

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250380

# 基于组合权重—云模型的湖南省郴州市水安全评价

盛 东<sup>1</sup>, 徐幸仪<sup>1</sup>, 赵 磊<sup>2</sup>, 徐 蕾<sup>2</sup>, 王远坤<sup>2</sup>

(1. 湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 为弥补现有水安全评价方法在指标选择的科学性、权重分配的准确性方面的不足, 围绕指标优选和权重赋值优化, 构建了一套系统的水安全评价流程, 从防洪、饮水、用水、河湖生态和社会经济安全五个方面出发, 通过相关性分析、主成分分析和信息敏感性分析筛选关键指标, 并结合熵权法、层次分析法、投影寻踪模型与云模型, 利用模拟退火算法求解组合权重, 最终采用云模型进行综合评价, 并以湖南省郴州市为例进行分析。结果表明, 指标优选筛选出了工业重复用水率、人均水资源占有量等 22 个关键指标; 基于模拟退火算法求解的组合权重与指标信息敏感性的相关性最高 ( $R^2=0.744\ 2$ ), 权重分配更加合理; 郴州市 2016~2022 年水安全状态整体为“基本安全”, 呈现持续改善趋势。研究结果验证了所构建模型的有效性和适用性, 为城市水安全评价提供了新的方法论支持与实践指导。

**关键词:** 水安全; 指标优选; 模拟退火算法; 组合权重; 云模型; 郴州市

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0042-06

## Water Security Assessment of Chenzhou City, Hunan Province Based on Combined Weight and Cloud Model

SHENG Dong<sup>1</sup>, XU Xing-yi<sup>1</sup>, ZHAO Lei<sup>2</sup>, XU Lei<sup>2</sup>, WANG Yuan-kun<sup>2</sup>

(1. Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, China;

2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric  
Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** To address the shortcomings of existing water safety evaluation methods in terms of scientific indicator selection and accurate weight allocation, this study focuses on the optimal selection of indicators and optimization of weight assignment, starting from five aspects of flood control, drinking water, water use, river and lake ecology, and socio-economic security. The key indicators are selected through correlation analysis, principal component analysis, and information sensitivity analysis. The combined weight method, integrating entropy weight method, analytic hierarchy process, projection pursuit model, and cloud model, is used to solve the indicator weights, which are then optimized by simulated annealing. Finally, the cloud model is employed for comprehensive evaluation, with an application case in Chenzhou City, Hunan Province. The results show that the indicator optimization identified 22 key indicators, including industrial recycled water rate and per capita water resource availability; The correlation between the weights obtained by the simulated annealing algorithm and indicator information sensitivity is the highest ( $R^2=0.744\ 2$ ), indicating a more reasonable weight distribution; The water safety status of Chenzhou City from 2016 to 2022 was generally basically safe, with a continuous improvement trend. The results validate the effectiveness and applicability of the proposed model, which provides new methodological support and practical guidance for urban water safety evaluation.

**Key words:** water security; indicator optimization; simulated annealing algorithm; combined weight; cloud model; Chenzhou City

收稿日期: 2025-03-03, 修回日期: 2025-04-15, 接受日期: 2025-04-19

基金项目: 郴州绿色可持续发展示范区揭榜挂帅项目(2022sfq50); 湖南省水利科技项目(XSKJ2023059-15); 国家重点研发计划(2022YFC3800700)

作者简介: 盛东(1979-), 男, 正高级工程师, 研究方向为流域(区域)水资源管理, E-mail: 740330071@qq.com

通讯作者: 王远坤(1981-), 男, 教授、博导, 研究方向为水文水资源, E-mail: yuankunw@ncepu.edu.cn

## 1 引言

指标体系构建与权重赋值优化是水安全评价的核心环节<sup>[1]</sup>。指标体系的构建是评价的基础,当前研究多采用相关性分析和主成分分析等单一方法进行指标优选,易遗漏关键因素,难以全面反映水资源管理的复杂性<sup>[2]</sup>。因此,亟需更全面的优选方法确保指标体系的科学性与完整性。同时,权重赋值的合理性直接影响水安全评价的可靠性<sup>[3]</sup>。传统方法如熵权法和层次分析法存在主观性或信息利用不足的问题<sup>[4]</sup>。近年来,组合权重法受到关注,该方法通过融合多种权重计算方法,提高了评价的科学性<sup>[5]</sup>。然而,现有研究仍主要依赖经验赋值或传统矩法,缺乏灵活高效的权重优化方案。随着计算技术的发展,优化算法在复杂问题中的应用优势日益显现。优化算法能适应复杂的约束条件和目标函数,显著提升权重赋值的科学性和灵活性<sup>[6]</sup>。鉴于目前水安全评价方法在指标体系构建和权重赋值上的不足,本文以郴州市为例,采用基于信息敏感性优化的指标体

系构建方法,同时结合模拟退火算法优化组合权重,以提升水安全评价的科学性和可靠性。

## 2 研究方法

### 2.1 数据说明

选取湖南省郴州市作为研究区域,数据主要涵盖 2016~2022 年期间与水安全相关的指标。研究数据主要来源于湖南省及郴州市发布的水资源公报、年度水利工作报告、水土保持公报、年度环境质量报告和统计年鉴等。

### 2.2 研究方法

本文构建了一套系统的水安全评价流程,涵盖指标优选和权重优化两个核心环节。首先,从防洪、饮水、用水、河湖生态和社会经济安全 5 个方面初选指标,并通过相关性分析、主成分分析和信息敏感性分析进行优选,形成评价指标体系。其次,采用融合熵权法、层次分析法、投影寻踪模型和云模型的组合权重法,并引入模拟退火算法优化权重。最后,利用云模型开展水安全评价,确保结果科学可靠。研究流程见图 1。

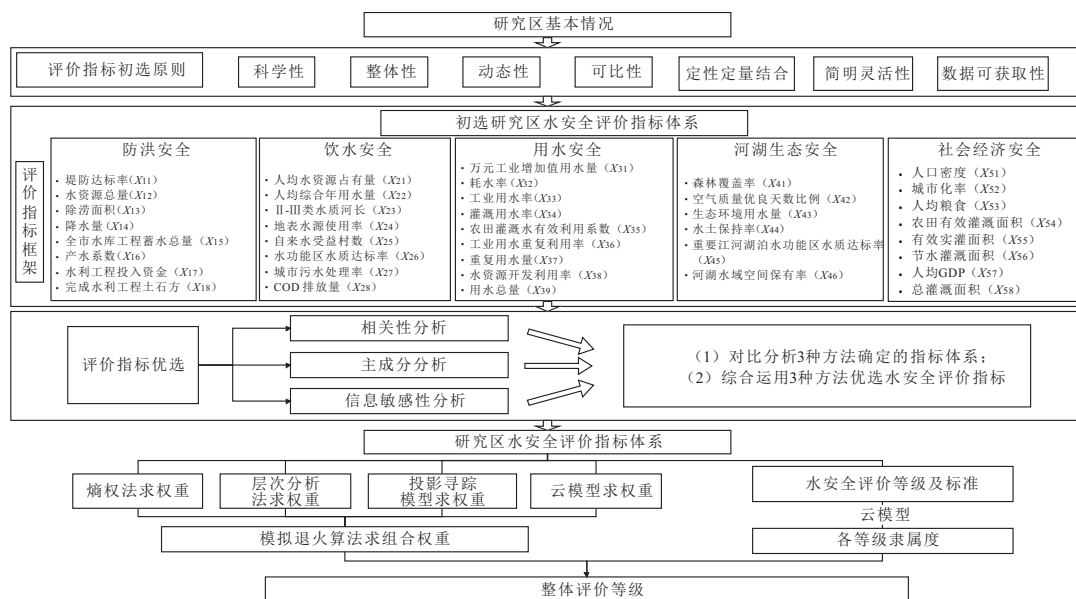


图 1 研究流程图

Fig. 1 Flow chart of the study

#### 2.2.1 指标初选

结合系统理论框架的概念,综合考虑防洪、饮水、用水、河湖生态和社会经济安全等 5 个方面,初选了郴州市水安全评价指标共 39 个,具体内容见图 1。

#### 2.2.2 指标优选方法

综合运用相关性分析、主成分分析和信息敏感性分析进行指标优选,通过比较主成分分析和

信息敏感性分析结果确定最终用于水安全评价的指标体系。信息敏感性法是主成分分析方法的改进,通过计算指标敏感性来反映指标在原始指标体系中的重要程度<sup>[7]</sup>。其计算公式为:

$$\beta_j = \sum_{i=1}^k \omega_i \left| \frac{\partial Z_i}{\partial \mathbf{X}_j} \right| = \sum_{i=1}^k \beta_{ij} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \beta_{ij} = \omega_i \left| \partial Z_i / \partial \mathbf{X}_j \right| = \omega_i \left| \mathbf{e}_{ij} \right| \quad (2)$$

$$\mathbf{e}_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\lambda_i} \quad (3)$$

式中,  $\beta_j$  为第  $j$  个指标的敏感性;  $\omega_i$  为主成分  $Z_i$  的方差贡献率;  $Z_i$  为第  $i$  个主成分;  $\mathbf{X}_j$  为原始数据中第  $j$  个变量的所有观测值构成的列向量;  $\beta_{ij}$  为第  $i$  个主成分对第  $j$  个指标的敏感性;  $\mathbf{e}_{ij}$  为特征值  $\lambda_i$  对应的特征向量;  $a_{ij}$  为第  $j$  个指标在第  $i$  个主成分上的负载系数;  $\lambda_i$  为指标相关系数矩阵的特征值。

### 2.2.3 权重确定

(1) 组合权重求解。为解决主观权重和客观权重的局限性, 本文综合考虑熵权法、层次分析法、模拟退火算法优化的投影寻踪模型(SAPP)及云模型在求解权重方面的特性, 利用模拟退火算法<sup>[8]</sup>来求解组合权重, 构造适应度函数为:

$$\min f(a) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\omega_{ij} - Z_j|^2 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n Z_j^2 = 1 \quad (5)$$

式中,  $\omega_{ij}$  为第  $i$  种方法求解的第  $j$  个指标的权重;  $Z_j$  为随机生成的第  $j$  个指标的权重;  $m, n$  分别为评价对象的个数、评价指标的数目。

(2) 组合权重评价。在多指标评价中, 权重大小通常反映了各指标的重要性, 而信息敏感性描述了指标变化对评价结果的影响。本文通过比较权重与信息敏感性之间的相关关系来验证组合权重的准确性, 两者相关性高, 说明权重求解的准确性高, 反之亦然。

### 2.2.4 基于云模型的水安全评价

采用正态云理论, 构建基于云模型的水安全评价模型, 具体步骤如下。

**步骤 1** 确定标准云。采用黄金分割法与专家经验法确定标准云参数。每个等级的参数组合( $E_x, E_n, H_e$ )体现了从“非常安全”到“极不安全”的安全性递减趋势(表 1)。具体步骤为: ①采用黄金分割点(0.618)确定五个等级的期望值( $E_x$ ), 实现区间[0,1]的合理划分; ②结合历史数据与专家经验, 确定熵( $E_n$ )和超熵( $H_e$ )的取值, 以增强各等级之间的区分度和合理性。

表 1 水安全评价等级及标准云参数

Tab. 1 Water security evaluation levels and standard cloud parameters

| 评价等级 | 标准云参数                  | 评价等级 | 标准云参数                  |
|------|------------------------|------|------------------------|
| 非常安全 | (1, 0.103, 0.0131)     | 不安全  | (0.309, 0.064, 0.0081) |
| 安全   | (0.691, 0.064, 0.0081) | 极不安全 | (0, 0.103, 0.0131)     |
| 基本安全 | (0.5, 0.039, 0.005)    |      |                        |

**步骤 2** 计算指标云参数。使用实际数据和步骤 1 确定的标准云参数来生成每个指标的云模型:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{X}}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_{ij} \\ S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (X_{ij} - \bar{X})^2 \\ E_{x_j} = \bar{\mathbf{X}}_j \\ E_{n_j} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |X_{ij} - \bar{\mathbf{X}}_j| \\ H_{e_j} = \sqrt{|S_j^2 - E_{n_j}^2|} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $E_{x_j}, E_{n_j}, H_{e_j}$  分别为指标  $j$  的期望、熵、超熵;  $S_j^2$  为样本方差。

**步骤 3** 计算综合云参数。基于各指标云参数及组合权重进一步计算准则层和目标层云参数。计算公式为:

$$E_x = E_{x_1} \lambda_1 + E_{x_2} \lambda_2 + \cdots + E_{x_n} \lambda_n \quad (7)$$

$$E_n = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \cdots + \lambda_n^2} E_{n_1} + \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \cdots + \lambda_n^2} \cdot E_{n_2} + \cdots + \frac{\lambda_n^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \cdots + \lambda_n^2} E_{n_n} \quad (8)$$

$$H_e = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \cdots + \lambda_n^2} H_{e_1} + \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \cdots + \lambda_n^2} \cdot H_{e_2} + \cdots + \frac{\lambda_n^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \cdots + \lambda_n^2} H_{e_n} \quad (9)$$

**步骤 4** 绘制云图及云图对比。基于正向云模型, 利用 Matlab 绘制标准云图与评价结果云图, 并通过实际云图与标准云图的匹配程度判断水安全等级。具体步骤为: ①根据期望值的接近程度, 计算实际期望值与各等级标准值的欧氏距离, 距离最小者为初步归属等级; ②采用重叠面积法分析云滴分布相似性, 结合熵和超熵, 验证等级判断的准确性; ③引入模糊性量化指标, 其中熵表示不确定性, 值越大离散性越强; 超熵表示熵的稳定性, 反映系统波动性。

## 3 结果与分析

### 3.1 评价指标优选

#### 3.1.1 相关性分析

为避免不同准则层之间的干扰, 对初选的 39 个指标分别在 5 个准则层内进行独立相关性分析。根据统计学原则, 并结合已有研究<sup>[9]</sup>及敏感性分析结果, 设定相关性阈值为 0.9。相关系数大于 0.9 表示高度共线性, 可能导致信息冗余。分析结果见图 2, 各层内部部分指标存在较强相关性。在防洪安全层, 剔除  $X_{12}, X_{15}, X_{17}$ ; 在饮水安全层, 剔除  $X_{26}$ ; 在用水安全层, 剔除  $X_{32}$ 、

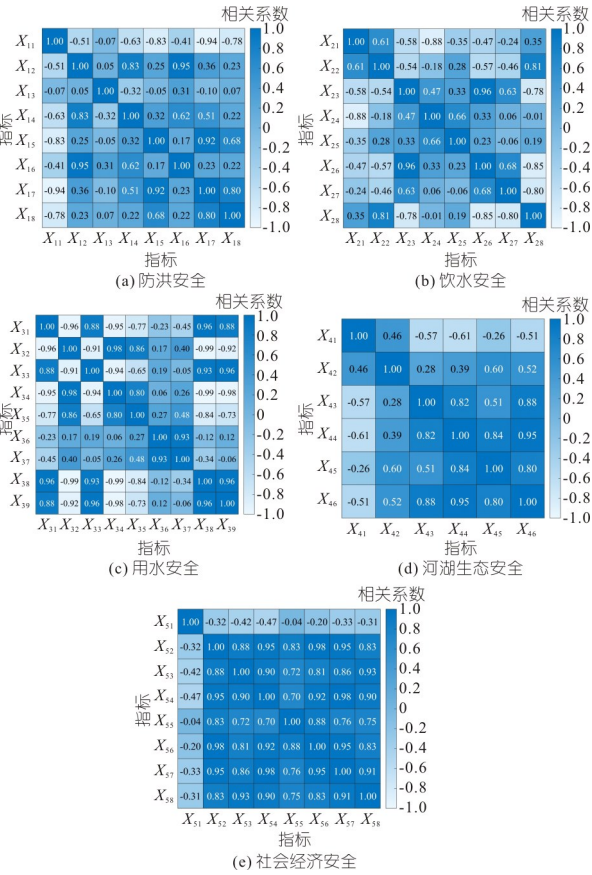


图 2 水安全评价指标相关性分析结果

Fig. 2 Results of correlation analysis on water security evaluation indicators

$X_{34}$ 、 $X_{37}$ 、 $X_{38}$ ;在河湖生态安全层,剔除  $X_{46}$ ;在社会经济安全层,剔除  $X_{52}$ 、 $X_{54}$ 、 $X_{56}$ 。相关性分析最终保留 27 个指标。

3.1.2 主成分分析

基于相关性分析结果,对保留指标进行主成分分析。主成分分析共提取 6 个主成分,其中前 3 个主成分反映了原始指标信息的 83.506%,累计方差贡献率达 80% 以上,因而保留前 3 个成分,见图 3(a)。由图 3(a)可知,人均水资源占有量( $X_{21}$ )的累计贡献度最高,其次为产水系数( $X_{16}$ )等,而  $X_{18}$ 、 $X_{23}$ 、 $X_{27}$ 、 $X_{35}$ 、 $X_{41}$ 、 $X_{42}$ 、 $X_{43}$ 、 $X_{44}$ 、 $X_{45}$ 、 $X_{53}$ 、 $X_{58}$  等 11 个指标对水安全评价贡献度较低。

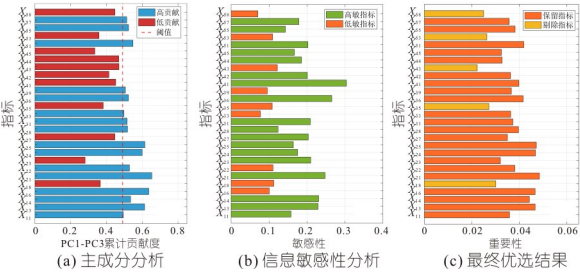


图 3 指标筛选结果

Fig. 3 Results of the indicator screening

3.1.3 信息敏感性分析

基于相关性分析结果对指标进行信息敏感性分析,结果见图 3(b)。将指标按信息敏感性从高到低排序,保留累积敏感性高于敏感性之和的 80% 的指标。研究表明,郴州市水安全最敏感的指标为工业重复用水率( $X_{36}$ )和人均水资源占有量( $X_{21}$ )等,而总灌溉面积( $X_{58}$ )等 9 个指标表现出较低的信息敏感性。结合主成分分析和信息敏感性分析结果,最终确定水安全评价指标体系,剔除信息敏感性和主成分贡献度较低的指标。最终将  $X_{18}$ 、 $X_{35}$ 、 $X_{43}$ 、 $X_{53}$ 、 $X_{58}$  等 5 个指标剔除,保留剩余 22 个指标,最终结果见图 3(c)。

3.2 组合权重计算

通过模拟退火算法确定组合权重,权重计算结果见图 4(a)。图 4(b)对比分析显示,各权重方法与信息敏感性分析的相关性差异显著。总体而言,各方法效果排序为组合权重>SAPP>层次分析法>熵权法>云模型。熵权法与云模型的相关性均低于 0.5,难以有效反映指标的重要性;SAPP( $R^2 = 0.5286$ )和层次分析法( $R^2 = 0.5175$ )表现较好,能较准确体现指标敏感性。组合权重法表现最优,相关性达到 0.7442,说明其权重分配更科学、合理,具有更强的实际应用价值。

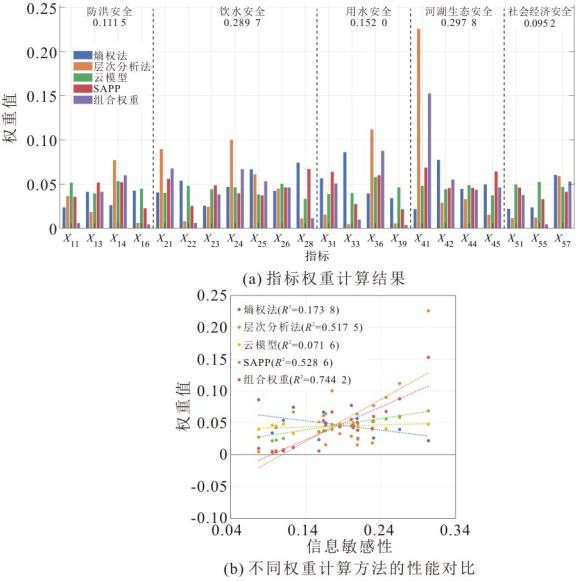


图 4 指标权重计算结果与不同权重计算方法的性能对比  
Fig. 4 Indicator weight calculation results and performance comparison of different methods

3.3 指标层云参数计算

各指标层云参数(图 5)揭示了郴州市水安全的多层次特征。总体来看,郴州市水安全整体处于基本安全水平,但部分领域存在波动和风险。堤防达标率、人口密度等指标期望值较高、熵值和超熵较低,反映出水安全状况较为稳定;而人均综合年用水量、工业用水率、重复利用率及空气质量

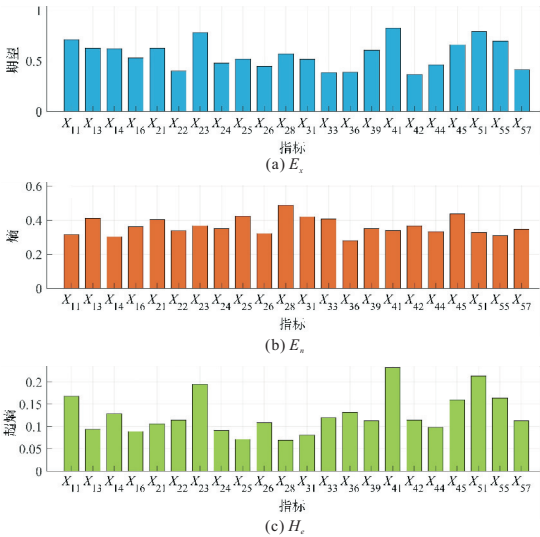


图 5 指标层云参数计算结果  
Fig. 5 Calculation results of cloud parameters for indicator levels

优良天数比例等指标期望值普遍低于 0.4,显示相关领域亟待改善。此外,COD 排放量(熵值 0.487 4,超熵 0.069 0)和除涝面积(熵值 0.411 5,超熵 0.093 4)等指标的不确定性较大,需重点关注。建议加强用水效率、水质管理和生态保护,提升水安全管理的稳定性和可持续性。

3.4 准则层云参数计算

根据指标层云参数及组合权重,计算得出各准则层的云参数(表 2、图 6(a)~(e))。结果显示,防洪安全、饮水安全和社会经济安全的期望值均高于 0.5,处于基本安全水平;河湖生态安全期望值达 0.66 以上,表现较好,说明这些领域水安全状况较为稳定。相对而言,用水安全期望值仅为 0.434 7,低于安全线,反映出资源利用与管理方面存在突出问题。同时,饮水安全与河湖生态安全的不确定性较低,而用水安全的熵值和超熵较高,表明其波动性大、稳定性差。总体而言,郴州市水安全处于基本安全水平,但需重点加强用水管理,提升效率与可持续性。

表 2 准则层云参数计算结果  
Tab. 2 Calculation results of cloud parameters for criterion levels

| 项目  | 评价指标   | 期望( $E_x$ ) | 熵( $E_e$ ) | 超熵( $H_e$ ) | 安全等级 |
|-----|--------|-------------|------------|-------------|------|
| 准则层 | 防洪安全   | 0.623 2     | 0.077 7    | 0.026 9     | 基本安全 |
|     | 饮水安全   | 0.556 7     | 0.037 6    | 0.010 3     | 基本安全 |
|     | 用水安全   | 0.434 7     | 0.075 5    | 0.028 4     | 不安全  |
|     | 河湖生态安全 | 0.661 8     | 0.063 5    | 0.037 8     | 安全   |
|     | 社会经济安全 | 0.576 5     | 0.085 0    | 0.036 6     | 基本安全 |
| 目标层 | 水安全    | 0.548 8     | 0.058 0    | 0.025 0     | 基本安全 |

3.5 综合评价结果

基于准则层云参数计算目标层云参数,计算结果见表 2。目标层云参数显示,期望值为

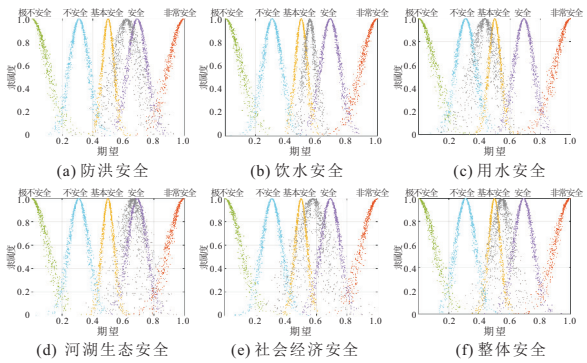


图 6 郴州市水安全状况  
Fig. 6 Water safety situation in Chenzhou City

0.525 7,熵值和超熵较低,结合郴州市 2016~2022 年整体水安全状况图(图 6(f))可发现,郴州市 2016~2022 年水安全总体处于基本安全水平,当前水安全状态相对稳定,不确定性小。尽管如此,期望值仍具有进一步提升的潜力,这意味着虽然当前水安全状况较为稳定,但在优化水资源管理和提升水效率方面仍可采取更多措施,以进一步提高水安全水平。

为逐年评估水安全状况,将构建的云模型应用于 2016~2022 年,结果见表 3。分析显示,郴州市水安全水平呈持续改善趋势,等级由“极不安全”逐步提升至“非常安全”,2022 年维持在“安全”水平。期望值整体上升,尤其在 2021 年达到峰值,虽 2022 年略有回落,但仍处较高水平。熵值由 2016 年的 0.359 2 降至 2021 年的 0.267 2,表明不确定性逐年减少,水资源管理趋于稳定。超熵虽在 2021 年有所波动,但总体下降,进一步反映出水安全波动性降低。

表 3 郴州市 2016~2022 年各年份的期望、熵和超熵  
Tab. 3 Expectation, entropy, and hyper-entropy of each year in Chenzhou City (2016-2022)

| 年份   | 期望( $E_x$ ) | 熵( $E_e$ ) | 超熵( $H_e$ ) | 安全等级 |
|------|-------------|------------|-------------|------|
| 2016 | 0.229 5     | 0.359 2    | 0.008 7     | 极不安全 |
| 2017 | 0.448 7     | 0.367 8    | 0.017 3     | 不安全  |
| 2018 | 0.528 0     | 0.370 8    | 0.020 2     | 基本安全 |
| 2019 | 0.496 5     | 0.369 5    | 0.019 0     | 基本安全 |
| 2020 | 0.735 1     | 0.325 6    | 0.024 9     | 安全   |
| 2021 | 0.836 4     | 0.267 2    | 0.083 3     | 非常安全 |
| 2022 | 0.674 3     | 0.393 4    | 0.042 9     | 安全   |

4 结论

a. 基于信息敏感性指标体系优化和优化算法求解组合权重,有效提升了水安全评价的科学性和准确性。

b. 郴州市 2016~2022 年水安全整体处于“基本安全”状态,但在准则层,用水安全面临较大风险和不确定性,建议未来聚焦用水安全,降低风险与不确定性。

c. 未来研究可通过扩展数据集、引入深度学习等技术,进一步支持水安全管理与决策。

#### 参考文献:

- [1] 龚巧灵, 官冬杰. 基于 BP 神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 292-299. (GONG Q L, GUAN D J. Study on water resources security evaluation of Chongqing section of Three Gorges Reservoir based on BP neural network[J]. Research of soil and water conservation, 2017, 24(6): 292-299. (in Chinese))
- [2] 张彦, 李明然, 寇利卿. 基于 PSR-PCA-ANFIS 模型的保定市中心城区水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 68-75. (ZHANG Y, LI M R, KOU L Q. Evaluation of water resources security in Baoding central city based on PSR-PCA-ANFIS model[J]. China rural water and hydropower, 2022(2): 68-75. (in Chinese))
- [3] 周振民, 穆文彬. 组合权重可变模糊模型在地表水水质评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2011(10): 82-86. (ZHOU Z M, MU W B. Application of variable fuzzy model based on combined weight in evaluation of surface water quality[J]. China rural water and hydropower, 2011(10): 82-86. (in Chinese))
- [4] 李书浩. 基于矩估计组合赋权的烤烟可用性评价及预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022. (LI S H. Evaluation and prediction of flue-cured tobacco availability based on moment estimation and combination weighting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese))
- [5] 王钰, 李扬, 张紫涵, 等. 基于组合赋权-集对分析的城市供水安全评价[J]. 水电能源科学, 2024, 42(4): 30-34. (WANG Y, LI Y, ZHANG Z H, et al. Urban water supply safety evaluation based on combination weighting-set pair analysis[J]. Water resources and power, 2024, 42(4): 30-34. (in Chinese))
- [6] 刘璐, 张绍阳, 冉思雨, 等. 基于 PSO-SA 算法的源项反演方法研究[J]. 现代电子技术, 2024, 47(1): 100-104. (LIU L, ZHANG S Y, RAN S Y, et al. Research on source inversion method based on PSO-SA algorithm[J]. Modern electronics technique, 2024, 47(1): 100-104. (in Chinese))
- [7] 迟国泰, 陈洪海. 基于信息敏感性的指标筛选与赋权方法研究[J]. 科研管理, 2016, 37(1): 153-160. (CHI G T, CHEN H H. A study of indice screening and weighting method based on information sensitivity[J]. Science research management, 2016, 37(1): 153-160. (in Chinese))
- [8] WANG Z P, TIAN J C, FENG K P. Optimal allocation of regional water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Energy reports, 2022, 8: 9119-9126.
- [9] 迟国泰, 曹婷婷, 张昆. 基于相关-主成分分析的人的全面评价评价指标体系构建[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(1): 111-119. (CHI G T, CAO T T, ZHANG K. The establishment of human all-around development evaluation indicators system based on correlation-principle component analysis[J]. Systems engineering-theory & practice, 2012, 32(1): 111-119. (in Chinese))
- \*\*\*\*\*
- (上接第 122 页)
- 参考文献:
- [1] 霍志芳, 谷拴成, 韩庆达. 巷道围岩松动圈测试的研究[J]. 西安矿业学院学报, 1994, 14(1): 18-21. (HUO Z F, GU S C, HAN Q D. Research on measuring cracked range of roadway surrounding rock[J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 1994, 14(1): 18-21. (in Chinese))
- [2] 郭亮, 李俊才, 张志铖, 等. 地质雷达探测偏压隧道围岩松动圈的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3009-3015. (GUO L, LI J C, ZHANG Z C, et al. Research on surrounding rock loose zone of tunnel under unsymmetrical loading with ground penetrating radar and its application[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(S1): 3009-3015. (in Chinese))
- [3] 陈庆发, 周科平, 胡建华, 等. 缓倾薄层弱结构松动圈声波测试时测孔布置的理论依据与验证[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1406-1410. (CHEN Q F, ZHOU K P, HU J H, et al. Theory basis and practice of acoustic measuring boreholes arrangement for broken rock zone in gently inclined thin layer weakness structure[J]. Journal of central south university (science and technology), 2009, 40(5): 1406-1410. (in Chinese))
- [4] 王克权, 赵俊杰, 王振涛. 孤岛工作面回采巷道围岩松动圈测试及支护设计[J]. 矿业装备, 2024(12): 7-9. (WANG K Q, ZHAO J J, WANG Z T. Test and support design of surrounding rock loose zone in mining roadway of isolated island working face[J]. Mining equipment, 2024(12): 7-9. (in Chinese))
- [5] 吴钰, 李东, 罗登泽, 等. 猴子岩水电站地下洞室群围岩松弛损伤控制技术[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 142-145. (WU Y, LI D, LUO D Z, et al. Control technology of loosening surrounding rock and damage of underground cavern group in houziyan hydropower station[J]. Water resources and power, 2021, 39(8): 142-145. (in Chinese))
- [6] 国家能源局. 水电水利地下工程施工安全评估导则—围岩稳定: DL/T 5826-2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021. (National Energy Administration. Guide for Safety Assessment of Hydropower and Water Resources Underground Engineering Construction-Surrounding Rock Stability: DL/T 5826-2021[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物岩石地基开挖施工技术规范: SL 47-2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical specification for excavation construction of rock-foundation of hydraulic structures: SL 47-2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2021. (in Chinese))
- [8] FRANTZISKONIS G, DESAI C S. Constitutive model with strain softening[J]. International journal of solids and structures, 1987, 23(6): 733-750.