J. Lake Sci.(湖泊科学),2011,**23**(1):67-72
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2011 by *Journal of Lake Sciences*

淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析*

吴阿娜,朱梦杰,汤　琳,朱　刚,汪　琴,张锦平**
(上海市环境监测中心, 上海 200030)

摘　要:根据 2008 年 5 -9 月专项监测数据,分析蓝藻水华高发期淀山湖叶绿素 a 浓度的动态变化,及其与 pH、溶解氧、TN、TP 等环境因子的相互关系. 结果表明,淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 存在明显的时间变化和空间分异,特别是叶绿素 a 的峰值共对应了 3 次水华暴发过程. 其叶绿素 a 对数与总磷对数呈极显著正相关,与硝酸盐氮、TN/TP 呈负相关,与总氮、氨氮等则无显著相关性;这表明淀山湖可能是一定程度的磷限制性湖泊. 此外,叶绿素 a 与水温、pH、溶解氧呈显著正相关,与透明度存在极显著负相关.
关键词:淀山湖;叶绿素 a;蓝藻水华;环境因子;相关分析

Dynamics of chlorophyll-a and analysis of environmental factors in Lake Dianshan during summer and autumn

WU Enuo, ZHU Mengjie, TANG Lin, ZHU Gang, WANG Qin & ZHANG Jinping
(*Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai* 200030, *P. R. China*)

Abstract: According to the monitoring data at 13 sampling sites of Lake Dianshan from May to September 2008, the relationship between chlorophyll-a concentrations and environmental factors (water temperature, pH, DO, TN and TP) was investigated. The results indicated that there was an obvious temporal and spatial variation of chlorophyll-a. The first cyanobacterial bloom in 2008 occurred on July 23 at Qiandungang site and Youyongchang site. The most severe bloom covered a total area of 17km^2 on August 27. Significantly positive logarithmic correlation was found between chlorophyll-a and total phosphorus, but not for ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen. Phosphorus might be the main limited factor in Lake Dianshan. Significantly positive correlations were found between chlorophyll-a concentration and water temperature, pH, dissolved oxygen, and markedly negative correlation between chlorophyll-a and transparency.
Keywords: Lake Dianshan; chlorophyll-a; cyanobacterial bloom; environmental factor; correlation analysis

淀山湖位于上海市青浦区和江苏省昆山市交界处,湖区面积为 62km^2. 作为上海市郊最大的天然淡水湖泊和区域重要水源地之一,淀山湖已经成为黄浦江上游水源保护区的重要组成部分. 当前淀山湖氮磷营养盐浓度已远高于湖泊富营养化水平,已经具备了暴发大规模、大面积蓝藻水华的水质营养条件,特别是夏、秋季节,在合适的水温、光照及水文等条件下,成为蓝藻水华暴发的高发季节[1-2]. 2007 年、2008 年淀山湖蓝藻水华频发,特别是 2007 年 8 月 30 日淀山湖不同程度的蓝藻水华覆盖了全湖将近 80% 的水面. 淀山湖蓝藻水华可能对区域饮用水安全及水环境带来重大影响,因此有必要对其发生规律进行研究,以期为供水安全和环境保护提供必要的参考资料.

有关淀山湖的研究目前主要集中于水质富营养化评价、藻毒素污染水平等方面的初步探讨,对于藻类水华期间的藻类生物量及其影响因子的分析,尤其是对蓝藻水华高发期这一特殊时期的针对性研究仍相对较少[1,3-5]. 叶绿素 a 具有湖泊富营养化水平和水华消长情况的表征能力,开展叶绿素 a 及其与环境因子的相关性研究具有重要的意义[6-7],本研究即以淀山湖蓝藻水华高发期(2008 年 5 -9 月)专项监测数据为基

* 上海市科委项目(08DZ1203007)资助. 2010 -01 -18 收稿; 2010 -08 -24 收修改稿. 吴阿娜,女,1980 年生,博士,工程师; E-mail:enuowu@hotmail.com.
** 通讯作者;E-mail:zhangjp@semc.gov.cn.

础,分析淀山湖叶绿素 a 含量的时间动态变化和空间分异特征,并探讨其与营养盐指标及其它相关环境因子的内在关联,以期为淀山湖蓝藻水华预警等水环境保护工作提供一定的科学依据.

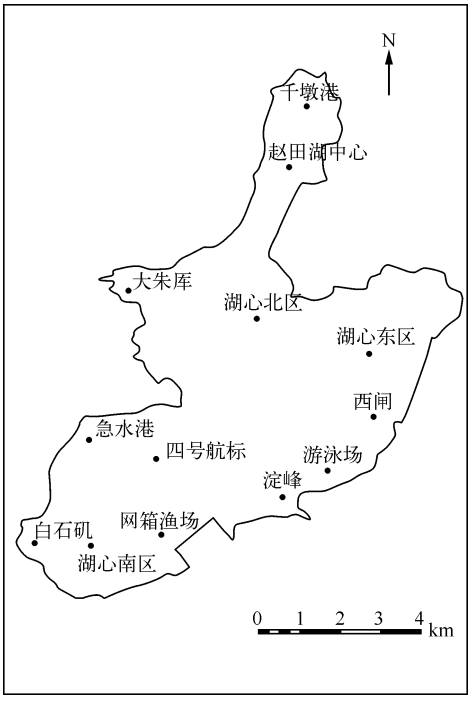


图 1 淀山湖监测点位分布

Fig. 1 Sampling sites in Lake Dianshan

1 研究方法

1.1 采样方法

淀山湖共设 13 个常规监测点位(图 1),其中急水港、千墩港、大朱厍和白石矶代表淀山湖的主要进水口,西闸和淀峰分别为淀山湖主要出水口,赵田湖中心、湖心北区、湖心东区、四号航标、湖心南区、游泳场及网箱渔场则为湖体监测点位.

为有效监控淀山湖蓝藻水华发生及规律,于蓝藻水华高发季节(2008 年 5 -9 月)开展为期 5 个月的专项监测,水样每周采集一次,共计 18 次. 每次的采样工作一般在上午 9:00 到下午 14:00 之间进行,各点位采样次序一致,尽量减小因采样时间不同而带来的误差.

1.2 分析方法

监测项目包括水温(T)、溶解氧(DO)、pH、氨氮(NH_4-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、可溶性磷酸盐(PO_4^{3-}-P)、硝酸盐氮(NO_3-N)、亚硝酸盐氮(NO_2-N)、透明度(SD)和叶绿素 a,其中水温、pH、溶解氧以及透明度为现场测定,其它指标带回实验室分析测定,水样均取自水面以下 0.5m.

样品分析方法:叶绿素 a 测定采用分光光度法,取 500ml 水样用醋酸纤维滤膜抽滤,滤膜低温干燥后用丙酮萃取,离心后取上清液测定吸光度;透明度采用萨氏盘测定;其它相关理化指标分析方法依据《水和废水监测分析方法(第四版)》[8].

数据统计方法:利用 SPSS for Windows 17.0 计算统计数据的相关系数,分析淀山湖水体叶绿素 a 与环境因子的相关性,建立相应的回归方程.

2 结果与讨论

2.1 叶绿素 a 时空变化特征

根据淀山湖蓝藻水华高发期(2008 年 5 -9 月)13 个监测断面共 18 次监测结果,淀山湖叶绿素 a 平均值为 18.89mg/m^3,变化范围在 0.39 -513.11mg/m^3. 可以看出,监测期间淀山湖出水口、进水口及湖区监测点位叶绿素 a 存在较大程度的时间变化和空间分异.

从叶绿素 a 动态变化上,本次调查共监测到淀山湖叶绿素 a 的 3 次明显峰值,分别为 7 月 23 日、8 月 19 日、8 月 27 日,上述时段淀山湖均发生了明显的蓝藻水华暴发过程(图 2). 7 月 23 日左右,淀山湖发生 2008 年首次蓝藻水华,主要集中在游泳场沿岸和江苏省界内千墩港桥附近,其中千墩港桥叶绿素 a 含量达到 513.11mg/m^3. 8 月 19 日至 20 日,淀山湖蓝藻水华面积增大,其中 19 日游泳场、赵田湖中心至湖心北区等附近水域叶绿素 a 浓度均达 115mg/m^{3}以上;20 日蓝藻水华区域逐渐向西北方向推移,游泳场点位叶绿素 a 降至 6.27mg/m^3,而湖心北区、湖心东区点位含量则受到蓝藻堆积影响,持续上升至 324.55mg/m^{3}和446.87mg/m^3. 8 月 27 日左右淀山湖又一次暴发蓝藻水华,发生范围集中在淀山湖淀峰-急水港航道以北的湖区水面,湖心北区、游泳场、湖心东区及主要出水口监测点位叶绿素 a 均达到 30mg/m^{3}以上.

从叶绿素 a 空间分布上,根据各点位监测值的加权平均计算各功能区叶绿素 a,可以发现进水口叶绿素

a 含量相对较高，且随时间变化较大，最高高达 134.35mg/m^3；出水口点位叶绿素 a 含量相对较低，叶绿素 a 波动范围在 0.39－59.21mg/m^3；湖区 7 个监测点位叶绿素 a 变化相对较大，特别是湖心北区、湖心东区及赵田湖中心等点位波动范围在 2.71－446.87mg/m^3.

表 1 2008 年 3 次淀山湖蓝藻水华过程及叶绿素 a 监测结果

Tab. 1 The cyanobacterial bloom of Lake Dianshan and chlorophyll-a concentration in 2008

蓝藻水华暴发时间	发生面积(km^2)	主要发生范围	叶绿素 a (mg/m^3)
7 月 23 日	—	千墩港附近/游泳场沿岸	3.09－513.11
8 月 19 日	8.0	游泳场/西闸/湖心北区/赵田湖中心等区域	7.03－320.10
8 月 27 日	14.0－17.0	淀峰-急水港航道以北水面	8.81－115.25

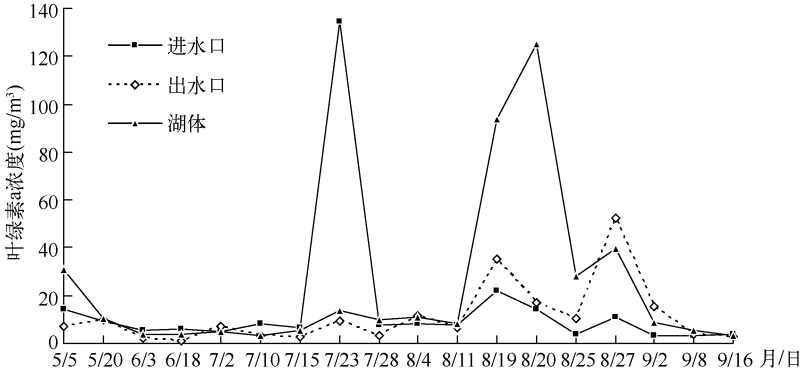


图 2 淀山湖各功能区叶绿素 a 含量的时空变化

Fig. 2 Temporal and spatial changes of chlorophyll-a in different section of Lake Dianshan

2.2 叶绿素 a 与相关环境因子

2.2.1 *相关分析* 湖泊水体中浮游植物的生长受到多种环境因子的影响和制约，而叶绿素 a (Chl. a)的现存量则在一定程度上反映浮游植物的生长状况. 淀山湖不同功能区 Chl. a 含量和相关环境因子之间的 Pearson 相关系数及其双尾显著性分析结果(表 2)可以看出，进水口、湖区及出水口等各功能区 Chl. a 与 pH、DO、TP 均呈极显著相关，湖区、出水口 Chl. a 与 SD、NO_3-N 呈显著负相关，湖区 Chl. a 与 T 呈显著相关. 综合全湖 13 个监测点位监测数据，淀山湖全湖 Chl. a 含量与 pH、T、DO 及 TP 呈显著正相关，与 SD 呈极显著负相关，而与氨氮、总氮、硝酸盐氮及可溶性磷酸盐等则无显著相关.

表 2 淀山湖叶绿素 a 含量与环境因子之间的相关系数及检验结果

Tab. 2 Correlation coefficients between chlorophyll-a and environmental factors in Lake Dianshan

因子	进水口	湖区	出水口	全湖
pH	0.425 **	0.596 **	0.826 **	0.499 **
SD	－0.226	－0.244 **	－0.358 *	－0.234 **
T	0.143	0.176 *	0.224	0.162 *
DO	0.339 **	0.304 **	0.733 **	0.310 **
NH_4-N	－0.039	－0.113	0.289	－0.071
TP	0.782 **	0.488 **	0.433 **	0.602 **
TN	－0.020	－0.063	－0.158	－0.044
NO_2-N	－0.018	－0.119	－0.212	－0.082
NO_3-N	－0.012	－0.228 *	－0.470 **	－0.163 *
PO_4^{3-}-P	0.020	0.081	0.301	－0.099
TN/TP	－0.164	－0.202	－0.126	－0.131 *

* $P < 0.05$，显著相关；** $P < 0.01$，极显著相关.

2.2.2 叶绿素 a 与营养盐指标 营养盐的含量变化可以影响浮游植物的数量,而浮游植物的生长状况又是营养盐含量变动的主要条件. 作为浮游植物体内主要成分的叶绿素 a,其与营养盐的相关关系研究一直是湖泊富营养化研究中的热点问题. 由于其关系的复杂性,以往研究中学者对氮、磷等营养盐与叶绿素 a 的关系存在各种不同的观点[9-12]. 淀山湖蓝藻"水华"高发期叶绿素 a 与氮、磷等营养盐相关分析结果表明,Chl. a 与 TP 存在极显著正相关,与硝酸盐氮存在显著负相关,与总氮、亚硝酸盐氮、可溶性磷酸盐等指标均不存在明显相关.

2008 年淀山湖蓝藻水华高发期监测结果显示,淀山湖 TP、TN 含量在监测期间存在较大程度的变化,总体均超过富营养化标准[1];TP 变化幅度在 0.063 - 1.04mg/L,均值为 0.201mg/L,超过地表水 V 类湖库标准;TN 含量变化幅度在 0.391 - 9.33mg/L,均值为 2.42mg/L. TP 在总体趋势上与 Chl. a 存在明显的一致性,而 TN、TN/TP 与 Chl. a 关系相对较弱(图 3). 已有研究结果表明可利用 N/P 大于 7 时,P 是可能的限制性营养盐[7],而本研究期间淀山湖 TN/TP 平均值为 14.7,且相关分析显示 Chl. a 与 TP 存在极显著正相关,因此磷可能是淀山湖浮游植物生长潜在的限制性营养盐. 但值得一提的是,由于目前淀山湖氮、磷营养盐已远超过富营养水平,水华暴发可能更多受到水文、气象等因子的协同诱导作用,当然这需要更多的数据分析加以明确.

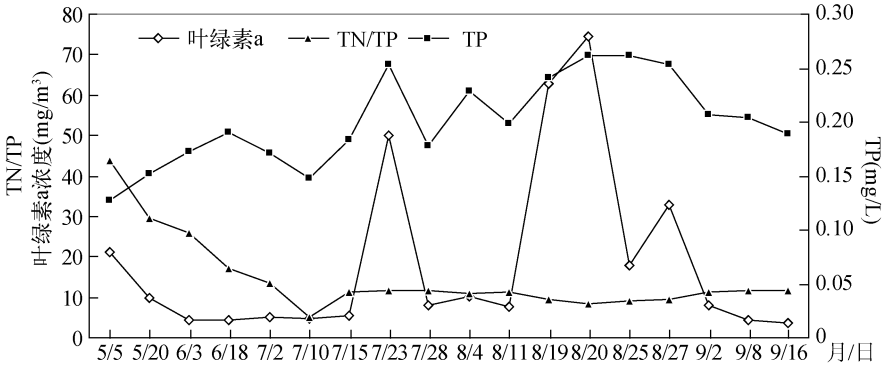


图 3 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 浓度 TN/TP 和 TP 浓度的变化

Fig. 3 The fluctuations of chlorophyll-a, TN/TP and TP in Lake Dianshan

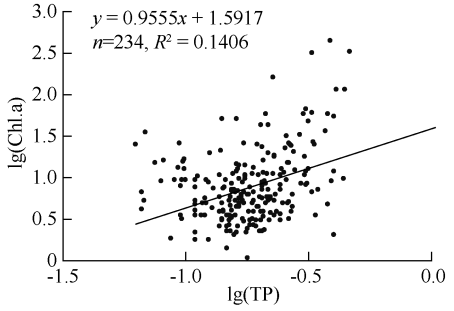


图 4 淀山湖蓝藻水华高发期总磷与叶绿素 a 的相关分析

Fig. 4 The correlation between chlorophyll-a and total phosphorus of Lake Dianshan

OECD 在北美、北欧、阿尔卑斯地区进行的综合调查表明,lg(Chl. a) = 0.96lg(TP) - 0.55[12],日本相关研究结果表明 lg(Chl. a)与 lg(TP)存在显著正相关[13],本研究进一步对 lg(Chl. a)与 lg(TP)进行相关分析和回归分析,表明两者存在极显著正相关,相关系数为 0.327,其回归方程为 lg(Chl. a) = 0.9555lg(TP) + 1.5917(图 4).

2.2.3 叶绿素 a 与理化参数 (1) Chl. a 与水温、pH:温度直接影响藻类的生长,淀山湖 Chl. a 含量与水温呈显著正相关,相关系数为 0.162,表明水温对浮游植物的生长具有一定的促进作用,但比较相关研究该相关程度较弱,可能与本次监测为蓝藻水华高发的夏、秋季节,水温变化相对较为平缓有关. 淀山湖蓝藻水华高发期湖泊水体呈弱碱性,pH 主要分布在 7.0 - 9.0 之间,相关分析表明淀山湖 Chl. a 含量与 pH 呈显著正相关,相关系数为 0.499(图 5a),这主要是由于浮游植物光合作用过程中吸收二氧化碳,从而增加了 pH 值. Chl. a 与水温和 pH 均呈显著正相关的结论与王丽卿等的研究结果均较为吻合[4,14-16].

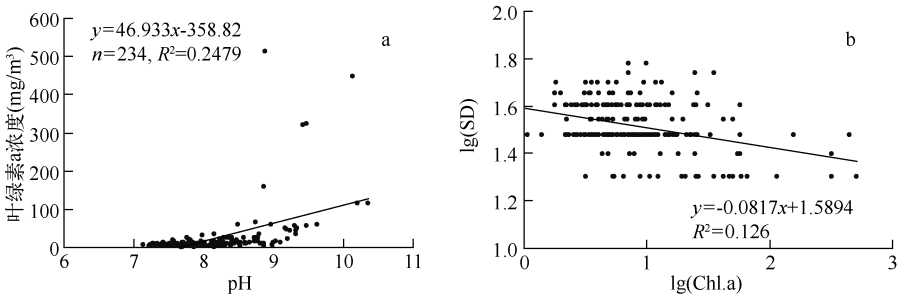


图 5 淀山湖 pH(a)和透明度(b)与叶绿素 a 的相关分析

Fig. 5 The correlation between chlorophyll-a and pH(a), transparency(b) of Lake Dianshan

(2) Chl. a 与透明度：蓝藻水华暴发期间，藻类的大量聚集往往引起湖体透明度的下降，因此透明度与叶绿素 a 存在显著负相关(图 5b)，但由于受到不同水流情况干扰影响，淀山湖进水口、出水口及湖区等不同功能区相关程度存在一定差异(表 2). 目前日本、美国等国家根据当地湖泊分析结果多表明透明度与叶绿素 a 存在反双曲线关系[17]，进一步相关分析结果显示淀山湖蓝藻水华高发期 lg(Chl. a)与 lg(SD)呈极显著负相关，相关系数为 0.355，其关系式为 lg(SD) =1.5894 -0.0817lg(Chl. a).

(3) Chl. a 与 DO：DO 作为体现湖泊水体营养水平的重要指示参数，不仅是浮游植物生长的重要条件，也是浮游植物代谢过程所必需的. 相关分析显示淀山湖 Chl. a 含量与 DO 呈极显著的正相关关系，相关系数为 0.310，叶绿素 a 与溶解氧变化具有较高的一致性，表明在淀山湖采样期间 Chl. a 含量越高，浮游藻类数量越多，光合作用使得水体中 DO 浓度增加(图 6). 尽管有研究发现水华大量发生期间可能会因大量的藻类死亡分解而消耗水体中 DO 从而使水体呈厌氧状态，但本研究中淀山湖蓝藻水华覆盖程度相对较低且水华持续时间较短(一般仅为 1 -3d)，监测期间并未记录藻类大量聚集使得溶解氧迅速下降的现象.

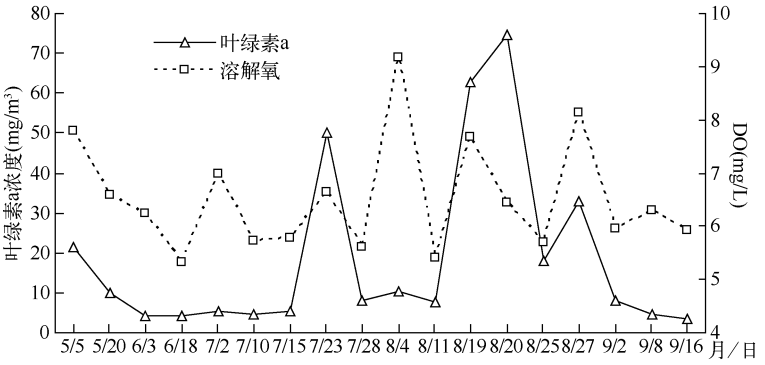


图 6 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 与溶解氧变化

Fig. 6 The fluctuations of chlorophyll-a and DO in Lake Dianshan

3 结论

湖泊富营养化是现阶段我国主要的水环境问题，湖泊蓝藻水华的发生规律、内在机制以及预警研究已经成为重要的研究课题. 近年来淀山湖蓝藻水华频发，开展相关的基础研究，可以为富营养化防治及蓝藻水华预警提供科学数据及决策依据. 本文尝试利用 2008 年淀山湖专项监测数据，分析淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 的动态变化趋势和空间分异特征，并初步识别其相关环境因子.

(1) 2008 年淀山湖蓝藻水华高发期(5 -9 月)叶绿素 a 平均值为 18.9mg/m^3，已达到富营养化水平，叶绿素 a 存在明显的动态变化和空间分异，在时间上根据叶绿素 a 共识别出 3 次明显的蓝藻水华暴发过程，空

间上进水口叶绿素 a 浓度相对较高.

(2) 淀山湖可能是一定程度的磷限制性湖泊,叶绿素 a 的对数与总磷的对数呈极显著正相关,其回归方程为 lg(Chl. a) = 0.9555lg(TP) + 1.5917,叶绿素 a 与氨氮、总氮等均不存在显著相关关系,与硝酸盐氮、TN/TP 存在负相关.

(3) 淀山湖叶绿素 a 含量与水温、pH、溶解氧等理化环境因子呈显著正相关,而叶绿素 a 浓度与透明度存在极显著负相关关系. 其中水温是影响浮游植物生长的关键因子,而 pH、溶解氧及透明度是叶绿素 a 浓度变化的被动反应因子.

4 参考文献

[1] 宋永昌. 淀山湖富营养化及其防治研究. 上海:华东师范大学出版社, 1992.

[2] 程 曦, 李小平. 淀山湖氮磷营养物 20 年变化及其藻类增长响应. 湖泊科学, 2008, **20**(4):409-419.

[3] 施 玮, 吴和岩, 赵耐青等. 淀山湖水质富营养化和微囊藻毒素污染水平. 环境科学, 2005, **26**(5):36-41.

[4] 王丽卿, 张军毅, 王旭晨等. 淀山湖水体叶绿素 a 与水质因子的多元分析. 上海水产大学学报, 2008,**17**(1):58-64.

[5] 杨漪帆, 朱永青, 林卫青. 淀山湖蓝藻水华及其控制因子的模型研究. 环境污染与防治, 2009,**31**(6):58-63.

[6] 吕唤春, 王飞儿, 陈英旭等. 千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析. 应用生态学报, 2003, **14**(8):1347-1350.

[7] 韩新芹, 叶 麟, 徐耀阳等. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态及其影响因子分析. 水生生物学报, 2006, **30**(1):89-94.

[8] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京:中国环境科学出版社, 1997.

[9] 胡 韧, 林秋奇, 段舜山等. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素 a 与磷分布的特征. 生态科学, 2002, **21**(4):310-315.

[10] Lau SSS, Lane SN. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication:a long-term study. *Science of the Total Environment*, 2002, **228**:167-181.

[11] Chen Y, Fan C, Teubner K *et al*. Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll-a in a large shallow lake, Taihu, China:an 8-year investigation. *Hydrobiologia*, 2003, **506**(1):273-279.

[12] 世界经济合作与发展组织. 水体富营养化监测评价与防治. 北京:中国环境科学出版社, 1989.

[13] 宋敬阳. 湖泊富营养化相关物理量的定量关系. 中国环境管理干部学院学报, 1999, **9**(1):33-36.

[14] 王飞儿, 吕唤春, 陈英旭等. 千岛湖叶绿素 a 浓度动态变化及其影响因素分析. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2004,**30**(1):22-26.

[15] 阮晓红, 石晓丹, 赵振华等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系. 湖泊科学, 2008, **20**(5):556-562.

[16] 刘冬燕, 宋永昌, 陈德辉. 苏州河叶绿素 a 动态特征及其与环境因子的关联分析. 上海环境科学, 2003, **22**(4):264.

[17] 刘鸿亮. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社,1987.