

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222363

# 居民小区海绵设施增量成本效益地区差异性及其敏感性分析

黄 臻<sup>a,b</sup>, 许 萍<sup>a,b</sup>

(北京建筑大学 a. 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室; b. 水环境国家级实验教学示范中心, 北京 100044)

**摘要:** 为进一步推进海绵城市建设, 深入居民小区的海绵设施研究, 采用系统动力学及 Morris、EFAST 敏感性分析法对居民小区海绵设施效益进行地区差异性分析。结果表明, 深圳、北京、兰州海绵设施运行 20 年的综合增量成本效益及经济、环境、社会增量效益占比分别为 1 504.5(69%、23%、8%)、352.4(54%、28%、18%)、2.0(27%、53%、20%) 万元。海绵设施综合效益参数敏感性由高到低依次为年均降水量、雨水回收率、缺水导致的经济损失等, 其中降雨量和降雨特征限制了北京、兰州的效益值, 而兰州较低的水使用价值也影响了其效益值。

**关键词:** 地区差异性; 海绵设施效益; 居民小区; 全局敏感性

**中图分类号:** [TV-9]; X321

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)06-0069-05

## 1 引言

随着城市化进程加快, 城市的不透水地面占比增加, 加剧了城市洪涝灾害的发生几率。居民小区是城市建设中重要的一环, 对城市的水文过程具有深刻影响。近年来, 海绵城市理念不断发展, 但在居民小区尺度上对海绵设施的研究不够深入<sup>[1]</sup>, 导致海绵城市在居民小区的建设推进面临困难。现有研究<sup>[2, 3]</sup> 主要集中于单一海绵设施的雨水控制效果及定性效益评价, 对居民小区等区域性海绵设施的综合效益货币化研究较少, 且以往研究以经济效益为主, 较少考虑环境和社会效益, 并且计算方法不同<sup>[4, 5]</sup>, 导致不同地域的效益无法进行横向比较。鉴此, 本文构建了包含经济、环境、社会效益及成本的海绵设施综合增量成本效益模型, 对北京、兰州、深圳进行效益计算及分析, 针对地区效益的差异进行了相关参数定性和定量敏感性分析, 旨在为今后推进海绵城市建设提供参考。

## 2 研究方法与数据

### 2.1 研究对象及参数概况

本文设定在北京、深圳、兰州均存在一个同样规模小区, 根据各地区气候及经济条件不同模拟规模小区在北京、深圳、兰州的海绵设施增量成本效益, 以此横向比较各地区海绵设施增量成本效益差异性。该规模小区占地面积 5.912 7 hm<sup>2</sup>,

其中建筑屋面占地 3.1 hm<sup>2</sup>, 硬化路面占地 0.39 hm<sup>2</sup>。小区设置绿化覆盖率为 42%, 室外绿地面积 2.502 7 hm<sup>2</sup>, 其中下凹式绿地面积 1.502 7 hm<sup>2</sup>, 下凹式绿地高度低于路面 10 cm, 绿色屋顶面积 1 hm<sup>2</sup>, 透水铺装面积 0.92 hm<sup>2</sup>, 蓄水池收集硬化路面、硬化屋面、透水铺装及绿色屋顶的径流雨水, 径流系数依次为 0.9、0.9、0.4、0.3, 蓄水池设计降雨重现期为 3 年, 降雨时间为 60 min。该小区海绵设施建于 2020 年, 建设期 1 年, 运行周期为 20 年。

### 2.2 方法概述

#### 2.2.1 基于系统动力学的海绵设施综合增量成本模型构建

为分析海绵设施综合增量成本效益中各因素间关系, 运用 VENSIM PLE 软件构建系统动力学流程图(图 1)。该模型包含了增量成本、经济增量效益、环境增量效益、社会增量效益 4 个子系统。其中经济、环境、社会增量效益组成了增量效益, 增量效益与增量成本的差值为海绵设施综合增量成本效益。

模型时间边界为 2020~2040 年, 对这 20 年的效益成本增量采取效益现值的概念, 据世界银行统计, GDP(2015 年不变价美元)在 2015~2021 年平均增长率为 2.5%, 设折现率为 2.5%。基于此, 小区海绵设施综合效益相关公式及部分数据取值见表 1。

收稿日期: 2022-11-09, 修回日期: 2023-01-06

基金项目: 国家重大水专项(2018ZX07110-008-006)

作者简介: 黄臻(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为城市节水理论与标准, E-mail: 1064741910@qq.com

通讯作者: 许萍(1971-), 女, 博士、教授, 研究方向为城市节水理论与标准, E-mail: xuping@bucea.edu.cn

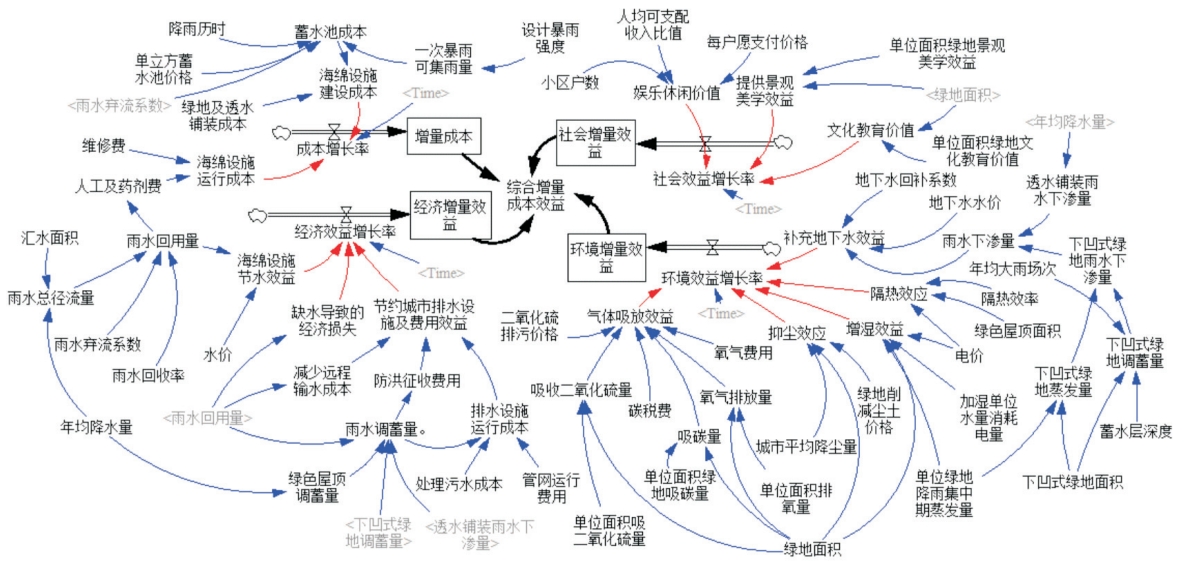


图 1 系统动力学流程图

Fig. 1 System dynamics flow diagram

表 1 小区海绵设施各项效益所选指标公式及数据

Tab. 1 The selected index formula and data of various benefits of sponge facilities in the community

效益	效益指标	公式及部分数据
增量成本	海绵设施建设成本 <sup>[6]</sup>	下凹式绿地成本(元)+绿色屋顶成本(元)+透水铺装成本(元)+蓄水池成本(元)
	海绵设施运行成本 <sup>[6]</sup>	雨水回用量(m <sup>3</sup> )×药剂费(0.75 元/m <sup>3</sup> )+蓄水池维修费(元)+下凹式绿地维修费(元)+绿色屋顶维修费(元)+透水铺装维修费(元)
经济增量效益	节水效益	居民自来水水价(元)×雨水回用量(m <sup>3</sup> )
	缺水导致的经济损失 <sup>[7,8]</sup>	雨水回用量(m <sup>3</sup> )×单位缺水导致的经济损失(元/m <sup>3</sup> )
	远程输水费用 <sup>[9]</sup>	雨水回用量(m <sup>3</sup> )×单位远程输水费用(元/m <sup>3</sup> )
	防洪费用 <sup>[10]</sup>	雨水调蓄量(m <sup>3</sup> )×水库投入年成本(0.67 元/m <sup>3</sup> )
	节约排水设施运行费用	(管网运行费用 <sup>[4]</sup> (0.08 元/m <sup>3</sup> )+处理污水成本(元/m <sup>3</sup> ))×雨水调蓄量(m <sup>3</sup> )
环境增量效益	气体收放效益 <sup>[11]</sup>	(吸二氧化碳量(60.126 kg/hm <sup>2</sup> )×二氧化硫排污价格(0.6 元/kg)+碳税费(10.1 元/t)×吸碳量(4.363 2 t/hm <sup>2</sup> )+氧气费用(1 000 元/t)×氧气排放量(4 t/hm <sup>2</sup> ))×绿地面积(hm <sup>2</sup> )
	抑尘效益	绿地面积(hm <sup>2</sup> )×单位绿地削减尘土价格(170 t/元) <sup>[11]</sup> ×绿地尘土削减率 <sup>[12]</sup> (0.07)×城市平均降尘量(t/hm <sup>2</sup> )
	增湿效益	加湿单位水量消耗电量 <sup>[12]</sup> (kw·h)×单位绿地降雨集中中期蒸发量(mm)×电价(元/(kw·h))×绿地面积(hm <sup>2</sup> )
	隔热效益	电价(元/(kw·h))×绿地面积(m <sup>2</sup> )×夏季非阴雨天数(d)×隔热效率 <sup>[13]</sup> (0.25 kw·h/(m <sup>2</sup> ·d))
	补充地下水效益	回补地下水系数(0.2)×地下水水价(m <sup>3</sup> /元)×雨水下渗量(m <sup>3</sup> )
社会增量效益	提供景观美学效益 <sup>[14]</sup>	绿地面积(hm <sup>2</sup> )×单位面积提供景观美学效益(390.72 元/hm <sup>2</sup> )
	文化教育价值 <sup>[15]</sup>	绿地面积(hm <sup>2</sup> )×单位面积文化教育价值(382 元/hm <sup>2</sup> )
	休闲娱乐价值 <sup>[16]</sup>	每户愿支付价格(161.84 元/户)×小区户数(1 500 户)×人均可支配收入比值

注:水价、地下水水价、处理污水成本数据来源于中国水网;单位缺水导致的经济损失反映水利用于城市产业的经济价值,用于第三产业的单位水经济价值大于第一、二产业<sup>[17]</sup>;城市平均降尘量、夏季非阴雨天数及单位绿地降雨集中中期蒸发量数据来源于各地区降雨资料及环境公报;人均可支配收入计算的是不同城市与珠海的人均可支配收入之比,珠海人均 GDP 为 15.9 万元。

### 2.2.2 全局敏感性分析法

考虑到海绵设施综合增量成本效益模型的参数众多,运用 sim lab 软件对参数进行 morris 法定性及 EFAST 法定量的全局敏感性分析,其中 Morris 法<sup>[18]</sup>计算量小,可以快速辨别出敏感参数,适用于输入参数多的情况,能得到不同参数相对的敏感性大小。而 EFAST 法<sup>[19]</sup>更着重于计算的准确性,可量化各参数对输出变量的贡献度。综上所述,本文提出全局敏感性分析流程,见图 2,采用的参数及取值范围见表 2。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同地区效益差异性分析

北京、深圳、兰州通过海绵设施综合增量成本效益模型计算所得效益值。结果表明,北京、深圳、兰州的初始建设投入差距较小,且增量成本增长均较缓,其中北京、深圳增量效益增长较快,综合增量成本效益分别于 2030、2025 年开始收益,而兰州增量效益增长缓慢,综合增量成本效益于

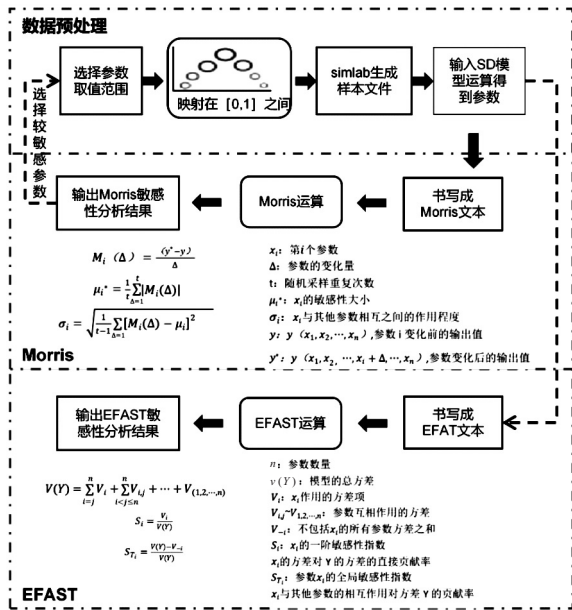


图 2 全局敏感性分析流程图

Fig. 2 Sensitivity analysis flowchart

表 2 不同区域参数取值及参数范围

Tab. 2 Parameter values in different regions and parameter range

内容	指标名称	北京	深圳	兰州	最小值	最大值
经济	水价(第一阶梯)J1/(元·m <sup>-3</sup> )	3.64	2.67	1.75	1	10
	处理污水成本 J2/(元·m <sup>-3</sup> )	1.36	0.90	0.95	0.5	2
	减少远程输水成本 J3/(元·m <sup>-3</sup> )	2.23	0.98	0	0	5
	单位缺水导致的经济损失 J4/(元·m <sup>-3</sup> )	14.70	14.7	5.48	0	20
	地下水水价 J5/(元·m <sup>-3</sup> )	1.57	1.06	0.3	0.3	2
	电价 J6/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.49	0.68	0.51	0.3	1
	人均可支配收入 J7/万元	7.50	7	5.2	1.7	7.8
气候	年均降水量 Q1/mm	560	1 904	300	200	5 000
	一次暴雨可集雨量 Q2/(L·s <sup>-1</sup> )	428.7	563.7	122.4	50	800
	城市平均降尘量 Q3/(t·hm <sup>-2</sup> )	696	360	972	200	1 500
	加湿单位水量消耗电量 Q4/kW·h	125	168.2	125	125	168.2
	10 mm 以上降雨场次 Q5/d	16	24.8	9	0	50
	初期雨水弃流系数 Q6	0.85	0.9	0.8	0.8	0.95
	单位绿地降雨集中中期蒸发量 Q7/m	269.9	618	102.9	150	1 000
	夏季非阴雨天(6~9月晴且多云天数)Q8/d	82	67	87	20	123
	雨水回收率 Q9	0.9	0.9	0.5	0.1	0.9

注:设定 10 mm 以上降雨能充满蓄水池,计算雨水可收集雨量与可蓄雨量之比得到雨水回收率。

2040 年才收益。20 年后深圳综合增量成本效益现值为 1 504.5 万元,分别为北京的 4.3 倍(352.4 万元)、兰州的 752.3 倍(2.0 万元)。探究差异原因,发现经济增量效益的地区性差异最大,其中深圳的经济增量效益高达 1 528.5 万元,为北京的 2.8 倍、兰州的 16.1 倍;环境增量效益差异相对较小,其中北京、兰州相差不大,深圳效益值为北京、兰州 2 倍多;各地区社会增量效益差异不大。兰州、北京、深圳不仅各项效益值有所差距,各项效益对综合增量成本效益贡献度也不同,见图 3。由图 3 可知,深圳与北京的综合增量成本效益结构较为相似,均为经济增量效益占比最高,分别达 69%、54%,环境增量效益分别仅占

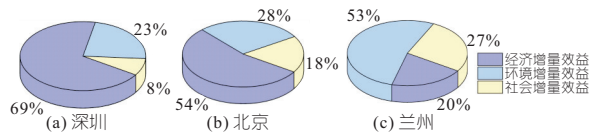


图 3 海绵设施运行 20 年北京、深圳、兰州海绵设施各项增量效益占比

Fig. 3 Proportion of incremental benefits of sponge facilities in Beijing, Shenzhen and Lanzhou in 20 years of operation

23%、28%,兰州则相反,环境增量效益占比最大为 53%,经济增量效益占比仅 20%。基于上述差异结合各指标贡献率进一步分析,结果见图 4。由图 4 可知,深圳有 8 项效益指标明显大于北京、兰州,差异较显著的指标依次为缺水导致的经济效益、增湿效益及节水效益,其中深圳缺水导致的经济效益值大于北京 806.2 万元,以及兰州 1 201.6 万元。观察各项效益指标,经济增量效益的各指标均有显著差异性,且各指标值均为深圳最高,兰州最低,其中深圳与北京各项指标差值在 1.3~5.0 倍之间,处于兰州 10.1~36.7 倍之间。环境增量效益指标中仅增湿效益差异较明显,其中深圳增湿效益为北京的 3.1 倍、兰州的 10.2 倍。社会增量效益各项指标数值相差不大,导致 3 个地区社会增量效益差异性不大。由于组成指标的各参数在系统中相互关联,无法直接判断影响因素较大的参数,因此对各地区不同参数进行敏感性分析。

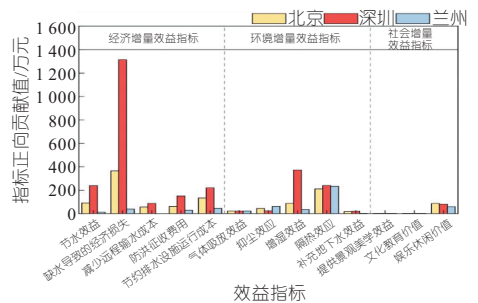


图 4 海绵设施运行 20 年北京、深圳、兰州海绵设施增量效益指标正向贡献值

Fig. 4 Contribution value of sponge facilities in Beijing, Shenzhen and Lanzhou for 20 years of operation

### 3.2 效益参数敏感性分析

#### 3.2.1 morris 定性分析结果

对 16 个差异性参数随机组合,形成 170 组样本,计算得到 morris 敏感性分析结果,见图 5。如图 5 所示,参数敏感指数  $\mu$  与方差  $\sigma$  大小排序大体相同,参数敏感性指数  $\mu$  越高代表对效益的敏感性越大,方差  $\sigma$  越大则参数间交互作用越强,因此参数对海绵设施效益影响程度越大参数间交互作用越强。综合增量成本效益的参数敏感性  $\mu$  大于 300 的参数有 7 个,依次为年均降雨量

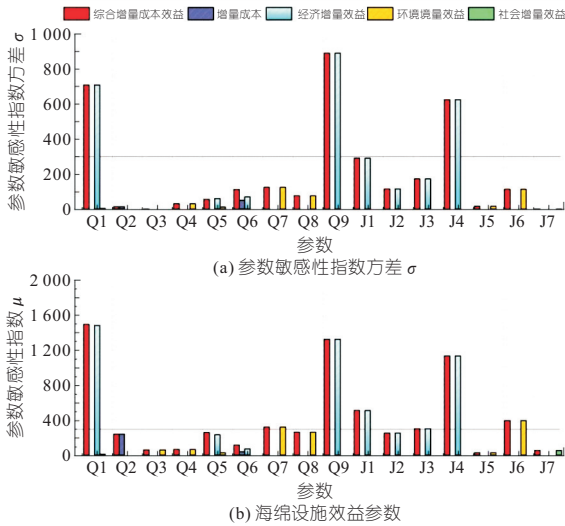


图 5 海绵设施运行 20 年后最终效益的 Morris 法敏感性指数结果

Fig. 5 Results of Morris sensitivity index of benefit parameters of sponge facilities after 20 years of operation

(Q1)、雨水回收率(Q9)、单位缺水导致的经济损失(J4)、水价(J1)、单位绿地降雨集中期蒸发量(Q7)、电价(J6)、减少远程输水成本(J3),进一步分析可知,敏感程度位于前 5 的参数主要对经济增量效益产生影响,其中年均降雨量、雨水回收率通过影响雨水的直接回用量及调蓄量来影响各项经济增量效益指标,中大雨场次占比较多且年均降雨量大的地区更易获得更多效益,因此深圳各项经济增量效益指标不同程度地大于北京、兰州,导致深圳经济增量效益远大于其他两个地区。而 Q7、J6 仅对环境增量效益产生影响,且 Q7、J6 对综合增量成本效益敏感程度位于第 6、7,因此 3 个地区环境增量效益虽有所差异,但较经济增量效益差异程度小。由图 5 可知,参数对增量成本、社会增量效益敏感程度低,因此选择 7 个参数进行 EFAST 定量分析,探究参数对海绵设施综合增量成本、经济增量、环境增量效益的影响。

3.2.2 EFAST 定量分析结果

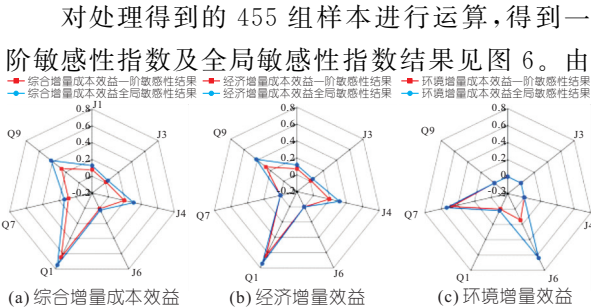


图 6 海绵设施运行 20 年海绵设施效益参数 EFAST 敏感性指数结果

Fig. 6 Results of EFAST sensitivity index results of sponge facilities benefit parameters after 20 years of operation

图 6 可知,除电价外,其余参数一阶敏感性指数与全局敏感性指数差值不大,一阶敏感性表示的是参数对效益的直接贡献率,全局敏感性指数与一阶敏感性指数差值即为参数间交互作用对效益的影响值,因此大多参数对海绵设施效益的影响贡献度主要通过直接作用。

如图 6(a)所示,对综合增量成本效益敏感程度较高的参数依次为年均降水量(0.6~0.8)、雨水回收率(0.4~0.6)、单位缺水导致的经济损失(0.2~0.4)及水价(0.1~0.2)。这 4 个参数的敏感性是对经济增量效益的影响值贡献(图 6(b))。其中缺水导致的经济损失关联着敏感性前 3 的参数,且缺水导致的经济损失是 3 个地区差异性最大的指标。由表 2 可知,北京、兰州该效益指标值低于深圳,主要是因为降雨量和降雨特征限制,此外兰州还由于单位缺水导致经济损失较低,兰州的高新兴产业占比低于深圳、北京,导致水使用经济价值较低。而水价相关联的节水效益也存在较大地区性差异,深圳与兰州差值为 216.4 万元,兰州水价与北京、深圳亦存在差距。

由图 6(c)可知,电价(J6)与单位绿地降雨集中期蒸发量(Q7)对综合增量成本效益敏感指数位于 0~0.1 之间,但对环境增量效益的敏感指数为 0.63、0.53,因此 J6、Q7 是导致环境增量效益地区性差异的主要原因,然而 J6、Q7 对环境增量效益的影响远弱于敏感性前 4 的参数。J6、Q7 关联的增湿效益存在较大地区性差异,根据表 2 可知兰州、北京的单位绿地降雨集中期蒸发量较低,导致增湿效益较低。

4 结论

采用系统动力学构建了海绵设施综合增量成本效益模型,提出 Morris 法与 EFAST 法定性与定量相结合的敏感性分析方法,针对地区效益的差异性开展了相关参数定性和定量敏感性分析。结果表明深圳、北京、兰州分别在 2025、2030、2040 年综合增量成本效益开始收益。但 3 个地区的增量成本及社会增量效益差异性较弱,是由于对海绵设施综合增量成本效益较为敏感的参数主要对经济、环境增量效益产生影响。其中经济增量效益的地区差异性最大,此外环境增量效益亦有一定差异。

参考文献:

[1] 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.
- [2] WEI Y, JIANG J, LAI J, et al. Integrated decision support system for sponge city management: A case study of the national demonstration area of Guangming district, Shenzhen[M]. Green infrastructure in Chinese cities. Springer, 2022: 399-430.
- [3] 李阳. 模糊层次分析法及 InfoWorks 水文模型在洪山区小区海绵改造应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [4] 左建兵, 刘昌明, 郑红星, 等. 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.
- [5] 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——以固原市海绵小区建设为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 175-183.
- [6] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)[Z]. 住房和城乡建设部, 2014, 10.
- [7] 韩宇平, 阮本清. 水资源短缺风险经济损失评估研究[J]. 水利学报, 2007(10): 1253-1257.
- [8] 田敏, 任建民, 白亚军, 等. 海绵城市理念下兰州市雨水利用效益分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 49-53.
- [9] 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.
- [10] 张晓平, 朱道林, 许祖学, 等. 西藏土地利用多功能性评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 185-194.
- [11] 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.
- [12] 李萌萌. 雨水利用效益计算方法及利用模式研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [13] JIM C Y, PENG L L. Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof [J]. Urban forestry & urban greening, 2012, 11(1): 73-85.
- [14] 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, (5): 911-919.
- [15] 许妍, 高俊峰, 黄佳聪, 等. 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.
- [16] CHEN W Y, JIM C Y. Cost - benefit analysis of the leisure value of urban greening in the new Chinese city of Zhuhai[J]. Cities, 2008, 25(5): 298-309.
- [17] 钱龙霞, 王红瑞, 王颖, 等. 基于 M-copula 的水资源短缺风险经济损失预测模型及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(4): 907-17.
- [18] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-74.
- [19] SALTELLI A. Sensitivity analysis: could better methods be used? [J]. Journal of geophysical research: Atmospheres, 1999, 104(D3): 3789-93.

## Regional Differences and Sensitivity Analysis of Incremental Cost-effectiveness of Sponge Facilities in Residential Areas

HUANG Zhen<sup>a,b</sup>, XU Ping<sup>a,b</sup>

(a. Key Laboratory for Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education;

b. National Demonstration Center for Experimental Water Environment Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To further promote the construction of sponge cities, system dynamics and Morris, EFAST sensitivity analysis methods were used to analyze the regional differences in the benefits of sponge facilities in residential areas. The research conclusions are as follows: The comprehensive incremental cost benefit and economic, environmental, and incremental social benefits of Shenzhen, Beijing, Lanzhou sponge facilities in operation for 20 years accounted for 1 504.5 (69%, 23%, 8%), 352.4 (54%, 28%, 18%), and 2.0 (27%, 53%, 20%) ten thousand yuan, respectively. The sensitivity of the comprehensive benefit parameters of sponge facilities from high to low is sorted as average annual precipitation, rainwater recovery rate, economic loss caused by water shortage, etc. Among them, the rainfall and rainfall characteristics limit the benefit value of Beijing and Lanzhou. The low of water use in Lanzhou also affects the benefit value.

**Key words:** regional differences; benefits of sponge facilities; residential areas; global sensitivity