

绿色屋顶径流减控效果的监测分析

杨默远, 张书函, 潘兴瑶
(北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘 要: 基于 3 年的连续试验监测与数据分析, 揭示绿色屋顶的产流规律, 定量识别实际运行过程中绿色屋顶的径流减控效果。结果表明, 绿色屋顶的年径流总量控制率为 77%, 在 174 场降雨中, 绿色屋顶发生产流的有 33 场, 产流多发生在大雨及大雨以上等级降雨中; 随着降雨量的增加, 绿色屋顶的径流系数逐渐增加, 对于暴雨和特大暴雨, 绿色屋顶的径流系数分别为 0.35 和 0.44; 绿色屋顶的场次径流总量控制率普遍在 50% 以上, 且随着降雨总量的增加而逐渐减少, 两者呈幂函数关系; 绿色屋顶同样具有较好的洪峰流量削减效果, 洪峰流量削减率与场次径流总量控制率存在较高的一致性, 两者的相关系数为 0.95; 绿色屋顶的初损过程对降雨的滞蓄起到重要作用, 典型场次的初损占比(初损量与降雨控制总量的比例)最高可达 90%, 且随降雨总量的增加而减少, 两者呈对数函数关系。初损过程对应的年径流总量控制率约为 51%, 大致相当于 10 mm 的设计降雨量, 即绿色屋顶具有 10 mm 的调蓄容积。

关键词: 海绵城市; 绿色屋顶; 径流总量控制率; 径流减控效果; 初损过程

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0134-05

Monitoring and Evaluation of Green Roof Runoff Reduction Effect

YANG Mo-yuan, ZHANG Shu-han, PAN Xing-yao
(Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on three years of continuous experimental monitoring data, the runoff generation pattern of green roofs was revealed, and the runoff reduction effect of green roof during actual operation was quantitatively identified. The results showed that the volume capture ratio of annual rainfall of green roof was 77%. Among the 174 rainfall events, the runoff was generated by the green roof only in 33 rainfall events, which mostly occurred in heavy rain and above. As the increase of the total rainfall volume, the runoff coefficient of the green roof gradually increased. For torrential rain and extra torrential rain, the runoff coefficients of the green roof were 0.35 and 0.44, respectively. The volume capture ratio of rainfall of the green roof was generally above 50%. With the increase of the total rainfall volume, the volume capture ratio of rainfall was gradually reduced, and there was a power function relationship between them. The green roof also had a good effect on flow peak reduction, which had a high correlation with the volume capture ratio of annual rainfall, and the correlation coefficient was 0.95. The initial loss process of green roof played an important role in the delay and storage of rainfall. The proportion of initial loss (the ratio of the initial loss to the volume capture of rainfall) of typical events was up to 90%, and it decreased with the increase of the total rainfall volume, showing a logarithmic function relationship.

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002, 2017ZX07103-007); 北京市自然科学基金青年基金资助项目(8194061, 8184075); 北京市科委重大研发项目(Z181100005318003)

The volume capture ratio of annual rainfall contributed by the initial loss process was about 51%, which was roughly equivalent to 10 mm of design rainfall, indicating the green roof had a storage volume of 10 mm.

Key words: sponge city; green roof; volume capture ratio of rainfall; runoff reduction effect; initial loss process

随着城市化进程的不断推进,城市不透水下垫面比例日益增加,破坏了城市原有的自然水循环过程,造成直接地表径流比例的增加,引起内涝风险加剧、面源污染严重等一系列城市水问题。绿色屋顶能够有效利用屋面的不透水下垫面空间,具有良好的径流调控和污染物削减效果,且生态环境效益显著,是海绵城市建设中的一种重要技术手段,具有较高的推广应用价值^[1]。但在实际应用过程中,应充分考虑屋顶承重负荷以及屋顶防水等实际问题,合理开展绿色屋顶的规划建设^[2]。

相关研究结果表明,绿色屋顶对径流总量的削减效果突出,特别是针对中小强度降雨事件,能够滞蓄大部分降雨,而对于大强度降雨事件,其径流减控效果有限^[3-4]。绿色屋顶径流减控效果的主要影响因素包括基质层厚度^[5]、基质组成^[6-7]、植被类型^[8-9]、前期土壤含水量条件^[10-11]等。目前针对绿色屋顶径流减控效果的研究大都存在较高的不确定性和区域局限性,在全国大力推进海绵城市建设的背景下,绿色屋顶在实际运行中的径流减控效果究竟如何,是亟待解决的重要难题。笔者以实际运行中的绿色屋顶为研究对象开展综合监测,针对性地构建降雨-径流过程计算模型,进而揭示绿色屋顶的产流规律,定量识别绿色屋顶的径流减控效果与年径流总量控制率,并在此基础上,进一步明确了初损过程对绿色屋顶径流减控效果的重要贡献,以期海绵城市建设中绿色屋顶的规划设计和推广应用提供参考。

1 试验设计

2014年—2016年,在北京市水科学技术研究院的屋顶平台开展绿色屋顶降雨-径流过程的试验监测,屋顶平面布置见图1。绿色屋顶面积约为65 m²,设有独立的排水管与流量监测装置。绿色屋顶的结构见图2。种植层:选择佛甲草,具有抗旱节水、隔热降温、易于管理等优点,被广泛应用于屋顶绿化工程中;基质层:厚度为10 cm,填料由草炭土、蛭石和砂土按4:2:1的比例混合而成,具有质量

轻、透水性强、持水性好、性能稳定、养护方便等特点,底层铺设土工布,防止基质流失;排水层:厚度为5 cm,由轻质塑料制成,均匀布置碗状结构以承载径流,并有排水出口;防穿刺层:在排水层下铺设PE土工膜,防止植物穿透屋顶;防水层:在原有屋顶基础上利用改性沥青聚乙烯防水。



图1 屋顶平面布置示意

Fig. 1 Schematic diagram of green roof

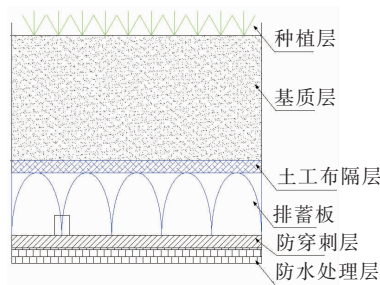


图2 绿色屋顶的结构

Fig. 2 Structure of green roof

降雨数据由自记式翻斗雨量计获得,记录时间间隔为1 min。利用三角堰法对屋顶径流进行监测,屋顶径流通过雨落管排出后,引入定制加工的三角堰测流箱,通过设置在测流箱内的稳流板缓解水位波动,利用液位计获取三角堰的出水水位,根据三角堰计算公式得到最终的屋顶径流量,记录时间间隔同样为1 min。

2 结果与分析

2.1 绿色屋顶试验区的降雨过程分析

2014年—2016年绿色屋顶试验区的降雨总量分别为536.9、532.9和664.5 mm,其中汛期(6月1日—9月15日)降雨量约占年降雨量的80%左右。另外,在2016年7月20日发生了一场极端降雨事件,场次降水量高达264.7 mm。

依据《降水量等级》(GB/T 28592—2012),对场次降雨数据进行分级。3 年中绿色屋顶试验区共监测有效降雨事件 174 场,其中小雨 122 场、中雨 27 场、大雨 14 场、暴雨 10 场、特大暴雨 1 场,不同等级降雨事件的发生频率与降雨量占比见图 3。总体而言,试验区域降雨事件以小雨和中雨为主,占总降雨场次的 85% 左右;大雨和特大暴雨发生概率虽小,但降雨总量占到了降雨量的 75% 左右。

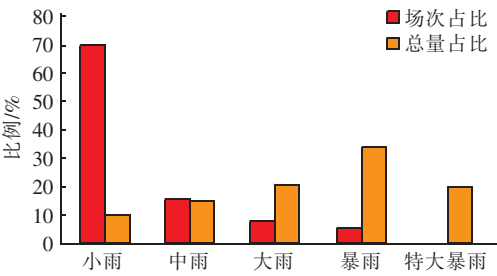


图 3 不同等级降雨场次分布规律

Fig. 3 Distribution of different levels of rainfall events

2.2 绿色屋顶产流规律分析

在所有降雨事件中,绿色屋顶发生产流的共有 33 场,约占总降雨场次的 19.0% (见表 1)。随着降雨等级的增加,绿色屋顶的产流概率逐渐增加,对于小雨事件,绿色屋顶基本不产流(122 场中仅有 3 场产流);对于暴雨和特大暴雨,绿色屋顶均有径流产生。随着降雨量的增加,绿色屋顶的径流系数也在逐渐增加,对于暴雨和特大暴雨,绿色屋顶的径流系数分别为 0.35 和 0.44,与《室外排水设计规范》中绿色屋顶的径流系数取值(0.3~0.4)较一致。

总体而言,绿色屋顶对小雨和中雨具有明显的水量滞蓄效果,基本没有径流产生,对暴雨和特大暴雨的水量滞蓄效果明显降低,但仍能滞蓄 60% 左右的降雨量。针对 2014 年—2016 年这 3 年监测到的所有降雨场次,绿色屋顶的年平均径流系数为 0.23,即进行绿色屋顶建设后,屋面的年径流总量控制率能够达到 77%。

表 1 产流规律统计

Tab. 1 Runoff generation characteristic

项 目	降雨场次	产流场次	产流概率/%	降雨总量/mm	径流总量/mm	径流系数
小雨	122	3	2.5	132.9	0.47	0
中雨	27	12	44.4	200.2	3.63	0.02
大雨	14	7	50.0	274.4	25.74	0.09
暴雨	10	10	100.0	447.4	156.55	0.35
特大暴雨	1	1	100.0	264.7	117.31	0.44
合计	174	33	19.0	1 319.6	303.70	0.23

2.3 基于典型场次的绿色屋顶径流减控效果分析

在绿色屋顶发生产流的 33 场降雨中,选择数据完整而且代表性较强的 20 场监测数据,用以分析绿色屋顶的径流减控效果。在 20 场降雨中,共包括 5

场中雨、4 场大雨、10 场暴雨、1 场特大暴雨,场次降雨历时多集中在 1~5 h 之间,主要为短历时高强度降雨。典型场次的绿色屋顶降雨-径流特征值如表 2 所示。

表 2 典型场次绿色屋顶的产流特征值统计

Tab. 2 Statistics of green roof runoff generation characteristic response to typical rainfall

项 目	降雨等级	降雨总量/mm	降雨历时/h	雨前干期/d	径流总量控制率/%	洪峰流量削减率/%	初损历时/min	洪峰滞时/min
2014-06-10	中雨	14.50	0.42	3	99.0	99.0	20	10
2014-06-17	暴雨	44.30	1.67	2	60.4	45.7	35	5
2014-07-16	暴雨	30.70	1.42	1	66.2	66.2	10	0
2014-08-30	大雨	21.00	1.75	7	92.3	93.4	0	0
2014-08-31	暴雨	37.80	2.08	1	50.4	47.9	15	0
2015-06-26	暴雨	33.20	2.67	7	84.8	78.8	75	5
2015-06-27	暴雨	33.50	1.00	1	50.1	56.4	10	0
2015-06-29	中雨	8.30	2.25	3	96.9	98.3	35	35
2015-07-27	暴雨	54.80	4.58	1	54.4	36.3	15	0
2015-08-01	中雨	9.70	1.00	1	88.6	93.5	10	25

续表2(Continued)

项 目	降雨等级	降雨总量/mm	降雨历时/h	雨前干期/d	径流总量控制率/%	洪峰流量削减率/%	初损历时/min	洪峰滞时/min
2015-08-07	暴雨	52.00	1.58	1	54.7	63.3	0	10
2016-07-19	大雨	27.80	13.42	5	92.8	91.5	360	15
2016-07-20	特大暴雨	264.70	26.75	1	55.7	53.3	15	0
2016-07-25	中雨	11.80	3.42	5	96.3	96.9	155	25
2016-07-27	大雨	24.30	2.42	2	84.3	87.0	5	0
2016-07-30	暴雨	62.20	4.25	3	61.2	52.6	150	20
2016-08-06	中雨	12.10	1.00	6	99.6	99.1	25	5
2016-09-22	大雨	28.70	10.42	4	95.0	95.6	95	0
2016-09-26	大雨	18.00	3.92	4	83.5	89.7	20	80
2016-10-06	暴雨	31.40	18.25	2	87.4	85.9	200	0

绿色屋顶的场次径流总量控制率在 50.1% ~ 99.6% 之间,随着降雨总量的增加,场次径流总量控制率逐渐减少,两者呈幂函数形式的负相关关系[见图 4(a)]。当降雨总量高于 30 mm 后,场次径流总量控制率基本在 50% ~ 60%。此外,由于雨前干期直接决定降雨开始时的土壤含水量条件,因此影响到场次径流总量控制率,两者呈幂函数形式的正相关关系[见图 4(b)]。

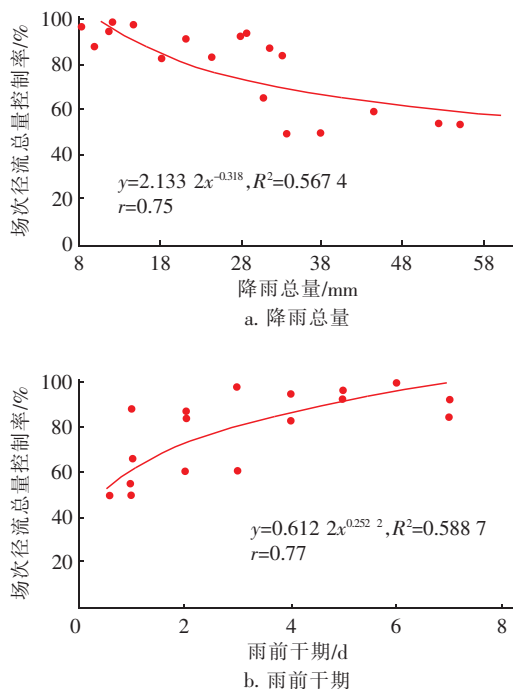


图4 场次径流总量控制率与降雨总量和雨前干期的关系

Fig.4 Relationship between volume capture ratio of rainfall events and total rainfall volume or antecedent dry time

绿色屋顶 also 具有良好的洪峰流量削减效果,且洪峰流量削减率与径流总量控制率具有很好的一致性,两者的相关系数为 0.95(见图 5)。

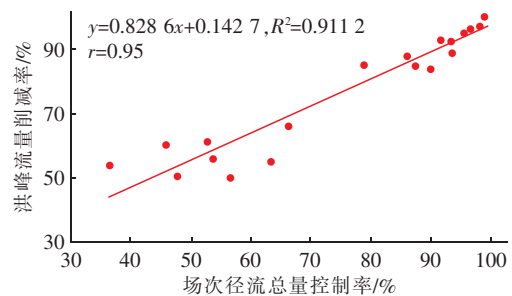


图5 场次径流总量控制率与洪峰流量削减率的关系

Fig.5 Relationship between volume capture ratio of rainfall events and flow peak reduction rate

2.4 初损量对绿色屋顶径流减控效果的贡献程度

试验数据表明,绿色屋顶的初损过程是其能够有效滞蓄降雨的一个重要原因,在本研究的 20 场典型产流降雨场次中,初损占比(初损量占总控制量的比例)最高可达 90%,即有 90% 的降雨入渗量发生在开始产流前的初损阶段,仅有 10% 的降雨入渗量发生在产流阶段。初损占比随降雨总量的增加而减少,两者呈对数函数关系,如图 6 所示。

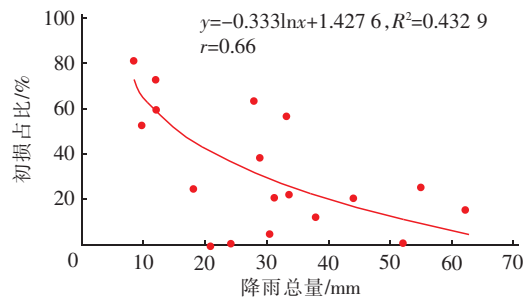


图6 初损占比与降雨总量的关系

Fig.6 Relationship between initial loss ratio and total rainfall volume

上述分析仅针对绿色屋顶产流场次,对于其余降雨场次,其降雨量均消耗于初损过程,因而没有径

流产生。综合分析2014年—2016年的所有降雨场次,初损过程控制了年降雨总量的51%,参考《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,大致相当于10 mm的设计降雨量,即绿色屋顶具有10 mm的调蓄容积。

3 结论

在3年的降雨-径流监测试验中,共监测到174场降雨,其中绿色屋顶产流的有33场,产流概率约为19.0%,多发生在大雨及以上等级降雨,绿色屋顶的年径流总量控制率为77%。随降雨量的增加,绿色屋顶的径流系数逐渐增加,对于暴雨和特大暴雨,绿色屋顶的径流系数分别为0.35和0.44。

基于20场典型降雨-径流过程数据的模拟分析,发现绿色屋顶的场次径流总量控制率普遍在50%以上,且随降雨总量的增加而减少,两者呈幂函数关系。对于“2016·7·20”特大暴雨(264.7 mm),场次径流总量控制率为55.7%,绿色屋顶仍有一定的径流减控效果。绿色屋顶同样具有较好的洪峰流量削减效果,洪峰流量削减率与场次径流总量控制率存在较高的一致性,相关系数为0.95。

绿色屋顶的初损过程是其能够有效滞蓄降雨的一个重要原因,典型场次的初损占比最高可达90%,且随降雨总量的增加而减少,两者呈对数函数关系。初损过程对应的年径流总量控制率约为51%,大致相当于10 mm的设计降雨量,即绿色屋顶具有10 mm的调蓄容积。

参考文献:

- [1] 邓陈宁,李家科,李怀恩. 城市雨洪管理中绿色屋顶研究与应用进展[J]. 环境科学与技术,2018,41(3): 141-150.
Deng Chenning, Li Jiakel, Li Huaien. Research advances in application of green roof to management of urban storm-water runoff [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(3): 141-150 (in Chinese).
- [2] 和晓艳. 屋顶绿化的相关技术研究[D]. 南京:南京林业大学,2013.
He Xiaoyan. Research of the Roof Greening Technology [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013 (in Chinese).
- [3] Gregoire B G, Clausen J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality [J]. Ecol Eng, 2011, 37: 963-969.
- [4] Van Woert N D, Rowe D B, Andresen J A, et al. Green roof stormwater retention [J]. J Environ Qual, 2005, 34(3): 1036-1044.
- [5] Sutton R K. Green Roof Ecosystems [M]. New York: Springer International Publishing, 2015.
- [6] Stovin V. The potential of green roofs to manage urban stormwater [J]. Water Environ J, 2010, 24(3): 192-199.
- [7] Vijayaraghavan K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends [J]. Renew Sust Energ Rev, 2016, 57: 740-752.
- [8] Lundholm J, Macivor J S, Macdougall Z, et al. Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions [J]. PloS One, 2010, 5(3): e9677.
- [9] Schroll E, Lambrinos J, Righetti T, et al. The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate [J]. Ecol Eng, 2011, 37(4): 595-600.
- [10] Graceson A, Hare M, Monaghan J, et al. The water retention capabilities of growing media for green roofs [J]. Ecol Eng, 2013, 61 (Part A): 328-334.
- [11] Villarreal E L, Bengtsson L. Response of a *Sedum* green-roof to individual rain events [J]. Ecol Eng, 2005, 25(1): 1-7.



作者简介:杨默远(1989-),男,河南开封人,博士,高级工程师,主要从事城市水文机理与雨水控制利用研究。

E-mail: ymoyuan@163.com

收稿日期:2019-01-07