

徐晨曦,万红莲,何若楠,等.关中平原城市群脆弱性时空演变与驱动因子[J].中国沙漠,2023,43(6):111-120.

关中平原城市群脆弱性时空演变与驱动因子

徐晨曦^a,万红莲^{ab},何若楠^a,殷鹏^a,倪敬峰^a,黄敏^a,王晓利^a

(宝鸡文理学院 a.地理与环境学院, b.陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要:以关中平原城市群作为研究区域,通过熵值法综合测度关中平原城市群的城市脆弱性,并分析其时空演变特征,运用地理探测器探究其驱动因子。结果表明:(1)2004—2018年,在时间上,关中平原城市群城市脆弱性整体呈下降趋势,在空间上呈现四周高中间低的特征,2004年脆弱类型多呈现高度脆弱和较高脆弱;城市间脆弱性差距逐步缩小,趋于稳定低值,城市发展态势良好。(2)地方财政收入、霍夫曼系数和生活垃圾无害化处理率对城市群脆弱性影响逐年增强,固定资产投资密度、科教支出占财政支出比例、人口自然增长率、城镇登记失业率、空气质量良好天数比率、污水处理厂集中处理率、建成区工业废水排放密度对城市群的脆弱性的影响力逐年减弱。(3)各驱动因子间存在交互效应,交互结果对关中平原城市群城市脆弱性影响效果显著。2004年社会环境在很大程度上制约经济规模、城市基础设施、生态情况的发展,对城市群脆弱性的影响力较强。2011年经济结构对城市群的胁迫,是城市脆弱性的主要因素。2018年经济规模是制约城市群发展、影响城市群脆弱性的关键因素,环境污染程度与资源利用情况之间的相互作用对城市脆弱性的牵制力较强。

关键词:城市脆弱性; 关中平原城市群; 时空演变格局; 地理探测器

文章编号: 1000-694X(2023)06-111-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00065

中图分类号: F042

文献标志码: A

0 引言

脆弱性指子系统或系统组成部分在受到外来压力和灾害时,易受到暴露性和敏感性影响的表现^[1]。20世纪60年代,脆弱性的研究首先由于灾害风险问题而被关注^[2],随着社会的发展与研究的深入,有关脆弱性的研究从只关心自然灾害方面的脆弱性,发展到现在涉及生态^[3]、经济^[4]、社会^[5]、贫困^[6]等多方面,成为全球环境变化^[7]及可持续发展^[8]等科学领域关注的热点问题。伴随着城市化进程的不断加快,城市问题愈渐严重,脆弱性这一概念被城市地理学引入,用以描述城市经济发展和城市环境保护、资源承载力、社会资源分配等方面的冲突与矛盾^[9-12]。目前,学者们对城市脆弱性的研究日趋多样化,主要包括生态脆弱性、经济脆弱性、社会脆弱性、自然灾害脆弱性等角度的城市脆弱性研究。温利华^[13]从生态系统角度定义了城市脆弱性的概念,认为目前对生态系统的城市脆弱性内涵

有3种认识,分别基于自然生态属性、人文社会科学和系统内外部共同作用。李鹤等^[14]研究了东北三省矿业城市经济脆弱性的演变过程及应对时机选择。黄晓军等^[15]研究了极端高温对中国城市社会系统脆弱性的影响。杨佩国等^[11]基于北京市历史暴雨洪涝灾情数据,研究不同降雨量下的北京市城市脆弱性。城市脆弱性研究方法方面包括综合指数法^[16-17]、集对分析法^[18]、耦合协调评价法^[19]、三角图法^[20]等。关于城市脆弱性的尺度研究,主要以国家、省域、市域为基本研究单元。梅大伟等^[21]利用人口普查数据研究了中国城市脆弱性的内在机理。张晓瑞等^[22]综合测度了中国城市脆弱性的空间分异特征。仲施雅等^[23]采用主成分分析和层次分析法研究山东省城市脆弱性空间分布特征。万红莲等^[24]利用PSR评价法,对西安地区生态环境脆弱性进行了评价。

目前对城市脆弱性的研究多从单一角度进行,综合视角下的复合系统城市脆弱性研究较少。而

收稿日期:2023-03-07; 改回日期:2023-05-31

资助项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目(18YJA810004); 陕西省科技厅软科学研究计划项目(2022KRM028)

作者简介:徐晨曦(1997—),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事旅游资源开发与规划研究。E-mail: 1259883861@qq.com

通信作者:万红莲(E-mail: hyhm2006@163.com)

城市脆弱性的研究对象多为典型城市,以单一城市或单一省份为单位的区域研究较多,对城市群城市脆弱性的研究较少。关中平原城市群作为西部发展战略的重要一环,资源环境约束加剧,城市脆弱问题不容忽视。通过脆弱性评价、脆弱性时空演变特征和影响城市发展因素的识别研究,对城市群各城市的可持续发展状况进行综合评估,对探索关中平原城市群可持续发展道路具有重要的实践意义,也可为相关部门制定遏制城市脆弱性的针对性防

控决策提供科学依据与参考。

1 研究区概况

关中平原城市群坐落在关中平原^[25],涉及陕西省、山西省和甘肃省,包括西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南、天水各市,以及商洛、运城、临汾、平凉的部分县区 and 庆阳市区^[26](图1)。杨凌农业高新技术产业示范区不作为独立研究单元进行讨论,数据归并到咸阳市进行分析。

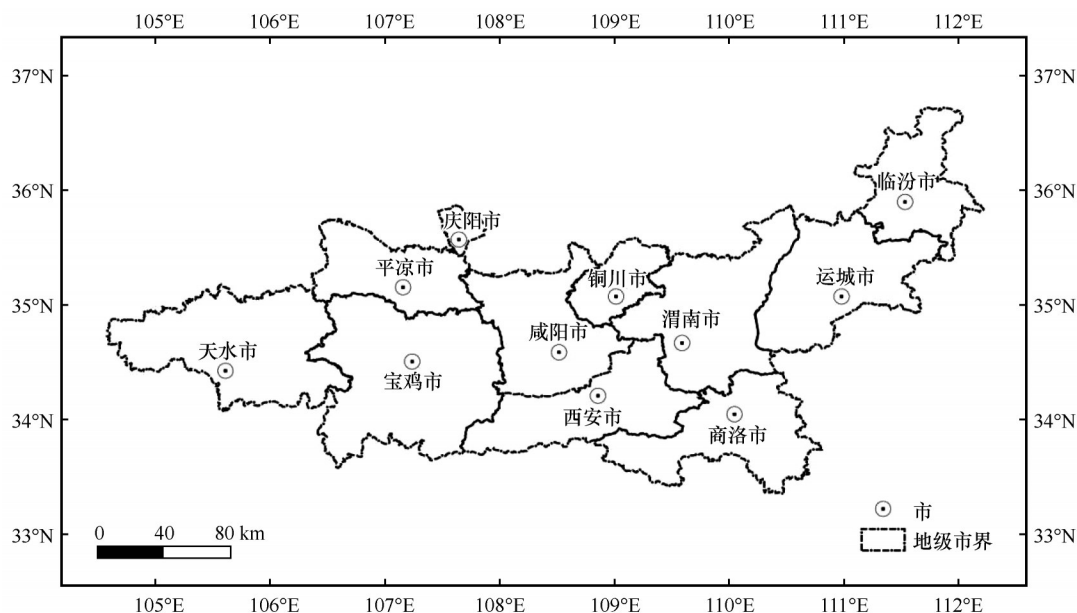


图1 关中平原城市群区位

Fig.1 Location of Guanzhong Plain urban agglomeration

2 资料与方法

2.1 评价指标体系构建

统计数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》《陕西统计年鉴》《陕西区域统计年鉴》《山西统计年鉴》《甘肃发展年鉴》《平凉年鉴》《庆阳年鉴》。时间跨度为2004—2018年,空间跨度为陕西、甘肃、山西省。统计年份未完全覆盖研究时间段,部分缺失统计数据由各城市国民经济与社会发展公报、环境质量状况公报、水资源公报补齐。

为客观反映关中平原城市群在经济、社会、资源和环境方面的真实情况,遵循系统性、科学性、可操作性、代表性原则,针对关中平原城市群实际情况及地方特色,结合前人研究成果^[27-28],并咨询相关政府部门工作人员及专家学者意见,利用德尔菲

法^[29],从经济子系统、社会子系统、资源子系统和环境子系统4个方面选出32项指标构建关中平原城市群城市脆弱性评价体系。经济子系统主要反映城市经济实力、发展潜力与结构稳定程度对城市脆弱性的影响程度。社会子系统主要反映城市人口承载压力与社会服务完善程度与城市脆弱性的关系。资源子系统主要反映城市生活保障、能源依赖程度和利用效率。环境子系统主要反映城市环境自净力、环境恢复力与承载力对城市脆弱性的响应。

2.2 熵值法赋权

指标权重赋权方法主要分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法主要依据决策者对指标的重视程度进行赋权,其局限性在于主观随意性大,客观性差。客观赋权法在一定程度上避免了人为因素和主观因素的影响,通过基于数学理论的方法

处理各个指标值,分析得出权重,因而赋权结果可信度更高^[30]。

熵值法^[31]根据指标值内包含的有效信息判断其权重,本质上挖掘了指标的离散程度。当指标的熵值越大,其离散程度越大,赋权越小,反之亦然。熵值法适用于多指标综合评价,各个领域均有应用。因此,选取熵值法对各指标进行权重计算。

在城市脆弱性指标的选取过程中,指标值越大,城市脆弱程度越高的指标为正向指标;指标值越小,城市脆弱程度越低的指标为负向指标。为消除原始指标值因为指标量纲和数量等级的不同对计算城市综合脆弱指数时的影响,将各项原始指标值进行标准化处理。

正向指标:

$$X_{ij} = \frac{x_{j\min}}{x_{ij}} \quad (1)$$

负向指标:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{j\max}} \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为标准化后数值; x_{ij} 为 j 指标在 i 年份的原始数据; $x_{j\max}$ 为 j 指标的最大值; $x_{j\min}$ 为 j 指标的最小值。

指标比重

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

指标熵值

$$e_j = -K \sum_{i=1}^n Y_{ij} \ln(Y_{ij}), K = \ln(lm) (K > 0) \quad (4)$$

式中: l 为年份数量; m 为城市数量。

各指标的权重

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)} \quad (5)$$

城市综合脆弱指数

$$V_j = \sum_{i=1}^n (w_j X_{ij}) \quad (6)$$

城市综合脆弱指数 V_j 越大,代表该城市的整体系统或其中某部分在遭到外界干扰时的应对能力越低,所受到的影响越大,则城市系统的稳定性越差,越不利于城市健康长久地发展。

2.3 地理探测器

地理探测器^[32]基于影响因子贡献度与其空间

分布的相似性,其中的因子探测和交互探测功能可用于识别影响关中平原城市群城市脆弱性驱动因子^[33]。本文借助因子探测及交互作用功能,得到单指标及双指标对城市脆弱指数的解释力,从而衡量各指标对城市脆弱指数的影响程度。

3 结果与分析

3.1 关中平原城市群城市脆弱性时间演变特征

根据2004—2018年关中平原城市群经济、社会、资源和环境子系统的统计数据,由公式(1)~(6)进行处理和权重计算(表1),由公式(1)~(2)获得关中平原城市群城市脆弱指数(表2)。

关中平原城市群城市综合脆弱性整体呈下降趋势,但在各城市下降趋势表现不同(图2)。2004年关中平原城市群脆弱指数极差为0.1608,2018年下降到0.0501,说明关中平原城市群的城市间脆弱性差距正在逐步缩小。2004—2018年,关中平原城市群城市综合脆弱指数最高时为2004年平凉的0.4892,最低值是2017年运城的0.2551。平凉城市综合脆弱指数从2004年的0.4892下降到2018年的0.3064,为关中平原城市群城市脆弱性下降速率最高的城市。临汾下降趋势最为平缓,15年内下降了18.9%。西安在2009年之前下降趋势平缓,2009年以后呈V型波动下降。2007年咸阳脆弱指数突然回升,2010年之后趋势又回归正常。2010年和2011年庆阳城市脆弱指数偏离庆阳整体趋势线,之后逐年下降。

3.2 关中平原城市群脆弱性空间分析

选取研究时间两端与中间的2004、2011、2018年,根据城市脆弱指数由低到高的值将11个关中平原城市用自然断裂点法划分为5种脆弱类型(表3)。

总体上,关中平原城市群城市综合脆弱度由高脆弱度向低脆弱度逐渐转化(图3)。城市脆弱度情况整体呈现边缘高、中心低的特征。2004年关中平原城市多表现为高脆弱度,较高脆弱度城市分布在关中平原城市群中部和东北小部分区域,主要是西安、咸阳和临汾等城市。宝鸡城市脆弱水平低于同时期其他城市,属于中脆弱度城市。2011年关中平原城市群城市脆弱类型变化显著,除庆阳、临汾外,

表 1 关中平原城市群经济-社会-资源-环境系统城市脆弱性指标体系
Table 1 Urban vulnerability indicator system of economic-social-resource-environment
system of Guanzhong Plain urban agglomeration

目标层	准则层	指标层	单位	指标性质	权重
经济子系统	经济规模	地方 GDP 总量 X_1	亿元	-	0.0321
		固定资产投资密度 X_2	万元·km ⁻²	-	0.0326
		地方财政收入 X_3	亿元	-	0.0322
	经济结构	经济外向度 X_4	%	-	0.0324
		第二产业从业人口比重 X_5	%	-	0.0321
		第三产业增加值占 GDP 比重 X_6	%	-	0.0298
		霍夫曼系数 X_7	%	-	0.0310
	经济创新	科教支出占财政支出比例 X_8	%	-	0.0300
社会子系统	人类发展	人口自然增长率 X_9	%	+	0.0308
		人均 GDP X_{10}	元	-	0.0316
		万人普通中学在校学生数 X_{11}	人	-	0.0301
		万人拥有医生数 X_{12}	人	-	0.0312
	社会环境	城乡收入比 X_{13}	%	-	0.0297
		CPI X_{14}	-	-	0.0286
		城市恩格尔系数 X_{15}	%	-	0.0299
		城镇登记失业率 X_{16}	%	+	0.0295
	基础设施	建成区排水管网密度 X_{17}	km·km ⁻²	-	0.0319
		人均城市道路面积 X_{18}	m ²	-	0.0314
		年末移动电话用户数 X_{19}	万户	-	0.0324
		万人拥有公共汽车 X_{20}	辆	-	0.0315
资源子系统	资源保障	人均生活用水量 X_{21}	m ³	-	0.0306
		人均粮食占有量 X_{22}	t	-	0.0309
	资源利用	万元 GDP 电耗 X_{23}	kW·h	+	0.0323
		万元 GDP 建设用地 X_{24}	m ²	+	0.0320
环境子系统	生态	建成区绿化覆盖率 X_{25}	%	-	0.0315
		人均公园绿地面积 X_{26}	m ²	-	0.0314
		空气质量良好天数比率 X_{27}	%	-	0.0307
	环境容纳	工业固体废物综合利用率 X_{28}	%	-	0.0317
		污水处理厂集中处理率 X_{29}	%	-	0.0321
		生活垃圾无害化处理率 X_{30}	%	-	0.0321
	环境污染	建成区工业粉尘排放密度 X_{31}	t·km ⁻²	+	0.0321
		建成区工业废水排放密度 X_{32}	万 t·km ⁻²	+	0.0320

其他城市均呈现整体降低趋势。2018 年关中平原城市群城市脆弱度继续降低,城市脆弱类型无高脆弱度城市和较高脆弱度城市分布,此时城市脆弱类型在数量上表现为两头少、中间多,在空间分布上

呈现截断式分布,总体上较低脆弱城市所占面积最大。15 年间关中平原城市群城市综合脆弱度类型变化明显,脆弱指数持续下降,城市脆弱度趋于稳定低值,城市发展态势良好。

表 2 关中平原城市群城市综合脆弱指数

Table 2 Urban Comprehensive Vulnerability Index of Guanzhong Plain urban agglomeration

年份	城市										
	西安	宝鸡	咸阳	铜川	渭南	商洛	运城	临汾	天水	平凉	庆阳
2004	0.3331	0.3284	0.3539	0.4754	0.4181	0.4544	0.4092	0.3784	0.4543	0.4892	0.4310
2005	0.3420	0.3075	0.3264	0.4482	0.4158	0.4443	0.3559	0.3609	0.4402	0.4352	0.4336
2006	0.3386	0.3106	0.3058	0.4528	0.3796	0.3903	0.3778	0.3352	0.3946	0.4183	0.3978
2007	0.3239	0.3123	0.3516	0.4293	0.3553	0.3592	0.3525	0.3206	0.3789	0.3887	0.3976
2008	0.3181	0.3087	0.2982	0.4086	0.3329	0.3553	0.3031	0.3308	0.3583	0.3660	0.3790
2009	0.3084	0.3164	0.2972	0.4054	0.3221	0.3299	0.2967	0.3095	0.3443	0.3644	0.3699
2010	0.2858	0.3041	0.2912	0.3866	0.2980	0.3140	0.2770	0.3092	0.3621	0.3403	0.3257
2011	0.3151	0.2955	0.2915	0.3770	0.2905	0.3206	0.2718	0.3239	0.3403	0.3487	0.3822
2012	0.2824	0.2877	0.2811	0.3666	0.2792	0.3311	0.2759	0.3149	0.3141	0.3338	0.3316
2013	0.3086	0.2851	0.2924	0.3664	0.2923	0.3358	0.2685	0.3186	0.3135	0.3195	0.3071
2014	0.2942	0.2797	0.2811	0.3615	0.2936	0.3202	0.2905	0.3083	0.3105	0.3125	0.2919
2015	0.2768	0.2822	0.2910	0.3521	0.2916	0.3266	0.2827	0.2983	0.3031	0.2971	0.2863
2016	0.2855	0.2716	0.2838	0.3258	0.2924	0.3314	0.2728	0.2825	0.2926	0.2908	0.2837
2017	0.3028	0.2611	0.2734	0.3083	0.2792	0.3122	0.2551	0.2767	0.2975	0.2714	0.2748
2018	0.3010	0.2655	0.2809	0.3156	0.2715	0.3155	0.2956	0.3066	0.2905	0.3064	0.2978

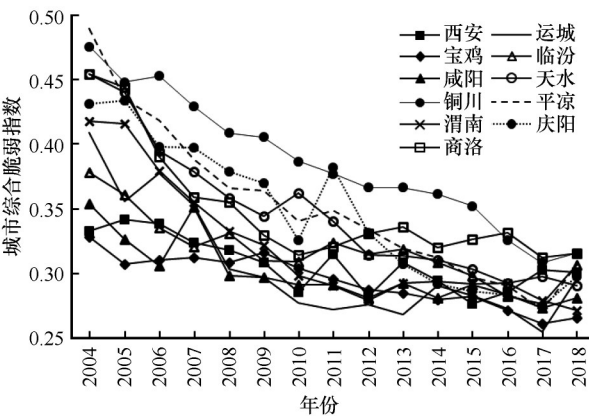


图 2 2004—2018 年关中平原城市群各市综合脆弱指数

Fig.2 Urban Comprehensive Vulnerability Index of Guanzhong Plain urban agglomeration by each cities in 2004—2018

4 关中平原城市群城市脆弱性驱动因子分析

4.1 因子探测

为厘清 32 个评价指标对关中平原城市群城市脆弱性的影响程度,使用地理探测器的因子探测功能对其进行识别。选取 2004、2011、2018 年指标数据,将其标准化后再利用自然断裂点法进行离散化

处理,将每项指标数据分为 5 层,最后用地理探测器的因子探测功能处理经过离散化的数据和关中平原城市群城市脆弱指数,得到 Q 值(表 4)。 Q 值高低代表影响因子对城市脆弱度的贡献程度, Q 值越大,指标对城市脆弱度的影响力越大。

总体看,2004、2011、2018 年影响力排名前五的因子集中在社会子系统中,经济子系统与环境子系统次之,资源子系统排名最后。这一结果与同阶段时空分异特征相符。社会子系统年末移动电话用户数、人口自然增长率、万人拥有医生数、万人拥有公共汽车、万人普通中学在校学生数、人均城市道路面积等指标成为关中平原城市群城市脆弱性主要影响因子。2004—2018 年,社会子系统指标对城市脆弱性的影响也有所变化,2004 年年末移动电话用户数、人口自然增长率、成为社会子系统中城市脆弱性的主要影响因子;2011 年人口自然增长率、万人拥有医生数、万人拥有公共汽车成为社会子系统中城市脆弱性的主要影响因子;2018 年万人普通中学在校学生数、人均城市道路面积、年末移动电话用户数成为社会子系统中城市脆弱性的主要影响因子。人口是制约城市发展的重要因素,合理的人口数量与人口结构为城市发展提供动力,城

表 3 关中平原城市群城市脆弱指数分级标准

Table 3 Classification standard of Urban Vulnerability Index of Guanzhong Plain urban agglomeration

指数分级	综合脆弱指数	经济脆弱指数	社会脆弱指数	资源脆弱指数	环境脆弱指数
高脆弱度	>0.3822	>0.1019	>0.2028	>0.0550	>0.0773
较高脆弱度	0.3239~0.3821	0.0747~0.1018	0.1826~0.2027	0.0438~0.0549	0.0667~0.0772
中脆弱度	0.3151~0.3238	0.0660~0.0746	0.1620~0.1825	0.0350~0.0437	0.0541~0.0666
较低脆弱度	0.2809~0.3150	0.0568~0.0659	0.1491~0.1619	0.0306~0.0349	0.0464~0.0540
低脆弱度	<0.2808	<0.0567	<0.1490	<0.0305	<0.0463

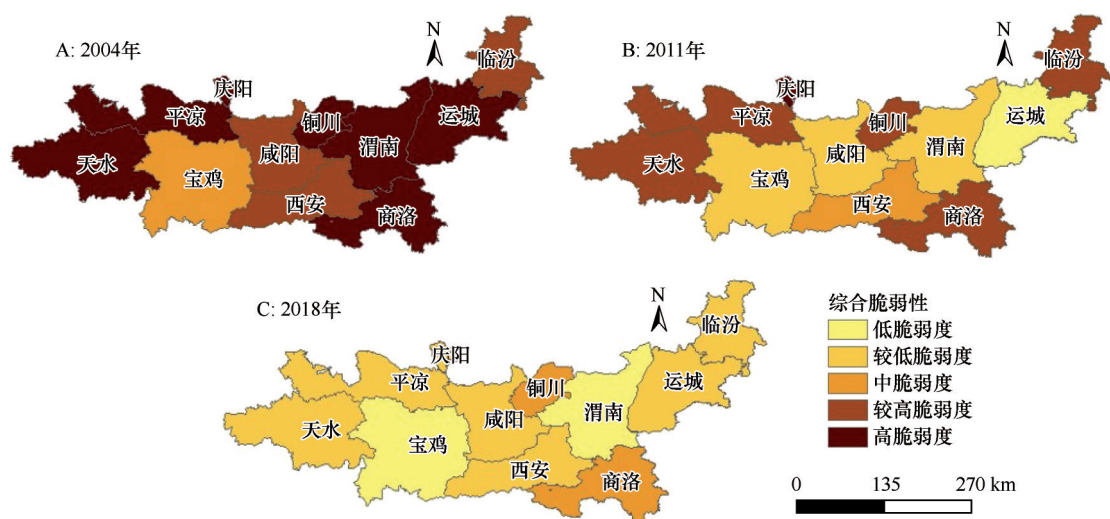


图 3 2004、2011、2018 年关中平原城市群综合脆弱性空间分异

Fig.3 Spatial differentiation of Comprehensive Vulnerability Index of Guanzhong Plain urban agglomeration in 2004, 2011 and 2018

市的产业类型与人口结构密切相关。关中平原城市群自然资源环境本身制约着城市可容纳的人口数量,且各城市前期以重工业为主,现在面临资源开采困难、环境整治等问题,产业转型的同时也带来人口结构的变动,资源子系统在 2004 年与 2011 年间并未成为影响关中平原城市群城市脆弱性的关键系统,但是在 2018 年却跃居第二位,原因也可能与此相关。

环境子系统中污水处理厂集中处理率与空气质量良好天数比率指标成为城市脆弱性的主要影响因子。其原因可能为关中平原城市群为西北重工业基地,矿产资源开采及重化工业生产带来的废水废气排放,促使环境恶化,生态破坏。干旱半干旱地区生态修复能力较弱,对于城市可持续发展也会带来较大的影响。2004—2011 年,环境子系统中污水处理厂集中处理率指标较突出,说明水资源是制约关中平原城市群城市发展的重要因素。随着经济发展与科技进步,到 2018 年,环境子系统对关

中平原城市群城市脆弱性影响力有所降低。这说明 15 年间关中平原城市群各城市生态修复初见成效,提高了城市环境容纳程度。近年来,关中平原城市群各城市对于大气污染的治理力度逐渐增大,空气质量明显改善。

经济子系统中固定资产投资密度和社会子系统的人均 GDP、霍夫曼系数成为城市脆弱性的主要影响因子。固定资产投资密度与人均 GDP 都反映城市经济发展规模,霍夫曼系数则反映产业结构。城市系统能否有效抵御各种灾害,主要取决于其经济发展状况,经济规模支撑城市基础设施建设、教育投入、生态环境治理投入等,因此,经济子系统在 2004—2018 年都占有较大的影响力。2004—2011 年经济规模成为影响关中平原城市群城市脆弱性的影响因子,2018 年产业结构代替经济规模成为影响各城市脆弱性的主要影响因子。关中平原城市群各城市大多数都为资源型城市,在前期发展过程中,城市规模扩张成为主要发展方向,在资源面临

表 4 关中平原城市群城市脆弱性影响指标 Q 值

Table 4 The impact index Q value of urban vulnerability of Guanzhong Plain urban agglomeration

指标	年份		
	2004	2011	2018
X_1	0.702	0.102	0.506
X_2	0.931	0.699	0.573
X_3	0.219	0.234	0.566
X_4	0.572	0.666	0.197
X_5	0.170	0.617	0.577
X_6	0.174	0.318	0.289
X_7	0.210	0.486	0.888
X_8	0.597	0.534	0.291
X_9	0.833	0.753	0.593
X_{10}	0.531	0.776	0.327
X_{11}	0.799	0.371	0.785
X_{12}	0.533	0.797	0.118
X_{13}	0.520	0.180	0.383
X_{14}	0.315	0.321	0.284
X_{15}	0.278	0.371	0.145
X_{16}	0.635	0.476	0.340
X_{17}	0.475	0.175	0.490
X_{18}	0.561	0.325	0.771
X_{19}	0.887	0.306	0.673
X_{20}	0.642	0.761	0.590
X_{21}	0.276	0.527	0.343
X_{22}	0.292	0.378	0.203
X_{23}	0.603	0.709	0.789
X_{24}	0.498	0.455	0.460
X_{25}	0.817	0.399	0.469
X_{26}	0.549	0.568	0.365
X_{27}	0.830	0.524	0.248
X_{28}	0.419	0.440	0.133
X_{29}	0.882	0.735	0.200
X_{30}	0.229	0.267	0.513
X_{31}	0.153	0.452	0.383
X_{32}	0.738	0.696	0.417

枯竭之后,各城市逐渐进行产业转型,降低重工业比例,大力发展创新产业,因此霍夫曼系数成为影响关中平原城市群城市脆弱性的重要因子。

4.2 交互作用

地理探测器的交互作用探测主要用以探测因子之间两两交互之后的影响力相较于单因子是增强或是减弱,表征了两个因子对于关中平原城市群城市脆弱性的作用关系。交互探测显示,关中平原城市群的影响因子的交互作用皆呈现双因子增强和非线性增强结果,且从数量上看,双因子增强结果多于非线性增强结果,表明因子交互之后对城市群脆弱性的影响作用要大于单一因子作用。

2004、2011、2018 年,与其他指标交互作用最强的为固定资产投资密度(X_2)、万人拥有医生数(X_{12})、霍夫曼系数(X_7 ,表 5),与同时期因子探测结果较一致。这表明经济子系统与社会子系统仍是影响关中平原城市群城市脆弱性的重要子系统。2004 年间,交互作用最强的 10 组因子中,地方 GDP 总量与人均粮食占有量及建成区绿化覆盖率、人均粮食占有量与建成区绿化覆盖率及污水处理厂集中处理率、人均公园绿地面积指标与生活垃圾无害化处理率指标交互作用显著。这些指标与城市经济规模、城市基础设施、生态状况息息相关,表明此时关中平原城市群各城市发展阶段较低,抵御外界风险能力不高。值得注意的是,CPI 指标在因子探测中的结果并不突出,却与固定资产投资密度、人均城市道路面积、年末移动电话用户数、人均公园绿地面积交互之后,远超各指标单因子影响力。CPI 指数是度量城市发展质量的重要指标,间接反映城市居民生活质量水平,而交互作用后 CPI 影响力显著提升。影响关中平原城市群城市脆弱性的间接因素有很多,且不断转化。2011 年经济子系统中交互作用较强影响因子由地方 GDP 总量转变为城乡收入比、第三产业增加值占 GDP 比重等,此时关中平原城市群各城市经济总量有所提升,扩大城市规模的同时转向收入分配与产业转型。这表明经济结构胁迫成为城市群城市脆弱性的重要因素。2018 年交互作用最强的 10 组因子中,双因子增强和非线性增强交互关系各有 5 组。其中有 5 组因子是与地方 GDP 总量指标的交互结果,与之相交互的指标分别是地方财政收入、万人拥有公共汽车、霍夫曼系数、建成区工业粉尘排放密度和人均 GDP。这说明此时经济规模仍制约着社会子系统、环境子系统及其本身发展,是影响城市群城市脆弱性的关键因素。建成区工业粉尘排放密度与生活垃圾无害化处理率的交互结果同样在影响力排名前 10 的因

表5 关中平原城市群城市脆弱性影响指标交互结果

Table 5 Interactive results of Urban Vulnerability Index of Guanzhong Plain urban agglomeration

2004年				2011年				2018年			
$A \cap B$	Q_A	Q_B	交互关系	$A \cap B$	Q_A	Q_B	交互关系	$A \cap B$	Q_A	Q_B	交互关系
$X_1 \cap X_{22}$	0.702	0.292	双因子增强	$X_2 \cap X_6$	0.699	0.318	双因子增强	$X_{24} \cap X_{31}$	0.460	0.383	非线性增强
$X_1 \cap X_{25}$	0.702	0.817	非线性增强	$X_6 \cap X_{24}$	0.318	0.455	非线性增强	$X_3 \cap X_{14}$	0.566	0.284	非线性增强
$X_{22} \cap X_{25}$	0.292	0.817	双因子增强	$X_6 \cap X_{29}$	0.318	0.735	双因子增强	$X_1 \cap X_3$	0.506	0.566	双因子增强
$X_{22} \cap X_{29}$	0.292	0.882	双因子增强	$X_6 \cap X_{26}$	0.318	0.568	非线性增强	$X_1 \cap X_{20}$	0.506	0.590	双因子增强
$X_{26} \cap X_{30}$	0.549	0.229	非线性增强	$X_2 \cap X_{28}$	0.699	0.440	双因子增强	$X_1 \cap X_{31}$	0.506	0.383	非线性增强
$X_{14} \cap X_2$	0.315	0.931	双因子增强	$X_{24} \cap X_{28}$	0.455	0.440	非线性增强	$X_{20} \cap X_{30}$	0.590	0.513	双因子增强
$X_{14} \cap X_{18}$	0.315	0.561	非线性增强	$X_6 \cap X_{20}$	0.318	0.761	双因子增强	$X_{30} \cap X_{31}$	0.513	0.383	非线性增强
$X_{14} \cap X_{19}$	0.315	0.887	双因子增强	$X_6 \cap X_{13}$	0.318	0.180	非线性增强	$X_1 \cap X_7$	0.506	0.888	双因子增强
$X_{14} \cap X_{26}$	0.315	0.549	非线性增强	$X_{13} \cap X_{25}$	0.180	0.399	非线性增强	$X_1 \cap X_{10}$	0.506	0.327	非线性增强
$X_{18} \cap X_{26}$	0.561	0.549	双因子增强	$X_{28} \cap X_{32}$	0.440	0.696	双因子增强	$X_{19} \cap X_{25}$	0.673	0.469	双因子增强

子组中,在一定程度上反映了环境污染程度与资源利用情况之间的相互作用对城市脆弱性的牵制力。

5 讨论

城市作为经济、社会、资源以及环境耦合系统,其内部各子系统和要素间相互影响、相互作用,因此,必须从综合视角来衡量城市的发展水平和可持续发展能力^[2]。关中平原城市群各城市大多为资源型城市,资源为城市经济发展提供动力,城市规模快速扩张,人口数量增加,但自然环境是制约城市人口容量的客观因素,人口增长从为城市提供生产活动力逐渐转化为城市压力。因此,2004—2011年,关中平原城市群城市脆弱性的影响因子中人口自然增长率指标占比较大。生态环境胁迫城市可持续发展,资源开采带来的环境损害一定程度降低了城市对自然灾害的抵御能力与修复能力,因此,环境子系统在关中平原城市群城市脆弱性影响力占比也较高。在生态文明建设背景下,退耕还林、生态修复、污染治理等工程建设在关中平原城市群各城市相继开展,各城市社会及生态环境脆弱性有所改善,综合脆弱性总体降低,其影响因子也发生改变,资源子系统对城市脆弱性影响程度下降,经济与社会子系统影响程度上升。这表明在以后的城市化发展中,关中平原城市群各城市应重视社会系统与资源系统的改善,完善城市基础设施,提高质量与管理水平,整合城市公共资源,节约资源等。因子探测与交互作用结果显示,经济结构逐渐成为关中平原城市群城市脆弱性的主要影响因子,应提

升第三产业发展水平,支持创新产业,建设智慧城市,从而预防与规避脆弱性风险。尽管资源子系统随着城市化水平的提高对城市脆弱性的影响力降低,但关中平原城市群本身所拥有的土地、水等资源有限。因此,生态治理仍需坚持,加强森林与湿地保护,降低大气与水污染,加大治污科技投入,从而在资源与环境系统方面降低关中平原城市群城市脆弱性。

6 结论

2004—2018年,关中平原城市群城市脆弱性整体呈下降趋势,城市间脆弱性差距逐步缩小,趋于稳定低值,城市发展态势良好。关中平原城市群脆弱性在整体上呈现四周高中间低的特征,脆弱类型在2004年多呈现高脆弱度和较高脆弱度。

因子探测结果显示,地方财政收入、霍夫曼系数和生活垃圾无害化处理率在对城市群脆弱性的影响程度逐年增大;而固定资产投资密度、科教支出占财政支出比例、人口自然增长率、城镇登记失业率、空气质量良好天数比率、污水处理厂集中处理率、建成区工业废水排放密度对城市群脆弱性的影响力逐年减弱。

交互作用均呈现双因子增强与非线性增强结果,各影响因子之间存在交互效应,交互结果对关中平原城市群城市脆弱性影响效果显著。其中,2004年,地方GDP总量与人均粮食占有量及建成区绿化覆盖率交互之后的影响力最大;人均公园绿地面积与生活垃圾无害化处理率交互后,影响力变化

最为显著;CPI指标与其他指标交互结果最突出。2018年,建成区工业粉尘排放密度与万元GDP建设用地的交互影响力最大,地方GDP指标与其他指标交互后,影响力变化显著,说明2018年经济规模是制约城市群发展、影响城市群脆弱性的关键因素,同时,环境污染程度与资源利用情况之间的相互作用对城市脆弱性的牵制力较强。

参考文献:

- [1] White G F. Human Adjustments of Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States [R]. Chicago, USA: University of Chicago, 1945.
- [2] Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100 (14): 8074–8079.
- [3] 万红莲, 毛楠, 宋海龙, 等. 基于三角图法的榆林市农业生态系统脆弱性类型变化研究 [J]. 中国沙漠, 2021, 41 (3): 224–234.
- [4] 武剑, 杨爱婷. 基于SPA的广东省区域经济脆弱性及障碍因素研究 [J]. 经济地理, 2012, 32 (9): 32–38.
- [5] 李鹤. 东北地区矿业城市脆弱性特征与对策研究 [J]. 地域研究与开发, 2011, 30 (5): 78–83.
- [6] 刘子宁, 郑伟, 贾若, 等. 医疗保险、健康异质性与精准脱贫: 基于贫困脆弱性的分析 [J]. 金融研究, 2019 (5): 56–75.
- [7] Downing T E. Vulnerability to hunger in Africa: a climate change perspective [J]. Global Environmental Change, 1991, 1 (5): 365–381.
- [8] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展 [J]. 地理科学进展, 2014, 33 (7): 874–883.
- [9] 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.
- [10] Janssen M A, Schoon M L, Ke W, et al. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change [J]. Global Environmental Change, 2006, 16 (3): 240–252.
- [11] 杨佩国, 靳京, 赵东升, 等. 基于历史暴雨洪涝灾情数据的城市脆弱性定量研究: 以北京市为例 [J]. 地理科学, 2016, 36 (5): 733–741.
- [12] Honing C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems [J]. Ecosystems, 2001, 4 (5): 390–405.
- [13] 温利华. 资源型城市生态脆弱性综合评价 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [14] 李鹤, 张平宇. 矿业城市经济脆弱性演变过程及应对时机选择研究: 以东北三省为例 [J]. 经济地理, 2014, 34 (1): 82–88.
- [15] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 等. 中国城市高温特征及社会脆弱性评价 [J]. 地理研究, 2020, 39 (7): 1534–1547.
- [16] 高超, 雷军, 金凤君, 等. 新疆绿洲城市生态环境系统脆弱性分析 [J]. 中国沙漠, 2012, 32 (4): 1148–1153.
- [17] 李博, 苏飞, 杨智, 等. 基于脆弱性视角的环渤海地区人海关系地域系统时空特征及演化分析 [J]. 生态学报, 2018, 38 (4): 1–10.
- [18] 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.
- [19] 张万萍. 城市社会系统脆弱性研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [20] 李博, 韩增林. 基于三角图法的沿海城市系统脆弱性分类方法研究 [J]. 海洋开发与管理, 2011, 28 (11): 99–102.
- [21] 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 [J]. 城市问题, 2018 (9): 13–19.
- [22] 张晓瑞, 贺岩丹, 方创琳, 等. 城市生态环境脆弱性的测度分区与调控 [J]. 中国环境科学, 2015, 35 (7): 2200–2208.
- [23] 仲施雅, 孙剑锋, 秦伟山, 等. 山东省城市脆弱性空间格局分异研究 [J]. 鲁东大学学报 (自然科学版), 2018, 34 (3): 252–258.
- [24] 万红莲, 朱婵婵, 宋海龙, 等. 西安地区生态环境脆弱性评价研究 [J]. 四川环境, 2017, 36 (5): 143–148.
- [25] 胡琳, 程路, 林扬, 等. 关中区域大气重污染年份气象条件分析 [J]. 干旱区研究, 2020, 37 (6): 1496–1503.
- [26] 程靖峰. 国务院批复《关中平原城市群发展规划》 [J]. 现代企业, 2018 (1): 41.
- [27] 刘梦丽. 中原城市群城市脆弱性时空格局演变及障碍因素研究 [D]. 河南开封: 河南大学, 2018.
- [28] 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.
- [29] 张晓瑞, 李涛, 方创琳. 城市脆弱性的综合测度研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32 (2): 89–93.
- [30] 王晓男. 综合评价中若干理论方法的适用性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [31] 杨丽, 孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评 [J]. 经济问题, 2015 (3): 115–119.
- [32] 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.
- [33] 任向宁, 董玉祥. 基于地理探测器的区域土壤耕层有机碳含量多元复合模型构建: 以珠三角核心区为例 [J]. 热带地理, 2018, 38 (4): 546–556.

Research on spatio-temporal evolution and driving factors of urban agglomeration vulnerability in Guanzhong Plain

Xu Chenxi^a, Wan Honglian^{ab}, He Ruonan^a, Yin Peng^a, Ni Jingfeng^a, Huang Min^a, Wang Xiaoli^a

(a. School of Geography and Environment / b. Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, Shaanxi, China)

Abstract: As the research area, the urban vulnerability of Guanzhong Plain urban agglomeration is measured comprehensively by entropy value method, and its spatio-temporal evolution characteristics are analyzed and driving factors are explored by Geo-detector. The results showed that: (1) From 2004 to 2018, the urban vulnerability of Guanzhong as a whole shows a decreasing trend in terms of time, which presents characteristics of high around and low in middle in 2004, and vulnerability types mostly present high and higher in space; the vulnerability gap between cities gradually decreases and tends to be stable and low with well development, which laterally reflects that social factors contribute more in influencing the urban vulnerability of Guanzhong. (2) The influence of local fiscal revenue, Hoffman coefficient and harmless treatment rate of domestic waste on urban vulnerability increases year by year, while the influence of fixed asset investment density, ratio of science and education expenditure to fiscal, natural population growth rate, urban registered unemployment rate, and ratio of days with good air quality, centralized treatment rate of sewage treatment plants and industrial wastewater discharge density in built-up areas on urban vulnerability diminishes year by year. (3) There are interaction effects among the driving factors; the interaction results have significant effects on the urban vulnerability of Guanzhong. The social environment largely constrains the development of economic scale, urban infrastructure and ecological situation with a strong influence on urban vulnerability in 2004. The coercing of economic structure to Guanzhong is the main factor of urban vulnerability in 2011. The economic scale is the key factor that constrains development of Guanzhong and affects urban vulnerability, the interaction between degree of environmental pollution and resource utilization has a stronger hold on urban vulnerability in 2018.

Key words: urban vulnerability; Guanzhong Plain urban agglomeration; spatio-temporal pattern; geo-detector