

# 木屑强化生物滞留池对径流中营养物质的长期有效去除

万哲希, 刘雨童, 李 田

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 生物滞留设施出水通常含有较多淋出的营养物质, 降低了其用作景观水体补充水的价值. 采用硬木屑作为生物滞留设施基质的有机成分, 以降低基质中的营养物质含量, 同时强化设施除氮能力. 通过连续 2 年的现场实验, 考察设施出水中污染物的含量及其变化, 分析影响设施出水水质的因素, 并考察营养物质减少可能造成的对植物生长的影响. 结果表明, 设施出水中氮(N)和磷(P)均得到有效控制, 质量浓度远低于污水再生利用能够达到的出水平均质量浓度. 在连续 2 年的运行过程中, 基质中木屑降解淋出量减少, 设施出水化学需氧量(COD)和总磷(TP)平均质量浓度下降至 10.88 和 0.08  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水总氮(TN)质量浓度没有明显变化, 平均质量浓度为 2.72  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 使用发酵木屑作为基质有机组分可在减少生物滞留设施出水中有机物与营养物质淋出的同时, 稳定提供设施脱氮需要的碳源, 设施出水可为城市河道提供优质的补充水源.

**关键词:** 生物滞留; 营养物质; 木屑; 雨水利用

**中图分类号:** X52

**文献标志码:** A

## Long-Term and Effective Removal of Nutrients in Stormwater Using a Field-Scale Wood-Chip Bioretention System

WAN Zhexi, LIU Yutong, LI Tian

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The nutrients are usually leaching from the bioretention system and reducing the reusable value of stormwater for landscape water supplement. In this paper, wood chips were used as the organic component of the bioretention system to reduce the medium nutrient content and to increase the nitrogen removal capacity of the system. The pollutant concentrations in the effluent, the factors affecting the effluent quality, and the nutrients reduction

impact on plant growth were analyzed. The results show that the mass concentrations of nitrogen (N) and phosphorus (P) in the effluent are much lower than that of the wastewater reclamation, indicating that both N and P are effectively controlled. The amount of wood chips in the medium is decreased in the continuous operation for two years, while the average mass concentrations of chemical oxygen demand (COD) and total phosphorus (TP) in the effluent are decreased to 10.88 and 0.08  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively. The mass concentration of total nitrogen (TN) does not change significantly with the average value of 2.72  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Using wood chips as the medium organic component can stably provide the carbon source for the denitrification, while reducing the organic matter and nutrients concentration in the effluent. The effluent of the wood-chip bioretention system can provide high quality supplementary water for urban rivers.

**Key words:** bioretention; nutrient; wood chips; use of rainwater

景观水体是现代化城市水环境的重要组成部分. 国家相关技术标准和条例规定, 景观水体补充水不能使用自来水或地下水<sup>[1]</sup>. 采用经强化二级处理的污水厂出水作为景观水体补充水, 虽然符合国家部分技术标准的要求<sup>[2-3]</sup>, 但相关标准中营养物质质量浓度的限值过于宽松, 对于不流动或流动缓慢的浅水型景观水体存在明显的富营养化问题. 因此, 缺水城市景观水体的补充水源是一个亟待解决的问题.

在地下水位高的地区, 低影响开发设施的出水受到设施底部距离地下水最高动水位需大于 1 m 的限制, 通常不允许直接下渗, 需要收集后排入市政雨

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 上海市科委项目(16DZ1202106)

第一作者: 万哲希(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为海绵城市建设. E-mail: zhexiwan@163.com

通信作者: 李 田(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为城市雨水管理、海绵城市建设. E-mail: tianli@tongji.edu.cn

水管网. 作为一种广泛使用的低影响开发设施, 生物滞留对雨水径流中多种污染物有较好的去除效果<sup>[4-7]</sup>. 因此, 在径流不能直接下渗的地方, 强化生物滞留等绿色基础设施的营养物质控制效果, 利用经过生物滞留设施净化的、水质优良的雨水作为景观水体补充水使用, 一方面能提高低影响开发设施的效益, 另一方面也能缓解我国城市景观水体水源补充的困难.

目前, 国内外大部分生物滞留设施检测到营养物质(特别是氮)的大量淋出<sup>[8-10]</sup>的现象, 部分设施出水营养物质质量浓度往往高于进水. 出现这个问题的原因有两方面: 一方面是为了维持植物生长, 生物滞留设施往往需在基质中加入堆肥物作为营养物质, 这是营养物质淋出的源头; 另一方面, 是设施含沙量高, 缺少能发生反硝化作用的缺氧环境. Dietz 等<sup>[11]</sup>通过将设施出水管上弯, 从而在设施底部构造了适合反硝化的缺氧环境. Hsieh 等<sup>[12]</sup>通过在设施底部使用低渗透速率的基质构建缺氧的保水层, 但实际运行过程中, 依然出现了  $\text{NO}_3\text{-N}$  的淋出.

除了通过设施结构变化构造缺氧环境外, 部分研究采用有机物作为设施基质成分, 用以提高反硝

化效果. 废报纸、锯屑<sup>[13]</sup>、硬木屑<sup>[14]</sup>作为基质成分, 均能在实验室条件下, 有效去除径流中的  $\text{NO}_3\text{-N}$ . 但此类方法, 缺少现场研究数据, 也无法说明对氮素去除的长期有效性.

因此, 本研究采用硬木屑作为基质有机成分, 考察现场生物滞留池长期运行效果及出水水质, 通过现场实验考察生物滞留设施出水中污染物质量浓度, 分析影响设施出水水质的因素, 评价营养物质减少对植物生长的影响, 确定设施出水作为景观水体补充水的可行性.

## 1 材料与方法

### 1.1 场地描述

生物滞留设施位于上海内环高架某路段下方, 于 2015 年 11 月修建, 用于收集处理高架路面雨水径流. 设施平面尺寸为  $8.00\text{ m} \times 2.50\text{ m}$ , 深度为  $0.95\text{ m}$ , 汇水区域面积约  $400\text{ m}^2$ . 设施的构造从上到下依次是: 覆盖层、基质层、排水层(如图 1 所示). 覆盖层厚度为  $0.05\text{ m}$ , 采用长度为  $0.05\sim 0.10\text{ m}$  的松树皮.

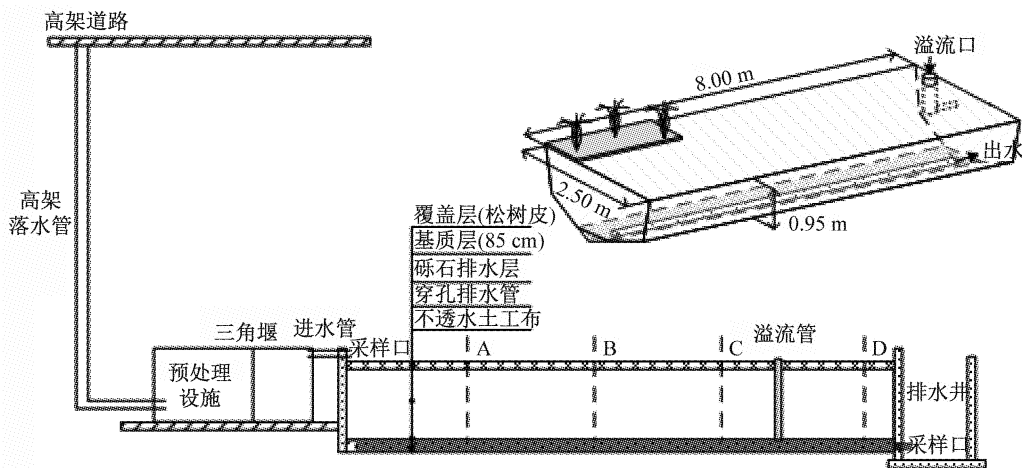


图 1 设施结构示意图

Fig.1 Structure of the bioretention system

设施基质层由黄沙、土壤和硬木屑(质量比为  $75:20:5$ )组成. 基质层的有机质含量为  $31\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , TN 含量为  $67.8\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 其中硬木屑在使用前经生活污水接种发酵稳定, 木屑经稳定化处理后, 易降解有机物含量下降, 碳氮质量比由 266 降至 56. 排水层由粒径为  $2\sim 5\text{ cm}$  的级配碎石组成, 其中设有塑料穿孔管排水. 设施底部铺设不透水土工膜防止出水下渗. 植被层为黄菖蒲, 种植密度约每平方米 20 株.

### 1.2 采样和检测方法

高架径流通过落水管和进水槽进入设施, 通过穿孔排水管末端的出水槽排放到市政雨水管道. 进水槽和出水槽末端均安装有  $90^\circ$  三角堰, 通过超声波液位计与无纸记录仪连接, 对进、出水流量进行连续监测.

现场实验分为两个阶段, 第一阶段为 2016 年的汛期(4 月到 9 月), 第二阶段为 2017 年的 6 月到 9 月. 两个阶段设施产生明显出流, 获得完整水质检测

数据的降雨事件分别有 11 场和 8 场。

相关降雨事件的特征见表 1。

表 1 监测降雨事件的降雨特征

特征值	降雨量/ mm	降雨历时/ h	降雨强度/ (mm · h <sup>-1</sup> )	前期晴天 数/d
平均值	24.9	15.5	2.1	3.4
中值	22.0	11.5	2.0	3.5
最大值	63.9	45.5	4.9	7.1
最小值	9.9	2.5	0.6	0.3

水样采集方法:在设施产生进水以及出水的前 30 min 每 5 min 采集 1 个水样,之后每 15 min 采集 1 个样品,采样位置分别位于进水管和出水管的末端。水样保存在 2 L 塑料瓶中,分析前储存在 4 °C 的冰箱中。水质检测指标包括总悬浮固体(TSS)、COD、TP、正磷酸盐(Ortho-P)、TN、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和硝态氮(NO<sub>3</sub>-N),采用国家标准检测方法<sup>[15]</sup>。有机氮(Org-N)的质量浓度由计算得出,即  $\rho_{\text{Org-N}} = \rho_{\text{TN}} - \rho_{\text{NH}_3\text{-N}} - \rho_{\text{NO}_3\text{-N}}$ 。

基质样品采集方法:在 2016 年 3 月和 10 月两个时间点,分别从设施中收集基质样品,测定 N 在基质中的含量。样品采集断面共 A、B、C 和 D 4 个,如图 1 所示。在每个断面不同部位收集 3 个长约 60 cm 的基质柱,并将其分为对应于 0~10、10~30 和 30~60 cm 深度的 3 个部分。测量时,将同一断面 3 个不同部位相同深度的样品各取 100 g,混合成 1 个样品后按照标准方法测定 N 含量<sup>[16]</sup>。

植物采集方法:在 2016 年 11 月对设施植物进行收割。对收割后的植物叶长进行测定,之后对植物自然风干脱水,对其干重进行测定。

### 1.3 数据处理方法

各监测污染物均检测过程样,结合流量检测结果,计算出污染物的降雨事件平均质量浓度(EMC)。相关数据的显著性和相关性分析均采用 IBM SPSS 20 软件完成。进、出水污染物质量浓度的数据符合正态分布,部分数据存在方差不齐性的情况,故采用单因素方差分析中的 Games Howell 方法。相关性分析采用皮尔逊相关系数表征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 COD 和 TSS 的去除

以发酵稳定的木屑作为基质成分,生物滞留设施对路面径流中的 COD 和 TSS 有显著的去除作用( $P < 0.01$ )(图 2,图中△代表进出水间污染物质量

浓度存在显著性差异),平均去除率分别达到 75.94%和 90.53%。生物滞留设施去除 TSS 的机理仅与滤饼过滤和深层过滤机制有关<sup>[6, 17]</sup>,因此本实验的 TSS 去除率与其他研究<sup>[18]</sup>结果中 TSS 去除率相近。进水中 COD 和 TSS 呈现显著的强相关性(皮尔逊系数为 0.821,  $P < 0.01$ ),说明进水的 COD 主要以颗粒态形式存在,因此设施在进水过程中对 COD 的去除也与过滤作用有关。

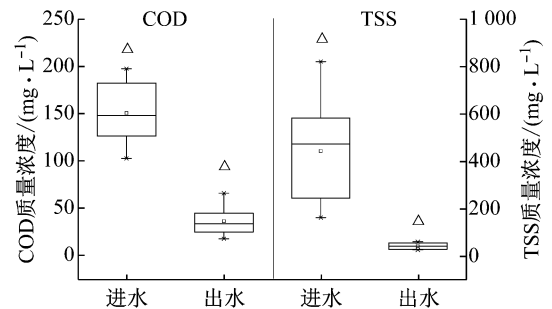


图 2 生物滞留设施对 COD、TSS 的去除效果  
Fig.2 Removal effect of COD and TSS

设施运行的第 1 年,COD 出水平均质量浓度为 36.22 mg · L<sup>-1</sup>。对出水中 COD 质量浓度影响因素的分析表明(图 3),出水中 COD 质量浓度与出水中 TSS 质量浓度以及降雨事件发生时的气温有显著相关( $R_{\text{COD}} = 0.927, P < 0.01; R_{\text{TSS}} = 0.699, P < 0.05$ ),说明一方面设施出水中 COD 主要以颗粒的形式存在,另一方面随着气温升高而 COD 质量浓度也会升高。由于 COD 主要以颗粒态形式存在,设施基质能通过过滤作用去除大部分的 COD 和 TSS,因此进水中 COD 和 TSS 质量浓度变化,不是导致出水 COD 和 TSS 浓度上升的主要原因( $R_{\text{COD}} = 0.489, P > 0.050; R_{\text{TSS}} = 0.195, P > 0.05$ )。

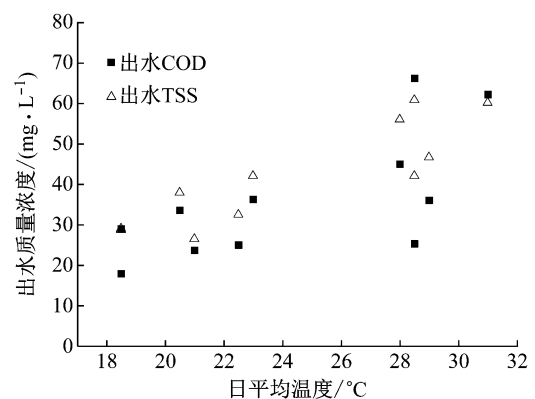


图 3 日平均气温与出水 COD、TSS 质量浓度的关系  
Fig.3 Daily average temperature versus COD and TSS mass concentration of effluent

COD 质量浓度升高与使用木屑有机物的分解淋出作用有关. 虽然本研究中所使用木屑经稳定化处理, 但是与文献报道<sup>[19-20]</sup>的腐熟度较高的堆肥相比, 所使用木屑的碳氮比是堆肥物的一倍, 因此设施在第 1 年运行时木屑中存在大量易降解的有机物, 这些有机物会随着温度升高, 微生物活性增加, 大量分解淋出, 相似的现象在王建军等<sup>[21]</sup>的研究中被观察到.

对比设施使用第 1 年和第 2 年的出水水质(图 4)可以发现, 在相似温度范围内(18~30 °C), 第 2 年出水 COD 和 TSS 出水质量浓度下降明显( $P < 0.05$ ). 第 2 年出水中 TSS 和 COD 的平均质量浓度仅为 20.89 和 10.88  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 全部降雨事件出水 COD 质量浓度均满足地表水 IV 类标准. 此外, 第 2 年设施出水中 COD 和 TSS 的质量浓度没有相关性( $R = -0.204, P = 0.629$ ), 说明设施经过 1 年使用后, 木屑经降解、破碎淋出的颗粒物与有机物质量浓度大幅度减小, 木屑降解不再是出水中 COD 的主要来源, 这是设施第 2 年出水中 COD 和 TSS 质量浓度没有上升趋势的原因. 这说明长期运行的生物滞留设施出水不会受到添加有机物的影响.

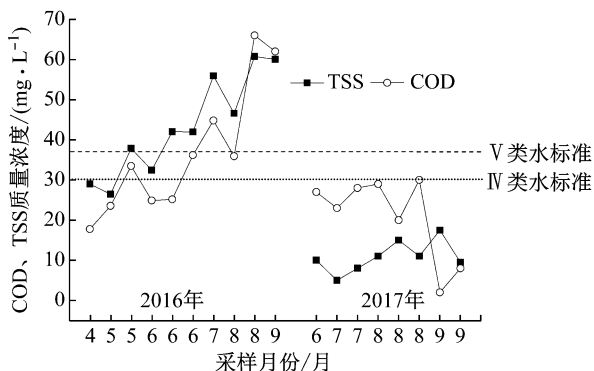


图 4 设施 2 年运行过程中出水中 COD、TSS 质量浓度变化

Fig. 4 Change of COD and TSS concentration in effluent in the two-year operation

## 2.2 N 和 P 的去除

使用木屑作为基质有机成分, 第 1 年设施出水中的 TN 和 TP 平均质量浓度均低于进水( $P < 0.05$ )(图 5, 图中  $\triangle$  代表进出水间污染物质量浓度存在显著性差异,  $\square$  代表 2 年间出水污染物质量浓度存在显著性差异.), 出水中 TN、TP 的平均质量浓度分别为 2.72 和 0.16  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 低于使用堆肥为基质有机组分的现场设施中 N 和 P 的出水质量浓度<sup>[9]</sup>. TN 和 TP 平均去除率为 37.8% 和 75.7%, 明显优于国外相关现场监测的结果(表 2).

由于设施的处理对象为高架道路径流, 进水中营养物质质量浓度低于城市污水, 本设施在第 1 年运行中 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 出水质量浓度远小于污水回用工艺出水质量浓度<sup>[22-24]</sup>. 若以《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)作为出水水质评价的依据, 设施出水中 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$  的平均质量浓度符合地表水 IV 类, COD 出水质量浓度符合地表水 V 类, TN 接近地表水 V 类, 这是污水回用工艺出水水质难以达到的.

生物滞留设施中 N 的淋出主要以  $\text{NO}_3^--\text{N}$  为主. Smith<sup>[25]</sup>的研究认为, 设施对  $\text{NO}_3^--\text{N}$  去除的主要影响因素是其与基质的接触时间. 如表 2 所示, 与其他现场设施相比, 本实验中设施的渗透速率大、基质层深度小, 因此接触时间相较其他设施偏小. 但由于在基质中加入木屑强化设施的反硝化效果, 设施对 TN 和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的去除好于其他现场设施.

对比第 1 年和第 2 年设施的 TP 去除情况可知(图 5), 第 2 年出水的 TP 质量浓度比第 1 年明显降低( $P < 0.05$ ), 平均出水质量浓度为 0.06  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 生物滞留设施可以依靠基质对 P 的吸附和过滤作用将其截留, 出水中的 P 主要成分是 Ortho-P, 部分添加堆肥物的设施正磷酸盐淋出的质量浓度可达 4~6  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[9, 26]</sup>. 本实验进出水中测得的 Ortho-P 质量浓度在检测限以下, TP 主要由颗粒态磷组成. 这与王建军等<sup>[21]</sup>的实验结果一致, 即采用木屑作为基质的生物滞留设施出水 TP 主要以颗粒态为主, 淋出的 TP 质量浓度最高能达到 0.4  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 本实验将木屑先行发酵稳定, 出水中 TP 质量浓度最高仅为 0.29  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 并且随着设施运行, 木屑进一步稳定, 第 2 年出水中 TP 质量浓度最高仅有 0.09  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 达到地表水 II 类(湖库 IV 类)要求, 说明采用木屑作为基质的现场设施, 与其他现场设施相比, 能有效减少 P 的淋出.

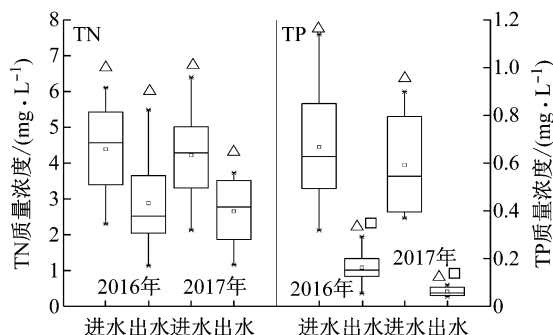


图 5 生物滞留设施对营养物质的去除

Fig. 5 Removal of nutrients by the bioretention system

表 2 现场生物滞留池案例进出水中营养物质质量浓度比较

Tab. 2 Comparison of nutrient concentrations of different field-scale bioretention systems

实验地点	上海 (本实验)	Charlotte, N. C. [5]	Nashville, N. C. [27]	Greensboro, N. C. [28]	College Park, M. D. [7]
渗透速率/( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	8.20	1.10	1.30	2.54~15.00	
平均降雨量/mm	24.9	27.4		33.5	
服务面积比/%	5.0	6.0	4.8	5.0	6.5
基质层深度/m	0.8	1.2	0.9	1.2	0.8
污染物		$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			
TSS	进水	443.21	49.50	25.00	100.00
	出水	41.96	20.00	7.30	7.40
TN	进水	4.37	1.68	0.94	1.27
	出水	2.72	1.14	<u>1.64</u>	<u>5.23</u>
TP	进水	0.67	0.19	0.07	0.10
	出水	0.16	0.13	0.06	<u>3.00</u>
$\text{NH}_3\text{-N}$	进水	0.58	0.34	0.29	0.22
	出水	0.31	0.10	0.08	<u>1.54</u>
$\text{NO}_3\text{-N}$	进水	1.13	0.41	0.19	0.50
	出水	0.92	<u>0.43</u>	<u>1.11</u>	0.30

注: 1. 服务面积比等于设施表面积除以设施的汇水面积; 2. 各污染物质量浓度均为平均质量浓度; 3. 下划线代表污染物的出水质量浓度高于进水。

在 2 年运行过程中, TN 出水质量浓度无明显变化(图 5), 说明设施经长期运行对 TN 依然有较好的控制效果.  $\text{NO}_3\text{-N}$  在第 2 年的平均出水浓度比第 1 年高  $0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  在第 2 年的去除率较第 1 年下降了约 30%. Wan 等<sup>[29]</sup> 的研究表明, 在添加木屑现场设施中, 影响  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除率的主要因素是降雨强度, 但设施两年运行过程中, 降雨强度间没有显著性差异( $P=0.415$ ), 因此,  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除率的下降可能来自于基质中可被微生物利用有机物的减少。

在使用木屑作为基质的生物滞留设施中, 出水中均存在 Org-N 淋出的现象(质量浓度为  $4\sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )<sup>[8, 30]</sup>. 对本设施出水中各形态 N 的质量浓度对比分析发现(图 6, 图中  $\triangle$  代表 2 年出水污染物质量浓度存在显著性差异), 第 1 年出水中 Org-N 平均质

量浓度为  $1.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 第 2 年平均质量浓度下降了  $0.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $P<0.05$ ), 且场次降雨之间的变化范围明显缩小. 本研究第 2 年出水中平均 Org-N 浓度与没有添加有机物的设施<sup>[7]</sup> 相比没有明显差异, 说明现场设施长期运行木屑淋出的 Org-N 得到有效控制. 由于 Org-N 与有毒藻种生长有关<sup>[31]</sup>, 因此, 本设施较低的 Org-N 出水质量浓度有利于提高出水的景观利用价值。

### 2.3 基质中 N 浓度变化对植物生长的影响

以木屑替代堆肥物作为基质组分, 基质不同位置处 N 含量如图 7 所示, 设施在建成时基质中 N 的平均含量仅为  $0.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . 运行 1 年后, 基质表层中 N 含量明显升高( $P<0.05$ ), 平均含量为  $0.11 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . 在使用堆肥作为基质组分的设施中, N 含量为  $1.7\sim 2.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[32]</sup>. 尽管本设施运行过程中 N 在表层和靠近进水口部分逐渐积累, 但是基质的 N 含量仍低于添加堆肥物的设施。

设施中植物(黄菖蒲)前后 2 年的生长情况见表 3. 第 1 年运行结束时, 黄菖蒲平均叶长约为  $63.9 \text{ cm}$ , 每株干重为  $4.98 \text{ g}$ . 在第 2 年运行结束时植物生长情况较第 1 年明显改善, 平均叶长增加了 36.9%, 每株干重增加 73.5%, 第 2 年黄菖蒲的叶长与营养物质充足时报道的叶长值 ( $71.6\sim 84.6 \text{ cm}$ ) 相似<sup>[33-34]</sup>, 说明随着设施的运行, 虽然基质中的营养物质含量与直接使用堆肥物的效果存在差距, 但是植物生长状况良好, 起始较低的基质 N、P 含量没有明显抑制植被的长势。

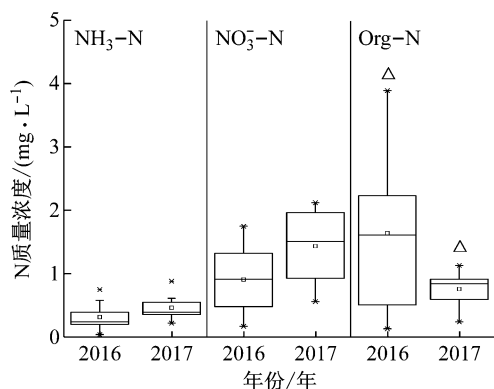


图 6 设施在 2 年运行过程中出水中不同形态 N 含量的变化

Fig. 6 Changing contents of different N forms in effluent

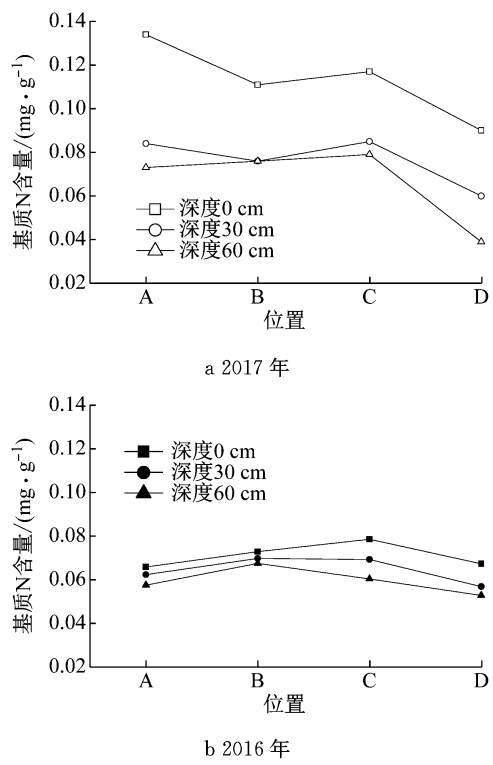


图 7 生物滞留设施运行 1 年前后不同深度介质中 N 含量变化

Fig.7 Changing contents of N at different depths of the medium

表 3 设施 2 年运行过程中菖蒲生长情况  
Tab.3 Plant growth of calamus in the two-year operation

年份/年	平均叶长/cm	含 N 质量分数/%	每株干重/g
2016	63.9	1.79	4.98
2017	87.5	2.55	8.64

### 3 结论

(1) 使用木屑作为基质有机成分的生物滞留设施对高架道路径流中 COD、TSS、TP 和 TN 均有显著的去除作用,设施对 TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的平均去除率能达到 37.8%和 18.6%,明显优于同类现场设施.出水 TP 能达到地表水环境质量的Ⅲ类水标准,NH<sub>3</sub>-N 能达到Ⅱ类水标准,出水 TN 平均质量浓度只有 2.7 mg·L<sup>-1</sup>.

(2) 设施出水中 COD 和 TSS 质量浓度受到降雨事件发生时气温的影响,使用 1 年后,出水中 COD 质量浓度大幅下降.第 2 年监测期间,设施出水 COD 平均质量浓度仅为 10.88 mg·L<sup>-1</sup>,达到地表水环境质量标准中的Ⅰ类水标准.设施运行的第 2 年,随着木屑降解趋于稳定,出水中 TP 和 Org-N 质量浓度进一步降低,TP 出水平均质量浓度为 0.08 mg·

L<sup>-1</sup>.

(3) 基质表层中 N 含量会随着设施运行逐渐累积,设施运行 1 年后,基质中氮含量提高了近 1 倍,植物第 2 年生长情况好于第 1 年,株高达到正常范围.使用木屑替代堆肥对植物生长影响小,有利于保证生物滞留池出水满足景观水体补充水要求.

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑节能设计标准:GB50555—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Standard for water saving design in civil building: GB50555—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.
- [2] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.城镇污水处理厂污染物排放标准:GB18918—2002[S].北京:中国环境出版社,2002.  
National Environmental Protection Agency, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant: GB18918—2002 [S]. Beijing: China Environment Science Press, 2002.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局.城市污水再生利用 景观环境用水水质标准:GBT18921—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. The reuse of urban recycling water-water quality standard for scenic environment use: GBT18921—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [4] HSIEH C H, DAVIS A P, NEEDELMAN B A. Nitrogen removal from urban stormwater runoff through layered bioretention columns[J]. Water Environment Research, 2007, 79(12): 2404.
- [5] HUNT W F, SMITH J T, JADLOCKI S J, *et al.* Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, N. C[J]. Journal of Environmental Engineering, 2008, 134(5): 403.
- [6] LI H, DAVIS A P. Urban particle capture in bioretention media. II: theory and model development[J]. Journal of Environmental Engineering, 2008, 134(6): 419.
- [7] LI L Q, DAVIS A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48(6): 3403.
- [8] LYNN T J, YE H D H, ERGAS S J. Performance and longevity of denitrifying wood-chip biofilters for stormwater treatment: a microcosm study [J]. Environmental Engineering Science, 2015, 32(4): 321.
- [9] MULLANE J M, FLURY M, IQBAL H, *et al.* Intermittent rainstorms cause pulses of nitrogen, phosphorus, and copper in leachate from compost in bioretention systems[J]. Science of the Total Environment, 2015, 537(10): 294.

- [10] IQBAL H, GARCIA-PEREZ M, FLURY M. Effect of biochar on leaching of organic carbon, nitrogen, and phosphorus from compost in bioretention systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 521/522(15): 37.
- [11] DIETZ M E, CLAUSEN J C. Saturation to improve pollutant retention in a rain garden[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 40(4): 1335.
- [12] HSIEH C H, DAVIS A P, NEEDELMAN B A. Nitrogen removal from urban stormwater runoff through layered bioretention columns[J]. *Water Environment Research*, 2007, 79(12), 2404.
- [13] KIM H, SEAGREN E A, DAVIS A P. Engineered bioretention for removal of nitrate from stormwater runoff[J]. *Water Environment Research*, 2003, 75(4): 355.
- [14] WAN Z X, LI T, SHI Z B. A layered bioretention system for prohibiting nitrate and organic matters leaching[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 107: 233.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
National Environmental Protection Agency. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2002.
- [16] CARTER M R, GREGORICH E G. Soil sampling and methods of analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [17] LI H, DAVIS A P. Urban particle capture in bioretention media. I: laboratory and field studies[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, 134(6): 409.
- [18] BROWN R A, HUNT W F. Underdrain configuration to enhance bioretention exfiltration to reduce pollutant loads[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2011, 137(11): 1082.
- [19] 刘强, 陈玲, 邱家洲, 等. 污泥堆肥对园林植物生长及重金属积累的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(6): 870.  
LIU Qiang, CHEN Ling, QIU Jiazhou. *et al.* Effects of sewage sludge compost on growth and heavy metal accumulation in horticultural plants[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(6): 870.
- [20] 张继宁, 吕凡, 邵立明, 等. 木炭对污泥堆肥有机质减量和腐熟度的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(4): 577.  
ZHANG Jining, LÜ Fan, SHAO Liming, *et al.* Impact of wood biochar on organic degradation and maturity of sewage sludge[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(4): 577.
- [21] 王建军, 李田, 张颖. 给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(12): 4642.  
WANG Jianjun, LI Tian, ZHANG Ying. Water treatment residual as a bioretention media amendment for phosphorus removal[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12): 4642.
- [22] GREENWAY M. The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5): 501.
- [23] AVILA C, SALAS J J, MATIN I, *et al.* Integrated treatment of combined sewer wastewater and stormwater in a hybrid constructed wetland system in southern Spain and its further reuse[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 50: 13.
- [24] 陈洪斌, 李辰, 刘富强. 膜生物反应器用于居民区生活污水处理与回用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(2): 247.  
CHEN Hongbin, LI Chen, LIU Fuqian. Membrane bioreactor technology for treatment and reuse of mixed domestic wastewater from residential areas[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(2): 247.
- [25] SMITH D P. Sorptive media biofiltration for inorganic nitrogen removal from stormwater[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008, 134(5): 624.
- [26] CHAHAL M K, SHI Z, FLURY M. Nutrient leaching and copper speciation in compost-amended bioretention systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 556: 302.
- [27] BROWN R A, HUNT W F. Impacts of media depth on effluent water quality and hydrologic performance of undersized bioretention cells[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, 137(3): 132.
- [28] HUNT W F, JARRETT A R, SMITH J T, *et al.*, Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in north carolina[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, 132(6): 600.
- [29] WAN Z X, LI T, LIU Y T. Effective nitrogen removal during different periods of a field-scale bioretention system[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(18): 17855.
- [30] RANDALL M T, BRADFORD A. Bioretention gardens for improved nutrient removal[J]. *Water Quality Research Journal of Canada*, 2013, 48(4): 372.
- [31] BERMAN T, CHAVA S. Algal growth on organic compounds as nitrogen sources[J]. *Journal of Plankton Research*, 1999, 21(8): 1423.
- [32] BROWN S, CORFMAN M, MENDREY K. Stormwater bioretention systems: testing the phosphorus saturation index and compost feedstocks as predictive tools for system performance[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 98.
- [33] 李强, 高祥, 丁武泉. 常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(8): 2628.  
LI Qiang, GAO Xiang, DING Wuquan. Influence of perennial flooding and drought on growth restoration of acorus calamus in water-level-fluctuation zone of the three gorges reservoir[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(8): 2628.
- [34] 刘长娥, 宋祥甫, 付子轼. 8种湿地植物不同苗龄植株的表型特征及相关性分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2014, 23(1): 93.  
LIU Chang, SONG Xiangfu, FU Zishi. Analyses on phenotypic characteristics of eight wetland species with different plant ages and their correlation[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2014, 23(1): 93.