

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.027

基于 SWMM 精细化建模的 LID 措施径流 削减能力量化研究

史本宁¹, 韩璐², 李锐², 程笑渡², 单志超¹

(1.山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2.西安建筑科技大学 城市发展与现代交通学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 城市化进程不断加快使得地表透水面积比例不断缩减, 加剧了城市洪涝灾害风险, 利用低影响开发(LID, Low-Impact Development)理念对雨洪进行管理, 能增强地表对雨水的入渗、储存等能力。基于暴雨洪水管理模型(SWMM, Storm Water Management Model), 对城市建成区某场地精细化建模, 采用绿色屋顶、下沉式绿地及透水铺装这 3 种 LID 措施对研究区域进行多形式布设, 通过模拟量化了单项 LID 措施径流削减能力, 基于较优布设形式设计了措施组合而成的四种方案, 并量化其径流削减能力。结果表明: 暴雨重现期越小, 径流削减能力越显著; 措施面积一定时, 多项措施组合方案径流削减能力明显优于单项措施; 重现期越小, 3 种措施均衡布置的方案最优, 重现期越大, 径流削减能力强的单项措施组合而成的方案最优。

关键词: SWMM; 精细化; LID 措施; 径流总量削减率

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)12-0120-07

0 引言

随着城市化进程的不断加快, 城市空间的快速增长使土地利用空间格局发生了显著变化^[1]。建设用地的快速增加使地表透水面积比例不断减小, 阻碍了地表径流与可透水下垫面间的水文循环^[2], 导致地表对雨水的渗透、截流、储存能力减弱^[3], 加剧了城市洪涝灾害风险, 近年来频发的暴雨洪涝灾害严重威胁着人员生命和经济财产安全。城市雨水管网系统是城市生命线工程的重要组成部分^[4], 主要负责雨水的输送, 它的功能受阻会直接影响城市功能的正常发挥^[5]。而我国传统的雨水排放方式存在诸多问题, 如排水系统规划设计不合理、设计过程中参考的标准较低、管道老化现象严重等问题。已建城区中较旧城区往往存在街道狭窄、建筑密度大、排水设施老化等问题^[6]。现行雨水管网排水能力常常无法应对频发的暴雨负荷, 且严重危害了受纳水体生态环境。

收稿日期: 2024-03-10

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JM-354); 西安建筑科技大学 2022 年度新型城镇化专项研究基金项目(2022SCHZ14)

作者简介: 史本宁(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事市政设施规划、总图运输优化等工作。

通信作者: 李锐(1975—), 女, 博士, 副教授, 从事总图运输方面研究教学工作。电子邮箱: lirui7010@163.com

20 世纪 90 年代, 低影响开发(LID, Low-Impact Development)理念被提出, 雨水管理规划理念发生了向“生态保护和可持续发展”的转变。该理念的核心是在城市开发建设过程中采用源头削减、中途转输、末端调蓄等手段, 通过渗、滞、蓄、净、用、排等技术, 使开发地区的水文循环尽可能地接近于自然生态。LID 主要工程措施包含透水铺装、生物滞留设施、绿色屋顶、下沉式绿地、植草沟等^[7]。同时, 正在广泛推进海绵城市建设即是应统筹低影响开发雨水系统、城市雨水管渠系统及超标雨水径流排放系统, 实现这 3 者的相互补充、相互依存。

国内外对 LID 的研究主要集中在不同尺度下对径流总量控制、峰值削减等方面。Palla 等^[8]模拟了不同暴雨重现期下一个小型城市集水区水文响应, 利用添加绿色屋顶和透水铺装实现透水面积转换。Mijin 等^[9]利用雨水花园、透水路面和雨水罐探索了 LID 措施在紧凑的高密度城市形态、传统的中等密度城市形态以及保护性的中等密度城市形态这 3 种不同城市形态土地利用下的水文行为。Fava 等^[10]构建了格里戈里奥流域(巴西圣卡洛斯)的生态恢复力评价模型, 在其中加入了生物滞留细胞参数, 评估了 LID 措施对增加恢复力的贡献。Abdeljaber 等^[11]结合生命周期评价和生命周期成本分析评估研究区域技术、经济和

环境性能,强调 LID 环境效益与财政效益。黄国如等^[12]通过现场监测的方式研究不同降雨特征下透水铺装和绿地在实际应用中的雨水径流控制能力,分析得出:透水铺装和绿地的径流总量削减率与雨前干旱期有关,随其增长而增长。在 LID 措施的布设方式研究中,程涛等^[13]分析了海绵城市中在上下游布置 LID 或采取管网改造的不同作用效果,并从流域水循环的视角提出洪涝控制策略。黄诚等^[14]将 4 种 LID 组合,模拟了 8 种情景下的径流控制情况,并基于遥感系数随机布设绿色屋顶设施,从空间尺度对比汇水区径流系数对不同比例 LID 措施的影响。徐宗学等^[15]梳理了常见 LID 措施的功能特点,归纳了在该研究领域中常见的模型工具、优化算法及规划目标等,并运用 NSGA-II 算法,构建以 LID 措施为成本、雨洪要素控制率为目标的多目标优化决策模型进行 LID 优化布局。张瀚等^[16]通过检测数据对模型参数进行率定和验证,并模拟了 LID 措施在自然状态、半饱和状态和饱和状态三种典型前期条件下对径流和污染物控制及削减效果。

上述研究对社区等小尺度的 SWMM(Storm Water Managament Model) 精细化建模方面研究较少,在 SWMM 建模的基础上往往对 LID 措施布置不够精准,未关注布置形式对于 LID 径流控制能力的影响。本文以小尺度为研究对象,区分 LID 措施布置形式,以 SWMM 软件模拟作为研究方法,对 LID 措施径流控制能力进行量化,对比单项措施与组合措施的差异。在内涝频发、广泛推进海绵城市建设的大背景下,本文旨在针对地表不透水比例高的城市建成区雨水排放等亟待解决的问题,建立以 LID 理念为核心的雨洪管理规划方法,确定缓解积水内涝的 LID 措施最优规模与位置,为城市建成区的雨洪管理规划与实施提供数据基础,这对城市区域的安全运行、提高城市韧性具有重要意义。

1 SWMM 模型及实例应用

1.1 SWMM 原理

SWMM 是在 1971 年由美国环境保护署开发的一个单一事件或长期的动态降雨-径流模拟模型^[17]。SWMM 模型将研究系统概化为雨量计、子汇水区、节点和连接等可视化对象,以及气象数据、水文数据等不可可视化对象^[18],根据输入的降雨过程曲线和能代表研究区域属性的参数对城市降雨-径流过程进行模拟,模拟内容包括水文、水力和水质模拟。本文仅

进行水文和水力模拟。

水文模拟包含对降雨、坡面汇流、地表截留和渗透雨水、蒸发、融雪、雨水下渗补给地下水、地下水与雨水管网系统的流量交换以及 LID 措施等的演算过程;水力模拟主要对水流在雨水管网、河道或者明渠中的运动过程进行演算,允许外部水流和水质数据的输入^[17]。SWMM 模型原理如图 1 所示。

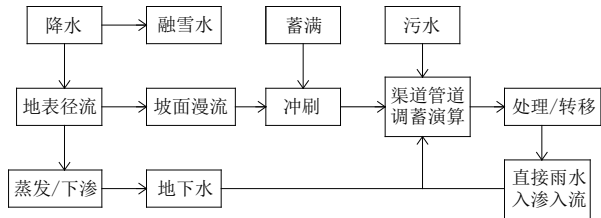


图 1 SWMM 运行过程图

1.2 研究区域概化

1.2.1 研究区域概况

研究区域位于贵州省南部偏东地区某市城市建成区,该区域整体开发程度较高,建筑物密集,面积大约为 71 786.01 m²,地表高程为东北高西南低,采用雨水管网与污水管网分流的排水体制,雨水管网的两个出口连接其左侧的剑江河。研究区域地理位置及范围如图 2 所示。



图 2 研究区域地理位置图

通过下载研究区域的遥感影像,并结合研究区域实地现状以及实地勘测 CAD 图纸对下垫面进行解析,可将研究区域下垫面分为 3 种类型,分别为屋面、绿化和硬化地面。其中屋面面积为 22 648.3 m²,占研究区域总用地面积的 31.56%,建筑物较为密集;绿地面积为 14 872.79 m²,占研究区域总用地面积的 20.85%;硬化地面面积为 34 264.85 m²,占研究区域总用地面积的 47.59%,其中包括 3 070.55 m²地砖铺装。后续子汇水面积的划分以及不透水面积比例计算需以下垫面数据为基础。

研究区域所在市属亚热带季风湿润气候,全年中 1 月最冷,日平均气温 5.6℃,7 月最热,日平均气温 24.8℃。据 1989—2018 年暴雨次数统计资料显示,该市雨量充沛,年平均降雨量为 1 454.7 mm,共

出现过 142 次暴雨。暴雨过程集中在每年 5~8 月,这 4 个月降雨量占全年降雨量的 81.7%,其中,6 月暴雨最集中,占总暴雨日数的 35.2%^[18]。基于研究区域的暴雨降雨情况对该地区雨水管网进行概化模拟,分析其运行情况和现状排水能力,有利于提高研究区域雨洪管理能力,为应对暴雨灾害气候提供了重要理论依据。

1.2.2 研究区域概化

(1) 雨水管网概化

雨水管网概化是在保留管网原有作用基础上,对管网结构进行简化,使其符合模型输入要求^[19]。雨水管网概化时应遵循如下原则:一是尽量保证原始节点与管段的数量、位置不变;二是检查 CAD 图中雨水管网是否存在管道逆坡、管段重复记录等不合理之处;三是选用主干路、次干路以及支路的雨水管段,去掉管长较短、管径较小、连接混乱的管段。最终将管网概化为 39 个节点和 37 个管段,其中 37 个节点是检查井、2 个是排放口。

(2) 子汇水面积划分

为了精准布设 LID 措施,需精细化地人工划分子汇水面积、建立精细化的 SWMM 模型。精细化的子汇水面积划分主要体现在根据下垫面的不同对研究区域进行划分,以各类下垫面的界限为划分边界,将不同类型地表独立划分为一个子汇水面积。例如,研究区域地表为屋面、绿地、硬化地面,则一个屋面、一块绿地或者一条道路将被划分为不同的子汇水面积。当以小尺度的建筑物密集的城市建成居住区为研究目标时,建立的精细化模型的各个子汇水区面积往往较小、雨水在地表的流动方向较为清晰、子汇水面积的坡度和不透水面积等参数更精确。最后将研究区域划分为 207 个子汇水面积,概化后的研究区域如图 3 所示。

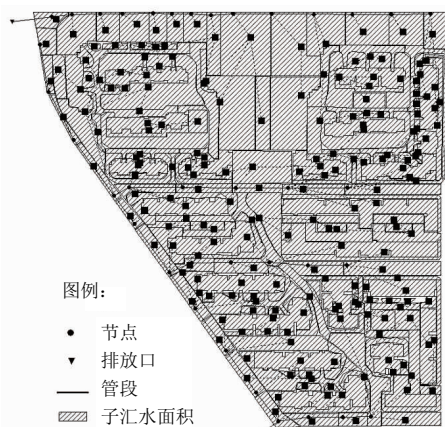


图 3 研究区域概化图

1.3 降雨过程设计

将不同暴雨过程线输入 SWMM,可实现雨水管网系统在不同降雨量大小下的运行状态模拟。本文采用芝加哥雨型公式法设计降雨过程。芝加哥雨型是一种降雨强度不均匀的单峰雨型,它以暴雨强度公式为基础,可以生成随时间变化的降雨过程线,通过设置雨峰系数,可以设定降雨强度峰值在一场降雨中出现的时间点。研究区域所在市的暴雨强度公式如下式所示,根据公式设计降雨历时 120 min,重现期分别为 1、2、5、10、20 a 的暴雨过程线,如图 4 所示。

$$i = \frac{11.299(1 + 0.707 \lg P)}{(t + 9.35 P^{0.031})^{0.695}} \quad (1)$$

式中: i 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; t 为降雨历时, min; P 为设计暴雨重现期, a。

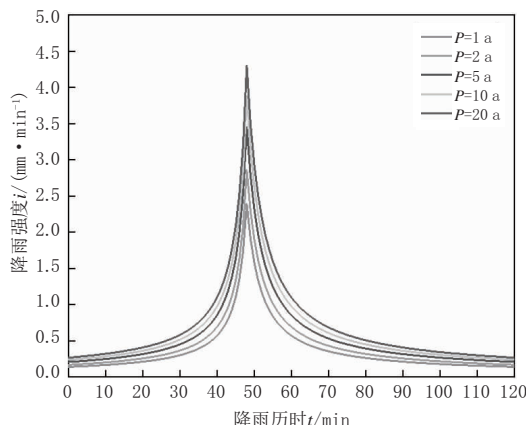


图 4 不同暴雨重现期下降雨过程曲线图

1.4 参数设置及模型验证

1.4.1 参数分类及取值

建模需输入大量数据,参数获取是建模过程中的重要组成和关键步骤。建模的参数可分为子汇水面积参数、管段参数、节点参数,又可分为确定性参数和非确定性参数,确定性参数来自于 CAD 勘测图纸等实测数据,非确定性参数主要来自经验取值。

子汇水面积参数有 13 种,其中确定性参数有面积、特征宽度、坡度,不确定性参数有不透水面积比例、不透水面积粗糙系数 N 值、透水面积粗糙系数 N 值、不透水面积洼地蓄水、透水面积洼地蓄水、无洼地蓄水不透水面积比例以及霍顿模型参数(包括最大下渗速率、最小下渗速率、衰减常数、排干时间),管段参数主要有上游管底高程、下游管底高程、管段截面与管段粗糙系数,节点参数主要有两个,分别是节点内底标高和节点最大水深。非确定性参数取值如表 1 所列。

表 1 研究区域 SWMM 模型参数表

参数名称	参数值
不透水面积粗糙系数 N 值	0.013
透水面积粗糙系数 N 值	0.17
不透水面积洼地蓄水 /mm	1.5
透水面积洼地蓄水 /mm	5
无洼地蓄水不透水面积比例 /%	25
最大下渗速率 /(mm·h ⁻¹)	76.8
最小下渗速率 /(mm·h ⁻¹)	3.03
衰减常数 /h ⁻¹	4
排干时间 /d	10
管道粗糙系数 N 值	0.013

1.4.2 模型验证

由于部分参数根据经验取值,因此,需验证模型的适用性。本文采取刘兴坡^[20]和计宝鑫^[21]提出的一种针对实测数据缺少问题,以研究区域实际综合径流系数为目标值的降雨径流模型参数验证方法^[22]。该方法通过对比研究区域实际综合径流系数值与模拟径流系数值的差距范围,对主要的参数进行率定和模型验证。径流系数是径流总量与降雨总量的比值,不同下垫面类型的径流系数不同,实际综合径流系数值是各类下垫面径流系数面积加权值与研究区域总面积的比值。不同城市化区域的综合径流系数取值如表 2 所示,模拟径流系数则是模拟所得的径流总量与降雨量的比值。

根据研究区域下垫面数据直接计算出其综合径流系数值为 0.698,研究区域建筑密度大,属于城镇建筑密集区,查表可知综合径流系数位于 0.6~0.7。对比分析实际与模拟径流系数结果及变异系数,如表 2 所列。

表 2 变异系数计算表

重现期 /a	径流总量 /mm	模拟径流系数	实际综合径流系数	变异系数 /%
1	32.408	0.669	0.698	4.24
2	41.189	0.732		-4.76

根据研究理论,当实际与模拟径流系数变异系数在±5%范围时,证明建立的模型有较好适用性,能表达研究区实际情况,本研究区域模型完成验证。

2 单项 LID 措施径流总量削减量化分析

2.1 措施选择

LID 措施主要包含绿色屋顶、透水铺装、下沉式绿地(以下均指狭义)、生物滞留设施、植草沟等。在

对设施进行比选时,应综合考虑区域水文地质与水资源特点、土地利用布局、LID 措施主要功能、控制目标、经济价值及景观效果。本研究区域下垫面类型主要可分为屋面、硬化地面和绿地,总面积大小为硬化地面>屋面>绿地。小区可供居住的建筑物分布密集,在措施比选时,应选择对占地面积要求相对较小的措施。本文衡量了汇水区域地表特征,在不改变各类地表用地功能的情况下,选取绿色屋顶对普通屋面进行改造、下沉式绿地对绿地进行改造、透水铺装对硬化地面进行改造,以实现削减径流总量、削减径流峰值以及延缓峰值时间的目的,使研究区域一定量的径流总量不外排。

2.1.1 绿色屋顶

绿色屋顶也叫种植屋面或是屋顶绿化。根据屋顶的种植基质与景观化程度可以将其划分为简单式与花园式。简单式绿色屋顶以轻重量、小体积的植物布设绿化景观。花园型绿色屋顶借助乔、灌、草、地被植物的搭配,达到空间多样性。该类屋顶占地面积较大,能实现空间丰富、层次多样的效果。简单式绿色屋顶基质深度较小,通常小于 150 mm,花园式绿色屋顶基质深度较深,甚至可超过 600 mm。

2.1.2 下沉式绿地

下沉式绿地是指低于周边铺砌地面或道路标高 200 mm 以内的绿地^[7]。相比于普通绿地,它利用下凹的空间来积蓄和存储周边道路、建筑物汇集的雨水,延长了雨水下渗的时间、减少了雨水的对外排放^[23]。下沉式绿地的下凹深度应根据当地植物耐淹性能及土壤渗透性能综合确定,一般为 100~200 mm,其内部应设置溢流口,保证暴雨时径流及时地溢流排放,溢流口的顶部标高一般应高于绿地 50~100 mm 并低于路面标高。

2.1.3 透水铺装

透水铺装是雨水渗透设施的一种,由人工材料铺装。透水铺装多孔隙的属性,可以将降雨分散地下渗透到地下,不但能控制消纳自身以及周边汇集的雨水,还能净化过滤、储蓄雨水。透水铺装兼具城市美化优势与硬化地面的便利,具有延长地面集水时间、降低地表径流、削减径流峰值的作用^[7]。

2.2 单项 LID 措施布置方案

通过在 SWMM 软件中对研究区域子汇水面积添加 LID 措施并进行模拟的方式,可实现对研究区域径流量控制效果的演算。基于研究区域较为精细化的 SWMM 模型,主要按照不同下垫面类型划分子

汇水区域,在此基础上布置 LID 措施的方法为“定义 LID 措施—添加到子汇水面积”。LID 措施本身是一种分布式的工程措施,本文对单项措施布设方式进行区分,将布设方式分为相对分散布设与相对集中布设,相对集中布设又分成集中上游和集中下游这 2 种。

(1) 相对分散布设

在研究区域符合坡度和防水要求的屋顶布置绿色屋顶,每个屋顶布置的绿色屋顶面积占该屋面总面积比例相同。受不同下垫面面积所限,分别布置绿色屋顶占比为 5%、10%、15%、20%、25%。在绿地布置下沉式绿地,每块绿地所设置下沉式绿地面积占该绿地面积比例相同,分别布置下沉式绿地占比为 5%、10%、15%。在机动车道和透水砖铺装以外硬化地面布置透水铺装,每块硬化地面所设置透水铺装面积占该硬化地面面积比例相同,分别布置透水铺装占比为 5%、10%、15%、20%、25%,如图 5 所示。



图 5 绿色屋顶相对分散布设图

(2) 相对集中布设

分为集中上游和集中下游布设。研究区域地形坡度下降方向为由北向南和由东向西。根据地形选取上游处若干屋顶,将选定的屋顶整个屋面都布设绿色屋顶,集中下游布设与上游处布设方法相同。下沉式绿地和透水铺装布设方法与绿色屋顶相同。受不同类型下垫面可改造面积所限,分别布置绿色屋顶、下沉式绿地和透水铺装占比为 5%、10%、15%,如图 6、图 7 所示。

2.3 模拟结果分析

径流总量削减率指研究区域设置 LID 措施相比于未设置 LID 径流总量的减少量占未设置 LID 措施时径流总量的比例。利用 SWMM 软件分别模拟并计算表 3 中所有布设方式在不同暴雨重现期($P=1、2、$

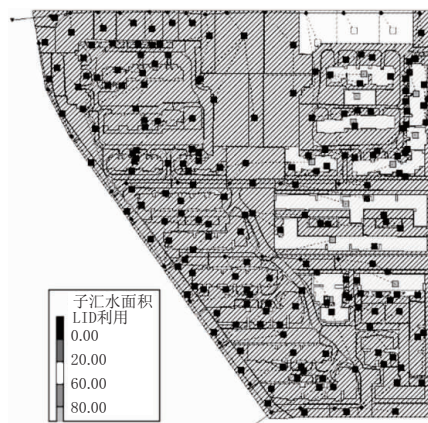


图 6 绿色屋顶集中上游布设图

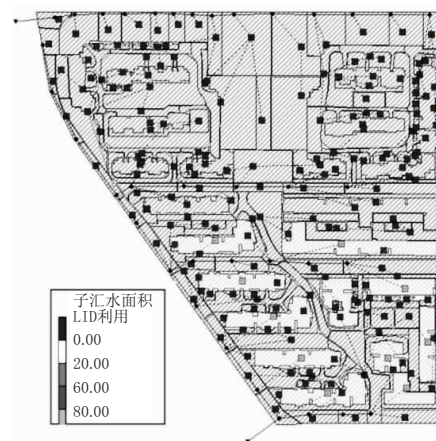


图 7 绿色屋顶集中下游布设图

5、10、20 a) 下 120 min 的径流总量削减率。对所有模拟及计算结果整合得出:绿色屋顶在相对分散布设下径流总量削减率为 9.59%~33.08%,相对集中布设下径流总量削减率为 5.33%~17.98%;下沉式绿地在相对分散布设下径流总量削减率为 4.28%~18.86%,相对集中布设下的径流总量削减率为 4.92%~16.22%;透水铺装相对分散布设下径流总量削减率为 19.55%~55.11%,相对集中布设下的径流总量削减率为 6.30%~21.79%。当透水铺装面积为 25% 时,径流总量削减率最大,为 55.11%。

总结并分析模拟结果得出:一是以 LID 措施类型作为唯一变量,径流总量削减率排序为透水铺装>绿色屋顶>下沉式绿地;二是以布设方式作为唯一变量,径流总量削减率排序为相对分散>集中下游>集中上游,集中下游布设和集中上游布设的径流总量削减率结果之间相差较小,并与相对分散布设有显著差距;三是以 LID 措施布设总面积作为唯一变量,总面积越大,径流总量削减率越大。且发现绿色屋顶与透水铺装的总面积大于 15% 后,削减率增长缓慢甚至没有变化。

表 3 径流总量模拟结果表				
重现期 / a	布置	降雨量 / mm	径流总量 / mm	径流总量 削减率 /%
1	单项 LID		14.547	55.11
	方案 1		12.849	60.35
	方案 2	48.448	6.944	78.57
	方案 3		7.702	76.23
	方案 4		6.028	81.40
2	单项 LID		19.026	54.69
	方案 1		16.507	60.69
	方案 2	56.269	9.767	76.74
	方案 3		11.142	73.46
	方案 4		8.152	80.59
5	单项 LID		25.42	53.60
	方案 1		22.547	58.85
	方案 2	69.211	15.164	72.32
	方案 3		16.506	69.87
	方案 4		13.908	74.62
10	单项 LID		30.504	52.68
	方案 1		27.909	56.71
	方案 2	78.973	20.154	68.74
	方案 3		22.556	65.01
	方案 4		20.846	67.66
20	单项 LID		35.992	51.45
	方案 1		35.018	52.76
	方案 2	88.710	26.247	64.59
	方案 3		29.173	60.65
	方案 4		28.702	61.28

3 多项 LID 措施组合方案径流削减能力量化分析

3.1 多项 LID 组合措施布置方案

基于上述分析,若只设置单项措施,径流总量最大削减率发生在暴雨重现期为 1 a、透水铺装占比 25%时的情景,为 55.11%。随着 LID 措施总面积的增大,径流总量削减率的增长速度降低。因而,对这 3 种 LID 措施进行组合,设计了 4 种方案,使每 1 种组合方案的 LID 措施总面积占总研究区域面积的 25%,每种方案的单项措施均采用相对分散布设方式,并分析 4 种方案与单项 LID 措施(25%透水铺装)径流控制能力的优劣。具体方案如下。

- 方案 1:10%透水铺装 +15%下沉式绿地。
- 方案 2:10%透水铺装 +15%绿色屋顶。

方案 3:15%透水铺装 +5%绿色屋顶 +5%下沉式绿地。

方案 4:3 种 LID 措施占总面积 25%且各单项 LID 措施面积相等。

3.2 径流总量削减率结果及分析

利用 SWMM 软件对这四种 LID 措施方案在不同暴雨重现期的降雨情景进行模拟,通过模拟出的降雨量、下渗量、径流总量结果以及计算得出的径流系数与径流总量削减率,共同分析单项 LID 措施(25%透水铺装)与多项措施组合的 4 种方案的径流总量削减效果,模拟及计算结果如表 3、图 8 所示。

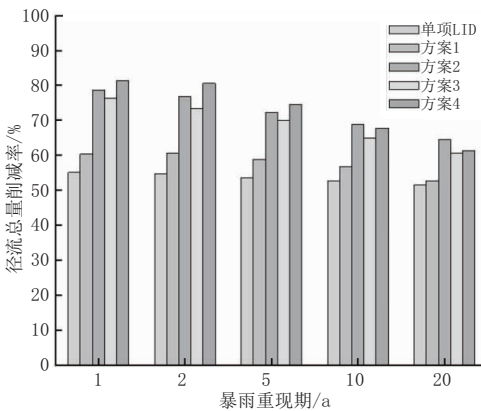


图 8 单项与多项组合 LID 措施径流总量削减率图

据表与图可知:重现期相同时,4 种方案均对径流总量有明显削减效果,径流系数均小于 0.45,下渗量显著增加,多项措施组合方案的径流总量削减率优于单项 LID 措施,随着暴雨重现期增大,降雨量、下渗量、径流总量、径流系数均呈现增大的趋势,径流总量削减率呈现降低趋势,即 LID 措施对研究区域的径流总量削减率在重现期较小时更显著。径流总量削减率随着重现期的增大而减少,是因为降雨强度增大,土壤及 LID 结构层的渗透能力更迅速地达到饱和状态,地表逐渐增多的积水只能汇入每个子汇水区最低处的雨水口再经过雨水管网排出,导致径流总量削减率降低。通过总结发现重现期为 1、2、5 a 时,径流总量削减率大小为方案 4>方案 2>方案 3>方案 1>单项 LID 措施,重现期为 10 a 和 20 a 时,径流总量削减率大小为方案 2>方案 4>方案 3>方案 1>单项 LID 措施。

4 结论与展望

本文以贵州省某城市建成区域为研究对象,建立了研究区域较为精细化的 SWMM 模型,通过模拟量化了单项 LID 措施的径流削减能力,提出对单项措施的布设方式进行区分,发现对于单项措施而言,

径流总量削减率为透水铺装>绿色屋顶>下沉式绿地,相对分散布设方式下,径流削减能力明显更强。以相对分散布设方式为基础,设计了多项措施组合的4种方案,并对比分析单项与多项措施在面积一定时对研究区域排水的改善能力,得出在重现期较小时,措施之间面积占比均衡的方案(方案4)最优,重现期较大时,单项措施削减率更强的措施组合而成的方案(方案2)更优。

本文主要采用了模拟的方法研究LID对排水的改善能力,旨在缓解城市积水内涝严重的现状问题,文中分析了透水铺装、绿色屋顶及下沉式绿地这3种LID措施在城市建成区的径流削减能力。而LID措施种类多样,不同下垫面类型改造适用性不同,本文不能提供一套广泛适用各类型用地的改造方案。今后研究应在全面分析研究区域土地利用类型及LID措施适建性的基础上,研究更多措施的综合效益。

参考文献:

- [1] 彭建,魏海,武文欢,等.基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例[J].生态学报,2018,38(11):3741-3755.
- [2] 王冲.城市区域LID性能评价及优化设计研究[D].天津:天津大学,2018.
- [3] 袁艺,史培军,刘颖慧,等.土地利用变化对城市洪涝灾害的影响[J].自然灾害学报,2003(3):6-13.
- [4] 李杰.生命线工程的研究进展与发展趋势[J].土木工程学报,2006(1):1-6,37.
- [5] 余翰武,伍国正,柳浒.城市生命线系统安全保障对策探析[J].中国安全科学报,2008(5):18-22.
- [6] 马萌华.基于模糊综合评价的海绵城市LID措施综合效能评价体系研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [7] 北京建筑大学.海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [8] Palla A, Gnecco I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale[J].Journal of hydrology, 2015(528):361-368.
- [9] Mijin S, Fouad J, Raghavan S, et al. Evaluating the Impact of Low Impact Development (LID) Practices on Water Quantity and Quality under Different Development Designs Using SWAT[J].Water, 2017, 9(3):193-210.
- [10] Fava Maria Clara et al. Linking Urban Floods to Citizen Science and Low Impact Development in Poorly Gauged Basins under Climate Changes for Dynamic Resilience Evaluation[J]. Water, 2022, 14(9): 1467-1467.
- [11] Abdeljaber Abdulrahman et al. Comparative Performance and Cost Integrated Life Cycle Assessment of Low Impact Development Controls for Sustainable Stormwater Management[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 95(7): 1-12.
- [12] 黄国如,赵晓莺,麦叶鹏.低影响开发措施对雨水径流的控制效应[J].水资源保护,2021,37(4):29-36.
- [13] 程涛,黄本胜,邱静,等.基于洪涝削减效果的海绵措施优化布局研究[J].水力发电学报,2021,40(7):32-46.
- [14] 黄诚,张晓祥,韩炜,等.基于SWMM模型及GIS技术的城市雨洪调控情景模拟——以镇江市城区为例[J].人民长江,2022,53(4): 31-36.
- [15] 徐宗学,李鹏,程涛.基于海绵城市理念的LID措施优化布局——以济南市黄台桥流域为例[J].南水北调与水利科技(中英文), 2022,20(3):552-562.
- [16] 张瀚,邱静,黄本胜,等.广州天河智慧城不同LID措施前期状态对径流和污染物调控效果的影响研究[J].中国农村水利水电,2022(10):12-19.
- [17] 刘家宏.暴雨径流管理模型理论及其应用——以SWMM为例[M].北京:科学出版社,2015:16.
- [18] 徐山川.基于GIS的SWMM模型在洪雅县的应用研究——以柳江古镇为例[D].重庆:重庆大学,2018.
- [19] 张傲.基于城市流域水文特征的管网结构概化方法及其应用研究[D].张家口:河北建筑工程学院,2020.
- [20] 刘兴坡.基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J].给水排水,2009,45(11):213-217.
- [21] 计宝鑫.基于SWMM模型的西安市城区汇水区域划分与径流特征研究[D].西安:西安理工大学,2017.
- [22] 王思润.基于SWMM的降雨径流模拟及LID组合方案分析[D].西安:西安理工大学,2020.
- [23] 程江,徐启新,杨凯,等.下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素[J].给水排水,2007(5):45-49.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com