

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*

盛海燕, 虞左明**, 韩轶才, 姚佳玫, 朱英俊
(杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 为了掌握富春江水库浮游植物群落特征, 探寻其与环境因子的关系, 于2006年1月至2007年12月, 对其进行了20次采样调查. 鉴定结果表明富春江水库共有浮游植物107种, 浮游植物密度范围在 $0.21 \times 10^5 - 3.01 \times 10^7$ cells/L之间. 浮游植物组成随季节变化有所不同, 春季绿藻、隐藻、硅藻占优势, 夏季蓝藻和硅藻占优势, 秋冬季硅藻、隐藻占优势. 浮游植物群落结构受水文条件的影响较大, 浮游植物密度与水体温度呈显著正相关, 与透明度在不同范围内表现出不同的相关关系; 与TN、TP在不同范围内表现出不同的相关关系, 与TN/TP及可溶性硅呈显著正相关. 库区总氮和总磷浓度均很高, 足够满足藻类生长需要; TN/TP较低, 基本在8-30之间, 说明氮磷含量不是富春江库区藻类生长的限制因子. 水文季节性变化会明显地影响浮游植物群落结构和密度的季节性变化, 特别是降雨、水温及水力滞留时间等因子是影响水库浮游植物群落结构及密度变化的主要因子.

关键词: 富春江水库; 浮游植物; 时空变化; 环境因子

Phytoplankton community and its relationship with environmental factors of a large riverine reservoir, Fuchunjiang Reservoir in subtropical China

SHENG Haiyan, YU Zuoming, HAN Yicai, YAO Jiamei & ZHU Yingjun
(Hangzhou Institute of Environmental Protection Science, Hangzhou 310014, P. R. China)

Abstract: During January 2006 to December 2007, phytoplankton and environmental factors were monitored for twenty times in Fuchunjiang Reservoir. A total of 107 taxa were identified by microscope. The phytoplankton density was ranged from $0.21 \times 10^5 - 3.01 \times 10^7$ cells/L. The specific composition of phytoplankton community changed with the seasons. Bacillariophyta, Chlorophyta and Cryptophyta dominated in Spring; Cyanophyta and Bacillariophyta dominated in Summer; and Bacillariophyta and Cryptophyta dominated in Autumn and Winter. The structure of phytoplankton community was obviously affected by hydrological conditions. There was significant positive correlation between phytoplankton density and water temperature. The correlation coefficients between phytoplankton density and transparency, TN, TP varied in different ranges. Phytoplankton density was significant positive correlations with water temperature, TN/TP, and soluble silicon. TN and TP concentrations were high enough to meet the needs of algal growth. Low N/P between 8 to 30 showed that nitrogen and phosphorus content may not be limiting factors for the growth of algae in Fuchunjiang Reservoir. The seasonal change of phytoplankton community and density were obviously affected by seasonal change in hydrological, especially by precipitation, water temperature and water retention time.

Keywords: Fuchunjiang Reservoir; phytoplankton; spatio-temporal changes; environmental factors

河流建设大坝以后, 水库按照社会经济效益原则和既定的调度方案实施调度, 改变了原有河流的周期性水文过程, 使水文过程趋于均一化, 也改变了自然水文情势的年内丰枯周期变化规律, 影响了水体的生态过程^[1]. 研究一个水库的浮游植物群落结构是了解该水库生态系统结构的基础, 浮游植物群落是水生态系统的重要组成部分, 浮游植物种类组成、数量分布以及丰度通常呈季节性变化, 是浮游植物群落动态的重要

* 浙江省科技厅重大项目(2005C13001)和杭州市科技发展计划重大项目(20052113A)联合资助. 2009-10-13 收稿; 2009-11-06 收修改稿. 盛海燕, 女, 1978年生, 硕士.

** 通讯作者; E-mail: yuzm@hzhky.com.

特征,判断水体富营养化程度的关键指标之一^[2-3]. 在影响浮游植物群落动态变化的因子中,水文过程可能起着关键的作用^[4]. Gaedke 等发现影响德国温带大型深水湖泊——Constance 湖浮游植物大小变化的主要因素之一是外部天气条件对水体的扰动^[4,5]. 在热带与亚热带地区,温度与光照季节性变化不如温带地区显著,水动力学的季节变化通常引起浮游植物群落季节变化^[2,6-8].

富春江水库地处浙江省钱塘江干流中下游,是杭州市范围内最大的河流型水库,其主要功能是发电,兼有航运、灌溉、水产、城市供水等综合效能,并担负华东电网的调峰调频和事故备用任务,其水域面积为 56 km²,水力滞留时间短(6d),年际和年内降水量不均匀. 由于钱塘江流域工农业生产的发展和人口的增加,钱塘江水体污染日益严重,偶有蓝藻水华爆发,富春江水库作为周边地区主要供水水源地及钱塘江下游杭州市区水厂的主要饮用水来源,其富营养化程度的增加为饮用水水质安全带来严重隐患. 本文对其理化因子及浮游植物的组成与分布进行研究,探讨该水库浮游植物群落种类组成与数量的动态变化特征,为该水库及相似水体的富营养化控制与水质管理提供基础资料和科学依据.

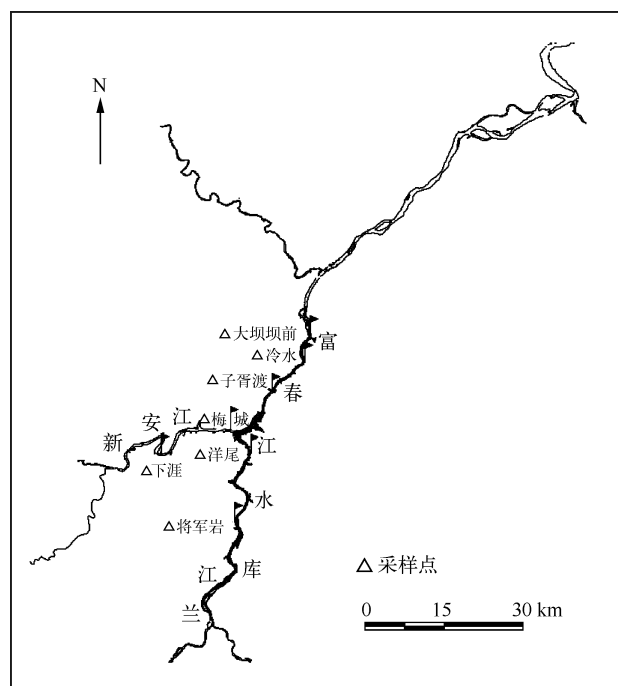


图1 富春江水库各采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites in Fuchunjiang Reservoir

1 材料和方法

1.1 采样时间和采样点设置

于2006年1、3、4、5、6、7、8、9、10、12月和2007年3、4、5、6、7、8、9、10、11、12月对富春江水库各采样点进行了20次采样调查,共设置7个采样点(图1). 根据Kimmel & Groeger对河流型水库的划分,将水库分成河流区、过渡区和湖泊区,因此本次采样点的设置也参考这一划分方法,在富春江水库河流区即新安江和兰江上各设置一个采样点(下涯和将军岩),在过渡区设置了2个采样点(洋尾和梅城),湖泊区设置了3个采样点(子胥渡、冷水和大坝坝前),力图能体现河流型水库的总体特征.

1.2 样品采集、处理和分析

常规理化监测项目包括:水温、塞氏透明度(SD)、pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、可溶性磷(DP)、可溶性硅. 透明度采用塞氏圆盘法现场测定,水温、溶解氧浓度采用美国银泉公司生产的YSI-52型溶解氧测定仪现场测定,其余理化项目采集后4h内在实验室测定.

理化分析方法按照《水和废水监测分析方法》进行^[9]. 叶绿素a浓度的测定采用分光光度法^[10].

浮游植物的定性样品用25#浮游植物网拖取;定量样品从表层0.5m处采取1L水,现场用鲁哥氏液固定,带回实验室静置沉淀后浓缩计数;浮游植物物种鉴定和计数等参考文献[11].

1.3 数据分析

数据采用Excel分析,显著性差异采用One-way ANOVA分析方法, $P < 0.05$ 认为有显著性.

2 结果与分析

2.1 水库水文条件

富春江水库2007年降雨量1424.2mm,降雨量季节性差异较大,主要集中在3、4、5、6、8、9、10月份,最大降雨量出现在10月份,达到211.1mm;最小降雨量在11月份,为24.5mm(图2). 与富春江水库多年平

均降雨量 1608.5mm 相比,2007 年降雨量偏少。

富春江水库 2007 年月平均出库流量的波动范围在 $246 \sim 743 \text{ m}^3/\text{s}$ (图 2), 平均出库流量为 $502 \text{ m}^3/\text{s}$, 4 月最高, 11 月最低, 出库流量与降雨量的季节变化基本一致, 与多年平均出库流量 $866 \text{ m}^3/\text{s}$ 相比, 出库流量明显偏少。富春江水库的水位波动不大, 坝前水位在 21.28 – 23.66m 之间变化。水体流速较快, 多年平均水力滞留时间仅为 6d。与亚热带水库——飞来峡水库相比, 富春江水库的流量 ($54.9 \sim 488 \text{ m}^3/\text{s}$) 要比飞来峡水库大, 水体流速快, 水位差别不大 (飞来峡水库: 21.37 – 23.96m) [12]。

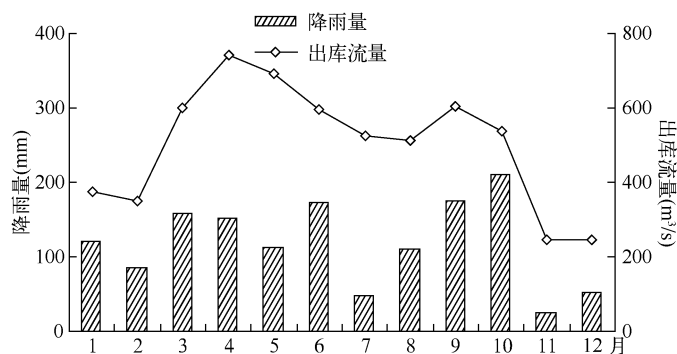


图 2 富春江水库降雨量和出库流量的季节动态

Fig. 2 Seasonal dynamics of precipitation and outflow in Fuchunjiang Reservoir

富春江水库地处亚热带北缘, 因受气温的影响, 水体表层温度呈现明显的四季变化 (图 3a)。在两年的调查采样期间, 最低温度出现在 1 月份, 最高温度出现在 7 月份。2006 年平均水温为 18.9°C , 2007 年平均水温为 21.1°C 。富春江水库三个区的水温变化差异不大, 仅在气温高的夏季河流区水温要比过渡区和湖泊区低。由于富春江水库水体交换快, 水力滞留时间短, 在丰水期 (6 月) 和枯水期 (11 月) 都无垂直分层现象 (图 3b)。

富春江水库的透明度在三个区域差异比较显著, 河流区透明度显著高于过渡区和湖泊区 (图 4a)。河流区的透明度一年出现两个峰值, 出现在冬季和夏季。夏季 8 月份河流区透明度高与其上游新安江水库下泻水量有关, 因新安江水库水质良好, 透明度高; 冬季因藻类生长缓慢, 藻类数量比其它季节低, 透明度比其它季节高。富春江水库的过渡区和湖泊区透明度较低, 与过度、无序的采砂现象有关。

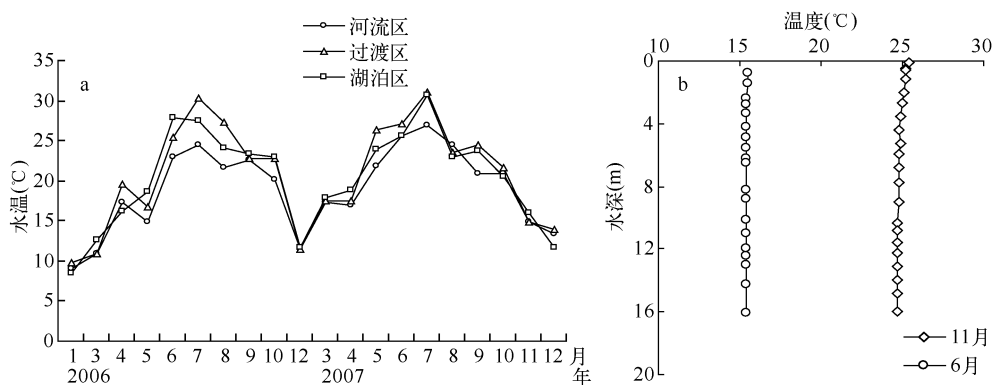


图 3 富春江水库水温季节动态(a)及垂直分布(b)情况

Fig. 3 Seasonal dynamics (a) and vertical distribution (b) of water temperature in Fuchunjiang Reservoir

2.2 营养盐季节变化

富春江水库 TN 浓度较高, 全年浓度均在 1 mg/L 以上, 2006 年年均浓度为 2.13 mg/L , 2007 年年均浓度为 2.33 mg/L 。水库 TN 浓度季节变化明显 ($P = 0.0001$), 冬季浓度大于其它季节, 最低值均出现在 8 月份 (图 4b)。进入冬季, 入库流量减少, TN 浓度逐渐升高, 显示出流域点源污染特征。湖泊区的总氮浓度略高于

其它两个区,没有显著差异($P=0.1156$).

富春江水库 TP 浓度范围为 $0.068-0.601\text{mg/L}$,也处于较高水平. 2006 年年均浓度为 0.230mg/L ,2007 年年均浓度为 0.142mg/L ,2007 年 TP 浓度显著降低是因为建德市开展了污染整治工作,削减了大量的入库工业污染源. 水库 TP 浓度的季节变化与 TN 类似,季节变化明显($P=0.0001$),冬季浓度大于其它季节,最低值均出现在 8 月份(图 4c). 富春江水库的可溶性磷含量比较高,占 TP 含量的 50% 以上. 河流区的 TP 浓度略高于其它两个区. 富春江水库 TN/TP 在 8-30 之间,湖泊区的 TN/TP 值要高于河流区和过渡区(图 4d). 富春江水库氨氮浓度范围在 $0.11-1.22\text{mg/L}$ 之间,三个区的氨氮浓度差别不大($P=0.8149$),季节变化比较明显($P<0.0001$)(图 4e). 富春江水库可溶性硅浓度范围为 $2.82-17.9\text{mg/L}$,2006 年年均浓度为 9.1mg/L ,2007 年年均浓度为 8.51mg/L ,季节变化不明显(图 4f). 可溶性硅浓度在过渡区要高于河流区和湖泊区,也是因为局部采砂引起的.

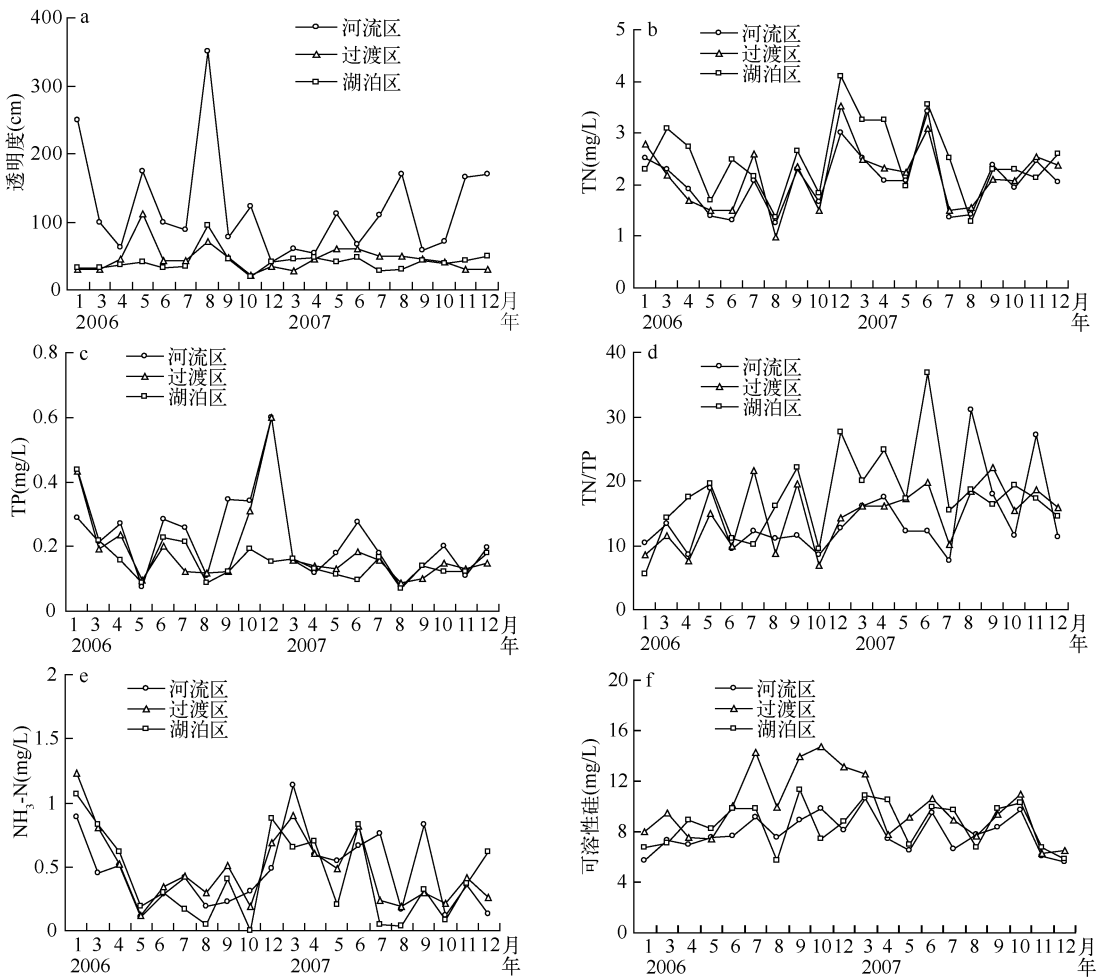


图 4 富春江水库水体透明度(a)和营养盐(b-f)的季节动态

Fig. 4 Seasonal dynamics of water transparency(a) and nutrients(b-f) in Fuchunjiang Reservoir

2.3 浮游植物群落组成

两年调查期间共检出浮游植物 107 个分类单位,隶属 7 门 69 属. 其中硅藻门 49 个最多,占总数的 45%,其次为绿藻门,共有 27 个占 25%,再次是蓝藻门 17 个,占 16%,裸藻门 4 个,占 4%,隐藻门 3 个,占 3%,甲藻门 5 个,占总数的 5%,金藻门 2 个,占 2%.

在富春江水库出现频率较高的常见类群有：蓝藻门的颤藻(*Oscillatoria* sp.)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis*)、席藻(*Phormidium* sp.)、微囊藻(*Microcystis*)、尖头藻(*Raphidiopsis*)、色球藻(*Chroococcus*)、细小平裂藻(*Merismopedia enuissima*)；绿藻门的实球藻(*Pandorina morum*)、盘星藻(*Pediastrum*)、团藻(*Volvox aureus*)、空星藻(*Coelastrum*)、集星藻(*Actinastrum hantzschii*)、十字藻(*Crucigenia*)、栅藻(*Scenedesmus*)、单生卵囊藻(*Oocystis solitaria*)；硅藻门的直链藻(*Melosira*)、小环藻(*Cyclotella*)、舟形藻(*Navicula* sp.)、极小曲壳藻(*Achnanthes minutissima*)、针杆藻(*Synedra* sp.)、冠盘藻(*Stephanodiscus* sp.)、园筛藻(*Coscinodiscus*)；隐藻门的卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)、蓝隐藻(*Chroomonas* sp.)；裸藻门的绿色裸藻(*Euglena* sp.)、扁裸藻(*Phacus* sp.)、囊裸藻(*Trachelomonas* sp.)；甲藻门的多甲藻(*Peridinium* sp.)、裸甲藻(*Gymnodinium* sp.)。

浮游植物种类组成呈现出明显的季节变化，一年中各种藻类的优势种群交替出现，春季以绿藻、隐藻、硅藻为优势，夏季以蓝藻和硅藻占优势，秋冬季以硅藻、隐藻为优势。

2.4 浮游植物密度和个体丰度变化

富春江水库浮游植物密度季节变化明显，整体上呈现夏秋季高、冬春季低的规律，不同月份之间密度差异显著($P = 0.0149$)，不同年份之间差异也显著($P = 0.0736$)。富春江水库各采样点的浮游植物密度在 $0.21 \times 10^5 - 3.01 \times 10^7$ cells/L 之间，2006 年月均值为 1.69×10^6 cells/L，2007 年月均值为 2.69×10^6 cells/L。2006 年最高值出现在 9 月份，最低值出现在 12 月份；2007 年最高值出现在 7 月份，最低值出现在 11 月份(图 5)。

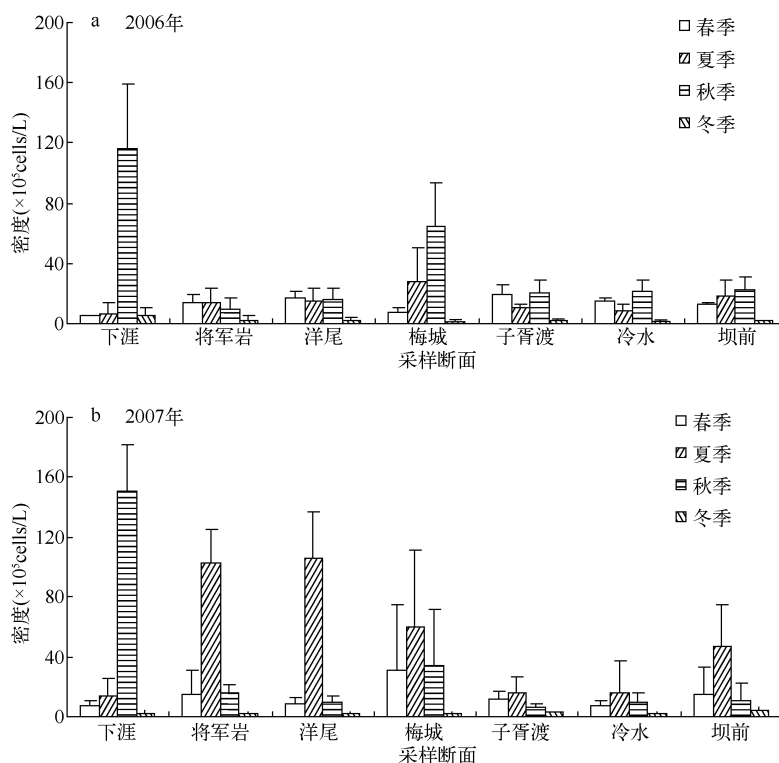


图 5 富春江水库浮游植物密度季节变化

Fig. 5 Seasonal changes of phytoplankton density in Fuchunjiang Reservoir

2006 年富春江水库 7 个采样点的浮游植物密度空间差异显著($P = 0.0401$)，2007 年空间差异不显著($P = 0.0764$)。2006 年下涯和梅城两个点秋季密度显著高于其它点位；2007 年夏季浮游植物密度显著高于 2006 年，且河流区和过渡区显著高于湖泊区(图 5)。

2006 年富春江水库三个区的浮游植物密度百分比组成类似，春季、夏季和冬季都是硅藻最多，其次为隐藻、绿藻和蓝藻，其它门的藻类密度均较低(图 6a)；秋季河流区硅藻最多，过渡区和湖泊区则以隐藻最多。

2006 年年均密度组成百分比分别为: 河流区: 硅藻 47.78%, 绿藻 19.06%, 隐藻 18.23%, 蓝藻 14.33%; 过渡区: 硅藻 36.83%, 绿藻 22.27%, 隐藻 22.50%, 蓝藻 14.89%; 湖泊区: 硅藻 32.75%, 绿藻 18.33%, 隐藻 27.23%, 蓝藻 19.13%, 甲藻 1.99%. 2007 年浮游植物密度组成与 2006 年相比有所变化, 夏季蓝藻比例明显增加, 春、冬季仍以硅藻为主, 秋季过渡区和湖泊区以隐藻为主 (图 6b). 2007 年年均密度组成百分比分别为: 河流区: 硅藻 41.76%, 蓝藻 25.43%, 绿藻 14.85%, 隐藻 14.39%; 过渡区: 蓝藻 31.53%, 硅藻 28.21%, 隐藻 26.91%, 绿藻 9.82%; 湖泊区: 隐藻 30.42%, 硅藻 30.31%, 蓝藻 26.31%, 绿藻 11.81%.

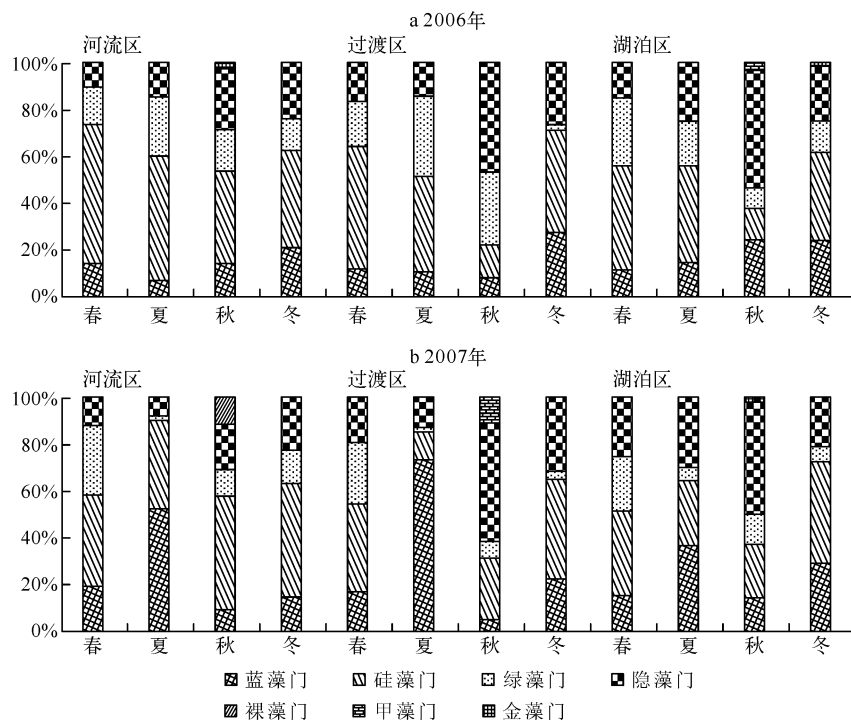


图 6 浮游植物密度百分比

Fig. 6 The composition of phytoplankton abundance

2.5 理化因子对浮游植物的影响

富春江水库水温与浮游植物密度呈显著正相关 ($r=0.512, P<0.01$) (图 7a), 随着水温的上升, 藻类的生长速度也加快, 水温对藻类的生长具有明显的促进作用. 富春江水库水体透明度与浮游植物密度的关系存在空间异质性, 湖泊区和过渡区透明度与浮游植物密度呈显著正相关 ($r=0.499, P<0.01$), 河流区透明度与浮游植物密度呈显著负相关 ($r=0.418, P<0.01$) (图 7b).

2.6 营养盐对浮游植物的影响

在富春江水库中总氮和总磷浓度较低时, 藻类密度与其呈显著正相关 ($0<TN<3; r=0.366, P<0.05$; $0<TP<0.2; r=0.315, P<0.05$); 当总氮和总磷浓度达到较高水平时, 藻类密度与其呈显著负相关 ($1<TN<5; r=0.464, P<0.01$; $0.1<TP<1.0; r=0.268, P<0.05$), 即较高水平的氮、磷营养盐会对藻类的生长起抑制作用 (图 8a, 图 8b). 氮磷比与藻类密度呈显著正相关 ($r=0.354, P<0.01$) (图 8c). 氨氮与藻类密度不相关 ($r=0.159, P>0.05$). 可溶性硅浓度在 15mg/L 以下与藻类密度呈显著正相关 ($r=0.389, P<0.01$) (图 8d).

3 讨论

富春江水库作为一个典型的河流型水库, 水温全年没有分层现象, 这与飞来峡水库类似^[12]. 水库浮游植物生物量低, 全年叶绿素 a 的浓度几乎都低于 $10\mu\text{g/L}$ (梅城除外), 浮游植物的细胞数量也不高, 除了 7、8 月份外均低于 10^7cells/L ; 但浮游植物种类较多, 全年共出现 107 个分类单元, 浮游植物的优势种类具有明显的

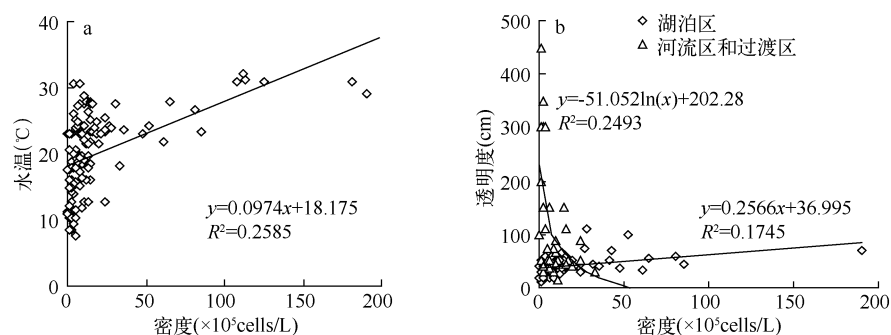


图7 水温和透明度与浮游植物密度的关系

Fig. 7 Relationships between water temperature, transparency and phytoplankton density

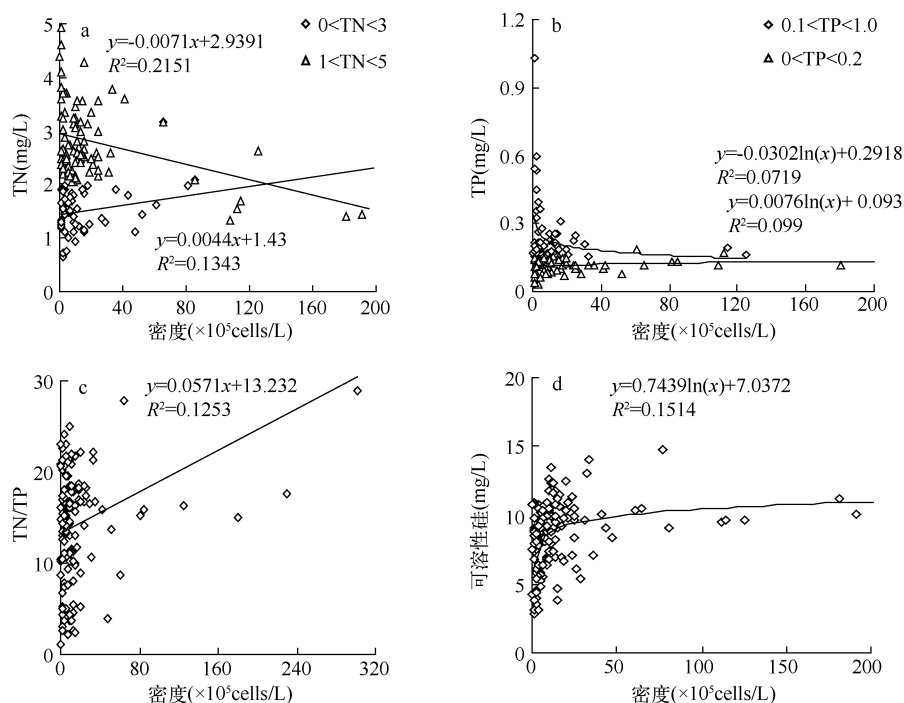


图8 营养盐因子与浮游植物密度的关系

Fig. 8 Relationships between nutrient factors and phytoplankton density

季节变化. 这些特征也与亚热带河流型水库(飞来峡水库)比较类似^[12].

富春江水库处于典型的亚热带季风气候区,流域的水文季节性变化会明显地影响浮游植物群落和密度的季节性变化^[12-13],特别是集中式降雨导致的水文过程剧烈变化能够显著地影响浮游植物群落. 2007 年降雨量较多的月份(图2),即夏、秋季节,藻类密度较大(图5). 河流型水库的出库水量主要由降雨量形成的入库水量决定,降水的增加可能会增加入库营养盐水平,但水力滞留时间会随水库出库流量的增加而减少,不利于浮游植物生物量的积累. 夏秋季节河流区及过渡区的浮游植物密度略高于湖泊区,但没有明显的空间异质性,体现了河流型水库的特征. 与广东飞来峡水库相比,富春江水库的水力滞留时间较低 6d(飞来峡水库 15d),但浮游植物密度要高于飞来峡水库($2.17 \times 10^4 - 8.08 \times 10^5$ cells/L),这与富春江水库的 TN、TP 浓度高于飞来峡水库有关^[12].

温度不仅影响浮游植物的季节演替还直接影响浮游植物在水体中时空分布和组成变化^[14]. 虽然夏季水库滞留时间短,但是浮游植物密度最高,也反映出水温对浮游植物生长的影响. 夏季水温的升高特别有利于蓝藻的生长,大部分蓝藻的最适温度在 25–35℃ 之间^[15-16],这使大部分蓝藻在夏季更具有优势,2007 年夏季因降雨量偏少使得富春江水库蓝藻数量比 2006 年大大增高,成为优势种群.

河流区水体透明度明显高于其它区域,因为下泄来水是上游新安江水库的下泄水,新安江水库水质良好,透明度高,因此其透明度与浮游植物密度的关系与其它区域明显不同. 湖泊区和过渡区的浮游植物密度与透明度呈显著正相关,这符合大部分藻类随着光照强度增加生长速率快的特征,即透明度越大在同一水深条件下水下光照越强,越有利于藻类生长. 根据本次研究结果,浮游植物密度与透明度在不同范围内存在的相关关系不同,水体透明度较小时,浮游植物密度与透明度呈显著正相关,透明度较大时,浮游植物密度与透明度呈反双曲线关系. 这一结果与北美、北欧、日本的湖泊研究^[17]以及国内的香溪河库湾研究^[18]的结果类似.

关于营养盐(特别是氮、磷)的浓度及其比例,对浮游植物生长的影响已经有较多的报道^[19-20]. 许多研究结果表明,营养盐的浓度以及不同的配比对藻类的代谢活动和生长速率有着显著的影响^[21-22]. 从营养盐浓度来看,富春江水库处于中—富营养水平. 在淡水环境中较高 N:P 比显示淡水常常是 P 限制,且大量的营养盐添加试验也证实了这一点^[23]. 富春江水库总磷月平均值在 0.075–0.393mg/L 之间,2006 年年均值为 0.230mg/L,2007 年年均值为 0.142mg/L,显然富春江水库的总磷已足够能满足藻类生长需求,不会成为藻类生长的限制因子. 根据本次研究结果,尽管水体中氮磷的含量都较高,但氮磷比不高,基本都在 8–30 之间,因此推断水华的发生不大可能受到氮磷的限制.

4 结论

富春江水库是一个位于亚热带北缘的典型河流型大型水库,其浮游植物群落结构、组成及密度具有明显的变化规律,且受水文、水温、营养盐等环境因子的显著影响.

(1) 富春江水库在调查期间共检出浮游植物 107 种,隶属 7 个门 69 属. 其中硅藻门 49 种,绿藻门 27 种,蓝藻门 17 种,裸藻门 4 种,隐藻门 3 种,甲藻门 5 种,金藻门 2 种. 浮游植物种类组成呈现出明显的季节变化,一年中各种藻类的优势种交替出现,春季以绿藻、隐藻、硅藻为优势,夏季以蓝藻和硅藻占优势,秋季以硅藻、隐藻为优势,冬季以硅藻为优势.

(2) 富春江水库浮游植物密度季节变化明显,整体上呈现夏秋季高、冬春季低的规律,不同月份之间密度差异显著,不同年份之间差异也显著;且随着年份的不同,空间差异有所变化,2007 年河流区和过渡区的浮游植物密度高于湖泊区.

(3) 富春江水库处于典型的亚热带季风气候区,流域的水文季节性变化会明显的影响浮游植物群落和密度的季节性变化,特别是降雨、水温及水力滞留时间等因子是影响水库浮游植物群落结构及密度变化的主要因子.

(4) 富春江水库营养盐水平较高,特别是氮磷浓度比较高,营养盐因子不是浮游植物生长的限制因子.

5 参考文献

- [1] 董哲仁. 生态水工学探索. 北京:中国水利水电出版社,2007: 92-98.
- [2] 赵孟绪,雷腊梅,韩博平. 亚热带水库浮游植物群落季节变化及其影响因素分析——以汤溪水库为例. 热带亚热带植物学报,2005,13(5): 386-392.
- [3] 张 婷,李 林,宋立荣. 熊河水库浮游植物群落结构的周年变化. 生态学报,2009,29(6): 2971-2979.
- [4] 胡 韧,雷腊梅,韩博平. 南亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变化——以新丰江水库为例. 生态学报,2008,28(10): 4652-4664.
- [5] Gaedke U. The size distribution of plankton biomass in a large lake and its seasonal variability. *Limnol Oceanogr*,1992, 37: 1202-1220.
- [6] Nogueira MG. Phytoplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir(Parapanema River), Sao Paulo, Brazil. *Hydrobiologia*, 2000, 431: 115-128.

- [7] Cleber CF, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2001, **445**: 165-174.
- [8] 林秋奇, 胡 韧, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响. *生态学报*, 2003, **23**(11): 2278-2284.
- [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(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [10] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [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] 何国全, 雷腊梅, 韩博平. 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.
- [13] Figueredo CC, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2001, **445**: 165-174.
- [14] 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.
- [15] Robaas RD, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *Mar Freshwater Res*, 1987, **21**: 391-399.
- [16] 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.
- [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.
- [18] 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.
- [19] Brett MT, Lubnow FS, Villar AZ *et al.* Nutrient control of bacterioplankton and phytoplankton dynamics. *Aquatic Ecology*, 1999, **33**: 135-145.
- [20] Hlaili AS, Chikhaoui MA, Grami BE *et al.* Effects of N and P supply on phytoplankton in Bizerte Lagoon (western Mediterranean). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, **333**(1): 79-96.
- [21] Schluter L. The influence of nutrient addition on growth rates of phytoplankton groups, and microzooplankton grazing rates in a mesocosm experiment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, **228**: 53-71.
- [22] Hodgkiss IJ, Lu SH. The effects of nutrients and their ratios on phytoplankton abundance in Junk Bay, Hong Kong. *Hydrobiologia*, 2004, **512**: 215-229.
- [23] Harris GP. Phytoplankton ecology (structure, function and fluctuation). USA: Chapman and Hall, 1986.