

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.016

进水方式对OAO蔬菜潜流湿地净化效果的影响

巢波, 张皓驰, 陈太飞, 李先宁
(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为提高好氧/厌氧/好氧(OAO)蔬菜潜流湿地对总氮的去除效果,同时维持其对有机物的高去除率,在野外条件下采用人工模拟的当地村落无序排放污水,分析不同进水方式(首端进水、三点进水和两点进水)对湿地去除污染物效果的影响。结果表明,相较于首端进水,三点进水方式下湿地对总氮的去除效果有所提高,但对COD和总磷去除率的提升效果不显著,最佳脱氮进水流流量比为1:2:1,脱氮效果提升13.56%,氨氮、硝态氮和总氮去除率分别达到75.11%、95.07%和79.86%,相应出水平均浓度分别为0.65、0.53和1.32 mg/L。采用两点进水方式时,湿地脱氮除磷效率及COD去除率均高于三点进水和首端进水,最佳脱氮进水流流量比为1:3,氨氮、硝态氮和总氮去除率分别为82.10%、97.71%和85.59%,相应出水平均浓度分别为0.92、0.09和0.93 mg/L。

关键词: OAO蔬菜潜流湿地; 村落无序排放污水; 脱氮; 三点进水; 两点进水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)01-0104-06

Effect of Feeding Strategy on Purifying Performance of OAO Vegetable Subsurface-flow Wetland

CHAO Bo, ZHANG Hao-chi, CHEN Tai-fei, LI Xian-ning

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper analyzed the effects of different feeding strategies (one-point feeding, two-point feeding and three-point feeding) on the performance of wetlands for the removal of pollutant in simulated randomly-discharged sewage from a village under field conditions, so as to improve the total nitrogen removal performance of aerobic/anaerobic/aerobic (OAO) vegetable subsurface-flow wetland and maintain its high removal efficiency of organic matter. Compared with one-point feeding strategy, the removal efficiency of total nitrogen in the wetland with three-point feeding strategy was improved, whereas the removal efficiencies of COD and total phosphorus were not significantly improved. Under the optimal flow distribution ratio for nitrogen removal (1:2:1), the removal efficiency of total nitrogen increased by 13.56%, the removal rates of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen reached 75.11%, 95.07% and 79.86%, respectively, and the corresponding average concentrations in effluent were 0.65 mg/L, 0.53 mg/L and 1.32 mg/L, respectively. The nitrogen, phosphorus and COD removal rate of the wetland with two-point feeding strategy were higher than those of the wetland with one-point feeding and three-point feeding strategies. The optimal flow distribution ratio for nitrogen removal was 1:3, the removal rates of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and total nitrogen were 82.10%, 97.71% and 85.59%, and the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202004); 江苏省环保科研课题(2016029)

通信作者: 李先宁 E-mail: lxneu@126.com

corresponding average concentrations in effluent were 0.92 mg/L, 0.09 mg/L and 0.93 mg/L, respectively.

Key words: OAO vegetable subsurface-flow wetland; randomly-discharged sewage from village; denitrification; three-point feeding; two-point feeding

农村居民常见的生活习惯,诸如生活污水随意撒泼、家禽粪尿疏于管理、生活垃圾乱丢乱放等,均会造成污染物在地表积累。降雨产生的雨水径流冲刷地表积累的污染物,从而形成村落无序排放污水。这类污水通常具有随机性、分散性、隐蔽性、水质水量不稳定等特点^[1],这些特点制约了对其进行控制和治理的效果,导致其成为太湖流域面源污染中难以治理的一部分^[2]。受地理条件、经济状况、人口分布等多种因素的影响,部分农村区域的这类污水并不适用于常见的统一接管(至市政管网)或分散式污水处理设施治理模式,因而人工湿地被认为是一种可供选择的方法。该方法通过完善生态沟渠、在沟渠末端建设人工湿地等可有效削减污染物入河量,从而改善河道水质^[3]。

人工湿地主要依托基质、微生物、植物根系之间的物理、化学和生物协同作用去除污水中的污染物^[4-5]。研究发现,传统好氧/厌氧(OA)潜流湿地存在抗冲击负荷差、出水水质波动大等不足^[6],因此在OA湿地基础上进行改良的好氧/厌氧/好氧(OAO)蔬菜潜流湿地应运而生。相较于OA湿地,OAO蔬菜潜流湿地在前端增设了一级预曝气池,不仅能去除污水中的部分有机物,使氨氮发生硝化反应,还能降解有毒有害物质(如酚类、硫化物等),为后续生物脱氮营造良好的条件^[7]。这类湿地采用的是生长迅速且具有经济价值的蔬菜作为湿地植物,其根系的吸附拦截作用对氮、磷有较好的去除效果^[8]。

溶解氧是人工湿地脱氮和有机物去除的重要因素,通过在OAO蔬菜潜流湿地的好氧段铺设通风管可以有效提高溶解氧水平,使其对COD和氨氮有较好的去除效果,但对总氮的去除效果并不理想。这是由于碳源在反硝化阶段之前已经降到很低的水平,反硝化成为了总氮去除的限制因素^[9]。通过投加碳源可以改善总氮的去除效果^[10],但是出水COD浓度也会升高。因此,针对该类湿地对氨氮和COD的去除率高而对总氮去除率低的问题,笔者通过多点进水的方式,分析不同进水方式对OAO蔬菜潜流湿地净化效果的影响,旨在为进一步提高人

工湿地对污染物的去除效能提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验装置位于宜兴市大浦镇洋渭村东南大学试验基地,试验在3组构造参数一致的人工湿地中进行,如图1所示。第一组采用首端进水,进水通过①进入湿地;第二组采用三点进水,进水通过①、②、③分别进入湿地;第三组采用两点进水方式,进水通过①、②分别进入湿地,每处进出水口均设有流量计调节流量。人工湿地采用砖石混凝土结构,有效长×宽×深为12 m×1 m×0.6 m,前端设置一个有效长×宽×深为2 m×1 m×1 m的配水池,末端设置与湿地同宽深的集水槽。湿地沿水流流向分成3段,每段长4 m,用砖墙隔开,并在墙的下部设两排(每排4个)直径为0.1 m的过水口来保证水流的通过。池体从下向上依次填充砾石层(直径为10~30 mm)0.15 m、粗砂层(直径为5~10 mm)0.15 m。湿地好氧段种植水生蔬菜,厌氧段不种植物,仅在基质表面用PVC薄膜遮盖严实,制造厌氧环境。根据宜兴当地的自然气候特征,选取本地常见的、具有较好净污能力且有一定经济价值的空心菜作为湿地植物^[11],空心菜种植密度为9株/m²。

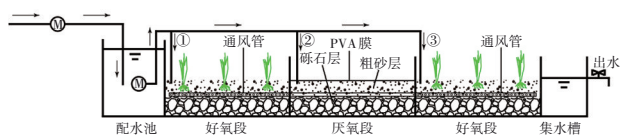


图1 OAO蔬菜潜流湿地试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of OAO vegetable subsurface-flow wetland

1.2 试验方法及湿地运行工况

通过人工配水模拟村落无序排放的污水进行OAO湿地净化试验。首先将自来水通过潜水泵打入配水池,再在配水池中添加相应药品并通过人工搅拌的方式确保其充分溶解,最后用潜污泵将污水输送至OAO湿地。试验设置3种进水方式及多种进水流量比,其中首端进水方式为对照组。为尽可能降低气温变化对人工湿地净化效能的影响^[1],试验在夏季6月—8月开展,期间气温稳定在26~37℃。

根据前期试验结果,当首端进水水力负荷为 $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,系统对污染物的去除效果最好^[12]。因此,本研究进水水力负荷采用 $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,故湿地的水力停留时间为 19.2 h (孔隙率取 0.4)。3组不同进水方式下人工湿地的运行时间均为3个月,采用间歇式进水,间隔 1 d 。为确保试验在湿地稳定运行状态下开展,3组湿地在基地均预先连续运行24个月以上^[11]。试验发现,不同进水方式下,改变进水流量比后湿地对污染物的去除率仅在前2~3批进水期内波动较大($\pm 30\%$),后续基本保持稳定($\pm 10\%$ 以内)。因此,以稳定期内污染物去除率代表此流量比下湿地的最佳处理性能。采用自动采样装置进行水样采集,每 2 h 采集1次。运行期间湿地各段水样pH变化较小,基本在 $7.1 \sim 7.3$ 之间。

1.3 进水水质

试验开始前,对宜兴市大浦镇洋渭村多个位置的村落无序排放污水进行了长期跟踪监测,发现污染严重时段COD为 $150 \sim 169 \text{ mg/L}$ 、TP为 $2.0 \sim 2.8 \text{ mg/L}$ 、TN为 $23.4 \sim 24.8 \text{ mg/L}$ 、 NH_4^+-N 为 $9.1 \sim 10.3 \text{ mg/L}$ 、 NO_3^--N 为 $9.2 \sim 9.8 \text{ mg/L}$,各项指标均远超《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类水标准。为获得稳定的试验原水,参照洋渭村在污染严重时段内无序排放污水的水质,采用自来水添加相应药品进行配制。试验用水水质:COD为 $145 \sim 170 \text{ mg/L}$ 、TP为 $1.9 \sim 3.3 \text{ mg/L}$ 、TN为 $22.2 \sim 27.5 \text{ mg/L}$ 、 NH_4^+-N 为 $8.8 \sim 12.4 \text{ mg/L}$ 、 NO_3^--N 为 $8.9 \sim 10.2 \text{ mg/L}$ 。

1.4 分析项目和方法

COD采用重铬酸钾法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, NO_3^--N 采用酚二磺酸分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 三点进水方式下污染物去除效果

三点进水方式下进水流量比对氮去除效果的影响如图2所示。可以看出,当进水流量比为 $1:2:1$ 时湿地的脱氮效果最好,较其他3种进水流量比高出 $8.89\% \sim 11.03\%$,比首端进水高 13.56% 。在此进水流量比下,湿地对氨氮、硝态氮和总氮的去除率分别达到了 75.11% 、 95.07% 和 79.86% ,出水中3项指标的平均浓度分别为 0.65 、 0.53 和 1.32 mg/L ,不仅符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准,而且达到《地表水环

境质量标准》(GB 3838—2002) IV类水标准。 $1:1:2$ 、 $1:1:1$ 和 $2:1:1$ 进水流量比条件下湿地的脱氮效果差异不大,但与首端进水方式相比普遍有所提升。根据上述结果可以推断,湿地中段较高的进水流量能够提高前段的硝化水平,同时维持后段较高的反硝化速率,最终提高总体脱氮效率。结合前人的研究^[13],判断该现象主要是因为多点进水降低了有机负荷,既提高了前段硝化菌的竞争优势,又在湿地后段为反硝化菌补充了碳源,增强了反硝化菌的活性和代谢能力,从而提高了反硝化效能。

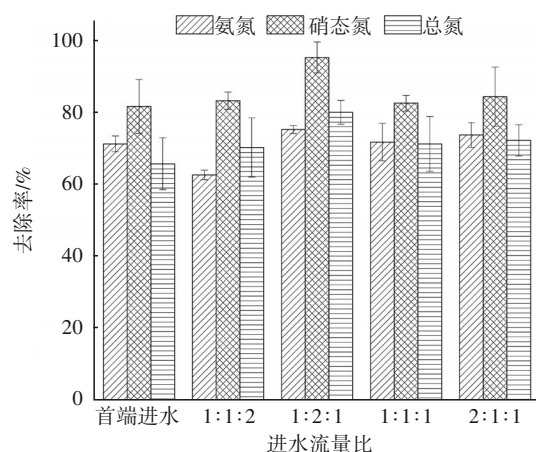


图2 三点进水方式下进水流量比对氮去除效果的影响

Fig.2 Effect of flow distribution ratio on nitrogen removal with three-point feeding strategy

三点进水方式下进水流量比对COD和总磷去除效果的影响见图3。

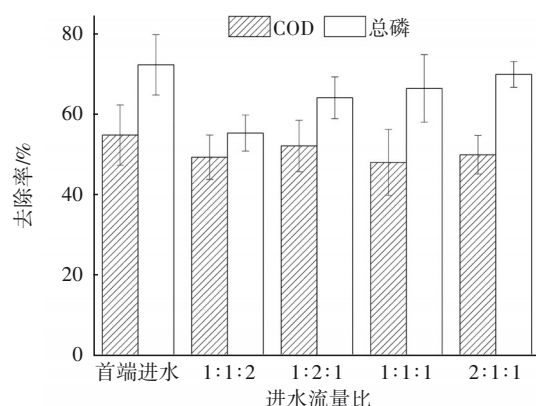


图3 三点进水方式下进水流量比对COD和总磷去除效果的影响

Fig.3 Effect of flow distribution ratio on COD and TP removal with three-point feeding strategy

从图3可知,COD去除率在不同进水流量比下差异不大,这是因为COD主要在好氧段被去除^[14],

因此三点进水方式下,进水流量比虽然有所不同,但污水最终都会流向末端好氧段后再排出湿地,故末端好氧段保证了较高的COD去除率。首端进水方式下TP去除率明显高于其他4种进水流量比的,这是因为后段流量较大时,较短的水力停留时间会导致后段的进水难以与基质充分接触,从而影响物化与基质的吸附作用,导致TP去除率下降^[15]。

当进水流量比为1:2:1时,湿地对TP的去除率虽然受到后段影响,但仍可以达到63.12%,而COD去除率在不同进水流量比下的差异较小。该流量比下湿地出水COD和TP的平均浓度仅为24.92和0.08 mg/L,可以达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准。综合三点进水方式下不同进水流量比对各种污染物去除效果的影响,得出1:2:1是此进水方式下的最佳流量比。

在进水流量比为1:2:1条件下,分析三点进水与首端进水方式人工湿地氧分布情况,结果如图4所示。可以看出,三点进水方式下人工湿地中的溶解氧浓度普遍高于首端进水。在湿地前段(0~4 m),由于三点进水方式使得前段的有机负荷下降,溶解氧消耗量减少,因此溶解氧浓度的下降趋势较首端进水平缓;中段(4~8 m)进水后,由于进水中带入了溶解氧,导致该段溶解氧浓度高于首端进水,随着进水中污染物降解消耗溶解氧,使得溶解氧浓度明显下降,这与Wang等人^[16]的研究结果一致。在湿地后段(8~12 m),进水中带入的溶解氧使末端浓度处于较高水平,明显高于首端进水,因此多点进水方式下末端好氧处理污染物的能力更强。

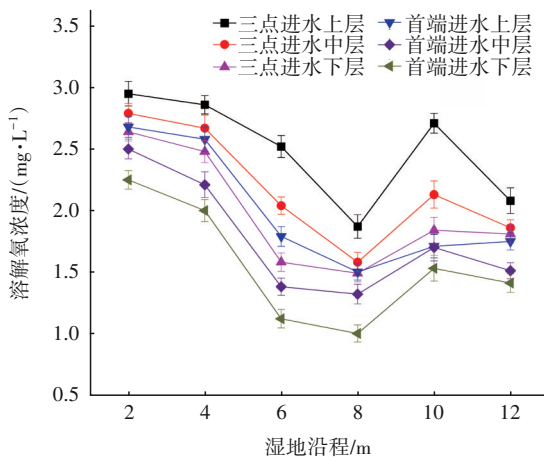


图4 三点进水与首端进水人工湿地氧分布情况

Fig.4 Oxygen distribution in artificial wetland with three-point and one-point feeding strategies

采用三点进水方式,将进水流量比为1:2:1与首端进水方式的污染物去除效果进行比较,结果见表1。可知,两种进水方式下湿地对COD的去除率差异较小(2.87%),但对TP的去除率差异较大(9.81%)。这是因为COD主要在好氧段被去除,末端好氧段保证了湿地对COD的高去除率,故两种进水方式对COD的去除效果差异不大。但是,总磷主要依靠湿地中基质的吸附及物化作用去除,因此末端进水会导致磷与基质的接触时间较首端进水短,故物化和吸附作用都不充分,致使出水中总磷浓度偏高。三点进水方式下人工湿地对氮的去除率明显升高,氨氮、硝态氮和总氮去除率分别提高了4.05%、11.90%和13.56%,表明最优进水流量比下三点进水方式对人工湿地的脱氮效能有显著提升,使各段有机物负荷有所降低,有利于提高硝化菌的竞争优势,从而加快了氨氮的硝化反应进程;同时,在硝化反应完成后,有机物的及时补充解决了反硝化过程中碳源不足问题,使得反硝化菌活性增强,进而提高了湿地整体脱氮效果。

表1 三点进水与首端进水方式下污染物去除效果

Tab.1 Removal efficiency of pollutants with three-point and one-point feeding strategies %

项目	COD 去除率	TP 去除率	NH ₄ ⁺ -N 去除率	NO ₃ ⁻ -N 去除率	TN 去除率
首端进水	55.03	72.93	71.06	83.17	66.30
三点进水	52.16	63.12	75.11	95.07	79.86

2.2 两点进水方式下污染物去除效果

由三点进水方式下污染物的去除效果可以看出,最后一段进水不利于磷去除,中部厌氧段较大的进水流量有利于氮去除,因此进一步探究了两点进水方式下湿地对氮的去除效果,结果如图5所示。可以看出,两点进水方式下湿地系统对氨氮、硝态氮、总氮的去除率均随着中段进水流量的增大呈现先升高后下降的变化趋势。当进水流量比为1:3时,氨氮、硝态氮、总氮的去除率分别达到了82.10%(较大值)、97.71%(最大值)、85.59%(最大值)。可见,在此进水流量比下,有机负荷的降低有利于硝化菌的优势竞争,同时厌氧段又补充了反硝化菌需要的碳源,因此硝态氮去除率较高。但是继续加大中段进水流量后,厌氧段较高的进水流量缩短了此段水力停留时间,使得硝化作用不充分,同时造成过多的碳源迁移至末端好氧段,导致氨氮和硝态氮

去除率反而下降。两点进水方式下湿地对氨氮、硝态氮和总氮的最高去除率分别为86.26%、97.71%和85.59%，与三点进水方式下的最佳效果相比，分别提高了11.15%、2.64%和5.73%，表明两点进水比三点进水方式更有利于脱氮。

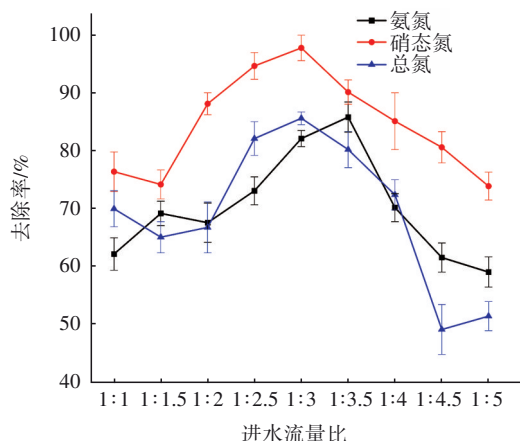


图5 两点进水方式下进水流量比对氮去除效果的影响

Fig.5 Effect of flow distribution ratio on nitrogen removal with two-point feeding strategy

当两点进水且最佳进水流量比为1:3时,湿地对COD和总磷的去除率分别为57.03%和74.72%,也高于三点进水时的最佳效果。在此进水流量比下,湿地对各污染物的去除效果更好,出水COD、总磷、氨氮、硝态氮和总氮的平均浓度分别为16.40、0.04、0.92、0.09和0.93 mg/L,均达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水标准。

3 结论

① 在采用三点进水方式下的OAO蔬菜潜流人工湿地中,当以强化脱氮为目的时,最佳进水流量比为1:2:1,且总氮去除率高出其他3种进水流量比(2:1:1、1:1:1、1:1:2)8.89%~11.03%,高出首端进水13.56%。在最佳进水流量比下,湿地尾水中的氨氮、硝态氮和总氮可以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准,且TP和COD也可达到Ⅳ类水标准。

② 当采用两点进水方式时,OAO蔬菜潜流人工湿地在1:2.5~1:4的进水流量比范围内,氨氮、硝态氮、总氮去除率均较高,尤其是在进水流量比为1:3时,去除率分别达到了82.10%、97.71%和85.59%,与三点进水的最佳处理效果相比,分别提高了6.99%、2.64%和5.73%;COD和总磷去除率分

别为57.03%和74.72%,也高于三点进水的最佳处理效果。因此,在两点进水最优条件(进水流量比为1:3)下,湿地对各污染物的去除效果较好,出水COD、总磷、氨氮、硝态氮和总氮的平均浓度达到了《地表水环境质量标准》Ⅲ类水标准。

③ 三点进水和两点进水都能改善潜流湿地对氨氮和COD去除率高而总氮去除率低的现状,对潜流湿地的设计、运行均具有指导意义,对提高农村污水处理效果、改善水环境具有重要价值。

参考文献:

- [1] 陈太飞. 水生蔬菜型人工湿地对村落无序排放污水净化特性的研究[D]. 南京:东南大学,2018.
CHEN Taifei. Study on the Purification of Rural Disorderly Discharged Wastewater by Aquatic Vegetable Constructed Wetland [D]. Nanjing: Southeast University, 2018(in Chinese).
- [2] 冯羽中,刘秋菊,张皓驰,等. 生态沟渠对村落无序排放污水截留效果的试验[J]. 净水技术, 2022, 41(6):79-89.
FENG Yuzhong, LIU Qiuju, ZHANG Haochi, et al. Experiment of interception effect of ecological ditches on unordered discharge sewage in rural villages [J]. Water Purification Technology, 2022, 41 (6) : 79-89 (in Chinese).
- [3] 翟志东. 村落无序排放污水中氮磷的拦截去除技术及其工程应用研究[D]. 南京:东南大学,2017.
ZHAI Zhidong. Interception and Removal Technology of Nitrogen and Phosphorus in Rural Disorderly Discharged Wastewater and Its Engineering Application Research [D]. Nanjing: Southeast University, 2017(in Chinese).
- [4] 潘玲阳,武威,高磊,等. 拔风管对分流式复合潜流人工湿地脱氮性能的影响[J]. 环境工程学报, 2022, 16(11):3750-3762.
PAN Lingyang, WU Wei, GAO Lei, et al. Effect of air duct on nitrogen removal performance of a hybrid subsurface flow constructed wetland with step-feeding [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(11):3750-3762(in Chinese).
- [5] 武威,柴文云,范珍,等. 三级串联垂直潜流人工湿地的脱氮性能及微生物学特征[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7):2578-2588.
WU Wei, CHAI Wenyun, FAN Zhen, et al. Nitrogen removal performance and microbiological characteristics of a three-stage series of vertical flow constructed

- wetlands [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7):2578-2588 (in Chinese).
- [6] 马凯, 张国珍, 王宏伟, 等. 多级AO+人工湿地组合工艺处理生活污水的研究[J]. 兰州交通大学学报, 2022, 41(4):96-102.
- MA Kai, ZHANG Guozhen, WANG Hongwei, *et al.* Experimental research on wastewater treatment by combined process of multi-stage AO and constructed wetland [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2022, 41(4):96-102(in Chinese).
- [7] 石雷. 氧环境连续切换模块化植物滤床控制农村面源污染的研究[D]. 南京:东南大学, 2022.
- SHI Lei. Study on Oxygen Environment Continuous Switching Modular Plant Filter Bed in Rural Non-point Source Pollution Control [D]. Nanjing: Southeast University, 2022(in Chinese).
- [8] 陈太飞, 韩群, 翟志东, 等. OAO水生蔬菜型人工湿地工艺对农村无序排放污水中氮磷的去除效果[J]. 净水技术, 2018, 37(11):120-128.
- CHEN Taifei, HAN Qun, ZHAI Zhidong, *et al.* Effect of OAO process by aquatic vegetable constructed wetland on nitrogen and phosphorus removal for unordered discharge sewage treatment in rural villages [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(11):120-128 (in Chinese).
- [9] 胡沅胜, 赵亚乾, 赵晓红. 强化总氮去除的改进型潮汐流人工湿地[J]. 中国给水排水, 2015, 31(15):133-138.
- HU Yuansheng, ZHAO Yaqian, ZHAO Xiaohong. Modified tidal flow constructed wetland for enhanced total nitrogen removal [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(15):133-138(in Chinese).
- [10] 龚柔艳, 湛宏伟, 危润初, 等. 低温条件下投加碳源的垂直流人工湿地模拟装置影响去除微污染水体氮素的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(35):310-315.
- GONG Rouyan, CHEN Hongwei, WEI Runchu, *et al.* Nitrogen removal from micro polluted water by adding carbon sources under low temperature in simulation device of vertical-flow constructed wetland [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(35):310-315 (in Chinese).
- [11] 谢静, 吕锡武, 李洁. 6种湿地植物吸收污水中氮和磷的动力学[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8):4067-4072.
- XIE Jing, LÜ Xiwu, LI Jie. Uptake dynamics of N and P in polluted water by 6 different wetland plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8):4067-4072 (in Chinese).
- [12] 韩群. 新型潜流人工湿地处理农村生活污水灌溉尾水的研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- HAN Qun. Study on Treatment of Rural Domestic Sewage Irrigation Tailwater by New Subsurface Flow Constructed Wetland [D]. Nanjing: Southeast University, 2018(in Chinese).
- [13] 袁丽梅. 多点进水厌氧-多级缺氧/好氧-膜组合工艺处理生活污水的试验研究[D]. 上海:东华大学, 2007.
- YUAN Limei. Research on Domestic Wastewater Treatment Using a Step-feed Anaerobic-Multiple Anoxic/Oxic-Membrane Process [D]. Shanghai: Donghua University, 2007(in Chinese).
- [14] 高续涛, 李振灵, 丁彦礼, 等. 不同结构的人工湿地系统对溶解性有机物去除效率的研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(10):3449-3457.
- GAO Xutao, LI Zhenling, DING Yanli, *et al.* Study on removal efficiency of dissolved organic compounds in constructed wetland systems with different structures [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(10):3449-3457(in Chinese).
- [15] 吕利平, 李航, 张欣, 等. 多点进水对前置预缺氧A²/O工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15):8-13.
- LÜ Liping, LI Hang, ZHANG Xin, *et al.* Effect of step-feed on nitrogen and phosphorus removal of pre-anoxic A²/O process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15):8-13(in Chinese).
- [16] WANG Y, SHEN L Y, WU J, *et al.* Step-feeding ratios affect nitrogen removal and related microbial communities in multi-stage vertical flow constructed wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2020, 721:137689.

作者简介:巢波(1994-),男,江苏常州人,硕士,工程师,主要研究方向为农村水环境治理和流域水污染防治。

E-mail:220160586@seu.edu.cn

收稿日期:2023-11-06

修回日期:2023-11-24

(编辑:任莹莹)