

基于相对差异函数的海绵城市弹性评价

冯峰, 靳晓颖, 刘翠, 冯跃华

Resilience evaluation of sponge city based on relative difference function

FENG Feng, JIN Xiaoying, LIU Cui, FENG Yuehua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20200318002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于博弈论组合赋权的水环境综合治理效果评价

Evaluation of comprehensive water environment treatment effect based on game theory combination weighting
水利水运工程学报. 2018(6): 105 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.014>

蚌埠市农业旱灾脆弱性综合评价

Comprehensive assessment of agricultural drought vulnerability based on improved cloud similarity: a case study of Bengbu city
水利水运工程学报. 2017(3): 56 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.008>

基于网络层次分析法的节水型社会综合评价

Comprehensive evaluation of water-saving society based on analytic network process
水利水运工程学报. 2017(2): 29 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.004>

基于全偏确定度的区域水资源承载力动态评价

Dynamic evaluation of regional water resources carrying capacity based on full partial certainty degree
水利水运工程学报. 2019(6): 38 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.005>

大坝安全监测系统评价体系

Technical framework for dam safety monitoring system evaluation
水利水运工程学报. 2019(4): 63 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.009>

常州市运北主城区畅流活水方案设计与现场验证

Study on clean water diversion schemes to improve the water environment of Yunbei main urban area in Changzhou City
水利水运工程学报. 2019(5): 10 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.002>





扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20200318002

冯峰, 靳晓颖, 刘翠, 等. 基于相对差异函数的海绵城市弹性评价 [J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 53-61. (FENG Feng, JIN Xiaoying, LIU Cui, et al. Resilience evaluation of sponge city based on relative difference function[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1): 53-61. (in Chinese))

基于相对差异函数的海绵城市弹性评价

冯 峰^{1,2}, 靳晓颖^{1,2}, 刘 翠^{1,2}, 冯跃华³

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004; 2. 河南省黄河中下游水资源节约集约利用工程技术中心, 河南 开封 475004; 3. 河南省豫东水利工程管理局, 河南 开封 475000)

摘要: 针对海绵城市中观尺度的区域水系统综合评价问题, 引入工程弹性的理念, 构建了由生态弹性、工程弹性、自然弹性和社会弹性 4 个维度共 17 个影响因子的弹性指标体系, 基于相对差异函数的模糊可变评价模型, 对 17 个指标 5 个级别(极强、较强、中等、较弱、极弱)弹性阈值进行说明和界定。以开封市为研究实例进行评价计算, 结果显示: 2013 年、2014 年和 2015 年系统弹性为 V 级, 表明这 3 年开封市的海绵城市水系统具有极弱的弹性; 2016 年、2017 年为 IV 级, 开封市海绵城市水系统弹性为中等。同时对 2013 年、2017 年的 17 个指标的相对隶属度覆盖等级进行对比, 与开封海绵城市建设和成效进行对照分析, 评价结果与实际情况高度吻合, 均发生了明显的弹性增强过程。经过实例计算可得基于相对差异函数的海绵城市水系统弹性评价体系构建合理, 针对中观尺度的评价区域, 能够通过指标信息确定对应的相对隶属度, 获得精准的评价结果, 为海绵城市提高水系统弹性提供可靠的理论依据和数据支持。

关 键 词: 海绵城市; 相对差异函数; 水系统; 弹性评价; 开封市

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2021)01-0053-09

2019 年 9 月, 黄河流域生态保护和高质量发展的主要目标任务中明确提出: 推进水资源节约集约利用。要坚持以水定城、以水定地、以水定人、以水定产, 把水资源作为最大的刚性约束, 合理规划人口、城市和产业发展, 推动用水方式由粗放向节约集约转变^[1]。重大国家战略及“四水同治”都为城市与水资源协调匹配发展、多元优化利用提出了新要求。近年来聚焦于水环境、水资源问题的水系统弹性的研究取得了一些进展, 在研究尺度方面, 对水系统弹性的研究包括: 宏观国土、区域、流域、城市、社区、单个建筑物等多个尺度, 但主要集中在城市和社区尺度上^[2-3]。在研究方向方面, 水系统弹性的理论构建、评价和策略是主要研究方向^[4]。对于水系统弹性的评价主要分为定性和定量两种。张灵等从流域尺度构建了洪水弹性评价指标体系, 用熵权法校正的层次分析法确定权重, 对北江上游进行评价^[5]。Liu 等从城市尺度构建了水弹性评价指标体系, 用向量相加的方法得到了综合弹性指数^[6]。虽然水系统弹性评价取得了一定的成果, 但也存在着指标选择不合理、指标权重确定影响评价准确性、评价模型适用性较弱等问题。水系统弹性评价是比较复杂的综合评价问题, 针对海绵城市的水系统弹性评价研究成果则更少。因此, 在总结水系统弹性概念和方法的基础上, 基于海绵城市的特点开展针对性评价研究, 通过分析弹性内涵来遴选指标, 采用 3 种不同的权重来规避不利影响, 构建基于相对差异度函数的模糊可变评价模型。

1 海绵城市水系统弹性评价体系

定义海绵城市的水系统弹性, 需要明确 4 方面的内容: 弹性的主体、对象、尺度和内涵^[7]。弹性的主

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809110); 2019 年度河南省水利科技攻关计划项目(GG201939); 2021 年河南省高等学校重点科研项目(21B570003)

作者简介: 冯 峰(1978—), 女, 河南驻马店人, 教授, 博士, 主要从事水资源高效利用、海绵城市关键技术等研究。

E-mail: fengfeng_624@163.com

体是海绵城市的水系统,包括供排水管网等城市的工程水系统,还有河流、湖泊、绿地等自然水系统。弹性的对象是城市水系统,包括水量、水质、水生态等。弹性的尺度是指研究区域的大小,如国土、流域范畴为宏观尺度,社区、校园、家庭范畴为微观尺度,城市、区域水系为主的是中观尺度。弹性的内涵是指当城市水系统面临降雨时,利用雨水资源及抵抗发生内涝灾害的能力。在海绵城市的建设过程主要利用渗、滞、蓄、净、用、排等关键措施,让雨水能够慢下来、渗下来、蓄起来,使城市成为吸纳、蓄集雨水的弹性海绵体,在需水时再充分利用蓄集的雨水资源,满足城市的生态需求。因此,海绵城市水系统的弹性内涵由 4 个维度构成:①生态弹性维度,主要考虑降雨时能够汇集雨水的下垫面,包括土地利用状态、水系分布格局等;②工程弹性维度,主要考虑能够安全排走超过利用能力的雨水资源的相关工程设施,如排涝站、市政管网、河道等;③自然弹性维度,主要考虑与海绵城市相关性比较大的自然要素,如雨水资源利用潜力、降水量、地下水等情况;④社会弹性维度,主要考虑海绵城市带来的经济社会影响,如雨水资源利用的效益、水质及社会发展等要素。

在水系统弹性评价体系构建中指标选取非常重要,将关系到最终评价结果是否科学合理。因此,从海绵城市水系统的弹性内涵、开封的实际情况与区域特点出发,并综合考虑指标的独立性、适用性和易得性,选择 4 个维度中最具有代表性的指标。生态维度中除了硬化地面、植被、水域面积等指标外,海绵城市的建设也会显著改善城市的生态环境和空气质量,因此将空气质量良好率也作为一个指标;工程弹性维度选择了排水管道长度、排水泵站数量和河道治理长度共 3 个指标;自然弹性维度选择了降雨量、雨水资源利用潜力、产水模数、地下水资源模数及地下水漏斗面积等 5 个指标;社会弹性维度除选择了雨水资源经济、生态效益、万元 GDP 用水量之外,考虑到海绵城市收集的雨水资源主要是生态环境用水,将景观娱乐用水区水质也作为一个指标,共 4 个。设计的评价体系共 3 层:第 1 层是系统评价目标层;第 2 层是由生态弹性、工程弹性、自然弹性和社会弹性 4 个维度构成的准则层;第 3 层是由 17 个指标组成的指标层,如图 1 所示。

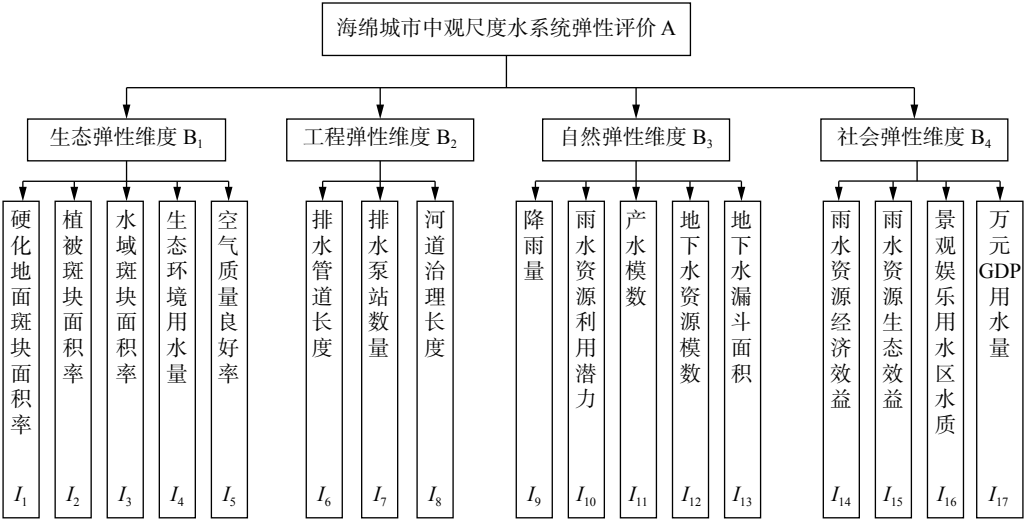


Fig. 1 Resilience evaluation system of mesoscale water system in sponge city

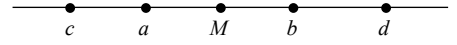
2 基于相对差异度的模糊可变评价模型

事物 u 具有对模糊概念吸引性质 A 的相对隶属度 $\mu_A(u)$, 可与排斥性质的 A^c 相对隶属度 $\mu_{A^c}(u)$ 达到动态平衡。定义相对差异度^[8] 为:

$$D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u) \tag{1}$$

映射 $D_A: D \rightarrow [-1, 1], u \rightarrow D_A(u) \in [-1, 1]$, 称为 u 对 A 的相对差异度函数。

根据可变模糊集理论^[9], 设 $X_0=[a,b]$ 为实轴上的模糊可变集合 V 的吸引域, 即 $0 < D_A(u) \leq 1$ 区间, $X=[c,d]$ 为含 $X_0(X_0 \subset X)$ 的上、下界范围域区间(图 2)。

图 2 区间 X_0 、 X 的关系Fig. 2 Diagram of interval X_0 and X

根据模糊可变集合 V 的定义可知 $[c,a]$ 与 $[b,d]$ 均为 V 的排斥域, 即 $-1 \leq D_A(u) < 0$ 区间。设 M 为吸引域区间 $[a,b]$ 中 $D_A(u) = 1$ 的点值。 x 为 X 区间内任意点的量值, 则 x 落入 M 点右侧时, 其相对差异度函数模型为:

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-b}{M-b} \right)^\beta, x \in [M, b] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-b}{d-b} \right)^\beta, x \in [b, d] \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 为非负指数, 通常可取 1; M 为吸引域区间 $[a,b]$ 中 $D_A(u) = 1$ 的点值; b, d 为排斥域界限值。

当 x 落入 M 点左侧时, 其相对差异度函数模型为:

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-a}{M-a} \right)^\beta, x \in [a, M] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-a}{c-a} \right)^\beta, x \in [c, a] \end{cases} \quad (3)$$

式中: a, c 为吸引域界限值。

$D_A(u)$ 确定后, 可计算出相对隶属度 $\mu_A(u)$ 的值为:

$$\mu_A(u) = [1 + D_A(u)]/2 \quad (4)$$

根据已构建的海绵城市水系统弹性评价指标, 基于相关差异度函数的模糊可变评价方法过程如下:

(1) 根据 c 个级别的标准值构建区间矩阵 $I_{ab} = ([a, b]_{ih}), i=1, 2, \dots, m; h=1, 2, \dots, c$ (m 为指标数, c 为级别数)。

(2) 根据 I_{ab} 构建变动区间的范围值矩阵 $I_{cd} = ([c, d]_{ih}), i=1, 2, \dots, m; h=1, 2, \dots, c$ 。

(3) 确定指标 i 级别 h 的 M 矩阵, M 点为标准值区间矩阵中相对差异度函数等于 1 时所在位置的点值, 由 c 个级别、 m 个指标构成 M 矩阵。

(4) 应用式 (2)~(4) 以及矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} 、 M 中的对应数据, 计算指标 i 级别 h 的相对隶属度矩阵 $\mu_A(u) = (\mu_A(u)_{ih})$ 。

(5) 采用熵值权向量^[10] 确定目标权重 w 。在信息论中熵值反映了信息无序化程度, 其值越小系统无序度越小^[11]。指标的熵值采用式 (5) 计算, 所涉及到的评价指标的熵值权向量采用式 (6) 计算。

$$H_i = -\frac{1}{\ln c} \left[\sum_{j=1}^c f_{ij} \ln f_{ij} \right], (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, c) \quad (5)$$

$$f_{ij} = (1 + b_{ij}) \left(\sum_{j=1}^c (1 + b_{ij}) \right)$$

式中: H_i 为指标 i 的熵值; f_{ij} 为熵值计算的参数; b_{ij} 为第 i 行第 j 列的指标值; m 为指标数; c 为级别数。

$$\omega_i = (1 - H_i) \left(m - \sum_{i=1}^m H_i \right), \sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \quad (6)$$

式中: ω_i 为第 i 个指标的熵值权向量。

(6) 利用模糊可变识别模型计算样本所对应各级别的综合相对隶属度。

$$u'_h = 1 / \left[1 + \left(\frac{d_{gh}}{d_{bh}} \right)^\alpha \right] \quad (7)$$

式中: d_{gh} 为对应级别 h 与优决策之间的加权广义权距离; d_{bh} 为对应级别 h 与劣决策之间的加权广义权距离; $d_{gh} = \left\{ \sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_A(u)_{ih})^p] \right\}^{\frac{1}{p}}$; $d_{bh} = \left\{ \sum_{i=1}^m [w_i \mu_A(u)_{ih}^p] \right\}^{\frac{1}{p}}$; α 为模型的优化准则参数, $\alpha=1$ 表示加权最小一乘

方准则, $\alpha=2$ 表示最小二乘方准则; p 为距离参数, $p=1$ 表示为海明距离, $p=2$ 表示为欧氏距离。模糊可变识别模型一般选择 $\alpha=1$, $p=1$ 。

(7)采用式(8)计算评价样本数据的等级,从而确定其评价级别。

$$H=\left(u'_h/\sum_{h=1}^cu'_h\right)h$$

(8)

式中: H 为第 j 个方案的级别特征值。

3 海绵城市水系统弹性阈值确定及评价

开封市位于黄河下游,河南省中东部,东经 $113^{\circ}51'51''\sim115^{\circ}15'42''$,北纬 $34^{\circ}11'43''\sim35^{\circ}11'43''$,总面积 $6\,444\text{ km}^2$,市区面积 546 km^2 。开封市境内的水资源包括地表水和浅层地下水,水资源总量的多年平均值(不含过境水)为 8.35 亿 m^3 ,其中地表水资源为 3.51 亿 m^3 ,占水资源总量的 42% ;地下水资源(允许开采量)为 4.84 亿 m^3 ,占水资源总量的 58% 。近年来水资源已成为开封市经济快速发展的重要制约因素,一方面开封市水资源短缺,黄河水成为最重要的淡水水源;另一方面发生降雨时却不能将雨水有效就地下渗利用,甚至会发生城市内涝等灾害。因此开展该区域的海绵城市水系统弹性评价就显得非常重要。

3.1 指标体系数据来源

2013 年在中央城镇化工作会议上首次提出了海绵城市的概念,2015、2016 年全国共确定海绵城市建设试点 30 个。研究区域开封市也相应地开展了一些海绵城市的建设和改造,选择 2013—2017 年为计算时段,观察海绵城市建设前后城市水系统的弹性变化。对此时段开封市海绵城市水系统弹性评价指标进行赋值,生态弹性维度共有 5 个定量指标构成,其中硬化地面斑块、植被斑块、水域斑块的面积率指标数据来源于解译高分二号遥感卫星拍摄的高清影像,卫星全色分辨率为 0.8 m ,多光谱分辨率是 3.2 m ,影像来源于国防科工局高分卫星地面接收站;自然弹性维度由 5 个定量指标构成,其中雨水资源利用潜力是前期研究成果计算所得^[12];社会弹性维度共有 4 个定量指标,其中雨水资源利用的经济效益、生态效益是前期研究成果计算所得^[12]。其他的指标数据来自 2013—2017 年开封市统计年鉴和开封市水资源公报,如表 1 所示。

表 1 开封市海绵城市水系统弹性评价指标(2013—2017 年)
Tab. 1 Resilience evaluation index of water system in sponge city of Kaifeng (2013—2017)

影响因素	指标	指标编号	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
生态弹性维度(5)	硬化地面斑块面积率(%)	I_1	72.26	73.73	74.94	80.44	82.89
	植被斑块面积率(%)	I_2	26.66	23.34	22.37	16.83	14.47
	水域斑块面积率(%)	I_3	1.08	2.93	2.68	2.73	2.63
	生态环境用水率(%)	I_4	1.90	1.00	9.50	12.30	13.80
	空气质量良好率(%)	I_5	38.35	47.67	60.54	62.19	51.23
工程弹性维度(3)	排水管道长度(km)	I_6	1469	1387	1475	1542	1604
	排水泵站数量(个)	I_7	22	22	22	23	24
	河道治理长度(km)	I_8	16.00	8.50	16.00	22.50	32.50
自然弹性维度(5)	降雨量(mm)	I_9	389.9	529.5	598.0	566.4	591.0
	雨水资源利用潜力(10^6 m^3)	I_{10}	37.12	38.81	40.16	39.03	44.19
	产水模数($10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$)	I_{11}	14.20	14.10	14.30	14.30	15.70
	地下水资源模数($10^4\text{ m}^3/\text{km}^2$)	I_{12}	11.50	10.30	10.90	10.80	11.90
	地下水漏斗面积(>8 m深)(km^2)	I_{13}	210	270	252	287	280
社会弹性维度(4)	雨水资源经济效益(亿元)	I_{14}	1.40	1.96	2.05	1.30	1.55
	雨水资源生态效益(亿元)	I_{15}	8.52	7.91	7.73	5.55	9.87
	景观娱乐用水区水质	I_{16}	劣V类	劣V类	劣V	V类	V类
	万元GDP用水量($\text{m}^3/\text{万元}$)	I_{17}	94.00	80.00	86.00	62.70	60.70

注:表中“万元GDP用水量”为对应统计当年价格。

3.2 评价标准弹性阈值

在分析国内外相关标准的基础上, 结合研究区域的基本条件、实际情况和平均水平, 确定了开封市海绵城市水系统 17 个指标对应的 5 级标准弹性阈值, 对 I、V 级的弹性阈值确定说明依据, II、III、IV 级进行相应划分, 如表 2 所示。越大越优型指标为递增型指标, 越小越优型指标为递减型指标, 此标准对于共性指标具有适用性, 为不同区域进行对比评价提供了可行性。

表 2 开封市海绵城市水系统弹性阈值分级标准 (V 级)
Tab. 2 Classification standard of water system resilience threshold in sponge city of Kaifeng (V)

指标	指标类型	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
		(极强弹性)	(较强弹性)	(中等弹性)	(较弱弹性)	(极弱弹性)
I ₁	递减	0~20	20~35	35~50	50~75	75~100
I ₂	递增	75~100	50~75	35~50	20~35	0~20
I ₃	递增	15~25	10~15	5~10	1~5	0~1
I ₄	递增	15~25	10~15	5~10	1~5	0~1
I ₅	递增	80~100	70~80	60~70	50~60	0~50
I ₆	递增	2 000~2 200	1 800~2 000	1 400~1 800	1 000~1 400	0~1 000
I ₇	递增	30~40	30~28	24~28	20~24	0~20
I ₈	递增	55~60	40~55	25~40	10~25	0~10
I ₉	递增	662.7~773.1	552.2~662.7	441.8~552.2	331.4~441.8	0~331.4
I ₁₀	递增	55~60	49~55	42~49	35~42	0~35
I ₁₁	递增	50.0~55.0	36.6~50.0	23.3~36.6	10.0~23.3	0~10.0
I ₁₂	递增	50.0~55.0	36.6~50.0	23.3~36.6	10.0~23.3	0~10.0
I ₁₃	递减	0~55	55~128	128~201	201~273	273~345
I ₁₄	递增	8~10	6~8	4~6	2~4	0~2
I ₁₅	递增	20~25	15~20	10~15	5~10	0~5
I ₁₆	递减	I	II	III	IV	V (劣 V)
I ₁₇	递减	0~15	15~50	50~100	100~150	150~200

生态弹性维度共有 5 个指标:

- (1)硬化地面斑块面积率, 递减型指标。根据海绵城市低影响开发的理念, 城市的土地利用格局对于雨水资源的入渗、蓄集、利用非常重要, 硬化的不透水面积越小越好。当不透水地面面积超过 75% 时, 降雨只有 15% 可以通过渗入地下, 55% 的降雨将在不透水硬化地面快速形成地表径流。当城市只有 20% 以下的不透水面积时, 高达 60% 的降雨能够渗入地下。确定该指标 I 级的弹性阈值为 0~20%, V 级为 75%~100%。
- (2)植被斑块面积率, 递增型指标。海绵城市植被面积越大越有利于通过植被叶片截渗雨水、根部蓄集净化雨水。当植被面积超过 75% 接近自然状态时, 只有 10% 的降雨会形成地表径流。当植被面积低于 20% 时, 只有 5% 的降雨能够渗入地下。确定该指标 I 级的弹性阈值为 75%~100%, V 级为 0~20%。
- (3)水域面积斑块率, 递增型指标。城市中的水域可以有效地调蓄雨水, 形成良好的生态环境。例如我国湖北省武汉市, 全市水域面积占国土面积的 1/4, 中心城区有湖泊 38 个, 水域面积居全国城市首位。城市应尽可能地保留天然的水系网格、湿地等, 增加调蓄能力。确定该指标 I 级别的弹性阈值为 15%~25%, V 级为 0~1%。
- (4)生态环境用水率, 递增型指标。生态环境用水在城市用水中占比越高, 说明城市越重视生态环境建设, 对应的生态环境、绿化、水域都会更利于雨水资源的渗、滞、蓄、净、用。但考虑到城市的发展还需要大量的工业、农业、城市居民生活用水等, 确定该指标 I 级别的弹性阈值为 15%~25%, V 级为 0~1%。
- (5)空气质量良好率, 递增型指标。根据生态环境部的要求, 2020 年地级及以上城市空气质量优良天数比率应超过 80%^[13]。确定该指标 I 级别的弹性阈值为 80%~100%, V 级为 0~50%。

工程弹性维度共有 3 个指标:

(6)排水管道长,递增型指标。海绵城市应该拥有较完善的排水管网系统,一方面排水管网决定着发生较大降雨时能否顺利排走超出利用能力的雨水,另一方面排水管网将雨污分流后,雨水资源经过净化后可以再次利用,并减少城市发生内涝的可能性。根据开封市发展规划和现有基础条件,确定该指标 I 级的弹性阈值为 2 000~2 200 km, V 级为 0~1 000 km。

(7)排水泵站数量,递增型指标。海绵城市应该拥有较完善的排涝措施,排水泵站在城市降雨量较大时,能够保障尽快排走地表径流、不发生内涝、保障城市安全。根据开封市发展规划和现有的基础条件,确定该指标 I 级的弹性阈值为 30~40, V 级为 0~20。

(8)河道治理长度,递增型指标。河道治理长度,会增加海绵城市河流的过流能力,改善水流,保持良好的生态。开封市区共有河道长 57.924 km,确定该指标 I 级的弹性阈值为 55~60 km, V 级为 0~10 km。

自然弹性维度共有 5 个指标:

(9)降雨量,递增型指标。以开封市多年平均降雨量 662.7 mm 为参照,确定该指标 I 级别的弹性阈值 662.7~773.1 mm, V 级为 0~331.4 mm。

(10)雨水资源利用潜力,递增型指标。全国年径流总量控制率分为 5 个区,开封位于全国年径流总量控制率的Ⅲ区范围,控制率要求 75%~85%^[14]。以开封市多年平均降雨量 662.7 mm 产生的地表径流的 85% 为 I 级别的弹性阈值下限,以 75% 为 V 级弹性阈值上限。确定 I 级弹性阈值为 55%~60%, V 级为 0~35%。

(11)产水模数,递增型指标。开封位于全国产水模数分区中的 10~50 范围,确定该指标 I 级别的弹性阈值为 50~55, V 级为 0~10。

(12)地下水资源模数,递增型指标。开封位于全国产水模数分区中的 10~50 范围,确定该指标 I 级别的弹性阈值为 50~55, V 级为 0~10。

(13)地下水漏斗面积(>8 m 深),递减型指标。海绵城市可以充分地利用雨水资源,涵养地下水,从而有效地减少地下漏斗的面积。以开封城区面积的 10%~50% 作为弹性阈值,确定该指标 I 级别的弹性阈值为 0~55 km², V 级为 273~345 km²。

社会弹性维度共有 4 个指标:

(14)雨水资源经济效益,递增型指标。海绵城市的建设重新梳理了雨水管理与生态环境、城市建设及社会发展之间的关系,全方位解决水安全、水资源、水环境、水生态和水景观及水经济等相关问题,从而实现生态效益、社会效益、经济效益和艺术价值的最大化。根据前期研究成果,确定该指标 I 级别的弹性阈值为 $8 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8$ 元, V 级为 $0 \sim 2 \times 10^8$ 元。

(15)雨水资源生态社会效益,递增型指标。海绵城市的建设可显著提高现有雨水系统的排水能力,降低内涝造成的各种损失。透水铺装、绿色屋顶、下沉式绿地等设施可以最大限度地恢复水生态系统,带来控制面源污染、提升生态景观效果、提高生态系统服务价值等生态社会效益。根据前期研究成果,确定该指标 I 级别的弹性阈值为 $20 \times 10^8 \sim 25 \times 10^8$ 元, V 级为 $0 \sim 5 \times 10^8$ 元。

(16)景观娱乐用水区水质,递减型指标。根据中华人民共和国地表水环境质量标准(GB 3838—2002)^[15],确定该指标 I 到 V 级标准与 5 类水质一致。

(17)万元 GDP 用水量,递减型指标。以 2018 年河南省万元 GDP 用水量平均值 50 m³/万元为弹性阈值的中位数,确定该指标 I 级别的弹性阈值为 0~15 m³/万元, V 级为 150~200 m³/万元。

3.3 开封市海绵城市水系统弹性评价

根据表 2 的开封市弹性阈值分级标准,构建模糊可变集合评价的标准值区间矩阵 I_{ab} 。根据表 2 的 17 个指标对应的 5 级阈值,构建模糊可变集合评价的变动区间矩阵 I_{cd} 。为了对比权重对评价结果的影响,选择 3 种不同的方法。第 1 种为子系统等权向量法,设定生态弹性、工程弹性、自然弹性和社会弹性 4 个维度子系统为等权向量 (0.2500, 0.2500, 0.2500, 0.2500), 每个指标权向量为 0.0500、0.0500、0.0500、

0.0500、0.0500、0.0834、0.0833、0.0833、0.0500、0.0500、0.0500、0.0500、0.0500、0.0625、0.0625、0.0625、0.0625;第 2 种方法为指标等权向量,取 17 个指标的权向量相同,每个指标权向量为 0.05880。第 3 种为熵值权向量,利用式(5)计算 17 个指标的熵值权向量^[15],每个指标权向量为 0.0530、0.0630、0.0530、0.0530、0.0440、0.0760、0.0730、0.0800、0.0930、0.0540、0.0520、0.0530、0.0740、0.0460、0.0480、0.0520、0.0330。采用式(2)~(4)以及矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} 、 M 中的对应数据,计算指标 i 级别 h 的相对隶属度矩阵。取 $\alpha=1$, $p=1$ 的组合计算 u'_h ,采用 3 种权向量的计算结果稍有不同,取其平均值并判断所属级别,计算各年份的级别特征值^[16],如表 3 所示。

表 3 开封市海绵城市水系统弹性评价结果						
Tab. 3 Evaluation results of water system resilience in sponge city of Kaifeng						
年份	系统等权向量	指标等权向量	熵值权向量	平均值	级别	海绵城市弹性
2013	4.3200	4.3630	4.3350	4.3390	Ⅳ	较弱弹性
2014	4.3960	4.4030	4.3760	4.3920	Ⅳ	较弱弹性
2015	4.0790	4.0740	4.0100	4.0540	Ⅳ	较弱弹性
2016	3.9280	3.9470	3.8940	3.9230	Ⅲ	中等弹性
2017	3.7170	3.7680	3.6830	3.7230	Ⅲ	中等弹性

4 结果分析

开封市海绵城市水系统弹性评价模型,基于相对差异度和隶属度模糊可变的评价方法,能够有效地处理分级标准为区间值的评价情况,充分利用指标数据携带的信息,对 5 个等级的弹性阈值利用模糊可变的判别方法,使评价结果更加精确合理。相比简单的级别判定方法,其评价结果是更精准的级别定位,对开封市海绵城市水系统弹性的评价结果更加直观和准确。如表 3 所示,根据结果可见不同权向量对评价的影响很小,可认为采用模型、选取指标、计算过程都比较合理,最终将 3 种权向量级别特征的平均值为最终结果,2013 年、2014 年、2015 年评价级别为Ⅳ等,2016 年、2017 年评价级别为Ⅲ等。为了进一步分析,将 2013 年、2017 年 17 个指标的相对隶属度分布进行对比,如图 3 所示。可见 2013 年只有 2 个指标的相对隶属度覆盖了 2、3、4 级别,大部分指标都在 3、4、5 级别(如图 3(a)),2017 年已有 2 个指标的相对隶属度跨越在 1、2、3 级别,6 个指标覆盖在 2、3、4 级别(如图 3(b)),可以明显地看出这 5 年中开封市海绵城市弹性增强的过程变化。

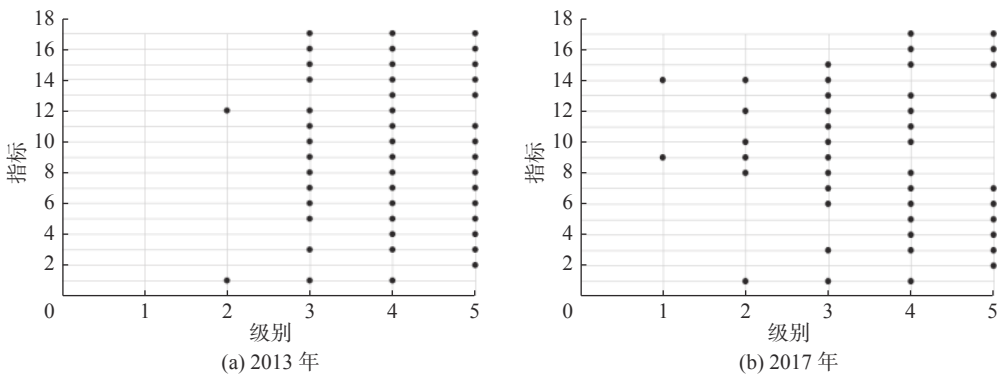


图 3 开封市海绵城市水系统弹性各指标相对隶属度分布对比

Fig. 3 Relative membership distribution of each index of water system resilience in sponge city of Kaifeng in 2013 and 2017

5 结 语

中观尺度海绵城市水系统弹性是一个比较复杂、影响因素较多的综合评价问题,如何获得科学合理的评价结果显得尤为重要,引入工程弹性的理念,对海绵城市的水系统弹性的内涵进行了分析,识别出生态弹性、工程弹性、自然弹性和社会弹性 4 个维度,构建了 17 个指标的评价体系,基于相对差导度函数和相对隶属度构建模糊可变评价模型。以开封市为研究实例,选择 2013—2017 年为计算时段,为了规避指标权重对评价结果的不利影响,采用了系统等权向量、指标等权向量和熵值权向量 3 种方法分别进行评价。根据评价结果,2013 年、2014 年、2015 年评价级别为Ⅳ等,开封市海绵城市水系统弹性较弱,2016 年、2017 年评价级别为Ⅲ等,开封市海绵城市水系统为中等弹性。同时对 2013 年、2017 年 17 个指标的相对隶属度分布进行对比分析,可以明显看出这 5 年弹性增强的变化过程。通过实例验证,认为构建的评价指标体系、模型、弹性阈值标准等比较合理,为其他中观尺度的弹性评价提供可借鉴的方法和思路,还可以根据评价结果具体地分析每个指标的弹性变化过程,找到弱项和维度短板,从而为海绵城市未来的建设和发展提供方向和思路。

参 考 文 献:

- [1] 习近平. 习近平在河南主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会[EB/OL]. (2019-09-19)[2020-03-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-09/19/content_5431299.htm. (XI Jinping. XI Jinping presided over a symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin in Henan province[EB/OL]. (2019-09-19)[2020-03-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-09/19/content_5431299.htm. (in Chinese))
- [2] 俞孔坚. 海绵城市: 理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 81-87. (YU Kongjian. Sponge city: theory and practice[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 81-87. (in Chinese))
- [3] DUFTY N. The importance of connected communities to flood resilience[C]//Proceedings of the 8th Victorian Flood Conference. Melbourne, Australia, 2013.
- [4] SCHELFAUT K, PANNEMANS B, VAN DER CRAATS I, et al. Bringing flood resilience into practice: the freeman project[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(7): 825-833.
- [5] 张灵, 陈晓宏, 千怀遂. 北江下游防洪保护区恢复力诊断[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1129-1134. (ZHANG Ling, CHEN Xiaohong, QIAN Huaisui. Diagnosis of resilience to flood hazard in lower reaches of the Beijiang River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1129-1134. (in Chinese))
- [6] LIU D D, CHEN X H, NAKATO T. Resilience assessment of water resources system[J]. Water Resources Management, 2012, 26(13): 3743-3755.
- [7] 奈杰尔·邓尼特, 安迪·克莱登. 雨水园: 园林景观设计中雨水资源的可持续利用与管理[M]. 周湛曦, 孔晓强, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 78-86. (DUNNETT N, CLAYDON A. Rain garden: sustainable utilization and management of rain water resources in landscape design[M]. ZHOU Zhanxi, KONG Xiaoqiang, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 78-86. (in Chinese))
- [8] 陈守煜. 水资源系统可变集评价原理与方法[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 134-142. (CHEN Shouyu. Variable sets assessment theory and method of water resource system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 134-142. (in Chinese))
- [9] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005: 156-168. (CHEN Shouyu. Theories and methods of variable fuzzy sets in water resources and flood control system[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005: 156-168. (in Chinese))
- [10] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061. (ZHANG Xianqi, LIANG Chuan. Application of fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1061. (in Chinese))
- [11] 吴云星, 谷艳昌, 王士军, 等. 基于信息熵-变权模糊模型的土石坝震损评估[J]. 水利水电工程学报, 2018(4): 38-45. (WU

- Yunxing, GU Yanchang, WANG Shijun, et al. Assessment of seismic damage for earth-rockfill dam based on information entropy-variable weight fuzzy model[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(4): 38-45. (in Chinese))
- [12] 靳晓颖, 冯峰, 刘翠. 海绵视角下开封市雨水资源利用潜力及措施研究[J]. *黄河水利职业技术学院学报*, 2019, 31(3): 11-16. (JIN Xiaoying, FENG Feng, LIU Cui. Research on rainwater resource utilization potential and measures in Kaifeng based on sponge city[J]. *Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute*, 2019, 31(3): 11-16. (in Chinese))
- [13] 董淑秋, 韩志刚. 基于“生态海绵城市”构建的雨水利用规划研究[J]. *城市发展研究*, 2011, 18(12): 37-41. (DONG Suqiu, HAN Zhigang. Study on planning an “eco-sponge city” for rainwater utilization[J]. *Urban Studies*, 2011, 18(12): 37-41. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵型建筑与小区雨水控制及利用: 17S705[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017: 15-25. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Sponge architecture and district rainwater control and utilization: 17S705[S]. Beijing: China Planning Press, 2017: 15-25. (in Chinese))
- [15] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 10-13. (State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 10-13. (in Chinese))
- [16] 冯峰, 靳晓颖, 谢秋皓. 区域水资源可持续发展能力的模糊可变评价[J]. *人民黄河*, 2017, 39(3): 45-50, 54. (FENG Feng, JIN Xiaoying, XIE Qiuhaohao. Research on water resources carrying capacity based on nature-society binary pattern and fuzzy variable method[J]. *Yellow River*, 2017, 39(3): 45-50, 54. (in Chinese))

Resilience evaluation of sponge city based on relative difference function

FENG Feng^{1,2}, JIN Xiaoying^{1,2}, LIU Cui^{1,2}, FENG Yuehua³

(1. *Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China*; 2. *Henan Engineering Technology Center for Water Resources Conservation and Utilization in the Middle and Lower Reaches of the Yellow River, Kaifeng 475004, China*; 3. *Eastern Henan Water Conservancy Administration Bureau, Kaifeng 475000, China*)

Abstract: Aiming at the comprehensive evaluation of sponge city water system, based on the concept of engineering elasticity, we construct a resilient index system with 17 factors from four dimensions: ecological, engineering, natural and social resilience. Based on the fuzzy variable evaluation model of the relative difference function, the five levels (very strong, strong, medium, weak and very weak) of the resilience thresholds corresponding to the 17 indicators are explained and defined. We take Kaifeng as the research example to evaluate and calculate, and the result shows: the water system resilience classified as V in 2013, 2014 and 2015 suggests that Kaifeng water system has a very weak resilience; that as IV in 2016 and 2017 shows a medium resilience. In addition, the change trend of relative membership coverage of 17 indicators in 2013 and 2017 was analyzed and compared with the construction effect of Kaifeng sponge city, showing that the evaluation results are highly concordant with the actual situation, thus an obvious resilient enhancement process was found. Through the example verification, we have established a reasonable evaluation system and elastic threshold, aiming at the evaluation area of mesoscale, to determine the corresponding relative membership degree through the index information, so as to obtain accurate evaluation results, and provide reliable data support and theoretical basis for the sponge city to improve the resilience of its water system.

Key words: sponge city; relative difference function; water system; resilience evaluation; Kaifeng City