

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 ₁₀ 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, 陈广洲 (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, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜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	谭玉琨, 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)
曝气时间比对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)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ 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 ₄ 、CO ₂ 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 ₂ 、N ₂ 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 ₂ 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, 曹群岭, 汤铭豪 (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, 贾亮宇 (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肿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	李雨岑, 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)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量

文帅龙^{1,2}, 龚琬晴^{1,2}, 吴涛³, 郑小兰^{1,2}, 江雪¹, 李鑫¹, 钟继承^{1*}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 天津市水利科学研究院, 天津 300061)

摘要: 于桥水库是天津市重要的饮用水源地, 但近年来呈现富营养化加重趋势, 而其内源负荷及污染分布特征尚不清楚。本研究利用 Peeper (pore water equilibrium) 技术获取沉积物-水界面氮磷剖面特征, 分析于桥水库间隙水氮磷分布的空间差异; 采集沉积物无扰动柱样分析沉积物中易释放态氮及磷的赋存特征, 并利用原柱样静态培养法对其水土界面氮磷交换速率进行估算。结果表明: ①沉积物中活性磷、氨氮、硝态氮和亚硝态氮的含量分别为 0.5~6.5、0.5~10.9、2.2~16.2 和 0.05~0.6 mg·kg⁻¹, 在垂直方向随深度增加营养盐含量降低, 而在空间分布上差异显著。②上覆水中 PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 质量浓度较低, 间隙水中 PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 质量浓度远大于上覆水, 表明于桥水库间隙水具有向上覆水体扩散营养盐的潜力。在垂直方向上间隙水中 PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 具有在 0~5 cm 快速增加, 之后表现出逐渐降低的趋势。③静态释放结果表明, PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 从沉积物间隙水扩散至上覆水中, 其释放通量分别为 1.1~13.3 mg·(m²·d)⁻¹ 和 20.6~250.5 mg·(m²·d)⁻¹; NO₃⁻-N 交换通量在 -20.4~33.4 mg·(m²·d)⁻¹ 之间, NO₂⁻-N 交换通量在 -7.4~0.4 mg·(m²·d)⁻¹ 之间。PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 为于桥水库主要的沉积物内源向上覆水释放营养盐, 总体释放速率在空间上呈现南高北低、淋河口和水坝前较高的释放特征。与类似研究比较可知, 于桥水库沉积物-水界面通量相对较高, 表明沉积物是于桥水库上覆水营养盐的重要来源。

关键词: 于桥水库; 沉积物-水界面; 间隙水; 分布特征; 释放通量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2154-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709081

Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir

WEN Shuai-long^{1,2}, GONG Wan-qing^{1,2}, WU Tao³, ZHENG Xiao-lan^{1,2}, JIANG Xue¹, LI Xin¹, ZHONG Ji-cheng^{1*}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Tianjin Hydraulic Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Yuqiao Reservoir is an important source of drinking water in Tianjin. In recent years, the eutrophication status is becoming more and more serious, but its internal loading and distribution characteristics of nitrogen and phosphorus is not clear. The profiles of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface were analyzed using the Peeper (pore water equilibrium) technique and the spatial distribution was investigated. The existing forms of the released nitrogen and phosphorus were investigated by the static intact sediment cores, and the fluxes of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface were estimated by static incubations with intact sediment cores. The results demonstrated the following. ① The contents of PO₄³⁻-P, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, and NO₂⁻-N in sediments were 0.5-6.5, 0.5-10.9, 2.2-16.2, and 0.05-0.6 mg·kg⁻¹, respectively. The contents of nutrient were lower as depth increased, and horizontal distribution characteristics indicated significant differences. ② The contents of PO₄³⁻-P and NH₄⁺-N in the interstitial water were much higher than in the overlying water, suggesting that the interstitial water had the potential to diffuse nutrients to the overlying water. The concentrations of PO₄³⁻-P and NH₄⁺-N in the interstitial water increased rapidly at 0-5 cm and then decreased gradually. ③ PO₄³⁻-P and NH₄⁺-N diffused from the sediment to the overlying water, and the fluxes of them were 1.1-13.3 mg·(m²·d)⁻¹ and 20.6-250.5 mg·(m²·d)⁻¹, respectively. The exchange fluxes of NO₃⁻-N and NO₂⁻-N ranged from -20.4 to 33.4 mg·(m²·d)⁻¹ and from -7.4 to 0.4 mg·(m²·d)⁻¹, respectively. PO₄³⁻-P and NH₄⁺-N were the main nutrients in the sediment released to the overlying water. The fluxes were high in the south and low in the north, and also high in the mouth of the Linhe River and downstream of the reservoir. Compared with similar studies, the fluxes at the sediment-water interface of Yuqiao Reservoir were relatively high, indicating that the sediment was an important source of nutrients for the overlying water in Yuqiao Reservoir.

Key words: Yuqiao Reservoir; sediment-water interface; interstitial water; spatial distribution; diffusive flux

收稿日期: 2017-09-09; 修订日期: 2017-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371457, 41771516); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07113001); 天津市水务局于桥水库专项

作者简介: 文帅龙(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊生态环境与污染修复, E-mail: wensl313@sina.com

* 通信作者, E-mail: jczhong@niglas.ac.cn

沉积物是湖库及其流域中营养盐及其他污染物的重要归宿和蓄积库^[1]。沉积物-水界面的地球化学行为会对湖泊生态系统有着极为重要的影响, 沉积物中营养盐在某些条件下会以间隙水为介质, 通过扩散、对流以及再悬浮等过程向上覆水体释放^[2-4]。当外源污染逐步得到有效控制后, 如何有效控制来自沉积物的内源氮磷负荷就成为了湖库水体治理的关键^[5]。氮磷释放风险与氮磷形态、上覆水氮磷质量浓度、间隙水氮磷剖面特征、孔隙度和有机质浓度间的关系最为密切^[6]。而底泥、间隙水和上覆水氮磷的垂直分布规律和沉积物-水界面交换通量对研究水体富营养化状况和污染源分析具有重要意义^[7, 8]。

随着国内北方部分地区用水日益紧张, 引滦入津、南水北调等跨流域调水工程相继实施, 水库逐渐成为重要的饮用水源地。于桥水库为国家重点大型水库, 是引滦入津工程的重要调蓄水库, 作为天津市重要的饮用水源地, 其水生态环境安全至关重要。近年来, 于桥水库开始出现藻类水华, 但针对于桥水库水体污染和富营养化的研究, 多集中于沉积物重金属、浮游生物群落结构特征及环境评价与治理^[9-11], 而针对于桥水库沉积物-水界面氮磷赋存特征与交换通量的研究则鲜见报道。因此, 开展于桥水库沉积物、间隙水和上覆水之间营养盐质量浓度、分布规律、扩散过程和交换通量的研究, 对了解于桥水库水体内源污染特征, 掌握沉积物中氮、磷营养盐释放特性, 遏制于桥水库富营养化态势和内源污染负荷的治理都具有重要的现实意义。

本研究以于桥水库为研究对象, 利用 Peeper 间隙水采集器获取沉积物间隙水, 采用原柱样静态培养法对其水土界面氮磷交换速率进行估算。本研究主要探讨氮磷营养盐在沉积物-水界面分布特征、交换过程及空间差异, 以期于桥水库内源污染负荷治理和水体富营养化防治提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及采样点布设

于桥水库位于天津市蓟县城东, 翠屏山北部 ($40^{\circ}00' \sim 40^{\circ}04'N$, $117^{\circ}26' \sim 117^{\circ}37'E$), 是一座山谷型盆地水库, 是天津市生活饮用水和工农业用水的重要水源地。正常蓄水时平均水深 4.3 m, 东西最长 30 km, 南北最宽 8 km, 总库容 15.59 亿 m^3 , 控制流域面积约为 2 060 km^2 , 其中沙河、淋河和黎河是汇入于桥水库的主要河流^[12]。水库所在区域属温带大陆性季风性半湿润气候, 年平均气温为 $10.4 \sim 11.5^{\circ}C$, 年平均降水量为 748.5 mm, 降雨主要集中在 6~9 月。目前于桥水库整体水质呈中营养-轻富营养状态(2014 年), 主要表现为氮污染超标, 磷为限值因子, 水质营养状态空间差异显著, 富营养化有加重的趋势^[12]。

采样点分布如图 1 所示, 样品采集时间为 2016 年 8 月, 采样点经纬度由 GPS 定位, 其中 S1 和 S2 点分别位于黎河和淋河入库河口, 水库 S3 和 S6 南面是高大的翠屏山, S4 点北部区域为大片密集的村庄和农田, S5 位于水库中间区域, S7 点西面是蓟县城区, S8 点位于水库下游拦河大坝前。

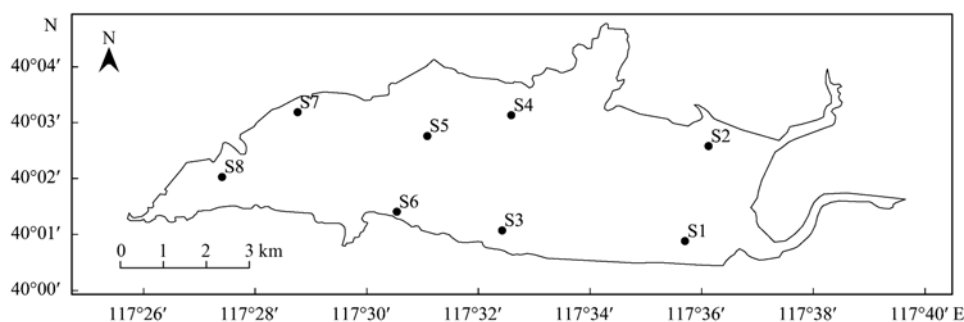


图1 于桥水库采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Yuqiao Reservoir

从东至西共设置 8 个采样点, 所有样点均采集柱状沉积物做静态培养释放实验, 各点放置 Peeper 采集间隙水, S5 和 S8 点由于水深等原因导致 Peeper 丢失, 间隙水取样失败, 其他研究点成功地获取了间隙水。采样点上覆水基本理化性质见表 1。

1.2 间隙水的采集

用定制 Peeper 投放器向水下垂直投放 Peeper 并插入沉积物一定深度, 形成一个完整的沉积物-水剖面。Peeper 间隙水采集器构造及具体投放方法详见文献^[13]。Peeper 内的 36 个隔室装有去离子

水,并用 0.2 μm 孔径的聚砜树脂膜覆盖密封,之后把 Peeper 放入装有超纯水的桶中通 N₂ 达 24 h,在无氧条件下把 Peeper 运至采样点使用.当 Peeper 插入沉积物后,间隙水及上覆水中的营养盐透过 0.2 μm 渗透膜进入 Peeper 的隔室,经过两周的平衡后,每个隔室内的营养盐浓度与外界间隙水浓度相同,这样 Peeper 中不同深度水样就能够代表原位间隙水^[14].自 Peeper 投放起计时,平衡 15 d 后取出 Peeper,利用移液枪枪头穿刺 Peeper 上每一个采样单元(1 cm 的间隔)的滤膜,从已穿刺破的孔中抽取适量体积间隙水装入具塞小瓶中于 4℃ 保存.采样结束后快速带回位于南京的湖泊与环境国家重点实验室分析.

表 1 于桥水库上覆水理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the overlying waters in Yuqiao Reservoir

点位	Eh/mV	pH	电导率/mS·m ⁻¹	水深/m
S1	141.5	9.35	560	4.73
S2	137.7	9.76	550	3.59
S3	138.5	9.17	550	1.97
S4	133.9	10.16	540	2.45
S5	141.4	9.11	560	3.63
S6	56.1	9.35	530	4.36
S7	140.2	9.41	560	3.98
S8	9.9	10.06	530	9.18

1.3 柱状沉积物的采集与释放实验

在预先设定的 8 个研究点位用 GPS 定位,用重力采样器(直径为 90 mm)采集柱状沉积物,垂直取样深度约为 20~35 cm,每点采集 4 根柱子,并用多参数水质仪(YSI)探测沉积物-水界面处的温度.同时取原水上覆水 10 L 备用.将采集的样品运输到位于于桥水库坝前的天津市水务局于桥水库管理处的水质科实验室进行静态释放实验研究.在实验室内将采集的沉积物柱样 3 根用于平行释放实验,1 根柱状沉积物按每层 5 cm 切分后放入干净的聚乙烯袋中密封低温保存.释放实验在室内将柱状样中上层水用虹吸法抽去,再用虹吸法沿壁小心滴注已过滤的原采样点水样,至液面高度距沉积物表面 20 cm 处停止(此时水柱体积为 1 135 mL),标注刻度,将所有柱状样蔽光室内按照水库原位温度进行恒温培养.此后在指定时间(0、12、24、36、48、60、72 h)用移液管于水柱中靠近沉积物表层 5 cm 处取样,每次取样体积为 50 mL,同时用原样点初始过滤水样补充至刻度以保持水量平衡,全部实验于 72 h(3 d)止,每次采样的样品用干净的 100 mL

塑料瓶盛装并及时放入冰箱 4℃ 保存,待实验结束后样品迅速带回位于南京的湖泊与环境国家重点实验室分析.

沉积物-水界面营养盐交换速率(F)按下式计算^[15]:

$$F = \left[V(c_n - c_0) + \sum_{j=1}^n V_{j-1}(c_{j-1} - c_a) \right] / (S \times t)$$

式中, F 为平均交换通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; V 为柱中上覆水体积(L); c_n 、 c_0 、 c_{j-1} 为第 n 次、0 次(即初始)和 $j-1$ 次采样时某物质质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_a 为添加水样中的物质质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样体积(L); S 为柱样中水-沉积物接触面积(m^2); t 为释放时间(d).所计算的营养盐释放速率均为 3 d 平均表观交换通量.

1.4 样品测定方法

静态释放水样及间隙水水样中磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)的分析采用流动注射分析仪进行分析(Skalar Sanplus, 荷兰).沉积物烘干研磨过 100 目筛后,无机氮采用 Bremner 氯化钾 [$c(\text{KCl}) = 2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$] 提取,易释放态磷用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NH_4Cl 提取,提取液经离心后取上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜后测样, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 分别用纳氏试剂比色法、紫外分光光度法和重氮偶合分光光度法测定, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 用钼蓝比色法测定.

1.5 数据处理与统计分析

所有实验数据使用 Excel 2007 和 SPSS 22.0 进行整理和统计分析,使用 Origin 2017 和 ArcGIS 10.2 软件进行绘图.

2 结果与讨论

2.1 沉积物中易交换态氮、磷分布特征

由氯化钾提取的无机氮(主要是铵态氮、硝态氮和亚硝态氮)和氯化铵提取的磷通常都是易交换态的,而沉积物中易交换态氮、磷容易释放到间隙水,进而会扩散至上覆水中.无机氮的增加将导致水体富营养化,活性磷作为湖泊水库等水体浮游植物生长所必需的物质基础,往往被认为是湖泊等地表水体的一种限制性营养盐,湖泊水库等水体易交换态氮、磷的增加将促进各种水生生物的活性,如藻类大量繁殖等,进而带来一系列后果,如水体溶解氧降低,水质恶化等.

图 2 表示了 S1、S2、S3、S4、S6 和 S7 这 6 个采样点沉积物 0~20 cm 中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与

NO_2^- -N 的分布特征. 从中可以看出, 在垂直方向上, PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 与 NO_2^- -N 在沉积物中的含量总体上表现出随深度增加逐渐降低的特征. 6 个采样点中 PO_4^{3-} -P 的含量基本在 $0.5 \sim 6.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 在空间分布特征上, 其中 S2 和 S7 点含量较高, 其水平分布为 $\text{S7} > \text{S2} > \text{S1} > \text{S6} > \text{S3} > \text{S4}$, 大致表现出水库上下游含量高, 中间含量低的特征, 其中中部南岸高于北岸, PO_4^{3-} -P 在各样点间浓度差异较大, 与水库不同部位的沉积物中有机质的含量有关. NH_4^+ -N 含量基本在 $0.5 \sim 10.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 其中 S2 点最高, 水平分布基本为 $\text{S2} > \text{S1} > \text{S3} > \text{S6} > \text{S4} > \text{S7}$, 表现出自水库上游到下游逐渐降低的趋势, 这点与 PO_4^{3-} -P 的水平分布特征不同, 其中南岸大于北岸. NO_3^- -N 在沉积物中的含量在 $2.2 \sim 16.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 水平方向上分布为 $\text{S2} > \text{S6} > \text{S7} > \text{S3} > \text{S1} > \text{S4}$, NO_2^- -N 在沉积物中的含量在 $0.05 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 水平分布为 $\text{S2} > \text{S6} > \text{S7} > \text{S3} > \text{S1} > \text{S4}$, 其水平分布特征与 NO_3^- -N 保持高度一致.

从图 2 中可以看出 S2 点沉积物中各种营养盐含量都处在相对较高的水平, S2 点位于淋河入库口, 上游携带的营养物质在此处沉积, S2 北岸有大面积农田分布, 化肥等营养物质输入较高, 受人为

活动影响比较大, 这可能是该点沉积物中营养盐含量相对较高的原因; S4 点各种营养盐含量相对较低; S7 点 PO_4^{3-} -P 含量最高, 而 NH_4^+ -N 含量最低, 此采样点靠近蓟县城区, 受人为活动影响也比较大. 陈蕾等的研究表明水库底泥中赋存氮、磷物质的多少, 在一定程度上能够影响间隙水中氮、磷的浓度^[16].

2.2 间隙水中氮磷分布特征

本实验获得的于桥水库间隙水中各营养盐分布情况见图 3. 通常, 在氮、磷释放时, 沉积物中吸附的氮磷首先进入沉积物间隙水, 这一步常被认为是氮、磷释放速率的决定步骤, 进而向上层多相界面和上覆水混合扩散, 扩散的强度主要取决于沉积物间隙水中营养物质的浓度梯度^[17], 间隙水氮磷浓度的高低是沉积物氮磷释放能力和强度的直接反映.

PO_4^{3-} -P 的垂直分布特征在各采样点呈现高度的一致性(图 3). PO_4^{3-} -P 在沉积物间隙水中的质量浓度基本在 $0.01 \sim 5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 其中 S2 点最高, PO_4^{3-} -P 在上覆水中质量浓度较低, 平均质量浓度为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 间隙水与上覆水 PO_4^{3-} -P 质量浓度的差异反映了沉积物-水界面磷酸盐的迁移过程, 主要以间隙水向上覆水迁移及扩散为主, 沉积物起

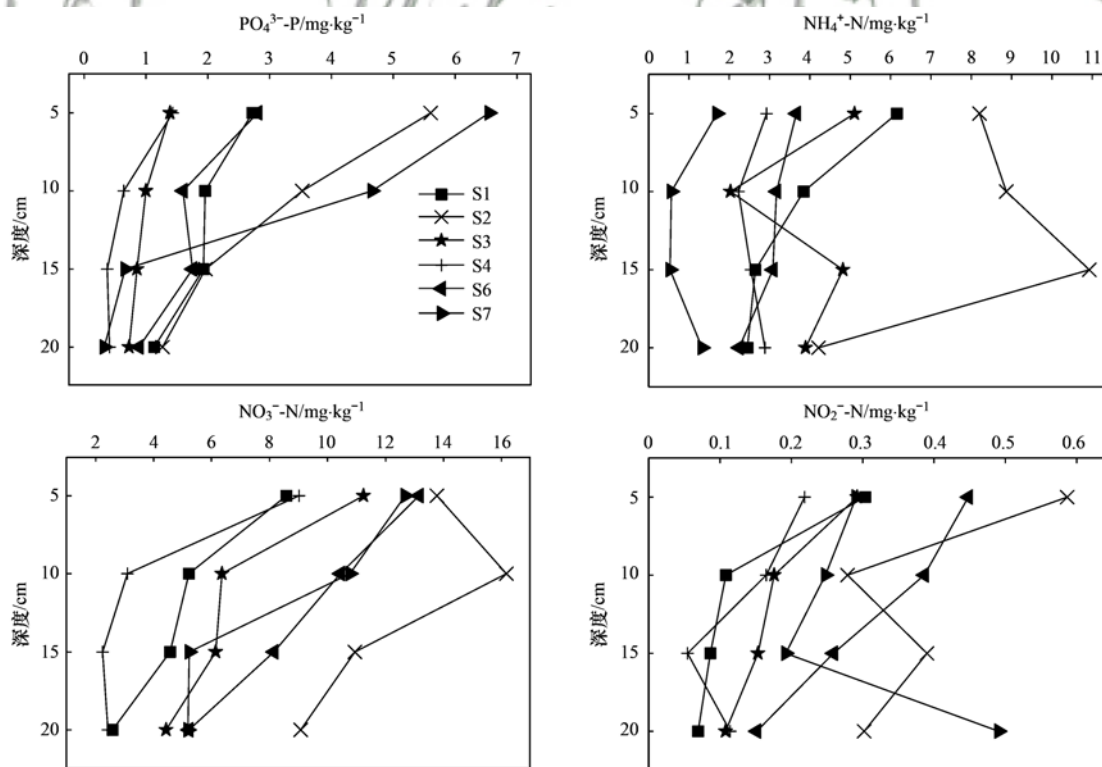
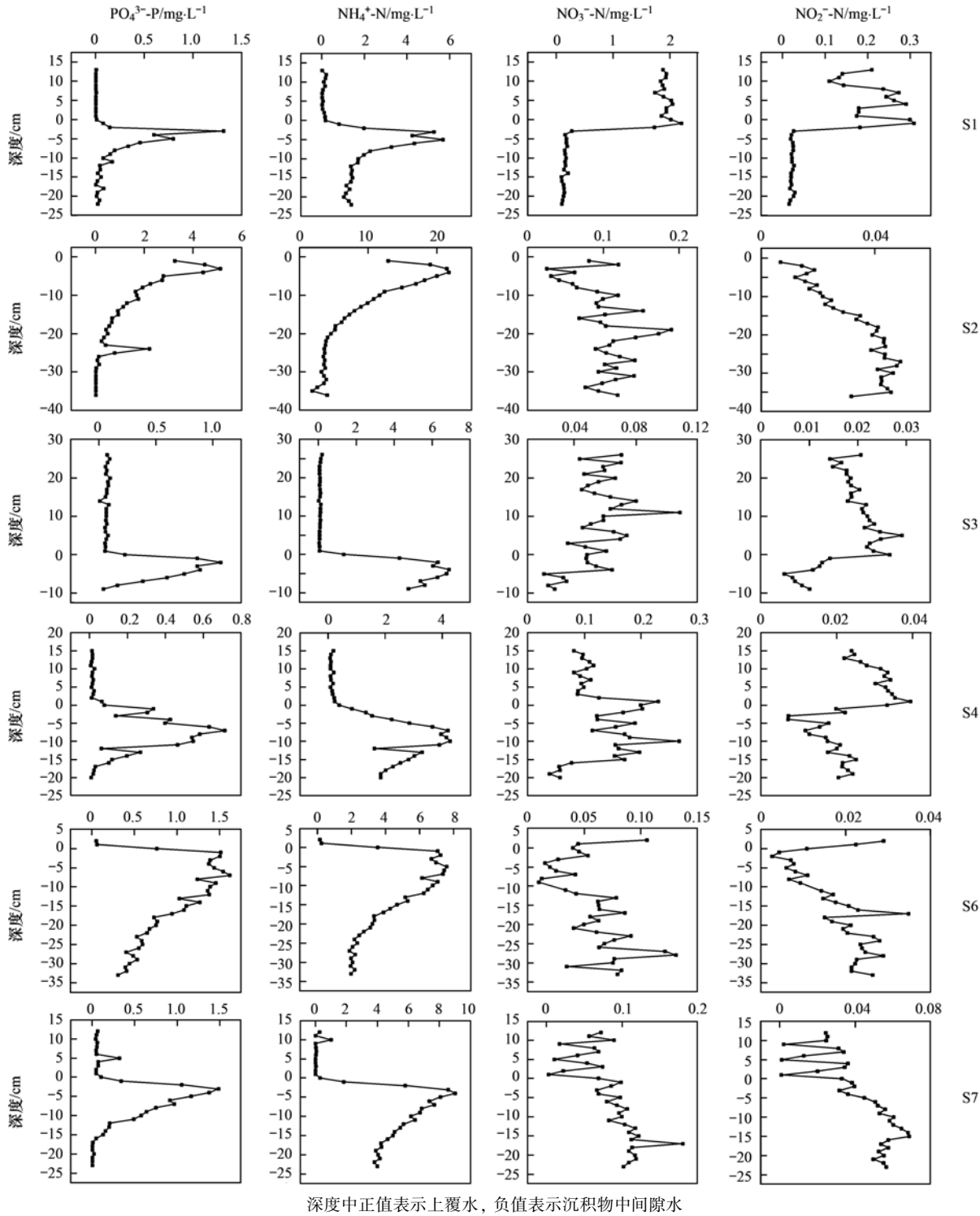


图 2 沉积物中营养盐含量分布

Fig. 2 Distribution of nutrients in the sediment



深度中正值表示上覆水, 负值表示沉积物中间隙水

图3 上覆水-间隙水营养盐垂直分布特征

Fig. 3 Vertical characteristics of nutrients in the overlying-interstitial water

到了“源”的作用^[18]. 通过对于桥水库表层沉积物中各形态磷含量的研究(另文发表), 发现沉积物潜在活性磷中铁结合态磷(Fe-P)含量最高, 最大值达 $332.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小值为 $75.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $161.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 Fe-P 在释放过程中对上覆水体中磷浓度变化的影响较大. 此外, 水库中有机态磷

(Org-P) 总体含量较低, 但东西部相对较高. 沉积物间隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度高于上覆水, 主因在缺氧的沉积物中, 铁结合态的磷和较易分解的含磷有机物, 可分别通过三价铁还原和有机质分解释放游离态的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 从而使其浓度远大于上覆水^[19, 20]. 间隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度在沉积物表层 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 左右

快速增加达到最大值, 其中 S1、S6、S7 最大值在 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, S2、S3 最大值分别为 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在 $5 \sim 15 \text{ cm}$ 处, S1、S3、S7 点 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均质量浓度又迅速降低至 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 深度超过 15 cm 时 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度趋于稳定, S2 点 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在 $5 \sim 30 \text{ cm}$ 处迅速降低至 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 深度超过 30 cm 后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度趋于稳定. 王一茹等^[21]对滇池草海间隙水的研究表明间隙水磷浓度由表层至下层呈现先增加后下降的趋势, 间隙水磷浓度最高值主要分布在 6 cm 左右, 这与本文的研究结果基本一致.

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的垂直分布特征与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 具有较高的一致性, 其相关系数在 $0.73 \sim 0.99$ 之间, 平均值高达 $0.89 (P < 0.01)$, 达到相关性显著, 说明两者之间具有一定的内在联系. 从图 3 可以看出, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是间隙水中主要的无机氮形态, 上覆水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低, 且上下较一致, 各点的平均质量浓度为 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 沉积物间隙水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度基本在 $1.8 \sim 21.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 间隙水显著高于上覆水, 这暗示着沉积物是上覆水中氨氮主要的“源”, 沉积物的氨氮浓度成为影响于桥水库水质的主要因素. 垂直方向上 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 $0 \sim 5 \text{ cm}$ 处快速增加到最大值, 在 $5 \sim 20 \text{ cm}$ 又逐渐下降, 在 20 cm 以下深度维持在相对稳定的水平, 在 $2.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右波动. 李宝等^[22]对滇池福保湾间隙水的研究得出间隙水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在垂向上都有先增加后降低的趋势, 具有较大向上覆水释放的潜力.

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在上覆水和间隙水中波动明显, 垂直方向上分布规律不明显. 间隙水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的质量浓度分别在 $0.01 \sim 2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.001 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间. S1 采样点上覆水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的质量浓度明显高于间隙水中的浓度, 表明沉积物-水界面主要表现为吸附状态. S7 点则相反, 表现为间隙水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的质量浓度高于上覆水, 表明此处以释放为主.

通过比较可以看出, 沉积物间隙水中营养盐的主要成分是 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$. 间隙水中氮主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式存在, 这与文献[16, 21]的研究结果一致. 沉积物有机氮在微生物作用下可矿化出大量的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 厌氧环境中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以铵离子的形式储存在间隙水中或吸附在沉积物矿物表面^[23], 从而提高了沉积物间隙水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度, 而沉积物间隙水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放则成为了上覆水氮素的重要来源.

在空间分布上, 6 个采样点的沉积物间隙水中营养盐的分布存在较大差异, 这与 6 个点所处的位置条件、溶解氧水平、氧化还原环境及微生物活动有关. 间隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的质量浓度在空间上呈现出 $\text{S2} > \text{S6} > \text{S7} > \text{S1} > \text{S3} > \text{S4}$ 的分布特征, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度则表现为 $\text{S2} > \text{S7} > \text{S6} > \text{S3} > \text{S1} > \text{S4}$, 其中 S2 点间隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度最高, 这与其沉积物中营养盐含量很高相一致, 且该处又处于河口, 与扰动剧烈有关; S4 点间隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度最低, 可能的原因是其沉积物中营养盐含量低, 且其靠近岸边, 水深较浅, 溶解氧较高的缘故. 此外, 与图 2 比较可知, 营养盐含量在间隙水中与沉积物中的空间分布并不完全一致, 这说明沉积物中营养盐含量并不是其释放到间隙水中的决定性因素, 但沉积物作为水库营养盐的一个重要“源”, 在其他条件的作用下可能会有较大的释放潜力.

2.3 沉积物-水界面磷交换通量

静态培养过程中, 各采样点 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在柱状沉积物上覆水中的浓度随时间的增加而呈现增大趋势 (图 4), 在沉积物-上覆水界面处以释放为主, 总体释放速率在 $1.14 \sim 13.31 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间, 在水库中部 S3 和 S6 释放速率明显大于 S4 和 S5, 表明水库中部 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 南岸释放速率要高于北岸, 这与 S4 点间隙水中磷酸盐含量最低, 且南岸背靠翠屏山, 地表径流冲刷携带的营养盐在南岸沉降堆积及扰动有关. S1 和 S2 位于水库上游, 但 S2 沉积物及间隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的含量远大于 S1 中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的含量, 所以 S2 的释放速率高于 S1. S7 和 S8 位于水库下游, 其释放速率相对处于中等水平, S7 点虽然沉积物中磷酸盐含量较高, 但其氧化还原电位较高, 这可能限制了磷酸盐的释放速率, S8 点水深较深, 沉积物-水界面处扰动作用较弱. 各点释放通量的差异, 与沉积物中营养盐含量、氧化还原条件、温度、pH、有机质含量等因素有关. 沉积物中有机物分解为可以利用的营养盐, 其可以释放到上覆水体, 且溶解性有机碳和溶解氧也可以控制沉积物中磷的释放^[24, 25], Chlot 等^[26]研究表明有机质以及氨基盐的氧化会增加溶解性活性磷的释放速率, 然而, 有机碳和氮负荷的增加是如何影响沉积物中磷的释放, 这一机理目前尚不清楚^[27], 也有研究表明 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通过促进微生物的矿化而增加界面磷的释放速率, 但也不是对所有的沉积物均能发挥作用^[28].

由图 3 可知, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在间隙水和上覆水之间存

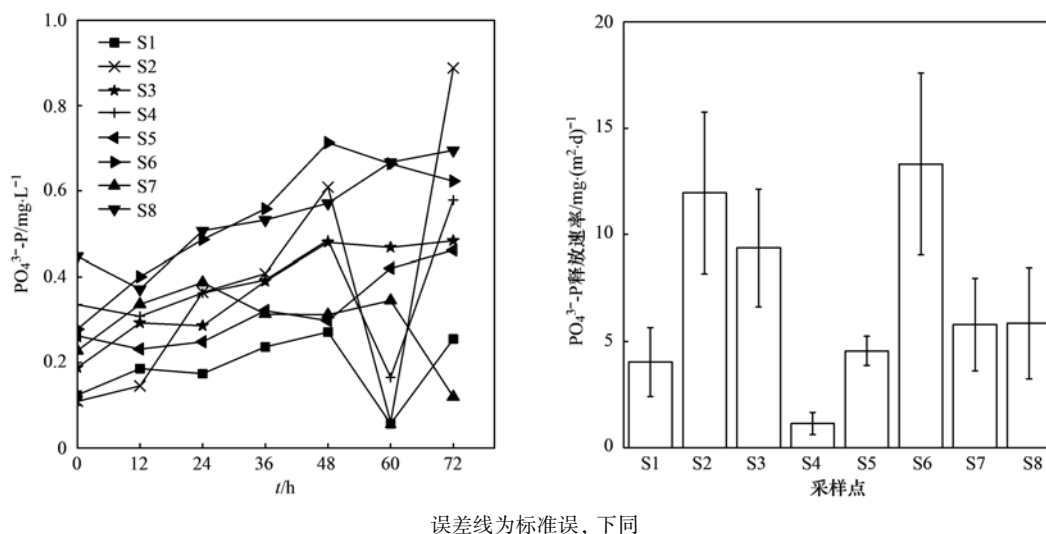


图4 静态培养下不同采样点上覆水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度变化及其释放速率

Fig. 4 Changes in $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations in the overlying water for different core samples and its release rate under static incubations with intact sediment cores

在较大的浓度差(释放潜力),但就其空间分布特征来看,间隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的质量浓度($\text{S2} > \text{S6} > \text{S7} > \text{S1} > \text{S3} > \text{S4}$),与沉积物-水界面磷释放量($\text{S6} > \text{S2} > \text{S3} > \text{S7} > \text{S1} > \text{S4}$, S5 和 S8 除外)之间并不完全一致,这表明磷的释放通量并非完全受沉积物-水界面浓度差(释放潜力)的控制,表明沉积物-水界面磷的迁移过程受多种因素影响.已有的研究表明在好氧条件下沉积物表层毫米级别的好氧层及沉积物-水界面处的底层扩散边界层会阻止间隙水磷向上覆水体迁移^[29],当上覆水水体中溶解氧降低,好氧层或者扩散边界层变薄或消失,间隙水中的溶解性磷会随着浓度梯度更容易向上覆水体扩散^[30].

2.4 沉积物-水界面无机氮交换通量

静态培养过程中, S4 和 S7 点上覆水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随时间变化差异不大(图5),波动中略微上升,其余各点均呈现出随着时间的增加而变大的趋势,总体增大趋势明显,说明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在沉积物-上覆水界面处以释放为主.总体释放速率在 $20.6 \sim 250.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间.其中 S2 和 S8 的释放速率较高,中部各点次之. S8 点位于水库下游,靠近大坝,水深较深,且此处受夏季风向的影响容易发生藻类水华的沉降聚集,夏季沉积物表层缺氧,在还原条件下其氨氮释放速率较高; S2 点沉积物及间隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较高且位于淋河口,此处沉积物受人为活动影响较大,这可能是其释放速率相对较大的原因; S7 点沉积物中氨氮含量最低,又靠近岸边,沉积物扰动作用明显,沉积物更容易发生再悬浮,浅水区沉积物厌氧程度相对较低,故其释放

速率较低;中部 $\text{S3} > \text{S4}$, $\text{S6} > \text{S5}$, 总体表现出上下游释放量较高,水库中部南高于北的释放特征.

上覆水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在 S1 、 S2 、 S5 和 S8 处随时间增加而下降,在沉积物-上覆水界面以吸附为主; S3 、 S4 、 S6 和 S7 随时间增加略有升高,在沉积物-上覆水界面以释放为主.总体交换通量在 $-20.4 \sim 33.4 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间.除 S5 外,水库中部区域均以释放为主,水库上下游两端以吸附为主.上覆水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度在 S3 、 S4 、 S5 、 S6 和 S7 点变化幅度很小,而 S1 、 S2 和 S8 点变化幅度较大,其中 S1 和 S2 点上覆水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度随时间增加而大幅度降低, S8 点略有增长,说明 S1 和 S2 点沉积物-上覆水界面以吸附为主, S8 以释放为主.总体交换通量在 $-7.4 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间.

与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 一样, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在间隙水和上覆水之间也存在很强烈的浓度差(释放潜力),其间隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度($\text{S2} > \text{S7} > \text{S6} > \text{S3} > \text{S1} > \text{S4}$)与沉积物-水界面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放量($\text{S2} > \text{S6} > \text{S1} > \text{S3} > \text{S7} > \text{S4}$, S5 和 S8 除外)的空间分布特征也有一定差异,这是因为间隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 除了通过分子扩散作用进入上覆水外,还可通过硝化或者氨氧化过程,在沉积物表层的兼性厌氧层中降低其浓度,从而降低间隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的释放潜力^[31].总的来说,淡水沉积物中氮的矿化及再生过程通常受到有机质分解速率、沉积物沉积速率、生物扰动作用以及微生物转化作用的影响^[32], S1 和 S2 靠近入库河口,上游河流携带大量新鲜的有机物在此处沉积, S8 位于水库下游,大量颗粒物在坝前堆积.夏季高温

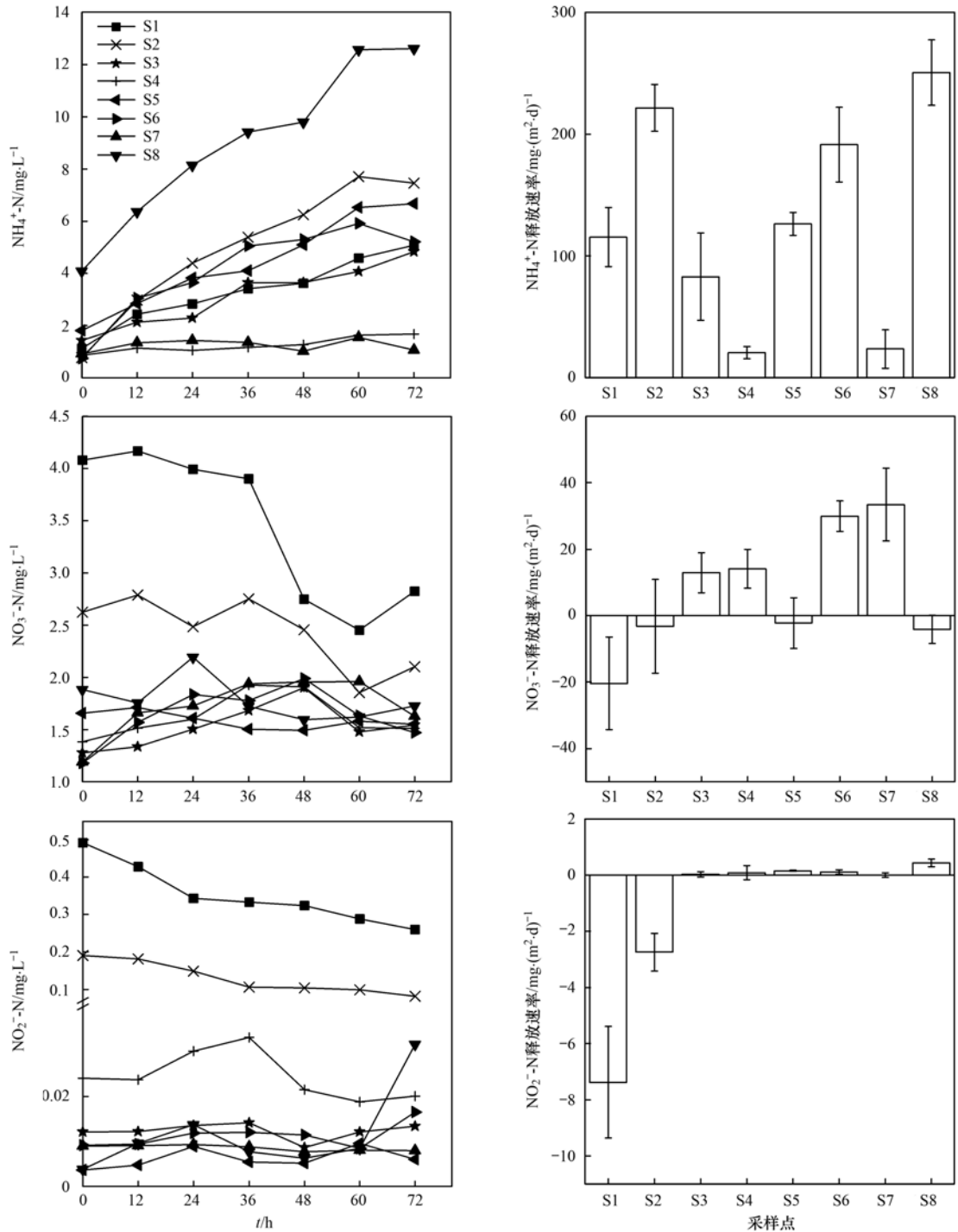


图5 静态培养下不同采样点上覆水无机氮质量浓度变化及其释放速率

Fig. 5 Changes in inorganic nitrogen concentrations in the overlying water for different core samples and its release rate under static incubations with intact sediment cores

环境下，水库底部沉积的有机物降解消耗大量氧，沉积物-上覆水界面处于缺氧或厌氧环境，此时在还原条件下，由于反硝化作用沉积物颗粒吸附 NO_3^--N 和 NO_2^--N 并将其还原 NH_4^+-N 释放到间隙水，进而扩散至上覆水，这也与表层沉积物间隙水中 NO_3^--N 和 NO_2^--N 质量浓度极低，而 NH_4^+-N 质量浓度极高相一致。

综上所述，夏季于桥水库沉积物主要表现为“源”向上覆水体释放氨氮和磷酸盐，可见内源释放在于桥水库水体富营养化的进程中扮演者重要的作用，其中S2点位于淋河入库口，其营养盐释放潜力较大，且采样时已经观察到该处夏季已有藻类水华发生。S8位于坝前区域，此处水深较深，受夏季风向的影响藻类水华容易沉降堆积，内源氮磷释放

也相对较为强烈. 另外水库南岸个别区域营养盐释放潜力也较大, 这些区域在于桥水库水体富营养控制上应重点防治. 表2是近年国内外湖库 NH_4^+ -N和 PO_4^{3-} -P营养盐释放通量, 通过比较可知于桥水库氮磷释放通量较高, 内源释放对于桥水库富营养化的进程具有重要影响.

表2 国内外湖库氮磷扩散通量比较

Table 2 Comparison of fluxes of ammonia and orthophosphate in domestic and foreign lakes and reservoirs

湖库名称	NH_4^+ -N	PO_4^{3-} -P
	$/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	$/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
太湖 ^[33]	29.1	1.1
抚仙湖 ^[30]	2.1 ~ 13.7	0.4 ~ 1.1
滇池 ^[34]	22.9 ~ 163.1	0.9 ~ 2.1
骆马湖 ^[15]	-7.3 ~ 77.9	0.1 ~ 0.5
加拿大 Deer Lake ^[35]	39.0 ~ 62.0	1.0 ~ 1.8
周村水库 ^[36]	62.8 ~ 133.2	0.4 ~ 1.3
于桥水库(本研究)	20.6 ~ 250.5	1.1 ~ 13.3

3 结论

(1) 于桥水库沉积物中无机氮及易释放态磷在垂直方向上表现出随深度加深营养盐含量减小的趋势, 水平方向上 PO_4^{3-} -P在水库上下游含量高, 中间含量低, NH_4^+ -N表现出从水库上游到下游逐渐降低的特征, 水库中下游南岸 PO_4^{3-} -P和 NH_4^+ -N含量明显高于北岸.

(2) 沉积物间隙水中营养盐的主要成分是 PO_4^{3-} -P和 NH_4^+ -N. 间隙水中无机氮主要以 NH_4^+ -N的形式存在, 间隙水中 PO_4^{3-} -P和 NH_4^+ -N明显高于上覆水, 表明水库沉积物具有很大的营养盐释放潜力. 在垂直方向上都表现出在0~5 cm深度营养盐浓度迅速增大, 在5 cm以下随深度的增加而降低的特征. NO_3^- -N与 NO_2^- -N在上覆水和间隙水中含量较少, 波动明显, 水平分布差距显著.

(3) 沉积物-水界面 PO_4^{3-} -P和 NH_4^+ -N的释放通量分别为1.1~13.3 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和20.6~250.5 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, NO_3^- -N交换通量在-20.4~33.4 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间, NO_2^- -N交换通量在-7.4~0.4 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间. PO_4^{3-} -P和 NH_4^+ -N在空间差异上总体表现为淋河口及水坝前释放通量高, 中部南高于北的释放特征. 于桥水库 PO_4^{3-} -P和 NH_4^+ -N释放通量相对较大, 且各个研究点均表现为“源”, 表明沉积物内源释放是水库上覆水中营养盐的重要来源, 应及时采取措施控制内源负荷, 防止水质进一步恶化.

致谢: 本文的研究工作得到了天津市水务局引

滦工程于桥水库管理处的大力协助, 在此深表谢意!

参考文献:

- [1] 范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理[J]. 科学通报, 2004, **49**(15): 1523-1528.
Fan C X, Zhang L, Wang J J, *et al.* Processes and mechanism of effects of sludge dredging on internal source release in lakes[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(17): 1853-1859.
- [2] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. Chemosphere, 2003, **50**(1): 53-61.
- [3] Moss B, Kosten S, Meerhoff M, *et al.* Allied attack: climate change and eutrophication[J]. Inland Waters: Journal of the International Society of Limnology, 2011, **1**(2): 101-105.
- [4] Zhang X F, Mei X Y. Effects of benthic algae on release of soluble reactive phosphorus from sediments: a radioisotope tracing study[J]. Water Science and Engineering, 2015, **8**(2): 127-131.
- [5] Søndergaard M, Bjerring R, Jeppesen E. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes[J]. Hydrobiologia, 2013, **710**(1): 95-107.
- [6] 张路, 范成新, 王建军, 等. 长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 263-270.
Zhang L, Fan C X, Wang J J, *et al.* Nitrogen and phosphorus forms and release risks of lake sediments from the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, **20**(3): 263-270.
- [7] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 359-366.
Fan C X, Yang L Y, Zhang L. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu Lake and their interrelations[J]. Journal of Lake Sciences, 2000, **12**(4): 359-366.
- [8] 王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 703-709.
Wang P, Lu S Y, Wang D W, *et al.* Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(4): 703-709.
- [9] 胡晓芳, 王祖伟, 宋晓旭, 等. 于桥水库上游支流沉积物重金属含量及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(6): 1210-1218.
Hu X F, Wang Z W, Song X X, *et al.* Concentrations and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from tributaries of Yuqiao reservoir[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(6): 1210-1218.
- [10] 秦铮, 郑丽娜. 于桥水库富营养化趋势分析及应急措施[J]. 科技信息, 2008, (24): 651.
Qin Z, Zheng L N. Eutrophication trend analysis and emergency measures in Yuqiao reservoir[J]. Science & Technology Information, 2008, (24): 651.
- [11] 郑吴柯, 刘宪斌, 赵兴贵, 等. 于桥水库浮游植物群落特征[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(1): 35-40.
Zheng W K, Liu X B, Zhao X G, *et al.* Phytoplankton

- community feature in Yuqiao reservoir [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(1): 35-40.
- [12] 徐媛, 谢汝芹, 卢蔚, 等. 于桥水库富营养化评价及空间分布特征研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, **25**(1): 1-6.
Xu Y, Xie R Q, Lu W, *et al.* Evaluation and spatial characteristics of eutrophication in Yuqiao reservoir[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, **25**(1): 1-6.
- [13] 张路, 范成新, 王建军, 等. 太湖草藻型湖区间隙水理化特性比较[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 556-560.
Zhang L, Fan C X, Wang J J, *et al.* Comparison of physicochemical characters of pore water in grass/algae type zone in Lake Taihu [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(5): 556-560.
- [14] Urban N R, Dinkel C, Wehrli B. Solute transfer across the sediment surface of a Eutrophic Lake; I. Porewater profiles from dialysis samplers[J]. *Aquatic Sciences*, 1997, **59**(1): 1-25.
- [15] 范成新, 张路, 杨龙元, 等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(4): 370-378.
Fan C X, Zhang L, Yang L Y, *et al.* Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a Lake[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, **33**(4): 370-378.
- [16] 陈蕾, 郑西来, 刘杰. 产芝水库底泥和其间隙水中氮、磷分布特征[J]. *环境污染与防治*, 2011, **33**(2): 44-48.
Chen L, Zheng X L, Liu J. Distribution of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water of Chanzhi Reservoir [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, **33**(2): 44-48.
- [17] 柴蓓蓓. 水体沉积物中污染物释放及其多相界面过程研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008. 38-51.
Chai B B. Study on pollutants release from sediments and the multi phase interface effect [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. 38-51.
- [18] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 207-217.
Fan C X, Zhang L, Bao X M, *et al.* Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: II. chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(3): 207-217.
- [19] Gunnars A, Blomqvist S. Phosphate exchange across the sediment-water interface when shifting from anoxic to oxic conditions an experimental comparison of freshwater and brackish-marine systems[J]. *Biogeochemistry*, 1997, **37**(3): 203-226.
- [20] Jensen H S, Mortensen P B, Andersen F O, *et al.* Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark[J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(5): 908-917.
- [21] 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.
Wang Y R, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment pore water and overlying water of Dianchi Caohai Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2336-2344.
- [22] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾间隙水氮磷分布及其与底泥微生物和磷酸酶相互关系[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(4): 420-427.
Li B, Ding S M, Fan C X, *et al.* Distributions of nitrogen and phosphorus in interstitial waters in the sediments of Fubao Bay in Lake Dianchi and their relationships with the activities of microbe and alkaline phosphatase in the surface sediments[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(4): 420-427.
- [23] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 37-43.
Wang S R, Jiao L X, Jin X C, *et al.* Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments from Shallow Lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(1): 37-43.
- [24] Lavoie M, Auclair J C. Phosphorus mobilization at the sediment-water interface in softwater shield lakes: the role of organic carbon and metal oxyhydroxides [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2012, **18**(4): 327-341.
- [25] Müller S, Mitrovic S M, Baldwin D S. Oxygen and dissolved organic carbon control release of N, P and Fe from the sediments of a shallow, polymictic lake [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **16**(3): 1109-1120.
- [26] Chlot S, Widerlund A, Öhlander B. Interaction between nitrogen and phosphorus cycles in mining-affected aquatic systems-experiences from field and laboratory measurements [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(8): 5722-5736.
- [27] Li H, Song C L, Cao X Y, *et al.* The phosphorus release pathways and their mechanisms driven by organic carbon and nitrogen in sediments of eutrophic Shallow Lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 280-288.
- [28] Boström B, Pettersson K. Different patterns of phosphorus release from lake sediments in laboratory experiments [J]. *Hydrobiologia*, 1982, **91-92**(1): 415-429.
- [29] Glud R N, Berg P, Fossing H, *et al.* Effect of the diffusive boundary layer on benthic mineralization and O₂ distribution: a theoretical model analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, **52**(2): 547-557.
- [30] 王建军, 沈吉, 张路, 等. 云南滇池和抚仙湖沉积物-水界面营养盐通量及氧气对其的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(5): 640-648.
Wang J J, Shen J, Zhang L, *et al.* Sediment-water nutrient fluxes and the effects of oxygen in Lake Dianchi and Lake Fuxian, Yunnan Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(5): 640-648.
- [31] Risgaard-Petersen N, Meyer R L, Revsbech N P. Denitrification and anaerobic ammonium oxidation in sediments: effects of microphytobenthos and NO₃⁻ [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2005, **40**(1): 67-76.
- [32] Cornwell J C, Owens M S. Quantifying sediment nitrogen releases associated with estuarine dredging [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2011, **17**(4-5): 499-517.
- [33] 徐徽, 张路, 商景阁, 等. 太湖水土界面氮磷释放通量的流动培养研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, **25**(4): 66-71.
Xu H, Zhang L, Shang J G, *et al.* Study on ammonium and phosphate fluxes at the sediment-water interface of Lake Taihu using flow-through incubation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, **25**(4): 66-71.
- [34] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养

- 盐释放通量估算[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 114-120.
- Li B, Ding S M, Fan C X, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment nitrogen and phosphorus in Fubao Bay in Dianchi Lake [J]. Environmental Science, 2008, 29(1): 114-120.
- [35] Beutel M W, Leonard T M, Dent S R, *et al.* Effects of aerobic and anaerobic conditions on P, N, Fe, Mn, and Hg accumulation in waters overlaying profundal sediments of an Oligo-Mesotrophic Lake[J]. Water Research, 2008, 42(8-9): 1953-1962.
- [36] 黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物间隙水营养盐分布特征及扩散通量[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4357-4363.
- Huang T L, Liu F, Shi J C. Distribution features and diffusion fluxes of nutrient in interstitial water of a source water reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8): 4357-4363.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.
图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.
会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.
学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.
报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.
专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjkx@rcees.ac.cn;网址: www.hjkx.ac.cn

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 $MnFe_2O_4$ -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_2O 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_2O 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-nan, 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)