

基于减法集对势的漳河上游水资源冲突 风险评价与态势分析研究

何伟军^{1,2}, 李佳琪¹, 袁亮¹, 孟旭¹

(1. 三峡大学 经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 河海大学 商学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为有效预防漳河上游水资源冲突, 积极维护地区水安全, 科学合理地评价水资源冲突风险和预测风险态势演化尤为重要。基于水量、用水效率、水质、生态环境和社会经济等5个维度构建了水资源冲突风险评价及态势分析框架, 运用熵权法和集对分析理论构建了基于减法集对势的水资源冲突风险评价及态势分析模型, 对漳河上游2011-2020年的水资源冲突风险进行评价, 通过五元减法集对势动态分析风险发展态势。结果表明: 漳河上游水资源冲突风险水平较低且呈现下降的态势; 3个省份水资源冲突风险等级由高到低依次为山西省、河北省、河南省。从水资源冲突的5个维度来看, 河北省需重点关注水量和用水效率引起的冲突风险, 河南省整体情况较好, 山西省则需重点关注水量、水质和社会经济引起的冲突风险。研究结果对识别漳河上游水资源冲突风险、缓解水事纠纷和维护地区稳定具有重要的现实意义。

关键词: 水资源冲突; 风险评价; 态势分析; 减法集对势; 漳河上游

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0020-10

Risk assessment and situation analysis of water resources conflicts in the upper reaches of the Zhanghe River based on subtraction set pair potential

HE Weijun^{1,2}, LI Jiaqi¹, YUAN Liang¹, MENG Xu¹

(1. College of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. School of Business, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Accurate risk assessment of water resources conflicts and prediction of risk situation are vital to the prevention of water resources conflicts in the upper reaches of the Zhanghe River and the safeguarding of regional water security. Based on the five dimensions of water volume, water use efficiency, water quality, ecological environment and socio-economy, a risk assessment and situation analysis framework of water resources conflicts was constructed and a model was established using entropy method and set pair analysis based on subtraction set pair potential. Then the model was used to evaluate the risk of water resources conflicts in the upper reaches of the Zhanghe River during the period of 2011-2020. Additionally, the risk development trend was analyzed by five-element subtraction set pair potential. The results show that the risk level of water resources conflicts in the upper reaches of the Zhanghe River is low and shows a downward trend. The risk level of water resources conflicts in the three provinces from high to low is Shanxi Province, Hebei Province and Henan Province. From the perspective of five dimensions of water resources conflicts, Hebei Province needs to focus on the conflict risk caused by water volume and water use efficiency; the overall situation in Henan Province is good, whereas Shanxi Province should focus on the conflict risks caused by water volume, water quality and socio-economy. The research results are of great practical significance in alleviating water affair disputes, maintaining regional stability and re-

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-10-12

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(20YJCGJW009); 国家自然科学基金项目(72104127, 71478101); 国家社会科学基金重大项目(2019ZDA089)

作者简介: 何伟军(1965-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源技术经济及管理。

通讯作者: 袁亮(1987-), 男, 湖北荆州人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为跨界水资源配置。

alizing sustainable development in the upper reaches of the Zhanghe River.

Key words: water resources conflict; risk assessment; situation analysis; subtraction set pair potential; the upper reaches of the Zhanghe River

1 研究背景

习近平总书记于 2021 年 10 月 22 日在深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调,水安全是生存的基础性问题,要高度重视水安全风险^[1]。跨界流域水资源冲突是相关利益主体在跨界流域因开发、利用、保护和管理水资源所引发的水资源冲突事件,表现为不同利益主体之间关于水资源问题的矛盾和对立,若不能及时化解,将会进一步加剧冲突的频度与强度,导致冲突向更加消极的方向发展,不仅会影响水资源利用效率和周边环境安全,而且会影响区域经济社会发展与安全稳定^[2]。所以,跨界流域水资源冲突风险是一个值得深入研究的问题。因此,国内外学者运用定性研究和定量研究的方法,在冲突成因、风险评价和化解机制等方面展开了深入研究^[3]。

在定性研究方面,学者们主要是对水资源冲突的识别、成因及解决办法进行分析。在冲突识别与成因方面,吕添贵等^[4]对鄱阳湖流域水资源冲突识别、成因及对策展开了研究;Pena - Ramos 等^[5]对中亚地区水资源冲突问题进行了分析;杜德斌等^[6]提出水资源的供给与需求在总量及时间上的失衡与错位将诱发水资源冲突问题;田贵良等^[7]认为跨界水资源冲突的深层次原因在于水资源的产权制度不够完善,包括水资源分配、水资源交易及水资源监督管理 3 个层面。在冲突化解机制方面,葛金金等^[8]构建了矛盾协调框架,并以晋江流域为例进行分析;刘彦麟^[9]以石羊河流域为例,从管理体制方面提出了水资源冲突的解决方案,认为冲突预警监测是防治冲突的最重要阶段;孙冬营等^[10]认为制定公平的水资源分配方案有助于解决流域跨界水资源配置冲突问题;佟金萍等^[11]通过度量边界效应,提出相关措施防治水资源冲突。

在定量研究方面,国内外学者主要运用模糊理论、博弈论、F - H (Fraser - Hipel) 方法和图模型^[12]等方法对冲突风险评价和冲突演化展开了研究。考虑到水资源冲突风险评价中存在的不确定性,胡庆和等^[13]以资水流域为研究对象,构建了非线性模糊综合评价模型评估了该流域的水资源冲突风险;赵钟楠等^[14]从水量、水质、水生态要素等方面分析水资源风险的内涵,对我国水资源风险的现状进行了

评价,最后提出了相关建议以防控水资源风险;胡庆和等^[15]从水量、水质、生态和体制 4 个维度构建了水资源冲突风险评价指标体系来测度水资源冲突风险。鉴于水资源冲突的博弈特点和动态演化特征,Atef 等^[16]采用博弈论方法分析了跨界流域水资源冲突管理和水资源合作;钟勇等^[17]基于“囚徒困境”非合作博弈模型探讨了跨界流域水资源冲突的化解思路;李芳等^[18]基于非对称性“鹰鸽博弈”模型对跨区域水资源冲突的博弈策略进行了分析;袁亮等^[19]基于破产理论和讨价还价模型构建了基于主体不平等的跨国界河流水资源冲突的破产博弈模型。考虑到用水主体的主观偏好和利益需求,陈军飞等^[20]基于改进的 F - H 冲突分析方法构建了水量配置冲突分析框架,以此模拟冲突的演化过程。为了将 F - H 方法概念化和模型化,Kilgour 等^[21]开发了冲突分析的图模型;Bashar 等^[22]基于博弈参与人的偏好不确定性因素改进了冲突分析的图模型,用来分析水资源冲突管理问题;于晶等^[23]建立了不确定偏好下的跨区域水资源冲突分析的图模型,为控制水资源冲突提供了决策依据。

综上所述,国内外学者从风险识别、成因和控制等方面展开了研究,为跨界流域水资源冲突风险研究奠定了基础。但是,目前关于跨界流域水资源冲突风险的研究还存在以下不足:

(1) 现有关于水资源冲突风险的研究以定性研究为主,各种研究提出的化解策略的实用性有待进一步加强;

(2) 现有研究对水资源冲突风险的评价主要考虑社会、经济、水量和水质等 4 个方面,还需基于系统思维从更加全面的视角分析水资源冲突的来源,进行综合评价;

(3) 目前关于水资源冲突风险的研究多采用演化博弈或模拟仿真进行比较静态分析,缺乏量化冲突的指标,无法评估冲突的程度和预测冲突的动态发展态势。

基于此,本文从水量、用水效率、水质、生态环境和社会经济 5 个维度对水资源冲突风险进行较为全面的分析,并进一步考虑到水资源冲突风险具有的突发性与不确定性特征,采用集对分析理论,通过联系度的计算,将不确定因素转换成模糊数学问题,对水资源冲突风险进行静态评价,同时对水资源冲突

风险的发展态势进行动态分析,并通过水资源冲突风险指标诊断识别主要因素,这将有利于流域水资源冲突的预警和防控。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

漳河上游流域指岳城水库坝址以上的区域,地处晋冀豫三省交界,流域面积 17 874 km²,主要包括北部清漳河和南部浊漳河两大支流,研究区地理位置如图 1 所示。近年来,受全球气候变暖、自然降水减少和人类活动增多等因素影响,流域水资源总量逐渐减少。此外,漳河上游先后修建各类水库 100 多座,总库容约 14 × 10⁸ m³,水资源开发利用程度已远超其承载能力,该地区是我国水资源最短缺的地区之一^[24]。

随着经济社会的发展,流域用水需求增加,漳河上游水资源短缺和水事矛盾问题进一步恶化,区域的安全稳定面临严峻挑战^[25]。



图 1 漳河上游流域地理位置

2.2 研究方法

跨界流域水资源冲突风险指的是跨界流域用水主体之间因为水资源利用问题产生纠纷,甚至引发地区之间的冲突,导致社会动乱的可能性。由于水资源冲突风险具有突发性和不确定性,本文利用集对分析方法对流域水资源冲突风险展开研究,对冲突风险的等级进行静态评价,并对冲突风险的态势进行动态分析,以识别冲突风险引致因素,具体流程见图 2。

2.2.1 冲突风险评价指标体系构建 本文遵循系统性、一致性、简要性、独立性等原则,根据 Citespace 软件的词频分析构建水资源冲突风险评价指标体

系,充分考虑指标对水资源冲突风险的影响大小和数据的可获得性,从水量冲突、用水效率冲突、水质冲突、生态环境冲突、社会经济冲突等 5 个维度构建水资源冲突风险评价指标体系^[26-29],见表 1。

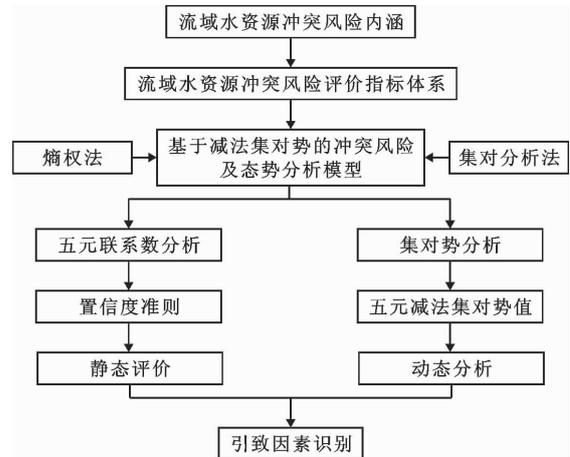


图 2 水资源冲突风险评价及态势分析研究流程

2.2.2 冲突风险评价模型

(1) 单指标联系度计算。将冲突风险评价标准分为 5 级,有 S_1, S_2, S_3, S_4 等 4 个评价标准门限值,对应相应的等级区间。

假设评价指标集合为 $A = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,评价等级标准为 $S_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 。评价指标在第 k 级的评价等级看作另一个集合 B_k ,则集合 A 与 B_k 构成一组集对 $H(A, B_k)$ 。 N 为集对 H 中所有特性的数量, S 为集合 A 与 B_k 共有的特性的个数, P 为集合 A 与 B_k 相对立的特性的个数, $F = N - S - P$,为集合 A 与 B_k 既不共有也不对立的特性的个数。此时,集合 A 与 B_k 联系度 U_{A-B_k} 的表达式如下^[30]:

$$U_{A-B_k} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

假设: a 为同一度, b 为差异度, c 为对立度, $a, b, c \in [0, 1]$,且有 $a + b + c = 1$; i 为差异度系数, $i \in [0, 1]$; j 为对立度系数, $j = -1$ 。则有:

$$U_{A-B_k} = a + bi + cj \quad (2)$$

由于风险存在不同条件下的确定性和不确定性,因此,将集对分析中联系数的差异度 b_i 进行拓展,则有:

$$U = a + b_1i_1 + b_2i_2 + b_3i_3 + cj \quad (3)$$

式中: $a, b_1, b_2, b_3, c \in [0, 1]$, a, b_1, b_2, b_3, c 满足归一化条件,并且满足 $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$; i_1, i_2, i_3 为各拓展项差异度系数, $i_1, i_2, i_3 \in [0, 1]$; j 为对立度系数, $j = -1$ 。

表 1 流域水资源冲突风险评价指标体系

目标层	准则层	指标层	计算方法或来源	指标含义	指标性质
水资源冲突风险(A)	水量冲突(B ₁)	人均水资源量 C ₁ /m ³	水资源总量 / 总人口	水资源丰缺状态	正向
		供水模数 C ₂ /10 ⁴ (m ³ · km ⁻²)	供水总量 / 区域面积	单位面积供水能力	正向
		产水模数 C ₃ /10 ⁴ (m ³ · km ⁻²)	水资源总量 / 区域面积	单位面积产水能力	正向
	用水效率冲突(B ₂)	水资源开发利用率 C ₄ /%	供水总量 / 水资源总量	水资源开发利用程度	负向
		万元 GDP 用水量 C ₅ /m ³	用水总量 / GDP	水资源与经济发展协调度	负向
		万元工业增加值用水量 C ₆ /m ³	工业用水量 / 工业增加值	工业用水效率	负向
		农田灌溉定额 C ₇ /(m ³ · hm ⁻²)	统计数据	农业用水效率	负向
		人均用水量 C ₈ /m ³	统计数据	居民人均用水情况	负向
	水质冲突(B ₃)	工业废水治理投资 C ₉ /10 ⁴ 元	统计数据	对废水治理的重视程度	正向
		城市污水处理厂污水处理能力 C ₁₀ /10 ⁴ (t · d ⁻¹)	统计数据	城市对污水的处理能力	正向
		城市污水处理率 C ₁₁ /%	污水处理量 / 污水总量	城市污水处理能力	正向
	生态环境冲突(B ₄)	生态环境用水率 C ₁₂ /%	生态环境用水量 / 用水量	生态系统对水资源的需求	负向
		森林覆盖率 C ₁₃ /%	森林面积 / 土地面积	区域水资源更新能力	正向
	社会经济冲突(B ₅)	城市人口密度 C ₁₄ /(人 · km ⁻²)	城市总人口 / 城市土地面积	国土面积人口压力	负向
		城镇化率 C ₁₅ /%	统计数据	城镇化程度	负向
		人口自然增长率 C ₁₆ /%	统计数据	人口对水资源的压力	负向
		GDP C ₁₇ /10 ⁸ 元	统计数据	地区经济发展水平	正向
		人均 GDP C ₁₈ /元	GDP 总量 / 总人口	区域经济发展状况	正向
		GDP 增长率 C ₁₉ /%	GDP 增长额 / GDP 总量	地区经济发展能力	正向

对于正向型指标,集对 $H(A, B_k)$ 的单指标联系度 μ_c^p 为:

$$\mu_c^p = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & (x_n \geq S_1) \\ \frac{2x_n - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{2S_1 - 2x_n}{S_1 - S_2}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & (\frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_n < S_1) \\ 0 + \frac{2x_n - S_2 - S_3}{S_1 - S_3}i_1 + \frac{S_1 + S_2 - 2x_n}{S_1 - S_3}i_2 + 0i_3 + 0j & (\frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_n < \frac{S_1 + S_2}{2}) \\ 0 + 0i_1 + \frac{2x_n - S_3 - S_4}{S_2 - S_4}i_2 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_n}{S_2 - S_4}i_3 + 0j & (\frac{S_3 + S_4}{2} \leq x_n < \frac{S_2 + S_3}{2}) \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2x_n - 2S_4}{S_3 - S_4}i_3 + \frac{S_3 + S_4 - 2x_n}{S_3 - S_4}j & (S_4 \leq x_n < \frac{S_3 + S_4}{2}) \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j & (x_n < S_4) \end{cases} \quad (4)$$

对于负向型指标,集对 $H(A, B_k)$ 的单指标联系度 μ_c^n 为:

$$\mu_c^n = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & (x_n \leq S_1) \\ \frac{S_1 + S_2 - 2x_n}{S_2 - S_1} + \frac{2x_n - 2S_1}{S_2 - S_1}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & (S_1 < x_n \leq \frac{S_1 + S_2}{2}) \\ 0 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_n}{S_3 - S_1}i_1 + \frac{2x_n - S_1 - S_2}{S_3 - S_1}i_2 + 0i_3 + 0j & (\frac{S_1 + S_2}{2} < x_n \leq \frac{S_2 + S_3}{2}) \\ 0 + 0i_1 + \frac{S_3 + S_4 - 2x_n}{S_4 - S_2}i_2 + \frac{2x_n - S_2 - S_3}{S_4 - S_2}i_3 + 0j & (\frac{S_2 + S_3}{2} < x_n \leq \frac{S_3 + S_4}{2}) \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2S_4 - 2x_n}{S_4 - S_3}i_3 + \frac{2x_n - S_3 - S_4}{S_4 - S_3}j & (\frac{S_3 + S_4}{2} < x_n \leq S_4) \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j & (x_n > S_4) \end{cases} \quad (5)$$

(2) 准则层综合联系度计算。单指标联系度分别乘以各指标对应的权重,对同一准则层下所有指标的加权结果进行求和即可得到准则层综合联系度 $\mu_{C,B}$:

$$\mu_{C,B} = \sum_{g=1}^l w_g a_g + \sum_{g=1}^l w_g b_{g,1} i_1 + \sum_{g=1}^l w_g b_{g,2} i_2 + \sum_{g=1}^l w_g b_{g,3} i_3 + \sum_{g=1}^l w_g c_g j \quad (6)$$

式中: C 为指标层, B 为准则层; l 为各准则层单指标的个数; a_g 为同一度, b_g 为差异度, c_g 为对立度; w_g 为第 g 个单指标的权重,由于熵权法能客观表述指标的相对重要性,故通过判断矩阵构建和归一化处理^[31],计算并确定各项指标的熵权,以增强结果的客观性。

(3) 目标层综合联系度计算。计算步骤与准则层综合联系度的计算类似,将公式(6)中的单指标联系度用准则层联系度替换,单指标权重用准则层权重替换,即可得到目标层综合联系度 $\mu_{B,A}$:

$$\mu_{B,A} = \sum_{g=1}^Z w_g a_g + \sum_{g=1}^Z w_g b_{g,1} i_1 + \sum_{g=1}^Z w_g b_{g,2} i_2 + \sum_{g=1}^Z w_g b_{g,3} i_3 + \sum_{g=1}^Z w_g c_g j \quad (7)$$

式中: Z 为目标层中指标的总数。

(4) 确定冲突风险等级。为增强评价的客观性,采用置信度准则来确定评价等级^[32],计算公式如下:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (8)$$

$$\text{式中: } f_1 = \sum_{g=1}^Z w_g a_g, f_2 = \sum_{g=1}^Z w_g b_{g,1}, f_3 = \sum_{g=1}^Z w_g b_{g,2}, f_4 = \sum_{g=1}^Z w_g b_{g,3}, f_5 = \sum_{g=1}^Z w_g c_g, f_1 \text{ 为添加权重后的同}$$

一度; f_2, f_3, f_4 为添加权重后的各个差异度; f_5 为添加权重后的对立度;本文以五元联系度的计算为例,取 $K = 5$; λ 为置信度,其范围为 $[0.5, 0.7]$,本文取 $\lambda = 0.5$; k 为评价等级; h_k 为目标层的 k 元联系度,当 $h_{k-1} \leq \lambda \leq h_k$ 时,风险等级为第 k 级。

(5) 确定流域冲突风险等级。采用均值法,取研究区3省五元联系度的均值得到漳河上游2011-2020年的五元联系度 H_k ,计算漳河上游冲突风险等级。

$$H_k = (F_1 + F_2 + \dots + F_k) > \lambda \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (9)$$

式中: $F_1 = (f_{1(HB)} + f_{1(HN)} + f_{1(SX)})/3, F_2 = (f_{2(HB)} + f_{2(HN)} + f_{2(SX)})/3, F_3 = (f_{3(HB)} + f_{3(HN)} + f_{3(SX)})/3, F_4 = (f_{4(HB)} + f_{4(HN)} + f_{4(SX)})/3, F_5 = (f_{5(HB)} + f_{5(HN)} + f_{5(SX)})/3$; HB、HN、SX分别代表河北、河南、山西。当 $H_{k-1} \leq \lambda \leq H_k$ 时,风险等级为第 k 级。

2.2.3 冲突风险态势分析 考虑到除法集对势 $S_f(u) = a/c$ 在 c 值很小时所得到的集对势值趋于不稳定,采用减法集对势展开研究^[33],即:

$$S_f(u) = a - c + bc - ba = (a - c)(1 - b) \quad (10)$$

将公式(10)中不确定性项的差异度 b 值按差异度系数的比值进行分配,构建五元减法集对势 $S_f(u)$ 的计算公式^[34]如下:

$$S_f(u) = (a - c)(1 + b_1 + b_2 + b_3) + 0.5(b_1 - b_3)(b_1 + b_2 + b_3) \quad (11)$$

式中: a 为同一度; b_1, b_2, b_3 为差异度; c 为对立度。

按照“均分原则”将 $S_f(u)$ 划分为5个势级^[30],如表2所示。

表2 减法集对势势级分级

态势	标准	含义
反势	$S_f(u) \in [-1, -0.6)$	水资源冲突风险高,严重阻碍社会稳定与可持续发展。
偏反势	$S_f(u) \in [-0.6, -0.2)$	水资源冲突风险较高,威胁到社会稳定与可持续发展。
均势	$S_f(u) \in [-0.2, 0.2]$	水资源冲突风险一般,基本维持社会稳定,促进可持续发展。
偏同势	$S_f(u) \in (0.2, 0.6]$	水资源冲突风险较低,社会稳定与可持续发展满意程度较高。
同势	$S_f(u) \in (0.6, 1.0]$	水资源冲突风险低,社会稳定与可持续发展满意程度很高。

2.3 数据来源

研究数据主要来源于河北省水利厅公布的《河北省水资源公报》(2011-2020年)、河南省水利厅公布的《河南省水资源公报》(2011-2020年)、山西省水利厅公布的《山西省水资源公报》(2011-2020年)等资料。部分数据来源于《中国统计年鉴》《国民经济和社会发展统计公报》和《生态环境状况公报》。

3 结果与分析

3.1 指标权重的确定

基于数据收集和熵权法,确定漳河上游水资源冲突风险评价指标体系的权重,见表3。

3.2 指标分级

为增强评估的合理性与有效性,将风险等级划分为“低、较低、中、较高、高”5个等级^[35]。“低”表

示发生水资源冲突的风险低,社会保持安全稳定;“高”表示发生水资源冲突的风险高,众多因素对社会的安全与稳定产生严重威胁。根据各项指标的

大值和最小值的差值等分确定每项指标的风险等级区间,将评价指标区间等分为 5 个等级^[36],等级划分及对应含义见表 4。

表 3 漳河上游水资源冲突风险评价指标体系权重

目标层	准则层	指标层	指标性质	权重		
				河北省	河南省	山西省
漳河上游 水资源冲突风险 (A)	水量冲突 (B ₁)	人均水资源量(C ₁)	正向	0.0444	0.0412	0.0547
		供水模数(C ₂)	正向	0.0738	0.0370	0.0371
		产水模数(C ₃)	正向	0.0434	0.0440	0.0519
	用水效率 冲突 (B ₂)	水资源开发利用(C ₄)	负向	0.0361	0.0386	0.0561
		万元 GDP 用水量(C ₅)	负向	0.0445	0.0496	0.0488
		万元工业增加值用水量(C ₆)	负向	0.0389	0.0498	0.0459
		农田灌溉定额(C ₇)	负向	0.0539	0.0532	0.0652
		人均用水量(C ₈)	负向	0.0560	0.0447	0.0465
	水质冲突 (B ₃)	工业废水治理投资(C ₉)	正向	0.0746	0.0590	0.0479
		城市污水处理厂污水处理能力(C ₁₀)	正向	0.0651	0.0664	0.0560
		城市污水处理率(C ₁₁)	正向	0.0659	0.0712	0.0528
	生态环境 冲突(B ₄)	生态环境用水率(C ₁₂)	负向	0.0615	0.0700	0.0420
		森林覆盖率(C ₁₃)	正向	0.0483	0.0645	0.0822
		城市人口密度(C ₁₄)	负向	0.0464	0.0517	0.0306
		城镇化率(C ₁₅)	负向	0.0535	0.0563	0.0516
	社会经济 冲突(B ₅)	人口自然增长率(C ₁₆)	负向	0.0568	0.0509	0.0471
		GDP(C ₁₇)	正向	0.0602	0.0623	0.0607
		人均 GDP(C ₁₈)	正向	0.0432	0.0607	0.0551
		GDP 增长率(C ₁₉)	正向	0.0335	0.0289	0.0678

表 4 水资源冲突风险评价指标分级标准

准则层	指标层	评价指标等级划分				
		低	较低	中	较高	高
B ₁	C ₁	> 336.00	[302.27, 336.00]	[268.53, 302.26]	[234.78, 268.52]	< 234.78
	C ₂	> 10.68	[9.67, 10.68]	[8.65, 9.66]	[7.62, 8.64]	< 7.62
	C ₃	> 18.57	[15.33, 18.57]	[12.08, 15.32]	[8.82, 12.07]	< 8.82
B ₂	C ₄	< 71.59	[71.59, 86.69]	[86.70, 101.79]	[101.80, 116.89]	> 116.89
	C ₅	< 60.87	[60.87, 64.05]	[64.06, 67.23]	[67.24, 70.40]	> 70.40
	C ₆	< 21.46	[21.46, 25.31]	[25.32, 29.16]	[29.17, 33.01]	> 33.01
	C ₇	< 154.42	[154.42, 166.19]	[166.20, 177.96]	[177.97, 189.73]	> 189.73
	C ₈	< 204.41	[204.41, 219.84]	[219.85, 235.27]	[235.28, 250.69]	> 250.69
B ₃	C ₉	> 42571.85	[40359.76, 42571.85]	[38147.66, 40359.75]	[35935.55, 38147.65]	< 35935.55
	C ₁₀	> 536.35	[442.97, 536.35]	[349.58, 442.96]	[256.18, 349.57]	< 256.18
	C ₁₁	> 92.53	[91.16, 92.53]	[89.77, 91.15]	[88.37, 89.76]	< 88.37
B ₄	C ₁₂	< 3.26	[3.26, 3.68]	[3.69, 4.10]	[4.11, 4.51]	> 4.51
	C ₁₃	> 27.12	[24.52, 27.12]	[21.91, 24.51]	[19.29, 21.90]	< 19.29
	C ₁₄	< 186.71	[186.71, 314.65]	[314.66, 442.59]	[442.60, 570.53]	> 570.53
B ₅	C ₁₅	< 45.65	[45.65, 47.70]	[47.71, 49.75]	[49.76, 51.81]	> 51.81
	C ₁₆	< 5.10	[5.10, 5.43]	[5.44, 5.76]	[5.77, 6.09]	> 6.09
	C ₁₇	> 30880.97	[25559.30, 30880.97]	[20237.62, 25559.29]	[14915.93, 20237.61]	< 14915.93
	C ₁₈	> 35150.05	[34646.16, 35150.05]	[34142.26, 34646.15]	[33638.35, 34142.25]	< 33638.35
	C ₁₉	> 9.51	[8.95, 9.51]	[8.38, 8.94]	[7.80, 8.37]	< 7.80

3.3 风险评价

借助五元联系度公式和置信度准则进行时空诊断分析,2011-2020年漳河上游及3个省份的水资源冲突风险等级评价结果如表5所示。由表5可知,2011-2020年3个省份的水资源冲突风险状况不一,2017年后冲突风险等级呈现下降的趋势,其中河北省V级和IV级占比最多,河南省I级占比最多,山西省V级占比最多。依据置信度准则, H_k 值越大表明水资源冲突风险越高,可见,山西省水资源冲突风险最大(V级),河南省水资源冲突风险最小(I级)。整体来看,漳河上游IV级占比最多,自2017年开始水资源冲突风险等级呈现下降趋势。

3.4 态势分析

根据修正后的五元减法集对势公式得到2011-2020年漳河上游3个省份水量、用水效率、水质、生

态环境和社会经济5个维度的水资源冲突风险集对势值变化特点,如图3和表6~8所示。

表5 2011-2020年漳河上游及其3个省份水资源冲突风险评价等级

年份	河北省	河南省	山西省	漳河上游
2011	V	III	V	IV
2012	III	IV	V	IV
2013	IV	IV	V	IV
2014	V	II	V	IV
2015	V	II	V	IV
2016	IV	I	V	IV
2017	IV	I	V	III
2018	III	I	I	II
2019	II	I	III	II
2020	II	I	III	II

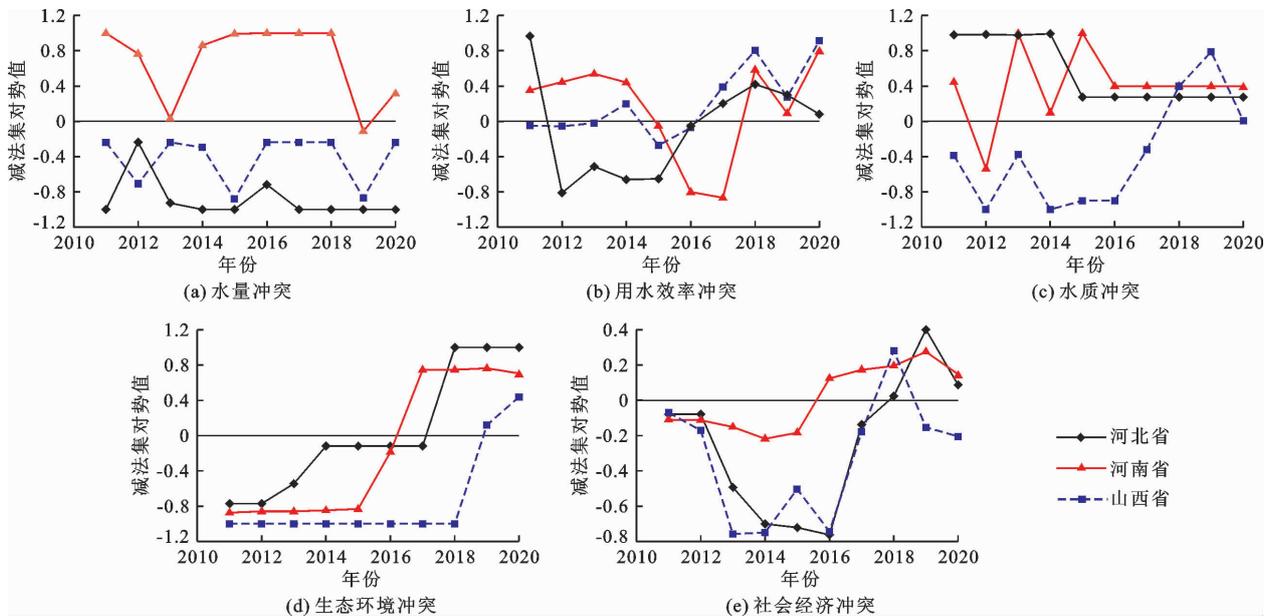


图3 2011-2020年漳河上游5个维度冲突风险的减法集对势值

表6 2011-2020年河北省水资源冲突风险评价指标值联系数的五元减法集对势

年份	水量冲突		用水效率冲突		水质冲突		生态环境冲突		社会经济冲突	
	集对势	态势	集对势	态势	集对势	态势	集对势	态势	集对势	态势
2011	-1.000	反势	0.964	同势	0.982	同势	-0.771	反势	-0.078	均势
2012	-0.236	偏反势	-0.811	反势	0.986	同势	-0.771	反势	-0.079	均势
2013	-0.926	反势	-0.514	偏反势	0.978	同势	-0.546	偏反势	-0.493	偏反势
2014	-1.000	反势	-0.660	反势	0.994	同势	-0.120	均势	-0.701	反势
2015	-1.000	反势	-0.654	反势	0.274	偏同势	-0.120	均势	-0.722	反势
2016	-0.719	反势	-0.053	均势	0.274	偏同势	-0.120	均势	-0.763	反势
2017	-1.000	反势	0.201	偏同势	0.274	偏同势	-0.120	均势	-0.138	均势
2018	-1.000	反势	0.420	偏同势	0.274	偏同势	1.000	同势	0.023	均势
2019	-1.000	反势	0.298	偏同势	0.274	偏同势	1.000	同势	0.402	偏同势
2020	-1.000	反势	0.080	均势	0.274	偏同势	1.000	同势	0.087	均势

表 7 2011 - 2020 年河南省水资源冲突风险评价指标值联系数的五元减法集对势

年份	水量冲突		用水效率冲突		水质冲突		生态环境冲突		社会经济冲突	
	集对势	态势								
2011	1.000	同 势	0.352	偏同势	0.445	偏同势	-0.873	反 势	-0.110	均 势
2012	0.767	同 势	0.446	偏同势	-0.537	偏反势	-0.860	反 势	-0.113	均 势
2013	0.029	均 势	0.539	偏同势	0.997	同 势	-0.860	反 势	-0.151	均 势
2014	0.861	同 势	0.441	偏同势	0.100	均 势	-0.846	反 势	-0.218	偏反势
2015	0.993	同 势	-0.050	均 势	1.000	同 势	-0.832	反 势	-0.183	均 势
2016	1.000	同 势	-0.801	反 势	0.400	偏同势	-0.184	均 势	0.124	均 势
2017	1.000	同 势	-0.868	反 势	0.400	偏同势	0.747	同 势	0.173	均 势
2018	1.000	同 势	0.586	偏同势	0.400	偏同势	0.747	同 势	0.195	均 势
2019	-0.111	均 势	0.093	均 势	0.400	偏同势	0.765	同 势	0.276	偏同势
2020	0.326	偏同势	0.806	同 势	0.400	偏同势	0.705	同 势	0.148	偏同势

表 8 2011 - 2020 年山西省水资源冲突风险评价指标值联系数的五元减法集对势

年份	水量冲突		用水效率冲突		水质冲突		生态环境冲突		社会经济冲突	
	集对势	态势								
2011	-0.238	偏反势	-0.047	均 势	-0.388	偏反势	-1.000	反 势	-0.070	均 势
2012	-0.709	反 势	-0.056	均 势	-1.000	反 势	-1.000	反 势	-0.170	均 势
2013	-0.238	偏反势	-0.020	均 势	-0.379	偏反势	-1.000	反 势	-0.758	反 势
2014	-0.297	偏反势	0.200	均 势	-1.000	反 势	-1.000	反 势	-0.750	反 势
2015	-0.881	反 势	-0.273	偏反势	-0.900	反 势	-1.000	反 势	-0.504	偏反势
2016	-0.238	偏反势	-0.073	均 势	-0.901	反 势	-1.000	反 势	-0.744	反 势
2017	-0.238	偏反势	0.389	偏同势	-0.321	偏反势	-1.000	反 势	-0.179	均 势
2018	-0.238	偏反势	0.802	同 势	0.398	偏同势	-1.000	反 势	0.282	偏同势
2019	-0.869	反 势	0.276	偏同势	0.789	同 势	0.120	均 势	-0.152	均 势
2020	-0.238	偏反势	0.914	同 势	0.006	均 势	0.439	偏同势	-0.204	偏反势

水量冲突方面(图 3(a)),河南省集对势值虽有波动,但始终处于均势、偏同势和同势的发展态势,整体情况良好;河北省处于反势的发展态势年份占比较大,情况不乐观;山西省一直在偏反势和反势间波动。用水效率冲突方面(图 3(b)),3 省集对势值均处于大幅度波动状态,河南省和山西省整体上呈现向好的发展态势,情况较河北省乐观。河北省和山西省自 2015 年起、河南省自 2017 年起呈现直线上升的发展态势。水质冲突方面(图 3(c)),自 2016 年开始,河北省与河南省的发展态势趋于一致,均向偏同势发展,情况乐观。2016 年之前,河北省的态势较河南省的稳定,河南省波动较大;山西省整体波动幅度较大,2018 年之前发展态势始终在偏反势和反势之间波动,2016 - 2019 年呈现大幅度向好的发展态势。生态环境冲突方面(图 3(d)),3 省

均是在经历了一段或两段时间平稳态势发展后呈现直线上升趋势,整体态势十分乐观。河北省自 2017 年开始向偏同势、同势的态势发展;河南省自 2015 年开始发展态势转向均势、偏同势、同势;山西省自 2018 年发展态势呈现直线上升的趋势,情况逐渐转好,在此之前始终处于反势的发展态势。社会经济冲突方面(图 3(e)),河南省整体呈现较为平稳的态势,先是均势而后向偏同势态势发展;河北省与山西省在 2018 年之前的发展态势基本一致,但在之后,河北省的发展态势比山西省乐观,山西省呈现偏反势的发展态势。

通过计算出的 3 个省份 2011 - 2020 年 5 个维度风险的集对势值(表 6 ~ 8),对冲突风险发展的态势进行分析,找出引致因素。由表 6 可看出,2011 - 2020 年河北省水资源冲突风险总体状况自 2017 年

起逐年改善,发展态势逐渐转为均势,需要重点关注水量冲突和用水效率冲突两个方面;由表7可看出,2011-2020年河南省水资源冲突风险总体状况自2014年起逐年改善,发展态势逐渐转为均势和偏同势;由表8可看出,2011-2020年山西省水资源冲突风险总体状况自2017年起逐年改善,发展态势逐渐转为均势和偏同势,需要重点关注水量冲突、水质冲突和社会经济冲突3个方面。

4 讨论

由于近年来气候变暖和人类活动的加剧,漳河上游也出现了一系列的水资源问题,水事纠纷时有发生,水资源冲突风险逐渐显现。因此,本文综合考虑水量、用水效率、水质、生态环境和社会经济等5个维度,构建了全面的水资源冲突风险的评价指标体系,形成了系统的水资源冲突风险评价框架;采用集对分析理论,利用同一度、差异度和对立度表示的联系度将不确定因素转换成模糊数,对冲突风险的5个维度分别进行了评价,对水资源冲突风险的指标进行诊断,识别了冲突风险的主要因素,并综合评价了流域的水资源冲突程度;通过修正的减法集对势值对冲突风险发展态势进行动态分析,提出了缓解流域水资源冲突风险的相应措施,这将有利于流域水资源冲突的预警和防控。结果表明该方法与研究区实际情况相契合,可用于该地区的水资源冲突风险的评价。

研究发现,在水利部指导和区域合作的共同作用下,漳河上游水资源风险等级呈现下降趋势,一方面,漳河上游按照国家水利发展的目标与区域经济社会发展战略的要求,从防洪安全、供水安全和生态安全三方面着手,在防汛抗旱、水资源管理、水生态治理修复等方面取得了显著成效,减少了矛盾和纠纷;另一方面,漳河上游水事纠纷由过去因争地引发水事纠纷转变为因争夺水资源和水能资源引发水事纠纷,为预防和解决水事纠纷问题,漳河上游管理局多次召开水事纠纷预防座谈会,就水资源的开发与利用与3省进行协商,制定水量分配方案,降低了水事纠纷发生频率。

从水资源冲突的5个维度来看,(1)河北省水量和用水效率方面不太乐观。因为河北省水资源先天不足、公众节水意识不强且用水粗放,同时存在节水基础薄弱、内生动力不足、刚性约束不强等问题^[37]。(2)河南省整体情况较好。依托2014年出台的《关于实行最严格水资源管理制度的实施意

见》,积极推进落实“三条红线”,在水利项目建设、节水型社会建设、防洪抗汛、做好干旱防御工作等方面成效显著。(3)山西省水量、水质和社会经济层面均处于弱势。因为山西省属温带大陆性季风气候,降水量、地表水资源量、地下水资源量均严重不足,面临严峻的资源型缺水和水质型缺水问题。并且,山西省作为煤炭资源型地区,产业发展需要大量的水资源,农业、服务业和采矿业耗水量大,水足迹较高^[38]。

5 结论

本文首先构建了流域水资源冲突风险评价指标体系;其次通过指标层、准则层、目标层联系度的计算,借助置信度准则对水资源冲突风险等级进行了静态评价;最后通过五元减法集对势值的计算对水资源冲突风险的发展态势进行动态分析,得出以下主要结论:

(1)漳河上游水资源冲突风险水平较低且呈现下降的态势。漳河上游管理局自1993年成立以来,积极开展水事纠纷调解工作,水事矛盾得到了一定程度的缓解。但是,由于冲突具有快速扩散性、时间敏感性和社会危害性等特点,一旦爆发会严重威胁社会的稳定,不利于社会的可持续发展。河北、河南、山西3省之间关于漳河上游取、用水问题的共同协商开展较少,利益共同体和流域共同体意识不强,水事纠纷问题难以得到根本解决,水资源冲突风险依然存在。

(2)山西省水资源冲突风险最高,河北省次之,河南省最小。山西省资源型和水质型缺水问题严重,水资源冲突风险程度较高;河北省作为主要的水源地向京津地区供水且连续干旱和长期超采使得其淡水资源急剧减少,冲突风险主要来源于水资源短缺;河南省整体处于弱冲突的状态,仍需积极推进“四水共治”,实现社会经济与生态环境保护高质量协调发展^[39]。

(3)从5个维度来看,水量冲突方面,河北省的情况最不乐观,山西省波动幅度较大;用水效率冲突方面,河北省波动幅度最大,情况与河南省和山西省相比不太乐观;水质冲突方面,山西省整体波动幅度较大,情况不乐观;生态环境冲突方面,3省均呈现向好的发展态势;社会经济冲突方面,山西省与河北省和河南省相比情况不是很乐观。

(4)跨界流域水资源冲突具有易发生和难调解的特点,化解冲突的重点是谋求利益关系的理性平

衡^[40]。漳河上游管理局要加强水资源利用管理,3省需要牢固树立利益共同体与流域共同体的理念。河北省要重点关注水资源的调配和利用效率,加快解决水资源短缺、水生态损害、水环境污染等问题,以提高水安全保障能力。河南省要继续统筹水利发展和安全,加大政策执行力度,实现可持续发展。山西省要重点关注水量、水质和社会经济等问题,考虑人口规模和经济发展水平,结合水资源自然条件在用水结构方面提出相关解决措施。

参考文献:

- [1] 李国英. 在 2022 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 中国水利, 2022(2): 1-10.
- [2] 牛文娟, 王伟伟, 戴传阳, 等. 跨界流域水资源冲突的脆性与评价[J]. 水利经济, 2017, 35(6): 59-65+81-82.
- [3] 喻子豪, 杜德斌, 刘承良, 等. 全球水冲突问题研究进展与热点的可视化分析[J]. 世界地理研究, 2020, 29(5): 893-904.
- [4] 吕添贵, 刘芳苹, 汪立, 等. 跨界流域水资源管理冲突识别、成因与机理及对策——以鄱阳湖流域为例[J]. 人民长江, 2021, 52(2): 85-89.
- [5] PENA - RAMOS J A, BAUGS P, FURSOVA D. Water conflicts in central Asia: Some recommendations on the non-conflictual use of water[J]. Sustainability, 2021, 13(6): 3479.
- [6] 杜德斌, 刘承良, 胡志丁, 等. “亚洲水塔”变化对中国周边地缘政治环境的影响[J]. 世界地理研究, 2020, 29(2): 223-231.
- [7] 田贵良, 李晓宇, 印浩, 等. 跨界水资源冲突协调的产权路径、博弈模型与案例仿真[J]. 管理工程学报, 2020, 34(6): 173-182.
- [8] 葛金金, 张汶海, 杨勇, 等. 水资源矛盾冲突协调技术研究: 以晋江流域为例[J]. 环境工程, 2020, 38(10): 47-52.
- [9] 刘彦麟. 石羊河流域水资源矛盾冲突及其管理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [10] 孙冬营, 王慧敏, 王圣. 社会选择理论在流域跨界水资源配置冲突决策问题中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(5): 37-44.
- [11] 佟金萍, 马剑锋, 秦腾, 等. 漳河流域跨界水资源冲突的边界效应研究[J]. 生态经济, 2015, 31(12): 136-141.
- [12] 赵微, 黄介生, 李娜. 水资源冲突分析研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 406-409.
- [13] 胡庆和, 施国庆, 黄涛珍, 等. 非线性 FCA 模型在流域水资源冲突风险评价中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 6-9.
- [14] 赵钟楠, 田英, 张越, 等. 水资源风险内涵辨析与中国水资源风险现状[J]. 人民黄河, 2019, 41(1): 46-50.
- [15] 胡庆和, 黄涛珍. 流域水资源冲突的风险评价[J]. 统计与决策, 2007(4): 34-37.
- [16] ATEF S S, SADEQINAZHAD F, FARJAAD F, et al. Water conflict management and cooperation between Afghanistan and Pakistan[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 875-892.
- [17] 钟勇, 刘慧, 田富强, 等. 跨界河流合作中的囚徒困境与合作进化的实现途径[J]. 水利学报, 2016, 47(5): 685-692.
- [18] 李芳, 吴凤平, 陈柳鑫, 等. 非对称性视角下跨境水资源冲突与合作的鹰鸽博弈模型[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 157-166.
- [19] 袁亮, 沈菊琴, 何伟军, 等. 基于主体不平等的跨国界河流水资源分配的破产博弈研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2018, 20(2): 65-69+91-92.
- [20] 陈军飞, 蔡苗, 孙冬营, 等. 基于改进 F-H 方法的区域水量配置冲突研究[J]. 软科学, 2018, 32(9): 84-89.
- [21] KILGOUR D M, HIPEL K W, FANG Liping. The graph model for conflicts[J]. Automatica, 1987, 23(1): 41-55.
- [22] BASHAR M A, HIPEL K W, KILGOUR D M, et al. Interval fuzzy preferences in the graph model for conflict resolution[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2018, 17: 287-315.
- [23] 于晶, 赵敏, 孙冬营, 等. 基于图模型的流域上下游水质污染冲突研究[J]. 水利学报, 2013, 44(12): 1389-1398.
- [24] YUAN Liang, HE Weijun, DEGEFU D M, et al. A system dynamics simulation model for water conflicts in the Zhanghe River Basin, China[J]. International Journal of Water Resources Development, 2021, 6: 1-17.
- [25] 王金凤, 武桃丽. 漳河上游径流变化特征及其归因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 165-171.
- [26] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量-质-域的京津冀水资源承载力综合评价[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 358-371.
- [27] 李昌彦, 王慧敏, 佟金萍, 等. 气候变化下水资源适应性系统脆弱性评价——以鄱阳湖流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(2): 172-181.
- [28] 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.
- [29] 金菊良, 汤睿, 周戎星, 等. 基于联系数的城市水生态文明建设评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 1-6+14.
- [30] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [31] 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.

(下转第 39 页)

- [14] NICCOLUCCI V, GALLI A, REED A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(16): 2939 - 2944.
- [15] 刘超,许月卿,孙丕苓,等. 基于改进三维生态足迹模型的张家口市生态可持续性评价[J]. *水土保持通报*, 2016,36(6):169 - 176.
- [16] LI Penghui, ZHANG Ruqian, XU Liping. Three-dimensional ecological footprint based on ecosystem service value and their drivers: A case study of Urumqi[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108117
- [17] 焦士兴,郭力菲,王安周,等. 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价[J]. *人民黄河*,2021,43(11):87 - 91 + 96.
- [18] 石蒙蒙,薛兴燕,赵勇,等. 基于GIS的河南省水足迹时空差异研究[J]. *人民黄河*,2016,38(2):75 - 79 + 83.
- [19] LIU Lingna, LEI Yalin, GE Jianping, et al. Sector screening and driving factor analysis of Beijing's ecological footprint using a multi-model method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 191: 330 - 338.
- [20] ZHAO Chunfu, CHEN Bin. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(21): 12723 - 12731.
- [21] XU Shichun, HE Zhengxia, Long Ruyin. Factors that influence carbon emissions due to energy consumption in China: Decomposition analysis using LMDI[J]. *Applied Energy*, 2014, 127: 182 - 193.
- [22] 孙才志,张灿灿. 中国人均水足迹驱动效应分解与空间聚类分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*,2018,39(2):1 - 11.
- [23] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[J]. *生态学报*,2008,28(3):1279 - 1286.
- [24] 李菲,张小平. 甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征[J]. *干旱区地理*,2020,43(6):1486 - 1495.
- [25] LIANG Dongzhe, LU Hongwei, FENG Liyang, et al. Assessment of the sustainable utilization level of water resources in the Wuhan metropolitan area based on a three-dimensional water ecological footprint model[J]. *Water*, 2021, 13(24): 3505.
- [26] 赵先贵,马彩虹,高利峰,等. 基于生态压力指数的不同尺度区域生态安全评价[J]. *中国生态农业学报*, 2007,15(6):135 - 138.
- [27] 李友光,袁榆梁,李卓成,等. 基于能值水生态足迹的河南省水资源可持续利用评价[J]. *人民黄河*,2022,44(6):100 - 104 + 162.
- [28] 沈玉洁. 基于生态足迹法的河南省水资源可持续利用分析[J]. *水资源开发与管理*,2020(6):47 - 52 + 3.
- [29] 武晗. 基于三维足迹家族模型的资源环境压力分析[D]. 郑州:河南财经政法大学,2021.
- [30] 焦士兴,郭力菲,王安周,等. 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价[J]. *人民黄河*,2021,43(11):87 - 91 + 96.

(上接第29页)

- [32] 万炳彤,鲍学英,李爱春. 隧道施工引起的地下水环境负效应评价体系研究[J]. *水资源与水工程学报*,2019,30(5):58 - 63 + 71.
- [33] 赵克勤,宣爱理. 集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J]. *系统工程*,1996(1):18 - 23 + 72.
- [34] 金菊良,李蔓,周戎星,等. 减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用[J]. *水资源保护*,2022,38(1):198 - 204.
- [35] 陈舞,孙海清,王浩,等. 山岭隧道坍塌风险评价的熵权-集对分析模型及工程应用[J/OL]. *工程科学与技术*, (2022-09-14) [2022-10-10]. DOI: 10. 15961/j.jsuese. 202200247.
- [36] 苏印,官冬杰,苏维词. 基于SPA的喀斯特地区水安全评价——以贵州省为例[J]. *中国岩溶*,2015,34(6):560 - 569.
- [37] 河北省水利厅节约用水处. 建立健全节水法规制度 全面提升水资源集约节约安全利用水平[J]. *河北水利*, 2021(12):8 - 9.
- [38] 刘秀丽,郭丕斌,王昕. 煤炭资源型地区产业能-水足迹效率及影响因素[J]. *生态学报*,2020,40(24):8999 - 9010.
- [39] 李乐乐. 河南:“四水同治”助力中原更出彩[J]. *河南水利与南水北调*,2018,47(12):5 - 6.
- [40] 李浩,黄薇,梁佩瑾. 基于博弈论的省际水事纠纷预防机制研究[J]. *长江科学院院报*,2011,28(12):72 - 76.