

西安市老城区海绵改造对雨水径流削减效益模拟研究

洪伟¹, 高徐军², 杜颖恩³, 李轩³, 马勇勇³, 陈至立², 张学弟², 薛树红²

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 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; 3. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了有效地评估和量化老城区海绵改造前后的内涝削减程度和海绵调蓄能力,以西安市小寨老城区海绵改造为研究对象,采用 SWMM 模型分别计算不同工况下的节点溢流量和管道外排量,并根据水量守恒原理,分别计算出“渗”“蓄”“排”所对应的水量,进而采用入渗量、蓄水量及外排量占比等指标分析老城区海绵措施雨水径流削减效益,并对老城区改造工程进行效果评价。结果表明:降雨量为 17.2 mm 且降雨历时在 2 h 的设计降雨条件下,建设前全区的径流控制率为 67.10%,建设后全区径流控制率达 82.52%,同时在其他设计重现期的条件下,建设后比建设前均有明显的提升;经过海绵改造后,雨水很大程度上被海绵措施储蓄起来,径流控制效果显著改善;海绵措施建设后,蓄水量占比较建设前显著提升,且随着重现期的增大海绵调蓄能力逐渐趋于饱和,当重现期为 100 a 时该区域海绵措施综合蓄水量为 $35.359 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该研究成果对城市内涝防治、老城区海绵设施成效评估具有非常重要的工程实践意义。

关键词: 海绵城市; 城市雨水径流; SWMM 模型; 水量守恒; 老城区

中图分类号: TV121⁺.1; TU998.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)05-0070-08

Simulation of reduction effect of sponge reconstruction in old urban area of Xi'an City on rainfall runoff

HONG Wei¹, GAO Xujun², DU Ying'en³, LI Xuan³, MA Yongyong³, CHEN Zhili²,
ZHANG Xuedi², XUE Shuhong²

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an 710065, China; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To effectively evaluate and quantify the waterlogging reduction, regulation and storage capacity of sponge construction before and after the transformation of the old urban area, we studied the sponge transformation of Xiaozhai old urban area in Xi'an. Storm water management model (SWMM) was used to calculate the node overflow and the pipeline discharge under different working conditions. According to the principle of water volume conservation, the corresponding water volume of infiltration, storage, and drainage was calculated respectively. Then, indicators such as percentage of infiltration, water storage and external discharge were used to analyze the reduction effects of sponge measures on the rainfall runoff in Xiaozhai, and to evaluate the outcome of the urban reconstruction project. The results show that under the designed rainfall condition with a rainfall of 17.2 mm and a rainfall duration of 2 h, the runoff control rate of the whole area was 67.10% before sponge construction, but it reached 82.52% after that. Under other designed return periods, there was always a significant improvement after the construction. After sponge transformation, rainwater was largely stored by sponge measures, and the runoff control effect was significantly improved. In addition, the percentage of water storage increased significantly; however, the regulation and storage capacity of these measures gradually became saturated with the increase of the return period. When the return period was 100 a, the comprehensive water storage capacity of sponge

收稿日期:2021-03-10; 修回日期:2021-07-08

作者简介:洪伟(1990-),男,甘肃定西人,博士研究生,主要从事城市地理研究。

通讯作者:马勇勇(1993-),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要从事水动力模拟研究。

measures in this area reached 353,590 m³. The research results can provide some reference for the prevention of urban waterlogging and the effectiveness evaluation of sponge facilities in old urban areas.

Key words: sponge city; urban rainfall runoff; storm water management model (SWMM); conservation of water volume; old urban area

1 研究背景

随着我国城市化的迅速发展,城市的下垫面和气象条件发生了显著变化,致使城市不透水面积占比增加,城市洪涝现象比以往更为频发,严重影响了社会生产生活的高质量发展。以低影响开发(low impact development, LID)为核心的海绵城市理念,是现代化城市高质量发展进程中出现的新理念、新方法,为提升雨水资源的利用效率与洪灾防控提供了新型城市雨水管控思路,经过大量的实践证明,海绵城市对城市内涝具有明显的缓解作用^[1-2]。城市中的老旧城区一般具有建成年代久、规划设计不健全和排水系统设施不完善的特点,导致其相较于新建城区更易形成周边及地块内积水,严重影响了城区人民的生活质量^[3-4],因而老旧城区海绵化改造是海绵城市建设中的一个重要且紧迫的问题。

为了有效地评估和量化老城区改造前后的内涝削减程度和海绵调蓄能力,达到研究老城区海绵改造的综合调控容量的需要,模型模拟是最为理想且可靠的方法。在模型模拟海绵建设效果评估方面,常见的海绵城市评估模型有暴雨洪水管理模型 SWMM(storm water management model)^[5]、城市综合流域排水模型 InfoWorks ICM^[6]、DHI 公司的水力模型 MIKE URBAN^[7]等。国外利用数值模型对海绵城市进行效果评估的研究较早,已经有许多学者通过数值模型对雨水管理的实施效果、LID 模式下水文特征、数值模型参数的准确性、LID 设施对污染物输移的影响及 LID 设施的优化方法等方面进行了研究,并取得一定的成果^[8-11]。国内利用数值模拟评估海绵建设效果起步较晚,已有学者通过数值模型对水文水质参数的取值、LID 设施的场次径流控制率和径流总量控制率及单体 LID 设施的径流控制率进行了研究^[12-15]。然而目前研究主要集中在单体 LID 设施及海绵城市新建区域,对于老旧城区海绵改造的雨水径流控制效果及径流削减效益的研究还有待深入。

本研究以西安市小寨老城区为研究对象,采用理论分析方法,以城区内不产生内涝积水为标准,采用 SWMM 模型搭建城市内涝数值模型,综合考虑老城区本底建筑设施情况,以及城市地下管网布设方

式,模拟计算不同场次降雨条件下的城市管道外排和节点溢流情况,分析计算出“渗”“蓄”“排”所对应的水量,采用蓄水量、蓄排比等量化指标对老城区海绵措施综合调控容量进行量化评估,从而为后续海绵措施改造提供数据支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

西安市地处陕西省中部的关中盆地,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨量为 571 mm,降雨主要发生在 7-9 月,约占全年降雨量的 77%^[16-17]。小寨老城区作为典型老城区代表,又是西安市的经济核心区,积涝现象严重,在 2016 年,“7·24”短历时强降雨对其造成了严重的经济损失,其中小寨什字内涝积水最为严重,主要干道均有不同程度的积水,区域性内涝风险程度较大,且大环河、皂河等水质也有待提高。

区域管网数据根据中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司提供的小寨老城区海绵城市改造工程管网数据建立。根据西安市小寨老城区海绵布设图及实地调研结果,对老城区海绵改造的设施类型、布设位置、调蓄容积和设施规模等情况进行采集,具体的布设情况如图 1 所示,其中建筑与小区试点区域 35 处,绿地广场试点区域 12 处,调蓄容积为 28.75×10^4 m³,改造建筑面积为 187.71×10^4 m²,透水铺装面积为 10.26×10^4 m²,改造绿地面积为 26.40×10^4 m²。

2.2 模型概化

由于本研究主要涉及地表产汇流、低影响设施模拟和管网计算,因此,选用操作便捷、模拟效果好、管网计算稳定的 SWMM 模型对研究区进行概化模拟。SWMM 模型是基于水动力学理论开发的一种模型,能较好地模拟单一或连续降雨事件下的径流状况^[18-19]。

SWMM 模型中包括有众多的下渗模型,本研究的模拟对象是城市区域,下渗过程更贴近 Horton 下渗,所以选用 Horton 下渗模型^[20]。Horton 下渗模型是一个表征入渗介质的入渗率随时间变化的经验公式:

$$f = (f_0 - f_\infty)e^{-kt} + f_\infty \quad (1)$$

式中: f 为表征下渗能力的参数, mm/min ; f_0 为开始下渗时的下渗值, mm/min ; f_∞ 为下渗稳定时的下渗值, mm/min ; k 为入渗介质的入渗衰减指数, s^{-1} 或 h^{-1} , 与入渗介质的自身属性有关。

SWMM 的管网汇流模型采用的是求解一维圣维南方程组, 以求得管道中的水深和流速等水力参数, 本研究的地表径流过程中存在非恒定流情况, 因此选择适应能力更强的动力波法进行求解计算^[21], 以保证计算的精度和稳定性。

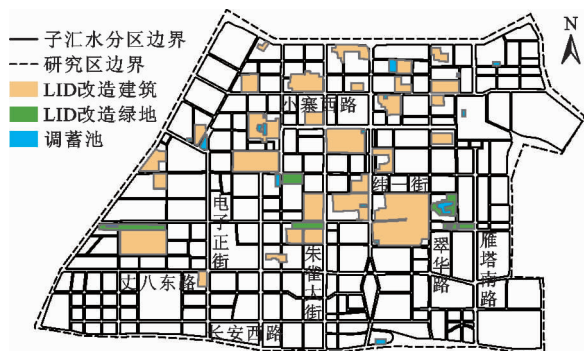


图1 西安市小寨老城区海绵改造分布

2.3 参数设定

根据西安市雁塔区老城区地形图以及老城区海绵城市详细规划工程建设图, 构建老城区改造建设前、后的 SWMM 模型, 分别见图 2、3。模型将建设前区域概化为 233 个子汇水区域, 排水管网管段

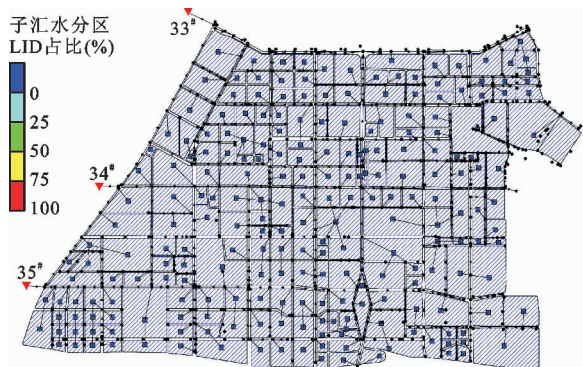


图2 西安市小寨老城区海绵城市建设前 SWMM 模型

2.4 设计降雨

本次对小寨老城区模拟海绵城市建设前和建设后的各个工况进行选取。研究区域为海绵试点区域改建区, 参考《海绵城市建设评价标准》(GB/T 51345—2018) 中年径流总量控制率分布图, 西安地区属于 II 区, 年径流总量控制率可取 80% ~ 85%, 故小寨地区海绵城市建设年径流总量控制率目标选取 80%, 根据西安地区多年平均降雨量统计结果, 年径流总量控制率 80% 对应的年降雨量为 17.2

410 段, 管网节点 557 个, 末端排水口 3 个。建设后模型将模拟区域概化为 233 个子汇水区域, 排水管网管段 554 段, 管网节点 659 个, 末端排水口 3 个。共设置调节塘、透水铺装、下沉式绿地、蓄水模块 (蓄水池) 4 种 LID 改造措施。

本文对西安小寨老城区海绵设施建设前后各种工况进行降雨径流模拟, 由于该地区暂无实测资料对模型的基本参数进行率定, 模型参数的取值主要结合小寨实际情况并参考距该研究区域不远的沣西新城海绵城市 SWMM 模型参数及相关文献, 两者同处陕西省关中地区, 无论在气象方面还是土壤方面等都具有较高的相似性, 故本次模拟参考西安沣西新城海绵城市的 SWMM 模型参数具有一定的合理性和科学性。

结合现有的资料和模型原理, 将模拟区域的土地利用类型分为 6 类: 绿地、道路、广场、停车场、小区和公共建筑。渗入模型选取 Horton 模型, 根据相关文献和调研查勘, 其中最大入渗速率选取 210 mm/h , 最小入渗速率选取 28 mm/h ; 管道传输演算模型选取动力波模型, 建设前管道统一选取圆管形状, 根据近期建设重点分布图, 建设后管道采用圆管和方管两种形状。模型所用具体参数设定见表 1; 根据相似模拟案例中 LID 设施的控水参数, 本研究中具体参数设置见表 2。

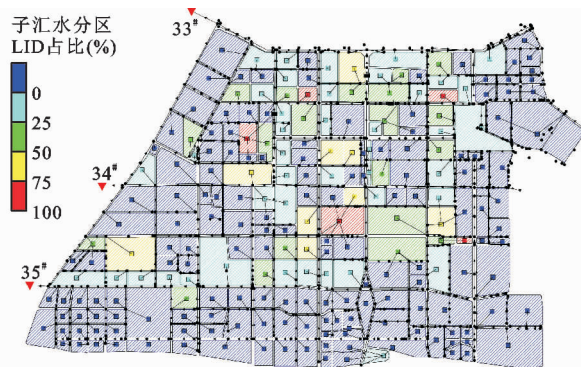


图3 西安市小寨老城区海绵城市建设后 SWMM 模型

mm , 结合已有规划和研究, 提出对年径流总量控制率为 80% (17.2 mm) 的目标。

本次模拟采用设计降雨量 1 年一遇、17.2 mm (1.35 年)、2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇、30 年一遇、50 年一遇、100 年一遇 2 h 设计降雨对研究区域海绵设施建设前及建设后的径流控制率进行模拟。由芝加哥雨型法生成相关重现期降雨过程。芝加哥雨型法是以暴雨强度公式为基础的设计典型降雨过程, 能反映大多数降雨的共性, 符合短历时暴雨特征^[26]。

表 1 SWMM 模型水文参数设定^[22-25]

参数名称	参数取值范围	参数取值
子汇水区面积/hm ²	依据不同用地属性划分汇水区,计算其面积	
地表漫流路径宽度/m	取子汇水区面积平方根	
不渗透面积百分比/%	根据建筑密度和绿地率计算	
不渗透性粗糙系数/(m ^{-1/3} ·s)	0.001~0.015	0.0045
渗透性粗糙系数/(m ^{-1/3} ·s)	0.100~0.400	0.200
管道粗糙系数/(m ^{-1/3} ·s)	0.012~0.015	0.013
不渗透性洼地蓄水深度/mm	3.0~3.5	3
渗透性洼地蓄水深度/mm	3~10	7
透水区最大下渗速率/(mm·h ⁻¹)	依据用地属性取值	210
透水区最小下渗速率/(mm·h ⁻¹)	依据用地属性取值	28
透水区下渗衰减常数/(h ⁻¹)	0~7	4

表 2 SWMM 模型 LID 设施模拟参数表

位 置	参 数	雨水	透水	下沉式
		花园	铺装	绿地
表面层	蓄水深度/mm	300	0	200
	表面粗糙系数/(m ^{-1/3} ·s)	0.12	0.01	0.15
	植被覆盖	0.1	0	0.2
	表面坡度/%	1	0.5	1
土壤层	厚度/mm	800		
	导水率/(mm·h ⁻¹)	87.71		
	孔隙数(容积分数)	0.4		
	厚度/mm		60	
路面层	渗透性		0	
	孔隙比		0.15	
	高度/mm	500	500	
蓄水层	孔隙比	0.75	0.75	
	排水系数/(mm·h ⁻¹)	0.5	0.5	
暗渠层	暗渠偏移高度/mm	0	0	
	排水指数	0.5	0.5	

西安地区暴雨强度公式为^[27]:

$$i = \frac{2210.87 \times (1 + 2.915 \times \lg P)}{167 \times (t + 21.933)^{0.974}} \quad (2)$$

式中: i 为暴雨强度,mm/min; P 为降雨重现期,a; t 为降雨时长,min。

由西安城区短历时降雨雨型分析计算得到综合雨峰系数 $r=0.3548$,雨峰位置较靠前,降雨较集中。结合雨峰系数(取值为0.35),生成各重现期历时2h的降雨过程,如图4所示。

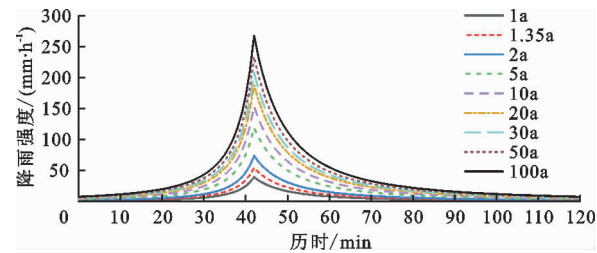


图 4 研究区不同重现期历时 2 h 降雨过程线

3 结果与分析

3.1 研究区海绵措施径流控制效果模拟结果

海绵城市建设区域需达到《海绵城市建设技术指南》规定的年径流总量控制要求。对低于雨水设施设计降雨量的降雨,雨水设施不得出现雨水未经控制直接外排的现象。特殊情况下(如地下水位高、径流污染严重、土壤渗透性差、地下建筑(构)物阻挡、地形陡峭等),径流雨水难以通过入渗补充地下水、储存回用等方式减排时,若径流雨水经过合理控制(如土壤渗滤净化)后排放,仍可视作达到径流总量控制要求。

采用 SWMM 模型通过数值模拟的方法,对研究区域海绵城市建设前后在 1 年一遇、1.35 年一遇、2 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、20 年一遇、30 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇降雨且历时 2 h 的不同重现期径流控制率进行模拟分析。建设前后各重现期模拟结果如表 3 和图 5 所示。

海绵城市建设前后模拟结果表明:降雨量为 17.2 mm(1.35 a)且降雨历时 2 h 的设计降雨情况下,建设前全区径流控制率达 67.10%,不满足海绵城市建设的评价标准。海绵设施改造后建设后全区

径流控制率达 82.52%,其控制率有了较大提升,同时满足了海绵城市建设的评价标准。此外,在 1、2、5、10、20、30、50 和 100 a 等 8 个不同重现期降雨条件下的径流总量控制率的模拟结果表明,其建设前

分别为 68.65%、62.38%、49.60%、42.16%、36.53%、33.86%、31.06%、27.92%;建设后分别为 83.55%、79.58%、68.22%、65.03%、55.64%、52.58%、49.67%、46.04%。

表 3 研究区海绵城市建设前后全区径流控制率模拟结果

降雨 重现期/a	降雨量/ mm	降雨 总体积/ 10^4 m^3	建设前		建设后	
			出流量/ 10^4 m^3	径流控制率/%	出流量/ 10^4 m^3	径流控制率/%
1	12.77	30.88	9.68	68.65	5.08	83.55
1.35	17.62	42.62	14.02	67.10	7.45	82.52
2	23.98	57.98	21.81	62.38	11.84	79.58
5	38.79	93.81	47.28	49.60	29.81	68.22
10	49.94	120.75	69.84	42.16	42.23	65.03
20	61.13	147.81	93.81	36.53	65.57	55.64
30	67.76	163.86	108.37	33.86	77.70	52.58
50	76.02	183.83	126.73	31.06	92.52	49.67
100	87.23	210.93	152.03	27.92	113.82	46.04

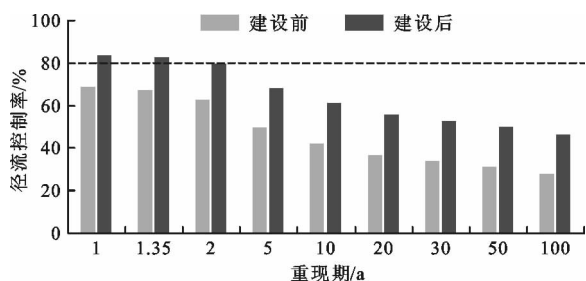


图 5 研究区海绵城市建设前后径流控制率对比

综上所述,在小寨老城区进行海绵城市改造,建设海绵措施和雨水调蓄池后,径流控制率显著提高,降雨重现期较小时,大部分降水会留在当地,降雨重现期较大时,也能起到很好的径流削减作用。

3.2 研究区海绵措施控制径流过程模拟结果

城市内涝治理中重要的不仅是海绵措施对径流量的控制效果,研究径流过程变化也同样重要。研究区不同设计降雨重现期下海绵城市建设前后 3 个排水口(33#、34#、35#)流量过程线模拟结果见图 6。图 6 表明,由于增加了蓄水池、透水铺装等海绵措施,建设后排水口流量过程线明显低于建设前,说明经过海绵改造后,雨水很大程度上被海绵措施储蓄起来,径流控制效果显著改善;对于 35#排水口而言,主要排出的是研究区南部汇入管道的雨水,该分区在 LID 和调蓄池上的改造甚微,主要是进行管网系统的新建或改建,改造后该分区的管网排水能力得到较大的提升,所以,在较大重现期下(5~100 a),建设后由于 35#排水口的峰值排水能力有较大

提升,能快速将分区地表径流排出,但是在小重现期下(1~2 a),由于较少的 LID 措施和调蓄设施的存在,能消纳一部分水量,因此出现了建设前流量过程线较建设后外排量高的情况。

3.3 研究区海绵措施渗蓄排水量平衡分析

通过对海绵措施综合调控容量进行评估,可以更加经济、合理地推进海绵城市改造工作,保障海绵措施建设的科学性和规模的合理性。本研究以西安市小寨老城区海绵改造项目区域为对象,通过理论分析和数值模拟,综合考虑该老城区的本底建筑设施情况,对改造后的老城区海绵设施的综合调控容量进行合理评估,并对渗、蓄、排中各水量占比进行定量分析。

模拟计算研究区域海绵城市建设前后不同重现期下的总降雨量以及下渗量、外排量和 LID 蓄水量。其不同重现期下降雨量分配结果见表 4,渗、蓄、排水量占比见图 7。

分析表 4 可得,研究区域在改造前后,下渗量和蓄水量随重现期的增大而增大,且下渗量随着降雨重现期的增大而逐渐趋于饱和,说明仅仅依靠研究区本底条件,很难应对极端暴雨情况;在改造后,“蓄”占比得到明显提高,“排”占比明显下降,实现了将水留在当地的效果,海绵改造效果得以彰显;改造后,随着降雨重现期的增大,LID 蓄水量随重现期的增大而增大,且逐步趋于饱和,表明 LID 的调蓄能力是有一定限度的,该区域海绵措施综合蓄水量为

35.359 × 10⁴ m³,这就需要通过灰色措施及绿色措施来实现协同作用,使得内涝得到更有效的缓解,同时还可以使用净化措施充分利用雨水资源,发挥雨水资源的利用价值。

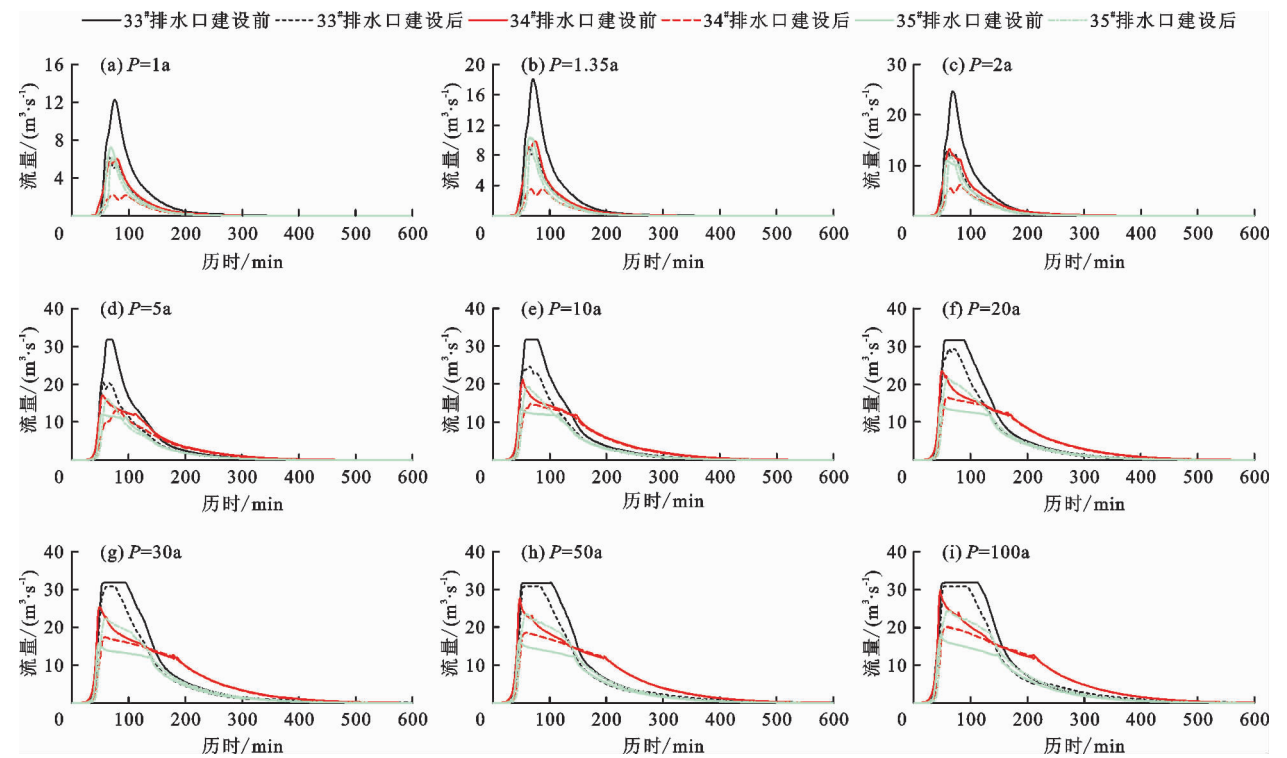


图 6 研究区不同设计降雨重现期下海绵城市建设前后排水口流量过程线

表 4 研究区不同设计降雨重现期下的降雨量及渗、蓄、排水量模拟结果

降雨重现期/a	降雨量/mm	总降雨量/10 ⁴ m ³	工况	下渗量/10 ⁴ m ³	LID 蓄水量/10 ⁴ m ³	外排量/10 ⁴ m ³
1	12.77	30.882	改造前	18.901	2.306	9.675
			改造后	21.319	4.483	5.080
1.35	17.62	42.616	改造前	25.860	2.736	14.020
			改造后	29.328	5.834	7.454
2	23.98	57.981	改造前	33.407	2.768	21.806
			改造后	38.300	7.838	11.843
5	38.79	93.805	改造前	43.450	3.080	47.275
			改造后	50.769	13.230	29.806
10	49.94	120.746	改造前	47.364	3.543	69.839
			改造后	55.766	17.956	47.024
20	61.13	147.808	改造前	49.637	4.364	93.807
			改造后	58.695	23.546	65.567
30	67.76	163.856	改造前	50.504	4.983	108.369
			改造后	59.827	26.331	77.698
50	76.02	183.827	改造前	51.311	5.790	126.726
			改造后	60.800	30.505	92.522
100	87.23	210.927	改造前	52.073	6.824	152.030
			改造后	61.744	35.359	113.824

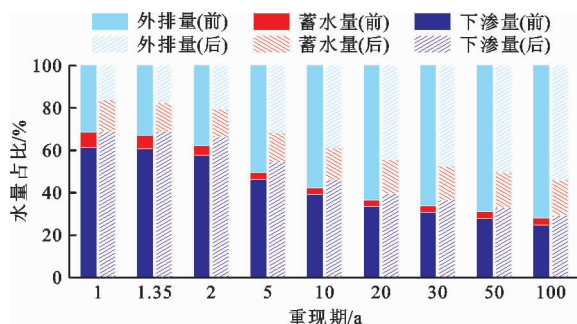


图7 研究区不同降雨重现期下建设前后渗、蓄、排水量占比

分析图7可知,在相同重现期下海绵改造后的外排水量占比较建设前均明显减少,减少幅度在14.88%以上,而蓄水量和下渗水量则不同程度地增加,这表明海绵改造设施对于雨水的滞、蓄作用显著,增加了雨水蓄留和就地入渗量;不同重现期下海绵改造前后外排量占比变化幅度在重现期为20 a时最大,为19.11%,在重现期为1 a时最小,仅为14.88%;不同重现期下海绵改造前后蓄水量占比变化幅度随着重现期的增大而增加,当重现期为100 a时,蓄水量占比在海绵改造后增加了13.53%;不同重现期下海绵改造前后下渗量占比变化幅度在重现期为2 a时最大,为8.44%,而随着重现期的变大下渗量的变幅逐渐减小,当重现期为100 a时,下渗量变幅仅为4.59%,这是因为土壤的下渗能力是有限的,重现期愈大对应的降雨强度也愈大,此时雨强大大大超过土壤的下渗能力,在一定的时间内大部分水量来不及快速下渗,因此重现期较大的下渗量占比变化幅度较小。

4 结 论

本文以西安市小寨老城区为例,对老城区海绵改造雨水径流削减效益模拟及海绵措施综合调控容量评估进行了研究,基于SWMM建立降雨径流数值模型,模拟了老城区在不同重现期下海绵改造前后的径流控制率以及渗、蓄、排各部分水量占比等关键指标,从而完成了老城区海绵综合调控容量的量化评估,主要结论有以下几点:

(1)利用SWMM模型量化分析在不同重现期条件下全区的径流总量控制率,海绵城市建设前后模拟结果表明:就全区而言,降雨量为17.2 mm且降雨历时在2 h的设计降雨条件下,建设前全区的径流控制率为67.10%,建设后全区径流控制率达82.52%,满足海绵城市建设评价标准。此外,在其他设计重现期的条件下,建设后相比于建设前均有

明显的提升。因此,小寨老城区海绵城市改造在年径流控制率方面可实现预期效果。

(2)对海绵城市建设前后的排水口流量过程线进行模拟表明:由于增加了蓄水池、透水铺装等海绵措施,不同设计降雨重现期下建设后排水口流量过程线明显低于建设前,说明经过海绵改造后,雨水很大程度上被海绵设施储蓄起来,径流控制效果显著改善。

(3)量化分析在不同重现期条件下的老城区降、蓄、排各部分水量,海绵城市建设前后模拟结果表明:建设后,蓄水量占比较建设前显著增大,且随着重现期的增大,海绵调蓄措施逐渐趋于饱和,说明了海绵调蓄能力是有限度的,且当重现期为100 a时,研究区海绵设施综合蓄水量为 $35.359 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

通过体系构建和模型评估,对西安市小寨老城区海绵城市建设前后的各项指标进行对比分析,进而对老城区本底条件和海绵改造效果进行量化评估,结果表明,海绵城市建设中海绵设施源头减排效果显著,灰、绿设施结合可有效缓解城市内涝灾害,削减污染,降低城市排水管网压力,对小寨老城区进行海绵设施改造具有非常重要的工程实践意义。

参考文献:

- [1] 赵银兵,蔡婷婷,孙然好,等. 海绵城市研究进展综述:从水文过程到生态恢复[J]. 生态学报,2019,39(13): 4638-4646.
- [2] 黄绵松,杨少雄,齐文超,等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护,2019,35(5):13-18.
- [3] 武永新,张立洪. 基于低影响开发的旧城区内涝数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):114-119.
- [4] 刘烨璇,李顺群,胡铁馨,等. 砂石渗井在黏土地区海绵城市建设中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):113-118.
- [5] YIN Dingkun, EVANS BARRY, WANG Qi, et al. Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale[J]. Science of the Total Environment, 2020, 720: 137630.
- [6] CHENG Tao, XU Zongxue, HONG Siyang, et al. Flood risk zoning by using 2D hydrodynamic modeling: A case study in Jinan City[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 5659197.
- [7] NGUYEN T T, NGO H H, GUO Wenshan, et al. A new model framework for sponge city implementation: Emerging challenges and future developments[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 253: 109689.
- [8] ITTLAND R, FÖRSTER K, WESTERHOLT D, et al. Ro-

- bust vegetation parameterization for green roofs in the EPA stormwater management model (SWMM) [J]. *Hydrology*, 2021, 8(1): 8010012.
- [9] ROSA D J, CLAUSEN J C, DIETZ M E. Calibration and verification of SWMM for low impact development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2015, 51(3): 746–757.
- [10] ESLAMI S M R. GIS application for assessment of low-impact development effects on stormwater runoff [D]. Kuala Lumpur: University Teknologi Malaysia, 2010.
- [11] BAEK S S, CHOI D H, JUNG J W, et al. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach [J]. *Water Research*, 2015, 86: 122–131.
- [12] 吴亚男,熊家晴,任心欣,等. 深圳鹅颈水流域 SWMM 模型参数敏感性分析及率定研究 [J]. *给水排水*, 2015, 51(11): 126–131.
- [13] 郭凤,陈建刚,杨军,等. SWMM 模拟植草沟功能的参数敏感性分析 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(9): 131–134 + 139.
- [14] 肖友淦. 基于 SWMM 的年径流总量控制率计算探讨 [J]. *给水排水*, 2019, 55(7): 64–69.
- [15] 靳俊伟,黄丽萍,程巍. 重庆市海绵城市年径流总量控制指标解读 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(6): 15–18.
- [16] 史悦,彭宇欣,丁艳萍,等. 基于容积法的地下空间暴雨内涝风险模型及应用 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(23): 127–133.
- [17] 牛樱. 西安市小寨区域海绵城市建设项目技术总结 [J]. *给水排水*, 2020, 56(S1): 613–618.
- [18] 李沐寒,尹海伟,孔繁花,等. 南京市鼓楼区 LID 空间配置与雨洪调控效益研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(3): 30–38.
- [19] ZENG Zhiqiang, YUAN Xiaohui, LIANG Ji, et al. Designing and implementing an SWMM-based web service framework to provide decision support for real-time urban stormwater management [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 135: 104887.
- [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.
- [21] 徐慧珺. 基于 SWMM 模型的南京典型区雨洪模拟研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [22] 陈莎,陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟 [J]. *水资源保护*, 2018, 34(5): 13–19.
- [23] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟 [J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 31–36.
- [24] 熊向隰,那金,潘晓峰,等. 基于 SWMM 模型的海绵城市措施效果模拟研究——以深圳市光明新区为例 [J]. *给水排水*, 2018, 54(4): 129–133.
- [25] 朱甜甜,于增知,于晗,等. 基于不同土地利用类型下的初期雨水径流污染特征分析与 LID 措施研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(3): 8–14.
- [26] 金丽娜,张雅斌,赵荣,等. 西安市极端强降水时空分布特征 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(25): 197–201 + 204.
- [27] 毕旭,程龙,姚东升,等. 西安城区暴雨雨型分析 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(35): 295–297 + 325.

(上接第 69 页)

- [29] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 106(7): 183–192.
- [30] 张娇艳,李扬,吴战平,等. 贵州省未来气候变化(2018–2050 年)预估分析 [J]. *气象科技*, 2018, 46(6): 1165–1171.
- [31] 胡慧杰,崔凯,曹茜,等. 黄河近百年径流演变特征分析 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(9): 14–19.
- [32] 杜懿. 水文时间序列的特性分析及预测研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [33] 栾金凯,刘登峰,冯九梁,等. 1961–2015 年山东省降水量时空变化特征分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(S1): 47–54.
- [34] 董满宇,王磊鑫,李洁敏,等. 1960–2017 年滦河流域降水集中度与集中期时空变化特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 468–475.
- [35] 齐泓玮,尚松浩,李江. 中国水资源空间不均匀性定量评价 [J]. *水力发电学报*, 2020, 39(6): 28–38.
- [36] ZHANG Qiang, YANG Jinhu, WANG Wei, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 113–127.