

# 武汉市水资源脆弱性评价及障碍因子分析

侯雷

(湖北文理学院 资源环境与旅游学院, 湖北 襄阳 441053)

**摘要:** [目的] 对武汉市水资源脆弱性及其障碍因子进行研究, 进一步明确水资源系统特征及影响机制, 从而为区域水资源管理及高效利用提供科学依据。[方法] 结合武汉市水资源现状, 基于压力—状态—响应(PSR)模型共选取12项指标构建水资源脆弱性评价体系, 运用熵权法确定各项指标权重, 并利用集对分析法对水资源脆弱性水平进行评价, 在此基础上应用障碍度模型对武汉市水资源脆弱性障碍因子进行识别和分析。[结果] 2013—2022年武汉市水资源脆弱性整体呈现逐渐降低的趋势, 脆弱性等级由中等脆弱降低为微脆弱, 其中压力子系统水资源脆弱性逐渐下降, 状态子系统和响应子系统水资源脆弱性呈现波动下降趋势。万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、河流水质达标率、水资源开发利用率和污水集中处理率是影响水资源脆弱性的主要障碍因子; 从各子系统来看, 其障碍度表现为: 压力( $P$ ) > 状态( $S$ ) > 响应( $R$ )。[结论] 武汉市水资源虽然受到人类活动的影响较大, 但其对经济社会的快速发展起到了重要的支撑作用, 今后仍可通过不断优化水资源配置, 加快产业结构升级及科技创新成果应用, 提高污水处理水平, 进一步降低区域水资源脆弱性, 从而有效缓解水资源的供需矛盾。

**关键词:** 水资源脆弱性; PSR模型; 集对分析; 障碍度; 评价

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)05-0214-09

**中图分类号:** TV213

**文献参数:** 侯雷. 武汉市水资源脆弱性评价及障碍因子分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 214-222. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.023; Hou Lei. Evaluation of water resource vulnerability and analysis of obstacle factors in Wuhan City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 214-222.

## Evaluation of Water Resource Vulnerability and Analysis of Obstacle Factors in Wuhan City

Hou Lei

(College of Resource Environment and Tourism,  
Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei 441053, China)

**Abstract:** [Objective] The vulnerability and obstacle factors of water resources in Wuhan City were explored to further clarify the characteristics and influencing mechanism of water resources system, therefore to provide a basis for regional water resources management and efficient utilization. [Methods] Combined with the current situation of water resources in Wuhan City, 12 indicators were selected to construct a water resource vulnerability assessment system based on a pressure-state-response model. The entropy weight method was used to calculate the indicator weight, and the set pair analysis method was used to assess water resource vulnerability. On this basis, an obstacle degree model was applied to identify obstacles of water resource vulnerability in Wuhan City. [Results] The overall vulnerability of water resources in Wuhan City showed a gradually decreasing trend from 2013 to 2022, and the vulnerability level decreased from middle to micro vulnerability. From the perspective of each subsystem, the vulnerability of water resources in the pressure subsystem gradually decreased, whereas the state and response system vulnerability levels showed a fluctuating decrease. The main obstacles affecting the vulnerability of water resources are water consumption per 10 000 yuan of GDP, water consumption per 10 000 yuan of industrial added value, compliance rate of river water quality, development and utilization rate of water resources, and the centralized treatment rate of

收稿日期: 2024-04-01

修回日期: 2024-06-21

资助项目: 湖北文理学院博士科研启动基金项目“汉江流域不同土地利用类型土壤抗侵蚀能力研究”(kyqdf2021012)

第一作者: 侯雷(1993—), 男(汉族), 陕西省蓝田县人, 博士, 讲师, 主要从事水文水资源的研究。Email: houleizd@163.com。

sewage. The order of obstacle degree was pressure > state > response. [Conclusion] Although water resources are greatly influenced by human activities, they can provide important support for economic and social development in Wuhan City. The vulnerability of regional water resources could be effectively reduced and the supply-demand contradiction of water resources alleviated by continuously optimizing the allocation of water resources, accelerating the upgrading of industrial structures, improving the level of sewage treatment, and applying technological innovation.

**Keywords:** vulnerability of water resources; pressure-state-response model; set pair analysis; obstacle degree; evaluation

水资源是人类生存的重要物质基础和保障,同时其数量和质量又受到人类活动的影响<sup>[1]</sup>。随着经济的发展及城市化水平的提高,水资源短缺及水污染问题已成为制约社会经济可持续发展的关键因素,并会导致水资源系统发生变化<sup>[2]</sup>。水资源脆弱性是衡量水资源系统的变化的重要指标,对其进行科学全面的评价,有利于促进水资源的高效利用及其与城市的协调发展<sup>[3]</sup>。对于水资源脆弱性的研究,早期主要是针对地下水的脆弱性进行探究,随后逐步延伸和扩展至整个水资源系统<sup>[4]</sup>。在评价方法方面,已有许多学者从不同角度展开研究,一些学者主要从水资源脆弱性组成和模型应用两个方面,通过构建评价指标体系对水资源脆弱性进行探究。例如任鑫源等<sup>[5]</sup>从抵抗力、适应力和恢复力 3 个层次构建水资源脆弱性指标评价体系;潘争伟等<sup>[6]</sup>所构建的水资源利用系统脆弱性评价体系则主要包括水资源自然禀赋、开发利用程度和用水效率 3 个方面;周奉等<sup>[7]</sup>、范玲等<sup>[8]</sup>、王利平等<sup>[9]</sup>分别基于 DPSIR (driving force-pressure-state-impact-response) 模型、PSR (pressure-state-response) 模型、VSD (vulnerability scoping diagram) 模型构建了水资源脆弱性评价指标体系。在指标权重的确定及综合评价结果计算方面,目前主要应用的方法包括模糊综合评价法<sup>[10]</sup>、层次分析法<sup>[11]</sup>、集对分析法<sup>[12]</sup>、BP 神经网络法等<sup>[13]</sup>。由于水资源系统脆弱性研究是一项复杂的系统工程,系统内部及系统间均存在不确定性,因此在上述方法中,集对分析法体现出一定的优势,通过对水资源系统中脆弱性状况的不确定性因素进行定量化处理,而被广泛应用<sup>[14-15]</sup>。虽然目前已开展了较多关于水资源脆弱性评价的研究,但在此基础上,仍缺乏对水资源脆弱性影响机制的深入探索,尤其对水资源脆弱性障碍因子的识别和分析方面较薄弱。

因此,本研究以武汉市为例,基于 PSR 模型构建评价指标体系,采用熵权法和集对分析法对水资源脆弱性进行评价,同时结合障碍度模型对障碍因子进行识别和分析,阐明水资源脆弱性与各子系统的变化特征及联系,揭示水资源脆弱性影响机制,从而进一步明确人类活动对水资源的影响及动态联系,为水资源

的科学高效利用及经济社会的可持续发展提供依据。

## 1 材料及方法

### 1.1 研究区概况

武汉市为湖北省的省会城市,位于东经 113°41′—115°05′,北纬 29°58′—31°22′,地处长江中游地区,是中国中部地区的中心城市,气候属亚热带季风性湿润气候,四季分明,雨量充沛。该市江河纵横,湖泊众多,地理位置与自然条件优越。近年来,城市化迅速发展,人口数量不断增长,对水资源数量及质量造成了较大影响。2022 年武汉市总用水量  $4.53 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,万元 GDP 用水量  $21.9 \text{ m}^3$ ,农田灌溉水有效利用系数为 0.605,工业用水重复利用率为 91.7%。

### 1.2 数据来源

本文研究所采用的数据主要来源于《武汉统计年鉴》《武汉市水资源公报》《武汉市国民经济和社会发展统计公报》及《武汉市生态环境状况公报》。

### 1.3 研究方法

1.3.1 建立评价指标体系 PSR 模型能够较好地阐释人类社会与生态环境的关系及相互作用<sup>[16]</sup>,其中压力(P)主要反映人类活动对水资源造成的负荷,状态(S)指由于压力导致的水资源状态改变所呈现出的结果,响应(R)则代表用以改善水资源状态并缓解水资源压力所采取各项响应措施<sup>[17]</sup>。因此本文在 PSR 模型框架的基础上,结合相关研究<sup>[4, 8, 18]</sup>,分别从压力、状态和响应 3 个方面共选取 12 项指标构建水资源脆弱性评价指标体系。在指标选取过程中主要遵循科学性、代表性、系统性及可获得性的原则,根据所有指标对水资源脆弱性的影响,将其分为正向指标(指标值越大其脆弱性越高)和逆向指标(指标值越大其脆弱性越低)两类。由于目前尚未有统一的水资源脆弱性评价标准,所以本研究结合武汉市水资源利用现状,并参考武汉都市圈<sup>[4]</sup>及其他省份已有的水资源脆弱性评价标准<sup>[6, 12]</sup>,将水资源脆弱性等级划分为 5 级,分别为微脆弱(I 级)、轻度脆弱(II 级)、中度脆弱(III 级)、重度脆弱(IV 级)和极脆弱(V 级),其中人均水资源量划分采用国际标准,具体指标等级划分见表 1。

表 1 水资源脆弱性评价体系及评价标准

Table 1 Water resource vulnerability assessment index system and assessment criteria

目标层	准则层	指标层	脆弱性等级				
			微脆弱 (I级)	轻度脆弱 (II级)	中度脆弱 (III级)	重度脆弱 (IV级)	极脆弱 (V级)
水资源脆弱性评价	压力(P)	万元 GDP 用水量 $X_1/(\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$	$\leq 15$	(15,30]	(30,45]	(45,60]	$>60$
		人均用水量 $X_2/(\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	$\leq 200$	(200,300]	(300,400]	(400,600]	$>600$
		农业灌溉用水量 $X_3/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	$\leq 3\ 000$	(3 000,4 500]	(4 500,6 000]	(6 000,7 500]	$>7\ 500$
		万元工业增加值用水量 $X_4/\text{m}^3$	$\leq 35$	(35,55]	(55,75]	(75,95]	$>95$
	状态(S)	年降水量 $X_5/\text{mm}$	$\geq 1\ 200$	[800,1 200)	[400,800)	[200,400)	$<200$
		水资源利用率 $X_6/\%$	$\leq 10$	(10,25]	(25,40]	(40,60]	$>60$
		人均水资源量 $X_7/\text{m}^3$	$\geq 3\ 000$	[2 000,3 000)	[1 000,2 000)	[500,1 000)	$<500$
		河流达到或优于Ⅲ类水质断面占比 $X_8/\%$	$\geq 98$	[90,98)	[80,90)	[70,80)	$<70$
		河流水质达标率 $X_9/\%$	$\geq 96$	[86,96)	[76,86)	[66,76)	$<66$
		工业用水重复利用率 $X_{10}/\%$	$\geq 93$	[90,93)	[85,90)	[80,85)	$<80$
		污水集中处理率 $X_{11}/\%$	$\geq 96$	[90,96)	[80,90)	[70,80)	$<70$
生态环境用水比例 $X_{12}/\%$	$\geq 7$	[5,7)	[3,5)	[1,3)	$<1$		

1.3.2 计算指标权重 由于各指标对水资源脆弱性的影响程度不同,因此需明确各指标权重,用以反映各指标对水资源脆弱性影响作用的大小。为避免计算指标权重过程中各指标量纲不同的影响,需对各项指标值进行归一化处理。

正向指标:

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

负向指标:

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

式中: $S_{ij}$ ,  $X_{ij}$  分别为第  $i$  个对象第  $j$  项指标经过标准化处理后的值和原始值;  $\max X_j$ ,  $\min X_j$  分别为第  $j$  项指标的最大值和最小值。

从权重确定方法来看,熵权法具有应用范围广且客观性强的特点,主要通过计算信息熵确定各指标的权重,即信息熵越小,离散程度越大,指标的权重值就越大<sup>[19]</sup>,因此本文采用熵权法计算指标权重,具体步骤包括构造矩阵、指标标准化、计算熵值及权重等<sup>[20]</sup>。

1.3.3 集对分析法 集对分析是一种从同、异、反 3 个方面分析并解决不确定性问题的分析方法,通过构建具有一定联系的两个集合,对研究对象之间的确定性和不确定性关系进行分析<sup>[21]</sup>。该方法可准确反映水资源脆弱性的变化特征及机制。联系度  $\mu$  是集对分析的基础,其表达式为:

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}I + \frac{P}{N}J \quad (3)$$

式中: $\mu$  为联系度;  $N$  为两个集合的特性总数;  $S$  为两个集合相同特性数;  $F$  为两个集合中既不相同也不对立的特性总数;  $P$  为两个集合中对立的特性总数;  $I$  为差异度系数,取值范围为 $[-1,1]$ ;  $J$  为对立度系数,取值范围为 $[-1,1]$ 。

$$\text{令 } a = \frac{S}{N}, b = \frac{F}{N}, c = \frac{P}{N}, \text{ 则:}$$

$$\mu = a + bI + cJ \quad (4)$$

式中: $a, b, c$  分别表示集对的同一度、差异度和对立度。

在具体应用中,差异度  $b$  可细化展开,本文采用五元联系度对水资源脆弱性进行研究,其表达式为:

$$\mu = a + b_1I_1 + b_2I_2 + b_3I_3 + cJ \quad (5)$$

本文构建水资源脆弱性评价对象与评价标准的集合,若集合  $A$  为评价样本,集合  $B$  为评价标准,则集对  $H(A, B)$  的五元联系度为:

$$\mu_{ij} = \sum_{j=1}^q \omega_j a_j + \sum_{j=1}^q \omega_j b_{j,1} I_1 + \sum_{j=1}^q \omega_j b_{j,2} I_2 + \sum_{j=1}^q \omega_j b_{j,3} I_3 + \sum_{j=1}^q \omega_j c_j J \quad (6)$$

式中: $q$  为评价指标数量。

令:

$$f_1 = \sum_{j=1}^q \omega_j, f_2 = \sum_{j=1}^q \omega_j b_{j,1}, f_3 = \sum_{j=1}^q \omega_j b_{j,2},$$

$$f_4 = \sum_{j=1}^q \omega_j b_{j,3}, f_5 = \sum_{j=1}^q \omega_j c_j \text{ 则:}$$

$$\mu_{ij} = f_1 + f_2 I_2 + f_3 I_3 + f_4 I_4 + f_5 J \quad (7)$$

在联系度计算中,对于正向指标,计算方法为:

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1+0 I_1+0 I_2+0 I_3+0 J & (x_{ij} \leq s_1) \\ \frac{s_1+s_2-2x_{ij}}{s_2-s_1} + \frac{2x_{ij}-2s_1}{s_2-s_1} I_1+0 I_2+0 I_3+0 J & (s_1 < x_{ij} \leq \frac{s_1+s_2}{2}) \\ 0 + \frac{s_2+s_3-2x_{ij}}{s_3-s_1} I_1 + \frac{2x_{ij}-s_1-s_2}{s_3-s_1} I_2+0 I_3+0 J & (\frac{s_1+s_2}{2} < x_{ij} \leq \frac{s_2+s_3}{2}) \\ 0+0 I_1 + \frac{s_3+s_4-2x_{ij}}{s_4-s_2} I_2 + \frac{2x_{ij}-s_2-s_3}{s_4-s_2} I_3+0 J & (\frac{s_2+s_3}{2} < x_{ij} \leq \frac{s_3+s_4}{2}) \\ 0+0 I_1+0 I_2 + \frac{2s_4-2x_{ij}}{s_4-s_3} I_3 + \frac{2x_{ij}-s_3-s_4}{s_4-s_3} J & (\frac{s_3+s_4}{2} < x_{ij} \leq s_4) \\ 0+0 I_1+0 I_2+0 I_3+J & (x_{ij} > s_4) \end{cases} \quad (8)$$

对于逆向指标,计算方法为:

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1+0 I_1+0 I_2+0 I_3+0 J & (x_{ij} \geq s_1) \\ \frac{2x_{ij}-s_1-s_2}{s_1-s_2} + \frac{2s_1-2x_{ij}}{s_1-s_2} I_1+0 I_2+0 I_3+0 J & (\frac{s_1+s_2}{2} \leq x_{ij} < s_1) \\ 0 + \frac{2x_{ij}-s_2-s_3}{s_1-s_3} I_1 + \frac{s_1+s_2-2x_{ij}}{s_1-s_3} I_2+0 I_3+0 J & (\frac{s_2+s_3}{2} \leq x_{ij} < \frac{s_1+s_2}{2}) \\ 0+0 I_1 + \frac{2x_{ij}-s_3-s_4}{s_2-s_4} I_2 + \frac{s_2+s_3-2x_{ij}}{s_2-s_4} I_3+0 J & (\frac{s_3+s_4}{2} \leq x_{ij} < \frac{s_2+s_3}{2}) \\ 0+0 I_1+0 I_2 + \frac{2x_{ij}-2s_4}{s_3-s_4} I_3 + \frac{s_3+s_4-2x_{ij}}{s_3-s_4} J & (s_4 \leq x_{ij} < \frac{s_3+s_4}{2}) \\ 0+0 I_1+0 I_2+0 I_3+J & (x_{ij} < s_4) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $s_1, s_2, s_3, s_4$  分别为水资源脆弱性评价标准分别为微脆弱、轻度脆弱、中度脆弱和重度脆弱的临界值。

本文采用置信度准则确定水资源脆弱性等级,计算公式为:

$$h_k = \sum_{k=1}^k f_k > \lambda \quad (10)$$

式中: $h_k$  为属性测度; $f_k$  为各联系度分量; $\lambda$  为置信度,取值范围一般为 $[0.5, 0.7]$ ,由于 $\lambda$  值过大会导致评价结果偏保守,为提高评价结果的灵敏度<sup>[15]</sup>,本文 $\lambda$  的取值为 0.5。在计算过程中,当 $h_{k-1} < \lambda < h_k$  时,即脆弱性等级为  $k$  级。

1.3.4 障碍度模型 在水资源脆弱性评价的基础上,可运用障碍度模型分析并识别影响水资源脆弱性的主要障碍因子,主要涉及的衡量指标有因子贡献度、指标偏离度和障碍度<sup>[22]</sup>,其计算公式为:

$$T_j = W_i \cdot U_{ij} \quad (11)$$

$$E_j = 1 - K_j \quad (12)$$

式中: $T_j$  为因子贡献度; $W_i$  为第  $i$  个准则层的权重,已由熵权法求得; $U_{ij}$  为第  $i$  个准则层第  $j$  项指标的权重; $E_j$  为指标偏离度; $K_j$  表示第  $j$  项指标经标准化处理后的值。

$$V_j = T_j E_j / \sum_{j=1}^n T_j E_j \quad (13)$$

式中: $V_j$  为第  $j$  项指标对水资源改善的障碍度; $n$  为指标个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 水资源脆弱性等级综合评价

通过熵权法计算可得水资源脆弱性评价各指标的权重不同指标在各准则层中的权重(见表 2)。从指标权重来看,由大到小排名前 3 的指标分别为万元 GDP 用水量(0.194 1)、污水集中处理率(0.123 8)和河流水质达标率(0.110 6),反映出人类活动对水资源脆弱性的影响主要表现为用水效率及水环境两个方面。

表 2 水资源脆弱性评价指标权重

准则层	指标层	分项权重	指标权重	指标属性
P	$X_1$	0.487 6	0.194 1	正向
	$X_2$	0.121 3	0.048 3	正向
	$X_3$	0.127 3	0.050 7	正向
	$X_4$	0.263 8	0.105 0	正向
	$X_5$	0.160 0	0.054 9	逆向
	$X_6$	0.212 7	0.073 0	正向
S	$X_7$	0.172 3	0.059 1	逆向
	$X_8$	0.132 5	0.045 4	逆向
	$X_9$	0.322 5	0.110 6	逆向
R	$X_{10}$	0.398 8	0.103 2	逆向
	$X_{11}$	0.478 3	0.123 8	逆向
	$X_{12}$	0.122 9	0.031 8	逆向

表 3 为武汉市水资源脆弱性联系度及评价等级,武汉市 2013—2022 年水资源脆弱性程度呈现由高到低的变化趋势,逐渐由中度脆弱等级变化为微脆弱等级。其中 2013—2015 年水资源脆弱性等级虽然均为中度,但其置信度由 0.515 2 增加至 0.741 0,表明水资源脆弱性在该等级内有一定降低。2016—2021 年

为水资源脆弱性等级均为轻度,其年份所占比重为 60%,从置信度来看,其中 2018 年置信度值最低为 0.589 7,2020 年置信度最高为 0.709 4,水资源脆弱性在轻度等级内总体呈现先下降后上升的趋势,表明在该时段范围内水资源脆弱性水平呈现先上升后下降的变化特征。

表 3 武汉市水资源脆弱性联系度及等级

Table 3 Water resources vulnerability connection degree and level in Wuhan City

年份	脆弱性联系度					$h_k$	脆弱性等级
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$		
2013	0.050 7	0.226 4	0.238 0	0.220 4	0.264 5	$h_3=0.515 2$	Ⅲ
2014	0.044 1	0.247 4	0.294 5	0.101 9	0.312 1	$h_3=0.586 0$	Ⅲ
2015	0.162 4	0.225 2	0.353 4	0.069 7	0.189 4	$h_3=0.741 0$	Ⅲ
2016	0.353 3	0.250 0	0.267 1	0.082 1	0.047 4	$h_2=0.603 4$	Ⅱ
2017	0.278 9	0.344 0	0.175 9	0.036 5	0.164 7	$h_2=0.622 9$	Ⅱ
2018	0.261 4	0.328 3	0.176 0	0.051 5	0.182 9	$h_2=0.589 7$	Ⅱ
2019	0.195 8	0.475 7	0.114 4	0.055 9	0.158 2	$h_2=0.671 5$	Ⅱ
2020	0.304 2	0.405 2	0.209 0	0.068 7	0.013 0	$h_2=0.709 4$	Ⅱ
2021	0.299 9	0.359 4	0.113 8	0.088 2	0.138 7	$h_2=0.659 3$	Ⅱ
2022	0.618 7	0.144 3	0.057 7	0.043 8	0.135 5	$h_1=0.763 0$	I

注: $f_k, h_k$  为各联系度分量和属性测度。

## 2.2 各子系统等级评价

(1) 压力子系统。由表 4 可知,压力子系统水资源脆弱性等级逐渐降低。结合图 1 可知,该变化与社会生产活动中不同类型用水量降低密切相关,主要表现为万元 GDP 用水量与万元工业增加值用水量下降明显,2013—2022 年分别降低了 50.23% 和 37.06%。从指标脆弱性等级来看,2013—2022 年万元 GDP 用水量由重度脆弱等级变化为轻度脆弱,万元工业增加

值用水量由轻度脆弱变化为微脆弱,其变化主要得益于近年来水资源高效利用方式及节水技术的不断升级,使得相同水资源量所创造出价值更多。压力子系统水资源脆弱性为轻度的年份为 2016—2021 年,年份比例为 60%,该等级内的置信度总体呈现逐渐上升的趋势,由 2016 年的 0.667 4 增加至 2020 年的 0.788 3,同样反映出压力子系统的水资源脆弱性呈逐渐降低的特征。

表 4 武汉市水资源各子系统脆弱性等级

Table 4 Water resources vulnerability level of subsystem in Wuhan City

年份	类别	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	等级	年份	类别	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	等级
2013	P	0	0.184 7	0.615 9	1.000 0		Ⅲ	2018	P	0.263 8	0.773 9	0.951 5	1.000 0		Ⅱ
	S	0.144 1	0.160 0	0.160 0	0.340 6	1.000 0	V		S	0.076 1	0.234 1	0.482 5	0.554 0	1.000 0	Ⅳ
	R	0	0.606 3	0.864 6	0.864 6	1.000 0	Ⅱ		R	0.529 0	0.797 5	0.864 6	0.891 7	1.000 0	I
2014	P	0	0.211 0	0.789 4	1.000 0		Ⅲ	2019	P	0.263 8	0.773 4	0.944 1	1.000 0		Ⅱ
	S	0.125 5	0.160 0	0.160 0	0.205 1	1.000 0	V		S	0.002 6	0.450 2	0.548 7	0.614 9	1.000 0	Ⅲ
	R	0	0.621 3	0.864 6	0.864 6	1.000 0	Ⅱ		R	0.363 3	0.822 7	0.864 6	0.905 2	1.000 0	Ⅱ
2015	P	0.052 8	0.377 6	0.891 0	1.000 0		Ⅲ	2020	P	0.296 3	0.817 6	0.984 2	1.000 0		Ⅱ
	S	0.160 0	0.234 1	0.482 5	0.554 0	1.000 0	Ⅳ		S	0.160 0	0.495 1	0.878 6	1.000 0		Ⅲ
	R	0.352 7	0.629 7	0.864 6	0.864 6	1.000 0	Ⅱ		R	0.529 0	0.839 5	0.864 6	0.945 8	1.000 0	I
2016	P	0.290 0	0.667 4	0.953 1	1.000 0		Ⅱ	2021	P	0.283 3	0.788 3	0.919 5	1.000 0		Ⅱ
	S	0.379 3	0.482 5	0.778 5	0.939 1	1.000 0	Ⅲ		S	0.160 0	0.369 6	0.540 7	0.614 9	1.000 0	Ⅲ
	R	0.423 2	0.671 6	0.864 6	0.891 7	1.000 0	Ⅱ		R	0.533 5	0.864 6	0.864 6	0.986 5	1.000 0	I
2017	P	0.263 8	0.729 3	0.955 2	1.000 0		Ⅱ	2022	P	0.751 4	0.751 4	0.892 7	1.000 0		I
	S	0.126 0	0.414 7	0.572 5	0.614 9	1.000 0	Ⅲ		S	0.403 0	0.614 9	0.614 9	0.614 9	1.000 0	Ⅱ
	R	0.529 0	0.747 2	0.864 6	0.878 2	1.000 0	I		R	0.709 1	1.000 0				I

(2) 状态子系统。2013—2022 年状态子系统水资源脆弱性呈现波动下降的趋势,等级类型主要包括轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极脆弱等级,其中中度脆弱等级年份所占比例最大为 50%。结合各指标变化来看,与 2013 年相比,2022 年河流达到或优于Ⅲ类水质断面比例提高 27.0%,河流水质达标率提高 4.5%,两项指标的脆弱性等级均由重度脆弱变化为轻度脆弱,表明近年来武汉市水质的改善及生态质量提升使得水资源脆弱性明显降低,水资源系统抵抗外界因素干扰的能力不断增强。2022 年状态子系统水资源脆弱性等级达到轻度脆弱,表明该年份水资源从数量和质量方面均达到较高水平。

(3) 响应子系统。响应子系统水资源脆弱性等级在轻度脆弱和微脆弱等级波动变化,其中 2017 年水资源脆弱性首次由轻度脆弱变化为微脆弱。其主要原因为 2017 年工业用水重复利用率指标脆弱性等级下降为轻度脆弱,污水集中处理率指标的脆弱性等级下降为微脆弱,工业用水重复利用率和污水集中处理率分别增加 0.90% 和 0.60%。2019 年水资源脆弱性升高为轻度脆弱,主要是由于污水集中处理率脆弱性等级的影响。由此可见,工业生产过程中的节水技术的应用及优化升级,在提高水资源利用效率的同时,也降低了水资源脆弱性,同时污水处理率的提升也对水资源可持续利用程度的提高起到了促进作用。

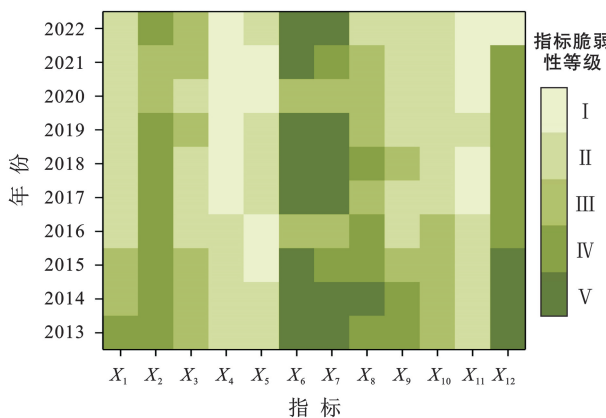


图 1 武汉市水资源各项指标脆弱性状态

Fig.1 Water resource index vulnerability status in Wuhan City

### 2.3 障碍度分析

为进一步明确水资源脆弱性的障碍因子,本文运用障碍度模型对水资源脆弱性各项指标及子系统的障碍度进行计算,由表 5 可知,2013—2022 年水资源脆弱性单项指标的障碍度排名前 5 的指标分别为万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、河流水质达标率、水资源开发利用率和污水集中处理率。

表 5 武汉市 2013—2022 年水资源脆弱性障碍度平均值  
Table 5 Average value of water resource vulnerability obstacle degree in Wuhan City during 2013—2022

指标	障碍度	排序	指标	障碍度	排序
X <sub>1</sub>	0.279 0	1	X <sub>7</sub>	0.048 7	7
X <sub>2</sub>	0.034 5	11	X <sub>8</sub>	0.042 3	9
X <sub>3</sub>	0.037 3	10	X <sub>9</sub>	0.119 7	3
X <sub>4</sub>	0.121 1	2	X <sub>10</sub>	0.065 7	6
X <sub>5</sub>	0.048 4	8	X <sub>11</sub>	0.086 5	5
X <sub>6</sub>	0.110 7	4	X <sub>12</sub>	0.006 0	12

从各子系统障碍度变化来看,其障碍度大小排序依次为:压力子系统>状态子系统>响应子系统。压力子系统呈现先上升后下降的趋势,2013—2022 年之间其障碍度平均值为 0.472 0,状态子系统障碍度则呈现先下降后上升的趋势,其值在 2018 年时降到最低,响应子系统障碍度的变化总体呈现波动上升的趋势,表明近年来针对水资源保护及生态环境改善所采取的措施效果逐渐凸显,促使水资源脆弱性的不断降低。从主导作用来看,2013 年和 2015 年状态子系统的障碍度占主导作用,其余年份则压力子系统障碍度占主导作用(图 2)。

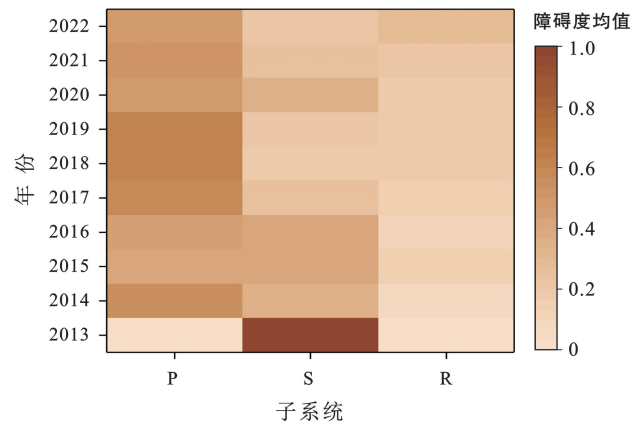


图 2 水资源脆弱性各子系统障碍度  
Fig.2 Obstacle degree of subsystem of water resource vulnerability

## 3 讨论

对水资源脆弱性进行系统评价,深入分析水资源脆弱性变化特征,既是实现水资源高效管理的基础和前提,也可为水资源的可持续利用提供参考。根据本文研究结果可知,近年来武汉市水资源脆弱性呈降低趋势,等级由中度脆弱变化为微脆弱,有研究表明水资源脆弱性与水资源承载力发展趋势相反<sup>[23]</sup>,由此反映出武汉市水资源对经济社会发展起到了较好的支撑作用,与已有关于武汉市水资源承载力研究<sup>[24]</sup>所得出的结果类似。通过对区域水资源状况进行分析可

知,武汉市水资源补给条件相对较好,降水作为水资源的主要来源,多年平均降水量为 1 240.6 mm。同时武汉市水资源的开发利用及治理程度能够满足社会发展的需求,以中心城区为例,该区域水资源需求量大且受到人类活动影响明显,但是 2022 年武汉市中心城区供水能力占总供水能力的 70.82%,年污水处理量占总污水处理量的 79.89%。在评价方法上,与已有研究<sup>[12,25]</sup>对比,本研究在评价基础上进一步结合障碍度模型对阻碍水资源脆弱性改善的因子进行诊断分析。根据研究结果可知,障碍度排名前 3 的指标分别为万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、河流水质达标率,主要原因为武汉市人口增长及经济社会的发展速度较快,给水资源的保护与管理造成较大压力。在主要障碍因子中,万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量均体现出水资源利用效率情况,而河流水质达标率则反映了污水处理技术水平。因此若需进一步降低水资源脆弱性,应从水资源的数量和质量两个方面同步采取相应措施。在水资源利用方面,需依据区域水资源禀赋,不断优化水资源配置,合理调整用水结构和格局。同时需加强科技创新成果的应用,加快产业结构升级,推广高效节水技术,提升节水意识。在改善水质方面,需加强面源污染治理,提高污水处理率,保障区域生态用水。从评价方法来看,由于近年来武汉市城市化进程不断加快,人类活动对资源环境的影响受到越来越多的关注,而 PSR 模型可从压力、状态及响应 3 个方面探究生态环境系统与社会经济系统之间的动态联系<sup>[26]</sup>,所以本文基于 PSR 模型构建武汉市水资源脆弱性评价体系,其评价结果可有效揭示人类活动与水资源脆弱性的关系及相互作用。由于目前水资源脆弱性评价体系及评价方法仍在不断完善,所以今后可在此基础上进一步强化对水资源脆弱性成因、动态过程及机理的研究。

## 4 结论

(1) 武汉市水资源脆弱性等级由 2013 年的中度脆弱变化为 2020 年的微脆弱,整体呈现逐渐降低的趋势,其中水资源脆弱性为轻度的年份所占比重为 60%。

(2) 2013—2022 年压力子系统水资源脆弱性等级呈下降趋势,主要与万元 GDP 用水量及万元工业增加值用水量降低有关;状态子系统水资源脆弱性等级呈现波动下降变化特征,其中河流达到或优于Ⅲ类水质断面占比及河流水质达标率分别提高 27.0%和 4.5%;响应子系统水资源脆弱性在轻度脆弱和微脆弱两个等级波动变化。

(3) 2013—2022 年武汉市水资源脆弱性单项指标障碍度排名前 5 的指标分别为万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量、河流水质达标率、水资源开发利用率和污水集中处理率;子系统障碍度表现为:压力>状态>响应。

## 参考文献 (References)

- [1] 吕文凯,周金星,万龙,等.滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价[J].地球学报,2021,42(3):341-351.  
Lü Wenkai, Zhou Jinxing, Wan Long, et al. Evaluation of water resources vulnerability in karst faulted basin of Eastern Yunnan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021,42(3):341-351.
- [2] 杨法喧,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.  
Yang Faxuan, Zheng Le, Qian Hui, et al. Vulnerability assessment of urban water resources based on DPSIR model: A case study of Xi'an City [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020,31(1):77-84.
- [3] 朱逸凡,何宏,张文静,等.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的长春市水资源脆弱性评价[J].水土保持通报,2022,42(5):174-180.  
Zhu Yifan, He Hong, Zhang Wenjing, et al. Water resource vulnerability assessment of Changchun city based on DPSIR-TOPSIS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):174-180.
- [4] 朱娟娟,黄建武,揭毅.武汉城市圈水资源脆弱性评价[J].水资源保护,2015,31(2):59-64.  
Zhu Yijuan, Huang Jianwu, Jie Yi. Evaluation on water resources vulnerability of Wuhan city circle [J]. Water Resources Protection, 2015,31(2):59-64.
- [5] 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 Yuanxin, Lin Qing, Han Ting, et al. Evaluation on the vulnerability of water resources in Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(2):227-232.
- [6] 潘争伟,金菊良,刘晓薇,等.水资源利用系统脆弱性机理分析与评价方法研究[J].自然资源学报,2016,31(9):1599-1609.  
Pan Zhengwei, Jin Juliang, Liu Xiaowei, et al. Mechanism and evaluation method of water resources utilization system vulnerability [J]. Journal of Natural Resources, 2016,31(9):1599-1609.
- [7] 周奉,苏维词,郑群威.基于 DPSIR 模型的黔中地区水资源脆弱性评价研究[J].节水灌溉,2018(8):59-65.  
Zhou Feng, Su Weici, Zheng Qunwei. Vulnerability as-

- assessment of water resources in central areas of Guizhou Province based on DPSIR model [J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(8):59-65.
- [8] 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.  
Fan Ling, Wang Huixiao, Liu Changming, et al. Vulnerability assessment of water resources based on pressure-state-response model in Xinjiang [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022,20(6):1052-1064.
- [9] 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 Liping, Zhang Jianyun, Shu Zhangkang, 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.
- [10] 邹君,刘兰芳,田亚平,等.地表水资源的脆弱性及其评价初探[J].*资源科学*,2007,29(1):92-98.  
Zou Jun, Liu Lanfang, Tian Yaping, et al. Concept and quantitative assessment of vulnerability of surface water resource [J]. *Resources Science*, 2007,29(1):92-98.
- [11] 王红梅,黄勇,王丽丽.基于层次分析法对扬州市深层地下水资源评价[J].*河北工程大学学报(自然科学版)*,2016,33(4):67-71.  
Wang Hongmei, Huang Yong, Wang Lili. Evaluation of deep groundwater resources Yangzhou based on AHP [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2016,33(4):67-71.
- [12] 原彩萍,刘原一,职璐爽.基于模糊集对法的山西省水资源脆弱性评价[J].*水资源保护*,2021,37(5):112-116  
Yuan Caiping, Liu Yuanyi, Zhi Lushuang. Water resources vulnerability assessment in Shanxi Province based on fuzzy set pair method [J]. *Water Resources Protection*, 2021,37(5):112-116.
- [13] 崔东文.基于改进 BP 神经网络模型的云南文山州水资源脆弱性综合评价[J].*长江科学院院报*,2013,30(3):1-7.  
Cui Dongwen. Comprehensive assessment of the vulnerability of water resources by improved BP neural network model [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013,30(3):1-7.
- [14] 胡蓓琳,潘争伟,金菊良,等.基于集对分析模型的巢湖流域水资源系统脆弱性评价[J].*水电能源科学*,2013,31(10):21-24.  
Hu Beilin, Pan Zhengwei, Jin Juliang, et al. Vulnerability evaluation of Chaohu Basin water resources system based on set pair analysis model [J]. *Water Resources and Power*, 2013,31(10):21-24.
- [15] 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 Yanhao, Chen Fulong, He Chaofei, et al. Water resources vulnerability assessment of Xinjiang based on fuzzy set pair analysis [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023,34(4):107-117.
- [16] 周江文,程朋根,张品超,等.基于 PSR 模型的南昌市生态环境变化分析[J].*江西科学*,2019,37(5):677-684.  
Zhou Jiangwen, Cheng Penggen, Zhang Pinchao, et al. Analysis of ecological environment change of Nanchang City based on PSR model [J]. *Jiangxi Science*, 2019,37(5):677-684.
- [17] 周申蓓,汪心愿,童建.基于 PSR 模型的长江流域水资源系统韧性分析[J].*水利经济*,2023,41(3):23-28.  
Zhou Shenbei, Wang Xinyuan, Tong Jian. Resilience analysis of water resources system of the Yangtze River Basin based on pressure-state-response model [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2023,41(3):23-28.
- [18] 管文闯,饶碧玉,路远,等.基于 DPSIRM 模型的高原城市水源地水资源脆弱性评价及障碍诊断[J].*中国农村水利水电*,2022(3):147-154.  
Guan Wenchuang, Rao Biyu, Lu Yuan, et al. Evaluation of water resources vulnerability and obstacle diagnosis of water sources in plateau cities based on DPSIRM model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(3):147-154.
- [19] 刘晓敏,孙天合.基于熵权法的武威市水资源脆弱性评价[J].*天津农业科学*,2020,26(7):49-54.  
Liu Xiaomin, Sun Tianhe. Evaluation of water resource vulnerability in Wuwei city based on entropy weight method [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2020,26(7):49-54.
- [20] 杨静,荆平,高蝶,等.京津冀城市群水资源循环经济发展的障碍因子分析[J].*中国农村水利水电*,2020(10):131-136.  
Yang Jing, Jing Ping, Gao Die, et al. An analysis of the development obstacle factors of water resource recycling economy in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(10):131-136.
- [21] 金菊良,沈时兴,潘争伟,等.水资源集对分析理论与应用研究进展[J].*华北水利水电大学学报(自然科学版)*,



- 2017,38(4):54-66.
- Jin Juliang, Shen Shixing, Pan Zhengwei, et al. Advances in theoretical and applied research on set pair analysis method for water resources system [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017,38(4):54-66.
- [22] 焦士兴,陈林芳,王安周,等.河南省农业水资源脆弱性时空特征及障碍度诊断[J].农业现代化研究,2020,41(2):312-320.
- Jiao Shixing, Chen Linfang, Wang Anzhou, et al. The spatial-temporal patterns of vulnerability analysis and the obstacle diagnosis of agricultural water resource in Henan Province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2020,41(2):312-320.
- [23] 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.
- Shi Xiaoxin, Yuan Chongle, Qian Hui, et al. Evaluation and obstacle factors of water resources carrying capacity in Hebei Province based on DPSIR-TOPSIS model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021,32(5):92-99.
- [24] 肖静,袁江棋,罗响,等.基于博弈论和云模型的武汉市水资源承载力变化研究[J].武汉理工大学学报(社会科学版),2022,35(3):86-93.
- Xiao Jing, Yuan Jiangqi, Luo Xiang, et al. Change of water resource carrying capacity in Wuhan City based on game theory and cloud model [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Social Sciences Edition), 2022,35(3):86-93.
- [25] 周正柱,王俊龙.长江经济带生态环境压力、状态及响应耦合协调发展研究[J].科技管理研究,2019,39(17):234-240.
- Zhou Zhengzhu, Wang Junlong. Research on the coupling coordinated development of ecological environment pressure, state and response in Yangtze River economic belt [J]. Science and Technology Management Research, 2019,39(17):234-240.
- [26] 马冬梅,陈大春.基于熵权法的模糊集对分析模型在乌鲁木齐市水资源脆弱性评价中的应用[J].水电能源科学,2015,33(9):36-40.
- Ma Dongmei, Chen Dachun. Application of fuzzy set pair analysis model based on entropy weight in water resources vulnerability assessment of Urumqi [J]. Water Resources and Power, 2015,33(9):36-40.
- [27] 解刚,王向东.北京市房地产类建设项目下凹式绿地的雨水拦蓄能力及挖深研究[J].水土保持通报,2013,33(2):144-146.
- Xie Gang, Wang Xiangdong. Storage capacity and digging depth for rainwater collection on low elevation green land in projects of real estates in Beijing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(2):144-146.
- [29] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, et al. Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure [J]. Built Environment, 2007,33(1):115-133.
- [30] 张永勇,侯进进,夏军,等.中国典型城市小区尺度下垫面对径流过程的调控特征与空间差异[J].中国科学:地球科学,2022,52(8):1427-1442.
- Zhang Yongyong, Hou Jinjin, Xia Jun, et al. Regulation characteristics of underlying surface on runoff regime metrics and their spatial differences in typical urban communities across China [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022,52(8):1427-1442.
- [31] Kauffman G J, Belden A C, Vonck K J, et al. Link between impervious cover and base flow in the white clay creek wild and scenic watershed in Delaware [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009,14(4):324-334.
- [32] 燕超,胡海波,徐晓梅,等.模拟降雨条件下城市下垫面径流系数变化规律[J].中国水土保持科学,2022,20(5):24-30.
- Yan Chao, Hu Haibo, Xu Xiaomei, et al. Changing pattern of runoff coefficients in urban underlying surfaces under simulated rainfall conditions [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(5):24-30.
- [33] 相莹敏,刘加刚,卜自珍,等.北京市典型生产建设项目土壤侵蚀规律研究[J].中国水土保持,2020(5):33-35.
- Xiang Yingmin, Liu Jiagang, Bu Zizhen, et al. The law of soil erosion of typical production and construction projects in Beijing [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(5):33-35.

(上接第 182 页)