

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.02.16

基于SWMM的银川市金凤区雨洪模拟及LID效果评估

李明慧¹, 侯精明¹, 王添¹, 栾广学¹, 银雅伦¹, 杨露¹, 李欣怡¹, 樊超², 沈建²

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中规院(北京)规划设计有限公司, 北京 100044)

摘要: 针对城市内涝及非点源污染问题,从海绵城市建设角度出发,以银川市金凤区作为研究区域,采用SWMM建立雨洪模型,选取设计雨峰系数为0.4的5种降雨重现期和降雨重现期为0.5 a的4种雨峰系数共9场降雨,评估研究区在下凹式绿地、透水铺装、雨水花园、下凹式绿地组合透水铺装及雨水花园组合透水铺装5种LID方案下对径流及4种污染物的控制效果。模拟结果表明:随着重现期的增大,5种方案的径流控制率及污染物负荷削减率均有所减小;下凹式绿地组合透水铺装方案的削减效果最为显著,重现期为0.5~5 a时,该方案径流控制率均大于65%,污染物负荷削减率均大于45%;重现期为10 a时,径流控制率及TSS、COD、TP与TN负荷削减率分别为61.38%、42.86%、58.23%、44.03%和55.95%;重现期为0.5 a时,随着雨峰系数的增大,5种LID方案的径流控制率及污染物负荷削减率的变化均不明显。LID方案对中小重现期降雨有较好的控制效果,但因组合方案各措施间受到相互作用及不透水面积等因素的影响,并未达到“1+1>2”的叠加效应,最优方案还需深入研究。

关键词: 海绵城市; 低影响开发(LID); SWMM; 雨水径流控制; 污染物削减; 银川市金凤区

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0128-07

Rainstorm simulation and LID effect evaluation of Jinfeng District, Yinchuan based on SWMM

LI Minghui¹, HOU Jingming¹, WANG Tian¹, LUAN Guangxue¹, YIN Yalun¹,
YANG Lu¹, LI Xinyi¹, FAN Chao², SHEN Jian²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. CAUPD Beijing Planning and Design Consultants Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: In view of urban waterlogging and non-point source pollution, the SWMM is used to establish a stormwater model for Jinfeng District of Yinchuan City from the perspective of sponge city construction. Five return periods with a design rainfall peak coefficient of 0.4 and four rainfall peak coefficients with a return period of 0.5 a constitute a total of nine rainfall events, which are adopted to assess the control effect of five LID schemes of concave green space, permeable pavement, rain garden, the combination of concave green space and permeable pavement, the combination of rain garden and permeable pavement on runoff and four pollutants. The simulation results show that the runoff control rate and pollutant load reduction rate of the five schemes decrease with the increase of the return period; concave green space has the best performance, when the return period is 0.5–5 a, the runoff control rate of each scheme is greater than 65%, and the pollutant load reduction rate is greater than 45%; when the return period is 10 a, the runoff control rate and the reduction rate of TSS, COD, TP and TN load are 61.38%, 42.86%, 58.23%, 44.03% and 55.95%, respectively; when the return period is 0.5 a, with the increase of rainfall peak coefficient, the runoff control rate and pollutant load reduction effect of the five LID schemes show no obvious changes. The LID schemes have a good control effect on rainfall with medium and small

收稿日期:2022-08-01; 修回日期:2022-11-07

基金项目:中德合作交流项目(M-0427);国家自然科学基金项目(52079106、52009104);陕西省科技创新团队项目(2020TD-023)

作者简介:李明慧(1997—),女,陕西蒲城人,硕士研究生,研究方向为水环境模拟。

通讯作者:侯精明(1982—),男,河北怀安人,博士,教授,博士生导师,研究方向为城市水科学。

return periods; however, the superposition effect of “1 + 1 > 2” has not been achieved, due to the interaction among various measures of the combined schemes and the impervious areas in between, and the optimal scheme is yet to be discussed in further study.

Key words: sponge city; low impact development (LID); storm water management model (SWMM); rainfall runoff control; pollutant reduction; Jinfeng District of Yinchuan City

1 研究背景

随着我国城市化快速发展,市区大部分地面被住宅、商业区和道路所覆盖,不透水区域大幅增加,城市水环境问题日益严重,主要表现在城市内涝及雨水径流污染两方面^[1-6]。为了对城市内涝及水环境污染进行科学治理,通过数值模型模拟分析低影响开发措施对地表径流及非点源污染的作用机理就显得尤为重要^[7]。

低影响开发(low impact development, LID)是海绵城市建设的重要组成部分。它是一种新型雨水管理理念,在美国、英国、澳大利亚等国家相继推行^[8]。其具体工程措施主要包括透水铺装、绿色屋顶、下凹式绿地、雨水再生系统等。近年来,将 SWMM(storm water management model)用于我国海绵城市建设的研究越来越多,如吴忠等^[9]利用 SWMM 模型研究了小范围功能区不同 LID 策略下的截污效果,结果表明 LID 措施具有一定的截污减排效能和削减污染物峰值浓度的作用;韩璐遥等^[10]模拟了各 LID 布设方案对不同排水区的径流总量、洪峰流量及污染物负荷的控制效果;俞茜等^[11]研究了不同降雨特征情况下 LID 措施的降雨控制效果,结果表明 LID 措施对降雨径流的控制效果较为显著,但随降雨量级的增加,控制效果会显著减弱。然而,目前大多数研究仅仅简单地得出 LID 措施能够削减雨水径流及污染物负荷的结论,仍缺少最佳 LID 布设方式的研究。

为了得到最佳 LID 设施建设方案来解决城市内涝及非点源污染问题,同时鉴于对银川市海绵城市建设的相关研究较少,本文以银川市金凤区为研究对象,采用 SWMM 模型,以寻求最佳 LID 布设方式为目标,评估不同 LID 设施在不同降雨重现期及不同雨峰系数条件下对径流及污染物的控制效果,研究成果可为银川市内涝及非点源污染防治工作提供参考。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

银川市属于中温带大陆性气候,城区多年平均

降水量为 199.54 mm。本文研究区域选取银川市金凤区中部,地处银川市中心,金凤区中部总面积为 30.40 km²,水系总水面面积约 1.18 km²,景观水系、沟道常水位控制在 1 106.50 m 左右。研究区位置及主要街道、水系分布见图 1。

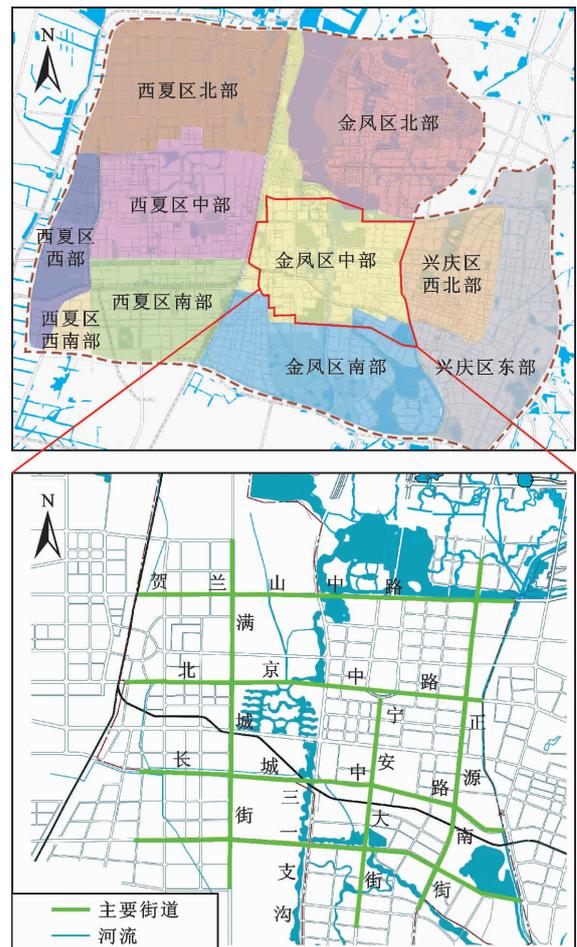


图 1 研究区位置及主要街道、水系分布

2.2 模型概化

根据已有的管网资料(管网数据由银川市市政管理局提供)、实测地形及本地特征构建 SWMM 模型,模型共划分子汇水区 158 个,管网节点 5 545 个,雨水管 3 561 段。模型概化图如图 2 所示。土地利用类型分为道路、房屋、绿地和其他,各类型面积占比如表 1 所示。

2.3 参数设定

依据现有的资料和模型原理,对模型参数进行

设置。水力模型参数主要包括节点及管道参数,其中节点参数主要包括节点高程、最大深度等;管道参数主要有形状、管道长度、管道曼宁糙率等^[12]。水文模型包含子汇水区、LID 措施、雨量计等,其中子汇水区参数包含透水区曼宁系数、不透水区曼宁系数等^[13-14]。下渗模型选用 Horton 模型,相关参数结合文献[15]、[16]及 SWMM 模型用户手册在参考范围内取值。部分参数值如表 2 所示。

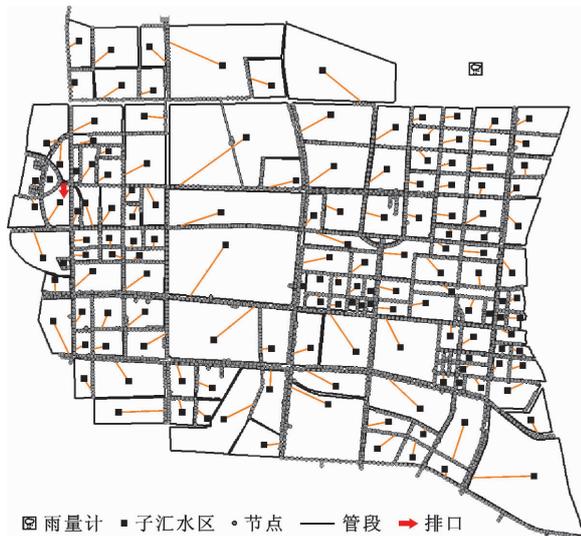


图 2 研究区模型概化图

表 1 研究区各土地利用类型面积占比

土地利用类型	道路	房屋	绿地	其他
面积占比/%	31.27	35.38	29.47	3.88

表 2 SWMM 模型部分参数取值

内容	参数	数值
子汇水区	不透水区曼宁系数	0.01
	透水区曼宁系数	0.1
注蓄量	不透水区注蓄量/mm	0.05
	透水区注蓄量/mm	0.05
	最大入渗速率/(mm·h ⁻¹)	23.75
霍顿下渗模型	最小入渗速率/(mm·h ⁻¹)	2.5
	衰减系数/d ⁻¹	4

从 SWMM 模型水质模块中选取地表径流中 TSS、COD、TP、TN 4 种典型污染物作为研究对象,将研究区土地利用类型分为房屋、绿地、道路 3 种,污染物累积模型和冲刷模型分别选用饱和模型和指数模型。因银川市海绵城市建设相关研究较少,故参考西北地区相关研究成果^[17-18],模型参数设定如表 3 所示。

表 3 地表污染物累积函数和冲刷函数参数取值

类型	参数	TSS	COD	TP	TN
房屋	最大累计/(kg·hm ⁻²)	140	100	1.4	2.3
	幂、饱和常数/d ⁻¹	10	10	10	10
	冲刷系数	0.009	0.008	0.008	0.008
	冲刷指数	0.4	0.54	0.45	0.55
道路	最大增长/(kg·hm ⁻²)	120	120	1	19
	幂、饱和常数/d ⁻¹	10	10	10	10
	冲刷系数	0.09	0.085	0.09	0.085
	冲刷指数	0.2	0.53	0.5	0.53
绿地	最大增长/(kg·hm ⁻²)	130	90	1.5	27
	幂、饱和常数/d ⁻¹	8	8	8	8
	冲刷系数	0.008	0.007	0.007	0.007
	冲刷指数	0.5	0.8	0.45	0.45

本研究利用 SWMM 软件建立模型,选用透水铺装、下凹式绿地、雨水花园 3 种 LID 设施进行模拟,查阅相关文献[19-25]及 SWMM 用户手册提供的参考数据,LID 参数如表 4 所示。

表 4 3 种 LID 设施参数取值

LID 处理层	模型参数名称	透水铺装	下凹式绿地	雨水花园
表面层	蓄水深度/mm	20	300	500
	植被覆盖率	0	0.7	0.8
	地表粗糙系数	0.015	0.24	0.2
	地表坡度/%	1	1	1
路面层	透水层厚度/mm	100		
	孔隙比	0.19		
	不透水率	0		
	渗透性/(mm·h ⁻¹)	300		
蓄水层	堵塞因子	0		
	透水层厚度/mm	300		
	孔隙比	0.75		
	导水率/(mm·h ⁻¹)	260		
排水层	堵塞因子	0		
	排水系数/(mm·h ⁻¹)	0		
	排水指数	0.5		
	偏移高度/mm	6		
土壤层	透水层厚度/mm	500		500
	孔隙率	0.42		0.42
	产水能力	0.2		0.2
	枯萎点	0.1		0.1
	导水率/(mm·h ⁻¹)	86		86
	导水率坡度/%	10		10
吸水头/mm	3.5		3.5	

根据《室外排水设计标准》^[26],对于不透水区占比大于 70% 的城镇建筑密集区的综合径流系数控制为 0.60 ~ 0.85。本研究区现状不透水面积占比为 70.53%,当重现期为 0.5 a 时,径流系数为 68.55%,重现期为 1 a 时,径流系数为 73.45%,符合设计标准,故认为模型参数设置可支撑本研究内容。

2.4 降雨数据

降雨数据采用银川市暴雨强度公式生成,降雨历时为 120 min。银川市暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{551.4(1 + 0.5814 \lg p)}{(t + 11)^{0.669}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, mm/min; t 为设计降雨历时, min; p 为设计重现期, a。

(1) 不同降雨重现期下的降雨过程。本次模拟采用芝加哥雨型,降雨重现期为 0.5、1、3、5、10 a 共 5 种过程线,雨峰系数为 0.4,得到各重现期下的降雨过程线如图 3 所示。

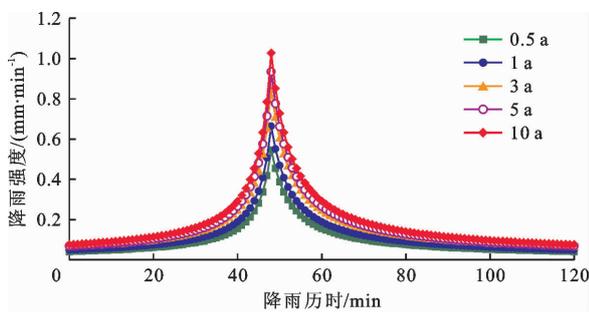


图 3 不同降雨重现期的设计降雨过程

(2) 不同雨峰系数下的降雨过程。设计降雨重现期取 0.5 a,雨峰系数分别为 0.3、0.4、0.5、0.6,降雨历时均为 120 min。各雨峰系数下的降雨过程线如图 4 所示。

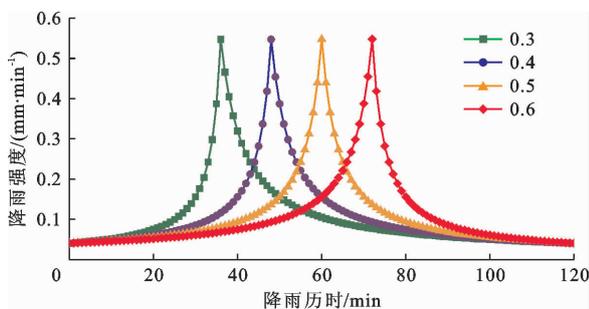


图 4 不同雨峰系数的设计降雨过程

2.5 LID 方案设计

本研究区整体排水设施的调蓄能力减缓,导致降雨时城市产生的内涝及污染问题严重,因此在城市积涝点附近分别布设下凹式绿地、透水铺装、雨水

花园、下凹式绿地组合透水铺装(方案 4)、雨水花园组合透水铺装(方案 5) 5 种方案。下凹式绿地与雨水花园布设面积相等且均设在绿地,透水铺装设在道路,面积小于其他两种措施,方案 4 与方案 5 均为绿色设施与透水铺装组合且面积相同。5 种方案 LID 措施的面积及占比情况见表 5。

表 5 5 种设计方案 LID 措施的面积及占比

LID 方案	面积/hm ²	占比/%
下凹式绿地	203.08	6.68
雨水花园	203.08	6.68
透水铺装	135.39	4.45
方案 4	338.46	11.13
方案 5	338.46	11.13

3 结果与分析

3.1 LID 方案在同一雨峰系数不同重现期下径流及污染物控制效果分析

当雨峰系数为 0.4 时,在降雨重现期分别为 0.5、1、3、5、10 a 下,现状及 5 种 LID 设计方案的径流削减率与污染物负荷削减率如表 6 所示。

分析表 6 可知,各 LID 方案与现状相比,径流削减率均有所增大,在相同重现期下,研究区径流削减率为方案 4 > 方案 5 > 透水铺装 > 下凹式绿地 > 雨水花园。以重现期 0.5 a 为例,与现状径流削减率相比,下凹式绿地提高了 3.56%,透水铺装提高了 7.30%,雨水花园提高了 1.69%,方案 4 提高了 10.59%,方案 5 提高了 7.81%。方案 4 与方案 5 均用绿色设施搭配透水铺装,布设面积相同,由此可见,透水铺装的径流控制效果最好,搭配绿色设施效果会更好。由于方案 4 与方案 5 措施间受到相互作用及不透水面积等因素的影响,因此径流调控并未达到“1 + 1 > 2”的叠加效应。

表 6 中的模拟结果表明,各 LID 措施在径流污染物控制方面也具有很好的效果。在降雨重现期为 0.5 ~ 10 a 下,污染负荷削减率均随着重现期的增大而减小。在相同重现期下,污染物负荷削减效果均为方案 4 > 下凹式绿地 > 方案 5 > 雨水花园 > 透水铺装。以重现期 0.5 a 为例,下凹式绿地、透水铺装、雨水花园、方案 4 及方案 5 的 TSS 负荷削减率分别为 48.72%、26.39%、29.74%、56.28% 和 42.97%,COD 负荷削减率分别为 56.05%、29.68%、32.38%、70.46% 和 44.77%,TP 负荷削减率分别为 48.98%、27.76%、30.84%、57.55% 和

43.57%, TN 负荷削减率分别为 54.48%、28.04%、31.07%、68.57% 和 44.03%, 由此可以看出, 污染物指标削减的效果均为 COD > TN > TP > TSS。

表 6 不同重现期下 LID 措施径流削减率及污染物负荷削减率变化(雨峰系数为 0.4)

方案	重现期/a	径流削减率/%	TSS 负荷削减率/%	COD 负荷削减率/%	TP 负荷削减率/%	TN 负荷削减率/%
现状	0.5	74.26				
	1	70.33				
	3	63.78				
	5	60.89				
	10	57.05				
下凹式绿地	0.5	77.82	48.72	56.05	48.98	54.48
	1	72.37	46.95	53.34	46.99	51.72
	3	65.45	46.02	53.66	46.73	52.27
	5	61.11	42.34	49.01	43.55	47.50
	10	57.12	38.51	48.98	39.23	47.98
透水铺装	0.5	81.56	26.39	29.68	27.76	28.04
	1	75.14	22.83	25.99	24.06	24.45
	3	66.99	19.20	22.14	20.26	20.72
	5	64.12	18.11	20.99	19.11	19.60
	10	60.75	17.04	19.85	17.97	18.48
雨水花园	0.5	75.95	29.74	32.38	30.84	31.07
	1	72.17	25.78	28.43	26.83	27.12
	3	65.33	21.70	24.29	22.65	23.01
	5	60.95	20.50	23.08	21.42	21.80
	10	57.86	19.28	21.86	20.16	20.58
方案 4	0.5	84.85	56.28	70.46	57.55	68.57
	1	78.96	50.98	63.17	51.86	62.43
	3	70.08	47.60	62.04	48.99	59.88
	5	65.48	46.88	60.81	45.19	58.36
	10	61.38	42.86	58.23	44.03	55.95
方案 5	0.5	82.07	42.97	44.77	43.57	44.03
	1	76.72	37.78	39.77	38.31	38.96
	3	67.24	32.57	34.74	32.99	33.87
	5	64.70	31.07	33.30	31.45	32.40
	10	61.12	29.61	31.91	29.93	30.98

3.2 LID 方案在同一重现期不同雨峰系数下径流及污染物控制效果分析

当重现期为 0.5 a 时, 在雨峰系数分别为 0.3、

0.4、0.5、0.6 下, 现状及 5 种 LID 设计方案的径流削减率与污染物负荷削减率如表 7 所示。

表 7 不同雨峰系数下 LID 措施径流削减率及污染物负荷削减率变化(降雨重现期为 0.5 a)

方案	雨峰系数	径流控制率/%	TSS 负荷削减率/%	COD 负荷削减率/%	TP 负荷削减率/%	TN 负荷削减率/%
现状	0.3	74.62				
	0.4	74.26				
	0.5	74.09				
	0.6	73.97				
下凹式绿地	0.3	77.84	49.18	56.44	49.40	54.93
	0.4	77.82	48.72	56.05	48.98	54.48
	0.5	77.78	48.26	55.66	48.56	54.03
透水铺装	0.3	81.90	26.57	29.92	27.94	28.27
	0.4	81.56	26.39	29.68	27.76	28.04
	0.5	81.38	26.25	29.46	27.61	27.84
雨水花园	0.3	76.26	29.98	32.60	31.09	31.36
	0.4	75.95	29.74	32.38	30.84	31.07
	0.5	75.76	29.52	32.10	30.60	30.82
方案 4	0.3	85.38	56.80	71.02	58.10	69.11
	0.4	84.85	56.28	70.46	57.55	68.57
	0.5	84.60	55.71	69.95	57.05	67.99
方案 5	0.3	82.62	43.36	45.13	43.88	44.36
	0.4	82.07	42.97	44.77	43.57	44.03
	0.5	81.74	42.61	44.44	43.17	43.63
	0.6	81.60	42.01	43.56	42.41	42.91

当雨峰系数由 0.3 增至 0.6 时, 降雨总量由 38.257 mm 增至 38.283 mm, 增加了 0.026 mm。由表 7 可以看出, 5 种 LID 设计方案的径流削减率随雨峰系数的增大均小幅减小。在污染物负荷削减率方面, 随着雨峰系数的增加, 以透水铺装为例, TSS 削减率由 26.57% 降至 26.16%, 减少了 0.41%; COD 削减率由 29.92% 降至 29.27%, 减少了 0.65%; TP 削减率由 27.94% 降至 27.50%, 减少 0.44%; TN 削减率由 28.27% 降至 27.69%, 减少 0.58%, 可见 5 种 LID 方案的污染物负荷削减率均

随雨峰系数的增大而减小,但变化幅度均较小。上述结果是由于不同雨峰系数的降雨总量基本不变,污染物总量的变化也很小,因此径流及污染物负荷削减率变化不大。

4 讨论

本文对银川市金凤区海绵城市改造前后径流及污染物负荷削减效果进行模拟,结果表明,随着降雨重现期的增加,各LID方案的径流控制率与污染物负荷削减率均有所降低,这与吴洁等^[27]对海绵校园设计模拟的研究结果相符。在相同降雨重现期下,随着雨峰系数的增大,径流控制率与污染物负荷削减率小幅减小,王琳等^[25]在济南韩仓河流域的雨洪模拟中也得出了此类结论,出现此类现象的原因是雨峰系数越大,则研究区的降雨量和污染物负荷量越大。

LID设施对城市雨水径流及污染物负荷的削减有着重要意义。研究发现,将下凹式绿地、雨水花园等绿色设施与透水铺装进行组合,较单项措施的削减效果有明显提升,但LID措施的选用和组合方案设计是一个复杂的过程,各LID措施间会受到不透水面积限制及相互作用等因素的影响,从而不能简单地将各个LID措施组合来取得最佳效果,因此最优方案还有待进一步研究。

5 结论

为提高城市防御洪涝灾害的能力,以“慢排缓释”为主要理念,通过设置下凹式绿地、透水铺装、雨水花园、下凹式绿地组合透水铺装(方案4)及雨水花园组合透水铺装(方案5)5种LID设施方案,模拟了银川市金凤区在同一雨峰系数不同降雨重现期及不同雨峰系数同一降雨重现期两种降雨条件下,海绵改造前后径流及污染物削减的变化,主要结论有以下几点:

(1)各LID方案在降雨重现期为0.5~3a时,径流控制率均大于65%;降雨重现期为5a时,径流控制率均大于60%;降雨重现期为10a时,径流控制率均大于55%。由此可见,LID措施对中小重现期降雨雨洪的调控效果较好。

(2)下凹式绿地组合透水铺装对径流及污染物负荷的削减最为显著,降雨重现期为0.5~5a时,径流控制率均大于65%,污染物负荷削减率均大于45%;降雨重现期为10a时,径流削减率及TSS、COD、TP与TN负荷削减率分别为61.38%、

42.86%、58.23%、44.03%和55.95%;

(3)当降雨重现期为0.5a、LID方案雨峰系数由0.3增至0.6时,降雨总量增加0.026mm,研究区污染负荷增加,5种LID方案的径流及污染物负荷削减率均有所减小,但变化幅度均不明显。

(4)方案4与方案5均为绿色设施组合透水铺装,其中方案4对径流及污染物的控制效果最好,但由于组合方案各措施间受到相互作用及不透水面积等因素的影响,并未达到“1+1>2”的叠加效应,因此要达到最佳优化方案还需深入研究。

参考文献:

- [1] 任南琪,张建云,王秀衢. 全域推进海绵城市建设,消除城市内涝,打造宜居环境[J]. 环境科学学报,2020,40(10):3481-3483.
- [2] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):53-61.
- [3] 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.
- [4] 陈倩云,余弘婧,高学睿,等. 当前我国城市内涝问题成因分析与应对策略[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(1):55-63.
- [5] 黄国如. 城市暴雨内涝防控与海绵城市建设辨析[J]. 中国防汛抗旱,2018,28(2):8-14.
- [6] 王龙,黄跃飞,王光谦. 城市非点源污染模型研究进展[J]. 环境科学,2010,31(10):2532-2540.
- [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] 王璐璐,陈康,谭秀娟,等. SWMM模型在海绵城市规划中的应用[J]. 给水排水,2019,55(S1):20-22.
- [9] 吴忠,曾一鸣,师懿. 小区雨水面源污染控制SWMM模拟研究[J]. 环境科学与技术,2019,42(9):171-177.
- [10] 韩璐遥,叶兴成,王飞,等. 基于不同排水片区的低影响开发措施优化方案选取[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):160-165.
- [11] 俞茜,李娜. 不同降雨特征下低影响开发的降雨径流控制效果研究进展[J]. 水电能源科学,2021,39(8):18-21+9.
- [12] 杜颖恩,侯精明,马红丽,等. 基于SWMM的LID设施空间格局优化模拟研究[J]. 中国给水排水,2021,37(19):120-125.
- [13] 石佳. 暴雨特性对典型LID措施的污染控制效果影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.

- [14] 彭思琪,代文江. 基于 SWMM 模型的西安地铁停车场海绵城市建设效果模拟[J]. 陕西水利,2022(1):18-22.
- [15] 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.
- [16] 夏威. 基于 LID 的非点源污染调控效果研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [17] 刘碧云,任建民,张进丽,等. 基于 SWMM 模型的兰州交通大学校园区城市雨洪模拟及 LID 效果评价[J]. 水电能源科学,2021,39(7):9-12.
- [18] 尚蕊玲,王华,黄宁俊,等. 城市新区低影响开发措施的效果模拟与评价[J]. 中国给水排水,2016,32(11):141-146.
- [19] 李家科,李亚,沈冰,等. 基于 SWMM 模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报,2014,33(4):60-67.
- [20] 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.
- [21] 贺靖雄,李翠梅,程桂,等. 海绵城市雨水花园水文水质过程模拟[J]. 水电能源科学,2019,37(4):9-12.
- [22] 罗陶然. 基于 SWMM 模型的海绵城市径流水量及水质模拟[D]. 西安:西安工业大学,2019.
- [23] 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.
- [24] 黄少卿. 基于 SWMM 模型的 LID 设施雨洪及非点源污染控制效果研究[D]. 西安:西北大学,2020.
- [25] 王琳,陈刚,王晋. 基于 SWMM 的济南韩仓河流域宏观 LID 实践模拟[J]. 中国农村水利水电,2020(4):1-4.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 室外排水设计标准:GB 50014—2021[S]. 北京:中国计划出版社,2021.
- [27] 吴洁,汪恂,李燕萍. 基于 LID 的海绵校园设计模拟研究[J]. 水电能源科学,2021,39(8):128-132.

(上接第 127 页)

- [17] 张金良,李岩,白玉川,等. 黄河下游花园口-高村河段泥沙时空分布及地貌演变[J]. 水利学报,2021,52(7):759-769.
- [18] 龚西城,张昊,李琳琪,等. 黄河下游河势控制与滩区治理示范工程的实施及效果[J]. 人民黄河,2021,43(5):54-60+66.
- [19] 任杰,董增川,徐伟,等. 基于 MIKE21 FM 模型的河道防浪林行洪影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):420-424.
- [20] 彭秀竹,徐向舟,赵莹,等. 黄河下游丁坝群对河势控制效果研究[J]. 大连理工大学学报,2022,62(4):378-385.
- [21] 张帆. 非恒定流作用下丁坝水沙运动及水毁特征数值模拟[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
- [22] NING Jian, LI Guodong, LI Shanshan. Numerical simulation of the influence of spur dikes spacing on local scour and flow[J]. Applied Sciences, 2019, 9(11): 2306.
- [23] 白玉川,许栋,王玉琦,等. 二维溃坝波遇障碍物的水流泥沙数值模拟[J]. 水利学报,2005,36(5):538-543.
- [24] 唐小娅,童思陈,许光祥,等. 三峡水库汛期泥沙淤积对坝前水位的滞后响应[J]. 水科学进展,2019,30(4):528-536.
- [25] 于洋. 明渠弯道水流泥沙运动的三维数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [26] 张晓雷,夏军强,陈倩,等. 生产堤溃决后漫滩水流的概化模型试验研究[J]. 水科学进展,2018,29(1):100-108.
- [27] 孙志林,倪晓静,许丹. 丁坝周围流动图像与局部冲刷深度[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(11):2189-2196.
- [28] 邹骥,刘亚,卢金友. 平滩流量下弯曲分汊河道水力要素的突变性特征[J]. 长江科学院院报,2020,37(2):15-20.
- [29] 史志鹏,张根广,张宝军,等. 溃坝洪水模拟中泥沙因素的影响[J]. 水电能源科学,2015,33(4):68-71.
- [30] 冉大川,姚文艺,李占斌,等. 不同库容配置比例淤地坝的减沙效应[J]. 农业工程学报,2013,29(12):154-162.