

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.003

海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用

高玉琴¹, 陈佳慧¹, 王冬冬¹, 张振兴², 赵晨程¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 美国伊利诺伊大学香槟分校, 伊利诺伊州 厄巴纳-香槟 IL61801)

摘要:为对低影响开发(LID)措施综合效益进行量化评价,综合考虑生态、经济及社会等因素,选取径流量削减率、污染物削减率、成本投资、运行效益、雨水利用、生态价值等 16 项 LID 措施评价指标,采用层次分析法和熵权法确定指标权重,基于云模型构建了 LID 措施综合效益评价体系。将评价体系应用于南京一住宅小区的 4 个 LID 措施初步设计方案量化评价,结果显示,功效最大型方案截污减排效益最优,社会效益良好,对于“较优”的隶属度最大,为最优方案。

关键词:LID 措施;云模型;熵权法;综合效益评价

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0013-07

Comprehensive benefits evaluation system and application of low impact development measures in sponge city //
GAO Yuqin¹, CHEN Jiahui¹, WANG Dongdong¹, ZHANG Zhenxing², ZHAO Chencheng¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, Illinois IL61801, USA)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the comprehensive benefits of low impact development (LID), taking ecological, economic and social factors into consideration to select sixteen LID measures evaluation indicators, including runoff cut rate, pollutant cut rate, cost investment, operational benefits, rainwater utilization, and ecological value, using analytic hierarchy process and entropy weight method to determine the index weight. The LID measure comprehensive benefits evaluation system is established based on the cloud model. The evaluation system are applied to a certain area of Nanjing to quantitatively evaluate the preliminary design schemes of 4 LID measures. The results show that the most effective scheme has the best pollution interception and emission reduction benefits and good social benefits. And it has the highest degree of subordination to the “better”, being the best scheme.

Key words: LID measures; cloud model; entropy weight method; comprehensive effectiveness evaluation

随着我国经济的发展,城镇化发展迅速。人们在享受城镇化红利的同时,也给城市水资源、环境与生态系统带来了巨大压力。快速城市化导致了不透水面显著增加,破坏了原有的自然水文循环过程,引起了一系列水文效应^[1],导致了城市内涝日益严重、降雨径流污染加重和水资源短缺等诸多城市水问题。我国以低影响开发(low impact development, LID)为核心理念,提出了海绵城市这一新型城市雨洪管理概念^[2-4]。LID 是 20 世纪 90 年代末期由美国马里兰州、西雅图和波特兰市共同提出的一种雨洪管理概念^[5],主张在场地开发过程中采用分散式、经济、本土化的源头控制措施使区域水文特征趋

近开发前,也称为低影响设计。LID 技术的功能主要包括渗透、径流调蓄和输送、过滤、保护性设计、低影响景观等方面,具体采用的有透水铺装、雨水花园、植草沟、绿色屋顶、渗渠、生物滞留设施等各种小型措施^[6]。

国内外对 LID 的研究主要集中在径流削减、洪峰延迟及径流污染削减几方面,部分学者开展了针对 LID 在环境生态、经济、社会等各个方面的综合效益评价研究。仇士恺^[7]建立了一个雨水管理措施优化模型,以成本投入最小为目标函数,利用动态设计优选模式进行求解,并以翡翠水库为例,进行了模拟优化;钟沂玻^[8]利用 AGNPS 模型对研究区域内 3

基金项目:国家自然科学基金(52079039);江苏省自然科学基金(BK20181310);江苏省水利科技项目(520047612)

作者简介:高玉琴(1978—),女,副教授,博士,主要从事水利水电工程研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

种不同 LID 措施的效能进行模拟,并分别对其进行了径流削减、面源污染削减以及成本因素 3 个方面的综合评价;褚筱文^[9]利用 DSS 模拟了城市雨水管理措施对年均径流量的削减效能,并进行了成本-效益评价;贾海峰等^[10]基于 SUSTAIN 系统对广东佛山某学校 4 个 LID BMPs 方案的截污减排效果进行模拟分析,并综合成本和效益因素给出了最佳情景方案;王锋^[11]定量识别 LID 方案的多项效益,采用层次分析法和加权求和法,构建了一种 LID 方案运行效果评价方法。穆聪^[12]通过对环境、经济和社会指标货币化后的效益值进行加权求和,获得综合效益值,建立了海绵城市 LID 措施综合效益评价体系。

上述研究主要关注 LID 措施的成本效益比较,对生态效益、社会效益等综合评价大多采用定性描述,缺乏一套可以定量评价 LID 措施效益的理论体系^[13]。为此本文提出了一种可量化的 LID 综合效益评价方法并应用于南京市某住宅小区 LID 初步设计方案量化评价,以期为海绵城市建设提供参考。

1 评价指标体系构建与评价方法

1.1 评价指标体系构建

LID 措施的根本设计目标是实现区域开发后的径流大小、峰现时间等水文特征与天然状态下基本一致。大量研究与实践证明,LID 措施不仅可以有效调控径流与污染物,还具有广泛的环境、经济、美学和社会效益,是一种实现低碳、生态、可持续的高效雨水管理理念^[14-15]。本文综合考虑环境、经济和社会三方面因素,构建能综合反映径流状态且与城市生态环境有直接联系,同时考虑成本投入等情况的 LID 综合效益评价指标体系。

1.1.1 环境效益

LID 措施通过对雨水的入渗、存储,削减径流总量;通过植物根系对雨水的拦截作用,降低径流流速,延缓径流峰现时间,从而缓解城市排水系统的压力,减少管道溢流污染,具有显著的环境效益^[16]。考虑 LID 措施对于径流量和降雨径流污染物的控制削减效能,选取径流总量削减率、径流峰值削减率、峰现滞后时间、总悬浮物(TSS)削减率、总氮(TN)削减率、总磷(TP)削减率、化学需氧量(COD)削减率等 7 项指标反映 LID 措施的环境效益。

1.1.2 经济效益

LID 措施能通过减少大量的管道、道路等高能耗基础设施的使用,降低政府对公共基础设施的投入和维护费用。本文主要考虑方案的成本投资和建成后的运行经济效益。成本投资是 LID 措施开发建

设的重要关注点,主要包括基建费、管理维护费和运行效果等。建成后的运行效益主要考虑节水效益和渗透补充地下水^[17]产生的效益。

a. 基建费。基建费用是 LID 措施开发建设的一次性投资成本,包括土方填挖、设施安装放置和表面植被种植铺设等内容。

b. 管理维护费。管理维护费是确保 LID 措施在后期运行中正常发挥功效的投入费用,包括植被修剪、沉积物和垃圾清扫、底部排水设施维护等人力和资金的投入。

c. 运行效果。LID 措施的运行效果主要由运行稳定性和工程影响性反映。运行稳定性表示 LID 措施在正常维护管理的情况下,出现失效、故障的风险;工程影响性用于描述 LID 措施施工期间对场地的破坏程度以及对公众出行的影响程度。根据国内外相关实践研究,用“优、较优、良好、较差、差”5 个等级进行分类评价,见表 1。

表 1 LID 措施运行效果评价

Table 1 Operation effect evaluation of LID measures

LID 措施	运行稳定性	工程影响性
绿色屋顶	较优	较低
生物滞留设施	较优	中等
透水铺装	较差	高
植草沟	优	中等
雨水花园	较优	中等
渗渠	差	中等
雨水桶	优	低
下凹绿地	优	中等
湿塘/景观水体	良好	较高
干塘	较优	较高
微型湿地	良好	较高

d. 节水效益。节水效益主要指雨水桶、蓄水池等蓄水措施收集存储的雨水置换了城市用水用于绿地灌溉、景观补水、路面喷洒等而减少的费用。对雨水的收集回用可达到减少雨水排放和节约水资源的双重目标,其收益可依照收集水量和城市用水价格计算。

e. 补充地下水效益。补充地下水效益指诸如生物滞留设施、下凹绿地等部分 LID 措施具有促进雨水入渗、实现地下水回补功效而产生的经济效益。可通过下渗水量与单位体积的集水效益计算:

$$Y = aHS \tag{1}$$

式中:Y 为补充地下水效益;a 为单位体积集水效益,按水资源影子价格考虑,元/m³;H 为单次降雨的雨水入渗量,可通过 SWMM 模型模拟得出,mm;S 为透水地表面积,m²。

1.1.3 社会效益

基于 LID 模式的场所设计,注重美观的植物搭

配,提升了场地美学效益,具有丰富的生态景观价值;场地设计串联起水系、公园、绿地,增强开放空间的联系,为市民提供散步、慢跑等需求的户外休闲场所,增加了体育锻炼活动的人数,也降低了机动交通和燃料的消耗;LID 措施对雨水资源通过渗入地下、收集回用和雨水贮留等形式加以利用,在缓解城市用水矛盾的同时,也提供了市民参与管理的机会,提升公众环保、惜水、节水的意识,具有一定的社会效益。本文主要考虑其雨水资源利用、生态景观价值及公众教育宣传 3 个方面。

LID 措施的社会效益难以被直接衡量和定价,按“低、较低、中等、较高和高”5 个等级进行 3 项指标的定性评价,见表 2。

表 2 LID 措施社会效益评价

Table 2 Social benefits evaluation of LID measures			
LID 措施	雨水资源利用	生态景观价值	公众教育宣传
绿色屋顶	中等	较高	较高
生物滞留设施	较高	较高	较高
透水铺装	较低	较低	较低
雨水花园	较高	高	较高
植草沟	低	较低	较低
雨水桶	高	低	中等
渗渠	较低	低	低
下凹绿地	低	中等	较低
湿塘/景观水体	高	较高	较高
干塘	高	低	较低
微型湿地	高	高	高

综上,确定 LID 措施综合效益评价指标体系如图 1 所示。

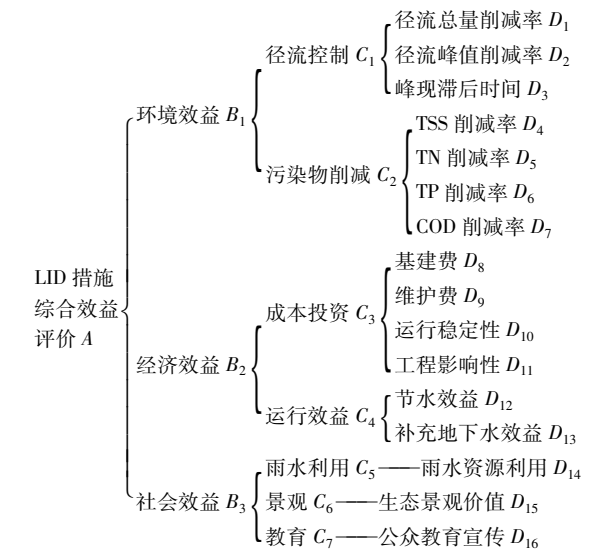


图 1 LID 措施综合效益评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive benefits evaluation index system of LID measures scheme

1.2 指标量化

本文选取的 16 项评价指标中,既有定量指标又有定性指标,需对各定性指标进行量化以便于综合

评价。建造、维护成本通过实际的方案规划设计面积和措施单价计算,运行效益指标和社会效益的 3 项指标均是定性指标,可通过其模糊语气与模糊标度^[18]进行转换。

1.3 指标权重确定

为了得到更为准确客观的评价结果,采用熵权法计算评价指标的客观权重。为保证与决策者主观思维的一致性,综合考虑主客观因素,本文结合层次分析法^[19-21]求解主客观组合权重^[22-23]。

在熵权法求出客观权重 w_{j1} 的基础上,利用层次分析法的求取结果 w_{j2} 进行修正,得到第 j 个指标的组合权重 w_j 为

$$w_j = \frac{w_{j1} + w_{j2}}{2} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

1.4 基于云模型的 LID 措施综合效益评价

LID 措施评价优选涉及经济成本、防洪除涝、景观效果、生态环境等诸多方面,存在定量、定性指标,具有一定的随机性和模糊性。为做到客观准确并解决无法避免的不确定性,本文选择云模型用于 LID 措施的量化评价。

基于云模型的评价方法是不确定性评价中的重要方法,可实现定性概念和定量数值之间的转化^[24]。本文在确定系统指标值 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、指标权重 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 与指标评价论域 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 后,通过给出云的数字特征和设定条件 $x = x_0$ 的 X 条件云发生器计算各个指标在各等级下的隶属度^[25-26]。

综上,可以得到 LID 措施方案对于各评价等级的隶属度 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 。根据隶属度最大原则进行等级评判,并选取等级最高的方案为最优方案。

2 实例应用

2.1 研究区概况

研究区为南京亚东国际公寓片,位于南京市雨花台区,北纬 32°0'0"、东经 118°45'36",属亚热带季风气候,四季分明,雨量丰沛,多年平均降水量为 1061.3 mm。年内降水分布不均,主要集中在 6—8 月。研究区整体地势平坦,平均坡度 2.69%,高程在 5.26 ~ 10.95 m,最大高差 5.69 m,总面积约 9.94 hm²,其内有 44 栋住宅楼。研究区为不透水区和透水区混合区域,主要以住宅建筑群、小区道路、停车场等不透水硬质下垫面为主,不透水面积占总面积的 78.9%。研究区内部建设有比较完备的给水管网、污水管网和雨水管网,无天然或人工水系发挥雨水调蓄作用,遭遇暴雨时仍采用快放快排模式,未有效解决内涝问题,也造成了雨水资源的大量

流失。

2.2 LID 措施方案设置

研究区用地规划都已完成,对空间需求较大的 LID 措施有所限制,因此本文暂不考虑微型湿地、景观水体等所需空间较大的 LID 措施。同时经实地勘察,进行研究区场地条件分析,初步选取适用于研究区的 LID 措施为绿色屋顶、生物滞留池、雨水花园、植草沟、渗渠、透水铺装和雨水桶。

在实际项目中,为了避免雨水管理措施过于单一,往往通过 LID 措施的组合使用,形成多种规划设计方案。本文利用以上 7 种措施进行组合,并按照模型得到的排水管网运行情况,在管网负荷较大及节点发生溢流的汇水区加大 LID 措施布置比例,规划了 4 种情景方案。

a. 方案 1:基础型方案。本方案按照最基本的 LID 措施布置方式,布置最常见、建设简单、成本较低的植草沟、渗渠,以及收集利用雨水的雨水桶。大体设计方案为:小区内道路两边的雨水沟采用植草沟或渗渠来传输、调蓄雨水;适宜的建筑周边使用雨水桶收集屋面雨水。

b. 方案 2:功效最大型方案。功效指的是径流量和径流污染控制功效。由于植草沟与渗渠功效较低,本方案考虑采用雨水桶、雨水花园、生物滞留设施、绿色屋顶、透水铺装这 5 种 LID 措施。这一方案的布置如下:小区内道路周边绿地设置生物滞留设施;在景观水体或其他水系以及地势低洼处可考虑建设雨水花园或生物滞留设施;在未设置雨水桶的住宅建筑的屋面采用绿色屋顶;停车场、人行道等载重负荷较小的小区道路布设透水铺装。为提高功效,本方案中的 5 种措施的比例要适当高些。

c. 方案 3:示范型方案。这一方案重点突出海绵城市雨水资源利用的示范意义^[27],扩大对公众的教育影响力度,使 LID 理念更加深入人心。本方案选用全部 7 种措施,展示各单项措施的工程做法和效果,为 LID 措施的大力推广提供借鉴。其布置如下:小区内道路两边的雨水沟采用植草沟来转输、调蓄雨水,并搭配渗渠共同发挥作用;其他几类 LID 措施的布置形式与方案 2 大致相同;同时为了强化教育示范意义,突出景观生态价值,适当提高雨水花园、

生物滞留设施和绿色屋顶的所占比例。

d. 方案 4:综合型方案。由于透水铺装建造时需要破坏原有道路,给居民通行造成不便。因此,此方案中透水铺装不予考虑,选用剩余 6 种措施。这一方案的布置可大致参照示范型方案,为兼顾成本和效益,各单项措施的布置比例视实际情况而定,不宜过高;同时考虑施工难度,布置适量的绿色屋顶即可。

结合研究区场地条件,上述 4 个 LID 措施设计方案建造面积如表 3 所示。

表 3 研究区 LID 措施设计面积

Table 3 Planning area of LID measures in the study area			
方案	LID 措施	建造面积/m ²	面积占比/%
方案 1	雨水桶	196.5	0.16
	植草沟	4000	4.02
	渗渠	2000	2.01
方案 2	雨水桶	78.6	0.08
	生物滞留设施	1120	1.13
	雨水花园	1040	1.05
	绿色屋顶	6750	6.79
	透水铺装	9020	9.07
方案 3	雨水桶	39.3	0.04
	植草沟	2600	2.62
	渗渠	1300	1.31
	生物滞留设施	960	0.97
	雨水花园	800	0.08
	绿色屋顶	5750	5.78
	透水铺装	8000	8.05
方案 4	雨水桶	170.3	0.17
	植草沟	6000	6.04
	渗渠	3000	3.02
	生物滞留设施	800	0.80
	雨水花园	720	0.72
	绿色屋顶	4000	4.02

2.3 评价结果与分析

2.3.1 设计方案的环境效益

在各设计方案的截污减排效益分析中,基于模型构建步骤,建立研究区 SWMM 雨洪模型,利用已有的两场降雨径流实测水量水质资料,进行参数率定和验证,建立适用于研究区域的 SWMM 模型^[14]。选取 5 年一遇的暴雨作为降雨输入,得到研究区在 4 种情景方案下的径流及各污染物排放情况如表 4 所示。

表 4 LID 措施设计方案径流与污染控制效果模拟

Table 4 Simulation of runoff pollution control effect of LID measures scheme

方案	径流量削减率/%	峰值流量削减率/%	峰现滞后时间/min	污染物削减率/%			
				TSS	TN	TP	COD
方案 1	19.13	13.50	1	25.69	9.99	14.93	15.59
方案 2	54.92	49.72	5	67.46	58.87	62.64	62.17
方案 3	40.21	34.22	3	59.31	46.99	53.17	51.75
方案 4	33.50	32.10	2	54.82	40.71	47.12	46.18

研究区模型模拟结果显示,应用 LID 措施能有效减少径流总量和峰值流量,滞后峰值出现时间。其中,方案 2 对于径流削减效能最为明显,可将 5 年一遇降雨径流总量减少 3012 m³,相比未使用 LID 措施情景削减径流 54.92%;单场降雨最大峰值流量减少为 1.848 m³/s,削减了 49.72%。可见,LID 措施可减少降雨径流外排流量,削减洪峰,延迟洪峰出现时间,提高区域防洪能力,避免或减轻本区域居民的水灾损失。

同时模拟结果显示,应用 LID 措施也能有效减少污染物含量,使径流水质得到改善。方案 2 对于污染物削减最为显著。

2.3.2 设计方案的经济效益

a. 建造和维护成本。结合研究区 LID 措施方案设置与 LID 措施的成本投资和管理维护费用计算 4 种方案的成本总值,结果见表 5(维护成本按 1 年的成本计算)。其中方案 2 的绿色屋顶、生物滞留设施、雨水花园等复杂的 LID 措施面积占比较大,故建造成本及维护成本也相对较高。

表 5 LID 措施设计方案成本总值
Table 5 Total cost of LID measures design scheme
单位:万元

方案	建造成本总值	维护成本总值	成本总值
方案 1	51.28	3.69	54.97
方案 2	704.27	29.70	733.97
方案 3	635.46	27.39	662.85
方案 4	375.31	16.72	392.03

b. 运行效果。根据表 3 将 LID 措施运行效果评价表(表 1)中各措施运行稳定性和工程影响性的模糊语气转化为模糊标度,并且将 LID 措施运行稳定性按不同方案各项 LID 措施面积占比进行分配,求和推算各设计方案运行稳定性的量化值,结果见表 6。由于雨水桶及植草沟运行稳定性较佳,且方案 1、4 中这两项措施面积占比较大,故得出方案 1、4 的运行稳定性较另两个方案更优的结论。同时,由于方案 2、3 设置了透水铺装,对居民出行造成不便,工程影响性较大。

表 6 LID 措施设计方案运行稳定性量化值
Table 6 Quantitative value of LID measures program operation stability

方案	运行稳定性	工程影响性
方案 1	0.660	0.486
方案 2	0.500	0.630
方案 3	0.537	0.610
方案 4	0.693	0.421

c. 节水效益。节水效益主要考虑雨水桶存蓄的雨水代替自来水产生的效益,同样采用 5 年一遇

降雨,由研究区 SWMM 模型运行结果可得各方案下雨水桶存蓄的雨水量。由自来水价格和各方案存蓄雨量,可计算出各 LID 措施方案的节水效益如表 7 所示。由计算结果可知,单场降雨就可产生上百元的节水效益,每年小区雨水资源利用替代的城市供水将相当可观,有利于减轻城市供水压力。

表 7 LID 措施设计方案效益
Table 7 Benefits of LID measures scheme

方案	雨水桶存蓄雨量/m ³	节水效益/元	总入渗量/m ³	补充地下水效益/元
方案 1	334.05	1015.51	492.4	1684.00
方案 2	93.64	284.67	1000.39	3421.33
方案 3	58.95	179.21	1219.52	4170.76
方案 4	255.45	776.57	742.99	2541.02

d. 补充地下水效益。由土地利用图及 LID 措施布设情况得出研究区各子汇水区应用 LID 措施后的透水地表面积,模型导入 5 年一遇降雨,求得研究区入渗体积分量。研究区位于长江流域,渗透补充的地下水以生态环境用水的形式存在。根据生态环境用水的影子价格,各 LID 措施设计方案补充地下水产生的效益如表 7 所示。由于方案 3 采用的 LID 措施种类最多,占地面积也最大,故其降雨入渗量也相对最大,补充地下水的效益也十分可观。

2.3.3 设计方案的社会效益

根据表 2 得出各 LID 措施社会效益的量化值,将 LID 措施社会效益量化值按不同方案各项 LID 措施面积占比进行分配,求和推算出各设计方案社会效益的量化值,结果见表 8。

表 8 LID 措施设计方案社会效益量化值
Table 8 Quantitative value of social benefits of LID measures scheme

方案	雨水资源利用	生态景观价值	公众教育宣传
方案 1	0.143	0.179	0.193
方案 2	0.407	0.520	0.384
方案 3	0.344	0.447	0.430
方案 4	0.296	0.415	0.400

方案 1 虽设置的雨水桶最多,但面积占比较小,且未设计生物滞留池、雨水花园等雨水资源化利用较优的 LID 措施,故其综合雨水资源化利用情况相对较差;方案 3 虽设置了全部 7 种 LID 措施,但由于其生物滞留池、雨水花园及绿色屋顶等生态价值较高的设施面积占比不及方案 2,故 4 种方案中,综合生态景观价值最高的仍是方案 2;方案 3 设置了最多种类的 LID 措施,公众宣传教育示范作用最强。

2.3.4 LID 措施设计方案综合评价

基于熵权法和层次分析法分别进行计算,得到各项指标的客观和主观权重,然后根据式(2)得到

指标的组合权重。

确定指标评价等级为 $V = \{ \text{优, 较优, 中等, 较差, 差} \}$, 取超熵为 0.005, 云滴数为 1000, 基于 X 条件云发生器进行 Matlab 编程, 计算得到 4 个 LID 措施设计方案的各指标隶属度矩阵, 并通过组合权重向量与隶属度矩阵进行模糊变换, 得到 4 个 LID 措施设计方案在 5 个等级下的隶属度, 从而对方案进行综合评价, 结果见表 9。

表 9 设计方案综合评价结果

Table 9 Comprehensive evaluation results of design scheme

方案	隶属度					评价结果
	优	较优	中等	较差	差	
方案 1	0.0033	0.2758	0.1392	0.3744	0.2074	较差
方案 2	0.0541	0.6529	0.0695	0.0164	0.2071	较优
方案 3	0.0002	0.5768	0.1612	0.2170	0.0448	较优
方案 4	0.0001	0.6075	0.3898	0.0027	0.0000	较优

由表 9 可知, 方案 1 (基础型方案) 在 4 个方案中综合效益最低, 评价结果为“较差”, 其余 3 种方案评价结果均为“较优”。

同时方案 2 (功效最大型方案) 对于“较优”的隶属度最大, 选取该方案作为研究区 LID 措施的最终方案。方案 2 截污减排效益最优, 社会效益良好, 虽成本投资相对较大, 但由于截污减排效益占比权重较高, 方案 2 仍表现出最佳的综合效能。方案 4 综合效能排名第二, 且投资仅为方案 2 的一半, 可作为研究区建设或改造的备选方案。若研究区全面规划实施方案 2, 径流量较现状情景将减小约 55%, 污染物排放总量减少约 60%。由于方案 2 下模拟区规划 LID 措施面积只占模拟区域总面积的 18.1%, 故仍有巨大的实施空间与径流、污染削减潜力。

3 结 语

在借鉴和调研国内外典型雨水管理工程实践、发展研究及雨洪模型应用的基础上, 结合我国城市发展的具体情况, 基于生态、经济及社会效益构建了 LID 措施综合效益评价指标体系。在量化评价中, 利用 AHP-熵权法赋予指标组合权重, 并基于云模型求解隶属度, 综合考虑主客观因素对 LID 措施设计方案综合效益进行评价, 降低了使用单一方法进行评价的主观性。将研究结果应用于南京市一住宅小区, 对 4 个 LID 措施设计方案进行综合评价, 其中功效最大型方案截污减排效益最优, 社会效益良好, 对于“较优”的隶属度最大, 表现出最佳的综合效能。

本文从理论研究和工程实践两方面加强对 LID 措施在环境、经济、社会等多方面效益的理解, 以期为国家海绵城市建设和雨洪管理提供借鉴, 具有一

定的参考价值。LID 措施的综合效益评价是一个复杂的过程, 在以后的研究中可考虑 LID 措施促进土地升值、降低机动和交通燃料的消耗等因素深入探究。

参考文献:

[1] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))

[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. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 13-18. (in Chinese))

[3] 赵珊珊, 杨高升, 王晓莹, 等. 径流控制量市场交易机制研究[J]. 水利经济, 2019, 37(1): 35-41. (ZHAO Shanshan, YANG Gaosheng, WANG Xiaoying, et al. Market transaction mechanism of runoff control[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(1): 35-41. (in Chinese))

[4] 丁继勇, 冷向南, 陈军飞, 等. 海绵城市建设“碎片化”问题及其治理[J]. 水利经济, 2020, 38(4): 33-40. (DING Jiyong, LENG Xiangnan, CHEN Junfei, et al. Governance of fragmented phenomenon of sponge city construction[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(4): 33-40. (in Chinese))

[5] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 城市雨洪管理低影响开发技术研究与利用进展[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))

[6] LI T, ZHANG W, HUANG J. Development, assessment and implementation of integrated stormwater management plan: a case study in Shanghai[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30(2): 206-211.

[7] 仇士恺. 最佳管理作业 (BMPs) 最佳化配置之研究: 应用于翡翠水库集水区[D]. 台北: 台湾大学, 2004.

[8] 钟祈波. 应用 ANGPS 模式推估集水区最佳管理措施之成效[D]. 台北: 中兴大学, 2006.

[9] 褚筱文. 应用雨洪管理措施 DSS 模拟都市暴雨之最佳化管理[D]. 台北: 台北科技大学, 2010.

[10] 贾海峰, 姚海蓉, 唐颖, 等. 城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法及案例[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 260-267. (JIA Haifeng, YAO Hairong, TANG Ying, et al.

- LID-BMPs planning for urban runoff control and case study[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 260-267. (in Chinese))
- [11] 王锋. 基于雨洪模型的海绵城市评价方法的研究[D]. 北京:清华大学, 2017.
- [12] 穆聪. 海绵城市低影响开发设施调控效果及综合效益研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [13] 戚海军. 低影响开发雨水管理措施的设计及效能模拟研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2013.
- [14] 朱寒松, 董增川, 曲兆松, 等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 32-36. (in Chinese))
- [15] 曹加杰, 王杰, 吴向崇, 等. 城市河道开放空间景观修复后评价研究:以南京内秦淮河东段为例[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 195-201. (CAO Jiajie, WANG Jie, WU Xiangchong, DING Changhui, WANG Weixi, WANG Hao. Post evaluation of urban river open space landscape restoration: a case study of the eastern part of the Inner Qinhuai River in Nanjing[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(3): 195-201. (in Chinese))
- [16] 陈垚, 何智伟, 张琦, 等. 基于水文控制目标的中小尺度海绵城市改造方案评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 1-8. (CHEN Yao, HE Zhiwei, ZHANG Qi, et al. Evaluation of reconstruction schemes for small-and medium-scale sponge city based on hydrological control target[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 1-8. (in Chinese))
- [17] 杜新强, 贾思达, 方敏, 等. 海绵城市建设对区域地下水资源的补给效应[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 13-17. (DU Xinqiang, JIA Sida, FANG Min, et al. Recharge effect of sponge city construction on regional groundwater resources[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 13-17. (in Chinese))
- [18] 刘健. 城市防洪标准的模糊优选研究[D]. 济南:山东大学, 2006.
- [19] 李仟, 马跃先, 郑佩佩. 基于 AHP-Fuzzy 法的绿色小水电综合评价[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 154-157. (LI Qian, MA Yaoxian, ZHENG Peipei. Comprehensive assessment of green small hydropower station based on AHP-fuzzy method [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6): 154-157. (in Chinese))
- [20] 范佳辉, 张亚丽, 李明诗. 基于空间光谱信息协同的城市不透水层提取方法比较研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 212-218. (FAN Jiahui, ZHANG Yali, LI Mingshi. Comparing four methods for extracting impervious surfaces using spectral information in synergy with spatial heterogeneity of remotely sensed imagery [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 45(1): 212-218. (in Chinese))
- [21] 王静, 刘淑静, 陈爱慧, 等. 基于层次分析法的我国海水淡化开发利用潜力评价方法研究[J]. 水利经济, 2020, 38(6): 12-14. (WANG Jing, LIU Shujing, CHEN Aihui, et al. Evaluation method for development and utilization potential of seawater desalination in China based on AHP [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(6): 12-14. (in Chinese))
- [22] 陈建明, 程细英, 李美枫. 基于层次-熵权法的江苏省沿海垦区水生态效应评价[J]. 水利经济, 2020, 38(2): 43-48. (CHEN Jianming, CHENG Xiyang, LI Meifeng. Evaluation and analysis of water ecological effect in coastal reclamation area in Jiangsu Province based on AHP-entropy weight method[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(2): 43-48. (in Chinese))
- [23] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))
- [24] 张海侠. 基于熵-云模型的我国绿色智慧城市发展水平评价研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2017.
- [25] 唐新玥, 唐德善, 常文倩, 等. 基于云模型的区域河长制考核评价模型[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 41-46. (TANG Xinyue, TANG Deshan, CHANG Wenqian, et al. Evaluation model of regional river chief system based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 41-46. (in Chinese))
- [26] 李晓英, 江崇秀, 张琛. 基于云模型的城市资源水价研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 215-221. (LI Xiaoying, JIANG Chongxiu, ZHANG Chen. Study on city resource water price based on cloud model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 215-221. (in Chinese))
- [27] 汤鹏, 王浩. 基于 MCR 模型的现代城市绿地海绵体适宜性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 62(3): 116-122. (TANG Peng, WANG Hao. Analysis on the suitability of green sponge space in modern city based on MCR model[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 62(3): 116-122. (in Chinese))

(收稿日期:2020-10-11 编辑:彭桃英)