

基于可变毕达哥拉斯模糊和 VIKOR 耦合方法的冀中南地区水资源系统韧性评价

张小丽¹,姜力荣¹,马睿²,王文川¹,李彦彬¹,王慧杰²,江晨辉²

(1. 华北水利水电大学水资源学院; 2. 水利部水利水电规划设计总院)

摘要:为精准评估冀中南地区水资源系统韧性,从水资源系统扰动前、中、后 3 个阶段出发,选取涵盖自然环境、人口、社会经济、技术管理等关键因素的 18 个指标,构建了反映抵抗性、恢复性、适应性的冀中南地区水资源系统韧性评价指标体系。引入毕达哥拉斯模糊集(PFS)处理决策信息中的不确定性和模糊性,结合 PFS 熵测度和 PFS 散度测度确定指标权重,建立了基于可变毕达哥拉斯模糊和 VIKOR 耦合方法的水资源系统韧性评价模型。模型评价结果表明:2015—2023 年冀中南地区水资源系统韧性整体呈上升趋势,但受适应性子系统波动的影响,在 2018—2019 年、2021—2022 年出现波动;各市水资源系统韧性值虽有波动,但整体较好,在不同年份因特定指标变化导致韧性值变化。

关键词:可变毕达哥拉斯模糊;VIKOR;水资源系统韧性;冀中南地区

Evaluation of water resources system resilience based on variable Pythagorean fuzzy and VIKOR coupling method in central and southern regions of Hebei Province//Zhang Xiaoli¹, Jiang Lirong¹, Ma Rui², Wang Wenchuan¹, Li Yanbin¹, Wang Huijie², Jiang Chenhui² (1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power; 2. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources)

Abstract: To accurately evaluate the water resources system resilience in the central and southern regions of Hebei Province, based on the three stages of water resource system disturbance: before, during, and after, 18 indicators covering key factors such as natural environment, population, socioeconomy, and technical management were selected to construct an evaluation index system for water resource system resilience in the central and southern regions of Hebei Province, reflecting resistance, recovery, and adaptability. To address the uncertainty and fuzziness in decision-making information, the Pythagorean fuzzy set (PFS) was introduced. By combining PFS entropy measurement and PFS divergence measurement, the indicator weights were determined. The evaluation model for water resource system resilience based on variable Pythagorean fuzzy and VIKOR coupling method was established. The model evaluation results indicated that the water resources system resilience in the central and southern regions of Hebei Province showed an overall upward trend from 2015 to 2023, but was affected by fluctuations in the adaptive subsystem, leading to variations during 2018-2019 and 2021-2022. Although the resilience values of water resources systems in various cities fluctuate, they are generally good, and the resilience values change in different years due to changes in specific indicators.

Key words: variable Pythagorean fuzzy; VIKOR; water resources system resilience; central and southern regions of Hebei Province

水资源系统是由自然要素与人类活动相互作用形成的动态复合体系。Borgomeo^[1]将其定义为由水文过程、基础设施、生态系统和人类活动相互关联形成的整体,涵盖水的物理循环(降水、径流等)、工程设施(水库、管道等)以及社会决策(用水政策、经济行为等),是一个复杂、开放的动态系统。在人口持

续增长和经济社会快速发展的双重压力下,水资源系统的稳定性和可持续性面临严峻挑战^[2-3]。在此背景下,深入探究并提升水资源系统的韧性,对保障水安全、实现水资源可持续发展至关重要。

水资源系统内部要素之间的多维性、动态性以及多尺度耦合特征,决定了其韧性评价是一个多准

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006602);河南省高等学校青年骨干教师培养计划;河南省自然科学基金项目(262300421761);国家自然科学基金青年科学基金项目(51709108)

作者简介:张小丽(1985—),女,副教授,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail:zx1436@163.com

通信作者:马睿(1988—),女,高级工程师,博士,主要从事水资源规划与战略研究。E-mail:marui@giwp.org.cn

则决策难题。Hashimoto 等^[4]最早将韧性概念引入水资源领域,用抵抗性、恢复性和适用性 3 个指标来评估水资源系统的性能,由此开启了水资源系统韧性评价领域的多准则决策研究范式。目前研究者提出了多种韧性评价方法,如甘容等^[5]基于熵权法确定各评价指标的权重,采用模糊综合评价法、灰关联分析法和 TOPSIS 法对信阳市水资源系统韧性进行了评价;付帅等^[6]采用熵权法计算指标权重,采用综合评价法分析了鄱阳湖流域水资源-经济-生态系统韧性;周铭毅等^[7]采用熵权法和多准则妥协解排序法(VIKOR)对广东省 21 个地级市的洪涝灾害韧性进行评估;黄生志等^[8]基于层次分析-熵权法评价了陕西省 2020 年和 2035 年的水资源系统韧性。尽管上述方法取得了一定的成果,但存在难以处理水资源系统指标模糊或区间数据的问题^[9]。

为解决多准则决策难题中的不确定性问题,Atanassov 于 1986 年提出了直觉模糊集(intuitionistic fuzzy set,IFS)理论^[10],通过引入隶属度与非隶属度,更准确地刻画了元素的不确定性,提高了传统模糊集在模糊决策中的适用性。然而,IFS 仍受到“隶属度与非隶属度之和不超过 1”的限制,导致其在处理更高程度不确定性时存在一定的表达瓶颈。为进一步提升信息表达的灵活性与精度,Yager 等^[11]于 2013 年提出了毕达哥拉斯模糊集(Pythagorean fuzzy set,PFS)。作为对 IFS 的推广,PFS 允许“隶属度与非隶属度之和大于 1”,放宽了 IFS 的约束条件,从而允许决策者在更广的范围内表达判断偏好与模糊性,有效缓解了传统模糊语言表达不足、信息失真的问题^[12]。随着决策问题日益复杂,PFS 被广泛应用于多准则决策中,并逐渐成为研究热点。已有研究中,不少学者将 PFS 与 VIKOR 结合,利用 PFS 优越的不确定性表达能力与 VIKOR 在多属性妥协优化中的优势,实现了对多属性信息的综合评价^[13]。如 Wu 等^[14]将区间值 PFS 与 VIKOR 结合评价了石油污泥处理技术;Yu 等^[15]基于 PFS 与 VIKOR 评价了岸桥安全风险。

鉴于此,本文引入可变模糊集与相对隶属度机制,利用可变集动态调整元素的模糊特性,更灵活地应对信息不完备与模糊性;利用相对隶属度反映决策者在不同属性上的差异性偏好,从而更精准地获取模糊信息。立足水资源系统韧性的视角,通过可变集和相对隶属度,得到可变毕达哥拉斯模糊(variable Pythagorean fuzzy,VPF)决策矩阵,并与 VIKOR 结合,构建基于 VPF 和 VIKOR 耦合方法的水资源系统韧性评价模型(以下简称“VPF-VIKOR 模型”),对冀中南地区水资源系统韧性进行评价,以期

为区域水资源安全保障以及可持续发展提供支撑。

1 研究区概况

冀中南地区指河北省内位于京津以南的地区,包括保定市、石家庄市、沧州市、衡水市、邢台市、邯郸市及廊坊市(图 1)。该区域人口密集、经济发达、河网密布,主要由山麓平原、中部平原和滨海平原组成,海河流域贯穿全境。在水源配置上,着力打造以南水北调中线、引黄入冀补淀、位山引黄、南水北调东线、李家岸引黄等跨流域调水工程为骨干,以廊涿、天津干线、雄安干渠、保沧、石津、邢清、邯沧等 7 条大型输水干渠为网络,以太行山区的岗南、黄壁庄、王快、西大洋、东武仕、朱庄等 6 座大型水库为补充,利用白洋淀、衡水湖、大浪淀、广阳等 4 座平原水库实施调蓄配置的“四纵七横多库”供水资源网络,实现多水源统一配置调度,保障城镇和重点区域、河湖生态用水,解决水资源宏观调控以及流域防洪、抗旱的问题^[16]。

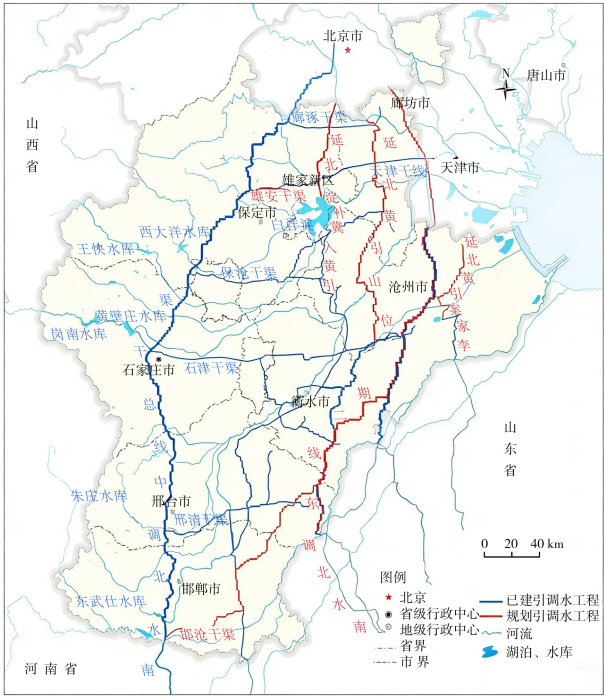


图 1 冀中南地区概况

Fig.1 Overview of central and southern regions of Hebei Province

本文所有数据均来源于 2015—2023 年河北省以及各市的统计年鉴、水资源公报、国民经济和社会发展统计公报。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

韧性可以看作水资源系统在受到外部冲击或内部变化时,提升系统自身的适应性,并不断适应外部

冲击和内部变化的循环过程。这一过程中,系统经历了从风险冲击到冲击后维持自身稳定再到迅速恢复,甚至将危机转变为机遇,实现创新发展等不同阶段^[17]。基于此,本文针对水资源系统扰动前、扰动中和扰动后 3 个阶段,对应分析抵抗性、恢复性、适应性 3 类指标^[18]。水资源系统的韧性可以分解为:干扰前水资源系统抵御外界干扰、保持功能不受损害的能力;干扰中水资源系统在功能受损后能够迅速恢复到正常状态的能力;干扰后水资源系统在面对新的环境条件或需求变化时,能够调整自身结构和功能以适应这些变化的能力^[19]。由于水资源系统面临的压力是多方面的,其韧性取决于自然环境、人口、社会经济、技术管理等多个子系统间的相互作用,水资源系统韧性评价的指标体系需要从多维度进行构建。本文参考 Leštáková 等^[20-22]的研究成果,从扰动阶段的时间属性、指标属性的功能指向及因果链的逻辑验证(阶段-功能-逻辑)三方面入手,选择抵抗性、恢复性和适应性对应的指标,构建水资源系统韧性评价指标体系(图 2)。

抵抗性通常指系统在面对干扰时保持稳定状态的能力^[23],反映系统在未受干扰时的防御基础,如资源禀赋、基础设施等。此类指标多为存量指标或强度指标,体现系统的抗压阈值,指标值越稳定、越优(如水资源总量越高、开发利用率越低),系统抵御干扰的能力越强。抵抗性指标变化直接影响系统“抗干扰门槛”,如人口密度越高,抵抗性越弱。

恢复性是衡量系统在面对扰动或灾害后,能够迅速恢复到正常状态的能力^[22],反映系统在干扰过程中的修复效率,如污染物处理、资源再利用等。此类指标多为流量指标或效率指标,体现系统修复速度,指标值越优(如污水处理量越高、单位产值能耗越低),系统从受损状态恢复的效率越高。恢复性指标变化直接影响系统修复效率(如第三产业占比越高,经济结构越低碳),系统在污染后恢复水质的



图 2 冀中南地区水资源系统韧性评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of water resources system resilience in central and southern regions of Hebei Province

压力越小。适应性指系统调整结构或策略以适应环境变化的能力^[23-24],反映系统在干扰后的调整能力,如政策投入、技术创新等。此类指标多为投入指标或结构指标,体现系统进化潜力,指标值越优(如生态用水越多、财政收入增长越快),系统对新环境的调整能力越强。适应性指标变化直接影响系统转型能力,如森林覆盖率越高,生态系统自我调节能力越强,适应气候变化的潜力越大。

参考《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》、GB/T 32716—2016《用水定额编制技术导则》、相关文献^[24-26]以及行业标准,结合冀中南地区实际情况,得到评价指标等级标准(表 1)。

2.2 VPF-VIKOR 模型

VPF-VIKOR 模型的构建思路为:在已获取韧性评价指标值的前提下,首先,根据可变模糊集和相对

表 1 评价指标等级标准

Table 1 Evaluation index level standards									
等级	n_1/m^3	$n_2/(\text{人}/\text{km}^2)$	$n_3/\text{亿 m}^3$	$n_4/\text{亿 m}^3$	n_5/m^3	$n_6/\%$	$n_7/\text{亿 m}^3$	$n_8/\text{亿 m}^3$	$n_9/\text{亿 m}^3$
非常强	≤ 100	≤ 100	> 2000	> 30	≤ 500	≤ 10	≤ 2	≤ 5	> 4
强	$> 100 \sim 200$	$> 100 \sim 200$	$> 1500 \sim 2000$	$> 24 \sim 30$	$> 500 \sim 1000$	$> 10 \sim 40$	$> 2 \sim 3$	$> 5 \sim 10$	$> 3 \sim 4$
一般	$> 200 \sim 300$	$> 200 \sim 350$	$> 1000 \sim 1500$	$> 17 \sim 24$	$> 1000 \sim 1700$	$> 40 \sim 70$	$> 3 \sim 4$	$> 10 \sim 15$	$> 2 \sim 3$
弱	$> 300 \sim 400$	$> 350 \sim 500$	$> 500 \sim 1000$	$> 10 \sim 17$	$> 1700 \sim 2200$	$> 70 \sim 100$	$> 4 \sim 5$	$> 15 \sim 20$	$> 1 \sim 2$
非常弱	> 400	> 500	≤ 500	≤ 10	> 2200	> 100	> 5	> 20	≤ 1
等级	$n_{10}/\%$	$n_{11}/(\text{kWh}/\text{万元})$	n_{12}/m^3	$n_{13}/\text{亿 m}^3$	$n_{14}/\text{亿元}$	$n_{15}/\%$	$n_{16}/\text{亿元}$	$n_{17}/\%$	$n_{18}/\%$
非常强	> 60	≤ 650	> 2200	> 5	> 50	> 30	> 20	> 45	> 50
强	$> 50 \sim 60$	$> 650 \sim 750$	$> 1700 \sim 2200$	$> 3 \sim 5$	$> 40 \sim 50$	$> 24 \sim 30$	$> 14 \sim 20$	$> 41 \sim 45$	$> 40 \sim 50$
一般	$> 40 \sim 50$	$> 750 \sim 850$	$> 1000 \sim 1700$	$> 2 \sim 3$	$> 30 \sim 40$	$> 16 \sim 24$	$> 8 \sim 14$	$> 38 \sim 41$	$> 30 \sim 40$
弱	$> 30 \sim 40$	$> 850 \sim 1000$	$> 500 \sim 1000$	$> 1 \sim 2$	$> 20 \sim 30$	$> 8 \sim 16$	$> 3 \sim 8$	$> 35 \sim 38$	$> 20 \sim 30$
非常弱	≤ 30	> 1000	≤ 500	≤ 1	≤ 20	≤ 8	≤ 3	≤ 35	≤ 20

隶属度定义计算各指标的隶属度和非隶属度,并结合 PFS 的定义,构建 VPF 决策矩阵;其次,利用 VIKOR 计算 VPF 决策矩阵中各方案的最大群体效益值 S_j 、个体遗憾值 I_j 和利益比率值 Q_j ,其中,各指标的权重基于 PFS 熵测度和 PFS 散度测度获得;最后,计算各子系统的综合度量值,并利用耦合协调度模型计算水资源系统的韧性值。模型计算流程见图 3。

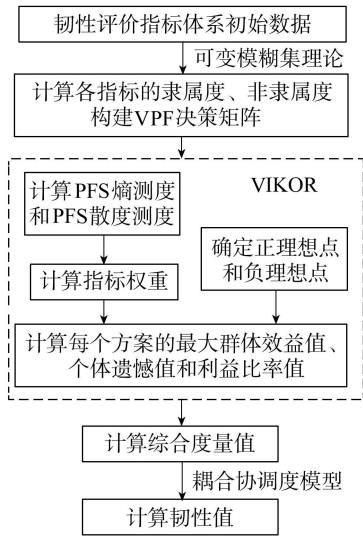


图3 模型计算流程

Fig.3 Model calculation process

2.2.1 构建 VPF 决策矩阵

设 U 为论域,则 U 上的 PFS^[27-28] 为:

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle \mid x \in U \} \quad (1)$$

式中: $\mu_A(x)$ 、 $\nu_A(x)$ 分别为 U 中元素 x 属于 A 的隶属度和非隶属度,即 $\mu_A(x) \in [0, 1]$, $\nu_A(x) \in [0, 1]$, 且 $0 \leq \mu_A^2(x) + \nu_A^2(x) \leq 1$, $\forall x \in U$ 。此外, $\pi_A(x) = \sqrt{1 - \mu_A^2(x) - \nu_A^2(x)}$ ($\forall x \in U$) 为 U 中元素 x 属于 A 的犹豫度。为方便表述,将 $\mu_A(x)$ 和 $\nu_A(x)$ 分别记为 μ_α 和 ν_α ,称 $\alpha = \langle \mu_\alpha, \nu_\alpha \rangle$ 为 PFS。

本文对隶属度和非隶属度的计算基于可变模糊集理论^[29-30]和相对隶属度的计算。设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上可变模糊集合的吸引域区间, $X_1 = [c, d]$ 为包含 X_0 ($X_0 \subset X_1$) 的某一值域区间, M 为区间 $[a, b]$ 中的 μ_α 点, x 为区间 X_1 内任意点的量值,当 x 落入 M 点左、右侧时,相对隶属度计算公式分别为:

$$\mu_\alpha = \begin{cases} 0.5 \left[1 + \left(\frac{x-a}{M-a} \right)^f \right] & x \in [a, M] \\ 0.5 \left[1 - \left(\frac{x-a}{c-a} \right)^f \right] & x \in [c, a] \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_\alpha = \begin{cases} 0.5 \left[1 + \left(\frac{x-b}{M-b} \right)^f \right] & x \in [M, b] \\ 0.5 \left[1 - \left(\frac{x-b}{d-a} \right)^f \right] & x \in [b, d] \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为大于 0 的指数,本文取 $f = 1$ 。式(2)和式(3)满足当 $x=a, b$ 时, $\mu_\alpha = 0.5$; 当 $x=M$ 时, $\mu_\alpha = 1$; 当 $x=c, d$ 时, $\mu_\alpha = 0$ 。

基于以上理论,设有 m 个研究对象,每个研究对象有 n 个评价指标,研究对象的指标特征值矩阵 $X = (x_{ij})$, x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) 为第 j 个研究对象的第 i 个指标的特征值。以特征值作为论域中的元素,计算相对隶属度、隶属度和非隶属度,进而基于矩阵 X 构建 VPF 决策矩阵 $Y = (\langle \mu_{\alpha_{ij}}, \nu_{\alpha_{ij}} \rangle) = (\alpha_{ij})$, α_{ij} 为第 j 个研究对象在第 i 个指标上的 PFS。

2.2.2 基于 PFS 熵测度和 PFS 散度测度确定指标权重

PFS 熵测度用于衡量 PFS 本身的不确定性或信息匮乏程度,熵值越大,表示该集合越不确定;PFS 散度测度用于衡量两个 PFS 之间的差异、不相似性或分离程度,距离值越大,表示两个集合越不相同,反映指标对方案排序的区分能力。在确定指标权重时,引入 PFS 熵测度和 PFS 散度测度可以同时考虑指标的不确定性和区分度,使得权重值更贴合实际。

根据 IFS 相关理论及 Rani 等^[31-32]的研究成果,当 $\mu_\alpha + \nu_\alpha = 1$ 时, PFS 熵测度的计算公式可以简化为:

$$\zeta(\alpha) = \frac{\mu_\alpha e^{\nu_\alpha} + \nu_\alpha e^{\mu_\alpha} - 1}{\sqrt{e} - 1} \quad (4)$$

式中: $\zeta(\alpha)$ 为 PFS 熵测度。

设 $\beta = \langle \mu_\beta, \nu_\beta \rangle$, 根据文献[28], 当 $\mu_\alpha + \nu_\alpha = 1$, $\mu_\beta + \nu_\beta = 1$ 时, PFS 散度测度计算公式可以简化为:

$$\xi(\alpha, \beta) = \frac{1}{\sqrt{e} - 1} \left[\left(\frac{\mu_\alpha + \mu_\beta}{2} \right) \exp\left(\frac{\nu_\beta + \nu_\alpha}{2}\right) + \left(\frac{\nu_\alpha + \nu_\beta}{2} \right) \exp\left(\frac{\nu_\alpha + \nu_\beta}{2}\right) - \frac{\mu_\alpha e^{\nu_\alpha} + \nu_\alpha e^{\mu_\alpha} + \mu_\beta e^{\nu_\beta} + \nu_\beta e^{\mu_\beta}}{2} \right] \quad (5)$$

式中: $\xi(\alpha, \beta)$ 为 PFS 散度测度。

设第 i 个指标的权重为 w_i , 且 $0 \leq w_i \leq 1$ 。设 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 为评价指标权重向量, 其中 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。根据文献[28], 基于 PFS 熵测度和 PFS 散度测度的指标权重计算公式为:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^m \left\{ \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m \xi(\alpha_{ij}, \alpha_{it}) + [1 - \zeta(\alpha_{ij})] \right\}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m \xi(\alpha_{ij}, \alpha_{it}) + [1 - \zeta(\alpha_{ij})] \right\}} \quad (t \neq j) \quad (6)$$

2.2.3 利用 VIKOR 计算利益比率值

VIKOR 是解决多准则决策问题的有效手

段^[33],其核心思想为:确定正理想方案和负理想方案后,计算各备选方案最大群体效益值 S_j 、个体遗憾值 I_j 和利益比率值 Q_j ,并根据 Q_j 来确定方案的优劣顺序。 S_j 、 I_j 、 Q_j 值基于度量值 L_p 求得(p 为度量参数), L_p 的计算公式可见文献[34]。为了评估以VPF形式给出的多属性决策问题,本文结合PFS散度测度的概念,将 L_p 的计算公式拓展为:

$$L_{p,j} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[w_i \frac{\xi(\alpha_j^+, \alpha_{ij})}{\xi(\alpha_j^+, \alpha_j^-)} \right]^p \right\}^{1/p} \quad (1 \leq p \leq \infty) \tag{7}$$

式中: $L_{p,j}$ 为第 j 个研究对象的度量值; α_j^+ 、 α_j^- 分别为第 j 个研究对象第 i 个指标的最大、最小PFS,即正理想解和负理想解。 $p=1$ 对应曼哈顿距离,强调所有指标的平均偏离; $p=\infty$ 对应切比雪夫距离,强调指标中的最大偏离。

进而得到 S_j 、 I_j 、 Q_j 的计算公式为:

$$S_j = L_{1,j} = \sum_{i=1}^n w_i \frac{\xi(\alpha_j^+, \alpha_{ij})}{\xi(\alpha_j^+, \alpha_j^-)} \tag{8}$$

$$I_j = L_{\infty,j} = \max_{1 \leq i \leq n} \left[w_i \frac{\xi(\alpha_j^+, \alpha_{ij})}{\xi(\alpha_j^+, \alpha_j^-)} \right] \tag{9}$$

$$Q_j = \tau \frac{S_j - S^-}{S^+ - S^-} + (1 - \tau) \frac{I_j - I^-}{I^+ - I^-} \tag{10}$$

其中

$$S^+ = \max(S_j) \quad S^- = \min(S_j)$$
$$I^+ = \max(I_j) \quad I^- = \min(I_j)$$

式中: $\tau \in [0,1]$ 为决策系数。

2.2.4 水资源系统韧性计算

利用综合度量值衡量不同指标下水资源系统韧性的表现,其值越大表示水资源系统在该指标下的表现越好,计算公式为:

$$R_k = 1 - Q_k \tag{11}$$

式中: R_k 为综合度量值, $k=1,2,3$ 时, R_k 分别为抵抗性综合度量值、恢复性综合度量值、适应性综合度量值。每个方案都有对应的 R_1 、 R_2 、 R_3 ,利用式(10)及表1进一步计算每个方案对应的 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 。

水资源系统韧性受抵抗性、恢复性、适应性3类指标的共同影响,本文采用耦合协调度^[34-36]表征水资源系统韧性与不同指标之间的关系,进而计算水资源系统的韧性值,计算公式为:

$$D = \sqrt{CT} \tag{12}$$

其中

$$C = 3 \left[\frac{R_1 R_2 R_3}{(R_1 + R_2 + R_3)^2} \right]^{1/3}$$
$$T = aR_1 + bR_2 + cR_3$$

式中: D 为水资源系统韧性值,取值范围为0~1,其值越大,水资源系统韧性水平越高; C 为各指标间的耦合度,取值范围为0~1,其值越大,各子系统之间

耦合程度越强; T 为协调指数; a 、 b 、 c 分别为抵抗性、恢复性和适应性子系统对水资源系统韧性的贡献系数, $a+b+c=1$,本文取 $a=b=c=1/3$ 。

2.3 评价步骤

步骤1 基于冀中南地区2015—2023年各指标数据,计算冀中南地区水资源系统韧性评价指标的隶属度和非隶属度,进而构建VPF决策矩阵。

步骤2 基于VPF决策矩阵及式(6),计算得到冀中南地区水资源系统韧性评价指标权重:抵抗性指标权重向量为(0.134, 0.011, 0.001, 0.051, 0.053),恢复性指标权重向量为(0.134, 0.058, 0.016, 0.133, 0.003, 0.003),适应性指标权重向量为(0.011, 0.039, 0.018, 0.033, 0.181, 0.117)。

步骤3 确定冀中南地区水资源系统韧性评价指标的正理想方案和负理想方案,结果见表2。

表2 各指标正理想方案和负理想方案

Table 2 Positive ideal scheme and negative ideal scheme of each indicator

指标	负理想方案	正理想方案
n_1	(0.656, 0.344)	(0.935, 0.065)
n_2	(0.461, 0.539)	(0.706, 0.294)
n_3	(0.501, 0.499)	(0.514, 0.486)
n_4	(0.593, 0.407)	(0.881, 0.119)
n_5	(0.534, 0.466)	(0.579, 0.421)
n_6	(0.049, 0.951)	(0.750, 0.250)
n_7	(0.681, 0.319)	(0.957, 0.043)
n_8	(0.559, 0.441)	(0.886, 0.114)
n_9	(0.535, 0.465)	(0.844, 0.156)
n_{10}	(0.764, 0.236)	(0.945, 0.055)
n_{11}	(0.069, 0.931)	(0.638, 0.362)
n_{12}	(0.500, 0.500)	(0.644, 0.356)
n_{13}	(0.514, 0.486)	(0.863, 0.137)
n_{14}	(0.550, 0.450)	(0.906, 0.094)
n_{15}	(0.210, 0.790)	(0.730, 0.270)
n_{16}	(0.514, 0.486)	(0.895, 0.105)
n_{17}	(0.830, 0.170)	(0.954, 0.046)
n_{18}	(0.767, 0.233)	(0.926, 0.074)

步骤4 利用VIKOR计算冀中南水资源系统韧性的抵抗性综合度量值、恢复性综合度量值、适应性综合度量值。

步骤5 基于耦合协调度计算冀中南地区水资源系统韧性值。

3 结果与分析

图4为2015—2023年冀中南地区水资源系统韧性综合度量值。由图4可见,冀中南地区水资源抵抗性子系统综合度量值呈现不稳定的波动上升趋势,原因是该子系统主要受水资源总量、供水总量、人均用水量等因素影响。冀中南地区水资源总量在时间上的分布不均造成水资源的波动起伏,供水总

量基本保持不变,同时人口密度始终呈上升趋势(2013—2023 年上升 2.14%),使得人均水资源量的下降,对抵抗性子系统造成一定压力,呈现不稳定波动趋势。为缓解地区缺水压力,水资源开发利用一直维持在较高水平,远高于国际公认的 40% 安全标准,说明冀中南地区水资源抵抗性子系统的抗扰动能力较弱。随着科学技术不断发展,万元 GDP 用水量始终呈下降趋势(2013—2023 年减少 38.25%),但距离国内先进水平的 5 m^3 和世界先进水平的 3.75 m^3 仍有较大提升空间。因此,抵抗性子系统虽然相对较弱,但整体仍呈波动上升趋势。

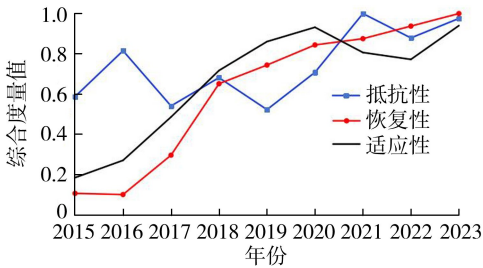


图 4 2015—2023 年冀中南地区水资源系统韧性综合度量值
Fig. 4 Comprehensive measurement values of water resources system resilience in central and southern regions of Hebei Province from 2015 to 2023

由图 4 可见,2015—2016 年冀中南地区水资源恢复性子系统综合度量值出现小幅度下降,2016—2023 年稳步上升,其中 2016—2018 年上升趋势最明显。主要原因是,2016 年冀中南地区污水处理量较 2015 年下降 8.3%,导致恢复性子系统出现小幅度下降趋势。由于工艺发展迅速,2018 年污水处理量较 2016 年提升 9.9%,同时 2018 年第三产业占比较 2016 年提升 17.1%,导致恢复性子系统综合度量值迅速上升。2019—2023 年,冀中南地区污水处理量处于相对稳定水平,第三产业占比提升较为缓慢,只有 3.3%,单位产能消耗降低 0.5%。目前,冀中南地区水资源恢复性子系统的修复效率还相对较弱,但污水处理量、第三产业占比、单位产值消耗仍有很大进步空间,因此恢复性子系统仍呈现上升趋势。

由图 4 可见,冀中南地区水资源适应性子系统整体呈现上升趋势,但在 2020—2022 年出现小幅度下降。从构成适应性子系统的指标来看,主要受环保治理投资影响。随着经济不断发展,污染物排放不断增加,2015—2020 年,冀中南地区环保治理投资不断增加,因此适应性子系统的调整能力不断提升,综合度量值呈现上升趋势;但 2020—2022 年,环保治理投资减少 34.3%,因此适应性子系统的综合度量值出现了 0.16 的小幅度下降;2022—2023 年,随着环保治理投资恢复,适应性子系统的综合度量

值再次呈现上升趋势。由此可见,虽然经济发展会对水资源系统的适应性造成影响,但随着环保治理投资的不断加大,水资源系统韧性与经济发展之间的矛盾并非不可协调。通过以上分析,可以看出冀中南地区水资源系统韧性仍具有较大上升空间,可以通过加大环保投资和治理力度等方法来提升。

图 5 为 2015—2023 年冀中南地区水资源韧性值。由图 5 可见,2015—2023 年冀中南地区水资源系统韧性值整体呈上升趋势,其变化过程可以分为 3 个阶段:第一阶段为 2015—2021 年,期间冀中南地区水资源系统韧性稳步上升,由 0.42 上升至 0.67,该阶段主要有南水北调中线等引水工程的加持,且采取了节水措施与环保政策,如投放节水贷助力企业实施节水改造、发布了《河北省用水定额》等;第二阶段为 2021—2022 年,期间冀中南地区水资源系统韧性下降 0.1,原因是冀中南部分地区出现了干旱,根据国家预警发布中心报道,2022 年 6 月中旬保定南部、廊坊南部、石家庄北部、沧州西部、衡水北部、邢台东部、邯郸东部已经出现重度气象干旱,水资源总量较上一年下降 48.1%,冀中南地区为保证生产生活不受影响,除跨流域调水以外,还大量开采了地下水;第三阶段为 2022—2023 年,冀中南地区水资源系统韧性达到 0.69,为历年以来最高值,原因是除了水资源总量在摆脱干旱后逐渐恢复以外,还在节水技术推广方面取得了成果,如邢台市引入智慧水务平台实时监测管网漏损、深泽县出台节水奖励办法、沧州市运东污水处理厂优化工艺和设备等。同时,冀中南地区也为应对干旱修建了大量调水、储水工程,一定程度上提高了冀中南地区水资源系统的韧性。

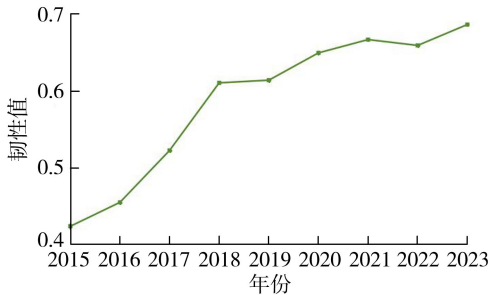


图 5 2015—2023 年冀中南地区水资源系统韧性值
Fig. 5 Water resources system resilience values in central and southern regions of Hebei Province from 2015 to 2023

图 6 为冀中南地区各市水资源韧性评价结果。由图 6(a) 可见,2015—2023 年冀中南地区各市水资源系统韧性整体呈上升趋势,但在不同年份出现韧性出现波动,如 2021—2022 年廊坊市水资源系统

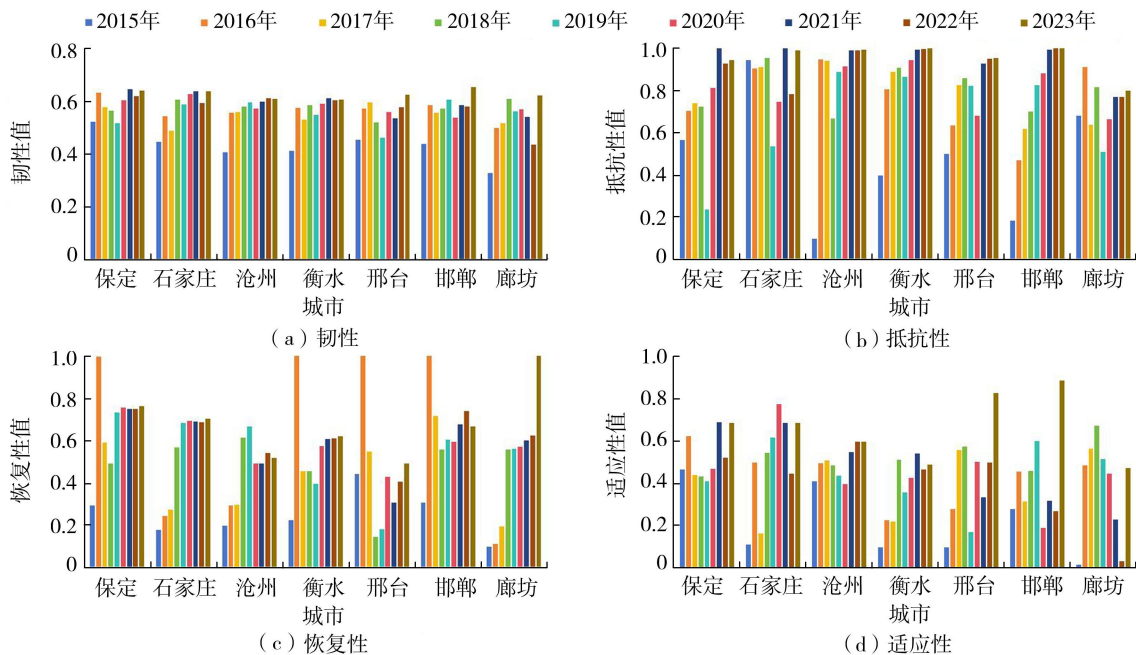


图 6 2015—2023 年冀中南地区各市水资源系统韧性评价结果

Fig. 6 Evaluation results of water resources system resilience of various cities in central and southern regions of Hebei Province from 2015 to 2023

韧性由 0.54 下降到 0.44,原因是 2022 年廊坊市财政收入增长相较于前一年下降 12%,导致水资源系统适应性大幅下降,进而影响到水资源系统的韧性。由图 6(b)可见,2015—2023 年冀中南地区各市水资源系统抵抗力整体仍呈现上升趋势,但保定、石家庄、廊坊等市在 2019 年出现水资源系统抵抗力下降的情况,其中保定市下降最为严重,原因是 2019 年保定市的水资源总量减少了 32%,但供水总量却保持不变,给水资源的供需关系以及可持续利用带来冲击,进而影响水资源系统的抵抗力。为改善冀中南地区水资源系统抵抗力下降的情况,可扩建包括岗南水库在内的关键水库,同时实施万元 GDP 用水量阶梯水价。由图 6(c)可见,2015—2023 年冀中南地区各市水资源系统恢复性呈增长趋势,其中邢台、衡水等市在 2016—2019 年水资源系统恢复性出现一定程度的下降,原因是人均水资源量的减少。2019 年衡水市的人均水资源量相较于 2016 年减少 48%,邢台市减少 77%,同时两市的单位产能消耗和工业用水量有所增加,造成水资源系统恢复性下降。为改善冀中南地区水资源系统恢复性下降的情况,可在邢台、保定等工业城市推广再生水联合调度技术,用再生水替代一部分工业用水,钢铁企业将污水处理量与产能挂钩,纳入考核标准。由图 6(d)可见,2015—2023 年冀中南地区各市水资源系统性水平得到明显提升,其中保定、沧州的适应性水平相对较好,趋势稳定,其余各市适应性变化较大。各市应因地制宜,结合当地的发展情况,围绕适应性指标

精准施策,如建立水资源韧性基金、推广保定“智慧水网”、降低用水预测误差,以提高水资源系统的适应性,进而提高水资源系统的韧性。

4 结 论

a. 综合考虑冀中南地区实际情况和数据获取难度,针对源系统扰动前、扰动中、扰动后 3 个阶段,构建了冀中南地区水资源系统韧性评价指标体系。该评价指标体系包括抵抗力、恢复性、适应性 3 类 18 项指标,充分考虑水资源系统抵御外界干扰、保持功能不受损害的能力、水资源系统在功能受损后能够迅速恢复到正常状态的能力和水资源系统在面对新的环境条件或需求变化时调整自身结构和功能以适应变化的能力。

b. 引入 PFS,构建了 VPF-VIKOR 模型,基于 PFS 熵测度与 PFS 散度测度确定评价指标的权重,使指标模糊化过程更贴近区域实际,进而提高了冀中南地区水资源系统韧性评价水平。

c. 2015—2023 年冀中南地区水资源系统韧性整体呈上升趋势,2015—2017 年韧性处于相对较低水平,2017 年后变化较小,2023 年达到峰值,为 0.69。2018—2019 年、2021—2022 年冀中南地区水资源系统韧性出现波动,主要受适应性子系统波动影响,如财政收入放缓、水资源总量变化等因素。

d. 2015—2023 年冀中南地区各市的水资源系统韧性水平虽有波动,但整体呈上升趋势,不同城市在不同年份因特定因素导致韧性变化。2021—

2022 年廊坊市水资源系统因财政收入增长下降致使韧性降低;2016—2019 年邢台、衡水等市水资源系统因人均水资源量的减少导致韧性出现一定程度的下降。

参考文献:

[1] Borgomeo E. Water resource system modelling for climate adaptation[M]//Kondrup C, MercoglianoP, BoselloF, et al. Climate Adaptation Modelling. Cham: Springer, 2022: 141-147.

[2] 马海良,顾芳旭,张晓力. 基于 PDA 模型的中国水资源消耗及其政策影响因素研究[J]. 水利经济,2024,42(4): 30-38. (Ma Hailiang, Gu Fangxu, Zhang Xiaoli. Research on policy influencing factors of water resource consumption in China based on PDA model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4): 30-38. (in Chinese))

[3] 金菊良,常哲,周亮广,等. 流域水资源安全风险评价问题的系统分析[J]. 水利水电科技进展,2025,45(5): 112-118. (Jin Juliang, Chang Zhe, Zhou Liangguang, et al. System analysis of water resources security risk assessment in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 112-118. (in Chinese))

[4] Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation [J]. Water Resources Research,1982,18(1): 14-20.

[5] 甘容,孔令迪,郭林,等. 基于多种方法的信阳市水资源系统韧性评价[J]. 水资源与水工程学报,2024, 35(4): 12-19. (Gan Rong, Kong Lingdi, Guo Lin, et al. Resilience evaluation of water resources system in Xinyang City based on multiple methods [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2024,35(4): 12-19. (in Chinese))

[6] 付帅,冯英香,余杰,等. 基于 PSR 模型的鄱阳湖流域水资源-经济-生态韧性时空差异及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(6): 61-71. (Fu Shuai, Feng Yingxiang, Yu Jie, et al. Spatiotemporal analysis of economic and ecological water resource resilience and its drivers in the Poyang Lake Basin based on the PSR model [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2025,44(6): 61-71. (in Chinese))

[7] 周铭毅,尚志海,蔡灼芬,等. 基于 VIKOR 方法的广东省城市洪涝灾害韧性评估[J]. 灾害学,2023,38(1): 206-212. (Zhou Mingyi, Shang Zhihai, Cai Zhuofen, et al. Assessment of urban flood disaster resilience in Guangdong Province based on VIKOR method[J]. Journal of Catastrophology,2023,38(1): 206-212. (in Chinese))

[8] 黄生志,闫俊,郭怿,等. 面向陕西水网韧性提升的水库

群优化调配研究[J]. 水资源保护,2025,41(5): 258-267. (Huang Shengzhi, Yan Jun, Guo Yi, et al. Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing resilience of water network in Guanzhong area [J]. Water Resources Protection,2025,41(5): 258-267.

[9] Wang Jie, Wei Guiwu, Lu Mao. An extended VIKOR method for multiple criteria group decision making with triangular fuzzy neutrosophic numbers [J]. Symmetry, 2018,10(10): 497.

[10] Dong Tong, Yin Shi, Zhang Nan. New energy-driven construction industry: digital green innovation investment project selection of photovoltaic building materials enterprises using an integrated fuzzy decision approach [J]. Systems,2022,11(1): 11.

[11] Yager R R, Abbasov A M. Pythagorean membership grades, complex numbers, and decision making [J]. International Journal of Intelligent Systems,2013,28(5): 436-452.

[12] 曾庄. Pythagorean 模糊集及其多属性决策应用[D]. 成都:西南交通大学,2019.

[13] 罗静,沈淑霞,王贵君. 基于毕达哥拉斯模糊数双向投影的 VIKOR 决策方法[J]. 模糊系统与数学,2022,36(1): 1-10. (Luo Jing, Shen Shuxia, Wang Guijun. VIKOR decision making method based on bidirectional projection of Pythagorean fuzzy numbers [J]. Fuzzy Systems and Mathematics,2022,36(1): 1-10. (in Chinese))

[14] Wu Weidong, Huang Peng, Geng Shuai. Application of interval-valued Pythagorean fuzzy VIKOR approach for petroleum sludge treatment technology evaluation and selection [J]. Environmental Science and Pollution Research,2021,28(36): 50890-50907.

[15] Yu Jiashuo, Xiao Hanbin, Sun Feiyue, et al. Research on the safety evaluation method for quayside container cranes based on the best-worst method-Pythagorean fuzzy VIKOR approach[J]. Applied Sciences,2024,14(3): 1312.

[16] 吴亚娜,徐宝同,孙蓬勃. 河北省水资源统筹利用总体布局研究[J]. 河北水利,2019(4): 24-25. (Wu Yana, Xu Baotong, Sun Pengbo. Research on the overall layout of coordinated utilization of water resources in Hebei Province[J]. Hebei Water Resources, 2019(4): 24-25. (in Chinese))

[17] 马海良,赵煜华,赵芯. 长江流域城市经济韧性的统计测度和时空差异研究[J]. 水利经济,2024,42(6): 25-32. (Ma Hailiang, Zhao Yuhua, Zhao Xin. Research on statistical measurement and spatial and temporal differences of urban economic resilience in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(6): 25-32. (in Chinese))

[18] 赵志龙,杨亚锋,徐冬梅,等. 基于二级模糊综合评判法的水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水电能源科学,2022,40(10): 39-43. (Zhao Zhilong, Yang Yafeng,

- Xu Dongmei, et al. Resilience evaluation and regulation model of water resources system based on two-level fuzzy comprehensive evaluation and its application [J]. Water Resources and Power, 2022, 40 (10): 39-43. (in Chinese))
- [19] Wang C H, Blackmore J M. Resilience concepts for water resource systems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009, 135 (6): 528-536.
- [20] Leštáková M, Logan K T, Rehm I S, et al. Do resilience metrics of water distribution systems really assess resilience? a critical review [J]. Water Research, 2024, 248: 120820.
- [21] Umunnakwe A, Huang H, Oikonomou K, et al. Quantitative analysis of power systems resilience: standardization, categorizations, and challenges [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 149: 111252.
- [22] Xu Hui, Li Shuxiu, Tan Yongtao, et al. Comprehensive resilience assessment of complex urban public spaces: a perspective of promoting sustainability [J]. Land, 2022, 11 (6): 842.
- [23] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型 [J]. 水利学报, 2008, 39 (4): 401-409. (Jin Juliang, Wu Kaiya, Wei Yiming. Connectionnumber based assessment model for watershed water security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (4): 401-409. (in Chinese))
- [24] 高玉琴, 汪键, 高见, 等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (2): 22-29. (Gao Yuqin, Wang Jian, Gao Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (2): 22-29. (in Chinese))
- [25] 邓乐乐, 郭生练, 王俊, 等. 基于博弈论-云模型的湖北省汉江中下游地区水资源承载力评价 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 200-208. (Deng Lele, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Water resources carrying capacity assessment for middle-lower reaches of the Hanjiang River in Hubei Province based on game theory-cloud model [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 200-208. (in Chinese))
- [26] 贾玉博, 杨宏伟, 栗晓玲, 等. 基于水代谢和水循环理论的石羊河流域水资源承载力评价 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (5): 86-94. (Jia Yubo, Yang Hongwei, Su Xiaoling, et al. Water resources carrying capacity evaluation in the Shiyang River Basin based on theories of water metabolism and water cycle [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 86-94. (in Chinese))
- [27] Li Shihui, Wang Bo. Research on evaluating algorithms for the service quality of wireless sensor networks based on interval-valued intuitionistic fuzzy EDAS and CRITIC methods [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020 (1): 5391940.
- [28] Verma R, Sharma B D. Exponential entropy on intuitionistic fuzzy sets [J]. Kybernetika, 2013, 49 (1): 114-127.
- [29] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型: 模糊水文水资源数学基础 [J]. 大连理工大学学报, 2005, 45 (2): 308-312. (Chen Shouyu. Theory and model of engineering variable fuzzy set: mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45 (2): 308-312. (in Chinese))
- [30] 陈守煜, 郭瑜. 水质综合评价的模糊可变集合方法 [J]. 水资源保护, 2005, 21 (6): 19-22. (Chen Shouyu, Guo Yu. Application of variable fuzzy sets method in comprehensive evaluation of water quality [J]. Water Resources Protection, 2005, 21 (6): 19-22. (in Chinese))
- [31] Rani P, Mishra A R, Pardasani K R, et al. A novel VIKOR approach based on entropy and divergence measures of Pythagorean fuzzy sets to evaluate renewable energy technologies in India [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 238: 117936.
- [32] Peng Xindong, Yuan Huiyong, Yang Yong. Pythagorean fuzzy information measures and their applications [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2017, 32 (10): 991-1029.
- [33] Chen Tingyu. Remoteness index-based Pythagorean fuzzy VIKOR methods with a generalized distance measure for multiple criteria decision analysis [J]. Information Fusion, 2018, 41: 129-150.
- [34] Chatterjee P, Chakraborty S. A comparative analysis of VIKOR method and its variants [J]. Decision Science Letters, 2016, 5 (4): 469-486.
- [35] 何玲, 杜哲, 陈哲思, 等. 河北省生态环境与高质量发展耦合协调 [J]. 环境科学, 2025, 46 (10): 6475-6486. (He Ling, Du Zhe, Chen Zhesi, et al. Coupling coordination between ecological environment and high-quality development in Hebei Province [J]. Environmental Science, 2025, 46 (10): 6475-6486. (in Chinese))
- [36] 安莉娜, 范国福, 吴迪, 等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (2): 35-41. (An Lina, Fan Guofu, Wu Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 35-41. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 05 - 13 编辑: 徐娟)