

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0088

王先庆,李博,郑建.基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):87-93.
WANG X Q,LI B,ZHENG J. Comprehensive evaluation of water resources security based on GRA-ANP model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(4):87-93. (in Chinese)

基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价

王先庆¹,李博²,郑建³

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550000; 2. 贵州大学 喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室, 贵阳 550000; 3. 兖矿集团东华建设有限公司地矿建设分公司, 山东 邹城 273500)

摘要:水资源安全系统是由自然、社会等因子组成的复杂系统,具有复杂和模糊的特征。综合考虑供水安全、社会安全、经济安全、生态环境安全4个方面的水资源安全问题,基于网络层次分析法(ANP),对水资源安全评价的主要控制因素进行网络层次划分和权重计算,并结合灰色关联分析法(GRA)建立了水资源安全综合评价模型。应用此评价模型对贵州省2008—2015年的水资源安全状态进行等级评价。结果表明:2008—2015年贵州省水资源安全总体处于相对稳定状态,属较安全状态和临界安全状态范围,且安全状态等级呈现稳步上升的趋势。该评价结果与实际情况相符,说明采用GRA-ANP模型的水资源安全综合评价方法是合理有效的,该评价方法及结果可为区域水资源安全评价以及水资源开发利用提供借鉴和参考。

关键词:水资源安全评价;网络层次分析法(ANP);灰色关联分析法(GRA);贵州省

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comprehensive evaluation of water resources security based on GRA-ANP model

WANG Xianqing¹, LI Bo², ZHENG Jian³

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550000, China; 2. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Guizhou University, Guiyang 550000, China; 3. Yankuang Group Donghua Construction Co., Ltd, Geology Construction Branch, Zoucheng 273500, China)

Abstract: Water resources security is a complex system composing of natural and social factors, with complex and fuzzy features. In this paper, a network hierarchy division and a weight calculation have been proposed for the main control factors of the water resource safety assessment on the basis of Analytic Network Process (ANP), comprehensively considering four aspects of water resource security, namely, water supply security, social security, economic security, and ecological environment security. In addition, a comprehensive evaluation model of water resources security was established by combining Grey Relation Analysis (GRA). The water resource security of Guizhou province from 2008 to 2015 was then evaluated with this model. The results showed that its security was overall in a relatively stable state, which was between safer and near safe condition, and the safety grade steadily was on the rising. This result was coincided with the reality, which indicated that the comprehensive evaluation model with the applications of GRA-ANP was reasonable and effective. The evaluation method and results thus can provide a

收稿日期:2019-01-23 修回日期:2019-04-12 网络出版时间:2019-04-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190419.1616.010.html>

基金项目:国家自然科学基金(41702270);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788);贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2018]113);贵州省科学技术基金(黔科合基础[2019]1413)

作者简介:王先庆(1994—),男,贵州遵义人,主要从事水资源可持续发展研究。E-mail:1732762855@qq.com

通信作者:李博(1982—),男,河南南阳人,副教授,博士,主要从事水资源管理与规划等方面研究。E-mail:617238458@qq.com

reference for regional assessment of water resources security and the development and utilization of water resources.

Key words: water resources safety assessment; ANP; GRA; Guizhou Province

水资源是一种不可或缺的自然资源,是影响人类生存和社会经济发展的一个关键性因素,水资源安全与国民经济、社会安定息息相关^[1-4]。随着人口、经济的飞速增长以及气候变化的影响,越来越多的地方出现了水资源匮乏、水环境恶化等水资源问题,严重威胁着国家和地区的水资源安全。目前,对水资源安全问题的研究主要集中在水量、水质及水生态系统等方面。Raskin 等^[5]用取水量与水资源量之比来评价水资源安全程度大小,并定义为水资源脆弱性指数;Shiklomanov 等^[6]采用水资源可利用量、工农业用水量和生活用水量指标来分析水资源安全状况;李泽红等^[7]分别从水质、水量、水灾害防治方面对水资源安全进行了评价;王鹏全等^[8]基于水量平衡条件下,利用 WEAP 软件建立了水量、水质预测模型对区域水资源安全进行了分析评价。事实上,水资源安全处在一个极其复杂的系统当中,影响因素众多,仅用简单的几个指标难以反映出水资源安全的真实状态。因此,本文综合考虑供水安全、社会安全、经济安全、生态环境安全等 4 个方面的水资源安全问题,对水资源安全评价的主要控制因素进行层次划分和权重计算,再结合灰色关联分析法建立水资源安全评价模型。并以贵州省为例,采用基于灰色关联-网络层次分析的水资源安全评

价模型对水资源安全状态进行综合评价,旨在补充以往研究的不足和为该地区水资源开发利用提供科学依据。

1 水资源安全评价指标及等级划分

水资源安全是指一个国家或地区在现有或者可预见的经济、技术和社会发展水平条件下,按照可持续发展为原则,水资源能够满足国民经济和社会可持续发展的需要,其实质在于水资源供给能否满足合理的水资源需求^[9-10]。

水资源安全评价在建立起评价体系之前,首先对影响水资源安全的因素进行分析。水资源安全受多种因素的影响,针对研究区的用水特点,数据的代表性、可操作性和可观测性等特点,选择合理的评价指标。本文在综合考虑国家标准、行业规范、前人研究成果^[11-12]以及研究区地形地貌、生态环境和经济、社会的基础上,从水资源供水安全、社会安全、经济安全和生态环境安全 4 个方面来评价水资源安全状况。选取 13 项代表性影响因素,构建了水资源安全评价指标体系,并将水资源安全评价因素分为 5 个状态等级,分别为安全状态(I 级)、较安全状态(II 级)、临界状态(III 级)、较不安全状态(IV 级)和不安全状态(V 级),见表 1。

表 1 水资源安全评价指标及等级划分

Tab. 1 Indicators and gradings of water resources safety assessment

准则层	指标层	I	II	III	IV	V
供水安全	人均水资源量/ m^3	5 000	3 000	2 000	1 000	500
	产水模数/%	65	55	45	35	20
	水资源利用率/%	6	10	15	22	30
	地下水开发利用程度/%	0.2	1.2	2.2	3.2	4.2
社会安全	人口密度/(人· km^2)	75	150	300	600	900
	城镇化率/%	85	60	45	35	25
	人均用水量/(L· d^{-1})	160	210	260	310	360
经济安全	万元 GDP 用水量/ m^3	60	120	180	240	300
	工业用水率/%	10	25	40	55	70
	灌溉用水率/%	20	35	55	65	80
生态环境安全	生态用水率/%	1.6	1.2	0.8	0.4	0.2
	植被覆盖率/%	82	67	52	37	22
	水功能区水质达标率/%	85	75	65	55	35

2 确定指标权重

依据网络层次分析法(ANP)确定各影响指标的权重值。ANP 是源于 AHP,它是一种适用于非

独立的递阶层次结构的决策方法,可解决内部具有依存、外部具有反馈关系的复杂的决策问题。根据指标间的相互关系,构建超级矩阵,计算出各指标的权重大小^[13-14]。具体步骤如下^[15-16]。

2.1 判断矩阵的构建

通过专家打分、调查问卷等方式来比较元素之间的重要程度,给出数值,构建 ANP 判断矩阵,打分标准依照 T. L. SAATY 创立的 1~9 标度方法^[17]。

设 ANP 的控制层中有准则元素 B_1, B_2, B_3, \dots , 网络层有元素组 $C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}, \dots$, 其中 $i=1, 2, \dots, n$, 将元素组中元素对 C_{ij} 的影响力大小进行两两比较得到判断矩阵 W_{ij} , W_{ij} 中列向量是 B_i 元素组中的元素 $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{ij}$ 对 B_j 元素组中 $C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jm}$ 的元素的影响程度排序向量。两两比较打分过程一般会受到主观判断的影响,因此需对各组判断矩阵进行一致性检验^[18]。

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \dots & w_{i1}^{(jm)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \dots & w_{i2}^{(jm)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{in}^{(j1)} & w_{in}^{(j2)} & \dots & w_{in}^{(jm)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 ANP 加权超矩阵和极限矩阵

将网络层元素相互影响的排序向量组合起来,得到一个控制元素下的超矩阵

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对矩阵 W 进行归一化处理,得特征矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

最后运用公式

$$\omega = W \times P \quad (4)$$

求得加权超矩阵,对加权矩阵通过公式

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega_{ij}^t \quad (5)$$

求得极限矩阵,从而得到每一项指标的重要性排序。

3 评价方法

灰色关联分析方法是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断是否紧密联系,序列之间曲线距离越接近关联性就越大,反之关联性则越小。本文利用影响水资源安全评价指标的参考序列和其比较序列之间关联度的思路,结合指标权重建立评价模型,该评价模型避免了主观任意性,并且和实际情况相吻合,具体评价步骤如下^[19]。

3.1 确定评价对象和评价标准

参考数列(评价标准)记为: $x_j^0 = \{x_j^0(1), x_j^0(2), \dots, x_j^0(n)\}$, 比较序列(评价对象)记为: $x_i^0 = \{x_i^0(1), x_i^0(2), \dots, x_i^0(n)\}$, 运用初值法对评价矩阵进行无量纲化处理得矩阵

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

其中,无量纲化计算公式为

$$x(k) = \frac{x^0(k)}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^0(k)} \quad (6)$$

式中: $x(k)$ 为第 k 项评价因子的无量纲化值; $x^0(k)$ 为各评价因子的实际值; $x_j^0(k)$ 为水资源安全评价分级标准中评价指标的标准值; $k=1, 2, \dots, n$ 。

3.2 灰色关联系数的求解

灰色关联系数计算公式为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_i(k) - x_j(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i(k) - x_j(k)|}{\min_i \max_k |x_i(k) - x_j(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i(k) - x_j(k)|} \quad (7)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为第 i 个评价对象中的第 k 个指标与第 k 个最优指标的关联系数; ρ 为分辨系数,一般取 $\rho=0.5$; $k=1, 2, \dots, n$; $i=1, 2, \dots, n$ 。

3.3 计算灰色加权关联度

结合网络层次分析法确定的各影响指标权重,计算各指标权重差异的灰色加权关联度。

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k \xi(k) \quad (8)$$

式中: w_k 表示指标权重; r_i 表示第 i 个评价对象对理想对象的灰色加权关联度; $i=1, 2, \dots, n$; $k=1, 2, \dots, n$ 。

3.4 综合评价

根据计算的灰色加权关联度结果,建立起评价对象的关联序列,对关联度从大到小进行排序,关联度越大,表示与等级集合的关联程度越好,从而判定水资源安全等级。

4 实例分析

4.1 研究区概况

贵州省位于中国西南部,区域面积约为 17.62 万 km^2 ,与广西、云南、湖南、重庆、四川相接,为西南交通枢纽。其地处云贵高原,平均海拔约 1 100 m,整

体地势西北高,东南低。区内气候类型属亚热带季风气候,年平均温度约 16.2℃,年平均降水量 1 100 mm 至 1 300 mm。水资源主要补给来源为大气降水,地表水与地下水相互补给,转化,循环交替比较频繁。区内地形起伏大,局部区域气候存在明显差异。

4.2 数据来源

本文基础数据来源于 2008—2015 年《贵州省水资源公报》和《贵州省统计年鉴》。其中人均水资源

量、产水模数、人口密度、人均用水量、万元 GDP 用水量、植被覆盖率和水功能区水质达标率数据可直接利用,水资源利用率为供水量和水资源总量之比,地下水开发利用程度为地下水供水量与地下水资源量之比,城镇化率为城镇人口和总人口之比,工业用水率为工业用水量与总用水量之比,灌溉用水率为灌溉用水量和总用水量之比,生态用水率为生态用水量和总用水量之比,见表 2。

表 2 2008—2015 年贵州省水资源安全评价影响指标数据

Tab. 2 Water resources safety indicators assessment in Guizhou Province from 2008 to 2015

影响指标	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
人均水资源量/m ³	2 826.00	2 226.00	2 283.00	1 806.00	2 796.00	2 168.00	3 458.00	3 269.00
产水模数/%	64.78	51.68	54.30	35.55	55.29	43.11	68.86	65.49
水资源利用率/%	8.93	11.03	10.61	16.18	9.40	12.11	7.86	8.45
地下水开发利用程度/%	2.98	2.80	2.86	0.51	0.43	0.81	1.12	1.06
人口密度/(人·km ²)	204.00	201.00	197.00	197.00	198.00	199.00	199.00	200.00
城镇化率/%	29.11	30.00	33.81	35.00	36.50	37.80	40.01	42.01
人均用水量/(L·d ⁻¹)	252.00	245.00	242.00	274.00	263.00	263.00	272.00	276.00
万元 GDP 用水量/m ³	286.00	257.00	219.00	167.00	135.00	115.00	103.00	107.00
工业用水率/%	33.12	34.01	33.83	42.16	27.31	29.37	29.02	26.16
灌溉用水率/%	50.22	50.13	49.33	44.35	52.39	49.86	50.36	52.90
生态用水率/%	0.48	0.55	0.61	0.56	0.64	0.75	0.73	0.76
植被覆盖率/%	39.93	39.93	40.52	41.53	47.00	48.00	49.00	50.00
水功能区水质达标率/%	30.30	18.20	15.20	25.40	63.40	72.20	72.20	70.70

4.3 指标权重计算

4.3.1 各级指标判断矩阵的构建

将水资源安全评价设为目标层,供水安全 B_1 、社会安全 B_2 、经济区安全 B_3 及生态环境安全 B_4 设定为准则层元素; C_{ij} 表示元素组内的元素($i=1, 2, 3, \dots$, 表示准则层元素的个数; $j=1, 2, 3, \dots$, 表示网络层中各个元素组内元素的个数),水资源安全评价体系见图 1。

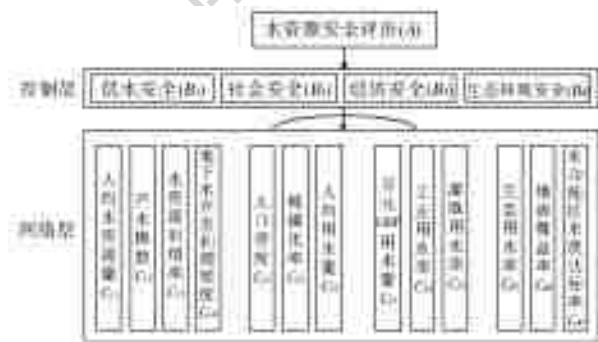


图 1 基于 ANP 的水资源安全评价体系

Fig. 1 The evaluation system of ANP-based water resources safety

结合实际情况,采用专家打分的方式,利用专家对各项指标的打分结果计算获得各指标的直接和间

接重要程度,构建元素组及元素间的两两比较判断矩阵,分别录入 Super Decisions 软件计算并对判断矩阵进行一致性检验。例如构建“供水安全 B_1 ”下元素组判断矩阵,见表 3。

表 3 “供水安全 B_1 ”下元素组判断矩阵

Tab. 3 Element group judgment matrix under "Water Supply Safety B_1 "

准则 B_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	权重 W
C_{11}	1	2	1	2	0.330 1
C_{12}	1/2	1	1/3	2	0.206 8
C_{13}	1	3	1	1	0.288 3
C_{14}	2	1/2	1	1	0.174 8

注:CR=0.069 5<0.1,符合一致性检验。

各元素组及元素间构造的判断矩阵数量较多,此处不一一列出。

4.3.2 加权超矩阵和极限超矩阵计算

结合上述各级指标判断矩阵,运用特征根法求得加权矩阵。加权矩阵反映了 ANP 网络结构中各安全性指标之间的相互影响程度,是元素之间相互影响共同作用的结果。最后运用式(5)对上述加权超矩阵进行收敛运算求得稳定的权重极限,使超矩

阵中每一行的数值都相等,该数值即为对应水资源安全评价指标的最终权重。此计算过程极其繁琐,因此借助 Super Decisions 软件,通过执行 Computations, Weighted Super Matrix, Limit Matrix 命令

来实现对加权超矩阵和极限超矩阵的计算。

4.3.3 各评价指标权重

由 Super Decisions 软件,求得加权超矩阵和极限超矩阵,最终获得各个评价指标的稳定权重,见表 4。

表 4 水资源安全评价指标权重

Tab. 4 Weights of water resources safety evaluation indicators

目标层	准则层	一级权重	指标层	二级权重	综合权重
水资源安全综合评价(A)	供水安全(B ₁)	0.390 5	人均水资源量(C ₁₁)	0.385 0	0.134 8
			产水模数(C ₁₂)	0.228 9	0.080 1
			水资源利用率(C ₁₃)	0.212 0	0.074 2
			地下水开发利用程度(C ₁₄)	0.174 1	0.060 9
	社会安全(B ₂)	0.138 1	人口密度(C ₂₁)	0.415 6	0.087 7
			城镇化率(C ₂₂)	0.319 1	0.067 3
			人均用水量(C ₂₃)	0.265 3	0.056 0
	经济安全(B ₃)	0.276 1	万元 GDP 用水量(C ₃₁)	0.393 7	0.099 7
			工业用水率(C ₃₂)	0.259 1	0.066 2
			灌溉用水率(C ₃₃)	0.347 1	0.088 2
	生态环境安全(B ₄)	0.195 3	生态用水率(C ₄₁)	0.451 5	0.082 7
			植被覆盖率(C ₄₂)	0.231 1	0.042 3
			水功能区水质达标率(C ₄₃)	0.317 4	0.059 9

4.4 水资源安全等级计算

4.4.1 无量纲化处理

以 2015 年水资源安全评价指标体系中供水安全的指标数值作为比较序列,同时将表(1)中的等级标准作为参考数列。按照式(6)对供水安全评价标准及指标数值进行无量纲化处理,结果为

$$X =$$

$$\begin{bmatrix} 2.173 & 9 & 1.304 & 3 & 0.869 & 6 & 0.434 & 8 & 0.217 & 4 & 1.421 & 3 \\ 1.477 & 3 & 1.250 & 0 & 1.022 & 7 & 0.795 & 5 & 0.454 & 5 & 1.488 & 4 \\ 0.361 & 4 & 0.602 & 4 & 0.903 & 6 & 1.325 & 3 & 1.807 & 2 & 0.509 & 0 \\ 0.090 & 9 & 0.545 & 5 & 1.000 & 0 & 1.454 & 5 & 1.909 & 1 & 0.481 & 8 \end{bmatrix}$$

4.4.2 关联系数计算

按照式(7)进行关联系数的计算为

$$\zeta = \begin{bmatrix} 0.494 & 3 & 0.872 & 6 & 0.572 & 7 & 0.426 & 3 & 0.378 & 0 \\ 0.999 & 9 & 0.761 & 2 & 0.614 & 5 & 0.515 & 2 & 0.414 & 7 \\ 0.841 & 5 & 0.898 & 1 & 0.654 & 0 & 0.473 & 7 & 0.360 & 2 \\ 0.656 & 1 & 0.932 & 4 & 0.588 & 4 & 0.429 & 8 & 0.338 & 5 \end{bmatrix}$$

4.4.3 灰色加权关联度的计算

结合 ANP 法确定的水资源供水安全权重,按照式(8)进行加权关联度的计算

$$r_1 = [0.385 \ 0 \ 0.228 \ 9 \ 0.212 \ 0 \ 0.174 \ 1] \times \begin{bmatrix} 0.494 & 3 & 0.872 & 6 & 0.572 & 7 & 0.426 & 3 & 0.378 & 0 \\ 0.999 & 9 & 0.761 & 2 & 0.614 & 5 & 0.515 & 2 & 0.414 & 7 \\ 0.841 & 5 & 0.898 & 1 & 0.654 & 0 & 0.473 & 7 & 0.360 & 2 \\ 0.656 & 1 & 0.932 & 4 & 0.588 & 4 & 0.429 & 8 & 0.338 & 5 \end{bmatrix} = [0.718 \ 8 \ 0.862 \ 9 \ 0.602 \ 3 \ 0.457 \ 3 \ 0.375 \ 8]$$

对关联度进行排序发现,最大灰色加权关联度 $r_{1\max} = 0.862 \ 9$,说明水资源供水安全等级为 II 级,属较安全状态。同理

$r_2 = [0.685 \ 5 \ 0.849 \ 0 \ 0.929 \ 5 \ 0.747 \ 3 \ 0.599 \ 4]$,最大灰色加权关联度 $r_{2\max} = 0.929 \ 5$,水资源社会安全等级为 III 级,属临界安全状态。

$r_3 = [0.605 \ 7 \ 0.848 \ 1 \ 0.745 \ 4 \ 0.549 \ 4 \ 0.416 \ 7]$,最大灰色加权关联度 $r_{3\max} = 0.848 \ 1$,水资经济安全等级为 II 级,属较安全状态。

$r_4 = [0.508 \ 8 \ 0.688 \ 8 \ 0.964 \ 6 \ 0.655 \ 9 \ 0.488 \ 5]$,最大灰色加权关联度 $r_{4\max} = 0.964 \ 6$,水资源生态环境安全等级为 III 级,属临界安全状态。

4.5 水资源安全综合等级计算

运用灰色加权关联度方法,计算贵州省 2015 年水资源安全评价准则层权重及关联度见表 5,结合式(8),计算水资源安全综合加权关联度。

$$r = [0.395 \ 0 \ 0.138 \ 1 \ 0.276 \ 1 \ 0.195 \ 3] \times \begin{bmatrix} 0.718 & 8 & 0.862 & 9 & 0.602 & 3 & 0.457 & 3 & 0.375 & 8 \\ 0.685 & 5 & 0.849 & 0 & 0.929 & 5 & 0.747 & 3 & 0.599 & 4 \\ 0.605 & 7 & 0.848 & 1 & 0.745 & 4 & 0.549 & 4 & 0.416 & 7 \\ 0.508 & 8 & 0.688 & 8 & 0.964 & 6 & 0.655 & 9 & 0.488 & 5 \end{bmatrix} = [0.639 \ 2 \ 0.822 \ 9 \ 0.757 \ 7 \ 0.565 \ 1 \ 0.440 \ 0]$$

综合最大关联度 $r_{\max} = 0.822 \ 9$,水资源安全等级属于 II 级,属较安全范围。

同理,贵州省 2008—2015 年水资源安全综合等级变化情况,见表 6。

表 5 水资源安全评价准则层权重及关联度

Tab. 5 Weights and correlations of criterion layer in water resources safety evaluation model

准则层	权重	I	II	III	IV	V
供水安全(B_1)	0.390 5	0.711 8	0.862 9	0.602 3	0.457 3	0.375 8
社会安全(B_2)	0.138 1	0.685 5	0.849 0	0.929 5	0.747 3	0.599 4
经济安全(B_3)	0.276 1	0.605 7	0.848 1	0.745 4	0.549 4	0.416 7
生态环境安全(B_4)	0.195 3	0.508 8	0.688 8	0.964 6	0.655 9	0.488 5

表 6 2008—2015 年贵州省水资源安全综合评价等级

Tab. 6 Comprehensive evaluation classifications of water resources safely in Guizhou Province from 2008 to 2015

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
供水安全(B_1)	II	III	II	III	II	III	II	II
社会安全(B_2)	III	III	III	III	III	III	III	III
经济安全(B_3)	III	III	III	III	II	II	II	II
生态环境安全(B_4)	IV	IV	IV	IV	III	III	III	III
水资源安全综合等级	III	III	III	III	II	III	II	II

为更直观的反映 2008—2015 年水资源安全状态的变化情况,结合表 6 结果,制作水资源安全状态的年际变化柱状图,见图 2。

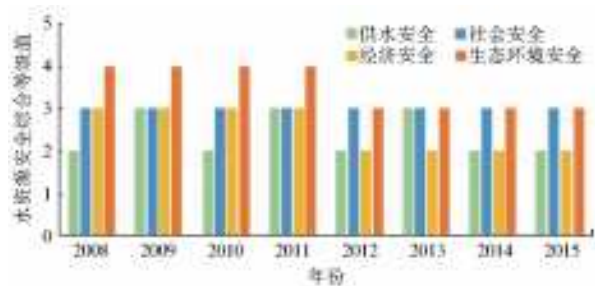


图 2 水资源安全状态的年际变化柱状

Fig. 2 Annual variability of water resources security conditions

结果表明,2008—2015 年贵州省水资源安全总体处于较安全状态和临界安全状态范围,且安全状态等级呈现稳步上升的趋势。2008 至 2011 年,水资源安全处于临界安全状态,且生态环境安全处于较不安全状态,通过查阅水资源公报,得知这几年降雨量大幅减少,多地洪涝、干旱频频发生,水资源量蒸发严重,甚至于 2010 年遭遇了百年一遇的干旱,多地无水可饮,加之生态用水率和水功能区水质长期处于较低水平,导致水资源安全处于较低水平;2012—2015 年,水资源安全等级得到了显著提升,较为明显的是“万元 GDP 用水量”8 年下降 63%,且在 2010—2012 年下降了 38%;2012—2015 年“水功能区水质达标率”相比 2008—2011 年提升超过了 2 倍。这要归功于近年来贵州在发展思路上的转变,从“只要金山银山”到“既要金山银山,又要绿水青山”,政府逐年加大在水利建设、水资源管理等方面的投入,加强水资源保护政策的施行力度,使得近

几年生态用水、水功能区水质达标率等指标得到大幅提高,加之降雨量的增加,水资源安全状态呈现良好状态。值得注意的是,水资源社会安全与生态环境安全一直处于临界安全状态,主要体现在人均用水量居高不下,生态用水率处于较低水平。

5 结论

本文从水资源供水安全、社会安全、经济安全和生态环境安全出发,分析选取了影响水资源安全的 13 项特征评价指标,并构建了贵州省水资源安全评价指标体系及等级划分标准;基于网络层次分析法(ANP)确定评价体系中各项影响指标的权重,运用超级决策软件 Super Decisions 计算求解各项指标权重,将(ANP)的理论计算过程程序化,大大提高了评价工作的效率;将灰色关联分析法(GRA)与网络层次分析法(ANP)相结合,建立了能够客观反映多因素决策特征的水资源安全评价模型。

结果表明,2008 至 2015 年贵州省水资源安全总体处于相对稳定状态,属于较安全状态和临界安全状态范围,且安全等级呈现稳步上升的趋势。但水资源社会安全与生态环境安全一直处于临界安全状态,主要体现在人均用水量居高不下,生态用水率处于较低水平。经论证,评价结果与实际情况基本相符,说明采用 GRA-ANP 模型的水资源安全综合评价方法是合理有效的。

参考文献(References):

- [1] LI B, WANG X Q, WEI T, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources in karst region based on the ecological footprint model—Liupanshui City case [J]. Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA, 2018, 67(6): 566-575. DOI: 10. 2166/aqua. 2018. 016.
- [2] 杜朝阳, 钟华平, 于静洁. 可持续水资源系统机制研究 [J]. 水科学进展. 2013, 24(4): 581-588. (DU C Y, ZHONG H P, YU J J. Mechanism of sustainable water resources system [J]. Advances in Waterscience, 2013, 24(4): 581-588. (in Chinese))
- [3] PROSKURYAKOVA LN, SARITAS O, SIVAEV S.

- Global water trends and future scenarios for sustainable development; The case of Russia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018 (170): 867-879. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.120.
- [4] 郭梅,许振成,彭晓春. 水资源安全问题研究综述[J]. *水资源保护*, 2007, 23(3): 40-45. (GUO M, XU Z C, PENG X C. Progress in water security[J]. *Water Resources Protection*. 2007, 23(3): 40-45. (in Chinese))
- [5] RASKIN P, GLEICK P, KIRSHEN P, et al. Water futures; assessment of long-range patterns and problems. com-comprehensive assessment of the freshwater resources of the world[M]. Stockholm Sweden Stockholm Environment Institute, 1997.
- [6] SHIKLOMANOV IA, RODDA J C. World water resources at the beginning of the twenty-first century [M]. Cambridge University Press, 2004.
- [7] 李泽红,汤尚颖,许志国. 水资源安全的内涵及其评价[J]. *安全与环境工程*, 2005, 12(4): 38-41. (LI Z H, TANG S H, XU Z G. Connotation and evaluation of water resource security[J]. *Safety and Environmental Engineering*. 2005, 12(4): 38-41. (in Chinese))
- [8] 王鹏全,方三朝,张永明,等. 基于WEAP模型的石羊河水资源安全分析[J]. *中国农村水利水电*, 2014(9): 92-95. (WANG P Q, FANG S C, ZHANG Y M, et al. Water security analysis of shiyang river based on WEAP model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(9): 92-95. (in Chinese))
- [9] 畅明琦,刘俊萍. 水资源安全的内涵及其性态分析[J]. *中国农村水利水电*, 2008(8): 9-14. (CHANG M Q, LIU J P. The connotation of water resources security and its behavior analysis[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(8): 9-14. (in Chinese))
- [10] 刘邦贵,刘永强,王浩,等. 基于物元分析法的区域水资源安全评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 5(12): 100-103. (LIU B G, LIU Y Q, WANG H, et al. Evaluation of regional water security based on matter element analysis[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 5(12): 100-103. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.Nsbdqk.2014.05.023.
- [11] 刘丽颖,杨清伟,曾一笑,等. 喀斯特地区水资源安全评价模型构建及其应用[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(2): 203-210. (LIU L Y, YANG Q W, ZENG Y X, et al. Construction and application of water resources security evaluation model in karst region[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(2): 203-210. (in Chinese)) DOI: 10.11932/karst.2018.02.06.
- [12] 李兰秀. 天津市水资源安全研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. (LI L X. Tianjin water resources security research [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))
- [13] SAATY T L. Decision making with dependence and feed-back; the analytic network process [M]. Pittsburgh, USA: RWS Publication, 1996.
- [14] SAATY T L. Decision making: the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP) [J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2004, 13(1): 1-35. (in Chinese))
- [15] 付冉冉. 基于ANP的BIM应用目标决策研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. (FU R R. BIM Application decision method based on ANP theory [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [16] 陈思宇,方国华,黄显峰. 模糊网络层次分析法在水利工程招标风险评价中的应用[J]. *水利经济*, 2018, 36(2): 15-19. (CHEN S Y, FANG G H, HUANG X F. Application of fuzzy network analytic hierarchy process in risk evaluation of water conservancy project bidding [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2018, 36(2): 15-19. (in Chinese)) DOI: 10.3880 / j. issn. 1003-9511. 2018. 02. 004.
- [17] 李博. GRA-FAHP模型的煤层底板突水危险性评价[J]. *地质论评*, 2015, 61(5): 1128-1134. (LI B. Risk assessment model of coal floor water-irruption based on GRA-FAHP [J]. *Geological Review*, 2015, 61(5): 1128-1134. (in Chinese)) DOI: 10.16509/j.geOreview. 2015. 05. 015.
- [18] 吕跃进. 指数标度判断矩阵的一致性检验方法[J]. *统计与决策*, 2006(18): 31-32. (Lyu Y J. Consistency test method for index scale judgment matrix [J]. *Statistics and Decision*, 2006(18): 31-32. (in Chinese)) DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2006.18.013.
- [19] 侯满义,李曙林,李寿安. 基于灰色关联层次分析的飞机战伤抢修性评价[J]. *电光与控制*, 2006(6): 68-71. (HOU M Y, LI S L, LI S A. Aircraft warfare reparability evaluation based on grey relational hierarchy analysis [J]. *Electro-optic and control*, 2006(6): 68-71. (in Chinese))