

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.021.

徐盼盼, 徐嘉敏, 商逸纹, 等. 基于 VSD 模型的陕南城市群水资源脆弱性评价及影响因子研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 319-327, 343.

Xu Panpan, Xu Jiamin, Shang Yiwen, et al. Water Resource Vulnerability Assessment and Impact Factors of Southern Shaanxi Urban Agglomeration Based on VSD Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 319-327, 343.

## 基于 VSD 模型的陕南城市群水资源脆弱性 评价及影响因子研究

徐盼盼<sup>1,2,3,4</sup>, 徐嘉敏<sup>5</sup>, 商逸纹<sup>1,2,3</sup>, 马 军<sup>1,2,3</sup>, 王灵博<sup>1,2,3</sup>, 钱 会<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 长安大学 水利与环境学院, 西安 710054;

2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 水利部旱区生态水文与水安全重点实验室,  
西安 710054; 4. 长安大学 秦岭生态环境研究院, 西安 710054; 5. 长安大学 能源与电气工程学院, 西安 710018)

**摘 要:** [目的] 构建基于社会-经济-生态耦合作用下的陕南城市群水资源脆弱性模型, 阐明水资源脆弱性状态, 厘定影响因子, 助力秦岭地区人水和谐。[方法] 基于暴露度-敏感性-适应性 (Vulnerability Scoping Diagram, VSD) 对陕南城市群水资源脆弱性进行了评价, 结合多元统计法, 进一步识别了社会-经济-生态耦合作用下水资源脆弱性的影响因子。[结果] 2011—2020 年, 陕南整体水资源脆弱性的变化趋势与商洛市最相似, 除 2011 年极度脆弱外, 基本保持在轻度脆弱状态, 而汉中市和安康市的水资源脆弱性等级较高, 水安全保障程度相对较低; 陕南城市群水资源脆弱性的主控因子有生态环境用水量、人均水资源量、年降水量; 优化生态环境用水量分配, 加强对年降水量与人均水资源量监测, 将成为陕南城市群降低水资源脆弱性新的工作重心。[结论] 陕南城市群水资源系统安全性的提升与当地注重水生态文明建设以及与社会-经济协调发展有关。此外, 构建的 VSD 模型适用于陕南城市群水资源脆弱性评价, 可为缓解人-城-水矛盾提供理论指导。

**关键词:** 水资源脆弱性; VSD 模型; 多元统计法; 陕南城市群; 秦岭

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0319-09

## Water Resource Vulnerability Assessment and Impact Factors of Southern Shaanxi Urban Agglomeration Based on VSD Model

Xu Panpan<sup>1,2,3,4</sup>, Xu Jiamin<sup>5</sup>, Shang Yiwen<sup>1,2,3</sup>, Ma Jun<sup>1,2,3</sup>, Wang Lingbo<sup>1,2,3</sup>, Qian Hui<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of  
Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, the Ministry of Education, Xi'an 710054, China;  
3. Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions, Ministry of Water Resources,  
Chang'an University, Xi'an 710054, China; 4. Academy of Qinling Ecological Environment, Chang'an University,  
Xi'an 710054, China; 5. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to construct a water resource vulnerability model for the southern Shaanxi urban agglomeration based on the coupling effect of society, economy, and ecology, to clarify the state of water resource vulnerability, to determine the influencing factors, and to contribute to the harmony between human and water in the Qinling region. [Methods] In view of this, the water resource vulnerability of the southern Shaanxi urban agglomeration was evaluated based on the Vulnerability Scoping Diagram (VSD), and further its influencing factors under the coupling of society, economy and ecology were identified by using multivariate statistical methods. [Results] The overall trend of water resource

收稿日期: 2024-01-03

修回日期: 2024-01-31

资助项目: 国家自然科学基金“秦岭水源涵养功能动态变化与水安全保障”(42341102)

第一作者: 徐盼盼(1993—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 副教授, 主要从事旱区水文地质与工程地质研究。E-mail: panpanxu@chd.edu.cn

通信作者: 钱会(1963—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 教授, 主要从事水资源与环境研究。E-mail: qianhui@chd.edu.cn

http://stbcyj.paperonce.org

vulnerability in southern Shaanxi was most similar to that in Shangluo City from 2011 to 2020. Except for extreme vulnerability in 2011, it remained basically in a mild fragile state. However, the water resource vulnerability levels in Hanzhong City and Ankang City were relatively high, and the degree of water security guarantee was relatively low. The main control factors for the vulnerability of water resources included ecological environment water consumption, per capita water resources, annual precipitation. Optimizing the allocation of water consumption in the ecological environment, and strengthening the monitoring of annual precipitation and per capita water resources will become the new focus on reducing water resource vulnerability in the southern Shaanxi urban agglomeration. [Conclusion] The improvement of water resource system security in the southern Shaanxi urban agglomeration is related to the local emphasis on water ecological civilization construction and coordinated development with society and economy. In addition, the VSD model constructed in this paper is suitable for evaluating the vulnerability of water resources in the southern Shaanxi urban agglomeration, and can provide theoretical guidance for alleviating the contradiction among people, city, and water.

**Keywords:** water resource vulnerability; VSD model; multivariate statistical method; southern Shaanxi urban agglomeration; Qinling Mountains

水资源既是经济发展的战略性资源,也是实现生态绿色发展和生态环境良性循环的重要控制因素。正值大力推进“一带一路”“黄河流域生态保护和高质量发展”等战略之际,水资源脆弱性成为了制约国家战略实施的重大难题。城市因水而建,由水而兴,“四水四定”原则要求评估水资源脆弱性来加强城市水资源管理与水安全保障<sup>[1]</sup>,这对城市的水资源脆弱性及驱动机制研究提出了迫切要求。

水资源脆弱性作为度量水资源安全的重要标准,日益受到国内外学者们的高度重视与广泛关注。法国学者 Albinet 和 Margat 于 20 世纪 60 年代首次将生态学领域的脆弱性概念运用到地下水资源的研究中<sup>[2]</sup>。我国对水资源脆弱性研究起步较晚,但发展较快,研究对象逐渐从地下水拓展到地表水、水资源-社会经济-生态复合系统,广大学者从多维度视角探究了不同尺度下水资源复合系统脆弱性对气候变化和人类活动的响应规律<sup>[3-5]</sup>。基于指标法构建的水资源脆弱性评估模型凭借其灵活性强、覆盖面广、层次清晰等优势应时而生,成为了当前水资源脆弱性评价的主流研究方法<sup>[5-6]</sup>。在水资源脆弱性评估中,压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)模型缺乏考虑对社会经济系统产生的影响,不能全面分析水资源系统脆弱性的形成过程与机理<sup>[3,7]</sup>;驱动力-压力-状态-影响-响应(Driving force-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR)模型弥补了 PSR 模型的不足,但存在评价指标分类不明确、评价体系冗余的问题<sup>[8]</sup>;粗糙集-支持向量机回归(Rough Set-Support Vector Regression, RS-SVR)模型在应用过程中实现了指标降维,去除了冗余属性,但未能全面考虑水

资源-社会经济-生态复合系统对水资源脆弱性的影响,使得驱动机制认识欠清<sup>[5]</sup>。为此,国内外学者开展了大量研究,并达成了基本共识,即脆弱性应由暴露度、敏感性和适应能力 3 个固定属性组成<sup>[9-12]</sup>。由 Polsky 等<sup>[13]</sup>于 2007 年首次提出的暴露度-敏感性-适应性(Vulnerability Scoping Diagram, VSD)模型提供了一个规范的体系和清晰的流程,有益于后续各层指标的筛选与分类,具有系统性、可比性、独立性<sup>[9-11]</sup>。基于该优势,VSD 模型在生态脆弱性评价和城市内涝脆弱性评价中得到了推广与应用<sup>[11,14-15]</sup>。水资源脆弱性受自然与非自然两方面因素影响,其中自然因素可理解为水资源系统本身存在的不稳定因子或是随自然变迁而产生的不稳定性,非自然因素可分为经济社会发展过程中对水资源系统产生的干扰和人类基于对生态环境要求而实施影响水资源系统的一系列措施<sup>[16]</sup>。可见,水资源脆弱性受自然与经济社会因素综合影响,指标体系内部联系密切且具逻辑性,难以将其进行简单区分与取舍,而 VSD 模型统筹兼顾,以暴露度、敏感性、适应能力 3 种属性遴选指标,在规避指标重复性的同时厘清其因果关系,有助于理解各指标对区域水资源脆弱性的耦合影响。譬如:林钟华等<sup>[9]</sup>借助 VSD 模型研究了珠三角城市群水资源脆弱性演变趋势及驱动因子,为该地区水资源可持续利用与适应性管理提供了科学依据;肖安财等<sup>[10]</sup>基于 VSD 模型构建了南方丰水山区水资源脆弱性评价模型,厘清了其演变规律,阐明了该模型在丰水山区的适用性;李国琴等<sup>[12]</sup>凭借 VSD 模型评估了湖北省人水耦合系统脆弱性时空演变规律及影响因素,并验证了该模型的可行性。

陕西是中华民族和华夏文明的重要发祥地、“一带一路”建设的重要节点、“两屏三带一区多点”国家生态安全战略格局的重要组成部分。秦岭作为我国“中央水塔”,连接东西、和合南北,涵养着八百里秦川。在城市人口经济发展与水资源承载力相适应的大背景下,如何从根本上提高陕西秦岭周边城市群发展质量和水资源利用效率,协调城市发展与水环境保护的关系,助力保障水塔安全,是当前亟需探索的重要内容。陕南背靠“中央水塔”,地处引汉济渭和南水北调中线等重要输水工程的水源地,然而水资源优势难以发挥、经济发展受限等问题严重制约了该区“人-城-水”和谐发展。目前,陕西省水资源脆弱性研究多聚焦于省域尺度或关中地区,缺乏对陕南城市群的深入研究,亟需采用VSD模型对陕南城市群水资源脆弱性进行评估,以期揭示社会-经济-生态耦合作用下水资源脆弱性的影响因子,为缓解人-城-水矛盾提供理论依据。

## 1 研究区概况

陕南城市群位于 $105^{\circ}30'50''-111^{\circ}1'25''E, 31^{\circ}42'27''-34^{\circ}33'40''N$ ,包括汉中、安康和商洛3市,地势南北高中间低,北靠秦岭山脉,南临大巴山,地跨亚热带湿润季风气候区和暖温带大陆性季风气候区,年降水量 $710\sim 1\,200\text{ mm}$ ,具有典型的南方气候特征,水热资源丰富<sup>[17]</sup>。区内有汉江、嘉陵江等长江水系的主要支流经过,水资源总量较为丰富。据陕西省水资源公报,2022年陕南水资源总量达232.89亿 $\text{m}^3$ ,但水资源利用率仅在11%左右,开发程度严重不足。此外,“十三五”规划期间陕南地区规模以上工业完成总产值3 790.38亿元,较“十二五”规划期间增长44.0%;“十四五”规划期间陕南秉持生态优先原则发展绿色化、智能化产业,城市化进程持续推进,对水资源需求进一步提高。再者,陕南3市为南水北调中线工程供给70%的水量,却未获得与之匹配的经济补偿,加剧了陕南地区水资源与经济社会发展的矛盾<sup>[18]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 VSD模型

2.1.1 指标选取原则 评价指标的选取直接影响评价结果的可靠性,陕南城市群水资源脆弱性评估涉及到水资源、经济社会、生态等因素。因此,评价指标的选取应遵循以下原则<sup>[14-15]</sup>:

(1) 全面性。影响水资源脆弱性的因素已构成统一整体,评价指标应覆盖水资源、经济社会、生态等方面,确保评价体系的全面性。

(2) 代表性。具有代表性的指标不仅可以避免指标信息冗余,而且可以有效地表征水资源脆弱性的真实状况。

(3) 适配性。应结合当地情况,有针对性选取的指标能够科学、合理地体现陕南地区水资源脆弱性的基本特征。

2.1.2 评价体系构建 为表征陕南城市群水资源的暴露度特征,应从水资源系统的自然与社会属性两方面来选取指标,基于农业、工业、生活、生态对水资源系统的扰动,选取生态环境用水量和农业用水量作为自然属性暴露度指标,体现研究区“水资源”“生态”特征;选取工业用水量和居民生活用水量作为社会属性暴露度指标,反映“经济社会”方面的特征<sup>[10]</sup>。研究区水资源的敏感性表现为生态、生活、水量等方面受到外界影响及其程度,人均水资源量、年降水量和地下水供水量可直接表征陕南城市群水资源量的变化,具有代表性;此外,由于陕南城市群水资源量较为丰富,选取水田面积不仅可以表征水资源量的变化,也可反映人类活动与水资源、生态环境的相互影响,从而体现水资源的脆弱性<sup>[10,19]</sup>。水资源系统的适应能力可通过水利工程供水量、工业污水处理率、减少水土流失面积、万元GDP水耗体现,其中,水利工程供水量表征了水利发展水平和水安全保障能力;工业污水处理率是衡量地区污水处理效果的最佳指标,表征经济与水资源的协同发展效果;减少水土流失面积是生态地质环境对经济社会做出的响应能力;万元GDP水耗表征社会经济发展对水资源压力的适应能力。可见,基于当地实际情况选取指标,能够科学、合理地涵盖陕南地区水资源脆弱性的基本特征,具有高适配性。针对指标影响水资源脆弱性的不同模式,可分为正、逆向两类指标,正向指标数值越大,表征脆弱程度越低,而逆向指标与之相反(表1);且指标可归纳为“水资源”“经济社会”“生态”3个类型(表2)。

2.1.3 数据归一化处理 为了消除指标单位引起的结果差异,统一各指标的量纲及变化程度,通过下式进行标准化处理:

正向指标:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

逆向指标:

$$X_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: $X_{ij}$ 为处理后的归一化数值( $i=1,2,3,\dots,n;j=1,2,3,\dots,m$ ),其中 $n$ 为样本数量, $m$ 为评价指标数量; $x_{\max}$ 与 $x_{\min}$ 分别为第 $j$ 个指标的最大值与最小值。

2.1.4 指标权重确定 主客观组合赋权法的计算结果更客观、更科学。层次分析法是一种利用较少的定量信息使决策思维过程数学化的主观赋权法,具有系统性和简捷性的优势<sup>[20]</sup>。本研究共建立 4 个判断矩阵:准则因素判断矩阵、暴露度因素判断矩阵、敏感性因素判断矩阵、适应能力因素判断矩阵。依据陕南地区水资源脆弱性评价指标体系,通过构建的判断矩阵,对各层级指标两两比较,确定相对重要性,并检验其一致性。熵值法是根据各指标的相对变化程度对

系统整体的影响来确定指标权重的一种客观赋权法,能够有效规避主观因素的影响<sup>[15]</sup>。因此,本研究采用层次分析法和熵值法分别计算主观、客观权重。基于最小信息熵减少不确定性,以及逼近固有信息熵和拉格朗日中值定理快速收敛到最优解的优势,计算指标的综合权重,公式如下<sup>[15]</sup>:

$$\omega_i = \frac{(\mu_i \varphi_i)^{0.5}}{\sum_{i=1}^n (\mu_i \varphi_i)^{0.5}}$$

(3)

式中: $\varphi_i$  为主观权重; $\mu_i$  为客观权重; $\omega_i$  为组合权重。

表 1 陕南城市群水资源脆弱性评价体系

Table 1 Water resource vulnerability assessment system for urban agglomerations in southern Shaanxi

准则层	指标层	符号	指标含义	属性	遴选依据
暴露度	农业用水量(亿 m <sup>3</sup> )	X <sub>1</sub>	农业干扰	—	衡量农业发展水平
	工业用水量(亿 m <sup>3</sup> )	X <sub>2</sub>	工业干扰	—	反映工业发展水平与工业水效
	居民生活用水量(亿 m <sup>3</sup> )	X <sub>3</sub>	社会生活干扰	—	常住人口总数与节水政策宣传
	生态环境用水量(亿 m <sup>3</sup> )	X <sub>4</sub>	生态环境干扰	+	生态政策引导与当地生态环境用水需求
敏感性	水田面积(10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	X <sub>5</sub>	农业对外界干扰的敏感性	+	农业发展对水资源总量变化的敏感性
	人均水资源量(m <sup>3</sup> /人)	X <sub>6</sub>	水资源对外界干扰的敏感性	+	区域常住人口总数与用水总量
	年降水量(亿 m <sup>3</sup> )	X <sub>7</sub>	气候对外界干扰的敏感性	+	区域水资源的丰寡程度
	地下水供水量(亿 m <sup>3</sup> )	X <sub>8</sub>	地下水量对外界干扰的敏感性	—	地下水资源的敏感性
适应能力	水利工程供水量(万 m <sup>3</sup> )	X <sub>9</sub>	水利工程的调节能力	+	水利发展水平和水安全保障能力
	工业污水处理率(%)	X <sub>10</sub>	处理工业污水的能力	+	衡量地区污水处理效果
	减少水土流失面积(10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	X <sub>11</sub>	自然的调节适应能力	+	生态地质环境的适应能力
	万元 GDP 水耗(m <sup>3</sup> /万元)	X <sub>12</sub>	社会应对水资源困境的能力	—	水资源消费水平和社会节水降耗状况

表 2 指标类型及数据来源

Table 2 Indicator type and data source

指标类型	数据名称	数据来源
水资源	水利工程供水量、人均水资源量	陕西省统计局(tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj)
	居民生活用水量	陕西省水利厅(http://slt.shaanxi.gov.cn)
经济社会	工业污水处理率、地下水供水量	陕西省统计局(tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj)
	工业用水量、万元 GDP 水耗	陕西省水利厅(http://slt.shaanxi.gov.cn)
	年降水量、减少水土流失面积	陕西省统计局(tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj)
生态	农业用水量、生态环境用水量	陕西省水利厅(http://slt.shaanxi.gov.cn)
	水田面积	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)

2.2 水资源脆弱性指数

鉴于水资源脆弱性受多方面影响,采用模糊综合评价法对  $X$  与  $\omega$  进行计算,公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^{12} X_i \omega_i$$

(4)

式中: $W$  为模糊综合评价得分; $X_i$  为标准化处理后的指标值; $\omega_i$  为组合权重。鉴于 S 型函数具有单调性、有界性、变化的连续平稳性等性质,可使得水资源脆弱性的结果具有可比性,从而使得脆弱性评价等级更加准确<sup>[21]</sup>。结合陕南发展规划目标及发展现状分析,把陕南城市群水资源脆弱性评价等级划分 5 个等级,见表 3<sup>[20]</sup>。

2.3 多元统计法

多元统计分析是一种多指标的综合分析方法,在

自然、社会、经济等领域中得到广泛应用<sup>[22]</sup>。本文选取的 12 个指标可能存在一定相关性,导致信息冗余,增加分析难度,因此,采用主因子分析和聚类分析进一步识别影响陕南城市群水资源脆弱性的主控因子。

表 3 陕南城市群水资源脆弱性分级

Table 3 Classification of water resource vulnerability for urban agglomerations in southern Shaanxi

脆弱等级	脆弱程度	划分范围
I	不脆弱	<0.32
II	轻度脆弱	0.32~0.45
III	中度脆弱	0.45~0.55
IV	严重脆弱	0.55~0.68
V	极度脆弱	>0.68

2.3.1 主因子分析 主因子分析是通过对大量指标“降维”的方式提取主因子,使分析更加清晰明了,其主要步骤<sup>[23]</sup>:(1)对原始数据进行标准化处理;(2)基于标准化数据得到相关系数矩阵,计算特征值 $\lambda_j$ ,一般选取 $\lambda_j$ 值大于1的因子进行分析,即主因子;(3)计算方差贡献率和累积方差贡献率,后者应不小于80%,即主因子的信息覆盖率不小于80%,公式如下:

$$\alpha_p = \frac{\sum_{j=1}^p \lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \quad (5)$$

式中: $\lambda_j$ 为第 $j$ 个主成分的特征值; $\alpha_p$ 为前 $p$ 个指标的累积方差贡献率。

2.3.2 聚类分析 聚类分析是按照一定的数据连接规则、一定的层次结构将数据分裂或聚合,最终形成一个层次序列的聚类解使得各分类间应具有显著差异,核心步骤包括<sup>[24]</sup>:(1)数据标准化处理,并计算相关系数矩阵;(2)采用欧氏距离逐步计算至各类对象归为一类,绘制聚类分析谱系图,公式如下:

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (6)$$

式中: $d(x_i, x_j)$ 为欧式距离; $x_{ik}$ 为第 $x_i$ 类数据中第 $k$ 个变量值; $x_{jk}$ 为第 $x_j$ 类数据中第 $k$ 个变量值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 指标变化特征

3.1.1 暴露度 农业用水量随时间呈减少趋势(图1A);工业用水量基本呈稳定状态,但于2020年呈减少趋势,明显低于平均水平(图1B),这可能是因为新冠疫情暴发下“停工”政策限制了工业生产;居民生活用水量呈稳定—增长—减少的变化特征(图1C)。生态环境用水量呈先减少后增加的变化趋势(图1D),一方面是因为年降水量先减少后增加的变化趋势引起生态环境用水量呈相应的变化特征,另一方面农业用水量的减少以及近年来当地政府重视生态环境保护使得更多的水资源用于生态环境治理<sup>[25]</sup>。

3.1.2 敏感性 水田面积先减少,是由于水田经济效益低下,非农用地挤占所致,但在这一过程中诱发了生态环境问题,因此制定措施保护水田,使水田面积趋于稳定(图1E)。年降水量呈先减少后增多的变化趋势(图1F),人均水资源量亦呈现该趋势(图1G),可见降水量是决定人均水资源量多寡的主控因子;地下水供水量主要呈稳定状态,但存在骤然增大的现象(图1H),这是因为地下水不易开发,只有在水资源总量明显不足的情况下,才增加地下水开采量。

3.1.3 适应能力 水利工程供水量指标呈现先降后升

再降的变化趋势(图1I),是因为水利工程基础设施经历了从初期的不匹配到后期的跟进完善;工业污水处理率主要呈现稳步提升状态,但存在骤降现象(图1J),随着生产技术逐渐成熟,工业污水处理率稳步提高,而骤降现象可能是由于该阶段工业迅猛发展,导致污水排放与污水处理失衡;减少水土流失面积呈短暂增加后持续下降最终在低水平保持稳定的变化趋势(图1K);此外,在生产技术成熟的同时,水资源利用率也随之提升,万元GDP水耗指标持续稳定下降(图1L)。

#### 3.2 水资源脆弱性评价结果

基于陕南城市群2011—2020年12个可覆盖“水资源—经济社会—生态”范畴的指标数据,通过数据标准化处理、主客观组合赋权、模糊综合评价等方法,得到陕南地区以及汉中、安康、商洛三市的水资源脆弱性评价结果,见表4。

### 4 讨论

#### 4.1 水资源脆弱性分析

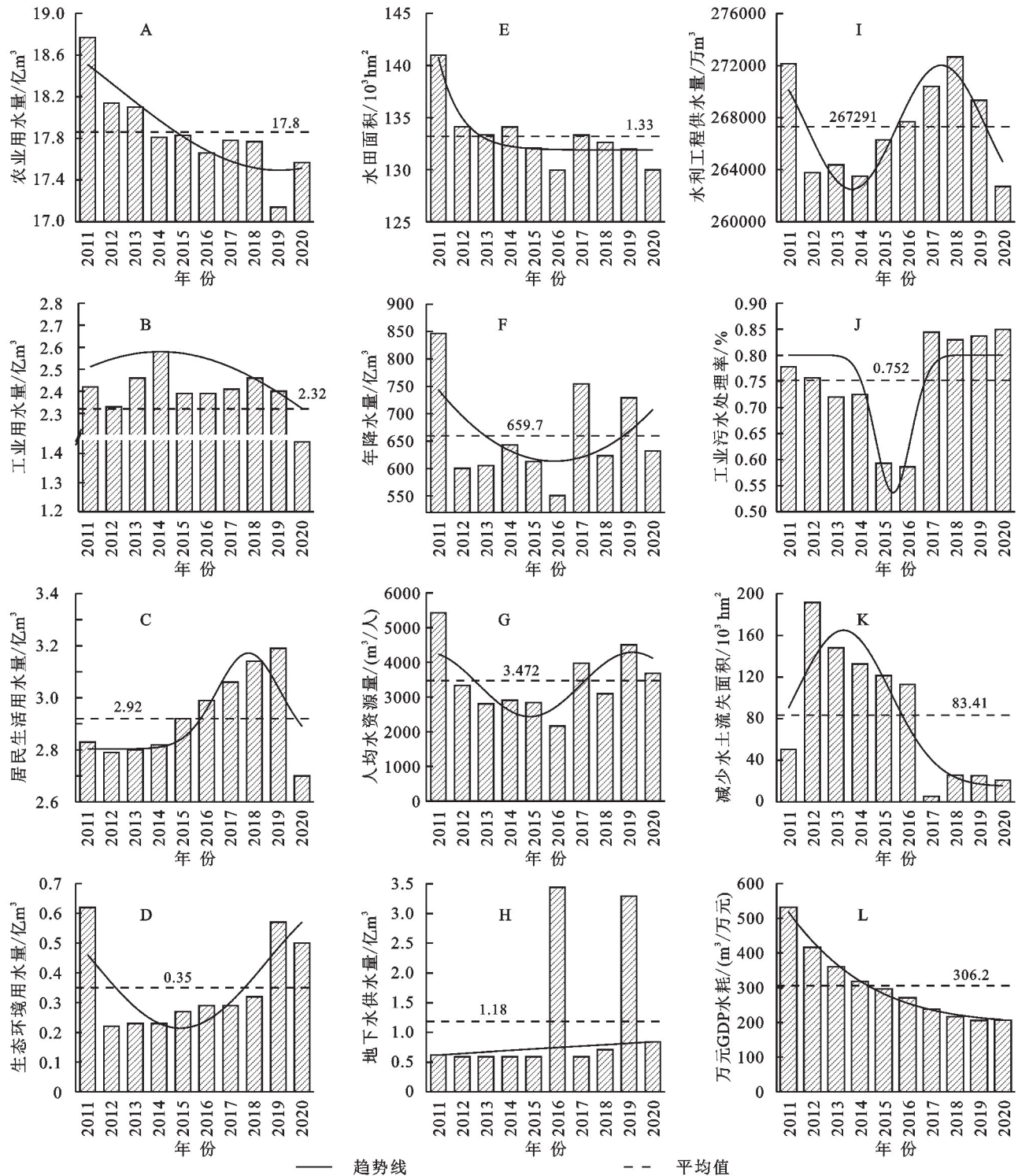
陕南地区2011年的水资源为极度脆弱状态,这可能是由于21世纪初社会经济的高速发展引起了工、农业用水量增大,同时陕南作为重要水源地,持续向外输水,造成人均水资源量不足。随着陕南地区水资源保护力度加大,区域水环境暴露度猛增问题得到解决,水资源于2016年达到不脆弱状态。2017—2020年脆弱等级有小幅上升(图2),这是因为生态移民后居民生活趋于稳定,生活用水量增长的同时,当地政府注重生态环境治理与保护,生态环境用水量增加使水资源系统的暴露度得以改善,此外年降水量呈增长趋势,当地水资源脆弱性最终在轻度脆弱状态趋于稳定。

汉中市2011年水资源属于轻度脆弱状态,可能是由于21世纪初汉中市工农业发展处于起步阶段,对水资源的影响程度较小;2013—2014年,汉中市在经历生态移民搬迁工程后,居民生活用水量加大,但经济发展水平较低,污水处理技术尚未成熟,年降水量大幅减少,且群众节水意识低,导致水资源脆弱性显著升高<sup>[26]</sup>。刘引鸽等<sup>[27]</sup>亦得到相似结论:2015—2020年,汉中市调整工农业产业占比,减少农田面积,并加大水污染防治力度,加大生态环境用水量,保障全市经济发展水质要求和水环境安全,且该阶段年降水量有所增加,水资源最终稳定在中度脆弱状态。

安康市2011—2019年水资源脆弱性始终介于轻度与中度之间,这是由于安康市经济发展起步相对较晚,水资源生态环境的暴露度较低,且该市属南水北调中线工程重要的水源涵养区,人均水资源量较充足;2018年后,安康市进入经济快速增长期,各产业对水资源需求

加大,暴露度增大,忽略了对生态环境的保护,且降水量不稳定,直接导致人均水资源量不稳定,于 2020 年达到严重脆弱状态;这与赵浩等<sup>[28]</sup>在关于 2011—

2020 年安康市水资源承载力研究中发现水资源子系统贴适度值与人均水资源量变化趋势保持一致的结论相吻合,证明了上述分析结果的合理性。



注:图 A—D 为暴露度;图 E—H 为敏感度;图 I—L 为适应能力。

图 1 陕南城市群单指标变化特征

Fig. 1 Characteristics of the single-indicator change for urban agglomerations in southern Shaanxi

商洛市 2011 年水资源为极度脆弱状态,这是由于 21 世纪初,商洛地区处于生态移民项目的实施阶段,社会经济的高速发展引起了工农业用水量增多,

暴露度增大,而商洛年降水量在陕南三市中最小,敏感性较强;在 2012—2020 年,商洛水资源脆弱性稳定在轻度脆弱与不脆弱状态,随着工农业生产技术与污

水处理技术升级、产业结构调整等暴露度和适应能力的综合影响,商洛市水资源环境总体得到改善。刘引 鸽等<sup>[27]</sup>亦得出该阶段商洛市的水量脆弱性等级降低幅度最大,区域水资源系统脆弱性好转的结论。

表 4 陕南城市群水资源脆弱性评价结果

Table 4 Assessment results of water resource vulnerabilities for urban agglomerations in southern Shaanxi

年份	陕南		汉中市		安康市		商洛市	
	综合得分	脆弱程度	综合得分	脆弱程度	综合得分	脆弱程度	综合得分	脆弱程度
2011	0.801	极度	0.375	轻度	0.426	轻度	0.814	极度
2012	0.394	轻度	0.493	中度	0.459	中度	0.402	轻度
2013	0.359	轻度	0.566	严重	0.433	轻度	0.349	轻度
2014	0.376	轻度	0.559	严重	0.457	中度	0.443	轻度
2015	0.352	轻度	0.457	中度	0.467	中度	0.405	轻度
2016	0.228	不	0.275	不	0.392	轻度	0.256	不
2017	0.429	轻度	0.473	中度	0.494	中度	0.403	轻度
2018	0.425	轻度	0.446	轻度	0.470	中度	0.242	不
2019	0.476	中度	0.458	中度	0.500	中度	0.293	不
2020	0.431	轻度	0.454	中度	0.600	严重	0.411	轻度

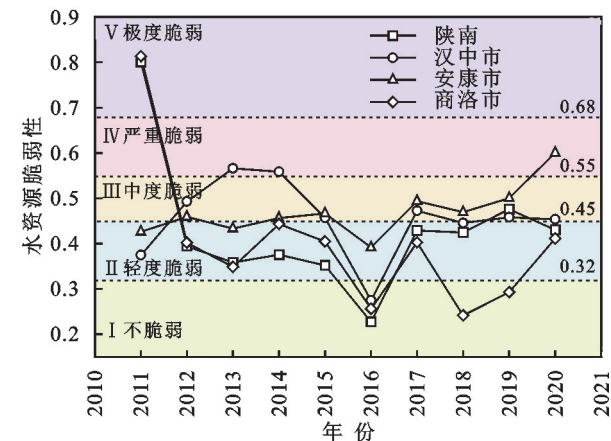


图 2 陕南城市群水资源脆弱性评价

Fig. 2 Evaluation of water resources vulnerability for urban agglomerations in southern Shaanxi

4.2 驱动因子分析

利用 SPSS 软件对 VSD 模型指标及水资源脆弱性进行主因子分析,结果见表 5。由表可知,第 1,2,3 主因子的特征值为 5.61,3.94,1.93,分别解释了 43.16%, 30.34%,14.87%的总方差贡献率,信息覆盖率高达 88.37%,其余主成分的特征值均小于 1,可见,这 3 个主因子足以阐释各指标与水资源脆弱性的关系。各评价指标的主因子载荷见表 6,主因子 2 反映了生态环境用水量、人均水资源量、年降水量和减少水土流失面积以及水资源脆弱性,表明陕南城市群的水资源脆弱性与这 4 项评价指标密切相关。

表 5 主因子的特征值及相应的贡献率

Table 5 Characteristic values and corresponding contribution rates of the main factors

主因子	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	5.611	43.16	43.16
2	3.944	30.34	73.50
3	1.933	14.87	88.37

基于欧式距离计算原则,利用 SPSS 中系统聚类法对 VSD 模型指标及水资源脆弱性进行分析,获得最小分支距离为 12.5 的指标分类组数,如图 3 所示。12 个水资源脆弱性评价指标与水资源脆弱性可分为 5 类。其中,水资源脆弱性、人均水资源量、年降水量、生态环境用水量、工业污水处理率归为一类,表明了人均水资源量、生态环境用水量、年降水量、工业污水处理率是影响陕南城市群水资源脆弱性的主控因素,进一步验证了上述分析结果的准确性。

表 6 主因子荷载

Table 6 Principal factor loading diagram

评价指标	主因子荷载		
	1	2	3
工业污水处理率	0.960	-0.004	0.047
万元 GDP 水耗	0.943	0.100	0.031
农业用水量	0.920	0.132	0.008
水田面积	0.842	0.477	0.242
地下水供水量	-0.616	0.032	0.288
人均水资源量	0.265	0.929	0.032
生态环境用水量	-0.100	0.917	-0.112
年降水量	0.308	0.873	0.225
水资源脆弱性	0.566	0.814	0.046
减少水土流失面积	0.505	-0.777	-0.084
工业用水量	0.344	-0.265	0.876
居民生活用水量	-0.557	0.185	0.790
水利工程供水量	-0.068	0.569	0.731

综上所述,年降水量、人均水资源量、生态环境用水量在主因子分析与聚类分析中均属水资源脆弱性的主控因子。年降水量具有显著的年际变化特征,同时降水量决定了人均水资源量与生态环境用水量的丰寡;人均水资源量的高低直接影响了生态环境用水的可持续利用。当人均水资源量充足时,更多的水资源可用于维护生态系统健康,反之可能会优先满足人

类生活和生产需求,而忽视生态环境的用水需求,导致生态环境恶化等问题;同时,丰富的生态环境用水量创造健康的生态环境,形成良好的区域水循环系统,间接影响了年降水量与人均水资源量。此外,陕南森林覆盖率高,人口仅占陕西省总人口的 22%,但 2008—2017 年水资源总量占有率却达到了全省的 66%,相较于社会因素,水资源脆弱性受自然因素影响更为明显。年降水量与人均水资源量可以形象地表征水资源系统现状,是水资源脆弱性的风向标。生态环境用水量是社会对环境维护与发展投入力度的体现,同时也在一定程度上反映了研究区的水质情况<sup>[20]</sup>。水质作为水资源系统重要度量之一,使生态环境用水量在水资源脆弱性评估中具有重要地位。

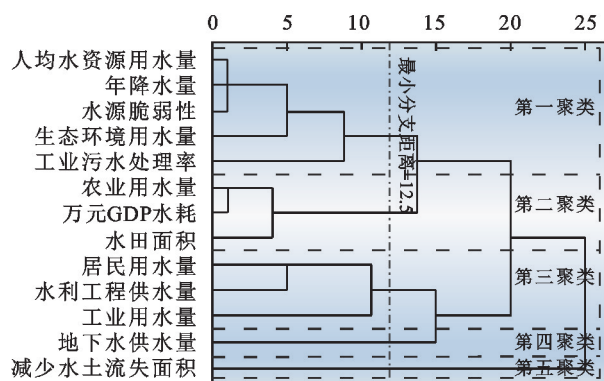


图 3 VSD 模型指标聚类谱系

Fig. 3 Cluster genealogy of VSD model indicators

## 5 结论

(1) 陕南整体水资源脆弱性的变化趋势与商洛市最相似,除 2011 年极度脆弱外,基本维持在轻度脆弱状态,而汉中市和安康市的水资源脆弱性等级较高,水安全保障程度相对较低。陕南城市群水资源脆弱性的主控因子包含生态环境用水量、人均水资源量、年降水量。

(2) 生态环境用水量是保证生态环境绿色发展、人水和谐的重要因素,优化生态环境用水量分配,是促进生态与水资源可持续协同发展的必由之路。降水量直接决定该系统水资源量的多寡,人均水资源量表征“人-城-水”的协调程度,加强二者的监测,监督水资源规划的落实情况,为各产业优化年度水资源分配提供参考。

### 参考文献(References):

[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.  
Li Y X, Xue D Q, Song Y Y. Spatio-temporal characteristics and trend warnings of water resources carrying capacity in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(7):1574-1584.

[2] Xia J, Chen J X, Weng J W, et al. Vulnerability of water resources and its spatial heterogeneity in Haihe River Basin, China[J]. Chinese Geographical Science, 2014, 24(5):525-539.  
[3] 袁媛,郑艳.国内外水资源脆弱性研究进展与展望[J].干旱区资源与环境,2022,36(7):116-125.  
Yuan Y, Zheng Y. Progress and future prospects of water resources vulnerability at home and abroad[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 116-125.  
[4] 夏军,石卫,雒新萍,等.气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J].水科学进展,2015,26(2):279-286.  
Xia J, Shi W, Luo X P, et al. Revisions on water resources vulnerability and adaption measures under climate change[J]. Advances in Water Science, 2015,26(2):279-286.  
[5] 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.  
Chen Y, Feng Y Z. Assessment and prediction of water resources vulnerability in river basin based on RS-SVR model: A case study of the Yellow River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(1):137-149.  
[6] 黄彦号,陈伏龙,何朝飞,等.基于模糊集对分析的新疆水资源脆弱性评价[J].水资源与水工程学报,2023,34(4):107-117.  
Huang Y H, Chen F L, He C F, et al. Water resources vulnerability assessment of Xinjiang based on fuzzy set pair analysis[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2023,34(4):107-117.  
[7] 付丽娜,丁万川.基于 DPSIR 模型的湖南省水生态安全评估研究[J].湘潭大学学报:自然科学版,2023,45(2):37-47,65.  
Fu L N, Ding W C. Research on DPSIR model based water ecological security assessment in Hunan[J]. Journal of Xiangtan University: Natural Science Edition, 2023,45(2):37-47,65.  
[8] 白庆芹,武俊杰,郝守宁.基于 DPSIR 模型的西藏水资源脆弱性评价[J].人民长江,2019,50(6):98-103.  
Bai Q Q, Wu J J, Hao S N. Water resource vulnerability assessment of Tibet based on DPSIR model[J]. Yangtze River, 2019,50(6):98-103.  
[9] 林钟华,刘丙军,伍颖婷,等.变化环境下珠三角城市群水资源脆弱性评价[J].中山大学学报:自然科学版,2018,57(6):8-16.  
Lin Z H, Liu B J, Wu Y T, et al. Assessment of water resource vulnerability of the Pearl River Delta metropolitan under environment change[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018,57(6):8-16.

- [10] 肖安财,龙菁蔚,吴佳莉,等.基于 VSD 模型的丰水区水资源脆弱性分析:以湘西土家族苗族自治州为例[J].灌溉排水学报,2022,41(8):45-53.
- Xiao A C, Long J W, Wu J L, et al. Using VSD model to analyze water resource vulnerability in wet mountain region: Taking Xiangxi Tujiazu & Miaozu autonomous prefecture as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(8):45-53.
- [11] Li P X, Fan J. Regional ecological vulnerability assessment of the Guangxi Xijiang River economic belt in southwest China with VSD model [J]. Journal of Resources and Ecology, 2014,5(2):163-170.
- [12] 李国琴,黄建武,陈娟.基于 VSD 的湖北省人水耦合系统脆弱性评价[J].水电能源科学,2013,31(2):53-56.
- Li G Q, Huang J W, Chen J. Vulnerability assessment of coupled human-water system in Hubei Province based on VSD[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2):53-56.
- [13] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram [J]. Global Environmental Change, 2007,17(3/4):472-485.
- [14] 刘悦.基于 VSD 模型的“一带一路”沿线重点省份生态脆弱性时空分异研究[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2022.
- Liu Y. Study on the Spatial and Temporal Variation of Ecological Vulnerability in Key Provinces along the “Belt and Road” Based on the VSD Model[D]. Dalian, Liaoning: Liaoning Normal University, 2022.
- [15] 霍童.基于 VSD 模型和层次分析法-熵权法的生态脆弱性时空变化评价及相关分析:以中国大运河苏州段为例[D].江苏苏州:苏州科技大学,2021.
- Huo T. Evaluation and Correlation Analysis of Temporal and Spatial Changes of Ecological Vulnerability Based on VSD Model and Analytic-Hierarchy Process-Entropy Method[D]. Suzhou, Jiangsu: Suzhou University of Science and Technology, 2021.
- [16] 陈攀,李兰,周文财.水资源脆弱性及评价方法国内外研究进展[J].水资源保护,2011,27(5):32-38.
- Chen P, Li L, Zhou W C. Research progress on vulnerability of water resources and assessment methods at home and abroad[J]. Water Resources Protection, 2011,27(5):32-38.
- [17] 李英杰,延军平,刘永林.秦岭南北气候干湿变化与降水非均匀性的关系[J].干旱区研究,2016,33(3):619-627.
- Li Y J, Yan J P, Liu Y L. Relationship between dryness/wetness and precipitation heterogeneity in the north and south of the Qinling Mountains[J]. Arid Zone Research, 2016,33(3):619-627.
- [18] 白荣君,李军媛.南水北调中线水源地生态补偿机制的制度保障研究:以秦岭地区陕南三市为例[J].生态经济,2022,38(11):209-214.
- Bai R J, Li J Y. Research on institutional guarantee of ecological compensation mechanism for water source area of the middle route project of the south-to-north water transfer: Taking the three cities of southern Shaanxi in Qinling area as examples [J]. Ecological Economy, 2022,38(11):209-214.
- [19] 王利平,张建云,舒章康,等.河南省水资源系统脆弱性时空分异特征研究[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2022,43(1):9-17.
- Wang L P, Zhang J Y, Shu Z K, et al. Study on the spatio-temporal differentiation characteristics of vulnerability of water resources system in Henan Province[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2022,43(1):9-17.
- [20] 任源鑫,张海宁,周旗,等.宝鸡市水资源脆弱性评价[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):119-126.
- Ren Y X, Zhang H N, Zhou Q, et al. Evaluation on water resources vulnerability of Baoji City[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(3):119-126.
- [21] 钱龙霞,张韧,王红瑞,等.一种改进投影寻踪风险评估函数模型[J].应用科学学报,2019,37(1):112-125.
- Qian L X, Zhang R, Wang H R, et al. An improved project pursuit risk assessment function model [J]. Journal of Applied Sciences, 2019,37(1):112-125.
- [22] Xu P P, Li M N, Qian H, et al. Hydrochemistry and geothermometry of geothermal water in the central Guanzhong Basin, China: A case study in Xi'an [J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78(3):87.
- [23] 李亚楠,苏锐,陈亮,等.新场-向阳山地段地下水化学数据的多元统计分析[J].铀矿地质,2020,36(1):67-72.
- Li Y N, Su R, Chen L, et al. Multivariate statistics on hydrochemical parameters in Xinchang-Xiangyangshan sector, Beishan area, Gansu [J]. Uranium Geology, 2020,36(1):67-72.
- [24] 赵翔翔,李彦彬,张海涛,等.基于聚类分析的水资源开发利用分区研究[J].水电能源科学,2022,40(11):40-44.
- Zhao Y X, Li Y B, Zhang H T, et al. Study on zoning for water resources development and utilization based on cluster analysis [J]. Water Resources and Power, 2022,40(11):40-44.
- [25] 任源鑫,林青,韩婷,等.陕西省水资源脆弱性评价[J].水土保持研究,2020,27(2):227-232.
- Ren Y X, Lin Q, Han T, et al. Evaluation on the vulnerability of water resources in Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(2):227-232.

- 51(2):308-314.
- Zhang Q, Chen C, Chen X M, et al. Effects of different depths of straw returning to field on soil physical properties and profile changes of yellow brown soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020,51(2):308-314.
- [24] Morris E K, Morris D J P, Vogt S, et al. Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. The ISME Journal, 2019, 13(7):1639-1646.
- [25] Meng M J, Li C, Zhao Y P, et al. Long-term forest conversion affects soil stability and humic substances in aggregate fractions in subtropical China[J]. Forests, 2022,13(2):339.
- [26] Chaplot V, Cooper M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils[J]. Geoderma, 2015, 243:205-213.
- [27] Souza F G, Campos M C C, Pinheiro E N, et al. Aggregate stability and carbon stocks in Forest conversion to different cropping systems in Southern Amazonas, Brazil[J]. Carbon Management, 2020,11(1):81-96.
- [28] Das S, Bhattacharyya R, Das Saha N, et al. Soil aggregate-associated carbon and organic carbon pools as affected by conversion of forest lands to agriculture in an acid soil of India[J]. Soil and Tillage Research, 2022,223:105443.
- [29] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China[J]. Plant and Soil, 2009,323:153-162.
- [30] Chen Q, Liu Y Q, Huang J H, et al. Soil water movement changes following conversion from evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests to Chinese fir plantations[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(7):2712-2725.

~~~~~

(上接第 327 页)

- [26] 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.
- Liu Z, Wen Y J, Han M, et al. Evaluation of water resources vulnerability under the influence of human activities in Shaanxi Province[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017,28(3):82-86.
- [27] 刘引鸽,杨雨欣,包江川,等.基于模糊综合指数法的陕西省水资源脆弱性评价[J].水资源与水工程学报, 2022,33(6):18-27.
- Liu Y G, Yang Y X, Bao J C, et al. Water resources vulnerability assessment of Shaanxi Province based on fuzzy comprehensive index method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022,33(6):18-27.
- [28] 赵浩,赵立磊,田辉,等.基于博弈论组合赋权-TOPSIS模型的安康市水资源承载力综合评价[J].地质与资源, 2023,32(5):642-654.
- Zhao H, Zhao L L, Tian H, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Ankang city based on game theory combination weighting-topsis model [J]. Geology and Resources, 2023,32(5):642-654.

~~~~~

(上接第 335 页)

- [26] 金贵,王占岐,胡学东,等.基于模糊证据权模型的青藏高原区土地适宜性评价[J].农业工程学报,2013,29 (18):241-250.
- Jin G, Wang Z Q, Hu X D, et al. Land suitability evaluation in Qinghai-Tibet Plateau based on fuzzy weight of evidence model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29 (18):241-250.
- [27] 李汝资,刘耀彬,谢德金.中国产业结构变迁中的经济效率演进及影响因素[J].地理学报,2017,72(12): 2179-2198.
- Li R Z, Liu Y B, Xie D J. Evolution of economic efficiency and its influencing factors in the industrial structure changes in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(12): 2179-2198.
- [28] 陈丹玲,卢新海,张超正.区域一体化背景下城市土地利用效率的空间关联及其解释:以长江中游城市群为例[J].华中农业大学学报:社会科学版,2019(4):151-159,177-178.
- Chen D L, Lu X H, Zhang C Z. Study on the spatial correlation and explanation of urban land utilization efficiency under the background of regional integration: A case of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition, 2019(4):151-159, 177-178.
- [29] 姚澜.东北地区城市土地利用效率评价及空间演化分析[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2019.
- Yao L. Urban Land Use Efficiency Evaluation and Spatial Evolution Analysis in Northeast China[D]. Dalian, Liaoning: Liaoning Normal University, 2019.