基于熵权物元模型的资源型城市脆弱性评价

崔海宁[1]，王 芳[2]，汤 峰[3]

(1.河北瑞嘉土地规划咨询有限公司，河北 廊坊 065000；
2.沧州市地产开发服务中心，河北 沧州 061001；3.河北农业大学 国土资源学院，河北 保定 071001)

摘 要：[目的] 测度资源型城市——河北省唐山的城市脆弱性演变状况，为提高唐山和类似资源型城市可持续发展能力提供科学依据。[方法] 采用敏感性—应对能力框架，从资源环境、经济和社会三方面构建了城市脆弱性评价指标体系，运用物元分析模型对 2000—2014 年唐山城市脆弱性开展评价。[结果] 研究期间唐山城市脆弱性程度整体呈现下降趋势，警情等级从“向巨警转化”下降为“向无警转化”，并分为 4 个阶段；人均耕地面积、地方财政自给率、城乡平衡指数、资源密集型产业就业比重、第三产业增加值比重、产业结构多样化指数、单位电耗、工业固体废弃物综合利用率、科技支出占地方财政支出比重、第三产业从业人员等仍是制约唐山市脆弱性状况的主要因素。[结论] 物元模型可用于城市脆弱性评价。评价结果表明唐山城市脆弱性得到了改善，但未来仍需关注研究的障碍因子。

关键词：城市脆弱性；评价；物元模型；唐山市

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)04-0266-08 **中图分类号**：F299.27

文献参数：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[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：266-273. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.043. Cui Haining, Wang Fang, Tang Feng. Evaluation of urban vulnerability in resource-oriented city based on entropy weight and matter element model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 266-273.

Evaluation of Urban Vulnerability in Resource-oriented City Based on Entropy Weight and Matter Element Model

CUI Haining[1], WANG Fang[2], TANG Feng[3]

(1. *Hebei Ruijia Land Planning and Consulting Co. Ltd.*, *Langfang*, *Hebei* 065000, *China*;
2. *Cangzhou City Real Estate Development Service Center*, *Cangzhou*, *Hebei* 050061, *China*;
3. *College of Land and Resources*, *Agricultural University of Hebei*, *Baoding*, *Hebei* 071001, *China*)

Abstract: [Objective] The thesis aimed to evaluate the urban vulnerability evolution of resource-oriented Tangshan City of Hebei Province, and to provide scientific basis for improving the sustainable development ability of Tangshan City and similar resource-oriented cities. [Methods] Based on the framework of sensitivity response capability, the urban vulnerability evaluation index system was constructed from resources, environment, economy and society. Then we introduced matter element analysis model to evaluate the urban vulnerability of Tangshan City from 2000 to 2014. [Results] The overall level of urban vulnerability showed an downward trend in Tangshan City during the study period, the warning degree down from “to the huge warning transformation” to “no warning transformation”, and divided into 4 stages. There are still many factors that restrict the vulnerability, including per capita arable land area, the local financial self-sufficiency rate, urban and rural balance index, resource intensive industry employment proportion, the proportion of the added value of industrial structure, the diversity index, unit GDP power consumption, industrial solid waste comprehensive utilization rate, science and technology expenditure of local fiscal expenditure, third industry practitioners and so on. [Conclusion] The matter element analysis model can be applied to urban

收稿日期：2018-02-09 **修回日期**：2018-04-04
资助项目：河北省创新能力提升计划项目“河北省创新型乡镇评价指标体系和建设模式研究”(18456103D)
第一作者：崔海宁(1984—)，女(汉族)，河北省故城县人，工程师，硕士，主要从事土地利用规划与评价、城市可持续发展研究。E-mail：fangw1976@126.com。

vulnerability evaluation. The results show that the urban vulnerability of Tangshan City has been improved, but in the future, obstacle factors still need to be paid attention to.

Keywords: urban vulnerability; matter element analysis; Tangshan City

资源型城市是因自然资源开采和加工而兴起的一类城市。近年来,资源型城市因经济结构失衡、大量贫困和失业人口、生态环境严重破坏[1],并引发自然环境、经济、社会脆弱性问题而受到广泛关注[2-5]。城市脆弱性作为研究城市人地系统和谐发展的新视角和资源型城市健康持续发展的重要途径[6-7],对保障倡导城市安全发展具有重要的指导意义。城市脆弱性研究目前主要集中在概念、分析框架[6-7]、影响因素[8-9]、评价[10-11]、规避建议[12-14]等方面。城市脆弱性概念及内涵经历了由一元到多元、由简单到复杂的过程[2],涵盖了风险、暴露性、敏感性、适应性或恢复力等多种概念[8-11]。如从灾害[2]和气候变化[16]视角进行定义,也有从生态[8]、社会[17]和经济[18]等视角进行界定,但无法全面体现城市作为环境—经济—社会综合体的脆弱性特征[5,19],整合多视角的概念逐步成为共识[2,11]。评价是城市脆弱性研究的基础性环节,通过对城市脆弱性的程度识别可为降低城市脆弱性水平提供参考[19],通常是在指标体系构建基础上结合不同数学方法综合成脆弱度指数并判断城市脆弱性程度。常见评价模型包括综合指数法[5],集对分析法(SPA)[20-21]、函数模型法[17]、数据包络分析(DEA)[22]、能值法[15]、情景分析[23]等,取得了很好效果,但需要借助人为进行城市脆弱性指数的等级划分[24],主观性强且无法识别单指标的状态水平,易忽视指标间的分异信息[25],同时这些模型可评价出评价对象的脆弱性等级,但无法反映出评价对象向某个等级转化的中间状态。作为全国首批资源型城市转型发展示范区之一,河北省唐山市的城市脆弱性具有代表性和典型性。因此,本研究通过构建表征城市综合脆弱性的评价指标体系,尝试构建基于物元分析的城市脆弱性评价模型,测度唐山市 2000—2014 年城市脆弱性的演变状况,为提高唐山和类似资源型城市可持续发展能力提供科学依据。

1　研究区概况和数据来源

唐山市作为河北省经济和城市化发展的快速地区,是一座"依煤而建,因钢而兴"的资源型城市,是北方重要的能源、原材料生产基地和全国三大铁矿集中区之一[26]。区域综合经济实力整体较强,地区和人均 GDP 均位居全省前列,但经济结构高度单一且超重型化,工业产值占全市 GDP 的 80%以上,整体产业链条短,矿产资源的长期"群采"也破坏了区域生态环境和自然景观,形成了较大规模的采空区和采煤塌陷地,还排放了大量工业废弃物排、大量 SO_2,粉尘、烟尘等工业废气,影响了环境质量。

研究数据主要涉及 2001—2015 年的人口、社会、经济、资源、环境状况等,其中人口、经济、城市建设、资源利用等数据主要来自于城市统计年鉴、河北省和唐山市社会经济统计年鉴,以及相应年份唐山国民经济和社会发展统计公报(中国统计信息网 http://www.tjcn.org/)。废污水排放量、固体废弃物排放等数据来源于《唐山市环境状况公报》。评价中采用的 GDP 为统一折算到 2000 年现价 GDP。对于缺失的个别年份数据采用滑动平均法或趋势外推法获得。数据处理和评价在 Excel 和 Matlab 7.0 平台支持下完成。

2　研究方法

2.1　物元分析原理和方法

物元模型是一种解决不相容的复杂问题的方法,适用于多因子综合评价。城市是一个复杂系统,城市脆弱性评价指标涉及到众多指标且单项指标评价具有不相容性,所以构建城市脆弱性评价物元模型具有一定可行性。通过关联函数分析决策对象各子系统间的矛盾性,在等级确定上结合客观标准先对评价指标的经典域进行区间界定,然后通过脆弱性单指标的关联函数获得单指标状态,再进行多指标综合,从而提高了等级判定的客观性和科学性。将物元分析理论与方法应用到城市脆弱性评价中,基本步骤为:

(1) 构建城市脆弱性评价物元。城市脆弱性物元 $\boldsymbol{R}=(Q,C,V)$,由城市脆弱性对象 Q 及其特征向量 C(评价指标)和特征量值 v(评价指标值)共同构成。其中,对象 Q 有 n 个特征向量 $c_1,c_2,\cdots,c_n$。

(2) 确定脆弱性经典域、节域物元矩阵。城市脆弱性状态的经典物元矩阵可表达为:$\boldsymbol{R}_{oij}=(Q_{oj},c_i,v_{oij})$。其中 $\boldsymbol{R}_{oij}$ 为经典域物元;Q_{oj} 为所划分城市脆弱性程度的第 j 个评价等级;c_i 为特征向量($i=1,2,3,\cdots,n$),经典域 v_{oij} 为第 i 特征向量对应等级 j 的量值范围(a_{oij},b_{oij})。经典域符合物元矩阵可表达为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{vmatrix}(a_{o11},b_{o11}) & (a_{o11},b_{o11}) & \cdots & (a_{oj1},b_{oj1})\\(a_{o12},b_{o12}) & (a_{o22},b_{o22}) & \cdots & (a_{oj2},b_{oj2})\\\vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\(a_{o1i},b_{o1i}) & (a_{o2i},b_{o2i}) & \cdots & (a_{oij},b_{oji})\end{vmatrix} \quad (1)$$

节域物元矩阵表示为：

$$\boldsymbol{R}_p=(Q_p,c_i,v_{pi})=\begin{vmatrix} Q_p & c_1 & (a_{p1},b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2},b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{pn},b_{pn}) \end{vmatrix} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{R}_p$——节域物元；v_{pi}——节域物元关于 i 特征 C_i 的量值范围(a_{pi},b_{pi})。

(3) 确定关联函数和关联度。城市脆弱性评价指标关联函数 $K(x)$的定义为：

$$K_{(ci)j}=\begin{cases} -\dfrac{\rho_{ij}(v_i,V_{oij})}{|V_{oij}|} & (v_i\in V_o) \\ \dfrac{\rho(v_i,V_{oij})}{\rho_{pi}(v_i/V_{oij})-\rho(v_i,V_{oij})} & (v_i\notin V_o) \end{cases} \tag{3}$$

式中：$K_{(ci)j}$——第 i 项指标相应于第 j 个脆弱性等级的关联度。

$$\begin{cases} \rho_{ij}(v_i,V_{oij})=|v_i-\dfrac{1}{2}(a_{oij}+b_{oij})|-\dfrac{1}{2}(b_{oij}-a_{oij}) \\ \rho_{pi}(v_i,V_{pi})=|v_i-\dfrac{1}{2}(a_{opi}+b_{opi})|-\dfrac{1}{2}(b_{opi}-a_{opi}) \end{cases} \tag{4}$$

式中：$\rho_{ij}(v_i,V_{oij})$——点 v_i 特征向量 C_i 的量值，与对应特征向量有限区间 $V_{oij}=[a_{oij},b_{oij}]$的距离；$\rho_{pi}(v_i,V_{pi})$——点 v_i 特征向量 C_i 的量值，与对应特征向量有限节域(有限区间)$V_{pi}=[a_{pi},b_{pi}]$的距离，$|V_{oij}|=|b_{oij}-a_{oij}|$；$V_{oij}$，$V_{pi}$——待评价城市脆弱物元的指标值、经典域物元和节域物元的量值范围。

(4) 计算综合关联度和评价等级。待评价物元 $Q_x(x=1,2,3,\cdots,m)$是关于等级 j 的综合关联度 $K_j(Q_x)$。根据得到的指标关联函数 $K(x)$和指标权重，采用综合指标法构建城市脆弱性评价模型为：

$$K_{j(Q_x)}=\sum_{j=1}^{n}W_{Vi}k_{(ci)j} \tag{5}$$

式中：ω_{vi}——指标权重值。采用熵值法确定权重，由于该方法比较常见，不再赘述。

若 $K_{ij}=\max[K_{(ci)j}]$，则待评价对象第 i 个指标属于城市脆弱性等级 j 级；若 $K_{jx}=\max[K_{j(Q_x)}]$，则待评对象 T_x 属于脆弱性标准等级 j 级。K_{jx} 值越大表明评价对象在对应的等级中越稳定，反之则表明评价对象有向仅次于该等级 k 值的等级转化的趋势，两等级的值越接近，转化的可能越大。若 $K_{jx}\leqslant 0$，表明城市脆弱性水平在设定标准等级之外，并向最大 k 值对应等级转化。

2.2 脆弱性评价指标体系构建

本研究认为城市脆弱性是指城市资源环境、经济、社会系统在面对内外部自然要素和人为要素干扰因素的作用下，表现出高度敏感并缺乏应对能力，并导致城市结构和功能易受到损害的属性[19]。可从城市对资源环境、社会和经济维度的敏感性和适应力角度构建城市脆弱性评价指标体系。敏感性越小，而应对能力越强则城市脆弱性越小，参考已有相关文献研究，遵循科学性、灵敏性、相关性、可操作性与可靠性等原则，建立了唐山城市脆弱性评价指标体系(表 1)。

2.3 脆弱性警度的确定

依据城市脆弱性的可拓性，在借鉴相关预警研究[31]的基础上，结合唐山市发展现状与研究目标，将城市脆弱性指数划分为 5 个等级，定性描述为无警(Ⅰ)、轻警(Ⅱ)、中警(Ⅲ)、重警(Ⅳ)、巨警(Ⅴ)。评价经典域的确定则主要依据以下几点原则进行：①参考已有国家或国际标准的指标值；②参照相关指标的全国平均水平以及所处省份的经济社会发展平均水平；③依据现有的环境与社会、经济协调发展的理论，力求定量化作为标准值；④参考相关文献[32]制定。依据以上原则，确定各个指标经典域的取值范围(表 2)。

3 唐山市城市脆弱性评价结果分析

3.1 物元分析评价

按照构造的物元模型公式(1)—(4)，以唐山市 2000—2014 年各指标数据为对象，得到不同时期指标脆弱性级别的关联度。为更好识别城市脆弱性状况，分别从敏感性和应对能力进行分析。

3.1.1 城市脆弱敏感性预警状况分析 由于篇幅有限，本文仅以 2000 年 C_1 指标(工业废水排放强度)为例介绍各参数意义。将 2000 年 C_1 指标原始数据代入相应的公式后，得出其相应的评价等级的关联分别为：$K_{(C1)1}=-0.189$，$K_{(C1)2}=0.392$，$K_{(C1)3}=-0.131$，$K_{(C1)4}=-0.348$，$K_{(C1)5}=-0.478$，可判定 2000 年唐山市该指标属于级别Ⅳ 级，即属于“重警”水平。同理可得到年份各个指标的相关数值和等级(表 3—4)。

由敏感性系统各项指标的物元分析结果表 3 可以看出，指标工业废水排放强度、二氧化硫排放强度、单位 GDP 碳排放、城镇居民人均可支配收入、城镇人均居住面积、城乡收入平衡指数等因素在研究期间预警等级呈现不同程度的下降趋势，对降低唐山城市脆弱的敏感性具有促进作用。工业废水排放强度、二氧化硫排放强度、单位 GDP 碳排放分别由 2000 年的 21.96，28.93 和 8.1 t/10^4 元降低到 2014 年的 5.01，

4.42 和 2.75 t/10^4 元,表明城市在绿色生产、提高能源利用率方面取得良好效果。城镇居民人均可支配收入 6 802 元提升至 2014 年的 28 891 元,城镇人均居住面积由 2000 年的 20 m^2/人上升至 2014 年的 28.07 m^2/人,表明城市经济发展实力和人均生活保障水平不断提高。但人均耕地面积、地方财政自给率、城乡平衡指数、资源密集型产业就业比重、第三产业增加值比重、产业结构多样化指数等指标在研究期间基本处于警度较高状态,一定程度上阻碍了城市脆弱的敏感性降低。

表 1　唐山市城市脆弱性评价预警指标体系

决策层	目标层	指标层	权重	性质
敏感性	资源敏感性	C_1 工业废水排放强度	0.041 5	+
		C_2 工业固体废弃物排放强度	0.036 4	+
		C_3 二氧化硫排放强度	0.031 4	+
		C_4 人均耕地面积	0.037 7	−
	环境敏感性	C_5 单位 GDP 碳排放	0.029 3	−
		C_6 建成区绿化覆盖率	0.042 4	−
		C_7 人均公共绿地面积	0.039 8	−
	经济敏感性	C_8 城镇居民人均可支配收入	0.020 17	−
		C_9 资源密集型产业就业比重	0.039 1	+
		C_{10} 外贸依存度	0.023 6	−
		C_{11} 地方财政自给率	0.026 3	−
		C_{12} 第三产业增加值比重	0.041 6	−
		C_{13} 产业结构多样化指数	0.031 0	+
敏感性	社会敏感性	C_{14} 城市居民恩格尔系数	0.030 3	−
		C_{15} 城镇登记失业率	0.029 1	+
		C_{16} 城镇人均居住面积	0.026 6	−
		C_{17} 城乡收入平衡指数	0.038 4	−
应对能力	资源应对能力	C_{18} 万元 GDP 综合能耗	0.036 1	+
		C_{19} 万元 GDP 水耗	0.022 8	+
		C_{20} 万元 GDP 电耗	0.027 6	+
		C_{21} 万元 GDP 建设用地占用	0.034 0	+
	环境应对能力	C_{22} 工业固体废弃物综合利用率	0.021 1	−
		C_{23} 污水处理厂集中处理率	0.021 3	−
		C_{24} 生活垃圾无害化处理率	0.030 2	−
	经济应对能力	C_{25} 人均地方财政收入	0.023 4	−
		C_{26} 科技支出占地方财政支出比重	0.020 3	−
		C_{27} 人均 GDP	0.024 2	−
		C_{28} 固定资产投资密度	0.022 4	+
		C_{29} 第三产业从业人员比重	0.022 7	−
	社会应对能力	C_{30} 每万人拥有公共汽车	0.019 1	−
		C_{31} 万人普通中学在校学生数	0.023 6	−
		C_{32} 万人拥有医生数	0.020 1	−
		C_{33} 百人拥有移动电话数	0.022 0	−
		C_{34} 百人拥有国际互联网用户数	0.012 1	−
		C_{35} 建成区供水管道密度	0.015 3	−
		C_{36} 排水管网密度	0.012 7	−
		C_{37} 人均城市道路面积	0.012 7	−

注:资源密集型产业就业比重 C_9:为从事采掘业和制造业人口占就总业人口比重;外贸依存度 C_{10}:表征区域对外贸易活动对经济发展的影响和依赖,外贸依存度=进出口总额/GDP;产业结构多样化指数 C_{13}:表征城市产业结构多样化状况,一般来说指数值越大表明产业结构越合理。计算公式为:$W=\sum|I_i-I_{i-1}|$其中,I_i 为第 $i(i=1,2,3)$次产业的增加值占 GDP 的比重;城乡收入平衡指数 C_{17}:表明城乡收入差距。城乡收入平衡指数=农民人均纯收入/城镇居民人均可支配收入。

表 2 唐山城市脆弱性评价预警指标经典域范围

指标层	单位	巨警(Ⅴ)	重警(Ⅳ)	中警(Ⅲ)	轻警(Ⅱ)	无警(Ⅰ)
C_1	t/10^4 元	[25～35]	[20～25]	[15～20]	[10～15]	[0～10]
C_2	t/10^4 元	[2～4]	[1～2]	[0.1～1]	[0.05～0.1]	[0～0.05]
C_3	t/10^4 元	[20～30]	[15～20]	[10～15]	[5～10]	[2～5]
C_4	h/人	[0～0.3]	[0.3～0.75]	[0.75～1.05]	[1.05～1.2]	[1.2～2]
C_5	t/10^4 元	[8～10]	[6～8]	[4～6]	[2～4]	[1～2]
C_6	%	[10～15]	[15～25]	[25～30]	[30～35]	[35～50]
C_7	m^3/人	[3～5]	[5～7]	[7～9]	[9～12]	[12～15]
C_8	元	[0～3 000]	[3 000～8 000]	[8 000～15 000]	[15 000～25 000]	[25 000～35 000]
C_9	%	[45～50]	[40～45]	[35～40]	[30～35]	[10～30]
C_{10}	%	[0.1～0.4]	[0.4～0.8]	[0.8～1.2]	[1.2～1.5]	[1.5～3]
C_{11}	%	[50～60]	[60～70]	[70～80]	[80～90]	[90～100]
C_{12}	%	[20～25]	[25～30]	[30～35]	[35～40]	[40～45]
C_{13}	—	[50～60]	[60～70]	[70～80]	[80～95]	[95～110]
C_{14}	%	[60～80]	[50～60]	[40～50]	[30～40]	[5～30]
C_{15}	%	[4.5～5]	[4～4.5]	[3～4]	[2～3]	[1～2]
C_{16}	m^2	[10～15]	[15～20]	[20～25]	[25～30]	[30～40]
C_{17}	%	[20～30]	[30～40]	[40～50]	[50～60]	[60～80]
C_{18}	标准煤/10^4 元	[3～5]	[2.5～3]	[2～2.5]	[1.5～2]	[1～1.5]
C_{19}	m^3/10^4 元	[30～40]	[20～30]	[15～20]	[10～15]	[5～10]
C_{20}	千瓦时/10^4 元	[2 000～2 500]	[1 500～2 000]	[1 000～1 500]	[500～1 000]	[200～500]
C_{21}	k/10^4 元	[20～40]	[15～20]	[10～15]	[5～10]	[2～5]
C_{22}	%	[30～50]	[50～65]	[65～75]	[75～85]	[85～100]
C_{23}	%	[40～50]	[50～60]	[60～70]	[70～85]	[85～100]
C_{24}	%	[20～45]	[45～65]	[65～70]	[70～85]	[85～100]
C_{25}	万元	[0～3 000]	[3 000～6 000]	[6 000～9 000]	[9 000～12 000]	[12 000～15 000]
C_{26}	%	[0.2～1]	[1～1.5]	[1.5～2]	[2～2.5]	[2.5～3]
C_{27}	元	[1 000～10 000]	[10 000～20 000]	[20 000～30 000]	[30 000～40 000]	[30 000～90 000]
C_{28}	10^4 元/km^2	[30～100]	[100～500]	[500～1 000]	[1 000～2 500]	[2 500～3 000]
C_{29}	%	[0～20]	[20～30]	[30～40]	[40～50]	[50～60]
C_{30}	辆	[0～2]	[2～4]	[4～6]	[6～8]	[8～12]
C_{31}	人	[0～200]	[200～300]	[300～400]	[400～500]	[500～750]
C_{32}	人	[5～15]	[15～20]	[20～25]	[25～30]	[30～50]
C_{33}	部/百人	[0～40]	[40～60]	[60～80]	[80～100]	[100～200]
C_{34}	户/百人	[4～15]	[15～20]	[20～25]	[25～35]	[35～50]
C_{35}	km/km^2	[1～3]	[3～6]	[6～9]	[9～12]	[12～15]
C_{36}	km/km^2	[1～3]	[3～5]	[5～7]	[7～9]	[9～12]
C_{37}	m^2/人	[3～6]	[6～9]	[9～12]	[12～15]	[15～18]

3.1.2 城市脆弱应对能力预警状况分析 由脆弱性应对能力单个指标的物元分析结果可知(表 4),应对能力指标中的万元 GDP 综合能耗、万元 GDP 水耗、万元 GDP 建设用地占用、污水处理厂集中处理率、人均地方财政收入、人均 GDP、固定资产投资密度、百人拥有移动电话数、国际互联网用户数、建成区供水管道密度、排水管网密度和人均城市道路面积等指标在研究期间预警等级呈不同程度的增强趋势,表明这些因素对城市脆弱性应对能力的提高具有促进作用。由表 4 可知,万元 GDP 综合能耗由 2000 年的 3.94 标准煤/万元下降至 2014 年的 1.4 标准煤/万元,万元 GDP 水耗和电耗、地耗则分别下降了 22.74 m^3/万元、479.11 kW·h/万元、28.28 k/万元,反映出唐山在节约利用能源、提高资源利用效率方面效果较显著,一定程度缓解了城市资源脆弱性。建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积分别提高了 7.84%和 4.38,这与唐山实施植物物种多样性保护、道路绿化、特色景观和采沉区生态改造等专项行动有关,生态建设得到改善。污水处理、工业固体废弃物综合利用率分别提高了 48.5%,35.32%,生活垃圾无害化处理率在

2010 年达到 100%,单位 GDP 碳排放量由 2000 年的 8.1 t/万元下降到 2014 年的 2.75 t/万元。此外,城市人均道路面积、每万人拥有公共汽车数量、建成区供水管道和排水管道密度分别提高了 6.55 m^3,0.43 万辆,1.55,3.39 km/km^2。表明唐山市配套设施和城市现代化水平较高。百人拥有移动电话数和拥有国际互联网户数分别增长了 170.9 和 20.09 人,万人普通中学在校生学生数和万人拥有医生数、城镇人均居住面积也在研究期间呈现上升趋势,表明唐山在城市基础设施建设、信息化建设以及生活、医疗等保障方面得到改善。但万元 GDP 电耗、工业固体废弃物综合利用率、科技支出占地方财政支出比重、第三产业从业人员比重等仍处于中警状态,影响了脆弱性的应对能力提升。

表 3　唐山城市脆弱性评价敏感性指标关联度与等级

关联度	2000 年						2002 年	2004 年	2006 年	2008 年	2010 年	2012 年	2014 年
	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	等级	等级	等级	等级	等级	等级	等级	等级
$K_{(C_1)j}$	−0.189	0.392	−0.131	−0.348	−0.478	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
$K_{(C_2)j}$	−0.947	−0.893	0.008	−0.061	−0.348	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
$K_{(C_3)j}$	0.107	−0.893	−0.928	−0.946	−0.957	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ
$K_{(C_4)j}$	−0.559	−0.400	−0.211	−0.063	0.062	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
$K_{(C_5)j}$	0.050	−0.050	−0.525	−0.683	−0.763	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_6)j}$	−0.609	−0.452	−0.315	−0.087	0.087	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
$K_{(C_7)j}$	−0.550	−0.438	−0.250	0.500	−0.250	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
$K_{(C_8)j}$	−0.359	0.240	−0.150	−0.547	−0.728	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ
$K_{(C_9)j}$	0.240	−0.319	−0.168	−0.423	−0.060	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
$K_{(C_{10})j}$	−0.803	−0.767	−0.715	−0.658	0.342	Ⅰ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_{11})j}$	−0.226	0.413	−0.293	−0.529	−0.647	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ
$K_{(C_{12})j}$	−0.356	−0.097	0.240	−0.253	−0.440	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
$K_{(C_{13})j}$	−0.195	0.320	−0.340	−0.560	−0.707	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
$K_{(C_{14})j}$	−0.409	−0.278	−0.071	0.250	−0.188	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_{15})j}$	−0.413	−0.288	0.320	−0.160	−0.440	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
$K_{(C_{16})j}$	−0.333	0.000	0.000	−0.333	−0.500	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_{17})j}$	−0.403	−0.254	−0.005	0.015	−0.248	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

表 4　唐山城市脆弱预警应对能力指标关联度与等级

关联度	2000 年						2002 年	2004 年	2006 年	2008 年	2010 年	2012 年	2014 年
	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	等级	等级	等级	等级	等级	等级	等级	等级
$K_{(C_{18})j}$	0.470	−0.470	−0.576	−0.647	−0.697	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
$K_{(C_{19})j}$	0.328	−0.328	−0.664	−0.731	−0.776	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_{20})j}$	0.300	−0.300	−0.650	−0.767	−0.825	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
$K_{(C_{21})j}$	0.180	−0.820	−0.856	−0.880	−0.897	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_{22})j}$	0.400	−0.600	−0.771	−0.822	−0.855	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
$K_{(C_{23})j}$	0.300	−0.300	−0.650	−0.767	−0.844	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
$K_{(C_{24})j}$	−0.764	−0.629	−0.567	−0.133	0.133	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
$K_{(C_{25})j}$	0.229	−0.771	−0.885	−0.924	−0.943	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ
$K_{(C_{25})j}$	0.225	−0.775	−0.862	−0.900	−0.922	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ
$K_{(C_{27})j}$	−0.306	0.291	−0.153	−0.445	−0.445	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
$K_{(C_{28})j}$	0.463	−0.537	−0.931	−0.967	−0.987	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ
$K_{(C_{29})j}$	−0.167	0.500	−0.167	−0.375	−0.500	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
$K_{(C_{30})j}$	−0.418	−0.273	−0.030	0.090	−0.238	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_{31})j}$	−0.520	−0.414	−0.246	0.138	−0.050	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ
$K_{(C_{32})j}$	−0.487	−0.402	−0.282	−0.103	0.103	Ⅰ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_{33})j}$	0.354	−0.354	−0.569	−0.677	−0.741	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
$K_{(C_{34})j}$	0.146	−0.854	−0.899	−0.923	−0.948	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅱ
$K_{(C_{35})j}$	−0.436	−0.248	0.257	−0.102	−0.358	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
$K_{(C_{36})j}$	−0.376	−0.172	0.477	−0.159	−0.369	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ
$K_{(C_{37})j}$	−0.037	0.040	−0.480	−0.653	−0.740	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ

3.2 城市脆弱性评价状况总体分析

结合公式(5)计算综合关联度,并判定城市脆弱性的警度等级(图 1)。研究期间唐山城市脆弱性安全警度由“向巨警转化”状态降低为“向无警转化”状态,表明城市脆弱性总体正逐步降低,呈日益好转的趋势,并呈现出 4 个阶段。2000—2003 年,城市脆弱性不完全符合“巨警”的标准,但具备“向巨警转化”的条件;2004—2006 年,城市脆弱性不完全符合“重警”的标准,但具备“向重警转化”的条件,表明城市脆弱性程度较高,“重警”等级不稳定。2007 年唐山市制定实施资源型城市转型战略以来,城市脆弱性状况明显得到改善。2007—2011 年,唐山市城市脆弱性不完全符合“中警”和“轻警”的标准,但具备“向中警转化”和“向轻警转化”的条件,2012—2014 年,城市脆弱性不完全符合“无警”的标准,但具备“向无警转化”的条件。

研究采用熵权物元模型进行城市脆弱性评价,不仅可对每个参评指标所处的等级状况进行判定,且结果可以体现城市脆弱性所处的状态和向某个脆弱性等级转化的中间状态。从实际评价结果来看,与已有关于唐山脆弱性的研究结果基本一致[34]。已有研究结果显示唐山城市脆弱性由 2000 年的“重警”降低至“轻警”,本研究中则是“向巨警转化”状态降低为“向无警转化”状态,评价的警情等级略有差异。这可能是与已有研究的指标体系和评价方法有所差异,多指标综合评价法强调对综合质量的分析,物元分析模型更强调对影响因子的分析,关联函数可提示更多的分异信息,体现不同时期评价指标在城市脆弱性评价预警中的差异作用,可有效地克服城市脆弱性评价概念的模糊性和单项指标评价结果的不相容性,避免了主观判断的不确定性,结果可信度较高,揭示出更丰富的信息量。

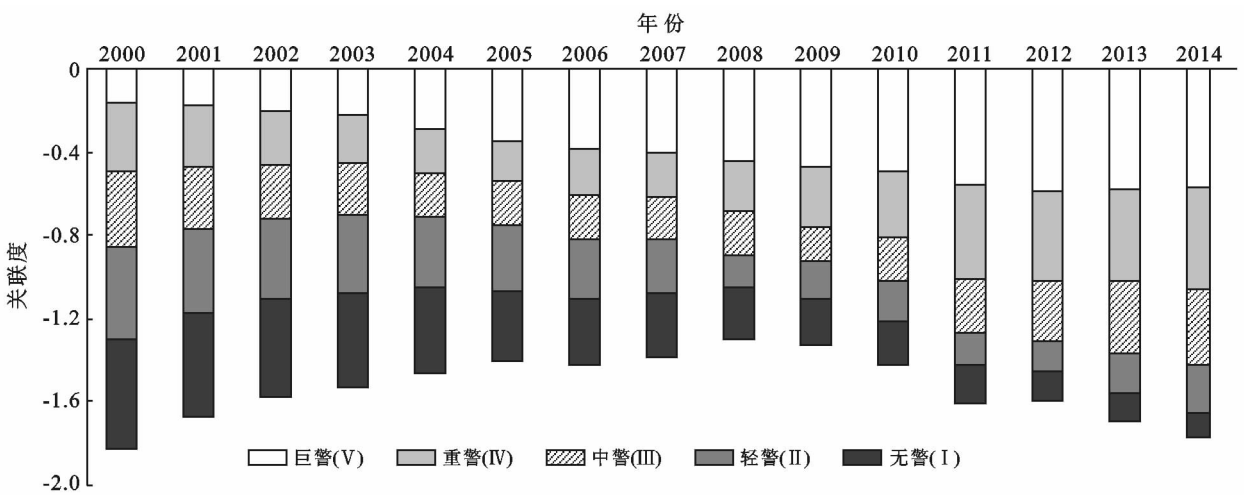


图 1 唐山市 2000—2014 年城市脆弱性状况预警等级

4 结 论

(1) 基于敏感性—应对能力框架,本研究从资源环境、经济和社会维度构建了城市脆弱性评价预警指标体系,结合物元分析评价模型对唐山市综合脆弱性进行了评价。结果表明:2000—2014 年间唐山在资源环境、经济和社会发展方面采取了多项举措降低城市的脆弱性,取得了一定成效,城市脆弱性状况趋于良好。脆弱性警情等级演变分为 4 个阶段:2000—2003 年的“向巨警转化”状态,2004—2006 年为“向重警转化”状态,2007—2011 年为“向中警转化”和“向轻警转化”的叠加期,2012—2014 年为“向无警转化”状态。

(2) 物元分析结果表明,当前制约唐山市脆弱性提高的主要因素是人均耕地面积、地方财政自给率、城乡平衡指数、资源密集型产业就业比重、第三产业增加值比重、产业结构多样化指数、万元 GDP 电耗、工业固体废弃物综合利用率、科技支出占地方财政支出比重、第三产业从业人员等。这种结果表明城市处于矿产资源的大规模开采阶段,高能源消耗、高污染排放的根本矛盾仍然存在,第二产业占 GDP 的比重始终居高不下,采矿业的工业总产值占工业总产值的比重达到 14%,资源型产业的就业人口比重一直处在 50%以上,城市对人才与资金的吸引力不够,产业结构的调整速度缓慢[30,33],仍制约着区域可持续性发展。

(3) 根据研究所得到出的城市脆弱性状况演变路径和物元分析得到的障碍因子,提出如下建议:①以成为全国首批资源型城市转型发展示范区为契机,依托区域资源优势来延伸产业链条,推进传统产

业的升级和生态化改造,以更好地发挥资源和经济效益;②积极主动承接京津产业转移,充分利用北京、天津各类科技智力资源,尤其是人才的引进,培育壮大战略性新兴产业;③巩固城市基础设施建设水平,进一步保护耕地资源,开展工矿废弃地整治补充耕地,促进人地关系协调发展。

(4) 物元分析方法要求必须设定脆弱性评价的经典域和节域,而目前研究仅涉及到标准等级值,不是一个域。此外,对突发性自然灾害等影响城市脆弱性的因素未进行考虑,今后在脆弱性评价指标体系构建、经典域和节域等方面还需要深入研究。

[参 考 文 献]

[1] 董锁成,李泽红,李斌,等. 中国资源型城市经济转型问题与战略探索[J]. 中国人口·资源与环境,2007,17(5):12-17.

[2] 方创琳,王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征[J]. 地理学报,2015,70(2):234-247.

[3] 孙平军,修春亮. 辽宁矿业城市经济系统应对能力分析与脆弱性评价[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(4):22-27.

[4] 程钰,任建兰,徐成龙. 资源衰退型城市人地系统脆弱性评估:以山东枣庄市为例[J]. 经济地理,2015,35(3):87-93.

[5] 王岩,方创琳. 大庆市城市脆弱性综合评价与动态演变研究[J]. 地理科学,2014,34(5):547-555.

[6] Sanchez R R, Seto K, Simon D, et al. Vulnerability [R]. Bonn: IHDP Report, 2005.

[7] 徐君,李贵芳,王育红. 国内外资源型城市脆弱性研究综述与展望[J]. 资源科学,2015,37(6):1266-1278.

[8] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. Proceedings of The National Academy of Sciences of The America, 2003,100(14):8074-8079.

[9] Cutter L S. Vulnerability to environmental hazards[J]. Progress in Human Geography, 1996,20(4):529-539.

[10] Hufschmidt G. A comparative analysis of several vulnerability concepts[J]. Natural Hazards, 2011,58(2):621-643.

[11] 李鹤,张平宇,程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展,2008,27(2):18-25.

[12] Chang L, Huang S. Assessing urban flooding vulnerability with an emergy approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2015,143:11-24.

[13] Mccarthy J J, Canziani O F, Leary N A, et al. IPCC Climate change2001, Impacts, Adaptation, and Vulnerability[J]. Contribution of Working Group Ⅱ to the Third Assessment Report, 2001,19(2):81-111.

[14] 史兴民,韩申山,安鹏飞,等. 中西部典型资源型城市环境脆弱性评价[J]. 地域研究与开发,2010,29(6):63-68.

[15] 李鹤,张平宇. 东北地区矿业城市社会就业脆弱性分析[J]. 地理研究,2009,28(3):751-760.

[16] 杨艳茹,王士君,陈晓红. 石油城市经济系统脆弱性动态演变及调控途径研究:以大庆市为例[J]. 地理科学. 2015,35(4):456-563.

[17] 赵林,王维,张宇硕,等. 东北振兴以来东北地区城市脆弱性时空格局演变[J]. 经济地理. 2014,34(12):69-77.

[18] Kates R W, Ausubel J H, Berberian M. Climate impact assessment: Studies of the interaction of climate and society[R]. ICSU/SCOPE Report 27, John Wiley & Sons, Chichester, 1985.

[19] 那伟,刘继生. 辽源市经济系统的脆弱性及其规避措施研究[J]. 地理科学,2009,29(5):666-672.

[20] 苏飞,张平宇. 基于集对分析的大庆市经济系统脆弱性评价[J]. 地理学报,2010,65(4):454-464.

[21] 韩瑞玲,佟连军,佟伟铭,等. 基于集对分析的鞍山市人地系统脆弱性评估[J]. 地理科学进展,2012,31(3):344-352.

[22] 李博,佟连军,韩增林. 东北地区煤炭城市脆弱性与可持续发展模式[J]. 地理研究,2010,29(2):361-372.

[23] 喻忠磊,杨新军,石育中. 关中地区城市干旱脆弱性评价[J]. 资源科学,2012,34(3):581-588.

[24] 李博,杨智,苏飞. 基于集对分析的大连市人海经济系统脆弱性测度[J]. 地理研究,2015,34(5):967-976.

[25] 苏飞,陈媛,张平宇. 基于集对分析的旅游城市经济系统脆弱性评价:以舟山市为例[J]. 地理科学,2013,33(5):538-544.

[26] Zou Lele, Wei Yiming. Impact assessment using DEA of coastal hazards on social-economy in Southeast Asia [J]. Natural Hazards, 2009,48(2):167-189.

[27] 辛馨,张平宇. 基于三角图法的矿业城市人地系统脆弱性分类[J]. 煤炭学报,2009,34(2):284-288.

[28] 王岩,方创琳,张蔷. 城市脆弱性研究评述与展望[J]. 地理科学进展,2013,32(5):755-768.

[29] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.

[30] 韩瑞玲,朱绍华,张秋雯. 唐山市经济与环境发展的适应性评价[J]. 应用生态学报,2014,25(10):2968-2974.

[31] 周彬,钟林生,陈田,等. 基于变权模型的舟山群岛生态安全预警[J]. 应用生态学报,2015,26(6):1854-1862.

[32] 赵宏波,马延吉. 基于变权—物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究:以吉林省为例[J]. 生态学报. 2014,34(16):4720-4733.

[33] 金悦,陆兆华,檀菲菲,等. 典型资源型城市生态承载力评价:以唐山市为例[J]. 生态学报,2015,35(14):4852-4859.

[34] 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[J]. 自然资源学报,2016,31(11):1858-1870.