

新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征*

吴志旭¹, 刘明亮², 兰佳¹, 何剑波², 虞左明²

(1: 淳安县环境保护监测站, 杭州 311700)

(2: 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 2010年7月对亚热带特大型水库——新安江水库湖泊区水体的垂向物理、化学参数以及浮游植物群落进行了观测研究,并应用 Water-PAM 对水体浮游植物垂向光合作用参数进行了测定。研究结果表明:夏季该水库湖泊区在水下 10~20 m 处形成明显的温跃层,垂向 pH 值、溶解氧及浊度的变化同叶绿素 a 浓度呈现高度一致;夏季浮游植物群落以硅藻占绝对优势,水体表层以梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)为主,表层以下其它各层均以巴豆叶脆杆藻(*Fragilaria crotonensis*)为绝对优势种,垂向分布表现为 5~10 m 区间为浮游植物高密度区域,温跃层以下浮游植物密度显著下降,水温分层可能是决定浮游植物垂向分布的重要因素之一。浮游植物最大光合效率从表层向下层逐步降低,实际光合效率最大值出现在垂向 10 m 区域。

关键词: 新安江水库(千岛湖); 浮游植物; 垂向分布; Water-PAM; 湖泊区

Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir(Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification

WU Zhixu¹, LIU Mingliang², LAN Jia¹, HE Jianbo² & YU Zuoming²

(1: Chun'an Environmental Monitoring Station, Hangzhou 311700, P. R. China)

(2: Institute of Environmental Protection Science, Hangzhou 310014, P. R. China)

Abstract: The investigation on vertical distribution of phytoplankton and physical-chemical characteristics was conducted in the lacustrine zone during summer stratification in Xin'anjiang Reservoir(Lake Qiandao). The Water-PAM Chlorophyll Fluorometer was used to obtain vertical profiles of phytoplankton photosynthesis. The results showed that depth of thermocline appeared between 10—20 m. Besides, the vertical profiles of pH, dissolved oxygen and turbidity were in agreement with chlorophyll-a. In summer, the phytoplankton was dominated by Bacillariophyta, *C. meneghiniana* was dominant in surface layer, while *F. crotonensis* was absolutely dominant below the surface layer. High-density of phytoplankton was found around 5—10 m below the water surface. However, a sharp decline was observed for phytoplankton density below thermocline layer. Therefore, the thermal stratification might affect the vertical distribution of phytoplankton population. Phytoplankton maximum photosynthetic efficiency had a negative relationship with water depth and the actual maximum value of photosynthetic efficiency was determined at 10 m depth.

Keywords: Xin'anjiang Reservoir(Lake Qiandao); phytoplankton; vertical distribution; Water-PAM; lacustrine zone

新安江水库(又名千岛湖)位于浙江省西部与安徽省南部交界的淳安县境内(29°22'~29°50'N, 118°34'~119°15'E),为1959年新安江水电站大坝建成蓄水后所形成的特大山谷型深水水库。大坝以上控制流域面积为10442 km²,其中60%位于安徽省境内,40%位于浙江省境内。该水库是一个集旅游、航运、水力发电、

* 杭州市科技局项目(20100834M42)、杭州市环保局项目(201006)、浙江省自然科学基金项目(Y5110314)和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07528-003-04-02)联合资助。2011-05-06 收稿;2011-09-16 修改稿。吴志旭,男,1975年生,高级工程师;E-mail:caepb@126.com.

水资源供应和渔业生产等多功能于一体的特大型水库,其巨大的水资源量对本地区以及长三角的经济和社会发展具有极其重要的影响.近年来,随着库区及上游流域社会经济的不断发展和资源的不合理利用,水库的污染负荷也相应增加,水体营养状况发生了显著变化,出现了明显的富营养化加速迹象,因此有关该水库的水体理化特征及其浮游生物状况一直受到广泛关注^[1-2].

作为世界水坝大国和水资源相对匮乏的国家,如何保护好河流生态系统,在水利能源开发的同时保护库区及河流水体生态系统健康已成为我国水环境科技工作者面临的严峻挑战^[3-4].很多省份水库已成为主要的供水水源,水库功能由发电、防洪转向供水也已成为世界性的趋势^[5].目前对水温分层水库浮游生物研究尚处在起步阶段,对水温分层水库富营养化及“水华”发生机制研究主要集中在浮游植物随时间和水库不同生态特征区之间的变化^[6-7],缺乏对浮游植物群落垂直分布规律的研究,尤其是缺乏对藻类光合作用过程中一些重要生理学参数的测定.因此,研究特大型热分层水库垂向理化指标和浮游植物特征,对揭示热分层水库水生生态系统结构具有非常重要的科学意义.本文以新安江水库湖泊区为研究对象,对其夏季垂向的理化指标、浮游植物和光合活性进行监测,探讨夏季浮游植物的垂向分布特征和影响因子,为科学保护新安江水库水生态安全和饮用水安全提供科学依据,同时也为我国水库生态学研究积累重要的基础资料.

1 研究对象概况

新安江水库为山谷型水库,呈分枝状态^[8],从大坝至新安江入口纵长 150 km,水面最宽处约 50 km,岸线总长度 1406 km;水库水面面积在水位达到正常蓄水位 108 m 时为 580 km²,正常蓄水位库容 178.4 × 10⁸ m³,平均水深 31 m.新安江流域位于亚热带北缘、东南沿海季风区,气候温暖,雨量充沛,年平均气温 16.90℃.新安江水库大坝前湖泊区垂直水温属单对流型,春季、夏季、秋季形成稳定的热分层,冬季无分层现象.

2 研究方法

2.1 水样的采集与处理

2010年7月,在新安江水库湖泊区大坝前(29°30′36″N,119°12′37″E)观测点采用 Hondex 便携式数字声纳深度计测定水深;用塞氏圆盘法现场测定水体透明度;水温、溶解氧采用 YSI-52 型溶解氧测定仪现场测定;于距水面 0.5、5、10、20、30、40、50、60、80 m 处,用 3 × 5 L 柱状采水器分别采集水样;理化项目分析 4 h 内在实验室完成,分析方法按照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[9];采用分光光度法测定水样叶绿素 a 浓度;用 Water-PAM 现场测定浮游植物光合作用参数^[10].

2.2 垂直方向连续数据获取

对于垂直水体的温度、电导率、深度、溶解氧(DO)、浊度、叶绿素 a(Chl.a)、CDOM、光合有效辐射(PAR)、透射率等连续数据采用加拿大 RBR 公司的 XRX-620 快速多参数水质剖面仪测定.

2.3 浮游植物样品的采集与分析

定性样品采集使用 25[#]浮游生物网,在水面下 0.5 m 深处作“∞”字型缓慢绕动数分钟,带回实验室置于生物显微镜下,10 × 40 倍观察,进行种属鉴定;定量样品各层取 2.5 L 水样,现场用鲁哥氏剂固定,带回实验室沉淀浓缩至 30 ml,用显微镜分类计数;浮游植物物种鉴定和计数等参考《中国淡水藻类》^[11].

3 结果与讨论

3.1 水体物理化学指标的垂向变化

2010年夏季监测到湖泊区存在明显的水温和物理化学指标分层现象(图1).在10~20 m处形成温跃层,表层和底层水温相差 20℃(图1a).垂向水体溶解氧 6.6 m 处出现峰值,达到 12.54 mg/L,在 11 m 处出现低值,仅为 6.02 mg/L,8 m 以上区域溶解氧均处在过饱和状态,这可能与光合有效辐射和浮游植物浓度有

关, 8 m 以上叶绿素 a 浓度含量较高, 且 PAR 强度也较强, 光合作用大于呼吸作用; 11 m 处 PAR 强度基本为零, 叶绿素 a 浓度依然较高, 呼吸作用占主导作用, 因此会在 6 ~ 11 m 形成溶解氧浓度快速下降的趋势. 湖泊区夏季藻类密度峰值并不是出现在表层, 而是出现在 6 m 的区域, 叶绿素 a 浓度达到 7.66 $\mu\text{g/L}$, 远高于表层 1.0 $\mu\text{g/L}$ 水平. 中午光照最强时, 浮游植物初级生产力占一天累积总量的份额也最大, 但就表层水体而言, 经常会出现光抑制现象, 最大初级生产力一般出现在表层以下的水层, 张运林等^[12] 在室内模拟得到的强光作用下初级生产力最大值出现在 0.2 m.

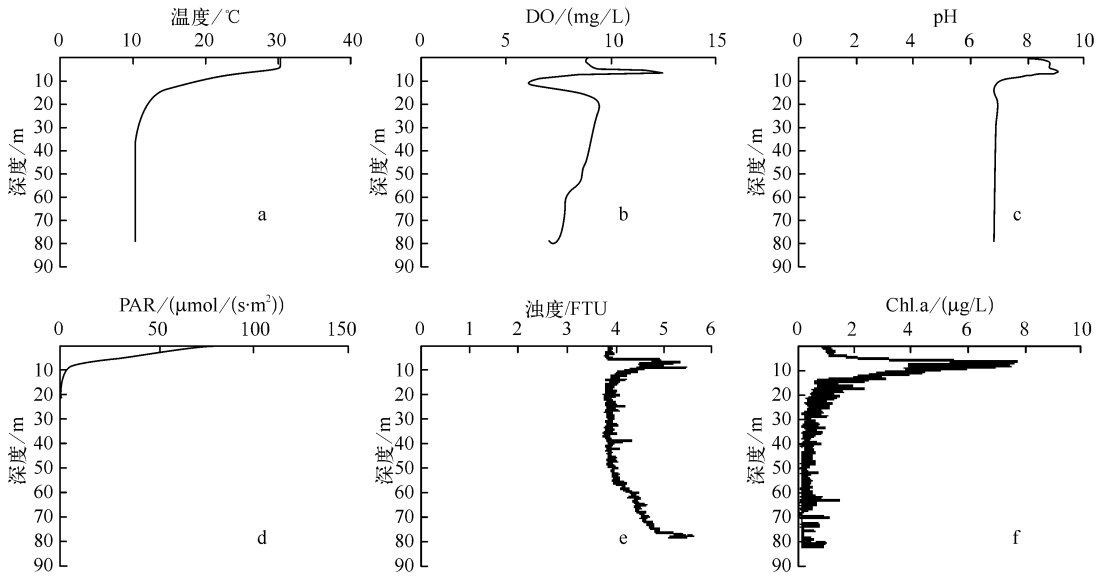


图 1 2010 年 7 月新安江水库湖泊区观测点垂向水温 (a)、溶解氧 (b)、pH (c)、PAR (d)、浊度 (e) 和叶绿素 a (f) 变化曲线

Fig. 1 Vertical profile of water temperature (a), DO (b), pH (c), PAR (d), Turbidity (e) and Chl. a (f) of lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir in July of 2010

垂向水体的 pH 值变化同叶绿素 a 变化趋于一致 (图 1c), 表层水体 pH 值并不是最高, 在 5.5 ~ 6.5 m 区域 pH 值超过 9.0, 10 m 以下区域基本上稳定在 7.0. 水体的 pH 值变化主要同藻类的光合作用有关, 由于藻类光合作用消耗了水体中的 CO_2 , 破坏了 $\text{CO}_2/\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的平衡, 使水体呈碱性.

PAR 由于受水体中无机悬浮物、浮游植物的吸收、散射作用而发生衰减^[12], 其强度随着深度增加而逐渐减低, PAR 强度在表层有快速降低的过程, 并在 6 m 水层达到 22 $\mu\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 到 14 m 水层降为 1 $\mu\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 在 25 m 水层基本接近 0 (图 1d). PAR 衰减情况直接影响到浮游植物光合作用过程和水体初级生产力的分布, 但在水体表面一般会出现光抑制现象, 光合速率降低, 初级生产力或者浮游植物浓度最大值一般出现在次表层^[13].

夏季湖泊区浮游植物主要集中在 6 m 的区域, 浊度峰值也出现在该区域, 达到 5.4 FTU. 垂向水体浊度的变化同叶绿素 a 变化趋势一致 (图 1e), 因此浮游植物密度可能是影响新安江水库透明度的主要因素, 而非受水质化学指标影响, 夏季湖泊区透明度很难突破 6 m 浮游植物密集区, 致使调查时大坝前观察点透明度为 5.4 m.

整个水柱总氮平均浓度为 $0.720 \pm 0.045 \text{ mg/L}$, 波动范围为 0.65 ~ 0.77 mg/L; 总磷全部低于实验室最低检出限 (0.01 mg/L); 可溶性硅水柱平均浓度为 $3.99 \pm 2.02 \text{ mg/L}$, 波动范围为 1.30 ~ 6.78 mg/L. 由于藻类生长过程的消耗, 表层至 10 m 水层氮、硅浓度明显低于 20 m 以下的水体. 随着水体深度的变化, 氮与硅的浓度发生变化, 下层水的总氮浓度高于上层水 ($R = 0.979, P < 0.001$), 硅同样如此 ($R = 0.867, P = 0.002$). 但是垂向叶绿素 a 和浮游植物密度的变化与总氮在统计上没有显著相关性 ($R = -0.588, P = 0.096$;

$R = -0.575, P = 0.105$), 与可溶性硅呈显著负相关 ($R = -0.759, P = 0.018; R = -0.695, P = 0.038$), 说明垂向氮的变化并非取决于藻类生长, 而可溶性硅是藻类生长的重要营养因子.

3.2 浮游植物密度的垂向变化

本次调查期间, 新安江水库湖泊区水柱浮游植物平均密度为 $421.26 \times 10^4 \pm 278.95$ cells/L, 密度范围在 $116.23 \times 10^4 \sim 1039.25 \times 10^4$ cells/L 之间. 夏季水温分层期, 浮游植物并非表层密度最高, 高密度区域出现在水深 5 ~ 10 m 间; 在温跃层以下随着深度的增加, 浮游植物密度呈显著下降, 80 m 位置的密度是 10 m 处的 1/10 (图 2).

3.3 浮游植物群落结构的垂向变化

新安江水库夏季以硅藻门占绝对优势 (图 3), 水柱中硅藻所占比例高达总密度的 76.9%. 在硅藻的垂向分布中, 表层以梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*) 为主, 占 85.6%, 其它各层均以巴豆叶脆杆藻 (*Fragilaria crotonensis*) 为绝对优势种 (图 4), 温度可能是影响藻种分布的主要因素^[14], 小环藻属喜高温性种, 最适生长温度为 30 ~ 40℃^[15], 脆杆藻属冷水种, 喜欢偏冷的环境^[16].

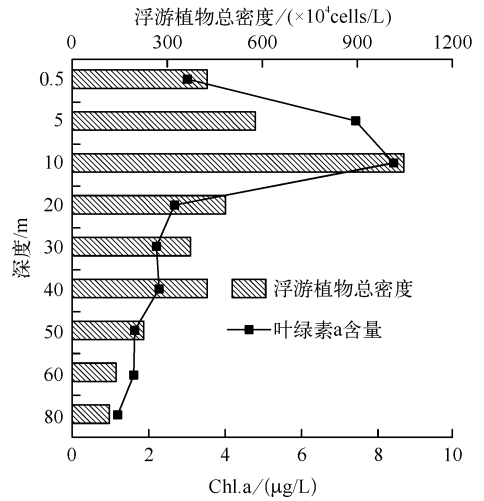


图 2 2010 年夏季新安江水库大坝前断面浮游植物垂向分布

Fig. 2 Vertical distribution of phytoplankton of Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2010

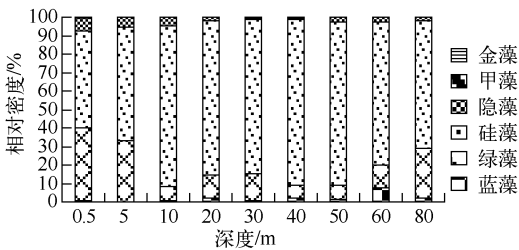


图 3 2010 年夏季新安江水库湖泊区断面浮游植物群落结构的垂向变化

Fig. 3 Composition of phytoplankton density of lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2010

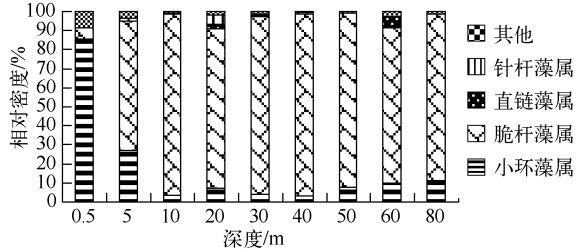


图 4 硅藻优势种群的垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of the dominant species of Bacillariophyta

3.4 浮游植物光合效率的垂向变化

利用水样荧光仪 (Water-PAM) 对垂向分层水样的最大光合效率 (F_v/F_m) 和实际光合效率进行测定^[10]. 最大光合效率明显存在由表层向下层逐步降低的特征, 表层的最大光合效率达到 0.6, 40 m 以下藻类的活性不强, 最大光合效率仅在 0.3 左右. 最大光合效率的降低反映了藻类受到环境的胁迫^[17]. 浮游植物群落变化结果表明, 水库表层中的优势种为小环藻, 而表层以下优势种转变为脆杆藻. 不同藻类的生长对环境的要求存在明显差异, 吴晓东等的研究发现, 在冬季同一湖泊中硅藻、绿藻的最大光合效率明显高于蓝藻^[18]. 小环藻喜好光照较强的表层水体, 而脆杆藻则更耐受低温低光照的条件从而形成优势. 脆杆藻这一类在 40 m 以下仍旧生长且有光合活性的藻类对环境的适应性极强, 但是迁移到表层水体, 却可能竞争不过那些本身对环境要求高的藻类. 小环藻属于 C 策略者, 一旦环境满足其生长要求就大量迅速繁殖^[19-20], 所以在表层水体小环藻占优势.

实际光合效率的最大值不是出现在表层水体, 而是在 10 m 水域 (图 5), 40 m 及以下区域降至非常低的水平, 均在 0.2 以下. 实际光合效率与藻类密度的结果基本一致, 说明光合效率大小直接反映了藻类生长的

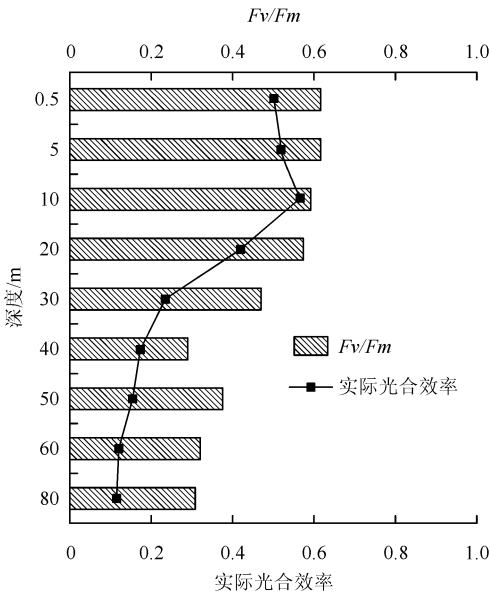


图5 2010年夏季新安江水库湖泊区浮游植物光合效率垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of phytoplankton photosynthetic efficiency of Xin'anjiang Reservoir in the summer of 2010

3) 下层水体的总氮和可溶性硅高于上层水体;垂向叶绿素 a、浮游植物密度与总氮没有显著相关性,与可溶性硅呈显著负相关;可溶性硅是藻类生长的重要营养因子。

4) 观测点水柱浮游植物平均密度为 $421.26 \times 10^4 \pm 278.95$ cells/L,水下 5~10 m 为浮游植物高密度区域,温跃层以下随着深度的增加浮游植物密度显著下降;群落结构以硅藻占绝对优势,硅藻所占比例高达总密度的 76.9%,表层水体以小环藻为主,其它各层均以脆杆藻为绝对优势种。

5) 浮游植物光合作用生理参数也存在垂向差异,最大光合效率 (F_v/F_m) 从表层向下层逐步降低,但实际光合效率最大值并不出现在表层水体,而是出现在距水面 10 m 区域,这种现象可能是由不同藻种的光饱和点和强光抑制点差异所致,超过藻类光饱和点的强光会对光合作用产生抑制作用。

5 参考文献

- [1] 余员龙,任丽萍,刘其根等. 2007-2008年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素. 湖泊科学, 2010, 22(5): 684-692.
- [2] 李共国,虞左明. 浙江千岛湖浮游动物多样性研究. 生物多样性, 2001, 9(2): 115-121.
- [3] Varis O, Vakkilainen P. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century. *Geomorphology*, 2001, 41: 93-104.
- [4] Chen XQ, Zong YQ, Zhang EF *et al.* Human impacts on the Changjing (Yangtze) River basin, China, with special reference to the impacts on the dry season water discharges into the sea. *Geomorphology*, 2001, 41: 111-113.
- [5] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151-160.
- [6] Nalewajko C, Murphy TP. Effects of temperature and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach. *Limnology*, 2001, 2: 45-48.
- [7] Lopes MRM, Bicudo CEM, Ferragut MC. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. *Hydrobiologia*, 2005, 542(1): 235-247.
- [8] 《新安江水电站志》编辑委员会. 新安江水电站志. 杭州: 浙江人民出版社, 1993: 67-68.

情况. 10 m 水层中的优势种为脆杆藻,已经进入温跃层,光照强度接近 0. 日本学者通过室内试验发现海洋硅藻在不同光照和温度下生长结果不同^[21-22],因此我们推断温跃层可能是脆杆藻的最佳生长环境. 光照、水温和优势种变化可能都是影响实际光合效率的因素,但光照最强的区域并非是藻类生长最快的区域,超过藻类光饱和点的强光反而可能成为抑制因子。

4 结论

新安江水库是一座位于亚热带北缘的特大型多年调节型深水水库,水体在夏季具有热分层现象,其物理、化学、浮游植物群落及其光合作用生理过程具有自身特征,明显有别于其它水库^[23]。

1) 夏季新安江水库湖泊区在 10~20 m 处形成温跃层,表层和底层水温相差 20℃;浮游植物密度的峰值不是出现在表层,而是出现在距离表层 6 m 的区域,水下 5~10 m 区间为浮游植物高密度区域。

2) 垂向 pH 值、溶解氧和浊度的变化同叶绿素 a 浓度呈现高度一致性,在叶绿素 a 浓度最高的 6 m 区域, pH 值、OD 出现峰值;PAR 随着水深的增加呈明显减少,在区域为 22 $\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,到 25 m 区域基本接近 0;浮游植物密度是影响新安江水库透明度的主要因素之一。

- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [10] Adams III WW, Demmig-Adams B. Chlorophyll fluorescence as a tool to monitor plant response to the environment. In: Papageorgiou GC, Govindjee eds. Chlorophyll fluorescence: a signature of photosynthesis. Berlin: Springer, 2004: 583-604.
- [11] 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.
- [12] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 湖泊光学研究动态及其应用. 水科学进展, 2003, **14**(5): 653-659.
- [13] Behrenfeld MJ, Falkowski PG. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**: 1-20.
- [14] 盛海燕, 虞左明, 韩轶才等. 亚热带大型河流型水库(富春江水库)浮游植物群落及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2010, **22**: 235-243.
- [15] 曾艳芝, 黄翔鹤. 温度、光照对小环藻和叶绿素 a 含量的影响. 广东海洋大学学报, 2007, **27**(6): 36-40.
- [16] 石英, 童国榜, 王苏民等. 云南鹤庆盆地晚第四纪硅藻植物群与环境. 海洋地质与第四纪地质, 1998, **18**(4): 79-85.
- [17] Wu ZX, Gan NQ, Huang Q *et al.* Response of *Microcystis* to copper stress—Do phenotypes of *Microcystis* make a difference in stress tolerance? *Environmental Pollution*, 2007, **147**(2): 324-330.
- [18] 吴晓东, 孔繁翔, 曹焕生等. 越冬浮游植物光合活性的原位研究. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 139-145.
- [19] Reynolds CS. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biology*, 1984, **14**: 111-142.
- [20] Sommer U. Growth and survival strategies of plankton succession. In: Sommer U ed. Plankton ecology-succession in plankton communities. Berlin: Springer Series in Contemporary Bioscience, 1988: 227-260.
- [21] Nishikawa T, Yamaguchi M. Effect of temperature on light-limited growth of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg, a causative organism in the discoloration of *Porphyra thalli*. *Harmful Algae*, 2006, **5**: 241-247.
- [22] Nishikawa T, Yamaguchi M. Effect of temperature on light-limited growth of the harmful diatom *Coscinodiscus wailesii*, a causative organism in the bleaching of aquacultured *Porphyra thalli*. *Harmful Algae*, 2008, **7**: 561-566.
- [23] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋等. 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. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 244-250.