

2000—2015 年内蒙古地区土地沙漠化脆弱性评估

赵志荣^{1,2}, 许端阳², 张绪教¹, 卢周扬帆^{1,2}, 张晓宇²

(1.中国地质大学, 北京 100083; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要:脆弱性是区域生态环境的重要评价指标, 基于 VSD(Vulnerability Scoping Diagram)脆弱性评估框架, 选取 17 个自然和社会经济指标构建沙漠化脆弱性评估指标体系, 评估了内蒙古地区 2000—2015 年土地沙漠化脆弱性演变趋势, 识别重要影响因素, 并提出内蒙古地区沙漠化防治建议。结果表明: (1) 内蒙古沙漠化暴露度和敏感性演变均呈现出较强的空间异质性。暴露度显著升高区域集中在内蒙古西南部; 敏感性显著升高区域位于内蒙古中部; 全区适应能力不断提升。 (2) 沙漠化脆弱性呈现“东北部低—西南部高”的空间格局, 脆弱性显著升高区域集中在巴彦淖尔市乌拉特后旗中部, 且主要由暴露度升高造成。 (3) 2000 年以来内蒙古地区经济发展及其带来的适应能力提升是导致内蒙古土地沙漠化脆弱性普遍降低的重要原因, 植被、风蚀和干湿指数等是脆弱性演变的关键自然因素。该结果对于内蒙古地区沙漠化防治及区域经济社会可持续发展具有重要的意义。

关键词:沙漠化; 脆弱性; VSD; 内蒙古

中图分类号: X144

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)01-0168-08

Assessment of the Land Desertification Vulnerability in Inner Mongolia During the Period 2000—2015

ZHAO Zhirong^{1,2}, XU Duanyang², ZHANG Xujiao¹, LU Zhouyangfan^{1,2}, ZHANG Xiaoyu²

(1.China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2.Institute of Geographic

Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Vulnerability is an important indicator for regional ecology and environment assessment. Based on the VSD (vulnerability scoping diagram) framework, an indicator system of desertification vulnerability consisting of 17 natural and social economic factors was constructed to assess the evolutionary trend, identify important influencing factors, and propose strategies to control desertification in Inner Mongolia from 2000 to 2015. The results show that: (1) both exposure and sensitivity of desertification in Inner Mongolia showed significant spatial heterogeneity, the area experiencing the significant increase in desertification exposure mainly concentrated in the southwestern part, while the regions with obviously increasing trend of desertification sensitivity were mainly located in the central of Inner Mongolia; and the desertification adaptability of the whole region showed a stable increasing trend; (2) the desertification vulnerability of Inner Mongolia showed a spatial pattern of ‘lower-northeast and higher-southwest’; the regions with significant increasing trend of desertification vulnerability concentrated in the middle of the Urad Houqi and Bayan Nur, which were mainly induced by the increasing trend of exposure; (3) the adaptability improvement induced by economic development was the main reason for the reduction of desertification vulnerability in Inner Mongolia since 2000, and vegetation, wind erosion and dry-wet index were the key natural factors on the evolution of desertification vulnerability. The results of this research exhibited the great significance for desertification control and sustainable development of regional economy and society.

Keywords: desertification; vulnerability; vulnerability scoping diagram; Inner Mongolia

收稿日期: 2019-02-19

修回日期: 2019-03-22

资助项目:国家重点研发计划项目“荒漠化治理技术产业化政策机制体系研究”(2017YFC0506704); 内蒙古干旱荒漠区特色沙生植物的开发潜力研究(2016YFC0501002); 国家自然科学基金“2030”土地退化零增长“目标下我国沙漠化防治的空间布局与成本估算”(71573245)

第一作者:赵志荣(1994—), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统与遥感技术应用研究。E-mail: 973077103@qq.com

通信作者:许端阳(1983—), 男, 河南洛阳人, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化与沙漠化、科技政策与管理等的研究。E-mail: xudy@igsnr.ac.cn

沙漠化是干旱、半干旱及部分半湿润地区由于人地关系不相协调所造成的以风沙活动为主要标志的土地退化^[1],是区域经济社会发展和生态环境脆弱的重要特征之一^[2];具体表现为可供农牧的土地面积减少、植被覆盖度及生物量减少、土地生产能力退化、作物单位面积产量降低及引发的贫困、社会动荡等问题,严重限制了人类福祉的提升^[3]。自然条件(干旱、土壤类型、植被等)和社会经济条件(人口、放牧、人均收入等)共同影响土地沙漠化的演化过程,导致区域沙漠化—社会—经济复合系统十分脆弱,并在空间上呈现典型的区域差异^[4];开展区域沙漠化脆弱性评估,识别其动态演化特征及关键影响因素,对于沙漠化防治及区域经济社会可持续发展具有重要的意义。

脆弱性是一个相对的、负面的、针对结果的描述词语^[5],作为一项有效描述一个系统受外界变化破坏难易程度的指标,在可持续发展中是不可或缺的^[6]。不同的研究领域对脆弱性的定义有所差异,自然灾害、气候变化等自然科学领域认为脆弱性是系统由于灾害、气候变化等不利影响而遭受损害的程度或可能性,侧重研究单一扰动所产生的多重影响,是气候的变率特征、幅度和变化速率及其暴露度、敏感性和适应性的函数^[7]。社会生态系统研究领域认为脆弱性是在自然或人文因素的不利扰动下,社会—生态系统的敏感程度和应对能力,是系统所受压力和自身敏感性相互作用的结果^[8]。近年来,随着人们对自然—社会—经济复合系统认识的不断拓展,脆弱性从单纯针对自然系统的固有脆弱性逐渐演化为针对自然和社会系统的意义更为广泛的综合概念,其研究应用逐渐变广,可见到社会—生态系统综合性脆弱性评价^[9-10]、基于气候变化的生态系统脆弱性和植被 NPP 脆弱性研究^[11]和针对土地退化及干旱条件的脆弱性研究^[12-13]等。脆弱性评估方法多样,不同的理论模型侧重点不同,如在全球气候变化背景下以可持续发展为角度的 AHV(airline house vulnerability)理论模型,针对灾害的 R-H(risk-hazards)模型, HOP(hazards of place)模型^[14]和 VSD 评价整合模型^[15]等。其中 VSD 评价整合模型基于“暴露—敏感—适应”的 3 个维度,用“方面层—指标层—参数层”逐级递进的方式组织、评价数据,结合暴露度、敏感性和适应能力的数学关系揭示自然与人文要素的双重影响,得到广泛应用。

土地沙漠化脆弱性是沙漠或沙地生态系统在特定时空尺度暴露在外界干扰时具有的反应程度和自我恢复能力^[16]。已有学者在土地沙漠化脆弱性方面进行了大量研究,例如,周利光等^[17]利用脆弱性评估模型计算了内蒙古锡林郭勒草原畜牧业对干旱的脆

弱性指数;鲁大铭等^[18]研究表明西北干旱地区脆弱性指数时空格局整体呈现北低南高、东低西高的格局,且经济脆弱性持续下降。在沙漠化脆弱性影响因素方面, Salvati 等^[19]研究认为人均收入、作物密度、灌溉和海拔高度是意大利土地沙漠化的关键指标; Ren^[20]对长江黄河源头流域沙漠化脆弱性研究表明,气温升高是该研究区脆弱性演变的主要自然因素,过度放牧和使用沼泽水是该研究区脆弱性演变的主要人为因素;郭兵等^[21]研究表明,2000—2013 年我国北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性呈减小趋势,受 GDP 密度、气温、降水等因子影响显著。总体来看,目前我国沙漠化脆弱性评估尚处起步阶段,不同研究对沙漠化土地内涵的认识及指标体系设计差异较大,一方面现有指标体系对区域沙漠化土地特征及社会经济因素考虑不充分,另一方面是对区域土地沙漠化脆弱性时空演变关键影响因素缺乏识别,且缺乏大尺度的土地沙漠化脆弱性评估实践,对区域沙漠化防治的支撑能力不强。

内蒙古自治区(以下简称“内蒙古”)地处我国北部边疆,沙漠及沙漠化土地广泛分布,经济社会发展及生态环境极其脆弱。据国家林业局第五次中国荒漠化和沙化状况公报^[22],内蒙古沙化土地面积达 40.79 万 km²,在我国的省份中位列第二,沙漠化防治形势依然十分严峻。本文以内蒙古为典型研究区,参考 VSD 脆弱性评估框架,构建土地沙漠化脆弱性评估指标体系,根据沙漠化脆弱性与暴露度、敏感性和适应能力之间的数学关系,对 2000—2015 年内蒙古土地沙漠化脆弱性进行评估,识别关键影响因素,以期对内蒙古沙漠化防治以及经济社会可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古位于 37°24′—53°23′N, 97°12′—126°04′E(图 1),跨中国东北、华北、西北三大地区,由东北向西南斜伸,呈狭长形,辖 12 盟市,102 旗县区,总面积 118.3 万 km²。气候以温带大陆性季风气候为主,年平均气温 -3~9℃,年总降水量 50~450 mm,年日照时数大于 2 700 h,蒸发量很大,干旱问题异常突出,全区干旱、半干旱区占总面积的 60%以上;全年大风天气大部分发生在春季,大风日数平均在 10~40 d,大部分地区沙尘暴日数为 5~20 d;土壤带基本呈东北—西南向排列,以栗钙土、棕钙土、风沙土等为主。在干旱多风沙天气和长期过度放牧等人类活动影响下,内蒙古土地沙漠化严重,包括巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、巴音温都尔沙漠、库布齐沙漠和乌兰布和沙漠,科尔沁沙地、毛乌素沙地、浑善

达克沙地和呼伦贝尔沙地^[23];2000 年以来,“三北”防护林建设、京津风沙源治理、退耕还林、天然林保护等一系列生态工程的实施使得研究区土地沙漠化得到控制、生态环境好转,但国家林业局第五次中国荒漠化和沙化状况公报显示内蒙古荒漠化和沙化土地面积仍占土地总面积的 50%和 30%以上,研究区生态环境脆弱,沙漠化防治任务艰巨。

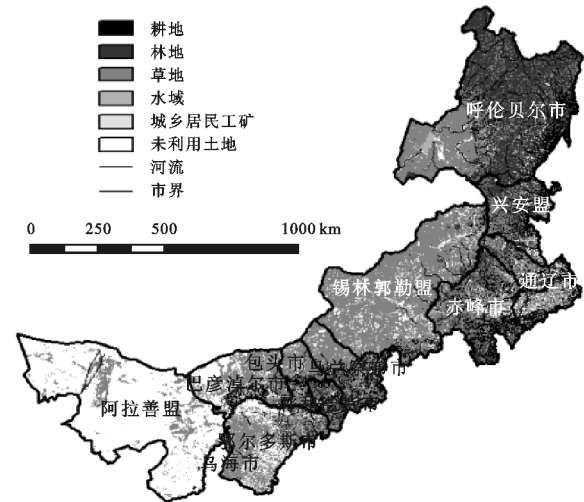


图 1 研究区范围及土地利用基本情况

1.2 数据收集

本研究所使用数据包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、气候、土地利用、土壤、植被以及经济社会数据等。NDVI 为 GIMMS NDVI3g V1.0 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 Inventor Modeling and Monitoring group, GIMMS)发布的最新版全球植被指数变化数据;气象数据为国家气象科学数据共享服务平台下载的国家台站的风速、降雨、温度等月值数据,采用反距离权重法(IDW)进行插值;土地利用数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台;水资源数据来源于内蒙古水资源公报;土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心;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。为了便于统计分析,

同时考虑到所有数据中的最低分辨率,本研究将所有数据重采样为 8 km×8 km 的栅格数据。

1.3 方法

1.3.1 沙漠化脆弱性评估指标体系 VSD 脆弱性评价框架将脆弱性分解为暴露性、敏感性和适应能力 3 个维度,暴露度包含干旱、人类活动等指标,敏感性包含植被、土壤、经济等因素,适应能力包含技术、经济等指标^[9,15]。本文参考 VSD 脆弱性评价框架逐级递进、细化评价指标和数据,结合土地沙漠化的影响因素以及研究区实际情况,构建沙漠化脆弱性评估指标体系。基于前人研究以及专家知识,利用层次分析法,按照目标层、准则层和指标层建立层次结构,构建判断矩阵评定各层次中各有关因素相对重要性,进行层次单排序来确定各因素重要性次序的权重值,利用 ArcGIS 栅格计算器对各项指标进行加权求和得到各维度的空间分布图层,根据 3 个维度的关系(公式 1)计算得到沙漠化脆弱性评估结果。

V=E+S-A (1)

式中:V 为脆弱性;E 为暴露度;S 为敏感性;A 为适应能力。

沙漠化暴露度是沙漠化系统暴露于外界压力或风险干扰与胁迫的程度,主要指气候变量及人类活动的干扰^[11,23],包括干湿指数、风蚀气候侵蚀力、人口密度、放牧密度和未利用地比重 5 个指标(表 1),均与沙漠化暴露度呈正相关,即暴露度随着各指标数值增加而升高。干湿指数综合了降雨、气温、辐射等多个气候要素,是表征一个地区干湿程度及对植被生长影响的重要指标,风蚀气候侵蚀力是影响土地沙漠化的重要外部营力^[24],二者分别从地表干湿条件和风蚀程度表征土地沙漠化暴露度高低;内蒙古地区农村人口比重较高,种植业和畜牧业是其主要的经营活动,人口的增多和畜牧量的增加会加剧土地退化,因此用人口密度和放牧密度代表人类活动对土地沙漠化暴露度的影响;未利用土地比重是在自然环境的限制下,人类活动未开发利用的土地数量,未利用土地比重越高土地沙漠化暴露度越高。

表 1 沙漠化暴露度指标体系

维度	编号	指标	单位	权重	性质	指标说明与计算
暴露度	E ₁	干湿指数	mm/mm	0.271	+	地区潜在蒸散量与降水量的比值(公式 2)
	E ₂	风蚀侵蚀力	—	0.359	+	采用联合国粮农组织 ^[24] 提出的风蚀气候因子计算公式(公式 3,4)
	E ₃	人口密度	人/km ²	0.085	+	人口数量与县域行政面积之比
	E ₄	放牧密度	只/km ²	0.113	+	羊总数(牛、马等大牲畜按 5 个羊单位进行换算)与县域行政面积之比
	E ₅	未利用地比重	%	0.172	+	未利用地面积与县域行政面积之比

$$E_1 = ET_0 / P$$

(2)

$$E_2 = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} u^3 \left(\frac{ET_{0i} - P_i}{ET_{0i}} \right) d$$

(3)

$$ET_0 = 0.19 (20 + T)^2 (1 - r)$$

(4)

式中: E_1 为干湿指数(mm/mm); ET_0 为最大潜在蒸散(mm); P 为降雨量(mm); E_2 为风蚀气候侵蚀力(无单位); \bar{u} 为 2 m 高处的月均风速(m/s); d 为月天数; T 为月平均气温; r 为月平均相对湿度。

沙漠化敏感性是指外界条件变化对系统的格局、过程和功能的影响程度^[9],包括植被覆盖度、土壤沙粒含量、粮食单产、单位面积水资源量、人均 GDP 和农村人

口比重 6 个指标(表 2)。植被覆盖度作为反映地表信息的重要参数,是影响土地荒漠化直接有效的指标,植被覆盖度越高沙漠化敏感性越低;土壤沙粒含量和单位面积粮食产量代表了土壤质地和土壤肥力,作为代表土壤退化的敏感性指标,土壤沙粒含量越高、单位面积粮食产量越低沙漠化敏感性越高;单位面积水资源量作为衡量某一地区的水量自我供给能力,不仅仅包括降水量还包括水库、江河湖泊和地下水,单位面积水资源量越高沙漠化敏感性越低;内蒙古地区人均 GDP 和农村人口比重是影响沙漠化敏感性的经济因素,人均 GDP 越高、农村人口比重越低沙漠化敏感性越低。

表 2 沙漠化敏感性指标体系

维度	编号	指标	单位	权重	性质	指标说明与计算
敏感性	S_1	植被覆盖度	%	0.320	—	使用像元二分模型 ^[25] 利用 NDVI 数据估算植被覆盖度(公式 5)
	S_2	土壤沙粒含量	%	0.211	+	来源于国家 1:100 万土壤类型数据
	S_3	单位面积水资源量	万 m ³ /km ²	0.125	—	县域水资源总量与总面积之比
	S_4	人均 GDP	元	0.078	—	—
	S_5	粮食单产	t/hm ²	0.167	—	粮食总产量与粮食种植面积之比
	S_6	农村人口比重	%	0.099	+	农村人口与总人口之比

$$S_1 = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min})$$

(5)

式中: S_1 为植被覆盖度(%); $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别为区域内最大和最小的 NDVI 值。

沙漠化适应能力是指沙漠系统适应气候变率和极端气候事件时减轻潜在损失、利用机会或应付气候变化

的能力,是系统对变化的环境做出的调整^[9,17],主要受社会经济因素影响,包括当年造林面积占总面积比重^[26]、社会固定资产投资密度、第三产业比重、农牧民人均可支配收入、农林牧渔业总产值和各类技术人员比重 6 个指标(表 3),各指标数值越高沙漠化适应能力越强。

表 3 沙漠化适应能力指标体系

维度	编号	指标	单位	权重	性质	指标说明与计算
适应能力	A_1	造林面积比重	%	0.166	+	当年造林总面积与县域行政面积之比
	A_2	社会固定资产投资密度	万元/km ²	0.231	+	社会固定资产投资额与行政面积之比
	A_3	第三产业比重	%	0.105	+	—
	A_4	农牧民纯收入	元	0.250	+	—
	A_5	农林牧渔业总产值	万元	0.174	+	—
	A_6	各类技术人员比重	%	0.074	+	每千人中各类技术人员人数

1.3.2 数据处理 将社会经济数据的各指标数据赋值到以县为单位的矢量图中进行空间化,然后再根据不同的指标字段值生成对应的栅格数据层。由于评价指标类型多样,单位不一,需要对各项指标数据进行标准化统一处理,本文采用常用的 min—max 标准化(min—max normalization)方法(公式 6,7)对数据进行无量纲化处理,在沙漠化脆弱性评价体系中,有些指标与维度呈正效应(暴露度、敏感性或适应能力随着相应指标数值的增大而升高),有些呈负效应(暴露度、敏感性或适应能力随着相应指标数值的增大而降低),根据各指标对相应维度的不同影响区别对待,最终将各指标数据整理为具有空间属性的归一化栅格数据。以 2000—2015 年脆弱性指数的均值的自然

间断点为标准,对研究区沙漠化脆弱性进行等级划分,由低到高分不为不脆弱、较低脆弱、中等脆弱、较高脆弱和高脆弱(表 4)。

正效应的指标处理方法为:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}$$

(6)

负效应的指标处理方法为:

$$X_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}$$

(7)

式中: X_{ij} 为标准化数据; x_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 项评价指标; $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别为第 j 项评价指标的最大值和最小值。经处理后的 $X_{ij} \in [0,1]$; X_{ij} 越趋于 1,说明其对相对应维度的贡献越大;反之,则越小。

表 4 沙漠化脆弱性分级

等级	不脆弱	较低脆弱	中等脆弱	较高脆弱	高脆弱
脆弱性范围	<0.27	0.27~0.41	0.41~0.53	0.53~0.65	>0.65

1.3.3 分析方法 利用线性回归模型分析栅格尺度上的内蒙古地区 2000—2015 年土地沙漠化脆弱性、暴露度、敏感性和适应能力的年际变化趋势,并通过 t 检验法($p<0.05$)对脆弱性以及构成脆弱性的 3 个维度进行显著性检验,判断其是否发生显著变化,来确定研究区沙漠化脆弱性演变趋势。为了进一步识别影响沙漠化脆弱性的关键因素,使用相关性系数分析各指标与沙漠化脆弱性评估结果的相关性,相关性系数绝对值越大则此指标对脆弱性结果影响越明显。若相关性系数大于 0 则表示正相关,此指标对脆弱性指数呈正向影响;若相关性系数小于 0 表示负相关,此指标对脆弱性指数呈反向影响。相关性系数绝对值大于 0.5 时,指标 y 与 x 具有强相关关系。

2 结果与分析

2.1 内蒙古土地沙漠化脆弱性空间分异

基于 2000—2015 年研究区各指标均值,计算出内蒙古沙漠化暴露度、敏感性、适应能力以及脆弱性空间分异情况(表 5)。研究区沙漠化暴露度大致呈现东北部低—西南部高的规律,而这也与内蒙古沙漠化土地、植被、降雨空间分布基本一致;其中,暴露度高的区域位于阿拉善盟、巴彦淖尔市西部和锡林郭勒盟西南部,且阿拉善盟中北部暴露度最高,内蒙古东北部及河套平原地区沙漠化暴露度均较低。在盟市层面,阿拉善盟沙漠化暴露度最高,兴安盟和呼伦贝尔市沙漠化暴露度最低。研究区沙漠化敏感性空间分布与暴露度基本相似,呈现由东北向西南逐渐升高的规律;沙漠化高敏感性区域集中分布在阿拉善盟额济纳旗、巴彦淖尔市北部、包头市北部和锡林郭勒盟西部。在盟市层面,沙漠化敏感性均值最高的是阿拉善盟、乌兰察布市和包头市,最低的是兴安盟和呼伦贝尔市。沙漠化适应能力主要受经济条件影响;随着近年来内蒙古社会经济的快速发展以及生态建设投入力度的不断加大,各盟市的土地沙漠化适应能力也逐渐增强,其中通辽市、呼和浩特市和乌海市沙漠化适应能力平均值最高,乌兰察布市最低。基于暴露度、敏感性、适应能力的沙漠化脆弱性呈东北部低—西南部高格局分布,沙漠化脆弱性较高的区域主要集中在内蒙古西部和中北部,较多分布在阿拉善盟、巴彦淖尔市、锡林郭勒盟和乌兰察布市。阿拉善盟沙漠化脆弱性指数平均值最高,呼伦贝尔市最低。

表 5 2000—2015 年内蒙古地区各盟市沙漠化暴露度、敏感性、适应能力和脆弱性均值

盟市	暴露度	敏感性	适应能力	脆弱性
阿拉善盟	0.25	0.58	0.13	0.70
巴彦淖尔市	0.12	0.55	0.12	0.56
乌兰察布市	0.07	0.58	0.10	0.54
锡林郭勒盟	0.08	0.56	0.12	0.53
包头市	0.07	0.58	0.14	0.51
鄂尔多斯市	0.09	0.55	0.14	0.49
乌海市	0.11	0.50	0.15	0.48
呼和浩特市	0.05	0.52	0.15	0.42
赤峰市	0.06	0.48	0.13	0.41
通辽市	0.08	0.46	0.16	0.38
兴安盟	0.04	0.42	0.11	0.34
呼伦贝尔市	0.03	0.37	0.14	0.26

2.2 内蒙古土地沙漠化脆弱性时空演变

2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年内蒙古土地沙漠化脆弱性分级结果见图 2。总体上看,2000—2015 年内蒙古土地沙漠化脆弱性明显降低,高脆弱性和不脆弱土地面积级变化尤其明显,土地沙漠化高脆弱性区域由 2000 年的 $4.28\times10^5\text{ km}^2$ 降低到 2015 年的 6.04 万 km^2 ,不脆弱土地面积由 2000 年的 5.52 万 km^2 升高到 2015 年的 $4.02\times10^5\text{ km}^2$ 。2015 年,内蒙古沙漠化脆弱性以不脆弱和较高脆弱为主,分别为 $4.02\times10^5\text{ km}^2$, $2.32\times10^5\text{ km}^2$,分别占研究区总面积的 36.61%和 21.16%,沙漠化高脆弱性区域最少,为 6.04 万 km^2 ,占 5.50%,集中分布在阿拉善盟中北部、巴彦淖尔市西北部和锡林郭勒盟西部。

2000—2015 年,内蒙古土地沙漠化脆弱性呈升高趋势的土地面积为 1.27 万 km^2 ,仅占研究区总面积 1.16%,其中显著升高的面积为 $1.73\times10^3\text{ km}^2$,占研究区总面积的 0.16%,沙漠化脆弱性显著升高的区域集中在巴彦淖尔市乌拉特后旗中部;沙漠化脆弱性呈降低趋势的土地面积为 $1.08\times10^6\text{ km}^2$,占研究区总面积的 98.84%,其中显著降低的面积为 $1.04\times10^6\text{ km}^2$,占研究区总面积 95.51%(图 3)。在沙漠化脆弱性升高区域,沙漠化暴露度以显著升高为主,占脆弱性升高区域总面积的 92.93%,而沙漠化敏感性变化不显著,说明沙漠化脆弱性升高主要由沙漠化暴露度升高造成;在沙漠化脆弱性降低区域,东北部脆弱性降低是沙漠化暴露度降低、敏感性降低和适应能力提高综合影响的结果,西南部在沙漠化暴露度显著增加的情况下沙漠化脆弱性仍显著降低,说明西南部脆弱性降低是沙漠化敏感性降低和沙漠化适应能力升高的结果。

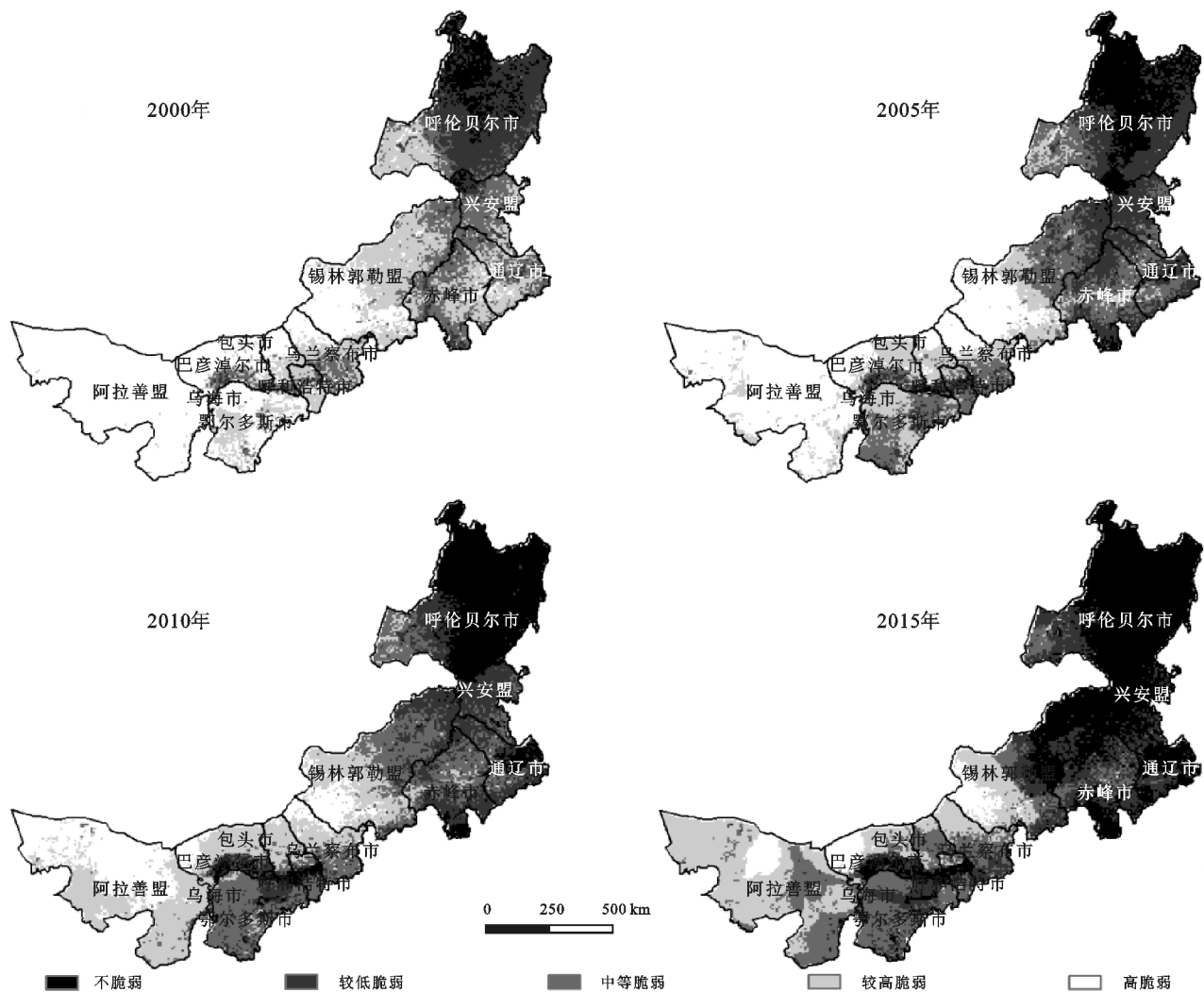


图 2 2000—2015 年内蒙古地区沙漠化脆弱性分级

2.3 土地沙漠化脆弱性变化关键驱动因素识别

基于相关性分析,可以看出 2000—2015 年各指标对内蒙古土地沙漠化脆弱性变化的影响不同且存在明显的空间分异。在暴露度方面,干湿指数和风蚀气候侵蚀力与脆弱性指数呈现较强的正相关性;在敏感性各指标中人均 GDP、单位面积粮食产量和植被覆盖度与脆弱性指数呈现较强的负相关性;在适应能力方面,农牧渔业总产值和农牧民纯收入与脆弱性指数呈现较强的负相关性。总体来看,由于气候、土壤和植被等一些自然条件的年际变化不是很明显,脆弱性降低与十多年来经济指标不断升高密切相关,整体来看沙漠化脆弱性与经济指标具有较强的负相关关系,相关系数绝对值为 0.5~1,与自然条件一些指标具有中等或较弱的相关性,且相关系数呈现出明显的空间异质性,其中与干湿指数的相关系数值最高为 0.40,其次为植被覆盖度和风蚀气候侵蚀力。

在脆弱性降低区域,大部分地区沙漠化脆弱性与农牧民纯收入、农林牧渔业总产值和人均 GDP 共 3 个指标均呈现较高的相关性,其中农牧民纯收入对沙

漠化脆弱性影响最大,影响面积为 $1.02 \times 10^6 \text{ km}^2$;在自然条件因素中,植被覆盖度因子分布广且分散,风蚀气候侵蚀力因子和干湿指数因子主要分布在内蒙古东北部和中部,其中干湿指数对沙漠化脆弱性影响最大,影响面积为 $4.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。在脆弱性升高区域,农村人口比重、农林牧渔业产值、三产比重和农牧民收入是主要的社会经济因素,其中农村人口比重对脆弱性升高的影响最明显,主要集中在巴彦淖尔市西部和锡林郭勒盟西部,其影响面积为 $2.56 \times 10^3 \text{ km}^2$,占脆弱性指数升高面积的 20.16%;单位面积水资源量和粮食单产是主要的自然因素,单位面积水量对脆弱性升高的影响更明显,影响面积为 $1.02 \times 10^3 \text{ km}^2$,占脆弱性指数升高面积的 8.06%。

3 讨论与结论

本文研究结果与前人研究保持较好的一致性,例如 2000—2013 年我国北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性呈减小趋势^[21];蒸发、降水、气温和人类活动是控制锡林郭勒盟暴露敏感性格局的关键因

素^[27]。本文探讨各指标对沙漠化脆弱性影响的空间差异,以识别内蒙古地区土地沙漠化脆弱性变化关键驱动因素,相对以往研究^[11-12],弥补了脆弱性框架未能清晰识别不同因素对脆弱性的影响的不足。从研究结果看,由于研究时段内经济指标快速升高,沙漠化脆弱性的适应能力不断提升,导致沙漠化脆弱性指数变化幅度较大,但沙漠化暴露度和敏感性呈现出较强的空间异质性,尤其需要关注沙漠化暴

露度和敏感性显著增加的区域,未来研究要考虑到实际经济发展走势和社会经济发展状况,进一步提升经济指标在时间序列上演变的可参照性;本研究未考虑相关的政策变量,如放牧禁令、公益林保护、人工草地修复、农田开垦和草方格固沙等生态项目和政策,今后考虑将生态政策的实施引入沙漠化脆弱性评估体系,以获得有关人为导致的荒漠化和恢复过程的更准确信息。

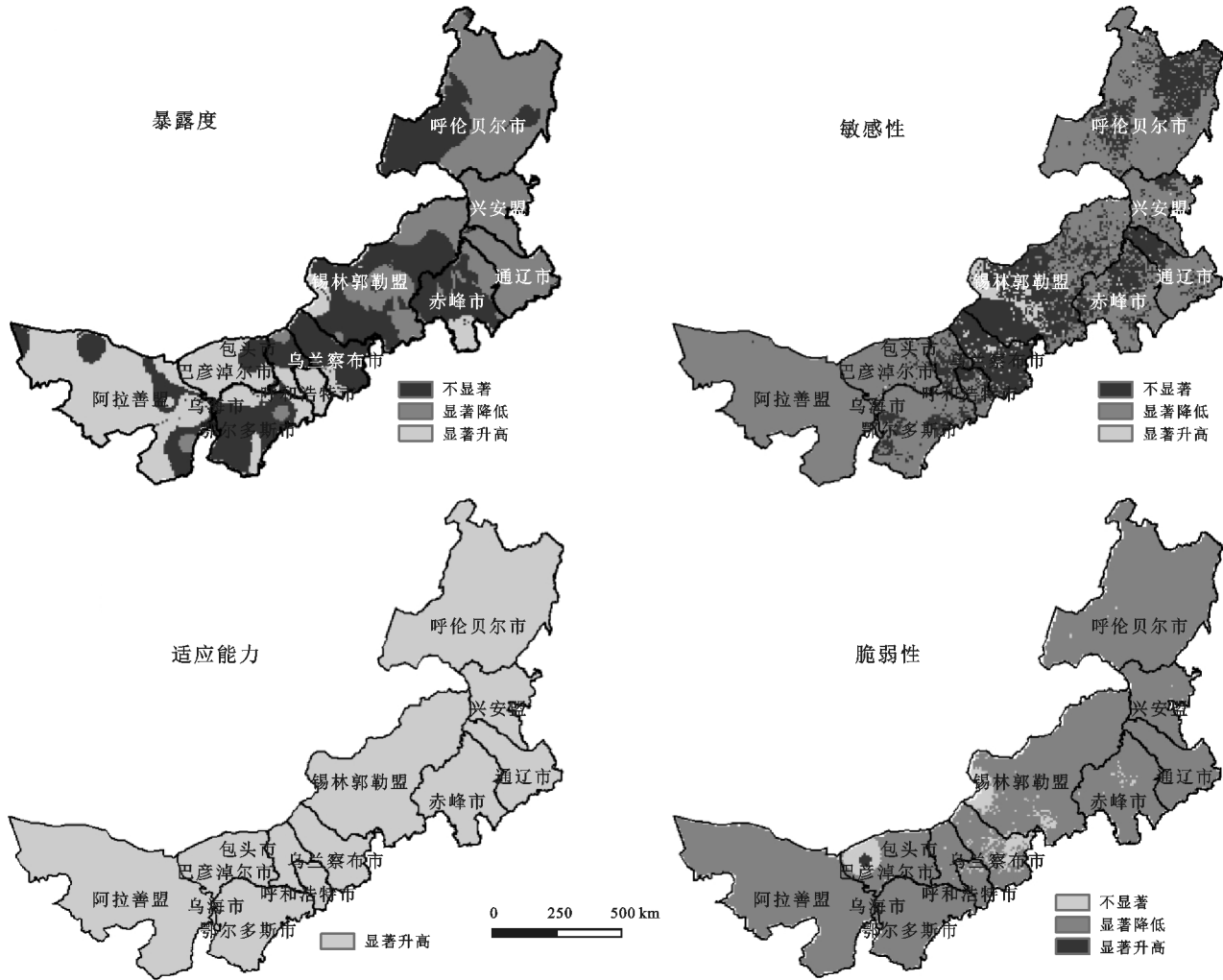


图3 内蒙古地区暴露度、敏感性、适应能力和脆弱性演变趋势

内蒙古沙漠化暴露度和敏感性演变均呈现出较强的空间异质性,暴露度显著增加区域主要集中在内蒙古西南部,敏感性显著增加区域位于内蒙古中部;沙漠化脆弱性适应能力不断提升。研究区沙漠化脆弱性呈现“东北部低—西南部高”的空间格局,沙漠化脆弱性较高的区域主要集中在内蒙古西部和中北部。

2000—2015年,绝大部分地区沙漠化脆弱性呈降低趋势,在巴彦淖尔市乌拉特后旗中部沙漠化脆弱性显著增加,且沙漠化脆弱性升高主要由沙漠化暴露度升高造成。2000年以来内蒙古地区经济发展及其

带来的适应能力提升是导致内蒙古土地沙漠化脆弱性普遍降低的重要原因,如乌兰察布市2015年农林牧渔业总产值229.77亿元较2000年的57.62亿元增长298.75%,2015年农牧民人均收入8 428元较2000年的2 003元增长320.77%,适应能力由2000年的0.059提升至2015年的0.172,即使在暴露度和敏感性均增加的情况下,乌兰察布市的沙漠化脆弱性仍降低了0.05。自然条件改善也是导致研究区脆弱性降低的重要因素;如2000年以来内蒙古植被覆盖度呈增加趋势,干湿指数呈降低趋势均为沙漠化脆弱性的降低做出了贡献。

综合来看,内蒙古东北部和河套地区为低暴露度—低敏感性—高适应能力区域,沙漠化脆弱性相对较低,应在实施好现有生态治理政策和工程基础上,做好沙漠化防治成果的巩固;内蒙古西部是沙漠化高暴露度—高敏感性—低适应能力区域,沙漠化脆弱性较高,须重点防护;建议在今后沙漠化治理中,重点关注鄂尔多斯、阿拉善等内蒙古西部地区的沙漠化防治工作,加大防沙治沙投入力度和适应能力建设,在严格执行禁牧和公益林保护政策基础上,引导京津风沙源治理工程布局向该区域倾斜,并根据区域水资源承载力积极发展沙区生态产业,在发展区域特色经济的同时引导民间力量参与沙漠化防治。

参考文献:

- [1] 王涛.我国沙漠化研究的若干问题:2.沙漠化的研究内容[J].中国沙漠,2003,23(5):477-482.
- [2] 卞建民,汤洁,林年丰.松嫩平原西南部土地碱质荒漠化预警研究[J].环境科学研究,2001,14(6):47-49.
- [3] Mouat D, Lancaster J, Wade T, et al. Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1997, 48(2):139-156.
- [4] 张希彪,张多勇,上官周平,等.1949—2013年甘肃省环县土地沙漠化驱动因素研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(1):130-135.
- [5] Downing T E. Progress in assessing famine vulnerability and drought risk[C]// Thomas Telford Publishing : Natural disasters: Protecting vulnerable communities; Proceedings of the Conference held in London, 1993.
- [6] Kelly P M, Adger W N. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation[J]. Climatic Change, 2000, 47(4):325-352.
- [7] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [8] 黄晓军,黄馨,崔彩兰,等.社会脆弱性概念、分析框架与评价方法[J].地理科学进展,2014,33(11):1512-1525.
- [9] 陈佳,杨新军,尹莎,等.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[J].地理学报,2016,71(7):1172-1188.
- [10] 李平星,樊杰.基于 VSD 模型的区域生态系统脆弱性评价:以广西西江经济带为例[J].自然资源学报,2014,29(5):779-788.
- [11] 苑全治,吴绍洪,戴尔阜,等.历史及未来气候变化下中国潜在植被 NPP 的脆弱性研究(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2):131-142.
- [12] 张龙生,李萍,张建旗.甘肃省生态环境脆弱性及其主要影响因素分析[J].中国农业资源与区划,2013,34(3):55-59.
- [13] Liu X, Wang Y, Peng J, et al. Assessing vulnerability to drought based on exposure, sensitivity and adaptive capacity: A case study in middle Inner Mongolia of China[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(1):13-25.
- [14] 黄建毅,刘毅,马丽,等.国外脆弱性理论模型与评估框架研究评述[J].地域研究与开发,2012,31(5):1-5.
- [15] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram[J]. Global Environmental Change, 2007, 17(3/4):0-485.
- [16] 任小玢,胡光印,董治宝.沙漠化脆弱性的概念与评价[J].中国沙漠,2015,35(1):40-50.
- [17] 周利光,杜凤莲,张雪峰,等.草原畜牧业对干旱的脆弱性评估:以内蒙古锡林郭勒草原为例[J].生态学杂志,2014,33(1):259-268.
- [18] 鲁大铭,石育中,李文龙,等.西北地区县域脆弱性时空格局演变[J].地理科学进展,2017,36(4):404-415.
- [19] Salvati, Luca. A socioeconomic profile of vulnerable land to desertification in Italy[J]. Science of the Total Environment, 2014, 466:287-299.
- [20] Ren X, Dong Z, Hu G, et al. A GIS-based assessment of vulnerability to aeolian desertification in the source areas of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Remote Sens, 2016, 8(8), 626, <https://doi.org/10.3390/rs8080626>.
- [21] 郭兵,孔维华,韩芳,等.北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性变化遥感监测及其驱动机制分析[J].热带亚热带植物学报,2018,26(1):1-12.
- [22] 国家林业局.第五次全国沙漠化和沙化土地监测情况[R].中国林业网,2015.
- [23] 刘昕.内蒙古的沙漠和沙地[J].内蒙古林业,2017(10):26-28.
- [24] 董玉祥,康国定.中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].水土保持学报,1994,8(3):1-7.
- [25] 马中刚,孙华,王广兴,等.基于 Landsat 8-OLI 的荒漠化地区植被覆盖度反演模型研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(9):12-18,141.
- [26] 李鹏山.农田系统生态综合评价及功能权衡分析研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [27] 徐广才,康慕谊, Metzger M, 等.锡林郭勒盟生态脆弱性[J].生态学报,2012,32(5):1643-1653.