

DOI: 10.20103/j.stxb.202310142230

马丽莎, 郑江华, 彭建, 凯撒·米吉提, 李刚勇, 刘亮, 张建立. 新疆生态脆弱性特征及其驱动力. 生态学报, 2024, 44(20): 9053-9066.

Ma L S, Zheng J H, Pen J, KAISa · Mijiti, Li G Y, Liu L, Zhang J L. Research on the characteristics and driving forces of ecological vulnerability in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9053-9066.

新疆生态脆弱性特征及其驱动力

马丽莎¹, 郑江华^{1,2,*}, 彭建³, 凯撒·米吉提³, 李刚勇³, 刘亮¹, 张建立³

¹ 新疆大学地理与遥感学院, 乌鲁木齐 830046

² 新疆绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046

³ 新疆草原总站, 乌鲁木齐 830000

摘要: 新疆作为我国生态脆弱区之一, 常年受到气候和人为因素的严重干扰, 使其生态系统出现退化。新疆生态脆弱性聚类特征及从县域尺度和不同土地类型呈现新疆生态脆弱区, 尚有待进一步探究。以“敏感性-恢复力-压力度”为评价模型, 选取 15 个评价指标采用主成分分析、地理探测器方法评价 2000—2019 年新疆生态脆弱性状况及驱动力, 旨在探讨新疆生态脆弱性的时空变化、聚类特征、不同地类脆弱程度及其各指标对新疆生态脆弱性指数的驱动力影响。(1) 时间上, 2000—2019 年新疆生态脆弱性指数呈波动下降。不同脆弱性等级占比波动较大, 各等级面积占比均呈先增后减再增变化; 各脆弱性程度均向更低级或不变的脆弱性等级转变。(2) 空间上, 近 2000—2019 年新疆生态脆弱性呈“南高北低”分布规律特征, 县域尺度下, 生态脆弱性南北分异特征明显, 以天山山脉为界, 形成南部高脆弱区、北部低脆弱区和东部中脆弱区。(3) 新疆生态脆弱性呈“南热北冷聚集”, 不同地类的生态脆弱性等级面积占比变化不大, 脆弱性程度呈现波动减弱的向好趋势。(4) 单因子探测器与交互作用探测器均证明归一化植被指数、植被覆盖度、降水量、净初级生产力、干燥度、年平均气温、土壤有机质为新疆生态脆弱性的主要影响因素。研究结果可为新疆生态环境保护和可持续发展提供科学参考与决策依据。

关键词: 新疆; 生态脆弱性; 动态监测; 冷/热点分析; 地理探测器

Research on the characteristics and driving forces of ecological vulnerability in Xinjiang

MA Lisha¹, ZHENG Jianghua^{1,2,*}, PENG Jian³, KAISa · Mijiti³, LI Gangyong³, LIU Liang¹, ZHANG Jianli³

¹ College of Geography and Remote Sensing, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

² Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China

³ Xinjiang Grassland Technical promotion Station, Urumqi 830000, China

Abstract: As one of the ecologically fragile areas in China, Xinjiang has been seriously disturbed by climate and human factors for many years, which has degraded its ecosystem. The clustering characteristics of ecological vulnerability in Xinjiang and the presentation of Xinjiang's ecological fragile areas at the county scale and different land types are still to be further explored. This study adopts the evaluation model of “sensitivity-resilience-pressure” and selects 15 evaluation indicators. The study used principal component analysis and geographical detector methods to evaluate the ecological vulnerability and driving forces of Xinjiang from 2000 to 2019. The aim is to explore the spatiotemporal changes, clustering characteristics, and the degree of vulnerability in different land types, as well as the impact of each indicator on the ecological vulnerability index in Xinjiang. (1) Over the period of 2000—2019, the ecological vulnerability index of Xinjiang showed a fluctuating downward trend. The proportion of different vulnerability levels fluctuated significantly, with the proportion of each level showing an initial increase, followed by a decrease, and then another increase. The vulnerability

基金项目: 新疆天然草原生态脆弱性评价项目 (202234140009); 塔城地区草原健康评估与制图 (202334140016)

收稿日期: 2023-10-14; **网络出版日期:** 2024-08-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zheng.jianghua@xju.edu.cn

levels all shifted towards lower levels or remained unchanged. (2) Spatially, the ecological vulnerability in Xinjiang over 2000—2019 years exhibited a “high in the south and low in the north” distribution pattern. At the county scale, the north-south differentiation of ecological vulnerability was significant, with the Tianshan Mountains acting as a boundary, forming a high vulnerability zone in the south, a low vulnerability zone in the north, and a medium vulnerability zone in the east. (3) The ecological vulnerability in Xinjiang exhibited a “hot in the south and cold in the north” aggregation pattern. The proportion of ecological vulnerability levels in different land types showed little variation, while the vulnerability levels demonstrated a fluctuating and decreasing trend towards improvement. (4) Both single-factor detector and interaction detector proved that Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Fractional Vegetation Cover (FVC), precipitation, Net Primary Productivity (NPP), dryness, annual average temperature, and Soil Organic Matter were the main influencing factors of ecological vulnerability in Xinjiang. The research results can provide scientific reference and decision-making basis for ecological environmental protection and sustainable development in Xinjiang.

Key Words: Xinjiang; ecological vulnerability; dynamic monitoring; cold/hot spot analysis (Getis-Ord G_i^*); geographic probes

近年来,为实现可持续发展,人类经济发展和生态系统之间的平衡保护问题日益受到广泛关注^[1]。然而,生态环境问题不仅受自然因素影响,也受加速的城市化进程和不断扩大的资源需求带来的不可逆转破坏和冲击^[2],最终导致生态脆弱区的扩张和生态脆弱程度的增加;故生态脆弱性便成为研究区域环境变化与可持续发展的重要问题之一^[3-5]。政府间气候变化专门委员会建议,生态系统脆弱性研究应该包含系统对外界扰动的敏感性,系统变化的评价,以及对变化的适应能力^[6]等方面;所以正确认识和构建区域生态系统脆弱性评价体系,探究其时空变化及驱动因素,对于实现大区域生态保护和可持续发展的目标至关重要。

生态脆弱性是指在一定时间、空间尺度上,生态系统对外部扰动的敏感度与弹性,即一旦被扰动,就很难将其回复至初始状态^[7]。现如今国内外学者们运用不同的方法对生态脆弱性的研究已取得大量成果,从研究方法方面,主要包括主成分分析法^[8-9]、层次分析法^[10-11]、熵权法^[12-13]、机器学习和深度学习^[14-15]等;从模型构建方面,已经形成了如 SRP (Sensitivity-Resilience-Pressure) 模型^[16-17]、VSD (Vulnerability-Scoping-Diagram) 模型^[18-19]、PSR (Pressure-State-Response) 模型^[12,20]等模型。对比现有方法与模型,主成分分析可以从各指标本身特性更客观的评价分析;SRP 模型综合考虑了敏感性、恢复力和压力三个方面的因素,对生态脆弱性进行全面评估。其模型基于生态系统稳定性的内涵,结构相对全面,系统地包含了生态脆弱性的基本要素^[21],更适用于区域综合性的生态脆弱性评价。由此可见,评价区域生态环境脆弱性的方法基本成熟,逐渐完善,而且这些模型和方法在揭示区域生态环境脆弱性机制和灾害风险预测方面具有重要的前沿意义^[22]。随着对生态环境的认识不断深入,评价内容和指标系统也在不断丰富和完善。除了传统的生态系统服务价值、生物多样性和土地利用等指标外^[23],近年来还显现出一系列关于气候变化、生态系统健康度、环境脆弱区域划定等新的评价内容和指标体系^[24-25],这些新的内容和指标使得评价结果更加全面和准确。总体而言,采用以上指标和方法对研究区域进行数据处理、空间分析和时间序列动态分析已成为生态环境脆弱性研究的重要发展趋势。

近年来,为了保障资源的可持续开发,我国制定了耕地保护红线、城镇发展边界、生态保护红线等调控措施,坚定不移地走生态优先发展的道路^[26]。而新疆地处中国的西北边陲地区,拥有丰富的生物多样性和独特的生态系统;作为我国生态系统最脆弱的地区之一,常年受到自然气候(如干旱)和人类活动(如过度放牧)的严重干扰,因此新疆生态系统内部结构和功能上出现过度退化,已经严重威胁区域的可持续发展^[27]。而已有研究成果在构建新疆生态脆弱性评估指标体系^[28-29]、量化评估方法^[29-30]和研究区域^[31-32]等方面进行了大量研究,促进了新疆生态脆弱性评估体系的完善,但生态系统的复杂性需要探究更加精准和可靠的评估方法。其次,由于新疆的地理环境多样性,不同区域不同土地类型生态脆弱性的评估结果具有一定的异质性,需要进

行差异化的分析和解释。与传统方法相比,生态系统的脆弱性还需要考虑社会经济因素的影响,如何将其定量评估且对其时空尺度的驱动机制研究,亟待深入探究^[33]。

综上所述,本研究基于“敏感性-恢复力-压力度”评价框架模型,从自然因素、地形因素、人类活动、社会经济等多层面选取 15 个评价指标,通过主成分分析方法确定各指标权重,构建 2000—2019 年新疆生态脆弱性评价指标体系,旨在探讨新疆生态脆弱性的时空分异特征、脆弱性面积占比、转移聚类特征、不同土地类型脆弱程度及其各指标对生态脆弱性指数的驱动力影响,而研究结果可为新疆环境保护和可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

新疆地处中国西北部,位于 34°25′—49°10′N,73°40′—96°23′E,其独特的地理位置形成了山地、绿洲、荒漠等多种景观生态系统^[34]。属于干旱或半干旱气候,具有气温温差大、降水量少且年内分布不均、日照充足和气候干燥等气候特征^[27]。植被的分布在水平地带,逐渐向南从荒漠草原、温带荒漠和暖温带荒漠等类型转变为高寒荒漠;而在垂直方向上,则从低海拔向高海拔逐渐变化为荒漠、荒漠草原、典型草原、草甸草原、山地草甸和高寒草甸^[35]。总的来说,该地区光热资源丰富,降水不足,蒸发强烈,生态系统稳定性差、抗逆性弱,是我国西北典型的生态脆弱区^[28]。

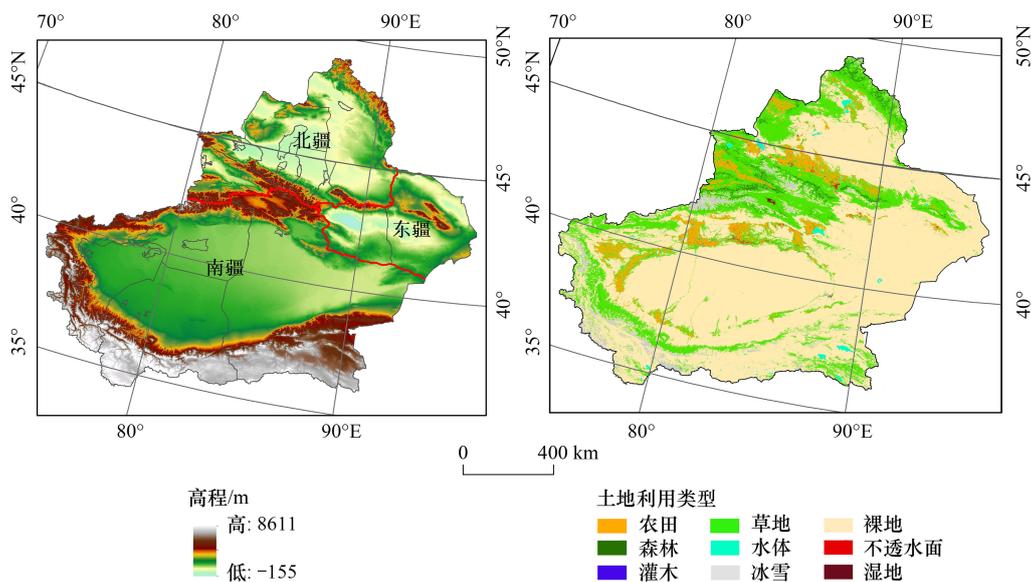


图 1 研究区高程、土地利用分布图

Fig.1 Study area digital elevation model (DEM), land use distribution map

2 研究方法

2.1 数据来源

采用了新疆土地利用数据、DEM 数据、气象数据、土壤有机质数据、归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、净初级生产力 (Net primary productivity, NPP)、植被覆盖度 (Fractional Vegetation Cover, FVC)、社会经济数据,数据来源与处理如表 1 所示。为确保使用的指标具备良好的空间重叠性,所有栅格数据都被统一重采样为 1 km 分辨率,并被投影到同一投影和坐标系 (Albers 地图投影和 WGS-1984 坐标系)。

表 1 数据来源与相关信息

Table 1 Data Source and Related information

| 数据类型 Data type | 数据名称 Data name | 数据来源 Data source | 时间分辨率 Temporal resolution | 空间分辨率 Spatial resolution | 年份 Year |
|-------------------------------------|-------------------|---|------------------------------|-----------------------------|------------|
| 高程 DEM data | DEM 数据 | 中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn) | - | 30m | - |
| 土壤有机质数据 Soil organic matter data | 土壤有机质 | 中山大学陆气相互作用研究小组发布中国土壤特征数据集 (http://globalchange.bnu.edu.cn/research/soil2) | - | 30m | - |
| 气候数据 Climate data | 自校准帕默尔干旱指数 | 英国东安格利亚大学的干旱数据集 (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/) | 月 | 5km | 2000—2019 |
| | 年平均气温 | 国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn) | 年 | 1km | 2000—2019 |
| | 年降水量 | | 年 | 1km | 2000—2019 |
| | 干燥度 | | 年 | | 2000—2019 |
| | 净初级生产力 | | 月 | 500m | 2000—2019 |
| 植被数据 Vegetation data | 归一化植被指数 | | 月 | 1km | 2000—2019 |
| | 植被覆盖度 | | 年 | | 2000—2019 |
| | PM _{2.5} | | 年 | | 2000—2019 |
| 社会经济数据 Socioeconomic data | 夜间灯光 | | 年 | | 2000—2019 |
| | 人口密度 | | 年 | | 2000—2019 |
| | 人均 GDP | | 年 | | 2000—2019 |
| 土地利用数据 Land use data | 土地利用数据 | 中国分省逐年地表覆盖数据集 (CLCD) (https://zenodo.org/record/5816591) | 年 | 30m | 2000—2019 |

DEM: 高程 Digital elevation model; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter

2.2 生态脆弱性指标体系构建

SRP 模型是一种基于生态敏感性-生态恢复力-生态压力度综合评价模型,用于评估特定地区的生态脆弱性。本研究基于全面性、科学性、可比性、层次性、稳定性和数据可用性的原则,参考了与之相关的脆弱性评价指标体系和相关论文^[21,36-39],选取了国内外研究中使用较为频繁的指标,并结合 SRP 模型的指标层选取原则和新疆地理特征,选取了 15 项指标构建新疆生态脆弱性评价指标体系,用正向指标和负向指标表明各指标对生态脆弱性环境的影响^[21],具体指标如表 2 所示。

表 2 基于 SRP 模型的新疆生态脆弱性评价指标体系

Table 2 Xinjiang ecological vulnerability assessment index system based on SRP model

| 总目标层 Total target layer | 子目标层 Child target layer | 准则层 Child target layer | 指标层 Metrics layer | 属性 attribute | | | |
|--|----------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------|--------|--------|---|
| 新疆生态脆弱性指数 Ecological vulnerability index of Xinjiang | 生态敏感性 | 地形因子 | 高程 | + | | | |
| | | | 坡度 | + | | | |
| | | | 起伏度 | + | | | |
| | | | SOM | - | | | |
| | | | 年均降水量 | - | | | |
| | | 气象因子 | 年均气温 | + | | | |
| | | | 干燥度 | - | | | |
| | | | 干旱指数 | + | | | |
| | | | PM _{2.5} | + | | | |
| | | | 归一化植被指数 | - | | | |
| | 生态恢复力 | 植被因子 | 植被覆盖度 | - | | | |
| | | | 净初级生产力 | - | | | |
| | | | 生态压力度 | 人类干扰因子 | 夜间灯光 | + | |
| | | | | | 社会经济因子 | 人口密度 | + |
| | | | | | | 人均 GDP | - |

+: 指标对生态脆弱性环境有促进作用; -: 指标对生态脆弱性环境有抑制作用

2.3 空间主成分分析权重

采用主成分分析 (PCA) 法进行计算^[40]。具体计算公式如下:

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

式中: ω_i 为第*i*个主成分贡献率; λ_i 为第*i*个主成分特征值。

在此基础上,将 15 项指标中的前六项主成分按其累积贡献率超过 85%这一准则,得出了历年的生态脆弱度指数 (EVI),计算公式及构建的各年 EVI 指数如下^[41]:

$$EVI = \sum_{i=1}^n Y_i \times \omega_i$$

式中:EV_i为生态脆弱性指数; Y_i 为第*i*个主成分; ω_i 为第*i*个主成分相应的贡献率。

$$EVI_{2000} = 0.451 PC_1 + 0.179 PC_2 + 0.108 PC_3 + 0.098 PC_4 + 0.065 PC_5 + 0.036 PC_6$$

$$EVI_{2005} = 0.447 PC_1 + 0.173 PC_2 + 0.110 PC_3 + 0.098 PC_4 + 0.068 PC_5 + 0.040 PC_6$$

$$EVI_{2010} = 0.457 PC_1 + 0.170 PC_2 + 0.114 PC_3 + 0.085 PC_4 + 0.069 PC_5 + 0.048 PC_6$$

$$EVI_{2015} = 0.453 PC_1 + 0.172 PC_2 + 0.119 PC_3 + 0.072 PC_4 + 0.067 PC_5 + 0.047 PC_6$$

$$EVI_{2019} = 0.461 PC_1 + 0.180 PC_2 + 0.118 PC_3 + 0.069 PC_4 + 0.065 PC_5 + 0.031 PC_6$$

2.4 生态脆弱性等级划分

为了进一步揭示新疆生态脆弱性的空间变异特征,本研究对构建的新疆生态脆弱性指数 EVI 进行分级。参照国内外研究分级成果,先对新疆生态脆弱性指数进行标准化后进一步划分为 5 级^[28,5]。具体划分标准和等级如表 3。

表 3 新疆生态脆弱性等级划分

Table 3 Xinjiang's ecological vulnerability hierarchy

| 等级 Grade | 取值范围 Value range | 脆弱度 Fragility | 等级 Grade | 取值范围 Value range | 脆弱度 Fragility |
|-----------------|---------------------|------------------|----------------|---------------------|------------------|
| 1 级 Level one | 0.0—0.2 | 微度脆弱 | 4 级 Level four | 0.6—0.8 | 重度脆弱 |
| 2 级 Level two | 0.2—0.4 | 轻度脆弱 | 5 级 Level five | 0.8—1.0 | 极度脆弱 |
| 3 级 Level three | 0.4—0.6 | 中度脆弱 | | | |

2.5 热点分析

热点分析是用于识别区域中特定变量的热点(高值区)和冷点(低值区)的空间聚类程度^[42]。该分析的空间实现通过 ArcGIS 10.8 环境中的热点分析统计工具,此次分析用于反映研究区内各地区生态脆弱等级的相关性与值的聚集特征^[43]:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{i,j}(d) X_j}{\sum_{j=1}^n X_{i,j}}$$

式中, G_i^* 统计的是 Z 值得分,Z 值得分越高,高值像元就越聚集,相反则低值像元就越聚集。 X_j 表示像元 j 的草地退化等级评分, $W_{i,j}$ 是像元 i 与 j 之间以距离规则定义的空间权重,空间范围相邻为 1,不相邻为 0, n 为像元总数。

2.6 地理探测器

Geodetector 是一种用于探测地理事物空间分层变化特征和规律的方法,可以解决传统统计学无法处理的随尺度变化而引起的空间依赖性和异质性问题^[44]。因子影响力用 q 值来表示, q 值越大表明该指标对生态脆弱性的影响力越大,计算公式为^[18]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2}$$

式中： h 为某指标的分类数或分区； N 为区域内的单元数； N_h 为第 h 层的单元数； σ^2 和 σ_h^2 分别为第 h 层和全区域生态脆弱性的方差^[45]。

3 结果与分析

3.1 新疆生态脆弱性时间变化特征

如图 2 从不同年份生态脆弱性面积占比来看,总体 2000—2019 年生态脆弱性较高,中等以上等级面积占比 80%以上,且不同脆弱性等级占比波动较大,各等级面积占比均呈先增后减再增的变化规律;高脆弱性的面积占比总体有所减小,而低脆弱性面积占比均有所增加,表明新疆生态脆弱性程度在逐渐减弱并好转;其中极度脆弱面积占比减幅最大,减小 10.99%,主要转变为重度脆弱,其占比增加了 15.07%,其次为中度脆弱,占比增加 3.03%。这种变化规律与空间变化规律一致,表明新疆生态脆弱性正逐年减弱。

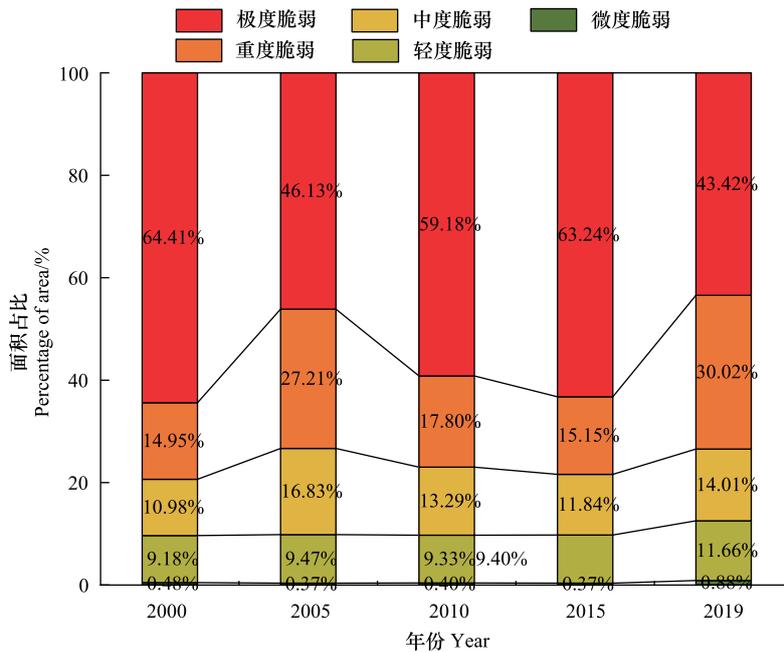


图 2 2000—2019 年新疆生态脆弱性面积占比

Fig.2 Proportion of ecological vulnerability area in Xinjiang from 2000 to 2019

从图 3 各年新疆生态脆弱性等级变化,可以明确看出各等级间的相互转变。2000—2019 年各脆弱性等级波动较大,其中微度脆弱与极度脆弱之间相互转变,转变量最大,极度脆弱除了转变为微度脆弱或不变,还转变为重度脆弱;而重度脆弱等级主要转变为轻度脆弱或不变;轻度脆弱和中等脆弱等级基本不变;综上所述,各脆弱等级均转变为更低级或不变的脆弱性等级,再次证明新疆生态脆弱性的减缓、向好趋势。

3.2 新疆生态脆弱性空间分布特征

由图 4 可知,空间上 2000—2019 年新疆生态脆弱性呈“南高北低”分布规律,呈向好趋势。主要分为三个阶段:2000—2005 年脆弱性呈降低趋势,平均 EVI 值由 0.78 减小至 0.73;如南疆山区附近、北疆阿勒泰地区、昌吉州等区域的极度脆弱区转变为重度、中度等脆弱区,哈密市的西部也有明显的脆弱性降低变化,但伊犁的边缘区域中度脆弱区域有略微扩大;2005—2015 年脆弱性呈增加趋势,平均 EVI 值由 0.73 增加至 0.76 后增加至 0.78;如北疆阿勒泰地区、昌吉州以及南疆的山区附近较 2005 年有明显的脆弱度增加变化,这些区域的

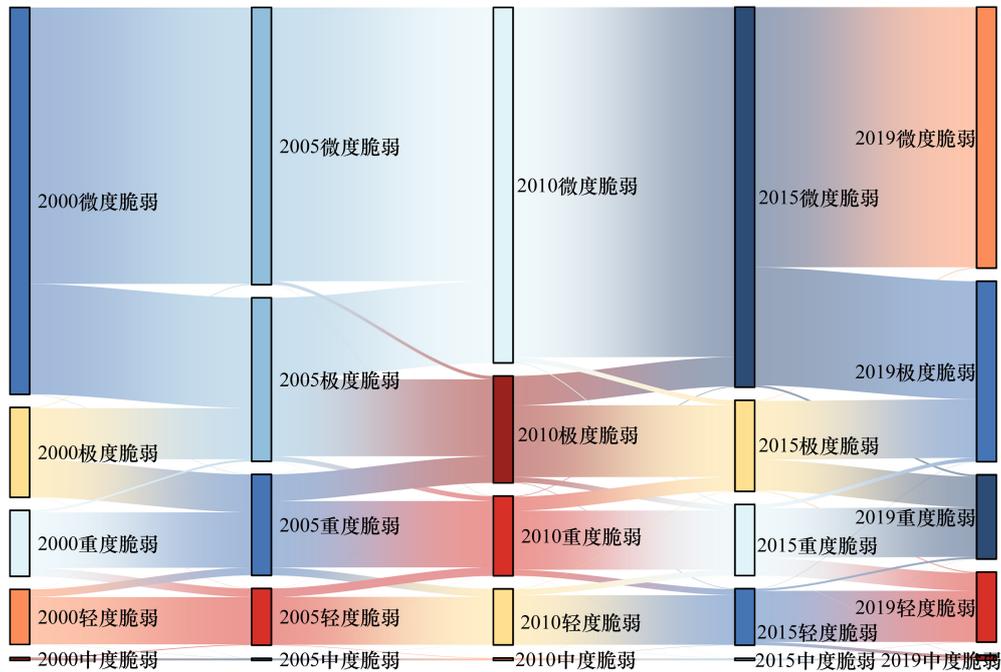


图 3 2000—2019 年新疆生态脆弱度变化

Fig.3 Changes in ecological vulnerability in Xinjiang from 2000 to 2019

极度脆弱区域有所扩张,但与 2000 年对比,2015 年的新疆生态脆弱性有略微降低;2015—2019 年脆弱性明显大幅度降低,平均 EVI 值由 0.78 降低至 0.71;如南疆大部分区域与北疆塔城地区、阿勒泰地区、昌吉州等地脆弱性降低变化明显,而伊犁地区河谷附近的生态脆弱性也由中度脆弱变为微度脆弱。

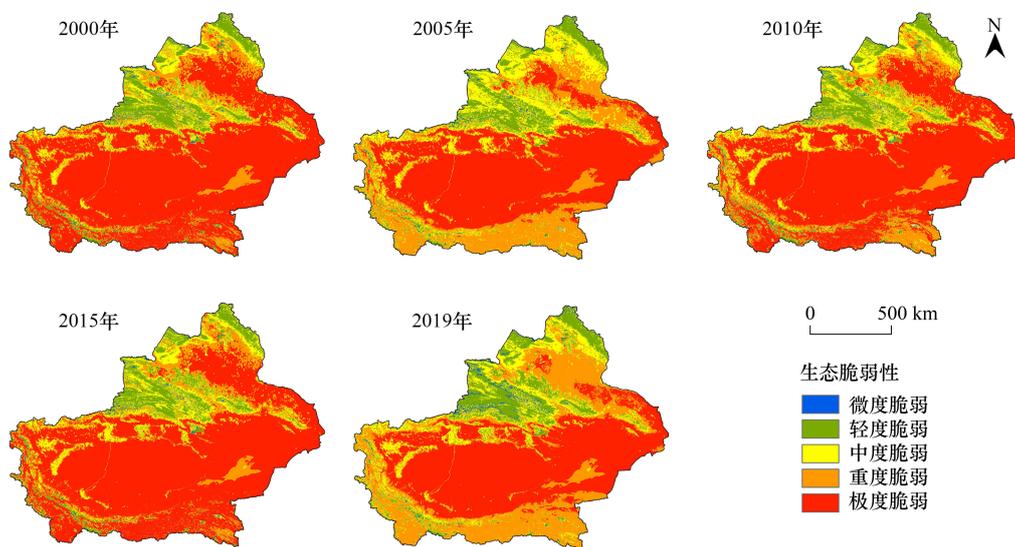


图 4 2000—2019 年新疆生态脆弱性分布

Fig.4 Grassland coverage and trend characteristics of Xinjiang from 2001 to 2020

通过对 2000—2019 年新疆生态脆弱性县域尺度均值化分析,发现新疆生态脆弱性南北分异特征明显,以天山为界,南疆以极度脆弱为主,北疆以中度脆弱为主,东疆以重度和极度脆弱为主(图 5)。共统计 23 个地级市,仅有伊犁哈萨克自治州脆弱度为轻度脆弱,EVI 值为 0.35,9 个地级市为中度脆弱,8 个地级市为重度脆

弱,5 个地级市脆弱度较高为极度脆弱,对脆弱度较高的地级市应进行实地考察并实行针对化管理和治理,缓解现阶段脆弱状况,使得各生态系统健康且平衡。

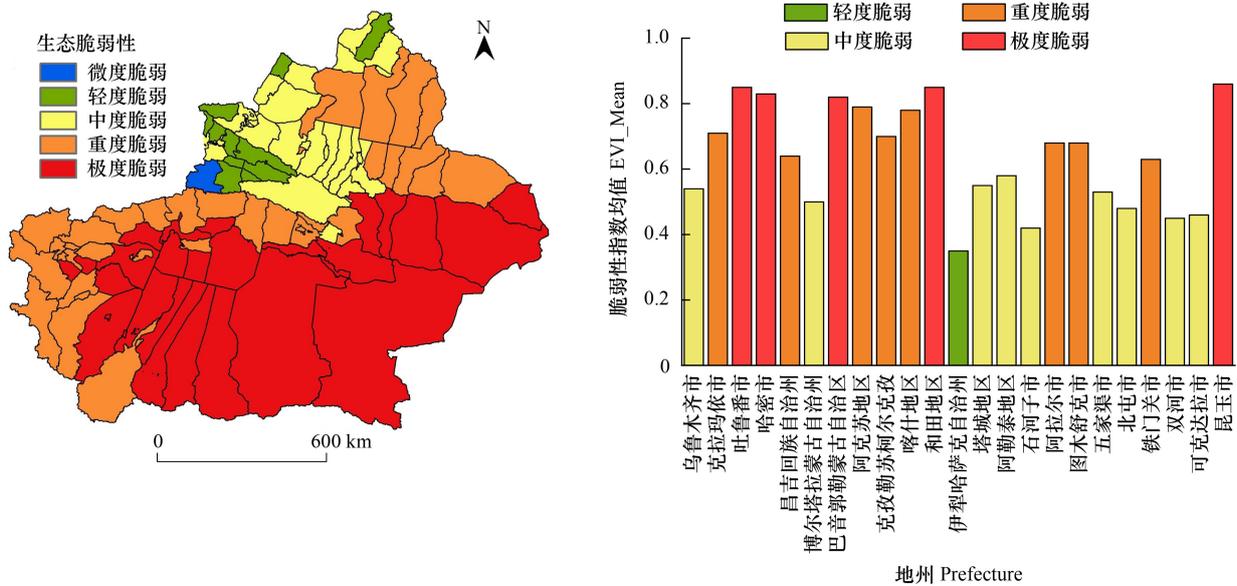


图 5 2000—2019 年县域尺度生态脆弱性空间分布与统计

Fig.5 The spatial distribution and statistical analysis of ecological vulnerability at the county scale from 2000 to 2019

3.3 新疆生态脆弱性聚类特征变化

2000—2019 年新疆生态脆弱性聚类特征如图 6 所示,总体上,生态脆弱性聚类特征呈“南热北冷聚集”,表明南部生态脆弱性高,北部生态脆弱性低,沿天山山脉逐渐形成生态屏障将南部热点与北部冷点区域隔开;且聚集特征波动较大,南部热点区域呈先增后减再增再减的趋势,而北部伊犁地区、阿勒泰地区冷点区域较为稳定,低值趋向聚集分布,2015 年的热点高值集聚特征明显,表明 2015 年新疆生态脆弱性达到最高,生态系统较为脆弱,但到 2019 年热点区域收缩,生态系统脆弱性降低;各年冷热点聚集特征与脆弱性等级分布较为一致。

3.4 新疆不同土地类型生态脆弱性

从 2000—2019 年新疆各地类生态脆弱性等级面积占比中可以看出,各地类的生态脆弱性等级面积占比变化不大,各地类脆弱性程度较为稳定,但仍呈现波动减弱的向好趋势(图 7)。如 2000—2019 年除裸地的生态脆弱性较高,以极度脆弱为主(平均为 55.6%),但占比有所下降,主要转化为重度脆弱;森林、湿地和灌木生态脆弱性极低,以微度脆弱为主。其他地类的生态脆弱性较适中,且均以中度脆弱为主,但高脆弱等级占比均减小。如草地的重度脆弱占比由 25%减小至 22%;冰雪的中等以上脆弱性占比由 24%下降至 17%;水体的中等以上脆弱性占比则由 19%增加至 28%,总体呈先增后减再增的变化趋势,表明水体生态脆弱性自 2005 年出现持续恶化,但整体来看各地类生态脆弱性略有下降。

3.5 新疆生态脆弱性驱动力分析

如图 8 所示,各时间段内各指标因子对 EVI 的解释力均有差异,但总体比较,各指标解释能力相对直观,单因子 q 值从大到小为:NDVI>FVC>降水量>NPP>干燥度>年平均气温>SOM>PM_{2.5}>地形起伏度>坡度>海拔>sc_pdsi>人口密度>夜间灯光>GDP;NDVI、FVC、NPP 均为植被因子且影响最大,五年平均 q 值分别达到 0.62、0.60、0.47,表明植被因子对生态脆弱性具有代表性,能够很好的表征植被生态系统状况。其次为气候因素和土壤因子,如降水量、干燥度、年平均气温、PM_{2.5}、SOM 对生态脆弱性影响较大,平均 q 值为 0.33—0.54,地形因素对生态脆弱性影响解释力一般,平均 q 值为 0.20 左右;而社会经济要素对生态脆弱性的影响最低,q

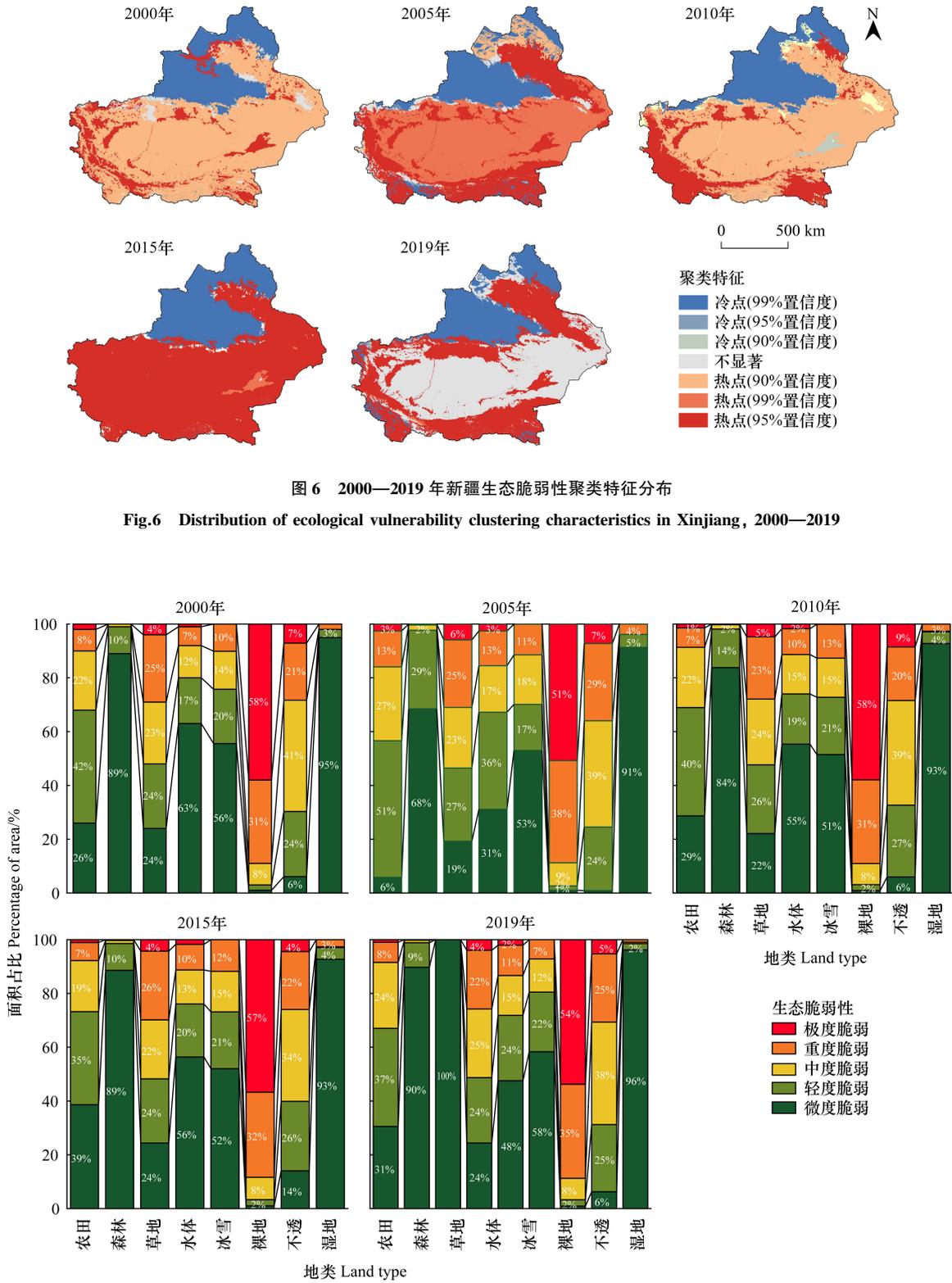


图 6 2000—2019 年新疆生态脆弱性聚类特征分布

Fig.6 Distribution of ecological vulnerability clustering characteristics in Xinjiang, 2000—2019

图 7 2000—2019 年不同土地类型生态脆弱性面积占比

Fig.7 The proportion of ecological vulnerability area for different land types from 2000 to 2019

值均小于 0.1。因此, NDVI、FVC、降水量、NPP、干燥度、年平均气温、SOM 为新疆生态脆弱性的主要影响因素。

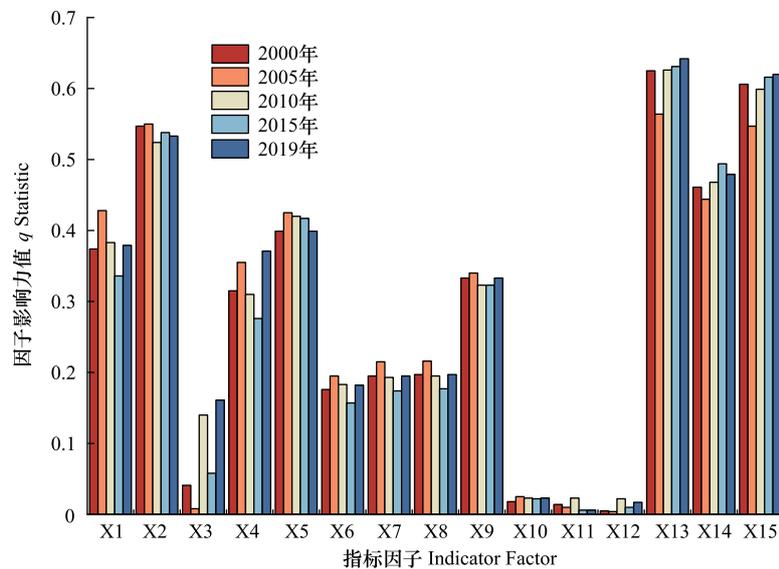


图8 2000—2019年新疆生态脆弱性驱动力单因子

Fig.8 Single factor driving force of ecological vulnerability in Xinjiang from 2000 to 2019

X1: 年平均气温, X2: 降水量, X3: scpdsi, X4: $PM_{2.5}$, X5: 干燥度, X6: 海拔, X7: 坡度, X8: 地形起伏度, X9: 土壤有机质, X10: 人口密度, X11: GDP, X12: 夜间灯光, X13: 归一化植被指数, X14: 净初级生产力, X15: 植被覆盖度

交互探测器分析结果显示(图9):五年中各因子与新疆生态脆弱性指数 EVI 交互作用关系均较为稳定,相较于单因子分析,任何因素的交互作用均强于单因子 q 值影响;NPP、NDVI、FVC 和其他任何指标均为双变量增强关系, q 值范围为 0.47—0.76;降水量、年平均气温、干燥度、 $PM_{2.5}$ 与其他变量指标关系表现为非线性增强;且年平均气温和 FVC、年平均气温和 NDVI、NDVI 和干燥度、NDVI 和 $PM_{2.5}$ 、降水量和海拔、干燥度和 SOM 等的交互作用最强。另外,其他单因子如海拔、地形起伏度、 q 值影响较小时, SOM 的加入显著增强了它们对生态脆弱性的交互影响。再次证明, NDVI、FVC、降水量、NPP、干燥度、年平均气温、SOM 为新疆生态脆弱性的主要影响因素。

4 讨论

本研究根据 SRP 模型选取 15 个指标利用主成分分析方法进行客观赋予权重,构建 2000—2019 年五期新疆生态脆弱性指数 EVI。指标考虑了植被因子、气候因子、地形因子、社会经济因素、人为干扰因素等多方面选取,整体构建的评价体系效果较好,经过分级后发现 5 期新疆生态脆弱性指数 EVI 呈波动下降趋势,空间上呈“南高北低”的分布格局,在整个研究区生态脆弱性等级以轻度脆弱和重度脆弱为主,这与孙桂丽等^[28]、岳笑等^[27]、陆海燕等^[29] 研究结果较为一致。由于北疆地区的自然条件较好,水源充足,植被覆盖度高,其生态恢复力较强,生态脆弱性较低;主要以轻度脆弱和极度脆弱为主,而轻度脆弱区主要分布在植被覆盖较高,植被生态状况较好的区域,如伊犁地区、阿勒泰地区等地,极度脆弱区主要分布在城镇率高、人口密集和未利用地区。而南疆地区自然条件较差,水资源短缺,生态压力大且恢复难度大^[34],区域以极度脆弱和重度脆弱为主,极度脆弱区主要分布在塔克拉玛干沙漠、塔里木盆地以及城镇区等地带,重度脆弱区主要分布在山区的边缘区域。新疆地形复杂、自然环境多样,这些特征可能导致不同地类之间存在差异的生态脆弱性表现。例如,裸地可能由于土壤贫瘠、植被稀疏等原因,更容易表现出极度脆弱的特征;而森林、湿地和灌木等地类可能受到保护和管理的影响相对较小,因此表现出较低的生态脆弱性。时间上,2000—2019 年新疆生态脆弱性指数 EVI 呈波动下降趋势,高脆弱等级面积明显减小,且各脆弱等级均向为低脆弱等级转变。其中,2005—2015 年生态脆弱性增加区主要分布于南疆,原因可能为近年来南疆地区社会经济迅速发展,第一产业增长尤为明

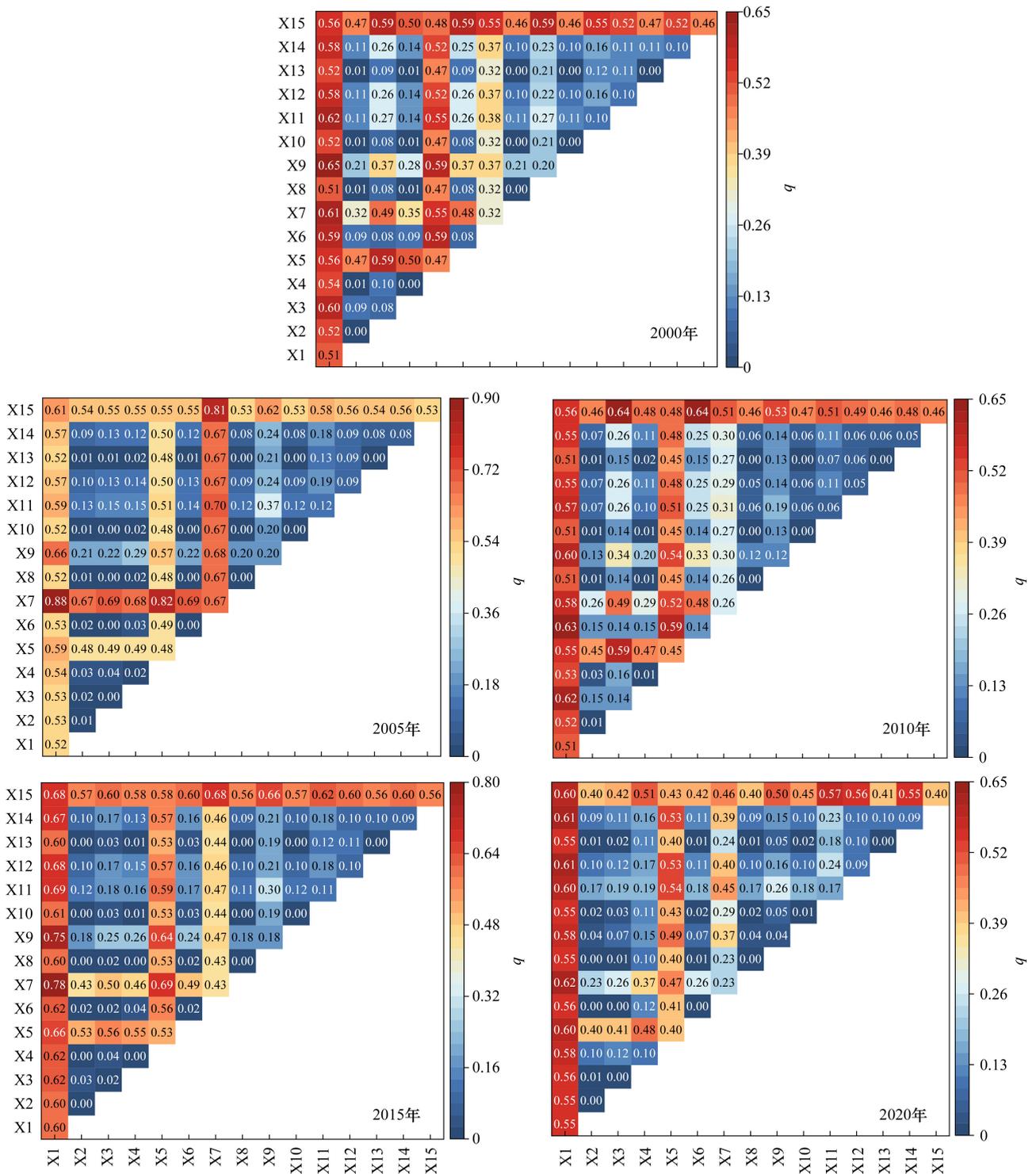


图9 2000—2019年新疆生态脆弱性驱动力交互因子结果

Fig.9 Results of interaction factors of driving drivers of ecological vulnerability in Xinjiang from 2000 to 2019

显,但这一进展却导致其生态系统运行的稳定性持续下降;随着人口的增长,该地区的人均农业资源拥有量呈急剧下降态势,因此南疆地区的生态环境面临着越来越大的挑战,生态脆弱性不断上升^[46]。

从新疆生态脆弱性驱动力分析,本研究通过地理探测器(GeoDetector)中单因子和交互作用探测器分析了2000、2005、2010、2015、2019年5期影响新疆生态脆弱性空间分布格局的驱动因素,发现新疆生态脆弱性受自

然因素和人为影响共同驱动的结果。降雨量、年平均气温为新疆生态脆弱性的主要影响因素,这与李雨衡等^[33]和黄越等^[47]的研究结果部分一致。而本研究还探究得到 NDVI、FVC、NPP、干燥度、SOM 也是新疆生态脆弱的主要影响因素之一。降水是影响干旱和半干旱区植被生长发育的重要因素,植被覆盖度高意味着其生态功能较强,二者的增加客观上都有利于生态脆弱性的降低^[48]。例如北疆降雨量和植被盖度、植被生长状况较南疆降雨量大且植被更丰富,故北疆生态系统脆弱性较低,而南疆干旱地带生态系统脆弱性较高。因此,南疆应注重对生态系统的积极响应,因地制宜地开展生态保护工作,实现生态环境可持续发展^[49]。

本研究基于 SRP 模型构建了新疆生态脆弱性评价指标体系,有效地反映了新疆区域生态脆弱性的时空变化特征,并分析了各驱动因子对生态脆弱性的影响。与前人研究对比,本研究除了探讨了不同时期草地脆弱性时空特征,还结合选取的指标重点探讨了新疆生态脆弱性聚类特征,并从县域尺度和不同土地类型呈现新疆生态脆弱区。然而,本研究仍存在一定局限性,首先,针对指标选取时,考虑的仍不够全面,未考虑如气象因素中的太阳辐射、二氧化碳浓度等,地表因素的景观要素、土壤水分和土壤侵蚀度,人类活动因素中的矿业开采、放牧密度等因素的影响。其次,参照的 SRP 模型也存在一定的局限性,如 SRP 模型过于简化了复杂的生态系统动态过程,忽略了生态脆弱性评估中的许多重要因素;且 SRP 模型对于空间异质性的刻画不够充分,不能很好地捕捉生态脆弱性的空间分布特征。最后,本研究时间序列较短,因指标数量多,无法使指标均满足长时间序列研究;综上,未来应考虑更全面的指标,构建更完善且长时间序列的生态脆弱性评价指标体系,或加深尺度多维度的探究脆弱性的时空特征及驱动力研究,为实现新疆生态系统可持续发展和生态保护提供决策依据和参考。

5 结论

(1) 时间上,2000—2019 年新疆生态脆弱性指数呈波动下降趋势,即生态脆弱性呈好转趋势。不同脆弱性等级占比波动较大,各等级面积占比均呈先增后减再增变化;各脆弱性程度均向更低级或不变的脆弱性等级转变。

(2) 空间上,2000—2019 年新疆生态脆弱性呈“南高北低”分布规律特征,县域尺度下,生态脆弱性南北分异特征明显,以天山山脉为界,形成生态屏障将南部高脆弱区与北部低脆弱区隔开。

(3) 聚类特征方面,新疆生态脆弱性呈“南热北冷聚集”,表明南部生态脆弱性高,北部生态脆弱性低。不同地类的生态脆弱性等级面积占比变化不大,脆弱性程度呈现波动减弱的向好趋势。

(4) 驱动力方面,单因子探测器与交互作用探测器均证明 NDVI、FVC、降水量、NPP、干燥度、年平均气温、SOM 为新疆生态脆弱性的主要影响因素。

致谢:感谢自治区级产学研联合培养研究生基地新疆草原总站提供的数据和调研支持。

参考文献 (References):

- [1] Jin Y, Li A, Bian J, Nan X, Lei G, Muhammad K. Spatiotemporal analysis of ecological vulnerability along Bangladesh-China-India-Myanmar economic corridor through a grid level prototype model. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106933.
- [2] Jiang B, Chen W, Dai X, Xu M, Liu L, Sakai T, Li S. Change of the spatial and temporal pattern of ecological vulnerability: A case study on Cheng-Yu urban agglomeration, Southwest China. *Ecological Indicators*, 2023, 149: 110161.
- [3] He D, Hou K, Li X X, Wu S Q, Ma L X. A reliable ecological vulnerability approach based on the construction of optimal evaluation systems and evolutionary tracking models. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138246.
- [4] Yang Z, Li B, Nan B, Dai X, Peng C, Bi X. A methodological framework for assessing pastoral socio-ecological system vulnerability: A case study of Altay Prefecture in Central Asia. *Science of The Total Environment*, 2023, 862: 160828.
- [5] Zhao X, Xu Y, Wang Q, Pu J, Shi X, Huang P, Gu Z. Sustainable Agricultural Development Models of the Ecologically Vulnerable Karst Areas in Southeast Yunnan from the Perspective of Human-Earth Areal System. *Land*, 2022, 11(7): 1075.
- [6] Chen Y, Duo L, Zhao D, Zeng Y, Guo X. The response of ecosystem vulnerability to climate change and human activities in the Poyang lake city

- group, China. *Environmental Research*, 2023, 233: 116473.
- [7] He L, Shen J, Zhang Y. Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 1115-1125.
- [8] Cao J, Yang Y, Deng Z, Hu Y. Spatial and temporal evolution of ecological vulnerability based on vulnerability scoring diagram model in Shennongjia, China. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 5168.
- [9] Dai X, Gao Y, He X, Liu T, Jiang B, Shao H, Yao Y. Spatial-temporal pattern evolution and driving force analysis of ecological environment vulnerability in Panzhihua City. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(6): 7151-7166.
- [10] Hoque M A-A, Pradhan B, Ahmed N. Assessing drought vulnerability using geospatial techniques in northwestern part of Bangladesh. *Science of The Total Environment*, 2020, 705: 135957.
- [11] 张振龙, 王勇, 王哲, 冯喜杨, 夏清, 袁波, 杨利, 姜永兴, 张艳, 朱健美. 基于 PSR 模型的茂县生态脆弱性时空演化特征分析及趋势预测. *化工矿物与加工*, 2023, 52(4): 1-8.
- [12] 陈朝霞, 于婧, 钟哲, 包丹, 张又天, 李明. 基于 PSR 模型的武汉市生态脆弱性空间分异研究. *中国农业信息*, 2023, 35(1): 67-76.
- [13] 李洪广, 周旭, 肖杨, 罗雪, 梁任刚, 杨大方. 基于 SRP 模型的西南喀斯特山区生态脆弱性时空变化特征. *生态科学*, 2021, 40(3): 238-246.
- [14] 支泽民, 陈琼, 刘飞. 基于 SPR 模型的生态脆弱性评估——以青海省为例. *青海环境*, 2020, 30(4): 186-190.
- [15] Wu J-Y, Liu H, Li T, Ou-Yang Y, Zhang J-H, Zhang T-J, Huang Y, Gao W-L, Shao L. Evaluating the ecological vulnerability of Chongqing using deep learning. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(36): 86365-86379.
- [16] Li Q, Shi X, Wu Q. Effects of protection and restoration on reducing ecological vulnerability. *Science of The Total Environment*, 2021, 761: 143180.
- [17] Huang B, Zha R, Chen S, Zha X, Jiang X. Fuzzy evaluation of ecological vulnerability based on the SRP-SES method and analysis of multiple decision-making attitudes based on OWA operators: A case of Fujian Province, China. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110432.
- [18] 齐润泽, 潘竟虎. 河湟地区生态脆弱性时空演变及影响因素研究. *干旱区研究*, 2023, 40(6): 1002-1013.
- [19] Yang X, Dai X, Li W, Lu H, Liu C, Li N, Yang Z, He Y, Li W, Fu X, Ma L, Shan Y, Wang Y. Socio-Ecological Vulnerability in Aba Prefecture, Western Sichuan Plateau: Evaluation, Driving Forces and Scenario Simulation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(10): 524.
- [20] Li X, Song L, Xie Z, Gao T, Wang T, Zheng X, Liu J, Liu L. Assessment of Ecological Vulnerability on Northern Sand Prevention Belt of China Based on the Ecological Pressure-Sensibility-Resilience Model. *Sustainability*, 2021, 13(11): 6078.
- [21] Gu H, Huan C, Yang F. Spatiotemporal Dynamics of Ecological Vulnerability and Its Influencing Factors in Shenyang City of China: Based on SRP Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(2): 1525.
- [22] Chen X, Li X, Eladawy A, Yu T, Sha J. A multi-dimensional vulnerability assessment of Pingtan Island (China) and Nile Delta (Egypt) using ecological Sensitivity-Resilience-Pressure (SRP) model. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2021, 27(7): 1860-1882.
- [23] Luo Q, Bao Y, Wang Z, Chen X, Wei W, Fang Z. Vulnerability assessment of urban remnant mountain ecosystems based on ecological sensitivity and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110314.
- [24] Zhang R, Chen S, Gao L, Hu J. Spatiotemporal evolution and impact mechanism of ecological vulnerability in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111214.
- [25] Wu J, Zhang Z, He Q, Ma G. Spatio-Temporal Analysis of Ecological Vulnerability and Driving Factor Analysis in the Dongjiang River Basin, China, in the Recent 20 Years. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4636.
- [26] Li D, Huan C, Yang J, Gu H. Temporal and Spatial Distribution Changes, Driving Force Analysis and Simulation Prediction of Ecological Vulnerability in Liaoning Province, China. *Land*, 2022, 11(7): 1025.
- [27] 岳笑, 张良侠, 周德成, 樊江文. 干旱—半干旱典型生态脆弱区生态脆弱性时空演变及驱动因子分析. *环境生态学*, 2023, 5(6): 1-9,14.
- [28] 孙桂丽, 陆海燕, 郑佳翔, 刘燕燕, 冉亚军. 新疆生态脆弱性时空演变及驱动力分析. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 258-269.
- [29] 陆海燕, 孙桂丽, 李路, 卢航, 白一纯. 基于 VSD 模型的新疆生态脆弱性评价. *新疆农业科学*, 2020, 57(2): 292-302.
- [30] Wu X, Tang S. Comprehensive evaluation of ecological vulnerability based on the AHP-CV method and SOM model: A case study of Badong County, China. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108758.
- [31] Xue L, Wang J, Zhang L, Wei G, Zhu B. Spatiotemporal analysis of ecological vulnerability and management in the Tarim River Basin, China. *Science of The Total Environment*, 2019, 649: 876-888.
- [32] 孙桂丽, 陆海燕, 禹明柱, 闫鑫苒, 郑旭, 张元梅. 天山北坡经济带生态脆弱性评价及驱动力分析. *西南农业学报*, 2022, 35(9): 2161-2170.

- [33] 李雨衡, 赵艳, 程磊磊, 刘润樱, 李雪辉, 白建华. 中亚地区生态脆弱性时空演变及其驱动因素. 陆地生态系统与保护学报, 2023, 3(1): 47-56.
- [34] He P, Sun Z, Han Z, Dong Y, Liu H, Meng X, Ma J. Dynamic characteristics and driving factors of vegetation greenness under changing environments in Xinjiang, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(31): 42516-42532.
- [35] 买买提安尼瓦尔, 杨元合, 郭兆迪, 方精云. 新疆草地植被的地上生物量. 北京大学学报(自然科学版), 2006(4): 521-526.
- [36] Ma L, Kang H, He D, Liu J, Tang H, Wu S, Li X. The evolution process of ecological vulnerability and its quantitative analysis of influencing factors: a case study of Longdong area. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(18): 51464-51490.
- [37] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, Kupriyanov A. Spatiotemporal ecological vulnerability analysis with statistical correlation based on satellite remote sensing in Samara, Russia. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112138.
- [38] Wang Z, Xiong H, Zhang F, Qiu Y, Ma C. Sustainable development assessment of ecological vulnerability in arid areas under the influence of multiple indicators. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 436: 140629.
- [39] Cai X, Li Z, Liang Y. Tempo-spatial changes of ecological vulnerability in the arid area based on ordered weighted average model. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108398.
- [40] Sun Z, Liu Y, Sang H. Spatial-Temporal Variation and Driving Factors of Ecological Vulnerability in Nansi Lake Basin, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(3): 2653.
- [41] 刘佳茹, 赵军, 沈思民, 赵彦军. 基于 SRP 概念模型的祁连山地区生态脆弱性评价. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1573-1582.
- [42] Gong J, Jin T, Cao E, Wang S, Yan L. Is ecological vulnerability assessment based on the VSD model and AHP-Entropy method useful for loessial forest landscape protection and adaptative management? A case study of Ziwuling Mountain Region, China. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109379.
- [43] 孙宇晴, 杨鑫, 郝利娜. 基于 SRP 模型的川藏线 2010—2020 年生态脆弱性时空分异与驱动机制研究. 水土保持通报, 2021, 41(6): 201-208.
- [44] 张军民, 荣城, 董国松. 2000—2020 年漓江流域景观生态脆弱性时空分异. 水土保持研究, 2022, 29(5): 283-292.
- [45] Tang B, Tan Z. A study on the spatial-temporal patterns and influencing factors of atmospheric vulnerability in the Pearl River Delta. *PLOS ONE*, 2023, 18(11): e0289436.
- [46] 张学渊, 魏伟, 周亮, 郭泽呈, 李振亚, 张静, 颀斌斌. 西北干旱区生态脆弱性时空演变分析. 生态学报, 2021, 41(12): 4707-4719.
- [47] 黄越, 程静, 王鹏. 中国北方农牧交错区生态脆弱性时空演变格局与驱动因素——以盐池县为例. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1175-1185.
- [48] 杨艳, 周德成, 宫兆宁, 刘子源, 张良侠. 基于植被生产力的黄土高原地区生态脆弱性及其控制因子分析. 生态环境学报, 2022, 31(10): 1951-1958.
- [49] 肖向华. 新疆草原生态修复治理现状分析. 草食家畜, 2021(2): 50-54.