

基于熵值-TOPSIS模型的湖南省水资源安全空间评价及障碍因子诊断

罗紫薇^{1,2,3}, 胡希军^{1,2,3}, 汤佳^{1,2,3}, 韦宝婧^{2,3,4}

(1. 中南林业科技大学 风景园林学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中南林业科技大学 城乡景观生态研究所, 湖南 长沙 410004; 3. 湖南省自然保护区风景资源大数据工程技术研究中心, 湖南 长沙 410004; 4. 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 湖南省水资源安全对维系长江中下游地区水安全有着重要作用, 对其进行空间评价和障碍因子诊断, 旨在为区域生态治理和水资源开发利用提供决策依据。从水资源条件、社会经济条件和生态环境条件3个子系统中选择13个指标构建水资源安全空间评价指标体系, 运用熵值-TOPSIS模型评价水资源安全综合状况并绘制空间分布图, 利用障碍度模型识别主要障碍因子。结果表明: 2000-2015年湖南省水资源安全处于Ⅲ级(基本安全), 至2020年达到Ⅱ级(较安全)状态, 并逐年好转, 与水利建设成果同步; 2000-2020年间全域水资源安全空间分异明显, 郴州市保持着较高的水资源安全水平状态, 湘潭市和衡阳市处于较低安全水平; 湖南省水资源安全主要障碍因子为GDP、人口密度、农田有效灌溉单位用水量、单位工业增加值用水量和单位GDP用水量。湖南省水资源安全水平在研究期内稳步提高, 处于不安全水平的区域还需要进一步围绕主要障碍因子进行优化。

关键词: 水资源安全; 熵值-TOPSIS模型; 空间评价; 障碍因子; 湖南省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)06-0035-11

Spatial evaluation and obstacle factor diagnosis of water resources security in Hunan Province based on entropy weight-TOPSIS model

LUO Ziwei^{1,2,3}, HU Xijun^{1,2,3}, TANG Jia^{1,2,3}, WEI Baojing^{2,3,4}

(1. College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China; 2. Institute of Urban and Rural Landscape Ecology, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China; 3. Hunan Big Data Engineering Technology Research Center of Landscape Resources in Natural Protected Areas, Changsha 410004, China; 4. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Water resources security in Hunan Province plays an important role in maintaining water security in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The spatial evaluation and obstacle factor diagnosis of water resources security in Hunan Province are aimed to provide decision-making basis for regional ecological management and water resources development and utilization. Here, 13 indices from subsystems of water resources condition, social economic condition and ecological environment condition were selected to construct a spatial evaluation index system of water resources security, then the entropy weight-TOPSIS model was used to evaluate the comprehensive situation of water resources security, and the spatial distribution map was drawn. Meanwhile, the main obstacle factors were identified by obstacle degree model. The results show that the water resources security of Hunan Province was at level Ⅲ (basic safety) from 2000 to 2015, and reached level Ⅱ (relatively safe) by 2020, which showed an annual

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-07-19

基金项目: 国家林业和草原局重点学科项目(林人发[2016]21号); 湖南省“双一流”培育学科项目(湘教通[2018]469号); 湖南省研究生科研创新项目(CX20210850); 中南林业科技大学研究生科技创新基金项目(CX202101023)

作者简介: 罗紫薇(1994-), 女, 湖南株洲人, 博士研究生, 主要从事大地景观规划与生态修复、水安全格局方面的研究。

通讯作者: 胡希军(1964-), 男, 浙江东阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事大地景观规划与生态修复、风景园林规划与设计方面的研究。

improving trend, keeping pace with the achievements of water conservancy constructions. In the research period, the spatial differentiation of water resources security was distinct, Chenzhou City maintained a high-level water resources security, whereas Xiangtan and Hengyang City were at a low level. The main obstacle factors of water resources security in Hunan Province were GDP, population density, water consumption per unit of farmland effective irrigation, water consumption per unit of industrial added value and water consumption per unit of GDP. The water resources security level of Hunan Province has been steadily improving in the research period, it is suggested that the further optimization of the unsafe areas should focus on the main obstacle factors.

Key words: water resources security; entropy weight - TOPSIS model; spatial evaluation; obstacle factor; Hunan Province

1 研究背景

水资源作为最基础的生活、经济和环境资源,其安全问题与人类的生存和社会的可持续发展息息相关,是国家生存与发展的战略性问题^[1]。对区域水资源进行安全评价、总结区域水资源安全问题,是总体调控区域内水资源可持续开发利用的前提和基础。

水资源安全评价是对区域内水资源维护良好生活、生产和生态不受侵害能力的评估。专家学者们对各个尺度、地域的水资源安全进行了评价,评价方法归纳为:(1)运用单一指标或模型进行评价,通过综合考虑区域社会经济、资源环境等因素,从水资源安全总体出发,使用水安全指数^[2-3]、水贫困指数^[4-5]、水压力综合指数^[6]、水短缺指数^[7]、水资源承载力指数^[8]等综合指标评价水资源安全状况;(2)通过建立不同水安全层面的子目标,构建水资源安全评价指标体系,如将其分为经济、生态、水资源 3 类^[9],水资源条件、社会协调能力、经济协调能力和生态环境协调能力 4 类^[10]等,或利用 PSR (pressure - state - response, 压力 - 状态 - 响应) 模型^[11]或 DPSIR (driving force - pressure - state - response, 驱动力 - 压力 - 状态 - 影响 - 响应) 模型^[12]等框架进行指标筛选,并基于如多准则综合评价法^[13]、层次分析法^[14]、模糊综合评价法^[15]、熵值法^[16]、模糊物元模型^[17]、BP (back propagation) 神经网络^[18]、LVQ (learning vector quantization) 网络模型评价法^[19]等方法确定指标权重,通过功效系数法^[20]、TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution)^[21]等模型方法进行水资源安全综合评价。

水资源安全的障碍因子诊断一般有定性和定量两种方式。定性分析主要是对评价期内的重要水事和经济发展状态进行描述,侧面反映水资源安全的状态变化^[22]。定量分析包括指标权重排序^[11]、计

算响应指数和响应度^[23]、贝叶斯网络模型^[24]以及障碍度排序^[25]等方法。定量诊断区域水资源安全的主要障碍因子,识别其对水资源安全的影响关系,才能满足区域水资源保护和利用的实际需求。

现有水资源安全评价研究多为将计算区域水资源安全评价目标层的决策优属度值作为水资源安全程度的定量指标,是区域多年水资源安全程度的横向比较,无法提供空间上的实际指导意义。同时,水资源安全评价研究多止步于评价结果层面,对障碍因子诊断的重视程度不够。

湖南省作为洞庭湖流域的主要省份,其水资源安全状态不仅影响着区域人民的生产和生活,同时也在维系洞庭湖区和长江流域粮食安全、经济安全与湿地生态安全等方面具有重要的作用。对湖南省进行水资源安全评价、明确影响区域水资源安全的阻碍因素从而进行针对性调控,是促进长江中下游地区可持续发展的重要手段。本研究综合考虑数据的可获得性及其实际意义,结合研究区 2000 - 2020 年自然、社会、经济等统计资料,构建水资源安全空间评价指标体系,从时间和空间两个层面对湖南省区域水资源安全状况做出准确判断,运用障碍度模型识别影响区域水资源安全的主要障碍因素,从而为湖南省乃至洞庭湖流域水资源的合理开发和保护提供决策依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

湖南省地处中国中部,下辖 13 个地级市、1 个自治州,总面积为 211 829 km²,97.6% 的面积属长江流域,2.4% 属珠江流域。湖南省属大陆性亚热带季风气候,水系密布,湘、资、沅、澧四水以及汨罗江和新墙河等分别从东、南、西三面汇入洞庭湖,后从城陵矶站汇入长江,全省多年平均降水量为 1 450

mm,多年平均水资源总量为 $1\,689 \times 10^8\text{ m}^3$ ^[26],水资源相对丰富但其时空分布存在明显差异。湖南省区位及水系分布见图 1。

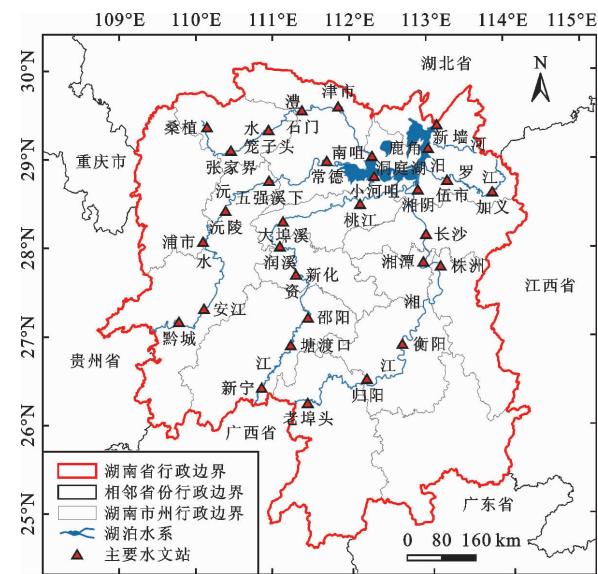


图 1 湖南省区位及水系分布

2.2 数据来源

研究区水文数据来源于 2000 - 2020 年《湖南省统计年鉴》及《湖南省水资源公报》,部分指标数据经统计、计算所得;原始降水量数据为 1 km 栅格数

据,在 ArcGIS 平台中将其“重采样”为 30 m 分辨率的栅格数据;其他 12 类统计数据连接入湖南省行政区划(市、县、区)矢量数据,按年份分别进行“要素转栅格”操作,再统一“重采样”为 30 m 分辨率栅格数据。所有栅格数据统一采用 WGS_1984_UTM_Zone_49N 投影,GCS_WGS_1984 地理坐标系。各种类数据及来源具体见表 1。

2.3 研究方法

2.3.1 水资源安全评价指标体系 综合水资源安全内涵,参考相关研究成果^[11,27],设置水资源条件、社会经济条件和生态环境条件 3 个准则层,坚持科学性、整体性、实用性、代表性和地域性原则^[28],选取 13 个评价指标全面体现区域空间水资源安全状况,参考国内外不同类型地区水资源安全、水资源可持续发展等相应指标标准以及《湖南省“十三五”水利发展规划》等规划指标综合确定各指标的安全等级及相应赋值,并结合相关文献和湖南省水资源特点制定各指标分级赋值方法^[29-30],正向影响指标最高级赋值为 5、最低级赋值为 1,安全等级递减,负向影响指标反之。湖南省水资源安全评价指标体系见表 2。依据该分级赋值方法,在 ArcGIS 平台中将 13 个指标的栅格图进行“重分类”操作,分级赋值后获得 13 个指标分级栅格图。

表 1 研究区数据来源一览表

序号	数据名称	数据来源	数据年份
1	地区生产总值(GDP)、人口数量、废污水排放量、化肥施用量	《湖南省统计年鉴》	2000、2005、2010、2015、2020
2	有效灌溉面积、产水系数、地表水资源量、地下水资源量、GDP 万元用水量、万元工业增加值用水量、行政分区用水量、各类用水消耗量	《湖南省水资源公报》	2000、2005、2010、2015、2020
3	湖南省年降水量	国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)	2000、2005、2010、2015、2020
4	湖南省行政区划(市、县、区)	资源环境数据云平台 (http://www.resdc.cn)	2015

2.3.2 熵值 - TOPSIS 模型 熵值法是一种客观确权方法,通过计算各指标熵值及占有样本的比重,确定各指标的权重。TOPSIS 法是一种基于对有限个评价对象逼近理想解程度进行排序的方法^[31-32]。本研究基于熵值 - TOPSIS 模型构建湖南省水资源安全空间评价模型。

(1)熵值法。指标的信息熵越小,表面指标值

的变异程度越大,提供的信息量越多,在综合评价中起到的作用越大,其权重也就越大^[33]。此方法可极大地消除主观判断对评价结果的影响,熵值法已在多个领域得到广泛运用。对 2000 - 2020 年湖南省水资源安全评价指标数据通过 min - max 标准化法处理^[34],运用熵值法确定水资源安全评价各指标权重,结果见表 2。计算步骤如下:

表2 湖南省水资源安全评价指标体系

准则层 S	指标层 X /单位	影响 属性	权重	意义	分级赋值方法				
					1	2	3	4	5
水资源 条件 S_1	年降水量 X_1/mm	+	0.0778	区域降水情况	< 1 200	[1 200,1 400)	[1 400,1 600)	[1 600,2 000)	$\geq 2 000$
	产水系数 X_2	+	0.0854	区域降水的动态变化	< 0.50	[0.5,0.55)	[0.55,0.60)	[0.60,0.65)	≥ 0.65
	地表水资源量 $X_3/10^8 \text{ m}^3$	+	0.0878	区域水资源分布情况	< 50	[50,100)	[100,150)	[150,200)	≥ 200
	地下水资源量 $X_4/10^8 \text{ m}^3$	+	0.0699	区域浅层水资源情况	< 10	[10,20)	[20,30)	[30,40)	≥ 40
社会经济 条件 S_2	人口密度 $X_5/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	-	0.0848	人口压力对水资源的影响	≥ 100	[50,100)	[20,50)	[5,20)	< 5
	GDP $X_6/10^6$ 元	+	0.1249	区域水利建设能力	< 1 000	[1 000,2 000)	[2 000,4 000)	[4 000,6 000)	$\geq 6 000$
	万元 GDP 用水量 X_7/m^3	-	0.0654	总体经济用水情况	≥ 500	[200,500)	[100,200)	[50,100)	< 50
	万元工业增加值 用水量 X_8/m^3	-	0.0765	工业用水效率	≥ 300	[200,300)	[100,200)	[50,100)	< 50
	农田有效灌溉单位用 水量 $X_9/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2})$	-	0.0813	农业灌溉用水效率	≥ 1.0	[0.8,1.0)	[0.6,0.8)	[0.5,0.6)	< 0.5
	人均生活用水量 X_{10}/m^3	-	0.0617	居民生活用水情况	≥ 55	[50,55)	[45,50)	[40,45)	< 40
生态环 境条件 S_3	生态环境用水量 $X_{11}/10^8 \text{ m}^3$	+	0.0708	生态环境保障程度	< 0.25	[0.25,0.50)	[0.50,1.00)	[1.00,2.00)	≥ 2.00
	废污水排放量 $X_{12}/10^4 \text{ m}^3$	-	0.0571	区域污水排放情况	$\geq 10 000$	[8 000,10 000)	[6 000,8 000)	[4 000,6 000)	< 4 000
	化肥施用量 $X_{13}/10^4 \text{ t}$	-	0.0566	区域化肥施用空间分布	≥ 40	[30,40)	[20,30)	[10,20)	< 10

① 标准化后的指标值占比

$$P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n Y_{ij} \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为标准化后第 i 期第 j 个指标值的占比, %; n 为数据期数; Y_{ij} 为标准化后第 i 期第 j 个指标值。

② 计算第 j 个指标的信息熵值

$$E_j = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (P_{ij} \cdot \ln P_{ij}) \quad (2)$$

③ 确定各指标权重

$$W_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^m (1 - E_j) \quad (3)$$

式中: W_j 为第 j 个指标的权重; m 为指标个数。

(2) TOPSIS 模型。运用 TOPSIS 模型可计算 2000—2020 年湖南省水资源安全综合评价得分, 通过接近度排序可知区域水资源安全状态变化情况, 得分越接近 1, 则安全水平越优, 越接近 0, 则安全水平越劣。计算步骤如下:

① 将指标体系中的极小型指标 (影响属性为“-”) 转为极大型指标 (影响属性为“+”), 即正向化处理, 并将正向矩阵进行归一化处理得到正向归一化矩阵, 计算公式如下:

极小型指标正向化:

$$y_{ij} = \max x_j - x_{ij} \quad (4)$$

正向指标归一化:

$$z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \tag{5}$$

得到正向归一化矩阵 Z :

$$Z = (z_{ij})_{n \times m} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \tag{6}$$

式中: n 为期数; m 为指标个数; y_{ij} 为正向化处理后的第 i 期第 j 个指标值。正向归一化矩阵见表 3。

表 3 评价指标正向归一化矩阵

年份	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
2000	0.42	0.45	0.42	0.45	0.65	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.49	0.00
2005	0.39	0.44	0.40	0.41	0.15	0.11	0.28	0.19	0.18	0.52	0.31	0.46	0.52
2010	0.47	0.46	0.45	0.45	0.63	0.29	0.50	0.47	0.38	0.39	0.42	0.56	0.49
2015	0.46	0.45	0.46	0.44	0.00	0.56	0.56	0.58	0.59	0.64	0.51	0.49	0.49
2020	0.49	0.44	0.50	0.48	0.40	0.77	0.59	0.64	0.68	0.40	0.68	0.00	0.50

② 提取矩阵 Z 中各指标的最大值和最小值,确定最优方案 Z^+ 和最劣方案 Z^- :

$$Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_m^+) = (\max\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}\}, \max\{z_{12}, z_{22}, \dots, z_{n2}\}, \dots, \max\{z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{nm}\})$$
$$= (0.49, 0.46, 0.50, 0.48, 0.65, 0.77, 0.59, 0.64, 0.68, 0.64, 0.68, 0.56, 0.52) \tag{7}$$

$$Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_m^-) = (\min\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}\}, \min\{z_{12}, z_{22}, \dots, z_{n2}\}, \dots, \min\{z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{nm}\})$$
$$= (0.39, 0.44, 0.40, 0.41, 0.00, 0.07, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.08, 0.00, 0.00) \tag{8}$$

③ 按公式(9)、(10) 计算被评价对象与方案 Z^+ 与 Z^- 间的加权欧氏距离 D_i^+ 和 D_i^- , 计算结果见表 4。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j (Z_j^+ - Z_{ij})^2} \tag{9}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j (Z_j^- - Z_{ij})^2} \tag{10}$$

式中: W_j 为熵值法所得的第 j 个指标权重。

表 4 2000 - 2020 年最大和最小加权欧氏距离计算结果

加权欧氏距离	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
D_i^+	0.47	0.36	0.22	0.21	0.16
D_i^-	0.37	0.29	0.24	0.26	0.25

④ 计算被评价对象与方案 Z^+ 的接近度 C_i :

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \tag{11}$$

式中: 接近度 C_i 的取值范围为 $[0, 1]$ 。

通过上述熵值 - TOPSIS 模型对指标数据进行计算,运用 ArcGIS 平台,可获得 2000 - 2020 年湖南省水资源安全综合评价得分及水资源安全等级空间分布情况,综合评价得分结果在 0 ~ 1 之间,空间赋值叠加值在 1 ~ 5 之间,参考相关文献[35] ~ [36],确定的湖南省水资源安全评价分级标准如表 5 所示。

2.3.3 障碍度模型 本研究利用障碍度模型计算湖南省水资源安全影响指标的障碍度大小,指标的障碍度与其对区域水资源安全的阻力大小呈正相关^[37]。诊断主要障碍因素,可更实际和针对性地提

出水资源安全管控措施,达到改善水资源安全状态的目的,主要包括以下步骤:

表 5 湖南省水资源安全评价分级标准

安全等级	综合得分	空间叠加值
I 级(安全)	≥ 0.8	≥ 4.2
II 级(较安全)	$[0.6, 0.8)$	$[3.4, 4.2)$
III 级(基本安全)	$[0.4, 0.6)$	$[2.6, 3.4)$
IV 级(不安全)	$[0.2, 0.4)$	$[1.8, 2.6)$
V 级(极不安全)	< 0.2	< 1.8

(1) 计算因子贡献度 F_i , 指标偏离度 I_i

$$F_i = W_i \cdot X_{ij} \tag{12}$$

$$I_i = 1 - x_{ij} \tag{13}$$

式中: W_i 为第 i 个指标的权重; X_{ij} 为该指标所属的第 j 个准则层的权重; x_{ij} 为归一化后的指标数值。

(2) 计算指标 i 、准则层 j 对水资源安全的障碍度 P_i 、 U_j

$$P_i = 100 \times (F_i \cdot I_i) / (\sum_{i=1}^m F_i \cdot I_i) \tag{14}$$

$$U_j = \sum P_{ij} \tag{15}$$

3 结果与分析

3.1 湖南省水资源安全综合评价

利用上述熵值法计算所得指标权重代入水资源安全 TOPSIS 模型,计算 2000 - 2020 年水资源安全贴近度,即湖南省水资源安全综合得分,结果见表

6. 由表 6 可知,2000—2020 年湖南省综合水资源安全变化总体呈上升趋势,水资源安全水平可分为 3 个阶段:2000—2005 年、2010—2015 年和 2020 年,分别代表着低水平的基本安全、高水平的基本安全以及较安全的水资源安全状态。

表 6 2000—2020 年湖南省水资源安全综合评价得分表

年份	综合得分	安全等级
2000	0.4381	Ⅲ级(基本安全)
2005	0.4439	Ⅲ级(基本安全)
2010	0.5229	Ⅲ级(基本安全)
2015	0.5523	Ⅲ级(基本安全)
2020	0.6028	Ⅱ级(较安全)

通过查阅各年《湖南省水资源公报》可知,第 1 阶段中,湖南省连续遭受了较为严重的洪涝灾害和旱情,造成了极大的经济损失,同时水资源质量状况未得到根本改善,存在着水质性缺水和水源性缺水威胁。为此,2005 年湖南省为实现工程水利向资源水利、传统水利向现代水利、可持续发展水利转变这一指导思想,编制了“十一五”水利规划,大力发展水利建设,全面推进以长沙市为代表的经营水利、湘潭政策水利、茶陵民营水利和以湖区 21 个城市积山丘区 35 个城市防洪为代表的外资水利等 4 种水利,并启动水源地水资源质量、入河排污口检测和水源地安全保障规划。直至 2010 年提升水资源安全水平成效显著,2005—2010 年也是 20 年来水资源安全水平增长速度最快的阶段。2010—2015 年全省水资源安全水平维系着平稳状态,各市(州)水功能区水质达标率实现预期目标,蓄水工程蓄水量较前一阶段大幅增加。为响应国务院最严格水资源管理制度,2015 年湖南省出台了一系列水资源管理和水资源论证等工作的方案通知,湖南省水资源管理进入严格实行“红线”管理的新时期,同时提出“节约水资源、保障水安全”,倡导全社会形成节约用水意

识,宜章县莽山水库工程也正式开工建设,至 2020 年,湖南省水资源安全水平又上升了一个台阶。

水库作为最重要的蓄水工程,具有防洪、供水、农业灌溉、改善民生和生态效应 5 个方面的作用,水库可调节区域径流、蓄洪补枯,使得水资源在时间上和空间上重新分配,使之适应用水部门的要求,可见水库水利建设与区域水资源安全息息相关,因此,水库座数及蓄水动态可作为湖南省水利建设量化指标。通过查阅 2000—2020 年《湖南省水资源公报》,统计各年大、中型水库及其蓄水量(图 2),与计算出的各年水资源安全综合得分在数据统计分析软件 IBM SPSS Statistics 25 中进行双变量相关性分析,分析结果见表 7。由表 7 可知,水资源安全综合得分与各指标的相关性系数均大于 0.7,说明水资源安全综合得分的变化呈现出与湖南省水利建设同步的趋势。

表 7 湖南省水资源安全综合得分与水利建设量化指标相关性

指标	大型座数	中型座数	大型蓄水量	中型蓄水量
皮尔逊相关系数	0.836	0.830	0.774	0.961

注:双尾显著性检验,样本量 $n=5$ 。

3.2 湖南省水资源安全空间评价

3.2.1 水资源安全等级空间分布分析 为了更直观地表达水资源安全等级空间分布情况,根据上述熵值法所得的指标权重(表 2),在 ArcGIS 平台中,将 13 个指标分级栅格图进行“加权叠加”操作,再依据评价等级划分标准(表 5)进行“重分类”,获得 2000—2020 年湖南省水资源安全等级空间分布并统计出各等级面积的占比情况,分别见图 3 和表 8。

根据图 3、表 8 可知,湖南省 14 个市(州)2000—2020 年水资源安全基本处于较安全、基本安全和不安全 3 个等级状态,且随着湖南省水利建设的发展,不安全等级所占面积逐渐减少,逐步向较安全等级转变。

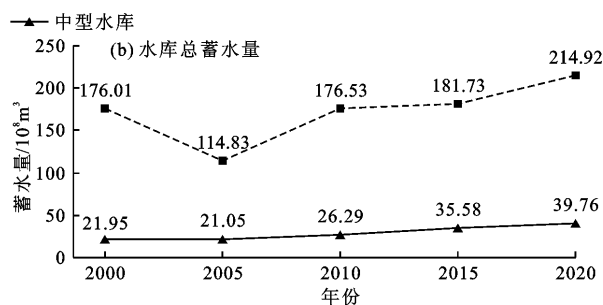
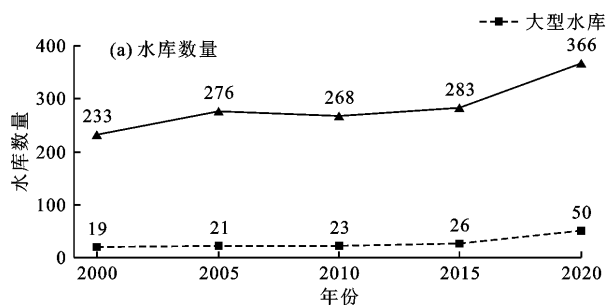


图 2 2000—2020 年湖南省水库建设量化指标

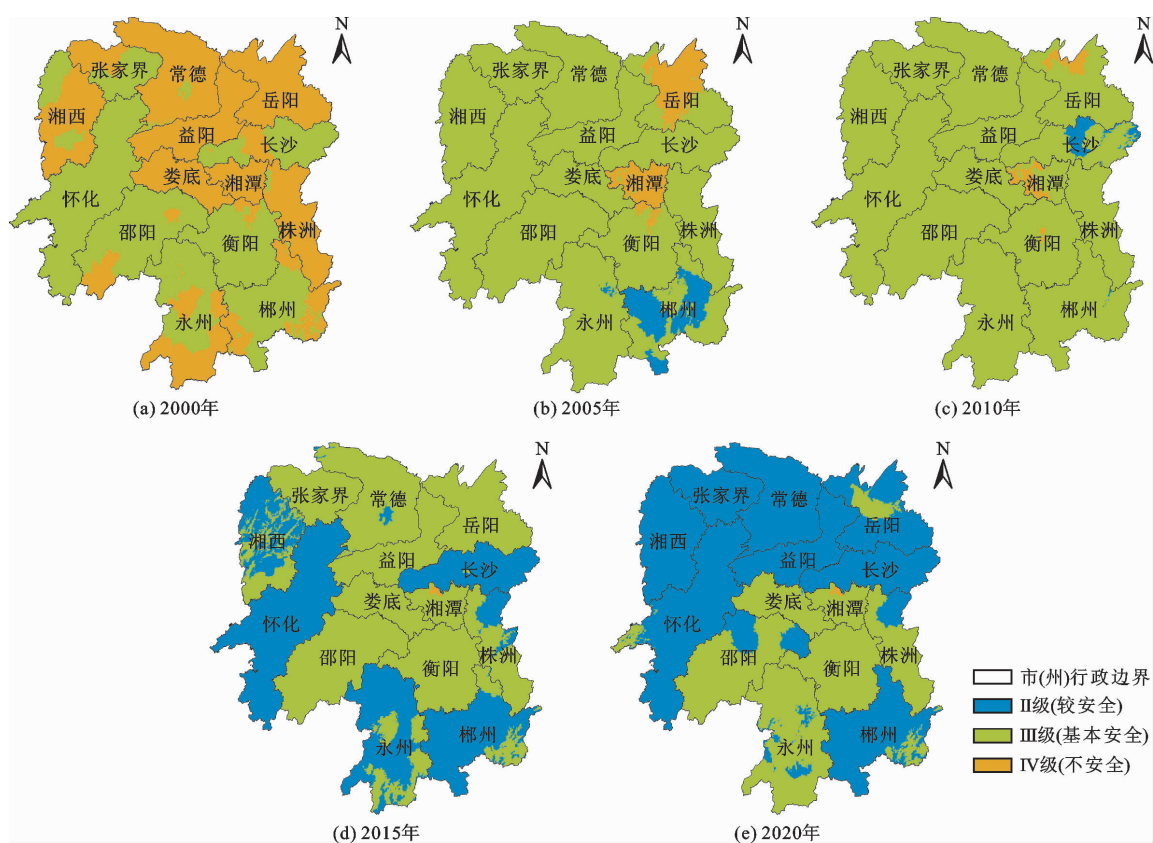


图 3 2000 - 2020 年湖南省水资源安全评价等级空间分布

表 8 2000 - 2020 年湖南省水资源安全评价
各等级面积占比

安全等级	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
Ⅱ级(较安全)		4.14	1.14	39.42	62.57
Ⅲ级(基本安全)	49.93	89.65	97.29	60.49	37.33
Ⅳ级(不安全)	50.07	6.21	1.56	0.10	0.10

在水资源安全综合得分最低的 2000 年,湖南省处于不安全等级的市(州)有 7 个,分别为常德、岳阳、益阳、娄底、湘潭、株洲和湘西州,永州、张家界、邵阳和郴州界内部分区县亦处于水资源不安全状态;2005 年不安全等级面积大幅减少,仅湘潭市和岳阳市市区、岳阳县、汨罗市及临湘市仍处于不安全等级,其他区域的水资源安全状态大幅改善,基本安全等级区域面积已达 89.65%,郴州的市区、桂阳县、宜章县和资兴市甚至呈现出较安全的水资源安全水平;2010 年水资源综合水平为较安全,不安全等级面积进一步减少,仅岳阳、湘潭及衡阳市的小部分区域水资源仍为不安全,长沙市的长沙县转变为较安全等级,基本安全等级面积占比达 97.29%,可见湖南省水资源安全实现了向高水平基本安全的转变;2015 年仅韶山市为水资源不安全水平,长沙、怀

化、郴州以及永州、湘西州等市(州)的大部分区域转变为较安全水平;至 2020 年水资源综合水平已达到安全,较安全等级面积比重超过 60%,整体水资源安全水平得到质的提升。

3.2.2 水资源安全全域空间分异分析 在 ArcGIS 平台中,对历年湖南省水资源安全加权叠加图(重分类前)的符号系统属性进行调整,选择百分比截断类型的“拉伸”显示,“拉伸”渲染器用于以平滑渐变的颜色显示连续的栅格像元值,可以增大视觉对比度,使得水资源安全水平在空间上连续分布,高值和低值区域更为明显,空间异质性更加具体,可进一步明晰湖南省全域水资源安全空间分异情况,如图 4 所示,图中安全水平数值越大,则该区域安全性越高。

由图 4 可以看出,2000 年全域水资源安全呈现出西南部高、东北部低的空间分布状态,水资源安全水平最高值出现在怀化市的沅陵县和溆浦县,株洲市的炎陵县和湘潭市的湘潭县处于最低安全水平;2005 年水资源安全水平极差较大,湖南省东南部特别是郴州市水资源安全水平最高,而北部各市(州)以及中部的湘潭市安全水平处于低值;至 2010、2015 年水资源安全水平极差减小,除湘潭市外,全域水资源安全水平均得到改善,长沙市、湘西州、怀

化市的水资源安全水平大幅提高,郴州市仍保持着较高水平;综合得分最高的 2020 年,湖南省北部多

个市(州)处于水资源安全较高水平,中部的湘潭及衡阳市处于较低水平。

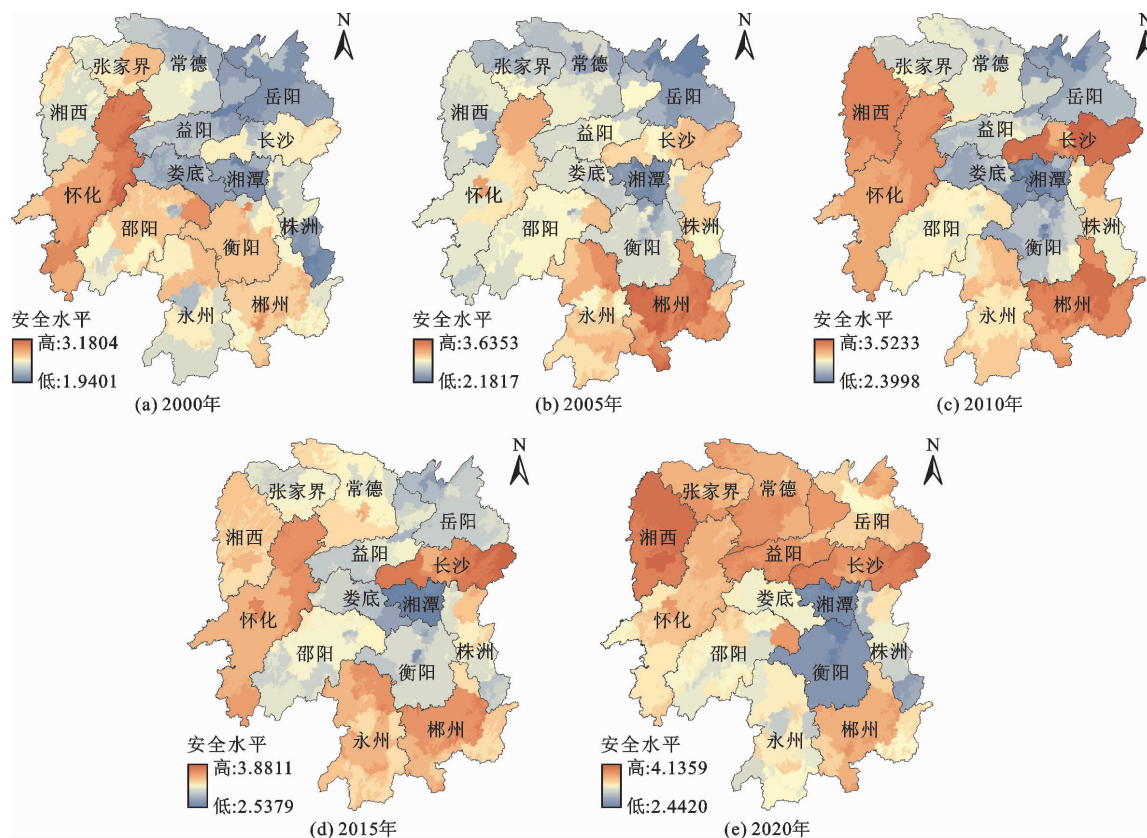


图4 2000-2020年湖南省水资源安全全域空间评价分布

图4还显示,各年水资源安全情况空间分异明显,位于水系密度最高(洞庭湖区)的岳阳市以及湘江穿流而过的湘潭市反而多年处于水资源安全较低水平,而处于相似地理位置的长沙市以及位于山区的湘西州水资源安全水平却呈现逐年提升趋势,同时怀化市在2000-2020年间均保持着较高的水资源安全水平,这些空间分异现象需要通过综合分析主要障碍因子以及当地实际情况进行解释。

3.3 湖南省水资源安全障碍度分析

水资源安全障碍因子诊断从指标层因子和准则层因素两个层面出发,找出湖南省水资源安全的主要障碍因子,以便相关部门对该类因子进行综合调控,从而提高全域水资源安全水平。

3.3.1 指标层障碍因子分析 根据障碍度模型公式(14)计算出2000-2020年湖南省水资源安全障碍因子障碍度,见表9。从表9中各指标层因子障碍度时间变化上来看, X_6 (GDP)障碍度变化最大,由2000年的27.86%递减至2020年的6.66%, X_{11} (生态环境用水量)和 X_{12} (废污水排放量)障碍度逐年递减,而 X_7 (万元GDP用水量)和 X_8 (万元

工业增加值用水量)障碍度逐年递增,对区域水资源安全的影响增大,其他指标层因子障碍度均在一定范围内波动。从单一年份因子障碍度排序上来看,2000、2005年主要障碍因子为 X_6 (GDP)、 X_5 (人口密度)和 X_9 (农田有效灌溉单位用水量),2010、2015年为 X_6 (GDP)、 X_8 (万元工业增加值用水量)和 X_7 (万元GDP用水量),2020年为 X_8 (万元工业增加值用水量)、 X_7 (万元GDP用水量)和 X_9 (农田有效灌溉单位用水量)。

将各年份湖南省水资源安全空间分布与相应的主要障碍因子类型进行对照,着眼于障碍度变化较大的因子,结合区域实际,可对水资源安全空间分布演变趋势进行解释。2000-2005年,从湖南省各市(州)基础数据变化来看,正向影响的主导因子GDP障碍度变化较大,长沙市、郴州市、怀化市的GDP增长率均高于岳阳市和湘潭市,特别是长沙市GDP增长速度数倍于后者,岳阳市、湘潭市的GDP增长率在全省范围内处于较低档;对于负向影响的主要因子人口密度而言,郴州市、怀化市远低于岳阳市、湘潭市,长沙市高于后两者,同时考虑到GDP对水资

源安全水平的影响远大于人口密度,综合而言,长沙市、郴州市、怀化市的水资源安全水平呈提高趋势,而岳阳市和湘潭市则相反。2010 和 2015 年水资源安全空间分布情况类似,因此对 2005 - 2015 年统一进行分析,GDP 仍为主要障碍因子,长沙市和湘西州的 GDP 增长速度高于湘潭市和娄底市;负向影响的因子万元工业增加值用水量障碍度增加,在 2010 年成为第二主要障碍因子,2015 年成为第一主要障碍因子,从数据上看,长沙市的负增长速度最快,湘潭市处于全省中间水平,娄底市和湘西州则处于低速区间;同为障碍度变化较大的万元 GDP 用水量因子,娄底市负增长速率为全省最低,其他市(州)数值相差不大,由此可解释长沙市、湘西州的水资源安全水平大幅提高,湘潭市和娄底市仍保持较低水平。2015 - 2020 年,除湘潭市和衡阳市之外,湖南省其他市(州)水资源均处于较高水平,此期间 GDP 因子障碍度大幅降低,变化最大的主要障碍因子为万元工业增加值用水量,湘潭市和衡阳市的该指标实际用水量负增长速度处于全省最低,同时在 2020 年实际万元工业增加值用水量、万元 GDP 用水量和农田有效灌溉单位用水量 3 个负向影响的主要障碍因子指标值均处于全省较高水平,因此,湘潭市和衡阳市的水资源安全水平在全省范围内较低可以得到解释。

表 9 2000 - 2020 年湖南省水资源安全障碍因子障碍度 %

障碍因子	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
X_1	6.98	6.49	5.58	5.87	5.92
X_2	7.31	6.55	6.20	6.55	7.21
X_3	7.88	7.27	6.45	6.65	6.52
X_4	5.90	5.69	5.21	5.44	5.41
X_5	11.32	9.85	9.82	9.92	10.84
X_6	27.86	23.45	18.51	11.89	6.66
X_7	2.40	7.23	10.90	12.50	14.04
X_8	4.34	7.09	11.60	13.92	16.10
X_9	9.21	8.88	9.42	10.58	11.75
X_{10}	7.34	7.48	7.08	7.79	7.90
X_{11}	5.82	3.87	3.16	2.78	1.97
X_{12}	3.04	2.66	2.77	2.74	1.93
X_{13}	0.60	3.50	3.31	3.38	3.75

3.3.2 准则层障碍因素分析 通过公式(15)统计出 2000 - 2020 年湖南省水资源安全准则层障碍因素的障碍度(图 5),进一步剖析影响湖南省水资源安全的系统因素。

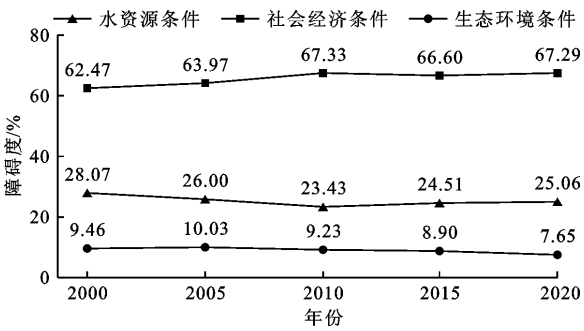


图 5 2000 - 2020 年湖南省水资源安全准则层障碍度

由图 5 可知,3 个准则层障碍度发展均较为稳定,社会经济条件障碍度始终最大,且均超 60%,即对湖南省水资源安全的影响最大,水资源条件次之,生态环境条件影响最小。可见,社会经济条件是制约湖南省水资源安全的最主要系统因素。

通过以上分析,节水型社会建设、相关水利建设以及经济投入等经济社会调控手段对湖南省水资源安全水平的提高作用明显,通过对社会经济条件因素进行主动调控,将会对区域水资源安全起到积极的促进作用。因此,加强对水资源安全主要制约因素即社会经济条件中不断变化的主要障碍因子的综合调控,结合对水资源条件中地表水资源量的保护,这种适应性调控可一定程度上提升区域水资源安全程度,促进湖南省全域生活、生产、生态的可持续发展。

4 讨 论

(1)分级标准对评价结果而言至关重要,在已有的区域水资源安全评价研究中^[9-11],评价指标和分级标准尚未形成统一的体系,本研究对水资源安全评价是在前人的研究基础上量化分级标准,对评价结果可能产生一定影响,但评价结果所呈现的变化趋势和空间分布规律是一致的、有效的。采用熵值法获取各评价指标权重,代入 TOPSIS 模型进行贴近度排序,并采用该权重对各指标空间分级数据进行加权叠加,所获得的评价结果是时间(2000 - 2020 年)和空间(湖南省区域)上的相对定论,而不是对水资源安全优劣进行的绝对评判。

(2)在以往的水资源安全障碍因子研究中,往往停留在获取主要障碍因子层面,并未对障碍因子障碍度变化情况与水资源安全空间分布演变趋势之间的关系进行解释^[24-25],本研究以湖南省 2000 - 2020 年水资源安全水平变化较为明显的市(州)为例,通过对比其具体实际数据变化情况,对其水资源安全水平的变化趋势进行解释说明,结果显示两者

存在一定的同步性,由此提出可主动对主要障碍因素进行调控,以达到提升区域水资源安全水平的目的。需要注意的是,区域水资源安全的主要障碍因子不是一成不变的,需要机动地对社会调控对象和方式进行调整,同时,寻找障碍因子数值变化与水资源安全水平变化间的量化关系是今后需要继续深化研究的关键问题。

(3)从研究结果上看,2000—2020 年湖南省水资源安全水平总体呈上升趋势,说明湖南省长期以来坚持生态文明建设和水资源保护取得了一系列成效。但纵观区域水资源安全的空间分布情况,受多种障碍因子影响,湖南省局部仍存在水资源不安全等级的区域,为进一步提升湖南省水资源安全水平,提出以下对策建议:

①将水资源作为最大刚性约束。统筹强化流域管理,深入推进最严格水资源管理制度,加强对水源涵养区、地下水的保护,量水而行,合理确定区域水资源承载力和开发利用上限。

②加强影响水资源安全短板因素的适应性管理。以万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、农田有效灌溉单位用水量为重要指标,建立分地区、分产业的水资源配置方案。

③加大水利工程建设,增强水资源开发能力。研究结果显示水利工程建设与水资源安全水平同步变化,因此,应提高水利设施建设的财政支出,在水资源安全水平较低的区域上游兴建水利工程,如新建大中型水库、原有水库扩容、改建拦河闸坝等水资源调配工程,进一步增强水资源开发能力。

④推进节水型社会建设,提高水资源利用效率。从节约和保护出发,倡导工农业节水和城市生活节水,通过改进节水工艺、发展高科技节水技术等手段,促进水资源、经济、社会、环境、生态的协调发展。

5 结 论

(1)2000—2015 年湖南省水资源安全处于Ⅲ级(基本安全)状态,至 2020 年达到Ⅱ级(较安全)状态,总体安全水平逐年转好,水资源安全变化呈现出与湖南省水利建设成果同步趋势。

(2)2000—2020 年湖南省 14 个市(州)水资源安全基本处于Ⅱ级(较安全)、Ⅲ级(基本安全)和Ⅳ级(不安全)3 个状态。全域水资源安全空间分异情况明显,郴州市保持着较高水资源安全水平状态,中部的湘潭市及衡阳市始终处于较低安全水平。

(3)2000—2020 年各年份水资源安全主要障碍

因子存在差异,主要集中于 GDP、人口密度、农田有效灌溉单位用水量、万元工业增加值用水量和万元 GDP 用水量等 5 个因子。社会经济条件是制约湖南省水资源安全的最主要系统因素,通过对其中的主要障碍因子进行主动调控,将会提高区域水资源安全水平。

参考文献:

- [1] 曾霞,侯兵,王丹. 新型城镇化进程中的水资源安全评价及区域差异[J]. 华北水利水电大学学报, 2018, 34(4): 14—18.
- [2] JIA Xiaoli, LI Chunhui, CAI Yanpeng, et al. An improved method for integrated water security assessment in the Yellow River basin, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(8): 2213—2227.
- [3] 钟姗姗,刘鹏. 2007—2015 年湖南省水资源安全状态与短板要素甄别[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 50—56.
- [4] SULLIVAN C. Calculating a water poverty index[J]. World Development, 2002, 30(7): 1195—1210.
- [5] 陈思元,王思聪,梁契宗,等. 基于水贫困指数的黑龙江省水资源安全评价[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 4(5): 30—34.
- [6] LIU Mei, WEI Jinhua, WANG Guangqian, et al. Water resources stress assessment and risk early warning—A case of Hebei Province China[J]. Ecological Indicators, 2017, 73: 358—368.
- [7] ZENG Zhao, LIU Junguo, SAVENIJE H H G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality[J]. Ecological Indicators, 2013, 34: 441—449.
- [8] 周念清,杨硕,朱勃. 承载指数与模糊识别评价许昌市水资源承载力[J]. 水资源保护, 2014, 30(6): 25—30.
- [9] 黄微尘,余朕天,李春晖,等. 基于 ELECTRE Ⅲ 的淮河流域水资源安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 20—25.
- [10] 唐莲,刘子西,齐娅荣. 宁夏水资源安全综合评价[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(5): 1810—1816.
- [11] 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.
- [12] 汪雁佳,李景保. 三峡水库运行后荆南三口地区水资源安全状态及归因分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(11): 1992—2005.
- [13] 张洋,李鹏,杨志,等. 基于 DPSIR 模型的甘肃省 2000—2018 年水安全评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 127—132 + 138.

- [14] 黄楚珩,蒋志云,杨志广,等. 基于熵值法和层次分析法的广东省水资源安全评价及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):140-147.
- [15] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):53-58+78.
- [16] 李少朋,赵衡,王富强,等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2021,37(3):20-25.
- [17] 杜向润,冯民权,张建龙. 基于改进模糊物元模型的水安全评价研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(8):222-228.
- [18] 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.
- [19] 王婧,靳春玲,贡力,等. 基于 FCM-LVQ 网络模型的疏勒河流域水安全评价[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(1):103-109+116.
- [20] 李丹丹. 河南省水资源安全预警指标体系的构建[D]. 开封:河南大学,2019.
- [21] 武兰珍,赵霞,成艺,等. 黄河流域甘肃段水资源承载力与水资源安全评价[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(9):897-903.
- [22] 李治军,姚蓉,王涛,等. 基于 AHP-熵权法与模糊模型的西安市水资源安全评价[J]. 水利科技与经济,2022,28(5):1-5.
- [23] 郑炜. 城镇化进程中的水资源安全响应研究——以广州市为例[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2021,42(3):60-66.
- [24] 梁永玉,任潇潇,曹苏周,等. 基于贝叶斯网络的祁连山自然保护区水资源安全影响因素诊断[J]. 水文,2021,41(5):65-71+12.
- [25] 任潇潇,牛成英. 祁连山内陆河流域水资源安全评价及障碍因子诊断[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版),2021,41(3):42-49.
- [26] 湖南省人民政府. 自然地理 [EB/OL]. (2022-03-01) [2022-06-24] <https://www.hunan.gov.cn/hnszf/jxxx/hngk/zrdl/zrdl.html>.
- [27] 张立锋,张国兴. 黄河流域中心城市水资源安全评价研究[J]. 水电能源科学,2022,40(3):55-58.
- [28] 李丹,毛玉鑫,陈森林,等. 临沂市水资源安全综合评价研究[J]. 中国农村水利水电,2022(3):75-79.
- [29] 曾佩,傅琼华,皮家骏. 基于物元法的江西省水资源安全评价[J]. 水电能源科学,2019,37(4):21-24.
- [30] 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.
- [31] 岳启蒙,文倩,贺奕,等. 水生态文明城市建设对城市水生态承载力的影响——以武汉市为例[J]. 生态学报,2021,41(14):5586-5597.
- [32] 杨海燕,付凯,孙晓博,等. 基于 CRITIC-GR-TOPSIS 法的烟台市水资源承载力综合评价[J]. 水土保持通报,2021,41(2):215-221+305.
- [33] 柳梦琪,曾忠平. 基于熵权 TOPSIS 法的武汉市土地利用多功能性评价[J]. 水土保持通报,2021,41(2):314-321.
- [34] 马继敏,脱云飞,王倩,等. 基于 GRA-TOPSIS 法云南省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):11-17+26.
- [35] 余灏哲,韩美. 基于模糊物元模型的山东省水资源安全 TOPSIS 评价[J]. 安全与环境工程,2015,22(6):1-6.
- [36] 张自英,潘万贵,黄涛,等. 水资源安全综合评价与预测——基于浙江省台州市实证分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):70-74.
- [37] 石晓昕,袁重乐,钱会,等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(5):92-99.