

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.02

基于改进 G1 - 和谐度方程的兰州市水生态文明评价

贡力, 逯晔坤, 靳春玲, 祁英弟, 路瑞琴, 马梦含
(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过水生态文明理念,对兰州市水生态文明建立相关评价指标体系,以兰州市为例进行水生态文明程度评价研究,从而判断重点问题,进行有效解决。采用熵权、变异系数、G1 相结合的改进 G1 法较为客观地确定兰州市水生态文明评价指标权重,通过和谐度方程(HDE)综合评价方法定量分析兰州市 2014-2017 年水生态文明程度。兰州市水生态文明建设中应加大对水监管和水文化的管理及宣传,其 2014-2017 年和谐度值分别为 0.08、0.38、0.72、0.94,水生态文明程度显著提高。兰州市水生态文明程度逐年提高,2017 年已达显著文明,通过打造黄河风情线,近年来兰州市水生态建设效果明显,随着发展阶段的不同将伴随着不同侧重点,应需在研究中更加完善指标体系,提出不同时段的相关特点,更好地指导兰州市水生态文明建设工作。

关键词: 水生态文明评价;改进 G1 法;和谐度方程;兰州市

中图分类号:TV213;X321

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)06-0006-06

Water ecological civilization evaluation of Lanzhou City based on improved G1 - harmony degree equation

GONG Li, LU Yekun, JIN Chunling, QI Yingdi, LU Ruiqin, MA Menghan

(College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Through the concept of water ecological civilization, the relevant evaluation index system for Lanzhou water ecological civilization was established, and this study take Lanzhou City as an example to carry out the evaluation of water ecological civilization degree, so as to judge and solve the key problems. The improved G1 method by combining the entropy weight, coefficient of variation and G1 was used to objectively determine the weight of the evaluation index of water ecological civilization in Lanzhou City. The comprehensive evaluation method of the harmony degree equation (HDE) was used to quantitatively analyze the degree of water ecological civilization in Lanzhou City from 2014 to 2017. In the construction of water ecological civilization in Lanzhou City, the management and publicity of water supervision and water culture should be increased. The values of harmony in 2014-2017 were 0.08, 0.38, 0.72, and 0.94, respectively, indicating the degree of water ecological civilization is significantly improved. The degree of water ecological civilization in Lanzhou City has been increasing year by year. In 2017, it has reached a remarkable civilization. Through the creation of the Yellow River customs line, the water ecological construction effect in Lanzhou City has been obvious in recent years. With the different development stages, it will be accompanied by different focuses, and we should improve the indicator system and propose relevant characteristics of different time periods, to better guide the construction of water ecological civilization in Lanzhou City.

Key words: evaluation of water ecological civilization; improved G1 method; harmony degree equation (HDE); Lanzhou City

1 研究背景

水生态文明是人类遵循人、水、自然、社会和谐

发展这一客观规律,并贯穿于经济社会发展和“自然-人工”水循环的全过程,反映了社会人水和谐程度和文明进步状态^[1-2]。开展水生态文明建设,

收稿日期:2019-05-16; 修回日期:2019-08-12

基金项目:国家自然科学基金(51669010)

作者简介:贡力(1977-),男,江苏丹阳人,博士,教授,硕士生导师,主要从事寒旱地区输水工程及调水安全的研究。

通讯作者:逯晔坤(1992-),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要进行水环境及渠系工程安全评价。

加快实施水资源管理制度、合理调配水资源、保证供水安全、倡导节约用水、减少污染以及治理生态环境,彻底解决人民长期承受的“水多之患”、“水少之怕”、“水脏之忧”等问题,就必须建立水生态文明评价体系,这一体系是水资源管理领域的一种新思想新理念,也是面对国家生态文明评价大形势下水利行业的一个重要响应。

自从水生态文明建设发展战略实施以来,国内学者相继开展了大量研究并取得了较大进展,不仅在内涵方面进行了深层次的研究,而且从多角度建立了指标评价及评价方法^[3-8]。例如:左其亭^[9]以生态文明理念为基础,对水生态文明建设的关键问题作出分析并提出具体建议;刘海娇等^[10]从水资源开发利用、水生态环境保护、水景观营造和水管理保障 4 方面构建评价指标体系,并建立了熵权和可拓相结合的水生态文明评价模型;王富强等^[11]从最严格水资源管理、水资源优化配置等方面构建了评价指标体系,以郑州市为例进行了水生态文明城市建设相关评价;黄显峰等^[12]考虑了水生态文明建设的 5 个相关方面构建了评价指标体系并建立基于实数编码的加速遗传算法的投影寻踪评价模型;王浩^[13]以“自然 - 社会”二元多过程的演变规律为核心,从防洪抗旱、高效供水、水生态、水文化和水管理五大体系出发,对水生态文明建设关键问题进行研究;张丛林等^[14]针对我国目前水问题,通过生态弹性力、资源承载力和环境承载力对水生态文明制度体系进行研究;皮家骏等^[15]从水资源、水生态、水利用、水管理和水文化方向利用 PSR 模型构建指标体系,利用物元模型对南昌市水生态文明进行评价。

综上所述,水生态文明建设评价中,指标体系的建立对水生态文明建设评价尤为关键。而兰州市生

态环境脆弱,黄河作为兰州市重要水资源来源,对兰州市水生态文明进行评价,有利于其生态环境建设、经济结构调整和产业转型升级,其水生态文明构建与城市经济发展密不可分。要在充分掌握水生态文明内涵的基础上建立指标体系,重点评价水生态文明变化趋势,以及各指标在生态文明建设过程中的状况和特点,找出明显关键制约因素,以制定针对性措施推进生态文明建设。

本文以兰州市水生态文明建设评价为目标,构建兰州市水生态文明评价指标体系,提出改进 G1 - HDE 的综合评价方法对兰州市水生态文明进行评价,确定其水生态文明程度,从而全面把控兰州市水生态文明建设方向,为其进一步开展水生态文明建设提供参考。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

本文研究采用数据主要来源于:(1)《甘肃省统计年鉴》《甘肃省水资源公报》《甘肃省水利发展统计公报》;(2)《甘肃省生态保护与建设规划(2014 - 2020)》和《兰州市十三五环境保护规划》。

各指标数据的处理根据参考文献[1]进行确定。

2.2 构建兰州市水生态文明评价指标体系及分级阈值

兰州市水生态文明评价指标体系的建立充分考虑到城市水生态文明建设的实践需求,将水安全、水生态、水环境、水节约、水监管、水文化 6 个方面作为评价指标体系的准则层,并对上述 6 个准则选取 18 个典型指标,从而构建兰州市水生态文明评价指标体系(见图 1)并确定各指标等级划分阈值(见参考文献[1])。

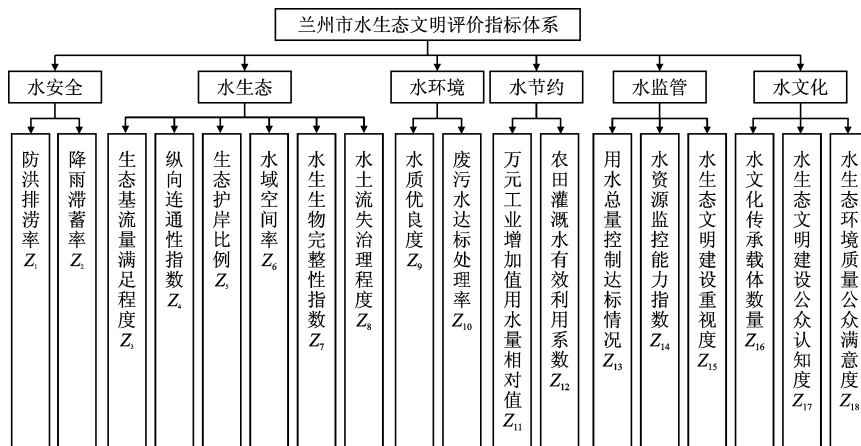


图 1 兰州市水生态文明评价指标体系

2.3 改进 G1 赋权法

主观赋权法 G1 是专家或决策者根据自我掌握信息和偏好,人为确定权重的方法,其缺乏实际数据,具有一定的随意性^[16]。因此,本文提出采用改进 G1 赋权方法确定权重^[17-18]。首先通过熵权法确定兰州市水生态文明的各评价指标的权重大小,代替 G1 法中人为主观确定各指标的序关系,对于其权重相同的指标采用专家评判确定相对序关系;其次运用变异系数法计算兰州市水生态文明各评价指标的变异系数,通过相邻指标的变异系数之比确定兰州市水生态文明各评价指标的重要性程度,代替 G1 法中人为主观确定相邻指标重要性程度的方法;最后采用 G1 法中权重的计算方法确定兰州市水生态文明评价指标的权重。改进 G1 法权重的确定修正了 G1 法主观及随意的特点,权重的确定更加灵活和客观。计算步骤如下:

(1) 熵权法确定各评价指标权重大小。数据处理及计算步骤如下:

正向指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

负向指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

计算评价指标的熵值 e_j , 确定各评价指标的权重 ω_j , 即:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中 $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}$, $k = 1 / \ln m$ 。

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (4)$$

(2) 根据权重大小确定评价指标的重要性程度排序关系。

通过上述确定的评价指标的权重大小,继而构建指标的序关系,记为:

$$X_1 > X_2 > \cdots > X_{k-1} > X_k > X_{k+1} > \cdots > X_n \quad (5)$$

(3) 确定评价指标的变异系数值。

计算评价指标的标准差:

$$\sigma_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_k - \bar{X}_k)^2 / n} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

计算评价指标的变异系数:

$$C_k = \frac{\sigma_k}{\bar{X}_k} \quad (7)$$

(4) 采用评价指标的变异系数值确定相邻指标 X_{k-1} 与 X_k 的重要性程度 r_k :

$$r_k = \begin{cases} \frac{C_{k-1}}{C_k} & (C_{k-1} \geq C_k) \\ 1 & (C_{k-1} < C_k) \end{cases} \quad (8)$$

(5) 通过 G1 法确定各评价指标的最终权重。

根据上述确定的 r_k 确定第 n 个评价指标的权重,即:

$$\omega_n = [1 + \sum_{k=2}^n (\prod_{j=k}^n r_j)]^{-1} \quad (9)$$

依据权重 ω_n 的值计算第 $n-1, n-2, \dots, 3, 2$ 个指标的权重值为:

$$\omega_{k-1} = r_k \omega_k \quad (k = n, n-1, \dots, 3, 2) \quad (10)$$

2.4 和谐度方程评价方法

和谐度方程 (harmony degree equation, 简称 HDE) 是左其亭^[19]于 2009 年为定量表达和谐程度而首次提出的,并对和谐度方程进行了系统介绍,构建了以“和谐”为理念进行定量研究的一套方法论体系^[20]。随后左其亭等^[21-23]及有关学者^[24-25]对和谐度方程评价方法及应用进行了详细描述,使和谐度方程在综合评价问题中能够灵活应用,其评价结果更为可靠、符合实际。

2.4.1 和谐度方程 (harmony degree equation)

(1) 单因素和谐度方程:

$$HD_k = a \cdot i - b \cdot j \quad (11)$$

(2) 多因素和谐度方程:

$$HD = \sum_{k=1}^m \omega_k HD_k \quad (12)$$

式中:各参数意义及确定方式见文献[26]。

2.4.2 兰州市水生态文明评价标准的确定 通过方程式(12)将改进 G1 法赋权确定的兰州市水生态文明评价指标的权重和和谐度方程确定的评价指标和谐度值进行加权平均计算,确定出兰州市水生态文明的和谐度值,对比表 1 兰州市水生态文明和谐度值划分标准确定最终文明程度。通过上述评价方法的介绍说明,兰州市水生态文明评价流程见图 2。

表 1 兰州市水生态文明和谐度值划分标准

和谐度值	(-1,0)	(0,0.4)	(0.4,0.6)	(0.6,0.8)	(0.8,1)
文明程度	V	IV	III	II	I
	极不文明	不文明	较不文明	一般文明	显著文明

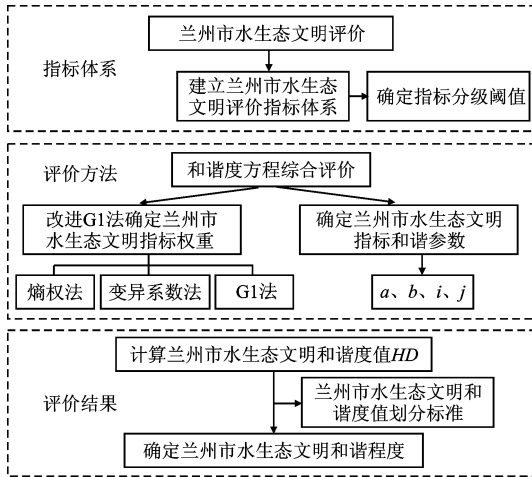


图 2 兰州市水生态文明评价流程

3 结果分析与讨论

3.1 兰州市水生态文明评价指标权重的确定

根据处理的数据,采用改进 G1 法计算兰州市水生态文明各评价指标权重,计算结果见表 2。

3.2 兰州市水生态文明评价指标和谐度计算

按照和谐度参数计算方法,确定各指标参数值。其中和谐参数计算采用模糊思想,将和谐参数划分为 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1,依次与指标等级 V~I 相对应进行计算。兰州市各指标 2014-2017 年的和谐参数计算结果见表 3。

采用和谐度方程(公式 11),计算兰州市各指标 2014-2017 年和谐度值,结果见表 4。

3.3 确定兰州市水生态文明和谐程度

根据多因素和谐度方程(公式 12)确定兰州市水生态文明和谐度值,并对照表 1 确定出兰州市水生态文明程度见表 5。

3.4 讨论

(1)通过指标权重计算(见表 2)可以发现水生态的纵向连通性指数、水监管的用水总量控制达标情况和水生态文明建设重视度权重最高,对兰州市水生态文明程度的影响最为显著。兰州市水生态文明评价中准则层的重要性依次为水监管、水文化、水生态、水安全、水节约和水环境,准则层从 6 个方面充分反映了“人、水”之间和谐发展对水生态文明建设的客观规律,继而对今后兰州市水生态文明建设

提出合理有效的把控要素。

表 2 兰州市水生态文明各指标权重的计算结果

指标	熵权法 权重 计算	指标重 要程度 排序	指标 变异 系数值	相邻指 标重要 性比值	各指标 权重的 确定	各指标 最终 权重
Z ₁	0	Z ₁₃	0	1.00	0.157	0.016
Z ₂	0.012	Z ₄	0	1.00	0.157	0.110
Z ₃	0.003	Z ₁₅	0.392	1.04	0.157	0.045
Z ₄	0.450	Z ₁₇	0.376	1.18	0.151	0.157
Z ₅	0.002	Z ₁₈	0.318	1.16	0.128	0.034
Z ₆	0	Z ₂	0.273	1.69	0.110	0.006
Z ₇	0.001	Z ₁₁	0.162	1.18	0.065	0.022
Z ₈	0	Z ₉	0.137	1.00	0.055	0.006
Z ₉	0.004	Z ₁₂	0.152	1.23	0.055	0.055
Z ₁₀	0	Z ₃	0.124	1.33	0.045	0.011
Z ₁₁	0.005	Z ₅	0.093	1.00	0.034	0.065
Z ₁₂	0.004	Z ₁₆	0.115	1.55	0.034	0.055
Z ₁₃	0.450	Z ₇	0.074	1.40	0.022	0.157
Z ₁₄	0	Z ₁	0.053	1.08	0.016	0.015
Z ₁₅	0.025	Z ₁₄	0.049	1.40	0.015	0.157
Z ₁₆	0.002	Z ₁₀	0.027	1.80	0.011	0.034
Z ₁₇	0.024	Z ₈	0.015	1.00	0.006	0.151
Z ₁₈	0.017	Z ₆	0.056		0.006	0.128

(2)2014-2017 年兰州市水生态文明各评价指标的和谐度值见图 3。由图 3 得出:从 2014-2017 年和谐度值为负的指标逐渐减少,同时各指标和谐度值整体上升趋势明显;生态基流量满足程度、废水达标处理率,水生态文明建设公众认知度及水环境质量公众满意度的和谐度值从极不文明上升趋势显著,得到了一定的改善;至 2017 年水域空间率和谐度值依旧为负值,故应重点分析原因,确定其对水生态文明的影响性,后期应纳入重点考察因素。

(3)兰州市水生态文明程度计算结果(见表 5)表明,其水生态-文明程度从 2014-2017 年依次为极不文明、不文明、一般文明、显著文明,呈现稳步上升趋势,与实际情况一致。主要因为近年来兰州市积极响应水生态文明建设,不断突出水生态文明建设的重要性,科学编制《兰州市水生态文明建设综合规划》和《兰州市水生态文明建设试点实施方

案》，以兰州市重要水资源黄河为载体，科学规划兰州水系，改善城市供水结构，合理布局生产、生活和生态用水工程，控制污染物，打造两岸湿地等景观建设，从而增强了人与水环境的和谐发展。

表3 2014-2017年兰州市水生态文明各评价指标和谐参数值

年份	和谐参数	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀	Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃	Z ₁₄	Z ₁₅	Z ₁₆	Z ₁₇	Z ₁₈
2014	a	0.55	0.61	0	1	0.54	0.22	0.51	0.75	0.57	0.23	0.65	0.36	1	0.86	0.63	0.38	0.09	0
	b	0.45	0.39	1.00	0	0.46	0.78	0.49	0.25	0.43	0.77	0.35	0.64	0	0.14	0.37	0.62	0.91	1.00
	i	0.50	0.57	0.20	1	0.52	0.42	0.48	0.67	0.51	0.29	0.53	0.48	1	0.71	0.57	0.40	0.26	0.14
	j	0.45	0.39	1.00	0	0.46	0.78	0.49	0.25	0.43	0.77	0.35	0.64	0	0.14	0.37	0.62	0.91	1.00
2015	a	0.72	0.82	0.15	1	0.56	0.28	0.55	0.78	0.78	0.62	0.71	0.68	1	0.93	0.94	0.50	0.38	0
	b	0.28	0.18	0.85	0	0.44	0.72	0.45	0.22	0.22	0.38	0.29	0.32	0	0.07	0.06	0.050	0.62	1.00
	i	0.61	0.69	0.26	1	0.53	0.46	0.50	0.68	0.65	0.45	0.55	0.64	1	0.76	0.76	0.50	0.43	0.18
	j	0.28	0.18	0.85	0	0.44	0.72	0.45	0.22	0.22	0.38	0.29	0.32	0	0.07	0.06	0.50	0.62	1.00
2016	a	0.65	1.00	0.37	1	0.67	0.31	0.66	0.79	1.00	0.94	0.77	1.00	1	1.00	1.00	0.50	0.57	0.42
	b	0.35	0	0.63	0	0.33	0.69	0.34	0.21	0	0.06	0.23	0	0	0	0	0.50	0.43	0.58
	i	0.57	1.00	0.34	1	0.60	0.47	0.56	0.69	0.88	0.58	0.58	0.83	1	0.85	1.00	0.50	0.54	0.47
	j	0.35	0	0.63	0	0.33	0.69	0.34	0.21	0	0.06	0.23	0	0	0	0	0.50	0.43	0.58
2017	a	0.75	1.00	0.58	1	0.81	0.31	0.73	0.84	1.00	1.00	0.85	1.00	1	1.00	1.00	0.50	0.95	0.79
	b	0.25	0	0.42	0	0.19	0.69	0.27	0.16	0	0	0.15	0	0	0	0	0.50	0.05	0.21
	i	0.63	1.00	0.44	1	0.68	0.47	0.60	0.71	0.93	0.62	0.65	0.87	1	0.88	1.00	0.50	0.77	0.63
	j	0.25	0	0.42	0	0.19	0.69	0.27	0.16	0	0	0.15	0	0	0	0	0.50	0.05	0.21

表4 2014-2017年兰州市水生态文明各评价指标和谐度值

年份	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀	Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃	Z ₁₄	Z ₁₅	Z ₁₆	Z ₁₇	Z ₁₈
2014	0.07	0.20	-1.00	1.00	0.07	-0.52	0.00	0.44	0.11	-0.53	0.22	-0.24	1.00	0.59	0.22	-0.23	-0.80	-1.00
2015	0.36	0.53	-0.68	1.00	0.10	-0.39	0.07	0.48	0.46	0.13	0.31	0.33	1.00	0.70	0.71	0.00	-0.22	-1.00
2016	0.25	1.00	-0.27	1.00	0.29	-0.33	0.25	0.50	0.88	0.54	0.39	0.83	1.00	0.85	1.00	0.00	0.12	-0.14
2017	0.41	1.00	0.08	1.00	0.51	-0.33	0.37	0.57	0.93	0.62	0.53	0.87	1.00	0.88	1.00	0.00	0.73	0.45

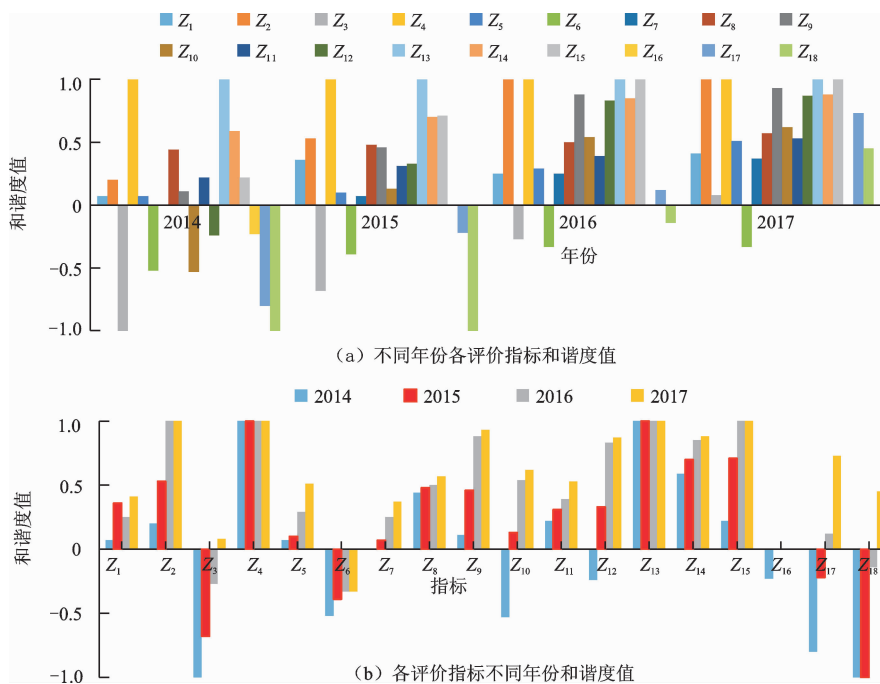


图3 2014-2017年兰州市水生态文明各评价指标和谐度值

表5 2014 - 2017 年兰州市水生态文明程度

年份	HD	文明程度
2014	0.08	不文明
2015	0.38	不文明
2016	0.72	一般文明
2017	0.94	显著文明

4 结 论

(1) 本文提出兰州市水生态文明评价对建立黄河上、中、下游整体性、系统性发展具有一定作用。兰州市水生态文明评价是打造黄河生态经济带重要因素,从水安全、水生态、水环境、水节约、水监管、水文化6方面及18个具有代表性的指标构成评价指标体系,尽可能体现兰州市水生态文明状况。兰州市水生态文明评价具有一定的模糊性和不可量化性,随着发展阶段的不同将具有不同的侧重点,应需在研究中更加完善指标体系,提出不同时段的相关特点,更好地指导兰州市水生态文明评价。

(2) 采用改进 G1 - HDE 的综合评价模型进行水生态文明评价,并以兰州市为例进行分析,得出水监管和水文化两方面在兰州市水生态文明评价中较弱,在今后工作中应加强这两方面建设,以提高人们对水生态文明的重视度。通过综合评价得出兰州市2014 - 2017年水生态文明程度逐渐提高,与实际情况相吻合,证明了此模型具有一定的适用性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 水生态文明城市建设评价导则:SL/Z 738[S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [2] 刘畅,冯宝平,张展羽,等. 基于压力 - 状态 - 响应的熵权 - 物元水生态文明评价模型[J]. 农业工程学报,2017,33(16):1 - 7.
- [3] 左其亭,罗增良. 水生态文明定量评价方法及应用[J]. 水利水电技术,2016,47(5):94 - 100.
- [4] 徐梦珂,陈星,王好芳,等. 青岛市水生态文明建设评价[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):109 - 114.
- [5] 詹卫华,邵志忠,汪升华. 生态文明视角下的水生态文明建设[J]. 中国水利,2013(4):7 - 9.
- [6] 崔东文,金波. 基于随机森林回归算法的水生态文明综合评价[J]. 水利水电科技进展,2014,34(5):56 - 60 + 79.
- [7] 向婧怡,张红举,陈力,等. 基于内容分析法的水生态文明概念及评价指标探讨[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(S1):169 - 175.
- [8] 胡庆芳,霍军军,李伶俐,等. 水生态文明城市指标体系的若干思考与建议[J]. 长江科学院院报,2018,35(8):22 - 26.
- [9] 左其亭. 水生态文明建设几个关键问题探讨[J]. 中国水利,2013(4):1 - 3 + 6.
- [10] 刘海娇,黄继文,仕玉治,等. 黄河下游典型城市水生态文明评价[J]. 人民黄河,2013,35(12):64 - 67.
- [11] 王富强,王雷,魏怀斌,等. 郑州市水生态文明城市建设现状评价[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(4):639 - 642.
- [12] 黄显峰,贾永乐,方国华. 基于投影寻踪法的城市水生态文明评价[J]. 水资源保护,2016,32(6):117 - 122.
- [13] 王浩. 水生态文明建设的理论基础及若干关键问题[J]. 中国水利,2016(19):5 - 7.
- [14] 张丛林,乔海娟,董磊华,等. 水生态文明制度体系框架研究[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):28 - 34.
- [15] 皮家骏,欧阳澍,张带琴,等. 基于 PSR - 物元模型的水生态文明评价研究——以南昌市为例[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):55 - 61.
- [16] 鲍学英,柴乃杰,王起才. 基于 G1 法和改进 DEA 的铁路绿色施工节能措施综合效果研究[J]. 铁道学报,2018,40(10):15 - 22.
- [17] 陈端,曹阳,夏辉,等. 基于熵权法和 G1 法的大坝监测指标权重融合[J]. 水电能源科学,2012,30(6):92 - 94.
- [18] 祝志川. 基于变异系数 - G1 法的混合交叉赋权方法[J]. 统计与决策,2017(12):78 - 81.
- [19] 左其亭. 和谐论的数学描述方法及应用[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(4):129 - 133.
- [20] 左其亭,韩春辉,马军霞,等. 和谐度方程(HDE)评价方法及应用[J]. 系统工程理论与实践,2017,37(12):3281 - 3288.
- [21] 左其亭,庞莹莹. 基于和谐论的水污染物总量控制问题研究[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):1 - 5 + 12.
- [22] 左其亭,马军霞,陶洁. 现代水资源管理新思想及和谐论理念[J]. 资源科学,2011,33(12):2214 - 2220.
- [23] ZUO Q T, ZHAO H, MAO C C, et al. Quantitative analysis of human-water relationships and harmony-based regulation in the Tarim River Basin [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(8):1 - 11.
- [24] 马军霞. 水质评价的和谐度方程(HDE)评价方法[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(2):11 - 14 + 20.
- [25] 逯晔坤,靳春玲,贡力. 黄河兰州段水质评价的 HDE 方法应用[J]. 中国农村水利水电,2019(3):32 - 36.
- [26] 左其亭. 和谐论:理论 - 方法 - 应用(第二版)[M]. 北京:科学出版社,2016.