

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220796

# 植物对氮素在生物滞留系统中迁移与累积的影响

王洪浩, 赵凡, 李京玲, 姚瑶, 薛恬鑫

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西太原 030024)

**摘要:** 为研究植物对氮素在生物滞留系统中迁移与累积的影响, 推动黄土分布区雨水生物滞留系统植被建设, 选取马蔺、萱草、八宝景天、金色麦冬和无植物构建5组生物滞留系统模拟装置, 探讨不同植物处理下氮素在填料中的迁移和各介质中的累积情况。结果表明, 试验期间植物氮素的累积量和植物生物量增加量关系密切, 均表现为八宝景天>马蔺>萱草>金色麦冬, 且植物吸收的氮素主要累积在植物的上部结构中; 5组生物滞留系统填料中 $\text{NH}_4^+$ -N的分布差异不显著且含量较低,  $\text{NH}_4^+$ -N主要在填料层上部通过吸附作用去除, 各系统对 $\text{NH}_4^+$ -N均有较好的去除效果; 植物对于填料中 $\text{NO}_3^-$ -N分布和 $\text{NO}_3^-$ -N在系统中的迁移影响显著, 相对于无植物组, 存在植物的系统可降低填料中 $\text{NO}_3^-$ -N含量, 进水前填料中 $\text{NO}_3^-$ -N含量越低 $\text{NO}_3^-$ -N出水浓度越低; 5种处理下TN平均去除率表现为马蔺(50.59%)>八宝景天(43.99%)>萱草(37.85%)>金色麦冬(30.51%)>无植物(26.09%)。

**关键词:** 生物滞留系统; 植物; 迁移; 累积; 氮素

**中图分类号:** TV213.9; X703; TU992

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0076-05

## 1 引言

城市化的快速发展造成了一系列水问题, 如水生态平衡失调、雨水径流污染、洪涝灾害增多等<sup>[1]</sup>。雨水生物滞留系统由于能实现水文削峰, 提高径流水质, 并提供美学和生态效益, 因此在全世界雨洪管理中应用广泛<sup>[2]</sup>。在海绵城市雨洪污染控制方面, 对于氮素已有很多研究, 然而由于氮素转化的复杂性和去除的不稳定性, 高效且稳定地去除氮素仍是目前雨水生物滞留系统要解决的难题之一。植物在雨水生物滞留系统中发挥着重要作用, 与未种植植物的生物滞留系统相比, 存在植物的系统表现出更好的氮、磷去除效果<sup>[3]</sup>。山西省的黄土具有明显的湿陷性特征<sup>[4]</sup>, 湿陷性黄土会影响植物、微生物的生长及氮素的去除效率<sup>[5]</sup>, 同时由于黄土分布区气象、植被、径流等条件的差异, 该地区氮素在生物滞留系统中的迁移累积可能有别于其他地区。且现阶段黄土分布区生物滞留系统的研究主要集中在填料改良和黄土入渗性能<sup>[6,7]</sup>, 忽视了不同植物处理对氮素在生

物滞留系统中迁移累积的影响。本文通过因地制宜选择合适的植物种类, 以山西省黄土和河沙作为填料, 研究不同植物处理下氮素在填料中的迁移和各介质中的累积情况, 探索降雨径流过程中氮的迁移转化机制和归宿途径, 结果有助于揭示生物滞留系统的脱氮机理, 并筛选出构建湿陷性黄土分布区海绵城市的优势植物。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验装置

依据《海绵城市建设技术指南》<sup>[8]</sup>设置雨水生物滞留系统各层厚度和填料配比(图1), 采用DN200的有机玻璃管自制10套生物滞留系统模拟装置。装置高为650 mm, 自上而下分别为积水区(150 mm)、填料层(400 mm)和排水层(100 mm), 底部排水口均为DN10的有机玻璃管。此外, 填料层为黄土和河沙以体积比6:4配成, 排水层由1~2 mm的粗砂和3~6 mm砾石构成。柱子的内壁经过磨砂处理, 以尽量减少优先流动的影响。选择山西省太原市道路两旁常见的马

**收稿日期:** 2022-04-20, **修回日期:** 2022-07-12

**基金项目:** 山西省自然基金项目(201901D111059); 国家自然科学基金青年基金项目(51409184)

**作者简介:** 王洪浩(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制与生态修复, E-mail: 1905804228@qq.com

**通讯作者:** 李京玲(1979-), 女, 博士、副教授, 研究方向为水污染控制与生态修复, E-mail: lijingling@tyut.edu.cn

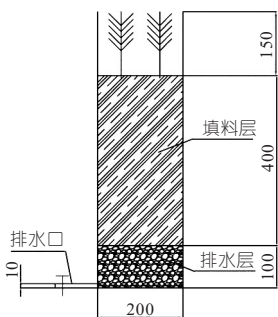


图 1 生物滞留系统结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of bioretention system structure

藓、萱草、八宝景天和金色麦冬 4 种草本植物作为供试植物,每个装置种植 4 株植物,同时设置无植物对照组,处理组和无植物对照组均设两组平行样。

## 2.2 试验方案

### 2.2.1 进水水量和水质

试验选取汇水面积与生物滞留池表面积之比为 10 : 1,暴雨重现期为 1 年,降雨历时为 60 min,根据太原市暴雨公式<sup>[9]</sup>求得试验模拟的径流量为 5.44 L。根据太原市典型道路雨水水质监测的相关统计结果<sup>[10]</sup>人工配制模拟雨水径流,水质指标与浓度见表 1。

表 1 模拟雨水径流水质

Tab. 1 Simulated rain-runoff water quality

项目	试剂	浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )
TSS	道路浮土	600
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NH <sub>4</sub> Cl	4.70±0.16
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	KNO <sub>3</sub>	5.57±0.14
TN		10.72±0.22

### 2.2.2 试验过程

2021 年 5 月完成装置的制作,在试验启动前,进行为期 4 周的自来水进水,需定期检查出水水质,使试验启动前出水水质保持稳定。试验开始后,每 7 d 一个周期进水 5.44 L,共进水 8 次。

### 2.2.3 样品采集及测定方法

(1)水样采集及分析方法。每次试验进水前采集进水水样,用储水桶在出水口收集试验出水,进水结束后采集水样同时测定出水体积;最后一次进水结束后,在系统排水落干期间利用 25 mL 的针头塑料注射器通过生物滞留系统装置采样点的橡胶堵头采集不同土壤深度的孔隙水样。TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用离子色谱仪测定,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度法测定。

(2)土样分析方法。土样 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用离子色谱仪测定,土样 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用靛酚蓝比色法测定。

(3)植物采集及分析方法。观察记录试验前后植物的地上结构形态和地下结构形态并测量株

高和根长;地上生物量和地下生物量采用烘干法测定;植物 TN 采用半微量凯氏定氮法测定。

## 2.3 计算方法

氮素去除率计算公式为:

$$\text{氮素去除率} = \frac{V_{\text{进水}} c_{\text{进水}} - V_{\text{出水}} c_{\text{出水}}}{V_{\text{进水}} c_{\text{进水}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $V_{\text{进水}}$  为进水体积,L; $V_{\text{出水}}$  为出水体积,L; $c_{\text{进水}}$  为进水氮素浓度,mg/L; $c_{\text{出水}}$  为出水氮素浓度,mg/L。

## 3 结果与分析

### 3.1 氮素在植物中的累积

不同植物处理下,各系统试验前后植物地下和地上氮素总量见图 2。由图 2 可知,在整个试验运行期间,不同植物的地下和地上部分均出现了一定程度上的氮素累积。4 种植物的氮素累积量由高到低依次为八宝景天>马蔺>萱草>金色麦冬,其中地上部分氮素累积量分别为 2.49、1.90、1.43、0.43 g/m<sup>2</sup>;地下部分氮素累积量分别为 0.45、0.71、0.96、0.37 g/m<sup>2</sup>。由试验结果可知,整个试验期间,各植物的地上部分氮素累积量大于地下,八宝景天和马蔺的地上部分氮素累积量占比最大,分别占其全部氮素累积量的 84.7%、72.9%。

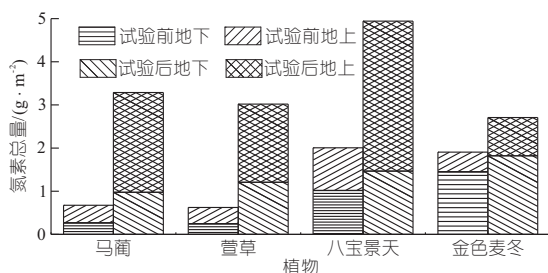


图 2 试验前后氮素在 4 种植物中的累积

Fig. 2 Nitrogen accumulation in 4 plants during experiment

表 2 为供试植物的生理指标。由表 2 可知,试验运行期间植物净增生物总量表现为八宝景天>马蔺>萱草>金色麦冬,对植物氮素累积量和植物净增生物总量进行线性回归分析,回归方程为  $y=0.0038x+0.7907$  ( $R^2=0.7734$ ),可看出试验期间植物氮素累积量与植物生物量增加量关系

表 2 供试植物的生理指标

Tab. 2 Physiological indexes of tested plants

植物	试验后根长/cm	植物地下净增生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	植物地上净增生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	植物净增生物总量/(g·m <sup>-2</sup> )
马蔺	37.83	194.04	288.90	482.94
萱草	15.11	145.02	112.81	257.83
八宝景天	16.62	106.70	500.76	607.46
金色麦冬	9.55	60.61	58.70	119.31

密切。从收割植物去除氮素的角度来看,植物上部结构生物量增长越多积累的氮素占比越大,越有利于通过收割植物去除氮素。

### 3.2 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在填料中的迁移和累积

#### 3.2.1 植物对填料中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积的影响

最后一次进水前,不同植物处理下填料中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  累积分布情况见图 3。图 3 中虚线表示第一次进水前填料中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的初始含量为 1.28 mg/kg。由图 3 可看出,不同植物填料层  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  沿深度变化范围为 0.42~0.96 mg/kg,不同植物填料层  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  分布无明显差异且含量较低。可能是由于负责硝化作用的微生物活性并不强烈依赖于植物<sup>[11]</sup>,且系统填料对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附作用及硝化作用<sup>[12]</sup>,使填料层吸附的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  大部分转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。随着生物滞留系统运行时间增加和环境温度升高,负责硝化作用的微生物数量增加和活性增强<sup>[13]</sup>,导致填料层更多的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  通过硝化作用转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,使最后一次进水前系统填料中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量低于试验前初始含量。

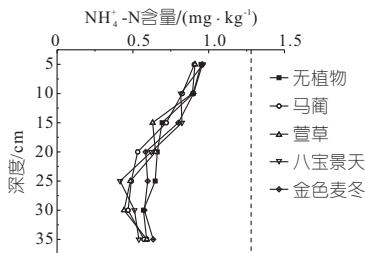


图 3 不同植物处理下填料中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的累积

Fig. 3 Accumulation of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in fillers under different plant treatments

#### 3.2.2 植物对进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 迁移的影响

在最后一次进水过程中,不同植物处理下进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度随填料深度的增加迁移变化情况见图 4。由图 4 可知,各系统进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为 4.70 mg/kg,各系统  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度随填料深度增加而降低,马蔺处理在填料层 40 cm 处的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为 0.98 mg/kg,其他处理在填料层

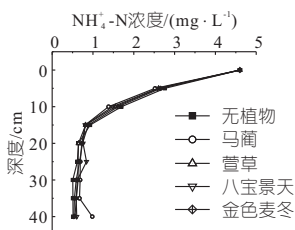


图 4 不同植物处理下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在系统中的迁移

Fig. 4 Migration of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in system under different plant treatments

40 cm 处的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为 0.51~0.60 mg/kg,可看出不同植物处理下各系统出水浓度均较低,对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  均有较好的去除效果。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$  主要通过填料的吸附作用去除,因此在填料层 0~15 cm 处  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效果显著。马蔺处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的浓度在填料层 40 cm 处高于其他系统,可能是由于马蔺根系发达,使部分进水沿马蔺的根系形成的通道流动,削弱了填料对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸附能力,使马蔺出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度有所升高。

### 3.3 进水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在填料中的迁移和累积

#### 3.3.1 植物对填料 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积的影响

最后一次进水前,不同植物处理下填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  分布情况见图 5。图 5 中,虚线表示第一次进水前填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的初始含量为 4.48 mg/kg。由图 5 可看出,不同植物处理下填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  分布差异较大,马蔺、萱草、八宝景天处理下填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量低于初始含量,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量随填料深度增加而增加,变化范围为 2.83~4.49 mg/kg。无植物和金色麦冬处理下填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量高于初始含量,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量随填料深度增加而减小,变化范围为 5.12~7.53 mg/kg。分析发现,不同处理下填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的分布与植物根系长度密切相关,由表 2 可知,萱草、八宝景天的根长分别为 15.1、16.6 cm,两系统对应的有根系存在的填料层  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量较低,在 0~15 cm 的平均含量分别为 3.13、3.04 mg/kg,而在 15~40 cm 的平均含量较高,分别为 4.13、3.86 mg/kg。马蔺的根系长度为 37.8 cm,基本贯穿整个填料层,所以整个填料层的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量均处在较低水平,含量为 3.01 mg/kg。由于金色麦冬在移植后,长势很差,生物量增长缓慢,根系亦短小不发达,所以金色麦冬和无植物组填料层的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著高于其他系统。

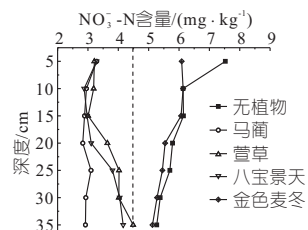


图 5 不同植物处理下填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的累积

Fig. 5 Accumulation of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in fillers under different plant treatments

综上所述,植物的存在显著影响了系统填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的分布和含量,植物的根系越长越发达填料中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量越低。这是因为降水结

束后,氧气充足易发生硝化反应,导致吸附在填料颗粒上更多的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  转换为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,植物根系的存在使得填料中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  可在两次降雨事件期间通过植物吸收作用去除,同时有研究指出<sup>[14]</sup>,植物根系附近形成的生物圈增加了微生物的生物量,使微生物对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的固定作用增强。

### 3.3.2 植物对进水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 迁移的影响

不同植物处理下进水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度随填料深度的增加变化情况见图 6。由图 6 可知,金色麦冬和无植物组  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度随填料深度增加而快速升高,这可能主要是由于两系统进水前填料中积累了大量的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,在进水过程出现  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的淋溶,使水流中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度快速升高。马蔺、萱草、八宝景天由于进水前填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著低于金色麦冬和无植物组, $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的淋溶量小,所以在填料层 0~15 cm 的区域  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度随填料深度增加缓慢,在填料层 15~40 cm 的区域由于系统底部提供缺氧环境及植物根系可分泌出有机物充当碳源<sup>[11]</sup>使反硝化作用增强,马蔺、萱草、八宝景天  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度出现一定的降低趋势。将最后一次进水前填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量与进水后  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的出水浓度进行相关性分析,发现两者显著正相关( $P < 0.01, R = 0.997$ )。相对于无植物组,植物的存在可降低  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的出水浓度,不同植物处理下填料层 40 cm 处  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度分别为无植物(8.66 mg/L) > 金色麦冬(8.57 mg/L) > 萱草(5.81 mg/L) > 八宝景天(5.74 mg/L) > 马蔺(5.07 mg/L)。

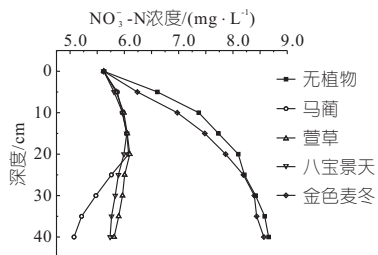


图 6 不同植物处理下  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在系统中的迁移

Fig. 6 Migration of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in system under different plant treatments

### 3.4 植物对进水氮素去除的影响

不同植物处理下的 TN 去除率及出水浓度在整个试验期间的变化情况见图 7。由图 7 可知,取 8 次进水 TN 去除率的算术平均值,由高到低表现为马蔺(50.59%) > 八宝景天(43.99%) > 萱草(37.85%) > 金色麦冬(30.51%) > 无植物(26.09%)。不同植物处理下系统对 TN 的去除率有显著差异( $P < 0.05$ ),这表明不同植物处理

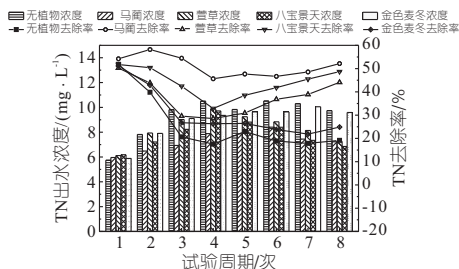


图 7 不同植物处理下 TN 去除率及出水浓度随运行时间的变化

Fig. 7 Changes of TN removal rate and effluent concentration with running time under different plant treatments

会影响生物滞留系统中 TN 的去除效果。在系统运行的前期,不同植物处理下 TN 的去除率均出现一定的下降,这可能是由于试验前期植物生长缓慢,进水前填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量过高,进水过程中出现  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的淋溶。由此可知,后期由于植物的生长和系统反硝化作用增强,马蔺、萱草、八宝景天  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的出水浓度降低,使 TN 的去除率提高,而无植物组的 TN 去除率一直保持在较低水平。可见存在植物的系统相对于无植物,可保持系统长期且较为稳定的氮素去除效果。

## 4 结论

a. 整个试验运行期间,氮素在植物中的累积量表现为八宝景天 > 马蔺 > 萱草 > 金色麦冬,植物的生物量增长越快,氮素累积量越大。

b. 不同植物处理下,填料中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  分布无明显差异且含量较低,进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  主要在填料层 0~15 cm 通过填料吸附去除;不同植物处理下,填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  分布与进水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在系统中的迁移差异明显,植物的存在可显著降低填料中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量及其出水浓度。

c. 在整个试验运行期间,TN 的平均去除率表现为马蔺 > 八宝景天 > 萱草 > 金色麦冬 > 无植物,分别比无植物组高 24.5%、17.9%、11.76%、4.42%。

### 参考文献:

[1] 王建婷,董增川,孙艳伟,等.基于海绵城市的生物滞留池水文效应分析[J].水电能源科学,2017,35(10):42-45,50.  
 [2] LI HOUNG,DAVIS A P. Water quality improvement through reductions of pollutant loads using bioretention[J]. Journal of environmental engineering,2009,135(8): 567-576.

[3] 章茹,李艳根,刘志超,等. 植物及存水区对南方生物滞留池去污效果的影响[J]. 环境工程,2017,35(8):29-33,45.

[4] 荆和平,马克生. 山西黄土的分布特征与滑坡(崩塌)灾害[C]//第三届全国边坡工程学术研讨会论文集. 2011:169-176.

[5] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 西安市雨水花园蓄渗雨水径流的试验研究[J]. 水土保持学报,2012,26(6):75-79,84.

[6] 增超,李家科,蒋春博,等. 4种生物滞留填料对径流污染净化效果对比[J]. 水资源保护,2018,34(4):71-79.

[7] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 雨水花园对不同赋存形态氮磷的去除效果及土壤中优先流的影响[J]. 水利学报,2015,46(8):943-950.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[9] 王方. 太原市海绵城市建设的探讨[J]. 山西建筑,2017,43(23):131-132.

[10] 来雪慧,赵金安,李丹,等. 太原市工业区不同下垫面降雨径流污染特征[J]. 水土保持通报,2015,35(6):97-100,105.

[11] BRATIERES K, FLETCHER T D, DELETIC A, et al. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study [J]. Water research, 2008, 42(14): 3930-3940.

[12] 王哲,夏辉,袁浩. 白洋淀周边地下水浅埋区农田土壤硝态氮剖面分布规律研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 36-39.

[13] 金雪莲,姚槐应,樊昊心. 土壤硝化作用的温度响应综述[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(20): 8-16.

[14] 陈韬,邹子介,李剑洋. 生物滞留系统中 $^{15}\text{NO}_3^-$ 的迁移转化及丹麦草对此过程的影响研究[J]. 环境工程, 2017, 35(4): 60-64.

### Effects of Plants on Nitrogen Migration and Accumulation in Bioretention System

WANG Hong-hao, ZHAO Fan, LI Jing-ling, YAO Yao, XUE Tian-xin

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to study the effects of plants on the migration and accumulation of nitrogen in the biological retention system, and promote the vegetation construction of rainwater biological retention system in loess distribution area, 5 groups of biological retention system simulation devices were constructed by selecting Iris, Hemerocallis, Sedum, Ophiopogon and non-plants. The migration of nitrogen in fillers and the accumulation of nitrogen in each medium under different plant treatments were investigated. The results show that there was a close relationship between plant nitrogen accumulation and plant biomass increase during the experiment, which was as follows: Sedum > Iris > Hemerocallis > Ophiopogon. The nitrogen absorbed by plants was mainly accumulated in the upper structure of plants. The distribution difference of  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  in the five groups of biological retention system fillers is not significant and the content of  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  is low.  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  is mainly removed in the upper part of the packing layer by adsorption, and each system has a good removal effect on  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ . Plants have a significant effect on the distribution of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  in the packing and the migration of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  in the system. Compared with the non-plant group, the system with plants can reduce  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content in the filler, and the lower the  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content in the filler before influent, the lower the  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  effluent concentration. The average TN removal rates of 5 treatments were as follows: Iris (50.59%) > Sedum (43.99%) > Hemerocallis (37.85%) > Ophiopogon (30.51%) > non-plant (26.09%).

**Key words:** bioretention system; plant; migration; accumulation; nitrogen

(上接第 134 页)

[11] 祁彬溪,王凡,陈捷翎. 粘滑断层错动作用下穿越断层隧道结构响应数值模拟[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊 2): 753-758.

[12] 刘立鹏,汪小刚,贾志欣,等. 水岩分算隧道衬砌外水压力折减系数取值方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 495-500.

[13] SUN BENBO, DENG MINJIANG, ZHANG SHER-ONG, et al. Inelastic dynamic analysis and damage assessment of a hydraulic arched tunnel under near-fault SV waves with arbitrary incoming angles[J]. Tunnelling and underground space technology, 2020, 104: 103523. 1-103523. 18.

[14] CHEN Z, WEI J. Correlation between ground motion parameters and lining damage indices for mountain tunnels[J]. Natural hazards, 2013, 65(3): 1683-1702.

### Dynamic Response Analysis of Water Conveyance Tunnel Under Normal Fault Dislocation

HU Liang-ming<sup>1</sup>, LI Tian-xiao<sup>1</sup>, SUN Ben-bo<sup>1</sup>, ZHAO Zi-nan<sup>1</sup>, LI Qian<sup>2</sup>, LI Shu-yu<sup>3</sup>

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. Zhengzhou Water Construction Reconnaissance Design Institute, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** When the water conveyance tunnel in long-distance water diversion project passes through the potential earthquake area, there is a major engineering safety hazard caused by active fault dislocation. It is of great engineering significance to reveal the influence of fault dislocation on the stability of water conveyance tunnel. Based on ABAQUS finite element analysis software, considering the complex dynamic interaction characteristics of surrounding rock, fault, lining and internal water, the three-dimensional numerical simulation of surrounding rock-fault fracture zone-lining-internal water system was carried out, and the influence of different fault dislocation momentum, width and cohesion on the stability of water conveyance tunnel was analyzed in depth. The results show that the vertical displacement and damage degree of the lining structure of the water conveyance tunnel decrease under the conditions of small fault dislocation, fault width and large fault cohesion, which has a certain reference value for the theoretical study of the dynamic response of the water conveyance tunnel across faults.

**Key words:** normal fault; water conveyance tunnel; numerical simulation; lining damage