

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



# 目次

|                                                                                                                        |                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 南京北郊春季气溶胶吸湿性分析 .....                                                                                                   | 徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)                  |
| 南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响 .....                                                                                     | 于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)                 |
| 南京北郊冬季霾天 PM <sub>2.5</sub> 水溶性离子的污染特征与消光作用研究 .....                                                                     | 周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)                      |
| 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 .....                                                                                             | 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)                |
| 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 .....                                                                                      | 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)                      |
| 贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析 .....                                                                                             | 朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)                              |
| 北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征 .....                                                                                             | 薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)      |
| 北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征 .....                                                                                              | 胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)                |
| 燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析 .....                                                                                                    | 欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)                    |
| Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究 .....                                                                                                 | 谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)                         |
| 办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露 .....                                                                                            | 李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)                              |
| 森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳 .....                                                                                               | 黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)    |
| 北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能 .....                                                                                             | 王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)                     |
| 气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响 .....                                                                                        | 方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)                      |
| 长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析 .....                                                                                           | 刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)                              |
| 深圳近岸海域全氟化合物的污染特征 .....                                                                                                 | 刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)      |
| 杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义 .....                                                                                     | 李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)                |
| 小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价 .....                                                                                         | 黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)             |
| 调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应 .....                                                                                            | 万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)                             |
| 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, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)       |
| 藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响 .....                                                                                       | 包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)          |
| 巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究 .....                                                                                               | 李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)                      |
| 贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征 .....                                                                                      | 肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)                |
| 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义 .....                                                                                         | 李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)           |
| 元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征 .....                                                                                                | 张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)                        |
| 植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究 .....                                                                                             | 黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)                              |
| Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究 .....                                                                                        | 丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)                   |
| 三维花状结构 $\alpha$ -FeOOH 协同 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 可见光催化降解双氯芬酸钠 .....                                             | 许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)              |
| UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素 .....                                                                | 冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)                |
| 钼掺杂 TiO <sub>2</sub> 光催化降解全氟辛酸 .....                                                                                   | 刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)    |
| 低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7 .....                                                                                                 | 吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)                      |
| 纳米 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /CeO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解 ..... | 孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)                          |
| 流变相法制备包覆型 CMC-Fe <sup>0</sup> 及降解水中 TCE 的研究 .....                                                                      | 樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)                         |
| Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究 .....                                                                                      | 祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)                  |
| 锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制 .....                                                                                            | 肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)                         |
| 铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性 .....                                                                                 | 郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)                         |
| 聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附 .....                                                                                        | 张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)                    |
| 大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径 .....                                                                                         | 杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)           |
| 污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究 .....                                                                                            | 孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)                              |
| 不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征 .....                                                                                            | 张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)                   |
| 基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素 .....                                                                                          | 贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)                             |
| 蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究 .....                                                                                            | 雍佳君, 成小英 (2232)                                  |
| 不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析 .....                                                                                    | 王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)                           |
| 石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应 .....                                                                                          | 王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)                 |
| Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化 .....                                                                      | 司友斌, 孙林, 王卉 (2252)                               |
| 根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响 .....                                                                                             | 马微, 鲍艳宇 (2259)                                   |
| 不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响 .....                                                                                         | 禄兴丽, 廖允成 (2266)                                  |
| 城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化 .....                                                                                            | 李晓燕, 张舒婷 (2274)                                  |
| 中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征 .....                                                                                   | 李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)           |
| 经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟 .....                                                                                   | 张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292) |
| 生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响 .....                                                                                               | 陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)                              |
| 改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用 .....                                                                                            | 曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)                    |
| 蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制 .....                                                                                        | 曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)                             |
| 焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价 .....                                                                                           | 杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)                    |
| 《环境科学》征订启事(1965) 《环境科学》征稿简则(2115) 信息(1925, 2076, 2084, 2146)                                                           |                                                  |

# 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)06-2061-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.020

## 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>, WEI 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  $182.4\text{ km}$ ,河口距三峡大坝约  $250\text{ km}$ ,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.

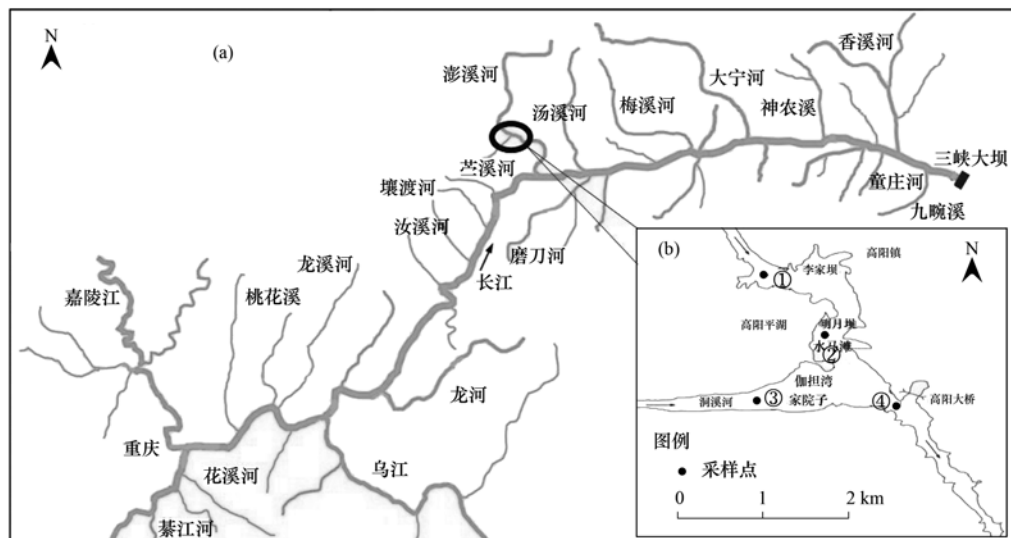


图 1 澎溪河回水区高阳平湖位置和采样点分布示意

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 ( $N31^{\circ}5.908'$ ,  $E108^{\circ}39.913'$ )、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;铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -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.

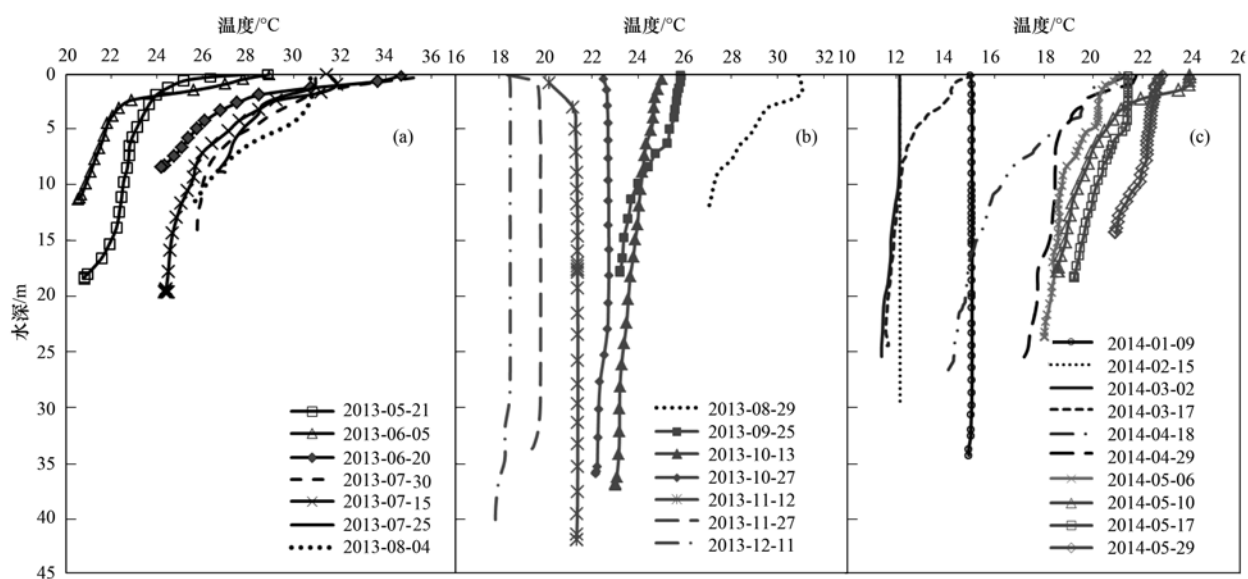


图2 高阳平湖水深及温度梯度垂直剖面变化

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

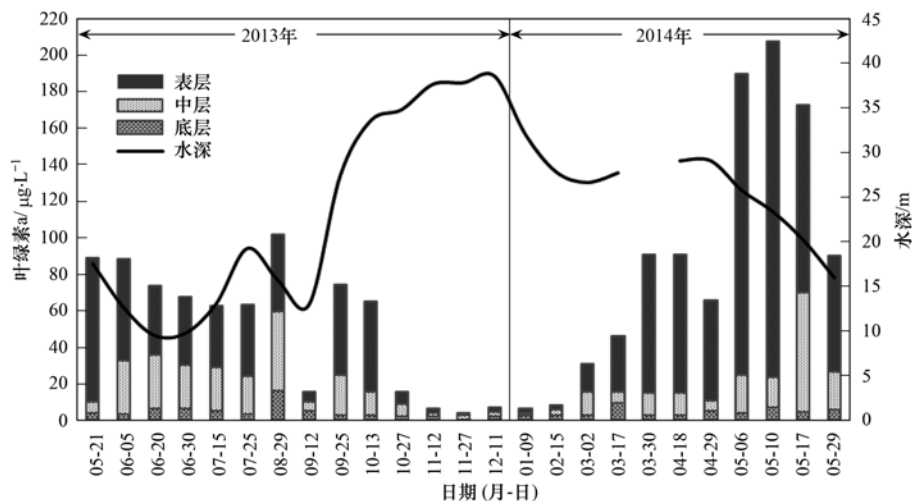
### 2.2 叶绿素变化特征

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<sup>[17]</sup> 在香溪河的研究也得到了类似的结果. 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,

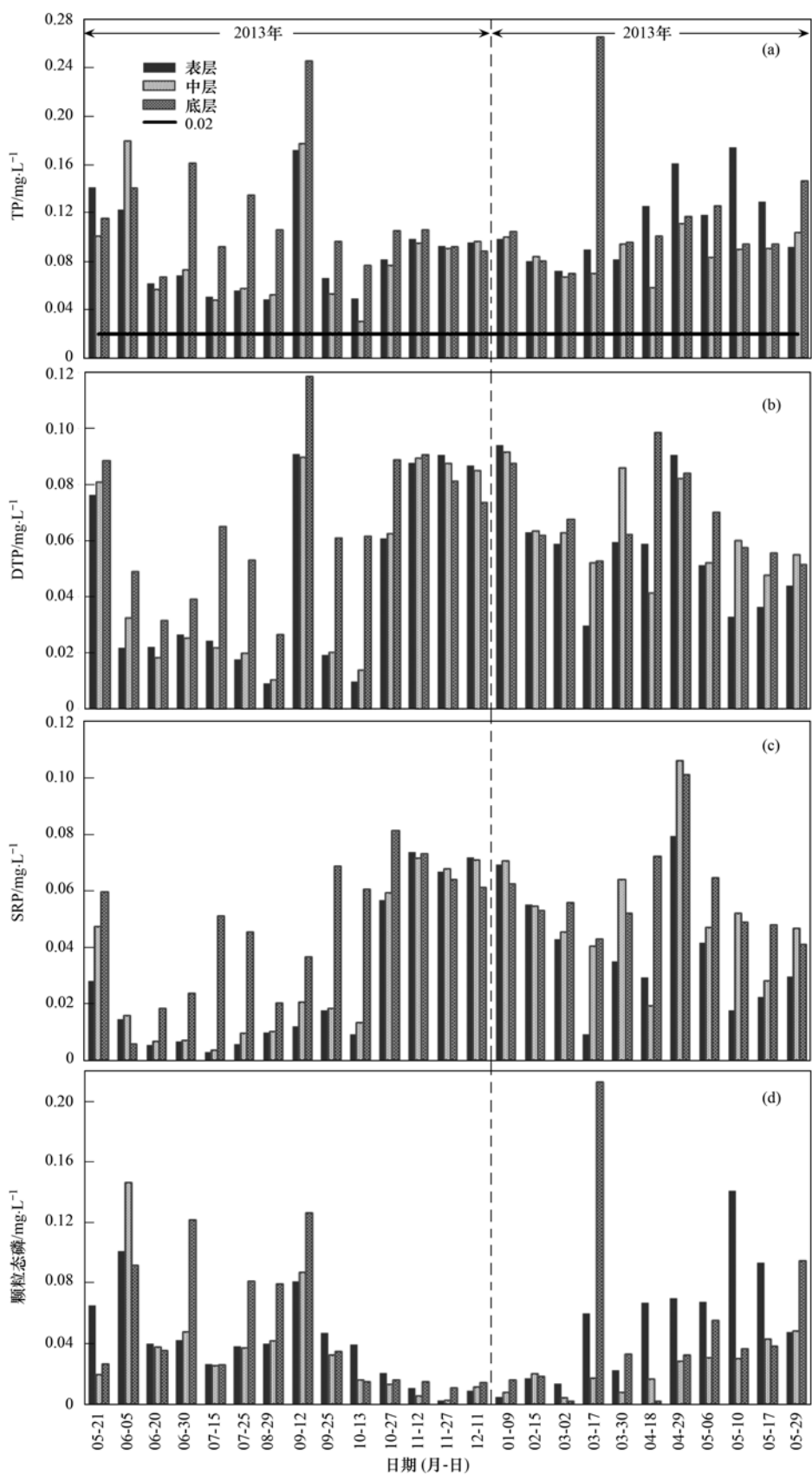
表层和中层 TN 浓度没有明显差异, 至春末夏初(4 月和 5 月)水华高发期时, 表层 TN 明显高于中层和底层, 与 TP 垂向分布特征相似[图 4(a)]. 与总磷趋势不同的是, 除水华高发期, 全年其它时期各水层总氮差别不大. 水华高发期水体各层 TN 的总量也高于其它时期的.

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

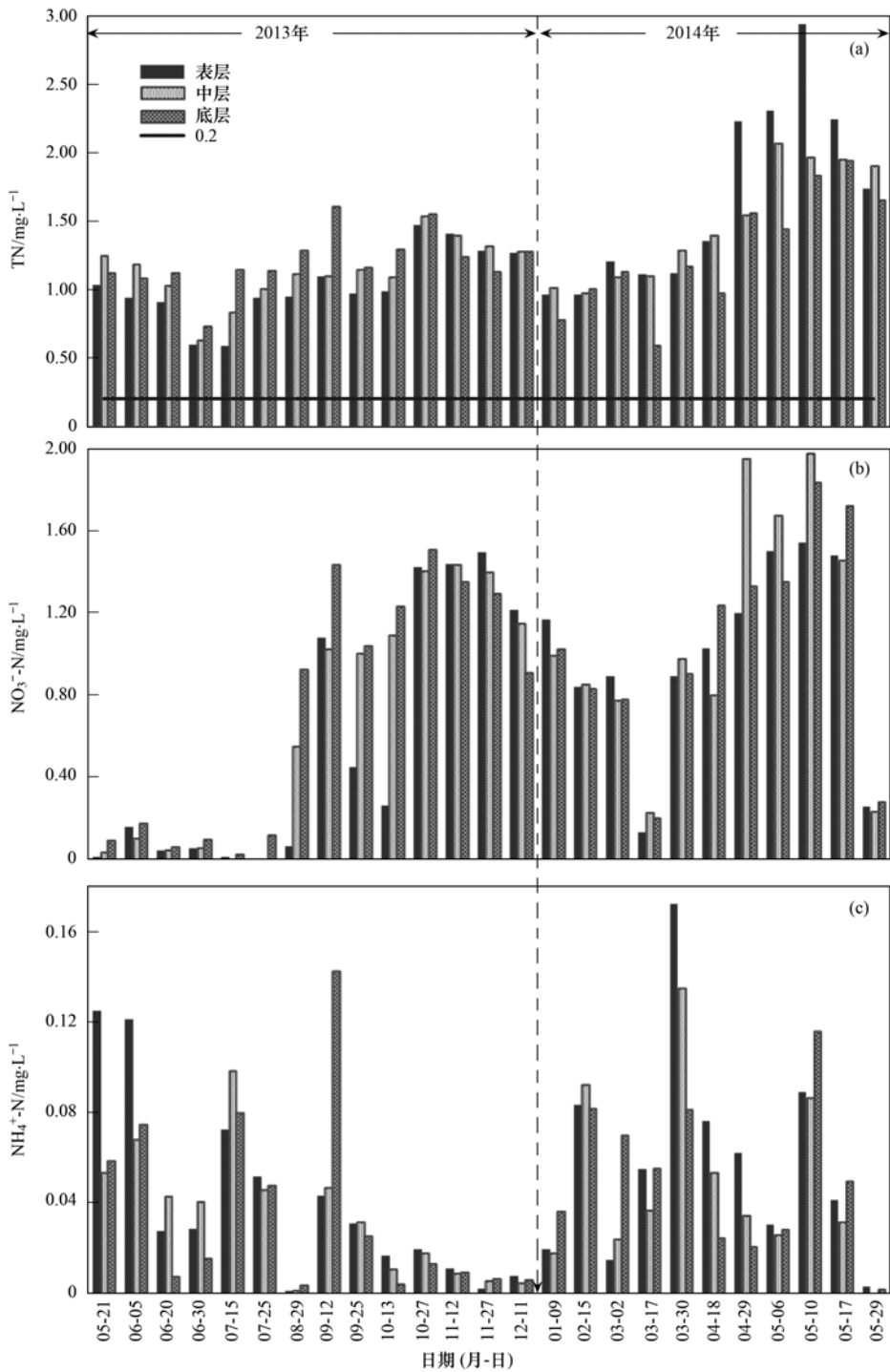
叶绿素 a 和营养盐浓度的垂向分布均受水温分层和水位变化影响. 将表、中层叶绿素 a 与同层营养盐进行相关分析, 结果见表 1. 在整个监测过程中, 底层由于得不到光照, 叶绿素 a 一直保持在  $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  以下, 且没有明显的变化, 因此未纳入相关分析. 分析结果(表 1)显示, 表、中层叶绿素 a 与其相应水层的营养盐关系不同. 表层叶绿素 a 与表层



(a) 中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



(a)中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 ± 0.04) mg·L<sup>-1</sup>。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>[15]</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 μg·L<sup>-1</sup>,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>[27]</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>[28]</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>[29]</sup>。龙天渝等<sup>[30]</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>[31]</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] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                    |                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring .....                                                                                             | XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)            |
| Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing .....                                                  | YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)                  |
| Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...                            | ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)              |
| Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution .....                              | LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)            |
| Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China .....                                            | MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)                 |
| Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China .....                                                                                        | ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)                          |
| Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China .....                                                                                  | XUE Yi-feng, YAN Jing, TAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)          |
| Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing .....                                                                                     | HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)          |
| Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant .....                                                                                                 | OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)         |
| Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve .....                                                                                                        | TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)  |
| Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation .....                                                                                                                        | LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)                          |
| Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke .....                                                                                                          | HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)              |
| Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing .....                                                                                   | WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)          |
| Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst .....                                                                          | FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)               |
| Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary .....                                                                     | LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)                       |
| Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen .....                                                                                    | LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)         |
| Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China .....                                                              | LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)        |
| Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River .....                                                         | HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)          |
| Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir .....                                                         | WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)                   |
| Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir .....                                 | ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)               |
| Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis .....                                                                     | BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)   |
| <i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu .....                                                                                     | LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)              |
| Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province .....                                                              | XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)  |
| Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle .....                                                                    | LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)      |
| Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace .....                                                                   | ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)   |
| Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments .....                                                                                 | HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)                       |
| Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction .....                                                                      | DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)   |
| Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like $\alpha$ -FeOOH Synergized with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Under Visible Light Irradiation ..... | XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)        |
| Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Process: Kinetics and Factors .....                                          | FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)      |
| Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO <sub>2</sub> Photocatalyst .....                                                                                    | LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)           |
| Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp .....                                                                                                 | WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)               |
| Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /CeO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Heterogeneous Fenton-Like Systems .....             | SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)           |
| Preparation of Coated CMC-Fe <sup>0</sup> Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water .....                                                | FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)         |
| Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode .....                                                                                | QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)               |
| Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite .....                                                                                              | XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)         |
| Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon .....                         | ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)   |
| Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB) .....                                                                                                               | ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)    |
| Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant .....                               | YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)          |
| Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water .....                                        | SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)                      |
| Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor .....                                                                     | ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)      |
| Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -OH Process .....                                                        | JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)                      |
| Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment .....                                                                             | YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)                               |
| Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics .....                               | WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)          |
| Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains .....                                             | WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)      |
| Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 .....                                                                   | SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)                               |
| Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice .....                                                                                                                     | MA Wei, BAO Yan-yu (2259)                                          |
| Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field .....                                                                                 | LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)                                  |
| Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City .....                                                          | LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)                                 |
| Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China .....                                                           | LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)              |
| Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model .....                       | ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292) |
| Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon .....                                                                                                     | CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)                             |
| Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi .....                                                                          | ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)          |
| Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils .....                                                                   | ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)                  |
| Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake .....                                                                                   | YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)          |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

( HUANJING KEXUE )

(月刊 1976年8月创刊)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

|       |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管   | 中国科学院                                                                                                                                                               | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                             |
| 主 办   | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                       | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                             |
| 协 办   | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编   | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑   | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版   | 科学出版社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                                 | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印刷装订  | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行   | 科学出版社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                    | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                               |
| 订 购 处 | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                            | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行