

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221702

基于组合赋权法—云模型的甘肃省水安全时空变化分析

李长春, 朱亚强, 吴 京, 侯爱冰, 张发斌

(甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司黄河流域生态保护和高质量发展研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 定量评估区域水安全是水安全问题诊断和科学决策的重要基础。为分析甘肃省水安全的时空变化特征, 构建2个系统层、6个准则层、25个评价指标的指标体系, 基于改进的层次分析法和熵权法的组合赋权法计算各指标权重, 利用云模型综合评价了甘肃省14个市(州)2010、2015、2020年水安全状况。结果表明, 2010、2015、2020年各市(州)水安全呈上升趋势, 总体处于基本安全和比较安全等级; 水资源短缺和水旱灾害为影响甘肃省水安全的主要制约因素, 改善水资源条件、提高现代水管理水平为提升甘肃省水安全的重要措施。

关键词: 水安全; 组合赋权法; 指标体系; 云模型; 甘肃省

中图分类号: TV213.4; [TV11]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0023-04

1 引言

目前水安全定义尚不明确, 其概念在不断演化中^[1], 由最初的水量、水质等基本内容^[2], 到增加水生态环境、恢复力和公平性等要素至水安全的内涵中^[3]。基于水安全的内涵, 向红梅等^[4]基于“动力—状态—影响—响应”(DPSIR)模型动态评价了广东省水安全状况; 李雪松等^[5]从水循环、水环境、水生态、水社会、水经济安全5个子系统评价了中国2000~2012年水安全发展状态。受地理位置和气候条件的限制, 甘肃省水资源短缺且时空分布不均, 以往对水资源、水生态等方面的研究较多, 而基于可获取、可量化的统计数据, 以行政区划为单元的水安全时空动态评价尚未开展。鉴此, 本文立足甘肃省水资源和经济社会发展基础, 在指标体系构建中考虑人类对水安全的心理感受、水文化等因素, 丰富了水安全内涵, 为科学评价水安全提供了参考依据。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

年均降水量、人均水资源量等数据来源于《甘肃省水资源公报》、《甘肃省水土保持公报》及各市(州)的水资源公报。公众对水安全的满意度等通过问卷调查获得。

2.2 研究方法

以甘肃省14个市(州)水安全为研究对象, 选取2010、2015、2020年作为典型年份。权重确定为水安全评价的重要部分之一, 以层次分析法为代表的主观赋权法考虑决策者的意向, 但主观性较大, 而基于数据的客观赋权法过于依赖基础数据, 因此选择改进层次分析法和熵权法的组合赋权法综合确定, 提高了指标权重的合理性和计算结果的可靠性。水安全评价指标具有模糊性和随机性, 云模型能研究指标之间模糊性和随机性及两者之间的相关性^[6], 将定性概念进行定量化表达, 具有普遍适用性。

2.2.1 指标体系构建

按目标层、系统层、准则层、指标层4个层次, 选取25个指标构建水安全评价指标体系见表1。

2.2.2 权重确定

利用改进层次分析法——标度扩展法^[7], 对指标进行 $n-1$ 次相对重要性比较, 其步骤如下。

步骤1 按重要程度将 n 个指标进行两两比较, 依次递减排列, 设 $X_1 \geq X_2 \geq \dots \geq X_n$ 。

步骤2 对 $i=1, 2, \dots, n-1$, 比较指标 X_i 与 X_{i+1} 的重要性, 并将对应标度值记为 a_i 。

步骤3 根据标度构造判断矩阵 \mathbf{P} , 对于矩阵元素 p_{ij} , 当 $i=j$, $p_{ij}=1$; 否则 $p_{ij}=a_i a_{i+1} \dots a_{j-1}$, $p_{ji}=1/p_{ij}$ 。对于权重集合 \mathbf{W} 的各指标权重 w_i ($i=1, 2, \dots, n$), 若 $i=n$, 则 $w_i=1$; 否则 $w_i=a_i a_{i+1} \dots a_{n-1}$, 并取规范化值。

收稿日期: 2022-07-16, 修回日期: 2022-09-01

作者简介: 李长春(1981-), 男, 高级工程师, 研究方向为水文水资源, E-mail: 43554956@qq.com

表 1 水安全评价指标体系

Tab. 1 Index system of water security evaluation

目标层	系统层	AHP 权重	准则层	AHP 权重	指标层	组合权重	指标属性
水安全 G	自然子系统 S ₁	0.615	水资源安全 C ₁	0.386	年均降水量 I ₁ /mm	0.063	正向
					人均水资源量 I ₂ /(m ³ ·人 ⁻¹)	0.047	正向
					产水模数 I ₃ /(10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)	0.060	正向
					供水模数 I ₄ /(10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)	0.067	正向
					江河重要堤防(1~3级)达标率 I ₅ /%	0.062	正向
					单位面积蓄水工程总库容 I ₆ /(10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)	0.031	负向
		0.192	水生态安全 C ₃	0.192	洪灾成灾面积 I ₇ /10 ⁴ ha	0.019	负向
					旱灾害成灾面积 I ₈ /10 ⁴ ha	0.029	负向
					生态环境用水率 I ₉ /%	0.035	正向
					水土流失治理程度 I ₁₀ /%	0.022	正向
					重要断面生态基流保证率 I ₁₁ /%	0.022	正向
					地下水开采系数 I ₁₂	0.009	负向
		0.192	水环境安全 C ₄	0.192	水功能区水质达标率 I ₁₃ /%	0.030	正向
					万元 GDP 污水排放量 I ₁₄ /(t·万元 ⁻¹)	0.011	负向
					污水回用率 I ₁₅ /%	0.042	正向
					水质符合和优于三类水的河长占总评价河长的比率 I ₁₆ /%	0.051	正向
					集中式饮用水源地水质达标率 I ₁₇ /%	0.014	正向
					农田前均用水量 I ₁₈ /(m ³ ·ha ⁻¹)	0.059	负向
		0.385	水管理安全 C ₅	0.833	耗水率 I ₁₉ /%	0.073	负向
					万元 GDP 用水量 I ₂₀ /(m ³ ·万元 ⁻¹)	0.017	负向
					万元工业增加值用水量 I ₂₁ /(m ³ ·万元 ⁻¹)	0.039	负向
					水利投资占 GDP 的比例 I ₂₂ /%	0.085	正向
					公众对水安全的满意度 I ₂₃	0.048	正向
					历史文化保护传承指数 I ₂₄	0.039	正向
0.167	水文化安全 C ₆	0.167	现代水文化创造创新指数 I ₂₅	0.025	正向		

熵权法利用指标数据提供的信息量的大小决定指标的权重,避免了人为干扰。假设水安全评价指标矩阵为 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{m \times n}$, 首先对数据进行标准化及无量纲化处理, 得到矩阵 $\mathbf{X}'=(u_{ij})_{m \times n}$ 。则第 i 个指标的熵值为:

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n u_{ij} \ln u_{ij} \quad (1)$$

式中, e_i 为第 i 个评价指标的熵值; u_{ij} 为第 i 个指标第 j 个对象的无量纲化值; n 为评价指标的个数。

定义第 i 个指标的熵值后, 计算第 i 个指标所对应的熵权 w_i 为:

$$w_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^n (1 - e_i) \quad (2)$$

结果记为 $\mathbf{W}=[w_1, w_2, w_3, \dots, w_n]$ 。

按组合赋权法计算, 利用改进的层次分析法确定准则层对系统层、系统层对目标层的权重; 再由各指标的实际数据, 利用熵权法确定指标层对准则层的权重; 最后基于乘法集成法综合确定各指标对目标层的权重, 结果见表 1。

2.2.3 阈值确定

指标阈值与当地水资源状况、经济社会发展水平有关, 本文在水安全评价过程中, 基于国家规范标准、已有研究成果和文献资料, 征询专家意见, 综合考虑甘肃省的实际情况, 确定甘肃省水安全评价各项指标的阈值, 具体分级结果见表 2。

表 2 水安全评价指标标准

Tab. 2 Standards of water security evaluation index

评价 指标	评价等级标准				
	安全	比较安全	基本安全	较不安全	不安全
I ₁	≥800	[600,800)	[400,600)	[200,400)	[0,200)
I ₂	≥2 300	[1 000,2 300)	[500,1 000)	[300,500)	[0,300)
I ₃	≥50	[35,50)	[20,35)	[15,20)	[0,15)
I ₄	≥10	[6,10)	[4,6)	[2,4)	[0,2)
I ₅	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[20,40)	[0,20)
I ₆	≥40	[10,40)	[5,10)	[1,5)	[0,1)
I ₇	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	≥80
I ₈	[0,75)	[75,150)	[150,225)	[225,300)	≥300
I ₉	≥5	[3,5)	[2,3)	[1,2)	[0,1)
I ₁₀	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[20,40)	<20
I ₁₁	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[20,40)	<20
I ₁₂	[0,0.3)	[0.3,0.8)	[0.8,1.0)	[1.0,1.3)	≥1.3
I ₁₃	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)
I ₁₄	[0,10)	[10,25)	[25,40)	[40,55)	≥55
I ₁₅	[8,100]	[6,8)	[4,6)	[2,4)	[0,2)
I ₁₆	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)
I ₁₇	[95,100]	[90,95)	[85,90)	[80,85)	[0,85)
I ₁₈	[0,150)	[150,300)	[300,450)	[450,600)	≥600
I ₁₉	[0,30)	[30,50)	[50,60)	[60,70)	[70,100]
I ₂₀	[0,30)	[30,60)	[60,120)	[120,180)	≥180
I ₂₁	[0,20)	[20,50)	[50,100)	[100,150)	≥150
I ₂₂	≥1.5	[1,1.5)	[0.6,1)	[0.3,0.6)	[0,0.3)
I ₂₃	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)
I ₂₄	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[20,40)	[0,20)
I ₂₅	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[20,40)	[0,20)

注:表中数据单位同表 1。

2.2.4 云模型

云模型是将定性描述定量化表达的不确定性转化模型。设 \mathbf{V} 为一个集合定量域, T 为 \mathbf{V} 的定性概念。定量值 v 对 T 的隶属度 $C_T(v) \in [0, 1]$ 的随机数, 映射为:

$$C_T(v): \mathbf{V} \rightarrow [0, 1], \forall v \in \mathbf{V} \quad v \rightarrow C_T(\mathbf{V}) \quad (3)$$

式中, v 为 \mathbf{V} 的云滴, 其在论域 \mathbf{V} 上的分布称为云模型。

云模型的整体特性通过三个特征参数表征(期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e)。 E_x 表示云滴在论域分布中心位置, E_n 为对定性概念模糊度的度量, H_e 体现云的离散程度。特征参数为:

$$E_{x_{i,j}} = (x_{i,j}^1 + x_{i,j}^2) / 2 \quad (4)$$

$$E_{n_{i,j}} = (x_{i,j}^1 - x_{i,j}^2) / 2.355 \quad (5)$$

式中, $E_{x_{i,j}}$ 、 $E_{n_{i,j}}$ 分别为第 i 个指标在第 j 个等级中的期望、熵值; $x_{i,j}^1$ 、 $x_{i,j}^2$ 分别为指标 i 对应评价等级 j 的上下阈值。

H_e 值越小, 云厚度越小, 本文取经验值 0.01^[8]。

基于云模型的水安全评价基本步骤如下。

步骤 1 基于式(4)、(5)特征参数,利用正向云发生器计算评价指标对不同评价等级的隶属度^[9],得到隶属度矩阵 z 。

步骤 2 利用权重集 W 与隶属度矩阵 z 进行模糊转化,计算出评语论域的模糊子集 $B=W \times z$ 。

步骤 3 对模糊子集量化,赋予各等级对应的分值 h_i ,水安全等级为安全、比较安全、基本安全、较不安全、不安全,分别取 100、80、60、40、20,通过模糊子集中各标准对应的隶属度 b_i ,确定水安全评分 h' ,计算公式为:

$$h' = \sum_{i=1}^m h_i b_i / \sum_{i=1}^m b_i \quad (6)$$

3 评价结果及合理性分析

3.1 评价结果

在评价过程中,水安全划分为安全、比较安全、基本安全、较不安全、不安全 5 个等级,对应水安全综合评分取值范围分别为 [80, 100]、[60, 80]、[40, 60]、[20, 40]、[0, 20)。甘肃省各市(州) 2010、2015、2020 年水安全评价结果见表 3。由表 3 可知,总体来看,全省水安全评分呈上升趋势,反映出甘肃省水安全持续向好。从市(州)评价结果来看,2010 年除甘南州、陇南市、张掖市为比较安全之外,其余 11 个市(州)均为基本安全,其中酒泉市、白银市、定西市、庆阳市评分均低于 50 分,

表 3 各市(州)水安全评价结果

Tab.3 Water security evaluation results of each city(state)

城市	2010 年			2015 年			2020 年		
	自然子系统 S_1	社会子系统 S_2	目标层 G	自然子系统 S_1	社会子系统 S_2	目标层 G	自然子系统 S_1	社会子系统 S_2	目标层 G
酒泉	52	46	49	51	61	55	54	67	59
嘉峪关	59	52	56	75	56	67	71	65	69
张掖	62	57	60	67	66	66	65	71	67
金昌	55	47	52	66	57	63	67	57	63
武威	52	56	53	53	65	57	62	70	65
兰州	51	50	51	54	67	59	61	69	64
白银	39	54	45	42	63	51	57	68	61
临夏	51	58	53	53	62	57	63	69	66
定西	41	57	47	45	62	52	65	71	68
天水	47	55	50	43	61	50	62	69	64
平凉	50	52	51	51	66	57	64	69	66
庆阳	41	58	48	38	67	50	45	75	57
甘南	65	67	66	60	71	64	77	73	75
陇南	66	66	66	57	70	62	69	77	72

水安全风险较高。2015 年,嘉峪关市、金昌市、兰州市达到比较安全,全省 14 个市(州)达到比较安全的有 6 个。2020 年,除酒泉市、庆阳市,全省其余市(州)均达到比较安全,但评分处于 70 分以下的仍有 12 个,评分值总体不高。各市(州)水安全时空变化情况见图 1。

3.2 合理性分析

从水资源来看,甘肃省河西、陇中、陇东地区,水资源安全评价结果为基本安全和较不安全状态,其中庆阳市、白银市、酒泉市三年的评分均低于 40 分,处于较不安全的等级,主要原因是本区域水资源禀赋条件较差,缺水问题突出。陇南市、甘南州分别处于长江上游、黄河源头区,为甘肃省丰水区,两市多年平均降水量分别为 596、562 mm,水资源安全评分较高。从水灾害来看,由于甘肃省特殊的地理和气候条件,干旱发生频率大,程度深,加之受社会经济发展水平的限制,抵御水旱灾害的能力较弱,各市(州)水灾害安全评价总体不高。从水生态和水环境来看,甘肃省水生态和水环境总体呈改善趋势,但黄河流域的兰州、白银、临夏、定西、天水、平凉、庆阳等市州,植被覆盖度低,水土流失严重,该地区集中了全省约 70% 的人口和 GDP,工业发达,水污染相对严重,因此该地区水生态、水环境安全评价相对于同时期的内陆河流域和长江流域得分较低。从水管理来看,河西内陆河及甘肃省黄河流域年降水量多处于 400 mm 以下,农业用水占比高,达 70% 左右,2020 年农田每公顷均用水量仍达到 27.27 ~ 46.33 m³/ha,远高于全国平均水平(23.73 m³/ha),为影响该地区水管理层分值的主要因素。从水文化的角度看,河西五市水资源短缺,实施了流域综合治理,建设了一批节水型社会,同时在水资源配置、水权制度等方面开展了大量的探索研究,因此河西五市水文化评分整体较高。

分析全省水安全分值变化情况,2020 年自然子系统和社社会子系统平均评分比 2010 年分别增加 11、14 分(表 3)。从自然子系统来看,陇中地

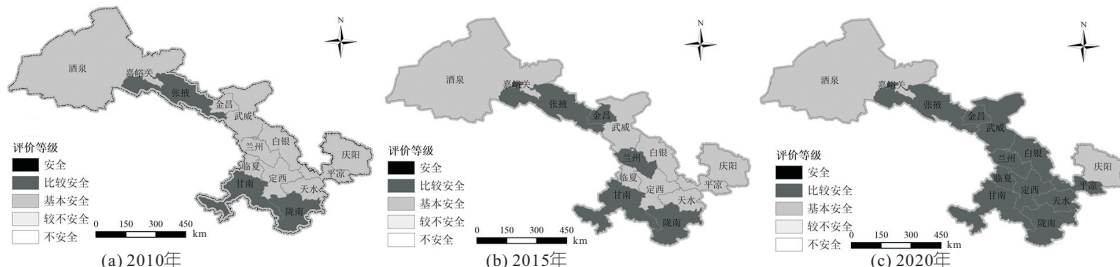


图 1 各市(州)水安全时空变化评价等级

Fig.1 Evaluation level of temporal and spatial changes of water security in cities(state)

区评分增加最明显,如定西市、白银市、天水市分别增加 24、18、15 分,主要原因为本区域近年来引洮工程建成通水,极大地改善了供水条件,三市单位面积蓄水总库容从 $0.08 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 增至 $0.15 \text{ m}^3/\text{km}^2$,同时,对大江大河的堤防进行除险加固,有效降低了水灾害,水旱成灾面积由 2010 年的 $24.87 \times 10^4 \text{ ha}$ 降低到 2020 年 $1.13 \times 10^4 \text{ ha}$;开展水土流失治理,生态环境得到改善,水土流失治理程度由 2010 年的 56% 增至 59%。而酒泉市、庆阳市等地区,由于目前还未建成重大骨干水源工程,加之庆阳市境内泾河、马莲河水质条件差,因此评分增值较低。从社会子系统来看,酒泉市、庆阳市分值分别增加 21、17 分,酒泉市的万元 GDP 用水量从 $771 \text{ m}^3/\text{万元}$ 降至 $338 \text{ m}^3/\text{万元}$,庆阳市的万元 GDP 用水量从 $179 \text{ m}^3/\text{万元}$ 降至 $37 \text{ m}^3/\text{万元}$,表明严峻的水资源条件倒逼本区域提升水管理水平,缓解供用水矛盾。这也说明在区域水安全中,自然子系统和社会子系统存在互馈关系,水资源短缺、生态退化、水环境污染等必然对社会发展产生负面影响,通过提升水管理水平,能缓解自然本底条件所带来的水安全风险。因此,建议水资源短缺区域在实施深度节水、提高用水效率的基础上,积极谋划引调水工程,建设区域水网,提高供水保障能力。

4 结论

a. 时间序列上,甘肃省各市(州)总体评分呈上升趋势;空间分布上,甘肃省水安全等级存在地域差异。

b. 在构建指标体系的过程中,考虑了公众对水安全的满意度、水文化等精神要素,为科学评价水安全提供了有益借鉴。

c. 水资源短缺且时空分布不均制约甘肃省水安全的主要因素,应加强现代化水管理水平,提高用水效率,建设区域水网。

参考文献:

- [1] 夏军,石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报,2016,47(3):292-301.
- [2] GREY D, SADOFF C W. Sink or swim? Water security for growth and development[J]. Water policy,2007,9(6):545-571.
- [3] BAKKER K. Water security: Research challenges and opportunities[J]. Science,2012,337(6097):914-915.
- [4] 向红梅,金腊华. 基于 DPSIR 模型的区域水安全评价研究[J]. 安全与环境学报,2011,11(1):96-100.
- [5] 李雪松,李婷婷. 水安全综合评价研究——基于中国 2000-2012 年宏观数据的实证分析[J]. 中国农村水利水电,2015(3):45-49.
- [6] 王润英,李宇. 基于熵-云模型的城市洪灾风险评价模型[J]. 水电能源科学,2016,34(9):61-63,86.
- [7] 黄德才,郑河荣. AHP 方法中判断矩阵的标度扩展构造法[J]. 系统工程,2003,21(1):105-109.
- [8] 黄显峰,赵梦婷,方国华,等. 基于组合权重云模型的水资源安全评价模型[J]. 水利经济,2021,39(5):60-65,82.
- [9] 李庆,董庆宽,赵蕾. 云模型中正向云算法的修正[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2013,40(5):169-174,180.

Analysis of Temporal-Spatial Variation of Water Security in Gansu Province Based on Combined Weighting-Cloud Model

LI Chang-chun, ZHU Ya-qiang, WU Jing, HOU Yuan-bing, ZHANG Fa-bin

(Yellow River Basin Ecological Protection and High-Quality Development Research Center,

Gansu Water Conservancy & Hydropower Survey & Design Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Carrying out quantitative assessment of regional water security is an important basis for water security diagnosis and scientific decision-making. To analyze temporal-spatial characteristics of water security in Gansu Province, an index system of 2 system layers, 6 criteria layers and 25 evaluation indexes was constructed. Based on the combination weighting method of improved AHP and entropy weight method, the weight of each index was calculated. The water security status of 14 cities (states) in Gansu Province in 2010, 2015 and 2020 was comprehensively evaluated by cloud model. The results show that the water security of each city (state) is on the rise in 2010, 2015 and 2020, and it is generally in the basic and relatively security level. The shortage of water resources and flood and drought disasters are the main restrictive factors that affect the water security in Gansu Province. Improving water resources conditions and modern water management level are the important measures to improve the water security in Gansu Province.

Key words: water security; combination weighting method; evaluation index system; cloud method; Gansu Province