

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.04.002

## 污水厂中有机磷的赋存形态、生物有效性及强化去除

张钰婷<sup>1,2</sup>, 尚巍<sup>2</sup>, 邱顺添<sup>1</sup>, 郑兴灿<sup>2</sup>, 孙永利<sup>2</sup>, 李鹏峰<sup>2</sup>,  
顾森<sup>2</sup>, 王金丽<sup>2</sup>, 隋克俭<sup>2</sup>, 葛铜岗<sup>2</sup>, 吕小佳<sup>2</sup>

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 现阶段以生物与化学协同为主的除磷技术,使出水总磷中磷酸盐含量较低,但大部分溶解性有机磷(Dissolved organic phosphorus, DOP)难以得到有效去除,出水DOP残留量占总磷的52%~93.1%。有机磷不但能够为藻类提供磷源,而且在常规污水处理系统中难以完全去除,这给再生水处理技术提出了新的挑战。以揭示DOP潜在风险、强化DOP深度去除为目标,综合阐述了污水处理厂中DOP的赋存形态及生物有效性,为科学认识DOP的环境效应提供理论依据;通过介绍深度处理过程中DOP强化去除研究进展,可为今后城市污水处理厂提标改造和实现出水总磷超低量排放提供思路和方法。

**关键词:** 城市污水; 有机磷; 生物有效性; 强化去除方法

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0012-06

## Occurrence, Bioavailability and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Municipal Wastewater Treatment Plant

ZHANG Yu-ting<sup>1,2</sup>, SHANG Wei<sup>2</sup>, KHU Soon-thiam<sup>1</sup>, ZHENG Xing-can<sup>2</sup>,  
SUN Yong-li<sup>2</sup>, LI Peng-feng<sup>2</sup>, GU Miao<sup>2</sup>, WANG Jin-li<sup>2</sup>, SUI Ke-jian<sup>2</sup>,  
GE Tong-gang<sup>2</sup>, LÜ Xiao-jia<sup>2</sup>

(1. School of Environment Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** Phosphate in the effluents can be nearly eliminated by the combination of biological and chemical technology at present. However, the dissolved organic phosphorus (DOP) is hard to be removed as well as the residual DOP accounted for 52%~93.1% of the total phosphorus in the effluent. DOP not only provide phosphorus resource for algae but also hard to be removed by regular sewage treatment process, which will propose new challenges to reclaimed water treatment technology. To reveal the potential risk of DOP and promote the advanced removal of DOP, the occurrence and bioavailability of DOP in municipal wastewater treatment plant were comprehensively introduced in this paper, which provided theoretical basis for the scientific understanding of environmental effects of DOP. In addition,

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106); 中国博士后科学基金资助项目(2022M713469); 中国建设科技集团科技创新基金青年基金资助项目(Z2022Q15); 中国市政工程华北设计研究总院有限公司课题(HJ-2021-53-HJY)

通信作者: 尚巍 E-mail: shangwei73@sina.com

the research of enhanced DOP removal methods in the advanced treatment was also introduced to provide the idea and methods for upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants, as well as for the extremely low phosphorus discharge.

**Key words:** urban sewage; organic phosphorus; bioavailability; enhanced removal methods

溶解性有机磷(DOP)在水生生态系统中普遍存在,并且逐渐被认为是湖泊富营养化和藻类生长所必需的生物有效磷的潜在来源。然而,由于DOP的复杂性和分析技术的局限性,DOP的重要性和环境效应往往被忽视。随着新技术的开发,DOP的生物地球化学行为逐渐被研究者重视。在湖泊系统中,DOP的内源循环机制已有较为成熟的研究<sup>[1-3]</sup>,结果表明部分DOP能够转化为磷酸盐而被藻类吸收利用。此外,某些形式的DOP也可以直接被藻类吸收<sup>[4]</sup>。因此,对磷组分在水体中的不同赋存形态及其生物活性的研究具有重要的环境意义。污水处理厂作为磷汇合和循环的重要节点,对磷组分解析、迁移转化规律、生物有效性及去除能力的研究十分重要,且受到越来越多研究者的关注。

现阶段城市污水处理厂以生物与化学协同为主的除磷技术,使出水总磷中磷酸盐含量较低,但大部分DOP难以得到有效去除。此外,在深度处理将无机磷降低至极高水平后,残留的DOP组分是否具有生物有效性是与之关联的另一个重要问题。污水中磷对藻类的生物有效性可能因污水中磷组分的形态及种类而异<sup>[2]</sup>,目前全球范围内高度关注污水排放引起的富营养化问题,并对此做出了相当大的努力,因此更好地了解污水中剩余的磷组分及其降解技术至关重要。

传统的除磷技术已无法应对越来越高的污水排放标准,仅对总磷及无机磷的监测与控制亦无法揭示藻类生长的作用与机制。污水处理厂中不同形态的DOP组分对生物有效性的影响及环境的反馈作用不同,因此,揭示污水厂中磷形态的沿程变化,对水环境营养物的管控与循环利用研究具有重要意义。此外,对污水厂中磷赋存形态有清晰的认知,才能更有针对性地提出不同磷组分高效去除的实用性策略。综合分析了近年来有机磷组分检测方法的研究现状、污水厂中磷组分的赋存形态及其污染特征,总结有机磷生物有效性和现有强化去除方法的研究现状,为深度除磷技术的开发与应用、

再生水安全利用水平的提升提供了思路和方法。

## 1 DOP分析方法研究现状

DOP的反应活性通常取决于其组成、分子大小和结构特征,因此对DOP的组成和结构的表征成为研究重点。近年来,对DOP分子组成和结构的表征分析方法研究得到快速发展,凝胶排阻色谱-电感耦合等离子体质谱(SEC-ICP-MS)、近红外光谱(NIR)和X射线荧光光谱(P-NEXFS)等方法<sup>[5]</sup>得到应用,然而,由于DOP复杂程度高、丰度较低以及无机盐分的干扰,上述方法在应用中存在较大挑战。

傅里叶变换离子回旋共振质谱(FTICR-MS)被认为是获取复杂有机混合物分子组成信息的行之有效的分析技术,它已被用于表征DOP和溶解性有机氮(DON)的分子结构。FTICR-MS能够分析各种复杂成分的详细信息,且分析灵敏度高,检测限较低<sup>[6]</sup>。FTICR-MS提高了研究者对DOP分子水平上的认知,然而仍有诸多原因限制了其在DOP表征中的应用。在预处理中,传统的固相萃取方法在分离、脱盐和浓缩过程中均会导致部分分子信息丢失<sup>[7]</sup>。此外,不同磷组分化合物在正负离子模式下的电离和识别程度均不相同<sup>[8]</sup>。

酶水解技术已被应用于土壤、河湖沉积物及上覆水中DOP组分的研究,酶水解技术能够有效解析环境样品中磷酸单酯、磷酸二酯和植酸磷组分,实验环境较温和,可有效避免部分有机磷的水解<sup>[4]</sup>。然而,酶水解技术通常只能分析DOP中能够被酶水解的组分,可以用来表征DOP的生物利用度,但难以全面解析DOP的赋存形态和结构组成。自<sup>31</sup>P核磁共振技术(<sup>31</sup>P-NMR)被引用到土壤中磷组分的分析后,也逐步被应用于有机磷组分的分析。<sup>31</sup>P-NMR分析技术可以同步检测多种磷组分,如磷酸盐、焦磷酸盐、多聚磷酸盐、磷酸酯、磷酸单酯和磷酸二酯<sup>[9-10]</sup>,因此目前在多种磷组分测定中的应用最为广泛。<sup>31</sup>P-NMR技术提供了所有磷组分的组成,但其具有较高的检测限。不同磷组分表征方法的优、缺点<sup>[5-10]</sup>见表1。

表 1 溶解性有机磷表征方法的优、缺点

表征方法	检测磷组分	优点	缺点
SEC-ICP-MS	检测有机磷的分子质量	能同步获得不同磷组分的分子质量信息	实验耗时长,无法确定有机磷赋存形态,无法检测颗粒磷
NIR	总磷	所需制备样品量小、测试时间短	无法得知磷组分的组成结构
P-NEXFS	磷酸盐矿物、有机磷等	每一种磷组分均表现出独特的光谱指纹,可区分磷矿、有机磷、无机磷组分	环境因素影响大
FTICR-MS	分子质量、官能团	灵敏度高、检测限较低	前处理过程可能导致部分分子信息丢失
酶水解技术	磷酸单酯、磷酸二酯、植酸磷	反应条件温和、避免部分有机磷的水解	只能检出可酶水解的有机磷组分
<sup>31</sup> P-NMR	磷酸盐、焦磷酸盐、多聚磷酸盐、 磷酸酯、磷酸单酯、磷酸二酯	可同步检出多种磷组分	检出限高,高达 50~100 mg/L

2 污水中有机磷赋存形态及其生物有效性

2.1 污水中有机磷比例

生活污水中磷组分主要源于人类排泄物及食物残渣,其中有机磷占比约为 30.0%,经生物处理后,磷酸盐含量显著降低,剩余部分中有机磷较难降解<sup>[11]</sup>。在深度处理工艺中,典型的化学除磷可去除污水中大部分无机磷,而残留磷组分中 DOP 占主导,占溶解性总磷的 52%~93.1%<sup>[6,12]</sup>。此外,研究者对城市污水处理厂二级出水水质进行了分析,结果<sup>[13-18]</sup>见表 2。由此可见,污水处理厂出水中 DOP 占比较高,DOP 为主要残留磷组分。

表 2 污水处理出水中有机磷含量

Tab.2 Organophosphorus content of effluent in wastewater treatment plants			
项 目	二级出水有机磷占比 (浓度)	深度处理工艺	总出水有机磷占比 (浓度)
中国东北某大型城市污水厂	15.0% (0.066 2 mg/L)	混凝-沉淀-过滤	81.96% (0.065 9 mg/L)
中国苏南某污水厂	12.0% (0.082 8~0.25 mg/L)		
中国合肥某污水厂	28.6%(0.04 mg/L)	混凝-砂滤	71.4%
昆明某大型城市污水厂	5%	气浮-砂滤	≥ 90.0%
美国 Loudoun 污水厂			93.1%(0.054 mg/L)
美国 Pinery 污水厂			76.9%(0.060 mg/L)
美国某污水厂			0.015~0.050 mgP/L
加拿大某污水厂			52.0%(0.055 mg/L)

2.2 污水中有机磷赋存形态

由于污水厂出水中 DOP 含量较高,且 DOP 的存

在同样能够引起藻类及浮游生物的繁殖,因此残留 DOP 赋存形态及其生物利用性逐渐受到研究者的重视。Gao 等<sup>[6]</sup>研究表明,合肥某污水处理厂出水中 DOP 分子质量为 200~800 u,平均分子质量为 521 u,主要组分为短链烷基 DOP。Gigliotti 等<sup>[19]</sup>结合 <sup>31</sup>P-NMR 分析结果,得知污水处理厂污泥中疏水性 DOP 的主要成分为磷酸单酯和磷酸二酯,而污泥中的亲水性部分主要由正磷酸盐、有机磷酸单酯和少量焦磷酸盐组成。由于污泥中磷组分可能部分释放到污水中,导致污水可能含有部分磷酸单酯和磷酸二酯成分。

2.3 污水中有机磷的生物有效性

Gao 等<sup>[6]</sup>研究表明,67.0%~90.0% 的 DOP 可被生物有效利用,且难降解的 DOP 具有更高的生物利用度。Qin 等<sup>[16]</sup>对美国两座污水处理厂的尾水进行树脂分离,结果表明 DOP 主要以疏水形式存在,疏水性 DOP 占 DOP 的 61.4%~80.7%,且通过藻类生长情况对不同种类 DOP 的生物利用度进行分析,发现 73.0%~75.0% 的 DOP 可以被藻类有效利用。王小东等<sup>[20]</sup>对无锡某污水处理厂出水 DOP 进行了分析,结果表明疏水性 DOP 占比较高,为 72.1%,且生物利用率为 20%。

因此,污水处理厂出水中 DOP 组分的分子质量主要分布在 200~800 u 之间,且多为疏水性成分,其中约 20.0%~90.0% 的 DOP 具有生物有效性。经上述研究综合分析,可知污水处理厂出水中 DOP 主要赋存形态可能为磷酸单酯和磷酸二酯。由此可见,污水中 DOP 组分与河湖中 DOP 组分相似。Read 等<sup>[21]</sup>对美国富营养化的 Mendota 湖水 DOP 进行检测,结果表明 DOP 全部为磷酸单酯组分。熊



强<sup>[22]</sup>和李凌萍<sup>[23]</sup>对滇池湖水中的DOP组分进行了分析,其中磷酸单酯占比为0~80.9%,磷酸二酯占比为0~24.1%。研究报告,磷酸单酯是藻类细胞膜的重要组成成分<sup>[3]</sup>,通常可迅速转化为磷酸盐<sup>[2]</sup>。磷酸二酯的占比虽然较低,但是生物利用度更高,易被细菌等微生物分解矿化。Li等<sup>[24]</sup>通过藻类生长曲线研究表明,非活性磷如核酸、ATP、DNA、RNA等成分几乎完全可以被生物利用,且具有非常快的吸附速率。

### 3 有机磷强化去除研究现状

#### 3.1 不同工艺中有机磷去除的研究现状

针对现阶段污水厂出水DOP占比高的问题,已有部分研究者对其去除进行了研究。Liu等<sup>[25]</sup>对比分析了传统混凝-沉淀-过滤、高密度沉淀池、添加磁粉、膜过滤等工艺中DOP浓度的变化情况,结果表明高密度沉淀池对DOP的去除效果较高,剩余DOP<4 μg/L,膜过滤对无机磷的去除率较高,剩余组分中DOP占比>50%。翟俊等<sup>[26]</sup>分析了多级人工湿地中磷组分的沿程去除规律,指出DOP经一级湿地处理后,浓度显著降低,去除贡献约为81.5%,在第二级和第三级湿地后,其浓度变化较小。李玥<sup>[27]</sup>采用复合人工湿地对不同磷组分的去除效果进行了研究,结果显示,复合人工湿地对DOP的去除效果较好,在种植风车草和黄花鸢尾的复合湿地中,DOP的去除率分别为77%和76%。刘双等<sup>[28]</sup>采用氟改性水滑石对污水中不同磷组分进行吸附研究,氟改性水滑石对总磷的去除率高达95.89%,对DOP同样有一定吸附能力,约50%的DOP能被有效去除。Gao等<sup>[6]</sup>从分子角度评价了DOP在处理工艺中的结构变化,结果表明生物处理过程更易去除低芳香性DOP,铝盐混凝法能够均匀地去除不同链长的烷基DOP和高芳香性DOP。紫外消毒能够将长链烷基氧化为短链,并对高芳香性、长链烷基DOP(如单宁和木质素)有较好的去除效率。

综上,现阶段的污水处理技术,如化学沉淀、膜过滤、人工湿地及吸附等技术对总磷具有较好的去除效能,然而对有机磷的去除效果不稳定,且无法实现对有机磷的完全去除,使得再生水的回用仍然存在一定风险。

#### 3.2 臭氧氧化技术对有机磷去除的研究现状

臭氧氧化技术不仅对二级出水有机物的去除

效果较好,而且能够氧化常规污水处理工艺很难去除的有机磷,实现有机磷向无机磷的转化,有助于后续工艺进一步除磷。马宏涛等<sup>[29]</sup>研究表明,臭氧可将大部分浮选废水中的有机磷转化为无机磷,并结合混凝沉淀法实现污水中磷的高效去除。Wu等<sup>[30]</sup>采用臭氧氧化法对二嗪磷、甲基对硫磷和对硫磷三种农药废水进行氧化降解,结果表明臭氧对二嗪磷的氧化速率较高,能够较快地分解二嗪磷的中间产物,实现有机磷的加速矿化。此外,已有研究<sup>[20]</sup>表明,臭氧氧化技术对二级出水中DOP的去除效果显著,DOP去除率高达79.1%~100%。

由此可见,臭氧氧化技术能有效降解有机磷,将有机磷部分氧化为磷酸盐,实现有机磷的无机化,为后续化学除磷提供有利条件。然而,臭氧对不同形态有机磷的氧化速率存在差异和优先选择性,且对不同形态有机磷的转化机制及中间产物组成结构尚不清晰,因此有必要进行更深入的研究。

### 4 结语

近年来,已有少数研究者关注了污水处理厂中有机磷的赋存形态、污染特征及沿程变化。然而,DOP在污水处理厂中的结构组成及迁移转化研究目前仍然欠缺,且往往被忽视。对污水处理厂中DOP组分的明晰能够极大程度地评判其潜在风险,并有针对性地提出强化污水中有机磷去除的深度处理技术和削减策略,并通过改变有机磷的结构组成,实现有机磷的高效降解。因此,有待从以下几方面进行进一步研究:

① 污水厂水质成分复杂,有机磷浓度较低且水质波动较大的现状使DOP组分的检测受到一定限制。因此,可以通过优化污水中DOP的富集方法,使DOP在前处理过程中尽量减少成分损失;通过合理选择提取剂种类及优化提取剂配比,提高DOP的提取效率;通过对比分析不同的检测方法,如<sup>31</sup>P-NMR技术、酶水解技术、FTICR-MS技术等,筛选出DOP组分解析最佳方法,或使用两种分析方法对DOP组分及结构进行综合、全面的分析。

② 目前,由于生物有效性表征方法不一致,污水厂中DOP的生物有效性数据结果存在较大差异。此外,不同污水处理工艺导致DOP形态及结构存在差异,间接导致生物有效性结果不一致。因此,可通过优化DOP生物有效性的表征方法,提高

对DOP生物有效性测试结果的准确性。此外,解析DOP沿程变化及对生物有效性的贡献,对比河湖水与污水处理厂出水中导致藻类生长的DOP种类的异同,全面揭示污水处理厂中DOP迁移转化规律至关重要。

③ 在水环境保护力度不断加大的压力下,国家对城镇污水排放要求越来越严格,对控磷更加重视,然而,大多数研究仍限于对磷酸盐及总磷的控制,较难去除的DOP在出水中占比较高仍是现存的主要问题。虽然部分研究者提出了针对DOP去除的水处理方法,然而对其降解工艺的研究仍然较少,对不同工艺中有机磷组分去除能力及其中间产物的研究不足,对不同工艺反应机理尚不清晰。因此,合理开发DOP去除工艺,实现DOP高效去除,并探索DOP去除机理仍是未来的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] NI Z K, HUANG D L, LI Y, *et al.* Novel insights into molecular composition of organic phosphorus in lake sediments[J]. *Water Research*, 2022, 214: 118197.
- [2] FENG W Y, YANG F, ZHANG C, *et al.* Composition characterization and biotransformation of dissolved, particulate and algae organic phosphorus in eutrophic lakes[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114838.
- [3] LIU S S, ZHU Y R, MENG W, *et al.* Characteristics and degradation of carbon and phosphorus from aquatic macrophytes in lakes: insights from solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR and solution  $^{31}\text{P}$  NMR spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 543: 746–756.
- [4] FENG W, ZHU Y, WU F, *et al.* Forms and lability of phosphorus in algae and aquatic macrophytes characterized by solution  $^{31}\text{P}$  NMR coupled with enzymatic hydrolysis [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 (1): 37164.
- [5] VENKATESAN A K, GAN W H, ASHANI H, *et al.* Size exclusion chromatography with online ICP-MS enables molecular weight fractionation of dissolved phosphorus species in water samples [J]. *Water Research*, 2018, 133: 264–271.
- [6] GAO S X, ZHANG X, FAN W Y, *et al.* Molecular insight into the variation of dissolved organic phosphorus in a wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2021, 203: 117529.
- [7] LÜ J T, ZHANG S Z, LUO L, *et al.* Solid-phase extraction-stepwise elution (SPE-SE) procedure for isolation of dissolved organic matter prior to ESI-FT-ICR-MS analysis [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2016, 948: 55–61.
- [8] MIAO Y X, LÜ J T, HUANG H L, *et al.* Molecular characterization of root exudates using Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 98: 22–30.
- [9] BELL D W, PELLECHIA P, CHAMBERS L R, *et al.* Isolation and molecular characterization of dissolved organic phosphorus using electrodialysis-reverse osmosis and solution  $^{31}\text{P}$ -NMR [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2017, 15(5): 436–452.
- [10] BAI X L, SUN J H, ZHOU Y K, *et al.* Variations of different dissolved and particulate phosphorus classes during an algae bloom in a eutrophic lake by  $^{31}\text{P}$  NMR spectroscopy[J]. *Chemosphere*, 2017, 169: 577–585.
- [11] 徐伟勇. 城市污水处理厂尾水中磷的形态分析及除磷研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2009.
- XU Weiyong. Study on Speciation and Removal of Phosphorus in Tail Water from Municipal Wastewater Treatment Plant [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009 (in Chinese).
- [12] GU A Z, LIU L, NEETHLING J B, *et al.* Treatability and fate of various phosphorus fractions in different wastewater treatment processes [J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(4): 804–810.
- [13] 马明扬. 污水厂生化工艺和深度处理工艺对不同形态磷的去除[J]. *供水技术*, 2021, 15(4): 17–20.
- MA Mingyang. Removal of different forms of phosphorus by biochemical process and advanced treatment process in wastewater treatment plant [J]. *Water Technology*, 2021, 15(4): 17–20 (in Chinese).
- [14] 彭五庆,李彭,蔡浩东,等. 污水厂生化尾水深度化学除磷效果优化及其对颗粒态磷粒径分布的影响[J]. *净水技术*, 2022, 41(2): 68–74.
- PENG Wuqing, LI Peng, CAI Haodong, *et al.* Optimization of advanced chemical phosphorus removal of biochemical tail water in WWTP and influence on particle size distribution of particulate phosphorus [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(2): 68–74 (in Chinese).
- [15] 崔朋,章诗璐,宋子明,等. 溶气气浮极限除磷中试研究[J]. *给水排水*, 2020, 46(11): 33–37, 44.
- CUI Peng, ZHANG Shilu, SONG Ziming, *et al.* Pilot-plant study of dissolved air flotation for phosphorus

- removal to meet ultra-low phosphorus limits [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(11): 33–37, 44 (in Chinese).
- [16] QIN C, LIU H, LIU L, *et al.* Bioavailability and characterization of dissolved organic nitrogen and dissolved organic phosphorus in wastewater effluents[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 47–53.
- [17] NEETHLING J B, STENSEL H D. Nutrient species implications for technology performance and water quality impacts [J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2013(13): 152–171.
- [18] GALVAGNO G, ESKICIOGLU C, ABEL-DENEE M. Biodegradation and chemical precipitation of dissolved nutrients in anaerobically digested sludge dewatering centrate[J]. *Water Research*, 2016, 96: 84–93.
- [19] GIGLIOTTI G, KAISER K, GUGGENBERGER G, *et al.* Differences in the chemical composition of dissolved organic matter from waste material of different sources [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(5): 321–329.
- [20] 王小东,王子文,陈明飞,等. 污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2800–2806.
- WANG Xiaodong, WANG Ziwen, CHEN Mingfei, *et al.* Pollution characteristics and enhanced removal of organic phosphorus in effluent from a wastewater treatment plant [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2800–2806 (in Chinese).
- [21] READ E K, IVANCIC M, HANSON P, *et al.* Phosphorus speciation in a eutrophic lake by  $^{31}\text{P}$  NMR spectroscopy[J]. *Water Research*, 2014, 62: 229–240.
- [22] 熊强. 滇池不同来源有机磷特征及其生物有效性[D]. 南昌:南昌大学, 2014.
- XIONG Qiang. Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Dianchi Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014 (in Chinese).
- [23] 李凌萍. 滇池有机磷特征及其对水污染的贡献[D]. 南昌:南昌大学, 2015.
- LI Lingping. Characteristic of Organic Phosphorus in Dianchi Lake and the Contribution to Water Pollution[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015 (in Chinese).
- [24] LI B, BRETT M T. The influence of dissolved phosphorus molecular form on recalcitrance and bioavailability[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 37–44.
- [25] LIU L, SMITH D S, BRACKEN M, *et al.* Occurrence, implication and bioavailability of dissolved organic phosphorus (DOP) in advanced wastewater effluents [J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2011(11): 4852–4863.
- [26] 翟俊,翟豪冲,马宏璞,等. 多级人工湿地对生活污水中磷素的去除规律[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(21): 75–79.
- ZHAI Jun, ZHAI Haichong, MA Hongpu, *et al.* Mechanism of phosphorus removal from domestic sewage by multi-stage constructed wetland [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(21): 75–79 (in Chinese).
- [27] 李玥. 复合人工湿地磷去除效果及过程分析研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- LI Yue. Purified Efficiency and Transformation of Phosphorus through Intergrated Vertical Flow Constructed Wetlands [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016 (in Chinese).
- [28] 刘双,夏传,蒋晓云,等. 氟改性水滑石在污水深度除磷中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2021, 52(4): 39–42.
- LIU Shuang, XIA Chuan, JIANG Xiaoyun, *et al.* Application of fluorine-modified hydrotalcite in sewage deep-dephosphorization [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2021, 52(4): 39–42 (in Chinese).
- [29] 马宏涛,孙水裕,许明鑫. 臭氧联合混凝沉淀法去除浮选废水中有机磷[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(1): 285–290.
- MA Hongtao, SUN Shuiyu, XU Mingxin. Dephosphorization of flotation wastewater containing organic phosphorus using ozone-coagulation sedimentation method [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(1): 285–290 (in Chinese).
- [30] WU J G, LAN C Y, CHAN G Y S. Organophosphorus pesticide ozonation and formation of oxon intermediates [J]. *Chemosphere*, 2009, 76(9): 1308–1314.

作者简介:张钰婷(1990–),女,河北张家口人,博士,工程师,研究方向为水环境污染控制技术。

E-mail: zhangyt\_bjfu@126.com

收稿日期: 2022-04-08

修回日期: 2022-07-15

(编辑:丁彩娟)