

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

郭兵^{1,2,3,4,5}, 孔维华^{3*}, 韩芳³, 王军军⁶, 姜琳³, 逯跃锋³

(1. 东华理工大学江西省数字国土重点实验室, 南昌 330013; 2. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241; 3. 山东理工大学建筑工程学院, 山东 淄博 255000; 4. 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室, 武汉 433079; 5. 区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 武汉 430062; 6. 威海市城市规划技术服务中心有限公司, 山东 威海 264200)

摘要: 针对研究区的生态环境特征(风力侵蚀、沙漠化、盐渍化严重、水力侵蚀严重), 引入了大尺度景观格局指数(香农均匀性指数和蔓延度指数)和极端气候指数(极端高温日数、极端低温日数和极端降雨日数), 构建了北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性评价体系, 进而分析和探讨了该地区近 13 年的生态脆弱性时空变化格局和驱动机制。结果表明, 北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性总体上属于中度脆弱状态, 呈现自西向东递减的趋势。2000-2013 年, 北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性呈现减小趋势。近 13 年北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性时空变化格局受 GDP 密度、气温、降水、地形等因子影响显著。这些为北方半干旱荒漠草原生态区的生态环境修复及保护提供重要的科学支撑。

关键词: 生态脆弱性; 时空格局; 盐渍化; 沙漠化; 驱动机制

doi: 10.11926/jtsb.3749

Dynamic Monitoring of Ecological Vulnerability in the Semi-arid Desert and Steppe Ecological Zone of Northern China Based on RS and Its Driving Mechanism Analysis

GUO Bing^{1,2,3,4,5}, KONG Wei-hua^{3*}, HAN Fang³, WANG Jun-jun⁶, JIANG Lin³, LU Yue-feng³

(1. Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. School of Civil Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 4. Key Laboratory for National Geographic Census and Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan 433079, China; 5. Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response (Hubei University), Wuhan 430062, China; 6. Weihai City Planning Technology Service Center, Weihai 264200, Shandong, China)

Abstract: Considering the unique geographical conditions (serious soil wind erosion, salinization, desertification and soil water erosion) and extreme climate index (extreme high/low temperature days and extreme precipitation days) in the semi-arid desert and steppe ecological zone of northern China, an evaluation system for the ecological vulnerability was established by introducing the large-scale landscape pattern indexes (Shannon uniformity index and contagion index). Then, the spatial and temporal changes in the ecological vulnerability during the last 13

收稿日期: 2017-04-10

接受日期: 2017-06-15

基金项目: 东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放研究基金项目(DLLJ201709); 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室开放基金项目(KLGIS2017A02); 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目(2016NGCM02); 区域开发与环境影响湖北省重点实验室开放基金项目(2017(B)003); 山东理工大学博士科研启动基金项目(4041/416027)资助

This work is supported by the Open Fund of Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology (Grant No. DLLJ201709), the Open Fund of Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University (Grant No. KLGIS2017A02), the Open Fund of Key Laboratory for National Geographic Census and Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation (Grant No. 2016NGCM02), the Project of Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response (Hubei University) (Grant No. 2017(B)003), and the Initial Scientific Research Fund of Doctor in Shandong University of Technology (Grant No. 4041/416027).

作者简介: 郭兵(1987~), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为生态环境遥感与灾害遥感。E-mail: guobingjl@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: kongwhsdg@163.com

years were analyzed and discussed. The results showed that the ecological vulnerability over the semi-arid desert and steppe ecological zone of northern China belonged to moderate vulnerability, and showed a decreasing trend from west to east. During 2000–2013, there was a decreasing change trend in ecological vulnerability. In the last 13 years, the temporal and spatial patterns of ecological vulnerability of the semi-arid desert and steppe ecological zone of northern China were significantly affected by GDP density, temperature, precipitation and topography factors. All of these would provide scientific supports for environmental modification and protection in the semi-arid desert and steppe ecological zone of northern China.

Key words: Ecological vulnerability; Temporal and spatial patterns; Salinization; Desertification; Driving mechanism

生态系统是构成陆地生态圈的最基本的组成单元之一,是维持社会经济可持续健康发展的重要保证^[1]。20 世纪以来,全球气候变暖日益加剧,随之而来的生物多样性丧失、极端天气事件频发、环境退化、海平面上升对人类的生存和社会经济的可持续发展造成了极大威胁^[2-4]。生态脆弱性研究作为全球环境变化及可持续性科学领域重要的分析工具,已经被许多国际性科学计划和机构提上了研究日程,成为生态环境和全球变化等学科领域关注的热点问题^[5]。生态脆弱性的研究,不仅能为脆弱生态区的可持续发展和生态修复提供决策支持,而且为非脆弱生态区的生态系统保护提供很大程度的借鉴作用和科学依据^[6]。通过对区域生态系统的现状以及在外环境胁迫下可能发生的趋势变化进行分析,生态脆弱性研究能够一定程度的掌握脆弱生态系统的成因与变化机制及其相应的区域特点,进而做出生态脆弱性评价及分级最终为因地制宜地环境改造和建设各种生态环境恢复工程提供科学、合理的依据^[7-9]。

在全球气候变化和人类活动双重胁迫下,北方半干旱荒漠草原生态区的生态环境正在发生深刻变化,干旱频发,导致沙漠化、盐渍化急剧发展和植被退化等^[10]。针对北方干旱半干旱不同脆弱生态系统已开展大量的研究,高雅等^[11]构建了内蒙古平庄西露天煤矿区土壤生态系统评价体系,分析了矿区主要景观单元的土壤理化性质与土壤线虫群落结构特征,并对生态脆弱性时空变化分布规律进行了研究和探讨;李佳^[12]基于生态-经济-社会耦合模型,运用生态旅游双向责任制度,从生态、社会、经济 3 个方向选取指标构建了评价体系,全面剖析和研究了三江源地区的生态脆弱性;周岩等^[13]首先分析了土地利用变化,选取了山区平原过渡区生态环境敏感因子,建立了辉南县生态脆弱性评价体系,

对研究区生态环境脆弱性时空变化进行分析和探讨;罗传秀等基于 GIS 从地形、气候、人文、地质及生态政策等方面构建了指标体系,采用 AHP 法确定了每个指标的权重并建立了生态脆弱性数据库^[14];荆玉平等结合 RS 与 GIS 技术对内蒙古自治区奈曼旗近 25 年来的土地利用变化进行了分析,并结合景观指数和土地利用数据,构建了生态脆弱性综合指数模型,进而对研究区进行了生态脆弱性评价^[15]。不同学者针对不同的研究区和研究尺度所构建的脆弱性评价体系相差较大,因此,针对北方半干旱荒漠草原生态区的脆弱生态系统尚缺少一个系统、规范的评价体系。

本研究针对北方半干旱荒漠草原生态区特殊的生态环境和地理国情(沙漠化、盐渍化、水力侵蚀和风力侵蚀化严重),引入了大尺度景观格局指数和极端气候指数,构建了研究区生态脆弱性遥感评价体系,并分析和探讨了该地区 2000–2013 年的脆弱性时空变化格局及其驱动机制,为研究区后续的生态脆弱性研究提供重要参考。

1 研究区和数据源

1.1 研究区概况

北方半干旱荒漠草原生态区东起大兴安岭西麓,西至陕北、鄂尔多斯高原,主要包括内蒙古中东部、山西和陕西省的北部、吉林及黑龙江省的西部,是从农耕区向草原牧区、丘陵平原地区向高原地区、从半湿润地区向半干旱地区的过渡地带^[5](图 1)。该地区位于 400 mm 降水线附近,属于典型的半干旱气候,其主要的植被类型为草原、草甸^[6]。北方农牧交错带是受到荒漠化威胁最为严重的地区之一,该地区也是东部生态环境重要的保护屏障,同时又是农、牧区的桥梁和纽带^[5]。由于该地

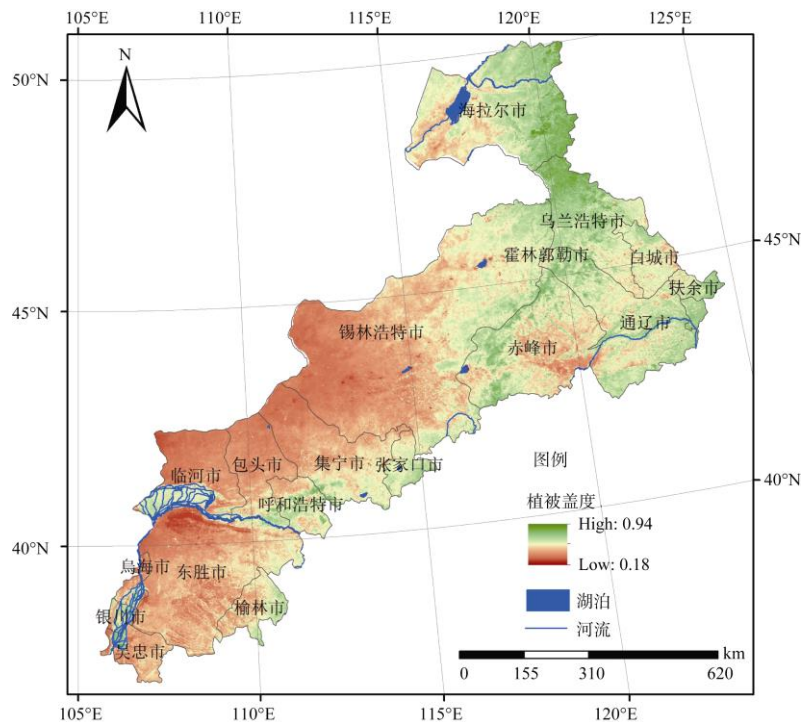


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the studied area

带地表物质结构松散、干旱多风、土壤盐渍化显著、土壤侵蚀强烈、蒸发剧烈等自然原因,再加上人类活动的长期影响,草场过度放牧、毁林(草)开荒、陡坡耕作,造成了该区域生态脆弱性增大,生态环境敏感性较高,特别是冬季,该地区受蒙古-西伯利亚寒流的影响,多大风,加之植被覆盖较低,风力侵蚀尤其严重^[6]。

1.2 指标介绍

本研究根据北方半干旱荒漠草原生态区的生态环境特征,结合《国家主体功能区规划实施方案》、《生态环境状况评价技术规范(试行)》以及相关研究^[16-18],同时考虑到指标获取的可操作性和关联性,本文从水体、气候、植被、土壤和人文 5 个方面选取指标构建了评价体系(图 2)。

1.3 数据来源

土地利用遥感监测数据采用中国科学院遥感与数字地球研究所(2000 年、2005 年、2010 年)和国家自然资源和地理空间基础信息库项目办公室(2013 年)提供的中国土地利用遥感监测数据集($1 \text{ km}^2 \times 1 \text{ km}^2$)。NPP 数据来自 MOD17A3 产品,该数据集的时空间分辨率分别为 1 年和 1 km,可以

从 Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS)官方网站免费下载(<https://lpdaac.usgs.gov/products>)。GDP 公里格网数据(GDP 密度)来源于中国科学院遥感与数字地球研究所(2000、2005 和 2010 年)和国家自然资源和地理空间基础信息库项目办公室(2013 年),空间分辨率为 1 km。气象站点数据主要包括 20-20 时的降水量(0.1 mm)、平均风速(0.1 m s^{-1})、日照时数(0.1 h)、日最高气温(0.1°C)、日最低气温(0.1°C)、日平均气温(0.1°C)。来源于中国气象共享数据网。土壤数据(1:100 万),数据格式为 Grid,由中国科学院南京土壤研究所研制。90m DEM 数为 SRTM3 产品,由地理空间数据云网站免费下载,空间投影为 WGS-1984,社会、经济统计数据则主要来源于 2001-2014 年省级统计年鉴、中国县域经济年鉴、中国统计年鉴、中国农村统计年鉴以及中国区域统计年鉴等。

2 方法

2.1 综合指数法

当前针对生态环境脆弱性的研究多采用分级赋权重评价模型^[5,8],该方法对选取的各脆弱性评价

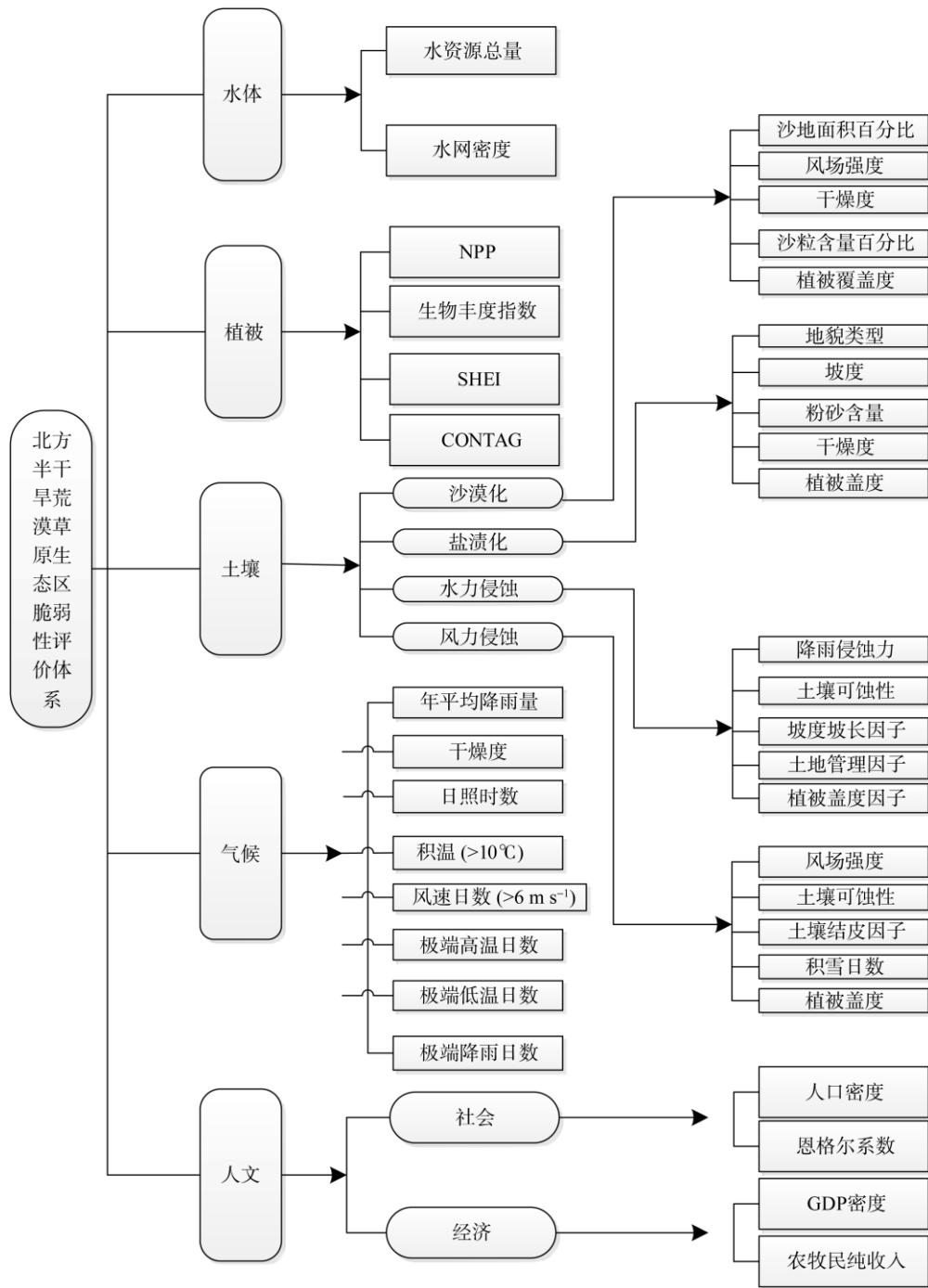


图 2 北方半干旱荒漠草原生态区脆弱性评价体系

Fig. 2 Evaluation system of vulnerability in semi-arid desert and grassland ecological zone of northern China

因子分等级用于评价，这种方法适用于大尺度的宏观研究，而且如果脆弱性评价因子选择科学合理的话，结果也是比较理想的。但是考虑到不同的分级方案对最终的脆弱性评价结果的影响较大，并且分级方案的主观性很强，为了避免指标分级过程中人为因素的过多干扰，本文采取一级指标分级赋权重

加权而二级指标归一化赋权重加权求和两种评价模型进行综合研究，以上两种评价模型的公式一致，即

$$EVI = \sum_{i=0}^n I_i \times \omega_i \tag{1}$$

其中，EVI (ecological vulnerability index)为生态脆

表 1 北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性指标介绍及生态学意义

Table 1 Evaluation indexes and ecological significance

一级指标 First level	二级指标 Second level	计算方法及数据 Methods and data	生态学意义 Ecological significance
水体 Water	水资源总量(-)、水网密度(-)	土地利用公里格网数据	水资源量和水网密度作为评价水体生态脆弱性的指标, 在生态系统中具有重要的生态支持功能。
植被 vegetation	NPP (-)、生物丰度指数(-)、SHEI (-)、CONTAG (-)	$SHEI = (H / H_{max}), H = -\lg_2 \sum_{i=1}^n (P_i^2)$ $CON = (1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m (P_i g_{ik} / \sum_{k=1}^m g_{ik}) \cdot (\ln P_i \cdot (g_{ik} / \sum_{k=1}^m g_{ik}))}{2 \ln m}) \times 100$ MOD17A3 产品数据 土地利用公里格网数据 环保部生物丰度指数模型 ^[3,12]	NPP 和生物多样性指数是整个生态系统正常运作的基础, 直接影响生态系统本身的功能, 因此植被净初级生产力在脆弱性评价中为逆向指标。
气候 Climate	年平均降雨量(-)、干燥度(+)、日照时数(-)、积温(>10 ℃)(-)、风速日数(>6 m s ⁻¹)(+)、极端高温日数(+)、极端低温日数(+)、极端降雨日数(+)	气象数据的累加计算 755 气象站点数	全球气候变化正在直接或间接地对自然和社会、人文生态系统产生影响。
土壤 Soil	沙漠化(+)、盐渍化(+)、风力侵蚀(+)、水力侵蚀(+)	沙漠化敏感性数据、盐渍化敏感性数据、土壤侵蚀数据	水力侵蚀、沙漠化、风力侵蚀、盐渍化造成地表切割破碎、自然植被退化、生物多样性破坏、土地质量下降、生态功能衰退等环境问题
人文 Human	社会(+)、经济(+)	人口密度公里格网数据、GDP 公里格网数据	人文因素一定程度上制约区域生态系统的健康状况

-: 逆向作用; +: 正向作用。

-: Reverse effect; +: Positive effect.

弱性指数; I_i 为第 i 个归一化指标(或分级指标); ω_i 为第 i 个指标权重; n 为指标个数。

归一化方法:

$$\text{正向指标 } I_i = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (2)$$

$$\text{逆向指标 } I_i = (I_{\max} - I) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (3)$$

其中, I_i 为脆弱性评价指标 I 的归一化值; I_{\min} 为 I 指标的最小值; I_{\max} 为 I 指标的最大值。 I_i 越大, 说明脆弱性指标对脆弱性影响越显著, 脆弱性值越大; 反之则越小。

2.2 气候倾向率

气候趋势系数主要反映各气候因子长期趋势变化的方向和程度, 其计算方法为 n 个时刻的气候因子与自然数 1,2,3,⋯, n 的相关系数^[18-19]。

$$r_{xt} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t}) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (4)$$

式中, r_{xt} 为趋势系数绝对值; X_i 为气候因子 i ; \bar{x} 为气候因子 i 的多年平均值; n 为时间序列数; \bar{t} 为

$(n+1)/2$, r_{xt} 越大则表明相应的气候因子年际变化越剧烈。

气象要素趋势变化的一次线性方程为:

$$\bar{p}_t = a_0 + a_1 t \quad t=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\frac{d\bar{x}_t}{dt} = a_1 \quad (6)$$

式中, a_1 为气候倾向率, 单位为某要素单位 $(10 \text{ a})^{-1}$ 。根据线性回归理论得:

$$a_1 = r_{xt}(\rho_x / \rho_t) \quad (7)$$

式中, ρ_x 是要素 x 的均方差, ρ_t 为数列 1, 2, ⋯, n 的均方差, 这样就可以从趋势系数 r_{xt} 计算出气候倾向率。

3 结果和分析

3.1 近 13 年生态脆弱性时空变化格局分析

根据北方半干旱荒漠草原生态区的自然、人文特征及主导生态环境问题, 参考国内外相关文献^[5-6,20], 确定了该地区的指标权重(表 2)。

利用 ArcGIS 10.2 的栅格计算器, 基于表 2 中北方半干旱荒漠草原生态区脆弱性评价体系中指

表 2 一级指标权重

Table 2 Index weight of first level

一级指标 First level	水体 Water	气候 Climate	植被 Vegetation	土壤 Soil	人文 Human	权重 Weight
水体 Water	1	2	1/2	1/2	2	0.18
气候 Climate	1/2	1	1/2	1/2	1/2	0.11
植被 Vegetation	2	2	1	1	2	0.28
土壤 Soil	2	2	1	1	3	0.30
人文 Human	1/2	2	1/2	1/3	1	0.13

表 3 一级指标脆弱性分区阈值

Table 3 Thresholds of first level index

	分级标准 Classification	微度脆弱 Slight erosion	轻度脆弱 Mild erosion	中度脆弱 Mild erosion	重度脆弱 Intensive erosion	极度脆弱 Severe erosion
非土壤 Non-soil	水体 Water					
	植被 Vegetation					
	气候 Climate	<0.53	0.53~0.60	0.60~0.63	0.63~0.68	>0.68
	人文 Human					
土壤 Soil	沙漠化 Desertification	<0.22	0.22~0.32	0.32~0.44	0.44~0.55	>0.55
	盐渍化 Salinization	<0.34	0.34~0.42	0.42~0.49	0.49~0.57	>0.57
	风力侵蚀 Wind erosion	<0.33	0.33~0.45	0.45~0.58	0.58~0.70	>0.70
	水力侵蚀 Water erosion	<200	200~2 500	2 500~5 000	5 000~8 000	>8 000

标权重值,利用综合指数法计算生态脆弱性指数(不包括土壤),根据该指数的数据直方图分布和标准差结合 ArcGIS10.2 的 Natural Breaks 工具,确定该指数分级阈值(表 3),得到生态脆弱性指数(不包括土壤)的分级结果,然后结合土壤脆弱性指数分级结果(由于土壤脆弱性计算中沙漠化、盐渍化、风力侵蚀、水力侵蚀计算指标的重复性较大,为了避免指标的重复计算导致的其影响因子权重被扩大,本研究对土壤指数的二级指标沙漠化、盐渍化、风力侵蚀、水力侵蚀的分级结果求最大值进而直接获取土壤脆弱性分级结果),最后利用栅格计算器计算获取了北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性值(EVI)。

参考北方半干旱区的生态环境特征及北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性值 EVI 直方图分布和标准差,将生态脆弱性值划分为 5 级:微度脆弱($EVI \leq 1.4$)、轻度脆弱($1.4 < EVI \leq 3.0$)、中度脆弱($3.0 < EVI \leq 3.7$)、重度脆弱($3.7 < EVI \leq 4.5$)、极度脆弱($EVI \geq 4.5$)。北方半干旱荒漠草原生态区 2000、2005、2010 和 2013 年的生态脆弱性分级如图 3。

图 3 为北方半干旱荒漠草原生态区 2000、2005、2010 和 2013 年的生态脆弱性空间分布格局。可见,北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性总体上呈现自西向东递减的趋势,其中银川平原总体生态脆弱性较低,但是局部地区脆弱性值较高,主要原

因是该地区河网密集,水资源丰富,适合植被生长,农业历史悠久,但是部分低洼地区排水不畅,土地盐渍化、沼泽化严重,再加上人类的过度放牧,草地严重退化,出现较严重的沙漠化。河套平原地区生态脆弱性较高,原因在于该地区降水较少,蒸发强度大,多风沙,加上人类活动强烈,极大地破坏了该地区的生态环境。土默特平原位于内蒙古中部,主要包括黄灌区和大黑河灌区,地表水和地下水资源丰富,矿化度低,适合农业发展,因此该地区总体生态系统状况较好。而大青山以北的内蒙古高原和浑善达克沙地的生态脆弱性较高,主要是该地区降水稀少,植被稀疏,多荒漠和荒漠草原分布,风沙大,河网密度系数小,沙漠化、盐渍化严重,因此该地区生态系统状况较差。

为了进一步分析近 13 年北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性变化,利用 ArcGIS 10.2 的栅格计算器对 2000-2005、2005-2010、2000-2010 和 2000-2013 年 4 期的生态脆弱性值进行计算,获取了脆弱性变化强度,并根据脆弱性动态变化值的直方图分布和标准差结合 ArcGIS10.2 的 Natural Breaks 工具,对 4 期脆弱性变化值(CI)进行了分级:重度减小区($CI \leq -1$),中度减小区($-1 < CI \leq -0.5$),稳定区($-0.5 < CI \leq 0.5$),中度增加区($0.5 < CI \leq 1$),重度增加区($CI > 1$)。结果表明,2000-2005 年(图 4),北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性稳定区面积

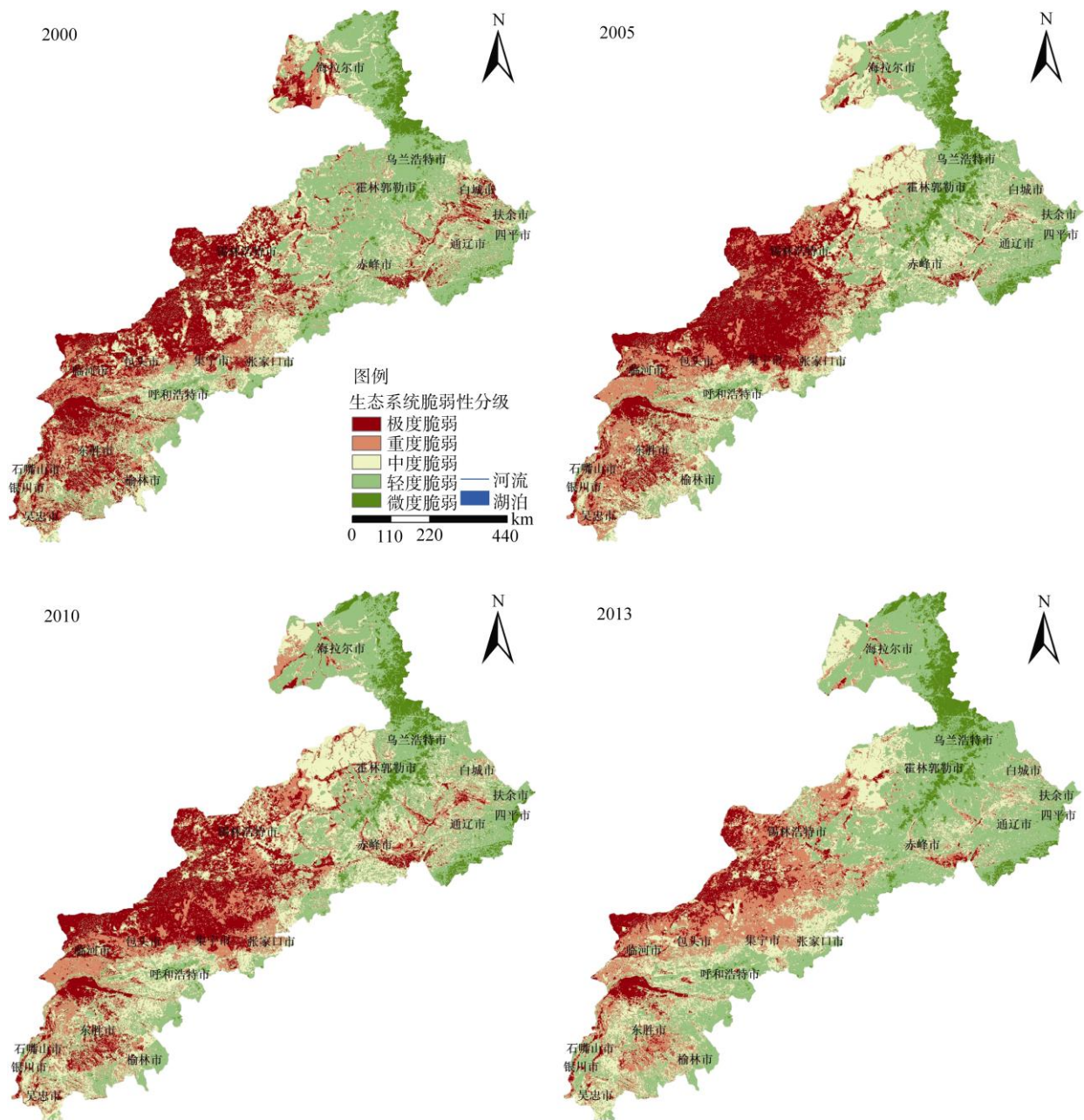


图 3 北方半干旱荒漠草原生态区 2000-2013 年生态脆弱性

Fig. 3 Ecological vulnerability of semi-arid desert and grassland ecological zone of northern China during 2000-2013

最广，主要分布于该地区中部；中度和重度增加区则主要分布于锡林浩特的南部和北部、包头市的中北部及集宁市，原因是该地区降水较少，植被稀疏，多为荒漠草原、荒漠，多风沙，风力侵蚀较严重；中度和重度减小区则主要集中于临河市、东胜市、海拉尔市、乌兰浩特市、白城市、通辽市及四平市，主要是由该区域的降水、河流密度、植被及地形决定。2005-2010 年，研究区的生态脆弱性总体上稳定，局部改善的格局，主要变现为：脆弱性

稳定区广泛分布；中度和重度增加区分布面积较小，主要集中于赤峰市；而脆弱性中度和重度减小区则主要分布于东胜市、临河市、银川市、海拉尔、白城市、扶余市及四平市等地区，以上脆弱性变化强度的空间布局主要受相关地区的气候、植被及人类活动影响。纵观 2010-2013 年，北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性总体上呈现减小趋势，稳定区分布最广，中度减小区则主要分布于该区的中部和东部，如集宁市、霍林郭勒市、张家口市、赤

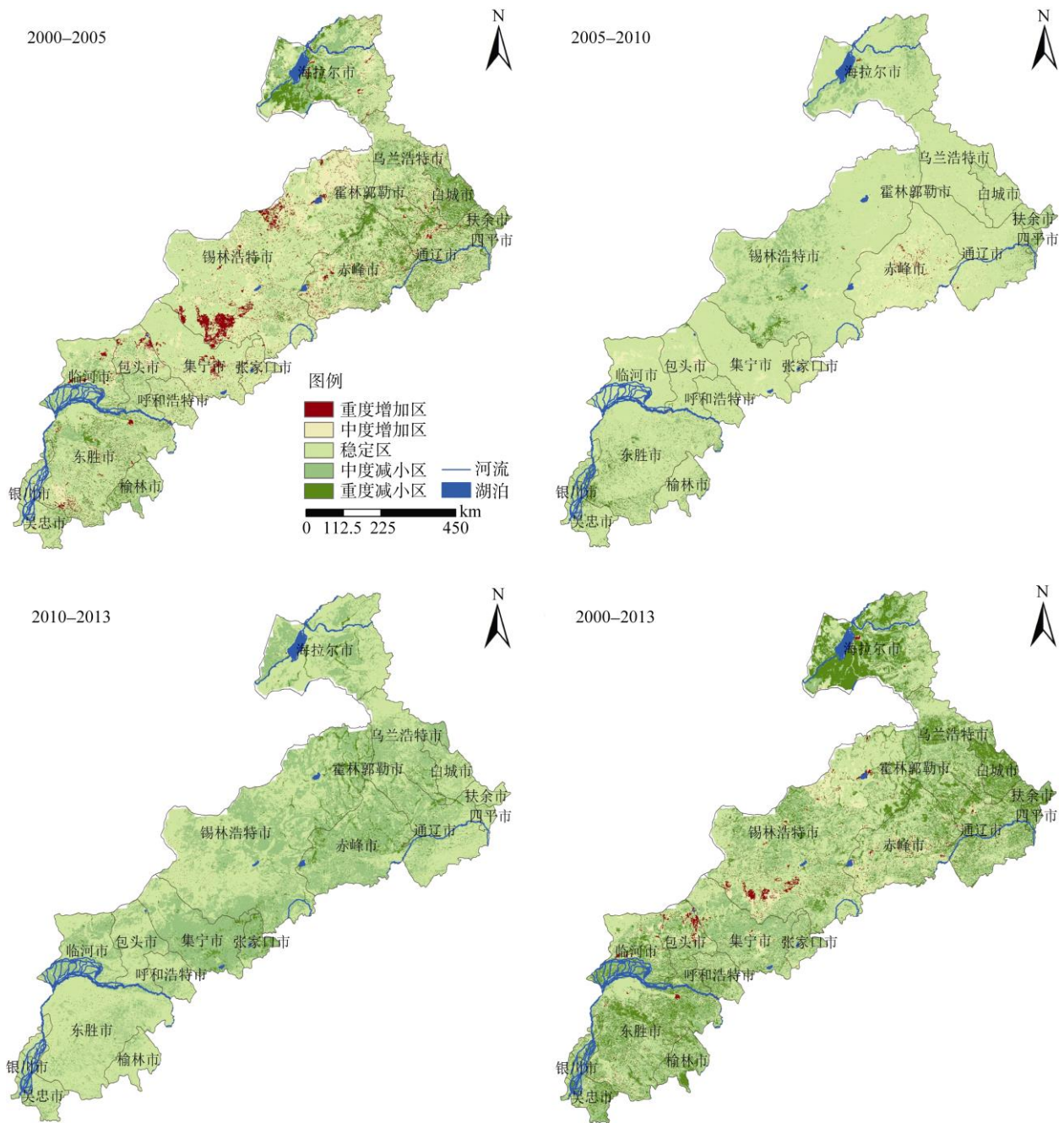


图 4 北方半干旱荒漠草原生态区 2000-2013 年生态脆弱性变化强度

Fig. 4 Change intensity of ecological vulnerability during 2000-2013

峰市、通辽市等。2000-2013 年，北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性呈现总体改善，局部恶化的趋势，脆弱性中度和重度减小区主要分布于西部和东部，而脆弱性中度和重度增加区则零散分布于包头市北部、锡林浩特市南部、赤峰市中部等地区。

3.2 生态脆弱性变化与地形因子的相关性分析

北方半干旱荒漠草原生态区东起大兴安岭，西

至阴山山脉，南起黄土高原，北至外蒙古高原。该地区地形主要为高原、丘陵和平原，加上该地区处于一级阶梯和二级阶梯的过渡带，因此该地区的生态环境受地形影响显著。

结果表明(图 5: A): 北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性平均值先随着海拔的升高而降低，在 800 m 高程带达到区间最小值，然后随着海拔的升高而增大，在 1 100 m 附近达到最大值。脆弱性

均值在 1 100~1 700 m 海拔带保持相对稳定,而在 1 700 m 之后则随着海拔的升高而降低。生态脆弱性标准差随海拔的变化表现出与脆弱性均值相似的规律。以上分布格局的主要原因是海拔较低的地区主要是位于东北平原与内蒙古高原过渡地带的科尔沁沙地以及河套平原,生态环境受盐渍化、沙漠化、水土流失等影响,生态系统状况属于中度脆弱;随着海拔的升高地貌类型逐渐由平原变为高原,其中呼伦贝尔高原平均海拔 800 m 左右,降水充沛,植被盖度较高,植被类型多为草地、灌木林地,生态脆弱性较好。在海拔 1 100~1 700 m 地带,主要分布着阿拉善高原、鄂尔多斯高原和内蒙古高原大部,

该地区深居内陆,降水稀少,植被稀疏,景观类型单一,沙漠化、风力侵蚀、盐渍化等灾害严重,加上受人为因素干扰,生态脆弱性较大;海拔 1 700 m 以上的地带主要分布阴山山脉、太行山北部,该地区植被类型多样、植被覆盖度较高,生态脆弱性较低。生态脆弱性变化强度则以 800、1 200、1 400 m 为分界点正负交替变化,在 800 m 以下的低海拔地区生态脆弱性呈现减小趋势,800~1 200 m 海拔带生态脆弱性呈增加趋势,1 200~1 400 m 海拔带的生态脆弱性呈轻微减小,>1 400 m 的地区生态脆弱性则表现为增加趋势,该分布格局主要受气温、降水以及人类活动的影响(图 5: B)。

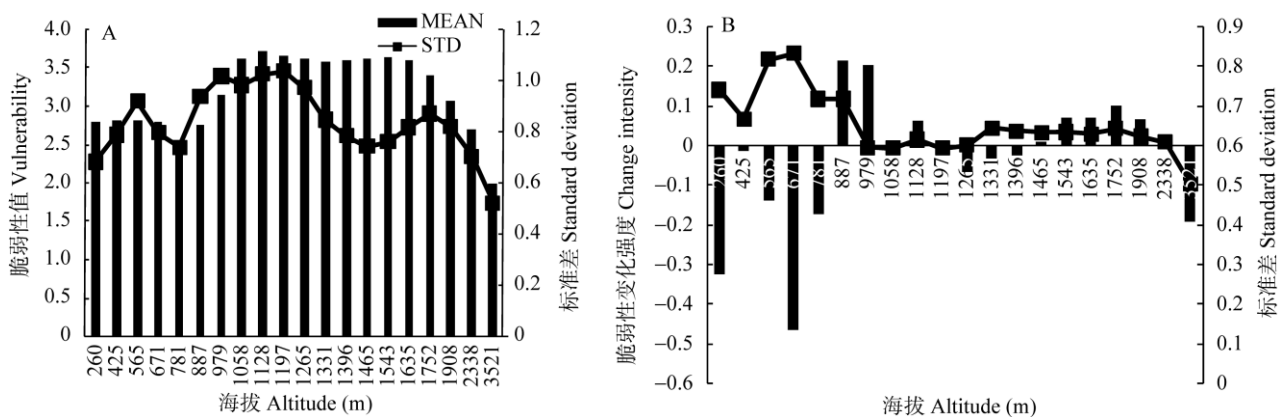


图 5 海拔对近 13 年平均脆弱性及脆弱性变化强度的影响

Fig. 5 Relations between altitude and average vulnerability and change intensity

3.3 生态脆弱性变化与气候因子的相关性分析

基于气象站点数据统计分析了气温和降水的气候倾向率与生态脆弱性及其变化强度的相关性。

从图 6: A 可见,气温气候倾向率与生态脆弱性值表现为正相关性,原因在于近几十年来,北方半干旱荒漠草原生态区的气温呈现上升趋势,气温升高的幅度越剧烈,土壤水分蒸发量越大,加上年降水的减小和年内降水变率大,造成相应地区水资源减小,地下水矿化度增大,土地沙漠化、盐渍化、干旱等灾害加剧。图 6: B 为生态脆弱性变化强度与气温气候倾向率的相关性,结果表明,当气温气候倾向率 $<0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 时,生态脆弱性为减小趋势,但是减小的强度逐渐降低,说明在该区间气温的增加对生态系统状况的改善产生积极的影响,这是因为气温的增加对热量资源的增加、植被的光合作用和生长期生长、喜热植被类型的生长区扩张产生影响;当 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}<$ 气温气候倾向率 $<0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$

时,生态脆弱性变化强度为正值并且呈现增加趋势,说明该区间气温的增加是该地区的生态脆弱性加速增大,该阶段气温的加速增加造成区域水资源枯竭、土地沙漠化、盐渍化加剧、沙尘暴和干旱频次增加等;当 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}<$ 气温气候倾向率 $<0.57\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 时,生态脆弱性变化强度为正值但是呈现减小趋势,说明生态脆弱性随着气温增加速度的增大,其加剧的幅度减小,该现象与相应地区气候状况、生态脆弱性状况等因素相关;当气温气候倾向率 $>0.57\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 时,生态脆弱性变化强度为负值,说明生态脆弱性随着气温增加速度的增大而减小,该现象与气温对区域生态系统的积极影响(积温等)相关。

图 6: C 为北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性多年平均值与降水气候倾向率的相关性,结果表明:当降水气候倾向率 $<0\text{ mm}\text{ (10 a)}^{-1}$,脆弱性值随着降水气候倾向率的增加而增大,当降水气候

倾向率 $>0 \text{ mm (10 a)}^{-1}$, 脆弱性值则随着降水增加幅度的增大而减小。这是因为北方半干旱地区的降水稀少, 水资源稀缺, 随着该地区降水增加速率的增大, 土壤水分增加, 地区植被覆盖得到改善, 风力侵蚀、盐渍化、旱灾等灾害的频次和强度减小, 因此生态脆弱性减小。图 6: D 为生态脆弱性变化强度与降水气候倾向率的相关性, 结果表明, 当降水气候倾向率 $<-5 \text{ mm (10 a)}^{-1}$, 生态脆弱性变化强度为正值并且强度增加, 说明生态脆弱性呈现增加趋势并且增加的强度呈增大趋势; 当 $-5 \text{ mm (10 a)}^{-1} <$ 降水气候倾向率 $<8 \text{ mm (10 a)}^{-1}$ 时, 生态脆弱性变化强度为正值但强度减小, 说明生态脆弱性呈现增大

趋势但增大的强度逐渐减小; 当降水气候倾向率 $>8 \text{ mm (10 a)}^{-1}$ 时, 生态脆弱性变化强度为负值且强度增加, 说明生态脆弱性减小趋势加剧。北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性变化强度与降水气候倾向率的相关性主要原因是总体上降水的增加对生态环境的改善产生积极的影响, 如土壤湿度、植被盖度、地表水资源、土壤表层结皮因子(有效抑制风力侵蚀)的增加, 但是考虑到气温呈现上升趋势, 蒸散比增加, 当降水增加速度较小时, 土壤水分仍然处于减小趋势, 因此在 $0 \text{ mm (10 a)}^{-1} <$ 降水气候倾向率 $<8 \text{ mm (10 a)}^{-1}$ 时, 北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性呈现增加趋势。

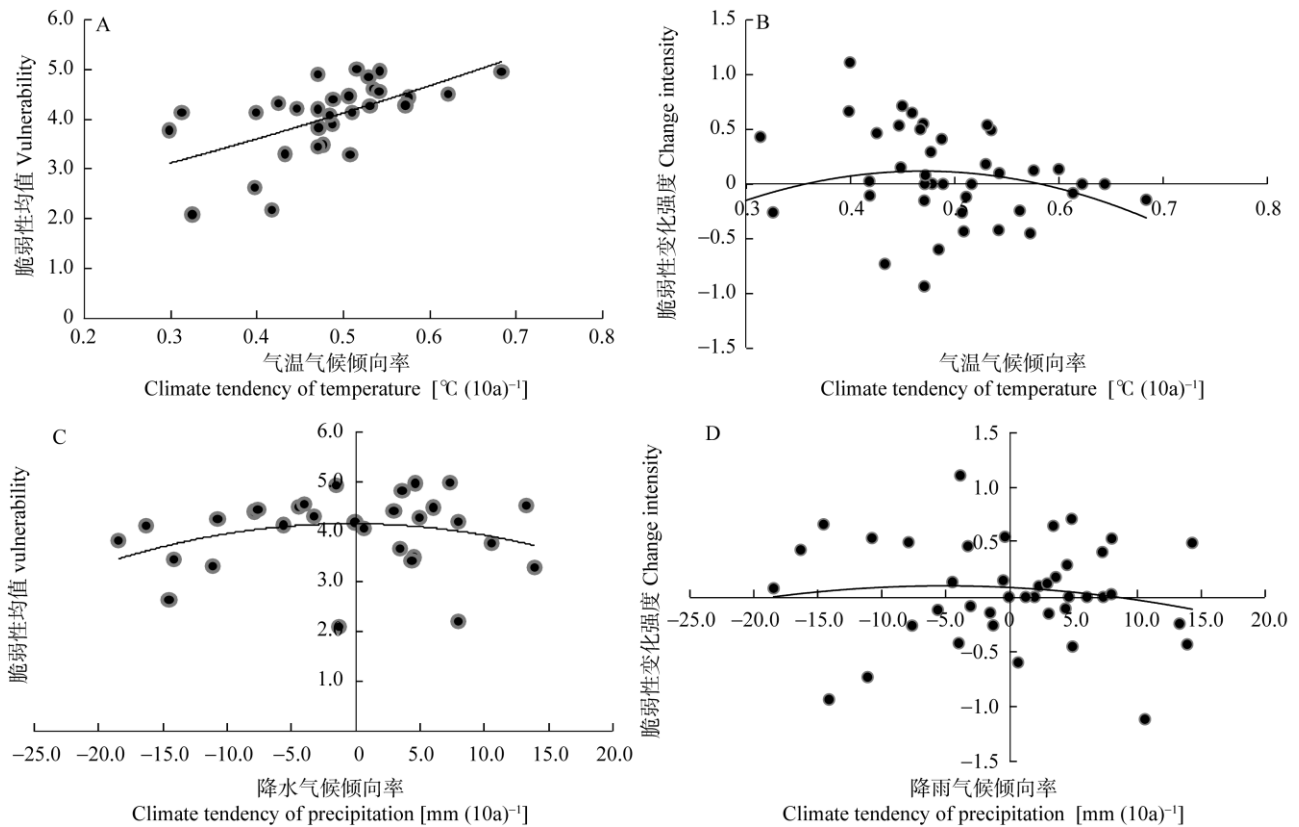


图 6 年均气温和降水气候倾向率与近 13 年平均脆弱性值和脆弱性变化强度的相关性

Fig. 6 Relations between temperature climate tendency rate and the average vulnerability and change intensity in last 13 years

3.4 生态脆弱性变化与社会经济的相关性分析

社会经济状况包括非常广泛和复杂的内容, 在一定程度上影响着生态系统状况及其变化, GDP 作为社会经济的一个重要指标, 能够反映地区经济实力, 与该地区的生态环境质量密切相关。

图 7 为近 13 年生态脆弱性平均值与国内生产总值密度(GDP 密度, 万元 km^{-2})的相关性, 结果表

明, 总体上两者的相关性趋势变化(曲线 c)可分为两个阶段: GDP 密度 <1000 和 GDP 密度 >1000 。在 GDP 密度 <1000 阶段, 变化曲线又分为 2 种情况: 曲线 a 和曲线 b。曲线 a 反映的是生态脆弱性随着 GDP 密度的增加而减小, 说明随着生态环境的改善, 能够为人类的生存和发展提供更多的资源, GDP 密度会随之增加; 曲线 b 则反映了生态脆弱性

值随着 GDP 密度的增加而增大, 说明了随着人类开发强度的增加, 对生态环境产生了极大的破坏, 因此生态脆弱性值会随之增加。当 GDP 密度 >1000 时, 生态脆弱性则随着 GDP 密度的增加而增加, 主要原因是人类的开发强度超出了生态环境承载能力和自我恢复能力, 人类活动对生态环境的破坏作用显著。

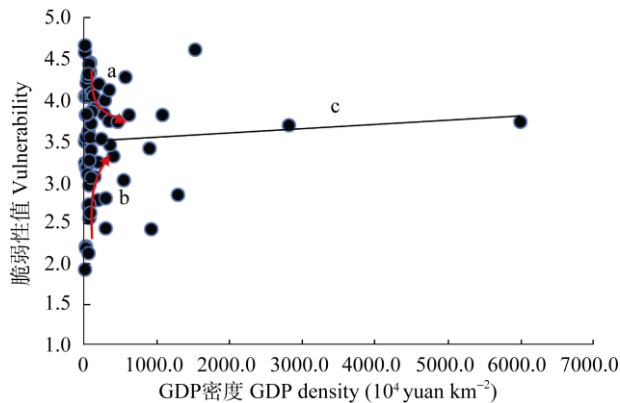


图 7 近 13 年 GDP 密度与平均脆弱性值的相关性

Fig. 7 Relations between GDP density of different industries and the average vulnerability

4 讨论与结论

全球气候变化和人类活动胁迫下北方半干旱荒漠草原区的生态系统正在发生深刻变化, 本研究充分考虑研究区生态环境特征, 引入极端气候因子(气候变暖)和大尺度景观格局指数(反映人类活动对生态景观格局的作用), 构建了北方半干旱荒漠草原区的生态脆弱性评价体系, 并对近 13 年生态脆弱性时空格局和驱动机制进行了分析和探讨。

(1) 近 13 年北方半干旱荒漠草原区的生态脆弱性总体上处于中度脆弱状态, 且总体上呈现自西向东递减的趋势, 这主要受来自太平洋的暖湿气流影响, 降水自东向西逐渐减小, 此外, 西部地区多沙漠分布, 主要有腾格里沙漠、毛乌素沙漠、乌兰布和沙漠以及浑善达克沙地, 该地区降水稀少, 蒸散量极大, 植被覆盖度较低, 多草原、荒漠, 物种多样性低, 再加上冬季受蒙古-西伯利亚高压的影响, 春冬季多大风, 风力侵蚀严重。而东部地区受太平洋气流影响显著, 降水充沛, 河流较多, 植被类型自东向西依次为乔木-灌木-草原, 种群结构多样, 生态环境状况较优。

(2) 2000–2013 年, 北方半干旱荒漠草原生态区生态脆弱性呈现减小趋势, 2000–2005、2005–2010 和 2010–2013 年 3 个阶段, 生态系统均表现出不同程度的减小, 以上脆弱性变化强度的空间布局主要受该地区的气候、植被及人类活动影响。

(3) 近 13 年北方半干旱荒漠草原生态区的生态脆弱性均值受自然因素影响显著, 如地形、气温、降水等, 且脆弱性变化强度与气温、降水的变化强度表现为显著的相关性, 其原因在于该生态区的生态系统状况受风力侵蚀、盐渍化、旱灾、沙漠化等影响较大, 随着全球气候变暖日益加剧, 该地区气温、降水发生了深刻的变化, 极大地改变了地区的水、热平衡, 对该生态区的主导生态环境问题产生了深刻影响, 进而改变了地区生态系统过程。

(4) 人类活动与生态脆弱性变化是相互制约和相互作用的, 随着生态环境的改善, 生态系统能够为人类的生存和发展提供更多的资源, 如水资源、耕地资源等, 人类开发强度随之增加; 随着人类开发强度的增加, 也一定程度地对区域生态环境产生了破坏, 因此生态脆弱性值会随之增加, 主要原因是人类的开发强度超出了生态环境承载能力和自我恢复能力, 人类活动对生态环境的破坏作用显著。

参考文献

- [1] HUANG F, LIU X N, ZHANG Y Z. GIS-based eco-environmental vulnerability evaluation in west Jilin Province [J]. *Sci Geo Sin*, 2003, 23(1): 95–100. doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2003.01.017.
黄方, 刘湘南, 张养贞. GIS 支持下的吉林省西部生态环境脆弱态势评价研究 [J]. *地理科学*, 2003, 23(1): 95–100. doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2003.01.017.
- [2] YOUNG O R, BERKHOUT F, GALLOPIN G C, et al. The globalization of socio-ecological systems: An agenda for scientific research [J]. *Glob Environ Chang*, 2006, 16(3): 304–316. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.004.
- [3] GALLOPIN G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity [J]. *Glob Environ Chang*, 2006, 16(3): 293–303. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004.
- [4] YAO Y B, ZHANG X Y, YANG J H. Quantitative assessment and subarea comment of fragile eco-environment in Gansu Province [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2007, 27(5): 120–126. doi: 10.3969/j.issn.1000-288X.2007.05.028.
姚玉璧, 张秀云, 杨金虎. 甘肃省脆弱生态环境定量评价及分区评述 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27(5): 120–126. doi: 10.3969/j.issn.

- 1000-288X.2007.05.028.
- [5] ZHOU Y, LI X Q, ZHAO J Z. Analysis of the correlation between the typical ecological fragile zones and poverty in China [J]. *Trans Beijing Insti Technol*, 2008, 28(3): 261-262.
周毅, 李旋旗, 赵景柱. 中国典型生态脆弱带与贫困相关性分析 [J]. *北京理工大学学报*, 2008, 28(3): 261-262.
- [6] XU G H. The Statement on the relation of environment system and climate system in drought area of inner land [J]. *Desert Oasis Meteo*, 2007, 1(1): 53-56. doi: 10.3969/j.issn.1002-0799.2007.01.013.
徐羹慧. 内陆干旱区生态环境系统与气候系统关系的分析评述 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2007, 1(1): 53-56. doi: 10.3969/j.issn.1002-0799.2007.01.013.
- [7] FÜSSEL H M. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research [J]. *Glob Environ Change*, 2007, 17(2): 155-167. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002.
- [8] ALASTAIR C, ROBERT J J, JIM M. Classification and evaluation of spider (Araneae) assemblages on environmentally sensitive areas in northern Ireland [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2004, 102(1): 29-40. doi: 10.1016/S0167-8809(03)00274-3.
- [9] LI S C, WU S H, DAI E F. Assessing the fragility of ecosystem using artificial neural network model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25(13): 621-626. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.03.032.
李双成, 吴绍洪, 戴尔阜. 生态系统响应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价 [J]. *生态学报*, 2005, 25(13): 621-626. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.03.032.
- [10] CARPENTER S R, MOONEY H A, AGARD J, et al. Science for managing ecosystem services: Beyond the millennium ecosystem assessment [J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2009, 106(5): 1305-1312. doi: 10.1073/pnas.0808772106
- [11] GAO Y, LU Z H, WEI Z K, et al. Ecological risk receptors analysis of Pingzhuang western open-cut coal mining area in Inner Mongolia [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(11): 2844-2854. doi: 10.5846/stxb201311062684.
高雅, 陆兆华, 魏振宽, 等. 露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例 [J]. *生态学报*, 2014, 34(11): 2844-2854. doi: 10.5846/stxb201311062684.
- [12] LI J. A study on the vulnerability of social-ecosystem based on tourism: A case study of Sanjiangyuan [J]. *Ground Water*, 2012, 34(2): 210-211, 215. doi: 10.3969/j.issn.1004-1184.2012.02.84t.
李佳. 基于旅游的社会-生态系统脆弱性研究——以三江源为例 [J]. *地下水*, 2012, 34(2): 210-211, 215. doi: 10.3969/j.issn.1004-1184.2012.02.84t.
- [13] ZHOU Y, ZHANG Y H, ZHAI Y J. Analysis of ecological vulnerability based on land-use changes in mountain plain transition zones [J]. *Terri Nat Resou Study*, 2013(6): 29-32. doi: 10.3969/j.issn.1003-7853.2013.06.011.
周岩, 张艳红, 翟羽娟. 基于土地利用变化的辉南县生态脆弱性时空变化分析 [J]. *国土与自然资源研究*, 2013(6): 29-32. doi: 10.3969/j.issn.1003-7853.2013.06.011.
- [14] LUO C X, PAN A D, QIAN H S. The assessment of ecosystem vulnerability to climate change of Xinjiang [J]. *Arid Environ Monit*, 2006, 20(1): 39-43. doi: 10.3969/j.issn.1007-1504.2006.01.011.
罗传秀, 潘安定, 千怀遂. 气候变化下的新疆生态环境脆弱性评价 [J]. *干旱环境监测*, 2006, 20(1): 39-43. doi: 10.3969/j.issn.1007-1504.2006.01.011.
- [15] JING Y P, ZHANG S W, LI Y. Ecological risk analysis of rural-urban ecotone based on landscape structure [J]. *Chin J Ecol*, 2008, 27(2): 229-234.
荆玉平, 张树文, 李颖. 基于景观结构的城乡交错带生态风险分析 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27(2): 229-234.
- [16] LITTELL J S, ONEIL E E, MCKENZIE D, et al. Forest ecosystems, disturbance, and climate change in Washington State, USA [J]. *Clim Change*, 2010, 102(1): 129-158. doi: 10.1007/s10584-010-9858-x.
- [17] RÖMER H, WILLROTH P, KAISER G, et al. Potential of remote sensing techniques for tsunami hazard and vulnerability analysis: A case study from Phang-Nga Province, Thailand [J]. *Nat Hazard Earth Syst Sci*, 2012, 12(6): 2103-2126. doi: 10.5194/nhess-12-2103-2012.
- [18] SHI Z S, CHEN L D, HAO J P, et al. The effects of land use change on environmental quality in the red soil hilly region, China: A case study in Xianning County [J]. *Environ Monit Assess*, 2009, 150(3): 295-306. doi: 10.1007/s10661-008-0231-8.
- [19] DI B F, YANG Z, AI N S, et al. Evaluation on degraded ecosystem in Jinshajiang Xerothermic Valley using RS and GIS: A case study of Yuanmou County in Yunnan [J]. *Sci Geo Sin*, 2005, 25(4): 484-489. doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2005.04.016.
第宝锋, 杨忠, 艾南山, 等. 基于 RS 与 GIS 的金沙江干热河谷区退化生态系统评价——以云南省元谋县为例 [J]. *地理科学*, 2005, 25(4): 484-489. doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2005.04.016.
- [20] EAKIN H, LUSERS A L. Assessing the vulnerability of social-environmental systems [J]. *Annu Rev Environ Resour*, 2006, 31(1): 365-394. doi: 10.1146/annurev.energy.30.050504.144352.