

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.01.015

河流表层沉积物磷的生物吸收、吸附机制及影响因素

叶舟, 吕丹亚, 姚有智, 吴康, 华飞, 靳维维

(芜湖职业技术学院材料工程学院, 安徽 芜湖 241003)

摘要:综述了河流表层沉积物磷的生物吸收、吸附机制及效应影响因素, 探究了水环境磷治理的新材料及方法, 以为河流水生态环境评估及磷污染负荷削减提供一定的理论基础。

关键词:河流表层沉积物; 磷的生物吸收; 磷的吸附

中图分类号: X22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1891(2021)01-0070-05

On the Biological Absorption, Adsorptive Mechanism and Influencing Factors of River Surface Sediment Phosphorus

YE Zhou, LYU Danya, YAO Youzhi, WU Kang, HUA Fei, JIN Weiwei

(School of Materials Engineering, Wuhu Institute of Technology, Wuhu, Anhui 241003, China)

Abstract: This paper summarizes the biological absorption, adsorptive mechanism and influencing factors of river surface sediment phosphorus and explores new materials and methods for phosphorus treatment in water environment in order to provide some theoretical backup for the assessment of river ecosystem and the reduction on phosphorus pollution load.

Keywords: river surface sediments; phosphorus biological absorption; phosphorus adsorption

0 引言

磷是河流水质的重要指示因子, 同时也是水体富营养化的重要限制性因子^[1-2]。磷是包括微生物在内的所有生命体不可缺少的重要营养元素, 主要以磷酸盐形式存在于水体沉积物中, 在全球地理化学生物循环中扮演了重要的角色^[3-4]。沉积物不仅可以作为河流“磷源”, 也可作为“磷汇”, 河流上覆水营养物质浓度水平可直接受到沉积物-水界面的影响, 沉积物起到了积极调控上覆水营养物质平衡的作用。河流作为连接陆域及水域的关键桥梁, 在全球碳、氮、磷营养元素输移和转化过程中作用卓为显著^[5-6]。目前, 有关河流沉积物表层磷的迁移及转化机制的研究报道较多, 而磷的生物吸收、吸附过程在沉积物磷循环过程中扮演了重要的角色。因此, 针对河流表层沉积物磷的生物吸收、吸附的研究显得卓为重要。

磷的生物吸收主要是指以聚磷菌为代表的一类微生物菌群, 通过吸收同化作用来完成对上覆水营养物质磷素生物固定的过程。磷的吸附亦称为

“磷的非生物吸收”, 主要指以附着在沉积物颗粒表面一系列比表面积较大的吸附位点作为介质, 通过物理、化学作用来完成对上覆水中营养物质磷素固定的过程。

当前, 我国城市地区河流受各种外界因素影响情况普遍发生, 从水生态保护及水污染防治角度, 有必要针对河流水体及沉积物作出合理评估, 并采取相关技术手段调控水环境污染负荷。在河流水生态环境改善过程中, 能否精准识别河流沉积物磷的吸收能力(纳污能力), 尤其熟悉沉积物如何扮演“磷源”“磷汇”角色显得格外重要。已有相关研究表明, 在磷的生物地球化学循环过程中, 微生物在沉积物磷的吸收、储存及释放过程中作用显著^[7-8]。

近年来, 国内大多学者在研究河流水环境污染状况方面, 焦点集中在研究各种氮磷形态、释放风险、平衡浓度等。国外早先就有学者从沉积物磷的吸收(包含生物吸收及吸附)角度着手研究, 针对磷的生物吸收的研究更为突出, 目的是为了进一步掌握河流水生态微生物环境变化机理机制。通过对

收稿日期: 2020-05-13

基金项目: 芜湖职业技术学院科技创新服务平台“环境监测与控制技术研究中心”项目(kjcxpt202004)。

作者简介: 叶舟(1993—), 男, 安徽芜湖人, 讲师, 硕士, 研究方向: 环境污染控制及评价。

水体固着或悬浮颗粒磷生物吸收、吸附解析特征进行持续研究,进一步掌握微生物处理技术在水环境保护及处理处置、调控领域的奏效路径。本文从河流沉积物磷的生物吸收、吸附机制及效应影响因素出发,摸索水生态环境新材料及方法,以期对河流生态环境评估及氮磷污染负荷削减提供一定的理论基础。

1 沉积物磷的生物吸收、吸附机制

沉积物中微生物通过吸收同化途径来完成对水体磷素的生物固定过程,而沉积物磷的吸附作用主要是通过其本身一定比表面积颗粒物所释放出的较多吸附位点来捕捉水体磷素。沉积物-水界面间隙层细菌则借助改变固液相间氧化还原电位的形式从而有效控制沉积物磷非生物吸收过程。

国内外相关研究一致表明,生物吸收在沉积物对磷的吸收过程中占主要方面。Lock 等^[9]对藻类作为影响沉积物磷吸收的影响因素研究得出,灭菌(吸附)占未灭菌(生物总吸收)的 50%~70%,也就意味着微生物在沉积物磷吸收上扮演角色并不显著。Stutter 等^[10]对河流磷元素循环研究过程中,首次提出在不使用放射性同位素 P 标记的前提下能够有效区分沉积物磷的生物吸收和非生物吸收(吸附)2 个过程,并且得出生物吸收、非生物吸收贡献比例分别为 37.5%、62.5%。Aldridge 等^[11]通过对美国多种情形河段(主要为渠道化、已整治、未整治 3 种情形)下磷素滞留潜力中的岩石附生生物群落作为研究对象得出:非生物因素在沉积物磷吸收占据七成以上,生物因素则不足三成,并且自然情形下磷的生物吸收潜力明显较人工整治情形高。Lotting 等^[12]为了研究沉积物粒径对磷吸收作用的影响,对河流表层沉积物按照粒径进行分选,得出粒径较大的沉积物明显较粒径小的生物固磷能力高,也揭示了自然或人为干扰过程可能影响沉积物磷的吸附方式。Maitra 等^[3]以磷酸盐溶解菌(PSB)作为研究对象,发现 PSB 可以有效提高间隙水中的磷浓度,可初步说明 PSB 对沉积物磷的释放具有积极促进作用。Scinto 等^[13]对某一沼泽地 3 种不同附生植物对磷的吸收情况进行研究探讨,并通过植物对沉积物磷的响应来评估生物与非生物吸收机制的相对量级。

在沉积物磷滞留潜力研究领域,众多学者主要将研究重点聚集在附生植物、微生物方面,但也不乏学者尝试从外源碳摄入对沉积物磷的生物吸收影响角度进行研究。Khoshmanesh 等^[14]在对湿地沉

积物进行研究发现,以葡萄糖、乙酸酯等作为外加碳源时,生物吸收贡献率差异性显著,其中乙酸酯对生物吸收贡献程度最高。Khoshmanesh 等^[15]又对聚磷菌进一步展开研究,发现当所处环境从有氧向缺氧过度时,添加乙酸酯的沉积物释磷现象更为明显,这也从侧向说明了以乙酸酯作为外加碳源对沉积物磷的生物吸收能力成效显著。

近些年,国内对于沉积物磷的生物吸收、吸附研究日益增多,其中多数学者在沉积物磷吸附解析特征领域(如 EPC₀)研究颇多。胡洁蕴等^[16]通过磷的吸附-解析动力学模型演示了沉积物对磷的吸收以化学吸附为主,并且吸附性能随着沉积深度增加而减少。易齐涛等^[17]对淮南某一采煤塌陷区水域的沉积物研究发现,对比添加 NaHCO₃ 组,添加 CaCl₂ 能显著增强沉积物对磷的吸附潜能。易文利等^[18]通过研究外源碳及沉水植物对沉积物磷吸附的影响,揭示外源碳可显著提高活性有机磷的质量分数。李如忠等^[19-21]学习国外沉积物磷吸收的相关经验,以城郊河流表层沉积物作为研究对象,首先对河流上覆水基本理化性质、水质指标及沉积物磷形态作出基础分析,接着从沉积物磷的生物吸收、吸附等角度出发,通过对灭菌(吸附)、未灭菌(总吸收)2 种处理条件下的河流沉积物样品进行实验分析,综合了添加外源磷、外源碳供给情形下的 8 种实验方案来分析最终得出:添加碳源后,无论沉积物生物吸收还是吸附均有大幅度提升,其中添加乙酸钠方案提升效果最为显著。该团队也率先提出了吸附响应度的新概念,即定量刻画磷的生物吸收或吸附对于外源添加剂的响应程度。

2 沉积物磷的生物吸收、吸附的影响因素分析

2.1 沉水植物及微生物种类的影响

在水生态系统中,沉水植物一般视为初级生产者,主要通过微生物吸收、自身代谢活动 2 种渠道来分解吸收富营养化水体中的氮、磷等营养物质,同时也会在某种程度抑制藻类的生长,与沉水植物休戚相关的微生物主要以植株内部为栖息地^[22-23]。一些研究认为,沉水植物表面所附着的微生物尤其是细菌会对水体中有机物降解、氮化合物的脱氮、磷化合物的转化等作用显著。当同处于植物表面环境这一情形下,这些特定微生物对各种分泌物的利用率和敏感性远远超过真菌、放线菌、原生动物、藻类等^[24-25]。

目前利用沉水植物来处理污水的研究颇多,而

对微生物作为奏效因子在其中起作用的研究甚少^[26-27]。何聃等^[28]研究表明沉水植物附着的细菌以变形菌、拟杆菌、放线菌、蓝藻细菌等门类为主。Eriksson 等^[29]研究表明,在水生态系统中,常见功能植物的内生细菌假细胞单孢菌属、肠杆菌属、芽孢杆菌属、气单胞菌属在对水体氮、磷营养物质降解方面成效显著。李琳等^[30]研究表明,沉水植物中伊乐藻及金鱼藻对于水体氮磷吸收潜力最高,关联度最高的菌门为变形菌门。刘祚屹等^[31]为养殖尾水的原位处理筛选优良藻种,以海洋中 7 种微藻种群为研究对象,最终得出微藻的氮磷吸收速率与藻类细胞体积增加同向增长,而单位氮磷利用效率表现出逆向增长,眼点拟微绿球藻及亚心形扁藻属于对养殖尾水氮磷营养物质吸收效果最好的藻类。于小彦等^[32]对巢湖一支流十五里河研究得出,沉积物中细菌优势门种大多数为变形菌门,与李琳等^[30]的研究结果高度一致。同一河段的沉积物内部微生物组成及细菌群落结果相似,且下游沉积物细菌丰富度和多样性明显较中上游偏高。

2.2 城乡梯度的影响

城乡梯度对沉积物生物吸收及吸附的影响随着季节更替而不断变化,总体来说,生物吸收潜力会随着城乡梯度方向逐渐下降,而吸附潜力则大体随城乡梯度方向表现出增加趋势。但是此过程中也存在一些不确定人为扰动因素影响,例如高校、污水厂、化工厂等点源污染的介入。

一般而言,城乡梯度下河流沉积物总磷呈由高到低的变化趋势,而沉积物磷的生物吸收潜力在某种意义下会随着总磷浓度高低变化趋势表现出同向性。原因在于总磷含量丰富的地区微生物种类丰富、数目庞大、营养物质(有机质)充足、土壤微生物生物膜生长也相对完整,即沉积物磷的生物因素相对较高^[10]。富磷较高的沉积物区域,沉积环境可能处于厌氧或缺氧状态,导致沉积颗粒中部分 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,部分向上覆水体进行释放,从而空留了部分磷的吸附位点供沉积物进行再吸附,即沉积物磷的吸附潜能也会普遍偏高^[19]。

2.3 水项指标背景浓度的影响

水项指标背景浓度一般指河流上覆水中营养物质的浓度,水质好坏直接影响沉积物中营养物质的浓度。张滢元等^[33]通过对长江沉积物磷的吸附容量主要影响因素为沉积物有机质和钙的本底含量,而有机质含量与上覆水营养物质是正相关的。主要微生物对磷的去除包括对磷的正常同化及过量积累,而微生物存储磷的数量也依赖于溪流水体

营养状况,富营养化区域显然较贫营养地区微生物吸收存储更多的磷。

就生物吸收而言,假如上覆水体磷浓度偏高,多数微生物吸磷量已达到饱和,此时沉积物生物吸收潜力就会大幅下降,若上覆水体磷浓度偏低,微生物吸磷不足,因此生物吸收潜力会增强。就吸附而言,土壤对磷的吸附能力是通过土壤气孔中磷的浓度及土壤相位补充土壤气孔中的磷 2 个方面来综合控制的^[34],当土壤粒子吸附磷达到饱和时(沉积物表面磷吸附位点全部被占满),土壤吸附磷的能力就会迅速减弱,亦即沉积物吸附潜能顺势降低。

2.4 不同外源碳补给的影响

土壤是微生物摄取碳源最为直接和有效的来源,土壤碳可利用性对微生物的生长和活性具有直接影响^[35-36]。微生物对氮、磷等生命必需矿质元素的需求响应直接受土壤中可利用碳源含量的高低制约。水体微生物维持自身碳、养分等元素的平衡是借助“沉积物”平台交换而实现的。只有当沉积物中可利用碳源充足时,微生物才可以利用所必需的营养元素(如磷素)来完成自身生长;当碳源不足时,微生物的生长则明显会受到抑制^[37]。

Khoshmanesh 等^[14-15]通过研究湿地沉积物发现,当以葡萄糖作为碳源时,生物吸收贡献率可从原先 9% 上升到 40%;当以乙酸酯作为碳源时,生物吸收贡献率可以最高达 45%。至于乙酸酯强于葡萄糖这一现象产生原因可能是葡萄糖大部分用于细菌(聚磷菌)细胞生长,这一过程会产生 CO_2 ,使得水体 pH 数值降低,导致沉积物颗粒对磷的吸附点位减少,磷的生物吸收能力自然减弱。另一方面也可能是土壤酸化以及过量积累后引起的毒害作用抑制了微生物的生长和活性^[38]。李如忠等^[20]通过研究不同外源碳对城郊河流沉积物响应得出,添加乙酸钠作为碳源的生物吸收贡献率提升了 6 倍多,相应地,添加碳源后沉积物吸附贡献率则有所下降。汤宁等^[39]通过对污水厂尾水收纳河段沉积物磷形态及释放风险研究也得出,由于污水厂尾水中微生物可利用碳源普遍较少,对受纳河流氮磷循环包括沉积物生物吸收、吸附过程无疑将会产生一定的限制性。

3 结论与展望

通过研究沉积物磷的生物吸收、吸附过程对典型河流水环境治理及调控具有积极促进作用,在水环境保护领域具有开阔的研究前景。通过发现一些高耐活性、吸收潜力高的微生物、优势菌种及水

生植物,并以“培养基”的形式将其附着在河流表层沉积物上,形成丰富的“人工-自然沉积物复合体”。未来应选择适应性高、吸附量大、生态修复能力强的一些人工河床底质来弥补自然沉积物所面临的不足。相关环境研究者不妨将研究重点聚焦在微生物、物理(材料)领域,利用基因工程和组织培养技术来培养具备周期长、吸附量大、超富集重金属能力特点,并且能够生长在河流沉积物上的一些优

势种或新物种;利用物理技术模拟自然沉积物质地,通过改变沉积物质地特征(如粒径大小、类型比例等)并结合磷平衡浓度(EPC_0)动态变化特征来有效模拟沉积物对水体磷素的响应程度。结合沉积物的吸收、吸附特性,最大化使用科学技术手段,有望在各模拟背景下挑选出能解决实际水环境问题且磷吸收效率最高的配置组合,以期为河流水环境磷污染负荷调控与削减做出积极贡献。

参考文献:

- [1] BAIG J A, KAZI T G, ARAIN M B, et al. Evaluation of arsenic and other physico-chemical parameters of surface and ground water of Jamshoro, Pakistan[J]. *Hazardous Materials*, 2009, 166(2-3): 662-669.
- [2] 马迎群, 迟明慧, 温泉, 等. 嘉兴市北部湖区沉积物磷释放通量估算及影响因素研究[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(2): 212-219.
- [3] 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: 69-83.
- [4] 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.
- [5] 龚小杰, 王晓锋, 刘婷婷, 等. 流域场镇发展下三峡水库典型入库河流水体碳、氮、磷时空特征及富营养化评价[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 111-123.
- [6] LUNDQVIST J. A global perspective on water and the environment[J]. *Physics and Chemistry of the Earth Part B: Hydrology Oceans and Atmosphere*, 2000, 25(3): 259-264.
- [7] JAISI D P, HOW Y, STOUT L M, et al. Modeling of biotic and abiotic processes affecting phosphate oxygen isotope ratios in mineral-water-biota interface[J]. *Water Research*, 2017, 126: 262-273.
- [8] 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 and Technology*, 2011, 45(15): 6254-6261.
- [9] LOCK M A, JOHN P H. The effect of flow patterns on uptake of phosphorus by river periphyton[J]. *Limnology and Oceanogr*, 1979, 24(2): 376-383.
- [10] 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: 4425-4436.
- [11] 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.
- [12] LOTTIG N R, STANLEY E H. Benthic sediment influence on dissolved phosphorus concentrations in a headwater stream[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 84(3): 297-309.
- [13] SCINTO L J, REDDY K R. Biotic and abiotic uptake of phosphorus by periphyton in a subtropical freshwater wetland [J]. *Aquatic Botany*, 2003, 77: 203-222.
- [14] KHOSHMANESH A, HART B T, DUNCAN A, et al. Biotic uptake and release of phosphorus by a wetland sediment[J]. *Environmental Technology Letters*, 1999, 20(1): 85-91.
- [15] KHOSHMANESH A, HART B T, DUNCAN A, et al. Luxury uptake of phosphorus by sediment bacteria [J]. *Water Research*, 2002, 36(3): 774-778.
- [16] 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.
- [17] 易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 等. 区域水化学条件对淮南采煤塌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.
- [18] 易文利, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 外加碳源及沉水植物对沉积物各形态磷的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(Z1): 1092-1096.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] DAI Yanran, JIA Chenrong, LIANG Wei, et al. Effects of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. on restoration of a eutrophic waterbody and its optimal coverage[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 40: 113-116.

- [23] 毕业亮,吴诗敏,周思宁,等.绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应[J].环境科学,2019,40(5):2265-2270.
- [24] 项学敏,宋春霞,李彦生,等.湿地植物芦苇和香蒲根际微生物特性研究[J].环境保护科学,2004(4):35-38.
- [25] 李潞滨,刘敏,杨淑贞,等.毛竹根际可培养微生物种群多样性分析[J].微生物学报,2008(6):772-779.
- [26] 金树权,周金波,包薇红,等.5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J].环境科学,2017,38(1):156-161.
- [27] 王立志.两种沉水植物对间隙水磷浓度的影响[J].生态学报,2015,35(4):1051-1058.
- [28] 何聃,任丽娟,邢鹏,等.沉水植物附着细菌群落结构及其多样性研究进展[J].生命科学,2014,26(2):161-168.
- [29] ERIKSSON P, WEISNER S. Functional differences in epiphytic microbial communities in nutrient-rich fresh water ecosystems: an assay of denitrifying capacity[J]. *Freshwater Biology*, 1996, 36(3): 555-562.
- [30] 李琳,岳春雷,张华,等.不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性[J].环境科学,2019,40(11):4962-4970.
- [31] 刘祚屹,綦世斌,何宁,等.碳、氮、磷营养对7种海洋微藻种群增长的影响研究[J].南方水产科学,2020,16(1):87-97.
- [32] 于小彦,张平究,张经纬,等.城市河流沉积物微生物量分布和群落结构特征[J].环境科学学报,2020,40(2):585-596.
- [33] 张滢元,黑鹏飞,杨静,等.本底吸附物对长江沉积物磷吸附容量的影响[J].环境科学研究,2017,30(4):545-551.
- [34] 邢波,章燕,周小龙,等.人工湿地对磷去除影响因素的研究[J].环境卫生工程,2012,20(3):1-4.
- [35] PAOLA I, ERLAND B. Effect of drying and rewetting on bacterial growth rates in soil[J]. *FEMS microbiology ecology*, 2008, 65(3):400-407.
- [36] STEFANO M, PHILIP T, ANDREAS R, et al. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils [J]. *The New Phytologist*, 2012, 196(1) 79-91.
- [37] 贺云龙,齐玉春,彭琴,等.外源碳输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响及其微生物学驱动机制[J].生态学报,2017,37(2):358-366.
- [38] 贺云龙,齐玉春,彭琴,等.外源碳氮添加对草地碳循环关键过程的影响[J].中国环境科学,2018,38(3):1133-1141.
- [39] 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.

(上接第 52 页)

- [7] 周凌亚.浅谈明清徽州的刺绣工艺[J].文教资料,2016(26):57-58.
- [8] 马晨晨.徽州地区刺绣文化保护与传承[J].服装学报,2018,3(4):363-366.
- [9] 王璐.传统云肩样式在现代服装设计中的创新应用研究[D].杭州:浙江理工大学,2017.
- [10] 王丹.传统云肩的艺术形态在现代服装中的创新应用研究[D].大连:大连工业大学,2018.
- [11] 王金华.中国传统服饰:云肩肚兜[M].北京:中国纺织出版社,2017.
- [12] 杨明.徽州刺绣艺术在现代服装设计中的应用[J].丝绸,2018,55(4):71-76.
- [13] 陈春怡,汪臻,张俊林.徽州地域色彩文化与当代徽茶包装设计[J].鸡西大学学报,2014,14(11):151-152+155.
- [14] 时少波.徽州古文化色彩与现代品牌色彩设计[J].美术大观,2009(10):128.
- [15] 孙富明.烟雨徽州[EB/OL](2018-11-28)[2020-03-01].<https://www.meipian.cn/1rmljjp7>.