

小区绿色屋顶改造对径流的影响

崔瑞君¹, 侯精明¹, 王雁鸿¹, 李欣怡¹, 陈皓南¹, 王 添¹, 邓文涛², 马 欢²

(1. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:为探明绿色屋顶改造效果,以沣西新城天福和园小区为研究对象,应用耦合水文和水动力过程数值模型,选择 1、2、5、10、20、30 a 共 6 个降雨重现期以及 5 种不同绿色屋顶改造面积,组合成 30 种改造工况,研究不同工况对径流的影响。结果表明:绿色屋顶改造可有效改善地表积涝情况,降雨重现期不变且改造面积最大时,绿色屋顶径流控制率可提高 11.09%~16.20%,流量峰值削减率可提升至 17.66%~68.45%,排口流量峰值削减率可提升至 17.49%~37.40%,绿色屋顶改造贡献率可提升至 14.20%~16.77%,而排口贡献率随改造面积增大而减小;改造面积不变且降雨重现期逐渐增大时,绿色屋顶流量峰值削减率、绿色屋顶改造贡献率呈先增大后减小趋势,在降雨重现期为 5 a 时效果最好,峰值流量削减率可达 68.45%,绿色屋顶改造贡献率可达 16.77%;排口流量峰值削减率呈先减小后增大再减小趋势,折点出现在重现期为 5 a 和 20 a;排口贡献率则呈上升趋势。

关键词:城市内涝;绿色屋顶;雨洪模型;径流控制率;流量峰值削减率;贡献率

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)04-0094-08

Effects of green roof retrofitting in residential communities on runoff//CUI Ruijun¹, HOU Jingming¹, WANG Yanhong¹, LI Xinyi¹, CHEN Haonan¹, WANG Tian¹, DENG Wentao², MA Huan² (1. *State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*; 2. *POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China*)

Abstract: To investigate the effects of green roof retrofitting, the Tianfu Heyuan residential community in Fengxi New City was selected as the study area. A numerical model coupling hydrological and hydrodynamic processes was applied. Six rainfall return periods (1, 2, 5, 10, 20, and 30 years) were selected, along with five different green roof retrofit area scenarios, resulting in 30 retrofit conditions to examine the impact on runoff. The results show that green roof retrofitting can effectively mitigate surface waterlogging. When the rainfall return period remains constant and the retrofit area is maximized, the runoff control rate of green roofs can be increased by 11.09% to 16.20%, the peak flow reduction rate can reach 17.66% to 68.45%, the outlet peak flow reduction rate can increase to 17.49% to 37.40%, and the contribution rate of the green roof retrofitting can reach 14.20% to 16.77%. Meanwhile, the contribution rate at the outlet decreases as the retrofit area increases. When the retrofit area remains unchanged and the rainfall return period increases, both the green roof peak flow reduction rate and its contribution rate show a trend of first increasing and then decreasing, with the best effect observed at a 5-year return period, where the peak flow reduction rate can reach 68.45% and the contribution rate can reach 16.77%. The outlet peak flow reduction rate shows a trend of first decreasing, then increasing, and then decreasing again, with inflection points at the 5-year and 20-year return periods. The contribution rate at the outlet shows an overall increasing trend.

Key words: urban inundation; green roof; stormwater model; runoff control rate; peak flow reduction rate; contribution rate

随着我国城镇化建设步伐加快,原有很多绿地被不透水下垫面替代,自然雨水的渗透受到严重干扰,导致透水率降低、地表径流量增大、径流速度加快、城市内涝频发等一系列问题^[1-5],低影响开发

基金项目:国家自然科学基金项目(52009104);陕西省重点研发计划项目(2023GXLH-042);陕西省联合基金重点项目(2022JC-LHJJ-09);中德合作交流项目(M-0427)

作者简介:崔瑞君(2001—),女,硕士研究生,主要从事城市水利研究。E-mail:cuiruijun0328@163.com

通信作者:侯精明(1982—),男,教授,博士,主要从事地表水及其伴随过程数值模拟研究。E-mail:jingming.hou@xaut.edu.cn

(low impact development, LID) 建设理念应运而生^[6-7]。绿色屋顶是一种 LID 设施,也是海绵城市的重要设施之一^[8-9]。国内外许多研究表明,绿色屋顶不仅具有美学价值,还具有截留雨水、降低城市热岛效应、增加城市绿化面积、提高空气质量、降低建筑能耗及减少噪声等效果^[10-11],在我国北京、上海、杭州等地得到了广泛应用^[12-14]。

绿色屋顶的径流特性和水文原理受到了广泛关注。例如:李鹏程等^[15]对绿色屋顶、普通屋顶、坡面屋顶 3 种类型屋顶进行了对照试验,得出 3 种屋顶综合降水量的平均径流系数分别为 0.27、0.50、0.77,绿色屋顶对小雨至大雨级别场次降雨的蓄滞效果显著;何瑛瑛等^[16]研究了极端降雨条件下绿色屋顶径流调控效益,发现极端降雨条件下绿色屋顶平均径流削减率和洪峰削减率均显著低于非极端降雨;罗珊等^[13]对杭州地区绿色屋顶雨水径流控制效果进行了评估,得出绿色屋顶雨水平均截留率在 53%~62%之间,洪峰削减率可达 50%,且径流系数与降水量、前期降雨间隔时间等因素显著相关;Akther 等^[17]通过探究不同气候区绿色屋顶径流调控效果,得出雨水平均蓄存率为 57%~87%;Locatelli 等^[18]研究发现,降雨重现期为 0.1~1 a 和 5~10 a 时,绿色屋顶峰值削减率分别为 40%~78%和 10%~36%。上述学者采用不同方法研究了绿色屋顶改造后的调控效益,但均未综合探究绿色屋顶改造对排口及地表积水的影响以及改造面积占比对绿色屋顶改造效果的影响。基于此,本文着重探究绿色屋顶改造后的影响规律,以降雨重现期和绿色屋顶改造面积为变量,分析 30 种工况条件下,径流控制率、地表积滞情况、绿色屋顶流量峰值削减率、排口流量峰值削减率、绿色屋顶改造贡献率及排口贡献率 6 种指标的变化规律,以期绿色屋顶实际应用提供参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

天福和园小区位于陕西省咸阳市西咸新区沣西新城天府路以南,兴信路以西,咸户路以东,天雄西路以北^[19]。区域属半湿润大陆性季风气候,降雨时间分布不均衡,全年暴雨多集中在夏季,易发生内涝灾害^[20],选择该研究区域进行模拟对于小区尺度内涝过程模拟有一定的代表性。

1.2 数据来源

1.2.1 降雨数据

芝加哥模型是根据暴雨强度公式设计的典型降雨过程,该模型通过引入雨峰系数 r 来描述降雨峰

值出现的时刻($0 < r < 1$)^[21-23]。本文降雨数据依据芝加哥雨型生成器得出,具有西咸新区特征参数的芝加哥雨型降雨强度公式^[24]如下:

$$q_i = \frac{1239.1(1 + 1.971\lg P)}{(t + 7.4246)^{0.8124}} \tag{1}$$

式中: q_i 为降雨强度; P 为降雨重现期; t 为降雨历时。

设计降雨历时取 120 min,雨峰系数取 0.45,本文选择 1、2、5、10、20、30 a 共 6 个降雨重现期。不同降雨重现期设计降雨过程线如图 1 所示。

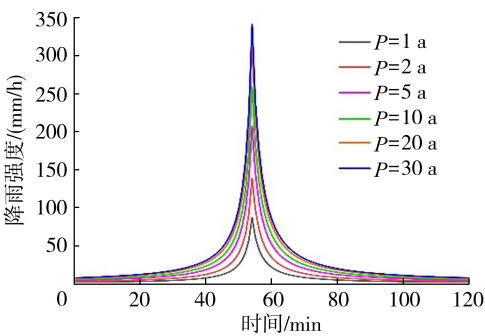


图 1 研究区不同降雨重现期条件下设计降雨过程线

1.2.2 地形、管网及土地利用

研究区域地形数据采用无人机巡航测算,利用地理信息技术手段,对无人机测算结果进行修正,得到网格精度为 1 m 的数字高程模型数据,如图 2 所示。

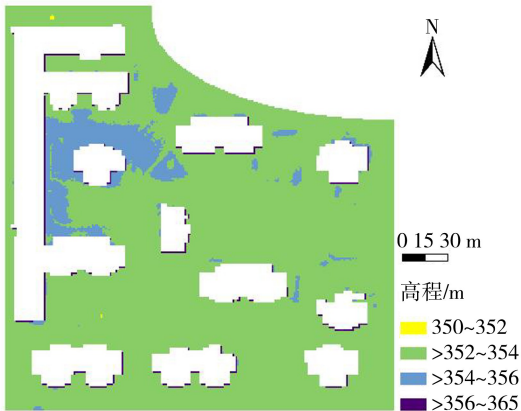


图 2 研究区数字高程模型

研究区域总面积为 6.02 hm²,主要土地利用类型为建筑、道路和绿地,其中建筑屋顶面积 1.57 hm²。土地利用类型划分如图 3 所示,研究区域不同土地利用类型下渗率及曼宁系数取值如表 1 所示。

本文采用分区模型^[25],将建筑在暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)中以子汇水分区的形式来体现,通过 SWMM 模型给定不同重现期降雨,以模拟建筑屋顶的产流过程。共在 SWMM 模型中设置 81 个汇水分区,186 个雨水井,

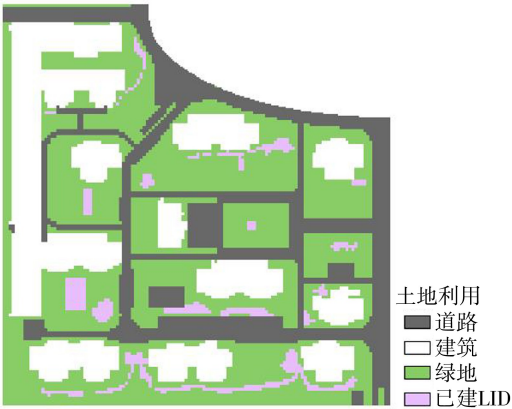


图3 研究区土地利用类型划分

表1 研究区不同土地利用类型下渗率及曼宁系数取值

土地利用类型	下渗率/(mm/h)	曼宁系数/(m ^{1/3} /s)
道路	0	0.014
建筑	0	0.015
绿地	10	0.060
已建 LID	12.92	0.200

107 个雨水管道,2 个排口,分别位于小区西北角和西南角,具体分布如图 4 所示。

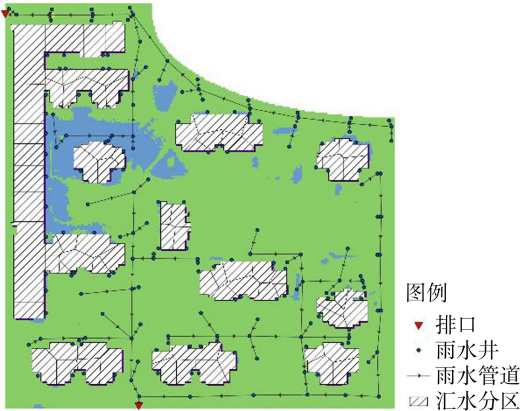


图4 研究区管网分布

2 研究方法

2.1 GAST 模型

采用西安理工大学开发的地表水及其伴随输移过程数值模型(GAST 模型)^[26]对地表水动力过程进行计算,模型采用 Godunov 格式的有限体积法对二维浅水方程进行空间离散,能够稳健地解决不连续问题,并可严格保持物质守恒^[27]。选用近似黎曼求解器 HLLC 处理计算单元界面上质量与动量通量的急变与非连续问题^[28]。

2.2 SWMM 模型

一维管网模型的计算采用 SWMM 模型,其操作简便,能准确模拟管网排水、水质等,在多种场景下得到了广泛应用。SWMM 模型包括地表产流、地表汇流、管网汇流、水质模拟 4 个模块。该模型通过求

解圣维南方程来模拟水流在管网中的运动,其水动力计算方法包括恒定流、运动波、动力波 3 种方法,动力波方法通过求解完整的一维圣维南方程对管道流态进行数值求解,理论上最符合实际情况,因此本文采用动力波方法计算管网的水力信息,数值方法采用有限差分法^[29-30]。

2.3 GAST-SWMM 耦合模型

GAST-SWMM 耦合模型主要解决的问题是雨水节点地表径流与地下管网的水量交换^[31-32]。在实际进行水量交换时,假设地表高程为 Z ,地表网格水位为 Z_{2D} ,节点水位为 Z_{1D} ,共有 3 种不同的计算情况^[33-35]:①当 $Z_{1D} < Z_{2D} < Z$ 时,地表的水量通过节点进入管网系统,即地表二维模型中的水量进入管网一维模型,此时采用堰流公式进行计算;②当 $Z < Z_{1D} < Z_{2D}$ 时,地表水量在水头作用下进入管网,即地表二维模型中的水量进入管网一维模型,此时采用孔口流量计算公式进行计算;③当 $Z < Z_{2D} < Z_{1D}$ 时,管网系统中的水量发生溢流进入地表,即管网一维模型水量进入地表二维模型,此时采用孔口流量计算公式进行计算。

地表网格水位与管网节点水位计算水量交互后,将计算的溢流量或入流量重新反馈给地表二维模型和管网一维模型分别进行通量计算。其中管网一维模型将水量交互计算得到的入流或溢流量通过新增外部函数直接传回 SWMM 系统即可;地表二维模型则需要根据入流或溢流量对地表网格的水深进行重新计算,计算公式为

$$Z_{\text{new}2D} = Z_{2D} - \frac{(Q_R - Q_Y) \Delta t}{A_{\text{cell}}} \quad (2)$$

式中: $Z_{\text{new}2D}$ 为考虑此时间步长下管网节点溢流或入流通量计算的新网格水位,m; Q_R 为节点入流量, m^3/s ; Q_Y 为节点溢流量, m^3/s ; Δt 为时间步长,s; A_{cell} 为节点对应的地表网格面积, m^2 ; Z_{2D} 为未考虑管网节点溢流或入流通量的网格水位,m。

3 模型验证与方案设计

3.1 模型率定与验证

本文绿色屋顶建设选型为简单式绿色屋顶,同时参考相关资料与文献^[36-39],绿色屋顶表面层护堤高度为 60 mm,植被覆盖系数为 0.8,曼宁系数为 0.15;土壤层厚度为 150 mm,孔隙率为 0.5,田间持水率为 0.2,导水率为 13.6 mm/h;排水材料厚度为 50 mm;孔隙率为 0.5,粗糙度为 0.3。模型率定与验证所采用的降雨数据主要来自小区内部自动雨量站,实测流量数据采用同一时段内小区管网排口监测数据。率定数据和验证数据分别采用天福和园小

区 2017 年 9 月 6 日和 2023 年 4 月 2 日的监测数据,模型率定与验证结果如图 5 所示。

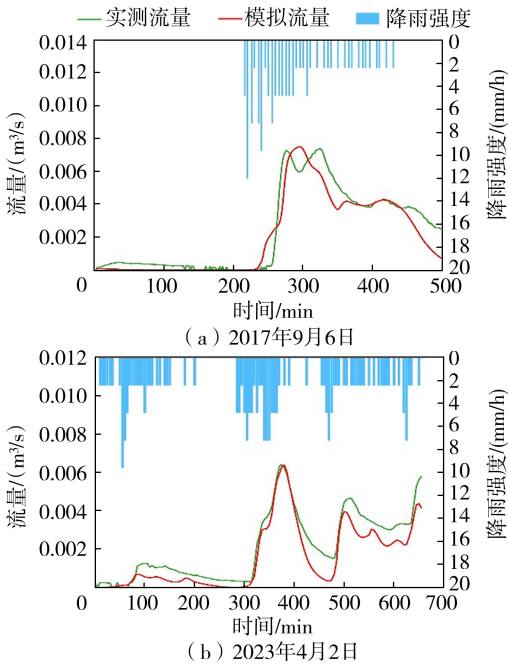


图 5 模型率定与验证结果

为进一步分析模型模拟的准确性,引入纳什效率率系数 (NSE) 作为评价标准,取 0.5 作为最低值^[40]。通过计算,可得两场降雨的排口流量 NSE 分别为 0.84 和 0.85,均大于 0.5,表明模型参数选取合理,有较好的准确性且模拟效果良好。

3.2 方案设计

小区共有 12 栋住宅楼,建筑划分如图 6 所示。结合研究区域积水实地调查结果与耦合模型现状模拟结果,在 A 栋住宅区附近容易产生积涝点,因此以 A 栋住宅区为初始点位,逐渐扩大绿色屋顶改造面积。在绿色屋顶设计时,考虑其他规划,仅将建筑屋顶 70% 的区域进行改造。对绿色屋顶的表面层、土壤层以及排水层的各项参数进行设置,搭建精确且贴合实际的模拟环境,对比分析不同工况计算结果,从而探究不同降雨重现期和绿色屋顶改造面积下的径流变化规律。通过耦合模型得出结果,计算径流控制率、峰值削减率和贡献率,从而探究绿色屋

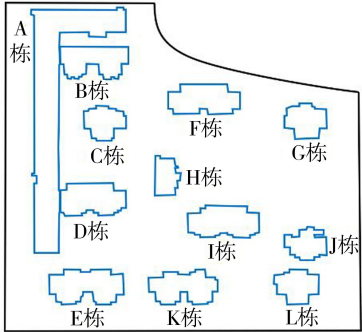


图 6 研究区建筑划分示意图

顶改造规律及效果。绿色屋顶改造区域及改造面积所占小区内屋顶总面积的比例如表 2 所示。

表 2 绿色屋顶改造方案

方案	改造区域	面积占比/%
C0	无	0
C1	A 栋	31.6
C2	A、B、C、D、E 栋	59.7
C3	A、B、C、D、E、F、G、H、I 栋	75.5
C4	A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L 栋	100.0

4 结果与分析

4.1 径流控制率

径流控制率 $\beta^{[33]}$ 是海绵改造的重要评价指标:

$$\beta = 1 - \frac{\sum_i Q_i}{10RA_2} \tag{3}$$

式中: Q_i 为排水分区内第 i 个排口的累计外排量, m^3 ; R 为降雨场次累计雨量, mm ; A_2 为排水分区面积, hm^2 。排口外排量根据耦合模型计算得出。

不同工况条件下计算得到的径流控制率如图 7 所示。未进行绿色屋顶改造时,研究区域整体径流控制率在 39.42%~75.67% 范围内,且随着降雨重现期的增大逐渐减小。

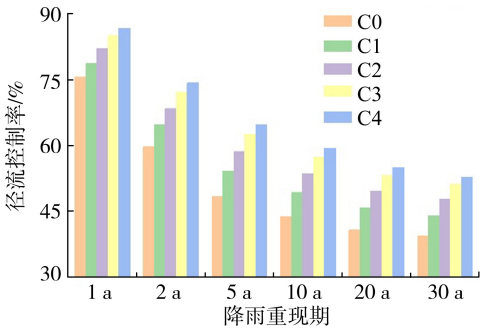


图 7 不同工况径流控制率对比

进行绿色屋顶改造后,研究区域径流控制率有显著提高。同一降雨重现期下,径流控制率随着改造面积占比的增大而增大。降雨重现期分别为 1、2、5、10、20、30 a 时,改造后径流控制率提升值分别为 11.09%、14.57%、16.20%、15.65%、14.25%、13.43%。其中,降雨重现期为 5 a 时,提升最多。

由于绿色屋顶对雨水存在截留蓄滞作用,经由落水管汇入地表的雨量减少,故进行绿色屋顶改造后径流控制率有所提升;且随着改造面积占比增大,截留的雨水增多,径流控制率也随之增大。不同重现期下径流控制率的提升效果不同,呈先增大后减小的趋势,在降雨重现期为 5 a 时出现峰值;结果表明相较于大重现期,绿色屋顶在小重现期下改造效果更好。

4.2 地表积涝情况

对比不同改造方案下模拟结果的地表最大积水量发现,随着绿色屋顶改造面积增大,削减雨量增多,可有效减少地表积涝水量。地表积涝最大水量如图 8 所示。

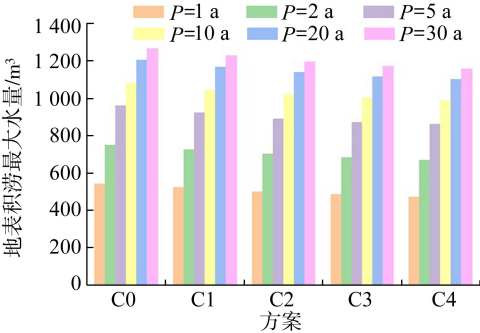


图 8 不同工况地表积涝最大水量对比

进行绿色屋顶改造后,研究区域地表积涝最大水量明显减少。降雨重现期为 5 a 时,C0、C1、C2、C3、C4 方案的地表积涝最大水量分别为 961.73、922.88、891.98、872.58、860.74 m³。

分析可得降雨发生时,绿色屋顶的植物和土壤可以截留部分雨水,这部分雨水可以缓慢下渗或蒸发,同时蓄水层也能够存储一定量的雨水,从而有效减少了地表积涝最大水量。随着改造面积增大,这种作用更为明显。故地表积涝最大水量随着改造面积增大逐渐减小。

4.3 流量峰值削减率

4.3.1 绿色屋顶流量峰值削减率

在 SWMM 中将建筑屋顶概化为子汇水分区,经由落水管将屋顶雨水排入地表,通过耦合模型得到不同时刻屋顶相连节点的总入流量,计算峰值流量,对比改造前后峰值流量,得到绿色屋顶流量峰值削减率。

由图 9 可知,在同一降雨重现期下,随着绿色屋顶改造面积占比的增大,峰值削减率逐渐增大。降雨重现期分别为 1、2、5、10、20、30 a 时,C4 方案的峰值削减率最大,分别为 66.12%、67.56%、68.45%、55.29%、29.82%、17.66%。改造面积不变时,随着降雨重现期增大,流量峰值削减率呈先增大后减小的趋势,在降雨重现期为 5 a 时,流量峰值削减率最大。

分析可得在同一降雨重现期下,随着改造面积增大,峰值时刻绿色屋顶削减的雨量增多,故峰值削减率呈增大趋势。改造面积不变时,绿色屋顶流量峰值削减率在降雨重现期 $P=5$ a 时削减效果最好,当 $P>5$ a 时,绿色屋顶改造效果有较大衰减。这是因为绿色屋顶对降雨峰值流量的削减主要受降水量

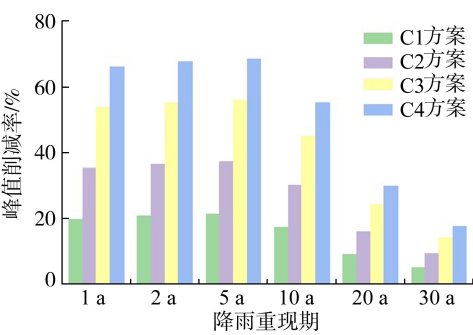


图 9 不同工况绿色屋顶流量峰值削减率对比

和降雨强度的影响,其中降雨强度起主导作用。当 $P\leq 5$ a 时,降水量和降雨强度较小,绿色屋顶的改造对屋顶落水管流量削减效果明显;但由于绿色屋顶自身截留蓄滞能力有限,当 $P>5$ a 时,随着降水量和降雨强度增大,超过其调蓄能力,因此屋顶落水管流量削减效果减弱。在 $P=30$ a 时,绿色屋顶对降雨峰值流量的削减作用已不足 20%,难以单独通过绿色屋顶改造应对较高重现期暴雨。

4.3.2 排口流量峰值削减率

排口流量作为重要指标,常被用来进行 LID 措施的改造效果评估。不同绿色屋顶改造方案排口流量峰值削减率如图 10 所示。

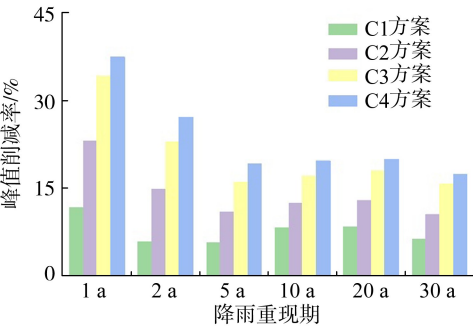


图 10 不同工况排口流量峰值削减率对比

由图 10 可知,在同一降雨重现期下,随着绿色屋顶改造面积占比增大,排口峰值削减率逐渐增大。降雨重现期分别为 1、2、5、10、20、30 a 时,C4 方案的峰值削减率最大,分别为 37.40%、27.12%、19.16%、19.73%、20.02%、17.49%。改造面积不变时,随着降雨重现期增大,排口流量峰值削减率呈先减小后增大再减小的趋势,在降雨重现期为 5 a 时排口流量峰值削减率最小。

分析可得随着改造面积增大,绿色屋顶截留作用增强,故流入排口的雨量逐渐减小,排口流量峰值削减率随之增大。改造面积不变,随着降雨重现期增大,排水系统面临更大压力,而绿色屋顶也逐渐趋于饱和,故排口流量峰值削减率减小;当降雨重现期进一步增大,排水系统的设计能力开始发挥作用,与绿色屋顶协同作用,使得排口流量峰值削减率增大。

在降雨重现期为 30a 时,由于降雨强度变大,绿色屋顶短时间内达到饱和状态,排水系统的设计能力面临很大挑战,故排口流量峰值削减率有所下降。

4.4 贡献率

产汇流过程中,降雨被绿色屋顶部分截留,再经由落水管排入地表,而地表上的降雨可通过排口排出,也可通过土壤下渗,同时伴随蒸散发过程。由于本次模拟过程为短历时暴雨,蒸散发量占比极小,在本研究中可将蒸散发量忽略不计,主要探究绿色屋顶截留、管网外排部分。

4.4.1 绿色屋顶改造贡献率

为探究绿色屋顶改造对于降雨总量削减的贡献,引入绿色屋顶改造贡献率这一概念,其计算公式为

α = (V₀ - V₁)/V (4)

式中:α 为绿色屋顶改造贡献率;V₀、V₁ 分别为改造前、后节点入流总量;V 为降雨总量。

图 11 为不同工况绿色屋顶改造贡献率对比。由图 11 可知,在同一降雨重现期下,随着改造面积增大,绿色屋顶改造贡献率显著提高。降雨重现期为 5 a 时,C1、C2、C3、C4 方案的绿色屋顶改造贡献率分别为 5.42%、9.45%、13.74%、16.77%。改造面积不变时,随着降雨重现期增大,绿色屋顶改造贡献率呈先增大后减小的趋势,在降雨重现期为 5 a 时贡献率最大。

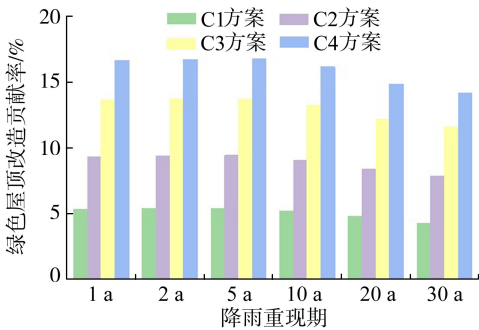


图 11 不同工况绿色屋顶改造贡献率对比

分析可得随着改造面积增大,绿色屋顶削减雨量增加,因此贡献率随之增大。改造面积不变时,C1、C2、C3、C4 方案绿色屋顶改造贡献率在 6 个降雨重现期的平均值分别为 5.08%、8.93%、13.02%、15.90%,在降雨重现期为 5 a 时,绿色屋顶改造贡献率大于其他重现期且大于平均贡献率,因此在降雨重现期为 5 a 时,绿色屋顶雨量削减效果最好。

4.4.2 排口贡献率

为探究绿色屋顶改造后,排口外排水量占降雨总量的比例,引入排口贡献率这一概念:

γ = V₂/V (5)

式中:γ 为排口贡献率;V₂ 为排口入流总量。

不同工况下排口贡献率计算结果如图 12 所示。同一降雨重现期下,随着绿色屋顶改造面积增大,排口贡献率逐渐减小;同一改造方案下,随着降雨重现期增大,排口贡献率逐渐增大。降雨重现期为 1、2、5、10、20、30 a 时,改造后排口贡献率降低值分别为 11.09%、14.57%、16.2%、15.65%、14.25%、13.57%。

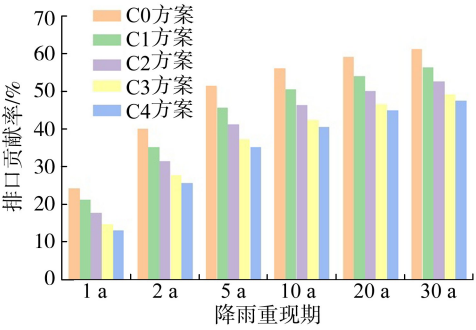


图 12 不同工况排口贡献率对比

分析可得同一降雨重现期下,随着改造面积增大,绿色屋顶所截留的雨水量增多,经由地表流入排口的雨量减小,故排口贡献率逐渐降低。由于屋顶所占研究区域的面积有限,且绿色屋顶截留效果存在阈值,降雨主要依靠排口外排,因此排口外排水量占降雨总量比例较大。当改造面积相同时,随着降雨重现期增大,排口逐渐发挥更大的作用,因此排口贡献率呈上升趋势。

5 结论

a. 在任一工况下,绿色屋顶的应用都能有效提高径流控制率,削减流量峰值,同时能够不同程度减少地表积涝水量。其中径流控制率由改造前的 39.42%~75.67% 提升至改造后的 44.13%~86.76%,绿色屋顶流量峰值削减率为 5.15%~68.45%,排口流量峰值削减率为 5.72%~37.40%。

b. 同一改造面积径流控制率随降雨重现期增大逐渐减小,同一降雨重现期径流控制率随改造面积增大逐渐增大。绿色屋顶改造面积占比为 100% 时,不同降雨重现期下径流控制率提升效果不同。当降雨重现期为 5 a 时,绿色屋顶对径流控制率的提升效果最好,可以达到 16.20%。

c. 绿色屋顶流量峰值削减率和排口流量峰值削减率随改造面积增大而增大。同一改造面积不同降雨重现期下,绿色屋顶流量峰值削减率呈先增大后减小趋势,当降雨重现期为 5 a 时,峰值流量削减效果最好,为 68.45%。排口流量峰值削减率呈先减小后增大再减小趋势,两个折点分别出现在降雨重现期为 5 a 和 20 a 时。

d. 绿色屋顶改造贡献率随改造面积增大而增大,排口贡献率随改造面积增大而减小。在同一改

造面积下,不同降雨重现期绿色屋顶改造贡献率先增大后减小趋势,排口贡献率呈增大趋势;在降雨重现期为5 a时,绿色屋顶改造贡献率最大。

参考文献:

[1] 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. (CHEN Xiaoping,HUNAG Pei,ZHOU Zhixiang,et al. A review of green roof performance towards management of roof runoff [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(8):2581-2590. (in Chinese))

[2] 梅超,石虹远,李瑞栋,等. 基于数值试验的降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析[J]. 水资源保护,2024,40(1):86-92. (MEI Chao, SHI Hongyuan, LI Ruidong,et al. Response analysis of rainfall runoff process to spatial distribution of impervious area based on numerical experiments [J]. Water Resources Protection,2024,40(1):86-92. (in Chinese))

[3] 章恒全,方静,杨柳,等. 空间溢出视角下新型城镇化进程对水资源压力的影响[J]. 水利经济,2023,41(1):1-9. (ZHANG Hengquan, FANG Jing, YANG Liu, et al. Impact of new urbanization process on water resources pressure from the perspective of spatial spillover [J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(1):1-9. (in Chinese))

[4] 曾妍,钟炜. 面向可持续雨洪管理的低影响开发措施综合效益评估[J]. 天津理工大学学报,2025,41(1):126-133. (ZI Yan, ZHONG Wei. A comprehensive benefit assessment of low impact development measures for sustainable stormwater management[J]. Journal of Tianjin University of Technology,2025,41(1):126-133. (in Chinese))

[5] 黄若琳,王锸洋,潘骁骏,等. 低影响开发设施组合下的城市雨洪调控情景模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(4):22-35. (HUANG Ruolin, WANG Luoyang,PAN Xiaojun,et al. Scenario simulation study on urban rain flood control under the combination of low impact development facilities [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(4):22-35. (in Chinese))

[6] 吴加亮,王慧敏,刘林明,等. 海绵城市低影响开发研究及应用[J]. 中国工程咨询,2024(4):86-91. (WU Jialiang, WANG Huimin, LIU Linming, et al. Study and application of low-impact development of sponge city[J]. Chinese Consulting Engineers,2024(4):86-91. (in Chinese))

[7] 何旻,程麒铭,苏义鸿,等. 基于参数全局敏感性分析的LID设施空间布局优化研究[J]. 水资源保护,2025,41(3):194-203. (HE Yang, CHENG Qiming, SU Yihong, et al. Research on spatial layout optimization of LID facilities

based on global sensitivity analysis of parameters[J]. Water Resources Protection,2025,41(3):194-203. (in Chinese))

[8] 闫婧,张守红,章孙逊,等. 不同气候区绿色屋顶蒸散发模拟研究[J]. 生态学报,2023,43(10):3936-3945. (YAN Jing, ZHANG Shouhong, ZHANG Sunxun, et al. Simulation of evapotranspiration from green roofs in different climatic zones [J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(10):3936-3945. (in Chinese))

[9] 谢鹏,宫永伟,仇志铭,等. 多孔纤维棉在绿色屋顶中的适配性试验研究[J]. 水资源保护,2023,39(3):237-245. (XIE Peng, GONG Yongwei, QIU Zhiming, et al. Experimental study on suitability of porous fiber cotton in green roofs [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):237-245. (in Chinese))

[10] 郝留昌,王志勇. 绿色屋顶固碳潜力影响因素及其全生命周期环境效益研究综述[J]. 重庆建筑,2024,23(3):22-26. (HAO Liuchang, WANG Zhiyong. A comprehensive review of factors influencing carbon sequestration potential of green roofs and environmental benefits in their full life cycle [J]. Chongqing Architecture,2024,23(3):22-26. (in Chinese))

[11] CZEMIEL BERNDTSSON J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality:a review [J]. Ecological Engineering,2010,36(4):351-360.

[12] 张郁媛,宫永伟,何松,等. 简单式绿色屋顶滞留效果模拟准确性的影响因素[J]. 中国给水排水,2023,39(15):132-138. (ZHANG Yuyuan, GONG Yongwei, HE Song, et al. Factors affecting simulation accuracy of extensive green roof retention performance [J]. China Water & Wastewater,2023,39(15):132-138. (in Chinese))

[13] 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. (LUO Shan, ZHOU Yongchao, ZHANG Yiping. Experimental study on performance and its influence factors of green roof on stormwater management [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2018,52(5):845-852. (in Chinese))

[14] 骆天庆,黄胤. 上海梅雨期佛甲草轻薄屋顶绿化的滞蓄效果监测评估[J]. 风景园林,2023,30(7):94-101. (LUO Tianqing, HUANG Yin. Measurement and evaluation of detention and retention effects of lightweight *Sedum lineare* roof greening in plum rain season in Shanghai [J]. Landscape Architecture,2023,30(7):94-101. (in Chinese))

[15] 李鹏程,赵建利,王钰,等. 绿色屋顶降雨径流特性及其结构参数优选试验研究[J]. 中国农村水利水电,2024(4):43-49. (LI Pengcheng, ZHAO Jianli, WANG Yu, et al. Experimental study on rainfall runoff characteristics and

- structural parameter optimization of green roofs[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024 (4): 43-49. (in Chinese))
- [16] 何瑛瑛,张守红,闫婧,等. 极端降雨条件下绿色屋顶径流调控效益研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43 (11): 134-143. (HE Yingying, ZHANG Shouhong, YAN Jing, et al. Stormwater retention performance of green roofs under extreme rainfall conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43 (11): 134-143. (in Chinese))
- [17] AKTHER M, HE Jianxun, CHU A, et al. A review of green roof applications for managing urban stormwater in different climatic zones[J]. Sustainability, 2018, 10 (8): 2864.
- [18] 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.
- [19] 官保君,侯精明,李东来,等. 小区尺度雨洪过程模拟及径流分配特性研究[J]. 水力发电学报, 2024, 43 (3): 24-34. (GUAN Baojun, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Study on simulations of rainfall-flood processes and runoff allocation characteristics on community scale [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43 (3): 24-34. (in Chinese))
- [20] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30 (1): 45-55. (HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (1): 45-55. (in Chinese))
- [21] LI Bingyao, HOU Jingming, WANG Xinghua, et al. High-resolution flood numerical model and dijkstra algorithm based risk avoidance routes planning[J]. Water Resources Management, 2023, 37 (8): 3243-3258.
- [22] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (6): 41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (6): 41-47. (in Chinese))
- [23] YANG Jie, XIANG Ying, XU Xiazhen, et al. Design hyetograph for short-duration rainstorm in Jiangsu [J]. Atmosphere, 2022, 13 (6): 899.
- [24] 乔贤玲,侯精明,张文晴,等. 社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (5): 73-81. (QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (5): 73-81. (in Chinese))
- [25] 李东来,侯精明,申若竹,等. 基于地块概化和路网精细模拟理念的城市雨洪过程分区自适应模型[J]. 水科学进展, 2023, 34 (2): 197-208. (LI Donglai, HOU Jingming, SHEN Ruozhu, et al. Partition adaptive model of urban rainstorm and flood process based on the simulation concept of plots generalization and road networks fine [J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (2): 197-208. (in Chinese))
- [26] 侯精明,张兆安,马利平,等. 基于 GPU 加速技术的非结构流域雨洪数值模型[J]. 水科学进展, 2021, 32 (4): 567-576. (HOU Jingming, ZHANG Zhaoan, MA Liping, et al. Unstructured numerical model for rainfall-runoff process in watershed based on GPU acceleration technology [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (4): 567-576. (in Chinese))
- [27] 张晔,侯精明,张玉蓉,等. 漂流河段水动力数值模拟研究[J]. 水利水运工程学报, 2021 (6): 73-79. (ZHANG Ye, HOU Jingming, ZHANG Yurong, et al. Study on hydrodynamic numerical simulation of drift reach [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021 (6): 73-79. (in Chinese))
- [28] 张文晴,侯精明,王汉岗,等. 基于 GAST-SWMM 模型的西安市中心城区内涝灾害模拟及风险评估[J]. 人民珠江, 2023, 44 (8): 68-81. (ZHANG Wenqing, HOU Jingming, WANG Hangang, et al. Simulation and risk assessment of waterlogging disasters in the main urban area of Xi' an based on GAST-SWMM model [J]. Pearl River, 2023, 44 (8): 68-81. (in Chinese))
- [29] 银雅伦,侯精明,李欣怡,等. GAST-SWMM 耦合数值模型在大尺度城区致涝风险评估中的应用[J]. 环境工程, 2024, 42 (4): 82-90. (YIN Yalun, HOU Jingming, LI Xinyi, et al. Application of GAST-SWMM coupled numerical model in large-scale urban inundation risk assessment [J]. Environmental Engineering, 2024, 42 (4): 82-90. (in Chinese))
- [30] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 考虑不同水流交换模式的城市洪涝一维二维双向耦合模型[J]. 水科学进展, 2024, 35 (2): 244-255. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, LI Qijie, et al. Study on the bidirectional coupling 1-D and 2-D model of urban flood based on different flow exchange modes [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (2): 244-255. (in Chinese))
- [31] 吕佳豪,侯精明,李东来,等. 城市排水管网排口水位变化对城市洪涝过程的影响[J]. 给水排水, 2023, 49 (5): 140-149. (LYU Jiahao, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Impacts of variation of drainage pipe network outlet water level on urban flood inundation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49 (5): 140-149. (in Chinese))

(下转第 110 页)

Chinese))

[28] 王海霞,李玉义,任天志,等. 冬小麦生长季不同灌溉模式对冬小麦-夏玉米产量与水分利用的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(7):1759-1764. (WANG Haixia,LI Yuyi,REN Tianzhi, et al. Effects of different irrigation modes in winter wheat growth season on the grain yield and water use efficiency of winter wheat-summer maize [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1759-1764. (in Chinese))

[29] 朱金城,陶洪斌,高英波,等. 底墒对夏玉米生长发育、水分利用及产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2013,18(3):34-38. (ZHU Jincheng, TAO Hongbin, GAO Yingbo, et al. Effects of sowing irrigation on plant establishment, water consumption and yield of summer maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(3):34-38. (in Chinese))

[30] 罗俊杰,王勇,樊廷录. 旱地不同生态型冬小麦水分利用效率对播前底墒的响应[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(1):61-65. (LUO Junjie, WANG Yong, FAN Tinglu. Effect of winter wheat yield and WUE with different soil water before sowing in semi-arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1):61-65. (in Chinese))

[31] 徐志鹏,穆奎,董文俊,等. 关中地区播前土壤墒情对覆膜旱作夏玉米产量和水分利用的影响[J]. 水土保持学

报,2021,35(6):123-134. (XU Zhipeng, MU Kui, DONG Wenjun, et al. Effects of soil moisture content before sowing on summer maize yield and water use under plastic mulching in Guanzhong region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 123-134. (in Chinese))

[32] 许振柱,于振文. 限量灌溉对冬小麦水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(1):6-10. (XU Zhenzhu, YU Zhenwen. Effects of limited irrigation on water use of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(1):6-10. (in Chinese))

[33] 李全起,房全孝,陈雨海,等. 底墒差异对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. 农业工程学报,2004,20(2):93-96. (LI Quanqi, FANG Quanzhao, CHEN Yuhai, et al. Effects of different soil moistures before sowing on water consumption characteristics and yield of summer maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(2):93-96. (in Chinese))

[34] 郭三党,李倩,荆亚倩. 基于改进 TOPSIS 法的城市空气质量综合评价[J]. 河南科学,2021,39(11):1842-1849. (GUO Sandang, LI Qian, JING Yaqian. Comprehensive evaluation of urban air quality based on improved TOPSIS method [J]. Henan Science, 2021, 39(11):1842-1849. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-05 编辑:俞云利)

(上接第 101 页)

[32] 梁鑫,侯精明,陈光照,等. 考虑降雨空间分布的城市内涝对模式雨型响应特征分析[J]. 水利水运工程学报,2024(2):44-54. (LIANG Xin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Investigation of the response characteristics of urban waterlogging to model rainfall patterns taking into account the spatial distribution of rainfall[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2):44-54. (in Chinese))

[33] 李欣怡,侯精明,潘占鹏,等. 城市更新的雨洪过程动态响应模拟研究:以银川市为例[J]. 水利学报,2023,54(11):1347-1358. (LI Xinyi, HOU Jingming, PAN Zhanpeng, et al. Simulation study on dynamic response of rain and flood process in urban renewal: a case study of Yinchuan City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(11):1347-1358. (in Chinese))

[34] 郭敏鹏. 基于动力波法的城市地表径流与管网排水过程耦合数值模型研究及应用[D]. 西安:西安理工大学,2022.

[35] 梁鑫,侯精明,王添,等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):56-63. (LIANG Xin, HOU Jingming, WANG Tian, et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6):56-63. (in Chinese))

[36] 刘柯涵. 基于智能算法的 SWMM 模型参数率定和 LID 设施布局优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.

[37] 冯孟娟. 基于 SWMM 模型的海绵城市内涝模拟及评价:以广州庙头涌为例[D]. 邯郸:河北工程大学,2023.

[38] LIU Zhao, LI Wenqing, WANG Lixia, et al. The scenario simulations and several problems of the sponge city construction in semi-arid loess region, Northwest China [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2022, 18(1):95-108.

[39] ROSSMAN L A. Storm water management model: user's manual version 5.1 [EB/OL]. [2024-09-01]. https://www.openswmm.org/content/files/SWMM5.1UserManual_CN.pdf.

[40] 马鑫,侯精明,李丙尧,等. 建筑小区雨水花园空间布局对径流过程影响规律研究[J]. 环境工程,2022,40(12):105-111. (MA Xin, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Influence law of rainwater gardens spatial layout on runoff process in building communities [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12):105-111. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-15 编辑:俞云利)