

基于模糊综合指数法的陕西省水资源脆弱性评价

刘引鸽^{1,2}, 杨雨欣¹, 包江川¹, 王少雄¹

(1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013; 2. 宝鸡文理学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: 根据水资源系统的结构和功能, 构建了水量、水质、灾害 3 个准则层, 自然因素、人为因素、承载因素 3 个约束层, 27 个指标层的水资源脆弱性评价体系。基于层次分析法与熵值法组合定权, 运用模糊综合评价法, 从时间和空间两个维度对 2007–2017 年陕西省 10 个地级市水资源脆弱性进行评价和区划, 采用障碍度模型探究水资源脆弱性的障碍因子。结果表明: 咸阳市和渭南市的水资源脆弱性为 V 级; 西安市、宝鸡市、铜川市、榆林市为 II 级; 延安市、汉中市、安康市、商洛市为 I 级。研究期内咸阳市、渭南市、安康市、商洛市的水资源脆弱性呈下降趋势, 西安市、铜川市、延安市、汉中市呈增高趋势, 宝鸡市和榆林市两市脆弱性不变。在空间上表现出“南北低, 中部高”的分布特征。影响水资源脆弱性的主要障碍因子为年降水量变化率、万元 GDP 用水量、旱涝面积受灾比、万元 GDP 废水排放量、地下水资源开发利用率。研究表明陕西省各地水资源脆弱状况差异较大, 增强和降低趋势并存, 有待于进一步开展因地制宜的管理和调控。

关键词: 水资源脆弱性; 模糊综合评价; 综合指数法; 障碍因子; 陕西省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)06-0018-10

Water resources vulnerability assessment of Shaanxi Province based on fuzzy comprehensive index method

LIU Yinge^{1,2}, YANG Yuxin¹, BAO Jiangchuan¹, WANG Shaoxiong¹

(1. School of Geographic & Environmental Sciences, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

Abstract: Based on the structure and function of water resources system, a water resources vulnerability evaluation system is constructed, which consists of three criterion layers, namely, water yield, water quality and disaster, three constraint layers, which are natural factors, human factors and bearing factors, and 27 indices. The weight are assigned using the combination of entropy weight method and analytic hierarchy process, and the water resources vulnerability of 10 prefecture-level cities in Shaanxi Province from 2007 to 2017 is evaluated and categorized using the fuzzy comprehensive evaluation method from spatial and temporal perspectives. In the meantime, the obstacle degree model is applied to explore the obstacle factors of water resources vulnerability. The results show that the water resources vulnerability of Xianyang and Weinan is categorized as Grade V; that of Xi'an, Baoji, Tongchuan and Yulin is Grade II; and that of Yan'an, Hanzhong, Ankang and Shangluo is Grade I. Over the 11 years, the water resources vulnerability of Xianyang, Weinan, Ankang and Shangluo showed a downward trend, whereas that of Xi'an, Tongchuan, Yan'an and Hanzhong showed an increasing trend, and that of Baoji and Yulin remained unchanged. Spatially, it showed the distribution pattern of "low in the north and south regions, high in the middle regions". The main obstacle factors affecting water resources were change rate of annual precipitation, water consumption of 10 thousand RMB GDP, disaster ratio of drought and flood area, wastewater discharge of 10 thousand RMB GDP, and development and utilization rate of groundwater resources. The research shows that the wa-

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771048); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-364); 宝鸡文理学院创新科研项目(YJSCX21YB05)

作者简介: 刘引鸽(1965-), 女, 陕西兴平人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与适应、水文循环、资源环境管理等方面的研究。

ter resources vulnerability varies widely across various regions in Shaanxi Province, with the coexistence of the tendency of increase and decrease, indicating that individualized management and regulation measures that suit local circumstances should be carried out.

Key words: water resources vulnerability; fuzzy comprehensive evaluation; comprehensive index method; obstacle factor; Shaanxi Province

1 研究背景

水作为一种自然资源,不仅是社会发展的经济基础,同时也是人类生产生活的物质基础。工业革命以来,经济的发展、人口的激增以及环境的变化导致人类对水资源的依赖与开发利用程度与日俱增,造成水资源紧缺、水质恶化以及水旱灾害频发等问题,进一步致使区域水资源空间配置和供需矛盾突出,水资源系统脆弱性加剧^[1-2]。

针对水资源迁移规律及水环境脆弱性的综合研究^[3]对区域水资源的管理与决策有着重要意义,亦成为近年来的研究热点。水资源脆弱性的研究始于20世纪60年代^[4],之后学界对于水环境的研究日益丰富深入,包括水资源评价指标的建立^[5]、对水资源系统各层次脆弱性的评价研究^[6],涵盖水文系统、水利系统、生态环境等方面^[7]。我国对于水环境脆弱性的研究主要集中在流域水环境和地域水资源系统两方面,多运用学术理论、数学模型^[8-10]以及空间可视化^[11]等手段,包括 TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) 模型^[12]、人工神经网络模型^[13]、DRASTIC 模型^[14]、RS (remote sensing) 与 GIS (geographic information systems) 技术等。例如,吕文凯等^[15]利用 DPSIR (drive - pressure - state - impact - response) 模型对滇东岩溶陷盆地石漠化区的水资源脆弱性进行了评估,指出了造成区域水资源脆弱性的主要因子。陈岩等^[16]利用 RS - SVR (rough set - support vector regression) 模型对黄河流域水资源脆弱性进行了评价并建立3种情景对未来水资源脆弱性进行了预测。穆瑾等^[17]利用 AHP (analytic hierarchy process) 及 GIS 技术对贵阳市水资源脆弱性进行了评价,发现脆弱性在空间上存在南移趋势。

目前对于地域水资源脆弱性的研究多集中于整体,往往忽略了区域内部的差异性。陕西省水资源配置与经济发展极不协调,水资源供需矛盾深化^[18],水污染问题突出^[19-21]。陕西省南部为湿润气候,中部的关中和陕北为半湿润或半干旱气候区,各地水情差异明显。因此,本文从水量、水质、灾害3方面出发建立水资源评价指标体系,利用模糊评

价法和综合指数法,对2007-2017年陕西省10个地级市的水资源脆弱性进行等级评价与空间区划,明确影响水资源脆弱性的主要障碍因素,以期为陕西省区域水资源规划管理以及生态治理等方面提供一定的理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

陕西省地处我国西北内陆,总面积约为 $20.56 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南、榆林、延安、汉中、安康、商洛10个地级市(见图1)。

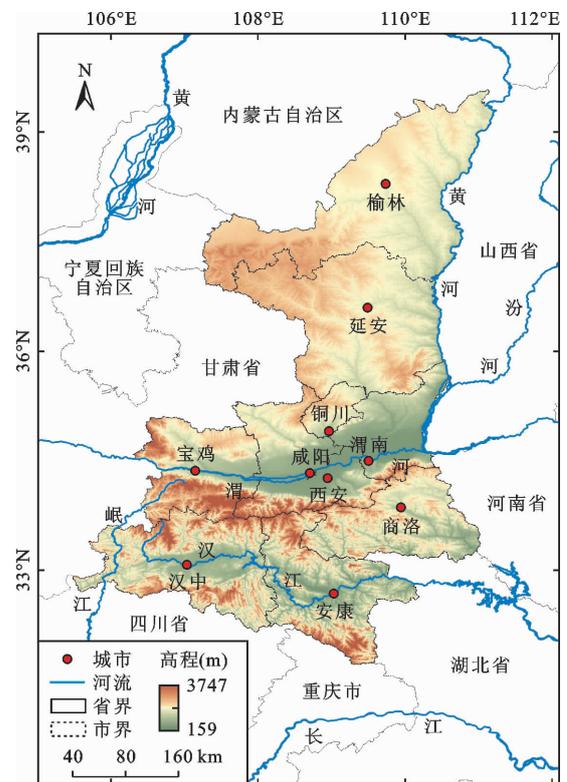


图1 陕西省区位及概况图

省内高原、平原、山地交错,地势南北高、中部低。境内的两大河流渭河和汉江均以降水补给为主,多年平均降水量为 656.2 mm ,折合降水总量为 $1.349.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。省内水资源分布不均,陕南地区降水充沛,水资源总量占全省70%以上,水资源禀赋极高;关中地区拥有全省60%以上的人口,水资源总量仅占全省的20%,人均水资源占有量仅为

639 m³,不足全国人均水资源占有量的1/3水平;陕北地区两座能源型城市的水资源总量之和约为32×10⁸ m³,不足全省总量的10%,同样面临着严峻的水资源短缺问题^[22],因此,进行陕西省水资源评价对水资源管理及调配具有重要意义。

2.2 数据来源

研究应用的水资源量数据、水资源开发利用数据、废污水排放处理数据、水质状况数据等来源于2007-2017年《陕西省水资源公报》《陕西省环境公报》。各市社会经济统计数据来源于2008-2018年《陕西省统计年鉴》。

2.3 研究方法

2.3.1 指标体系构建 本研究结合区域环境状况,

从全面性、系统性、可操作性等原则出发,构建了包含水量、水质和灾害3个准则层,自然、人为和承载力3个约束层,27个指标层的水资源脆弱性指标体系。各项指标及其含义见表1。水量脆弱性表示水资源系统应对耗水的适应性;水质脆弱性表示系统的净化能力被改变的敏感性;灾害脆弱性表示受灾体被旱涝灾害破坏的可能性。自然脆弱性表示系统中由自然要素形成的特质能够被外界干扰的难易性质;人为脆弱性表示系统易于被人为作用改变利用的程度;承载力脆弱性表示水资源系统抵抗外部负荷或人为干扰的适应性^[23]。正向指标的值越大,表示水资源系统越稳定;负向指标的值越大,表示越不利于水资源可持续发展。

表1 水资源脆弱性评价指标体系

目标层 A	准则层 B	约束层 C	指标层 D	单位	指标含义	性质	
水资源脆弱性 A	水量脆弱性 B ₁	自然脆弱性 C ₁	年降水量 D ₁	mm	年降水量之和	-	
			径流深度 D ₂	mm	流域面积的水层厚度	-	
			产水模数 D ₃	10 ⁴ m ³ /km ²	单位面积的水资源量	-	
		人为脆弱性 C ₂	绿地拥有水平 D ₄	森林与植被绿化的人均拥有量	km ²		-
				地表水资源开发利用程度 D ₅	%	地表水资源的开发利用程度	+
				地下水资源开发利用程度 D ₆	%	地下水资源的开发利用程度	+
			承载力脆弱性 C ₃	人均用水量 D ₇	m ³	人均日生活用水量	+
				单位面积灌溉用水量 D ₈	m ³ /hm ²	每公顷灌溉面积的用水量	+
				万元 GDP 用水量 D ₉	m ³	每万元 GDP 产值的用水量	-
	自然脆弱性 C ₄	河流水质状况 D ₁₀	COD 浓度 D ₁₁	mg/L	化学需氧量	+	
			生态环境用水率 D ₁₂	%	建设生态环境的用水占比	-	
			工业废水排放处理率 D ₁₃	%	工业废水处理量/排放总量	-	
		人为脆弱性 C ₅	污水投资水平 D ₁₄	套	地区工业废水治理设备数目	-	
			污水处理能力 D ₁₅	10 ⁴ t/d	企业的工业废水日均处理量	-	
			万元 GDP 废水排放量 D ₁₆	10 ⁴ t	每增长万元 GDP 排放废水量	+	
	承载力脆弱性 C ₆	人均生活污水排放量 D ₁₇	t/d	人均排放的生活污水量	+		
		亩均化肥施用量 D ₁₈	t/hm ²	单位耕地所用的农肥施用总量	+		
		自然脆弱性 C ₇	径流深度变化率 D ₁₉	%	年径流深度/近 50 a 平均深度	+	
			年降水量变化率 D ₂₀	%	年降水量/近 50 a 平均量	+	
			产水系数 D ₂₁	10 ⁴ m ³ /mm	水资源量占降水量的比值	-	
		灾害脆弱性 B ₃	人为脆弱性 C ₈	水利工程调蓄能力 D ₂₂	10 ⁴ t	应对干旱缺水的抗灾能力	-
	提防保护率 D ₂₃			%	河堤对洪涝灾害的保护能力	-	
	城市内涝防治能力 D ₂₄			km/人	应对内涝灾害的能力	-	
	承载力脆弱性 C ₉	旱涝面积受灾比 D ₂₅	%	旱涝受灾面积/土地面积	+		
		百万方水承载人口数 D ₂₆	人	单位水资源所承载的人口数量	+		
		土地垦植指数 D ₂₇	%	农作物种植面积占比	+		

2.3.2 指标原始数据标准化 评价指标不仅具有不同的量纲和单位,也有正逆之分,为消除原始数据值的影响,便于计算,将原始数据进行标准化处理:

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = [x_{ij} - \min(x_i)] / [\max(x_i) - \min(x_i)] \quad (1)$$

$$\text{逆向指标: } x'_{ij} = [\max(x_i) - x_{ij}] / [\max(x_i) - \min(x_i)] \quad (2)$$

式中: x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$) 为第 i 项指标的第 j 个数值; x'_{ij} 为 x_{ij} 标准化后的值; $\max(x_i)$ 为第 i 项指标的最大值; $\min(x_i)$ 为第 i 项指标的最小值; n 为指标项数; m 为第 i 项指标的样本量。

2.3.3 模糊综合评价法 模糊评价法^[24]是专门用于解决综合评估问题的数学方法,将各项指标定量地划分为若干等级,根据等级的隶属度进行单因素评价,再利用分层评价的原理进行各系统评价,最终求得各研究区水资源脆弱性总评分。涉及到以下过程:

(1) 建立评价因子和评价等级。将陕西省水资源脆弱性的评价指标分为若干个因子集,如 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 表示某评价对象的 n 项指标。

参考《地表水环境质量标准》^[25], 确定水资源脆弱性评价集 $T = \{I, II, III, IV, V\}$ 。其中, I 级为微度脆弱, 表示区域水资源系统稳定; II 级为轻度脆弱, 表示水资源系统能够为区域经济社会发展提供保障; III 级为中度脆弱, 表示区域水资源开发利用程度基本达到系统调节的临界水平; IV 级为重度脆弱, 表示区域水资源开发利用程度已超出系统调节能力; V 级为极度脆弱, 表示水资源系统面临崩坏。

(2) 评价指标权重确定。采用层次分析法(AHP)与熵值法进行组合定权, 以提高评价结果的真实性和准确性。层次分析法^[26-27]能够利用较少的信息进行权重量化, 相比其他权重方法更加灵活。而熵值法^[28]常被用于评价多因素的复杂系统, 能够在很大程度上减少人为的主观影响, 从而增加可信度^[29]。组合定权的计算公式如下:

$$w_i = \lambda \alpha_i + (1 - \lambda) \beta_i \quad (3)$$

式中: α_i 、 β_i 分别为第 i 项指标采用层次分析法和熵值法所赋的权重; w_i 为组合后的权重; λ 为组合定权系数, 令 $\lambda = 0.5$ 。

(3) 评价标准划分。结合研究区实际情况, 依据已有标准及专家意见等划分原则, 并参考前人研究方法^[30-34], 按指标的不同发展程度, 将其分为 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级。

(4) 构造模糊综合评价矩阵。设指标 u_i 的模糊评价为 $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$, 则指标 u_i ($i = 1, 2, \dots,$

n) 的模糊综合评价矩阵为:

$$R = (r_{it}) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1t} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nt} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: r_{it} 为指标 u_i 对评价等级 T_t 的隶属度, 表示第 i 项指标因子被评价为 t 类等级的可能性。这里采用频数法确定 r_{it} 。

(5) 模糊综合评判。根据模糊综合评价原理, 对权重向量 A 与评价矩阵 R 进行模糊合成运算, 得到研究对象的模糊综合评判结果:

$$B = A \cdot R = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1t} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nt} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_t) \quad (5)$$

式中: B 为模糊评价的结果; 向量集 $A = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 为组合权重 w_i 的集合。

按照最大隶属度法则, 认为 $b_g = \max(b_1, b_2, \dots, b_t)$, 则评价对象的脆弱等级为最大隶属度所对应的 g 类。

2.3.4 综合指数 模糊综合评价法得到的评价结果往往为脆弱等级, 而非点值, 存在两地评价等级近似却难以进一步区分的问题^[35]。因此引入综合指数法, 研究水资源脆弱性的空间分布差异, 以求完善水资源脆弱性的评价结果。模糊综合评价中的综合指数是利用隶属度归一化即权重度与评分值进行加权得出的。

对水资源脆弱性评价集 $V = \{I, II, III, IV, V\}$ 中的 5 项评价等级分别赋值 1、2、3、4、5 分, 则研究对象的综合指数为:

$$C = 1b_1 + 2b_2 + 3b_3 + 4b_4 + 5b_5 \quad (6)$$

2.3.5 障碍度模型 在水资源脆弱性的评价中, 不仅要对区域水环境现状进行测评, 更需进一步分析解决区域水资源敏感脆弱问题的阻碍因素。障碍度模型是用于计算单个指标或子系统对整体系统发展目标影响程度的数学方法, 本文引入障碍度模型, 对陕西省水资源脆弱性展开延伸性研究, 探求影响陕西省水资源脆弱性的主要障碍因素。

$$W_i = w_i \cdot z_i \quad (7)$$

$$P_{ij} = 1 - x'_{ij} \quad (8)$$

$$M_i = \sum_{j=1}^m M_{ij} = \frac{P_{ij} \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m P_{ij} \cdot W_i)} \times 100\% \quad (9)$$

式中: W_i 为因子贡献度, 即单个因素对总目标的贡献程度; z_i 为指标所在各子系统所占权重; P_{ij} 为第 i 项指标第 j 个样本的偏离度, 指因子与系统发展目标间的差距; M_{ij} 为第 i 项指标第 j 个样本的障碍度; M_i 为第 i 项指标的障碍度。

3 结果与分析

3.1 评价指标权重分析

运用 AHP 与熵值法组合计算出 27 个评价指标

的权重, 如表 2 所示。由表 2 可以看出, 年降水量变化率(D_{20}) 的权重最大, 说明降水量的波动情况对脆弱指数的影响较大, 并对灾害脆弱性产生重要的影响; 生态环境用水率(D_{12}) 权重最小, 说明该指标对水资源的脆弱性影响较小。

3.2 水资源脆弱性时间变化

根据上述综合模糊评价法, 得到 2007 - 2017 年陕西省 10 个地级市的水量、水质及灾害的水资源脆弱性评价结果及变化趋势, 如表 3 所示。

表 2 各评价指标权重计算结果

指标	熵值法	AHP	总权重	指标	熵值法	AHP	总权重	指标	熵值法	AHP	总权重
D_1	0.020	0.053	0.037	D_{10}	0.047	0.026	0.036	D_{19}	0.038	0.056	0.047
D_2	0.017	0.029	0.023	D_{11}	0.047	0.010	0.028	D_{20}	0.039	0.095	0.067
D_3	0.017	0.097	0.057	D_{12}	0.016	0.006	0.011	D_{21}	0.020	0.016	0.018
D_4	0.025	0.007	0.016	D_{13}	0.026	0.047	0.036	D_{22}	0.013	0.053	0.033
D_5	0.077	0.030	0.054	D_{14}	0.018	0.109	0.064	D_{23}	0.022	0.009	0.016
D_6	0.081	0.018	0.049	D_{15}	0.025	0.030	0.027	D_{24}	0.014	0.022	0.018
D_7	0.040	0.011	0.026	D_{16}	0.039	0.073	0.055	D_{25}	0.059	0.047	0.053
D_8	0.052	0.031	0.041	D_{17}	0.048	0.024	0.036	D_{26}	0.067	0.028	0.047
D_9	0.055	0.058	0.056	D_{18}	0.022	0.010	0.016	D_{27}	0.057	0.008	0.033

表 3 陕西省及其各地级市水量、水质、灾害水资源脆弱性评价结果及变化趋势

地区	水量		水质		灾害	
	脆弱等级	趋势系数	脆弱等级	趋势系数	脆弱等级	趋势系数
西安	II	0.20	V	-0.32	III	-0.06
宝鸡	II	0	II	0.11	II	-0.05
咸阳	V	0	II	-0.19	IV	0
铜川	II	0.10	V	0.13	III	-0.05
渭南	V	0.12	II	0.05	IV	-0.12
榆林	II	-0.05	I	-0.17	II	-0.01
延安	II	0	III	0.13	I	-0.06
汉中	I	0.08	II	-0.10	I	0.02
安康	I	0.02	I	-0.08	I	-0.03
商洛	I	-0.17	III	-0.27	I	-0.08
陕西省	II	0.30	I	-0.72	I	-0.45

由表 3 可以看出, 各地级市水资源脆弱性差异显著。咸阳、渭南市的水量脆弱性等级最高, 为 V 级, 属于极度脆弱状态。安康、汉中、商洛市的水量脆弱性最低, 为 I 级, 属于微度脆弱状态; 西安、宝

鸡、铜川、榆林、延安市的水量脆弱性为 II 级, 与陕西省平均水平一致, 属于轻度脆弱状态。其中, 西安、铜川、渭南、汉中、安康市的水量趋势系数为正, 表明在研究时段内这些地区水量脆弱性等级呈递增趋势, 区域面临日益严峻的用水问题。西安市水量脆弱性等级增高趋势最为显著, 说明西安市水量紧缺问题最为严重。榆林、商洛市的水量趋势系数为负, 表明水量脆弱性等级降低, 区域水资源系统的水量脆弱性好转, 其中商洛市的水量脆弱性等级降低幅度最大; 宝鸡、咸阳、延安市的水量趋势系数为 0, 表明其水量脆弱性等级稳定, 分别保持 II 级、V 级、II 级不变。

从水质脆弱性来看, 西安、铜川市水质脆弱性达到 V 级, 属于极度脆弱状态。榆林、安康市的水质脆弱性为 I 级, 属于微度脆弱状态; 宝鸡、咸阳、渭南、汉中市为 II 级, 属于轻度脆弱等级; 延安、商洛市达到 III 级, 属于中度脆弱状态。2007 - 2017 年间宝鸡、铜川、渭南、延安市的水质趋势系数为正, 水质脆弱性等级呈增高趋势, 说明区域水环境水质状况恶化; 西安、咸阳、榆林、汉中、安康、商洛市的水质脆弱性等级呈降低趋势, 各地水环境的水质状况好转。

陕西省灾害脆弱性最高的是咸阳和渭南市, 为

IV级,属于重度脆弱状态;延安、汉中、安康、商洛市的灾害脆弱性为 I 级,属于微度脆弱状态,与陕西省平均水平一致。宝鸡、榆林市属于轻度脆弱状态,西安、铜川市为中度脆弱状态。样本年间,陕西省 10 市中除汉中市灾害脆弱等级增高、咸阳市灾害脆弱等级不变外,其余 8 市的灾害脆弱等级均有降低趋势,其中渭南市的承灾能力提升最为显著。总体来看,2007-2017 年陕西省承灾能力得到提升。

2007-2017 年陕西省 10 市水资源综合脆弱性评价结果及变化趋势如表 4 所示。由表 4 可见,咸阳、渭南市的综合脆弱性属于极度脆弱状态,表明区域水环境问题频发,水资源系统压力极大。西安、宝鸡、铜川、榆林市水资源综合评价等级为 II 级,属于轻度脆弱状态;延安、汉中、安康、商洛市为微度脆弱状态。宝鸡、榆林市的脆弱性趋势系数为 0,说明样本年间该两地区水资源系统稳定;西安、铜川、延安、汉中市的水资源综合脆弱性加剧,其中汉中市的发展趋势系数最大,表明样本年间该区域水资源脆弱等级呈升高趋势,水环境问题愈加严重;咸阳、渭南、安康、商洛市的水资源综合脆弱性呈降低趋势,说明咸阳、渭南市水资源系统的高脆弱状态已得到改善。

表 4 陕西省及其各地级市水资源综合脆弱性评价结果及变化趋势

地区	脆弱等级	趋势系数
西安	II	0.06
咸阳	V	-0.11
宝鸡	II	0
铜川	II	0.04
渭南	V	-0.12
榆林	II	0
延安	I	0.01
汉中	I	0.08
安康	I	-0.04
商洛	I	-0.04
陕西省	I	-0.11

3.3 水资源脆弱性空间变化

2007-2017 年陕西省 10 个地级市水量脆弱性指数、水质脆弱性指数、灾害脆弱性指数的空间分布见图 2~5。图 2 为水量、水质、灾害的综合脆弱性指数;图 3~5 分别表示水量、水质、灾害在自然、人为、承载力 3 个约束层的脆弱性指数。

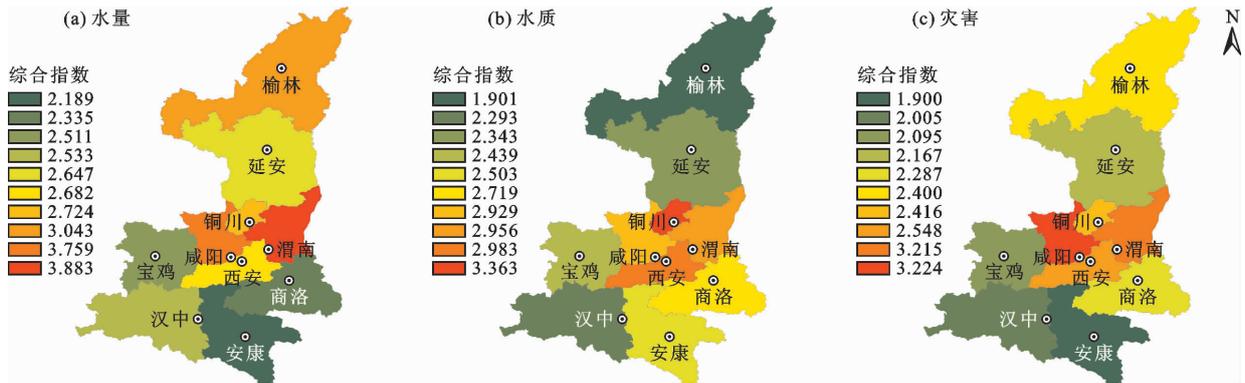


图 2 2007-2017 年陕西省水量、水质及灾害脆弱性综合指数空间分布

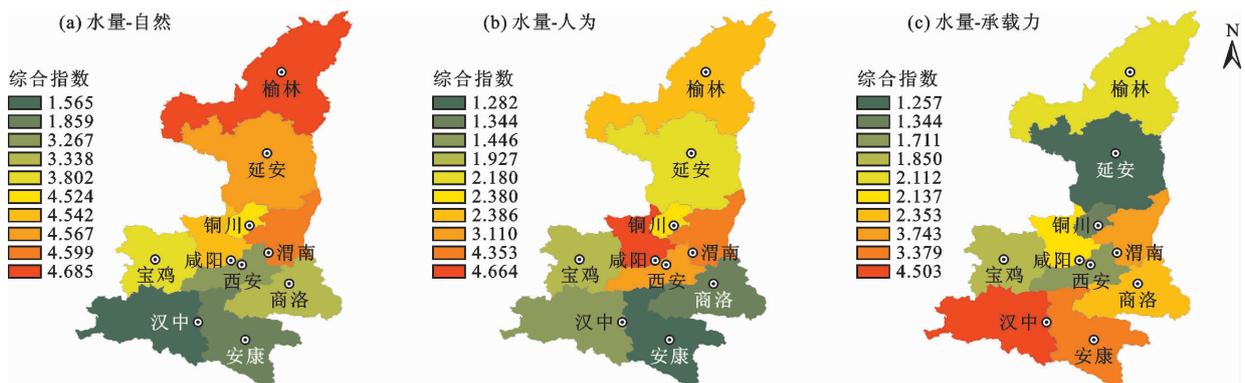


图 3 2007-2017 年陕西省水量在自然、人为及承载力层的脆弱性综合指数空间分布

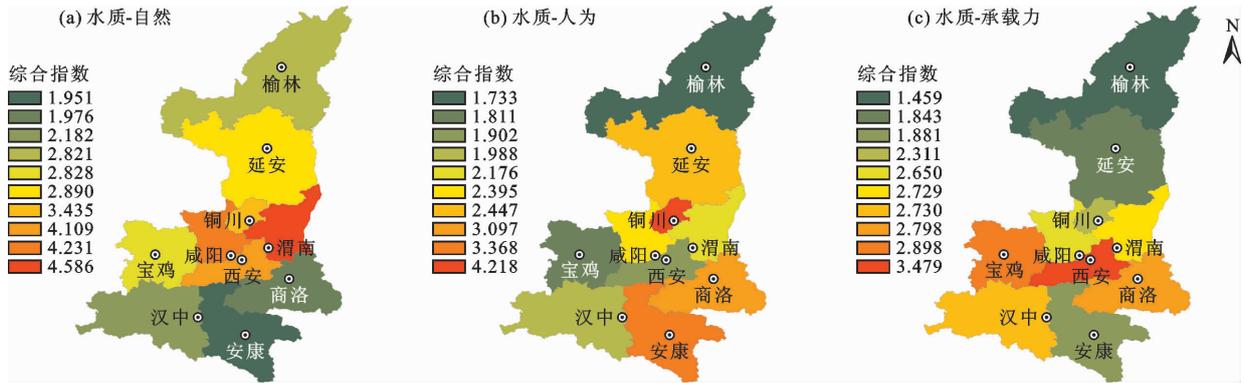


图4 2007-2017年陕西省水质在自然、人为及承载力层的脆弱性综合指数空间分布

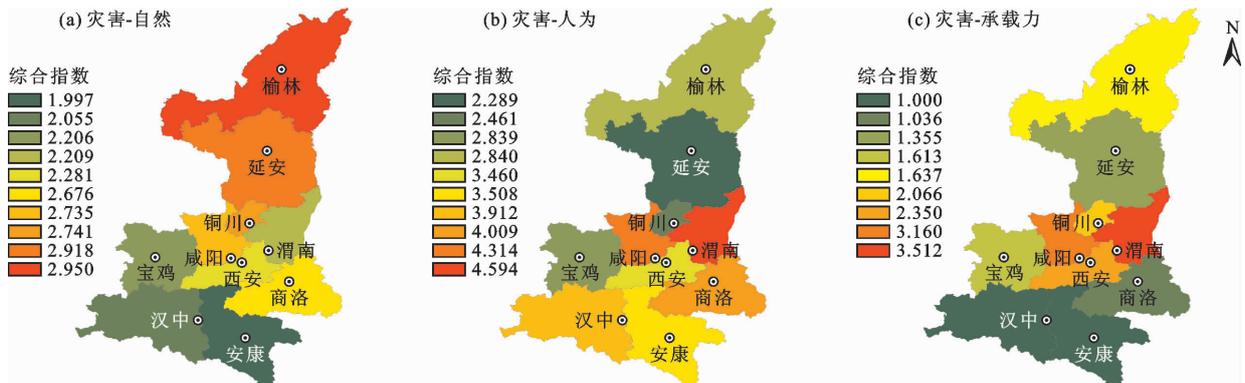


图5 2007-2017年陕西省灾害在自然、人为及承载力层的脆弱性综合指数空间分布

由图2(a)和图3可见,陕西省水量脆弱性指数大致呈“中部高,南北低”的空间分布格局。关中地区的水量脆弱性多受人为及自然因素影响,该地区集中了全省60%以上的人口,是陕西省的经济文化中心,但水资源总量仅占全省的1/5。严峻的人均用水问题或是导致关中地区水资源脆弱性较高的原因。陕南3市汉中、安康、商洛市水量在自然层、人为层的脆弱性较低,主要是因为陕南地区降水充沛,且区域内河网密布,水系发达,水资源储备富足。

如图2(b)和图4所示,铜川市的水质脆弱性指数最高,西安市次之,榆林市最低。关中地区的水质脆弱性受自然层影响较大,这是因为关中地区人口集中,经济相对发达,水资源利用率较高,地表水资源条件相对不足,地下水的开发利用成为关中地区生产、生活用水的重要途径。分析表明关中地区地下水供水量连续多年占全省总量的50%以上,咸阳、渭南市2017年的地表水开发利用率相较于2007年分别增长了95%、86%,而且河流水质状况常年较差,化肥使用量大幅增长,这些因素成为影响关中地区水环境高脆弱性的主要原因。陕北地区的榆林市水质在人为层、承载力层均表现出较低脆弱性,从指标数据分析可知,榆林、延安市工业废水处理率分别为20%、16%,居于全省首位;万元工

业GDP废水排放量约为 74×10^4 t,仅占全省的8.5%,而工业生产总产值约占全省的28%,政府对当地废水的有效监管以及水环境综合治理极大程度上保护了该地区的水质系统。

由图2(c)和图5可见,关中地区灾害脆弱性指数相对较高,主要受人为和承载力层的影响。据陕西省政府对关中水系规划建设的调研报告显示^[36],关中地区具有调蓄能力的蓄水工程可供水量仅占关中总供水量的18.3%,调蓄能力不足,缺乏蓄洪和防洪的控制性调蓄设施,或是致使关中地区灾害脆弱性较高的原因。陕南3市的灾害脆弱性相对较弱,从指标层分析可知,陕南地区产水系数、径流深度变化率以及水利工程需调能力居于全省首位,意味着该地区有充沛的降水量与径流量,且水利工程具备蓄调水量的作用。

2007-2017年陕西省水资源脆弱性综合指数空间分布如图6所示。由图6可见,陕西省水资源脆弱性基本呈“南北低、中部高”的分布形态。即陕南、陕北地区水资源脆弱性综合指数低,关中地区水资源系统的压力较大,以渭南、咸阳市尤甚,综合指数分别达到了3.369、3.325;陕南地区水资源脆弱性综合指数普遍较低,其中安康市最低,为2.191。各城市水资源平均脆弱性综合指数由低至高排序依

次为:安康 < 汉中 < 宝鸡 < 延安 < 榆林 < 商洛 < 西安 < 铜川 < 咸阳 < 渭南。

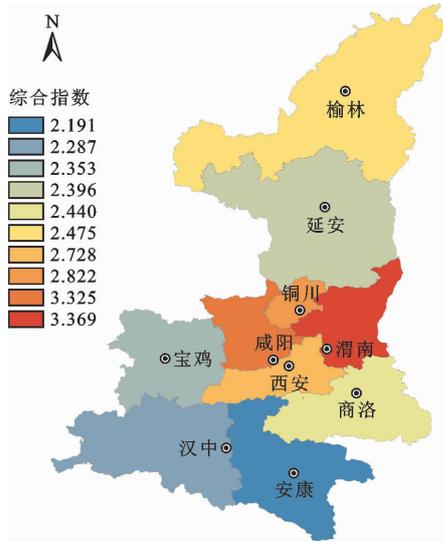


图 6 2007 - 2017 年陕西省水资源脆弱性综合指数空间分布

4 影响水资源脆弱性的障碍因子分析

为确定对水资源脆弱性产生负面影响的障碍因子,采用障碍度模型,计算各指标的障碍度,结果见图 7。由图 7 可以看出,水资源脆弱性主要障碍因子排在前 5 位的为年降水量变化率 (D_{20})、万元 GDP 用水量 (D_9)、旱涝面积受灾比 (D_{25})、万元 GDP 废水排放量 (D_{16})、地下水资源开发利用效率 (D_6)。因各市水资源脆弱性在空间分布上表现出较强的一致性,且根据区域地理环境、气候及社会经济等特征,将陕西省划分为陕北、关中和陕南 3 个区域进行障碍因子分析,如图 8 所示。图 8 表明,关中地区与陕南地区水资源脆弱性的最大障碍因子均为万元 GDP 用水量 (D_9),其障碍度分别为 8.3%、8.7%;陕北地区的最大障碍因子为年降水量变化率 (D_{20}),其障碍度为 8.8%。

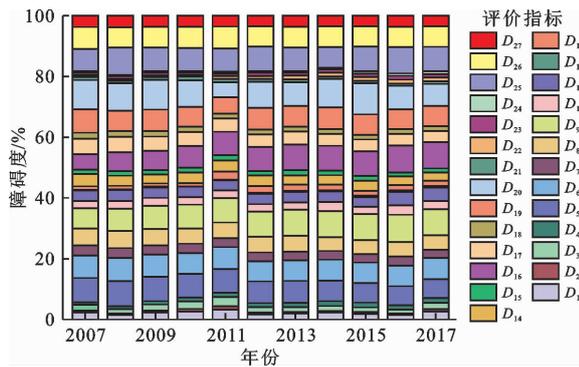


图 7 2007 - 2017 年陕西省水资源脆弱性各评价因子障碍度

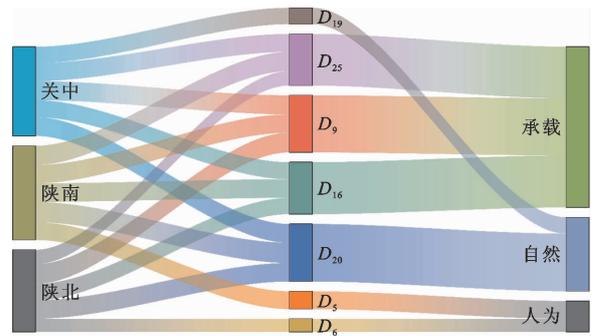


图 8 2007 - 2017 年陕北、关中、陕南地区水资源脆弱性主要障碍因子分析

关中地区水资源脆弱性的主要障碍因子有万元 GDP 用水量 (D_9)、年降水量变化率 (D_{20})、旱涝面积受灾比 (D_{25})、万元 GDP 废水排放量 (D_{16})、径流深度变化率 (D_{19})。2017 年关中各市万元 GDP 平均用水量约为 51×10^4 t, 超出全省平均水平 3×10^4 t。但关中作为全省用水压力最大的地区,人均水资源量只有 380 m^3 , 仅相当于全国平均水平的 $1/8$, 远低于绝对缺水线, 高量的生产用水情况无疑使区域水环境负担了更大的压力。目前, 关中地区饮用水水源仍以无重大污染的地表水为主, 如汉江、丹江及各大水库等。而降水作为地表水的主要补给, 在时空分布上十分不均衡, 65% 集中在汛期, 不仅有碍于水资源的有效利用, 同时也会对河流下游地区造成一定的洪涝隐患, 无益于关中地区水资源系统的保护与修复。

陕北地区水资源脆弱性的主要障碍因子为万元 GDP 用水量 (D_9)、年降水量变化率 (D_{20})、万元 GDP 废水排放量 (D_{16})、旱涝面积受灾比 (D_{25})、地下水资源开发利用效率 (D_6)。由数据分析可知, 2007 - 2017 年间陕西省万元 GDP 用水量减少了 74.3% , 而陕北地区减少了 67% , 远低于其他地区。年降水量变化率反映一个地区降水的稳定性, 年降水量变化率越大, 表明该地区降水愈不稳定, 洪涝灾害频率较高。2007 - 2017 年榆林和延安市的年降水量变化率不仅远高于陕南及关中地区, 而且其间增长了 71% , 说明区域降水不均的情况更加严重。陕西省万元 GDP 废水排放量在 2007 - 2017 年间降低了 86% , 地下水资源开发利用效率降低了 7% , 而陕北地区万元 GDP 废水排放量同时期增长了 1% , 地下水资源开发利用效率增长了 11% , 造成了陕北地区的水量脆弱性。

陕南地区水资源脆弱性的主要障碍因子为年降水量变化率 (D_{20})、旱涝面积受灾比 (D_{25})、万元 GDP 废水排放量 (D_{16})、万元 GDP 用水量 (D_9)、地表水资源

开发利用率(D_5)。陕南地区自然条件优越,水资源总量占全省70%以上。2007年陕南地区年降水量变化率仅为9%,2017年达到64%,一般来说一个地区降水丰富且变化率越小,则表明该地区水资源利用价值越高。而陕南地区的年降水量变化率从2017年至2017年增长了55%,反映了该地区降水情况越来越不稳定以及洪涝灾害越加频繁。且从统计数据可知,2007年陕西省旱涝面积受灾比约为13%,陕南地区仅为5.7%;2017年陕西省旱涝面积受灾比大幅减小,约为3.8%,而陕南地区旱涝面积受灾比却高出陕西省平均水平的1倍。2017年陕南3市GDP占全省的14%,而万元GDP用水量高出全省平均水平63%,说明该地区在生产用水节水方面仍存在较大的改进空间。

5 讨论

本文基于水资源脆弱性评价体系,对陕西省水资源脆弱性进行评估,从自然因素角度来看,陕西省水资源脆弱性受降水影响在空间上表现出区域分异性,水量脆弱性及灾害脆弱性的空间变化规律与刘引鸽等^[37]研究的陕西省水资源生态风险特征类似。

从人为因素角度来看,人口集中、水资源开发利用强度高的地区,其水资源脆弱性越高,如陕西省关中地区,水量脆弱性与灾害脆弱性明显高于陕南和陕北地区。这与刘珍等^[38]提出的人类活动下的陕西省水资源脆弱性空间格局一致。

从承载因素角度来看,陕西省水资源承载脆弱性的空间分布结果与水资源“北少南多”的分布特性相反,陕南地区的承载脆弱性最低。其原因一方面是本文水资源评价指标体系的建立仅考虑影响脆弱性的直接原因,如万元GDP用水量、万元GDP废水排放量、旱涝面积受灾比等,将降水量、径流等自然条件归为自然因素;另一方面与夏玮静等^[39]的研究结果类似,陕南地区虽水资源丰富,但存在水资源利用效率低下、节水意识不强等问题。

此外,本文从自然、人为、承载力3个角度对陕西省水资源脆弱性展开研究,没有充分考虑自然条件对承载因素不同程度的制约,且由于缺少陕西省部分城市的指标数据,研究时段也仅有11a,研究结果可能有一定的误差,今后应采用更多指标和长序列数据,全面系统地研究水资源脆弱性。

6 结论

基于水资源系统结构和功能,从水量、水质、灾害3方面建立陕西省水资源脆弱性指标评价体系。

通过模糊综合评价法计算各地级市水资源脆弱性评价等级,运用障碍度模型分析对水资源脆弱性产生负面影响的障碍因子,得到以下结论:

(1)2007-2017年陕西省水资源综合脆弱性空间上表现出陕北、陕南地区脆弱性低,关中地区脆弱性高的分布特征。各地级市脆弱性综合指数由低至高排序依次为:安康<汉中<宝鸡<延安<榆林<商洛<西安<铜川<咸阳<渭南。时序上水资源脆弱性增强和降低并存,咸阳、渭南市的水资源脆弱性等级呈下降趋势,西安、铜川、延安、汉中、安康、商洛市的水资源脆弱性等级呈增高趋势,宝鸡、榆林两市的水资源脆弱性等级不变。渭南与咸阳两市处于极度脆弱状态;西安、宝鸡、铜川、榆林市属于轻度脆弱状态;延安、汉中、安康、商洛市属于微度脆弱状态。

(2)陕西省水量、水质、灾害脆弱性差异显著。其中咸阳、渭南市水量脆弱性属于极度脆弱状态;陕南3市属微度脆弱状态;西安、宝鸡、铜川、榆林、延安市属轻度脆弱状态。西安、铜川市的水质脆弱性最高,属极度脆弱状态;榆林、安康市属微度脆弱状态;宝鸡、咸阳、渭南、汉中市属轻度脆弱状态;延安、商洛市属中度脆弱状态。咸阳、渭南市的水资源脆弱性最高,属重度脆弱状态;西安、铜川市属中度脆弱状态;宝鸡、榆林市属轻度脆弱状态;延安、汉中、安康、商洛市为微度脆弱状态。

(3)影响水资源脆弱性的因素主要为年降水量变化率、万元GDP用水量、旱涝面积受灾比、万元GDP废水排放量、地下水资源开发利用等。其中万元GDP用水量对关中、陕南地区的水资源脆弱性影响最大,主要是对水量脆弱性造成影响。陕北地区水资源脆弱性的首要障碍因子为年降水量变化率,其显著影响陕北地区的水量脆弱性。

参考文献:

- [1] 李雨欣,薛东前,宋永永. 中国水资源承载力时空变化与趋势预警[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1574-1584.
- [2] LIU Ying, WEN Yanjun, ZHAO Yaqian, et al. Analysis of drought and flood variations on a 200-year scale based on historical environmental information in western China[J]. Environmental Research and Public Health, 2022, 19(5): 2771.
- [3] CHEN Yan, FENG Yazhong, ZHANG Fan, et al. Assessing and predicting the water resources vulnerability under various climate-change scenarios: A case study of Huang-Huai-Hai River Basin, China[J]. Entropy, 2020, 22(3): 333.
- [4] ALBINET M, MARGAT J. Cartographie de la vulnérabilité

- à la pollution d'es nappes deau souterraine [J]. Bull. BRGM Paris, 1970, 3(4): 13–22.
- [5] 杨飞,马超,方华军.脆弱性研究进展:从理论研究到综合实践[J].生态学报,2019,39(2):441–453.
- [6] 唐国平,李秀彬,刘燕华.全球气候变化下水资源脆弱性及其评估方法[J].地球科学进展,2000,15(3):313–317.
- [7] 蒋万军,刘宏伟,马震,等.张家口地区水资源与环境问题研究现状[J].地球与环境,2021,49(1):92–105.
- [8] 陈岩,冯亚中.基于RS-SVR模型的流域水资源脆弱性评价与预测研究——以黄河流域为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):137–149.
- [9] 金菊良,苏维,周戎星,等.基于基尼系数和联系数的区域水资源空间均衡评价模型[J].人民黄河,2021,43(9):73–78.
- [10] 杨法暄,郑乐,钱会,等.基于DPSIR模型的城市水资源脆弱性评价——以西安市为例[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):77–84.
- [11] 郭泽呈,魏伟,庞素菲,等.基于SPCA和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析——以石羊河流域为例[J].生态学报,2019,39(7):2558–2572.
- [12] 左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重TOPSIS模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J].水资源保护,2020,36(2):1–7.
- [13] CHEN Yingyi, SONG Lihua, LIU Yeqi, et al. A review of the artificial neural network models for water quality prediction[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 5776.
- [14] 唐学芳,吴勇,陈晶,等.基于DRASTIC-GIS模型的成都典型区域地下水脆弱性评价[J].环境监测管理与技术,2020,32(6):28–32.
- [15] 吕文凯,周金星,万龙,等.滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价[J].地球学报,2021,42(3):341–351.
- [16] 陈岩,冯亚中.基于RS-SVR模型的流域水资源脆弱性评价与预测研究——以黄河流域为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):137–149.
- [17] 穆瑾,赵翠薇.变化环境下2000–2015年贵阳市水资源脆弱性评价[J].长江科学院院报,2019,36(9):12–17+28.
- [18] 刘引鸽,郑润禾,龙颜,等.渭河中游气候变化及其对水文要素的影响[J].水土保持研究,2021,28(2):108–117.
- [19] 刘引鸽,龙颜,郑润禾,等.渭河流域上游气候变化及其对径流的影响[J].水资源与水工程学报,2020,31(6):1–8.
- [20] 刘引鸽,黄雪,慕建利,等.基于CMIP5模式数据渭河流域近200年来径流变化[J].地球环境学报,2022,13(2):196–207.
- [21] LIU Yinge, XU Yuxia, ZHAO Yaqian, et al. Using SWAT model to assess the impacts of land use and climate changes on flood in the upper Weihe River, China [J]. Water, 2022, 14(13): 2098.
- [22] LIU Yinge, YU Keke, ZHAO Yaqian, et al. Impacts of climatic variation and human activity on basin runoff in western China[J]. Sustainability, 2022, 14(2): 942.
- [23] 邹君,杨玉蓉,谢小立.地表水资源脆弱性:概念、内涵及定量评价[J].水土保持通报,2007,27(2):132–135+145.
- [24] 安强,魏传江,贺华翔,等.基于模糊综合评价法的河南省中原城市群水资源承载力评价研究[J].节水灌溉,2019(12):65–71.
- [25] 国家环保总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [26] 苏贤保,李勋贵,刘巨峰,等.基于综合权重法的西北典型区域水资源脆弱性评价研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(3):112–118.
- [27] 王富强,马尚钰,赵衡,等.基于AHP和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):67–74.
- [28] 程启月.评测指标权重确定的结构熵权法[J].系统工程理论与实践,2010,30(7):1225–1228.
- [29] 职璐爽,薛惠锋.基于熵权法的城市水资源脆弱性研究——以广东省为例[J].水土保持通报,2018,38(5):322–329.
- [30] 马艳.基于AHP的西安市水资源可持续开发利用模糊综合评价[D].西安:长安大学,2008.
- [31] 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.
- [32] 刘晓敏,刘志辉,孙天合.基于熵权法的河北省水资源脆弱性评价[J].水电能源科学,2019,37(4):33–35+39.
- [33] 原彩萍,刘原一,职璐爽.基于模糊集对法的山西省水资源脆弱性评价[J].水资源保护,2021,37(5):112–116+130.
- [34] 黄垒,张礼中,朱吉祥,等.基于综合指数法的保定市地表水资源脆弱性评价[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):68–73.
- [35] 宁阳明,尹发能.水污染指数法和模糊综合评价法在水质评价中的应用[J].河南师范大学学报(自然科学版),2020,48(6):57–63.
- [36] 李绍文,靳李平,张健,等.关中地区水利发展几点思考及建议[J].陕西水利,2018(2):197–200.
- [37] 刘引鸽,傅志军.陕西省水资源生态风险评价及驱动因素分析[J].水土保持通报,2012,32(6):273–278.
- [38] 刘珍,文彦君,韩梅,等.人类活动影响下的陕西省水资源脆弱性评价[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):82–86.
- [39] 夏玮静,王宁练,沈月.基于流域的陕西省水资源承载力研究[J].干旱区地理,2020,43(3):602–611.