

基于神经网络综合建模的区域城市群发展脆弱性评价 ——以滇中城市群为例

范峻恺, 徐建刚

(南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093)

摘要: 城市脆弱性是评价城市发展韧性状况的有效测度。目前我国对于城市脆弱性的研究以运用统计学方法评价特殊城市为主, 尚未形成对区域城市群具有普遍适用性的科学客观评价方法。以滇中城市群为例, 从环境系统、经济系统、社会系统三个方面综合构建城市脆弱性评价体系, 采用熵值法和BP神经网络综合建模方法, 对2007—2016年10年间滇中城市群的城市脆弱性进行评价。结果表明: 滇中城市群的城市脆弱性总体呈现下降趋势, 但城市组团之间差异较大, 呈现出发展中的不均衡性。评价结果对滇中城市群韧性发展规划具有重要指导意义, 为区域城市群发展脆弱性研究提供一种科学评价方法。

关键词: 城市韧性; 城市脆弱性; 复合系统; BP神经网络; 熵值法; 滇中城市群

城市群是城市发展到成熟阶段的高级城市空间形态, 具有该区域内各类生产要素集聚和扩散的职能^[1]。作为我国区域发展战略的核心、区域经济建设的引擎, 城市群内部各城市优势互补、紧密联系共同促进当地的发展, 同时在更大范围内优化配置资源, 从而形成辐射效应。2018年11月, 中央出台了《关于建立更加有效的区域协调发展新机制的意见》, 进一步明确要以中心城市带动周边发展, 从而推动区域城市群的有效融合与互动发展。但是, 伴随着区域城市群的飞速发展, 出现了片面追求短期效益、城市内部生态污染、城市之间恶性竞争^[2]等问题, 对区域城市群的稳定持续发展造成了严重的影响。

城市脆弱性评价是城市韧性研究框架的基本出发点^[3]。脆弱性早期是针对自然灾害的研究^[4], 描述物体受到外部事物影响而受损的情况。随着经济社会的不断发展, 对城市脆弱性的研究进一步扩展到了经济系统和社会系统^[5-7], 用以衡量城市经济发展的敏感性和社会发展的稳定性。城市脆弱性作为对整个城市复合系统发展韧性的测度, 描述的是在多元因素条件下, 城市的发展超过了目前社会经济条件和科学技术水平能够维持城市持续发展的能力, 因此近年来对城市脆弱性的研究开始趋向于整体视角下的综合评价^[8-10]。在研究区域上, 目前多以资源型城市^[11,12]、沿海城市^[13]、山地城市^[14]等特殊城市为主, 缺乏对区域城市群具有普遍适用性的城市脆弱性研究; 在评价方法上, 主要使用主成分—聚类分析法^[15,16]、层次分析法^[17]、TOPSIS法^[18]、变权模型^[19]、熵权物元模型^[20]等传统统计学方法, 尚难以综合各类要素对城市脆弱性做出系统客观的评价。

城市是一个关联着集聚、非线性、多样性、自组织的复杂适应系统^[21], 具有交互性和复杂性的特点。城市发展的过程就是城市中多要素主体与环境交互作用相互适应的过

收稿日期: 2019-05-10; 修订日期: 2019-09-06

项目基金: 国家自然科学基金项目 (51278239, 51778278)

作者简介: 范峻恺 (1993-), 男, 云南红河人, 硕士, 研究方向为数字城市与智慧规划。E-mail: 8931210@qq.com

通讯作者: 徐建刚 (1960-), 男, 江苏淮安人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市复杂系统、城市与区域规划方法。E-mail: xjg129@sina.com

程。在这个过程中, 各类要素主体除了与环境交互外, 彼此也可以互为环境, 互相进行适应。随着要素的增加, 系统表现出复杂性的特点, 任何一个要素的变化都会导致整个系统的变化。在面对多要素的共同作用时, 传统统计学方法难以综合所有因子的影响做出全面客观的评价。近年来, 随着互联网和人工智能的快速发展, 神经网络开始广泛运用于城市规划领域, 其强大的非线性映照能力, 可以在任何确定精度下无限逼近任何非线性的连续函数, 以协调所有指标做出系统全面的评价。其中, BP神经网络是人工神经网络中应用最广的类型, 较之传统的统计学模型, 其具有较强的容错性、自适应性和自组织性^[22]。

为全面认识和分析评价区域城市群发展脆弱性状况, 本文引入能够全面表达城市自然环境要素与建成环境要素相互作用特征的环境系统概念, 从环境系统、经济系统和社会系统三位一体的复合系统视角来构建城市脆弱性综合评价体系。以滇中城市群作为实证点, 选取了该城市群2007—2016年10年间的17项指标共计850个数据, 通过熵值法确定各项指标的权重, 运用BP神经网络模型计算滇中城市群中各个城市的脆弱性指标特征, 并从区域空间的角度对比相同时间段各个城市的脆弱性, 从发展演进的角度评价不同时间段的城市脆弱性。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况与数据来源

滇中城市群位于我国云南省中部地区, 是云南经济最发达的区域。在2016年修编的《滇中城市群规划(2016—2049年)》中, 除了原有的昆明、曲靖、玉溪、楚雄4个州市, 还将红河北部的蒙自、建水、弥勒等7个县市纳入滇中城市群。该区域交通设施密集、基础设施完善, 是云南省发展基础最好、发展水平最高、发展前景最佳的区域, 是带动全省经济、社会发展的龙头和云南省参与国内外区域合作、竞争的主体。自2006年中央正式将建设资源节约型和环境友好型社会确定为国民经济与社会发展中长期规划的一项战略任务以来, 云南省进一步在“十一五”规划中明确提出污染减排指标要求, 将资源环境保护作为各级政府必须履行的法律责任, 反映出云南省由以环境换取经济增长向以环境优化经济增长战略思想的转变。因此2006年是云南乃至我国经济发展战略转型的一个关键性节点, 是由单一经济增长向生态、环境、经济、社会等多系统平衡发展的重要转变期。对昆明、曲靖、玉溪、楚雄、红河5个城市组团, 从环境、经济、社会三个系统进行城市脆弱性评价, 研究滇中城市群中2007—2016年10年间各个城市脆弱性的动态变化, 分析三个系统之间的耦合关系, 一方面是对云南省发展战略调整后单系统与整体综合效益的评价, 另一方面可从城市脆弱性的角度讨论《滇中城市群规划(2016—2049年)》中将红河北部7县市纳入滇中城市群的合理性。

本文的数据主要来源于2008—2017年10年间云南、昆明、曲靖、玉溪、楚雄、红河地区的统计年鉴, 部分指标在原始数据的基础上通过统计分析获得。

1.2 研究方法

本文从区域系统的整体视角出发, 首先引入层次分析法, 确定对城市环境、社会和经济系统起主导作用的影响因素及其代表性指标, 建立三层指标体系; 其次, 采用熵值法, 通过计算每个城市指标数值自身的差异性特征(信息熵)客观地确定指标权重; 进

而, 构建以每个城市三大系统指标数据为输入层、城市脆弱性等级为输出层的BP (back propagation) 神经网络模型。

1.2.1 熵值法计算原理

熵值法是通过各指标值变异程度的高低说明指标的重要程度, 是一种客观科学确定权重的方法^[23]。指标的变异程度与信息熵之间成负相关关系, 与其重要性成正相关关系, 即指标的信息熵越小其权重越大; 反之, 则指标的权重越小^[24]。使用熵值法确定区域城市群发展脆弱性评价中各项指标的权重可以合理规避人工判断所造成的主观性。计算公式如下:

在 n 个城市共计 m 项指标中, 首先进行如下归一化处理。其中, 正向指标是指与目标函数具有正相关关系的指标, 负向指标是指与目标函数具有负相关关系的指标。在本文中, 正负向指标的内涵与其对城市发展的积极作用相反, 而与城市脆弱性指数值相一致, 即正向指标越大则城市脆弱性指数越大, 负向指标越大则城市脆弱性指数越小。

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个城市中第 j 项指标的数值 ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$); x'_{ij} 是归一化后的数值, 为了方便起见, 下面计算中归一化后的数据仍记为 x_{ij} 。

计算第 j 项指标下第 i 个城市占该指标的比例:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (3)$$

计算第 j 项指标的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (4)$$

式中: $k=1/\ln(n)$, 满足 $e_j \geq 0$ 。

计算第 j 项指标的信息熵冗余度:

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

计算各项指标的权重:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (6)$$

1.2.2 BP神经网络模型

BP神经网络是根据误差反向传播算法进行训练的多层前馈网络, 该算法以实际输出值和期望输出值的误差平方作为目标函数, 采用梯度下降的方法计算目标函数的最小值^[25]。BP神经网络具有输入层、隐含层和输出层三层结构, 同一层的神经元之间相互独立, 而每一层的神经元通过连接权重相互联系。该网络的运算从信号的正向传播开始, 输入的信号首先从输入层传到隐含层, 在隐含层逐层处理后传到输出层, 在输出层如果不能获得既定期望的输出, 就开始进入误差的反向传播, 即误差信号从原来已经连接的通路返回, 通过自动修正各神经元的权值, 不断降低信号误差^[26]。反复循环多次后

获得误差范围内的输出结果。

本文的BP神经网络模型是使用MATLAB R2018a软件的newff函数进行编程求解的。MATLAB的神经网络工具箱具有权值初始化、学习和训练等多种函数，可以依据自身需要构建任意输入层和输出层的BP网络。在本次研究中，以环境、经济、社会三个系统的共17个指标作为输入层数据，城市脆弱性等级指数作为输出层数据。在网络中经过反复的学习和优化，找到各项指标与城市脆弱性等级之间存在的内在联系，训练完成后使用该模型对区域城市群发展脆弱性进行综合评价。

因为区域城市群发展脆弱性综合评价的指标大都无法确定其最优范围，而使用人工神经网络对城市脆弱性的评价研究至今也没有形成固定的评价标准，因此本文使用自然断裂点的分类方法对样本数据的值域区间设定影响等级，将城市脆弱性分为四级，I表示城市脆弱性等级低，II表示城市脆弱性等级较低，III表示城市脆弱性等级较高，IV表示城市脆弱性等级高，然后带入熵值法得到的各项指标权重，完成BP神经网络的评价结构体系。构建拓扑结构为 $17 \times 6 \times 1$ 的神经网络，即输入层节点 $X_1 \sim X_{17}$ 共17个，隐含层节点6个，输出层节点1个 Y （图1）。设置网络的学习速率为0.05，最大训练次数为2000次，训练要求精度为 0.5×10^{-3} ，其他参数使用默认设置，训练至网络自动完成收敛，即BP神经网络模型构建完成。将归一化后的各项指标数据输入到已构建的神经网络模型中，输出的城市脆弱性等级指数在 $[0, 4]$ 之间。

1.3 评价指标体系构建

指标体系是进行城市脆弱性评价的基础，已有研究中不同领域的学者根据各自研究的侧重点，从自然、资源、生态、经济、社会等多个角度建立了不同的指标体系^[8,19]。本文从环境、经济、社会三个方面研究滇中城市群发展脆弱性，以科学性和可操作性为原则，结合滇中城市群自然资源禀赋好、农业人口比例高、产业结构多样化的特点，共选取了17个三级指标，构建滇中城市群发展脆弱性评价指标体系（表1）。

在环境系统指标体系中，工业三废的排放强度和利用率用以衡量废气、废水、废渣的排放和再利用情况；人均年供水量是对区域内水资源使用情况的测度；建成区绿化覆盖率体现的是城市环境的宜居程度。在经济系统指标体系中，外贸依存度（进出口总值与GDP的比值）和实际利用外资占GDP比例描述的都是经济系统的开放程度和接纳使用外资的能力；第三产业占GDP比例和地区GDP增长率都是对城市整体经济发展水平的测度；工业总产值描述的是一个时期内工业的发展水平；固定资产投资强度是对固定资产的建设投资，用以描述对人民生活的福利投入。在社会系统指标体系中，人口自然增长率和乡村人口比例描述的是城市的人口增长速度和人口结构分布；城镇居民人均可支配收入和农民人均纯收入是通过收入情况衡量城镇居民和农村居民的生活水平；第三产业就业人数比例是对城市第三产业发展情况的测度；公路通车里程数用以描述城市基础设

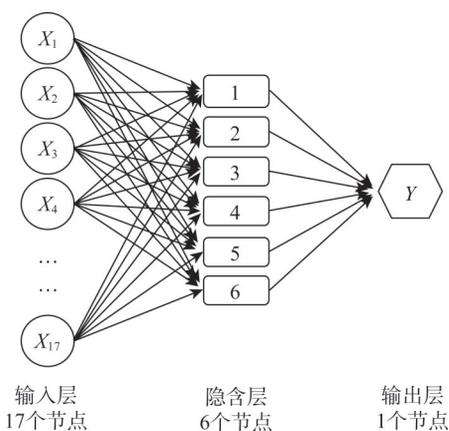


图1 滇中城市群发展脆弱性评价模型的BP神经网络拓扑结构图

Fig. 1 BP neural network topological structure of urban development vulnerability evaluation

表1 滇中城市群发展脆弱性评价指标体系

Table 1 Indicator system of urban development vulnerability evaluation

二级指标	三级指标	单位	指标属性
环境系统	X_1 : 工业废气排放强度	10^4 t/km^2	正向
	X_2 : 人均年供水量	t/人	负向
	X_3 : 工业废水重复利用率	%	负向
	X_4 : 工业固体废物综合利用率	%	负向
	X_5 : 建成区绿化覆盖率	%	负向
经济系统	X_6 : 外贸依存度	%	正向
	X_7 : 实际利用外资占GDP比例	%	正向
	X_8 : 第三产业占GDP比例	%	负向
	X_9 : 地区GDP增长率	%	负向
	X_{10} : 工业总产值	10^4 元	负向
	X_{11} : 固定资产投资强度	10^4 元/ km^2	负向
社会系统	X_{12} : 人口自然增长率	‰	正向
	X_{13} : 乡村人口比例	%	正向
	X_{14} : 城镇居民人均可支配收入	元	负向
	X_{15} : 农民人均纯收入	元	负向
	X_{16} : 第三产业就业人数比例	%	负向
	X_{17} : 公路通车里程	km	负向

施的建设情况。

为了更加准确对比不同时期的价值指标，需要扣除价格变动的因素，使用可比价格能确切反映物量的变化。本文使用价格指数进行可比价格的换算，以2006年作为基期，换算公式如下：

$$x'_k = \frac{x_k}{p_k} \times 100 \quad (7)$$

式中： x_k 表示指标的当年价格（元）； x'_k 表示指标换算后的可比价格（元）； p_k 表示 k 年的云南省相应的价格指数（表2）。其中，固定资产投资金额使用固定资产投资价格指数进行换算；城镇居民人均可支配收入使用城市居民消费价格指数进行换算；农民人均纯收入使用农村居民消费价格指数进行换算；其余价值指标均使用居民消费价格指数进行换算。

2 结果分析

2.1 单系统城市脆弱性时间序列分析

通过熵值法计算得到滇中城市群2007—2016年这10年间每一年各项指标的权重，取平均值获得滇中城市群发展脆弱性评价指标权重（表3）。

可以看到，经济系统的权重超过了环境系统和社会系统之和，根据熵值法的运算法则，这是因为经济系统中的指标（尤其外贸依存度、实际利用外资占GDP比例）变异程度较高，即各地区各年份之间的指标数值差距较大，这一方面说明经济发展是近10年来滇中城市群发展成效最明显的部分，另一方面说明滇中城市群各地区之间发展差距最明

表2 2007—2016年云南省部分价格指数统计

Table 2 Price index statistics of Yunnan province from 2007 to 2016

年份	居民消费价格指数	城市居民消费价格指数	农村居民消费价格指数	固定资产投资价格指数
2006	100.0	100.0	100.0	100.0
2007	105.9	105.9	105.9	104.2
2008	111.9	111.6	112.3	111.9
2009	112.4	112.2	112.5	109.8
2010	116.5	116.4	116.5	112.7
2011	122.3	122.0	122.2	117.9
2012	125.6	125.7	125.0	119.6
2013	129.4	130.0	128.4	120.9
2014	132.6	133.3	130.9	122.1
2015	135.1	136.3	132.6	121.0
2016	137.1	138.2	134.8	121.1

注：本表按不变价计算（2006年=100）。

表3 滇中城市群发展脆弱性评价指标权重

Table 3 Indicator weight of urban development vulnerability evaluation

二级指标	权重	三级指标	权重
环境系统	0.3025	X_1 : 工业废气排放强度	0.0825
		X_2 : 人均年供水量	0.0392
		X_3 : 工业废水重复利用率	0.1105
		X_4 : 工业固体废物综合利用率	0.0408
		X_5 : 建成区绿化覆盖率	0.0295
经济系统	0.5247	X_6 : 外贸依存度	0.1349
		X_7 : 实际利用外资占GDP比例	0.1285
		X_8 : 第三产业占GDP比例	0.0689
		X_9 : 地区GDP增长率	0.0857
		X_{10} : 工业总产值	0.0410
		X_{11} : 固定资产投资强度	0.0557
社会系统	0.1728	X_{12} : 人口自然增长率	0.0467
		X_{13} : 乡村人口比例	0.0372
		X_{14} : 城镇居民人均可支配收入	0.0187
		X_{15} : 农民人均纯收入	0.0160
		X_{16} : 第三产业就业人数比例	0.0218
		X_{17} : 公路通车里程	0.0323

显的是经济系统。

根据样本数据中各项指标的数值，归一化后使用自然断裂点的分类方法设定城市脆弱性影响等级，得到BP神经网络的训练数据集（表4），其中每一行为每个系统中所包含的三级指标，各项指标均为最大值1时城市脆弱性等级最高，均为最小值时城市脆弱性等级最低。经过151次的训练，误差小于 0.5×10^{-3} ，达到目标训练精度要求，训练完成，最终网络均方差为 0.49885×10^{-3} （图2）。

表4 城市脆弱性等级BP神经网络评价标准

Table 4 BP neural network evaluation criteria of urban development vulnerability level

等级		I	II	III	IV
环境系统	X_1 : 工业废气排放强度	0.1385	0.3764	0.6267	1.0000
	X_2 : 人均年供水量	0.1228	0.4324	0.6198	1.0000
	X_3 : 工业废水重复利用率	0.0380	0.1170	0.5304	1.0000
	X_4 : 工业固体废物综合利用率	0.2453	0.5583	0.7566	1.0000
	X_5 : 建成区绿化覆盖率	0.2090	0.3652	0.7103	1.0000
经济系统	X_6 : 外贸依存度	0.0758	0.1911	0.6035	1.0000
	X_7 : 实际利用外资占GDP比例	0.0597	0.1817	0.6248	1.0000
	X_8 : 第三产业占GDP比例	0.3169	0.6224	0.7646	1.0000
	X_9 : 地区GDP增长率	0.1491	0.3746	0.6108	1.0000
	X_{10} : 工业总产值	0.2229	0.6411	0.8430	1.0000
	X_{11} : 固定资产投资强度	0.2550	0.6857	0.8968	1.0000
社会系统	X_{12} : 人口自然增长率	0.2933	0.5631	0.7361	1.0000
	X_{13} : 乡村人口比例	0.2801	0.6984	0.8449	1.0000
	X_{14} : 城镇居民人均可支配收入	0.3525	0.6195	0.8007	1.0000
	X_{15} : 农民人均纯收入	0.2579	0.5555	0.7924	1.0000
	X_{16} : 第三产业就业人数比例	0.3218	0.5574	0.7420	1.0000
	X_{17} : 公路通车里程	0.3329	0.6185	0.8293	1.0000

结合熵值法确定的各项指标权重,把归一化后每一年每个城市的各项指标数据输入到已构建的神经网络中,运行得到滇中城市群5个城市组团环境、经济、社会系统的脆弱性指数,以时间为横轴、城市脆弱性指数为纵轴,做出5个城市的城市脆弱性时序图。

从环境系统来看,滇中城市群5个城市组团的脆弱性存在明显的波动(图3)。昆明市的城市脆弱性有一定上升趋势,至2015年,已经成为5个城市组团中城市脆弱性最高的城市,可见近10年来昆明市在大力发展经济的同时,对于自然生态系统保护的重视程度还有所欠缺。曲靖市在2007年的城市脆弱性显著高于其他4个城市组团,这与曲靖市的煤炭、烟草等产业的发展有关,但是经过这10年整治,去污染化取得了一定的成果,城市脆弱性整体呈现下降趋势。玉溪市、楚雄州、红河州的城市脆弱性总体上变化相对平稳,但是2013年在楚雄州、2014年在玉溪市各出现了一次波峰。其中2013年在楚雄州出现的波峰主要是2013年楚雄州的工业废水重复利用率过低造成的,仅有30.3%(2012年为93%、2014年为93.5%);2014年在玉溪市出现的波峰主要是2014年玉溪市的工业废气排放强度显著提高造成的,达到 $1466.87 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ (2013年为 $785.08 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 、2015年为 $823.4347 \times 10^4 \text{ t/km}^2$)。

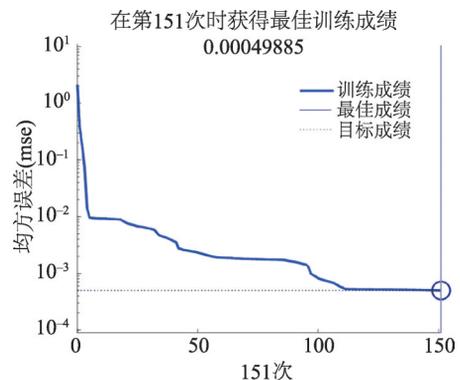


图2 BP神经网络训练误差曲线
Fig. 2 Deviation curve of BP neural network

从经济系统来看,滇中城市群5个城市组团的城市脆弱性都有一定程度的下降(图4),其中昆明市的城市脆弱性下降幅度最大。作为滇中城市群的核心城市,昆明市抓住“十一五”和“十二五”期间的发展机遇,不断加大科研投入,转变经济发展方式,发展高新技术产业,提高经济发展质量,实现了这10年来昆明市经济的快速发展。总体上看,楚雄州的城市脆弱性显著高于其余4个城市组团,这和楚雄州整体工业发展起步晚、产业结构单一、产品低端化严重有关,“农业发展种烤烟,工业发展做卷烟”的现象明显^[27]。在2009年,除昆明以外的4个城市组团都出现了城市脆弱性的波峰,这是2009年的地区GDP增长率快速下降所造成的(表5)。说明在2008年末的全球金融危机和2009年秋季起的特大干旱灾害影响下,因为产业布局不平衡、经济发展不充分等原因,除昆明以外4个城市组团的经济都受到了严重的影响,不过一年之后经济发展又都恢复了高速状态,直到2013年经济发展进入新常态阶段。

从社会系统来看,滇中城市群5个城市组团的城市脆弱性都呈现出了显著的下降趋势(图5),其中昆明市城市脆弱性下降的节点发生在2009年,曲靖市和红河州发生在2010年,楚雄州发生在2013年,玉溪市下降幅度最小无明显节点。这表明在经济发展的同时,滇中城市群各城市组团的社会保障制度也在逐步完善,人民生活质量显著提高,其中昆明市走在了最前面,其次是曲靖市和红河州,楚雄州的社会建设发展相对较晚,

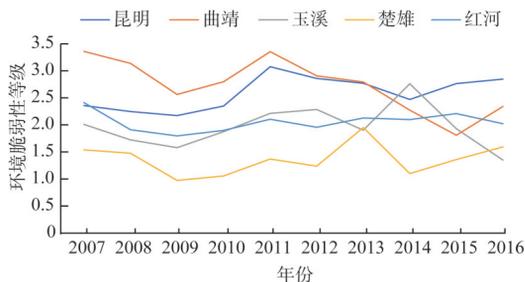


图3 环境系统城市脆弱性

Fig. 3 Urban vulnerability of environmental system

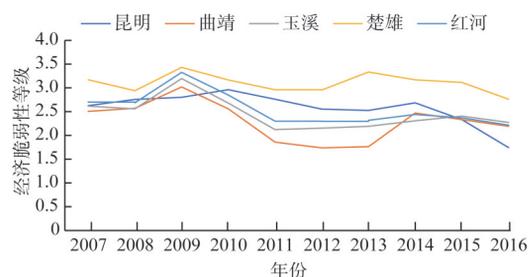


图4 经济系统城市脆弱性

Fig. 4 Urban vulnerability of economic system

表5 近10年滇中城市群GDP增长率

Table 5 GDP growth rate of Central Yunnan Urban Agglomeration in recent 10 years (%)

年份	昆明	曲靖	玉溪	楚雄	红河
2007	9.90	14.41	12.88	10.13	12.62
2008	8.10	14.56	13.72	14.18	13.31
2009	14.00	10.15	7.67	11.95	8.54
2010	11.28	11.34	10.20	13.47	11.83
2011	12.83	14.70	13.47	13.65	14.42
2012	16.83	12.68	11.10	15.03	12.94
2013	10.01	9.72	6.91	7.62	10.01
2014	6.17	-4.53	4.94	8.95	7.18
2015	4.88	3.32	3.09	6.11	6.32
2016	6.77	6.87	3.85	9.34	7.62

注: 本表为可比价格下的GDP增长率。

这与各个地区的经济发展情况是分不开的。至2016年,昆明市、玉溪市、楚雄州社会系统的发展脆弱性已经降至第Ⅱ等级,即城市脆弱性较低;曲靖市、红河州社会系统的发展脆弱性已经降至第Ⅰ等级,即城市脆弱性低。

2.2 复合系统城市脆弱性耦合分析

城市作为一个多要素高度自组织、自适应的复杂系统,各个系统之间联系紧密交错关联相互作用。首先,自然资源与生态环境是经济社会发展的物质基础和环境条件,经济系统和社会系统的发展离不开环境系统的自身禀赋;同时,经济社会的发展所造成的资源消耗、城市扩张等人类活动会对资源环境产生压迫。这时资源环境系统与社会经济系统之间呈现出此消彼长的状态,对应到滇中城市群的发展中即是2007—2009年和2009—2011年间。在这段时间里,由于国家和云南省强有力的资源节约和环境保护的政策导向,滇中城市群5个城市组团环境系统的脆弱性指数都有显著下降,除昆明和曲靖外其余3个城市组团都进入城市脆弱性的第Ⅱ等级,即城市脆弱性较低,可见滇中城市群的环境系统保护工作取得了较好的成绩。但同时,经济系统的脆弱性指数在波动中有所上升,社会系统的脆弱性有小幅度下降,在这个阶段部分高能耗、高排放、高污染产业的发展受到一定程度的限制,但由于国际形势良好以及“十一五”初期的政策红利,经济系统、社会系统的发展速度并没有受到严重影响,良好态势持续到2008年末全球金融危机的爆发。2009年秋季以来,云南省遭遇了80年一遇的特大干旱灾害,持续时间长、灾害范围广,对基础自然资源的供应和基本农业生产造成了严重的影响,因此在2009—2011年间,滇中城市群环境系统的城市脆弱性指数呈现出显著提高趋势。在外部经济形势严峻和本身资源环境制约的双重影响下,当地政府想要快速摆脱疲软的经济态势,开始大量承接从东部、中部转移的部分技术含量低、重复性的初级工程和工业,加上国家和政府大量的固定资产投资,滇中城市群经济系统的城市脆弱性指数得到明显下降,社会系统的城市脆弱性指数也缓慢下降,经济社会逐步恢复快速发展态势。滇中城市群一体化发展初期脆弱性呈现的不稳定特征是区域系统自组织能力不足、城市群核心城市辐射效应不强的体现。

2012年党的十八大做出“大力推进生态文明建设”的战略决策,将资源环境保护置于一个前所未有的高度。正确认识到社会经济的发展不应该是以牺牲资源环境为代价,相反,应该依靠经济产业发展、促进基础设施建设、带动城乡人口就业、提高居民生活水平,同时提升科技含量、创新发展模式,以此实现资源环境承载力的动态增长,达到环境系统、经济系统、社会系统三者良性循环发展的目标。因此在2011—2016年间,滇中城市群5个组团环境系统和经济系统的城市脆弱性指数都在波动之中呈现下降趋势,社会系统的城市脆弱性指数呈现出明显下降趋势,可见这些年来滇中城市群尽管GDP增长速度放缓,但资源环境保护得到了有效落实,人民生活水平得到了显著提高,实现了经济社会与自然资源环境的和谐共生发展。

最后,对环境、经济、社会三个系统的城市脆弱性按照熵值法所确定的权重进行叠

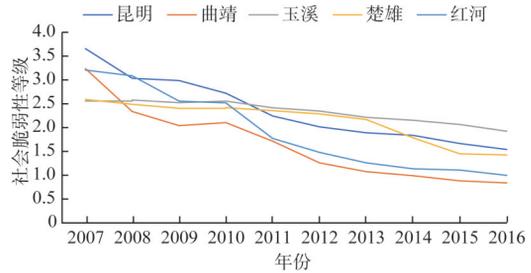


图5 社会系统城市脆弱性

Fig. 5 Urban vulnerability of social system

加得到滇中城市群近10年的系统发展脆弱性(图6)。可以看出,尽管这10年滇中城市群5个城市组团的城市脆弱性指数都呈现出下降趋势,但仍然主要集中于城市脆弱性的第III等级,即城市脆弱性较高,直到2016年玉溪市和红河州才降到了城市脆弱性的第II等级,即城市脆弱性较低,说明从系统发展脆弱性的角度来看,滇中城市群还有很长的路要走,尤其昆明市和曲靖市要注意环境系统的城市脆弱性,楚雄州要注意经济系统的城市脆弱性,昆明市、玉溪市、楚雄州要注意社会系统的城市脆弱性。从区域城市群发展脆弱性的角度来看,滇中城市群5个城市组团的城市脆弱性指数相差不大,红河州略优于另外4个城市组团,环境、经济、社会三个系统的发展都较为均衡。从地理位置上看,红河州北连昆明、西邻玉溪,是云南省的第三大经济体,将红河州发展最好的北部7县市纳入滇中城市群,对滇中城市群带动云南省南部地区的发展具有重要意义。

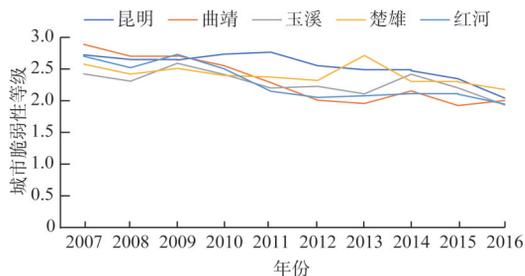


图6 滇中城市群系统发展脆弱性

Fig. 6 System urban development vulnerability of Central Yunnan Urban Agglomeration

3 结论与讨论

本文运用熵值法和BP神经网络模型对2007—2016年滇中城市群发展脆弱性进行评价,得出以下结论:第一,总体上滇中城市群发展脆弱性呈现出较明显的下降趋势,并且5个城市组团的城市脆弱性指数趋于相同,说明自2009年提出建立滇中城市群以来,以昆明市为中心,有效带动了周边各县市社会经济的发展;第二,总体上滇中城市群环境系统与经济系统、社会系统的城市脆弱性指数在2007—2009年和2009—2011年间呈现出此消彼长的状态,在2011—2016年间三系统的城市脆弱性指数均呈现出一定程度的下降趋势,可见云南省对于资源环境系统的保护理念和经济社会系统的发展模式在逐步实现改变,资源环境与经济社会和谐共生发展是今后的必然趋势;第三,至2016年滇中城市群的5个组团,只有玉溪市和红河州刚刚进入城市脆弱性的第II等级,即城市脆弱性较低,而其余的昆明市、曲靖市、楚雄州还处于城市脆弱性的第III等级,即城市脆弱性较高,说明降低滇中城市群发展脆弱性还有很长的路要走;第四,滇中城市群需要更加注意环境、经济、社会三个系统的协调发展,尤其昆明市和曲靖市要注意环境系统的城市脆弱性,楚雄州要注意经济系统的城市脆弱性,昆明市、玉溪市、楚雄州要注意社会系统的城市脆弱性;第五,2007—2016年这10年间,红河州环境系统、经济系统、社会系统的城市脆弱性都较为均衡,总体优于滇中城市群的其余4个城市组团,加之其北连昆明、西邻玉溪的地理优势,以及云南省第三大经济体的经济优势,将红河州北部7县市纳入滇中城市群将更加有利于滇中城市群乃至云南全省的发展。

针对滇中城市群发展脆弱性的评价结果,提出以下建议:第一,继续发挥昆明在滇中城市群的引领作用,适当限制和迁出部分低效率、低技术产业,曲靖、玉溪、楚雄、红河四州市根据自身资源环境禀赋积极承接昆明的迁出产业。第二,进一步落实科学发展观,加大科研创新力度,持续优化经济社会发展模式,不断细化城市复合系统发展考核指标,明确各级政府的资源环境保护责任,打造环境系统、经济系统、社会系统良性

循环发展的宜居城市。第三, 结合本地发展特色, 持续补齐自身短板, 降低城市发展脆弱性。在环境系统方面, 除了严格管理限制各州市发展高能耗、高排放、高污染产业, 昆明市、曲靖市还要增加城市植被绿化覆盖率提高城市环境质量, 加强湖泊水源保护治理力度解决城市缺水问题; 在经济系统方面, 楚雄州除了要充分把握整体农业基础好、烟草种植区位优势的优势外, 还要积极拓宽经济发展路径, 比如发展烟草加工及配套、食品加工、冶金化工等第二、第三产业; 在社会系统方面, 昆明市、玉溪市、楚雄州还要进一步加强城市基础配套设施建设, 提供充分就业岗位, 做好城乡居民生活的基本保障。第四, 红河州要抓住并入滇中城市群的发展契机, 明确蒙自城镇组团作为区域性国际贸易基地和新材料产业集群的定位, 通过聚合滇中与滇东南人流、物流、信息流等生产要素, 拉动经济增长, 成为推动区域新型工业化、城镇化、信息化、现代农业化发展的龙头; 同时, 还要做好人口引导和产业集聚, 保护生态发展空间, 促进人口、产业与资源环境协调发展, 继续保持多系统间平稳持续共同发展的良好趋势。

上述评价表明, 运用熵值法和BP神经网络对滇中城市群发展脆弱性进行评价, 能有效避免人工确定指标权重造成的主观性, 客观描述城市系统内部的复杂适应关系, 从而能够更加科学评价区域城市群的发展韧性。当然, 本次研究作为对区域城市群发展脆弱性评价方法的一次探索, 也存在一些不足之处。在指标的选择方面, 由于数据获取途径的限制, 对环境、经济、社会三个系统只是选择了代表性指标, 样本数量偏少导致BP神经网络在训练过程中没有达到最大训练次数就完成收敛, 故训练所得的网络适应性相对较弱; 在熵值法的运用方面, 由于熵值法仅仅是对样本数据的合理运算, 其权重的确定也是基于样本数据, 故缺乏对实际指标影响程度的分析研究。

参考文献(References):

- [1] 李磊, 张贵祥. 京津冀城市群内城市发展质量. 经济地理, 2015, 35(5): 61-64. [LI L, ZHANG G X. The city development quality of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. Economic Geography, 2015, 35(5): 61-64.]
- [2] 马艳梅, 吴玉鸣, 吴柏钧. 长三角地区城镇化可持续发展综合评价: 基于熵值法和象限图法. 经济地理, 2015, 35(6): 47-53. [MA Y M, WU Y M, WU B J. Comprehensive evaluation of sustainable urban development of Yangtze River Delta based on entropy method and quadrant method. Economic Geography, 2015, 35(6): 47-53.]
- [3] 邵亦文, 徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析. 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. Urban Planning International, 2015, 30(2): 48-54.]
- [4] WHITE G F. Natural Hazards. Oxford: Oxford University Press, 1974: 3-16.
- [5] DEPIETRI Y, WELLE T, RENAUD F G. Social vulnerability assessment of the Cologne urban area (Germany) to heat waves: Links to ecosystem services. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2013, 6(12): 98-117.
- [6] 高超, 金凤君, 雷军, 等. 干旱区绿洲城市经济系统脆弱性评价研究. 经济地理, 2012, 32(8): 43-49. [GAO C, JIN F J, LEI J, et al. Vulnerability assessment of economic system of oasis cities in arid area. Economic Geography, 2012, 32(8): 43-49.]
- [7] 袁海红, 高晓路. 城市经济脆弱性评价研究: 以北京海淀区为例. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1159-1172. [YUAN H H, GAO X L. Assessing the economic vulnerability to disasters of cities: A case study of Haidian district in Beijing. Journal of Natural Resources, 2014, 29(7): 1159-1172.]
- [8] 王岩, 方创琳, 张蔷. 城市脆弱性研究评述与展望. 地理科学进展, 2013, 32(5): 755-768. [WANG Y, FANG C L, ZHANG Q. Progress and prospect of urban vulnerability. Progress in Geography, 2013, 32(5): 755-768.]
- [9] 李平星, 樊杰. 基于VSD模型的区域生态系统脆弱性评价: 以广东西江经济带为例. 自然资源学报, 2014, 29(5): 779-788. [LI P X, FAN J. Regional ecological vulnerability assessment based on VSD model: A case study of Xijiang Riv-

- er Economic Belt in Guangxi. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(5): 779-788.]
- [10] 梅大伟, 修春亮, 冯兴华, 等. 中国城市脆弱性的时空变化及其内在机理: 基于“五普”、“六普”及《中国城市统计年鉴》数据的分析. *城市问题*, 2018, 278(9): 15-21. [MEI D W, XIU C L, FENG X H, et al. The spatiotemporal change of urban vulnerability and its internal mechanism in China. *Urban Problems*, 2018, 278(9): 15-21.]
- [11] 苏飞, 张平宇. 石油城市经济系统脆弱性评价: 以大庆市为例. *自然资源学报*, 2009, 24(7): 1267-1274. [SU F, ZHANG P Y. Vulnerability assessment of petroleum city's economic system: A case study of Daqing city. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(7): 1267-1274.]
- [12] 王岩, 方创琳. 大庆市城市脆弱性综合评价与动态演变研究. *地理科学*, 2014, 34(5): 547-555. [WANG Y, FANG C L. Comprehensive evaluation and dynamic evolution analysis of Daqing's urban vulnerability. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(5): 547-555.]
- [13] 唐波, 刘希林, 李元. 珠江三角洲城市群灾害易损性时空格局差异分析. *经济地理*, 2013, 33(1): 72-78, 85. [TANG B, LIU X L, LI Y. Hazard vulnerability analysis of the spatial temporal pattern differences in Pearl River Delta urban agglomerations. *Economic Geography*, 2013, 33(1): 72-78, 85.]
- [14] 温晓金, 杨新军, 王子侨. 多适应目标下的山地城市社会—生态系统脆弱性评价. *地理研究*, 2016, 35(2): 299-312. [WEN X J, YANG X J, WANG Z Q. Assessment on the vulnerability of social-ecological systems in a mountainous city depending on multi-targets adaption. *Geographical Research*, 2016, 35(2): 299-312.]
- [15] 孟晋晋, 刘花台. 基于主成分—聚类分析模型的生态环境脆弱性分析: 以平潭综合实验区为例. *环境科学与技术*, 2014, 37(1): 179-182. [MENG J J, LIU H T. Eco-environment vulnerability analysis based on principal component-clustering analysis model: Taking comprehensive experimental area of Pingtan as an example. *Environmental Science and Technology*, 2014, 37(1): 179-182.]
- [16] 李彤玥. 基于“暴露—敏感—适应”的城市脆弱性空间研究: 以兰州市为例. *经济地理*, 2017, 37(3): 86-95. [LI Y T. Spatial vulnerability based on the framework of the exposure-sensitivity-adaptive capacity: A case study of Lanzhou. *Economic Geography*, 2017, 37(3): 86-95.]
- [17] 方创琳, 王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征. *地理学报*, 2015, 70(2): 234-247. [FANG C L, WANG Y. A comprehensive assessment of urban vulnerability and its spatial differentiation in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 234-247.]
- [18] 李海玲, 马蓓蓓, 薛东前, 等. 丝路经济带背景下我国西北地区城市脆弱性的空间分异与影响因素. *经济地理*, 2018, 38(2): 66-73. [LI H L, MA B B, XUE D Q, et al. The spatial differentiation and determinants of urban vulnerability in Northwest China under the background of the Silk Road Economic Belt. *Economic Geography*, 2018, 38(2): 66-73.]
- [19] 张路路, 郑新奇, 张春晓, 等. 基于变权模型的唐山城市脆弱性演变预警分析. *自然资源学报*, 2016, 31(11): 1858-1870. [ZHANG L L, ZHENG X Q, ZHANG C X, et al. Early-warning of urban vulnerability in Tangshan city based on variable weight model. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(11): 1858-1870.]
- [20] 崔海宁, 王芳, 汤峰. 基于熵权物元模型的资源型城市脆弱性评价. *水土保持通报*, 2018, 38(4): 272-279. [CUI H N, WANG F, TANG F. Evaluation of urban vulnerability in resource-oriented city based on entropy weight and matter element model. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(4): 272-279.]
- [21] 仇保兴. 复杂科学与城市规划变革. *城市规划*, 2009, 33(4): 11-26. [QIU B X. Complicated science and urban planning reform. *City Planning Review*, 2009, 33(4): 11-26.]
- [22] 孙湛, 马海涛. 基于BP神经网络的京津冀城市群可持续发展综合评价. *生态学报*, 2018, 38(12): 343-353. [SUN Z, MA H T. Assessment of the sustainable development of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on a back propagation neural network. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 343-353.]
- [23] 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. *地理科学*, 2013, 33(11): 1323-1329. [WANG F X, MAO A H, LI H L, et al. Quality measurement and regional difference of urbanization in Shandong province based on the entropy method. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(11): 1323-1329.]
- [24] 贾珊珊. 区域系统发展脆弱性评价研究: 以京津冀都市圈河北8市为例. 天津: 天津财经大学, 2015. [JIA S S. Study on the evaluation of regional system development's vulnerability: Taking for example Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan circle's 8 cities in Hebei province. Tianjin: Tianjin University of Finance and Economics, 2015.]
- [25] 阮秀凯, 刘莉, 张耀举, 等. 现代无线通信系统盲处理技术新进展: 基于智能算法. 上海: 复旦大学出版社, 2015: 19-

39. [RUAN X K, LIU L, ZHANG Y J, et al. New Development of Blind Processing Technology in Modern Wireless Communication System: Based on Intelligent Algorithm. Shanghai: Fudan University Press, 2015: 19-39.]
- [26] 王新华, 李堂军, 丁黎黎. 复杂大系统评价理论与技术. 济南: 山东大学出版社, 2010: 80-89. [WANG X H, LI T J, DING L L. Theory and Technology of Complex System Evaluation. Jinan: Shandong University Press, 2010: 80-89.]
- [27] 程超, 童绍玉, 彭海英. 滇中城市群经济发展水平与资源环境承载力的脱钩分析. 中国农业资源与区划, 2017, 38(3): 121-130. [CHENG C, TONG S Y, PENG H Y. Analysis of economic development and resource and environment carrying capacity in the Central Yunnan Urban Agglomeration. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(3): 121-130.]

Vulnerability assessment of urban agglomeration based on neural network model: A case study of Central Yunnan Urban Agglomeration

FAN Jun-kai, XU Jian-gang

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Urban vulnerability is an effective measure to evaluate urban development resilience. At present, most studies on urban vulnerability focus on the special city and use the statistical method in China, and there is no urban vulnerability assessment method that is applicable to all the regional urban agglomerations. Taking the Central Yunnan Urban Agglomeration as an example, this paper develops an assessment system of urban vulnerability from three aspects of environmental system, economic system and social system. Entropy method and back propagation neural network model are used to evaluate the urban vulnerability of the study area from 2007 to 2016. The evaluation shows that the vulnerability of this urban agglomeration has a declining trend on the whole, but there is a big difference between the urban groups, which shows an unbalanced development. The evaluation results have reference significance for the planning and resilience development of the Central Yunnan Urban Agglomeration, and provide a scientific evaluation method for the study on the comprehensive development vulnerability of urban agglomeration.

Keywords: urban resilience; urban vulnerability; complex system; back propagation neural network; entropy method; Central Yunnan Urban Agglomeration