

武汉月湖沉积物中硅藻的垂直分布与水质变化

徐 栋^{1,2}, 胡胜华^{1,3}, 周巧红^{1,2}, 张丽萍^{1,2}, 徐恒力³, 吴振斌^{1,2}

(1.中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049; 3.中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:采用活塞取样器采集了月湖湖中央 2 处钻孔沉积物, 分析了其中硅藻种类与密度的垂直变化, 同时采用 $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ 推测沉积物的沉积速率, 并进行了总有机质、生物硅含量分析, 以了解月湖各个不同年代的水质变化。结果表明, 2 个柱状沉积物中硅藻的优势属为: 小环藻属、直链藻属、舟形藻属、*Cyclotella* 属。Z-1 钻孔优势种为: 梅尼小环藻、颗粒直链藻、*Navicula porifera*、*Cyclotella tholifomis*。Z-2 钻孔中优势种为: 梅尼小环藻、颗粒直链藻、舟形藻、*Cyclotella invisitatus*。就硅藻密度而言, 总趋势是上层最多, 平均 $7.14 \times 10^5 \sim 58.65 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$, 中层其次, 平均 $0.08 \times 10^5 \sim 13.98 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$, 下层最少, 平均 $0.24 \times 10^5 \sim 0.64 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 。硅藻种类数变化虽然没有明显规律, 但种类最少的样品出现在中层, $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ 测年数据表明中层为 19 世纪 90 年代—20 世纪 70 年代。相关分析表明: Z-1 孔生物硅与沉积硅藻密度显著正相关 ($r=0.933, P=0.021<0.05$), 总有机质含量与种类数显著负相关 ($r=-0.972, P=0.005<0.05$); Z-2 孔生物硅与沉积硅藻密度显著正相关 ($r=0.985, P=0.002<0.05$), 沉积硅藻密度与种类数显著负相关 ($r=-0.933, P=0.021<0.05$)。研究结果表明, 月湖沉积物中硅藻种类与密度的垂直变化可以反映月湖的富营养演化历程: 19 世纪 60 年代—19 世纪 80 年代, 月湖水水质较好; 19 世纪 90 年代—20 世纪 10 年代, 月湖开始由贫营养状态向中营养状态转变, 为水体富营养化开始发生时间; 20 世纪 20 年代—20 世纪 40 年代, 月湖水体营养等级持续增加, 已富营养化; 20 世纪 50 年代—20 世纪 70 年代, 周边人口数量急剧上升与污水的直接排放导致月湖水水质持续恶化; 20 世纪 80 年代至月湖截污前这段时期使月湖最终沦为劣五类水体的湖泊。

关键词: 月湖; 硅藻; 生物硅; 总有机质; 沉积速率; 水质变化

中图分类号: X172 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)04-0796-07

The Vertical Distribution of Diatoms in the Sediments and Water Quality Change of Moon Lake in Wuhan

XU Dong^{1,2}, HU Sheng-hua^{1,3}, ZHOU Qiao-hong^{1,2}, ZHANG Li-ping^{1,2}, XU Heng-li³, WU Zhen-bin^{1,2}

(1.State Key Lab of Fresh Water Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This article described and analyzed the vertical distribution of diatom species and their density in two bored sediment cores collected from the center part of the Moon Lake. $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ analysis was adopted to estimate the sedimentary rate of these two cores; The content analysis of TOM and BSi was conducted to find out the water quality change during different periods in the Moon Lake. The result indicated that the dominant genera in two columnar sediment cores were *Cyclotella*, *Aulacoseira*, *Navicula* and *Cyclotella*. The dominant species of Z-1 bored sediment cores were *Cyclotella meneghiniana*, *Aulacoseira granulata*, *Navicula porifera* and *Cyclotella tholifomis*, the dominant species of Z-2 bored sediment cores were *Cyclotella meneghiniana*, *Aulacoseira granulata*, *Navicula* sp. and *Cyclotella invisitatus*. The diatom density in the two cores shares similar trends: the highest density existed in the upper layer, with an average range of $7.14 \times 10^5 \sim 58.65 \times 10^5 \text{ individuals} \cdot \text{g}^{-1}$, which followed by the intermediate layer presenting an average range of $0.08 \times 10^5 \sim 13.98 \times 10^5 \text{ individuals} \cdot \text{g}^{-1}$, and the lowest density was in the bottom layer, with an average range of $0.24 \times 10^5 \sim 0.64 \times 10^5 \text{ individuals} \cdot \text{g}^{-1}$. No obvious regular pattern was found for the change of diatom species number in either core; However, the lowest species number was in the middle layer of the two sediment cores,

收稿日期: 2008-07-14

基金项目: 国家“十五”科技项目 (2002AA601021); 国家杰出青年基金项目 (39925007); 湖北省科技攻关重大项目 (2006AA305A03); 教育部 2008 年“中国科学院接收国内高校博士生”访学资助项目

作者简介: 徐 栋 (1977—), 男, 博士, 主要研究方向为水环境污染生物防治、生态修复及水污染控制。E-mail: xudong@ihb.ac.cn

通讯作者: 吴振斌 E-mail: wuzb@ihb.ac.cn

which corresponded to the periods between the 1890's and the 1970's according to $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ analysis. The result of correlational analysis showed that in Z-1 bored sediment core, the Bsi density was positively correlated with sediment diatom density ($r=0.933$, $P=0.021<0.05$), and the TOM content was negatively correlated with diatom species number ($r=-0.972$, $P=0.005<0.05$); In Z-2 bored sediment core, the BSi density was positively correlated with sediment diatom density ($r=0.985$, $P=0.002<0.05$), and the TOM content was negatively correlated with diatom species number ($r=-0.933$, $P=0.021<0.05$). The research result indicated that the vertical distribution of diatom species and their density could be used to trace eutrophication evolution course of the Moon Lake as follows: from the 1860's to the 1880's, the Moon Lake water quality was good; from the 1890's to the 1910's, the Moon Lake started its transformation from the poor nutrition condition to a medium condition, it was the beginning of water eutrophication; From the 1920's to the 1940's, the water nutrition level kept increasing, leading to a eutrophic condition. Due to the sharp rise of the surrounding population and the direct discharge of sewage, the water quality kept deteriorating from the 1950's to the 1970's. After that time, the Moon Lake was finally degenerated among the list of water of the worst five kinds of water quality, till before its recent pollutant truncation.

Keywords: Moon Lake; diatom; BSi; TOM; sedimentation rate; water quality change

硅藻的分布受水环境的控制。硅藻作为指示过去湖泊酸度、盐度和营养变化最有价值的生物指标之一^[1],在古湖沼研究中已被广泛应用^[2-4]。在长期受人为干扰的湖泊中,湖泊营养态的转变会引起硅藻组合的变化^[5-6]。许多研究表明,北美殖民时期和欧洲工业革命时期,湖泊富营养化普遍发生,贫营养硅藻属种也逐渐由耐营养属种所取代^[7-9]。在中国东部地区浅水湖泊,历史时期人类活动非常频繁,但人类尺度范围内的硅藻研究成果极少。针对平原浅水湖泊日趋严重的湖泊富营养问题,在制定湖泊修复方案时,有必要开展湖泊营养本底的研究。本文通过月湖湖心浅钻连续的高分辨率硅藻地层分析,对近 140 a 来湖泊营养演化过程进行了恢复,分析了湖泊富营养化的发生时间、发展过程和趋势,为湖泊富营养化机理研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 沉积物的样品采集

月湖(114°15'E, 30°33'N)位于武汉市汉阳区,东面靠近长江,西面接近汉水,周边居住人口密集,该湖泊向沿岸社区居民提供了观光、休闲等众多环境服务,但因多年的生活污水排放,月湖已成为一个严重富营养化小型浅水湖泊。根据调查显示,月湖面积约 0.66 km²,水深(1.2±0.05)m,底质为淤泥,湖水透明度(61.1±2.4)cm, pH 值为 8.1±0.3。

为避免人为活动所致的底泥扰动,采用活塞取样器选择 Z-1 与 Z-2 两处的钻孔取样作为实验对象,每个钻孔深度 50 cm(见图 1)。

Z-1 与 Z-2 两处钻孔分布于湖心处,该区域受到的人为干扰活动较少且湖水较深,采样后将样品置于塑料袋中,柱样每 10 cm 一个样,合计样品 10 个,用自

封袋密封带回实验室放入冰柜低温(4℃)保存备用。

Z-1 与 Z-2 采样沉积物性状如表 1 所示。

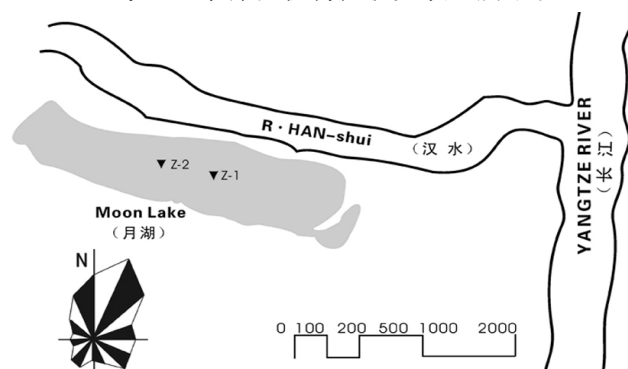


图 1 沉积柱样采集点分布图

Figure 1 Distribution map of collection points for sediments of cores

表 1 Z-1 和 Z-2 钻孔沉积物性状

Table 1 Properties of sediments drilled from Z-1, Z-2

钻孔深度/cm	Z-1 性状描述	Z-2 性状描述
0~10	黄稀泥,有植物碎屑	黄青色稀泥
11~20	黄泥与青泥互层,较多植物碎屑	黄黑泥,出现植物碎屑
21~30	青黄泥,有粘性	黑青泥,较多植物碎屑
31~40	青黄泥,粘性强	青黄泥,植物碎屑多
41~50	青黄泥,粘性重	青灰泥,大量植物碎屑

1.2 生物硅(BSi)的测定

生物硅研究过去主要集中在海洋沉积物中^[10-12],用来指示海洋表层生产力的变化,目前已建立了 7 种生物硅测量方法^[13-19]。生物硅在一定浓度下的碱性溶液中可以完全溶解,而溶解硅又可以利用硅钼蓝比色法来测定,这就是生物硅测定的基本原理。利用硅钼蓝比色法^[19]测定溶解硅含量,这一步骤比碱融分光光度法操作简便,准确度也较高^[19]。

1.3 总有机质(TOM)的测定

按中国科学院南京土壤所《土壤理化分析》^[20]中

的方法进行。

1.4 测定沉积速率

沉积物时间剖面的建立通过典型沉积物柱样的 $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ 测定沉积速率来确立^[29]。

沉积速率实验步骤为:首先将低温(4℃)备用的沉积物样品(共计10个),90℃烘干至恒重,计算含水量,研磨过100目筛装入塑料袋待测。准确称取3g样品蜡封后放置3周测定沉积速率,所用仪器是美国EG&G ORTEC公司生产的GWL-120210-S型高纯锗井型光子检测系统,能量分辨率为1.91 keV,低环境本底由全封闭屏蔽室保证。

最终计算公式如下:

$$D_R = \frac{H\lambda}{\ln \frac{I_0}{I_s}}$$

式中: D_R 为沉积速率, H 为深度, λ 为 ^{210}Pb 的衰变常数, I_0 为表层 ^{210}Pb 放射性活度, I_s 为深度为 H 处的 ^{210}Pb 放射性活度。

1.5 沉积硅藻的鉴定

沉积硅藻的鉴定与统计,按照常规方法进行处理^[3],最后用Leica立体式双目显微镜进行属种鉴定与统计(100倍油镜,放大10×100倍),每个样品硅藻壳体统计以300粒为基数。

沉积硅藻种属鉴定根据Krammer与Lange-Bertalot(1986—1991)的分类系统^[22]。

1.6 数据处理

经One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test检验,

Z-1处钻孔、Z-2处钻孔各项测试数据,生物硅(BSi)、总有机质(TOM)、沉积硅藻种类数(Species)、沉积硅藻密度(Density)均符合正态分布,故采用Pearson相关系数分析,分析在软件SPSS 13.0中进行。

2 结果与讨论

2.1 柱状样的沉积速率与沉积年龄

2个柱状样由于沉积速率不同,故不同深度代表的年代不尽相同,Z-1钻孔的平均沉积速度为 $0.35 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,因此这段沉积物最底层的沉积时间可以回溯到约140 a前(1865年左右)。Z-2钻孔的平均沉积速度为 $0.38 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,这段沉积物最底层的沉积时间可以回溯到约130 a前(1875年左右)。

2.2 生物硅(BSi)含量

在硅钼蓝比色法实验基础上,以10 cm间隔分析了Z-1与Z-2钻孔沉积物中的生物硅含量,对10个沉积物样品做了重复性测定,测定结果平均偏差较小,回收率达到了95%以上。运用SPSS 13.0对采样点Z-1和Z-2进行统计分析,结果表明采样点之间无显著性差异($P>0.05$)。

从图2可以看出,Z-1钻孔与Z-2钻孔的生物硅含量均显示了阶段性变化:0~10 cm处,Z-1平均含量0.88%、Z-2平均含量为0.70%;11~20 cm处,Z-1平均含量0.74%、Z-2平均含量为0.51%;21~30 cm处,Z-1平均含量为0.65%、Z-2平均含量为0.54%;31~40 cm处,Z-1平均含量为0.57%、Z-2平均含量

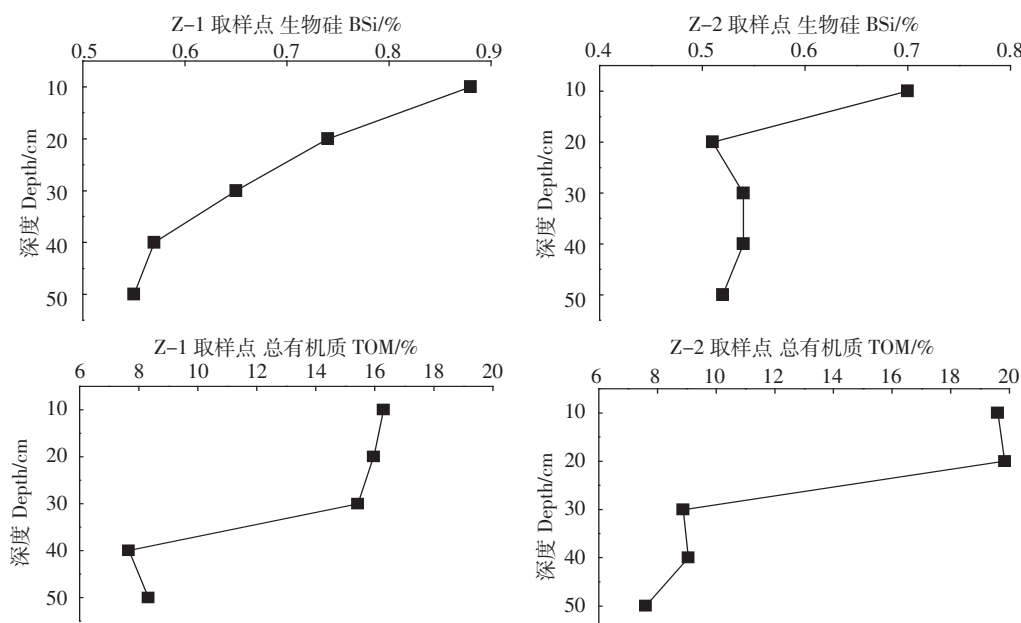


图2 月湖钻孔的生物硅和总有机质记录

Figure 2 Sedimentary biogenic silica and TOM records in Moon Lake

为 0.54%;41~50 cm 处,Z-1 平均含量为 0.55%、Z-2 平均含量为 0.52%。

2.3 总有机质(TOM)的测定

灼烧法(LOI 法)测定月湖沉积物中总有机质含量如下:Z-1 钻孔与 Z-2 钻孔有机质含量相似,下层(41~50 cm)处有机质含量普遍较低;Z-1 钻孔中层 C 31~40 cm 处有机质含量出现了快速上升,随后(上层 0~10 cm,中层 A 11~20 cm,中层 B 21~30 cm)变化不大,呈现缓慢上升的变化趋势;Z-2 钻孔中层 C 31~40 cm 处有机质含量变化不大,在中层 B 21~30 cm 出现了快速上升,随后(上层 0~10 cm,中层 A 11~20 cm)有机质含量变化不大。

2.4 沉积物中硅藻的属种组成与密度分布的总趋势

月湖 2 处钻孔沉积物中沉积硅藻经过鉴定有 24 属 83 种。

Z-1 钻孔共有 20 属 61 种,Z-2 钻孔共有 24 属 68 种,分析 2 个柱状样中沉积硅藻种类出现的频率,有 4 个属在各柱状样的样品中出现频率较高,它们

是:小环藻属(*Cyclotella*)、直链藻属(*Aulacoseira*)、舟形藻属(*Navicula*)、*Cyclostephanos* 属,其中小环藻属、直链藻属、舟形藻属出现最高,达 100%,即 2 个柱状样 10 个样品中每一个样品都有小环藻属、直链藻属、舟形藻属的藻种。其次是 *Cyclostephanos* 属为 80% (见表 2)。从密度分布来看,小环藻属个体数最多,占总数的 60%以上,最少的是直链藻属(见表 2)。

2.5 沉积物中硅藻种类数与密度的垂直变化

根据沉积物不同深度以及对应的不同年代,将 2 个柱状样自下而上分成 5 层,分析硅藻种数(图 3)与密度的分布特点。

下层:代表约 19 世纪 60 年代—19 世纪 80 年代,Z-1 处钻孔(41~50 cm),硅藻种类数保持在 36 种左右,密度基本稳定在 $0.64 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$;Z-2 处钻孔(41~50 cm),硅藻种类数保持在 22 种左右,硅藻密度基本稳定在 $0.23 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

中层(C):代表约 19 世纪 90 年代—20 世纪 10 年代,Z-1 处钻孔(31~40 cm),硅藻种类数保持在 34

表 2 2 个柱状样中优势硅藻属的密度、百分比与出现频率

Table 2 The statistics for diatoms in the sediments of two cores

项目	Z-1 处钻孔样			Z-2 处钻孔样		
	密度 Density/ $\times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$	频率 Frequency/%	占总个体数百分比 Percentage in the total/%	密度 Density/ $\times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$	频率 Frequency/%	占总个体数百分比 Percentage in the total/%
小环藻属	47.41	100	60.17	2.96	100	35.8
直链藻属	4.31	100	5.47	0.73	100	8.88
舟形藻属	25.55	100	3.24	0.75	100	9.09
<i>Cyclostephanos</i> 属	12.83	60	16.28	0.78	100	9.45

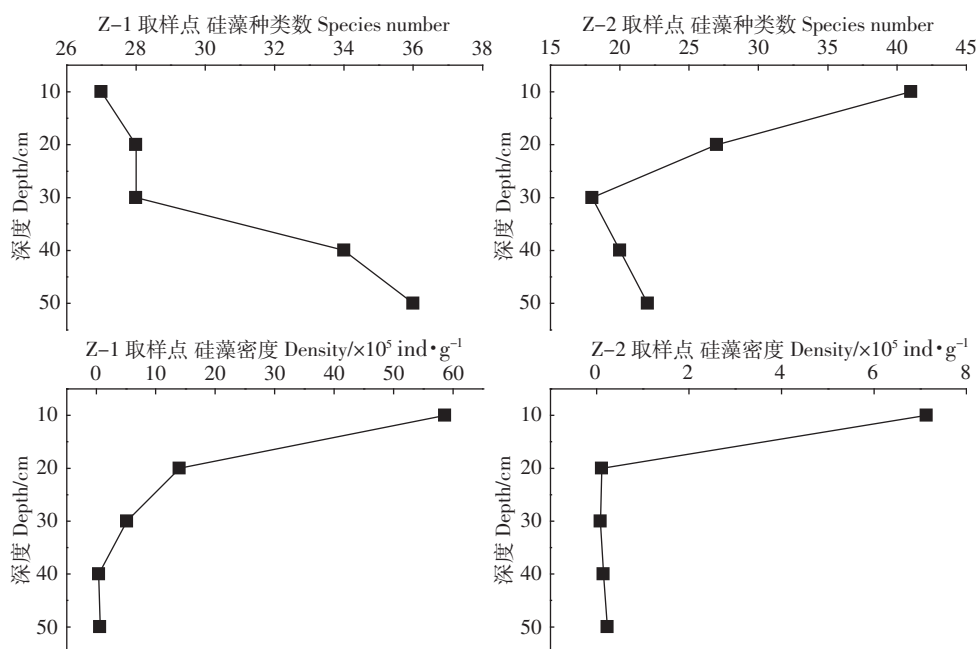


图 3 Z-1,Z-2 钻孔沉积物中硅藻种类数与密度的垂直变化

Figure 3 The vertical distribution of the diatom species and density in drilled sediments from Z-1,Z-2

种左右,密度基本稳定在 $0.41 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$;Z-2 处钻孔(31~40 cm),硅藻种类数保持在 20 种左右,密度基本稳定在 $0.15 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

中层(B):代表约 20 世纪 20 年代—20 世纪 40 年代,Z-1 处钻孔(21~30 cm),硅藻种类数保持在 28 种左右,密度基本稳定在 $5.12 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$;Z-2 处钻孔(21~30 cm),硅藻种类数保持在 18 种左右,密度基本稳定在 $0.08 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

中层(A):代表约 20 世纪 50 年代—20 世纪 70 年代,Z-1 处钻孔(11~20 cm),硅藻种类数保持在 28 种左右,密度基本稳定在 $13.98 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$;Z-2 处钻孔(11~20 cm),硅藻种类数保持在 27 种左右,密度基本稳定在 $0.11 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

上层:代表约 20 世纪 80 年代至月湖清淤前这段时期,Z-1 处钻孔(0~10 cm),硅藻种类数保持在 27 种左右,密度基本稳定在 $58.65 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$;Z-2 处钻孔(0~10 cm),硅藻种类数保持在 41 种左右,密度基本稳定在 $7.14 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

Z-1 处钻孔样硅藻种类数在 27~36 种之间波动,基本呈现下降趋势,即接近表层,种类缓慢减少;Z-2 处钻孔样硅藻种类数基本呈现上升趋势,即越接近表层,种类越多,从 41~50 cm 处 22 种增加到表层的 41 种。

Z-1 处钻孔样硅藻密度呈现稳步上升趋势,即越接近表层,密度越大,在 41~50、31~40 cm 处密度较低,21~30、11~20 cm 处密度显著上升,在 1~10 cm 处出现最大值($58.65 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$);Z-2 处钻孔样硅藻密度呈现急剧上升趋势,即越接近表层,密度越大,在 41~50、31~40、21~30、11~20 cm 处变化幅度不大,在 1~10 cm 处出现最大值($7.14 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$)。

2.6 沉积物中硅藻主要优势种密度的垂直分布

根据表 2 可知,小环藻属、直链藻属、舟形藻属、*Cyclostephanos* 属不仅出现频率高,而且个体数也多。

Z-1 处钻孔优势种为:颗粒直链藻(*Aulacoseira granulata*)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、*Navicula porifera*、*Cyclostephanos tholifomis*,密度垂直分布见图 4。Z-1 处钻孔柱样该 4 种优势硅藻占到鉴定与统计出的沉积硅藻总密度的 4.0%、5.2%、1.1%、1.2%。

Z-2 处钻孔中优势种为:颗粒直链藻、梅尼小环藻、舟形藻(*Navicula* sp.)、*Cyclostephanos invisitatus*,密度垂直分布见图 5。Z-2 处钻孔柱样该 4 种优势硅藻占到鉴定与统计出的沉积硅藻总密度的 6.7%、32.0%、3.4%、5.8%。

2.7 生物硅、总有机质、沉积硅藻种类数、沉积硅藻密度之间的相关关系

经相关分析,Z-1 钻孔生物硅与沉积硅藻密度显著正相关($r=0.933, P=0.021<0.05$),总有机质含量与种类数显著负相关($r=-0.972, P=0.005<0.05$)。

经相关分析,Z-2 钻孔生物硅与沉积硅藻密度显著正相关($r=0.985, P=0.002<0.05$),沉积硅藻密度与种类数显著负相关($r=-0.933, P=0.021<0.05$)。

3 讨论

自 20 世纪 50 年代以来,由于月湖沿岸污染严重的化工、印染、造纸、冶金等工业的兴起以及人口的不断增长,使得月湖水质富营养化等级不断升高,导致很多敏感水生生物不能适应,同时硅藻种类多样性也相应减少,如 Z-1 钻孔中自 50 cm 处起硅藻种类数就在不断减少,而密度不断上升主要是耐污种大量出现的缘故。Z-2 钻孔沉积物中硅藻种类数与密度自 50 cm 处起就逐渐下降,到中层(21~30 cm)达到最低值,这一期间(20 世纪 20 年代—20 世纪 40 年代)水质富营养化进程比较缓慢的;随后硅藻种类与密度都明显增加了,但分析发现,增加的主要是耐污性的硅藻种类与密度,附着种、贫-中营养种类数以及密度都大幅减少

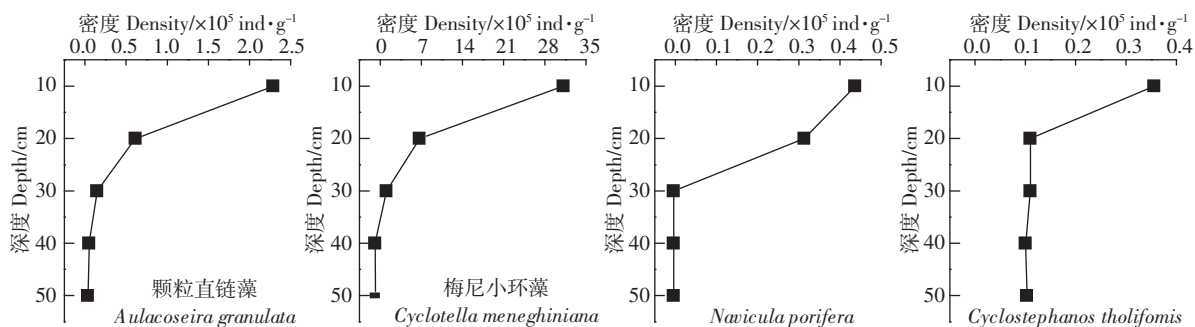


图 4 Z-1 钻孔沉积物中优势种密度的垂直变化

Figure 4 The vertical distribution of dominant species density in drilled sediments from Z-1

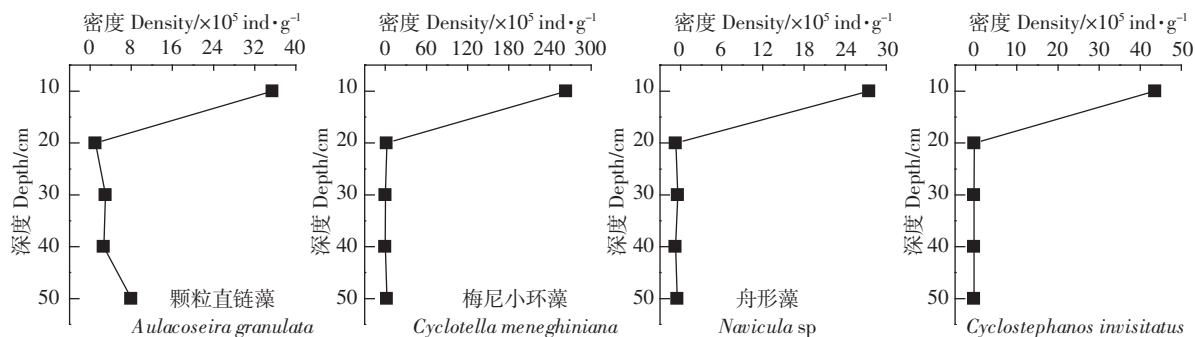


图 5 Z-2 钻孔沉积物中优势种密度的垂直变化

Figure 5 The vertical distribution of dominant species density in drilled sediments from Z-2

了,这实际上是月湖富营养化加速的体现。

2 处钻孔在硅藻种类数上出现不一致的原因分析主要是硅藻生境结构不同,Z-1 钻孔处无水生植物分布,硅藻绝大多数是浮游种,附生种极少;而 Z-2 钻孔曾是较大面积的水草区,水质尚好,故在沉积物中有较多的附生种、寡污种,20 世纪 50 年代后随着月湖水水质富营养化的加速,水生植物生境受到破坏,这些附生种、寡污种的硅藻种类与密度大幅减少,而浮游种大量出现,导致出现 Z-2 钻孔中硅藻种类数的生物多样性增加。

根据已有研究,颗粒直链藻是淡水中较为常见的种类,在水质评价中属 α - β 中度污染的指示生物^[23]。董旭辉等^[24-25]对长江中下游地区 45 个湖泊的沉积硅藻进行了调查,认为 *Navicula* 属、*Cyclotella meneghiniana*、*Cyclostephanos invisitatus*、*C. tholifomis* 种是长江中下游湖泊富营养化指示性属种,当 *Cyclostephanos*、*Stephanodiscus* 等种类与 *Cyclotella meneghiniana*、*C. atomus* 组合出现可预警湖泊水体富营养的发生,本次研究印证了这一观点。

沉积物中硅藻种类与密度变化主要与沉积年代水质有关,一般认为影响硅藻种类与数量的因素主要与 N、P、有机质等^[26-27]。杨洪等^[28]发现武汉东湖沉积物中硅藻的分布与相应的总氮、总磷、总有机碳关系密切,在中富营养到富营养初期,硅藻种类较丰富,从而反映了人类活动的影响。本文研究表明,硅藻的密度与有机质含量有关,这一结论与 Denys^[29]、顾泳洁^[30]的一致。

汇入月湖的氮、磷等营养物质与月湖边梅子山的风化岩石碎屑与植被不仅为硅藻生长提供了丰富的溶解硅,也构成了湖泊生物的主要营养源。当降水加强时,营养物质进入湖中,利于增强硅藻生产力,同时月湖作为一封闭浅水型湖泊,硅藻在春秋两季大量繁殖,生物量很大。生物硅是一种百分含量单

位,因而其含量还受到沉积速率的作用,但从月湖的生物硅变化幅度来看,最高含量与最低含量相差明显,而沉积速率的变化却并不大,可见沉积速率对生物硅含量的影响并不大,生物硅密度主要是由硅藻生产力本身变化所决定,故生物硅含量与沉积硅藻密度密切相关。

由于沉积物具有时间上连续的特点,因此,利用沉积物中硅藻可以追溯河流、湖泊水质的变化历史。吴俊宗等^[31-33]根据沉积物中硅藻的变化,重建了台湾湖泊水质变化历史,并以其中硅藻种类与数量的垂直变化反映了不同年代的水质变化。本研究也反映了月湖水质的富营养化历程:19 世纪 60 年代—19 世纪 80 年代,月湖边居民人口数量少,湖泊受到的环境压力为轻;19 世纪 90 年代—20 世纪 10 年代,月湖生物硅沉积缓慢上升,反映月湖开始由贫营养状态向中营养状态转变,为水体富营养化开始发生时间;20 世纪 20 年代—20 世纪 40 年代,月湖水体营养等级持续增加,已富营养化;20 世纪 50 年代—20 世纪 70 年代,周边人口数量急剧上升与污水的直接排放导致月湖水水质持续恶化;20 世纪 80 年代至月湖截污前这段时期入湖污水增多,污水不经任何处理直接排放,这无疑加速了生物硅的沉积,最终使月湖水水质恶劣、水华频发,沦为劣五类水体的湖泊。

参考文献:

- [1] Charles D F. Relationships between surface sediment diatom assemblages and lake water characteristics in adirondack lakes[J]. *Ecology*, 1985, 66(3):994-1011.
- [2] Fritz S C, Juggins S, Battarbee R W, et al. Reconstruction of past changes in salinity and climate using a diatom-based transfer function[J]. *Nature*, 1991, 352:706-708.
- [3] Psenner R, Schmidt R. Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition[J]. *Nature*, 1982, 356:781-783.
- [4] Bennion H. A diatom phosphorus transfer function for shallow, eutrophic ponds in southeast England[J]. *Hydrobiologia*, 1994, 275:391-410.

- [5] Yangdong P, Brugam R. Human disturbance and trophic status changes in crystal lake, Mc Henry county, Illinois, USA[J]. *J Paleolimn*, 1997, 17: 369-376.
- [6] Hall R, Smol J P A. A weighted-averaging regression and calibration model for inferring total phosphorus concentration from diatoms in British Columbia (Canada) lakes[J]. *Freshwater Biology*, 1992, 27: 417-434.
- [7] Engstrom D R, Swain E B, Kingston J C. A palaeolimnological record of human disturbance from Harvey's lake, Vermont: geochemistry, pigments and diatoms[J]. *Freshwater Biology*, 1985, 15: 261-288.
- [8] Fritz S C, Kingston J C, Engstrom D R. Quantitative trophic reconstruction from sedimentary diatom assemblages: a cautionary tale[J]. *Freshwater Biology*, 1993, 30: 1-23.
- [9] Sabater S, Haworth E Y. An assessment of recent trophic changes in Windermere South Basin (England) based on diatom remains and fossil pigments[J]. *J Paleolimn*, 1995, 14: 151-163.
- [10] 叶曦雯, 刘素美, 赵颖翡, 等. 东、黄海沉积物中生物硅的分布及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3): 265-269.
YE Xi-wen, LIU Su-mei, ZHAO Ying-fei, et al. The distribution of biogenic silica in the sediments of the East China Sea and the Yellow Sea and its environmental significance[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3): 265-269.
- [11] 赵颖翡, 刘素美, 叶曦雯, 等. 黄、东海柱状沉积物中生物硅含量的分析[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(3): 423-428.
ZHAO Ying-fei, LIU Su-mei, YE Xi-wen, et al. The analysis of biogenic silica in the sediments of the East China Sea and the Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(3): 423-428.
- [12] 叶曦雯, 刘素美, 张 经. 黄、渤海沉积物中生物硅的测定及存在问题的讨论[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 129-134.
YE Xi-wen, LIU Su-mei, ZHANG Jing. Determination of biogenic opal in sediment of the Huanghai and Bohai Sea and questions in the method[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(1): 129-134.
- [13] Eisma D, Van Der Gaast S J. Determination of opal in marine sediments by X-ray diffraction[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1971, 5: 382-389.
- [14] Ellis D S, Moore M Z. Calcium carbonate, opal and quartz in Holocene pelagic sediments and the calcite compensation level in the South Atlantic Ocean[J]. *J Mar Res*, 1973, 31: 210-227.
- [15] Chester R, Elderfield H. The infrared determination of opal in siliceous deep-sea sediments[J]. *Geochim Cosmochimica Acta*, 1968, 32: 1128-1140.
- [16] Leinen M. A normative calculation technique for determining opal in deep-sea sediments[J]. *Geochim Cosmochimica Acta*, 1977, 41: 671-676.
- [17] Eggimann D W, Manherm F T, Betzer P R. Dissolution and analysis of amorphous silica in marine sediments[J]. *J Sedimentary Petrol*, 1980, 50: 215-225.
- [18] Pokras E. Preservation of fossil diatoms in Atlantic sediments cores—control by supply rate[J]. *Deep Sea Res*, 1986, 33: 893-902.
- [19] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments[J]. *Deep Sea Res*, 1989 (9): 1415-1426.
- [20] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. The physical and chemical analyses for soils[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 448-449.
- [21] Yokichi Takayanagi, translated by Ying F. The guideline of the fossil [M]. Beijing: Geology Press, 1984: 67-70.
- [22] Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae (1-4 Teil)[M]// Ettl H, Gerloff J, Heyning H, et al. Sußwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1986, 1988, 1991a, 1991b.
- [23] 况琪军, 谭渝云, 万登榜, 等. 汉江中下游江段藻类现状调查及水华成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(1): 63-70.
KUANG Qi-jun, TAN Yu-yun, WAN Deng-bang, et al. On the phytoplankton in the middle and lower reaches of the Hanjiang River and the prevention of water blooms[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2000, 9(1): 63-70.
- [24] 董旭辉, 羊向东, 王 荣. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示属种[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 570-574.
DONG Xu-hui, YANG Xiang-dong, WANG Rong. Diatom indicative species of eutrophication of the lakes in the middle and lower reach regions of Yangtze River[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 570-574.
- [25] 董旭辉, 羊向东, 潘红玺. 长江中下游地区湖泊现代沉积硅藻分布基本特征[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 298-304.
DONG Xu-hui, YANG Xiang-dong, PAN Hong-xi. Distribution of modern lake sediment diatoms in the middle and lower reaches of Yangtze River catchment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 298-304.
- [26] Kristiina Vuorio, Annika Lagus, Janna M Lchtimaki, et al. Phytoplankton community responses to nutrient and iron enrichment under different nitrogen to phosphorus ratios in the northern Baltic Sea[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 322: 39-52.
- [27] CHEN S Y, YU X Q. Lake nutrient accumulation process from lacustrine records in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 526-529.
- [28] 杨 洪, 易朝路, 谢 平, 等. 人类活动在东湖沉积物中的记录[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3): 261-264.
YANG Hong, YI Chao-lu, XIE Ping, et al. Records of human activities in the sediments of Lake Donghu, Wuhan[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3): 261-264.
- [29] Denys L. Environmental changes in man-made coastal dune pools since 1850 as indicated by sedimentary and epiphytic diatom assemblages (Belgium)[J]. *Aquatic Conservation*, 2003, 13(3): 191-211.
- [30] 顾泳洁, 吕亚红. 苏州河沉积物中硅藻的垂直分布与水质变化[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3617-3623.
GU Yong-jie, LV Ya-hong. The vertical distribution of diatoms in the sediments and water quality change of Suzhou Creek[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3617-3623.
- [31] WU J T, Chang S C. Relation of the diatom assemblages in the surface to the pH values of an alpine lake in Taiwan[J]. *Arch Hydrobiol*, 1996, 137: 551-563.
- [32] Luc Denys. Relation of density-weighted averages of diatom indicator values to measured environmental conditions in standing freshwater[J]. *Ecological Indicators*, 2004(4): 255-273.
- [33] SU H, WU J T. Paleolimnological environment indicate by the diatom and pollen assemblages in an alpine lake in Taiwan[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22: 149-158.

致谢: 在实验和论文写作期间, 得到了施之新、张甬元、刘保元先生, 成水平研究员, 张世羊、高云霓、陶敏等课题组同仁的帮助, 谨致谢忱。