

陕西省水资源脆弱性评价

任源鑫¹, 林青¹, 韩婷¹, 李改萍^{1,3}, 周旗^{1,2}

(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; 3.陕西省宝鸡市金台区金河镇人民政府, 陕西 宝鸡 721013)

摘 要:为了探究陕西省水资源脆弱性的现状趋势,利用 2008—2017 年陕西省各地市水质和水量的统计数据,基于抵抗力、适应力和恢复力 3 个层次构建了包含 16 个指标的水资源脆弱性综合评价指标体系,运用均方差法与变异系数法相结合的综合赋权法、K-means 算法,对陕西省水资源脆弱性进行评价,分析了陕西省水资源脆弱性空间分布及未来趋势,讨论了影响脆弱性的综合原因。结果表明:2008—2017 年陕西省水资源脆弱性呈波动下降趋势,整体呈中等脆弱性;关中与陕北水资源脆弱性在时间变化趋势上具有一致性;水资源脆弱性空间差异明显,关中的脆弱性等级高于陕北、陕南。西安市为极脆弱等级,安康市为不脆弱等级;人为政策的干预及极端天气事件的发生对水资源脆弱性的影响较为显著。

关键词:水资源;脆弱性评价;综合赋权法;K-means 算法;陕西省

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0227-06

Evaluation on the Vulnerability of Water Resources in Shaanxi Province

REN Yuanxin¹, LIN Qing¹, HAN Ting¹, LI Gaiping^{1,3}, ZHOU Qi^{1,2}

(1.College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences,

Baoji, Shaanxi 721013, China; 2.Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and

Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China;

3.People's Government of Jinhe Town, Jintai District, Baoji City, Shaanxi Province, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract:In order to explore the current situation of water resources vulnerability in Shaanxi Province, a comprehensive index system consisting of 16 indicators based on three aspects including resistance, adaptability and resilience was developed by using the statistical data of water quality and quantity of Shaanxi Province during the period from 2008 to 2017. A comprehensive weighting method combining the mean square error and the coefficient of variation method as well as K-means algorithm were utilized to classify the evaluation grades and evaluate the vulnerability of water resources in Shaanxi Province. The spatial distribution and future trends of water resources vulnerability were analyzed, and the reasons for affecting water resources vulnerability in Shaanxi Province were discussed. The results showed that the water resources fragility of Shaanxi Province presented the fluctuating downward trend from 2008 to 2017, and the overall situation was moderately fragile; similar variation trends of water resources fragility existed in Guanzhong and northern Shaanxi on a time scale, however, the spatial difference of water resources vulnerability was significant; the grade of water resources vulnerability of Guanzhong was higher than those of northern Shaanxi and southern Shaanxi, the most vulnerable areas appeared in Xi'an, while the areas with the least vulnerability appeared in Ankang City. Regional water vulnerability was significantly influenced by both human policy interventions and extreme weather events.

Keywords:water resources; vulnerability evaluation; comprehensive weighting method; K-means algorithm; Shaanxi Province

水安全问题已经成为当今世界所面临最严重的问题之一,气候变化及人类活动的影响造成水资源空间分布格局的改变,直接导致人类生活环境的变化,水资源脆弱性研究对于探求水资源安全、预测水资源脆弱性变化趋势具有重大的现实意义^[1]。水资源脆弱性的概念最早由法国学者 Albinet 等^[2]针对地下水的脆弱性提出。早期的研究中,国内外专家学者主要针对地下水的污染问题进行相关脆弱性探讨^[3-4]。21 世纪以来,随着水问题的突出,水资源脆弱性的定义逐渐扩展为地表水与地下水共同的脆弱性,且包含水质与水量两方面。Perveen 等^[5]指出水资源脆弱性的直接原因主要为水资源自身条件的限制所产生。近年来,国内针对于水资源脆弱性的评价已经发展成为评价地区水资源质量的重要途径。如刘瑜洁等^[6]针对京津冀地区的水资源状况进行了综合评价,并指出该地区目前所面临的水资源问题及未来发展趋势。苏贤保等^[7]针对西北典型区域的水资源脆弱性评价,得出气候暖湿化对水资源脆弱性的良性影响。陕西作为“一带一路”和“西部大开发”重点开发区域在我国具有重要的战略地位,而水资源严重短缺和水质污染已经成为陕西省所面临最严峻的问题,探究水资源脆弱性空间格局对于陕西省水资源优化与管理具有重要意义。2017 年,刘珍等^[8]首次针对人类活动影响下的陕西省水资源脆弱性做出了整体性评价。屈小娥^[9]从社会、经济等方面对陕西省水资源承载力进行了综合研究。但现有研究中对于水资源存在状态未能排除主观因素的影响,难以将水资源进行定性及定量的区分。本研究综合考虑人为因素与客观条件因素,以水质与水量两方面,建立以抵抗力、适应力、恢复力 3 个层次下的水资源脆弱性指标评价体系,以陕西省各地级行政单位为评价单元,通过均方差法与变异系数法组成的客观综合权重法对其进行综合评价,旨在探究陕西省水资源脆弱性空间格局及未来发展趋势,找到影响水资源脆弱性的综合原因,为陕西省水资源管理及评价提供相关参考依据。

1 研究区概况

陕西省位处我国西北部,东西窄,南北长,地貌多样性主要表现在北部为黄土高原、中部为关中平原,南部为秦岭山地。秦岭山脉是中国南北气候的分界线,秦岭以北为黄河流域,秦岭以南为长江流域,陕西境内南北主要河流分别为汉江、嘉陵江、丹江、旬河、牧马河、渭河、无定河、延河、洛河和泾河等。陕西省南北跨度大,造成了降水量时空分布不均,整体上呈南多北少,由北向南递增的特点,图 1 为陕西省主要水系分布图。

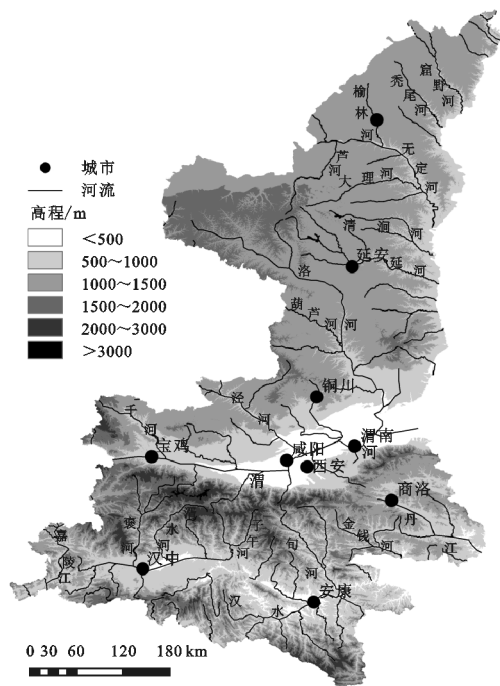


图 1 陕西省水系分布

2 水资源脆弱性指标体系构建及数据来源

区域水资源脆弱性的大小与该地区水系要素、自然条件、过境水量、人为活动等年际变化活动密切相关。根据科学性、系统性、主导性、可操作性、独立性、区域性 6 个基本原则^[10],结合陕西省地区特征,本文从水质与水量两方面考虑,构建由抵抗力、适应力、恢复力 3 部分 16 个指标的水资源评价体系。数据主要来源于《陕西省统计年鉴》、《陕西省水资源公报》及各研究区统计年鉴,个别统计未记载数据,采用插值法计算得成,评价体系中各指标的含义见表 1。

由于各指标性质不一,需将指标分为以下 3 类: (1) 正向指标:指标的值越大其脆弱性越高的指标。(2) 逆向指标:其值越大,脆弱性就越低。(3) 适度指标:指标值不宜过大,也不宜过小,而是在一定的阈值范围内为佳。在进行水资源脆弱性综合评价时,必须将指标进行同趋化处理,即将逆向指标和适度指标转化为正向指标,将这一过程称之为指标正向化。本文对 16 个指标进行了分类,其中 X_1 为适度指标; $X_2, X_3, X_4, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}$ 为负向指标; $X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}$ 为正向指标。

3 评价方法

3.1 指标权重的确定

指标权重的确定是水资源脆弱性评价体系建立的一个重要步骤,权重的确立既要遵循客观规律,又

要考虑各指标要素的实际科学内涵^[11]。为了避免主观因素的影响,本文基于陕西省 2008—2017 年统计数据,选择客观赋权法中变异系数法和均方差法相结合的组合赋权法来确定评价指标的权重。由于各指

标之间的量纲(度量单位)存在差异,需对各指标进行标准化处理。设 $X_i(i=1,2,3)$ 为层次级,其中 i 表示抵抗力、适应力、恢复力 3 个层次的顺序。 $X_j(j=1,2,\cdots,16)$,其中 j 表示各指标顺序。

表 1 水资源脆弱性各指标含义

脆弱性层次	水资源特性	评价指标	单位	指标含义	数据来源或计算方法
抵抗力	水量	多年平均降水量 X_1	mm	多年降水量的平均值	陕西省统计年鉴
		多年平均径流深度 X_2	mm	多年径流深度平均值	陕西省水资源公报
	水质	年产水模数 X_3	万 m^3/km^2	水资源总量/流域面积	陕西省水资源公报
		每 km^2 入河废水量 X_4	亿 t/km^2	水资源的承载能力	陕西省统计年鉴
适应力	水量	生态用水量 X_5	%	生态环境用水比例	生态用水量/总用水量
		人均生活用水量 X_6	L/人	人均每天用水量	陕西省水资源公报
		每 km^2 工业用水量 X_7	万 t/km^2	工业用水总量	陕西省水资源公报
		农田灌溉每 hm^2 用水量 X_8	m^3/hm^2	农作物公顷灌溉用水量	陕西省水资源公报
	水质	万元 GDP 用水量 X_9	$\text{m}^3/\text{万元}$	工业生产耗费水资源量	陕西省水资源公报
		单位农田面积化肥施用量 X_{10}	t/hm^2	单位农作物播种面积农药化肥施用量	化肥施用量/耕地面积
		工业污水排放强度 X_{11}	亿 t/km^2	单位土地面积废污水排放量	工业污水排放总量/土地面积
		生活污水排放强度 X_{12}	亿 t/km^2	单位生活污水排放总量	陕西省水资源公报
恢复力	水量	森林覆盖率 X_{13}	%	森林、植被覆盖情况	陕西省统计年鉴
		水利工程调蓄能力 X_{14}	m^3/km^2	区域单位面积水库容量	陕西省统计年鉴
	水质	污水处理率 X_{15}	%	污水处理情况	陕西省水资源公报
		工业污水重复利用率 X_{16}	%	工业污水重复利用程度	陕西省统计年鉴

3.1.1 极差变换法

计算各指标的权值 ω_{1j} ,计算公式如下:

正向指标极差化法^[12]公式:

$$y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (X_{ij} \text{ 为正向指标}) \tag{1}$$

负向指标极差正规化公式:

$$y_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (X_{ij} \text{ 为负向指标}) \tag{2}$$

适度指标标准化公式:

$$y_{ij} = 1/(1 + |X_{ij} - A|) \quad (X_{ij} \text{ 为适度指标}) \tag{3}$$

式中:A 为各适度指标多年均值,正向指标、逆向指标及适度指标经过指标正向标准化后,其最大值为 1,最小值为 0。

3.1.2 均方差法 均方差法^[13]是用于反映数据集合中随机变量离散程度的常用指标权重计算方法。具体计算步骤如下:

计算各指标的均值 $E(C_j)$,计算公式如下:

$$E(C_j) = \sum_{j=1}^{16} y_{ij} / 16 \tag{4}$$

计算各指标的均方差值 $R(C_i)$,计算公式如下:

$$R(C_j) = \sqrt{\sum_{j=1}^{16} [y_{ij} - E(C_j)]^2} \tag{5}$$

式中: y_{ij} 为各指标的极差正规化数值。

3.1.3 变异系数法 变异系数法客观反映指标间的相对重要程度,削弱极值指标对评价结果的影响^[11,14]。计算公式如下:

$$\omega_{2j} = \frac{v_j}{\sum_{j=1}^{16} v_j} = \frac{S_j / \overline{X_j}}{\sum_{j=1}^{16} S_j / \overline{X_j}} \tag{7}$$

式中: ω_{2j} 为评价因子权重; v_j 为评价因子变异系数; S_j 为评价因子标准差; $\overline{X_j}$ 为归一化后评价因子均值。

3.1.4 组合赋权 本文利用组合赋权法^[15]将变异系数法与均值法相结合,结合了两者优先,弥补相互间不足。使得指标权重与实际更贴合。其组合方法为线性加权法^[16],其公式为:

$$\omega = \lambda \omega_{1j} + (1 - \lambda) \omega_{2j} \tag{8}$$

式中: ω 为权重值; ω_{1j} 为变异系数法得到的权重值; ω_{2j} 为均方差法得到的权重值; $\lambda = 0.5$ 。表 2 为陕西省水资源脆弱性各指标权重值。

3.2 评价等级划分

根据水资源脆弱性指数(WVI_i)公式对水资源脆

弱性进行量化^[7]。

$$WVI_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \omega_j$$

(9)

式中： ω_j 为第 j 个指标的组合权重值； r_{ij} 为第 i 个评价单元第 j 个指标标准化后结果。众多聚类算法中基于 K -Means 算法的划分是众多学者研究的热点，并在不同研究领域取得相当理想的效果。为了达

表 2 陕西省水资源各指标权重

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
ω	0.049	0.051	0.069	0.048	0.059	0.059	0.068	0.098
指标	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
ω	0.064	0.056	0.066	0.08	0.052	0.041	0.077	0.063

表 3 水资源脆弱性等级划分

综合指数 等级	不脆弱	较脆弱	中等脆弱	重度脆弱	极脆弱
综合指数	<0.31	0.31~0.36	0.36~0.43	0.43~0.50	0.50~0.67

4 结果与分析

4.1 陕西省水资源脆弱性时间评价及分析

根据公式(9)结合陕西省 2008—2017 年统计数据,计算出近 10 年来陕西省 10 市 1 区水资源脆弱性变化情况,各地区采用平均值法来表征该地区水资源脆弱性情况^[18],综合指数值越大表明脆弱性越强,计算结果如图 2 所示。

由图 2 可知,近 10 a 间陕西省水资源脆弱性整体呈下降趋势。陕西省水资源脆弱性已由 2008 年的 0.4(中等脆弱),降到了 2017 年的 0.34(较脆弱),降幅达到 17.6%。2008—2014 年,陕西省水资源脆弱性呈波动形式,在 2015—2017 年,水资源脆弱性呈直线下降的趋势。2015 年为陕西省自 2013 年实施最严格管理制度的目标之年^[19],全省水质达标率已实现 70% 以上,城镇污水处理率达到 84%,因此在 2015 年后,陕西省水资源脆弱性持续下降。近 10 a 间,陕西省水资源脆弱性综合指数均值为 0.37,属中等脆弱。由于陕西省不同地域条件的差异,关中(西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南、杨凌)、陕北(榆林、延安)、陕南(汉中、安康、商洛)水资源脆弱综合指数在各自内部城市之间存在一定的一致性,但在 3 种不同的地域条件范围内存在明显的不同,但均呈现整体下降的趋势。

关中、陕北地区脆弱性综合指数在时间趋势存在较好的对应关系,相关系数达到 0.6,且通过显著性检验。具体可分为两个阶段,第 1 阶段为 2008—2014 年,水资源脆弱性呈上升趋势,最为严重的西安市及渭南市呈现出重度脆弱以上等级,关中地区水资源脆弱性综合指数由 2008 年的 0.38 上升到 2014 年的

到类内差距最小,类间差距最大的效果^[17]。本文选取 $K=5$ 进行聚类划分,以 5 个聚类中心为分割阈值,对计算结果进行分级,分为不脆弱、较脆弱、中等脆弱、重度脆弱和极脆弱。结合陕西省 10 市 1 区 2008—2017 年统计数据,对陕西省水资源脆弱性综合指数进行等级划分,表 3 为陕西省水资源脆弱性等级划分结果。

0.44(重度脆弱),升幅达 15.8%。陕北地区水资源脆弱性综合指数由 2008 年的 0.33 升到 2014 年的 0.43(重度脆弱)。2014 年,陕西省关中及陕北地区出现了大范围的持续干旱^[20],主要江河径流流量减少偏枯,各月降雨量均远低于多年平均值,水量的严重不足直接导致了该时间内水资源脆弱性达到峰值。第 2 阶段为 2015—2017 年,关中城市整体呈现出大的下降趋势,宝鸡市水资源脆弱性降为较脆弱等级,关中地区 2017 年脆弱性指数为 0.38,已经降为中等脆弱等级。关中、陕北 10 a 间脆弱性指数均值分别为 0.42,0.37,均属中等脆弱等级。

陕南地区时间趋势可分为 3 个阶段,第 1 阶段 2008—2013 年,水资源脆弱性呈降低趋势,由 2008 年的 0.32(较脆弱)降为 2013 年的 0.27(不脆弱)。第 2 阶段 2014—2015 年,此阶段陕南地区水资源脆弱性虽有小幅上升,但均在不脆弱等级范围之内。第 3 阶段 2016—2017 年,陕南地区水资源脆弱性在不脆弱阶段呈下降趋势。陕南地区在 10 a 间水资源脆弱性综合指数均值为 0.3,属不脆弱等级。陕南地区水资源丰富,水系发达,丹江、汉江污染较轻,近年来当地政府注重河流生态治理与保护^[21],因此陕南地区水资源脆弱性一直处于较低阶段。

4.2 陕西省水资源综合脆弱性指数空间分布

通过对抵抗力、适应力、恢复力 16 个指标因子的综合平均计算,利用 ArcGIS 10.3 绘制出陕西省 10 市 1 区 10 a 间水资源综合脆弱性指数空间等级分布图(图 3)。

由图 3 可以看出,在地级行政尺度上,水资源脆弱性的空间差异明显。其中,不脆弱区 1 个,较脆弱区 3 个,中等脆弱区 5 个,重度脆弱区 1 个,极脆弱区 1 个。西安市水资源脆弱性综合指数为 0.63,属极脆弱等级,在陕西省各地市中最为严重。安康市水资源脆弱性综合指数为 0.24,属不脆弱等级,在陕西省各城市中脆弱性最低。陕南地区地处秦岭以南,属亚热

带湿润气候,降雨充沛,水系发达,水利工程建设力度较大,森林覆盖率相对于关中和陕北较高,且人口仅占陕西省总人口的 22%,但 2008—2017 年水资源总量的占有率却达到了全省的 66%,污水排放总量仅为全省的 16%;关中平原属于暖温带半湿润半干旱地区,位于秦岭以北,降雨较于陕南少,且关中地区地形较为平坦,人口所占陕西省总人口的 63%,为陕西省经济发展的黄金地带,经济发达,其生活、农业、经

济用水需求量大,但水资源占有率仅为全省的 19%,污水排放量却占到全省的 75%,如此不合理的配比使得关中地区水资源极为脆弱;陕北为温带大陆性干旱半干旱地区,特有的自然条件本身影响着当地水资源脆弱性的形式。由评价结果我们可以看出,关中城市群水资源脆弱性较陕北、陕南最为严重,陕南地区水资源脆弱性最好,这与刘引鸽等^[22]所提出的陕西省水资源生态风险趋势相吻合。

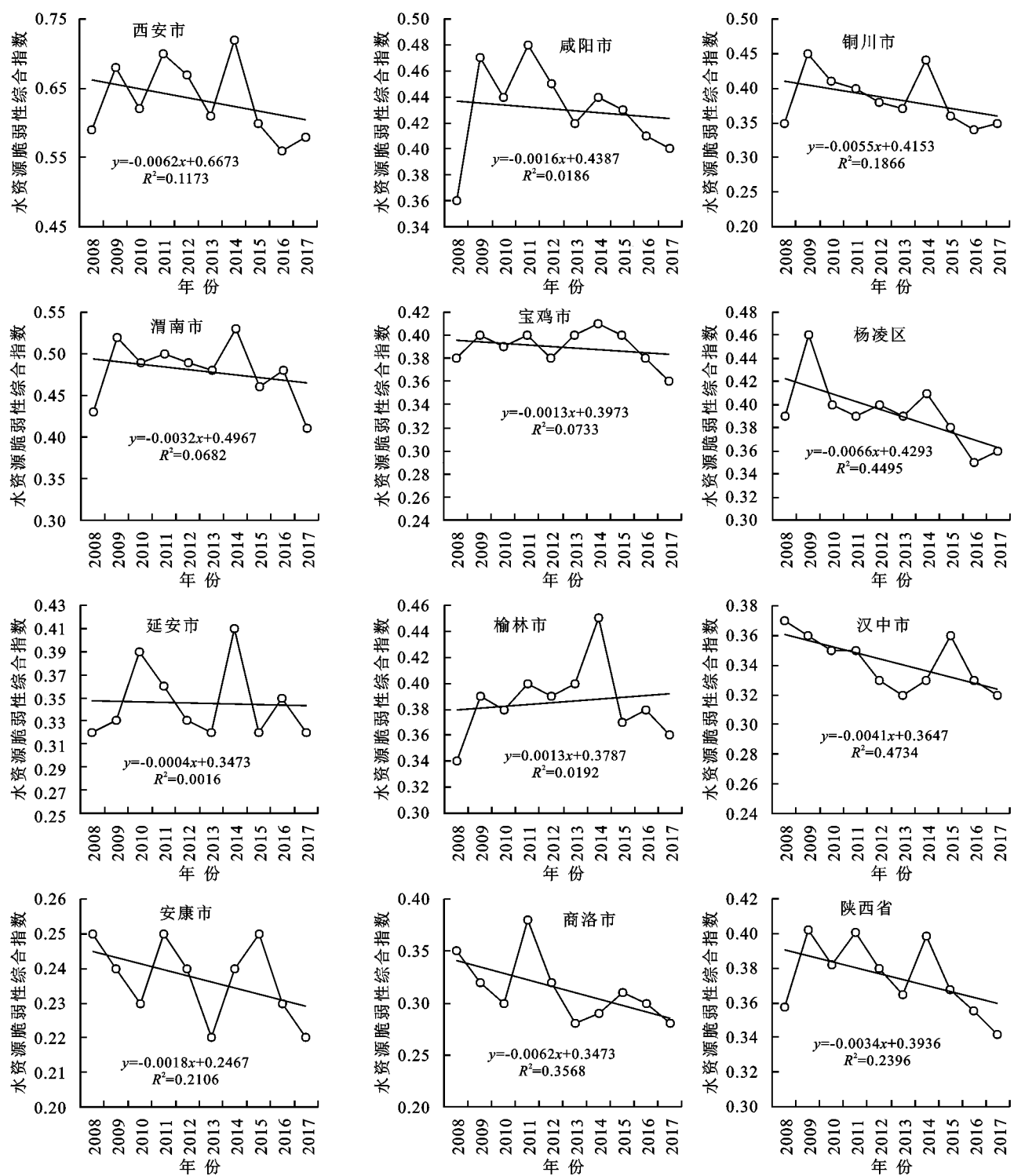


图 2 陕西省各地市水资源脆弱性综合指数时间分布

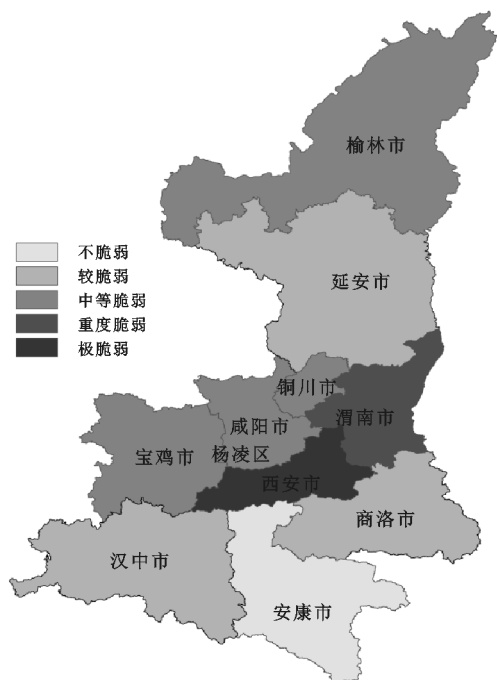


图 3 陕西省水资源综合脆弱性指数空间等级分布

5 结论

(1) 除榆林市外,陕西省各地级市水资源脆弱性综合指数均处于下滑状态,且在未有着较为明显的下降趋势。2015 年是陕西省实行最严格管理制度的目标之年,陕西省各地市在此之后脆弱性下滑趋势明显。由此可见,政府的强有力干预政策对于水资源脆弱性的改善具有重要意义。

(2) 关中及陕北地区在水资源脆弱性时间趋势上具有一致性,即可分为 2008—2014 年上升阶段和 2015—2017 年下降阶段。陕南地区水资源脆弱性综合指数可分为 3 个阶段:2008—2013 年下降阶段,2014—2015 年上升阶段,2015—2017 年下降阶段。2014 年陕西省 20 a 一遇的罕见旱情使得受灾区域水资源脆弱性达到峰值,极端天气对于水资源脆弱性的影响较为显著。

(3) 陕西省水资源脆弱性整体呈中等脆弱等级,关中、陕北属中等脆弱等级,陕南属不脆弱等级。陕西省水资源脆弱性空间差异明显,关中脆弱性最高,其次为陕北、陕南。西安市水资源脆弱性最为严重,为极脆弱等级。安康市水资源脆弱性最好,为不脆弱等级。关中地区面临着严重的水资源短缺及水污染问题,陕南地区较丰富的水资源环境及较少的污染问题决定着其较低的水资源脆弱性。因此,改善陕西省水资源配比及降低水体污染对提升水资源脆弱性有着巨大的作用。

参考文献:

[1] 夏军, 雒新萍, 曹建廷, 等. 气候变化对中国东部季风区水资源脆弱性的影响评价[J]. 气候变化研究进展, 2015,

11(1):8-14.

- [2] Albinet M, Margat J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine[J]. Bull BRGM, 2ème série, 1970,3(4):13-22.
- [3] National Research Council. Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty[M]. Washington D C: the National Academy Press,1993.
- [4] 马芳冰, 王烜, 李春晖. 水资源脆弱性评价研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2012,23(1):30-37.
- [5] Perveen S, James L A. Scale invariance of water stress and scarcity indicators: Facilitating cross-scale comparisons of water resources vulnerability[J]. Applied Geography, 2011,31(1):321-328.
- [6] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2016,36(3):211-218.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017,31(2):91-97.
- [10] 职璐爽. 广东省水资源脆弱性评价[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [11] 乔萌萌. 苏州市水资源脆弱性研究[D]. 江苏苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [12] 李静. 土地评价指标标准化方法研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [13] 刘辉, 陈日辉, 王时彬. 基于层次分析法和均方差法的矿山通风方案优选[J]. 黄金, 2016,37(1):39-43.
- [14] 赵微, 林健, 王树芳, 等. 变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响[J]. 环境科学, 2013,34(4):1277-1283.
- [15] 谢轶. 组合赋权法确定清河流域总量减排绩效评估指标权重[J]. 环境保护科学, 2014,40(1):28-31.
- [16] 江强强, 方堃, 章广成. 基于新组合赋权法的地质灾害危险性评价[J]. 自然灾害学报, 2015,24(3):28-36.
- [17] 李云霞. 基于核 K-Means 与 GIS 的县域地质环境承载力评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [18] 何刚, 夏业领, 秦勇, 等. 长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J]. 水土保持研究, 2019,26(1):287-292,300.
- [19] 陕西省人民政府. 关于实行最严格水资源管理制度的实施意见[Z]. 陕政发[2013]23 号, 2013.
- [20] 陕西省水利厅. 陕西省水资源公报[R]. 西安: 陕西省水利厅, 2014.
- [21] 王英. 陕南地区河流生态治理与保护利用模式研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [22] 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.