

DOI:10.19479/j.2095-719x.2404274

海绵城市示范区生态效率时空差异研究

熊程, 陈卫, 崔一鸣, 齐珊娜
(天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384)

摘要:针对海绵城市建设投入产出生态效果评价,以天津市海绵城市建设示范区为例,探究不同建设模式下生态效率时空差异,为北方半干旱区海绵城市全域建设提供参考。采用非期望SBM模型,从示范区和排水分区两个尺度分析2017—2020年生态效率时空差异。中新天津生态城示范区和解放南路示范区中各DMU分区的生态效率有效提高;各个分区的下垫面特征、海绵设施与生态效率改变关系明显,离主要河流水系较近分区的生态效率改善情况优于离主要河流较远的分区,老旧小区较多的分区生态效率值相对较低;从时间序列上4a的生态效率值得到明显提高,新建城区生态效率改善情况优于老旧城区;海绵型公园与绿地项目、水系整治与生态修复项目对于生态效率的提升效果较为显著;竣工运行后海绵设施的管理维护水平对生态效率的保持至关重要。

关键词:海绵城市;生态效率;SBM模型;数据包络分析;生态修复

中图分类号:X321 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-719X(2024)04-0274-07

Study on Spatiotemporal Differences in Ecological Efficiency in Sponge City Demonstration Area

XIONG Cheng, CHEN Wei, CUI Yiming, QI Shanna
(School of Geology and Geomatics, TCU, Tianjin 300384, China)

Abstract: Aiming at the evaluation of the ecological effect of the input and output of sponge city construction, taking Tianjin Sponge City Construction Demonstration Zone as an example, this article explored the spatial and temporal differences of ecological efficiency under different construction modes, which provided a reference for the construction of sponge city in the northern semi-arid area. The unexpected SBM model was used to analyze the spatiotemporal differences in eco-efficiency from 2017 to 2020 from two scales: demonstration area and drainage zoning. The eco-efficiency of DMU sub-districts in the Sino-Singapore Tianjin Eco-City Demonstration Zone and Jiefang South Road Demonstration Zone has been effectively improved. The underlying surface characteristics of each sub-district and the sponge facilities built result in obvious change in ecological efficiency. The improvement of eco-efficiency in the area closer to the main river system is better than that in the area farther from the main river system, and the eco-efficiency value of the zone with more old communities is relatively low. From the time series, the eco-efficiency of 4 years is significantly improved. The improvement of eco-efficiency in new urban areas is better than that in old urban areas. Sponge-type park and green space projects, water system remediation, and ecological restoration projects have significant effects on improving ecological efficiency. The level of management and maintenance of the sponge facility after completion and operation is critical to maintaining eco-efficiency.

Key words: sponge city; eco-efficiency; SBM model; MAXDEA; ecological restoration

十四五期间全国海绵城市建设进入系统化全域推进阶段,选取基础条件好、积极性高、特色突出的城市开展典型示范,力争通过3a集中建设,示范城市防洪排涝能力明显提升,河湖空间严格管控,生态环境

显著改善。天津作为前期国家海绵城市建设局域推进阶段的第二批试点城市已经竣工运行,从生态效率角度评估天津示范区建设的海绵效果的时空差异,可为全域推进海绵城市规划提供设计提供参考。

收稿日期:2023-03-01;修订日期:2023-04-10

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项天津中心城区海绵城市建设运行管理技术体系构建与示范(2017ZX07106001)

作者简介:熊程(1998—),男,四川乐山人,天津城建大学硕士生

通信作者:陈卫(1970—),男,教授,博士,从事资源环境生态评价与规划研究。E-mail:towei@163.com.

在海绵城市建设绩效评价方面,李萌萌等^[1]进行了海绵城市建设效益指标的重要性排序.高玉琴等^[2]构建了基于云模型的低影响开发措施综合效益评价体系.沈炜彬等^[3]从年径流总量控制率及年径流污染控制率两项核心指标出发,借助SWMM模型对杭州市萧山区世纪城海绵城市建设进行了评估.郭清等^[4]针对苏州地区采用模糊综合评价法进行全过程指标评估.楼诚等^[5]基于嘉兴市现状海绵城市设计,从5个方面分析不同设计方法建设效果的优缺点并进行综合评价.王翠玲等^[6]根据地表植被、地形坡度、包气带及含水层等海绵特性,构建基于海绵城市建设的地质适宜性评价体系.吴京戎等^[7]构建了基于DPSIR-EES和系统动力学模型的海绵城市建设绩效评价体系,对海绵城市整个动态系统进行绩效评价.当前这些海绵城市建设绩效评价仅从产出角度出发,针对单个示范区和单个时间节点开展综合评价,尚未考虑建设投入因素不同,从多地块、多示范区对比分析海绵城市建设效果的时空差异.在住房和城乡建设部出台的海绵城市建设评价标准^[8]中对城市排水、生态环境等方面尤为重视,但没有涉及投资生态效率评价.

在生态效率评价方面,Schaltegger最早提出了生态效率(Eco-efficiency)的概念^[9],而后不同的国际机构如世界可持续发展工商理事会、联合国贸易和发展会议等从不同的角度都提出了相应生态效率的基本内涵.其对生态效率的定义和基本内涵是一致的,即通过单位自然资源消耗所获福利的最大化程度来衡量社会经济发展的可持续性.测算区域生态效率可有效反映其城市发展对资源的利用效率、对资源环境的影响程度与协调情况^[10].早期生态效率的测算主要使用数据包络分析、超效率DEA和Malmquist指数等方法,目前则更多的使用超效率SBM模型、DEA-ESDA、DEA-Tobit面板门槛模型对生态效率进行测度、影响因素分析和动态变化分析,并结合生态足迹、能值分析、远近程耦合、生命周期、碳足迹等多种方法多角度研究生态效率^[11-13].总的来说,生态效率研究方法经历了由静态分析到动态模拟,由单一区域到区域间,由时间趋势到时空结合的分析过程的转变^[14-16].

本文在对上述海绵城市建设绩效评价现状和生态效率分析方法进行总结的基础上,以海绵城市建设生态效率时空差异及影响因素为核心,以天津市解放南路示范区与生态城示范区为实例,采用非期望SBM模型,选取生态用地投入面积、建设用地投入面积、建设资金投入、运维资金投入作为投入指标,选取水生态修复、水环境改善和水安全提升类指标数据作为产出指

标,从示范区和排水分区2个尺度分析2017—2020年不同建设模式下示范区生态效率时空差异和影响因素.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为天津市海绵城市建设示范区,包括解放南路示范区(见图1)与中新生态城示范区(见图2).天津市解放南路示范区位于中心城区,示范区地下水埋深介于1~2 m之间,面积约为16.7 km²,地形相对平坦,高程不超过3.5 m.片区主要河道包括海河、复兴河、长泰河和外环河.现状下垫面中,公建及居住、道路占比高,整体绿化率较低,径流控制难度较大.解放南路示范区地处老城区,有较多工厂旧址、老旧小区,属于老城区海绵城市改造模式.中新生态城示范区位于生态城中新合作区南部,面积22.8 km².地势总体较为平坦,地面高程主要为2~6 m.生态城示范区为新建城区,规划设计阶段就充分考虑了低影响开发和雨水资源利用因素,属于新建城区海绵城市建设模式.

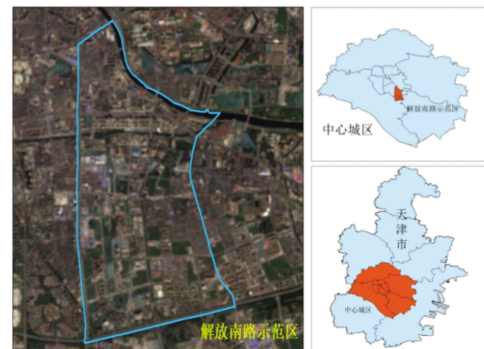


图1 解放南路示范区位置范围图

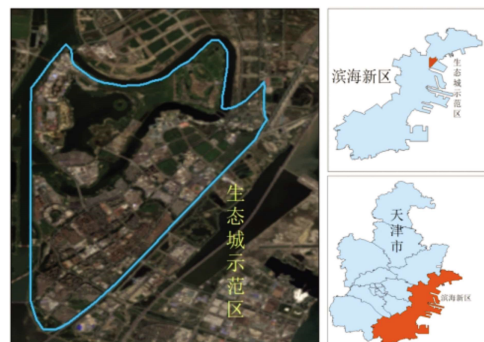


图2 中新生态城示范区位置范围图

1.2 数据来源与处理

数据来自天津市海绵城市相关部门统计以及相关课题组实际监测计算得出,水质数据来自于各区所设置的站点,少部分缺失数据采用前后时间段内平均数值代替或通过天津市生态环境局查询.建设资

金、运行维护资金、建设用地、生态用地投入等数据来自海绵城市相关建设报告。

由于生态效率是按照年份进行计算得到的相对效率值，只能在相同年份的单元之间进行对比分析，不能直接对效率值进行时间序列分析。本文为使生态效率值能进行时间序列的对比分析，在解放南路示范区与中新生态城示范区的每一年分析数据当中加入同一个理想单元，理想单元的投入指标为2017年中各单元的相对最少投入，产出量为2017年中各单元相对最好的产出效果，这样结果能以时间序列进行分析。

1.3 生态效率评价指标体系构建

天津海绵城市示范区总投资约749 226万元。生态城示范区估算投资406 539万元；解放南路示范区估算投资342 687万元。通过建设，各分区径流总量控制率达到或超过生态城示范区80%、解放南路示范区78%的预期目标，雨水径流悬浮物大幅下降，初期雨水径流水环境质量上升。示范区评价指标结合海绵城市建设评价标准选取如表1所示。

表1 生态效率指标体系

指标类型	指标名称	说明
投入指标	建设资金投入	城市项目设施建设过程中的投入资金/万元
	运维资金投入	运行中的日常维护投入资金/万元
	生态用地投入面积	城市建设中生态项目投入用地面积/hm ²
	建设用地投入面积	城市建设中建筑投入用地面积/hm ²
期望产出指标	径流总量控制率(水安全提升)	城市建设后各排水分区径流总量控制率/%
非期望产出指标	水土流失(水生态修复)	初期雨水径流SS质量浓度/(mg·L ⁻¹)
	径流水环境质量(水环境改善)	初期雨水径流COD _{mn} 指标/(mg·L ⁻¹)

1.4 研究方法

1.4.1 SBM模型

Charnes 提出数据包络法^[17](data-envelopment-analysis, DEA)来计算有多个输入输出元素间的关系，可以用来对能源与环境绩效评价进行有效分析。托恩(Tone)提出了松弛测度(slack-based measure, SBM)模型^[18]，允许投入、期望产出和非期望产出的不同比例调整，是一种非径向的效率测度方法。SBM模型不但比传统DEA模型有更强的效率区分度，并且能够提供更多与投入产出效率相关的冗余信息。由于在规模报酬不变(CRS)和规模报酬可变(VRS)的不同假设下所测度的效率值是不同的，采用基于规模报酬可变的SBM模型测度，其基本原理如下：

假如该系统有n个决策单元，每个单元都有投入、期望产出、非期望产出3个向量，表示为 $x \in R^m$ ，

$y^g \in R^s, y^b \in R^s$ ，定义一个矩阵 X, Y^g, Y^b 如下： $[X] = [x_1, \dots, x_n]^T \in R^{m \times n}$ ， $[Y^g] = [y_1^g, \dots, y_n^g]^T \in R^{s \times n}$ 及 $[Y^b] = [y_1^b, \dots, y_n^b]^T \in R^{s \times n}$ ， $X > 0, Y^g > 0, Y^b > 0$ 。

定义生产集合 p 为： $p = \{(x, y^g, y^b) | x \geq \lambda x, y^g \leq \lambda Y^g, y^b \geq \lambda Y^b, \lambda \geq 0\}$ ，式中 λ 是权重向量。

因此SBM-DEA模型可表示为

$$P^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{s}_i}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left[\sum_{i=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{i=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right]} \quad (2)$$

式中： s 表示投入、产出的松弛量。

目标函数 P^* 关于 \bar{s}, s^g, s^b 是严格递减的，并且 $0 \leq P^* \leq 1$ 。 P^* 的值越大，效率越高。对于特定的决策单元，当且仅当 $P^* = 1$ ，且 \bar{s}, s^g, s^b 均为0，生态效率相对有效。对上述模型施加不同约束条件后，可得到规模报酬不变的SBM-DEA模型及相应效率值。

1.4.2 DMU单元划分

生态城示范区中为了使排水分区能够满足管控要求，并尽量保持排水分区完整性，在排水分区的基础上共分为10个子排水分区；解放南路示范区结合排水防涝规划，细分为17个海绵管控分区，示范区依据各子排水分区进行DMU单元划分。详见表2和图3、图4。

表2 DMU单元划分表

	示范区	雨水分区	单元名称
解放南路	1	大沽南路分区	大沽南路分区1
	2		大沽南路分区2
	3	太湖路分区	太湖路分区1
	4		太湖路分区2
	5	解放南路分区	解放南路分区
	6	中央绿轴分区	中央绿轴分区1
	7		中央绿轴分区2
	8		中央绿轴分区3
	9	郁江道分区	郁江道分区
	10	复兴门分区	复兴门分区
	11	陈塘分区	陈塘分区1
	12		陈塘分区2
	13	浯水道分区	浯水道分区1
	14		浯水道分区2
	15	洞庭路分区	洞庭路分区1
	16		洞庭路分区2
	17		洞庭路分区3
中新生态城	1	起步东区	起步东区1
	2		起步东区2
	3		起步东区3
	4	起步西区	起步西区1
	5		起步西区2
	6	中部片区	中部片区1
	7		中部片区2
	8		中部片区3
	9	生态岛东区	生态岛东区
	10	生态岛西区	生态岛西区

表4 生态城示范区生态效率评价结果

序号	DMU 单元	2017年	2018年	2017—2018 年均值	2019年	2020年	2019—2020 年均值	2017—2020 年均值
1	起步东区 1	0.53	0.51	0.52	1.00	1.00	1.00	0.76
2	起步东区 2	1.00	0.87	0.94	0.98	1.00	0.99	0.96
3	起步东区 3	0.86	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00	0.97
4	起步西区 1	0.65	0.78	0.72	1.00	0.98	0.99	0.85
5	起步西区 2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	中部片区 1	0.69	0.77	0.73	0.56	0.68	0.62	0.67
7	中部片区 2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	中部片区 3	0.48	0.67	0.58	0.84	1.00	0.92	0.75
9	生态岛东区	0.65	0.84	0.75	0.90	1.00	0.95	0.85
10	生态岛西区	0.36	0.67	0.52	0.63	1.00	0.82	0.67
0	理想单元	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	

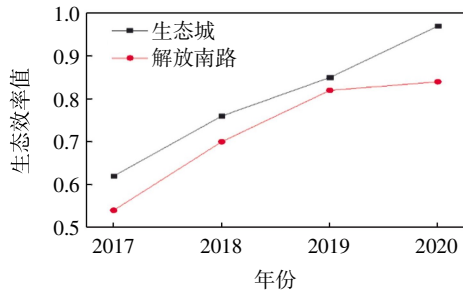


图5 生态效率变化趋势图

中新生态城示范区规划设计起点较高、建筑及人口密度较低、基础设施和管理维护方面更加完善,因此到建设后期的2019年、2020年生态效率值也能保持一个较为稳定的提高速度。解放南路示范区属于老城区改造,规划设计年代较远,建筑及人口密度较高、基础设施和管理维护方面存在很多不足,只能通过局部修补提升城市环境功能,在4a建设中生态效率值一直低于生态城示范区。

2019—2020年解放南路示范区与生态城示范区相比有较大差距,在后期的实地走访中发现解放南路示范区很多海绵设施管理与维护上的欠缺,比如发现路边的下凹式绿地,铺满了枯叶、垃圾,堵塞下渗。

2.3 示范区生态效率的空间差异

2017—2020年解放南路示范区与生态城示范区各分区生态效率结果如图6-7所示。

解放南路示范区不同单元之间的原始下垫面情况有所不同,原始生态环境差距较大。大沽南路分区、太湖路分区、复兴门分区,陈塘分区由于靠近海河、长泰河等水域,原始生态情况较好,建设过程中,生态效率值一直处于较高水平。而离水系较远的单元如洞庭路分区1、洞庭路分区2,4a生态效率平均值较低。洞庭路分区1和2、浯水道分区1、解放南路分区、陈塘分区1这几个地块老旧小区较多、环境较为复杂、生

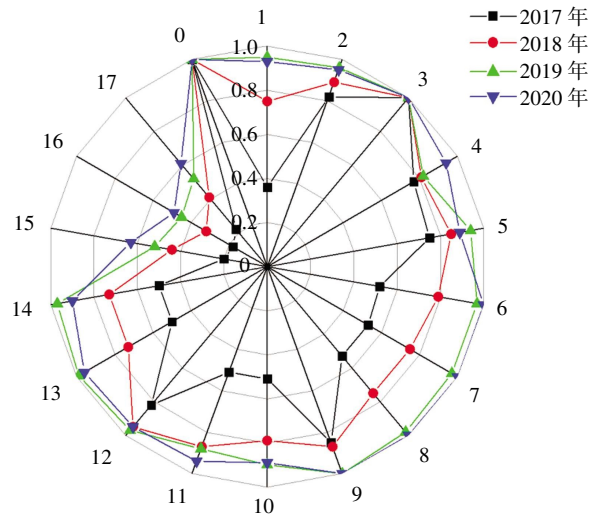


图6 解放南路各分区生态效率年际对比图

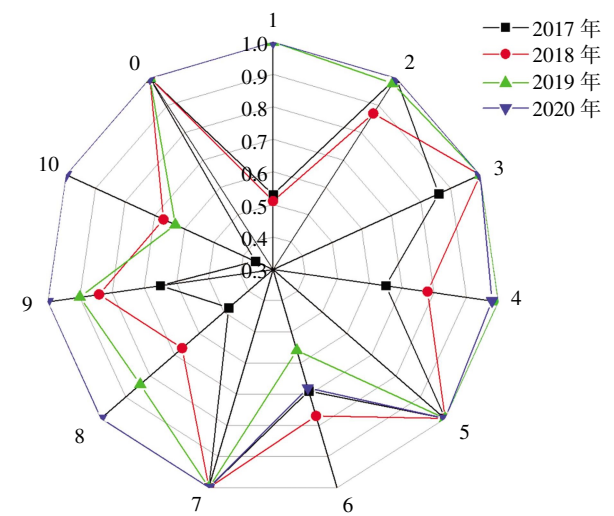


图7 中新生态城各分区生态效率年际对比图

态基础较弱,改造项目比较多,海绵设施管理维护不足,生态效率值一直较差。老旧小区改造项目较少、公园绿地项目较多的大沽南路分区1和太湖路分区1在4a建设当中,生态效率平均值逐渐接近1。中央绿

轴的3个分区生态效率值也在逐年提高,表明建设效果较好。究其原因,中央绿轴分区修建的设施大多为海绵型公园与绿地项目(下凹式绿地、雨水花园、绿地雨水扩容、雨水滞留设施),这些项目设施能直接改善雨水下渗,减少地表径流的形成,改善公园绿地所在的生态环境。相反既没有公园绿地改造项目又离这些项目较远的区域,如洞庭路分区1,4a中的生态效率一直相对较差。

中新生态城示范区的中部片区3、生态岛东区和西区都临近水域,3个分区都投入大量资金修建水系整治与生态修复项目,这类设施能够较好地直接改善水体的质量。2017—2018年多数设施都在修建当中,因此这3个分区的生态效率值较低,但随着海绵设施的完善,3个分区的生态效率值都得到明显提高。尽管起步东区1也靠近水系,但由于未修建相应的水系整治与生态修复项目,前两年的建设中生态效率值改善结果与前面3个分区相比有一定差距。后期修建了大型海绵公园与绿地项目,提升区域雨水地表径流控制能力,后面也达到生态效率有效的状态。4a建设中只有起步东区2、起步东区3、起步西区2以及中部片区2,相对生态效率平均值大于0.9,都保持生态效率有效的状态。可以发现这4个分区位置相邻,且都位于慧风溪、蓟运河周围,具有类似的生态本底,修建有较多的海绵小区及设施。

3 讨论

解放南路示范区与生态城示范区在2017—2018年的生态效率增长速率都为4a中最高,随着时间的推移到2019年全部竣工投入使用,生态效率值在2020年增长率已趋于平缓。整体上两个示范区的生态效率在4a中都呈现出明显的上升趋势,生态城示范区生态效率值在4a中均好于解放南路示范区。

2020年生态城示范区的整体生态效率平均值0.966,增长空间较小。分析原因,中新生态城示范区不同分区的生态效率值受水系整治与生态修复项目影响较大,随时间推移到2020年各类海绵设施功能发挥已经基本达到饱和状态。在海绵城市建设全域推进过程中,新建城区宜优先采用高标准建设,整体进行规划设计。在建设过程中因地制宜规划设计海绵型公园与绿地项目、下沉式绿地等生态修复项目,针对现有水域特点开展水系综合治理。

解放南路示范区不同分区的生态效率值不仅与各分区下垫面、原始环境有关,也与分区所建海绵设

施有关。在有较多老旧小区的城市宜采用老城区海绵建设模式,充分利用老旧小区改造项目同步开展海绵城市建设。在老旧小区居住小区内宜多修建透水铺装、花坛绿地等,道路两旁宜修建下凹式绿地等,改变原有的下垫面结构既能起到净化水质的作用又能减少地表径流的形成。老城区海绵城市建设由于人口密度大、改造空间小,海绵设施健康管理往往不足,导致海绵设施不能发挥正常功能,因此在建设完成后进入运维期应完善日常管理机制。

研究中采用非期望SBM模型,从示范区和排水分区两个尺度分析生态效率时空差异,从新建区和建成区两种海绵城市建设模式进行对比评价,故产出指标选用水安全类的径流总量控制率(海绵城市建设后各排水分区径流总量控制率)、水生态修复类的水土流失(初期雨水径流SS浓度)、水环境改善类的径流水环境质量(初期雨水径流COD_{Mn}指标),投入指标选用资金投入(分为建设资金、运维资金两类)、用地投入(分为生态用地、建设用地两类),这样评价指标具有一定的代表性,在海绵城市建设效果评价方面具有一定的普遍性。后期随着示范项目完善和数据搜集全面,考虑引入水资源类的雨水资源利用率指标进行评价。

4 结论

(1)从示范区尺度上,在北方半干旱区海绵城市的建设过程中,解放南路示范区与中新生态城示范区建设总体是有效的,从时间序列上4a的生态效率值得到明显提高,新建城区生态城示范区的生态效率优于老城区解放南路示范区。

(2)从分区单元尺度上,各分区原始下垫面特征与生态效率改善情况有较为明显的关系,DMU地块中离主要河流水系较近分区的生态效率改善情况优于离主要河流较远的分区;老旧小区较多的分区生态效率值相对较低;海绵型公园与绿地项目、水系整治与生态修复项目对于生态效率的提升效果较为显著。

(3)随着示范区建设竣工进入运维期,设施运转水平的保持与管理水平的提升,是保持示范区高效率运转的重要影响因素。

参考文献:

- [1] 李萌萌,陈亮,郭祺忠,等.海绵城市及不同设施建设效益的专家问卷调查研究[J].中国给水排水,2021,37(17):107-114.
- [2] 高玉琴,陈佳慧,王冬冬,等.海绵城市低影响开发措施综

- 合效益评价体系及应用[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 13-19.
- [3] 沈炜彬, 邱梦雨, 陈盛达. SWMM 模型下海绵城市建设效果核心指标评价: 以萧山世纪城区域为例 [J]. 给水排水, 2021, 47(8): 61-65.
- [4] 郭清, 常僊宇. 基于模糊综合评价法的地块海绵城市建设效果评估[J]. 给水排水, 2021, 47(增刊1): 167-171.
- [5] 楼诚, 郑晓欣, 廉凡, 等. 嘉兴市海绵设施运行和管护现状调查与分析[J]. 给水排水, 2020, 56(7): 66-70.
- [6] 王翠玲, 刘长礼, 吕敦玉, 等. 郑州市海绵城市建设的地质适宜性评价[J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1626-1635.
- [7] 吴京戎, 姜金延. 基于 DPSIR-EES 和 SD 模型的海绵城市建设绩效评价[J]. 人民长江, 2021, 52(2): 54-59.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51345—2018 海绵城市建设评价标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2018.
- [9] SCHALTEGGER S, STURM A. Ökologische Rationalität: ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten [J]. Die Unternehmung, 1990, 15(2): 273-290.
- [10] 田鹏, 汪浩瀚, 李加林, 等. 东海海岸带县域城市生态效率评价及影响因素[J]. 地理研究, 2021, 40(8): 2347-2366.
- [11] 刘军, 问鼎, 童昀, 等. 基于碳排放核算的中国区域旅游业生态效率测度及比较研究[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1979-1992.
- [12] 马晓君, 李煜东, 王常欣, 等. 约束条件下中国循环经济发展中的生态效率: 基于优化的超效率SBM-Malmquist-Tobit模型[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3584-3593.
- [13] 马勇, 童昀, 任洁. 多源遥感数据支持下的县域尺度生态效率测算及稳健性检验: 以长江中游城市群为例[J]. 自然资源学报, 2019(6): 1196-1208.
- [14] 盖美, 展亚荣. 中国沿海省区海洋生态效率空间格局演化及影响因素分析[J]. 地理科学, 2019, 39(4): 616-625.
- [15] 任胜钢, 张如波, 袁宝龙. 长江经济带工业生态效率评价及区域差异研究[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5485-5497.
- [16] 黄和平, 王智鹏. 江西省农用地生态效率时空差异及影响因素分析: 基于面源污染、碳排放双重视角[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 412-423.
- [17] CHAMES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [18] TONE K. A slack-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.