

云贵高原湖泊夏季浮游植物组成及多样性^{*}

张 民¹,于 洋¹,钱善勤^{1,2},李大命^{1,2},孔繁翔^{1**}

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,南京 210008)

(2:中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:浮游植物是水生生态系统中重要的初级生产者,对维持水生态系统的平衡起着十分重要的作用。根据2008年云贵高原湖泊丰水期浮游植物调查数据,系统地分析了云贵高原13个湖泊中浮游植物的种群密度、生物量、组成及其多样性。云贵高原13个湖泊中共鉴定出浮游植物7门109种(绿藻52种、蓝藻23种、硅藻20种、其他14种)。13个湖泊浮游植物Shannon-Wiener指数在0.5~2.2之间,其值大小与单个环境因子无显著相关。相关分析发现浮游植物总量与总氮、总磷、COD_{Mn}、硝态氮含量显著正相关,物种丰富度与总氮、总磷(0.1mg/L范围内)、COD_{Mn}含量亦显著正相关。另外,研究也发现各湖泊间浮游植物组成的相似性与各湖泊间营养状态差异显著负相关。由此可见,湖泊的营养状态不仅影响浮游植物的总量、组成以及物种丰富度,而且也影响各湖泊物种组成的相似性。

关键词:云贵高原;浮游植物;生物多样性;湖泊

Phytoplankton community structure and biodiversity in summer Yunnan-Guizhou Plateau lakes

ZHANG Min¹, YU Yang¹, QIAN Shanqin^{1,2}, LI Daming^{1,2} & KONG Fanxiang¹

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: Phytoplankton is very important to keep the balance of aquatic ecosystems as one of primary producers. In the present study, phytoplankton in 13 lakes of Yunnan-Guizhou Plateau were investigated during the summer June – August of 2008, and phytoplankton abundance, biomass, community structure and biodiversity were analyzed. A total of 109 taxa (52 green algae, 23 cyanobacteria, 20 diatoms, 14 others) were found in the lakes. Shannon-Wiener indexes of phytoplankton in the 13 lakes were ranged from 0.5 to 2.2, which were not significant correlations with any single factor. Furthermore, phytoplankton abundance and biomass were obviously correlated with TN, TP, COD_{Mn} and NO₃-N, and species richness was remarkably correlated with TP (< 0.1mg/L), TN and COD_{Mn}. In addition, there was significantly negative correlation between Soreson similarity of community structure and variation of trophic states in the 13 lakes. Our results indicated that trophic states of lake can influence phytoplankton abundance, biomass, species richness and Soreson similarity of community structure.

Keywords: Yunnan-Guizhou Plateau; phytoplankton; biodiversity; lakes

浮游植物是水生生态系统的主要部分之一,它与水生高等植物共同组成湖泊中的初级生产者,特别是在缺少水生高等植物的一些湖泊中,成为唯一的初级生产者。浮游植物个体微小,种类繁多,作为物质代谢和能量循环的初级生产者,对维持水生态系统的平衡起着十分重要的作用,其生物量的多寡也直接左右着水体生态系统中其它水生生物的正常代谢。它们的种类和数量变动与一些环境因素的变化有密切关系,而且与水体营养状况密切相关,因此,浮游植物也被广泛应用于水质的生物学评价上^[1]。

* 科技部基础性工作专项“中国湖泊水质、水量和生物资源调查项目”(2006FY110600)资助。2010-06-21 收稿;
2010-09-06 收修改稿。张民,男,1978年生,博士,助理研究员;E-mail:mzhang@niglas.ac.cn。

** 通讯作者;E-mail:fxkong@niglas.ac.cn。

云贵高原为我国淡水湖泊分布较多的地区之一,区内多构造湖,也有像异龙湖、威宁草海等溶蚀湖。区内的湖泊主要集中在滇中和滇西北地区,除抚仙湖、泸沽湖、阳宗海及程海等湖泊为湖盆坡度较大、湖岸线平直的深水湖外,其他各湖均系湖盆平缓、岸线弯曲,水深在15m以内的浅水湖泊^[2]。

云贵高原湖泊具灌溉、供水、航运、养殖、发电等多种功能,滇池、抚仙湖、泸沽湖和洱海等湖泊还是我国著名的风光旅游胜地。但由于该区域湖泊入湖支流水系较多,而出湖水系普遍较少,故湖泊换水周期长,生态系统较脆弱。

云贵高原湖泊水体营养状况多样,既有贫营养型湖泊,又有富营养型湖泊,其不同类型湖泊浮游植物差异显著,一般富营养化湖泊藻类种类和数量都多于贫营养湖泊。近年来由于湖泊富营养化的加剧,各湖泊中浮游植物的优势种发生了明显的演替,许多湖泊中蓝藻逐步占据了优势地位并形成水华,如滇池由1977年的颗粒直链藻、水华束丝藻为优势种转变为现在的铜绿微囊藻为优势种^[2],而且每年都会暴发大面积的蓝藻水华,另外星云湖、杞麓湖等湖泊每年也不同程度的暴发蓝藻水华。这种浮游植物优势种类的演替对于湖泊生态系统功能必然产生影响,而全面认识云贵高原湖泊浮游植物的组成、分布及其多样性是认识湖泊生态系统功能的基础。

本研究于2008年夏季对云贵高原13个湖泊的浮游植物进行调查,系统地分析云贵高原湖泊浮游植物的组成、分布及其多样性,以期为认识云贵高原湖泊生态系统结构和功能等提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 调查湖泊概况

本次调查所选择的是面积大于10km²的湖泊,共计13个,其中云南11个,包括滇池、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、阳宗海、异龙湖、大屯海、长桥海、洱海、程海和泸沽湖,以及贵州草海和四川邛海。各湖泊详细信息见表1^[2]。

表1 云贵高原湖泊参数
Tab. 1 General description of the lakes

湖泊	经纬度	水位 (m)	面积 (km ²)	最大水 深(m)	平均水 深(m)	蓄水量 (×10 ⁸ m ³)
滇池(DC)	24°40'–25°02'N; 102°36'–102°47'E	1886	297.9	5.87	2.93	11.69
洱海(EH)	25°36'–25°58'N; 100°06'–100°18'E	1974	249	20.7	10.17	25.31
抚仙湖(FX)	24°21'–24°38'N; 102°49'–102°57'E	1721	211	155	89.6	189
程海(CHH)	26°27'–26°38'N; 100°38'–100°41'E	1503	77.2	35.1	25.7	19.87
泸沽湖(LG)	27°41'–27°45'N; 100°45'–100°50'E	2690.8	48.5	93.5	40.3	19.53
异龙湖(YL)	23°38'–23°42'N; 102°30'–102°38'E	1412	38	6.2	2.4	1.05
杞麓湖(QL)	24°08'–24°13'N; 102°43'–102°49'E	1797	36.9	6.8	4.03	1.49
星云湖(XY)	24°17'–24°23'N; 102°45'–102°48'E	1722	34.7	11	5.3	1.84
阳宗海(YZ)	24°51'–24°58'N; 102°58'–103°01'E	1771	31.7	30	19.5	6.17
大屯海(DT)	23°23'–23°27'N; 103°17'–103°20'E	1286	12.3	5	3.7	0.45
长桥海(CQ)	23°24'–23°27'N; 103°20'–103°24'E	1284	10.7	5.5	3.7	0.4
邛海(QH)	27°47'–27°52'N; 102°16'–102°21'E	1509	31	34	10.32	3.2
草海(CH)	26°49'–26°53'N; 104°12'–104°18'E	2172	25	5	2.4	0.6

1.2 样点设置

本次调查采样点根据所调查湖泊面积、湖泊形态、湖泊污染状况以及湖泊进出水情况设定。对于深水湖泊抚仙湖、泸沽湖、阳宗海及程海,采集表层、5m、10m、20m的混合样,其他浅水湖泊采集表底混合样。根据以上原则,滇池采集7份样品、抚仙湖采集5份样品、星云湖采集4份样品、杞麓湖采集3份样品、阳宗海采集3份样品、异龙湖采集3份样品、大屯海采集3份样品、长桥海采集3份样品、洱海采集7份样品、泸沽湖采集4份样品、程海采集3份样品、邛海采集3份样品、草海采集3份样品,共计51份样品。

1.3 水样的采集和鉴定

本次调查于2008年6—8月进行,每个样点采集水样600ml,利用鲁哥氏液现场固定,水样静置24h后吸去上清液,最后根据藻细胞数浓缩至10—30ml,分析时取均匀样品0.1ml,在光学显微镜下鉴定计数^[3],每个样品计数两片取其平均值。生物量则根据藻类的平均体积与密度乘积计算,其中藻类平均体积根据目微尺实测藻体大小,根据藻类的形状,使用相应的体积公式计算,藻类密度按1计算^[4]。

采样时,利用多参数水质自动监测仪(YSI 6600V2,美国)现场测定水温(T)、电导率(Cond)、pH、溶解氧(DO)等水质参数,同时利用透明度盘测定透明度。另外采集水样于实验室分析总氮(TN)、总磷(TP)和COD_{Mn},分别采用国家标准方法测定(GB/T 11894—1989,GB/T 11893—1989和GB/T 11892—1989),溶解性氮磷利用连续流动分析仪(SKALAR San ++,荷兰)测定,叶绿素a含量利用丙酮萃取的方法测定^[5]。

1.4 数据处理

本文利用SPSS 16.0 for Windows软件进行相关分析。通过Canoco 4.5软件的冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)计算浮游植物组成与物种组成和环境因子的相关性,RDA分析中环境因子和种群组成数据均经过log(x+1)转换^[6],通过软件中的预筛选功能(forward selection)对群落组成影响显著的环境因子进行筛选,采用499次非限制性Monte Carlo permutations对计算结果的显著性进行验证,排序结果用种类、样品和环境因子关系的三序图表示。富营养化指数根据总氮、总磷、COD_{Mn}、透明度和叶绿素a含量计算^[7]。浮游植物多样性和组成相似性采用SPADE(Species Prediction and Diversity Estimation)软件进行计算,多样性指数包括Shannon-Wiener指数^[8],Simpson指数^[9]和Pielou指数^[10],其中Shannon-Wiener指数受物种丰富度影响较大,Simpson指数较多的反映了物种的优势度,Pielou指数则是物种均一性的度量。组成相似性采用Sorenson相似性指数表征。各指数具体计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{Shannon-Wiener 指数} &= - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \\ \text{Simpson 指数} &= \sum_{i=1}^n P_i^2 \\ \text{Pielou 指数} &= - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i / \ln S \\ \text{Sorenson 指数} &= 2j / (a + b) \end{aligned}$$

式中, P_i 为第*i*个浮游植物种的数量, S 为每个湖泊中的浮游植物物种总数, a 和**b**分别为要比较的两个湖泊中的浮游植物种数, j 为两个湖泊中的共有种数。

2 结果和讨论

2.1 浮游植物的组成与分布

通过对浮游植物样品的鉴定和计数以及生物量的换算,发现云贵高原13个湖泊间无论是浮游植物细胞数还是生物量都存在明显的差别(图1)。长桥海、大屯海、滇池和异龙湖等几个污染较重的富营养化湖泊

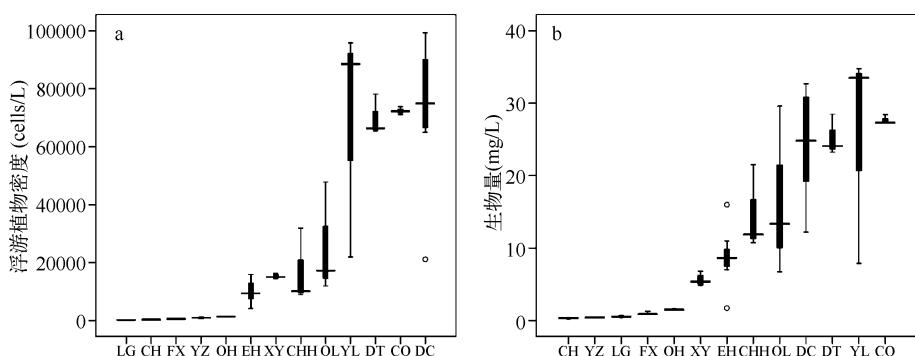


图1 云贵高原湖泊浮游植物细胞数(a)与生物量(b)

Fig. 1 Phytoplankton abundance (a) and biomass (b) of Yunnan-Guizhou Plateau lakes

藻类的细胞数和生物量较高,其细胞数在 6×10^4 cells/ml 和 1×10^5 cells/ml 之间,而生物量在 18~35 mg/L 之间。草海、阳宗海、泸沽湖、抚仙湖和邛海藻类的细胞数和生物量较低。虽然各个湖泊浮游植物细胞数与生物量的排序由于物种组成的差别并未一一对应,但是细胞数和生物量两个指标整体上都与湖泊的营养状态水平相一致,具有显著相关性,其中与总氮的相关性最高(表 2)。

表 2 浮游植物细胞数、生物量与水质参数相关性($n=51$)

Tab. 2 Correlation of phytoplankton density, biomass and water quality parameters

	水温	透明度	pH	溶解氧	电导率	TP	TN	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	COD_{Mn}	Chl. a	生物量	细胞数
水温	1														
透明度	-0.322*	1													
pH	0.091	-0.174	1												
溶解氧	0.552**	0.067	0.100	1											
电导率	0.427**	-0.261	0.363**	0.033	1										
TP	0.256	-0.500**	0.233	-0.054	0.325*	1									
TN	0.240	-0.389**	0.241	0.068	0.342*	0.571**	1								
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.156	-0.143	0.239	-0.257	0.100	0.037	0.420**	1							
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.021	-0.080	0.155	-0.352*	0.051	0.007	0.371**	0.850**	1						
$\text{NH}_4\text{-N}$	-0.223	0.192	-0.160	-0.394**	-0.128	-0.203	-0.001	0.327*	0.528**	1					
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.309*	-0.239	0.209	-0.109	0.386**	0.720**	0.150	0.055	-0.009	-0.148	1				
COD_{Mn}	0.476**	-0.470**	0.241	0.326*	0.348*	0.667**	0.778**	0.171	0.017	-0.281*	0.244	1			
Chl. a	0.264	-0.568**	0.330*	0.069	0.342*	0.829**	0.739**	0.214	0.107	-0.185	0.513**	0.840**	1		
生物量	0.504**	-0.334*	0.481**	0.334*	0.406**	0.381**	0.679**	0.369**	0.269	-0.042	0.241	0.624**	0.593**	1	
细胞数	0.427**	-0.325*	0.483**	0.303*	0.268	0.490**	0.694**	0.359**	0.283*	-0.031	0.261	0.651**	0.646**	0.947**	1

** 表示极显著相关($P < 0.01$, 双尾检验); * 表示显著相关($P < 0.05$, 双尾检验)。

浮游植物种类分析发现,13 个湖泊共鉴定出 7 门 109 种,其中绿藻种类最多,52 种,蓝藻其次,23 种,硅藻再次之,20 种,甲藻、金藻、隐藻和裸藻的种类最少,共 14 种。13 个湖泊中杞麓湖的藻类种类最多,达到 50 种,泸沽湖最少,只有 14 种(表 3)。本研究中所计的藻类较历史数据偏少^[2,11~12],其中可能有物种消亡的原因,也可能是由于采样频次和季节的原因导致可能个别稀有种类未能计入,但总体上本研究中所列的藻类

表 3 云贵高原湖泊浮游植物组成

Tab. 3 Phytoplankton species composition of Yunnan-Guizhou Plateau lakes

湖泊	种数							优势种
	蓝藻	绿藻	硅藻	甲藻	金藻	隐藻	裸藻	
滇池	10	23	5	1	0	4	2	45 铜绿微囊藻、惠氏微囊藻
抚仙湖	8	19	3	2	1	2	0	35 小转板藻、网状空星藻、波吉卵囊藻
星云湖	4	21	10	1	0	4	1	41 铜绿微囊藻、惠氏微囊藻
杞麓湖	10	23	11	2	0	3	1	50 水华束丝藻、沼泽颤藻
阳宗海	6	11	2	2	1	0	0	22 细小隐球藻、铜绿微囊藻、钝脆杆藻
异龙湖	11	19	7	1	0	2	2	42 水华束丝藻、铜绿微囊藻
大屯海	10	14	2	2	0	2	2	32 水华束丝藻、沼泽颤藻、铜绿微囊藻
长桥海	8	20	10	2	0	3	2	45 水华束丝藻、沼泽颤藻、铜绿微囊藻
洱海	8	24	4	3	0	3	0	42 铜绿微囊藻、不定微囊藻、细小隐球藻
程海	4	8	4	2	0	2	0	20 水华束丝藻、沼泽颤藻、铜绿微囊藻
泸沽湖	2	7	2	2	1	0	0	14 圆筒锥囊藻
邛海	1	9	1	2	0	2	0	15 梅尼小环藻
草海	13	14	4	1	1	2	1	36 无明显优势种

可以反映湖泊中主要藻类的分布情况。另外,由13个湖泊不同门类浮游植物生物量对总生物量的贡献可见,滇池、星云湖、杞麓湖、异龙湖、大屯海、长桥海和程海中蓝藻的贡献量都占据绝对优势,其他湖泊中或金藻、或绿藻、或硅藻、或多种藻共同占据优势(图2)。进一步通过优势种的分析发现,以蓝藻为主要优势种的湖泊中优势种主要为束丝藻、颤藻和微囊藻,抚仙湖优势种为绿藻门的小转板藻、网状空星藻和波吉卵囊藻,邛海的优势种为硅藻门的梅尼小环藻,泸沽湖的优势种为金藻中的圆筒锥囊藻,阳宗海优势种为细小隐球藻、铜绿微囊藻、钝脆杆藻,洱海的优势种为铜绿微囊藻、不定微囊藻、细小隐球藻,而草海无明显优势种。

通过RDA分析发现,在选取的13个环境因子中,经Monte Carlo检验,有9个因子与浮游植物分布显著相关($P < 0.05$)。4个排序轴中第一轴的特征值最大(0.228),其物种与环境的相关度也最高(0.948)(表4),从第二轴到第四轴这两个值都逐渐降低。浮游植物组成在四个轴上的累积变化率为49.3%,其中第一轴贡献22.8%,物种与环境相关性在四个轴上的累积变化率达到78.6%,第一轴占36.3%,表明物种组成与环境因子的变化具有显著相关性。从排序图上可以看出,第一轴的正方向TN是主要组成因子,与之相对应的湖泊主要有滇池、星云湖、杞麓湖、异龙湖、大屯海和长桥海(图3),与之相对应的藻类主要是蓝藻和绿藻,其中蓝藻更占优势,表明营养加富使得蓝藻优势度增加。同时,较高的温度有利于蓝藻的生长^[13-15],所以在第一轴的正方向上也有温度与之对应。另外,由于富营养化的加剧和藻类的生长,水体里可溶性的正磷酸盐、硝酸盐、离子含量也随之增加,也导致水体中电导率、pH和溶解氧的变化,这些都在第一轴的正方向上有所体现。在第一轴的负方向上唯一的主要组成因子是透明度,与此对应的湖泊是相对贫营养的湖泊,包括泸沽湖、抚仙湖、阳宗海、草海等,这些湖泊中主要是一些清洁水体常见的藻类占优势,如金藻。

2.2 浮游植物的多样性

浮游植物的组成与分布在云贵高原各湖泊中差异显著,这可能与湖泊的形态,海拔等因素有关,但更为重要的是受湖泊营养水平的影响^[16-17]。从上面的分析可以发现,湖泊营养状态等级较高的湖泊均以蓝藻为优势种,中等营养水平的湖泊中蓝藻、绿

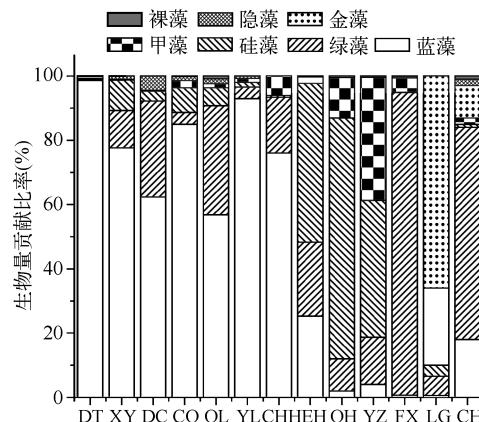


图2 不同藻类生物量的贡献比率

Fig. 2 Contribution of different phytoplankton to total biomass

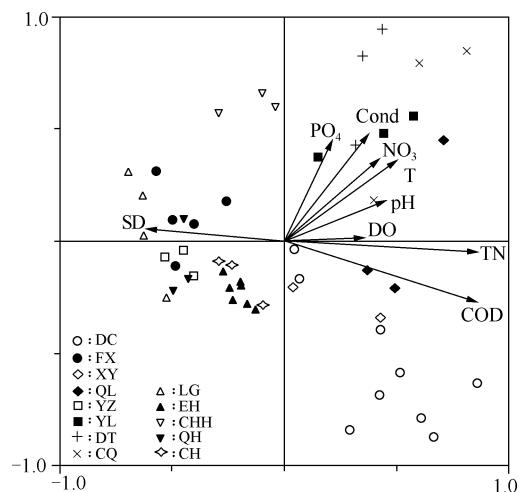


图3 不同湖泊环境因子与浮游植物组成的RDA排序图

Fig. 3 RDA biplot shows different phytoplankton communities in relation to environmental factors in 13 Yunnan-Guizhou Plateau lakes

表4 浮游植物组成与环境因子RDA分析结果

Tab. 4 Results from RDA of phytoplankton communities in relation to environmental factors

轴	1	2	3	4	总变化率
特征值	0.228	0.184	0.045	0.036	1.000
物种-环境相关性	0.948	0.911	0.907	0.863	
累积百分比变化率					
物种	22.8	41.2	45.7	49.3	
物种-环境相关性	36.3	65.7	72.9	78.6	
总典型特征值					0.627

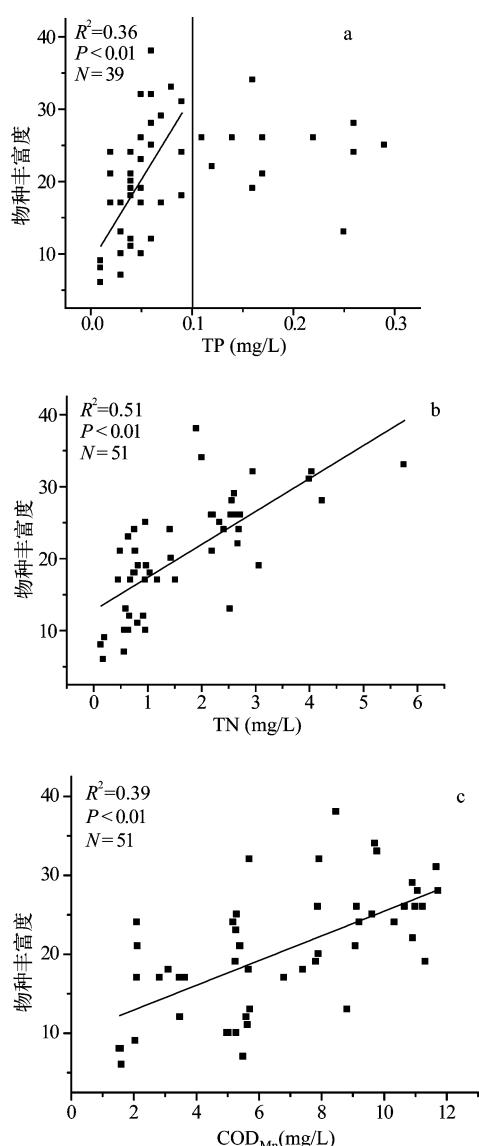


图 4 物种丰富度与总磷(a)、
总氮(b)及 COD_{Mn}(c)的相关性

Fig. 4 Correlation of TP (a), TN (b),
COD_{Mn} (c) and species richness

Simpson 指数与 Shannon-Wiener 指数显著负相关 ($P < 0.01$), 表明邛海虽然生物多样性和物种丰富度很低, 但是仅有的生物种中个别藻的优势度非常高, 根据物种鉴定结果, 这一优势度很高的物种为梅尼小环藻. Pielou 指数与 Shannon-Wiener 指数显著正相关, 亦为草海最高, 邛海最低(图 5c). 均匀度指数在一定程度上与物种数目无关, 在物种数目一定的情况下, 均匀度与个体数目或生物量等指标在各个物种中分布的均匀程度有关. 因此可见草海中各物种的个体数目最均衡, 这与鉴定结果中未见明显优势种的结果相一致, 其他湖泊则随着物种优势度的增加 Pielou 指数逐渐降低.

藻、硅藻和隐藻都占有一定比例, 而贫营养湖泊主要优势种为绿藻和金藻. 而且本研究发现湖泊总磷浓度在 0.1 mg/L 范围内与物种丰富度具有明显的正相关关系, 但是超过 0.1 mg/L 物种丰富度不再随总磷浓度的升高而升高(图 4a, $P < 0.01$), 湖泊的总氮含量、COD_{Mn} 含量与藻类的物种丰富度具有明显的正相关关系(图 4b, 图 4c, $P < 0.01$). 由此可见, 湖泊的营养水平不仅影响着云贵高原湖泊浮游植物的总量, 而且对其组成以及物种丰富度都有显著影响. 有研究认为物种丰富度与湖泊营养状态呈现单峰关系, 即在某一特定营养状态范围内物种丰富度最高^[18], 但本研究发现浮游植物物种丰富度与总氮及 COD_{Mn} 含量呈单调上升的线性关系, 与总磷在 0.1 mg/L 的浓度范围内亦呈单调上升的线性关系.

物种多样性不仅可以反映群落或生境中物种的丰富度、变化程度或均匀度, 也可反映不同自然地理条件与群落的相互关系. 因此可以用物种多样性来定量表征群落和生态系统的特征, 包括直接和间接地体现群落和生态系统的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度、生境差异等. Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数是常用的多样性指数, 其中 Shannon-Wiener 指数受物种丰富度影响较大, Simpson 指数较多地反映了物种的优势度, Pielou 指数则是物种均一性的度量. 由云贵高原 13 个湖泊浮游植物多样性分析可见, 草海的 Shannon-Wiener 指数值最高, 邛海最低, 表明草海的生物多样性最高, 而邛海最低(图 5a), 这一结果与物种丰富度结果略有差异, 主要是因为 Shannon-Wiener 指数除受物种丰富度影响外, 还受物种均匀度的影响, 因此其变化幅度要比丰富度指数和均匀度指数的大.

典型的浮游植物的 Shannon-Wiener 指数值基本在 2.4–2.6 之间^[19], 本研究中 13 个湖泊的 Shannon-Wiener 指数处于 0.5–2.2 之间, 明显偏低, 但却与 Jeppesen 等的研究结果相一致^[18], 这一结果也反映了湖泊中浮游植物的多样性明显低于海洋的事实^[20]. 与 Shannon-Wiener 指数相反, Simpson 指数邛海最高, 草海最低(图 5b), 而且

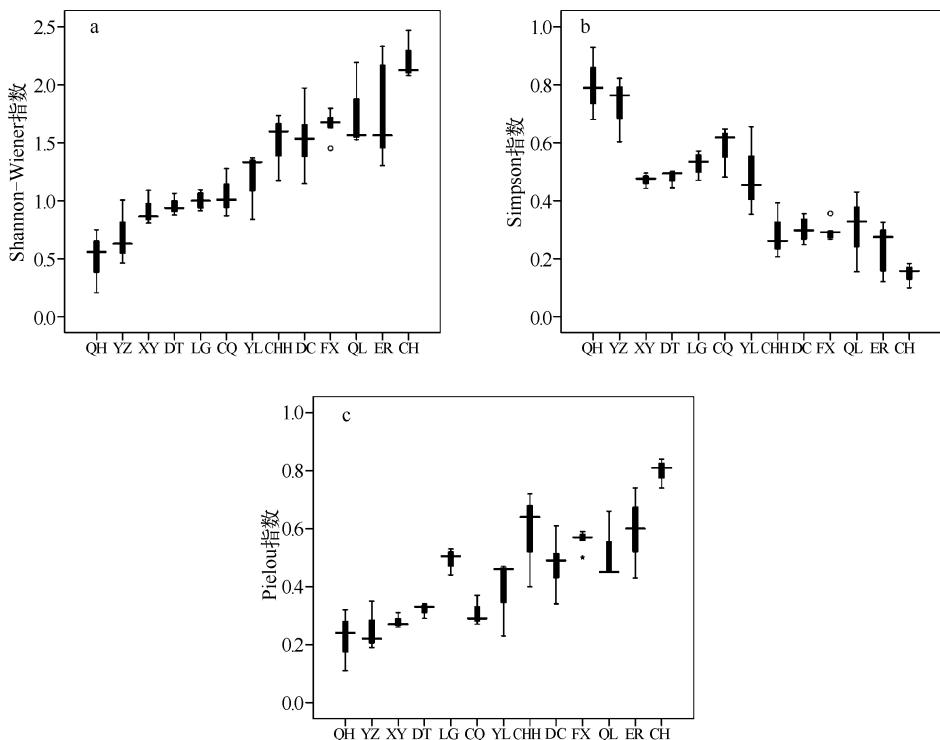


图 5 云贵高原湖泊浮游植物 Shannon-Wiener 指数(a)、Simpson 指数(b) 和 Pielou 指数(c)

Fig. 5 Shannon-Wiener index (a), Simpson index (b) and Pielou index (c) of phytoplankton in Yunnan-Guizhou Plateau lakes

不同湖泊浮游植物多样性受群落所处的发育阶段不同或生境的差异的影响而表现为多样性指数的明显不同,本研究分析了物种多样性与诸环境因子的相关性,但未发现多样性指数与单个环境因子的显著相关($P > 0.05$),这可能是由于云贵高原13个湖泊物种多样性的影响因子多样,如湖泊面积、水深、所处纬度、海拔以及富营养化都会影响物种多样性,因此无法归一到统一的单因子。

云贵高原13个湖泊浮游植物组成相似性分析可以看出泸沽湖与其他湖泊的相似性普遍较低,相似系数均小于0.4,滇池与抚仙湖、星云湖、杞麓湖、异龙湖以及洱海的相似性较高,相似系数高于0.6。所有湖泊中杞麓湖和异龙湖的相似性最高,相似系数为0.696,而异龙湖和泸沽湖的相似性最低,相似系数为0.214(表5)。另外,为反映Sorenson相似性与湖泊营养状态间的关系,本文计算了不同湖泊营养状态指数的差值(数据未列出),利用此差值大小表示两个湖泊营养状态差别,并对各湖泊间营养状态指数差值与对应的Sorenson相似性进行相关分析,结果表明各湖泊营养状态差异与Sorenson相似性明显负相关,Pearson相关系数为-0.418($P = 0.000$),这表明云贵高原各湖泊浮游植物相似性受营养状态差异的影响,湖泊营养水平越相近的湖泊其藻类组成也相似,反之则藻类组成差别显著。

表 5 云贵高原湖泊浮游植物组成相似性(Sorenson 相似性)
 Tab. 5 Sorenson similarity of phytoplankton composition in Yunnan-Guizhou Plateau lakes

湖泊	滇池	抚仙湖	星云湖	杞麓湖	阳宗海	异龙湖	大屯海	长桥海	泸沽湖	洱海	程海	邛海	草海
滇池	1.000												
抚仙湖	0.615	1.000											
星云湖	0.690	0.568	1.000										
杞麓湖	0.681	0.571	0.667	1.000									
阳宗海	0.394	0.500	0.387	0.389	1.000								
异龙湖	0.628	0.447	0.537	0.696	0.313	1.000							
大屯海	0.474	0.424	0.389	0.512	0.407	0.622	1.000						
长桥海	0.539	0.456	0.471	0.632	0.358	0.575	0.597	1.000					
泸沽湖	0.207	0.375	0.222	0.219	0.278	0.214	0.304	0.271	1.000				
洱海	0.621	0.675	0.627	0.581	0.462	0.471	0.453	0.477	0.281	1.000			
程海	0.313	0.407	0.333	0.400	0.238	0.419	0.423	0.369	0.412	0.381	1.000		
邛海	0.407	0.571	0.364	0.400	0.324	0.386	0.383	0.367	0.414	0.448	0.514	1.000	
草海	0.380	0.493	0.320	0.424	0.386	0.442	0.328	0.350	0.286	0.462	0.509	0.440	1.000

致谢:感谢福建师范大学的庄惠茹老师和卢海生老师帮助鉴定藻种,感谢中国科学院水生生物研究所宋立荣老师在云南野外工作中的帮助.

3 参考文献

- [1] 胡红波,顾泳洁,李 明.丽娃河水体富营养化与浮游藻类的指示关系.生物学杂志,2005,22(2):32-35.
- [2] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志.北京:科学出版社,1998.
- [3] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类-系统、分类及生态.北京:科学出版社,2006.
- [4] 黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析.北京:中国标准出版社,1999.
- [5] 阎 荣,孔繁翔,韩小波.太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步研究.湖泊科学,2004,16(2):163-167.
- [6] Muylaert K, Van der Gucht K, Vloemans N et al. Relationship between bacterial community composition and bottom-up versus top-down variables in four eutrophic shallow lakes. *Appl Environ Microbiol*, 2002, 68: 4740-4750.
- [7] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范(第二版).北京:中国环境科学出版社,1990.
- [8] Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949: 117.
- [9] Simpson EH. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, 163: 688.
- [10] Pielou EC. Ecological Diversity. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [11] Wang RN. The Cyanobacterial bloom and the changes of the phytoplankton community in Dianchi Lake, Kunming, China. In: Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences Yunnan University. Eutrophication and cyanobacterial bloom control: Theoretical principles and practical eco-technology in hypereutrophic lakes. 2001.
- [12] 李荫玺,王 林,祁云宽.唐芳抚仙湖浮游植物发展趋势分析.湖泊科学,2007,19(2):223-226.
- [13] Jeppesen E, Meerhoff M, Jacobsen BA et al. Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation-the successful strategy varies with lake size and climate. *Hydrobiologia*, 2007, 581: 269-285.
- [14] Wolf M Mooij, Stephan Hülsmann, Lisette N et al. The impact of climate change on lakes in The Netherlands: A review. *Aquatic Ecology*, 2005, 39: 381-400.
- [15] Paerl HW, Huisman J. Climate: blooms like it hot. *Science*, 2008, 320: 57-58.
- [16] Cook GD, Welch EB, Peterson SA et al. Restoration and management of lakes and reservoirs. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1993.
- [17] Ryding SO, Rast W. The control of eutrophication of lakes and reservoirs. Paris: UNESCO & The Partenon Publishing Group, 1989.
- [18] Jeppesen E, Jensen JP, Søndergaard M et al. Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. *Freshwater Biology*, 2000, 45: 201-218.
- [19] Harris GP. Phytoplankton ecology: Structure, function and fluctuation. London: Chapman and Hall, 1986.
- [20] Margalef R. Diversity. In: Sournia A ed. Phytoplankton manual. Paris: UNESCO, 1978.