

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

**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

|                                                                         |                                              |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 .....                                              | 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)                        |
| 2013年1月北京市PM <sub>2.5</sub> 区域来源解析 .....                                | 李璇,聂滕,齐珩,周震,孙雪松(1148)                        |
| 2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 .....                                             | 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)                 |
| 上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 .....                                               | 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)                           |
| 厦门春季PM <sub>10</sub> 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 .....                       | 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)                       |
| 硫氧同位素示踪南京北郊大气PM <sub>2.5</sub> 中硫酸盐来源 .....                             | 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)                |
| 结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 .....                                       | 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)                       |
| 春季华东高山背景区域PM <sub>2.5</sub> 和PM <sub>2.5-10</sub> 中水溶性无机离子特征 .....      | 苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)             |
| 落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 .....                                             | 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)                       |
| 四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 .....                                           | 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)                       |
| 深圳市船舶排放清单与时空特征研究 .....                                                  | 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)                 |
| 超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 .....                                                   | 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)                      |
| 空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 .....                                                | 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)                     |
| 基于氢氧稳定同位素的黄土高原下二次蒸发效应 .....                                             | 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)             |
| 黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 .....                                              | 张永领,王明仕,董玉龙(1249)                            |
| 调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 .....                               | 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)                     |
| 春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 .....                                            | 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)              |
| 降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 .....                                          | 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)              |
| 北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 .....                                              | 钟惠舟,韦朝海(1277)                                |
| 丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 .....                                              | 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)                |
| 三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 .....                                    | 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)                  |
| 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 .....                                          | 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)                     |
| 一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 .....                                           | 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)                      |
| 昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 .....                                           | 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)         |
| 河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 .....                                               | 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)                       |
| γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究 .....                                                  | 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)                |
| 电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收 .....                                             | 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)                |
| Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 .....                                              | 孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)         |
| 生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 .....                                                | 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)                      |
| 308 nm光作用下α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 表面HNO <sub>3</sub> 的光解 ..... | 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)                  |
| L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 .....                                     | 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)                          |
| 酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 .....                               | 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)              |
| 枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 .....                                        | 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)                    |
| 嗜酸降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 .....                                                | 李静,李文英(1385)                                 |
| Fe <sup>3+</sup> 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N <sub>2</sub> O释放的影响 .....          | 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)                   |
| 内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 .....                                           | 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)       |
| 利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 .....                                        | 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)                      |
| 进水渗滤液总氮和BOD <sub>5</sub> /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 .....               | 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)                          |
| 重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 .....                                        | 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)                      |
| 湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 .....                                     | 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)                         |
| 沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 .....                                              | 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)                    |
| 施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 .....                                               | 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)                         |
| 不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 .....                                           | 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)              |
| 陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 .....                                     | 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)                     |
| 有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 .....                                          | 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)                          |
| 玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 .....                                               | 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)              |
| 硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响 .....                                               | 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474) |
| 丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 .....                                          | 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)              |
| 滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 .....                                            | 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)                         |
| 不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 .....                                     | 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)                          |
| 工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 .....                                            | 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)                      |
| 《环境科学》征订启事(1216)                                                        |                                              |
| 《环境科学》征稿简则(1248)                                                        |                                              |
| 信息(1163,1194,1248,1424)                                                 |                                              |

# 三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换： 以梅溪河为例

操满<sup>1</sup>, 傅家楠<sup>1</sup>, 周子然<sup>2</sup>, 邓兵<sup>2</sup>, 王雨春<sup>3</sup>, 汪福顺<sup>1\*</sup>

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200633; 3. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

**摘要:** 三峡水库建成以后, 梅溪河库湾多次发生水华现象, 为研究干流水体倒灌对库湾营养盐的影响, 于 2012 年 8 月至 2013 年 7 月对受干流回水影响的梅溪河进行了详细的现场监测. 结果表明, 三峡水库在不同的水位调度时期, 梅溪河库湾水体均表现为分层异向流动; 受长江干流倒灌影响, 梅溪河库湾营养盐分布季节变化显著, DIN 的年倒灌净通量约为 5 478.02 t, DIP 的年倒灌净通量约为 234.04 t, DSi 的年倒灌净通量约为 5 935.22 t, 长江干流每年对梅溪河 DIN、DIP、DSi 的补给量分别约为源头输入量的 2.37 倍、4.32 倍和 1.33 倍; 干流倒灌对库湾营养盐分布的影响不仅局限在河口区域, 对梅溪河中上游的营养盐分布也将造成影响, 干流倒灌对库湾 P 的补给将对库湾 P 限制起到缓解作用, 为藻类的暴发提供必要条件.

**关键词:** 三峡水库; 干流倒灌; 梅溪河; 营养盐交换; 通量

中图分类号: X143; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1293-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.04.021

## Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary

CAO Man<sup>1</sup>, FU Jia-nan<sup>1</sup>, ZHOU Zi-ran<sup>2</sup>, DENG Bing<sup>2</sup>, WANG Yu-chun<sup>3</sup>, WANG Fu-shun<sup>1\*</sup>

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200633, China; 3. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Frequent algal blooms have been observed in the Meixi bay of the Three Gorges Reservoirs (TGR) since its initial filling. In order to understand the effects of intrusions from Changjiang mainstream on the nutrient supply of the Meixi Bay, a detailed field monitoring was conducted from August 2012 to July 2013. The results showed that there were significant intrusions from the mainstream to the Meixi Bay during the different water level scheduling periods of the TGR. As a result, the invading flow from the mainstream of the Changjiang caused a significant effect on the nutrient distribution in the Meixi River. Annually, the mainstream transported net fluxes of 5 478.02 t DIN, 234.04 t DIP and 5 935.22 t DSi to the Meixi Bay, which were 2.37 times, 4.32 times and 1.33 times of the corresponding fluxes from the upstream, respectively. The influence on the nutrient distributions was not only limited in the estuary area but also in the upper reaches, the supply of DIP changed the nutrient structure and relieved the P restrictions on phytoplankton growth.

**Key words:** Three Gorges Reservoirs (TGR); backward flow from mainstream; Meixi River; nutrient exchange; flux

三峡水库自 2003 年 6 月蓄水之后, 受水库干流顶托作用的影响, 一些回水淹没区支流流速显著减缓、水体浊度明显下降、支流库湾中营养盐滞留时间增长. 整体水体环境向有利于浮游植物生长方向发展. 调查显示, 在整个三峡库区, 回水区水体处于富营养状态的断面比例为 5.0% ~ 52.5%, 非回水区为 10.8% ~ 24.3%, 回水区富营养化程度高于非回水区<sup>[1]</sup>. 近年来, 部分成库前水环境质量较好的次级河流发生了严重的富营养化现象<sup>[2]</sup>. 人们对于三峡库区水环境问题的关注范围开始由原先的库区干流扩展到了支流库湾.

营养盐是浮游植物生命活动的物质基础, 浮游植物按一定比例 (Redfield 比值) 摄取营养物质维持

自身的物质和能量代谢<sup>[3]</sup>, 在充足营养盐、适宜水温 and 光照条件下浮游植物可以大量增殖. 早期人们对三峡库湾藻华发生机制的研究, 更多地关注了来自支流输入的营养盐<sup>[4]</sup>. 相比较而言, 有关干流水体相互作用过程中, 干流对支流营养盐的逆向输入研究相对较少<sup>[5]</sup>, 然而库区干流与支流库湾存在着重要的水体交换<sup>[6~10]</sup>, 同时长江干流营养盐含量相对较高, 使得干流水体将对支流营养盐产生重要

收稿日期: 2014-09-25; 修订日期: 2014-12-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07104-001); 国家自然科学基金项目 (42173128)

作者简介: 操满 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境水化学, E-mail: huoxingman@shu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: fswang@shu.edu.cn

影响<sup>[11]</sup>. 此外,在现有干支流相互作用的研究中,大部分都忽略了不同水位调度时期,这种相互作用的差异<sup>[12,13]</sup>. 因此,分时期定量估算干支流之间营养盐的交换通量,弄清干支流之间营养盐的相对贡献,对解决库区支流日益严重的水华问题具有重要的理论和实际意义.

本研究于 2012~2013 年按月对三峡库区干流及支流梅溪河进行了详细的野外观测,结合干、支流交汇区域的水流特点和三峡水库水位调度实际,估算了干、支流营养盐的交换通量,以期为进一步揭示库区支流富营养化问题提供理论依据.

## 1 材料与方法

梅溪河位于长江北岸三峡库区中部,重庆奉节县境内,发源于巫溪县,在奉节老城区东注入长江,是长江的一级库区支流. 三峡水库蓄水 175 m 后,在距河口 12 km 的范围内形成回水区.

### 1.1 样点设置

本次研究在梅溪河共设置 4 个断面(河口、中部、上游、源头),采样编号依次为 MX01、MX02、MX03、MX04,另外,在长江干流梅溪河河口上下游各设置一采样点,记为 CJ01、CJ02. 具体样点分布见图 1.

### 1.2 样品采集与分析

于 2012 年 8 月至 2013 年 7 月期间对梅溪河及干流各断面逐月进行现场调查,在各断面处,采用 ADCP(美国 Teledyne RDI 公司)进行走航式测流,测得数据包括断面流量、流速、流向、水深、断面面积以及断面宽等;剖面上的水质基本参数利用

美国维赛公司生产的 YSI 进行测定,测量的内容包括水深、温度、pH、DO、叶绿素 a、浊度等.

在梅溪河各断面处,利用 5 L Niskin 采水器按照 0 m、5 m、10 m、20 m、40 m、底层分层采集水样. 考虑到长江干流目前仍为一维流态、水柱剖面上水质均一<sup>[14]</sup>,对长江干流只采集表层水. 将采集的原水经 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤后,加高汞保护,用于溶解态营养盐的测定.

营养盐的测定运用荷兰 SKALAR 分析仪器公司生产的连续流动分析仪进行. 通过要求标准曲线的相关系数  $\geq 0.999$  和利用标准溶液进行中间校准来控制数据质量.

### 1.3 计算方法

估算河流营养盐输送的通量,通常用河流流量与营养盐的平均浓度相乘得到<sup>[15,16]</sup>,因此,计算梅溪河河口处的营养盐通量可以按照以下公式计算:

$$f = 10^{-3} M \times q \times \bar{c} \quad (1)$$

式中, $f$  表示营养盐的输送通量( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $q$  表示流入或流出水团的流量( $\text{m}^3$ ), $\bar{c}$  表示各种营养盐的平均浓度( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), $M$  表示各营养盐的摩尔质量( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ). 流出库湾的营养盐平均浓度是根据流出水团在不同深度处浓度求平均值得到,由于长江干流营养盐分布比较均一,因此倒灌进入库湾的营养盐平均浓度运用干流上两个断面表层水浓度的平均值代替.

在计算的过程中,为了尽可能减少水柱剖面上不同深度处营养盐浓度差异对计算结果的影响,将河口断面按 5 m 划分一个网格,将河口剖面划分为  $n$  个微断面,在每一个微断面上运用公式 (1) 进行计算.

首先按照流速的方向,将微断面区分为流入库湾和流出库湾的区域,然后根据各个网格内水流的流速,按公式 (2) 计算出各个网格内水体的体积:

$$q_i = v_i \times s_i \quad (2)$$

式中, $q_i$  代表各网格内相应的流量( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), $v_i$  代表相应的流速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $s_i$  代表网格的面积( $\text{m}^2$ ). 然后按照公式 (3)、(4) 分别计算出流入库湾和流出库湾的水团的流量及各营养盐通量:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (3)$$

$$F = \sum_{i=1}^n f_i \quad (4)$$

计算出了各营养盐的瞬时通量  $F$ , 只需按照公式  $F_t = \int_{t_1}^{t_2} F dt$ , 就可以算出某个时间段内的通量.

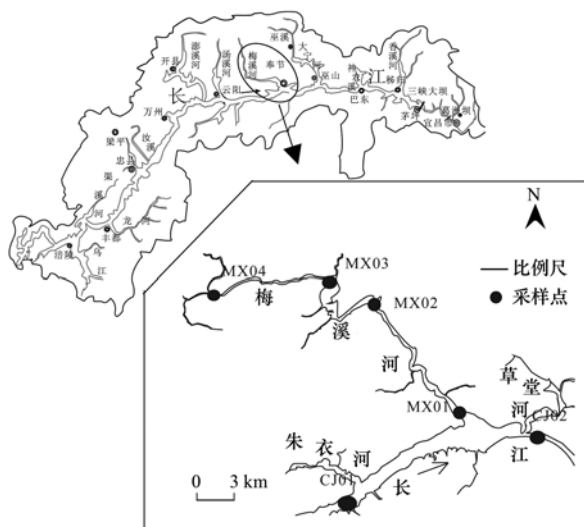


图 1 梅溪河采样站示意图

Fig. 1 Map of sampling sites in Meixi River

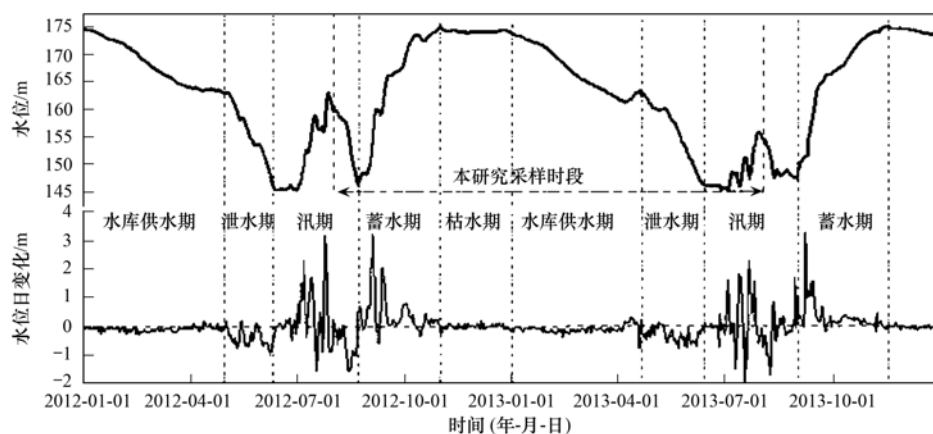
## 2 结果与分析

### 2.1 三峡水库水位变化特征

如图 2 所示, 2012 年 8 月至 2013 年 7 月, 三峡水库调度大致经过了 4 个时期, 分别是枯水期、汛前消落期(可分为水库供水期和泄水期)、汛期和蓄水期<sup>[17]</sup>. 在经历了汛期低水位运行后, 三峡水库于 2012 年 8 月下旬正式开始蓄水, 水位从 146 m 开始快速上升, 日均上升 0.4 m, 至 10 月底成功实现 175 m 实验性蓄水; 11 月开始进入枯水期, 水库保持 174 ~ 175 m 高水位运行,

水位日变幅很小; 2013 年 1 月至 5 月为汛前消落期, 水位从年初的 175 m 逐步减小, 至 3 月减小至 165 m 左右, 为水库供水期, 泄水期从 4 月初开始到 5 月下旬, 水位从 165 m 降至 145 m; 6 月至 8 月为水库汛期, 水位受降雨量影响, 波动较大.

本文在计算通量时选取 2012 年 9 月(蓄水期)、2012 年 12 月(枯水期)、2013 年 3 月(水库供水期)、2013 年 5 月(泄水期)和 2013 年 6 月(汛期)代表一个完整的水位调度过程进行对比研究, 本研究的监测结果具有很强的代表性.



数据引自中国长江三峡集团公司水情信息

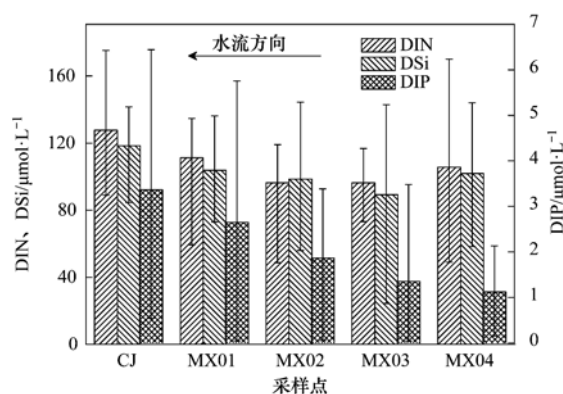
图 2 2012 至 2013 三峡水库坝前水位变化

Fig. 2 Variation in water level of the TGR in 2012-2013

### 2.2 干流水体中营养盐分布特征

在 2012 年 8 月至 2013 年 7 月观测区间内, 长江干流水体中 DIN、DSi、DIP 浓度的年平均值分别为 127.67、111.96 和 2.09  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均明显高于梅溪河库湾. 在梅溪河库湾地区, DIN 和 DSi 的变化趋势一致, 从河口到上游逐渐降低, 在源头处又有所升高, DIP 浓度从河口一直到源头均呈递减趋势(图 3). 图 4 所示为长江干流和梅溪河库湾表层水体各断面处营养盐的逐月变化. 总体看来, 库湾各断面水体和长江干流水体营养盐浓度有着相似的变化趋势. 特别是在梅溪河河口断面处, 各营养盐浓度的变化趋势与干流更加趋于一致. 长江干流表层水体中 DIN 浓度最小值出现在 2012 年 9 月, 为 88.94  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最大值出现在 2013 年的 6 月, 为 175.26  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 梅溪河口断面也分别在这两个月达到最小值 59.38  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 116.20  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的较高浓度; 对于 DIP 的浓度, 干流水体中的最小值出现在 2012 年 8 月, 为 0.54  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最大值出现在 2013 年 2 月, 为 6.44  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 梅溪河河口断面 DIP 的

最小值也出现在 2012 年 8 月, 为 0.51  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 在 2013 年 3 月达到最大值 5.76  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 对于 DSi 的浓度, 梅溪河库湾也与长江干流变化趋势基本一致.



柱状图的高度代表各采样点表层水体营养盐浓度的年度平均值, 上、下误差线分别代表年度最大值与最小值

图 3 长江干流和梅溪河库湾营养盐的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of nutrients in the Yangtze River and the Meixi Bay

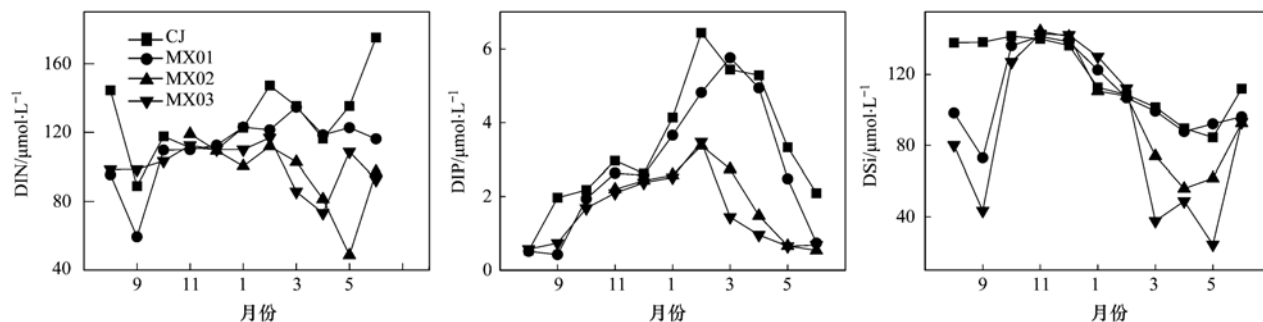


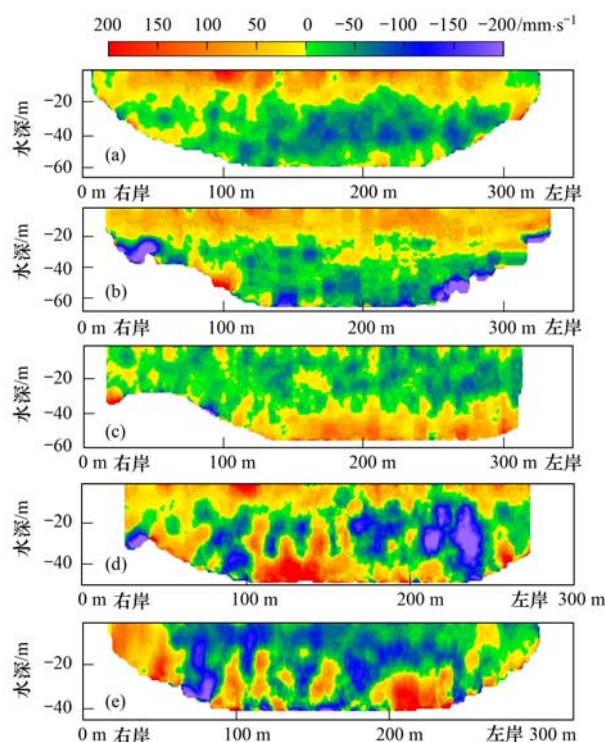
图4 干流和梅溪河库湾表层水体营养盐逐月变化

Fig. 4 Monthly variations of nutrient concentration in surface water of the Yangtze River and the Meixi Bay

### 2.3 梅溪河库湾水动力特征

最初的研究认为,长江干流水体向库湾内部扩散是造成营养盐空间分布格局的主要原因,但扩散作用影响范围有限,不致在整个库湾形成如此明显的空间差异<sup>[18]</sup>. 经过广泛深入的研究,发现倒灌异重流现象广泛地存在于三峡干、支流的交汇地带,在监测中,也同样发现在梅溪河河口区域,常年存在倒灌异重流的现象.

图5为三峡水库各调度时期梅溪河河口断面水流的分布. 总体来看,梅溪河河口全年的流速都比较小,均小于  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 且在不同蓄水时期,断面上水流均出现相向的分层运动,不同水体间的密度和温度差异是异重流形成的主因<sup>[19]</sup>. 在水库蓄水期[图5(a)],由于长江干流水体浊度较高,因此从水面下20 m至底层范围内倒灌进入梅溪河库湾,倒灌水团流速平均为  $-0.066 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,流出水团从表层流入长江,平均流速为  $0.068 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 在枯水期[图5(b)],梅溪河水深达到最大,约65 m左右,干流水体温度略低于梅溪河库湾,类似于9月从底部潜入梅溪河库湾,平均倒灌速度约为  $-0.074 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,流出水团的厚度约为30 m,平均流出速度为  $0.071 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 在水库供水期[图5(c)],水体温度开始上升,梅溪河底层水体温度较表层上升缓慢,而干流相对较强的掺匀过程使得干流水体的温度介于梅溪河表、底层之间,因此干流水体基本从40 m以上范围倒灌进入库湾,进出断面的流速都很小,倒灌水团平均流速约为  $-0.065 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,流出流速约为  $0.062 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 在水库泄水期[图5(d)],同样是温度的差异导致干流水体从断面的中部流入库湾,流速较大,其中,流入速度约为  $-0.111 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,流出速度约为  $0.106 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 6~7月为三峡水库的汛期[图5(e)],受水位调度和雨量的影响,水位波动较大,梅溪河河口断面水深维持在40 m左右,流出和



流速为正代表流向长江,流速为负代表流向支流库湾;

(a)2012年9月蓄水期;(b)2012年12月枯水期;

(c)2013年3月供水期;(d)2013年5月泄水期;

(e)2013年6月汛期

图5 梅溪河河口断面(MX01)水流分布

Fig. 5 The distribution of flow regime at the river mouth of Meixi River(MX01)

流入水团的速度都较大,流入水团平均流速为  $-0.112 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,流出水团平均流速为  $0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 2.4 梅溪河库湾营养盐分布

三峡水库频繁的水位调度不仅造成了支流库湾水动力形态的差异,也使得库湾物理、化学特性和干支流的营养盐交换水平不断改变. 干流水体流量大、流速快,具有显著的一维流动特征. 相比较而言,梅溪河由于受干流的顶托作用,流速较小,特别

是上游地区,流速几乎为零.在泄水期和汛期所在的春夏季节,水温适宜,光照充足,营养盐丰富,为浮游植物的生长繁殖提供了有利条件,是水华暴发的敏感时期.梅溪河库湾于 2013 年 4 月至 6 月暴发了不同程度的水华,在水华最为严重的 6 月,梅溪河表层水体中叶绿素 a 的含量甚至达到了枯水期( $0.91\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )时的 30~40 倍,达到了  $34.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

图 6 为梅溪河库湾营养盐 (DIN、DIP、DSi) 及水质参数(浊度、叶绿素 a)在不同水位调度时期的等值线分布.总体上,干流水体中 N、P、Si 的浓度相对较高,库湾上游浓度低,沿河口逆向库湾上游,形成一个较为明显的浓度梯度.在干支流交汇区域,高浓度水团出现的位置与相应蓄水时期干流倒灌的位置一致,蓄水期(9 月)和枯水期(12 月),河口中部水团中 N、P、Si 浓度较高;在水库供水期(3 月),高浓度水团出现在 40 m 以上范围内;在泄水期(5 月),河口中部水团 N、P、Si 浓度较大;汛期(6 月)由于水体混合程度较高,各营养盐分布较为均匀.就时间尺度上来看,在不同蓄水时期,干支流各营养盐的变化趋势基本一致: DIN 基本呈现夏季较高,冬季偏低的现象.可能是由于夏季雨量丰富,大量氮肥随地表径流进入水体.冬季农业活动减少,河流的 N 浓度明显降低. DSi 有着与 DIN 相反的规

律: 冬季浓度偏高,夏季浓度降低.此外,不同调水时期,梅溪河 DSi 均呈现了明显的表底浓度分层现象,这是由于夏季水华的优势种主要为硅藻门的小环藻<sup>[1]</sup>,硅藻类浮游植物的大量生长和繁殖,消耗了表层水体中大量的硅酸盐,这些藻类死去后,其残体沉积到底层,沉积物中微生物的分解作用又可以将硅酸盐释放出来.梅溪河中 DIP 的浓度较小,在春夏之际,随着大量磷肥的输入及干流倒灌得到补给,这也为藻类的暴发提供了必要的条件,暴发水华之后,在水华暴发的集中区域,表层水体中的 P 也几乎消耗殆尽.

2.5 干支流营养盐的交换通量

由于干支流存在频繁的水体交换,并且干流水体中 DIN、DIP、DSi 的浓度相对较高,这势必会引起干支流营养盐的相互交换.表 1、表 2 分别为梅溪河河口断面 3 种营养盐(DIN、DIP、DSi)的通量估算.总体上,在三峡水库不同水位调度时期,不论是水体的交换量还是营养盐的交换水平都各有差异.除了三峡水库的枯水期(11~12 月)之外,3 种营养盐的倒灌通量均大于库湾输出通量,估算表明,梅溪河与长江干流之间 DIN 的年倒灌净通量(倒灌通量与流出通量的差值)为 5 478.02 t, DIP 的年倒灌净通量为 234.04 t, DSi 的年倒灌净通量为 5 935.22 t.

表 1 河口断面流出通量估算<sup>1)</sup>  
Table 1 Estimation of the out-flux

| 时间<br>(年·月)                           | 流出流量 <sup>2)</sup><br>/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ | DIN                                                     |                                      | DIP                                       |                                      | DSi                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                       |                                                        | 浓度 <sup>3)</sup><br>/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ | 通量<br>/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ | 浓度<br>/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ | 通量<br>/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ | 浓度<br>/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ | 通量<br>/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| 2012-09                               | 281.25                                                 | 97.89                                                   | 385.43                               | 1.53                                      | 13.33                                | 137.95                                    | 1 086.38                             |
| 2012-12                               | 369.38                                                 | 112.49                                                  | 581.72                               | 2.67                                      | 30.61                                | 140.27                                    | 1 450.75                             |
| 2013-03                               | 251.25                                                 | 133.52                                                  | 469.66                               | 5.68                                      | 44.27                                | 102.08                                    | 718.14                               |
| 2013-05                               | 248.75                                                 | 165.80                                                  | 577.41                               | 1.52                                      | 11.70                                | 108.91                                    | 758.54                               |
| 2013-06                               | 335                                                    | 129.87                                                  | 609.10                               | 3.23                                      | 33.51                                | 92.69                                     | 869.43                               |
| 年流出通量估算/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ |                                                        | 16 313.29                                               |                                      | 836.68                                    |                                      | 29 142.24                                 |                                      |

1) 正值代表流出库湾,负值代表倒灌流入库湾; 2) 流出、倒灌流量根据 ADCP 河口剖面数据划分网格计算得到; 3) 流出水体营养盐浓度根据剖面上每间隔 5m 处的浓度求平均值得到

表 2 河口断面倒灌通量估算<sup>1)</sup>  
Table 2 Estimation of the in-flux

| 时间<br>(年·月)                           | 倒灌流量<br>/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ | DIN                                                     |                                      | DIP                                       |                                      | DSi                                       |                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                       |                                          | 浓度 <sup>1)</sup><br>/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ | 通量<br>/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ | 浓度<br>/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ | 通量<br>/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ | 浓度<br>/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ | 通量<br>/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| 2012-09                               | -282.5                                   | 108.41                                                  | -428.74                              | 1.97                                      | -17.22                               | 140.39                                    | -1 110.51                            |
| 2012-12                               | -322.7                                   | 109.02                                                  | -492.53                              | 2.55                                      | -25.51                               | 135.04                                    | -1 220.13                            |
| 2013-03                               | -325                                     | 137.66                                                  | -626.37                              | 5.57                                      | -56.09                               | 101.49                                    | -923.58                              |
| 2013-05                               | -440                                     | 176.74                                                  | -1 088.71                            | 1.85                                      | -25.29                               | 115.44                                    | -1 422.22                            |
| 2013-06                               | -358.13                                  | 141.55                                                  | -709.68                              | 3.76                                      | -41.75                               | 91.46                                     | -917.15                              |
| 年倒灌通量估算/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ |                                          | -21 791.31                                              |                                      | -1 070.72                                 |                                      | -35 077.46                                |                                      |

1) 倒灌水体营养盐浓度取长江干流表层水体的浓度值

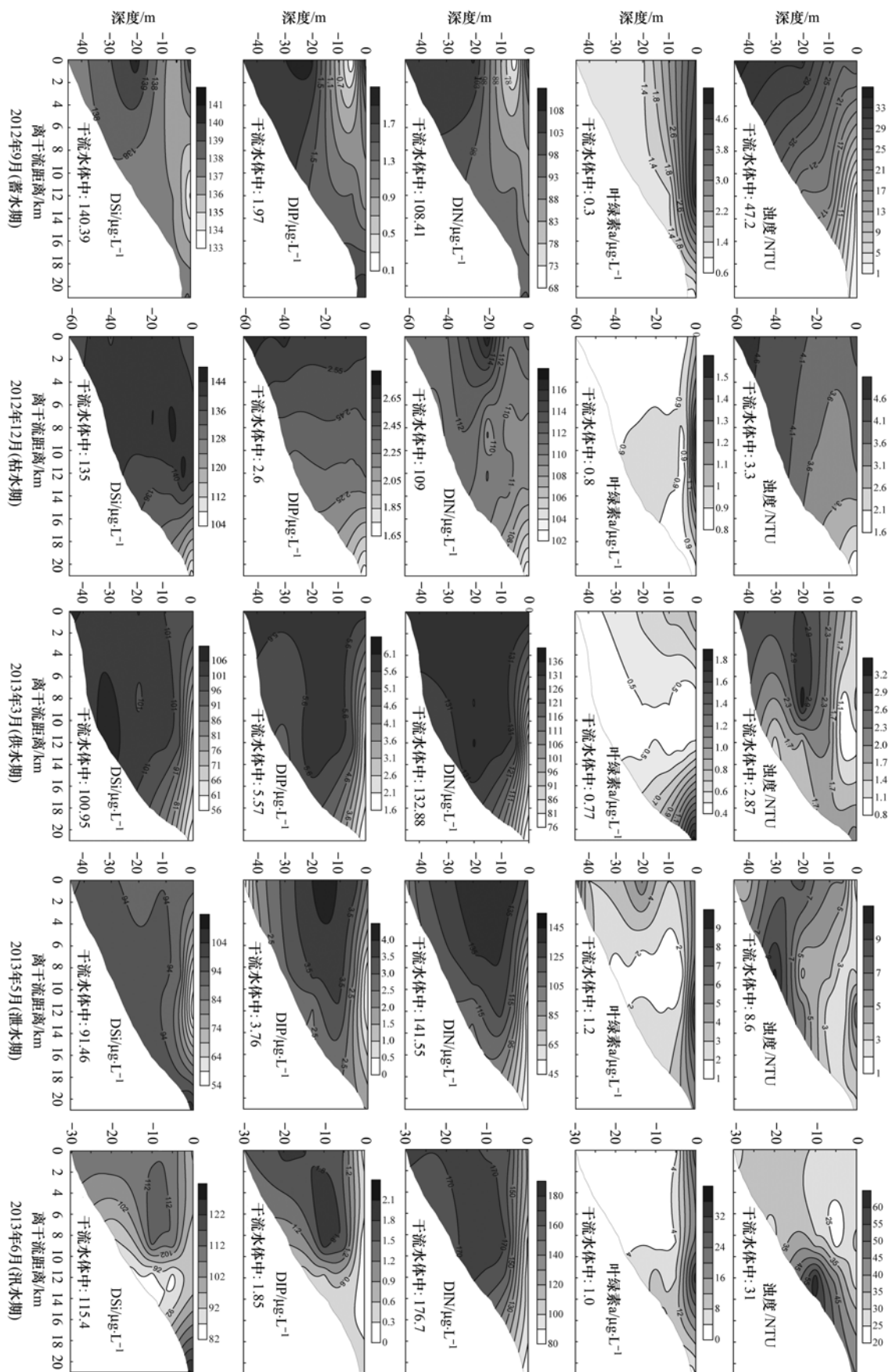


图6 梅溪河库湾营养盐(DIN、DIP、DSi)和水质参数(浊度、叶绿素a)在不同水位调度时期的等值线分布

Fig. 6 Contours of DIN, DIP, DSI, turbidity and Chl-a in the Meixi River in different scheduling periods of the TGR

### 3 讨论

#### 3.1 干流倒灌对支流库湾营养盐的补给作用及其潜在影响分析

梅溪河多年平均流量  $49.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 年径流量  $14.477 \text{ 亿 m}^3$ . 由此可见, 梅溪河库湾干支流的水量交换水平相对于径流量不容忽视, 据观测, 梅溪河源头水体中 DIN 的年度平均值为  $105.63 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , DIP 为  $1.12 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , DSi 为  $101.91 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 照此计算, 每年从梅溪河源头输入到库湾的 DIN 的量约为  $2308.49 \text{ t}$ , DIP 约为  $54.20 \text{ t}$ , DSi 约为  $4454.37 \text{ t}$ . 长江干流每年对梅溪河 N、P、Si 的补给量分别约为源头输入量的 2.37 倍、4.32 倍和 1.33 倍. 因此, 长江干流倒灌对梅溪河营养盐的补给作用也不容小觑, 特别是对 DIP 的补给作用. 但这种补给作用的影响范围以及库湾中游和上游频频发生的水华现象是否与此有关还有待进一步研究. 氮、磷、硅的空间和时间分布特征是反映支流回水段受干流逆向影响的重要依据<sup>[20]</sup>, 梅溪河沿岸大部分是陡峭的高山, 山上森林密布, 除了上游有几个规模不大的煤场外, 沿途几乎没有其他点源污染, 由长江干流到梅溪河上游营养盐的空间(图 3)和时间(图 4)分布来看, 长江干流对梅溪河库湾营养盐有明显的补给作用. 根据罗光富<sup>[21]</sup>对长江干流、梅溪河库湾以及梅溪河源头输入水体中营养盐组成的分析, 梅溪河库湾水体中 DIN/DSi、DIN/DIP、DSi/DIP 均与长江干流水体中的比值相近, 与梅溪河源头(MX04)的组成相差较远, 可以推测长江干流向梅溪河补给的营养盐可达梅溪河的上游(MX03). 胡念三等<sup>[8]</sup>运用多普勒三维点式流速仪对三峡库区其他 4 条支流库湾水动力的观测研究则更直观地证实了干流倒灌水体能到达库湾中上游, 在观测期当天, 长江水体向香溪河库湾倒灌范围达到距离河口约  $20 \text{ km}$ , 向大宁河库湾倒灌范围达到距河口  $32 \text{ km}$  处, 向磨刀溪和小江倒灌范围分别至距河口  $30 \text{ km}$  和  $50 \text{ km}$  处. 杨正健<sup>[22]</sup>利用常量离子示踪、同位素示踪等多元示踪技术, 分析了三峡水库典型支流库湾营养盐的主要来源及补给模式, 发现除每年 3 月香溪河库湾真光层内营养盐多受上游来流影响外, 其他时期均由长江倒灌异重流进行补给. 陈媛媛等<sup>[13]</sup>借用常量离子  $\text{Cl}^-$  估算了支流库湾不同河段倒灌水量, 计算了香溪河上游径流和干流倒灌对回水区氮、磷、硅负荷的贡献, 结果表明, 沿河口逆向上游, 干流倒灌对香溪河库湾营养盐的补给作用逐渐减小, TN、

TP、DSi 的贡献率分别由河口区域的 94.83%、86.13%、95.68% 减小至上游区域的 34.07%、12.89%、36.81%. 由此可见, 在三峡水库频繁的水位调度模式下, 干流水体交换剧烈, 干流对支流库湾营养盐的影响不仅仅局限在河口地区, 也必将对库湾中游乃至上游的营养盐分布造成影响.

#### 3.2 库湾水华诱发因素

近年来, 梅溪河库湾中上游频频出现水华现象, 而水华现象是富营养化最明显的表征. 引起梅溪河库湾富营养化的主要因子有以下 3 类: 营养因子、生态因子和环境因子<sup>[23]</sup>. 钟成华等<sup>[24]</sup>认为, 营养盐浓度升高是库区干支流发生富营养化的潜在原因, 但是蓄水所导致库区和支流的水流条件变化才是最大的诱发因素, 一方面水库蓄水, 支流库湾水流变缓有利于水华发生; 另一方面水库干流和支流水体物理化学性质存在差异, 水库的水位调节导致水库干流支流存在普遍的交换状态, 这种交换反过来又会进一步改变库湾水体的物理、化学特性, 从而不断影响着支流库湾水华的发生<sup>[25-28]</sup>. 目前整个梅溪河库湾 DIN/DSi/DIP 的年均摩尔比为 51.83:49.73:1, 远远偏离 Redfield 比值, 按照营养盐对浮游植物相对限制法则, 梅溪河浮游植物的生长从全年来看主要受 P 的潜在限制. 上游源头水体中 DIN/DSi/DIP 的年均摩尔比为 94.31:90.99:1, 长江倒灌水体中 DIN/DSi/DIP 的年均摩尔比为 37.97:35.22:1. 由此可以预见, 长江干流水体的倒灌将改变梅溪河库湾的营养盐结构, 大量 P 的输入将会对库湾水华的暴发提供条件, 同时, 库湾水动力条件和水体的物理、化学特性的改变也促进了支流库湾水华的暴发.

### 4 结论

(1) 在三峡水库不同调水时期, 在梅溪河库湾均存在明显的水体分层异向流动.

(2) 受长江干流倒灌影响, 梅溪河库湾营养盐分布季节变化显著, DIN 的年倒灌净通量约为  $5478.02 \text{ t}$ , DIP 的年倒灌净通量约为  $234.04 \text{ t}$ , DSi 的年倒灌净通量约为  $5935.22 \text{ t}$ , 长江干流每年对梅溪河 N、P、Si 的补给量分别约为源头输入量的 2.37 倍、4.32 倍和 1.33 倍.

(3) 干流倒灌对库湾营养盐分布的影响不仅局限在河口区域, 对梅溪河中上游的营养盐分布也将造成影响, 干流倒灌对库湾 P 的补给将对库湾 P 限制起到缓解作用, 为藻类的暴发提供必要条件.

## 参考文献:

- [1] 国家环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京: 国家环境保护总局, 2007-2013.
- [2] 李晓. 三峡库区一级支流水质变化预测及对策研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [3] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *American Scientist*, 1958, **46**(3): 205-221.
- [4] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态[J]. *生态学报*, 2008, **28**(5): 2073-2079.
- [5] Beckmann M C, Schöll F, Matthaei C D. Effects of increased flow in the main stem of the River Rhine on the invertebrate communities of its tributaries[J]. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(1): 10-26.
- [6] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响[J]. *水利学报*, 2010, **41**(6): 691-696.
- [7] Yang Z J, Liu D F, Ji D B, *et al.* Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, **53**(4): 1114-1125.
- [8] 胡念三, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库干流倒灌对支流库湾营养盐分布的影响[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(10): 6-11.
- [9] 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.
- [10] 蒋定国, 戴会超, 王冰伟, 等. 香溪河库湾春季营养盐空间差异性成因分析[J]. *水利学报*, 2013, **44**(5): 562-568.
- [11] 刘玉洁, 尹真真. 三峡水库建成蓄水后支流回水区富营养化时空分布特征[J]. *环境保护科学*, 2014, **40**(2): 30-34.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张智, 龙天渝, 谷尘勇, 等. 三峡成库后重庆段运行水位流场模拟[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2006, **29**(8): 14-17.
- [15] Billen G, Garnier J, Deligne C, *et al.* Estimates of early-industrial inputs of nutrients to river systems: implication for coastal eutrophication[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **243-244**: 43-52.
- [16] Li M T, Xu K Q, Watanabe M, *et al.* Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **71**(1-2): 3-12.
- [17] 杨霞. 三峡水库香溪河库湾异重流背景下水华暴发影响因子研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.
- [18] Zhai S J, Hu W P, Zhu Z C. Ecological impacts of water transfers on Lake Taihu from the Yangtze River, China[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(4): 416-420.
- [19] 张佳磊. 三峡库区大宁河富营养化和水华研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [20] 罗专溪, 朱波, 郑丙辉, 等. 三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(2): 208-212.
- [21] 罗光富. 支流河口水力作用对三峡库区干支流营养盐交换的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [22] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生态机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [23] 叶闽, 洪一平, 彭盛华. 三峡水库水体富营养化的潜势研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. 26-30.
- [24] 钟成华, 幸治国, 赵文谦, 等. 三峡水库蓄水后大宁河水体富营养化调查及评价[J]. *灌溉排水学报*, 2004, **23**(3): 20-23.
- [25] 李崇明, 黄真理, 张晟, 等. 三峡水库藻类“水华”预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, **16**(1): 1-6.
- [26] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库 172.5 m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, **40**(4): 358-369.
- [27] Naselli-Flores L, Barone R. Water-level fluctuations in mediterranean reservoirs: setting a dewatering threshold as a management tool to improve water quality[J]. *Hydrobiologia*, 2005, **548**(1): 85-99.
- [28] Leston S, Lillebø A L, Pardal M A. The response of primary producer assemblages to mitigation measures to reduce eutrophication in a temperate estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **77**(4): 688-696.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                              |                                                              |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America .....                                                                                                    | GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>       | (1141) |
| Regional Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Beijing in January 2013 .....                                                                                                          | LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>                     | (1148) |
| Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing .....                                                                                                            | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>   | (1154) |
| Soluble of Metals within TSP in Shanghai .....                                                                                                                                               | CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>            | (1164) |
| Analysis of Component Spectral Characteristics of PM <sub>10</sub> -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen .....                                         | ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>              | (1173) |
| Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....                                                                                         | WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>               | (1182) |
| Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014 .....                                                                                                            | BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>              | (1187) |
| Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>2.5-10</sub> in Mountain Background Region of East China in Spring .....                                    | SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>          | (1195) |
| Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves .....                                                                                             | YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>           | (1202) |
| Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province .....                                                                        | HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>                 | (1208) |
| Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen .....                                                                                         | YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>             | (1217) |
| Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes .....                                                                                                          | SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>         | (1227) |
| Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards .....                                                                                        | ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>    | (1234) |
| Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen .....                                               | JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> | (1241) |
| Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport .....                                                                                                     | ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long                 | (1249) |
| Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary .....                             | WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>     | (1256) |
| Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season .....                                                                | YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>   | (1263) |
| Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event .....                                                                       | REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>          | (1270) |
| Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources .....                                                         | ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai                                 | (1277) |
| Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period .....                                                              | LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>                | (1285) |
| Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary .....                                         | CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>              | (1293) |
| Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake .....                                                                                       | WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>    | (1301) |
| Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond .....                                                                                        | YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>          | (1309) |
| Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer .....                                                                                   | LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>      | (1317) |
| Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study .....                                                                                                                       | ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>            | (1326) |
| Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using $\gamma$ Irradiation .....                                                                                 | ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>    | (1332) |
| Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony .....                                                                                   | CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>    | (1338) |
| Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation .....                                                                                                                  | SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>     | (1345) |
| Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol .....                                                                                     | KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>              | (1352) |
| Photolysis of Gaseous HNO <sub>3</sub> on the $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Films Under 308 nm UV Light .....                                                                     | LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>           | (1359) |
| Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode .....                                               | HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>           | (1365) |
| Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis .....                                                                     | XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>          | (1374) |
| Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i> .....                                                                                   | MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>       | (1379) |
| Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water .....                                                                         | LI Jing, LI Wen-ying                                         | (1385) |
| Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process .....                                  | LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>               | (1392) |
| Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System .....                                                                                               | ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>     | (1399) |
| Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                                                      | WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>              | (1406) |
| Effects of Total Nitrogen and BOD <sub>5</sub> /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor .....       | YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>          | (1412) |
| Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing .....                                                                          | SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>        | (1417) |
| Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province .....                                                 | ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>          | (1425) |
| Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain .....                                                                                                                       | SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>        | (1431) |
| Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil .....                                                                                                        | WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>       | (1437) |
| Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions .....                                                                                    | DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>            | (1445) |
| Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County .....                           | QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>              | (1453) |
| Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure .....                                                                     | WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>             | (1461) |
| Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead .....                                                                                                                   | CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>      | (1468) |
| Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling .....                                                                             | XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>         | (1474) |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content .....                                                                            | GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>                | (1481) |
| A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area ..... | CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>       | (1489) |
| Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase .....                                             | WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>           | (1497) |
| Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs .....                                                                                                             | WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>         | (1507) |

# 《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 汤鸿霄 陈吉宁 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4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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