

# 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系

张磊<sup>1,2,3</sup>, 蔚建军<sup>1,2</sup>, 付莉<sup>1,2</sup>, 周川<sup>1,2</sup>, Douglas G. Haffner<sup>1,2,3</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基地中加三峡水域科学研究中心, 重庆 400715; 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:** 为探讨三峡水库调度运行背景下, 库区回水区营养盐和叶绿素 a 时空变化及其相互关系, 于 2013 年 5 月~2014 年 5 月在三峡库区北岸最大、也是库区水华频发的支流——澎溪河的回水区高阳平湖进行了定点和高频监测。结果表明水体热分层是高阳平湖水华发生的诱导因素。高阳平湖水体热分层发生于春季(3月初), 消亡于夏末(9月中旬), 冬季没有分层。2014 年春季, 随着水体分层的发生和发展, 表层叶绿素 a 在 69 d 内从  $14.92 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  骤增至  $183.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 并暴发水华, 之后叶绿素 a 随着混合层深度增加而下降。水体没有分层时, 表、中和底层营养盐浓度相近; 水体分层之后, 各层磷浓度有了明显差异, 表层和底层总磷浓度相差  $(0.18 \pm 0.04) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。高水位期(9月至次年4月), 高阳平湖硝氮和溶解性磷高于低水位期(5~8月)的含量, 分别占总氮、总磷浓度的 71.4%~95.4% 和 42.7%~94.4%, 是总氮和总磷的主要组成部分, 干流倒灌输入的硝氮和溶解性磷是其主要来源。

**关键词:** 三峡库区; 澎溪河回水区; 营养盐; 叶绿素 a; 时空变化

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-0000-00 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.000

## Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll A, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir

ZHANG Lei<sup>1,2,3</sup>, YU Jian-jun<sup>1,2</sup>, FU Li<sup>1,2</sup>, ZHOU Chuan<sup>1,2</sup>, Douglas G. Haffner<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. China-Canada Three Gorges Reservoir Water Science Centre, Chongqing 400715, China; 3. Great Lakes Institute for Environmental Research, University of Windsor, Windsor, Ontario N9B 3P4, Canada)

**Abstract:** In order to explore the temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll a and their relationship in the Three Gorges Reservoir, nutrients and chlorophyll a were monitored chronically and frequently in Gaoyang Lake in Pengxi River in the Three Gorges Reservoir from May 2013 to May 2014. The study showed that the thermal stratification affected the vertical distribution of chlorophyll a and nutrients. The water thermal stratification in Gaoyang Lake occurred in early March and disappeared in the middle of September, and there was no stratification in winter (November to February of the second year). Chlorophyll a in the surface water increased from  $14.92 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  to  $183.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  and then the chlorophyll a concentration decreased with the increasing depth of the mixing layer (epilimnion) in the spring of 2014. Furthermore, phosphorus concentration was significantly different among layers when the water stratified and the concentration gradient of TP between the surface and the bottom was  $0.18 \pm 0.04 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . When water was not stratified in Gaoyang Lake, the surface, middle and bottom layers had similar concentrations of chlorophyll a and nutrients, respectively. Nitrate N and dissolved phosphorus were the major components of TN and TP, respectively, during the high water level period in Gaoyang Lake with nitrate N accounting for 71.4%-95.4% of TN and dissolved phosphorus 42.7%-94.4% of TP, showing that the backwater from the mainstream of Yangtze was the main source of nitrate N and dissolved phosphorus in Gaoyang Lake.

**Key words:** Three Gorge Reservoir; Pengxi River backwater area; nutrients; chlorophyll a; temporal and spatial variation

三峡水库蓄水之后水位上升, 干流水体倒灌支流形成了面积广阔的回水区。支流库湾由原来的河流型变为河流湖泊型, 水动力条件、营养的输移和分布模式都发生了显著变化<sup>[1,2]</sup>。自 2003 年蓄水之后支流回水区富营养化越来越严重, 频繁暴发严重水华, 引起社会的广泛关注<sup>[3,4]</sup>。目前对三峡库区富营养化的研究主要集中制在富营养化状态调查评价<sup>[5,6]</sup>、氮磷营养的输移<sup>[7-9]</sup>和水体富营养化预测模

型构建<sup>[10]</sup>这三方面, 水华暴发机制尚不清楚。研究表明干流营养盐浓度高于支流, 三峡库区水位上升使大量干流水体携带营养盐倒灌支流, 使支流富营养化加重<sup>[11]</sup>。张宇等<sup>[12]</sup>对香溪河的研究表明干流水体在不

收稿日期: 2014-11-30; 修订日期: 2015-01-22

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2013DFG92520)

作者简介: 张磊(1967~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水体富营养化防治、土壤微生物修复, E-mail: zhanglei03@aliyun.com

同时期分别以表、中、底层异重流形式倒灌支流,形成了独特的分层特征. 三峡水库为河道型水库,河道型水库支流区域受气温影响更为显著<sup>[13]</sup>,气温对水体的影响主要表现为水温变化和水体热分层,水体分层会影响营养盐的垂向输移和分布<sup>[14]</sup>. 陈洋等<sup>[15]</sup>研究发现香溪河回水区水体热分层对水华形成有重要影响,且水体分层结构较典型湖泊更为复杂. 因此,研究气温和异重流双重因素影响下三峡库区支流回水区水体分层特征和营养盐垂向分布对弄清三峡库区回水区水华的形成机制有重要的意义. 本研究选取库区北岸最大支流澎溪河的回水区、同时也是水华高发区—高阳平湖段为研究区域,按热分层原理对营养盐和叶绿素的垂向分布进行了长期、定点和高频监测,通过从营养盐和叶绿素垂向变化的角度探索回水区水华发生的机制,以期为深入研究三峡库区回水区水华机制奠定基础.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

澎溪河(又名小江)地处四川盆地东部边缘,介于北纬  $30^{\circ}49' \sim 31^{\circ}42'$ ,东经  $107^{\circ}56' \sim 108^{\circ}54'$ 之间,流域面积  $5\,173\text{ km}^2$ ,干流全长  $182.4\text{ km}$ ,河口据三峡大坝约  $250\text{ km}$ ,是三峡库区北岸流域面积最大的支流. 三峡水库蓄水后,澎溪河流域包含了峡谷、消落区以及湖库等各种特征的水域,是库区 30 余条支流中暴发水华最频繁的支流之一. 本研究所选高阳平湖位于澎溪河回水区中段[图 1(a)],是三峡水库蓄水倒灌澎溪河形成的平湖,也是库区与长江干流直接相连的最大湖面,面积  $5 \sim 6\text{ km}^2$ . 是澎溪河回水区暴发水华最严重的区域之一,被认为是澎溪河回水区水华的发源地. 采样期间,2013 年 5 月和 2014 年 5 月均暴发了严重水华.

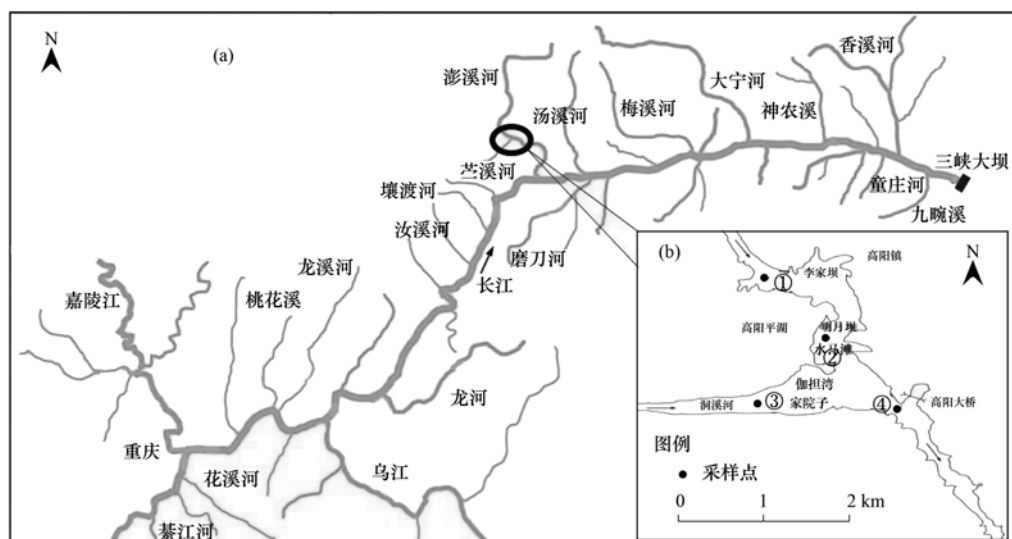


图 1 澎溪河回水区高阳平湖位置和采样点分布示意

Fig. 1 Location and distribution of sampling sites in Gaoyang lake in the Pengxi River backwater area

### 1.2 采样方案

根据高阳平湖周围环境,参照地表水监测点布设规范,本研究选取了样点 ① ( $N31^{\circ}5.908'$ ,  $E108^{\circ}5.39.913'$ )、样点 ② ( $N31^{\circ}5.282'$ ,  $E108^{\circ}40.416'$ )、样点 ③ ( $N31^{\circ}4.537'$ ,  $E108^{\circ}40.168'$ )、样点 ④ ( $N31^{\circ}4.179'$ ,  $E108^{\circ}41.125'$ )共 4 个采样点[图 1(b)]. 各采样点分表层(水下  $0.5\text{ m}$ )、中层(位于温跃层中部,温跃层具体深度范围根据多参数水质仪现场读取的深度-温度剖面确定)、底层(湖底上  $0.5\text{ m}$ )3 层采集水样. 平时每月采样 2 次,水华期增加至 3 次. 采样时间控制在当日上午  $08:00 \sim 11:00$ ,将样品低温保存运

回实验室,48 h 之内完成所有指标的测试.

原水样用于测定总磷和总氮,水样经  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  醋酸纤维滤膜过滤后,过滤物用于叶绿素 a 的测定,滤液用来测定硝氮、氨氮、正磷酸盐和溶解性总磷.

### 1.3 监测指标与分析方法

XR-420-CTD<sup>+</sup>快速多参数水质剖面仪:由加拿大 RBR 公司生产,可现场读取温度、深度和电导等数据.

本研究分析测试指标包括总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、正磷酸盐(SRP)、总氮(TN)、硝态氮( $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )、氨态氮( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ )和叶绿素 a. 测试方法

为:总磷(TP)和溶解性总磷(DTP)用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法;正磷酸盐(SRP)为钼锑抗分光光度法;颗粒态磷由总磷减去溶解性总磷估算;总氮(TN)为过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)为紫外分光光度法;氨态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)为水杨酸-次氯酸盐光度法;叶绿素 a 采用丙酮萃取光度法. 具体测试参照水和废水监测分析方法<sup>[16]</sup>.

文中各指标数据为 4 个采样点各指标数据的平均值.

## 2 结果与分析

### 2.1 水温垂向分布特征

澎溪河回水区高阳平湖水温垂向变化特征见图 2. 表层水温 1 月和 2 月最低,为  $12.1^\circ\text{C}$  [图 2(c)]; 7 月中旬最高,为  $35.2^\circ\text{C}$  [图 2(a)]. 底层最低水温出现在 1 月和 3 月中旬 [图 2(c)],约为  $11.6^\circ\text{C}$ ; 底层最高水温出现在 8 月底,温度约为  $27.1^\circ\text{C}$  [图 2

(c)]. 全年表层水温变化在  $12.1 \sim 35.2^\circ\text{C}$  之间,底层水温变化在  $11.6 \sim 27.1^\circ\text{C}$  之间. 3 月初水体开始出现弱分层 [图 2(c)],表底层温差约为  $0.7^\circ\text{C}$ . 2014 年 3 月 17 日开始形成不规则的温跃层,至 4 月下旬形成了包含混合层、温跃层、等温层和变温层的稳定的分层结构. 5 月上旬降雨和三峡水库泄水导致高阳平湖水体紊动增强,水体分层结构被破坏,温跃层逐渐消失,混合层深度由 5 月 10 日的  $0.32\text{ m}$  迅速增加至 5 月 29 日的  $8.5\text{ m}$ . 仲夏水体分层最明显,从监测数据可以清晰看到温跃层较厚,混合层深度非常浅薄. 6 月表层和底层温差最高 [图 2(a)],达到  $10.4^\circ\text{C}$ . 夏末,水体分层开始消亡,温跃层逐渐消失,混合层深度从 2013 年 8 月 29 日的  $1.7\text{ m}$  增加至 9 月 25 日的  $6.3\text{ m}$ . 11 月受气温下降影响,高阳平湖出现了表层水温略低于下层水温的逆温分层现象 [图 2(b)]. 12 月到次年 2 月,水体没有分层,处于全同温状态.

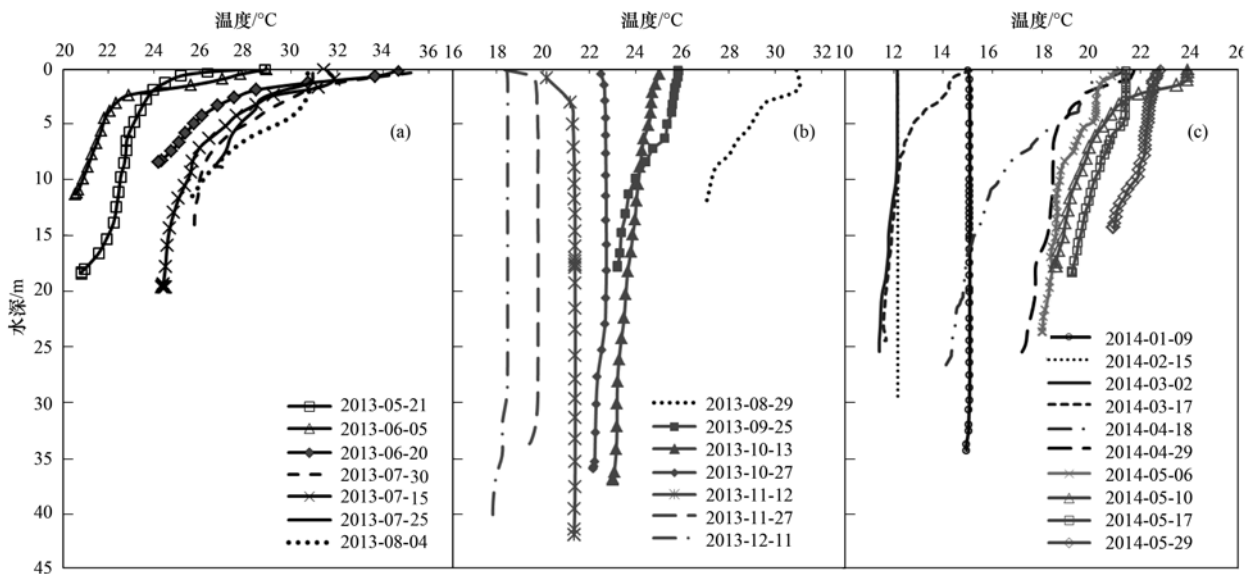


图 2 高阳平湖水深及温度梯度垂直剖面变化

Fig. 2 Vertical profile of water depth to temperature gradient in Gaoyang Lake

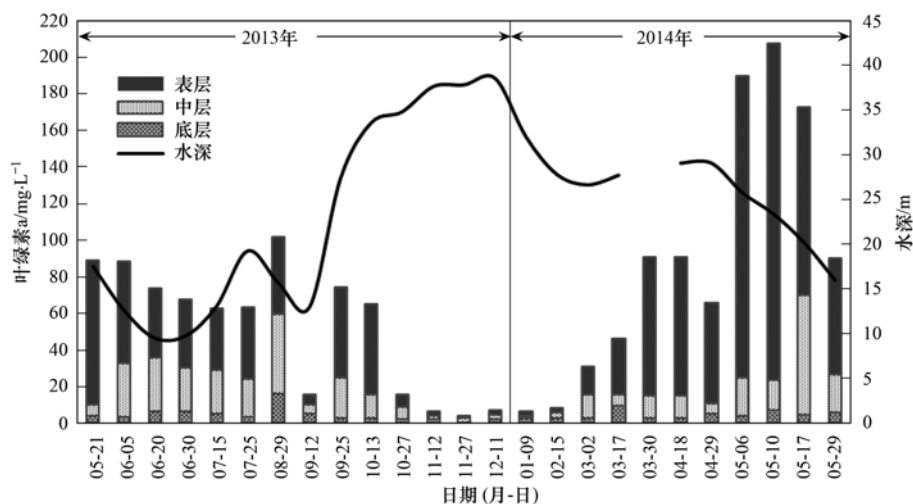
### 2.2 叶绿素变化特征

叶绿素 a 是表征藻类等浮游植物现存生物量的重要指标,常被作为评价水体富营养化的主导因子和水华预测的指征. 研究期间高阳平湖叶绿素 a 动态变化如图 3 所示. 叶绿素 a 浓度变化范围较大,表层的变化范围为  $(1.31 \pm 0.28 \sim 183.73 \pm 113.06) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、中层为  $(1.27 \pm 0.1 \sim 65.45 \pm 32.15) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、底层为  $(1.25 \pm 0.31 \sim 15.99 \pm 6.8) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ . 底层浓度低且保持稳定. 表层叶绿素 a 的峰值出现在三峡水库水位开始下降的 5 月. 通过对

2014 年完整水华过程的观测发现,3 月初表层叶绿素 a 浓度开始快速增长,与中层叶绿素 a 浓度差逐渐拉大,于 5 月 10 日达到最大值,同时暴发严重水华. 之后叶绿素 a 随混合层深度增加而下降. 中层叶绿素 a 仅在水华开始消退时出现短期增长.

### 2.3 磷变化特征

研究期间 TP 平均浓度变化范围为  $(0.05 \pm 0.02 \sim 0.20 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,全年 TP 浓度远高于富营养化阈值  $(0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$  [图 4(a)]. 在水体热分层期间,即 3 月中旬至 10 月中旬,各水层总磷随着



2014 年 3 月 30 日水深数据缺失

图 3 高阳平湖叶绿素 a 分布特征

Fig. 3 Distribution characteristic of chlorophyll a in Gaoyang Lake

水体分层而分层;冬季,即 10 月下旬至次年 2 月,水体未分层时,表、中、底层的 TP 浓度非常接近. 全年 25 次采样中,有 13 次底层 TP 高于中层和上层,占总采样数的 52%. 其中有 10 次底层 TP 分别超过上、中层 TP 的 1.3 倍. 这 10 次中,9 次发生于初夏(5 月底)至仲秋(10 月下旬),即水体明显分层时期,只有一次在春季,即 2014 年 3 月 17 日水体开始出现分层现象时. 该现象显示了分层所形成的下层厌氧环境与下层高磷的联系. 黄钰铃等在香溪河的研究也得到了类似的结果<sup>[17]</sup>. 同样,在这 25 次采样中,只有 5 次上层的 TP 明显超过其它层次,该现象均发生在春季,即水华高发季. 25 次采样中,有 6 次水体没有分层,各层 TP 值接近.

DTP 和 SRP 变化规律相似. 6 ~ 10 月上旬,二者垂向分布趋势为从表层至底层逐渐增大,底层浓度远高于表中层. 颗粒态磷浓度变化如[图 4(d)]所示,其浓度变化与叶绿素 a 变化一致,即水华高发期(4 月和 5 月),表层颗粒态磷含量高于中层和底层,相关分析显示其与叶绿素 a 极显著正相关( $P < 0.01$ ),相关系数为 0.732. 2013 年 6 月 5 日至 10 月 13 日(低水位期),总磷中颗粒态磷占比大于 50%,是高阳平湖磷的主要形态. 高水位期(10 月下旬至次年 5 月),溶解态磷所占比重为 42.7% ~ 94.4%,是高阳平湖磷的主要形态.

#### 2.4 氮变化特征

研究期间 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度时空变化如图 5 所示. TN 浓度也远高于公认的富营养化阈值( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 2014 年 3 月初水体开始分层时,

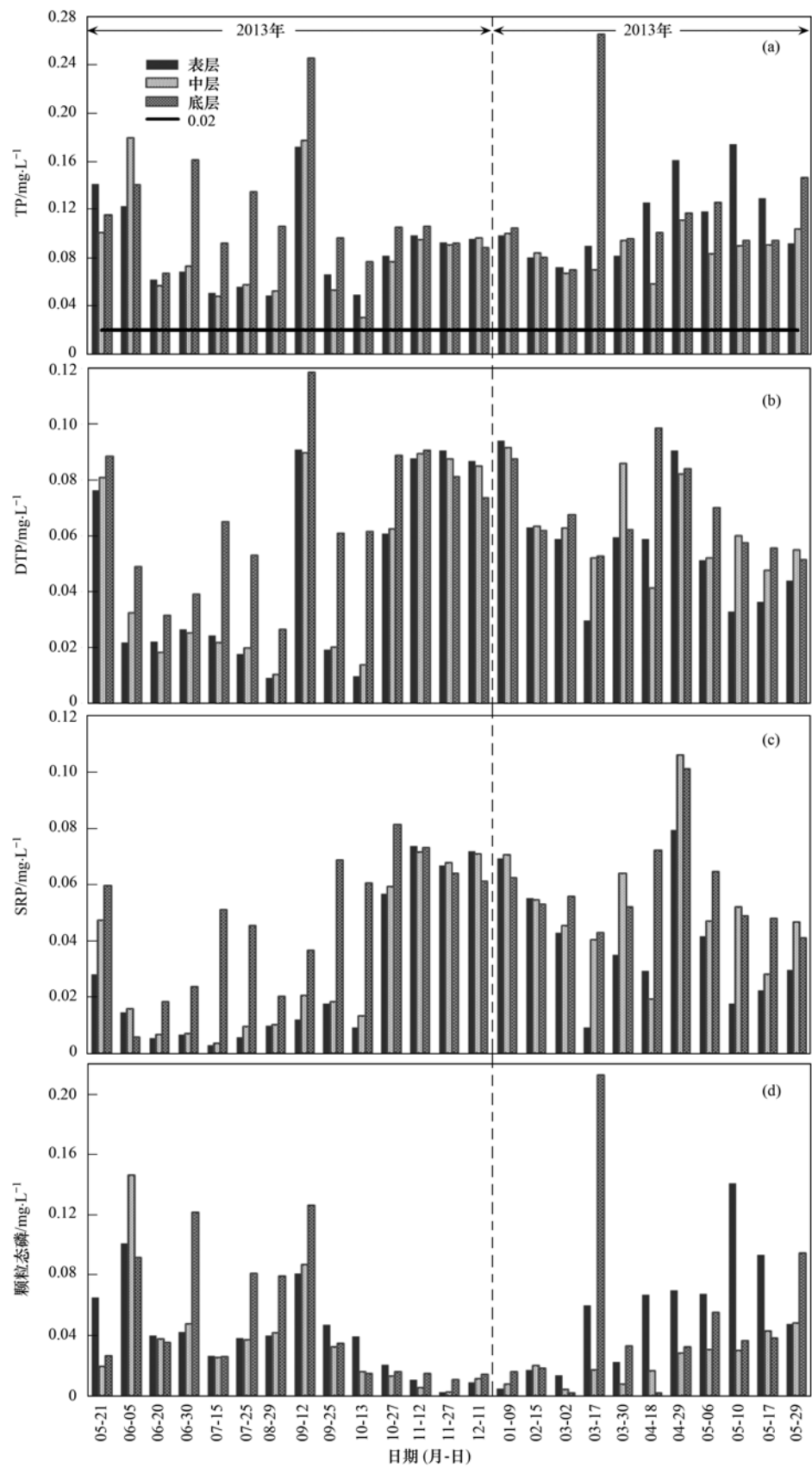
表层和中层 TN 浓度没有明显差异,至春末夏初(4 月和 5 月)水华高发期时,表层 TN 明显高于中层和底层,与 TP 垂向分布特征相似[图 4(a)]. 与总磷趋势不同的是,除水华高发期,全年其它时期各水层总氮差别不大. 水华高发期水体各层 TN 的总量也高于其它时期的.

夏季  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度(5 月下旬至 7 月下旬)低于  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 9 月初三峡水库开始蓄水(见图 3 水位线),高阳平湖下层和中层硝态氮骤然增长,之后其上层浓度也迅速增长. 除 2014 年 3 月 17 日外,整个冬季和春季硝态氮都维持在较高水平,其在总氮中所占比重为 71.4% ~ 95.4%,是氮的主要组成部分. 冬季水体未分层期间,各水层硝态氮浓度相似. 至 5 月中下旬三峡水库开始放水时,各层硝态氮又降至较低水平. 硝态氮浓度的动态说明其主要受三峡水库水位管理方式影响.

尽管  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度仅约为  $\text{NO}_3^-$ -N 值的 1/10,但其年周期变化呈现与后者互补的趋势. 水华高发期,上层  $\text{NH}_4^+$ -N 一般高于其他层次;水体未分层的冬季,  $\text{NH}_4^+$ -N 水平极低且各层间差别不大.

#### 2.5 叶绿素与营养盐的关系

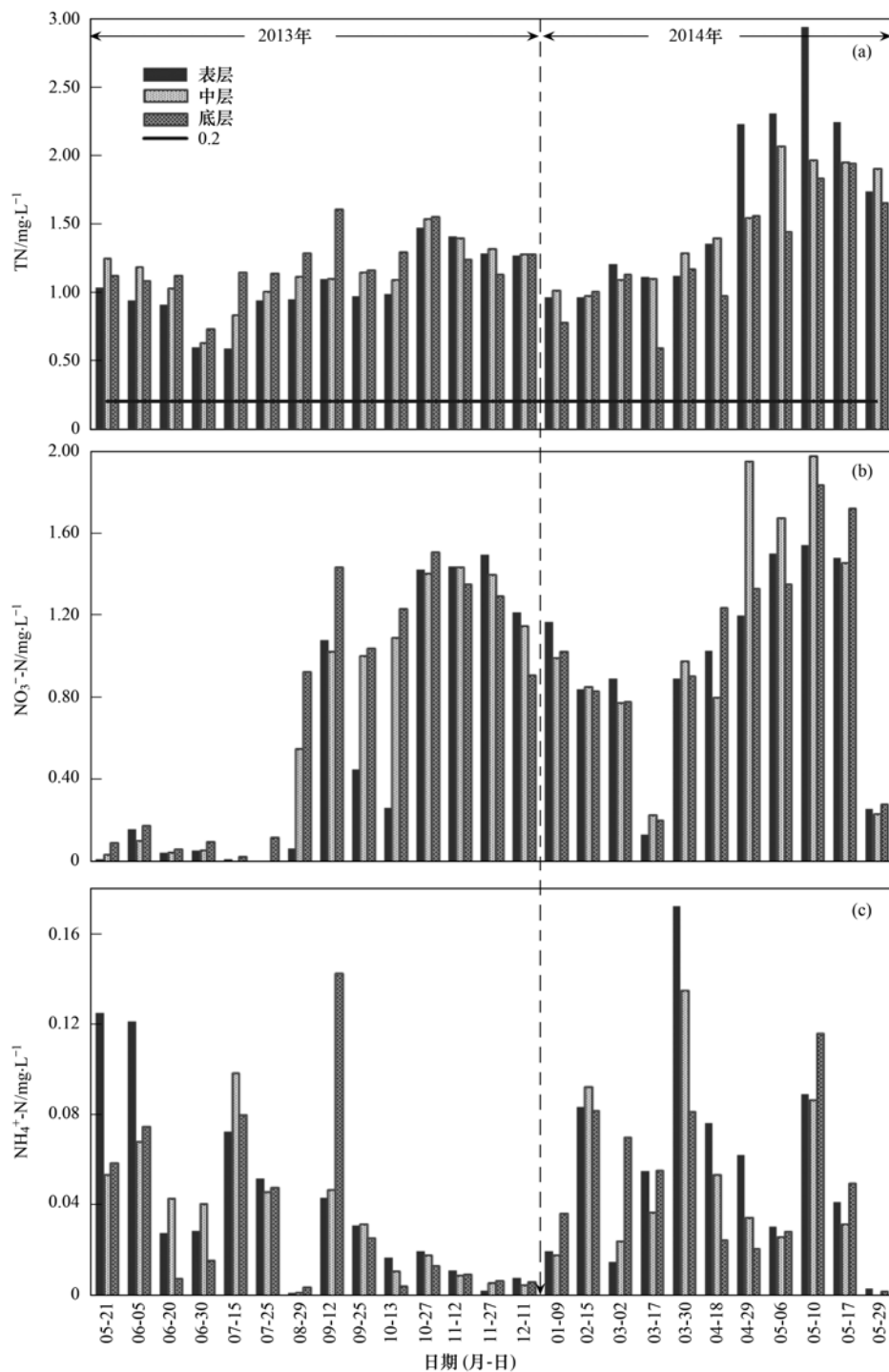
叶绿素 a 和营养盐浓度的垂向分布均受水温分层和水位变化影响. 将表、中层叶绿素 a 与同层营养盐进行相关分析,结果见表 1. 在整个监测过程中,底层由于得不到光照,叶绿素 a 一直保持在  $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,且没有明显的变化,因此未纳入相关分析. 分析结果(表 1)显示,表、中层叶绿素 a 与其相应水层的营养盐关系不同. 表层叶绿素 a 与表层



黑线为磷富营养化阈值  $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图 4 研究期间高阳平湖不同形态磷的变化动态

Fig. 4 Changing dynamics of phosphorus forms in Gaoyang Lake during the study period



黑线为氮富营养化阈值  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

图5 研究期间高阳平湖氮的动态变化

Fig. 5 Changing dynamics of nitrogen in Gaoyang Lake during the study period

$\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP 极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 DTP 和 SRP 极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); 中层叶绿素 a 仅与中层  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  正相关, 但相关性不显著, 与其它 5 种营养盐呈负相关关系. 其中, 与 TP、DTP 和 SRP 极显著负相关 ( $P < 0.01$ ).  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 SRP 是藻类可以直接利用的营养形态. 除冬季外, 高浓度叶绿素 a

(图3) 紧随  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  [图5(c)] 和 SRP [图4(c)] 的峰值出现.

### 3 讨论

#### 3.1 水体分层与水华的关系

水体热分层广泛存在于各种湖泊和水库, 其形

表 1 高阳平湖营养盐与叶绿素 a 相关系数<sup>1)</sup> (n = 100)

Table 1 Correlation coefficients among nutrients and chlorophyll a in Gaoyang Lake

位置	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TN	TP	DTP	SRP
表层	0.369 **	0.126	0.556 **	0.575 **	-0.225 **	-0.292 **
中层	0.069	-0.173	-0.053	-0.282 **	-0.478 **	-0.505 **

1) \* 为  $P < 0.05$ , \*\* 为  $P < 0.01$

成主要受水体深度、流动性以及气候条件等因素影响<sup>[18,19]</sup>。在一般水体中,表层水体受季节的影响明显,在高温季节升温较快,低温季节降温较快,而底层水体则升温或降温滞后,这样就使水体在高温季节、低温季节及过渡季节分别形成正温成层、逆温成层和全同温状态等 3 种类型<sup>[20]</sup>。而三峡库区回水区水体分层情况还要受水动力条件影响,泄水和低水位期温度较低的干流水体主要以中表层异重流形式倒灌支流,且倒灌流量和流速较小,这样的水环境有利于温跃层形成<sup>[21]</sup>。水库蓄水进入高水位运行之后,干流倒灌支流的流量和流速显著增加,水团之间的相互作用增强,加剧了水体的垂向扰动,不利于温跃层形成<sup>[10]</sup>。高阳平湖水体低水位期间分层比较明显,高水位期(11 月至次年 2 月)表现为垂向掺混均匀。

水体分层可能对库区内几乎所有水环境演化过程起着控制或者影响作用<sup>[22]</sup>。水温分层导致底层水体缺氧,会引起底泥有机质、氮、磷的溶解释放<sup>[23~26]</sup>,使水体营养增加。冬季没有分层时,虽然高阳平湖水温可以达到 18℃,且营养丰富,但表层叶绿素 a 和颗粒态磷浓度很低;2014 年 3 月 17 日及之后,虽然水温只有 14℃,水体分层现象逐渐显现,表层叶绿素 a 浓度也开始增加。至 4 月下旬水体形成稳定分层结构之后,叶绿素 a 开始暴发式增长,于 5 月上旬暴发水华(图 3)。此外,水温分层对高阳平湖氮、磷垂向分布也有明显影响,水体未分层期间(10 月 27 日~次年 2 月 15 日)表、中、底层氮、磷含量非常接近。随着水温分层的发生和发展,表、中、底层出现明显的浓度差,表底层总磷浓度差高达 $(0.18 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。前人研究发现水温分层不仅影响水体的理化环境和营养盐的垂向输移,而且混合层深度还是表层叶绿素 a 浓度的控制因素,混合层越小表层叶绿素 a 浓度越大<sup>[27]</sup>。对高阳平湖的研究得到了相似的结果。2014 年 4 月下旬,稳定分层结构形成之后,表层叶绿素 a 骤增至 $183.73 \text{ ug} \cdot \text{L}^{-1}$ ,并暴发了水华。之后,由于降雨和三峡水库泄水引起的强扰动使水体分层结构被破坏,温跃层消失,混合层深度增加,叶绿素 a 随之下降。

这是因为没有温度分层情况下,水体在垂直方向上不断进行对流交换,加之水体较深,藻类随水体垂向循环过程中,长时间处于无光环境而无法生长<sup>[28]</sup>。随着水体分层的发生和发展,水体分层后温跃层的存在一方面限制了下层水体藻类的生长,降低了上层水体藻类生长的竞争压力;另一方面阻碍了水体垂向的对流交换,使上层水环境相对稳定<sup>[29]</sup>。在混合层的藻类只在混合层上下运动,获得充足的光照,可以形成暴发式生长。

3.2 水文条件对水华的影响

分析叶绿素 a 数据(图 3)和水温分层(图 2)发现,2014 年 4 月下旬水体形成稳定分层结构之后,叶绿素 a 开始暴发式增长,当水体分层被降雨和三峡水库泄水引起的强扰动破坏之后,叶绿素 a 浓度快速下降。2013 年夏末水体分层结构与 2014 年 4 月下旬至 5 月的水体分层情况相似(图 2),但并没有引起叶绿素 a 的大幅度增长。这可能是水文条件不同所致。前人研究发现较缓的流速能促进藻类的生长,而过高的流速则抑制藻类的生长<sup>[30]</sup>。龙天渝等<sup>[31]</sup>在嘉陵江的研究得到了相似的结论。因此,水华暴发于三峡库区刚开始泄水的 5 月上旬,可能是因为泄水初期回水区流速较缓,适宜藻类生长。由此说明稳定的水体分层是澎溪河回水区水华暴发的基础,最适流速的出现则是水华暴发的诱因。应通过优化三峡水库调度方式对这两个因素加以控制,避免回水区最适流速和稳定分层结构同时出现而暴发水华。

3.3 营养盐分布特征及干流输入影响

硝氮和溶解性磷随时间变化与水位变化一致,且高水位期比低水位期高出数倍。回水与干流的水体交换表现为异向流动,水位升高使大量的干流水体以异重流形式倒灌支流,氮磷等溶解性营养物质随水体输入支流,回水区营养含量增加,为次年春季水华提供了物质基础<sup>[3]</sup>,水华期间异重流对中上层水体的营养补给会延长水华的持续时间。2013 年 10 月到次年 5 月高水位期间(图 2),高阳平湖硝氮和溶解性磷在总氮和总磷中所占比重分别为 71.4%~95.4% 和 42.7%~94.4%,是高阳平湖氮

磷的主要组成部分. 说明干流倒灌输入是高阳平湖硝氮和溶解性磷的主要来源,与张宇等在香溪河的研究结果一致<sup>[12]</sup>. 郭劲松等<sup>[32]</sup>研究发现,澎溪河藻类对硝氮利用明显,但相关分析发现表层叶绿素 a 与硝氮和正磷酸盐的相关性并不高,这说明营养盐并不是高阳平湖水华暴发的限制性因素. 在水库调度过程中应重点关注水文条件.

#### 4 结论

(1)高阳平湖水体分层受气温变化和水位变化双重影响. 水体热分层形成于春季(2014 年 3 月 2 日~5 月 10 日),从 3 月初开始出现水体弱分层现象,之后表底层温差逐渐增大,4 月下旬形成稳定的分层结构. 5 月下旬分层结构被三峡水库泄水引起的强扰动破坏,温跃层逐渐消失. 混合层深度增加,从 2014 年 5 月 10 日的 0.32m 增加至 29 日的 8.5m. 仲夏水体分层最明显,6 月表底层水温差高达 10.4℃. 夏末(9 月中旬),水体分层开始逐渐消亡,冬季没有分层.

(2)水温分层是影响营养盐和叶绿素垂向分布的主要因素. 水体没有分层情况下,表、中、底层营养盐和叶绿素 a 无明显差异,叶绿素 a 浓度小于  $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 春季,随着水温分层的发生和发展,表层叶绿素 a 在 69 d 内从  $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  骤增至  $183.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,并暴发水华. 之后水体分层结构被破坏,叶绿素 a 下降.

(3)干流倒灌输入的硝氮和溶解性磷是高阳平湖硝氮和溶解性磷的主要来源. 高水位期,高阳平湖硝氮和溶解性磷在总氮和总磷中所占比重分别为 71.4%~95.4% 和 42.7%~94.4%,是高阳平湖氮磷的主要组成部分.

#### 参考文献:

- [1] Holbach A, Floehr T, Kranzioch I, *et al.* Dilution of pollution? Processes affecting the water quality in the river-style Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(10): 7140-7141.
- [2] Li H M, Tang H J, Shi X H, *et al.* Increased nutrient loads from the Changjiang (Yangtze) river have led to increased harmful algal blooms[J]. *Harmful Algae*, 2014, **39**: 92-101.
- [3] Dai H C, Mao J Q, Jiang D G, *et al.* Longitudinal hydrodynamic characteristics in Reservoir tributary embayments and effects on algal blooms[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(7): e68186.
- [4] Tan L, Cai Q H, Zhang H Y, *et al.* Trophic status of tributary bay aggregate and their relationships with basin characteristics in a Large, subtropical dendritic Reservoir, China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, **23**(3): 650-659.
- [5] 乔飞, 孟伟, 郑丙辉, 等. 长江流域污染负荷核算及来源分析[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(1): 80-87.
- [6] 张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 等. 三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3382-3389.
- [7] 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 7-12.
- [8] 吴起鑫, 韩贵琳, 唐杨. 三峡水库坝前水体水化学及溶解无机碳时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 654-661.
- [9] 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[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1266-1272.
- [10] Holbach A, Wang L J, Chen H, *et al.* Water mass interaction in the confluence zone of the Daning River and the Yangtze River—a driving force for algal growth in the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(10): 7027-7037.
- [11] Huang Y L, Zhang P, Liu D F, *et al.* Nutrient spatial pattern of the upstream, mainstream and tributaries of the Three Gorges Reservoir in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6833-6847.
- [12] 张宇, 刘德富, 纪道斌, 等. 干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2621-2627.
- [13] 李一平, 滑磊, 王沛芳, 等. 河道型水库水动力特征与气候条件的响应关系[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(3): 317-323.
- [14] 赵林林, 朱广伟, 许海. 太湖梅梁湾理化指标分层的空间分布特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(7): 721-727.
- [15] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3049-3056.
- [16] 国家环境环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版) 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 黄钰铃, 刘德富, 苏妍妹, 等. 香溪河库湾底泥营养盐释放规律初探[J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(5): 9-13.
- [18] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2574-2581.
- [19] 赵林林, 朱广伟, 陈元芳, 等. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素[J]. *水科学进展*, 2011, **22**(6): 844-850.
- [20] De Laurentiis E, Minella M, Maurino V, *et al.* Effects of climate change on surface-water photochemistry: a review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(20): 11770-11780.
- [21] 陈媛媛, 刘德富, 杨正健, 等. 分层异重流对香溪河库湾主要营养盐补给作用分析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(3): 762-770.
- [22] 王敬富, 陈敬安, 杨永琼, 等. 红枫湖季节性热分层消亡期水体的理化特征[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(8): 845-851.
- [23] Foley B, Jones I D, Maberly S C, *et al.* Long-term changes in oxygen depletion in a small temperate lake: effects of climate change and eutrophication[J]. *Freshwater Biology*, 2012, **57**



- (2): 278-289.
- [24] Obenour D R, Michalak A M, Zhou Y T, *et al.* Quantifying the impacts of stratification and nutrient loading on hypoxia in the northern gulf of Mexico [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(10): 5489-5496.
- [25] Toffolon M, Ragazzi M, Righetti M, *et al.* Effects of artificial hypolimnetic oxygenation in a shallow lake. Part 1: Phenomenological description and management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **114**: 520-529.
- [26] 牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 等. 三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量估算[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1308-1314.
- [27] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3049-3056. (本条与第15条重复, 请核对)
- [28] Valdespino-Castillo P M, Merino-Ibarra M, Jiménez-Contreras J, *et al.* Community metabolism in a deep (stratified) tropical reservoir during a period of high water-level fluctuations [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6505-6520.
- [29] 夏品华, 林陶, 李存雄, 等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1477-1485.
- [30] Mitrovic S M, Hardwick L, Dorani F. Use of flow management to mitigate cyanobacterial blooms in the Lower Darling River, Australia [J]. *Journal of Plankton Research*, 2011, **33**(2): 229-241.
- [31] 龙天渝, 蒙国湖, 吴磊, 等. 水动力条件对嘉陵江重庆主城区藻类生长影响的数值模拟[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1498-1503.
- [32] 郭劲松, 陈园, 李哲, 等. 三峡小江回水区叶绿素 a 季节变化及其同主要藻类的相互关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 976-981.