

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5

第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中文拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源碳的响应及释放风险

李如忠, 鲍琴, 戴源

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 2017年7月至2018年5月, 在巢湖十五里河干流的城乡梯度方向, 按照每两个月采样1次的频率, 采集5个点位的表层沉积物样, 分析沉积物磷形态, 解析磷平衡浓度及对外源碳(乙酸钠)的响应, 并对沉积物磷释放风险进行评估。结果表明, 十五里河水体磷素污染严重, 沉积物总磷含量平均为 $915.04 \sim 1\,205.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且沿城乡梯度方向缓慢下降, 而生物有效性磷含量则保持稳定; 外源碳降低了沉积物 EPC_0 值(下降约29%), 也改变了各采样点 EPC_0 值大小排序; 上覆水 SRP 浓度高于 EPC_0 值所占比例为 66.7%, 而且磷吸附解吸平衡饱和度 $\text{EPC}_{\text{sat}} < -20\%$ 所占比例约 60.0%, 表明十五里河沉积物以磷吸附占优势, 即沉积物总体上处于磷“汇”状态; 外源碳的输入使得 $\text{EPC}_{\text{sat}} < -20\%$ 所占比例由 60.0% 上升为 73.3%, 降低了沉积物磷释放风险水平。

关键词: 磷平衡浓度(EPC_0); 磷吸收; 沉积物; 外源碳添加; 磷释放风险; 巢湖

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2178-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201811050

Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin

LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Five surface sediment samples were collected every two months from the Shiwuli River along an urban-rural gradient, Chaohu Lake Basin, from July 2017 to May 2018. Sediment phosphorus fractions were investigated, and equilibrium phosphate concentration (EPC_0) and its response to exogenous carbon (sodium acetate) addition were explored. Moreover, the risk of phosphorus release from sediment into water column was also evaluated. Results show that the Shiwuli River was seriously polluted by phosphorus. The average values of total phosphorus content in sediments ranged from 915.04 to $1\,205.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and it decreased slowly along the urban-rural gradient, while the bio-available phosphorus content remained stable. Exogenous carbon addition not only reduced the EPC_0 values of sediments (about 29%), but changed the order of EPC_0 values among the five sampling sites as well. In general, the ratio of overlying water SRP (soluble reactive phosphorus) concentration to EPC_0 value was 66.7%, and phosphorus adsorption-desorption equilibrium saturation $\text{EPC}_{\text{sat}} < -20\%$ accounted for about 60.0%, indicating that the surface sediments in the Shiwuli River were dominated by phosphorus adsorption, namely, keeping the phosphorus “sink” state. The inputs of exogenous carbon addition increased the proportion of $\text{EPC}_{\text{sat}} < -20\%$ from 60.0% to 73.3%, which lowered the risk of phosphorus release from sediments.

Key words: equilibrium phosphate concentration (EPC_0); phosphorus uptake; sediment; external carbon addition; phosphorus release risk; Chaohu Lake

磷是水生生物的主要营养元素,也是引起水体富营养化的重要因素^[1]。沉积物不仅是河流的磷汇,也是河水磷的重要内源,可以通过水-沉积物界面向上覆水释放磷而影响河流水质^[2,3]。因此,在河流水质改善中,准确识别河流沉积物磷的“源”或“汇”状态十分重要。截至目前,有关水体沉积物磷吸附/解吸的研究已有很多^[4,5],且研究的内容大都集中在等温吸附和吸附动力学特征方面,其中等温吸附的研究主要针对沉积物性质及环境因素对吸附量的影响^[6,7];有关吸附动力学的研究则主要侧重于描述吸附的快慢和模型拟合的优劣^[8]。磷平衡浓度(EPC_0)通常是指沉积物固相与周边水溶液中磷

酸盐达到吸附与解吸附平衡时水柱中磷酸盐的浓度。有研究表明^[9,10],外加碳源可以影响沉积物磷的生物吸收,而且不同碳源的影响效应存在差异。众所周知,碳、氮和磷同为重要的生源物质。由生态化学计量学原理,不难推断,对于氮、磷污染相对较为严重的水体,碳素丰度可能将在很大程度上限制氮、磷的生物地球化学过程,从而对沉积物的内源磷释放或内源磷固定产生一定程度的影响。但由于相关研究还不够充分,这种影响

收稿日期: 2018-11-07; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579061)

作者简介: 李如忠(1970~),男,博士,教授,主要研究方向为水环境保护与修复机制, E-mail: Lrz1970@163.com

效应对于调控沉积物磷平衡浓度的实际效用及其规律性, 仍缺乏权威的、统一的结论. 当前, 我国城市地区河流水体氮磷污染普遍较为严重, 河流水质改善和氮磷污染负荷削减任务艰巨. 针对这类河流水体, 弄清内源磷释放特征及其影响机制, 对于有效提升河流磷负荷削减和控制能力具有重要意义.

巢湖是国家重点治理的“三湖”之一, 水体氮磷污染严重, 水华大面积暴发频频, 特别是西半湖常年处于富营养状态. 十五里河是合肥城区与西半湖联通的重要水道, 该河上游原有两个氮磷复合肥生产企业, 大量未经处理的工业废水常年直接排入河道, 导致十五里河水体氮、磷污染严重^[11], 并成为巢湖西半湖水体富营养化的重要外因. 目前, 削减和控制入湖氮磷负荷已成为巢湖富营养化治理的重要工作. 作为该流域氮磷污染最严重的城市河道, 十五里河水质改善和氮磷负荷削减尤为引人关注. 截至目前, 有关十五里河的氮磷养分滞留、沉积物氮磷形态和污染特征的研究已有一些^[12~14], 但就沉积物磷吸附-释放临界浓度的外源碳输入影响及其作用机制的研究则还鲜见报道. 本研究拟以该河为对象, 解析沉积物磷吸附平衡浓度及其对外源碳

的响应, 并评估磷释放风险, 以期为十五里河的磷负荷削减和污染控制提供依据.

1 研究区概况

十五里河发源于合肥市大蜀山东南麓, 地处东经 116°40′~117°52′, 北纬 31°30′~32°37′, 全长 35 km, 河流形态曲折变化明显. 十五里河自西北向东南流经合肥市蜀山区和包河区, 在义城镇附近汇入巢湖. 河流上游通过修建溢流坝形成的人工湖(即天鹅湖)是当地重要的景观水体, 坝下主河道长 22.64 km, 流域面积约 111.25 km². 汇流区地形总体平缓, 丘陵岗地和河湖低洼平原为主要地貌类型; 气候温和湿润, 年均气温 15~19℃, 平均湿度 77%, 平均降水量为 1 000 mm.

十五里河上游为合肥市政府政务中心所在地, 河道渠道化特征显著, 城内毗邻地段的两家农用化肥生产企业(即江淮化肥厂和红四方化工集团)分别于 2008 年和 2012 年关停、搬迁; 中游为城市在建区, 主要开发建设商品住宅和低污染工业园区; 下游为城郊结合部, 目前大部分土地已划归环湖北岸湿地和景观建设用地. 本研究采样期间十五里河干流的水质情况见表 1.

表 1 十五里河水质统计结果
Table 1 Mean water quality indexes of the Shiwuli River

采样点	TP /mg·L ⁻¹	SRP /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	EC /μS·cm ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	ORP /mV	pH
SP1	0.83	0.44	22.12	2.33	0.47	244.7	31.33	22.3	7.69
SP2	0.90	0.51	25.90	8.66	0.86	431.0	26.62	1.2	7.79
SP3	1.38	0.90	26.47	11.78	0.62	397.7	30.12	51.7	7.72
SP4	1.26	0.69	25.40	12.96	0.68	462.2	47.83	-4.3	7.73
SP5	0.86	0.51	23.76	4.97	2.24	419.8	24.64	29.0	7.70

2 材料与方法

2.1 样品的采集与预处理

沿十五里河干流的城乡梯度方向, 结合河道和两侧土地利用特征, 布设 5 个采样点位(SP1~SP5), 见图 1. 其中, 采样点 SP1、SP2 位于城市建成区, SP3、SP4 位于城市在建区, SP5 位于城郊结合部的巢湖西半湖北侧的湖滨地带.

2017 年 7 月至 2018 年 5 月, 按照每两个月一次的采样频率, 采集表层沉积物样(0~5 cm)及其上覆水样(上覆水基本理化特征见表 1). 在每个采样点 0.5 m² 范围内, 采集 3 个沉积物平行样, 并均匀混合用于代表该点位沉积物. 将沉积物放置在实验室自然风干, 剔除枯枝碎叶, 研磨后过 100 目尼龙筛, 装入贴有标签的自封袋备用.

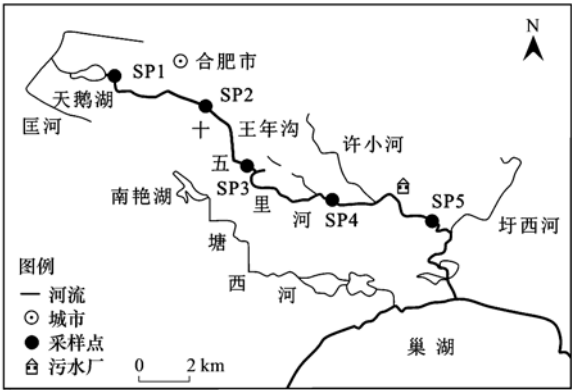


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Schematic graph of the sampling sites

2.2 实验方案设计

针对每个采样点, 设计 4 种实验方案(表 2), 其中方案 1 为常规方法. 针对每种方案, 考

虑设置 8 种不同初始浓度情形(即 0、0.02、0.04、0.1、0.2、0.4、1.0 和 2.0 mg·L⁻¹ 的磷酸二氢钾溶液). 向每个 50 mL 离心管分别加入 0.4 g 沉积物干样, 各方案均加入 20 mL 初始磷浓度. 另外, 方案 3 和方案 4 加入 20 mL 100 mg·L⁻¹ 乙酸钠(以 C 计).

为保持每种方案的体积相同, 将方案 1 和方案 2 再加入 20 mL 蒸馏水, 使水土质量比达 100:1; 方案 2 和方案 4 中另加入 3~4 滴氯仿. 将离心管加

塞后置于 25℃、200 r·min⁻¹ 的条件下, 恒温振荡 72 h. 振荡结束后, 再将其置于 3 000 r·min⁻¹ 离心机中离心 5 min; 分别取上清液 10 mL 置于 50 mL 比色管中, 定容到 50 mL 标线刻度, 并加入 1 mL 抗坏血酸和 2 mL 钼酸盐溶液, 加塞振荡摇匀, 静置 15 min 后, 利用分光光度计(700 nm 吸光度)测定磷酸盐浓度(平衡浓度). 由起始浓度与平衡浓度之差, 扣除空白, 计算沉积物吸附磷酸盐的量. 然后, 利用线性回归法, 计算吸附/解吸平衡浓度.

表 2 EPC₀ 实验条件

Table 2 EPC₀ experimental conditions

方案	初始磷浓度/mg·L ⁻¹	碳源 ¹⁾	氯仿 ²⁾
1	0、0.02、0.04、0.1、0.2、0.4、1.0、2.0	×	×
2	同上	×	√
3	同上	乙酸钠(100 mg·L ⁻¹ , 以 C 计)	×
4	同上	乙酸钠(100 mg·L ⁻¹ , 以 C 计)	√

1) × 表示未添加碳源; 2) × 表示未添加氯仿, √ 表示添加氯仿

2.3 样品分析测试

沉积物总磷(TP)和无机磷(IP)采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 法测定; 易交换态磷(Ex-P)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)及碎屑磷(Ca-P)采用三步连续提取法测定. 磷酸盐(SRP)采用钼酸铵分光光度法测定.

2.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 和 Excel 统计软件完成数据处理和图件绘制.

3 结果与分析

3.1 沉积物磷形态

5 个采样点沉积物各形态磷含量统计结果, 见表 3. 总体上, TP 含量沿城乡梯度方向逐渐减小, 平均值变化范围为 915.04~1 205.31 mg·kg⁻¹. 显然, 5 个采样点的 TP 含量均已明显超过了加拿大安大略省环境和能源部发布指南中能引起最低级别生物毒性效应的 TP 含量(600 mg·kg⁻¹)^[15], 同时也超过了美国国家环境保护局对湖泊沉积物污染状况评价标准的重度污染标准值(650 mg·kg⁻¹)^[16], 由此可以判定十五里河沉积物磷污

染相当严重.

从表 3 可见, IP 平均含量为 709.70~801.27 mg·kg⁻¹, 占 TP 的 48.30%~95.79%. 李如忠等^[12]曾于 2009 年对十五里河表层沉积物磷污染状况进行研究, 得到 IP 含量范围为 551.45~1 477.38 mg·kg⁻¹(均值为 854.81 mg·kg⁻¹), 占 TP 的 91.29%~98.80%, 与本研究存在一定出入. Ex-P 和 Fe/Al-P 易释放于水体, 属于可供水生植物及其他生物利用的潜在活性磷, 因此常被称作生物有效性磷. 十五里河沉积物生物有效性磷占 TP 比重约为 13.30%~48.88%(平均值为 27.71%), 显著低于该河 2009 年水平(平均值为 50.18%)^[12], 但却明显高于天津于桥水库上游河流表层沉积物(平均值为 4.48%, 不计 Ex-P)^[17], 也高于合肥城郊农田溪流水系统沉积物(13.64%~22.18%)^[18]. 总体上, 沿城乡梯度方向 5 个采样点位 TP 含量呈缓慢下降态势, 但生物有效性磷含量则基本相当.

3.2 EPC₀ 变化特征及对外源碳的响应

采用下式计算单位质量沉积物的吸附量 Q (g·kg⁻¹):

$$Q = (c_0 - c_e) \times V/W \tag{1}$$

表 3 沉积物各形态磷含量/mg·kg⁻¹

Table 3 Phosphorus form contents in sediments/mg·kg⁻¹

采样点	Ex-P	Fe/Al-P	Ca-P	IP	TP
SP1	94.39 ± 71.17	197.06 ± 45.75	357.43 ± 60.91	785.92 ± 107.50	1 205.31 ± 224.56
SP 2	81.01 ± 66.90	231.98 ± 89.66	358.10 ± 70.43	801.27 ± 94.54	1 139.69 ± 216.17
SP 3	95.49 ± 73.26	209.51 ± 53.55	328.73 ± 60.15	709.70 ± 102.02	1 125.94 ± 157.82
SP 4	79.88 ± 48.63	223.35 ± 107.98	270.67 ± 84.47	734.22 ± 101.98	1 072.07 ± 189.11
SP 5	80.67 ± 55.21	219.22 ± 66.43	230.81 ± 64.67	715.14 ± 105.77	915.04 ± 204.97

式中, c_0 为实际初始浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_e 为实验结束后平衡质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为加入样品的溶液体积, L ; W 为沉积物干重, g .

在低浓度磷的范围内, 沉积物对磷的吸附采用线性方程模拟, 即:

$$Q = m \times c_e - \text{NAP} \tag{2}$$

式中, Q 为沉积物对磷的吸附量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; c_e 为平衡磷浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NAP 为沉积物本底吸附态磷, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; m 为斜率, $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$. 这里, 实验测得的沉积物磷吸附量实际上仅是表观吸附量, 它包括原先结合在沉积物上可以解吸的磷和真正在实验中被吸附的磷^[19].

图 2 为 2017 年 7 月各采样点 4 种方案的沉积物对磷等温吸附曲线. 不难看出, 碳源添加使得磷吸附平衡浓度整体向左发生了偏移. 该月相应的各采样点 EPC_0 值及其线性拟合的可决系数 R^2 见表 4. 5 个采样点位中各方案的 EPC_0 值大小排序具有基本相同的规律性, 即表现为: 方案 3 < 方案 1 < 方案 2 < 方案 4.

其它 5 次采样中, 沉积物对磷等温吸附曲线与图 2 情形类似, 各采样点 EPC_0 值及其线性拟合的可决系数 R^2 见表 4. 总体上, 作为常规方法的方案 1, 相应的 EPC_0 值范围为 $0.008 \sim 0.570$ (均值为 0.356) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 与长江中下游浅水湖泊沉积物基本相当($0.012 \sim 0.416 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[20]. 方案 1、2 和方案 4 中各采样点 EPC_0 大小排序相同, 总体上都表现为: $\text{SP4} > \text{SP3} > \text{SP2} > \text{SP5} > \text{SP1}$; 方案 3 的 EPC_0 变化范围为 $0.031 \sim 0.483 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.252 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显低于方案 1, 各采样点 EPC_0 值排序大体为: $\text{SP2} \approx \text{SP3} > \text{SP4} > \text{SP1} > \text{SP5}$. 总的来看, 乙酸钠的添加不仅降低了各采样点的 EPC_0 值, 也使相应的 EPC_0 值排序发生了改变, 但处于河段首末端的 SP1 、 SP5 的 EPC_0 值始终处于相对较低的水平.

总体上, 方案 2 的 EPC_0 均值($0.384 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)相较于方案 1 高出 8%, 方案 3 比方案 1 约低 29%, 而方案 4 的 EPC_0 均值($0.403 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)比方案 3 提高了 60%. 根据 EPC_0 的基本内涵, 初步判定乙酸钠对降低十五里河沉积物的磷平衡浓度有效.

表 4 十五里河沉积物磷平衡浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Phosphorus equilibrium concentration in sediments from the Shiwuli River/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$											
日期 (年·月)	方案	SP1		SP2		SP3		SP4		SP5	
		EPC_0	R^2	EPC_0	R^2	EPC_0	R^2	EPC_0	R^2	EPC_0	R^2
2017-07	1	0.171	0.970	0.400	0.966	0.351	0.974	0.460	0.937	0.308	0.959
	2	0.206	0.952	0.308	0.957	0.308	0.928	0.490	0.935	0.388	0.968
	3	0.087	0.971	0.134	0.975	0.199	0.963	0.109	0.976	0.097	0.931
	4	0.169	0.983	0.472	0.840	0.558	0.967	0.583	0.960	0.466	0.944
2017-09	1	0.153	0.953	0.437	0.988	0.361	0.973	0.433	0.963	0.361	0.900
	2	0.184	0.940	0.383	0.961	0.325	0.947	0.508	0.841	0.291	0.957
	3	0.176	0.949	0.277	0.956	0.216	0.933	0.216	0.965	0.136	0.972
	4	0.191	0.884	0.399	0.995	0.421	0.922	0.472	0.855	0.313	0.969
2017-11	1	0.071	0.928	0.147	0.995	0.102	0.967	0.008	0.964	0.287	0.958
	2	0.066	0.938	0.210	0.966	0.293	0.909	0.098	0.943	0.331	0.969
	3	0.063	0.977	0.171	0.955	0.101	0.960	0.045	0.960	0.031	0.973
	4	0.072	0.984	0.268	0.944	0.297	0.878	0.142	0.938	0.386	0.934
2018-01	1	0.393	0.910	0.340	0.906	0.490	0.956	0.468	0.945	0.342	0.891
	2	0.469	0.946	0.374	0.886	0.522	0.868	0.570	0.945	0.277	0.958
	3	0.290	0.919	0.325	0.939	0.408	0.965	0.369	0.948	0.159	0.869
	4	0.467	0.920	0.377	0.926	0.478	0.892	0.484	0.950	0.310	0.915
2018-03	1	0.486	0.897	0.416	0.916	0.570	0.906	0.528	0.929	0.266	0.982
	2	0.536	0.938	0.492	0.939	0.594	0.905	0.537	0.879	0.271	0.885
	3	0.439	0.909	0.433	0.953	0.417	0.914	0.374	0.945	0.244	0.971
	4	0.467	0.963	0.502	0.928	0.516	0.889	0.535	0.913	0.318	0.947
2018-05	1	0.414	0.861	0.516	0.908	0.385	0.904	0.524	0.872	0.487	0.906
	2	0.466	0.912	0.497	0.927	0.498	0.924	0.505	0.916	0.531	0.871
	3	0.398	0.918	0.387	0.937	0.360	0.924	0.483	0.940	0.428	0.945
	4	0.461	0.893	0.471	0.895	0.449	0.884	0.570	0.871	0.485	0.873

3.3 基于 EPC_0 的沉积物磷释放风险评估

一般地, EPC_0 值越高沉积物向上覆水中释放磷的潜力越大. 当水柱中 SRP 浓度高于 EPC_0 值时, 沉积物往往表现出磷吸附的趋势, 而当 SRP 浓

度低于 EPC_0 值时, 则又表现出磷释放的特点. 而且, EPC_0 值与上覆水 SRP 浓度悬殊越大, 磷吸附或解吸作用也就愈发强烈. 因此, 通过比较 EPC_0 值与上覆水 SRP 浓度的相对大小, 可以初步解析沉

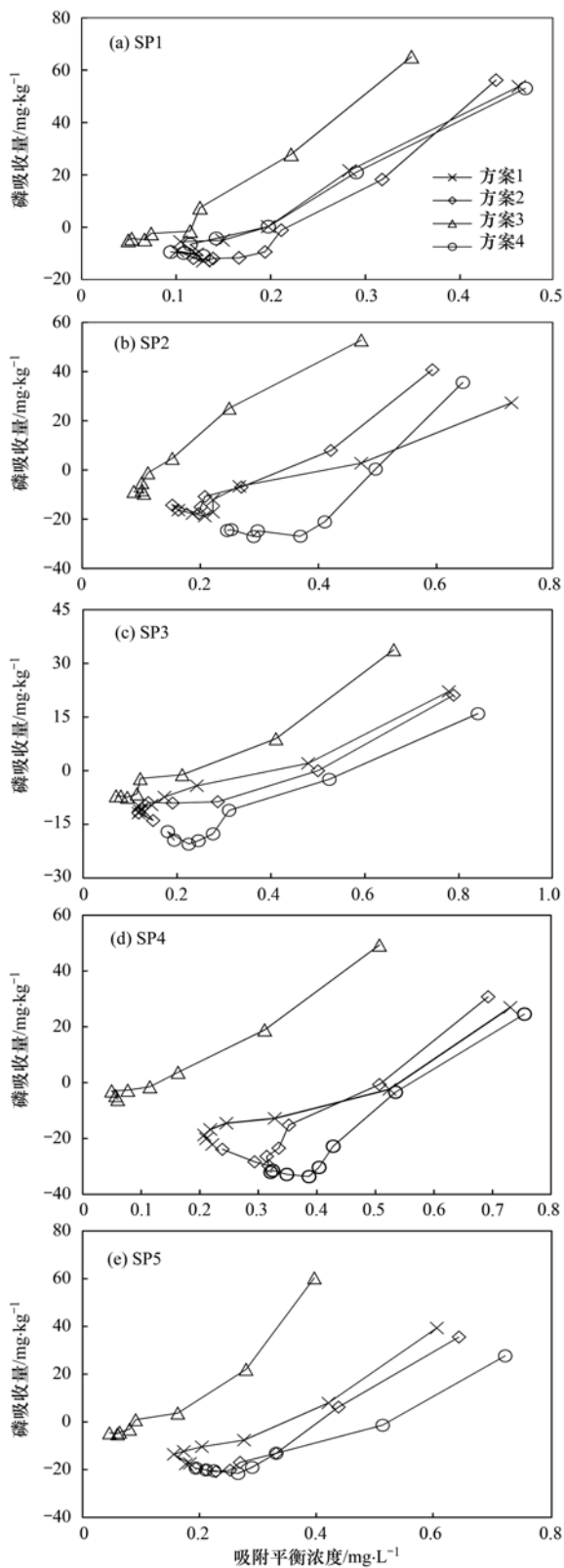


图2 十五里河沉积物对磷等温吸附曲线

Fig. 2 Isothermal adsorption curve of phosphorus in sediments of the Shiwuli River

沉积物的磷释放潜能,进而评估沉积物对水体释放磷的潜力或风险水平^[21]。

图3为方案1和方案3中每个采样点 EPC_0 值与其相应的上覆水 SRP 浓度的对比情况。可以看

出,各采样点不同月份的 EPC_0 值存在明显的动态变化性,但变化幅度总体上低于上覆水 SRP 浓度,且都是以 11 月为最低。在方案 1 中,7、9、11 月各采样点基本表现为上覆水 SRP 浓度大于 EPC_0 值,表明沉积物磷吸附作用更显著,即发生了正吸附。2018 年 3 月,除 SP3 外,其它 4 个采样点均表现为 EPC_0 大于上覆水 SRP 浓度,表明沉积物可能向水体释放磷(即发生负吸附)。SP2、SP3、SP4 在 2018 年 1 月和 5 月表现为 SRP 浓度大于 EPC_0 值,SP1 和 SP5 则表现为 EPC_0 值大于 SRP 浓度。在整个采样期间,除 SP3 上覆水 SRP 浓度一直高于 EPC_0 外,其它 4 个采样点都出现了 EPC_0 值高于上覆水 SRP 浓度的情况。总体上,SRP 浓度高于 EPC_0 值的比率约为 66.7%,表明十五里河沉积物中磷吸收行为占据优势。

在方案 3 中, EPC_0 与上覆水中 SRP 浓度相对大小关系基本未发生变化,即原本发生正吸附的样本,在添加了碳源后基本上仍处于正吸附状态,并且吸附作用得到了进一步地加强;但原来发生负吸附的情形,在添加了碳源后则有可能发生反转,即由释放状态转变为吸附状态。例如,采样点 SP4 的 7 月样本和采样点 SP5 的 1 月样本就出现了这种情况。

针对天然水体沉积物-水界面磷吸附解吸过程, Jarvie 等^[22]提出了磷吸附解吸平衡饱和度概念,并将其表征为: $EPC_{sat} = 100\% \times (EPC_0 (SRP)/EPC_0)$,规定当 $EPC_{sat} > 20\%$ 时,沉积物向水体释放磷;当 $EPC_{sat} < -20\%$ 时,沉积物向水体吸收磷;当 EPC_{sat} 为 $\pm 20\%$ 时,沉积物-水界面处于一种平衡状态。整个采样期间,方案 1 的 EPC_{sat} 变化范围为 $-13466\% \sim 61\%$,方案 3 的 EPC_{sat} 范围为 $-2221\% \sim 57\%$,具体情况见表 5。

在方案 1 中, $EPC_{sat} > 20\%$ 所占比例约为 26.7%,而 $EPC_{sat} < -20\%$ 所占比例约 60.0%,且其 EPC_{sat} 绝对值显著高于前者,意味着无外源碳辅助作用下十五里河沉积物以磷吸收特征占主导,即处于磷汇状态。在方案 3 中, $EPC_{sat} > 20\%$ 所占比例约为 13.3%,而 $EPC_{sat} < -20\%$ 所占比例上升为 73.3%,且其 EPC_{sat} 绝对值也显著高于前者,意味着外源碳输入使河床沉积物的磷“汇”功能得到加强、磷释放风险得以下降,这对改善十五里河水质、减轻磷负荷向下游传输带来的生态压力是有利的。另外,在方案 1、3 中,除采样点 SP3 始终表现出磷吸附特征外,其它 4 个采样点都有一定的磷释放。

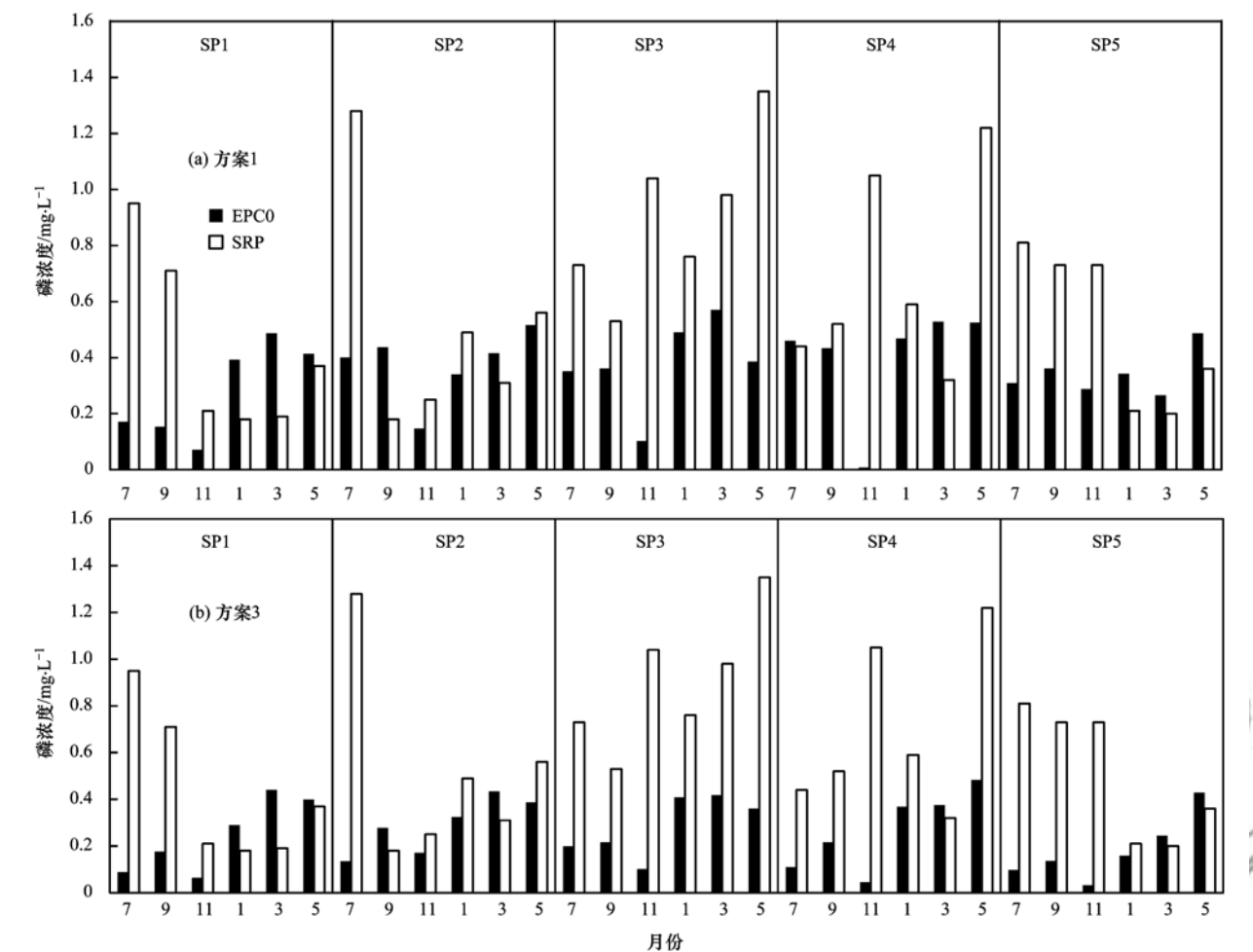


图3 各采样点沉积物 EPC₀ 与上覆水 SRP 浓度比较

Fig. 3 Comparison between sediment EPC₀ and corresponding overlying water SRP concentration

表 5 沉积物磷吸附解吸平衡饱和度/%

Table 5 Phosphorus adsorptions-desorption equilibrium saturation in the sediments/%

日期 (年·月)	SP1		SP2		SP3		SP4		SP5	
	方案 1	方案 3	方案 1	方案 3	方案 1	方案 3	方案 1	方案 3	方案 1	方案 3
2017-07	-457	-986	-220	-853	-108	-267	4	-305	-163	-737
2017-09	-365	-303	59	35	-47	-145	-20	-141	-102	-435
2017-11	-195	-233	-71	-47	-915	-931	-13 466	-2217	-154	-2 221
2018-01	54	38	-44	-51	-55	-86	-26	-60	39	-32
2018-03	61	57	25	28	-72	-135	39	15	25	18
2018-05	11	7	-9	-45	-250	-276	-133	-153	26	16

4 讨论

由于方案 1 与方案 2 的差异仅在于是否添加了抑制剂, 因此两方案 EPC₀ 差值大小基本可以体现生物因素的影响水平. 方案 1 和方案 2 的 EPC₀ 均值分别为 0.356 mg·L⁻¹ 和 0.384 mg·L⁻¹, 表明在无外源碳辅助作用下, 十五里河现状沉积物磷的生物吸收作用较弱, 对于推动沉积物磷平衡浓度变化的能力有限. 方案 3 中 5 个采样点 EPC₀ 均值为 0.252 mg·L⁻¹, 明显低于方案 1, 意味着外加碳源促进了磷的生物吸收, 致使沉积物磷平衡浓度下降明显.

众所周知, EPC₀ 是沉积物磷的吸附-释放临界浓度, 它是生物非生物因素共同作用的结果. 十五里河水体氮、磷污染严重, 沉积物氮和磷含量均很高, 于是作为生源物质的碳源是否充足, 将影响沉积物磷的生物地球化学循环, 进而可能影响沉积物-水界面的磷交换和动态平衡. 十五里河沉积物中有机质含量大约为 5.56% ~ 8.73%^[13], 与沉积物中较高的氮磷含量相比, 有机质含量似乎略显不足, 因此可以为生物吸收磷而提供的碳素并不充足. 笔者以为, 十五里河现状沉积物磷的吸收作用较弱, 可能与沉积物中有机质(或碳源)不够充分有

很大的关系。

虽然方案3、4中均添加了乙酸钠,但由于方案4中又滴入了氯仿,致使产生的最终效应截然不同。与常规方法(方案1)相比,方案3的 EPC_0 显著下降,而方案4则明显增大。Khoshmanesh等^[9]的研究发现,乙酸钠能够促进沉积物对磷的吸收,而且其效果超过葡萄糖或葡萄糖与乙酸钠混合溶液带来的影响。易文利等^[23]以葡萄糖为外加碳源研究了沉积物磷释放特征,结果发现葡萄糖促进了沉积物中Fe/Al-P(生物有效磷)的释放,这与本研究方案4结论一致。众所周知,好氧环境可以抑制沉积物磷的释放,而厌氧环境则加速磷的释放。无论是葡萄糖还是乙酸钠,都属易于生物吸收利用和生化降解的有机物,而大量生化降解情形的存在势必造成水体溶解氧浓度的显著下降,从而获得有利于沉积物磷释放的厌氧环境条件,加速易交换态磷、铁铝结合态磷等向水相的释放,这可能是方案4中 EPC_0 值增大的主要原因。可以推断,方案3中 EPC_0 值的减小并不单纯由磷的生物吸收造成,而是吸收与释放过程相互博弈的结果,即外源碳在促进生物有效性磷释放的同时,也刺激了磷的生物吸收,由于后者在速度或强度上超过了前者,导致最终结果表现出磷吸附特征,使得 EPC_0 值减小。另外,沉积物磷形态及粒度大小也可能影响沉积物对磷的吸收和释放,这已为很多研究所证实^[24~26]。需要特别指出的是,本研究的相关结果仅是基于72h培养时间而得到的,适当延长培养时间可能会给各方案结果带来怎样的影响,还有待深入探究。

本研究得到沉积物IP平均含量及其在TP所占比例、生物有效性磷占TP百分比等,都显著低于该河2009年的水平。笔者以为,可能与该河上游地区的两家氮肥、磷肥生产企业(即江淮化肥厂和红四方化工集团)分别于2008年和2012年关停、搬迁有很大关系。由于化肥厂以前的生产废水基本上都是处于直排状态,而且厂区当时处于城郊外围,十五里河流域也没有其他明显的点源存在,生活污水排放量也较少,导致化肥厂排放的大量氮磷富集在河道底质沉积物中。毫无疑问,两个化肥厂的搬迁直接导致入河废水中无机磷和生物可利用磷量大幅度下降,致使多年后表层沉积物中IP平均含量、IP和生物有效性磷在TP中所占比例等不可避免降低。另外,十五里河沉积物磷吸收占优势主要得益于较高的上覆水SRP浓度,随着河流截污及河道水质的逐步改善,沉积物磷释放趋势可能随之增强,因此在十五里河水环境治理和水生态修复中需要引起注意。

5 结论

(1)十五里河水体和沉积物磷污染较为严重,沿城乡梯度方向沉积物TP含量呈缓慢下降态势,但生物有效性磷含量则保持稳定,且生物有效性磷占TP比重较数年前显著下降。

(2)十五里河沉积物 EPC_0 对于外加碳源响应较为积极,并在外加碳源影响下沉积物 EPC_0 下降明显,提高了沉积物磷的吸附能力。

(3)十五里河沉积物以磷吸附特征占优势地位,总体上处于磷汇状态;而且外源碳添加有利于加强十五里河沉积物的磷汇作用、降低沉积物磷释放风险,从而可以减轻对下游巢湖的生态压力。

参考文献:

- [1] 于胜楠,李勇,李大鹏,等. 灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3962-3969.
Yu S N, Li Y, Li D P, et al. External phosphorus adsorption and immobility with the addition of ignited water purification sludge [J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3962-3969.
- [2] Collins S D, Shukla S, Shrestha N K. Drainage ditches have sufficient adsorption capacity but inadequate residence time for phosphorus retention in the Everglades [J]. Ecological Engineering, 2016, **92**: 218-228.
- [3] Small G E, Ardón M, Duff J H, et al. Phosphorus retention in a lowland Neotropical stream following an eight-year enrichment experiment[J]. Freshwater Science, 2016, **35**(1): 1-11.
- [4] 易齐涛,孙鹏飞,谢凯,等. 区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3894-3903.
Yi Q T, Sun P F, Xie K, et al. Impact of regional water chemistry on the phosphorus isothermal adsorption of the sediments in Three subsidence waters of the Huainan mine areas [J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3894-3903.
- [5] Wang Q R, Li Y C. Phosphorus adsorption and desorption behavior on sediments of different origins[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(6): 1159-1173.
- [6] 胡洁蕴,李淑芹,宋歌,等. 北京市北运河沉积物对氮、磷的吸附/解吸动力学特征[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 650-659.
Hu J Y, Li S Q, Song G, et al. Adsorption/desorption dynamic characteristic of sediments on nitrogen and phosphorus in the north Grand Canal of Beijing [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(3): 650-659.
- [7] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(4): 1474-1480.
- [8] 姜霞,王秋娟,王书航,等. 太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1285-1291.
Jiang X, Wang Q J, Wang S H, et al. Characteristic analysis of the adsorption/desorption of nitrogen and phosphorus in the sediments of Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1285-1291.
- [9] Khoshmanesh A, Hart B T, Duncan A, et al. Biotic uptake and release of phosphorus by a wetland sediment [J]. Environmental Technology Letters, 1999, **20**(1): 85-91.

- [10] Lottig N R, Stanley E H. Benthic sediment influence on dissolved phosphorus concentrations in a headwater stream [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(3): 297-309.
- [11] 李如忠, 李峰. 巢湖十五里河沉积物生物有效性氮磷分布及相关性[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(8): 873-881.
Li R Z, Li F. Distribution and correlation analysis of bioavailable nitrogen and phosphorus in sediments of Shiwuli River, Chaohu Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(8): 873-881.
- [12] 李如忠, 李峰, 周爱佳, 等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
Li R Z, Li F, Zhou A J, *et al.* Distribution and bioavailability of nitrogen and phosphorus species in the sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- [13] 李如忠, 张亮. 巢湖十五里河不同水力特性区沉积物及间隙水营养盐的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 2960-2968.
Li R Z, Zhang L. Distribution characteristics of nutrients in core sediments and interstitial water from different hydraulic property zones in Shiwuli Stream, Chaohu Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 2960-2968.
- [14] 李如忠, 丁贵珍. 基于 OTIS 模型的巢湖十五里河源头段氮磷滞留特征[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 742-751.
Li R Z, Ding G Z. Characteristics of nitrogen and phosphate retention in the headwater stream of Shiwulihe in Lake Chaohu basin based on OTIS model [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(3): 742-751.
- [15] 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 等. 不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3375-3383.
Li R Z, Qin R B, Huang Q F, *et al.* Fractions and release risk of phosphorus in surface sediments of three headwater streams with different styles of water supply [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3375-3383.
- [16] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39**(1): 20-31.
- [17] 吕豪朋, 李崇巍, 马振兴, 等. 天津于桥水库上游河流表层沉积物不同形态磷的空间分布[J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **38**(3): 66-71.
Lyu H P, Li C W, Ma Z X, *et al.* Spatial distribution of different forms of phosphorus in sediments of the upstream of Tianjin Yuqiao Reservoir [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, **38**(3): 66-71.
- [18] 裴婷婷, 李如忠, 高苏蒂, 等. 合肥城郊典型农田溪流水系统沉积物磷形态及释放风险分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 548-557.
Pei T T, Li R Z, Gao S D, *et al.* Phosphorus fractions and release risk in surface sediments of an agricultural headwater stream system in Hefei suburban, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 548-557.
- [19] 李慧, 周易勇, 余能智. 锦江河沉积物磷形态与吸附行为及磷释放风险[J]. *水生生态学杂志*, 2017, **38**(4): 27-35.
Li H, Zhou Y Y, Yu N Z. Determination of phosphorus forms and adsorption behavior of sediments in Jinjiang River and the risk of phosphorus release [J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(4): 27-35.
- [20] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 38-43.
Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphate adsorption characteristics onto the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(3): 38-43.
- [21] 于佳真, 王晓昌, 薛涛, 等. 不同温度下西安汉城湖沉积物吸附、释放特性和磷形态[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(11): 6275-6282.
Yu J Z, Wang X C, Xue T, *et al.* Phosphorus sorption, release characteristic under different temperature and phosphorus fractions in sediments of Hancheng Lake in Xi'an [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(11): 6275-6282.
- [22] Jarvie H P, Jürgens M D, Williams R J, *et al.* Role of river bed sediments as sources and sinks of phosphorus across two major eutrophic UK river basins: the Hampshire Avon and Herefordshire Wye [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **304**(1-4): 51-74.
- [23] 易文利, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 外加碳源及沉水植物对沉积物各形态磷的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(6-7): 1092-1096.
Yi W L, Wang S R, Yang S W, *et al.* Influences of submerged vegetation *Myriophyllum spicatum* and carbon source addition on the forms of phosphorus in sediments [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(6-7): 1092-1096.
- [24] 刘佳, 雷丹, 李琼, 等. 黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1608-1615.
Liu J, Lei D, Li Q, *et al.* Characteristics of phosphorus fractions and phosphate diffusion fluxes of sediments in cascade reservoirs of the Huangbai River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1608-1615.
- [25] Meng J, Yao Q Z, Yu Z G. Particulate phosphorus speciation and phosphate adsorption characteristics associated with sediment grain size [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **70**: 140-145.
- [26] Bastami K D, Neyestani M R, Raeisi H, *et al.* Bioavailability and geochemical speciation of phosphorus in surface sediments of the Southern Caspian Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **126**: 51-57.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)