

# 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

贾斌凯<sup>1</sup>, 李怀恩<sup>1</sup>, 黄绵松<sup>2</sup>, 孙文靖<sup>1</sup>, 党菲<sup>1</sup>, 付德宇<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 宁夏首创海绵城市建设发展有限公司, 宁夏 固原 756000)

**摘要:** [目的] 计算住宅小区海绵改造后对降雨径流的调控效益, 旨在为海绵城市建设提供技术参考。[方法] 结合宁夏回族自治区固原市某住宅小区各低影响开发(low impact development, LID)设施的布设情况, 计算不同设计降雨量下 LID 设施对降雨径流的截蓄量与各 LID 设施截蓄容积的利用率; 再结合固原市 2004—2014 年的降雨资料, 计算出该小区年均降雨径流总截蓄量与各 LID 措施对降雨径流的截蓄量。基于计算出的小区 LID 设施对降雨径流的截蓄数据, 结合资源环境经济学原理, 计算小区降雨径流年调控效益、单方降雨径流调控效益与各 LID 措施年均降雨径流调控效益。[结果] 小区海绵改建后, 年均降雨径流调蓄量增加 11 568 m<sup>3</sup>, 产生的效益为 111 302 元/a, 单方降雨径流调控效益为 9.62 元/m<sup>3</sup>; 各 LID 设施年均效益分别为: 雨水花园 45 273 元/a, 下沉式绿地 27 103 元/a, 雨水桶 6 654 元/a, 雨水池 32 272 元/a。[结论] 住宅小区海绵改建能够有效控制小区降雨径流的外排量, 提高小区年径流总量控制率, 具有明显的经济、环境和社会效益。

**关键词:** 住宅小区; 海绵改造; 降雨径流调蓄; 效益计算; LID 效益

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2020)01-0130-06

**中图分类号:** X196

**文献参数:** 贾斌凯, 李怀恩, 黄绵松, 等. 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.019; Jia Binkai, Li Huaien, 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.

## Regulation and Control Benefits of Rainfall-Runoff by Low Impact Development Measures in a Residential District of Guyuan City

Jia Binkai<sup>1</sup>, Li Huaien<sup>1</sup>, Huang Miansong<sup>2</sup>, Sun Wenjing<sup>1</sup>, Dang Fei<sup>1</sup>, Fu Deyu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Ningxia Capital Sponge City Construction & Development CO., Ltd, Guyuan, Ningxia 756000, China)

**Abstract:** [Objective] The regulation and control benefits of rainfall-runoff after sponge reconstruction in residential districts were calculated to provide a technical reference for sponge city construction. [Methods] The interception capacity of rainfall-runoff and the utilization rate of low impact development (LID) facilities was calculated under different rainfall intensities, based on LID facilities in a residential district of Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region. The total annual rainfall-runoff interception capacity and the rainfall-runoff interception capacity of each LID were measured using the rainfall data of Guyuan City from 2004 to 2014. The annual rainfall-runoff control benefit of each LID was determined using the calculated rainfall-runoff interception and storage capacity data of LID facilities, the resource and environment economics, the annual regulation benefit, and the unilateral rainfall-runoff control benefit. [Results] After sponge reconstruction, the average annual rainfall-runoff storage increased by 11 568 m<sup>3</sup>, the benefit was 111 302 yuan per year, and the benefit of unilateral rainfall-runoff control was 9.62 yuan/m<sup>3</sup>. The average annual benefits for each LID

收稿日期: 2019-06-20

修回日期: 2019-09-14

资助项目: 固原海绵城市建设及运营关键技术研究项目“固原市海绵城市建设效益分析计算”(SCHM-2018)

第一作者: 贾斌凯(1992—), 男(汉族), 山西省运城人, 博士生, 主要研究方向为环境经济学。Email: 429259672@qq.com。

通讯作者: 李怀恩(1960—), 男(汉族), 陕西省商南人, 博士, 教授, 主要从事城市面源污染治理、水文水资源研究。Email: lhuaien@mail.edu.cn。

facility were 45 273 yuan per year for a rain water garden, 27 103 yuan per year for a sunken green space, 6 654 yuan per year for a rain water bucket, and 32 272 yuan per year for a rain pool. [Conclusion] Sponge reconstruction in residential areas can effectively control the external displacement of rainfall-runoff and improve the total annual runoff control rate, which has economic, environmental, and social benefits.

**Keywords:** residence community; sponge transformation; rainfall-runoff regulation and storage; benefit calculation; low impact development (LID) benefit

随着中国城市化进程加快,城市缺水、城市内涝、热岛效应、城市黑臭水体等城市问题凸显,为缓解这些城市问题,中国在 2015,2016 年先后批准了 30 个海绵城市建设试点,在全国各地开展海绵城市发展之路,海绵城市效益的货币化研究是目前海绵城市需要研究的问题之一。住宅小区海绵改造是完成城市海绵建设任务和解决城市水环境问题的关键,住宅小区是各种低影响开发(low impact development, LID)措施组合应用的最小整体单元之一;以住宅小区为研究对象,对雨水径流调控效益进行货币化计算,可以明确住宅小区海绵改造的效益,也可以为市政道路、绿地与广场等海绵改造单元雨水径流调控效益的货币化研究提供参考,为整个海绵城市改造效益的货币化研究提供技术支撑。

《海绵城市建设技术指南(试行)》中提供了 17 种主要的低影响开发措施,包括透水铺装、绿色屋顶、下沉式绿地、生物滞留设施、渗透塘、渗井、湿塘、雨水湿地、蓄水池、雨水罐、调节塘、植草沟、渗管/渠、植被缓冲带、初期雨水弃流设施、人工土壤渗滤等,不同气候和下垫面条件使得不同区域 LID 措施的组合具有一定差异,气候条件、下垫面条件和 LID 措施组合的差异使得同一设施在不同情况下产生的效益也不一样,所以,LID 效益货币化研究是一个复杂的问题。国内外学者从不同的角度研究分析 LID 措施的效益,马恒升等<sup>[1]</sup>以项目生命周期理论为指导,从经济、环境、社会 3 个方面对国内外城市 LID 建设、运营的雨洪管理效益进行了分析;张书涵等<sup>[2]</sup>从经济、环境和社会方面讨论了城市雨水利用的效益,认为城市雨水利用的社会效益远大于直接经济效益;左建兵等<sup>[3]</sup>根据城市水文学原理和经济学原理建立了城市雨水利用成本效益分析模型,并对北京市 267 项雨水利用工程的成本和效益进行了分析;刘俊杰等<sup>[4]</sup>计算了某市政道路下沉式绿地年径流控制率,从年径流总量控制率和年径流污染控制率两个方面与成本进行了简单对比;唐树英<sup>[5]</sup>提出市政道路径流总量控制、污水再生利用等 6 种具体效益指标及计算标准,结合全生命周期成本的理念,构建出环境综合效益与经济综合效益模型;李晨等<sup>[6]</sup>从增设 LID 措施前后外排量、节水量、回补地下水量、消除污染而减少的社会损失、节电量

和固碳释氧量的变化,分析计算了北京市某海绵小区的生态效益;曹秀丽等<sup>[7]</sup>从经济、环境和社会 3 个方面,选取了减少土地成本、减少中水费用、减少污染物去除费、径流削减、降低洪泛成本和减少区域碳排放 6 个指标,分析计算了某物流中心 LID 措施的成本效益;Juan 等<sup>[8]</sup>结合洪水和海岸侵蚀风险管理评估指南,分析计算了伦敦市 SuDS 系统缓解城市内涝的效益;Zhan 等<sup>[9]</sup>从减少污水处理费、减少能耗、减少空气污染、吸收 CO<sub>2</sub> 以及支付意愿 5 个指标货币化了香港某社区 LID 措施的效益,并做了成本—效益对比分析。

本文重点探讨住宅小区 LID 改造后雨水调控效益的量化与货币化方法。以宁夏回族自治区固原市某住宅小区为研究对象,结合小区各 LID 设施的布设情况,计算不同设计降雨量下 LID 设施对降雨径流的截蓄量与各 LID 设施截蓄容积的利用率;再结合固原市 2004—2014 年的降雨资料,量化该小区年均降雨径流总截蓄量与各 LID 措施对降雨径流的截蓄量。基于量化的小区 LID 设施对降雨径流的截蓄数据,结合资源环境经济学原理,计算小区降雨径流年调控效益、单方降雨径流调控效益与各 LID 措施年均降雨径流调控效益。以期计算方法与结果可以为固原市以及西北地区住宅小区海绵化改造效益的货币化提供参考,为海绵城市 LID 设施的科学布设提供技术支撑。

## 1 研究背景

### 1.1 海绵改造前小区概况

玫瑰苑小区属于居民住宅小区,位于宁夏回族自治区固原市原州区,是固原市海绵城市建设试点示范小区之一。小区总面积为 43 800 m<sup>2</sup>,其中屋面面积 8 883 m<sup>2</sup>,占小区面积的 20.3%;绿地面积 24 734 m<sup>2</sup>,占小区面积的 56.5%;硬化道路面积 10 183 m<sup>2</sup>,占小区面积的 23.2%。小区海绵改造前,除了部分屋面雨水径流被居民收集利用外,大部雨水径流经过市政排水管网进入清水河中。由于居民使用的雨水收集设施容积有限,单场降雨单个雨落管下雨水收集量约 0.2~0.5 m<sup>3</sup>,所以小区雨水利用率仅为 1%左右。小区海绵改造前没有任何 LID 措施,根据小区下垫

面类型与雨量径流系数,计算出小区海绵改造前径流控制率约为 60%。

## 1.2 海绵改造后小区 LID 配置

小区海绵改造的目标是将年径流总量控制率提升至 90%,对应的设计降雨量为 22.6 mm。小区海绵改造运用的雨水设施主要有雨水桶、植草沟、雨水花园、下沉式绿地和蓄水模块(雨水池)。小区雨水设施处理雨水径流的工艺流程见图 1。雨水桶主要分布于各建筑物雨落管下,用以收集屋面雨水,雨水桶数量为 17 个,单个雨水桶容积为 1 m<sup>3</sup>;雨水花园和

下沉式绿地则是在原有绿地的基础上改建的,用以收集和處理路面、草地以及雨水桶溢流的径流雨水,面积分别为 574 m<sup>2</sup> 和 514 m<sup>2</sup>,占小区总面积的 2.53% 和 2.52%,蓄水深度分别为 0.3 m 和 0.2 m,考虑该小区为 I 级非自重湿陷性黄土地区,设施均设有土工布防渗;植草沟主要设置在雨水花园、下沉式绿地前端,用以引导和净化径流雨水;蓄水模块修建在地下,位于整个雨水径流处理系统的末端,容积为 168 m<sup>3</sup>,用以收集小区溢流雨水及雨水花园和下沉式绿地处理后的雨水。

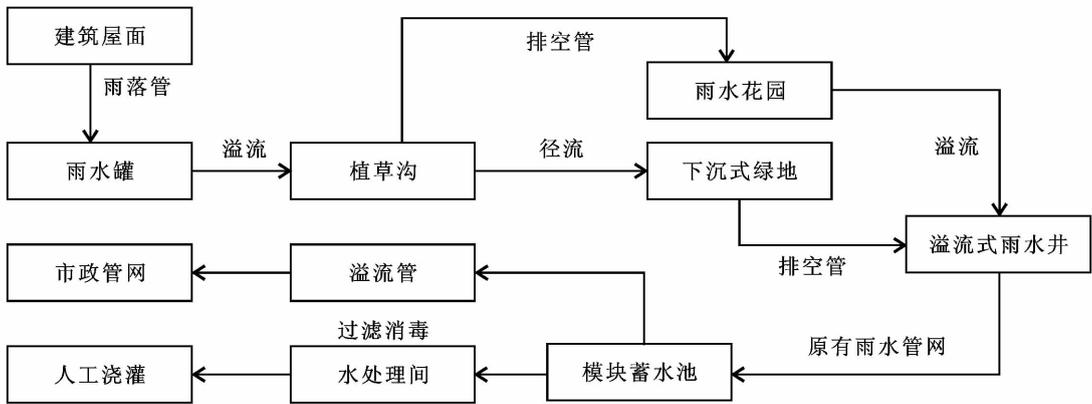


图 1 海绵小区雨水设施流程示意图

## 2 数据与计算

### 2.1 小区各 LID 设施降雨径流调控定量分析计算

#### 2.1.1 小区海绵改造后降雨径流调蓄情况

(1) 降雨期间各 LID 设施降雨径流截蓄量分析。在单场降雨期间,各 LID 设施由于其属性和位置不同,其发挥的作用不同。如图 2 所示,在理想条件下,随着设计降雨量增大,有 2 个关键小节点与 1 个关键大节点,分别为 5,14,22.5 mm。

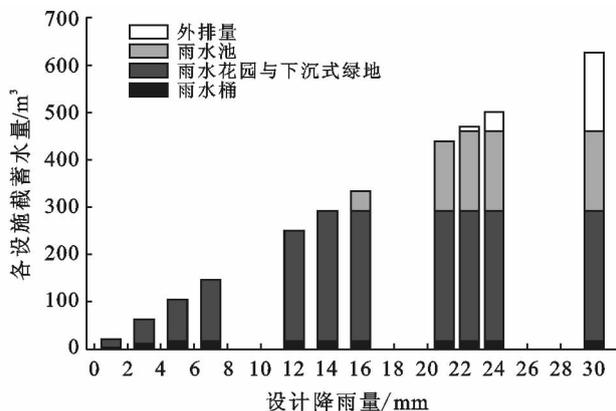


图 2 不同设计降雨量下各 LID 设施径流截蓄情况

在设计降雨量小于 5 mm 时,随设计降雨量增大的径流雨水均被雨水桶、雨水花园和下沉式绿地截蓄;在设计降雨量在 5~14 mm 之间时,雨水桶蓄满径流,随设计降雨量增大的径流雨水均被雨水花园和下沉式绿地截蓄;在设计降雨量在 14~22.5 mm 时,雨水桶、雨水花园和下沉式绿地截蓄空间均蓄满,雨水池开始截蓄雨水径流,随设计降雨量增大的径流雨水均被雨水池截蓄;当设计降雨量大于 22.5 mm 时,小区各 LID 设施蓄滞容积均蓄满雨水,小区开始产生外排水径流。

(2) 降雨结束后小区降雨径流实际截蓄量分析。降雨结束后,由于小区内雨水花园和下沉式绿地均为防渗型设施,2 种设施处理的雨水流入雨水模块。如图 3 所示,降雨结束后小区是否有出流的关键节点为 9 mm,设计降雨量小于 9 mm 时,小区降雨径流全部被截留;设计降雨量大于 9 mm 时,雨水花园和下沉式绿地处理的雨水量大于雨水模块的容积,多余雨水排出小区外;结合图 2 可知,在设计降雨量大于 14 mm 时,在降雨期间蓄水模块便已蓄滞了小区部分未被处理的雨水,降雨结束后,经过雨水花园和下沉式绿地处理的雨水进入蓄水模块与未被处理的雨水混合,雨水模块蓄满后,多余的雨水排出小区外。

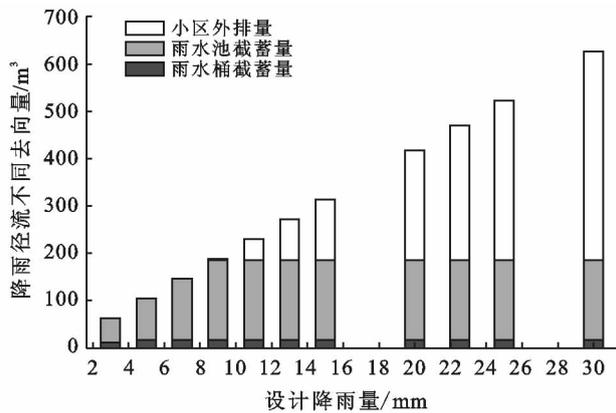


图 3 不同设计降雨量下小区实际截留雨量

### 2.1.2 小区各 LID 设施降雨径流年调控量 固原

表 1 原州区年均降雨量与降雨场次

降雨量/mm	2~5	5~10	10~15	15~20	20~22.5	>22.5
降雨场次	16	12	6	3	1	4

表 2 各 LID 设施年均截蓄径流量与单位 LID 设施年均截蓄量

设施	年均蓄水总量/m³	单位设施蓄滞水量
雨水桶	646	38.0 m³/(个·a⁻¹)
雨水花园	6 201	10.8 m³/(m²·a⁻¹)
下沉式绿地	3 713	7.2 m³/(m²·a⁻¹)
雨水池(滞)	1 008	6.0 m³/(m³·a⁻¹)
雨水池(蓄)	4 704	28.0 m³/(m³·a⁻¹)
总滞蓄量	11 568	—

## 2.2 效益识别

2.2.1 经济效益 固原市属于严重缺水地区,人均水资源量仅为 368 m³(按 2011 年人口计),不足全国人均的 1/6,远低于公认的维持一个地区经济发展所必须的 1 000 m³。固原市海绵改造前,原州区中水生产量较低,主要用于热电厂冷却和清水河补水。城市海绵改造前,居民日常生活用水、绿地浇灌用水等主要是自来水。海绵改造后,玫瑰苑小区雨水桶与雨水池集蓄的雨水可以补充小区居民的生活用水,如:洗车、浇灌花卉、冲洗厕所等,以及替代部分市政用水,如:小区绿地浇灌等。从经济角度来看,小区 LID 设施集蓄的雨水可以增加小区的可用水资源量以及减少水资源远程输水成本。

(1) 增加小区水资源效益 B<sub>1</sub>。小区 LID 设施集蓄的雨水水质接近中水水质,用途也与中水相似,故可用中水价格作为雨水回用的价值。

(2) 减少远程输水成本效益 B<sub>2</sub>。雨水资源化利用增加了区域可利用水资源量,降低远程输水压力,

市多年平均降雨量为 466 mm,降雨年内分配不均,降雨主要发生在 7—9 月份。根据固原市雨量站 2004—2014 年观测的降雨数据,原州区年均降雨 42 次,各降雨量与场次见表 1。

根据不同设计降雨量下各 LID 设施径流截蓄情况和原州区年均降雨量与降雨场次数据,玫瑰苑各 LID 设施年均截蓄径流量与单位 LID 设施年均截蓄量见表 2。其中,雨水池滞留的雨水是指在降雨期间,雨水池能够减少的径流量;雨水池蓄留雨水,是由于雨水花园与下沉式绿地均不可下渗,在降雨过后,截蓄的雨水经过雨水花园与下沉式绿地净化后进入雨水池,供社区居民使用,小区海绵改建后年雨水利用量约增加至 5 350 m³,利用率由 1%提升至 26%。

减少了远程输水的成本。固原市原州区自来水主要引自六盘山区,根据六盘山水库和引水管网建设成本、运营期限及年引水量,计算得原州区远程引水成本约 1.9 元/m³。

2.2.2 生态环境效益 从生态环境角度来看,对小区雨水径流进行截蓄能够减少区域径流外排量,有利于海绵城市达到年径流总量控制率目标;同时,小区 LID 措施对雨水径流的净化和区域外排径流的减少,能够缓解面源污染;小区对径流量与面源污染物的截蓄能够减少城市雨水径流对区域水生态环境的影响,具有提升水环境的效益。

(1) 年径流总量控制效益 B<sub>3</sub>。大部分雨水径流会通过市政排水管网进入接纳水体,市政管网的建设运营成本决定了雨水径流运移具有一定的成本。某区域内市政排水管网每年的折旧费和运营维护费分摊到年均运移的雨/污水总量上,即为单方雨/污水的运移成本。根据谭雪等<sup>[10]</sup>的研究,西部地区管网建设的平均成本为 1.64 元/m³,以此作为小区年径流总量控制的单位效益。

(2) 缓解城市面源污染效益 B<sub>4</sub>。一般情况下,由于城市污水处理厂处理负荷有限,不会接纳雨水径流,大部分城市雨水径流会通过市政排水管网直接进入接纳水体,使接纳水体遭受面源污染的影响。控制城市面源污染的效果与在末端建立污水处理厂处理城市雨水径流的效果一致,所以,源头控制污染物的效益可以用污水末端处理的成本替代。根据谭雪等<sup>[11]</sup>的研究,污水处理厂的综合处理成本为 1.49

元,以此作为小区径流控制缓解城市面源污染的单位效益。

(3) 提升水环境效益  $B_5$ 。水环境恶化会造成区域经济损失,提升水环境质量能够减少因区域水环境恶化带来的经济损失。一般污染造成的损失是污染治理成本的 1.5~3 倍,固原地区经济发展水平降低,水环境质量对经济发展的影响较低,取 1.5 倍,污水处理成本 1.49 元/ $m^3$ ,即源头减少单方径流提升的水环境效益为 2.25 元。

2.2.3 社会效益 缓解内涝效益  $B_6$ 。城市不透水面增加和排水管网排水能力不足造成城市部分地区内涝频发,海绵城市小区源头径流截蓄能够减少进入排水管网的雨水径流,缓解易涝区域内涝程度,减少内涝带来的损失。

2.2.4 玫瑰苑小区的内部效益与外溢效益 上述的效益分类是站在整个城市角度进行分析的,站在玫瑰苑小区的角度分析,上述 6 种效益可以分为发生在玫瑰苑小区内的内部效益和发生在玫瑰苑小区以外的外溢效益。

(1) 内部效益主要是增加小区水资源效益( $B_1$ )。

(2) 外溢效益有:减少城市远程输水成本( $B_2$ )、减少排水管网运营成本( $B_3$ )、缓解城市面源污染( $B_4$ )、提升水环境( $B_5$ )、缓解城市内涝( $B_6$ )。

## 2.3 效益计算

### 2.3.1 经济效益

(1) 增加小区水资源效益。固原市中水回用价格为 1.2 元/ $m^3$ ,根据表 2 的计算结果,小区雨水桶与雨水池年均蓄水总量分别为 646  $m^3$  和 4 704  $m^3$ ,故增加小区水资源的效益为: $B_1 = (646 + 4\ 704)m^3/a \times 1.2 \text{ 元}/m^3 = 6\ 420 \text{ 元}/a$ 。小区海绵改造前绿地浇灌用水主要是自来水,所以,除非必要,极少进行绿地浇灌。海绵改造 4—9 月份间月均绿地浇灌 2 次,按 1.5 L/ $m^2$  浇灌量,年均浇灌用水 222  $m^3$ ,固原市自来水价格为 2.9 元/ $m^3$ ,则海绵改造后每年节省绿地浇灌费为 644 元。综上,增加水资源效益为 7 064 元/a。

(2) 减少远程输水成本效益。固原市原州区单方水资源远程运移成本约为 1.9 元,根据表 2 的计算结果,小区雨水桶与雨水池年均蓄水总量分别为 646  $m^3$  和 4 704  $m^3$ 。故小区 LID 设施集蓄雨水减少水资源远程输水成本的效益为: $B_2 = (646 + 4\ 704)m^3/a \times 1.9 \text{ 元}/m^3 = 10\ 165 \text{ 元}/a$ 。

### 2.3.2 生态环境效益

(1) 年径流总量控制效益。根据表 2 的计算结果,小区对降雨径流的截蓄量年均增加 11 568  $m^3$ ,而单方雨水的运移成本为 1.64 元。则小区年径流总量

控制效益为: $B_3 = 11\ 568 \text{ m}^3/a \times 1.64 \text{ 元}/m^3 = 18\ 972 \text{ 元}/a$ 。

(2) 缓解城市面源污染效益。根据表 2 的计算结果,小区对降雨径流的截蓄量年均增加 11 568  $m^3$ ,而单方雨水减少的面源污染效益为 1.49 元,则小区缓解城市面源污染的效益为: $B_4 = 11\ 568 \text{ m}^3/\text{年} \times 1.49 \text{ 元}/m^3 = 17\ 236 \text{ 元}/a$ 。

(3) 提升水环境效益。根据表 2 的计算结果,小区对降雨径流的截蓄量年均增加 11 568  $m^3$ ,而源头减少单方降雨径流提升的水环境效益为 2.25 元。则小区提升水环境效益为  $B_5 = 11\ 568 \text{ m}^3/a \times 2.25 \text{ 元}/m^3 = 26\ 028 \text{ 元}/a$ 。

2.3.3 社会效益 缓解内涝效益。根据固原市内涝点数据与年均降雨量与降雨场次数据,计算得各 LID 措施缓解内涝的年效益见表 3。结合玫瑰苑各 LID 设施的数量和面积,计算得玫瑰苑缓解内涝的年效益  $B_6$  为 31 837 元/a。

表 3 玫瑰苑 LID 措施缓解内涝的年效益

项目	效益/(元·a <sup>-1</sup> )	数量	年效益/元
雨水花园/ $m^2$	20.75	574	11 911
下沉式绿地/ $m^2$	13.84	515	7 128
雨水桶(1 $m^3$ /个)	69.18	17	1 176
雨水池/ $m^3$	69.18	168	11 622
合计	—	—	31 837

## 3 结果与分析

海绵改建后,玫瑰苑小区径雨水流调控年效益计算结果见表 4。总效益约为 110 658 元/a,其中雨水花园、下沉式绿地、雨水桶和雨水池的效益分别为 45 273, 27 103, 6 654, 32 272 元/a。内部效益为 7 064 元/a,占总效益的 5.8%;外部效益为 104 238 元/a,占总效益的 94.2%。小区海绵改造后年均滞蓄径流量增加 11 568  $m^3$ ,平均单方雨水径流源头滞蓄效益为 9.62 元。李晨等<sup>[6]</sup>计算北方某城市雨水径流调控效益约为 19.06 元/ $m^3$ ,其计算的结果约为固原市的 2 倍,与本文计算结果具有差异的原因是其选择的效益计算项目较多,包括了节电、补充地下水、固碳释氧等效益,且两地气候、经济与生态环境等方面差异,也导致计算的结果略有差异;从海绵城市单位面积年效益方面看,其计算的小区单位面积效益为  $2.60 \times 10^4 \text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,而本文计算的玫瑰苑小区的效益约为  $2.50 \times 10^4 \text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,两者相差较小;故计算的玫瑰苑小区单方雨水径流的滞蓄效益为 9.62 元较为合理。

表 4 玫瑰苑 LID 措施年效益与单方雨水径流控制效益

元/a

分类	项目	序号	雨水花园	下沉式绿地	雨水桶	雨水池	不同效益合计
经济效益	水资源效益	B <sub>1</sub>	—	—	775	6 289	7 064
	减少远程输水成本效益	B <sub>2</sub>	—	—	1 227	8 938	10 165
生态环境效益	年径流总量控制效益	B <sub>3</sub>	10 170	6 089	1 059	1 653	18 971
	缓解城市面源污染效益	B <sub>4</sub>	9 240	5 532	963	1 502	17 237
	提升水环境效益	B <sub>5</sub>	13 952	8 354	1 454	2 268	26 028
社会效益	缓解内涝效益	B <sub>6</sub>	11 911	7 128	1 176	11 622	31 837
总效益	—	—	45 273	27 103	6 654	32 272	111 302
单方雨水径流源头截蓄效益	—	—	—	—	—	—	9.62
内部效益	—	—	—	—	775	6 289	7 064
外溢效益	—	—	45 273	27 103	5 879	25 983	104 238

玫瑰苑小区各单位 LID 设施年效益见表 5。雨水花园为 78.9 元/(m<sup>2</sup>·a),下沉式绿地为 52.5 元/(m<sup>2</sup>·a),雨水桶为 391.4 元/(个·a),雨水池为 192.1 元/(m<sup>3</sup>·a)。根据固原市 LID 措施建造成本,4 项措施的成本分别为 80 元/m<sup>2</sup>,40 元/m<sup>2</sup>,2 000 元/个和 2 200 元/m<sup>3</sup>,在不考虑各设施运营维护成本的前提下,雨水花园和下沉式绿地运行 1 a 后即可回本,雨水桶和雨水池则分别需运营 4 a 和 12 a 方可回本。即便考虑雨水花园与下沉式绿地的维护与翻修

成本,其产生的总效益也远大于建设维护成本;雨水桶为塑料制品,假设其露天放置使用寿命平均为 15 a,假设其维护成本为建设成本的 0.5~1 倍,雨水桶运营 6~8 a 产生的效益即可抵消其成本,剩余的 7~9 a 产生的效益即为雨水桶的纯收益;建设在地下的雨水池若运营维护得当,一般不需要重建,假设运营周期内运营维护费用为建设成本的 0.5~1 倍,雨水池在 18~24 a 产生的效益即可抵消其成本,剩余的 6~12 a 内产生的效益即为纯收益。

表 5 玫瑰苑小区各单位 LID 措施年效益

项目	序号	雨水花园	下沉式绿地	雨水桶	雨水池
		元/(m <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	元/(m <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	元/(个·a <sup>-1</sup> )	元/(m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup> )
水资源效益	B <sub>1</sub>	—	—	45.6	37.4
减少远程输水成本效益	B <sub>2</sub>	—	—	72.2	53.2
年径流总量控制效益	B <sub>3</sub>	17.7	11.8	62.3	9.8
缓解城市面源污染效益	B <sub>4</sub>	16.1	10.7	56.6	8.9
提升水环境效益	B <sub>5</sub>	24.3	16.2	85.5	13.5
缓解内涝效益	B <sub>6</sub>	20.8	13.8	69.2	69.2
合计	—	78.9	52.5	391.4	192.1

## 4 结论

(1) 住宅小区海绵改建能够有效控制小区降雨径流的外排量,提高小区年径流总量控制率,具有明显的经济、环境和社会效益。

(2) 玫瑰苑小区海绵改造后,平均每年增加的雨水径流调控量约为 11 568 m<sup>3</sup>,增加的径流调控经济效益、生态环境效益和社会效益分别为 17 229,62 236,31 837 元/a,合计为 111 302 元/a,平均雨水径流调控效益为 9.62 元/m<sup>3</sup>。

(3) 玫瑰苑小区各 LID 设施中,雨水花园、下沉式绿地、雨水桶和雨水池的效益分别为 45 273,27 103,6 654,32 272 元/a。单位面积雨水花园效益为 78.9 元/(m<sup>2</sup>·a),单位面积下沉式绿地效益为 52.5 元/(m<sup>2</sup>·a),单个雨水桶效益为 391.4 元/(个·a),单位容积雨水池的效益为 192.1 元/(m<sup>3</sup>·a)。

(4) 本文量化分析、货币化计算住宅小区海绵改

建对降雨径流调控效益的分析计算方法,可以为海绵城市住宅小区效益货币化计算提供参考。计算结果可以为固原市及西北部分地区,住宅小区海绵改建过程中,各 LID 设施的科学布设提供一定的技术支撑。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 马恒升,徐涛,赵林波,等.低影响开发(LID)雨洪管理费用效益分析[J].价值工程,2013,32(12):287-289.
- [2] 张书函,陈建刚,丁跃元.城市雨水利用的基本形式与效益分析方法[J].水利学报,2007,38(S1):399-403.
- [3] 左建兵,刘昌明,郑红星.北京市城市雨水利用的成本效益分析[J].资源科学,2009,31(8):1295-1302.
- [4] 刘俊杰,王建军,马小杰.云锦路下沉式绿地海绵城市效益分析[J].中国市政工程,2016(2):33-35,39,114.
- [5] 唐树英.海绵城市市政道路低影响开发综合效益分析[J].建筑节能,2017,45(10):88-91.
- [6] 李晨,王桂锋,张传杰,等.北方城市海绵社区生态效益分析[J].水土保持通报,2017,37(3):119-124.

(下转第 141 页)

## 5 结论

(1) 通过对西安市供水工程和用水户进行分析,绘制水资源系统网络概化图,在确定调配目标的基础上,构建了多水源联合调配模拟模型,并拟定了模拟调配规则。

(2) 通过典型年和长序列年法求解模拟模型,确定了来水频率分别为 50%,75%,95%时,西安市引汉济渭与黑河引水工程多水源联合调配方案。计算结果表明,引汉济渭调水量在保证城市工业用水方面发挥着主要作用,同时工程实施后,黑河引水工程各水库供水优先顺序发生了变化,满足河道生态基流前提下,先向水库灌区供水,再向城市供水,各水库农业灌溉保证率均显著提高。在特枯水年,黑河引水工程可供水量减少,引汉济渭向城市生活供水量达到西安市生活需水总量的 36.28%,对保障生活供水安全发挥了极大的作用。

(3) 西安市属于资源性缺水城市,水资源供需矛盾日益突出。引汉济渭调水工程建成通水后,为西安市供水安全提供可靠保障,还可以归还河道被挤占的生态用水量。该工程能够缓解西安市水资源供需矛盾,实现以水资源的可持续利用支撑经济社会可持续发展的迫切需求。

### [参 考 文 献]

- [1] 张静,黄国和,刘焯,等. 不确定条件下的多水源联合供水调度模型[J]. 水利学报,2009,40(2):160-165.
- [2] 刘建林,马斌,解建仓,等. 跨流域多水源多目标多工程联合调水仿真模型:南水北调东线工程[J]. 水土保持学报,2003,17(1):75-79.
- [3] 畅建霞,姜瑾. 引汉济渭调水工程水资源配置研究[J]. 自然资源学报,2011,26(1):110-118.
- [4] 刘玘玘,汪妮,解建仓,等. 西安市多水源联合调度模型及应用[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):37-41.
- [5] Ostfeld A, Kogan D, Shamir U. Reliability simulation of water distribution systems-single and multiquality[J]. Urban Water, 2002,4(1):53-61.
- [6] Zhang H, Li H, Tam C M. Permutation-based particle

swarm optimization for resource-constrained project scheduling[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2006,20(2):141-149.

- [7] 高申. 郑州市城区跨流域调水工程与调蓄水库联合调配研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.
- [8] Rothman D W, Mays L W. Water resources sustainability: Development of a multi-objective optimization model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014,140(12):04014039.
- [9] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. Science Advances, 2016,2(2):e1500323. DOI:10.1126/sciadv.1500323.
- [10] 于冰,梁国华,何斌,等. 城市供水系统多水源联合调度模型及应用[J]. 水科学进展,2015,26(6):874-884.
- [11] Mo Shuhong, Duan Haini, Shen Bing, et al. Interval two-stage stochastic integer programming for urban water resource management under uncertainty [J]. Journal of Coastal Research, 2015,73:160-165.
- [12] Hämäläinen R, Kettunen E, Ehtamo H. Evaluating a framework for multi-stakeholder decision support in water resources management [J]. Group Decision and Negotiation, 2001,10(4):331-353.
- [13] 齐子超. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [14] 张永永,黄文政,黄强,等. 陕西省南水北调工程受水区水资源供水情势综合评价[J]. 资源科学,2010,32(8):1499-1504.
- [15] 刘玘玘,尚宇梅,张宇,等. 引汉济渭来水条件下西安市多水源联合调度[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(1):25-30.
- [16] Rajasekaram V, Nandalal K D. Decision support system for reservoir water management conflict resolution [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005,131(6):410-419.
- [17] 章燕喃,田富强,胡宏昌,等. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]. 水利学报,2014,45(7):844-849.
- [18] Willuweit L, O'Sullivan J J. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: Presenting the dynamic urban water simulation model [J]. Water Research, 2013,47(20):7206-7220.

(上接第 135 页)

- [7] 曹秀丽,周叶奎. 台州卷烟物流配送中心 LID 措施的成本效益分析[J]. 价值工程,2017,36(11):75-77.
- [8] Ossa-Moreno J, Smith K M, Mijic A. Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK[J]. Sustainable Cities and Society, 2017,28:411-419.
- [9] Zhan Wenting, Chui T F M. Evaluating the life cycle net benefit of low impact development in a city [J].

Urban Forestry & Urban Greening, 2016,20:295-304.

- [10] 谭雪,石磊,陈卓琨,等. 基于全国 227 个样本的城镇污水处理治理全成本分析[J]. 给水排水,2015,51(5):30-34.
- [11] 谭雪,石磊,马中,等. 基于污水处理厂运营成本的污水处理费制度分析:基于全国 227 个污水处理厂样本估算[J]. 中国环境科学,2015,35(12):3833-3840.