

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.23.014

不同水源补水区底泥污染物含量和形态分布特征

寇晓梅^{1,2}, 王 怡³, 魏海杉³, 吴世璋^{1,2}, 邵 甜^{1,2}, 梁振豪³

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省“四主体一联合”河湖生态系统保护与修复校企联合研究中心, 陕西 西安 710065; 3. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 以西安市某景观水体不同水源补水区底泥为研究对象,通过采集不同季节的底泥并分析其中有机碳含量以及氮、磷等营养盐的组成和形态分布,评价不同水源补水区域的底泥污染特征。结果表明,再生水补给区域底泥(RWS)中TOC含量年均值为55.41 mg/g,约为地表水补给区域底泥(SWS)的1.55倍,且RWS的VS/TS值明显高于SWS的;RWS中TN和TP含量年均值分别为21.77和5.35 mg/g,约为SWS的2.35和1.97倍。同时,RWS中最活跃的离子交换态氮(IEF-N)和弱吸附磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)含量分别为0.71和0.22 mg/g,为SWS的2.45和3.14倍。此外,RWS中可还原态磷(Fe-P)和有机态磷(NaOH-nrP)含量分别为0.44和0.20 mg/g,为SWS的2.44和1.54倍。总之,再生水补给区域底泥中TOC、TN和TP含量均明显大于地表水补给区,且活跃态氮、磷含量也明显高于后者。因此,再生水补给的景观水体碳、氮、磷释放风险更大,特别是在高温的夏秋季节,因而建议对再生水补给的景观水体底泥污染物释放进行有效管控。

关键词: 再生水补给区域底泥; 地表水补给区域底泥; 有机物含量; 营养盐含量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)23-0098-06

Content and Forms Distribution Characteristics of Pollutants from Sediment in Areas Recharged by Different Water Sources

KOU Xiao-mei^{1,2}, WANG Yi³, WEI Hai-shan³, WU Shi-zhang^{1,2}, SHAO Tian^{1,2}, LIANG Zhen-hao³

(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Union Research Center of University and Enterprise for River and Lake Ecosystems Protection and Restoration, Xi'an 710065, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: This paper collected the sediment from areas recharged by different water sources of a landscape water body in Xi'an in different seasons, analyzed its organic carbon content and the composition and distribution of nutrients such as nitrogen and phosphorus, and evaluated the characteristics of sediment pollution. The annual mean TOC content in the sediment from the area recharged by reclaimed water (RWS) was 55.41 mg/g, which was approximately 1.55 times that of the sediment from the area recharged by surface water (SWS). The VS/TS ratio of RWS was significantly

基金项目: 陕西省重点产业创新链(群)项目(2021ZDLSF05-04); 国家自然科学基金资助面上项目(52170172)

通信作者: 王怡 E-mail: wangyi1003@sina.com

higher than that of SWS. The annual average contents of TN and TP in RWS were 21.77 mg/g and 5.35 mg/g, respectively, which were approximately 2.35 times and 1.97 times those of SWS. Meanwhile, the contents of the most active ion exchange nitrogen (IEF-N) and weakly adsorbed phosphorus ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$) in RWS were 0.71 mg/g and 0.22 mg/g, respectively, which were 2.45 times and 3.14 times those of SWS. In addition, the contents of reductive phosphorus (Fe-P) and organic phosphorus (NaOH-nrP) in RWS were 0.44 mg/g and 0.20 mg/g, respectively, which were 2.44 times and 1.54 times those of SWS. In conclusion, the contents of TOC, TN and TP in RWS were significantly higher than those in SWS, and the contents of “active” nitrogen and phosphorus in RWS were also significantly higher than those in SWS. Therefore, the risk of carbon, nitrogen and phosphorus release in landscape water recharged by reclaimed water was higher, especially in summer and autumn when the weather was high. It is thus suggested to effectively control the release of pollutants from the sediment of landscape water recharged by reclaimed water.

Key words: sediment from the area recharged by reclaimed water; sediment from the area recharged by surface water; organic matter content; nutrient content

景观水体在改善环境、美化风景及调节气候方面发挥着重要作用^[1],但其所需的大量补给水无疑加剧了干旱半干旱地区的水资源短缺。再生水作为城市的“第二水源”,在景观水体补给中具有广阔的应用前景^[2],但目前关于再生水与地表水长期补给对景观水体底泥影响的相关报道较少。

西安市护城河作为市区的重要景观水体,近年来一直采用地表水与再生水联合补给模式运行,其中南门段在清淤改造后从2015年开始采用再生水作为补给水源,东南角在清淤改造后从2003年开始采用地表水补给。笔者以东南角地表水补给区域底泥(SWS)和南门段再生水补给区域底泥(RWS)作为研究对象,通过历时一年按季度进行采样,分析不同水源补给区底泥中污染物的含量及形态变化,旨在揭示不同水源补给形成底泥的污染特征,期为不同水源补给的底泥污染控制提供一定参考。

1 材料与方法

底泥样品采集期为2019年12月—2020年11月,分别在西安市护城河的地表水补给区域东南城角(东南角地表水)和再生水补给区域南门段(南门段再生水)按季度采集底泥。监测期间相应区段补给的地表水中TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TP、 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 和COD年均浓度分别为3.38、0.26、2.51、0.09、0.03和10.52 mg/L;补给的再生水中相应指标年均浓度分别为9.66、0.24、8.65、0.20、0.14和16.35 mg/L。每个区域设3个采样点,采用抓斗式彼得采泥器在

底泥表层0~10 cm处采集样本,运往实验室后对底泥进行均质化处理,经离心、冷冻干燥后进一步研磨并过100目筛网用于后续分析。

底泥VS/TS值通过重量法测定。底泥中TN先采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 进行消煮,然后采用奈氏试剂分光光度法测定;TP采用氢氧化钠熔融-钼锑抗分光光度法测定;TOC采用高温外热重铬酸钾氧化法测定。底泥中可转化态氮(TTN)采用化学连续提取法进行分级提取,依次获得离子交换态氮(IEF-N)、弱酸可提取态氮(WAEF-N)、强碱可提取态氮(SAEF-N)和强氧化剂可提取态氮(SOEF-N)^[3];底泥中潜在的活性磷采用Hupfer等^[4]改进的连续提取法进行分级提取,依次获得弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、可还原态磷(Fe-P)和有机态磷(NaOH-nrP),并经过适当稀释后采用钼蓝法对各形态磷进行定量分析。

2 结果与讨论

2.1 TOC含量的季节性变化

沉积物中TOC是影响水体黑臭的重要因素,能够与重金属和氮发生一系列复杂的生物化学反应,促进底泥中重金属形态转变和氮循环转化。护城河不同水源补给区域底泥TOC含量及VS/TS值的季节性变化如图1所示。从图1(a)可以看出,SWS中TOC含量年变化范围为32.20~41.52 mg/g,年均值为35.65 mg/g;而RWS的年变化范围为52.53~56.53 mg/g,年均值为55.41 mg/g。无论是SWS还是RWS中的TOC含量最大值均出现在冬季,最小值

均出现在秋季。从图1(b)可知,SWS中VS/TS值的年变化范围为9.56%~10.63%,年均值为10.23%,RWS的年变化范围为13.80%~16.03%,年均值为14.71%。因此,RWS中TOC含量和VS/TS值均明显高于SWS的,且两者均在秋季最低。

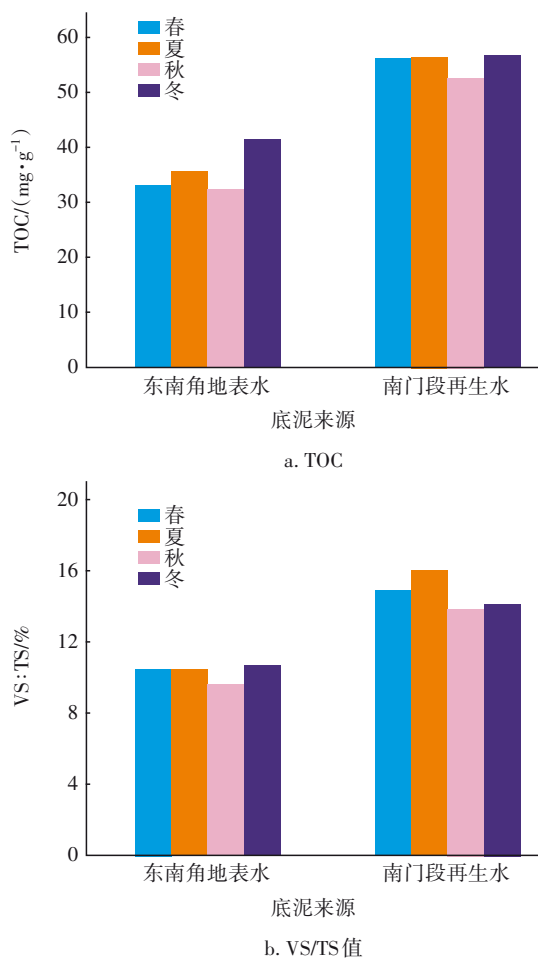


图1 不同水源补给区域底泥TOC含量及VS/TS值的季节性变化

Fig.1 Seasonal change of TOC content and VS/TS ratio of sediments in different water supply areas

2.2 TN和TP含量的季节性变化

护城河不同水源补给区域底泥TN及TP含量的季节性变化如图2所示。从图2(a)可以看出,不同水源补给区底泥TN含量差异较大,SWS中TN含量年变化范围为8.32~9.93 mg/g,最高值出现在冬季,最低值出现在夏季,年均值为9.27 mg/g;RWS中的年变化范围为19.03~24.28 mg/g,最高值出现在春季,最低值出现在秋季,年均值为21.77 mg/g,是SWS相应值的2.35倍。从图2(b)可知,护城河不同水源补给区域底泥TP含量差异明显,SWS中TP

含量年变化范围为2.63~2.77 mg/g,最高值出现在冬季,最低值出现在秋季,年均值为2.71 mg/g;RWS中的年变化范围为4.89~5.64 mg/g,最高值出现在秋季,最低值出现在夏季,年均值为5.35 mg/g,是SWS中相应值的1.97倍。因此,RWS中TN和TP的含量均明显高于SWS的。此外,两种底泥中TN和TP含量的最小值主要发生在温度较高的夏秋季,表明夏秋季的较高水温会促进底泥中氮磷等污染物向上覆水释放,促进上覆水中藻类生长^[5],导致底泥中的氮磷转化为悬浮生长的生物性有机氮磷。

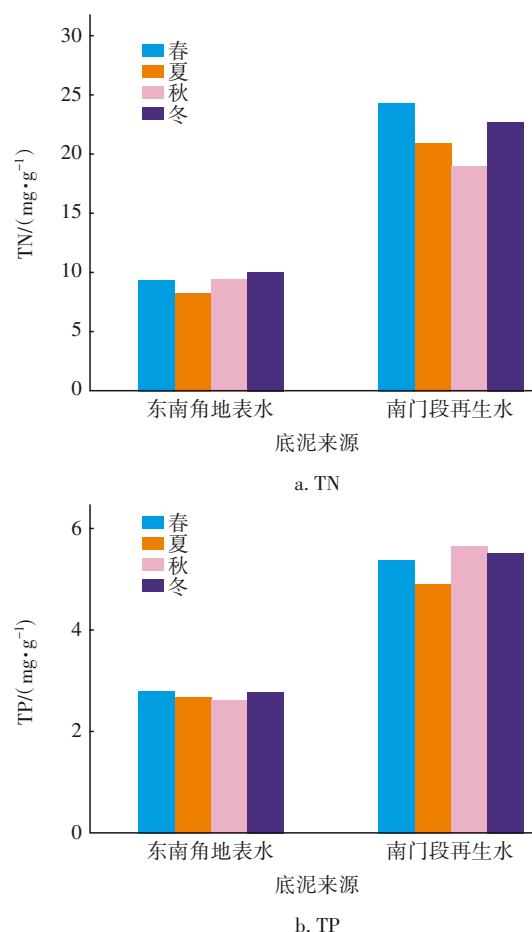


图2 不同水源补给区域底泥TN及TP含量季节性变化

Fig.2 Seasonal change of TN and TP contents of sediments in different water supply areas

2.3 TTN含量的季节性变化

不同水源补给区域底泥TTN含量的季节性变化及其不同组分的含量对比如图3所示,其中底泥TTN主要包括IEF-N、WAEF-N、SAEF-N和SOEF-N。从图3(a)可以看出,不同区域底泥中TTN含量的季节性变化均较小。SWS中的TTN含量年均值为

3.98 mg/g, RWS的为4.85 mg/g,可见RWS的年均值为SWS的1.22倍。

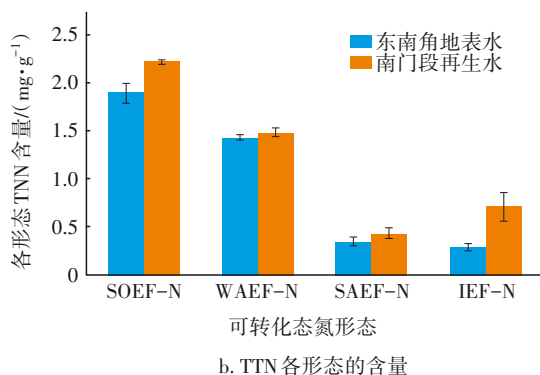
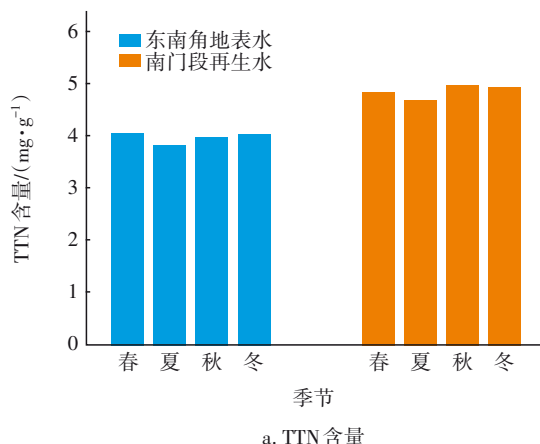


图3 不同水源补给区域底泥 TTN 含量的季节性变化及其不同组分的含量

Fig.3 Seasonal change of TTN content of sediments and its form distribution in different water supply areas

从图3(b)可知,作为底泥中可转化态氮中份额最大的SOEF-N,其与底泥的结合能力最强(通常指底泥中与有机质和硫化物结合的氮)^[6]。SWS中SOEF-N含量的年变化范围为1.78~2.04 mg/g,年均值为1.89 mg/g;RWS中的年变化范围为2.19~2.25 mg/g,年均值为2.22 mg/g。可见,RWS中SOEF-N含量明显高于SWS的。作为底泥中可转化态氮份额第二的WAEF-N,其主要指与溶解性有机物结合的有机氮及与碳酸盐结合的无机氮^[7]。SWS中WAEF-N含量的年变化范围为1.42~1.47 mg/g,年均值为1.44 mg/g;RWS中的年变化幅度为1.43~1.52 mg/g,年均值为1.48 mg/g。作为在敏感氧化条件下与铁锰化合物结合的SAEF-N^[8],其在SWS中的年均值为0.35 mg/g,在RWS中的年均值为0.43 mg/g。因此,补给水源对底泥WAEF-N和SAEF-N含量的影响较小。作为最易与水体发生相互作用

的最“活跃”态氮IEF-N^[9],其在SWS中的年变化范围为0.27~0.33 mg/g,年均值为0.29 mg/g;其在RWS中的年变化范围为0.51~0.83 mg/g,年均值为0.71 mg/g,是SWS中IEF-N含量的2.45倍。可见,RWS中IEF-N含量显著高于SWS的。总之,再生水补给区域底泥中IEF-N含量显著高于地表水补给区域底泥,其他可转化态氮含量均略高于地表水补给区域底泥。

2.4 活性磷的季节性变化

不同水源补给区域底泥潜在活性磷含量的季节性变化及其不同组分含量的变化如图4所示,其中底泥潜在活性磷主要包括了NH₄Cl-P、Fe-P和NaOH-nrP。

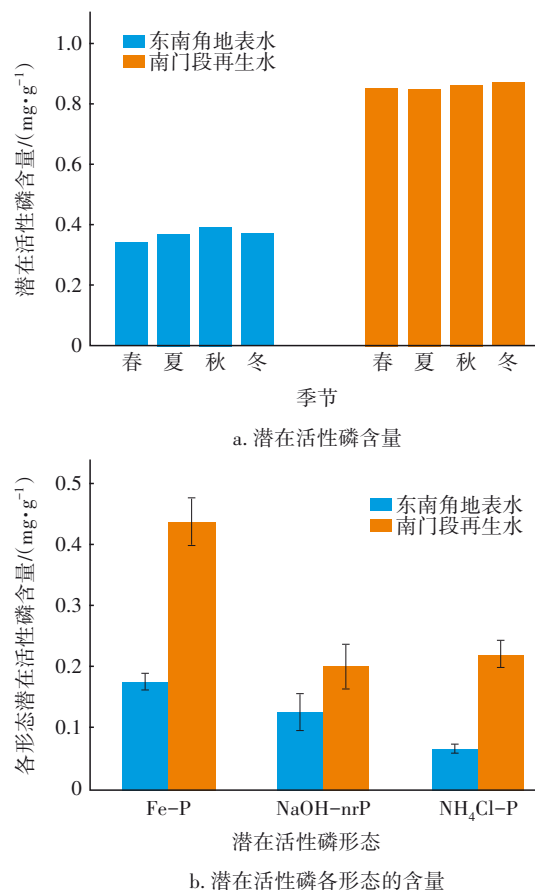


图4 不同水源补给区域底泥潜在活性磷含量的季节性变化及其不同组分的含量

Fig.4 Seasonal change of active phosphorus content of sediments and its form distribution in different water supply areas

从图4(a)可知,同一底泥中活性磷含量的季节性变化较小,但是不同底泥中潜在活性磷含量的差异较大。SWS中潜在活性磷含量的年均值为0.38

mg/g, RWS的为0.87 mg/g, 为SWS的2.29倍。

从图4(b)可知, 无论再生水补给还是地表水补给, Fe-P均为潜在活性磷中的主要形态, 其在SWS中含量的年变化范围为0.16~0.19 mg/g, 年均值为0.18 mg/g; 在RWS中的年变化范围为0.39~0.48 mg/g, 年均值为0.44 mg/g, 为SWS的2.44倍。此外, SWS中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量的年变化范围为0.06~0.07 mg/g, 年均值为0.07 mg/g; RWS中的年变化范围为0.20~0.24 mg/g, 年均值为0.22 mg/g, 为SWS的3.14倍。SWS中 NaOH-nrP 含量的年变化范围为0.09~0.17 mg/g, 年均值为0.13 mg/g; RWS中的年变化范围为0.17~0.25 mg/g, 年均值为0.20 mg/g, 为SWS的1.54倍。因此, 再生水补给区域底泥中Fe-P、 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 NaOH-nrP 的含量均明显高于地表水补给区域底泥。

Fe-P和 NaOH-nrP 均具有较强的释放活性, 是内源污染的重要来源^[10]。再生水生产时混凝沉淀及强化除磷过程中铁盐(FeCl_3 或 FeSO_4 等)的加入使得再生水中 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 含量高于地表水, 从而引起底泥中Fe-P含量增加^[11]; 而再生水中较高的COD浓度使底泥中有机物含量增加, 间接造成 NaOH-nrP 含量上升。当底泥中的氧化还原环境变化时, 其中的Fe-P与 NaOH-nrP 均可以转化为可溶性磷, 并通过间隙水扩散作用进入上覆水, 从而对水体水质产生较大影响^[12]。 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 是指被沉积物矿物颗粒表面吸附的磷酸盐, 再生水中较高的磷浓度使得对应补给区域底泥对上覆水中磷的吸附量增加, 导致 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量较高。但该部分磷属于弱吸附态活性磷, 当底泥环境发生变化或受到扰动时, 最易进入上覆水中并被浮游植物利用^[13]。因此, 再生水补给区域底泥的磷释放风险显著高于地表水补给区域底泥。

2.5 底泥中碳、氮、磷的释放风险

根据前述可知, 再生水中TN、TP和COD的年均浓度分别为地表水的2.86、2.22和1.55倍, 再生水中较高的污染物浓度使得常年补给再生水的护城河南门段底泥中碳、氮、磷含量明显高于补给地表水的东南城角区域底泥中的含量。同时, 作为沉积物中最易释放的氮、磷形态, 再生水补给区域沉积物中IEF-N和 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量分别为地表水补给区域相应值的2.45和3.14倍。此外, 地表水补给区域底泥中TN、TP的季节性变化较小, 而再生水补给区

域底泥中TN、TP含量在夏季明显下降, 表明高温促进了该区域底泥中污染物的释放。其原因在于, 再生水补给区域底泥主要为藻沉积型底泥, 而地表水补给区域主要为无机物沉降形成的底泥。因此, 与地表水补给相比, 常年补给再生水的景观水体底泥中碳、氮、磷释放风险较高。

3 结论

① 再生水补给区域底泥TOC、TN和TP含量年均值分别为55.41、21.77和5.35 mg/g, 分别为地表水补给区域底泥的1.55、2.35和1.97倍。因此, 再生水补给区域底泥的有机物及氮、磷含量均明显高于地表水补给区域底泥。

② 再生水补给区域底泥可转化态氮中各形态氮含量大小为 SOEF-N (2.22 mg/g)> WAEF-N (1.48 mg/g)> IEF-N (0.71 mg/g)> SAEF-N (0.43 mg/g), 最“活跃”的IEF-N含量是地表水补给区域底泥的2.45倍, 其他形态的可转化态氮含量也均大于地表水补给区域底泥的。

③ 再生水补给区域底泥潜在活性磷中Fe-P、 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 NaOH-nrP 的含量分别为0.44、0.22和0.20 mg/g, 分别为地表水补给区域底泥相应含量的2.44、3.14和1.54倍, 表明再生水补给区域底泥中潜在活性磷的释放风险明显大于地表水补给区域底泥。

④ 夏秋季高温天气底泥中污染物含量明显低于春冬季的, 表明温度较高会促进底泥中污染物的释放, 特别是再生水补给区域底泥, 因此建议加强对再生水补给区域底泥释放的管理, 尤其是在夏季高温季节。

参考文献:

- [1] PENG S Y, LI S H. Scale relationship between landscape pattern and water quality in different pollution source areas: a case study of the Fuxian Lake watershed, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107136.
- [2] 王文怀, 王怡, 韦存智, 等. 水绵强化浮床净化再生水补给的景观水体效果[J]. 中国给水排水, 2018, 34(21): 59-63.
WANG Wenhui, WANG Yi, WEI Cunzhi, et al. Effect of enhanced *Spirogyra* floating bed on purification of landscape water supplied with reclaimed water [J].

- China Water & Wastewater, 2018, 34(21): 59-63 (in Chinese).
- [3] 赵宝刚, 张夏彬, 咎逢宇, 等. 洪泽湖表层沉积物氮形态分布及影响因素[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(6): 30-38.
- ZHAO Baogang, ZHANG Xiabin, ZAN Fengyu, *et al.* Distribution and influence factors of nitrogen form in surface sediment of Lake Hongze [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(6): 30-38 (in Chinese).
- [4] HUPFER M, GÄCHTER R, GIOVANOLI R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis [J]. Aquatic Science, 1995, 57(4): 305-324.
- [5] 李运奔, 匡帅, 王臻宇, 等. 东巢湖沉积物—水界面氮、磷、氧迁移特征及意义[J]. 湖泊科学, 2020, 32(3): 688-700.
- LI Yunben, KUANG Shuai, WANG Zhenyu, *et al.* Characteristics and significance of nitrogen, phosphorus and oxygen transportation at the sediment-water interface in east Lake Chaohu [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(3): 688-700 (in Chinese).
- [6] 梅涵一, 王妍, 刘云根, 等. 云南不同类型农村沟渠底泥中氮赋存形态分布[J]. 环境化学, 2016, 35(10): 2060-2070.
- MEI Hanyi, WANG Yan, LIU Yungen, *et al.* Distribution of nitrogen speciation in ditch sediments from different rural types in Yunnan [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(10): 2060-2070 (in Chinese).
- [7] ZHOU S L, SUN Y, LI Z X, *et al.* Characteristics and driving factors of the aerobic denitrifying microbial community in Baiyangdian Lake, Xiong'an New Area [J]. Microorganisms, 2020, 8: 714.
- [8] PAN X, LIN L, HUANG Z, *et al.* Distribution characteristics and pollution risk evaluation of the nitrogen and phosphorus species in the sediments of Lake Erhai, Southwest China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(22): 22295-22304.
- [9] ZHAO H C, ZHAO H X, WANG S R, *et al.* Coupling characteristics and environmental significance of nitrogen, phosphorus and organic carbon in the sediments of Erhai Lake [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(16): 19901-19914.
- [10] LI H, SONG C L, YANG L, *et al.* Phosphorus supply pathways and mechanisms in shallow lakes with different regime [J]. Water Research, 2021, 193: 116886.
- [11] 季斌, 秦慧, 陈威, 等. 铁盐应用于污水协同除磷研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(2): 11-14.
- JI Bin, QIN Hui, CHEN Wei, *et al.* Research progress on phosphorus synergetic removal by ferric salt in wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(2): 11-14 (in Chinese).
- [12] 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 等. 洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 734-742.
- LIU Siru, ZHAO Jidong, XIAO Shangbin, *et al.* Spatio-temporal variation of release flux of sediment nitrogen and phosphorus in high-risk period of algal bloom in Lake Erhai [J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 734-742 (in Chinese).
- [13] KONG M, LIU F F, ZHANG W J, *et al.* High resolution investigation of pH on control of mobile and organic phosphorus and associated release kinetics following lanthanum modified bentonite (LMB) amendment at the water-sediment interface [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126148.

作者简介:寇晓梅(1973-),女,陕西西安人,硕士,教授级高工,主要研究方向为景观水体修复和污泥资源化。

E-mail:364914196@qq.com

收稿日期:2021-06-27

修回日期:2021-08-09

(编辑:任莹莹)