J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(2):244-250
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn

一座富营养化水库——福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布*

林 佳,苏玉萍**,钟厚璋,陈友震,李艳芳,林 慧
(福建师范大学环境科学与工程学院,福州 350007)

摘 要:对福建省水温分层型富营养化山仔水库夏季大坝断面垂向水体的物理化学参数进行了监测分析,并应用荧光分析法结合显微镜细胞计数法,对垂向分层水体和沉积物中的浮游植物生物量、群落组成及丰度进行了分析. 结果表明,水库的水温分层能够引起水化学指标的分层. 夏季大坝断面水体中的浮游植物以蓝藻门微囊藻属占绝对优势,垂向分布表现为表层的浮游植物细胞数量高于底层,温跃层以下细胞数急剧减少,水温分层可能决定着浮游植物的垂向分布,底泥中的浮游植物将为水体的水华提供"种源".
关键词:水温分层;富营养化;山仔水库;浮游植物;垂向分布

Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi Reservoir(Fujian) during summer stratification

LIN Jia, SU Yuping, ZHONG Houzhang, CHEN Youzhen, LI Yanfang & LIN Hui
(*College of Environmental Science and Engineering*, *Fujian Normal University*, *Fuzhou* 350007, *P. R. China*)

Abstract: Water quality variables and phytoplankton in Shanzi Reservoir in Fujian Province were monitored and sampled during a period of the summer stratification. The fluorometry and light microscopy were used to measure the phytoplankton abundance and the biomass of phytoplankton in water column and sediment. The results showed that a clear thermal stratification was formed in summer and could cause the stratification of the physical and chemical parameters. *Microcystis*, the absolutely dominant Cyanophyta specie in Shanzi Reservoir, had a higher abundance in surface water than in bottom, and the biomass presented a sharp decline bellow the thermocline. Hence, the thermal stratification might affect the vertical distribution of phytoplankton population. The abundant cyanobacterial cells in sediment could provide a "species of source" for water blooming in summer.
Keywords: Thermal stratification; eutrophication; Shanzi Reservoir; phytoplankton; vertical distribution

水体富营养化是当前世界范围内备受关注的水环境问题之一,特别是作为饮用水源地的水库. 富营养化改变了水库水体的理化性质,大大影响了水库功能的发挥,产毒素藻类的暴发直接威胁到人们的饮水安全. 分层型水库由于其水体稳定性强,容易导致浮游植物多样性降低,种类组成向单一性的富营养化蓝藻类转变,进而形成水库的优势种[1-3]. 目前国内对水温分层型水库浮游生物的研究尚处于起步阶段,对水温分层型水库富营养化"水华"发生及演变的机制研究主要集中在探索浮游植物随时间和水库水平空间的变化,缺乏对浮游植物尤其是对优势种属随着垂向水体变化规律的研究[4-5]. 国外已有的研究侧重于探讨海洋与湖库的水体动力学、水体化学以及光照、营养盐、浮游动物等多种因素对浮游植物时空分布的影响[6-9],而水库沉积物对浮游植物垂向分布的影响鲜见报道. 国内外对湖泊相关的研究表明,沉积物常作为浮游植物休眠体的场所,为种群再生长提供必需的"种源",在一定程度上为藻类水华的暴发提供条件[10-12]. 因此,研究

* 福建省自然科学基金项目(2007J0235,WO750003)、福建省教育厅科学研究基金项目(JB07074)和福建省亚热带资源与环境重点实验室开放课题基金项目联合资助. 2009-09-18 收稿;2009-11-30 收修改稿. 林佳,女,1985年生,硕士研究生;E-mail:linjia1025@163.com.
** 通讯作者;E-mail:ypsu@fjnu.edu.cn.

浮游植物在水库垂向分层水体与沉积物中的分布及其影响因素，对揭示分层型富营养化水库“水华”的暴发机理具有重要意义.

目前，福建省主要饮用水源地山仔、东张、山美、东圳等水库均呈现不同程度的富营养化，这些水库水温的季节性分层，是否决定着水体优势浮游植物的分布？沉积物是否为优势浮游植物种群再生长提供必需的“种源”？为此，本文以山仔水库为研究对象，对其夏季垂向分层水体和沉积物的物理化学指标和浮游植物指标进行监测分析，探讨影响夏季优势浮游植物群落垂向分布的因子，以期为水温分层型水库富营养化的防治提供科学的参考.

1 研究对象概况

山仔水库位于福建省福州市连江县，水库中心的地理坐标是北纬 26°17′51″，东经 119°21′35″，山仔水库处河谷地段，属中亚热带季风气候区域，气候温暖，四季分明，雨量适中. 整个库区流域面积为 1646km^2，总库容 $1106\times10^8 m^3$，于 1994 年 11 月开始蓄水发电，1997 年被确定为福州市的第二饮用水源地. 近几年库区藻类大量增长，尤其是能分泌毒素的蓝藻在春末至夏初形成“水华”，严重威胁到福州市供水安全，山仔水库的水质状况引起人们的普遍关注. 山仔大坝河段垂直水温属于单对流型，从春季-夏季-秋季形成稳定的热分层，冬季形成均匀的水体温度[13-14].

2 研究方法

2.1 水样的采集与处理

2009 年 7 月，于山仔水库大坝断面(26°20′24″N，119°19′48″E)采用 Hondex 便携式数字声纳深度计测定水深；使用塞氏盘测定水体的透明度；利用 2L 采水器按 1m 间隔，采集水库大坝垂向分层水样，现场使用水银温度计测定水温；采集垂向五层水样，即水面以下 0.5m，3m，6m，26m 及坝底 47m 水样，现场使用水银温度计测定水温，应用便携式溶解氧分析仪(JPB－607)测定水体溶解氧；将水样保存带回实验室后使用数字式 pH 分析仪(PHS-3C)及便携式浊度仪(AQ2010)测定五层水样的 pH 和浊度；氨氮(NH_3-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、总溶解性磷(TDP)、总铁(Fe)和亚铁(Fe^{2+})按《湖泊富营养化调查规范》进行保存和分析[15]. 此外，同步采集垂向五层水样各 1L，用于水体浮游植物定量样品的分析.

2.2 沉积物样品的采集与处理

2009 年 7 月，利用奥地利进口不锈钢柱状采泥器采集大坝断面(26°20′24″N，119°19′48″E)柱状沉积物；样品采集后，现场将沉积物按每隔 2cm 厚度分割，得到 0－2cm，2－4cm，4－6cm，6－8cm，>8cm 的分层样品. 每层取 1 克湿泥用于浮游植物定量分析，剩余置于阴凉处自然风干.

2.3 浮游植物样品的采集与分析

2.3.1 定性样品　水体浮游植物活体样品采集使用 25#浮游生物网，在水面上 0.5m 深处作“∞”字型缓慢拖动数分钟，放入标本瓶，贴上标签，带回实验室置于生物显微镜(Motic)下，10×40 倍观察，并进行种属鉴定.

2.3.2 定量样品　将采集的五层 1L 水样中，分别加入鲁哥氏碘液(15ml/L)固定，贴上标签，带回实验室待分析. 固定后样品浓缩至 30ml 后，使用 0.1ml 计数框(20mm×20mm)，在生物显微镜下用 10×40 倍进行计数，计算单位体积水样的浮游植物数量[16]. 采用视野法计算细胞个体数后，原水样中浮游植物数量的计算公式为：

$$N=\frac{A}{A_0}\times\frac{V_S}{V}\times n$$

式中，N 为每升原水样中浮游植物数量(cells/L)；A 为计数框的面积(mm^2)；A_0 为计数面积(mm^2)，即视野数×视野面积；V_S 为 1L 原水样浓缩后的计数样品的体积(ml)；V 为计数框体积(ml)；n 为计数所得浮游植物数目.

各取 1g 以 2cm 分割的新鲜沉积物分层样品，分别置于干净的小烧杯中，加 100ml 无菌水充分混匀，静置 1min 后取上部液体 30ml 于标记好的试剂瓶内，加入若干滴鲁哥氏碘液(15ml/L)固定. 之后按照上述水样浮

游植物计数方法进行分析,得到底泥中浮游植物数量(cells/g(FW)).

2.4 浮游植物叶绿素 a 含量的测定

2.4.1 叶绿素 a 的前处理 水样中叶绿素 a 的前处理:取一定量水样用 0.45μm 醋酸纤维滤膜过滤,置冰箱内冷冻保存;将滤膜直接放入具塞离心管中,用滴管加入 90% 丙酮 7-8ml,直接浸提 24h;充分摇匀比色管,用 3500r/min 离心 10min,将上清液转移到 10ml 具塞离心管中,用 90% 丙酮定容后测定[16].

沉积物中叶绿素 a 的前处理:取一定量风干后的底泥样品,测定含水率,并计算底泥干重.同时另取一定量风干后的底泥样品,放入研磨中研磨 2-5min,称取 3g 研磨好的样品置于 10ml 具塞离心管中,加入 90% 丙酮 2-3ml,于 4℃黑暗环境静置 8-10h,然后在 4000r/min 下离心 10min,再向离心管中加入 90% 丙酮 2-3ml,反复萃取 2-3 次,每次将离心所得的上清液转移至另一支离心管中,最后用 90% 丙酮定容至 10ml.此待测液用于测定叶绿素 a 含量[17].

2.4.2 叶绿素 a 的荧光法测定 标准曲线的绘制:取若干绿色植物叶片,洗净后去除叶脉,剪碎放入研钵,加入少量 1% 碳酸镁悬液及 90% 丙酮溶液充分研磨以提取叶绿素 a,收集提取液在 4000r/min 下离心 15min,把上清液倒入 50ml 容量瓶中,作为标准储备液,按照上述分光光度法进行三次平行测定,取平均值(离散分析后)标定该储备液浓度[18].将以上标准储备液稀释至适当浓度作为标准使用液,并以 10ml 容量瓶配制标准系列.采用日立 F-7000 荧光分光光度计,设定激发光波长为 428nm,发射光波长 667nm,扫描速度 1200nm/min,以 90% 丙酮溶液为空白参比测定叶绿素 a 荧光强度,制作荧光强度-叶绿素 a 浓度标准曲线.样品叶绿素 a 的测定:取待测样品,使用荧光分光光度计在和标准曲线测定相同的条件下测量荧光强度,运用回归方程求其浓度.

3 结果与讨论

3.1 垂向水层物理化学指标分析

2009 年夏季监测到山仔水库明显的水温分层及水体物理、化学指标的分层现象,夏季山仔水库在 6m 左右深度形成温跃层,表层和底层水温相差 5.1℃(图 1a).垂向水体溶解氧表现出明显的垂直分层现象(图 1b),表层水溶解氧达到 11.6mg/L 左右的过饱和状态.由于水温分层形成,上下层水体交换减弱,随着气温升高,浮游植物光合作用加强,产生的氧气释放到水体,使上层水体溶解氧浓度升高,甚至过饱和;而在水库下层水体则可能发生与此相反的过程,有机质和浮游植物死亡后的遗体沉入湖底,下层水体和沉积物中细菌矿化降解有机质消耗水体中溶解氧,使水底溶解氧浓度下降.

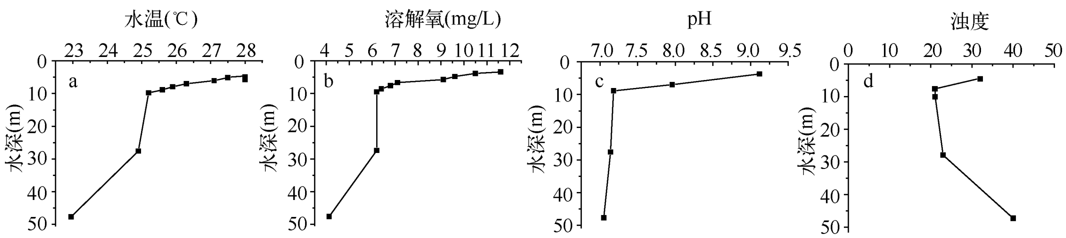

图 1 2009 年夏季山仔水库大坝断面垂向水温(a)、溶解氧(b)、pH(c)和浊度(d)

Fig.1 Vertical profile of water temperature (a), DO (b), pH(c) and turbidity (d) of Shanzi Reservoir in summer of 2009

垂向水体的 pH 变化与水温的变化趋势一致(图 1c),表层水呈碱性,pH 达到 9.12,且 6m 温跃层以下,pH 随水深的增加呈减小趋势.水体中 pH 的变化主要与藻类生长过程中的光合作用有关,由于藻类的光合作用,消耗水体中的 CO_2,破坏了 $CO_2/CO_3^{2-}/HCO_3^-$ 的平衡,会使水体 pH 呈微碱性.

由于水体表层的浮游植物数量较多,因而水体表层浊度值较大;无机颗粒物和有机物沉降在底部后,由于底栖生物的活动、气体释放、水库大坝放水等扰动引起底泥悬浮,使得浊度在沉积物-水界面有另一高值,悬浮的物质随水流动向水体各个方向扩散,会导致水体底部浊度大,而向上则不断降低(图 1d).

由于垂直水温分层的存在，一定程度上会"阻断"营养盐向上的输送，加上外来输入的营养盐受"异重流"等作用的影响，在水面下一定深度会形成一个营养盐质量浓度的高值[13]. 本研究中也发现夏季山仔水库大坝断面氨氮（NH_4-N）、总溶解性磷（TDP）、亚铁（Fe^{2+}）、总铁在水体垂向的分布均呈现出一个"凸"点，位于水面下 6m 左右深度（图 2）.

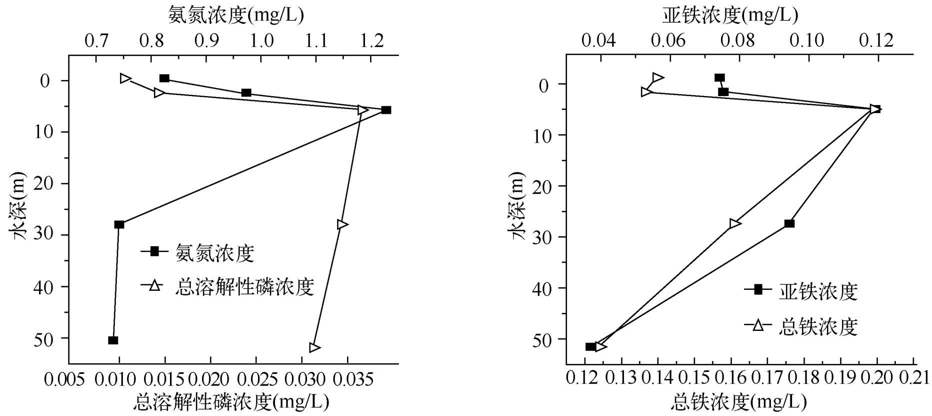

图 2 2009 年夏季山仔水库大坝断面主要化学指标垂向分布

Fig. 2 Vertical profile of the main chemical parameters of Shanzi Reservoir in summer of 2009

3.2 水体中浮游植物的垂向分布

采用 SPSS 软件对垂向水体中的叶绿素 a 含量、浮游植物的细胞密度与物理化学指标进行相关分析（表 1），结果表明，荧光分析法测得的叶绿素 a 含量与显微镜细胞计数结果呈极显著相关，相关系数达到 0.987（$P<0.01$）. 蓝藻生物量与荧光法测得的叶绿素 a 含量呈显著相关，相关系数达 0.835（$P<0.05$），表明蓝藻为山仔水库夏季水体中的优势种.

夏季水温分层期，山仔水库的浮游植物分布也出现分层现象，表现为表层高于底层，表层浮游植物的细胞密度达 10^7 cells/L，坝底浮游植物细胞密度为 10^6 cells/L，表层浮游植物生物量是底层的 10 倍左右，随着深度的增加，浮游植物密度呈下降趋势，温跃层以下浮游植物密度急剧减少（图 3）. 由于山仔水库水体的透明度仅 0.5m 左右，因此温跃层（6m）以下是低光照环境，加上水温下降明显，营养盐浓度不高（温跃层的存在使沉积物-水界面的营养盐无法向上扩散），水温分层对浮游植物的垂直分布形成屏蔽. 相关分析表明，垂向各层水体叶绿素 a 含量和浮游植物总数量与水温均呈显著正相关，相关系数分别为 0.845、0.851（$P<0.05$），而垂向各层水体蓝藻数量的与水温具有极显著相关性（$R=0.965$，$P<0.01$）（表 1）.

叶绿素 a 含量、浮游植物数量以及蓝藻生物量与 pH 值呈显著的正相关关系，相关系数分别为 0.953、0.928、0.820（$P<0.05$）（表 1）. 已有的研究表明，pH > 8.5 时有利于蓝藻的生长，在 pH > 9 时，微囊藻借助悬浮机制在水体表面形成"水华"后有利于吸收"空气-水"界面的 CO_2，而其它没有悬浮机制的藻类，由于缺乏赖以维持较高光合作用速率的 CO_2 而在竞争上处于劣势[19]. 磷是藻类生长所需的重要营养盐，叶绿素 a 含量和浮游植物数量与总溶解性磷含量均呈现极显著的负相关，相关系数分别为 −0.982，−0.961（$P<0.01$），反映了浮游植物对溶解性磷营养盐的利用. 氮也是藻类生长所需的重要营养盐，总氮浓度对藻类生长会产生影响[20]，但本研究发现浮游植物生物量与氨氮浓度的相关性不大，可能是由于水体中氮的形态复杂，浮游植物生长并不是直接利用氨氮形态的氮营养盐. 水体中的铁含量可能影响浮游植物的种群密度及群落结构[21]，本研究中浮游植物与亚铁及总铁的相关性均不大，可能是由于山仔水库中铁并没有成为浮游植物生长的限制因子，也可能是由于藻类生长过程中对铁的吸收是以铁络合物的形式实现，有待于进一步研究分析.

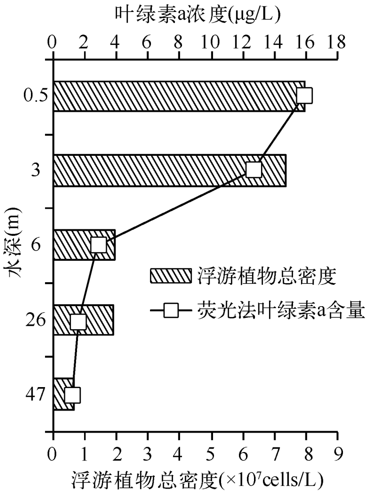

图3 荧光法及显微镜计数测定夏季大坝断面垂向浮游植物的密度

Fig. 3 The phytoplankton biomass in vertical profile of the dam section by fluorimetry and microscope counting method

表1 2009年夏季大坝断面垂向浮游植物生物量与物理化学指标相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis of the vertical phytoplankton biomass and physical and chemical parameters of the dam section in summer of 2009

	水温	溶解氧	pH	亚铁	总铁	氨氮	总溶解性磷	叶绿素a浓度	浮游植物总数量	蓝藻数量
水温	1									
溶解氧	0.950**	1								
pH	0.875	0.948*	1							
亚铁	0.345	0.144	-0.083	1						
总铁	0.065	-0.129	-0.282	0.937*	1					
氨氮	0.298	0.092	-0.122	0.722	0.760	1				
总溶解性磷	-0.781	-0.873	-0.972*	0.315	0.559	0.156	1			
叶绿素a浓度	0.845*	0.945**	0.953*	-0.090	-0.345	0.033	-0.971**	1		
浮游植物总数量	0.851*	0.936**	0.928*	-0.014	-0.300	0.063	-0.952*	0.987**	1	
蓝藻数量	0.965**	0.956**	0.820	0.411	0.122	0.232	-0.712	0.835*	0.857*	1

**($P<0.01$)表示极显著性相关;*($P<0.05$)表示显著相关.

3.3 水体优势浮游植物蓝藻门的垂向分布

山仔水库水体夏季以蓝藻门占绝对优势,水柱中蓝藻所占比例高达总生物量的98.6%以上,监测到蓝藻门共计4属7种,包括占绝对优势的水华微囊藻(散状细胞)(*Microcystis* sp.)以及惠氏微囊藻(*Microcystis wesenbergii*)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)、固氮鱼腥藻(*Anabaena azotica*)、针状篮纤维藻(*Dactylococcopsis acicularis*)、不整齐蓝纤维藻(*Dactylococcopsis irreguloris*).除蓝藻门外,水体中还监测到硅藻门(约占浮游植物总数量的0.8%)、绿藻门(约占浮游植物总数量的0.3%)、裸藻门(约占浮游植物总数量的0.2%),以及少量的隐藻门(约占浮游植物总数量的0.1%).

3.4 沉积物中的浮游植物垂向分布

山仔水库夏季沉积物表层叶绿素a含量在3000-6000ng/g(DW)之间,是坝底叶绿素a含量的近百倍,除沉积物6-8cm层之外,随着沉积深度的增加,叶绿素a含量总体上呈现递减的趋势(图4a).由于蓝藻在

冬季或者生长条件不适宜时会从水体中进入底泥休眠，硅藻个体内含有硅质，细胞较重，也易从水体中沉积到水底，从而使得沉积物表层积累了较高的浮游植物生物量. 通过显微镜镜检发现，夏季水库沉积物表层具有大量的蓝藻和硅藻细胞，细胞密度达 10^6 cells/g(FW)(图 4b)，与荧光法测得的较高的叶绿素 a 含量结果一致.

叶绿素 a 被广泛接受为间接测量浮游植物生物量的参数，但在一定程度上与藻类的组成有关[22]. 比较图 4a 及图 4b 可以看出，除沉积物 2 – 4cm 层之外，浮游植物总数量随沉积深度的变化基本与叶绿素 a 含量随沉积深度的变化相一致. 0 – 2cm 层浮游植物总数量低于 2 – 4cm 层，但叶绿素 a 含量却更高，可能是由于 0 – 2cm 层含有较多的叶绿素 a 含量高的蓝藻和绿藻所致[23]. 而 2 – 4cm 及 6 – 8cm 硅藻增多，则可能与沉积物中不同层的营养积累有关[24]. 沉积物中分布的藻类种类与水体中藻类种类一致，以蓝藻和硅藻为主，同时监测到了绿藻、裸藻和隐藻，进一步证明了沉积物作为藻类暴发“种源”的可能性.

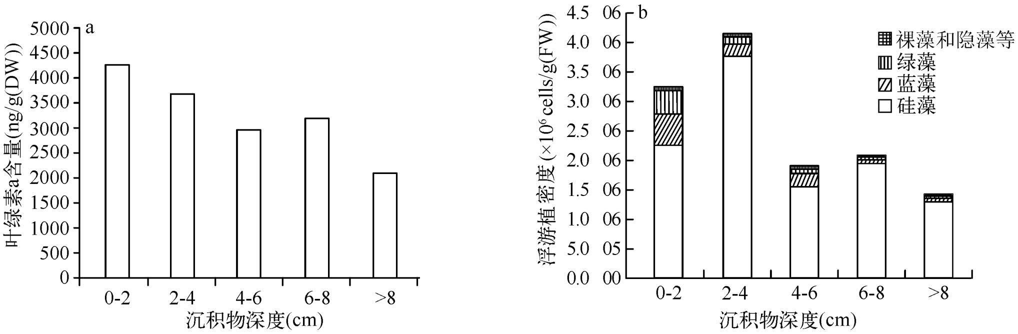

图 5 2009 年夏季大坝断面沉积物中叶绿素 a 含量(a)和浮游植物种类及数量(b)

Fig. 5 Concentration of chlorophyll-a in the sediment at dam section in summer of 2009(a) and phytoplankton species and quantity(b)

4 结论

对水温分层型富营养化山仔水库夏季大坝断面垂向水体的物理化学和浮游植物指标的研究结果表明，夏季的水温热分层能够引起水库水化学指标的分层，夏季水库大坝断面的浮游植物种类以蓝藻门微囊藻属占绝对优势，垂向分布表现为表层浮游植物数量明显高于底层数量，温跃层以下浮游植物生物量急剧减少，水温热分层可能决定着水库的浮游植物的垂向分布. 本研究还发现，水库沉积物中大量的浮游植物生物量可能为水体的水华提供“种源”.

5 参考文献

[1] 林秋奇，雷腊梅，韩博平. 南亚热带不同营养水平水库的蓝藻组成与动态. 生态学杂志，2007，**26**(7)：1027-1033.

[2] 王雨春，朱　俊，马　梅等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化. 湖泊科学，2006，**17**(1)：54-60.

[3] 王朝晖，韩博平，胡　韧. 广东省典型水库浮游植物群落特征与富营养化研究. 生态学杂志，2005，**24**(4)：402-405.

[4] 李秋华，胡　韧，韩博平. 南亚热带贫营养水库春季浮游植物群落结构与动态. 植物生态学报，2007，**31**(2)：313-319.

[5] 何国全，雷腊梅，韩博平. 南亚热带河流型水库浮游植物群落的季节变化：以广东飞来峡水库为例. 热带亚热带植物学报，2006，**14**(3)：183-189.

[6] Toru Nakane, Kisaburo Nakaka, Heather Bouman *et al*. Environmental control of short-term variation in the plankton community of inner Tokyo Bay, Japan. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, **78**(4): 796-810.

[7] Vanessa Becker, Vera Lucia M Huszar, Luigi Naselli-Flores *et al*. Phytoplankton equilibrium phases during thermal stratification in a deep subtropical reservoir. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(5): 952-963.

[8] Vanessa Becker, Luciana de Souza Cardoso, Vera Lu'cia M Huszar. Diel variation of phytoplankton functional groups in a

subtropical reservoir in southern Brazil during an autumnal stratification period. *Aquat Ecol*, 2009, **43**(2): 285-293.
[9] Tian Tian, Agostino Merico, Jian Su *et al*. Importance of resuspended sediment dynamics for the phytoplankton spring bloom in a coastal marine ecosystem. *Journal of Sea Research*, 2009, **62**: 214-228.
[10] Brunberg AK, Blomqvist P. Benthic overwintering of *Microcystis* colonies under different environmental conditions. *Plankton Res*, 2002, **24**: 1247-1252.
[11] Annika SD, Lars Anders H, Mikael G. Recruitment of resting stages may induce blooms of *Microcystis* at low N: P ratios. *Plankton Res*, 2003, **25**: 1099-1106.
[12] 谭 啸,孔繁翔,于 洋等. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响. 中国环境科学, 2009, **29**(6): 578-582.
[13] 苏玉萍,郑达贤,林婉珍等. 福建省山仔水库水体季节性分层特征研究. 福建师范大学学报,2007,**23**(3): 1-4.
[14] 苏玉萍,陈娜蓉,林婉珍等. 福建省山仔水库浮游植物特征与水体富营养状况分析. 亚热带资源与环境学报,2006, **1**(2): 48-54.
[15] 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.
[16] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社,1995.
[17] 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,2006,**16**(2): 163-168.
[18] 姜欣欣. 荧光光度法测定地表水叶绿素 a 的探讨. 现代科学仪器,2009,(1): 79-80.
[19] 金相灿,李兆春,郑朔方等. 铜绿微囊藻生长特性研究. 环境科学研究,2004, **17**: 52-54.
[20] An KG, Jones JR. Factor regulating blue-green dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia*, 2000, **432**: 37-48.
[21] Nagai T, Imai A, Matsushige K *et al*. Effect of iron complexation with dissolved organic matter on the growth of cyanobacteria in a eutrophic lake. *Aquatic Microbial Ecology*, 2006, **44**: 231-239.
[22] Calijur MC, Santos AC. Temporal changes in the phytoplankton community structure in a tropical and eutrophic reservoir (Barra Bonita, SP - Brazil). *J Plankton Res*, 2001, **24**: 617-634.
[23] 韩博平,韩志国,付 翔. 藻类光合作用机理与模型. 北京: 科学出版社,2003: 8-15.
[24] 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. 湖泊科学,2004,**16**(4):298-304.