

傅莉媛,刘相正,许海萍,等. 辽宁省大气环境脆弱性研究及影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(12): 60-68. Fu Liyuan, Liu Xiangzheng, Xu Haiping, et al. Study on the vulnerability of atmospheric environment and analysis of influencing factors in Liaoning Province[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(12): 60-68.

辽宁省大气环境脆弱性研究及影响因素分析

傅莉媛¹, 刘相正¹, 许海萍², 刘丹¹, 孙丛婷^{1*}

(1. 辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳 110036;

2. 营口市大石桥生态环境分局, 辽宁 营口 115100)

摘要: 构建合理的评价体系,对大气环境脆弱性进行科学评价,可为合理利用自然资源,并对大气污染精准防控提出政策建议。该文采用时序全局主成分分析处理2014-2019年辽宁省14个地级市的短面板数据提取主成分并进行脆弱性综合评价,结果表明:(1)根据主成分分析结果,可将辽宁省地级市进行系统聚类分为5类;(2)2014-2019年辽宁省大气环境脆弱性呈现波动下降的趋势,2017年重度脆弱区域面积最大达78.03%;(3)2014、2015、2016和2018年辽宁省大气环境脆弱性具有显著空间自相关性;(4)2014-2019年各因子对脆弱性空间分异影响变化较大。时序全局主成分分析能够对面板类大气环境脆弱性指标数据进行评价分析,为了有效控制辽宁省大气环境脆弱性,应当采取针对性的政策措施。

关键词: 时序全局主成分分析; 大气环境脆弱性; 时空分布; 空间分异性

中图分类号:X823 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.1244.21.338 文章编号:1003-6504(2021)12-0060-09

Study on the Vulnerability of Atmospheric Environment and Analysis of Influencing Factors in Liaoning Province

FU Liyuan¹, LIU Xiangzheng¹, XU Haiping², LIU Dan¹, SUN Congting^{1*}

(1. School of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China;

2. Yingkou Dashiqiao Ecological Environment Bureau, Yingkou 115100, China)

Abstract: Constructing a reasonable evaluation system can help to scientifically evaluate the vulnerability of the atmospheric environment, and policy recommendations would be provided for the precise prevention and control of air pollution as well as rational use of natural resources on the basis of evaluation results. Time series global principal component analysis was used to extract principal components from the short panel data of 14 cities in Liaoning Province from 2014 to 2019, and a comprehensive assessment of vulnerability was carried out consequently. The results show that: according to the results of principal component analysis, the cities of Liaoning Province were systematically clustered into five categories. From 2014 to 2019, the atmospheric environmental vulnerability of Liaoning Province decreased volatility, and the area of severely vulnerable areas reached 78.03% in 2017. The vulnerability of the atmospheric environment in Liaoning Province in 2014, 2015, 2016 and 2018 has significant spatial autocorrelation. From 2014 to 2019, the influence of various factors on the spatial differentiation of vulnerability has changed significantly. Time series global principal component analysis can evaluate and analyze panel data of atmospheric environmental vulnerability. Targeted policy measures should be adopted to effectively control the vulnerability of the atmospheric environment in Liaoning Province.

Key words: time series global principal component analysis; atmospheric vulnerability; temporal and spatial distribution; spatial differentiation

近年来,在经济快速发展情况下产生的生态环境问题日益加剧。国内外学者针对大气环境问题,从污染物控制^[1]、污染物排放^[2]、污染物治理^[3]、环境政策规

划^[4]、环境评价^[5,6]等方面对生态环境问题进行多角度研究。定量评价是利用评价模型对数据或语言等信息进行多元计算实现对被评价对象综合分析评价的

《环境科学与技术》编辑部: (网址)http://fjks.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2021-06-22;修回2021-09-07

基金项目:国家自然科学基金(21401185,51832007);中国科学院青年创新促进会资助(2017267);辽宁省教育厅重点攻关项目(LZD202004);辽宁省科学技术计划项目(2021-MS-152)

作者简介:傅莉媛(1998-),女,硕士,研究方向为大气环境脆弱性研究。(电子信箱)11032636225@qq.com;*通讯作者。(电子信箱)suncongting@163.com。

方法,目前多用较为成熟的综合评价方法对被评价对象开展定量评价^[7]。近年来,环境评价的研究从单一要素进行评价转为对多要素进行综合评价^[8]。在环境综合评价方面,生态环境脆弱性的本质是生态系统内部结构的不稳定和正常功能失效,这些都是由外部干扰造成的,及时准确地评价生态环境脆弱性,是保护生态系统健康发展的理论基础^[9]。国内外目前对生态环境脆弱性有较多研究,郭婧等利用熵权-灰色关联度法对高寒贫困山区生态脆弱性进行探索^[10],万里洋等^[11]对石化基地生态脆弱性的机理进行研究,Zhang 等^[12]用云理论对生态环境脆弱性影响因素的不确定性进行分析。然而大气环境作为生态环境的重要组成部分,从大气环境系统角度进行脆弱性的研究相对较少,张阳等^[13]利用多准则决策分析和有序加权平均研究了在人类活动对大气环境脆弱性的影响,构建了大气环境脆弱性评价模型。开展大气环境系统脆弱性研究有助于合理利用大气资源,推动大气污染的精准防治,为实现大气和人类经济社会协调可持续发展提供研究基础。

辽宁省作为东北老工业基地,大气环境污染问题一直备受关注,大面积、高强度的露天秸秆焚烧,产生大量的PM_{2.5},导致空气质量显著下降。重污染天气是气象条件和污染物共同作用形成,而气象条件是大气污染物扩散的重要影响因素,静稳天气会导致污染物扩散较慢并进行累积,最终产生重污染天气^[14]。辽宁省在12月入冬后极易产生逆温静稳天气,导致霾的出现。不仅如此,近年来辽宁省社会经济发展资源的大量消耗、车辆的日益增多以及工业污染的排放对辽宁省的大气环境造成了极大压力。

利用综合评价方法及统计研究方法对辽宁省14个地级市的大气环境脆弱性时空变化情况以及影响因子进行深度分析,能够为今后辽宁省大气环境的发展提供重要研究基础。全局主成分分析法适用于对短面板数据的处理,能够对指标进行有效降维^[15,16]。本研究以辽宁省大气环境脆弱性为切入点,采用时序全局主成分分析法对研究对象进行综合评价,计算大气环境脆弱性综合指数并利用空间分析软件对大气环境脆弱性的影响因子进行深度分析。

1 研究区域及分析方法

1.1 研究区域及数据来源

辽宁省位于东北地区南部,黄渤海北部,地势为自北向南、自东向西两侧向中部倾斜,由山地、丘陵、平原构成,温带季风气候。辽宁由于其独特的地理位置,是东北地区与国内京津冀、环渤海等重要经济圈

的连接处,对整个东北地区的经济发展产生重要影响。此外,辽宁地区具有丰沛的矿产资源和产业基础,是东北三大工业基地之一,也是国家的重要资源型支柱省份。辽宁省作为东北经济发展的关键,生态环境问题不能忽视,在党的十八大以来环境保护工作成效显著,大气环境质量显著改善,根据十九大提出的目标任务,到2020年打好污染防治攻坚战,2035年实现生态环境根本好转,21世纪中叶全面提升辽宁省生态文明。研究区域——辽宁省如图1所示。



图1 研究区域
Fig.1 Geographical location

本研究数据来源于2014–2019年国家统计年鉴、辽宁省统计年鉴、14个地级市统计年鉴以及经济发展公报、环境质量公报等,利用PM_{2.5}真气网收集部分污染物、AQI缺失数据。

1.2 指标体系建立

制定合理的评价指标体系是研究大气环境脆弱性的先决条件。暴露性-敏感性-适应能力(ESA)指标体系框架被广泛应用于脆弱性评价上^[17],结合辽宁省大气环境的成因和表现,根据ESA框架从3个维度选取了20个评价指标构成了辽宁省大气环境脆弱性评价体系,根据对大气环境脆弱性的影响将指标定量分为正向指标和负向指标,指标体系如表1所示。

1.3 综合评价方法

时序全局主成分分析(GPCA)是将时间序列数据和经典主成分分析进行融合处理短面板数据的分析方法,是在主成分分析的基础上将年度截面数据按照处理的时间顺序进行纵向排列叠加成全局表后按照主成分分析的方法进行操作^[18,19],本研究将辽宁省各地级市大气环境脆弱性评价指标体系中2014–2019各年度截面指标数据进行叠加形成全局表,分析软件为SPSS 25.0。根据主成分分析提取出特征值>1或累计贡献率≥85%的主成分,能够基本消除指标信息的重叠和相关性。指标权重由各主成分中指标载荷数和主成分特征值的平方根得到,主成分权重根据主成

表 1 辽宁省大气环境脆弱性指标体系
Table 1 Atmospheric environmental vulnerability assessment system of Liaoning Province

目标层	准则层	指标层	
大气环境脆弱性评价体系	暴露性	$\text{NO}_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	X1
		$\text{PM}_{2.5}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	X2
		$\text{PM}_{10}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	X3
		$\text{SO}_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	X4
		AQI 达到或优于二级的优良天数/d	X5
		AQI 重度污染及以上天数/d	X6
		二氧化硫排放强度/($\text{万 t}\cdot\text{亿元}^{-1}$)	X7
		烟粉尘排放强度/($\text{万 t}\cdot\text{亿元}^{-1}$)	X8
	敏感性	人口死亡率/ ‰	X9
		人口自然增长率/ ‰	X10
		人口密度/($\text{人}\cdot\text{hm}^{-2}$)	X11
		平均降雨量/mm	X12
		平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	X13
		环保经费投入强度占 GDP 比重	X14
	适应能力	能源消费总量/万 tce	X15
		单位 GDP 能耗/($\text{tce}\cdot\text{万元}^{-1}$)	X16
		每万人人均城市园林绿地面积/ hm^2	X17
		第二产业增加值占 GDP 比重	X18
		科学技术经费投入强度	X19
		汽车拥有量/辆	X20

分贡献率进行归一化得到,最后计算大气环境脆弱性综合指数,具体公式如下:

$$F_i = \frac{r_1}{\sqrt{\lambda_i}} x_1 + \frac{r_2}{\sqrt{\lambda_i}} x_2 + \cdots + \frac{r_{20}}{\sqrt{\lambda_i}} x_{20} \tag{1}$$

$$\text{IEVI} = w_1 F_1 + w_2 F_2 + \cdots + w_n F_n \tag{2}$$

式中, F 为提取出的主成分, $\frac{r_1}{\sqrt{\lambda_i}}$ 为指标 x 的权重, x 为原始指标数据标准化数值, w 为 F 的权重,IEVI为大气环境脆弱性综合指数。

1.4 空间自相关性分析

本研究首先根据辽宁省 14 市建立空间权重矩阵,然后通过全局 Moran’s I 指数和局部 Moran’s I 指数对 2014–2019 年辽宁省大气环境脆弱性进行空间自相关性分析,探索辽宁省大气环境脆弱性空间聚类并分析异常值。计算和分析软件为 GeoDa,具体公式如下:

全局 Moran’s I 指数:

$$I = \frac{\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n W_{ab} (x_a - \bar{x})(x_b - \bar{x})}{\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n W_{ab} \sum_{a=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{3}$$

局部 Moran’s I 指数:

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_b W_{ab} (x_b - \bar{x}) \tag{4}$$

式中, I 为 Moran’s I 指数, x_a, x_b 为不相同的两个地级市的脆弱性综合指数, $\bar{x}$ 为全部地级市脆弱性综合指数均值, W_{ab} 为空间权重矩阵, S 为空间权重矩阵各元素之和。

基于局部 Moran’s I 指数,进一步开展 LISA 聚类,分为高–高(HH)聚集,即区域本身和周边指数都较高的集聚;高–低(HL)聚集,即本身指数高周边指数低的集聚;低–高(LH)聚集,即本身指数低周边指数高的集聚;低–低(LL)聚集,即本身和周边指数都较低的集聚;No–significant,即区域不存在显著集聚^[20]。

1.5 地理探测器

使用地理探测器中的因子探测和交互作用探测探索大气环境脆弱性的空间分异性,本研究将主成分得分进行分级转化为类型量后和脆弱性综合评价结果输入到地理探测器中,得到影响大气环境脆弱性空间分异的影响因素并进行分析^[21,22]。

(1)因子探测。探索脆弱性综合评价结果的空间分异性以及影响因素对其空间分异的影响,具体公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \tag{5}$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \tag{6}$$

$$\text{SST} = N \sigma^2 \tag{7}$$

式中, h 为变量的分层,即主成分的分级; N_h 和 N 分别为层的单元数; σ_h^2 和 σ^2 是 h 和 Y 值的方差,SSW是层内方差和,SST为全区总方差。 q 的区间为 $[0, 1]$ 。

(2)交互作用探测。识别不同主成分交互叠加时,对研究对象空间分异性的影响。

2 结果与分析

2.1 指标分析

适用性分析:利用 SPSS 25.0 对全局表进行因子分析,通过 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和 Bartlett 球形检验指标之间的相关性,进一步确定主成分分析的可行性。检验结果显示 KMO 统计量为 0.585>0.5 (KMO 值越接近于 1 时,变量间相关性越大,越适合进行主成分分析),Bartlett 检验卡方值为 1 527.191,df=0.190,显著性检验 Sig=0.000<0.01,表明该研究指标适合进行时序全局主成分分析。

主成分分析:在进行 KMO 和 Bartlett 球形检验后进行主成分分析,结果如表 2 所示。综合考虑特征值和方差累计贡献率,选择初始特征值>1 的前 6 个主成分,能够表达足够信息,具有较高代表性且损失量小,将前 6 个主成分记为 F₁、F₂、F₃、F₄、F₅、F₆。根据 F₁~F₆ 各主成分和指标相关性,将主成分进行命名。如表 3 所示,F₁与 NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 年均浓度和 AQI 相关性较强,命名为大气环境污染因子;F₂与 SO₂、烟粉尘排放强度、环保经费投入强度、科技经费投入强度和汽车拥有量相关性较强,命名为大气-经济发展因子;F₃与能源消费总量、单位 GDP 能耗和第二产业占 GDP 比重相关性较强,将 F₃ 命名为能源-经济发展因子;F₄与人口死亡率、自然增长率和人口密度相关性较强,命名为人口潜在压力因子;F₅与年均温度相关性较强,命名为气象压力因子;F₆与人均城市绿地面积等相关性较强,命名为环保压力因子。

表 2 主成分分析的总方差解释						
Table 2 Interpretation of the total variance of principal component analysis						
成份	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	5.616	28.079	28.079	5.616	28.079	28.079
2	3.464	17.322	45.402	3.464	17.322	45.402
3	2.587	12.936	58.338	2.587	12.936	58.338
4	1.988	9.942	68.279	1.988	9.942	68.279
5	1.293	6.464	74.743	1.293	6.464	74.743
6	1.137	5.687	80.43	1.137	5.687	80.43
7	0.947	4.733	85.162			
8	0.643	3.216	88.378			
9	0.518	2.59	90.968			
10	0.487	2.434	93.401			
11	0.313	1.563	94.965			
12	0.267	1.333	96.298			
13	0.188	0.94	97.238			
14	0.146	0.731	97.969			
15	0.125	0.627	98.595			
16	0.1	0.501	99.096			
17	0.074	0.37	99.467			
18	0.057	0.286	99.752			
19	0.029	0.144	99.896			
20	0.021	0.104	100			

表 3 成分矩阵						
Table 3 Component matrix						
指标	成分					
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
X1	0.847	0.180	0.184	-0.190	-0.166	-0.172
X2	0.934	-0.036	0.112	0.165	-0.089	0.008
X3	0.912	-0.152	0.076	0.207	-0.100	-0.069
X4	0.836	-0.177	-0.154	0.236	0.078	-0.171
X5	0.864	0.061	0.130	0.153	-0.108	0.271
X6	0.804	0.124	0.084	0.269	-0.143	0.054
X7	0.323	-0.564	-0.075	0.378	0.130	-0.18
X8	0.044	-0.603	0.410	0.024	0.346	-0.365
X9	-0.273	0.586	0.384	0.541	0.079	-0.202
X10	0.124	0.275	0.108	0.435	0.639	0.086
X11	0.444	0.658	0.001	-0.379	0.184	0.133
X12	-0.340	0.569	0.343	0.450	-0.269	-0.235
X13	-0.171	0.294	-0.164	0.279	0.580	0.075
X14	-0.303	0.641	0.384	0.320	-0.336	-0.029
X15	0.118	0.260	0.693	-0.379	0.225	0.243
X16	-0.218	-0.323	0.789	-0.040	-0.063	0.255
X17	0.114	0.166	-0.507	0.388	-0.044	0.646
X18	0.404	-0.042	0.604	-0.247	0.157	0.170
X19	-0.421	-0.528	0.282	0.249	-0.114	0.319
X20	0.235	0.722	-0.241	-0.402	0.085	-0.179

为了对辽宁省 14 市的大气环境脆弱性进行系统分析,在全局主成分分析的基础上,将 2019 年的 6 个主成分得分作为变量,利用 SPSS 进行系统聚类。分类结果如图 2 所示,将辽宁省城市分为 5 类。

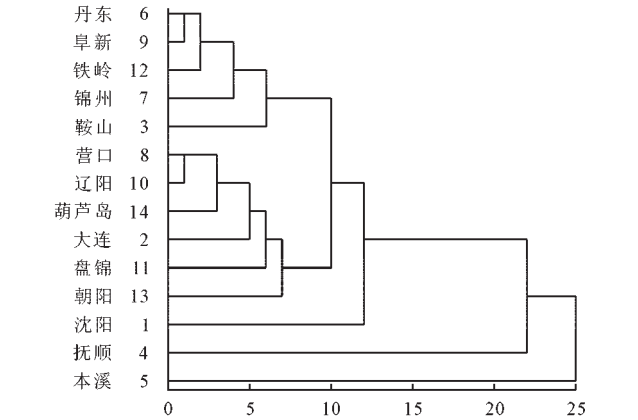


图2 辽宁省主成分系统聚类结果
Fig.2 Principal component system clustering results of Liaoning Province

第一类城市包括丹东、阜新、铁岭、锦州、鞍山,这类城市在 F₁ 和 F₅ 上得分较高,增强了大气环境脆弱性,F₂、F₃、F₆ 上的得分在省内处于中等偏下水平,这 3 个因子抑制大气环境脆弱性的作用强于其他城市。第二类城市包括营口、辽阳、葫芦岛、大连、盘锦和朝阳,这类城市多为辽宁省沿海城市,F₂、F₃ 上得分高于省均水平,其 F₂ 抑制大气环境脆弱性作用低于其他城市,而 F₃ 增强大气环境脆弱性作用也低于其他城市。F₄、F₅、F₆ 上得分基本都处于省内中等偏下水平。产生该结果主要是因为沿海城市经济发展相对较好、能耗强度低。除此之外,第二类城市大气环境脆弱性在省

内也处于较低水平。沈阳属于第三类城市,城市在F₁和F₂上发展最差,得分远高于省内平均水平。沈阳是重工业产业集聚城市,能源消耗量高,污染物排放强度处于省内较高水平,因此大气污染程度相对较高,该地区大气环境脆弱性也处于较高水平。抚顺属于第四类城市,该城市在F₃以及F₅和F₆上得分较高。本溪属于第五类,该城市F₄、F₅和F₆因子得分远高于省平均水平,与其他类城市相比,本溪市2019年大气环境脆弱性最强。

2.2 脆弱性时空演变分析

获得主成分得分后,进行大气环境脆弱性综合指数计算,最终计算公式为:

$$IEVI=0.349\ 1\ F_1+0.215\ 4\ F_2+0.160\ 8\ F_3+0.123\ 6\ F_4+0.080\ 4\ F_5+0.070\ 7\ F_6$$
 (8)

使用ArcGIS10.5对2014–2019年辽宁省14个地级市的大气环境脆弱性结果进行时空分布研究。国内外对脆弱性分级的方式不一,为消除极值对分级的影响,根据本研究评价方法及结果采用分位数分级,主要表现相对脆弱性程度,分级标准如表4所示。

大气环境脆弱性综合评价结果如图3所示,从时间角度分析辽宁省大气环境整体脆弱性呈现波动下

表 4 脆弱性分级标准

脆弱性级别	隶属度范围
轻度脆弱	0.28~1.00
较轻脆弱	1.00~1.46
中度脆弱	1.46~1.78
较重脆弱	1.78~2.30
重度脆弱	2.30~4.10

降趋势,2017年脆弱性综合指数有明显的上升趋势,除葫芦岛、营口、盘锦和大连外,其他城市均处于重度脆弱。到2019年,脆弱性综合指数明显下降,辽宁省大气环境基本处于轻度脆弱和较轻脆弱状态。从空间角度分析,辽宁省北部和东部地区大气环境脆弱性明显高于西部和南部大气环境脆弱性。从图3中可以看出,2014–2019年葫芦岛市大气环境脆弱性始终处于轻度脆弱状态。2014–2019年沈阳市和大连市分别从较重脆弱降低到较轻脆弱和从中度脆弱降低到轻度脆弱,实现了2个脆弱等级的跨越。沈阳市和大连市作为辽宁省省会和副省级城市,其大气环境及经济社会的发展对其他城市有较强的辐射作用。因此,为降低区域大气环境的脆弱程度,在对城市大气环境脆弱性指标进行具体管控的基础上,需要重点关注沈阳市和大连市的大气环境脆弱性发展。

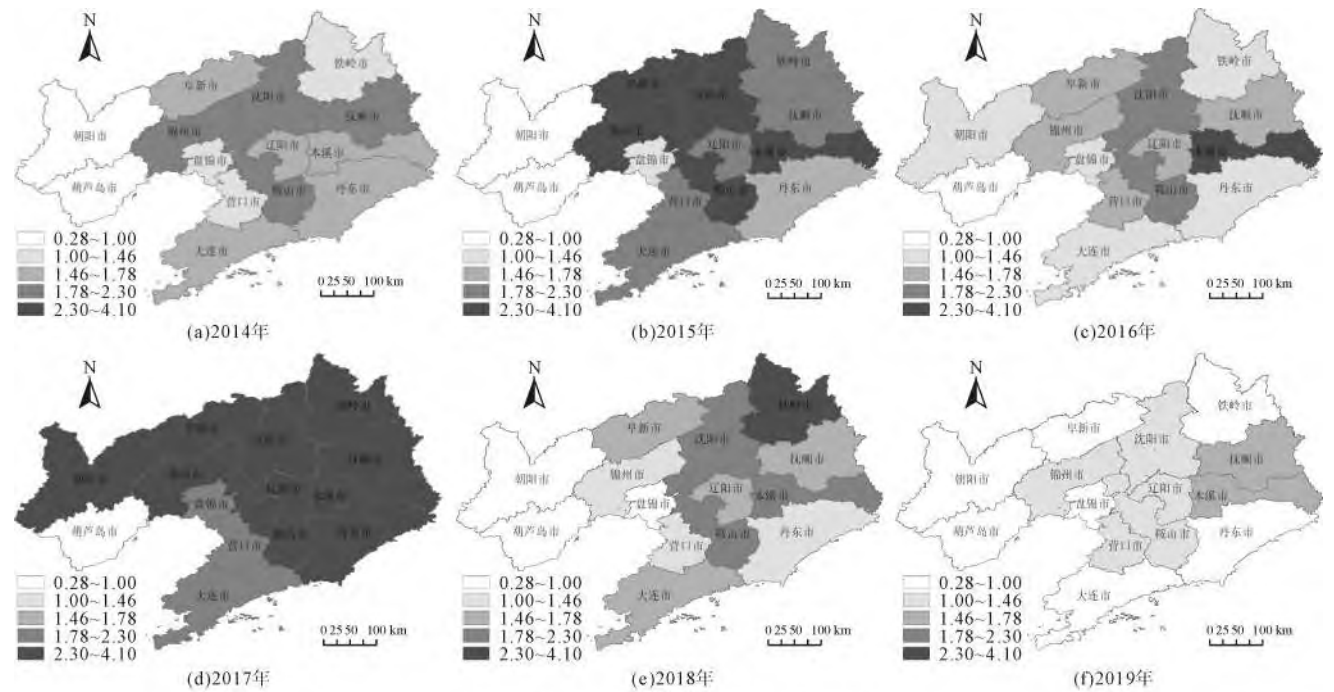


图3 辽宁省大气环境脆弱性时空分布
Fig.3 Temporal and spatial distribution of atmospheric environmental vulnerability in Liaoning Province

2014–2019年辽宁省大气环境脆弱性面积变化如图4所示,2014–2015年轻度脆弱和较重脆弱区面积没有明显变化,而较轻脆弱和中度脆弱区面积下降,重度脆弱区面积有明显增加。2016年重度脆弱和较重脆弱区面积明显下降,较轻脆弱和中度脆弱区面积

大幅增长。2017年是2014–2019年间辽宁省大气环境脆弱程度最强的一年,重度脆弱区面积占比最大,达78.03%。2017–2019年,大气环境脆弱性下降明显,2018年,重度脆弱区向较重、中度和较轻脆弱区转移,重度脆弱区面积下降到8.80%。到2019年,辽宁省大

气环境脆弱性持续下降,轻度脆弱区面积超半,达 57.83%,无较重脆弱和重度脆弱区。

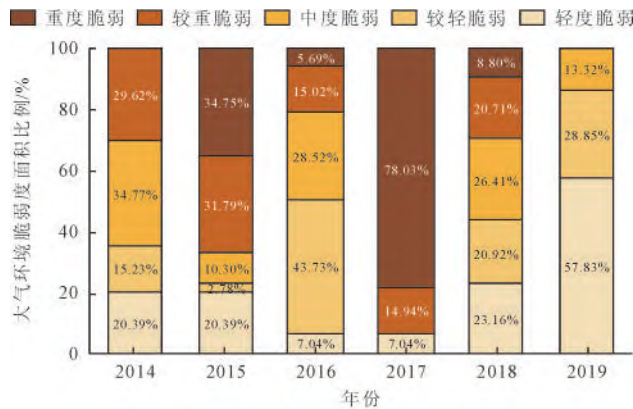


图4 辽宁省大气环境脆弱度面积比例
Fig.4 Atmospheric environmental vulnerability area ratio of Liaoning Province

2.3 脆弱性空间自相关分析

为了进一步探索辽宁省大气环境脆弱性分布的空间性质,对辽宁省 14 市 2014–2019 年大气环境脆弱性综合指数逐年进行全局自相关分析和局部自相关分析,分析结果见表 5 和图 5。辽宁省 2014、2015、2016 和 2018 年大气环境脆弱性具有显著的空间自相

关性, p 值均小于 0.1,2018 年空间自相关性最强,全局 Moran's I 指数达 0.212 9。2019 年全局 Moran's I 指数为 $-0.039\ 2$,且 p 值较高,无显著的空间自相关性。因此,为探索辽宁省大气环境脆弱性的局部空间集聚性,利用 GeoDa 对 2014 和 2018 年大气环境脆弱性进行 LISA 聚类图绘制。如图 6 所示,2014 年,沈阳、本溪、铁岭和营口市具有显著的局部空间自相关性,沈阳和本溪市为高-高聚集区,表明这两个城市的大气环境脆弱性高且周边城市大气环境脆弱性也高;铁岭和营口市为低-高聚集区,表明这两个城市大气环境脆弱性低,而周边城市大气环境脆弱性高。2014 年高-高聚集区主要分布较重脆弱区,低-高聚集区主要为较轻脆弱和较重脆弱区。2018 年,沈阳、本溪和葫芦岛市具有显著空间自相关性,沈阳和本溪市依旧为高-高聚集区,铁岭和营口市不再具有显著的局部自相关性,而葫芦岛市开始具有显著的局部自相关性,且为低-低聚集区,表明葫芦岛市大气环境脆弱性低,且周边城市也具有低大气环境脆弱性。2018 年高-高聚集区主要分布在较重脆弱和中度脆弱区,低-低聚集区分布在轻度脆弱和较轻脆弱区。

表 5 大气环境脆弱性空间自相关分析结果						
Table 5 Global spatial autocorrelation analysis results of potential population pressure factors						
	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
Moran's I 指数	0.186 5	0.135 4	0.117 4	-0.080 8	0.212 9	-0.039 2
标准差	0.161 1	0.154 8	0.150 7	0.152 3	0.142 6	0.159 9
z 得分	1.649 8	1.376 9	1.335 0	-0.062 6	2.032 3	0.259 2
p 值	0.069 0	0.099 0	0.094 0	0.493 0	0.020 0	0.364 0

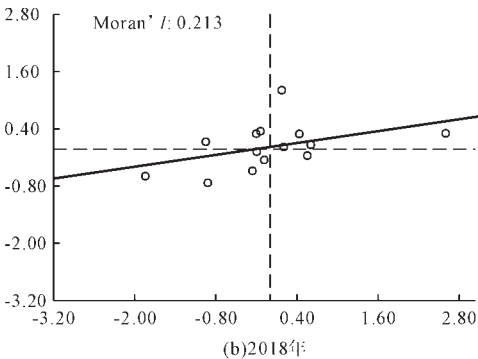
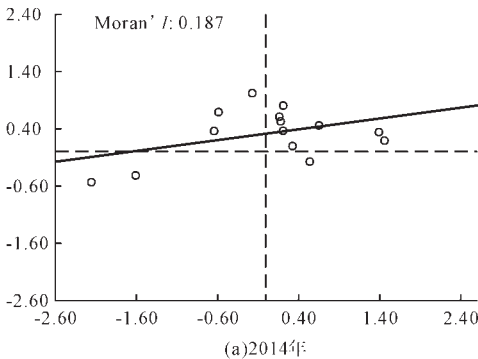


图5 辽宁省大气环境脆弱性全局自相关分析
Fig.5 Global autocorrelation analysis of vulnerability of atmospheric environment in Liaoning Province

2.4 脆弱性空间分异性分析

为了探索辽宁省大气环境脆弱性的空间分异性,使用地理探测器进行分析。首先将 6 个主成分利用 ArcGIS 的自然间断裂法进行分级,自然间断裂法使各个因子各个类之间差异最大化,类内差异最小化,实现恰当的分组。将每个因子分为 5 类后输入地理探测器,大气环境脆弱性综合指数作为 Y 值输入地理探测器,因子探测结果如表 6 所示。2014 年气象压力因子

(F_5)对辽宁省各地级市大气环境脆弱性的空间分异性影响最大,2019 年环保压力因子(F_6)对空间分异性影响最大,且与 2014 年相比其影响力从第 5 名上升到第 1 名。2014–2019 年人口潜在压力因子(F_1)对空间分异性保持第 2 名的高影响力,且 q 值从 0.616 8 上升到 0.627 4。除此之外,2014–2019 年,能源–经济发展因子(F_3)对空间分异性的 q 值从第 6 名提高到第 4 名,提高了对大气环境脆弱性空间分异性的影响力,而

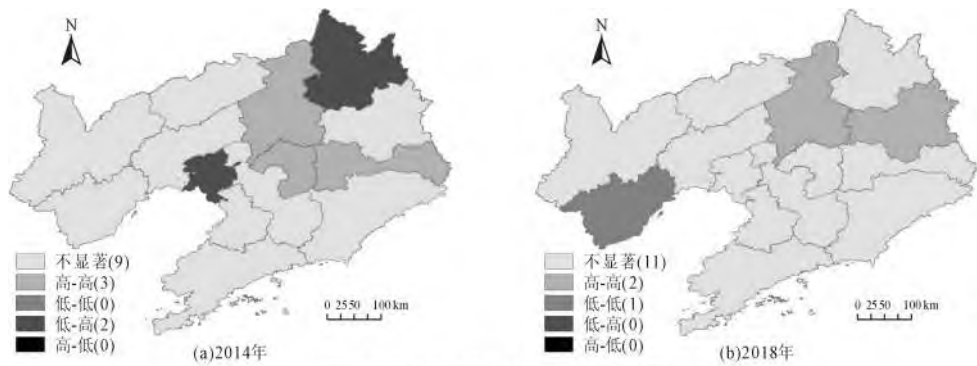


图6 辽宁省2014和2018年LISA聚类图
Fig.6 LISA cluster map of Liaoning Province in 2014 and 2018

大气环境污染因子(F_1)和大气-经济发展因子(F_2)的 q 值分别从第3、4名下降到第6、5名,对大气环境脆弱性的空间分异性影响减小。为了平衡辽宁省整体大气环境脆弱性,减小辽宁省空间异质性,应当主要从环保压力因子、人口潜在压力因子、气象压力因子入手。因子交互作用探测结果如表7所示,2014年 F_1 和 F_2 、 F_1

和 F_5 、 F_2 和 F_3 、 F_2 和 F_4 、 F_2 和 F_5 、 F_3 和 F_4 、 F_4 和 F_5 、 F_5 和 F_6 之间的交互作用强化了辽宁省大气环境脆弱性的空间分异性,其中 F_1 和 F_2 的交互作用最强, q 值达0.993 7。到2019年,因子的交互作用有所变化,其中 F_5 和 F_6 的交互作用最强, q 值达0.991 4,与2014年相比, F_1 和 F_6 、 F_4 和 F_6 的交互作用显著强化了脆弱性空间分异性。

表6 因子探测结果
Table 6 Factor detection results

q 值	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
2014年	0.613 8	0.531 3	0.445 9	0.616 8	0.743 6	0.448 0
排名	3	4	6	2	1	5
q 值	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
2019年	0.326 5	0.379 2	0.470 4	0.627 4	0.550 8	0.707 1
排名	6	5	4	2	3	1

表7 交互作用探测结果
Table 7 Interaction detection results

2014年	q 值	2019年	q 值
$F_1 \cap F_2$	0.993 7	$F_1 \cap F_6$	0.914 7
$F_1 \cap F_5$	0.984 5	$F_2 \cap F_3$	0.911 3
$F_2 \cap F_3$	0.977 0	$F_2 \cap F_4$	0.971 0
$F_2 \cap F_4$	0.904 7	$F_4 \cap F_6$	0.933 7
$F_2 \cap F_5$	0.917 4	$F_5 \cap F_6$	0.991 4
$F_3 \cap F_4$	0.916 1		
$F_4 \cap F_5$	0.904 6		
$F_5 \cap F_6$	0.940 2		

3 讨论

通过计算辽宁省内14个地级市大气环境脆弱性综合指数发现,2014–2019年辽宁省大气环境脆弱性整体呈现波动减弱的趋势,并且空间差异性明显减小,半数城市大气环境保持在轻度脆弱,且大气环境应对外部压力的能力增强。将主成分得分作为变量对城市进行系统聚类发现不同因素对城市大气环境脆弱性影响程度有较大不同,尽管近年来大气污染防治计划、辽宁省大气污染防治条例的出台较大程度地改善了大气环境问题,但大气环境仍旧存在发展上的不平衡。

大气环境脆弱性的影响因素重要性为大气环境

污染>大气-经济发展>能源+经济发展>潜在人口压
力>气象压力>环保压力。省会沈阳及副省级城市大连作为辽宁地区经济发展程度最高的地区,在生态、资源、经济、社会发展方面都处于辽宁省领先地位,对带动周边城市的发展起到重要作用。大连作为辽宁省重要的港口城市,承担大量对外进出口贸易,海运运输带来的船舶污染排放,是影响大连大气环境的重要因素。大连和沈阳对大气环境脆弱性综合指数贡献高的主要成分为大气环境污染因子、大气-经济发展因子、气象因子,并且由于大气环境污染因子和大气-经济发展系统因子权重高,在大气环境治理上应当着重于对污染物源头的防控,降低污染物的排放。气象压力因子是影响大气自净能力的关键,尤其在污染物的扩散方面,然而气象压力因子难以在短时间内通过有效手段进行控制,所以需要有关部门对气象因素进行长期有效监测并进行记录,并与大气环境质量数据进行比对分析,利用大数据对其进行研究,同时重点关注全球气候问题。2014–2019年葫芦岛和朝阳市的各因子得分基本低于平均水平,因此从时空分布图上可以看出葫芦岛和朝阳的大气环境脆弱性均较低,仅在2016和2017年朝阳市大气环境脆弱性偏高。抚顺和本溪市处于2019年大气环境脆弱性中度脆弱,其中抚顺市主要由于能源+经济发展因子和环保压力

因子得分较高,存在能源消耗总量高且单位 GDP 能耗也高的特点,在今后对其大气环境进行治理的同时,应当致力于对科技的创新,减少能源消耗量,提高能源利用效率,进而降低大气环境脆弱性;本溪市主要由于环保压力因子得分较高,存在人均园林绿地面积小等特点,今后应采取加强绿化等手段减小其环保压力。

除此之外,地理探测器结果显示 2014–2019 年各因子及因子间交互作用对大气环境脆弱性的空间分异影响程度产生明显变化。大气环境污染因子和环保压力因子、人口潜在压力因子和环保压力因子交互作用明显增强,促进了大气环境脆弱性空间分异性。为了减小大气环境脆弱性的空间分异性,提高地区大气环境承受更高强度的外部压力的能力,应当加强环保压力较大地区的绿化程度,以提高其大气环境的适应能力,在此基础上重视并出台相应政策以解决人口发展不平衡等问题。

大气环境与人类健康密不可分,空气污染是呼吸系统疾病发病的重要诱因,PM_{2.5}的提高将显著提高呼吸系统发病率,而降低大气环境脆弱程度对人类健康具有重要意义。因此,应加强区域大气环境污染因子的控制,加强大气污染区域联防,城市间统筹合作,制定各城市不同情景条件下的减排比,构建污染过程动态监控,学习其他省份先进区域联防成果,建立适用于辽宁省的空气质量 and 人群暴露、成本评估、健康评估等模型,实现科学治污。

4 结论

本文以暴露性–敏感性–适应能力指标框架出发,以辽宁省为评价对象,选取符合各准则层定义的一级评价指标。首次将时序全局主成分分析方法应用到大气环境脆弱性的评价分析上,对 2014–2019 年辽宁省大气环境脆弱性指标的面板数据进行了处理优化,结合聚类、莫兰指数、地理探测器等研究方法进一步分析辽宁省大气环境脆弱性空间相关性及其影响因子的空间效应,评价结果证实了辽宁省大气环境脆弱性评价指标体系的合理性,对影响因素的空间效应分析为辽宁省大气污染的区域联防及资源的空间优化配置提供研究基础。

[参考文献]

[1] Liang Y, Xu D H, Feng P, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,295:126456.
[2] Wang J X, Li H, Liu J G. Phase distribution of PCDD/Fs in

flue gas from municipal solid waste incinerator with ultra-low emission control in China[J]. Chemosphere, 2021,276: 130166.
[3] Wang K, Tong Y L, Yue T, et al. Measure-specific environmental benefits of air pollution control for coal-fired industrial boilers in China from 2015 to 2017[J]. Environmental Pollution, 2021,273:116470.
[4] 周璇,郭丕斌,黎斌林,等. 政策驱动与大气环境污染:基于区域面板数据的分析[J]. 生态经济, 2017,33(10):174–178. Zhou Xuan, Guo Pibin, Li Binlin, et al. The empirical analysis of policy impact on the atmospheric environmental quality and economic growth relationship: based on the model of the EKC and chow[J]. Ecological Economy, 2017, 33(10): 174–178.
[5] 秦海旭,段学军,赵海霞,等. 基于预警视角的南京市资源环境承载力评价研究[J]. 环境污染与防治, 2020,42(8):1026–1032. Qin Haixu, Duan Xuejun, Zhao Haixia, et al. Research on evaluation of carrying capacity of resources and environment in Nanjing from the perspective of early warning[J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(8):1026–1032.
[6] 吴建,李鹏,林溢,等. 中心城区城市化生态环境综合评价:以宁波为例[J]. 环境污染与防治, 2018,40(4):491–496. Wu Jian, Li Peng, Lin Yi, et al. Urban comprehensive ecological environmental evaluation for city center: taking Ningbo as an example[J]. Environmental Pollution & Control, 2018,40(4):491–496.
[7] 彭张林,张强,杨善林. 综合评价理论与方法研究综述[J]. 中国管理科学, 2015,23(S1):245–256. Peng Zhanglin, Zhang Qiang, Yang Shanlin. Overview of comprehensive evaluation theory and methodology[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015,23(S1):245–256.
[8] 张华,宋金岳,李明,等. 基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J]. 生态学杂志, 2021,40(6):1883–1894. Zhang Hua, Song Jinyue, Li Ming, et al. Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(6):1883–1894.
[9] Zhang H Y, Sun Y D, Zhang W X, et al. Comprehensive evaluation of the eco-environmental vulnerability in the Yellow River Delta wetland[J]. Ecological Indicators, 2021, 125:107514.
[10] 郭婧,魏珍,任君,等. 基于熵权灰色关联法的高寒贫困山区生态脆弱性分析:以青海省海东市为例[J]. 水土保持通报, 2019,39(3):191–199. Guo Jing, Wei Zhen, Ren Jun, et al. Analysis on ecological vulnerability in high-cold and poverty-stricken mountainous areas based on entropy and gray correlation methods: a case study in Haidong City, Qinghai Province[J]. Bulletin of

- Soil and Water Conservation, 2019,39(3):191-199.
- [11] 万里洋,吴和成. 石化基地生态环境系统脆弱性演化机理:以连云港为例[J]. 生态学报, 2019,39(17):6557-6566.
Wan Liyang, Wu Hecheng. The evolutionary mechanism of eco-environmental system vulnerability in the petrochemical base: a case study of Lianyungang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(17):6557-6566.
- [12] Zhang H Y, Wang T T, Ding Z L, et al. Uncertainty analysis of impact factors of eco-environmental vulnerability based on cloud theory[J]. Ecological Indicators, 2020,110:105864.
- [13] 张阳,王莱,金国华,等. 人类活动影响下城市大气环境的脆弱性评价[J]. 吉林大学学报:理学版, 2017,55(4):1044-1050.
Zhang Yang, Wang Mo, Jin Guohua, et al. Vulnerability assessment of urban atmospheric environment under influence of human activities[J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2017,55(4):1044-1050.
- [14] 毛曳,张恒德,朱彬. 2016冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析[J]. 环境科学, 2021,42(8):3615-3621.
Mao Ye, Zhang Hengde, Zhu Bin. Analysis of the continuous heavy pollution process in the winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei[J]. Environmental Science, 2021,42(8):3615-3621.
- [15] 金金,吴亚坤,罗素平,等. 基于全局主成分和聚类分析法的中药上市企业竞争力动态研究[J]. 中草药, 2019,50(11):2750-2756.
Jin Jin, Wu Yakun, Luo Suping, et al. Dynamic research on competitiveness of Chinese materia medica listed enterprises based on global principal component and cluster analysis method[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019,50(11):2750-2756.
- [16] Dai P F, Xiong X, Zhou W X. A global economic policy uncertainty index from principal component analysis[J]. Finance Research Letters, 2021,40:101686.
- [17] Li Y, Gong S Y, Zhang Z R, et al. Vulnerability evaluation of rainstorm disaster based on ESA conceptual framework: a case study of Liaoning Province, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021,64:102540.
- [18] 苗丽静,李学思. 辽宁城市创新能力的空间分异及影响因素研究[J]. 东北财经大学学报, 2020(4):90-97.
Miao Lijing, Li Xuesi. On spatial differences of urban innovation capacity and its influencing factors in Liaoning Province[J]. Journal of Dongbei University of Finance and Economics, 2020(4):90-97.
- [19] 马艳艳,郭金,张凯琳. 基于全局主成分分析法的东北地区区域创新能力评价研究[J]. 科学与管理, 2018,38(6):18-26.
Ma Yanyan, Guo Jin, Zhang Kailin. Regional innovation capability evaluation of northeast China based on global principal component analysis[J]. Science and Management, 2018,38(6):18-26.
- [20] 王贝贝,丁明军,管琪卉,等. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2019,39(15):5460-5472.
Wang Beibei, Ding Mingjun, Guan Qihui, et al. Gridded assessment of eco-environmental vulnerability in Nanchang City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(15):5460-5472.
- [21] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [22] 石天戈,时卉. 基于地理探测器的乌鲁木齐城市扩张特征与时空驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2021,44(3):867-876.
Shi Tiange, Shi Hui. Urban expansion and its temporal and spatial driving forces of Urumqi based on geo-detector method[J]. Arid Land Geography, 2021,44(3):867-876.