海绵城市建设水平评价与分区域控制策略

徐心一[1]，张 晨[1,2,3]，朱晓东[1]

(1. 南京大学 环境学院，污染控制与资源化研究国家重点实验室，江苏 南京 210023；2. 福建师范大学 福建省亚热带资源与环境重点实验室，福建 福州 350007；3. 福建师范大学 地理科学学院，福建 福州 350007)

摘 要：[目的] 探讨海绵城市建设成效及其关键影响因素，为中国分区域海绵城市建设规划提供理论依据与政策导向。[方法] 从水环境安全、水资源利用、水污染治理和水人居建设 4 个方面构建了海绵城市建设评价指标体系；根据地形地貌、气象气候、发展规模等区域特征，选取具有代表性的海绵城市建设试点——北京市、重庆市和镇江市作为研究区域；通过主成分分析法与灰色模糊综合评价模型定量分析海绵城市建设指数变化趋势，对比分析不同子目标层建设指数的变化及其差异。[结果] 2006—2015 年研究区域海绵城市建设指数均呈上升趋势，子目标层建设指数中仅北京市及重庆市的水资源利用指数有所下降。[结论] 中国海绵城市建设已取得阶段性成效，城市化与海绵城市建设指数变化联系密切。华北地区和华东地区的海绵城市建设还应分别加强对单位面积水库容积、农业污染负荷的管控；基于地形地貌分析，山地城市的海绵城市建设还应加强对节水量及生活废水排放的管控。

关键词：海绵城市；指标体系；灰色模糊综合评价；分区域管控

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)01-0203-09 **中图分类号**：X8，X24

文献参数：徐心一，张晨，朱晓东. 海绵城市建设水平评价与分区域控制策略[J]. 水土保持通报，2019，39(1)：203-211. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.033；Xu Xinyi，Zhang Chen，Zhu Xiaodong. Evaluation of sponged city construction level and regional governing strategic management[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(1)：203-211.

Evaluation of Sponged City Construction Level and Regional Governing Strategic Management

Xu Xinyi[1]，Zhang Chen[1,2,3]，Zhu Xiaodong[1]

(1. *State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse，School of the Environment，Nanjing University，Nanjing，Jiangsu* 210023，*China*；2. *Fujian Provincial Key Laboratory for Subtropical Resources and Environment，Fujian Normal University，Fuzhou，Fujian* 350007，*China*；3. *College of Geographical Sciences，Fujian Normal University，Fuzhou，Fujian* 350007，*China*)

Abstract：[Objective] To explore the effectiveness of sponge city construction and its key driving factors，in order to provide theoretical basis and policy guidance for sponge city construction in different areas in China. [Methods] The evaluation index system of sponge city construction was established from four aspects including water environment safety，the utilization of water resource，water pollution control and water habitat construction. According to the topography，climate and development scale，Beijing，Chongqing and Zhenjiang City were selected as the study areas. The change of sponge city construction and its key influencing factors was quantitatively analyzed by principal component analysis and fuzzy-gray comprehensive evaluation model. [Results] From 2006 to 2015，the index of sponge city construction showed an upward trend. Of all the sub-target layer construction indexes，only the water resources utilization index of Beijing and Chongqing City has decreased. [Conclusion] Chinese sponge city construction has achieved initial success，and urbanization is closely related to the change of sponge city construction index. The construction of sponge city in North China and East China should also strengthen the control of the reservoir volume per unit area and agricultural

收稿日期：2018-07-16 **修回日期**：2018-09-05

资助项目：国家自然科学基金项目“基于 LOICZ II 的连云港快速城市化海岸带环境效应研究”(40976021)。

第一作者：徐心一(1995—)，女(汉族)，安徽省安庆市人，硕士研究生，主要研究方向为生态环境规划、管理与评价。E-mail：xyxu_nju@hotmail.com。

通讯作者：朱晓东(1963—)，男(汉族)，江苏省无锡市人，博士，教授，主要从事生态环境规划、管理与评价研究。E-mail：xdzhu@nju.edu.cn。

pollution load; and based on topographic analysis, the construction of sponge city in mountainous cities should also strengthen the control of water saving and domestic wastewater discharge.

Keywords: sponge city; evaluation index; fuzzy-gray comprehensive evaluation models; subregional control

城市化是全球经济发展的必然趋势,但城市化进程往往伴随着不恰当的土地利用方式,从而加剧了自然流域地形地貌与植被覆盖状况的改变,阻碍了雨水的自然下渗,使得许多城市在暴雨发生时,雨水不能及时排出,引发内城"看海"现象[1]。另外,人口集聚与城市扩张带来了水资源压力的增大,城市缺水成为全球普遍性现象。为了缓解城市内涝与城市缺水的矛盾,早在 20 世纪 70 年代,一些发达国家即开始采用雨水资源利用与管理手段[2],如美国的"低影响开发"理念,提出了以提高天然渗透能力为目标的雨水收集利用模式[3-4];新加坡的弹性城市建设理念,强调通过中水回用、海水淡化和雨水管理等措施,实现水资源的循环利用[5];澳大利亚的水敏感城市设计理念基于水循环敏感性进行城市的规划和设计,减少对自然水循环的负面影响并修复管理水生态系统的健康等[6-7]。随着这些理念的发展,城市雨水管理中的控制目标也从最初的径流峰值控制向多样化演变,包括水体污染防治、水资源补充、再生水利用等完整的雨水控制体系[8]。

近 20 a 来中国经历了高速的城市化发展,2016 年中国城镇人口比重已达到 57.4%,城市化的快速进程同样带来了严峻的城市水问题[9]。据统计,2007 年以来中国超过 55%的城市遭遇过内涝灾害,60%的城市供水不足,其中严重缺水的城市有 110 个[10]。据此,习近平总书记在 2013 年 12 月的中央城镇化工作会议上提出"建设自然积存、自然渗透和自然净化的海绵城市",开辟了中国特色化的城市雨水管理途径。同时,国内相关学者对海绵城市的理论内涵、管理措施进行了大量的研究[11-12],如俞孔坚等[13]结合北京市等建设案例,阐述了"海绵城市"概念的起源、内涵及多尺度的构建方法体系,而对于评价指标体系的研究尚处探索阶段。2015 年 7 月,住建部颁布的《海绵城市建设绩效评价与考核办法(试行)》(以下简称《办法》)从 6 个方面提出了海绵城市建设情况 18 项考核指标及相应要求[14],但《办法》仅从宏观角度阐释了评价体系的构成要素,并未明确各考核指标的定量评价分析方法[15],且未区分不同区域特征城市的考核要求,无法直接指导海绵城市建设工作的进行。随后相关学者进行了海绵城市建设评价指标体系完善及分析方法的研究[16-17],如王诒建[18]对已有指标体系进行了细化,并提出实现各指标的具体工程项目和措施;胡爱兵等[19]以深圳市某新区为研究区域,对年径流总量控制率等四项指标进行了赋值与评价,但已有研究都只针对单个研究区域的海绵城市建设情况进行评价分析,缺乏区域之间的横向比较,且定量方法研究仅局限于个别指标[20]。而实际上,中国各城市自然地理和社会经济情况复杂多样,缺少本地水问题导向性的指标标准及建设措施,容易使海绵城市建设走弯路,甚至南辕北辙,而指标的量化结果可为城市之间的比较提供必要的依据。综上所述,对不同区域进行海绵城市建设的差异性研究是非常必要的,同时指标的量化分析方法仍需进一步探究。

因此,本文拟基于海绵城市建设目标,从水环境安全、水资源利用、水污染治理和水人居建设 4 个方面,构建一套科学全面的海绵城市建设评价指标体系。在此基础上,考虑地形地貌、气象气候、发展规模的代表性和差异性,选取北京市、重庆市及镇江市海绵城市试点作为研究区域,结合主成分分析法和灰色模糊综合评价模型,利用 SPSS 和 Matlab 软件技术,客观分析在中国快速城市化背景下,研究区域海绵城市建设水平的变化及其关键影响因素,并通过对比各区域研究结果的差异性,进一步制定出针对不同区域特征的海绵城市建设管控目标及相关措施建议,以期为中国海绵城市建设的分区域管控与推进提供科学依据与政策导向。

1 研究区域及方法

1.1 研究区概况

(1) 北京市概况。北京市位于华北平原北部,水资源短缺,受多种气象灾害影响,水问题多发,总面积为 16 400 km^2。该地属半湿润大陆性季风气候,多年平均降雨量为 540 mm,而汛期(7 月下旬和 8 月上旬)雨量约占全年降水量的 75%,极易形成洪涝灾害。北京市内总流域面积为 1 255 km^2。2016 年北京市实现 GDP 2.49×10^{12} 元,年末常住人口 2.17×10^{7} 余人,城区人口密度高达 1 323.48 人/km^2,交通、住房拥挤。依据《中小城市绿皮书》[21]划分标准,北京市属于超大型城市。

(2) 重庆市概况。重庆市位于中国西南部,水资源充沛,总面积为 34 519 km^2。地形由南北向长江河谷倾斜,山地面积高达 76%,以"山城"扬名。该地属季风性湿润气候,降雨充沛,多年平均降雨量为 1 150 mm,且雨量的 70%集中在 5—9 月。境内中小河流

稠密,河流天然落差大,易形成陡涨陡落的尖瘦型洪峰,沿江河谷地带年年遭受洪水威胁。2016 年重庆市实现 GDP1.76×10^{12}元,年末常住人口 3.04×10^{7} 余人,其中城市人口 1.84×10^{7} 余人,属超大型城市。主城区建筑密度大、排水管网密度低。

(3) 镇江市概况。镇江市位于中国东部沿海,水资源丰富,是一座长江大运河交汇处的山水城市,总面积为 3 840 km^{2},其中丘陵山地占 51.1%。该地属亚热带季风气候,多年平均降水量 1 236 mm,水热同期配置合理,4—10 月份降水量占全年的 80%,境内河流总长达 700 余 km。2016 年镇江市实现 GDP3.83×10^{11}元,年末常住人口 3.10×10^{6} 余人,其中城市人口近 1.00×10^{6} 人,属中小型城市。近几年经济发展较为迅速,但面临着水资源污染严重、公园绿地面积不足等问题。

1.2　指标体系构建

海绵城市建设立足于解决城市化发展过程中的水问题,以实现有效缓解城市内涝、降低水资源消耗强度、治理水体面源污染、建设宜居城市生态环境为目标。根据指标体系构建的代表性、敏感性、生态优先及可实施性等原则,本研究结合《办法》所提供的指标体系,确定了水环境安全、水资源利用、水污染治理、水人居建设 4 项子目标层及 26 项底层指标来表征海绵城市的建设水平,并建立了相应的指标体系框架(图 1)。

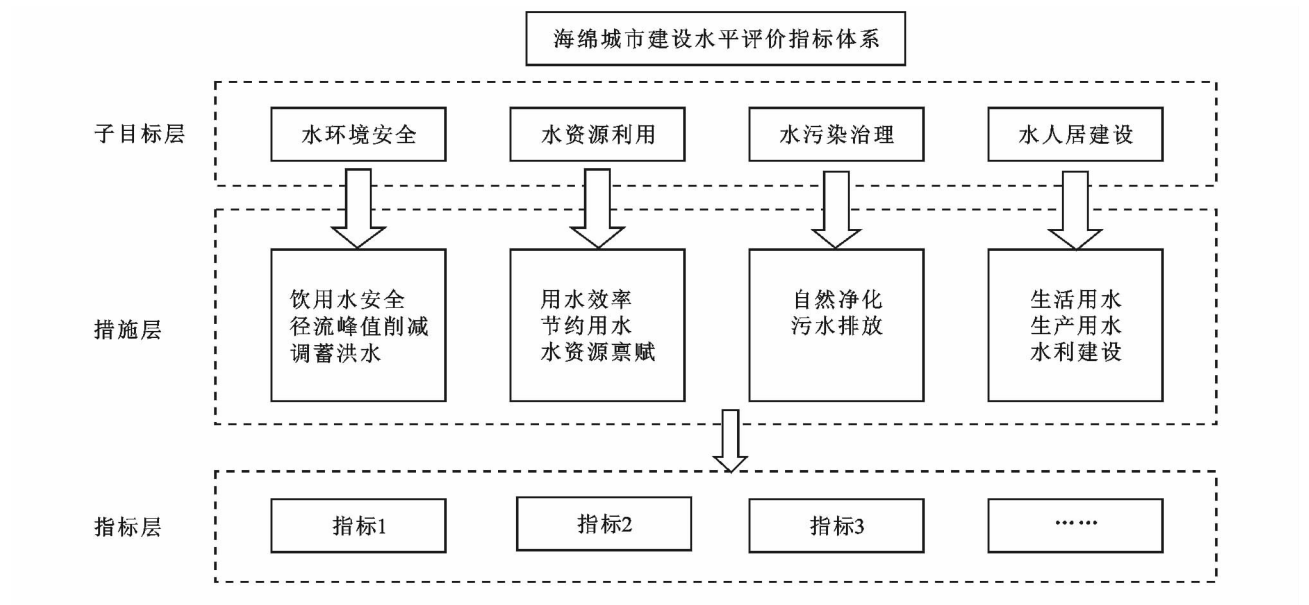


图 1　海绵城市建设水平评价指标体系

4 项子目标层中,水环境安全子目标层旨在评价城市洪涝安全及饮用水安全状况,由城市地面雨水入渗、滞留、蓄积、排水能力及饮用水水质达标率相关指标来表征;水资源利用子目标层旨在评价城市水资源禀赋条件及开发利用状况,其指标主要描述了城市用水效率及地表、地下水总量等;水污染治理子目标层旨在评价水环境质量及自净能力,主要通过污水排放与治理、地表水水质、植被覆盖 3 个方面的相关指标予以表征;水人居建设子目标层反映人类经济社会活动对水环境系统产生的间接压力及驱动作用力,选取了与水资源开发利用密切的社会经济性指标,包括人均用水量、万元 GDP 水耗、水利投资等。

1.3　评价方法

本文将主成分分析法与灰色模糊综合评价模型相结合,采用"组合评价法"按照以下步骤对研究区域海绵城市建设水平进行综合评价。评价具体方法如下。

(1) 数据标准化处理。采用极值标准化法,将指标按照"正、负向"类型进行标准化处理,以消除指标间的量纲影响。

(2) 指标体系综合和简化。运用主成分分析法对研究区域海绵城市建设各项指标进行共线性分析,形成一组新的互相无关的综合指标来代替原来的指标,并以方差作为信息量的测度,对新指标体系进行降维处理,完成对海绵城市构建子系统的主成分评价[22],以消除指标之间的信息重叠。

(3) 海绵城市建设子系统权重确定。利用层次分析法,根据海绵城市建设子系统间的相互关联影响以及隶属关系,确定各子系统相对于海绵城市建设综合评价的相对重要性权值。

(4) 研究区域海绵城市建设综合评价指数计算。将模糊综合评判与灰色综合评价法进行组合,以克服两类方法的缺陷,建立灰色模糊综合评价模型[23-24]。将海绵城市看成是由多项指标组成的模糊集合,运用

灰色关联度求解各指标对相应子目标层的归属程度，然后根据各指标在评价目标中的权重分配，确定研究区域海绵城市建设的模糊评价矩阵，通过计算最终得到研究区域海绵城市建设的综合评价指数（表 1）。

表 1 海绵城市建设评价指标体系选取

子目标层	措施层	底层指标
海绵城市建设评价指标体系	水环境安全	径流峰值削减	入渗量/m^3
			洪涝成灾面积/m^2
		调蓄洪水	绿地率/%
			人均管网基数（m/人）
			调蓄水面保持率/%
		饮用水安全	饮用水水源地达标率/%
	水资源利用	用水效率	再生水利用率/%
			单位面积水库塘坝容积/($m^3 \cdot m^{-2}$)
			管网漏损率/%
		节约用水	节水量/m^3
		水资源禀赋	人均地表水资源总量（m^3/人）
			人均地下水资源总量（m^3/人）
	水污染治理	污水排放	工业废水排放量/kg
			生活废水排放量/kg
			农业污染负荷/($kg \cdot m^{-2}$)
			污水处理率/%
		自然净化	地表水水质达到Ⅲ类比例/%
			湿地面积百分比/%
			森林覆盖率/%
	水人居建设	生活用水	人均用水量（m^3/人）
		生产用水	万元 GDP 水耗/m^3
			人均 GDP（元/人）
		水利建设	人均公园绿地面积（m/人）
			水利投资（万元）
		城市化进程	人口城市化/%
			城市土地扩张/%

注：基础数据来源于中国城市统计年鉴（2006—2015 年）、中国城市建设统计年鉴（2006—2015 年）、中国水利年鉴（2006—2015 年）以及 3 个城市的统计年鉴（2006—2015 年）、环境质量公报（2006—2015 年）、水资源公报（2006—2015 年）、国民经济和社会发展统计公报（2006—2015 年）等。

2 结果与分析

2.1 海绵城市建设指数测算与评价

借助 SPSS 统计分析软件，对标准化后的 26 项底层指标进行主成分分析，根据主成分累计贡献率 $F_1+F_2>85\%$ 的原则，对 4 项子目标层进行主成分选择，选择结果详见表 2。

用各城市的主成分代替原来的指标变量，计算得到水环境安全、水资源利用、水污染治理和水人居建设数值。利用层次分析法和灰色模糊综合评价模型对各子系统根据权重系数进行加权后综合评判，得到研究区域海绵城市建设指数计算结果见表 3。

表 2 主成分因子的方差贡献率分析

城市	指 标	因子	特征根 φ	累计贡献率/%	主因子
北京市	水环境安全	F_1	2.939	58.78	F_1
		F_2	1.267	84.11	F_2
		F_3	0.484	93.78	F_3
		F_4	0.192	97.62	—
		F_5	0.119	100.00	—
	水资源利用	F_1	2.676	44.60	F_1
		F_2	1.547	70.39	F_2
		F_3	1.160	89.72	F_3
		F_4	0.467	97.50	—
		F_5	0.069	100.00	—
	水污染治理	F_1	4.398	62.82	F_1
		F_2	1.841	89.12	F_2
		F_3	0.553	97.03	—
		F_4	0.054	100.00	—
	水人居建设	F_1	5.617	80.24	F_1
		F_2	1.103	96.01	F_2
		F_3	0.012	100.00	—
重庆市	水环境安全	F_1	3.284	54.74	F_1
		F_2	1.226	75.17	F_2
		F_3	1.068	92.21	F_3
		F_4	0.012	100.00	—
	水资源利用	F_1	3.931	65.51	F_1
		F_2	1.252	86.38	F_2
		F_3	0.508	94.85	—
		F_4	0.045	100.00	—
	水污染治理	F_1	5.079	72.56	F_1
		F_2	0.949	86.12	F_2
		F_3	0.036	100.00	—
	水人居建设	F_1	5.117	73.10	F_1
		F_2	1.160	89.67	F_2
		F_3	0.583	98.00	—
		F_4	0.013	100.00	—
镇江市	水环境安全	F_1	3.343	83.57	F_1
		F_2	0.515	96.43	F_2
		F_3	0.027	100.00	—
	水资源利用	F_1	3.257	54.28	F_1
		F_2	1.276	75.56	F_2
		F_3	0.954	91.45	F_3
		F_4	0.021	100.00	—
	水污染治理	F_1	2.930	41.85	F_1
		F_2	2.136	72.37	F_2
		F_3	1.113	88.26	F_3
		F_4	0.039	100.00	—
	水人居建设	F_1	5.707	81.54	F_1
		F_2	1.020	96.10	F_2
		F_3	0.175	100.00	—

表 3　研究区域海绵城市建设指数计算结果

年份	海绵城市建设指数		
	北京市	重庆市	镇江市
2006	0.52	0.55	0.39
2007	0.55	0.56	0.41
2008	0.54	0.54	0.42
2009	0.68	0.56	0.42
2010	0.65	0.54	0.43
2011	0.66	0.58	0.46
2012	0.70	0.55	0.55
2013	0.78	0.72	0.66
2014	0.76	0.67	0.88
2015	0.83	0.79	0.92

如图 2a 所示,2006—2015 年期间北京市、重庆市和镇江市的海绵城市建设指数均呈上升的趋势。其中,镇江市海绵城市建设指数提升较快,上升 135.9%,海绵城市建设水平由相对较差变到了相对较好,表明城市规模较小,海绵城市建设收效更快;北京市及重庆市的海绵城市建设指数均有所波动且提升幅度较小,分别为 59.6%和 43.6%,海绵城市建设水潜力较大。

分别对单个城市进行各子目标层评价结果与分析(见图 2b—2d)。北京市及重庆市各项子目标层中,仅水资源利用指数呈下降的变化趋势,与海绵城市建设指数整体变化趋势相反,而水环境安全、水污染治理及水人居建设子目标层指数均呈上升趋势,与海绵城市建设指数整体变化趋势一致,表明大型城市水生态环境建设与污染治理均得到有效改善,对海绵城市建设水平有一定程度的积极影响,而被大量消耗的水资源成为其海绵城市建设过程中的短板。镇江市的各子目标层指数均呈上升的变化趋势,与海绵城市建设指数整体变化趋势一致,其中水污染治理指数上升幅度最慢,且其水平远远低于北京市与重庆市,表明中小型城市的水污染治理可能是其海绵城市建设过程中的短板。

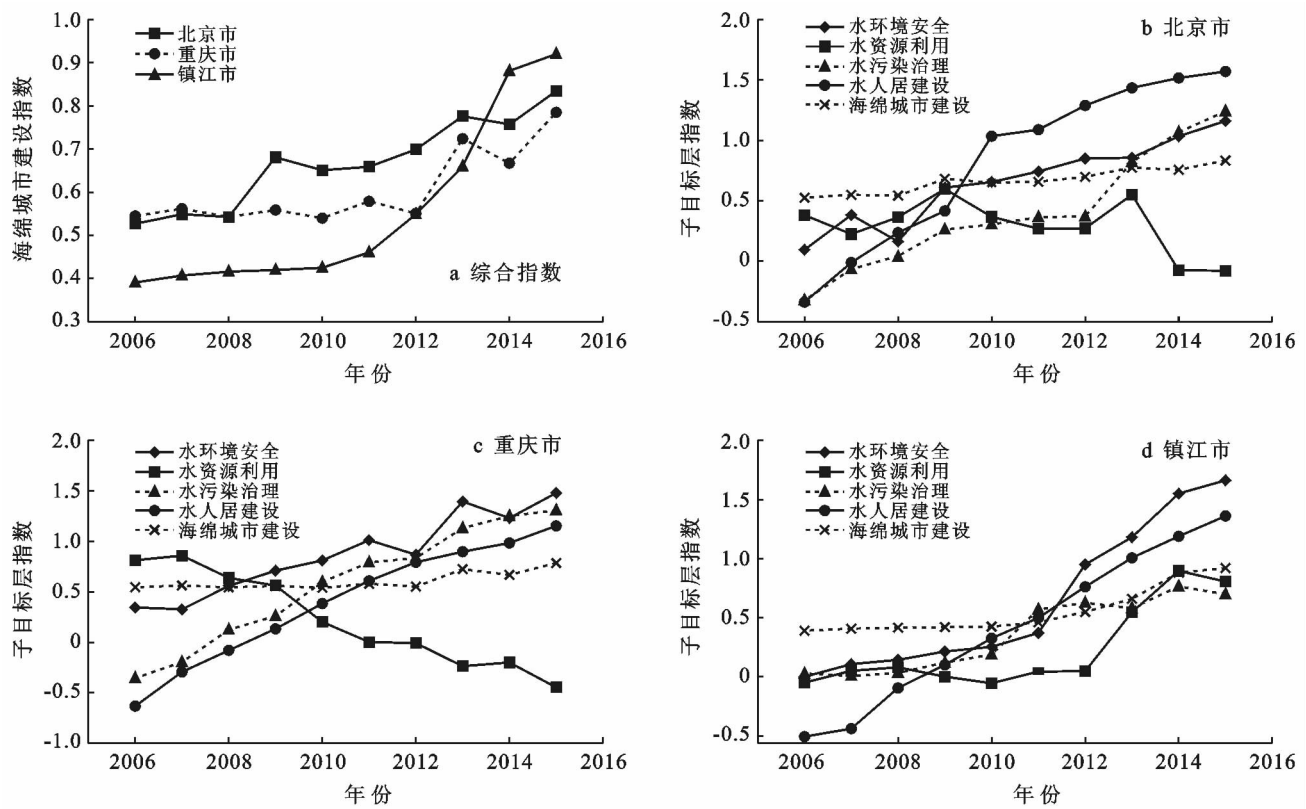


图 2　研究区域海绵城市建设指数变化趋势

2.2　水环境安全评价分析

如图 3 所示,2006—2015 年期间研究区域水环境安全指数均呈上升的变化趋势,其中,镇江市的水环境安全指数提升较快且水平相对较高,水环境安全建设成效较为显著;重庆市的水环境安全指数前期处于较高水平,但上升幅度相对较小,表明重庆市的水环境安全状况相对较好但建设力度仍有不足;北京市的水环境安全指数则相对较小,水环境安全状况相对较差。

基于以上结果,进一步运用主成分分析法探究水

环境安全指数的关键影响因素。由结果可知,北京市及重庆市水环境安全指数的第一主成分与人均管网基数之间存在较高的相关性(相关系数分别为+0.90和+0.96),表明人均管网基数是北京市及重庆市水环境安全状况变化的关键影响因素,且该基数的增大对北京市及重庆市的水环境安全建设具有较强推动作用。同理,绿地率(+0.97)、入渗量(+0.95)及人均管网基数(+0.91)是镇江市水环境安全状况变化的关键影响因素且同样起正向推动作用。通过对研究区域的现状分析,由于超大型城市人口与建筑高度集中,而排水管网系统的建设不能满足城市需求,北京市具有较高的排水压力,水环境安全性能相对较差。重庆市的城市规模虽不及北京市,但其特殊的山地地形加速了雨水的径流过程,径流量的控制较高地依赖排水系统和雨水回用[17],突发性暴雨发生时易产生内涝灾害,水环境安全指数波动较大。镇江市城市规模较小且河网密集,降雨引发的径流雨水能有效地被水体容纳,水环境安全性能较好。

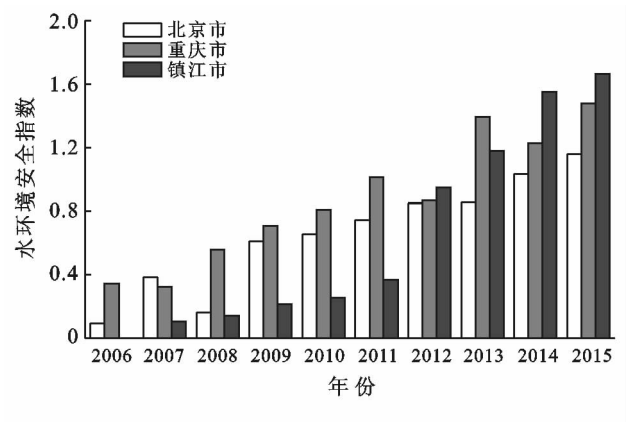


图 3 研究区域水环境安全指数变化趋势

2.3 水资源利用评价分析

如图 4 所示,2006—2015 年期间研究区域的水资源利用指数变化差异较大。其中,镇江市的水资源利用指数提升较快且数值相对较大,水资源利用建设成效较为显著;北京市的水资源利用指数有明显波动,而重庆市的水资源利用指数则呈下降趋势,从2013 年开始降为负值,说明其水资源利用建设严重不足。

根据主成分分析结果可知,节水量(+0.94)和单位面积水库容积(-0.92)是重庆市水资源利用状况变化的关键影响因素,其中节水量的增多对重庆市水资源利用建设有较强阻碍作用,而单位面积水库容积的增大则对水资源利用建设有较强的促进作用。而北京市和镇江市水资源利用指数的关键影响因素分别为单位面积水库容积(+0.86)和再生水利用率(+0.91),且这两项指标同样起正向推动作用。通过对研究区域的现状分析,镇江市所处的华东地区近年来逐步重视节水型社会建设,加大工农业水循环技术改造,有效提高了城市再生水利用率,水资源利用状态较好。北京市所处的华北地区水资源保有量少、需求大,水利设施修建空间较小,水资源利用状况较差。重庆市所处的西南地区节水建设不足,水利设施建设与管理手段相对落后,起伏的地形加大了水资源利用难度,水资源利用状况较差。

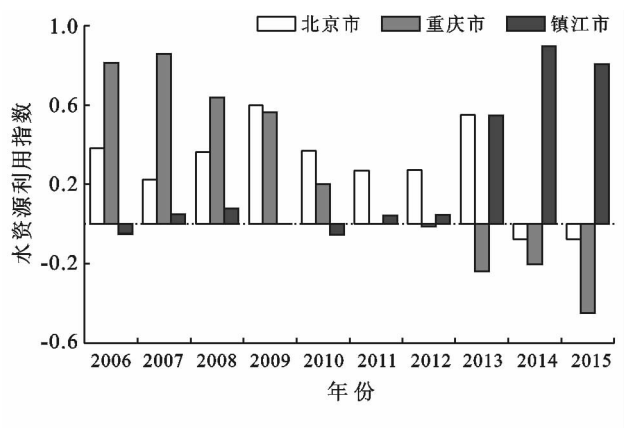


图 4 研究区域水资源利用指数变化趋势

2.4 水污染治理评价分析

如图 5 所示,2006—2015 年期间研究区域水污染治理指数变化趋势略有差异。其中,北京市和重庆市的水污染治理指数均呈上升的变化趋势,表明水污染治理建设已显成效;而镇江市的水污染治理指数有所波动,提升幅度相对较小,水污染治理建设仍有不足。

根据主成分分析结果可知,镇江市水污染治理指数变化的关键影响因素为农业污染负荷(-0.97),且该数值的增大对镇江市水污染治理建设起阻碍作用;森林覆盖率(+0.97)和污水处理率(+0.96)是北京市的关键影响因素,这两项指标同样对北京市的水污染治理建设有正向推动作用;而重庆市的关键影响因素则为生活废水排放量(-0.99)、森林覆盖率(+0.98)和工业废水排放量(+0.93),其中生活废水排放量的增加对重庆市水污染治理建设起阻碍作用,而森林覆盖率和工业废水排放量的增加则起推动作用。通过对研究区域的现状分析,城市化水平相对较低的镇江市农业面源污染负荷相对较大,农药化肥等农业面源污染物经雨水冲刷进入水体,水污染治理状况较差。城市化水平相对较高的北京市和重庆市近年来大力建设污水处理厂、实施绿色城市建设工程等,有效地增强了城市污水处理能力,北京市及重庆市的水污染治理状况相对较好。

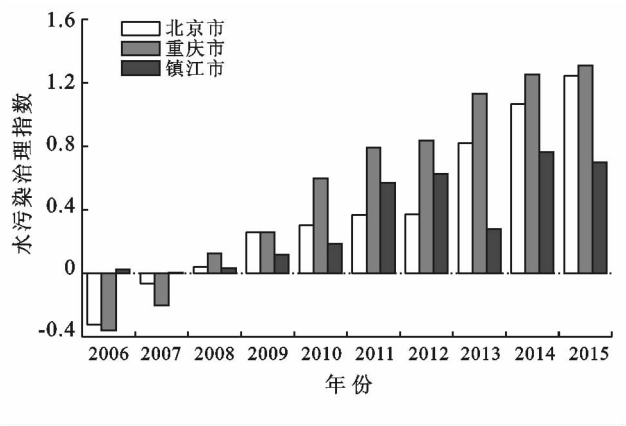


图 5　研究区域水污染治理指数变化趋势

2.5　水人居建设评价分析

如图 6 所示,2006—2015 年期间研究区域的水人居建设指数均呈上升的变化趋势,表明 3 个城市的水人居建设均有成效。其中,北京市的水人居建设指数提升较快,而重庆市与镇江市的水人居建设指数变化趋势及水平较为接近,均低于北京。

根据主成分分析结果可知,人均 GDP(+0.96)、城市土地扩张(−0.95)和人均公园绿地面积(+0.90)是镇江市水人居建设状况变化的关键影响因素,其中城市土地扩张对镇江市水人居建设有较强的阻碍作用,而人均 GDP 及人均公园绿地面积的增大则起推动作用。重庆市与北京市水人居建设的关键影响因素为万元 GDP 水耗(+0.95/+0.92)和人口城市化(−0.91/−0.90),其中万元 GDP 水耗的增加对水人居建设有较强推动作用,而人口城市化则有较强的抑制作用。通过对研究区域的现状分析,北京市所处的华北地区经济发展较快,人类活动对水环境系统产生的驱动效果更为显著,水人居建设水平相对较高;而重庆市的经济水平虽优于镇江市,但其人口规模带来的压力也更大,水人居建设水平与镇江市相近,均相对较差。

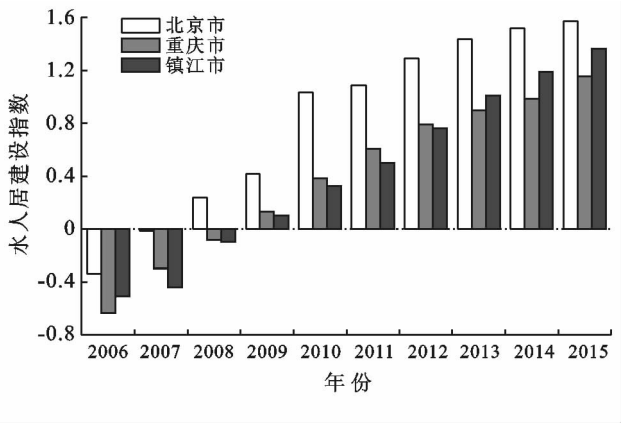


图 6　研究区域水人居建设指数变化趋势

2.6　重点管控指标分析

综合海绵城市建设指数变化及其关键影响因素的分析结果,当子目标层评价结果呈上升的变化趋势时,关键影响指标的相关系数为负值则表示其对海绵城市建设具有较强的限制作用,这类指标对海绵城市建设有较大的不良影响,是急需解决的关键因素,需要严格把控,本文将其定义为高管控指标;而当系数为正值则表明其对海绵城市建设具有较强的推进作用,有利于海绵城市建设状况的改善,本文将其定义为低管控指标,并分别提出相应的管控措施。同理,当子目标层评价结果呈下降的变化趋势时,高管控和低管控的划分依据相反,划分结果见表 4。

表 4　不同研究区域特征及其关键影响指标

影响指标		北京市	重庆市	镇江市
地形地貌		平 原	山 地	丘 陵
地理位置		华北地区	西南地区	华东地区
城市化水平/%	城镇人口占比	86.50	60.94	67.90
	建成区面积比	8.54	5.11	3.57
海绵城市建设指数		0.83	0.79	0.92
关键影响指标	高管控指标	人口城市化(−0.90) 单位面积水库容积(+0.86)	人口城市化(−0.91) 节水量(+0.94) 生活废水排放量(−0.99)	城市土地扩张(−0.95) 农业污染负荷(−0.97)
	低管控指标	人均管网基数(+0.90) 森林覆盖率(+0.97) 万元 GDP 水耗(+0.92) 污水处理率(+0.96)	人均管网基数(+0.96) 森林覆盖率(+0.98) 万元 GDP 水耗(+0.95) 单位面积水库容积(−0.92) 工业废水排放量(+0.93)	人均管网基数(+0.91) 人均 GDP(+0.96) 人均公园绿地面积(+0.90) 入渗量(+0.95) 再生水利用率(+0.91)绿地率(+0.97)

注:表中数据基准年均为 2015 年;关键影响指标后数值表示该指标与目标层的相关系数。

本研究结果显示不同地区海绵城市建设的高管控与低管控指标具有较显著的差异性。北京市的高管控指标为人口城市化和单位面积水库容积,表明华北地区对这两项指标的要求应严于华东地区与西南地区,海绵城市建设应注重提升水利设施调蓄雨水能力,引导城镇人口向周边城市转移;重庆市的高管控指标为人口城市化、节水量和生活废水排放量,表明山地城市对这 3 项指标的要求应严于平原与丘陵地区,海绵城市建设需加强城市节水改造、提升森林抚育力度,并抬高城镇落户门槛以控制人口数量;而镇江市的高管控指标为城市土地扩张和农业污染负荷,表明华东地区对这两项指标的要求应严于华北、西南地区,海绵城市建设需加大农药化肥、畜禽水产养殖的管控力度,引导建设用地从新增向存量挖潜转变,并保护水源涵养区面积不减少。

3 结 论

作为新型城镇化建设过程中的一项重大举措,海绵城市已在中国多个城市开展了试点建设,如何针对城市的区域特征有效的提出相应的管控策略是各界关注的重点问题。本文从水环境安全、水资源利用、水污染治理、水人居建设 4 个方面构建了一套完整的海绵城市建设评价指标体系。运用主成分分析法和灰色模糊综合评价模型,对北京市、重庆市及镇江市的海绵城市建设状况做出了定量评估,结果显示研究区域 2006—2015 年海绵城市建设指数均呈上升的变化趋势,表明海绵城市建设已有成效。对比分析各子目标层变化趋势及关键影响因素的区域差异性,本研究得到以下主要研究结论并提出了不同区域海绵城市建设的相关政策建议。

(1) 水环境安全指数均有显著提高。城市规模较小的镇江市水环境安全指数相对较高,推动其水环境安全建设的关键因素中,绿地率的数值相对较低,因此镇江市的海绵城市建设工作需进一步扩大绿地面积,提高雨水的入渗能力;城市规模较大的北京市及重庆市水环境安全指数相对较低,人均管网基数作为推动其水环境安全建设的关键因素,海绵城市建设应注重城市管网系统优化建设。

(2) 水资源利用指数变化差异较大。镇江市的水资源利用指数大幅度上升,再生水利用率是推动其水资源高效利用的关键因素,反映了华东地区的海绵城市建设应注重水的循环利用,提高用水效率;北京市的水资源利用指数波动较大,单位面积水库容积是推动其水资源高效利用的关键因素,反映了华北地区的海绵城市建设应加强水库等水利工程实施力度,提高水利设施蓄洪补枯作用;重庆市的水资源利用指数持续下降,节水量及单位面积水库容积作为推动其水资源高效利用的关键因素,反映了西南地区的海绵城市建设应注重工农业节水改造,同时加大水利基础设施的修建。

(3) 研究区域水污染治理指数均呈上升趋势。城市化水平较高的北京市及重庆市水污染治理指数提升较快,但废水排放量及污水处理率仍是阻碍其水污染治理的关键因素,海绵城市建设需进一步加大重点涉水行业的综合整治,推进污水处理设施的建设;城市化水平较低的镇江市水污染治理指数波动较大,农业污染负荷是阻碍其水污染治理的关键因素,镇江市的海绵城市建设应加大对农药化肥、畜禽污染的管控力度。

(4) 研究区域水人居建设指数均有显著提高。北京市的水人居建设指数相对较高,但人口城市化是阻碍其水人居建设的关键因素,应注意华北地区的海绵城市建设中城市人口扩张问题。镇江市及重庆市的水人居建设指数相对较低,城市土地扩张对镇江市水人居建设有较强的阻碍作用,说明华东地区海绵城市建设应严守城市开发边界,保护水源涵养区及湿地面积不减少;而人口城市化对重庆市水人居建设有较强的阻碍作用,说明西南地区的海绵城市建设应严格控制其人口规模,优化人口结构及空间分布。

(5) 基于以上结果与分析,本研究提出了中国分区域海绵城市建设的重点指标管控目标:基于地理位置分析,华北地区的海绵城市建设应加强对单位面积水库容积、人口城市化的指标管控;华东地区的海绵城市建设应加强对农业污染负荷、城市土地扩张的指标管控。基于地形地貌分析,山地地区的海绵城市建设应加强对节水量、生活废水排放量、人口城市化的指标管控。

综上所述,本研究结果对于中国分区域海绵城市建设工作的合理有序开展具有一定的实用价值,同时可为完善与细化海绵城市分区域管控目标提供一定的科学依据。但限于数据的可获得性,本文未将海绵城市制度建设纳入评价指标体系研究。因此,未来的研究将进一步考虑海绵城市制度建设水平,并纳入更多类型的区域进行对比分析,从而完善相应的指标体系。

[参 考 文 献]

[1] 杨帆,徐建刚,林蔚. 基于元胞自动机的低影响开发对城市内涝削减效果模拟[J]. 自然资源学报,2017,23(7):1158-1169.

[2] 车伍,闫攀,赵杨,等. 国际现代雨洪管理体系的发展及

剖析[J]. 中国给水排水,2014,30(18):45-51.
[3] Dietz M E. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007,186(1/2/3/4):351-363.
[4] Agency U S E P. Low impact development(LID): A literature review[R]. Epa-841-B-00-005, Office of Water, Washington, D. C, 2000.
[5] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 城乡建设,2015(2):8-15,4.
[6] Roy A H, Wengerr S J, Fletcher T D, et al. Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: Lessons from Australia and the United States[J]. Environ Manage, 2008,42(2):344-59.
[7] Hoyer J, Dickhaut W, Kronawitter L, et al. Water sensitive urban design-principles and inspiration for sustainable stormwater management in the city of the future [M]. Berlin: Jovis Publishing Company, 2011:79-87.
[8] 王虹,丁留谦,程晓陶,等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. 水利学报,2015,46(11):1261-1271,1279.
[9] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展,2016,27(6):793-799.
[10] 张浪,郑思俊. 海绵城市理论及其在中国城市的应用意义和途径[J]. 现代城市研究,2016(7):2-5.
[11] 王俊岭,王雪明,张安,等. 基于"海绵城市"理念的透水铺装系统的研究进展[J]. 环境工程,2015,33(12):1-4,110.
[12] 刘昌明,张永勇,王中根,等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. 自然资源学报,2016,31(5):719-731.
[13] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等. "海绵城市"理论与实践[J]. 城市规划,2015,39(6):26-36.
[14] 中华人民共和国住房与城乡建设部. 关于印发《海绵城市建设绩效评价与考核办法》的通知(建成[2015]635 号)[Z]. 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2015-07-10.
[15] 马越,甘旭,邓朝显,等. 海绵城市考核监测体系涉水核心指标的评价分析方法探讨[J]. 净水技术,2016,35(4):42-51.
[16] 潘笑文,徐得潜. 基于典型年法的海绵城市建设控制指标研究[J]. 水土保持通报,2017,37(1):123-127,131.
[17] 尹洪军,靳俊伟,程巍,等. 重庆海绵城市建设规划层面的控制指标量化探索[J]. 中国给水排水,2016,32(21):152-155.
[18] 王诒建. 海绵城市控制指标体系构建探讨[J]. 规划师,2016,32(5):10-16.
[19] 胡爱兵,任心欣,丁年. 深圳市某区域"海绵城市"目标分解机制及指标体系构建[C]// 2015 中国城市规划年会,2015.
[20] 任心欣,汤伟真. 海绵城市年径流总量控制率等指标应用初探[J]. 中国给水排水,2015,31(13):105-109.
[21] 中国城市经济学会中小城市经济发展委员会. 中国中小城市发展报告(2010):中国中小城市绿色发展之路[R]. 北京:社会科学文献出版社,2010:15-18.
[22] 张晨,赵言文,于莉. 烟台市牟平区生态承载力研究[J]. 水土保持通报,2012,32(4):271-275.
[23] 邹源飞. 海绵城市指标体系在控规中的实证研究[J]. 低碳世界,2017(6):173-174.
[24] 席文娟. 改进模糊综合评价法在水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(3):25-29.

(上接第 202 页)

[11] 向延平. 湘鄂渝黔边区旅游扶贫绩效评价感知调查研究:以德夯苗寨为例[J]. 资源开发与市场,2009,25(7):655-657.
[12] 安志杰,包纪祥,杜世德. 科技扶贫成效综合评价研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,1993,21(2):82-88.
[13] 郭建宇. 农业产业化扶贫效果分析:以山西省为对象[J]. 西北农林科技大学学报:社会科学版,2010,10(4):20-26.
[14] 田大庆,王奇,叶文虎. 三生共赢:可持续发展的根本目标与行为准则[J]. 中国人口·资源与环境,2004,14(2):9-12.
[15] 林闽钢. 中国农村贫困标准的调适研究[J]. 中国农村经济,1994(2):56-59.
[16] 汪三贵. 中国农村的贫困问题[J]. 农村经济与社会,1991(6):1-10.
[17] 庄天慧,张军. 民族地区扶贫开发研究:基于致贫因子与孕灾环境契合的视角[J]. 农业经济问题,2012(8):50-55,111.
[18] 祝慧,莫光辉. 精准扶贫的阶段性成效与创新突破[J]. 经济纵横,2016(7):53-57.
[19] 朱志祥. 以十九大精神引领生态文明建设,守护好佛山的绿水青山金山银山[N]. 佛山日报,2017-11-20(A01).
[20] 张家其,吴宜进,葛咏,等. 基于灰色关联模型的贫困地区生态安全综合评价:以恩施贫困地区为例[J]. 地理研究,2014,33(8):1457-1466.
[21] 张家其,段维维,朱烜伯. 湘西农村贫困地区人居环境综合评价[J]. 企业经济,2018,37(9):176-181.