

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM_{2.5})排放测算方法:以上海市为例 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)

上海夏季PM_{2.5}中有机物的组分特征、空间分布和来源 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)

北京南郊区PM_{2.5}中水溶性无机盐季节变化及来源分析 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源解析 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)

两种水生植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州 (2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)

载镧或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)

低温污水前置强化混凝 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)

夏季太湖草/藻型湖区N₂O生成与迁移特征及其影响因素 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)

太湖藻型湖区CH₄、CO₂排放特征及其影响因素分析 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO₂、N₂O特征 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO₂通量特征 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪 (2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇 (2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗生内生菌的筛选与鉴定 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM_{2.5}健康效应 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)

中国PM_{2.5}污染空间分布的社会经济影响因素分析 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征

苏青青^{1,2}, 刘德富^{3*}, 纪道斌^{1,2*}, 宋林旭^{1,2}, 崔玉洁^{1,2}, 李欣^{1,2}, 陈秀秀⁴, 刘心愿^{1,2}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002; 3. 湖北工业大学, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068; 4. 宣州区水务局, 宣城 242000)

摘要: 为研究蓄水期香溪河沉积物-水系统中氮磷营养盐的分布特征, 于 2016 年在香溪河布点采样, 分析沉积物-水系统氮、磷及有机质含量, 探讨沉积物间隙水和上覆水营养盐“源-汇”特征, 并对采样点位进行了聚类分析. 结果表明, 沉积物中 $\rho(\text{TN})$ 在河口处含量较高, 在中下游区域较接近; $\rho(\text{TP})$ 在上游区域明显高于中下游及河口; $\rho(\text{O. M.})$ 呈现下游高上游低的分布特征, 且各采样点在深度 10cm 的范围内, $\rho(\text{O. M.})$ 的最大值超过了临界点 (1.5%), 存在一定的释放风险. 上覆水的分布上, $\rho(\text{DTN})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 均在干支流交汇处最大, 且 $\rho(\text{DTN})$ 从河口至上游沿程递减, $\rho(\text{DTP})$ 沿程变化不大, 而间隙水中 $\rho(\text{DTN})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 的分布和上覆水体相反, 在上游处最大, 并从上游向河口处递减. 研究期间 5 个采样点位的 DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DTP (除 CJ 点位外) 均以“源”的方式向上覆水释放营养盐, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 则是一部分点位呈现为“源”, 一部分点位呈现为“汇”, 且氮素的“源-汇”过程较磷素更为强烈, 这是因为蓄水期底部的氧化环境和干流水体的倒灌潜入深度和方式差异所致. 结合聚类分析结果发现对于沉积物-水系统, CJ、1 号、2 号采样点特征相近, 而 3 号和 4 号采样点特征相近.

关键词: 三峡水库; 香溪河; 蓄水期; 沉积物-水系统; 氮磷营养盐

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2135-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708166

Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR

SU Qing-qing^{1,2}, LIU De-fu^{3*}, JI Dao-bin^{1,2*}, SONG Lin-xu^{1,2}, CUI Yu-jie^{1,2}, LI Xin^{1,2}, CHEN Xiu-xiu⁴, LIU Xin-yuan^{1,2}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Ecoenvironment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 4. Water Authority of Xuanzhou District, Xuancheng 242000, China)

Abstract: This study characterizes the nutrient distribution of the sediment-water system in the Xiangxi River (XXR) during the impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR). In 2016, the research group obtained samples in the Xiangxi River, analyzed the distribution of nitrogen, phosphorus, and O. M. (organic matter) in the sediment-water system, explored the characteristics of “source-sink” between the interstitial water and overlying water, and carried out a cluster analysis for the sampling sites. The results showed that $\rho(\text{TN})$ in the sediments was higher than in the estuary, and the $\rho(\text{TN})$ was close to that in the middle and downstream samples of the river. The $\rho(\text{TP})$ in the upstream sample was the highest of all sites, $\rho(\text{O. M.})$ presented low distribution characteristics in the downstream, and the maximum value of $\rho(\text{O. M.})$ exceeded the critical point (1.5%) within a depth of 10 cm, and there was a certain risk of release. For the distribution in the overlying water, $\rho(\text{DTN})$ and $\rho(\text{DTP})$ were the largest in the estuary, $\rho(\text{DTN})$ decreased from the estuary to the upstream, and $\rho(\text{DTP})$ did not change along the river. During the study, DTN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and DTP in all sites (except CJ point) were released as nutrients to the overlying water as the “source,” but some points for $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ presented as “sources,” and some of them presented as “sinks.” The “source-sink” process of nitrogen was stronger than that of phosphorus. This was due to the difference between the oxidation environment at the bottom of the XXR and the stream flow backward depth of the Xiangxi bay during impoundment. Based on the results of a cluster analysis, the characteristics of CJ, 1, and 2 indicated similar sediment-water systems, while the characteristics of 3 and 4 were similar.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiangxi River; impoundment period; sediment-water system; nitrogen and phosphorus nutrients

三峡水库自蓄水以来, 受水库干流水体回水托顶的影响, 库区支流平均水深不断升高, 断面平均流速逐渐降低, 各支流水环境状况发生了显著变化^[1,2]. 香溪河作为三峡库区库首的一级支流在蓄

收稿日期: 2017-08-20; 修订日期: 2017-11-05

基金项目: 国家自然科学基金重大计划项目(91647207); 国家自然科学基金项目(51509086); 国家国际科技合作项目(2014DFE70070); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-005-02); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402204)

作者简介: 苏青青(1981~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为生态水文学, E-mail: qqsu@ctgu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dliu@189.cn; dbjictgu@hotmail.com

水后, 由于水位抬升, 流速减缓, 导致河流输送营养盐能力受阻, 营养物质富集, 每年暴发不同程度水华事件^[3, 4]. 有研究表明水体中相对充足的氮、磷等营养盐是富营养化的物质基础^[5], 而香溪河营养盐主要来源有点源、面源污染与沉积物内源污染等^[6-9]. 沉积物作为水体氮磷的重要蓄积库, 上覆水的氮磷进入到沉积物后, 会发生明显的形态转化和再迁移作用^[10]. 其中间隙水作为沉积物释放氮磷的主要载体, 其氮磷浓度的高低是沉积物释放能力和强度的直接反映^[11], 并直接影响上覆水氮磷浓度和沉积物-水界面氮磷交换过程^[12]. 因此, 了解沉积物-水系统中营养盐的赋存和分布, 对评价沉积物生源要素动态循环、防止富营养化、控制“内负荷”具有重要意义^[13].

近年来, 许多学者针对三峡库区支流沉积物-水系统营养盐的分布和迁移转化进行了一些研究. 冉祥滨^[14]分别对 135 m 蓄水和 156 m 蓄水后, 三峡水库营养盐分布特征与滞留效应进行了研究, 并对悬浮颗粒的氮磷形态进行了分析; 高飞等^[15]对彭溪河支流水体和沉积物中的磷形态进行了分析; 张永生等^[16]分析了大宁河沉积物营养盐的时空分布与叶绿素的相关性; 王静等^[17]对小江支流在蓄水期和泄水期的硝化反硝化速率进行了研究, 并提出蓄水期有外源物质入库, 且蓄水期氮的相关理化指标和硝化速率均高于泄水期; 潘婷婷等^[18]用磷形态标准测试程序 SMT 法分别对三峡水库的干流和支流的磷形态进行分析, 提出了支流的水文条件对沉积物磷释放的潜在影响. 牛凤霞等^[19]对香溪河支流秋末冬初的磷释放通量进行了估算, 提出了沉积物内源营养负荷的潜在释放风险. 罗玉红等^[20]估算了香溪河沉积物和间隙水磷释放通量的时空变化特征; 李欣等^[21]研究了香溪河沉积物-水界面的氮磷交换特性, 提出了上覆水环境条件对氮磷交换有一定的影响. 目前, 对于三峡库区沉积物-水系统氮磷释放影响的研究多集中在滞留效应、硝化反硝化速率、静态释放通量与水环境因子的相关性分析上, 而对蓄水期沉积物-水系统中氮磷的分布和释放特征鲜有研究. 有研究表明三峡水库蓄水期支流受回水的影响, 水体流速降低, 水力滞留时间延长, 从而导致营养盐滞留^[14]. 同时, 支流缓慢的流速有利于水体中悬浮物质的沉积, 导致库底水体中的悬浮微粒含量增加和多种污染物在库底积聚^[22], 库湾沉积物中污染物含量较高^[23]. 且蓄水期沉积物的理化指标含量均高于泄水期, 沉积物与上覆水

之间的物质迁移转化在蓄水期加剧^[17]. 故本文以三峡水库典型支流香溪河为研究对象, 结合蓄水期的水环境特点对沉积物-水系统的氮、磷及有机质赋存特征进行了分析, 揭示了沉积物间隙水和上覆水氮磷“源/汇”关系, 并对采样点位进行了聚类分析, 探讨了蓄水期沉积物体系和上覆水体系的水环境的差异, 以期对沉积物内源氮负荷的计算及控制提供理论基础, 并为三峡库区的富营养化风险防治提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

香溪河系长江三峡水库湖北省库区内第一大支流, 干流全长 94 km, 河口距三峡大坝 34.5 km, 河流由北向南, 在秭归香溪汇入水库干流. 流域范围为 110°25' ~ 111°06'E、30°57' ~ 31°34'N, 流域面积 3 099 km²^[1]. 香溪河流域属亚热带大陆性季风气候, 多年平均气温 16.6℃, 年均降雨量为 1 015.6 mm^[24]. 据昭君镇以下 2 km 处水文站(控制流域面积 1 900 km²)记载, 香溪河流域河口断面多年平均流量 40.18 m³·s⁻¹^[25]. 三峡水库蓄水至 175 m 后, 香溪河库湾自河口形成约 40 km 范围的回水区.

1.2 样点设置

从香溪河的河口至回水末端昭君镇沿河道中泓线每间隔约 6 km 布设 1 个采样断面, 共 4 个, 在主河道上设置 4 个采样断面, 分别编号为 1、2、3、4. 另外在长江干流靠近香溪河河口的位置设置一个采样断面, 记为 CJ, 采样点的基本情况见图 1.

1.3 样品采集与处理

采用中国水利水电科学研究院水环境研究所研制的柱状采样器(Φ 60 × 1 000 mm)采集 5 个采样点的上覆水和沉积物样品[(0 ± 20) cm], 以 2 cm 的间隔抽取上覆水并倒入 300 mL 聚乙烯水样瓶中, 待间隙水抽取完毕后以 2 cm 的间隔切取沉积物样品并分装入聚乙烯离心管中. 每个采样点的水样和沉积物样品均采集 3 次, 将 3 次样品混合作为该采样点样品, 水样和沉积物样品均放入冷藏箱中保存, 带回实验室后立即分析. 同时采用 Hydrolab DS5 多参数水质监测仪测定水温、水深、pH、DO. 沉积物间隙水的获取: 在室温条件下, 采用 DL-5M 型低速冷冻离心机在 2 000 r·min⁻¹下离心 30 min, 将离心出的上清液倒入 50 mL 离心管中, 分别将上覆水和沉积物间隙水样品经 0.45 μm 的纤维滤膜过滤后于 24 h 之内完成分析测试.

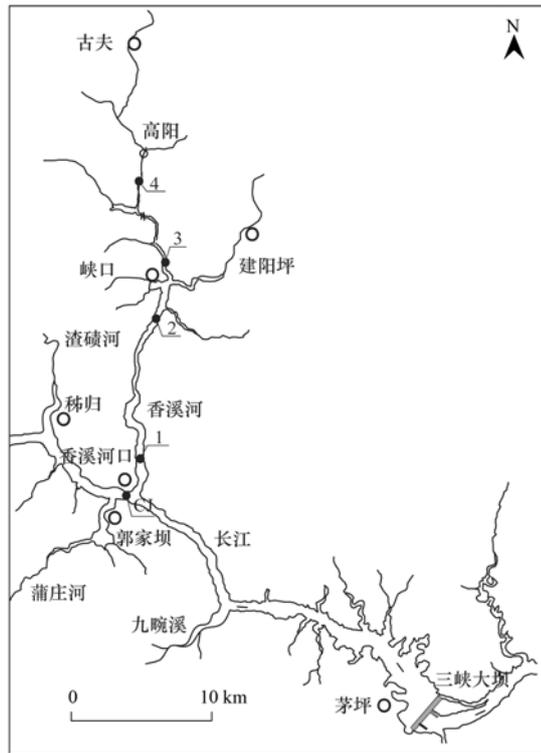


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Sites locations

1.4 分析方法

沉积物磷形态、总氮和有机质的分析方法参考文献[26]。磷形态采用标准测试程序SMT法, 总氮采用Se催化消解法进行分析[26], 硝氮(NO_3^- -N)和氨氮(NH_4^+ -N)分别采用酚二磺酸法和表面扩散法测定[27], 有机质采用重铬酸钾法进行测定[26]。上覆水及间隙水中的DTP、DTN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P均采用SKALAR流动分析仪(荷兰)测定。

1.5 数据统计分析

实验数据均用Excel 2010处理; 采用Surfer 13.0和Origin 9.0制作图表。

2 结果与分析

2.1 蓄水期水环境特征

香溪河上覆水中的 $\rho(\text{DO})$ 、温度和pH分布如表1所示。从中可以看出: $\rho(\text{DO})$ 呈现中间高两头低的分布特征, 变化范围为6.84~7.46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为7.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 温度从上游到下游呈逐渐升高, 变化范围为14.04~21.55 $^{\circ}\text{C}$, CJ采样点的温度值最高, 为21.55 $^{\circ}\text{C}$; pH从上游到河口下游总体上缓慢降低, 上覆水pH变化范围为8.78~8.97, 平均值为8.91, 呈弱碱性。

表1 采样点基本信息

采样点	深度 /m	距河口的距离 /km	上覆水		
			DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	T/ $^{\circ}\text{C}$	pH
CJ	82	/	6.84	21.55	8.78
1号	59	2.80	7.37	19.40	8.93
2号	51	12.70	7.46	18.53	8.93
3号	39	19.20	7.31	18.51	8.93
4号	30	27.60	7.09	14.04	8.97

2.2 沉积物氮、磷及有机质分布特征

2.2.1 沉积物氮分布特征

图2为沉积物中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N)、 $\rho(\text{NH}_4^+$ -N)的分布情况。从中可知, 香溪河沉积物

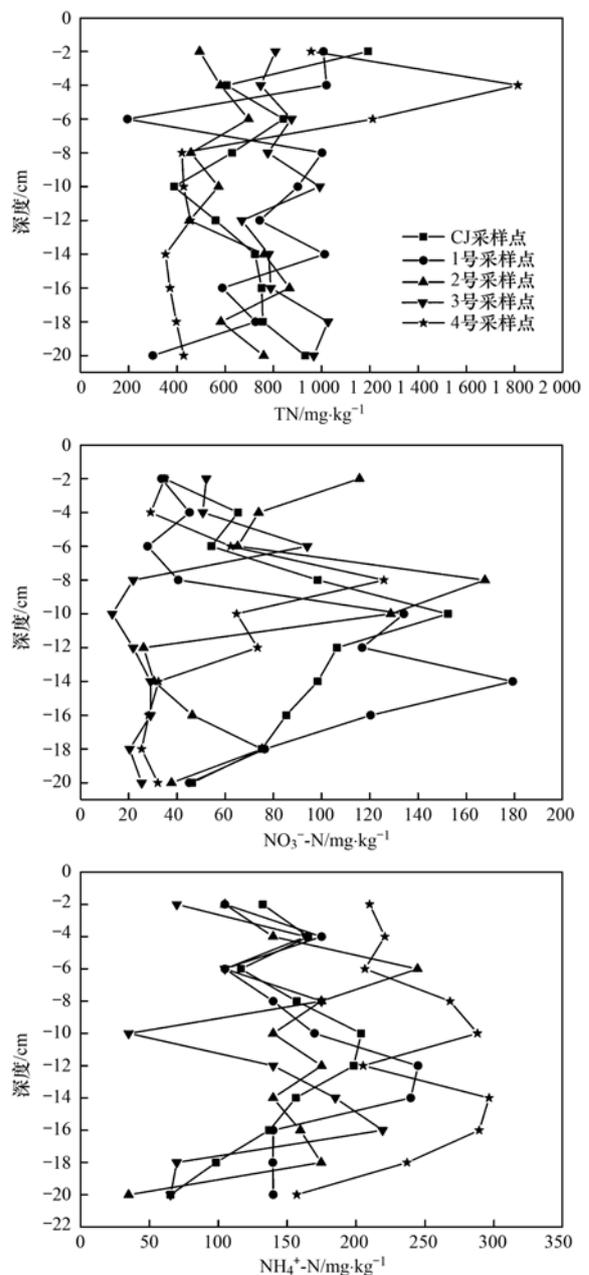


图2 沉积物氮形态分布

Fig. 2 Distribution of nitrogen forms in the sediment

中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 范围分别为: 195.01 ~ 1 813.94、13.19 ~ 179.25 和 34.97 ~ 296.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从空间上看,干支流交汇处到上游处沉积物的 $\rho(\text{TN})$ 呈现两头略高中间略低的分布特征,3号采样点 $\rho(\text{TN})$ 平均值最高,最大值为1 026.34 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 沿程变化不明显,1号采样点 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 平均值最高,最大值为179.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 则是从上游到河口逐渐降低,最大值出现在4号采样点,最大值为296.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从垂向上看,CJ、1、4号采样点的 $\rho(\text{TN})$ 随深度增加逐渐降低,2、3号采样点 $\rho(\text{TN})$ 差异不大,CJ、1、2、3、4号采样点的 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 随深度增加先升高后降低,CJ、1、2、4号采样点的 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 随深度增加先降低后升高,3号采样点则是先升高再降低。

2.2.2 沉积物磷分布特征

沉积物磷形态分布如图3所示。从中可以看出, $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{NaOH-P})$ 、 $\rho(\text{HCl-P})$ 、 $\rho(\text{OP})$ 范围分别为:926.21 ~ 4 613.20、81.32 ~ 678.38、540.20 ~ 3 484.59、106.37 ~ 646.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沉积物中TP的主要组成形态为IP,OP所占比例较小,其中IP以HCl-P为主,这与前人对三峡干支流沉积物研

究结果相近^[18, 28-30]。从空间上看,从干支流交汇处到上游,沉积物的 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{NaOH-P})$ 、 $\rho(\text{HCl-P})$ 均呈现逐渐升高的分布特征,其中4号采样点 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{HCl-P})$ 最高,分别为3 744.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和3 456.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 3号点的 $\rho(\text{NaOH-P})$ 最高,为678.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; $\rho(\text{OP})$ 则呈现中间高两头低的分布特征,最大值出现在3号采样点,含量为824.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从垂向上看, $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{NaOH-P})$ 、 $\rho(\text{HCl-P})$ 均是3号和4号点明显地随深度增加逐渐增加,而CJ、1、2号采样点 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{NaOH-P})$ 、 $\rho(\text{HCl-P})$ 随深度变化不大。 $\rho(\text{OP})$ 的分布上,中游处的2号和3号点随深度增加先增加后减少,而河口和上游处的CJ、1号和4号采样点则随深度增加略有下降。

2.2.3 沉积物有机质分布特征

图4表示的是沉积物中 $\rho(\text{O.M.})$ 的分布情况。从中可知,香溪河沉积物中 $\rho(\text{O.M.})$ 范围为:0.60% ~ 1.70%,与卓海华等^[31]和封丽等^[32]的研究结果接近。从空间上看,干支流交汇处到上游沉积物的 $\rho(\text{O.M.})$ 均呈现逐渐降低的分布特征,其中CJ采样点 $\rho(\text{O.M.})$ 最高,最大值为1.70%。从垂向上看,总体上各点位 $\rho(\text{O.M.})$ 的垂向变化均较

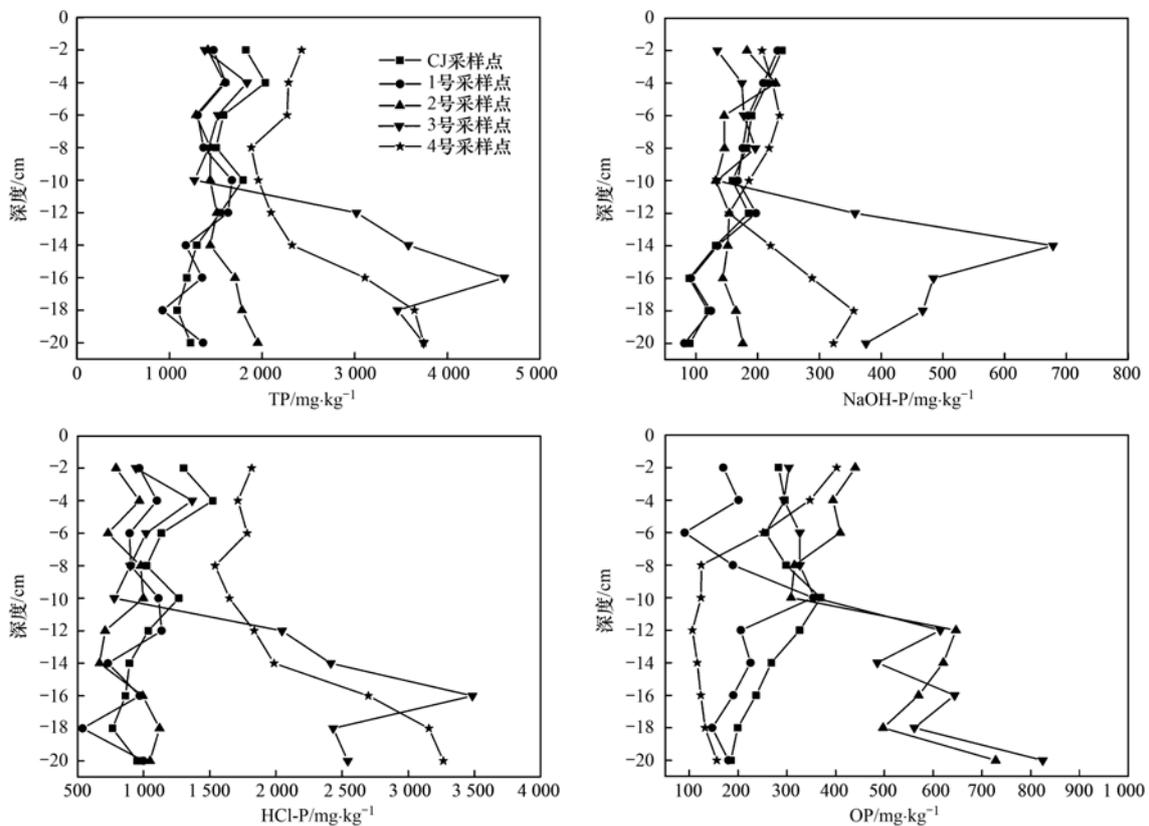


图3 沉积物磷形态分布

Fig. 3 Distribution of phosphorus forms in the sediment

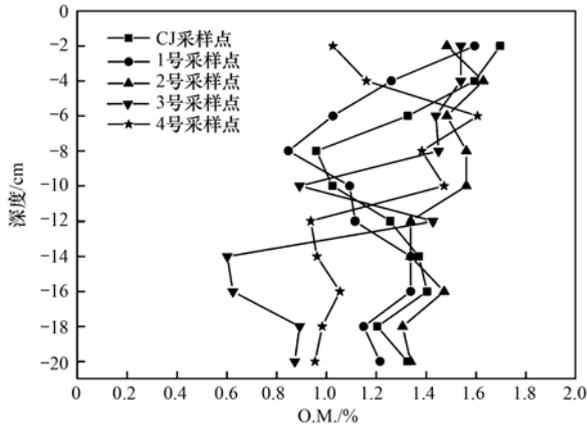


图 4 有机质分布

Fig. 4 Distribution of O. M.

大, 整体上随着深度先减少后增加, 然后再下降的变化特征. 有研究表明沉积物中有机质含量占总量的 1.5% 时为污染临界点, 超过 3% 则属于严重污染^[33]. 从图 4 中可以发现在深度 10 cm 的范围内沉积物有机质含量均超过了污染临界点, 具有一定的污染释放的风险.

2.3 沉积物-水系统氮磷营养盐分布特征

2.3.1 氮

图 5 是沉积物-水系统中 $\rho(\text{DTN})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的分布情况. 从中可以看出, 空间上: 从干支流交汇处到上游, 上覆水中的 $\rho(\text{DTN})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 逐渐降低, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 的浓度较低但在空间上分布不明显; 间隙水的分布上, 则是上游 $\rho(\text{DTN})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 均大于河口, $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 较低且分布空间差异较小. 垂向上: 间隙水中 $\rho(\text{DTN})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 高于上覆水, $\rho(\text{DTN})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 随深度增加而逐渐增加. 与 DTN 和 NH_4^+-N 分布的规律明显不同的是, 上覆水中 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 明显高于间隙水,

而且随着深度的降低含量逐渐升高, 上覆水体中 DTN 主要以 NO_3^--N 形式存在, 这与上覆水体氧化条件较好有利于 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化有关, 而间隙水中的 DTN 则主要以 NH_4^+-N 形式存在, 这说明底部沉积物的还原性的条件对 NH_4^+-N 的生成有利, 同时有机质的分解作用也可以使 NH_4^+-N 再生^[34].

2.3.2 磷

图 6 表示的是沉积物-水系统中 $\rho(\text{DTP})$ 、 $\rho(\text{PO}_4^{3--}\text{P})$ 的分布. 从中可以看出, 空间上: 上覆水中的 $\rho(\text{DTP})$ 在干支流交汇处略高, 整体上沿程变化不明显; $\rho(\text{PO}_4^{3--}\text{P})$ 则在上游处最高, 从上游到河口沿程降低. 间隙水体中上游的 $\rho(\text{DTP})$ 高于中下游, 中下游至河口浓度变化不明显; $\rho(\text{PO}_4^{3--}\text{P})$ 沿程变化不明显, 从上游到河口几乎一致. 垂向上: 间隙水中 $\rho(\text{DTP})$ 略高于上覆水体, 各点位在垂向上几乎不随深度而改变, 间隙水中 $\rho(\text{PO}_4^{3--}\text{P})$ 略高于上覆水体, 在深度 8 cm 左右, $\rho(\text{PO}_4^{3--}\text{P})$ 的浓度不再随深度增加而递增.

2.4 沉积物-水系统营养盐源/汇关系

通过沉积物-水界面的不同形态氮磷的浓度梯度差异, 可以判断出界面两侧营养盐交换趋势和扩散方向, 梯度值越大, 迁移扩散的趋势就越显著. 表 4 表示的是沉积物-水系统氮磷营养盐源-汇趋势, 从中可以看出, 不同形态的氮磷营养盐在沉积物-水界面的扩散方向各不相同. 其中 DTN 和 NH_4^+-N 均表现为“源”, 而部分点位沉积物中的 NO_3^--N 则呈现为“汇”, 部分呈现为“源”. DTP 方面, 由于上覆水和间隙水中 $\rho(\text{DTP})$ 接近, 除 CJ 点位以外, 其他 4 个点位均表现为微弱的“源”的趋势; $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 的扩散规律与 DTP 略有不同, 除 CJ 采

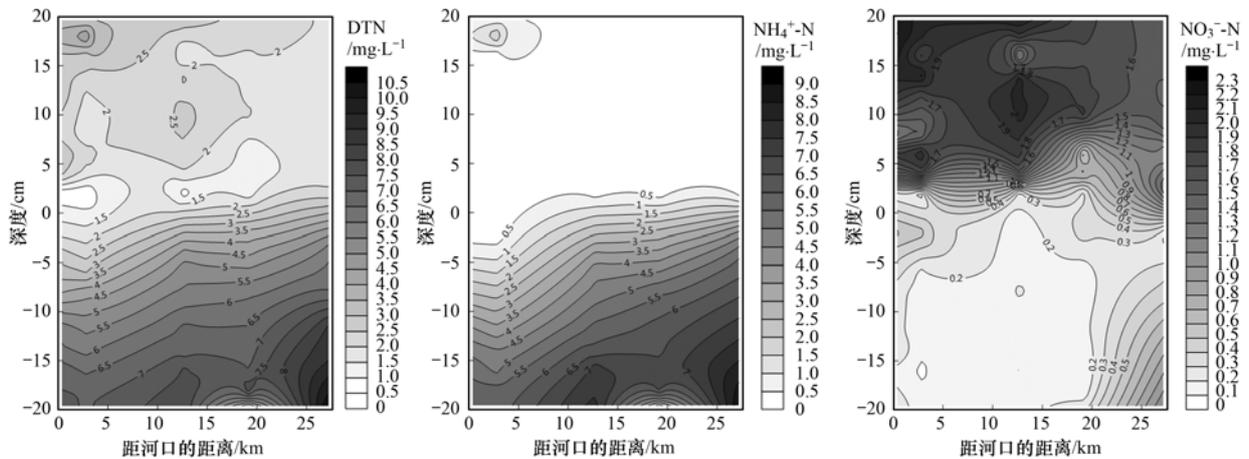


图 5 上覆水-间隙水中 $\rho(\text{DTN})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的分布

Fig. 5 Distribution of different nitrogen concentrations between interstitial water and overlying water

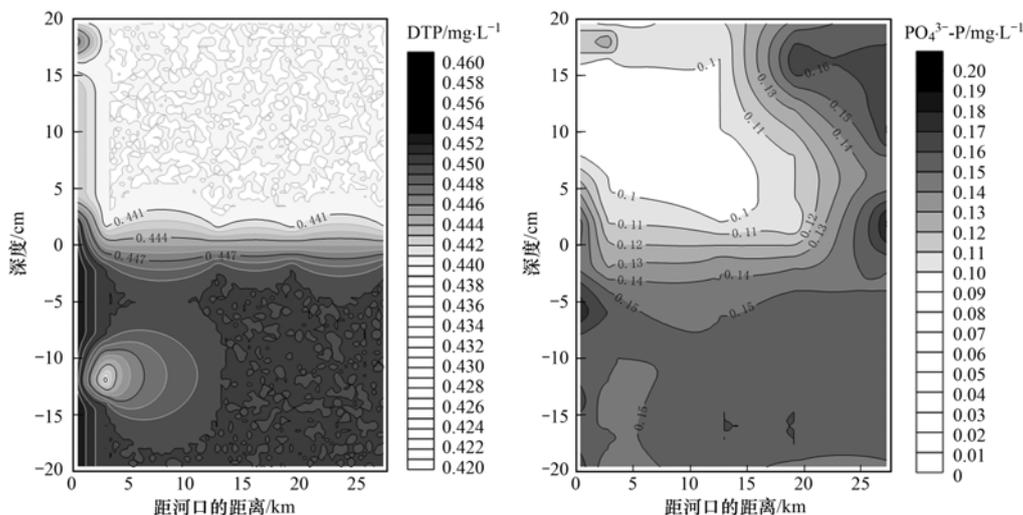
图 6 上覆水与间隙水中 $\rho(\text{DTP})$ 和 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 分布Fig. 6 Distribution of $\rho(\text{DTP})$ and $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ between overlying water and interstitial water表 2 上覆水间隙水氮磷营养盐源-汇趋势¹⁾

Table 2 Trend of nutrient source-sink between interstitial and overlying water

指标	研究对象	各样点营养盐浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				
		CJ 采样点	1 号采样点	2 号采样点	3 号采样点	4 号采样点
DTN	上覆水	0.65	0.52	0.77	1.22	2.19
	间隙水	1.86	1.68	3.54	3.68	4.87
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	上覆水	0.16	0.11	0.27	0.21	0.11
	间隙水	0.19	0.15	2.38	2.67	4.24
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	上覆水	0.23	0.15	0.25	0.27	1.54
	间隙水	0.64	0.54	0.12	0.36	0.17
DTP	上覆水	0.45	0.44	0.44	0.44	0.44
	间隙水	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	上覆水	0.16	0.11	0.10	0.10	0.19
	间隙水	0.15	0.13	0.14	0.14	0.15

1)“汇”表示沉积物吸收上覆水中的氮、磷营养盐物质,“源”表示沉积物中的间隙水释放氮、磷营养盐到上覆水

样点和 4 号采样点处呈现“汇”的特征外,其余点位均呈现“源”的特征。

3 讨论

3.1 不同采样点聚类分析

由于沉积物-水系统的氮磷的赋存和释放常受到水环境的影响,上覆水温度、 $\rho(\text{DO})$ ^[35]、扰动^[36]、 pH ^[37]等环境因子都会影响沉积物-水系统中营养物质的释放,为了进一步探明香溪河水环境对沉积物-水系统营养盐分布的影响,本研究采用分层聚类法^[38]分别对各个点位的沉积物-水系统营

养盐进行分析。

图 7 表示的采样点的聚类分析结果,对比其可以发现对于沉积物体系,分为 2 类;第 1 类包括 CJ 采样点、1 号和 2 号采样点,第 2 类包括 3 号和 4 号采样点;而对于上覆水体系,分为了 3 类,第 1 类包括 3 号点和 4 号采样点,第 2 类包括 1 号点、2 号点,第 3 类包括 CJ 采样点。由于蓄水期干流水体通常分别以不同的倒灌方式进入干流,正是由于倒灌方式和深度的不同导致了底部水环境的差异,由于上覆水体受到的影响更为直接,故上覆水体的聚类分析结果更为分散,将 CJ 采样点和 1 号、2 号采

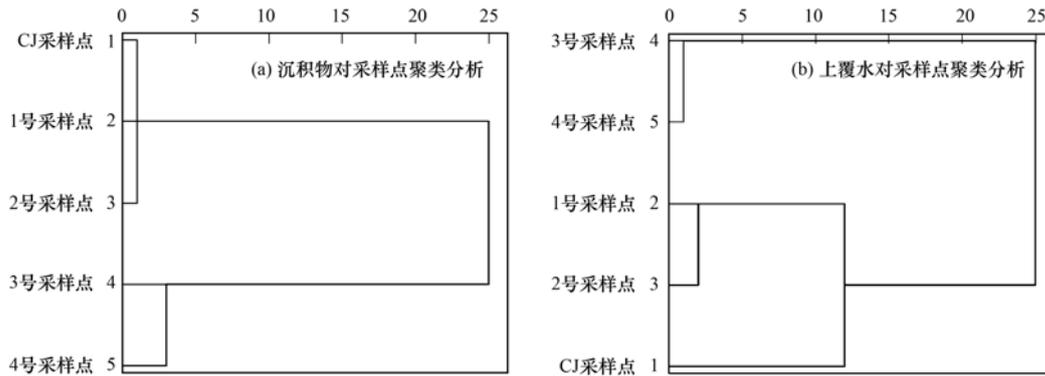


图7 采样点聚类分析

Fig. 7 Dendrogram for sampling sites

样点又分为了2类。

3.2 蓄水期沉积物-水系统营养盐分布影响因素分析

三峡水库蓄水以后, 长江干流断面平均流速由原来的 $2.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到 $0.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而支流库湾的流速则由蓄水前的 $1.00 \sim 3.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到 $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 处于准静止状态, 有研究者认为支流库湾水体滞留时间较大, 属于典型的湖泊型水体^[39]。然而, 作者所在课题组针对香溪河的监测发现, 无论是水库供水、水位降落期、水位上升期, 长江干流水体分别会通过底层、中层、表层倒灌入香溪河库湾, 而上游来流则主要从库湾底层流向水库干流^[40]。研究期间发现, 尽管蓄水期水位上升迅速, 但底部水体仍然具有较好的氧化条件, 上覆水体中的 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 高于 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$, 说明沉积物-水系统的硝化速率大于反硝化速率。同时蓄水期干流水体的倒灌也会对库湾的营养盐存在补给作用, 上覆水体中 $\rho(\text{DTN})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 均在干支流交汇处最大, 但由于蓄水期干流潜入深度和方式的不同, 从而对整个河段的影响大不相同, 沿河口至上游, 倒灌对这个库湾的补给逐渐减小^[41]。同时聚类分析的结果也证明了这一点, 对沉积物-水系统中营养盐的分布上, 在 CJ、1号、2号采样点较为接近为一类, 3号和4号采样点则为另一类, 但由于由于上覆水体中营养盐的分布受到的影响更为直接, 故结果较为分散。

3.3 蓄水期水环境对沉积物-水系统营养盐源/汇的影响机制分析

研究期间, 沉积物中的 DTN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DTP (除 CJ 点位外) 均表现为“源”。其中间隙水中的 $\rho(\text{DTN})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 $\rho(\text{DTP})$ 分别是上覆水浓度的 3.184、31.57、1.02 倍, 说明 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的扩散趋势最大, 其次是 DTN 和 DTP。上覆水体中的 DTN 则

以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主, $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 与 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 比值为: 2.38 ~ 4.13, 说明上覆水体处于氧化状态, 氧化程度高, 硝化作用强烈, 这与蓄水期底部水体 DO 的含量高一致。但底部的氧化环境对沉积物磷的释放有一定的抑制作用, 加之蓄水期水位上升, 两岸的消落带被淹没, 导致大量的颗粒物在水体悬浮、沉降, 因此间隙水中的 DTP 因再悬浮等迅速释放到水体, 使得间隙水-上覆水中 DTP 含量接近。

沉积物中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 则是一部分点位呈现为“源”, 一部分点位呈现为“汇”。同样沉积物中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的“源/汇”比 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的更为明显, 其中 2号、4号采样点表现为“汇”, 其原因可能是: 一方面与沉积物-水界面 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 强烈地向上释放有关; 另一方面与采样点的水环境易受到周边环境的影响有关, 2号采样点靠近集镇, 受到人为干扰较大, 而 4号采样点则位于上游, 由于上游支流存在一定的面源污染^[42], 加之 4号点底部的含氧量最高, 温度最低, 具有较好的硝化反应条件, 故导致 4号采样点处上覆水体 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 含量最高。在 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的分布上, CJ 和 4号采样点呈现为“汇”, 其中 CJ 间隙水和上覆水中 $\rho(\text{PO}_4^{3-} - \text{P})$ 比较接近, 分别为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而 4号点的间隙水和上覆水中的 $\rho(\text{PO}_4^{3-} - \text{P})$ 分别为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这可能是: 一方面由于底部的氧化环境不利于磷素的释放, 另一方面 4号点有着丰富的氮磷营养盐来源^[42], 进而导致了该点位沉积物在 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的“源/汇”关系上具有一定的特殊性。

4 结论

(1) 蓄水期香溪河 $\rho(\text{DO})$ 呈现中间高两头低的分布特征, $\rho(\text{DO})$ 变化范围为 $6.84 \sim 7.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $7.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 研究期间沉积物-水界面均

处于好氧状态; 温度从上游到下游呈逐渐升高, 变化范围为 14.04 ~ 21.55℃; pH 从上游到河口下游总体上缓慢降低, 上覆水 pH 变化范围为 8.78 ~ 8.97, 平均值为 8.91, 呈弱碱性。

(2) 沉积物中 $\rho(\text{TN})$ 的平均含量分别为 727.53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 占 TN 的比例分别为 22.33% 和 9.56%。其中 $\rho(\text{TN})$ 呈现两头略高中间略低的分布特征, $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 沿程变化不明显, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 则是从上游到河口逐渐降低。沉积物中 $\rho(\text{TP})$ 平均含量为 1922.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, NaOH-P 、 HCl-P 和 OP 分别占 TP 的 10.85%、71.27%、17.88%, 主要以 HCl-P 为主, 从干支流交汇处到上游, 沉积物的 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{NaOH-P})$ 、 $\rho(\text{HCl-P})$ 均呈现逐渐升高的分布特征。 $\rho(\text{O.M.})$ 的含量范围为 0.6% ~ 1.7%, 在深度 10cm 的范围内 5 个采样点位的沉积物有机质含量均超过了污染临界点, 存在污染释放的风险, 需引起重视。

(3) 上覆水的分布上, $\rho(\text{DTN})$ 、 $\rho(\text{DTP})$ 的变化范围分别为: 0.52 ~ 4.46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中 $\rho(\text{DTN})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 均在干支流交汇处最大, 且 $\rho(\text{DTN})$ 从河口至上游沿程递减, $\rho(\text{DTP})$ 沿程变化不大, 而间隙水中 $\rho(\text{DTN})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 的分布和上覆水体相反, 在上游处最大, 并从上游向河口处递减。

(4) 研究期间 5 个采样点位的 DTN、 NH_4^+-N 和 DTP (除 CJ 点位外) 均以“源”的方式向上覆水释放营养盐, 而 NO_3^--N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 则是一部分点位呈现为“源”, 一部分点位呈现为“汇”。且氮素的“源/汇”过程较磷素更为强烈, 这是因为蓄水期底部的氧化环境和干流水体的倒灌潜入深度和方式差异所致, 与聚类分析结果一致。

致谢: 黄佳维、黄亚男、王雄、吴庆、吕林鹏、徐慧等在采样和实验方面提供帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 刘德富, 黄钰铃, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 中国环境监测总站. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2004-2015. China National Environmental Monitoring Centre. Bulletin of ecological and environmental monitoring of the Three Gorges Project of the Yangtze River [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection the People's Republic of China, 2004-2015.
- [3] 姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾冬季甲藻水华生消机理初探[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 645-651.
- [4] Yao X J, Liu D F, Yang Z J, et al. Preliminary studies on the mechanism of winter dinoflagellate bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(6): 645-651.
- [5] 李媛, 刘德富, 孔松, 等. 三峡水库蓄泄水过程对香溪河库湾水华影响的对比分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 1882-1893.
- [6] Li Y, Liu D F, Kong S, et al. Comparative analysis of the impact of discharging and impounding process of Three Gorges Reservoir on the algal bloom in the Xiangxi Bay [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(8): 1882-1893.
- [7] 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, 21(9): 49-52.
- [8] Li J X, Liao W G. An analysis on the possibilities of eutrophication in the Three Gorges Reservoir [J]. Science & Technology Review, 2003, 21(9): 49-52.
- [9] 李崇明, 黄真理. 三峡水库入库污染负荷研究(I)——蓄水前污染负荷现状[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 611-622.
- [10] Li C M, Huang Z L. Study on the pollutant loads into Three Gorges Reservoir (I)——pollutant load status before impoundment [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5): 611-622.
- [11] 郑丙辉, 王丽婧, 龚斌. 三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 125-131.
- [12] Zheng B H, Wang L J, Gong B. Load of non-point source pollutants from upstream rivers into Three Gorges reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 125-131.
- [13] 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.
- [14] Zhang Y, Liu D F, Ji D B, et al. Effects of intrusions from Three Gorges Reservoir on nutrient supply to Xiangxi Bay [J]. Environmental Science, 2012, 33(8): 2621-2627.
- [15] 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.
- [16] Chen Y Y, Liu D F, Yang Z J, et al. The impacts of the stratified density currents on supply pattern of main nutrients in Xiangxi River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3): 762-770.
- [17] 王雨春, 此里能布, 马根连, 等. 洱海沉积物磷的化学赋存形态研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 150-154.
- [18] Wang Y C, Cili N B, Ma G L, et al. Study on chemical characteristics of phosphorus in sediment of Erhai Lake [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, 3(2): 150-154.
- [19] 王一茹, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2336-2344.
- [20] Wang Y R, Wang S R, Jiao L X, et al. Temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment porewater and overlying water of Dianchi Caohai Lake [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2336-2344.
- [21] 胡俊, 刘永定, 刘剑彤. 滇池沉积物间隙水中氮、磷形态及相关性的研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(10): 1391-

- 1396.
- Hu J, Liu Y D, Liu J T. Studying on the form and the relativity of nitrogen and phosphorus in the pore water of sediment in Dianchi Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25** (10): 1391-1396.
- [13] 王立群, 戴雪荣, 华路, 等. 安徽龙河口水库沉积物碳、氮、磷地球化学记录及其环境意义[J]. *海洋湖沼通报*, 2007, (4): 59-64.
- Wang L Q, Dai X R, Hua L, *et al.* The geochemical records of C-N-P and enviromental implications in recent sediments of Longhekou Lake[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007, (4): 59-64.
- [14] 冉祥滨. 三峡水库营养盐分布特征与滞留效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- Ran X B. Nutrient distributions and retention of the Three Gorges Reservoir[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [15] 高飞, 张旭. 三峡库区澎溪河水体和沉积物中磷的形态分布[J]. *华中农业大学学报*, 2016, **35**(3): 72-76.
- Gao F, Zhang X. Chemical forms of phosphorus in the water and sediment from Pengxi River in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2016, **35**(3): 72-76.
- [16] 张永生, 李海英, 任家盈, 等. 三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- Zhang Y S, Li H Y, Ren J Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of nutrients in daning river sediments and their correlations with chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- [17] 王静, 刘洪杰, 雷禹, 等. 三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 946-953.
- Wang J, Liu H J, Lei Y, *et al.* Nitrification and denitrification rates in a small tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam reservoir during water collection and release events [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 946-953.
- [18] 潘婷婷, 赵雪, 袁轶君, 等. 三峡水库沉积物不同赋存形态磷的时空分布[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2968-2973.
- Pan T T, Zhao X, Yuan Y J, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of different phosphorus forms in sediments from the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2968-2973.
- [19] 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.
- Niu F X, Xiao S B, Wang Y C, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment phosphorous in the Three Gorges Reservoir during late autumn and early winter[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1308-1314.
- [20] 罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 等. 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- Luo Y H, Nie X Q, Li X L, *et al.* Distribution and emission flux estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi River[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- [21] 李欣, 纪道斌, 宋林旭, 等. 香溪河沉积物-水界面的营养盐交换特征[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(8): 1212-1220.
- Li X, Ji D B, Song L X, *et al.* Characteristics of nutrient exchange at the sediment-water interface in Xiangxi Bay [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(8): 1212-1220.
- [22] 张敏, 徐耀阳, 邵美玲, 等. 三峡水库香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量的时空分布[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(11): 2799-2805.
- Zhang M, Xu Y Y, Shao M L, *et al.* Spatiotemporal distribution of total nitrogen and total phosphorus in sediments of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(11): 2799-2805.
- [23] 韩霜, 王欢, 蔡庆华, 等. 香溪河库湾春季水华期间悬浮颗粒物粒度动态的初步研究[J]. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 123-125.
- Han S, Wang H, Cai Q H, *et al.* Size distribution of suspended particulate matter in Xiangxi Bay of Three Gorges reservoir during an algal bloom in spring [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 123-125.
- [24] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(1): 141-144.
- Tang T, Li D F, Pan W B, *et al.* River continuum characteristics of Xiangxi River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 141-144.
- [25] 雒文生, 谈戈. 三峡水库香溪河库湾水质预测[J]. *水电能源科学*, 2000, **18**(4): 46-48.
- Luo W S, Tan G. Three Gorges Reservoir Xiangxihe Bay water quality prognosis [J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2000, **18**(4): 46-48.
- [26] 姜霞, 王书航. 沉积物质量调查评估手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [28] 王颖, 沈珍瑶, 呼丽娟, 等. 三峡水库主要支流沉积物的磷吸附/释放特性[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1654-1661.
- Wang Y, Shen Z Y, Hu L J, *et al.* Adsorption and release of phosphorus from sediments from the main branches of the Three-Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2008, **28**(8): 1654-1661.
- [29] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 381-388.
- Zhu G W, Qin B Q, Gao G, *et al.* Fractionation of phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(3): 381-388.
- [30] 张彬, 方芳, 陈猷鹏, 等. 三峡水库消落区土壤理化特征及磷赋存形态研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 713-720.
- Zhang B, Fang F, Chen Y P, *et al.* Phosphorus speciation and physical-chemical characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central district of Three Gorges Reservoir area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(3): 713-720.
- [31] 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 等. 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5020-5031.
- Zhuo H H, Qiu G S, Zhai W Y, *et al.* Evaluation of temporal

- and spatial variation characteristics of nutrients in surface sediment in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5020-5031.
- [32] 封丽, 李崇明, 张韵, 等. 三峡水库运行期支流沉积物营养盐污染评价[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(12): 151-157. Feng L, Li C M, Zhang Y, *et al.* Nutrients distribution and pollution evaluation for top-layer sediments in tributaries of Three Gorges Reservoir during water storage period[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, **38**(12): 151-157.
- [33] 林茂. 三峡库区消落区沉积物中磷和有机质分布及其相互影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. Lin M. Distribution and influence between phosphorous and organic matter in soil/sediment of fluctuating zone in Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Chongqing university, 2010.
- [34] 冯峰, 方涛, 刘剑彤. 武汉东湖沉积物氮磷形态垂向分布研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1078-1082. Feng F, Fang T, Liu J T. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediments of Lake Donghu[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(6): 1078-1082.
- [35] Liikanen A, Murtoniemi T, Tanskanen H, *et al.* Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake[J]. *Biogeochemistry*, 2010, **59**(3): 269-286.
- [36] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(7): 958-962.
- [37] Jensen H S, Andersen F O. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(3): 577-589.
- [38] 陈胜可. SPSS 统计分析从入门到精通[M]. (第二版). 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [39] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮, 等. 三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J]. *水资源保护*, 2005, **21**(6): 23-26. Zhang Y, Zheng B H, Liu H L, *et al.* Characters of nitrogen and phosphorus of the Three Gorges Reservoir after impounding[J]. *Water Resources Protection*, 2005, **21**(6): 23-26.
- [40] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库 172.5m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, **40**(4): 358-369. 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 Technical Science*, 2010, **53**(4): 1114-1125.
- [41] 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: 物理学 力学 天文学*, 2010, **40**(1): 101-112. Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. *Scientia Sinica (Physics, Mechanics, Astronomy)*, 2010, **40**(1): 101-112.
- [42] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区香溪河非点源氮磷负荷模拟[J]. *环境科学学报*, **33**(1): 267-275. Song L X, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Study on non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir area based on SWAT[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 267-275.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM _{2.5}) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM _{2.5} in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM _{2.5} in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe ₂ O ₄ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N ₂ O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO ₂ and N ₂ O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO ₂ Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM _{2.5} Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)