

李凯,王建龙,林宏军,等.生物滞留设施排空时间影响因素研究[J].环境工程技术学报,2022,12(1):240-247.

LI K,WANG J L,LIN H J,et al.Study on the influencing factors of emptying time of bioretention facilities[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 240-247.

生物滞留设施排空时间影响因素研究

李凯¹,王建龙^{1,2*},林宏军³,王泽熙¹,彭柳苇¹,张长鹤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

2.北京建筑大学,北京未来城市设计高精尖创新中心

3.北京市市政工程设计研究总院有限公司

摘要 生物滞留设施是我国海绵城市建设中应用较为广泛的技术措施之一,在其设计和运行维护过程中,排空时间对雨水径流总量的控制效果、植物生长状况等具有重要影响,但目前尚缺乏排空时间影响因素的系统研究。通过实验室试验,研究了调蓄水深、降雨间隔、淹没区高度及构造类型对排空时间的影响。结果表明:试验条件下,不同构造类型生物滞留设施调蓄层排空时间为10~140 min,完全排空时间为6~47 h。调蓄层排空时间随调蓄水深和淹没高度的增加而增加,随降雨间隔的增加而降低,调蓄水深对调蓄层排空时间影响最大;完全排空时间随调蓄水深和降雨间隔的增加而增加,随淹没高度的增加而降低,降雨间隔对完全排空时间影响最大。研究结果可为海绵城市建设过程中生物滞留设施优化设计提供技术支撑。

关键词 生物滞留;排空时间;设计参数;降雨间隔;模拟试验

中图分类号:X522 文章编号:1674-991X(2022)01-0240-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210156

Study on the influencing factors of emptying time of bioretention facilities

LI Kai¹, WANG Jianlong^{1,2*}, LIN Hongjun³, WANG Zexi¹, PENG Liuwei¹, ZHANG Changhe¹

1.Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education,
Beijing University of Civil Engineering and Architecture

2.Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture

3.Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd.

Abstract Bioretention facilities are one of the measures widely used in sponge city construction in China. During the design, operation and maintenance of bioretention facilities, the emptying time has an important influence on the total runoff volume control efficiency and plant growth. However, there is a lack of systematic research on the influencing factors of emptying time. The effects of storage-layer height, rainfall interval, submerged-area height and structure type on the emptying time were investigated via laboratory experiments. The results showed that under the test conditions, the discharge time of the storage layer of different structure types of bioretention facilities was 10-140 min, and the complete discharge time was 6-47 h. The emptying time of the storage layer increased with the increase of the storage-layer water depth and the submerged-area height, and decreased with the increase of the rainfall interval. The emptying time of the storage layer water was affected most significantly by the storage height. The total emptying time increased with the increase of water storage water depth and rainfall interval, and decreased with the increase of submerged-area height. The rainfall interval had the greatest effect on the total emptying time. The research results could provide technical support for the design and optimization of bioretention facilities in the process of sponge city construction.

Key words bioretention; emptying time; design parameters; rainfall interval; simulation experiment

近年来,随着海绵城市建设的推广,生物滞留设施由于具有良好的水量削减和水质净化效果^[1],逐渐得到广泛应用,而排空时间对其雨水径流总量控制效果、景观效果、植物生长状况、蚊蝇滋生、设施运

行状况等方面具有重要影响。针对上述问题,国内外已开展了相关研究,如梁小光等^[2]分析了欧美国家有关生物滞留设施排空时间的规定及控制方式,提出了生物滞留设施底部穿孔排水管的开孔面积计算

收稿日期:2021-04-28

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX0713-002)

作者简介:李凯(1996—),男,硕士研究生,研究方向为城市雨水控制与利用, lk66608@163.com

* 责任作者:王建龙(1978—),男,教授,博士,研究方向为城市雨水控制与利用, wjl_xt@163.com

方法。马越等^[3]推导了湿陷性黄土地区典型生物滞留设施调蓄容积与排空时间的关系式,该公式仅适用于种植土层、砾石层孔隙水饱和状态。杨庆华等^[4]分析了低影响开发雨水调蓄设施蓄水深度与降水量、硬化率以及渗透系数之间的相关性,推导了调蓄设施的调蓄容积理论计算公式。唐雪芹^[5]通过生物滞留带产流延时、蓄水层蓄水时间等 5 个指标,评价了生物滞留带的蓄渗效果,提出了最优蓄渗效果的构造组合。在生物滞留设施工程应用中,常常由于排空时间选择不当,而导致产生蚊蝇滋生、植物受淹等问题,因此,合理选择生物滞留设施排空时间对于其设计和运行维护至关重要。目前我国 GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》中规定下凹式绿地排空时间宜为 24~28 h^[6],而在生物滞留设施的设计中鲜有明确规定。国外对生物滞留设施排空时间的规定差异较大,美国部分地区规定如表 1 所示。梁小光等^[2]通过综合分析径流污染物控制所需下渗速率,推荐我国生物滞留设施排空时间上限为 24~28 h,下限不宜低于 6~12 h。综上,生物滞留设施设计参数对排空时间的量化影响还缺乏系统研究,此外,对于调蓄层排空时间的研究也鲜见报道。

表 1 美国部分地区生物滞留设施排空时间
Table 1 Emptying time of bioretention facilities in different districts of the United States h

地区	下限	上限
哥伦比亚特区 ^[7] 、新泽西州 ^[8] 、宾夕法尼亚州 ^[9]		72
纽约州 ^[10] 、明尼苏达州 ^[11] 、密歇根州 ^[12]		48
缅因州 ^[13]	24	48
马里兰州 ^[14] 、北卡罗来纳州 ^[15]	12	48
马里亚纳群岛 ^[16] 、佐治亚州 ^[17] 、康涅狄格州 ^[18]		24
加利福尼亚州 ^[19]	6	
科罗拉多州 ^[20]		12
艾奥瓦州 ^[21]	4	12

生物滞留设施排空时间一般指设施蓄水量全部排出所需时间,本研究根据生物滞留设施渗透过程及其对雨水径流控制效果、植物健康生长的影响,将排空时间分为调蓄层排空时间与完全排空时间。调蓄层排空时间为生物滞留蓄水层最大蓄水体积排空所需时间,主要受设计调蓄水深和生物滞留设施整体渗透性能影响,是引起蚊蝇滋生、高温雨水径流抑制植物生长的重要影响因素;完全排空时间为生物滞留设施开始进水至排水管停止出流所需时间,主要受生物滞留设施渗透性能、设计滞蓄容积、生物滞留介质吸水率等参数影响,是影响植物耐淹性能的主要因素。通过实验室柱状模拟试验,系统研究

了不同影响因素条件下,生物滞留设施调蓄层排空时间和完全排空时间的变化特征,以期生物滞留设施的精细化设计、施工与维护管理提供依据。

1 装置与方法

1.1 材料与装置

生物滞留设施结构类型对其水量水质控制效果具有重要影响,冉阳等^[22]研究提出生物滞留池经结构优化、有效蓄水深度、入渗率和水力流动方向等方面改良后,可提升雨水入渗速率及对氮、磷污染物的去除效果。设计了包括传统型、无植物型、倒置型、混合型、覆盖层型不同类型的生物滞留模拟设施,其构造如图 1 所示。各设施尺寸均为 $L \times B \times H = 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 。不同类型生物滞留设施的相同结构层填料组成相同,种植土层采用壤土和中砂按体积 1:1 混合的复合填料,中砂粒径为 0.3~0.5 mm,填料层采用粒径 1~2 mm 的黄砂,砾石层采用粒径 5~10 mm 的碎石,混合填料为黄砂与种植土层填料按体积比为 1:1 混合的复合填料,覆盖层为枯草和松树皮,种植土层植物采用马蔺,植株高为 40~45 cm,种植密度为 125 株/ m^2 。

1.2 试验方法

试验进水采用瞬时进水方式,进水量为设计调蓄水深最大蓄水量,出流流量记录间隔为 1 min,流速较大时采用量筒测量,当出流流速降低至 1 mL/s 时,使用翻斗式雨量计(型号 HOBORG3-M)测量。试验中通过安装在淹没出流管不同高度的阀门控制淹没区高度。试验具体方案见表 2。

不同类型生物滞留设施介质层总高度均为 80 cm。以传统型为例,如图 1(e) 所示。渗透系数采用常水头法测量,不同类型生物滞留设施的种植层各深度渗透速率(q)如表 3 所示。由表 3 可知,传统型、无植物型、混合型、覆盖层型的 q_1 (0~10 cm 深度处)均较小,说明其表层渗透性能较差。这与相关研究试验结果一致,如谢瑶^[23]研究发现生物滞留设施表层 20 cm 由于堵塞等原因,渗透性能最差。因此,实际应用中为提高生物滞留设施蓄水的下渗速率,种植土表层 0~20 cm 建议使用渗透系数较高的介质。林宏军等^[24]研究发现通过将部分填料倒置于表层,倒置型生物滞留设施的径流总量控制率、峰值削减率和污染物去除效果均优于传统生物滞留设施。

2 结果与讨论

2.1 调蓄水深对排空时间的影响

生物滞留设施调蓄层调蓄水深对其渗透过程具

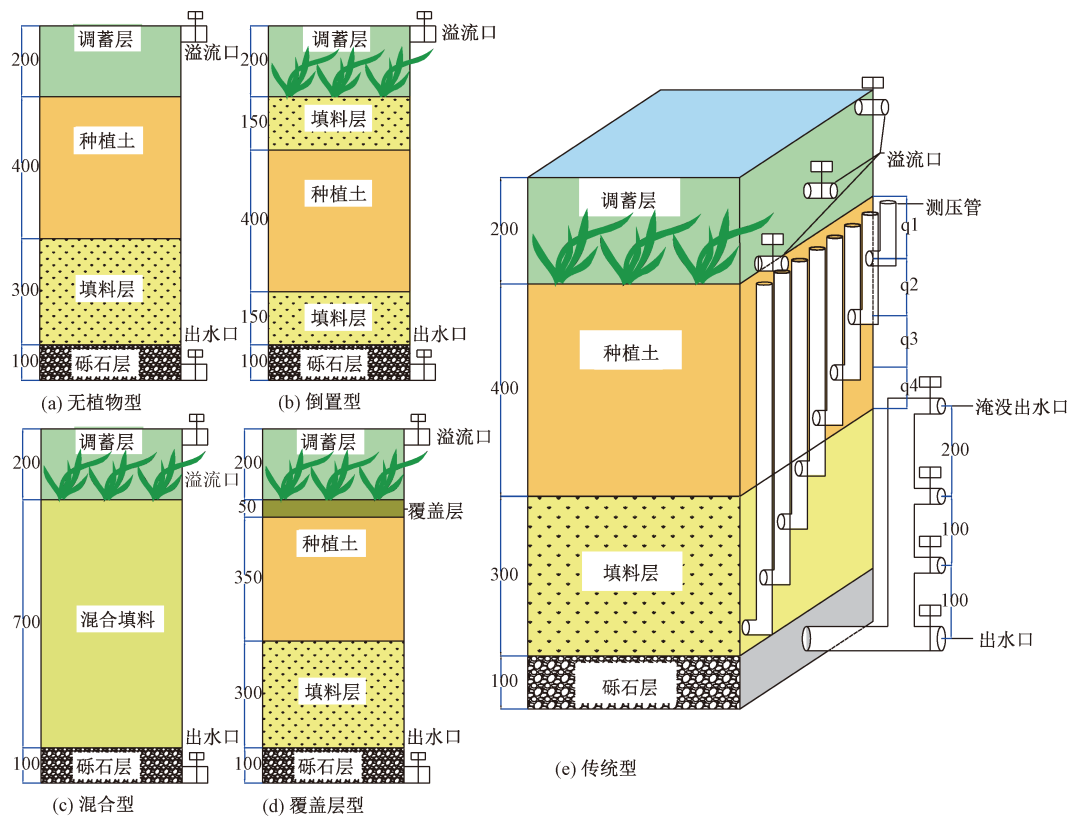


图 1 不同类型生物滞留设施构造组成

Fig.1 Composition of different types of bioretention facilities

表 2 试验方案

Table 2 Experimental scheme

试验名称	试验内容	其他试验条件
调蓄水深	5、10、15、20 cm	淹没高度 0 cm、降雨间隔 3 d
淹没高度	0、10、20、40 cm	调蓄水深 10 cm、降雨间隔 3 d
降雨间隔	3、7、15 d	调蓄水深 10 cm、淹没高度 0 cm

表 3 生物滞留种植层不同深度渗透速率

Table 3 Permeation rates at different depths of planting layer of the bioretention cm/h

项目	传统型	无植物型	倒置型	混合型	覆盖层型
q_1	2.89	1.82	500.00	10.83	2.56
q_2	3.25	2.31	6.47	11.82	3.03
q_3	5.20	3.47	5.82	13.00	5.50
q_4	3.25	2.17	4.16	5.91	3.56
K_{equ}	3.06	2.04	12.77	11.30	2.78
K	10.93	4.62	5.80	11.56	8.06

注： $q_1 \sim q_4$ 分别为 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 深度的雨水渗透速率； K_{equ} 为种植层 0~20 cm 等效渗透系数； K 为装置整体渗透系数。

有重要影响，不同调蓄水深条件下，传统型生物滞留设施 2 h 出流过程线如图 2 所示。由图 2 可知，不同试验工况的出流速率均呈先增加后降低趋势，且随着调蓄水深的增加，出流速率的峰值增大，出流速率

均在第 10 分钟左右达到峰值，调蓄水深为 5、10、15、20 cm 时，出流速率峰值分别为 0.04、0.24、0.25、0.31 L/min。因此，适当增加生物滞留调蓄水深可以增加雨水径流的下渗速率。

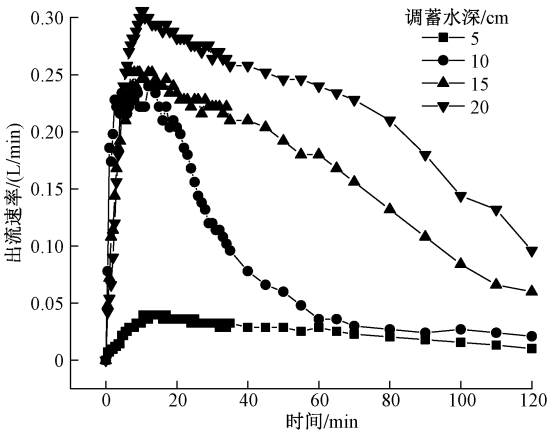


图 2 传统型不同调蓄水深出流过程线($T=2\text{ h}$)

Fig.2 Outflow process of traditional bioretention at different retention water heights ($T=2\text{ h}$)

生物滞留设施调蓄水深可直接影响排空时间，传统型在不同调蓄水深条件下排空时间如表 4 所示。由表 4 可知，随着调蓄水深的增加，生物滞留设施调蓄层排空时间和完全排空时间均增加，调蓄水深由 5 cm 增至 20 cm 时，调蓄层排空时间由 35 min

增至 100 min, 完全排空时间由 25 h 增至 37 h。同时, 随着调蓄水深的增加, 生物滞留设施开始出流时间提前, 出流总量增加, 调蓄水深由 5 cm 增至 20 cm 时, 排水口开始出流时间由第 55 分钟提前至第 26 分钟, 出流总量增加 20.93 L, 水量削减率由 39.6% 降至 19.5%。因此, 通过增加调蓄水深可以增加生物滞留调蓄层排空时间和完全排空时间, 但出流时间提前, 雨水径流外排总量削减率降低。

表 4 传统型不同调蓄水深时排空时间

Table 4 Emptying time of traditional bioretention at different retention water heights

调蓄水深/ cm	进水总量/ L	开始出流 时间/min	出流总量/ L	调蓄层排空 时间/min	完全排空 时间/h
5	8	55	4.83	35	25
10	16	35	10.32	60	27
15	24	27	16.10	88	29
20	32	26	25.76	100	37

2.2 降雨间隔对排空时间的影响

降雨间隔对生物滞留设施渗透过程具有重要影响, 不同降雨间隔时传统型 2 h 出流过程线如图 3 所示。由图 3 可知, 随着降雨间隔的增加, 出流速率到达峰值时间缩短, 峰值增大, 降雨间隔为 3、7 和 15 d 时, 出流速率峰值分别出现在第 12、6、1 分钟, 峰值分别为 0.24、0.24 和 0.32 L/min, 原因在于降雨间隔增加后生物滞留设施内部初始含水率降低, 降雨初期雨水下渗速率较大。

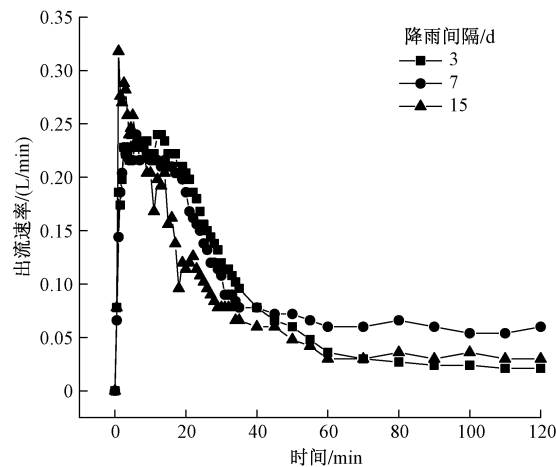


图 3 传统型不同降雨间隔时出流过程线(T=2 h)

Fig.3 Outflow process of traditional bioretention at different rainfall intervals (T=2 h)

不同降雨间隔时传统型排空时间的影响如表 5 所示。由表 5 可知, 随着降雨间隔的增加, 调蓄层排空时间减少, 完全排空时间增加。降雨间隔由 3 d 增至 7 d 时调蓄层排空时间减少 20 min, 完全排空时间

几乎不变, 由 7 d 增至 15 d 时, 调蓄层排空时间减少 20 min, 完全排空时间增加 20 h, 说明间隔时间较长时对完全排空时间影响较大。且随着降雨间隔增加, 开始出流时间提前, 出流总量减少。降雨间隔由 3 d 增至 15 d 时, 底部排水口开始出流时间由第 35 分钟提前至第 31 分钟, 出流总量减少 4.67 L。因此, 在降雨间隔时间较长的地区, 应充分利用生物滞留设施在该地区调蓄层排空时间短、完全排空时间长的特点, 因地制宜选择设计参数, 例如减少表层蓄水空间, 增加填料层厚度, 提高蓄滞效果。

表 5 传统型不同降雨间隔条件时排空时间

Table 5 Emptying time of traditional bioretention under different rainfall intervals

降雨间隔/ d	进水总量/ L	开始出流 时间/min	出流总量/ L	调蓄层排空 时间/min	完全排空 时间/h
3	16	35	10.32	60	27
7	16	35	6.85	40	27
15	16	31	5.65	20	47

2.3 淹没高度对排空时间的影响

研究表明, 设置淹没出流区并提高滞留时间可提升污染物去除效果, 如仇付国等^[25]研究发现, 通过在生物滞留系统底部增加内部淹没区并提高滞留时间, 可以大幅增加对 NO₃-N 和 TN 的去除效果。不同淹没高度条件下传统型生物滞留设施 2 h 出流过程线如图 4 所示。由图 4 可知, 随着淹没高度的增加, 生物滞留设施出流速率峰值时间提前, 峰值降低, 淹没高度为 0、10、20、40 cm 时, 出流速率峰值分别为 0.24、0.17、0.16 和 0.10 L/min。同时随着淹没高度增加, 雨水的渗流路径逐渐缩短, 稳定出流速率增加。由此可见, 淹没高度增加会缩短径流雨水下渗路径, 削弱生物滞留的水量控制效果。

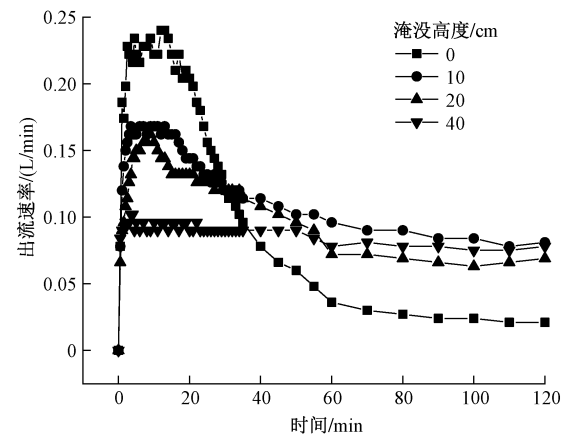


图 4 传统型不同淹没高度时出流过程线(T=2 h)

Fig.4 Outflow process of traditional bioretention at different submerged heights (T=2 h)

生物滞留设施内部淹没高度可直接影响排空时间,不同淹没高度条件下传统型出流特征见表 6。

表 6 传统型不同淹没高度时排空时间

Table 6 Emptying time of traditional bioretention at different inundation heights

淹没高度/ cm	进水总量/ L	开始出流 时间/min	出流总量/ L	调蓄层排空 时间/min	完全排空 时间/h
0	16	35	10.32	60	27
10	16	35	9.35	65	25
20	16	44	7.34	65	14
40	16	60	6.68	70	6

由表 6 可知,随着淹没高度的增加,调蓄层排空时间小幅度增加,完全排空时间则会大幅度减少。同时随着淹没高度的增加,开始出流时间延后,出流总量减少。淹没高度由 0 cm 增至 40 cm 时,调蓄层排空时间增加 10 min,完全排空时间减少 21 h,底部排水口开始出流时间由第 35 分钟延后至第 60 分钟,出流总量减少 3.64 L。可见,增加内部淹没高度可以大幅缩短生物滞留设施的完全排空时间,对调

蓄层排空时间影响较小,但会减少外排水量。

2.4 结构类型对排空时间的影响

2.4.1 结构类型对调蓄层排空时间的影响

不同类型生物滞留设施在试验条件下调蓄层排空时间如图 5 所示。从图 5 可知,调蓄层排空时间由低到高顺序均为倒置型<混合型<传统型<无植物型<覆盖层型,与表 3 各装置 K_{equ} 由高到低顺序基本相同。可见,在相同试验条件下,渗透系数越高,调蓄层排空时间越短。由图 5(a) 可知,调蓄水深由 10 cm 增至 20 cm 时,倒置型的调蓄层排空时间由 20 min 增至 90 min,增长幅度超过其他 4 种类型,原因为倒置结构使用渗透系数较高的填料在种植土层上,在增加表层渗透系数的同时可充分发挥填料层空隙的滞蓄作用,相当于增加了调蓄层的容积。当蓄水深度超过填料层厚度(>15cm)时,下渗速度减慢,调蓄层排空时间变长。因此,调蓄层排空时间受生物滞留设施表层渗透系数影响较大。

由图 5(a)、图 5(b) 可知,不同类型生物滞留设施

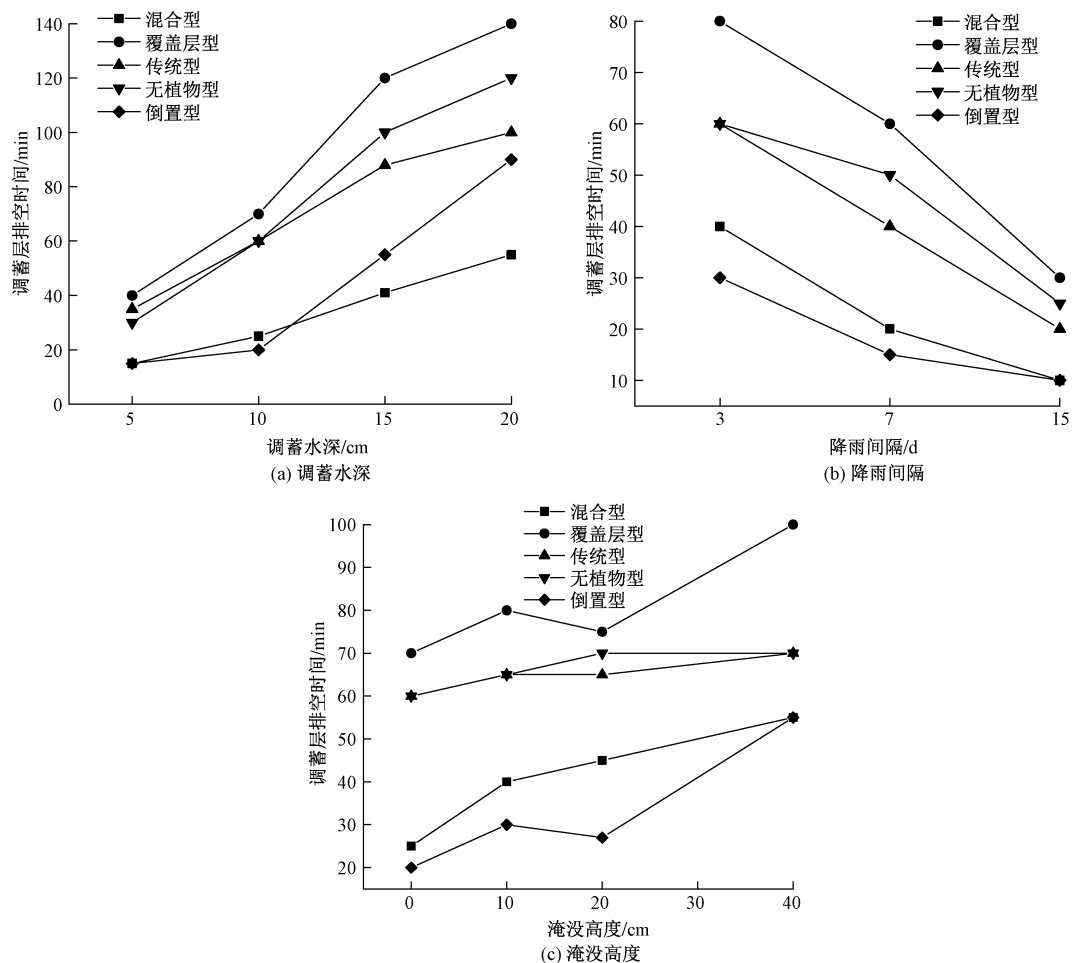


图 5 不同类型生物滞留设施调蓄层排空时间变化

Fig.5 Comparison of emptying time of storage layer among different types of bioretention facilities

的调蓄层排空时间均随调蓄水深的增加而增加,变化范围为 15~140 min, 随降雨间隔的增加而降低,变化范围为 20~100 min; 由图 5(c) 可知, 随淹没高度的增加, 调蓄层排空时间整体呈增加趋势, 变化范围为 10~80 min, 但在淹没高度由 10 cm 增至 20 cm 时, 不同类型生物滞留的调蓄层排空时间均较小, 覆盖层型和倒置型分别缩短 3 和 5 min, 传统型不变, 无植物和倒置型均增加 5 min, 说明淹没高度对其调蓄层排空时间影响较低。对不同影响因素与调蓄层排空时间进行 SPSS 相关性分析, 结果如表 7 所示。由表 7 可见, 显著性水平 P 均小于 0.05, 说明 3 种影响因素均与调蓄层排空时间显著相关, 其相关系数绝对值由高到低排序与时间变化范围由大到小排序一致, 因此, 调蓄层排空时间的影响大小为调蓄水深>降雨间隔>淹没高度。

2.4.2 结构类型对完全排空时间的影响

不同类型的生物滞留设施在试验条件下完全排空时间如图 6 所示。从图 6 可知, 完全排空时间变

表 7 调蓄层排空时间影响因素相关性分析			
Table 7 Correlation analysis of factors influencing the emptying time of storage layer			
项目	调蓄水深	淹没高度	降雨间隔
显著性(P)	0.012	0.044	0.021
相关系数	0.988	0.956	-0.982

化范围为 6~47 h, 当降雨间隔较短、淹没高度较低时, 完全排空时间由低到高顺序为无植物型<倒置型<覆盖层型<混合型<传统型, 与表 3 中各装置 K 由低到高顺序基本相同。刘霞等^[26] 研究认为, 土壤的滞留贮水功能在积水入渗过程中对下渗速度有较大影响。生物滞留设施完全排空时间可能由整体渗透系数和土壤贮水能力综合决定, 径流雨水下渗过程中土壤逐渐吸水处于饱水状态, 下渗结束后部分土壤贮水会在重力作用下逐渐向下运移至排水口继续排出。因此, 整体渗透系数越大, 持水能力低, 完全排空时间短; 整体渗透系数越小, 持水能力大, 完全排空时间长。

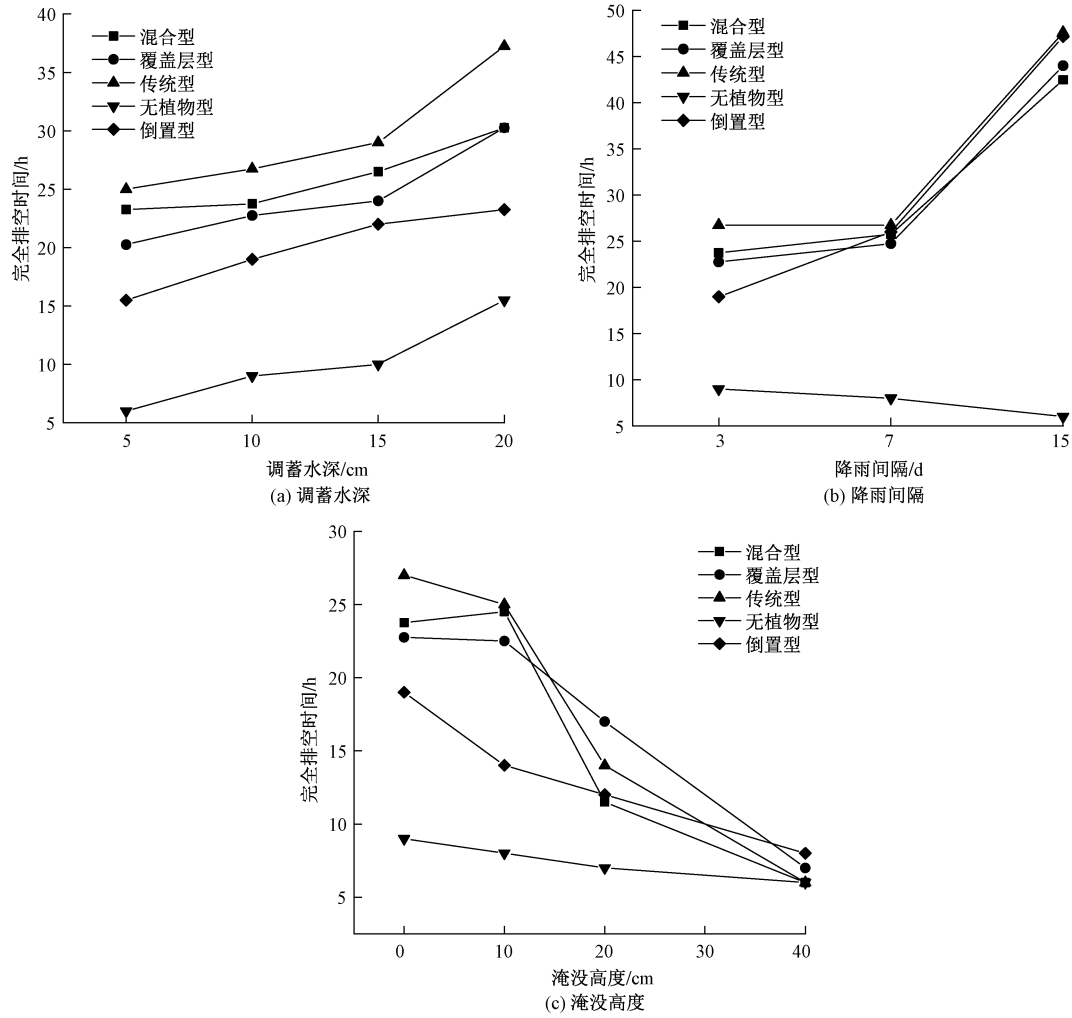


图 6 不同类型生物滞留设施完全排空时间变化

Fig.6 Comparison of complete emptying time of different types of bioretention facilities

由图 6(a)、图 6(c) 可知, 不同类型生物滞留设施的完全排空时间均随调蓄水深的增加而增加, 变化范围为 6~37 h, 随淹没高度的增加而缩短, 变化范围为 6~27 h; 由图 6(b) 可知, 完全排空时间随着降雨间隔增加, 变化范围为 6~47 h。对不同影响因素与完全排空时间进行 SPSS 相关性分析, 结果如表 8 所示。由表 8 可见, 显著性水平 P 均小于 0.05, 说明不同影响因素均与完全排空时间显著相关, 其相关系数绝对值由高到低排序与时间变化范围由大到小排序一致, 因此, 完全排空时间的影响大小为降雨间隔>调蓄水深>淹没高度。

表 8 完全排空时间影响因素相关性分析

Table 8 Correlation analysis of influencing factors of complete emptying time

项目	调蓄水深	淹没高度	降雨间隔
显著性(P)	0.019	0.049	0.029
相关系数	0.981	-0.971	0.996

由图 6(b) 可知, 4 种有植物生物滞留设施完全排空时间逐渐增加, 无植物型完全排空时间降低。说明植被对生物滞留设施的渗透性能具有重要影响, 如刘霞等^[26] 研究发现, 植被具有明显的改良土壤水文物理性质、提高土壤入渗和贮水能力的作用; 郭雷^[27] 研究发现, 林、灌、草植被能显著降低土壤容重和增加土壤孔隙度, 改善土壤物理性质; Luo 等^[28] 研究发现, 有植被覆盖的土壤吸水率相对无植被覆盖的土壤大幅提升。可见植被增强了生物滞留设施的贮水能力, 因此, 无植物型完全排空时间较短, 且随着降雨间隔增加, 长期蒸发与植物吸水使土壤含水量降低, 该现象会更加明显。

3 结论

(1) 随着调蓄水深的增加, 生物滞留设施调蓄层排空时间和完全排空时间均增加; 随着淹没区高度的增加, 生物滞留设施调蓄层排空时间增加, 完全排空时间减少; 随着降雨间隔时间的增加, 生物滞留设施调蓄层排空时间减少, 有植物生物滞留设施完全排空时间增加, 无植物生物滞留设施完全排空时间减少。

(2) 调蓄水深、淹没高度、降雨间隔与生物滞留设施调蓄层排空时间、完全排空时间均显著相关, 且对调蓄层排空时间的影响程度由高到低为调蓄水深>降雨间隔>淹没高度; 对完全排空时间的影响程度由高到低为降雨间隔>调蓄水深>淹没高度。

(3) 不同结构的生物滞留设施渗透和贮水能力

不同, 排空时间差异较大, 调蓄层排空时间为 10~140 min, 完全排空时间为 6~47 h。在实际工程应用中, 应根据当地降雨特征和设计目标要求, 合理确定调蓄层排空时间和完全排空时间, 并注意二者的区别。

参考文献

- [1] 北京市规划和自然资源委员会. 海绵城市建设设计标准: DB11/T 1743—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [2] 梁小光, 魏忠庆, 上官海东, 等. 海绵城市建设中生物滞留设施排空时间研究[J]. 给水排水, 2018, 54(11): 26-30.
LIANG X G, WEI Z Q, SHANGGUAN H D, et al. Research on the emptying time of biological detention facility in sponge city construction[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(11): 26-30.
- [3] 马越, 胡志平, 姬国强, 等. 湿陷性黄土地区海绵城市建设雨水渗蓄风险防控若干问题探讨[J]. 给水排水, 2020, 56(9): 70-77.
MA Y, HU Z P, JI G Q, et al. Discussion on risk control of stormwater infiltration and detention for sponge city construction in collapsible loess area[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(9): 70-77.
- [4] 杨庆华, 杨乾, 唐雪芹. 基于低影响开发策略的雨水调蓄容积取值计算[C]//《环境工程》2018年全国学术年会论文集(下册). 北京: 《环境工程》编辑部, 2018: 264-268.
- [5] 唐雪芹. 城市道路生物滞留带蓄渗效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [6] 住房和城乡建设部. 城镇内涝防治技术规范: GB 51222—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [7] GREG H, REBECCA C S, BRAIN V W. Draft district of Columbia stormwater management guidebook[R]. Ellicott City: Center for Watershed Protection, 2013.
- [8] BLICK S A, KELLY F, SKUPIEN J J. New Jersey stormwater best management practices manual[R]. Trenton: New Jersey: New Jersey Department of Environmental Protection, 2004.
- [9] MEAN P E, EFFICIENCIES B M P P R. Pennsylvania stormwater best management practices manual[R]. Harrisburg: Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2006.
- [10] Center for Watershed Protection. New York State stormwater management design manual[R]. New York: New York State Department of Environmental Conservation, 2003.
- [11] Minnesota Stormwater Steering Committee. The Minnesota stormwater manual[R]. Saint Paul: Minnesota Pollution Control Agency, 2005.
- [12] JANIS B, ANDY B, THOMAS C. Low impact development manual for Michigan: a design guide for implementers and reviewers[M]. Detroit: Southeast Michigan Council of Governments (SEMCOG), 2008.
- [13] NICK L, JEFF D, JOHN M. Maine Stormwater Management Design Manual[R]. Augusta: Maine Department of Environmental

- Protection, 2016.
- [14] CHENG M S, ZHEN J X, SHOEMAKER L. BMP decision support system for evaluating stormwater management alternatives[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2009, 3(4): 453-463.
- [15] Charlotte-Mecklenburg Storm Water Services. Charlotte-Mecklenburg BMP design manual[R]. Raleigh: North Carolina Department of Environment and Natural Resources (NCDENR), 2013.
- [16] KASPARI P, ALLEN S. Environmentally sound approaches for stormwater management on Pacific Island Nations[C]//World Environmental and Water Resources Congress 2008, Honolulu, Hawaii, USA: American Society of Civil Engineers, 2008: 1-11.
- [17] HAUBNER S M. Georgia stormwater management manual[R]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2001.
- [18] Connecticut Department of Energy and Environmental Protection (CDEEP). Connecticut stormwater quality manual[R]. Hartford: CDEEP, 2004.
- [19] Clean Water Program's Management Committee. Clean water program Alameda County[R/OL]. 2019. [2021-05-10]. <https://www.cleanwaterprogram.org/c3-guidance-table.html>.
- [20] Urban Drainage and Flood Control District(UDFCD). Urban storm drainage criteria manual: volume 3: stormwater quality[R]. Washington DC: Environmental Protection Agency, 2018.
- [21] IOWA Department of Natural Resources. Iowa stormwater management manual[R]. Des Moines: IOWA Department of Environmental Protection, 2007.
- [22] 冉阳, 付峥嵘, 马满英, 等. 改良型生物滞留池在海绵城市雨水处理中的研究与应用[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(1): 173-180.
- [23] 谢瑶. 重庆市海绵城市建设技术模式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [24] 林宏军, 王建龙, 赵梦圆, 等. 倒置生物滞留技术水量水质控制效果研究[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(6): 11-17.
- [25] 仇付国, 王珂, 李林彬, 等. 滞留时间和进水有机物对生物滞留系统除氮的影响[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(4): 197-202.
- [26] 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 1-5.
- [27] 郭雷. 林灌草根系统对土壤水分入渗的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.
- [28] LUO W Z, LI J H, SONG L, et al. Effects of vegetation on the hydraulic properties of soil covers: four-years field experiments in Southern China[J]. *Rhizosphere*, 2020, 16: 100272. ⊗
- RAN Y, FU Z R, MA M Y, et al. Research and application of amended bioretention tank in rainwater treatment of sponge city[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(1): 173-180.
- LIN H J, WANG J L, ZHAO M Y, et al. Study on water quantity and water quality control effect of inverted bioretention technology[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(6): 11-17.