

基于集对分析耦合可变模糊集的海绵城市建设绩效评价

丁 琨, 倪 勇, 范凌峰

(安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 针对海绵城市建设现状, 构建 5 项一级指标和 21 项二级指标的海绵城市绩效评价指标体系, 利用综合赋权法为评价指标赋权, 将集对分析与可变模糊集耦合, 对海绵城市绩效进行综合评价, 通过实例表征该方法应用于海绵城市建设绩效评价较为科学合理。

关键词: 海绵城市; 集对分析; 可变模糊集; 层次分析法; 绩效评价

中图分类号: TU99

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2022) 01-051-07

Performance Evaluation of Sponge City Construction Based on Set Pair Analysis Coupled with Variable Fuzzy Sets

DING Kun, NI Yong, FAN Lingfeng

(School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In view of the current situation of sponge city construction, the sponge city performance evaluation index system with 5 primary indicators and 21 secondary indicators is constructed, and the comprehensive assignment method is used to assign weights to the evaluation indicators, coupling the setpair analysis with variable fuzzy sets to make a comprehensive evaluation of sponge city performance. The example proved that it is a scientific, available method for the performance evaluation of sponge city construction.

Keywords: sponge city; set pair analysis; variable fuzzy set; analytic hierarchy process; performance evaluation

“海绵城市”指城市可以像海绵一般在环境变化的适应和自然灾害的应对上具有很好的弹性^[1]。但随着我国城市化建设的快速发展,从前那种粗放式利用土地和破坏自然为主的城市建设模式,使城市原始的水生态、水环境被严重破坏,从而导致各种水问题突出。当城市遇到洪涝灾害时,可以采用渗、滞、蓄、净、用、排等措施^[2],储存和利用城市的大部分降雨,在干旱时补给城市,从而提高城市应

对环境变化的能力,缓解城市在快速发展过程中所造成的各种负面影响。目前,我国海绵城市建设的措施和方案很多,影响因素也很复杂,因此需要构建科学合理的评价方法^[3]。

刘秋常^[4]将 TOPSIS 法和熵权法相结合,对鹤壁市海绵城市建设绩效等级进行了准确评价。翟慧敏^[5]则通过层次分析结合物元分析法对鹤壁市进行了实证分析。刘、翟二人使用的理论有差别,

收稿日期: 2021-09-15

基金项目: 国家“十三五”水专项资助项目(2017ZX07303); 安徽省高校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2018A0508); 安徽省质量工程资助项目(2018sjjd072)

作者简介: 丁琨(1968-), 男, 教授, 硕士, 研究方向: 海绵城市建设和水处理技术。

但评价结果却相近。黄丽娟、朱伟伟^[6-7]等通过层次分析法来确定指标的权重,根据权重可对海绵城市建设进行针对性地指导。程鸿群^[8]采用群组评价理论改进了权重和绩效值群组的一致性,使专家打分具有可靠性。徐心一^[9]利用灰色模糊评价模型结合主成分分析方法,对北京、镇江、重庆三市的海绵城市建设情况和差异性进行了研究,为日后城市建设提供理论指导。

上述评价方法主要以灰色综合评价法、层次分析法为主,在一定程度易受主观因素影响,评价结果会有一定的偏差。集对分析-可变模糊集耦合将主观客观相结合,减少主观影响程度,并且方法构造简明,计算方便,适用于解决各种不确定性问题。

1 海绵城市建设绩效评价指标体系建立

1.1 指标选择依据

根据住建部 2015 年 7 月发布的海绵城市建设绩效评价方法,可从水生态、水环境、水资源、水安全、制度建设及执行情况、显示度等六个方面对海绵城市进行评价和考核。在构建海绵城市建设的评价指标体系时,还应参考《绿色生态城区评价标准》、《水生态文明城市建设评价导则》、《生态环境评价技术规范》等相关文件。

1.2 指标筛选方法

基于以上构建评价指标体系的相关原则,在指标筛选过程中,既要考虑指标的科学性、独立性,又要考虑个别指标的特殊性和现况认知的差异性,既不能用单一因素来确定指标的取舍,也不能强求指标的衡量方法与准确性的一致性,必要时需要根据评价者对当前研究领域的熟悉程度来做出判断。通过选取“水”、“径流控制”、“径流污染控制”、“海绵城市”、“海绵城市评价”等关键词,查找与低影响开发、低碳城市、海绵城市等相关的评价标准,通过理论分析、频度统计、专家咨询等方法,分析海绵城市的内涵、目标、影响因素及其发展状况,并根据被评价城市的自然环境特征和经济状况,对专家意见进一步调整,最终形成真实可靠、可操作的评价指标体系^[10]。

通过对住建部颁布的《海绵城市指标构建原

则》进行了分析,确定海绵城市建设措施影响评价的指标体系,从五大影响因素中筛出 21 项指标因子^[11],对海绵城市建设措施的影响性进行综合评价分析,见表 1。

表 1 海绵城市建设措施影响评价指标体系

影响因素	关联指标因子
径流总量	年降雨量、建成区城市绿化覆盖率、地下水资源量
径流峰值	城市排水管道密度、水库总库容量、森林覆盖率、水灾受灾面积
径流污染	平均降水 pH、城市污水处理能力、化学需氧量排放量、氨氮排放量、湿地面积率、饮用水水质达标率
水资源利用	生态用水总量、水资源开发利用率、水域及水利面积、人均水资源量、管网漏损控制
社会经济	城市化率、城市人口密度、生态建设与投资比

2 海绵城市建设绩效评价模型

2.1 评价指标综合权重

2.1.1 主观赋权-层次分析法

(1) 比较两层元素,构建判断矩阵 P ^[12]。

$$P = A - B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

其中, b_{mn} 为同一层次中,第 m 元素对第 n 元素的相对重要性。

表 2 指标相对重要程度赋值

标度赋值	指标重要性比较结果说明
1	元素 m 与 n 具有相同重要性
3	元素 m 与 n 略重要
5	元素 m 与 n 十分重要
7	元素 m 与 n 非常重要
9	元素 m 与 n 极其重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断矩阵的中间值
倒数	语义描述相反

(2) 依照判断矩阵 P , 求出最大特征值 $\lambda_{\max}$ 的特征向量 w , 计算其相对权重:

$$Pw = \lambda_{\max} w \quad (2-2)$$

各评价指标权重用标准化后的特征向量表示。

(3) 为尽量保证专家判断思维一致性,不至于

出现互相矛盾,需检验其一致性。公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (2-3)$$

式中, CI 可表示判断矩阵的一致性,最大特征值用 $\lambda_{\max}$ 表示,矩阵的阶数用 n 表示,具体数值参考表 3。

表 3 RI 值参照表

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2-4)$$

式中, CR 为判断矩阵的随机一致性比率。

2.1.2 客观赋权 - 熵权法

(1) 形成决策矩阵^[13]

假设用于评价的指标有 n 个,被评价的对象有 m 个,则依据样本实测值来形成矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times m}$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

(2) 对其进行标准化处理

对于值越大则表示越优的指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (2-6)$$

对于值越小则表示越优的指标:

$$y_{ij} = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (2-7)$$

式中, y_{ij} 表示标准化后的值, $\max(x_i)$, $\min(x_i)$ 表示指标的最大和最小值。

由此得到隶属度矩阵 Y

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

(3) 计算指标 i , 对象 j 的特征比重 P_{ij} :

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^m y_{ij}} \quad (2-9)$$

(4) 计算指标 i 的熵值 e_i :

$$e_i = -\frac{\sum_{j=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij})}{\ln(m)} \quad (2-10)$$

(5) 计算指标 i 的差异性系数 d_i :

$$d_i = 1 - e_i \quad (2-11)$$

(6) 确定指标权重:

$$w_i = \frac{d_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (2-12)$$

式中, $0 \leq w_i \leq 1$ $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

2.1.3 主客观综合权重确定

用 $sw(i)$ 表示主观赋权,用 $ow(i)$ 表示客观赋权,用 $cw(i)$ 表示综合权重。公式如下:

$$cw(i) = \frac{\sqrt{sw(i) \times ow(i)}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{sw(i) \times ow(i)}} \quad (2-13)$$

2.2 集对分析与可变模糊集耦合方法

(1) 集对分析

设 $A = (a_1, a_2, \cdots, a_n)$, $B = (b_1, b_2, \cdots, b_n)$ 。 A 和 B 在论域上具有一定联系,其所构成的集对记作 $H(A, B)$ 。

$$\mu_{A-B} = \frac{s}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (2-14)$$

式中, μ_{A-B} 称为 $H(A, B)$ 的联系度;

$$\text{令 } a = \frac{s}{N}, b = \frac{F}{N}, c = \frac{P}{N} \quad (2-15)$$

$$\mu_{A-B} = a + bi + cj \quad (2-16)$$

式中, S 表示同一性个数; P 表示对立性个数; F 表示差异性个数,且满足 $S+F+P=N$ 。 a 、 b 、 c 分别表示同一性、差异性。

(2) 基于集对分析 - 可变模糊集耦合的综合评价模型^[14]

设各个指标在各等级区间的边界为 $N_{j,s}$, 为表示两个集合之间的模糊联系度 μ_{pjs} , 则需得到实际数据和指标等级之间的接近程度。计算公式如下:

$$\mu_{pjs} = \begin{cases} 1 - 2 \cdot \left| \frac{N_{j,s-1} - x_{pj}}{N_{j,s-1} - N_{j,s-2}} \right| & x_{pj} \text{ 落在相邻标准集 } s-1 \text{ 内} \\ 1 & x_{pj} \text{ 落在讨论集 } s \text{ 内} \\ 1 - 2 \cdot \left| \frac{x_{pj} - N_{j,s}}{N_{j,s+1} - N_{j,s}} \right| & x_{pj} \text{ 落在相邻标准集 } s+1 \text{ 内} \\ -1 & x_{pj} \text{ 落在其他标准集内} \end{cases} \quad (2-17)$$

按下式来计算样本与评价等级之间的综合联

系度 μ_{ps} , 即

$$\mu_{ps} = \sum_{j=1}^m w \mu_{pjs} \tag{2-18}$$

式中, 其指标的综合赋权用 w 表示, 其相对隶属度为:

$$r_{ps} = 0.5 + 0.5 \mu_{ps} \tag{2-19}$$

3 案例分析

以我国首批海绵城市建设试点镇江市为例, 运用集对分析 - 可变模糊集对其进行绩效综合评价。

3.1 指标数据收集

(1) 数据来源

镇江评价指标数值(表 4)主要来自 2015-2020 年《中国统计年鉴》、《江苏省统计年鉴》、《镇江市水资源公报》。

(2) 指标标准化处理

为保证评价结果正确, 需对上表数据进行标准化, 其处理后的结果见表 5。

3.2 指标权重的确定

先利用层次分析法, 对镇江设置 I、II、III 三个基础评价等级, 并邀请 5 位专家根据其研究领域和经验水平进行评价并取均值。以目标层为例, 对准则层的五项指标两两进行比较得到判断矩阵 P , 计算判断矩阵 $\lambda_{\max}=5.653\ 5$ 的最大特征值, 利用一致性指标公式计算得到 $CI=0.060\ 4$, $CR=0.061\ 7$, 并且 CR 的值是小于 0.1 的, 因此矩阵 P 符合一致性。再将特征向量归一化后的向量 $w=(0.390\ 3, 0.259\ 3, 0.187\ 0, 0.112\ 6, 0.050\ 8)^T$ 作为各指标的权重, 再利用熵权法和综合法计算得到主客观的综合权重, 结果见表 6。

表 4 镇江市海绵城市评价指标数据汇总

评价要素	评价指标	2014	2015	2016	2017	2018	2019
径流总量控制	年降水量	1 120.5	1 579.1	1 996.1	1 332.4	1 272.1	736.6
	地下水资源量	4	5.5	5	2.7	3	1.8
	建成区绿地覆盖率	40	41.9	42.5	43	43.2	43.5
径流峰值控制	城市排水管道密度	18.2	14.2	14.5	10.1	10.4	10.2
	水库总库容量	495	498	501	503	505	507
	森林覆盖率	41.5	41.9	42.3	42.5	42.9	43.1
	水灾受灾面积	5.9	224.77	11.5	13.79	8.71	6.77
	平均降水 pH	6.09	6.08	6.09	6.22	6.34	6.45
径流污染控制	城市污水处理率	92.8	93.5	94.5	95.3	95.9	96.5
	化学需氧量排放量	5 670.39	5 370.2	5 102.5	4 846.9	4 603.5	4 373.4
	氨氮排放量	502.75	477.5	453.2	430.54	409.1	388.6
	湿地面积率	10.2	10.2	10.9	10.9	10.9	10.9
	饮用水源水质达标率	95.6	100	92.3	100	95.3	97.9
水资源控制与利用	生态用水总量	15.2	33	43.2	24.3	15	6.7
	水资源开发利用率	5.3	5.5	6.2	6.3	6.5	7.1
	水域及水利面积	12.5	12.7	13.1	13.4	13.5	13.6
	人均水资源量	479.3	1 038.9	1 357.9	762.6	469.3	209.1
	管网漏损率	15.6	15.2	14.5	13.25	11.5	9.5
社会经济	城市化率	66.6	67.9	69.2	70.5	71.2	72.2
	城市人口密度	2 915	2 920	2 924	2 929	2 938	2 945
	生态建设与保护投资比重	3.01	3.25	3.51	3.64	3.78	3.87

表 5 镇江市各指标数据标准化值

准则层	指标层	2014	2015	2016	2017	2018	2019
径流总量控制 (B ₁)	B ₁₁	0.695 2	0.331 1	0.000 0	0.527 0	0.574 8	1.000 0
	B ₁₂	0.594 6	1.000 0	0.864 9	0.243 2	0.324 3	0.000 0
	B ₁₃	0.000 0	0.542 9	0.714 3	0.857 1	0.914 3	1.000 0
	B ₂₁	1.000 0	0.506 2	0.543 2	0.000 0	0.037 0	0.012 3
径流峰值控制 (B ₂)	B ₂₂	0.000 0	0.250 0	0.500 0	0.666 7	0.833 3	1.000 0
	B ₂₃	0.000 0	0.250 0	0.500 0	0.625 0	0.875 0	1.000 0
	B ₂₄	1.000 0	0.000 0	0.974 4	0.964 0	0.987 2	0.996 0
	B ₃₁	0.027 0	0.000 0	0.027 0	0.378 4	0.702 7	1.000 0
径流污染控制 (B ₃)	B ₃₂	0.000 0	0.189 2	0.459 5	0.675 7	0.837 8	1.000 0
	B ₃₃	0.000 0	0.231 5	0.437 9	0.634 9	0.822 6	1.000 0
	B ₃₄	0.000 0	0.221 2	0.434 1	0.632 6	0.820 4	1.000 0
	B ₃₅	0.000 0	0.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
水资源控制与利用 (B ₄)	B ₃₆	0.428 6	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.389 6	0.727 3
	B ₄₁	0.232 9	0.720 5	1.000 0	0.482 2	0.227 4	0.000 0
	B ₄₂	0.000 0	0.111 1	0.500 0	0.555 6	0.666 7	1.000 0
	B ₄₃	0.000 0	0.181 8	0.545 5	0.818 2	0.909 1	1.000 0
社会经济 (B ₅)	B ₄₄	0.235 2	0.722 3	1.000 0	0.481 8	0.226 5	0.000 0
	B ₄₅	0.000 0	0.065 6	0.180 3	0.385 2	0.672 1	1.000 0
	B ₅₁	0.000 0	0.232 1	0.464 3	0.696 4	0.821 4	1.000 0
	B ₅₂	0.000 0	0.166 7	0.300 0	0.466 7	0.766 7	1.000 0
	B ₅₃	0.000 0	0.279 1	0.581 4	0.732 6	0.895 3	1.000 0

表 6 海绵城市建设措施影响评价指标权重

准则层	指标层	权重		
		层次分析法	熵权法	综合权重
径流总量控制 (B ₁)	年降水量	0.241 4	0.035 0	0.104 3
	地下水资源量	0.035 7	0.044 0	0.051 1
	建成区绿地覆盖率	0.103 2	0.029 2	0.062 9
	城市排水管道密度	0.102 9	0.092 6	0.116 4
径流峰值控制 (B ₂)	水库总库容量	0.026 7	0.038 8	0.036 5
	森林覆盖率	0.038 0	0.039 3	0.043 8
	水灾受灾面积	0.080 5	0.026 2	0.052 1
	平均降水 pH	0.058 1	0.093 9	0.083 8
径流污染控制 (B ₃)	城市污水处理率	0.009 0	0.042 7	0.022 2
	化学需氧量排放量	0.040 6	0.040 8	0.046 2
	氨氮排放量	0.033 5	0.041 4	0.042 3
	湿地面积率	0.025 1	0.058 3	0.045 1
水资源控制与利用 (B ₄)	饮用水源水质达标率	0.015 3	0.036 6	0.028 4
	生态用水总量	0.011 7	0.048 5	0.027 0
	水资源开发利用率	0.043 6	0.047 6	0.051 7
	水域及水利面积	0.015 6	0.042 2	0.029 1
社会经济 (B ₅)	人均水资源量	0.029 6	0.048 5	0.045 4
	管网漏损率	0.005 8	0.067 6	0.026 4
	城市化率	0.017 9	0.040 1	0.028 9
	城市人口密度	0.004 9	0.049 9	0.019 9
	生态建设与保护投资比重	0.026 7	0.036 8	0.036 5

计算综合权重可看出准则层中径流总量控制权重最高,社会经济权重最低;在指标层中,城市排水管网密度、水资源开发利用率、年降水量等指标

的权重较大。

3.3 基于集对分析耦合可变模糊集的海绵城市建设综合评价

(1) 建立评价等级及标准

根据实际情况可将评价等级分为三类,等级 I、II、III。使用均值标准差法^[15]来确定等级标准:正向指标为: $(0, \bar{x}-0.5\delta)$, $[\bar{x}-0.5\delta, \bar{x}+0.5\delta)$, $[\bar{x}+0.5\delta, +\infty)$;负向指标为: $[\bar{x}+0.5\delta, +\infty)$, $[\bar{x}-0.5\delta, \bar{x}+0.5\delta)$, $(0, \bar{x}-0.5\delta)$ 分别对应 I、II、III 级。其中均值用 $\bar{x}$ 表示,均方差用 δ 表示。结果如表 7 所示。

表 7 海绵城市建设措施影响评价指标等级标准

目标项	指标	优	中	劣
		I	II	III
径流总量控制 (B ₁)	1 年降水量	< 1 127	1 127~1 552	> 1 552
	2 地下水资源量	> 4.4	4.4~3.0	< 3.0
	3 建成区绿地覆盖率	> 43	43~41.7	< 41.7
	4 城市排水管道密度	> 15	11~15	< 11
径流峰值控制 (B ₂)	5 水库总库容量	> 504	504~499	< 499
	6 森林覆盖率	> 42.7	42.7~42.1	< 42.1
	7 水灾受灾面积	< 1.2	1.2~89.2	> 89.2
	8 平均降水 pH	> 6.3	6.3~6.1	< 6.1
径流污染控制 (B ₃)	9 城市污水处理率	> 95.5	95.5~94.0	< 94.0
	10 化学需氧量排放量	< 4 753	4 753~5236	> 5 236
	11 氨氮排放量	< 422	422~465	> 465
	12 湿地面积率	> 10.85	10.49~10.85	< 10.49
水资源控制与利用 (B ₄)	13 饮用水源水质达标率	> 98	98~95	< 95
	14 生态用水总量	> 29.61	29.61~16.19	< 16.19
	15 水资源开发利用率	> 6.5	6.5~5.8	< 5.8
	16 水域及水利面积	> 13.4	13.4~12.9	< 12.9
社会经济 (B ₅)	17 人均水资源量	> 931	931~508	< 508
	18 管网漏损率	< 12	12~14	> 14
	19 城市化率	> 70.7	70.7~68.5	< 68.5
	20 城市人口密度	> 2 934	2 934~2 923	< 2 923
	21 生态建设与保护投资比重	> 3.7	3.7~3.3	< 3.3

(2) 联系度的确定

根据 SPA-VFS 原理, 设集合 $A_l (l=1, 2, \dots, 21)$ 为评价样本值 X_l , 集合 $S_k (K=1, 2, 3)$ 为评价等级标准 B_k , 二者可构成一个集对 $H(A_l, B_k)$ 。计算方法如下^[16]:

当该指标处在评价等级区间内令其联系度为 1; 若处在相隔等级区间则令其联系度为 -1。再由公式 (2-18) 计算集对 $H(A_l, B_k)$ 的综合联系度。

表 8 海绵城市建设影响评价结果

联系度	2014			2015			2016		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
B ₁₁ (A ₁)	-0.104	0.103	0.104	-0.104	0.099	0.104	-0.104	0.102	0.104
B ₁₂ (A ₂)	-0.024	0.051	0.024	-0.051	0.045	0.051	0.051	0.044	-0.051
B ₁₃ (A ₃)	-0.046	0.063	0.046	-0.044	0.063	0.044	0.015	0.063	-0.015
B ₂₁ (A ₄)	-0.116	0.107	0.116	-0.090	0.116	0.090	0.111	0.116	-0.111
B ₂₂ (A ₅)	-0.023	0.036	0.023	-0.028	0.036	0.028	0.023	0.036	-0.023
B ₂₃ (A ₆)	-0.033	0.044	0.033	-0.033	0.044	0.033	0.044	0.037	-0.044
B ₂₄ (A ₇)	-0.047	0.052	0.047	-0.052	0.050	0.052	0.040	0.052	-0.040
B ₃₁ (A ₈)	-0.084	0.083	0.084	-0.084	0.082	0.084	-0.084	0.083	0.084
B ₃₂ (A ₉)	-0.022	0.022	0.022	-0.022	0.022	0.022	-0.008	0.022	0.008
B ₃₃ (A ₁₀)	-0.046	0.044	0.046	-0.046	0.043	0.046	-0.021	0.046	0.021
B ₃₄ (A ₁₁)	-0.042	0.041	0.042	-0.042	0.039	0.042	-0.019	0.042	0.019
B ₃₅ (A ₁₂)	-0.045	0.043	0.045	-0.045	0.043	0.045	0.045	0.043	-0.045
B ₃₆ (A ₁₃)	-0.023	0.028	0.023	-0.028	0.024	0.028	-0.028	0.027	0.028
B ₄₁ (A ₁₄)	-0.027	0.024	0.027	-0.027	0.024	0.027	0.027	0.024	-0.027
B ₄₂ (A ₁₅)	-0.052	0.042	0.052	-0.052	0.046	0.052	-0.008	0.052	0.008
B ₄₃ (A ₁₆)	0.029	0.022	-0.029	-0.029	0.022	0.029	0.029	0.024	-0.029
B ₄₄ (A ₁₇)	-0.045	0.040	0.045	-0.045	0.040	0.045	0.045	0.041	-0.045
B ₄₅ (A ₁₈)	-0.026	0.024	0.026	-0.026	0.024	0.026	-0.026	0.024	0.026
B ₅₁ (A ₁₉)	-0.029	0.027	0.029	-0.029	0.028	0.029	-0.011	0.029	0.011
B ₅₂ (A ₂₀)	-0.020	0.020	0.020	-0.020	0.020	0.020	-0.016	0.020	0.016
B ₅₃ (A ₂₁)	0.023	0.036	-0.023	-0.028	0.036	0.028	0.036	0.033	-0.036
综合联系度	-0.066	0.066	0.0954	-0.208	0.208	0.948	0.142	0.906	-0.142
相对隶属度	0.467	0.533	0.977	0.396	0.604	0.974	0.571	0.953	0.429
归一化隶属度	0.236	0.270	0.494	0.201	0.493	0.306	0.288	0.495	0.217
评价等级		III			III			II	

表 9 海绵城市建设影响评价结果 (续)

联系度	2017			2018			2019		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
B ₁₁ (A ₁)	0.003	0.104	-0.003	0.033	0.104	-0.033	0.104	0.095	-0.104
B ₁₂ (A ₂)	-0.051	0.042	0.051	-0.048	0.051	0.048	-0.051	0.047	0.051
B ₁₃ (A ₃)	0.041	0.063	-0.041	0.063	0.055	-0.063	0.063	0.055	-0.063
B ₂₁ (A ₄)	-0.116	0.092	0.116	-0.116	0.098	0.116	-0.116	0.094	0.116
B ₂₂ (A ₅)	0.025	0.036	-0.025	0.031	0.036	-0.031	0.036	0.034	-0.036
B ₂₃ (A ₆)	0.044	0.038	-0.044	0.044	0.038	-0.044	0.044	0.038	-0.044
B ₂₄ (A ₇)	0.037	0.052	-0.037	0.043	0.052	-0.043	0.046	0.052	-0.046
B ₃₁ (A ₈)	0.009	0.084	-0.009	0.084	0.077	-0.084	0.084	0.080	-0.084
B ₃₂ (A ₉)	0.017	0.022	-0.017	0.022	0.021	-0.022	0.022	0.021	-0.022
B ₃₃ (A ₁₀)	0.028	0.046	-0.028	0.046	0.043	-0.046	0.046	0.039	-0.046
B ₃₄ (A ₁₁)	0.026	0.042	-0.026	0.042	0.040	-0.042	0.042	0.036	-0.042
B ₃₅ (A ₁₂)	0.045	0.043	-0.045	0.045	0.043	-0.045	0.045	0.044	-0.045
B ₃₆ (A ₁₃)	0.028	0.025	-0.028	0.025	0.028	-0.025	0.025	0.028	-0.025
B ₄₁ (A ₁₄)	0.025	0.027	-0.025	-0.027	0.023	0.027	-0.027	0.024	0.027
B ₄₂ (A ₁₅)	0.032	0.052	-0.032	0.037	0.052	-0.037	0.052	0.042	-0.052
B ₄₃ (A ₁₆)	0.029	0.025	-0.029	0.029	0.026	-0.029	0.029	0.026	-0.029
B ₄₄ (A ₁₇)	0.041	0.045	0.039	-0.045	0.043	0.045	-0.045	0.044	0.045
B ₄₅ (A ₁₈)	0.000	0.026	0.000	0.026	0.024	-0.026	0.026	0.025	-0.026
B ₅₁ (A ₁₉)	0.025	0.029	-0.025	0.029	27.640	-0.029	0.029	0.028	-0.029
B ₅₂ (A ₂₀)	0.002	0.020	-0.002	0.020	0.019	-0.020	0.020	0.019	-0.020
B ₅₃ (A ₂₁)	0.036	0.036	-0.036	0.036	0.036	-0.036	0.036	0.036	-0.036
综合联系度	0.326	0.925	-0.247	0.420	0.950	-0.420	0.510	0.960	-0.510
相对隶属度	0.663	0.950	0.377	0.710	0.975	0.290	0.755	0.980	0.245
归一化隶属度	0.329	0.484	0.187	0.045	0.754	0.148	0.387	0.513	0.132
评价等级		II			II			II	

通过以21个评价指标分三级对镇江市六年来海绵城市建设进行评价,得到其综合联系度、相对联系度,并计算其归一化隶属度,得到最终评价等级,其中2014、2015年为Ⅲ级,其余年份都为Ⅱ级,并且评分在逐年提升,体现镇江市海绵城市建设和生态环境都在向优发展。

4 结论

从现状城市生态环境问题成因分析入手,建立可能影响海绵城市建设的指标评价体系,并遴选5项一级指标,21项二级指标因子。为减小决策主观因素影响,采用综合权重法对指标因子进行赋权,通过综合权重计算,发现准则层中径流总量控制权重最高,即被评价海绵城市建设的首要任务是控制径流总量,城市排水管网密度、年降雨量、水资源开发利用率等在指标层中所占权重较大。将21项指标因子的实测值进行标准化处理,利用均值标准差法对实测值进行等级标准划分,将指标实测值和标准等级作为数据基础,构建模糊联系度进行集对分析,并与可变模糊集相耦合,得到相对隶属度和评价等级。

结果显示,除2014、2015年为Ⅲ级外,其余均为Ⅱ级,且呈递增状态,表明镇江市海绵城市建设由中等向优发展,生态环境逐年好转,综合评价结果与镇江市海绵城市建设状况高度吻合,体现了利用集对分析耦合可变模糊集对海绵城市建设影响评价真实可靠、科学合理,并且可操作性强,可为类似城市低影响开发绩效评价提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 范卓越.基于集对分析—可变模糊集耦合的海绵城市建设评价研究[D].合肥:安徽建筑大学,2018.
- [3] Sun S W. Analysis and research on the regional adaptability of sponge city[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 233: 03059.
- [4] 刘秋常,韩涵,李慧敏,等.基于熵权TOPSIS法的海绵城市建设绩效评价——以河南省鹤壁市为例[J].人民长江,2017,48(14):23-26.
- [5] 翟慧敏,程启先,李佳惠,等.鹤壁市海绵城市绩效评价模型构建与应用[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2019,32(4):590-594.
- [6] 黄丽娟,张鹏.海绵城市绩效评价的指标权重设定分析[J].绿色科技,2016(22):117-122.
- [7] 朱伟伟.海绵城市评价指标体系构建与实证研究——以杭州市为例[D].杭州:浙江农林大学,2016.
- [8] 程鸿群,余佳雪,姬睿,等.基于群组评价的海绵城市建设绩效评价研究[J].科技管理研究,2016,36(24):42-47.
- [9] 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.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.海绵城市建设评价标准:GB/T 51345—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [11] 赵维树,段伟伟.基于因子和聚类分析的安徽省智慧城市发展评价[J].安徽建筑大学学报,2021,29(2):27-33.
- [12] 王韶东.基于SWOT-AHP模型智慧城市老城区改造策略研究——以大连为例[J].安徽建筑大学学报,2021,29(2):21-26.
- [13] Kumar K, Chen S M. Multiattribute decision making based on interval-valued intuitionistic fuzzy values, score function of connection numbers, and the set pair analysis theory[J]. Information Sciences, 2021, 551: 100-112.
- [14] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000.
- [15] 王文圣.水文水资源随机模拟技术[M].成都:四川大学出版社,2007.