

DOI: 10.5846/stxb202203100586

望元庆, 宋书愉, 王杰, 李洪飞, 许端阳, 李陇堂. 2000—2018 年内蒙古沙区“生态-经济-社会”复合系统脆弱性演变及关键影响因素. 生态学报, 2023, 43(6): 2271–2286.

Wang Y Q, Song S Y, Wang J, Li H F, Xu D Y, Li L T. Vulnerability evolution of the ecological-economic-social complex system and the key influencing factors in the sandy region of Inner Mongolia from 2000 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2271–2286.

2000—2018 年内蒙古沙区“生态-经济-社会”复合系统脆弱性演变及关键影响因素

望元庆^{1, 2}, 宋书愉^{2, 3}, 王 杰^{2, 3}, 李洪飞⁴, 许端阳^{2, *}, 李陇堂¹

1 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750002

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

摘要:在气候变化和人类活动共同影响下,沙区“生态-经济-社会”复合系统快速变化,为沙漠化治理及区域可持续发展带来了严峻的挑战。因此,揭示沙区“生态-经济-社会”复合系统脆弱性演变规律,辨识影响脆弱性演化的关键因素及区域差异对沙区可持续管理具有重要意义。以内蒙古自治区为研究区,利用“暴露-敏感-适应”评估模型构建沙区“生态-经济-社会”复合系统脆弱性评价指标体系,将空间主成分分析与时空地理加权回归模型相结合,探讨 2000—2018 年内蒙古“生态-经济-社会”复合系统脆弱性时空演变及关键因素作用机制。结果表明:(1)脆弱性及暴露度、敏感性和适应性三个维度在空间上均有较强的异质性特征,脆弱性具有整体分散、局部聚集的分布格局;暴露度的空间分布为中部高,两边低;敏感性的空间分布为西部高,东部低;适应性的高低值分布与脆弱性相反。(2)脆弱性的变化在总体上呈现大部分区域降低,局部区域升高的趋势,显著升高区域主要聚集在内蒙古南部地区。(3)影响脆弱性分布的因素在每年均有所不同,但总体上植被覆盖度、沙漠化程度、气象指数等生态指标是影响脆弱性显著变化区域的主要因素。

关键词:生态-经济-社会系统;脆弱性;“暴露-敏感-适应”评估模型;时空地理加权回归;内蒙古

Vulnerability evolution of the ecological-economic-social complex system and the key influencing factors in the sandy region of Inner Mongolia from 2000 to 2018

WANG Yuanqing^{1, 2}, SONG Shuyu^{2, 3}, WANG Jie^{2, 3}, LI Hongfei⁴, XU Duanyang^{2, *}, LI Longtang¹

1 School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750002, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: Under the combined effects of climate change and human activities, the rapidly change of the ecological-economic-social complex system in sandy areas poses serious challenges to desertification control and regional sustainable development. Therefore, it is of great significance to reveal the vulnerability evolution law of the ecological-economic-social complex system in sandy region, identify the key factors affecting the vulnerability evolution for the sustainable management of sandy region. In this paper, the Inner Mongolia Autonomous Region was taken as the research area, and the VSD (Vulnerability Scoping Diagram) model was used to construct the vulnerability assessment index system for the ecological-

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41971253)

收稿日期:2022-03-10; 网络出版日期:2022-11-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xudy@igsnr.ac.cn

economic-social complex system. The spatial principal component analysis and spatio-temporal geographically weighted regression model were combined to explore the spatio-temporal evolution of the vulnerability of the ecological-economic-social complex system and the influencing mechanisms of the key factors from 2000 to 2018. The results show that: (1) vulnerability, exposure, sensitivity and adaptability have strongly heterogeneous characteristics in space, and vulnerability has a distribution pattern of overall dispersion and local aggregation; the spatial distribution of exposure is high in the middle and low on both sides; the spatial distribution of sensitivity is high in the west and low in the east; the distribution of high and low values of adaptability is the opposite of vulnerability. (2) Vulnerability changes generally show a trend of decreasing in most regions and an increasing trend in some areas. The areas with vulnerability significantly increase mainly concentrated in the southern Inner Mongolia. (3) The factors that affect the distribution of vulnerability are different each year, but in general, ecological indicators such as vegetation cover, desertification degree and meteorological indices are the main factors that affect significant change in vulnerability.

Key Words: ecological-economic-social system; vulnerability; Vulnerability Scoping Diagram model; geographically and temporally weighted regression; Inner Mongolia

沙区是以沙漠或沙漠化土地为重要土地覆被与土地利用类型^[1],生态、经济、社会系统受其影响较为严重的自然地理单元及行政区域;沙区生态条件恶劣、生物资源匮乏、社会经济落后,是陆地表层最为脆弱的区域之一。一方面,恶劣的气候条件及贫瘠的土壤环境导致沙区资源匮乏、承载能力十分有限;另一方面,经济社会的快速发展及人口的高速增长加剧了沙区人地矛盾,并引发出地下水过度消耗、土地退化等新的生态环境问题^[2-3]。在气候变化和人类活动的共同影响下,以沙漠化正逆过程为标志的沙区环境快速变化,逐渐形成以沙漠化土地和脆弱生态系统为基底,生态、经济、社会要素相互作用的复合系统,具有高度的脆弱性、动态性和复杂性,为沙区可持续发展与管理带来了严峻的挑战。因此,迫切需要对沙区“生态-经济-社会”复合系统(以下简称“沙区 EES 系统”)的脆弱性进行诊断,分析其演变过程及其关键影响因素,为推动沙漠化治理以及实现沙区可持续发展提供科学依据。

脆弱性能表征系统应对外界风险时承受的压力和适应能力,是区域可持续发展的研究主题之一^[4]。随着人们对可持续发展及其与人-地耦合系统关系认识的不断深入,脆弱性的内涵也由最初与“风险”概念相似的自然系统脆弱性^[5-6]加入了人文因素^[7-8],逐步向社会经济领域^[9-10]渗透,其研究也逐渐从单纯的针对自然系统固有属性扩大到“生态-经济-社会(EES)”复合系统^[11-12]视角下更为广泛、更加综合的脆弱性研究^[13-15],研究的范围涉及沿海地带^[16]、连片山区^[17]、河湖流域^[18]等多种区域,研究的内容包括脆弱性特征、趋势预测及影响机理等多个方面。相比单一系统的脆弱性研究而言,复合系统脆弱性研究呈现出地理学、经济学、生态学等多学科交叉的特征;并且,随着对人本因素研究的深入,复合系统脆弱性研究也逐渐向旅游^[19]、产业^[20]、文化^[21]等领域扩展,研究尺度也呈现空间化、小尺度等特征。

沙区脆弱性研究也逐渐由注重气候变化影响下的干旱与生态脆弱性^[22]向人地矛盾视角下综合考虑沙漠化动态变化及其对经济社会影响^[23]的过程转变。研究的侧重点不再局限于影响沙区发展的单一要素发展变化,而是从复合系统理论出发,集成了人地相互作用、系统发展模拟等多个研究视角,如王娅^[24]基于社会-生态系统视角对典型沙区沙漠化逆转过程脆弱性及影响因素进行评估和识别,分析了沙漠化逆转的驱动机制;陈佳^[25]对受沙漠化严重的半干旱地区社会-生态系统进行综合评估,并预测了不同发展情景下的脆弱性区域差异。结合前人研究,本文认为沙区 EES 复合系统是以沙漠化土地或荒漠生态系统为基底,气候变化和人类活动为主要扰动因素,生态-经济-社会高度耦合的人-地关系地域系统,具有复杂性、动态性、多尺度性等特征,其脆弱性可以定义为“气候变化和人类活动对沙区生态环境与经济社会发展不利影响程度,是暴露度、敏感性、适应能力的函数”。近年来,国内外学者也尝试从生态、社会、经济等多个维度对沙区脆弱性进行量化评估,其中以“地中海地区荒漠化与土地利用计划(Mediterranean Desertification and Land Use Project,

MEDALUS)”提出的环境敏感区(Environmental Sensitivity Area, ESA)方法最具代表性,该方法综合考虑土壤、气候、植被、土地管理等指标来进行敏感性及脆弱性评估,并在欧洲地中海地区^[26—27]、中亚^[28—29]、中国北方沙区^[30]等地进行了优化应用。但这一方法很少从沙区 EES 复合系统的角度来进行设计,对系统间的关联性以及自然与人文环境要素的内在连通性考虑不够,也缺乏从脆弱性的角度来综合考虑暴露度、敏感性与适应能力之间的关系。另一方面,由于缺乏对沙区 EES 复合系统脆弱性指标体系的构建与评估方法,导致对于区域层面沙区 EES 复合系统脆弱性演变过程、不同指标的贡献、影响、耦合作用关系与区域分异缺乏客观的认知,对沙区可持续发展的支撑性不够。

内蒙古自治区是我国沙漠化最为严重的区域之一,沙漠与沙漠化土地面积占全区总面积的 85.98%;内蒙古沙漠化及其引发的沙尘暴等环境问题,严重影响到京津冀乃至中国华北地区的生态安全。2000 年以来,国家在内蒙古地区持续实施了“三北”防护林、退耕还林还草、京津冀风沙源治理等大规模生态工程,为沙漠化治理与生态环境改善作出了巨大贡献;但受气候变化与快速城镇化、能矿资源开采等影响,局部地区生态环境与沙漠化依然呈恶化趋势,沙区 EES 复合系统脆弱性形成机制更为复杂,为区域生态环境与沙漠化治理提出了挑战。因此,本文以内蒙古为研究区,尝试从 EES 复合系统的视角,结合“暴露度-敏感性-适应能力”这三个脆弱性评估维度来设计沙区 EES 复合系统脆弱性评估指标体系,利用脆弱性评估领域广泛使用的“暴露-敏感-适应”(Vulnerability Scoping Diagram, VSD)评估模型,对 2000—2018 年内蒙古沙区 EES 复合系统脆弱性空间格局及演化趋势进行评估诊断,并借助空间主成分分析与时空地理加权回归模型对内蒙古沙区 EES 复合系统脆弱性影响因素及交互作用进行识别分析,旨在为沙区适应性管理及沙漠化可持续治理提供理论参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于中国北部边疆(图 1),总面积 118.3 万 km²,界于 37°24′—53°23′N, 97°12′—126°04′E 之间,呈狭长型,平均海拔 1000 m 左右,基本属于高原型地貌区;年平均气温在 0—8℃ 之间,年降水量在 100—450 mm,是湿润、半湿润季风气候向干旱、半干旱气候的过渡带。从东北到西南,随着降水量的减少和温度的上升,依次分布着森林、草原和荒漠地貌类型;土壤带也由东向西,按黑土地带、暗棕壤地带、黑钙土地带、栗钙土地带、棕壤地带、黑垆土地带、灰钙土地带、风沙土地带和灰棕漠土地带顺序排列。内蒙古沙漠及沙漠化土地分布广泛,拥有巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布齐等沙漠,以及科尔沁、毛乌素、浑善达克和呼伦贝尔等沙地;其中,76 个旗县(市)、995 个乡镇(苏木)分布有沙漠及沙漠化土地^[31],占全区旗县(市)总数的 95%,少数没有沙漠及沙漠化土地分布的旗县(市)也受到潜在沙漠化土地的影响;因此,本研究将内蒙古全境纳入沙区范围进行分析研究。

1.2 数据来源及处理

本研究所使用数据资料主要包括气象数据(2000—2018 年)、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据(2000—2018 年)、5 期土地利用类型数据(2000、2005、2010、2015、2018 年)、植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据(2000—2018 年),以及内蒙古各县市社会统计数据

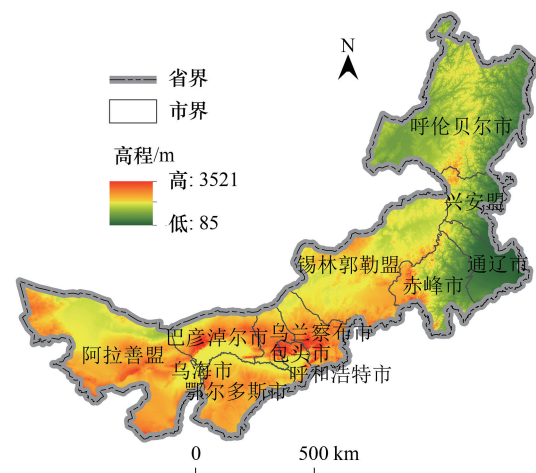


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

(2000—2018 年)。其中气温、降水、风速等月值气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台;NDVI 数据来源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)全球监测与模型研究组(Global Invent or Modeling and Monitoring group, GIMMS)发布的 GIMMS NDVI3gV1.0 数据集,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为月;NPP 由光能利用率(Carnegie Ames Stanford Approach, CASA)模型模拟所得,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为年;土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,空间分辨率为 1 km;社会经济数据为内蒙古自治区统计年鉴和中国林业统计年鉴整理得到。为便于计算与分析,利用 ArcGIS10.4 软件将各指标数据整理为具有空间属性的归一化栅格数据,像元大小为 1 km。

2 方法

2.1 脆弱性评价体系

本文以 VSD 模型为基础,从暴露度、敏感性和适应能力三个维度出发,综合考虑生态、经济、社会三个系统特征,构建评估指标体系,对内蒙古沙区 EES 复合系统脆弱性进行定量评估。VSD 评估模型由 Polsky 等^[32]基于“暴露-敏感-适应能力”发展而来,目前被广泛引用于生态脆弱性评价^[33]、干旱脆弱性评价^[34]、人地耦合系统脆弱性评价^[35]等多个方面。可根据 3 个维度的关系(公式 1)计算得到脆弱性评估结果^[25,34,36],如下:

$$VI = E + S - A \quad (1)$$

$$E = \sum_{i=1}^7 w_i e_i \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^6 w_i s_i \quad (3)$$

$$A = \sum_{i=1}^3 w_i a_i \quad (4)$$

式中: VI 为脆弱性; E 为暴露度; S 为敏感性; A 为适应性; e_i 为各暴露度指标; s_i 为各敏感性指标; a_i 为各适应性指标; w_i 为各个指标的权重。

本文在综合分析研究区实际情况及前人对社会生态系统脆弱性相关研究的基础上,遵循适用性、科学性和可获得性等原则,构建了包含 3 个一级指标、16 个二级指标的内蒙古 EES 脆弱性评价体系(表 1)。暴露度是指影响沙区环境变化(特别是沙漠化正逆过程)的气候和人类活动变量的特征和变化程度,分为内部驱动因素和外部驱动因素,因此不仅要考虑到人类发展指标和经济发展指标以及贫瘠自然条件带给系统的压力,如农业人口密度、牲畜密度等,还要考虑与沙漠化密切相关的气候变化因素,如干湿指数、干旱指数、风力气候侵蚀力等。敏感性指沙区 EES 复合系统对内外部刺激因素的易感性,取决于所在区域的环境本底与沙漠化特征,考虑到气候和人类活动造成的沙漠化现象带给系统的影响,纳入土地沙漠化程度、植被耗水及植被覆盖度等反应沙漠化影响的指标。适应性是指沙区政府与农户层面适应环境变化,推动沙漠化逆转和经济社会协调发展,使系统恢复到原来状态的能力,重点考虑为减少沙漠化带来的影响而在治理过程中本身系统产生的适应性行为,所以要把生态造林面积等指标包含在内。

本文基于前人研究以及专家知识,利用层次分析法来确定指标权重,并采用 Min-Max 标准化方法对数据进行无量纲化处理。在此基础上,计算脆弱性指数,并以 2000—2018 年脆弱性指数均值的自然间断点为标准,将脆弱性划分为 5 个等级:不脆弱、较低脆弱、中等脆弱、较高脆弱、高脆弱(表 2)。

2.2 脆弱性趋势分析

2.2.1 Slope 分析

本研究利用 MATLABR 2018a 分析栅格尺度上的内蒙古地区 2000—2018 年长时间序列内 EES 复合系统脆弱性、暴露度、敏感性和适应能力的年际变化趋势(公式 2),并对其进行 F 检验。变化趋势分为 3 类:显著增加($\text{slope} > 0$, $P < 0.05$)、显著降低($\text{slope} < 0$, $P < 0.05$)、无显著变化($P > 0.05$)。

表 1 内蒙古沙区生态-经济-社会(EES)复合系统脆弱性评估体系
Table 1 Vulnerability assessment system of Ecological-Economic-Social(EES) system in Inner Mongolia sandy region

目标层 Object level	准则层 Criterion level	指标层 Indicator level	单位 Unit	权重 Weight	解释 Explanation
暴露度 Exposure	社会	人口总量	万人	0.26	人口的数量可以直观反映人类社会给研究区的社会生态系统带来的压力,人口数量越多代表人类的需求就越大,给研究区的生态系统所带来的压力就越大
		农业人口密度	人/km ²	0.23	受沙漠化影响的区域往往在城市边缘地区或者郊区,受农村人群活动的影响较大,所以选择农业人口作为社会层面的暴露性指标,可以反映沙漠化区域人类的压力
	经济	土地利用强度	-	0.06	沙区生态环境脆弱,土地利用强度可以反映人类的经济建设需求和对土地资源的利用强度。土地利用强度可以采取方田的计算方法,将不同类型土地进行分级,1级为未利用土地;2级为水草地;3级为农业用地;4级为建设用地。土地利用强度指数为各类型土地面积与总面积的乘积 ^[37]
		牲畜密度	头/km ²	0.09	沙漠化的形成与人类活动的关系非常密切,放牧行为是导致土地沙漠化发生的主要因素,沙漠化与牲畜密度呈正相关,牲畜密度越小,沙漠化发生的机率越大
	生态	干湿指数	-	0.14	干湿指数是衡量区域水热状况重要的综合性指标,是体现沙区气候条件的重要指标之一,通常用年潜在蒸散发与年降水量之比来计算 ^[38]
		温度植被干旱指数	-	0.14	温度植被干旱指数可以表征沙区受干旱影响的程度大小,也可反应气候变化对研究区域的潜在影响,根据地表温度和 NDVI 数据计算 ^[39]
敏感性 Sensitivity	社会	风蚀气候侵蚀力	-	0.08	北方地区受风蚀影响严重,风蚀气候侵蚀力可有效的度量气候影响风蚀的程度,并有效的评判土地沙化、沙漠化以及农田风蚀,可根据降水、风速和温度数据计算 ^[40] 。西北地区受风力侵蚀危害严重,对沙漠化的形成影响较大,因此风力侵蚀力是自然气候条件对系统的沙漠化灾害形成压力的重要因素
		粮食总量	kg	0.27	粮食产量可表征系统应对气候变化等外部干扰因素时的状态,当气候旱化加剧时,粮食产量就会受到相应的影响。
	经济	耕地面积	km ²	0.25	耕地面积一方面可以判断人类活动对沙区生态的压迫程度,另一方面可以反映受沙漠化灾害影响下的沙区社会系统的自我供给能力
		植被覆盖率	-	0.11	植被覆盖率可以反映沙区生态子系统受气候和人类活动影响的状态,体现生态子系统对外界干扰的敏感程度,根据像元二分模型处理 NDVI 数据获得 ^[41]
	生态	植被耗水	-	0.15	对于沙区等干旱地区而言,水分的缺少会加剧土壤沙漠化,植被耗水则在气候旱化的驱动下会进一步加剧土壤的干旱程度,反应区域内植被对水分的消耗状态,可根据 NDVI 数据、植被耗水系数及土壤蒸发系数计算 ^[42]
适应性 Adaptability	社会	土地沙漠化程度	-	0.09	可以反映沙区在气候和人类活动的相互作用下的沙漠化系统状态,通过对遥感判读、解译来分析沙漠化动态,将沙漠化程度分为轻度沙漠化面积、中度沙漠化面积、强度沙漠化面积、极强度沙漠化面积四类,根据 NPP 计算 ^[43]
		景观破碎度指数	-	0.13	景观破碎度指数是生态学的方法,判断沙漠化影响下的耕地、林地、水域和湿地,建设用地等各类土地利用状态,一般选取景观聚合度指数、景观分离度指数、景观斑块密度指数和景观丰富度指数四个指标来进行计算,计算的方法有移动窗口空间分析法等 ^[44]
		农牧民人均收入	元	0.33	反映沙区社会子系统的经济适应能力。农牧民人均收入越高,表示在干旱气候条件和沙漠化灾害的环境条件下,社会系统承受其影响的能力就越强
	经济	农业经济效率	-	0.26	农业经济效率主要是指生产效率,可以根据 DEA 模型通过投入产出比来计算 ^[45] ,投入方面包括农牧业机械总动力、化肥施用量、有效灌溉面积,产出方面则是农业产值。农业经济效率可以体现沙区农业农作物的生产情况,进而反映气候条件和人类管理情况,可作为体现沙区社会生态系统适应能力的变量之一
		生态造林面积	km ²	0.41	反映沙区政府对生态环境治理的投入情况和治理水平,生态造林面积越大,表示政府对生态环境治理的投入也越大,是衡量沙区复合系统适应沙漠化环境的能力的重要指标

表 2 内蒙古沙区 EES 复合系统脆弱性分级

Table 2 Vulnerability classification of EES system in the sandy region of Inner Mongolia

	不脆弱 None vulnerability	较低脆弱 Low vulnerability	中等脆弱 Moderate vulnerability	较高脆弱 Relatively high vulnerability	高脆弱 High vulnerability
脆弱性范围 Range	<0.11	0.11—0.19	0.19—0.27	0.27—0.35	>0.35

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times Ci - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Ci}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中: θ_{slope} 为回归趋势斜率,若 $\theta > 0$,说明各维度指数在研究时段内呈增加趋势,反之则呈减少趋势; n 为总年份; Ci 为第 i 年的各维度指数。

2.2.2 分段突变检验

对长时序栅格数据进行突变检验是分析栅格对象逐年变化趋势,判断其突变时间节点的有效方法。常用的突变检验的方法主要包括 Manner-Kendall 检验^[46]、Standard Normal Homogeneity test^[47]、Pettitt 检验^[48]等。本文选取分段检验的方法对 19 年长时序脆弱性指数进行逐像元突变点检验。分段检验能对时间序列样本在不同时刻的观测值进行相关性分析,通过判断对样本序列分段后各子段序列间的样本均值、方差等是否存在显著性差异来检验样本序列的平稳性。

2.3 脆弱性影响因素分析

空间主成分分析可以有效降低指标的共线性,对多个指标进行降维处理,从而避免影响因素的重复性,简化数据结构^[49],空间主成分分析与时空地理加权回归模型相结合能杜绝直接使用时空地理加权回归模型时出现的高度共线性问题,从而有效地分析地理数据的时空异质性变化^[50-51]。

2.3.1 空间主成分分析

空间主成分分析 SPCA (Spatial Principal Component Analysis) 以主成分分析的统计学原理和 ArcGIS 为基础,将每个空间变量对应一个矩阵,把相关的空间变量对因变量的影响程度分配到响应的具体主成分因子,并以栅格数据的形式展示出来,可直观的显示主成分分析的结果^[52-53]。借助 ArcGIS 10.4 软件的主成分分析工具输入各个指标的栅格数据,可得到各个主成分的空间载荷图及其累积贡献率,从而实现对指标层的降维,剔除共线性影响。

2.3.2 时空地理加权回归

本文借助 MATLABR2018a 利用时空地理加权回归模型来对 2000—2018 年内蒙古 EES 脆弱性演变的主成分影响因素进行综合分析,探索显著变化区域在时空变化下,各个影响因素对脆弱性值的影响程度。

为了将数据的时空特性纳入到回归模型中予以分析,Huang 等^[54]提出了时空地理加权回归模型 GTWR (Geographically and Temporally Weighted Regression),具体的模型构建如下:

$$C_i = \alpha_0(x_i, y_i) + \sum_{j=1}^k \alpha_j(x_i, y_i) W_{ij} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中: C_i 代表脆弱性指数; W_{ij} 表示第 i 个单元脆弱性指数的第 j 个主成分因素; (x_i, y_i) 是第 i 个单元的空间坐标; $\alpha_j(x_i, y_i)$ 是主成分因素 j 在第 i 个空间单元的回归系数; ε_i 是随机误差。

3 结果与分析

3.1 脆弱性基本空间格局

基于 2000—2018 年脆弱性指数均值可以看出,内蒙古沙区 EES 复合系统脆弱性的空间分布格局呈现整体分散、局部集聚的状态(图 2),高脆弱性区域主要分布于锡林郭勒盟中部、呼伦贝尔市东部及赤峰市南部,

阿拉善盟南部的部分地区也存在高脆弱性特征;鄂尔多斯市、锡林郭勒盟西北部及呼伦贝尔西部则表现出明显的低脆弱性特征。暴露度在空间上主要表现为中南部高、西南及东北部低的趋势,高值区主要集中在巴彦淖尔市南部、包头市、赤峰市及通辽市南部区域,低值区则主要集中在阿拉善盟南部及呼伦贝尔市北部。敏感性在空间上大致呈现西高东低的分布格局,敏感性最高的区域主要分布在阿拉善盟地区;此外,鄂尔多斯市北部及呼伦贝尔市东部的部分地区也表现出一定的高敏感性。适应性在空间分布上则存在三个高值聚集区和两个低值聚集区,高值区分布在阿拉善盟、通辽市及包头市和呼和浩特市连片区域,低值区则主要分布在东部的锡林郭勒盟中部和呼伦贝尔市东部。

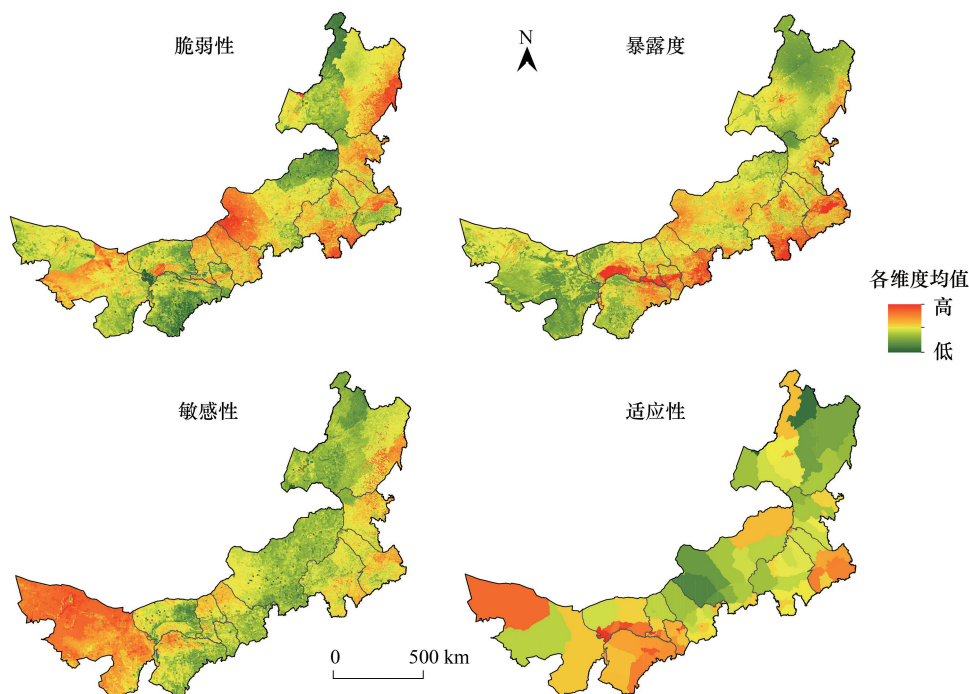


图 2 敏感性、暴露度、适应性及脆弱性均值分布图

Fig.2 Distribution of mean values of sensitivity, exposure, adaptability and vulnerability

从各盟市的均值来看,各个盟市的脆弱性在 0.10—0.35 之间变化(图 3),其中位于内蒙古沙区中部的乌兰察布市脆弱性均值在 12 个盟市中为最高,达到 0.308,位于南部的鄂尔多斯市脆弱性均值最低,为 0.14。暴露度均值在各个盟市之间的变化幅度相对脆弱性而言较小,均值最大的是位于内蒙古沙区东北部的呼和浩特市,均值最小的是位于西北部的阿拉善盟,二者之间相差 0.12。各个盟市的敏感性均值相对脆弱性和暴露度而言,都处于较高状态,且除阿拉善盟外,其余盟市的敏感性均值都相差不大,处于 0.25 至 0.35 之间。各个盟市的适应性均值总体上也处于较高水平,其中适应性最高的是乌海市,其均值达到 0.39,适应性最低的是呼伦贝尔市,其均值为 0.25。

3.2 脆弱性时空演变分析

3.2.1 脆弱性等级变化

根据 2000、2005、2010、2015、2018 年 5 个时间断面内内蒙古沙区 EES 复合系统的脆弱性等级变化情况可以看出:(1)内蒙古沙区整体的脆弱性指数处于逐渐降低的趋势,变化的主要年份区间在 2000—2005 年间,其大部分地区由高脆弱转化为中等脆弱和不脆弱。在该年份区间内,整个内蒙古地区高脆弱区域减少了 $2.54 \times 10^5 \text{ km}^2$ (表 4),减少的面积区域逐渐主要向中等脆弱和较低脆弱区域转化,二者分别增加了 $1.21 \times 10^5 \text{ km}^2$ 和 $0.72 \times 10^5 \text{ km}^2$;(2)虽然在整个时序中,脆弱性等级整体上呈现降低趋势,但其中也出现个别区域脆弱性逐

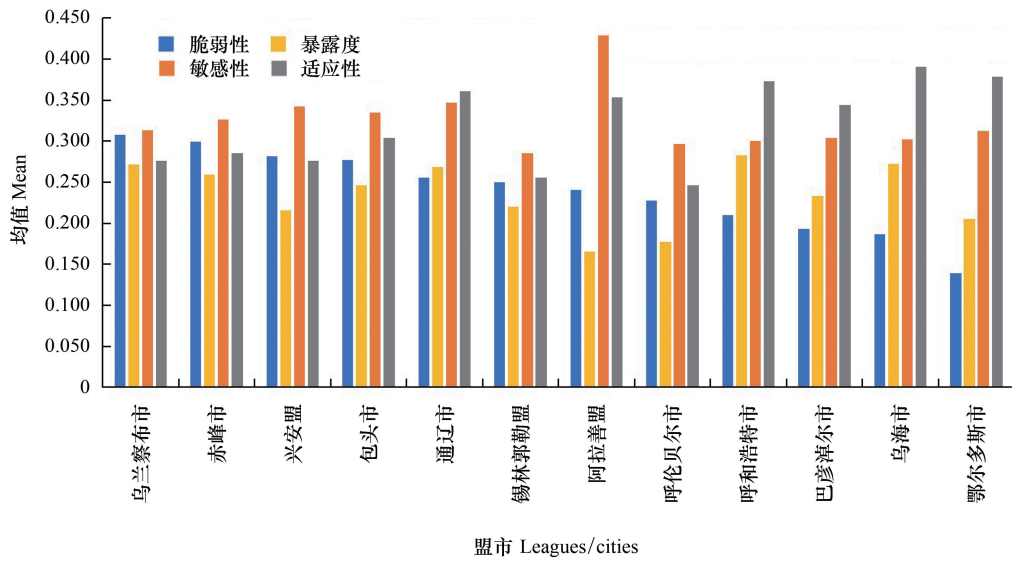


图3 沙区各盟市脆弱性、暴露度、敏感性及适应性均值柱状图

Fig.3 Histogram of the mean values of vulnerability, exposure, sensitivity, and adaptability in each league of the sandy region

渐增强的现象,如在 2010、2015、2018 年高脆弱区域分别增加了 $0.21\times 10^5\text{ km}^2$ 、 $0.37\times 10^5\text{ km}^2$ 、 $0.13\times 10^5\text{ km}^2$; (3) 等级变化情况在整体上可概括为高脆弱和较高脆弱区域收缩,面积分别减少 $1.48\times 10^5\text{ km}^2$ 、 $0.34\times 10^5\text{ km}^2$,中等脆弱、较低脆弱性和不脆弱区域扩张,面积分别增加 $0.58\times 10^5\text{ km}^2$ 、 $0.87\times 10^5\text{ km}^2$ 、 $0.38\times 10^5\text{ km}^2$ 。

表 4 脆弱性面积统计/ km^2

Table 4 Vulnerable area statistics

年份 Year	不脆弱 None vulnerability	较低脆弱 Low vulnerability	中等脆弱 Moderate vulnerability	较高脆弱 Relatively high vulnerability	高脆弱 High vulnerability
2000	1.04×10^5	1.36×10^5	2.21×10^5	3.01×10^5	3.90×10^5
2005	1.56×10^5	2.08×10^5	3.42×10^5	3.11×10^5	1.36×10^5
2010	1.23×10^5	2.03×10^5	3.88×10^5	2.75×10^5	1.63×10^5
2015	1.30×10^5	2.26×10^5	2.80×10^5	2.58×10^5	2.60×10^5
2018	1.42×10^5	2.23×10^5	2.79×10^5	2.67×10^5	2.42×10^5

3.2.2 脆弱性及各维度趋势分析

根据脆弱性及各维度趋势分析的结果(图 4),从整体上来看,内蒙古沙区 EES 复合系统脆弱性的变化趋势为脆弱性显著降低区域的面积大于脆弱性显著升高区域,具体表现为西部阿拉善盟地区整个区域脆弱性显著降低,中南部呼和浩特市及乌兰察布市等沿内蒙古省界南部区域则显著升高,中东部的大部分区域未呈现明显变化趋势;暴露度在内蒙古地区除鄂尔多斯东部和呼和浩特市及呼伦贝尔市少部分地区外都呈现显著降低的趋势;敏感性的变化趋势更加明显,以显著升高为主要变化趋势,具体来说,显著降低的区域分布于整个内蒙古,显著增加的区域则大面积集中于东北部;适应性的区域分布则呈现县区分异的特点,从内蒙古整个沙区来看,主要呈现东西部地区显著升高、中部显著降低的趋势。

3.2.3 脆弱性突变检验

对 19 个年份的脆弱性指数进行分段检验,每段时序以五年为基准,检测各像元在时间序列上的突变情况。结果表明(图 5):(1)发生突变的地区主要集中于内蒙古东部即兴安盟和呼伦贝尔东部地区、内蒙古中部即赤峰市西部、锡林郭勒盟和乌兰察布地区,阿拉善盟、巴彦淖尔盟和包头市等盟市的少部分地区也存在脆弱性指数在时间序列上发生突变的现象;(2)发生脆弱性指数突变的地区其突变时间有所不同,内蒙古东部

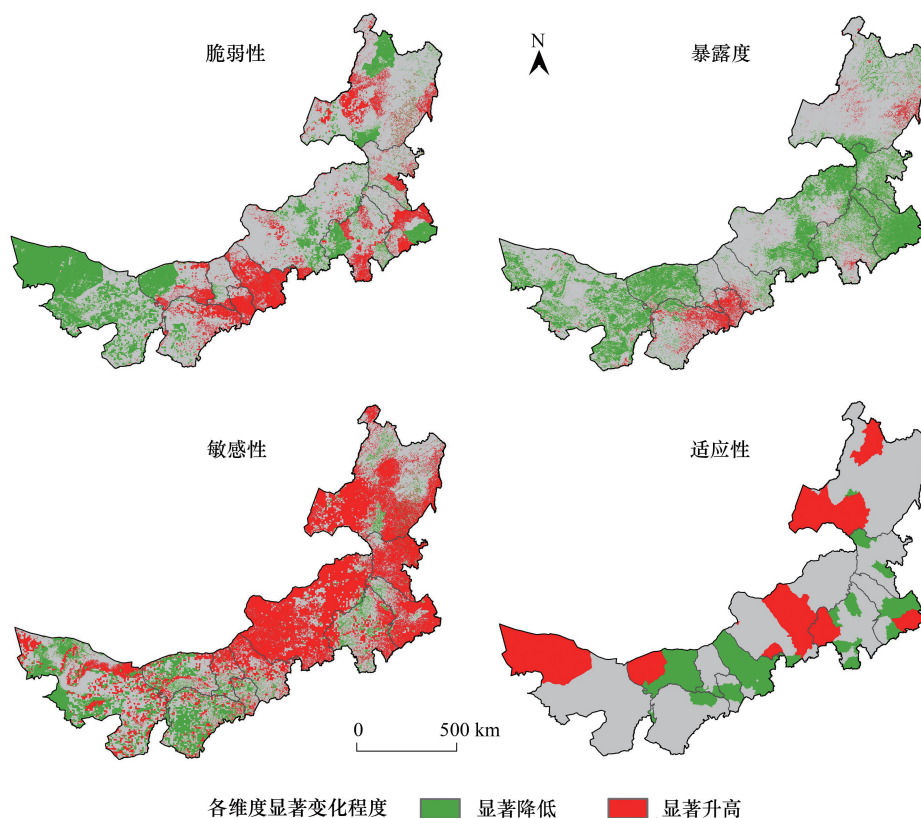


图 4 脆弱性各维度变化趋势

Fig.4 Trend of each dimension of vulnerability

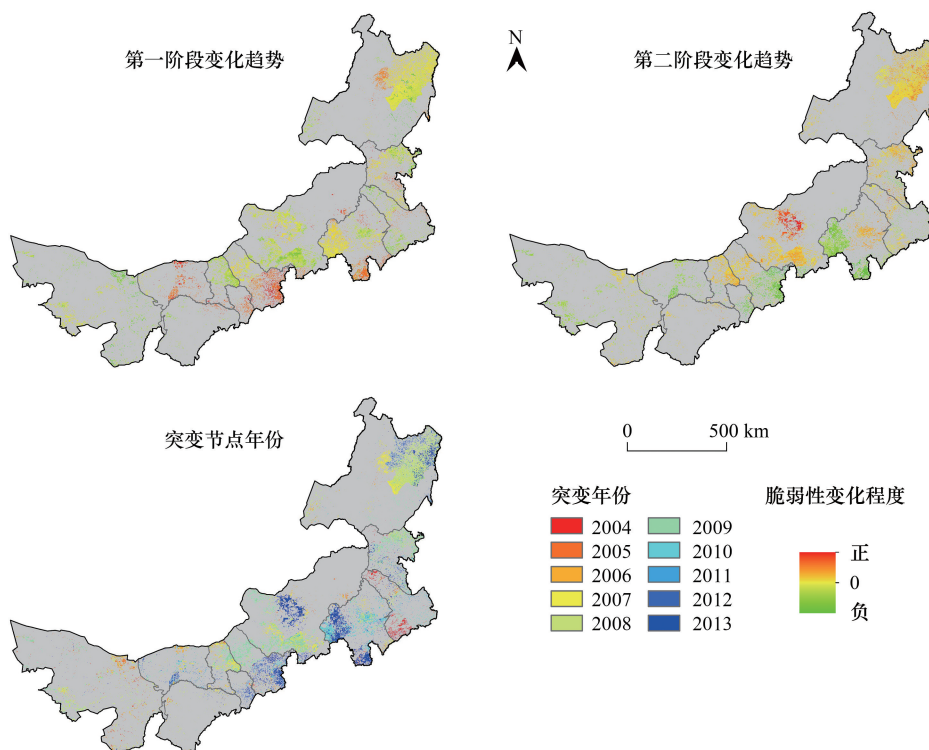


图 5 脆弱性指数分段检验分布格局

Fig.5 Distribution pattern of segmented test of vulnerability index

脆弱性指数突变地区突变时间集中在 2008 年前后,内蒙古中部脆弱性指数突变地区突变时间集中在 12 年前后;(3)脆弱性指数发生突变的地区,突变前后其脆弱性指数的变化趋势相反,巴彦淖尔盟、呼和浩特市、赤峰市突变地区在第一阶段呈现脆弱性指数升高的趋势,而在第二阶段脆弱性指数降低,呼伦贝尔市、乌兰察布盟、兴安盟突变地区在第一阶段呈现脆弱性指数降低的趋势,在第二阶段则逐渐升高。

3.3 脆弱性影响因素探测

3.3.1 空间主成分分析

对 16 个指标进行空间主成分分析,根据主成分累积贡献率的 $\geq 85\%$ 即能较好反映原始变量绝大部分信息的原则,可提取到 6 个主成分因子,选取 3 个节点年份进行展示,如下表 5 所示。表 5 列出了根据主成分荷载矩阵识别出的脆弱性关键影响因素,其中社会、经济、生态三个维度上均有作为主成分主导因素的载荷指标,生态指标占比最大,为主要影响因素。从各个年份的主成分分析总体情况来看,在三个年份中第一主成分均为植被覆盖度指数和沙漠化程度,贡献率在 43% 以上,可以认为其为原变量中影响脆弱性指数的主要因子;农业经济效率和干旱指数分别是第二主成分和第三主成分的主导因素,贡献率在 15% 和 10% 左右,对脆弱性指数的影响仅次于植被覆盖指数和沙漠化程度。第四、五、六主成分在三个年份中有所不同,但土地利用强度指标均占有一定的贡献率。

表 5 空间主成分分析结果
Table 5 Results of spatial principal component analysis

年份 Year	主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Rate of contribution	累积贡献率/% Accumulating contribution rate	主导因素 Primary factors	所属维度 Dimension
2000	PC1	0.075	43.06	43.06	NDVI*、沙漠化程度	生态
	PC2	0.028	16.48	59.53	干旱指数*、农业经济效率	生态、经济
	PC3	0.022	12.70	72.23	干旱指数	生态
	PC4	0.010	6.22	78.44	耕地面积*、沙漠化程度	社会、生态
	PC5	0.008	4.39	82.84	土地利用强度	社会
	PC6	0.007	3.75	86.59	农牧民纯收入	经济
2010	PC1	0.080	47.84	47.84	NDVI*、沙漠化程度	生态
	PC2	0.024	14.41	62.25	干旱指数、农业经济效率	生态、经济
	PC3	0.015	9.00	71.25	干旱指数*	生态
	PC4	0.012	7.24	78.49	沙漠化程度	生态
	PC5	0.008	4.82	83.30	农业经济效率*	经济
	PC6	0.006	3.84	87.15	土地利用强度	社会
2018	PC1	0.087	46.21	46.21	NDVI*、沙漠化程度	生态
	PC2	0.029	15.17	61.38	干湿指数、农业经济效率	生态、经济
	PC3	0.021	11.33	72.71	干旱指数	生态
	PC4	0.014	7.29	80.00	干湿指数*	生态
	PC5	0.009	4.83	84.83	农业经济效率	经济
	PC6	0.006	3.31	88.14	土地利用强度	社会

NDVI:归一化植被指数,Normalized difference vegetation index;* 表示该因素对总体水平的贡献为负

3.3.2 显著降低区域影响因素分析

在主成分分析的基础上,对显著变化区域各主成分因子进行影响因素分析。为保证各因素之间的可比性,将显著性降低区域和显著性升高区域各点的六个主成分因子利用 GTWR 模型计算出来的系数值在 Python 中进行排列,并用自然断点法进行分类,对其划分为强负影响、中负影响、弱负影响、弱正影响、中正影响及强正影响六个等级。

显著降低区域的脆弱性影响因素分析结果如下(图 6):(1)总的来看,第一主成分即植被覆盖度和沙漠

化程度对脆弱性的影响逐渐由负向向正向转变,说明沙漠化程度和植被覆盖度对脆弱性降低的正面影响在逐渐增强,转变尤其明显的区域主要是内蒙古西南部地区和中部地区,表明沙漠化程度的降低和植被覆盖度的增加对这两个地区的脆弱性指数的降低起到了较大的作用。而在阿拉善北部地区,第一主成分的两个因素大部分时间内处于负影响状态,说明在该地区植被覆盖度呈现降低的趋势,沙漠化程度呈现升高的趋势,对脆弱性降低的贡献为负。(2)第二主成分主导因素为气象指数和农业经济效率,空间上主要呈现正向影响的趋势,特别是在阿拉善左旗和额济纳旗地区呈现出中正和强正影响,表明该地的脆弱性指数变化受干旱等气象因素干扰和农业活动影响较大,农业经济效率的提升和气候的变化对这两个地区的脆弱性起到抑制发展的作用。但在阿拉善右旗和锡林郭勒盟中部,随着年份变化,其影响程度逐渐降低。(3)第三主成分的主导因素在三年中均为干旱指数,且随着年份增长,其影响力在大部分地区上变化较大,但整体上呈现逐渐收缩的趋势,强度由强正影响逐步变为弱正影响,或由强负影响逐步变为弱负影响,这表明干旱指数虽然对脆弱性显著降低具有一定的贡献,但贡献度在逐年下降。(4)从其他主成分构成来看,生态、经济和社会三个维度的指标均有一定的载荷量,且在三年中各有所不同,土地利用强度指标对其影响在三年中均有体现,对主成分贡献率逐渐降低但对脆弱性指数的影响程度逐渐增加,由中负影响向中正影响转变。

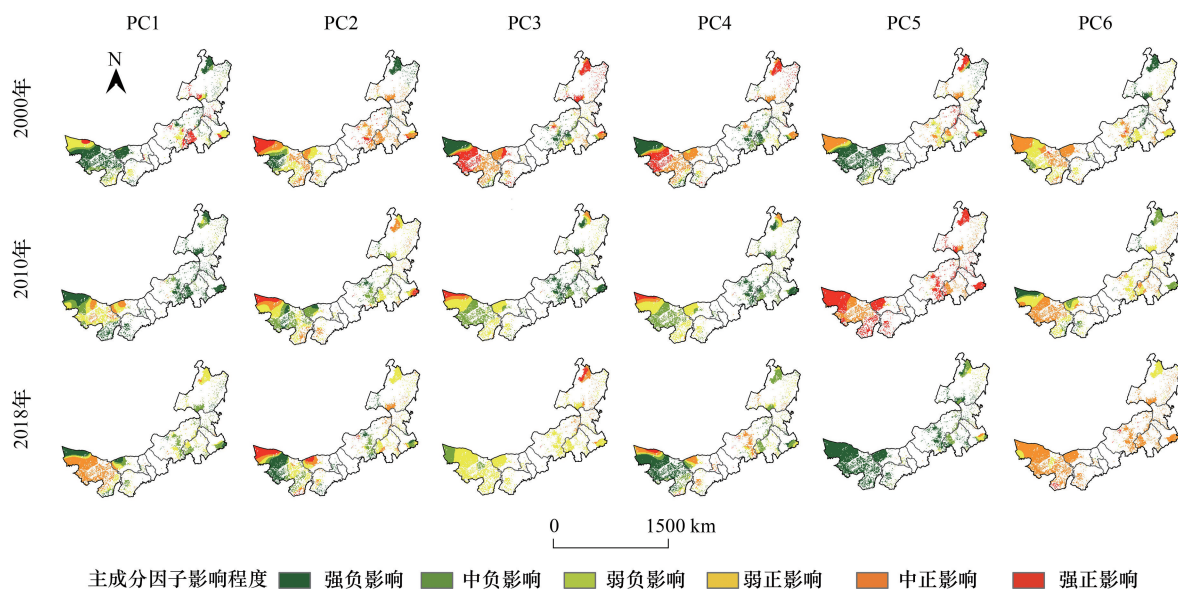


图6 脆弱性显著降低区域影响因素分析

Fig.6 Analysis of influencing factors in areas with significantly reduced vulnerability

3.3.3 显著升高区域影响因素分析

显著升高区域相对于显著降低区域而言,各主成分的影响值相对小(图7),各主成分影响值的变化也不大,总体上前三个主成分的影响力呈现弱化的趋势,由强负影响和中负影响向弱正影响转变。(1)第一主成分主导因素指标即植被覆盖度和沙漠化程度对脆弱性的影响在大部分地区呈现出先向强负影响转化再向弱正影响转化的趋势,表明在脆弱性显著升高区域,植被覆盖度和沙漠化程度指数发生了较大变化,在2000年至2010年间,植被覆盖度和沙漠化程度对脆弱性升高的贡献为负,即这段时期内植被覆盖度是逐渐提高的,沙漠化程度也处于减弱的状态,而在2010年至2018年间,第一主成分贡献度转为正值,说明在后8年间植被覆盖度下降,沙漠化程度又再次加重,从而导致了脆弱性的显著上升。(2)第二主成分即农业经济效率和气象指数由强负、中负影响向弱正、中正影响转变,与第一主成分的变化情况不同,第二主成分对大多数地区的脆弱性变化影响是由负向正转变,说明在研究期伊始农业经济效率和气象指数对这些地区的脆弱性升高并没有贡献,但随着气候的变化和资源的不合理利用促进了后期脆弱性的显著升高。(3)第三主成分即干旱指

数在空间上的变化情况与第一主成分类似,其影响程度先由弱正影响变为强负影响,再由强负影响变回弱正影响。这说明在研究期后期,脆弱性显著升高区域受干旱影响较大,温度的升高和水分的降低了沙区生态系统的适应能力。(4)其它各个主成分每年的主导因素各不相同,除了2000年的沙漠化程度、农牧民纯收入和2018年的农业经济效率对脆弱性升高具有抑制作用外,其它主导因素在各年均对脆弱性升高具有正面作用。

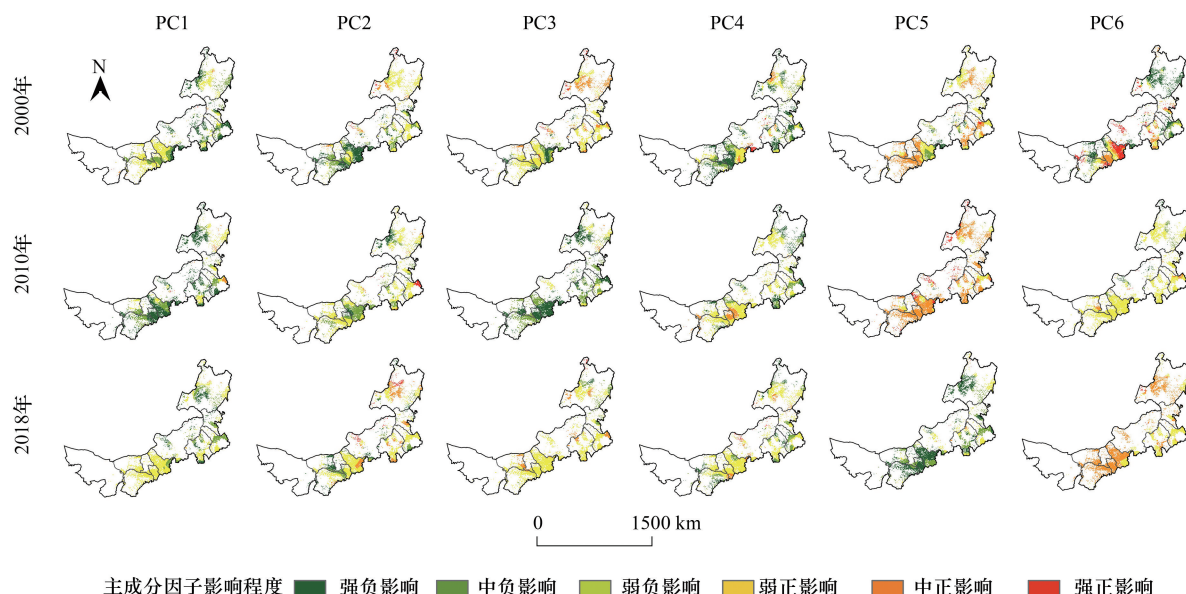


图7 脆弱性显著升高区域影响因素分析

Fig.7 Analysis of influencing factors in areas with significantly increased vulnerability

4 讨论

4.1 脆弱性时空格局演变

内蒙古沙区“生态-经济-社会”复合系统脆弱性由敏感性、暴露度和适应性共同作用而成,其空间分布在内蒙古沙区东部地区与暴露度具有一定的一致性,在西部地区与敏感性也具有部分相似性,但总体来看,其受适应性影响更大,与适应性的高低值分布呈现相反的空间格局。敏感性表现为西高-东低,这与前人研究结果较为相似^[55-56]。其分布主要受内蒙古沙区原本的沙漠化基底环境影响,由于内蒙古自东向西降水递减、温度递增,使西部地区风蚀作用相对东部地区更强烈,土地更易被沙化,沙漠化程度更高、植被覆盖度更低。暴露度在空间上主要表现为中南部高、西南及东北部低。由于暴露度指标表征系统受到压力的程度,主要由农业人口密度、牲畜密度和干湿、干旱指数等气象因子决定,而中南部地区相对于其他区域而言有更高的人口聚集度,建设用地面积更多,土地利用强度更高^[57],因而呈现出更高的暴露度水平。适应性的分布与暴露度和敏感性不同,在沙区南部局部地区表现出较高水平。这是由于随着沙漠化治理工程的实施,生态造林、退耕还林还草等生态保护项目的实施,在一定程度上缓解甚至扭转了部分区域土地退化的局势^[58]。并且,沙产业的发展促使了生产技术和资源利用率的提高,使区域“生态-经济-社会”复合系统内各种要素转换效率得到提升,农牧民纯收入进一步增加,进而利于提升区域的适应能力^[59]。

从脆弱性的综合情况来看,脆弱性在空间上逐年呈现出整体下降的趋势,但也有个别地区出现恶化的情况。脆弱性呈现升高的区域主要是沿内蒙古沙区省界南部的锡林郭勒盟和乌兰察布地区及东北部局部地区,这与前人的研究结果具有较好的一致性^[60-61]。这些地区从2000年至2018年间,具有较快的人口增长趋势,建筑用地迅速扩张,同时具有大量耕地,土地承载压力较大,致使脆弱性指数呈现升高的趋势。脆弱性下降较为明显的区域如内蒙古西部阿拉善盟地区等是由于生态造林面积增加而使得植被覆盖度有较大的提升。由

此可以看出,人类土地利用变化情况与脆弱性的增减有较大关系^[62]。这说明对于内蒙古沙区而言,降低区域复合系统脆弱性最有效的方法是通过实施生态修复工程,促进植被生长的方法来实现。

根据突变检验的结果,发生突变的地区主要集中于内蒙古东部即兴安盟和呼伦贝尔东部地区、内蒙古中部即赤峰市西部、锡林郭勒盟和乌兰察布地区。通过分析,巴彦淖尔盟、呼和浩特市、赤峰市脆弱性前期上升后期下降可能是因为前期区域内实际载畜量超过理论载畜量,草畜矛盾尖锐,且沙大多风的自然因素导致草地风蚀沙化,环境较为恶劣,植被覆盖度低,后期禁牧政策的颁布和严格实施以及人工种草和退耕还林还草制度缓解了草地的退化^[63]。呼伦贝尔市、乌兰察布盟、兴安盟突变地区的前期脆弱性指数突变则可能是受到沙漠化程度变化的影响,如随着防沙治沙工程的实施,呼伦贝尔沙地逐渐呈现改善的趋势,全国第四次荒漠化和沙化监测结果显示,呼伦贝尔沙地沙化面积首次出现缩减,较 2004 年减少 242.7 km²^[64],沙漠化程度的降低和植被覆盖率的升高缓解了脆弱性指数的上升。而后期脆弱性指数的上升则可能与人口的增加和土地利用强度的增长有关,随着区域发展产业的转型,许多荒地和未利用地被开垦出来作为建设用地和农用地^[65],在一定程度上促进了脆弱性的升高。

4.2 脆弱性影响因素

通过对众多指标的主成分分析,提取了发挥主要作用的六个主成分,避免了对脆弱性显著性变化区域进行时空地理加权回归时出现的共线性问题,也降低了时空地理加权回归模型分析空间数据因工作量大而产生的难度。根据脆弱性显著变化区域的主成分分析结果,各年份影响脆弱性变化的主成分因素各有不同,在三个年份均占有一定贡献率的指标是植被覆盖度指数和沙漠化程度、农业经济效率和气候指数以及土地利用强度指标,其中植被覆盖度指数和沙漠化程度对脆弱性的影响最大,这与前人的结果具有一定的相似性^[66-67]。但异于前人研究的是,本文认为农业经济效率指标对脆弱性变化也具有一定的影响力,这是因为前人的研究中对于内蒙古的脆弱性评估更多从生态系统或干旱风险的视角,并很少考虑农业的发展对区域脆弱性的影响,而本文从“生态-经济-社会”复合系统的角度出发,将农业经济效率纳入指标体系中,并通过分析验证了该指标的重要性。

从各个影响因子与脆弱性显著变化的情况来看,不管是显著升高区域,还是显著降低区域,各个影响因子随着年际变化在部分区域出现影响的正负向转化的情况,这说明各个因子对脆弱性的影响不是绝对的,在不同的时期呈现出对脆弱性抑制或促进的不同状态。脆弱性发生显著变化的地方,其变化并非线性发展,部分因子对脆弱性的影响程度在空间变化中存在一定的协同性,说明脆弱性与各个影响因子之间的关系也可能不是简单的线性相关,各个因子之间存在着相互关联和相互作用。因此,降低复合系统脆弱性,实现沙区可持续发展要从全局考虑,综合研究各个要素之间的内在连通性。

4.3 政策启示

土地沙漠化作为土地退化的重要类型之一,不仅对区域生态环境产生重要影响,也在气候变化和人类活动作用下,对区域经济发展带来威胁。将受沙漠化严重影响的内蒙古沙区作为研究区域,对其“生态-经济-社会”复合系统脆弱性进行科学评估有利于快速识别内蒙古沙区的发展弱势区域,并提出相应的管理措施。对于高脆弱性区域而言,应从长时序、宏观的视角出发,充分利用沙区特有生物资源,提高农业生产技术效率,建立低成本、高效率的生态修复体系和经济发展路径。制定合理的区域发展规划,优化土地利用结构,严格控制城市的盲目扩张;选择合理的农作物种植结构,普及节水灌溉等技术,促进水土资源的优化利用,提高农业经济效率,增强系统的适应能力。对于低脆弱性区域而言,应保持现有的生态监管力度,控制牲畜放牧的密度和强度,降低土地利用强度,防止土地退化,进而避免脆弱性的升高;经济发展与生态保护并重发展,在保护生态的同时注重人口发展的需求,促进生态农业、生态旅游等多种环境友好型产业发展,提升居民的生活水平。

5 结论

本文以中国内蒙古沙区的 EES 复合系统为脆弱性评价对象,围绕生态、经济、社会三个子系统构建了脆

弱性评价指标体系,通过对 19 个年份的脆弱性评估和影响因素分析,得出以下结论:

(1)敏感性、暴露度、适应性和脆弱性的空间分布具有较高的空间异质性,脆弱性的分布格局总体上呈现整体分散、局部集聚的特点,高值区主要集中于内蒙古中部、西南部和东北部地区,整体上处于逐渐降低的趋势;脆弱性指数的趋势变化趋势为南部的局部地区显著升高,西部显著降低。脆弱性发生突变的地区也主要集中于内蒙古东部和内蒙古中部地区,其中东部地区脆弱性先升高后降低,西部先降低后升高。

(2)通过影响因素分析发现植被覆盖度、沙漠化程度、干旱及干湿气象指数等生态指标是影响脆弱性显著变化区域发生变化的主要因素。农业经济效率、土地利用强度等经济和社会指标也具有一定的贡献率,但相对生态指标而言影响较弱。

(3)对脆弱性水平较高的区域如内蒙古中部和东北部以及阿拉善南部地区应加大禁牧禁伐的监管力度,增加造林面积以提升植被覆盖度,提高农业生态效率,强化生态-经济-社会系统的适应能力。对于脆弱性水平较低的区域则应该保持生态治理力度,经济发展与生态保护同步进行,发展环境友好型产业,提高居民收入。

参考文献 (References):

- [1] 朱俊凤. 沙产业理论概念及其内涵的探讨. 中国沙漠, 2004, 24(5): 13-17.
- [2] 樊胜岳, 刘一文, 周宁. 基于 STIRPAT 模型的内蒙古沙漠化地区环境压力分析. 中国沙漠, 2019, 39(3): 117-125.
- [3] 朱震达. 中国的脆弱生态带与土地荒漠化. 中国沙漠, 1991, 11(4): 11-22.
- [4] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.
- [5] 李骊, 张青青, 王雅梅, 李宏, 赵新风. 2000—2018 年克孜河流域生态系统脆弱性、服务功能价值及风险评价. 中国沙漠, 2021, 41(2): 164-172.
- [6] 许萌, 董潇楠, 谢苗苗, 王玉, 全德. 基于承灾脆弱性与生态系统服务供需匹配的城市空间治理分区. 生态学报, 2021, 41(15): 6012-6023.
- [7] 刘倩, 蒋金秀, 杨星, 张军以, 杨新军. 农户贫困脆弱性测度及其影响因素——基于秦巴山区的实证分析. 地理研究, 2022, 41(2): 307-324.
- [8] 杨忍, 潘瑜鑫. 中国县域乡村脆弱性空间特征与形成机制及对策. 地理学报, 2021, 76(6): 1438-1454.
- [9] 唐波, 吕智聪, 林琳. 珠三角城市群经济脆弱性时空格局和调控路径. 地域研究与开发, 2020, 39(1): 13-18.
- [10] 任崇强, 孙东琪, 翟国方, 李宇. 中国省域经济脆弱性的综合评价及其空间差异分析. 经济地理, 2019, 39(1): 37-46.
- [11] 贺小荣, 彭坤杰, 许春晓. 长江经济带旅游-经济-生态系统脆弱性时空演变及趋势预测. 生态学报, 2022, 42(2): 487-499.
- [12] 孔伟, 任亮, 刘璐, 李艳龙, 刘海涛. 京津冀生态涵养区旅游地社会-经济-生态系统脆弱性特征及其影响因素. 水土保持通报, 2020, 40(4): 211-218.
- [13] Birkmann J. Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies. Tokyo: United Nations University Press, 2006: 16-18.
- [14] 余中元, 李波, 张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析. 生态学报, 2014, 34(7): 1870-1879.
- [15] 杨飞, 马超, 方华军. 脆弱性研究进展: 从理论研究到综合实践. 生态学报, 2019, 39(2): 441-453.
- [16] 王洁, 王卫安, 王守芬. 气候变化背景下中国沿海地区典型区域脆弱性评价——以长三角为例. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(3): 81-85, 89.
- [17] 贾焱焱, 胡静, 谢双玉, 乔花芳, 刘大均. 贫困山区旅游地社会——生态系统脆弱性及影响机理. 人文地理, 2021, 36(1): 155-164.
- [18] 杨友宝, 彭安琪, 王荣成. 长江经济带干线流域旅游产业系统环境脆弱性演变及障碍因子识别. 经济地理, 2022, 42(2): 212-221.
- [19] 梁旺兵, 田红旭. 社会—生态耦合分析视角下民族旅游社区居民生计脆弱性研究. 资源开发与市场, 2021, 37(7): 863-870.
- [20] 陈玉鑫, 刘冰, 邓祥征, 张帆. 乡村振兴战略背景下农村产业发展脆弱性评估——基于农户调研数据的分析. 农业现代化研究, 2021, 42(6): 996-1005.
- [21] 王娅, 杨国靖, 周立华. 祁连山北麓牧区社会-生态系统脆弱性诊断——以甘肃省南裕固族自治县为例. 冰川冻土, 2021, 43(2): 370-380.
- [22] 蒙古军, 张彦儒, 周平. 中国北方农牧交错带生态脆弱性评价——以鄂尔多斯市为例. 中国沙漠, 2010, 30(4): 850-856.
- [23] 陈佳. 干旱乡村人地系统演化的脆弱性—恢复力整合研究——以甘肃民勤县为例[D]. 西安: 西北大学, 2018.

- [24] 王娅,周立华,魏轩. 基于社会-生态系统的沙漠化逆转过程脆弱性评价指标体系. 生态学报, 2018, 38(3): 829-840.
- [25] 陈佳,杨新军,尹莎,吴孔森. 基于 VSD 框架的半干旱地区社会—生态系统脆弱性演化与模拟. 地理学报, 2016, 71(7): 1172-1188.
- [26] Egidì G, Cividino S, Paris E, Palma A, Salvati L, Cudlin P. Assessing the impact of multiple drivers of land sensitivity to desertification in a Mediterranean country. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 89: 106594.
- [27] Elnashar A, Zeng H W, Wu B F, Gebremicael T G, Marie K. Assessment of environmentally sensitive areas to desertification in the Blue Nile Basin driven by the MEDALUS-GEE framework. *The Science of the Total Environment*, 2022, 815: 152925.
- [28] Hu Y F, Han Y Q, Zhang Y Z. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan. *Journal of Arid Environments*, 2020, 180: 104203.
- [29] Jiang L L, Bao A M, Jiapaer G, Guo H, Zheng G X, Gafforov K, Kurban A, De Maeyer P. Monitoring land sensitivity to desertification in Central Asia; convergence or divergence? *The Science of the Total Environment*, 2019, 658: 669-683.
- [30] Xu D Y, You X G, Xia C L. Assessing the spatial-temporal pattern and evolution of areas sensitive to land desertification in North China. *Ecological Indicators*, 2019, 97: 150-158.
- [31] 乌云娜,裴浩,白美兰. 内蒙古土地沙漠化与气候变化和人类活动. 中国沙漠, 2002, 22(3): 292-297, T001, T002.
- [32] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments; the vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change*, 2007, 17(3/4): 472-485.
- [33] 霍童,张序,周云,陈伟. 基于暴露-敏感-适应性模型的生态脆弱性时空变化评价及相关分析——以中国大运河苏州段为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2281-2293.
- [34] 李文龙,石育中,鲁大铭,刘倩,乌铁红. 北方农牧交错带干旱脆弱性时空格局演变. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1599-1612.
- [35] 宋永永,米文宝,仲俊涛,张维龙,张冠乐,拓星星. 宁夏限制开发生态区人地耦合系统脆弱性空间分异及影响因素. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 85-91.
- [36] 姚成胜,殷伟,李政通. 中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1720-1734.
- [37] 庄大方,刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111.
- [38] 王延禄. 我国建立、引用和验证气象干旱指标综述. 干旱区地理, 1990, 13(3): 80-86.
- [39] 姚春生,张增祥,汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 473-478.
- [40] FAO, UNEP, UNESCO. A Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment. FAO, Rome, 1979.
- [41] 彭文甫,王广杰,周介铭,徐新良,罗怀良,赵景峰,杨存建. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川-都江堰段植被覆盖动态监测. 生态学报, 2016, 36(7): 1975-1988.
- [42] Zhang Y S, Kadota T, Ohata T, Oyunbaatar D. Environmental controls on evapotranspiration from sparse grassland in Mongolia. *Hydrological Processes*, 2007, 21(15): 2016-2027.
- [43] Xu D Y, Zhang X Y. Multi-scenario simulation of desertification in North China for 2030. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(2): 1060-1074.
- [44] 李栋科,丁圣彦,梁国付,赵清贺,汤茜,孔令华. 基于移动窗口法的豫西山地丘陵地区景观异质性分析. 生态学报, 2014, 34(12): 3414-3424.
- [45] 赵晨,王远,谷学明,赵卉卉,吴尧萍,朱晓东,陆根法. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率. 生态学报, 2013, 33(5): 1636-1644.
- [46] 李林,李凤霞,郭安红,朱西德. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79-85.
- [47] Khaliq M N, Ouada T B M J. On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT). *International Journal of Climatology*, 2007, 27(5): 681-687.
- [48] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126.
- [49] 计伟. 高速公路周边居民健康风险评价: 以北京市为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [50] 卢月明,王亮,仇阿根,张用川,赵阳阳. 一种基于主成分分析的时空地理加权回归方法. 测绘科学技术学报, 2017, 34(6): 654-658.
- [51] 田鹏,李加林,王丽佳,刘瑞清,史小丽. 基于 GTWR 模型的浙江省海岸带三维生态足迹动态变化及其影响因素. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3173-3186.
- [52] 张学渊,魏伟,颀斌斌,郭泽呈,周俊菊. 西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2389-2402.
- [53] 韩文维,陈佳,袁倩文,杨新军. 恢复力视角下秦岭贫困山区乡村振兴潜力研究. 自然资源学报, 2021, 36(10): 2571-2584.
- [54] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3): 383-401.

- [55] 徐玲玲, 延昊, 钱拴. 基于 MODIS-NDVI 的 2000—2018 年中国北方土地沙化敏感性时空变化. 自然资源学报, 2020, 35(4): 925-936.
- [56] 田璐, 邱思静, 彭建, 胡熠娜, 贾靖雷, 毛祺. 基于 PSR 框架的内蒙古自治区沙漠化敏感性评估. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1682-1692.
- [57] 樊胜岳, 周宁, 刘文文. 走出马尔萨斯陷阱: 人口压力与沙漠化的关系. 干旱区地理, 2020, 43(1): 218-226.
- [58] 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 陈瑜, 刘锐, 潮洛濛. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响. 生态学报, 2021, 41(12): 4963-4975.
- [59] 陈宽, 潮洛濛. 内蒙古植被 NDVI 变化趋势及影响因子数据集(2000—2015). 全球变化数据学报: 中英文, 2020, 4(2): 137-143, 137.
- [60] 陈臻琦, 张靖, 张贻龙, 刘睿. 基于 VSD 的近 20 a 来浑善达克沙地生态脆弱性变化研究. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1464-1473.
- [61] 郝润全. 气候变化对内蒙古主要草原区生态脆弱性影响评价. 第 32 届中国气象学会年会 S6 应对气候变化、低碳发展与生态文明建设, 2015: 342-349.
- [62] Jiang L, Huang X X, Wang F T, Liu Y C, An P L. Method for evaluating ecological vulnerability under climate change based on remote sensing: a case study. Ecological Indicators, 2018, 85: 479-486.
- [63] 同丽嘎, 宁小莉, 张靖, 张雪峰. 近 30a 浑善达克沙地沙漠化时空演变特征及驱动机制研究. 干旱区地理, 2021, 44(4): 992-1002.
- [64] 张宝珠, 金维林, 葛士林, 杜敏, 佟爱武, 贺其叶乐图, 林文江. 呼伦贝尔沙地治理布局及治理模式. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1310-1313.
- [65] 徐大伟. 呼伦贝尔草原区不同草地类型分布变化及分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [66] 赵志荣, 许端阳, 张绪教, 卢周扬帆, 张晓宇. 2000—2015 年内蒙古地区土地沙漠化脆弱性评估. 水土保持研究, 2020, 27(1): 168-175.
- [67] Dai Y J, Tian L, Zhu P Z, Dong Z, Zhang R H. Dynamic aeolian erosion evaluation and ecological service assessment in Inner Mongolia, Northern China. Geoderma, 2022, 406: 115518.