内蒙古岱海湖泊沉积记录的小冰期气候环境*

曹建廷 沈 吉 王苏民
(中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

提 要 通过对岱海深水区沉积柱样有机碳同位素、总有机碳,碳酸盐含量、频率磁化率等环境代用指标的分析,结合剖面的岩性特征和^{210}Pb定年,初步探讨了岱海小冰期以来气候环境演化过程,结果表明:在小冰期初期740－540aBP,以冷湿气候为主;在540－480aBP为寒冷干旱气候,可能为小冰期盛期;480－370aBP,气候转温和,以凉偏湿气候为主;370－220aBP,凉偏干气候为主;220－130aBP,为小冰期末次冷波动,以冷干气候为主;130aBP左右小冰期结束,其后进入现代有效降水略有增加的温偏湿气候.本文环境代用指标揭示的小冰期前期的冷偏湿气候与同期的黄河中下游地区冷偏干气候不同,同时其揭示的最后两次冷期与根据冰芯、树轮、历史文献重建的十年平均温度确定的1450's－1510's、1790's－1890's两次冷期极相吻合.

关键词 小冰期 沉积记录 岱海
分类号 P532 P343.3

小冰期(约1400－1900aAD)是中全新世以来一个百年尺度的全球性气候恶化事件,在此期间世界各地普遍出现了降温和冰进[1,2],引起全球环境,特别是生态敏感带环境的剧烈变化,其中一些环境变化严重影响了当时人们的生活.小冰期又是现代气候增暖现象最直接的背景事件,探讨生态敏感区小冰期气候环境变化,有助于认识生态系统对气候变化的响应,进一步理解现代气候环境的背景,为预测未来气候环境变化趋势提供科学依据.

湖泊沉积是湖泊流域气候、地质、生物等综合作用的产物[3].利用湖泊沉积,特别是内陆封闭湖泊沉积,恢复陆地古气候环境是过去全球变化研究的重要内容和手段之一[4].内蒙岱海地区地处东南季风区的边缘,生态结构脆弱,生态系统对气候变化响应敏感,是我国历史上典型的农牧交错地区[5,6].具有封闭湖盆的岱海记录了岱海地区气候环境的变化、生态系统对气候变化的响应.本文通过对岱海湖泊沉积多环境指标分析,探讨了小冰期以来的气候环境演化.

1 区域概况

岱海位于内蒙古自治区乌兰察布盟凉城县境内(40°29′－40°37′N,112°33′－112°46′E)(图1),湖泊面积133.4km^2,最大水深16.05m.

湖区现代气候为中温带半干旱气候,冬季长而寒冷,夏季短而温暖;降水主要集中在夏季,年降水量423.7mm.自形成以来,岱海的水位和面积波动较大.

1997年5月用活塞型采样器采得岱海表层沉积和短柱岩芯,其中短柱岩芯在岱海东北部水深约13m处深水区采得(图1),其长176cm,现场以2cm间隔切割岩芯,样品密封于塑料袋

* 国家自然科学基金(49702028)及中国科学院创新工程重大项目(KZCX1－Y－05)联合资助.
收稿日期:1999－8－10;收到修改稿日期:2000－02－25.曹建廷,男,1967年生,博士生.

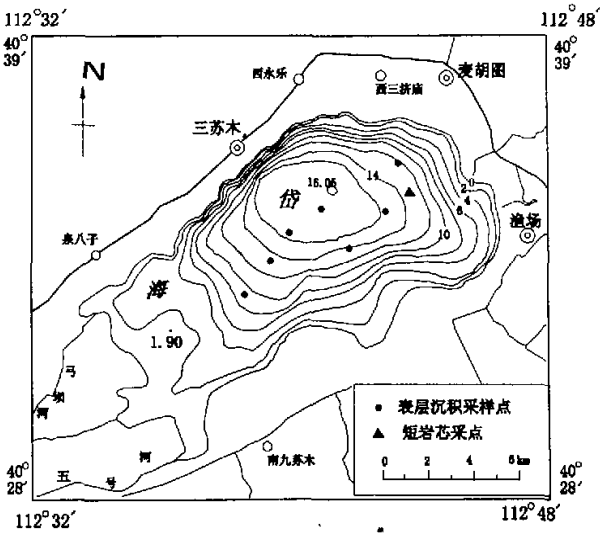


图1 岱海水深与采样位置(等深线单位为m)

Fig. 1 Bathymetric map of Daihai Lake and core sampling sites

后运回实验室进行环境指标分析.

2 实验方法

有机碳(TOC)的测试采用重铬酸钾容量法——外加热法分析[7].

有机碳同位素($\delta^{13}C_{org}$)的分析使用静态氧化法制备CO_2气体,在MAT－251型质谱仪上测定其$\delta^{13}C$值(PDB).本次研究共分析样品97个,其中DH孔88个,其它表层沉积物、现代挺水植物和沉水植物9个.

碳酸盐含量测定采用库仑法,测试前用筛分的方法排除螺壳碎屑的干扰.由CSC－1型碳酸盐含量自动分析仪测定,仪器最小检出限为1mg碳酸盐.

样品的磁化率采用英国Bartington公司产MS2型磁化率测量仪测定,测定其低频磁化率(χ_{LF})和高频磁化率(χ_{HF})后,并计算出频率磁化率(χ_{fd}).

本次研究分析和鉴定介形类化石样75个(DH剖面0－150cm),由中国科学院地理研究所完成.

沉积速率采用^{210}Pb方法测定.使用仪器为国产α谱仪及1024型多道分析器[8].

3 实验结果

经实验分析,DH孔沉积物的总有机碳、有机碳同位素、碳酸盐含量、频率磁化率和介形类化石含量如图2所示;岱海现代挺水植物、沉水植物和表层沉积物的有机碳同位素$\delta^{13}C$值如

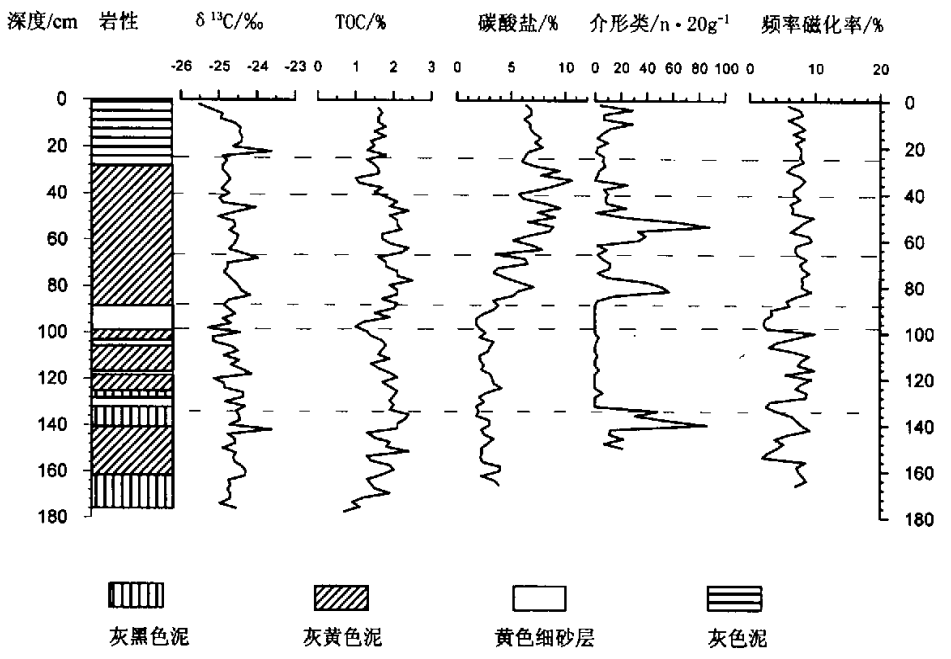


图 2　岱海沉积岩芯环境代用指标的垂直分布

Fig. 2　The vertical distribution of environmental proxies and lithological profile of the DH core

表 1 所示;^{210}Pb 测定结果如图 3,推算 12.5cm 以上的现代沉积速率为 1.8mm·a^{-1}.

表 1　内蒙古岱海现代植物与表层沉积有机碳同位素组成[1)]

Tab. 1　$\delta^{13}C_{org}$ content of surface sediments and contemporary hydrophytes in Daihai Lake

样品号	T	CH	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
$\delta^{13}C_{org}$(PDB,‰)	−28.3	−21.21	−25.40	−24.83	−25.67	−24.75	−24.66	−25.15	−26.00

1) T:挺水植物;CH:沉水植物;S1−S7:表层沉积.

4　岱海气候环境演化特征

理解湖泊沉积中代用指标的环境意义和确定较准确沉积年代,是利用湖泊沉积重建过去环境演变的两个关键环节.本文根据岱海 DH 剖面所分析环境指标的综合判识,初步探讨了本区小冰期以来的气候环境演化过程.

4.1　各代用指标的气候环境意义

4.1.1　总有机碳(TOC)　湖泊沉积物中的有机碳主要来源于外源的陆生植被和内源的湖泊水生植物.沉积物中的 C/N 比值一般可用于区别有机质来源[9].水生植物的 C/N 比值在 4−10 之间,而陆源的维管植物的 C/N 比值约为 14−23[10].岱海流域植被较稀疏,近代湖泊沉积

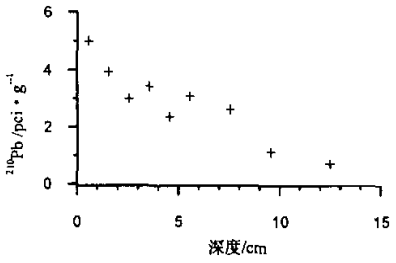


图3 岱海DH孔湖泊沉积物^{210}Pb强度与深度关系

Fig. 3 Relation between ^{210}Pb intensity and depth for DH core, Daihai Lake

的C/N比值小于10[15]，反映岱海有机质来源主要是湖泊水生物.当气候温暖湿润，湖泊水生生物发育，湖泊水位较高，有机质保存条件好，有机碳含量高，反之，冷干气候条件下有机碳含量较低.总有机碳含量还受保存条件的影响，因此有必要结合有机碳同位素的研究.

4.1.2 有机碳同位素($\delta^{13}C_{org}$) 有机碳同位素组成主要受有机质母质碳同位素组成的影响.对岱海现代环境中的水生植物及表层沉积物进行碳同位素研究表明(表1)，岱海挺水植物的$\delta^{13}C$值为$-28.3‰$，而沉水植物$\delta^{13}C$为$-21.2‰$，这可能是因为它们分别主要以大气CO_2和水溶CO_2为光合作用的来源，与大气中的CO_2相比水溶的CO_2的$\delta^{13}C$值偏重[11]，这同样也是造成藻类的$\delta^{13}C$偏重的原因.岱海表层沉积物有机质的$\delta^{13}C$值变化范围为$-24.75‰$至$-26.00‰$，湖湾浅水处的$\delta^{13}C$值相对偏负，可能与少部分的有机质来源于近岸的挺水植物有关，而湖中深水处的$\delta^{13}C$相对偏重.

在陆源有机质影响较小的条件下，岱海湖泊水生植物中的沉水植物和藻类($\delta^{13}C$值约为$-21.2‰$)与挺水植物($\delta^{13}C$值约$-28.3‰$)在沉积物中所占的比例大小将影响有机碳同位素组成:在高湖面环境，湖泊藻类与沉水植物发育，导致碳同位素偏重;而在低湖面环境，浅水区增加，挺水植物发育，因此碳同位素值偏负，如同现代湖湾的近岸区碳同位素偏负.

4.1.3 碳酸盐含量 湖泊沉积物中自生碳酸盐主要是湖泊中生物活动和(或)物理化学作用的结果，其含量的高低指示湖水的咸化和淡化，间接地反映气候的干湿变化，已成为古气候有效湿度判别的重要代用指标之一[12].

4.1.4 磁化率 湖泊沉积物磁化率的大小，取决于其中磁性矿物的种类、含量以及粒度特征.细粘滞性晶粒具有很高的χ_{fd}，χ_{fd}增高反映湖泊沉积物中细粘滞性晶粒成分相对磁性贡献增加，而细粘滞性晶粒往往指示了灼烧或成土作用的效应，一般情况下气温增高，成土作用增强，因此沉积物的磁化率间接指示了古气候环境的变化[13].

4.1.5 介形类化石 由于介形类对湖泊的水深与盐度等环境要素极为敏感，水体物化参数控制了介形类的种群和丰度，而湖面波动和水体参数等主要由气候环境变化引起，因此从对气候变化比较敏感的湖泊中发现的介形虫属种及其丰度，可为恢复湖区气候环境提供较详细参考资料[14].

4.2 岱海小冰期以来气候环境演化

岱海DH剖面的年代序列是根据图3计算的表层0—12.5cm的平均沉积速率1.8mm·a^{-1}推算而得.^{210}Pb强度随深度的指数递减规律较明显，说明由此得到的沉积速率是可靠的.考虑本文研究时段较短，而^{14}C测年(半衰期5570a)易受湖泊"硬水"的影响，利用^{14}C测年法来确定的近千年时间标尺，存在明显年龄偏大问题[15];加上采样点位于深水区，受陆源影响较稳定.因此尽管剖面下部存在沉积压实现象，平均沉积速率趋于减小，但与上部的平均沉积速率相差不大，应用上部沉积速率推算剖面134cm以上的沉积年代仍是比较可靠的.

在134cm以下，剖面颜色总体较深，以灰黑色泥和灰黄色泥为主，沉积物指示了深水环境。该段总有机碳为上升段，总体较高，$\delta^{13}C$值较高，最高达－23.76‰；该段内在166cm以上碳酸盐含量为低值段，且有微小下降趋势；χ_{fd}值呈明显的两峰一谷分布，指示气候波动剧烈；该面150cm以上介形类化石含量丰富，而且种类较多，有 *Limnocythere inopinata*, *L.* cf *inopinata*, *L. Sanctipatricci* 该介形类现代生态环境指示温水－次深水环境[5]. 综合所有指标可以看出，尽管该段有凉干气候的波动，总体仍为温偏湿的气候环境.

根据沉积速率推算，结合下部气候特征，134cm以上岩芯基本是小冰期以来的沉积产物. 综合各项指标及剖面的岩性特征，134cm以上剖面可分为六个阶段.

(1) 第一阶段 740－540aBP(134cm－98cm)：冷偏湿时期

总的看本段沉积物以弱氧化的灰黄色泥为主，其中134cm－128cm、118cm和104cm处为细砂层. 碳同位素总体由高变低，$\delta^{13}C$值为－24.15‰至－25.55‰，TOC曲线也由高变低，TOC含量2.4%－1.4%，有机碳低和偏负的同位素比值指示了偏冷的环境条件；碳酸盐含量较低，表明湖水矿化度较低，湖区有效降水仍偏多；χ_{fd}波动频繁，介形类化石锐减，大部分层值缺失可能反映湖泊环境温度急剧降低. 本段总体为冷偏湿气候，岩性的频繁变化、频率磁化率的急剧波动均表明该时段环境的不稳定，可能表明岱海地区开始进入小冰期.

(2) 第二阶段 540－480aBP(98cm－88cm)：冷干时期

本段为黄色细砂层，表明为低湖面事件的沉积. 该面$\delta^{13}C$、TOC、碳酸盐含量、χ_{fd}均为低值段，缺失介形类化石. TOC和$\delta^{13}C$明显低谷，一方面表明温度降低，湖泊生产力降低，另一方面湖面降低不利于有机质保存. χ_{fd}达到整段最低值2.2%，表明气温低，降水少，流域成土作用不发育. 碳酸盐含量虽为明显低谷区，这主要与砂性物质成分有关，不指示湖泊有效湿度的增高. 介形类化石缺失，可能表明湖水参数急剧变化，不能满足介形类的发育. 综合判识各环境指标，该段总体反映了湖区冷干的气候环境背景，这一细砂层可能是小冰期极盛期的产物.

(3) 第三阶段 480－370aBP(88cm－66cm)：气候凉偏湿时期

该段岩性以黄色粉砂质泥为主，碳同位素总体向正值方向移动，有机碳丰度逐渐增高，表明湖泊生产力的提高，沉水植物和藻类所占有机质比例增加，指示当时较好的温湿气候条件；介形类化石较丰富，表明比前一段较好的生存条件. 值得注意的是自本段开始，沉积物中的碳酸盐含量明显较高，可能反映从此段开始岱海的湖水有一定的盐度. 碳酸盐含量明显增高，有机碳含量高而稳定，表明当时的水生生物光合作用较强导致湖泊碳酸盐的大量沉淀，同时导致有机质丰度的增高. 后期$\delta^{13}C$值逐渐偏负，这可能与流域径流增加，外源有机质含量增加有关. 综合各环境指标，本段判识为凉偏湿气候.

(4) 第四阶段 370－220aBP(66cm－40cm)：凉偏干时期

该段岩性仍以灰黄色粉砂质泥为主，碳同位素总体由高值方向向低值方向波动，$\delta^{13}C$值为－24.03‰至－25.02‰；TOC丰度曲线也由高到低，其含量分布为2.4%－1.1%，反映较好的温度条件；碳酸盐含量为高值段，最高达9.07%，表明当时湖区有效降水减少，湖水矿化度进一步增高；介形类化石数量本段相对较高，可能表明湖水矿化度的增加有利于其发育. 综合偏正的$\delta^{13}C$、较高的TOC和碳酸盐含量，本段判识为凉偏干的气候环境.

(5) 第五阶段 220－130aBP(40cm－24cm)：冷偏干气候期

该段下部以黄灰色粉砂质粘土为主，上部以灰色粘土为主；$\delta^{13}C$值偏负，稳定在－24.8‰

左右，可能表明湖面萎缩，挺水植物占有机质来源比例增加；有机碳丰度低，为一明显低谷段，其含量在1.6%－1.0%之间，可能表明温度的降低导致了湖泊生产力下降；碳酸盐含量为高值段，达到最高值10.62%，平均高达7.8%，反映湖区偏干环境；频率磁化率总体偏低，其中有一较小的谷值5.7%；介形类化石数量逐渐减少. 结合偏负的$\delta^{13}C$较低的TOC、较高碳酸盐含量，降低的χ_{fd}，本段判识为冷干的气候环境. 由沉积物特征可以看出，与早期冷干气候相比，本段冷干的程度和持续时间都不及第三阶段，这可能相当于小冰期的最后一次冷波动.

(6) 第六阶段130aBP以来(24cm以上)：为温偏湿气候期

该段岩性为灰色粘土，颜色明显比下部加深，部分层位具有明暗相间的条纹；$\delta^{13}C$值下部较高，向上有明显降低的趋势，结合历史记录，考虑到本世纪初岱海水面积超出200km^2，1929年缩小至50km^2，50年代增至约200km^2，近年来湖水面逐渐降低，因此该段下部的$\delta^{13}C$偏重可能对应前半世纪的高湖面，藻类与沉水植物占有机质来源比例增多. 而自本世纪50年代以来湖水位逐渐下降与该段上部的$\delta^{13}C$偏负的演化相对应；TOC丰度向上逐步增高和介形类丰度有所增加，表明温度条件有所改善；碳酸含量开始趋于降低，但含量仍较高，平均为6.84%，表明湖区有效降水有所增加，但增加幅度不大. 综合各指标显示盐度有所降低，温度有所回升，有效降水略有增加的温偏湿气候环境.

5 结论与讨论

综合岱海湖泊沉积多环境指标重建的气候环境演化过程与历史文献记录基本一致. 岱海湖泊深水处DH短柱岩有效地记录了近千年来本区气候大致经历了温湿－冷湿－冷干－凉湿－凉干－冷干－凉湿的气候演化阶段，期间又有次一级的干湿与暖冷不同组合的波动. 根据《内蒙古历代自然灾害史料》，《内蒙古及邻近地区气象灾害旱涝丰歉年表》和《察右前旗自然灾害史料》等文献记载，岱海地区辽宋为温偏湿期(1000－700aBP)，元代凉湿期(700－600aBP)[6]，这分别与本文DH孔记录134cm以下和以上的第一段基本一致. 据上述文献记载18世纪后半叶到19世纪末，夏秋季出现的霜雪灾害频率很高，降尘增多，多旱灾，这与第五段冷偏干气候相对应. 比较巧合的是本文根据代用指标确定的740aBP左右为小冰期的开始，与张丕远等根据我国大量文献记录气候资料统计分析1230AD前后气候突变，其后气候较为稳定的寒冷阶段基本对应[16].

区域性气候变化是在全球变化气候背景下发生的，因此岱海DH孔揭示的区域性气候变化必然受全球气候变化的影响. 岱海地区小冰期气候第二段反映的岱海地区小冰期盛期和第五段小冰期末次波动分别与王绍武等利用史料、冰芯和树木年轮重建10年平均气温序列分析得出的我国范围近千年的五次冷期中的二次冷期1450's－1510's、1790's－1890's极相一致[17]，这说明岱海地区小冰期气温变化与全国其它地区具有同步性.

值得注意的是本文研究表明，在小冰期的前期岱海地区以冷偏湿气候为主，表明当时降水不仅仅受夏季风控制，有可能受中高纬西风带扰动，更多气旋活动降水影响，这反映在由温湿气候向冷干气候的急剧变化过程中大气环流的复杂性. 在小冰期中后期本区主要为冷干、凉湿、凉干与冷干气候，这与中国黄河中下游地区历史文献记录偏冷偏干的气候相一致[18]，参考现代气温资料与西伯利亚高压强度指数关系，当时气候变化可能主要受西伯利亚高压强度变化影响[19]，而在这一时期我国西北新疆地区，从东天山的树木年轮分析，尽管呈现一系列干湿

波动，但降水总体偏多[20,21]，表明其主要受高纬西风带扰动影响. 根据以上分析，推断本区在小冰期初期受东南季风、西风带扰动及西伯利亚高压的交互影响；中后期主要受西伯利亚高压影响，而东南季风、西风带扰动影响减弱.

19 世纪末小冰期气候的结束，使中国北方进入一个相对温暖阶段，岱海近百年来气候向温湿化变化便是以这个相对温暖阶段为背景的. 近 130aBP 以来气候环境指标反映的近代气候有效降水有所增加也与整个高纬度地区降水增加相一致[22]，但这与最近几十年来的湖泊水面持续萎缩相矛盾. 这一方面可能因为随温度增高，蒸发作用增强，有效降水减少；另一方面与近几十年来随着地方经济的发展人类活动大大加强，使岱海入湖水量大量减少有关.

参 考 文 献

1 Grove J M. The Little Ice Age. London: Methuen, 1988

2 Porter S C. Pattern and forcing of Northern Hemisphere glacier variation during the last millennium. *Quat Res*, 1986, **26**: 27－48

3 Birks H J, Birks Hilary H. Quaternary Palaeoecology. London: Arnold, 1980. 85－87

4 王苏民，李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段. 科学通报，1991，**36**：54－56

5 王苏民，余源盛，吴瑞金等. 岱海——湖泊环境与气候变化. 合肥：中国科技大学出版社，1990. 151－153

6 刘清泗，李华章. 中国北方农牧交错带全新世环境演变. 见：周廷儒，张兰生等著. 中国北方农牧交错带全新世环境演变及预测. 北京：地质出版社，1992. 38－40

7 于天仁，王振权. 土壤分析化学. 北京：科学出版社，1980. 15－17

8 韩晓钟，左之正，朱海虹. 鄱阳湖现代沉积物的测定分析－^{210}铅方法的应用. 河海大学学报（增刊），1987，**2**：220－225

9 Jasper, J P, Hayer J M. A carbon isotope record of CO_2 levels during the late Quaternary. *Nature*, 1990, **347**: 462－464

10 中国科学院兰州地质研究所等. 青海湖考察报告. 北京：科学出版社，1979

11 Deuser W G, Degens E T. Carbon isotope fractionation in the system CO_2(gas)～CO_2(aqueous)～HCO_3^-(aqueous). *Nature*, 1967. **215**: 1033－1035

12 王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化. 海洋与湖沼，1993，**24**(1)：31－35

13 俞立中，许　羽，许世远. 湖泊沉积物的磁性研究与环境应用. 见：金德生主编. 地质实验与模拟. 北京：地震出版社，1995. 305－314

14 汪品先，陈嘉树，刘传联等编译. 古湖泊学译文集. 北京：海洋出版社，1991. 180－198

15 任国玉. 内蒙古湖相沉积^{14}C 年代测定中"硬水"影响的发现. 湖泊科学，1998，**10**(3)：80－82

16 郑景云，葛全胜，张丕远. 气候突变：史实与意义. 地球科学进展，1999，**14**(2)：178－181

17 王绍武，叶瑾琳，龚道溢. 中国小冰期的气候. 第四纪研究，1998，(1)：54－62

18 叶笃正主编. 中国的全球变化预研究. 北京：气象出版社，1992. 35－37

19 王绍武，叶瑾琳，龚道溢. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究. 地理学报，1999，**54**(2)：125－131

20 中国科学院冰川冻土沙漠研究所冰川室. 我国西部高山冰川波动变化和气候变迁的有关关系. 见：气候变迁和超长期预报文集. 北京：科学出版社，1977. 18－22

21 温　刚，严中伟，叶笃正. 全球环境变化. 长沙：湖南科学技术出版社，1997. 132－134

22 秦伯强. 近百年来亚洲中部内陆湖泊演变及其原因分析. 湖泊科学，1999，**11**(1)：11－18

A Preliminary Study of Climate Change During the Little Ice Age Inferred from Lacustrine Sediments in Daihai Lake, Inner Mongolia

CAO Jianting SHEN Ji WANG Suming

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract

Located in the marginal belt of the southeast monsoon, Daihai Lake has always been one of the most significant areas in the paleoclimate studies. After synthesizing the environmental multi-proxies, such as TOC, $\delta^{13}C_{org}$, carbonate contents, frequency dependent susceptibility and ostracode fossils of sediment core in Daihai Lake, and combining the lithological characteristics of the sedimentary core with ^{210}Pb dating, the paleoclimatic evolution of this region since the beginning of the Little Ice Age(LIA) has been preliminarily reconstructed. Six stages of climate change, with fluctuation on temperature and precipitation, are divided as following:

(1) In the early stage of the Little Ice Age(740—540aBP), cold and wet climate.

(2) In 540—480aBP, cold and arid climate.

(3) In 480—370aBP, cool and wet climate.

(4) In 370—220aBP, cool and arid climate.

(5) In 220—130aBP, cold and arid climate.

(6) From 130aBP to present, warm and wet climate.

The comparisons between climate characteristics in this region and that of other regions in China have also been carried out elementarily. Different from the cold arid climate in the middle and lower reaches of the Huanghe River during LIA, the LIA climate in Daihai Lake was cold and humid, similar to the coresponding climate in the northwestern China. The situation of precipitation during the LIA may suggest that this region belonged to transitional type between the northwest area of China and middle and lower reaches of the Huanghe River in climate change. Furthermore, the last two cold periods recorded by the lacustrine sediments in Daihai Lake (DH core) are in good agreement with two cold periods, namely 1450's—1510's and 1790's—1890's, which was inferred from ten-year-average temperature by tree rings, ice core and historical literature.

Key Words Little Ice Age, sedimentary records, Daihai Lake