

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

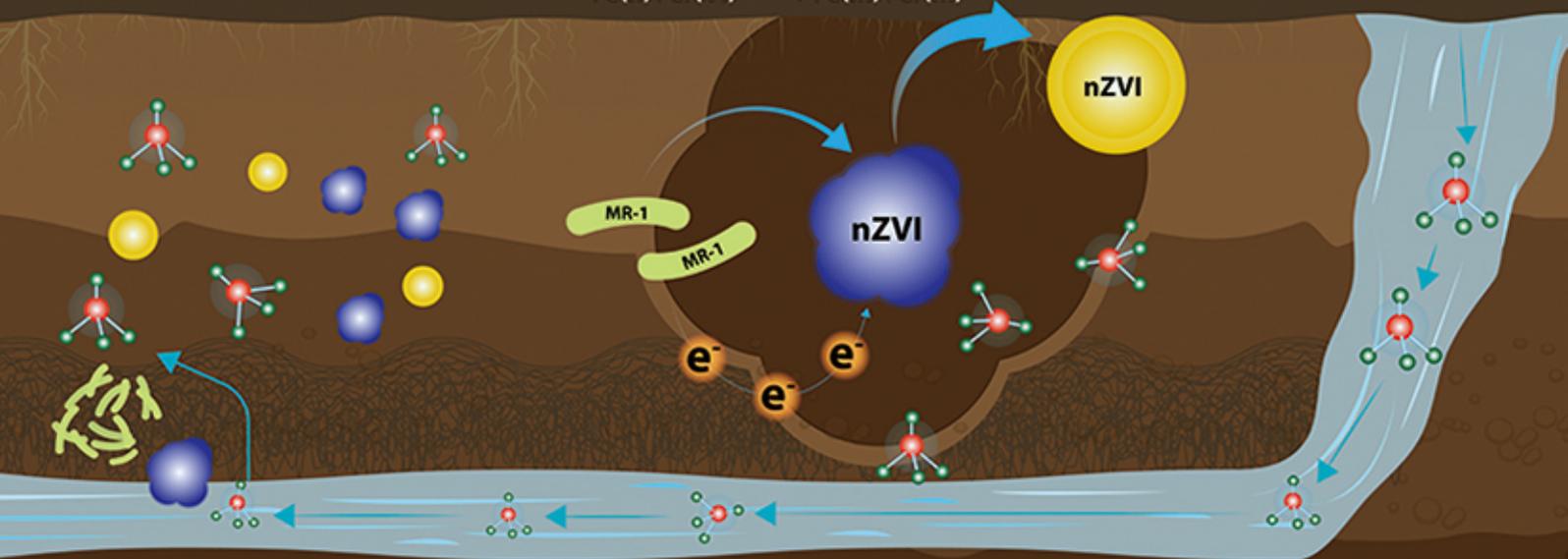
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期  
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 时空分布与健康效应评估 ..... 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化模拟与分析 ..... 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM<sub>2.5</sub> 污染影响 ..... 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 ..... 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 ..... 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 ..... 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM<sub>2.5</sub> 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 ..... 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 ..... 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 ..... 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 ..... 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 ..... 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 ..... 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 ..... 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 ..... 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 ..... 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 ..... 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 ..... 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 ..... 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 ..... 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 ..... 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 ..... 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 ..... 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 ..... 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 ..... 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 ..... 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 ..... 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 ..... 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 ..... 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 ..... 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 ..... 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 ..... 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 ..... 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 ..... 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 ..... 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 ..... 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中铜元素的空间分布特征及其风险评价 ..... 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜形态的影响 ..... 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 ..... 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 ..... 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 ..... 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应 ..... 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 ..... 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 ..... 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 ..... 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 ..... 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 ..... 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 生物炭对土壤 N<sub>2</sub>O-N 排放和 NH<sub>3</sub>-N 挥发的影响 ..... 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 ..... 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 ..... 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

# 城市新区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析

李如忠<sup>1</sup>, 宋敏<sup>1</sup>, 杨继伟<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 蚌埠 233000)

**摘要:**以合肥蜀峰湾体育公园5个水塘和3条沟渠为对象,采集表层沉积物及上覆水样,测算不同季节表层沉积物磷平衡浓度( $EPC_0$ ),并解析其对外源碳或氮添加的响应,据此评估沉积物磷释放风险水平,识别主要环境影响因素.结果表明,该城市公园沟塘沉积物磷素污染处于轻-中度污染水平,总磷(TP)含量为209.28~713.51  $mg \cdot kg^{-1}$ ,生物有效磷含量占TP的质量分数为18.51%~36.21%;环境背景情形下水塘沉积物 $EPC_0$ 变化范围为0.012~0.142  $mg \cdot L^{-1}$ (均值0.057  $mg \cdot L^{-1}$ ),沟渠 $EPC_0$ 变化范围为0.036~0.156  $mg \cdot L^{-1}$ (均值0.078  $mg \cdot L^{-1}$ );外源碳的添加导致水塘1、3和沟渠1的 $EPC_0$ 值升高(其中水塘3上升约47.5%),提高了沉积物磷释放风险,其余沟塘沉积物 $EPC_0$ 值则出现下降(特别是水塘5下降约58.6%),意味着磷释放风险水平下降;而在外源氮添加情形下,所有沟塘沉积物 $EPC_0$ 值都出现了不同程度的下降(沟渠1、2的夏季情形除外),特别是水塘2表现尤为显著(下降约51.6%),表明沟塘沉积物磷吸收存在氮限制性;根据偏最小二乘回归分析(PLSR)结果,氮、磷对水塘和沟渠沉积物的 $EPC_0$ 值影响存在差异.

**关键词:**新区;景观水体;磷平衡浓度( $EPC_0$ );磷释放风险;影响因素

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4287-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202101015

## Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park

LI Ru-zhong<sup>1</sup>, SONG Min<sup>1</sup>, YANG Ji-wei<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu 233000, China)

**Abstract:** This study examined five ponds and three ditches in the Shufengwan Sports Park in a new urban district of Hefei City, from which surface-layer sediments and overlying water samples were collected during autumn, winter, and summer. The equilibrium phosphate concentrations ( $EPC_0$ ) of the sediments and its response to exogenous carbon or nitrogen were then measured. The resulting  $EPC_0$  values were used to assess the risk of phosphorus release by the sediments. Finally, major factors influencing phosphorous release were identified using the Partial Least Squares Regression (PLSR) method. The sediments in the urban park exhibited a light-to-moderate level of phosphorous pollution, with the total phosphorus content (TP) ranging from 209.28 to 713.51  $mg \cdot kg^{-1}$  and biologically available phosphorus accounting for 18.51%-36.21% of the total phosphorus content. Under ambient background, the  $EPC_0$  values in pond sediments were 0.012-0.142  $mg \cdot L^{-1}$ , with a mean value of 0.057  $mg \cdot L^{-1}$ , while in ditches the values ranged from 0.036 to 0.156  $mg \cdot L^{-1}$  with an average value of 0.078  $mg \cdot L^{-1}$ . The addition of exogenous carbon increased the  $EPC_0$  values (by approximately 47.5% in pond 3), and thus increased the risk of phosphorus release from sediments, in pond 1, 3, and ditch 1. However,  $EPC_0$  values of the other ponds and ditches decreased (in particular, by approximately 58.6% in pond 5), indicating that the risk of phosphorus release decreased. After the addition of exogenous nitrogen, the  $EPC_0$  values of almost all ponds and ditches declined to varying degrees (except in ditches 1 and 2 during the summer). In particular, in the  $EPC_0$  value of pond 2 declined by approximately 51.6%. The declining values imply that nitrogen was a limiting factor in phosphorus uptake by sediments in ponds and ditches. According to the results of PLSR, nitrogen and phosphorus had different effects on the  $EPC_0$  values of sediments in ponds and ditches.

**Key words:** new urban district; landscape water; equilibrium phosphate concentration ( $EPC_0$ ); phosphorus release risk; influencing factors

目前,河流、湖库及海湾水体富营养化已成为全球面临的重要生态环境问题之一.有研究表明,磷是水体富营养化的主要限制性因素<sup>[1]</sup>,而沉积物作为磷的“源”和“汇”,对水体富营养化的发生往往起着重要的决定性作用<sup>[2]</sup>.一般地,沉积物磷平衡浓度( $EPC_0$ )与上覆水溶解性反应磷浓度(SRP)的相对大小关系,常被作为确定磷迁移方向的判据<sup>[3]</sup>,据此评定沉积物扮演的磷“源”或“汇”角色.目前,国内外有关沉积物 $EPC_0$ 的研究主要集中在尺度较大

的湖泊、河流等开放的自然水体<sup>[4,5]</sup>,对于城区内景观水体,特别是新区公园中沟塘沉积物的研究相对不足.众所周知,城市内景观水体大多具有流动性较差、自净能力较弱的缺陷.由于周边地区人类活动强度和生态压力较大,加之城市排水系统渗漏、城区

收稿日期: 2021-01-04; 修订日期: 2021-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579061); 安徽省重点研究与开发计划项目(20200407020005)

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

面源污染负荷冲击等,使得这类水体极易受到氮、磷污染而出现水质恶化,甚至发生水体富营养化<sup>[6]</sup>.随着城市化进程的不断推进,国内城市规模越来越大、人口越来越多,新城区在城市建成区总面积占比快速增加.由于新城区建立的时间相对较短,域内景观水体多由自然半自然状态向高度人工控制状态转变,与老城区存在已久的公园水塘显著不同.不难料想,在水质、沉积物理化性质及磷吸附-解吸特征方面,新旧城区景观水体可能并不一致.针对新城区公园水体沉积物磷释放风险的研究,不仅可以为相应水体沉积物磷释放调控提供依据,也可以为未来沉积物磷素污染研究提供基础资料.

合肥市为安徽省省会,是巢湖水体富营养化氮磷污染负荷的最大贡献者.目前该市老城区环城公园景观水塘和河流都已表现出明显的富营养化特征<sup>[7,8]</sup>.蜀峰湾体育公园位于合肥市西部城区蜀山区,公园周边区域为快速崛起的科技新城区.在公园建成之初,因地处城郊而缺乏有效管理,导致少数水塘和沟渠遭受附近住宅小区生活污水的污染影响.随着水环境整治工程的实施,公园周边生活区污水全部纳入城市排水管网.本研究以蜀峰湾体育公园中5个典型水塘和3条沟渠为对象,采集不同季节表层沉积物及上覆水,通过测算沉积物磷平衡浓度(EPC<sub>0</sub>),评估沉积物磷释放风险及其对外源碳氮的响应,解析沉积物磷吸收的碳氮限制性,并识别主要

环境影响因素,以期为蜀峰湾体育公园沟塘沉积物磷释放调控提供指导,也为国内外其他城市新城区景观水体水环境研究提供参考.

## 1 研究区概况

蜀峰湾体育公园位于合肥市大蜀山森林公园东侧,地处黄山路与香樟大道交口西北角,东部与蜀峰湾人工湖相毗邻,地势自西向东倾斜.公园内种植大量的景观林木,林间小道多采用鹅卵石铺砌.公园内水塘多是在原有洼地基础上建设而成,沟渠也多为水塘间联络通道.

本研究选取的5个小水塘和3条沟渠为封闭水体,主要靠自然降水补给,干旱季节也接受蜀峰湾人工湖补水.水塘水深约0.6~0.8 m,水面面积约80~280 m<sup>2</sup>.其中,水塘2在公园建成前曾长期受到附近住宅小区生活污水影响,底泥沉积物污染相对较明显.除水塘3外,其它水塘均有成片生长的大型水生植物,大致情况见表1.3条沟渠全年大多数时间处于断流状态且长度均不大,其中沟渠1呈L型形态,渠壁和沟渠底部铺砌有块石,沟渠宽度约1.2 m;沟渠2为块石铺砌的直线型沟渠,宽约0.8 m;沟渠3为直线型普通土沟,宽约1 m.沟渠1中无大型水生植物,沟渠2、3稀疏分布大型湿生植物.采样期间水塘水质统计计算结果(均值±标准差)见表2.

表1 沟塘水生植物情况<sup>1)</sup>

Table 1 Status of aquatic plants in ponds and ditches

沟塘	沉水植物	浮叶植物	挺水植物
水塘1	苦草 <i>Vallisneria natans</i>	睡莲 <i>Nymphaea tetragona</i>	美人蕉、香蒲 <i>Canna indica</i> 和 <i>Typha orientalis</i>
水塘2	苦草 <i>Vallisneria natans</i>	—	慈姑、美人蕉 <i>Sagittaria trifolia</i> 和 <i>Canna indica</i>
水塘3	苦草 <i>Vallisneria natans</i>	—	—
水塘4	苦草 <i>Vallisneria natans</i>	—	再力花、香蒲 <i>Thalia dealbata</i> 和 <i>Typha orientalis</i>
水塘5	苦草 <i>Vallisneria natans</i>	—	香蒲 <i>Typha orientalis</i>
沟渠1	—	—	—
沟渠2	—	梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i>	慈姑 <i>Sagittaria trifolia</i>
沟渠3	—	—	芦苇 <i>Phragmites australis</i>

1) “—”表示无该类型植物

表2 水塘水质理化性质<sup>1)</sup>

Table 2 Physicochemical properties of water quality in ponds

指标	水塘1	水塘2	水塘3	水塘4	水塘5
TN/mg·L <sup>-1</sup>	8.20 ± 0.64	7.90 ± 0.46	8.68 ± 0.73	8.67 ± 0.65	7.98 ± 0.41
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.74 ± 0.05	1.11 ± 0.02	0.60 ± 0.05	0.76 ± 0.05	0.71 ± 0.03
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	2.85 ± 0.51	2.93 ± 0.18	3.61 ± 0.42	3.70 ± 0.28	3.62 ± 0.34
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.070 ± 0.016	0.166 ± 0.026	0.108 ± 0.037	0.111 ± 0.035	0.112 ± 0.041
SRP/mg·L <sup>-1</sup>	0.033 ± 0.002	0.091 ± 0.025	0.064 ± 0.025	0.080 ± 0.033	0.070 ± 0.018
COD/mg·L <sup>-1</sup>	7.17 ± 1.22	12.88 ± 2.48	8.23 ± 1.73	4.56 ± 0.41	7.10 ± 1.08
pH	8.20 ± 0.64	7.90 ± 0.46	8.68 ± 0.73	8.67 ± 0.65	7.98 ± 0.41
EC/μS·cm <sup>-1</sup>	395 ± 51	470 ± 30	298 ± 37	362 ± 80	422 ± 32
TDS/mg·L <sup>-1</sup>	201 ± 25	237 ± 16	200 ± 49	245 ± 98	291 ± 119

1) 3次采集水样

## 2 材料与方法

### 2.1 采样点布设与样品预处理

根据水塘面积的不同,在每个水塘的植物区设置 2~5 个采样点;在每条沟渠设置 3~4 个采样点,采样点大致均匀地分布于沟渠中。2019 年秋季(10 月)、冬季(12 月)和 2020 年夏季(8 月),分别采集沉积物样品及水塘上覆水样,利用便携式仪器现场测定水温( $T$ )、pH、总溶解固体(TDS)和电导率(EC)。

在每个采样点采集 400 mL 水样,带回实验室分析。水样于 4℃ 下避光保存,并于 24 h 内完成水质指标的分析测试。水质指标包括总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、总磷(TP)、溶解性磷(SRP)和化学需氧量(COD)。在每个点位附近采集 3 份表层 0~10 cm 新鲜沉积物,混合均匀后代表该点位。将沉积物样品放置在实验室阴凉干燥处自然风干,研磨并过 100 目筛后装于自封袋中,密封保存至化学分析。鉴于水塘面积均不大,从每个采样点的干样品中,各取等量的干样品进行掺混,用于后续磷平衡浓度及释放风险分析。沟渠沉积物样品的采集与处理方式与水塘相似。

### 2.2 样品分析测试

总磷(TP)中易交换态磷(Ex-P)与铁铝结合态磷(Fe/Al-P)属于生物有效性磷,为主要的参与沉积物

与上覆水之间交换的磷形态<sup>[9]</sup>,因此本研究仅讨论这 3 种形态磷。采用 SMT 法测定沉积物 TP 和 Fe/Al-P;采用提取剂为  $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{MgCl}_2$  连续浸提法测定沉积物 Ex-P。磷浓度的测定采用钼锑抗分光光度法。

水质指标的分析测试参照文献[10]。利用质量与体积比为 5:1 的沉积物和水混合物测定 pH 值;沉积物有机质(OM)含量由 550℃ 下灼烧 4 h 后的质量差测定。

### 2.3 沉积物磷平衡浓度

沉积物磷平衡浓度( $\text{EPC}_0$ )是指沉积物固相与周边水溶液中的磷酸盐达到吸附与解吸附平衡时水相中磷酸盐的浓度<sup>[11]</sup>,通常用来描述沉积物对磷的吸附或解吸潜力<sup>[12]</sup>。有关  $\text{EPC}_0$  测定方法详见参考文献[2]。

### 2.4 实验方案设计

针对每个采样点,设计 4 种实验方案(表 3),每个方案设 3 个平行。有关实验方法的具体操作步骤参见文献[11],培养时间为 24 h,相应的标准磷培养液初始浓度的设置参照文献[13,14]。由于该公园部分水体在成为城市公园以前已在一定程度上受到了生活污水的污染影响,与自然流域相比<sup>[15]</sup>,其沉积物磷等污染物含量相对高一些,依据生态计量学原理,考虑将方案 2、3 中外源碳、氮浓度均取为  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这里,外源碳和氮分别为乙酸钠和硝酸钾;抑制剂为氯仿。

表 3  $\text{EPC}_0$  实验条件<sup>1)</sup>

Table 3 Experimental conditions for  $\text{EPC}_0$

方案	磷培养液初始浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	碳源 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	氮源 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	抑制剂
空白对照	0、1、5、9、12、15	—	—	—
1	同上	—	—	3~4 滴
2	同上	150 (以 C 计)	—	—
3	同上	—	150 (以 N 计)	—

1) “—”表示未添加该类型药剂,标准磷培养液采用  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  配制

### 2.5 数据处理

采用单因素方差分析(ANOVA),解析不同季节沟塘  $\text{EPC}_0$  值及相同季节下水塘与沟渠之间  $\text{EPC}_0$  值的差异性;采用基于 SIMCA 软件的偏最小二乘回归分析技术(PLSR)解析上覆水水质指标或沉积物理化指标对  $\text{EPC}_0$  值的重要性,其中回归分析生成的  $F_{\text{VIP}}$  值代表自变量(水质指标或沉积物理化指标)对因变量( $\text{EPC}_0$  值)的贡献能力。一般认为, $F_{\text{VIP}}$  值大于 1 的自变量属于重要变量, $F_{\text{VIP}}$  值介于 0.8~1 的自变量属于较为重要变量,小于 0.8 的为一般变量<sup>[16]</sup>。相关数据处理与图形绘制由 Excel、Origin 和 SPSS 软件完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 沉积物磷形态

图 1 为蜀峰湾公园沟塘沉积物 TP、Fe/Al-P 和 Ex-P 含量均值情况。可以看出,沟渠 TP 含量普遍高于水塘。其中,水塘 TP 含量变化范围为 209.28~573.85  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,沟渠 TP 含量范围为 401.59~713.51  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与巢湖六叉河小流域农业水塘沉积物 TP 含量相近(286.3~651.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>,显著低于合肥城区污染严重的关镇河支渠沉积物 TP 含量(1 048.78~1 781.24  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[18]</sup>。根据沉积物污染水平的分类标准<sup>[19]</sup>:TP > 1 300  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,重

度污染水平;  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} < \text{TP} < 1\,300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 中度污染水平;  $\text{TP} < 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 轻度污染水平. 据此, 可以判定蜀峰湾公园沟塘沉积物中磷素处于轻度至中度污染水平.

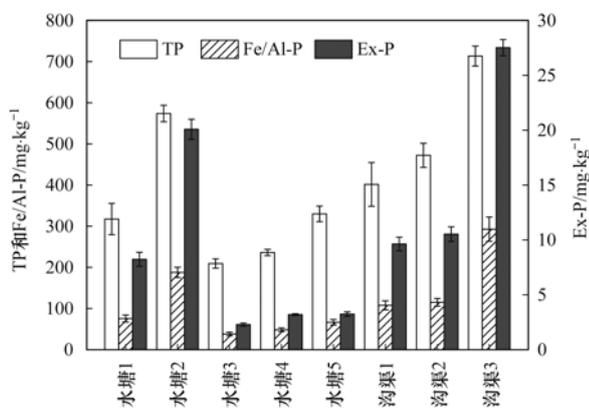


图 1 沉积物各形态磷含量

Fig. 1 Contents of phosphorus forms in sediments

由于生物有效性磷往往可以直接或间接用于生物新陈代谢, 因此, 生物有效磷含量及其占 TP 质量分数较高的沉积物, 相应的生物吸收效应可能也就越容易发生. 这里, 沟渠沉积物 Fe/Al-P 和 Ex-P 含量基本都较水塘高一些, 特别是以往曾受生活污水影响的沟渠 3. 生物有效磷占 TP 质量分数最高的是沟渠 3 (44.89%), 其次是水塘 2 (36.2%), 最低值出现在水塘 3 (19.27%), 其他沟塘质量分数为 21.13%~29.22%, 且沟渠总体上高于水塘. 总体上, 蜀峰湾公园沟塘沉积物生物有效磷占 TP 质量分数高于合肥城郊农田溪流水系统中的水塘 (14.49%~15.43%)<sup>[20]</sup>, 而低于农业流域中不同类型水塘 (31.03%~60.86%)<sup>[13]</sup>.

此外, 水塘沉积物 OM 变化范围为 3.63%~5.74% (均值 4.66%), 沟渠为 4.19%~6.04% (均值 4.99%); 水塘沉积物 TN 含量变化区间为 1 026~1 798  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (均值 1325  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 沟渠为 1 217~2 054  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (均值 1627  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 水塘沉积物 TP 含量变化区间为 202.23~603.92  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (均值 333.43  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 沟渠为 348.15~749.85  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (均值 529.10  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

### 3.2 环境背景情形下 $\text{EPC}_0$ 值

与加碳、氮或抑制剂的 3 个方案相比, 空白对照情景更为接近实际环境条件. 这里, 不妨将此条件获得的平衡浓度称为环境背景情形下  $\text{EPC}_0$  值. 不同季节相应的环境背景情形的沟塘沉积物  $\text{EPC}_0$  值见表 4. 显然, 除水塘 2 外, 水塘  $\text{EPC}_0$  值均低于沟渠. 而且, 所有沟塘沉积物  $\text{EPC}_0$  值均表现为夏季最高, 冬季最低的特点, 表明沉积物与上覆水磷交换过程

受季节影响颇为明显.

总体上, 环境背景情形下沟塘在不同季节  $\text{EPC}_0$  值之间存在极显著差异性 ( $P < 0.01$ ); 每个季节下, 水塘与沟渠之间  $\text{EPC}_0$  值也均存在极显著差异性 ( $P < 0.01$ ).

表 4 环境背景情形下沟塘  $\text{EPC}_0/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 4  $\text{EPC}_0$  in ponds and ditches under ambient background/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

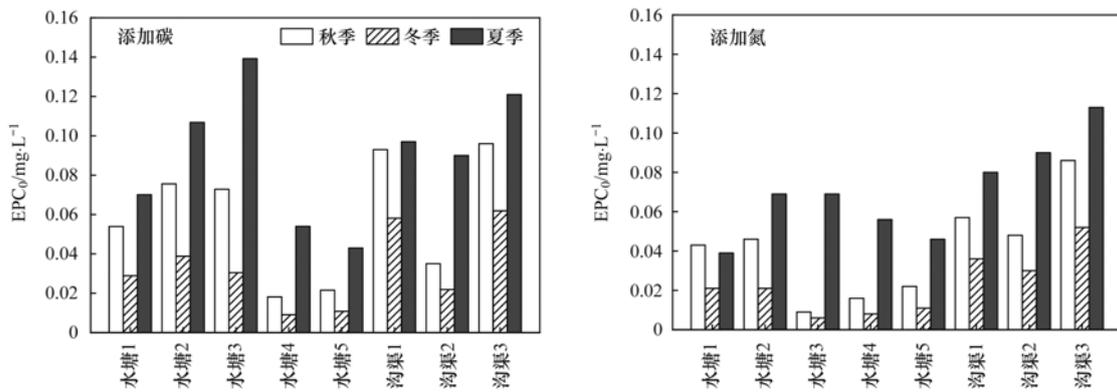
沟塘	秋季	冬季	夏季
水塘 1	0.048	0.026	0.051
水塘 2	0.117	0.058	0.142
水塘 3	0.040	0.020	0.095
水塘 4	0.024	0.012	0.072
水塘 5	0.053	0.026	0.068
沟渠 1	0.062	0.039	0.078
沟渠 2	0.058	0.036	0.082
沟渠 3	0.125	0.069	0.156

不难理解, 空白对照组中  $\text{EPC}_0$  值可以看作是生物与非生物共同作用的结果, 而滴入了抑制剂的方案 1 中  $\text{EPC}_0$  值仅体现了非生物因素作用, 因此根据两者的  $\text{EPC}_0$  差值占空白组中  $\text{EPC}_0$  值的比例, 可以近似评估环境背景下沉积物磷吸附-解吸过程中生物作用的贡献率. 这里, 蜀峰湾公园水塘沉积物的磷吸附解吸过程中生物因素贡献率明显高于沟渠. 具体地, 5 个水塘的比值变化范围为 5.96%~12.09%, 均值为 7.57%; 3 个沟渠的比值变化范围为 3.58%~5.03%, 均值为 4.47%. 上述结果在数值上与汤宁等<sup>[21]</sup>和 Griffiths 等<sup>[22]</sup>所得的结果相近.

### 3.3 外源碳或氮添加情形下 $\text{EPC}_0$ 值

外源碳添加情形下 3 次采样相应的沟塘沉积物  $\text{EPC}_0$  值变化情况见图 2. 与环境背景情形一样, 外源碳添加情形下所有水塘和沟渠  $\text{EPC}_0$  值都表现为夏季最高、冬季最低, 而且两个季节的悬殊性都较明显. 秋、冬季水塘  $\text{EPC}_0$  值大小表现出一致的趋势, 即水塘 2 > 水塘 3 > 水塘 1 > 水塘 5 > 水塘 4; 夏季排序稍有不同, 即水塘 3 > 水塘 2 > 水塘 1 > 水塘 4 > 水塘 5. 沟渠  $\text{EPC}_0$  值的季节变化相对较为简单, 3 个季节的  $\text{EPC}_0$  值都表现为: 沟渠 3 > 沟渠 1 > 沟渠 2.

与环境背景情形相比 (表 4), 外源碳添加情形下公园中 8 个沟塘沉积物  $\text{EPC}_0$  值发生了不同情况的变化, 其中水塘 1、水塘 3 和沟渠 1 的  $\text{EPC}_0$  值出现了增大, 沟渠 2 的夏季  $\text{EPC}_0$  值也稍有增加, 而其他沟塘  $\text{EPC}_0$  值则出现了不同幅度的下降. 由  $\text{EPC}_0$  的环境生态学意义,  $\text{EPC}_0$  值下降意味着沉积物磷释放可能性降低, 而  $\text{EPC}_0$  值增大则意味着磷释放可能性的增加. 可以看出, 外源碳添加导致蜀峰湾公

图2 添加外源碳或氮情形下沉积物的  $EPC_0$  值Fig. 2  $EPC_0$  values of sediments after the addition of exogenous carbon or nitrogen

园不同沟塘沉积物-上覆水界面磷扩散出现截然不同的效果。

总体上,在外源碳添加情形下,无论是水塘还是沟渠不同季节的沉积物  $EPC_0$  值之间存在极显著差异性 ( $P < 0.01$ ); 每个季节下,水塘与沟渠之间  $EPC_0$  值也均存在极显著差异性 ( $P < 0.01$ )。

外源氮添加的沟塘沉积物  $EPC_0$  值变化情况,见图2。与环境背景情形一样,在外源氮添加情形下所有水塘和沟渠  $EPC_0$  值也都表现为夏季最高、冬季最低。总体上,3个季节都表现为沟渠  $EPC_0$  值略高于水塘。秋、冬季节,5个水塘  $EPC_0$  值大小排序相同,即水塘2  $\approx$  水塘1 > 水塘5 > 水塘4 > 水塘3; 夏季,5个水塘  $EPC_0$  值大小排序为:水塘2  $\approx$  水塘3 > 水塘4 > 水塘5 > 水塘1。秋、冬季节,3个沟渠  $EPC_0$  值大小排序相同,即沟渠3 > 沟渠1 > 沟渠2; 夏季,  $EPC_0$  值大小排序发生变化,即沟渠3 > 沟渠2 > 沟渠1。

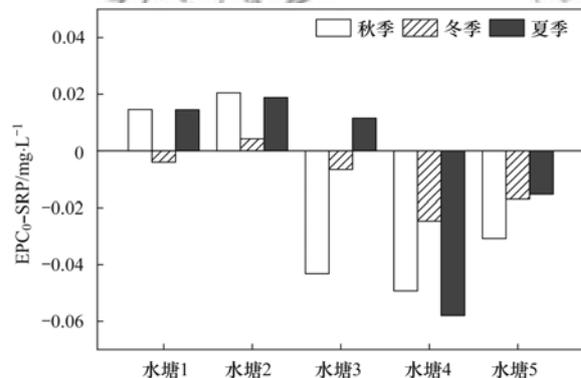
与环境背景情形相比(表4),除沟渠1和沟渠2的夏季沉积物  $EPC_0$  值略微增加外,其他各季节所有沟塘  $EPC_0$  值都出现了下降,但降幅显著不同,其中水塘2、水塘3、水塘5和沟渠3变化相对最为显著,而水塘1、水塘4、沟渠1和沟渠2降幅较为微弱。类似地,外源氮添加引起沟塘沉积物  $EPC_0$  值的上下波动,意味着氮素可以调控这些沟塘沉积物的磷释放效应。

总体上,在外源氮添加情形下,无论是沟渠还是水塘不同季节的沉积物  $EPC_0$  值之间存在极显著差异性 ( $P < 0.01$ ); 每个季节下,水塘与沟渠之间  $EPC_0$  值也均存在极显著差异性 ( $P < 0.01$ )。

### 3.4 磷释放风险对外源碳氮添加的响应

沉积物  $EPC_0$  与上覆水 SRP 的相对大小常被用作识别沉积物磷“源-汇”角色的简单判据。当  $EPC_0$  值高于上覆水体 SRP 浓度时,沉积物表现释放磷的

趋势;反之,则表现为吸附磷的趋势<sup>[23]</sup>。环境背景情形下,3个季节水塘沉积物  $EPC_0$  值与上覆水 SRP 浓度的差值情况见图3。可以看出,水塘1和水塘3沉积物在部分季节表现出磷释放趋势,而水塘2一直表现为磷释放趋势,意味着沉积物作为磷“源”,有释放磷的趋势;水塘4和水塘5沉积物  $EPC_0$  值一直低于相应的上覆水 SRP 浓度,意味着沉积物作为磷“汇”,有吸附磷的趋势。

图3 环境背景情形下水塘沉积物  $EPC_0$  与 SRP 的差值Fig. 3 Differences between  $EPC_0$  and SRP values in ponds under ambient background conditions

不妨以环境背景情形(即空白组)沟塘沉积物  $EPC_0$  值为基准,定量刻画外源碳或氮添加情形下沟塘沉积物磷释放风险水平<sup>[21]</sup>。

$$K = \frac{EPC_0 - EPC_0^0}{EPC_0^0} \times 100\%$$

式中,  $K$  为磷释放风险水平的相对变化率(%);  $EPC_0^0$  为环境背景的沉积物  $EPC_0$  值。

外源碳或氮添加情景下沟塘沉积物磷释放风险水平的变化性见图4。在添加外源碳情形下,水塘1、水塘3、沟渠1以及沟渠2的部分季节,相应的沉积物磷释放风险水平都有不同程度地上升,特别是水塘3,秋季时磷释放风险甚至提高了81.5%(3个季节均值为47.5%);沟渠1的磷释放风险水平

也提升了 24.4%~50% (均值为 41.5%)。除此之外,其他沟塘沉积物磷释放风险水平都有不同程度地下降,表现最为明显的水塘 2 和水塘 5,相应的磷释放风险水平下降幅度分别为 24.8%~35.5% (均值为 31%), 36.8%~59% (均值为 51.6%),水塘 4 和沟渠 3 也都有 20% 左右的降幅。总的来看,水塘沉积物磷释放对于外源碳的响应程度略高于沟渠。

显然,外源氮添加情形下所有沟塘沉积物的磷释放风险都出现了不同程度的下降,仅有沟渠 1 和

2 在夏季时出现了小幅度上升。同样,水塘沉积物磷释放风险下降幅度明显超过了沟渠,特别是水塘 2、3 和 5 表现更为显著,变化范围分别为 -63.5%~-51.5% (均值 -58.6%), -77.6%~-22.3% (均值 -58.3%) 和 -58.1%~-32.4% (均值 -49.5%)。在 3 个沟渠中,降幅最大的沟渠 3 变化范围为 -31.2%~-24.6% (均值 -27.8%),而降幅最小的沟渠 1 仅为 -8.1%~2.6% (均值为 -4.4%)。

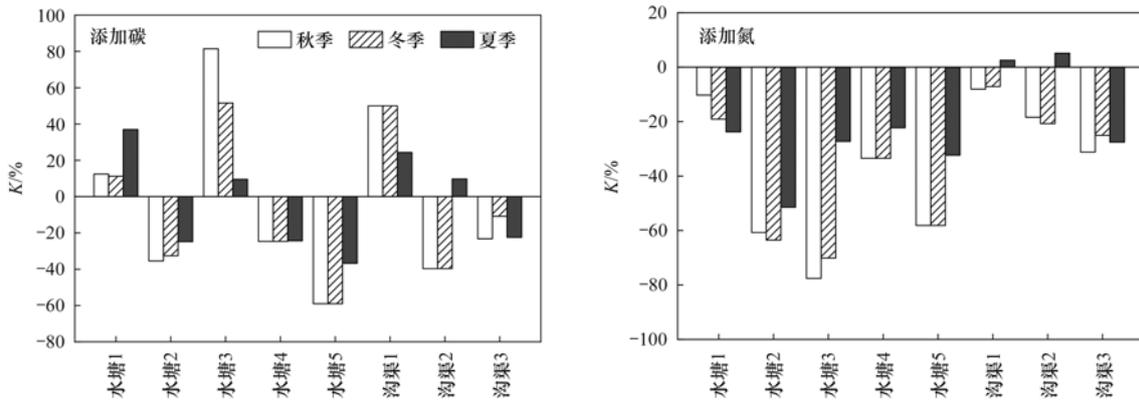


图 4 外源碳氮情形下沟塘沉积物磷释放风险水平的相对变化

Fig. 4 Relative variation of phosphorus release risk in ponds and ditches after the addition of exogenous carbon or nitrogen

### 3.5 环境影响因素识别

表 5 为体现水塘上覆水指标对沉积物  $EPC_0$  贡献能力的  $F_{VIP}$  参数值。在环境背景情形下, TP、SRP、COD 和  $T$  表现出了重要性 ( $F_{VIP} > 1$ ), 其余均为一般指标。而在添加碳情形下, TN 重要性明显提升, 达到较为重要水平, TP、SRP、COD 和  $T$  仍为重

要指标; 而在添加氮情形下, 也仅有 TP、SRP、COD 和  $T$  表现出重要性, 其他指标均为一般指标。不难看出, 不同情形下上覆水中磷素指标的重要性都十分显著。而且, 在添加碳氮情形下, 温度指标的  $F_{VIP}$  值都处于上升水平。不同情景下沉积物理化指标对水塘、沟渠  $EPC_0$  的  $F_{VIP}$  参数值见表 6。

表 5 上覆水水质指标对水塘  $EPC_0$  值的  $F_{VIP}$  参数值

Table 5 The  $F_{VIP}$  parameters of water quality indexes for different  $EPC_0$  values in ponds

方案	TP	SRP	TN	$NH_4^+$ -N	$NO_3^-$ -N	COD	pH	$T$
环境背景 $EPC_0$	1.19	1.48	0.37	0.34	0.34	1.40	0.19	1.14
碳添加 $EPC_0$	1.38	1.30	0.90	0.57	0.57	1.63	0.34	1.64
氮添加 $EPC_0$	1.44	1.33	0.64	0.75	0.76	1.16	0.39	1.73

表 6 沉积物理化指标对沟塘  $EPC_0$  值的  $F_{VIP}$  参数值

Table 6 The  $F_{VIP}$  parameters of physicochemical indexes for sediments with different  $EPC_0$  values in ponds and ditches

类型	方案	TP	Ex-P	Fe/Al-P	TN	$NH_4^+$ -N	$NO_3^-$ -N	OM	pH
水塘	环境背景 $EPC_0$	1.19	1.17	1.17	1.17	0.06	1.66	1.06	0.39
	碳添加 $EPC_0$	0.75	0.98	1.11	0.55	0.65	1.55	0.97	0.78
	氮添加 $EPC_0$	0.68	0.72	0.94	0.69	0.70	1.46	1.17	0.68
沟渠	环境背景 $EPC_0$	0.94	0.94	1.06	0.96	1.25	1.19	0.94	0.56
	碳添加 $EPC_0$	0.83	0.84	0.84	0.98	1.57	1.20	0.87	0.53
	氮添加 $EPC_0$	0.83	0.82	0.86	0.89	1.74	1.05	0.82	0.55

显然, 在环境背景下水塘沉积物理化指标中, 除 pH 和  $NH_4^+$ -N 外, 其他指标均表现出了重要性, 特别是  $NO_3^-$ -N ( $F_{VIP} > 1.5$ ), 其余 5 个指标的重要程度相差不大; 而在沟渠沉积物理化指标中, 除 pH 外, 其

他指标均表现为重要或较重要, 其中 Fe/Al-P、 $NH_4^+$ -N 和  $NO_3^-$ -N 的重要性相对较高。与环境背景情形相比, 添加碳情形下水塘和沟渠的重要指标数目都明显下降, 其中水塘中仅有 Fe/Al-P 和  $NO_3^-$ -N 为

重要指标, Ex-P 和 OM 降为较为重要指标, TP 和 TN 甚至变为一般指标; 沟渠中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 仍为重要指标, 但 Fe/Al-P 则降为较重要指标, 其他指标重要性变化不大. 与环境背景情形相比, 添加氮情形下水塘沉积物仅有  $\text{NO}_3^-$ -N 和 OM 为重要指标, Fe/Al-P 为较重要指标, 其他均为一般指标; 沟渠中也仅有  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 为重要指标, 但较为重要指标数目明显增多, 一般指标仅有 pH, 这与水塘明显不同.

#### 4 讨论

沉积物作为水生生态系统的重要组成部分, 对上覆水中的磷负荷起着较好的调节作用<sup>[24]</sup>, 尤其是表层沉积物对磷的吸附-解吸过程. 而且, 沉积物表面往往附着丰富的微生物群落, 由于与上覆水直接接触, 微生物的新陈代谢活动对上覆水营养盐浓度及其迁移转化过程具有非常重要的影响, 并成为受污染水体水环境修复的主要贡献项. 众所周知, 生物和微生物对 C、N 和 P 等生源物质的吸收往往服从一定的生态化学计量学关系, 因此当其中一种或几种生源物质供给不足时, 往往可能降低生物或微生物对其它生源物质的吸收和利用<sup>[25]</sup>. 尽管不同种类生物或微生物的生物化学计量学关系存在差异, 但相关技术思想已在环境保护领域得到较为充分的实证. 例如, 在城市污水处理过程中, 由于生活污水的碳含量相对于氮、磷往往较为不足, 为达到更好地脱氮除磷的目的, 往往需要向污水中投加一定比例的碳源. Khoshmanesh 等<sup>[15]</sup>的研究发现, 外源碳添加影响沉积物磷的生物吸附, 且不同碳的影响效应存在差异性. 汤宁等<sup>[21]</sup>的研究表明, 添加乙酸钠可以明显降低板桥河污水厂尾水受纳河段沉积物的  $\text{EPC}_0$  值, 从而可以降低沉积物内源磷释放风险. 本研究也以乙酸钠作为外加碳源, 发现部分沟塘  $\text{EPC}_0$  值降低, 相应地沉积物释磷风险降低, 意味着这些水体沉积物磷的生物吸收存在碳限制性. 值得注意的是, 在蜀峰湾体育公园 8 个沟塘中, 并非所有水体都表现出添加外源碳情形下沉积物  $\text{EPC}_0$  值下降, 如水塘 3 的秋季  $\text{EPC}_0$  值不仅没有下降反而上升了 81.5%, 甚至沟渠 2 在秋、冬季出现下降而夏季时反又上升的情况. 笔者以为, 这可能是由于这些沟塘中生源要素 N、P 或其它因素转变为生物吸收磷的限制性因素造成的. 众所周知,  $\text{EPC}_0$  是沉积物磷吸附与解吸过程相互竞争作用的结果. 当沉积物或上覆水中碳源较为充分时, 微生物大量生长繁殖可能带来呼吸作用增强, 进而导致水体溶解氧浓度下降, 甚至进入缺氧或厌氧状态, 从而加速沉积物磷的解吸

进程<sup>[26]</sup>, 于是出现沉积物  $\text{EPC}_0$  值上升. 本研究中, 水塘、沟渠沉积物有机质含量均值分别达 4.66% 和 4.99%, 对于沉积物氮或磷含量相对并不很高的部分沟塘而言, 碳素似乎并不十分缺乏, 这或许就是外源碳添加时不同沟塘  $\text{EPC}_0$  值响应效应不一的主要原因.

不难推断, 当氮素相对不足时, 适当补充外源氮可能也会促进生物对于磷的吸收, 从而间接影响沉积物对磷的吸附-解吸过程. 本研究中, 沟塘沉积物 TN 含量范围为 1 026 ~ 2 054  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , N/P 比值变化范围为 2.63 ~ 5.10, 低于全国平均值 5.2<sup>[27]</sup>. 显然, 与沉积物中相对较高的磷含量相比, 这些沟塘沉积物的氮含量显得相对不充足<sup>[28]</sup>. 由于外源氮的添加几乎降低了所有沟塘沉积物的磷释放风险(图 4), 意味着氮素可能是蜀峰湾体育公园沉积物磷生物吸附的限制性因子. 实际上, McDowell 等<sup>[29]</sup>在对农业河床沉积物磷吸收的研究中也发现, 外源氮对沉积物磷的生物吸收有很大的促进作用, 一定程度上降低了内源磷释放风险. 需要特别指出的是, 新城区公园水体在圈入城市之前往往都为城乡过渡带或农村沟塘, 污染来源主要以农业农村面源污染为主, 水体开放程度较高. 在成为新城区景观水体后, 虽然经过一定程度的人工改造, 但在水质好坏、沉积物污染程度, 乃至底质质地构成等方面可能仍与老城区景观水体有着较大的差异, 因此本研究揭示的规律或现象是否符合老城区沟塘景观水体, 仍还有待深入研究. 本研究中, 针对外源氮添加情形下沟塘沉积物释磷风险调控效应, 虽然相关结果仅是基于 24 h 培养时间得到的实验室模拟数据, 但由于公园水体沉积物理化性质的改变往往需要较长时间的积累, 因此可以认为在较长一段时期内氮素都将是影响蜀峰湾体育公园沉积物磷释放的重要因素. 事实上, 在环境保护实践中, 从水环境污染风险控制的角度, 往往也不会允许将大量的含氮营养物直接投放到沟塘沉积物中. 毫无疑问, 在氮限制性条件下, 如何设计和筛选安全、可靠的含氮材料或基质, 将是值得深入研究的课题.

与水塘相比, 本研究中沟渠仅在生态补水及降雨时过水, 其余时间均暴露在空气中, 沉积物与上覆水之间的磷交换相对较为匮乏, 导致磷素滞留在沉积物中, 使得沉积物磷缓冲能力相对较弱. 干湿交替可能导致沉积物再次处于淹水状态时, 相应的矿化速率增大, 并促使氢氧化铁发生还原反应, 从而出现磷释放能力增强<sup>[30,31]</sup>. 这些可能是蜀峰湾公园水塘与沟渠  $\text{EPC}_0$  值呈现极显著差异的主要原因.

## 5 结论

(1) 蜀峰湾体育公园沟塘沉积物  $EPC_0$  值具有较为明显的季节性变化特征, 表现为夏季相对最高, 冬季最低, 且水塘  $EPC_0$  普遍低于沟渠。

(2) 外源碳添加情形下, 水塘和沟渠均存在沉积物磷释放风险上升、下降两种情况, 且水塘变化幅度普遍高于沟渠; 不同季节下不论是水塘还是沟渠, 相应地沉积物  $EPC_0$  值之间存在极显著差异性, 同一季节下水塘与沟渠沉积物  $EPC_0$  值之间也存在极显著差异性。

(3) 外源氮添加情形下, 几乎所有水塘和沟渠沉积物磷释放风险均下降, 水塘下降幅度普遍高于沟渠; 不同季节下不论是沟渠还是水塘, 相应地沉积物  $EPC_0$  值之间存在极显著差异性, 同一季节下水塘与沟渠  $EPC_0$  值之间也均存在极显著差异性。

(4) 上覆水中磷素对水塘沉积物  $EPC_0$  影响较大, 氮素指标的重要性较小; 环境背景情形下水塘沉积物中磷素指标对  $EPC_0$  值的影响显著, 而沟渠沉积物则是氮素指标相对更重要。

### 参考文献:

- [1] Tu L Y, Jarosch K A, Schneider T, *et al.* Phosphorus fractions in sediments and their relevance for historical lake eutrophication in the Ponte Tresa basin (Lake Lugano, Switzerland) since 1959 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 806-817.
- [2] 黄威, 刘星, 赵丽, 等. 岱海沉积物内源磷释放特征的研究 [J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(9): 2094-2102.  
Huang W, Liu X, Zhao L, *et al.* Release characteristics of phosphorus in sediment from Daihai Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(9): 2094-2102.
- [3] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus retention and release by sediments in the eutrophic Mai Po Marshes, Hong Kong [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **57**(6-12): 349-356.
- [4] Hongthanat N, Kovar J L, Thompson M L, *et al.* Phosphorus source-sink relationships of stream sediments in the Rathbun Lake watershed in southern Iowa, USA [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(8), doi: 10.1007/s10661-016-5437-6.
- [5] 李松贵, 向速林, 张旭, 等. 小型浅水湖泊表层沉积物对磷的吸附特征及其影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2018, **38**(6): 61-66, 73.  
Li S G, Xiang S L, Zhang X, *et al.* Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on surface sediments of small shallow lake [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(6): 61-66, 73.
- [6] 李萍, 钟敏, 吴鹏举, 等. 东莞燕岭湿地景观水体富营养化的现状及机理分析 [J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(5): 47-51.  
Li P, Zhong M, Wu P J, *et al.* Eutrophication status and mechanism of landscape water body in Yanling Wetland in Dongguan [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(5): 47-51.
- [7] 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 等. 合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1718-1726.  
Li R Z, Liu K F, Qian J, *et al.* Nitrogen and phosphate pollution characteristics and eutrophication evaluation for typical urban landscape waters in Hefei city [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1718-1726.
- [8] 李如忠, 陈慧, 刘超, 等. 合肥环城公园景观水体水质特征及环境质量评价 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(3): 1121-1129.  
Li R Z, Chen H, Liu C, *et al.* Water quality characteristics and environmental quality assessment of landscape water in the round-city-park in Hefei [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 1121-1129.
- [9] 黎睿, 潘婵娟, 汤显强, 等. 三峡水库蓄水至 175m 后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2160-2169.  
Li R, Pan C J, Tang X Q, *et al.* Vertical distribution profiles and release potential of mainstream column sediments in the Three Gorges Reservoir after impoundment to 175 m [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2160-2169.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 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.
- [12] Roberts E J, Cooper R J. Riverbed sediments buffer phosphorus concentrations downstream of sewage treatment works across the river Wensum catchment, UK [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**(5): 2107-2116.
- [13] 付强, 尹澄清, 马允. 源头农业区不同类型水塘中水体沉积物磷吸附容量 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 70-76.  
Fu Q, Yin C Q, Ma Y. Phosphorus sorption capacities of the pond sediments in a headstream agricultural watershed [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(4): 70-76.
- [14] 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 等. 环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 728-733.  
Song J W, Xu G, Zhang Y, *et al.* Phosphorus storage capacity and loss risk in coastal reed wetland surrounding Bohai Sea [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 728-733.
- [15] 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.
- [16] Diemer L A, McDowell W H, Wymore A S, *et al.* Nutrient uptake along a fire gradient in boreal streams of Central Siberia [J]. *Freshwater Science*, 2015, **34**(4): 1443-1456.
- [17] 刘洋, 付强, 陆海明, 等. 农业流域中不同类型水塘沉积物磷素状态及其环境意义 [J]. *环境化学*, 2013, **32**(12): 2307-2314.  
Liu Y, Fu Q, Lu H M, *et al.* The status of phosphorus and its environmental significance in various pond sediments in an agriculture watershed [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(12): 2307-2314.
- [18] 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.
- [19] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.  
Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [20] 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.
- [21] 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 等. 污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 801-808.  
Tang N, Li R Z, Wang Y Q, *et al.* Phosphorus forms and release risk of sediments in urban sewage treatment plant effluent and receiving stream reach [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 801-808.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Kreiling R M, Thoms M C, Bartsch L A, *et al.* Complex response of sediment phosphorus to land use and management within a river network [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, **124**(7): 1764-1780.
- [25] Mise K, Maruyama R, Miyabara Y, *et al.* Time-series analysis of phosphorus-depleted microbial communities in carbon/nitrogen-amended soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, **145**, doi: 10.1016/j.apsoil.2019.08.008.
- [26] 徐洋, 陈敬安, 王敬富, 等. 氧化还原条件对红枫湖沉积物磷释放影响的微尺度分析[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 68-74.  
Xu Y, Chen J A, Wang L F, *et al.* The micro-scale investigation on the effect of redox condition on the release of the sediment phosphorus in Lake Hongfeng [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(1): 68-74.
- [27] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1-3): 139-151.
- [28] 张智博, 刘涛, 曹起孟, 等. 东平湖沉积物-菹草系统碳、氮、磷空间分布及化学计量特征[J]. *环境化学*, 2020, **39**(8): 2263-2271.  
Zhang Z B, Liu T, Cao Q M, *et al.* Spatial distribution and stoichiometric characteristics of C, N, P in the sediment-*Potamogeton crispus* system in Dongping Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(8): 2263-2271.
- [29] McDowell R W, Elkin K R, Kleinman P J A. Temperature and nitrogen effects on phosphorus uptake by agricultural stream-bed sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, **46**(2): 295-301.
- [30] 周健, 李春辉, 张志永, 等. 淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 130-136.  
Zhou J, Li C H, Zhang Z Y, *et al.* Effects of flooding and drying on the transformation of soil inorganic phosphorus in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 130-136.
- [31] Schönbrunner I M, Preiner S, Hein T. Impact of drying and re-flooding of sediment on phosphorus dynamics of river-floodplain systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **432**: 329-337.

## CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing, from 2014 to 2020 .....	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter .....	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols .....	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan .....	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm .....	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM <sub>2.5</sub> -bound Metals in Xinxiang .....	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea .....	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin .....	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China .....	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai .....	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta .....	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin .....	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years .....	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province .....	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin .....	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula .....	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area .....	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou .....	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park .....	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism .....	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands .....	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment .....	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period .....	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff .....	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone .....	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i> .....	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment .....	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation .....	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process .....	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System .....	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System .....	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration .....	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China .....	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau .....	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area .....	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter .....	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System .....	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium .....	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L. ....	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions .....	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau .....	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area .....	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities .....	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms .....	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland .....	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N <sub>2</sub> O Emission from Potted Maize .....	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Loaded Biochar .....	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard .....	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019 .....	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)