

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



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应

汤宁^{1,2}, 李如忠^{1,2*}, 王聿庆^{1,2}, 何瑞亮^{1,2}, 刘超^{1,2}

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学纳米矿物与污染控制安徽普通高校重点实验室, 合肥 230009)

摘要: 2018年10月~2019年4月, 在合肥市板桥河的蔡田铺污水厂尾水排放口上、下游河道4个采样点位, 按照每两个月采样一次的频率采集沉积物和上覆水样, 分析尾水排放对河道沉积物磷形态及磷平衡浓度(EPC₀)的影响, 解析沉积物磷平衡浓度及磷释放风险的外源碳(乙酸钠)响应。结果表明, 板桥河水体沉积物磷素受污水厂尾水影响较大, 排放口上、下游沉积物总磷均值分别为789.39 mg·kg⁻¹和854.41 mg·kg⁻¹, 生物有效性磷均值分别为157.19 mg·kg⁻¹和173.37 mg·kg⁻¹; 4个采样点的EPC₀值大小排序为: SP1 > SP2 > SP3 > CP, 表明尾水排入提高了河流EPC₀, 致使河流沉积物磷释放风险增加; 外源碳的添加明显降低沉积物的EPC₀值, 特别是紧邻排放口的SP1下降最为显著, 表明外源碳添加对降低沉积物磷释放风险有效。

关键词: 污水厂尾水; 磷形态; 磷平衡浓度(EPC₀); 外源碳添加; 磷释放风险

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0801-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201908084

Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach

TANG Ning^{1,2}, LI Ru-zhong^{1,2*}, WANG Yu-qing^{1,2}, HE Rui-liang^{1,2}, LIU Chao^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Nano minerals and Pollution Control of Anhui Higher Education Institutes, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: From October 2018 to April 2019, the surface sediment and overlying water samples were collected every two months from the upstream and downstream of the effluent outlet of the Caitianpu sewage treatment plant in the Banqiao River, Hefei City. The effects of the sewage treatment plant effluent on both phosphorus forms and the equilibrium phosphate concentration (EPC₀) in sediments were analyzed. The response of equilibrium phosphate concentration to external carbon (sodium acetate) and the release risk of phosphorus in sediments were investigated. Result show that the phosphorus pollution in Banqiao River was more severe. The average values of total phosphorus in the sediments at the upper and lower effluent outlet were 789.39 mg·kg⁻¹ and 854.41 mg·kg⁻¹, respectively, and the average bio-available phosphorus amounts were 157.19 mg·kg⁻¹ and 173.37 mg·kg⁻¹, respectively. The EPC₀ values of the four sampling points decreased in the order SP1 > SP2 > SP3 > CP, indicating that the sewage treatment plant effluent increased the EPC₀ level and phosphorus release risk of the stream sediments. Moreover, the addition of exogenous carbon significantly decreased the EPC₀ value of the sediment, especially in SP1, suggesting that the addition of exogenous carbon decreased the risk of phosphorus release from sediments.

Key words: sewage treatment plant effluent; phosphorus form; equilibrium phosphate concentration (EPC₀); external carbon addition; phosphorus release risk

随着城市污水厂建设规模和数量的日益增加, 污水厂尾水排放量越来越大, 由尾水排放带来的生态环境问题引起人们的关注^[1]. 由于污水脱氮除磷工艺技术的局限性, 使得尾水中氮、磷负荷依旧较高, 从而影响河流水质和水生态系统健康. 此外, 城市污水厂尾水往往具有微生物可利用性碳源含量偏低的特点^[2], 使得河流生源物质循环过程变得更为复杂. 磷是水体富营养化的主要限制性因子, 沉积物充当磷“源”或“汇”的何种角色, 往往受到磷平衡浓度(EPC₀)与上覆水可溶性磷酸盐浓度相对大小的控制. 一般地, EPC₀值越高, 沉积物向水体释放磷的风险相对越大^[3,4], 反之则越小. 截至目前, 针对河流底质磷平衡浓度的研究已有很多^[5,6], 特别是沉积物性质和环境因素对EPC₀值的影响颇受关注^[7,8], 而对污水厂尾水排入可能带来的沉积物

EPC₀变化及磷释放风险影响还关注不足. Stutter等^[9]的研究表明, 污水厂尾水使河道悬浮沉积物EPC₀值增大, 但由此导致的河流水环境水生态退化则可以通过调控内源磷释放加以缓解. 当前, 我国城市地区河流受污水厂尾水影响情况极为普遍, 从水污染防治和水生态保护角度来看, 有必要针对该情形下河流沉积物磷形态及磷释放风险调控开展专门研究.

巢湖是水体富营养化颇为严重的湖泊^[10], 目前全湖水体富营养化存在逐年加重的趋势, 特别是南淝河和十五里河等入湖河口水域水华现象更为突

收稿日期: 2019-08-10; 修订日期: 2019-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579061)

作者简介: 汤宁(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境保护与评价, E-mail: 466938720@qq.com

* 通信作者, E-mail: lrz1970@163.com

出. 据报道, 合肥城区南淝河入流补给水中 90% 来自污水处理厂尾水, 致使该河道整个干流都表现出较为明显的富营养化特征. 李如忠等^[11-13]对合肥城区污染严重的多条溪流沟渠, 开展了沉积物磷的生物非生物吸收贡献分析, 测算了沉积物的 EPC₀ 值, 但对污水厂尾水可能带来的河道沉积物磷形态及释放风险变化未给予必要的关注. 本文拟以南淝河流域板桥河支流为研究对象, 就污水厂尾水汇入对沉积物磷形态和磷平衡浓度影响开展量化分析, 解析外源碳添加对磷平衡浓度和释放风险的影响, 以期污水厂尾水接纳河道水环境管理和水污染控制提供依据.

1 研究区概况

板桥河是巢湖西半湖入湖河流南淝河的一条重要支流, 起源于合肥市长丰县境内, 横穿合肥北部城区, 全长 26.30 km, 流域面积 133.78 km². 该河水面

平均宽约 20m, 河道上口平均宽度 50m, 由于河床比降较小, 整条河流水体流动较为缓慢. 本研究所河段位于城市边缘, 河道两侧为环保透水砖砌成的垂直河岸, 河滩上种植香樟、柳树等景观林木.

板桥河中上游地处城郊结合部, 下游为城市建成区. 蔡田铺污水厂毗邻板桥河右侧大堤, 地处庐阳区故黄路与九顶山路交口北侧. 污水厂一、二期工程设计处理规模均为 5 万 m³·d⁻¹, 分别采用氧化沟、A²/O 处理工艺, 并分别于 2008 年和 2017 年投入运行. 三期工程采用 A²/O 处理工艺, 设计处理规模为 20 万 m³·d⁻¹, 目前正处于扩建中. 尾水由岸边排入河道, 由于污水厂出水的水泵提升动能转化, 在排放口附近尾水与河水掺混剧烈. 采样期间的板桥河及污水厂尾水的水质统计结果见表 1. 尾水排放口上、下游及尾水出流的氧化还原电位 ORP 值差异较为明显, 这与污水处理过程中大量曝气, 导致尾水出流的溶解氧浓度偏高、氧化性增强有关.

表 1 河流及污水厂尾水主要理化性质¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of stream water and sewage treatment plant effluent

指标	CP	SP1	SP2	SP3	尾水出流
TP/mg·L ⁻¹	0.16 ± 0.05	0.30 ± 0.07	0.24 ± 0.07	0.17 ± 0.03	0.38 ± 0.12
SRP/mg·L ⁻¹	0.10 ± 0.04	0.18 ± 0.06	0.15 ± 0.05	0.11 ± 0.04	0.21 ± 0.08
TN/mg·L ⁻¹	18.73 ± 11.82	27.34 ± 8.08	23.18 ± 9.14	20.45 ± 10.73	31.55 ± 7.59
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	2.54 ± 1.48	4.41 ± 1.08	3.58 ± 1.48	2.59 ± 0.92	4.99 ± 1.38
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	1.77 ± 0.79	2.48 ± 0.76	2.20 ± 0.74	1.87 ± 0.48	3.33 ± 1.17
COD/mg·L ⁻¹	20.08 ± 6.52	37.86 ± 8.00	24.89 ± 6.43	20.31 ± 6.48	44.06 ± 6.18
EC/μS·cm ⁻¹	444 ± 39	562 ± 122	555 ± 104	573 ± 95	608 ± 95
TDS/mg·L ⁻¹	220 ± 24	281 ± 60	277 ± 52	286 ± 47	304 ± 47
ORP/mV	-194 ± 91	353 ± 225	304 ± 219	2725 ± 202	434 ± 208
pH	7.50 ± 0.28	7.53 ± 0.12	7.52 ± 0.21	7.66 ± 0.25	7.60 ± 0.18

1) 2018 年 10 月 ~ 2019 年 4 月, 每两个月采集一次水样, 共计 4 次; 表格数据均为平均值 ± 标准差

2 材料与方法

2.1 采样点布设

本研究在蔡田铺污水厂尾水排放口的上、下方河道, 沿水流行进方向依次布设了 4 个采样点位, 即 CP、SP1、SP2 和 SP3. 该河段长约 2.5 km, 水面宽度 25 m 左右. 其中, 采样点 CP 位于尾水排放口上游 500 m 处并作为对照点, 在其下方与尾水排放口之间有一座滚水坝, 水坝上、下水位落差约 1 m; SP1、SP2 和 SP3 分别位于排放口下游 220、1 000 和 2 000 m 处, 其中 SP1 处于河流弧形转弯处, 且在 SP1 和 SP2 之间也有一座滚水坝, 但该坝的水位落差很小, 仅有 20 cm 左右. 在城市建成区, 板桥河沿河两侧的排污暗渠明显增多, 有些暗渠目前仍处于间歇性的违规排污状态. 为尽可能排除这类排污行为的干扰, 将 SP1、SP2 和 SP3 设定在排放口下游 2 000 m 内暗渠或暗管较少的河段内. 采样点分布大

体情况, 见图 1.

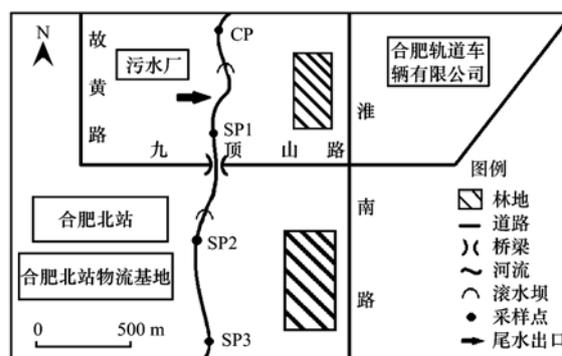


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Sketch-map of distribution of sampling sites

2.2 样品采集与预处理

2018 年 10 月 ~ 2019 年 4 月, 按照每两个月采集一次的频率采集沉积物和上覆水样. 在每个采样点 0.5 m² 范围内, 采集 3 份表层 (0 ~ 5 cm) 底质沉积物, 并将其充分混合以代表该点位样品. 将采集的

新鲜底质泥样放在实验室阴凉通风处自然风干, 剔除枯枝碎叶, 经研磨过 100 目尼龙筛后装入密封袋备用. 现场测定上覆水 EC、TDS、ORP 和 pH 指标, 其它水质指标(表 1)均在实验室完成分析测试.

2.3 实验方案设计

针对沉积物 EPC_0 , 设计 4 种实验方案(表 2), 其中方案 1 为常见实验方法. 有关实验方法的具体操作过程描述参见文献[13]. 考虑到污水脱氮除磷

工艺需要消耗大量的碳, 从而影响到尾水中碳含量, 为此这里将方案 3、4 中外源碳含量提高到 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.4 沉积物磷形态测定

采用 SMT 法测定沉积物总磷(TP)、无机磷(IP)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)和碎屑磷(Ca-P); 采用提取剂为 MgCl_2 的连续提取法, 测定沉积物易交换态磷(Ex-P).

表 2 EPC_0 实验条件

Table 2 EPC_0 experimental conditions

方案	初始磷浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	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(以 C 计) $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	×
4	同上	乙酸钠(以 C 计) $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	√

1) × 表示未添加碳源; 2) × 表示未添加氯仿, √ 表示添加氯仿

3 结果与分析

3.1 沉积物磷形态特征

4 个采样点沉积物各形态磷含量, 见表 3. 显然, 除 2018 年 10 月数据异常外, 其它各次采样中排污口下方各采样点沉积物 TP 含量均高于排放口上方对照点 CP, 高低排序为 $SP1 > SP2 > SP3 > CP$, 即排污口下方沉积物 TP 呈现递减趋势. 虽然 2018 年 10 月各采样点沉积物 IP、Fe/Al-P 含量大体相近, 但在其它时段, 则基本都表现为排放口下方更高一些,

Ex-P 含量也表现出了类似特征. 因此, 污水厂尾水排放对受纳河段沉积物磷形态存在较为明显的影响.

表 3 中各采样点底质 TP 含量均显著高于加拿大安大略省环境和能源部发布指南中可能引起最低级别生物毒性效应的 TP 含量阈值 ($600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[14], 也明显超过了美国国家环保署湖泊沉积物污染状况评价标准的重度污染标准 ($650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[15]. 因此, 可以认为板桥河沉积物磷污染较为严重, 生态风险水平较高.

表 3 沉积物不同形态磷含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Phosphorus form contents in sediments/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

日期(年-月)	指标	CP	SP1	SP2	SP3	平均值 ¹⁾
2018-10	Ex-P	25.13	26.16	28.35	30.34	28.28
	Fe/Al-P	337.94	300.63	295.25	290.41	295.43
	Ca-P	282.65	249.12	390.73	374.44	338.10
	IP	495.83	397.84	415.12	434.35	415.77
	TP	867.65	865.15	789.75	851.85	835.58
2018-12	Ex-P	25.75	27.81	31.32	30.29	29.81
	Fe/Al-P	263.10	335.31	263.10	270.10	289.50
	Ca-P	225.05	285.22	197.54	329.07	270.61
	IP	498.43	518.97	477.55	538.21	511.58
	TP	790.28	895.93	851.86	846.62	864.80
2019-02	Ex-P	22.45	24.51	33.17	47.52	35.07
	Fe/Al-P	256.10	297.02	354.34	373.91	341.76
	Ca-P	169.18	219.03	385.80	311.02	305.29
	IP	368.61	420.19	447.16	416.48	427.94
	TP	733.69	889.22	860.58	851.60	867.13
2019-04	Ex-P	22.86	25.34	38.34	38.85	34.18
	Fe/Al-P	304.24	323.50	330.05	345.36	332.97
	Ca-P	177.77	231.07	352.85	318.18	300.70
	IP	415.03	513.03	422.51	427.10	454.21
	TP	765.93	879.26	839.00	832.15	850.14

1) 表示 SP1 ~ SP3 平均值

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^[16].板桥河 4 个采样点 Fe/Al-P 的均值分别为 290.34、314.11、310.68 和 319.94 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 的 36.78%、35.60%、37.19% 和 37.84%;4 个采样点 Ex-P 的均值分别为 24.05、25.95、32.80 和 36.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 的 3.05%、2.94%、3.93% 和 4.35%,即 Fe/Al-P 和 Ex-P 占 TP 的百分比,均表现为 SP1 处相对最小. Fe/Al-P 含量在 10 月份随河流走向呈不断降低趋势,即表现为 CP>SP1>SP2>SP3,而在 2 月和 4 月均表现为随河流走向呈不断增加的趋势,即表现为 SP3>SP2>SP1>CP.除 2018 年 12 月以外,Ex-P 含量均表现出

沿河水行进方向不断增加的趋势,即表现为 SP3>SP2>SP1>CP.

总体上,对照点 CP 生物有效性磷占 TP 比重的均值为 39.77%,排放口下方 3 个采样点占 TP 比重均值为 40.62%.显然,尽管排污口上、下方沉积物的生物有效性磷量存在差异,但占 TP 比重则基本相当.

3.2 EPC₀ 对外源碳的响应

图 2 为 2019 年 4 月各采样点沉积物对磷的等温吸附曲线,相应地 EPC₀ 值及其线性拟合的可决系数 R^2 见表 4. 由图 2 可知,外源碳的添加使得各采样点的 EPC₀ 整体向左发生了偏移,并以 SP1 处向左偏移最为明显.其它 3 次采样也都获得了与图 2 相似的结果,相应地 EPC₀ 值及其线性拟合可决系

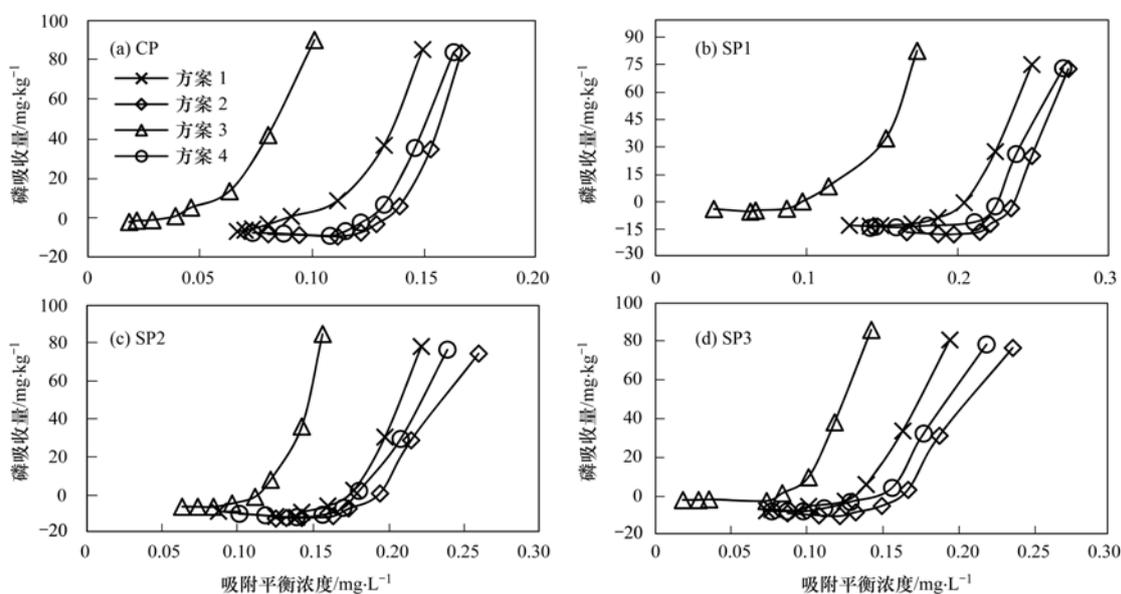


图 2 沉积物对磷等温吸附曲线

Fig. 2 Isothermal adsorption curve of phosphorus in sediments

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

Table 4 Phosphorus equilibrium concentration of sediments/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

日期 (年-月)	方案	CP		SP1		SP2		SP3	
		EPC ₀	R^2						
2018-10	1	0.131	0.757	0.148	0.572	0.226	0.817	0.173	0.571
	2	0.144	0.770	0.179	0.705	0.296	0.884	0.215	0.715
	3	0.071	0.594	0.076	0.546	0.125	0.762	0.096	0.557
	4	0.162	0.768	0.166	0.598	0.277	0.836	0.200	0.619
2018-12	1	0.063	0.806	0.111	0.736	0.097	0.919	0.076	0.527
	2	0.097	0.799	0.129	0.661	0.119	0.725	0.110	0.418
	3	0.025	0.813	0.045	0.765	0.044	0.799	0.038	0.658
	4	0.087	0.740	0.122	0.663	0.110	0.881	0.104	0.576
2019-02	1	0.130	0.625	0.184	0.742	0.100	0.734	0.071	0.631
	2	0.155	0.658	0.235	0.639	0.125	0.842	0.102	0.678
	3	0.101	0.637	0.104	0.580	0.076	0.745	0.051	0.718
	4	0.151	0.665	0.220	0.584	0.115	0.775	0.096	0.779
2019-04	1	0.082	0.851	0.174	0.732	0.143	0.669	0.103	0.804
	2	0.112	0.649	0.216	0.701	0.166	0.846	0.134	0.824
	3	0.032	0.848	0.077	0.770	0.091	0.721	0.047	0.649
	4	0.105	0.669	0.190	0.680	0.152	0.730	0.113	0.826

数 R^2 , 见表 4. 显然, 乙酸钠的添加显著降低了各采样点的 EPC_0 值.

由表 4 可见, 整个采样期间方案 1 的 EPC_0 均值为 $0.126 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 方案 3 为 $0.061 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显低于方案 1. 方案 2 和方案 4 添加了抑制剂氯仿, 相应地 EPC_0 均值分别为 $0.157 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.140 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 两种方案 EPC_0 值均高于方案 1. 总体上, 方案 3 均值比方案 1 低 52%, 而方案 2 相较于方案 1 高出了 25%. 4 个采样点中, 各方案 EPC_0 都表现出了相同的排序规律, 即方案 3 < 方案 1 < 方案 4 < 方案 2.

图 3 为整个采样期间 4 个采样点位 EPC_0 值的变化情况. 其中, 图 3(a) 为各采样点位 EPC_0 值在方案 1、方案 2 中的统计描述和比较. 显然, 抑制剂的

添加导致了 EPC_0 值的增大, 并且排放口下游各采样点的绝对增幅略高于对照点 CP. 由于方案 1 的 EPC_0 值是生物和非生物因素共同作用的结果, 而方案 2 仅是非生物因素的作用, 因此方案 1 与方案 2 的 EPC_0 差值体现的正是生物作用结果. 由于该差值在数值上明显低于方案 2 的 EPC_0 , 更是低于方案 1, 表明在沉积物磷吸收效应中生物因素不占主导地位. Griffiths 等^[17]在对美国沃克河流沉积物的研究中测得 EPC_0 为 $0.011 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 加入抑制剂后 EPC_0 值上升到 $0.013 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而对威斯康星州河流沉积物的研究发现, 加入抑制剂与否 EPC_0 值都为 $0.010 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明来自生物因素的沉积物磷吸收贡献也都相对较小.

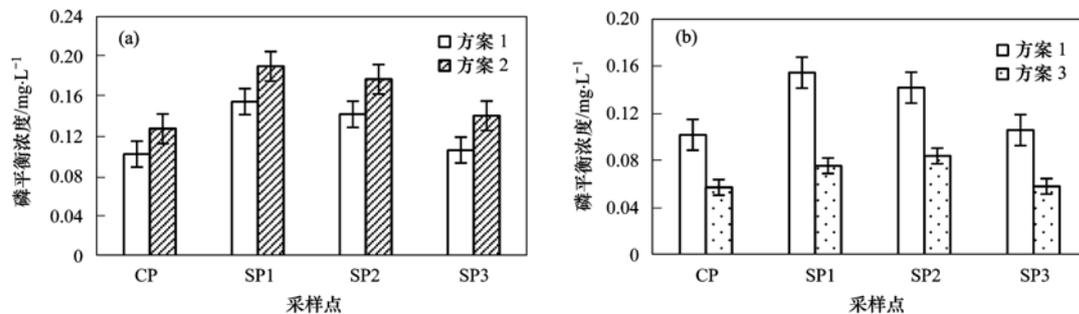


图 3 各采样点位 EPC_0 值变化情况

Fig. 3 Variations of EPC_0 in sediments of each sampling site

这里, 方案 1 中对照点 CP 的 EPC_0 变化范围为 $0.063 \sim 0.131 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.102 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; SP1 的 EPC_0 值变化范围为 $0.111 \sim 0.184 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.154 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 采样点 SP2 和 SP3 的 EPC_0 均值分别为 $0.142 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.106 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 也都高于对照点 CP. 因此, 可以认为污水厂尾水的排入导致受纳河段磷平衡浓度增加.

图 3(b) 为各采样点位 EPC_0 值在方案 1 和方案 3 中的统计描述和比较. 方案 1 与方案 3 的差异仅体现在是否添加外源碳, 因此两者的 EPC_0 差值揭示的恰好是外源碳添加与否给各采样点位 EPC_0 带

来的影响. 在方案 3 中, 采样点 CP、SP1、SP2 和 SP3 的 EPC_0 均值分别为 0.057 、 0.076 、 0.084 和 $0.058 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 较对应方案 1 的绝对下降幅度分别为 0.045 、 0.078 、 0.058 和 $0.048 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 即排污口下方 EPC_0 值下降更明显, 特别是采样点 SP1. 从图 3 也可以看出, 在方案 1、方案 2 和方案 3 中, 同一采样点的 CP 和 SP3 的磷平衡浓度已大体相当.

3.3 磷释放风险评估

根据 EPC_0 的生态学意义, EPC_0 值越高意味着沉积物向上覆水释放磷的潜力越大, 当水中 SRP 浓度高于 EPC_0 时, 沉积物表现出吸附磷的趋势, 反之

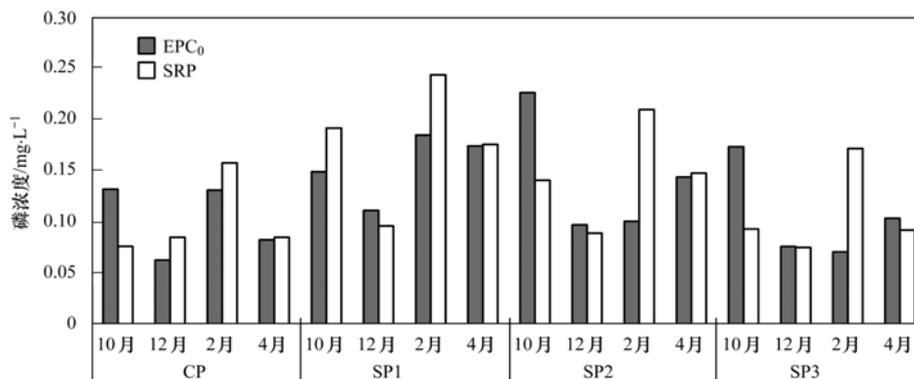


图 4 各采样点沉积物 EPC_0 与上覆水 SRP 浓度比较

Fig. 4 Comparison between sediment EPC_0 and overlying water SRP concentration

则表现出磷释放特征^[18]. 因此, 比较 SRP 和 EPC_0 不仅可以初步估算沉积物向水体释放磷的潜力, 也可以粗略评估磷释放风险. 图 4 为每个采样点位的方案 1 中 EPC_0 值及其相应上覆水体 SRP 浓度情况对比. 可以看出, 2 月时 4 个采样点上覆水 SRP 浓度均明显高于相应地 EPC_0 值, 而在 4 月时两者基本相当. 总体上, 4 个采样点沉积物发生磷吸收作用的大约 6 次, 磷释放作用有 6 次, 另有 4 次上覆水 SRP 与其相应的 EPC_0 值基本相当. 而且, 尾水排放口上、下方发生磷释放或吸收的几率大体相当.

为更好地展示不同实验方案下各采样点沉积物磷释放风险的相对变化, 不妨以方案 1 中 EPC_0 为基准, 采用下式计算各采样点位沉积物磷释放风险水平:

$$R = \frac{EPC_0^i - EPC_0^1}{EPC_0^1} \times 100\%$$

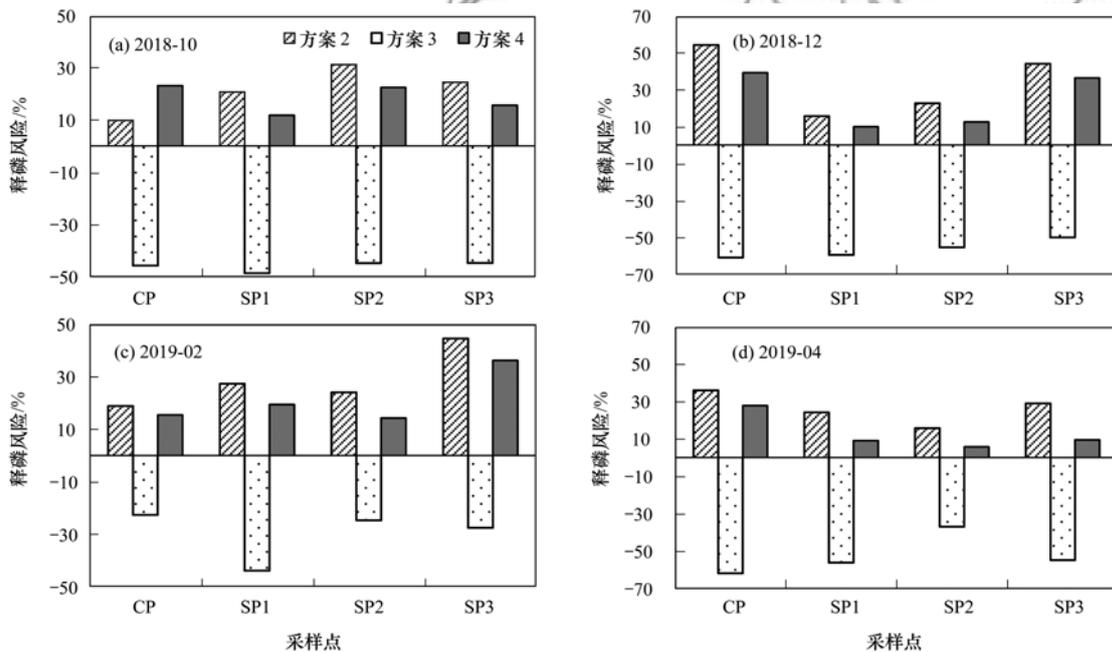


图 5 各采样点位沉积物磷释放风险变化情况

Fig. 5 Variations of phosphorus release risk in sediments of each sampling site

4 讨论

微生物对碳氮磷等生源物质的吸收利用存在一定的化学计量关系^[19,20]. 由表 1, 板桥河水体和蔡田铺污水厂尾水的氮磷含量较高, 研究河段沉积物不仅 TP 含量高, 生物有效磷在 TP 中所占比例也很大. 该河段沉积物有机质含量平均为 4.14% ~ 8.12%, 但与沉积物中相对较高的氮磷含量相比, 有机质相对不充足. 众所周知, 城市污水处理厂尾水普遍具有微生物可利用性碳源偏低的特点, 这对受纳河流碳氮磷循环过程无疑将会产生一定的限制性.

式中, R 表示磷释放风险的相对变化率(%); EPC_0^i ($i=2, 3, 4$) 分别代表方案 2、方案 3 和方案 4 的 EPC_0 值.

外源碳乙酸钠添加后引起的沉积物磷释放风险变化情况见图 5. 在方案 3 中, 磷释放风险的相对变化率全部是负值, 意味着磷释放风险下降. 总体上, 2018 年 12 月各采样点沉积物磷释放风险下降幅度最大, 变化范围为 -60.64% ~ -49.71%, 均值为 -56.15%; 2019 年 2 月磷释放风险下降幅度最小, 变化范围为 -43.62% ~ -22.40%, 均值为 -29.44%. 显然, 排放口上、下方沉积物磷释放风险变化似乎没有表现出明显的规律性.

在添加抑制剂的方案 2 和方案 4 中, 磷释放风险的相对变化率全部为正值, 意味着沉积物磷释放风险加大. 总体上, 乙酸钠的添加大幅度降低了沉积物向上覆水体释放磷的风险, 而添加抑制剂则带来沉积物磷释放风险的加大.

可以断言, 板桥河水体和沉积物中充足的氮、磷含量, 使得生物可利用碳物质成为了影响沉积物磷生物吸收的限制性因素. 这可能是方案 3 中各采样点 EPC_0 值发生明显变化的主要原因.

Lottig 等^[21]的研究表明, 外源碳添加可以影响沉积物磷的生物吸收, 而且不同浓度碳的影响效应存在差异. Khoshmanesh 等^[22]的研究发现, 乙酸钠对促进沉积物的磷吸收超过了葡萄糖或葡萄糖与乙酸钠混合溶液带来的影响. 李如忠等^[23]在对城市重污染河流十五里河的研究中发现, 外源碳的添加不仅提升了沉积物磷的生物吸收潜力, 也提高了生物因

素在沉积物磷吸收中的重要地位,而且乙酸钠添加所带来的影响效果最显著,其次是葡萄糖,乙酸钠与葡萄糖混合溶液则相对较弱。本研究仅选取乙酸钠作为外源碳物质,解析污水厂尾水受纳水体沉积物 EPC_0 的外源碳响应,实际上就是借鉴了上述成果。本研究也显示,乙酸钠的添加明显降低了板桥河沉积物 EPC_0 ,从而可以降低沉积物磷释放风险,但对板桥河其他河段,特别是受暗渠排污影响较大的河段是否也具有这一特点,还需要进一步深入探讨。

本研究中对照点 CP 位于污水厂尾水排放口的上游,由于与尾水排放口之间有一座滚水坝阻拦,因此不会发生尾水上溯影响,所以该处的各项指标值应该可以代表河流实际状况。实地调查中也发现,在采样点 SP1 和 SP2 之间也存在一个较大的排污暗渠,存在污水间歇性排入河道现象。在方案 1 和方案 2 中, EPC_0 值总体上表现为 $SP1 > SP2 > SP3 > CP$,但在方案 3 中却发生了一些变化,即表现为 $SP2 > SP1 > SP3 > CP$,笔者以为这可能与暗渠排污对 SP2 造成很大影响有一定的关系。这里,尾水排放口上、下方沉积物磷释放风险变化没有表现出明显的规律性,可能是因为沉积物磷形态及粒度大小也影响沉积物对磷的吸收和释放^[24,25]。需要特别指出的是,本研究的相关结果仅是基于 72 h 培养时间而得到的,更长培养时间可能对评价结果产生何种影响,还有待深入探究。

5 结论

(1)板桥河磷污染较为严重,污水厂尾水排放对受纳河段沉积物磷形态影响明显,总磷和生物有效性磷含量均表现为排污口下方采样点高于排污口上方的对照点,且紧邻排污口的采样点沉积物总磷含量最高。

(2)在污水厂尾水排放口下方沿水流前行方向,河流沉积物 EPC_0 值递减,但均高于排污口上方对照点,表明污水厂尾水提高了受纳河段 EPC_0 水平,致使河流磷释放风险增大。

(3)外源碳的添加可以提高板桥河沉积物磷吸附能力、降低沉积物 EPC_0 ,且对紧邻排放口的采样点表现相对最明显,但总体变化规律似乎并不显著。

参考文献:

- [1] Haggard B E, Storm D E, Stanley E H. Effect of a point source input on stream nutrient retention[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, **37**(5): 1291-1299.
- [2] 郑晓英,朱星,周翔,等. 铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2412-2418.
- Zheng X Y, Zhu X, Zhou X, *et al.* Removal of nitrogen in municipal secondary effluent by a vertical flow constructed wetland associated with iron-carbon internal electrolysis [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2412-2418.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Stutter M I, Demars B O L, Langan S J. River phosphorus cycling: separating biotic and abiotic uptake during short-term changes in sewage effluent loading[J]. *Water Research*, 2010, **44**(15): 4425-4436.
- [10] Li S S, Yuan Z W, Bi J, *et al.* Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hefei City, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(23): 5715-5722.
- [11] 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.
- [12] 李如忠,叶舟,高苏蒂,等. 人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3235-3242.
- Li R Z, Ye Z, Gao S D, *et al.* Biotic and abiotic uptake of phosphorus in benthic sediments of suburban streams under intense human disturbance scenario [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3235-3242.
- [13] 李如忠,鲍琴,戴源. 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[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2178-2185.
- Li R Z, Bao Q, Dai Y. Effects of exogenous carbon addition on

- equilibrium phosphate concentration and risk of phosphorus release from sediments in the Shiwuli river, Chaohu lake basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2178-2185.
- [14] 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. *地球科学进展*, 1998, **13**(4): 398-402.
- Li R W. Contamination of sediments and environmental sedimentology[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, **13**(4): 398-402.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Griffiths N A, Johnson L T. Influence of dual nitrogen and phosphorus additions on nutrient uptake and saturation kinetics in a forested headwater stream [J]. *Freshwater Science*, 2018, **37**(4): 810-825.
- [18] 李慧, 余能智. 沉积物磷吸附解吸平衡浓度的测定及其生态学意义[J]. *资源节约与环保*, 2016, (9): 98-99.
- [19] Gibson C A, O'Reilly C M. Organic matter stoichiometry influences nitrogen and phosphorus uptake in a headwater stream [J]. *Freshwater Science*, 2012, **31**(2): 395-407.
- [20] Schade J D, MacNeill K, Thomas S A, *et al.* The stoichiometry of nitrogen and phosphorus spiralling in heterotrophic and autotrophic streams [J]. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(3): 424-436.
- [21] Lottig N R, Stanley E H. Benthic sediment influence on dissolved phosphorus concentrations in a headwater stream [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(3): 297-309.
- [22] Khoshmanesh A, Hart B T, Duncan A, *et al.* Biotic uptake and release of phosphorus by a wetland sediment [J]. *Environmental Technology*, 1999, **20**(1): 85-91.
- [23] 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 等. 巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2730-2737.
- Li R Z, Bao Q, Zhang R G, *et al.* Potential for phosphorus uptake by bed sediments and its response to carbon additions in the Shiwuli river, Chaohu lake basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2730-2737.
- [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] Bastami K D, Neyestani M R, Raiesi 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

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)