

任楠波, 刘宏权, 潘增辉, 等. 基于 DPSIR-博弈论组合赋权 TOPSIS 模型的河北省水资源保障度演进评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 873-885. REN N B, LIU H Q, PAN Z H, et al. Evaluation on the evolution of water resources security degree in Hebei Province based on DPSIR-game theory combined weighting TOPSIS model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 873-885. (in Chinese)

基于 DPSIR-博弈论组合赋权 TOPSIS 模型的 河北省水资源保障度演进评价

任楠波, 刘宏权, 潘增辉, 柴春岭, 高惠嫣, 张西平, 陈任强, 梁素韬

(河北农业大学城乡建设学院, 河北 保定 071001)

摘要: 为对河北省水资源保障度进行客观、有效的评价, 确保水资源自然循环系统在不受人破坏或者威胁的情况下能满足国家或区域各方面发展需求的自然保障作用, 基于驱动力-压力-状态-影响-响应(driving-pressure-state-impact-response, DPSIR)模型初步构建水资源保障度评价体系, 通过收集河北省相关数据, 对初选评价指标相关性分析和筛选, 确定水资源保障度评价体系, 引入变异系数法和秩和比法组合赋权的 TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)模型, 对河北省 2001—2020 年的水资源保障度状况开展综合评价, 并对评价结果进行障碍因子诊断。结果表明: 河北省在 2001—2020 年水资源保障度的相对贴近度从 0.217 增加到 0.745, 呈现波动式增长趋势, 水资源保障度整体趋向于较高状态, 这说明河北省水资源保障度状况正在逐步改善, 与响应子系统中的跨流域供水占比提高密切相关; 大部分年份主要障碍因子为跨流域供水占比、工业废水化学需氧量、人均 GDP、生活废水化学需氧量和万元 GDP 用水量等 5 个指标。DPSIR-博弈论组合赋权 TOPSIS 模型对水资源保障度演进评价具有较好的客观性和适用性, 对该地区经济社会和生态环境的发展具有重要意义。

关键词: 河北省; 水资源保障度; DPSIR; 组合赋权; TOPSIS 模型; 障碍因子

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0085

随着经济全球化的不断发展及人类活动范围的不断扩大, 人类对水资源量急剧消耗, 各地区因水短缺、水污染、水生态退化、水灾害、水管理的失衡、跨境河流水争端等所造成水资源问题凸显^[1], 制约区域可持续发展。水资源保障度问题已经被世界各国政府部门所重视, 并成为全世界关注的焦点问题之一^[2]。

目前多数专家和学者对水资源安全采取各种角度和模型进行了综合评价, 而对水资源保障度的研究较少, 本文借鉴水资源安全指标体系的构建和评价模型^[3-4], 对河北省水资源障碍度进行综合评价。水资源保障度是一个国家或地区对水资源进行有效管理、保护和利用的程度和能力。它涵盖了保证人们和生态系统持续获取足够的水资源, 以满足各

种需求和维持生活的目标。“保障度”相比于“安全”这个词能够更全面、更准确地描述水资源管理的目标和要求, 体现水利部门拥有健全的管理机构和政策框架, 进行水资源规划和监测, 并基于科学数据和信息做出决策。评价指标有基于压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)^[5-6]和驱动力-压力-状态-影响-响应(driving-pressure-state-impact-response, DPSIR)^[7-9]模型来构建指标体系, 评价方法主要有层次分析法^[10-11]、模糊物元分析法^[12]、BP(back propagation)神经网络^[13]、系统动力学法^[14]、TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)^[15-16]、集对分析法^[17]等。水资源保障度评价指标的选取受诸多因素影响, 评价指标之间容易发生信息重复问题, 通过对初步构建评价体系进行

收稿日期: 2023-05-10 修回日期: 2023-09-20 网络出版时间: 2023-10-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231007.1607.012>

基金项目: 河北省重点研发项目(223742205D); 河北省水利科学研究院委托课题: 河北省水资源安全评价体系研究、河北省水资源管理关键技术研究

作者简介: 任楠波(1996—), 男, 河南焦作人, 主要从事水资源调控与高效利用研究。E-mail: 20217080926@pqs.hebau.edu.cn

通信作者: 刘宏权(1979—), 男, 河北邢台人, 教授, 博士, 主要从事水资源调控与高效利用研究。E-mail: lhq@hebau.edu.cn

张西平(1978—), 男, 陕西周至人, 副教授, 博士, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: xpzhang1@126.com

相关分析筛选,确定水资源保障度评价体系,采用基于 DPSIR 模型和博弈论组合赋权的 TOPSIS 模型法相结合,对河北省 2001—2020 年来水资源保障度状况进行评价分析,并对评价结果进行障碍因子诊断,明晰河北省水资源保障度现状,研究河北省水资源保障度水平的历史演变,为未来河北省水资源管理工作提供参考依据。

1 研究区概况

河北省地处环渤海中心地带,位于 36°05' N~42°40' N、113°27' E~119°50' E,东临渤海,西靠山西,南及东南与河南和山东相接壤,北及东北与内蒙古和辽宁接壤,中嵌京、津两市。该省境内南北宽约 750 km,东西长约 650 km,海岸线长约 487 km,总面积约 18.88 万 km²[18]。2020 年河北省水资源总量为 146.26 亿 m³,总用水量为 182.77 亿 m³,水资源总量供不应求,人均水资源量 196.2 m³,远低于世界极度缺水警戒线(500 m³/人)。河北省是我国北方重要的生态屏障和京津冀协同发展重要支撑,但其水资源问题突出,人均占有量低,时空分布不均,水资源供需矛盾日益加剧。随着社会经济不断发展,水资源开发利用强度和压力逐年加大,水

生态环境问题日趋严重。

2 研究方法

2.1 数据来源

以 2001—2020 年作为评价年份,初步选取 30 个代表性指标来构建河北省水资源保障度评价指标体系。通过对《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国社会统计年鉴》《河北省水资源公报》《河北省环境状况公报》《河北经济年鉴》等相关数据整理得到原始数据,部分指标数据通过计算得到。

2.2 构建评价指标体系

2.2.1 初选 DPSIR 模型的评价指标

DPSIR 模型是在 PSR 模型的基础上进行改进发展的,其从系统分析的角度看待人与自然、社会、经济、资源和环境的相互作用,具有综合性、科学性、区域性等特点^[4,19-20]。从水资源保障度内涵以及研究区域实际情况出发,并借鉴大量相关研究^[17-18,21],围绕“驱动力-压力-状态-影响-响应”4 个方面,构建河北省水资源保障度评价初选指标体系,其中指标可划分为正向指标(效益型指标)和负向型指标(成本型指标),见表 1。

表 1 河北省水资源保障度评价初选指标体系

Tab. 1 Preliminary selection index system of water resources security degree evaluation in Hebei Province

目标层	准则层	指标层	类型	意义
水资源保障度评价指标体系	驱动力(D)	C ₁ 人均GDP/万元	正向	表示区域经济发展状况对水资源保障度的驱动
		C ₂ 人口密度/(人·km ⁻²)	负向	表示人口的聚集程度对水资源保障度的驱动
		C ₃ 城镇化率/%	负向	表示区域发展对水资源保障度的驱动
		C ₄ 有效灌溉面积占耕地面积比重/%	正向	表示农业发展对水资源保障度的驱动
		C ₅ GDP 年增长率/%	负向	表示经济发展强度对水资源保障度的驱动
	压力(P)	C ₆ 万元GDP用水量/m ³	负向	表示经济发展强度对水资源数量的压力
		C ₇ 万元工业增加值用水量/m ³	负向	表示工业用水资源数量的压力
		C ₈ 万元农业产值用水量/m ³	负向	表示农业用水对水资源数量的压力
		C ₉ 工业废水化学需氧量/万t	负向	表示工业对水资源质量的压力
		C ₁₀ 单位耕地化肥使用量/(kg·hm ⁻²)	负向	表示农业生产对水资源质量的压力
		C ₁₁ 生活废水化学需氧量/万t	负向	表示生活对水资源质量的压力
	状态(S)	C ₁₂ 降水量/mm	正向	表示区域内年降水状况
		C ₁₃ 人均水资源量/m ³	正向	表示水资源人均状态
		C ₁₄ 单位面积水资源量/(万m ³ ·km ⁻²)	正向	表示水资源地均状态
		C ₁₅ 地表水资源开发利用率/%	负向	表示区域地表水开发利用现状
	影响(I)	C ₁₆ 地下水资源开发利用率/%	负向	表示区域地下水开发利用现状
		C ₁₇ 森林覆盖率/%	正向	表示对地表蓄水能力的影响

表 1(续)
Tab. 1 (Continued)

目标层	准则层	指标层	类型	意义
		C ₁₈ 河流水质达标率/%	正向	表示对河流水质的影响
		C ₁₉ 水土流失治理面积/万hm ²	正向	表示对水土流失治理的影响
	响应(R)	C ₂₀ 城市污水处理率/%	正向	表示水资源质量安全的响应
		C ₂₁ 生态用水率/%	正向	表示改善区域生态环境的响应
		C ₂₂ 跨流域供水占比/%	负向	表示跨流域外调水对区域供水能力的影响

注: 正向: 越大越优型; 负向: 越小越优型。

驱动力是引发环境和生态变化的潜在因素, 是引起水资源保障度问题的根本动力, 其属于“隐式”。压力是引发生态环境发生变化的直接原因, 是引起水资源保障度问题的外在原因, 成为驱动力的表现形式, 其属于“显式”^[22-23]。状态反映驱动力和压力作用下水资源的现状^[24], 表现出当前的变化状态和趋势, 其属于“静态”的状态。影响是反映压力和驱动力作用引起水资源状况改变的最终结果, 其属于“动态”的变化。响应指人们通过制定积极政策措施来提高水资源保障度, 是人类为了减弱水资源问题对人类健康生存、发展的影响而采取的一系列管

理措施^[25-27]。

2.2.2 指标筛选

初选评价指标之间可能存在着信息重复和冗余等问题, 若直接利用初选评价指标体系进行保障度评价, 会导致评价数据需求量大和结果产生叠加的影响效应等, 从而增加评价难度, 影响评价的准确性和可靠性。因此, 需要对初选相关性显著的指标进行精简。本文使用 IBM SPSS Statistics 26 分析软件, 对各个准则层内各项指标之间进行相关性分析, 从中选取皮尔逊相关系数绝对值超过 0.9^[28] 的指标进行分析和筛选, 结果见表 2。

表 2 准则层内指标间的相关分析筛选表

Tab. 2 Correlation analysis screening table among indexes in criterion layer

准则层	指标层	相关系数矩阵						结果
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	-	
驱动力(D)	C ₁	1.000	0.982	0.954	-0.121	-0.787	-	保留
	C ₂	0.982	1.000	0.952	-0.091	-0.712	-	剔除
	C ₃	0.954	0.952	1.000	0.062	-0.643	-	剔除
	C ₄	-0.121	-0.091	0.062	1.000	0.429	-	保留
	C ₅	-0.787	-0.712	-0.643	0.429	1.000	-	保留
压力(P)	C ₆	1.000	0.998	0.990	0.814	-0.927	0.420	保留
	C ₇	0.998	1.000	0.986	0.788	-0.935	0.373	剔除
	C ₈	0.990	0.986	1.000	0.851	-0.892	0.462	剔除
	C ₉	0.814	0.788	0.851	1.000	-0.581	0.720	保留
	C ₁₀	-0.927	-0.935	-0.892	-0.581	1.000	-0.242	剔除
	C ₁₁	0.420	0.373	0.462	0.720	-0.242	1.000	保留
状态(S)	C ₁₂	1.000	0.901	0.902	-0.543	-0.754	-	剔除
	C ₁₃	0.901	1.000	0.986	-0.738	-0.639	-	保留
	C ₁₄	0.902	0.986	1.000	-0.675	-0.718	-	剔除
	C ₁₅	-0.543	-0.738	-0.675	1.000	0.145	-	保留
	C ₁₆	-0.754	-0.639	-0.718	0.145	1.000	-	保留

表 2(续)
Tab. 2 (Continued)

准则层	指标层	相关系数矩阵						结果
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	-	
影响(I)	C ₁₇	1.000	0.120	-0.422	-	-	-	保留
	C ₁₈	0.120	1.000	0.122	-	-	-	保留
	C ₁₉	-0.422	0.122	1.000	-	-	-	保留
响应(R)	C ₂₀	1.000	0.577	0.695	-	-	-	保留
	C ₂₁	0.577	1.000	0.931	-	-	-	剔除
	C ₂₂	0.695	0.931	1.000	-	-	-	保留

采用相关性分析方法对指标进行筛选,各指标之间的相关系数越大,表明相关性越高,指标间信息重复度越大。通过对指标的分析 and 筛选,可以避免在准则层内指标所反映信息的重复。

表 2 驱动力(D)子系统中的 C₁ 人均 GDP、C₂ 人口密度、C₃ 城镇化率 3 项指标之间的相关系数绝对值均超过 0.9,而人均 GDP 更能直接反映区域内经济发展状况对水资源保障度的驱动,故将与其相关的两项指标删除。压力(P)子系统中 C₆ 万元 GDP 用水量和 C₇ 万元工业增加值用水量、C₈ 万元农业产值用水 3 项指标相关系数绝对值超过 0.9,由于万元 GDP 用水量是反映了经济发展强度对水资源数量的压力,故将与其相关的两项指标删除。而 C₆ 万元 GDP 用水量和 C₁₀ 单位耕地化肥使用量两项指标相关系数绝对值超过 0.9,因此删除单位耕地化肥使用量指标。状态(S)子系统 C₁₂ 降水量、C₁₃ 人均水资源量、C₁₄ 单位面积水资源量 3 项指标之间的相关系数绝对值均超过 0.9,由于人均水资源

量是国际上普遍采用的反映水资源量短缺状况的指标,故将与其相关的两项指标删除。响应(R)子系统中 C₂₁ 生态用水率和 C₂₂ 跨流域供水占比两个指标相关系数绝对值超过 0.9,考虑到跨流域供水占比是表示跨流域外调水对区域供水能力的影响的指标,因此删除生态用水率指标。最后筛选结果见表 2。

2.3 评价指标分级

水资源保障度评价过程中,如何确定评价标准阈值是评价工作的关键,它对评价结果有直接影响。评价标准目前尚无统一标准可循,主要是由自然条件、地理条件、政治条件、文化条件、技术条件、经济条件决定的。

保障度评价等级从极低到高分分为 5 个级别,优先参考国家和行业标准,其次参考相关文献^[29-31],同时根据河北省水资源特点、社会、人口和经济发展状况,制定出适合于本区域水资源保障度评价的分级标准,见表 3。

表 3 水资源保障度评价指标分级标准

Tab. 3 Grading standard of water resources security degree evaluation index

目标层	准则层	评价指标	保障度等级				
			高	较高	中	低	极低
			I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
驱动力(D)		C ₁ 人均GDP/万元	≥13.5	≥6~<13.5	≥3~<6	≥1~<3	<1
		C ₄ 有效灌溉面积占耕地面积比重/%	≥60	≥50~<60	≥40~<50	≥30~<40	<30
		C ₅ GDP年增长率/%	≤10	>10~≤15	>15~≤20	>20~≤30	>30
水资源保障度	压力(P)	C ₆ 万元GDP用水量/m ³	≤25	>25~≤100	>100~≤200	>200~≤250	>250
		C ₉ 工业废水化学需氧量/万t	≤0.1	>0.1~≤1	>1~≤3	>3~≤5	>5
		C ₁₁ 生活废水化学需氧量/万t	≤5	>5~≤9	>9~≤10	>10~≤11	>11
状态(S)		C ₁₃ 人均水资源量/m ³	≥3 000	≥2 000~<3 000	≥1 000~<2 000	≥500~<1 000	<500
		C ₁₅ 地表水资源开发利用/%	≤10	>10~≤20	>20~≤40	>40~≤60	>60
		C ₁₆ 地下水资源开发利用/%	≤30	>30~≤45	>45~≤53	>53~≤65	>65

表 3(续)
Tab. 3 (Continued)

目标层	准则层	评价指标	保障度等级				
			高	较高	中	低	极低
			I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
影响(I)		C_{17} 森林覆盖率/%	≥ 40	$\geq 30 \sim < 40$	$\geq 20 \sim < 30$	$\geq 10 \sim < 20$	< 10
		C_{18} 河流水质达标率/%	≥ 90	$\geq 70 \sim < 90$	$\geq 50 \sim < 70$	$\geq 30 \sim < 50$	< 30
		C_{19} 水土流失治理面积/万 hm^2	≥ 550	$\geq 500 \sim < 550$	$\geq 450 \sim < 500$	$\geq 400 \sim < 450$	< 400
响应(R)		C_{20} 城市污水处理率/%	≥ 80	$\geq 70 \sim < 80$	$\geq 60 \sim < 70$	$\geq 45 \sim < 60$	< 45
		C_{22} 跨流域供水占比/%	≥ 30	$\geq 15 \sim < 30$	$\geq 5 \sim < 15$	$\geq 2 \sim < 5$	< 2

2.4 权重确定

水资源保障度评价是涉及多方面复杂问题,参与评价的指标较多,且不同类型、不同量纲的指标之间存在着相互制约、相互关联的模糊关系,导致系统分析难度较高,因此,本文采用数学转化将不同量纲的评价指标转换为相同单位的数值,作为评价指标的权重。为克服单一方法计算权重存在的不足,本文基于博弈论思想,采用变异系数法与秩和比法进行组合赋权,能更科学、客观、准确地反映指标的重要程度,使评价结果更为可靠。

2.4.1 变异系数法

变异系数法直接使用各项实测指标变化所涉及的信息来确定指标权重值,是一种客观计算权重的方法。具体步骤如下:

变异系数求解公式为

$$\delta_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \quad (1)$$

式中: σ_j 、 \bar{x}_j 、 δ_j 为第 j 项指标的标准差、平均值、变异系数。

对各项指标的变异系数进行归一化处理,可得到各指标权重 w_{j1} 为

$$w_{j1} = \frac{\delta_j}{\sum_{j=1}^n \delta_j} \quad (2)$$

式中: δ_j 为第 j 项指标的标准差, w_{j1} 为第 j 项指标的变异系数权重。

2.4.2 秩和比法

秩和比法是对实测指标矩阵进行无量纲化处理,后编秩,利用秩次得到各项评价指标权重^[32]。具体步骤如下:

对评价指标集 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 进行如下处理,得到标准化矩阵 $C_{ij} = (c_{ij})_{m \times n}$ 。

$$\text{正向型指标: } c_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

$$\text{负向型指标: } c_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (4)$$

式中: x_{ij} 、 c_{ij} 分别为第 i 个样本的第 j 项指标上的实测值、标准值。

计算各指标归一化后的样本均值,并对各评价指标归一化后的样本均值按大小进行排序,排序顺序 $R'(j = 1, 2, \dots, n)$ 。

计算各评价指标权重,表达式为

$$w_{j2} = \frac{R'}{\sum_{j=1}^n R'} \quad (5)$$

2.4.3 博弈论组合赋权

博弈论是运筹学中的一个重要分支,它研究的是具有斗争和竞争性质的主体之间相互影响,处理2个以上主体理性均衡策略方案,达到各因素妥协状态下实现最优的目标。博弈论组合赋权以纳什均衡为目标,吸纳了多类权重因素,寻求兼顾多类权重的最优组合^[33-36]。通过变异系数法和秩和比法进行组合赋权,考虑了数据的离散程度和分布特征,得到更加稳定和准确的指标权重。组合赋权步骤如下:

选用变异系数法和秩和比法分别计算指标权重,基本权重向量集 $W_k = \{w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{nk}\} (k = 1, 2, \dots, l)$,其中 n 为评价指标数量, l 为确定赋权方法个数,本文取2。设线性组合系数为 $\lambda_k = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l\}$,则向量线性组合权重为

$$W = \sum_{k=1}^l \lambda_k w_{nk}^T, \lambda_k > 0 \quad (6)$$

根据博弈论思想,实现 W 和 w_{nk} 的离差最小为目标,寻求最优的线性组合系数,其相应目标函数为

$$\min \left\| \sum_{k=1}^l \lambda_k w_{nk}^T - w_{nk}^T \right\|_2 \quad (7)$$

根据矩阵微分性质,确定式(7)最优化的一阶导数条件的线性微分方程组为

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T & \cdots & w_1 w_l^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T & \cdots & w_2 w_l^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_l w_1^T & w_l w_2^T & \cdots & w_l w_l^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \\ \vdots \\ w_l w_l^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

将计算得到的组合系数 λ_k 进行归一化,即 $\lambda_k^* = \lambda_k / \sum_{k=1}^l \lambda_k$,可得博弈论组合赋权的组合权重为

$$w^* = \sum_{k=1}^l \lambda_k^* w_{nk}^T \quad (9)$$

2.5 TOPSIS 模型

TOPSIS 法又称为优劣解距离法,是逼近理想方案的排序方法。该方法的基本思想是通过归一化的原始实测值矩阵,确定每项评价指标属性的正理想解和负理想解,并利用欧氏距离公式求出评价目标与最优解和最劣解的距离,从而求出评价对象与最优解之间的贴近度^[15-16]。该方法充分利用原始数据,具有计算过程简便且实用性强,可用于多属性、多个评价目标决策分析。本文基于 TOPSIS 模型对河北省的水资源进行安全性评价应用。

对 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 使用公式(3)和(4)进行处理,得到标准化矩阵 $C_{ij} = (c_{ij})_{m \times n}$ 。

利用式(10)将标准化矩阵与组合权重相乘建立加权矩阵 V_{ij} 。

$$V_{ij} = w^* C_{ij} = \begin{bmatrix} w_1^* c_{11} & w_2^* c_{12} & \cdots & w_n^* c_{1n} \\ w_1^* c_{21} & w_2^* c_{22} & \cdots & w_n^* c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1^* c_{m1} & w_2^* c_{m2} & \cdots & w_n^* c_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据加权矩阵得出评价指标的正理想解 V_j^+ 和负理想解 V_j^- 。

$$V_j^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) = \{ \max v_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n \} \quad (11)$$

$$V_j^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) = \{ \min v_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n \} \quad (12)$$

采用欧氏距离计算公式得到评价样本 i 与正负理想解的距离。

$$S_i^+ = \|v_{ij} - v_j^+\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (13)$$

$$S_i^- = \|v_{ij} - v_j^-\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (14)$$

计算各评价样本 i 与理想解的相对贴近度。

$$K_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (15)$$

2.6 障碍因子诊断模型

障碍度模型是通过分析影响因素,找出阻碍事物发展的对象,对评价目标的水平或者程度做出病理诊断,从而确定主要的障碍因素^[37]。采用障碍度模型对河北省水资源保障度的各子系统和单项指标进行定量分析与诊断,指标的障碍度与其对区域水资源保障度的阻碍程度成正比,辨识出主要障碍因子,可以更切合实际、有针对性地制定相应的水资源管理方案,达到改善水资源保障度状况的目的^[21,38-39]。具体计算步骤如下:

计算因子贡献度 F_j ,公式为

$$F_j = R_j \times w_j^* \quad (16)$$

式中: R_j 为单项指标 j 所属准则层权重; w_j^* 为单项指标 j 的博弈论组合权重。

计算偏离度 I_j ,公式为

$$I_j = 1 - x_{ij} \quad (17)$$

计算各评价指标障碍度 A_j ,公式为

$$A_j = \frac{F_j \times I_j}{\sum_{j=1}^n F_j \times I_j} \times 100\% \quad (18)$$

式中: A_j 为单项指标 j 对最终目标的障碍度。

在各单项指标障碍度基础上,研究各子系统对河北省水资源保障度水平的障碍度,其公式为

$$B_j = \sum_{j=1}^n A_j \quad (19)$$

3 结果与分析

3.1 计算结果

根据水资源保障度评价指标体系和得到的原始数据,采用变异系数法和秩和比法分别计算得到不同评价年指标权重 w_{j1} 和 w_{j2} ;通过公式(6)~(9)计算得到组合权重系数 $\lambda_1^*=0.579$ 、 $\lambda_2^*=0.421$,以及指标组合权重 w^* ,各指标权重值见表4。由表4可知,变异系数法和秩和比法计算权重结果虽有差异,但总体变化趋势基本相同。从权重角度分析, C_{22} 跨流域供水占比对水资源问题影响较大, C_{19} 水土流失治理面积影响较小,这与河北省近年来的引水工程所替代地下水的超采情况一致^[29]。从维度角度分析,用变异系数法计算的驱动力(P)和响应(R)子系统权重比较高,用秩和比法计算的驱动力(D)和影响(I)子系

统权重比较高。考虑到两种方法的侧重不同,为确 并以组合权重为最终权重值。
保评价结果的合理性,本文采用博弈论组合赋权,

表 4 水资源保障度各评价指标权重
Tab. 4 The weight of each evaluation index of water resources security degree

准则层	权重	指标层	变异系数法 w_{j1}	秩和比法 w_{j2}	组合权重 w^*
驱动力(D)	0.205	C_1 人均GDP	0.106	0.086	0.097
		C_4 有效灌溉面积占耕地面积比重	0.007	0.057	0.028
		C_5 GDP年增长率	0.062	0.105	0.080
压力(P)	0.270	C_6 万元GDP用水量	0.158	0.010	0.096
		C_9 工业废水化学需氧量	0.133	0.076	0.109
		C_{11} 生活废水化学需氧量	0.044	0.095	0.066
状态(S)	0.191	C_{13} 人均水资源量	0.048	0.114	0.076
		C_{15} 地表水资源开发利用率	0.079	0.048	0.066
		C_{16} 地下水资源开发利用率	0.064	0.029	0.049
影响(I)	0.148	C_{17} 森林覆盖率	0.044	0.124	0.077
		C_{18} 河流水质达标率	0.028	0.067	0.044
		C_{19} 水土流失治理面积	0.018	0.038	0.027
响应(R)	0.185	C_{20} 城市污水处理率	0.054	0.019	0.039
		C_{22} 跨区域供水占比	0.155	0.133	0.146

3.2 水资源保障度评价结果分析

根据上述模型,利用式(10)~(15)计算得到各年份的相对贴适度 K_i ,结果见表5;由各指标分级标准利用式(10)~(15)计算可得, K_i 在(0, 0.388]、(0.388, 0.504]、(0.504, 0.650]、(0.650, 0.824]、(0.824, 1]范围内分别代表V级(极低)、IV级(低)、III级(中)、II级(较高)、I级(高)。

从表5可知,河北省2001—2020年整体水资源保障度状况已从极低转向较高状态。2001—2007年的水资源保障度等级为V级,贴适度呈现增加趋势;2008—2010年水资源保障度等级达到IV级,说明河北省水资源状况得到了较好改善;2011—2012年水资源保障度等级达到III级,2013年水资源保障度等级处于IV级;2014年年底南水北调中线正式通水后^[16],河北省在调水补偿和节水宣传等多方面开展了工作,从而水资源状况的整体水平呈现上升的趋势,水资源保障度状况逐渐好转。

3.3 各子系统相对贴适度分析

运用相同模型,进一步对河北省水资源保障度各子系统进行分析,计算得到2001—2020年各子系统相对贴适度,结果见图1。

从图1可以看出:①驱动力(D)子系统。驱动力子系统的相对贴适度整体呈现逐渐上升的趋势。人均GDP对其影响最大,而GDP年增长率次之,表明近年来河北省经济发展水平不断提高,水资源的监测和管理技术不断更新和发展,可以更好地保护和管理水资源,从而驱动力子系统的保障度状态呈现逐渐改善。②压力(P)子系统。压力子系统的相对贴适度整体呈现上升趋势。从原始数据分析显示,河北省的万元GDP用水量逐年减小,这反映出当地经济发展与水资源利用率之间的矛盾得到了有效缓解。这也标志着河北省在优化水资源配置、降低水资源负荷和提高用水效率方面取得了良好的成果。主要措施还包括将COD列为“十三五”规划约束性指标,对废水的排放量和水质都将受到更加严格的控制和监管。这种措施将能够极大地降低污染物的排放量,改善水质,提高水体的溶氧量,使得压力子系统达到较高保障度状态。③状态(S)子系统。状态子系统的相对贴适度变化波动较大,但整体处于中等水平,这说明河北省的水资源状况存在一定的不稳定性。波动较大的主要原因是丰水年降水量大,使得人均水资源量有所增加,水资

源供应得到了提高。但是,这也反映出河北省水资源的开发利用程度应当有所降低,以避免过度开发和浪费造成的水资源短缺和环境问题。④影响(I)子系统。影响子系统的相对贴进度整体呈现波动上升的趋势,这说明河北省政府在环境保护和治理方面采取了一些有效的措施。其中,森林覆盖率对影响子系统的影响比较大。河北省政府通过颁布相关的治理方案,加大水土流失治理力度,积极推进森林资源保护和恢复工作,森林覆盖率明显提高,有效保护了水源地和调节水循环,河流水质得到了显著改善。⑤响应(R)子系统。响应子系统的相对贴进度呈现逐步上升的趋势,这说明河北省政府对水资源保障能力问题采取了一系列有效的措施。其中,实施南水北调工程、引黄入冀补淀工程等重大工程逐步形成了跨流域调水的格局,这些工程对于提高河北省的水资源保障能力起到了重要的作用。截至 2020 年年底,河北省引黄、引江水量达到 51.01 亿 m³,有效地抑制了地下水的超采问题。

3.4 障碍因子诊断

根据单指标障碍度模型,对评价指标进行指标障碍度进行测算,找出影响 2001—2020 年河北省水资源保障度的主要障碍因子,本文列出排名前六的指标,结果见表 6。

表 5 河北省水资源保障度评价结果

Tab. 5 Evaluation results of water resources security degree in Hebei Province

年份	S_i^+	S_i^-	相对贴进度 K_i	等级
2001	0.256	0.071	0.217	V
2002	0.264	0.056	0.176	V
2003	0.246	0.085	0.258	V
2004	0.246	0.096	0.280	V
2005	0.240	0.098	0.290	V
2006	0.248	0.081	0.247	V
2007	0.240	0.092	0.277	V
2008	0.203	0.130	0.390	IV
2009	0.185	0.132	0.417	IV
2010	0.191	0.140	0.422	IV
2011	0.153	0.163	0.516	III
2012	0.167	0.179	0.517	III
2013	0.179	0.167	0.482	IV
2014	0.177	0.160	0.474	IV
2015	0.160	0.180	0.529	III
2016	0.129	0.222	0.633	III
2017	0.120	0.216	0.642	III
2018	0.083	0.232	0.737	II
2019	0.112	0.231	0.674	II
2020	0.091	0.265	0.745	II

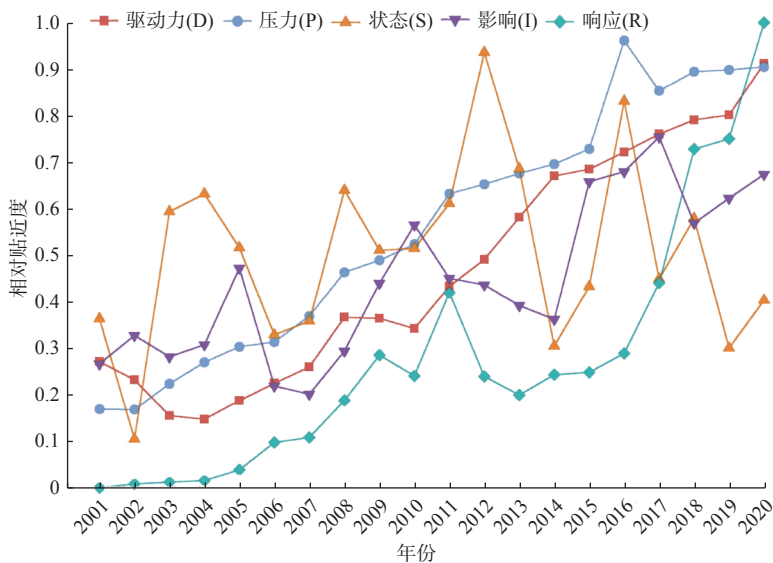


图 1 2001—2020 年河北省水资源保障度各子系统相对贴进度

Fig. 1 The relative closeness of each subsystem of water resources security degree in Hebei Province from 2001 to 2020

由表 6 数据可知, C₂₂ 跨流域供水占比在 2001—2018 年障碍度值较高, 这表明跨流域供水对河北省水资源保障度的影响较大, 随着跨流域调水取代城市地下水的超采量, 引黄、引江水量逐年增加, 优化

水资源的配置, 缓解水资源压力, 故跨流域供水占比在 2019—2020 年障碍度值减小。其次占比较高的有 C₉ 工业废水化学需氧量和 C₁ 人均 GDP, 这表明应通过采用生物处理和物理化学处理技术, 优化

工艺流程,调整经济结构和产业结构,提高劳动生产率。再者,占比相对较高的有 C_{11} 生活废水化学需氧量和 C_6 万元 GDP 用水量,这表明要倡导居民

改进生活方式,减少使用含有化学物质的清洁剂和洗涤剂,同时还需要提高水资源利用效率,推广循环经济模式。

表 6 2001—2020 年河北省水资源保障度主要障碍因子及障碍度

Tab. 6 The main obstacle factors and obstacle degree of water resources security degree in Hebei Province from 2001 to 2020

年份	项目	因子排序					
		NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6
2001	障碍因子	C_{22}	C_6	C_9	C_1	C_{13}	C_{11}
	障碍度/%	16.004	15.304	15.189	11.822	6.946	6.510
2002	障碍因子	C_{22}	C_9	C_6	C_1	C_{13}	C_{11}
	障碍度/%	15.277	14.913	13.246	11.108	8.183	6.405
2003	障碍因子	C_{22}	C_9	C_1	C_6	C_5	C_{11}
	障碍度/%	17.354	17.086	12.254	11.992	8.524	7.360
2004	障碍因子	C_9	C_{22}	C_1	C_5	C_6	C_{11}
	障碍度/%	18.618	17.732	11.947	10.180	9.508	8.085
2005	障碍因子	C_9	C_{22}	C_1	C_5	C_6	C_{11}
	障碍度/%	19.796	18.174	11.698	11.018	8.435	7.607
2006	障碍因子	C_9	C_{22}	C_{11}	C_1	C_5	C_{13}
	障碍度/%	16.888	16.071	10.514	10.351	10.035	7.760
2007	障碍因子	C_{22}	C_9	C_{11}	C_5	C_1	C_{17}
	障碍度/%	16.769	16.110	11.547	10.151	9.879	7.495
2008	障碍因子	C_{22}	C_9	C_{11}	C_1	C_{17}	C_5
	障碍度/%	19.612	15.179	14.628	11.357	9.479	8.845
2009	障碍因子	C_{22}	C_{11}	C_9	C_1	C_5	C_{13}
	障碍度/%	17.719	15.152	14.463	11.143	9.000	7.751
2010	障碍因子	C_{22}	C_{11}	C_9	C_5	C_1	C_{13}
	障碍度/%	20.407	14.522	13.912	12.503	9.897	8.498
2011	障碍因子	C_{22}	C_9	C_5	C_1	C_{11}	C_{17}
	障碍度/%	18.609	15.517	14.112	10.191	9.896	8.864
2012	障碍因子	C_{22}	C_9	C_5	C_1	C_{17}	C_{11}
	障碍度/%	28.268	16.505	11.709	9.703	9.548	8.985
2013	障碍因子	C_{22}	C_9	C_{11}	C_5	C_1	C_{17}
	障碍度/%	29.010	13.401	8.312	7.957	7.956	7.702
2014	障碍因子	C_{22}	C_{13}	C_9	C_{17}	C_{15}	C_1
	障碍度/%	23.757	13.352	12.051	7.210	6.965	6.879
2015	障碍因子	C_{22}	C_{13}	C_9	C_{11}	C_{15}	C_1
	障碍度/%	27.651	12.351	11.202	9.494	7.670	7.223
2016	障碍因子	C_{22}	C_5	C_1	C_{18}	C_{13}	C_{19}
	障碍度/%	43.274	10.030	9.650	8.638	6.553	5.608
2017	障碍因子	C_{22}	C_{13}	C_{11}	C_{15}	C_5	C_1
	障碍度/%	27.626	17.451	11.732	11.634	8.162	5.858
2018	障碍因子	C_{13}	C_{22}	C_{15}	C_{11}	C_5	C_{17}
	障碍度/%	17.078	16.754	11.069	10.472	10.110	10.108

表 6(续)
Tab. 6 (Continued)

年份	项目	因子排序					
		NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6
2019	障碍因子	C ₁₃	C ₁₅	C ₂₂	C ₅	C ₁₁	C ₁₇
	障碍度/%	23.328	22.338	12.853	9.076	8.464	8.448
2020	障碍因子	C ₁₅	C ₁₃	C ₁₇	C ₁₁	C ₄	C ₁₉
	障碍度/%	36.357	27.230	13.462	12.578	7.219	3.153

根据指标障碍度计算结果,发现指标 C₁ 人均 GDP、C₅ GDP 年增长率、C₆ 万元 GDP 用水量、C₉ 工业废水化学需氧量、C₁₆ 地下水资源开发利用、C₁₈ 河流水质达标率、C₂₀ 城市污水处理率、C₂₂ 跨区域供水占比的障碍度值呈现出逐年下降的趋势,这表明河北省多年的水资源管理工作取得了良好的

成效。

3.5 各子系统障碍度分析

根据单项指标障碍度计算结果,得出 2001—2020 年河北省水资源保障度的子系统障碍度(图 2),各子系统系统对河北省水资源保障度的障碍度变化各不相同。

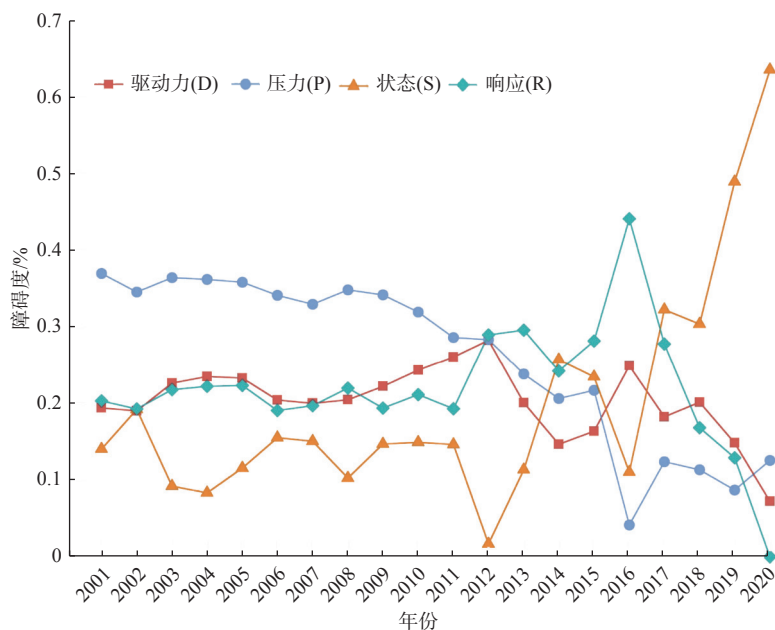


图 2 2001—2020 年河北省水资源保障度各子系统障碍度

Fig. 2 The obstacle degree of each subsystem of water resources security degree in Hebei Province from 2001 to 2020

由图 2 可知,从各子系统系统障碍度总体变化趋势看,在整个研究期内,驱动力和影响子系统一直处于波动状态,但整体趋势相对稳定。压力子系统的障碍度呈现出下降趋势,障碍度值从 2001 年的 37.00% 下降到 2020 年的 12.58%,表明压力子系统对河北省水资源保障度的制约得到了有效缓解。状态子系统障碍度呈现快速上升趋势,障碍度值从 2001 年的 14.05% 上升到 2020 年的 63.59%,表明状态子系统越来越成为阻止河北省水资源保障度提高的制约因素;响应子系统的障碍度呈现出快速的下降趋势,表明响应子系统对河北省水资源保障度的影响得到了迅速地减弱。

4 结论与展望

基于 DPSIR 概念框架,构建水资源保障度综合评价模型,系统分析各指标对水资源保障度问题的影响和反馈机制;通过对初选评价指标相关性分析和筛选,提高评价指标的准确性和代表性;利用变异系数法和秩和比法进行组合赋权,充分考虑数据的离散程度和分布特征,实现评价指标的最优权重;应用 TOPSIS 模型进行水资源保障度评价,建模方便和实用,根据评价结果表明,该模型具有较好的客观性和适用性。

从评价结果得出,河北省 2001—2020 年整体水

资源状况已从极低转向较高状态,整体达到中等水平。2001—2007年的水资源保障度等级为V级,2008—2010年水资源保障度等级达到IV级,2011—2012年水资源保障度等级达到III级,贴进度从2014年年底开始逐年呈现上升趋势,与响应子系统中的跨流域供水占比提高密切相关。

从权重计算结果得出,响应子系统是影响河北省水资源保障度的主要子系统,跨流域供水占比指标障碍度值最高,表明跨流域供水占比是影响水资源保障度的首要障碍因子。

本文确定评价标准阈值是评价工作的关键,它对评价结果有直接影响,目前尚无统一标准可循的评价标准。因此,合理确定评价标准阈值仍需继续深入研究。本次评价由于河北省各主要城市缺乏相关指标资料,仅对河北省水资源保障度进行时间序列评价,没有深入探讨其空间分布特征,在未来研究中可以利用遥感、大数据技术分析各城市水资源保障度,结合时空分布,讨论河北省水资源保障度水平,更全面地评价该地区的水资源保障度状况。

参考文献:

- [1] 夏军,石卫.变化环境下中国水安全问题研究与展望[J].*水利学报*,2016,47(3):292-301. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150937.
- [2] 秦昌波,苏洁琼,容冰,等.我国水资源安全面临的挑战与应对策略研究[J].*环境保护*,2019,47(10):46-48. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2019.10.010.
- [3] 曹琦,陈兴鹏,师满江.基于DPSIR概念的城市水资源安全评价及调控[J].*资源科学*,2012,34(8):1591-1599.
- [4] 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. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.01.12.
- [5] 张彦,李明然,寇利卿.基于PSR-PCA-ANFIS模型的保定市中心城区水资源安全评价[J].*中国农村水利水电*,2022(2):68-75. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2022.02.012.
- [6] 范玲,王会肖,刘昌明,等.基于压力-状态-响应模型的新疆水资源脆弱性评价[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(6):1052-1064. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0104.
- [7] 王晓玮,邵景力,崔亚莉,等.基于DPSIR和主成分分析的阜康市水资源承载力评价[J].*南水北调与水利科技*,2017,15(3):37-42,48. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.03.007.
- [8] HE G, FU Y W, ZHAO S H. Evaluation of water ecological security in Huaihe River basin based on the DPSIR-EES-SMI-P model[J]. *Water Supply*, 2023, 23(3): 1127-1143. DOI: 10.2166/WS.2023.034.
- [9] CAO J Y, YAN Z C, Wan J Q, et al. Comprehensive evaluation model for urban water security: A case study in Dongguan, China[J]. *Water*, 2022, 14(23): 3957-3957. DOI: 10.3390/W14233957.
- [10] 王先庆,李博,郑建.基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价[J].*南水北调与水利科技*,2019,17(4):87-93. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0088.
- [11] 张修宇,王李良,杨淇翔.河南省引黄受水区水资源安全综合评价[J].*人民黄河*,2021,43(9):90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.09.017.
- [12] 郭娇,李金燕,张翔.基于主客观组合赋权的水资源模糊物元综合评价[J].*人民长江*,2020,51(7):106-111. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.07.018.
- [13] 龚巧灵,官冬杰.基于BP神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J].*水土保持研究*,2017,24(6):292-299. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.06.044.
- [14] 李文雅,赵玲玲,翁学先,等.基于系统动力学的珠澳地区取用水系统水资源承载力[J].*水资源与水工程学报*,2022,33(6):103-110,119. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2022.06.13.
- [15] 张德彬,刘国东,王亮,等.基于博弈论组合赋权的TOPSIS模型在地下水水质评价中的应用[J].*长江科学院院报*,2018,35(7):46-50,62. DOI: 10.11988/ckyyb.20161231.
- [16] 杜雪芳,李彦彬,张修宇.基于TOPSIS模型的郑州市水资源承载力研究[J].*人民黄河*,2022,44(2):84-88. DOI: 10.3969/j.issn.1000-379.2022.02.017.
- [17] 张凤太,王腊春,苏维词.基于DPSIRM概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J].*中国环境科学*,2015,35(11):3511-3520.
- [18] 石晓昕,袁重乐,钱会,等.基于DPSIR-TOPSIS模型的河北省水资源承载力评价及障碍因素研究[J].*水资源与水工程学报*,2021,32(5):92-99. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.05.13.
- [19] 孙才志,吴永杰,刘文新.基于DPSIR-PLS模型的中国水贫困评价[J].*干旱区地理*,2017,40(5):1079-

1088. DOI: [10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2017.05.019](https://doi.org/10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2017.05.019).
- [20] ZHAO J H, XIU H R, WANG M, et al. Construction of evaluation index system of green development in the Yellow River basin based on DPSIR model[J]. *Top Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 510: 032033. DOI: [10.1088/1755-1315/510/3/032033](https://doi.org/10.1088/1755-1315/510/3/032033).
- [21] 杨振华, 周秋文, 郭跃, 等. 基于SPA-MC模型的岩溶地区水资源安全动态评价: 以贵阳市为例[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1589-1600.
- [22] MAHSA M, SAMAN J, ALI M, et al. A new combined framework for sustainable development using the DPSIR approach and numerical modeling[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(4): 264-277. DOI: [10.1016/J.GSF.2021.101169](https://doi.org/10.1016/J.GSF.2021.101169).
- [23] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于DPSIR模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(6): 971-981. DOI: [10.13209/j.0479-8023.2012.126](https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2012.126).
- [24] CAO Y H, LIU M Y, ZHANG Y, et al. Spatiotemporal evolution of ecological security in the Wanjiang City Belt, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(6): 1052-1064. DOI: [10.1007/s11769-020-1156-6](https://doi.org/10.1007/s11769-020-1156-6).
- [25] ZHOU S D, FELIX M, BENJAMIN B, et al. Assessing agricultural sustainable development based on the DPSIR approach: Case study in Jiangsu, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(7): 1292-1299. DOI: [10.1016/S2095-3119\(13\)60434-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60434-7).
- [26] ZHANG X R, WANG Y S, YUAN X F, et al. Regional land ecological security evaluation and ecological poverty alleviation practice: A case study of Yangxian County in Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(4): 682-700. DOI: [10.1007/S11442-022-1967-8](https://doi.org/10.1007/S11442-022-1967-8).
- [27] CUI B S, HU B, ZHAI H J, et al. Study on the interaction between engineering construction and ecosystem changes in the Longitudinal Range-Gorge Region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(2): 21-32. DOI: [10.1007/s11434-007-7003-7](https://doi.org/10.1007/s11434-007-7003-7).
- [28] 迟国泰, 曹婷婷, 张昆. 基于相关-主成分分析的人的全面发展评价指标体系构建[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(1): 111-119. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6788.2012.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6788.2012.01.014).
- [29] 许胜男, 陈国鹰, 张义明, 等. 基于DPSIRM模型和改进TOPSIS法的河北省水环境安全评价[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(5): 50-54.
- [30] 王飞, 张爱国, 陈国鹰, 等. 基于DPSIRM模型的河北省水资源承载力评价[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(7): 57-60, 116.
- [31] 刘君龙, 陈进, 袁喆, 等. 基于DPSIR-模糊集对评价模型的湖北省水资源评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(3): 57-64. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0050](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0050).
- [32] 刘晓佳, 张可. 基于加权秩和比法的桥梁施工方案优选研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(10): 21-25.
- [33] RAMALINGAM S. Mathematical programming and game theory[J]. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2020, 90(3): 570-570. DOI: [10.1080/00949655.2019.1628891](https://doi.org/10.1080/00949655.2019.1628891).
- [34] 李天宏, 薛晶, 夏炜, 等. 组合赋权法-木桶综合指数法在长江生态航道评价中的应用[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(1): 36-49. DOI: [10.16058/j.issn.1005-0930.2019.01.004](https://doi.org/10.16058/j.issn.1005-0930.2019.01.004).
- [35] LAI C G, CHEN X H, CHEN X Y, et al. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory[J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(2): 1243-1259. DOI: [10.1007/s11069-015-1645-6](https://doi.org/10.1007/s11069-015-1645-6).
- [36] 崔威, 李晓英, 郭宜薇. 基于博弈论组合赋权的水电站事故风险评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 408-416. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0041](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0041).
- [37] 马继敏, 脱云飞, 王倩, 等. 基于GRA-TOPSIS法云南省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 11-17, 26.
- [38] 罗紫薇, 胡希军, 汤佳, 等. 基于熵值-TOPSIS模型的湖南省水资源安全空间评价及障碍因子诊断[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(6): 35-45. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643x.2022.06.05](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643x.2022.06.05).
- [39] 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. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.001](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.001).

Evaluation on the evolution of water resources security degree in Hebei Province based on DPSIR-game theory combined weighting TOPSIS model

REN Nanbo, LIU Hongquan, PAN Zenghui, CHAI Chunling,
GAO Huiyan, ZHANG Xiping, CHEN Renqiang, LIANG Sutao

(College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: Hebei Province is an important ecological barrier in northern China and an important support for the coordinated development of Beijing, Tianjin and Hebei. However, its water resources problem was prominent, the per capita possession was low, the spatial and temporal distribution was uneven, and the contradiction between supply and demand of water resources was increasing. With the continuous development of social economy, the intensity and pressure of water resources development and utilization were increasing year by year, and the problem of water ecological environment was becoming more and more serious. In order to objectively and effectively evaluate the water resources security degree of Hebei Province, ensure that the natural circulation system of water resources can meet the natural guarantee function of national or regional development needs without being destroyed or threatened by people.

Based on the DPSIR model, the evaluation system of water resources security degree was preliminarily constructed. By collecting relevant data of Hebei Province, the correlation analysis and screening of the primary evaluation indexes were carried out to determine the evaluation system of water resources security degree. The TOPSIS model combined with the variation coefficient method and the rank sum ratio method was introduced to comprehensively evaluate the water resources security degree of Hebei Province from 2001 to 2020, and the evaluation results were diagnosed with obstacle factors.

The results showed that the relative closeness of water resources security degree in Hebei Province increased from 0.217 to 0.745 from 2001 to 2020, from extremely low to high, and reached a medium level as a whole. From 2001 to 2007, the level of water resources security degree was grade V. From 2008 to 2010, the level of water resources security degree reached grade IV. From 2011 to 2012, the level of water resources security reached grade III. From the end of 2014, the progress has been increasing year by year, which was closely related to the increase of the proportion of cross-basin water supply in the response subsystem. From the weight calculation results, it was concluded that the response subsystem was the main subsystem affecting the water resources security degree of Hebei Province, and the obstacle degree of the proportion index of inter-basin water supply was the highest, indicating that the proportion of inter-basin water supply was the primary obstacle factor affecting the water resources security degree.

In order to further improve the situation of water resources security degree in Hebei Province, it was necessary to optimize the allocation of water resources and alleviate the pressure of water resources. The biological treatment and physical and chemical treatment technology, are adopted, the process flow, is optimize the economic structure and industrial structure, are adjusted, and improve labor productivity is improved; it was necessary to advocate residents to improve their lifestyles and reduce the use of cleaners and detergents containing chemical substances. At the same time, it was necessary to improve the efficiency of water resources utilization and promote the circular economy model. The DPSIR-game theory combined weighting TOPSIS model had good objectivity and applicability for the evaluation of water resources security evolution, and was of great significance to the development of economy, society and ecological environment in the region. The research results provided a reference for the rational development, utilization and management of water resources in Hebei Province in the future.

Key words: Hebei Province; water resources security degree; DPSIR; combination empowerment; TOPSIS model; obstacle factor