

基于 VSD-云物元模型的长沙市水资源脆弱性评价及障碍因子诊断

邓红卫, 李 艺

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: [目的] 基于脆弱性内涵对湖南省长沙市水资源脆弱性进行评价并明确其障碍因子, 为该市水资源管理调控策略的科学制定提供理论依据。[方法] 结合 VSD 概念框架建立综合评价指标体系, 运用博弈论来确定组合权重, 基于云物元模型对长沙市 2014—2020 年水资源脆弱性状况进行综合评价, 并利用障碍度模型对影响该市水资源脆弱性的障碍因子进行诊断分析。[结果] ① 2014—2020 年, 长沙市水资源脆弱性呈递减态势, 由中等脆弱水平降低至轻微脆弱水平; ② 各准则层脆弱性演变趋势各异, 暴露度维度脆弱性持续较高, 敏感性维度脆弱性变化不稳定, 适应性维度脆弱性呈明显下降态势; ③ 暴露度准则层障碍度最大, 人均水资源量、人均日生活用水量、工业废水排放总量、上型水库蓄水量、年降水量是制约长沙市水资源脆弱性下降的主要障碍因子。[结论] 为进一步降低长沙市水资源脆弱性等级, 应协调好社会经济发展与水资源开发利用之间的关系, 减少人类活动对水资源系统的压力, 进一步加强节水监督管理, 加大水库建设投资力度, 促进再生水和雨水资源化利用。

关键词: 水资源脆弱性; VSD 模型; 云物元模型; 障碍因子; 长沙市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)06-0174-11

中图分类号: TV213.4

文献参数: 等. 基于 VSD-云物元模型的长沙市水资源脆弱性评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 174-184. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.022; Deng Hongwei, Li Yi. Evaluation of water resource vulnerability in Changsha City based on VSD and cloud matter-element model, and diagnosis of obstacle factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 174-184.

Evaluation of Water Resource Vulnerability in Changsha City Based on VSD and Cloud Matter-element Model, and Diagnosis of Obstacle Factors

Deng Hongwei, Li Yi

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hu'nan 410083, China)

Abstract: [Objective] The vulnerability of water resources in Changsha City was evaluated based on the connotation of vulnerability and its obstacles factors were identified, in order to provide a theoretical basis for the formulation of water resources management and control strategies in Changsha City, Hunan Province. [Methods] A comprehensive evaluation index system was established based on the vulnerability scoping diagram (VSD) conceptual framework. Game theory was used to determine the combined weight. The cloud matter-element model was used to comprehensively evaluate the vulnerability of water resources in Changsha City from 2014 to 2020. The obstacle degree model was used to diagnose and analyze the obstacle factors affecting the vulnerability of water resources in the city. [Results] ① From 2014 to 2020, the vulnerability of water resources in Changsha City showed a decreasing trend, from a medium level of vulnerability to a slight level of vulnerability; ② The evolution trends of vulnerability at each criterion level were different, the vulnerability of the exposure dimension was consistently high, the vulnerability of the sensitivity dimension was unstable, and the vulnerability of the adaptability dimension showed a clear downward trend; ③ The

收稿日期: 2023-05-15

修回日期: 2023-06-15

资助项目: 金属矿山安全与健康国家重点实验室开放基金项目“基于超深部固废源头减量低碳清洁闭环采矿方式研究”(2022-JSKSSYS-08); 中南大学校企联合创新项目(1053320200341; 1053320200344)

第一作者: 邓红卫(1969—), 男(汉族), 湖南省岳阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事金属矿山开采、矿山安全、水资源利用与灾害防治研究。Email: denghw208@126.com。

通信作者: 李艺(1999—), 女(汉族), 湖南省益阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源安全。Email: ly870517850@163.com。

obstacle degree for the exposure criterion level was the highest, and per capita water resources, per capita daily water consumption, total industrial wastewater discharge, water storage capacity of the upper-type reservoir, and annual precipitation were the main obstacle factors that restricted the decline of water resource vulnerability in Changsha City. [Conclusion] In order to further reduce the level of vulnerability of water resources in Changsha City, the relationship between socio-economic development and the development and utilization of water resources should be coordinated in the future to reduce the pressure of human activities on the water resources system, and at the same time, the supervision and management of water conservation should be further strengthened, the investment in the construction of reservoirs should be intensified, and the utilization of recycled water and rainwater resources should be promoted.

Keywords: water resource vulnerability; VSD model; cloud matter-element model; obstacle factors; Changsha City

水是维持地球生态系统良性循环和人类生存的战略资源。但目前有 40 亿人面临极端水资源短缺,1/2 以上人口遭遇水资源不安全问题^[1],供需失衡和水环境问题已经危及人类生存^[2],水资源系统脆弱性成为制约城市可持续发展的瓶颈。脆弱性问题是可持续研究中的核心问题之一。因此,从脆弱性角度开展水资源研究,对于缓解城市水资源矛盾,制定管理政策以及保障社会经济和城市可持续发展具有重要意义。

水资源脆弱性是指水系统受到扰动并经过适应措施之后仍存在的净影响,其脆弱性水平可以描述为暴露性、系统敏感性和适应性因素的组合^[3-4]。在水资源脆弱性评估中,评价指标体系的建立及评价方法的选择是两个核心部分。由于脆弱性概念内涵的多元化因素的影响,水资源脆弱性评估领域缺乏一个通用的脆弱性评估框架。杨大方等^[5]利用压力—状态—响应(PSR)模型建立了贵州的水资源系统脆弱性指标体系,但未考虑到系统状态对社会经济产生的影响。Varis 等^[6]基于驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)框架对亚太地区的 10 条主要河流进行了脆弱性评估。朱逸凡等^[7]也基于 DPSIR 框架构建评价指标体系对长春市水资源的脆弱性进行了实证分析,DPSIR 框架虽然弥补了 PSR 模型在反映社会经济影响方面的不足,但 DPSIR 框架本身并没有对脆弱性进行定义,导致了其与脆弱性概念之间的关系仍然十分模糊。而 Polsky 等^[8]提出的 VSD (vulnerability scoping diagram)脆弱性评估框架与脆弱性内涵具有一一对应关系,其明确的脆弱性涵义将脆弱性分解为暴露程度、敏感性和适应能力 3 个维度,更适用于系统地对区域尺度进行脆弱性分析和评价。此外,VSD 框架用方面层—指标层—参数层逐级递进、细化的方式来组织评价数据,具有较好的兼容性^[9]。在水资源脆弱性评价方法方面,定量评价方法应用较多^[10]。夏军等^[11]通过建立水资源系统敏感性、暴露度、灾害风险、抗压性的计算公式构建了

RESC 模型,用于评估中国东部季风区的水资源脆弱性;Gui 等^[12]针对澜沧江流域开发了敏感性、暴露性、危险性和适应性函数。上述函数法可以体现水资源脆弱性的物理机制,但选取的指标较少,不能全面反映水资源脆弱性。为此,综合指数法得到广泛应用。周奉等人^[13]利用熵权-TOPSIS 法评价了黔中地区水资源脆弱性;原彩萍等^[14]分别用模糊综合法、灰关联分析法、模糊集对法对山西省水资源脆弱性进行了评价及对比分析。综合指数法虽然可以较为全面地反映水资源脆弱性,但传统等级划分方法并未充分考虑水资源脆弱性等级边界的模糊性和随机性,忽略了各等级间的模糊过渡区域,导致了评价结果存在一定误差。此外,对于城市水资源系统脆弱性的障碍因子分析较为欠缺,不利于提出针对性建议以改善水资源脆弱性。

因此,基于已有研究,本文基于理解传统的“暴露—敏感—应对”的脆弱性内涵,使用 VSD 框架体现“脆弱性”这一概念及指标间的相关关系;从水资源—社会经济—生态环境复合系统中选取指标,力求全面反映水资源脆弱性,同时基于博弈论思想确定最优组合权重,避免主、客观因素的干扰;综合等级划分的明确性和云边界的模糊性,提出基于云物元模型的水资源脆弱性综合评价模型对长沙市进行实证分析;在此基础上,引入障碍度模型识别阻碍长沙市水资源脆弱性改善的主要障碍因子,挖掘当前水资源系统的薄弱环节,旨在增加长沙市水资源开发利用和管理调控的方向性和有效性。

1 研究区概况

长沙市位于湖南省东部偏北,全市总面积 11 819.5 km²,人口约为 1 042.1 万人(2022 年)。作为长江中游地区重要的中心城市,长沙既是全国“两型社会”综合配套改革试验区,也是全国首批 45 个水生态文明城市建设试点市之一。长沙市毗邻洞庭湖,水系完整,河网密布,拥有丰富的水资源和河流资源,

其河流大都属湘江水系,流入湘江的支流有 15 条,多年平均降雨量为 1 377.1 mm,水资源总量为 $1.23 \times 10^{10} \text{ m}^3$,但人均水资源占有量仅有 $1 226 \text{ m}^3$,为中度缺水型城市。随着城市化率的不断提高以及“网红经济”的快速发展,长沙市水资源呈现出供需矛盾加剧、水质污染严重等问题。此外,长沙市属于典型的亚热带季风气候,水资源时空分布不均,部分地区水资源相对匮乏,季节性缺水、水质性缺水、工程性缺水、区域性缺水现象一直存在。因此,长沙市水资源面临较大的脆弱性挑战,水资源脆弱性将成为制约当地经济可持续发展的主要因素,需要加强水资源的保护和管理。

2 研究方法

2.1 评价指标体系的构建

水资源脆弱性评价需要考虑多个系统指标,各指

标相互联系且相互制约。结合城市水资源系统的特点,参考已有研究,本研究从传统的脆弱性内涵出发,基于 VSD 概念模型从暴露度、敏感度和适应度 3 个维度选取合适的指标构建水资源脆弱性评价指标体系(表 1)。VSD 评估框架与“暴露—敏感—应对”的脆弱性内涵一一对应,高度集成了脆弱性概念、脆弱性指标和数据,更能体现水资源脆弱性的成因及形成过程,揭示自然、社会经济、人类活动对水资源系统的复合影响,在区域尺度的脆弱性评估中更有优势。暴露度是指水资源系统受到外界干扰或胁迫使得资源、生态和社会经济等易受损害的程度;敏感性指水资源系统对外部压力和威胁的反应和敏感程度,包括水量、水质、供水结构和功能等方面;适应性则指水资源系统通过工程或非工程措施,应对和适应外界胁迫和扰动的能力^[15]。

表 1 长沙市水资源脆弱性评价指标体系

Table 1 Assessment indicator system of water resource vulnerability in Changsha City

目标层	准则层	指标层	指标含义	指标属性
长沙市水资源系统脆弱性 V	暴露度 V_1	V_{11} 城镇化率/%	社会发展干扰	+
		V_{12} GDP 增长率/%	经济发展干扰	+
		V_{13} 万元工业增加值用水量/ $(\text{m}^3/\text{万元})$	工业干扰	+
		V_{14} 农业灌溉平均用水量	农业干扰	+
		V_{15} 生态环境用水量/ 10^4 m^3	生态环境干扰	-
		V_{16} 人均日生活用水量/ $(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	社会生活干扰	+
		V_{17} 工业废水排放总量/ 10^4 t	水污染压力	+
		V_{18} 水资源开发利用率/%	人类开发利用水资源的程度	+
	敏感性 V_2	V_{21} 人均水资源量/ $(\text{m}^3/\text{人})$	水资源量对外界干扰的敏感性	-
		V_{22} 年降水量/mm	降水量对外界干扰的敏感性,反映水资源丰枯变化	-
		V_{23} 地表水质评价状况/%	水质对外界干扰的敏感性	-
		V_{24} 地下供水量/ 10^4 m^3	地下供水量对外界干扰的敏感性	-
	适应性 V_3	V_{31} 森林覆盖率/%	地表植被对降水和蓄积的调节能力	-
		V_{32} 上型水库蓄水量/ 10^4 m^3	区域水利工程防洪、蓄水灌溉、供水能力	-
		V_{33} 污水集中处理率/%	污水处理能力	-
		V_{34} 农田灌溉水有效利用系数	农业节水能力	-

注:“+”表示该指标为正向指标,与水资源脆弱性呈正相关,负向指标则相反。

2.2 评价指标权重的确定

2.2.1 层次分析法确定主观权重 通过两两判断比较准则层,计算出各准则层的权重;同样,在准则层下,对指标层的各个评价指标也进行判断比较,从而计算出 16 个评价指标的权重。具体步骤为:

(1) 采用 9 分法进行重要性比较,然后根据所有比较结果构建判断矩阵 A :

$$A = (a_{ij})_{n \times m} \quad (1)$$

式中: a_{ij} ($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$) 为指标 i 对指标 j 的相对重要程度数值; n, m 为指标数。

(2) 利用方根法计算权重向量:

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

将向量标准化即得到判断矩阵的权重向量 W_i :

$$W_i = \bar{W}_i / \sum_{i=1}^n \bar{W}_i \quad (3)$$

(3) 计算判断矩阵的最大特征根:

$$AW = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (5)$$

式中: W 为权重向量(特征向量); λ_{\max} 为最大特征根; n 为变量个数。

(4) 对判断矩阵进行一致性检验: 当 $CR < 0.1$ 时可接受一致性, 当 $CR \geq 0.1$ 时不能满足一致性检验。

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (6)$$

$$CR = CI / RI \quad (7)$$

式中: CR 为检验系数; CI 为一致性检验指标; RI 为平均随机一致性指标。

2.2.2 熵值法确定客观权重 依据熵的定义, 熵值可以衡量指标的离散程度, 使用熵值法可以客观地评估各指标的重要性。指标的熵值越小, 表示其变化范围越大, 该指标对评价结果的影响也越大。具体步骤为:

(1) 利用原始数据构建数据矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: X_{ij} ($i = 1, 2 \cdots n; j = 1, 2 \cdots m$) 表示第 i 个准则层下第 j 项评价指标原始值; n 为准则层数; m 为指标数。

(2) 采用极差标准化法, 分别利用公式(9)和(10)对正向指标和负向指标进行标准化处理, 以实现指标数据的有效性。

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_j\}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (9)$$

$$X'_{ij} = \frac{\max\{X_j\} - X_{ij}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (10)$$

式中: X'_{ij} 为标准化后的评价指标值; $\min\{X_j\}, \max\{X_j\}$ 分别表示各准则层下第 j 项指标的极小值和极大值。

(3) 计算第 j 项指标的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n [p_{ij} \ln(p_{ij})] \quad (11)$$

式中: p_{ij} 为第 i 个准则层下第 j 项指标的比重; $k = 1 / \ln n$ 。

(4) 计算信息熵的冗余度(差异):

$$d_j = 1 - e_j \quad (12)$$

(5) 计算各项指标的客观权重:

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (13)$$

2.2.3 博弈论组合赋权法 为了获得更客观合理的权重, 本研究利用 Matlab 求解多种赋权法对应的最优线性组合系数, 使组合权重向量和各基础权重向量之间的离差值达到最小, 得到最优组合权重向量。具体步骤为:

(1) 构建基本权重向量集 $W_k = \{W_1^k, W_2^k \cdots W_m^k\}$ ($k = 1, 2 \cdots n$), 其中 m 为评价指标数量, n 为赋权方

法个数, 本文选用了层次分析法和熵权法, 因此 $n = 2$ 。设线性组合系数为 $a_k = \{a_1, a_2 \cdots a_n\}$, 则向量线性组合权重为:

$$W = \sum_{k=1}^n a_k \cdot W_k^T \quad (14)$$

(2) 优化组合系数 a_k , 寻找最满意组合权重向量, 根据目标函数:

$$\min \left\| \sum_{k=1}^n a_k W_k^T - W_k \right\| \quad (15)$$

可转化为:

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T & \cdots & \omega_1 \omega_n^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T & \cdots & \omega_2 \omega_n^T \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_n \omega_1^T & \omega_n \omega_2^T & \cdots & \omega_n \omega_n^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \\ \vdots \\ \omega_n \omega_n^T \end{pmatrix} \quad (16)$$

(3) 计算求解得到组合系数集 $\{a_1, a_2 \cdots a_n\}$ 并进行归一化处理:

$$a_k^* = \frac{a_k}{\sum_{k=1}^n a_k} \quad (17)$$

(4) 最终得到博弈论综合权重向量为:

$$W_k^* = \sum_{k=1}^n a_k^* \omega_k^T \quad (18)$$

2.3 云物元模型

2.3.1 云物元模型概述 云物元模型指云模型改进的可拓物元评价模型。物元模型以可拓方法为研究手段有效处理水资源脆弱性评价这一类矛盾性问题, 但该模型在描述事物特征量值 V 时将其看作固定值处理, 忽略了评价对象本身的随机模糊性, 而云模型在实现定性定量信息的转化过程中, 通过云模型的模糊性映射指标数值的不确定性, 可以弥补物元分析法的不足。因此, 云物元模型将云计算中的模糊数学方法和可拓性理论相结合, 把不确定性信息转化为可比性信息, 有效解决定量和定性概念之间的转化问题, 充分考虑水资源脆弱性等等级界限值的模糊性和随机性, 减少传统评价过程中模糊和不确定因素对结果的影响, 进而使评价过程更合理、评价结果更精准。云物元模型表示为:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & (E_{x_1}, E_{n_1}, He_1) \\ & C_2 & (E_{x_2}, E_{n_2}, He_2) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (E_{x_n}, E_{n_n}, He_n) \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: R 表示物元; N 为水资源脆弱性水平; n 为单指标评价等级个数; C_i 为水资源脆弱性水平的评价指标; V_i 为评价指标 C_i 的指标值; Ex 表示期望; En 代表熵, 其值越大代表不确定性程度越高; He 为超熵, 其数值越大表示样本的分布越分散。

在云物元模型中, 用固定区间 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 来表示不同脆弱性等级, 通过云模型将该区间值转换为云参数^[16], 代替物元模型中的评价指标值, 具体计算公式为:

$$Ex = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \quad (20)$$

$$En = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2.5348} \quad (21)$$

$$He = s \quad (22)$$

式中: C_{\min}, C_{\max} 为某一评价指标的最小值和最大值; s 为常数, 本研究中使用算法确定其值。

根据公式(23)–(24)计算各脆弱性等级的隶属度 $\mu(x)$:

$$En' = r \times He + En \quad (23)$$

$$\mu(x) = \exp\left[\frac{-(x - Ex)^2}{2(En')^2}\right] \quad (24)$$

式中: En', r 为随机数; x 为评价指标值。

2.3.2 脆弱性评价指标标准 参照已有研究^[17-18]将长沙市水资源脆弱性划分为 I (不脆弱), II (轻微脆弱), III (中等脆弱), IV (强烈脆弱) 和 V (极端脆弱) 5 个等级。在已有研究的基础上, 结合相关国际标准、长沙市“十四五”水利发展规划等相关发展规划及长沙市发展现状, 确定各评价指标对于 5 个脆弱性等级的极值。其中, 水资源开发利用率 (V_{18}) 以国际公认的 40% 水资源开发生态警戒线为界, 以 10% 为等间距向左缩小; 人均水资源量 (V_{21}) 采用国际公认缺水标准进行划分; 年降水量 (V_{22}) 分级借鉴邹君^[19]的研究成果; 森林覆盖率 (V_{31}) 的指标标准范围是以世界平均森林覆盖率 30% 为基准值, 向左和向右分别增减 15% 得到。其他指标的临界值通过等间距法^[20]求解得到。各指标在不同脆弱性等级的参考范围详见表 2。

表 2 长沙市水资源脆弱性评价标准

Table 2 Water resources vulnerability assessment criteria in Changsha City

评价指标	I (不脆弱)	II (轻微脆弱)	III (中等脆弱)	IV (强烈脆弱)	V (极端脆弱)
V_{11}	(0, 20]	(20, 40]	(40, 60]	(60, 80]	(80, 100]
V_{12}	(0, 4]	(4, 6]	(6, 8]	(8, 10]	(10, 20]
V_{13}	(0, 20]	[20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 75]
V_{14}	(200, 520]	(520, 540]	(540, 560]	(560, 580]	(580, 600]
V_{15}	(10 000, 20 000]	(8 000, 10 000]	(6 000, 8 000]	(4 000, 6 000]	[4 000, 0)
V_{16}	(0, 100]	(100, 120]	(120, 140]	(140, 160]	(160, 320]
V_{17}	(0, 2 000]	(2 000, 4 000]	(4 000, 6 000]	(6 000, 8 000]	(8 000, 16 000]
V_{18}	(0, 10]	(10, 20]	(20, 30]	(30, 40]	(40, 100]
V_{21}	(3 000, 6 000]	[2 000, 3 000]	[1 000, 2 000]	[500, 1 000]	(0, 500)
V_{22}	(1 550, 3 100]	[1 450, 1 550]	[1 350, 1 450]	[1 250, 1 350]	(0, 1 250]
V_{23}	(98, 100]	(96, 98]	(94, 96]	(92, 94]	(80, 92]
V_{24}	(8 000, 16 000]	(6 000, 8 000]	(4 000, 6 000]	(2 000, 4 000]	(0, 2 000]
V_{31}	(60, 100]	(45, 60]	(30, 45]	(15, 30]	(0, 15]
V_{32}	(60 000, 120 000]	(50 000, 60 000]	(40 000, 50 000]	(30 000, 40 000]	(0, 30 000]
V_{33}	(99, 100]	(97, 99]	(95, 97]	(93, 95]	(80, 93]
V_{34}	(0.6, 1]	(0.55, 0.6]	(0.55, 0.5]	(0.45, 0.5]	(0, 0.45]

2.3.3 长沙市水资源脆弱性云物元评价模型的建立

(1) 计算 Ex 和 En 参数值。根据表 2 的评价标准, 使用公式(20)–(21)分别计算出不同脆弱性等级下每个评价指标的 Ex 和 En 参数值, 计算结果详见表 3。

(2) 计算 He 参数值。利用 MATLAB 软件绘制出不同 He 值下所有评价指标的水资源脆弱性等级隶属云云图。隶属度指在模糊逻辑中用于表示某一事物或概念对某一范畴或集合的属于程度。本研究中, 隶属度用于表示某一评价指标对某一脆弱性等级

的贡献程度。以城市水资源脆弱性评价体系中的“工业废水排放总量”指标为例, 比较不同 He 值下的云图, 当 $He=50$ 时, 隶属度大于 0.5 的部分是相对清晰的, 隶属度小于 0.5 的部分是模糊和交叉的, 有利于在云模型中获得较为准确的隶属度^[21]。因此, 选择 $He=50$ 作为水资源脆弱性评价中“工业废水排放总量”这一指标的评价参数。依照同样的处理方法, 可以得到城市水资源脆弱性评价指标体系中不同等级下其他指标的云物元模型参数(表 3)。

表 3 长沙市水资源脆弱性评价标准云物元参数

Table 3 Cloud matter element parameters of water resources vulnerability assessment standard in Changsha City

指标	I (不脆弱)	II (轻微脆弱)	III (中等脆弱)	IV (强烈脆弱)	V (极端脆弱)
V_{11}	(10,8.493,0.2)	(30,8.493,0.2)	(50,8.493,0.2)	(70,8.493,0.2)	(90,8.493,0.2)
V_{12}	(2,1.699,0.06)	(5,0.849,0.06)	(7,0.849,0.06)	(9,0.849,0.06)	(15,4.247,0.06)
V_{13}	(10,8.493,0.2)	(22.5,2.123,0.2)	(27.5,2.123,0.2)	(32.5,2.123,0.2)	(55,16.987,0.2)
V_{14}	(360,135.892,1.5)	(530,8.493,1.5)	(550,8.493,1.5)	(570,8.493,1.5)	(590,8.493,1.5)
V_{15}	(15 000,4 246.645,80)	(9 000,849.329,80)	(7 000,849.329,80)	(5 000,849.329,80)	(2 000,1 698.658,80)
V_{16}	(50,21.233,1)	(110,4.247,1)	(130,4.247,1)	(150,4.247,1)	(240,67.946,1)
V_{17}	(1 000,849.329,50)	(3 000,849.329,50)	(5 000,849.329,50)	(7 000,849.329,50)	(12 000,3 397.316,50)
V_{18}	(5,4.247,0.2)	(15,4.247,0.2)	(25,4.247,0.2)	(35,4.247,0.2)	(70,12.74,0.2)
V_{21}	(4 500,1 273.994,15)	(2 500,424.665,15)	(1 500,424.665,15)	(750,212.332,15)	(250,212.332,15)
V_{22}	(2 325,658.23,10)	(1 500,42.466,10)	(1 400,42.466,10)	(1 300,42.466,10)	(625,530.83,10)
V_{23}	(99,0.849,0.05)	(97,0.849,0.05)	(95,0.849,0.05)	(93,0.849,0.05)	(86,5.096,0.05)
V_{24}	(12 000,3 397.316,50)	(7 000,849.329,50)	(5 000,849.329,50)	(3 000,849.329,50)	(1 000,849.329,50)
V_{31}	(80,16.987,0.3)	(52.5,6.37,0.3)	(37.5,6.37,0.3)	(22.5,6.37,0.3)	(7.5,6.37,0.3)
V_{32}	(90 000,25 479.871,300)	(55 000,4 246.645,300)	(45 000,4 246.645,300)	(35 000,4 246.645,300)	(15 000,12 739.935,300)
V_{33}	(99.5,0.425,0.08)	(98,0.849,0.08)	(96,0.849,0.08)	(94,0.849,0.08)	(86.5,5.521,0.08)
V_{34}	(0.8,0.17,0.003)	(0.575,0.021,0.003)	(0.525,0.021,0.003)	(0.475,0.021,0.003)	(0.225,0.19,0.003)

(3) 求解评价指标对应各个脆弱性等级的隶属度。根据表 3,公式(23)–(24)计算,为避免计算结果的偶然性,重复计算 1 000 次后取这 1 000 次计算结果的中位数作为最终的隶属度值。

(4) 求解准则层和目标层对应各个脆弱性等级的隶属度。

$$\mu_j(B_i) = \sum_{s=1}^n W_{is} \mu_j(I_{is}) \quad (25)$$

式中: $\mu_j(B_i)$ 表示第 i 个准则层对等级 j 的隶属度; W_{is} 表示第 s 个指标对第 i 个准则层的综合权重; $\mu_j(I_{is})$ 表示第 s 个指标层对等级 j 的隶属度。目标层同理。

(5) 根据最大隶属度原则,计算不同物元的脆弱性等级 L :

$$L = \max \mu_j(B) \quad (26)$$

$$j \in \{I, II, III, IV, V\}$$

2.4 障碍度模型

为进一步探究主要影响区域水资源脆弱性的因素、提供水资源管理调控的有效策略,在评价水资源脆弱性的基础上,本研究通过障碍度模型计算评价指标和准则层的障碍度,确定其对目标的影响程度。指标障碍度越高,则该指标对水资源脆弱性的贡献度越高,越不利于该区域水资源系统脆弱性的降低。计算公式为:

$$F_j = W_j \cdot P_{ij} \quad (27)$$

$$I_j = 1 - R'_j \quad (28)$$

$$O_j = \frac{F_j \times I_j}{\sum_{j=1}^m (F_j \times I_j)} \times 100\% \quad (29)$$

$$U_j = \sum_{j=1}^m O_j \quad (30)$$

式中: F_j 为贡献度; W_j 为准则层权重; P_{ij} 为指标层权重; I_j 为指标偏离度; R'_j 为指标标准化值; O_j 为指标层障碍度; U_j 为准则层障碍度。

3 结果与讨论

3.1 数据来源

本研究使用的数据来源于 2014—2020 年的《长沙市统计年鉴》《长沙市国民经济和社会发展统计公报》《长沙市水资源公报》以及长沙市人民政府工作报告,缺失的数据通过政府网站进行公开申请获得。原始数据详见表 4。

3.2 水资源脆弱性综合评价

3.2.1 权重计算结果 运用 AHP 法和熵权法分别确定脆弱性评价指标的主观权重和客观权重,然后利用博弈论思想确定综合权重。表 5 为长沙市水资源脆弱性评价指标权重确定结果。

3.2.2 综合评价结果及分析 使用软件 MATLAB 编写云物元综合隶属度计算代码,通过计算得到长沙市水资源在不同脆弱性等级下的隶属度;结合前文综合权重计算结果求出各准则层以及目标层对应不同评价等级的隶属度,最终根据最大隶属度原则来确定长沙市各年份水资源脆弱性评价等级,具体评价结果详见表 6。

表 4 长沙市评价指标统计数据(2014—2020 年)

Table 4 Statistical data of evaluation indicators in Changsha City (2014—2020)

指标	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
V ₁₁	72.45	75.44	77.56	79.86	81.93	82.46	82.6
V ₁₂	10.3	9.9	9.4	9.0	8.5	8.1	4.0
V ₁₃	37.00	34.00	33.00	31.00	35.70	39.79	21.90
V ₁₄	587.00	582.00	567.00	568.00	578.00	566.88	547.05
V ₁₅	6 712	6 237	6 237	5 754	7 859	10 758	13 632
V ₁₆	124.00	126.50	123.50	124.50	122.50	123.84	142.26
V ₁₇	4 397	5 102	4 287	4 066	3 475	6 053	4 537
V ₁₈	39.9	38.8	38.1	30.0	38.1	37.3	32.8
V ₂₁	1 500.40	1 486.80	1 822.00	1 544.70	606.20	1 205.00	1 224.55
V ₂₂	1 659.8	1 622.1	1 860.3	1 717.9	1 296.5	1 440.3	1 889.7
V ₂₃	95.3	93.8	90.9	90.2	100	100	100
V ₂₄	9 810	9 104	8 397	7 816	7 174	5 995	655
V ₃₁	54.71	54.90	54.80	54.82	54.95	54.90	55.00
V ₃₂	56 187	60 436	57 857	53 402	47 432	36 423	56 297
V ₃₃	96.32	96.91	96.93	98.30	98.33	98.40	98.40
V ₃₄	0.431 6	0.471 0	0.500 0	0.530 9	0.539 2	0.545 1	0.549 0

表 5 长沙市水资源脆弱性评价指标权重确定结果

Table 5 Weight calculation results of assessment indicators of water resources vulnerability in Changsha City

指标	主观权重	客观权重	权重系数		综合权重	准则层	
			AHP 法	熵权法		名称	权重
V ₁₁	0.028 7	0.038 2			0.032 4		
V ₁₂	0.037 6	0.027 7			0.033 7		
V ₁₃	0.063 9	0.029 7			0.050 5		
V ₁₄	0.028 8	0.032 7			0.030 3	V ₁	0.401 7
V ₁₅	0.027 0	0.033 1			0.029 4		
V ₁₆	0.031 7	0.133 1			0.071 3		
V ₁₇	0.104 2	0.046 6			0.081 7		
V ₁₈	0.096 3	0.035 2	0.609 8	0.390 2	0.072 5		
V ₂₁	0.100 9	0.049 9			0.081 0		
V ₂₂	0.023 2	0.062 9			0.038 7	V ₂	0.267 0
V ₂₃	0.103 2	0.098 6			0.101 4		
V ₂₄	0.026 3	0.076 5			0.045 9		
V ₃₁	0.068 2	0.048 6			0.060 5		
V ₃₂	0.028 6	0.073 7			0.046 2	V ₃	0.331 3
V ₃₃	0.160 4	0.120 5			0.144 8		
V ₃₄	0.071 2	0.093 2			0.079 8		

表 6 长沙市水资源脆弱性综合评价结果(2014—2020 年)

Table 6 Comprehensive assessment results of water resources vulnerability in Changsha City (2014—2020)

年份	综合隶属度					评价结果
	I (不脆弱)	II (轻微脆弱)	III (中等脆弱)	IV (强烈脆弱)	V (极端脆弱)	
2014	0.038 01	0.054 23	0.140 28	0.042 31	0.074 57	III
2015	0.039 30	0.050 27	0.121 39	0.108 28	0.069 78	III
2016	0.042 38	0.074 04	0.099 10	0.093 14	0.065 24	III
2017	0.040 51	0.105 39	0.106 95	0.071 36	0.062 25	III
2018	0.048 03	0.117 53	0.062 07	0.080 82	0.064 67	II
2019	0.050 90	0.083 20	0.082 94	0.083 17	0.065 30	II
2020	0.076 75	0.122 86	0.079 33	0.038 06	0.055 02	II

(1) 综合评价分析。根据表 6 对长沙市水资源脆弱性综合评价结果展开分析。近年来长沙市的水资源系统整体形势见好,水资源脆弱性等级从中等脆弱降低至轻微脆弱水平,可分为两个发展阶段。第一阶段为 2014—2017 年,该阶段水资源脆弱性等级为中度脆弱,2014—2015 年期间,水资源系统有向强烈脆弱变化的趋势,2015—2017 年,水资源系统对于轻微脆弱等级的隶属度值逐年增大,说明长沙市水资源脆弱性状况转而向轻微脆弱等级发展,但依然具备一定的改善空间;第二阶段为 2018—2020 年,此阶段水资源脆弱性等级降低至轻微脆弱,2018—2019 年期

间脆弱性改善趋势不明显,但该发展期间长沙市水资源系统对于不脆弱等级的隶属度值不断上升,这说明水资源脆弱性水平呈现向不脆弱等级发展的态势。这些现象表明近 7 a 来长沙市水资源脆弱性逐年好转,水资源管理成效日益凸显,但仍存在不稳定的现象,需进一步采取措施对水资源系统进行监控与管理,防止其逆向发展。

(2) 各维度评价分析。为探究上述变化产生的具体原因,从暴露度、敏感度和适应度 3 个维度出发,分别建立各维度及指标的脆弱性变化趋势图,如图 1—2 所示。

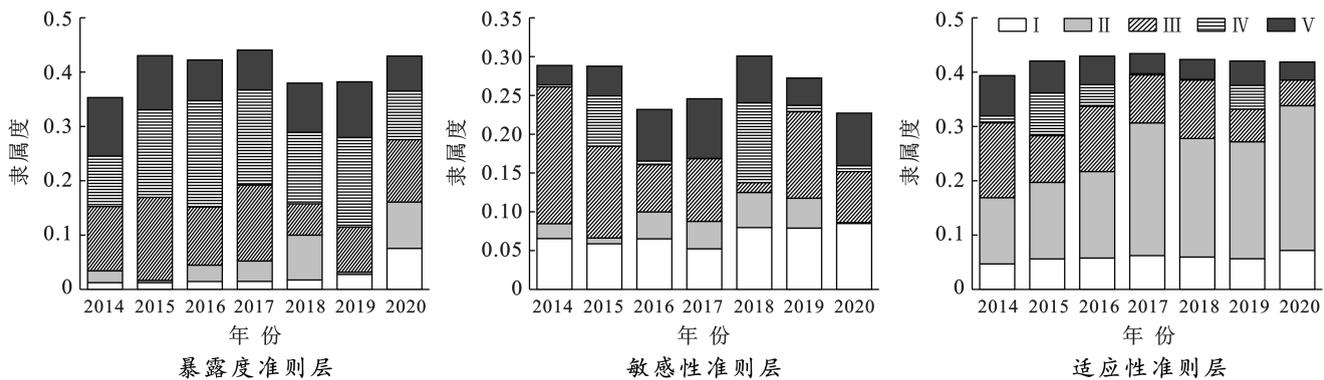


图 1 各维度脆弱性变化趋势

Fig.1 Changing trend of vulnerability in each dimension

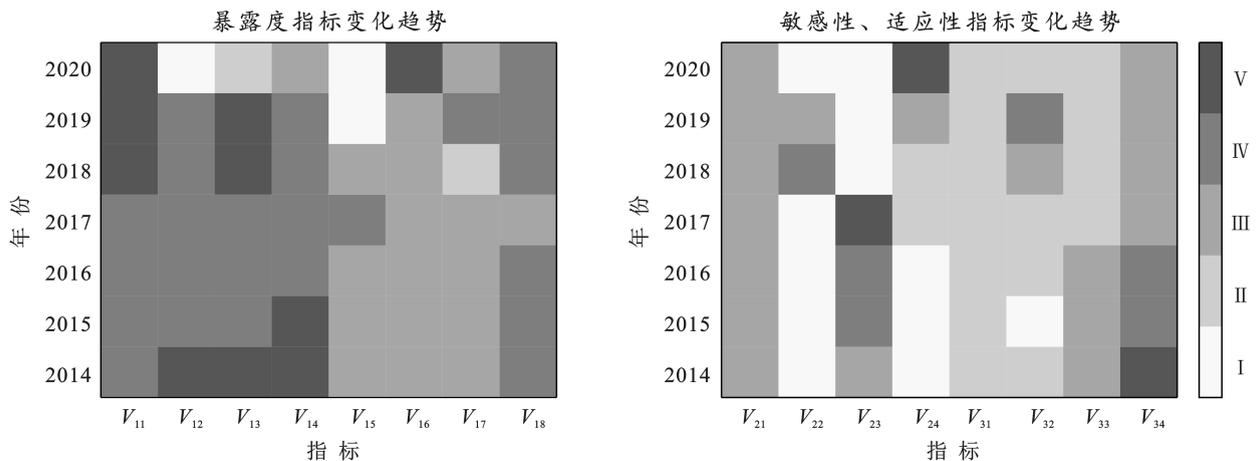


图 2 各维度指标脆弱性变化趋势

Fig.2 Changing trend of vulnerability of each dimension index

图 1 表明,暴露度准则层脆弱性除 2014 年和 2020 年为中等脆弱外,其他年份持续表现为强烈脆弱,对应强烈脆弱等级的平均隶属度为 0.165 8,说明外部环境对水资源系统造成的压力过大,水资源系统呈现出不安全状态。根据原始数据及图 2,研究阶段期间,该市致力于城乡规划事业发展,城镇化进程持续加快,城镇化率由最初的 72.45% 增长到 82.6%,人

们对水资源需求量不断增加,导致水资源需求系统负载过大,达到了极端脆弱等级。“十三五”期间,长沙市大力发展社会经济,工业化进程持续推进,导致 GDP 增长率、万元工业增加值用水量、工业废水排放总量等指标值偏高、脆弱等级较高,其中,万元工业增加值用水量呈下降趋势,说明随着节水工作的推进,长沙市的工业用水水平和工业结构调整已经有了较

大的提高,但与国内先进水平省份、发达国家平均水平相比还存在一定的差距。人均日生活用水量除 2020 年受新冠疫情影响上升至 142.26 L/d 外,其他年份基本稳定在 123.64 L/d 的平均水平,远低于国家控水标准,说明长沙市居民节水意识较强,但节水措施仍有进一步普及的空间。为缓解水资源短缺,长沙市水资源开发利用除 2017 年为 30%,2020 年为 32.8% 外,其他年份都逼近于国际公认的 40% 的生态标准,脆弱性水平处于强烈脆弱等级,说明长沙市水资源开发利用程度较高、水资源开发利用模式有待改善。生态环境用水量的脆弱性等级改善最为明显,2019 年起降为不脆弱,生态环境用水量从 2014 年的 $6.71 \times 10^7 \text{ m}^3$ 增长到 2020 年的 $1.36 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要原因是“十三五”期间该市全面展开生态文明建设,建设期间实施了城市绿色空间拓展,生态绿心保护,环城绿带生态圈建设等工程,2020 年末,全市生态绿地增加到 4 263.5 hm^2 ,说明长沙市愈来愈重视生态修复工作。由图 1 可知,敏感性准则层脆弱性等级呈现不稳定的波动趋势,局部年份变动较大,这说明水资源系统在外界干扰下表现出不稳定的状态,主要受气候变化、水资源量等不稳定因素的影响。受季风气候影响,长沙市人均水资源量属于中度缺水水平。根据原始数据及图 2 可知,2014—2020 年长沙市人均水资源量均处于中等脆弱等级,2018 年缺水最为严重,人均水资源量仅为 606.2 $\text{m}^3/\text{人}$ 。2018—2020 年,浏阳河三角洲断面水质提升并稳定至 III 类,洩水胜利断面由 2017 年的 V 类水质逐年提升至 2020 年的 II 类水质,龙王港入湘江口水质由黑臭改善至 II 类,地表水质评价状况达到了 100%,稳定于不脆弱等级,原因是 2018 年长沙市出台了“强力推进环境大治理坚决打赢蓝天保卫战”三年行动计划,此阶段连续开展了湘江保护和“一江一湖六河”综合治理工作,水环境质量显著提升。研究期间该市地下供水量逐年减少,从 2014 年的 $9.81 \times 10^7 \text{ m}^3$ 降低至 2020 年的 $6.55 \times 10^6 \text{ m}^3$,脆弱性等级不断升高,主要原因是长沙市地下水资源储量虽大,但从水源水量、水质两方面考虑,可利用量小,不利开采。

由图 1 可知,适应性准则层脆弱性呈稳定下降态势,从 2015 年降低至轻微脆弱并保持在该水平,对应轻微脆弱等级的平均隶属度为 0.1975,说明长沙市针对外界干扰的适应能力良好,但仍有提升空间。根据原始数据及图 2 可知,长沙市森林覆盖率脆弱性稳定在轻微脆弱水平,“十三五”期间,森林覆盖率不断提升,2020 年提升至 55%,说明这期间开展的创建生态园林城市,开展公园绿化提质改造等手段取得有效成

果。同时,该市扎实推进了水体污染整治工程,实施工业污染源全面达标排放计划,实现城区污水全截污、全收集、全处理,到 2020 年,该市污水集中处理率达到了 98.4%,脆弱性等级降低至轻微脆弱。在此期间,长沙市还全面推进节水型社会建设,加强建设节水灌溉项目,2020 年的农田灌溉水有效利用系数达到 0.549,脆弱性等级降低至中等脆弱水平,但距离发达国家的 0.7~0.8 仍有较大差距。上型水库蓄水量脆弱性变化较大表明要进一步增强水利工程调蓄能力的稳定性。评价结果显示,暴露度和适应性维度相较于敏感性维度脆弱性等级稳定性更高,且具有正向变化的态势,因此具有更大的改善空间。

3.3 障碍度及障碍因子分析

根据公式(26)~(29)对长沙市水资源脆弱性两个发展阶段的准则层各维度及指标层各指标的障碍度进行计算和分析(本文仅展示排序位于前 5 位的障碍因子)。

(1) 各维度障碍因子诊断分析。由图 3 可知,2014—2017 年各维度障碍度变化情况各不相同。其中,暴露度障碍度呈逐年递增态势,由 2014 年的 32.77% 上升至 2017 年的 57.31%。敏感性障碍度呈现出波动起伏变化态势,整体上由 15.11% 上升 28.49%。适应性障碍度呈稳步下降趋势,由 52.11% 递减至 14.21%,表明 2014—2017 年,暴露度维度障碍度最大,平均值达到了 42.65%,其次是适应性和敏感性;2018—2020 年,长沙市水资源脆弱性下降至轻微脆弱。由图 3 可知,截至 2020 年,暴露度维度障碍度波动上升至 69.60%,敏感性障碍度递减至 27.81%,适应性障碍度波动下降至 2.58%,其中暴露度障碍度均值仍然最大,达到了 56.02%。研究表明暴露度维度依旧是改善长沙市水资源脆弱性的主要障碍因子,主要原因是长沙市水资源禀赋条件较差,而社会经济高速发展,工业化进程加快,城镇化水平不断提高,外来人口持续增多导致了外界环境对水资源系统的多方面压力始终处于较高水平,水资源供给与社会经济发展不平衡,阻碍了水资源脆弱性的降低;而适应性不再是降低水资源脆弱性的主要障碍因子,主要归因于“十三五”期间该市依托《长沙市“十三五”生态建设与环境保护规划》,致力于水体污染治理、重点流域治理和公共节水管理且各项措施成效显著,适应能力的提升已经接近饱和状态。未来应协调好社会经济发展与水资源开发利用之间的关系,减少人类活动对水资源系统的干扰和压力,同时保障水资源系统各项适应能力稳中有进,从而进一步降低水资源脆弱性。

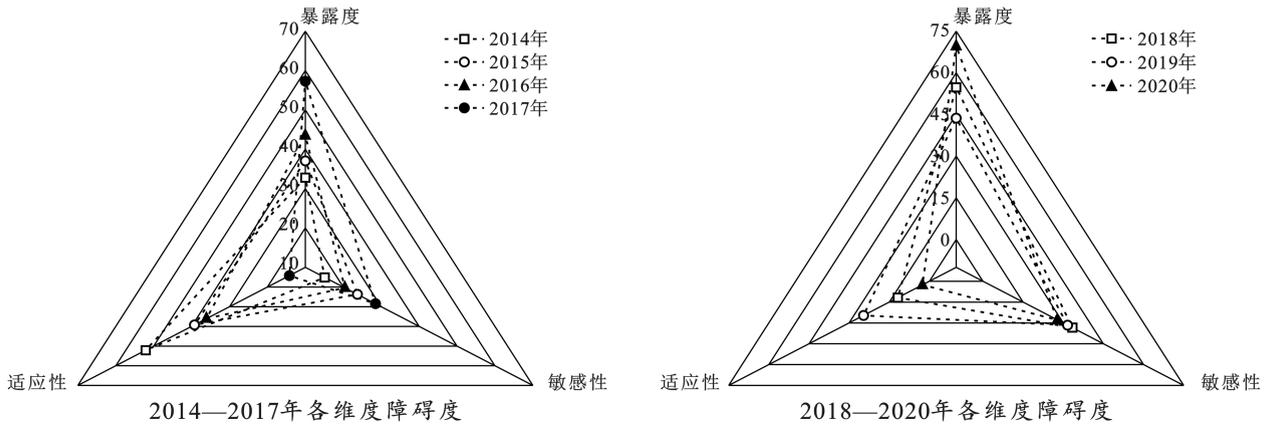


图 3 长沙市水资源脆弱性准则层各维度障碍度

Fig.3 Obstacle degree of each dimension of water resources vulnerability criterion layer in Changsha City

(2) 指标层障碍因子诊断分析。综合各障碍因子出现频率及障碍度排序,并根据表 7 可知,2014—2017 年,前 5 位的障碍因子主要分布在暴露度和适应性两个维度,这与该阶段准则层的障碍因子分析结果基本保持一致,依次是人均日生活用水量(V_{16})、污水集中处理率(V_{33})、地表水质评价状况(V_{23})、森林覆盖率(V_{31})、农田灌溉水有效利用系数(V_{34}),说明提升节水效率、水污染治理、生态环境保护是此阶段的重点整治方向;2018—2020 年,除人均日生活用水量外,上阶段的其他 4 个主要障碍因子已不在前 5 位之列,表明上一阶段水污染治理、节水技术推广、植树造林等措施成效显著。人均水资源量(V_{21})、人均日生活用水量(V_{16})、工业废水排放总量(V_{17})、上型水

库蓄水量(V_{32})、年降水量(V_{22})成为此阶段影响长沙市水资源脆弱性降低的主要障碍因子。其中,人均日生活用水量依旧位列前五,主要原因是近年来长沙市人口大幅增加、城市网红效应凸显,再加上长沙市中度缺水的自然属性,这也解释了人均水资源量障碍度排序靠前的原因;近年来降水总量偏少且年内分布不均,使得年降水量对改善水资源脆弱性的阻碍作用加强;另外,受降雨特征的影响以及大中型水库建设饱和的限制,上型水库蓄水量的障碍度也有所上升。因此,未来推进节水型城市建设尤为重要,控制污水排放总量、提升水利工程调蓄能力、促进再生水和雨水资源化利用也是降低长沙市水资源脆弱性的重点调控方向。

表 7 长沙市 2014—2020 年水资源脆弱性指标层主要障碍因子障碍度

Table 7 Main obstacle factors of water resources vulnerability index layer in Changsha from 2014 to 2020

障碍 排序	2014 年		2015 年		2016 年		2017 年		2018 年		2019 年		2020 年	
	障碍 因子	障碍 度/%												
1	V_{33}	25.73	V_{33}	22.91	V_{33}	20.26	V_{22}	20.48	V_{17}	20.54	V_{16}	23.48	V_{18}	16.87
2	V_{34}	14.18	V_{23}	14.17	V_{23}	18.64	V_{18}	14.64	V_{21}	20.37	V_{32}	16.33	V_{13}	16.38
3	V_{16}	11.71	V_{16}	12.55	V_{16}	13.40	V_{16}	12.94	V_{16}	17.92	V_{21}	14.53	V_{17}	15.59
4	V_{31}	10.75	V_{34}	11.71	V_{17}	11.07	V_{17}	12.71	V_{22}	9.73	V_{22}	10.36	V_{24}	14.90
5	V_{23}	8.64	V_{17}	6.65	V_{31}	8.26	V_{31}	7.58	V_{32}	6.29	V_{31}	7.37	V_{21}	12.92

3.4 讨论

通过运用 VSD 概念模型从暴露度、敏感性、适应性 3 个维度选取了 16 个与水质、水量、水生态有关的评价指标建立长沙市水资源脆弱性评价指标体系,充分体现“脆弱性”概念内涵及指标间的相关关系。利用云物元模型实证评估长沙市水资源脆弱性等级,既解决了水资源脆弱性各评价指标与指标等级隶属过程中的不相容问题,又有效处理了指标数据的模糊性和随机性。结合障碍度模型对制约当地水资源脆弱

性改善的障碍因子进行了诊断分析,为长沙市水资源管理调控策略制定提供了参考依据。

由水资源脆弱性总体变化趋势及综合评价结果与分析结果可知,长沙市水资源脆弱性呈现逐年下降的态势。罗紫薇等^[22]研究结果显示 2020 年长沙市水资源为较安全水平,与本研究所得的评价结果为轻微脆弱类比一致,同时该正向变化也与长沙市水生态文明城市试点建设^[23]，“十三五”生态建设和环境保护成果相符合。从准则层角度出发,长沙市暴露度层面的

脆弱程度和障碍度均较高,主要原因是水资源压力大、水资源供给能力与区域经济发展水平协同度较低,而长沙市适应水平高,响应措施得力,未来需要以减轻污水排放等人类活动对水资源可持续利用造成的压力为重点调控方向,这与前人的研究结论具有较好的重合度^[24-25]。

综上所述,长沙市水资源脆弱性评价结果与研究期内长沙市的水资源实际状况及发展趋势基本吻合,说明本研究评价结果可靠,所选方法合理,模型适用,可为其他同类型区域的水资源脆弱性评估提供方法借鉴。

4 结论

(1) 2014—2020 年长沙市水资源脆弱性呈梯级递减趋势,由 2014—2017 年的中等脆弱下降到 2018—2020 年的轻微脆弱水平,区域水资源形势有所改善,但还存在一定的提升空间。

(2) 长沙市水资源系统暴露于外界干扰环境的程度较大,敏感性变化不稳定,适应能力提升最快。研究末期,暴露度准则层脆弱性等级最高,为中等脆弱水平,适应性和敏感性准则层脆弱性等级次之,分别为轻微脆弱和不脆弱等级。从稳定性来看,暴露度、适应性准则层相较于敏感性维度脆弱性等级稳定性更高,且具有正向变化的态势。

(3) 2014—2017 年中等脆弱等级阶段,准则层各维度障碍度均值排序为暴露度、适应性、敏感性;2018—2020 年轻微脆弱等级阶段,各维度障碍度均值排序是暴露度、敏感性、适应性。暴露度维度是制约长沙市水资源脆弱性的最大障碍因子,而适应性对于长沙市脆弱性的影响有所下降。

(4) 人均水资源量、人均日生活用水量、工业废水排放总量、上型水库蓄水量、年降水量是现阶段影响长沙市水资源脆弱性的主要障碍因子,其中人均日生活用水量是持续性障碍因子,今后应加强水资源规划和节水监督管理,加大水污染治理和水库扩建投资力度,促进再生水和雨水资源化利用,并对其他指标做好监测及改善工作。

[参 考 文 献]

[1] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity [J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1500323.

[2] Varis O, Keskinen M, Kummu M. Four dimensions of water security with a case of the indirect role of water in global food security [J]. *Water Security*, 2017, 1: 36-45.

[3] 夏军,陈俊旭,翁建武,等.气候变化背景下水资源脆弱性

研究与展望[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(6): 391-396.

[4] Hamouda M A, Nour El-Din M M, Moursy F I. Vulnerability assessment of water resources systems in the Eastern Nile Basin [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23: 2697-2725.

[5] 杨大方,周旭,张继,等.贵州省水资源脆弱性时空变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5): 70-79.

[6] 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.

[7] Xiang Xiaojun, Li Qiong. Water resources vulnerability assessment and adaptive management based on projection pursuit model [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 103(S1): 431-435.

[8] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: the vulnerability scoping diagram [J]. *Global Environmental Change*, 2007, 17(34): 472-485.

[9] 黄建毅,刘毅,马丽,等.国外脆弱性理论模型与评估框架研究评述[J]. *地域研究与开发*, 2012, 31(5): 1-5, 15.

[10] 袁媛,郑艳.国内外水资源脆弱性研究进展与展望[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(7): 116-125.

[11] 夏军,雒新萍,曹建廷,等.气候变化对中国东部季风区水资源脆弱性的影响评价[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(1): 8-14.

[12] Gui Zihan, Chen Xiaohong, He Yanhu. Spatiotemporal analysis of water resources system vulnerability in the Lancang River basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126614.

[13] 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, 276(8): 59-65.

[14] 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, 130.

[15] 林钟华,刘丙军,伍颖婷,等.变化环境下珠三角城市群水资源脆弱性评价[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2018, 57(6): 8-16.

[16] 李昌顺,周科平,林允.基于云物元的老旧社区内涝灾害脆弱性评价[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(6): 217-223.

[17] 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.

[18] 职璐爽,薛惠锋.基于熵权法的城市水资源脆弱性研究:以广东省为例[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 322-329.

[19] 邹君.湖南生态水资源系统脆弱性评价及其可持续开发利用研究[D].湖南长沙:湖南师范大学,2010.

[20] 王利平,张怡雯,张建业,等.河南省典型枯水年水资源脆弱性评价及贡献因子识别[J]. *水利水运工程学报*, 2022, 195(5): 1-11.

要性评价时仅考虑了中心性与辐射性两个影响因子,判定略显主观。最后,本次研究主要基于 30 m 精度遥感解译的土地数据进行空间模拟,数据精度有待提高,同时对于未来规划考虑不足,未将相关上位规划成果纳入研究框架。今后的研究将进一步结合上位规划数据以及人群动态数据,提升生态网络格局识别的精度。

[参 考 文 献]

- [1] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23: 1-16.
- [2] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 1999, 19(1): 10-17.
- [3] 朱捷, 苏杰, 尹海伟等基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(8): 1986-2001.
- [4] 李晟, 李涛, 彭重华, 等. 基于综合评价法的洞庭湖区绿地生态网络构建[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2687-2698.
- [5] 史学民, 秦明周, 李斌, 等. 基于 MSPA 和电路理论的郑汴都市区绿色基础设施网络研究[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(6): 631-638.
- [6] 张豆, 渠丽萍, 张桀滢. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化: 以长三角地区为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7525-7537.
- [7] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [8] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 景观连接度的概念、度量及其应用[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1903-1910.
- [9] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 基于最小费用模型的景观连接度评价[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 2042-2048.
- [10] Mcrae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104: 19885-19890.
- [11] 薛冰, 李京忠, 肖骁, 等. 基于兴趣点(POI)大数据的人地关系研究综述: 理论、方法与应用[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(6): 51-60.
- [12] 战明松, 朱京海. 基于 POI 数据的特大城市生态空间廊道识别与空间布局优化研究: 以沈阳市中心城区为例[J]. *中国园林*, 2021, 37(10): 112-117.
- [13] Yue Cao, Rui Yang, Steve C. Linking wilderness mapping and connectivity modelling: a methodological framework for wildland network planning [J]. *Biological Conservation*, 2020, 251.
- [14] Sun Hui, Liu Chunhui, Wei Jiaying. Identifying key sites of green infrastructure to support ecological restoration in the urban agglomeration [J]. *Land*, 2021, 10(11): 21-24.
- [15] 杜雨阳, 王征强, 于庆和, 等. 基于生境质量模型和电路理论的区域生态安全格局构建: 以秦岭(陕西段)为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 1069-1078.
- [16] 吴静, 黎仁杰, 程朋根. 城市生态源地识别与生态廊道构建[J]. *测绘科学*, 2022, 47(4): 175-180.
- [17] 谢于松, 王倩娜, 罗言云. 基于 MSPA 的市域尺度绿色基础设施评价指标体系构建及应用: 以四川省主要城市为例[J]. *中国园林*, 2020, 36(7): 87-92.
- [18] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [21] Deng Hongwei, Song Xiaojie, Li Changshun, et al. Comprehensive Evaluation on urban water security based on the Novel DPEBLR concept model and the cloud matter-element model: a case study of Chongqing, China [J]. *Water*, 2022, 14(21): 3486.
- [22] 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.
- [23] 王力新, 何璇, 黄永战. 创建水生态文明城市建设水美长沙[J]. *湖南水利水电*, 2019, 219(1): 70-71.
- [24] 胡光伟, 许滢, 张明, 等. 基于 SPA 的湖南省水资源与社会经济发展协同度评价[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(1): 65-72.
- [25] 傅泽鼎, 胡旭跃, 黄草, 等. 基于 SPR 模型湖南省水资源承载力评估研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(2): 92-103.

(上接第 184 页)