

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.019

生物滞留设施对城市雨水径流热污染的削减效应

张 珊¹, 李俊奇^{1,2}, 李小静^{2,3}, 孙 瑶¹

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 3. 北京建筑大学 海绵城市研究院, 北京 100044)

摘 要: 径流热污染是水污染的重要方面,也是城市水体生态环境破坏的重要原因,生物滞留是缓解城市雨水径流热污染最有效的措施之一。通过不同填料的生物滞留实验,在人工模拟均匀降雨的条件下,探究了在不同降雨特征下不同填料生物滞留设施对城市雨水径流热污染的削减效果。结果表明,不同填料生物滞留设施热负荷削减效果从大到小依次为:炉渣、石英砂、陶粒、沸石;径流温度越高,所携带的热量越大,生物滞留设施的径流热污染负荷削减率也越高;体积削减对生物滞留设施削减雨水径流热污染的贡献大于热交换。

关键词: 生物滞留; 雨水径流; 热污染; 城市雨水管理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0116-05

Reduction Effect of Bioretention on Urban Stormwater Runoff Thermal Pollution

ZHANG Shan¹, LI Jun-qi^{1,2}, LI Xiao-jing^{2,3}, SUN Yao¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China; 3. Sponge City Research Institute, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Runoff thermal pollution is an important aspect of water pollution and an important cause of ecological environment destruction of urban water bodies. Bioretention is one of the most effective measures to alleviate urban stormwater runoff thermal pollution. Through soil column bioretention experiments with different fillers under the condition of artificially simulated uniform rainfall, reduction effect of bioretention on urban stormwater runoff thermal pollution under different rainfall characteristics was explored. The thermal load reduction effects of bioretention with different fillers from large to small were as follows: slag, quartz sand, ceramsite and zeolite. The higher the temperature of the runoff, the greater the amount of heat it carried, and the higher the heat reduction rate of the bioretention would be obtained. The contribution of volume reduction to the stormwater runoff thermal pollution reduction was greater than that of heat exchange.

Key words: bioretention; stormwater runoff; thermal pollution; urban stormwater management

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-008); 国家自然科学基金资助项目(52070013)
通信作者: 李俊奇 E-mail: jqli6711@vip.163.com

热污染是破坏水生态系统的重要因素。在城市化地区,雨水径流往往携带大量非透水下垫面富集的热量排入接纳水体,使水体水温在短时间内升高; Hunt 等人^[1]发现,径流温度在 7 月和 8 月最高,最高温度超过 30 ℃。过高的水温会引起水体的自净能力减弱、水中溶解氧含量降低、化学反应速率加快等物化特性变化,进而导致水生动植物的数量减少甚至死亡,对水体生态系统造成破坏^[2-3]。因此,研究城市雨水径流热污染的削减具有重要意义。

生物滞留设施作为常用的绿色基础设施,不仅可有效控制雨水径流,同时由于其较高的饱和土壤热容,对雨水径流温度也有明显的降低效果^[1],还可延缓径流升温时间^[4]; Long 等人^[5]研究表明,生物滞留设施使径流温度平均降低 8.8 ℃,峰值温度平均降低 8.6 ℃,输出的热量平均减少 37 MJ/m³。生物滞留设施在夏季气温较高时,出水流量显著减少,体积削减率最大超过 50%,能有效减少热量输出^[6]。在小降雨事件中,生物滞留设施对径流热负荷的削减效果较好;对于极端暴雨,生物滞留设施的削减效果一般^[5]。其次,生物滞留设施的土壤层厚度、土壤类型、蓄水层厚度、是否防渗等均对雨水径流热污染削减效果有影响^[7]。此外,降雨量、降雨强度、服务面积及其内部设施构造等因素均会影响生物滞留设施对径流热污染的控制效能^[4,7-8]。

虽然国内外针对生物滞留设施控制径流热污染已开展了一些实证研究,但是主要采用野外监测的方式,仅讨论了设施构造对雨水径流热污染的削减效能,无法直观了解降雨特征对生物滞留设施热污染负荷削减率的影响规律。因此,笔者通过模拟人工降雨,控制降雨特征变量,对不同填料的生物滞留实验装置削减雨水径流热污染的效能进行研究,以期得到不同填料、不同降雨量和不同雨水径流温度对生物滞留设施削减径流热污染的影响规律。

1 实验设计

实验采用人工配水方式进行模拟降雨,通过控制实验进水的温度、体积和历时,设置交叉实验,测定在不同填料组成与不同降雨特征的情况下,实验装置内部各层的土壤水分温度和底部出水温度,从而量化研究不同填料组成的生物滞留设施在不同降雨特征条件下对雨水径流热污染的控制效能。

1.1 实验装置设计

实验装置由生物滞留实验箱和人工降雨系统组

成,置于室外,如图 1 所示,共 4 组。实验箱为不锈钢材质,长×宽×高为 0.9 m×0.9 m×1.5 m,内含生物滞留柱体及其隔热层。生物滞留柱体为圆柱形,直径为 500 mm,PVC 材质,柱体外为 200 mm 厚的石棉隔热层。生物滞留构造由上至下分别是蓄水层、树皮覆盖层、种植土层、填料层、砾石层,对应厚度分别为 150、50、200、900、200 mm,树皮覆盖层和种植土层的介质粒径均为 0.35~1 mm,砾石层介质粒径为 6~20 mm;蓄水层设有 DN=10 mm 的溢流管,底部砾石层设有 DN=10 mm 的渗排管。在生物滞留柱体上方设置人工降雨系统,包括直径为 450 mm 的喷头及其配套的流量计、离心泵、保温水箱和由隔热材料包裹的连接管。选用炉渣、石英砂、陶粒和沸石作填料,分别填至 4 个生物滞留柱体内(分别记作 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]),粒径分别为 2~5、2~5、3~5、3~5 mm。选用耐淹性较好的马兰作为种植植物。每次模拟降雨间隔为 24 h。实验入流流量由流量计记录,出流流量采用体积法人工测量。

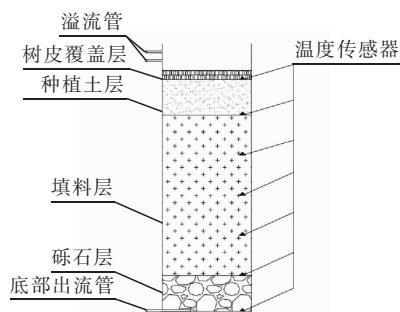


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

1.2 实验方案设计

在设计降雨强度和生物滞留服务面积一定的条件下,汇集雨水径流量与汇水面径流系数呈正相关。此时,实验进水体积(即进入生物滞留设施的雨水径流体积)由下式确定:

$$V = q \times A \times \Psi \times t \times 10^4 \quad (1)$$

式中: V 为实验进水体积, L; q 为设计降雨强度, L/(s·hm²); A 为生物滞留服务面积, m²; Ψ 为径流系数; t 为降雨历时, s。

实验进水模拟均匀雨强降雨,进水体积为 45、60、75 和 90 L,进水时间为 0.5 h 和 1 h;北京地区路面夏季雨水径流的最高温度为 22.8~26.6 ℃^[4],所以选取进水温度分别为 22、25、28 ℃。实验方案如表 1 所示。

表1 实验方案设计

Tab.1 Design of experiment schemes

项 目	方案一		方案二		方案三				
进水温度/℃	22		25		28				
进水体积/L	60	60	60	60	90	75	60	45	60
降雨强度/(mm·min ⁻¹)	0.375	0.25	0.375	0.25	0.75	0.625	0.5	0.375	0.25
进水历时/min	30	60	30	60	30	30	30	30	60

1.3 热污染削减评价方法

评价热污染削减程度主要采用热污染负荷削减率(η)这一指标,其为进、出水热量之差与进水总热量的比值。生物滞留设施进水总热量 Q_1 为:

$$Q_1 = C \cdot \rho \cdot V \cdot T \quad (2)$$

式中: C 为水的比热容,取 $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ 为水的密度,取 $1 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$; V 为进水总体积, m^3 ; T 为进水温度, $^\circ\text{C}$ 。

生物滞留设施出水总热量 Q_2 为:

$$Q_2 = \sum C \cdot \rho \cdot V_i \cdot T_i \quad (3)$$

式中: V_i 为每分钟出水体积, m^3 ; T_i 为每分钟出水温度, $^\circ\text{C}$ 。

可得热污染负荷削减率:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% = \frac{V \cdot T - \sum V_i \cdot T_i}{V \cdot T} \times 100\% \quad (4)$$

2 实验结果与分析

2.1 进水体积对热污染负荷削减率的影响

当进水温度为 28°C 、进水历时为 30 min 时,根据生物滞留设施进水体积、出水体积、进水温度和出水温度的监测数据,绘制不同实验工况下的温降、热污染负荷削减率与进水体积关系图,见图2和图3,可知生物滞留设施可降低雨水径流温度。由图2可知,进水体积为 45 、 60 、 75 和 90 L 时,出水温度较进水温度均有降低,降幅为 $0.31 \sim 2.99^\circ\text{C}$ 。

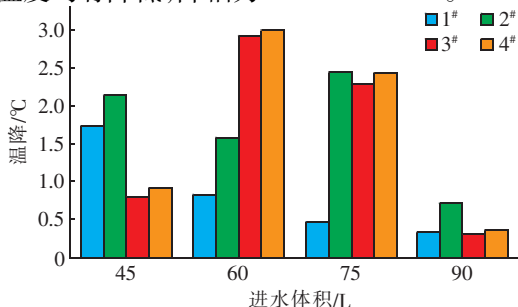


图2 不同进水体积下各装置出水的温降

Fig.2 Temperature drop of different devices under different inlet volumes

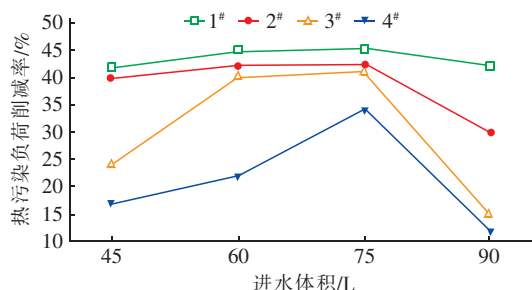


图3 不同进水体积下各装置的热污染负荷削减率

Fig.3 Heat reduction rate of different devices under different inlet volumes

外来径流携带的总热量值是影响受纳水体温度变化幅度的主要因素,评估总热量削减值应综合考虑体积削减和热交换两方面作用的叠加效应,本研究重点比较不同工况下的热污染负荷削减率。由图3可知,4种不同填料生物滞留装置的热污染负荷削减率最高可达 $34.15\% \sim 45.15\%$,削减效果较为显著。通过分析不同进水体积下热污染负荷削减率的变化趋势发现,当进水体积为 $45 \sim 75 \text{ L}$ 时,每个装置的热污染负荷削减率随进水体积的增加均逐步升高,但当进水量提高至 $75 \sim 90 \text{ L}$ 时,热污染负荷削减率不升反降。究其原因,当进水体积较少时,体积削减作用明显,且进水携带的总热量较少,热交换较充分。当进水体积从 45 L 增至 75 L 时,生物滞留内部的土壤逐渐由非饱和状态趋于饱和状态,蓄水层开始集水,设施内部蓄积的大部分雨水径流的温度也在逐渐接近土壤温度。当进水体积在 $45 \sim 75 \text{ L}$ 之间时,随进水体积的增大设施的出水时间也逐渐延长,径流与填料的热交换也更为充分,热污染负荷削减率也越高;当进水体积在 $75 \sim 90 \text{ L}$ 时,生物滞留的土壤呈饱和状态的时间占比大于进水为 $45 \sim 75 \text{ L}$ 时的时间占比,内部水流很快,出水体积增大,此时雨水径流温度又较接近土壤温度,所体现出的进、出水温差较小,故此时热污染负荷削减率降低。

比较不同装置对同一工况的热负荷削减效果可知,在不同进水体积条件下,4种填料对热负荷削减

的作用为:炉渣 > 石英砂 > 陶粒 > 沸石。在进水体积为 45、60、75 和 90 L 时,炉渣的热污染负荷削减率比石英砂的热污染负荷削减率分别高 1.81%、2.52%、2.85% 和 12.09%,表明炉渣的热负荷削减效能高于石英砂;而陶粒的热污染负荷削减率较炉渣分别低 17.9%、4.78%、4.23% 和 27.24%,较石英砂分别低 16.09%、2.26%、1.38% 和 15.15%,热负荷削减效能低于炉渣和石英砂。实验结果显示,沸石在 4 种工况下的热负荷削减效果都欠佳,进水体积为 45、60、75 和 90 L 时,热污染负荷削减率分别为 17.04%、22.10%、34.15% 和 11.68%,均低于 35%,由此可推断在相同降雨条件下,沸石的热负荷削减效果相对于其他 3 种填料均较差。究其材料自身属性发现,影响热交换的主要因素是比热容和孔隙率,4 种填料中炉渣和陶粒的孔隙率较大,而石英砂和沸石的孔隙率都相对较小;比热容从大到小依次为:炉渣、石英砂、陶粒、沸石。因此,在这 4 种常用填料中,炉渣的比热容最大,孔隙率最高,接触水流的比表面积最大,热交换最充分;而沸石的孔隙率相对较小且比热容最小,热交换较差,其控制热污染的效能也最低。

综上可知,炉渣和石英砂作为生物滞留填料时,设施的热负荷削减效果较好,而以沸石作为填料的生物滞留设施的热处理效果较差。当进水体积在 45~75 L 时,进水体积越大,所携带的热量越多,热交换越多,生物滞留设施的热污染负荷削减率就越高,反之亦然。由式(1)可推得,在生物滞留系统下渗能力和热交换能力未达到饱和状态的前提下,当设计降雨强度和生物滞留服务面积一定时,生物滞留设施的热污染负荷削减率和汇水面径流系数呈正相关,即径流系数越大,热污染负荷削减率越高;当设计降雨强度和径流系数一定时,热污染负荷削减率和汇水面积呈正相关,即汇水面积越大,热污染负荷削减率越高。但当汇水面积过大或径流系数过大时,热污染负荷削减率则会明显降低,若选用生物滞留作为削减径流热负荷的绿色基础设施,宜分析下垫面组成和系统服务面积占汇水区比例来确定设计规模。

2.2 进水温度对热污染负荷削减率的影响

为探寻不同雨水径流温度 and 不同降雨历时对生物滞留设施控制热污染效能的影响,以 60 L 的雨水进水体积为例,设置了温度梯度为 3℃ 的 3 组入流

雨水温度即 28、25、22℃,以及降雨历时为 0.5 h 和 1 h 的对比实验。结果显示,生物滞留设施对不同温度径流的热负荷削减效果不同(见图 4)。在进水温度为 22~28℃ 的条件下,除在 0.5 h 降雨历时的 1[#]、2[#]外,其他实验组的热污染负荷削减率均随进水温度的升高而升高,进水温度为 28℃ 时生物滞留装置的热量削减率最高,初步分析其原因,进水温度越高,进入系统的热量越多,与内部土壤的温差越大,故热污染负荷削减率升高。

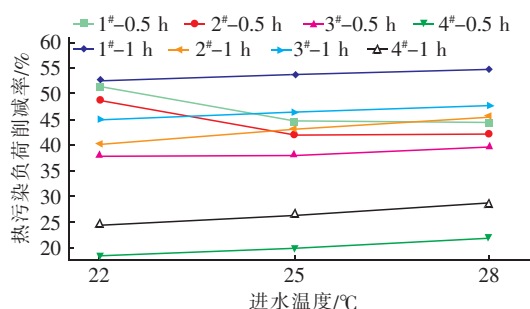


图 4 不同进水温度下各装置的热污染负荷削减率

Fig. 4 Heat reduction rate of different devices under different inlet temperatures

在不同进水温度条件下,不同填料装置的热量削减效果:炉渣 > 石英砂 > 陶粒 > 沸石。由图 4 可知,不同填料装置的平均热污染负荷削减率为 40.05%,其中,炉渣对径流热量的削减效果最好,热污染负荷削减率最高达 54.81%,最低为 44.62%,平均值为 50.36%;石英砂的热污染负荷削减率最高为 48.84%,最低为 40.48%,平均值为 43.73%;陶粒的热污染负荷削减率最高为 47.77%,最低为 37.98%,平均值为 42.60%;沸石的热污染负荷削减率最高为 28.69%,最低为 18.79%,平均值为 23.52%,热负荷削减效果最差。

2.3 热量削减贡献比分析

生物滞留设施主要通过“渗、滞、蓄”功能减少雨水径流外排体积,同时还通过雨水与设施内部土壤、填料等介质进行热交换作用,从而协同实现对雨水径流热污染的削减。本研究对温度和水量不同单位自变量进行热量削减贡献比分析,利用 SPSS 软件对实验数据进行标准回归分析,结果显示,在显著性水平为 0.05 的情况下,体积削减和热交换对热污染负荷削减率都有显著影响,二者的回归系数分别为 0.817 和 0.233,说明热污染负荷削减率与体积削减和热交换呈正相关,其中体积削减对热负荷削减作

用更为显著。由此得到标准回归方程:

$$\eta = 12.87 + 0.010 \ 2x_1 + 0.009 \ 7x_2 + e \quad (5)$$

式中: x_1 为体积削减所削减的热量, kJ; x_2 为热交换所削减的热量, kJ。

由式(5)可知, 体积削减对热量削减效率的影响大于热交换。在实验条件下, 保持其他条件不变, 当体积削减所削减的热量变化 1 kJ 时, 热污染负荷削减率变动 0.010 2%; 保持其他条件不变, 当热交换所削减的热量变化 1 kJ 时, 热污染负荷削减率变动 0.009 7%。

将实验中两种作用方式的削减效果区分开来, 装置 1#~4# 中体积削减的贡献率分别为 89.75%、83.99%、83.33%、66.07%, 热交换的贡献率分别为 10.25%、16.01%、16.67%、33.93%, 可知体积削减的贡献比大于热交换的贡献比。除沸石外, 其他 3 种填料的热交换贡献比均小于 20%, 经分析, 由于沸石填料所在装置的热污染负荷削减值较小, 且其体积削减率较低, 故体积削减贡献比相对较小, 而热交换贡献比相对较大。体积削减贡献比从大到小排序为: 炉渣、石英砂、陶粒、沸石, 与热污染负荷削减率排序吻合, 说明体积削减是生物滞留削减热负荷的主要作用方式, 体积削减量越高, 生物滞留设施的热污染负荷削减率提升的幅度也越大。在实际工程中, 可通过增加生物滞留体积控制量来提高热负荷削减效率。

3 结论

① 生物滞留设施对雨水径流热污染的削减作用较显著, 平均热污染负荷削减率超过 40%。

② 生物滞留不同填料条件下的热量负荷削减效果从大到小依次为: 炉渣、石英砂、陶粒、沸石。采用生物滞留设施缓解径流热污染时, 以炉渣作为填料效果较好。

③ 实验条件下, 进水温度越高, 生物滞留设施的热污染负荷削减率也越高, 进水温度为 28℃ 时, 各装置的热污染负荷削减率都较高, 最高的是炉渣填料, 其热污染负荷削减率可达 54.81%。延长生物滞留设施的出水时间, 可有效提高其热污染削减效率。

④ 利用 SPSS 软件对实验数据进行标准线性回归分析, 得出热污染负荷削减率与体积削减和热交换程度呈正相关, 且体积削减对热污染负荷削减率的贡献更大。

参考文献:

- [1] JONES M P, HUNT W F. Bioretention impact on runoff temperature in trout sensitive waters [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(8): 577–585.
- [2] MCKEE D, HATTON K, EATON J W, *et al.* Effects of simulated climate warming on macrophytes in freshwater microcosm communities [J]. *Aquatic Botany*, 2002, 74(1): 71–83.
- [3] SATTAR A M A, GHARABAGHI B, SABOURI F, *et al.* Urban stormwater thermal gene expression models for protection of sensitive receiving streams; urban stormwater thermal assessment and design guidance tool [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(13): 2330–2348.
- [4] LI J Q, GONG Y W, LI X J, *et al.* Urban stormwater runoff thermal characteristics and mitigation effect of low impact development measures [J]. *Journal of Water & Climate Change*, 2019, 10(1): 53–62.
- [5] LONG D L, DYMOND R L. Thermal pollution mitigation in cold water stream watersheds using bioretention [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2014, 50(4): 977–987.
- [6] 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): 600–608.
- [7] DIETZ M E, CLAUSEN J C. A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 167: 123–138.
- [8] SANCHEZ S C. Thermal Effects of Rain Gardens at the Headwaters of the Jenkintown Creek in Pennsylvania [D]. Philadelphia: Villanova University, 2018.

作者简介: 张珊(1995–), 女, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水环境科学与工程。

E-mail: zs2333@yeah.net

收稿日期: 2020–05–21

修回日期: 2020–06–24

(编辑: 刘贵春)