

城市雨水管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 21. 019

# 碳氧调控生物滞留池对径流中氮污染物的去除效果

张瑞斌<sup>1,2,3</sup>, 刘清泉<sup>1,2</sup>, 徐强强<sup>1,2,3</sup>, 王乐阳<sup>1,2,3</sup>

(1. 江苏龙腾工程设计股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省雨污水资源化利用工程技术研究中心, 江苏 南京 210014; 3. 南京市生态河道工程技术研究中心, 江苏 南京 210014)

**摘 要:** 针对生物滞留池对地表径流中氮污染物去除效率差、不稳定的问题,以无调控生物滞留池为对照,构建碳源投加、曝气-碳源投加、淹没区-碳源投加以及曝气-淹没区-碳源投加4种改良生物滞留池,探讨其不同水力停留时间(HRT)下的脱氮效果。结果表明,单一曝气或者设置淹没区仅能保证稳定的厌氧或好氧环境,而同时曝气和设置淹没区可以稳定调控生物滞留池上层好氧和下层厌氧环境,曝气-淹没区-碳源投加组装置的上层和下层DO浓度分别为6.52~7.58、0.51~2.67 mg/L;增大HRT能够显著提高各生物滞留池对COD和NH<sub>3</sub>-N的去除效果,而曝气-碳源投加组和曝气-淹没区-碳源投加组装置对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和TN的去除效果先升高后降低,长时间曝气会导致脱氮效果下降;相较于无调控生物滞留池,4种调控生物滞留池对COD、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和TN的去除效果均有不同程度提升,尤其在HRT为4 h的条件下,曝气-淹没区-碳源投加组的脱氮效果最高,达到了86.85%。因此,通过碳氧调控改良生物滞留池对地表径流中氮污染物的削减有显著促进作用。

**关键词:** 生物滞留池; 碳氧调控; 地表径流; 脱氮

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0117-06

## Effect of Carbon and Oxygen Regulated Bioretention Cell on Removal of Nitrogen Pollutants in Surface Runoff

ZHANG Rui-bin<sup>1,2,3</sup>, LIU Qing-quan<sup>1,2</sup>, XU Qiang-qiang<sup>1,2,3</sup>, WANG Le-yang<sup>1,2,3</sup>

(1. Jiangsu Long-leaping Engineering Design Co. Ltd., Nanjing 210014, China; 2. Jiangsu Rain-water Recycling Engineering Technology Research Center, Nanjing 210014, China; 3. Nanjing Ecological River Engineering Technology Research Center, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** By comparing with the non-regulated bioretention cell, four kinds of modified bioretention cells including carbon source addition, aeration-carbon source addition, submerged zone-carbon source addition, and aeration-submerged zone-carbon source addition were constructed to explore their nitrogen removal performance under different hydraulic retention times (HRT), so as to solve the problem of bioretention cells' poor and unstable removal efficiency of nitrogen pollutants from surface runoff. The single aeration or the setting of submerged zone only ensured a stable anaerobic or aerobic environment, while the simultaneous aeration and submerged zone stably regulated the aerobic and anaerobic environment of the upper and lower layers of the bioretention cell. The DO of the upper and

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07208010); 南京市建设行业科技计划项目(KS2310)

lower layers of the bioretention cell with aeration, carbon source addition and submerged zone were 6.52–7.58 mg/L and 0.51–2.67 mg/L, respectively. The increase of HRT significantly improved the removal efficiencies of COD and  $\text{NH}_3\text{-N}$  in each bioretention cell. However, the removal efficiencies of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and TN in the aeration–carbon source addition group and the aeration–submerged zone–carbon source addition group firstly increased and then decreased, and the long-term aeration led to the decrease of nitrogen removal efficiency. Compared with the non-regulated bioretention cell, the efficiencies of the four regulated bioretention cells for COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and TN removal were all improved. In particular, the TN removal rate of the aeration–submerged zone–carbon source addition group reached the highest of 86.85% under the condition of HRT of 4 h. Therefore, the modification of bioretention cells through carbon and oxygen regulation can significantly promote the reduction of nitrogen pollutants in surface runoff.

**Key words:** bioretention cell; carbon and oxygen regulation; surface runoff; nitrogen removal

生物滞留池作为地表径流污染的主要处理设施,通过植物、填料以及微生物等作用去除污染物,但是去除效果不稳定,尤其是脱氮能力<sup>[1]</sup>。相关研究指出,硝化和反硝化过程是生物滞留池脱氮的主要限速过程<sup>[2]</sup>。目前大多数学者通过增加淹没区或者改进填料以及增加缓释碳源等方式对传统生物滞留池进行改良,取得了一定成效,但忽视了硝化过程同样是脱氮的限速因素,如何调控生物滞留池的好氧、厌氧分区,均衡硝化与反硝化过程,成为目前生物滞留池脱氮的研究热点。

笔者以无调控传统生物滞留池(BRC)为对照,通过构建添加缓释碳源生物滞留池(C-BRC)、淹没区+缓释碳源生物滞留池(SZ-C-BRC)、曝气+缓释碳源生物滞留池(A-C-BRC)以及曝气+淹没区+缓释碳源生物滞留池(A-SZ-C-BRC),分析4种生物滞留池在不同水力停留时间(HRT)下的脱氮效果,探讨碳氧调控对生物滞留池脱氮的影响,以为提升生物滞留池的脱氮能力提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

构建5个中试规模的生物滞留池,试验装置主体为PVC材质,直径为40 cm、高为110 cm,无调控生物滞留池(BRC)从下往上依次为排水层(15 cm)、填料层(60 cm)、对照层(10 cm)、种植层(15 cm)以及表面覆盖层(5 cm);而各改良生物滞留池的填料层均由沙土层(30 cm)和缓释碳层(30 cm)组成,对照层为曝气层,如图1所示。其中,BRC装置的填料层由南京本地土壤和河沙按2:8填充,对照层仅由

3~5 cm 碎石填充。而各改良生物滞留池中的缓释碳层由自制的缓释碳源材料填充,缓释碳源材料主要由渗透性能较强的大孔物质、结合材料、改性玉米芯和牡蛎粉均匀混合制成,并经湿地工程应用实践证明具备较好的污染物去除效果<sup>[3]</sup>;沙土层由南京本地土壤和河沙按2:8填充;曝气层由3~5 cm 碎石和微曝气管组成,兼具曝气和布水效果。种植层由南京本地土壤填充,表面种植美人蕉;覆盖层由土壤和小砾石填充,缓冲水力冲击;出水管位于排水层底部,通过弯管抬升距底部出水口45 cm的方式设置淹没区。

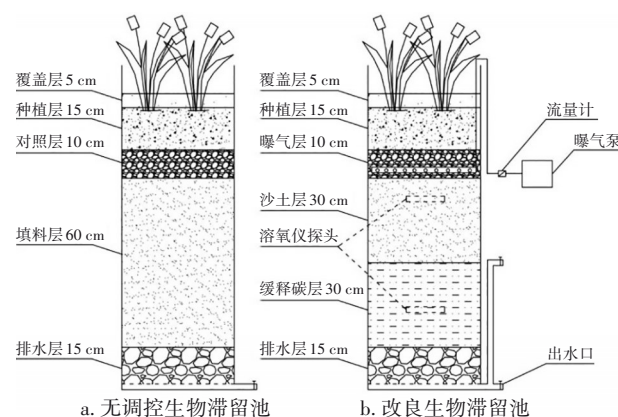


图1 生物滞留池装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of bioretention cell device

### 1.2 装置运行

试验地点为南京市江宁区,综合参照南京地区前人研究<sup>[4-5]</sup>以及海绵城市建设指南,确定模拟地表径流污染物含量和配水运行条件。模拟地表径流水质如下:COD为(70.73±2.03) mg/L,由葡萄糖提

供;  $\text{NH}_3\text{-N}$  为  $(4.00 \pm 0.09)$  mg/L, 由氯化铵提供;  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为  $(4.23 \pm 0.18)$  mg/L, 由硝酸钾提供; TN 为  $(8.05 \pm 0.11)$  mg/L。

设置 HRT 分别为 2、4、6 h, 进水水量为  $0.3 \text{ m}^3$ 。整个进水过程分为 2 个阶段:

第 1 个阶段为装置接种驯化阶段, 本研究采用自然接种方法, 使用自来水连续运行 2 周, 每天运行 2 h, 模拟装置中填料的稳定过程, 冲走附着在填料上的多余养分和不稳定有机物, 并使微生物稳定挂膜; 同时使用光纤式溶氧测量仪连接预埋 DO 敏感探头, 测定 BRC 装置上层 DO 浓度, 确定自然条件下生物滞留池的最高 DO 浓度(实测浓度范围为 3.50~7.95 mg/L), 并使用曝气泵和流量计调节曝气组装置的 DO 浓度, 使其上层 DO 浓度稳定在自然条件下的最高浓度值, 由此确定曝气调控装置中的曝气强度为  $0.08 \text{ L/min}$ 。

第 2 阶段为不同改良生物滞留池脱氮试验阶段, 进水为模拟地表径流, 装置间隔 5 d 运行一次, 分别在 HRT 为 2、4、6 h 条件下各运行 6 次, 共运行 3 个月, 每次试验运行开始后, 间隔 0.5 h 测定各装置上层和下层 DO 浓度一次, 采集底部出水水样一次, 测定出水 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和 TN 浓度(测定方法分别为重铬酸盐法、纳氏试剂分光光度法、分光光度法、碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法), 分析各生物滞留池在不同 HRT 条件下的脱氮效果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同生物滞留池中 DO 分布情况

不同 HRT 条件下各生物滞留池上层和下层的 DO 浓度如图 2 所示。不同 HRT 条件下, 各装置上层 DO 分布趋势相近, BRC、C-BRC 和 SZ-C-BRC 未曝气装置运行过程中 DO 浓度波动均较大, A-C-BRC 和 A-SZ-C-BRC 曝气装置运行过程中 DO 浓度波动均较小, 例如, 在 HRT 为 2 h 条件下, BRC、C-BRC 和 SZ-C-BRC 装置上层 DO 浓度分别为 3.45~7.82、3.64~7.45 和 3.54~7.14 mg/L, 而 A-C-BRC 和 A-SZ-C-BRC 装置上层 DO 浓度分别为 6.78~8.00、6.57~7.65 mg/L。从图 2(b)、(d) 和 (f) 可以看出, 不同 HRT 条件下, 设置淹没区的装置下层 DO 浓度均低于未设置淹没区的装置, 并且在多次运行过程中 DO 浓度波动较小, 而未设置淹没区的装置 DO 浓度波动较大。例如, 在 HRT 为 2 h 条件下, BRC、C-

BRC 和 A-C-BRC 装置下层 DO 浓度分别为 2.58~4.65、2.84~4.68 和 2.56~4.56 mg/L, 而 SZ-C-BRC 和 A-SZ-C-BRC 装置下层 DO 浓度分别为 0.87~1.49、0.85~1.58 mg/L。

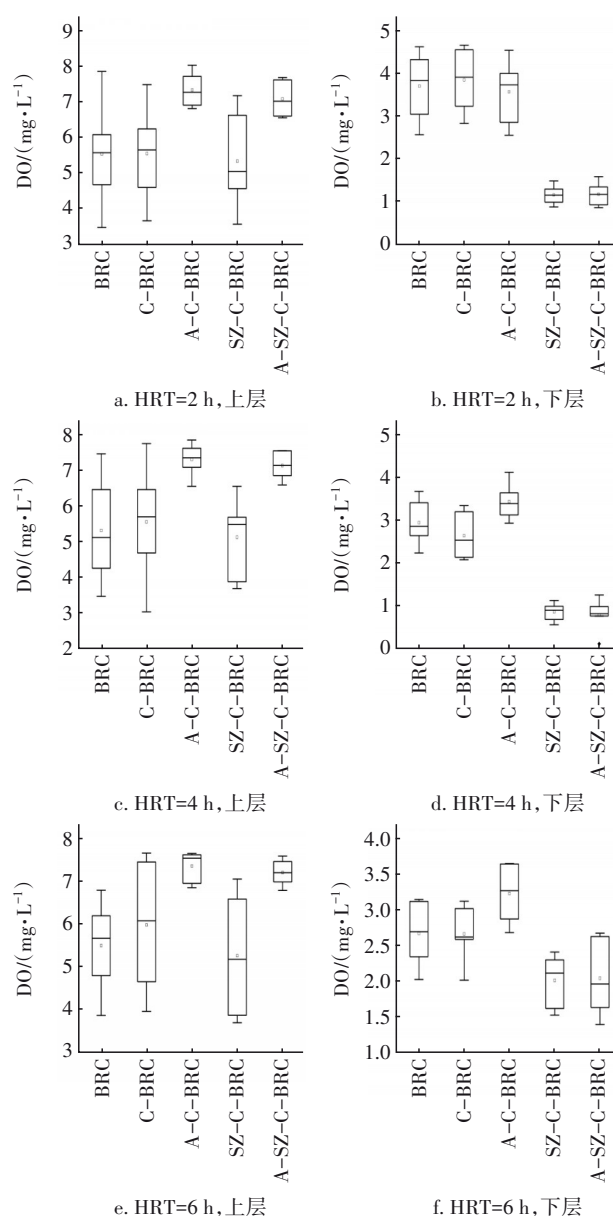


图2 不同 HRT 下生物滞留池上层和下层的 DO 浓度

Fig.2 DO concentration in upper and lower layers of bioretention cells at different HRTs

在不同 HRT 条件下, 各装置上层的 DO 浓度均高于下层, 尤其在有曝气调控装置中上层与下层 DO 浓度相差较大, 表明曝气和淹没区的设置对调控生物滞留池厌氧和好氧水平具有显著影响。同时发现, 随着装置运行 HRT 的增大, 无曝气装置下层 DO 浓度逐渐降低, 如在 HRT 为 2、4、6 h 条件下,

BRC装置下层DO浓度分别为2.58~4.65、2.24~3.65和2.03~3.12 mg/L,表明在长时间运行过程中,填料处于浸没状态,DO浓度逐渐降低,这与夏蒙蒙<sup>[6]</sup>的研究结果一致;而设有曝气调控装置下层DO浓度随运行HRT的增大而呈先降低后升高的趋势,如在HRT为2、4、6 h条件下,A-SZ-C-BRC装置下层DO浓度分别为0.85~1.58、0.76~1.25和1.39~2.68 mg/L,这可能是由于长时间曝气影响了下层DO分布。

## 2.2 不同生物滞留池对COD的去除效果

不同生物滞留池对COD的去除效果见图3。

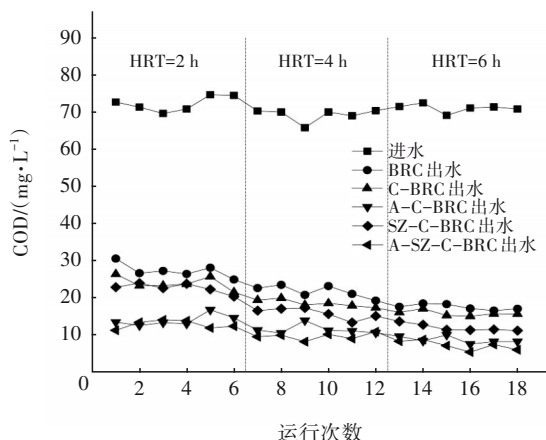


图3 生物滞留池对COD的去除效果

Fig.3 Removal of COD by bioretention cells

在HRT为2 h条件下,BRC、C-BRC、A-C-BRC、SZ-C-BRC、A-SZ-C-BRC对COD的平均去除率分别为62.22%、66.84%、80.76%、68.67%、82.23%;在HRT为4 h条件下,以上各生物滞留池对COD的平均去除率分别为68.66%、73.27%、83.48%、77.15%、86.18%;在HRT为6 h条件下,以上各生物滞留池对COD的平均去除率分别为75.40%、77.78%、87.83%、83.21%、89.97%。可见,各生物滞留池对COD的去除率均随着HRT的延长而增大。在不同HRT条件下,相较于BRC,4种调控生物滞留池对COD的去除效果均有所提升,其中,C-BRC、SZ-C-BRC装置对COD的去除效果提升较小,分别为3.17%~7.40%、10.38%~12.36%,而A-C-BRC、A-SZ-C-BRC设置曝气调控装置对COD的去除效果提升较大,分别为16.50%~29.81%和19.34%~32.27%。这表明,曝气调控对生物滞留池去除COD具有显著的提升效果,曝气为好氧微生物提供了稳定的好氧环境,提高了好氧微生物的活性及其对污

染物的降解效率。

## 2.3 不同生物滞留池对氨氮的去除效果

不同生物滞留池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果见图4。

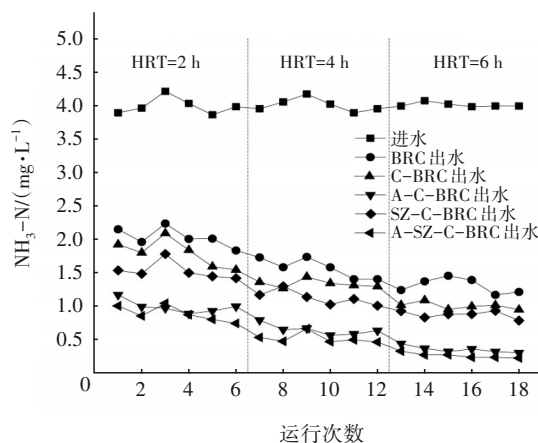


图4 生物滞留池对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果

Fig.4 Removal of  $\text{NH}_3\text{-N}$  by bioretention cells

在HRT为2 h条件下,BRC、C-BRC、A-C-BRC、SZ-C-BRC、A-SZ-C-BRC对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别为44.80%~54.00%、50.40%~61.25%、71.11%~78.36%、57.75%~62.85%、74.23%~79.24%,平均出水浓度分别为2.03、1.80、0.98、1.52、0.89 mg/L;在HRT为4 h条件下,以上各装置对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别为56.27%~64.50%、65.54%~68.72%、82.35%~86.24%、68.00%~74.54%、84.12%~88.28%,平均出水浓度分别为1.57、1.33、0.64、1.12、0.52 mg/L;在HRT为6 h条件下,以上各装置对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别为65.10%~70.73%、73.26%~76.34%、89.17%~92.57%、76.69%~80.35%、91.80%~94.40%,平均出水浓度分别为1.30、1.00、0.35、0.87、0.26 mg/L。可以看出,各装置对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均有较好的去除效果,在进水平均浓度为4.00 mg/L条件下,即使是BRC装置平均出水浓度最高也仅达到2.03 mg/L(HRT为2 h),基本达到了地表水Ⅴ类标准。与去除COD的趋势相似,各装置对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果也随HRT的增大而提升,例如,BRC装置在HRT为6 h条件下平均出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为1.30 mg/L,可达到地表水Ⅲ类标准。相较于BRC装置,C-BRC、A-C-BRC、SZ-C-BRC、A-SZ-C-BRC装置对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果均有所提升,其中,C-BRC、SZ-C-BRC对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果提升幅度相对较小(9.64%~12.05%、11.80%~25.87%),且SZ-C-BRC的提升效果高于C-BRC,可能是由于

与传统BRC相比,添加的缓释碳源对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 具有一定吸附效果;而曝气调控装置A-C-BRC、A-SZ-C-BRC对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果的提升显著(32.20%~54.07%、33.31%~58.51%),并且,多次运行过程中曝气调控装置出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度波动较小,可见,曝气调控提供的稳定DO环境显著促进了硝化过程。

## 2.4 不同生物滞留池对硝态氮的去除效果

不同生物滞留池对硝态氮的去除效果见图5。

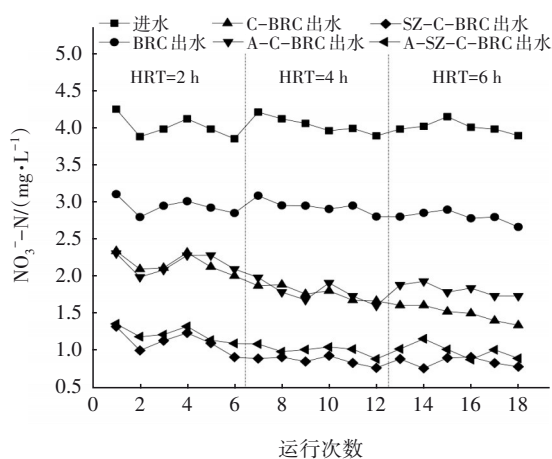


图5 生物滞留池对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效果

Fig.5 Removal of  $\text{NO}_3\text{-N}$  by bioretention cells

无调控生物滞留池BRC在各HRT(2、4、6 h)条件下对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效果均最差,平均去除率分别为26.67%、27.10%、30.01%,出水平均浓度为2.95、2.95、2.80 mg/L;与BRC装置相比,4种调控生物滞留池对硝态氮的去除效果均有提升,其中,添加缓释碳源的C-BRC、A-C-BRC装置对硝态氮的去除效果相近,平均去除率分别为45.94%和45.73%(HRT=2 h)、55.88%和55.76%(HRT=4 h)、62.51%和54.50%(HRT=6 h),去除率分别提升72.31%和71.52%(HRT=2 h)、106.22%和105.79%(HRT=4 h)、107.87%和81.22%(HRT=6 h);SZ-C-BRC与A-SZ-C-BRC对硝态氮的去除效果相近,平均去除率分别为72.09%和69.50%(HRT=2 h)、78.46%和74.96%(HRT=4 h)、78.75%和75.00%(HRT=6 h),去除率平均提升170.00%和160.67%(HRT=2 h)、189.57%和176.65%(HRT=4 h)、161.89%和149.42%(HRT=6 h)。可见,添加缓释碳源能够提高生物滞留池对硝态氮的去除效果,但是提升效果远低于同时添加缓释碳源和设置淹没区的装置。4种调控生物滞留池中,曝气的装置

在HRT为6 h条件下对硝态氮的去除效果均低于无曝气装置,例如,C-BRC、A-C-BRC对硝态氮的去除率分别为62.51%和54.50%,而SZ-C-BRC与A-SZ-C-BRC对硝态氮的去除率分别为78.75%和75.00%。可见,若曝气量和曝气时间控制不当,会抑制反硝化作用。

## 2.5 不同生物滞留池对总氮的去除效果

不同生物滞留池对TN的去除效果如图6所示。

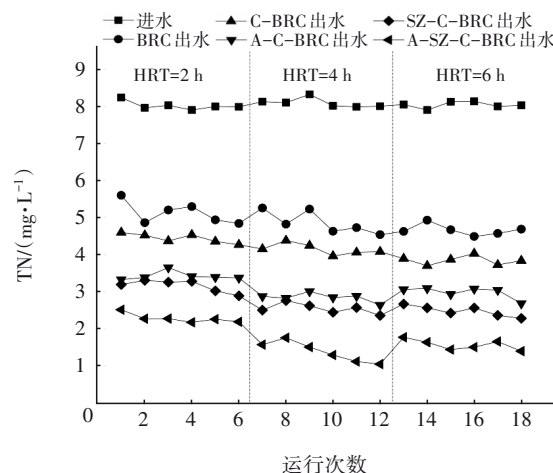


图6 生物滞留池对TN的去除效果

Fig.6 Removal of TN by bioretention cells

在不同HRT条件下,各生物滞留池对TN的去除效果差异显著,在HRT为2 h条件下,BRC、C-BRC、A-C-BRC、SZ-C-BRC、A-SZ-C-BRC对TN的去除率分别为36.09%、44.57%、57.27%、60.56%、71.52%;在HRT为4 h条件下,以上各装置对TN的去除率分别为39.85%、48.72%、64.79%、68.53%、82.89%;在HRT为6 h条件下,以上各装置对TN的去除率分别为41.95%、52.17%、62.89%、69.13%、80.44%。在不同HRT条件下,各装置的脱氮能力均为 $\text{BRC} < \text{C-BRC} < \text{A-C-BRC} < \text{SZ-C-BRC} < \text{A-SZ-C-BRC}$ 。与无调控生物滞留池相比,添加缓释碳源可以提高生物滞留池的脱氮效果,但提升幅度有限(19.01%~22.26%),添加缓释碳源结合单一曝气或者设置淹没区对生物滞留池脱氮能力也有较高提升效果,如A-C-BRC和SZ-C-BRC的脱氮提升效果分别为47.51%~62.61%、54.89%~71.97%;同时添加缓释碳源结合曝气以及淹没区设置,则可以显著提升生物滞留池的脱氮效果(79.49%~108.42%)。可见,同时控制生物滞留池上部稳定的好氧环境以及下层稳定的厌氧环境,结合缓释碳源的添加,促

进了生物滞留池中的硝化与反硝化过程,显著提升了总氮的去除效果。另一方面,与去除硝态氮的效果类似,A-C-BRC与A-SZ-C-BRC两个曝气调控的装置均在HRT为4 h时总氮去除率达到最高,总氮去除效果并没有随HRT的延长而持续增加,因此,在后续的研究中应该兼顾曝气时间与HRT的均衡,使污染物去除效果得到最大程度的优化。

### 3 结论

① 在装置运行过程中,随着填料的浸润,生物滞留池的DO浓度逐渐降低,无调控生物滞留池上层和下层DO浓度分别为3.45~7.82、2.03~4.65 mg/L,单一曝气或者设置淹没区仅能保证稳定的厌氧或好氧环境,同时曝气和设置淹没区可以稳定调控生物滞留池上层好氧和下层厌氧环境,A-SZ-C-BRC装置上层和下层DO浓度分别为6.52~7.58、0.51~2.67 mg/L。

② 增大HRT能够显著提高各生物滞留池对COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果,而对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和TN去除效果的影响各异,对无调控、碳源投加、曝气-碳源投加这3种生物滞留池装置去除 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN有提升效果,而对淹没区-碳源投加和曝气-淹没区-碳源投加两种生物滞留池装置的促进作用较小,而且长时间曝气会导致脱氮效果下降。

③ 相较于无调控生物滞留池,碳源投加、曝气-碳源投加、淹没区-碳源投加、曝气-淹没区-碳源投加4种调控生物滞留池对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN的去除效果均有提升,其中,对于COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ ,曝气-碳源投加、曝气-淹没区-碳源投加装置的去除效果提升明显;对于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和TN,淹没区-碳源投加、曝气-淹没区-碳源投加装置的去除效果提升显著;尤其在HRT为4 h条件下,曝气-淹没区-碳源投加装置的脱氮效果最高。

### 参考文献:

- [1] JIANG Y, YUAN Y P, PIZA H. A review of applicability and effectiveness of low impact development/green infrastructure practices in arid/semi-arid United States [J]. *Environments*, 2015, 2 (2): 221-249.
- [2] 王亚军, 耿冲冲, 许妍, 等. 不同强化手段对生物滞留池脱氮除磷性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(19): 77-82.  
WANG Yajun, GENG Chongchong, XU Yan, *et al.* Effect of different enhanced methods on efficiency of denitrification and phosphorus removal in bioretention cell [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36 (19): 77-82 (in Chinese).
- [3] 张瑞斌. 缓释碳源填料制备及其在人工湿地中的应用效果[J]. *中国环保产业*, 2021(7): 39-41.  
ZHANG Ruibin. Preparation of slow-release carbon source fillers and its application in constructed wetland [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2021 (7): 39-41 (in Chinese).
- [4] 张瑞斌, 潘卓兮, 奚道国, 等. 铝污泥填料改良生物滞留池对径流污染的削减效果[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(4): 756-762.  
ZHANG Ruibin, PAN Zhuoxi, XI Daoguo, *et al.* Effect of aluminum sludge filler improved bioretention tank on runoff pollutant reduction [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11 (4): 756-762 (in Chinese).
- [5] YOU Z Y, ZHANG L, PAN S Y, *et al.* Performance evaluation of modified bioretention systems with alkaline solid wastes for enhanced nutrient removal from stormwater runoff [J]. *Water Research*, 2019, 161: 61-73.
- [6] 夏蒙蒙. 土壤性质对生物滞留系统脱氮效果的影响研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.  
XIA Mengmeng. Study on Effect of Soil Properties on Nitrogen Removal of Bioretention System [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020 (in Chinese).

作者简介: 张瑞斌(1985- ), 男, 山东潍坊人, 博士, 高级工程师, 主要从事给排水及水生态修复规划设计工作。

E-mail: zhangruibin@lg-lg.com

收稿日期: 2022-01-15

修回日期: 2022-03-17

(编辑: 刘贵春)