

# 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<sub>2.5</sub>)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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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)

两种沉水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N<sub>2</sub>O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CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O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CO<sub>2</sub>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<sub>2.5</sub>健康效应 ..... 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)

中国PM<sub>2.5</sub>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)

# 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

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

**摘要:** 为分析澜沧江梯级水库建设对澜沧江流域沉积物-水界面交换过程的影响, 于 2016 年 2~3 月对澜沧江云南段间隙水-上覆水氮、磷营养盐进行了调查与分析. 结果表明, 澜沧江自然河道沉积物间隙水总氮(TN)均值为  $15.254 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 显著高于水库均值  $6.577 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 但其总磷(TP)均值为  $0.654 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 低于水库区域的  $1.432 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 澜沧江流域沉积物间隙水氮、磷浓度均高于上覆水浓度, 上覆水-间隙水垂向 TN 浓度在表层沉积物处达到最大值, 且自然河道总溶解氮(DTN)扩散通量均值为  $2.117 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ , 高于水库的均值  $0.785 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ; 但其总溶解磷(DTP)扩散通量为  $0.044 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ , 低于水库的均值  $0.053 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ , 上覆水氮盐主要来源于沉积物间隙水. 澜沧江梯级水库建设导致的沉积物组成差异与水体扰动差异是间隙水-上覆水界面交换差异的主要原因.

**关键词:** 澜沧江; 沉积物-水体界面; 扩散通量; 营养盐; 空间分布

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2126-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201709054

## 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\*, LIU De-fu, XU Ya-qian

(Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** A field survey was carried out to investigate the diffusive fluxes of nitrogen and phosphorus from sediment in the natural river areas and cascaded reservoirs in the Lancang River Basin from February through March in 2017. In the natural river areas, the mean value of total nitrogen (TN) concentrations in the sediment pore water was about  $15.254 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and the total phosphorus (TP) was only  $0.654 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; while in the reservoirs, the mean value of TN and TP were  $6.577 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $1.432 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. Both nutrients in the overlying water were less than that in the sediment pore water. The mean diffusive flux of total dissolved nitrogen (DTN) was almost  $2.117 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$  in the natural river areas, and the mean value of total dissolved phosphorus (DTP) was  $0.044 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ , while the mean value of DTN and DTP were  $0.785 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$  and  $0.053 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$  in the reservoirs, respectively. The TN content reaches the maximum in the overlying water-interstitial water vertical surface sediments. It was concluded that cascaded hydropower had greatly changed the nutrient exchange between the sediment and overlying water. Different hydrodynamics and varied chemical environments in the sediment could be additional causes.

**Key words:** Lancang River; sediment-water interface; diffusion flux; nutrients; space distribution

澜沧江流域因水电资源丰富被列为国家重点水电开发基地,并在其中下游规划开发 15 个梯级水电站.目前,澜沧江干流已经建成投运 7 级电站,从上到下依次为苗尾、功果桥、小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡、景洪等<sup>[1]</sup>.水库建设破坏了河流纵向连续性,改变了其原来的水文循环,对流域及下游生态环境产生重要影响.作为国际河流,如何确定梯级水库建设对流域及下游生源物质迁移转化规律的影响已成为澜沧江亟待解决的问题.

沉积物作为河流冲淤的直接对象,对水流改变响应最为敏感,同时也是河流及水库生源物质交换与转换的重要载体,深入认识沉积物在自然河流-水库之间的分布特征及其差异对认识梯级水库建设

的累积效应具有重要作用.近年来,部分学者针对澜沧江水库的沉积物已开展了一些研究工作,有大量学者研究澜沧江沉积物重金属形态分布以及污染评价<sup>[2,3]</sup>,Fu 等<sup>[4]</sup>定量研究了澜沧江漫湾大坝引起的沉积物淤积规律,傅开道等<sup>[5]</sup>研究澜沧江流域环境变化的粒度响应.但是这些工作均未从流域层面来分析梯级水库与自然河道沉积物-水界面物质交换特征及差异,本文主要研究了澜沧江流域沉积物

收稿日期: 2017-09-06; 修订日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(91647207, 51509086); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402204, 2016YFC0401702)

作者简介: 望雪(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为生态水文学, E-mail: kazuwx@126.com

\* 通信作者, E-mail: Yangjian198422@163.com

间隙水空间分布规律，并分析了水库和自然河道沉积物-水界面营养盐扩散通量差异及影响因素，以期为确定澜沧江梯级水库对流域营养盐的累积影响提供支撑。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域与样点设置

澜沧江-湄公河是发源于我国境内的著名国际河流，发源地位于青藏高原唐古拉山，北部与长江上源通天河相邻，其分水岭为唐古拉山脉。全长约4 900 km，总落差约为5 000 m，流域面积  $16.46 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 1)。澜沧江流经西藏进入云南，青藏高原的唐古拉山脉北麓至昌都为源头段，昌都至功果桥段为上游段，功果桥至景临桥河段为中游段，景临桥之下至流出国境均为下游段，后于云南南部的西双版纳傣族自治州流出国境<sup>[6]</sup>。出境后称湄公河，再经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨、越南注入南海。

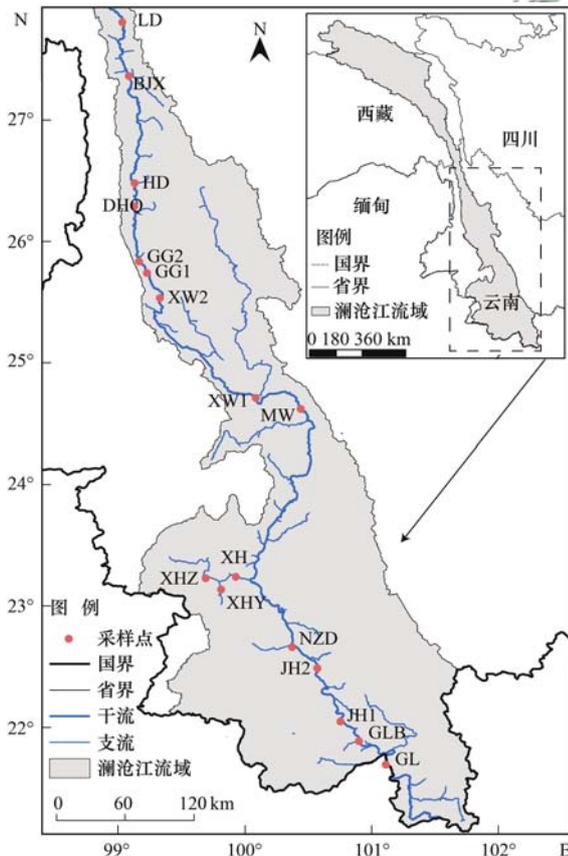


图 1 澜沧江流域及沉积物采样点分布

Fig. 1 Distribution map of sediment sampling sites in the Lancang River Basin

为分析澜沧江中下游沉积物空间分布特征及其在自然河流-梯级水库之间的差异，自上而下从与

西藏接壤的维西县至与缅甸接壤的勐腊县分别设置 14 个监测点，记为：里底、白济汛、黄登、大华桥、功果桥坝 1~2、小湾坝 1-2、漫湾坝、糯扎渡、景洪坝 1~2、橄榄坝和关累；在糯扎渡库区小黑江及其来流分别设置 3 个点，记为小黑江、小黑江左支和小黑江右支。各监测点具体特征如表 1 所示。

#### 1.2 采样与分析方法

##### 1.2.1 样品采集方法

本研究采用中国水利水电科学研究院水环境研究所研发柱状采泥器 ( $\phi 60 \times 1\,000 \text{ mm}$ ) 在样点中采集 0~20 cm 沉积物样品以及 0~20 cm 上覆水，采泥器原理为依靠自身重力垂直采集沉积物样品，在水深较大的库区内采用在采泥器两端平行添加配重的方式增加其自身重力。在采泥管彻底捕获沉积物后垂直提升采泥器到甲板上进行取样，为避免上覆水和沉积物自身或相互扰动，取样时垂直放置采泥管，用 50 mL 注射器配置橡胶软管分层吸取上覆水，用活塞缓慢地、均匀地将底泥顶出，沉积物与上覆水按照 0~2、2~5、5~10、10~15、15~20 cm 进行现场分层如(图 2)。沉积物用干净聚乙烯自封袋密封保存，排尽袋中的空气，上覆水立即装入 300 mL 聚乙烯采样瓶，4℃ 密封保存后带回实验室。自然河道与库区内流速均使用 Vector 点式流速仪(挪威)现场测定，保存数据之后回室内分析。

##### 1.2.2 分析测试方法

采集的泥样立即由中科院南京土壤研究所研发 QX-6530 便捷式氧化还原电位仪测得 Eh 值。沉积物样品分为两份，一份经由设备号为 TDZ5-WS 台式多管架自动平衡离心机，以  $3\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 10 min 分离得泥样和间隙水。因间隙水与上覆水含量较少，为避免误差故稀释 10 倍，上覆水和间隙水样品需经孔径为  $0.45 \mu\text{m}$  的玻璃纤维滤膜(Whatman

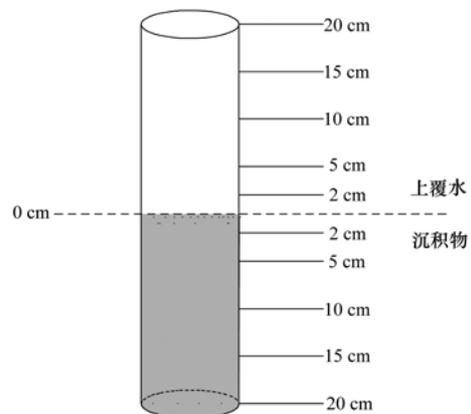


图 2 沉积物-水界面分层示意

Fig. 2 Sediment-water interface stratification diagram

表 1 澜沧江沉积物采样点特征统计表

Table 1 Statistics for the characteristics of the sediment sampling sites in the Lancang River

序号	名称	简称	所属县城	特征	分类(云南省内)	水深/m	流速/ $m \cdot s^{-1}$	
1	里底	LD	迪庆州维西县巴迪乡	自然河道	上游河流	0.61	0.263	
2	白济汛	BJX	迪庆州维西县白济汛乡	自然河道		0.56	0.319	
3	黄登	HD	云南省兰坪县	自然河道		0.71	0.134	
4	大华桥	DHQ	云南省兰坪县兔峨乡	自然河道		0.76	0.033	
5	功果桥坝 2	GG2	云南省云龙县	功果桥库尾	中游水库	11.18	0.063	
6	功果桥坝 1	GG1	云南省云龙县	功果桥库首		26.32	0.078	
7	小湾坝 2	XW2	云南省凤庆县小湾镇	小湾库尾		45.35	0.097	
8	小湾坝 1	XW1	云南省凤庆县小湾镇	小湾库首		105.46	0.147	
9	漫湾坝	MW	云南省云县漫湾镇	水库		42.21	0.126	
10	糯扎渡	NZD	云南省普洱市	水库		122.05	0.046	
11	景洪坝 2	JH2	云南省普洱市	景洪库尾		11.13	0.059	
12	景洪坝 1	JH1	云南省西双版纳景洪市	景洪库首		56.12	0.038	
13	橄榄坝	GLB	云南省景洪市勐罕镇	自然河道		下游河流	0.25	0.408
14	关累	GL	云南省景洪市关累镇	自然河道			0.32	0.554
15	小黑江	XH	云南省澜沧县	小黑江库湾	支流	53.78	0.140	
16	小黑江左支	XHZ	云南省澜沧县	自然河流		0.42	0.142	
17	小黑江右支	XHY	云南省澜沧县	自然河流		0.36	0.267	

GF/C) 过滤, 稀释后营养盐总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)含量按文献[7]中紫外分光光度法测得. 另一份按照 CJ/T 221-2005《城市污水处理厂污泥检验方法》测得沉积物含水率.

### 1.2.3 数据处理

沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量可以通过 Fick 第一定律<sup>[8,9]</sup>估算得到:

$$F = \Phi \cdot D \frac{\partial C}{\partial Z} \Big|_{z=0}$$

式中,  $F$  为沉积物与水界面的扩散通量 [ $mg \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ ];  $\Phi$  代表沉积物的孔隙率(%);  $D$  代表实际营养盐扩散系数 ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ );  $\partial C/\partial Z$  表沉积物与水界面的浓度梯度 ( $mg \cdot m^{-4}$ ), 此处采用沉积物 0~5 cm 间隙水与 0~5 cm 上覆水营养盐与深度拟合指数曲线求导而得; 在实际工作中  $D$  通常根据稀溶液中溶质的  $D_0$  ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ ) 和孔隙度来推导. 孔隙度采用沉积物中含水率(%) 计算确定<sup>[10]</sup>.

$$D = \Phi D_0, \Phi \leq 0.7$$

$$D = \Phi^2 D_0, \Phi > 0.7$$

应用 Stokes-Einstein 方程对理想扩散系数进行温度效应校正:

$$\frac{D_1 \eta_1}{T_1} = \frac{D_2 \eta_2}{T_2}$$

式中,  $D_1$  为在参考温度下  $T_1$  (K) 和水黏性  $\eta_1$  时的扩散系数, 在此参考温度为 25°C.  $D_2$  为实地采样时的水温  $T_2$  (K) 和水黏性  $\eta_2$  时的扩散系数. 水黏

性与水温之间的相互关系, 可由以下公式表达:

$$\lg \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{1.37023 \times (t_2 - t_1) + 8.36 \times 10^{-4} (t_2 - t_1)^2}{109 + t_2}$$

式中,  $\eta$  表示沉积物水黏性,  $t$  为水温(°C). 修正时实地温度为近底层水温. 通过参考温度和实际所测温度来计算水黏性的变化, 从而对  $D_0$  进行修正<sup>[11]</sup>.

数据的正态分布, 方差齐性检验, 方差分析 (ANOVA) 均采用 SPSS 21.

## 2 结果与分析

### 2.1 间隙水营养盐沿程分布特性分析

澜沧江流域(云南)间隙水 TN 如图 3(a)所示, TN 的沿程分布明显, 上游自然河道里底-大华桥(LD-DHQ)变化范围为 12.57~33.33  $mg \cdot L^{-1}$ , 均值为 22.993  $mg \cdot L^{-1}$ , 最大值出现在黄登(HD)样点, 为 33.334  $mg \cdot L^{-1}$ ; 中游景洪库区-功果桥水库内(GG2-JH1)变化范围为 2.729~17.274  $mg \cdot L^{-1}$ , 均值为 6.577  $mg \cdot L^{-1}$ , 最大值出现在景洪坝 2(JH2), 为 17.274  $mg \cdot L^{-1}$ . 下游河道橄榄坝(GLB)和关累(GL)分为 2.274  $mg \cdot L^{-1}$  和 12.577  $mg \cdot L^{-1}$ ; 支流小黑江右支(XHY)为 18.941  $mg \cdot L^{-1}$ 、小黑江左支(XHZ) 11.062  $mg \cdot L^{-1}$ . 单因素方差分析表明: 自然河道与库区间隙水 TN 含量存在显著性差异 ( $P = 0.037$ ), 自然河道沉积物间隙水总氮含量显著高于库区内; 自然河道与支流之间无显著性差异 ( $P = 0.498$ ), 库区与支流之间无显著性差异 ( $P = 0.282$ ).

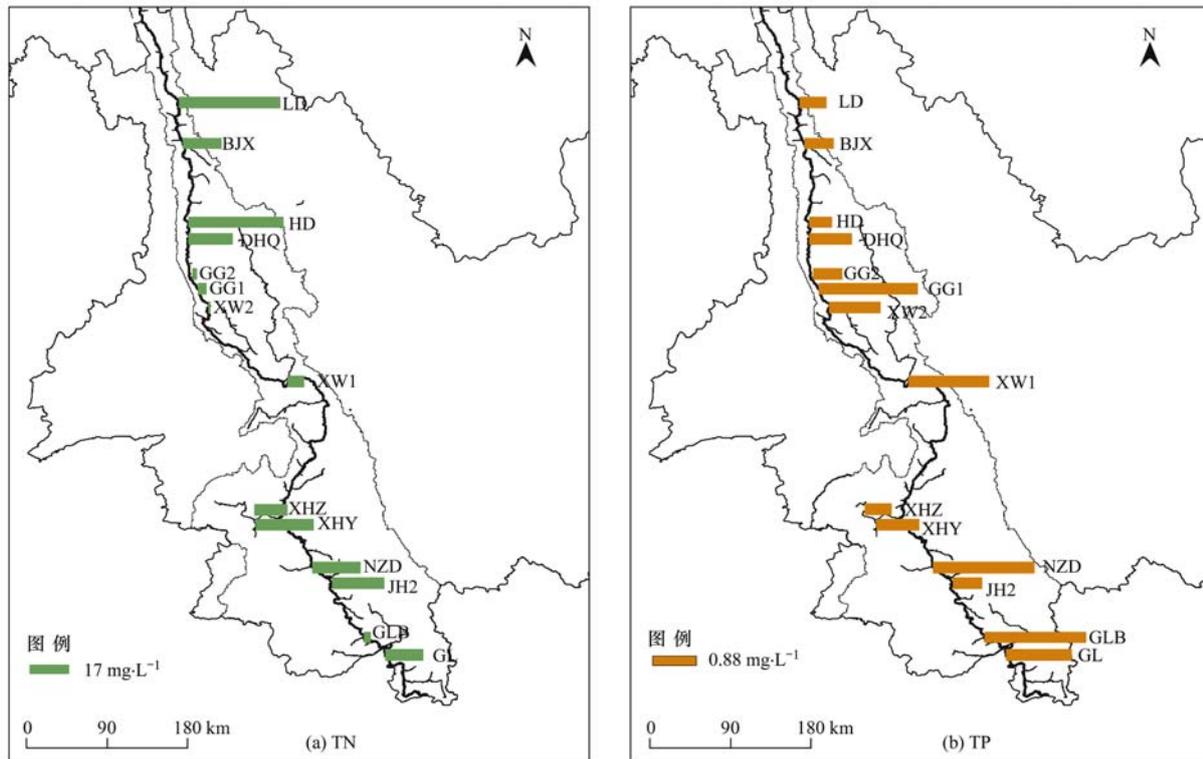


图3 间隙水营养盐沿程示意

Fig. 3 Distribution of nutrients in surface pore water

澜沧江中下游流域间隙水 TP 如图 3(b) 所示, 上游段自然河道内沉积物间隙水 TP 含量为  $0.39 \sim 0.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均值为  $0.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 中游段库区内间隙水 TP 含量为  $0.51 \sim 1.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均值为  $1.435 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 支流小黑江间隙水 TP 均值含量为  $0.527 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 单因素方差分析表明: 自然河道与库区间隙水 TP 含量存在显著性差异 ( $P = 0.034$ ), 自然河道与支流之间无显著性差异 ( $P = 0.995$ ), 库区与支流间隙水 TP 含量存在显著性差异 ( $P = 0.048$ ). 沉积物间隙水 TP 含量自然河道内低于库区, 干流自然河道与支流小黑江内无较大差别.

## 2.2 沉积物-水体界面氮磷营养盐的垂向分布

考虑采集样点众多, 在库区内选取景洪(表 1 中景洪坝 1, 下称景洪)与漫湾水库, 支流河道上选择小黑江, 自然河道内白济汛与关累等为代表性样点来阐述沉积物-水界面氮磷迁移转化规律. 白济汛样点位于上游维西县白济汛乡内, 而白济汛乡是澜沧江流入云南的第一个藏族自治州迪庆州境内农业人口第一大乡, 是州内澜沧江沿岸最大乡镇, 其人口密度较大, 受到人类活动影响较大, 澜沧江虽然支流众多, 但以非离子氨和总磷为主要污染物的支流是小黑江<sup>[12, 13]</sup>. 漫湾水电站作为澜沧江干流在云南境内规划的梯级电站中第一个修建投产的大

型水电站, 建库历史久, 库区内底泥沉积时间较长, 在一定条件下会成为污染物的释放源. 同时在漫湾电站建成后下游监测断面水质变化结果显示, 澜沧江下游氮磷污染主要集中在版纳水文站和勐罕渡口断面<sup>[14]</sup>, 这是因为自然景观带来了显著的经济效应的同时, 景洪城市生活污水、景洪橡胶厂有机废水等作为主要污染源<sup>[15]</sup> 也对环境产生了不可忽视的影响. 景洪水电站位于云南省西双版纳州州府景洪市北郊仅 5 km 处, 其库区内沉积物营养盐浓度作为水污染的敏感指标可反映人类活动对水环境的影响.

图 4 为景洪坝、漫湾坝、小黑江、白济汛和关累 TN 在间隙水-上覆水垂直剖面上的质量浓度分布. 从对比可以看出表层沉积物(0 ~ 5cm) 间隙水的 TN 含量远远高于上覆水, 这与管逢宇等<sup>[16, 17]</sup> 的结论一致. 各样点的 TN 浓度在上覆水垂向上无较大变化, 景洪坝上覆水均值  $\rho(\text{TN}) = 0.415 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TN}) = 5.721 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 漫湾坝上覆水均值  $\rho(\text{TN}) = 0.588 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TN}) = 5.001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 支流样点小黑江上覆水均值  $\rho(\text{TN}) = 0.379 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TN}) = 6.706 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 自然河道中白济汛上覆水均值  $\rho(\text{TN}) = 0.515 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TN}) =$

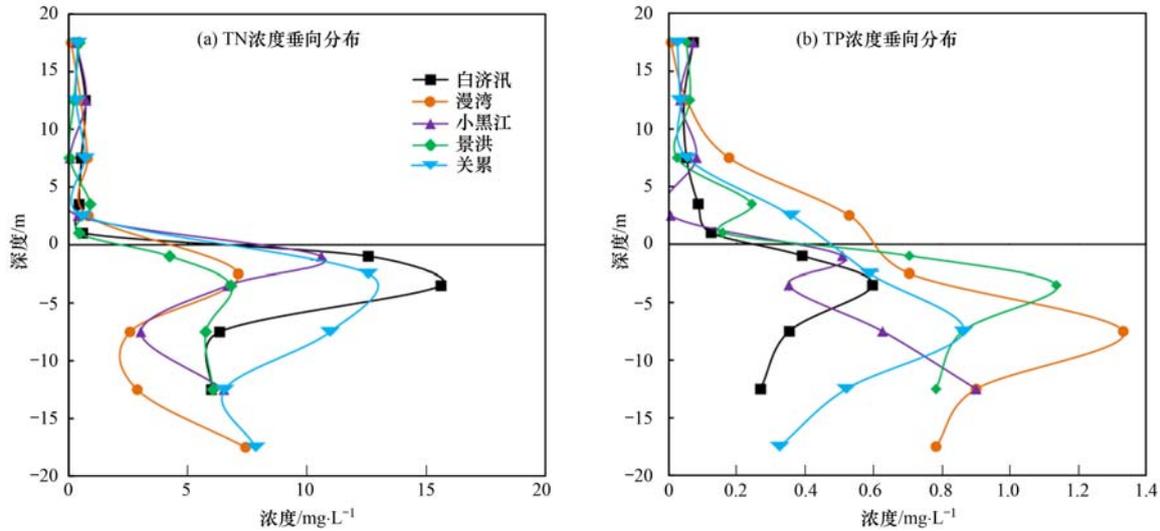


图4 代表性样点间隙水-上覆水中 TN、TP 浓度分布

Fig. 4 Water flow gap of heavenly stems and earthly branches overlying the water TN and TP concentration distribution

10.136  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 关累上覆水均值  $\rho(\text{TN}) = 0.371 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TN}) = 9.488 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 单因素方差分析结果显示:上覆水总氮含量在各样点之间均无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 且自然河道与库区相较也无显著性差异 ( $P = 0.819$ ); 间隙水总氮含量因不满足方差分析要求故采用非参数检验, 渐进显著性结果为 0.220, 大于 0.05, 表明间隙水总氮含量在各样点之间无显著性差异, 但自然河道与库区相较存在显著性差异 ( $P = 0.021$ ), 间隙水总氮含量自然河道内高于库区.

由图4可得出, 间隙水的 TP 浓度大于上覆水中 TP 浓度, 景洪坝上覆水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.109 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.873 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 漫湾坝上覆水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.192 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.931 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 小黑江上覆水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.049 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.598 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 白济汛上覆水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.077 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.404 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 关累

均值  $\rho(\text{TP}) = 0.119 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、间隙水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.532 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 库区内间隙水的 TP 含量随深度的增加有减小的趋势, 这与咎逢宇等结论相似<sup>[16, 17]</sup>. 上覆水各样点之间和自然河道与库区的总磷含量采用非参数检验分析, 渐进显著性为  $P = 0.861$  和  $P = 0.730$ , 说明均无显著性差异. 但间隙水总磷含量存在显著性差异, 其中白济汛与漫湾 ( $P = 0.004$ ), 白济汛与景洪 ( $P = 0.008$ ), 漫湾与小黑江 ( $P = 0.047$ ), 漫湾与关累 ( $P = 0.035$ ) 差异显著, 自然河道与库区之间分析结果表明存在显著性差异 ( $P = 0.003$ ), 并且库区内间隙水的总磷含量高于自然河道内.

### 2.3 间隙水-上覆水界面营养盐释放通量

由 2.2 节中沉积物-水体界面氮磷营养盐的垂向分布可看出, 各个采样点上覆水与沉积物间隙水中氮磷营养盐存在明显的浓度梯度, 在其作用下沉积物中的营养盐可能会由间隙水向上覆水扩散而进一步影响上层水体水质. 计算结果见表 2.

表2 间隙水与上覆水营养盐扩散通量

Table 2 Diffusive flux of total dissolved nutrients between sediment pore water and overlying water

指标	采样点	拟合曲线	$r$	$\Phi/\%$	$D_0 \times 10^{-6}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$D \times 10^{-6}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$F/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
DTN	白济汛	$y = 2.075e - 38.95x$	0.87	0.28	6.79	8.65	2.76
	漫湾	$y = 2.892.3e - 21.97x$	0.76	0.37	11.17	6.23	0.85
	小黑江	$y = 2.173.2e - 50.02x$	0.91	0.43	12.95	7.19	2.23
	景洪	$y = 1.231e - 32.18x$	0.80	0.38	14.21	6.36	0.72
	关累	$y = 2.173.2e - 50.02x$	0.88	0.29	14.71	7.94	1.36
DTP	白济汛	$y = 68.173e - 48.39x$	0.81	0.28	4.017	1.424	0.043
	漫湾	$y = 545.35e - 12.68x$	0.94	0.37	5.841	2.176	0.048
	小黑江	$y = 62.263e - 72.53x$	0.77	0.43	6.170	2.642	0.044
	景洪	$y = 295.34e - 24.1x$	0.78	0.38	6.396	2.465	0.058
	关累	$y = 55.254e - 68.52x$	0.85	0.29	5.524	2.985	0.033

Fick 第一定律表明, 当扩散通量为正值时代表营养盐从沉积物向上覆水扩散, 负值时表示营养盐由上覆水向沉积物扩散. 由表 2 可得出, DTN 与 DTP 在各采样点的通量均为正值, 即两者均主要是由沉积物向上覆水扩散. DTN 的扩散通量范围在  $0.72 \sim 2.23 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , 其中 DTN 的扩散通量均值在库区内为  $0.785 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , 在自然河道内为  $2.117 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ . DTP 的扩散通量范围在  $0.043 \sim 0.058 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , 其中 DTP 的扩散通量均值在库区内为  $0.053 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ , 在自然河道内为  $0.044 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ . 从趋势来看, DTN 在库区内的扩散通量小于自然河道白济汛、关累和支流小黑江, 而 DTP 在库区内的扩散通量大于自然河道白济汛、关累和支流小黑江.

### 3 讨论

#### 3.1 澜沧江流域间隙水营养盐空间差异分析

澜沧江流域自然河道沉积物间隙水总氮 TN 含量显著高于水库. 梯级水库内 TN 含量普遍较低, 由图 5 得出库区内水体流速小, 水体滞流性更强, 更新速度慢, 流动性差, 氮外源污染影响较小, 储存在沉积物中的氮盐易释放出来, 作为内源污染影响沉积物间隙水中 TN 含量. 而澜沧江上游流域的工业发展主要依靠矿产资源的开发与生产, 其中以兰坪县为主<sup>[18]</sup>. 澜沧江上游主要排污企业有 20 多家, 所有工矿企业污染源工业废水排放量为  $2.42 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 各工矿企业技术水平较低, 废水处理率不达标, 工业废水排放不符合地表水标准, 造成自然河道内工业污染物的排放量增加, 同时澜沧江上游农业人口占据 140 万总人口的绝大多数, TN 的排放量为  $449.06 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 以澜沧江最枯流量 ( $277.0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 估算, 其中氮排放量高达水环境容量的 4 倍<sup>[19]</sup>, 工业及农业生活污染是造成自然河道沉积物间隙水总氮 TN 含量较高的根本原因. 下游流域支流的 TN 含量高于干流处, 并且在出境口含量有明显增加, 其中最大值出现在关累. 这主要是因为关累样点位于西双版纳州勐罕镇内, 橡胶种植是西双版纳支柱产业, 橡胶林种植面积同有林地面积的比例已经达到了 27.06%, 橡胶林种植所施的化肥和农药随着雨水冲刷进入河流和天然橡胶加工废水的排放增加了河道中氮盐的负荷<sup>[20]</sup>. 经调查发现, 在小黑江支流存在不同情况的有机物污染, 主要的原因是小黑江流域规划了 7 级梯级电站<sup>[21]</sup>, 施工期产生的废污水, 以及因工程形成的集中城镇的生

活污水等增加了河道中的污染物排放量, 这是造成河流污染的主要原因<sup>[22]</sup>, 同时梯级开发使河道区间径流量减少, 河道对于污染水体的自净能力也会降低<sup>[23]</sup>. 另一方面河岸沿岸分布的工矿企业所排放的工业废水<sup>[24]</sup>, 农药和农膜的输入以及其有限的利用率也会对底质中氮磷累积产生一定的影响<sup>[25]</sup>. 而糯扎渡库区以及景洪库区作为小黑江下游的干流库区, 对于水体的氮磷元素具有明显的拦截效应, 导致糯扎渡和景洪水库间隙水 TN 含量较高.

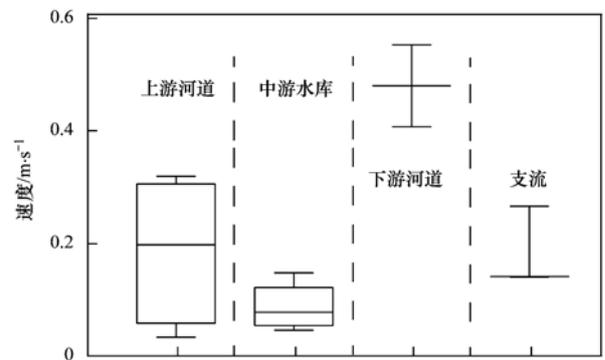


图 5 澜沧江流域流速分布示意

Fig. 5 Distribution map of flow velocity in the Lancang River Basin

沉积物间隙水 TP 含量自然河道内低于库区, 原因是水库内水体封闭性强, 流动性差, 营养盐的累积促使浮游藻类快速繁殖, 藻类光合作用将水体中的无机生源物质同化为有机质, 从而滞留在水库生态系统中, 外源的有机质及水库自生有机质颗粒的沉降导致磷在水库沉积物中的蓄积, 水库沉积物间隙水总磷 TP 含量高于自然河道沉积物间隙水总磷 TP 含量. 样点中 TP 含量大于均值的样点位于功果桥、小湾坝库区、橄榄坝和关累. 功果桥与小湾坝由于水库蓄水影响, 库区内水体环境相对稳定, 磷发生静沉降, 沉积物为水体中磷的“汇”, 所以 TP 的含量相对于自然河道较高<sup>[26]</sup>. 自然河道中橄榄样点周围人口众多, 其相邻的景洪市人口数接近 52 万, 其内还包含众多景点吸引游客无数, 生活污水与农耕带来的污染致使水体中的 TP 含量较高, 而粗砂质沉积物孔隙度大, 因而氧含量较高, 易生成氧化锰、氧化铁以及铁的磷酸盐, 形成了磷的高值区.

#### 3.2 间隙水与上覆水营养盐垂向分布分析

上覆水 TP 的浓度在干流的水库样点垂向从上至下有增大趋势, 说明磷盐在沉积物-水界面进行交换, 至使上覆水中接近沉积物-水界面处的 TP 浓度较上层水体大. 支流小黑江样点间隙水和上覆水

中 TP 含量均小于干流库区与自然河道内的 TP 浓度. 造成这种现象的原因是小黑江底泥沉积时间较短, 在采样时通过观察得到, 底泥气泡较多, 溶氧较高, 且有机质含量较少. 富氧时, 无机磷可被吸附在含 Fe 氧化物的沉积物中保存, 磷与 Fe(III) 结合, 以磷酸铁形式沉积<sup>[27]</sup>, 磷被吸附, 限制了磷盐向上覆水体扩散, 导致小黑江上覆水中 TP 含量较低<sup>[28]</sup>. 导致上覆水营养盐浓度远远低于间隙水浓度的原因复杂, 营养盐在沉积物与水体界面的交换受较多因素的影响, 例如浓度扩散、吸收、解吸、矿化溶解、底栖生物作用以及水动力条件等<sup>[29]</sup>.

间隙水中 TN 含量高于上覆水体, 由表 2 可得沉积物间隙水中的氮盐向上覆水体中扩散. TN 含量在上覆水-间隙水垂向上表层沉积物(0~5 cm)处达到最大值, 且随着深度的增加呈现“C”型分布趋势. 这是因为表层沉积物中存在大量的微生物<sup>[30]</sup>, 其剧烈活动导致有机质被降解释放大量的氮盐, 随着沉积物深度的增加, 厌氧条件加剧, 沉积物有机质不断被微生物矿化降解, 释放的无机氮盐进入间隙水中, 由间隙水向上覆水体扩散. 自然河道内白济汛与关累水深 2 m, 显著的风浪作用会加速水体交换, 表层沉积物溶氧量更高, 显著的硝化作用使得表层沉积物间隙水的无机盐氮含量更高.

### 3.3 间隙水-上覆水界面营养盐释放通量

DTN 在库区内的扩散通量小于自然河道白济汛、关累和支流小黑江, 而 DTP 在库区内的扩散通量大于自然河道白济汛、关累和支流小黑江. 影响沉积物-水界面交换通量的因素十分复杂, 除了受到间隙水与上覆水营养盐浓度差决定, 还受到 Eh、沉积物有机质 C/N、DO 含量、pH、底栖生物、水体扰动等因素的共同作用<sup>[31~33]</sup>.

自然河道白济汛、关累和支流小黑江样点 DTN 扩散通量高于漫湾和景洪库区, 这是因为自然河道内水深较浅, 由图 5 水动力条件对比可得, 自然河道内河流流速大, 说明白济汛与关累受到水体扰动的更大影响, 水体扰动会致使底泥发生起悬和掺混的运动, 而沉积物扰动致使吸附在底泥颗粒上的分子态氮在水流作用下再悬浮, 加速沉积物间隙水中氮扩散, 从而显著增加氮盐的扩散通量<sup>[34,35]</sup>. 沉积物环境(Eh)在 3 个样点中分布有较大差异, 其中库区内沉积物测得为还原性, 自然河道内沉积物为氧化性环境, DTP 在还原性环境有更大交换通量<sup>[36]</sup>. 许多研究表明在一定的条件下, 沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量可作为判断沉积物为水

体氮磷元素“源”与“汇”的评价标准, 由表 2 可得出澜沧江流域内沉积物为其上覆水体营养盐的“源”.

## 4 结论

(1) TN 含量沿程分布趋势为自然河道沉积物间隙水总氮 TN 含量均值为  $15.254 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 显著高于水库均值  $6.577 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 储存在沉积物中的营养盐作为内源污染影响沉积物间隙水中 TN 含量; 水库内磷发生静沉降、周围环境污染严重等导致 TP 含量较大.

(2) 沉积物间隙水的 TN 含量远高于上覆水, 上覆水均值  $\rho(\text{TN}) = 0.461 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 间隙水均值  $\rho(\text{TN}) = 5.806 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 上覆水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.117 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 间隙水均值  $\rho(\text{TP}) = 0.801 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . TN 的浓度在上覆水垂向无显著性差异, TP 的浓度在干流的水库样点垂向从上至下有增大趋势, 在支流上则有相反的减小趋势, 同时支流间隙水和上覆水中 TP 含量均小于干流的 TP 含量.

(3) 根据 Fick 第一定律的计算表明, DTN 与 DTP 在漫湾坝、景洪坝、自然河道白济汛和关累以及支流小黑江均为沉积物向底层水中扩散, 说明沉积物是底层水体营养盐的重要来源.

### 参考文献:

- [1] 郭有安, 周毅. 澜沧江中下游梯级电站发电与生态需水耦合优化研究[J]. 水力发电, 2017, 43(7): 92-95.  
Guo Y A, Zhou Y. Coupling research of power generation and ecological water requirement of cascade hydropower stations in the middle and lower reaches of Lancang River[J]. Water Power, 2017, 43(7): 92-95.
- [2] 张继来, 傅开道, 王波, 等. 澜沧江河床沉积物重金属污染评价[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1136-1144.  
Zhang J L, Fu K D, Wang B, et al. Assessment of heavy metal pollution of bed sediment in the Lancang River[J]. Progress in Geography, 2014, 33(8): 1136-1144.
- [3] 董世魁, 赵晨, 刘世梁, 等. 水坝建设影响下澜沧江中游沉积物重金属形态分析及污染指数研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 466-474.  
Dong S K, Zhao C, Liu S L, et al. Speciation and pollution of heavy metals in sediment from middle Lancang-Mekong River influenced by dams[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2): 466-474.
- [4] Fu K D, He D M, Lu X X. Sedimentation in the Manwan reservoir in the upper Mekong and its downstream impacts[J]. Quaternary International, 2008, 186(1): 91-99.
- [5] 傅开道, 杨文辉, 苏斌, 等. 流域环境变化的河流沉积物粒度响应——澜沧江案例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(9): 1148-1155.  
Fu K D, Yang W H, Su B, et al. Response of river sediments to basin environmental changes: a case study of the Lancang River

- [J]. *Progress in Geography*, 2015, **34**(9): 1148-1155.
- [6] 张继来. 澜沧江中下游水沙和鱼中重金属分布及其生态风险评价[D]. 昆明: 云南大学, 2015. 11-17.
- [7] 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. 525-644.
- [8] 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.
- [9] Li Y H, Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1974, **38**(5): 703-714.
- [10] Bolalek J, Graca B. Ammonia nitrogen at the water-sediment interface in Puck Bay (Baltic Sea)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, **43**(6): 767-779.
- [11] 刘巧梅. 长江口潮滩沉积物-水界面营养元素 N 的累积、迁移过程[D]. 上海: 华东师范大学, 2004. 25-29.
- [12] 支国强, 戴丽. 澜沧江流域环境状况及“十一五”水环境保护展望[J]. *环境科学导刊*, 2008, **27**(5): 31-34.  
Zhi G Q, Dai L. Environmental condition and Eleventh-Five-Year water environmental protection planning of Lancang River[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2008, **27**(5): 31-34.
- [13] 李丽娟. 澜沧江水环境质量评价与成因分析[J]. *地理学报*, 1999, **54**(S1): 127-132.  
Li L J. Water quality status assessment and causal analysis of Lancang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, **54**(S1): 127-132.
- [14] 张榆霞, 刘嘉麒, 王立前. 漫湾电站建成后澜沧江下游水质变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(4): 501-506.  
Zhang Y X, Liu J Q, Wang L Q. Changes in water quality in the downstream of Lancangjiang River after the construction of Manwan hydropower station[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **14**(4): 501-506.
- [15] 李海东. 西双版纳州水污染现状及防治对策[J]. *云南环境科学*, 2003, **22**(2): 45-46.  
Li H D. Water pollution situation and countermeasures in Xishuangbanna[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2003, **22**(2): 45-46.
- [16] 管逢宇, 霍守亮, 席北斗, 等. 巢湖近代沉积物及其间隙水中营养物的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(10): 2088-2096.  
Zan F Y, Huo S L, Xi B D, *et al.* Characteristics of nutrient profiles in sediments and pore water of Lake Chaohu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(10): 2088-2096.
- [17] 孙羚晏, 龙爱民, 肖红伟, 等. 磨刀门表层沉积物间隙水与上覆水之间的营养盐交换研究[J]. *海洋环境科学*, 2013, **32**(6): 911-915.  
Sun L Y, Long A M, Xiao H W, *et al.* Exchange of nutrients in the interstitial water and overlying in the Modaomen Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, **32**(6): 911-915.
- [18] 李鸿, 苏玮玮, 叶银龙, 等. 澜沧江中上游流域矿区土壤重金属含量的调查[J]. *广东微量元素科学*, 2012, **19**(2): 32-38.  
Li H, Su W W, Ye Y L, *et al.* Research on heavy metal pollution in soil within the upper reaches of Lancang River[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2012, **19**(2): 32-38.
- [19] 赵祖军, 李妍丽. 澜沧江上游云南江段污染现状及防治对策[J]. *环境科学导刊*, 2013, **32**(5): 68-70.  
Zhao Z J, Li Y L. Current pollution situation and pollution control in Yunnan section of upper Lancang River[J]. *Environmental Science Survey*, 2013, **32**(5): 68-70.
- [20] 高天明, 沈镭, 刘立涛, 等. 橡胶种植对景洪市经济社会和生态环境的影响[J]. *资源科学*, 2012, **34**(7): 1200-1206.  
Gao T M, Shen L, Liu L T, *et al.* The impacts of rubber plantation on society, economy and eco-environment in Jinghong City[J]. *Resources Science*, 2012, **34**(7): 1200-1206.
- [21] 杨树, 杨开菊. 云南普洱山区性河流梯级水电站整体开发研究[J]. *人民长江*, 2011, **42**(5): 15-17.  
Yang S, Yang K J. Study on integral development of cascade hydropower stations in mountainous basin of Pu'er City in Yunnan Province[J]. *Yangtze River*, 2011, **42**(5): 15-17.
- [22] Liu S F, Forrest J. The role and position of grey system theory in science development[J]. *The Journal of Grey System*, 1997, **9**(4): 351-356.
- [23] 吉灯才. 云南糯扎渡水库水质预测研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004. 36-39.
- [24] 顾磊. 威远江、小黑江流域面源污染调查[J]. *环境科学导刊*, 2007, **26**(1): 62-63.  
Gu L. Investigation of non-point source pollution in Weiyuanjiang River and Xiaoheijiang River[J]. *Environmental Science Survey*, 2007, **26**(1): 62-63.
- [25] 陈永川, 汤利. 沉积物-水体界面氮磷的迁移转化规律研究进展[J]. *云南农业大学学报*, 2005, **20**(4): 527-533.  
Chen Y C, Tang L. Study prospect on removing and transformaing characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment-water interface[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, **20**(4): 527-533.
- [26] 向速林, 陶术平, 吴代赦. 鄱阳湖沉积物和水界面磷的交换通量[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(2): 326-333.  
Xiang S L, Tao S P, Wu D S. Exchange fluxes of phosphorus at the sediment-water interface in Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(2): 326-333.
- [27] 徐洋, 陈敬安, 王敬富, 等. 氧化还原条件对红枫湖沉积物磷释放影响的微尺度分析[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 68-74.  
Xu Y, Chen J A, Wang J F, *et al.* The micro-scale investigation on the effect of redox condition on the release of the sediment phosphorus in Lake Hongfeng[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(1): 68-74.
- [28] 何桐, 谢健, 余汉生, 等. 大亚湾表层沉积物间隙水与上覆水中营养盐分布特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(11): 2361-2368.  
He T, Xie J, Yu H S, *et al.* The distribution of nutrients in the interstitial water and overlying water in Daya Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(11): 2361-2368.
- [29] 程劲竹, 郭沛涌, 刘宁, 等. 山美水库表层沉积物黑碳分布特征及其对磷形态的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 1012-1018.  
Cheng J Z, Guo P Y, Liu N, *et al.* Spatiotemporal distribution of black carbon and its effect on phosphorous speciation in surface sediments of Shanmei Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 1012-1018.
- [30] 卢少勇, 金相灿, 郭建宁, 等. 沉积物-水系统中氮磷变化与

- 上覆水对藻类生长的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2169-2173.
- Lu S Y, Jin X C, Guo J N, *et al.* Variation of nitrogen and phosphorus concentration in water-sediment system and influence of overlying water on the algae growth [J]. Environmental Science, 2007, **28**(10): 2169-2173.
- [31] 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.
- [32] 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3384-3393.
- Li L, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Vertical variation of phosphorus forms in Lake Dianchi and contribution to release [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3384-3393.
- [33] Morin J, Morse J W. Ammonium release from resuspended sediments in the Laguna Madre estuary[J]. Marine Chemistry, 1999, **65**(1-2): 97-110.
- [34] Asmus R M, Jensen M H, Jensen K M, *et al.* The role of water movement and spatial scaling for measurement of dissolved inorganic nitrogen fluxes in intertidal sediments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, **46**(2): 221-232.
- [35] 钱嫦萍, 陈振楼, 胡玲珍, 等. 崇明东滩沉积物再悬浮对沉积物-水界面氮、磷交换行为的影响[J]. 环境科学, 2003, **24**(5): 114-119.
- Qian C P, Chen Z L, Hu L Z, *et al.* Effects of sediment resuspension on nitrogen and phosphate exchange at the sediment-water interface in East Chongming Tidal Flat[J]. Environmental Science, 2003, **24**(5): 114-119.
- [36] 戚晓红, 刘素美, 张经. 东、黄海沉积物-水界面营养盐交换速率的研究[J]. 海洋科学, 2006, **30**(3): 9-15.
- Qi X H, Liu S M, Zhang J. Sediment-water fluxes of nutrients in the Yellow Sea and the East China Sea [J]. Marine Sciences, 2006, **30**(3): 9-15.



## CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM <sub>2.5</sub> ) 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)