

中文引用格式:许慧,叶泽鸿,周启琳,等. 中国核心城市韧性发展预测及动态空间分异研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(3): 179-186.

英文引用格式:XU Hui, YE Zehong, ZHOU Qilin, et al. Resilient prediction and dynamic spatial differentiation of core Chinese mainland cities [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 179-186.

中国大陆核心城市韧性发展预测及 动态空间分异研究*

许慧¹教授, 叶泽鸿¹, 周启琳², 张日芬³

(1 重庆邮电大学 经济管理学院, 重庆 400065; 2 重庆市重大项目服务中心,
重庆 401121; 3 柳州工学院 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545616)

中图分类号: X913.1 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.0075

资助项目: 重庆市社会科学规划中特理论项目(2024ZTZD14); 重庆市教委科学技术研究计划项目重点项目(KJZD-K202400603); 重庆市教育委员会人文社科研究项目(23SKGH463)。

【摘要】 为提高城市治理水平及促进可持续发展, 基于2011—2020年中国大陆25个核心城市(直辖市、省会城市与自治区首府)的面板数据, 通过理想解逼近(TOPSIS)-熵权法分析中国大陆核心城市的韧性测度, 并通过反向传播(BP)神经网络模型预测2026与2029年这些核心城市的韧性情况, 从而对区域板块韧性的动态空间分异情况开展研究。结果表明: 各城市韧性指数标准差在0.180上下波动, 城市间的韧性离散程度相对稳定, 但存在一些城市韧性指数呈逐年下降趋势; 城市韧性预测指数的标准差在2026年降至0.173, 城市间的韧性离散程度降低, 城市韧性差距缩小。在2014、2020、2026和2029年4个时间截面中, 城市韧性空间异质格局演变相对稳定, 城市韧性水平排位如下: 东部地区>中部地区>西部地区>东北地区, 其中, 东部地区的经济及基础设施韧性最高, 中部地区的社会及生态韧性最高。

【关键词】 核心城市; 城市韧性预测; 空间分异格局; 反向传播(BP)神经网络模型; 自然间断点法

Resilient prediction and dynamic spatial differentiation of core Chinese mainland cities

XU Hui¹, YE Zehong¹, ZHOU Qilin², ZHANG Rifen³

(1 School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2 Chongqing Major Projects Service Center, Chongqing 401121, China; 3 School of Civil Engineering and Architecture, Liuzhou Institute of Technology, Liuzhou Guangxi 545616, China)

Abstract: In order to improve urban governance and promote sustainable development, the resilience measurement of core cities in Chinese mainland was analyzed based on panel data from 25 core cities (municipalities directly under the central government, provincial capitals, and regional capitals) between 2011 and 2020. Technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS)-Entropy

Weight Method was applied. The resilience situation for 2026 and 2029 was predicted using a BP neural network model. This research aimed to explore the dynamic spatial differentiation of regional resilience. The results show that the standard deviation of the resilience index across cities fluctuates around 0.180, with the resilience disparity between cities remaining relatively stable. However, some cities show a downward trend in their resilience index year by year. The standard deviation of the predicted resilience index for 2026 decreases to 0.173, indicating a reduction in the resilience disparity between cities and a narrowing of the resilience gap. In the four time points of 2014, 2020, 2026, and 2029, the spatial heterogeneity of urban resilience evolves relatively stably. The urban resilience rankings are as follows: Eastern region > Central region > Western region > Northeastern region. Among them, the economic and infrastructure resilience in the Eastern region is the highest, while the social and ecological resilience in the Central region is the highest.

Keywords: core cities; prediction of urban resilience; spatial heterogeneous pattern; back propagation(BP) neural network; natural intermittent point method

0 引言

城市自形成以来就一直经受着许多因素的冲击和干扰,包括自然灾害与人为灾害^[1]。2002年,宜可城-地方可持续发展协会首次提出“城市韧性”议题,并将其引入城市与防灾研究。2020年11月,我国《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》首次将“韧性城市”纳入国家战略规划体系,建设韧性城市重要性凸显。本研究选取我国大陆直辖市、省会城市(含自治区首府)为研究对象,统称为“核心城市”,开展核心城市韧性发展预测及动态空间分异格局研究,在推进韧性城市建设,提高城市治理水平及促进可持续发展等方面具有理论价值和实践意义。

从国内现有研究出发,张鹏等^[2]运用泰尔指数等方法分析了山东省17个城市的城市韧性时空分异及其影响因素;王文瑞等^[3]利用遥感技术及地理信息系统平台研究了兰州市城市韧性时空特征;吴菊平等^[4]分析了滇中城市群的城市韧性测度及时空格局演变;李梦杰等^[5]构建灾害韧性评价模型,分析了中原城市群灾害韧性水平的时空演变特征及障碍因子。综上,国内研究多从省域尺度或市域尺度研究城市韧性的时空分异及其影响因素,而从全国尺度进行韧性预测及动态空间分异格局的研究较少;韧性城市建设研究多以发达、典型区域的城市群为主,而以区域板块为对象的研究较少。

鉴于此,笔者以核心城市为研究对象,构建核心城市韧性测度指标体系,通过理想解逼近(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)-熵权法进行韧性测度分析,

并通过反向传播(Back Propagation, BP)神经网络模型预测核心城市在2026与2029年的韧性情况;根据经济发展情况进行区域板块划分,通过詹克斯自然间断点法研究区域板块韧性动态空间分异格局,以期获取核心城市韧性水平发展情况,丰富城市韧性理论研究体系,并对韧性城市建设实践工作提供一定借鉴。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究范围及数据来源

选取中国大陆25个核心城市(包括直辖市、省会城市(含自治区首府))为研究对象(由于拉萨市、乌鲁木齐市、太原市、长春市、南宁市和海口市的数据缺失,暂时未纳入研究范围)。研究数据来源:①2012—2021年的《中国统计年鉴》;②各核心城市2012—2021年的《统计年鉴》;③各核心城市2011—2020年的《国民经济和社会发展统计公报》;④前瞻数据库等。对于个别缺失数据,则采用插值法、自回归拟合法、相邻年份均值法,或通过相关部门联系以获取缺失数据等方式进行处理。

1.2 中国大陆核心城市韧性测度指标体系

根据《安全韧性城市评价指南》、洛克菲勒基金会韧性城市100项目及相关研究文献,遵循科学性、代表性、可操作性等原则,确定韧性评价的4个维度,分别为社会韧性、经济韧性、生态韧性和基础设施韧性,体系共含22个韧性城市测度指标。

韧性社会是指城市可有效应对卫生挑战与经济风险,并应对未来挑战^[6]的能力。城市社会状态通过人口出生率^[7-8]和城镇化率^[9]来评估其与

社会生产力的匹配度。社会保障能力依托卫生健康财政支出比例和城镇登记失业率^[10-12]衡量,而社会发展潜能通过每万人在校大学生数量^[9-10,13]反映。

经济韧性指经济系统面临经济灾害威胁时的预测、抵御和恢复能力。城市经济灾后恢复的速度和质量,可通过人均国内生产总值^[1,4,9,13]、地方财政收入^[1,9-10]及社会消费品零售总额^[10,14]衡量。经济抗压能力可通过城镇居民人均可支配收入^[11,13,15]表征;另外,公共安全财政支出比例可反映经济环境抗压能力。经济发展潜力以第三产业占国内生产总值比重^[10,15]进行评估。

生态韧性是衡量生态系统功能完善程度的关键标准。城市生态状态主要通过建成区绿化覆盖率及人均公园绿地面积^[1,9-10,13]衡量。改善生态能力可通过污水处理率^[10,13]和一般工业固体废物综合利用率^[10,13,15]评估,而工业烟(粉)尘排放量^[13]显示生态压力程度。

基础设施韧性是描述基础设施在灾害中应急响应和减轻负面影响的能力。移动电话普及率是衡量基础设施服务能力的指标。疏散与安置能力可通过每万人医疗卫生机构床位数、人均道路面积,以及每万人拥有公共汽车量^[1,9,13]和排水管道密度^[1,10,13]等衡量。此外,全社会用电量^[9,13]反映城市能源供给能力。

1.3 研究方法

1.3.1 TOPSIS-熵权法

该模型使用客观计算,综合考虑多个指标的影响力度,适用于多评价单元、多指标的大系统,而熵权法使权重分配更科学,结果更贴近实际情况^[16]。

1) 熵权法。作为一种基于信息熵理论的权重赋值方法,熵权法用于多标准决策分析。通过计算各评价指标的信息熵,反映每个指标的信息量大小,从而确定其权重。信息熵越大,表明该指标提供的信息越少,权重越小;反之,权重越大。该方法不依赖于专家主观判断,具有客观性特点。

2) TOPSIS法。作为一种多标准决策分析方法,TOPSIS法通过计算各备选方案与理想解和负理想解的距离来进行排序。理想解为所有标准中的最佳值,负理想解为最差值。每个备选方案的优劣通过与理想解的接近度和与负理想解的远离度来衡量,选择与理想解最接近且与负理想解最远的方案。该方法简单直观,广泛应用于多标准决策问

题中。

1.3.2 BP神经网络预测模型

BP神经网络是一种经典的人工神经网络模型,用于解决模式识别、分类和回归等问题,通过BP算法来训练网络参数,从而实现输入数据的预测或分类。利用Python语言编写3层BP神经网络模型,该模型包括输入层、隐藏层及输出层,其对应的神经元数量分别为 N 、 $2(N-10)$ 、 N 。输入层输入不同指标值作为自变量,经过隐藏层的中间处理,最后输出韧性预测结果。

1.3.3 詹克斯自然间断点法

詹克斯自然间断点法是一种地图分级算法,旨在利用指类内差异最小、类间差异最大的原则进行数据分级。由于詹克斯自然间断点法属于相对分类法,因此,在对不同年份序列的数据分级聚类时,其不同年份的分类阈值具有一定差异。使用ArcGIS10.8软件运用詹克斯自然间断点法,分级聚类研究对象的各维度韧性指数。

2 中国大陆核心城市韧性发展预测研究

2.1 中国大陆核心城市韧性测度及分析

根据城市韧性测度指标体系,选取2011、2014、2017和2020年4个时间截面,运用TOPSIS-熵权法计算指标数据,以测度中国核心城市各个维度的韧性,计算结果(部分)见表1。

分析可知:2011—2020年,中国大陆核心城市的城市韧性指数最高值为0.850,最低值为0.092,北京、上海和广州排位在前3名,呼和浩特在最后2名徘徊。一些城市的韧性指数存在呈逐年下降趋势,如昆明的城市韧性指数从2011年的0.242,逐年下降到2020年的0.164,其共同点为经济韧性和基础设施韧性都处于较低排位。

2011—2020年核心城市韧性指数均值及标准差如图1所示。由图1可知:4个时间截面中,城市韧性指数的标准差在0.180上下波动,核心城市的城市韧性离散程度保持稳定。由于社会韧性和生态韧性的指数均值在2014—2017年的下跌程度大于2017—2020年的回弹程度,且经济韧性指数在时间截面中呈现下降状态,导致城市韧性指数均值呈下跌趋势。社会、经济、生态和基础设施韧性指数的范围分别为0.142~0.773、0.045~0.950、0.405~0.902和0.096~0.726。

表1 中国核心城市(部分)韧性测度结果

Table 1 Resilience measurement results of core Chinese cities (portion)

年份 维度地区	2020年					2017年					2014年					2011年				
	城市	社会	经济	生态	基础设施	城市	社会	经济	生态	基础设施	城市	社会	经济	生态	基础设施	城市	社会	经济	生态	基础设施
北京	75	46	79	64	45	85	57	83	68	47	82	55	80	87	50	79	65	87	77	47
广州	52	74	37	73	63	49	71	35	74	56	54	72	40	90	57	53	68	41	87	49
南京	38	63	34	64	31	39	65	30	65	34	38	55	31	68	36	38	59	29	76	35
上海	79	25	95	47	58	76	14	95	45	55	76	17	94	53	62	78	16	93	63	73
天津	28	22	27	52	34	37	16	36	58	38	51	20	49	49	50	49	22	42	61	55
武汉	31	62	26	62	28	35	50	29	53	34	38	50	31	70	38	33	35	26	66	38
长沙	22	38	22	54	23	25	47	22	46	17	24	48	22	66	17	24	48	22	66	16
成都	32	41	30	62	32	30	31	27	60	30	34	35	30	78	34	31	38	27	80	31
重庆	41	19	40	51	41	42	23	40	52	40	45	25	45	46	38	42	23	44	54	33
呼和浩特	10	33	09	57	14	11	26	11	49	14	14	35	13	65	10	14	33	14	67	12
昆明	16	37	16	59	19	18	38	14	52	18	23	56	15	63	22	24	61	15	58	15
西安	21	51	18	56	21	21	36	17	56	25	27	46	19	70	31	24	39	17	57	30
西宁	19	49	05	49	32	19	42	05	55	31	14	36	05	65	21	13	18	06	63	24

注:表格数据为测度结果×100。

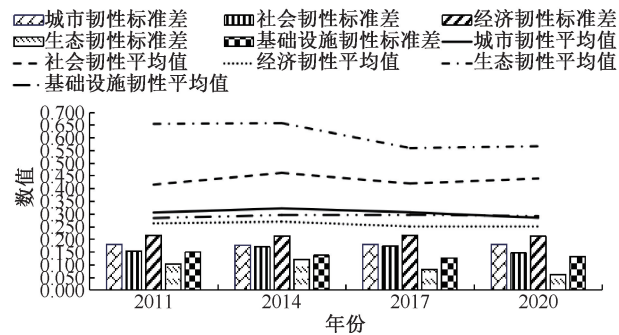


图1 2011—2020年核心城市韧性指数均值及标准差

Fig. 1 Average and standard deviation of resilience index of core cities from 2011 to 2020

2.2 中国核心城市韧性发展预测

2.2.1 模型训练设计

在BP神经网络模型中,用于训练的数据称为特征值,用于预测的数据称为样本值。样本值也称标签,是指要预测或分类的目标变量;特征值是指用来预测或分类目标变量的变量,用来表征样本的特点。在模型训练时,需要衡量预测值与真实值之间的误差,这种误差称为损失率,采用平均绝对值误差计算方法^[17],如下式:

$$L(y_i - \hat{y}_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (1)$$

式中: n 为训练样本数; y_i, \hat{y}_i 为对应的预测值与真实值,当损失率低于0.005时^[4],达到精度要求。

采用非连续年份数据训练与预测方法,设计2个试验。试验1,以2014年的韧性数据作为特征值,2020年的韧性数据为标签,将数据输入搭建好的BP神经网络模型中进行训练至误差函数收敛。训练得出2014和2020年数据之间的关系模型,进而以2020年数据为特征值,预测2026年的城市韧性指数数据。试验2,以2011年的韧性数据作为特征值,2020年的韧性数据为标签,将数据投入搭建好的BP神经网络模型中进行训练至误差函数收敛。训练得出2011年数据和2020年数据之间的关系模型,进而以2020年数据为特征值,预测2029年的城市韧性指数数据。经过5000次训练,2个试验的损失率均低于0.005,达到训练精度要求,结束训练。

2.2.2 预测结果分析

以试验1的训练模型为基础,2020年城市韧性指数为特征值,得出2026年的城市韧性预测数据。以试验2的训练模型为基础,2020年城市韧性指数为特征值,得出2029年的城市韧性预测数据。

根据计算可知:北京、上海、广州等城市的城市韧性预测结果始终高于总体核心城市的韧性指数均值,昆明、西安、西宁等城市的城市韧性预测指数处于相对较低的位置,见表2。城市韧性预测指数的标准差在2026年将达到0.173,与2020年相比下降了0.007,说明中国核心城市的综合韧性水平离散程度降低,城市韧性差距缩小。

表2 2026、2029年中国核心城市(部分)韧性预测结果

Table 2 Prediction results of resilience of core cities in China (portion) for 2026 and 2029

数值	2026年预测值	2029年预测值
维度	城市韧性	
北京	0.726 703 38	0.727 967 88
广州	0.489 584 15	0.498 741 42
上海	0.787 817 92	0.790 998 29
昆明	0.180 146 92	0.187 241 30
西安	0.198 800 98	0.190 356 23
西宁	0.205 031 52	0.215 102 11
维度	社会韧性	
北京	0.429 779 61	0.368 233 66
广州	0.769 228 32	0.771 362 50
上海	0.265 682 13	0.302 965 36
昆明	0.416 369 98	0.511 167 62
西安	0.517 251 12	0.420 632 42
西宁	0.462 985 42	0.556 522 56
维度	经济韧性	
北京	0.770 621 47	0.759 152 72
广州	0.355 175 19	0.372 584 67
上海	0.938 749 48	0.939 416 66
昆明	0.161 118 23	0.170 342 78
西安	0.160 488 55	0.151 596 17
西宁	0.063 681 52	0.064 717 72
维度	生态韧性	
北京	0.590 028 15	0.590 028 15
广州	0.723 628 88	0.723 628 88
上海	0.479 784 41	0.479 784 41
昆明	0.592 895 62	0.592 895 62
西安	0.488 489 58	0.488 489 58
西宁	0.544 610 21	0.544 610 21
维度	基础设施韧性	
北京	0.432 885 46	0.452 365 50
广州	0.562 533 39	0.533 333 47
上海	0.572 478 56	0.585 394 85
昆明	0.205 609 46	0.187 467 29
西安	0.203 842 08	0.200 897 00
西宁	0.359 675 10	0.376 872 39

由表2可知:

社会韧性指数均值维持上升趋势,从2017年的0.420上升到2029年的0.455,其标准差在0.145上下波动,社会韧性差距相对稳定。

经济韧性指数均值经0.001的起伏后,在2029年回到0.249,标准差从2017年的0.216降至2026年的0.203,并保持稳定,核心城市经济韧性差距缩小。

生态韧性指数均值呈现出缓慢上升趋势,从2017年的0.560上升至2029年的0.572,其标准差

在4个维度中相对较小,2029年达到最低0.060,生态韧性差距达到最小值。

基础设施韧性指数均值从2020年的0.292上升至2026年的0.295,其标准差在0.130上下波动,核心城市的基础设施韧性差距相对稳定。

中国大陆核心城市的各维度韧性差距排序为:经济韧性>社会韧性>基础设施韧性>生态韧性。

3 中国大陆核心城市韧性空间分异研究

3.1 中国大陆核心城市区域板块划分

根据经济发展情况,我国被划分为4大区域板块^[1](暂未包括台湾省、香港与澳门特别行政区),见表3。

表3 区域板块划分

Table 3 Regional sector division

区域板块	包含城市
东部地区	北京市、天津市、石家庄市、济南市、上海市、南京市、杭州市、福州市、广州市
中部地区	合肥市、南昌市、郑州市、武汉市、长沙市
西部地区	呼和浩特市、西宁市、银川市、兰州市、西安市、成都市、重庆市、贵阳市、昆明市
东北地区	哈尔滨市、沈阳市

3.2 区域板块韧性动态空间分异研究

基于詹克斯自然间断点法对各区域板块的韧性水平进行分级。首先,将维度下各核心城市的韧性值组成排序数列,并计算其平均值的偏差平方和;然后,通过数列插空迭代每个分类组合,分别计算每个分类组合的类别均值的平方偏差平方和;最后,通过平均值的偏差平方和与类别均值的平方偏差平方和计算方差拟合优度,并找到最大方差拟合优度对应的分类方式,从而找到相对应的自然断点处,并据此对数据进行分级。区域板块的数据以其包含的核心城市的韧性平均值为基础进行计算。区域板块韧性水平分为4个级别(四级最低),其包含的核心城市韧性水平分为5类(V类最低)。

3.2.1 区域板块城市韧性动态空间分异格局

区域板块城市韧性动态空间分异格局演变见表4。东部地区的整体城市韧性水平保持在一级,除了2014年,其内部城市韧性水平Ⅱ类与Ⅲ类同为最高占比。由于北京和上海的基础设施韧性指数较高,且经济韧性指数断崖式领先,所以在2014—2029年的城市韧性水平稳定在Ⅰ类,而石家庄的城

市韧性水平较为靠后,根据数据,在2026与2029年将持续保持这种情况。中部地区的整体城市韧性稳定在二级水平。相较于2014年,其内部的城市韧性水平最高占比在2020年将上升为Ⅲ类。西部地区整体城市韧性水平处于三级。其内部城市韧性水平

最高占比在2020年达到Ⅳ类,重庆在西部地区具有较高的城市韧性水平,其次为成都。东北部地区整体城市韧性水平处于四级,沈阳和哈尔滨城市韧性水平稳定在Ⅳ类与Ⅴ类。

表4 区域板块城市韧性动态空间分异格局演变

Table 4 Dynamic spatial differentiation pattern evolution of urban resilience in regional sectors

区域板块		东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
年份	类 / 级别				
2014年	I类	北京、上海	—	—	—
	II类	天津、广州	—	重庆	—
	III类	济南、南京、杭州	武汉	成都	—
	IV类	福州	合肥、南昌、郑州、长沙	兰州、西安、昆明	沈阳
	V类	石家庄	—	呼和浩特、西宁、银川、贵阳	哈尔滨
	级别	一级	二级	三级	四级
2020年	I类	北京、上海	—	—	—
	II类	南京、杭州、广州	—	重庆	—
	III类	天津、济南、福州	武汉、合肥、郑州	成都	—
	IV类	—	南昌、长沙	西宁、兰州、西安、昆明	沈阳
	V类	石家庄	—	呼和浩特、银川、贵阳	哈尔滨
	级别	一级	二级	三级	四级
2026年	I类	北京、上海	—	—	—
	II类	南京、杭州、广州	—	成都、重庆	—
	III类	天津、济南、福州	武汉、合肥、郑州	—	—
	IV类	—	南昌、长沙	西宁、兰州、西安、贵阳、昆明	沈阳
	V类	石家庄	—	呼和浩特、银川	哈尔滨
	级别	一级	二级	三级	四级
2029年	I类	北京、上海	—	—	—
	II类	南京、杭州、广州	—	成都、重庆	—
	III类	天津、济南、福州	武汉、合肥、郑州	—	—
	IV类	—	南昌、长沙	西宁、兰州、西安、贵阳、昆明	沈阳
	V类	石家庄	—	呼和浩特、银川	哈尔滨
	级别	一级	二级	三级	四级

3.2.2 区域板块社会韧性动态空间分异格局

基于自然间断点法计算,东部地区社会韧性水平在2026年为一级,在2029年退至三级。从内部看,东部地区在2014年的社会韧性水平最高占比为II类,2020年社会韧性水平为III类的城市占比最高,而2029年最高占比演变为IV类。由于人口出生率和卫生健康财政支出比例较低,以及城镇登记失业率过高,天津的社会韧性均为V类。

中部地区人口出生率、城镇化率和卫生健康财政支出比例的增速高于其他地区,其社会韧性水平在2014、2020年均处于一级,根据预测,中部地区在2026与2029年仍保持一级。其内部的社会韧性水平最高占比呈现出螺旋式上升趋势,在2020年达到I类,而在2029年演变为II类。

西部地区随内部韧性水平最高占比的上升,其社会韧性水平在2029年将达到二级。由于城镇登记失业率较高,而每万人在校大学生数过少,重庆社会韧性在2014与2020年处于最低水平,根据预测,此情况持续到2029年。

东北地区社会韧性保持四级水平,其内部哈尔滨在III类水平处波动,而沈阳则稳定在IV类水平。

3.2.3 区域板块经济韧性动态空间分异格局

基于自然间断点法计算,东部地区经济韧性水平稳定在一级,保持排位第1。从内部看,其经济韧性水平最高占比保持在II类。北京和上海的经济韧性保持在I类。中部地区经济韧性水平稳定在二级,位列第2。内部经济韧性水平最高占比为III类。由于地方一般公共(预算)收入、产业结构差异等,

2014与2020年,武汉经济韧性水平较高,南昌经济韧性水平最低,根据预测,此情况将持续至2029年。

相较于2014年,西部地区经济韧性水平在2020年有一定提高,达到三级。从内部看,最高占比从2014年的IV类演变为V类,在2029年回弹至IV类。重庆在西部地区中具有较高经济韧性,其次为成都。东北地区经济韧性水平在2020年下降到四级,根据预测,东北地区在2026与2029年仍保持四级。哈尔滨的经济韧性在2020年演变为V类水平,而沈阳经济韧性经波动在2029年恢复到III类水平。

3.2.4 区域板块生态韧性动态空间分异格局

基于自然间断点法计算,东部地区生态韧性水平在2014年为一级,2026年将降为三级。从内部看,生态韧性水平I类占比呈现出先升后降趋势,2020年达最高。随着工业烟(粉)尘排放量减少,以及建成区绿化覆盖率和人均公园绿地面积的提高,中部地区生态韧性水平明显上升,2020年达到一级。内部生态韧性水平最高占比在2014年为II类,而在2020年下降为III类,根据预测,在2026年将恢复到II类。西部地区的整体生态韧性水平呈现出螺旋式上升状态,从2014年的三级演变为2020年的四级,而在2026年回弹至二级。其内部生态韧性水平III类保持最高占比,II类在2029年也同III类达最高占比,成都在西部地区中具有较高的生态韧性。东北部地区整体生态韧性水平先升后降,在2020年上升到三级,但在2026年下跌为四级。其中,哈尔滨生态韧性水平在IV、V类间波动。

3.2.5 区域板块基础设施韧性动态空间分异格局

东部地区整体基础设施韧性水平保持在一级,排位稳定第1。从内部看,其基础设施韧性水平最高占比在2020年演变为III类,而在2026年将回弹至II类。广州和上海的基础设施韧性保持I类水平,在东部地区中具有较高的基础设施韧性。中部

地区的整体基础设施韧性水平保持在二级,位排第2,相较于2020年,其内部基础设施韧性水平最高占比在2026年将上涨为III类。西部地区的整体基础设施韧性水平保持在三级,排位保持第3,其内部基础设施韧性水平II类占比呈现出稳步上升状态,并在2029年达到最高。重庆具有较高的基础设施韧性水平,其次为成都。东北地区的基础设施韧性水平保持在四级,其内部的沈阳和哈尔滨的基础设施韧性水平稳定处于IV类与V类。

4 结 论

1) 在2011、2014、2017和2020年4个时间截面中,北京、上海和广州的韧性指数排位稳定在前3,呼和浩特在最后2名徘徊。一些城市韧性指数呈逐年下降趋势,如昆明、哈尔滨等。城市韧性指数标准差波动幅度不大,城市间韧性差距稳定。

2) 在2014、2020、2026和2029年4个时间截面中,北京、上海、广州等城市的城市韧性预测结果始终高于25个城市的韧性预测指数均值,昆明、西安、西宁等城市的城市韧性预测指数处于相对较低位置。标准差在2026年有所下降,城市间韧性差距进一步缩小。各维度韧性差距大小为:经济韧性>社会韧性>基础设施韧性>生态韧性。

3) 城市韧性空间异质格局演变相对稳定,韧性水平排列为:东部地区>中部地区>西部地区>东北地区。东部地区经济韧性和基础设施韧性较高,其中,北京与上海经济韧性呈现出断崖式领先状态。中部地区的社会韧性与生态韧性整体表现出较高水平,经济韧性与基础设施韧性稳定排位第2。西部地区的生态韧性呈现螺旋式上升趋势后保持稳定,其社会韧性呈现上升趋势。总体上看,东北地区城市韧性相对较弱,其经济韧性和生态韧性下跌后保持稳定,其余2个韧性维度保持在较低水平。

参 考 文 献

- [1] 张明斗,冯晓青.中国城市韧性度综合评价[J].城市问题,2018(10):27-36.
ZHANG Mingdou, FENG Xiaoqing. Comprehensive evaluation on Chinese cities' resilience [J]. Urban Problems, 2018(10): 27-36.
- [2] 张鹏,于伟,张延伟.山东省城市韧性的时空分异及其影响因素[J].城市问题,2018(9):27-34.
ZHANG Peng, YU Wei, ZHANG Yanwei. Spatial-temporal differentiation and its influencing factors of Shandong province's urban resilience [J]. Urban Problems, 2018(9): 27-34.
- [3] 王文瑞,郭子萍,万炜,等.兰州市城市韧性时空特征研究:基于规模-密度-形态分析框架[J].兰州大学学报:自然科学版,2021,57(1):39-46.
WANG Wenrui, GUO Ziping, WAN Wei, et al. Temporal and spatial characteristics of urban resilience in Lanzhou: based on the perspective of "size-density-morphology" [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2021, 57(1): 39-46.
- [4] 吴菊平,潘玉君,骆华松,等.滇中城市群城市韧性时空格局演变及动态预测研究[J].生态经济,2023,39(8):

95-105.

WU Juping, PAN Yujun, LUO Huasong, et al. Spatial-temporal pattern evolution and dynamic prediction of urban resilience in Dianzhong urban agglomeration [J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(8): 95-105.

- [5] 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.
- LI Mengjie, LIU Delin. Spatial-temporal evolution and obstacle factors of urban disaster resilience in Zhongyuan urban agglomeration [J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(9): 144-151.
- [6] JACOB C M, BRIANA D, DI RENZO G C, et al. Building resilient societies after COVID-19: the case for investing in maternal, neonatal, and child health[J]. *The Lancet Public Health*, 2020, 5(11): 624-627.
- [7] 周文. 人口转变过度论: 人口负增长下对传统人口转变理论的再思考[J]. *人口与经济*, 2023(3): 85-99.
- ZHOU Wen. Excessive demographic transition: Rethinking the traditional demographic transition with negative population growth [J]. *Population & Economics*, 2023(3): 85-99.
- [8] 马光明, 丁波鸫. 产业结构、居民工作时间与人口出生率[J]. *审计与经济研究*, 2023, 38(1): 96-106.
- MA Guangming, DING Boying. Industrial structure, residents' working hours and birth rate [J]. *Journal of Audit & Economics*, 2023, 38(1): 96-106.
- [9] 杨丽, 孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评[J]. *经济问题*, 2015(3): 115-119.
- YANG Li, SUN Zhichun. The development of western New-type urbanization level evaluation based on entropy method [J]. *On Economic Problems*, 2015(3): 115-119.
- [10] 黄琼, 崔子怡. 中国城市韧性发展水平测度、差异分解与动态演变及障碍因子识别[J]. *统计与决策*, 2023, 39(13): 106-111.
- HUANG Qiong, CUI Ziyi. Measurement, differences decomposition, dynamic evolution and obstacle factor identification of urban resilience development level in China [J]. *Statistics & Decision*, 2023, 39(13): 106-111.
- [11] 张雅宁, 司鹤. 城市综合韧性能力时空动态评估模型: 以传染病为例[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(10): 39-45.
- ZHANG Yaning, SI Hu. Spatial-temporal dynamic evaluation model of urban comprehensive resilience: taking infectious diseases as an example [J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(10): 39-45.
- [12] 陈子曦, 青梅. 中国城市群高质量发展水平测度及其时空收敛性研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2022, 39(6): 42-60.
- CHEN Zixi, QING Mei. Research on the measurement of the high-quality development level of China's urban agglomerations and its temporal and spatial convergence [J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2022, 39(6): 42-60.
- [13] 白立敏, 修春亮, 冯兴华, 等. 中国城市韧性综合评估及其时空分异特征[J]. *世界地理研究*, 2019, 28(6): 77-87.
- BAI Limin, XIU Chunliang, FENG Xinghua, et al. A comprehensive assessment of urban resilience and its spatial differentiation in China [J]. *World Regional Studies*, 2019, 28(6): 77-87.
- [14] 王林靖, 葛星, 钟敏. 十大城市群经济韧性的区域差异、动态演进及收敛性分析[J]. *统计与决策*, 2024, 40(10): 112-117.
- WANG Linjing, GE Xing, ZHONG Min. Regional differences, dynamic evolution, and convergence analysis of economic resilience in the top ten urban agglomerations [J]. *Statistics & Decision*, 2024, 40(10): 112-117.
- [15] 管卫华, 徐慧, 吴巍, 等. 基于新发展理念的南京城市韧性综合及动态预测研究[J]. *地理科学*, 2024, 44(4): 681-692.
- GUAN Weihua, XU Hui, WU Wei, et al. Comprehensive urban resilience and dynamic prediction of Nanjing city based on the new development concept [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(4): 681-692.
- [16] 许慧, 叶泽鸿. 中国核心城市韧性测度及空间异质格局研究[J/OL]. *生态经济*: 1-27[2024-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1193.f.20240723.1328.002.html>.
- XU Hui, YE Zehong. Resilience measurement and spatial heterogeneous patterns of core cities in China [J/OL]. *Ecological Economy*: 1-27[2024-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1193.f.20240723.1328.002.html>.
- [17] 王会强, 黄飞虎, 彭舰, 等. 基于时间依赖和变量交互的多元时间序列预测[J/OL]. *计算机科学*: 1-15[2024-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20240624.1903.008.html>.
- WANG Huiqiang, HUANG Feihu, PENG Jian, et al. Multivariate time series forecasting based on temporal dependency and variable interaction[J/OL]. *Computer Science*: 1-15[2024-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20240624.1903.008.html>.



作者简介: 许慧 (1988—), 女, 河南商丘人, 博士, 教授, 主要从事工程项目智能风险管理、韧性城市建设方面的研究。E-mail: xuhui@cqupt.edu.cn.