DOI:10. 11705/j. issn. 1672 - 643X. 2021. 01. 07

流域水资源可持续脆弱性回顾评价及敏感度分析

钟姗姗[1,2], 王化龙[3]

(1. 长沙理工大学,水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘　要: 流域水资源可持续脆弱性回顾评价不仅能够识别影响流域水资源可持续的潜在风险要素,评估系统的可持续发展能力,而且能够回看水资源政策实施效果,从而为政府完善现有政策提供依据。采用时间序列分析方法,基于欧几里德空间原理,构建了流域水资源可持续脆弱性 n 维空间评价模型;基于状态空间模型,分析了总脆弱度对资源、环境、社会经济 3 个维度在时间序列上的敏感度;最后将该模型用于湘江流域以验证其可行性。结果表明:湘江流域水资源系统总脆弱度在 2007 - 2018 年间总体呈下降趋势;流域水资源系统总脆弱度对环境维度高度敏感,对资源维度中度敏感,对社会经济维度低度敏感;脆弱性评价结果表明,湘江流域已实施的水资源管理政策成效显著。

关键词: 水资源; 脆弱性; 敏感度分析; 时间序列; 水资源回顾评价

中图分类号:TV213. 4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672- 643X(2021)01- 0043- 08

Retrospective vulnerability evaluation and sensitivity analysis of watershed water resources sustainability

ZHONG Shanshan[1,2], WANG Hualong[3]

(1. *School of Hydraulic Engineering*, *Changsha University of Science & Technology*, *Changsha* 410114, *China*; 2. *Key Laboratory of Water - Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province*, *Changsha* 410114, *China*; 3. *PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited*, *Changsha* 410014, *China*)

Abstract: With the retrospective vulnerability evaluation of watershed water resources sustainability, not only can the potential risks impacting watershed sustainability be identified, but also the watershed sustainability capacity and implementation effect of water resources policies can be evaluated, which would provide some guidance for the government to improve and optimize the existing policies. A n -dimensional space evaluation model for watershed water resources sustainable vulnerability was established using time series analysis method, based on Euclidean space theorem. Furthermore, the state space model was used to analyze the sensitivity of total vulnerability to the dimensions of resources, environment and socio-economy in time series. Finally, Xiangjiang Watershed was adopted as a case study to verify this model. Results show that the total vulnerability of water resources in this watershed showed an overall decreasing trend from 2007 to 2018, it was highly sensitive to the dimension of environment, moderately sensitive to the dimension of resources and slightly sensitive to the dimension of socio-economy. The conclusions of vulnerability evaluation show that the water resources management policies of Xiangjiang Watershed have achieved remarkable effects.

Key words: water resources; vulnerability; sensitivity analysis; time series; retrospective evaluation of water resources

1　研究背景

水是自然资源的重要组成部分,是支持人类生存和可持续发展的重要资源。然而水也是一种时空分布上很不均衡的有限资源,在人类活动不断加剧、城市快速化发展等影响下,水环境污染、水资源短缺

收稿日期:2020- 08- 16;　**修回日期**:2020- 12- 06
基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(19C0063)
作者简介:钟姗姗(1981-),女,辽宁沈阳人,博士,讲师,研究方向为流域规划与管理。

等问题一直困扰着人类,使得流域水资源可持续发展能力呈现出一定的脆弱性。近些年,我国政府高度重视流域水资源管理,颁布了一系列水管理政策以确保流域的可持续发展。2011 年,中央一号文件《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》明确提出,实行最严格的水资源管理制度,建立用水总量控制、用水效率控制和水功能区限制纳污“三项制度”,相应地划定用水总量、用水效率和水功能区限制纳污“三条红线”。同时文件要求县级以上地方政府对本行政区域的水资源管理和环境保护工作负总责。到目前为止,这些政策的实施效果如何?流域水资源可持续能力是否有所提升?

脆弱性是一个较新的研究命题,常用来评估系统对内外扰动的抵抗力以及从不利影响中恢复的能力,其目的是维护系统的可持续发展,减轻外部扰动对系统的不利影响,为退化系统的综合整治提供决策依据[1-3]。系统评价包括回顾评价、现状评价和预测评价。与现状评价和预测评价不同的是,回顾评价主要研究系统的历史状态变化规律,总结经验教训,从而为政策的制定和完善提供依据。流域水资源可持续脆弱性回顾评价通过评估流域水资源系统对外部扰动的抵抗力和从不利影响中恢复的能力,从而对流域水资源管理政策的实施效果进行回看。因此,本研究对流域水资源系统脆弱性开展回顾评价,期望通过揭示脆弱性的历史状态及其演变规律,识别关键影响要素,从而评定水资源管理政策实施对流域可持续性的影响效果。

脆弱性分析最初源于自然灾害领域[4-5]。随后,脆弱性的研究逐步从自然灾害领域拓展到自然科学和人文社会学领域,脆弱性概念已经在地理学、生态学、经济学、社会学、管理学、工程技术等多学科领域中得到广泛应用。脆弱性是流域水资源系统的关键属性之一,一般可认为脆弱性越大,流域水系统受水资源利用与开发活动影响的可能性越大,损失程度越严重,反之亦然。众多学者对水资源脆弱性问题展开了大量研究。夏军等[6]定性分析了气候变化条件下的水资源脆弱性,并提出了适应性调整方案。在一些特定区域的水资源脆弱性评价研究中,GIS[7]、集对分析[8]、AHP[9]、综合指数法[10]、熵权法[11]、粗糙集等方法相继被用于评定脆弱性等级,人工神经网络[12]、支持向量机[13]等被用于水资源脆弱性的预测研究中。已有相关研究中,脆弱性时空演变是主要研究内容。宋永永等[14]研究了黄河中下游地区城市脆弱性的空间异质性;潘争伟等[8]、王岩等[15]研究了脆弱性等级划分及其在时间上的动态演变过程;余中元等[16]、苏贤保等[17]对脆弱性时空演变进行了研究。

尽管脆弱性空间分布研究能够揭示脆弱性分布区域,然而为了开展回顾评价,脆弱性时间序列分析更能够帮助流域管理者了解已实施的流域水资源管理政策是否能够有效提升流域水资源可持续性。鉴于此,本研究基于时间序列分析,针对流域水资源可持续脆弱性开展回顾评价,分析脆弱性影响要素在时间序列上的变化,据此评定流域水资源管理政策对改善流域水资源可持续性的作用效果。为了更好地实施流域水资源脆弱性回顾评价,将欧氏空间距离理论用于水资源脆弱性评价中,与传统的综合指标评价模型相比,该模型能更好地建立多要素在特定时点的空间联系。本研究还采用状态空间模型动态分析了流域水资源脆弱性的影响要素及敏感度问题。本研究可为流域水资源管理政策的制定提供参考依据。

2 研究方法

2.1 指标体系

脆弱性是流域水资源系统本身固有的特性[1]。由于自然环境演变、水资源开发活动等的干扰,流域水资源系统存在不稳定性,系统各要素向不协调发展方向演化。脆弱性评价的目的就是实现流域水资源系统的协调、可持续发展。

在研究流域可持续发展能力时,魏伟等[18]认为可持续发展能力的影响要素有:经济社会发展、资源状况及其消耗、生态环境及其治理;赵蓉等[19]将流域可持续发展分为 5 个内容:经济、社会、环境、技术、管理。潘争伟等[20]认为水资源系统是涵盖水资源、水环境、水灾害以及社会经济生态的复杂系统,由此构建了包含水资源脆弱性、生态环境脆弱性和承载能力脆弱性 3 个维度的区域水资源系统脆弱性指标体系。根据已有研究成果,考虑流域可持续发展影响要素,结合脆弱性的成因及表现形式,本研究将流域水资源系统可持续脆弱性分为资源脆弱性(V_1)、环境脆弱性(V_2)和社会经济脆弱性(V_3)3 个维度,每个维度脆弱性(V_i)又由多个脆弱性驱动因素($R_1, R_2, \cdots, R_n$)诱发,如表 1 所示。则流域水资源可持续总脆弱度 $V = f(V_1, V_2, V_3)$。

2.2 基于欧式空间的脆弱性评价模型

2.2.1 欧式空间原理 欧几里德空间(Euclidean space),简称为欧氏空间,是一个由希腊著名数学家欧几里德建立的 n 维几何空间。根据欧氏法则,在

一个 n 维几何空间中,任意两点 $X(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 和 $Y(y_1,y_2,\cdots,y_n)$ 间的距离可表示为:

$$d(X,Y)=|\overrightarrow{XY}|=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2} \tag{1}$$

式中:$\overrightarrow{XY}$ 为点 X、Y 所构成的向量;$|\overrightarrow{XY}|$ 为向量 $\overrightarrow{XY}$ 的模。

那么,点 $X(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 到空间原点的距离可表示为:

$$d(X,0)=|\overrightarrow{X}|=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}x_i^2} \tag{2}$$

表 1　各维度脆弱性驱动因素及其含义

目标层	维度	含义	脆弱性驱动因素	指标属性
流域水资源可持续脆弱性	资源脆弱性(V_1)	资源脆弱性反映了流域暴露出的自然属性。该维度由自然因素构成,但会受到人类活动的干扰。	年降水量(折合水量)(R_{11})/10^8 m^3	−
			地表水资源量(R_{12})/10^8 m^3	−
			地下水资源量(R_{13})/10^8 m^3	−
			森林覆盖率(R_{14})/%	−
			耕地面积增加量(R_{15})/10^3 hm^2	−
			水资源开发利用率(R_{16})/%	+
	环境脆弱性(V_2)	环境脆弱性反映了在自然环境演变、水资源开发活动等扰动下,流域水资源系统因有限的适应能力而容易受到损害的一种状态。	Ⅲ类水质以上河长比(R_{21})/%	−
			水功能区水质达标率(R_{22})/%	−
			生态环境用水量(R_{23})/10^8 m^3	+
			耗水率(R_{24})/%	+
			洪灾受灾面积(R_{25})/10^3 hm^2	+
			旱灾受灾面积(R_{26})/10^3 hm^2	+
	社会经济脆弱性(V_3)	社会经济脆弱性要素主要由人为因素构成,反映了人类活动对流域水资源系统施加的压力。	水利、环保投入占总投入比重(R_{31})/%	−
			废水排放量(R_{32})/10^8 t	+
			污水处理率(R_{33})/%	−
			人均用水量(R_{34})/m^3	+
			万元 GDP 用水量(R_{35})/m^3	+
			人均 GDP(R_{36})/10^4 元	−

注:“+”为正向指标,该指标与脆弱性指数呈正向变化,其值越大越脆弱;“−”为逆向指标,该指标与脆弱性指数呈反向变化,其值越小越脆弱。

2.2.2　*脆弱性等级评价*　将欧氏空间距离原理用于定量描述某时刻待评价空间的脆弱状态[21-22],则流域水资源系统是一个由 3 个维度轴(资源轴、环境轴和社会经济轴)组成的、每个维度又由若干要素轴组成的 n 维空间系统。

图 1 为 t 时刻流域水资源系统的 n 维空间模型,n 维空间中的每一个点代表着某一时刻水资源系统脆弱度与各影响要素的空间组合。

根据欧氏空间距离法则,使用空间中任意点到原点的加权距离描述系统脆弱度水平,则有:

资源维度脆弱性指数:

$$V_{1t}=|M_{1t}|=\sqrt{\sum_{j=1}^{k}w_{1j}(R_{1jt})^2} \tag{3}$$

$$(j=1,2,\cdots,k)$$

环境维度脆弱性指数:

$$V_{2t}=|M_{2t}|=\sqrt{\sum_{j=1}^{k}w_{2j}(R_{2jt})^2} \tag{4}$$

$$(j=1,2,\cdots,m)$$

社会经济维度脆弱性指数:

$$V_{3t}=|M_{3t}|=\sqrt{\sum_{j=1}^{k}w_{3j}(R_{3jt})^2} \tag{5}$$

$$(j=1,2,\cdots,n)$$

系统总脆弱度:

$$V_t=|M_t|=\sqrt{\lambda_1(V_{1t})^2+\lambda_2(V_{2t})^2+\lambda_3(V_{3t})^2} \tag{6}$$

式中:V_{1t}、V_{2t}、V_{3t} 分别为 t 时刻资源、环境、社会经济维度脆弱性指数;M_{1t}、M_{2t}、M_{3t} 分别为 t 时刻资源、环境、社会经济维度脆弱性空间向量的模;R_{1jt}、R_{2jt}、R_{3jt} 分别为 t 时刻资源、环境、社会经济维度第 j 个指标在空间坐标轴的投影;w_{1j}、w_{2j}、w_{3j} 分别为 t 时刻资

源、环境、社会经济维度第 j 个指标的权重；λ_1、λ_2、λ_3 分别为资源、环境、社会经济维度权重；V_t 为 t 时刻水资源系统总脆弱度；M_t 为 t 时刻水资源系统总脆弱度空间向量的模。

鉴于脆弱性分级的复杂性，结合相关研究成果[23-24]，采用等间距分级法构建脆弱性等级评价标准，表 2 为脆弱度等级划分准则。

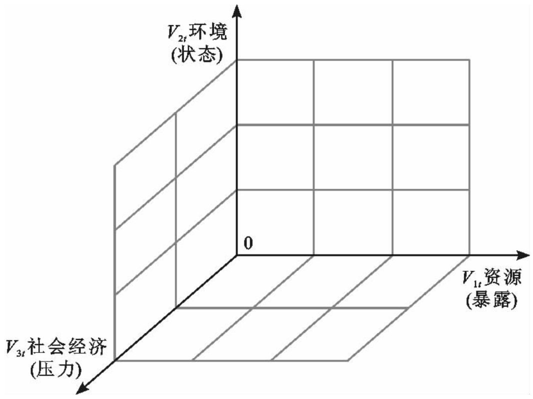

图 1 t 时刻流域水资源系统 n 维空间模型

表 2 脆弱度等级划分准则

脆弱性指数隶属区间	脆弱度等级
[0.000,0.250)	低度脆弱
[0.250,0.500)	中度脆弱
[0.500,0.750)	较高脆弱
[0.750,1.000]	高度脆弱

2.3 脆弱性维度敏感度分析

状态空间模型是一种以时间序列为基础的动态时域模型，可用于估计多变量动态变化情况[25]，最初用于控制工程领域，近些年在经济时间序列分析中的应用迅速增加。吴卫红等[26]利用状态空间模型动态分析了协同创新影响因素的变化趋势；杜颖等[27]利用状态空间模型测算了能源回弹效应。状态空间模型在分析多变量对目标的影响及其在时间序列上的表现等方面具有一定优势。本研究运用状态空间模型动态分析系统总脆弱度对脆弱性维度的敏感程度，客观反映系统的易干扰性和应对能力，为流域可持续发展提供决策依据和参考价值。

定义“敏感度”为各维度脆弱性指数变化所引起的系统总脆弱度变化情况，即系统总脆弱度对各维度的敏感程度。敏感度越大，说明流域水资源系统总脆弱度越易受到该维度变化的影响。为得到“敏感度”在时间序列上的表现，构建如下状态空间模型[16-17]。状态空间模型由状态方程和量测方程构成，公式(7)为量测方程，表示流域水资源系统总脆弱度与各维度间的关系；公式(8)~(10)为状态方程，表示状态变量的生成过程。

$$V = \alpha_t V_{1t} + \beta_t V_{2t} + \theta_t V_{3t} + c + u_t \tag{7}$$

$$\alpha_t = \varphi_1 \alpha_{t-1} + \varepsilon_{1t} \tag{8}$$

$$\beta_t = \varphi_1 \beta_{t-1} + \varepsilon_{2t} \tag{9}$$

$$\theta_t = \varphi_1 \theta_{t-1} + \varepsilon_{3t} \tag{10}$$

式中：α_t、β_t、θ_t 为状态变量，分别表示流域水资源系统总脆弱度对各维度的敏感程度(即“敏感度”)；V_{1t}、V_{2t}、V_{3t} 体现了时间变化对各维度脆弱性的影响；c 为常数项；u_t、ε_{1t}、ε_{2t}、ε_{3t} 为均值为 0、服从正态分布的不相关扰动项。

3 湘江流域水资源可持续脆弱性评价

3.1 研究区概况

湘江是长江重要的一级支流，湘江在湖南境内长度约 670 km，年平均径流量 722×10^8 m^3。湘江流域属于太平洋季风湿润气候，地貌以山地、丘陵为主，资源禀赋优良，矿产丰富，植被丰茂，是湖南省人口最稠密、经济最发达的区域，流域面积 94 660 km^2，覆盖长沙、株洲、湘潭、衡阳、郴州、永州、娄底、邵阳、岳阳 9 个市、67 个县(市、区)，约占全省行政区域面积的 40%，承载着全省 60% 左右人口和 75% 以上地区的生产总值。流域丰富的水资源不仅维系着近 $5\,000\times10^4$ 人口的生活、生产、生态用水需求，也是区域经济社会可持续发展的重要支撑。

3.2 数据来源

本研究数据来源于 2007-2018 年的《湖南省水资源公报》《湖南省统计年鉴》和《湖南省环境状况公报》。

3.3 脆弱度等级评价

表 3 为 2007-2018 年湘江流域水资源脆弱性评价指标取值。

为消除不同量纲指标对评价结果造成的偏差，采用极差标准化法[28]对表 3 中的各数据进行无量纲化处理：

正向指标：

$$R_{ijt} = [r_{ijt} - \min r_{ij}]/[\max r_{ij} - \min r_{ij}] \tag{11}$$

$(i = 1,2,3 \quad j = 1,2,\cdots,k \text{ 或 } m \text{ 或 } n)$

逆向指标：

$$R_{ijt} = [\max r_{ij} - r_{ijt}]/[\max r_{ij} - \min r_{ij}] \tag{12}$$

$(i = 1,2,3 \quad j = 1,2,\cdots,k \text{ 或 } m \text{ 或 } n)$

式中：R_{ijt} 为 r_{ijt} 的标准化值；r_{ijt} 为第 i 个维度的第 j 个指标在第 t 个样本中的值；$\max r_{ij}$、$\min r_{ij}$ 分别为第 i

个维度的第j个指标在各样本中的最大值和最小值。

得到标准化矩阵$\{\boldsymbol{R}_{ijt}\} = \{\boldsymbol{R}_{1jt}, \boldsymbol{R}_{2jt}, \boldsymbol{R}_{3jt}\}$。在此基础上,采用变异系数法[29] 计算各脆弱性因素的权重 ω_j。

$$CV_{ij} = \frac{S_{ij}}{\overline{R}_{ij}} \tag{13}$$

$$\omega_{ij} = \frac{CV_{ij}}{\sum_{j=1}^{k或m或n} CV_{ij}} \tag{14}$$

$$\overline{R}_{ij} = \frac{1}{p}\sum_{t=1}^{p} R_{ijt} \tag{15}$$

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{1}{p-1}\sum_{t=1}^{p}(R_{ijt} - \overline{R}_{ij})^2}$$

$$(j = 1,2,\cdots,k 或 m 或 n) \tag{16}$$

式中:CV_j 为指标j的变异系数;ω_j 为指标j的权重;$\overline{R}_{ijt}$ 为指标j各年样本数据的均值;S_j 为指标j的标准差。

同理,采用变异系数法计算各维度权重可得:

$(\omega_{11},\omega_{12},\omega_{13},\omega_{14},\omega_{15},\omega_{16}) = (0.168,0.137,0.132,0.184,0.098,0.282)$

$(\omega_{21},\omega_{22},\omega_{23},\omega_{24},\omega_{25},\omega_{26}) = (0.155,0.106,0.261,0.105,0.137,0.236)$

$(\omega_{31},\omega_{32},\omega_{33},\omega_{34},\omega_{35},\omega_{36}) = (0.133,0.148,0.242,0.118,0.232,0.127)$

$(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3) = (0.276,0.541,0.183)$

根据公式(3)、(4)、(5)、(6),分别计算 t 时刻各维度脆弱性空间向量的模 M_{1t}、M_{2t}、M_{3t} 以及 t 时刻系统总脆弱度空间向量的模 M_t,得到各维度脆弱性指数 V_1、V_2、V_3 及总脆弱度 V。表 4 展示了脆弱性指数计算结果。

3.4　脆弱性评价结果分析

根据表 4 中的计算结果绘制出 2007 – 2018 年湘江流域资源、环境、社会经济维度脆弱性指数变化趋势图,如图 2 所示。

表 3　2007 – 2018 年湘江流域水资源脆弱性评价指标取值

维度	指标	年份											
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
资源维度	R_{11} /10^8 m^3	1077.53	1166.10	1058.20	1407.00	923.30	1462.80	1176.00	1234.00	1457.00	1442.60	1235.10	1167.00
	R_{12} /10^8 m^3	565.16	640.70	558.50	794.40	465.10	835.50	675.80	698.80	827.10	909.00	743.60	538.00
	R_{13} /10^8 m^3	138.90	157.50	144.70	193.40	118.20	199.20	180.10	186.20	201.80	228.50	196.46	139.88
	R_{14} /%	56.10	55.90	56.45	57.01	57.13	57.34	57.52	59.57	59.57	59.60	59.68	59.82
	R_{15} /10^3 hm^2	1.38	0.40	1.31	2.12	3.40	8.20	3.50	3.51	4.41	−1.44	2.24	4.39
	R_{16} /%	30.0	24.6	24.7	24.9	24.3	24.6	25.1	24.9	24.3	24.0	23.7	24.5
环境维度	R_{21} /%	72.0	68.5	70.8	70.3	94.7	94.3	98.8	98.3	98.7	98.5	98.8	100.0
	R_{22} /%	62.2	58.1	60.3	60.9	84.4	84.0	89.8	85.9	86.6	87.2	95.7	97.2
	R_{23} /10^8 m^3	5.65	2.18	2.23	2.01	1.54	1.58	1.78	1.64	1.58	1.60	1.62	1.86
	R_{24} /%	44.2	41.9	44.5	42.9	41.9	41.8	41.1	42.0	40.7	40.2	40.1	40.9
	R_{25} /10^3 hm^2	1173.34	5435.00	1079.75	2011.33	689.50	1064.39	634.18	1041.13	757.40	1142.10	1175.10	68.50
	R_{26} /10^3 hm^2	1416.54	9108.00	1043.67	407.30	1977.39	0.23	2165.15	0.00	0.00	0.15	320.50	345.50
社会经济维度	R_{31} /%	8.20	8.60	10.30	10.41	10.06	10.27	11.40	12.44	13.64	16.35	17.31	16.35
	R_{32} /10^8 t	25.21	25.03	26.03	26.81	27.90	30.40	30.72	31.00	31.41	29.88	30.06	32.47
	R_{33} /%	46.30	52.10	59.20	75.00	82.80	85.80	88.36	89.52	92.70	94.30	95.50	96.00
	R_{34} /m^3	478.00	473.00	467.00	495.00	495.00	495.00	497.00	493.00	487.00	484.30	476.59	488.51
	R_{35} /m^3	355.00	285.00	249.00	204.00	166.00	148.00	136.00	123.00	114.00	105.90	94.52	92.52
	R_{36} /10^4 元	1.45	1.75	2.04	2.47	2.99	3.35	3.68	4.03	4.28	4.64	4.96	5.85

表 4 2007 - 2018 年湘江流域水资源脆弱性指数计算结果

脆弱性指数	年份											
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
V_1	0.867	0.639	0.670	0.410	0.742	0.304	0.459	0.338	0.176	0.315	0.312	0.501
V_2	0.756	0.811	0.590	0.542	0.215	0.194	0.159	0.183	0.111	0.113	0.081	0.073
V_3	0.866	0.742	0.626	0.590	0.546	0.567	0.551	0.501	0.449	0.338	0.291	0.458
V	0.807	0.751	0.619	0.514	0.421	0.293	0.314	0.284	0.191	0.210	0.184	0.262

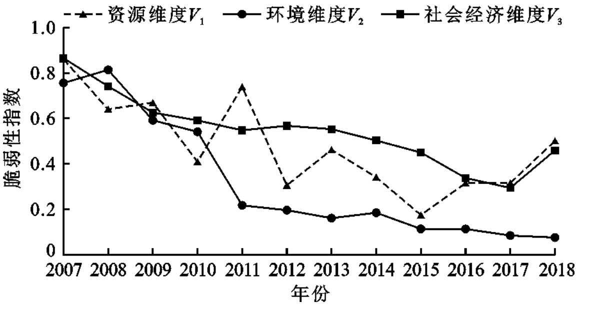

图 2 2007 - 2018 年湘江流域各维度脆弱性指数变化趋势

3.4.1 资源维度 资源维度脆弱性指数反映了流域自然资源对流域可持续能力的约束效果。由图 2 可以看出,资源维度脆弱性指数 V_1 仅在 2015 年为“低度脆弱”,大约 42% 的年份为“较高及高度脆弱”。资源脆弱性指数曲线在研究期内为一条“高低交错”的折线,且总体呈减弱下降趋势。这主要是由湘江流域的资源分布特征所导致,湘江流域范围内自然资源丰富,植被丰茂,但水资源时空分布不均,年际降雨量变化较大。

3.4.2 环境维度 环境维度脆弱性指数反映了流域水环境系统受自然环境演变、水资源开发活动等影响的状态。由图 2 可以看出,环境维度脆弱性指数 V_2 在 33% 的年份中为“较高和高度脆弱”,且分布在研究时段早期;67% 的年份为“低度脆弱”。环境脆弱性指数曲线为一条递减曲线,且在 2010 - 2011 年下降幅度显著。2011 年后,与资源维度和社会经济维度脆弱性指数曲线相比,环境维度脆弱性指数曲线始终维持在较低的水平。评价结果显示,研究时段前期,面对来自流域环境改变和外部活动的扰动,湘江流域环境系统明显适应能力不足,旱涝灾害较多,水污染严重,环境脆弱性高;研究时段后期,流域环境系统脆弱性得到了明显的改善,流域环境朝着可持续方向发展。

3.4.3 社会经济维度 社会经济维度脆弱性指数反映了外界要素对流域水资源系统的扰动强度及流域社会经济系统所受到的压力。由图 2 可以看出,社会经济维度脆弱性指数 V_3 仅在 2007 年呈“高度脆弱”状态,在 58% 的年份中为“较高脆弱”状态,33% 的年份中为“中度脆弱”状态。社会经济维度脆弱性指数曲线总体呈现下降趋势,但与资源维度和环境维度脆弱性指数曲线相比,该曲线较为平缓,下降幅度不大。评价结果显示,研究时段前期,流域开发强度不高,社会经济发展程度也较低,社会经济脆弱性大;研究时段后期,流域经济发展逐渐活跃,随之而来的用水量指标和废水排放量指标也不断增大,尽管应对措施(如污水处理、资金投入)的采用使得流域社会经济脆弱性有所降低,但与环境脆弱性相比,下降幅度不大。

3.4.4 流域水资源总脆弱度 图 3 为 2007 - 2018 年湘江流域水资源系统总脆弱度变化趋势图。

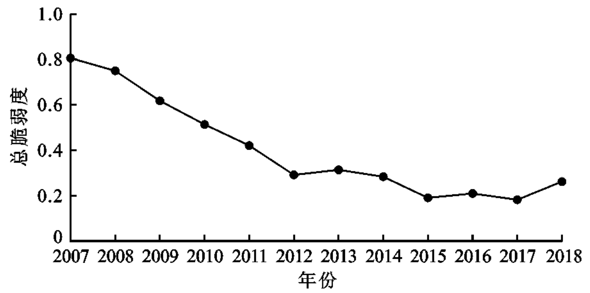

图 3 2007 - 2018 年湘江流域水资源系统总脆弱度变化趋势

由图 3 可以看出,流域水资源系统总脆弱度 V 在 2007 和 2008 年呈“高度脆弱”,2009 和 2010 年呈“较高脆弱”,2011、2012、2013、2014 和 2018 年为“中度脆弱”,2015、2016 和 2017 年为“低度脆弱”,总脆弱度曲线呈逐年下降趋势。湘江流域水资源脆弱性回顾评价结果表明研究区内流域水资源脆弱性逐年下降,对外界扰动的适应能力正逐步提升,流域具备一定的可持续能力。

3.5 脆弱性维度敏感度分析

根据公式(7)~(10),利用 Eviews8.0 的空间状态模型 Kalman 滤波法度量流域水资源系统总脆弱度 V 对各维度脆弱性指数 V_1、V_2、V_3 的动态敏感程度。为直观表达敏感程度随时间变化趋势,将状态变

量 α_t、β_t、θ_t 绘制成折线图，图 4 为系统总脆弱度分别对资源、环境、社会经济维度的动态敏感程度。

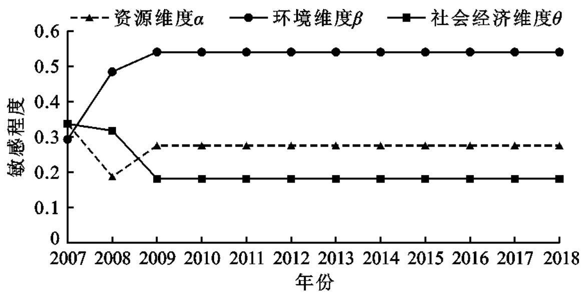

图 4　2007 – 2018 年湘江流域水资源系统总脆弱度对 3 个维度的动态敏感程度

（1）状态变量 α 表示资源维度对系统总脆弱度的边际产出，即资源维度脆弱性指数每增加 1 个单位，总脆弱度增加 α 个单位。由图 4 可知，总脆弱度对资源维度的敏感度为正，2007 年敏感度较高，2008 年有所降低，2009 年升高后趋于平缓。总体来看，系统总脆弱度对资源的供给具有中等敏感度。

（2）状态变量 β 表示环境维度对系统总脆弱度的边际产出，即环境维度脆弱性指数每增加 1 个单位，总脆弱度增加 β 个单位。由图 4 可知，总脆弱度对环境维度的敏感度为正，且 2007 – 2009 年敏感度逐年上升，2009 年后始终维持较高敏感度。与资源维度和社会经济维度相比，系统总脆弱度对环境维度的敏感度很高。

（3）状态变量 θ 表示社会经济维度对系统总脆弱度的边际产出，即社会经济维度脆弱性指数每增加 1 个单位，总脆弱度增加 θ 个单位。由图 4 可知，2007 – 2009 年总脆弱度对社会经济维度的敏感度逐年降低，2009 年后始终维持在较低水平。总体来看，系统总脆弱度对社会经济维度的敏感度较低。

由图 4 可以看出，2009 年以前，3 条敏感度曲线均处于调整状态；2009 年以后，由于总脆弱度曲线与环境维度脆弱性指数曲线的走势基本一致，而与资源和社会经济维度脆弱性指数曲线的变化趋势完全相异，使得总脆弱度对环境维度的敏感度始终维持在较高水平，对资源和社会经济维度的敏感度维持在中等和较低水平。

4　湘江流域水资源管理政策回看

基于可持续脆弱性评价结论，对湘江流域现有水资源管理政策的实施效果进行回看，从而巩固提高治理成果。2007 – 2018 年湖南省地方政府颁布了一系列流域水资源管理政策，如：2008 年，湖南省人民政府印发了《湘江流域水污染综合整治实施方案》，用 3 年时间（2008 – 2010 年）解决湘江流域水污染问题。从脆弱性评价值的变化趋势（图 2）可以看出，环境维度脆弱性指数在 2008 年有小幅上涨之后，2009 年开始逐年快速下降，环境脆弱性在政策的作用下得到明显改善。2013 年，湖南省人民政府决定将湘江保护和治理作为“一号重点工程”，用 3 个“三年行动计划”（2013 – 2021 年）使湘江流域水环境质量得到明显改善；同时为了积极响应中央一号文件，湖南省人民政府印发了《湖南省最严格水资源管理制度实施方案》。根据脆弱性评价结果，湘江流域水资源总脆弱度 V、资源维度脆弱性指数 V_1、环境维度脆弱性指数 V_2、社会经济维度脆弱性指数 V_3 在 2007 – 2018 年间均呈总体下降趋势，说明湘江流域水资源管理政策在环境保护和水资源治理方面取得了明显成效，人们的环保意识也在逐年提高。2017 年，在湖南省各市（州）实行最严格水资源管理制度的考核中，全省 14 个市（州）均顺利通过湖南省政府考核，其中长沙市、湘潭市、娄底市、衡阳市、永州市考核等级为优秀。

尽管如此，湘江流域水资源可持续脆弱性问题依然存在，如废水排放量逐年增大、社会经济脆弱性近年来有上升趋势、资源脆弱性在研究期内有降有升、湘江流域水资源年际分布不均衡等问题依然存在。敏感度分析结果表明，鉴于水资源系统总脆弱度对环境维度的高敏感度，环境治理依然是未来湘江流域管理的重中之重。

5　结　论

对流域水资源系统可持续脆弱性开展回顾评价不仅能够识别影响流域水资源可持续的潜在风险要素，为流域系统可持续发展提供预警，更重要的是能够对水资源政策实施效果进行回看，从而为政府改进、完善现有政策提供依据。基于欧几里德空间原理，构建了流域水资源可持续脆弱性 n 维空间评价模型，度量了流域水资源可持续脆弱度在时间序列上的变化；基于状态空间模型，分析了各维度脆弱性对系统总脆弱度的影响及其在时间序列上的变化；最后将该模型用于湘江流域进行实例验证，研究结果表明：

（1）湘江流域水资源系统总脆弱度在 2007 – 2018 年间总体呈下降趋势。

（2）资源维度脆弱性指数曲线为一条“高低交错”的下降折线，资源脆弱性指数在大约 42% 的年

份中为“较高及高度脆弱”;环境脆弱性指数曲线为1条递减曲线,环境脆弱性指数在67%的年份中为“低度脆弱”;社会经济脆弱性指数曲线呈下降趋势,但降幅不大,社会经济脆弱性指数在58%的年份中为“较高脆弱”,33%的年份中为“中度脆弱”。

(3)流域水资源系统总脆弱度对环境维度具有高敏感度,对资源维度具有中等敏感度,对社会经济维度具有低敏感度。

(4)脆弱性评价结论表明,湘江流域水资源管理政策在流域水资源治理和环境保护方面取得了显著成效。

参考文献:

[1] 陈晓红,万鲁河. 城市化与生态环境耦合的脆弱性与协调性作用机制研究[J]. 地理科学,2013,33(12):1450-1457.

[2] 李 鹤,张平宇,程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展,2008,27(2):18-25.

[3] BEROYA-EITNER M A. Ecological vulnerability indicators[J]. Ecological Indicators,2016,60:329-334.

[4] 张晓瑞,张琳雅,方创琳. 概念、框架和测度:城市脆弱性研究脉络评述及其拓展[J]. 地理与地理信息科学,2015,31(4):94-99.

[5] 王 岩,方创琳,张 蔷. 城市脆弱性研究评述与展望[J]. 地理科学进展,2013,32(5):755-768.

[6] 夏 军,石 卫,雒新萍,等. 气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J]. 水科学进展,2015,26(2):279-286.

[7] MORATALLA Á,GÓMEZ-ALDAY J J,SANZ D,et al. Evaluation of a GIS-based integrated vulnerability risk assessment for the Mancha oriental system (SE Spain)[J]. Water Resources Management,2011,25:3677-3697.

[8] 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.

[9] RICHARDSON C P,AMANKWATIA K. GIS-based analytic hierarchy process approach to watershed vulnerability in Bernalillo County,New Mexico[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2018,23(5):04018010.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 刘倩倩,陈 岩. 基于粗糙集和BP神经网络的流域水资源脆弱性预测研究-以淮河流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(9):1317-1327.

[13] 陈 岩,冯亚中. 基于RS-SVR模型的流域水资源脆弱性评价与预测研究-以黄河流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(1):137-149.

[14] 宋永永,米文宝,仲俊涛,等. 宁夏限制开发生态区人地耦合系统脆弱性空间分异及影响因素[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(11):85-91.

[15] 王 岩,方创琳. 大庆市城市脆弱性综合评价与动态演变研究[J]. 地理科学,2014,34(5):547-555.

[16] 余中元,李 波,张新时. 湖泊流域社会生态系统脆弱性分析——以滇池为例[J]. 经济地理,2014,34(8):143-150.

[17] 苏贤保,李勋贵,刘巨峰,等. 基于综合权重法的西北典型区域水资源脆弱性评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(3):112-118.

[18] 魏 伟,石培基,周俊菊,等. 基于GIS的石羊河流域可持续发展能力评估[J]. 地域研究与开发,2014,33(6):170-174.

[19] 赵 蓉,禹雪中,冯 时. 流域水电可持续性评价方法研究及应用[J]. 水力发电学报,2013,32(6):287-293.

[20] 潘争伟,周戎星,王艳华. 区域水资源系统脆弱性评价的集对分析与可变模糊集方法[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(11):198-202.

[21] 叶 菁,谢巧巧,谭宁焱. 基于生态承载力的国土空间开发布局方法研究[J]. 农业工程学报,2017,33(11):262-271.

[22] 熊建新,陈端吕,谢雪梅. 基于状态空间法的洞庭湖区生态承载力综合评价研究[J]. 经济地理,2012,32(11):138-142.

[23] 李双江,胡亚妮,崔建生,等. 石家庄经济与人居环境耦合协调演化分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(4):8-15.

[24] 陆建忠,崔肖林,陈晓玲. 基于综合指数法的鄱阳湖流域水资源安全评价研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(2):212-218.

[25] 李宏坤,何德鲁,张志新,等. 基于状态空间模型的可靠性评估方法[J]. 振动与冲击,2016,35(1):118-124.

[26] 吴卫红,陈高翔,张爱美. 基于状态空间模型的政产学研资协同创新四螺旋影响因素实证研究[J]. 科技进步与对策,2018,35(14):22-29.

[27] 杜 颖,肖荣阁,司慧娟. 基于状态空间模型的河北能源回弹效应研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(3):19-24.

[28] 余灏哲,韩 美. 基于模糊物元模型的山东省水资源安全TOPSIS评价[J]. 安全与环境工程,2015,22(6):1-6.

[29] 储 莎,陈 来. 基于变异系数法的安徽省节能减排评价研究[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(3):512-516.