转换函数法也被广泛应用到多个生物门类的古环境重建。不同生物指标建立的转换函数，为多环境要素的定量重建和重建结果的相互校验提供了条件。随着各个研究区数据库的不断扩大，一些更大区域或跨地区联合数据库已经建立或者正在建立中，这些研究一方面使得转换函数的使用范围进一步扩大，重建精度得到提高；另一方面数据库研究也逐渐扩展到古植被制图、生物群区划分、生物多样性研究和区域对比等方面。

近 20 年来，湖泊沉积研究取得了突飞猛进的发展，多种新的化石生物指标被发掘和应用到古环境研究中。本章在介绍了化石生物研究的基本原理的基础上，对一些常见的化石生物指标，从研究思路和途径、实验分析、古环境应用现状和研究中存在问题等方面进行详细叙述。其中 7.2 节至 7.4 节主要是介绍孢粉、炭屑、气孔器的研究内容；7.5 节至 7.9 节重点介绍一些常见的湖泊生物化石指标，包括藻类化石、水生植物化石、浮游和底栖动物化石；7.10 节简要介绍其它生物门类化石的研究和应用。

7.2 孢粉

7.2.1 概述

7.2.1.1 孢粉学研究对象

孢粉学（Palynology）是研究植物孢子和花粉的科学，是目前第四纪研究中的一个传统学科。孢粉学的内容主要包括两个部分，即孢粉形态学和孢粉分析。孢粉形态学又分为现代孢粉形态学和化石孢粉形态学，前者以研究现代植物孢子和花粉的形态、结构为目的；后者以埋藏在地层中的化石孢粉为研究对象，其研究必须以现代孢粉形态学为基础。孢粉分析是孢粉学中最重要的应用研究部分，研究内容主要涉及地质学（用于地层生物断代与地层的对比）、古植物学（研究区域植被演变史与地史时期植被分区）、古气候学（利用孢粉与植物群落的关系推断古气候）和地理学（利用孢粉研究植被和自然地理条件的关系，进一步推测构

造抬升历史及其气候环境效应等）。本节主要论述孢粉分析在湖泊沉积研究中的应用。

7.2.1.2 孢粉的基本特征

孢粉是孢子和花粉的统称，它们都是植物繁殖器官的一个组成部分。整个植物界，根据繁殖器官的性质可以分为两大类，即孢子植物和种子植物。孢子植物是指凡是用孢子进行繁殖的植物，如菌、藻植物和蕨类植物；种子植物包括裸子植物和被子植物，而花粉是其繁殖器官。孢子和花粉主要由原生质、内壁和外壁三部分构成，有些孢子还具有周壁。孢粉之所以被广泛应用，主要基于以下几个主要特征：

(1) 植物能产生大量的孢子或花粉，成为化石孢粉的机率很高。德国植物学家波尔曾计算过一朵欧洲榛子(*Corylus avellana*)花，其平均含有 2,550,000 粒花粉（Pohl, 1937），可以想象一棵树的花粉产量之大。据估计，全球整个植物界每年能产生数百万吨孢粉。

(2)孢粉体积小，易于传播。孢粉的直径一般介于 10～150μm 之间（Bradley, 1999），由于比重较轻，易被风或水搬运到较远的地方，因此在较大空间范围内，不同的孢粉成分混合在一起，使孢粉组合具有综合特征，这为地层对比提供了条件。

(3) 孢粉壁易于保存。孢粉的外壁含有孢粉素（$C_{96}H_{22}O_{24}$），这是一种复杂的有机化合物，具有极难氧化、在高温和浓酸里都难于破坏的特性。孢粉降落地表后，随着时间的流逝，孢粉内部组织（原生质、内壁）被破坏，但其外壁则被保存下来，形成化石孢粉。

(4) 不同的孢子和花粉具有特定的外壁结构和萌发器官等特征，由此可以鉴定它们的科、属，甚至种级水平。

(5) 特定植物产生特定类型的孢子或花粉，因此孢粉能较好的反映它们沉积时期的自然植被状况，为了解过去气候环境提供可靠信息。

7.2.2 孢粉分析方法

孢粉分析研究的基本步骤包括野外植被分布调查和样品采集以及实验室内孢粉样品分析处理、孢粉鉴定和计数、属种百分含量与浓度计算（有些包括沉积通量）、孢粉图式绘制、孢粉数据分析等方面。在此基础上，通过垂向孢粉组合特征分析，提取古植被演替和古气候环境变化等信息。

7.2.2.1 样品采集和实验分析

孢粉样品的采集应尽量避免人为干扰因素，同时根据沉积物岩性等特征初步估计样品中的孢粉含量，以确定采集的样品量。现代表土花粉研究中，采样必须对研究区设计研究路线，查明当地地质和植被分布情况，通常在所选定的样方（森林区为 10 m^2，草原或沼泽地为 1 m^2）内，于样方的四角和中心部位各取 1 块样品后混合在一起，从中取出适量样品作为表土样来进行分析。苔藓是天然的花粉捕获器，因此尽量采集苔藓进行表土花粉研究。

对现代孢粉样品，实验室采用醋酸法(用醋酸酐和硫酸 9:1 的混合液热水浴)和碱处理法(加 10%的 KOH 热水浴)。对化石孢粉样品，广泛采用的方法主要有氢氟酸(HF)法和酸碱法（又称格里丘克法或重液浮选法）两种。其中氢氟酸法提取沉积物孢粉的方法和步骤如下（图 7.2）：

（1）称重：依据岩性决定分析样品的重量，湖泊沉积物泥样一般 2～5g 即可，砂性较重的样品一般需要 5～20g。

（2）加指示性花粉：将样品放入塑料烧杯中，加入定量的石松孢子作为指示性花粉。

（3）加浓盐酸去除碳酸盐，直至反应完全为止，水洗至中性。

（4）加氢氟酸：在通风厨中加入 40%的浓氢氟酸以除去样品中的硅酸盐（氢氟酸有很强的腐蚀性，一定要注意安全）。

（5）加入 10%～15%的稀 HCl 并加热至溶液变清，然后水洗至中性。

（6）在试管中加入 9 份醋酸酐比 1 份浓硫酸的混合液，水浴 5 分钟后除去孢粉上的原生质，再清洗至中性。

（7）过筛：在超声波发生器中，将洗至中性的样品过 10μm 孔径的筛网，收取网布上的残留物。

（8）保存制片：将收集的样品离心至指型管中，加甘油保存，并制片。

图 7.2 氢氟酸法提取孢粉的流程图

酸碱法提取孢粉的步骤：在加盐酸（10%）处理后，加入 10%～15%的氢氧化钾溶液，搅拌并煮碱 20 分钟；水洗后用比重 2.1 左右的重液离心进行两次浮选；细心吸取离心管内的悬浮液体，然后用混合液处理，获得孢粉浓缩物；最后加少许甘油保存和制片。具体实验流程见图 7.3。

图 7.3 酸碱法提取孢粉的流程图

7.2.2.2 孢粉鉴定与数据处理

孢粉鉴定是孢粉分析的基础性工作，也是孢粉学家最关注的一个环节。目前国际上已出版了许多关于孢粉形态研究的专著和论文，我国孢粉学家主要依据已出版的现代孢粉形态研究成果（如中国科学院北京植物研究所古植物研究室孢粉组，1976; 中国科学院植物研究所古植物室孢粉组，1982；席以珍等，1994；王伏雄等，1995）进行孢粉鉴定。孢粉鉴定和统计在显微镜下完成，一般只能鉴定到属级水平，有些仅能鉴定至科，只有极少的孢粉类型能够鉴定到种级水平。

孢粉统计要达到一定数量，对于湖泊沉积物样品至少统计 300 粒以上。孢粉数据通常用百分比含量和浓度表示，当有详细的定年数据时，还可以计算孢粉沉积通量。孢粉百分比是指孢粉个体与某一个孢粉集合体总量的比值，用百分数表示。这个孢粉集合体总量可以是所有孢粉类型的总量、所有陆生植物花粉的总量或所有木本植物花粉总量。孢粉百分比含量可指示母体植物在当时当地植被中的相对丰富程度。应当指出，孢粉百分比含量并不等于植物在植被中的百分比，因为孢粉的产量、传播能力、沉积环境、保存特性等诸多因素都对孢粉的百分比含量有影响。但由于孢粉百分比含量有效地排除了统计者的主观因素的影响，而且使用方便，故至今仍是孢粉分析应用最频繁、并被研究者普遍接受的表达方式。其计算公式如下：

$$Pij = \frac{Nij}{\sum_{k=1}^{n} Nij}$$

其中 Pij 表示样品 i 中第 j 种植物孢粉的百分数，Nij 为第 i 号样品 j 种孢粉数量，n 为孢粉属种数。

孢粉浓度是指在单位体积或单位重量的沉积物中所含的某类孢粉或所有类型孢粉的粒

数（单位：grains/cm^{3}或 grains/g）。孢粉浓度的计算一般采用外加孢粉法，其计算公式为：

$$C = \frac{A}{E} \times \frac{F}{V}$$

式中 C 表示单位体积或单位重量样品中孢粉的粒数（grains/cm^{3}或 grains/g），A 为鉴定统计到的孢粉粒数，E 表示统计的外加孢粉粒数，F 为外加孢粉粒数，V 为样品的体积(cm^3)或重量(g)。

孢粉浓度受沉积物沉积速率的影响很大，在同样的植被条件下，沉积速率的增大会引起孢粉浓度的降低。为此，可以通过计算孢粉沉积通量来解决这个问题。孢粉沉积通量表示单位时间在单位面积上沉积的孢粉粒数（单位：grains/cm^2•yr）。

7.2.2.3 孢粉谱与分带

孢粉谱是指所列举的每个样品中各种孢粉属种的比例分布和组合特征。通常将各属种的变化用孢粉图式来表达。孢粉图式包括百分比、浓度和通量图式。绘制孢粉图式时，一般按生态类型划分乔木、灌木、陆生草本、水生草本、蕨类等类别，然后绘制主要孢粉属种图式（图 7.4）。孢粉图式的绘制一般用专门制图软件 Tilia Graph (Grimm, 1990)绘制。为使结果的解释更方便，需要把孢粉图谱划分为若干个带甚至亚带，通过对组合特征的描述，使植被演替过程显得更加明显，由此更清晰地反映出古气候变化的阶段性。

图 7.4 新疆乌伦古湖全新世孢粉组合

孢粉组合带的划分既可以通过经验判识，又可以借助于数值分析手段。经验判识划带主要根据孢粉组合中含量较高的孢粉属种以及具有明确生态指示意义的孢粉类型的变化特征来划分，同时考虑其他伴生种的变化。这需要具有一定的植物现代生态学知识。用于孢粉带划分的数值方法主要有聚类分析、主成分分析、对应分析等，它们都是根据样品之间的相似性或差异程度进行排序，来对样品进行归类。目前，最常用的划带方法是 Tilia Graph 软件中设计的 CONISS 程序（图 7.4）。而在实际操作中，一般采用数值分析与经验划带相结合的方法进行孢粉组合带的划分。

7.2.3 孢粉分析原理

7.2.3.1 孢粉的散布与来源

化石孢粉谱的解释需要了解孢粉的产量、散布、来源、沉降过程、迁移规律和保存状况及其与植被的关系等，这是孢粉古生态和古环境重建的基础。不同植物的孢粉产量差别很大，而且由于孢粉的结构、形状、大小与重量不同，其散布行为和途径也不尽相同。一般来说，具有气囊结构的松科花粉传播的距离较远。据观察，带气囊的松属花粉，靠风力传播最远，在 600～1000 m 以外都能检测到（Гричук et al., 1948; Birks et al., 1980）。李文漪等（1998）对巴山冷杉的表土花粉研究得出：距冷杉林 1 km 以外其浓度迅速降低至 10%以下；而 3 km 以外浓度仅有不足 1%；但距源区 50 km 时，有时还可偶尔检测到冷杉花粉。阔叶树花粉主要降落在森林内，分布区外仅个别出现。草本和蕨类植物一般传播距离不远。因此，通过对

不同植物孢粉产量和散布途径的了解，可以帮助我们了解不同植物孢粉在植物种群中的相对重要性。

对孢粉的传播方式和途径以及从生长地最终到达沉降点的传送过程的了解，是判识孢粉来源的关键。湖泊沉积物中孢粉的传播受多种因素影响，如湖盆周围森林覆盖率及其密闭程度、湖泊本身的情况（形状、大小、距林地的距离）、湖盆周围的地形组合状况、风速、水流以及各种生物因素等。对孢粉散布研究表明，大多数通过风传播的孢粉传播距离一般不超过 0.5 km，大而重的颗粒比小而轻的颗粒更易沉降（Dyakowska, 1936）。例如，水青冈和落叶松花粉相对较重，降落的地方离源地较近，因此，沉积物中水青冈和落叶松属化石花粉的出现指示了当时它们的植物生长在这个地点的附近。一个周围植被覆盖率很高的较小湖泊，其孢粉主要来源于湖泊周围，大致反映了地方性的植被信息；而对一个大型湖泊，花粉来源于较大的区域，孢粉组合可以反映区域植被变化的信息。研究表明，研究区域性的植被与气候，一般选择相对较大湖泊的沉积物进行分析较适宜，因为这些湖泊中的孢粉代表的是区域孢粉雨的信息，而不过多地受采样点附近的植被的影响（Prentice, 1985）。

7.2.3.2 花粉与植被、气候关系

研究现代孢粉雨的目的是揭示现代孢粉与植被之间的关系，为正确解释化石孢粉、重建古植被提供依据，并在此基础上，根据现代植被与气候之间关系，进一步重建古气候。现代植物群落可以被认为是过去植被的相似体，因此，如果现代孢粉雨的孢粉组合相似于某个时期的化石孢粉组合，那当时的植被和气候被认定为与现在这个地区的植被和气候相似。如果在现代孢粉雨中不能发现与化石孢粉组合相似的孢粉组合，则可认为当时的植被群落和气候与现代没有相似性（Ritchie, 1976）。这种方法的关键是要在现代植物群落中采集足够多的与化石孢粉组合相似的植被组合。近几十年来，国际上大量的现代孢粉雨工作大多围绕表土孢粉研究展开。在我国，近年来对表土孢粉也进行了广泛的研究，取得了丰硕的成果，研究区域覆盖中国北方、青藏高原、中国东部、中国南方和我国中部的主要生态类型区（Sun et al., 2003; 许清海等，2007；郑卓等，2007；于革等，2002；刘会平等，2001；Shen et al., 2006; Lu et al., 2008）。这些研究成果表明，不同的植被类型存在相对应的孢粉组合，即现代孢粉雨与植被存在较好的对应关系，即使是那些不同植被群落交错出现的地区也基本符合这种对应关系。例如，Lu et al.（2008）通过对青藏高原及其周边地区 800 多个表土孢粉数据的分析，探讨了云杉和冷杉花粉丰度与亚高山针叶林空间分布、海拔和气候之间的关系（图 7.5）。研究表明，云、冷杉花粉含量之和大于 20%，指示存在亚高山针叶林；在树线以上海拔 800 m 范围内，云、冷杉花粉含量之和降到 15%以下；在无林区，其含量不超过 6%。云、冷杉花粉出现的最适宜高度是 2500～4000 m，并且其含量随海拔增加而减少。云、冷杉花粉出现的相应年均温为－1°～10℃，年均降水量为 450～850 mm。该研究揭示了云、冷杉花粉与现代植被在空间分布上存在明显的一致性，这为青藏高原化石花粉的解释提供了重要参考依据。

图 7.5 青藏高原及周边地区现代表土孢粉雨中云杉和冷杉花粉含量的空间分布 （Lu et al., 2008）

孢粉产量和传播能力不同以及千变万化的自然条件，往往造成的孢粉散布复杂多变，并集中体现在孢粉组合及其数量中，从而产生孢粉的代表性问题。通过研究表土孢粉与大气花粉雨，探讨孢粉与现代植被之间的数量关系可能是解决这一问题的关键方法之一。1963 年

Davis（1963）提出了 R 的概念，对认识孢粉与植被关系起到了重大作用。后来人们发现，R 值没有考虑外来孢粉的影响，而且不同地点、不同植被的 R 值存在明显的不稳定性（Mary, 1989）。Davis（1984）提出了联合指数 A 的概念，用以定量描述孢粉与植被的关系。Prentice（1985）和 Randy（1995）还提出用孢粉源面积、孢粉产量和沉积盆地的大小来判识孢粉与植被的关系。近年来，生态学统计分析方法，如聚类分析（CA）、主成分分析（PCA）、降趋对应分析（DCA）等也被应用于孢粉与植被关系的研究中（Hjelle, 1997; Vincens et al., 1997; Jackson et al., 1995; Caroline et al., 2001）。

植物的生长发育直接受温度、湿度、地形地貌、土壤等自然因素的控制，不同的自然条件和不同地理带均生长不同的植被群落。根据孢粉组合恢复的植物群落的特性以及植物群落中主要成分的生态特征，可进一步推测该时段的气候状况及其变化过程。如在某一地层中发现了大量野桐、山矾、山龙眼及冬青等的花粉，可以推断当时为湿热多雨的气候；反之，如果地层中发现了大量麻黄、蒿属、藜科的花粉，表明当时为干旱少雨的气候条件。

影响孢粉谱正确反映植被的因素概括起来主要有以下三个方面：①孢粉本身的因素，如：孢粉外壁的坚固程度、孢粉的飞翔能力、不同植物的孢粉产量等对孢粉谱能否正确反映植被状况有很大影响。②自然环境因素。孢粉传播的动力一般是风、水和动物携带，其中以风和水对孢粉的传播影响最大。另外，沉积相带差异、沉积物中孢粉的分选性等也对孢粉谱有影响。③人为干扰因素，包括野外采样、实验操作的不当以及鉴定者的水平等，都在一定程度上影响数据的准确性。

对上述各种影响因素，前两类因素可以根据孢粉传播和产量研究的不断深入，逐渐求出各植物花粉校正系数以减少误差；而人为因素的影响，只要在工作中严格按采样和实验规范执行即可避免。

7.2.4 湖泊沉积孢粉在古环境研究中的应用

湖泊沉积物中生物信息量丰富，其化石孢粉记录是地质历史时期古植被的表征和古气候信息的可靠载体，通过湖泊沉积物孢粉分析，既可以揭示湖泊流域生态系统的发展历史，也可以重建不同时间尺度的区域植被演替和气候变迁。此外，湖泊历来是人类活动最频繁的场所，其沉积物化石孢粉也保存了流域毁林、耕作农业等信息，可以通过孢粉研究揭示人类活动对流域植被和生态环境的影响，评价人类活动对环境的干扰。本小节侧重介绍利用湖泊沉积物的孢粉资料进行植被演替和气候重建以及揭示人类活动影响等方面的几个研究实例，最后简要介绍和评价孢粉在环境定量研究中的应用前景。

7.2.4.1 孢粉在古植被与古气候研究中的应用

湖泊沉积钻孔的化石孢粉很早就被用于第四纪古气候重建，也是最早被用于提取古气候要素信息的生物化石指标。通过对湖泊沉积钻孔中化石孢粉的提取和鉴定、孢粉数据的处理、孢粉谱的绘制与分带以及对孢粉组合特征的综合分析，可以揭示研究区周围的区域植被演替和气候变迁历史。

刘兴起等（2002）、Shen et al.（2005）通过对青海湖东南部一长为 795 cm 的钻孔岩芯进行高分辨率的孢粉研究，揭示了约 20 cal. ka BP 以来青海湖流域植被演替和区域气候变化的历史。根据沉积物花粉中各科属花粉百分比和浓度的变化，划分出 6 个孢粉组合带（见图 7.6 和图 7.7）。孢粉组合反映流域植被经历了荒漠草原（约 20~18.2 cal. ka BP，相当于孢粉组合带Ⅰ）、以蒿、云冷杉和松为主的疏林草原（18.2~15.4 cal. ka BP，组合带Ⅱ）、以云冷杉和蒿为主的疏林草原（15.4~12.1 cal. ka BP，组合带Ⅲ）、以桦、蒿和莎草为主—云杉、蒿

和莎草为主—松、禾本科、蒿和莎草为主的森林草原或森林（12.1~5.8 cal. ka BP，组合带Ⅳ），以蒿为优势的疏林草原（5.8~2.1 cal. ka BP，组合带Ⅴ）以及草原（2.1~0 cal. ka BP，组合带Ⅵ）等 6 个大的演替阶段。根据古植被变化，推导出青海湖地区 20 cal. ka BP 以来的气候变化的过程：末次冰期盛期为寒冷干旱的气候；18.2~15.4 cal. ka BP 的冰川消退初期该区气候开始略显好转，为凉干气候条件；15.4 cal. ka BP 后，气候进一步好转，温度和湿度均有所增加，为温凉偏湿特征；12.1~5.8 cal. ka BP 的全新世早中期，气候由温暖偏干向暖湿变化；至全新世中后期，气候逐渐转凉变干；2.1 cal. ka BP 以来，气候向冷干方向发展。

图 7.6 青海湖钻孔记录的主要花粉类型、含量和浓度变化（据刘兴起等, 2002）

（用氢氟酸法提取花粉，用聚类分析划分组合带。年代为去除老碳效应后的校正年代数据。）

图 7.7 青海湖钻孔记录的木本花粉、草本花粉浓度和孢粉总浓度变化（刘兴起等, 2002）

（曲线为 7 次滑动平均结果）

孢粉组合还揭示青海湖地区过去 2 万年来几个明显的气候突变事件（图 7.7）。晚冰期期间，在约 16.0~15.4、14.1~13.7 和 12.9~12.1 cal. ka BP 期间，出现 3 次冷干事件，分别相当于欧洲的老、中、新仙女木期；全新世早期，9.8~9.1 cal. ka BP 期间，青海湖地区也经历了一个比较明显的冷期，孢粉浓度显著降低。综合对比分析表明，孢粉重建的古气候反映了东亚季风演化的规律，2 万年以来青海湖东亚季风增强、盛行和衰退的时间，同北半球夏季太阳辐射的增强、达到最大以及减弱的时间基本上是一致的，表明青海湖万年尺度上东亚季风的源驱动力同太阳辐射有关。而在千~百年尺度上，气候的不稳定性可能受北半球冰盖的影响（刘兴起等, 2002; Shen et al., 2005）。

肖霞云等（2007）通过对滇西北鹤庆盆地 737.72 m 长的湖泊沉积岩芯进行的高分辨率孢粉研究，揭示了 2.78 Ma 以来鹤庆盆地周围山地的古植被与古气候经历了 6 次大的变化过程（图 7.8、图 7.9），即 2.78~2.729 Ma，研究区周围山地主要被松林所占据，垂直植被带结构简单，反映气候相对温暖干旱；2.729~2.608 Ma，寒温针叶林和铁杉林面积增加较多，已存在结构清楚的垂直带谱，盆地周围较低海拔区气候相对温暖湿润；2.608~1.553 Ma B.P.，研究区周围山地大部分被松林所占据，寒温针叶林林带上升，反映气候整体偏暖干；1.553~0.876 Ma B.P.，研究区周围山地的垂直植被带增多，并且植被带上下迁移的幅度变大，反映气候变化幅度增加、气候组合特征更加复杂且大部分时期偏冷；0.876~0.252 Ma B.P.，研究区周围山地已呈现类似现今的所有植被带，各植被带的组成成分较其前期更丰富且复杂，它们在不同时期此消彼长，互相更替，而且其上下迁移的幅度是整个剖面中最大的，反映气候变化的幅度更大但频率降低、气候的组合特征更加复杂；0.252 Ma B.P.至今，研究区周围山地的大部分时期是松林和半湿润常绿阔叶林的扩张期，其它植被带扩张的时期很短，反映气候冷暖波动的幅度减小。在上述 6 次大的古植被与古气候变化背景下，还可划分出多次次一级的植被演替与气候波动（肖霞云等，2007）。在此基础上，进一步探讨了鹤庆盆地植被演替与气候变化的驱动机制，初步认为其主要影响因素是轨道参数等外部因素，但在两次山地垂直植被带明显增加和三次大的气候转型时期，青藏高原隆升也对鹤庆地区的环境变化起了非常重要的作用。

图 7.8 云南鹤庆深钻孢粉百分比图

图 7.9 云南鹤庆深钻孢粉浓度图

7.2.4.2 孢粉在人类活动影响中的应用

孢粉与人类活动之间的联系是通过人类活动对植被的影响建立起来的。早在 20 世纪 30~40 年代，人们就已经将地层中乔木花粉和谷物花粉的变化用于揭示流域人类活动的影响（Firbas, 1937; Iversen, 1949)。20 世纪 80 年代以来，人类活动的影响研究开始得到广泛关注，这些研究包括耕地、狩猎和放牧对植被生态景观的影响（Dimbleby, 1985; Behre, 1986; Birks et al., 1988; Hicks, 1993; Carpelan et al., 1995）。现代热带雨林的迅速减少和生态环境恶化，都与人类活动有直接的关联（Gascon, 2000; Achard, 2002; 林海, 2002）。

利用孢粉提取人类活动的信息，需要借助对现代被干扰植被和生态景观的了解，来识别反映人类干扰的孢粉指标，包括居住地、田间、休耕地、人工经济林地等孢粉组合特征以及农作物花粉形态特征等信息。此外，自然原因和人类干扰影响下的植被生态状况，其植被变化的速率、模式和变化趋势是有差别的，可以通过数值分析手段对人类活动的信号进行提取。

近年来，我国孢粉学在考古、东西方文化传播、人类活动对植被影响等方面的研究得到迅速发展（Li et al., 2007; Shen et al., 2006; 李宜垠等，2008）。如 Li et al.（2007）通过对黄土高原全新世系列古人类遗址剖面化石花粉、种子和植硅石等多生物指标的人类活动信号提取，探讨了中国西北新石器中、晚期人类活动方式和农业活动的特征。并在此基础上，从作物起源和分布特征上，探讨了东西方作物传播和文化交融的时空特征。李宜垠等（2008） 把反映人类活动的孢粉谱特征归结为 5 个方面，即乔木花粉减少、先锋树种花粉显著增加、栽培作物和田间杂草花粉相伴生、花粉通量或浓度和丰富度变化、喜氮植物和牧场杂草花粉出现。

湖泊和流域是密不可分的，流域人类活动引起的生态环境变化信息通过物质输移进入湖泊，并最终保存在沉积物中。因此湖泊沉积被经常用于揭示早期人类活动的信号，包括森林砍伐、人类用火、土地利用、土壤侵蚀和人口迁徙等（Lagerås, 1996; Higuera-Gundy et al., 1999; Noël et al., 2001; Vermoere et al., 2002），是研究人与自然相互作用的重要信息载体。在利用湖泊沉积孢粉研究人类活动时，必须与考古、历史文献记录进行比对，并与其他相关生物指标如炭屑和植硅体、沉积物的理化指标如与侵蚀相关的指标等进行综合分析，以便更准确地恢复人类活动方式和强度的历史演革。

洱海位于云南西北部，是新石器时期人类活动比较频繁、记录较多的地区之一，考古发现的最早人类活动遗迹的时代在 4000 年前后。通过洱海北部湖心一个 6.62m 长的钻孔沉积物高分辨率的孢粉分析（图 7.10），研究了洱海流域全新世时期森林植被变化的历史过程（Shen et al., 2006）。结果表明，约 12950～6370 cal. a BP，花粉中铁杉和常绿阔叶属种组合反映了当时洱海流域山地垂直植被带特征。山地上部以铁杉林发育为主，并有少量云冷杉、松、落叶阔叶树桦等；山地下部坡地和盆地周围以青冈栎、硬叶栎、栲和石栎等为主，代表了常绿阔叶林类型。约 6370 cal. a BP 后，青冈栎、栲、铁杉等树种相继大幅度减少，针叶松林迅速占据了整个流域的大部分地区。与松的增加相对应，一些陆生草本如禾本科、蒿、藜、车前和水生草本狐尾藻等也开始出现并增多。2140 cal. a BP 后，花粉浓度的急剧下降，指示流域内森林覆盖度明显降低。

图 7.10 洱海沉积钻孔花粉含量变化（Shen et al., 2006）

（铁杉代表高海拔森林树种，青冈栎、栲等为山麓和盆地周围主要植被类型，松为目前该流域主要的次生林类型，禾本科等草本与人类干扰有关。年代为 ^{14}C 校正年代）

洱海钻孔孢粉组合指示的植被演替表明该流域植被在 6370 cal. a BP 前后出现了一次重大的变化。6370 cal. a BP 前，该区以自然垂直植被带谱发育为特征，常绿阔叶林面积的持续扩大和铁杉林的稳定发育指示了全新世早中期温度的不断上升和西南季风的增强，夏季降水增多的气候环境。但此后，山地不同海拔的垂直植被带谱中建群树种在极短的时间内被次生松林所取代，标志着洱海盆地周围垂直植被带谱的退化，并一直维持到现在。花粉数据的降维对应分析（DCA）结果同样清楚地显示了植被在 6370 cal. a BP 后的大转变。禾本科、车前等人为指示花粉的出现和增多与松增加的一致性等证据均表明，人类活动是引起森林垂直带谱退化的主要驱动因素。由此可见，早期人类活动已经对流域植被产生了深刻的影响，花粉的记录模糊了自然变化的信息。6370 cal. a BP 后常绿阔叶树青冈栎－硬叶栎、栲－石栎和针叶树铁杉的相继下降反映了早期人类对山地森林植被由下至上的选择性砍伐。禾本科、蒿、藜科、车前和唇形科等含量的增加标志着洱海沿岸原始农业的开始和定居点的出现，同时也指示了畜牧业的存在。洱海周围许多新石器遗址中发掘的各种陶器、地窖、谷物、动物骨骼等遗存也反映当时的人类活动是以农业兼狩猎的社会经济，但在时间上，花粉记录的人类活动要早于考古学提供的年代（约 4000 a B.P.左右）。孢粉组合揭示的在 6370 cal. a BP 前后的人类活动干扰也为其它沉积代用指标如粒度等变化所印证。

根据花粉浓度，洱海周围大面积的毁林始于约 2140 cal. a BP 前后，并一直延续到 20 世纪。花粉含量显示该阶段早期（2140 ～1100 cal. a BP 期间）禾本科含量有适度增加。约 1100 cal. a BP 后，禾本科含量成倍上升，指示了湖泊四周农田耕作范围的进一步扩大。阔叶树种和杂草花粉的增多还与定居点的增多以及定居点周围普遍人工种植阔叶林有关。花粉浓度反映的强烈毁林开始时间与历史记载的人口第一次大量迁入云南以及洱海地区第一个行政区（叶榆县）设立的时间相接近。根据资料记载，叶榆县位于现今洱海西岸喜洲村一带，当时的居民点附近有栽培阔叶树种的历史记录，与花粉推导的结果相一致。流域内该时期发掘的大量青铜制品也指示早期人类活动的增强。

7.2.4.3 孢粉在定量研究中的应用

化石孢粉数据用于气候定量重建，最早使用指示种法（Iversen, 1944; Churchill, 1968; Grichuk, 1969）。该方法根据某个或某些特征种的现代生态条件来推断沉积时期的古气候。如用云杉花粉推断盛冰期时的古温度，就是一种简便易行的方法，至今仍在应用，但只能得出定性、半定量的结果，且具有多解性。尽管这种方法在 80 年代得到改进，但由于在计算操作上十分繁琐，在实践中未能推广使用。随着大量的表土资料的采集和分析，转换函数方法（Cole et al., 1968）被提出，多元线性回归方法被用于古气候参数的定量推算（Webb et al., 1972; Imbrie et al., 1981; Bartlein et al., 1984），但该方法并没有考虑花粉类型的生态分布特点，而是假定花粉与气候之间具有某种线性关系，故适用性较差。如在北美东北部用该方法成功的重建了 7000 年以来的古气候变化，但在北非的定量研究结果却并不理想（Overpeck, 1985）。

80 年代后期，花粉-气候响应面方法（Pollen-Climate Response Surface）被发展起来，并

成功应用于 COHMAP 等各种重要古气候研究项目（Bartlein et al., 1986; Webb et al., 1993）。此法选取若干有代表性的花粉类型，逐类地将现代花粉丰度在地理空间的分布转换为在气候空间(如年降雨量与夏季气温为坐标)的分布，然后用二次或三次趋势面分析的方法求出该类花粉分布的气候最佳条件（最高值）与极端条件（最低值），将化石花粉组合的数据与各种花粉的气候响应面对比，便可求得古气候参数。由于此法建立在逐类花粉的生态分布资料基础上，并且考虑了花粉与气候之间的非线性关系，因此具有较广泛的适用范围。但是趋势面分析方法在原理上还不是十分完善，所得结果往往是一种近似值，常常没有精确的或唯一的结果（张启锐, 1990）。

目前国际上使用较多的一种定量方法是最佳类比法（Guiot, 1987）。该方法依据现代气候资料和表土花粉的数据资料，通过类比的方法找出最趋近化石花粉组合的现代相似组合。其主要过程是用欧氏距离计算化石和表土花粉类型的差异，并根据相似型的现代表土样品的气候参数计算出古气候参数值。该方法具有很强的数理基础，可信度高，已成功地应用在第四纪古气候的重建中（Guiot et al., 1989; 1993; Guiot, 1990）。此方法结合 Prentice 等提出的生物群区模型（Prentice et al., 1992），得到了不断的改进和完善（Guiot et al., 1996; Peyron et al., 1998）。

随着不同区域现代孢粉数据库的建立，孢粉定量手段研究得到不断发展，除上述方法外，共存类群生态因子分析方法（The Coexistence Approach）（Mosbrugger, 1997）、非线性回归转换函数方法、生物群区化（Prentice et al., 1992）方法等在古植被和古气候定量重建中正被越来越多的研究者所接受。

我国在使用孢粉资料进行定量重建古植被和古气候研究方面起步较晚，但发展较快。从 20 世纪 90 年代，中国孢粉学家开始致力于中国第四纪孢粉数据库的建设（中国第四纪孢粉数据库小组, 2000; 2001)。同时，大量吸收国际同行使用孢粉定量重建古气候的方法，在中国尝试性地开展定量和半定量重建古气候的工作，并取得了很好的效果。如孙湘君等（1996）通过中国北方 200 多个表土花粉数据，使用花粉-气候响应面分析方法，研究了中国北方地区部分科属的花粉的百分含量和气候因子之间的关系；宋长青等（1997）以中国北方 215 块表土孢粉样品的分析结果中 13 种花粉类型与 4 种气候参数为基础资料建立花粉-气候因子转换函数，并应用于内蒙中部调角海子 DJ 钻孔岩芯，定量重建该地区 10 000～2 100 a BP 的气候变化。郑卓等（1999）使用中国南方和亚洲热带 265 个现代孢粉数据，采用类比法对雷州半岛的第四纪孢粉数据进行了孢粉-气候的定量转换，并获得我国热带地区近 40 万年来的年均温度和年降雨量古气候曲线。

7.3 炭 屑

7.3.1 概述

火是自然植被系统演替的驱动因素之一（Gibert, 1962; Johnston, 1970），包括天然火和人类用火，前者是气候的重要标志之一，后者则是人类活动的证据。火作为一种独特且重要的生态环境因子, 无论在过去还是现在，都对环境产生着重要影响。因此，火的研究是理解植被的演化，重建古气候以及揭示人类火活动状况的一个重要途径。沉积物中的炭屑是植物体不完全燃烧的产物，它可以保存原来植物的某些结构，也可以是无结构的球形体，在花粉分析中常见的黑色团块大部分是炭屑（Morrison, 1994）。

炭屑作为火发生的直接证据，在沉积物中易于保存下来。因此，在时间序列上，炭屑可以提供火活动的连续资料；在空间上，分布广泛、容易获得，同时粒径较大的炭屑具有原地

埋藏，不随气流漂移等诸多优势，能真实、客观地反映当时的植被状况。在解释炭屑记录的意义时，一般把炭屑分析与孢粉指标结合起来研究过去气候、植被和火之间的相互关系以及过去人类活动的历史（Patterson et al., 1987; MacDonald et al., 1991; Clark et al., 1998; Whitlock et al., 2003）。

7.3.2 炭屑的特征

炭屑是由植物体不完全燃烧所产生的一种非晶态无机碳化合物（Patterson et al., 1987），其形成的温度在 280~500℃之间（Chandler et al., 1983），更高温度将使有机物质充分燃烧变成灰烬，温度更低则仅会使有机物质轻度烧焦而不会烧成炭（Whitlock et al., 2001）。炭屑在显微镜下呈不透明、有棱角、黑色或棕色的块状物（图 7.11）。沉积物中的其他黑色物质如矿物、植物碎片和昆虫表皮等常常会与炭屑相混淆，但仔细辨别后可以区分。炭屑一般通过直接观察和破碎法（Umbanhower et al., 1998）以及对照已出版的图片（Clark, 1984; Sander et al., 1990）来进行鉴定。

图 7.11　粒径大于 250 μ m 的大炭屑（箭头所示）（Whitlock, 2001）

7.3.3 炭屑的传播与沉积

炭屑数量和类型受火的强度、持续时间、温度、湿度及空气含氧量、植被类型和组成、森林植被的密度、水文条件等诸多因素影响（Erdtman, 1972; Rowley-Conwy, 1982; Pyne et al., 1996）。炭屑形成后，从源地到沉积地点主要靠空气和水流搬运（Patterson et al., 1987）。炭屑的传播距离主要根据现代火的研究或模型模拟来估算，一般认为，粒径>1000 μm 的炭屑就近沉积（Clark et al., 1997）；粒径>125 μm 的炭屑颗粒主要沉降在离火源地 7 km 以内的范围内，超出这个范围很少有粒径>125 μm 的炭屑颗粒沉降；而微粒级的炭屑颗粒可能会被传送到几百甚至几千公里远的地方。对湖泊中现代炭屑的富集研究表明，炭屑的沉降能延续至火发生后的几年甚至几十年内（Whitlock et al., 1996; Anderson et al., 1986）。据此，地层记录中的炭屑峰值很可能是火发生期间和火发生后相当长一段时间的炭屑共同沉降而成，因此，依据湖泊中的炭屑丰度推测过去火的强度或火的大小时应该非常慎重。

7.3.4 炭屑的研究方法

沉积物中炭屑的分析方法主要有筛选法、薄片法、化学分析法和孢粉分析法（Whitlock et al., 2001）。筛选法是把样品直接过孔径为 100 μm 的分析筛，过完筛后，把样品倒入贴有网格的培养皿中，然后在体视显微镜下数出直径大于 100 μm 的炭屑颗粒的数量，表示为单位体积样品中有多少粒大炭屑（Millspaugh et al., 1995; Long et al., 1998）。薄片法是先用丙酮使样品脱水，然后在样品中加入环氧树脂，固化，最后切成薄片。薄片法的炭屑计量是基于粒径分级，统计方法是用一个格网在每个薄片上沿着不同的横断面移动，记下大炭屑（直径>50 μm）的炭屑数量和面积（Clark, 1988; Rhodes et al., 1995）。这两种方法主要用于较大粒级炭屑的鉴定和统计，根据这两种方法统计的炭屑可以重建地方火的情况。化学分析法主要是用硝酸去除样品中的有机质，运用烧失量来计量沉积物中炭屑的含量（Winkler, 1985; Laird et al., 2000）。这种方法对样品中所有的炭屑进行了分析，因而避免了炭屑大小的估算。该方法虽然处理过程简单，但结果不太可靠，因为当样品中炭屑含量较少时，烧失量还受其

它因素的影响（MacDonald et al., 1991)。孢粉流程法对炭屑的提取方法见标准的孢粉提取方法，其统计方法是用一个网格在孢粉片上逐渐移动，仅统计与网络线交叉的炭屑颗粒，由此再估算炭屑的面积。这种方法主要针对细炭屑进行统计，重建的是区域火的历史（Swain, 1973; Cwynar, 1978; Clark, 1982）。近年来，结合筛选法和孢粉流程法的优点进行炭屑提取的方法被采用，即用筛选法对样品中粒径>125 μm 的大炭屑进行提取和统计，而使用孢粉流程法获得粒径小于 125 μm 的小炭屑（李小强等，2006）。

7.3.5 炭屑记录的解释

炭屑是火事件的真实记录，尽管通过不同大小炭屑浓度变化和传输距离的相对远近可大致对炭屑来源进行初步判识，但由于风向、水文条件、炭屑的次级搬运等原因，炭屑峰值往往与已知的火事件发生时间并不对应（Mohr et al., 2000; Anderson et al., 1997）。在时间序列上，沉积物炭屑存在的背景因素与火的发生频率、炭屑产量、次生炭屑、区域和地方性火、地貌以及湖盆大小等特征有关（Millspaugh et al., 2000; Long et al., 1998; Clark et al., 1996），仅靠炭屑本身很难区分其来源，难以对环境进行准确推导。因此，在实际应用中，往往将炭屑分析结果与流域其他指标如孢粉、侵蚀强度等结合起来综合判断，借以获得合理的解释。

炭屑数据与孢粉记录相结合，可以使研究结果得到互相补充和印证。火发生后会使植被类型发生改变，在孢粉记录上往往表现为孢粉优势种类和孢粉组合的变化。高强度火事件后通常会使得草本植物增加，木本植物减少。因此根据孢粉记录判识植被类型与组成是否变化、变化大小等信息，可进一步推测火发生的规模，以及火发生对森林植被演替的影响（Swain, 1973; Patterson et al., 1988; Rhodes et al., 1995）。火的发生与温度、湿度、森林成分有关，而这些因素又与气候密切相关（孙湘君等，2000），因此炭屑和孢粉指标结合起来可以用于研究过去气候、植被和火之间的相互关系。在历史时期，两者的结合还可以探讨过去人类活动对流域生态景观影响的历史演革。

炭屑数据与理化指标的结合可以用于追踪炭屑的来源。湖泊沉积物磁化率指标反映了外来碎屑物质的输入量（Thompson et al., 1986; Gedye et al., 2000），如果炭屑峰值与反映流域侵蚀的磁化率、元素地球化学指标变化一致，可以证明该火事件发生在流域内；粒度通常反映流域水文的状况，也可为炭屑来源提供佐证。但是，这些指标由于机理复杂，对炭屑记录的解释也存在不确定性，其是否有助于对炭屑记录的解释取决于火发生的位置、火的类型和强度以及土壤与基质的类型等。例如，沉积物磁化率最高处一般位于湖泊流域坡陡一侧，这也是炭屑侵蚀潜力最大的地方（Millspaugh et al., 1995)，而流域缓坡这种信号往往很弱。

我国长江中下游地区人类活动历史悠久，湖泊沉积物孢粉和炭屑记录往往保存了流域人类活动引起的植被变化和火事件的历史。仝秀芳等（2009）对湖北省太白湖北部湖区 153 cm 长岩芯的孢粉、炭屑研究表明（图 7.12），1310 AD 前（孔深 98.5 cm 以下，孢粉组合带Ⅰ～Ⅲ），孢粉组合反映了以常绿阔叶和落叶阔叶混交林与针阔叶混交林的自然演替过程，这个时期主要出现大炭屑（>125 μm）的浓度峰值，反映了火主要发生在湖盆附近，流域植被没有发生根本变化。其中在 850 AD 前后曾出现一个小炭屑（<125 μm）峰值，与孢粉浓度的峰值对应，草本中蒿含量的一度增高以及随后的松含量上升，判断存在一次明显的区域性火事件。1310～1710 AD 期间（孔深 98.5～55.5 cm，孢粉组合带Ⅳ～Ⅴ），孢粉组合中松和阔叶乔木花粉含量同时减少，而禾本科、十字花科等草本花粉含量增多，反映流域自然植被开始受人类活动影响。此时大炭屑有所减少，而小炭屑变化不大，但有 2～3 次小峰值出现，并与孢粉浓度的峰值对应。说明这个阶段总体上地方性火发生频率降低，而区域性火频率略有增加。1710～1950 AD 期间（钻孔 55.5～24 cm，孢粉组合带Ⅵ），孢粉组合指示植被演替为以次生松为主的针阔混交林，反映原始森林植被遭到严重破坏，流域人类活动进一步加强。

该时段大炭屑浓度降至低值，而小炭屑浓度峰值和频率都达到整个剖面的最高水平，说明区域性火事件频繁发生，人类活动范围扩大到整个区域，这与孢粉推导的植被变化相一致。此时段磁化率和频率磁化率也迅速增高，反映流域侵蚀作用加强，与区域性火事件的增加相一致，说明人类活动的进一步增强。1950 AD 后（孢粉组合带Ⅶ），小炭屑浓度降到最低值，与孢粉浓度反映植被覆盖率的大幅减少一致，其炭屑浓度的降低可能与农业生产方式的改变有关，由此降低了湖泊流域的燃火频率。

图 7.12 太白湖钻孔沉积的孢粉属种含量、总浓度和炭屑浓度变化

7.4 气孔器

7.4.1 概述

表土花粉的研究发现，由于花粉产量、散布能力和沉积保存的差异，孢粉组合往往不能够完全反映植被的真实面貌，例如，松花粉的结构和高产量往往具超代表性，即使是无松林地点，其表土花粉组合中也往往占有很大比例，这在极地或山地垂直植被带也是如此（Ritchie, et al., 1987; 李文漪，1993；李旭等，1988；Sun et al., 1988; Yu et al., 2004; Jackson, 1991; Jackson et al., 1998; 许清海等，2005a, b；Li et al., 2000）。其次，有些针叶树的花粉鉴定也存在一定的困难，如柏科只可以鉴定到科，无法鉴定到属，并且在形态上容易和苔藓孢子相混。这种现象对植被的变化研究尤其是林线变化研究带来困难。因此需要其它手段来弥补孢粉重建古植被的某些不足，其中针叶树气孔器就是一个有效指标。气孔器可以像花粉一样在湖泊表层散布、沉积、扩散和再沉积，对它的提取可以和孢粉提取同时进行（MacDonald, 2001）。湖泊沉积物中的气孔器来自植物整个叶片或者大叶碎片，因此在埋藏学上类似植物大化石，无法长距离传播。如果没有水流作用，其出现可以认定针叶植物生长在湖泊的周围地区（MacDonald, 2001）。

一个完整的气孔器包括三部分：①保卫细胞；②由保卫细胞组成的气孔；③副卫细胞。以青杆（*Picea wilsonii*）为例，主要形态特征见图 7.13。气孔器主要分布在植物叶片、茎、胚珠和某些花的皮层，其中在叶子上最多。气孔是植物体与外界交换气体的主要门户，它的开闭能控制植物的气体交换和水分蒸散。气孔器分析可在辨析 CO_2 浓度和古植被类型等古环境重建中具有重要作用。本节主要介绍针叶树气孔器在重建古植被方面的应用。

图 7.13 青杆气孔器

（a-a，上部木质片；b-b，下部木质片；c-c，气孔器宽度；d-d，中缘的宽度；h-h, 气孔长；h-e，中缘聚合部的长度；G-G，中缘聚合部的宽度；∠1，上部木质片与中缘聚合部之间的夹角；∠2，保卫细胞 T 型外角度。据万和文等，2008）

7.4.2 实验室处理与鉴定

木质化的针叶树气孔器耐酸碱，因此在实验室中，对湖泊沉积物的气孔器提取可以采用 HF 处理的方法，可与孢粉的提取同步进行（Fragri et al., 1989）。不过，在孢粉处理中，为

了去除较大的有机物碎片，往往使用过筛的方法，但是，在气孔器提取实验中，往往不能这样过筛，否则会丢失样品中较大的叶片，导致气孔器浓度的降低。鉴定气孔器需要参照现代样本，其制作方法为：采集现代针叶树叶片，放置在自然环境下干燥至少一周，然后将叶片剪碎，加 10%的 KOH 溶液，加热处理后水洗至中性；再加 9:1 醋酸酐和浓硫酸混合液，反应结束后水洗至中性制片。

大多数气孔器大小在 20～80 μm 之间，在孢粉鉴定统计的同时就可以进行气孔器的鉴定统计。由于湖泊沉积物中气孔器的浓度远远低于多数植物种类孢粉浓度（<2000 个/cm^3）（MacDonald, 2001），故统计气孔器可能要比孢粉花费更多的时间。目前，有关气孔器的鉴定和分类的文献很少，Hanson（1995）、Hanson et al.（1996）、Sweeney（2004）、Trautmann（1953）和万和文等（2007）文著对气孔器的分析有较详细描述。

7.4.3 气孔器在重建古植被中的运用

7.4.3.1 现代湖泊表层沉积物气孔器研究

表土的气孔器研究表明，气孔器对阐明花粉-植被关系具有重要的辅助作用，其出现能够指示母体植物的存在（Hansen et al., 1996; Hansen, 1995; Leitner et al., 2004）。例如在西西伯利亚的苔原、森林苔原和森林地区，虽然现代没有云杉生长，但是云杉花粉在湖泊表层的比例达到 1%～10%，落叶松（*Larix*）花粉在生长地的含量也很少，因此仅利用花粉资料无法准确判断林线，但借助气孔器却能较好地指示不同植被带界线（Clayden et al., 1996）。另据西伯利亚东北部湖泊表层花粉和气孔器的研究，孢粉能够区分苔原与森林植被，却很难区分森林苔原与森林、森林苔原与苔原的界线，而气孔器能够帮助区分这些植被类型（Pisaric et al.（2001a）。Gervais et al.（2001）对西伯利亚科拉半岛现代湖泊表层的孢粉和气孔器研究工作，也得出类似的结论。依据云南现代湖泊表层花粉和气孔器的研究（图 7.14），发现不同海拔高度的湖泊表层沉积物中都有高含量的松花粉，但其气孔器仅出现在山麓湖泊中，在高山湖泊中不存在；而云、冷杉气孔器和花粉主要出现在高山湖泊中。上述现象与现代植被垂直分布的特征一致，证实气孔器对判识植被类型有很好的指示作用。

图 7.14 云南西北地区高山山麓和高山湖泊针叶树花粉百分含量和气孔器浓度

(洱海、西湖、海西海、茈碧湖、文笔海和拉什海为高山山麓湖泊；碧沽天池和老君山湖为高山湖泊)

7.4.4.2 湖泊沉积物气孔器在环境重建中的应用

利用湖泊沉积物的气孔器与孢粉结合，能较好地重建高山上部林线植被的变化（Ammann et al., 1993; Tinner et al., 1996）。例如，在阿尔卑斯山区，Welten（1982）利用气孔器成功地重建了晚第四纪高山地区树线植被的变化；在北极及邻近地区，Hansen 最早使用气孔器来辅助孢粉重建古植被（Hansen, 1995)。然而到目前为止，气孔器的研究主要集中在北极苔原地区、西伯利亚地区和北欧高纬度地区的重建林线植被的研究（Yu, 1997; Hansen, 1995; Clayden et al., 1997; Pisaric et al., 2003; Gervais et al., 2002），其它地区的研究成果报道相对较少。

7.4.4 我国气孔器研究的展望

在欧美，利用针叶树气孔器辅助孢粉重建古植被已经有几十年的历史，但是在我国还刚刚开始。针叶林作为我国主要森林植被类型之一，其面积占森林总面积的 49.8%（周以良等，1990）。尤其是在西南、东北和西北地区，针叶林是主要的森林类型。这些地区由于表土花粉的松、云杉属花粉的超代表性，在花粉谱中往往被明显夸大，影响了孢粉-植被关系的准确解释（吴玉书等，1987；李旭等，1988；许清海等，2005a, b；童国榜等，2002）。此外，柏科是西北地区的主要山地乔木，其变化对于重建古植被生态具有重要意义。但柏科花粉是低代表性花粉，其花粉形态与部分苔藓类孢子较相似，鉴定存在困难，其结果也有不确定性。所有这些因素均不同程度的影响古植被重建的准确性。据黄土高原、云南高原等地的表土花粉和气孔器研究，发现松的气孔器存在与否可以较好地指示母体植物是否出现；柏科气孔器在母体生长的表土中含量很高，可以作为柏科植物存在的良好标志。

由此可见，随着气孔器的深入研究，作为古环境研究的一个指标，气孔器将为中国古植被和古环境研究提供更多的信息。

7.5 硅藻

7.5.1 概述

硅藻属于硅藻门（Bacillariophyta），19 世纪早期曾被认为是动物，直到硅藻叶绿素的发现，人们才意识到它是自氧生物，应归为植物门类（Battarbee et al., 2001）。硅藻是食物链的重要初级生产者，其每年产生的生物量大约占地球总生物量的 25%（Werner, 1978）。硅藻几乎分布在所有不同类型的水体中。硅藻个体分上下壳瓣，其壳体由硅质细胞壁组成，一般 2.5μm～2mm 长。硅藻的分类主要依据壳体的特征，包括壳体的形态、对称与否、纹饰、突起等。近年来，随着分子技术的应用，硅藻的分类系统得以迅速发展，更多的新属被发现和从老系统中分离出来（Battarbee et al., 2001）。据统计，已发现的硅藻约 250 个属 1 万多个种（Mann et al., 1996），Round（1996）估计自然界可能存有近 1000 属，超过 10 万个种。

Stoermer et al.（1999）回顾了硅藻的研究历程，大致分三个阶段：第一阶段为发现阶段（19 世纪），以硅藻的描述为主，包括新种的发现、硅藻生活史、生理学、地理分布等的描述，并提出了指示种的概念；第二阶段为系统化阶段（20 世纪初到 20 世纪 70 年代），注重对硅藻生态信息的整理，包括不同环境梯度的硅藻谱系、以及一些硅藻指数的建立；第三阶段为目标阶段（最近 30 多年来），随着计算机技术的提高，硅藻与影响其生长和发育的环境因子的关系可以被更加准确地测定，硅藻的应用研究也得到空前发展，并被较好地用于环境管理和治理中。

在古湖沼研究中，硅藻化石被认为是沉积钻孔中最重要的藻类指标，主要基于以下几点因素（Smol, 2002; Stoermer et al., 1999）：①硅藻通常是许多淡水水体的优势藻类，超过一半的初级生产量来自硅藻；②硅藻分类主要依据其硅质壳体，分类系统相对完善，属种丰富，大多能鉴定到种和亚种级水平，因此反映的信息量也非常丰富；③硅藻出现在不同类型的水体中，各个硅藻种都有相对确定的环境适宜值和耐度，其化石组合可以用来定量重建多种环境变量，包括营养盐、盐度、水位、水温、pH 值等；④硅藻生命周期短、繁殖快，能够很快地响应新的生境，尤其适用于对环境事件的揭示；⑤硅藻的壳体能够较好地保存在湖泊沉积物中。

7.5.2 硅藻样品采集和实验室分析

7.5.2.1 硅藻样品采集

现代硅藻生态是化石硅藻记录的解释基础，因此有必要对湖泊现生硅藻种群的分布进行调查。对一个要研究的湖泊，通常采集一年内不同生境的硅藻样品以及相应的水质样品，要求按季节或一定时间间隔采样，同时采集表层沉积物的硅藻样品（通常 0.5cm 或 1cm 厚）。通过现生硅藻与表层沉积硅藻的对比，分析沉积物中硅藻组成与现生硅藻的关系、沉积物中硅藻的代表性和保存状况等。

湖泊硅藻包括浮游和底栖两种类型，后者还包括附生类型，即附着在水生植物和其它物体上。不同类型硅藻样品的采集方法见 Battarbee et al.（2001）的描述。

为建立硅藻生态信息数据库，开展硅藻转换函数的研究，需要选定某一研究区域，对该区域若干湖泊进行表层沉积硅藻样品的采集，并在采样点采集水质样品。现场同时进行常规的水参数如电导率、pH 值、水深、透明度等测定。如果以研究硅藻与水温的关系为目的，有必要对水温进行常年监测，温度数据多通过投放水下温度自动记录探头来获取。

7.5.2.2 实验室分析方法

沉积物硅藻样品的实验室分析用标准的方法处理（Batterbee, 1986; Battarbee et al., 2001）（图 7.15）。首先，选取沉积物样品 1～2g，加 10% HCl 并加热去除碳酸盐矿物，再加入 30% H_2O_2 去除沉积物中以及硅藻细胞壁上的有机质，待反应完全冷却 5～8 小时后，用蒸馏水连续 3 次清洗并离心。如果沉积物中不包含碳酸盐矿物，可以直接进行 H_2O_2 处理。如经过上述处理的沉积物样品中有大量较粗有机质或者较粗矿物颗粒残留，可以将沉积物过筛（0.5 mm 孔径），直至样品中只有细颗粒为止。若样品中的细颗粒含量过多，会影响硅藻的鉴定，可以用氨水过滤以除去部分悬浮细颗粒物质。倘若样品中细颗粒含量仍较高，可以考虑用重液浮选的办法提取硅藻浓缩物。至此，对样品预制片进行镜下检查，观察硅藻壳体的分离情况。如果壳体尚未分离，可将样品进行超声波处理。硅藻样品在制片前，加入一定数量的小球，用于硅藻浓度的计算。最后对硅藻浓缩液，用加拿大树胶或 Naphrax 树胶进行制片。

浮游硅藻采样后将水样立即用鲁格试剂固定（每 1000ml 升水加 10ml 鲁格试剂），在量筒中沉淀 48 小时后，用吸管去除上层清夜；对附生硅藻样品，取少量植物叶片和茎，用细毛刷轻轻刷洗叶片表面，用蒸馏水冲洗干净，同时将叶片在 45℃下烘干称重，用于计算硅藻浓度；对石生硅藻样品，同样用细毛刷或刀片轻轻刷刮石块表面，用蒸馏水冲洗干净，保留冲洗液，测量石块表面积（用锡泊纸包裹并测量覆盖面积）以计算硅藻的浓度。所有这些样品的实验室化学处理方法与沉积物硅藻基本相同。

图 7.15 硅藻样品的实验室分析流程（Battarbee et al., 2001）

7.5.2.3 硅藻鉴定和计数

对硅藻化石鉴定，需要合适的硅藻图版和现代标本作依据。建议使用 Krammer et al.（1990-1991）、Round et al.（1990）、Hustedt（1927-1966）、Patrick et al.（1966, 1975）等的硅藻图版，以及发表的相关文献。最近，国际上一些权威研究机构如英国伦敦大学学院环境变化研究中心也有专门的硅藻研究网页（www.geog.ucl.ac.uk/ecrc）（Battarbee et al., 2001），其中的硅藻图谱非常清晰，可供参考。

硅藻的鉴定和统计主要在光学显微镜下完成。但对一些难以看清壳面结构的硅藻种，扫描电镜可以帮助种的鉴定。硅藻计数要求一定的统计数量，通常是计数越多，统计的偏差越小。一般来说，对现代硅藻样品，要求至少满足 500 粒以上，对化石样品，在 300 粒以上。统计时，硅藻上下壳体同时出现时计数为 2 粒，链状（如 *Aulacoseira*）和丝状群体（如 *Fragilaria*）出现时必须全部计数。破碎的壳体根据具体情况而定，如出现半个壳体，计数为半粒；如 *Eunotia* 的种和 *Asteriorella* 的种，可以根据壳体两头的特征计数，出现一次计数半粒。

7.5.2.4 数据表达

硅藻数据表达方法主要用百分比和浓度表示。浓度（单位：粒/g 或粒/cm^3）的计算公式与孢粉相同。如果有精确的年代数据，硅藻化石浓度可以用来计算硅藻的通量（见 7.2 节），硅藻通量主要用于解释古生产力。

7.5.3 硅藻转换函数

硅藻的定量研究始于 20 世纪 60～70 年代欧洲湖泊酸沉降的研究，其目的是为了了解湖泊酸化的动态过程和酸化引起的水生生态的变化（Findlay et al., 1992; Battarbee et al., 1999），由此发展了利用硅藻化石推导湖水 pH 值的定量手段（Charles, 1985; Ford, 1986）。80 年代，发展了多元线性回归模型，该方法提高了硅藻定量推导的精确度，同时减小了推导的误差（Battarbee, 1984; Charles, 1985; Ford, 1986; Findlay et al., 1992; Hankansson, 1993）。随着欧美国家湖泊酸化、富营养化以及气候变率研究的系列项目的实施，多元线性回归的定量手段在当时得到了广泛应用。然而，在利用多元线形回归模型建立硅藻与环境函数关系前，事先都有一个主观的假设前提，即硅藻与某一目标环境指标是线形相关的（Anderson, 1997; Whitmore, 1989）。直到 80 年代后期和 90 年代开始，人们才认识到许多属种对环境变量的响应是非线性的，即高斯或单峰响应模式（ter Braak et al., 1988），并由此发展到现今的加权平均回归与校正转换函数方法（ter Braak et al., 1986; Birks et al., 1990）。在模型的设计上，加权平均定量模型克服了线性模型的弱点，很好地应用了个体生态学的特点，即在一个研究区内，属种对环境指标都有各自的最佳适宜值和生长幅度（ter Braak et al., 1989）。此后，硅藻的定量研究被迅速扩展到对湖泊盐度、营养盐、水温等环境指标的重建中（Fritz, 1991; Pienitz et al., 1993; Bennion, 1994; Gasse et al., 1995; Yang et al., 2003）。目前，加权平均模型（WA 模型）已得到了进一步的完善，尤其对转换函数的统计学检验方法和残差数据的信息提取有重要改进。

7.5.3.1 定量研究的基本思路和步骤

硅藻定量研究的基本步骤就是根据现代藻类和相关的环境数据库（calibration set 或 data base 或 training set），通过梯度分析手段，提取影响硅藻分布的最主要环境指标，以此建立硅藻与目标环境指标的推导模型或转换函数模型，利用硅藻化石组合进行古环境指标的重建（图 7.16）。

图 7.16 硅藻定量研究框图（据 Hall et al., 1999）

转换函数研究必须先建立数据库，数据库包括两方面：现代硅藻－水环境数据库和硅藻化石数据库。前者主要用于硅藻-环境转换函数研究，后者用于古环境重建。现代硅藻与水质数据库包括 n 个样点（一般在 40 个以上）、m 个硅藻属种和 p 个环境变量（要求 m>n），样点的选取必须在一定区域内体现出最大的环境梯度。目前通常采用表层沉积物进行硅藻分析，因为表层沉积物（0.5～1cm）通常代表了一定时间段内（1～5 年分辨，依据沉积速率和采样间距）的硅藻沉降量，可以与一个湖泊硅藻的年变化相联系。此外表层沉积物还包含了各种生境的硅藻组分，在样本量足够的情况下，一般很少出现硅藻化石种群与现代种群的不匹配问题。

影响硅藻分布的环境因素很多，但不是所有的环境指标都能够与硅藻建立显著的函数关系。随着统计生态学的发展，一系列的多变量统计手段被用于提取影响藻类生长的主要的环境变量，即环境梯度分析（Gradient analysis）（ter Braak, 1987）。梯度分析包括间接梯度分析（Indirect gradient analysis）和直接梯度分析（Direct gradient analysis）两种（ter Braak et al., 1988; ter Braak et al., 1986）。间接梯度分析有对应分析（Correspondence analysis, CA）、降维对应分析（Detrended correspondence analysis, DCA）等，通过对硅藻数据进行分析，拟合属种与主要坐标轴的函数关系，得出属种和样点在坐标轴上的排列规律，依此揭示坐标轴所代表的潜在环境梯度（Hill et al., 1980）。但对环境变量轴的解释必须依靠生态学的知识，或实测的环境指标数据加以判识（ter Braak, 1987）。直接梯度分析是间接梯度分析的扩展，在分析中加入了环境数据，通过将环境变量与坐标轴进行线性捆绑，直接进行属种与环境指标函数关系拟合，通过属种、样点在环境矢量上的排列，揭示影响硅藻分布的环境指标梯度（ter Braak et al., 1995; ter Braak, 1987）。目前在古湖沼学研究中，一种最有效的直接梯度分析手段是典型对应分析（canonical correspondence analysis, CCA），它同时将环境变量、硅藻属种和样品点显示在一个低维的空间中，直观地揭示出属种排列分布与各环境指标的关系（Hall et al., 1992; Bennion, 1994）。那些解释藻类组合的最大变率、具有统计显著性的变量，可以用于最终的定量重建的推导模型中（Smol et al., 2000）。然而 CCA 分析的假设前提是属种对环境的单峰响应（高斯响应）特点，即特定的生物种在其最佳的环境适宜值附近丰度达到最大（图 7.17）（ter Braak et al., 1988)。这就要求数据中硅藻组合应有显著变化，其分布必须覆盖较大的生境范围。为判识数据库是否适用于 CCA 分析或其它线性的梯度分析、线性或非线性转换函数模型，在进行这些分析前，可以通过 DCA 分析，检测属种数据的梯度长度。当梯度长度＞2.4 个标准离差单元（standard deviation unit）时，表明属种数据具有单峰响应特点，可进行 CCA 分析和基于加权回归的转换函数模型研究；当梯度长度＜2.4 SD 时，数据更适用于冗余分析（Redundancy analysis, RDA）和基于多元线性回归的转换函数计算（ter Braak et al., 1998）。

图 7.17 生物属种对特定环境的单峰响应关系

（图中 c 为最大丰度，u 为环境最适宜值，t 为属种忍耐宽度。依据 ter Braak et al., 1986）

加权平均回归与校正（或重建）模型（Weighted averaging regression and calibration model）被普遍用于转换函数建模和重建计算。该定量建模主要分两步：①回归：利用加权平均计算属种的环境最适宜值和忍耐幅度；②重建：利用加权平均，推导环境值及其变化范围（即阈值）。在回归步骤中，属种的环境适宜值就是将该属种所在湖泊的某一环境指标平均值，进

行丰度值加权；属种的忍耐值通过标准偏差来获得（Birks et al., 1990）。属种的最佳值及忍耐值的计算公式分别如下：

$$u_k=\sum_{i=1}^{m} y_{ki}x_i \Big/ \sum_{i=1}^{m} y_{ki} \qquad (1)$$

$$t_k=\sqrt{\sum_{i=1}^{m} y_{ik}(x_i-u_k)2 \Big/ \sum_{i=1}^{m} y_{ik}} \qquad (2)$$

式中 X_i 为采样点环境变量值，Yki 为属种 k 在 i 号样品中的百分含量，u_k 为属种 k 的最佳值；t_k 为属种的忍耐值，k＝1, ……, m i= 1, ……, n (下同)。

在重建步骤中，湖泊的某一环境指标值的估算，就是将属种的最佳值作为权重对硅藻化石组合中的各个属种百分含量进行加权，这就是古环境变量的初步推导值（initial X_i）：

$$\text{initial } X_i = \sum_{k=1}^{m} y_{ik}u_k \Big/ \sum_{k=1}^{m} y_{ik} \qquad (3)$$

相应地，初始环境指标阈值（initial Xi’）推导公式为：

$$\text{initial } X_i' = \left(\sum_{k=1}^{m} y_{ik}u_k / t_k^2\right) \Big/ \left(\sum_{k=1}^{m} y_{ik} / t_k^2\right) \qquad (4)$$

由于在上述计算过程中进行了两次加权，导致了推测的环境值（initial X_i）和阈值（initial X_i’）缩小（Birks et al., 1990）。为了得到实际的推导结果，必须对初始环境推测值进行还原，这种还原通过简单的线性回归方法来完成，通常有传统还原法（Classical deshrinking）和反向还原法（Inverse deshrinking）两种途径。若初始推测值和实测环境值的线性回归关系表示为 initial X_i＝a＋bx_i+ ε (a、b 分别为截距和斜率， ε 为误差，可以忽略不计)，最终的环境推导值计算公式为：

$$\text{final } X_i = (\text{initial } X_i - a)/b \qquad (5)$$

这就是传统还原回归法。类似地，若初始推测值和原始观测值的线性回归关系表示为：X_i＝a＋b*initial X_i+ ε ，则最终的环境推导值计算公式为：

$$\text{final } X_i = a+b\times\text{initial } X_i \qquad (6)$$

这就是反向还原回归法。final X_i 就是最后的环境指标重建值。

以上两种方法均有效（Anderson, 1997）。反向还原方法给出了较低的推导误差（RMSEP）；而传统还原法给出了较高的推导值与实测值之间相关系数（R^2）。Birks et al.（1990）认为，判识不同模型的优劣主要通过比较各自的转换函数检验结果（见下节描述）。

在加权平均（WA）方法的基础上，一些改进的定量模型也应运而生，最有代表性的是偏最小二乘法加权平均回归与校正模型（WA-PLS 模型）。WA-PLS 模型是最小二乘方法和反向还原回归方法的结合，其优点是考虑了硅藻数据的残差结构，并通过每一次残差结构组份（residual structural components）的不断提取，提高硅藻属种的环境适宜值计算的准确性，降低推导误差和最大偏差（ter Braak et al., 1993; Birks, 1998; Cameron et al., 1999）。Birks（1998）归纳以上不同模型的特点，认为当 WA-PLS 的残差提取后，如果第 n 个组份（通常在 2-6 个组份之间）的转换函数精确度比第一个组份提高 5%以上的话，说明该模型优于其它模型；而如果精度提高在 5%以内或没有提高的话，说明硅藻数据中的残余信息可以作为噪音，用 WA 模型效果更佳。

对于硅藻数据变率不大或环境梯度相对较窄（通常<2.4 个离差单元）的数据库来说，

用线性定量模型比较适合，如偏最小二乘法（PLS）线性回归模型（Korsman et al., 1996）。

7.5.3.2 转换函数评估

推导能力的评估可以通过以下几种途径获得：①近似误差统计检验；②独立数据检验；③跟靴法（bootstrapping）统计检验；④刀割法（jackknifing）统计检验等。近似误差统计检验就是用同样的数据库内容，通过转换函数来计算目标环境变量值，再与实测值比较。但这种检验结果会过于理想化，不足以反映真实的情况（Fritz et al., 1999）。独立数据检验在理论上是最理想的检验方法，它是通过同一个区域内野外湖泊调查，获得有别于建模用的数据库，用转换函数来计算目标环境变量值，然后与实测值比较。最近这种方法仅在瑞典被尝试（Christian et al., 2002），但由于时间和经费的限制（包括额外的季节性采样、实验室分析、研究区一定的湖泊数量和类型兼顾等），这种检验方法的应用很难被实施。由此发展了跟靴法和刀割法的统计检验技术，其原理均是通过重新取样（Resampling），调整原数据库内容，对转换函数进行检验（Birks, 1995; Fritz et al., 1999）。

7.5.3.3 重建结果验证

在进行古环境解释前，需要对环境指标定量的重建结果进行检验和验证。由于湖泊环境和硅藻生态的复杂性，硅藻定量重建可能存在多方面的误差。一种最直接有效的验证方法是利用较长期连续的湖泊监测数据。如 Fritz（1990）和 Laird et al.（1996a, 1996b）分别利用 North Dakota 地区 Devil 湖和 Moon 湖近 100 年来盐度监测数据和气象台站记录的干旱指数，与硅藻推导的同时段古盐度曲线进行了比较，验证了定量结果的可靠性，在此基础上，解释了近 2000 年来该区干旱化历史；Bennion（1995）、Bradshaw et al.（2001）等分别用湖泊总磷监测数据对奥地利 Mondsee 湖和瑞典 Mälanren 湖的过去几十年的总磷推导值进行了验证，认为硅藻转换函数恢复的总磷提供了可靠的营养本底值。

对大多数缺乏较长时期监测数据的湖泊来说，硅藻定量重建结果可以与其它生物指标（如摇蚊、介形类等）推导的定量结果、沉积物其它环境指标等进行对比和检验。如 Verschuren et al.（2000）同时应用硅藻和摇蚊对东非某个湖泊的古水文进行了恢复，两种生物定量手段得出了相似的结果。此外，地层硅藻数据与现代湖泊硅藻数据的相似程度、定量的误差源分析（Anderson, 1997）也可为定量结果的评估提供旁证。

最近十几年来，利用加权回归方法进行硅藻转换函数的研究和环境重建已取得巨大成果，这些成果主要集中在欧洲、北美和非洲（Fritz, 1990; Hall et al., 1992; Anderson et al., 1994; Wunsam et al., 1995; Gasse et al., 1995）。在我国，Yang et al.（2003; 2008）通过青藏高原 41 个湖泊和长江中下游 49 个湖泊表层沉积硅藻和水化学的调查，已经分别建立了两个区域硅藻与盐度、硅藻与总磷的转换函数，并成功地用于古环境的重建（羊向东等，2005；Yang et al., 2008; Dong et al., 2008）。

7.5.4 硅藻在古气候环境重建中的应用

气候和人类活动直接作用于湖泊，也可以通过流域植被-土壤相互作用影响湖泊生态环境。因此，利用硅藻化石数据能够提取古气候和人类活动的信息。例如，在内陆封闭湖泊，降水和蒸发可以影响湖泊水量平衡的变化，并最终体现在湖泊盐度和水位的变化上，据此，可以利用硅藻化石揭示气候的干湿变化。湖泊硅藻的分布具有明显的季节性，能快速响应水

温的变化，许多环境和生物因子（如水体分层、湖水结冰厚度和消融过程、光透度、藻类生产力等）与温度有关，因此，根据硅藻种群组合，可以提取温度的信号。在人类活动影响较大的地区，湖泊硅藻直接响应于营养态的变化，而历史时期水体营养浓度的变化与流域农业、森林砍伐、侵蚀加强而引起的入湖营养物质的增加有关，由此获取了人类活动的信息。下面以硅藻在温度、水位、盐度、营养变化的重建实例作重点介绍。

7.5.4.1 硅藻与温度

硅藻与温度的关系已被许多监测记录所揭示，这些结果已被用于古温度的定性和定量推导中。例如，Köster & Pienitz（2006）通过沉积物捕获器对美国 Bates 湖的硅藻进行了一年的监测，发现硅藻的季节分布模式主要与湖水分层有直接关系，春季和秋季水体混合时期以浮游和底栖种为主；而夏季分层时期浮游种占绝对优势。利用这个结果，很好地解释了该湖过去 1000 年来的硅藻化石记录，揭示了小冰期时段冬季水体混合时间明显增加、20 世纪夏季分层逐渐加强的过程。在阿尔卑斯山地，湖泊硅藻推导的湖水溶解有机碳浓度随海拔升高而降低，反映了湖泊生产力与树线森林植被变化密切相关，并间接指示了气候（温度）的变化（Sommarruga et al., 1999）。附生硅藻与水生植被有着密切关联，而后者主要在春夏季生长，并受水深条件的限制，因此在一定程度上，附生硅藻既可以指示水位的变化，同时也反映了水温的变化。

利用硅藻化石重建古温度，最重大的进展就是硅藻的定量方法的应用。Pienitz et al.（1997）研究了加拿大西北部 Whitehorse 和 Tuktoyaktuk 半岛亚北极以及北极 59 个湖泊的表层沉积物硅藻，使用典型对应分析（CCA），发现水温和夏季表层水温与硅藻属种数据有较好的相关性。通过加权平均回归和校正法建立的转换函数，第一次提出利用硅藻组合直接进行湖水温度的推导。Joynt et al.（2001）利用同样的方法，分别建立了加拿大西北部 61 个湖泊硅藻与夏季水温和年均气温的转换函数，并将之应用到 Fog 湖的钻孔中，定量重建了全新世中期以来的水温变化。类似的研究在瑞典北部（Bigler et al. 2003）、芬兰北部（Weckström et al., 1997）、阿尔卑斯山地（Lotter et al., 1997）和赤道巴布亚新几内亚山地（Vyverman & Sabbe, 1995）等地区也有成果报道。以上这些定量研究多集中在生态系统存在明显变化的地带。Smol et al.（2000）认为在环北极森林－苔原的树线地带、森林－草原和亚高山垂直植被带谱发育的地带，即群落交错带部位，温度梯度明显，植被生态能敏感响应气候的变化，适宜进行硅藻-温度的定量研究。然而，对几乎所有硅藻数据库的分析，均显示温度并非是唯一影响硅藻分布的关键因子，其它环境指标如 pH 值、盐度、溶解有机碳和总磷等，对硅藻数据解释的信息量有时甚至要高于温度（Anderson, 2000）。此外，硅藻对气候的响应并不直接，而是通过对生态环境的响应与气候建立起联系，转换函数只是将个体生态-环境-气候之间复杂的过程简单化（Birks, 1981; 1995）。因此，如何从硅藻数据中分辨出独立的温度信息，并在其它气候影响区得到普遍应用，是硅藻化石进行古温度定量重建的一个关键难点。目前对温度重建的可信度，尚需要通过不同指标独立重建的结果加以比较和评估。

7.5.4.2 硅藻与湖泊水位

湖面波动受控于地质、气候过程和流域地表状况等多种因素，并在一定程度上影响湖泊生态系统的变化（Wolin et al., 1999）。作为生态系统的重要组成部分，硅藻化石可以用来重建湖泊水位，并间接地揭示气候、流域环境、以及人类活动影响的变化。淡水湖泊水位变化的信息可以通过不同生态类型的硅藻组合来反映，如底栖或沿岸硅藻类型与浅水环境有关，

浮游类型与开阔湖区的深水环境有关，两者的比值能较好地指示了湖泊水位的变化（Gasse et al., 1989; Wolin et al., 1999）。然而，影响淡水湖泊硅藻生长的环境机理比较复杂，对水位变化的重建必须谨慎，需要其它指标的证据加以支持。

呼伦湖位于内蒙东北部，湖相沉积剖面硅藻化石记录表明（王苏民等，1995；Xue et al., 2003），晚冰期期间，硅藻主要由 *Aulacosiera granulata* 和小型的 *Fragilaria* 种类占优势，反映了湖泊形成初期水深逐渐增加的过程；全新世初期（10.0 ka B.P.前后）浮游硅藻 *Aulacosiera granulate*、*Cyclotella*、*Stephanodiscus* 等大量增多，湖泊水位快速上升；此后，硅藻浓度迅速减少，至全新世中期（7.2～5.0 ka B.P.），底栖和附生硅藻类型占绝对优势，湖水变浅。

近年来，现代生态调查研究更加予以重视，包括开展了不同生态环境、理化环境以及不同营养条件下硅藻与水深的关系研究、同一湖区不同深度硅藻分布规律的研究、区域湖泊硅藻与水深的转换函数研究等，并依此进行古水位的重建。例如，一些研究发现，不同生境的底栖、附生和浮游种有着各自不同的水深限制条件（Wolin et al., 1999）。通过对摩洛哥 Sadi Ali 湖大量现代硅藻分析，Barker et al.（1994）发现浮游种和沿岸种比值与水深之间存在对数函数关系；Yang et al.（1995）通过 Ontaria 和 East 湖不同深度硅藻的调查，将硅藻分为不同的生活型类型，利用多元回归手段建立了两者的关系；Lotter（1987）利用主成分分析（PCA），对瑞士 Rotsee 湖现代和硅藻化石组合分布进行了排序分析，得出了硅藻化石分布的水深范围，由此重建了全新世湖泊水位的变化。目前，转换函数法也开始尝试用于湖泊水位的定量重建研究中（Wolin et al., 1999）。

7.5.4.3 硅藻与湖水盐度

内陆干旱半干旱地区，气候和湖泊水文状况有直接的关系。湖泊尤其是封闭湖泊的水位变化取决于流域降水、径流和蒸发的平衡关系，并影响到湖水盐度、离子组成的变化（Cumming et al., 1995; Fritz et al., 1999）。湖泊生物通过其生理特征的适应和种群组成的改变，直接响应于水化学条件的变化。因此，尽管内陆湖泊硅藻可以用于重建湖泊水位，但大多数的研究主要针对湖水化学指标，尤其是湖水盐度的恢复，并在此基础上，建立湖泊水文和气候变化的动力学联系。例如，Gasse et al.（1991），Van Campo et al.（1993），Fan et al.（1996）通过青藏高原西部松西错和龙木措两个湖泊沉积钻孔硅藻化石记录，分析了淡水浮游硅藻种和咸水种含量的变化，对晚冰期以来古盐度进行了重建。北美大平原湖泊硅藻化石记录显示（Laird et al., 1996; Fritz et al., 1999），晚冰期～全新世过渡时期，淡水硅藻组合快速向咸水种组合变化，反映湖泊水文响应为冷湿到暖干气候的转变，这种盐度的快速变化，是太阳辐射增强与冰盖退缩相互作用的结果。

不同地区湖泊的表层沉积硅藻数据库研究表明，在盐度梯度上，硅藻呈现有规律的分布模式。在各个研究区，每个硅藻种均有各自明确的盐度适宜值和耐受幅度（Fritz et al., 1991）。内陆地区湖泊硅藻与盐度的定量关系被有效地利用。迄今为止，硅藻-盐度数据库区域转换函数模型已经在北美北部大平原（Fritz et al., 1991; 1993）、加拿大西部（Cumming et al. 1993; Wilson et al., 1994）、非洲东部和北部（Gasse et al., 199）、南美玻利维亚高原（Roux et al., 1991; Sylvestre et al., 2001）、西班牙东南部（Reed, 1998）和青藏高原（Yang et al., 2003）等地区建立起来。

应用硅藻转换函数，干旱－半干旱地区的湖泊古盐度被有效地定量重建，并应用到气候变率的研究中。例如，在数十年的分辨上，Victoria 湖钻孔沉积硅藻记录揭示了距今约 8000 年前后，硅藻组合和盐度的突然变化与极地冰芯钻孔记录的变化趋势一致，反映湖泊水文对全球大气环流快速变化的响应（Smol, 2002）。位于北美农业区 North Dakota 的 Moon 湖，对过去 2300 年的湖泊沉积物硅藻化石恢复的古盐度，清楚地显示该区曾经历过数次干旱时期，

无论从持续时间和频率上，都超过欧洲移民到来之后（Laird et al., 1996a; 1998）。肯尼亚 Naivasha 湖的沉积硅藻化石记录和古盐度重建结果，揭示了过去 1100 年来湖水位的连续变化模式，反映百年分辨的尺度上，气候的变率也非常明显。同时，该研究还发现，湖泊水文的变化与人类文明息息相关，如高水位时期对应于人类繁荣时期；低水位对应了人类出现生存压力时期（Verschuren et al., 2000）。

位于青藏高原南部的沉错和纳木错，是受冰川补给的两个微咸水湖泊。湖泊浅钻沉积硅藻揭示了过去 200 多年来湖泊盐度的变化（羊向东等，2003；王荣等，2006）。两个湖泊沉积硅藻化石记录显示（图 7.18；7.19），自 18 世纪以来，硅藻组合出现至少 4 次明显的阶段变化。小冰期最后一次冷期（约 1830～1880 A.D.），两个湖泊均以淡水硅藻种占优势，沉错以小型 *Fragilaria* 种类为主；而在纳木错，*Aulacosiera ambigua* 含量明显增多。20 世纪以来，两个湖泊微咸水种又开始增加，但至 60 年代以后，咸水种（*Roicosphenia curvata*）或半咸水富营养类型（*Stepanodiacus*）分别在两个湖开始出现并呈增加趋势。利用青藏高原硅藻-盐度转换函数（Yang et al., 2003），重建了过去湖水盐度变化（图 7.20）。盐度变化结果揭示小冰期湖水淡化和近 40 年来湖水加速咸化的过程。进一步对比分析又表明，这些湖泊盐度和水位变化是对区域气候变化的响应，近百年来增温引起的冰融水补给量的增加仍不足以弥补水量的亏损。

图 7.18 沉错钻孔沉积硅藻组合

图 7.19 纳木错钻孔沉积硅藻组合

图 7.20 沉错和纳木错硅藻重建的湖水古盐度

7.5.4.6 硅藻与富营养化

富营养化是全球范围内普遍出现的水环境问题，导致水体缺氧、水质恶化、生物多样性降低和蓝藻水华爆发等诸多后果，其程度的不断加重最终可以致使生物地球化学循环的重大改变以及生态系统结构和功能的退化（Hall et al., 1999; Smol, 2002）。硅藻是食物链的重要初级生产力，对营养态和营养浓度的变化非常敏感，而且在各个营养级水平上均有着不同的种群组合，与水体营养的关系已经被大量的区域研究所证实。例如，Yang et al.（2008）通过长江中下游地区 45 个湖泊表层沉积硅藻的调查与水质数据库组建，得出硅藻种群组合及其丰度分布响应于营养态的变化，最明显的变化出现在水质从中富营养向富营养转变的界限附近（图 7.21）。而且，在一定的营养梯度上，各个硅藻种均存在明显的单峰分布特点以及

各自的营养适宜值。

图 7.21 长江中下游湖泊硅藻在营养梯度上的分布

利用硅藻化石开展富营养化研究开始于 20 世纪 80 年代早期（Smol, 2002），随着数值分析手段的普遍应用，以及区域湖泊硅藻生态的广泛调查，至上世纪 90 年代，硅藻研究很快从定性阶段发展到半定量和定量研究阶段，研究内容涉及富营养化的诸多议题，如原因和机制、营养本底重建、人与自然影响的区分和生态修复等（Hall et al., 1999; Flower et al., 1997; McGowan et al., 2005）。

基于硅藻生态学特点，利用沉积钻孔岩芯的硅藻化石属种丰度和组合变化序列，许多湖泊的富营养化过程被有效地重建。这些研究表明，在世界范围内，20 世纪的湖泊富营养化多源于人类活动的干扰，如森林砍伐、农业和工业发展造成的面源和点源污染（Anderson, 1997）。例如，Stoermer et al.（1985）根据北美大湖区 Ontario 湖沉积钻孔的硅藻化石组成和丰度的变化，研究了欧洲移民入迁以来的人类干扰对湖泊生态系统的改变，结合相关沉积指标证据和文字记载，分析了该湖富营养化发生的可能原因。研究表明，公元 1770 年前，硅藻以耐贫-中营养的种类为主，反映了欧洲移民到来之前的自然生态环境；1770 年后至 19 世纪后期，硅藻组合发生转变，贫营养的 *Cyclotella* 种类减少，代表中度富营养的硅藻种出现，这个变化与当时的毁林和农业发展记录一致；20 世纪开始，贫营养种类消失，由耐营养种类所取代，反映水体富营养化加重，其变化与流域人口的增加、农业和工业活动的加强有关；1945 年后，硅藻保存度和产量下降，浮游硅藻种类减少，反映水质环境进一步恶化，磷的富集使得硅成为硅藻生长的限制性因子。该时段富营养化程度的加重与流域人口持续增加、污水大量排放、含磷洗涤剂的使用有关。

位于长江中下游的龙感湖，目前是一个草型生态类型湖泊。羊向东等（2002）通过该湖一个浅钻的沉积硅藻分析，利用 ^{210}Pb 对钻孔年代进行了确定，恢复了近两个世纪以来硅藻植物群演替的历史，并揭示了水生植被变化的过程（图 7.22a）。19 世纪，硅藻以底栖类型 *Fragilaria* 和 *Amphora libyca* 等为优势，反映当时营养程度偏低，水体清洁度高，水生植被较发育；20 世纪初期，浮游种 *Aulancoseira granulata* 增多，反映龙感湖水生植被有所减少，水体相对浑浊，湖泊开始向中等营养状态转变；20 世纪 70 年代初期以来，硅藻迅速向 *Coconeis placentula*、*Epithemia* sp.、 *Gomphonema* sp.等附生组合转变，反映了最近几十年来，水生植被发育，湖泊向草型生态系统演化（图 7.22b），与流域围垦、农业生产等人类活动引起的流域营养物质的大量输入有关。

图 7.22 龙感湖钻孔硅藻分布（a）与生态环境演化 (b)

（图 b 中 3 种样点符号分别表示不同组合带样品，数字为不同深度样品号，箭头表示变化趋势）

湖泊富营养化的根源在于氮、磷等营养物质的过量富集。对绝大多数湖泊来说，磷通常是湖泊生产力的主要限制性因素（Hall et al., 1999）。因此，使用硅藻-总磷转换函数法可进行过去湖水总磷浓度的定量重建。Yang et al.（2008）利用典型对应分析（CCA）方法，分析了长江中下游湖泊表层沉积硅藻与水质的关系，揭示出湖水总磷（TP）是解释硅藻组合

变化的最重要环境变量，然后利用加权平均回归与校正方法，建立了两者之间的转换函数。刀割法检验显示，该转换函数具有很高的实测值与推导值的回归相关系数（R^2_{jack}=0.82）和较低的推导误差（0.12）（图 7.23）。随后，将该转换函数应用到太湖、太白湖、龙感湖和洪湖的浅钻沉积物研究中，利用硅藻化石组合的变化，对近 200 年来湖水总磷浓度进行了定量重建。其中，硅藻推导的太湖总磷浓度的变化与 80 年代以来的监测记录，两者的变化趋势有很好的可比性（图 7.24）（Dong et al., 2008）。研究发现，尽管这些湖泊的硅藻组合变化反映的生态类型不同，但恢复的总磷本底值多在 50μg/L 左右，反映这些湖泊具有磷营养本底水平总体偏高的特点（Yang et al., 2008）。

图 7.23 长江中下游湖泊硅藻-总磷转换函数评估

最近 10 多年来，硅藻-总磷转换函数在许多地区被纷纷建立，并成功地应用到过去湖水总磷的定量恢复中（见表 7.2）。其它营养指标如总氮、叶绿素、溶解有机碳等的定量研

图 7.24 太湖总磷浓度重建值与监测记录的比较

（实线表示重建的总磷浓度曲线，十字点表示实测的全湖总磷浓度值，虚线为实测总磷的平均值）

究成果也有报道（Siver, 1999; Pienitz et al., 1999）。分析对比这些数据库，可以发现硅藻在总磷梯度上的分布存在以下共性：富营养湖泊中，随着总磷浓度的不断增加，硅藻种群组合存在趋同性，生物多样性（N_2, Simoson 指数）呈明显下降趋势。

表 7.2 不同地区硅藻-总磷转换函数比较

研究地区	湖泊数量	总磷范围（μg/L）	$RMSEP_{jack/boot}$	$R^2_{jack/boot}$	文献
B C Canada	37	5-28	0.21(μg/l)	0.73	Hall et al., 1992
Michigan, USA	41	1-51	0.41ln(μg/l+1)	0.73	Fritz et al., 1993
N Ireland	41	25-800	0.16log(μg/l)	0.71	Anderson et al., 1993
SE England	30	25-646	0.279 log(μg/l)	0.79	Bennion, 1994
Alps & Prealp	86	4-266	0.34 log(μg/l)	0.57	Wunsam et al., 1995
NW Europe	152	5-1190	0.21 log(μg/l)	0.91	Bennion et al., 1996
Alps	72	6-520	0.19 log(μg/l)	0.79	Lotter et al., 1998
Denmark	29	24-1145	0.28 log(μg/l)	0.37	Bradshaw et al., 2001
Sweden	45	5-370	0.19 log(μg/l)	0.49	Bradshaw et al., 2001
Finland	61	3-89	0.16 log(μg/l)	0.76	Kaappila et al., 2002
NE German	84	9-1680	0.43 log(μg/l)	0.86	Schönfelder et al., 2002
Minnesota, USA	55	7-139	0.25 log(μg/l)	0.68	Ramstack et al., 2003
长江中下游地区	45	30-560	0.17 log(μg/l)	0.75	Yang et al., 2008

浅水湖泊硅藻种群变化可以反映不同生态类型（如草型湖和藻型湖）和湖泊营养循环的动力学过程（Anderson, 1997）。Brenner et al.（1999）通过佛罗里达 Orange 湖钻孔的硅藻研究发现，20 世纪 30 年代以来附生硅藻类型占优势，指示水生植被发育。尽管文字记录了入

湖营养负荷增加，但硅藻推导的水体总磷呈下降趋势，相反，沉积物中磷的积蓄量却明显增多。由此作者认为水生植被的发育对水体总磷浓度有削减作用，从而造成了沉积物中磷的大量积蓄。这个结论同样被长江中下游湖泊的沉积硅藻研究所证实（图 7.25）。龙感湖钻孔中，1920 年前硅藻推导的总磷值与沉积物磷同步变化，对应于水生植被发育程度相对较低时期。但此后，两者呈明显的反向变化关系，湖水总磷浓度的降低趋势也与水生植被的不断扩张相对应。相反，太白湖硅藻以浮游类型为主，反映了钻孔沉积物磷与推导的湖水总磷变化趋势基本保持一致。有意义的是，这两个湖位于同一个流域内，硅藻和总磷演化的差异，揭示出草型湖和藻型湖具有不同的磷循环机制，反映了草型湖泊对营养盐的自调节功能较强。Anderson et al.（1993）和 Anderson（1997）通过北爱尔兰一个富营养湖 Lough Agher 湖的硅藻化石记录研究，利用转换函数重建了过去一个多世纪以来的水体总磷浓度变化，揭示了早期人类干扰下湖泊持续的富营养化过程，与沉积物磷浓度的逐渐增加相一致。但 40 年代后期以来，在外源磷污染得到有效控制的情况下，沉积物磷浓度一度减少，相反湖水总磷浓度仍继续升高，直至 70 年代以后才出现下降趋势。1945～1970 年间沉积物磷和水体总磷浓度的反向变化反映了富营养湖泊磷平衡的改变，沉积物磷的释放导致了湖水总磷浓度的暂时性升高，截污后的湖泊水质好转要滞后约 25 年之久（见图 7.26）。

图 7.25 龙感湖和太白湖沉积物磷与湖水总磷的比较

（实心圆点代表硅藻推导的总磷值，十字点代表测定的沉积物地球化学磷的含量）

图 7.26 北爱尔兰 Lough Augher 湖硅藻推导的水体总磷与沉积物磷通量的比较

（据 Anderson et al.，1993；Anderson，1997）

湖泊生态环境的变化是自然和人类活动共同作用下的结果，将湖泊沉积指标序列和流域记录、历史资料相结合，进行时间序列上人与自然驱动的湖泊响应过程与模型研究，是当前国际古湖沼学领域中的一个新的关注点。目前国际上利用统计学模型，将古生态数据与气候和人类活动资料进行拟合，区分自然和人为影响，揭示不同演化阶段人与自然对生态环境的影响份额。如，Hall et al.（1999）通过对加拿大北部 Qu’Appelle 地区 Pasqua 湖钻孔硅藻的分析数据，以及最近 100 年来的气象监测和流域记载的人类活动数据，利用冗余分析（Redundancy analysis, RDA）和方差分馏技术（Variance partitioning analysis, VPA），有效地揭示出近百年来人类活动和自然因素对硅藻种群演替的影响份额，以及各种因素相互叠加的影响份额，并揭示最近几十年来，流域资源利用（主要是耕地面积和牲畜数量）和城镇化（氮的排放）因素显著影响了硅藻的生态。

沉积物记录了湖泊及其流域相互作用的信息，借助于数值分析手段，可以提取硅藻与各沉积指标的关系，进而揭示湖泊生态环境变化的可能驱动因素。董旭辉等（2007）利用太白湖沉积钻孔的硅藻、有机碳、孢粉、磁化率、元素、粒度等指标序列，将硅藻数据作为响应变量，而将反映流域信息的其它指标作为影响变量，通过冗余分析，筛选出与硅藻关系最为密切和显著的影响变量，包括有机碳、木本花粉浓度、频率磁化率和沉积物磷。进一步研究表明（图 7.27）：19 世纪流域森林覆盖率较高，湖泊硅藻种群的变化主要受自然因素影响；

20 世纪早期，流域森林砍伐和有机质的增加是硅藻植物种群变化和富营养化发生的主要原因；70 年代以来，流域侵蚀速率的加大和入湖磷输入量的持续增多使得湖泊富营养化程度明显加重。

图 7.27 太白湖钻孔硅藻与多沉积指标的关系

7.6 植物大化石

7.6.1 概述

植物大化石通常是指在肉眼下可见，或能在体视显微镜下观察的植物残体，包括果实、根、茎、干、叶子、芽、花等植物器官组织。其个体尺寸变化较大（0.0001~1 m，但多数在 0.5～2 mm），如孢子小至数毫米而树干可大到数米。大的树木残体通常称为“巨化石”，偶尔可以在林地附近的泥炭地、河边或湖泊中找到；各种陆生、水生高等植物能产生大量的种子及植物残体，散布于各种土壤及沉积物中。此外，低等植物如苔藓、地衣或海藻等死后亦可保存为植物化石。图 7.28 中为部分植物化石的图片。

图 7.28 部分植物器官和残体

（1：*Carex vesicaria* 种子，2：*Carex paniculata* 种子，3：*Eleocharis palustris* 种子，4：*Menyanthes trifoliate* 种子，5：*Najas marina* 叶茎，6：*Najas marina* 种子，7：*Juncus effuses* 穗，8：*Myriophyllum spicatum* 叶茎，9：*Myriophyllum spicatum* 种子，10－13：*Potamogeton crispus* 种子，11：*Potamogeton crispus* 叶茎，12: *Potamogeton crispus* 叶刺，13：*Potamogeton pectinatus* 叶茎，14：*Potamogeton pectinatus* 种子

比例尺：照片背景方格为 1mm×1mm。董旭辉拍摄）

植物化石和孢粉一样，能提供丰富的过去环境变化信息，因此往往和孢粉指标结合，共同用于古植被、古环境和古气候的重建（Birks, 2001; Birks, 2003）。植物大化石的最初研究主要是对历史时期植被名称的收集，随着古生态学研究的发展，其在古环境重建的研究中发挥着愈来愈重要的作用。植物化石具有如下优点：

（1）许多常见孢粉只能鉴定到科或者属，而植物的种子、果实或残体则通常能鉴定到属或种级水平，因而能进一步细化植物群落类型，在植被重建中具有重要指示性价值。

（2）有些植物的花粉不易保存或产量极低，往往会误导孢粉数据的解释，植物化石能有效判别该种植物的真实状况。

（3）对产量高、扩散能力强的孢粉，通过植物种子、叶子等化石的多寡可以比较可靠地判断该植物的覆盖度（Birks et al., 2003）。

7.6.2 研究方法

7.6.2.1 采样点选择和样品采集

因为植物化石大小、重量及扩散方式的差异性，一般情况下很难推断一个采样点是否保存有丰富的化石。对于一个面积较大的湖泊，仅有少量的植物化石能被搬运至敞水区。因此，对这类湖泊，一般选择在湖湾、沿岸带或河口区进行取样。相比之下，小型湖泊更适合植物大化石的研究。Watts（1978）提出在温带地区，采样点选在沿岸带较陡、水体边缘水生植物较少、有入湖河流的浅水湖泊较合适。在森林覆盖的亚高山湖泊，植物化石保存良好，是开展植物大化石研究的理想场所。植物大化石样品采集时，要求的样量一般比较多，建议专门提取一平行孔进行样品采集。采集的样品要求在 4℃下冷藏保存。

7.6.2.2 实验处理方法

用量筒量取一定体积的样品沉积物（50～100 cm^3），加入 10％的焦磷酸钠（$Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$）溶液进行分散。含水量高的沉积物可以用 10％的 NaOH 进行分解，对碳酸钙含量高的样品可用 10％的 HCL 处理。在沉积物充分溶解后，分别用孔径为 250μm 和 125μm 的筛子进行分选，用水小心冲洗，提取的植物残体用小瓶冷藏保存。

挑选植物化石的实验器材见图 7.29 所示。取少量的过筛后的混合物置于 2～3mm 水深的培养皿（或小盘）中，搅拌使混合物分离。将培养皿置于 10～40 倍体式显微镜下观察，使用小刷、镊子或钢针挑选出悬浮液中所有的植物化石，保存在小盒中以待鉴定统计。

图 7.29 挑选植物化石的实验器材

1－钢勺：用于提取过滤后的悬浮液至培养皿；2－现代植物化石样本：用于对比鉴定；3－培养皿：用于陈放植物化石悬浮液；4－钢针：用于挑、拨样品；5－刷子（A0000 型号）：用于挑选、清洗化石；6－镊子：用于转移植物化石。

7.6.2.3 分类鉴定和记数

植物大化石的鉴定根据发表的模式种图版以及收集的现代标本。目前欧洲和北美地区研究人员使用较多的参考图版主要来自 Berggren（1964，1981），Beijerinck（1976），Davis（1993），Anderberg（1994），Webb et al. （2001）等的文献。

在计数时，对破碎的化石要进行折算计数，比如对可辨认的部分，两个不同的半个化石可合并统计为一个。对含量高但个体小的化石，比如轮藻孢子，灯心草属（*Juncus*）的种子，在挑选时可以不挑出。对数量极大的化石，可以直接计数为一个大的数字，比如 500 或 1000 个。植株的部分或苔藓不能按个体进行计算，可以赋以不同的等级以示含量高低（采用稀少、偶见、常见、大量四个等级来描述）（Birks et al., 1978）。关于湿地苔藓植物的统计记数方法，Janssens (1983, 1988) 有详细介绍。

7.6.2.4 数据表达

植物大化石数据可以用名称列表、组合图式来表示。对后者，样品中的化石数目应该转换为单位样品含量如每 100 毫升沉积物样品所含化石数，最后用 Tilia Graph 制图（Grimm, 1990）。如果沉积速率已知，还可以绘制植物化石通量图。由于不同化石数量上的巨大差异，百分比方法往往不能较好地显示结果（Watts et al., 1966）。

7.6.3 植物化石在环境重建中的作用

7.6.3.1 植物大化石与植被和环境重建

植物化石能鉴定到种、对当地植被具有直接指示意义，通常和孢粉研究结合进行历史时期的古植被重建。例如，Birks et al. （1978）曾借助植物化石的分析，详细地重建了全新世草地生态群落结构特征，并推断了草地-森林生态带的迁移状态。

古植被的重建能提供多种气候环境信息，如温度，水位和大气有效湿度等（Spence, 1967; Dieter, 1990），因此可以利用植物化石组合来反演历史时期流域气候变化、湖泊水位波动、以及其它环境变化。近年来一些研究尝试利用植物化石进行环境的定量重建。例如 Dieffenbacher-Krall et al.（2000）依据对美国东北部 13 个湖泊的 189 个表层沉积物样品中一些特殊植物化石残体以及它们沉积时的深度所做的分析，结果表明尽管一些植物种子出现的水深范围远大于该植物生长的深度范围，但如果将特征植物的残体结合在一起，就能非常有效的推断湖泊的水深，这个方法也在同区域的其它浅水湖泊中得到了较好的应用。

Birks（2000）通过对挪威西部的 Krakenes 湖植物化石记录研究，揭示了晚冰期以来植被和气候环境变化的过程（见图 7.30）：

图 7.30 挪威西部 Krakenes 湖晚冰期以来主要植物化石和部分小型动物化石含量图式

（图 7.30-3 中 *Equisetum* 和 *Sphagnum* 采用稀少（r）、偶见（o）、常见（f）、大量（a）以示含量高低。Birks，2000）

晚冰期先锋植物时期（12150-12000 a BP）。水生植物群落主要由先锋属种 *Ranunculus* 和 *Nitella* 构成。*Ranunculus* 是一种能在杂草中存活的入侵种，且是现代斯堪的纳维亚地区分布最北的一种植物（Hultén, 1971），普遍认为是出现在早全新世格陵兰湖泊沉积物中的重要属种（Fredskild, 1992）。而 *Nitella* 的许多种也具有较强的入侵能力（Stewart, 1996），在随后的 1000 年内都处于优势丰度。但之后由于气候变冷，该属种逐渐绝迹。

阿兰罗德（Allerod）期（12000-10900 a BP），水生植物群落以 *Nitella* 为优势种，*Ranunculus* sect. *Batrachium* 含量低。该组合与现今挪威树线附近的许多贫营养湖泊的组合非常接近。水生动物 *Daphnia* 和 *Plumatella* 数量丰富。在 Allerod 晚期开始 *Potamogeton*、*Carex nigra* 和 *Potentilla palustris* 缓慢出现，这些属种都适宜在浅水的贫、中营养水体中生存，反映该时期，气候转暖，但温度的回升并未带来植被的快速演替和发展。

新仙女木（YD）期（约 10900～10000 a BP）。化石总体含量很低, *Nitella*, *Daphnia* 和 *Plumatella* 含量快速减少，反映一次冷期的快速到来，湖水结冰时间延长，湖泊的大多数有机体难于存活。

全新世早期（约 10000～8800 a BP）。新仙女木晚期，温度开始快速回升，*Ranunculus* 和 *Nitella* 重新出现，在 10～30 年间数量开始升高，此后其它的沉水种类开始依次出现。*Ranunculus* sect. *Batrachium* 数量短时间内急剧增多，可能是对温度升高和入湖冰土减少（湖水浑浊度降低）的响应。*Nitella* 和 *Hippuris vulgaris* 在 30～40 年内才达到一定含量。*Ranunculus hyperboreus* 在整个 YD 时期内都有出现并且在全新世初期仍保持相当含量，但在 100 余年后逐渐消亡。全新世早期（H2～H1 阶段），另一个显著的植物群落演替是 *Isoetids* 的种属变化。大多数的 *Isoetids* 都能在扰动的生境中生长（Farmer et al., 1986; Rørslett, 1989），能较好地指示浅水风浪发生或清澈的深水沙石底质，但他们不能在高沉积速率的水体中存活

（Farmer et al., 1986）。其中 *Elotine hydroopiper* 主要分布在现今的挪威东南部，由此推测 Krakenes 湖区早全新世气候条件更趋向于大陆性气候环境。约 9000 a BP 前后，*Isoetids* 和大多数的沉水植物如 *Ranunculus* sect. *Batrachium*, *Nitella* 和 *Myriophyllum* 逐渐被浮叶 *Nymphaea* 和 *Potamogeton* 所代替。*Nymphaea* 的生长深度约 1～1.5 m，它的根能深入泥中获取营养，叶子能挡住光线进而影响其他沉水植物的生长，其竞争性强（Preston et al., 1997），表明全新世中后期，侵蚀速率增加带来了大量的陆源营养物质，湖泊底泥增厚，水体营养水平上升。

7.6.3.2 植物大化石与生态系统演化的重建

水生植物是构成湖泊的重要生境类型之一，也是湖泊生态系统的一个重要组成部分（Carpenter et al., 1986; Marshall et al., 1990）。植物大化石结合其它湖泊生物化石指标如硅藻、金藻、色素、摇蚊、枝角类、鱼类等，可以捕护湖泊食物链各个端元的相互关系，由此揭示水生态系统的结构功能变化（McGowan et al., 2005）。

在浅水湖泊生态系统中，双稳态效应（Scheffer et al., 1993）已被普遍认为是最重要的生态学理论。然而，由于缺乏历史阶段的生态系统变化的信息，该理论尚未从环境演化重建研究中得到证实，而植物化石记录研究可以为该理论提供直接证据。

Sayer et al.（2009）对位于英格兰东部 Norfolk 郡的一个小型浅水 Felbrigg 湖进行了沉积岩芯的植物化石分析，并结合该湖孢粉和硅藻等指标研究，重建了该湖水生植被与浮游植物群落组成、生长季节在年际上的变化过程（图 7.31）。

（1）约 1900 AD 前，植物大化石含量普遍较高，附生类或底栖类硅藻含量占主导地位，反映沉水植被发育，生长周期也较长（图 7.31a）。这一结果也被沉积物中的软体动物和枝角类分析结果所证实（Davidson et al., 2009）。

（2）1900-1950 AD 期间，植物化石仍保持高含量，且附生生物如 *Piscicola* 和 *Mollusca* 含量在该阶段达最大值，表明该时期植被覆盖量进一步增加（图 7.31b），湖泊生态系统仍以水生植物为主，藻类尚不发育。

图 7.31 英国 Felbrigg 湖过去 200 多年来浮游藻类和大型水生植物动态演替模式

（植物生长的季节性依据主要属种 *P. pectinatus, P. pusillus, Z. palustris, Chara* 和 *Ceratophyllum* 生长季节进行估算得到。Sayer et al., 2009）

（3）1950 以来时段。植物化石以 *Zannichellia* 和 *Potamogeton* 为主，但植物化石含量普遍开始降低，表明该时期植被覆盖率逐渐下降（图 7.31c-d）。藻类开始发展，并逐步侵占水生植物的生长空间。多项研究表明 *Z. palustris* 适宜在营养程度高和高有机质底泥的湖泊中生长（Barko et al., 1986)，反映 20 世纪以后 Felbrigg 湖开始出现明显的富营养化趋势，浮游植物的生物量逐渐升高（图 7.31e）。

7.6.3.3 植物大化石与 ^{14}C 测年

沉积物“碳库效应”是古湖沼学研究中的一个难题（Olsson, 1986）。湖泊沉积物中的陆生植物和一些水生植物大化石都可以用于精确的 ^{14}C 年代测定（Hatteh é et al., 2007）。陆生植物在生长过程中直接与大气进行碳交换，用其化石测年可以避免“碳库效应”（Wohlfarth,

1996; Turney et al., 2000）。然而对一些水生植物化石，如水生藻类或维管束植物，因为有机体从缺少 ^{14}C 的水体中获得碳元素而容易导致 ^{14}C 缺乏（Deevey et al., 1954），因此利用水生植物化石所测定的 ^{14}C 年龄容易偏老，即所谓的“碳库效应”或“硬水效应”。Törnqvist et al.（1992）研究表明利用水生植物残体进行 ^{14}C 测年所导致的“碳库效应”强弱，取决于该属种生长过程中获取碳元素的来源。例如，用 *Potamogeton* spp. 和 *Nuphar lutea* 进行 ^{14}C 测年，碳库效应非常明显；而用 *Nymphaea alba* 所测得的 ^{14}C 年代和陆生植物年代一致。因此，应尽量从湖泊沉积物中挑取陆生植物化石进行 ^{14}C 年代测定，才有可能获得更为准确的测年结果（如 Barnekow et al., 1998）。

7.7 摇蚊幼虫亚化石

7.7.1 概述

摇蚊属于双翅目（Diptra）摇蚊科（Chironmidae）昆虫，在全球已知分布约 400 个属，是淡水水生态系统中数量最多的昆虫，几乎遍及所有的淡水环境（Wielderholm, 1983）。在湖泊沉积物中，摇蚊幼虫亚化石远比其它水生动物化石丰富。作为四蜕期的全变态昆虫（图 7.32），摇蚊生命周期的大部分时间以幼虫的形式在水体中度过，处于第三和第四蜕期的摇蚊幼虫发育了几丁质的头囊，可以较好地在水体中保存，易于提取和鉴定（Walker, 1987）。不同摇蚊幼虫具有差别较大的生存最适宜值，其中许多种摇蚊幼虫的生态幅相对较窄。摇蚊的生命周期较短，能够迅速地响应环境的变化（Walker et al., 1995）。摇蚊从卵到幼虫到蛹最后发育到成虫的生活周期中，水体的理化性质直接影响其孵化、生长、摄食、蛹化和羽化。由此可见水的理化性质对摇蚊分布特征的重要影响源于其对摇蚊生理过程的影响（Brooks et al., 2000）。

图 7.32 摇蚊的生活史（Borror et al., 1976）

Gam 于 1927 年首次利用摇蚊幼虫亚化石作为古环境指标，此后直至上世纪 80 年代末，摇蚊幼虫亚化石记录被用于指示湖泊古生产力变化、湖泊富营养化和酸化。20 世纪 90 年代以来，摇蚊幼虫亚化石记录开始被普遍应用于古气候古环境的定量重建，包括温度、盐度、营养盐等指标。这主要归功于一系列表层样品数据库的建立，摇蚊属种的分布与气候、盐度、湖泊生产力等关系的研究，以及转换函数的发展（Walker, 2001; Brooks, 2006; Walker et al., 2006; Eggermont et al., 2006; Brodersen et al., 2006）。

7.7.2 实验分析与数据表达

从沉积物中提取摇蚊幼虫亚化石的实验室方法有相对固定的标准（Brooks et al., 2007，Walker, 2001）。首先将样品放入 10%的氢氧化钾溶液中，在 75℃加热 15 分钟后，过 212μm 和 90μm 的筛，后将剩余样品转移到体视显微镜下，在 40 倍镜下用镊子将摇蚊头壳挑出。根据沉积物性状以及是否含有碳酸盐等特性，还可以使用超声波或稀盐酸清洗等方法对样品作处理（Walker, 2001; Lang, 2003)。根据所用封片胶的性质，用不同的方法对挑出的头壳封

片。如果选用 Euparal 等封片胶做永久封片，就需要对挑出的样品在 100％酒精中去水后封片；如果选用 Berlese 溶液或 Hydro-Matrix®等水溶性的胶做封片，可以将挑出的头壳直接封片。头壳封片后在 100～400 倍生物显微镜下进行鉴定，一般可鉴定到属级水平，在某些情况下可鉴定到种。将完整的或具有大部分颏的头壳计为一个，将半个颏计为半个，不足一半的不统计。沉积样品中摇蚊幼虫亚化石统计数至少达 50 个壳体。摇蚊幼虫属种鉴定主要依据 Wiederholm（1983），Oliver et al.（1983），Rieradevall et al. (2001)，Brooks et al.（2007）的图谱文献。摇蚊幼虫亚化石的数据表达和数据分析与硅藻相同（见 7.5 节）。

7.7.3 摇蚊在环境重建中的应用

7.7.3.1 摇蚊与温度

利用摇蚊幼虫亚化石进行过去全球环境变化的定量研究是近年来国际上新兴的一个研究热点（Walker, 2001）。在定量研究的环境要素中，温度的重建无疑是人们最感兴趣的话题，研究也相对集中。由于温度对摇蚊生理机能的显著影响（Brooks, 2000），从而在大的地理尺度上影响了摇蚊的分布和属种组合（Walker, 1992）。通过对湖泊表层沉积物中摇蚊幼虫亚化石的鉴定及其组合与夏季水温的关系分析，利用加权平均及加权平均－偏最小二乘法等不同建模方法，Walker et al.（1991a, 1997）在加拿大建立了首个摇蚊-夏季表层水温推导模型。随后，一系列摇蚊-夏季表层水温转换函数的研究工作相继在芬兰（Olander et al., 1999）、瑞典（Larocque et al., 2001）、挪威（Brooks et al., 2001）和北美（Pofinchu et al., 2002）等地陆续展开，并成功地应用于古温度的定量重建中（Olander, 1999; Brooks, 2001; Pofinchu et al., 2002）。由于表层水温指数多通过一次测量获得，许多湖泊无连续观测数据，采用这种测量方式产生的温度值质量不高，必然会对转换函数的性能产生影响。为了解决这一问题，利用 7 月平均气温数据，摇蚊-夏季气温转换函数被逐步建立起来（Lotter et al., 1997; Olander et al., 1999; Brooks et al., 2001; Larocque et al., 2001）。从区域上看，应用模型并完成古气候定量重建的研究多集中在北美和欧洲。早期加拿大的相关研究表明利用摇蚊定量重建晚冰期古气候的演化，不仅能够反演像新仙女木事件这种大幅度的温度变化，而且许多小的波动如 Killarney Oscilation 的寒冷事件也得以被发现（Walker et al., 1991b; Levesque et al., 1993）。通过对沉积摇蚊进行的苏格兰西南 Whitrig Bog 湖晚冰期古温度重建的结果显示，古温度曲线与格陵兰冰芯的同位素记录十分吻合，变化细节也可以对比，冰消期发生的重大气候事件都有着清晰的记录（Brooks et al., 2000）（图 7.33)。在英格兰西北部的 Hawes Water 湖，类似的摇蚊研究也显示，推导的晚冰期气温变化与沉积物中氧同位素记录非常吻合，这两个指标均记录了末次间冰期的四个冷事件（Marshall et al., 2002; Bedford et al., 2004）。Cwynar et al.（1995; 2001）通过对美国缅因州和新罕布什尔州的摇蚊分析研究，发现摇蚊揭示了孢粉记录所未能反映的晚冰期气候波动，显示了摇蚊在温度重建中的优势。近年来，全新世气温变化的定量重建研究也开始受到关注，但利用沉积摇蚊记录重建可信的全新世温度序列，其难度明显比晚冰期的相关研究要大得多，这主要是因为全新世温度的波动范围与摇蚊-温度转换函数的推倒误差比较接近。另外，全新世植被的演替以及土壤的发育程度要比晚冰期明显得多，因而对湖水以及沉积物的化学性质具有较大的变异影响，这也意味着受流域变化驱动的湖泊内部要素如 pH、水深、营养水平和溶解氧等指标的波动对摇蚊种群的影响可能比温度影响更加强烈，从而也影响到摇蚊-温度转换函数的精度（Brooks, 2006）。尽管难度较大，但利用摇蚊定量重建全新世温度方面仍取得了一些进展。Velle et al.（2005）对挪威 6 个湖泊的摇蚊记录进行了分析，得到了区域性的全新世温度变化曲线。冰岛、澳大利亚北部以及瑞典北部的相关研究均表明摇蚊可能提供有价值的全新世气温变化信息（Caseldine et al.,

2003; Dimitriads et al., 2001; Rosén et al., 2001; Bigler et al., 2002）。在北美和欧洲的其它地区类似研究也有开展（Palmer et al., 2002; Korhola et al., 2002; Langdon et al., 2004; Brooks, 2006; walker et al., 2006）。此外，在瑞典北部，Larocque et al.（2003）利用摇蚊重建的温度值与有连续 87 年气候观测的资料进行了对比，结果显示摇蚊对小幅度的温度变化也足够敏感，具有准确重建全新世温度的潜力。

图 7.33 摇蚊重建的苏格兰东南部 Whitrig Bog 晚冰期温度变化与 GRIP 冰芯氧同位素记录的比较（S 代表冰阶，1s 代表间冰阶，YD 代表新仙女木事件，H 代表全新世；GS 一 1，GI 一 1，GS-2 均为 GRIP 同位素地层学事件；vedde ash 为用于定年的火山灰。所有曲线均经过 LOSS 平滑。Johnsen et al., 1992；Dansgaard et al., 1993）

7.7.3.2 摇蚊与盐度

封闭湖泊盐度的变化对于降水-蒸发的平衡非常敏感。基于一定盐度范围（0.05~300g/l）的 85 个湖泊表层沉积摇蚊组合特征，Walker (1995)建立了适用于加拿大西部封闭湖泊的摇蚊-盐度转换函数模型，后来被利用于不同建摸方法的优化（Heinrich, 2001）。该模型被成功地应用于该地区湖泊冰后期以来的盐度重建（Heinrich,1995; 1997; 1999; 2001)。在东非，Verschuren et al.（2000）根据肯尼亚 45 个湖泊中的摇蚊分布，建立了一个摇蚊-盐度转换函数，经过优化的第二个模型也在该地区建立（Verschuren, 2004）。利用该模型，典型湖泊的盐度演化过程得以成功重建（Verschuren, 2000; 2004; Eggermont et al., 2006; Kröpelin et al., 2008），结果显示摇蚊重建的盐度与硅藻重建的盐度在变化趋势上基本一致（Verschuren, 2004; Eggermont et al., 2006; Kröpelin et al., 2008），两者可互为验证。我国青藏高原以及西北地区分布有数量众多的咸水湖泊，利用摇蚊重建湖水盐度演化的潜力很大。目前青藏高原湖泊摇蚊-盐度转换函数已经建立（Zhang et al., 2007），将为该地区咸水湖泊盐度演化的定量重建和古水文研究提供有力的工具。

7.7.3.3 摇蚊与营养

在营养型湖泊中，湖泊的营养状态、生产力和底层滞水含氧量与摇蚊也有密切的关系。Thienemann（1921) 最早进行了相关的研究工作。上世纪 90 年代以来，许多研究者致力于应用数学模型定量刻画摇蚊幼虫与这些变量之间的关系。在北美，Quinlan et al. (1998)建立了利用摇蚊幼虫亚化石重建滞水层含氧量的方法；Quinlan（2000）及其合作者（Hall, 1999a, 1999b; Clerk, 2000; Little, 2000a, 2000b）应用摇蚊幼虫亚化石重建了加拿大典型湖泊的富营养化历史。在欧洲，Lotter et al. (1998)和 Brooks（2001）分别建立了瑞士以及英格兰中部和威尔士摇蚊-总磷推导模型；Brodersen（1994, 1997, 199）则建立了恢复丹麦浅水湖泊营养变化-叶绿素 a 的定量方法，并对摇蚊与营养和滞水层溶解氧关系的研究进行了论述（Brodersen et al., 2006）。在我国东部长江中下游地区，张恩楼等（2006）建立了摇蚊-湖水总磷转换函数模型，重建了近百年来武山湖湖水总磷的演化过程（图 7.34）。同一地区摇蚊与硅藻转换函数的建立（Yang et al., 2008），也为依据不同独立指标重建结果的验证提供了可能。

图 7.34 武山湖浅孔摇蚊组合与总磷重建

7.7.3.4 摇蚊与水深

利用摇蚊亚化石记录研究过去水位变化在最近也被开展（Hofmann, 1998; Korhola et al., 2000）。湖泊表层沉积物样品的调查显示，水深也是影响摇蚊分布的重要的因素之一（Walker, 1995）。在芬兰湖泊摇蚊分布调查的基础上，Korhola et al.（2000）建立了摇蚊-水深转换模型，不过他同时还指出由于在该数据库中，水深和温度呈负相关，很难区分二者的效应，而且较大的推导误差证实，只有在湖泊水位有较大变动的情况下摇蚊与水深的关系才具有统计学意义。鉴于大部分外流湖泊的水位变化影响因素较多，摇蚊-水深转换模型在内流湖泊中才可能提供有效的推导结果。由于数据库中的样品均取自湖泊的最深处，相应的转换模型只能应用于对取自该处的岩芯记录进行推导。但 Hofmann（1998）的研究却认为，取自滨岸带或近岸带的岩芯能够提供更有效的湖面波动记录。以上表明水深推导模型的应用有一定的局限性。

7.8 枝角类

7.8.1 概述

枝角类属无脊椎动物节肢动物门甲壳动物纲鳃足亚纲双甲目枝角亚目。枝角类身体通常短小，左右侧扁，体长一般不超过 1mm，少数种类体长可达近 10mm。湖泊是枝角类主要的栖息地，在蔓生水草的浅水沿岸区，枝角类种类特别丰富，敞水区种类虽然不多，但数量却往往很大。不同种类枝角类都有其特定生境，有些悬浮在水体中，有些附着在水生植物上，也有些种类则附着在湖底淤泥、岩石和沙砾上。此外，不同枝角类对水温、营养盐、盐度、酸碱度等环境因子的适宜范围和耐性也不同，因此在不同水域往往形成独特的群落组合（蒋燮治, 1979; Jeppesen et al., 2001a）。

枝角类在生长过程中要经历数次脱壳，这些脱落的壳瓣以及个体死亡后的尸体会缓慢沉降，除了一些外壳较脆弱的种类，许多枝角类的几丁质外壳都能在沉积物中以壳瓣、头甲、后腹部、尾爪、下颚等分离的残体形式得到保存，这些残体能在一定程度上反映水体枝角类种类组成及个体丰度（Jeppesen et al., 2001a）。只要对现代枝角类的分布、适宜度、耐性等生态学信息有较详尽了解，就可以根据沉积物中枝角类化石的种类组成、形态和数量等信息判断历史时期的环境条件。作为环境重建的有效生物指标，枝角类化石的研究，相对于硅藻、摇蚊化石来说，起步稍晚，系统性的环境重建典型实例尚不太多（Frey, 1986; Bos et al., 2003）。但现有的研究成果已表明，枝角类的种群、结构及其变化与诸多环境因子的紧密联系，也为枝角类化石的环境定量化重建研究提供拓展机遇。

7.8.2 实验室分析

湖泊表层和柱状沉积物枝角类样品的采集方法同于硅藻。样品的实验室分析方法依据 Frey（1986）、Amsinck et al.（2003）的介绍。首先，根据微化石丰富度，一般取 3 g 左右样品，用 10％的 KOH 溶液浸泡并在 60℃水浴锅中加热 1 小时，以去除有机质。样品清洗后，用一定规格滤网（80 μm）进行过滤，然后将滤网上的残留物收集到离心管中，加入 1 滴甲醛固定，并定容至 5 或 10 ml。将提取的枝角类样品制片，在光学显微镜下进行种类鉴别与计数。

枝角类微化石的鉴定主要根据外形特征，可参考国内外的一些图谱和文献（Frey，1959, 1960; Brooks, 1959; DeCosta, 1964; Goulden, 1964; 蒋燮治等，1979；陈受忠，1990, 1991）。盘肠溞科和象鼻溞科保存比较完整，其壳瓣、后腹部、头甲、休眠卵等都可用来进行属种鉴定，其中盘肠溞科的种类还可以借助头孔的数量和排列方式进行鉴别。在象鼻溞属的鉴定中，除了头孔特征，还可根据壳刺的存在与否区分长额象鼻溞与简弧象鼻溞。薄皮溞属则是根据尾爪鉴别计数。溞属和网纹溞属的外壳保存较差，主要利用休眠卵进行鉴别（Frey, 1986; Jeppesen et al., 2001b）。

在对微化石进行个体计数时，需结合枝角类结构特点进行校正，如根据尾爪或单片壳瓣计数需用总数除以 2，而据头甲或后腹部计数就是个体的数量。每个样品中的统计量应至少达到 100 个以上，以减小数据统计的误差。

7.8.3 数据表达

枝角类数据通常用相对丰度和绝对丰度两种方式表达。相对丰度为样品中某个种占枝角类总量的百分比；绝对丰度指单位重量沉积物中所含的枝角类个数（单位：个/克干重或 ind/g dw）(Amsinck et al., 2003)。图 7.35 同时列举了滇池钻孔沉积物中枝角类相对丰度和绝对丰度随沉积深度变化的情况，其中绝对丰度在 24cm 附近的剧烈变化表明湖泊初级生产力的显著改变；从相对丰度看，*Bosmina* spp.起初一直是优势种，在 12cm 附近则被 *Chydorus sphaericus*（圆形盘肠溞）代替，表明滇池水体环境发生了重大转变。

图 7.35 滇池沉积物中枝角类随沉积深度的变化

7.8.4 枝角类在环境重建中的应用

7.8.4.1 枝角类与温度

枝角类的种类组成和分布与温度紧密相关（Jeppesen et al., 2003; Bigler et al., 2006）。Korhola et al.（2000）的研究表明在北欧湖泊，夏季气温或水温是影响枝角类群落结构的重要环境因子。Lotter et al.（1997）最早尝试将现代枝角类与气候之间的关系进行定量化，发现枝角类是定量重建气候变化的灵敏生物指标。由此建立了浮游、底栖枝角类与夏季平均气温的推导模型（Lotter et al., 2000; Duigan, 2000）。此外，气候变化会导致枝角类物种多样性和狭温性种类的丰度变化，如末次冰期湖泊中枝角类化石种类少且以耐寒种类占优势，至全新世初期，气候的回暖导致枝角类种类明显增加（Korhola et al., 2001）。

7.8.4.2 枝角类与盐度

盐度的变化在很大程度上影响了枝角类的丰度和种类组成。如随盐度的增大，枝角类丰度会降低（Boronat et al., 2001)。已有研究表明，体形较大且以浮游植物为主要牧食者的溞属枝角类耐盐性较差，主要生活在含盐度低于 2‰的淡水水体中（Carpenter, 1993; Jeppesen et al., 1994）；而体形较小的枝角类如圆形盘肠溞则有很高的耐盐性，甚至可以在含盐度高达 56‰的水体中生存。其它枝角类如矩形尖额溞、长额象鼻溞、瘦尾细额溞、无刺大尾溞的耐

盐性也相对比较差（Aladin, 1991; Wolfram et al., 1999）。因此，根据枝角类化石组合和个体丰度变化，可为重建水体含盐度演化历史提供依据（Amisnck et al., 2003）。

7.8.4.3 枝角类与营养水平

湖泊营养水平的改变会直接或间接地影响枝角类的发育、繁殖、数量及群落结构等，因此，利用枝角类化石记录可以揭示湖泊营养富集的历史、富营养化发生的时间、程度和发展趋势。这方面的研究成果较多，如 Boucherle（1983）根据沉积物中象鼻溞的种类变化得出长刺型简弧象鼻溞出现在贫营养时期，富营养时段则转变为长额象鼻溞，且伴随溞属种群的增加；当营养状况再次转变为中营养水平时长额象鼻溞又被长刺型简弧象鼻溞所取代，据此可反演湖泊营养水平的演化历史。Shumate et al.（2002）利用沉积物中枝角类化石组合的变化，重建了佛罗里达 Apopka 湖营养演化历史，揭示出在人类活动强烈影响下，枝角类组合发生了明显变化，Apopka 湖已经由“草型湖”转变为现今的“藻型湖”。Liu et al.（2008）通过对我国云南抚仙湖一沉积柱的枝角类化石数据研究（图 7.36），得出喜好富营养环境的 *L. leydigii* （粗刺大尾溞）、*A. rectangula*（矩形尖额溞）和 *C. sphaericus*（圆形盘肠溞）的丰度自 20 世纪 70 年代中期逐渐增加，至 20 世纪 80 年代中后期达到最大，表明抚仙湖的营养水平正在向逐渐升高的态势发展。

图 7.36 抚仙湖沉积物中枝角类丰度随沉积深度的变化

7.8.4.4 枝角类与湖泊酸化

湖泊酸化会导致枝角类的物种多样性和密度下降，并伴随原有优势种被耐酸种替代（Paterson, 1994）。Barmuta et al.（1990）的研究表明，大多数枝角类在 pH 低于 5 时会消失，但长额象鼻溞表现出了相对较强的耐酸特点，在其它枝角类基本消失时能出现较多的数量，但在 pH 低于 4.7 时也几近消失。该结论也被 Hann（2000）的研究结果证实。在湖泊酸化过程的重建研究中，枝角类化石总是与其它生物指标如硅藻、金藻、摇蚊等结合进行综合分析（Battarbee et al., 2005; Charles et al., 1990; Renberg et al., 1990）。

7.8.4.5 枝角类与沉水植物

沉水植物对浅水湖泊的营养结构、生物群落状况及水体透明度等都有重要影响（谢平，1996；Jeppesen et al., 1996）。习居于沉水植物生境的枝角类（主要是盘肠溞科）的化石可以指示沉水植物覆盖度的变化，并为重建沉水植物的演化历史提供信息。例如，Thoms et al.（1999）利用盘肠溞的丰度、盘肠溞与象鼻溞的比值变化，反演了澳大利亚洪泛平原地区欧洲移民入迁以来沉水植物的演化以及水体营养富集的过程；Amsinck et al.（2003）利用柱状沉积物中枝角类化石记录反演了沉水植物覆盖度的变化。

7.8.4.6 枝角类与鱼类捕食

鱼类可以通过捕食这一下行效应（Top-down effect）调节水体中其它生物的构成和数量，

从而对水生生态系统的群落结构及其动态过程产生影响（Carpenter, 1993）。如食鱼性鱼类的引入或数量增加可导致浮游生物食性鱼类的灭绝，进而引发其它浮游动物捕食者如摇蚊类丰度的增加，最终使得某些小型枝角类如象鼻溞的数量急剧减小（Carpenter et al., 1987）。刘正文等（2002）通过对浮游生物食性银鱼和浮游动物之间的关系研究表明，银鱼生物量较高时，大型枝角类密度较低，而小型枝角类如象鼻溞的数量则很丰富；相反在银鱼生物量比较低的年份，大型枝角类密度较高，而象鼻溞则由于大型枝角类的捕食或其较强的竞争压力其数量降低。Liu et al.（2008）通过抚仙湖沉积钻孔的枝角类化石记录分析（图 7.36），发现 20 世纪 70 年代以来，沉积物中体型较大的原有优势种 *Bosmina* spp.相对减少，而体型较小的 *B. longirostris cornuta*（钩角型长额象鼻溞）则迅速增加。根据文献记录，认为银鱼入侵引起了枝角类组合的变化。

近年来，枝角类与鱼类之间的密切关系被进一步定量化，如 Jeppesen et al.（1996）通过对丹麦 30 个浅水湖泊表层沉积物枝角类分析，揭示了其与鱼类生物量之间存在的显著的相关关系，由此建立了二者之间的转换函数。可见，利用沉积物中枝角类化石推导过去鱼类变化可能是一条较好途径，并有潜在的应用前景。

7.9 介形类

7.9.1 概述

介行类属小型双壳甲壳类，成年个体壳长一般 0.5～3 mm，其壳体由低镁方解石组成。在湖泊中，介行类一般生活在中性到碱性的水体，在这类环境的沉积物中，壳体能很好地保存；而在酸性水体的沉积物中其检测记录很少（Holmes, 2001）。介行类有营两性和单性生殖两种，由于单性生殖的后代一直维持雌性个体，因此也称为孤雌生殖。营两性生殖的个体，雄性和雌性壳体有时很容易分辨，但也有些两性壳体几乎一致。一般来讲雄性直到成年阶段才能被区分出来。介行类具蜕壳的习性，其生命周期中一般蜕壳 7～8 次。介形类不同种类的生命周期差别很大，从几周至几年不等，但大多数属于季节性生长的种类。现有研究表明介形类生长周期和环境因素有很大关系（Delorme, 1989）。

与其它湖泊微体生物一样，介形类的分布也对气候（温度）、水环境（离子浓度、pH 值、水深、含氧量、营养盐等）和生境条件（底质）的变化很敏感（黄宝仁等, 1985；W illiams et al., 1993; 彭金兰，2002）。基于介形类明确的个体生态特征，介形类在古湖沼研究中的重要性早已被认识，并被用来重建第四纪古生态、古环境和古气候的变化。近年来，随着介形类现代生态调查和分类研究的深入，以及分析技术和手段的提高，利用介形类化石开展古环境重建，已经从定性描述和推导阶段发展到定量研究阶段（Forester, 1986; Smith, 1993; Mourguiart et al., 1994)。值得一提的是，介形类化石研究的另一个重要进展，就是介形类壳体的地球化学研究方面，包括利用氧和碳同位素（$^{18}O/^{16}O$ 和 $^{13}C/^{12}C$）、微量元素（尤其是 Mg 和 Sr），进行湖泊古水温、古盐度、古生产力的半定量和定量推导（Holmes, 1996; Shen et al., 2001, 2002）。本节重点介绍古生态的研究内容，有关介形类壳体的地球化学研究见本书第 6 章 6.2 和 6.3 节。

7.9.2 介形类分析与鉴定

湖泊钻孔沉积物中，介形类的实验提取过程包括3步：沉积物分解、颗粒分选和挑样（余

幼玉等，1988；Holmes, 2001）。首先根据岩性，称取一定量的干沉积物（通常15～30g），加水浸泡分离（一般2～3天，泥样的浸泡时间更长些）。然后用双层筛过筛冲洗（上层筛孔径为1 mm，即20目/寸；下层筛孔径0.061 mm，相当于250目/寸）。将冲洗过的样品进行沉淀、滤水以及80℃经30～40分钟烘干后，在挑样盘上用双目显微镜对介形类化石壳体进行提取。最后，对壳体用5%的双氧水处理或者用超声波进行机械处理，使其壳体表面清洁后，就可以进行镜下鉴定和统计，以及深度扫描电镜等手段分析。

为了了解介形类生态习性和分布特点，有必要对现代环境的介形类样品进行采集。对深水表层沉积物，一般用抓斗采样器和柱状采样器采集样品；用浮游动物网（孔径为250μm）在浅水环境采集活体介形虫，样品采集后，立即用90%的乙醇和品红等进行固定和着色，以便实验室分析。有关现代样品的挑选、保存和处理方法，详情见Holmes（2001）的描述。

介形类化石的鉴定主要依据壳体的外形和大小、壳体背脊绞合构造、闭壳肌痕数量和形态、边缘带构造发育情况、结合线行经、叠覆关系、毛细管孔的形态、数量和位置、毛细管带的宽度及结构、眼结节的有无等特征。但目前介形类的分类研究仍相对较弱，种类的鉴定主要依据区域性的图谱和文献（侯佑堂等，1962；Moore et al., 1961; Meisch, 2000），以及Holmes（2001）著作中列出的相关文献。

7.9.3 介形类在环境重建中的应用

基于介形类分布、组成与水位、温度、盐度和离子浓度的密切关系，在许多研究中，介形类化石主要围绕这些环境要素进行第四纪古生态和古环境的重建。下面就介形类在水文、盐度和气候变化方面的应用作简要介绍。

7.9.3.1 介形类与水位变化

水深是影响介形类分布的重要环境因子，尤其在大型湖泊。Mourguiart et al.（1992，1994）通过对玻利维亚 Altiplano 湖的介形类分布调查发现，在不同的水深条件下，生活着不同的种类组合。根据介形类与水深的转换函数，重建了 Titicaca 湖第四纪的水深和湖泊水位变化的历史，并在此基础上，探讨了水位与降水变率的关系。Holmes（1998）通过牙买加玛珥湖的介形类研究，发现 *Cypretta brevisaepta* 和 *Candonopsis* 分别与深水和浅水环境有关，并利用这一关系重建了该湖连续的水深变化历史，该重建结果与地球化学的变化趋势相吻合。

7.9.3.2 介形类与盐度和离子浓度变化

介行类是古水化学的有效指示器。在介形类地层研究中，相当多的成果集中在水体盐度和离子组成的重建方面。在内陆干旱、半干旱地区，湖泊盐度的上升往往是由于气候变干而引起的蒸发量增加的结果（De Deckker et al., 1988; Holmes, 1997），因此，介形类化石记录的盐度和离子浓度的变化可以指示水文信息, 进而反映湖区气候和有效湿度的变化。在北美，通过现代介形类种群分布和水化学数据的大量调查，Smith et al.（1992）运用统计手段，定量重建了全新世湖泊水化学组成的浓度变化序列（图7.37）。

图7.37 依据介行类重建的北美Minesota地区Elk湖的硫酸盐和碳酸盐浓度的变化

（图中实线是应用个体生态学方法获得的重建平均值，虚线是依据类比法得出的重建值，湖泊现代的测量值由黑点表示）。

（Smith et al., 1992）

在我国，利用湖泊介形类化石进行盐度变化的研究多集中在青藏高原地区和西北干旱区（Sun et al., 1995; 杨藩等，2002；刘俊英等，2007；董宁等，2008），但对环境定量重建的研究尚未开展。最近，Mischke et al.（2007）通过对青藏高原东部145个不同盐度和生境类型湖泊的现代介形类和环境数据的分析研究（图 7.38），揭示了研究区介形类与盐度和离子浓度的统计学关系，并利用加权平均回归方法，首次建立了介形类与盐度的转换函数，其推导能力（R^2=0.71, RMSEP=0.35）与研究区基于硅藻和摇蚊建立的转换函数结果有很好的可比性。尽管该转换函数尚未得到应用，但对研究区来说，该研究为普遍缺乏硅藻记录的碱性咸水湖泊来说，提供了一个重要的环境定量重建的手段，并为介形类化石古生态的解释提供了有价值的个体生态学信息。

图7.38 青藏高原湖泊表层沉积物中主要介形类属种随盐度（用电导率表示）梯度的分布（Mischke et al., 2007）

7.9.3.3 介形类与海水入侵

在海岸带地区，湖泊和河口区的沉积钻孔中的介形类化石记录了海相和陆相环境交替变化的信息。我国这方面的研究成果也相对较多（赵泉鸿等，1980；刘春莲等，2008；王强等，2008）。例如，王强等（2008）依据渤海湾多个钻孔介形类记录的分析研究，揭示了该区M IS 3阶段以来经历了多次海侵的证据；刘春莲等（2008）通过对珠江三角洲河口附近钻孔沉积物中介形类丰度的高分辨率研究，对晚第四纪环境变化和海平面波动引起的海侵过程进行了重建，得出珠江口冰后期海侵开始于约13 400 a B P；9 000～4 850 a B P为全新世海侵时期，其中最大海侵发生于7 500～7 140 a B P之间；全新世中期以后为持续海退期，河流作用增强，本区逐渐转变为上三角洲平原环境。

7.9.3.4 介形类与古温度

通过介形类与水文的关系，可以间接推导古气候（降水和有效湿度）的变化。但直接的古气候推导可以通过介形类与温度的关系研究来实现。Martens et al.（1985）认为温度能够影响介形类的出现率、生长速率、体长和生命周期等。然而，尽管人们已经认识到温度是控制介形类的一个重要因素，但至今介形类与温度的相关信息仍较少。有限的研究限于北美地区，如Delorme（1990）利用现代介形类的数据，建立了介形类与温度的转换函数；Forester et al.（1987）通过类比分析重建了密尼苏达地区的Elk湖年平均温度变化序列。

7.9.3.4 研究展望

介形类作为古环境变化的指示器，已逐渐成为古湖沼和古生态研究中的一个重要生物指标。Holmes（2001）在回顾和总结介形类研究成果的基础上，对今后介形类化石研究提出了未来方向和重要建议，具体包括以下几个方面：①完善介形类分类系统；②加强现代介形类生态学研究内容，建立不同区域高质量的数据库；③了解更多介行虫个体生命历史的信息；

④更加深入开展介形类壳体同位素和微量元素的应用研究。

7.10 其他生物化石

随着湖泊古生态研究的深入和实验技术的创新和发展，许多过去被忽略而现代生态学又经常涉及的生物体，其残体遗存物陆续在沉积地层中被发现，它们为湖泊古生态和古环境重建提供越来越多生物遗迹信息。与现代活体生物分类不同，这些化石生物分类主要依据残体部位的形态特征的描述，分类系统尚处于不断完善之中。然而，随着对这些生物现代过程和生态学知识的深入研究和了解，它们在生态环境演化和古环境重建中的重要性日趋明显，显示了广阔的应用前景。这些新拓展的生物化石指标包括非孢粉型、金藻、淡水海绵、甲螨、有壳变形虫化石、淡水软体动物、鱼类化石等等。目前这些化石门类的研究国内大多尚未开展，部分门类的化石研究也只是刚刚开展调查和试探性研究，如有壳变形虫化石（李鸿凯等，2009）。但由于篇幅限制，无法一一详细介绍，下面侧重就非孢粉型微体、金藻、甲螨和淡水软体动物化石在湖泊环境研究中的应用作简要叙述（见 Smol, 2002）的专著内容描述）。

7.10.1 非孢粉型遗迹

在孢粉鉴定时，我们常常看到其它不同来源的微体化石，如双星藻科、盘星藻属、真菌孢子等。由于其大多数类型缺乏分类学和生态学方面的知识积累（Van Geel, 2001），故在鉴定统计时往往被忽略，但其中仍有某些科属可能具有古环境指标的潜力，可以为孢粉研究提供补充信息。本书现对一些最常见的类型作简要介绍。

7.10.1.1 双星藻科(Zygnemataceae)

双星藻科是无支链的细丝状绿藻，通常存在于浅水表层沉积物中，喜栖息浅水、不流动和富含氧气的淡水湖泊、池塘、或湿地中（Van Geel, 2001）。能在地层中保存的是其孢子壁。该科现有 12 个属，如转板藻属 *Mougeotia*, 双星藻属 *Zygnema*, 水绵藻属 *Spirogyra* 和单板藻属 *Debarya* 等。双星藻科孢子的指标意义初步认为与不同的营养条件、水深等有关（Van Geel, 1978; Van Geel et al., 1996）。

7.10.1.2 盘星藻(*Pediastrum*)

盘星藻系放射状对称的集群绿藻，最外面的细胞每个都能伸出一个或两个角（Nielsen et al., 1992; Jankovská et al., 1995; Batten, 1996）。盘星藻是一个广适性藻类（Batten, 1996），经常从湖泊沉积物中检出，有时甚至丰度很高。研究表明，盘星藻化石对流域侵蚀、水体浊度、营养状况和 pH 值的变化等有指示意义。如 Crisman（1978）认为盘星藻通常生长在硬水且富营养的湖泊中；Cronberg（1982）则把盘星藻作为湖泊富营养化的指标。

7.10.1.3 蓝藻细菌(*Cyanobacteria*)

蓝藻细菌属于固氮生物，其分析可以帮助更好地了解过去湖泊和池塘的环境变化（van Geel et al., 1989）。在湖泊沉积物中经常出现顶胞藻属(*Gloeotrichia*)、束丝藻属(*Aphanizomenon*)和鱼腥藻属，其中顶胞藻属可以指示水生植物的生长以及贫营养水环境

（Van Geel et al., 1989）；而束丝藻属和鱼腥藻属的变化多与人类活动和富营养化有关（van Geel et al., 1994; Findlay et al., 1998）。

7.10.1.4 真菌

大多数真菌化石属于囊孢子、无性孢子和厚垣孢子。在相关文献中，这些孢子多发现于泥炭沉积物中，特别是形成于相对干旱条件的泥炭层中。在湖泊沉积物中，通常很少出现真菌的遗迹。真菌孢子在大多数情况下沉积在其产生地或附近，即便有迁移搬运距离一般也较短。一些研究显示，地层中不同真菌化石的出现能指示不同的环境条件。例如，在囊孢子类型中，子囊菌小圆孔壳属（*Amphisphaerella amphisphaerioides*）是杨属（*Populus*）的寄生种（Van Geel et al., 1981)。由于杨属花粉很难保存，因此子囊菌小圆孔壳属囊孢子的出现可以指示杨属的存在。焦菌属（*Ustulina deust*）也是一种寄生种类，可引起一些树种如冷杉、桤木、桦、鹅耳枥、栗、水青冈、椴和榆等木材的轻度腐烂。但焦菌属的囊孢子传播距离很短，通常只有几米远，故大型的湖泊或沼泽沉积的样品中很少出现（van Geel et al., 1988）。脉孢菌属（*Neurospora spec.*）的检出对森林火事件有指示意义（Shear et al., 1927; Dennis, 1968)。

7.10.1.5 其它

除上述最常见的非孢粉型化石外，轮虫、葡萄藻（*Botryococcus*）、某些植物残体也经常在孢粉分析中发现。对这些化石生物，目前还缺少详细的生态学研究，但作为环境代用指标，仍可能有潜在指示价值。通过与孢粉、其他化石生物鉴定及其与古环境的联系，也可为古环境判识提供帮助。

7.10.2 金藻

7.10.2.1 概述

金藻属于金藻科或黄群藻科，属自营养生物，是典型的真性浮游植物（Sandgren,1988），在湖泊中极少出现附生和底栖类型。金藻生长在各种类型的水体中，但以酸性或贫营养的淡水湖泊中最发育（Kristiansen, 1990; Sandgren, 1988）。在贫营养和低温水体中，金藻也常常是有效的竞争者，在极地湖泊和高山湖泊中广为分布（Wilkinson et al., 1996; Lotter et al., 1997）。在高盐度或者富营养的水体中金藻不形成优势群落（Duff et al., 1995; Sandgren, 1988; Siver, 1995）。在欧洲和北美，自 20 世纪 70 年代后期以来，金藻已被作为一个有效的化石生物指标，被用于古生态和古环境的重建。然而，在我国，化石金藻的研究目前几乎是一个空白。下面参照 Zeeb et al.（2001）的描述，对金藻的分类、实验分析及其在环境重建中的应用作简要介绍。

7.10.2.2 金藻分类与实验分析

金藻壳体是由硅质构成，在沉积物中主要以盾片和口形包囊两种硅质形态出现。盾片的分类系统基于盾片和鞭毛的超微结构。其盾片的分类文献见 Asmund et al.（1986）、Siver（1991）、Takahashi（1978）、Kristiansen et al.（1986）、Sandgren et al.（1995）等。包囊的鉴定目前主要依靠包囊主体形态、孢子和领口的形态等特征，并从数量和形态测量数据进行描述（Duff et al., 1995）。

实验室金藻的提取和计数方法与硅藻类似。通常，包囊、盾片和硅藻一起计数，数据的表达方式主要是相对丰度，即各种盾片占盾片总数的相对频度、以及某种包囊占包囊总数的百分比。不同金藻种的细胞盾片数差异很大，必须做盾片与细胞之间的转换，方法可以参照Siver（1991）、Cumming et al.（1993）等的描述。

7.10.2.3 金藻在环境重建中的应用

金藻在古湖沼学研究中的实际应用开始于最近 30 年，以芬兰、美国和加拿大湖泊沉积物的研究为代表（Smol, 1980; Munch, 1980; Smol et al., 1984; Battarbee et al., 1990）。这些早期的工作主要在金藻盾片对 pH 值、富营养化和土地利用等变化的响应方面研究。最成功的应用实例是对湖沼酸化过程的评估（Marsicano et al., 1993; Smol, 1986; Dixit et al., 1992; Cumming et al., 1994）。

在许多研究中，经常将金藻包囊总数与硅藻的比值用于古环境解释（Smol, 1983; Stoermer et al., 1985; Harwood, 1986）。例如温带湖泊，低的金藻包囊含量常常意味着富营养条件，因为金藻在高营养的水体中竞争力较差（Smol, 1985）；在极地湖泊该比值被用于推测湖冰和气候的变化（Smol, 1983, 1988）；在另一些湖泊，该比值也被用于指示过去湖水盐度的变化（Cumming et al., 1993; Zeeb & Smol, 1993）。沉积物中的金藻包囊也有用于判别纹泥的季节变化（Battarbee, 1981; Peglar et al., 1984）。

和所有古生态指标一样，早期的金藻研究主要基于地层中包囊和盾片的相对丰度，对古环境作定性解释。近年来，金藻定量研究得到迅速发展，许多环境指标如温度、营养盐、pH 值、盐度和电导率等环境因子，被有效地重建（Facher et al., 1996; Duff et al., 1997; Lotter et al., 1998）。然而，在一些富营养和咸水湖泊中，由于金藻保存较差，而且物种也不丰富，与某些其它生物指标相比，金藻反演环境的统计模型还不够健全（Lotter et al., 1998）。虽然金藻与环境关系没有硅藻敏感，但仍可为古环境和古生态解释提供补充信息。

7.10.3 甲螨

7.10.3.1 概述

甲螨（Oribatid mites）是一种螨类，通常体长 0.13～1.00mm 间，生长在湖泊、沼泽湿地、草地、森林等各种生境中。分类学上甲螨属于节足动物门有螯肢亚门甲螨亚目。甲螨亚化石归属于大化石的研究范畴。甲螨在古气候和古环境的应用潜力在最近才被认识（Solhøy, 2001）。已有研究表明，湖泊沉积地层中甲螨种类和丰度变化，可以为植物群落、气候和湖泊水位变化的重建提供重要线索（Erickson, 1988; Schelvis, 1990; Drouk, 1997; Solhoy et al., 2000）。

由于缺乏广泛的现代生态调查与研究，目前对甲螨的生态学知识了解还不够全面，加之其分类体系尚在不断完善和建立中，故研究进程仍比较缓慢。对湖沼环境而言，甲螨分类相对明确的仅有 *Hydrozetes* 和 *Limnozetes* 两个属，因此研究成果中大多数环境信息也主要由这两个属的种群数据提供（Erickson, 1988）。

7.10.3.2 实验分析

与植物大化石一样，沉积物中甲螨亚化石的提取需要样品量较多（40～80g），因此在野外打钻时最好单独提取一个平行柱状岩芯。在实验室首先用 125 μm 网筛过滤掉最大的颗粒，

而后将保留下来的沉积物进行分离。通常用蒸馏水、70%的酒精或焦磷酸钠溶液处理。如果沉积物中腐殖质含量和钙质胶结物较多，事前可用 10% NaOH 溶解有机质，用 10%的稀 HCl 去除碳酸钙。将提取的甲螨样品放置在玻璃培养皿中，利用体视显微镜（放大 12 倍）进行挑选和计数。高倍显微镜（100 到 1000 倍）用于甲螨亚化石的鉴定。甲螨的鉴定可参考 Sellnick（1960）、Gilyarov（1975）、Balogh et al.（1992）、Norton（1990）等人出版的图谱，但不同的区系种群分布往往包括许多未知种，因此在研究中，野外表层沉积物标本的采集也很必要。

7.10.3.4 环境重建应用前景

甲螨亚化石在环境重建方面的潜力已被某些区域现代生态调查和古湖沼沉积记录所证实。一些研究事例反映出甲螨亚化石记录可以提供 pH 值变化的信息（Behan-Pelletier et al., 1998），用于进行 pH 值的重建。更多的研究发现，湖泊中甲螨种群和属种丰度能指示湖泊水位和生产力的变化（Behan-Pelletier, 1996; Solhoy et al., 2000）。Behan-Pelletier（1996）通过调查研究，发现在水陆过渡地带，半水生指示种 *Naiazetes reevesi* 如果大量出现在第四纪地层中，可以准确地反映当时较大的水位变化。利用 Krakenes 全新世湖泊沉积物甲螨亚化石的记录，Solhoy et al.（2000）恢复了 1 万年来湖泊古生物量的变化。同样，Erickson（1988）通过美国 Glovers Pond 沉积物甲螨亚化石研究，重建了古湖泊生产力与水位变化的历史。此外，Markkula（1986a, b）通过泥炭地中 *Limnozetes* 种类多样性的调查分析，发现这些种类多样性的变化与泥炭地的湿度有明显关系。

甲螨可以生活在不同水体和陆相环境中，由于一些种有着特殊的生境要求，因此其化石产出可以精确指示当时的微生境条件，进而反映气候和环境的变化。例如，Fernandez et al.（1984）通过研究，认为 *Hydrozetes* 的某些种类与水体中浮叶植物的生长有一定关系；另一些甲螨种类与特定的树种及其组成的森林、灌丛有关，通过甲螨化石的鉴定，有助于重建古植被演替和林线变迁的历史（Wunderle, 1992; Behan-Pelletier et al., 1998; Winchester, 1997）。

正如其它生物指标一样，利用沉积物甲螨亚化石进行古环境的重建，需要和孢粉、水生植物化石等多项指标进行综合判识，才能获得更为科学的解释。

7.10.4 淡水软体动物

7.10.4.1 概述

淡水软体动物化石是第四纪湖泊沉积物中最常见的大型动物残体，在某些富钙质地层中有时非常丰富，形成所谓的“贝壳层”或“螺壳层”， 常作为区域地层对比的标志层。河流和湖泊的淡水软体动物种类至少超过 700 个种（Burch, 1975; 1989）。湖相软体动物化石不仅可为生物地层划分提供依据，在重建气候环境方面也有重要的指示意义（Miller, 2001）。

7.10.4.2 样品采集和实验室分析

对出露的湖相沉积剖面，依据软体动物的丰度情况，采集 1～2kg 的样品即可，现场或实验室用 1mm 网孔的纱布进行冲洗过滤，提取化石壳体。对钻孔岩芯沉积物，最好采集一个平行的柱状岩芯用于实验室分析和研究。实验处理前首先将样品烘干，随后浸泡在冷水中，待沉积物分散后，用 0.7～2.0 mm 的网筛滤去除淤泥。如果壳体和沉积物不能完全分离，需要对残留物重新干燥，在室温条件下浸泡在六偏磷酸化钠、碳酸钠或重碳酸钠溶液中，超声波震荡或水煮至沉积物分散。提取混杂壳体的残留物，经干燥后储存在瓶子中。

软体动物的鉴定和计数在低倍双目显微镜下完成（10～40 倍）。化石鉴定主要参照现在生存的壳体标本，以及相关的资料（Ložek, 1964; Graham, 1988; Clarke, 1973, 1981; Burch, 1975, 1989; Mackie et al., 1980; Jokinen, 1983, 1992）。样品中各软体动物种类一般用百分比和浓度来表示。

7.10.4.3 软体动物化石在环境重建中的应用

利用软体动物化石提取湖泊古生态信息，一种常用的方法是根据化石种的现代生存环境，将不同的种群归为不同的生态类型组合，如根据湖泊富营养水平将某些化石组合归为一类（Clarke, 1979）；第二种方法是根据化石现存种的地理分布进行分组。化石组合中可能还包含某些特殊生境的指示种。基于上述方法，再依据化石物种的丰度和比例及其在地层中的变化，可重建软体动物种群演替和环境变化的历史（Piechoki, 1977; Miller et al., 1990）。

软体动物化石尤其适用于古气候信息的提取。根据物种的现代地理分布格局，许多研究者将它们按气候梯度进行归类（Sparks, 1961; Harris et al., 1973; Miller et al., 1981; Keen, 1990）。在北美大陆，Taylor（1960）提出 5 个代表性类别，尽管这种归类存在主观性，但这些类型也确实在区域尺度上反映了温度和降水的气候特征。例如，化石组合中如果北方种类明显增加，往往反映化石种生活时期夏季温度偏凉。*Promenetus exacuous* 是美国堪萨斯州西南地区的常见种，主要生长在冷水中。在冰期时该种在本地区广泛分布，说明当时为寒冷的气候条件。

近年来，软体动物化石在环境定量重建研究方面已取得重要突破，并成功用于第四纪古温度和古降水的重建中。例如，Rousseau（1991）基于表层软体动物种群数据库与现代气候的关系分析，建立了软体动物与温度、湿度的转换函数。利用化石软体动物种群组合，重建了全新世时期 Burgundy 地区温度和湿度的变化。

软体动物化石壳体稳定同位素地球化学研究也是目前国际上研究的一个热点，通过其研究可以提取湖泊古生产力、古水文和古温度变化等重要信息（Miller et al., 1998; Bonadonna et al., 1999; Leng et al., 1999）。

参 考 文 献

陈受忠，张世萍, 1990. 高壳瀑属的初步研究. 华中农业大学学报, 9(2): 194-198.

陈受忠，张世萍，易忠等, 1991. 湖南省小型甲壳动物新种和新记录. 华中农业大学学报, 10(1): 86-94.

董宁，杨平，袁秀君，张海泉，王海玲, 2008. 柴达木盆地察尔汗地区第四纪古生物组合与沉积环境. 新疆石油地质, 29(1): 57-60.

董旭辉，羊向东，刘恩峰，王荣, 2007. 冗余分析（RDA）在湖泊沉积研究中的应用－以太白湖为例. 地理研究, 26(3): 477-484.

侯佑堂，陈德琼, 1962. 中国的介形类化石. 科学出版社，北京.

黄宝仁，杨留法，范云琦, 1985. 西藏现代湖泊表层沉积物中的介形类. 微体古生物学报, 2 (4) : 369-376.

蒋燮治，堵南山, 1979. 中国动物志－节肢动物门－甲壳纲. 北京：科学出版社. 39-41.

李鸿凯，卜兆君，王升忠，安芷生，赵红艳，马云艳, 2009. 长白山泥炭地现代有壳变形虫环境意义探讨. 第四纪研究. （出版中）。

李文漪, 1993. 中国北、中亚热带晚第四纪植被与环境研究，北京：海洋出版社. 1993: 14-26.

李文漪, 1998. 中国第四纪植被与环境. 北京：科学出版社. 16-19.

李小强，周新郢，尚　雪等, 2006. 黄土炭屑分级统计方法及其在火演化研究中的意义. 湖泊科学, 18(5): 540-544

李旭，刘金陵, 1988. 四川西昌螺髻山全新世植被与环境变化. 地理学报, 43(1): 44-51.

李宜垠，周力平，崔海亭, 2008. 人类活动的孢粉指示体. 科学通报, 53(9): 991-1002.

林海, 2002. 中国全球变化研究的回顾与展望. 地学前缘, 19(1): 19-25.

刘春莲, Fürsich3 Fran T, 董艺辛, 车晓光, 陈亮, 庄畅, 2008. 珠江三角洲 PRD05 孔的高分辨率介形类记录与晚第四纪古环境重建. 古地理学报, 10(3): 313-322.

刘会平, 唐晓春, 潘安定等, 2001. 神农架南坡表土孢粉植物群初步研究. 沉积学报, 19(1): 107~112

刘俊英, 袁鹤然, 郑绵平等, 2007. 西藏西部聂尔错古湖近 20 000- 2 000 年的微体古生物与环境及气候变化. 古地理学报, 9 (6) : 575 - 587.

刘兴起, 沈吉, 王苏民等, 2002. 青海湖 16 ka 以来的花粉记录及其古气候古环境演化. 科学通报, 47(17): 1351-1355.

刘正文, 吴庆龙, 陈源高等, 2002. 徐家河水库枝角类优势种群与近太湖新银鱼关系的初步研究. 海洋与湖沼, 33: 160-166.

彭金兰, 2002. 云南鹤庆晚第四纪介形类生态特征初探. 微体古生物学报, 19 (2) : 144-156.

宋长青, 孙湘君, 1997. 花粉-气候因子转换函数建立及其对气候因子定量重建. 植物学报, 39(6): 554-560.

孙湘君, 李逊, 陈怀成, 2000. 南海北部最近 37 ka 以来天然火与气候. 中国科学(D)辑, 30(2): 163-168.

湘君, 王奉瑜, 宋长青, 1996. 中国北方部分科属花粉-气候响应面分析. 中国科学(D 辑), 26(5): 431-436.

仝秀芳, 肖霞云, 羊向东等, 2009. 太白湖孢粉记录揭示的近 1500 年以来长江中下游地区的气候变化与人类活动. 湖泊科学, 21(5): 22-30.

童国榜, 刘志明, 王苏民等, 2002. 云南鹤庆盆地近 1Ma 来的气候序列重建初探. 第四纪研究, 22(4): 332-339.

万和文, 2008. 云南针叶植物气孔器研究, 安徽大学硕士论文.

万和文, 沈吉, 唐领余等, 2007. 中国西北地区松科和柏科气孔器形态. 微体古生物学报, 24 (3): 309 - 319 .

王伏雄, 钱南芬, 张玉龙等, 1995. 中国植物花粉形态(第二版). 北京: 科学出版社. 1-461, 图版 1-205.

王强, 张玉发, 袁桂邦, 张文卿, 2008. M IS 3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比. 第四纪研究, 28(1): 79-95.

王荣, 羊向东, 朱立平, 2006. 西藏纳木错过去 200 年来的环境变化. 第四纪研究, 26(5): 791-798.

王苏民, 吉磊, 1995. 呼伦湖－古湖泊学研究.合肥: 中国科学技术大学出版社, pp125.

吴玉书, 孙湘君, 1987. 昆明西山林下表土中花粉与植被间的数量关系. 植物学报, 29(2): 204-211.

席以珍, 宁建长, 1994. 中国干旱半干旱地区花粉形态研究. Yushania. 11: 119-191.

肖霞云, 沈吉, 王苏民等, 2007. 鹤庆深钻孢粉记录揭示的 2.78 Ma BP 以来的植被演替与气候变迁. 中国科学 D 辑, 37(6): 778-788.

谢平, 陈宜瑜, 1996. 加强淡水生态系统中生物多样性的研究与保护. 中国科学院院刊 4: 276-281.

许清海, 李月丛, 阳小兰等, 2005b. 北方草原区主要群落类型表土花粉分析，地理研究, 24(3): 394-402.

许清海, 李月丛, 阳小兰等, 2005a. 中国北方几种主要森林群落表土花粉组合特征研究. 第四纪研究, 25(5): 585-597.

许清海, 李月丛, 周力平等, 2007. 长白山针阔混交林带花粉通量及垂直散布特征初步研究. 科学通报, 52(5): 567~571

羊向东, 沈吉, 董旭辉, 刘恩峰, 王苏民, 2005. 长江中下游浅水湖泊历史时期营养态演化及其与湖泊生态系统的关系---以龙感湖、太白湖为例. 中国科学（D 辑增刊）, 35: 45-54.

羊向东, 沈吉, 夏威岚, 朱育新, 2002. 龙感湖近代沉积硅藻组合与营养演化的动态过程. 古生物学报, 41(3): 455-460.

羊向东, 王苏民, C. Kamenik, R. Schmidt, 沈吉, 朱立平, 李升峰, 2003. 藏南沉错钻孔硅藻组合与古盐度定量恢复. 中国科学（D 辑）, 33(2): 163-169.

杨藩, 孙镇城, 张永华, 乔子真, 2002. 青海柴达木盆地第四纪介形类属 *I lyocyp r is* 壳面瘤状装饰的分类意义. 微体古生物学报, 19 (1) : 15- 32.

于革, 刘平妹, 薛滨等, 2002. 台湾中部和北部山地植被垂直带表土花粉和植被重建. 科学通报, 47(21): 1163~1166

余幼玉, 陈娴, 1988. 微体化石处理. 微体古生物学报, 12(3): 425-432.

张恩楼, Alan Bedford Richard Jones, 沈吉等, 2006. 长江中下游地区典型湖泊摇蚊亚化石-湖水总磷定量模型研究. 科学通报, 51(11): 1318-1325

张启锐, 1990. 地质趋势面分析. 北京: 科学出版社. 6-84.

赵泉鸿, 韩道华, 1980. 江苏省微山湖西地区第四纪晚期的海陆过渡相化石群及其意义. 见:汪品先等. 海洋微体古生物论文集. 北京:海洋出版社, 120 - 129.

郑卓, Guiot J, 1999. 我国热带地区 40 万年以来古气候的定量恢复. 中山大学学报(自然科学版), 38(6): 94-98.

郑卓, 黄康有, 邓韫等, 2007. 中国东部大陆尺度南北样带尘土花粉散布规律与现状植被的关系. 中国科学 D 辑, 37(4): 534-543

中国第四纪孢粉数据库小组, 2000. 中国中全新世(6 ka BP)和末次盛冰期(18 ka BP)生物群区的重建. 植物学报, 42(11):

1201-1209.

中国第四纪孢粉数据库小组, 2001. 表土孢粉模拟的中国生物群区. 植物学报, 43(2): 201-209.

中国科学院北京植物研究所古植物研究室孢粉组, 1976. 中国蕨类植物孢子形态(第一版). 北京: 科学出版社. 1-414, 图版 1-89 和化石孢子图版 1-12.

中国科学院植物研究所古植物室孢粉组等, 1982. 中国热带亚热带被子植物花粉形态(第一版). 北京: 科学出版社.1-453, 图版 1-219.

周以良, 李世友, 1990. 中国植被, 北京: 科学出版社.

Achard F, Eva H D, Stibig H J, et al., 2002. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. Science, 297(5583): 999-1002.

Aladin, N. V., 1991. Salinity tolerance and morphology of the osmoregulation organs in cladocera with special reference to cladocera from the Aral Sea. Hydrobiologia 225: 291-299.

Ammann B, and Wick L, 1993. Analysis of fossil stomata of conifers as indicators of the alpine tree line fluctuations during the Holocene. Pages 175–185. In: Frenzel B., eds. Oscillations of the Alpine and polar tree limits of the Holocene. Pala ̈oklimaforschung/ Palaeoclimate Research 9 Gustav Fischer, Stuttgart, Germany.

Amsinck, S. L., E. Jeppesen & D. Ryves, 2003. Cladoceran stratigraphy in two shallow brackish lakes with special reference to changes in salinity, macrophyte abundance and fish predation. Journal of Paleolimnology 29: 495-507.

Anderberg A L. Atlas of Seeds: Part 4. 1994. Resedaceae - Umbelliferae. Swedish Museum of Natural History, Stockholm

Anderson N J & Rippey B, 1994. Monitoring lake recovery from point-source eutrophication: the use of diatom-inferred epilimnetic total phosphorus and sediment chemistry. Freshwater Biology, 32: 625-639.

Anderson N J, 1997. Reconstructing historical phosphorus concentrations in rural lakes using diatom models. In: Tunney H et al. (eds.), Phosphorus loss from soil to water. Oxford: CAB International. 95-118.

Anderson N J, 2000. Miniview: Diatoms, temperature and climatic change. Eur. J. Phycol., 35: 307-314.

Anderson N.J., Rippey B. & Gibson C.E., 1993. A comparison of sedimentary and diatom-inferred phosphorus profile: implications for defining predisturbance nutrient conditions. Hydrobiologia, 253, 357–366.

Anderson, R. S., Davis R. B., Miller N. G. et al., 1986. History of late- and post-glacial vegetation and disturbance around Upper South Branch Pone, northern Maine. Can. J. Bot. 64: 1977–1986.

Anderson, R. S., Smith S. J., 1997. The sedimentary record of fire in montane meadows. Sierra Nevada, California, USA: a preliminary assessment. In Clark, J. S., H. Cachier, J. G. Goldammer, B. Stocks (eds.) Sediment Records of Biomass Burning and Global Change. NATO ASI Series 1: Global Environmental Change, vol. 51, Springer (Berlin): 313–328.

Asmund, B. & J. Kristiansen, 1986. The genus Mallomonas (Chrysophyceae). Opera Botanica 85: 1–128.

Balogh, J. & P. Balogh, 1992. The Oribatid Mites Genera of the World (2 vol.). Hungarian Nat. Hist. Mus. Press, Budapest: 375pp.

Barker, P., J. C. Fontes, F. Gasse & J. C. Druart, 1994. Experimental dissolution of diatom silica in concentrated salt solutions and implications for paleoenvironmental reconstruction. Limnol. Oceanogr. 39: 99–110.

Barko J W, Smart R M. 1986. Sediment-related mechanisms of growth limitation in submersed macrophytes. Ecology, 67: 1328~1340

Barmuta, L. A., S. D. Cooper, S. K. Hamilton, K. W. Kratz & J. M. Melack, 1990. Responses of zooplankton and zoobenthos to experimental acidification in a high-elevation lake (Sierra Nevada, California, U.S.A.). Freshwater Biology 23: 571-586.

Bartlein P J, Prentice I C, Webb Ⅲ T, 1986. Climatic response surface from pollen data for some eastern North American taxa. Journal of Biogeography, 13: 35-57.

Bartlein P J, Webb Ⅲ T, Fleri E, 1984. Holocene climatic change in the northern Midwest: Pollen-derived estimates. Quaternary Research, 22: 361-374.

Battarbee et al., 2001. Diatoms. In Smol J P, Birks H J P & Last W M (eds): Tracking environmental change using lake sediments (Vol. 3), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands: 155-202.

Battarbee R W, 1986. Diatom analysis. In Berglund B E ed., Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology, Wiley, Chichester: 527-570.

Battarbee R W, Charles D F, Dixit S S & Renberg I, 1999. Diatoms as indicators of surface water acidity. In Stoermer E F & Smol J P eds，The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth sciences， Cambridge University Press, Cambridge, 85-127.

Battarbee R W. 1984. Diatom analysis and the acidification of lakes. Phil. Trans. R. Soc., Lond. 305: 451-477.

Battarbee, R. W., 1981. Diatom and Chrysophyceae microstratigraphy of the annually laminated sediments of a small meromictic lake. Striae 14: 105–109.

Battarbee, R. W., D. T. Monteith, S. Juggins, C. D. Evans, A. Jenkins & G. L. Simpson, 2005. Reconstructing pre-acidification pH for an acidified Scottish loch: A comparison of palaeolimnological and modeling approaches. Environmental Pollution 137: 135-149.

Battarbee, R. W., J. Mason, I. Renberg & J. F. Talling, 1990. Palaeolimnology and lake acidification. The Royal Society, London, 219 pp.

Batten, D. J., 1996. Colonial Chlorococcales. In Jansonius, J. & D. C. McGregor (eds.) Palynology: Principles and Applications. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Vol. 1: 191-203.

Bedford, A., Jones, R.T., Lang, B., Brooks, S.J., Marshall, J.D., 2004. A late-glacial chironomid record from Hawes Water, N.W. England. Journal of Quaternary Science 19, 281–290

Behan-Pelletier, V. M. & N. N. Winchester, 1998. Arboreal oribatid mite diversity: Colonizing the canopy. Appl. Soil Ecol. 9: 45–51.

Behan-Pelletier, V. M., 1996. Naiazetes reevesi n. g., n. sp. (Acari: Oribatida: Zetomimidae) from semi-aquatic habitats of eastern North America. Acarologia 37: 345–355.

Behre K E, 1986. Anthropogenic Indicators in Pollen Diagram. Rotterdam: A A Balkema.

Beijerinck W. 1976. Zadenatlas der Nederlandsche Flora. Backhuys & Meesters, Amsterdam. In Dutch, 316

Bennion H, Juggins S & Anderson N J, 1996. Predicting epilimnetic phosphorous concentrations using an improved diatom-based transfer function and its application to lake eutrophication management. Environmental Science & Technology, 30: 2004-2007.

Bennion H，Wunsam S & Schmidt R. 1995. The validation of diatom-phosphorous transfer functions: an example from Mondsee, Austria. Freshwat. Biol., 34: 271-283.

Bennion H. 1994. A diatom-phosphorus transfer function for shallow, eutrophic ponds in southeast England. Hydrobiologia. 275: 391-410.

Berggren G. 1964. Atlas of seeds: Part 2. Cyperaceae. Swedish Natural Science Research Council, Stockholm

Berggren G. 1981. Atlas of Seeds: Part 3. Salicaceae-Cruciferae. Swedish Museum of Natural History, Stockholm

Berglund B E, 1986. Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology. Wiley, Chichester: 527-570.

Bigler C & Hall R, 2003. Diatoms as quantitative indicators of July temperature: a validation attempt at century-scale with meteorological data from northern Sweden. Palaeogeogr. Palaeoclimatol., 189: 147-160.

Bigler C，Larocque1，Peglar SM，et a1., 2002. Quantitativemuhiproxy assessment of long•term pattems of Holocene environmental change from a small lake near Abisko，northern Sweden. The Holocene, 12: 481-496.

Bigler, C., O. Heiri, R. Krskova, A. F. Lotter & M. Sturm, 2006. Distribution of diatoms, chironomids and cladocera in surface sediments of thirty mountain lakes in south-eastern Switzerland. Aquatic Sciences 68: 154-171.

Birks H H, 2002. Plant macrofossil. In Smol J P, Birks H J P & Last W M (eds): Tracking environmental change using lake sediments (Vol. 3), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands: 49-74.

Birks H H, Birks H J B, Kaland P E, et al, eds., 1988. The Cultural Landscape-Past, Present and Future. Cambridge: Cambridge University Press.

Birks H H, Birks H J B, 2003. Reconstructing Holocene climate from pollen and plant macrofossils. In Global Change in the Holocene (Mackay A, Battarbee R, Birks J, Eds.), London: Arnold

Birks H H, Mathewes R M, 1978. Studies in the vegetational history of Scotland V. Late Devensian and Early Flandrian pollen and macrofossil stratigraphy at Abernethy Forest, Inverness-shire. New Phytologist, 80: 455~484

Birks H H. 2000. Aquatic macrophyte vegetation development in Krakenes Lake, western Norway, during the lateglacial and early-Holocene. Journal of Paleolimnology, 23: 7~19

Birks H H. 2001. Plant macrofossils. In Tracking environmental change using lake sediments. Volume 3: Terrestrial, algal, and siliceous indicators (Smol J P, Birks H J B, Last W M, Eds.). Dordrecht Kluwer

Birks H H. 2003. The importance of plant macrofossils in the reconstruction of Lateglacial vegetation and climate: examples from Scotland, western Norway, and Minnesota, USA. Quaternary Science Reviews, 22: 453~473

Birks H J B & Birks H H, 1980. Quaternary Palaeoecology. Edward Arnold, London: pp289.

Birks H J B & Gordon A D, 1985. Numerical Methods in Quaternary pollen analysis. Academic Press, London, pp317.

Birks H J B, 1981. The use of pollen analysis in the reconstruction of past climates: a review. In Wigley T M L, Ingram M J & Farmer G eds, Climate history: Studies in past climates and their impact on man, Cambridge University Press, Cambridge: 111-138.

Birks H J B, 1998. Numerical tools in palaeolimnology-progress, potentialities, and problems. Journal of Palaeolimnology, 20: 307-332.

Birks H J B, Birks H H, 1980. Quaternary Palaeoecology. London: E. Arnold.

Birks H J B, Line J M, Juggins S, Stevenson A C & ter Braak C J F, 1990. Diatoms and pH reconstruction. Phil. Trans. R. Soc., Lond., B327: 263-278.

Birks, H. J. B., 1995. Quantitative palaeoenvironmental reconstructions. In: Maddy D. and Brew J. S. (eds), Statistical Modelling of Quaternary Science Data. Technical Guide 5, Quaternary Research Association, Cambridge, pp. 161-254.

Birks, H. J. B., J. M. Line, S. Juggins, A. C. Stevenson & C. J. F. ter Braak, 1990. Diatoms and pH reconstruction. Phil. Trans. R. Soc., Lond. B327: 263-278.

Bonadonna, F. P., G. Leone & G. Zanchetta, 1999. Stable isotope analyses on the last 30 ka molluscan fauna from Pampa grassland, Bonaerense region, Argentina. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 153: 289–308.

Boronat L., M. R. Miracle & X. Armengol, 2001. Cladoceran assemblages in a mineralization gradient. Hydrobiologia 442: 75-88.

Borror, D.J., D.M. DeLong, C.A. Triplehorn. 1976. An Introduction to the Study of Insects, Fourth Edition. Holt, Rinehart and Winston, New York. 852pp.

Bos, D. G. & B. F. Cumming, 2003. Sedimentary cladoceran remains and their relationship to nutrients and other limnological variables in 53 lakes from British Columbia, Canada. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 60: 1177-1189.

Boucherle, M. M. & H. Züllig, 1983. Cladoceran remains as evidence of change in trophic state in three Swiss lakes. Hydrobiologia 103: 141-146.

Bradbury J P, 1988. A climate-limnologic model of diatom succession for paleolimnological interpretation of varved sediments at Elk Lake, Minnesota. Journal of Paleolimnology, 1:115–131.

Bradley R S, 1999. Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary. Academic Press, San Diego. 357-396.

Bradshaw E G, Anderson N J. 2001. Validation of a diatom-phosphorus calibration set for Sweden. Freshwater Biology. 46: 1035-1048.

Brenner M, Whitmore T J, Lasi M A, Cable J E & Cable P H, 1999. A Multi-proxy trophic state reconstruction for shallow Orange Lake, Florida, U.S.A.: possible influence of macrophytes on limnetic nutrient concentration. Journal of Paleolimnology, 21: 215-233.

Brodersen K P, Quinlan R, 2006, Midges as palaeoindicators of lake productivity, eutrophication and hypolimnetic oxygen, Quaternary Science Reviews 25: 1995–2012

Brodersen, K. P. & C. Lindegaard, 1997. Significance of subfossile chironomid remains in classification of shallow lakes. Hydrobiologia 342/343: 125–132.

Brodersen, K. P. & C. Lindegaard, 1999. Classification, assessment and trophic reconstruction of Danish lakes using chironomids. Freshwat. Biol. 42: 143–157.

Brodersen, K. P., 1994. Subfossile dansemyg i sø-sedimenter. Miljøforskning 12: 12–15.

Brooks S J, 2006. Fossil midges (Diptera: Chironomidae) as palaeoclimatic indicators for the Eurasian region, Quaternary Science Reviews 25:1894–1910

Brooks S J, Birks H J B, 2000. Chironomid— nferred late—glacial airtemperatures at Whitrig Bog．Southeast Scotland. Journal of Quaternary Science, 15: 759-764

Brooks S J, Langdon P G, Heiri O, 2007. The Identification and Use of Palaearctic Chironomidae Larvae in Palaeoecology. QRA Technical Guide No. 10. London: Quaternary Research Association.

Brooks S J，Birks H J B, 2001. Chironmid—inferred air temperatures from lateglacial and Holocene sites in north—west Europe：Progress and problems. Quaternary Science Reviews, 20: 1 723—1 741

Brooks, J. L., 1959. Cladocera. In Edmondson, W. T. (ed.) Freshwater Biology. 2nd Edition. John Wiley & Sons: 587-656.

Brooks, S. J., H. Bennion & H. J. B. Birks, 2001. Tracing lake trophic history with a chironomid-total phosphorus inference model. Freshw. Biol. 46: 513–532.

Burch, J. B., 1975. Freshwater sphaeriacean clams (Mollusca: Pelecypoda) of North America. Malacological Publications, Hamburg, Michigan, 96 pp.

Burch, J. B., 1989. North American freshwater snails. Malacological Publications, Hamburg, Michigan, 365 pp.

Cameron, N. G., H. J. B. Birks, V. J. Jones, et al. 1999. Surface-sediment and epilithic diatom pH calibration sets for remote European mountain lakes (AL:PE Project) and their comparison with the Surface Waters Acidification Programme (SWAP) calibration set. J. Paleolim. 22: 291-319.

Caroline P D, Patricia L F, 2001. Modern pollen precipitation from an elevational transect in central Jordan and its relationship to vegetation. Journal of Biogeography, 28: 1195-1210.

Carpelan C, Hicks S, 1995. Ancient Saami in Finnish Lapland and their impact on the forest vegetation. In: Butlin R, Roberts N, eds. Ecological Relations in Historical Times. Oxford: Blackwell, 195-205.

Carpenter S R & Lodge D M. 1986. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. Aquat. Bot. 26:341-370

Carpenter, S. R. & J. F. Kitchell, 1987. Complex interactions in lake communities. Springer-Verlag, New York.

Carpenter, S. R. & J. F. Kitchell, 1993. The trophic cascade in lakes. Cambridge University Press, New York.

Caseldine, C., Geirsdo′ ttir, A., Langdon, P., 2003. Efstadalsvatn—a multiproxy study of a Holocene lacustrine sequence from NW Iceland. Journal of Paleolimnology 30, 55–73.

Chandler, C., Cheney P., Thomas P. et al., 1983. Fire in forestry: volume I: forest fire behaviour and effects. John Wiley and Sons, New York.

Charles D F, 1985. Relationships between surface sediment diatom assemblages and lake water characteristics in Adirondack lakes. Ecology, 66: 994-1011.

Charles, D. F., M. W. Binford, E. T. Furlong, R. A. Hites, M. J. Mitchell, et al., 1990. Paleoecological investigation of recent lake acidification in the Adirondack Mountains, N. Y. Journal of Paleolimnology 3: 195-241.

Christian B & Hall R I, 2002. Diatoms as indicators of climatic and limnological change in Swedish Lapland: a 100-lake calibration set and its validation for paleoecological reconstructions. J. Paleolim., 27: 97-115.

Churchill D M, 1968. The distribution and prehistory of Eucalyptus diversicolor F. Muell., E. marginate Donnex Sm., and E. calophylla R. Br. In relation to rainfall. Aust. J. Bot., 16: 125-51.

Clark, J. S., 1988. Stratigraphic charcoal analysis on petrographic thin sections: applications to fire history in northwestern Minnesota. Quat. Res. 30: 81–91.

Clark, J. S., Lynch J., Stocks J. B.et al., 1998. Relationships between charcoal particles in air and sediments in West-central Siberia. The Holocene 8: 19–29.

Clark, J. S., Patterson W. A. III, 1997. Background and local charcoal in sediments: scales of fire evidence in the paleorecord. In Clark, J. S., H. Cachier, J. G. Goldammer & B. Stocks (eds.) Sediment Records of Biomass Burning and Global Change. NATO ASI Series 1: Global Environmental Change, vol. 51, Springer (Berlin): 23–48.

Clark, J. S., Royall P. D., 1996. Local and regional sediment charcoal evidence for fire regimes in presettlement northeastern North America. J. Ecol. 84: 365–382.

Clark, R. L., 1982. Point count estimation of charcoal in pollen preparations and thin sections of sediment. Pollen Spores 24: 523–535.

Clark, R. L., 1984. Effects on charcoal of pollen preparation procedures. Pollen Spores 26: 559–576.

Clarke, A. H., 1973. Freshwater molluscs of the Canadian interior basin. Malacologia 13: 1–509.

Clarke, A. H., 1979. Gastropods as indicators of tophic lake stages. Nautilus 94: 138–142.

Clarke, A. H., 1981. The freshwater molluscs of Canada: National Museum of Natural Sciences, National Museums of Canada, Ottawa, 446 p.

Clayden S L, Cwynar L C, and MacDonald, G.M., 1996. Stomata and pollen content of lake surface sediments from across the tree line on

the Taimyr peninsula, Siberia. Canadian Journal of Botany, 74: 1009-1015.

Clayden S L, Cwynar L C, MacDonald G M, Velichko,A A., 1997. Holocene pollen and stomates from a forest-tundra site on the Taimyr Peninsula, Siberia. Arctic and Alpine Research. 3:327-333.

Clerk, S., R. Hall, R. Quinlan et al. 2000. Quantitative inferences of past hypolimnetic anoxia and nutrient levels from a Canadian Precambrian Shield lake. J. Paleolim. 23: 319–336.

Cole H S, Bryson R A, 1968. The application of eigenvector techniques to the climatic interpretation of pollen diagrams: an initial study. I.Bog D Pond, Itasca. Center for Climatic Research, University of Wisconsin.

Crisman, T. L., 1978. Algal remains in Minnesota lake types: a comparison of modern and late-glacial distributions. Verh. Internat. Verein. Limnol. 20: 445–451.

Cronberg, G., 1982. Pediastrum and Scenedesmus (Chlorococcales) in sediments from Lake Växjösjön, Sweden. Arch. Hydrobiol. Suppl. 60, 4: 500–507.

Cumming B F & Smol J P, 1993. Development of diatom-based salinity models for paleoclimatic research from lakes in British Columbia (Canada). Hydrobiologia, 197: 51-66.

Cumming, B. F. & J. P. Smol, 1993. Scaled Chrysophytes and pH interference models: the effects of converting scale counts to cell counts and other species data transformations. J. Paleolim. 9: 147–153.

Cumming, B. F., K. A. Davey, J. P. Smol & H. J. B. Birks, 1994. When did acid-sensitive Adirondack lakes (New York, U.S.A.) begin to acidify and are they still acidifying? Can. J. Fish aquat. Sci. 51: 1550–1568.

Cumming, B. F., S. E. Wilson & J. P. Smol, 1993. Paleolimnological potential of chrysophyte cysts and scales and of sponge spicules as indicators of lake salinity. Int. J. Salt Lake Res. 2: 87–92.

Cumming, B. F., S. E. Wilson, R. I. Hall & J. P. Smol, 1995. Diatoms from British Columbia (Canada) lakes and their relationship to salinity, nutrients and other limnological variables. Bibliotheca Diatomologica 31. J. Cramer, Stuttgart, 207 pp.

Cwynar L C, Levesqu e A J.1995. Chironomid evidence for lateglacial climatic reversals in Maine．Quaternary Research. 43：4O5-413．

Cwynar L C, Spear R W, 2001. Late—glacial climate change in the White mountains of New Hampshire. Quaternary Science Reviews, 20: 1265—1274

Cwynar, L. C., 1978. Recent history of fire and vegetation from annually laminated sediment of Greenleaf Lake, Algonquin Park, Ontario. Can. J. Bot. 56: 10–12.

Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., et al., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. Nature 364, 218–220

Davidson T A, Langdon P G, Ruiz Z, et al., 2009. Long-term erosion of benthic pathways of production in a shallow lake. Freshwater Biology (in press).

Davis L W. 1993. Weed seeds of the Great Plains: a handbook for identification. University Press, Kansas.

Davis M B, 1963. On the theory of pollen analysis. Am. J. Sci., 261 : 897-912.

Davis O K, 1984. Pollen frequencies reflect vegetation patterns in a Great Basin (U.S.A.) mountain range. Rev. Palaeobot. Palynol., 40: 295-315.

De Deckker P. & Forester R. M., 1988. The use of ostracods to reconstruct palaeoenvironmental records. In De Deckker, P., Colin J.P. & Peypouquet J.P. (eds.), Ostracoda in the Earth Sciences. Elsevier, Amsterdam: 175–199.

DeCosta, J., 1964. Latitudinal distribution of chydorid Cladocera in the Mississippi Valley, based on their remains in surficial lake sediments. Invest. Indiana Lakes & Streams 6: 65-101.

Deevey D S, Gross M S, Hutchinson, G E, et al. 1954. The natural ^{14}C contents of materials from hardwater lakes. Washington DC. Natinal Academy of Sciences Proceedings, 40: 285~288

Delorme L. D., 1989. Methods in Quaternary ecology No. 7. Freshwater ostracodes. Geosci. Canada 16: 85–90.

Delorme L.D. 1990. Freshwater Ostracodes. In: Warner B.G. (ed.), Methods in Quaternary Ecology, Geoscience Canada, Reprint series (5): 93-100.

Dennis, R. W. G., 1968. British Ascomycetes. Cramer, Lehre, 585 pp.

Dieffenbacher-Krall A C, Halteman W A. 2000. The relationship of modern plant remains to water depth in alkaline lakes in New England. Journal of Paleolimnology, 24: 213~339

Dieter C D. 1990. The importance of emergent vegetation in reducing sediment resuspension in wetlands. Journal of Freshwater Ecology, 5: 467~474

Dimbleby G W, 1985. The Palynology of Archaeological Sites. London: Academic Press.

Dimitriadis S，Cranston P S. 2001. An Australian Holocene climate reconstruction using Chironomidae from a tropical volcanic maarlake[J]. Palaeogeography，Palaeoclimatology，Palaeoecology，，176：109—131.

Dixit, A. S., Dixit, S. S. & J. P. Smol, 1992. Long-term trends in lake water pH and metal concentrations inferred from diatoms and Chrysophytes in three lakes near Sudbury, Ontario. Can. J. Fish. aquat. Sci. 49 (Supplement. 1): 17–24.

Dong X, Bennion H, Battarbee R, Yang X, Yang H & Liu E, 2008. Tracking eutrophication in Taihu Lake using the diatom record: potential and problems. Journal of Paleolimnology, 40:413–429.

Drouk, A. Y., 1997. Acarological analysis: Problems of palaeoecological reconstructions. In Edwards, M. E., A. V. Sher & R. D. Guthrie (eds.) Terrestrial Palaeoenvironmental Studies in Beringia: 91–97.

Duff, K. E., B. A. Zeeb & J. P. Smol, 1995. Atlas of Chrysophycean Cysts. Kluwer Academic Press, Dordrecht, 189 pp.

Duff, K. E., B. A. Zeeb & J. P. Smol, 1997. Chrysophyte cyst biogeographical and ecological distributions: a synthesis. J. Biogeogr. 24: 791–812.

Duigan, C. A. & H. H. Birks, 2000. The late-glacial and early-Holocene palaeoecology of cladoceran microfossil assemblages at Krågenes, western Norway, with a quantitative reconstruction of temperature changes. Journal of Paleolimnology 23: 67-76.

Dyakowska, J, 1936. Researches on the rapidity of the falling dowh of pollen of some trees. Bulletin International de VAcademic Polonaise des Sciences et des Lettres, Bl 155-168.

Eggermont H, Heiri O, Verschuren D , 2006; Fossil Chironomidae (Insecta: Diptera) as quantitative indicators of past salinity in African lakes, Quaternary Science Reviews 25: 1966–1994

Erdtman, G., 1972. Pollen statistics and primeval agriculture in Denmark. J. Iversen (1904-1971), “Land occupation in Denmark’s Stone Age” Copenhagen 1941. A retrospect. Pollen et Spores, 14, 61-64.

Erickson, J. M., 1988. Fossil oribatid mites as tools for Quaternary paleoecologists: preservation quality, quantities, and taphonomy. In Laub, R. S., N. G. Miller & D. W. Steadman (eds.) Late leistocene and early Holocene paleoecology and archaeology of the eastern Great Lakes region. Bull. Buffalo Soc. Nat. Sci. 33: 207–226.

Facher, E. & R. Schmidt, 1996. A siliceous chrysophycean cyst-based pH transfer function for Central European lakes. J. Paleolim. 16: 275–321.

Faegri K & Iversen J, 1975. Textbook of pollen analysis. Blackwell.

Fan, H., F. Gasse, A. Huc, L. Yuanfang, A. Sifeddine & I. Soulie-Marsche, 1996. Holocene environmental changes in Bangong Co basin (Western Tibet). Part 3: Biogenic remains. Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol. 120: 65-78.

Farmer A M D, Spence H N. 1986. The growth strategies and distribution of isoetids in Scottish freshwater lochs. Aquat. Bot. 26: 247~258

Fernández, N. A. & J. Travé, 1984. La variabilité chaetotaxique et la néotrichie gastronotique des Hydrozetidae (Oribates). Acarologia, 25: 407–417.

Findlay D L & Shearer J A, 1992. Relationships between sedimentary diatom assemblages and lakewater pH values in the Experimental Lakes Area. Journal of Paleolimnology, 7: 145-156.

Findlay, D. L., H. J. Kling, H. Rönicke & W. J. Findlay, 1998. A paleolimnological study of eutrophied Lake Arendsee (Germany). J. Paleolim. 19: 41–54.

Firbas F., 1937. Der Pollen analytysche Nachweis des Getreidebaus. Zeitschrift fur Botanik, 31: 447-448.

Flower R J, Juggins S & Battarbee R W. 1997. Matching diatom assemblages in lake sediment cores and modern surface sediment samples: the implications for lake conservation and retoration with special reference to acidified systems. Hydrobiologia, 344: 27-40.

Ford J, 1986. The recent history of a naturally acidified lake (Cone Pond, N. H.). In Smol J P et al. (eds.), Diatoms and Lake Acidity. The

Netherlands: Junk, Dordrecht, 97-104.

Forester R. M., 1986. Determination of the dissolved anion composition of ancient lakes from fossil ostracodes. Geology 14: 796–798.

Forester R. M., Delorme L. D. & Bradbury J. P., 1987. Mid-Holocene climate in northern Minnesota. Quat. Res. 28: 263–273.

Fragri K, Iversen J, 1989.Textbook of Pollen Analysis.4th Ed. London: John Wiley and Sons London: 75-82.

Fredskild B. 1992. The Greenland limnophytes-their present distribution and Holocene history, Acta Bot. Fenn., 144: 93~113

Frey, D. G., 1959. The taxonomic and phylogenetic significance of the head pores of the Chyoridae (Cladocera). Int. Revue ges. Hydrobiol. 44: 27-50.

Frey, D. G., 1960. The ecological significance of cladoceran remains in lake sediments. Ecology 41: 684-698.

Frey, D. G., 1986. Cladocera analysis. In B. E. Berglund (ed.), Handbook of Holocene palaeoecology and palaecohydrology, Whiley & sons, Great Britain: 667-701.

Fritz S C, Cumming B F, Gasse F, et al., 1999. Diatoms as indicators of hydrologic and climatic change in saline lakes. In: Stoermer E F, Smol J P, eds. The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences. London: Cambridge University Press, 41-72

Fritz, S. C., 1990. Twentieth-century salinity and water-level fluctuations in Davils Lake, N. Dakota: A test of a diatom-based transfer function. Limnol. Oceanogr. 35: 1771-1781.

Fritz, S. C., S. Juggins, R. W. Battarbee & D. R. Engstrom, 1991. Reconstruction of past changes in salinity and climate using a diatom-based transfer function. Nature 352: 706-708.

Fritz, S., F. Juggins, R.W. Battarbee, 1993. Diatom assemblages and ionic characterization of lakes of the northern Great Plains, North America: a tool of reconstructing past salinity and climates fluctuations. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 50: 1844-1856.

Gascon C, Williamson G B, da Fonseca G A B, 2000. Ecology-Receding forest edges and vanishing reserves. Science, 288(5470): 1356-1358.

Gasse F, Lédée V, Massault M & Fontes J C, 1989. Water level fluctuations of Lake Tanganyika in phase with oceanic changes during the last glaciation and deglaciation. Nature, 342: 57-59.

Gasse, F., M. Arnold, J. C. Fontes, M. Fort, E. Gibert, A. Huc, B. Li, Y. Li, Q. Liu, F. Melieres, E. Van Campo, F. Wang & Q. Zhang, 1991. A 13,000-year climate record from western Tibet. Nature 353: 742-745.

Gasse, F., S. Juggins & L. B. Khelifa, 1995. Diatom-based transfer functions for inferring hydrochemical characteristics of African palaeolakes. Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol. 117: 31-54.

Gedye, S. J., Jones R. T., Tinner W. et al., 2000. The use of mineral magnetism in the reconstruction of fire history: a case study from Lago di Origlio, Swiss Alps. Palaeogeog., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 164: 101–110.

Gervais B R and MacDonald G M, 2001. Modern pollen and stomate deposition in lake surface sediments from across the treeline on the Kola Peninsula, Russia. Review of Palaeobotany and Palynology, 114(3-4): 223-237.

Gervais B R, MacDonald G M, and Snyder J.A. et al., 2002. Pinus sylvestris treeline development and movement on the Kola Peninsula of Russia: pollen and stomate evidence. Journal of Ecology, 90:627-638.

Gilbert L M, 1962. Fire as a factor in the development of vegetation types. Aust Fores, 26: 67-70.

Gilyarov, M. S. (ed.), 1975. A Key to the Soil-Inhabiting Mites, Sarcoptiformes. Nauka Publ., Moscow: 491 pp. (In Russian).

Goulden, C. E., 1964. The history of the Cladoceran fauna of Esthwaite water (England) and its limnological significance. Arch. Hydrobiol. 60: 1-52.

Graham, A., 1988. Molluscs: prosobranch and pyramidellid gastropods: keys and notes for identification of the species (2d ed.) E. J. Brill, Leiden, 662 pp.

Grichuk V P, 1969. An attempt to reconstruct certain elements of the climate of the Northern Hemisphere in the Atlantic period of the Holocene. In Golotsen (M. I. Neishtadt ed.) Izd-vo Nauka, Moscow.

Grimm E C. 1990. TILIA and TILIA.GRAPH. PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, Working Group on Data-Handling Methods, Newsletter 4: 5~7

Guiot J, 1987. Late Quaternary climate change in France estimated from multivariate pollen time series. Quaternary Research, 28: 100-118.

Guiot J, 1990. Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 80:49-69.

Guiot J, Cheddadi R, Prentice I C et al., 1996. A method of biome and land surface mapping from pollen data: application to Europe 6000 years age. Palaeoclimates, 1: 311-324.

Guiot J, Harrison S P, Prentice I C, 1993. Reconstruction of Holocene precipitation patterns in Europe using pollen and lake-level data. Quaternary Research, 40: 139-149.

Guiot J, Pons A, Beaulieu J L et al., 1989. A 140, 000 years climatic reconstruction from two European records. Nature, 338: 309-313.

Hakansson S, 1993. Numerical methods for the inference of pH variations in mesotrophic and eutrophic lakes in southern Sweden – A progress report. Diatom Research, 8(2): 349-370.

Hall R, and Smol J P A. 1992. P. A weighted-averaging regression and calibration model for inferring total phosphorus concentration from diatoms in British Columbia (Canada) lakes. Freshwater Biology. 27: 417-434.

Hall R, Smol J P. 1999. Diatom as indicators of lake eutrophication. Eugene F. The diatom: Application for the environmental and earth science. London: Cambridge university Press. 128-168.

Hall R.I., Leavitt P.R, 1999. Effects of agriculture, urbanization and climate on water quality in the northern Great Plains. Limnology & Oceanography, 44(3): 739-756.

Hall, R. I., P. R. Leavitt, A. S. Dixit, R. et al. 1999b. Limnological succession in reservoirs: a paleolimnological comparison of two methods of reservoir formation. Can. J. Fish. aquat. Sci. 56: 1109–1121.

Hall, R. I., P. R. Leavitt, R. Quinlan, et al. 1999a. Effects of agriculture, urbanization, and climate on water quality in the northern Great Plains. Limnol. Oceanogr. 44:739–756.

Hann, B. J. & M. A. Turner, 2000. Littoral microcrustacea in Lake 302S in the experimental lakes area of Canada: acidification and recovery. Freshwater Biology 43: 133-146.

Hansen B C. 1995. Conifer Stomate Analysis as A Paleoecological Tool - An Example From The Hudson-Bay Lowlands. Canadian Journal of Botany. 73(2): 244-252.

Hansen B C, MacDonald G M and Moser K A. 1996. Identifying the tundra - Forest border in the stomate record: An analysis of lake surface samples from the Yellowknife area, Northwest Territories, Canada. Canadian Journal of Botany, 74(5): 796-800

Harris, S. A. & E. Pip, 1973. Molluscs as indicators of late- and post-glacial climatic history in Alberta. Can. J. Zool. 51: 209–215.

Harwood, D. M., 1986. Do diatoms beneath the Greenland Ice Sheet indicate interglacials warmer than present? Arctic 39: 304–308.

Hatté C., Jull A.J.T., 2007. Radiocarbon dating: Plant Macrofossils, In: Scott A. Elias, Editor(s)-in-Chief, Encyclopedia of Quaternary Science, Elsevier, Oxford, 2958~2965

Hausmann S & Pienitz R, 2007. Seasonal climate inferences from high-resolution modern diatom data along a climate gradient: a case study. Journal of Paleolimnology, 8:73–96.

Heinrich, M. L., 1995. Chironomid-based Paleosalinity Reconstruction of Three Lakes in the Southcentral Interior of British Columbia, Canada. M.Sc. thesis, Simon Fraser Univ., Burnaby, 58 pp.

Heinrich, M. L., I. R.Walker, and R.W. Mathewes, 2001. Chironomid-based paleosalinity records in southern British Columbia, Canada:Acomparison of transfer functions. J. Paleolim. 26: 147–159.

Heinrich, M. L., I. R.Walker, R.W. Mathewes et al., 1999. Holocene chironomid-inferred salinity and paleovegetation reconstruction from Kilpoola Lake, British Columbia. Géographie Phys. Quat. 53: 211–221.

Heinrich, M. L., S. E.Wilson, I. R.Walker, et al. 1997. Midgeand diatom-based palaeosalinity reconstructions for Mahoney Lake, Okanagan Valley, British Columbia, Canada. Int. J. Salt Lake Res. 6: 249–267.

Hicks S, 1993. Pollen evidence of localized impact on the vegetation of northernmost Finland by hunter-gatherers. Veg Hist Archaeobot, 2(3): 137—144.

Higuera-Gundy, A., Brenner, M., 1999. A 10300 ^{14}C yr record of climate and vegetation change from Haiti. Quaternary Research, 52: 159—170.

Hill M O & Gauch H G, 1980. Detrended correspondence analysis, an improved ordination technique. Vegetation. 42: 47-58.

Hill M O, Gauch H G. 1980. Detrended correspondence analysis, an improved ordination technique. Vegetation. 42: 47-58.

Hjelle K L, 1997. Relationships between pollen and plants in human influenced vegetation types using presence-absence data in western Norway. Rev. Palaeobot. Palynol., 99 :1-16.

Hofmann, W., 1998. Cladocerans and chironomids as indicators of lake level changes in north temperate lakes. J. Paleolim. 19: 55–62.

Holmes J. A. 2001. Ostracoda. In: Smol J. P., Birks H. J. B. & Last W. M. (eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Volume 4: Zoological Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.: 125-151.

Holmes J. A., 1996. Trace-element and stable-isotope geochemistry of non-marine ostracod shells in Quaternary palaeoenvironmental reconstruction. J. Paleolim. 15: 223–235.

Holmes J. A., 1997. Recent non-marine Ostracoda from Jamaica, West Indies. J. Micropal. 16: 137–143.

Holmes J. A., 1998. A late Quaternary Ostracod record from Wallywash Great Pond, a Jamaican marl lake. J. Paleolim. 19: 115–128.

Hultén E. 1971. The circumpolar plants, II. Kungl. Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, 13(1): 1~463

Hustedt F, 1927-66. Die Kieselalgen Deutschlands, Öterreichs und der Schweiz. In Dr L. Rabenhorst's Kryptogamen-Flora von Deutschland, Öterreich und der Schweiz. 7. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.

Imbrie J, Webb Ⅲ T, 1981. Transfer function: calibrating micropaleontological data in climatic terms. In Climatic variations and variability: Factors and Theories (A. Berger,ed.) D. Reidel Publishing Company, Dordrecht and Boston.

Iversen J, 1949. The influence of prehistoric man on vegetation. Dan Geol Under, Ser Ⅳ, 3(6): 1-25

Iverson J., 1944. Viscum, Hedera and Ilex as climatic indicators. A contribution to the study of past-glacial temperature climate. Geol. Fören. Stockholm Förhandl., 66: 463-483.

Jackson S T and Kearsley, J B, 1998. Quantitative representation of local forest composition in forest-floor pollen assemblages. Journal of Ecology, 86(3): 474-490.

Jackson S T, 1991. Pollen representation of vegetational patterns along an elevational gradient. Journal of Vegetation Science, 2(5): 613-624.

Jackson S T, Webb III T, Prentice I C, et al., 1995. Exploration and calibration of pollen/ vegetation relationships: a PC program for the extended R value models. Rev. Palaeobot. Palynol., 84 : 365-374.

Jankovska, V. & J. Komárek, 1995. Pediastrum orientale from subfossil layers. Folia Geobot. Phytotax. 30: 319–329.

Janssens C R. 1988. Development of peatland vegetation types and patterns in the Myrtle Lake peatland: An example of a continental boreal peatland near the present-day prairie border in the upper midwest of the U.S.A. Proceedings of the 8th International Peat Congress, Leningrad, USSR. 1: 156~162

Janssens J A. 1983. A quantitative method for stratigraphic analysis of bryophytes in Holocene peat. J. Ecol. 71: 189~196

Jeppesen E, Leacitt P, Meester L D, Jensen J P. 2001a. Functional ecology and palaeolimnology: using cladoceran remains to reconstruct anthropogenic impact. TRENDS in Ecology & Evolution. 16: 191-198.

Jeppesen, E., E. A. Madsen, J. P. Jensen & N. J. Anderson, 1996. Reconstructing the past density of planktivorous fish and trophic structure from sedimentary zooplankton fossils: a surface sediment calibration data set from shallow lake. Freshwater Biology 36: 115-127.

Jeppesen, E., J. P. Jensen, H. Skovgaard & C. B. Hvidt, 2001b. Changes in the abundance of planktivorous fish in lake Skanderborg during the last two centuries—a palaeoecological approach. Palaeogography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 172: 143-152.

Jeppesen, E., J. P. Jensen, T. L. Lauridsen, S. L. Amsinck, K. Christoffersen, M. Sondergaard & S. F. Mithchell, 2003. Sub-fossils of cladocerans in the surface sediment of 135 lakes as proxies for community structure of zooplankton, fish abundance and lake temperature. Hydrobiologia 491: 321-330.

Jeppesen, E., M. SØndergaard, E. Kanstrup, B. Petersen, R.B. Eriksen, M. HammershØj, E. Mortensen, J.P. Jensen & A. Have, 1994. Does the impact of nutrients on the biological structure and function of brackish and freshwater lakes differ? Hydrobiologia 275/276: 15-30.

Johnsen, S.J., Hammer, C.U., Iversen, et a;. 1992. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. Nature 359, 311–313.

Johnston V R, 1970. The ecology of fire. Audubon, 72: 76-119.

Jokinen , E. H., 1992. The freshwater snails (Mollusca:Gastropoda) of New York State. New York State Mus. Bull. 482: 1–112.

Jokinen, E. H., 1983. The freshwater snails of Connecticut. State Geolog. and Nat. Hist. Survey of Connecticut. Dept. of Envir. Protection Bull. 109: 1–183.

Joynt Ⅲ E H & Wolfe A, 2001. Paleoenvironmental inference models from sediment diatom assemblages in Baffin Island lakes (Nunavut, Canada) and reconstruction of summer water temperature. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 58: 1222-1243.

Kaappila T, Moisioet T, Saionen V. 2002. A diatom-based inference model for autumn epilimnetic total phosphorus concentration and its application to a presently eutrophic boreal lake. J. Paleolim. 27: 261-273.

Keen, D. H., 1990. Significance of the record provided by Pleistocene fluvial deposits and their included molluscan faunas for palaeoenvironmental reconstruction and stratigraphy, case studies from the English Midlands. Palaeogeogr. Palaeoclimat. Paleoecol. 80: 5–34.

Korhola A，Vasko K，Toivonen H T T，et a1．2002. Holocene temperature changes in northern Fennoscandia reconstructed from chironomids using Bayesian modeling．Quaternary Science Reviews，21：1 841—1 860

Korhola, A. & M. Rautio, 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: J. P. Smol, H. J. B. Birks and W. M. Last (eds.), Tracking environmental change using lake sediments, Vol. 4 . Zoological Indicators, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 5-41.

Korhola, A., H. Olander and T. Blom, 2000. Cladoceran and chironomid assemblages as quantitative indicators of water depth in subarctic Fennoscandian lakes. Journal of Paleolimnology 24: 43-54.

Korsman T & Birks H J B, 1996. Diatom based water chemistry reconstructions from northern Sweden: a comparison of reconstruction techniques. J. Paleolimnol., 15: 65-77.

Köster D & Pienitz R, 2006. Seasonal diatom variability and paleolimnological inferences — a case study. Journal of Paleolimnology .2006. 35: 395 – 416.

Krammer K & Lange-Bertalot H，1986, 1988, 1991a, 1991b. Bacillariophyceae. In: Süsswasserflora von Mitteleuropa (Eds Ettl H., Gerloff J., Heynig H. & Mollenhauer D.). Vol. 2 (1-4), Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena.

Kristiansen, J. & R. Andersen (eds.) 1986. Chrysophytes: Aspects and Problems. Cambridge University Press, Cambridge, 337 pp.

Kristiansen, J., 1990. Phylum Chrysophyta. In Margulis, L. et al. (eds.) Handbook of Protoctista. Jones and Bartlett Publishers, Boston: 438–453.

Kröpelin S, Verschuren D, Lézine A.-M et al., 2008. Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara: The Past 6000 Years. Science: 765-768.

Lagerås, P., 1996. Farming and forest dynamics in an agriculturally mar-ginal area of southern Sweden, 5000 BC to present: a palynological study of Lake Avegöl in the Småland Uplands. The Holocene, 6: 301—314.

Laird, K. R., S. C. Fritz, B. F. Cumming & E. C. Grimm, 1998. Early-Holocene limnology and climatic variability in the Northern Great Plains. The Holocene 8: 275–285.

Laird, K. R., S. C. Fritz, E. C. Grimm & P. G. Mueller, 1996a. The paleoclimatic record of a closed-basin lake in the northern Great Plains: Moon Lake, Barnes Co., N. D. Limnol. Oceanogr. 40: 890-902.

Laird, K. R., S. C. Fritz, K. A. Maasch & B. F. Cumming, 1996b. Greater drought intensity and frequency before AD 1200 in the Northern Great Plains, USA. Nature 384: 552-555.

Laird, K., Fritz, S. C., Grimm, E. C., et al., 1996. The paleoclimatic record of a closed-basin lake in the northern Great Plains: Moon Lake, Barnes Co., N. D., Limnol. Oceanogr., 40: 890—902.

Laird, L. D., Campbell I. D., 2000. High resolution palaeofire signals from Christina lake, Alberta: a comparison of the charcoal signals extracted by two different methods. Palaeogeog., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 164: 111–123.

Lang B., Bedford A., Richardson N. et al. 2003. The use of ultra-sound in the preparation of carbonate and clay sediment for chironomid analysis. J. Paleolim. 30: 451–460.

Langdon, P.G., Barber, K.E., Lomas-Clarke, S.H., 2004. Reconstructing climate and environmental change in northern England through chironomid and pollen analyses, evidence from Talkin Tarn, Cumbria. Journal of Paleolimnology 32, 197–213

Larocque, I., Hall, R.I., 2003. Chironomids as quantitative indicators of mean July air temperature, validation by comparison with century long meteorological records from northern Sweden. Journal of Paleolimnology 29, 475–493.

Larocque, I., Hall, R.I., Grahn, E., 2001. Chironomids as indicators of climate change: a 100-lake training set from a subarctic region of northern Sweden (Lapland). Journal of Paleolimnology 26, 307–322.

Leitner R and Gajewski K, 2004. Modern and Holocene stomate records of tree-line variations in northwestern Quebec. Canadian Journal of Botany, 82: 726–734.

Leng, M. J., A. L. Lamb, H. F. Lamb & R. J. Telford, 1999. Palaeoclimatic implications of isotopic data from modern and early Holocene shells of the freshwater snail Melanoides tuberculata, from lakes in the Ethiopian Rift Valley. J. Paleolim. 21: 97–106.

Levesque, A.J., Mayle, F.E., Walker, I.R., Cwynar, L.C., 1993. The Amphi-Atlantic Oscillation: a proposed late-glacial climatic event. Quaternary Science Reviews 12, 629–643.

Li X Q, Dodson J, Zhou X Y, et al, 2007. Early cultivated wheat and broadening of agriculture in Neolithic China. Holocene, 17(5): 555-560.

Li Y Y, Zhang X S and Zhou G S, 2000. Quantitative Relationships between Vegetation and Pollen in Surface Samples. Bulletin of Chinese Science, 45(16): 577-584.

Little, J. L. & J. P. Smol, 2000a. Changes in fossil midge (Chironomidae) assemblages in response to cultural activities in a shallow, polymictic lake. J. Paleolim. 23: 207–212.

Little, J. L., R. I. Hall, R. Quinlan et al. 2000b. Past trophic status and hypolimnetic anoxia during eutrophication and remediation of Gravenhurst Bay, Ontario: comparison of diatoms, chironomids, and historical records. Can. J. Fish. aquat. Sci. 57: 333–341.

Liu G., Liu Z., Li Y., Chen F., Gu B. & Smoak J. M., 2008. Effect of fish introduction and eutrophication on cladoceran community (especially on Bosmina) represented by microfossils in Lake Fuxian, southwest China. Journal of Paleolimnology.

Long, C. J., Whitlock C., Bartlein P. J. et al., 1998. A 9000-year fire history from the Oregon Coast Range, based on a high-resolution charcoal study. Can. J. For. Res. 28: 774–787.

Lotter A F, Birks H J B, Hofmann W et al. 1998. Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps.Π. Nutrients. J. Paleolim., 19: 443-463

Lotter, A. F., H. J. B. Birks, U. Eicher, W. Hofmann, J. Schwander & L. Wick, 2000. Younger Dryas and Allerød summer temperatures at Gerzensee (Switzerland) inferred from fossil pollen and cladoceran assemblages. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 159, 349-361.

Lotter, A. F., H. J. B. Birks, W. Hofman & A. Marchetto, 1997. Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. I. Climate. Journal of Paleolimnology 18: 395-420.

Lotter, A., H. J. B. Birks, W. Hofmann & A. Marchetto, 1998. Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. II. Nutrients. J. Paleolim. 19: 443–463.

Ložek, V., 1964. Quartarmollusken der Tschechoslowakei. Rozpr. . ústuva. geolog. 31, 374 pp.

Lu H Y, Wu N Q, Yang X D et al., 2008. Spatial pattern of Abies and Picea surface pollen distribution along the elevation gradient in the Qinghai-Tibetan Plateau and Xinjiang, China. Boreas, 37(2): 254~262

MacDonald, G. M., Larsen C. P. S., Szeicz J. M et al., 1991. The reconstruction of boreal forest fire history from lake sediments: a comparison of charcoal, pollen, sedimentological, and geochemical indices. Quat. Sci. Rev. 10: 53–71.

MacDonld G, 2001. Conifer stomata, in: Smol J.P., et,al., Eds, Tracking Environmental changes using lake sediments. Kluwer Academic: Dordrecht, The Netherlands. 32-47.

Mackie, G. L., D. S. White & T. W. Zdeba, 1980. A guide to freshwater mollusks of the Laurentian Great Lakes with special emphasis on the genus Pisidium. Project Report for EPA-600-3-80-068, 144pp.

Mann D G & Droop J M, 1996. Biodiversity, biogeography and conservation of diatoms. Hydrobiologia, 336: 19-32.

Markkula, I., 1986a. Comparison of the communities of oribatids (Acari: Cryptostigmata) of virgin and forest-ameliorated pine bogs. Ann. Zool. Fenn. 23: 33–38.

Markkula, I., 1986b. Comparison of present and subfossil oribatid faunas in the surface peat of a drained pine mire. Ann. Ent. Fenn. 52: 39–41.

Marshall E J P, Westlake D F. 1990. Water velocities around water plants in chalk streams. Folia Geobot. Phytotax. 25: 279~289

Marshall, J.D., Jones, R.T., Crowley, S.F., Nash, S., Bedford, A., 2002. A high resolution late glacial isotopic record from Hawes Water, NW England. Climatic oscillations: calibration and comparison of palaeotemperature proxies. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 185, 25–40.

Marsicano, L. J. & P. A. Siver, 1993. A paleolimnological assessment of lake acidification in five Connecticult lakes. J. Paleolim. 9: 209–221.

Martens K., De Deckker P. & Marples T. G., 1985. Life history of Mytilocypris henricae (Chapman) (Crustacea, Ostracoda) in Lake Bathurst, New South Wales. Aust. J. mar. freshwat. Res. 36: 807–819.

Mary W S, 1989. Predicting tree frequencies from pollen frequency: an attempt to validate the R value method. New Phytol.,112 :129-143.

McGowan S, Leavitt P R, Hall R I, Anderson N J, Jeppesen E & Odgaard B V, 2005. Contrals of algal Abundance and community composition during ecosystem state change. Ecology, 86(8): 2200-2211.

Meisch, C., 2000. Freshwater Ostracoda of Western and Central Europe. In Schwoerbel, J. & P. Zwick (eds.), Suesswasserfauna von Mitteleuropa 8/3: Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 522 pp.

Miller B B, 2001. Freshwater molluscs. In: J. P. Smol, H. J. B. Birks & W. M. Last (eds.), 2001. Tracking EnvironmentaI Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands，153-171.

Miller, B. B. & T. A. Thompson, 1990. Molluscan faunal changes in the Cowles Bog area, Indiana Dunes National Lakeshore, following the low-water Lake Chippewa phase. In Schneider, A. F. & G. S. Fraser (eds.) Late Quaternary history of the Lake Michigan basin. Geolog. Soc. Am. Special Paper 251: 21–27.

Miller, B. B. & W. T. Kay, 1981. Gastropods from the Kanopolis local fauna (Yarmouthian?), Ellsworth County, Kansas: J. Paleontol. 55: 65–71.

Miller, B. B., M. J. S. Tevesz & J. S. Carney, 1998. Holocene environmental changes in the Whitefish Dunes area, Door Peninsula, northern Lake Michigan basin, USA. J. Paleolim. 19: 473–479.

Millspaugh, S. H., Whitlock C., 1995. A 750-year fire history based on lake sediment records in central Yellowstone National Park. USA. The Holocene 5: 283–292.

Millspaugh, S. H., Whitlock C., Bartlein P. J., 2000. Variations in fire frequency and climate over the last 17,000 years in central Yellowstone National Park. Geology 28: 211–214.

Mischke S., Herzschuh U., Massmann G. & Zhang C., 2007. An ostracod-conductivity transfer function for Tibetan lakes. J. Paleolimnol, 38: 509–524.

Mohr, J. A., Whitlock C., Skinner C. J., 2000. Postglacial vegetation and fire history, eastern Klamath Mountains. California. The Holocene 10: 587–601.

Moore et al.,1961. Treatise on invertebrate paleontology, part Q, Arthropoda 3, Crustacea, Ostracoda. Geol. Soc. America & Univ. Kansas Press.

Mosbrugger V, Utescher T, 1997. The coexistence approach – a method for quantitative reconstruction of Tertiary terrestrial paleoclimate data using plant fossils. Paleogeography, Paleoclimattology Paleoecology, 134: 61-86.

Mourguiart P. & Carbonel P., 1994. A quantitative method of palaeolake-level reconstruction using ostracod assemblages: an example from the Bolivian Altiplano. Hydrobiologia 288: 183-193.

Mourguiart P., Wirrman D., Fournier M. & Servant M., 1992. Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. C. r. Acad. Sci., Paris 315: 875–880.

Munch, C. S., 1980. Fossil diatoms and scales of Chrysophyceae in the recent history of Hall Lake, Washington. Freshwat. Biol. 10: 61–66.

Nielssen, H. & I. Sørensen, 1992. Taxonomy and stratigraphy of late-glacial Pediastrum taxa from Lysmosen, Denmark—a preliminary study. Rev. Palaeobot. Palynol. 74: 55–75.

Noël, H., Garbolino, E., Braner, A. et al., 2001. Human impact and soil erosion during the last 5000 yrs as recorded in lacustrine sedimen-tary organic matter at Lac d' Annecy, the French ALPS. J. Paleolim., 25: 229—244.

Norton, R. A., 1990. Acarina: Oribatida. In Dindal, D. L. (ed.) Soil Biology Guide. J. Wiley & Sons, New York: 779–803.

Olander, H., H. J. B. Birks, A. Korhola &T. Blom, 1999.An expanded calibration model for inferring lakewater and air temperatures from fossil chironomid assemblages in northern Fennoscandia. Holocene 9: 279–294

Oliver D.R. and Roussel M.E. 1983. The Insects and Arachnids of Canada. Part 11. The Genera of Larval Midges of Canada. Diptera: Chironomidae. Agric. Can. Publ. 1746: 1–263.

Olsson I. 1986. Radiometric dating. IN: Berglund, B. E. (ed.), Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology, 273~312. Wiley, Chichester

Overpeck J T, 1985. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. Quaternary Research, 23: 87-108.

Palmer S，Walker I。Heinrichs M et a1．2002. Postglacial midge community change and Holocene palaeotemperature reconstructions near treeline southern British Columbia(Canada)．Journal of Paleolirnnology，28：469-490．

Paterson, M. J., 1994. Paleolimnological reconstruction of recent changes in assemblages of Cladoceran form acidified lakes in the Adironback Mountains (New York). Journal of Paleolimnology 11: 189-200.

Patrick R & Reimer C W, 1966. The diatoms of the United States I. Acad. Nat. Sci. Philad., Monogr. 13, 688 pp.

Patrick R & Reimer C W, 1975. The diatoms of the United States II, part 1. Acad. Nat. Sci. Philad., Monogr. 13, 213 pp.

Patterson, W. A. III, Backman A. E., 1988. Fire and disease history of forests. In Huntley, B. & T. Webb III (eds.) Vegetation History. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 603–632.

Patterson, W. A., Edwards III, K. J., MacGuire D. J., 1987. Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. Quat. Sci. Rev. 6: 3–23.

Peglar, S. M., S. C. Fritz, T. Alapieti, M. Saarnisto & H. J. B. Birks, 1984. Compostition and formation of laminated sediments in Diss Mere, Norfolk, England. Boreas 13: 13–28.

Peyron O, Guiot J, Cheddadi R et al., 1998. Climate reconstruction in Europe for 18, 000 yr B. P. from pollen data. Quaternary Research, 49: 183-196.

Piechocki, K., 1977. The Late Pleistocene and Holocene mollusca of the Kunów region N-E margin of the Mts. Folia Quaternary 49: 23–36.

Pienitz R, Smol J P & MacDonald G M, 1999. Paleolimnological reconstruction of Holocene climatic trends from two boreal treeline lakes, Northwest Territories, Canada. Arct. Antarct. Alpine Res., 31: 82-93.

Pienitz R., Smol J.P. & Lean D R S, 1997. Physical and chemical limnology of 59 lakes located between the Scuthern Yukon and the Tuktoyaktuk Peninsula, Northwest Territories (Canada). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 54: 330-346.

Pienitz, R. & J. P. Smol, 1993. Diatom assemblages and their relationship to environmental variables in lakes from the boreal forest-tundra ecotone near Yellowknife, Northwest Territories, Canada. Hydrobiologia 269/270: 391-404.

Pisaric M F, MacDonald G.M, and Cwynar L C, et al., 2001a. Modern pollen and conifer stomates from north-central Siberian lake sediments: Their use in interpreting late quaternary fossil pollen assemblages. Arctic Antarctic and Alpine Research, 33(1): 19-27.

Pohl F, 1937. Die Pollenerzeugung der Windblütler. Beiträge Botanisches Centralblatt. 56(A), 365－470.

Porlnchu D F，Cwynar L C．2002. Late—Quaternary history of midge communities an d climate from a tundra site near the lower Lena River．northeast Siberia[J]．Journal of Paleolimnology，27：59-69

Prentice I C, 1985. Pollen representation, source area and basin size: toward a unified theory of pollen analysis. Quaternary Research, 23: 76-86.

Prentice I C, Cramer W, Harrison S P et al., 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and

climate. Journal of Biogeography, 19: 117-134.

Preston C D, Croft J M. 1997. Aquatic plants in Britain and Ireland. Harley Books, Colchester, 365

Pyne, S. J., Andrews P. L., Laven R. D., 1996. Introduction to Wildland Fire. John Wiley & Sons, Inc., New York, 769 pp.

Quinlan, R. & J. P. Smol, 2000. Using fossil chironomid assemblages to determine changes in anoxia in south-central Ontario (Canada) shield lakes. Verh. int. Ver. Limnol. 27: 1220–1225

Quinlan, R., J. P. Smol & R. I. Hall, 1998. Quantitative inferences of past hypolimnetic anoxia in south-central Ontario lakes using fossil midges (Diptera: Chironomidae). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 55: 587–596.

Ramstack J M, Fritz D R, Engstrom D R & Heiskary S A, 2003. The application of a diatom-based transfer function to evaluate regional water-quality trends in Minnesota since 1970. J. Paleolimnol., 29: 79-94.

Randy C, 1995. Pollen source area and pollen productivity evidence from hollows. Journal of Ecology, 83 : 591-602.

Reed, J. M., 1998. A diatom-conductivity transfer function for Spanish salt lakes. J. Paleolim. 19: 399-416.

Renberg, I., Y.-W. Brodin, G. Cronberg, F. El-Daoushy, F. Oldfield, B. Rippey, S. Sandoy, J.-E. Wallin, M. Wik. 1990. Recent acidification and biological changes in Lilla Oresjon, southwest Sweden, and the relation to atmosphere pollution and land-use history. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B 327: 391-396.

Rhodes, T. E., Davis R. B., 1995. Effects of late Holocene forest disturbance and vegetation change on acidic Mud Pond. Maine, USA. Ecology 76: 734–746.

Rieradevall M. and Brooks S.J. 2001. An identification guide to subfossil Tanypodinae larvae (Insecta: Diptera: Chironomidae) based on cephalic setation. J. Paleolim.25(1): 81–99

Ritchie J C, 1976. The late-Quaternary vegetational history of the western interior of Canada. Canadian Jour. Botany, 54: 1793-1818.

Ritchie J C, Hadden K A and Gajewski K, 1987. Modern pollen spectra from lakes in arctic western Canada. Canadian journal of Botany, 65(8): 1605-1613.

Rørslett B. 1989. An integrated approach to hydropower impact assessment. II. Submerged macrophytes in some Norwegian hydro-electric lakes. Hydrobiologia, 175: 65~82

Rosén P，Segerström U，Eriksson L，et al、Holocene climate change reconstructed from diatoms，chironomids，pollen and near—infrared spectroscopy at an alpine lake (Sjuodjijaure)in northern Sweden、The Holocene，2001，II：551-562．

Round F E, 1996. Opinion what characters define diatom genera, species and infraspecific taxa? Diatom Research, 11(1): 203-218.

Round F E, Crawford R M & Mann D G, 1990. The diatoms biology and morphology of the genera. Cambridge University Press, Cambridge, pp747.

Rousseau, D.-D., 1991. Climatic transfer function from Quaternary molluscs in European loess deposits. Quat. Res. 36: 195–209.

Roux, M., S. Servant-Vildary & M. Servant, 1991. Inferred ionic composition and salinity of a Bolivian Quaternary lake, as estimated from fossil diatoms in the sediments. Hydrobiologia 210: 3-18.

Rowley-Conwy, P., 1982. Forest grazing and clearance in temperate Europe with special reference to Denmark: an archaeological view. In: Bell, M. and Limbrey, S. (eds) Archaeological Aspects of Woodland Ecology. British Archaeological Reports, International Series, vol. 142, pp. 199-215.

Sander, P. M. & C. T. Gee, 1990. Fossil charcoal: techniques and applications. Rev. Palaeobot. Palynol. 63: 269–279.

Sandgren, C. D., 1988. The ecology of chrysophyte flagellates: their growth and perennation strategies as freshwater phytoplankton. In Sandgren, C. D. (ed.) Growth and Reproductive Strategies of Freshwater Phytoplankton. Cambridge University Press, Cambridge: 9–104.

Sandgren, C. D., J. P. Smol & J. Kristiansen, 1995. Chrysophyte Algae: Ecology, phylogeny and development. Cambridge University Press, Cambridge, 399 pp.

Sayer C, Burgess A, Kari K, et al. 2009. Long-term dynamics of submerged macrophytes and algae in a small and shallow, eutrophic lake: implications for the stability of the macrophyte-dominated state. Freshwater Biology, (in press)

Scheffer M, Hosper S H, Meijer M L, et al. 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. Trends Ecology & Evolution. 8: 275~279

Schelvis, J., 1990. The reconstruction of local environments on the basis of remains of oribatid mites (Acari; Oribatida). J. Archaeol. Sc.

17: 559–571.

Schönfelder I, Gelbrecht J, Schönfelder J, Steinberg C E W. 2002. Relationships between littoral diatoms and their chemical environment in northeastern German lakes and rivers. J. Phycol. 38: 66-82.

Sellnick, M., 1960. Hornmilben, Oribatei. Tierwelt Mitteleuropas 3, Ergänzung: 45–134.

Shear, C. L. & B. O. Dodge, 1927. Life histories and heterothallism of the red bread-mold fungi of the Monilla sitophila group. J. Agric. Res. 34: 1019–1042.

Shen C M, Liu K B, Tang L Y et al, 2006. Quantitative relationships between modern pollen rain and climate in the Tibetan Plateau. Review of Palaeobotany and Palynology, 140: 61~77

Shen J, Jones R T, Yang X D et al., 2006. The Holocene vegetation history of Lake Erhai, Yunnan province southwestern China: the role of climate and human forcings. The Holocene, 16（2）: 265-276.

Shen J, Liu X Q, Wang S M et al., 2005. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years. Quaternary International, 136: 131-140.

Shen J., Matsumoto R., Wang S.,Zhu Y. 2001. Quantitative reconstruction of the paleosalinity in the Daihai Lake, Inner Mongolia, China. Chinese Science Bulletin. 46(1): 73-76.

Shen J., Matsumoto R., Wang S.,Zhu Y. 2002. Quantitative reconstruction of the lake water paleotemperature of Daihai Lake, Inner Mongolia, China and its significance in paleoclimate. Science in China (D), 45(9): 792-799.

Shumate, B. C., C. L. Schelske, T. L. Crisman & W. F. Kenney, 2002. Response of the cladoceran community to trophic state change in Lake Apopka, Florida. Journal of Paleolimnology 27: 71-77.

Siver P A, 1999. Development of paleolimnological inference models for pH, total nitrogen and specific conductivity based on planktonic diatoms. J. Paleolimnol., 21: 45-59.

Siver, P. A., 1991. The Biology of Mallomonas: Morphology, Taxonomy and Ecology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 230 pp.

Siver, P. A., 1995. The distribution of chrysophytes along environmental gradients: their use as biological indicators. In Sandgren, C. D. et al. (eds.) Chrysophyte Algae: Ecology, Phylogeny and Development. Cambridge University Press, Cambridge: 232–268.

Smith A. J., 1993. Lacustrine ostracodes as hydrochemical indicators in lakes of the north-central United States. J. Paleolim. 8: 121–134.

Smith A. J., Delorme L. D. & Forester R. M., 1992. A lake's solute history from ostracodes: comparison of methods. In Kharaka Y. K. & Maest A. S. (eds.), Water-rock Interaction. A. A. Balkema. Rotterdam: 677–681.

Smol J P & Cumming B F, 2000. Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments. J Phycol, 36: 986-1011.

Smol J P, 2002. Pollution of lakes and rivers: a paleoenvironmental perspective.Oxford University Press Inc., New York, pp280.

Smol J P, Birks H J B & Last W M, 2001. Using Biology to study long-term environmental changes. In Smol J P, Birks H J P & Last W M (eds): Tracking environmental change using lake sediments (Vol. 3), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands: 1-3.

Smol J P, Cumming B F, 2000. Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments. J Phycol, 36: 986-1011.

Smol, J. P., 1980. Fossil synuracean (Chrysophyceae) scales in lake sediments: a new group of paleoindicators. Can. J. Bot. 58: 458–465.

Smol, J. P., 1983. Paleophycology of a high arctic lake near Cape Herschel, Ellesmere Island. Can. J. Bot. 61: 2195–2204.

Smol, J. P., 1985. The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores: a useful paleolimnological index. Hydrobiologia 123: 199–208.

Smol, J. P., 1986. Chrysophycean microfossils as indicators of lakewater pH. In Smol, J. P. et al. (eds.) Diatoms and Lake Acidity. Dr. W. Junk Publ., Dordrecht: 275–287.

Smol, J. P., 1988, Chrysophycean microfossils in paleolimnological studies. Palaeogeog. Palaeoclim. Palaeoecol. 62: 287–297.

Smol, J. P., D. F. Charles & D. R. Whitehead, 1984. Mallomonadacean microfossils provide evidence of recent lake acidification. Nature 307: 628–630.

Solhø T, 2001. Oribatid mites. In: J. P. Smol, H. J. B. Birks & W. M. Last (eds.), 2001. Tracking EnvironmentaI Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 81-104.

Solhoy, I. W. & T. Solhoy, 2000. The fossil oribatid mite fauna (Acari: Oribatida) in late-glacial and early-Holocene sediments in Kr 鋩

enes Lake, western Norway. J. Paleolimnology 23: 35 – 47.

Sommarruga R., Psenner R., Schafferer E, et al. 1999. Dissolved organic carbon concerntration and phytoplankton biomass in high-mountain lakes of the Austrian Alps: potential effect of climatic warming on UV underwater attenuation. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 31: 247-253.

Sparks, B. W., 1961. The ecological interpretation of Quaternary non-marine mollusca: Proc. Linnean Soc. London 172 session (pt. 1): 71–80.

Spence D H N. 1967. Factors controlling the distribution of freshwater macrophytes with particular reference to the lochs of Scotland. J. Ecol. 55: 147~170

Stewart N F. 1996. Stoneworts-Connoisseurs of Clean Water. British Wildlife, 8: 92~99

Stoermer E F & Smol J P, 1999. Applications and uses of diatoms—prologue. In Stoermer E F & Smol J P eds，The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth sciences， Cambridge University Press, Cambridge, 3-8.

Stoermer E F & Smol J P, 1999. The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth sciences. Cambridge University Press, Cambridge, 469 pp.

Stoermer, E. F., J. A. Wolin, C. L. Schelske & D. J. Conley, 1985. An assessment of ecological changes during the recent history of Lake Ontario based on siliceous algal microfossils preserved in the sediments. J. Phycol. 21: 257–276.

Sun X J, Luo Y L, Tian J et al, 2003. Pollen record of surface sediments from vertical forest zones of Changebai Mountain, Northeast China and their relations to the modern vegetation. Acta Botanica Sinica, 45(8): 910~916

Sun, X J and Wu Y S, 1988. The distribution of pollen and algae in surface sediments of Dianchi, Yunnan Province, China. Review of Palaeobotany and Palynology, 55: 193-206.

Sun, Z., Li J., Zhan S., Wang P., Wang T. & Li Y., 1995. Areal distribution of Quaternary ostracod assemblages and its main controlling factor in Chaidamu Basin, NW China. In R ha, J. (ed.) Ostracoda and Biostratigraphy, A. A. Balkema. Rotterdam: 277–281.

Swain, A. M., 1973. A history of fire and vegetation in northeastern Minnesota as recorded in lake sediments. Quat. Res. 3: 383–396.

Sweeney C A, A, 2004. key for the identification of stomata of the native conifers of Scandinavia. Review of Palaeobotany and Palynology, 128(3-4): 281-290.

Sylvestre, F., Servant-Vildary, S. & M. Roux, 2001. Diatom-based ionic concentration and salinity models from the south Bolivian Altiplano (15-23°S). J. Paleolim. 25: 279-295.

Takahashi, E., 1978. Electron Microscopical Studies of the Synuraceae (Chrysophyceae) in Japan. Taxonomy and Ecology. Tokai University Press, Tokyo, 194 pp.

Taylor, D. W., 1960. Late Cenozoic molluscan faunas from the High Plains. U.S. Geolog. Survey Professional. Paper 337: 1–94.

ter Braak C J F & Looman W N, 1986. Weighted averaging, logistics regression and the Gaussian response model. Vegetatio. 65: 3-11.

ter Braak C J F & Prentice I C, 1988. A theory of gradient analysis. Advances in Ecological Research. 18: 271-317.

ter Braak C J F & van Dam H, 1989. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. Hydrobiologia 178: 209-223.

ter Braak C J F and Smilauer P, 1998. CANOCO reference manual and user's guide to Canoco for Windows (version 4). New York: Centre for Biometry Wageningen.

ter Braak C J F, 1987. The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. Vegetation. 69: 69-77.

ter Braak C J F, Juggins S, 1993. Weighted averaging partial least squares regression (WA-PLS): an improved method for reconstructing environmental variables from species assemblages. Hydrobiologia, 269/270: 485-502

ter Braak C J F, Verdonschot P F M. 1995. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. Aquat. Sci. 57: 255-289.

ter Braak C J F. 1987. The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. Vegetation. 69: 69-77.

Thienemann, A., 1921. Seetypen. Naturwissenschaften 9: 343–346

Thompson, R., Oldfield F., 1986. Environmental Magnetism. Allen and Unwin Ltd., London, England, 227 pp.

Thoms, M. C., R. W. Ogden & M. A. Reid, 1999. Establishing the condition of lowland floodplain rivers: a palaeo-ecological approach. Freshwater Biology 41: 407-423.

Tinner W, Ammann B, and Germann P, 1996. Treeline fluctuations recorded for 12,500 years by soil profiles, pollen, and plant macrofossils in the Central Swiss Alps. Arctic and Alpine Research, 28(2): 131-147.

Törnqvist T E, de Jong A F M, Oosterbaan W A et al. 1992. Accurate dating of organic deposits by AMS measurement of macrofossils. Radiocarbon, 34: 566~577

Trautmann W, Zur. 1953. Unterscheidung fossiler Spaltoffnungen der mitteleuropaischen Coniferen. Flora, 140: 523-533.

Turney C S M, Coope G. R, Harkness D D et al. 2000. Implications for the dating of Wisconsinan (Weichselian) late- glacial events of systematic radiocarbon age differences between terrestrial plant macrofossils from a site in SW Ireland. Quaternary Research, 53 (1): 114~121

Umbanhowar, C. E., Jr., McGrath M. J., 1998. Experimental production and analysis of microscopic charcoal from wood, leaves, and grasses. The Holocene 8: 341–346.

Van Campo E, Gasse F, 1993. Pollen- and diatom-inferred climatic and hydrological changes in Sumxi Co basin (western Tibet) since 13,000 yr B.P. Quat Res, 39: 300-313

Van Geel, 2001. Non-pollen palynomorphs. In: J. P. Smol, H. J. B. Birks & W. M. Last (eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 99-119.

van Geel, B. & H. R. Grenfell, 1996. Spores of Zygnemataceae. In Jansonius, J. & D. C. McGregor(eds.) Palynology: Principles and Applications. Am. Ass. Strat. Palynol. Found., Vol. 1: 173–179.

van Geel, B. & S. T. Andersen, 1988. Fossil ascospores of the parasitic fungus Ustulina deusta in Eemian deposits in Denmark. Rev. Palaeobot. Palynol. 56: 89–93.

van Geel, B., 1978. A palaeoecological study of Holocene peat bog sections in Germany and The Netherlands. Rev. Palaeobot. Palynol. 25: 1–120.

van Geel, B., G. R. Coope & T. van der Hammen, 1989. Palaeoecology and stratigraphy of the Lateglacial type section at Usselo (The Netherlands). Rev. Palaeobot. Palynol. 60: 25–129.

van Geel, B., L. R. Mur, M. Ralska-Jasiewiczowa & T. Goslar, 1994. Fossil akinetes of Aphanizomenon and Anabaena as indicators for medieval phosphate-eutrophocation of Gościąż Lake (Central Poland). Rev. Palaeobot. Palynol. 83: 97–105.

van Geel, B., S. J. P. Bohncke & H. Dee, 1981. A palaeoecological study of an upper Late Glacial and Holocene sequence from "De Borchert", The Netherlands. Rev. Palaeobot. Palynol. 31: 367–448.

Velle, G., Brooks, S.J., Birks, H.J.B., Willassen, E., 2005. Chironomids as a tool for inferring Holocene climate, an assessment based on six sites in southern Scandinavia. Quaternary Science Reviews 24, 1429–1462.

Vermoere, M., Bottema, S., Vanhecke, L. et al., 2002. Palynological evi-dence for late- Holocene human occupation recorded in two wet-lands in SW Turkey. The Holocene, 12(5): 569—584.

Verschuren D, Laird K R, Cumming B F, 2000. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1100 years. Nature, 403: 410-414

Verschuren D, Laird K R, Cumming B F, 2000. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1100 years. Nature, 403: 410-414

Verschuren, D., Cumming, B.F., Laird, K.R., 2004. Quantitative reconstruction of past salinity variations in African lakes: assessment of chironomid-based models (Insecta: Diptera) in space and time. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 61, 986–998.

Verschuren, D., K. R. Laird & B. F. Cumming, 2000. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years. Nature 403: 410–414.

Vincens A, Ssemmanda I, Roux M, et al., 1997. Study of the modern pollen rain in western Uganda with a numerical approach. Rev. Palaeobot. Palynol., 96 : 145-168.

Vyverman W., Sabbe K, 1995. Diatom^temperature transfer functions based on the altitudinal zonation of diatom assemblages in Papua

New Guinea: a possible tool in the reconstruction of regional palaeoclimatic changes. Journal of Paleolimnology, 13: 65-77.

Walker I R & MacDonald G M, 1995. Distributions of Chironomidae (Insecta: Diptera) and other freshwater midges with respect to treeline, Northwest Territories, Canada. Arct Alp Res, 27:258–263

Walker I R, 1987. Chironomidae (Diptera) in Paleoecology. Quat Sci Rev, 6: 29-40

Walker I R, 2001. Midges: Chironomidae and related Diptera. In: Smol J.P., Birks H J B and Last W M eds. Tracking Environmental Change Using Late Sediments. Vol. 4: Zoological Indicators, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 43–66

Walker I R, Cwynar L C, 2006. Midges and palaeotemperature reconstruction—the North American experience, Quaternary Science Reviews 25 1911–1925

Walker I R，Smol J P，Engstrom，D R，et a1.,1991a. An assessment of Chironomidae as quan titative indicators of past climatic change ．Canadian Journal ofFisheries and Aquatic Sciences， 48：975-987

Walker, I. R., S. E.Wilson & J. P. Smol, 1995. Chironomidae (Diptera): Quantitative palaeosalinity indicators for lakes of western Canada. Can. J. Fish. aquat. Sci. 52: 950–960.

Walker, I. R., Smol, J. P., engstrom, D. R. et al. 1992. Aquatic invertebrates, climate, scale and statistical hypothesis testing: a response to Hann, Warner and Warwick. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 49: 1276-1280.

Walker, I.R., Mott, R.J., Smol, J.P., 1991b. AllerØd-Younger Dryas lake temperatures from midge fossils in Atlantic Canada. Science 253, 1010–1012.

Watts W A, Winter T C. 1966. Plant macrofossils from Kirchner Marsh, Minnesota - a paleoecology study. Bull. Geol. Soc. Amer, 77:1339~1360

Watts W A. 1978. Plant macrofossils and Quaternary paleoecology. In Walker D, Guppy J C (eds), Biology and Quaternary Environments. Australian Academy of Science, Canberra, 53~67

Webb Ⅲ T, Bryson R A, 1972. Late and postglacial climate change in the Northern Midwest, USA: Quantitative estimates derived from fossil pollen spectra by multivariate statistic analysis. Quaternary Research, 2: 70-115.

Webb C J, Simpson M J A. 2001. Seeds of New Zealand. Gymnosperms and dicotyledons. Manuka Press, Christchurch, New Zealand

Webb R S et al., 1993. Pollen response-surface estimates of late Quaternary changes in the moisture balance of the northeastern United States. Quaternary Research, 40: 213-227.

Weckström, J., A. Korhola & T. Blom, 1997. The relationship between diatoms and water temperature in thirty subarctic Fennoscandian lakes. Arctic and Alpine Research 29: 75-92.

Welten, 1982. Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen in den westlichen Schweizer Alpen: Bern-Wallis, Denkschrift der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, 95: 1-104.

Werner D, 1978. Regulation of metabolism by silicate in diatoms. In Bendz G & Lindqvist I eds: Biochemestry of silicon and related problems, Plenum Press, New York: 147-176.

Whitlock C, Larsen C, 2001. Charcoal as a fire proxy. In Smol J P, Birks H J B, Last W M (eds), Tracking environmental change using lake sediments. Volume 3: terrestrial, algal, and siliceous indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.

Whitlock C, Millspaugh SH, 1996. Testing assumptions of fire history studies: an examination of modern charcoal accumulation in Yellowstone National Park. The Holocene, 6: 7-15.

Whitlock, C., Anderson R. S., 2003. Fire history reconstructions based on sediment records from lakes and wetlands. In Veblen, T. T., W. L. Baker, G. Montenegro & T. W. Swetnam (eds.) Fire and Climate Change in the Americas. Springer-Verlag, Berlin.

Whitmore T J, 1989. Florida diatom assemblages as indicators of trophic state and pH. Limnology and Oceanography, 34: 882-895.

Wiederholm T, 1983. ed. Chironomidae of the Holarctic region. Keys and Diagnoses. Part I. Larvae. Entomologica Scandinavica Supplement.1-457

Wilkinson, A. N., B. A. Zeeb, J. P. Smol & M. S. V. Douglas, 1996. Chrysophyte stomatocyst assemblages associated with periphytic, high arctic pond environments. Nord. J. Bot. 16: 95–112.

Williams M A J, Dunkerley D L, De Decke P, Kershaw A P & Stokes T, 1993. Quaternary Environments. Edward Arnold, London.

Wilson, S. E., B. F. Cumming & J. P. Smol, 1994. Diatom-based salinity relationship in 111 lakes from the Interior Plateau of British

Columbia, Canada: The development of diatom-based model for paleosalinity and paleoclimatic reconstructions. J. Paleolim. 12: 197-221.

Winchester, N. N., 1997. Canopy arthropods of coastal Sitka spruce trees on Vancouver Island, British Columbia, Canada. In Stork, N. E., J. A. Adis & R. K. Didham (eds.) Canopy Arthropods. Chapman & Hall, London: 151–168.

Winkler, M. G., 1985. Charcoal analysis for paleoenvironmental interpretation: a chemical assay. Quat. Res. 23: 313–326.

Wohlfarth B. 1996. The chronology of the Last Termination: A review of radiocarbon-dated, high-resolution terrestrial stratigraphies. Quaternary Science Reviews, 15: 267~284

Wolfram, G., K., Donabaum, M. Schagerl & V. A. Kowarc, 1999. The zoobenthic community of shallow salt pans in Austria-preliminary results on phenology and the impact of salinity on benthic invertebrate. Hydrobiologia 408/409: 193-202.

Wolin J A & Duthie A C, 1999. Diatoms as indicators of water level change in freshwater lakes. In Stoermer E F & Smol J P eds, The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences, Cambridge Unviversity Press, Cambridge: 183-202.

Wunderle, I., 1992. Die Oribatiden-Gemeinschaften (Acari) der verschiedenen Habitate eines Buchenwaldes. Carolinea 50: 79–144.

Wunsam S, Schmidt R. 1995. A diatom-phosphorus transfer function for alpine and pre-alpine lakes. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 53: 85-99.

Xue B., Qu W.,wang,S.,Ma,Y.,Dickman.,MD, 2003. Lake level changes documented by sediment properties and diatom of Hulun Lake, China since the late Glacial. Hydrobiologia, 498(1-3): 133-141.

Yang X D, Anderson N J, Dong X & Shen J, 2008. Surface sediment diatom assemblages and epilimnetic total phosphorus in large, shallow lakes of the Yangtze floodplain: their relationships and implications for assessing long-term eutrophication. Freshwater Biology, 53: 1273-1290.

Yang X D, Christian Kamenik, Roland Schmidt et al., 2003. Diatom-based conductivity and water-level inference models from eastern Tibetan (Qinghai-Xizang) Plateau lakes. Journal of Paleolimnology, 30: 1-19.

Yang, J-R. & H.C. Duthie, 1995. Regression and weighted-averaging models relating surficial sediment diatom assemblages to water depth in Lake Ontario. J. Great Lakes Res. 21: 84–94.

Yu G, Ke X K, Xu B, et al., 2004. The relationships between the surface arboreal pollen and the plants of the vegetation in China. Review of Palaeobotany and Palynology, 129(4): 187-198.

Yu Z, 1997. Late Quaternary paleoecology of Thuja and Juniperus (Cupressaceae) at Crawford. Lake, Ontario, Canada: pollen, stomata and macrofossils. Review of Palaeobotany and Palynology, 96:241-254

Zeeb, B. A. & J. P. Smol, 1993. Postglacial chrysophycean cyst record from Elk Lake, Minnesota. Geol. Soc. Amer. Special Paper 276: 239–249.

Zeeb, B. A., K. & J. P. Smol, 2001. Chrysophyte scales and cysts. In: J. P. Smol, H. J. B. Birks & W. M. Last (eds.), 2001. Tracking EnvironmentaI Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 204-223.

Zhang E, Jones R, Bedford A, et al. 2007. A chironomid-based salinity inference model from lakes on the Tibetan Plateau. J Paleolimnol, 38(4): 477-491

Гричук В П, Заклинская Е Д, 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Москва: Географиздат. 47-66.

第 7 章图、表，其中图 7.13、16、28 用彩色；图 7.27、7.29 由出版社决定取向（作者注）

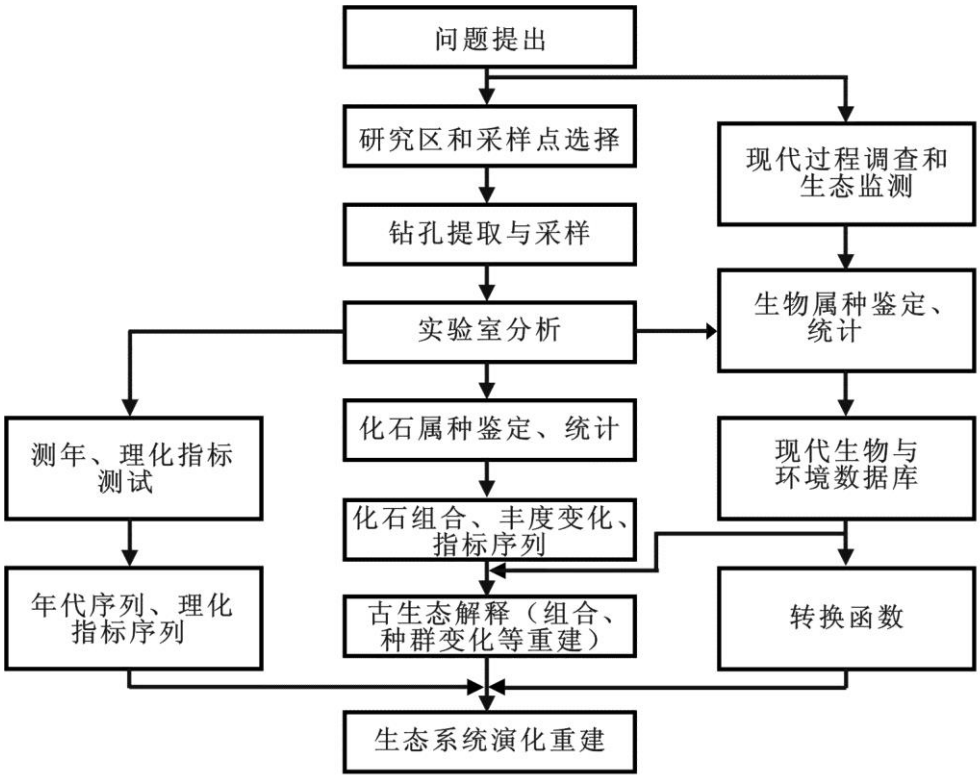


图 7.1

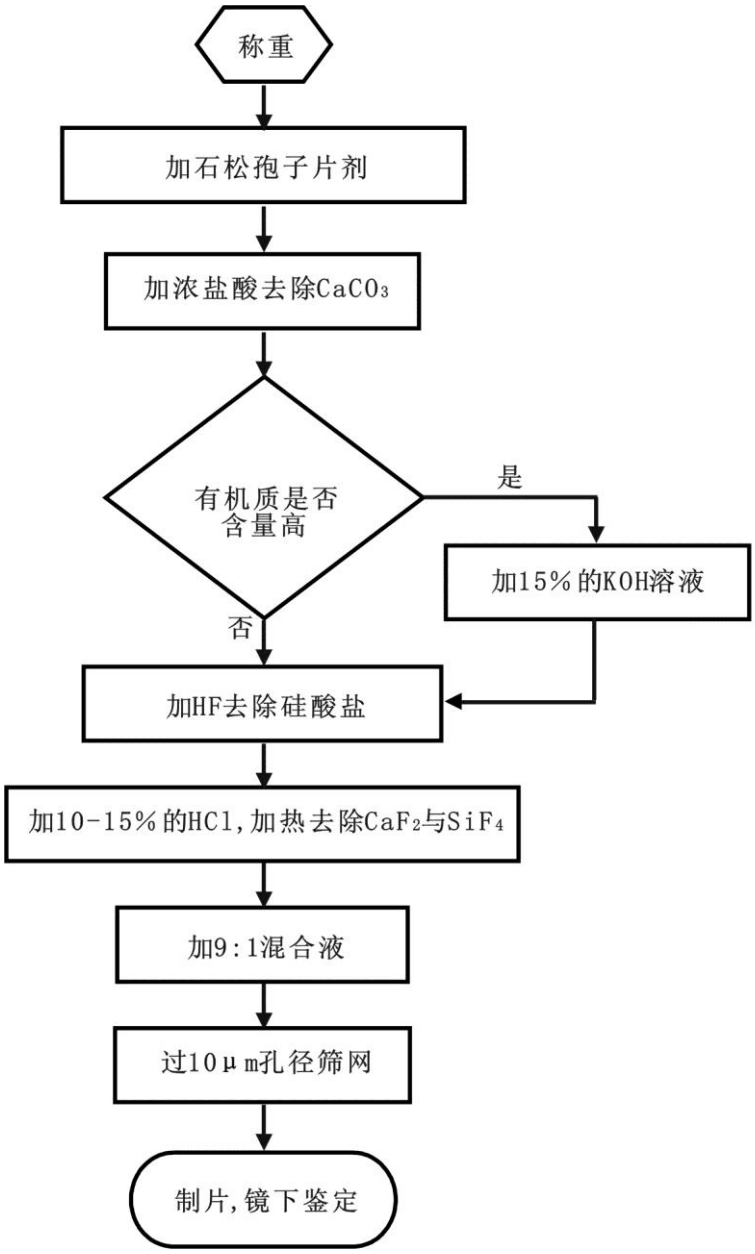

称重
加石松孢子片剂
加浓盐酸去除CaCO3
有机质是否
含量高
是
加15%的KOH溶液
否
加HF去除硅酸盐
加10-15%的HCl,加热去除CaF2与SiF4
加9:1混合液
过10μm孔径筛网
制片,镜下鉴定

图 7.2

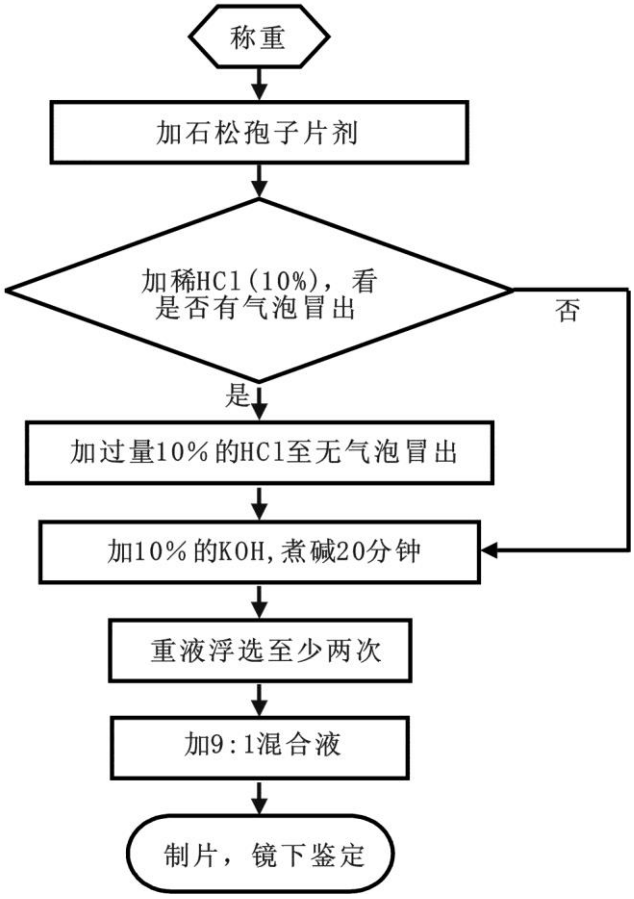

称重
加石松孢子片剂
加稀HCl(10%)，看是否有气泡冒出
否
是
加过量10%的HCl至无气泡冒出
加10%的KOH,煮碱20分钟
重液浮选至少两次
加9:1混合液
制片，镜下鉴定

图 7.3

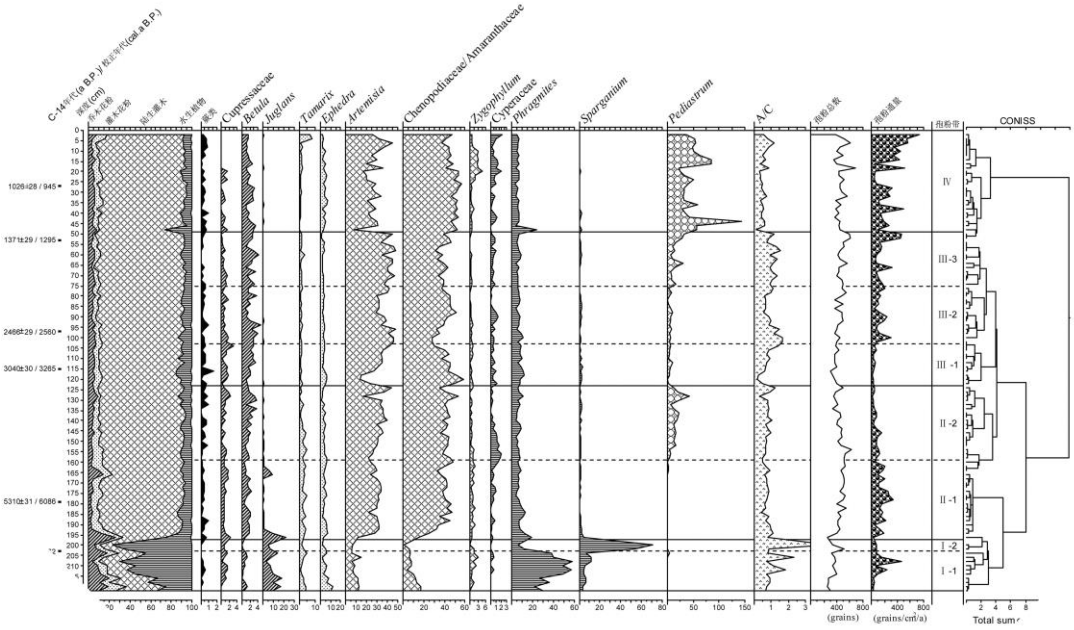

Cupressaceae
Betula
Juglans
Tamarix
Ephedra
Artemisia
Chenopodiaceae/Amaranthaceae
Zygophyllum
Cyperaceae
Phragmites
Sparganium
Pediastrum
A/C
CONISS
IV
III-3
III-2
III-1
II-2
II-1
I-2
I-1
(grains)
(grains/cm²/a)
Total sum

图 7.4

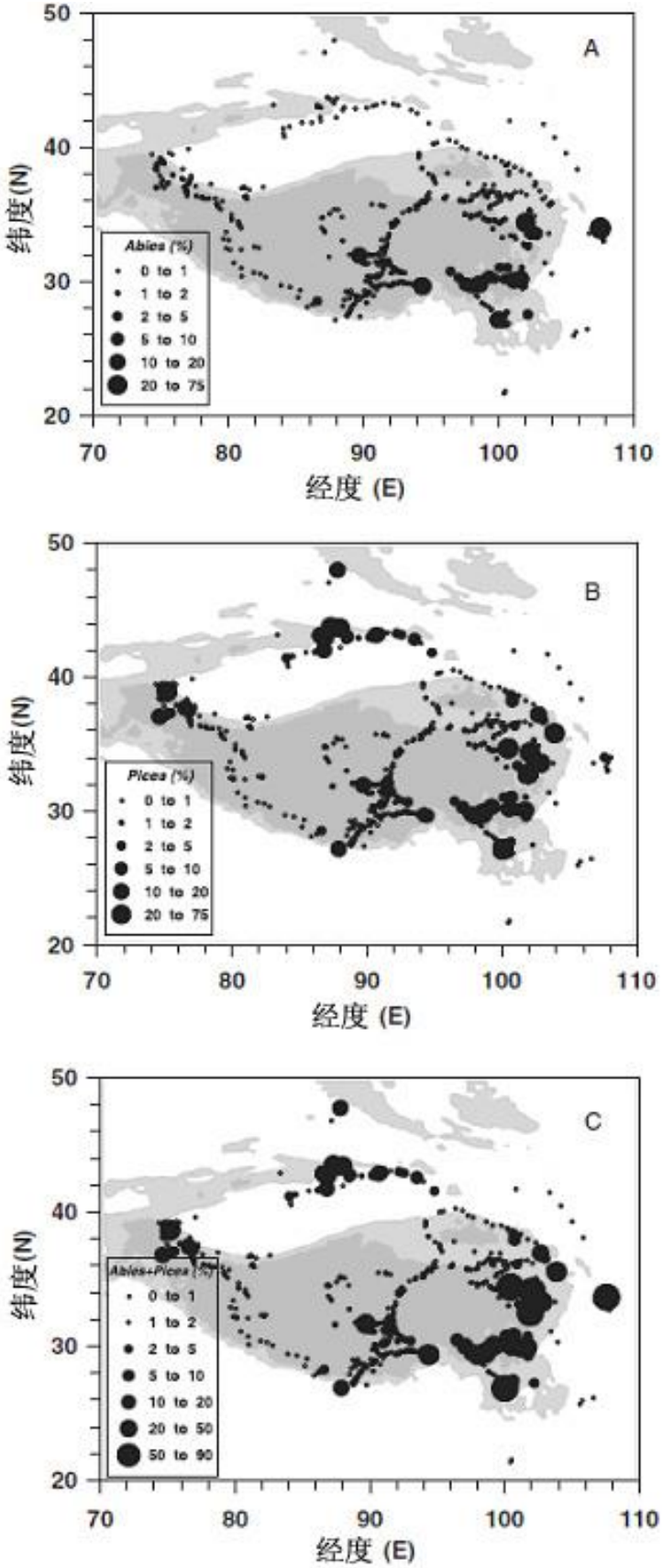

A
Abies (%)
0 to 1
1 to 2
2 to 5
5 to 10
10 to 20
20 to 75
纬度(N)
经度 (E)
B
Picea (%)
0 to 1
1 to 2
2 to 5
5 to 10
10 to 20
20 to 75
纬度(N)
经度 (E)
C
Abies+Picea (%)
0 to 1
1 to 2
2 to 5
5 to 10
10 to 20
20 to 50
50 to 90
纬度(N)
经度 (E)

图 7.5

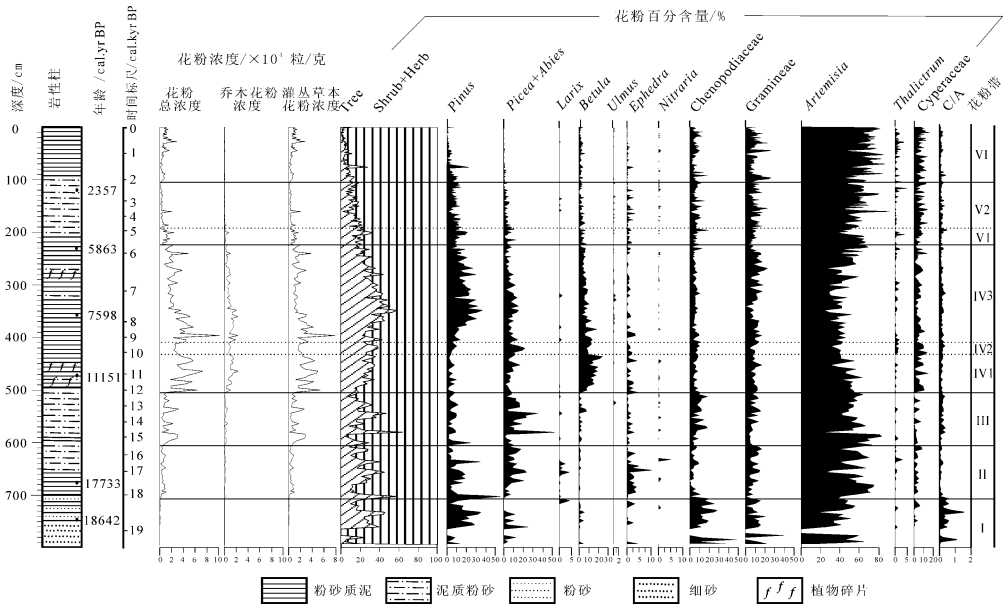

花粉百分含量/%
花粉浓度/×10⁴ 粒/克
深度/cm
岩性柱
年龄 /cal.yr BP
时间标尺/cal.kyr BP
花粉总浓度
乔木花粉浓度
灌丛草本花粉浓度
Tree
Shrub+Herb
Pinus
Picea+Abies
Larix
Betula
Ulmus
Ephedra
Nitraria
Chenopodiaceae
Gramineae
Artemisia
Thalictrum
Cyperaceae
C/A
花粉带
VI
V2
V1
IV3
IV2
IV1
III
II
I
2357
5863
7598
11151
17733
18642
粉砂质泥
泥质粉砂
粉砂
细砂
植物碎片

图 7.6

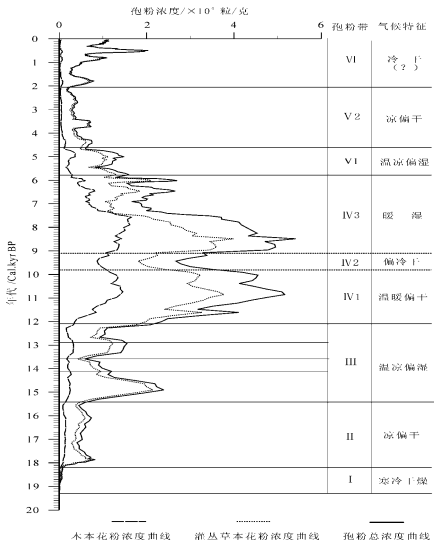

孢粉浓度/×10⁴ 粒/克
孢粉带
气候特征
年代/Cal.kyr BP
VI
冷干（2）
V2
凉偏干
V1
温凉偏湿
IV3
暖湿
IV2
偏冷干
IV1
温暖偏干
III
温凉偏湿
II
凉偏干
I
寒冷干燥
木本花粉浓度曲线
灌丛草本花粉浓度曲线
孢粉总浓度曲线

图 7.7

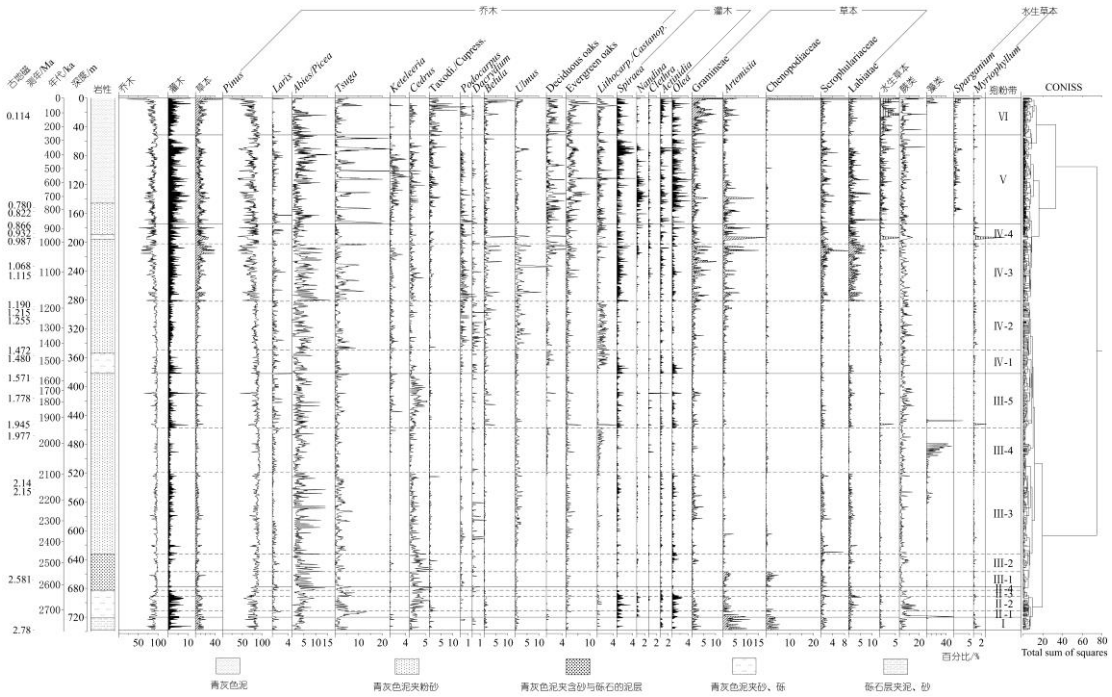

乔木
灌木
草本
水生草本
古地磁
测年/Ma
年代/ka
深度/m
岩性
孢粉带
CONISS
Total sum of squares
百分比/%
青灰色泥
青灰色泥夹粉砂
青灰色泥夹含砂与砾石的泥层
青灰色泥夹砂、砾
砾石层夹泥、砂

图 7.8

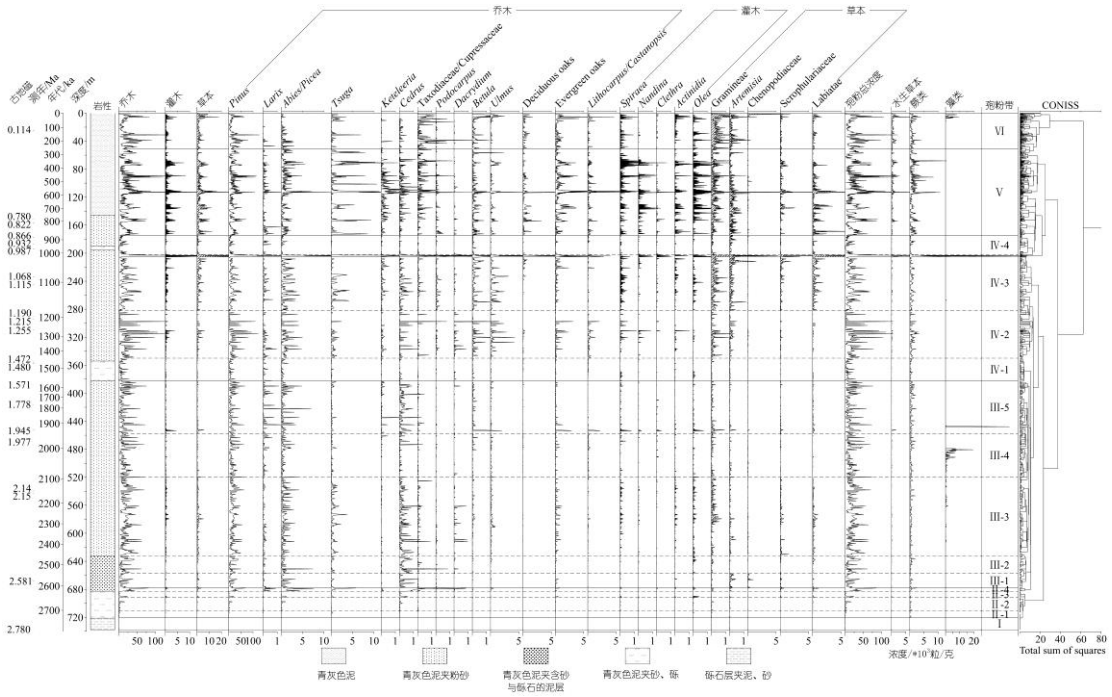

乔木
灌木
草本
古地磁
测年/Ma
年代/ka
深度/m
岩性
孢粉带
CONISS
Total sum of squares
浓度/*10⁴粒/克
青灰色泥
青灰色泥夹粉砂
青灰色泥夹含砂与砾石的泥层
青灰色泥夹砂、砾
砾石层夹泥、砂

图 7.9

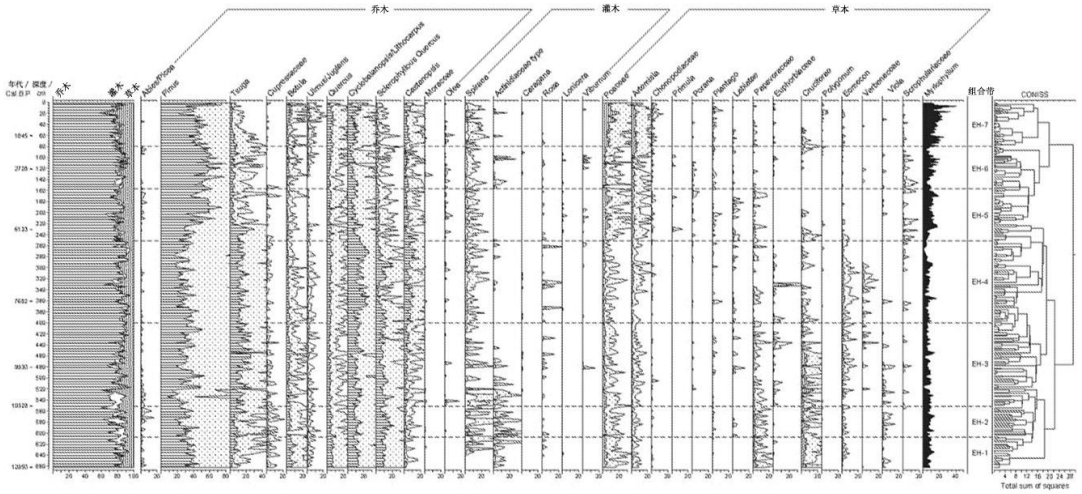


图 7.10

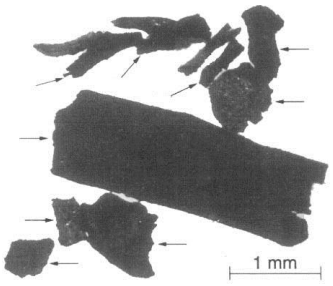


图 7.11

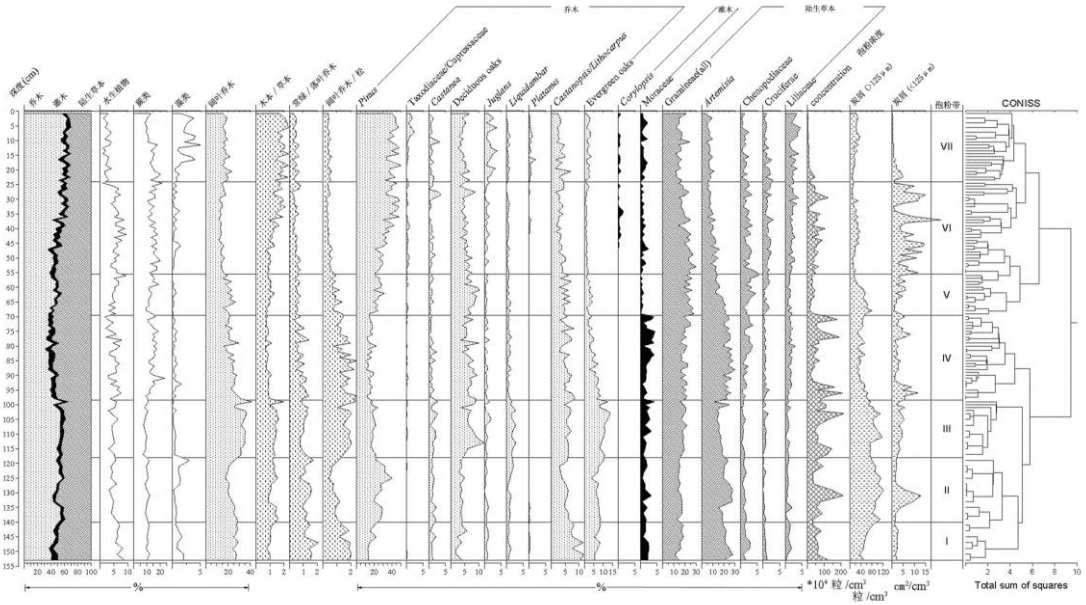


图 7.12

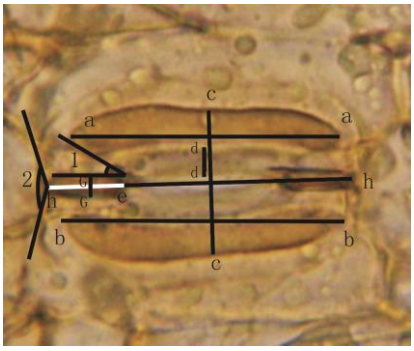

c
a
a
1
2
d
d
h
h
e
b
b
c

图 7.13

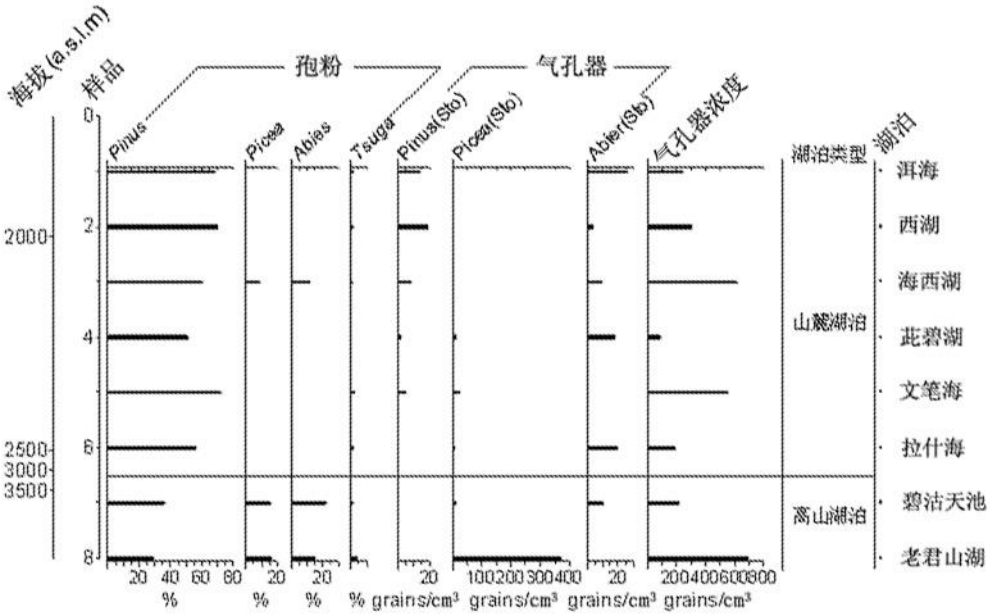

海拔(a.s.l.m)
样品
孢粉
气孔器
Pinus
Picea
Abies
Tsuga
Pinus(Sto)
Picea(Sto)
Abier(Sto)
气孔器浓度
湖泊类型
湖泊
洱海
西湖
海西湖
山麓湖泊
茈碧湖
文笔海
拉什海
高山湖泊
碧沽天池
老君山湖
2000
2500
3000
3500
0
2
4
6
8
20 40 60 80
20
20
20
100200300400
20
200400600800
%
%
%
% grains/cm³
grains/cm³
grains/cm³
grains/cm³

图 7.14

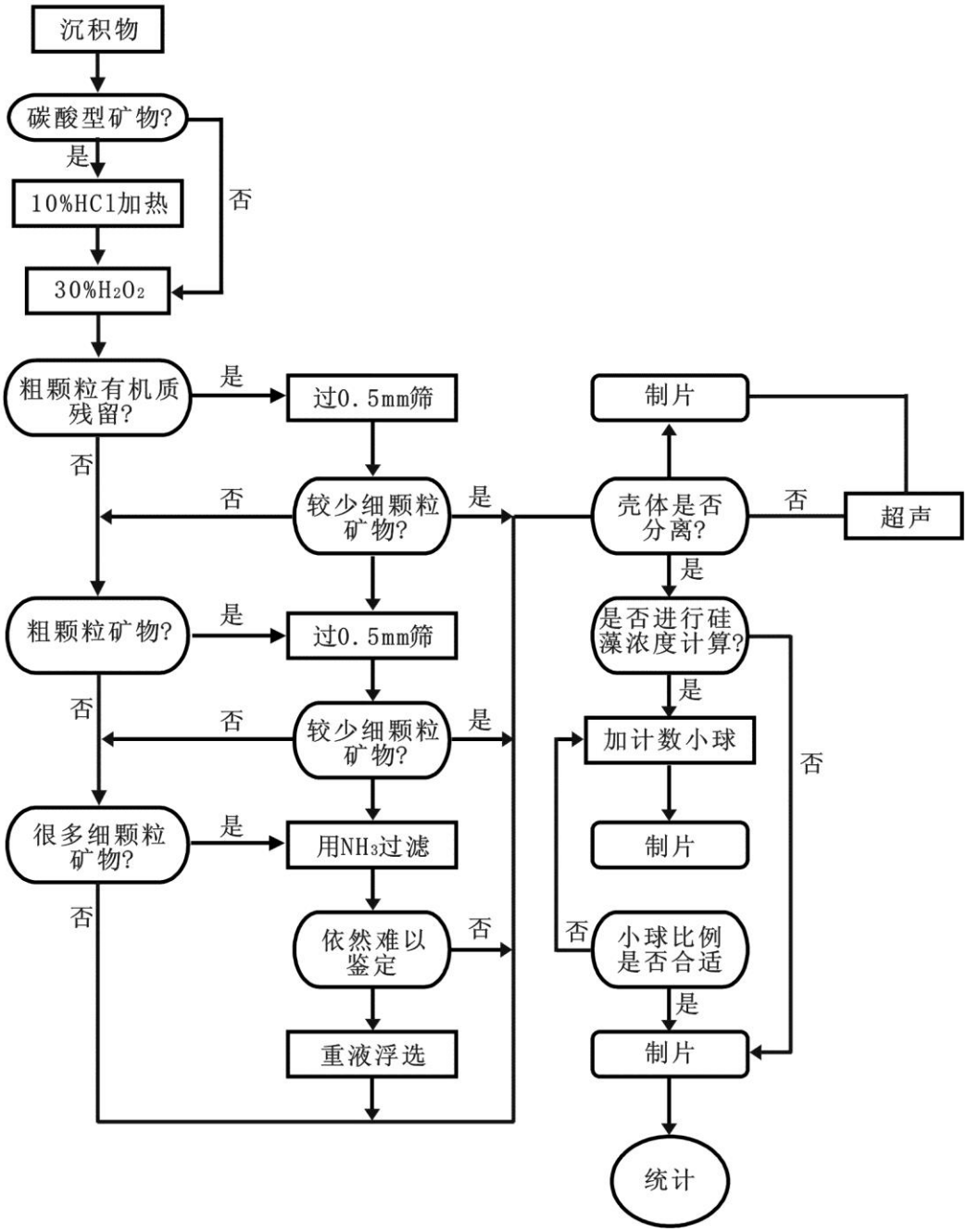

沉积物
碳酸型矿物?
是
否
10%HC1加热
30%H2O2
粗颗粒有机质残留?
是
过0.5mm筛
否
较少细颗粒矿物?
否
是
粗颗粒矿物?
是
过0.5mm筛
否
较少细颗粒矿物?
否
是
很多细颗粒矿物?
是
用NH3过滤
否
依然难以鉴定
否
重液浮选
制片
壳体是否分离?
否
超声
是
是否进行硅藻浓度计算?
是
否
加计数小球
制片
小球比例是否合适
否
是
制片
统计

图 7.15

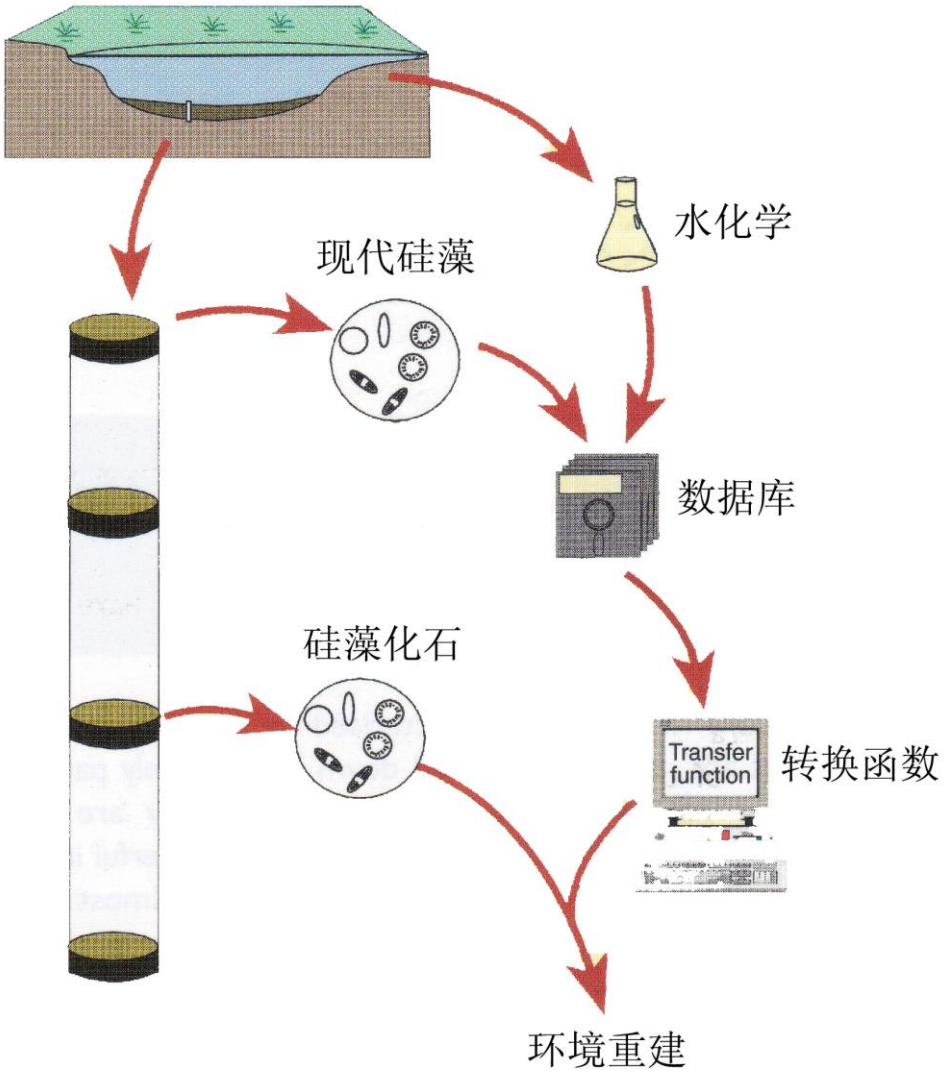


图 7.16

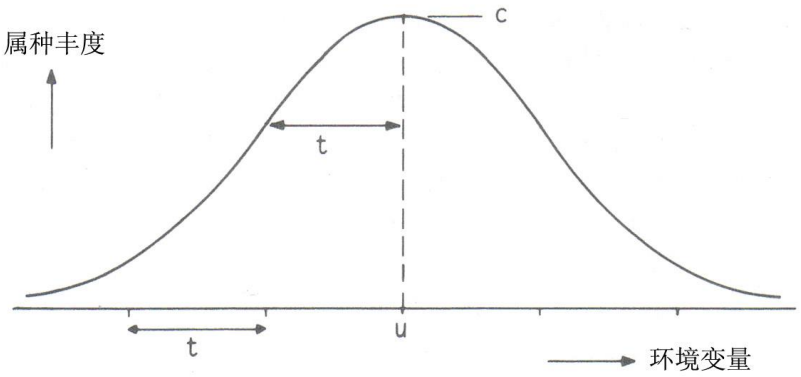

属种丰度
c
t
t
u
环境变量

图 7.17

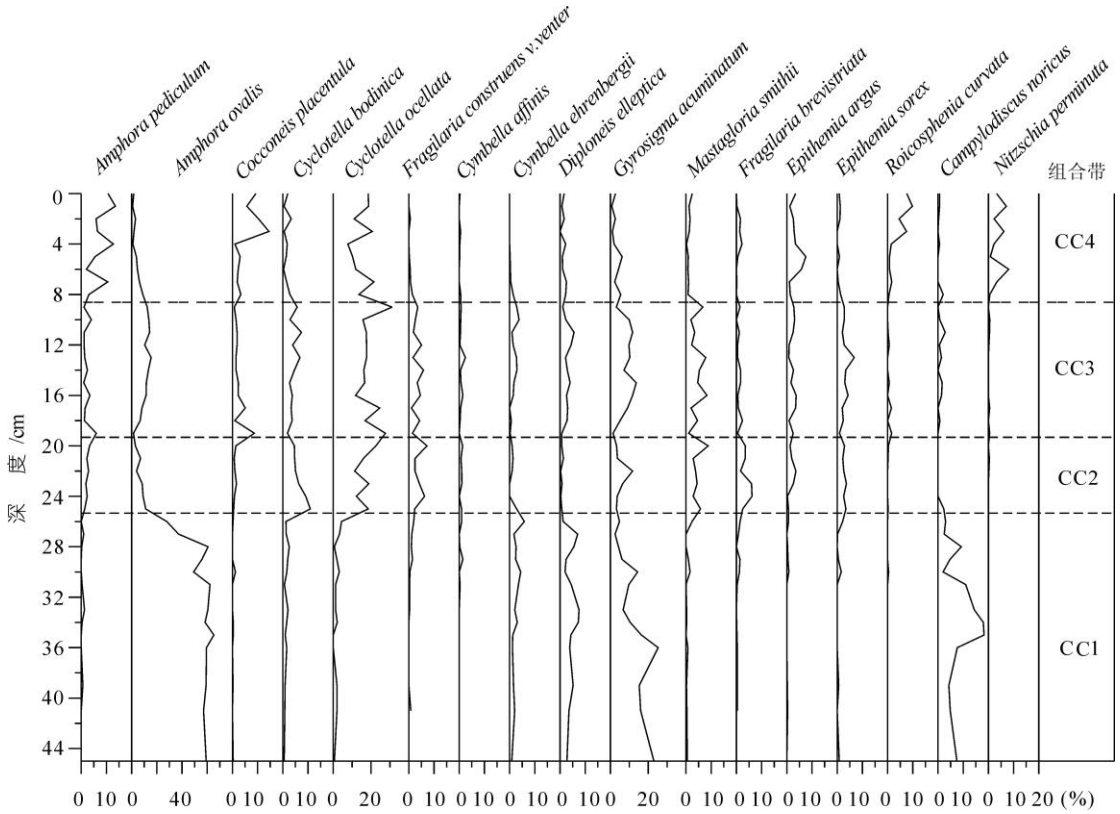

Amphora pediculum
Amphora ovalis
Cocconeis placentula
Cyclotella bodinica
Cyclotella ocellata
Fragilaria construens v.venter
Cymbella affinis
Cymbella ehrenbergii
Diploneis elleptica
Gyrosigma acuminatum
Mastogloia smithii
Fragilaria brevistriata
Epithemia argus
Epithemia sorex
Roicosphenia curvata
Campylodiscus noricus
Nitzschia perminuta
组合带
深 度 /cm
CC4
CC3
CC2
CC1
0 10 0 40 0 10 0 10 0 20 0 10 0 10 0 10 0 10 0 20 0 10 0 10 0 10 0 10 0 10 0 10 0 10 20 (%)

图 7.18

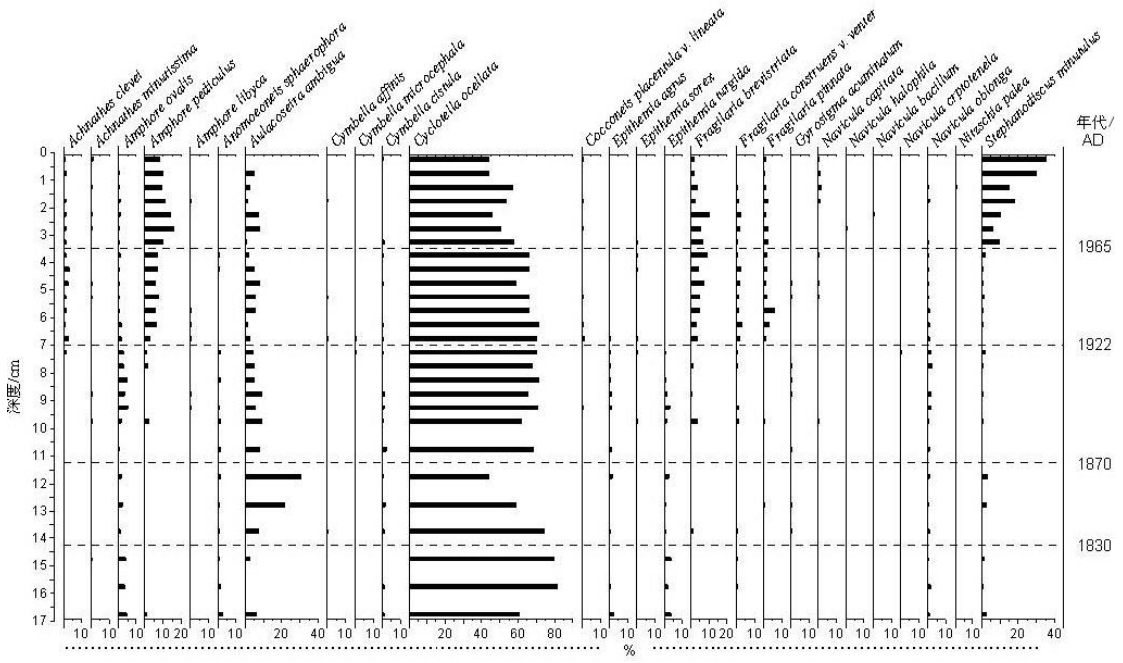

Achnanthes clevei
Achnanthes minutissima
Amphore ovalis
Amphore pediculus
Amphore libyca
Anomoeoneis sphaerophora
Aulacoseira ambigua
Cymbella affinis
Cymbella microcephala
Cymbella cistula
Cyclotella ocellata
Cocconeis placentula v. lineata
Epithemia agnus
Epithemia sorex
Epithemia turgida
Fragilaria brevistriata
Fragilaria construens v. venter
Fragilaria pinnata
Gyrosigma acuminatum
Navicula capitata
Navicula halophila
Navicula bacillum
Navicula cryptocephala
Nitzschia oblonga
Nitzschia palea
Stephanodiscus minutulus
深度/cm
年代/AD
1965
1922
1870
1830
%

图 7.19

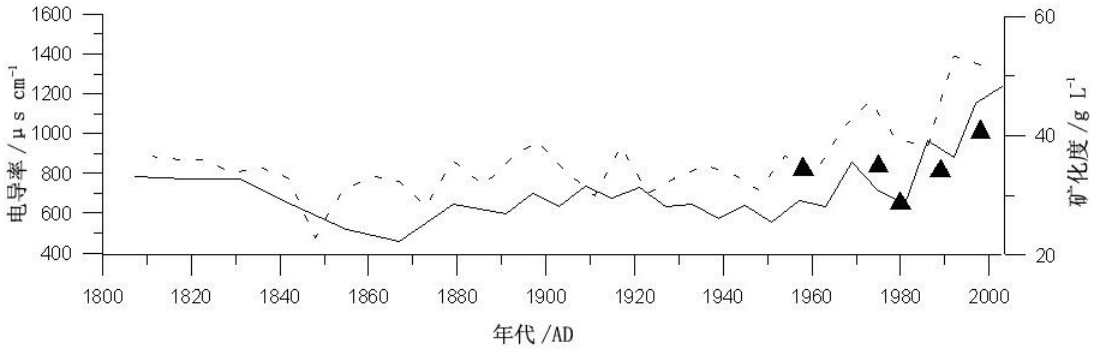

电导率 / μ s cm⁻¹
矿化度 / g L⁻¹
年代 /AD

图 7.20

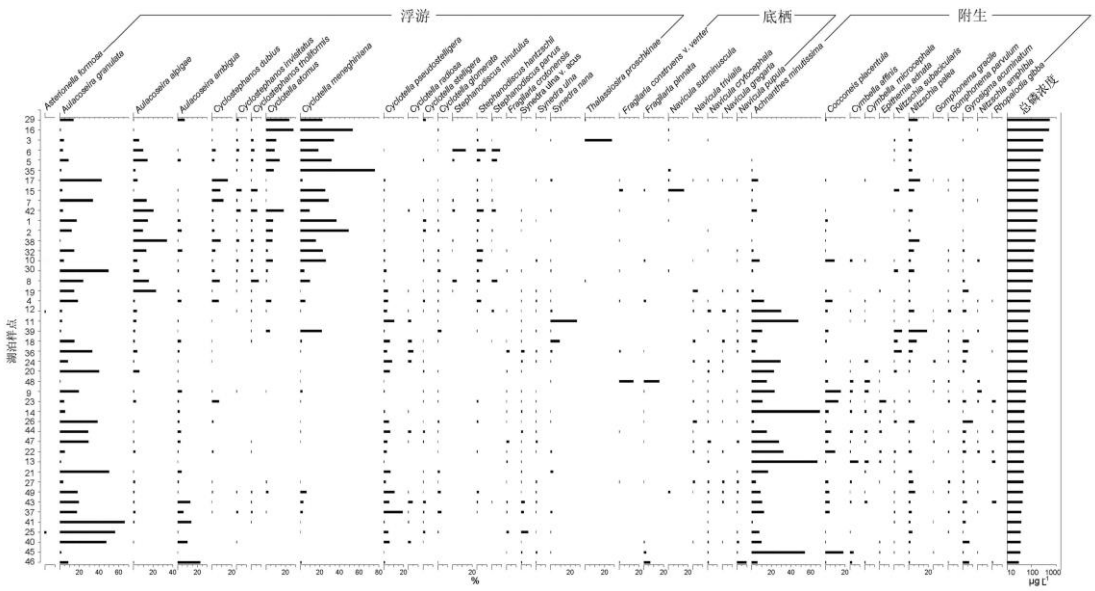

浮游
底栖
附生
总磷浓度
湖泊样点
%
μg L⁻¹

图 7.21

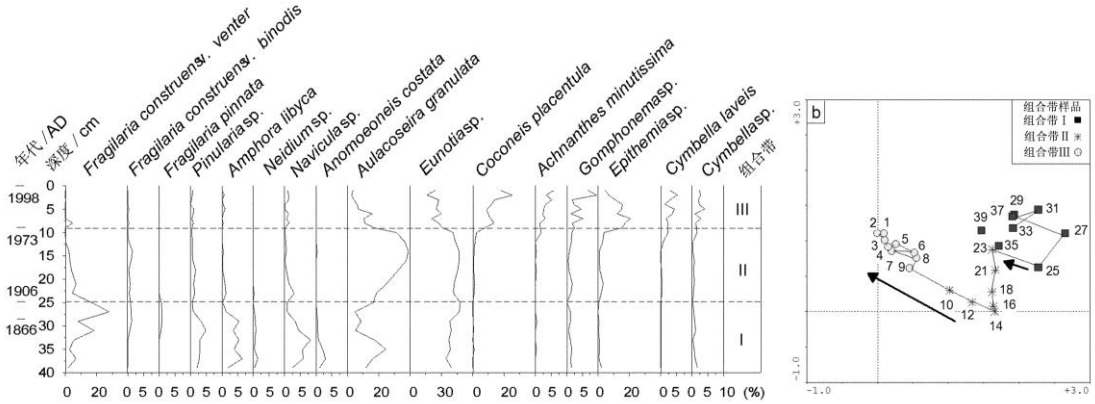

年代 / AD
深度 / cm
Fragilaria construens v. venter
Fragilaria construens v. binodis
Fragilaria pinnata
Pinularia sp.
Amphora libyca
Neidium sp.
Navicula sp.
Anomoeoneis costata
Aulacoseira granulata
Eunotia sp.
Coconeis placentula
Achnanthes minutissima
Gomphonema sp.
Epithemia sp.
Cymbella laveis
Cymbella sp.
组合带
1998
1973
1906
1866
III
II
I
(%)
b
组合带样品
组合带 I
组合带 II
组合带 III
+3.0
-1.0

图 7.22

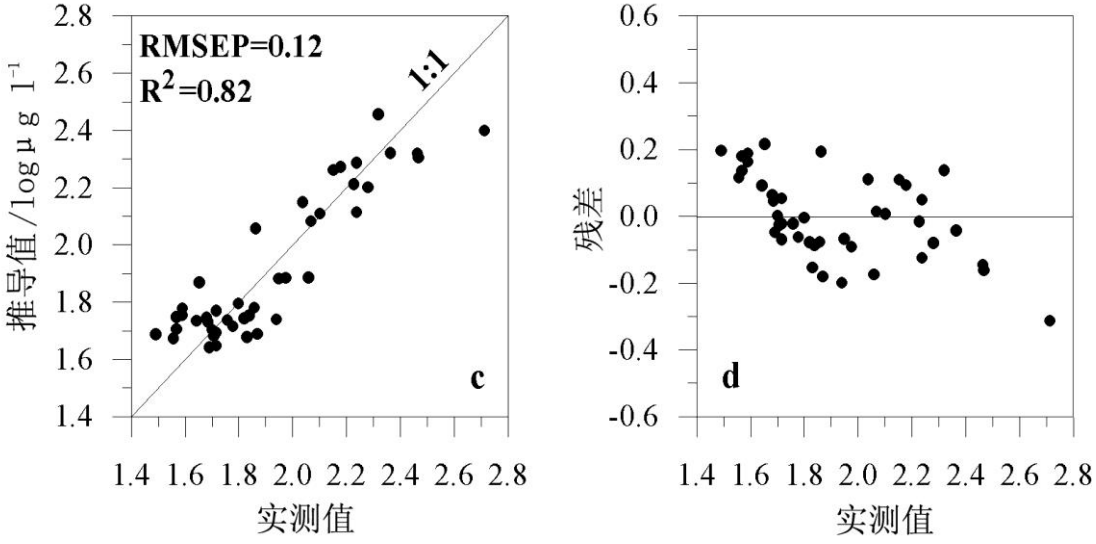


图 7.23

图 7.24

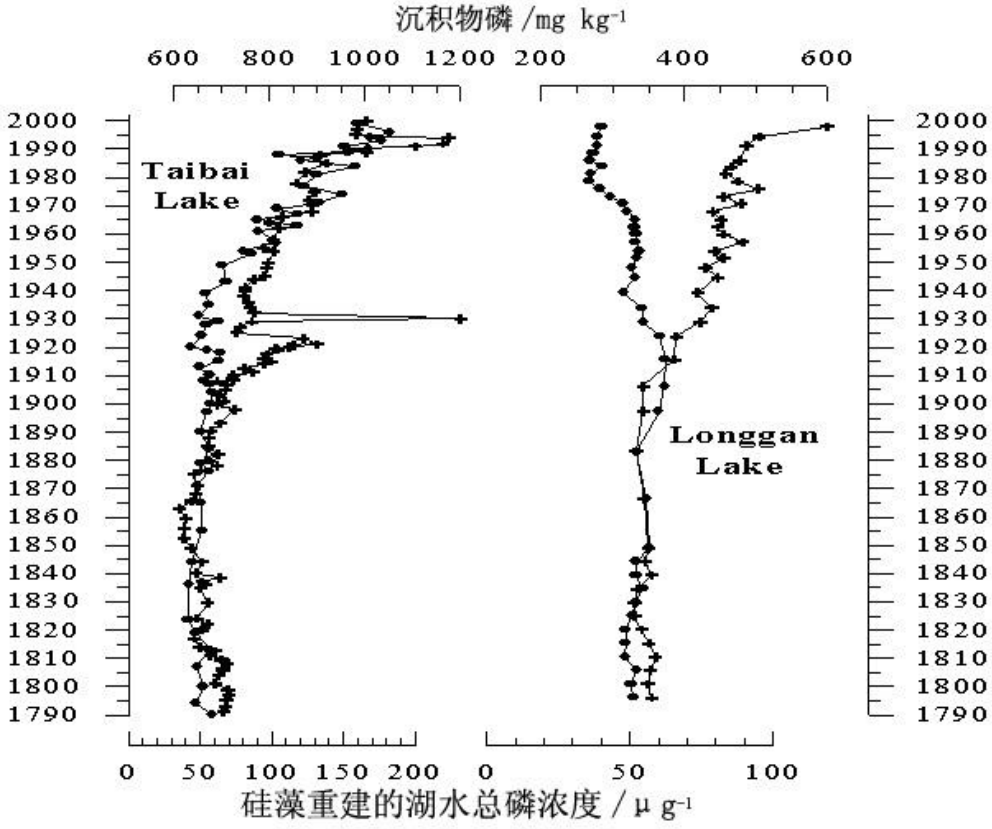

沉积物磷 /mg kg-1
600 800 1000 1200
200 400 600
Taibai Lake
Longgan Lake
2000 1990 1980 1970 1960 1950 1940 1930 1920 1910 1900 1890 1880 1870 1860 1850 1840 1830 1820 1810 1800 1790
0 50 100 150 200
0 50 100
硅藻重建的湖水总磷浓度 / μ g-1

图 7.25

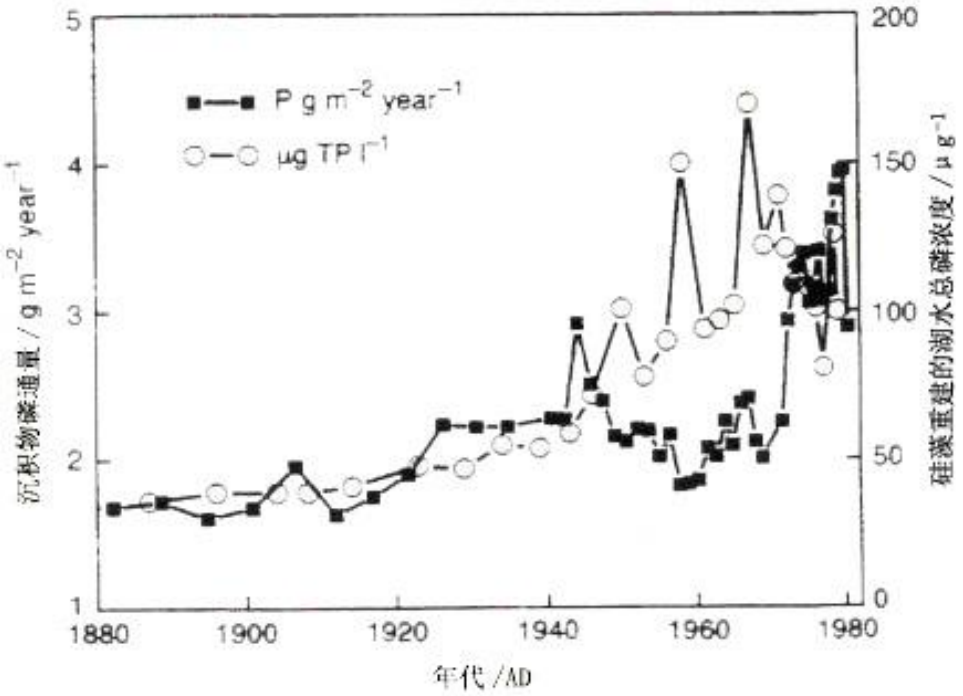

P g m-2 year-1
μg TP l-1
沉积物磷通量 / g m-2 year-1
硅藻重建的湖水总磷浓度 / μ g-1
1 2 3 4 5
0 50 100 150 200
1880 1900 1920 1940 1960 1980
年代 /AD

图 7.26

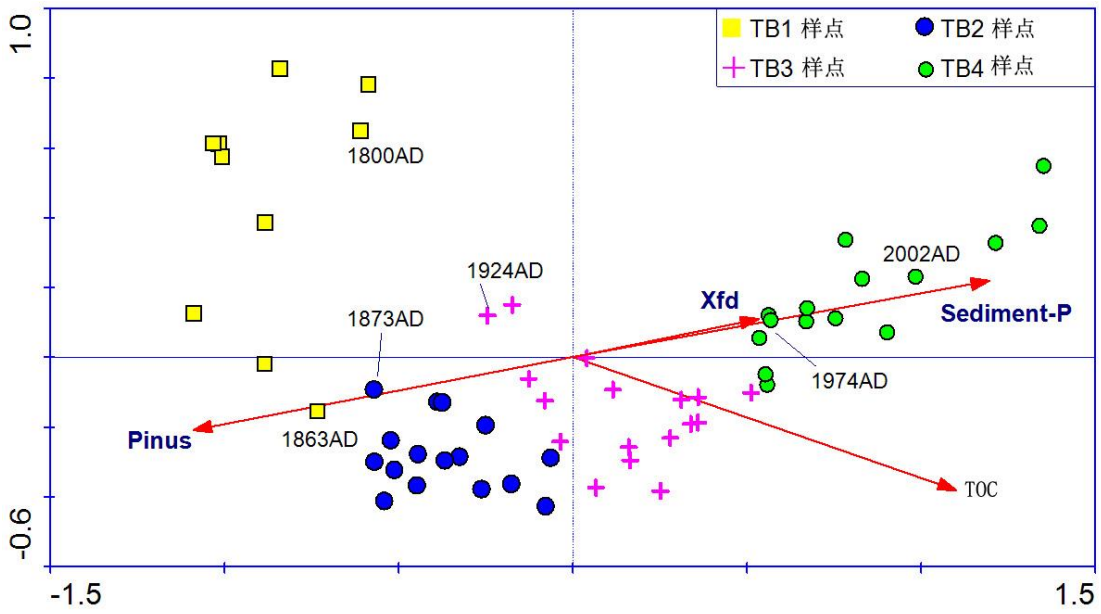

TB1 样点
TB2 样点
TB3 样点
TB4 样点
1.0
-0.6
-1.5
1.5
1800AD
1924AD
1873AD
2002AD
Xfd
Sediment-P
1974AD
Pinus
1863AD
TOC

图 7.27

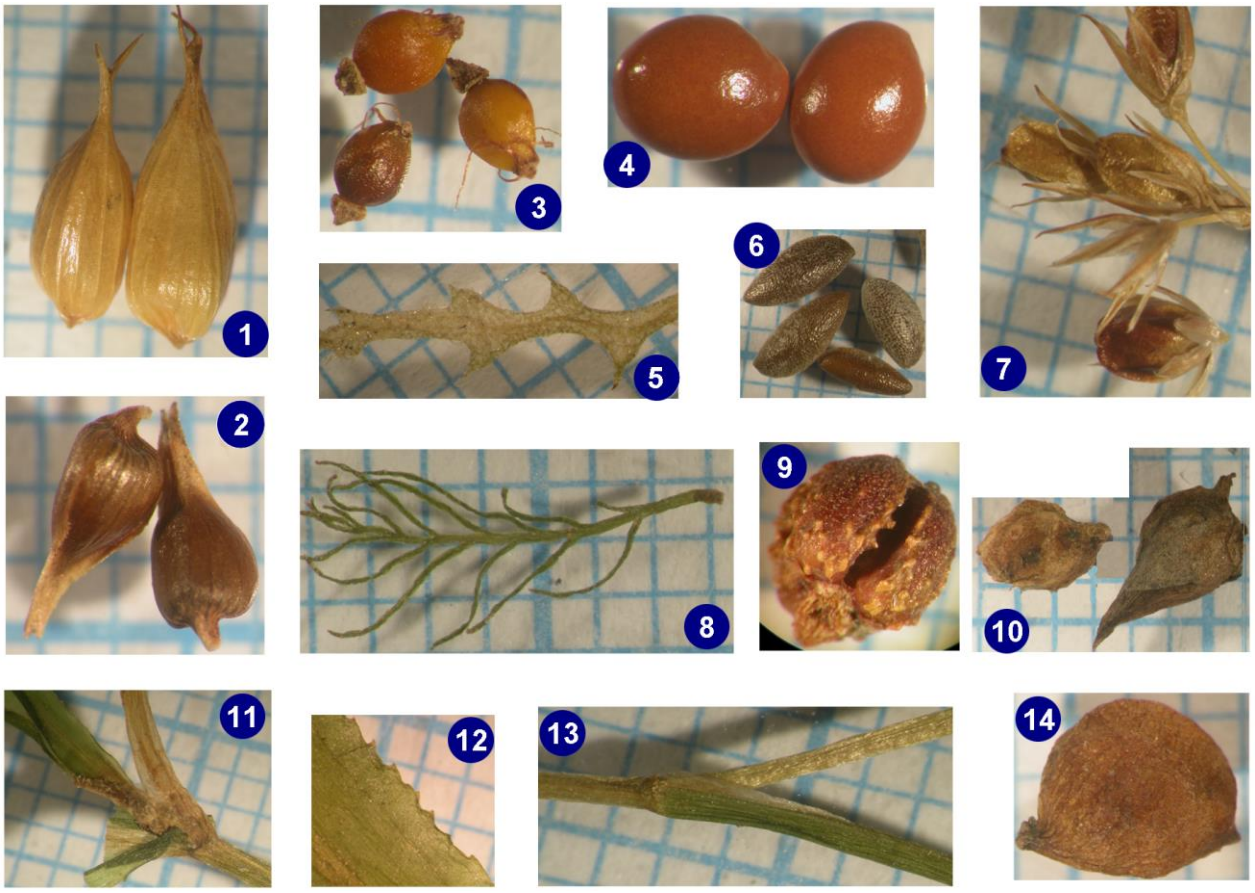

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14

图 7.28

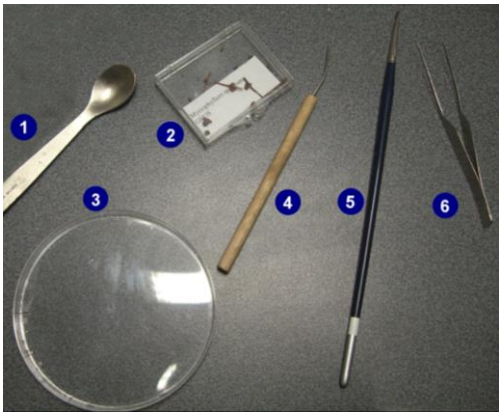


图 7.29

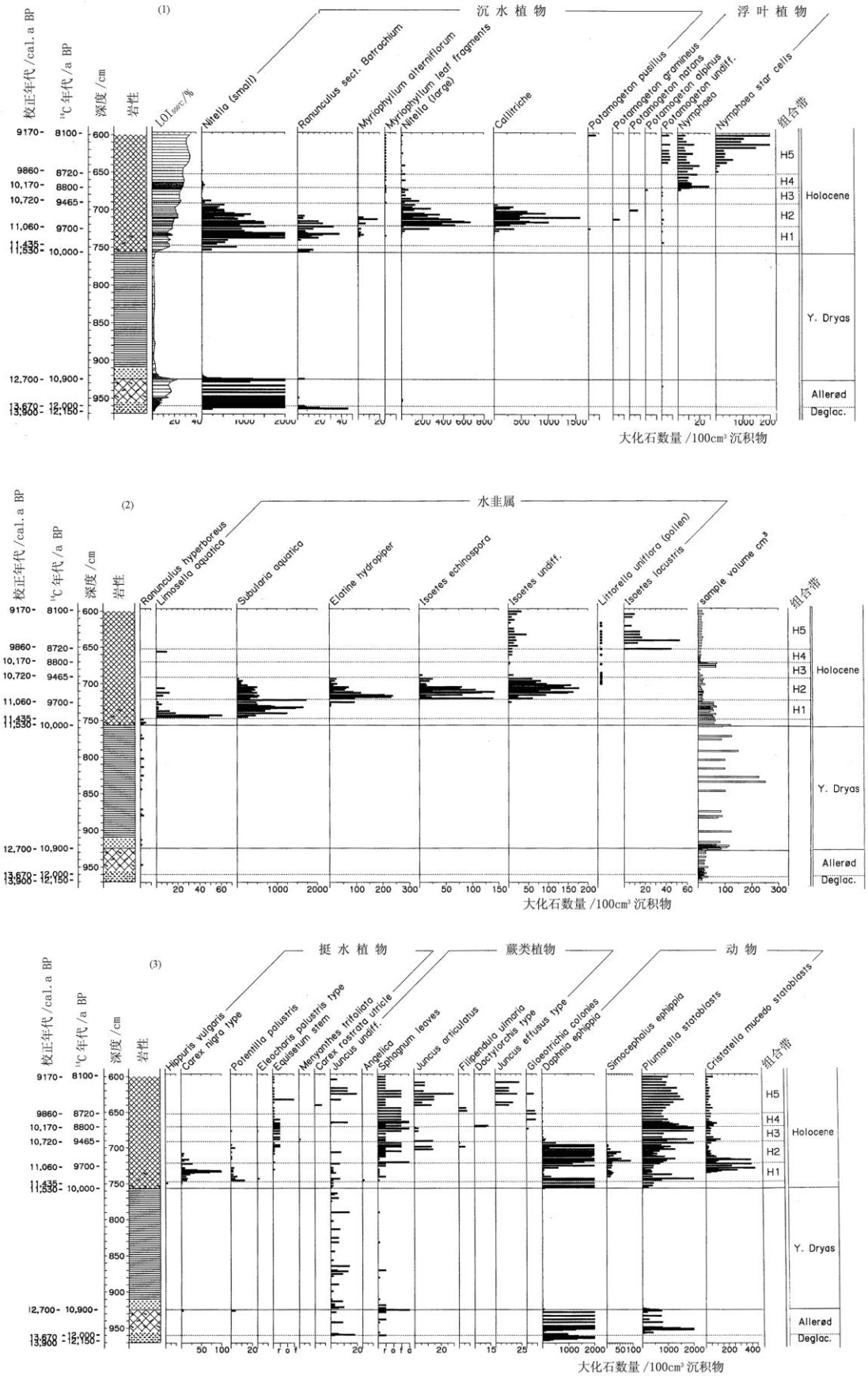

(1)
沉水植物
浮叶植物
校正年代/cal. a BP
^{14}C 年代/a BP
深度/cm
岩性
LOI550℃/%
Nitella (small)
Ranunculus sect. Batrachium
Myriophyllum alterniflorum
Myriophyllum leaf fragments
Nitella (large)
Callitriche
Potamogeton pusilus
Potamogeton gramineus
Potamogeton natans
Potamogeton alpinus
Potamogeton undiff.
Nymphaea
Nymphaea star cells
组合带
H5
H4
H3
H2
H1
Holocene
Y. Dryas
Allerød
Deglac.
大化石数量/100cm³ 沉积物
(2)
水韭属
Ranunculus hyperboreus
Limosella aquatica
Subularia aquatica
Elatine hydropiper
Isoetes echinospora
Isoetes undiff.
Littorella uniflora (pollen)
Isoetes lacustris
sample volume cm³
(3)
挺水植物
蕨类植物
动物
Hippuris vulgaris
Carex nigra type
Potentilla palustris
Eleocharis palustris type
Equisetum stem
Menyanthes trifoliata
Carex rostrata utricle
Juncus undiff.
Angelica
Sphagnum leaves
Juncus articulatus
Filipendula ulmaria
Dactylorchis type
Juncus effusus type
Gloeotrichia colonies
Daphnia ephippia
Simocephalus ephippia
Plumatella statoblasts
Cristatella mucedo statoblasts

图 7.30

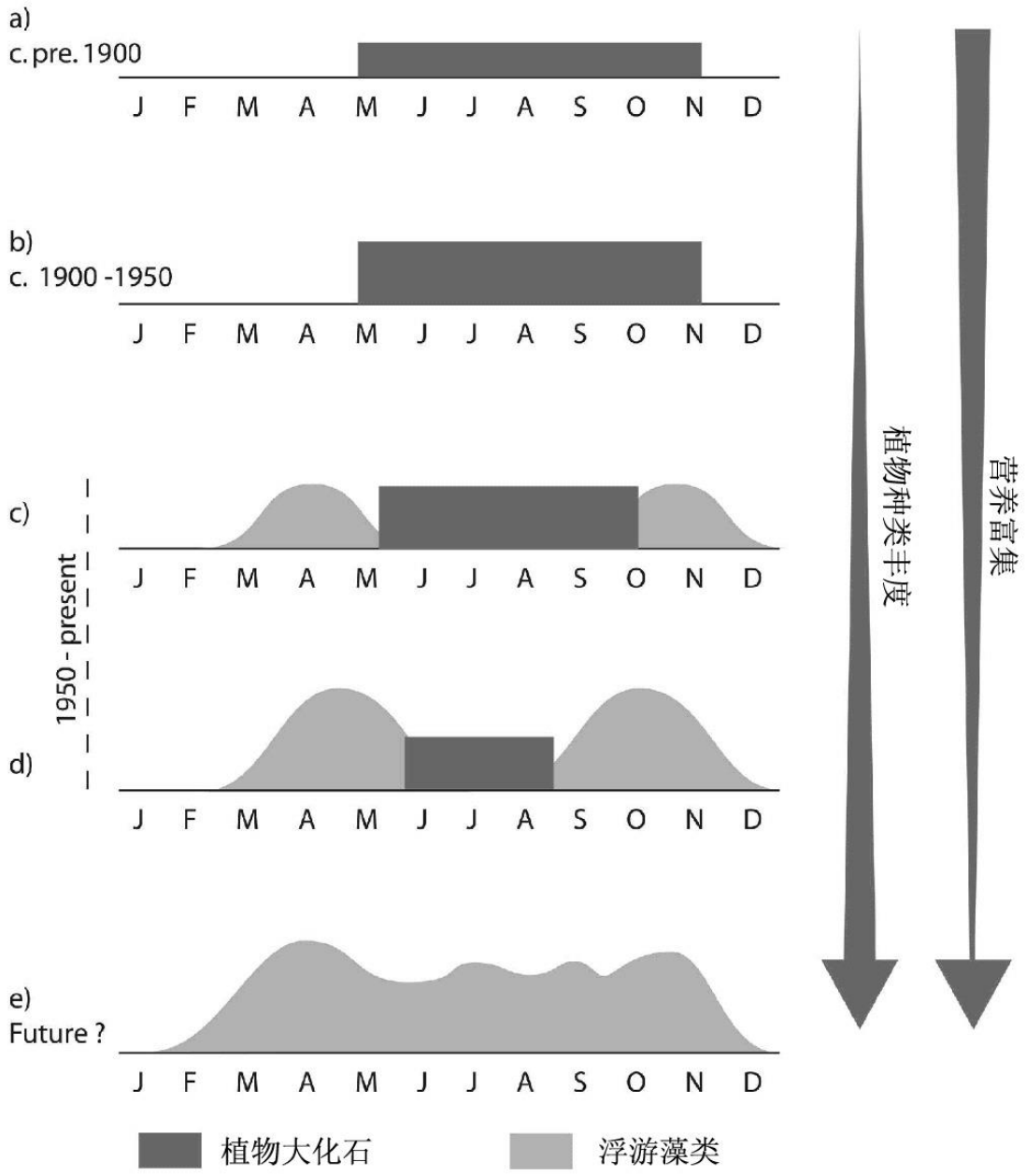

a)
c. pre. 1900
J F M A M J J A S O N D
b)
c. 1900 -1950
J F M A M J J A S O N D
c)
J F M A M J J A S O N D
1950 - present
d)
J F M A M J J A S O N D
e)
Future ?
J F M A M J J A S O N D
植物种类丰度
营养富集
植物大化石
浮游藻类

图 7.31

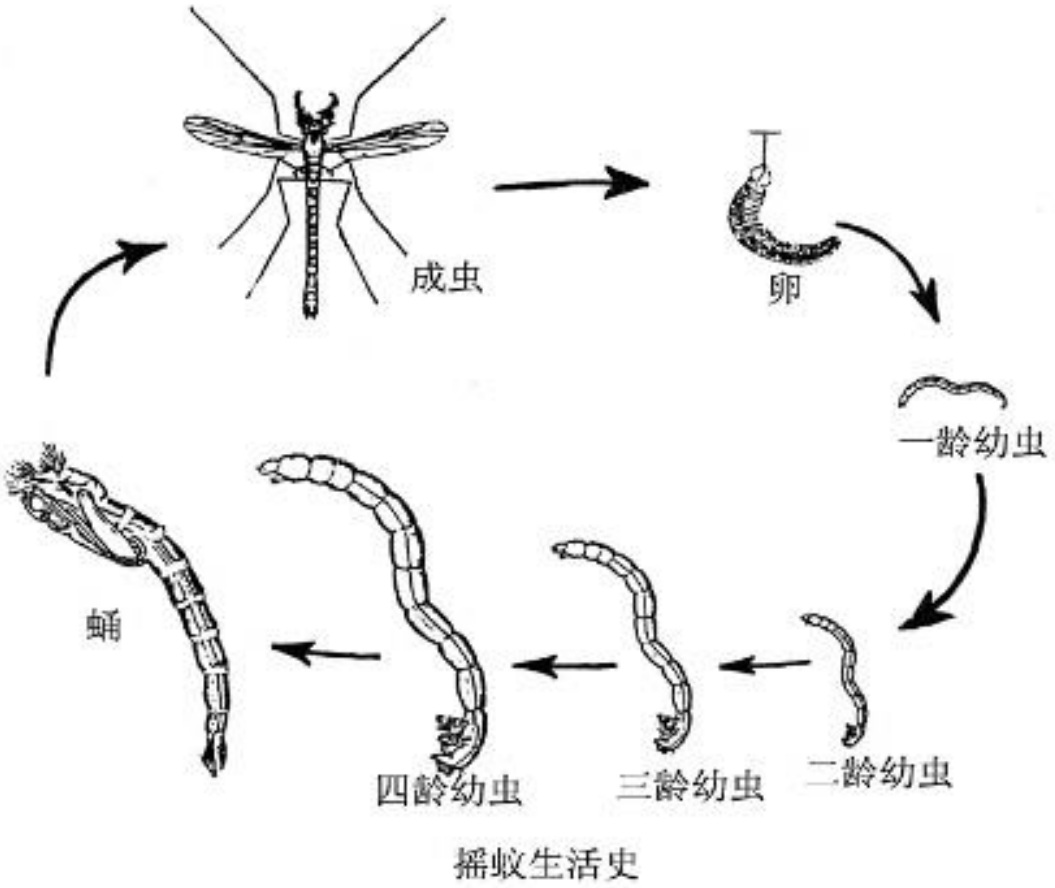


图 7.32

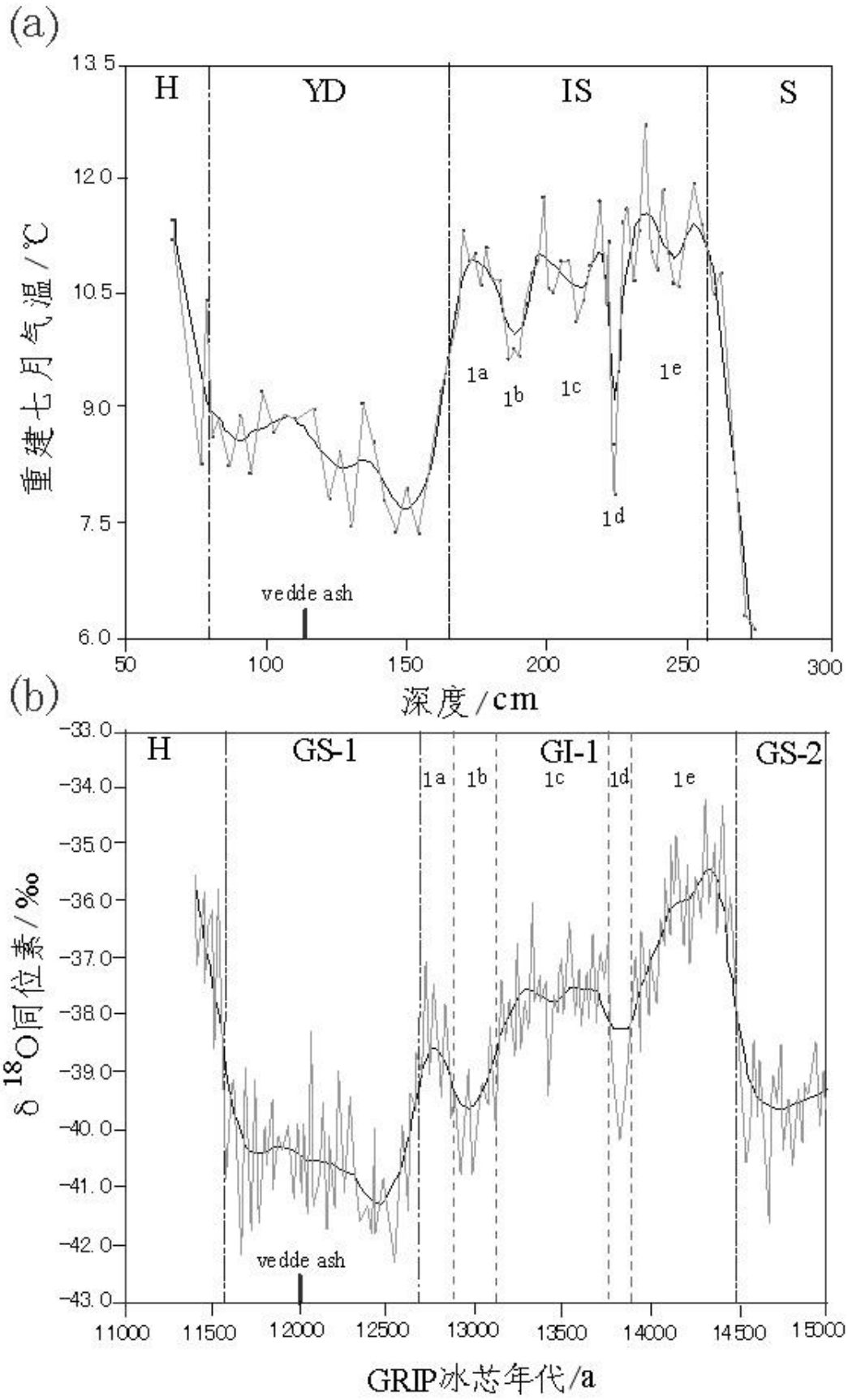

(a)
H
YD
IS
S
1a
1b
1c
1d
1e
vedde ash
重建七月气温/℃
深度/cm
(b)
H
GS-1
GI-1
GS-2
1a
1b
1c
1d
1e
vedde ash
δ18O同位素/‰
GRIP冰芯年代/a

图 7.33

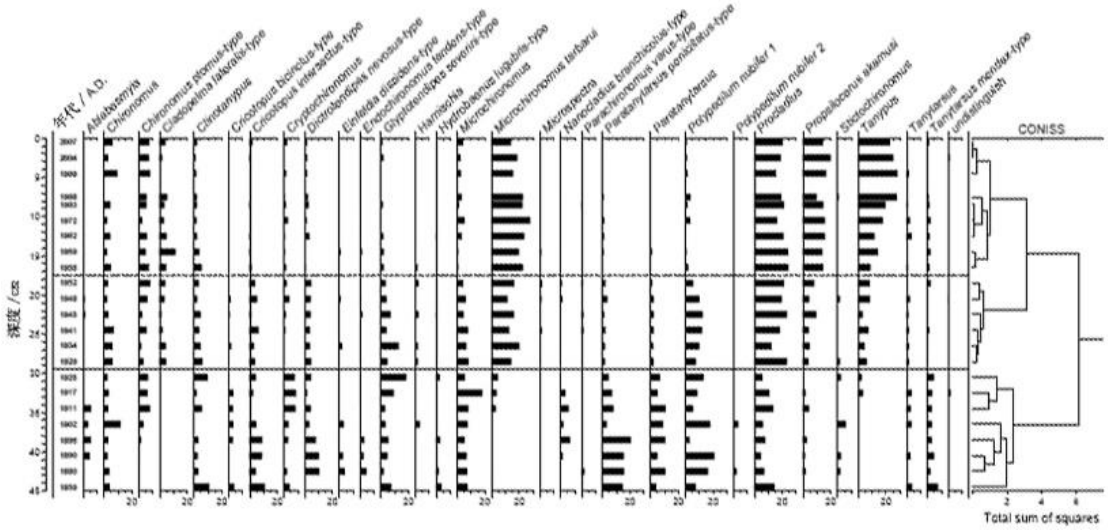

年代 / A.D.
深度 / cm
CONISS
Total sum of squares

图 7.34

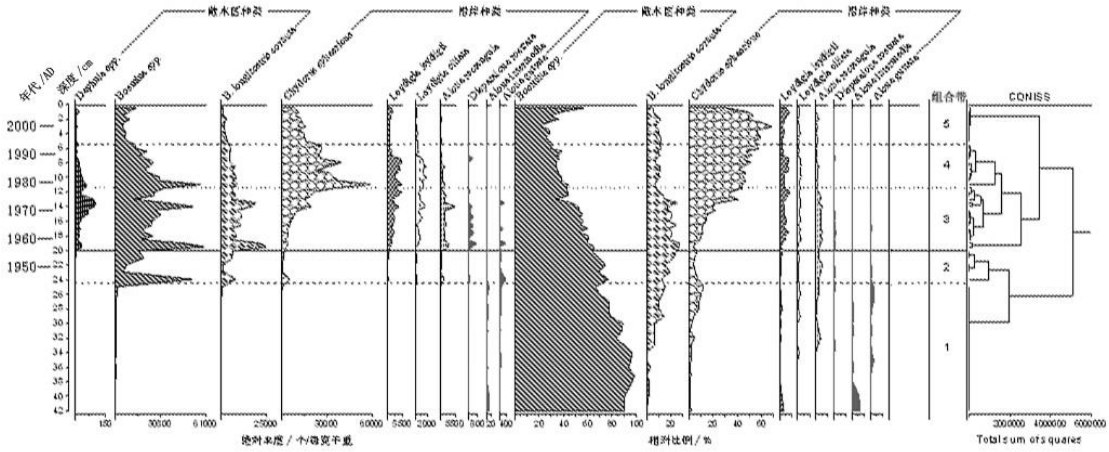
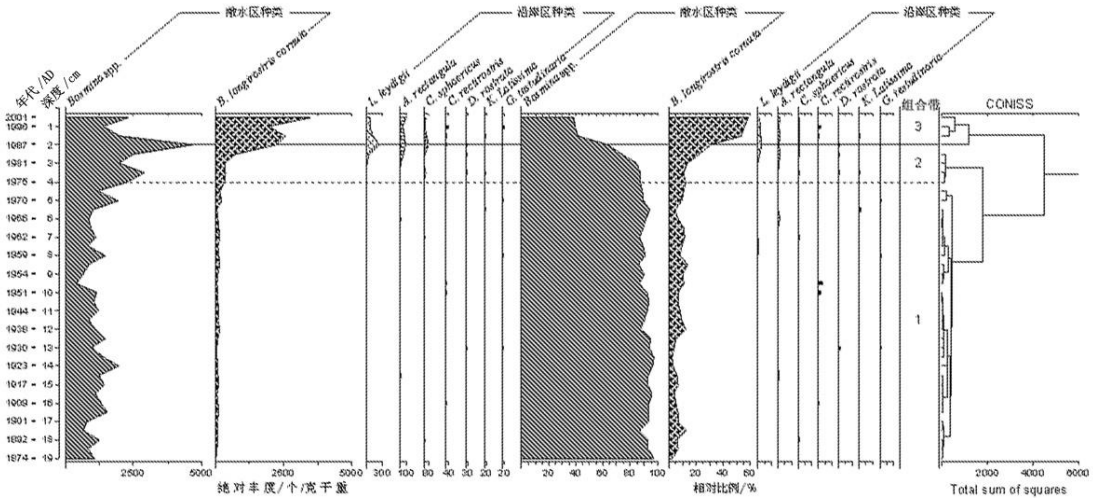

年代/AD
深度/cm
组合带
CONISS
Total sum of squares

图 7.35



敞水区种类
沿岸区种类
敞水区种类
沿岸区种类
年代/AD
深度/cm
Bosmina spp.
B. longirostris cornuta
L. leydigii
A. rectangula
C. sphaericus
C. rectirostris
D. rostrata
K. Latissima
G. testudinaria
Bosmina spp.
B. longirostris cornuta
L. leydigii
A. rectangula
C. sphaericus
C. rectirostris
D. rostrata
K. Latissima
G. testudinaria
组合带
CONISS
绝对丰度/个/克干重
相对比例/%
Total sum of squares

图 7.36

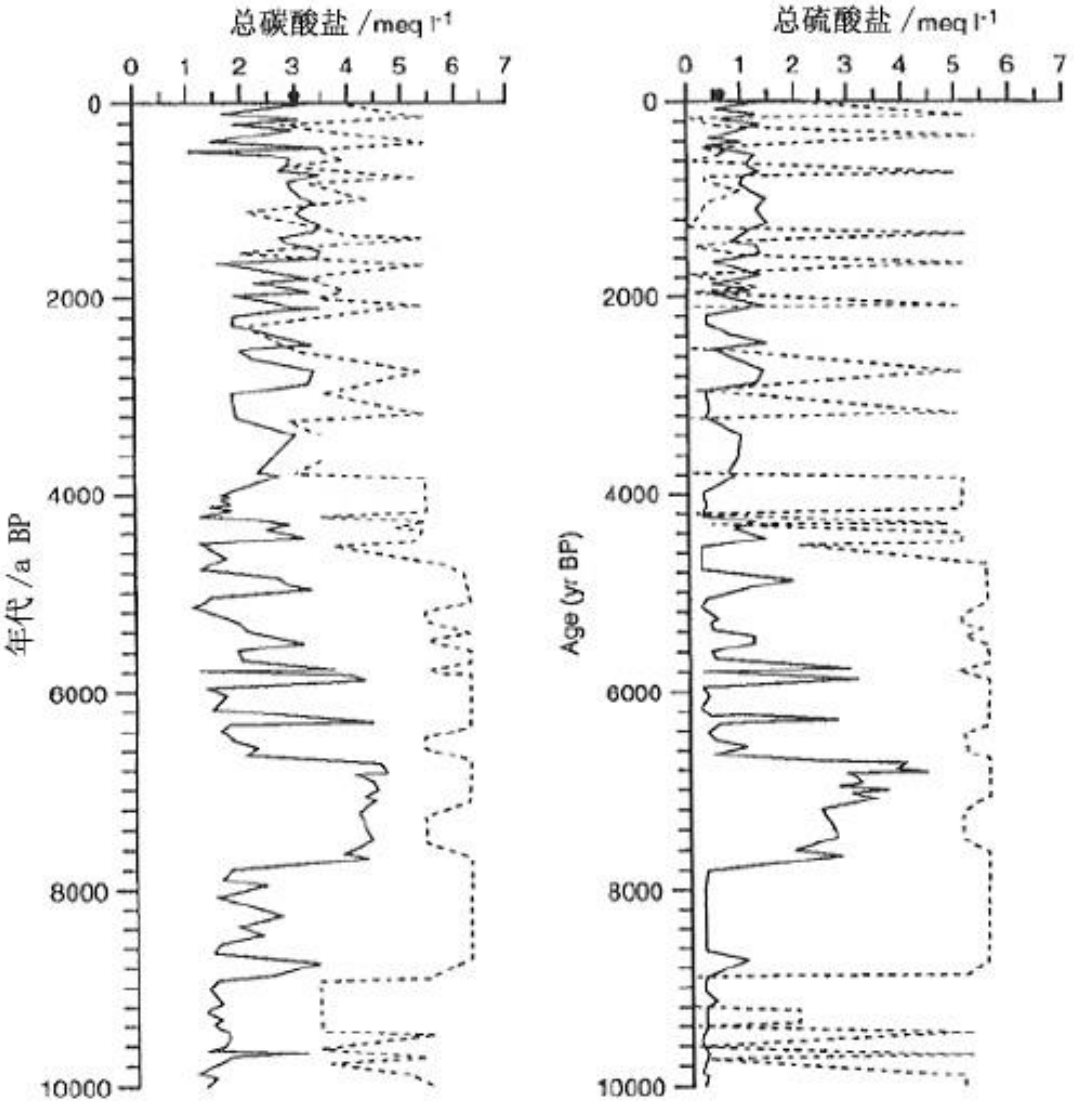

总碳酸盐 /meq l-1
0 1 2 3 4 5 6 7
0
2000
4000
6000
8000
10000
年代 /a BP
总硫酸盐 /meq l-1
0 1 2 3 4 5 6 7
0
2000
4000
6000
8000
10000
Age (yr BP)

图 7.37

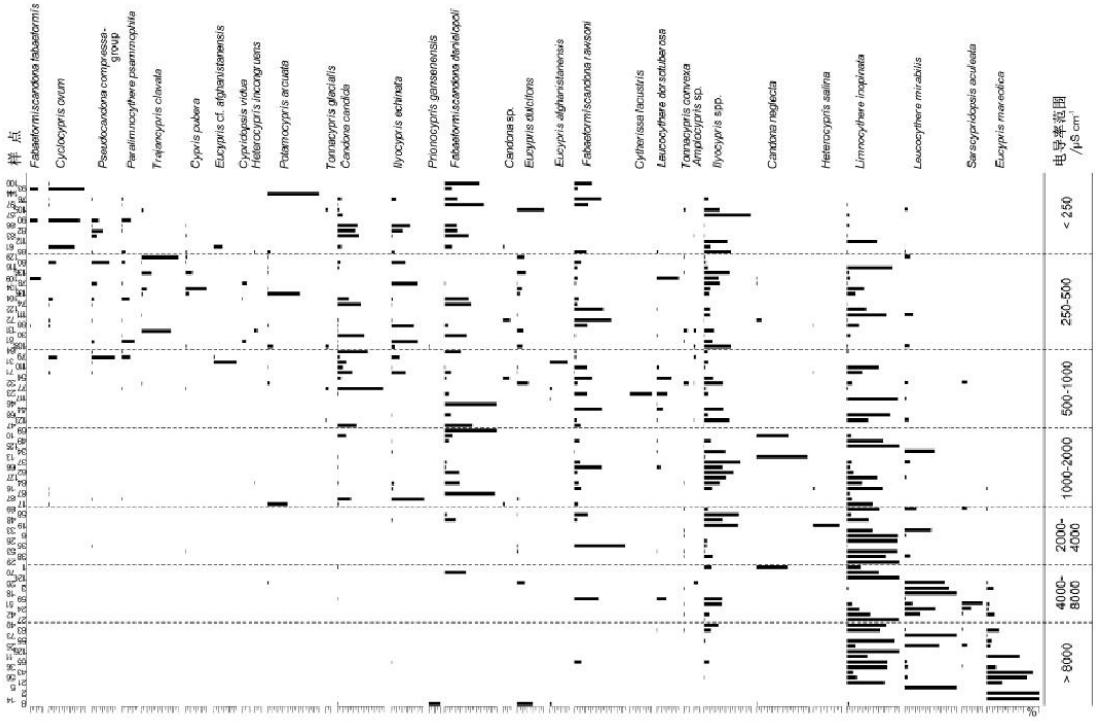

样 点
Fabaeformiscandona fabaeformis
Cyclocypris ovum
Pseudocandona compressa-group
Paralimnocythere psammophila
Trajanocypris clavata
Cypris pubera
Eucypris cf. afghanistanensis
Cypridopsis vidua
Heterocypris incongruens
Potamocypris arcuata
Tonnacypris glacialis
Candona candida
Ilyocypris echinata
Prionocypris ganseriensis
Fabaeformiscandona denticulopoli
Candona sp.
Eucypris dulciforis
Eucypris afghanistanensis
Fabaeformiscandona rawsoni
Cytherissa lacustris
Leucocythere dorsotuberosa
Tonnacypris convexa
Amplocypris sp.
Ilyocypris spp.
Candona neglecta
Heterocypris salina
Limnocythere inopinata
Leucocythere mirabilis
Sarscypridopsis aculeata
Eucypris mareotica
%
电导率范围 /μS cm-1
> 8000
4000-8000
2000-4000
1000-2000
500-1000
250-500
< 250

图 7.38