

·农业生态环境工程·(栏目主编:徐俊增 周蓓蓓)

文章编号:1672-3317(2025)01-0066-08

葡萄糖添加量与曝气时间对垂直潜流人工湿地脱氮的影响

王明宽^{1,2}, 童菊秀^{1,2*}, 张霞^{1,2}

(1.中国地质大学(北京)地下水循环与环境演化教育部重点实验室,北京 100083;

2.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083)

摘要:【目的】探究葡萄糖添加量与间歇曝气时间对不同粒径级配基质填充垂直潜流人工湿地脱氮的影响。

【方法】设置了2组试验,第1组试验设置了10、20、30 g葡萄糖外加碳源和细粒径、中粒径、粗粒径、正级配、反级配5种不同级配粒径沸石基质,研究葡萄糖添加量与沸石基质粒径对人工湿地脱氮的影响;基于第1组试验所得脱氮效果最佳的碳源及基质级配粒径组合,第2组试验研究了曝气0、2、4、6、8 h对人工湿地脱氮效果影响。

【结果】葡萄糖添加量相同时,细粒径(2~4 mm)基质填充装置整体脱氮效果较好;粒径级配相同填充装置中,10 g葡萄糖添加量处理的脱氮效果整体优于20、30 g葡萄糖添加量处理;正级配、反级配基质填充的垂直潜流人工湿地装置的孔隙度减小程度最小;10 g葡萄糖添加量、细粒径沸石基质填充装置的垂直潜流人工湿地脱氮效果最佳,TN的平均去除率达到50%左右。在此试验基础上,曝气时间为4 h时脱氮效果最佳,TN平均去除率达到86.9%。

【结论】因此,添加10 g葡萄糖且细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地曝气4 h时脱氮效果最佳。

关键词:垂直潜流人工湿地;葡萄糖添加量;粒径级配;间歇曝气

中图分类号:S273.5

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2024222

王明宽,童菊秀,张霞.葡萄糖添加量与曝气时间对垂直潜流人工湿地脱氮的影响[J].灌溉排水学报,2024,44(1):66-73.

WANG Mingkuan, TONG Juxiu, ZHANG Xia. Optimizing nitrogen removal in vertical-flow constructed wetland: Effect of glucose addition and aeration duration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 44(1): 66-73.

0 引言

【研究意义】据国家发展和改革委员会统计,截至2022年底,污水年排放量638.97亿 m^3 ,城市污水处理率98.11%,而全国具有污水处理能力的乡镇仅占45.68%,因此污水处理还有很大的提升空间。污水处理相关技术主要有物理技术、化学技术以及生物处理技术等^[1]。近年来,人工湿地技术被广泛应用到污水处理工作中,与以上污水处理技术相比,人工湿地技术具有高效、环保、成本低的优势^[2]。人工湿地是一种基质、植物、微生物共同存在的人造生态系统^[3],主要通过硝化和反硝化2种方式脱氮^[4],受多方面因素影响,如基质种类粒径、工艺耦合、溶解氧(DO)及外加碳源等^[5]。因此,探究多因素对人工湿地脱氮效率的影响并构造高效脱氮人工湿地对我国污水处理具有重要意义。

【研究进展】人工湿地系统基质不同会导致系统

内部的微生物系统发生变化,进而影响到硝化反硝化作用的进行。杨金辉等^[6]研究表明,添加沸石作为基质有助于去除人工湿地中的氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)。马江森等^[7]研究不同粒径基质人工湿地处理污水试验表明,基质粒径影响湿地基质对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附净化能力。基质装填方式也会影响其功效,不同粒径级配基质能够在一定程度上提高氮素去除率^[8]。碳源也会影响人工湿地脱氮效果,葡萄糖作为传统碳源,易于被微生物吸收且获取便捷。郝益婷等^[9]研究表明,添加葡萄糖作为碳源的人工湿地总氮(TN)去除率明显提升,去除率提高7.0%。刘文莉等^[10]研究发现,以葡萄糖作为碳源的人工湿地,真菌反硝化潜力显著增强。

作为硝化反应的一项重要因素,DO质量浓度同样会影响到人工湿地的脱氮效率,适宜质量浓度的DO可促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除。Wang等^[11]研究表明,仅增加DO量,并不能显著提高TN的去除率。而间歇曝气则可以根据需求控制供氧量与供氧时间^[12],在人工湿地脱氮方面被广泛应用。Li等^[13]研究认为,人工湿地在间歇曝气下TN与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均较高,与氧气供应导致细菌群落的丰度更高、多样性更强有关。同时,间歇曝气可提供一种交替的好氧-厌氧环境,以提高TN的去除率^[14]。Li等^[15]研究表明,间歇

收稿日期:2024-06-04 修回日期:2024-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(42072271)

作者简介:王明宽(2001—),男,硕士研究生,主要从事地下水、土壤水运动理论及其溶质运移理论研究。E-mail:761670433@qq.com

通信作者:童菊秀(1981—),女,副教授,博士,主要从事地下水、土壤水运动理论及其溶质运移理论研究。E-mail:juxiu.tong@cugb.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

曝气下人工湿地的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率可达 90.35%~97.14%; Fan 等^[16]研究表明, 使用间歇曝气改变人工湿地 DO 量, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除速率达 $3.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$, TN 去除速率达 $3.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ 。汪健等^[17]研究表明, 合理控制间歇曝气时间有利于提高人工湿地 TN 的去除率; 杜京京等^[18]研究表明, 较低的间歇曝气速率有利于提高人工湿地的反硝化潜势和 TN 去除率。

【切入点】目前, 关于间歇曝气对人工湿地脱氮效率影响研究较多, 关于基质、碳源添加量、曝气时间三因素对人工湿地脱氮效率影响研究鲜见。【拟解决的关键问题】为此, 设置葡萄糖碳源添加量、沸石基质粒径级配条件及间歇曝气时间, 研究葡萄糖碳源添加量、沸石基质粒径级配条件及间歇曝气时间对人工湿地脱氮效果的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在武汉大学农谷试验基地进行, 位于湖北省荆门市京山市屈家岭管理区, 属亚热带季风气候, 气候温暖, 湿润多雨, 寒冷期短, 无霜期长, 四季分明, 适宜部分人工湿地净水植物生长, 且当地湖泊湿地较多。截至 2022 年底, 湖北省行政村污水处理率仅为 32.39%, 污水处理提升空间较大。

1.2 最佳葡萄糖添加量与基质级配粒径选择试验

设置葡萄糖添加量和基质级配粒径 2 个因素, 其中, 葡萄糖添加量设置 3 个水平, 分别为 10、20、30 g, 3 个葡萄糖添加量试验按周期依次进行, 每组葡萄糖添加量试验持续 15 d。采用 3 种不同粒径的沸石作为填充基质: 2~4 mm (细粒径)、4~8 mm (中粒径) 和 8~16 mm (粗粒径), 共设置 5 个基质级配粒径水平; 其中, 1~3 号装置中, 分别均匀填充 90 cm 高的细粒径、中粒径、粗粒径沸石, 4 号装置则采用正粒径级配顺序等厚填充, 即自上而下填充细、中、粗粒径沸石高度各 30 cm, 在 5 号装置中进行反粒径级配等厚填充, 即自上而下填充粗、中、细粒径沸石高度各 30 cm。每个基质级配粒径共设 3 个重复, 每组试验共计 15 个装置。

试验装置 (图 1) 有机玻璃管高 100 cm、内径为 20 cm, 顶部布水区高 5 cm, 底部填充 5 cm 深的鹅卵石以保证正常排水, 中间 90 cm 为有效试验高度, 鹅卵石与上层基质之间用 10 目/英寸的不锈钢丝网隔开, 在柱体距离底部 5 cm 处两侧分别留有取样口和出水口, 出水口与溢流管连接。

试验于 2020 年 10—12 月进行, 选择耐寒抗冻石菖蒲作为净化植物, 每个装置各种植 1 株。试验开始前用无氮清水清洁装置。由蠕动泵控制湿地连续进水,

进水量为 $10 \text{ mL}/\text{min}$, 柱体内水位恒高于顶部基质上表面 3 cm。系统进水采用人工配置的生活污水, 氮源采用硫酸铵和硝酸钾, 试验进水中葡萄糖、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、COD 质量浓度见表 1, 系统进水依据张晓雨等^[19]所用污水的水质配置。采用食品级葡萄糖作为外加碳源, 参考 Srivastava 等^[20]研究, 选择在体积为 31.4 L 进水桶中添加 10、20、30 g (质量浓度为 318、637、955 mg/L) 葡萄糖作为碳源, 提前配置进水溶液。在 3 个葡萄糖添加量试验中, 氮质量浓度差异较小可忽略不计, 仅葡萄糖添加量不同。另外, 让装置在不添加葡萄糖的情况下运行 9 d, 用作与添加葡萄糖装置对比的空白对照组。

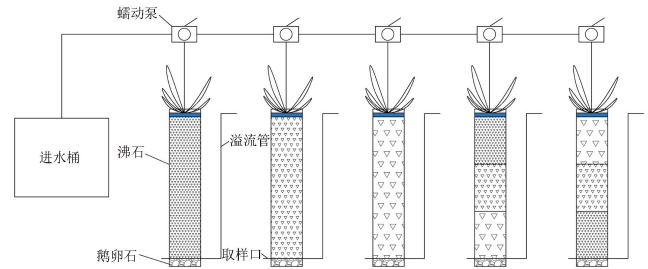


图 1 试验装置

Fig.1 Diagram of the experiment setup

表 1 试验进水水质

Tab.1 Concentration of the influent in experiment

周期	葡萄糖添加量/g	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg L^{-1})	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg L^{-1})	TN/ (mg L^{-1})	COD/ (mg L^{-1})
第 1	10	15 ± 1.7	5 ± 1.4	20 ± 1.6	85.27
第 2	20	15 ± 2.6	5 ± 2.4	20 ± 3.3	117.65
第 3	30	15 ± 1.4	5 ± 1.4	20 ± 2.2	153.84

每个试验进行 15 d, 前 5 天每天在各装置的下层取样口和进水口各取样 1 个, 5 d 后每 2 天取样 1 次, 故每次总共取样 6 个。每次取样后及时测定样品中的 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度, 其中各指标的检测方法见表 2。

表 2 试验测定样品检测方法

Tab.2 Sample testing methods in experiment

检测指标	检测方法	检测仪器
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	纳氏试剂光度法	AOE UV-1000 分光光度计
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	紫外分光光度法	AOE UV-1000 分光光度计
TN	过硫酸钾氧化紫外分光光度法	AOE UV-1000 分光光度计 华泰不锈钢压力蒸汽灭菌器
DO	/	便携式溶氧仪
pH 值	/	雷磁 pH 计

人工湿地的水力停留时间 (HRT) 计算式为:

$$HRT = V/Q, \quad (1)$$

式中: V 为各组人工湿地的有效体积 (L); Q 为进水量 (L/h)。5 组人工湿地试验前后的 HRT 计算结果见表 3。

表 3 试验前后 5 组人工湿地装置 HRT

Tab.3 HRT in five vertical subsurface flow constructed wetlands

试验装置	试验前		试验后	
	V/L	HRT/h	V/L	HRT/h
	细粒径	9.891	16.5	8.252
中粒径	10.004	16.7	9.015	15.0
粗粒径	10.597	17.7	9.806	16.3
正级配	9.863	16.4	9.156	15.3
反级配	9.524	15.9	9.156	15.3

不同基质填充人工湿地装置中孔隙度减小占比 θ (%) 计算式为:

$$\theta = \frac{\phi_0 - \phi}{\phi_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: ϕ_0 和 ϕ 分别为试验前和试验后装置的孔隙度。

1.3 间歇曝气试验

基于最佳葡萄糖添加量与基质级配粒径选择试验所得垂直潜流人工湿地除氮的最佳条件,即采用均匀填充细粒径沸石、添加 10 g 葡萄糖作为外加碳源的试验条件,开展间歇曝气试验。试验设置 5 个高 85 cm,内径为 18 cm 的有机玻璃柱。5 个装置内均填充 60 cm 高、粒径为 2~4 mm 的沸石,顶部布水区高度为 20 cm,底部填充 5 cm 深度的鹅卵石。增设人工曝气装置,曝气位置位于基质顶部,用气体流量计来控制进气量,进气量为 0.12 L/min,气水比为 8:1。曝气周期为 24 h,装置 1—装置 5 曝气时间分别为 0、2、4、6、8 h,试验同时进行,具体工况见表 4。在柱体距离底部 5 cm 处二侧分别留有取样口和出水口,出水口与溢流管连接。

表 4 试验工况

Tab.4 Experiment conditions

装置编号	运行周期/h	曝气时间/h
1	24	0
2	24	2
3	24	4
4	24	6
5	24	8

试验于 2021 年 7—9 月进行,选择美人蕉作为净化植物,每个装置各种植 1 株。采用蠕动泵控制湿地连续进水,进水量为 15 mL/min,柱体内水位恒高于顶部基质上表面 10 cm。采用人工配置生活污水作为湿地进水,氮源采用硫酸铵和硝酸钾,水质指标见表 5。

表 5 进水水质

Tab.5 Water quality of the influent

葡萄糖/g	NH ₄ ⁺ -N/(mg L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/(mg L ⁻¹)	TN/(mg L ⁻¹)	COD/(mg L ⁻¹)
10	34~37	11~15	40~47	85.27

本次试验进行 40 d,前 10 天内每 2 天在各装置的下层取样口和进水口各取样 1 次,后 30 天每 3 天取样 1 次,每次取样 6 个。取样后及时对样品进行检测,测定水样中氮素、DO 质量浓度和 pH 值,其中

各指标的检测方法见表 2。

不同人工湿地装置中 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 的去除率 μ (%) 计算式为:

$$\mu = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: C_0 和 C 分别为进水口和出水口的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN 质量浓度 (mg/L)。

2 结果与分析

2.1 葡萄糖添加量与基质级配粒径对垂直潜流人工湿地除氮效果影响

2.1.1 NH₄⁺-N 去除率

图 2 为不同葡萄糖添加量及不同基质粒径级配下 NH₄⁺-N 去除率。由图 2 可知,装置整体在运行第 1、第 2 天时 NH₄⁺-N 去除率较高,最高可达 96.4%;在第 2 天后呈下降趋势,10 g 葡萄糖添加量装置的 NH₄⁺-N 去除率最终稳定在 15%~40%;20、30 g 葡萄糖添加量的装置对 NH₄⁺-N 的去除率分别稳定在 10%~20%、15% 以下。对比图 2 (d) 可知,添加葡萄糖的装置对 NH₄⁺-N 去除率均优于不添加葡萄糖的空白装置,10 g 葡萄糖添加量装置的 NH₄⁺-N 平均去除率整体高于 20、30 g 葡萄糖添加量装置,虽然 20、30 g 葡萄糖添加量的人工湿地装置在运行初期 NH₄⁺-N 去除率较高,但在装置持续运行过程中其去除率明显降低,NH₄⁺-N 平均去除率远低于 10 g 葡萄糖添加量装置。整体上,葡萄糖添加量为 10 g 时,细粒径与中粒径基质填充的试验装置中 NH₄⁺-N 平均去除率较高,均在 50% 以上,其次正级配与反级配基质填充的装置中,二者差异较小,而粗粒径基质填充的装置中 NH₄⁺-N 去除效果最差。

2.1.2 NO₃⁻-N 去除率

图 3 为不同葡萄糖添加量及不同基质粒径级配下 NO₃⁻-N 去除率。由图 3 可知,各组装置的 NO₃⁻-N 去除率在运行初期均下降明显,有的甚至出现了 NO₃⁻-N 负去除率,即装置内生成的 NO₃⁻-N 要多于装置对 NO₃⁻-N 的去除量,随后在第 3—第 5 天,各装置对 NO₃⁻-N 的去除率波动回升。

由图 3 (d) 可知,添加葡萄糖的装置对 NO₃⁻-N 的去除率明显高于不添加葡萄糖的空白装置,因此添加葡萄糖可提高 NO₃⁻-N 的去除率。与 20、30 g 葡萄糖添加量装置相比,10 g 葡萄糖添加量装置在前期对 NO₃⁻-N 的去除率较低,除了细粒径基质填充的装置以外,其他几组在第 2—第 4 天对 NO₃⁻-N 的去除率均为负数,但在第 4 天之后其去除率开始升高,并在第 7 天显著提升。而 20、30 g 葡萄糖添加量装置在前期对 NO₃⁻-N 的去除率较高,在运行一段时间之后,

各组装置对 NO_3^- -N 的去除率大多在 20% 以下，只在短期内有一定效果。随着装置运行，10 g 葡萄糖添加量装置对 NO_3^- -N 的去除率逐渐超越其他装置，且显著高于 20、30 g 葡萄糖添加量装置。对比 5 组不同粒径基质填充装置，发现细粒径基质填充的装置在 3

种不同葡萄糖添加量时对 NO_3^- -N 的去除效果均为最佳，其中 10 g 葡萄糖添加量、细粒径基质填充的装置在第 15 天对 NO_3^- -N 的去除率最高为 98.1%，对 NO_3^- -N 的平均去除率也达到了 60% 左右，去除效果要优于其他装置。

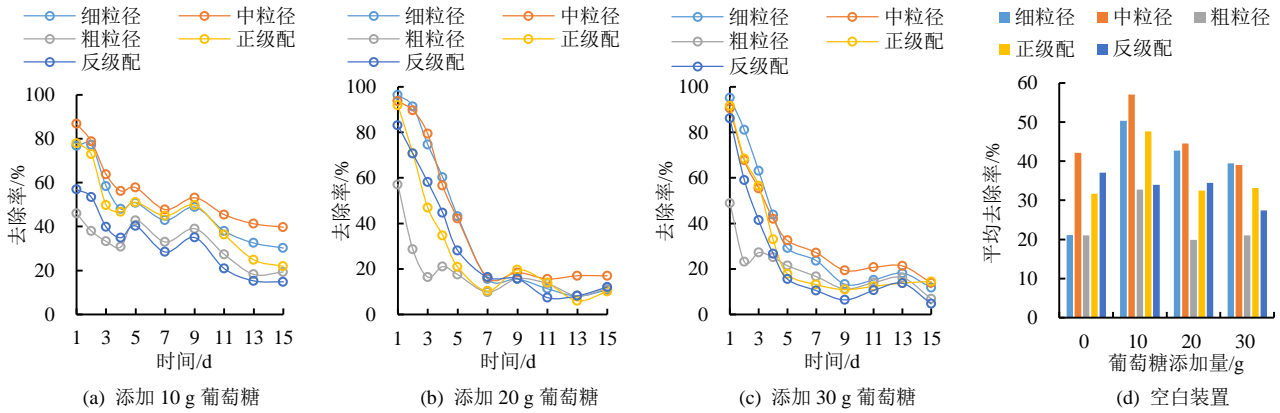


图 2 不同葡萄糖添加量及不同基质粒径级配下 NH_4^+ -N 去除率

Fig.2 NH_4^+ -N removal under different glucose addition and matrix particle size gradation

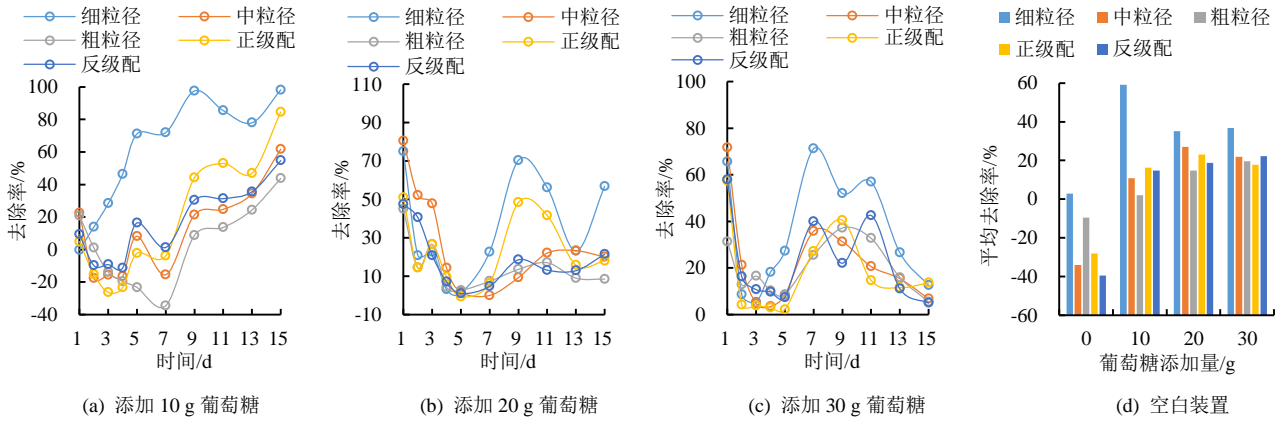


图 3 不同葡萄糖添加量及不同基质粒径级配下 NO_3^- -N 去除率

Fig.3 NO_3^- -N removal under different glucose addition and matrix particle size gradation

2.1.3 TN 去除率

图 4 为不同葡萄糖添加量及不同基质粒径级配下 TN 去除率。由图 4 可知，各装置在运行第 1 天对 TN 的去除率均较高，但在运行初期其去除率均下降，其中，10 g 葡萄糖添加量装置对 TN 的去除率在下降至第 4 天时有短暂的上升期，随后各装置 TN 去除率进入稳定期，在第 5—第 15 天内平稳波动。由图 4 (d) 可知，添加葡萄糖的装置对 TN 去除率明显高于不添加葡萄糖的空白装置，而与 10 g 葡萄糖添加量装置相比，20、30 g 葡萄糖添加量装置对 TN 的去除率整体较低；基质粒径越小的装置其 TN 去除率越高，正级配与反级配基质填充的装置中 TN 去除率虽然高于粗粒径基质填充的装置，但与细粒径基质填充的装置相比其去除效果较差。10 g 葡萄糖添加量、细粒径基质填充的装置对 TN 的去除率最高，平均达到 50%，最终也维持在 42% 左右。

试验在第 11 天左右进入稳定运行期，氮素去除

率变化稳定，以相同量葡萄糖作为外加碳源的各组试验中，细粒径基质填充的装置整体除氮效果较好；在相同粒径填充装置中，添加 10 g 葡萄糖装置的 NH_4^+ -N 整体去除效果较好；而在葡萄糖添加量分别为 10、20、30 g 时，对比分析不同粒径级配基质填充装置的除氮效果发现，10 g 葡萄糖添加量、细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地装置除氮效率最好。此研究结果可应用于对人工湿地除氮试验的改良。

2.1.4 孔隙度变化

试验前后各装置的孔隙度变化如表 6 所示。由表 6 可知，各装置的孔隙度均减小，其减小程度表现为细粒径>中粒径>粗粒径>正级配>反级配，可见均匀粒径基质填充的装置中，基质粒径越小孔隙度减小程度越大，且差异明显，细粒径基质孔隙度减少量与减少占比均最大，分别达到 0.058、16.57%；而正级配与反级配基质填充的装置孔隙度减少量与减少占比均低于均匀粒径基质填充的装置，其中正级配基质

填充的装置孔隙度减小程度略低于粗粒径基质填充的装置，反级配基质孔隙度减少量与减少占比明显低

于正级配基质，仅为 0.013、3.86%。

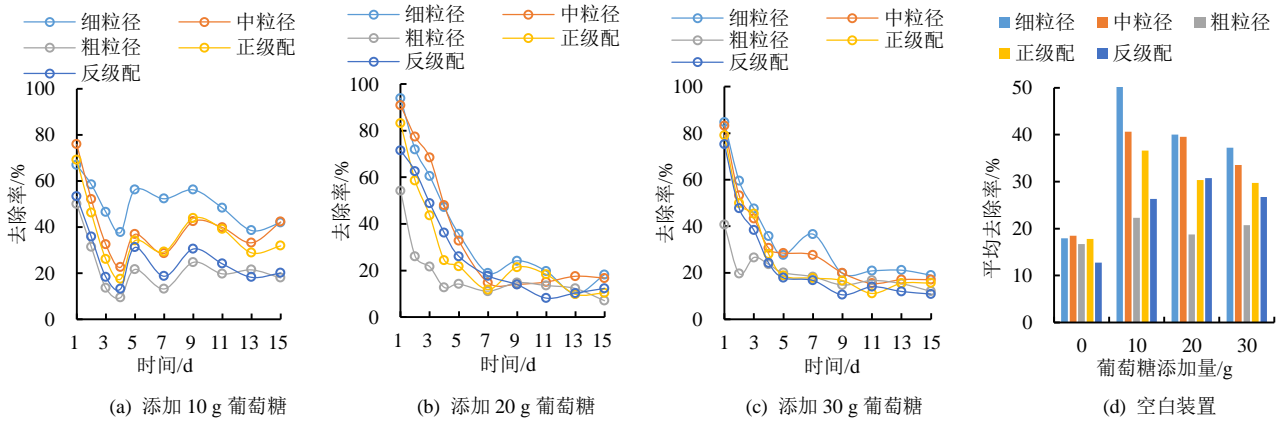


图 4 不同葡萄糖添加量及基质粒径级配下 TN 去除率

Fig.4 TN removal under different glucose addition and matrix particle size gradation

表 6 试验前后基质孔隙度变化

Tab 6 Porosity changes of substrate before and after the experiments

指标	细粒径	中粒径	粗粒径	正级配	反级配
试验前孔隙度	0.350	0.354	0.375	0.349	0.337
试验后孔隙度	0.292	0.319	0.347	0.324	0.324
孔隙度减小量	0.058	0.045	0.028	0.026	0.013
孔隙度减小占比θ/%	16.57	12.71	7.49	7.45	3.86

2.2 间歇曝气试验

2.2.1 DO 及 pH 值变化

在添加 10 g 葡萄糖碳源的细粒径沸石基质填充垂直潜流人工湿地中，设置 5 组不同曝气工况(表 4)，各组装置中出水口 DO 质量浓度及 pH 值变化见图 5。

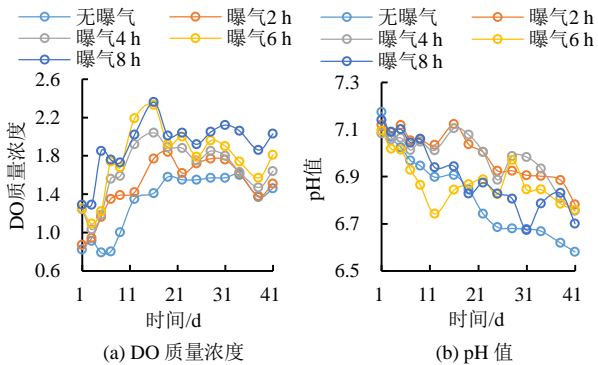


图 5 人工湿地在不同曝气状态下 DO 质量浓度及 pH 值

Fig.5 Changes of DO and pH in artificial wetlands under different aeration states

由图 5 (a) 可知，各组装置 DO 质量浓度随时间整体呈上升趋势，DO 质量浓度提升幅度最大达到 1.07 mg/L，试验运行过程中 DO 质量浓度波动变化。通常认为适于硝化反应的 DO 质量浓度应高于 2 mg/L，硝化反应发生的最低 DO 质量浓度为 0.2 mg/L^[21]。DO 质量浓度低于 0.2 mg/L 处于厌氧状态。由图 5(a) 可知，5 个装置的初始含氧量均高于硝化反应的最低 DO 质量浓度要求；DO 质量浓度高于 2 mg/L 时属于好氧状态，曝气 4、6、8 h 的装置都出现过 DO 质量

浓度高于 2 mg/L 的情况，其中曝气 4 h 与曝气 6 h 的装置此类情况出现较少，曝气 8 h 的装置 DO 质量浓度多次高于 2 mg/L。

由图 5 (b) 可知，各装置的初始 pH 值均略高于 7，整体呈下降趋势，在后期装置出水口 pH 值均在 7 以下，运行期间，pH 值有较长时间稳定在 7 左右。

2.2.2 NH₄⁺-N 去除率

5 组垂直潜流人工湿地在不同曝气条件下 NH₄⁺-N 去除率随时间变化见图 6 (a)。由图 6 (a) 可知，添加曝气设备的装置对 NH₄⁺-N 的去除率明显高于无曝气设备的装置，最终去除率和平均去除率均稳定在 90% 以上，各装置对 NH₄⁺-N 的去除率整体变化稳定。对于添加 10 g 葡萄糖、细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地装置来说，与曝气 2 h 装置相比，曝气 4、6、8 h 装置对 NH₄⁺-N 去除率的提升效果更显著，三者的 NH₄⁺-N 平均去除率分别达到 98.8%、99.1%、99.4%，差异极小。

2.2.3 NO₃⁻-N 去除率

5 组垂直潜流人工湿地在不同曝气状态下对 NO₃⁻-N 的去除率见图 6 (b)。由图 6 (b) 可知，各装置在运行初期对 NO₃⁻-N 的去除率均较高，第 2 天出现剧烈波动，随后呈较为平缓的波动下降趋势。无曝气、曝气 2、4、6 h 的 10 g 葡萄糖添加量、细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地装置在运行初期对 NO₃⁻-N 的去除率均在 60% 以上，而曝气 8 h、10 g 葡萄糖添加量、细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地装置 NO₃⁻-N 的去除率仅为 44.7%，各装置对 NO₃⁻-N 的去除率最终均稳定在 40% 左右。整体来看，随着曝气装置的运行，人工湿地内 DO 质量浓度增加，而 NO₃⁻-N 的去除率整体呈降低趋势，且曝气时间越短，垂直潜流人工湿地装置 NO₃⁻-N 去除率越高。

2.2.4 TN 去除率

5 组曝气时间不同的垂直潜流人工湿地对 TN 的去除率见图 6 (c)。TN 的去除需要硝化反应和反硝化反应共同作用完成, 由图 6 (c) 可知, 与无曝气设备的装置相比, 添加曝气设备的装置 TN 去除率均较高。无曝气设备的 10 g 葡萄糖添加量、细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地装置 TN 去除率稳定在

75% 左右, 平均去除率为 75.6%; 曝气 4 h、10 g 葡萄糖添加量、细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地装置 TN 平均去除率最高, 达到 86.9%; 与无曝气设备的 10 g 葡萄糖添加量、细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地装置相比, 曝气 4 h 的垂直潜流人工湿地 TN 平均去除率提高了 11.3%, 提升效果显著。

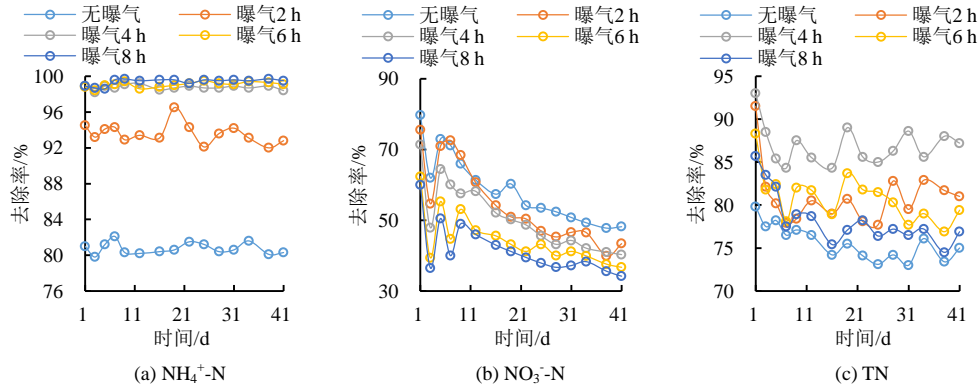


图 6 不同曝气条件下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 TN 去除率

Fig.6 Changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN removal under different aeration conditions

3 讨论

本研究表明, 细粒径填充基质的垂直潜流人工湿地除氮效果最佳, 这与赵林丽等^[22]研究结论相同, 但另有研究^[8]表明, 反级配基质填充方式可提升人工湿地除氮效果, 本研究同时考虑基质粒径与级配, 在对比 5 种不同粒径级配基质填充 (细粒径、中粒径、粗粒径、正级配、反级配填充的装置) 的人工湿地后发现, 细粒径基质对氮素去除效果最佳, 这可能是因为人工湿地基质粒径越小, 其与污水接触面积越大, 处理越充分。并且粒径较小的基质也会生成适宜反硝化细菌及氨氧化细菌生存的环境^[7], 提供更多能够进行脱氮反应的点位, 提高氮素去除率。与细粒径基质填充的装置相比, 正级配与反级配基质填充的装置粒径更大, 去除效果较差。另外, 本研究表明, 正级配、反级配基质装填方式对人工湿地孔隙度保持效果最好, 其中反级配基质孔隙度减少程度低于正级配基质, 这与葛秋易等^[23]研究结果相同, 其原因可能与装置运行过程中生成的生物膜有关。正级配基质因表层基质粒径较小, 微生物附着较多, 且装置表层含氧量高, 较多的有机物在表层发生反应, 生成更多生物膜, 使得孔隙度减少程度更大。反级配基质表层基质粒径较大, 表层微生物较少, 只能拦截少量有机物生成生物膜, 而进入中下层的有机物, 由于中下层氧气量低, 生成的生物膜较少, 总体孔隙度减小程度较低, 更有利于孔隙度保持^[24]。

本研究发现, 垂直潜流人工湿地添加葡萄糖作为外加碳源可促进氮素去除, 其中, 添加葡萄糖的各

装置 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率均明显高于不添加葡萄糖的装置, 这与 Lu 等^[25]的研究结论一致, 以葡萄糖作外加碳源可为脱氮反应提供电子供体, 并提高人工湿地中真菌反硝化能力, 促进氮素去除^[26]。装置运行初期, 各装置 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率均急速降低至负数, 这可能是因为装置初期 DO 质量浓度较高, 有利于硝化反应去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 同时生成了大量的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 故 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率在前期呈下降趋势; 但装置在运行过程中持续进水, 导致 DO 得不到有效补给, DO 质量浓度降低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率下降^[27], 硝化反应生成的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 减少, 同时反硝化作用在厌氧环境下消耗 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率上升。同理, 各装置的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率随装置运行呈降低趋势也可能是因为 DO 质量浓度降低。本研究中 10 g 葡萄糖添加量装置的氮素去除率要高于 20、30 g 葡萄糖添加量装置, 这与蒲艾平等^[28]的研究结果相同, 当葡萄糖添加过多时, 过剩的葡萄糖导致细菌滋生, 细菌附着在基质表面, 基质颗粒与污水接触面积减小^[29], 理论上 HRT 也相对减少, 从而影响到氮素去除效果。

间歇曝气可以在曝气期间提高人工湿地中的 DO 质量浓度, 并在曝气间隔期提供厌氧环境^[30], 合理控制间歇曝气时间可提升人工湿地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TN 去除效果^[17], 这与本研究结果一致。而间歇曝气装置导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率的降低, 这与姜应和等^[31]研究结果相同, 曝气使得 DO 质量浓度增加进而破坏人工湿地的反硝化反应环境, 影响 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除, 所以随着装置的曝气时间增加, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率逐渐降低。与前人^[13-14]研究不同的是, 本研究提前选择脱氮效果最佳的

沸石基质粒径级配与葡萄糖碳源添加量,在此基础上进行间歇曝气试验,研究碳源添加量、基质粒径级配以及间歇曝气时间多因素对垂直潜流人工湿地氮素去除率的影响,试验结果实用性更强。

4 结论

1) 葡萄糖作为外加碳源可提升垂直潜流人工湿地 TN 去除率,5 种不同级配粒径基质填充的垂直流人工湿地在添加 10 g 葡萄糖作为碳源时 TN 的去除率最优。

2) 在添加等量葡萄糖时,细粒径基质填充的垂直潜流人工湿地装置 TN 去除效果最佳。

3) 间歇曝气可提升垂直潜流人工湿地的 TN 去除率,在相同级配粒径基质添加相同葡萄糖碳源时,曝气 4 h 的装置 TN 去除率最高。

4) 碳源添加量、基质级配粒径以及间歇曝气时间对垂直潜流人工湿地 TN 去除均有影响,10 g 葡萄糖添加量、细粒径沸石基质填充的垂直潜流人工湿地装置在曝气时间为 4 h 时, TN 的平均去除率最高,达到 86.9%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- 杨文焕, 缪晨霄, 王智超, 等. 人工浮岛种植水生植物对包头南海湿地水质净化效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 122-128.
YANG Wenhuan, MIAO Chenxiao, WANG Zhichao, et al. Effect of artificial floating island planting aquatic plants on the purification of water quality in Baotou Nanhai wetland[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 122-128.
- 刘寿涛, 杨蕊嘉, 何钟响, 等. 灌溉水湿地净化系统中植物对镉的去除效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 47-54.
LIU Shoutao, YANG Ruijia, HE Zhongxiang, et al. Effect of plant pond and constructed wetland system on irrigation water purification and rice cadmium control[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(10): 47-54.
- KULSHRESHTHA N M, VERMA V, SOTI A, et al. Exploring the contribution of plant species in the performance of constructed wetlands for domestic wastewater treatment[J]. Bioresource Technology Reports, 2022, 18: 101 038.
- ZHANG Yan, LIU Xuelan, FU Chunyan, et al. Effect of Fe²⁺ addition on chemical oxygen demand and nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. Chemosphere, 2019, 220: 259-265.
- 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1 489-1 498.
CHENG Shuiping, WANG Yueyuan, WU Juan. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1 489-1 498.
- 杨金辉, 胡韵爽, 王向余, 等. 植物-基质组合对农田退水的净化效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 79-85.
YANG Jinhui, HU Yunshuang, WANG Xiangyu, et al. The efficacy of plants and their growing matrix in improving purification of farmland receding water in constructed wetlands[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 79-85.
- 马江森, 马锐, 卓亿元, 等. 基质粒径与排空时间对潮汐流人工湿地运行效能的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(5): 1 430-1 440.
MA Jiagsen, MA Rui, ZHUO Yiyuan, et al. Effect of substrate size and drained time on the treatment performance of tidal flow constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(5): 1 430-1 440.
- 武俊梅, 张翔凌, 王荣, 等. 垂直流人工湿地系统基质优化级配研究[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1 227-1 232.
WU Junmei, ZHANG Xiangling, WANG Rong, et al. Study on optimization gradation of substrates in vertical flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1 227-1 232.
- 郝益婷, 高峰, 马欢欢, 等. 碳源对蚯蚓人工湿地净化养殖废水的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 117-122, 144.
HAO Yiting, GAO Feng, MA Huanhuan, et al. Improving wastewater-treatment wetlands by exogenous carbon earthworms[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 117-122, 144.
- 刘文莉, 张崇邦, 管铭, 等. 不同植物种类、碳氮源供给和 pH 对人工湿地真菌反硝化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1 030-1 036.
LIU Wenli, ZHANG Chongbang, GUAN Ming, et al. Effects of plant species, carbon and nitrogen amendments and pH on potential fungal denitrification in constructed wetlands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(4): 1 030-1 036.
- WANG Xiaou, TIAN Yimei, ZHAO Xinhua, et al. Effects of aeration position on organics, nitrogen and phosphorus removal in combined oxidation pond-constructed wetland systems[J]. Bioresource Technology, 2015, 198: 7-15.
- ZHOU Xu, WANG Xuezhen, ZHANG Hai, et al. Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland[J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 269-275.
- LI Jia, ZHENG Lei, YE Changbing, et al. Evaluation of an intermittent-aeration constructed wetland for removing residual organics and nutrients from secondary effluent: Performance and microbial analysis[J]. Bioresource Technology, 2021, 329: 124 897.
- ZHAO Xin, WANG Ruigang, DONG Lu, et al. Simultaneous removal of nitrogen and dimethyl phthalate from low-carbon wastewaters by using intermittently-aerated constructed wetlands[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 404: 124 130.
- LI Linlin, ZHANG Jing, SHI Qiuyue, et al. Comparison of nitrogen removal performance and mechanism from low-polluted wastewater by constructed wetlands with two oxygen supply strategies: Tidal flow and intermittent aeration[J]. Chemosphere, 2023, 313: 137 364.
- FAN Jinlin, ZHANG Bo, ZHANG Jian, et al. Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands[J]. Bioresource Technology, 2013, 141: 117-122.
- 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 等. 间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 980-987.
WANG Jian, LI Huaizheng, ZHEN Baochong, et al. Effect of intermittent aeration on nitrogen removal efficiency in vertical subsurface flow constructed wetland[J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 980-987.
- 杜京京, 牛玉龙, 屈明祥, 等. 间歇曝气对垂直流人工湿地长期性能的影响[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(6): 751-755, 764.
DU Jingjing, NIU Yulong, QU Mingxiang, et al. Effects of intermittent aeration on long-term performance of vertical-flow constructed wetland[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(6): 751-755, 764.
- 张晓雨, 王福浩, 夏振刚, 等. 潮汐运行方式对人工湿地处理含盐废水脱氮性能的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(7): 107-117.
ZHANG Xiaoyu, WANG Fuhao, XIA Zhengang, et al. Effect of tidal operation mode on nitrification removal performance of constructed wetland treating saline wastewater[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(7): 107-117.

- [20] SRIVASTAVA P, DWIVEDI S, KUMAR N, et al. Performance assessment of aeration and radial oxygen loss assisted cathode based integrated constructed wetland-microbial fuel cell systems[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244: 1 178-1 182.
- [21] 王荣震, 张馨文, 冯成业, 等. 氧调控强化人工湿地脱氮性能的研究进展[J]. *水处理技术*, 2023, 49(4): 7-12, 19.
WANG Rongzhen, ZHANG Xinwen, FENG Chengye, et al. Research progress on enhancing nitrogen removal performance of constructed wetland by oxygen regulation[J]. *Technology of Water Treatment*, 2023, 49(4): 7-12, 19.
- [22] 赵林丽, 邵学新, 吴明, 等. 人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较[J]. *环境科学*, 2018, 39(9): 4 236-4 241.
ZHAO Linli, SHAO Xuexin, WU Ming, et al. Effects of different substrates and particle sizes on wastewater purification[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9): 4 236-4 241.
- [23] 葛秋易, 梁冬梅, 肖尊东. 基质优化人工湿地处理效率方法研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(22): 5-9.
- [24] 王荣, 贺锋, 肖蕾, 等. 不同级配基质方式下垂直流人工湿地净化效果及渗透性能研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5): 969-975.
WANG Rong, HE Feng, XIAO Lei, et al. Treatment efficiency and permeability of vertical flow constructed wetland in different gradation substrates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 969-975.
- [25] LU Songliu, HU Hongyi, SUN Yingxue, et al. Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(8): 1 036-1 043.
- [26] 程喆, 王晓昌, 张永梅, 等. 厨余发酵液与乙酸钠、葡萄糖脱氮性能的比较[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(1): 362-366.
CHENG Zhe, WANG Xiaochang, ZHANG Yongmei, et al. Comparison between fermentation liquid of food-waste and sodium acetate, glucose on denitrification potential[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(1): 362-366.
- [27] SAEED T, AL-MUYEED A, YADAV A K, et al. Influence of aeration, plants, electrodes, and pollutant loads on treatment performance of constructed wetlands: A comprehensive study with septage[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164 558.
- [28] 蒲艾平, 刘晓玲, 罗鸿兵, 等. 葡萄糖碳源对复合垂直流人工湿地甲烷排放的驱动影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(4): 719-727.
PU Aiping, LIU Xiaoling, LUO Hongbing, et al. Methane emissions driven by adding different concentrations of glucose as carbon source in an integrated vertical-flow constructed wetland[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(4): 719-727.
- [29] 汤梦涵, 刘霄, 谭欣. 外加碳源强化人工湿地脱氮研究进展[J]. *环境生态学*, 2023, 5(7): 107-114.
TANG Menghan, LIU Xiao, TAN Xin. Research progress on enhanced nitrogen removal in constructed wetlands by carbon source recharge[J]. *Environmental Ecology*, 2023(7): 107-114.
- [30] WU Haiming, FAN Jinlin, ZHANG Jian, et al. Decentralized domestic wastewater treatment using intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Impact of influent strengths[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 176: 163-168.
- [31] 姜应和, 李瑶, 张莹, 等. NO_3^- -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 1 898-1 903.
JIANG Yinghe, LI Yao, ZHANG Ying, et al. Effects of NO_3^- -N loading on the early-period efficiency of denitrification and carbon releasing in constructed wetland filled with bark[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(5): 1 898-1 903.

Optimizing nitrogen removal in vertical-flow constructed wetland: Effect of glucose addition and aeration duration

WANG Mingkuan^{1,2}, TONG Juxiu^{1,2*}, ZHANG Xia^{1,2}

(1. MOE (Ministry of Education) Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 Constructed wetlands are an effective technique for removing various organic and inorganic pollutants from wastewater. This study investigates the impact of glucose addition and intermittent aeration duration on nitrogen removal efficiency in vertical-flow constructed wetlands (VSFCWs) filled with substrates of varying particle sizes. 【Method】 The experiment was conducted in two phases. In the first phase, VSFCWs were tested with three glucose addition levels (10, 20, and 30 g) and five substrate types: fine particles (2 to 4 mm), medium particles, coarse particles, positive gradation, and negative gradation. Nitrogen removal efficiency was assessed for each treatment. In the second phase, the optimal combination of glucose addition and substrate type from the first phase was used to evaluate the effect of aeration durations ranging from to eight hours on nitrogen removal. 【Result】 When the glucose addition was the same, the VSFCWs filled with fine-grained matrix by particles with diameter of 2 to 4 mm was most effective in removing nitrogen. When the particle sizes were the same, adding 10 g of glucose was most effective in removing nitrogen. VSFCWs filled with matrix of positive and negative gradation reduced matrix porosity; VSFCW filled with the fine particle size gradation combined with a 10 g of glucose addition was most effective in nitrogen removal, with the total nitrogen removal rate reaching approximately 50%. The optimal aeration duration was 4 h, with its associated total nitrogen removal rate reaching 86.9%. 【Conclusion】 The most efficient nitrogen removal in the VSFCWs was achieved by using fine-sized zeolite substrate, 10 g of glucose addition, and a 4-hour aeration duration. These findings provide a reference for designing and operating constructed wetlands for enhancing nitrogen removal efficiency.

Key words: vertical subsurface flow constructed wetland; glucose addition; particle size grading; intermittent aeration

责任编辑: 白芳芳