城市海绵小区雨水利用的效益分析
——以固原市海绵小区建设为例

孙文靖[1]，李怀恩[1]，刘祺超[2]，贾斌凯[1]，张泽文[2]，党 菲[1]

(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] 对城市海绵小区雨水利用措施的经济、环境及社会效益进行识别计算并与其成本进行对比分析，为海绵小区建设评估提供参考。[方法] 以第二批试点宁夏回族自治区固原市西南新区 6 个海绵小区为研究对象，采用水量平衡法、替代工程法、影子工程法、市场价值法、碳税法、造林成本法等，对海绵小区产生的雨水资源利用、固碳释氧、降噪、调蓄径流、文化教育等 3 大类共 10 项效益进行定量计算并采用效益费用比进行静态和动态成本效益分析。[结果] 固原市西南新区 6 个海绵小区的总效益为 2.91×10^5 元/a，其中雨水花园的效益为 1.03×10^5 元/a，下沉式绿地的效益为 7.99×10^4 元/a，植草沟的效益为 6.15×10^4 元/a，经济、环境和社会效益比例分别为 22.84%，76.89%和 0.27%。[结论] 海绵小区雨水利用有较好的投资效益，固原市海绵小区的建设产生了良好的经济、环境和社会效益，值得进一步研究推广。

关键词：海绵城市；效益计算；海绵小区；低影响开发(LID)效益

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)01-0170-06 **中图分类号**：X196

文献参数：孙文靖，李怀恩，刘祺超，等.城市海绵小区雨水利用的效益分析[J].水土保持通报，2020，40(1)：170-175. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.025；Sun Wenjing，Li Huaien，Liu Qichao，et al. Benefits of rainwater utilization in urban sponge community[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(1)：170-175.

Benefits of Rainwater Utilization in Urban Sponge Community
—A Case Study of Sponge Community Construction in Guyuan City

Sun Wenjing[1], Li Huaien[1], Liu Qichao[2], Jia Binkai[1], Zhang Zewen[2], Dang Fei[1]

(1. *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid 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 economic, environmental, and social benefits of rainwater utilization at urban sponge community were evaluated and the cost comparative analysis were conducted in order to establish a reference for the evaluation of the construction of a sponge community. [Methods] The second batch of six sponge communities was obtained as the research object; this was sourced from the Southwest New District of Guyuan City in Ningxia Hui Autonomous Region. The water balance method, alternative engineering method, shadow engineering method, market value method, carbon tax method and afforestation cost method were used to generate the sponge community. The rainwater resource utilization, carbon sequestration, oxygen reduction, noise reduction, storage runoff, culture and education, etc, the ten benefits in three categories were quantitatively calculated. Further, the cost-benefit ratio was used for the static and dynamic cost-benefit analysis. [Results] The total benefit of the six sponge communities in the southwest of the New District of Guyuan City was 2.91×10^5 yuan/year. Moreover, the benefits of the rain garden, sinking green land, and planting grass were 1.03×10^5, 7.99×10^4, and 6.15×10^4 yuan/year, respectively. The economic, environmental and social benefits accounted for 22.84%, 76.89%, and 0.27%, respectively. [Conclusion] Therefore, the use of rainwater in the sponge community has noteworthy investment benefits. Accordingly, the construction of

收稿日期：2019-07-15 **修回日期**：2019-09-12

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：孙文靖(1995—)，女(汉族)，河南省郑州市人，硕士，主要研究方向为海绵城市效益。Email：283028150@qq.com。

通讯作者：李怀恩(1960—)，男(汉族)，陕西省商南县人，博士，教授，主从事海绵城市、生态水文研究。Email：lhuaien@mail.edu.cn。

the sponge community in Guyuan City has produced good economic, environmental, and social benefits, which deserves further research and promotion.

Keywords: sponge city; benefit calculation; sponge community; low impact development(LID) benefit

中国城市化进程加快而产生的环境和水安全问题日益突出，一方面城市建设增加了大量不透水面积，使洪峰流量增大、汇水时间缩短，导致城市洪涝灾害、地下水位下降、生活水源污染等问题，另一方面增大了区域水资源需求，加剧了水资源紧张状态，因此高效合理开发利用城市水资源特别是雨水资源显得尤为重要。

建设海绵城市是高效合理利用城市雨水资源、缓解城市用水紧张状况的崭新模式，但由于雨水设施规模、组合方式及地理气候的差异，导致其建设的投资差异较大，对不同雨水设施的成本效益评估已经成为目前人们关注的问题。许多学者研究发现绿色屋顶、透水铺装、雨水花园和下沉式绿地等低影响开发(LID)设施具有削减洪峰流量、径流污染及径流量的效益[1-8]，部分还有缓解热岛效应、净化空气等效益[9]。在效益定量化计算方面，Abdullah 等[10]通过计算投资回收期和净现值对比花园式和简单式绿色屋顶的差异，Peng 等[11]计算了绿色屋顶与气候有关的 6 项效益，张书涵等[12]计算了 6 个雨水利用示范区的经济效益，李俊奇等[13]计算小区不同雨水利用方案的经济效益进行方案优选。不同雨水设施会发挥不同的功能作用，不仅会产生经济效益，还会产生环境效益和社会效益，这些效益指标中既有定性指标也有定量指标。目前的成本效益研究多为定性描述，缺乏定量评价，且多对工程的经济效益进行分析，对雨水利用最突出的环境及社会效益多做定性描述，效益定量化方法也有待进一步研究。

对雨水设施效益的定量及货币化计算十分有必要，具体的货币化数值能够调动投资者的积极性，推动雨水科学收集利用的深度和广度。同时能为决策者提供参考，促进鼓励政策的施行。随着雨水管理实践的推进，海绵小区作为其重要单元之一，在城市雨水管理中起着不可替代的作用，但有关小区尺度的效益定量计算分析较少。本文对海绵小区的雨水管理利用效益进行识别并对经济、环境、社会 3 大类共 10 项效益进行量化，选取试点城市宁夏固原作为实例进行效益计算分析，以期为海绵城市的建设推进提供参考。

1　城市海绵小区雨水利用

目前，中国建设用地的 40%为居住小区[14]，海绵小区建设是海绵城市建设的重要组成部分。运用海绵城市理念，统筹住宅小区规划与布局，使用绿色基础设施替代灰色基础设施或将二者结合使用，增加雨水的入渗、滞蓄、净化、利用，能够“弹性”应对环境变化和自然灾害。海绵小区常用的雨水技术措施有渗透技术、储存技术、调节技术、转输技术和截污净化技术，具体内容见表 1。

表 1　海绵小区常用雨水技术措施

类 型	用地类型建筑与小区
渗透技术	透水铺装
	绿色屋顶
	下沉式绿地
	简易型生物滞留设施
	复杂型生物滞留设施
	渗透塘
	渗 井
储存技术	湿 塘
	雨水湿地
	雨水罐
调节技术	调节塘
转输技术	转输型植草沟
	干式植草沟
	湿式植草沟
	渗管/渠
截污净化技术	植被缓冲带
	初期雨水弃流设施

早期国内外住宅小区建设多采用灰色基础设施与硬化不透水铺装，相比之下绿地建设较少，粗放的建设不能满足人们随生活水平提高的居住环境需求，因此海绵小区的改建受到大家的欢迎，加入低影响开发 LID(low impact development)设施元素的住宅小区开始推广并走入大众的生活。

国外代表性的海绵小区有美国西雅图 High Point 居住区、德国 Waldsteige West 住宅区、德国 Am Rosensee 住宅区、高贝尔综合小区、卡米耶克洛岱尔生态小区等。High Point 住宅区位于美国华盛顿州西雅图 Delridge 区内，为容纳多阶层的混合式居住区，占地面积 49 hm^2，是 LID 在住宅应用的成功案例之一。该住宅区毗邻朗费罗河流域，由于住宅区污染物排入河流会造成污染因此在 2003 年重建，其设计综合运用了多种雨洪管理设施，如调蓄水池、植草沟、雨水花园、渗透沟等，并将其与风景园林结合营造出了一个舒适、生态、优美的住宅环境，该住宅区

LID 的成功实践不仅解决了环境资源问题，同时也是景观与园林工程结合的典范。

国内代表性的海绵小区有北京市顺义区东方太阳城老年住宅区、嘉兴烟雨小区、北京市海淀区海淀塔院小区、北京市通州区紫金雅园小区等。北京市顺义区东方太阳城老年住宅区位于北京市顺义区潮白河的西岸，占地面积 234 hm^2，为自然生态、布局合理的低影响开发(LID)雨水系统建设项目。由于住宅区存在地势低、无市政雨污水管线、中心景观水体富营养化等问题，因此加入 LID 元素进行改建，雨洪管理设施包括雨水湿地、雨水花园、植草沟、多功能调蓄水体、初期雨水弃流设施等，通过生态堤岸、人工土壤渗滤和中水湿地循环净化来改善中心景观水体[15]。该项目不仅提高了小区的防洪排涝能力而且提升了入湖水质，是经受住北京 2011 年“6·23”和 2012 年“7·21”等暴雨事件考验的成功 LID 住宅区改造。

2 城市海绵小区雨水利用效益

城市海绵小区雨水利用效益可分为经济效益、环境效益和社会效益，其中经济效益主要包括：节约自来水收益、回补地下水收益、节水增加的国家财政收入、节省城市排水设施的运行费用、降低城市河湖改扩建费用、减少土方回填费用、物质生产收益、节省引水费用、减轻污染而减少的社会损失、降低内涝损失等；环境效益主要包括：减少地面沉降的经济损失、固碳制氧效益、改善城市热岛效益、净化空气效益、防洪排涝效益、调蓄雨水效益、提供生境效益、降噪效益、保持生物多样性效益、滞尘效益、保护土壤效益等；社会效益包括：增加旅游收入、拉动经济发展、景观娱乐、促进周边房地产升值、提供工作岗位等。效益计算参考水利经济及资源环境经济学等方法，可以采用水量平衡法、替代工程法、影子工程法、市场价值法、碳税法、造林成本法、效益转移法等一种或多种方法。

2.1 经济效益

2.1.1 *雨水资源利用收益* 海绵城市雨水设施能够蓄集并回用雨水，回用雨水与中水用途相似，采用市场价格法计算该收益。

$$B_{水资源}=V_{利用}\times P_{中水} \tag{1}$$

式中：$V_{利用}$ 为雨水年利用量(m^3)；$P_{中水}$ 为当地中水的价格(元/m^3)，查询固原市水务局网站得固原市中水价格为 1.2 元/m^3。

2.1.2 *节省城市排水设施的运行费用* 雨水收集利用或者入渗后，可以减少向市政管网排放的雨水量，减轻市政管网的压力，从而节省市政管网的维护费用。

$$B_{削减}=\theta\times D\times R_V\times A\times P \tag{2}$$

式中：θ 为径流系数；D 为年均降水量(mm)；R_V 为年均径流量削减率；A 为汇水面积(m^2)；P 为管网运行及水处理费用，取污水厂处理设施运行费用的三分之一，参考 2008 年西部地区污水厂处理设施运行费用 1.05 元/m^3[16]，调算至 2018 年为2.33元/m^3，因此单方水的管网运行费用为 0.78 元/m^3。小区径流总量控制率按照《固原市海绵城市建设系统化方案》取为 90%，对应降雨量为 22.6 mm。固原市居民生活用水污水处理费为 0.70 元/m^3，非居民生活用水污水处理费为 1.00 元/m^3，取二者平均值 0.85元/m^3，因此管网运行及水处理费用 P 为1.63 元/m^3。

2.1.3 *减轻污染而减少的社会损失* 雨水措施的建设减少了污染雨水排入水体，也减少了因此产生的水体污染，采用市场价值法计算。

$$B_{消除污染}=\frac{1}{\alpha}\times P_{污}\times V_{排}$$
$$V_{排}=\theta\times D\times R_V\times A \tag{3}$$

式中：$P_{污}$ 为污水处理费用，可用排污费用来替代，为1.05元/m^3[16]；α 为环境治理的投入产出比，投入 1 元可消除 3 元环境污染，因此投入产出比为1∶3；$V_{排}$ 为排水量，即减少排放的雨水量(m^3)。θ 为径流系数；D 为年均降水量(mm)；R_V 为年均径流量削减率；A 为汇水面积(m^2)。

2.2 环境效益

2.2.1 *调蓄径流效益* LID 设施对雨水能够起到调蓄作用，与水库调蓄洪水的作用相似，采用影子工程法计算。

$$B_{调蓄}=P_{库}\times V_{调} \tag{4}$$

式中：$V_{调}$ 为调蓄的雨水量(m^3)；$P_{库}$ 为每 1 m^3 库容需要的年投入成本，取 0.67 元/m^3[17]。

2.2.2 *固碳释氧效益* 植物能够通过光合作用吸收 CO_2 并释放 O_2。吸收 CO_2 效益能够通过碳税法及绿地成本法进行计算，释放 O_2 效益能够通过工业制氧法和绿地成本法进行计算。

$$B_{吸碳}=V_{碳}\times P_{碳}\times S_{绿}$$
$$B_{制氧}=V_{氧}\times P_{工}\times S_{绿} \tag{5}$$

式中：$V_{碳}$ 为林草地吸碳量〔t/(a·hm^2)〕，每 hm^2 绿地每年净吸收二氧化碳 16 t；$P_{碳}$ 为碳税率，取1 023 元/t；$S_{绿}$ 为绿地面积(hm^2)；$V_{氧}$ 为林草地释氧量〔t/(a·hm^2)〕，每 hm^2 绿地每年释放氧气取 12 t；$P_{工}$ 为工业氧批发价，取 400 元/t[18-19]。

2.2.3 *净化空气效益* 绿色植物具有净化空气的功能，能够吸收空气中的粉尘，SO_2，氟化物，氮氧化物等，采用直接市场法进行计算。

$$B_{吸收SO_2}=S_{绿}\times Q_{SO_2}\times F_{SO_2}$$
$$B_{滞尘}=S_{绿}\times Q_d\times F_{治理} \quad (6)$$

式中:Q_{SO_2} 为单位面积植被吸收二氧化硫的量,取 140.62 kg/hm²;F_{SO_2} 为二氧化硫排污权价格,取 600 元/t;Q_d 为单位面积植被滞尘降尘的量,取 10.90 t/(hm²·a);$F_{治理}$ 为消减尘土的治理成本,取 1.50 元/t[18];$S_{绿}$ 表示绿地面积(hm²)。

2.2.4　降噪效益　LID 设施的建设能够增加城市的植物量,从而增加吸附声波的表面,因此能降低噪声对城市居民的影响,参考陈龙等[19]采用影子工程法计算出绿地降噪价值 156 033 元/(hm²·a)。

2.2.5　维持生物多样性效益　由于 LID 设施建设能够为野生动物提供更多的生活栖息环境,所以可以起到保护生物多样性的功能,参考谢高地等[20]采用当量因子法计算出草地生态系统维持生物多样性价值 839.82 元/(hm²·a)。

2.3　社会效益

2.3.1　提供美学景观效益　海绵城市建设能够改善城市水循环从而改善城市生态,林草地生态环境和水系生态环境增加为野生动物提供更多的生活栖息环境,采用效益转移法计算,参考谢高地等[20]采用当量因子法计算出的草地生态系统提供美学景观价值 390.72 元/(hm²·a)。

2.3.2　文化教育价值　海绵城市 LID 设施的应用能够增强人们的节水意识,有利于国家的可持续发展战略,采用效益转移法计算,生态系统的平均文化科研价值参考中国湿地生态系统单位面积的平均文化科研价值取为 382 元/hm²[21]。

3　实例计算

3.1　研究区概况

本文选取宁夏固原市西南新区的海绵小区作为研究对象。固原市为国家财政部、住建部、水利部在全国开展的第二批全国海绵城市建设试点城市。固原市位于宁夏回族自治区南部,黄土高原中西部,市域总面积 1.05×10^4 km²,市区面积为 45 km²。属于黄土高原暖温半干旱气候区,是典型的大陆性气候,平均气温为 6.7～8.8 ℃,多年平均降水量为 466 mm,各县(区)日照时数为 2 056.9～2 384.4 h,土壤为非自重至自重湿陷性黄土,海绵设施选择本地植物种植。海绵示范区主要有 4 个建设区域:西南新区、老城区、饮马河区、清水河。

西南新区海绵城市建设是以低影响开发(LID)理念引领的城市建设,包括透水路面、下沉式绿地、植草沟、雨水罐、雨水花园等。海绵小区包括玫瑰苑、福满苑、裕丰苑、丁香苑、荷花园和祥和苑,雨水设施主要包括雨水罐、植草沟、雨水花园、下沉式绿地、蓄水池以及展示标牌系统等。

3.2　雨水调蓄工程方案

西南新区住宅小区雨水改造系统工艺流程如图 1 所示。屋面雨水由屋面排水雨落管先进入雨水罐进行存储,溢流的雨水进入植草沟后经排空管进入雨水花园,植草沟内的径流则进入下沉式绿地,后经雨水管网流入蓄水池内用于人工浇灌,溢流的雨水排入市政管网。由于小区位于非自重湿陷性黄土地区,因此雨水系统都采取防渗措施。

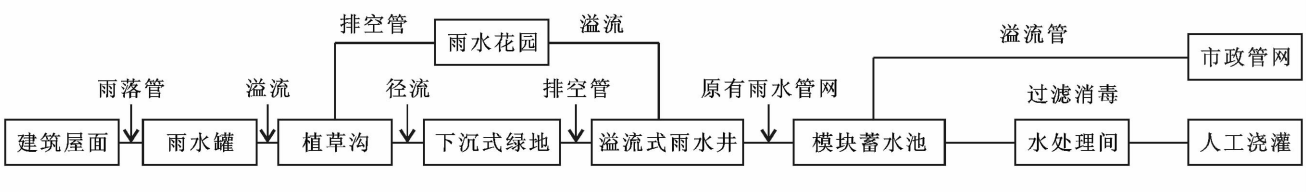


图 1　城市海绵小区改造工艺流程图

3.3　效益计算

3.3.1　雨水措施规模　本文研究海绵小区包括玫瑰苑、福满苑、裕丰苑、丁香苑、荷花园和祥和苑,其雨水设施主要为植草沟、雨水花园、下沉式绿地、雨水罐(容积均为 1 m³)和蓄水池,各小区海绵设施工程量见表 2。

表 2　城市海绵小区雨水设施量统计

设 施	玫瑰苑	福满苑	裕丰苑	丁香苑	荷花苑	祥和苑
植草沟/m²	404.37	622.00	181.10	534.30	721.93	244.90
下沉式绿地/m²	514.63	942.2	412.33	518.00	1 417.00	0
雨水花园/m²	574.45	586.00	466.68	1 075.5	1 107.75	1 202.75
雨水罐/个	17	0	0	6	0	36
蓄水池/m³	168.00	360.00	360.00	168.00	168.00	0

3.3.2 计算结果 结合固原市西南新区 6 个海绵小区的实际情况，按照前述效益计算方法并结合固原市实际参数计算出雨水花园、下沉式绿地、植草沟的效益，包括节省城市排水设施的运行费用、减轻污染而减少的社会损失、固碳释氧、净化空气、降噪、维持生物多样性、提供美学景观和文化教育，雨水罐和蓄水池的效益包括调蓄径流和雨水资源利用。

固原市西南新区 6 个海绵小区雨水设施的 3 类效益计算结果为：①经济效益中，节省城市排水设施的运行费用为 1.25×10^4 元/a；消除污染而减少的社会损失为 2.41×10^4 元/a；雨水资源利用效益为 2.99×10^4 元/a；②环境效益中，固碳释氧效益为 2.44×10^4 元/a；净化空气效益为 2 000 元/a；降噪效益为 1.80×10^5 元/a；维持生物多样性效益为 1 000 元/a；调蓄径流效益为 1.67×10^4 元/a；③社会效益中，文化教育、提供美学景观效益均为 400 元/a。

固原市西南新区 6 个海绵小区各类雨水设施的效益计算结果为：雨水花园为 1.03×10^5 元/a；下沉式绿地为 7.99×10^4 元/a；植草沟为 6.15×10^4 元/a；雨水罐为 1.75×10^4 元/a；蓄水池为 2.91×10^4 元/a。固原市西南新区 6 个海绵小区的效益及设施面积占小区总面积比例分别为：玫瑰苑 3.87×10^4 元/a，3.41%；福满苑 5.62×10^4 元/a，2.02%；裕丰苑 3.32×10^4 元/a，1.29%；丁香苑 5.29×10^4 元/a，4.76%；荷花苑 7.05×10^4 元/a，5.40%；祥和苑 3.97×10^4 元/a，3.07%（设施面积占小区总面积比＝雨水设施面积/小区总面积）。固原市 6 个海绵小区的总效益为 2.91×10^5 元/a，其中经济效益为 6.65×10^4 元/a，环境效益为 2.24×10^5 元/a，社会效益为 800 元/a，3 种效益比例为 22.84%，76.89% 和 0.27%，海绵小区的环境效益占有很大比重，可见海绵小区的建设能产生较好的环境效益。由计算结果可见，雨水设施产生的效益中：降噪＞雨水资源利用＞固碳释氧＞减轻污染而减少的社会损失＞调蓄径流＞节省城市排水设施的运行费用＞净化空气＞维持生物多样性＞提供美学景观＝文化教育，环境效益在排序中靠前，进一步说明固原市海绵小区产生较好的环境气候收益。计算得各雨水设施及小区产生的效益不同并存在较大差异，对小区效益进行排序发现其与雨水设施面积占小区总面积比排序大致相同，增加雨水设施的面积能够增加效益。

3.4 效益费用分析

参考水利建设项目经济评价，本文选择国民经济评价中的经济效益费用比来分析雨水设施的成本效益。

3.4.1 成本计算参数 对于雨水设施的成本计算，由于试点区部分小区还在建设中，因此参考《海绵城市建设技术指南(2014)》中低影响开发单项设施单价估算表，即下沉式绿地为 40～50 元/m^3，生物滞留设施为 150～800 元/m^3，植草沟为 30～200 元/m^3，考虑到准确性本文取其平均值进行计算，即下沉式绿地为 45 元/m^3，雨水花园为 475 元/m^3，植草沟为 115 元/m^3，植草沟、下沉式绿地和雨水花园的运行费用分别取为建造费用的 2.5% 和 6%[22]。

3.4.2 成本效益分析 效益费用比(benefit-cost ratio，BCR)是建设项目在计算期内效益流量的现值与费用流量现值的比率。为比较分析不同设施的成本效益，取植草沟、下沉式绿地和雨水花园生命周期的最小公倍数进行全生命周期的成本效益分析，查阅文献取为 30 a[23]，由于生命周期较长，考虑资金的时间价值进行动态效益费用分析，按折现率 7%[24] 进行计算，计算结果见表 3。

表 3 海绵小区雨水设施效益分析结果

类 型	建造费用 (10^4 元)	运行费用 (10^4 元/a)	年效益 (10^4 元/a)	寿命期内费用现值 PV/$\times10^4$ 元	寿命期内效益现值 EV/$\times10^4$ 元	动态效益费用比值	静态效益费用比值
植草沟	32.15	0.78	6.15	32.25	76.32	2.37	5.78
下沉式绿地	17.12	1.03	7.99	18.58	99.16	5.34	13.21
雨水花园	238.12	14.35	10.32	258.41	128.07	0.50	1.23

由表 3 可知，下沉式绿地的静态、动态效益费用比均最大，可获得较好的综合效益，雨水花园的比值均最小，且动态效益费用比较低，考虑雨水花园造价较高，分别约为下沉式绿地和植草沟的 10 倍和 4 倍，因此效益费用比较低，海绵小区规划时可考虑增多植草沟和下沉式绿地。总体看来，固原市海绵小区能产生较好的经济、环境和社会效益。

4 讨论与结论

海绵小区雨水利用包括渗透、储存、调节、转输、截污净化技术，能产生经济、环境和社会效益，本文以第二批试点城市宁夏回族自治区固原市西南新区海绵小区为实例，采用水量平衡法、替代工程法、影子工程法、市场价值法、碳税法、造林成本法等定量计算了

海绵小区产生的雨水资源利用、固碳释氧、降噪、调蓄径流、文化教育等经济、环境和社会 3 大类共 10 项效益，并采用效益费用比进行静态及动态成本效益分析，表明固原市海绵小区具有良好的效益。

第二批试点城市宁夏回族自治区固原市西南新区玫瑰苑、福满苑、裕丰苑、丁香苑、荷花园和祥和苑雨水措施的总效益为 2.91×10^5 元/年，其中雨水花园的效益为1.03×10^5 元/a，下沉式绿地的效益为 7.99×10^4 元/a，植草沟的效益为 6.15×10^4 元/a，这 3 种雨水设施均能产生较好的效益，其中雨水花园效益最佳。效益费用比成本效益分析结果表明，植草沟、下沉式绿地及雨水花园的静态及动态效益费用比均较好，具有良好的投资效益，其中植草沟和下沉式绿地的投资效益优于雨水花园。固原市 6 个海绵小区雨水设施的经济、环境和社会效益占比为 22.84%，76.89%和 0.27%，海绵小区建设会对环境产生较大的影响。固原市海绵小区环境效益占比较高而经济和社会效益占比较低，这和宁夏固原的区位特性有关，因处于非自重湿陷性黄土地区，故雨水设施都采取防渗并将蓄水池和雨水罐溢流的雨水通过小区雨水管网排入市政雨水管网，因此缺乏对地下水及水资源利用方面的效益；同时，由于小区未采用屋顶绿化和透水铺装，二者产生的节水、节电、减轻污染及固碳释氧等效益均未计算在内。

相较于李晨等[25]对北京某海绵社区的效益计算成果，固原市海绵小区效益较低，一方面是因为该试点区域的地理区位及城市特性，较少的降雨量、较大的蒸发量及湿陷性土地因素都使可回用雨水量较少，雨水设施类型及数量也少于北京市海绵社区；另一方面固原市经济发展水平较低，相关计算参数较北京低，因此产生的效益低于北京市海绵社区。对于小区尺度的海绵城市效益计算相关数据及案例均较少，本文部分参数参考相似地区进行效益计算，因此可能存在差异，需要在今后的工作中加强地域差异性的研究。对社会效益多采用定性描述而缺乏定量化的方法，对其货币化较为困难，因此社会效益指标选取及量化方法有待进一步补充。之后的研究可考虑将效益计算与绩效考核方法相结合，以指导雨水设施的组合优化，进一步完善海绵城市体系的建设。

[参 考 文 献]

[1] Shaneyfelt K M, Anderson A R, Kumar P, et al. Air quality considerations for stormwater green street design[J]. Environmental Pollution, 2017, 231: 768-778.

[2] Drake J, Bradford A, van Seters T. Stormwater quality of spring-summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 139: 69-79.

[3] Fassman E A, Blackbourn S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeablesoils [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15(6): 475-485.

[4] Czemiel Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4): 351-360.

[5] 唐双成，罗纨，贾忠华，等. 雨水花园对不同赋存形态氮磷的去除效果及土壤中优先流的影响[J]. 水利学报，2015，46(8)：943-950.

[6] 王书敏，李兴扬，张峻华，等. 城市区域绿色屋顶普及对水量水质的影响[J]. 应用生态学报，2014，25(7)：2026-2032.

[7] 王建军，李田，侯娟，等. 路面径流的大肠菌群污染及其雨水花园处理[J]. 环境工程学报，2014，8(12)：5221-5225.

[8] 赵飞，张书函，陈建刚，等. 透水铺装雨水入渗收集与径流削减技术研究[J]. 给水排水，2011，47(S1)：254-258.

[9] Jaffal I, Ouldboukhitine S E, Belarbi R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance[J]. Renewable Energy, 2012, 43: 157-164.

[10] 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.

[11] Peng L L H, Jim C Y. Economic evaluation of green-roof environmental benefits in the context of climate change: The case of Hong Kong[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(3): 554-561.

[12] 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.

[13] 李俊奇，车武，孟光辉，等. 城市雨水利用方案设计与技术经济分析[J]. 给水排水，2001，37(12)：25-28.

[14] 胡期光，刘冲. 海绵城市建设中既有居住小区绿化改造费用效益分析[J]. 天津城建大学学报，2018，24(6)：56-61.

[15] 北京建筑大学. 海绵城市建设技术指南：低影响开发雨水系统构建：试行[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.

[16] 原培胜. 污水处理厂处理成本分析[J]. 环境工程，2008，26(2)：55-57.

[17] 陈波，卢山. 杭州西湖风景区绿地生态服务功能价值评估[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版)，2009，35(6)：686-690.

[18] 王恩，章银柯，林佳莎，等. 杭州西湖风景区绿地货币化生态效益评价研究[J]. 西北林学院学报，2011，26(1)：209-213.

(下转第 183 页)

[参 考 文 献]

[1] 赵文武,房学宁.景观可持续性与景观可持续性科学[J].生态学报,2014,34(10):2453-2459.

[2] 施园园,赵华甫,郧文聚,等.北京市耕地多功能空间分异及其社会经济协调模式解释[J].资源科学,2015,37(2):247-257.

[3] OECD. Multifunctionality: Towards an Analytical Frame-work[R]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 2001.

[4] Gómez Sal A, González García A. A comprehensive assessment of multifunctional agricultural land-use systems in Spain using a multi-dimensional evaluative model [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 120(1):82-91.

[5] Aubry C, Ramamonjisoa J, Dabat M H, et al. Urban agriculture and land use in cities: An approach with the multi-functionality and sustainability concepts in the case of Antananarivo (Madagascar)[J]. Land Use Policy, 2012,29(2):429-439.

[6] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. Ecological Economics, 2002,41(3):393-408.

[7] Mastrangelo M E, Weyland F, Villarino S H, et al. Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services [J]. Landscape Ecology, 2014,29(2):345-358.

[8] 黄安,许月卿,郝晋珉,等.土地利用多功能性评价研究进展与展望[J].中国土地科学,2017,31(4):88-97.

[9] 党丽娟,徐勇,高雅.土地利用功能分类及空间结构评价方法:以燕沟流域为例[J].水土保持研究,2014,21(5):193-197,203.

[10] 陈婧,史培军.土地利用功能分类探讨[J].北京师范大学学报(自然科学版),2005,41(5):536-540.

[11] 陈睿山,蔡运龙,严祥,等.土地系统功能及其可持续性评价[J].中国土地科学,2011,25(1):8-15.

[12] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J].地理学报,2016,71(1):49-65.

[13] 刘彦随,刘玉,陈玉福.中国地域多功能性评价及其决策机制[J].地理学报,2011,66(10):1379-1389.

[14] 辛芸娜,孔祥斌,郧文聚.北京大都市边缘区耕地多功能评价指标体系构建:以大兴区为例[J].中国土地科学,2017,31(8):77-87.

[15] 甄霖,魏云洁,谢高地,等.中国土地利用多功能性动态的区域分析[J].生态学报,2010,30(24):6749-6761.

[16] 杜国明,孙晓兵,王介勇.东北地区土地利用多功能性演化的时空格局[J].地理科学进展,2016,35(2):232-244.

[17] 张晓平,朱道林,许祖学.西藏土地利用多功能性评价[J].农业工程学报,2014,30(6):185-194.

[18] 张路路,郑新奇,原智远,等.基于全排列多边形综合图示法的唐山市土地利用多功能性评价[J].中国土地科学,2016,30(6):23-32.

[19] 王枫,董玉祥.基于灰色关联投影法的土地利用多功能动态评价及障碍因子诊断:以广州市为例[J].自然资源学报,2015,30(10):1698-1713.

[20] 孙丕苓,许月卿,刘庆果,等.张家口市土地利用多功能性动态变化及影响因素[J].中国农业资源与区划,2018,39(8):65-74.

[21] 陈影,许皞,陈亚恒,等.基于遥感影像的县域土地功能分类及功能转换分析[J].农业工程学报,2016,32(13):263-272.

[22] 程启月.评测指标权重确定的结构熵权法[J].系统工程理论与实践,2010,30(7):1225-1228.

[23] Jun K S, Chung E S, Sung J Y, et al. Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts[J]. Science of the Total Environment, 2011,409(24):5228-5242.

[24] 雷勋平, Robin Qiu, 刘勇.基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J].农业工程学报,2016,32(13):243-253.

[25] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等.基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J].资源科学,2011,33(3):535-541.

(上接第 175 页)

[19] 陈龙,谢高地,盖力强,等.道路绿地消减噪声服务功能研究:以北京市为例[J].自然资源学报,2011,26(9):1526-1534.

[20] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.

[21] 许妍,高俊峰,黄佳聪.太湖湿地生态系统服务功能价值评估[J].长江流域资源与环境,2010,19(6):646-652.

[22] 舒安平,田露,王梦瑶,等.北京海绵城市雨水措施效益评估方法及案例分析[J].给水排水,2018,54(3):36-41.

[23] 车伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理[M].北京:中国建筑工业出版社, 2006.

[24] 李大龙,贾绍凤,吕爱锋,等.中国城市 LID 技术设施的成本效益区域差异[J].地理科学进展,2017,36(11):1402-1412.

[25] 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.