

长江中游城市群城市韧性时空演化特征及动态预测研究¹

尹建军^{1,2}, 胡 静^{1*}, 黄宇瑄¹

(1. 华中师范大学城市与环境科学学院 / 中国旅游研究院武汉分院, 湖北 武汉 430070; 2. 黄冈师范学院地理与旅游学院, 湖北 黄冈 430081)

【摘 要】：随着城市发展风险治理研究关注度的提升，城市韧性研究成为该领域研究的热点话题。选取长江中游城市群 26 个地级市作为研究对象，搜集 2006~2021 年度城市韧性指标数据，基于演化韧性理论，运用熵值法测度城市韧性水平，并刻画城市韧性时空演化特征，借助面板数据回归模型探寻城市韧性演化的主要影响因素，进一步利用灰色预测模型动态预测城市韧性发展趋势。研究表明：（1）研究期内，长江中游城市群城市韧性总体水平较低，城市韧性呈现缓慢持续稳步增长态势，地区差异较为显著，离散程度较小，并呈缓慢收敛的趋势；高等级韧性区少，低等级韧性区分布广泛，基本形成“以顶点为高韧性区，边为中、低韧性区的正三角形形态的核心—边缘”空间格局；（2）开放强度、产业结构多样化及城市化水平是该区域城市韧性发展变化的主要影响因素，其中城市化水平影响程度最大，开放强度和产业结构多样化影响稍弱，行政能力和创新能力对城市韧性影响不显著，需要进一步提升区域行政管理水平和区域创新能力；（3）未来，研究区域城市韧性仍将呈现稳步增长的发展态势，城市韧性总体水平将得到显著提升，高韧性值地区将会大幅增加，地区间差异呈现扩大趋势，武汉、长沙、南昌、株洲等区域中心城市的核心地位将进一步突显，“核心—边缘”城市韧性空间格局将进一步稳固。

【关键词】：城市韧性；时空演化；熵值法；灰色预测模型；长江中游城市群

【中图分类号】：K901.2 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004-8227(2023)11-2312-14

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202311007

城市作为人类活动的重要场所，既是一个巨大的自然-社会-经济系统，又是最为复杂的社会-生态系统，其发展过程会受到来自外界环境和自身各种不确定因素的干扰和冲击。这些因素既包括自然灾害，如地震、台风、泥石流、洪涝等；也包括人为灾难，如恐怖袭击、公共卫生事件爆发等。除此类突发性事件外，一些慢性累积型的因素，如经济危机、能源短缺、气候变化等也会对城市发展带来强烈的冲击。尤其在城市现代化建设进程中，城市空间和人口越发聚集，城市社会组织矛盾日益突出，城市经济结构更趋多元，带来的不确定性和未知风险空前复杂，城市发展所面临的潜在影响和灾难性后果也会更加显著[1]。如何应对不确定性风险的干扰，成为城市健康、稳定发展亟需解决的重要难题。诸多学者试图从宜居城市、低碳城市、绿色城市、海绵城市及智慧城市等城市建设理念[2]出发，找到解决城市应对风险干扰的路径，也取得一定成果，但研究重点多停留在传统硬性的城市规划与管理思维上，更加关注城市刚性抵抗灾害的能力，研究视角比较单一。随着城市发展风险治理领域研究的不

¹ 收稿日期：2023-03-29；修回日期：2023-05-22

基金项目：国家社会科学基金项目(20CMZ033)；教育部人文社会科学研究基金项目(21YJCZH225)

作者简介：尹建军(1980~)，男，副教授，主要研究方向为人文地理学、旅游地理与资源开发。E-mail: 273556567@qq.com

*** 通讯作者** E-mail: huj@ccnu.edu.cn

断推进，城市韧性研究受到越来越多学者的青睐，已然成为该领域研究的一种新视角和新理念。该理念不只是关注城市在应对风险发生时的抵抗力，还强调城市应对风险过程中通过系统性的要素整合不断获得的适应、变化及学习能力，而且关注人的参与、应对与决策的主观能动性[3]。显然，城市韧性水平的提升是城市应对不确定风险干扰的更有效途径。因此，从时空演化及动态预测的视角探讨城市韧性问题，对城市健康、稳定发展具有重要的现实意义。

城市韧性概念由韧性概念演进而来。追溯韧性语义源起，最早来源于拉丁语，词意为“恢复到原始状态”[4]，指物体受外力影响变形后再恢复到原始状态的能力，被称为工程韧性[5]；20世纪70年代初，加拿大生态学家霍利率先将韧性思想应用于生态学学科[6]，生态韧性随之诞生；20世纪90年代以来，有学者将韧性的应用研究从自然生态学向人类生态学延伸[6]，形成了最初的城市韧性思想。关于城市韧性研究，国外学者们更多注重城市韧性的理论研究，研究内容主要集中于理论框架构建[7,8,9,10]、城市韧性评价理论[11,12]、城市韧性影响机制[13]及城市韧性动态模拟[14,15]等方面。国内关于城市韧性的研究近些年日趋增多，学者们更加重视实证研究，理论研究相对比较薄弱。从研究内容看，主要集中在城市韧性概念内涵的理论综述[1,16]及城市韧性的测度与评价[17,18]、影响因素[19]等实证分析；从研究尺度看，多以全国[20,21]、城市群[22,23]、省域[24,25]及市域[26]等大中尺度地理单元为主，小尺度范围研究相对较少；从研究方法看，通常采用定量的方法开展研究，熵权-TOPSIS评价模型[27]、主成分分析法[28]、因子分析法[29]等常用于城市韧性测度与评价，回归分析[30]、面板空间计量模型[31]、地理探测器模型[32]、障碍因子分析[33]等则为影响因素分析的主要方法。

综上所述，国内外关于城市韧性的研究已取得比较丰硕的成果，为本研究的开展提供了坚实的理论基础。通过进一步梳理文献发现，已有研究成果中选取长江中游城市群作为研究区域的较少，为数不多的研究仅对城市或城市网络结构韧性进行测度和静态分析，探讨其主要影响因素，从动态视角刻画城市韧性时空演化规律，预测其未来发展变化趋势的研究较为鲜见，在一定程度上会削弱城市韧性研究结论的现实参考价值，有待进一步拓展。鉴于此，本文基于演化韧性理论，选取长江中游城市群为研究对象区域，构建城市韧性测度指标体系，运用熵值法从市域尺度测度城市韧性水平，刻画城市韧性时空演化特征，从而为探明该区域城市韧性发展现状，优化城市发展资源配置和城市韧性空间格局提供科学依据；其次，借助面板数据回归模型探寻城市韧性发展演化的影响因素，进一步利用灰色预测模型预测未来各地区城市韧性发展趋势，期待为政府科学制定城市发展战略，政策制定部门宏观把握地区差异，充分利用地区优势提升城市韧性水平，促进城市高质量协调发展提供理论参考。

1 理论阐释与研究方法

1.1 理论阐释

1.1.1 城市韧性的科学内涵

城市韧性由工程韧性和生态韧性演化而来，但其概念界定却发生了本质的变化。工程韧性和生态韧性着重强调系统受冲击后恢复到初始状态的能力，城市韧性更加注重系统受到不确定因素干扰后，打破原有的平衡状态达到另一种更强大、更智慧、更具适应性的新的平衡状态的能力，体现了对将系统局限在单一平衡状态下的传统韧性思想的摒弃。由此，立足于新的城市发展理念，本文认为城市韧性应该体现在：一方面城市系统在应对风险冲击时能够保持主要特征、维持稳定结构、发挥基本功能，使城市不受毁灭性打击，生产生活正常运转的能力；另一方面城市系统在应对风险中不断吸收外部干扰，适应和应对冲击带来的影响，通过城市结构重组、资源优配、科技创新等手段将城市由原有的平衡状态向另一种新的平衡状态转变的能力。其科学内涵可以从以下4个方面具体展开理解：(1)应对风险时的抵抗力。抵抗力是城市遭遇风险冲击时最先体现出的应对力，主要表现为城市生态系统在风险发生时所能承受干扰、控制功能和维持结构的能力，抵抗力的强弱是决定城市系统是否会受到风险毁灭性打击而一蹶不振的关键；(2)应对风险中的适应力。适应力主要表现为城市系统在应对风险时，通过对因风险冲击而产生的各种不良影响的学习和吸收，提升城市应对同类风险的抵抗力，适应力越强的城市进入恢复期越快；(3)风险干扰下的恢复力。恢复力表现为城市系统在受干扰之后，通过自身迅速、多样化、有效的干预措施实现对风险带来冲击的响应能力，恢复力对于城市系统恢复平衡状态起着决定性作用；(4)风险干扰后的创新力。主要表现为城市系统在恢复过程中更迅速应对干扰，通过优化、改革、创新等方式，实现城市发展路径突破和结构更新，达到一种新的稳定的发展状态的能力。

1.1.2 城市韧性发展的基本逻辑

由城市韧性内涵可知,城市韧性就是城市应对各种风险的抵抗力、适应力、恢复力和创新力,具体通过城市系统各要素来体现。城市系统作为一个复杂的社会生态系统和人类-环境耦合系统,包含地理环境和人本身两个子系统,地理环境系统主要包括经济、社会、生态、基础设施等要素,人自身系统则由人的身体素质、行为能力、思想意识、知识水平等要素组成。因此,综合以上要素可以将城市韧性归纳为经济韧性、社会韧性、生态韧性、基础设施韧性、组织管理韧性等多个维度,每个维度都能够反映城市应对风险干扰的一种或几种能力。通过构建多维度的指标体系,能够准确的测度城市的综合韧性水平。由于各维度选取的指标随着城市发展在不断的发展变化,因此城市韧性也会随之发生变化。时序上,当城市呈现稳定的良性发展时,城市韧性则会不断提升;反之,当城市受到风险干扰后打破原有的平衡状态,走向衰落,城市韧性则会下降。空间上,由于地区差异的存在,城市发展水平各不相同,城市韧性也会出现显著的差异。这种时空差异性真实的反映了城市韧性的演化特征。整个演化的过程是错综复杂的,受到多种因素的影响,这些因素主要包括城市发展过程中的行政力、开放力、市场力、创新力、城市化水平、产业结构多样化等。行政力体现的是政府部门的行政执行力,通过提升政府管理水平、企事业单位的办事效率,带动城市经济、社会的高效发展;开放力强调的是城市对外开放的程度,通过对外开放,可以大力引进外资和先进技术,为城市发展注入新的活力;市场力关注的是城市所占市场份额,通过提高国际、国内市场份额,促进消费,带动城市高水平发展;创新力突出改进旧事物和创造新事物的能力,通过提出新思想、构建新理念、引进新技术,创造新发明,提升城市生产力水平,从而促进城市高质量发展;城市化水平则是在城市化过程中,带动城市产业人力资源集聚、社会结构优化、基础服务设施完善、组织管理水平提升,促进城市整体发展;产业结构多样化有利于城市遭遇风险时能够灵活应变,自如应对,从容转型,提高城市转型发展能力。因此,城市韧性是由多维度、多指标综合组成,受多种因素影响,不断发展和变化的城市发展能力状态的具体体现,了解和掌握城市韧性及其发展规律是推动城市健康、稳定发展及城市间协调发展的战略要求。

1.2 研究区概况

根据 2015 年国务院批复的《长江中游城市群发展规划》,长江中游城市群以武汉为中心,以武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体,包括湖北省武汉市、黄石市、鄂州市、黄冈市、孝感市、咸宁市、仙桃市、潜江市、天门市、襄阳市、宜昌市、荆州市、荆门市;湖南省长沙市、株洲市、湘潭市、岳阳市、益阳市、常德市、衡阳市、娄底市;江西省南昌市、九江市、景德镇市、鹰潭市、新余市、宜春市、萍乡市、上饶市及抚州市、吉安市的部分县(区)。为了确保研究区域城市之间的可比性和数据的可获得性,文章选取除仙桃、潜江、天门、抚州和吉安外的地市(州)作为研究对象,共 26 个城市。该区域承东启西、连南接北,是推动长江经济带发展、促进中部地区崛起、巩固“两横三纵”城镇化战略格局的重点区域,在我国经济社会发展格局中具有重要地位。自 2015 年规划实施以来,区域发展动能持续增强,综合实力显著提升,经济增速位居全国前列,地区生产总值占全国比重稳步提高,在推动新型城镇化建设中作用越发凸显。因此,选择该区域作为研究对象区域有助于区域新型城镇化快速发展,不管是地理区位,还是经济功能上,都具有典型性和代表性。

1.3 指标体系构建

1.3.1 城市韧性测度指标体系

基于城市韧性内涵及城市韧性发展基本逻辑的理论阐释,遵循系统性、客观性、代表性及数据可获得性的指标选取基本原则,参考已有研究成果[20,23,24],从经济韧性、社会韧性、生态韧性、设施韧性和组织管理韧性 5 个维度,选取 27 个具体指标构建长江中游城市群城市韧性综合测度指标体系(表 1)。

1.3.2 影响因素指标体系

同样,基于城市韧性内涵及城市韧性发展基本逻辑理论,参考前人研究成果[2,30],选取行政能力(adm)、开放强度(open)、产

业结构优化(ind)、城市化水平(urb)及创新能力(inno)等与城市韧性水平密切相关的 5 个方面来分析城市韧性影响因素。分别选取一般公共预算开支占 GDP 比重(%)、实际利用外商投资额(万美元)、第三产业与第二产业比值(%)、城市人口比重(%)及科技支出占一般公共预算内财政支出的比重(%)等指标对上述影响因素进行表征。由于指标数据量纲不一致及数据的波动性较大,可能导致异方差的存在,考虑到对时间序列进行对数化处理不会改变其数据的特征,还能增强序列的平稳性,为消除异方差的影响,在利用面板数据回归模型进行回归分析时对行政能力(adm)、开放强度(open)、城市化水平(urb)等对应指标数据进行了对数化处理。

表 1 城市韧性综合测度指标体系及权重

目标层	准则层	具体指标	单位	属性	权重
城市韧性	经济韧性 (0.167 0)	人均 GDP(x1)	元	+	0.049 6
		城镇人均可支配收入(x2)	元	+	0.042 3
		第三产业占 GDP 比重(x3)	%	+	0.022 5
		第二产业占 GDP 比重(x4)	%	+	0.011 7
		规模以上工业企业数量(x5)	家	+	0.040 9
	社会韧性 (0.303 9)	城镇登记失业人口数量(x6)	人	-	0.005 5
		每万人拥有医疗床位数量(x7)	张	+	0.031 7
		每万人在校大学生数量(x8)	人	+	0.143 5

		人口自然增长率(x9)	‰	+	0.009 0
		城镇职工失业保险参保人数(x10)	人	+	0.114 2
	生态韧性 (0.139 3)	绿地公园面积(x11)	ha	+	0.094 1
		建成区绿化覆盖率(x12)	%	+	0.012 6
		污水集中处理率(x13)	%	+	0.010 3
		工业固体废物综合利用率(x14)	%	+	0.010 8
		生活垃圾无害化处理率(x15)	%	+	0.007 9
		单位 GDP 二氧化硫排放量(x16)	t/千万	-	0.003 6
	设施韧性 (0.220 1)				
		自来水供应量(x27)	百万 m ³	+	0.028 1
		煤气、天然气供应量(x18)	十亿 kW·h	+	0.019 3
			t/千万	-	0.004 7

		液化石油气供应量(x19)			
		人均城市公路面积(x20)	m ² /人	+	0.036 2
		人均排水管道长度(x21)	km/万人	+	0.073 8
	组织管理韧性 (0.169 7)	人均实际公共汽车拥有量(x22)	辆/万人	+	0.058 0
		教育支出占财政支出的比重(x23)	%	+	0.009 9
		环保支出占财政支出比重(x24)	%	+	0.024 2
		第三产业从业人员比重(x25)	%	+	0.025 4
		互联网(宽带)普及率(x26)	%	+	0.069 5
		公共社会保障和社会组织人员数量(x27)	人	+	0.040 7

1.4 研究方法

1.4.1 城市韧性测度方法—熵值法

关于综合指标体系测度的方法主要有熵值法、主成分分析法及因子分析法等，可以选择的指标赋权方法通常有客观赋权和主观赋权两种方法。熵值法既能克服主成分分析和因子分析由于指标降维分析而造成的信息载荷的损失，又能避免因主观赋权法带来的主观随意性的影响，因此，选择熵值法对韧性指数进行测度，具体公式及计算步骤[20]如下。

(1)构建面板数据矩阵:

选取 h 个年份, m 个城市, n 项指标构建原始指标矩阵, x_{tij} 为第 t 个年份, 第 i 个城市, 第 j 项指标的指标值, $1 \leq t \leq h, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$, h 、 m 和 n 分别取值 16、26 和 27。

(2)数据标准化:

为了消除指标数据量纲的影响, 采用极值法对各项指标进行标准化处理, 得到 y_{tij} 。

正向指标:

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

负向指标:

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

(3)指标归一化处理:

$$z_{tij} = y_{tij} / \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^m y_{tij} \quad (3)$$

(4)计算各项指标熵值:

$$P_j = -k \sum_{t=1}^h \sum_{i=1}^m z_{tij} \ln z_{tij} \quad (4)$$
$$k = 1 / \ln(h \times m)$$

(5)计算各项指标熵值的冗余度:

$$E_j = 1 - P_j \quad (5)$$

(6)计算各项指标权重:

$$W_j = E_j / \sum_{j=1}^n E_j \quad (6)$$

(7)计算城市韧性综合水平:

$$R_{it} = \sum_{j=1}^n (W_j \times y_{ijt}) \quad (7)$$

1.4.2 面板数据回归模型

面板数据回归模型分析是影响因素研究的一种有效方法,该模型通常基于更多的维度和更大的样本量进行分析,可以解决遗漏变量偏差问题,模型估计的有效性和精确度更高。面板数据回归包括固定效应模型、随机效应模型和混合面板回归模型三种类型,利用豪斯曼检验确定选取哪种模型,根据检验结果选择固定效应模型进行回归分析。其表达式为:

$$R_{it} = \alpha + \beta_{i1} * \ln(adm) + \beta_{i2} * \ln(open) + \beta_{i3} * ind + \beta_{i4} * \ln(urb) + \beta_{i5} * inno + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

式中: R_{it} 第 t 年地区 i 城市韧性的测度值; β_{it} 为影响因素自变量的待估参数向量; α 为常数项; ε_{it} 为随机误差项。

1.4.3 灰色预测模型

基于灰色预测理论的 GM(1,1)模型在动态预测研究中应用十分广泛,该模型可对数据少、数列不完整及可靠性低的数据进行预测,不考虑分布规律或变化趋势,适用于指数增长性的中短期预测。选用 GM(1,1)模型对城市韧性进行预测,其预测原理及步骤如下:

(1)建立原始非负时间数据序列: $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$.

(2)在原始序列基础上进行累加,得到累加序列: $X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$, 其中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=0}^k x^{(0)}(i), i = 1, 2, \dots, \text{对 } X(1) \text{ 进行紧邻均值, 得到序列:}$$

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)\}, \text{其中 } z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], k = 2, \dots, n.$$

(3)构建 GM(1,1)灰微分方程模型:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (9)$$

式中：a 为发展灰数；b 为内生控制灰数。

(4)根据最小二乘法求解式(1),得到 $\hat{\mu} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y$, 其中 $\mu^{\wedge} \mu^{\wedge}$ 为估计向量,

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

(5)GM(1,1)灰微分方程对应的白化微分方程如下：

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (11)$$

对式(2)求解，得白化响应式： $\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{\hat{b}}{a} \right] e^{-ak} + \frac{\hat{b}}{a}$ ，进行一次累减生成预测值： $\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k)$ ，从而得到预测序列： $\hat{X}^{(0)} = \{\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)\}$ 。

(6)模型评估，使用平均绝对百分比误差(MAPE),公式如下：

$$MAPE = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^n \left| \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \right| \times 100\% \quad (12)$$

1.5 数据来源

数据主要来源于 2007~2022 年的《湖北省统计年鉴》《河南省统计年鉴》《江西省统计年鉴》及所涉及的 26 个地级市统计年鉴；2007~2022 年的《中国城市统计年鉴》。部分数据通过查阅相关研究区域《国民经济统计公报》《政府工作报告》获得，个别缺失数据采用线性插值法进行补全。

2 城市韧性时空演化特征

2.1 总体特征

表 2 中对长江中游城市群 2006~2021 年城市韧性总体水平进行描述性统计分析。结果显示：(1)在研究期内，该区域城市韧性总体水平较低，但呈现缓慢稳步上升的态势；(2)逐年标准差介于 0.076 1~0.105 5 之间，标准差较小，说明各地区之间城市

韧性水平存在着一定差异,但离散程度相对较小;(3)变异系数由2006年的0.4481下降到2021年的0.2855,说明该区域随着时间的推进城市韧性水平的空间差异呈缓慢收敛的趋势;(4)偏态系数都为正值,在2006~2021年间呈现先减少后上升的趋势,说明城市韧性水平高值地区所占比例发生了先下降后上升的变化,目前处于缓慢上升阶段;(5)峰态系数在2006~2021年呈快速下降的趋势,说明该区域城市韧性水平相似地区集中分布明显减弱。

表2 长江中游城市群城市韧性水平描述性统计

统计量	2006 年	2011 年	2016 年	2021 年
均值	0.169 9	0.221 7	0.283 7	0.369 7
标准差	0.076 1	0.081 6	0.093 9	0.105 5
变异系数	0.448 1	0.368 2	0.331 0	0.285 5
偏态系数	2.720 4	2.129 9	1.833 4	1.946 2
峰态系数	8.195 6	5.106 5	3.110 1	3.612 1

图1a反应的是长江中游城市群2006~2021年城市总体韧性均值。可以看出,城市整体韧性水平较低,地区之间韧性水平差异较明显,韧性高值区较少,主要集中在武汉、长沙、南昌等省会城市及湖北的宜昌、湖南的株洲和湘潭,其他地区的韧性水平普遍较低。主要是因为省会城市作为各省的政治、经济、文化中心,发展战略地位突出,发展能力强,城市韧性水平高;而宜昌市作为湖北省副中心城市之一,其发展自然受到高度关注,株洲和湘潭则在长株潭一体化城市发展战略的带动下,取得快速的发展。从城市韧性各准则层均值来看,如图1b~图1f所示,经济韧性、社会韧性、生态韧性、设施韧性和组织管理韧性在地域上均存在一定差异性,其中经济韧性、社会韧性和设施韧性水平相对要高,但地区之间的差异更加明显,生态韧性和组织管理韧性水平相对要低,地区之间更趋平衡。武汉是唯一一个各准则层韧性水平都属于高值区的城市。相比而言,该研究区域组织管理韧性普遍偏低,说明该区域在积极响应国家发展战略的同时,应该进一步加大投入,增强政府组织管理水平,提高发展效率。

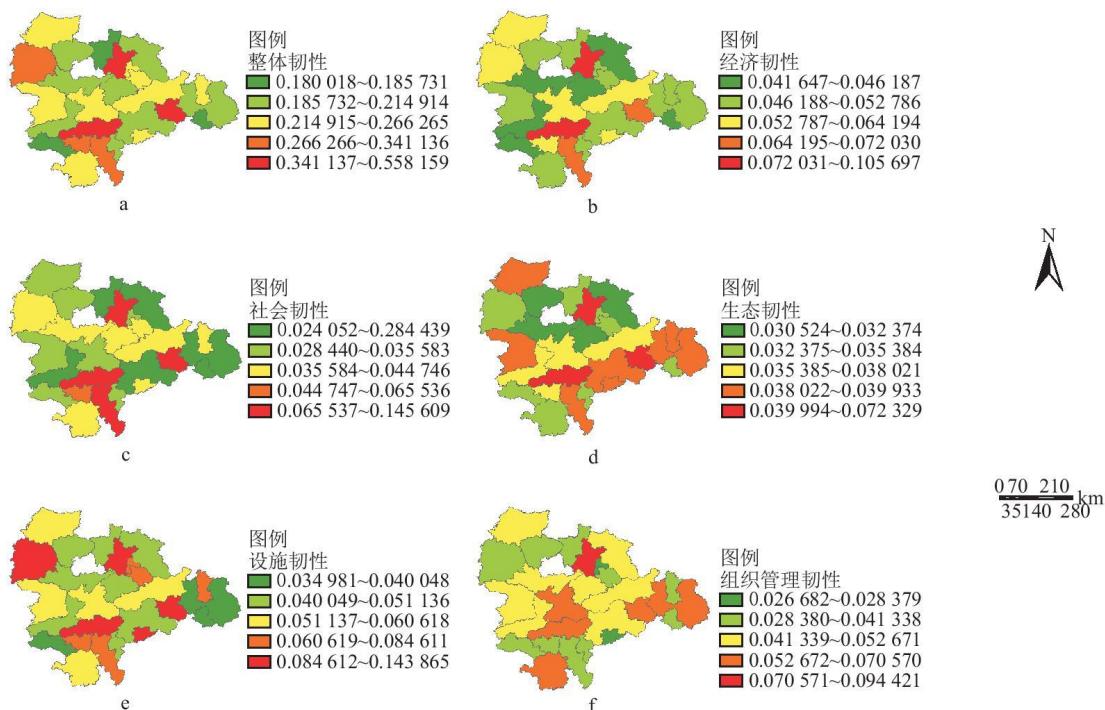


图 1 长江中游城市群城市总体韧性及各准则层韧性均值

2.2 时序演变特征

如图 2 所示,从各地区时序变化来看,长江中游城市群 2006~2021 年城市韧性水平呈缓慢稳步增长的态势,虽然武汉、长沙、南昌 3 个省会城市韧性中心地位突出,“核心-边缘”结构明显,但是各地区城市韧性增长幅度高度一致。说明地区发展速度相对比较平衡,省会城市作为区域发展核心的极化效应并未突出,扩散效应得到充分发挥。受 2019 年底爆发的新冠肺炎疫情影响,部分地区城市韧性增长速度有所减缓,如湖北的鄂州、黄冈、黄石、荆门及孝感等地区,其中咸宁城市韧性出现负增长。主要由于上述地区受新冠肺炎影响比较严重,当区域中心城市武汉及周边地区实施封闭式防疫管控时,自身应对突发疫情的抵御力、适应力和恢复力不足。

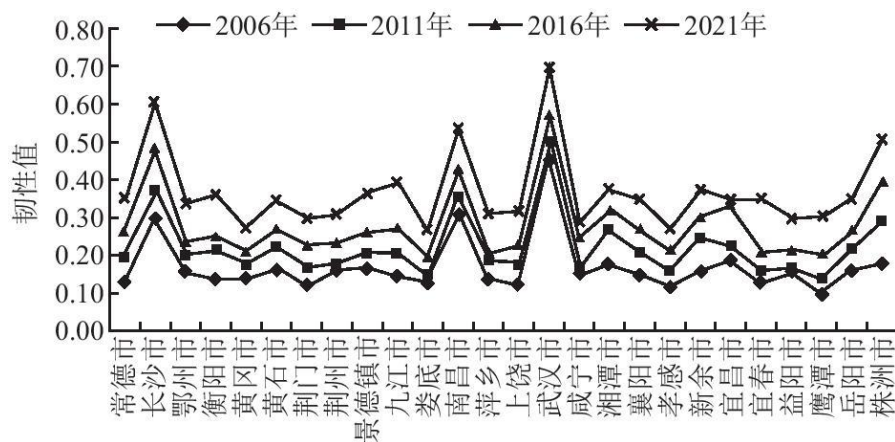


图 2 长江中游城市群 2006~2021 年城市韧性时序变化

图3反映的是长江中游城市群三大区域2006~2021年城市韧性时序变化特征。可以看出武汉城市圈、环长株潭城市群及环鄱阳湖城市群三大区域城市总体韧性呈现增长的态势，增长趋势略有不同。2006~2009年，三大区域城市韧性水平总体上较低，但武汉城市圈城市韧性要略高于环长株潭城市群，环鄱阳湖城市群城市韧性最低。2009年以后，环长株潭城市群城市韧性超越了武汉城市圈，之后一直保持一定优势稳步增长，可能是由于自2009年后长株潭一体化发展战略快速有力的推进，带动了环长株潭城市整体的快速发展，提升了城市韧性水平。2020年之前，环鄱阳湖城市群城市韧性水平一直处于最低，但2020年后，超越了武汉城市圈城市韧性。究其原因：武汉城市圈是受到2019年底全国爆发的新冠疫情影响最严重的区域，自疫情爆发后大半年时间里，城市都实行封闭管理，城市发展几乎处于停滞状态，城市韧性水平也停滞不前。而环鄱阳湖城市群受到新冠疫情影响相对较小，仍然保持原有增长态势。在研究期内，武汉城市圈城市韧性水平增长幅度最小，成为制约长江中游城市群城市韧性总体水平提升的主要因素，这与武汉城市圈在长江中游城市群中的地位和作用是不相符的。进一步整合区域资源、加强地区联系、充分发挥武汉特大中心城市的辐射作用，提升区域城市韧性水平，将成为未来武汉城市圈城市发展的主要方向。

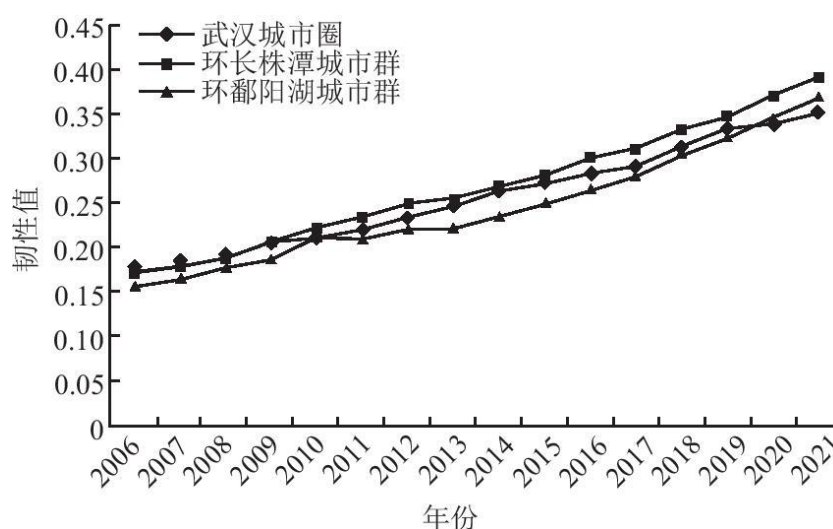


图3 长江中游城市群三大区域2006~2021年城市韧性时序变化

为进一步分析长江中游城市群城市韧性水平的时序变化特征，对2006~2021年城市韧性值进行核密度分析。由图4可知，整个研究期内，随着时间的推移核密度曲线位置呈现整体右移的趋势，也说明该区域城市韧性水平变化经历了“持续增长”的历程。核密度曲线形态上，右拖尾特征表现明显，大部分地区城市韧性集中在低值区，少数地区位于高值区，说明研究期内城市韧性总体水平偏低，与前面分析结果一致。从峰值变化来看，整体上波峰宽窄随时间没有明显的变化，但曲线峰值经历了“上升-下降-再上升-再下降-再上升”波动上升的过程，表明该区域城市韧性水平差异也存在波动上升的过程。2006~2021年，城市韧性核密度右尾抬高幅度较小，且比较平稳，说明城市韧性水平较高等级地区较少并无扩张的趋势。

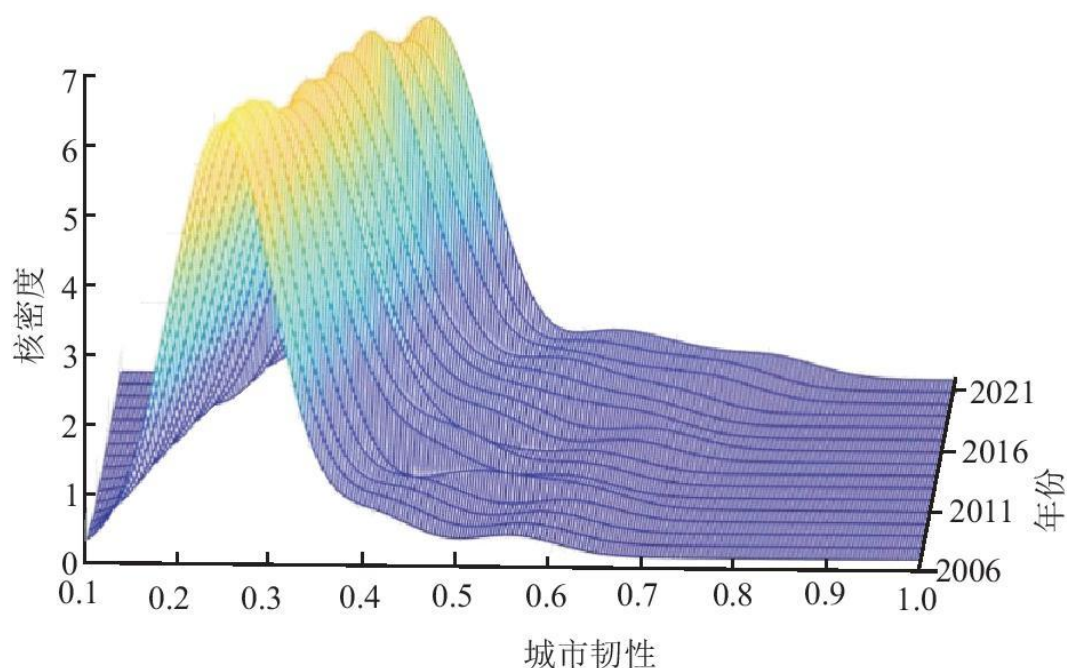


图4 长江中游城市群城市韧性核密度估计

2.3 空间演变特征

利用 ArcGIS10.5 软件的 Jenks 自然断点法将 2006、2011、2016、2021 年的各地区城市韧性水平划分为五个等级，即低度韧性(I 级, 韧性值 <0.2)、较低韧性(II 级, $0.2 \leq \text{韧性值} < 0.3$)、中度韧性(III 级, $0.3 \leq \text{韧性值} < 0.4$)、较高韧性(IV 级, $0.4 \leq \text{韧性值} < 0.5$)、高度韧性(V 级, 韧性值 ≥ 0.5),如图 5 所示。2006 年, 该区域韧性水平等级普遍较低, 除武汉为 VI 级、南昌为 III 级、长沙为 II 级外, 其它地区均为 I 级低度韧性区; 2011 年, 武汉升级为 V 级高韧性区, 长沙升级为 III 级中度韧性区, 南昌韧性等级保持不变, 湘潭、株洲、岳阳、宜昌、荆州、鄂州、黄石、九江等多个地区上升为 II 级较低韧性区; 2016 年, 武汉韧性等级保持 V 级不变, 长沙、南昌上升为 VI 级较高韧性区, 湘潭、株洲、宜昌继续上升为 III 级, 几乎没有 I 级低度韧性区; 2021 年, 绝大部分地区都达到 III 级中等韧性等级, 没有 VI 级较高韧性区, 武汉、长沙、南昌、株洲等四地达到 V 级高韧性区。

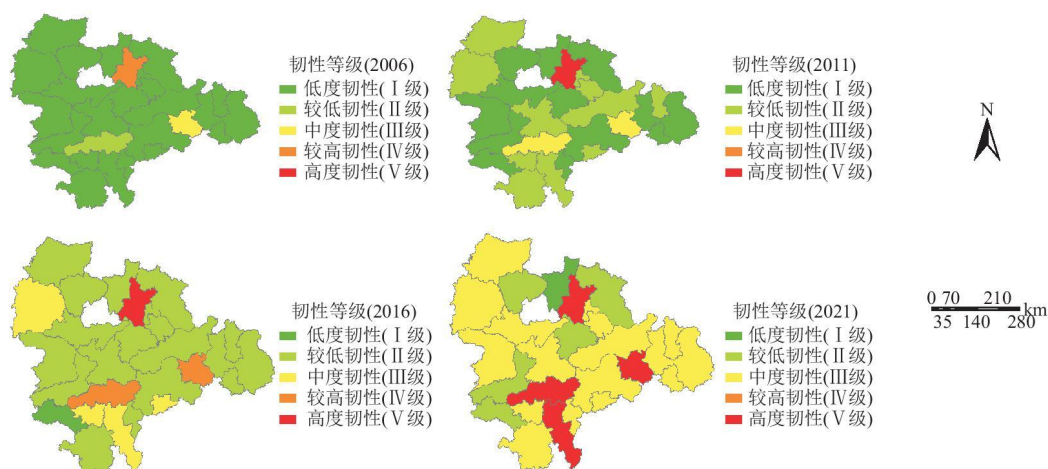


图5 长江中游城市群城市韧性空间格局演变

总体上，城市韧性空间演化体现了从低等级韧性向高等级韧性演替的规律，Ⅵ级、Ⅴ级韧性区较少，Ⅰ级、Ⅱ级韧性区较多，分布较广，其中高级韧性区呈缓慢增加，低级韧性区呈急剧减少，中等韧性数量不断增加。由此，也可以看出长江中游城市群城市韧性总体水平较低。Ⅵ级、Ⅴ级韧性区主要呈点状分布在三大区域(武汉城市群、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群)的中心节点地区，即武汉、长沙、南昌、株洲等地区。较低级韧性区则成片分布在各区域中心节点的周围，基本形成了“以顶点为高韧性区，边为中、低韧性区的正三角形形态的核心-边缘”空间格局。

3 城市韧性影响因素及动态预测

3.1 影响因素分析

利用 stata16.0 对长江中游城市群城市总体韧性和各层次韧性进行面板数据回归分析，得到回归结果(表 3)。结果显示，城市整体韧性受到开放强度、产业结构及城市化水平等因素正向影响比较明显，且均通过 1%的显著性检验，影响系数分别为 0.137、0.129、0.361。这意味着该区域开放强度、产业结构优化、城市化水平每上升 1 个百分点，城市韧性水平分别上升 0.137、0.129、0.361 个百分点。其中，影响最大的是城市化水平，这是由于城市化过程中，城市化水平的不断提升，可以带动城市周边腹地人口、产业向城市地区聚集，促进城市产业和城市功能日益完善，增强城市人力资本汇集，从而提升城市遭遇风险后的自我缓解和自我恢复能力。其次，开放强度也是影响城市整体韧性水平的重要因素，以实际利用外商投资额为表征的开放强度直接关系到区域发展资金、技术、人才的引进水平，对于地区而言，充足的资金、先进的技术、丰富的人才可以大大提升地区灾后重建的恢复力和创新力。再次，产业结构多样化虽然相比开放强度、城市化水平的作用力度偏小，但是其对城市韧性的影响力也是不可忽视的，因为产业结构多样化越优，城市遭受风险的冲击就会越小，在应对风险时的能力即抵御力就会越强，从而提升城市韧性水平。行政能力和创新能力虽然显示对城市韧性具有正向影响，但其均未通过显著性检验，也就是说这两个因素目前并未对长江中游城市群城市韧性产生真正的影响。可能是由于一方面该区域行政能力地区间差异不大，行政管理水平不高，还有待进一步提升，行政能力未能在城市应对风险时对抵御力、恢复力、适应力产生根本性的作用；另一方面该区域科技创新能力仍然不强，科技创新给城市带来新的发展动力不足，导致城市灾后发展创新力不够。

表 3 城市韧性影响因素回归结果

变量	整体韧性 (Res)	经济韧性 (eco)	社会韧性 (soc)	生态韧性 (ecol)	设施韧性 (inf)	组织管理韧性 (org)
行政能力	0.004 0	0.011 2*	-0.005 7	0.003 8	-0.006 2	0.011 1**
	(0.016 8)	(0.006 4)	(0.005 8)	(0.003 3)	(0.005 5)	(0.005 2)
开放强度	0.137 0***	0.044 8***	0.042 4***	0.039 2***	0.013 7	-0.006 5
	(0.024 1)	(0.008 5)	(0.013 2)	(0.003 6)	(0.009 5)	(0.020 5)

产业结构	0.129 0***	0.038 5***	0.016 6***	0.006 6**	0.024 8***	0.047 7***
	(0.023 1)	(0.006 9)	(0.006 3)	(0.003 2)	(0.007 4)	(0.005 3)
城市化水平	0.361 0***	0.092 1***	0.081 0***	0.023 7***	0.097 7***	0.039 9***
	(0.040 9)	(0.010 9)	(0.021 5)	(0.004 5)	(0.012 2)	(0.011 8)
创新能力	0.039 4	0.028 2***	0.010 1	-0.002 7	0.007 7	0.008 7
	(0.024 4)	(0.009 8)	(0.009 0)	(0.004 9)	(0.008 8)	(0.009 2)
Constant	0.059 0***	-0.002 5	0.009 2	0.023 2***	0.020 0***	0.012 9***
	(0.011 9)	(0.003 5)	(0.006 1)	(0.001 7)	(0.003 9)	(0.003 3)

Robust standard errors in parenses, *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1.

进一步探讨各影响因素对不同准则层韧性的影响，可以得知：行政能力对五个准则层的影响显著性不强，仅对组织管理韧性和经济韧性分别通过 5%和 10%的显著性检验，说明行政能力对于地区各准则层韧性的作用力都很小，这可能恰恰是行政能力对该区域整体韧性影响不显著的原因。开放强度对经济韧性、社会韧性、生态韧性影响显著，均通过 1%显著性检验，方向均为正，对设施韧性、组织管理韧性的影响不显著，说明大量的引进外资对于城市的经济发展、社会环境、生态保护等方面促进作用明显。产业结构多样化对五个准则层的影响均通过了 1%的显著性检验，且均为正向影响，说明城市产业结构不断调整和优化过程，不仅关乎到经济、社会发展，同时与生态保护、基础设施完善及组织管理水平提升都是密切相连的。城市化水平同样对五个准则层正向影响显著，且均通过了 1%的显著性检验，体现了城市化过程是带动产业人力资源集聚的过程、城市社会结构和生态结构优化的过程、基础服务设施不断完善的过程、组织管理水平不断提升的过程。创新能力只对经济韧性产生正向影响，且通过 1%的显著性检验，对其他准则层影响不显著，说明现阶段该区域科技创新水平在经济领域有了显著提升，为经济发展增添了新的动力，而在其他领域科技创新投入略显不够，带动作用明显不足。

3.2 预测结果分析

利用灰色预测模型预测城市韧性水平，并通过极比值检验模型适宜性，通过计算后验差比 C 值和小误差概率 p 值检验模型预测结果精度。基于 2006~2021 年长江中游城市群城市韧性测度值，利用灰色预测模型对该区域 2023~2027 年城市韧性水平进行预测，得到预测结果。模型预测结果检验显示，极比值检验值均在标准范围区间[0.889, 1.125]之内，说明 GM(1,1)模型构建适宜；后验差比 C 值均小于 0.35,说明预测结果精度等级好；小误差概率 p 值检验，除南昌市 P 值为 0.875,预测结果精度为合格外，其他地区 P 值均为 1,预测结果精度高，如表 4 所示。

图 6 是对 2023、2027 年预测结果的空间插值。结合表 4 可知，长江中游城市群城市韧性将继续呈现稳步增长的发展态势，城市韧性水平将得到显著提升。从城市韧性等级变化来看，到 2027 年，该区域高度韧性等级城市基本数量保持不变，仍然只有武汉、长沙、南昌和株洲四个城市，但其城市韧性增长速度远高于其他城市，韧性值分别增长至 0.787 9、0.791 9、0.615 8 和 0.675 4,达到很高韧性水平；较高韧性等级城市数量呈现大幅增长态势，由 2021 年的 0 个增长到 14 个，超过一半以上；其余城市均达到一般韧性等级，再无低韧性等级城市。从城市韧性空间格局变化来看，城市韧性地域性分异仍然显著存在，地区间差异呈现进一步扩大的趋势，“核心-边缘”城市韧性空间分布格局进一步稳固，武汉、长沙、南昌、株洲等区域中心城市的核心地位进一步强化。区域整体韧性水平的提升有利于增强城市未来应对风险的能力，但是地区间城市韧性水平不断扩大的差异，不利于提高地区间联合抵抗风险的协作能力。因此，加强地区间联系，开展区际合作，发挥核心地区扩散效应和带动作用，将成为未来该区域韧性水平提升的重要方向。

表 4 长江中游城市群城市韧性预测结果

城市	后验差比 C 值	小误差概率 p 值	韧性预测值				
			2023 年	2024 年	2025 年	2026 年	2027 年
常德市	0.009 6	1	0.364 4	0.379 4	0.394 6	0.409 9	0.425 4
长沙市	0.008 5	1	0.661 4	0.691 9	0.723 7	0.757 1	0.791 9
鄂州市	0.060 6	1	0.361 2	0.376 0	0.390 9	0.406 0	0.421 3
衡阳市	0.030 9	1	0.367 0	0.381 7	0.396 4	0.411 4	0.426 5
黄冈市	0.012 8	1	0.292 3	0.305 4	0.319 0	0.333 2	0.348 0

黄石市	0.016 8	1	0.383 8	0.399 4	0.415 2	0.431 2	0.447 4
荆门市	0.025 1	1	0.321 6	0.334 5	0.347 6	0.360 8	0.374 1
荆州市	0.015 5	1	0.333 7	0.350 7	0.368 5	0.387 3	0.407 1
景德镇市	0.052 6	1	0.375 5	0.394 4	0.414 3	0.435 2	0.457 1
九江市	0.035 5	1	0.396 6	0.413 5	0.430 6	0.447 9	0.465 5
娄底市	0.030 6	1	0.296 4	0.309 2	0.322 2	0.335 2	0.348 4
南昌市	0.156 2	0.875	0.550 1	0.566 2	0.582 6	0.599 1	0.615 8
萍乡市	0.073 8	1	0.314 5	0.326 8	0.339 2	0.351 7	0.364 3
上饶市	0.016 1	1	0.339 2	0.354 2	0.369 4	0.384 8	0.400 3
武汉市	0.050 8	1	0.709 8	0.728 5	0.747 8	0.767 6	0.787 9
咸宁市	0.043 6	1	0.328 6	0.345 1	0.362 3	0.380 5	0.399 5
湘潭市	0.015 4	1	0.416 9	0.432 0	0.447 4	0.462 9	0.478 5

襄阳市	0.005 6	1	0.400 4	0.422 7	0.446 3	0.471 1	0.497 3
孝感市	0.008 1	1	0.289 1	0.300 7	0.312 3	0.324 1	0.336 0
新余市	0.014 4	1	0.406 4	0.422 2	0.438 1	0.454 3	0.470 6
宜昌市	0.065 0	1	0.427 2	0.443 6	0.460 1	0.476 9	0.493 8
宜春市	0.061 7	1	0.362 4	0.380 2	0.398 3	0.416 7	0.435 2
益阳市	0.028 4	1	0.304 5	0.316 3	0.328 2	0.340 2	0.352 2
鹰潭市	0.037 3	1	0.314 4	0.329 7	0.345 2	0.360 8	0.376 7
岳阳市	0.046 4	1	0.351 7	0.364 1	0.376 7	0.389 3	0.402 1
株洲市	0.005 9	1	0.567 2	0.593 6	0.620 4	0.647 7	0.675 4

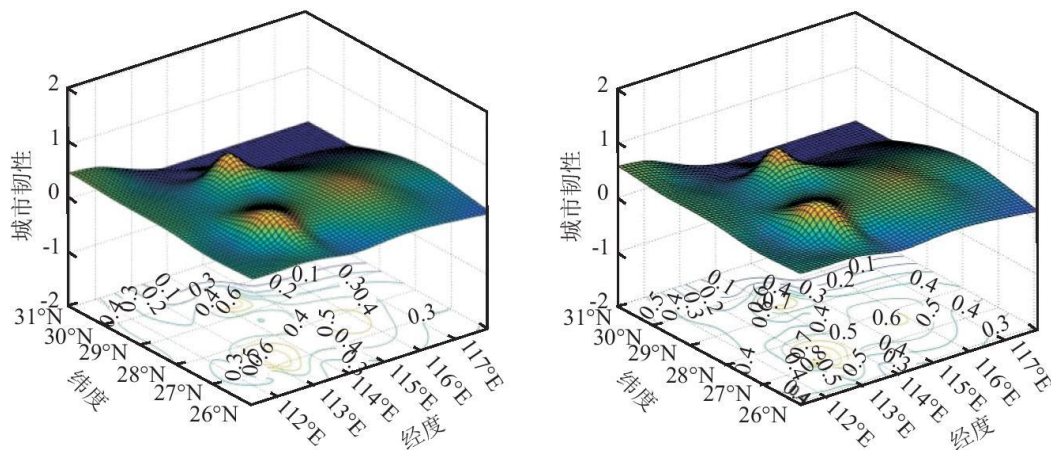


图6 长江中游城市群城市韧性预测结果空间插值

4 结论与讨论

4.1 结论

以长江中游城市群为研究对象区域，基于 2006~2021 年韧性指标数据，运用熵值法、ArcGIS 软件等手段对城市韧性进行测度及可视化呈现，并对其时空演化特征进行刻画，借助面板数据回归模型探讨城市韧性发展变化的主要影响因素及作用机理，利用灰色预测模型对该区域城市韧性发展变化进行预测，得到如下结论：

(1)研究期内，长江中游城市群城市韧性总体水平较低，地区间城市韧性虽存在一定空间差异，但离散程度较小，并呈缓慢收敛的态势；时序变化上，城市韧性水平呈现缓慢持续稳步增长态势，各地区增长幅度相对一致，地区之间发展速度比较平衡，武汉城市圈、环长株潭城市群及环鄱阳湖城市群三大区域城市韧性增长格局发生变化，武汉城市圈在区域韧性提升中的作用有所下降；城市韧性空间演化体现了从低等级韧性向高等级韧性演替的规律，高等级韧性区少，低等级韧性区分布广泛，基本形成“以顶点为高韧性区，边为中、低韧性区的正三角形形态的核心-边缘”空间格局。

(2)总体上，区域城市韧性受开放强度、产业结构及城市化水平等因素的正向影响比较明显，且均通过 1%的显著性检验，其中城市化水平影响最大，开放强度和产业结构多样化影响稍弱，行政能力和创新能力虽反映出对城市韧性具有正向影响，但其均未显著；开放强度、产业结构及城市化水平均对经济、社会、生态、设施及组织管理等各层次韧性产生显著影响，行政能力和创新能力只对经济和组织管理韧性产生微弱影响，也反映出区域行政管理水平和创新能力比较低，需要进一步提升。

(3)未来五年，长江中游城市群城市韧性仍将呈现稳步增长的发展态势，城市韧性水平将得到显著提升，高韧性区将会大幅增加，地区间差异呈现扩大趋势，武汉、长沙、南昌、株洲等区域中心城市的核心地位将进一步突显，区域“核心-边缘”城市韧性空间格局将进一步稳固。

4.2 讨论

文章通过阐释城市韧性内涵，解析城市韧性发展的基本逻辑，一定程度上充实和丰富了城市韧性基本理论，也为城市韧性测度及影响因素指标选取提供了有力理论支撑，这可能是相较于其他关于城市韧性研究成果所做的一点理论贡献。基于演化韧性理论和前人的研究成果，构建了经济韧性、社会韧性、生态韧性、设施韧性和组织管理韧性等五维城市韧性测度指标体系，尤其是组织管理韧性维度在已有研究成果基础上，突破了城市自身发展要素的局限，充分体现了人本身在城市韧性发展中的作用，一定程度上优化了城市韧性测度指标体系；利用灰色预测模型对研究区域未来城市韧性水平进行动态预测，打破了之前研

究成果更多注重针对城市发展的基本状态数据进行静态研究的惯例，某种程度上完善了城市韧性研究的范式；关于城市韧性水平测度及时空演化特征、城市韧性影响因素、城市韧性动态预测等研究结果也能为长江中游城市群优化城市发展资源配置和城市韧性空间格局提供科学依据，为当地政府科学制定城市发展战略，政策制定部门宏观把握地区差异，充分利用地区优势提升城市韧性水平，促进城市高质量协调发展提供理论参考。

此外，也存在以下方面的研究不足：一是指标体系构建还有待进一步完善，虽然已经考虑到人本身的因素，但只是从人作为城市的管理者的角度设置指标，基于数据获取性较困难的因素，没有将人自身的属性如文化修养、个人素养、道德水平等因素纳入测度指标范围，文化层面和数字经济层面也没有纳入城市韧性测度指标体系，从一定程度上影响测度结果的科学性；二是利用面板数据回归分析城市韧性的影响因素，具有更多的维度和更大的样本量、解决遗漏变量偏差问题、模型估计的有效性和精确度更高的特点，但是忽视了变量之间的空间关系，无法体现变量之间的空间自相关影响；三是应用灰色预测模型做城市韧性水平动态预测，主要基于前面的城市韧性测度结果，根据地区城市韧性时序变化规律进行预测，很难综合考虑城市韧性发展变化过程中其他外界影响因素，可能对结果造成一定的误差。这些都需要在今后的研究中不断的改进和完善。

参考文献：

- [1]邵亦文，徐江.城市韧性：基于国际文献综述的概念解析[J].国际城市规划，2015, 30(2) : 48-54.
- SHAO Y W, XU J. Understanding urban resilience: A conceptual analysis based on integrated international literature review [J] . Urban Planning International, 2015 , 30(2) : 48-54.
- [2]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.
- SHI L Y, ZHENG Q Y, YANG M, et al. A review of definitions ,influence factors and assessment of urban resilience [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022 , 42(14) : 6016 - 6029.
- [3]李亚，翟国方.我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究[J].规划师，2017, 33(8) : 5-11.
- LI Y, ZHAI G F. China' s urban disaster resilience evaluation and promotion[J] . Planners, 2017 , 33 (8) : 5- 11.
- [4] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. Engineering Structures, 2010 , 32 (11) : 3639-3649.
- [5] BERKES F, FOLKE C. Linking social and ecological systems for resilience and sustainability [M] BERKES F, FOLKE C. Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998 : 13-20.
- [6] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J] . Annual Review of Ecology and Systematics, 1973 , 4 : 1 -23.
- [7] CUTTER S L, BARNES L, BERRY M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J] . Global Environmental Change, 2008 , 18 (4) : 598 -606.
- [8] JABAREEN Y. Planning the resilient city: Concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk [J] .

Cities, 2013, 31: 220-229.

[9] NYSTROM M, JOUFFRAY J B, NORSTROM A V, et al. Anatomy and resilience of the global production ecosystem [J] . Nature, 2019, 575(7781) : 98- 108.

[10] O'CONNELL D, WALKER B, ABEL N, et al. The resilience, adaptation and transformation assessment framework : From theory to application [R] . Canberra, Australia: CSIRO, 2015.

[11] CARL F. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses[J] . Global Environmental Change,2006, 16(3) : 253-267.

[12] HOLLAND J H. Studying complex adaptive systems [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2006, 19(1) : 1-8.

[13] ROMERO LANKAO P , QIN H. Conceptualizing urban vulnerability to global climate and environmental change [J] . Current Opinion in Environmental Sustainability, 2011 , 3 (3) : 142 -149.

[14] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities [J] . Earthquake Spectra,2007, 23(1) : 41-62.

[15] DAVIDSON R A, QAGNAN Z. Restoration modeling of lifeline systems[J] . Research Progress and Accomplishments, 2004 : 55-64.

[16] 臧鑫宇, 王娇.城市韧性的概念演进、研究内容与发展 趋势[J].科技导报, 2019, 37(22) : 94-104.

ZANG X Y , WANG Q. The evolution of the urban resilience concept, and its research contents and development trend [J] . Science & Technology Review, 2019, 37(22) : 94- 104.

[17] 孙 阳, 张落成, 姚士谋.基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J].中国人口 -资源与环境, 2017, 27(8) : 151-158.

SUN Y, ZHANG L C, YAO S M. Evaluating resilience of prefecture cities in the Yangtze River delta region from a socio-eco-logical perspective[J] . China Population , Resources and Environment, 2017, 27(8) : 151-158.

[18] 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 M D, FENG X Q. Comprehensive evaluation on Chinese cities' resilience [J]. Urban Problems, 2018(10) : 27 -36.

[19] 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.

WANG S M, NIU J L. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong peninsula urban agglom-eration[J] . Economic Geography, 2022 , 42(8) : 51 - 61.

[20] 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 L M , XIU C L, FENG X H, et al. A comprehensive assessment of urban resilience and its spatial differentiation in Chi-na[J] . World Regional Studies, 2019 , 28(6) : 77-87.

[21] 刘彦平.城市韧性系统发展测度—基于中国 288 个城市 的实证研究[J].城市发展研究, 2021, 28(6) : 93-100. LIU Y P. Urban resilience system development measurement: Based on an empirical study of 288 Chinese cities [J] . Urban Development Studies, 2021, 28 (6) : 93- 100.

[22] 彭 翀, 林樱子, 顾朝林.长江中游城市网络结构韧性评 估及其优化策略[J].地理研究, 2018, 37 (6): 1193-1207.

PENG C , LIN Y Z, GU C L. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River [J] . Geographical Research, 2018 , 37 (6) :1193-1207.

[23] 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.

WANG X, SHI J L, CI F Y. Temporal and spatial evolution characteristics of resilience of urban agglomerations in Yellow River Basin[J] . Statistics & Decision, 2022 , 38(5) : 70-74.

[24] 孙亚南, 尤晓彤.城市韧性的水平测度及其时空演化规 律——以江苏省为例[J].南京社会科学, 2021 (7): 3140, 48.

SUN Y N , YOU X T. The measure of urban resilience and its spatio-temporal evolution : A case study of Jiangsu province[J]. Nanjing Journal of Social Sciences, 2021 (7): 31-40 , 48.

[25] 甘畅, 王 凯.湖南省旅游发展与经济韧性的耦合协调 性研究[J].地理与地理信息科学, 2022, 38(2) : 137-144.

GAN C, WANG K. Research on coupling coordination of tourism development and economic resilience in Hunan Province [J] . Geography and Geo-Information Science, 2022 , 38 (2) : 137 - 144.

[26] 修春亮, 魏冶, 王绮.基于“规模—密度—形态”的大 连市城市韧性评估[J].地理学报, 2018, 73(12) : 2315-2328.

XIU C L, WEI Z, WANG Q. Evaluation of urban resilience of Dalian city based on the perspective of “ Size-Density-Morphology” [J] . Acta Geographica Sinica, 2018 , 73 (12) : 2315 - 2328 .

[27] 路 兰, 周宏伟, 许清清.多维关联网络视角下城市韧性 的综合评价应用研究[J].城市问题, 2020(8) : 42-55.

LU L, ZHOU H W, XU Q Q. Application research on comprehensive evaluation of urban resilience from the perspective of multidimensional relational networks [J]. Urban Problems, 2020(8) : 42-55.

[28] 程 皓, 阳国亮, 纪晓君.中国十大城市群城市韧性与环 境压力脱钩关系研究[J].统计与决策, 2019, 35(7): 79-83.

CHENG H, YANG G L, JI X J. A study on decoupling relationship between urban toughness and environmental pressure in China's top ten city agglomerations [J]. Statistics & Decision, 2019, 35(7) : 79-83.

[29] 陈韶清, 夏安桃.长江中游城市群城市韧性与规模关系的 时空分析[J].湖南师范大学自然科学学报, 2020, 43(3): 10- 17.

CHEN S Q, XIA A T. Space-time analysis on the relationship between urban resilience and scale of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J] . Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2020 , 43 (3) : 10- 17.

[30] 李连刚, 胡晓辉.新冠肺炎疫情下中国区域经济韧性时空 格局与影响因素分析[J].世界地理研究, 2023, 32(3): 64-75.

LI L G, HU X H. Analysis on the spatial-temporal pattern and influencing factors of regional economic resilience in China under the COVID-19 pandemic [J]. World Regional Studies, 2023, 32(3) : 64-75.

[31] 方叶林, 苏雪晴, 黄震方, 等.城市韧性对旅游经济的空间 溢出效应研究——以长三角城市群为例[J].地理科学进 展, 2022, 41(2) : 214-223.

FANG Y L, SU X Q, HUANG Z F, et al. Spatial spillover effect of urban resilience on tourism economy: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration [J] . Progress in Geography, 2022, 41(2) : 214-223.

[32] 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.

LI X M, LIU K Q, TIAN S Z, et al. Evaluation of urban human settlements resilience based on DP SIR model: A case study of the Yangtze River Delta urban systems [J] . Human Geography, 2022, 37(1) : 54-62.

[33] 陈韶清, 夏安桃.快速城镇化区域城市韧性时空演变及障 碍因子诊断——以长江中游城市群为例[J].现代城市研 究, 2020, 35(1) : 37-44, 103.

CHEN S Q, XIA A T. Spatio-temporal evolution of urban resilience and diagnosis of obstacle indicators in rapidly urbanized regions: A case study of the urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J] . Modern Urban Research ,2020,35(1): 37-44, 103.