

基于 BP 神经网络与熵值法的浙江省城市韧性评估研究

孔家辉, 邹逸江*, 斯港杰

(宁波大学 地理科学与旅游文化学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 以浙江省为例, 利用 BP 神经网络与熵值法综合建模, 对 2011—2020 年间浙江省各地级市的城市韧性进行定量评价, 分析经济、社会、环境、设施 4 项城市单系统韧性及其复合韧性, 从而揭示浙江省城市韧性的空间分布特征与发展规律。研究表明: 浙江省韧性发展趋势较为平稳, 韧性水平的空间分布差异较大, 内部存在发展不均衡现象; 核心地区与边缘地区的韧性水平均呈现缓慢上升势态, 且分异格局短期内不会发生改变。

关键词: 浙江省; 城市韧性; 熵值法; BP 神经网络; 决策评价

中图分类号: TU984.11+6; TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5132 (2022) 04-0085-08

城市韧性是指城市系统经过有序准备后实现缓冲与对抗未知灾害带来的扰动, 实现公共安全、社会秩序和经济建设等正常运行的能力^[1]。伴随中国城市化进程的不断加快, 城市所面临的风险随着城市人口与空间分布的密集化、经济发展的多元化、社会结构的复杂化而日益增加。提升城市韧性既能在灾前设置缓冲区, 起到预防效果, 又能增强城市各系统灾后的自我修复能力。Cutter 等^[2]提出城市韧性应充分考虑经济、社会、城市基建、生态环境等多方面因素, 构建全面城市韧性评价体系。修春亮等^[3]构建基于“规模-密度-形态”的三维城市韧性研究框架, 评判大连城市韧性特征与潜在灾害的危险性。王丽华等^[4]选取长江中下游地区 20 个城市, 利用 FCM 聚类算法划分城市韧性等级, 分析不同城市韧性等级间的空间差异。吴浩等^[5]在双评价指南的基础上引入多源时空数据, 建立基于“隐性-韧性-显性”的城市资源环境承载力空间特征分析理论框架。陈羽丹^[6]利用 PSR 模型, 深入分析城市韧性发挥中“压力韧性”“状态韧性”“响应韧性”的过程, 对湖北黄石市进行城市韧性水平的量化评估。白立敏等^[7]从经济、社会、生态、基础设施 4 个方面系统构建了城市韧性综合测度指

标体系, 利用熵值法对我国地级以上城市韧性进行定量评估。孙才志等^[8]建立以信息熵为基础的海洋经济系统韧性评价体系, 利用 SBM 模型测算环渤海地区沿海城市的海洋经济系统熵变过程及韧性的演化规律。缪惠全等^[9]建立基于恢复过程的城市韧性评价体系, 通过救援、避难、重建、复兴 4 个阶段, 解析城市灾后恢复过程, 进而对城市韧性进行系统分析。

城市韧性的相关研究尚处于初级阶段, 虽然国内外学术界对城市韧性这一概念的解析已较为深入, 但对如何将城市韧性理念运用到不同地区的各级城乡规划中, 目前仍无成熟的理论体系和技术^[10]。近年来, 在浙江省 4 大都市圈高速发展的同时, 城市各类问题频发, 城市内外的潜在风险呈现出形式多样、关系复杂等特征。风险在制约城市经济、社会发展的同时, 还严重威胁城市居民的生命健康与财产安全。例如, 2020 年突发的新冠肺炎疫情、南方地区多轮强降水造成的洪涝灾害等危机事件, 浙江省各地级市的城市安全环境都受到了严重冲击, 因此亟需关注浙江省的城市韧性建设, 着力推动各地级市的城市系统韧性提升。目前, 浙江省形成了“工业化超前、城市化滞后”的错位局

收稿日期: 2022-02-24.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journaljg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(41801256); 浙江省公益项目(GF19D010001); 浙江省高校重大人文社科攻关计划项目(2021GH014)。

第一作者: 孔家辉(1996-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 地图学与地理信息系统。E-mail: 1911073008@nbu.edu.cn

*通信作者: 邹逸江(1963-), 男, 江苏宜兴人, 博士/教授, 主要研究方向: 3S 技术应用研究。E-mail: zouyijiang@nbu.edu.cn

面,城市发展面临严重问题,且有关浙江省城市韧性的研究较少。

本文以浙江省 11 个地级市为研究对象,采用 BP 神经网络和熵值法,通过经济、社会、环境和设施 4 个维度构建城市韧性评价体系,以期优化浙江省城市空间格局,应对潜在的灾害提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

浙江省位于我国东南沿海地区(118°~123°E, 27°12'~31°31'N)。据 2021 年《浙江统计年鉴》,截至 2020 年底全省辖 11 个地级市,37 个市辖区、53 个县级市。研究区位置如图 1 所示。

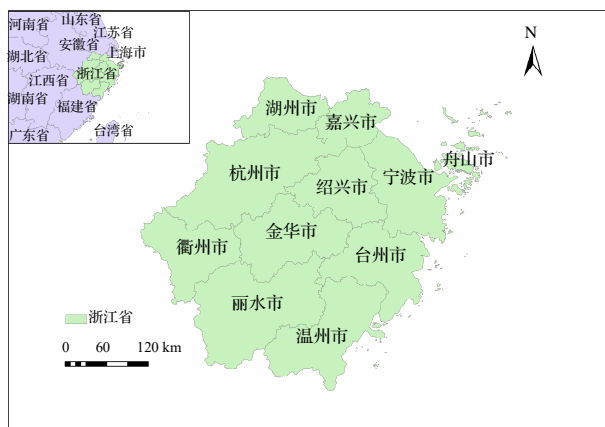


图 1 研究区位置

1.2 数据来源

本文数据来源: 2011—2020 年的《中国城市统计年鉴》《浙江自然资源与环境统计年鉴》《浙江经济普查年鉴》《城市供水统计年鉴》《浙江统计年鉴》以及浙江省杭州市、宁波市、温州市等 11 个地级市的地方统计年鉴等。针对部分数据的缺失,采用插值法填补数据。

2 研究方法

2.1 评价指标体系

Mayunga^[11]通过社会、经济、物质、人力和自然 5 个角度具体量化了社区灾害韧性,将城市韧性理论研究初步量化到实际应用中。Bruneau 等^[12]提出了社区韧性评价 4 维模型,4 个维度包含技术、组织、社会和经济,各维度均需要满足鲁棒性、冗余

性、智慧性和快速性 4 个基本特性,但是该评价体系缺乏考虑城市设施、医疗等系统,不同维度的量化分析方法还不够具体。此外,国内不同领域的多名学者从自身研究出发,围绕环境、社会、经济以及文化等多个方向建立了不同的城市韧性评价体系^[13-15]。

基于已有的相关研究,本文运用 AHP 方法的分层思想,按照目标层、准则层和指标层确定总体层级。以浙江省城市韧性水平为目标层,选取经济、社会、环境、设施 4 大城市子系统作为准则层,影响城市子系统的代表指标作为指标层,每层包含 5 项三级指标,共计 20 项(表 1)。其中过高的外资使用金额易加剧国内经济结构的失衡,对本土经济产生一定程度的挤占效应,因此将此类指标作为负向指标;作为负向指标的还有城镇失业人员数量、社会抚养比、二氧化硫排放、工业废水排放。其余指标均定义为正向指标。

2.2 熵值法

熵值法可以对影响城市系统韧性的变异程度进行客观评价,其变异大小与其重要性成正比,与其所处信息熵成反比。指标对城市韧性影响程度越高,其所占权重越大,反之则越小^[16]。使用熵值法确定各项指标的权重,既可以合理规避人工臆断所造成的主观影响,也可以有效克服多指标变量间的信息重叠问题^[17]。本文采用熵值法,计算影响浙江省城市韧性的 20 个三级评价指标所占权重。

使用熵值法计算前先将影响城市韧性等级的 20 项原始数据进行归一化处理。

正向指标归一化处理公式为:

$$X'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}},$$

反向指标归一化处理公式为:

$$X'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}},$$

式中: X'_{ij} 为原始数据归一化后值; x_{ij} 表示第 i 个地级市中影响城市韧性的第 j 项指标值。

本文的正向指标指代与城市韧性具有正相关关系,正向指标越大,影响城市韧性的积极性越强;反向指标与城市韧性具有负相关关系,影响城市韧性消极性越强,则负向指标越大。

表 1 浙江省城市韧性评价指标体系

目标层 (一级指标)	准则层 (二级指标)	指标层 (三级指标)	指标属性	指向
城市韧性	经济韧性	人均 GDP(X_1)/万元	正向	整体经济发展水平
		外资使用金额(X_2)/万元	负向	外资影响本土经济的潜在风险
		地方一般公共预算支出(X_3)/万元	正向	公共投资水平
		居民人均可支配收入(X_4)/万元	正向	居民收入与生活质量
		第三产业从业人员比重(X_5)/%	正向	城市经济结构
	社会韧性	每万人在校大学生数(X_6)/万人	正向	教育投入与人才储备
		每万人医院病床数(X_7)/万元	正向	医疗条件与质量
		非农就业人口比重(X_8)/%	正向	人口结构
		城镇登记失业人员数量(X_9)/万人	负向	就业市场
		社会抚养比(X_{10})/%	负向	未来劳动力发展潜力
	环境韧性	人均绿地面积(X_{11})/ m^2	正向	环境的宜居性
		工业固体废物综合利用率(X_{12})/%	正向	工业排放与回收利用情况
		万人二氧化硫排放(X_{13})/t	负向	空气质量
		污水集中处理率(X_{14})/%	正向	水资源回收利用
		工业废水排放(X_{15})/t	负向	水体污染等环境问题
	设施韧性	人均道路面积(X_{16})/ m^2	正向	交通通达度与拥堵程度
		万人拥有公共汽车(X_{17})/辆	正向	公共交通水平
		城市排水管道密度(X_{18})/ m^2	正向	预防洪涝灾害水平
		天然气普及率(X_{19})/%	正向	生活便捷性
		互联网普及率(X_{20})/%	正向	信息接收度

2.3 BP 神经网络

BP 神经网络是一种经典学习算法, 在自动化控制、人工智能等领域已得到了广泛应用. Clelland 最早提出 BP 神经网络的概念^[18], 其基本结构组成由一个输入层、多个隐藏层和一个输出层组成, 每层包含若干神经元节点, 结构如图 2 所示. 其中 $X_1 \sim X_n$ 为 n 个样本的输入层, $1 \sim m$ 为模型中 m 个隐藏层, Y 为 BP 神经网络的输出层.

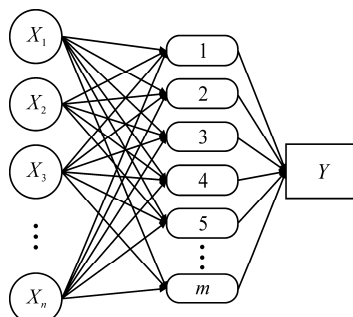


图 2 三层 BP 神经网络拓扑结构

利用 Matlab 中 newff 函数构建三层 BP 神经网络,

将经济、社会、环境、设施城市子系统中共计 20 项三级指标以及熵值法计算后的权重作为输入层数据, 城市子系统韧性得分作为输出层数据. 构建拓扑结构为 $20 \times 10 \times 1$ 的 BP 神经网络模型, 输入层神经元 $X_1 \sim X_{20}$, 隐藏层神经元 10 个, 输出层神经元 1 个, 学习速率设置为 0.01, 训练精度设置为 1×10^{-3} , 最大训练次数设置为 1 000 次. 输出的城市韧性评价在 $[0, 1]$ 区间. 不断优化后得到上述 20 个输入层指标与城市韧性强度间的关联, 进而对浙江省各城市的城市复合韧性进行评价.

3 韧性分析结果

3.1 城市韧性总体分析

通过熵值法计算得出浙江省各地级市 2011—2020 年影响城市韧性的三级指标权重, 历年权重取平均值, 即可得到浙江省城市韧性评价指标权重(表 2). BP 神经网络模型经过 103 次的训练, 误差下降至 0.001 以下, 完成目标精度要求(图 3). 将浙

江省各地级市经济、社会、环境、设施 4 个城市子系统的 20 类数据归一化后输入训练完毕的 BP 神经网络模型中,运行迭代后输出 2011—2020 年间浙江省 11 个地级市的经济、社会、环境、设施 4 个子系统的韧性得分,使用自然间断点法将得分分割成 5 个等级,得到 BP 神经网络的训练数据评价标准(表 3)。设定 1 级为低韧性,2 级为较低韧性,3 级为中等韧性,4 级为较高韧性,5 级为高韧性。等级由低到高指示城市韧性逐渐增大。

表 2 浙江省城市韧性评价指标权重

二级指标	权重	三级指标	权重
经济韧性	0.250 5	X_1	0.049 7
		X_2	0.051 3
		X_3	0.047 1
		X_4	0.049 9
		X_5	0.050 5
社会韧性	0.238 0	X_6	0.049 2
		X_7	0.050 3
		X_8	0.051 2
		X_9	0.051 1
		X_{10}	0.050 2
环境韧性	0.248 1	X_{11}	0.047 3
		X_{12}	0.051 2
		X_{13}	0.051 2
		X_{14}	0.051 0
		X_{15}	0.050 8
设施韧性	0.263 4	X_{16}	0.050 4
		X_{17}	0.047 1
		X_{18}	0.050 7
		X_{19}	0.050 3
		X_{20}	0.049 7

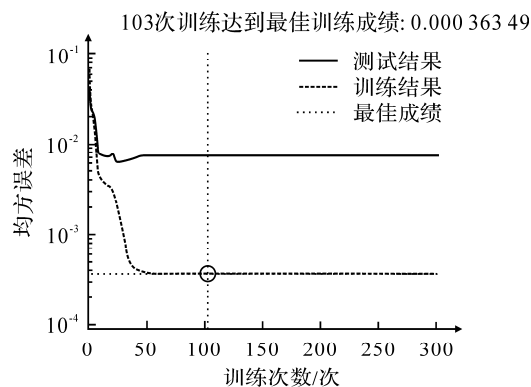


图 3 BP 神经网络训练曲线

表 3 城市韧性等级评价标准

韧性评价等级	韧性水平范围	韧性含义
1 级	[0, 0.234 6)	低韧性
2 级	[0.234 6, 0.262 2)	较低韧性
3 级	[0.262 2, 0.334 1)	中等韧性
4 级	[0.334 1, 0.391 2)	较高韧性
5 级	[0.391 2, 0.597 0)	高韧性

浙江省城市总体韧性水平发展趋势如图 4 所示。浙江省 2011—2020 年韧性发展整体较为平稳。2011—2014 年出现明显下降趋势,由 2011 年的 0.45 降至 2014 年的 0.33; 2014—2017 呈现上升趋势,由 2014 年的 0.33 上升到 2017 年的 0.38; 增长率达到 15.15%; 2017—2020 年呈现“下降—上升—平稳”的发展趋势。得益于浙江省原始城市韧性水平较强,虽然 10 年间的韧性发展没有明显的上升趋势,但全省整体韧性仍然维持在中高韧性水平。

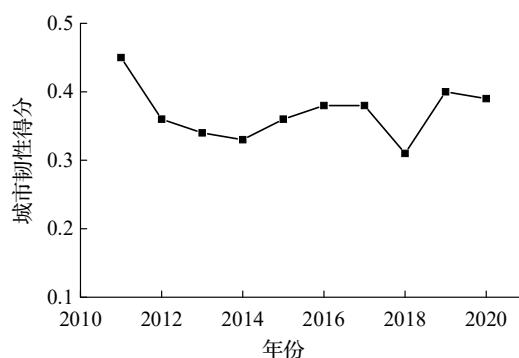


图 4 浙江省城市韧性发展水平

3.2 单系统韧性时序分析

将归一化后 2011—2020 年浙江省各地级市城市韧性指标权重输入 BP 神经网络模型中,得到浙江省 11 个地级市的经济、社会、环境、设施系统的韧性指数,绘制各地级市的单系统城市韧性水平时序,结果如图 5~8 所示。

利用自然间断点法,将浙江省各地级市 10 年韧性平均得分分成 3 类。从图 5 可以看出,浙江省经济韧性发展平均得分中杭州市与宁波市为第一梯队,10 年间平均得分维持在 0.70 以上。“十二五”至“十三五”期间,杭州市逐渐转型至以数字经济产业为核心,结合文化创意产业、金融服务产业、旅游休闲等产业协同发展的新兴多元产业结构。宁波市结合自身优势,着力推动传统制造业产业、港口业和高新技术产业集群的信息化。舟山市、温

州市、绍兴市、嘉兴市、台州市为第二梯队, 经济韧性指数上下波动不明显, 基本保持不变. 丽水市、湖州市、金华市、衢州市为第三梯队. 从发展趋势看, 浙江省各地级市经济韧性变化幅度较小, 发展较为平稳. 台州市的经济韧性上升幅度居全省第一, 从“十二五”至“十三五”期间增长达 79.33%.

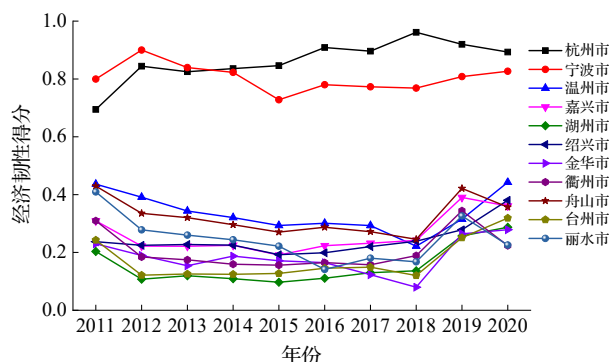


图5 浙江省地级市经济韧性得分

从图6社会韧性发展平均得分可以看出, 丽水市和杭州市处于第一梯队, 10年间平均得分在0.65以上. 杭州市近年来通过提高大学生租房补贴、高层次人才购房补贴等政策, 吸引中高层次人才入驻, 同时不断提升本地高校质量, 培养出大批优质毕业生. 丽水市逐步完善人才储备政策, 创造新岗位与新机遇, 一定程度上降低了居民失业率与社会抚养比. 温州市、宁波市、嘉兴市、舟山市、绍兴市为第二梯队, 10年间平均得分在0.50上下. 其余4个地级市为第三梯队, 10年间平均得分在0.30以下. 从发展趋势看, 浙江省各地级市社会韧性变化趋势分异明显, 其中台州市、湖州市和衢州市的社会韧性水平整体呈现上升趋势, 而宁波市和温州市则呈现小幅下降趋势. 宁波市数字产业的缺失导致其对外部人才的吸引力不足, 同时高等院校数量过少, 阻碍了本地中高层次人才的孵化, 导致社会韧性逐年下降. 在2017—2020年期间, 浙江省各地级市的社会韧性水平呈现“下降—上升—平稳”的势态, 体现浙江省各地级市的社会保障体系正在逐步完善.

从图7浙江省地级市环境韧性发展的平均得分可以看出, 舟山市为第一梯队, 10年间平均得分在0.80以上. 舟山市主要以第一产业和第三产业为主, 近年来依托海洋经济不断更新产业结构, 其

产生的二氧化硫、工业污水排放与杭州市、宁波市对比相对较少; 同时, 舟山市人均绿地面积与水资源利用率高, 使其环境韧性平均水平维持在0.80以上. 除衢州市和绍兴市外其余8个地级市为第二梯队, 平均得分在0.30上下. 衢州市和绍兴市为第三梯队, 平均得分低于0.20. 从发展趋势看, 浙江省各地级市的环境韧性呈现从震荡到平稳的趋势. 其中衢州市的环境韧性上升幅度居全省第一, “十二五”至“十三五”期间增长76.75%. 近年来, 衢州市积极响应浙江省3轮“811”环保行动, 解决了重点环境污染问题, 加快建设生态立市, 提升了城市环境韧性.

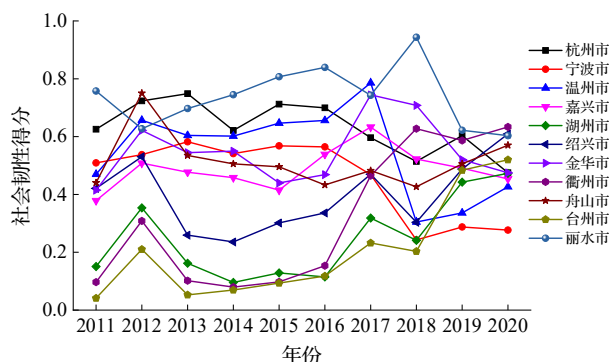


图6 浙江省地级市社会韧性得分

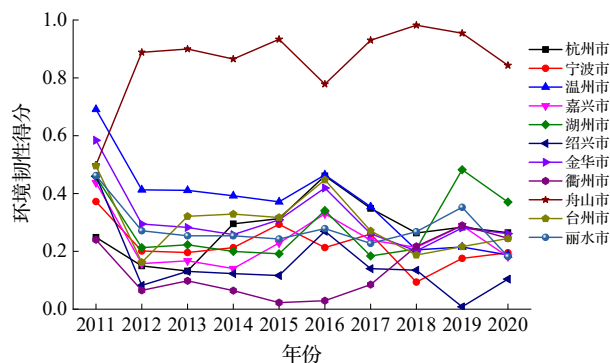


图7 浙江省地级市环境韧性得分

从图8浙江省地级市设施韧性发展的平均得分可以看出, 舟山市、宁波市、湖州市、杭州市处于第一梯队, 10年间平均得分在0.50以上. “十二五”至“十三五”规划期间, 舟山市人口基数小, 人均基础设施拥有量较多, 设施韧性平均水平居全省最高; 杭州市完善以公共交通为主导的城市出行系统、多式联运物流系统, 不断提升综合交通服务能力和质量; 宁波市加快发展大中运量公共交通, 弥补之前地铁轨道交通的缺失, 并优化加密常

规公交线网与公交专用道路网。温州市和嘉兴市为第二梯队,平均得分在0.40上下。其余5个地级市为第三梯队,平均得分在0.30以下。从发展趋势看,浙江省各地级市整体环境韧性发展呈现从震荡到平稳。2017—2019年期间,浙江省城市设施韧性整体波动较大,其中嘉兴市、衢州市、台州市和丽水市的设施韧性发展呈现峰值式的“上升-下降”趋势;杭州市和绍兴市出现小幅上升趋势;其余5个地级市均呈现不同程度的下降趋势。其中衢州市的设施韧性上升幅度居全省第一,从“十二五”至“十三五”期间增长达50.56%。近年来,衢州市加快建设高速公路网与城乡道路网,建立城乡快速交通连接体系,同时增加并提升对市政基础设施与便民服务设施的数量与质量,增强城市设施韧性。

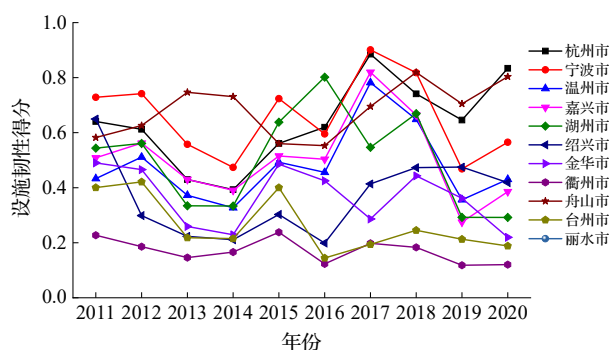


图8 浙江省地级市设施韧性得分

3.3 复合韧性空间分异特征

将经济、社会、环境、设施4个子系统各指标

的单一韧性得分,加权平均后计算得出浙江省各地级市的复合韧性得分。选取2011年、2015年和2020年的结果(图9)。从图9可以看出,杭州市、舟山市和宁波市的复合韧性得分最高,台州市和衢州市最低。全省平均城市复合韧性水平为0.37,中等韧性评价及以上的地级市占比达81.82%。浙江省城市复合韧性平均水平较高,应对各类灾害及恢复重建的能力较强。

结合图4和图9,在空间分异上可看出,2011—2020年期间浙江省城市复合韧性水平呈现平稳发展趋势,但部分地区的城市韧性水平产生差异。2011年只有宁波市处于5级,杭州市、温州市和舟山市处于4级,嘉兴市、绍兴市、金华市和丽水市处于3级,湖州市处于2级,衢州市和台州市处于1级。2015年各地级市复合韧性空间分布发生变化,杭州市、宁波市和舟山市处于5级,温州市处于4级,嘉兴市、金华市和丽水市处于3级,绍兴市、湖州市和台州市处于2级,衢州市处于1级。2020年各地级市复合韧性水平变化幅度较小,杭州市、宁波市、舟山市和温州市处于5级,嘉兴市、金华市、丽水市、湖州市和绍兴市处于3级,衢州市和台州市处于1级。在空间分异上,浙江省各地级市间的复合韧性水平发展不均衡,高复合韧性城市的分布特征较为明显,出现以杭州市、宁波市、舟山市和温州市构成的三角形区域,城市复合韧性水平自三角区域顶点向外围递减,韧性分布具有明显的差异化。

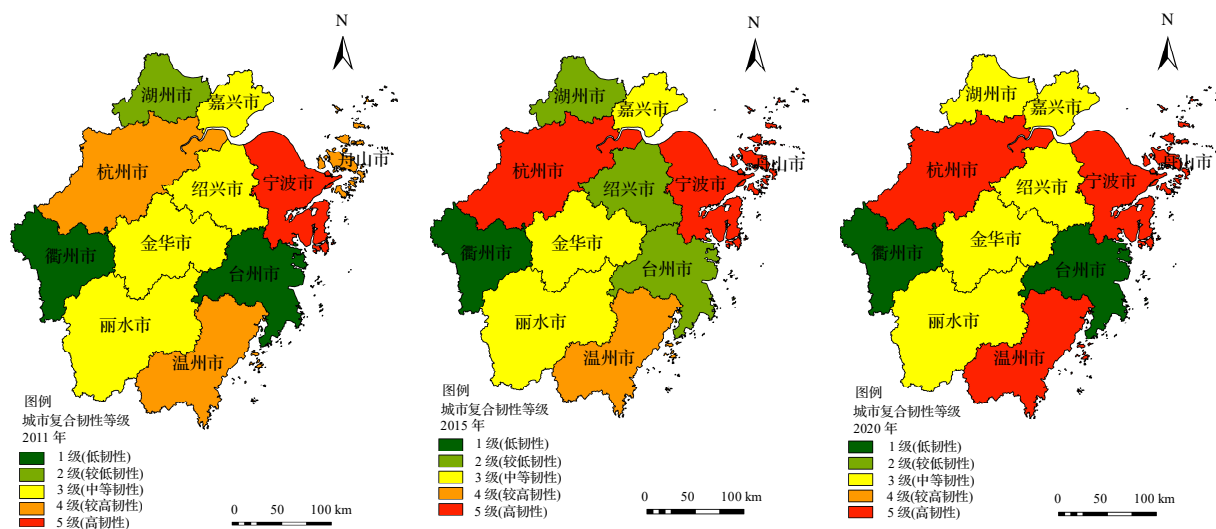


图9 浙江省城市复合韧性等级空间分异与演化

4 结论与建议

4.1 结论

本研究采用BP神经网络与熵值法相结合,对2011—2020年浙江省地级市城市韧性进行评价,在一定程度上避免人为因素带来的主观臆断性。通过不断调试BP神经网络模型,使模型输出结果误差值小,能有效反映出浙江省各地级市城市单系统与复合韧性指标的发展规律,得出结论如下:

(1)浙江省11个地级市城市韧性发展趋势总体较为平稳,呈现扁平“W”型变化。

(2)城市单系统韧性发展中,杭州市和宁波市的经济系统韧性主体地位凸显,呈现平稳上升趋势;环境韧性整体发展趋势较为平稳,呈小幅波动状态;社会系统与设施系统韧性指数均呈现震荡趋势。城市复合韧性指数在2015年后呈现反弹上升趋势,可见浙江省正在逐步改变传统的发展模式,通过数字化实现自然资源保护协同经济社会发展的可持续发展。

(3)在城市单系统韧性空间分布上,经济系统韧性空间分布呈现杭甬两城高,其余地级市低的格局;社会系统韧性空间分布呈现丽水市和杭州市高,其余地级市低的格局;环境系统韧性空间分布呈现舟山市高,其余地级市低的格局;设施系统韧性空间分布呈现宁波市、杭州市和湖州市高,其余地级市低的格局。

(4)至2020年,杭州市、宁波市和舟山市的复合城市韧性达到5级,即强韧性城市。其余地级市主要集中在3级或4级,即中等韧性和较高韧性,仅绍兴市、台州市和衢州市处于较低和低韧性水平。表明浙江省整体城市韧性水平较高,但仍有提升空间。

(5)经济子系统中影响程度最高的指标是外资使用金额,社会子系统中影响程度最高的指标是非农就业人口比重,环境子系统中影响程度最高的指标是工业固体废物综合利用率和万人二氧化碳排放,设施子系统中影响程度最高的指标是城市排水管道密度。

4.2 建议与对策

4.2.1 城市单系统韧性水平提升

(1)经济系统韧性提升:杭州市和宁波市的经

济系统韧性得分和发展趋势均处全省前列,两市应该辐射带动周边各地级市,发展联动产业,将自身富余的产业外包给周边区域,全面共同实现区域经济增长。经济基础较差的衢州市、台州市等地级市自身也需提高实力,选择因地制宜的产业,推进城市经济结构转变。

(2)社会系统韧性提升:绍兴市、湖州市、台州市和衢州市的社会系统表现较差,需要重点专注医疗条件、就业环境、教育环境等重点领域的建设。目前应着力推动数字化系统的普及,实现全省居民办理业务、就医问诊等流程的智能化、高效化。

(3)环境系统韧性提升:浙江省内的环境韧性水平通过不懈治理,至2020年已处于较高水平。应该在坚持现有环保政策的同时,大力推进城市发展和科技创新,实现节能减排、资源回收利用的绿色环保生产,努力打造全国范围内“碳中和”示范点。

(4)设施系统韧性提升:浙江省各地级市设施韧性得分波动较大,所以仍需不断加大对交通路网、供水供气、5G通信等城市基础设施的投入,以满足城市内日益增长的常住人口的需求。

4.2.2 城市复合韧性水平提升

浙江省城市复合韧性水平较高,但仍有提升空间。目前各地级市间仍存在明显的差异。应由政府带头建立城市系统韧性的考察体系,开展复合韧性管理模式,将城市复合韧性作为城市先进程度的重要指标,促使各地级市制定多系统共同进步的可持续发展目标。同时,要进一步推动智慧城市的建设,提升城市系统应对潜在风险的冗余与系统抗扰动性,从而增强城市的应灾能力与灾后恢复及重建能力。

参考文献:

- [1] Burton I, Kates R W, White G F. The Environment as Hazard[M]. New York: Guilford Press, 1993.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] 王丽华, 马东辉. 城市韧性恢复能力与空间形态特征相互关系研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2021, 43(3):197-202.
- [5] 吴浩, 江志猛, 林安琪, 等. 基于隐性-韧性-显性的武汉城市资源环境承载力空间特征[J]. 地理学报, 2021, 76(10):2439-2457.
- [6] 陈丹羽. 基于压力-状态-响应模型的城市韧性评估——以湖北省黄石市为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [7] 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.
- [8] 孙才志, 曹强, 邹玮. 基于熵效率模型的环渤海地区海洋经济系统韧性研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2020, 33(1):10-18.
- [9] 缪惠全, 王乃玉, 汪英俊, 等. 基于灾后恢复过程解析的城市韧性评价体系[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1):10-27.
- [10] 刘复友, 刘旸. 韧性城市理念在各级城乡规划中的应用探索——以安徽省为例[J]. 北京规划建设, 2018(2):40-45.
- [11] Mayunga J S. Understanding and applying the concept of community disaster resilience: A capital-based approach [EB/OL]. [2022-01-10]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=bd2b455ddf7730a0616ba2d05e5195ab>.
- [12] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4):733-752.
- [13] 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.
- [14] 石媛, 袁菲, 张海波. 城市社区防灾韧性评价指标研究[J]. 防灾科技学院学报, 2019, 21(4):47-54.
- [15] 张明斗, 冯晓青. 长三角城市群内各城市的城市韧性与经济发展水平的协调性对比研究[J]. 城市发展研究, 2019, 26(1):82-91.
- [16] 郭显光. 改进的熵值法及其在经济效益评价中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(12):98-102.
- [17] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. 地理科学, 2013, 33(11):1323-1329.
- [18] McClelland J, Rumelhart D, David E. Parallel Distributed Processing, Explorations in the Microstructure of Cognition, Volume 2: Psychological and Biological Models[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1987.

Evaluation of urban resilience in Zhejiang Province based on BP neural network model and entropy method

KONG Jiahui, ZOU Yijiang*, SI Gangjie

(Faculty of Geography Science and Tourism Culture, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Taking Zhejiang Province as an example, this paper conducts a quantitative evaluation of the urban resilience for prefecture-level cities in Zhejiang Province from 2011 to 2020 by applying BP neural network and entropy method. Analyzes are made in terms of the single system resilience of economy, society, environment and facilities and their composite resilience, the purpose of which is to reveal the spatial distribution characteristics and development rules of urban resilience in Zhejiang Province. The results suggest that the development trend of toughness in Zhejiang Province is relatively stable, the spatial distribution of toughness level is variant from place to place, and the internal development is unbalanced. The toughness levels of both core and marginal regions show a trend of slow growth, and the differentiation pattern will not change in the short term.

Key words: Zhejiang Province; urban resilience; entropy value method; BP neural network; decision evaluation

(责任编辑 史小丽)