

基于SWMM不同气候区城市绿色屋顶 径流调控效益研究

张成玉¹, 张守红^{1,2}, 章孙逊¹, 闫婧¹, 魏良怡¹, 杨航¹, 王任重远¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要:对比研究不同气候区城市绿色屋顶径流调控效益,可为不同气候区城市绿色屋顶水文设计和评估提供科学参考。基于北京市试验绿色屋顶2019年降雨-径流过程监测数据率定并检验SWMM,采用该模型模拟分析不同气候区城市(北京、上海、广州)绿色屋顶径流调控效益变化特征。结果表明:(1)种植佛甲草(*Sedum lineare*)的轻质基绿色屋顶具有较强的径流调控功能,监测期平均径流和峰值流量削减率分别为73.22%,77.63%。(2)SWMM可较精确地模拟绿色屋顶径流量和峰值流量,率定期平均Nse和 R^2 分别为0.64,0.73,检验期平均Nse和 R^2 分别为0.66,0.64。(3)在不同设计暴雨重现期下,三个城市的绿色屋顶径流削减率不同,但均随重现期的增大呈指数衰减趋势。(4)三个城市绿色屋顶径流削减率和峰值流量削减率均随基质层厚度的增加而上升,但达到某一厚度后径流调控效益不再增加,其中北京和上海的临界基质厚度为500 mm,广州为800 mm。综上,气候条件和基质厚度是影响绿色屋顶径流调控效益的主要因素,故在不同气候区城市布设绿色屋顶需综合考虑各因素,以达到最大效益。

关键词:绿色屋顶; 径流调控效益; SWMM; 气候区; 基质厚度

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0422-09

Study on Stormwater Control Performance of Green Roofs in Different Climatic Zones Based on SWMM Simulations

ZHANG Chengyu¹, ZHANG Shouhong^{1,2}, ZHANG Sunxun¹,
YAN Jing¹, WEI Liangyi¹, YANG Hang¹, WANG Renzhongyuan¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

Abstract: The comparative study of the stormwater control performance of green roofs in different climatic zones can provide scientific support and references for the hydrological design and evaluation of green roofs in cities in different climatic zones. Based on the monitoring data of the rainfall-runoff process from experimental green roofs in Beijing during 2019, SWMM was calibrated, verified, and applied to simulate and analyze the variation of stormwater control performance of green roofs in some cities (i. e., Beijing, Shanghai, Guangzhou) in different climatic zones. The results are as follows: (1) The light-weight green roof planted with *Sedum lineare* had excellent stormwater control performance, and average runoff reduction rate and peak runoff reduction rate of experimental green roofs were 73.22% and 77.63%, respectively. (2) The average values of the Nse and R^2 during the calibration period were 0.64 and 0.73, and were 0.66 and 0.64 for the validation period, respectively. It indicated that the SWMM could reproduce runoff hydrographs from green roofs. (3) Under different design storm return periods, the runoff reduction rates of green roofs in three

收稿日期:2022-01-17

修回日期:2022-02-22

资助项目:国家自然科学基金“绿色屋顶雨水滞留能力变化过程研究”(51609004)

第一作者:张成玉(1997—),女,陕西咸阳人,在读硕士研究生,研究方向为绿色屋顶水文模拟。E-mail:zhangchengyu@bjfu.edu.cn

通信作者:张守红(1985—),男,河南信阳人,博士,教授,主要从事雨水控制与利用、小流域综合治理研究。E-mail:zhangs@bjfu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

cities were different, but they all declined exponentially with the increase of the return period. (4) The runoff reduction rate and peak flow reduction rate of green roofs in three cities increased with the increase of substrate depth, but the reduction rate could not increase when reaching a certain depth, the critical substrate depth of Beijing and Shanghai was 500 mm, and that of Guangzhou was 800 mm. In summary, climate conditions and substrate depth are the main factors that affect the stormwater control performance of green roofs. Therefore, it is necessary to consider all factors comprehensively to achieve the best performance when green roofs are installed in cities in different climatic zones.

Keywords: green roof; stormwater control; SWMM; climatic zone; substrate depth

随着城镇化快速推进,大面积的森林、草地、农田等透水下垫面转变成城市道路、屋顶、停车场等不透水下垫面,阻碍了雨水下渗与土壤水分蒸发,增加了地表径流,改变了流域自然水循环,引发城市内涝等问题^[1]。建筑屋顶约占城市不透水下垫面的40%~50%^[2],是城市地表径流的重要产流源区。建设绿色屋顶,可有效滞留雨水,减少地表径流,从而降低城市内涝风险^[3]。除此之外,绿色屋顶也具有节约能源、缓解城市热岛效应和改善城市景观等功能^[4-6]。因此,在土地空间有限但环境问题突出的城镇核心区,绿色屋顶具有独特的应用前景。

绿色屋顶从上到下可分为植被层、基质层、过滤层、排水层和阻根防水层等^[7]。绿色屋顶的径流调控效益主要通过各结构层对雨水的滞留实现。在降雨结束后,蒸散发过程不断消耗滞留在绿色屋顶中的雨水,使绿色屋顶的雨水滞留能力逐渐得以恢复^[8]。绿色屋顶径流调控效益主要受植被类型与生长状况^[9]、基质类型^[3]与厚度^[10]等因素的影响。例如,Zhang等^[11]在墨尔本的试验监测表明种植 *Lomandra longifolia* 的绿色屋顶的径流削减率最大,比 *Stypanandra glauca* 高16%,比 *Sedum pachyphyllum* 高10%。罗珊等^[12]在杭州的研究指出以腐叶土为基质层的绿色屋顶比田园土的径流削减率低17%。葛德等^[13]在北京的监测表明15 cm 基质厚度的绿色屋顶的径流调控效益高于10 cm 厚的同种基质绿色屋顶。气候条件^[8,14]通过降雨和蒸散发过程影响绿色屋顶产流过程和雨水滞留能力恢复过程,进而对绿色屋顶径流调控效益产生重要影响。然而,当前大部分研究主要集中于某一气候区绿色屋顶的径流调控效益分析,缺少不同气候区绿色屋顶径流调控效益的对比研究。

在不同气候区开展绿色屋顶径流调控效益对比试验研究需投入大量的人力和物资,科学应用水文模型模拟分析不同气候区绿色屋顶径流调控效益具有较强可行性。国内外研究者常采用 Hydrus-1D^[15]、SWMM^[16]、SWMS-2D^[2]、MIKE URBAN^[17]、概率解析模型等^[18]模型模拟研究绿色屋顶径流调控效益。其中,

SWMM 适用于场降雨或者长期连续动态模拟降雨-径流过程,可用于模拟绿色屋顶、生物滞留池、透水铺装等海绵城市建设措施的水文过程。经过参数率定和检验后的SWMM可在场降雨条件下较为精确模拟绿色屋顶径流动态变化过程^[16,19],因此,该模型被广泛应用于绿色屋顶径流调控效益的模拟研究。

本研究基于北京市试验绿色屋顶的降雨-径流监测数据,率定并检验SWMM,应用该模型模拟不同气候区城市(北京、上海、广州)绿色屋顶的降雨-径流过程,并以径流削减率与峰值流量削减率为指标,定量对比分析3个城市绿色屋顶径流调控效益变化规律。研究结果可望为我国不同气候区城市绿色屋顶水文设计和径流调控效益评估提供科学参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计

试验绿色屋顶地点位于北京市海淀区北京林业大学林业楼楼顶(40.00°N,116.34°E)。北京为北温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促,多年平均降水量587 mm^[15],约80%降水集中在夏季。

试验绿色屋顶面积为1 m×1 m,从上向下依次为植被层、生长基质层、过滤层、排水层和防水层,其他配置详见已刊论文^[20]。植被层为绿色屋顶常用植物佛甲草(*Sedum lineare*)。基质层由浮石、草炭土、沸石、碎木屑按4:3:2:1的比例混合而成,基质密度为0.55 g/cm³,厚度为10 cm。过滤层为300~400 g/m²聚酯无纺布,排水层铺设直径>30 mm,厚度为10 cm的陶粒,防水层材料为TPO防水卷材。经估算,试验绿色屋顶的静荷载(植被层、基质层、排水层与防水层的荷载之和)约为1.64 kN/m²。

在绿色屋顶上方2 m处架设雨量分辨率为0.2 mm的HOBO U30自动气象站监测降雨过程。采用分辨率为1 mm的翻斗式雨量计监测径流过程。为保证数据可靠性,在每个雨量计下放置1个容积为250 L的塑料桶,承接绿色屋顶径流。每场降雨结束

后根据塑料桶内收集径流总量校核雨量计监测的径流数据。

1.2 设计暴雨

根据北京市雨水控制与利用工程设计规范(DB11/685—2013)、上海市暴雨强度公式与设计雨型标准

(DB31/T—1043)、广州市中心城区暴雨公式及计算图表(穗水〔2011〕214 号)得到 3 个城市气候特征、设计暴雨公式与雨峰系数见表 1。采用芝加哥雨型^[21]设计得到 3 个城市降雨历时为 120 min,重现期为 1,3,5,10,20,50 a,时间步长 5 min 的暴雨序列见图 1。

表 1 城市气象特征与设计暴雨公式

城市	气候区	年平均 降雨量/mm	年平均 蒸散量/mm	设计暴雨公式	雨峰 系数
北京	温带季风性气候	587	1490	$q = \frac{2001(1+0.811\lg P)}{(t+8)^{0.711}}$	0.35
				$q = \frac{1378(1+1.047\lg P)}{(t+8)^{0.642}}$	
上海	亚热带季风性气候	1195	1420	$q = \frac{1600(1+0.846\lg P)}{(t+7)^{0.656}}$	0.40
广州	亚热带季风性气候	1597	1026	$q = \frac{3618.427(1+0.438\lg P)}{(t+11.259)^{0.750}}$	0.48

注:q 为设计暴雨强度[L/(s·hm²)];t 为降雨历时(min);P 为重现期(a)。

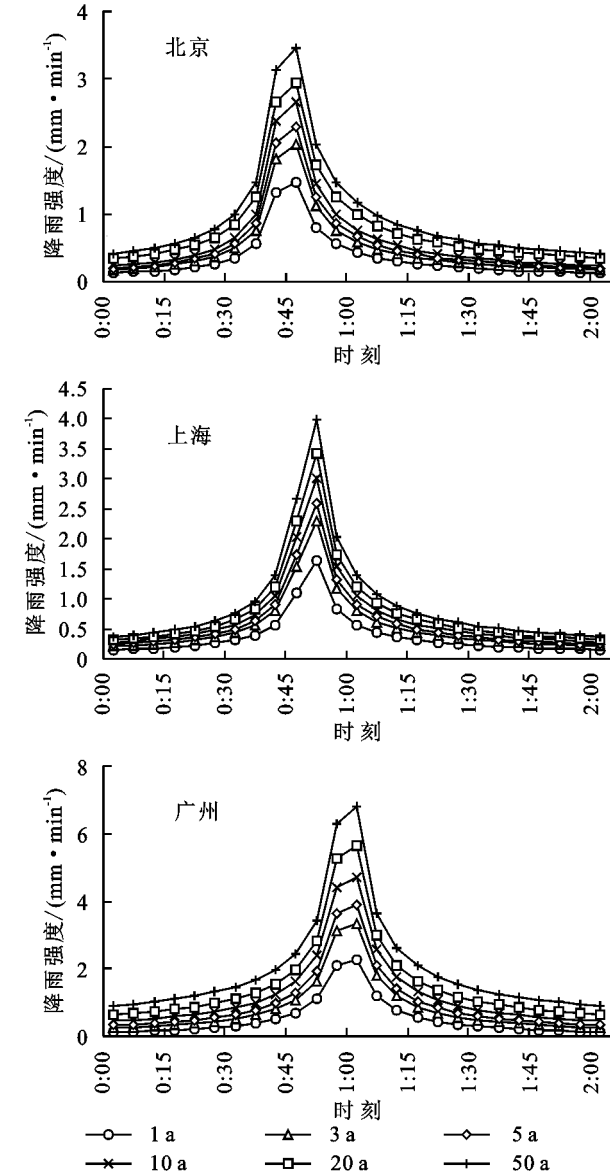


图 1 3 个城市设计暴雨

1.3 SWMM 模拟

SWMM 中绿色屋顶模块包括表层、基质层和排水层^[22],包含基质厚度、孔隙度、田间持水量、凋萎系数等 14 个参数。SWMM 绿色屋顶模块仅接受降雨为唯一入流项,并且底部完全不透水,故无排水层下渗。绿色屋顶模块的水文过程可通过求解上述 3 个结构层的水量平衡方程得出,将每一结构层的水量随时间的变化表示为入流量和出流量之差。本研究采用决定系数(R^2)和纳什效率系数(Nse)为评价指标进行模型参数率定和检验^[23]。其中,Nse 是判定残差与实测数据方差相对量的标准化统计值,取值在 $-\infty \sim 1$ 。Nse=1 表明模型模拟值与实测值完全匹配,当 $0 < \text{Nse} < 1$ 时模拟效果在可接受水平内,当 $\text{Nse} \leq 0$ 时说明模拟径流量与实测值径流量存在较大偏差。

$$\text{Nse} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_s^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_o^*)^2} \quad (1)$$

式中: Q_o^t 为 t 时刻的实测径流量(mm/min); Q_s^t 为 t 时刻的模拟径流量(mm/min); Q_o^* 为实测径流量的平均值(mm/min)。

1.4 径流调控效益评价指标

根据实测或模拟的绿色屋顶降雨-径流数据可采用径流削减率(D_r ,%)和峰值流量削减率(D_{pr} ,%)定量评估绿色屋顶径流调控效益,计算公式如下:

$$D_r = \frac{P - R}{P} \quad (2)$$

$$D_{pr} = \frac{I_{\max} - D_p}{I_{\max}} \quad (3)$$

式中: P 为降雨量(mm); R 为径流量(mm); I_{\max} 为场降雨最大 5 min 雨强(mm/min); D_p 为绿色屋顶场降雨单位面积的峰值流量(mm/min)。

2 结果与分析

2.1 北京试验绿色屋顶径流调控效益分析

参照 Stovin 等^[14]研究,以降雨间隔大于 6 h 为标准划分场降雨。2019 年 7—10 月共监测 19 场降雨,最大降雨为 7 月 28 日暴雨,降雨量为 92.6 mm,历时 1 365 min,最大降雨强度为 1.68 mm/min,雨前干期为 5.7 d(表 2)。监测期 19 场降雨中,绿色屋顶平均径流削减率为 73.22%,平均峰值流量削减率为 77.63%,表明绿色屋顶具有较强的径流调控效益。根据《降水等级标准》(GB/T28592—2012),19 场降雨中有小雨 9 场、中雨 5 场、大雨 2 场、暴雨 3 场。在小雨条件下,绿色屋顶不产生径流,径流削减率为 100%;中雨时,径流削减率在 31.47%~100%;大雨时,平均径流削减率为 57.38%;暴雨条件下,平均径流削减率降为 25.68%。这表明降雨量是影响绿色屋顶径流调控效益的重要因素之一,降雨量越大,绿色屋顶的径流削减率越低。在降雨的过程中,绿色屋顶通过植被层、基质层等结构滞留雨水,然而,由于各结构层的雨水滞留能力有限,超过绿色屋顶雨水滞留能力的降雨以径流形式排放。因此,降雨量越大,径流量越高,绿色屋顶径流削减率越低。

除降雨量外,雨前干期也是影响绿色屋顶径流调控效益的重要因素。以 8 月 6 日降雨为例,该场降雨的降雨量为 52.4 mm,低于 7 月 28 日(92.6 mm)和 9 月 9 日(73.0 mm)降雨,但该场降雨的径流削减率仅为 16.48%,为监测期内最低,主要原因在于该场降雨的前期干期(1.5 d)较短。葛德等^[13]研究指出,在降雨间隔期,滞留在绿色屋顶各结构层中的雨水通过蒸发过程返回大气,绿色屋顶的雨水滞留能力逐渐得到恢复。降雨间隔期越短,绿色屋顶雨水滞留能力恢复水平越低,下一场降雨过程中,绿色屋顶能够滞留的雨水越少。8 月 4 日降雨 24.0 mm,绿色屋顶雨水滞留能力被完全消耗,产生径流。8 月 6 日场降雨与上一场(8 月 4 日)降雨间隔仅为 1.5 d,由于绿色屋顶雨水滞留能力恢复水平最有限,且该场降雨的降雨量较大,因此该场降雨径流削减率最低。

2.2 SWMM 参数的率定与检验

为了使模型参数在不同降雨条件下都有较强的适用性,选择 7 月 28 日(暴雨)、8 月 2 日(大雨)、8 月 4

日(中雨)3 场降雨的产流过程数据对 SWMM 进行参数率定,然后,以 8 月 6 日(暴雨)、9 月 9 日(暴雨)、10 月 4 日(大雨)的降雨-径流数据进行参数检验。率定得到的 SWMM 模拟绿色屋顶降雨-径流过程的主要参数值见表 3。模型率定时(图 2)决定系数(R^2)和纳什效率系数(Nse)分别在 0.64~0.80,0.55~0.79,模型检验时(图 3) R^2 和 Nse 分别在 0.30~0.84,0.41~0.83,这表明 SWMM 可较准确模拟绿色屋顶的降雨-径流过程。对比 SWMM 模拟绿色屋顶径流过程与实测径流过程可发现,8 月 2 日、8 月 4 日、9 月 9 日和 10 月 4 日场降雨模拟径流具有较为明显的滞后性。这与 Liu 等^[24]采用 SWMM 进行绿色屋顶径流过程模拟得到的结果相似。SWMM 进行绿色屋顶场降雨径流过程模拟时出现产流滞后性的原因主要有两个方面。首先,模拟绿色屋顶面积(10 000 m²)远大于试验绿色屋顶面积(1 m²),模拟绿色屋顶的汇流时间较实测绿色屋顶更长,因此模拟绿色屋顶径流开始时间延后。其次,本研究在采用 SWMM 进行绿色屋顶场降雨径流过程模拟时,尽管已综合考虑蒸散发特征和平均雨前干期(7 d)设定了基质层初期含水量,但仍无法充分考虑基质层初期含水量变化过程对绿色屋顶产流过程的影响。在雨前干期较短(小于 7 d),即基质层初期含水量较高的情况下(例如,8 月 4 日降雨距离上一场降雨间隔时间为 2.5 d,基质含水量较高),模拟产流时间会出现一定滞后性。在场降雨前干期较长(大于 7 d),即基质层初期含水量较低的情况下,模拟产流时间则可能会提前。

2.3 不同气候区城市绿色屋顶的径流调控效益对比分析

2.3.1 不同气候区城市设计暴雨对比分析 北京、上海、广州 3 个城市不同重现期设计暴雨的降雨量和最大降雨强度对比见图 4。虽然北京与上海分别属于温带季风气候区和亚热带季风气候区,上海的年均降雨量约为北京的 2 倍,但北京的设计暴雨量(最大降雨强度)与上海同重现期的设计暴雨量(最大降雨强度)差异并不明显。例如,北京 10 年一遇 120 min 设计暴雨量是 83.38 mm,最大降雨强度为 2.65 mm/min,上海的 10 年一遇 120 min 设计暴雨量是 89.21 mm,最大降雨强度为 3.02 mm/min,两个城市的设计暴雨差异较小。上海与广州同属于沿海的亚热带季风性气候区,但上海设计暴雨量(最大降雨强度)均明显低于广州同重现期设计暴雨量(最大降雨强度)。上海 20 年一遇 120 min 设计暴雨量是 101.52 mm,而广州为 197.85 mm,是上海的 1.95 倍。

表 2 场降雨特征与绿色屋顶径流调控效益

降雨日期 (月-日)	降雨量/ mm	降雨 历时/min	最大雨强/ (mm·min ⁻¹)	雨前 干期/d	径流总量 削减率/%	峰值流量 削减率/%
07-10	15.2	255	0.72	2.4	63.62	62.38
07-14	3.6	20	0.32	3.6	100	100
07-17	3.8	175	0.16	3.0	100	100
07-17	0.4	10	0.04	0.3	100	100
07-22	22.0	645	0.48	5.2	71.27	70.44
07-28	92.6	1365	1.68	5.7	29.16	35.12
08-02	27.2	240	1.84	3.3	54.11	65.28
08-04	24.0	900	0.76	2.5	32.95	32.28
08-06	52.4	345	1.64	1.5	16.48	28.85
08-09	1.0	395	0.04	2.8	100	100
08-11	2.8	190	0.2	1.2	100	100
08-12	3.0	100	0.08	1.3	100	100
08-15	2.2	20	0.24	2.8	100	100
08-20	11.0	460	0.12	4.5	100	100
09-09	73.0	1185	1.04	20.2	31.39	57.21
09-12	20.0	355	0.16	2.4	31.47	43.56
10-04	35.0	515	0.64	20.9	60.66	79.84
10-13	1.4	85	0.04	9.1	100	100
10-17	1.6	105	0.04	3.8	100	100

表 3 SWMM 绿色屋顶模块主要参数

层模块	参数名称	单位	参数值
基质层	厚度	mm	100.0
	孔隙度	%	55.6
	田间持水量	%	27.5
	凋萎系数	%	14.0
	导水率	mm/h	267.0
	导水率梯度	—	6.0
	负压水头	mm	50.0

注：“—”代表无量纲参数的单位，其中基质厚度设定为固定值 100 mm，不进行率定。

2.3.2 不同气候区城市绿色屋顶径流调控效益对比分析 基于 SWMM 模拟的北京、上海和广州绿色屋顶在不同重现期设计暴雨条件下的径流削减率见图 5。相同重现期设计暴雨条件下,3 个城市绿色屋顶的径流削减率与城市的设计暴雨量排序相反。以上结果与 Liu 等^[24]采用 SWMM 模拟中国香港、悉尼和贝茨维尔 3 个城市绿色屋顶径流削减效益随设计暴雨重现期变化特征基本一致。3 个城市绿色屋顶的径流削减率均随着重现期增大呈指数趋势衰减,但不同气候区城市表现出的具体变化特征不同。在北京和上海,当设计暴雨重现期从 1 a 增加至 10 a 时,绿色屋顶径流削减均从 45%左右降低至 30%左右,降

幅较大,北京市绿色屋顶的径流削减率高于上海市。当重现期由 10 a 增加至 50 a 时,北京市绿色屋顶径流削减率下降至 26.7%,而上海市绿色屋顶径流削减率下降至 28.0%,仅比 10 a 重现期下降 2%左右,此时上海市绿色屋顶的径流削减效益优于北京市。在广州,当设计暴雨重现期从 1 a 增加至 50 a 时,绿色屋顶径流削减率从 35.4%持续衰减至 14.2%。本研究试验监测结果表明降雨量越大,绿色屋顶径流削减率越低。北京、上海和广州绿色屋顶径流削减率随设计暴雨重现期的具体变化特征主要受这 3 个城市设计暴雨量随重现期的变化特征影响。广州设计暴雨量随重现期持续大量增加,而北京和上海设计暴雨量随重现期增加而增加的趋势相对较为平缓(图 4),因此,北京和上海绿色屋顶径流削减率随设计暴雨重现期增加而降低的趋势也较为平缓,在 20 a 重现期后北京市设计暴雨量略高于上海市,这是上海市绿色屋顶的径流削减效益优于北京市的主要原因。

基质层厚度是影响绿色屋顶径流调控效益的主要设计变量之一。图 6 显示了北京、上海、广州 3 个城市绿色屋顶径流调控效益随基质厚度的变化规律(3 年一遇设计暴雨)。由图可见,3 个城市绿色屋顶径流削减率和峰值流量削减率均随基质厚度的增加

呈上升趋势,但不同气候区城市的变化特征有明显差异。在北京和上海,当设计暴雨量分别为 63.9,67.8 mm 时,基质厚度从 100 mm 增加到 500 mm 左右时,绿色屋顶径流削减率从 35%左右增加到 100%,峰值流量削减率从 23%左右增加到 100%。而在广州,则需要将绿色屋顶基质层厚度增加至 800 mm 以上时,才能实现 100%径流和峰值流量削减率。Guo 等^[25]用 SWMM 连续模拟分析表明位于亚热带湿润气候区的亚特兰大市绿色屋顶径流削减率最大值在 50%左右,当基质厚度超过 500 mm 后,绿色屋顶径流削减率不再随基质层厚度增加而增加。以上结果表明,不同气候区城市绿色屋顶径流调控效益随厚度变化趋势的临界值不同,除基质厚度外,当地气候条件也是影响绿色屋顶径流调控效益的重要因素。

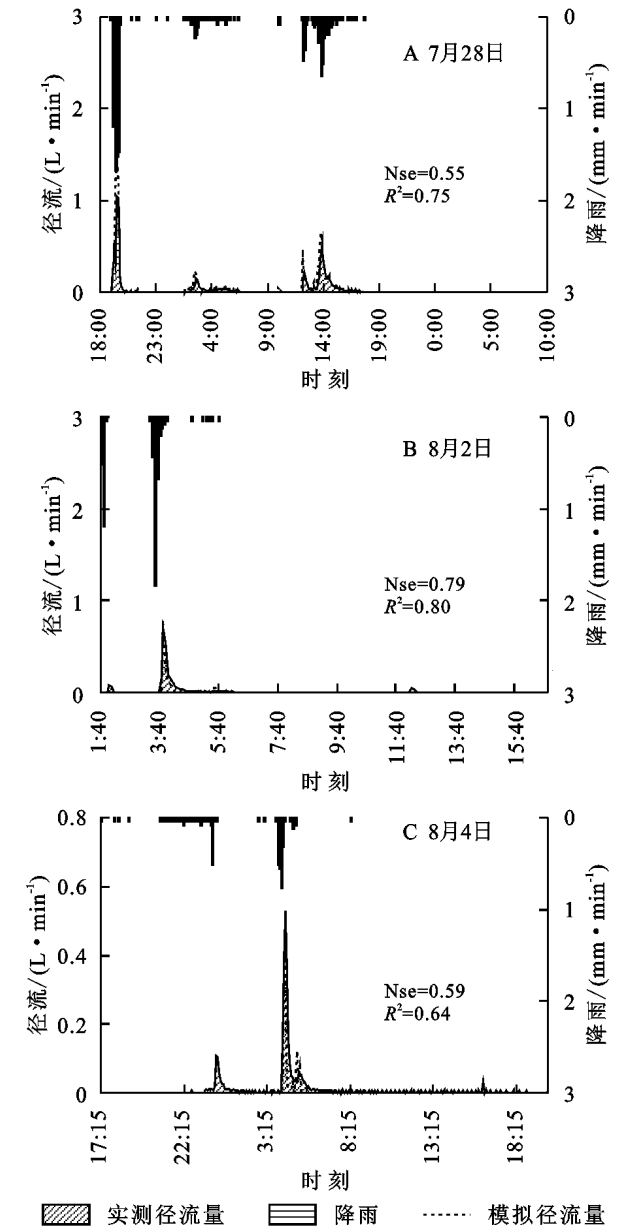


图2 绿色屋顶率定期径流过程模拟结果

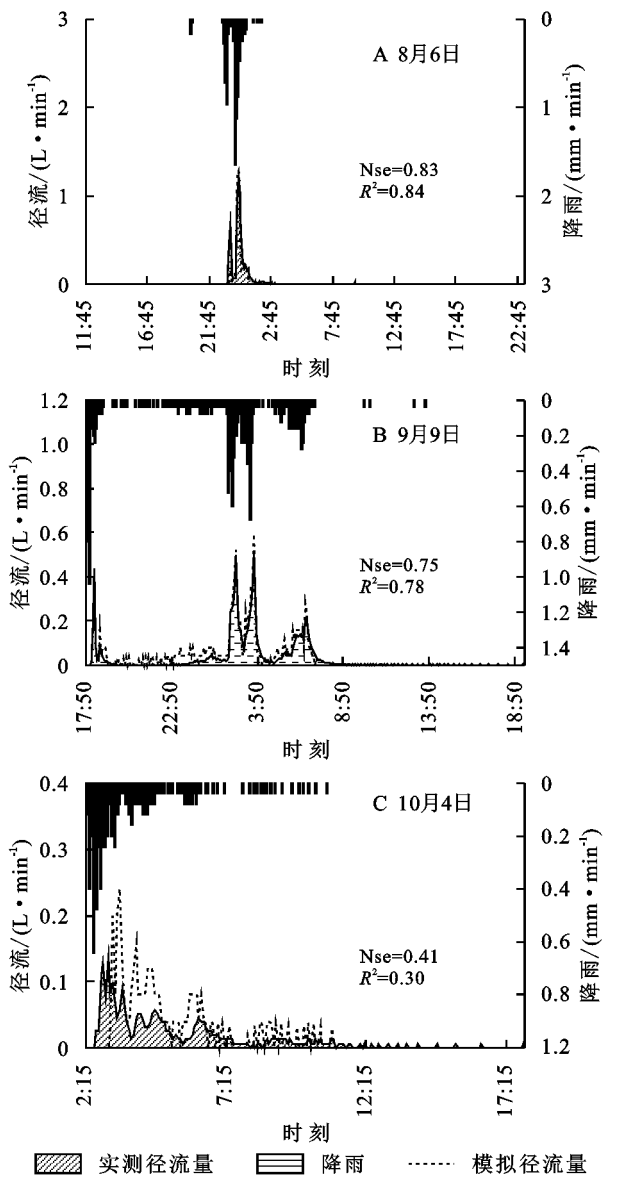


图3 绿色屋顶检验期径流过程模拟结果

3 讨论

绿色屋顶径流调控效益从根本上与其径流产生机制相关^[15]。为保障建筑结构安全,建造绿色屋顶时一般采用质量轻且透水性能强的生长基质,并在绿色屋顶底部安装排水层,以避免因绿色屋顶自重、表面或内部积水造成屋顶结构承重量超过其载荷能力。Bollman 等^[26]测试绿色屋顶生长基质导水率在 99.6~118.8 mm/min,Zhang 等^[18]梳理绿色屋顶研究文献基质层导水率变化范围为 69.9~288.0 mm/h。由于绿色屋顶基质层渗透率很高,非极端降雨条件下,绿色屋顶不会发生超渗产流^[15]。本研究试验绿色屋顶轻质基导水率为 267 mm/h,试验过程中未发生表面产流或积水。此外,由于绿色屋顶基质层下安装排水层,当基质层的含水量超过其田间持水量时,超出的雨水将以径流的形式从绿色屋顶底部排走,绿色屋顶也不会发生蓄满产

流^[16]。综上,绿色屋顶的降雨产流过程为非饱和产流过程。当降雨量小于绿色屋顶的滞留能力时,即绿色屋顶基质层含水量未达到其田间持水量时,雨水会被绿色屋顶全部滞留,几乎没有径流产生^[12]。因此,本试验中绿色屋顶在小雨条件下的径流削减率为 100%。当降雨量

超过绿色屋顶雨水滞留能力时,超量的雨水全部转化为径流。这种条件下,绿色屋顶的径流削减率随降雨量的增加而降低。因此,本试验中绿色屋顶在暴雨条件下的平均径流削减率为 25.68%,明显低于中雨和大雨条件下平均径流削减率(分别为 59.86%,57.38%)。

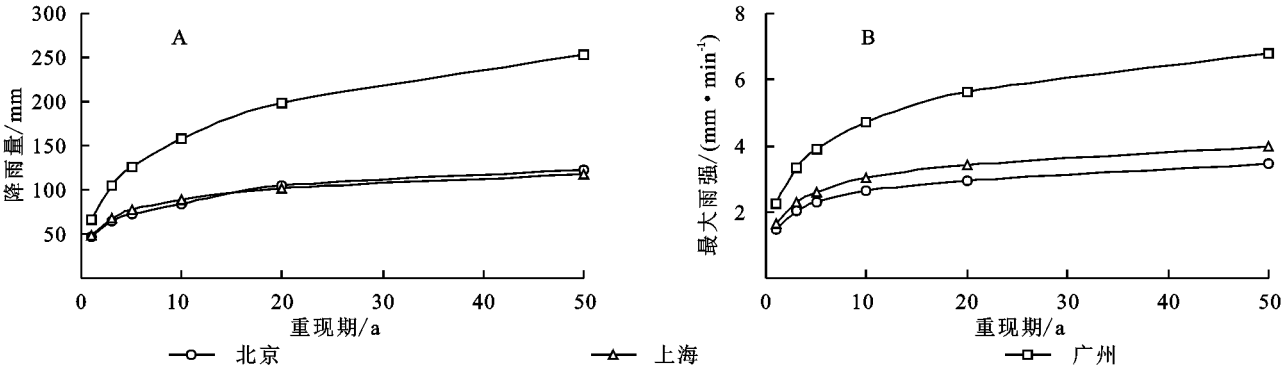


图 4 3 个城市设计暴雨特征对比

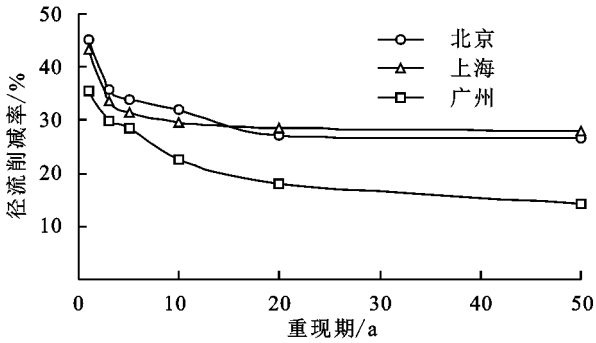


图 5 3 个城市绿色屋顶径流削减率

绿色屋顶主要通过生长基质层滞留雨水实现其径流和洪峰削减功能^[14]。在无蓄水层情况下,绿色屋顶雨水滞留能力主要由基质层厚度和基质层的田间持水量与初始含水量的差值决定^[13]。因此,基质层越厚,其雨水滞留能力越强。本研究采用 SWMM 模拟北京、上海、广州 3 个城市绿色屋顶的径流调控效益随基质层厚度增加而增加(图 5—6)。然而,在设计绿色屋顶时,除了考虑绿色屋顶径流调控效益外,还应综合考虑其经济效益以及建筑屋顶的安全荷载。绿色屋顶基质层越厚,其造价越高,且对建筑屋顶的承重能力要求越高。以本研究试验绿色屋顶为例,在屋顶最大荷载为 2.0 kN/m²时,绿色屋顶的基质层厚度不宜超过 148 mm。基质层的田间持水量由基质组成颗粒物的孔隙大小和结构决定,而基质层的初始含水量则与前一场降雨的降雨量大小、降雨间隔期长短以及蒸散发速率等因素相关并呈动态变化^[8]。在一定的基质层组成和厚度情况下,绿色屋顶的雨水滞留能力主要取决于基质层含水量的动态变化。在降雨过程中,基质层水分含量得到补充而上升;在降雨间隔期,基质层含水量因蒸散发过程耗水而降低。在湿润气候区,因降雨频繁、降雨量大、降雨间隔期较短、空

气湿润等气候特征,降雨间隔期水分消耗有限,绿色屋顶基质层长期处于较湿润(含水量较高)状态,基质层雨水滞留能力有限,绿色屋顶的径流削减率很难达到 100%。在干旱区,因降雨少、降雨间隔期较长、空气干燥等气候特征,降雨间隔期蒸散发耗水强烈,绿色屋顶基质含水量可降低至凋萎含水量,甚至更低,故下一场降雨开始时,基质层雨水滞留能力较大,径流削减率可随基质厚度增加而增加到 100%。本研究采用 SWMM 模拟场降雨径流过程时无法考虑基质层含水量的动态变化,模拟结果存在一定局限性。Guo 等^[25]通过 SWMM 连续模拟对比分析位于半干旱区的比斯利市和位于亚热带湿润气候区的亚特兰大市绿色屋顶径流削减率随基质厚度变化的特征,结果表明,比斯利市绿色屋顶径流削减率随基质厚度增加可达 100%,而亚特兰大市绿色屋顶径流削减率可达到的最大值在 50%左右。

除气候条件、基质层组成和厚度外,植被类型与生长状况、蓄水层、排水系统、绿色屋顶坡度和面积大小等因素也会对绿色屋顶径流调控效益产生重要影响。葛德等^[20]研究表明植被通过雨水截留和蒸散发耗水等过程提升绿色屋顶的径流调控效益。彭跃暖等^[27]研究指出绿色屋顶蓄水层可通过水分蒸发补充基质层水分含量,进而增加绿色屋顶的蒸散发量。绿色屋顶的坡度既影响水分运动也影响水分在基质层内分布,进而可能会对绿色屋顶的产汇流过程和径流调控效益产生影响^[9]。Gong 等^[28]研究指出面积大的绿色屋顶较小面积绿色屋顶具有更好的径流调控效益。绿色屋顶面积越大,汇流时间越长,径流和洪峰延迟时间越长,洪峰削减效益越大^[15]。本研究中 SWMM 模拟绿色屋顶产流过程的滞后性可能与模

拟绿色屋顶面积远大于试验绿色屋顶相关。Liu 等^[24]在采用 SWMM 模拟绿色屋顶径流过程时遇到同样问题。虽然 SWMM 模型被广泛应用于绿色屋顶径流调控效益模拟研究,但在基质水分动态变化过

程、蒸散发过程、优先流过程等关键水文过程模拟方面还存在明显不足,对这些关键水文过程的监测和模拟是揭示绿色屋顶径流调控机理和精准评估绿色屋顶水文效益的重要前提。

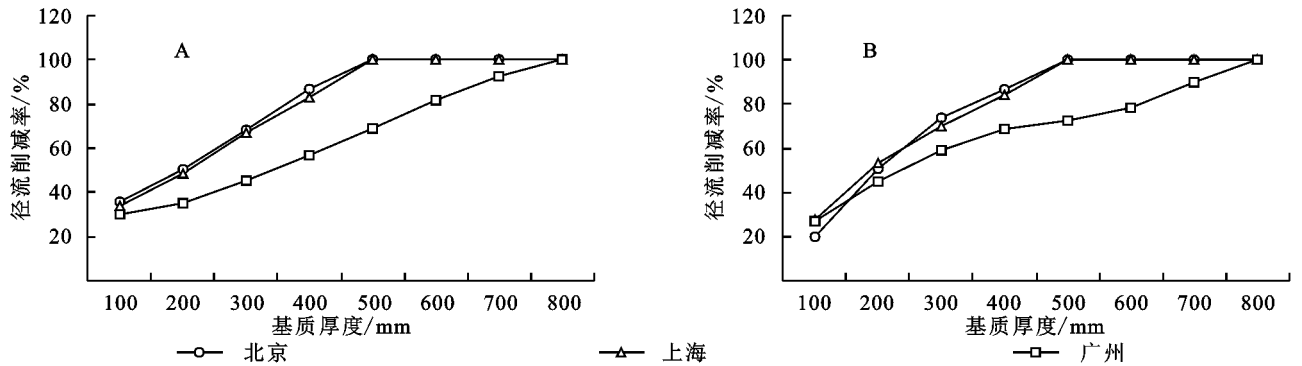


图 6 基质厚度对绿色屋顶径流调控效益的影响

4 结论

(1) 试验绿色屋顶具有较强的径流调控功能,19 场降雨的平均径流削减率为 73.22%,平均峰值流量削减率为 77.63%。

(2) SWMM 在模拟绿色屋顶场降雨径流过程时存在一定产流滞后性,但可较精确模拟径流量和峰值流量,率定期平均 Nse 和 R^2 分别为 0.64,0.73,检验期平均 Nse 和 R^2 分别为 0.66,0.64。

(3) 3 个城市的绿色屋顶径流削减率均随设计暴雨重现期的增大呈指数衰减趋势,但具体变化特征不同。

(4) 3 个城市绿色屋顶径流削减率和峰值流量削减率均随基质层厚度增加而上升,但 3 个城市绿色屋顶的临界基质厚度不同,在北京和上海,当基质厚度增加到 500 mm 时,绿色屋顶径流调控效益不再增加,而广州的临界基质厚度为 800 mm。

参考文献:

- [1] 王浩,张建云,王亦楠,等.水,如何平衡发展之重[J].中国水利,2020(21):11-19.
- [2] Palla A, Gnecco I, Lanza L G. Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof[J]. Journal of Hydrology, 2009, 379(1/2):193-204.
- [3] De-Ville S, Menon M, Jia X, et al. The impact of green roof ageing on substrate characteristics and hydrological performance[J]. Journal of Hydrology, 2017,547:332-344.
- [4] Czemieli Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. Ecological Engineering, 2010,36(4):351-360.
- [5] 陈小平,黄佩,周志翔,等.绿色屋顶径流调控研究进展 [J].应用生态学报,2015,26(8):2581-2590.
- [6] Cristiano E, Deidda R, Viola F. The role of green roofs in urban Water-Energy-Food-Ecosystem nexus: A review[J]. Science of the Total Environment, 2021,756:143876.
- [7] Carson T, Keeley M, Marasco D E, et al. Assessing methods for predicting green roof rainfall capture: A comparison between full-scale observations and four hydrologic models[J]. Urban Water Journal, 2017,14 (6):589-603.
- [8] Ebrahimian A, Wadzuk B, Traver R. Evapotranspiration in green stormwater infrastructure systems [J]. Science of the Total Environment, 2019,688:797-810.
- [9] Gong Y, Zhang X, Li H, et al. A comparison of the growth status, rainfall retention and purification effects of four green roof plant species[J]. Journal of Environmental Management, 2021,278:111451.
- [10] Nektarios P A, Kokkinou I, Ntoulas N. The effects of substrate depth and irrigation regime, on seeded Sedum species grown on urban extensive green roof systems under semi-arid Mediterranean climatic conditions[J]. Journal of Environmental Management, 2020,279(3):111607.
- [11] Zhang Z, Szota C, Fletcher T D, et al. Influence of plant composition and water use strategies on green roof stormwater retention [J]. Science of the Total Environment, 2018,625:775-781.
- [12] 罗珊,周永潮,张仪萍.绿色屋面对雨水径流控制效果及影响因素[J].浙江大学学报:工学版,2018,52(5): 845-852.
- [13] 葛德,张守红.基质类型及厚度对绿色屋顶径流调控效益的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(3):31-38.
- [14] Stovin V, Vesuviano G, Kasmin H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions[J]. Journal of Hydrology, 2012,414:148-161.
- [15] Zhang S, Lin Z, Zhang S, et al. Stormwater retention and detention performance of green roofs with different

- substrates: Observational data and hydrological simulations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,291:112682.
- [16] Peng Z, Stovin V. Independent validation of the SWMM green roof module[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017,22(9):100-111.
- [17] Locatelli L, Mark O, Mikkelsen P S, et al. Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,519: 3237-3248.
- [18] Zhang S, Guo Y. Analytical probabilistic model for evaluating the hydrologic performance of green roofs[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013,18(1):19-28.
- [19] Johannessen B G, Hamouz V, Gagne A S, et al. The transferability of SWMM model parameters between green roofs with similar build-up [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,569:816-828.
- [20] 葛德,张守红.不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响[J].*环境科学*,2018,39(11):5015-5023.
- [21] Keifer C J, Chu H H. Synthetic storm pattern for drainage design[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1957,83(4):1-25.
- [22] Rossman L A. Modeling low impact development alternatives with SWMM[J]. *Journal of Water Management Modeling*, 2010. DOI:10.14796/jwmm.r236-11.
- [23] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I : A discussion of principles-ScienceDirect[J]. *Journal of Hydrology*, 1970,10(3): 282-290.
- [24] Liu X, Chui T F M. Evaluation of green roof performance in mitigating the impact of extreme storms[J]. *Water*, 2019,11(4). DOI:10.3390/w11040815.
- [25] Guo Y, Zhang S, Liu S. Runoff reduction capabilities and irrigation requirements of green roofs[J]. *Water Resources Management*, 2014,28(5):1363-1378.
- [26] Bollman M A, DeSantis G E, DuChanois R M, et al. A framework for optimizing hydrologic performance of green roof media[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 140:105589.
- [27] 彭跃暖,秦华鹏,王传胜,等.蓄水层设置与植物选择对绿色屋顶蒸散发的影响[J].*北京大学学报:自然科学版*,2017,53(4):758-764.
- [28] Gong Y, Yin D, Li J, et al. Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,687:505-515.

~~~~~

(上接第 383 页)

- [19] Chen H S. Evaluation and analysis of eco-security in environmentally sensitive areas using an emergy ecological footprint [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017,14(2):136-153.
- [20] 周汝佳,张永战,何华春.基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价[J].*地理研究*,2016,6(35):1017-1028.
- [21] Zhang C Q, Dong B, Liu L P, et al. Study on ecological risk assessment for land-use of wetland based on different scale[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016,44(5):1-8.
- [22] 于海洋,张飞,曹雷.精河县土地利用/覆被变化及土地生态安全研究[J].*水土保持研究*,2017,24(6):348-353.
- [23] 汪建珍,卢李朋,赵锐锋,等.基于土地转移流的干旱区河谷城市土地系统稳定性评价:以兰州市近郊四区为例[J].*经济地理*,2014,34(4):153-158.
- [24] 徐兰,罗维,周宝同.基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评价:以洋河为例[J].*自然资源学报*,2015,30(4):580-590.
- [25] Zhang R S, Pu L J, Li J G, et al. Landscape ecological security response to land use change in the tidal flat reclamation zone, China[J].*Environmental Monitoring & Assessment*, 2016,188(1):1-10.
- [26] 张涛,蔡五田,李颖智,等.尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J].*环境科学*,2017,38(11):4537-4545.
- [27] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].*地理学报*,2014,69(1):3-14.
- [28] 王永庶,唐岱,延相东,等.基于网格尺度的保山市中心城区生态安全评价研究[J].*西南林业大学学报:自然科学版*,2021,41(5):80-87.
- [29] 吕乐婷,张杰,孙才志,等.基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J].*生态学报*,2018,38(16): 5952-5960.
- [30] 叶长盛,冯艳芬.基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价[J].*农业工程学报*,2013,29(19):224-232,294.
- [31] 李俊翰,高明秀.滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J].*生态学报*,2019,39(21): 7815-7828.