

# 三峡库区支流回水区水体分层与藻类生长研究 ——以澎溪河高阳平湖为例

付莉<sup>1,2</sup> 张磊<sup>1,2\*</sup> 蔚建军<sup>1,2</sup> 周川<sup>1,2</sup> Douglas G. Haffner<sup>2,3</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716;

2. 重庆市国际科技合作示范基地“中加三峡水域科学研究中心”, 重庆 400716;

3. 加拿大温莎大学大湖环境研究中心, 加拿大安大略省温莎市, N9B 3P4)

**摘要** 三峡水库自2003年蓄水以来, 库区支流形成了长短不一的回水河段, 缓慢的水流和蓄积的营养盐导致回水河段由库区蓄水之初在短时间内出现水华, 逐步发展到一年内水华可维持数月。为了研究回水区水环境与水华发生的关系, 从2013年4月—12月, 对库区北岸最大支流澎溪河的长年回水区——高阳平湖进行了定点监测。监测结果显示, 季节性变化及三峡库区特殊的调度方式, 导致高阳平湖水体在春、夏和秋季有明显分层。春季水华期间藻类群落结构单一, 只出现4门9属, 以蓝藻门的微囊藻(*Microcystis*)和绿藻门的实球藻(*Pandorina*)、空球藻(*Eudorina*)为主, 秋季藻类结构组成增至7门52属, 优势属逐渐被硅藻门的小环藻(*Cyclotella*)和针杆藻(*Synedra*)取代, 水体各层藻类细胞密度差异消失。研究结果说明高阳平湖水体分层状况影响藻类生长和分布。

**关键词** 水华 高阳平湖 三峡库区 水体分层  $Z_{cu}/Z_{mix}$

中图分类号 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)05-0000-07

## Water stratification and its relevance to growth of algal community on backwater area (Gaoyang Lake) in Three Gorges Reservoir

Fu Li<sup>1,2</sup> Zhang Lei<sup>1,2</sup> Yu Jianjun<sup>1,2</sup> Zhou Chuan<sup>1,2</sup> Douglas G. Haffner<sup>2,3</sup>

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. China-Canada Three Gorges Reservoir Water Science Centre, Chongqing 400716, China;

3. Great Lakes Institute for Environmental Research, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada N9B 3P4)

**Abstract** Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR) in 2003, backwater areas with various extents in the tributaries have formed. Within the short period of impoundment, algae bloom occurred due to low velocity of water and accumulated nutrients in the backwater areas. Moreover, the duration of algae bloom could vary from several days to months annually. In order to find out biogeochemical characteristics of tributaries affect the activities of algal bloom, sampling at multiple site were conducted from April to December in 2013. The study sites are located in Gaoyang Lake, the backwater area in Pengxi River, the largest river in the north bank of Yangtze River. Results show that there was clear thermal stratification was found at the vertical profile of water column in spring, summer and autumn. In late spring when algal bloom happened, the algal community consisted of 9 genera of 4 divisions, mainly composed by cyanophyta and chlorella groups, and the first dominant genus was composed by *Microcystis*, *Pandorina* and *Eudorina*. However, as the seasons altered, algae structures increased to 52 genera of 7 divisions in autumn. The first dominant genus was replaced by *Cyclotella* and *Synedra*, and the different in the average cell abundance at multiple layers disappeared. Consequently, a conclusion that water stratification affects the growth and distribution of algal community on Gaoyang Lake is proposed.

**Key words** algal bloom; Gaoyang Lake; the Three Gorges Reservoir; water stratification;  $Z_{cu}/Z_{mix}$

三峡大坝作为人类历史上至今人工修建的最大水坝, 自建立以来不仅起到防洪、发电、灌溉的作用, 而且带动了地区旅游经济、水产业等方面的发展。2013年大坝正式蓄水至今, 支流水环境退化情况超

**基金项目:** 中加国家国际科技合作专项项目“三峡库区面源污染的先进监测与模拟”(2013DEG92520)

**收稿日期:** 2014-12-23; **修订日期:** 2015-01-28

**作者简介:** 付莉(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境微生物及藻类水华爆发机制研究工作。E-mail: lifu\_216@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: zhanglei03@aliyun.com

出了三峡工程建设前的预期,引起社会的关注<sup>[1]</sup>。三峡库区蓄水前多数支流平均流速大于 1.0 m/s,大坝蓄水后于 2004 年库区调查发现水体表面流速降至 0.02 ~ 0.06 m/s<sup>[2]</sup>,回水顶托作用显著。水体流速变缓使颗粒物携带营养盐沉积,在库湾产生明显的滞留效应,导致库区氮、磷营养盐浓度明显升高,总氮常年维持在 1.42 ~ 2.23 mg/L,总磷为 0.08 ~ 0.14 mg/L<sup>[3]</sup>。国际上公认,当水体总氮浓度高于 0.2 mg/L、总磷浓度高于 0.02 mg/L 的时候,水体营养达到富营养化条件<sup>[4]</sup>,说明库区水体营养已经完全达到或超过富营养阈值。

支流回水区作为干流与支流交汇区,存在着 2 种生境的物理、化学和生物等方面的重要交换和相互影响<sup>[5]</sup>。支流回水相对于干流、支流来水和河口具有更稳定的水文特征,容易形成由于水温差导致的水体分层现象,层化而稳定的水体为浮游植物生长提供了有利条件,成为库区水华高发水域<sup>[6]</sup>。已有大量研究从不同角度揭示三峡库区回水区的独特性。相关研究多集中于表层至水面下 0.5 m 的水深范围<sup>[4,7]</sup>,而回水区水体垂向分层现象与藻类群落分布关系方面的研究相对较少。本研究以三峡库区北段最大支流澎溪河,即自 2003 年以来水华发生频率和程度最为严重的支流<sup>[6]</sup>为研究对象。为探讨分层水体与藻类生长关系,对其回水区——高阳平湖进行长期、定点采样。

## 1 研究区域

澎溪河(又名小江)位于三峡库区中段北岸(图 1a),主河道长 182.4 km,流域面积 5 172.5 km<sup>2</sup>,年平均径流量达 34.1 亿 m<sup>3</sup><sup>[8]</sup>。支流的上游和下游均属于峡谷型河道,位于河流中部的高阳平湖在库区蓄水后河道拓宽以致形成面积为 5 ~ 6 km<sup>2</sup> 的永久

回水区<sup>[9]</sup>,成为湖泊型河段,断面平均流速不超过 0.2 m/s<sup>[8]</sup>,较澎溪河上下河段更适宜藻类的生长。

## 2 研究方法

### 2.1 水样采集点

自 2013 年 4—12 月,根据具体天气情况,每隔大约 15 d 采样一次。如图 1(b),采样点位于高阳平湖中部(31°05′27.4″N,108°40′41.6″E)。每次采样均从上午 8:00—9:00 之间完成。

### 2.2 垂直方向水文、水质参数测量

采集水样前,先使用加拿大 RBR 公司生产的 XR-420-CTD + 快速多参数水质剖面仪采集水体断面深度、温度、电导率连续数据;然后,将启动的仪器缓慢匀速沉入水中直到触及采样点河床底部,仪器自动记录水体断面水质参数数值;直径 30 cm 塞氏圆盘法(Secchi Disc)现场测定水体透明度(SD)<sup>[10]</sup>;YSI-52 型溶解氧测定仪现场测定表层溶解氧。

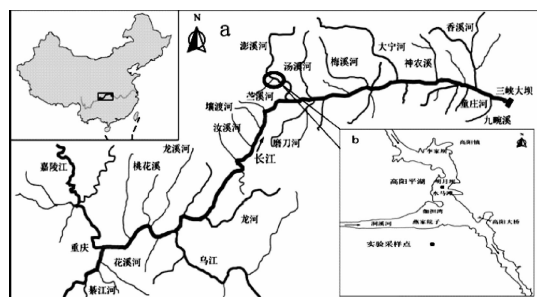
### 2.3 藻类样品的分层采集与鉴定

藻类定性样品使用 25#浮游生物网采集,采样方法为垂直提拉法<sup>[11]</sup>,即将浮游生物网沉入水下 2 m 处,垂直方向缓缓拉起并收集水样,每次采样均进行两次提拉。现场滴加鲁哥氏剂(1%)进行固定,室内沉降浓缩,在生物显微镜 10 × 40 倍条件下鉴定。藻类定量样品进行分层取样,距水面下及湖底上 0.5 m 处各取 1 L 水样,分别作为表层和底层采样。再根据 XR-420-CTD + 导出的数据确定温跃层,在该水层取 1 L 水样,或在水体 2 倍透明度深度处取样(冬季水体没有明显温跃层)作为水体中层样品。采用“计数框行格法”得出藻类细胞密度,藻类鉴定和计数参考《中国淡水藻类》<sup>[12]</sup>。测定叶绿素水样按照定量样品的分层方式,每层采集 500 mL 水样装入棕色玻璃瓶,采用反复冻融-浸提法<sup>[13]</sup>,计算出各水层藻类叶绿素 a 浓度。

## 3 结果与分析

### 3.1 水体理化特性

2013 年 4 月 30 日进行首次采样,整个库区处于较高水位,高阳平湖中部及采样点水深约 24 m,水体已经出现水华现象,肉眼可见水中悬浮聚集少量藻类。随着气温的回升,5 月 20 日采样时水面聚集大量的藻类,水华情况严重。在这段时间内表层水溶解氧饱和度由 110.2% 增加到 219.1%,形成极饱和状态。随后,由于三峡水库进入排水期,高阳平



(a. 三峡库区水系图 b. 高阳平湖采样点示意图)

(a. 三峡库区水系图 b. 高阳平湖采样点示意图)

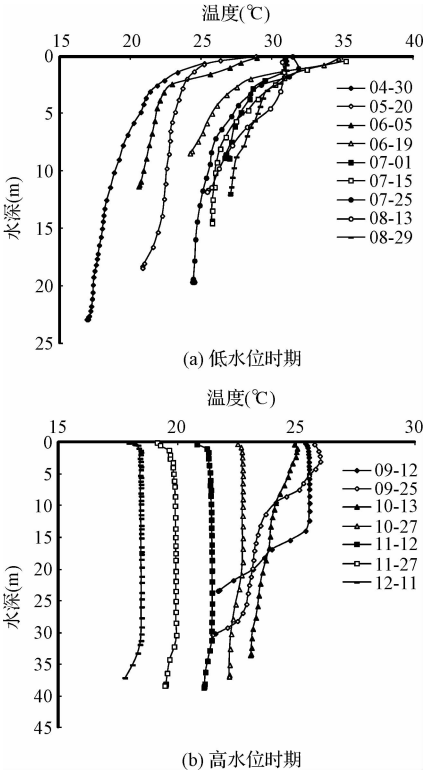
图 1 采样点示意图

Fig. 1 Sketch map of sampling location

湖水位短时间里快速下降,水华现象消失。9 月初,三峡水库蓄水,高阳平湖受到干流回水顶托,水位持续上升,最高水位达 38.67 m 且维持至年底(水位变化见图 4)。

3.1.1 水体温度的垂向变化

水体温度是湖库研究的重要环境参数之一,水温状况及分层现象将直接或间接影响到库区水环境中各种物理、化学和生物过程<sup>[14]</sup>。层化水体中,表层水体受到风力影响紊动活跃,温度分布均匀,形成混合层;底层水体温度受气温变化影响较为迟缓,从而形成滞温层;在混合层与滞温层间存在一个水体温度的过渡层,即温跃层<sup>[15]</sup>。表层水体水温高、密度小,底层水体温度低、密度大,导致不同水层之间形成由于密度屏蔽而无法对流的热分层。



(a. 低水位时期 b. 高水位时期)

图 2 高阳平湖垂向水温变化曲线

Fig. 2 The temperature curves in vertical distribution in Gaoyang Lake

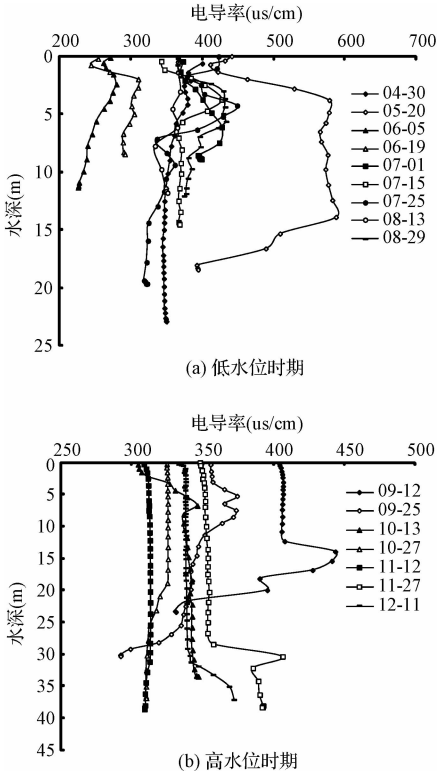
高阳平湖水体垂向水温随时空变化的特征明显,其水体分层与上面提到的传统“三层”层化模式存在一定差异性。图 2(a)显示出 4 月至 6 月混合层十分浅薄,这与高阳平湖四面环山的地理环境有直接关系,由于水体没有受到风力过多影响,因而没

有形成明显的水体混合层。进入 7 月后随着气温快速升高,“三层”层化现象出现,可以明显观察到水体混合层形成,最大深度可达水面下 3.8 m,同时温跃层随季节的变化在距水面下 3.5 ~ 7.0 m 范围出现。表层水体水温最高值达 35.5℃,与底层水体存在

10℃ 温度差。图 2(b)显示出水库进入蓄水期,回水区水位受干流顶托作用明显上升,断面逐步混合均匀,分层现象消失。这主要是因为气温下降使表层水温降低,导致水体密度大而形成上下掺混所致,断面最低水温约 17.7℃。

3.1.2 电导率的垂向变化

电导率剖面如图 3 所示,高阳平湖水体电导率随水位变化也存在分层现象,且有明显季节性特征。不同水体在混合过程中,电导率仍然具有相对保守的性质<sup>[16]</sup>。如图 3(a),5 月后水体垂向电导率变化大,这是由于春季气温回升,上游来水水温比高阳平湖表层水温低,而密度较表层水体密度大<sup>[17]</sup>,出现的密度差使上流来水以中层潜入方式进入高阳平湖,在 3 ~ 7 m 深度范围内潜流。电导率变化曲线还



(a. 低水位时期 b. 高水位时期)

图 3 高阳平湖垂向电导率变化曲线

Fig. 3 The conductivity curves in vertical distribution in Gaoyang Lake

显示,中层潜入流水体电导率明显高于原位水体,最大差值可达约 200 us/cm。在高水位时期(如图 3b),水体断面电导率趋于均匀,与水体温度变化趋势一致,表明回水区断面确实存在分层现象,在春、夏、秋季分层现象明显,进入冬季后分层现象消失。

3.2 叶绿素 a 分布特点

3.2.1 叶绿素 a 的时空变化

叶绿素 a 作为浮游植物现存量重要指标,其值的高低能够直观反映藻类整体生长状况<sup>[18]</sup>。高阳平湖叶绿素 a 浓度变化情况如图 4 所示。在不同时期,底层叶绿素 a 浓度变化幅度不大,基本维持在 1.25 ~ 6.12 μg/L 之间。而表、中层叶绿素 a 含量有明显季节性变化,且春秋形成峰值。春季水华爆发期间,表层叶绿素 a 浓度在短时间里骤升,其浓度高达 78.45 μg/L;秋季表层叶绿素浓度较高但没有出现水华现象。

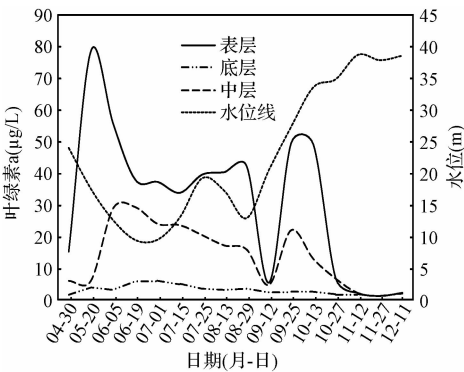


图 4 高阳平湖水体叶绿素 a 浓度的变化  
Fig. 4 Curves of Chl. a concentration in different layers in Gaoyang Lake

9 月初水库开始首次蓄水,水位明显回升,9 月 12 日采样时各水层水体中叶绿素 a 浓度低且处于同一水平,这时的表、中层水体温度和电导率整体混合均匀(图 2(b),图 3(b)),说明干流回水顶托不仅导致水容量增加,也对藻类密度存在稀释分散作用。10 月中下旬叶绿素 a 浓度较高,却没有出现实质性水华,虽然在适宜的光照、温度下利于藻类繁殖,但扩增的藻类在增大的混合层里(图 2(b),图 3(b))充分混合稀释,降低了表层叶绿素 a 浓度。待完全进入高水位运行时期,环境气温明显降低,分层现象消失,水体全断面混合均匀,各水层叶绿素 a 浓度降至约 2 μg/L。该现象显示水体分层与藻类生物量积累有密切关系,这与 Roelke 等<sup>[19]</sup>研究结果一致。

3.2.2 真光层对叶绿素 a 浓度影响

真光层( $Z_{eu}$ )深度为透明度的 2.7 倍<sup>[20]</sup>,是光线能到达水下的深度,也是水体能产生初级生产量的深度。藻类可以在混合层( $Z_{mix}$ )迁移悬浮,但只能在真光层进行光合作用和生长繁殖,所以真光层与混合层比值( $Z_{eu}/Z_{mix}$ )反映藻类生长潜势。 $Z_{eu}/Z_{mix}$  比例最早在海洋生态系统研究中发现,但被逐渐引入到湖泊研究中<sup>[21]</sup>。三峡水库蓄水后流速大大减缓,回水段库湾成为湖泊型水库,因此本研究运用  $Z_{eu}/Z_{mix}$  来探讨高阳平湖与藻类生长关系。图 5 显示,5—9 月高阳平湖真光层深度维持在约为 3m;秋季库区开始蓄水后,水流变缓浊度下降,真光层深度逐渐提高,11 月后真光层深度增至 9.45 m。高阳平湖混合层深度受水温和水库调度影响明显,4—8 月期间水体分层明显, $Z_{mix}$  约水下 1 m 范围,此时真光层大于混合层深度,即  $Z_{eu}/Z_{mix}$  较高,藻类可以充分利用光照繁殖且集中在水体表层,在  $Z_{eu}/Z_{mix}$  值最大的 4、5 月高阳平湖爆发了水华;9 月蓄水后,真光层略有增长但水体混合层深度增至 12 m,使增殖的藻类无法堆积。冬季水体垂向混合较好, $Z_{eu}/Z_{mix}$  比值降至约 0.35,藻类可在全断面存在和迁移,Roelke 等<sup>[19]</sup>研究也证明在这样的环境条件下藻类生物量小且难以积累,各水层叶绿素 a 浓度(图 4)接近且降至全年最低。该现象表明  $Z_{eu}/Z_{mix}$  理论对回水河段水华研究具有指导意义,说明真光层深度与混合层深度比值与水华生消过程有一定关系。

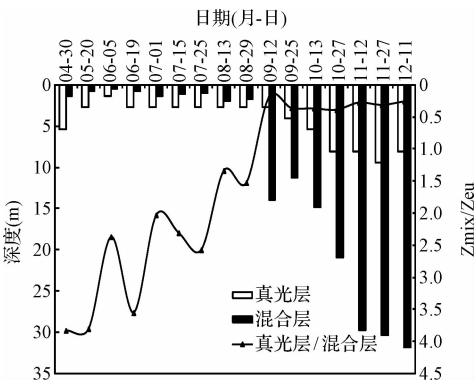


图 5 高阳平湖真光层、混合层深度及其比值变化趋势  
Fig. 5 Variation of  $Z_{eu}$ ,  $Z_{mix}$  and  $Z_{eu}/Z_{mix}$  in Gaoyang Lake

3.3 分层性水体中的藻类群落结构

本研究通过分层采样,探究浮游植物在水体垂向分布动态。长期采样发现每相邻 2 次采得水样中

藻类群落组成变化不大,但随着时间的迁移,藻类群落结构和各水层中的藻类细胞密度出现了明显差异。分别以 2013 年 4 月、6 月、9 月和 11 月采样结果代表不同季节藻类群落结构和细胞密度,阐述季节变化动态。

3.3.1 藻类群落结构交替

调查期间不同季节的藻类群落结构存在一定差异,仅在春季出现水华现象。

在春季,藻类群落结构较为单一,只出现了 4 门 9 属,分别为蓝藻门的鱼腥藻属(*Anabaena*)、微囊藻属(*Microcystis*)、绿藻门的实球藻属(*Pandorina*)、空球藻属(*Eudorina*)、空星藻属(*Coelastrum*)、硅藻门的直链藻属(*Melosira*)、小环藻属(*Cyclotella*)、舟形藻属(*Navicula*)和甲藻门的角甲藻属(*Ceratium*)。其中,蓝藻、绿藻、硅藻和甲藻 4 门分别占 22%、33%、33%和 11%。

在随后的监测中,藻类多样性明显增加。夏、秋和冬季的藻类结构分别增至 7 门 35 属、7 门 52 属和 7 门 36 属,且再无出现水华现象。经观察,蓝藻、绿藻、硅藻和甲藻 4 门仍然存在,但增现出了隐藻门、裸藻门和黄藻门 3 门藻类。

进一步分析观测数据发现,蓝、绿藻丰富性明显提升,从春季的 5 属扩增到 33 属,即从占藻类结构

的 55% 增至 65%。由于蓝绿藻较其它藻类种属更适应于生长在水体营养水平较高的水域<sup>[7]</sup>,其在藻类整体结构中所占比例较高,说明高阳平湖有明显富营养趋势。在整个研究调查过程中,只有春季出现水华现象,其藻类群落组成较其它时期更为单一,说明水华爆发是由少数几种适应其生存环境的优势藻类的急剧增殖导致。

3.3.2 藻类群落细胞密度变化

已有学者发现在分层性水体中表层藻密度受外界影响波动大<sup>[22]</sup>,高阳平湖的藻类细胞密度分布也受到环境变化的明显影响(图 6)。春夏秋冬四季表层水中的藻类细胞密度分别为  $2284 \times 10^4 \text{ cell/L}$ 、 $1060 \times 10^4 \text{ cell/L}$ 、 $1683 \times 10^4 \text{ cell/L}$ 和  $16 \times 10^4 \text{ cell/L}$ 。春季里  $Z_{eu}/Z_{mix}$  比值较大时,藻类可在稳定的分层性水体里快速繁殖且聚集水体表层,表层细胞密度约为底层细胞密度 30 倍,说明存在水体分层时,藻类细胞数在不同深度水层分布极不均匀。冬季各层水体中藻类细胞密度降至约  $14 \times 10^4 \text{ cell/L}$ ,结合冬季水体断面混合均匀的水文特点,进一步印证了水体分层影响藻类生长和藻类分布。

不同季节藻类优势属表现出明显更替(图 6)。春季以蓝藻门的微囊藻(*Microcystis*)和绿藻门中的实球藻(*Pandorina*)、空球藻(*Eudorina*)为主;夏季

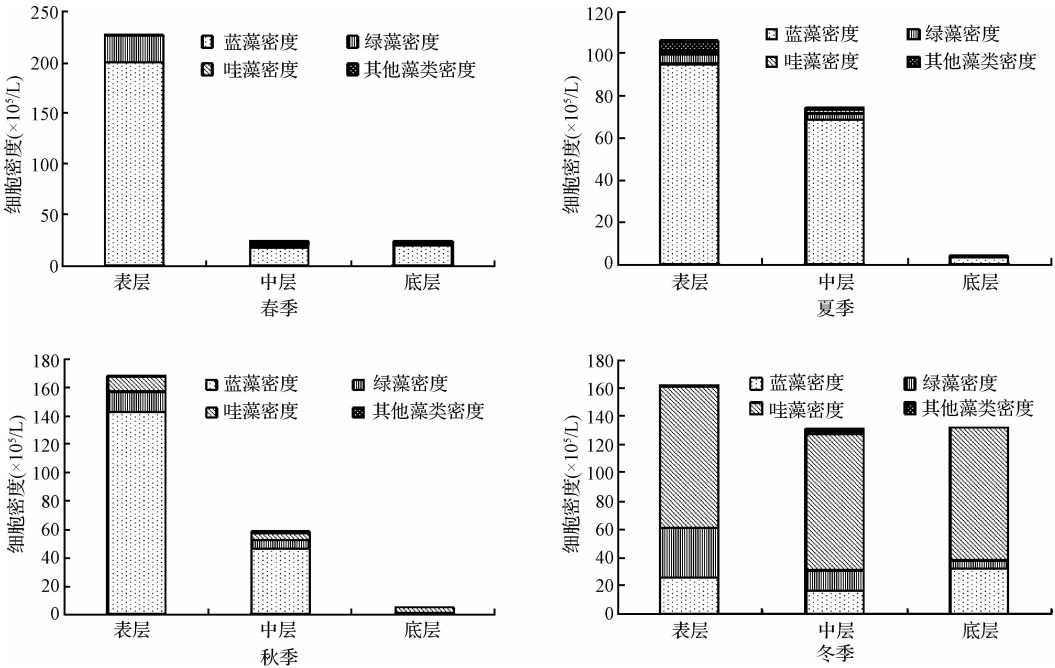


图 6 不同季节高阳平湖藻类细胞密度

Fig. 6 Algal density of cells in different seasons in Gaoyang Lake

温度升高,优势藻被更适应高温的蓝藻门的微囊藻(*Microcystis*)和束丝藻(*Aphanizomenon*)取代;进入秋季后,不同水层的优势藻出现差异,表、中层水体中仍以蓝藻门的微囊藻(*Microcystis*)为主,而底层水体中的优势藻为硅藻门的针杆藻(*Synedra*),即秋季表中层与底层的优势藻分别属于两个完全不同的门类;冬季各水层均以硅藻门的小环藻(*Cyclotella*)和针杆藻(*Synedra*)为主。值得注意的是断面垂向演变趋势是自下而上进行,优势藻从蓝绿藻过渡到蓝藻,最后被从底层成为优势属的硅藻代替。当硅藻成为底栖优势藻,说明其生长的水体环境发生明显变化,具有光线更为暗淡,受外境扰动小,热稳定等特点<sup>[23]</sup>,底栖硅藻的出现说明秋冬季对比春夏季水体环境具有显著变化,结合水体分层出现情况说明水体分层影响藻类种属分布。

## 4 结 论

(1)三峡库区澎溪河回水区高阳平湖在春、夏、秋三季里,由于水温差引起水体密度差,以及异重流作用,水体分层明显。进入冬季后,全断面混合均匀,水温降低且水体分层现象消失。

(2)春季水体分层和 $Z_{eu}/Z_{mix}$ 值升高平行发生,藻类集中于水体表层,充足的阳光以及稳定水环境为其繁殖创造了“优越”的水文条件,加速了水华爆发。进入蓄水期后,回水区水容量的增加及水体分层现象的消失,导致藻密度在全断面水体分布均匀,叶绿素a浓度有明显降低。

(3)春季水华期间其藻类群落结构单一,多样性明显低于其他季节,只出现4门9属,占绝对优势的蓝绿藻表明高阳平湖回水区有明显富营养趋势。水体存在分层时表层水体中的藻类细胞密度显著高于中层和下层,冬季水体上下混合均匀分层消失,各水层藻密度差异小且优势藻被硅藻代替,水体分层确实影响藻类生长和分布。

## 参 考 文 献

- [1] 许其功,席北斗,何连生,等. 三峡库区大宁河流域非点源污染研究. 环境工程学报, 2008, 2(3): 299-303  
Xu Qigong, Xi Beidou, He Liansheng, et al. Research on non-point pollution sources in Daning River watershed of the Three Georges Reservoir. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(3): 299-303 (in Chinese)
- [2] 中国环境监测总站主编. 长江三峡工程生态与环境监测公报. 北京: 国家环境保护总局, 2005
- [3] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征. 环境科学, 2011, 32(5): 1266-1272  
Guo Sheng, Li Chongming, Guo Jingsong, et al. Spatio-temporal variation of Nitrogen, Phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment. Environmental Science, 2011, 32(5): 1266-1272 (in Chinese)
- [4] Thomann R. V., Mueller J. A. Principle of surface water quality modeling and control. New York: Haper & ROV, 1987
- [5] Richardson J. S., Mackay J. Lake outlets and the distribution of filter feeders: An assessment of hypotheses. Oikos, 1991, 62(2): 370-380
- [6] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征. 湖泊科学, 2009, 21(1): 36-44  
Li zhe, Fang fang, Guo jinsong, et al. Spring algal bloom and nutrients characteristics in Xiaojiang River backwater area, Three Gorge Reservoir, 2007. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(1): 36-44 (in Chinese)
- [7] 魏复盛. 水和废水监测分析方法(第2版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [8] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院编. 三峡库区小江(澎溪河)流域生态环境综合整治工程可行性研究报告. 武汉: 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2004
- [9] 郭劲松, 李伟, 李哲, 等. 三峡水库小江回水区春季初级生产力. 湖泊科学, 2011, 23(4): 591-596  
Guo Jinsong, Li Wei, Li Zhe, et al. Spring primary productivity in Xiaojiang River backwater in the Three Gorges Reservoir. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 591-596 (in Chinese)
- [10] Koenings J. P., Edmundson J. A. Secchi disk and photometer estimates of light regimes in Alaskan lakes: Effects of yellow color and turbidity. Limnology and Oceanography, 1991, 36(1): 91-105
- [11] Syuhei B., Wataru M., Hiroyuki S., et al. Annual variation in biomass and the community structure of crustacean zooplankton over 5 years in Lake Toya, Japan. Limnology, 2012, 14(1): 59-70
- [12] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类. 北京: 科学出版社, 2006
- [13] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000
- [14] 张玉超, 钱新, 石川忠晴, 等. 浅水型湖泊水温日成层现象的初步探讨——以太湖为例. 四川环境, 2008, 27(3): 45-48  
Zhang Yuchao, Qian Xin, Hikawa Tadaharu, et al. Study

- on diurnal stratification in a typical shallow lake——Taihu Lake. *Sihuan Environment*, **2008**, 27(3):45-48 (in Chinese)
- [15] 杨正健, 刘德富, 马骏, 等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响. *武汉大学学报*, **2012**, 45(1):1-9  
Yang Zhengjian, Liu Defu, Ma Jun, et al. Effects of special vertical layered water temperatures on algal bloom in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. *Engineering Journal of Wuhan University*, **2012**, 45(1):1-9 (in Chinese)
- [16] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库 172.5m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响. *中国科学*, **2010**, 40(4):358-369  
Yang Zhengjian, Liu Defu, Ji Daobin, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level of 172.5m on water eutrophication in the Xiangxi Bay. *Science China*, **2010**, 40(4):358-369 (in Chinese)
- [17] Moreira-Turcq P. F., Seyler P., Guyot J. L., et al. Characteristics of organic matter in the mixing zone of the Rio Negro and Rio Solimões of the Amazon River. *Hydrological Processes*, **2003**, 17(7):1393-1404
- [18] Reynolds C. S. *The ecology of fresh water phytoplankton*. London: Cambridge Univ. Press, **1984**
- [19] Roelke D. L., Pierce R. H. Effects of inflow on harmful algal blooms: Some considerations. *J. Plankton Res.*, **2011**, 33(2):205-209
- [20] Lawrence I., Bormans M., Oliver R., et al. Physical and nutrient factors controlling algal succession and biomass in Burrinjuck Reservoir. Australia: Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology, **2000**
- [21] 姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾冬季甲藻水华生消机理初探. *环境科学研究*, **2012**, 25(6):654-651  
Yao Xujiao, Liu Defu, Yang Zhengjian, et al. Preliminary studies on the mechanism of winter Dinoflagellate bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, **2012**, 25(6):654-651 (in Chinese)
- [22] Guangjie Zhou, Xuemin Zhao, Yonghong Bi, et al. Phytoplankton variation and its relationship with the environment in Xiangxi Bay in spring after damming of the Three Gorges, China. *Environ. Monit. Assess.*, **2011**, 176(5):125-141
- [23] Sommer U. Benthic microalgal diversity enhanced by spatial heterogeneity of grazing. *Oecologia*, **2000**, 122(2):284-287