

百方知库
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.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM_{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO₂、HNO₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 王慎, 张思思, 许允, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO_x 排放影响 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N₂O 排放的影响及其微生物机制 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事 (2929) 《环境科学》征稿简则 (2947) 信息 (2646, 2656, 2857)

巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应

李如忠¹, 鲍琴¹, 张瑞钢², 陈慧¹

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 2017年7月(夏季)和2018年1月(冬季), 在巢湖十五里河干流的城乡梯度方向选择5个代表性采样点位, 采集表层沉积物样, 利用实验室培养法, 测算沉积物磷的总吸收潜力 SPU_{live} 、非生物吸收潜力 SPU_{kill} 和生物吸收潜力 SPU_{biotic} , 评估不同外加碳源(乙酸钠、葡萄糖及两者的混合溶液)对 SPU_{biotic} 的影响水平. 结果表明, 十五里河沉积物 SPU_{live} 存在时空差异性, 且表现为 SPU_{kill} 高于 SPU_{biotic} ; 未添加碳源时, 夏季和冬季的 SPU_{kill} 均值分别为 $3.016 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $3.368 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, SPU_{biotic} 均值分别为 $0.784 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.323 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 夏、冬两季的非生物吸收潜力存在显著差异性; 添加外源碳后, 不仅 SPU_{biotic} 有了较大幅度的提升, 生物因素在沉积物磷吸收中的贡献率水平也有了明显提高, 且两者均表现为添加乙酸钠效果最显著, 添加葡萄糖效果次之, 混合碳源的效果相对较弱. 由沉积物磷的生物吸收对外源碳的响应情况, 可以判定十五里河沉积物磷吸收存在一定程度的碳限制性.

关键词: 磷吸收潜力; 生物非生物吸收; 沉积物; 外源碳添加; 巢湖

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2730-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201812177

Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin

LI Ru-zhong¹, BAO Qin¹, ZHANG Rui-gang², CHEN Hui¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Surficial sediments were collected from five sampling sites in the mainstream of the Shiwuli River along an urban-rural gradient in the Chaohu Lake basin during July 2017 (summer) and January 2018 (winter). The total uptake (SPU_{live}), abiotic uptake (SPU_{kill}), and biotic uptake (SPU_{biotic}) of phosphorus by sediments were measured, and uptake responses to different carbon sources (i. e., sodium acetate, glucose, and a mixture of both) were explored quantitatively through incubation experiments. The results showed that SPU_{live} had obviously spatiotemporal variations across the five sites, and SPU_{kill} was higher than that of SPU_{biotic} . Under no carbon added, the mean values of SPU_{kill} were $3.016 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ and $3.368 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, and the average values of SPU_{biotic} were $0.784 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ and $0.323 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ in summer and winter, respectively. Moreover, significant differences were found in abiotic phosphorus uptake between the two months. In the presence of carbon addition, both the value of SPU_{biotic} and the contribution rate of biotic phosphorus uptake showed a distinct increase. In general, the magnitude and rate of biotic uptake of phosphorus by sediments was highest when sodium acetate was added, followed by glucose, while the effect of mixed carbon was the worst. The responses of biotic phosphorus uptake to carbon addition suggested that the uptake potential of phosphorus by sediments in Shiwuli River was restricted by the carbon availability to some degree.

Key words: phosphorus uptake potential; biotic and abiotic uptake; sediment; carbon addition; Chaohu Lake

磷是包括微生物在内的所有生命体中不可缺少的营养元素, 并主要以磷酸盐形式贮存于沉积物中, 因此沉积物在磷的生物地球化学循环中扮演重要角色^[1, 2], 对调控水体磷浓度具有重要的环境生态意义. 一些研究证实, 沉积物中微生物对磷的吸收、贮存和释放在磷循环中起着极其重要的作用^[3-6]. 近年来, 针对水底固着或悬浮颗粒生物磷吸收的研究逐渐增多^[7-9], 对推动微生物技术在水污染治理和水环境修复领域的应用发挥了积极作用. 截至目前, 有关开放水体微生物磷吸收的作用机制, 特别是生物与非生物因素在磷吸收中的相对贡献情况依旧不是很清楚, 如何通过技术调控强化沉积物固磷和降低磷释放风险, 也还缺乏成熟的技术方法. 投放经培养筛选的微生物菌种(如光合细

菌 PSB、高效微生物菌群 EM 等)可以在一定程度上改善和调控河流水质, 但却存在潜在生态风险, 而且污染治理成本较高, 大规模推广应用有一定难度. 为此, 河流底栖固着或悬浮颗粒物上土著微生物、藻类等的磷吸收作用引起人们的兴趣^[10-13], 其对外源营养物添加的响应受到人们的关注^[14]. 但由于河流水体类型和环境水文条件的多样性, 相关研究还显得很不充分, 远不能满足河流水环境治理工作的需要.

巢湖是水体富营养化较为严重的湖泊^[15], 目

收稿日期: 2018-12-23; 修订日期: 2019-01-11

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

前正面临入湖氮磷负荷削减的艰巨任务^[16]. 十五里河是合肥市西南城区与巢湖西半湖的重要联系纽带, 是巢湖西半湖外源氮、磷负荷输入的主要通道之一^[17]. 十五里河上游原有的两个化肥生产企业已分别于2008年和2012年关停、搬迁, 但长期污水排放在河道底部富集的氮磷营养物质并未得到有效处置, 并通过内源释放形式不断影响河流水质, 导致河流氮、磷水质指标长期处于劣V类水平^[17], 既严重影响了合肥市城市形象, 也加大了巢湖富营养化治理的难度. 目前, 如何有效改善十五里河水质状况、削减向下游巢湖传输的磷负荷, 成为困扰合肥市政府的一大难题. 本研究选择十五里河为对象, 尝试从河流自身磷净化能力提升角度, 解析十五里河沉积物磷吸收潜力, 并对其对于不同外源碳的响应效应开展量化分析, 以期对十五里河水环境治理和磷负荷削减提供依据.

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, 为丘陵地区小河流水体. 十五里河自西北向东南流经合肥市的蜀山区和包河区, 在义城镇附近汇入巢湖. 河流上游人工开挖形成的天鹅湖水体是当地重要的景观水体, 建有溢流坝, 坝下主河道长22.64 km, 流域面积约111.25 km². 汇流区地形较为平缓, 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%, 平均降雨量为1 000 mm.

十五里河上游地区为近十多年来新建的合肥市政务中心和高档居住小区, 该处附近原有的江淮化肥厂和红四方化工集团等两个化肥生产企业也已在近十年陆续停产、搬迁; 中游为城市在建区, 主要用于商品住宅和工业园区建设, 下游东南部为城郊结合部, 目前土地基本都划归巢湖北岸生态湿地保护范畴. 十五里河是巢湖流域水质污染最严重的河流水体^[18], 本研究期间河流水质情况见表1.

表1 河流水质统计结果

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
1	0.95	0.57	15.08	6.10	0.48	227.0	35.58	27.0	7.72
2	1.10	0.89	25.72	12.74	0.98	459.5	24.98	19.0	7.80
3	1.09	0.75	24.92	12.26	0.78	224.5	33.97	51.5	7.68
4	1.17	0.52	26.99	16.76	0.91	383.5	41.24	31.0	7.57
5	0.87	0.51	22.21	6.57	2.54	445.5	27.81	40.5	7.63

2 材料与方

2.1 采样点布

根据河流形态、排污口或支流汇入情况以及周边土地利用特征, 沿十五里河干流的城乡梯度方向布设5个采样点位, 分别位于天鹅湖坝下(采样点1)、南门换乘中心附近的梳背桥下游(采样点2)、徽州大道的高王桥上游(采样点3)、包河大道包河桥上游(采样点4)和巢湖入湖口上游1 km的义城镇附近(采样点5).

2017年7月(夏季)和2018年1月(冬季), 在每个采样点的0.5 m²范围内, 采集3个表层沉积物样, 并均匀混合代表该点位. 将采集的沉积物迅速送回实验室冷藏, 并对每个采样点取一部分新鲜沉积物用于磷吸收潜力估算, 其余部分放置在阴凉处自然风干、研磨, 过80目筛后用于分析沉积物理化性质.

2.2 实验方案

(1) 培养前沉积物磷含量的测定 针对每个采

样点, 按是否滴入抑制剂设置2种情景, 并分别取3个平行. 首先, 向6个100 mL离心管中, 分别移入4 g左右的新鲜沉积物; 然后, 分别加入40 mL磷提取液(0.1 mol·L⁻¹ NaOH、0.1 mol·L⁻¹ NaCl), 并向其中3个试管中另滴入3~4滴饱和氯仿溶液作为抑制剂. 将离心管加塞后放置于25℃、200 r·min⁻¹的振荡器中振荡16 h后, 再置于3 000 r·min⁻¹离心机中离心5 min. 取上清液2 mL, 将其注入50 mL比色管, 定容到标线刻度, 并滴加1 mL抗坏血酸(100 g·L⁻¹)和2 mL钼酸盐溶液(26 g·L⁻¹), 振荡摇匀, 静置15 min, 测定上清液磷酸盐浓度. 对3个平行取均值, 再由溶液体积换算出新鲜沉积物的磷含量, 即SRP^{initial}. 其中, 滴入氯仿的磷含量表示为SRP^{initial}_{live}, 未滴加氯仿的表示为SRP^{initial}.

(2) 培养后沉积物磷含量的测定 针对每个采样点沉积物均设置8种实验方案, 另有空白实验作为对照, 共9种方案(表2), 每种方案取3个平行. 首先, 向每个100 mL离心管中, 分别移入4 g左右

的新鲜沉积物. 除空白实验仅加入 40 mL 蒸馏水外, 其它 8 种方案均加入 20 mL 培养液($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$ 溶液; 其中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 溶液是由 KH_2PO_4 磷酸二氢钾配制). 这里, 方案 1 和方案 2 加入了 20 mL 蒸馏水, 方案 3 和方案 4 加入了 20 mL $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸钠 (以 C 计), 方案 5 和方案 6 加入了 20 mL $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖 (以 C 计), 方案 7 和方案 8 加入了 20 mL $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸钠和葡萄糖混合溶液 (两者按 1:1 体积比混合, 以 C 计). 其中, 方案 2、4、6 和 8 中均滴入了 3~4 滴饱和氯仿溶液.

表 2 实验方案设计¹⁾

Table 2 Design of the experimental scheme

方案	外源磷 ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	碳源	抑制剂 (99.7%)
空白	×	×	×
1	√	×	×
2	√	×	√
3	√	乙酸钠	×
4	√	乙酸钠	√
5	√	葡萄糖	×
6	√	葡萄糖	√
7	√	乙酸钠 + 葡萄糖	×
8	√	乙酸钠 + 葡萄糖	√

1) 乙酸钠、葡萄糖浓度均取 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 C 计); √ 表示添加试剂, × 表示不添加试剂

将所有离心管加塞并盖紧后置于 30°C 恒温培养箱中静置培养 24 h. 培养结束后, 再向各离心管中加入 40 mL 磷提取液 (同上), 并盖塞振荡、离心, 测定上清液的磷酸盐浓度. 对 3 个平行取平均值, 再根据溶液体积, 换算出沉积物可提取的磷含量 $\text{SRP}^{\text{final}}$ (扣除了培养液引入的磷量). 将滴入氯仿的磷含量表示为 $\text{SRP}_{\text{kill}}^{\text{final}}$, 未滴加氯仿的表示为 $\text{SRP}_{\text{live}}^{\text{final}}$. 将沉积物底质样过滤, 并将滤纸与沉积物一起置于烘箱中烘至恒重, 确定沉积物烘干后的质量 dw (事先将滤纸置于烘箱中烘至恒重并记录质量).

2.3 样品分析测试

沉积物样品中 TN 采用过硫酸钾消解法测定; TP 采用钼锑抗比色法进行测定; Ex-P 采用 EDTA 提取, 抗坏血酸法测定; Fe/Al-P 按照 SMT 法测定; 有机质 (OM) 含量采用烧失量估算 (105°C 烘箱烘干 12 h, 然后在 550°C 马弗炉中灼烧 5 h); pH 值采用 pH 计测定 (水土比为 5:1). 至于培养前后沉积物上清液的磷酸盐浓度, 采用分光光度计 (700 nm 吸光度) 测定.

2.4 磷吸收潜力估算

沉积物磷的吸收潜力根据式 (1)、(2) 计

算^[19, 20]:

$$\text{SPU}_{\text{live}} = \frac{(\text{SRP}_{\text{live}}^{\text{initial}} - \text{SRP}_{\text{live}}^{\text{final}})}{dw \times t} \quad (1)$$

$$\text{SPU}_{\text{kill}} = \frac{(\text{SRP}_{\text{kill}}^{\text{initial}} - \text{SRP}_{\text{kill}}^{\text{final}})}{dw \times t} \quad (2)$$

式中, SPU_{live} 和 SPU_{kill} 分别表示沉积物磷的总吸收潜力和非生物吸收潜力, $\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; $\text{SRP}_{\text{live}}^{\text{initial}}$ 和 $\text{SRP}_{\text{kill}}^{\text{initial}}$ 分别表示培养前未滴入和滴入氯仿提取的磷含量, μg ; $\text{SRP}_{\text{live}}^{\text{final}}$ 和 $\text{SRP}_{\text{kill}}^{\text{final}}$ 分别表示培养后未滴入和滴入氯仿提取的磷含量, μg ; dw 表示沉积物干质量, g ; t 表示培养时间, h .

由于 SPU_{live} 是生物与非生物吸收共同作用的结果, 而 SPU_{kill} 反映了非生物吸收效应 (也即物理化学吸附作用), 因此两者之差可以体现磷的生物吸收潜力, 不妨记作 $\text{SPU}_{\text{biotic}}$, 则有:

$$\text{SPU}_{\text{biotic}} = \text{SPU}_{\text{live}} - \text{SPU}_{\text{kill}} \quad (3)$$

2.5 数据处理

采用 Excel 软件完成数据处理和绘制图表. 采用 Mann-Whitney U 检验法分析研究对象的差异性, $P < 0.05$ 表示样本差异性显著, $P < 0.01$ 表示样本差异性极显著.

3 结果与讨论

3.1 沉积物基本理化特性

5 个采样点夏季和冬季表层沉积物的磷形态及其理化性质, 见表 3. 可以看出, 十五里河沉积物氮磷污染相当严重, 氮磷含量显著高于一般河流、湖库水体. 而与氮磷含量相比, 绝大多数采样点位沉积物的有机质含量却并不突出, 这可能与该河沉积物中的氮磷主要来自于上游的两个化肥厂污水大量排放造成的污染富集有关. 由生态化学计量学原理, 微生物在对氮、磷、碳等生源物质的吸收利用上存在一定的化学计量关系^[21, 22]. 由此, 大致可以推断, 十五里河沉积物中相对较不充分的有机质含量可能会对磷循环的生物地球化学过程产生一定的限制效应.

总体上, 5 个采样点 Ex-P 和 TN 都表现为冬季含量明显高于夏季, 前 3 个采样点的 Fe/Al-P 和 TP 冬季含量高于夏季, 而 IP 则恰好相反. OM 除采样点 1 外, 都表现为夏季含量高于冬季. 5 个采样点的沉积物氮磷含量存在明显的差异性, 但并没有表现出显著的城乡梯度特征.

3.2 磷吸收潜力的外源碳影响

3.2.1 磷的总吸收

不同外加碳情形下沉积物磷的总吸收潜力情况, 见图 1. 可以看出, 十五里河沉积物磷的总吸

表 3 沉积物磷形态及其基本理化特性

Table 3 Phosphorus forms in sediment and its basic physical and chemical properties

采样点	季节	Ex-P /mg·kg ⁻¹	Fe/Al-P /mg·kg ⁻¹	Ca-P /mg·kg ⁻¹	IP /mg·kg ⁻¹	TP /mg·kg ⁻¹	TN /mg·kg ⁻¹	OM /%	pH
1	夏	31.52	218.94	544.25	758.88	1 006.45	1 634.78	8.90	6.98
	冬	181.72	405.72	566.25	571.07	1 427.67	1 899.73	13.00	7.96
2	夏	22.45	166.95	646.03	875.79	1 064.9	1 846.78	7.70	7.60
	冬	150.77	283.44	362.69	567.63	1 317.63	2 208.95	6.50	7.65
3	夏	32.76	201.61	560.75	762.32	1 018.48	1 811.45	6.60	7.56
	冬	177.18	240.12	482.35	604.08	1 413.91	2 076.45	6.20	7.75
4	夏	43.9	398.98	459.66	886.1	1 204.16	1 829.11	8.10	7.46
	冬	175.94	121.7	344.81	521.55	1 039.12	2 032.28	4.22	7.81
5	夏	27.81	309.44	245.1	702.14	760.6	2 058.78	7.10	7.18
	冬	147.88	117.84	220.34	410.83	714.18	2 297.28	2.91	7.84

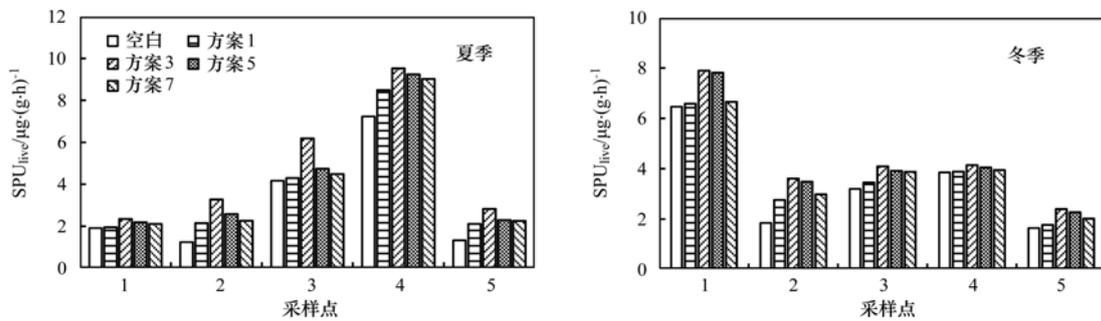


图 1 各采样点沉积物磷的总吸收潜力

Fig. 1 Total potential for phosphorus uptake by sediments for each sampling site

收潜力存在一定的时空差异性。总体上, 夏季时采样点 1 与采样点 5 的 SPU_{live} 基本相当, 且从上游至下游, SPU_{live} 逐步增大, 并于采样点 4 达到最大值, 然后迅速下降; 而冬季时采样点 1 的 SPU_{live} 明显高于其它 4 个采样点, 且采样点 2 至采样点 4 的 SPU_{live} 基本相当, 略高于采样点 5。此外, 采样点 2 和采样点 5 的夏、冬季节差异并不明显, 采样点 1 表现出冬季显著大于夏季, 而采样点 3 和 4 则为夏季明显高于冬季。十五里河中下游地区人为活动较为显著, 表层沉积物的组成和性质易受人为扰动的影响。采样过程中发现, 冬季时的采样点 1、夏季时的采样点 4 表层沉积物粒度都明显较同时期其他 4 个采样点更为细小一些。而且, 夏季时无论是 TP 还是生物可利用性磷(包括 Ex-P 和 Fe/Al-P)含量, 采样点 4 都明显最高, 冬季时采样点 1 也表现出 TP 和生物可利用性磷(特别是 Fe/Al-P)含量明显高于其他采样点的变化特征(表 3), 这可能是上述两个采样点 SPU_{live} 异常偏高的主要原因。

与空白样相比, 其它 4 个方案的 SPU_{live} 都有不同程度的增大, 意味着沉积物表现出了磷吸收特征。而且, 无论是夏季还是冬季, 各采样点沉积物磷的总吸收对外加碳的响应规律相似, 即添加乙酸钠的沉积物 SPU_{live} 最高, 葡萄糖次之, 乙酸钠和葡

萄糖混合溶液的最低, 但高于仅添加磷培养液的方案 1。由于外源碳添加与否对应的 SPU_{live} 数值相差不大, 表明外源碳输入对于沉积物磷的总吸收影响不大。

在方案 1 中, 夏季各采样点的 SPU_{live} 变化范围为 $1.950 \sim 8.489 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $3.800 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 冬季变化范围为 $1.770 \sim 6.853 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $3.691 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。李如忠等^[20]采用该方案对合肥城郊一条受人为扰动影响较大的溪流进行研究, 得到夏、秋季节 SPU_{live} 变化范围为 $1.27 \sim 9.10 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $3.143 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 与本研究相近。Lottig 等^[19]解析了不同底质类型溪流沉积物的磷吸收特征, 发现沙质河床沉积物 SPU_{live} 平均值为 $23.0 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 砾石河床为 $14.5 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 岩石河床为 $12.5 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 高于十五里河沉积物。

采用 Mann-Whitney U 检验法对十五里河沉积物总吸收潜力进行差异性分析, 结果发现: 采样点 2 和 3、采样点 2 和 4、采样点 3 和 5、采样点 4 和 5 存在极显著差异性($P < 0.01$), 其它采样点之间差异性则不显著($P > 0.082$); 不仅每个采样点位中各方案之间差异性不显著($P > 0.151$), 而且整个河流夏、冬两季的总吸收潜力差异性也不显著($P = 0.594$)。

3.2.2 磷的非生物吸收

不同外源碳添加情形的磷的非生物吸收潜力 SPU_{kill} 情况见图 2。其中, 未添加碳源(即仅添加含磷培养液)的夏季 SPU_{kill} 变化范围为 $1.190 \sim 7.378 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $3.016 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 冬季变化范围为 $1.643 \sim 5.631 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $3.368 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 也就是说, 冬季非生物吸收潜力略高

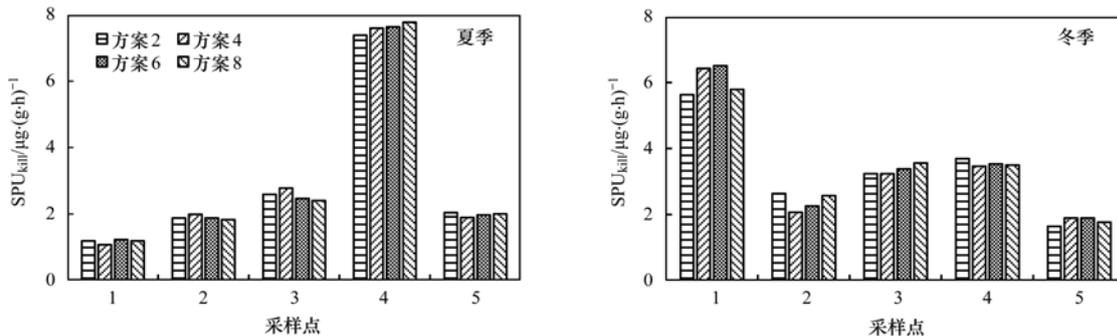


图 2 各采样点位沉积物磷的非生物吸收潜力变化

Fig. 2 Variations in the abiotic uptake potential for phosphorus by sediments for each sampling site

总体上, 沿城乡梯度方向 5 个采样点 SPU_{kill} 变化情况与 SPU_{live} 大体相似, 即夏季时采样点 4 的 SPU_{kill} 显著高于其他点位, 冬季时采样点 1 也明显高于其他采样点, 这可能与两个采样点表层沉积物的粒度更为细小, 以致对磷吸附能力更强有关^[7]. 除采样点 4 的夏季 SPU_{kill} 明显高于冬季外, 其他 4 个采样点几乎都较冬季低. 而且, 无论是夏季还是冬季, 外源碳添加与否对 SPU_{kill} 影响很小, 即添加碳源对非生物吸收潜力几乎没有明显的促进作用.

非生物吸收潜力的差异性分析结果表明, 采样点 1 和 3、采样点 1 和 4、采样点 2 和 3、采样点 3 和 5 存在极显著性差异性 ($P < 0.01$), 其它采样点之间差异性不显著 ($P > 0.074$); 各采样点各种方案之间差异性也不显著 ($P > 0.257$); 夏、冬两季的非生物吸收潜力存在显著差异性 ($P = 0.026$).

3.2.3 磷的生物吸收

5 个采样点位沉积物磷的生物吸收潜力情况见图 3。显然, 夏季时采样点 3 的 SPU_{biotic} 明显高于其

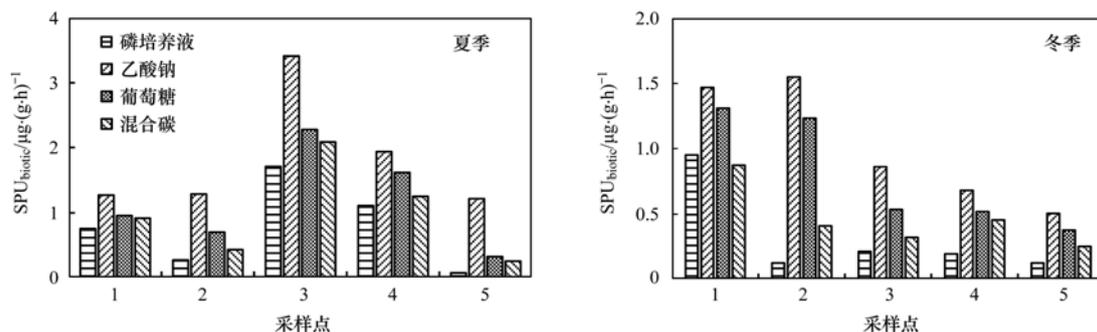


图 3 各采样点位沉积物磷的生物吸收潜力变化情况

Fig. 3 Variations in the biotic uptake potential of phosphorus by sediments for each sampling site

于夏季. 李如忠等^[20]在合肥城郊人为扰动较大溪流的研究中, 得到夏、秋两季的 SPU_{kill} 变化范围为 $1.19 \sim 7.44 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $2.567 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 与本研究较为接近. Lottig 等^[19]得到沙质河床沉积物的 SPU_{kill} 均值为 $24.0 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 砾石河床为 $9.8 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 岩石河床为 $5.0 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 稍高于十五里河沉积物.

它采样点, 冬季时采样点 1 相对较高, 且在添加乙酸钠、葡萄糖时与采样点 2 接近. 总体上, 夏季磷的生物吸收潜力高于冬季, 特别是中下游采样点. 就未添加外源碳而言, 除采样点 1 和采样点 5 的夏季生物吸收潜力略低于冬季外, 其它采样点都表现为夏季高于冬季, 特别是位于城市在建区的采样点 3 和采样点 4. 5 个采样点的夏季 SPU_{biotic} 变化范围为 $0.072 \sim 1.710 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.784 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 冬季变化范围为 $0.126 \sim 0.951 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.323 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 与文献^[20]对合肥城郊溪流沉积物 SPU_{biotic} 的估算结果相近.

显然, 在外加碳源的情形下, 5 个采样点的生物吸收潜力都表现出了相似的变化特征, 即添加乙酸钠的 SPU_{biotic} 最高, 添加葡萄糖次之, 投加混合溶液的 SPU_{biotic} 最低. 尽管添加碳源基本都较不添加碳源的生物吸收潜力更高, 但乙酸钠和葡萄糖混合溶液对沉积物的生物吸收潜力提升幅度并不大, 而

且夏、冬季都如此。

采样点 1 和采样点 5 之间存在极显著差异性 ($P=0.005$), 采样点 3 和采样点 5、采样点 4 和采样点 5 之间则都存在显著差异性 ($P<0.05$), 其它采样点之间的差异性不明显 ($P>0.083$)。5 个采样点中, 未添加碳源和添加乙酸钠情形之间存在极显著差异性 ($P=0.010$), 添加乙酸钠和添加混合碳源情形之间存在显著差异性 ($P=0.019$), 而其它各组方案之间差异性则不显著 ($P>0.059$)。总体上, 夏、冬两季节之间磷的生物吸收潜力接近显著差异性水平 ($P=0.055$)。

不妨采用 $(\text{SPU}_{\text{biotic}}^{\text{C+P}} - \text{SPU}_{\text{biotic}}^{\text{P}}) / \text{SPU}_{\text{biotic}}^{\text{P}} \times 100\%$

表 4 外源碳添加对磷的生物吸收潜力的影响水平/%

Table 4 Influence of carbon additions on the biotic uptake potential of phosphorus/%

季节	碳源	采样点 1	采样点 2	采样点 3	采样点 4	采样点 5
夏季	乙酸钠溶液	68.42	379.97	100.00	74.19	1 600.16
	葡萄糖溶液	26.32	159.99	33.33	45.16	350.03
	混合碳溶液	21.05	60.00	22.22	12.90	250.02
冬季	乙酸钠溶液	54.37	1 125.14	300.01	250.00	300.02
	葡萄糖溶液	37.64	875.11	150.00	166.67	200.01
	混合碳溶液	-8.37	225.03	50.00	133.34	100.01

3.3 生物非生物吸收贡献率

不同外加碳源情形下生物与非生物因素的磷吸收贡献情况见图 4。在未添加外源碳的情况下, 5 个采样点夏季的生物与非生物吸收贡献率范围分别为 3.41% ~ 39.77% (均值为 21.55%) 和 60.23% ~ 96.59% (均值为 78.45%), 冬季分别为 4.58% ~ 14.45% (均值为 7.48%) 和 85.55% ~ 95.42% (均值为 92.52%), 即十五里河沉积物磷吸收主要来

定量刻画磷的生物吸收潜力对于外加碳源的响应效果, 其中 $\text{SPU}_{\text{biotic}}^{\text{C+P}}$ 表示添加了磷培养液和外源碳的生物吸收潜力, $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; $\text{SPU}_{\text{biotic}}^{\text{P}}$ 表示仅添加了磷培养液的生物吸收潜力, $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。5 个采样点沉积物磷的生物吸收潜力对外源碳的响应情况, 见表 4。显然, 生物吸收潜力对乙酸钠的响应相对最为显著, 其次是葡萄糖, 而对于混合碳源的响应最弱。而且, 大多数采样点冬季响应水平高于夏季。可以说, 十五里河大多数采样点位沉积物中磷的生物吸收潜力对外源碳的响应效应, 特别是对乙酸钠的偏好性, 表明该河沉积物磷的生物吸收存在一定程度的碳限制性。

自非生物因素贡献, 尤其是冬季。但采样点 1 和采样点 3 的夏季生物贡献率仍高达 40% 左右, 生物因素影响较为显著。李如忠等^[20] 在对合肥城郊溪流研究中, 得到生物与非生物吸收贡献率分别为 3.98% ~ 35.21%、64.79% ~ 96.02%, 与本研究非常接近。Aldridge 等^[23] 针对岩石附生生物群落的实验研究发现, 磷的生物吸收贡献率不足 30%, 而非生物吸收贡献率达 70% 以上。Stutter 等^[6] 在对以藻

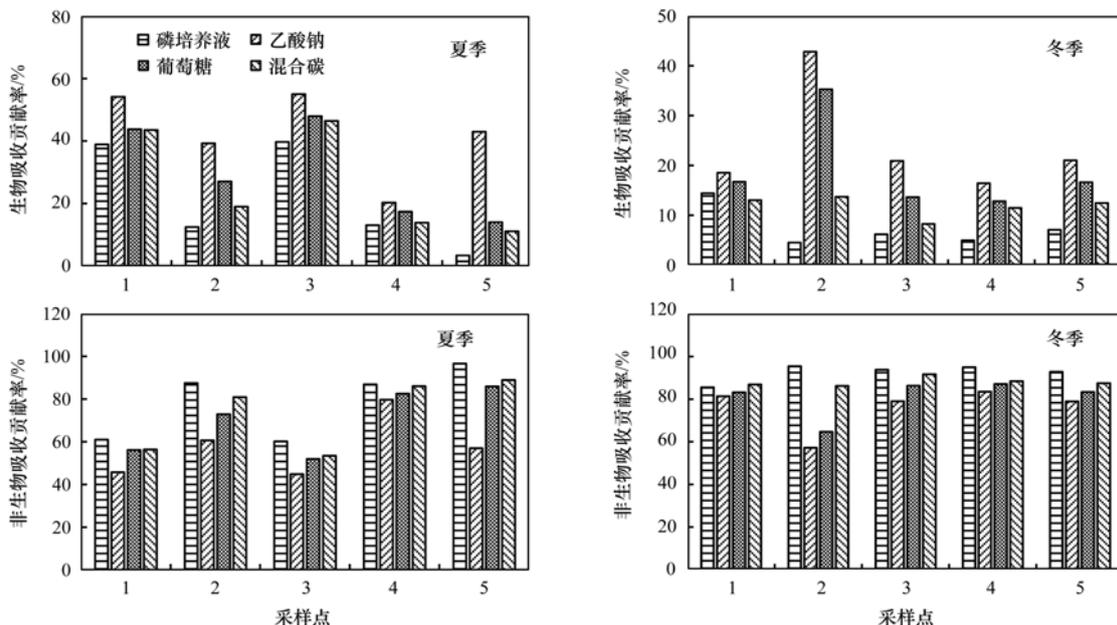


图 4 不同季节各采样点磷的生物与非生物吸收贡献率变化

Fig. 4 Changes in the contribution rates of biotic and abiotic uptake of phosphorus at each sampling site in different seasons

类和细菌为主体的水底生物膜研究中,得到磷的生物吸收率为 37.5%、非生物吸收率为 62.5%。但也有学者发现生物吸收贡献率占据主导地位,如 Lottig 等^[19]发现在沉积物粒度较粗的溪流磷滞留中,约 50% 以上的磷吸收都来自于生物作用过程。

在添加了乙酸钠后,5 个采样点的夏季和冬季沉积物磷的生物吸收贡献率,分别达 20.31% ~ 55.09% (均值为 42.40%) 和 16.48% ~ 42.83% (均值为 23.99%); 添加葡萄糖后,夏季和冬季的生物贡献率分别为 14.05% ~ 48.01% (均值为 30.09%) 和 12.86% ~ 35.33% (均值为 19.06%); 而以乙酸钠和葡萄糖混合液作为外源碳时,得到的夏季和冬季生物贡献率分别仅为 11.12% ~ 46.48% (均值为 26.83%) 和 8.30% ~ 13.77% (均值为 11.84%)。事实上, Khoshmanesh 等^[24]在对湿地沉积物的研究中也发现,当以葡萄糖为碳源,生物吸收贡献率可以由最初的 9% 快速上升到 40%; 而当以乙酸酯为碳源,生物吸收贡献率则可以进一步达到 45%, 即也表现出乙酸酯的作用效果高于葡萄糖。Khoshmanesh 等^[24]认为,这一现象的产生可能是因为葡萄糖被大部分用于细胞生长,产生大量的 CO₂, 使水体 pH 值降低,导致沉积物颗粒对磷吸附的点位减少,致使磷的生物吸收能力减弱; 而乙酸钠与葡萄糖混合溶液并没有为聚磷菌(PAO) 的生长提供有利条件,此时可能是其它细菌主导了沉积物磷的释放。

此外,生物对磷的吸收与磷赋存形态有很大的关系。一般地, Ex-P、Fe/Al-P 等易于被微生物吸收利用^[25, 26], 因此沉积物中生物有效性磷含量及其在总磷中的占比情况,可能影响磷的生物/非生物吸收贡献率。总的来说,在十五里河城乡梯度方向,5 个采样点位都表现为添加乙酸钠的沉积物磷的生物吸收贡献率最高,添加葡萄糖次之,而添加乙酸钠与葡萄糖混合溶液带来的生物吸收贡献率最低。

4 结论

(1) 十五里河沉积物氮磷污染严重,但有机质含量相对并不突出,且沉积物氮、磷和有机质含量并未表现出显著的城乡梯度特征。

(2) 十五里河表层沉积物磷的生物吸收潜力显著低于非生物吸收,其中夏季生物和非生物吸收潜力均值分别为 $0.784 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $3.016 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 冬季生物和非生物吸收潜力均值分别为 $0.323 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $3.368 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

(3) 外源碳添加不仅可以提升十五里河沉积物

磷的生物吸收潜力,也可以提高生物因素在沉积物磷吸收中的重要性,并以乙酸钠添加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的作用效果相对较弱。

参考文献:

- [1] Maitra N, Manna S K, Samanta S, *et al.* Ecological significance and phosphorus release potential of phosphate solubilizing bacteria in freshwater ecosystems[J]. *Hydrobiologia*, 2015, **745** (1): 69-83.
- [2] 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.
- [3] Khoshmanesh A, Hart B T, Duncan A, *et al.* Luxury uptake of phosphorus by sediment bacteria[J]. *Water Research*, 2002, **36** (3): 774-778.
- [4] Jaisi D P, How Y, Stout L M, *et al.* Modeling of biotic and abiotic processes affecting phosphate oxygen isotope ratios in a mineral-water-biota system[J]. *Water Research*, 2017, **126**: 262-273.
- [5] Jaisi D P, Kukkadapu R K, Stout L M, *et al.* Biotic and abiotic pathways of phosphorus cycling in minerals and sediments: Insights from oxygen isotope ratios in phosphate [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45** (15): 6254-6261.
- [6] Sutter 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.
- [7] 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.
- [8] Mangadze T, Bere T, Mwedzi T. Epilithic diatom flora in contrasting land-use settings in tropical streams, Manyame Catchment, Zimbabwe[J]. *Hydrobiologia*, 2015, **753**(1): 163-173.
- [9] Wan J J, Liu X M, Wu C X, *et al.* Nutrient capture and recycling by periphyton attached to modified agrowaste carriers [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23** (8): 8035-8043.
- [10] Scinto L J, Reddy K R. Biotic and abiotic uptake of phosphorus by periphyton in a subtropical freshwater wetland [J]. *Aquatic Botany*, 2003, **77**(3): 203-222.
- [11] McCormick P V, Shuford III R B E, Chimney M J. Periphyton as a potential phosphorus sink in the everglades nutrient removal project[J]. *Ecological Engineering*, 2006, **27**(4): 279-289.
- [12] Wolfe III J E, Lind O T. Phosphorus uptake and turnover by periphyton in the presence of suspended clays [J]. *Limnology*, 2010, **11**(1): 31-37.
- [13] Lu H Y, Wan J J, Li J Y, *et al.* Periphytic biofilm: A buffer for phosphorus precipitation and release between sediments and water [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 2058-2064.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] 李如忠, 秦如彬, 高苏蒂, 等. 城乡交错带典型溪流沟渠氮素污染特征及生态风险分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, **38**(3): 27-34.
Li R Z, Qin R B, Gao S D, *et al.* Investigation on the characteristics and ecological risk of nitrogen pollution in the streams across the ditches in a urban-rural fringe[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2017, **38**(3): 27-34.
- [17] 李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 等. 巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 211-218.
Li R Z, Que F X, Xiong H B, *et al.* Nitrification rates and pollution characteristics of sediments with different geomorphic features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 211-218.
- [18] 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.
- [19] Lottig N R, Stanley E H. Benthic sediment influence on dissolved phosphorus concentrations in a headwater stream [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(3): 297-309.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Aldridge K T, Brookes J D, Ganf G G. Changes in abiotic and biotic phosphorus uptake across a gradient of stream condition [J]. *River Research and Applications*, 2010, **26**(5): 636-649.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 等. 特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性: 以成都市为例[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 219-227.
Ding Y, Ouyang L L, Shi Q, *et al.* Distribution and bioavailability of phosphorus in surface sediments in megalopolis: A case study of Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 219-227.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹⁵ N-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)