

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.020

生物滞留系统对雨水径流中粪大肠菌群的去除效果

张玉娟, 窦月芹, 张学胜, 李玉成, 王 宁
(安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 粪大肠菌群是雨水径流中的典型病原微生物,为此,构建了3种不同基质的柱形生物滞留系统,研究系统对雨水径流中粪大肠菌群的去除效果。结果表明,在4种降雨强度下,生物滞留系统对粪大肠菌群的去除率在65.3%~95.4%之间,随着降雨强度的增加,对粪大肠菌群的去除率呈不同程度的降低。另外,随着降雨间隔时间的增加,系统对粪大肠菌群的去除率上升,间隔5~10 d时去除率趋于稳定。雨水径流削减率模拟结果显示,砂-炭生物滞留系统在强降雨时对径流的削减率最大。综合各系统去除粪大肠菌群和削减径流的能力,认为砂-炭生物滞留系统更适用于易发生雨水内涝的城市。

关键词: 生物滞留系统; 粪大肠菌群; 降雨强度; 降雨间隔; 径流削减

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0126-05

Removal Efficiency of Fecal Coliforms in Stormwater Runoff by Bioretention System

ZHANG Yu-juan, DOU Yue-qin, ZHANG Xue-sheng, LI Yu-cheng, WANG Ning
(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Fecal coliforms are typical pathogenic microorganism in rainwater runoff. Therefore, three columnar bioretention systems with different media were constructed to investigate the removal performances of the fecal coliforms in the rainwater runoff. The removal efficiency of fecal coliforms was between 65.3% and 95.4% under four rainfall intensities, and the removal efficiency of the fecal coliforms decreased in different degrees with the increasing rainfall intensity. In addition, with the increase of the rainfall interval time, the removal efficiency of the fecal coliforms by the system increased, and tended to be stable when the interval was 5 to 10 days. The simulation of the runoff discharge rate showed that the discharge rate of the sand/carbon bioretention system was the largest in heavy rainfall. Considering the ability of each system to remove the fecal coliforms and reduce the runoff, it is concluded that the sand/carbon bioretention system is more suitable for the city prone to waterlogging.

Key words: bioretention system; fecal coliform; rainfall intensity; rainfall interval; runoff reduction

目前对雨水径流污染控制的研究多集中在理化指标方面,但径流中同时也含有大量病原微生物,一

旦进入城市水体,会危害城市环境卫生,降低水体使用功能;当强降雨引起城市内涝或在受到病原微生

基金项目: 安徽省教育厅重点项目(KJ2017A019)
通信作者: 窦月芹 E-mail: yqindou@163.com

物污染的水体中娱乐时,还会危害人体健康^[1]。

生物滞留系统是国际上广泛应用的一种雨水径流低影响开发(LID)管理设施。一些研究采用生物滞留系统控制径流的病原微生物污染,获得了良好的效果,研究内容主要包括生物滞留系统的填料类型、工艺设计和运行参数(如 HRT)等对病原微生物去除效果的影响^[2-5],而对气候因素的影响分析较少。各地气候不同,在容易发生内涝的地区,应用雨水污染控制设施还需要考虑对径流的排放和行泄功能。我国对生物滞留系统控制雨水径流污染的研究和应用起步相对较晚,目前的研究也主要关注径流中非生物污染指标(如氮、磷、重金属等)的控制,对雨水径流中病原微生物污染控制的研究很少,特别是缺乏综合考虑降雨条件探索生物滞留系统控制径流量和病原微生物污染方面的研究。

笔者选取水体中典型的病原指示菌——粪大肠菌群作为目标污染物,考察生物滞留系统去除病原微生物的影响因素。典型的生物滞留池通常包括植被层、覆盖层、填料基质以及排水层,在一些以砂、生物炭等作为基质的柱形试验中,为突出研究填料基质的除污特征,有时不设植被层^[4,6]。本研究以土壤、砂和生物炭为填料,构建实验室规模的生物滞留柱,选取基质类型、降雨强度、降雨间隔时间等影响因素,综合考虑生物滞留池对径流量的削减,探索生物滞留池对径流中粪大肠菌群的去除效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

生物滞留系统小试装置如图 1 所示。装置为有机玻璃柱,直径为 25 cm、高为 110 cm,填料由下到上分别是 10 cm 砾石(粒径为 6~10 mm,孔隙率为 0.4)、10 cm 黄沙和 60 cm 基质。

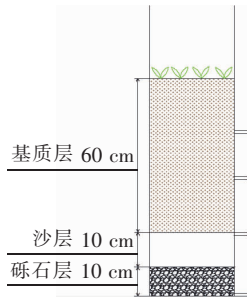


图 1 生物滞留系统装置示意

Fig.1 Schematics of bioretention system

按照填料基质的不同,设置 3 个生物滞留系统:

①草-土系统,基质采用校园花圃的土壤,土壤上种植草皮,渗透系数 k 为 3.29 cm/h,水力停留时间(HRT)为 24.2 h($HRT = \text{填料高度}/k$);②砂-炭系统,基质为 50% 中砂 + 30% 营养土 + 20% 生物炭(体积比,下同), k 为 27.08 cm/h,HRT 为 3.0 h;③砂-土系统,50% 中砂 + 50% 土壤, k 为 6.8 cm/h,HRT 为 11.8 h。为重点研究生物炭和中砂基质系统的水力特征及对粪大肠菌群的去除效果,砂-炭和砂-土生物滞留系统未设植被层。其中,生物炭为秸秆生物炭,粒径为 4~7 mm;草皮层为中华结缕草。试验前装置已经运行 6 个月以上,研究系统对氮、磷等指标的去除效果,渗透系数采用自来水通过水力试验测得^[7]。每个工况设 3 个平行。

1.2 试验方法

试验分为两个阶段:阶段 1,研究降雨强度对生物滞留系统去除粪大肠菌群的影响,采用真实雨水径流进行试验;阶段 2,研究降雨间隔时间对生物滞留系统去除粪大肠菌群的影响,采用校园内的鹅池景观水进行试验。

1.2.1 降雨强度的影响试验

分别在 2019 年 3 月 1 日、4 月 21 日和 27 日收集雨水径流后静置,2 h 内取上清液往试验装置进水。一般认为初始径流含有全部径流中的大部分污染物,本次试验设计处理降雨初期 1.27 cm 的径流^[8]。生物滞留池的设计径流处理量按式(1)计算。

$$Q = m \cdot \alpha \cdot A \cdot H \tag{1}$$

式中: Q 为设计径流处理量; m 为服务区域面积比生物滞留池面积的倍数,取 20; α 为径流系数,取 0.9; A 为生物滞留池面积; H 为处理径流深度,取 1.27 cm。装置的设计径流处理量为 11.2 L,设置降雨分别持续 12、3.0、0.5、0.25 h 达到设计流量,模拟不同的降雨强度。考虑到单次试验时间以及雨水收集量,装置进水量设为 3 L。进水工况见表 1。

表 1 生物滞留池的进水工况

Tab.1 Feeding conditions of bioretention systems

| 设计进水时间/h | 模拟雨型 | | 进水速度/(L·h ⁻¹) | 3 L 进水时间/min | 水力负荷/(mm·h ⁻¹) |
|----------|----------------------------|------|---------------------------|--------------|----------------------------|
| | 降雨强度/(mm·h ⁻¹) | 雨型 | | | |
| 12 | 1.1 | 中雨 | 0.9 | 192.6 | 19.1 |
| 3.0 | 4.2 | 暴雨 | 3.7 | 48.1 | 76.2 |
| 0.5 | 25.4 | 特大暴雨 | 22.4 | 8.0 | 457.2 |
| 0.25 | 50.8 | 特大暴雨 | 44.9 | 4.0 | 914.4 |

当12 h降雨强度大于140 mm时为特大暴雨。根据合肥市的暴雨强度公式,合肥市2年和50年一遇2 h降雨强度分别为26.0、48.5 mm/h,用0.5 h和0.25 h两种工况近似模拟。

在安徽大学校园以及附近居民小区选3类下垫面采样,分别为:校园主干道、小区道路以及屋面。降雨产生径流开始采样,根据降雨强度不同,5~30 min间隔人工采样,总共采样时间为30~180 min。其中道路径流采样点在雨水口,屋面径流采样点在楼房雨水排水管出口,各采样点的单次降雨事件的水样混合成一个样品。粪大肠菌群浓度以及采样当天的气象条件见表2,地表径流中粪大肠菌群的浓度变化较大^[3,9],一方面是由于地域以及下垫面用途不同,另一方面气温是影响细菌繁殖的一个重要因素。按照采样下垫面面积权重设置体积比混合径流作为装置进水。

表2 径流与鹅池水中粪大肠菌群浓度以及采样期的气象因素

Tab.2 Fecal coliforms concentration in runoff and Echi pond and meteorologic factors during sampling period

| 项 目 | 粪大肠菌群浓度/(10 ⁶ 个·L ⁻¹) | | | | 气温/ ℃ | 雨前 落干 期/d |
|------------|--|-------------|----------|------|----------|-----------------|
| | 居民区 道路径流 | 校园主 干道径流 | 屋面 径流 | 鹅池水 | | |
| 2019-03-01 | 2.14 | 1.25 | 0.36 | 0.71 | 6~11 | 2 |
| 2019-04-21 | 7.12 | 2.30 | 3.94 | 2.57 | 18~24 | 11 |
| 2019-04-27 | 3.28 | 1.62 | 1.15 | 1.60 | 14~21 | 2 |

1.2.2 降雨间隔时间的影响试验

试验于2019年5月—6月进行,历时42 d,选择3 h进水工况,分别研究降雨间隔时间为1、2、3、5、10 d时,系统对粪大肠菌群的去除效果。鹅池是安徽大学校园内的景观水体,面积约为5 000 m²。在阶段1的试验中,同时检测了鹅池水体的粪大肠菌群浓度,如表2所示,与地表径流中的粪大肠菌群浓度数量级相近。考虑到试验的可操作性,本阶段装置进水取自鹅池,试验期间鹅池除了降雨径流汇入,没有其他水源进入。

1.2.3 指标检测

采样当天分别在早晨、中午和下午用温度计测量温度,用多管发酵法检测粪大肠菌群数。

2 结果与分析

2.1 降雨强度对粪大肠菌群去除效果的影响

在进水时间为12 h的工况下,草-土、砂-炭、砂-土3种生物滞留系统对降雨径流中粪大肠菌群

的平均去除率分别为95.4%、91.2%、95.0%。随着降雨强度的增加,砂-炭和砂-土系统对粪大肠菌群的去除效果呈现下降趋势,当进水时间分别为3.0、0.5、0.25 h时,砂-炭系统对粪大肠菌群的平均去除率分别为90.9%、69.6%、65.3%,砂-土系统对粪大肠菌群的平均去除率分别为88.3%、80.5%、73.6%。由于降雨强度的增加,生物滞留系统的滞留水量增加,水压变大,生物滞留系统的水力停留时间相应减少,对粪大肠菌群的去除率也随之降低。而降雨强度对草-土系统中粪大肠菌群的去除效果影响相对较小,当进水时间分别为3.0、0.5、0.25 h时,对粪大肠菌群的平均去除率分别为92.4%、87.8%、85.4%,这是由于草-土系统的渗透系数 k 较小,即使降雨强度变大,水力停留时间依然较长,可以维持较高的去除率。这与一些文献中的结果比较一致^[10-11]。

12 h和3.0 h进水工况模拟中雨和暴雨,3种系统对径流中粪大肠菌群的去除率差别不大,3.0 h进水工况时粪大肠菌群平均去除率分别为92.4%、90.9%、88.3%。0.5和0.25 h进水工况模拟特大暴雨,3种系统对径流中粪大肠菌群的去除率差别较大,在0.25 h进水工况下,3种系统对粪大肠菌群的平均去除率分别为85.4%、65.3%、73.6%。一方面,各系统填料表面都有积水,静压水头增加,径流在系统中的水力停留时间主要取决于基质的渗透系数 k ,砂-炭系统的基质疏松、孔隙率大, k 值最大,径流的下渗速度大,与基质的接触时间短,故对粪大肠菌群的去除率较低;而另一方面,生物滞留系统填料主要是通过过滤和吸附作用去除污染物,与普通的砂和土壤相比,生物炭疏松多孔,比表面积和总孔隙率大,可以吸附更多的微生物,所以在特大暴雨工况下,砂-炭系统有较高的径流渗透率,同时对粪大肠菌群的去除率仍在60%以上。

草-土系统填料是单纯的种植土,在几种降雨强度下都有较高的粪大肠菌群去除率,但是基质的渗透率低,强降雨时溢流率高,而且系统长时间运行后较容易发生堵塞。

在0.5 h进水工况下,3月1日有1个草-土柱子对粪大肠菌群的去除率只有69.9%,明显低于其他两个平行柱子,观察到土壤基质层中有一条纵向的裂缝(直径为0.2~0.5 mm),出现短流,水力停留时间变短,可能是引起粪大肠菌群去除率明显降

低的主要原因。之后两次试验更换了其他的草-土柱子后,粪大肠菌群去除率升高。

2.2 降雨间隔时间对粪大肠菌群去除效果的影响

选择合肥夏季常见的暴雨雨型,即3.0 h进水工况,装置进水采用校园景观水体鹅池水,鹅池面积不大,池中常年生活着数只黑天鹅,而且池周围树木繁茂,鸟雀众多,动物粪便污染是鹅池粪大肠菌群浓度高的主因。试验期间,进水中的粪大肠菌群浓度为 $(1.1 \sim 7.5) \times 10^6$ 个/L。降雨间隔时间对粪大肠菌群去除效果的影响见图2。

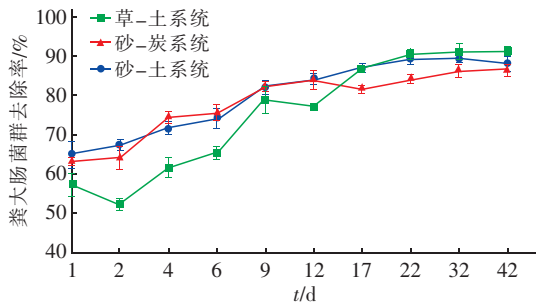


图2 不同降雨间隔时间下系统对粪大肠菌群的去除效果

Fig. 2 Removal of fecal coliforms under different rainfall event interval

在降雨间隔为1 d的试验开始前,系统连续3 d每天进水,以保持工况的稳定性。当降雨间隔为1 d时,3种系统对粪大肠菌群的去除率都较低,在52.1%~67.1%之间;随着降雨间隔时间的增加,系统对粪大肠菌群的去除率上升。当降雨间隔为3 d时,砂-炭和砂-土系统对粪大肠菌群的去除率达到了80%以上,当降雨间隔为5 d时,去除率趋于稳定。草-土系统在降雨间隔为5 d时,对粪大肠菌群的去除率上升至80%以上,当降雨间隔为10 d时,去除率趋于稳定。

生物滞留系统主要通过吸附、过滤、捕食、死亡过程去除粪大肠菌群。在降雨间隔期,系统内的水分主要通过蒸发来削减,逐渐恢复干燥度。一方面基质含水量是影响径流下渗速度的一个重要因素^[12],干燥的基质可以消纳更多的径流量,基质内部的结合水蒸发使得孔隙度变大,径流下渗速度变大,从而影响对粪大肠菌群的去除率;而另一方面,常温时含水量是细菌生存的重要条件,当降雨间隔时间较短时,填料基质内可以保持适宜的湿度环境,有利于粪大肠菌群的生长繁殖,在系统内生存的粪大肠菌群可能会由于再次入流的冲刷作用被带出系

统,从而导致粪大肠菌群的去除率降低。砂-炭和砂-土基质疏松,水分蒸发速度较快,所需干燥时间比土壤基质少。当各个系统达到一定干燥度后,粪大肠菌群适宜的生存环境消失,去除率达到稳定。

2.3 生物滞留系统的水力特征

根据3种生物滞留系统的渗透系数 k 计算不同降雨强度下系统的径流削减率,结果见图3。草-土系统对径流的削减能力最弱,当降雨强度为2.5 mm/h时,径流削减率为72.2%,当降雨强度达到5 mm/h(暴雨)时,径流削减率降至36.12%;砂-土系统对中雨和大雨时的径流削减率可以达到100%,对于暴雨和大暴雨时的径流削减能力减弱,当降雨强度为10 mm/h(大暴雨)时,径流削减率降至37.5%;砂-炭系统的径流削减能力最强,大暴雨和降雨强度为15 mm/h的特大暴雨时,径流削减率为100%,这对于夏季容易发生雨水内涝的城市尤其有意义。例如合肥市历时2 h、10年一遇的降雨强度为37.3 mm/h,在图3中,当降雨强度为37 mm/h时,砂-炭系统的径流削减率为40.6%。根据《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018),海绵城市建设中道路雨水设施设计既要进行污染控制,同时也应保障排水行泄功能。

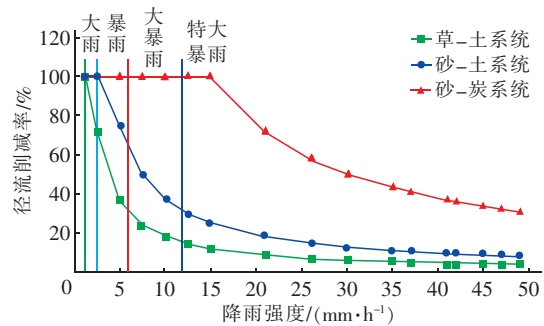


图3 不同降雨强度时各生物滞留系统的径流削减率

Fig. 3 Reduction rates of runoff under different rainfall intensities

综合考虑系统对城市降雨径流的削减能力、粪大肠菌群去除效果,以及文献中生物炭基质滞留池对径流中污染物的去除能力^[6,13],砂-炭基质生物滞留系统更适合应用于容易发生内涝的城市。

3 结论

采用草-土、砂-炭、砂-土等3种不同基质为填料,研究不同降雨条件下生物滞留系统对雨水径流中粪大肠菌群的去除效果。随着降雨强度的增加,生物滞留系统对粪大肠菌群的去除率降低,特大

暴雨时,3种系统对径流中粪大肠菌群的去除率显著不同,但都在60%以上。随着降雨间隔期的增加,系统对粪大肠菌群的去除率逐渐提高,当填料恢复一定的干燥度之后趋于稳定。另外,砂-炭基质生物滞留系统的径流削减能力最强。综合考虑对病原微生物的控制效果和径流削减能力,砂-炭基质生物滞留系统更适合应用于容易发生内涝的城市。

参考文献:

- [1] DOREVITCH S, PRATAP P, WROBLEWSKI M, *et al.* Health risks of limited-contact water recreation [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120 (2): 192 - 197.
- [2] 刘建伟,何岩,刘越,等. 生物滞留系统去除地表径流中病原微生物的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41 (10): 112 - 120.
LIU Jianwei, HE Yan, LIU Yue, *et al.* Research progress in removing pathogenic microorganism from urban overland runoff by bio-retention systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41 (10): 112 - 120 (in Chinese).
- [3] 王建军,李田,侯娟,等. 路面径流的大肠菌群污染及其雨水花园处理[J]. *环境工程学报*, 2014, 8 (12): 5221 - 5225.
WANG Jianjun, LI Tian, HOU Juan, *et al.* Coliforms in road runoff and its removal by rain gardens [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8 (12): 5221 - 5225 (in Chinese).
- [4] GUAN P, PRASHER S O, AFZAL M T, *et al.* Removal of *Escherichia coli* from lake water in a biochar-amended biosand filtering system [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 150: 105819.
- [5] WOLFAND J M, BELL C D, BOEHM A B, *et al.* Multiple pathways to bacterial load reduction by stormwater best management practices: trade-offs in performance, volume, and treated area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52 (11): 6370 - 6379.
- [6] RAHMAN M A, NACHABE M H, ERGAS S J. Biochar amendment of stormwater bioretention systems for nitrogen and *Escherichia coli* removal: effect of hydraulic loading rates and antecedent dry periods [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 310: 123428.
- [7] LI H L, SUN P P, SHI C, *et al.* A falling-head method for measuring intertidal sediment hydraulic conductivity [J]. *Groundwater*, 2010, 48 (2): 206 - 211.
- [8] DOU Y Q, ZHANG T C, ZENG J, *et al.* Polyurethane foam (PUF) passive samplers for monitoring phenanthrene in stormwater [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, 18 (4): 473 - 481.
- [9] 王华然,杨忠委,刘美霞,等. 天津地区典型地表水细菌污染状况与水质指标相关性研究[J]. *环境与健康杂志*, 2015, 32 (5): 408 - 411.
WANG Huaran, YANG Zhongwei, LIU Meixia, *et al.* Correlation between microbial contamination and water quality for typical surface water in Tianjin [J]. *Journal of Environment and Health*, 2015, 32 (5): 408 - 411 (in Chinese).
- [10] TONDERA K, RUPPELT J P, PINNEKAMP J, *et al.* Reduction of micropollutants and bacteria in a constructed wetland for combined sewer over flow treatment after 7 and 10 years of operation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 917 - 927.
- [11] KIM M H, SUNG C Y, LI M H, *et al.* Bioretention for stormwater quality improvement in Texas: removal effectiveness of *Escherichia coli* [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 84: 120 - 124.
- [12] 潘仪凯,张海江,张旭伟,等. 复杂型生物滞留设施的渗透性能试验研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34 (23): 134 - 138.
PAN Yikai, ZHANG Haijiang, ZHANG Xuwei, *et al.* Permeability of complex bioretention system [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34 (23): 134 - 138 (in Chinese).
- [13] BERGER A W, VALENCA R, MIAO Y, *et al.* Biochar increases nitrate removal capacity of woodchip biofilters during high-intensity rainfall [J]. *Water Research*, 2019, 165: 115008.

作者简介:张玉娟(1992 -),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为城市雨水径流污染的控制和监测技术。

E-mail: 854072967@qq.com

收稿日期: 2020 - 11 - 05

修回日期: 2020 - 12 - 30

(编辑:刘贵春)