

西安小寨商业区海绵城市改建效益货币化计算与分析

李文英¹, 贾斌凯¹, 李怀恩¹, 李家科¹, 陈至立², 李继成²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国电建 西北勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了缓解内涝、水环境等问题, 我国各地城市陆续开展海绵城市建设工作。海绵城市建设的效益是社会各界关注的重点之一。以西安市小寨海绵城市建设为例, 构建海绵城市效益货币化方法, 计算海绵城市建设的效益。小寨海绵城市建设项目的年效益约为 2 亿, 以社会折现率为 7% 计算, 在运营期为 30 年的效益为 26.6 亿元。效益约为海绵设施项目投资的 2.4 倍, 总投资的 1.3 倍。效益计算方法和结果可以为我国海绵城市建设提供一定的技术支撑。

关键词: 海绵城市; 效益货币化; 老城区改造

中图分类号: TU986.5; TU992

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)03-0452-11

Monetization Calculation and analysis of the benefits of sponge city construction in Xiaozhai commercial district in Xi'an

LI Wenying¹, JIA Binkai¹, LI Huaien¹, LI Jiake¹, CHEN Zhili², LI Jicheng²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to alleviate the problems of waterlogging and water environment, cities in China have successively carried out the construction of sponge cities. The benefits of sponge city construction attracted more attention of the whole society. In this study, the construction of Xiaozhai Sponge City in Xi'an is considered as the research object. A method for monetizing the benefits of sponge city has been constructed, and the benefits of sponge city construction has been calculated. Results show that the annual benefit of the Xiaozhai Sponge City Construction Project is about 200 million RMB. With a 7% of social discount rate, the benefit will reach 2.66 billion RMB during the 30-year operation period. The benefit is about 2.4 times the investment in the sponge facility project and 1.3 times the total investment. The benefit calculation methods and results of this study can provide certain technical support for the construction of sponge cities in China.

Key words: sponge city; monetization of benefits; reconstruction of old city

我国海绵城市建设试点城市都已陆续进入运营阶段, 其他地方城市的海绵城市改建也陆续开始。作为政府为改善城市生产、生活环境的福利性投入, 海绵城市的生态环境效益、社会效益以及经济效益是政府关注的重点。效益货币化结果能够直观体现海绵城市建设的各项效益的大小, 同时, 能够为海绵城市建设的投入、规划、优化等过程提供参考。因此, 海绵城市效益货币化研究是必要的。

国外类似的工程有美国的 LID-BMP (Low Impact Development type's Best Management Practices)^[1]、英国的 SUDS (Sustainable Urban Drain-

age System)^[2]、澳大利亚的 WSUD (Water Sensitive Urban Design)^[3] 等。美国 LID-BMP 效益的研究重点之一是成本-效益分析^[4-5], 将包括节省降雨税、增加的水资源、节省的隔热保温费、降噪效益以及景观效益等货币化, 通过分析对比 LID 设施的成本与对建设者的效益, 鼓励私人建设 LID 设施调控径流; 分析 LID-BMP 的生态环境效益也是效益研究的重点之一, 能够推动政府对公共区域的雨水进行调控以及说服政府提供更多的政策倾斜鼓励私人建设 LID 措施。英国 SUDS 的主要功能是防洪排涝, 效益研究重点主要是防洪排涝效益和生态环境效益^[6], 在估算防洪排涝效益方

收稿日期: 2020-10-12

修改稿日期: 2021-05-13

基金项目: 清洁能源与生态水利工程关键技术研究, 老城区海绵改造工程评估方法与优化设计技术研究及应用 (QNZX-2019-02)

第一作者: 李文英 (1978—), 女, 博士, 讲师, 主要从事水资源保护与水处理研究。E-mail: 331644417@qq.com

通信作者: 李怀恩 (1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事城市面源污染治理、水文水资源研究。E-mail: lhuaien@mail.edu.cn

面，制定了一份手册—《Flood Risk Management Hand book》^[7]。

目前，国内各学者也有构建一些评价海绵城市建设效益的指标^[8]，但这些指标并不一定能全部完成货币化计算。已构建效益货币化方法，仅在一些小区 LID 改造效益^[9]以及考虑生命周期成本的 LID 综合效益计算上有一些成果^[10]。在海绵城市建设整体效益研究方面，有将海绵城市的生态环境、社会效益等转化为城市的房产溢价计算海绵城市的效益^[11]，此方法也是对海绵城市建设成果进行货币化的途径之一，但不宜应用于海绵城市建设前期的规划和优化。而在海绵城市建设规划优化中，多以建设成本、雨水综合径流系数、污染物综合控制率等为约束条件进行优化^[12-14]，鲜见以效益货币化结果为约束条件的研究，究其原因还是效益货币化研究不够成熟，不能支撑海绵城市建设各项措施配置的规划与优化。

本研究通过估算西安市小寨海绵城市改建效益，构建海绵城市效益货币化方法，以期海绵城市效益货币化研究提供一定的参考。

1 海绵城市货币化指标与方法

1.1 效益货币化指标

在《海绵城市建设评价标准》中（下称《评价标准》），评价内容有七项，分别为：年径流总量控制率及径流体积控制、源头减排项目实施有效性、路面积水控制与内涝防治、城市水体缓解质量、自然水体与水生态岸线保护、地下水埋深趋势、城市热岛效应缓解。在分析上述七项评价内容后，结合源头 LID 措施、中途管网改建、末端河湖治理，以及海绵城市建设的目标和规划，识别海绵城市建设的效益，将识别的效益与《评价标准》中的内容相对应，分析效益指标的主要影响因素，构建了效益计算指标，具体见表 1。

表 1 海绵城市效益分类与各指标主要影响因素

Tab.1 Benefit Classification of Sponge City and Main Influencing Factors of Each Index

分类	效益	对应《评价标准》的主要评价内容	主要影响因素	效益计算指标
生态环境效益	提升地表水环境	城市水体环境质量	点源、面源污染	缓解面源污染 缓解点源污染
	补充地下水	地下水埋深变化趋势	雨水径流入渗	补充地下水
	缓解城市热岛	城市热岛效应缓解	植被水面蒸发	缓解城市热岛效应
	提供生境	自然生态格局管控与水体生态岸线保护	水域、植被面积	提供生境
社会效益	缓解城市内涝	路面积水控制与内涝防治	径流峰值削减，引起的内涝点情况改善	降低居民室内损失 减少交通损失 减少商场贸易损失 减少工厂损失
				减少市政基础设施损失
				减少下游城市防洪成本
				降低城市能耗
	提升城市景观	自然生态格局管控与水体生态岸线保护	水域、植被面积	提升城市景观
经济效益	降低市政管网运营负荷	年径流总量控制率及径流体积控制	径流削减量	降低市政管网运营负荷
	增加区域水资源	源头减排项目实施有效性	中水、雨水回用量	增加区域水资源 雨水、中水回用直接效益

1.2 效益货币化方法

1.2.1 生态环境效益

(1)提升地表水环境质量

使用受污染的水源增加了生产企业的成本，

威胁居民的身体健康。即水资源受到污染，会造成社会损失，相反，水环境质量提升能够减少损失，提升生产效益。有研究表明污染物排入水体的损失是其治理成本的几倍^[15]。本效益的计算方

法为

$$B = \sum_{i=1}^n q_i \times Q_G \times P_G \times N \quad (1)$$

式中: q_i 为各污染物的削减量, kg/a ; Q_G 为污染当量值, 是不同污染物或污染排放量之间的污染危害和处理费用的相对关系, P_G 为污染当量征收标准, 元, 可查阅《排污费征收使用管理条例》; N 为污染物进入不同功能区水环境的惩罚倍数, 参考《突发环境事件应急处置阶段环境损害评估推荐方法》。

表 2 污染物进入不同功能区水环境的惩罚倍数

Tab. 2 Penalty multiples for pollutants entering the water environment in different functional areas

地表水环境质量等级	罚款倍数
I	>8 倍
II	6~8 倍
III	4.5~8 倍
IV	3~4.5 倍
V	1.5~3 倍

(2) 补充地下水效益

海绵城市通过减少地下水开采和增加径流入渗等途径保证地下水位的稳定, 地下水的市场价格主要受开采成本的影响, 未考虑水资源、水生态等的价值, 因此, 渗入地下的雨水的价值宜采用水的影子价格来衡量, 本效益的计算公式为

$$B = Q \times P \quad (2)$$

式中: Q 为入渗补给量, m^3 ; P 为地下水资源影子价格, 元/ m^3 。

(3) 缓解城市热岛效应效益

海绵城市能够缓解热岛效应, 是因为海绵城市建设增加了城市的植被, 城市植被能够起到降温增湿的作用, 能够改善城市热岛效应^[16]。分析城市植被降温增湿的特征, 可以采用替代工程法进行评估。参考国内外学者对城市绿地降温效果的研究, 选择空调的使用作为替代工程, 空调具有和绿地同样的降温作用。

同时结合成果参照法, 根据国内外相关研究, 测定得出 1 hm^2 绿地在夏季能够从环境中吸收 81.8 MJ 的热量, 其降温效果与 189 台空调在全天的制冷效果相同^[17], 所以以空调作为替代工程, 其降低同样温度的耗电费用作为绿地调节温度的价值。因为植被的降温作用在夏季产生效益, 每年按 n 个月计算, 已知室内空调耗电 $0.86 \text{ kW} \cdot \text{h/台/h}$, 则植被调节温度总效益:

$$B = S \times 0.86 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{h}^{-1} \times P_{\text{电}} \times 189 \text{ 台} \times 24 \text{ h} \times n \times 30 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \quad (3)$$

式中: S 为实际绿化面积, hm^2 ; $P_{\text{电}}$ 为当地电价, 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(4) 提供生境效益

植被面积增加、水域面积扩展以及生态岸线的恢复可以提供生物栖息地, 因此可以起到维持生物多样性的作用^[18]。本效益的计算参考《城市生态建设环境绩效评估导则(试行)》的方法—谢高地^[19]的当量因子法, 计算公式为:

$$B = (A_g \times G_g + A_w \times D_w) \times K \quad (4)$$

式中: A_g 、 A_w 为分别为绿地与水域增加的面积, hm^2 ; D_g 、 D_w 为分别为绿地与水域对应的当量; K 为生态系统单位面积服务价值, 当量以耕地为基准, 当量为 1 时, 其服务功能单位价值可为区域平均粮食单产市场价值的 $1/7$, 或者参考谢高地 2015 年的计算结果, 每当量为约为 $3\,406 \text{ 元/hm}^2$ 。

1.2.2 社会效益

(1) 缓解城市内涝效益

海绵城市改建能够减少城市内涝带来的损失, 改建后减少的损失即为海绵城市改建的效益。一场内涝造成的损失是多方面的, 本研究主要选取道路交通损失、居民室内损失和商业交易损失为代表, 计算海绵城市建设的效益, 计算过程如下:

$$B = D_{\text{交通}} + D_{\text{居民}} + D_{\text{商业}} \quad (5)$$

式中: $D_{\text{交通}}$ 为缓解内涝减少的交通损失, 元/a; $D_{\text{居民}}$ 为缓解内涝减少的居民室内损失, 元/a; $D_{\text{商业}}$ 为缓解内涝减少的商业损失, 元/a。

(a) 减少交通损失

海绵城市建设消除了一些道路的积水点, 并改善了部分道路积水的状况, 有效缓解了城市内涝灾害。本文采用经济损失法, 从公路交通行业视角来分析城市暴雨内涝灾害带来的损失。

城市暴雨内涝道路积水交通经济损失可由耽搁时间与当地交通管理部门单位时间产值相乘来计算^[20], 则海绵城市建设对交通部门的效益为

$$d_{\text{交通}} = L_{\text{交通}} = U_j \cdot \frac{N}{N_{\text{总}}} \cdot T_d \quad (6)$$

式中: $d_{\text{交通}}$ 为海绵城市交通建设对交通部门的效益, 万元; $L_{\text{交通}}$ 为海绵城市建设前内涝造成的损失, 万元; U_j 为城市交通部门年产值, N 为受淹路段条数; $N_{\text{总}}$ 为城市主要路段条数; T_d 为道路积水交通耽搁时间。

(b) 降低居民室内损失

居民室内财产损失是城市内涝灾害损失的重

要组成部分,根据内涝损失线,计算单次内涝对居民造成的损失^[21]。内涝造成的居民室内损失计算如下:

$$d_{\text{居民}} = L_{\text{居民}} = \sum H_i \times L_p \times A_i \quad (7)$$

式中: $d_{\text{居民}}$ 为海绵城市改建后减少单次内涝造成居民损失的效益, 万元; $L_{\text{居民}}$ 为海绵城市建设前内涝造成的居民室内损失, 万元; H 为居民室内淹水高度, cm; L_p 为室内财产损失率曲线上水深对应的损失, 元/m², 参考图 1; A 为受淹面积, m²; i 为第 i 个积水点。

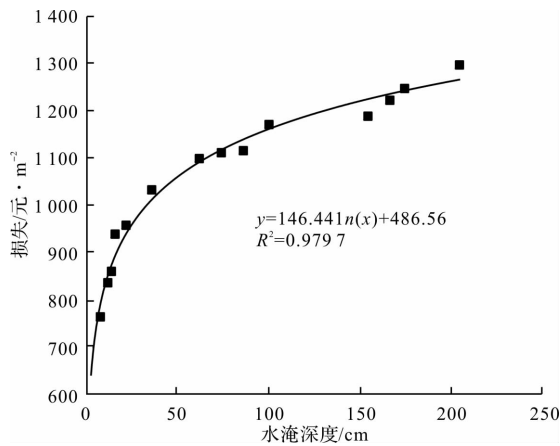


图1 洪涝灾害居民室内财产损失率曲线

Fig. 1 Indoor property loss curve of residents in flood disaster

(c)减少商业交易损失

商业损失主要指暴雨内涝期间和遭受内涝的商铺等在恢复期间损失的可能交易。单次内涝造成的商业损失计算如下:

$$d_{\text{商业}} = L_{\text{商业}} = L_{\text{交易}} \times T_{\text{内涝影响}} \times P_{\text{毛利润率}} \quad (8)$$

式中: $d_{\text{商业}}$ 为海绵城市改建后减少单次内涝造成交易损失的效益, 万元; $L_{\text{商业}}$ 为海绵城市建设前内涝造成商业损失, 万元; $L_{\text{交易}}$ 为受内涝影响区域的日交易额, 万元/d; $T_{\text{内涝影响}}$ 为商城、商店等商贸场所受内涝影响的时间, d; $P_{\text{毛利润率}}$ 为交易后仅去除货物成本的收益率, %。

(d)年均效益的计算

上述计算的效益是遭遇某一场降雨时海绵城市改造产生的效益, 海绵城市改造减少内涝损失的年均效益计算如下:

$$B = \sum_{i=1}^n B_i \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_i + 1} \right) \quad (9)$$

式中: i 为降雨量, mm; B_i 为遭遇降雨量 i 时海绵城市改造的效益, 万元; T_i 为降雨量为 i 时对应的重现期, n 年一遇。

内涝损失与降雨量之间基本线性相关。假设海绵城市建设只是延后内涝点出现点, 内涝损失

曲线形状不变。海绵城市改建使出现内涝时对应的降雨量增大, 内涝损失和海绵城市改造效益曲线如图 2 所示^[24]。

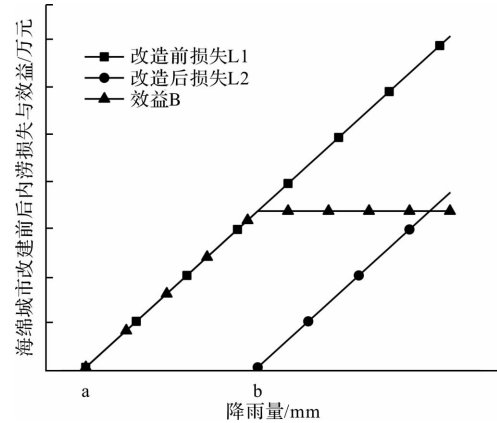


图2 海绵城市改造前后内涝损失与效益

Fig. 2 Losses and benefits caused by water logging before and after the sponge city reconstruction

年均效益的计算可以简化为:

$$B = \frac{1}{2} B_b \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b} \right) + B_b \frac{1}{T_b} = \frac{B_b}{2} \left(\frac{1}{T_a} + \frac{1}{T_b} \right) \quad (10)$$

式中: a 、 b 为分别为海绵城市改建前后的出现内涝损失时对应的降雨量, mm; B_b 为海绵城市改造后降雨量为 b 时的效益, 万元; T_a 、 T_b 为降雨量分别为 a 、 b 时对应的重现期, T 年一遇。

(2)提升防洪效益

海绵城市对降雨径流的截蓄能够削减洪峰流量, 减小下游防洪压力, 具有一定的防洪效益。海绵城市增加的截蓄容积带来的防洪效益计算宜采用替代工程法。选择水库作为替代工程。防洪效益的计算为:

$$B = V_{\text{径流}} \times P_{\text{水库}} \quad (11)$$

式中: $V_{\text{径流}}$ 为海绵城市建设增加的径流雨水容积, m³; $P_{\text{水库}}$ 为单方水库的建设成本, 元/m³, 每立方米库容的年均投入成本 0.67 元^[23-24]。

(3)降低城市能耗

海绵城市缓解城市热岛效应能够降低空调使用频率, 降低电能的消耗; 绿色屋顶具有隔热保温作用, 在夏季能够降低室外高温的侵袭, 提高空调制冷效率, 在冬季能够减少室内暖气的散失, 从而降低能源的消耗^[25]。所以, 降低社会能耗的效益计算方式为

$$ECO_{en} = E_{uhi} + E_{hi} \quad (12)$$

式中: ECO_{en} 为降低能耗的效益, 元/a; E_{uhi} 为缓解城市热岛效应降低能耗的效益, 元/a; E_{hi} 为绿色屋顶保温隔热减少的能耗的效益, 元/a。

其中,在进行总和时,缓解城市热岛效应气温降低节省的能耗应包含在缓解城市热岛效益中。

(a)气温降低的节电效益

在夏季,城市的生活、生产为了对抗高温天气,一般会开启空调降温,有研究表明,日均气温升高 1°C ,人均耗电量会增加 $1\sim 1.2\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{d}$ ^[26]。缓解热岛效应,气温降低可以减少这部分的电能消耗。缓解城市热岛效应的经济效益的计算方法如下:

$$E_{\text{ahi}} = VT \times VE \times N \times t_1 \times P_{\text{电价}} \quad (13)$$

式中: VT 为温度降幅, $^{\circ}\text{C}/\text{天}$; VE 为温度升高一度,人均耗电度数增加量,取 $1.1\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{人}\cdot\text{天}\cdot^{\circ}\text{C})$; N 海绵建设区人口数量,人; t_1 为夏季时长, d ; $P_{\text{电价}}$ 为当地电价, $\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

(b)绿色屋顶保温隔热效益

绿色屋顶保温隔热效率主要受到基质层厚度、植物类型以及室内外温差的影响,但是大部分地区没有具体数据,在进行实际估算时可以参照其他人的研究成果,例如 Jim 等的研究中^[27],土层为 30 cm 的绿色屋顶,夏季在晴天、多云天气的隔热节省的能耗约为 $0.9\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $0.57\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。屋顶保温隔热的效率与土层厚度成正比关系,在这里将隔热效率与土层厚度进行线性化处理。绿色屋顶降低能耗的效益计算方法为:

$$E_{\text{hi}} = W \times \frac{H}{10} \times S \times (d_{\text{晴}} + d_{\text{多云}}) \times P_{\text{电价}} \quad (14)$$

式中: W 为每平米绿色屋顶夏季每天隔热低效率, $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$; 每 10 cm 为单位,晴天和多云天气分别以 $0.3\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $0.2\text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 计; H 为基质层厚度, cm ; S 为绿色屋顶面积, m^2 ; $d_{\text{晴}}$ 、 $d_{\text{多云}}$ 为夏季晴天和多云天数, d/a ; $P_{\text{电价}}$ 为当地电价, $\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

(4)提升景观效益

海绵城市建设附加的景观效益主要来自植被面积的增加。本效益的计算参考1.2.1节中提供生境效益的计算方法。

1.2.3 经济效益

(1)降低市政管网运营成本效益

海绵城市的建设对年径流总量控制率和径流体积控制提出要求,在海绵城市建设前,径流雨水一般通过排水管网排入天然水体或者污水处理厂。由于雨水的运输和处理费用都由政府承担,没有一个明确的市场价格,所以,雨水的运输处理费用参考污水的收费标准。

从源头控制径流可以减少进入排水管网的水

量,这可以减少管网的运输负荷和市政管网输送的雨水成本。考虑到生活污水和工业废水的收费标准,雨水径流的运输和处理成本平均约为 $1\text{ 元}/\text{m}^3$ 。收益计算如下:

$$B = V_{\text{径流}} \times P_{\text{污水}} \quad (15)$$

式中: $V_{\text{径流}}$ 为海绵城市建设后减少的径流量, $\text{m}^3/\text{年}$; $P_{\text{污水}}$ 为单位雨水的运输处理费,参考污水处理费,取 $1\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

(2)增加区域水资源效益

(a)增加区域水资源总效益

无论是雨水利用、中水回用,还是管网漏损控制,都是直接增加了区域可用水资源量。雨水和中水的主要用途是绿地浇灌和道路浇洒等,从水质要求较低的地方置换自来水,使自来水可以用到更多对水质要求更高的地方。这实际上是对水资源的优化配置,所以,增加区域水资源总效益计算时,应考虑水资源的影子价格,而不是实际的价格。计算公式为:

$$B = (V_{\text{雨水}} + V_{\text{中水}} + V_{\text{自来水}}) \times P_{\text{影子水价}} \quad (16)$$

式中: $V_{\text{雨水}}$ 为增加的雨水资源利用量, m^3/a ; $V_{\text{中水}}$ 为增加的中水回用量, m^3/a ; $V_{\text{自来水}}$ 为管网漏损控制增加的可用自来水量, m^3/a ; $P_{\text{影子水价}}$ 为影子水价。

(b)增加区域水资源的直接经济价值

自来水和中水都有确定的市场价值和收费部门,增加的自来水和中水回用量直接增加了这些部门的收入。而雨水虽然没有直接的市场价格,但是雨水的水质和用途与中水类似,可以参考中水的价格。所以,雨水利用、中水回用和管网漏损控制具有直接的经济效益,直接经济效益包含在增加区域水资源总效益中。

增加区域水资源的直接经济价值计算方法为

$$B = V_{\text{雨水}} \times P_{\text{中水}} + V_{\text{中水}} \times P_{\text{中水价}} + V_{\text{自来水}} \times P_{\text{自来水价}} \quad (17)$$

式中: $V_{\text{中水}}$ 为污水处理厂出售的中水水量, $\text{m}^3/\text{年}$; $P_{\text{中水}}$ 为中水价格, $\text{元}/\text{m}^3$; $P_{\text{自来水价}}$ 为自来水价格, $\text{元}/\text{m}^3$ 。

2 研究区域介绍与效益计算

2.1 小寨海绵城市建设介绍

西安市小寨商业区是市内重要的休闲娱乐购物场所之一,7·24西安暴雨事件致使市内多处发生内涝,小寨十字积水严重,导致交通受阻。为了缓解小寨区域存在的水安全、水生态、水环境和水资源等问题,对小寨区域进行海绵城市建设。小寨海绵城市建设的指标体系见表3所示。

表 3 小寨区域海绵城市建设指标体系

Tab. 3 The Sponge City Construction Index System for Xiaozhai

类别	序号	指标	现状	2020 年目标	2030 年目标
水生态	1	年径流总量控制率	52.4%	80%/17.4mm	
	2	地下水水位	—	下降趋势得到遏制	下降趋势明显缓解
	3	热岛效应	—	缓解	缓解
水安全	4	城市排水	—	新建/改建雨水管渠设计标准 5 年一遇	
	5	内涝防治	—	内涝灾害防治标准 50 年一遇	
水环境	6	SS 削减率	—	50%	
	7	城市面源污染控制	—	旱季合流制管道不得有污染物进入水体	
水资源	8	污水再生利用	17.7%	20%	30%
	9	雨水资源收集利用率	—	占可收集回用雨水量比例为 8%	占可收集回用雨水量比例为 12%

小寨海绵城市建设区面积为 20.15 km², 主要工程及径流调蓄流程如图 3 所示, 其中粗线框为主要工程。建设工程的调蓄容积总计 428 817 m³, 其中地上调蓄池容积 40 000 m³、LID 措施 45 438 m³和调节塘 42 879 m³; 而地下调蓄池容积约为 300 500 m³, 约占总调蓄容积的 70%, 其上层可以作为地下停车场或地下仓储室, 可以高效率的利用城市土地资源。

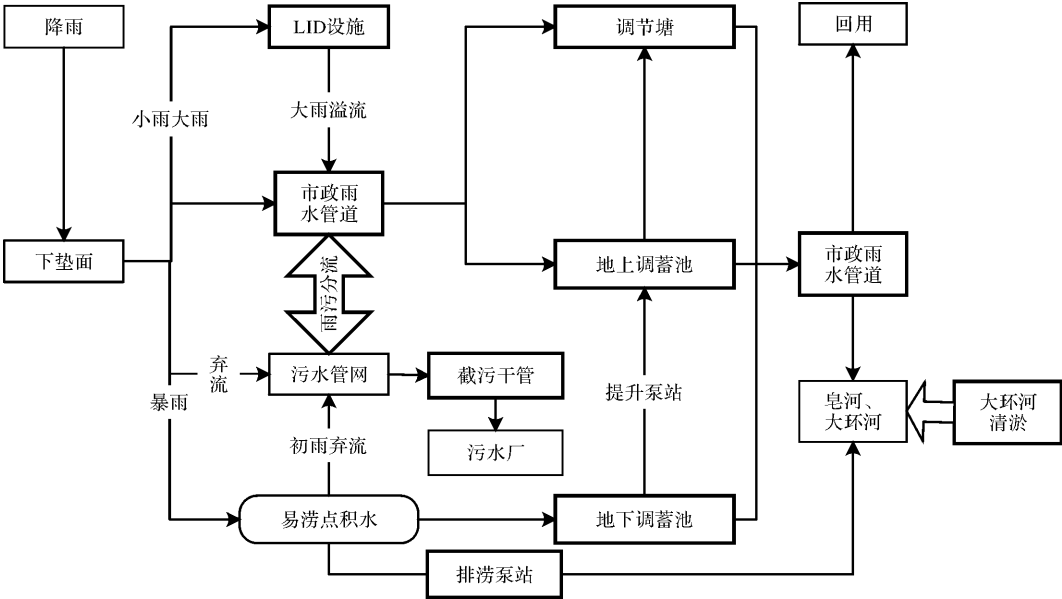


图 3 小寨海绵城市建设主要工程及径流调蓄流程

Fig. 3 The main projects and runoff regulation and storage process of Xiaozhai Sponge City construction

2.2 老城区海绵城市建设效果量化与货币化

2.2.1 生态环境效益

(1)提升地表水环境质量效益

(a)点源污染控制

小寨海绵城市建设点源污染控制的主要措施是新建截污干管, 收集混入雨水系统的污水, 提升区域污水收集量, 减少进入地表水环境中的污水。根据测算, 新建截污干管收集污水约 1.1 万 m³/d, 则每年收集的生活污水约为 401.5 万 m³。

西安市污水处理成本约为 1.5 元/m³, 地表水环境功能类型为Ⅲ~Ⅳ类, 污染物排入Ⅲ~Ⅳ的处罚标准分别为 4.5~8 倍和 3~4.5 倍, 这里损害倍数取 4.5 倍。点源污染控制的效益为:

$$B=401.5 \text{ 万 m}^3 \times 1.5 \text{ 元/m}^3 \times 4.5=2 \text{ 710 万元/a}$$

(b)面源污染控制

小寨区域面源污染主要形成于降雨初期形成的径流污染^[28], 初期 20%降雨中含有单场降雨总量约 60%的污染物。为减少城区面源污染, 海绵城市改造后, 将降雨初期屋顶 2 mm 和硬化面 4 mm 内的雨水弃流至污水井, 或雨水管断流后初期雨水进入草地等通过生物截留去除污染物。根据小寨用地类型、初雨水质、初雨弃流量以及年降雨场次(以 49 次计), 估算, 海绵城市改造后, 小寨面源污染控制的 COD、TSS 和 TP 量分别约为 1 976 t、2 603 t 和 2.6 t。

在《排污费征收标准管理办法》中, COD、TSS 和 TP 的当量分别为 1、4 和 0.25, 根据上表计算的污染物的削减量和当量值的计算规则, 上述三

种污染物的当量 D 的计算如下:

$$D = \frac{1\,976.4\text{ t/a}}{1\text{ kg}} + \frac{2\,603.9\text{ t/a}}{4\text{ kg}} + \frac{2.6\text{ t}}{0.25\text{ kg}} = 2\,637\,775/\text{a}$$

每一污染当量的收费标准为 0.7 元, 损害倍数取 4.5 倍, 则面源污染控制的年效益为

$$B = 0.7\text{ 元} \times 2\,637\,775/\text{a} \times 4.5 = 831\text{ 万元/a}$$

(c) 总效益

提升地表水质量的效益是点源污染控制和面源污染控制的和, 即总效益为

$$B = 2\,710\text{ 万元/a} + 831\text{ 万元/a} = 3\,541\text{ 万元/a}$$

(2) 补充地下水效益

小寨海绵改造增加的径流控制量约为 317 万 $\text{m}^3/\text{年}$. 由于西安市湿陷性黄土较多, LID 设施多为防渗型, 雨水不能直接从 LID 设施中渗入地下. 而是经过 LID 措施的处理后, 进入西安市地表水中, 从地表水环境中渗入补充地下水. 本文研究区域透水面的入渗补给系数取值为 0.2, 估算的每年增加的径流入渗量约为 63.4 万 m^3 . 根据刘秀丽的研究, 2020 年黄河流域生态用水的影子价格为 4.73 元^[29]. 由此产生的效益为

$$B = 63.4\text{ 万 m}^3/\text{a} \times 4.73\text{ 元} = 300\text{ 万元/a}$$

(3) 缓解热岛效应效益

根据规划中 LID 的设置, 小寨海绵改造前, 公园绿地用地面积为 81.93 hm^2 ; 海绵改造后, 公园绿地面积增加至 167.25 hm^2 , 面积增加了 85.3 hm^2 , 新建生态屋顶面积 109.3 hm^2 , 增加的绿地面积合计约 195 hm^2 . 西安市居民生活用电实行阶梯电价分档电量, 第一阶梯电价约为 0.5 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$. 西安夏季约为 4 个月. 根据缓解热岛效应效益计算方法:

$$\begin{aligned} B &= S \times 0.86\text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{台}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \times P_{\text{电}} \times \\ &\quad 189\text{ 台} \times 24\text{ h} \times n \times 30\text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \\ &= 195\text{ ha} \times 0.86\text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{台}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \times \\ &\quad 0.5\text{ 元/kW} \cdot \text{h} \times 189\text{ 台} \times 24\text{ h} \times 4 \times 30\text{ d} \cdot \text{a}^{-1} \\ &= 4\,564\text{ 万元/a} \end{aligned}$$

(4) 提供生境效益

小寨海绵改造后, 绿地面积增加约 195 hm^2 . 根据生境计算方法:

$$\begin{aligned} B &= (A_g \times D_g + A_w \times D_w) \times K \\ &= 195\text{ hm}^2 \times 1.87 \times 3\,406\text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a}) \\ &= 124\text{ 万元/a} \end{aligned}$$

2.2.2 社会效益

(1) 缓解城市内涝效益

(a) 减少交通损失

小寨交通部门单位时间产值估算. 根据 2018 年《西安统计年鉴》, 交通运输/仓储及邮政业创造

的财富约为 357.49 亿元. 西安市绕城高速主城区内的面积约为 460 km^2 , 其中雁塔区为 152 km^2 , 假设单位面积内交通运输/仓储及邮政业创造的财富相等, 则雁塔区创造的财富约为 118.1 亿元/a. 小寨区域建设区面积为 20.15 km^2 , 小寨交通部门单位时间产值为 428.9 万元/d.

50 年一遇内涝的影响时间估算. 根据模拟, 遭遇 50 年一遇降雨时, 小寨 1 d(24 h) 累积降雨量为 128 mm, 内涝点平均积水深度为 0.55 m. 根据公式计算如下:

$$T_c = \frac{RT^2}{RT - D_{\max}} = \frac{128 \times 1^2}{128 \times 1 - 55} = 1.76\text{ d}$$

海绵城市建设前建成的主要路段为 68 条. 遭遇 50 年一遇降雨后, 内涝点为 20 个, 影响的路段约为 30 条.

道路受淹交通经济损失为

$$\begin{aligned} L &= U_j \cdot \frac{N}{N_{\text{总}}} \cdot T_d \\ &= 428.9\text{ 万元/d} \times \frac{30}{68} \times 1.76\text{ d} = 333\text{ 万元} \end{aligned}$$

由于缺乏数据, 假设小寨道路出现内涝时对应的降雨重现期为 10 年一遇, 则年均减少交通损失的效益为

$$B_{\text{交通}} = \frac{333}{2} \times \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{50} \right) = 20\text{ 万元/a}$$

(b) 降低居民室内损失

居民、商铺等场所地面高于路面 30~50 cm 左右, 只有积水达到一定深度, 才能侵入室内, 损坏家装等设施, 这里积水深度取值高于 40 cm 才能侵入室内.

根据规划用地平衡表, 2020 年居住用地占城市规划用地的 41.3%, 商业服务设施用地占城市规划用地的 11.31%, 合计约为 52.6%. 在计算室内受淹损失时, 将受淹面积的 52.6% 作为室内受淹面积.

根据内涝积水点的模拟数据, 小寨海绵改造前, 遭遇 50 年一遇降雨时, 内涝造成的居民室内经济损失计约为 10 917 万元.

假设小寨由于内涝导致室内出现损失时对应的降雨重现期为 20 年一遇, 则年均减少室内损失的效益为:

$$B_{\text{居民}} = \frac{10\,917}{2} \times \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{50} \right) = 382\text{ 万元/a}$$

(c) 减少商业损失

根据 2018 年《西安统计年鉴》, 雁塔区 2018 年社会消费品零售总额约为 847.5 亿元. 雁塔区总面积约为 152 km^2 , 平均每 km^2 年均零售总额约为 5.6 亿元, 单位面积每日零售总额为 152.8 万元 $\text{km}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. 商场、商店等商贸场所受到积水入侵

后,根据店铺的受损程度,一般会耗费1~7 d才能再次营业,这里取平均值4 d.由于商场、商店等商贸场所多设置在临街的位置,内涝发生时被入侵和影响的几率更大,假设内涝点所在的道路上的商店全部被影响到,则受影响面积约为9 km².城市零售毛利润约为18%~22%,本研究取20%作为计算值.

缓解50年一遇降雨内涝的减少的零售损失约为:

$$\begin{aligned} D_{\text{商业}} &= L_{\text{交易}} \times T_{\text{内涝影响}} \\ &= 152.8 \text{ 万元 km}^{-2} \text{ d}^{-1} \times 9 \text{ km}^2 \times 4 \text{ d} \times 20\% = 1\ 100 \text{ 万元} \end{aligned}$$

假设小寨由于内涝导致室内出现损失时对应的降雨重现期为20年一遇,则年均减少交易损失的效益为:

$$B_{\text{商业}} = \frac{1\ 100}{2} \times \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{50} \right) = 38.6 \text{ 万元/a}$$

(2)提升防洪效益

海绵城市改建后,小寨区域增加的调蓄容积约为90万m³.根据效益计算方法,提升防洪效益为: $B = 90 \text{ 万 m}^3 \times 0.67 \text{ 元}/(\text{m}^3 \text{ 年}) = 60 \text{ 万元/a}$.

(3)降低城市能耗

(a)气温降低的节电效益

根据西咸新区海绵城市2015~2017年度的夏季遥感影像资料^[30],估计海绵城市建成后,地表气温评价降低约0.8℃.但鉴于西咸新区为新建城区,新增的绿地和水域面积较多;小寨海绵建设为老城改建,人口密度大,绿地和水域面积增加比率较少,海绵改建后,降温效果较低,本研究取平均降温0.2℃作为本效益的计算值.

小寨海绵城市改建区所属的行政区为雁塔区,人口密度为0.88万人/km².但海绵改造区内包含西安市内繁华的小寨商业区以及几所高校,是人口密度较大的地区之一,建设区内的人口密度不能直接用雁塔区的数据.规划区内的人口密度参考碑林区,取3.5万人/km².规划区的面积为20.15 km²,海绵改造缓解城市热岛效应影响的人口约为70万人左右.

西安市夏季为6~9月,总计120 d,但西安市的雨季也集中在6~9月约40 d,故,有效降温天数取80 d.

根据效益计算方法,气温降低的节电效益为:

$$\begin{aligned} E_{\text{ahi}} &= 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ kW} \cdot \text{h}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot \text{人}) \times 70 \text{ 万人} \\ &\quad \times 80 \text{ d} \times 0.5 \text{ 元}/\text{kW} \cdot \text{h} = 560 \text{ 万元/a} \end{aligned}$$

(b)绿色屋顶保温隔热效益

根据规划,小寨绿色屋顶的建设总面积约为109.3 ha,土层厚度为10 cm.西安夏季总天数为120 d,其中降雨天数是约为40 d,晴天与多云天

气计为1:1,即分别是40 d;那么厚度为10 cm的绿色屋顶在非降雨期内平均每天的节能效率为0.25 kW·h/(m·d).结合效益计算方法,绿色屋顶保温隔热效益为:

$$\begin{aligned} E_{\text{hi}} &= W \times \frac{H}{10} \times S \times (d_{\text{晴}} + d_{\text{多云}}) \times P_{\text{电价}} \\ &= 0.25 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m} \cdot \text{d}) \times 109.3 \text{ hm}^2 \times 80 \text{ d/a} \times 0.5 \text{ 元}/\text{kW} \cdot \text{h} = 1\ 093 \text{ 万元/a} \end{aligned}$$

(c)降低城市能耗效益

降低城市能耗效益的效益为气温降低的节电效益和绿色屋顶保温隔热效益之和,即:

$$\begin{aligned} ECO_m &= E_{\text{ahi}} + E_{\text{hi}} \\ &= 560 \text{ 元万/a} + 1\ 093 \text{ 万元/a} \\ &= 1\ 653 \text{ 万元/a} \end{aligned}$$

(4)提升景观效益

海绵城市改造后,小寨新增的植被面积约为195 hm².根据效益计算方法,提升景观效益为 $B = 195 \text{ hm}^2 \times 0.87 \times 3\ 406 \text{ 元}/\text{hm}^2 = 58 \text{ 万元/a}$.

2.2.3 经济效益

(1)降低市政管网运营成本

根据西安市年均降雨量和小寨海绵城市建设规划,海绵城市建成后,小寨区域年均增加的径流控制量约为317万m³/a,根据上述效益计算方式,降低市政管网运营成本的效益为

$$B = 317 \text{ 万 m}^3/\text{a} \times 1 \text{ 元}/\text{m}^3 = 317 \text{ 万元/a}.$$

(2)增加区域水资源效益

(a)增加区域水资源总效益

根据规划中测算,小寨海绵城市改造后,每年增加的雨水资源利用量约为60万m³,增加的再生水利用量约为1 000万m³/a;由于没有管网漏损控制的目标和项目,故自来水增加量为0 m³.2020年黄河流域工业用水和生活用水的影子价格分别为9.86元和8.14元,取其平均值8.5元作为本研究的计算值^[27].

根据效益计算方法:

$$B = (60 + 1\ 000) \text{ 万 m}^3/\text{a} \times 8.5 \text{ 元}/\text{m}^3 = 9\ 010 \text{ 万元/a}.$$

(b)增加区域水资源的直接经济效益

西安市居民用水实行阶梯水价,第一、二、三阶梯的水价分部为3.8元/m³、4.65元/m³、7.18元/m³,非居民用水水价为5.8元/m³,特殊行业为17元/m³;中水的价格为1.2元/m³.根据效益计算方法,雨水利用的直接经济效益为60万m³/a×1.2元/m³=72万元/a;售卖中水的直接受益为1 004万m³/a×1.2元/m³=1 205万元/a.总效益为: $B = 72 \text{ 万元/a} + 1\ 205 \text{ 万元/a} = 1\ 277 \text{ 万元/a}$.

2.3 效益计算结果与分析

综上,小寨海绵城市建设效益如表 4 所示.小寨海绵城市改建总效益约为 20 067 万元/a.其中生态环境效益为 8 529 万元/a,占总效益的 42.5%;社会效益为 2 211 万元/a,占总效益的 11.0%;经济效益为 9 327 万元/a,占总效益的 46.5%.计算结果显示,小寨海绵城市建设的主要效益是生态环境效益和经济效益,而社会效益较低.生态环境效益和经济效益较高的主要原因是海绵城市建设前,小寨区域造成的点源和面源污染比较严重,由于建筑密度、人口密度以及硬化率较高造成的热岛效应比较严重,城市缺水造

成的经济损失较大,海绵城市建设有效缓解了这些问题.社会效益主要是缓解内涝和降低能耗,虽然单次内涝可能造成的损失比较大,但是造成巨大损失的内涝频率较低,相应的年均效益比较低.本研究计算的价值为年均价值,考虑海绵城市的运营期约为 30 年,将每年产生的价值折算到当前点.取折现率 7% 计算,则总计的效益为 26.6 亿元.而小寨海绵改造投资约为 11 亿元,海绵城市改造效益高于投资成本,约为投资的 2.4 倍.总投资约为 20 亿元,效益约为投资的 1.3 倍.因此,小寨海绵城市改造的效益是可观的,海绵城市改造的成本远低于可能产生的效益.

表 4 小寨海绵城市改建效益
Tab. 4 Benefits of Xiaozhai Sponge City Construction

分类	效益	效益计算指标	万元/a	备注
生态环境效益	提升地表水环境	缓解点源污染	2 710	
		缓解面源污染	831	
	补充地下水	补充地下水	300	
	缓解城市热岛	缓解城市热岛效应	4 564	
	提供生境	提供生境	124	
社会效益	缓解城市内涝	减少交通损失	20	
		降低居民室内损失	382	
		减少商场贸易损失	39	
	城市防洪	减少下游城市防洪成本	60	气温降低的节电效益包含在缓解热岛效应效益中,不计入总效益.
	降低城市能耗	气温降低的节电效益	560	
		绿色屋顶保温隔热效益	1 653	
经济效益	提升城市景观	提升城市景观	58	
	降低市政管网运营负荷	降低市政管网运营负荷	317	
	增加区域水资源	增加区域水资源	9 010	水资源直接效益包含在增加区域水资源效益中,不计入总效益.
		雨水、中水回用直接效益	1 277	
合计			20 067	

以沈阳^[11]等人的研究方法作为对比,海绵城市建设效果显现后,房产升值 385 元/m²,涨幅为 5.48%.小寨海绵改建区 2020 年居住用地面积为 832.22 hm²,本研究中容积率取值为 2.以房产升值 385 元/m²计,小寨海绵城市改建后的房产价值提升约为 64 亿元;以涨幅计,雁塔区 2020 年 3 月至 2021 年 2 月的均价约为 1.64 万元,计算的房产价值提升约为 149 亿元.本研究的生态环境效益和社会效益为 1 0740 万元/a,折现后为 15.3 亿元,远低于使用沈阳等学者研究方法计算的结果,原因可能是:

(1)本研究使用的方法主要计算的效益是减少的损失或减少的成本,效益计算结果偏低,而提升的房产价值为居民的支付意愿,一般情况下支

付意愿计算的结果会偏高;

(2)本研究区域为老城区改造,改造区建筑密度较高,以房产价值计算的结果会偏高;

(3)老城改造的难度较大,改造的效果可能低于上述研究的案例;

(4)目前西安市房产价格过高,依托房价计算的效益结果偏高.

通过对比,上述方法仅能在海绵城市建设完成后,通过对房价的变化对海绵城市的效益进行估算,属于后评价,且对效益的估算结果取决于居民对海绵城市建设直观的感受和房产的价值.本研究构建的方法不仅能够估算海绵城市建设后的效益,还可以根据建设目标估算海绵城市建设的效益,在规划为海绵城市建设的整体布局和优

化提供一定的参考。

3 结论

(1)海绵城市建设的主要效益包括减轻市政管网的运营负荷,缓解城市内涝,补充地下水,增加区域水资源,减少社会能源消耗,增强城市景观,缓解城市热岛,为动植物提供栖息地,改善地表水环境质量,提高防洪能力以及因城市高生态价值用地类型增加带来的生态服务效益。

(2)西安市小寨商业区海绵城市改造年效益约为20 067万元/a,其中生态环境效益为8 529万元/a,社会效益为2 211万元/a,经济效益为9 327万元/a。以折现率为7%计算,小寨海绵城市改造的效益约为26.6亿元,海绵改造投资约为11亿元,效益约为投资的2.4倍。

(3)本文建立的货币化计算海绵城市效益的方法,可以为海绵城市效益计算提供参考。计算过程和结果可以为海绵城市建设及LID设施的科学布设提供一定的技术支撑。

参考文献 References

- [1] MAHDIYAR A, TABATABAEE S, SADEGHIFAM A N, et al. Probabilistic private cost-benefit analysis for green roof installation: A Monte Carlo simulation approach[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 20:317-327.
- [2] OSSA-MORENO J, SMITH K M, MIJIC A. Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK[J]. Sustainable Cities & Society, 2016, 28.
- [3] BARTON A B, ARGUE J R. A review of the application of water sensitive urban design (WSUD) to residential development in australia. Australian Journal of Water Resources, 2007, 11(1), 31-40.
- [4] BERARDI, UMBERTO. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits[J]. Energy and Buildings, 2016, 121:217-229.
- [5] JOKSIMOVIC D, ALAM Z. Cost efficiency of low impact development (LID) storm water management practices[J]. Procedia Engineering, 2014, 89, 734-741.
- [6] KULLER M, BACH P M, RAMIREZ-Lovering D, et al. Framing water sensitive urban design as part of the urban form: A critical review of tools for best planning practice[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 96:265-282.
- [7] PENNING-Orwell E, VIAVATTENE C, PARDOE J, et al. The benefits of flood and coastal risk management: a handbook of assessment techniques [M]. Rowsell:[s. n.]. 2010.
- [8] 俞茜,李娜,王杉,孟雨婷. 低影响开发设施的综合效益评估指标体系研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(12):94-103.
- [9] YU Qian, LI Na, WANG Shan, et al. Study on comprehensive benefit assessment systems for low impact development practices [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(12):94-103.
- [9] 贾斌凯,李怀恩,黄绵松,孙文靖,党菲,付德宇. 固原市玫瑰苑小区低影响开发措施改造对降雨径流的调控效益[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1):130-135, 141.
- [10] JIA Binkai, LI Huaen, HUANG Miansong, et al. Regulation and control benefits of rainfall-runoff by low impact development measures in a residential district of Guyuan city [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1):130-135, 141.
- [10] 杨丰璐,杨高升. 海绵城市背景下LID措施综合效益量化研究[J]. 资源与产业, 2020, 22(6):75-81.
- [11] YANG Fenglu, YANG Gaosheng. Quantitative study on comprehensive benefits of low influence development (LID) approaches in sponge cities[J]. Resources & Industries, 2020, 22(6):75-81.
- [11] 沈阳,徐苑昕,吴璟. 海绵城市建设对住房价格影响的定量分析——以四川省遂宁市为例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(6):573-581.
- [12] SHEN Yang, XU Yuanxin, WU jing. Quantitative analysis of impact of sponge city construction on housing prices with suining city in Sichuan Province as an example[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Technol), 2021, 61(6):573-581.
- [12] 李沐寒,尹海伟,唐爽. SUSTAIN支持下的LID建设成本效益研究——以南京市鼓楼区为例[J]. 风景园林, 2020, 27(11):57-63.
- [13] LI Muhan, YIN Haiwei, TANG Shuang. Research on cost-effectiveness of LID construction under support of sustain system: A case study of Gulou district, Nanjing[J]. Landscape Architecture, 2020, 27(11):57-63.
- [13] 孙会航,李俐频,田禹,等. 基于多目标优化与综合评价的海绵城市规划设计[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10):3605-3614.
- [14] SUN Huiheng, LI Lipin, TIAN Yu, et al. Sponge city planning and design based on multi-objective optimization and comprehensive evaluation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10):3605-3614.
- [14] 刘翠,冯峰,靳晓颖. 海绵城市理念下开封市雨水资源利用效益分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(3):102-106.
- [15] LIU Cui, FENG Feng, JIN Xiaoying. Analysis of the utilization benefit of rainwater resources in Kaifeng based on the concept of sponge-city[J]. Yellow River, 2021, 43(3):102-106.
- [15] 杨丹辉,李红莉. 基于损害和成本的环境污染损失核算——以山东省为例[J]. 中国工业经济, 2010(7):125-135.
- [16] YANG Danhui, LI Hongli. Environmental pollution loss accounting based on damage and cost: The case of

- Shandong province[J]. China Industrial Economics, 2010(7):125-135.
- [16] 林冰钰,杨心怡,张颖诗,等. 广州市核心区城市绿地降温效应研究[J]. 生态科学, 2021, 40(2):26-34.
LIN Bingyu, YANG Xinyi, ZHANG Yingshi, et al. Cooling effect of urban green space of Guangzhou core area[J]. Ecological Science, 2021, 40(2):26-34.
- [17] 张文娟,张峰,严昭,等. 兰州市绿地生态价值的初步分析[J]. 草业科学, 2006(11):98-102.
ZHANG Wenjuan, ZHANG Feng, YAN Zhao, et al. Preliminary analysis on the ecological value of green land in Lanzhou city[J]. Pratacultural Science, 2006(11):98-102.
- [18] 王伟,刘玥含,杜悦,等. 城市河流景观廊道生态修复技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(4):602-609.
WANG Wei, LIU Yuehan, DU Yue, et al. Study on ecological restoration technology of urban river landscape corridor[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., (Natural Science Edition), 2020, 52(4):602-609.
- [19] 谢高地,张彩霞,张雷明,等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8):1243-1254.
XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8):1243-1254.
- [20] 黄琰,董文杰,支蓉,等. 强降水持续过程对上海市内交通经济损失评估模型初探[J]. 物理学报, 2011, 60(4):810-819.
HUANG Yan, DONG Wenjie, ZHI Rong, et al. Brief research on economic impact assessment model for Shanghai urban transportation under durative extreme precipitation[J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(4):810-819.
- [21] 廖永丰,赵飞,邓岚,等. 城市内涝灾害居民室内财产损失评价模型研究[J]. 灾害学, 2017, 32(2):7-12.
LIAO Yongfeng, ZHAO Fei, DENG Lan, et al. Research on the urban residential indoor property loss assessment model for urban rainstorm waterlogging[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2):7-12.
- [22] 贾斌凯,李怀恩,黄绵松,等. 单位 LID 措施缓解城市内涝效益分析计算——以固原市为例[J]. 给水排水, 2021, 57(1):58-64.
JIA Binkai, LI Huaien, HUANG Miansong, et al. Benefit analysis and calculation of unit LID measure to alleviate urban water logging: a case study of Guyuan city[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(1):58-64.
- [23] 王新军,曹磊,王燕,等. 苏南城市中心区屋顶绿化适建性及生态价值评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(6):153-157.
WANG Xinjun, CAO Lei, WANG Yan, et al. Feasibility and ecological value assessment of roof greening in the central urban area of southern Jiangsu[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition) 2017, 41(6):153-157.
- [24] 王凤珍. 城市湖泊湿地生态服务功能价值评估[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
WANG Fengzhen. Evaluation on the ecosystem services values of urban lake wetlands—a case study of urban lake in Wuhan city[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [25] UGAI T. Evaluation of sustainable roof from various aspects and benefits of agriculture roofing in urban core [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2016, 216:850-860.
- [26] 王桂新,沈续雷. 气温变化对上海市日电力消费影响关系之考察[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2015(1):35-41.
WANG Guixin, SHEN Xulei. Impact of temperature change on daily electricity consumption in Shanghai [J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2015(1):35-41.
- [27] JIM C Y, PENG L L H. Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(1):73-85.
- [28] 王小林,余李鑫,王旭东,等. 西安市不同下垫面雨水水质分析及道路雨水利用设计[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(4):555-560.
WANG Xiaolin, YU Lixin, WANG Xudong, et al. Analysis of rain water quality from different underlying surfaces in Xi'an and the design of road drainage project[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & tech., (Natural Science Edition), 2017, 49(4):555-560.
- [29] 刘秀丽,邹瑾. 全国及九大流域分类用水影子价格的计算与预测[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(4):10-15.
LIU Xiuli, ZOU Cui. Calculating and forecasting shadow prices of all kinds of water in China and its nine major river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4):10-15.
- [30] 刘增超,李家科,蒋丹烈. 基于 URI 指数的海绵城市热岛效应评价方法构建与应用[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(04):53-58.
LIU Zengchao, LI Jiake, JIANG Danlie. Evaluation method construction and application of sponge city heat island effect based on URI index[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(4):53-58.

(编辑 吴海西 沈 波)