

近 2000 年来杭州西湖藻类种群的演替 与富营养化的发展过程

项斯端 吴文卫 黄三红 陈丽娟 姚 敏

(浙江大学生命科学院, 杭州 310012)

提 要 于 1991 年在西湖湖底作 15 个深度 1m 左右的钻孔, 根据其内微化石藻的垂直分布探索西湖近 2000 年藻类种群的演替, 并藉此反映湖泊的古生境及其富营养化发展的历程, 结果显示淡水西湖形成后藻类的垂直分布由下而上可分为 3 带: (1) 附生藻带 (短缝藻-桥穹藻-异极藻组合): -85cm 至 -45cm, 以喜酸性及真酸性的附生藻为主, 适应于当时的沼泽生境。 (2) 附生藻向浮游藻过渡带 (水花束丝藻-直链藻组合): 通常在 -30cm 至 -40cm 层段, 以不定性成分为主, 并有少量喜碱性藻种出现, 湖体显示中营养状态。 (3) 浮游藻带 (缢缩脆杆藻凸腹变种-四尾栅藻-螺纽鞘丝藻组合): -30cm 以上, 以喜碱性藻种为优势, 藻量增大进入富营养化时期, 到 -10cm 上下层段喜碱性藻种藻量形成峰值, 显示进入超富营养化时期。 -10cm 以上残骸量略有降低趋势, 这与 20 世纪 80 年代之后对西湖富营养化采取截污、引流等综合治理似有一定关系。

关键词 微化石藻 附生藻 浮游藻 喜酸性藻种 喜碱性藻种 营养状况 杭州西湖
分类号 Q949.2

杭州西湖濒临市区西侧, 为我国著名的游览性湖泊, 是一个小型浅水性富营养化湖泊, 湖面积仅 5.66km², 平均水深亦仅 1.56m。西湖的发育过程是由淡水湖沼经历了海水入侵的海相时期再淡化成现代西湖^[1], 形成淡水西湖的年代根据国家海洋局第二海洋研究所对湖底 0.75-0.95m 处泥炭层¹⁴C 测年值为 1860±194aBP, 因此, 一般研究多认为西湖形成淡水湖的年代距今约 2000 年。为了解西湖形成淡水湖泊之后, 湖内藻类种群的演替及湖泊营养变化历史, 作者等在湖内作了 15 个浅层柱状钻孔 (图 1), 分析了沉积层内藻类残骸的垂直分布, 由之了解近 2000 年来藻类种群的演替及其所反映的湖泊古生态, 从而探索西湖富营养化的发展过程。

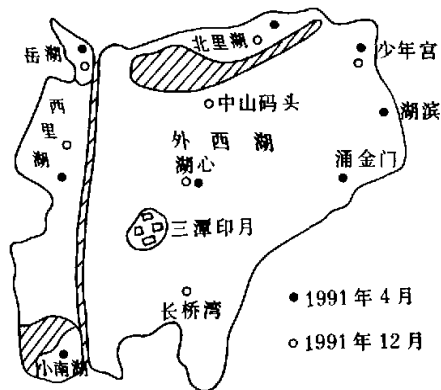


图 1 钻孔分布图
Fig. 1 Distribution of cores
in the West Lake, Hangzhou

· 国家自然科学基金项目 (39370140)。

收稿日期: 1999-08-15; 收到修改稿日期: 2000-04-02。项斯端, 女, 1928 年生, 教授。

1 方法

1991年4月及12月分别在西湖各湖区作柱状钻孔共15样柱(图1),在船上以重力冲击式采样管($\Phi 65\text{mm}$)插入湖底沉积层内,采样深度一般为湖底-80至-95cm,最深达-105cm,大多数样柱贯穿湖沼相沉积层.各样柱每隔10-20cm分层取泥样20g,加蒸馏水200mL稀释,并加 $\text{NaHCO}_3 15\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 助浮,共采集样品88份(4月50份,12月38份),按常规先在高倍显微镜下计数得出0.001mL水内含藻量,再计算每克泥内含藻量.

2 结果

2.1 各沉积层内化石藻含量

湖沼相的西湖沉积层在海陆过渡相的基底粉砂层之上,自下而上可分为泥炭层(或黑色腐植质淤泥层)、软腐泥层及稀腐泥层三层(表1).各沉积层的埋深在全湖有所上下,泥炭层顶板一般在湖底-45cm或-50cm处开始出现,而在受疏浚影响大的样柱则出现层位提高,如湖心4月份样柱泥炭层在-30cm即出现;在长桥、中山码头受疏浚影响小的样柱,到-70cm或-80cm才出现泥炭层,小南湖样柱到-55cm仍未见泥炭层(图2).同时各样柱内泥炭层厚度不一,如湖心点该层厚度不足20cm,而西里湖最厚可在40cm以上,与当年水草发育程度以及人为的疏浚在全湖不均一有关.

表1 沉积层性质及含藻体残骸量

Tab. 1 The properties of sediments and the abundance of microfossil algae

沉积层名称	沉积层性质	藻体残骸含量
湖沼相	稀腐泥层	棕褐色半流动性,稀粘质泥,藻体残骸含量高 东部二湖区 $351 \times 10^4 \text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 西部三湖区 $72 \times 10^4 \text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$
	软腐泥层	棕褐到褐色软质亚粘土,含维管束植物残体 东部二湖区 $228 \times 10^4 \text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 西部三湖区 $82 \times 10^4 \text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$
	黑色泥炭层或黑色腐植质淤泥层	黑色或黑褐色,含大量维管束植物残体,部分矿化 东部二湖区 $43 \times 10^4 \text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$ 西部三湖区 $6 \times 10^4 \text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$
海陆过渡相	基底粉砂层	灰白色粉砂质粘土,有机质和营养盐含量低 $(0-2.5) \times 10^4 \text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$

各沉积层内的含藻量明显不同,从表1可见,自下而上以数量级逐层递增,同时在同一沉积层内东部湖区(外西湖、北里湖)含藻量显然高于西部湖区(西里湖、岳湖、小南湖),相差约为3-5倍.

2.2 藻种的垂直分布

在15个样柱内共鉴定到化石藻55种,以含硅质细胞壁的硅藻门种数最多,达43种,占总种数的78%.此外绿藻门8种、蓝藻门2种、金藻门1种、裸藻门1种.硅藻门藻种按其pH的适应性按Hustedt分为真酸性、喜酸性、不定性、喜碱性、真碱性五大类^[2-4].现将西湖沉积层内43种硅藻分列于表2,再对照图3可见,在淡水期初形成时的黑色泥炭层或黑色腐植质层内以真酸性及喜酸性硅藻藻种为主,之后随湖泊富营养化而渐出现喜碱性硅藻成分,以及绿

藻门、蓝藻门一些适生于富营养环境的藻种。

表 2 主要硅藻藻种与 pH 值的关系

Tab. 2 The relationship between diatom sp. and pH values

喜碱性	双菱藻 <i>Surirella</i> sp.	不定性	光亮窗纹藻 <i>E. argus</i>	
	缢缩脆杆藻 <i>Fragilaria construens</i>		卵圆双眉藻 <i>Amphora ovalis</i>	
	缢缩脆杆藻凸腹变种 <i>F. construens</i> var. <i>venter</i>		扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>	
	放射针杆藻 <i>Synedra herolinensis</i>		尖异极藻 <i>Gomphonema acuminatum</i>	
	肘状针杆藻 <i>S. ulna</i>		球异极藻 <i>G. sphaerophorum</i>	
	针状针杆藻 <i>S. acus</i>		橄榄形异极藻 <i>G. olivaceum</i>	
	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>		瞳孔舟形藻矩形变种 <i>Navicula pupula</i> var. <i>rectangularis</i>	
	冰岛直链藻 <i>M. islandica</i>		偏肿桥穹藻 <i>Cymbella ventricosa</i>	
	意大利直链藻 <i>M. italica</i>		纤细桥穹藻 <i>C. gracilis</i>	
	变异直链藻 <i>M. varia</i>		埃伦桥穹藻 <i>C. ehrenbergii</i>	
	具星小环藻 <i>Cyclotella stelligera</i>		喜酸性	勃朗羽纹硅藻 <i>Pinnularia braunii</i>
	双尖菱板藻 <i>Hantzschia amphioxys</i>		弯羽纹硅藻 <i>P. gibba</i>	粗壮短缝藻 <i>Eunotia robusta</i>
	英吉利舟形硅藻 <i>Navicula anglica</i>		巴西短缝藻 <i>E. brasiliensis</i>	月形短缝藻 <i>E. lunaris</i>
	喙头舟形硅藻 <i>N. rhynchcephala</i>		瓮形短缝藻 <i>E. pectinalis</i>	普通肋缝藻 <i>Frustulia vulgaris</i>
	隐头舟形硅藻 <i>N. cryptocephala</i>		微绿肋缝藻 <i>F. viriolula</i>	窗格平板藻 <i>Tabellaria fenestrata</i>
弯棒杆藻 <i>Rhopalodia gibba</i>	真酸性	菱形肋缝藻 <i>F. rhomboids</i>		
不定性	短角美壁藻 <i>Catoneis silicula</i>	不清楚	草鞋形波缘藻 <i>Cyamatoptebra solea</i>	
	尖布纹藻 <i>Gyrosigma acuminatum</i>			
	放射舟形藻 <i>Navicula radiosa</i>			
	彩虹长筒藻 <i>Neidium iridis</i>			
	双菱藻 <i>Surirella linearis</i>			
	斑纹窗纹藻 <i>Epithemia zebra</i>			

在 15 个样柱内藻种垂直分布的基本规律可显示出 2000 年来湖体古环境的变化。根据 15 个样柱沉积层内化石藻的分布自下而上归纳为 3 带:附生藻带;附生藻向浮游藻过渡带;浮游藻带。

2.3 化石藻垂直分布及其组合

2.3.1 附生藻带(-85(-65)至-50(-45)cm) 以附生性藻种为主,组成短缝藻-桥穹藻-异极藻组合(*Eunotia* spp. -*Cymbella* spp. -*Gomphonema* spp. Assem.)。

分布在黑色泥炭层或黑色腐植质淤泥内,一般分布深度西部湖区的下界深于东部湖区。如西里湖可深至-85cm,岳湖-75cm,而湖心本带下界-65cm,与西部湖区沼泽化时期早于外湖且沼泽化程度大于湖心有关,上界则受湖内疏浚影响而变化,一般在-45至-50cm。本带化石藻以附生性的真酸性、喜酸性成分为主,如月形短缝藻、粗壮短缝藻、瓮形短缝藻、巴西短缝藻、弯羽纹藻、勃朗羽纹藻、普通肋缝藻、菱形肋缝藻以及窗格平板藻等,这些酸性藻种的存在与沉积层内大量维管束植物残体的存在显然有相关关系,显示西湖形成淡水湖泊后曾出现过水草繁生、逐渐沼泽化的时期,由于沼泽内大量维管束植物根系分泌的有机酸使水体常为微酸性弱还原环境,有利于喜酸性及真酸性的藻种存在。同时,由于该水体大量水生维管植物的生长消耗了水中 N、P 等营养成分,因此,水体除了上述的喜酸性藻种外,还伴生了多种耐贫营养生境的附生藻种,如扁圆卵形藻、埃伦桥穹藻、斑纹窗纹藻、光亮窗纹藻、瞳孔舟形藻矩形

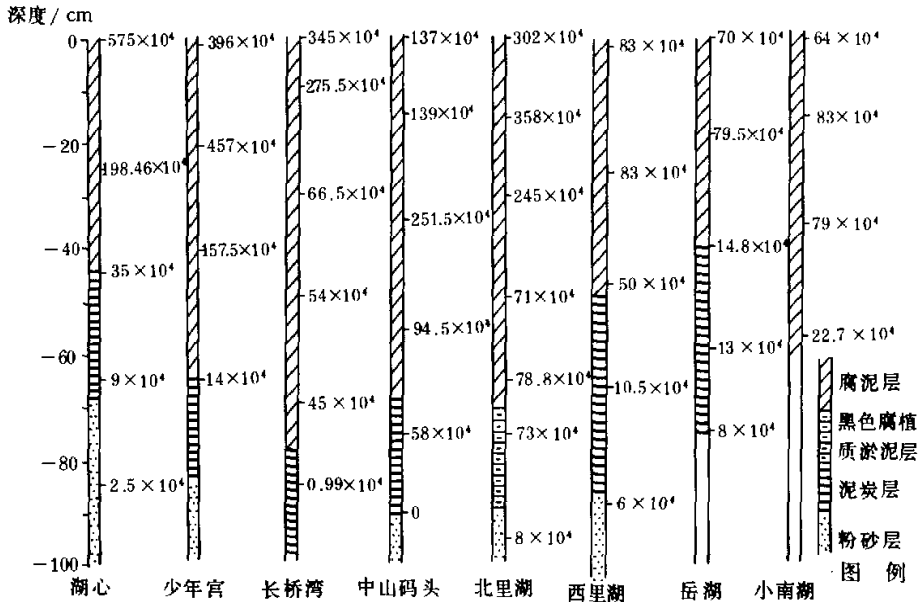


图2 西湖8样柱内各沉积层的化石藻密度(ind · g⁻¹)

Fig. 2 The density of microfossil algae in the sediments of eight cores

变种以及桥穹藻属多种(*Cymbella* spp.)、异极藻属多种(*Gomphonema* spp.) (图3)。本组合附生性藻种多样性大而丰度低,东部2湖区平均含化石藻量仅 $43 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$,西部3湖区则更低,平均仅 $(6-8) \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$,本带藻况显示当时西湖为腐植营养湖时期。

上述的各藻种中特别是月形短缝藻等短缝藻属种类以及菱形肋缝藻是酸性或微酸性指示藻种,而后的卵形藻、埃伦桥穹藻等对pH值适应范围较广,弱酸到碱性生境均能生长。因此,在连年种植荷花的北里湖、岳湖湖区,它们除了在-50cm以下的泥炭层分布外,可一直分布到沉积层上部(图3B)。

2.3.2 附生藻向浮游藻过渡带(-30至-40(-50)cm层段) 藻种生活型与前带不同,附生性成分中一些喜酸性的月形短缝藻等不复出现,而附生藻内一些对pH适应范围较广的不定性成分如扁园卵形藻、埃伦桥穹藻等仍可出现,同时一些浮游性成分如水花束丝藻休眠孢子亦有出现,形成水花束丝藻—冰岛直链藻组合(*Aphanizomenon flos-aquae-Melosira islandica* Assem.)。水花束丝藻一般是中营养水体的藻种但也能在富营养水体大量生长,绿藻门的盘星藻属(*Pediastrum*)2种及栅藻属(*Scenedesmus*)的四尾栅藻(*S. quadricanda*)、凡茂栅藻(*S. abundens*)以及喜碱性的缢缩脆杆藻及其凸腹变种也有低量出现(图3),本带藻况显示此时西湖已是中营养湖时期。

2.3.3 浮游藻带(-30cm至0cm层段) 以浮游性藻种为主,占95%—100%。但在有荷花种植或附近有木桩的沉积层内仍可有附生性藻种如扁园卵形藻等出现。本带藻种呈现缢缩脆杆藻凸腹变种—四尾栅藻—螺纽鞘丝藻组合(*Fragilaria construens* var. *venter-Scenedesmus*

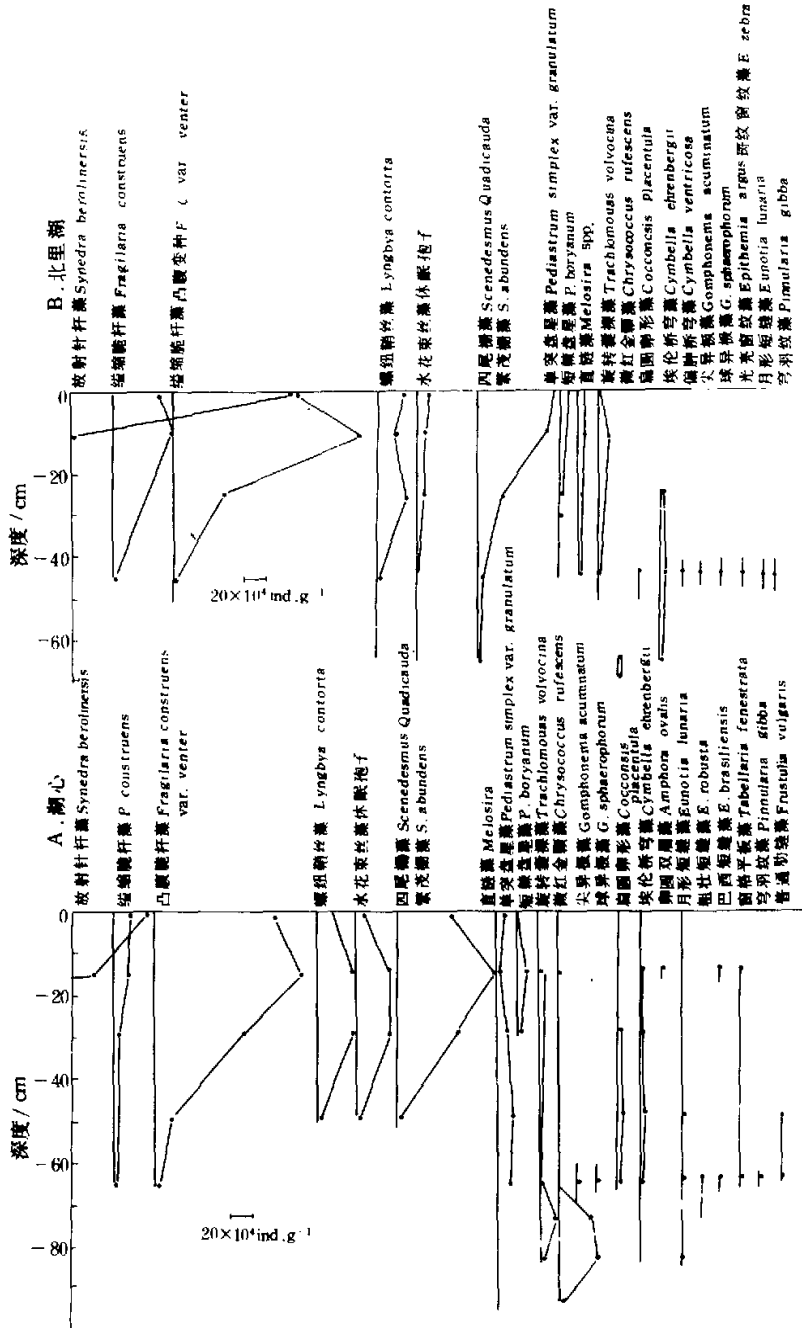


图 3 化石藻在湖底沉积层的垂直分布(A;外西湖湖心;B;北里湖)
 Fig. 3 Vertical distribution of microfossil algae in the sediment.

spp. -*Lyngbya contorta* Assem.), 以喜碱性的缢缩脆杆藻凸腹变种为优势种, 残骸高达 $150 \times 10^4 - 210 \times 10^4 \text{ ind} \cdot \text{g}^{-1}$, 占总残骸量的 40%—50%。水花束丝藻在该时期也大量生长, 但藻体未能在沉积层中保存下来, 仅有大量的休眠孢子存在。同时, 绿藻门的栅藻属(占 17%)及蓝藻门的螺旋鞘丝藻(占 14%)均大量出现。本层藻种以喜碱性成分为主, 显示西湖当时已进入富营养化时期, 在图 3 亦可见在 -10cm 附近层段喜碱性藻种的残骸量形成峰值, 显示西湖进入严重富营养化时期。-10cm 以上残骸量又略有减低。

本带最上 0cm 处为泥水交界层, 以放射针杆藻等活藻体形成组合, 因此 0cm 层不属于本文讨论的范畴。

综上所述, 从湖底 1m 深度的沉积层内保存了西湖近 2000 年来藻类演替的古生态, 能较好的显示淡水西湖形成之后如何从腐植营养湖向富营养湖演变的历程。

3 讨论

淡水西湖何时成为富营养湖泊由于缺乏历史性记录, 仅二十世纪中期之后有零散片段的一些资料, 无法系统分析, 因此作者只能根据沉积层化石藻的种类组合与它们适生的 pH 条件来反映当时的水环境并结合历史资料作些初步探讨。

从西湖沉积层内藻体残骸的垂直分布反映出 -45(-50)cm 以下到 -85cm 为附生藻带, -40(-50)cm 至 -30cm 层段为附生藻向浮游藻带转折。根据国家海洋局第二研究所在湖底 -75cm 至 -90cm 深度及 -25cm 至 -42cm 深度的¹⁴C 测年值看, 前者相当于本次调查的泥炭层附生藻带的下界, 测得地质年代 $1860 \pm 194 \text{ aBP}$, 相当于历史上的东汉年间(公元 25—220 年), 淡水西湖形成后开始沼泽化时期, 后者 -25cm 至 -42cm 深度与附生藻向浮游藻过渡时期相当, 其¹⁴C 值 $854 \pm 119 \text{ aBP}$, 推算其历史年代应为公元 12—13 世纪的南宋时期(1127—1279 年)。按西湖的有关历史资料记载约在东汉时期形成淡水湖^[5], 西湖形成后经常浅涸, 湖封蔓蔽, 到唐时白居易(公元 822 年)为引湖水灌田作《湖石记》, 文中论及湖内有茭、菱种植, 有无税田数十顷。到吴越钱穆时期湖中菰莲郁茂, 水草繁生, 钱王设撩湖兵士千人专司开浚。入宋之后豪族霸占, 私家辟菱荡茭田, 西湖水涸草生, 待苏轼知杭后, 上奏曰:“熙宁(1072)年时湖之葑合者十二、三耳, 而今十六、七年之间, 逐塞其半”, 当时积葑四千一百多亩。之后苏轼在治理西湖时取葑田积于湖中为苏堤^[1], 但他当时认为吴人种菱春辄芟除, 因此菱荡仍可租佃未加禁止。直到赵渊于宋淳佑七年(1247 年)奉命疏浚西湖才尽禁植菱、荷, 始尽锄菱根菱荡, 以免复生, 才使西湖水草繁生的状况得到根本性改变^[6,7]。

从地质年代与西湖史料对照起来看, 似乎东汉到南宋之前西湖经常水草蔓生, 因此沉积层中藻体残骸必然以附生藻为优势。待南宋偏安杭州之后, 将西湖进一步建成风景游览性湖泊, 与湖内藻类成份由附生性转变为以浮游性为优势的情况相符。

在沉积层 -10cm 附近层段化石藻量形成峰值。若参照西湖近年沉积速率 $0.39 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 推算其年代^[8], 则 -10cm 层段距今约 30 多年, 应为 20 世纪六、七十年代, 与当时西湖受原浣纱河将城市污水排入西湖而造成西湖富营养化加剧发展有一定关系。图 3 也显示近泥表层藻量虽高, 但不少喜碱性藻种量较 -10cm 附近的峰值似有降低趋势, 这和 80 年代之后政府部门对西湖富营养化采取截污、引流等一系列综合治理措施似有一定关系。

参 考 文 献

- 1 项斯端. 从藻类化石的垂直分布探讨杭州西湖的演变历程. 海洋与湖沼, 1999, 30(1): 14-24
- 2 日本生态学会环境问题专门委员会. 环境和指示生物(水域分册). 北京: 中国环境科学出版社, 1987
- 3 Haworth E Y. The diatoms of a sediment core from Blea Tarn, Langdale. *J Ecol*, 1969, 57: 429-439
- 4 Round F E. The diatoms of a core from Esthwaite water. *New Phytol*, 1961, 60: 43-59
- 5 章鸿钊. 杭州西湖成因一解. 中国地质学会志, 1924, 3(1): 21-29
- 6 施 涛. 淳佑临安志. 卷第十. 见: 南宋临安两志. 杭州: 浙江人民出版社, 1983. 185-189
- 7 谭其骧. 杭州都市发展之经过. 杭州历史丛编之序. 杭州: 浙江人民出版社, 1947
- 8 吴静波, 焦 磊, 章永昌. 杭州西湖湖底表层沉积物——内负荷的积累和反馈. 见: 杭州市环保局编. 西湖环境研究论文集, 1990. 91-100

Algae Species Succession and Trophic Developing Process During the Past 2000 Years in the West Lake, Hangzhou

XIANG Siduan WU Wenwei HUANG Sanhong CHEN Lijuan YAO Min

(College of Life Science, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract

Fifteen One-meter-deeped cores were drilled in West Lake, Hangzhou, in 1991. The vertical distribution of microfossil algae in the sediment were analyzed, in order to study the algae succession and trophic developing process of West Lake. Three zones were divided as follows:

(1) Epiphytic algae zone (*Eunotia* spp. -*Cymbella* spp. -*Gomphonema* spp. assem.): -85cm to -45cm deep, mainly made up of acidobiotic and acidophilous species which were suitable for the bog stage in 2000 years ago.

(2) Transitive zone from epiphytic algae to phytoplankton (*Aphanizomenon flos-aquae* -*Melosira* spp. assem.): usually existed in a depth between -30cm to -40cm, consisted of indifferent species combining with some alkaliphilous species, indicating that the lake had entered into mesotrophic stage.

(3) Phytoplankton zone (*Fragilaria construens* var. *venter* -*Scenedesmus quadricauda* -*Lyngbya contorta* assem.): At the depth of -30cm and above alkaliphilous species became the dominant species and its density were increased indicating that the lake had been entered into eutrophic stage. Around the depth of -10cm, the density of microfossil algae reached the peak value, representing a hypertrophic stage of West Lake. At the depth of -10cm and above, the density of microfossil algae were decreased, which maybe relative to the government's comprehensive control of eutrophication after 1980.

Key Words Microfossil algae, epiphytic algae, phytoplankton, acidophilous species, alkaliphilous species, trophic state, West Lake (Hangzhou)