

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.019

基于改进层次分析法的 LID 空间布局优化研究

李 尤^{1,2}, 邸苏闯^{3,4}, 潘兴瑶^{3,4}, 刘洪禄^{3,4}, 张书函^{3,4}, 李永坤^{3,4},
赵 飞^{3,4}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 4. 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心, 北京 100048)

摘 要: 结合低影响开发(LID)建设需求,从缓解城市洪涝风险的角度出发,以典型城市区域万泉河流域为例,基于 InfoWorks ICM 构建综合洪涝模型,参考北京市地方标准,在保持 70% 透水铺装占比不变的情况下,采用改进层次分析法开展下凹式绿地及雨水调蓄池的 LID 空间布局优化研究。结果表明,LID 措施能削减径流、缓解内涝。同时综合考虑安全效益与经济效益,得到径流总量平均削减率为 41.70%、峰值流量平均削减率为 40.16%、积水总量平均削减率为 61.08%、积水面积平均削减率为 56.74%、经济费用共计 4.82 亿元/a 的“70% 下凹式绿地 + 70% 透水铺装 + 每千平方米硬化面积配建调蓄容积为 30 m³ 的雨水调蓄池”优化组合方案。

关键词: LID 措施; LID 空间布局优化; 改进层次分析法; InfoWorks ICM

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)23-0113-08

Spatial Layout Optimization of Low Impact Development Based on Improved Analytic Hierarchy Process

LI You^{1,2}, DI Su-chuang^{3,4}, PAN Xing-yao^{3,4}, LIU Hong-lu^{3,4}, ZHANG Shu-han^{3,4},
LI Yong-kun^{3,4}, ZHAO Fei^{3,4}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 4. Beijing Engineering Technique Research Centre for Non-conventional Water Resource Exploration and Utilization and Water Use Efficient, Beijing 100048, China)

Abstract: Combining the need of low impact development (LID) construction and mitigating the risk of urban flooding, an integrated flood model based on InfoWorks ICM was constructed by taking a typical urban area—the Wanquan River watershed as an example. With reference to the local standards of Beijing, the proportion of 70% permeable pavements was kept unchanged, and LID spatial layout of sunken green land and rainwater storage tank were optimized by using improved analytic hierarchy process. The results showed that the LID measures could reduce runoff and mitigate waterlogging. At the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002, 2017ZX07103-007); 北京市科委重大研发项目(Z181100005318003); 北京市自然科学基金资助项目(8184075)

通信作者: 邸苏闯 E-mail: disuchuang@163.com

same time, the security and economic benefits were comprehensively considered, and the optimized combination scheme was obtained, which was “70% sunken green land + 70% permeable pavement + rainwater storage tanks with a volume of 30 m³ per thousand square meters of the impervious areas”. After implementation of the optimized combination scheme, average reduction rate of total runoff volume was 41.70%, average reduction rate of peak flow was 40.16%, average reduction rate of total water volume was 61.08%, average reduction rate of the waterlogging area was 56.74%, and economic cost was 482 million yuan per year.

Key words: LID measures; LID spatial layout optimization; improved analytic hierarchy process; InfoWorks ICM

随着城市化进程的加剧,水循环过程发生了极大改变,我国绝大多数大中型城市受到雨洪灾害的威胁^[1]。一方面,城市化带来硬化面积的增加,导致洪涝灾害频发;另一方面,城市水资源短缺问题严重^[2]。加之注重“末端集中”的传统城市建设模式和“快速排干”的落后雨洪管理方式,势必造成逢雨必涝、旱涝急转的严峻局面^[3]。与此同时,新兴的工厂企业引发水资源污染问题。原有绿地等自然生态景观被不透水地表代替^[4],削弱对水质的净化作用,水环境恶化不容忽视。为了缓解城市化带来的洪涝频发、水资源紧缺、水环境恶化等问题,国际和国内诸多城市均已开展低影响开发(LID)建设的探索,并取得了一定的成效^[5-13]。尽管目前城市雨洪控制、利用理念与技术,在一定程度上实现了控制雨水径流、增加水资源量、降低污染、减轻洪涝灾害的目标,但这些技术大都集中于点尺度、小区尺度,并且研究多集中于单一措施的技术参数和控制效果关系,不同措施空间布局及优化组合研究较少,在流域尺度对区域洪涝的措施效果缺乏定量评估技术,制约着低影响开发建设实践深入开展。

笔者以典型城市流域万泉河为例,在构建耦合降雨-产流、管网汇流、河道汇流与地表漫流子模型的综合洪涝模型基础上,针对雨水调蓄设施、下凹式绿地与透水铺装等典型 LID 措施及其组合方案,采用改进层次分析法(IAHP),从安全效益与经济效益两个方面进行系统评估,旨在为流域尺度的 LID 措施组合和空间优化布局提供参考。

1 流域概况

研究区为万泉河流域,该河道为北京市中心城区北部排水主干河道清河的主要支流之一。清河全长 28.69 km,流域总面积为 175 km²。万泉河流域位于清河上游,全长 7.26 km,流域面积为

19.30 km²,不透水面积占 64.47%,地面高程为 40.48~50.25 m。万泉河设计行洪标准为 20 年一遇,校核行洪标准为 50 年一遇。研究区属大陆性季风气候,为北京市暴雨中心之一,洪涝灾害易发。在 2012 年“7·21”等典型场次暴雨中造成了危害,如万泉河桥东,最大积水深度超过 0.5 m,严重影响了市民生命财产安全和城市安全运行。

2 研究方法

本研究的技术路线如图 1 所示。

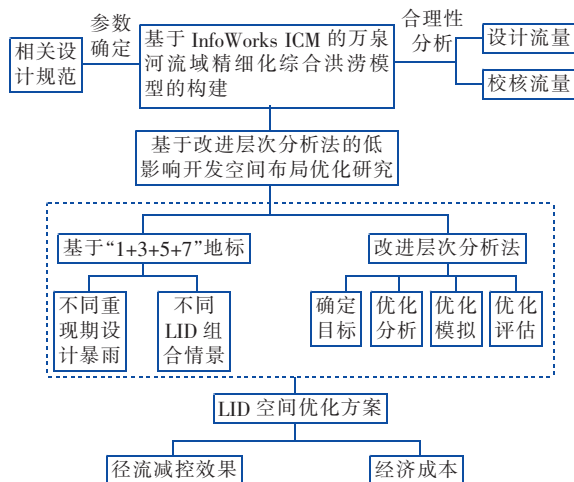


图 1 技术路线

Fig. 1 Technical route

本研究主要针对北京市地方标准《雨水控制与利用工程设计规范》(DB 11/685—2013)(简称“地标”)中有关 LID 措施规定进行组合和优化分析。该地标要求,雨水控制与利用规划中应优先利用低洼地形、下凹绿地、透水铺装等设施滞蓄雨水减少外排水量,并满足以下规定:①新建工程硬化面积达到 2 000 m² 及以上项目,应配建雨水调蓄设施,具体配建标准为每千平方米硬化面积配建调蓄容积不小于 30 m³;②凡涉及绿地率指标要求的建设工程,

绿地中至少应有 50% 为用于滞蓄雨水的下凹式绿地;③公共停车场、人行道、步行街、自行车道和休闲广场、室外庭院的透水铺装率不小于 70% (简称“1+3+5+7”标准)。

本研究在“1+3+5+7”标准基础上,利用 InfoWorks ICM 软件构建城市综合洪涝模型,采用改进层次分析法开展 LID 措施空间布局优化,探讨不同低影响开发组合方案缓解城市洪涝效果,完善城市洪涝风险防控体系。

2.1 综合洪涝模型构建

本研究需要依据综合洪涝模型进行不同 LID 措施及其组合方案的实施效果评估,该模型构建所需的基础资料包括:地形数据、遥感影像、河道数据、排水设施数据资料。基础资料主要来源于北京市第一次水务普查结果,针对排水设施、地形数据等通过专业勘测、实地调研等方式进行校核与完善,数据可靠且精度高。

根据上述所收集的资料利用 InfoWorks ICM 软件构建万泉河流域洪涝数值模型,主要包括产流模型、河道汇流模型、管网汇流模型、地表漫流模型及多模型耦合,详见文献[14]。构建的流域综合洪涝模型划分为 23 个排水单元,涵盖管道 76.01 km、河道 7.26 km、计算网格 217 544 万个三角网格。综合洪涝模型概化如图 2 所示。

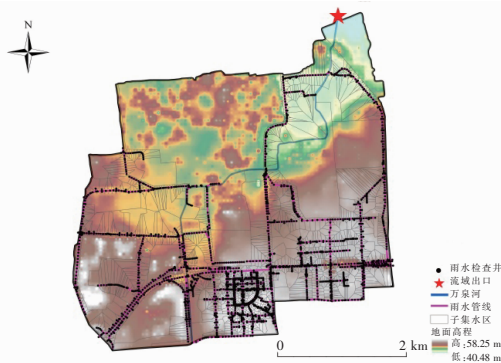


图 2 万泉河流域综合洪涝模型概化

Fig. 2 Integrated flood model of Wanquan River watershed

2.2 改进层次分析法

改进层次分析法 (IAHP) 源于层次分析法 (AHP), 是一种结合定性分析与定量判断的层次权重多决策分析方法^[15]。虽然层次分析法可以解决目标或因素结果复杂、数据资料缺失的问题,但却存在权重确定困难、受人为主观因素影响、判断矩阵一致性受评价因素个数干扰、计算过程繁琐等不

足^[16]。因此本研究采用改进的层次分析法,主要体现在以下几方面:①用 3 标度法取代 9 标度法,消除人为主观判断影响,提高评价结果的客观性;②通过最优传递矩阵构造判断矩阵,省去一致性检验工作程序,不仅避免了评价因子对矩阵一致性检验的干扰,同时也大大提高了运算速度^[16]。

应用改进层次分析法求解步骤如图 3 所示。从流域 LID 布局空间优化问题出发,考虑实地情况与经济发展状况构建包含目标层、准则层与指标层的层次结构模型;采用 3 标度法对各层次各因素进行两两比较,其结果即为比较矩阵;在此基础上通过系列矩阵计算最大特征值获得某一层所有因素对于目标层的权重,以此求得优化方案。

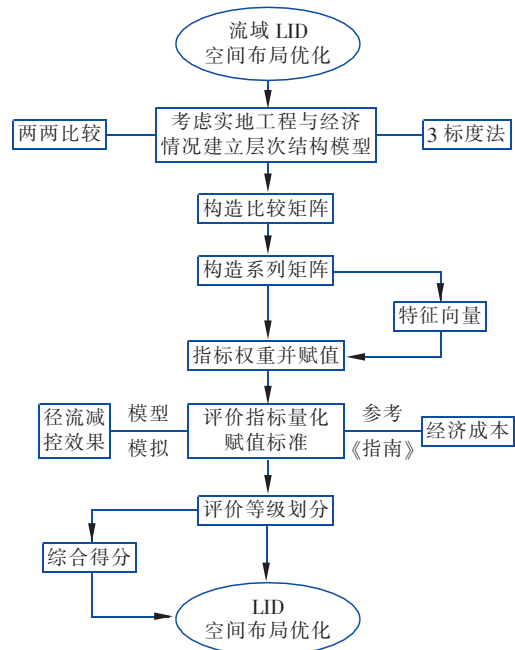


图 3 改进层次分析法求解步骤

Fig. 3 Steps of IAHP

3 结果与分析

3.1 模型合理性分析

由于缺乏实测降雨径流资料,因此采用河道流域出口设计洪水过程与校核洪水过程进行模型合理性分析,万泉河流域设计洪水为 20 年一遇,校核洪水为 50 年一遇。设计洪水与校核洪水过程采用瞬时单位线推求,采用径流系数法扣除各时段入渗损失,根据《北京市水文手册》(第二分册 洪水篇) 汇流参数 n 取值 1.5, k 取值 2。采用 20 年一遇设计洪水对模型参数进行率定、50 年一遇校核洪水对模型进行验证,模拟流量和校核流量如图 4 所示。可见,

流域出口模拟洪峰流量为 $104.60 \text{ m}^3/\text{s}$, 校核流量为 $99 \text{ m}^3/\text{s}$, 相对误差为 -5.66% , Nash-Sutcliffe 效率系数为 0.92 , 峰现时间和流量过程基本一致, 由此看出模型合理可靠, 可用于不同暴雨情景、下垫面变化情景的洪水过程影响研究。

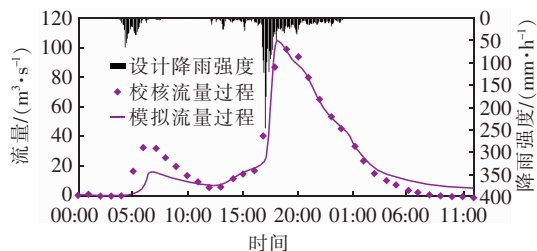


图4 校核洪水过程与模拟流量过程对比

Fig. 4 Comparison of calibrated flow and simulated flow process

3.2 模拟情景设置

3.2.1 LID 优化情景设置

根据流域实际工程情况、专家意见及地标开展下凹式绿地和雨水调蓄池两类 LID 措施的优化组合分析。在保持地标规定的 70% 透水铺装面积占比不变情况下, 设置下凹式绿地面积占比为 30% ~ 70%, 雨水调蓄池的调蓄容积为每千平方米硬化面积配置 $10 \sim 50 \text{ m}^3$, LID 布设情景见表 1, 其中 Q_0 是流域现状下垫面, Q_5 是“1+3+5+7”地标。

表1 基于“1+3+5+7”北京地标的 LID 优化情景设置

Tab. 1 LID optimization scenario based on “1+3+5+7”

Beijing local standards

情景	下凹式绿地所占面积比例/%	雨水调蓄池调蓄容积/ m^3	透水铺装面积占比/%
Q_0	—	—	—
Q_1	30	10	70
Q_2	30	30	70
Q_3	30	50	70
Q_4	50	10	70
Q_5	50	30	70
Q_6	50	50	70
Q_7	70	10	70
Q_8	70	30	70
Q_9	70	50	70

3.2.2 暴雨情景设置

现有的 LID 措施一般针对中低重现期洪水总量和洪峰流量削减效果较为明显, 高重现期情景下其对两者的削减效果不明显^[17]。由于北京市近年来的暴雨洪涝灾害例如 2012 年“7·21”和 2016 年

“7·20”等主要由长历时的降雨过程所导致。因此, 本研究设计暴雨重现期选用降雨历时为 24 h 的 2 年、10 年及 20 年一遇设计降雨。其设计暴雨量根据北京地方标准《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB 11/T 969—2016) 中推荐的水文手册方法推求, 见式(1), 分别为 80、209、265 mm。设计暴雨过程如图 5 所示。

$$H_{tp} = K_p \cdot \overline{H}_t \quad (1)$$

式中: H_{tp} 为某一历时(1、6、24 h)某一设计频率暴雨量, mm; K_p 为模比系数, 通过皮尔逊 III 型曲线表得出, 其中, C_s/C_v 值各标准历时统一采用 3.5, C_v 可由图查出; \overline{H}_t 是 3 个标准历时暴雨量均值, mm。设计雨型依据北京市地标设计雨型进行降雨过程的时程分配。

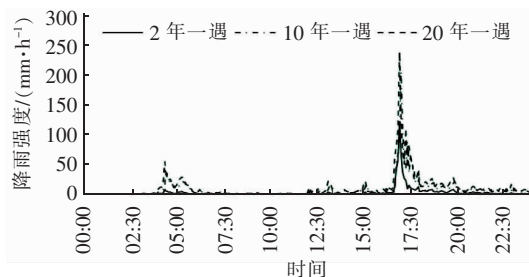


图5 2年、10年、20年一遇设计降雨过程

Fig. 5 Design rainfall of 2-year, 10-year and 20-year return periods

3.3 LID 参数选取

参照地标, 雨水调蓄池按照流域硬化面积配建调蓄容积, 硬化面积按式(2)计算。硬化面积高于 2000 m^2 的区域每千平方米硬化面积配置 10、30、 50 m^3 的配建总容积分别为 89 378.6、268 135.8 和 $446 893.0 \text{ m}^3$; 将流域 30%、50% 和 70% 的绿地铺设为下凹式绿地, 总面积分别为 205.7、342.8、 480.0 hm^2 ; 将流域 70% 的人行道路、停车场等铺设为透水铺装, 总面积为 147.32 hm^2 。3 种 LID 措施参数选取结合工程实地情况、InfoWorks ICM 用户手册及相关参考文献^[18]: 雨水调蓄池延时为 24 h; 下凹式绿地下凹深度为 200 mm; 透水铺装表层厚度为 2 mm, 铺装层厚度为 80 mm, 土壤层厚度为 100 mm; LID 措施土壤类型为砂质壤土, 孔隙度为 0.437, 田间持水量为 0.105, 凋萎点为 0.047。

$$S_i = S_b - S_g - S_p \quad (2)$$

式中: S_i 为硬化面积; S_b 为建设用地面积; S_g 为绿地面积; S_p 为透水铺装用地面积。

3.4 层次分析结果

结合流域实地情况以及 LID 领域专家的意见,本研究综合考虑安全效益 Z_1 以及经济效益 Z_2 ,采用改进层次分析法开展 LID 空间优化布局分析。其中,安全效益采用径流总量削减率 P_1 (%)、峰值流量削减率 P_2 (%)、积水总量削减率 P_3 (%) 和积水面积削减率 P_4 (%) 等 4 个评价指标;经济效益采用建造费用 P_5 (万元) 与维护费用 P_6 (万元) 两个评价指标。

3.4.1 改进层次分析法确定权重指标

根据上述要求,以基于地标优化 LID 组合方法 G 为最终目标,根据安全效益与经济效益两个准则,基于径流总量削减率等 6 个评价指标构建的层次结构模型如图 6 所示。采用 3 标度法对各层指标进行两两比较,对各位专家标度值选取平均值,最终得到指标层 P 中 6 个评价指标 $P_1 \sim P_6$ 对于目标层 G 的权重 ω ,见式(3)。

$$\omega = (0.081\ 5, 0.230\ 1, 0.139\ 2, 0.149\ 2, 0.222\ 2, 0.177\ 8) \quad (3)$$

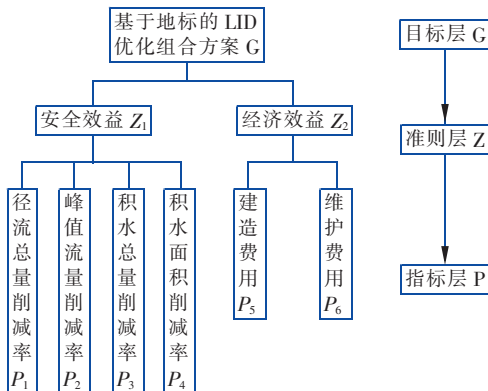


图 6 基于地标的 LID 措施空间布局优化层次结构模型

Fig. 6 Structure model for spatial layout optimization of LID measures based on Beijing local standards

3.4.2 评价指标量化赋值标准

在确定权重指标的基础上,基于流域现状下垫面,根据 InfoWorks ICM 模拟结果对 $Q_1 \sim Q_9$ 等 9 种方案的评价指标赋予分值。由于目前研究缺乏关于 LID 径流减控及内涝缓解的赋值标准,同时为了消除一般层次分析法中分值赋予过程的主观性,依据模拟结果,对每种评价指标分别赋予 1~9 分的分值。具体地, $P_1 \sim P_4$ 按照削减率从小到大依次赋予 1~9 分; P_5 、 P_6 按照费用从大到小依次赋予 1~9 分。构建的评价指标体系及赋值见表 2。

表 2 LID 空间优化评价指标体系及判别标准

Tab. 2 LID spatial optimization evaluation index system and criterion

目标层 G	准则层 Z (权重)	指标层 P (权重)	赋值标准
基于地标的 LID 空间布局优化方案 G	安全效益 Z_1 (0.6)	径流总量削减率 P_1 (0.135 8)	依据模型模拟结果
		峰值流量削减率 P_2 (0.383 5)	
		积水总量削减率 P_3 (0.232 0)	
		积水面积削减率 P_4 (0.248 7)	
	经济效益 Z_2 (0.4)	建造费用 P_5 (0.560 0)	基于相同地区参考及《指南》
		维护费用 P_6 (0.440 0)	

不同重现期下流量削减过程如图 7 所示,削减率及打分见表 3。

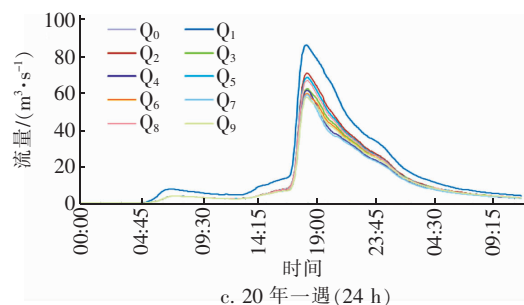
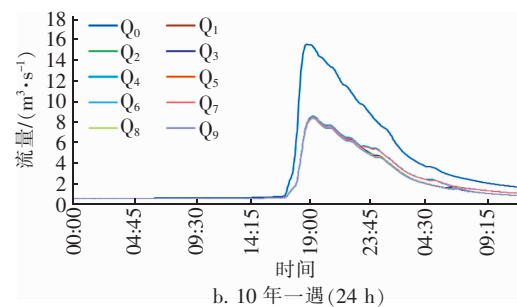
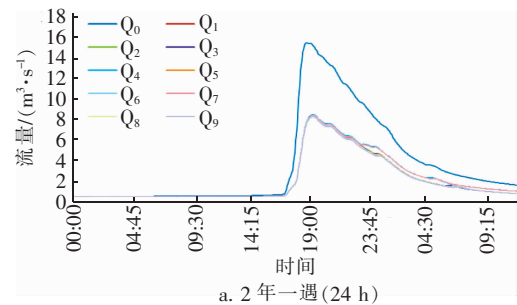


图 7 不同重现期下现状与不同 LID 方案径流削减过程

Fig. 7 Runoff reduction process of current situation and different LID schemes under different return periods

表3 不同LID情景下 $P_1 \sim P_4$ 值及分值Tab.3 $P_1 \sim P_4$ values and scores of different LID scenarios

情景	径流总量平均削减率/%	P_1 分值	峰值流量平均削减率/%	P_2 分值	积水总量平均削减率/%	P_3 分值	积水面积平均削减率/%	P_4 分值
Q_1	32.70	1	29.83	1	35.66	1	40.43	1
Q_2	39.11	4	36.57	4	54.85	4	50.14	4
Q_3	41.67	6	36.98	5	58.57	6	52.81	5
Q_4	34.23	2	31.68	2	47.14	2	43.50	2
Q_5	40.64	5	38.51	6	58.18	5	53.37	6
Q_6	43.19	8	38.93	7	62.05	8	56.30	7
Q_7	35.29	3	33.12	3	49.90	3	46.23	3
Q_8	41.70	7	40.16	8	61.08	7	56.74	8
Q_9	44.26	9	43.15	9	64.86	9	59.01	9

$Q_1 \sim Q_9$ 方案在不同降雨重现期条件下的径流总量平均削减率为 32.70% ~ 44.26%; 峰值流量平均削减率为 29.83% ~ 43.15%; 积水总量平均削减率为 35.66% ~ 64.86%; 积水面积平均削减率为 40.43% ~ 59.01%。

下凹式绿地及雨水调蓄池的建造费用参考《指

南》(北京地区 LID 建造费用), 维护费用取建造费用的 6%。LID 单项建造及维护成本: 下凹式绿地的建造费用为 40 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$), 维护费用为 2.4 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$); 雨水调蓄池的建造费用为 800 元/($\text{m}^3 \cdot \text{a}$), 维护费用为 48 元/($\text{m}^3 \cdot \text{a}$)。不同方案布设 LID 面积及打分结果见表 4。

表4 LID 措施经济效益评价指标计算结果及分值

Tab.4 Costs and scores of different LID schemes construction and maintenance

情景	下凹式绿地面积/ 10^4 m^2	雨水调蓄池调蓄容积/ 10^4 m^3	LID 建造费用/ (亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$)		建造总费用/ (亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$)	分值	LID 维护费用/ (亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$)		维护总费用/ (亿元 $\cdot \text{a}^{-1}$)	分值
			下凹式绿地	雨水调蓄池			下凹式绿地	雨水调蓄池		
Q_1	205.70	8.94	0.82	0.72	1.54	9	0.05	0.04	0.103	9
Q_2		26.81		2.15	3.18	6		0.03	0.089	6
Q_3		44.69		3.58	4.61	3		0.01	0.074	3
Q_4	342.83	8.94	1.37	0.72	2.43	8	0.08	0.04	0.143	8
Q_5		26.81		2.15	3.86	5		0.13	0.229	5
Q_6		44.69		3.58	5.29	2		0.21	0.315	2
Q_7	479.96	8.94	1.92	0.72	3.12	7	0.12	0.04	0.183	7
Q_8		26.81		2.15	4.55	4		0.13	0.269	4
Q_9		44.69		3.58	5.98	1		0.21	0.355	1

3.4.3 评价等级划分

根据各指标得分 X_i 和所求指标权重 ω , 求出各个 LID 情景综合得分 Y , 见式(4)。

$$Y = X_i \times (0.0815, 0.2301, 0.1392, 0.1492, 0.2222, 0.1778)^T \quad (4)$$

Y 值越大, 说明 LID 方案在综合考虑上述 6 个评价指标及 2 个准则层的情况下越好。

综合上述结果, 最后得到 9 个 LID 方案的综合指数 Y , 结果见表 5。可知, 基于北京市地方标准的 LID 优化方案排序为: $Q_8 > Q_9 > Q_5 > Q_6 > Q_2 > Q_7 > Q_3 > Q_4 > Q_1$, 方案 Q_8 的综合指数为 6.179 3, 在万

泉河流域最适用。

表5 LID 方案综合指数 Y 及排序Tab.5 LID schemes comprehensive index Y and sorting

情景	综合指数 Y	排序
Q_1	4.200 0	9
Q_2	4.800 0	5
Q_3	4.420 7	7
Q_4	4.400 0	8
Q_5	5.379 3	3
Q_6	5.220 7	4
Q_7	4.600 0	6
Q_8	6.179 3	1
Q_9	5.800 0	2

该 LID 措施组合方案为:每千平方米硬化面积配置 30 m^3 的调蓄容积、70% 绿地布设为下凹式绿地、70% 道路布设为透水铺装,简称“1 + 3 + 7 + 7”方案。相较于现状下垫面,在此方案下,2 ~ 10 年一遇设计暴雨径流总量、峰值流量、积水总量及积水面积的平均削减率分别为 41.70%、40.16%、61.08% 和 56.74%,下凹式绿地及雨水调蓄池建造费用共计 4.55 亿元/a,维护费用为 0.269 亿元/a。

4 结论与展望

① 本研究量化了透水铺装、下凹式绿地以及雨水调蓄池对径流减控和内涝缓解的效果。 $Q_1 \sim Q_9$ 情景不同 LID 占比组合方案径流总量平均削减率为 32.70% ~ 44.26%;峰值流量平均削减率为 29.83% ~ 43.15%;积水总量平均削减率为 35.66% ~ 64.86%;积水面积平均削减率为 40.43% ~ 59.01%。LID 措施能有效削减径流、缓解内涝,但随着重现期的增加,削减率呈现减小趋势。

② 提出了“1 + 3 + 7 + 7”的万泉河流域 LID 空间优化方案。基于北京地标“1 + 3 + 5 + 7”,采用改进层次分析法,得到“1 + 3 + 7 + 7”优化方案,即“70% 下凹式绿地 + 70% 透水铺装 + 每千平方米硬化面积配建调蓄容积为 30 m^3 的雨水调蓄池”优化组合方案。在此方案下,径流总量平均削减率为 41.70%、峰值流量平均削减率为 40.16%、积水总量平均削减率为 61.08%、积水面积平均削减率为 56.74%,经济费用共计 4.82 亿元/a,可为该流域 LID 措施空间布设提供参考。

③ 本研究从理论层面分析 LID 不同布置方案对城市洪涝灾害的影响,筛选出优化布局方案,主要从各类低影响开发措施的量级方面进行考虑。如要将理论上得出的 LID 措施规模在生产实践中予以落实,需要综合考虑地形、园林景观、城市规划,以及近期开展的环境综合整治工程,合理安排 LID 的建设时序。同时,在进行 LID 建设效果评估方面,可结合地方实际情况建立 LID 径流减控、内涝缓解效果等级划分标准,为层次分析法在低影响开发中的应用提供判别标准,同时也能直观量化、评估 LID 设施建设效果。

参考文献:

[1] 宣武赞. 基于海绵城市理念的 low 影响开发雨水系统构建与管理机制研究[D]. 西安:西安理工大学,

2017.

Xuan Wuyun. Based on the Concept of Sponge Urban Drainage System of the Low Impact Development Build and Management Mechanism Research [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017 (in Chinese).

[2] 刘垚. 低影响开发(LID)措施在雨水系统规划中应用研究:以宜丰县雨水系统规划为例[D]. 南昌:南昌大学,2015.

Liu Yao. Low Impact Development (LID) Application of Measures in the Rainwater System Planning: Take Rainwater System Planning of Yifeng County as an Example [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015 (in Chinese).

[3] 冯博. 基于水力模型的低影响开发规划研究[J]. 城市规划, 2016, 40(3): 89-94.

Feng Bo. Low impact development planning based on hydraulic model [J]. City Planning Review, 2016, 40(3): 89-94 (in Chinese).

[4] 王俊岭, 魏江涛, 张雅君, 等. 基于海绵城市建设的低影响开发技术的功能分析[J]. 环境工程, 2016, 34(9): 56-60.

Wang Junling, Wei Jiangtao, Zhang Yajun, et al. Function analysis of low impact development based on the construction of the sponge city [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(9): 56-60 (in Chinese).

[5] Entry J A. The impact of stormwater treatment and best management practices on nutrient concentration in the Florida everglades [J]. Water Air & Soil Pollution, 2014, 225(1): 1758.

[6] Lee J M, Hyun K H, Choi J S. Analysis of the impact of low impact development on runoff from a new district in Korea [J]. Water Science & Technology, 2013, 68(6): 1315-1321.

[7] 朱伟伟, 郑国全. 城市雨洪利用研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(6): 976-982.

Zhu Weiwei, Zheng Guoquan. Research progress on urban storm and flood utilization [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2015, 32(6): 976-982 (in Chinese).

[8] 吴海瑾, 翟国方. 我国城市雨洪管理及资源化利用研究[J]. 现代城市研究, 2012(1): 23-28.

Wu Haijin, Zhai Guofang. China's urban stormwater management and flood resources use [J]. Modern Urban Research, 2012(1): 23-28 (in Chinese).

[9] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 城市雨洪管理低影响开发技术研究与应用进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6):

- 1901 – 1912.
- Liu Wen, Chen Weiping, Peng Chi. Advances in low impact development technology for urban stormwater management[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1901 – 1912 (in Chinese).
- [10] 梁骞, 任欣欣, 张晓菊. 基于 SUSTAIN 模型的 LID 设施成本效益分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(1): 136 – 139.
- Liang Qian, Ren Xinxin, Zhang Xiaojun. Cost-effectiveness analysis of low impact development facilities based on SUSTAIN model[J]. 2017, 33(1): 136 – 139 (in Chinese).
- [11] 王婷, 刁秀媚, 刘俊, 等. 基于 SWMM 的老城区 LID 布设比例优化研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 39 – 43, 128.
- Wang Ting, Diao Xiumei, Liu Jun, et al. Optimization of LID layout proportions in old city area based on SWMM [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 39 – 43, 128 (in Chinese).
- [12] 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.
- Li Muhan, Yin Haiwei, Kong Fanhua, et al. Research on spatial distribution and stormwater regulation benefits of low impact development in Gulou District, Nanjing, China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(3): 30 – 38 (in Chinese).
- [13] 谭卓琳. 基于低影响开发的寒地住区空间布局模拟及优化研究: 以辰能溪树庭院为例[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Tan Zhuolin. Spatial Organization Simulation and Optimization of Community in Cold Region Based on Low Impact Development: a Case Study of Chenneng Creek Green [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [14] 李尤, 邸苏闯, 朱永华, 等. 基于多模型耦合的城市内涝多视角分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 82 – 90.
- Li You, Di Suchuang, Zhu Yonghua, et al. Multi-view analysis of urban flood based on multi-model coupling [J]. China Water and Hydropower, 2019(5): 82 – 90 (in Chinese).
- [15] 鲍学英, 王起才, 王恩茂. 改进的层次分析法在绿色建筑设计方案优选中的应用[J]. 四川建筑科学研
- 究, 2014, 40(2): 320 – 322, 326.
- Bao Xueying, Wang Qicai, Wang Enmao. Improved AHP in green building design selected applications [J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(2): 320 – 322, 326 (in Chinese).
- [16] 胡致远, 罗文强, 晏鄂川, 等. 基于改进层次分析法的英山县地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(4): 28 – 32, 40.
- Hu Zhiyuan, Luo Wenqiang, Yan Echuan, et al. IAHP-based evaluation of susceptibility of geological hazards in Yingshan County [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(4): 28 – 32, 40 (in Chinese).
- [17] 左其亭, 王鑫, 韩淑颖, 等. 论城市防洪排涝与生态海绵城市建设应和谐并举[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(5): 80 – 85.
- Zuo Qiting, Wang Xin, Han Shuying, et al. Integration green sponge city concept into urban flood management and drainage system [J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(5): 80 – 85 (in Chinese).
- [18] 章双双, 潘杨, 李一平, 等. 基于 SWMM 模型的城市化区域 LID 设施优化配置方案研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6): 10 – 15.
- Zhang Shuangshuang, Pan Yang, Li Yiping, et al. SWMM model-based study on optimal allocation of LID facilities in urbanized region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(6): 10 – 15 (in Chinese).



作者简介: 李尤 (1995 –), 女, 四川马尔康人, 博士研究生, 主要研究方向为山地水文与生态。

E-mail: ly950312@163.com

收稿日期: 2019 – 07 – 03