

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.001

基于联系数的城市水生态文明建设评价方法

金菊良^{1,2}, 汤睿¹, 周戎星¹, 王友贞³, 夏小林³, 张浩宇^{1,2}

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009;

3. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

摘要:为对不同不确定性条件下城市水生态文明建设进行定量评价,识别城市水生态文明建设中的薄弱指标并判断建设状态的发展趋势,提出了采用遗传模糊层次分析法筛选评价指标,采用联系数方法进行定量评价,并综合运用级别特征值法、属性识别法、减法集对势法和加权综合得分法来评价城市水生态文明建设状态的城市水生态文明建设评价方法。以安徽省马鞍山、淮北、六安、池州城市水生态文明建设评价为例对所提出的方法进行了验证,评价结果与实际情况契合度较高,表明该方法合理可靠;该方法充分利用了相关评价信息,分析和判断结果合理,应用简便,可用于不同城市水生态文明建设动态评价。

关键词:水生态文明建设;联系数;遗传模糊层次分析法;减法集对势;安徽省

中图分类号:TV213.4;X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0001-06

Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number // JIN Juliang^{1,2}, TANG Rui¹, ZHOU Rongxing¹, WANG Youzhen³, XIA Xiaolin³, ZHANG Haoyu^{1,2} (1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu 233000, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the urban water eco-civilization construction under various uncertainty conditions, identify the weak indicators in the urban water eco-civilization construction and estimate the trend of the construction state development, this paper puts forward a method of evaluating the urban water eco-civilization construction, where analytic hierarchy process is used to screen the evaluation indicators of the research area, connection number method is adopted to establish a quantitative evaluation model, hierarchical eigenvalue method, attribute identification method, subtraction set pair potential method and weighted comprehensive score method are used to evaluate the state of urban water eco-civilization construction. The evaluation method is verified by taking the urban water eco-civilization construction in Ma'anshan, HuaiBei, Lu'an and Chizhou in Anhui Province as examples. The evaluation results are in good agreement with the actual situations, indicating that the method is reasonable and reliable. The method makes full use of the relevant evaluation information, with reasonable analysis and estimate results and simple application. It can be used for the dynamic evaluation of water eco-civilization construction.

Key words: water eco-civilization construction; connection number; accelerated genetic algorithms based fuzzy analytic hierarchy process; subtraction set pair potential; Anhui Province

水生态文明建设是人类生产生活、社会经济发展的重要保证和基础^[1-3]。城市水生态文明建设评价和诊断研究的现有基础较为薄弱,尚缺乏统一的

理论框架和有效的定量方法^[4-5],其主要问题有:一是如何合理构建适用于不同城市水生态文明建设评价的指标体系和定量评价模型;二是如何诊断识别

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407206);中央高校基本科研业务费专项(JZ2020HGQA0202)

作者简介:金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: jinjl66@126.com

通信作者:周戎星(1990—),女,讲师,硕士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: zhourx11@163.com

城市水生态文明建设中的脆弱性指标和判别建设状态的发展趋势。目前城市水生态文明建设评价方法和模型主要有主成分分析法^[6]、模糊物元模型^[7]、随机森林回归算法^[8]、模糊综合评价法^[9]、投影寻踪法^[10]、压力-状态-响应概念模型^[11]、物元可拓模型^[12]等,这些方法和模型在评价指标值与评价等级之间的不确定性处理方面仍有改进空间,有关城市水生态文明建设的定量评价研究成果还很少。加速遗传算法与模糊层次分析法相结合的遗传模糊层次分析法 (accelerating genetic algorithm based fuzzy analytic hierarchy process, AGA-FAHP) 是由金菊良等^[13]提出的一种改进的层次分析法,有效地克服了传统层次分析法中构造、检验和修正判断矩阵的一致性问题的,计算结果较为客观稳定,已在资源、环境^[14]等领域取得较好的应用效果。集对分析是由赵克勤^[15]基于事物的普遍联系原理和对立统一的关系结构提出的一种不确定性定量分析理论,通过构造联系数可以从同、异、反三方面定量地分析系统确定性与不确定性特征关系,使评价结果更为全面精确,已经在社会、经济、信息管理、资源与环境科学^[15-18]等领域广泛应用。本文在实际调研、深入分析城市区域水资源-生态环境-经济社会复杂系统并结合专家咨询意见的基础上,采用 AGA-FAHP 筛选城市水生态文明建设评价指标,采用基于联系数的方法对城市水生态文明建设进行定量评价,并通过安徽省 4 城市评价验证了方法的实用性。

1 评价指标筛选

采用 AGA-FAHP 筛选评价指标的步骤如下:

步骤 1:通过咨询专家、比较各要素(子系统或指标)两两之间的重要性,得到模糊互补判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,其中 n 为要素的个数, $0 \leq a_{ij} \leq 1$, $a_{ij} + a_{ji} = 1$, a_{ij} 为要素 i 的重要性高于要素 j 的程度, a_{ji} 为要素 j 的重要性高于要素 i 的程度^[13, 19-21]。

步骤 2:检验模糊互补判断矩阵的一致性,计算各要素的权重。若模糊互补判断矩阵 A 满足加性传递性:

$$(a_{ik} - 0.5) + (a_{kj} - 0.5) = a_{ij} - 0.5 \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

则根据式(1)可构造模糊互补判断矩阵 A 的一致性指标 ρ :

$$\rho = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq i, k \neq i, j}}^n \frac{|(a_{ik} + a_{kj} - 0.5) - a_{ij}|}{[n(n-1)(n-2)]} \quad (2)$$

若 $\rho \leq 0.2$, 则判断矩阵 A 具有满意的一致性^[19-20]。

模糊互补判断矩阵 A 中要素 k 的权重设为 w_k ,

且满足 $w_k > 0$ 和 $\sum_{k=1}^n w_k = 1$ 。称 $W = (w_{ij})_{n \times n}$ 为 A 的权重矩阵,其中 $w_{ij} = \alpha(w_i - w_j) + 0.5$, 参数 $\alpha \geq 0.5(n-1)$ ^[19-20]。 α 越小说明决策者越重视要素权重间的差异,一般在具体应用时取 $\alpha = 0.5(n-1)$ 。显然,模糊互补判断矩阵 A 具有完全一致性的充要条件是 $A = W$;由已知模糊互补判断矩阵 A 推求各要素权重 $\{w_k | k = 1, 2, \dots, n\}$ 。若矩阵 A 具有完全的一致性,则满足:

$$\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |0.5(n-1)(w_i - w_j) + 0.5 - a_{ij}| = 0 \quad (3)$$

当式(3)左端的值小于或等于 0.1 时,则判断矩阵 A 具有满意的一致性^[13]。当矩阵 A 的一致性不满足要求时,就需要修正 A ,假设修正后的矩阵为 $B = (b_{ij})_{n \times n}$,矩阵 B 的各要素权重仍表示为 $\{w_k | k = 1, 2, \dots, n\}$ 。于是可用下式得到 A 的最优模糊一致性判断矩阵 B 和指标权重 w_k ^[13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{|b_{ij} - a_{ij}|}{n^2} + \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{|0.5(n-1)(w_i - w_j) + 0.5 - b_{ij}|}{n^2} \\ \text{s. t.} \left\{ \begin{array}{l} b_{ii} = 0.5 \\ 1 - b_{ji} = b_{ij} \\ b_{ij} \in [a_{ij} - d, a_{ij} + d] \cap [0, 1] \\ w_k > 0 \\ \sum_{k=1}^n w_k = 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (4)$$

式中:目标函数 $f(n)$ 称为一致性指标系数 (consistency index coefficient, CIC); d 为非负参数,经验取值范围为 $[0, 0.5]$ 。式(4)用加速遗传算法 (accelerated genetic algorithm, AGA)^[22]求解。

步骤 3:根据权重 w_k 的大小,筛选掉权重相对较小的要素,所剩下的要素组成城市水生态文明建设评价指标体系。

2 评价方法与步骤

为对不同城市水生态文明建设进行定量评价,针对评价指标隶属于评价等级的不确定性问题(如原有评价方法缺陷等),在筛选得到的评价指标体系的基础上,先计算不同城市生态文明建设的联系数,再综合级别特征值法、属性识别法、加权综合得分法和减法集对势法的评价结果得到城市水生态

文明建设评价结果。该方法具体评价步骤如下:

步骤 1:评价指标评分。已知城市水生态文明建设评价指标体系为 $\{C_j | j = 1, 2, \dots, m_1\}$, 其中 C_j 为指标体系中第 j 个评价指标, m_1 为评价指标数目, 根据各指标的变化范围及与评价目标的作用关系可直接对评价指标在 0~100 分之间评分, 得到的评价指标评分样本数据集合为 $\{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, m_2; j = 1, 2, \dots, m_1\}$, 其中 m_2 为评价样本数目。

步骤 2:构建城市水生态文明建设评价等级标准。根据 DB 34/T 3321—2019《水生态文明城市评价准则》, 本文采用 5 个评价等级 ($l = 5$)^[23]: 得分 (90, 100] 为 1 级, (80, 90] 为 2 级, (60, 80] 为 3 级, (40, 60] 为 4 级, (0, 40] 为 5 级, 等级越高则越不和谐。

步骤 3:应用 AGA-FAHP 确定评价指标的权重 $\{w_j | j = 1, 2, \dots, m_1\}$ 。

步骤 4:计算城市水生态文明建设评价样本的联系数^[15-17]:

$$u_i = v_{i1} + v_{i2}I_1 + v_{i3}I_2 + v_{i4}I_3 + v_{i5}J \quad (5)$$

式中: u_i 为样本 i (例如某年某城市) 的五元联系数; I_1, I_2, I_3 为差异度系数; J 为对立度系数^[15]。 v_{ik} 为各联系数分量, 同时也分别是样本 i 属于 5 个评价等级的相对隶属度^[24], $v_{ik} \in [0, 1]$ 且 $\sum_{k=1}^5 v_{ik} = 1$ 。 u_i 的 5 个联系数分量计算公式^[17] 为

$$\begin{cases} v_{i1} = \sum_{j=1}^{n_1} w_j \\ v_{i2} = \sum_{j=n_1+1}^{n_1+n_2} w_j \\ v_{i3} = \sum_{j=n_1+n_2+1}^{n_1+n_2+n_3} w_j \\ v_{i4} = \sum_{j=n_1+n_2+n_3+1}^{n_1+n_2+n_3+n_4} w_j \\ v_{i5} = \sum_{j=n_1+n_2+n_3+n_4+1}^{n_1+n_2+n_3+n_4+n_5} w_j \end{cases} \quad (6)$$

式中: n_k 为样本 i 的 m_1 个指标中属于评价等级为 k ($k = 1, 2, \dots, 5$) 级的指标个数, 且 $\sum_{k=1}^5 n_k = m_1$ 。将指标权重值代入式 (6) 和式 (5), 可得样本 i 的评价指标值联系数 u_i 。

步骤 5:计算级别特征值法^[25]等级值:

$$h_i = \sum_{k=1}^5 v_{ik}k \quad (7)$$

式中: h_i 为用级别特征值法计算的样本 i 的评价等级值。根据均分原则, $1.0 \leq h_i < 1.8$ 为 1 级, $1.8 \leq$

$h_i < 2.6$ 为 2 级, $2.6 \leq h_i < 3.4$ 为 3 级, $3.4 \leq h_i < 4.2$ 为 4 级, $4.2 \leq h_i \leq 5.0$ 为 5 级, 等级越高代表越不和谐。

步骤 6:计算属性识别法^[26]等级值:

$$g_i = \min_{k^*} \left\{ k^* \mid \sum_{k=1}^{k^*} v_{ik} > \lambda \right\} \quad (k^* = 1, 2, \dots, l) \quad (8)$$

式中: g_i 为用属性识别法计算的样本 i 的等级值; λ 为置信度, 一般可在 [0.50, 0.70] 内取值, λ 越大说明置信水平越高^[26]; l 为评价标准等级数目。 g_i 代表城市水生态文明建设属性识别法中样本 i 的等级值。

步骤 7:计算加权综合得分法^[27]评分值:

$$y_i = \sum_{j=1}^{m_1} w_j x_{ij} \quad (9)$$

式中: y_i 为综合评分值; w_j 为指标 j 的权重; x_{ij} 为样本 i 指标 j 的评分值, 根据步骤 2 的分级标准可判断样本 i 所属的等级, 得分越高越和谐。

步骤 8:用减法集对势法^[17]识别、判断城市水生态文明建设脆弱性指标和建设状态的发展趋势^[28-30]。五元联系数 u_i 的减法集对势可表达为^[17, 31]

$$s_f(u_i) = (v_{i1} - v_{i5})(1 + v_{i2} + v_{i3} + v_{i4}) + 0.5(v_{i2} - v_{i4})(v_{i2} + v_{i3} + v_{i4}) \quad (10)$$

基于最大信息熵的均分原则可把减法集对势的变化范围均等划分为 5 个等级^[17, 31]: $-1 \leq s_f(u) < 0.6$ 为 5 级, $-0.6 \leq s_f(u) < -0.2$ 为 4 级, $-0.2 \leq s_f(u) \leq 0.2$ 是 3 级, $0.2 < s_f(u) \leq 0.6$ 为 2 级, $0.6 < s_f(u) \leq 1$ 为 1 级, 等级越高代表越不和谐。

步骤 9:将上述 4 种方法计算出的结果进行对比分析, 定性综合得出当前城市水生态文明建设的评价结果。

3 实例验证

选取马鞍山、淮北、六安和池州 4 座具有代表性的安徽省城市运用上述方法进行实例分析验证。马鞍山市地处安徽东部, 交通便捷, 是一座工业发达的沿江城市; 淮北市是皖北矿产资源丰富的能源城市; 六安市位于皖西, 处在江淮之间, 生态环境良好, 是安徽省文明城市; 池州市位于安徽南部, 森林覆盖率高, 自然资源丰富, 旅游业发达。4 市在地理分布、自然条件和经济发展上均具有一定的代表性, 本文以 4 市 2018 年的水生态文明建设评价为例进行分析。

3.1 评价结果

根据指标体系构建原则^[24], 从城市水生态文明建设评价因子系统与研究区域社会经济系统交互

作用角度,基于所选 4 市的水生态文明建设实际情况,构建由水安全、水生态、水管理、水景观、水文化 5 个子系统、各子系统下若干二级评价指标组成的安徽省城市水生态文明建设初步评价指标体系。用 AGA-FAHP 对初步评价指标体系进行筛选,得到安徽省城市水生态文明建设评价指标体系如图 1 所示(括号中数值为指标权重)。

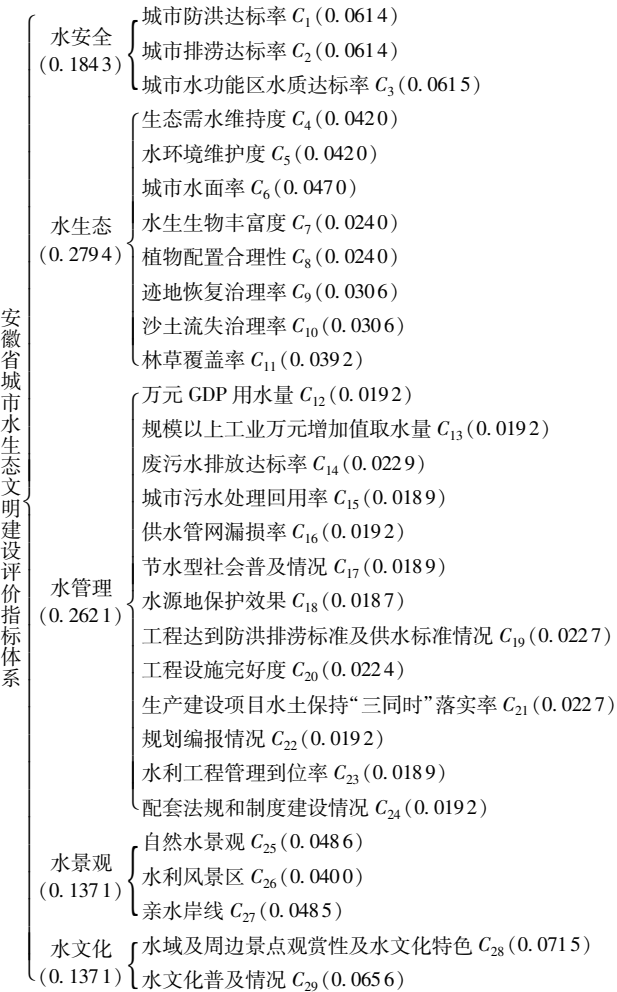


图 1 安徽省城市水生态文明建设评价指标体系及权重
Fig.1 Evaluation index system and weight of urban water eco-civilization construction in Anhui Province

4 市 2018 年评价指标评分结果见表 1^[4,10],评分细则参考安徽省水资源公报等。由式(6)计算得水生态文明建设评价样本联系数分量,再将评价年

的联系数分量分别代入式(7)~(10),根据表 1 可求得马鞍山、淮北、六安和池州 4 市 2018 年水生态文明建设评价的级别特征值、属性识别值(置信度取 0.70)^[26,32]、加权综合得分法评分值以及相应的减法集对势值如表 2 所示。

表 1 安徽省 4 市水生态文明建设评价指标评分结果
Table 1 Scores and results of urban water eco-civilization construction evaluation of the 4 cities in Anhui Province

评价指标	评价指标评分			
	马鞍山	淮北	六安	池州
C_1	80	60	100	100
C_2	60	100	100	100
C_3	70	100	100	100
C_4	83	67	83	100
C_5	85	83	83	100
C_6	100	100	100	100
C_7	75	100	100	100
C_8	80	100	100	100
C_9	84	100	100	10
C_{10}	70	100	100	100
C_{11}	100	100	100	100
C_{12}	70	100	16	77
C_{13}	70	100	78	69
C_{14}	85	100	100	100
C_{15}	70	100	100	0
C_{16}	65	100	100	100
C_{17}	80	100	100	100
C_{18}	85	100	100	100
C_{19}	80	100	100	100
C_{20}	76	100	100	100
C_{21}	78	100	100	100
C_{22}	0	100	100	100
C_{23}	80	50	100	100
C_{24}	80	100	100	100
C_{25}	90	60	100	100
C_{26}	65	100	100	100
C_{27}	80	100	100	100
C_{28}	85	67	100	100
C_{29}	90	100	100	100

3.2 分析与讨论

a. 从级别特征值法的评价结果看,马鞍山、淮北、六安、池州市 2018 年水生态文明建设分别处于 2 级、1 级、1 级和 1 级等级状态;从属性识别法的评价结果看,马鞍山、淮北、六安、池州市 2018 年水生

表 2 安徽省 4 市水生态文明建设评价的联系数分量和评价结果

Table 2 Connection number component and the evaluation results of watereco-civilization construction evaluation of the 4 cities in Anhui Province

城 市	联系数分量					评价结果			
	v_{i1}	v_{i2}	v_{i3}	v_{i4}	v_{i5}	级别特征值 法等级值	属性识别 法等级	加权综合得 分法评分	减法集 对势
马鞍山	0.0862	0.3419	0.5527	0.0000	0.0192	2.196	2	78.5	0.495
淮 北	0.7156	0.0420	0.2235	0.0000	0.0189	1.546	1	90.2	0.922
六 安	0.8776	0.0840	0.0192	0.0000	0.0192	1.199	1	96.5	0.951
池 州	0.9121	0.0000	0.0384	0.0000	0.0495	1.275	1	94.3	0.896

态文明建设分别处于2级、1级、1级、1级等级状态;从4市2018年水生态文明建设的加权综合得分法评分结果来看,马鞍山处于3级,淮北、六安和池州均属于1级;由减法集对势法的评价结果可知4市2018年水生态文明建设的的发展趋势依次处于2级、1级、1级、1级状态。这4种方法得出的结果具有较高的契合度。

b. 评价年的联系数分量评价结果刻画了4市2018年水生态文明建设处于5个评价等级的分布信息结构,它所提供的各评价等级信息结构明显比只有一维实数值的级别特征值法、属性识别法、加权综合得分法、减法集对势的评价结果丰富;级别特征值法、加权综合得分法的评价结果比属性识别法的评价结果更精细,属性识别法的评价结果含有置信概率信息,它的评价结论比较可靠、稳妥。综合考虑这4种方法得出的评价结果更为稳妥,4市2018年水生态文明建设的综合评价结果分别处于2级、1级、1级、1级状态。

c. 由表1中的评分可知,马鞍山市需改进的指标有规划编报情况、城市排涝达标率、水土流失治理率、城市污水处理回用率和城市水功能区水质达标率;对淮北市需改进的指标有水利工程管理到位率、城市防洪达标率、自然水景观、生态需水维持度、水域及周边景点观赏性及水文化特色;六安市在万元GDP用水量上需要改善;池州市城市污水处理回用率和迹地恢复治理率需要提高。

d. 尽管池州市的级别特征值法、加权综合得分法的评价结果优于淮北市,但池州市的减法集对势值劣于淮北市,这是由于池州市的迹地恢复治理率、城市污水处理回用率明显处于不和谐状态,存在明显的短板指标,这是池州市亟需改进之处。4市中六安市水生态文明建设的的发展趋势相对最佳。

e. 由表2评价结果与安徽省水资源公报、安徽省城市水生态相关资料对比分析可知,本文评价结果与4市水生态文明建设总体现状有较高的吻合度,表明了本文方法的合理性。4市水生态文明建设现状评价结果区分度明显,评价过程稳健,诊断分析合理,适用性广,表明本文方法在其他城市水生态文明建设动态评价和诊断分析中具有推广应用价值。

f. 图1评价指标体系与文献[4]一致,但在确定指标权重时,本文采用的AGA-FAHP能有效克服文献[4]中传统层次分析法构造、检验和修正判断矩阵的一致性问题的,计算结果更稳定,通用性也更高;在进行水生态文明建设评价时,文献[9]分别采用打分法和欧式距离法对10座城市进行评价,但两

种方法结果相差较大,而本文采用的联系数方法得出的结果精确稳定,说明本文采用的评价方法更具稳定性。

4 结 语

本文将城市水生态文明建设评价与所在城市经济社会发展、日常生活结合,为了能筛选出适用当前城市水生态文明建设的评价指标,定量准确评价城市水生态文明建设现状和发展趋势,在运用AGA-FAHP筛选评价指标的基础上,提出了基于联系数的城市水生态文明建设的评价方法,并以安徽省4个代表城市为例进行了验证,结果显示,该方法合理可靠,评价结果与实际情况契合度高,较好地解决了评价指标与评价等级之间不确定性方面的问题。本文提出的方法评价过程稳健,诊断分析合理,适用性广,在水生态相关问题的动态评价和诊断分析中具有推广应用价值。

参考文献:

- [1] 段秀举. 基于生态理念的山地城市水资源规划研究:以重庆市水资源规划为例[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [2] 王建华,胡鹏. 我国水生态文明建设内涵、评价标准与经验模式[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5): 112-118. (WANG Jianhua, HU Peng. The connotation evaluation criteria and experience model of water ecological civilization construction in China[J]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2018,16(5):112-118. (in Chinese))
- [3] 左其亭,罗增良,马军霞. 水生态文明建设理论体系研究[J]. 人民长江,2015,61(8):1-6. (ZUO Qiting, LUO Zengliang, MA Junxia. Study on theoretical system of water ecological civilization construction[J]. Yangtze River, 2015,61(8):1-6. (in Chinese))
- [4] 陈璞. 水生态文明城市建设的评价指标体系研究:以安徽省六安市为例[D]. 济南:济南大学,2014.
- [5] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨[J]. 水资源保护,2013,29(4):1-4. (TANG Kewang. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4):1-4. (in Chinese))
- [6] 任俊霖,李浩,伍新木,等. 基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明建设评价[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(10):1537-1544. (REN Junlin, LI Hao, WU Xinmu, et al. Assessment of 11 provincial capitals' water ecological civilization of the Yangtze River Economic Belt on the principal component[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(10): 1537-1544. (in Chinese))
- [7] 宋梦林,左其亭,赵钟楠,等. 河南省水生态文明建设试

- 点城市生态系统健康评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1185-1190. (SONG Menglin, ZUO Qiting, ZHAO Zhongnan, et al. Assessment of urban ecosystem health in experimental units of water eco-civilization construction in Henan[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2015, 13(6): 1185-1190. (in Chinese))
- [8] 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. (CUI Dongwen, JIN Bo. Comprehensive evaluation of water ecological civilization based on random forests regression algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(5): 56-60. (in Chinese))
- [9] 张翔宇, 宋瑞明, 刘姝芳, 等. 模糊综合评价模型在水生态文明建设评价中的应用[J]. 水力发电, 2019, 45(2): 43-46. (ZHANG Xiangyu, SONG Ruiming, LIU Shufang, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation model in water eco-civilization evaluation[J]. Water Power, 2019, 45(2): 43-46. (in Chinese))
- [10] 黄显峰, 贾永乐, 方国华. 基于投影寻踪法的城市水生态文明建设评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 117-122. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua. Evaluation of urban aquatic ecological civilization construction based on projection pursuit method [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 117-122. (in Chinese))
- [11] 刘畅, 冯宝平, 张展羽, 等. 基于压力-状态-响应的熵权-物元水生态文明建设评价模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 8-14. (LIU Chang, FENG Baoping, ZHANG Zhanyu, et al. Evaluation model of water ecological civilization based on pressure-state-response matter element model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(16): 8-14. (in Chinese))
- [12] 汪伦焰, 袁杰, 李娜, 等. 基于物元可拓模型的水生态文明城市建设评价: 以许昌市为例[J]. 人民长江, 2016, 47(18): 18-21. (WANG Lunyan, YUAN Jie, LI Na, et al. Evaluation of water ecological civilization city construction based on matter-element extension evaluation model; case of Xuchang City [J]. Yangtze River, 2016, 47(18): 18-21. (in Chinese))
- [13] 金菊良, 洪天求, 王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 22-28. (JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 22-28. (in Chinese))
- [14] 金菊良, 沈时兴, 陈梦璐, 等. 遗传层次分析法在区域水资源承载力评价指标体系筛选中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 1-6. (JIN Juliang, SHEN Shixing, CHEN Menglu, et al. Application of genetic analytic hierarchy process in screening the evaluation index system of regional water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 1-6. (in Chinese))
- [15] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000.
- [16] KUMAR K, GARG H. Connection number of set pair analysis based TOPSIS method on intuitionistic fuzzy sets and their application to decision making [J]. Applied Intelligence, 2018, 48(8): 2112-2119.
- [17] 金菊良, 沈时兴, 郦建强, 等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese))
- [18] 金菊良, 董涛, 郦建强, 等. 区域水资源承载力评价的风险矩阵方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 46-50. (JIN Juliang, DONG Tao, LI Jianqiang, et al. Risk matrix method for evaluating regional water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 46-50. (in Chinese))
- [19] 姚敏, 张森. 模糊一致矩阵及其在决策分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(5): 78-81. (YAO Ming, ZHANG Sen. Fuzzy consistent matrix and its application in decision marking [J]. Systems Engineering-theory and Practice, 1998, 18(5): 78-81. (in Chinese))
- [20] 宋光兴. 多属性决策理论、方法及其在矿业中的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2001.
- [21] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 65-70. (JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(3): 65-70. (in Chinese))
- [22] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 标准遗传算法的改进方案: 加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 8-13. (JIN Juliang, YANG Xiaohua, DING Jin. An improved simple genetic algorithm: accelerating genetic algorithm [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2001, 21(4): 8-13. (in Chinese))
- [23] 王月敏. 南四湖下级湖水生态环境综合评价研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.

- (in Chinese))
- [63] 郑雅方. 美国流域治理法律制度发展述评[J]. 法治与社会, 2017(24):18-20. (ZHENG Yafang. A review of the development of the legal system of watershed governance in the United States[J]. Rule of Law and Society, 2017(24):18-20. (in Chinese))
- [64] 王海燕, 葛建团. 欧盟跨界流域管理对我国水环境管理的借鉴意义[J]. 长江流域资源与环境, 2008(11):944-947. (WANG Haiyan, GE Jiantuan. European Union trans-boundary river basin management and its reference value for the water environmental management in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008(11):944-947. (in Chinese))
- [65] 谭婉冰. 基于强互惠理论的湘江流域生态补偿演化博弈研究[J]. 湖南社会科学, 2018(3) 158-165. (TAN Wanbing. A game study on the evolution of ecological compensation in the Xiangjiang River Basin based on the theory of strong reciprocity[J]. Hunan Social Sciences, 2018(3):158-165. (in Chinese))
- [66] 秦红. 京津冀区域水污染协同防治法律问题研究[D]. 保定:河北大学, 2017
- [67] 李奇伟. 从科层管理到共同体治理:长江经济带流域综合管理的模式转换与法制保障[J]. 吉首大学学报(社会科学版), 2018(6):60-68. (LI Qiwei. From hierarchical management to community governance: mode transformation and legal protection of integrated governance in Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Jishou University(Social Sciences), 2018(6):60-68. (in Chinese))
- [68] 王宏巍, 王树义. 《长江法》的构建与流域管理体制改革[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2011, 13(2):62-64. (WANG Hongwei, WANG Shuyi. Construction of the Yangtze River Law and reform of river basin management system[J]. Journal of Hohai University(Philosophy and Social Sciences), 2011, 13(2):62-64. (in Chinese))

(收稿日期:2020-09-15 编辑:彭桃英)

(上接第6页)

- [24] 金菊良, 陈鹏飞, 陈梦璐, 等. 水文水资源学家陈守煜先生学术研究的知识图谱分析[J]. 水利学报, 2019, 50(10):1282-1290. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Knowledge map analysis of academic research of Mr. Chen Shouyu, hydrological and water resources specialist[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10):1282-1290. (in Chinese))
- [25] ZOU Q, ZHOU J, ZHOU C, et al. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2013, 27(2):525-546.
- [26] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1):12-20. (CHENG Qiansheng. Attribute recognition theoretical model with application[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(1):12-20. (in Chinese))
- [27] 霍晓君, 潘彦昭, 张利雯, 等. 加权和分析法在生态城市发展中的协调度评价[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1):140-145. (HUO Xiaojun, PAN Yanzhao, ZHANG Liwen, et al. The city's ecological appraisalment of sustainable development: a case study in Baotou Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(1):140-145. (in Chinese))
- [28] 潘争伟, 吴成国, 周玉良, 等. 基于集对指数势的流域水资源系统脆弱性影响因子分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3):39-43. (PAN Zhengwei, WU Chengguo, ZHOU Yuliang, et al. Driving factors analysis of basin water resources system vulnerability based on set pair exponential potential [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3):39-43. (in Chinese))
- [29] 金菊良, 张浩宇, 宁少尉, 等. 效应全偏联系数及其在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(1):1-8. (JIN Juliang, ZHANG Haoyu, NING Shaowei, et al. Effect full partial connection number and its application in evaluation of regional water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2019, 40(1):1-8. (in Chinese))
- [30] CUI Y, FENG P, JIN J L, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method [J]. Entropy, 2018, 20(5):359.
- [31] 金菊良, 陈鹏飞, 张浩宇, 等. 五元减法集对势及其在水资源承载力趋势分析中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2):30-35. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, ZHANG Haoyu, et al. Five-variable subtraction set pair potential and its application in trend analysis of water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2020, 41(2):30-35. (in Chinese))
- [32] 方国华, 杨琳, 黄显峰. 基于权重集对分析法的滁州市饮用水水源地富营养化评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(2):42-45. (FANG Guohua, YANG Lin, HUANG Xianfeng. Eutrophication assessment of urban drinking water source of Chuzhou City [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(2):42-45. (in Chinese))

(收稿日期:2020-12-31 编辑:熊水斌)