

# 黄土高原地区城市韧性时空演变与障碍因子分析

樊昭颖<sup>1,2\*</sup>, 张子龙<sup>1,2,3#</sup>, 杨海楠<sup>1,2</sup>, 陈兴鹏<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>兰州大学黄河流域绿色发展研究院, 甘肃 兰州

<sup>3</sup>兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州

<sup>4</sup>兰州大学中国西部循环经济研究中心, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年12月16日; 录用日期: 2023年1月31日; 发布日期: 2023年2月17日

## 摘要

提高城市韧性, 增强城市有效应对各种灾害和危机的能力成为了目前城市建设和治理的关键问题。黄土高原生态本底脆弱, 人口、资源、环境矛盾突出, 城市发展面临着资源环境约束和经济高质量发展的双重压力, 开展城市韧性相关研究显得更加迫切, 对韧性状态的评价以及韧性提高的障碍因子的识别对于该地区城市可持续发展至关重要。基于System-of-Systems理论和PSR分析框架, 文章利用ANP-CRITIC组合赋权法和VIKOR方法构建了城市韧性评价模型, 对黄土高原城市韧性时空演变进行分析, 并运用障碍度模型对影响城市韧性的主要障碍因子进行识别。研究发现: 1) 黄土高原地区总体韧性水平呈上升趋势, 各韧性维度变化特征存在差异。其中, 全区的稳定性和适应性水平有所提高, 效率性水平先上升后下降, 冗余性则呈现出小幅下降态势。2) 黄土高原地区中高及高韧性值城市主要为各省会城市, 中低及低韧性值城市零星分布于区域边缘, 各维度城市韧性水平的空间分布格局差异化明显。3) 障碍度因子方面, 信息科技因素是制约黄土高原地区城市韧性提升的关键因素, 科技创新、人才储备、资金投入、经济发展和失业问题是影响该地区韧性提升的主要障碍因子。

## 关键词

城市韧性, ANP-CRITIC组合赋权法, VIKOR, 障碍因子, 黄土高原地区

## Spatial-Temporal Evolution and Obstacle Factors of Urban Resilience in China's Loess Plateau

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 樊昭颖, 张子龙, 杨海楠, 陈兴鹏. 黄土高原地区城市韧性时空演变与障碍因子分析[J]. 地理科学研究, 2023, 12(1): 32-51. DOI: 10.12677/gser.2023.121004

Zhaoying Fan<sup>1,2\*</sup>, Zilong Zhang<sup>1,2,3#</sup>, Hainan Yang<sup>1,2</sup>, Xingpeng Chen<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>Lanzhou University Institute of Green Development for the Yellow River Drainage Basin, Lanzhou Gansu

<sup>3</sup>Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou Gansu

<sup>4</sup>Lanzhou University Research Institute for Circular Economy in Western China, Lanzhou Gansu

Received: Dec. 16<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 31<sup>st</sup>, 2023; published: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Improving the resilience of cities and enhancing their ability to respond effectively to various disasters and crises has become a key issue in the current urban construction and governance. With the fragile ecological background of the Loess Plateau and the outstanding conflicts among population, resources and environment, urban development is facing the dual pressure of resource and environmental constraints and high-quality economic growth, it becomes more urgent to conduct research related to urban resilience, and the evaluation of resilience status and the identification of barriers to resilience improvement are crucial for sustainable urban development in the region. Based on the System-of-Systems theory and PSR analysis framework, the article constructs an urban resilience evaluation model using ANP-CRITIC combined assignment method and VIKOR method to analyze the spatial and temporal evolution of urban resilience in the Loess Plateau, and identifies the main obstacle factors affecting urban resilience using the obstacle degree model. The results show that: 1) The overall resilience level of the Loess Plateau region is on the rise, and there are differences in the change characteristics of each resilience dimension. Among them, the stability and adaptability level of the whole region has increased, the efficiency level has increased and then decreased, and the redundancy has shown a small decrease. 2) The cities with medium-high and high-resilience values in the Loess Plateau region are mainly provincial capitals, while the cities with medium-low and low resilience values are scattered at the regional edges, and the spatial distribution pattern of the resilience levels of cities in each dimension is significantly differentiated. 3) In terms of the obstacle factors, information technology is the key factor that restricts the resilience improvement of cities in the Loess Plateau region, and science and technology innovation, talent pool, capital investment, economic development and unemployment are the main barrier factors that affect the resilience improvement of the region.

## Keywords

Urban Resilience, ANP-CRITIC Combined Assignment Method, VIKOR, Obstacle Factor, Loess Plateau

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自改革开放以来,中国城市化经历了快速增长,城镇化率从17.9%提高到2021年的64.7%,城市人口规模、经济规模、用地规模快速扩张。伴随而来的是环境污染、生态破坏以及基础设施和公共服务供给不足等城市病,再加上气候变化、自然灾害、疫情传播等影响,未来城市发展面临着前所未有的风险

和挑战,以抵御力、适应性和恢复力提升为导向的可持续发展转型迫在眉睫[1]。韧性被认为是可持续性的一个重要表达或内核,并被形象地称为可持续性的急诊室。联合国可持续发展目标提出要提高城市应对气候变化与生态环境风险的抵御力、适应性和恢复力,达到可持续城市建设的要求,是增强城市韧性的重要体现。因而增强城市韧性既是策略性选择,也是全球变化背景下城市发展的新范式[2]。黄土高原作为中国“两屏三带”生态安全格局的重要组成部分[3],也是国家可持续能源的重要保障。然而,黄土高原生态环境脆弱,且粗放的经济活动和不合理的资源开发,使得生态恶化,人地关系进一步失衡,社会经济可持续发展受到严重制约[4][5]。同时,旱涝灾害、周期性经济危机、突发性公共卫生事件等不确定风险也给黄土高原地区的发展带来威胁。因此,城市发展和治理应通过提升城市韧性以预控潜在和隐性风险,当前如何有效评估城市韧性,消解转化供需矛盾,已成为黄土高原城市发展亟待解决的难题。

近年来,相关研究主要集中在城市韧性的评价指标体系和方法、时空格局演变和影响因素等方面。城市韧性评价主要包括单系统评价和综合评价两方面。其中,单系统评价主要针对城市某一子系统的韧性状态进行测度,包括经济韧性[6]、社会韧性[7]、生态韧性[8]、基础设施韧性[9]等方面,其指标评价体系大多基于研究目标的差异性,从城市基本构成要素、演进过程或韧性特征视角出发[10],但尚未形成统一标准。综合评价则将城市作为开放的复杂巨系统,从经济、社会、生态、基础设施、公共服务等多维度开展韧性评价,其中最具有代表性的就是洛克菲勒基金会提出的包括四个维度五十项指标的评价框架[11][12]。关于城市韧性的测度方法主要包含定性和定量两种,前者通过调研与访谈探索韧性构成要素,后者主要包括综合指标评价、韧性时间函数评价与模型模拟等[2]。此外,现有研究逐渐由传统的数理特征描述转向空间量化分析,具体体现在关键时间节点的城市韧性可视化表达、韧性城市的空间演变特征与规律探究[13][14]、韧性城市空间格局的整体特征描述[15]等方面。对于城市韧性的影响因素研究主要从多元干扰、城市系统状态及应对能力三个方面进行[16],旨在为韧性城市建设提出科学依据。总体来看,已有研究多基于单一视角来构建评价体系,较少从综合视角关注城市及其内部子系统的变化特征;同时,缺乏精确的集成综合评价方法,研究区域大多集中于国家层面、地区及部分经济发达省份[17]-[23],而对生态敏感、经济相对落后的黄土高原地区的关注较少。

鉴于此,本文利用 System-of-Systems (SoS)理论和压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)模型,以黄土高原地区的40个地级市为研究对象,综合考虑城市韧性阶段过程和城市系统组成要素,从城市稳定性、冗余性、效率性、适应性四种特征出发构建了城市韧性指标评价体系,分析了2011~2020年间各城市韧性指数的时空演变特征,最后利用障碍度模型对影响黄土高原城市韧性的障碍因素及阻碍程度进行了定量分析,旨在为缓解黄土高原城市人口、资源、环境矛盾,打破发展瓶颈,提升城市韧性,缩小区域发展差异及实现高质量发展提供借鉴。

## 2. 研究区概况与数据来源

### 2.1. 研究区概况

黄土高原地区位于107°E~114°E,32°N~41°N之间,海拔500~2000 m,面积64.87万km<sup>2</sup>,约占全国国土总面积的6.76%,是连接黄河上下游流域的关键区域[24]。2020年,区域常住人口1.3亿人,人均生产总值59,522元。生态环境脆弱、能源资源富集、经济发展滞后是该区的主要特征[25]。现阶段黄土高原正处于城镇化加速发展期,各种资源环境问题和区域发展不平衡不充分问题尤为突出,亟需探索新型发展模式,实现城市可持续发展。

本文以国家发展和改革委员会等2010年出台的《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010~2030年)》界定的“黄土高原地区”范围为参考,剔除数据缺失严重的甘肃省临夏州及青海省黄南州、海北州和海南州,选取包括山西省、内蒙古自治区、河南省、陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区和青海省共7个省(自

治区)的 40 个地市为研究对象(图 1)。

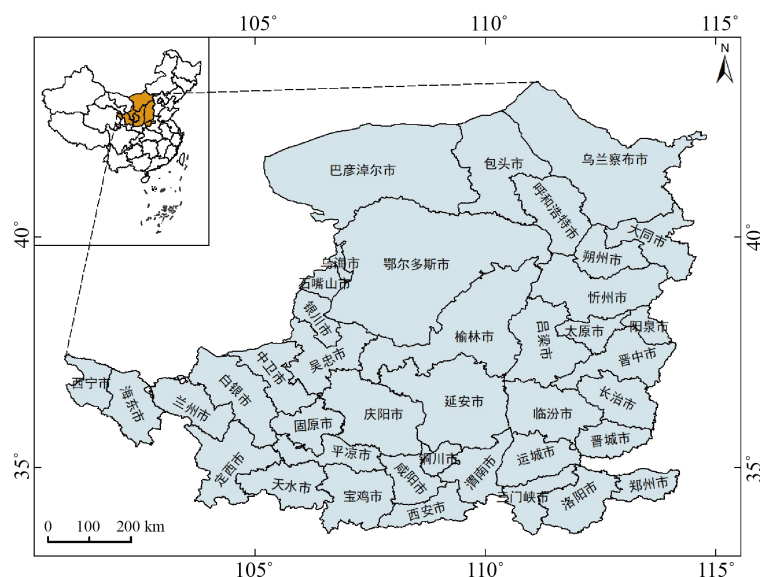


Figure 1. Location map of the study area  
图 1. 研究区区位图

## 2.2. 数据来源

本文研究数据包括统计数据、空气质量数据和行政区划矢量数据等, 时间跨度为 2011~2020 年。其中, 统计数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》以及各省(自治区)统计年鉴、各地级市统计年鉴和国民经济与社会发展统计公报; 空气质量数据主要来自中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台; 行政区划矢量数据来源于国家基础地理信息网 1:100 万基础地理信息数据(2021)。

## 3. 研究方法

### 3.1. 指标体系构建

城市韧性指城市系统能够抵抗干扰、自我组织、学习和适应的能力[26], 其实现过程大致包括抵抗(Resistance)、恢复(Recovery)和适应(Adaptation)三个阶段[9] [27] [28], 每一阶段表现出的韧性特征、发展逻辑及系统要素构成各有不同但又紧密联系, 是城市应对风险冲击的一种积极响应。

城市韧性的演变过程具有四个特征, 即稳定性、效率性、冗余性和适应性。这四类特征各自独立而又能够流畅衔接, 且阐释了一个韧性城市的全部发展过程[29] [30] [31]。1) 稳定性: 指系统在遭受扰动时, 具有一定的缓冲能力以保持系统的相对完整及正常运作, 是城市韧性的基础; 2) 效率性: 指城市系统受到冲击后迅速调整, 确保关键的基本功能充分快速恢复的能力; 3) 冗余性: 指系统具有多个相同功能的组成要素, 以增加系统的可靠性, 来抵抗外部扰动及变化; 4) 适应性: 指系统从历次冲击或扰动中, 汲取有效的应对措施, 以应对未来外界环境变化的能力。适应性越强可在一定程度上提高城市在下一周期中的稳定性和效率性, 这正是韧性与脆弱性最为不同的地方, 也是韧性的核心特征。值得注意的是, 在这一过程中, 由于城市自然禀赋、经济基础、管理水平等的差异性, 导致不同城市韧性的演进过程出现分异。

在构成要素方面,城市作为一个复杂的巨系统,不仅仅是建筑群的简单集合,人类的经济活动和信息流通也是其重要组成部分,将个别城市功能视为其子系统,是一种更深刻和全面地揭示城市问题潜在价值的视角[32]。因此,一个城市可以被视为一个类似于有机系统的 SoS [33],通过将单独运行良好的城市功能整体捆绑在一起,可以提高城市效率。根据 SoS 理论描述,本文将城市大系统理解为物理环境小系统、经济社会小系统和信息科技小系统的协同综合体,其中物理环境系统包括自然环境、基础设施、建筑等;经济社会系统是指人及人类活动所组成的空间,包括经济、文化、教育、医疗等;信息科技系统是指各类信息流相互交织作用,包括人们之间的沟通信息、互联网信息等。最终,城市综合韧性由各子系统指标耦合而成。

本文将城市韧性演变过程的四类特征和城市韧性的构成要素作为韧性评价的基本理论框架,并借鉴 PSR 模型的分析方法[34] [35],将城市实现韧性的三个过程分别对应于压力、状态和响应三个阶段,以三个阶段所表现出的城市韧性特征为核心,参考相关文献[13] [20] [21] [36],并根据指标选取原理,依托 SoS 理论,从物理、社会和信息 3 个子系统选取 28 个指标,构建了城市韧性评价指标体系(表 1)。之所以选取 PSR 模型,主要是因为城市系统发展中的问题、多维主体和不同指标间的多元反馈关系与 PSR 模型的内在逻辑一致。

**Table 1.** Urban resilience evaluation index system  
**表 1.** 城市韧性评价指标体系

韧性特征	子系统	对应阶段	指标	指标编号	指标方向
稳定性 C1	物理环境系统	S	人均道路面积(平方米)	C11	正向
		S	供水总量(万立方米)	C12	正向
		S	AQI(优良)天数占比(%)	C13	正向
		P	人口密度(人/平方千米)	C14	负向
	经济社会系统	P	城镇登记失业率(%)	C15	负向
		S	人均地区生产总值(元)	C16	正向
		S	每万人互联网用户数(户)	C17	正向
		S	每万人在校大学生数(人)	C18	正向
效率性 C2	物理环境系统	R	建成区排水管道密度(千米/平方千米)	C21	正向
		R	污水处理厂集中处理率(%)	C22	正向
		S	建成区绿化覆盖率(%)	C23	正向
	经济社会系统	R	每万人拥有医院床位数(张)	C24	正向
		S	地区生产总值增长率(%)	C25	正向
		S	移动电话年末用户数(万户)	C26	正向
		R	科学技术支出占公共财政预算支出比重(%)	C27	正向
冗余性 C3	物理环境系统	S	人均公园绿地面积(平方米)	C31	正向
		S	每万人拥有公交车数(辆)	C32	正向
	经济社会系统	R	城镇职工基本养老保险参保人数(人)	C33	正向
		S	第三产业占地区生产总值比重(%)	C34	正向
		S	城镇人均可支配收入(元)	C35	正向
		S	普通高等学校数(所)	C36	正向
		S	每百人公共图书馆藏书量(册)	C37	正向

Continued

适应性 C4	物理环境系统	S	公路货运量(万吨)	C41	正向
		S	固定资产投资增速(%)	C42	正向
	经济社会系统	S	外贸依存度(%)	C43	负向
		R	专利授权数(件)	C44	正向
	信息科技系统	R	教育支出占公共财政预算支出比重(%)	C45	正向
		S	电信业务总量(万元)	C46	正向

### 3.2. 分析方法

#### 3.2.1. 权重确定

本文采用主客观组合赋权法,即基于最小鉴别信息熵原理构建 ANP 法与 CRITIC 法的组合赋权模型,既兼顾决策者对属性的偏好,又力争减少赋权的主观随意性,使决策结果更加真实、客观。

##### 1) 网络分析法

网络分析法(Analytic Network Process, ANP)是在层次分析法的基础上进行优化的一种更全面,更贴合实际的决策方法。由于 ANP 求解过程中矩阵数量多且计算复杂度高,本文借助 Super Decisions 软件来辅助计算,具体实施步骤如下:

① 构建 ANP 结构图。首先对评价决策的问题进行全面、完整的描述,再以识别的目标和准则为导向,辨析各指标的内涵与意义,判断指标间是否存在相互影响及支配关系,从而建立城市韧性评价的 ANP 网络结构图(图 2)。

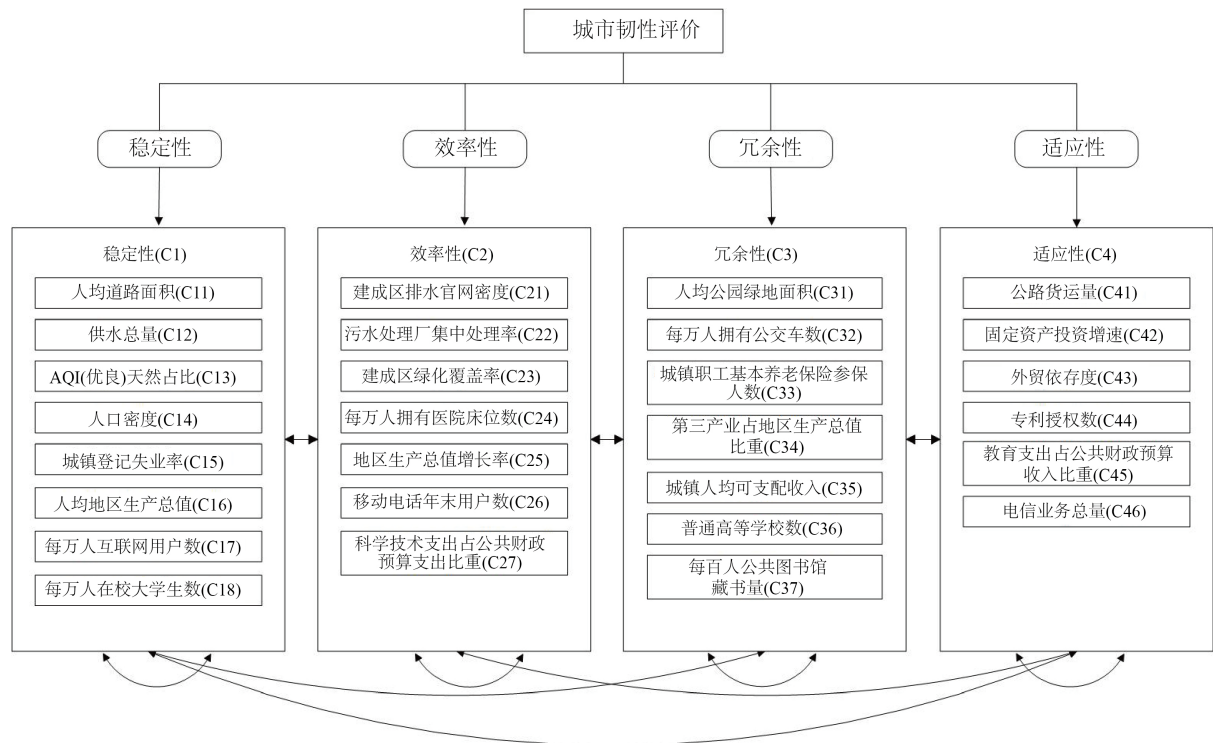


Figure 2. Structure of ANP for urban resilience assessment index

图 2. 城市韧性评估指标 ANP 结构图

② 确定判断矩阵。在创建网络结构模型以后,采用九分度法将具有依赖性和反馈关系的元素或元素组成对进行比较,以构造判断矩阵。

③ Super Decisions 软件建模运算。通过[Cluster Comparisons]命令将已构建的各指标项的判断矩阵分别输入模型并进行一致性检验,在此基础上使用[Unweighted Super Matrix]、[Weighted Super Matrix]和[Limit Matrix]命令得到未加权超矩阵、加权超矩阵和极限矩阵,最后通过[Priorities]命令得到各项指标的权重。

2) CRITIC 权重法

CRITIC (Criteria Importance Though Intercriteria Correlation)权重法是一种用于处理多属性决策的客观赋权法,其优点在于计算各指标间对比强度的同时考虑其冲突性,能够消除相关性较强的指标的影响,减少指标之间的信息重叠,有利于增强评价结果可信度[37]。具体步骤如下:

设有  $n$  个待评价的对象,  $m$  项评价指标  $x_j, j=1,2,\dots,m$ ,  $x_{ij}$  为第  $i$  个待评对象关于评价指标  $x_j$  的评价值,  $i=1,2,\dots,n$ 。

① 对各评价指标进行标准化处理:

正向指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (1)$$

负项指标:

$$y_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (2)$$

② 指标变异性计算

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}}, i \neq j \quad (3)$$

③ 指标冲突性计算

$$r_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^n (y_{hi} - \bar{y}_i)(y_{hj} - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n (y_{hi} - \bar{y}_i)^2 \sum_{h=1}^n (y_{hj} - \bar{y}_j)^2}} \quad (4)$$

式(4)中,  $r_{ij}$  为第  $i$  项指标和第  $j$  项指标间的相关系数,  $y_{hi}$  和  $y_{hj}$  为第  $h$  个评价对象的第  $i$  项指标和第  $j$  项指标的值,  $\bar{y}_i$  和  $\bar{y}_j$  为  $n$  个对象中第  $i$  项指标和第  $j$  项指标的均值。

第  $j$  项指标与其他指标的冲突性指标  $T_j$  为

$$T_j = \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}), i \neq j \quad (5)$$

④ 指标信息量计算

$$G_j = \sigma_j \times T_j, i \neq j, j=1,2,\dots,m \quad (6)$$

⑤ 指标权重计算

$$w_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^m G_j}, j=1,2,\dots,m \quad (7)$$

## 3) 组合权重

ANP 法计算的权重记为  $w_1$ ，CRITIC 法计算的权重记为  $w_2$ ，最终计算结果见表 2。

目标函数建立如下：

$$\min F = \sum_{i=1}^m w(i) \ln \frac{w(i)}{w_1(i)} + \sum_{i=1}^m w(i) \ln \frac{w(i)}{w_2(i)} \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m w(i) = 1, w(i) > 0$$

采用拉格朗日乘子法求最小值，可得：

$$w(i) = \frac{[w_1(i)w_2(i)]^{0.5}}{\sum_{i=1}^m [w_1(i)w_2(i)]^{0.5}} \quad (9)$$

**Table 2.** Calculation results of weights

**表 2.** 权重计算结果

一级指标	二级指标	编号	ANP 权重	CRITIC 权重	综合权重
稳定性 C1	人均道路面积(平方米)	C11	0.0212	0.0389	0.0304
	供水总量(万立方米)	C12	0.0209	0.0265	0.0248
	AQI(优良)天数占比(%)	C13	0.0521	0.0540	0.0560
	人口密度(人/平方千米)	C14	0.0789	0.0575	0.0711
	城镇登记失业率(%)	C15	0.0407	0.0487	0.0470
	人均地区生产总值(元)	C16	0.0928	0.0234	0.0492
	每万人互联网用户数(户)	C17	0.0401	0.0319	0.0378
	每万人在校大学生数(人)	C18	0.0761	0.0446	0.0616
效率性 C2	建成区排水管道密度(千米/平方千米)	C21	0.0384	0.0374	0.0400
	污水处理厂集中处理率(%)	C22	0.0302	0.0392	0.0364
	建成区绿化覆盖率(%)	C23	0.0138	0.0187	0.0170
	每万人拥有医院床位数(张)	C24	0.0219	0.0330	0.0284
	地区生产总值增长率(%)	C25	0.0488	0.0336	0.0428
	移动电话年末用户数(万户)	C26	0.0202	0.0302	0.0261
	科学技术支出占公共财政预算支出比重(%)	C27	0.0496	0.0313	0.0416
冗余性 C3	人均公园绿地面积(平方米)	C31	0.0209	0.0407	0.0308
	每万人拥有公交车数(辆)	C32	0.0056	0.0371	0.0152
	城镇职工基本养老保险参保人数(人)	C33	0.0244	0.0241	0.0256
	第三产业占地区生产总值比重(%)	C34	0.0279	0.0525	0.0404
	城镇人均可支配收入(元)	C35	0.0149	0.0377	0.0250
	普通高等学校学校数(所)	C36	0.0320	0.0426	0.0390
	每百人公共图书馆藏书量(册)	C37	0.0208	0.0143	0.0182



Continued

适应性 C4	公路货运量(万吨)	C41	0.0223	0.0272	0.0260
	固定资产投资增速(%)	C42	0.0406	0.0355	0.0401
	外贸依存度(%)	C43	0.0047	0.0560	0.0171
	专利授权数(件)	C44	0.0565	0.0219	0.0372
	教育支出占公共财政预算支出比重(%)	C45	0.0472	0.0426	0.0474
	电信业务总量(万元)	C46	0.0364	0.0191	0.0279

### 3.2.2. VIKOR 韧性评价

多准则优化和折衷解决方法(VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, VIKOR)是一种基于理想解的典型的多属性、多准则折衷评价与决策方法, 通过该方法得到的优选方案最接近理想方案, 能够将群体效益最大化, 将反对意见的个别遗憾值最小化, 使决策更具合理性[38]。

在城市韧性的 VIKOR 评价模型中,  $A_i (i=1,2,\dots,m)$  代表被度量的黄土高原地区城市,  $m=40$ ;  $B_j (j=1,2,\dots,n)$  代表城市韧性度量指标,  $n=28$ ,  $X_{ij}$  代表每个指标在各城市对应的指标归一化值, 具体计算步骤如下:

- ① 对各指标进行归一化处理

$$X_{ij} = \frac{x}{\sqrt{\sum x_i^2}} \quad (10)$$

- ② 确定每个样本城市对应各个指标的正理想解( $X^+$ )与负理想解( $X^-$ )

$$X_i^+ = \max_j X_{ij} \quad (11)$$

$$X_i^- = \min_j X_{ij} \quad (12)$$

式(11)和(12)中,  $X_i^+$  和  $X_i^-$  分别表示正向指标对应的正负理想解, 若为负向指标, 则正负理想解正好相反。

- ③ 确定评价城市的群体效用值(Group Utility Valve)  $S_j$  和个体遗憾值(Individual Regretvalue)  $R_j$ , 其中  $w_i$  是城市韧性度量指标的权重, 通过 ANP-CRITIC 组合赋权法获得。

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \frac{X_i^+ - X_{ij}}{X_i^+ - X_i^-} \quad (13)$$

$$R_j = \max_i w_i \frac{X_i^+ - X_{ij}}{X_i^+ - X_i^-} \quad (14)$$

- ④ 确定评价城市的折衷值  $Q_j$ , 其中  $v$  是调节系数, 通常取 0.5。

$$Q_j = v \frac{S_j - S^-}{S^+ - S^-} + (1-v) \frac{R_j - R^-}{R^+ - R^-} \quad (15)$$

- ⑤ 计算城市韧性指数( $U_R$ ),  $U_R$  的值在 0 至 1 之间, 值越大表明城市韧性越高。

$$U_R = 1 - Q \quad (16)$$

### 3.2.3. 障碍度模型

运用障碍度模型对指标进行障碍量化, 有利于找出影响研究目标发展的关键因素[6] [20]。依据前文

构建的韧性评价指标体系,将 28 个指标以 SoS 框架下的三个子系统为准则进行归类,以此计算各准则层及指标层的障碍度。具体公式如下:

$$I_{ij} = 1 - y_{ij} \quad (17)$$

$$O_j = I_{ij} W_j \sum_{j=1}^n I_{ij} W_j \cdot 100\% \quad (18)$$

各准则层的障碍度  $U_{ij}$  :

$$U_{ij} = \sum O_j \quad (19)$$

式中:  $y_{ij}$  为第  $i$  个研究单元第  $j$  项指标的标准化值。  $I_{ij}$  为指标偏离度,表示单项指标  $y_{ij}$  与最优目标值 1 之间的差距。  $W_j$  表示因子贡献度,指第  $j$  项指标对城市韧性的影响程度,即第  $j$  项指标的权重。  $O_j$  代表障碍度,表示第  $j$  项指标对城市韧性的障碍程度。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 黄土高原城市韧性的时序演化

#### 4.1.1. 城市综合韧性时序演化特征

总体而言,2011~2020 年黄土高原地区的城市韧性指数整体呈上升趋势(图 3)。韧性指数从 0.3795 上升到 0.4195,表明区域的整体韧性水平有所提高。韧性的变异系数由 0.5187 下降至 0.4024 (图 3),表明全区范围内城市韧性的空间异质性降低,发展逐步趋于均衡。

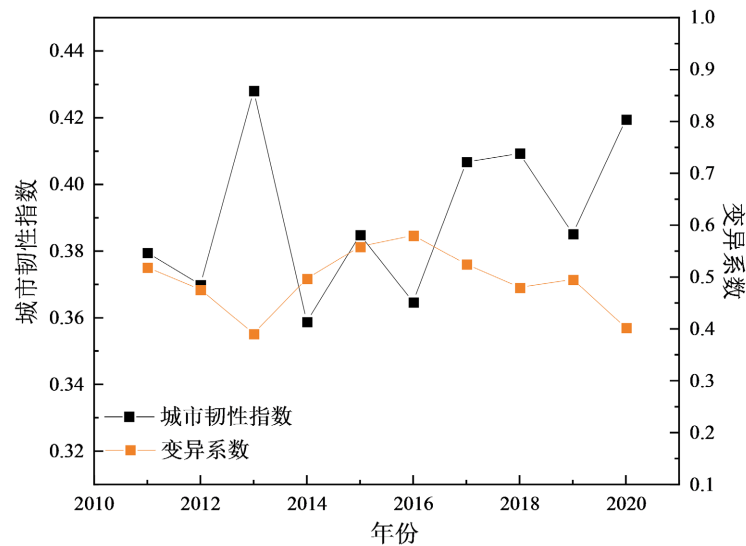


Figure 3. Urban resilience index and coefficient of variation in the Loess Plateau (2011~2020)

图 3. 黄土高原地区城市韧性指数及变异系数(2011~2020)

从市级尺度来看(图 4),各市的城市韧性水平变化趋势各不相同。有 33 个城市(占比 82.5%)呈现总体上升趋势,其中,天水、固原、咸阳、海东和乌兰察布的上升趋势最为明显,年均增速均超过 10%。其余 7 个(占比 17.5%)城市的韧性水平则表现出不同程度的下降趋势,其中临汾、呼和浩特和太原的降速最快,分别为-9.570%、-3.669%和-3.434%。



根据四个维度特征的变异系数变化来看(图 6), 10 年间稳定性的变异系数呈波动下降的态势, 由 0.5127 下降至 0.3934, 不均衡程度逐渐减小, 其余三个维度的变异系数较 2011 年均有所上升, 说明城市之间的效率性、冗余性和适应性的差异逐渐增大。

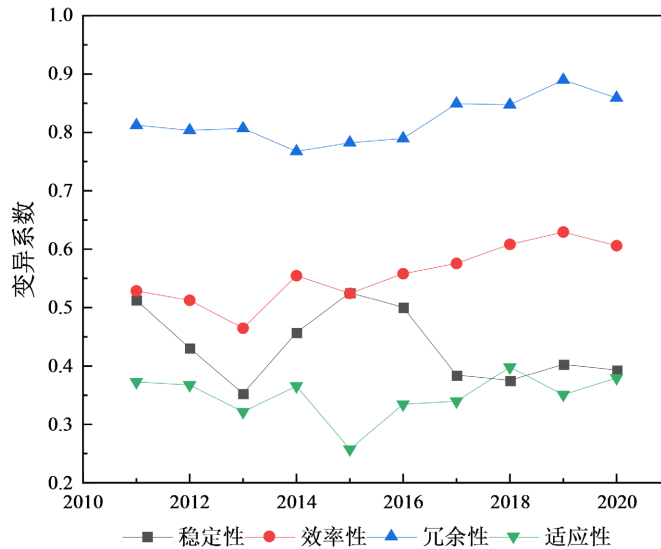
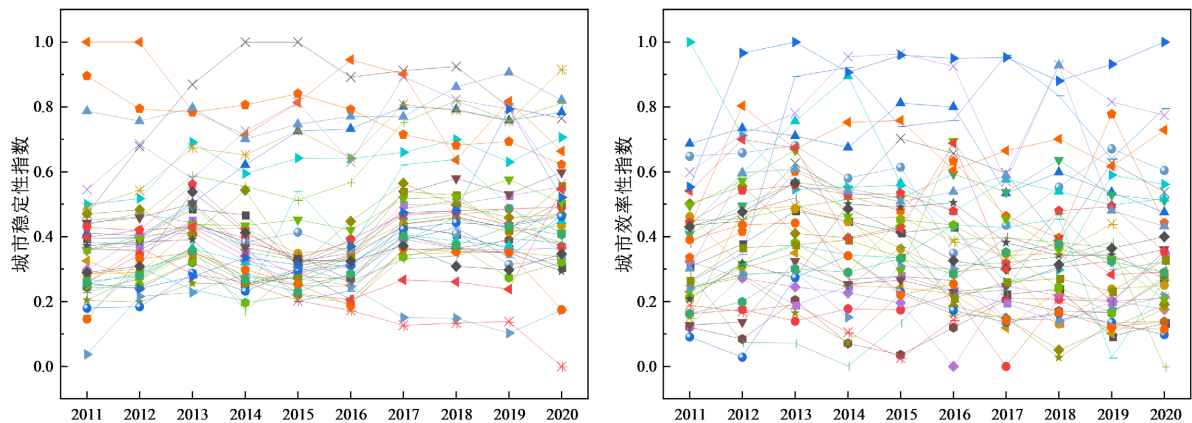


Figure 6. Coefficients of variation of four characteristic dimensions of urban resilience in the Loess Plateau (2011~2020)

图 6. 黄土高原地区四个特征维度韧性的变异系数(2011~2020)

分城市来看(图 7), 10 年间天水市的稳定性增幅最大, 由 2011 年的 0.0371 上升至 2020 年的 0.1731, 表明天水市水利、信息等基础设施进一步完善, 经济综合实力有一定程度的提高; 洛阳市的效率性提升最明显, 增幅达到 2.04 倍, 作为河南省的副中心城市, 随着洛阳都市圈建设全面启动, 洛阳在全国全省发展大局中的地位和作用更加凸显, 城市发展加快; 咸阳市的冗余性增幅最大, 达到 82.63%, 这与其区位优势密不可分——受到临近西安市的辐射带动作用, 科技创新和产业发展颇具成效; 鄂尔多斯市在适应性维度提升最显著, 指数由 2011 年的 0.1500 上升到 2020 年的 0.4343, 这受益于鄂尔多斯市实施创新驱动发展战略以及推进“科技兴蒙”行动, 科技创新支撑作用凸显。



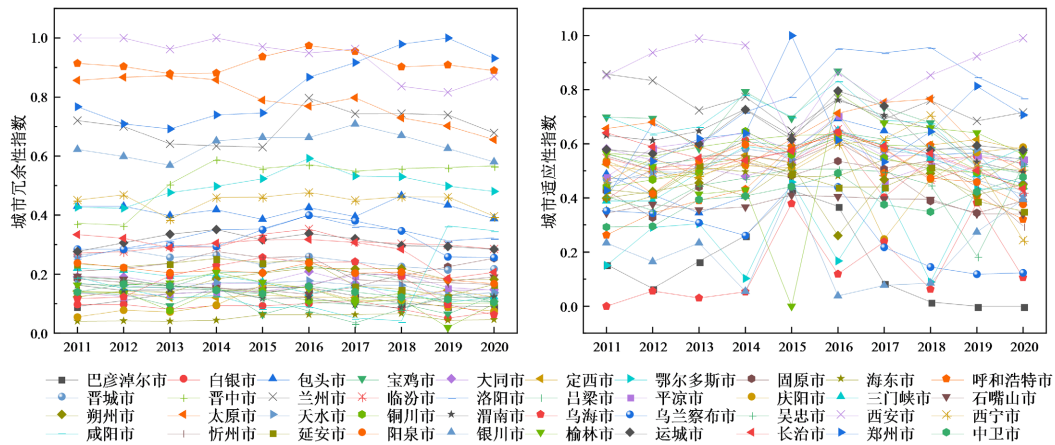
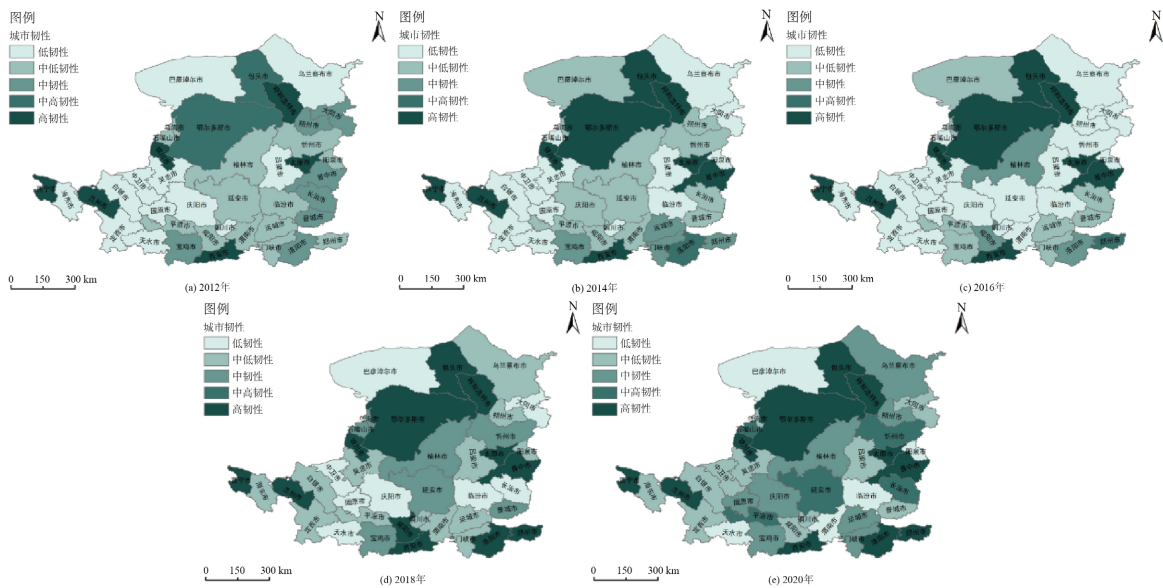


Figure 7. Index of four characteristic dimensions of urban resilience in the Loess Plateau (2011~2020)  
图 7. 黄土高原地区城市韧性四个特征维度指数(2011~2020)

## 4.2. 黄土高原城市韧性的空间格局演化

### 4.2.1. 城市综合韧性空间格局演化

为了反映城市韧性水平的空间格局及其变化,以偏离城市平均韧性(0.3907)的百分比范围划分韧性等级(表 3),将研究区内各城市的韧性指数划分为高韧性、中高韧性、中韧性、中低韧性和低韧性五类(图 8)。其中,高韧性的城市数量逐年增多,10年间从 7 个上升到 11 个,城市类型多为省会城市;中高韧性城市则紧邻高韧性城市分布;中韧性城市数量逐年增多,由区域中部向四周扩散分布;低韧性水平的城市则由 12 个下降到 5 个,包括中低韧性水平在内的城市占比逐渐减少,由连片分布变为零星分布。总体来看,中等及以上水平的城市在 2020 年达到 24 个,占比超过 50%,表明 2011~2020 年间黄土高原地区的城市韧性水平整体处于稳步提升状态。



注:受篇幅所限,仅展示偶数年份城市韧性水平分布图(下同)。

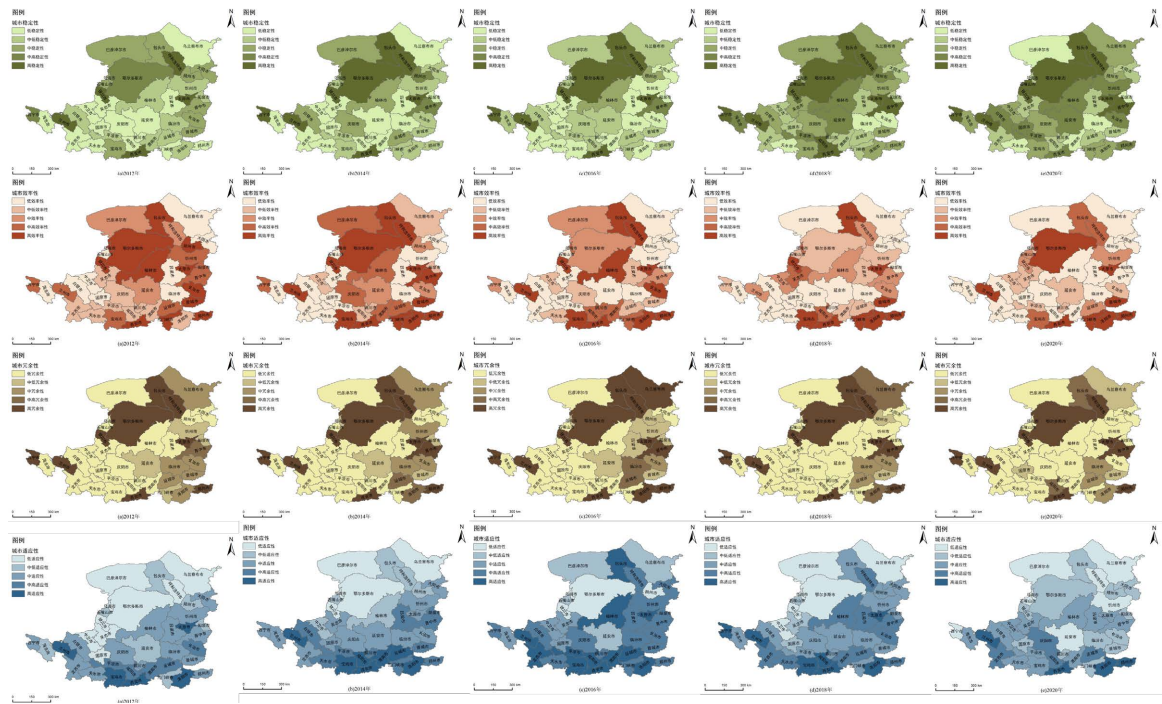
Figure 8. Spatial pattern and evolution of urban resilience levels in the Loess Plateau  
图 8. 黄土高原地区城市韧性水平空间格局及演化

**Table 3.** Metric levels of urban resilience  
**表 3.** 城市韧性的度量等级

韧性等级	低韧性	中低韧性	中韧性	中高韧性	高韧性
偏离比率	(-30%及以下)	(-30%, -10%)	[-10%, +10%)	[+10%, +30%)	(+30%及以上)

**4.2.2. 城市韧性四种特征的空间格局演化**

与综合韧性相同，分别以偏离城市平均稳定性(0.4403)、平均效率性(0.3945)、平均冗余性(0.3009)和平均适应性(0.5109)的百分比范围划分城市韧性各特征维度等级，并绘制空间格局演化图(图 9)。



**Figure 9.** Spatial pattern and evolution of four characteristics of urban resilience in the Loess Plateau  
**图 9.** 黄土高原地区城市韧性四种特征的空间格局及演化

总体来说，稳定性、效率性、冗余性和适应性水平都具有较强的空间连接性，但各维度的空间分布格局又存在差异。从稳定性来看，中高及高稳定性城市分布从省会城市逐渐向区域中部扩散，至 2020 年，区域内中等及以上稳定性的城市占比 65%，多集中连片分布在中部地区；从效率性来看，10 年间低效率性城市的数量有所增加，多分布于区域中部，高效率性城市为省会城市和其紧邻城市；高冗余性城市零星分布，且中西部地区城市的冗余性水平较低；城市适应性水平则呈现南高北低的空间分布格局，究其原因在于，巴彦淖尔、乌兰察布和鄂尔多斯等北部城市的外贸依存度较高，对经济适应性水平的影响较大。

**4.3. 黄土高原城市韧性的障碍因素**

**4.3.1. 准则层障碍度**

从障碍度的强度变化来看(图 10)，2011~2020 年各准则层障碍度排序基本稳定，从高到低依次为：信息科技系统障碍度 > 经济社会系统障碍度 > 物理环境系统障碍度，这表明信息科技因素是阻碍黄土高原地区城市韧性提升的关键因素。从障碍度时序演化趋势来看，10 年间各准则层障碍度均呈现小幅波

动, 物理环境系统障碍度先上升后下降, 经济社会系统障碍度先下降后上升, 信息科技系统障碍度在较高水平上保持稳定, 进一步说明信息科技因素始终对黄土高原地区城市韧性的提升具有较强的阻碍作用。

从障碍类型来看, 根据最大障碍因子的表现差异(表 4)可以将区域所有城市分类为信息科技障碍型、经济社会障碍型和均衡障碍型 3 类。其中, 信息科技障碍型城市占比较大。例如, 晋城、朔州、平凉、包头等城市为典型的信息科技障碍型, 其信息科技系统障碍度远高于其物理环境和经济社会系统障碍度。西安、郑州为典型的经济社会障碍型, 其经济社会系统障碍度高于其他两项。太原市的各准则障碍强度差别较小, 为均衡障碍型, 即物理环境因素、经济社会因素和信息科技因素对其城市韧性的影响程度相当。此外, 还存在两种城市障碍类型转变的情况, 如兰州由均衡障碍型向信息科技障碍型转变。因此, 对于黄土高原地区的韧性提升路径, 要因地制宜、分类施策。

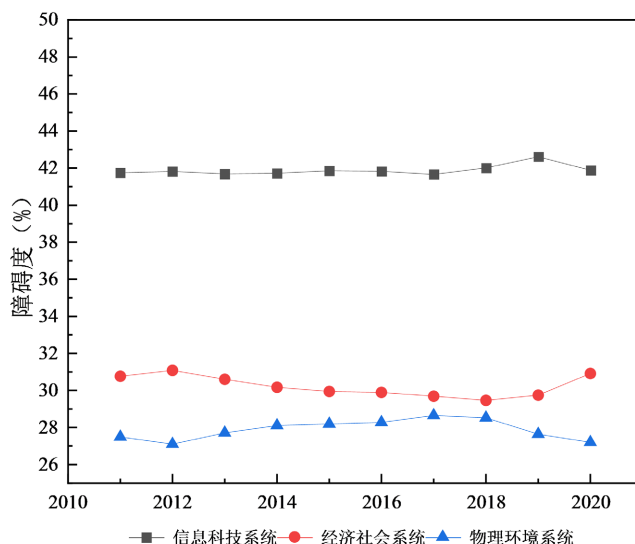


Figure 10. Evolution of obstacle factors of urban resilience criterion layer in Loess Plateau (2011~2020)

图 10. 黄土高原地区城市韧性准则层障碍因子演变(2011~2020)

Table 4. Obstacle factors of urban resilience criterion layer in Loess Plateau

表 4. 黄土高原地区城市韧性准则层障碍度

城市	2012			2016			2020		
	信息科技	经济社会	物理环境	信息科技	经济社会	物理环境	信息科技	经济社会	物理环境
巴彦淖尔市	45.06%	29.85%	25.09%	45.83%	33.09%	21.08%	43.07%	32.84%	24.09%
白银市	41.83%	28.62%	29.55%	42.79%	27.59%	29.62%	43.44%	29.79%	26.77%
包头市	43.05%	26.11%	30.84%	46.15%	27.15%	26.70%	43.88%	28.13%	27.99%
宝鸡市	41.34%	32.36%	26.29%	41.37%	30.78%	27.85%	40.06%	31.92%	28.02%
大同市	41.19%	33.04%	25.77%	41.59%	31.55%	26.86%	43.66%	30.36%	25.97%
定西市	42.72%	31.35%	25.93%	41.89%	30.36%	27.74%	43.50%	30.18%	26.32%
鄂尔多斯市	53.94%	26.56%	19.51%	53.32%	26.27%	20.41%	55.64%	27.09%	17.26%
固原市	42.32%	31.16%	26.52%	43.40%	30.79%	25.81%	45.92%	31.02%	23.06%
海东市	42.78%	27.87%	29.35%	43.40%	26.52%	30.07%	43.07%	29.91%	27.03%
呼和浩特市	39.42%	29.93%	30.65%	41.51%	29.51%	28.99%	38.43%	32.18%	29.39%
晋城市	46.08%	27.05%	26.87%	44.54%	24.37%	31.10%	45.84%	26.31%	27.85%
晋中市	43.44%	32.01%	24.55%	38.57%	32.52%	28.90%	41.40%	31.86%	26.73%

Continued

兰州市	36.36%	32.23%	31.41%	37.33%	31.20%	31.48%	37.07%	34.13%	28.80%
临汾市	41.30%	31.12%	27.59%	40.72%	30.01%	29.27%	42.75%	30.33%	26.93%
洛阳市	39.90%	34.36%	25.73%	40.29%	30.40%	29.31%	37.07%	33.45%	29.48%
吕梁市	40.07%	32.20%	27.73%	42.45%	29.07%	28.49%	43.98%	30.85%	25.17%
平凉市	43.66%	29.87%	26.48%	44.22%	28.20%	27.57%	45.41%	29.23%	25.36%
庆阳市	41.70%	33.88%	24.42%	43.53%	29.01%	27.46%	42.79%	31.84%	25.38%
三门峡市	41.62%	32.61%	25.77%	39.79%	29.69%	30.52%	39.72%	31.99%	28.29%
石嘴山市	42.26%	30.90%	26.84%	42.49%	30.88%	26.63%	42.68%	31.21%	26.11%
朔州市	46.07%	28.56%	25.37%	43.68%	26.38%	29.94%	45.41%	27.70%	26.89%
太原市	34.38%	33.12%	32.50%	34.44%	31.80%	33.75%	30.68%	35.14%	34.18%
天水市	40.24%	34.21%	25.56%	39.99%	33.42%	26.59%	40.05%	33.93%	26.01%
铜川市	40.79%	32.42%	26.79%	41.08%	31.39%	27.53%	42.74%	30.75%	26.51%
渭南市	43.12%	28.45%	28.44%	41.79%	27.61%	30.60%	42.58%	28.57%	28.85%
乌海市	44.37%	28.55%	27.08%	42.94%	30.71%	26.35%	42.54%	32.47%	24.98%
乌兰察布市	41.56%	30.34%	28.10%	46.11%	31.47%	22.42%	45.32%	31.91%	22.77%
吴忠市	44.17%	31.21%	24.61%	42.78%	29.80%	27.42%	43.54%	30.59%	25.87%
西安市	34.98%	38.70%	26.32%	29.04%	38.23%	32.73%	28.31%	38.62%	33.07%
西宁市	40.65%	27.32%	32.03%	43.91%	25.22%	30.87%	44.35%	25.97%	29.69%
咸阳市	38.61%	33.80%	27.59%	40.78%	27.86%	31.36%	39.86%	31.11%	29.03%
忻州市	42.29%	29.35%	28.36%	43.14%	30.14%	26.72%	47.54%	28.04%	24.42%
延安市	40.43%	31.21%	28.36%	41.77%	28.67%	29.56%	45.00%	27.48%	27.52%
阳泉市	40.03%	33.56%	26.42%	39.44%	31.30%	29.26%	41.66%	30.65%	27.69%
银川市	43.63%	29.65%	26.72%	42.60%	28.21%	29.19%	41.36%	29.51%	29.13%
榆林市	41.97%	30.97%	27.06%	43.69%	29.71%	26.59%	42.73%	30.05%	27.21%
运城市	43.60%	30.65%	25.75%	42.47%	28.47%	29.06%	42.31%	29.41%	28.28%
长治市	42.61%	30.84%	26.55%	40.62%	29.99%	29.39%	43.74%	29.50%	26.76%
郑州市	34.51%	36.10%	29.39%	33.63%	36.22%	30.15%	22.70%	38.55%	38.75%
中卫市	44.73%	31.25%	24.02%	44.06%	30.19%	25.75%	43.62%	31.88%	24.50%

注：受篇幅所限，仅展示 2012、2016 及 2020 年城市韧性障碍度结果。

#### 4.3.2. 指标层障碍因子

对城市韧性的指标层障碍因子进行分析，筛选出前五位的障碍因子并进行频次统计，以探究区域城市韧性提升的内部源头。考虑到 2011~2020 年数据样本量较大，为便于探究研究期内指标层障碍因子的变化趋势，选取 2012、2016 及 2020 年三个时间节点的障碍度进行分析(如表 5)。

2012 年，在区域层面，C16、C18、C44、C36、C27 为出现频次前五的指标，分别出现 36 次、36 次、28 次、27 次、25 次。表明经济发展水平不高、人才储备与供给能力较低和科技创新不足成为阻碍该时期城市韧性提升的主要因素，同时人口密度、城镇登记失业率对韧性发展具有一定的抑制作用。在地级市层面，大部分城市的主要障碍因子与区域整体态势相一致，只有少部分城市表现出差异性，如包头和西宁的城市韧性水平受空气质量影响较大，临汾、石嘴山、太原和兰州等市还受到建成区排水管网密度的制约。

2016 年，就整个区域而言，C16、C18、C36、C27、C44 分别出现 36 次、35 次、29 次、29 次、28 次，主要障碍因子较 2012 年保持不变，经济社会的发展水平不高、科技创新不足、人才和教育资源相对



**Table 5.** Ranking of barriers to urban resilience in the Loess Plateau  
**表 5.** 黄土高原地区城市韧性障碍因子排序

城市	2012 年指标排序					2016 年指标排序					2020 年指标排序				
巴彦淖尔市	C18	C16	C27	C36	C44	C18	C16	C27	C15	C36	C18	C15	C16	C27	C25
白银市	C18	C16	C36	C27	C34	C18	C16	C27	C36	C44	C18	C16	C27	C36	C44
包头市	C18	C13	C15	C44	C36	C18	C15	C44	C36	C45	C18	C15	C36	C44	C27
宝鸡市	C18	C16	C34	C36	C44	C18	C16	C34	C36	C44	C18	C16	C36	C44	C25
大同市	C18	C14	C16	C27	C36	C18	C14	C16	C27	C36	C18	C16	C14	C36	C27
定西市	C18	C16	C36	C27	C17	C18	C16	C27	C36	C44	C18	C16	C27	C36	C44
鄂尔多斯市	C18	C36	C44	C17	C27	C18	C27	C45	C36	C44	C18	C25	C36	C44	C27
固原市	C18	C16	C15	C27	C36	C18	C16	C15	C27	C36	C18	C16	C27	C36	C44
海东市	C18	C16	C27	C36	C17	C18	C27	C36	C44	C16	C18	C16	C27	C36	C44
呼和浩特市	C16	C44	C27	C15	C45	C44	C27	C14	C16	C15	C16	C14	C25	C15	C27
晋城市	C18	C16	C36	C44	C17	C18	C16	C27	C36	C44	C18	C16	C36	C44	C27
晋中市	C18	C16	C14	C44	C27	C16	C27	C18	C44	C14	C16	C25	C27	C44	C18
兰州市	C14	C16	C44	C21	C27	C16	C44	C27	C14	C46	C16	C25	C14	C27	C44
临汾市	C18	C16	C21	C27	C44	C18	C14	C16	C27	C21	C18	C14	C16	C27	C44
洛阳市	C18	C16	C15	C14	C44	C18	C16	C15	C13	C36	C18	C16	C15	C36	C25
吕梁市	C18	C14	C16	C36	C44	C18	C16	C36	C27	C44	C18	C16	C27	C36	C44
平凉市	C18	C16	C27	C36	C44	C18	C16	C27	C36	C44	C18	C16	C27	C36	C44
庆阳市	C18	C16	C36	C34	C44	C18	C16	C27	C36	C44	C18	C16	C27	C36	C44
三门峡市	C18	C14	C16	C36	C44	C18	C16	C36	C44	C21	C18	C36	C16	C44	C21
石嘴山市	C18	C16	C21	C27	C36	C18	C16	C21	C36	C44	C18	C21	C16	C36	C15
朔州市	C18	C36	C44	C27	C34	C18	C27	C36	C44	C25	C18	C27	C16	C44	C36
太原市	C16	C44	C21	C15	C11	C16	C44	C21	C15	C25	C16	C25	C21	C45	C44
天水市	C18	C14	C16	C27	C44	C18	C14	C16	C27	C44	C18	C16	C14	C15	C27
铜川市	C18	C16	C27	C36	C34	C18	C16	C36	C27	C44	C18	C16	C27	C36	C44
渭南市	C18	C16	C27	C36	C44	C18	C16	C13	C36	C27	C18	C16	C36	C27	C44
乌海市	C18	C15	C34	C45	C36	C18	C36	C14	C44	C45	C18	C14	C36	C15	C45
乌兰察布市	C18	C16	C27	C15	C36	C18	C16	C27	C15	C36	C18	C16	C27	C15	C36
吴忠市	C18	C16	C15	C27	C36	C18	C16	C27	C36	C34	C18	C16	C36	C44	C21
西安市	C14	C16	C27	C44	C15	C16	C14	C13	C45	C15	C16	C15	C18	C14	C25
西宁市	C18	C16	C27	C13	C44	C18	C16	C27	C44	C36	C18	C16	C27	C44	C25
咸阳市	C14	C18	C16	C34	C27	C18	C13	C34	C27	C16	C18	C27	C14	C16	C21
忻州市	C18	C16	C44	C36	C27	C18	C16	C15	C27	C44	C18	C16	C27	C36	C44
延安市	C18	C16	C14	C36	C44	C18	C16	C36	C27	C44	C18	C16	C27	C36	C44
阳泉市	C18	C14	C16	C36	C44	C18	C14	C16	C27	C36	C18	C14	C16	C21	C27
银川市	C16	C18	C15	C45	C44	C16	C45	C15	C18	C44	C18	C16	C15	C44	C21
榆林市	C18	C16	C36	C44	C34	C18	C36	C16	C44	C27	C18	C21	C27	C36	C44
运城市	C18	C16	C14	C27	C44	C18	C16	C27	C44	C36	C18	C16	C27	C44	C36
长治市	C18	C14	C16	C44	C36	C18	C14	C16	C44	C36	C18	C16	C27	C44	C36
郑州市	C14	C16	C44	C18	C17	C14	C16	C45	C27	C11	C14	C16	C25	C45	C21
中卫市	C18	C16	C15	C27	C36	C18	C16	C36	C15	C44	C18	C16	C36	C15	C44

匮乏依然约束着城市韧性提升。各地级市的人均地区生产总值、在校大学生数和科技支出依旧是主要的影响因素，因此，在进一步提升经济实力的同时，还需重视科技创新及教育投入在城市韧性提升中的关键支撑作用。此外，郑州、大同、临汾、天水 and 西安等市的韧性水平持续受到人口密度的制约，咸阳、渭南、西安和洛阳的韧性水平则受空气质量的影响较大，这也表明了快速城镇化所带来的人口膨胀、环境污染等问题对城市韧性的影响较大。

2020年，对于整个地区来说，C16、C18、C27、C44、C36分别出现36次、36次、29次、28次、27次，10年来普通高等学校数和专利授权数这两大障碍因子的影响程度有所减弱，空气质量的障碍度也显著降低，但科技支出和人才储备仍有着较强的制约性，并且地区生产总值增长率的指标障碍度不断提高，成为制约该时期城市韧性发展的又一重要因子。从市级层面来看，部分城市的主要障碍因子发生了转变。如鄂尔多斯、晋中、兰州、太原、呼和浩特和郑州等城市受地区生产总值增长率指标的制约不断增强，说明这些城市的经济增长潜力有待提升。总的来看，该时期地域经济差异性更加显著，积累人力资本和提升科技创新能力仍然是城市韧性提升的关键，社会稳定性层面的城镇登记失业率指标和经济效率性层面的地区生产总值增长率指标的频次显著增多，说明在推进地区经济发展和城镇化过程中，也要重视人口集聚带来的失业问题及经济发展潜力不足的问题。

## 5. 结论与建议

### 5.1. 结论

如何应对各种不确定的风险和挑战成为了当前城市发展中面临的重要课题，韧性理念则为全球城市治理提供了新视角，城市韧性研究也逐渐成为当前学术界的热点。通过参考和借鉴现有研究，本文从指标体系构建、研究方法和研究范围等方面做出优化。指标体系构建层面，综合考虑了城市韧性特征、城市韧性阶段过程和城市系统组成要素来构建指标体系，与现有研究多从单一视角或单一系统构建指标体系相比更加全面，与韧性城市理论的联系更为紧密；研究方法上，本文采取“ANP-CRITIC 主客观组合赋权法”确定权重，弥补了单一赋权法的缺陷，其次选用VIKOR法构建城市韧性评价模型，并依据障碍度模型定量探讨了制约城市韧性提升的各类因素，为城市管理者 and 决策者有针对性地制定城市韧性提升策略提供科学指导；研究对象上，选取经济相对落后且生态环境脆弱的黄土高原地区，填补了现有工作在黄土高原地区城市韧性实证分析方面的空白。相较于已有研究大多集中于国家层面和省级尺度，本文对黄土高原地区40个地级市进行城市韧性时空演变分析，研究尺度更为精细，有助于推动黄土高原地区各城市可持续发展。研究主要结论如下：

第一，2011~2020年黄土高原地区各市在韧性建设方面取得了一定的成就，一定程度上促进了城市的可持续发展。10年间黄土高原地区的城市综合韧性整体呈现良好的上升趋势，各韧性维度变化特征存在差异，稳定性和适应性水平有所提高，效率性先上升后下降，冗余性整体呈现小幅下降态势。

第二，黄土高原地区城市韧性水平分五等且具有空间分布差异。低韧性城市由连片分布转变为零星分布，韧性值较高城市多为省会城市。同时，城市韧性的各特征维度发展不均衡。高稳定性城市集中连片分布在中部地区，而稳定性较低的城市分布在区域边缘；低效率性城市主要分布在区域中部且数量呈上升趋势；高冗余性的城市在区域内分散分布，中西部城市的冗余性普遍较低；适应性水平则呈现“南高北低”的空间分布特征。

第三，研究期内，黄土高原地区的各准则层障碍度强度排序为信息科技空间障碍度 > 经济社会空间障碍度 > 物理环境空间障碍度，这表明信息科技因素是阻碍黄土高原地区城市韧性提升的关键因素。从指标层的障碍度分析得出，科技创新不足、人才储备与供给能力较低、经济发展水平不高和潜力不足是阻碍黄土高原地区城市韧性水平提升的主要障碍因子。此外，区域内40个地级市的障碍因子存在差异，

不同时期障碍因子的制约作用也在不断变化。

## 5.2. 城市韧性提升对策与建议

第一，营造良好的创新环境，增强城市经济实力。创新是经济发展的动力，政府要加强监管和政策落实力度，完善科技成果转化保障体系，健全研发投入增长机制。通过深化东西部科技创新合作，加快在黄土高原具备条件的地区创建国家自主创新示范区、国家技术创新中心等创新载体，以创新驱动推动经济转型发展，降低经济发展对自然资源的依赖程度，走绿色可持续发展道路。

第二，持续加大教育投入，增强当地人才吸引力。人才储备与供给能力较低是阻碍黄土高原地区城市韧性发展的重要障碍因子。为此，黄土高原各城市相关部门要发挥在强化引才措施、提升人才服务等方面的重要作用，完善社会保障制度，优化就业环境，增强人力资源吸引能力。加大教育投资力度，同时加强教育经费投入使用管理，经费使用进一步向薄弱环节倾斜，重视培育科技创新的源头。

第三，有序补齐韧性短板，提升城市联动发展效益。黄土高原地区各省市韧性水平差异明显，制约因素各异，各地应因地制宜，补齐自身短板，推动城市系统协调稳定发展。例如，西安、郑州等国家中心城市及兰州、太原等省会城市应把握国家发展战略契机，通过区域引领作用带动黄土高原地区城市经济快速发展；陕晋蒙三省交界处的资源型城市要加快产业结构优化升级与经济转型进程；甘肃、青海和宁夏的欠发达地区则应重点加强城市间的交流合作，建立跨市的合作协调机制，借鉴较高韧性水平城市的发展经验，结合自身资源禀赋，探索适宜的发展道路。

另需指出的是，城市是一个复杂的动态系统，城市韧性演化研究是涉及自然、社会、经济、政治和文化等综合要素的复杂问题[6]。政策制度、政府决策能力和合作能力、公众参与以及文化等因素对城市韧性的影响不容忽视。因此，开展涵盖政策、制度和文化等因素的综合城市韧性分析，以探索城市系统韧性影响机制，并模拟预测韧性演变趋势是未来研究的重要方向。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(72050001)资助。

## 参考文献

- [1] 孙鸿鹄, 甄峰. 面向日常活动与环境供需矛盾的城市韧性综合评估及空间特征研究——以南京为例[J]. 地理研究, 2022, 41(10): 2697-2711.
- [2] 史晨辰, 朱小平, 王辰星, 等. 韧性城市研究综述与展望——基于城市复杂系统视角[J]. 生态学报, 2023(4): 1-12.
- [3] 周亮, 唐建军, 刘兴科, 等. 黄土高原人口密集区城镇扩张对生境质量的影响——以兰州、西安-咸阳及太原为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 261-270.
- [4] 叶文丽, 杨新军, 吴孔森, 等. 黄土高原社会-生态系统恢复力时空变化特征与影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 912-924.
- [5] 黄晓军, 刘萌萌, 王博. 黄土高原地区县域经济的时空分异特征及其影响因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 569-579.
- [6] 唐宇, 宋永永, 薛东前, 等. 资源型城市经济韧性时空演变与障碍因素——以山西省为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 53-61.
- [7] 杨保清, 李贵才, 刘青. 基于 DPSRC 模型的国际社区社会韧性评价分析——以广州小北 16 个国际社区为例[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(5): 70-75.
- [8] 陶洁怡, 董平, 陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1975-1987.
- [9] 李亚, 翟国方, 顾福妹. 城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J]. 城市发展研究, 2016, 23(6): 113-122.
- [10] 倪晓露, 黎兴强. 韧性城市评价体系的三种类型及其新的发展方向[J]. 国际城市规划, 2021, 36(3): 76-82.

- [11] 邱爱军, 白玮, 关婧. 全球 100 韧性城市战略编制方法探索与创新——以四川省德阳市为例[J]. 城市发展研究, 2019, 26(2): 38-44+73.
- [12] Spaans, M. and Waterhout, B. (2017) Building Up Resilience in Cities Worldwide—Rotterdam as Participant in the 100 Resilient Cities Programme. *Cities*, **61**, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.05.011>
- [13] 李梦杰, 刘德林. 中原城市群城市灾害韧性时空演变及障碍因子研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(9): 144-151.
- [14] 贺山峰, 梁爽, 吴绍洪, 等. 长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变及其关联性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1988-1999.
- [15] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [16] 石龙宇, 郑巧雅, 杨萌, 等. 城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 6016-6029.
- [17] 张悦倩, 刘金龙, 李新春. 长三角城市群城市韧性与新型城镇化的耦合协调研究[J]. 城市问题, 2022(5): 17-27.
- [18] 朱诗尧. 城市抗涝韧性的度量与提升策略研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
- [19] 嵇娟, 陈军飞, 周子月. 江苏省城市洪涝韧性评价及影响因素研究[J]. 水利经济, 2022, 40(4): 48-54+93.
- [20] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 51-61.
- [21] 王璇, 史佳璐, 慈福义. 黄河流域城市群韧性度的时空演化特征[J]. 统计与决策, 2022, 38(5): 70-74.
- [22] 孙久文, 陈超君, 孙铮. 黄河流域城市经济韧性研究和影响因素分析——基于不同城市类型的视角[J]. 经济地理, 2022, 42(5): 1-10.
- [23] 石涛. 黄河流域城市韧性发展水平的时空演进及驱动要素分析[J]. 区域经济评论, 2022(1): 139-149.
- [24] 马蓓蓓, 钟堃, 李海玲. 黄土高原地区城市“社会-经济”系统脆弱性的时空特征与影响因素[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 1-8+2.
- [25] 宋永永, 薛东前, 马蓓蓓, 等. 黄土高原城镇化过程及其生态环境响应格局[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 174-184.
- [26] Ostrom, E. (2004) Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. *Ecological Economics*, **49**, 488-491. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.01.010>
- [27] Bruneau, M. and Reinhorn, A. (2007) Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities. *Earthquake Spectra*, **23**, 41-62. <https://doi.org/10.1193/1.2431396>
- [28] Ouyang, M., Dueñas-Osorio, L. and Min, X. (2012) A Three-Stage Resilience Analysis Framework for Urban Infrastructure Systems. *Structural Safety*, **36-37**, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.12.004>
- [29] Desouza, K.C. and Flanery, T.H. (2013) Designing, Planning, and Managing Resilient Cities: A Conceptual Framework. *Cities*, **35**, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.06.003>
- [30] Wamsler, C., Brink, E. and Rivera, C. (2013) Planning for Climate Change in Urban Areas: From Theory to Practice. *Journal of Cleaner Production*, **50**, 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.008>
- [31] Walker, B. and Salt, D. (2012) Resilience Practice. Island Press, Washington DC.
- [32] Kasai, S., Geoffrey Shen, P., Li, N. and Fang, D. (2015) A System-of-Systems Approach to Understanding Urbanization-State of the Art and Prospect. *Smart and Sustainable Built Environment*, **4**, 154-171. <https://doi.org/10.1108/SASBE-07-2014-0038>
- [33] Eisner, H., Marciniak, J. and Mcmillan, R. (1991) Computer-Aided System of Systems (S2) Engineering. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Charlottesville, 13-16 October 1991, 531-537.
- [34] 焦柳丹, 邓佳丽, 吴雅, 等. 基于 PSR+云模型的城市韧性水平评价研究[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 114-20.
- [35] 牛彦合, 焦胜, 操婷婷, 等. 基于 PSR 模型的城市多灾种风险评估及规划响应[J]. 城市发展研究, 2022, 29(4): 39-48.
- [36] 李雪铭, 刘凯强, 田深圳, 等. 基于 DPSIR 模型的城市人居环境韧性评价——以长三角城市群为例[J]. 人文地理, 2022, 37(1): 54-62.
- [37] Diakoulaki, D., Mavrotas, G. and Papayannakis, L. (1995) Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: The Critic Method. *Computers & Operations Research*, **22**, 763-770. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(94\)00059-H](https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00059-H)
- [38] Sen, D.K., Datta, S. and Mahapatra, S.S. (2016) A TODIM-Based Decision Support Framework for G-Resilient Supplier Selection in Fuzzy Environment. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, **33**, 7917-7927. <https://doi.org/10.1142/S0217595916500330>