

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山铈矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铈在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

干流倒灌异重流对香溪水库湾营养盐的补给作用

张宇¹, 刘德富^{1,2*}, 纪道斌¹, 杨正健^{1,3}, 陈媛媛¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心(三峡大学), 宜昌 443002; 3. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

摘要: 三峡水库蓄水以来, 其支流库湾每年均暴发严重的春季水华。为研究三峡水库支流营养盐受干流的逆向影响, 于2010年对三峡水库库首区域最大的支流香溪河库湾水流特点及总氮、总磷的时空动态分布进行了详细监测。研究发现库湾水体表现为分层异向流动, 存在明显的倒灌异重流现象, 分别以表、中、底3种形式倒灌入香溪河库湾; 特定的水流特性为库湾营养物质的运输提供了水动力基础, 香溪河河口处由干流倒灌输入总氮、总磷的平均瞬时通量分别为 $501.92 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $48.17 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 在2010年干流倒灌输入香溪河库湾的总氮、总磷污染负荷分别占总量的43.4%、21.5%。结果表明, 倒灌输入的总氮、总磷占有很大的比例, 同时加强三峡水库支流及干流上游流域污染控制才是有效控制支流水华发生的根本途径。

关键词: 三峡水库; 香溪河; 倒灌异重流; 营养盐; 干流补给

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2621-07

Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay

ZHANG Yu¹, LIU De-fu^{1,2}, JI Dao-bin¹, YANG Zheng-jian^{1,3}, CHEN Yuan-yuan¹

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-Environment in TGR Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Water Resources & Hydroelectric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Frequent spring blooms have been observed in tributary bays of Three Gorges Reservoir (TGR) since its initial filling. In order to study Three Gorges Reservoir of nutrients by the River tributaries reverse effect, a well-designed field monitoring plan was conducted. The results show: there are significant intrusions from Three Gorges Reservoir to Xiangxi Bay to the surface, middle and bottom with three forms of intrusion respectively. The unique flow characteristics provide a hydrodynamic background of nutrient distributions of Xiangxi Bay. The average instantaneous fluxes of the input TN and TP of the intrusions from the confluence were $501.92 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ and $48.17 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively; TN and TP loads originated from intrusions accounted for 43.4% and 21.5%, respectively to total amount in the whole year. The study shows that intrusion of the total nitrogen input, a large proportion of total phosphorus, and reducing the pollution loads of tributaries and upper reach basin of Three Gorges Reservoir is the fundamental way to eradicate algal blooms.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; adverse slope density flow; nutrients; river supplies

自2003年三峡水库蓄水以来, 部分支流每年均发生不同程度的富营养化现象^[1~3], 针对三峡水库支流库湾的富营养化及水华问题已有大量的研究^[4~9], 有学者认为相对充足的氮、磷等营养盐是水体富营养化的物质基础^[10], 而其来源主要分为: 上游来流与次级支流汇入、点源与面源污染、底泥释放、大气沉降^[11~14]等。但就三峡水库支流而言, 由于水库水位波动及倒灌异重流存在, 干流水体交换频繁, 加上长江干流营养盐浓度相对较高, 干流对支流营养盐存在明显的逆向影响, 目前有关这方面的研究相对较少^[15]。定量分析支流库湾氮、磷等营养盐受干流逆向影响的大小, 是研究支流库湾水环境状况的基础, 对解决三峡水库支流库湾水体富营养化及水华问题具有重要的理论及实践意义。

本研究以2010年的野外观测数据为依据, 分析了香溪河水流特性及干流倒灌输入总氮(TN)、总磷(TP)的瞬时通量, 以期为解决支流库湾水环境问题提供基础。

1 研究区域及研究方法

香溪河系长江三峡水库湖北省库区最大的支流, 发源于神农架林区, 流经兴山县、秭归县, 其干

收稿日期: 2011-10-19; 修订日期: 2012-01-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50925932); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51009080, 51009081); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-001, 2008ZX07104-004), “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB29B09); 湖北省环保科技项目(2008HB08)

作者简介: 张宇(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文学, E-mail: langren1986126@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: dfliu@ctgu.edu.cn

流长度 94 km,流域面积 3 095 km²,拥有南阳河、古夫河、高岚河 3 条主要支流. 水库蓄水 175 m 后,香溪河距离河口约 40 km 范围形成回水区.

1.1 样点设置

从香溪河库湾的河口至高阳镇设置 11 个采样断面,采样点编号依次为 00,01,02,⋯,10,其中 10 在水位为 145 ~ 156 m 时为上游区,在 156 ~ 175 m 时为回水区. 另外在水库干流香溪河库湾河口的上游设置一个采样点,记为 CJ. 样点分布见图 1.

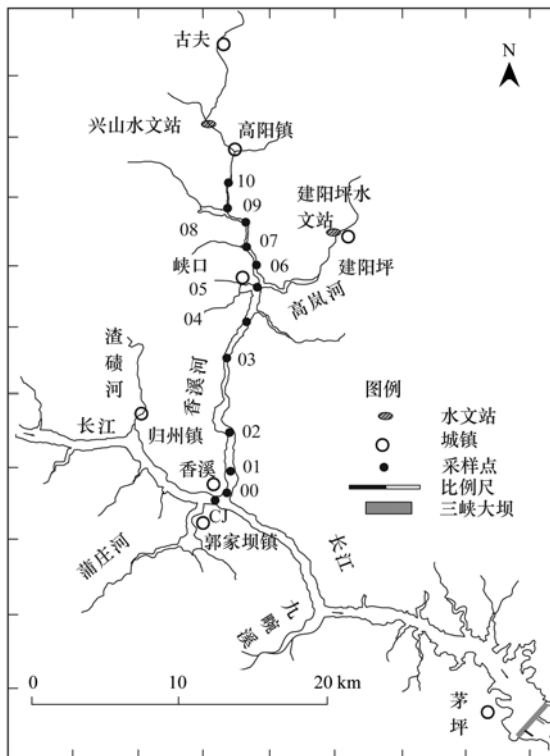


图 1 香溪河库湾采样点分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites

1.2 监测频率与指标

2010 年监测时段为 1 ~ 12 月,监测频率为每周 1 次,主要监测指标有:流速、营养盐(TN、TP)等. 其中,流速在中泓线处利用挪威产声学多普勒三维点式流速仪 6 MHz“Vector”ADV 测量,内部采样频率最大为 250 Hz,最大输出频率为 64 Hz^[16, 17];在 CJ、00、02 ~ 10 处每次取 350 mL 表层水,01 处按 0.5 m、2 m、5 m、10 m、20 m、40 m、底部进行分层取水,在蓄水期分层适当加密,用 GF/C 滤膜过滤并低温保存带回实验室分析,根据文献[18]测定水中 TN、TP 浓度.

1.3 数据处理

瞬时通量是指单位时间内流过河流指定断面的物质质量,对于反映干支流 N、P 交换有重要的意义.

如图 2 所示,根据 01 断面处沿深度方向的流速,可以将 01 横断面划分为由水体流入库湾的区域和流出库湾的区域,将相应的区域每 2 m 划分一个网格,计算出每个网格水体的流量:

$$q_i = V_i \times S_i$$

式中, q_i 为相应的流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), V_i 为相应的流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), S_i 为相应网格的断面面积(m^2). 由 $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ 即可得出 01 断面处流入或流出的瞬时流量.

根据 TN、TP 浓度,分别计算出每个网格 TN、TP 的大小:

$$\phi_i = q_i \times c_i$$

式中, ϕ_i 为相应的水体所携带的 TN、TP($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), c_i 为相应的 TN、TP 的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 由 $\Phi = \sum_{i=1}^n \phi_i$ 即可得出 01 断面处携带 TN、TP 的瞬时通量. 由 $\theta = \int_{t_1}^{t_2} \Phi dt$ 即可得出某时间段 01 处流入或流出的 TN、TP.

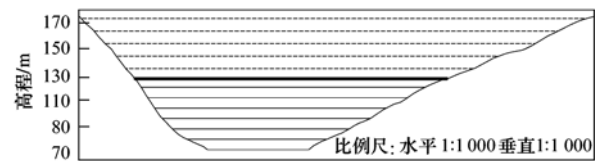


图 2 01 横断面

Fig. 2 Map of cross-section of 01

2 结果与分析

2.1 水位变化特征

2010 年三峡水库坝前水位变化过程如图 3 所示. 从中可以看出,2010 年三峡水库水位从年初的 169.37 m 不断降低,至 6 月 19 日降至 145.13 m,其中 5 月 7 日 ~ 6 月 19 日为泄水期,平均日降幅达到 0.27 m,最大日降幅为 0.6 m(5 月 20 日); 6 月 10 日 ~ 9 月 30 日为汛期,水库维持防洪限制水位 145 m 左右运行,期间保持着一定程度的波动,其中最大日增幅为 3.94 m(7 月 21 日),最大日降幅为 1.44 m(8 月 3 日); 水库于 9 月 10 日提前蓄水,至 11 月 2 日蓄水至 175 m,其间水位最大日增幅达到 1.62 m(9 月 10 日),2010 年水位经历了 156 m 高位运行 → 泄水期 → 145 m 汛期低水位运行 → 蓄水期 → 175 m 高位运行的完整的水位调度过程,本研究的监测结果具有一般代表性.

2.2 流速沿垂向变化规律

香溪河库湾整体流速较小,平均只有 cm 级,香

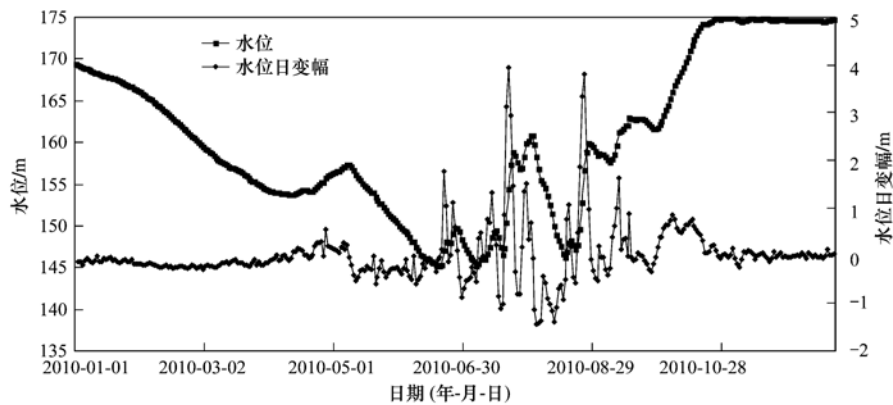


图3 2010 年水位及其日变幅曲线

Fig. 3 Curves of water level and its daily fluctuation during 2010

溪河属南北走向,由北流向南,数据分析采用 01 断面中泓线上北向分流速矢量(v),水流流入库湾流速为正,流出库湾为负。

如图 4 所示为 2010 年 01 断面不同时间流速沿垂向分布规律,由图可见无论是水库供水、水位降落期还是在蓄水期、水位上升期,库湾均不是一个方向流动而是分层异向流动。在 1、2 月干流水体从底部倒灌入香溪河库湾,1 月 27 日水流从 40 m 至河底范围潜入库湾,最大流速达到 $0.095\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平

均流速为 $0.038\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,2 月 7 日规律基本相同;在此之后,持续存在分层异向流动现象,5 月 9 日干流水体从水深 8 ~ 56 m 范围潜入库湾,最大流速达到 $0.079\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,6 月 6 日干流水体则从 6 ~ 38 m 范围开始潜入库湾,平均流速为 $0.026\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在 10 月 10 日水流从表层至水深 60 m 开始倒灌,而 12 月 20 日水流从底部倒灌入香溪河库湾,最大流速达到 $0.08\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。产生这种分层异向流动的最主要原因是由于干支流水体密度差引起的^[19]。

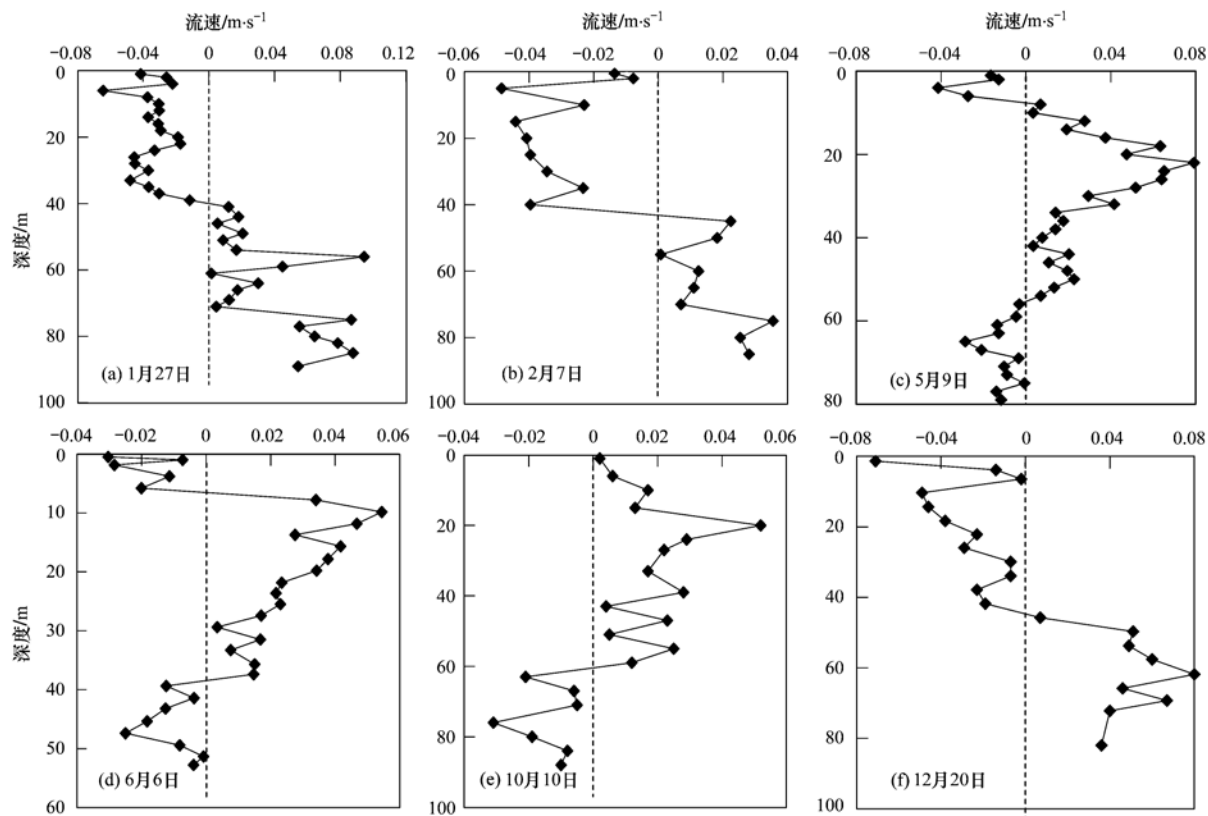


图4 01 断面流速沿深度方向分布

Fig. 4 Flow velocity profiles of 01 cross-section

2.3 TN、TP 垂向分布

如图 5 所示为 TN、TP 沿垂向变化规律,可见 1 月 27 日、2 月 7 日 TN 均在 40 m 至底部范围内呈明显增大趋势,垂向上平均质量浓度分别为 $1.648 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.469 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2 月 7 日最大质量浓度则达到 $2.344 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;5 月 9 日、6 月 6 日 TN 由表层至 5 m 呈增大趋势,5 ~ 40 m 变化不大,40 m 至河底

明显减小;而 12 月 20 日规律同 1 月 27 日、2 月 7 日基本一致;从时间变化来看,1 月 27 日平均质量浓度最大,达到 $1.648 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 10 月 10 日最小,仅为 $0.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. TP 沿垂向变化规律和 TN 基本相同,但沿垂向上整体变化范围不大,造成这种现象的原因是干流水体 TN 浓度明显大于香溪河库湾 TN 浓度,而 TP 浓度两者相差不大(图 6).

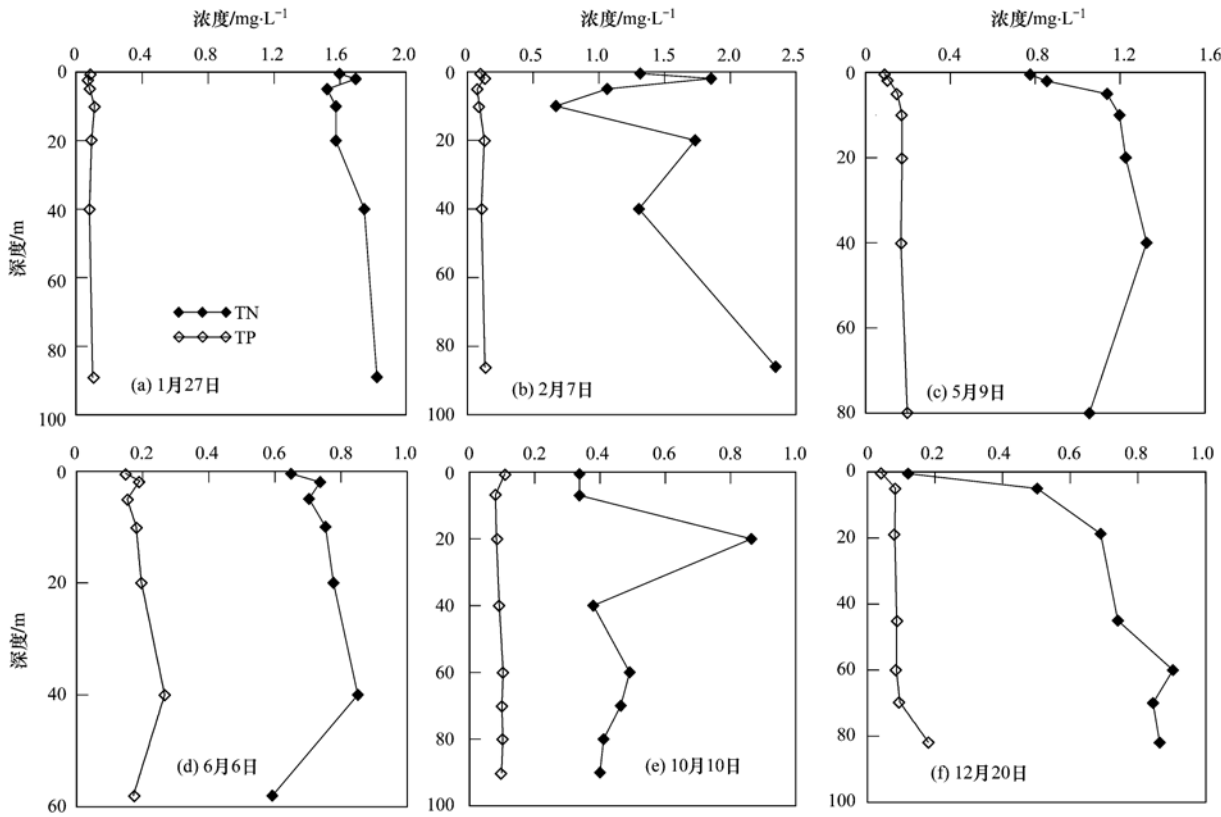


图 5 TN、TP 浓度沿深度方向变化

Fig. 5 Vertical distribution of TN and TP concentrations

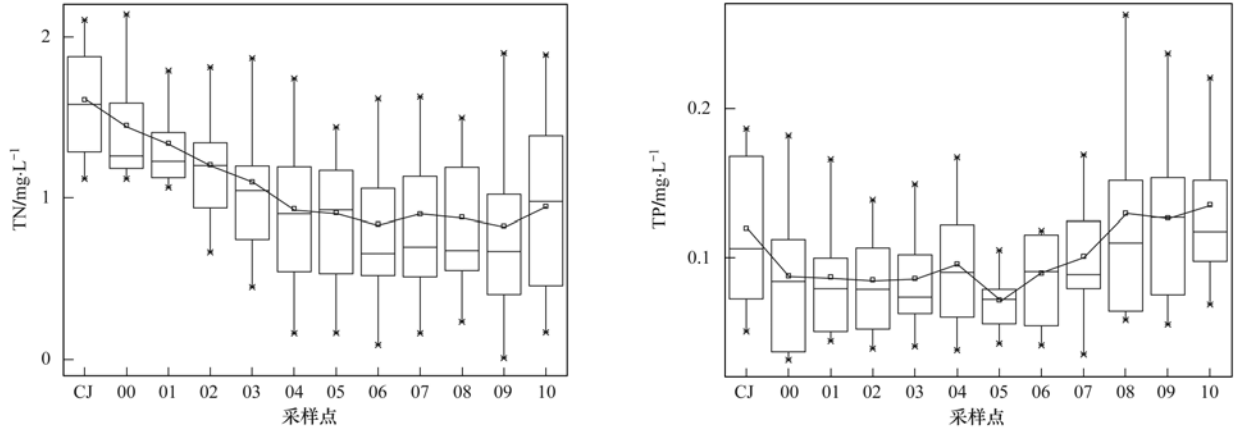


图 6 TN、TP 空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of TN and TP

2.4 01 断面 TN、TP 的瞬时通量

香溪河库湾上游、高岚河汇入的流量、倒灌流

入的流量小于流出的流量时水位下降,反之则水位上升.如表 1 所示流入库湾的流量最大在 12 月 20

日为 $644.45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 最小则在 6 月 6 日为 $183.46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 流入的流量均值为 $384.91 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 流出的流量最大在 12 月 20 日为 $677.50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 流入库湾 TN 在 1 月 27 日最大, 达到 $915.16 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 而最小则在 6 月 6 日仅为 $140.34 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 流入 TN 的均值为 $543.71 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 流出的 TN 最大在 1 月 27 日为 $1\,050.98 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$; 流入库湾 TP 最大在 12 月 20 日为 $72.18 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 流出 TP 最大在 1 月 27 日为 $56.7 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$.

表 1 01 断面 TN、TP 瞬时通量

Table 1 Instantaneous flux of TN, TP of 01 cross-section						
日期	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		TN/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$		TP/ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	
	流入	流出	流入	流出	流入	流出
1 月 27 日	527.17	644.37	915.16	1 050.98	53.77	56.70
2 月 7 日	320.09	417.79	910.34	700.64	42.57	44.70
5 月 9 日	259.36	305.95	324.25	309.85	44.09	52.58
6 月 6 日	183.46	228.23	140.34	162.19	34.75	35.44
10 月 10 日	374.94	170.98	180.72	72.67	41.64	14.10
12 月 20 日	644.45	677.50	540.69	296.74	72.18	46.07

香溪河来流主要包括上游来流、支流高岚河汇入、干流倒灌输入, 去向为流入干流, 整体水量应处于平衡状态. 如表 2 所示为香溪河库湾水量变化, 流入水量为上游来流、支流高岚河汇入、干流倒灌输入三者之和, 流出水量为流出香溪河库湾的水量, 库容变化即根据当天水位变化由库容曲线所得到的那部分水量. 可以看出, 流入水量与流出水量差值的大小基本与当天库容变化相同, 总体水量平衡.

表 2 香溪河库湾水量变化

Table 2 Water volume change of TN, TP of Xiangxi Bay			
日期	流入水量 $\times 10^7$ / m^3	流出水量 $\times 10^7$ / m^3	库容变化 $\times 10^7$ / m^3
1 月 27 日	4.690	5.567	0.883
2 月 7 日	2.941	3.610	0.675
5 月 9 日	2.545	2.643	0.097
6 月 6 日	2.154	1.972	0.184
10 月 10 日	3.629	1.477	2.171
12 月 20 日	5.678	5.854	0.172

3 讨论

3.1 倒灌异重流对香溪河库湾营养盐空间分布的影响

如图 6 所示为 2010 年 TN、TP 空间分布, TN 空间总体上呈现出干流高 (CJ)、库湾上游低、自河口至回水末端逐渐降低的分布, 水库干流 (CJ) TN 质量浓度均值为 $1.361 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变化范围为 $0.711 \sim 2.105 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TP 空间总体上呈现两头高、中间低的趋势, 水库干流 (CJ) TP 质量浓度均值为 0.120

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变化范围为 $0.07 \sim 0.186 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 库湾上游 (10) TP 质量浓度均值为 $0.135 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变化范围为 $0.07 \sim 0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

可以看出长江干流 TN、TP 浓度大小明显高于香溪河库湾 TN、TP 浓度大小, 而香溪河库湾常年存在倒灌异重流^[19], 干支流水体交换频繁, 干流对库湾营养盐存在补给作用, 苏妍妹等^[20]阐述了 2007 年水库蓄水期间蓄水过程对库湾内主要营养盐存在补给作用, 吉小盼等^[21]分析了泄水期干流对香溪河库湾营养盐的逆向影响; 干流对三峡水库其它支流营养盐同样存在补给作用, 罗专溪等^[22]研究发现支流回水段的氮磷分配特征初步呈现干流逆向影响效应, 分别有 19.05% TN、28.93% TP 源于干流倒灌输入. 结合前人研究发现, 水体从中表层倒灌时, 库湾水体营养盐受到的影响范围随着潜入距离的增大而增大, 从底部倒灌时, 则是整个库湾受到影响^[21], 1 月 27 日、2 月 7 日 (图 4), 水体从底部倒灌入库湾, 进而补给了库湾中上层水体的营养盐; 而在 5 月 9 日、6 月 6 日、10 月 10 日水体则是从中表层倒灌入香溪河库湾, 使得库湾上层水体的营养盐得到补给, 但是波及的范围较小; 在 12 月 27 日水体主要是从底部倒灌入库湾, 这样库湾营养盐受到影响的范围扩大.

李凤清等^[23]研究发现: 香溪河、高岚河每年大约有总氮 1 623.49 t 和总磷 331.85 t 汇入香溪河库湾, 李重荣等^[24]预测 2010 年面源污染负荷为: 总氮 1 239.8 t、总磷 423.1 t, 根据本研究瞬时通量可以计算出 2010 年由倒灌输入减去输出的总氮为 2 199.35 t、总磷为 207.15 t, 此处未考虑内源释放, 主要因为库湾水深较大, 底泥内源释放对表层营养盐分布的影响微弱^[25], 则香溪河总污染负荷基本上为上述来源之和, 从而可知, 由倒灌输入的 TN、TP 在总污染负荷中所占的比例大约分别为 43.4%、21.5%, 可见倒灌输入的 TN、TP 占有很大的比例.

可以看出, 倒灌输入的 TN、TP 对香溪河库湾影响较大, 占有很大的比例, 但目前关于干流倒灌对支流库湾营养盐的影响并未引起重视, 因此研究清楚干流的逆向影响将为治理支流水华提供基础.

3.2 控制三峡水库支流库湾营养盐的有效措施

三峡库区部分支流在回水区均出现不同程度的水华, 其中汤溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、大宁河、香溪河等尤为明显^[26], 其中长滩河为贫营养^[27], 梅溪河为中营养^[28], 谭路等^[29]调查指出汤溪河的平均总氮含量较其它支流低为 $0.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

一些氮、磷浓度较低的河流回水区域也可能暴发水华,罗专溪等^[30]对三峡水库蓄水初期生态环境特征进行分析指出:坝前水域及库区支流回水河段是水库富营养化的敏感区域,敏感性相当高;在支流回水区,干流水体交换频繁,干流营养盐本底浓度较大,可能是支流回水河段暴发水华的最主要原因之一。

目前普遍认为流域点源、面源污染导致的营养盐补给是导致支流水华的主要原因,继而采取了一系列控制支流流域污染的方法:周广杰等^[4]指出减少外源污染是控制三峡库区“水华”发生的最根本的可行性方法,蔡庆华等^[28]提出控制三峡水库富营养化需加强点源控制和面源水土保持工作,邱光胜等^[26]指出三峡库区支流水体营养盐浓度已经处于较高的水平,每年排入河流的工业废水和生活污水呈上升趋势,有必要加强库区支流点源、面源污染控制。

但是长江干流对支流库湾营养盐的补给占有很大一部分,并且干流营养盐本底浓度偏高,所以仅仅采用控制支流污染还不能够有效地控制支流水华;同时三峡水库干流上游输入的总氮、总磷是三峡水库氮、磷营养盐的主要来源,冉祥滨等^[31]调查指出三峡水库氮、磷的80%~90%来源于上游输入,孙阳等^[32]指出上游入库的氮、磷负荷占总负荷的70%~80%,因此在控制支流氮、磷输入来控制支流水华的基础上,必须要认识到减少上游污染输入的重要性,切实加强干流上游流域污染物的控制。

4 结论

(1) 香溪河库湾存在水体分层异向流动,在1月27日、2月7日,水体主要是从底层倒灌入库湾,在5月9日、6月6日、10月10日则从中表层倒灌,在12月20日水体主要是从底部倒灌入香溪河库湾。

(2) 支流营养盐受干流逆向影响显著,01处倒灌输入的TN、TP的平均瞬时通量为 $501.92 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $48.17 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3) 干流倒灌输入的TN、TP在香溪河库湾污染负荷中占有很大一部分,大约有43.4%、21.5%的TN、TP由干流倒灌输入香溪河库湾。

致谢:现场监测过程中得到孔松、刘流、胡念三、陈洋的大力协助,实验室样品分析得到李媛、张平、姚绪姣、崔玉洁的支持,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 张晟,刘景红,黎莉莉,等. 三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征[J]. 环境科学, 2006, **27**(6): 1056-1061.
- [2] 李永建,李斗果,王德蕊. 三峡工程Ⅱ期蓄水对支流富营养化的影响[J]. 西南农业大学学报, 2005, **27**(4): 474-478.
- [3] 郭劲松,陈杰,李哲,等. 156m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2710-2715.
- [4] 周广杰,况琪军,胡征宇,等. 三峡库区四条支流藻类多样性评价及“水华”防治[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(3): 337-341.
- [5] 胡建林,刘国祥,蔡庆华,等. 三峡库区重庆段主要支流春季浮游植物调查[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 116-119.
- [6] 韩新芹,叶麟,徐耀阳,等. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态及其影响因子分析[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 89-94.
- [7] Ye L, Han X Q, Xu Y, *et al.* Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi bay of three Gorges Reservoir [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **127**(1-3): 135-145.
- [8] Liu S M, Zhang J, Chen H T, *et al.* Nutrients in the Changjiang and its tributaries[J]. Biogeochemistry, 2003, **62**(1): 1-18.
- [9] Duan S W, Xu F, Wang L J. Long-term changes in nutrient concentrations of the Changjiang River and principal tributaries [J]. Biogeochemistry, 2007, **85**(2): 215-234.
- [10] 李锦秀,廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J]. 科技导报, 2003, **2**(9): 49-52.
- [11] Mortimer C H. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes[J]. Journal of Ecology, 1941, **29**(2): 280-329.
- [12] 刘建康,黄祥飞. 东湖生态学研究概况[J]. 环境科学, 1995, **18**(1): 51-53.
- [13] 张曼平. SOLAS 计划——IGBP 的一个新的国际合作研究计划[J]. 地球科学进展, 2000, **15**(3): 358-359.
- [14] 杨正先. 海洋大气 N 沉降通量研究进展[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(A02): 160-164.
- [15] Beckmann M C, Schöll F, Mattheai 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.
- [16] Voulgaris G, Trowbridge J H. Evaluation of the acoustic doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, **15**(1): 272-289.
- [17] Soulsby R L. Selecting record length and digitization rate for near-bed turbulence measurements [J]. Journal of Physical Oceanography, 1980, **10**(2): 208-219.
- [18] 国家环境保护总局. 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.
- [19] 纪道斌,刘德富,杨正健,等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学: G 辑, 2010, **40**(1): 101-112.
- [20] 苏妍妹,纪道斌,刘德富. 三峡水库蓄水期间香溪河库湾营养盐动态特征研究[J]. 科技导报, 2008, **26**(17): 62-69.

- [21] 吉小盼,刘德富,黄钰铃,等.三峡水库泄水期香溪河库湾营养盐动态及干流逆向影响[J].环境工程学报,2010,4(12):2687-2693.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 李重荣,王祥三,窦明.三峡库区香溪河流域污染负荷研究[J].武汉大学学报:工学版,2003,36(2):29-32.
- [25] 朱广伟,秦伯强,高光.强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂向分布特征[J].水科学进展,2004,15(6):775-780.
- [26] 邱光胜,涂敏,叶丹,等.三峡库区支流富营养化状况普查[J].人民长江,2008,39(13):1-4.
- [27] 邱光胜,胡圣,叶丹,等.三峡库区支流富营养化及水华现状研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(3):311-316.
- [28] 蔡庆华,胡征宇.三峡水库富营养化问题与对策研究[J].水生生物学报,2006,30(1):7-11.
- [29] 谭路,蔡庆华,徐耀阳,等.三峡水库175m水位试验性蓄水后春季富营养化状态调查及比较[J].湿地科学,2010,8(4):331-338.
- [30] 罗专溪,张远,郑丙辉,等.三峡水库蓄水初期水生态环境特征分析[J].长江流域资源与环境,2005,14(6):781-785.
- [31] 冉祥滨,姚庆祯,巩瑶,等.蓄水前后三峡水库营养盐收支计算[J].水生态学杂志,2009,2(2):1-8.
- [32] 孙阳,王里奥,袁辉.三峡水库氮磷污染贡献率估算[J].重庆大学学报,2004,27(10):138-141.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection 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 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, 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 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 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 (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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行