

doi: 10.12029/gc20221025001

郜苏日嘎拉, 王永亮, 陈国栋, 李永春, 薛羽, 张永健, 杜雨春子, 杜银龙, 杨建雨. 2024. 基于 SRP 模型的内蒙古鄂伦春地区生态脆弱性评价[J]. 中国地质, 51(1): 234-247.

Tai Surigala, Wang Yongliang, Chen Guodong, Li Yongchun, Xue Yu, Zhang Yongjian, Du Yuchunzi, Du Yinlong, Yang Jianyu. 2024. Ecological vulnerability assessment of Oroqen Region in the Inner Mongolia based on SRP model[J]. Geology in China, 51(1): 234-247(in Chinese with English abstract).

基于 SRP 模型的内蒙古鄂伦春地区生态脆弱性评价

郜苏日嘎拉¹, 王永亮^{1,2}, 陈国栋¹, 李永春¹, 薛羽⁴,
张永健³, 杜雨春子¹, 杜银龙¹, 杨建雨¹

(1. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古呼和浩特 010010; 2. 内蒙古师范大学, 内蒙古呼和浩特 010028; 3. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆乌鲁木齐 830000; 4. 乌兰察布市气象局, 内蒙古乌兰察布 012000)

摘要:【研究目的】随着社会经济发展和城镇化率不断提高, 当前人类赖以生存的生态环境不断遭受破坏, 生态脆弱性日益严峻, 生态脆弱性评价已成为了诸多专家学者研究的热点。鄂伦春地区从 20 世纪产业结构从狩猎业转变为农牧业以来, 当地生态环境面临脆弱化的风险。本文通过对鄂伦春地区 3 期生态脆弱性评价, 以期为当地环境保护和可持续发展提供科学依据。【研究方法】以内蒙古鄂伦春地区为研究区, 基于 SRP 模型, 选取生态恢复力、生态压力度和生态敏感性等 3 种类型 14 项指标, 利用 GIS 空间主成分分析 (SPCA) 和地理探测器 (GeoDetector) 对鄂伦春地区 2000、2010、2020 年 3 期生态脆弱性空间分布、时空演变和驱动因子进行分析。【研究结果】(1) 鄂伦春地区生态脆弱性整体为良好—轻度脆弱状态, 一般性脆弱区在 3 年的分布面积大致相当, 中度和重度脆弱区主要分布在阿里河镇南部、乌鲁布铁镇南部、大杨树镇和古里乡, 生态环境总体呈现恶化趋势。(2) 鄂伦春地区生态脆弱性在 2000—2010 年间生态环境呈向良好发展趋势, 在 2010—2020 年间生态环境遭受较大破坏, 生态脆弱性明显增加, 2020 年首次出现重度生态脆弱区面积达 111.72 km², 占研究区面积的 0.51%, 生态环境形式严峻。(3) 鄂伦春地区生态脆弱性空间分布主要受生物丰度 (D2)、景观多样性指数 (D3)、高程 (D5)、人口密度 (D13) 等因素影响, 在 2020 年影响因子呈现更加多元化, 蔓延度指数 (D4) 和年均降水量 (D12) 两个指标对当地生态脆弱性有较强的驱动作用, q 值分别为 0.737 和 0.568。【结论】鄂伦春地区 2000、2010、2020 年 3 期生态脆弱性总体呈现西北部低、东南部高的显著特征, 在 2000—2010 年间生态环境向良好发展, 在 2010—2020 年间生态环境呈恶化趋势, 鄂伦春地区生态脆弱性受人为活动和自然因素共同驱动导致。

关键词: SRP 模型; 生态脆弱性; 主成分分析; 地理探测器; 环境地质调查工程; 鄂伦春地区; 内蒙古

创新点: 结合遥感技术, 利用 GIS 平台和地理探测器 (GeoDetector) 对鄂伦春地区 3 期生态脆弱性空间格局, 时空演变进行了分析, 并对生态脆弱性空间分布驱动因子进行了探讨。

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0234-14

Ecological vulnerability assessment of Oroqen Region in the Inner Mongolia based on SRP model

收稿日期: 2022-10-25; 改回日期: 2022-12-08

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20220860) 资助。

作者简介: 郜苏日嘎拉, 男, 1995 年生, 工程师, 主要从事生态地质调查和评价工作; E-mail: taisurgl@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 王永亮, 男, 1993 年生, 工程师, 主要从事生态地质调查和评价工作; E-mail: 635593107@qq.com。

TAI Surigala¹, WANG Yongliang^{1,2}, CHEN Guodong¹, LI Yongchun¹, XUE Yu⁴,
ZHANG Yongjian³, DU Yuchunzi¹, DU Yinlong¹, YANG Jianyu¹

(1. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010028, Inner Mongolia, China; 3. Urumqi Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4. Ulangab Meteorological Bureau, Ulangab 012000, Inner Mongolia, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] With the continuous increase in socio-economic development and the urbanization rate, the ecological environment that supports mankind's survival has been damaged and ecological vulnerability has become more serious. Therefore, ecological vulnerability evaluation has become a hot research topic. Since the industrial structure of the Oroqen Region changed from hunting to farming and livestock in the 20th century, the local ecological environment has been threatened and is likely to be vulnerable to further threats. Consequently, in this paper, the ecological vulnerability of the Oroqen Region was evaluated in three phases to provide a scientific basis for environmental protection and sustainable development. **[Methods]** The Oroqen Region in Inner Mongolia was selected as the study area, and 14 indicators were selected based on the SRP model, which were categorized into three types, namely ecological resilience, ecological sensitivity, and ecological stress. Then, Geographic Information System Spatial Principal Component Analysis (SPCA) and GeoDetector were used to analyze the spatial distribution, spatial and temporal evolution, and driving factors of ecological vulnerability in the Oroqen Region in 2000, 2010, and 2020. **[Results]** (1) The overall ecological vulnerability of the Oroqen Region was a good-mild fragile state, the distribution area of the general fragile area remained stable for about three years, the moderately and severely fragile areas were mainly distributed in the south of Alihe, the south of Ulubuti, Dayangshu, and Guli, and there was an overall research deterioration trend. (2) The ecological vulnerability trend of the Oroqen Region was positive from 2000 to 2010, and the ecological vulnerability increased significantly from 2010 to 2020 when the ecological environment was damaged. Moreover, the area of severe ecological vulnerability that appeared for the first time in 2020 was 111.72 km², accounting for 0.51% of the study area. (3) The spatial distribution of the ecological vulnerability in the Oroqen area was mainly influenced by the biological abundance (D2), landscape diversity index (D3), elevation (D5), population density (D13), and other factors, and the influencing factors were more diverse in 2020. Furthermore, the two indicators SRPeading index (D4) and average annual precipitation (D12) had a strong driving effect on the local ecological vulnerability. **[Conclusions]** The ecological vulnerability of the Oroqen Region was low in the northwest and high in the southeast in 2000, 2010, and 2020, and the ecological environment became less vulnerable from 2000 to 2010 and deteriorated from 2010 to 2020. This was due to the continuous change in the natural conditions and the long-term influence of human activities. The ecological environment of the Oroqen Region is deteriorating in general.

Key words: SRP model; ecological vulnerability; principal component analysis; geographic detector; environmental geological survey engineering; Oroqen Region; Inner Mongolia

Highlights: Combined with remote sensing technology, GIS and GeoDetector were used to analyze the spatial patterns and temporal and spatial evolution of the three stages of ecological vulnerability in the Oroqen Region, and the driving factors of the spatial distribution of the ecological vulnerability were discussed.

About the first author: TAI Surigala, male, born in 1995, engineer, mainly engaged in ecological geological survey and evaluation; E-mail: taisurgl@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: WANG Yongliang, male, born in 1993, engineer, mainly engaged in ecological geological survey and evaluation; E-mail: 635593107@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20220860).

1 引 言

随着世界人口的不断增长,人类对生态环境的

破坏不断加剧,导致生态系统失衡,给人类的生存和
社会的可持续发展产生了巨大压力。生态系统
作为人类赖以生存的条件,生态脆弱性评估可以为

当地生态保护提供依据,促进社会可持续发展。生态脆弱性是生态系统在特定时空尺度相对于外界干扰所具有的敏感反应和自我恢复能力,是生态系统的固有属性(贾晶晶等,2020)。地理学家认为生态脆弱性除了考虑生态系统外,还应更多地关注全球变化和入地关系对生态脆弱性的影响,如地貌、气候、景观格局、植被覆盖等自然要素的差异,研究手段也是多尺度变换的,如空间尺度、时间尺度、景观尺度等。由于生态环境自身的复杂性,脆弱性研究应该是多学科、多尺度相结合,除了以生态学和地理学为主,还应充分运用社会学、经济学、灾害学和气象学等的基本原理与方法(王小丹和钟祥浩,2003)。近些年来,随着社会经济的发展,人类对生态环境日益重视(张慧琳等,2020)。当前国内学者从模糊评价法、层次分析法、熵权灰色关联度评价法、人工神经网络法等评价方法、空间主成分分析法进行了研究,并取得了诸多重要的研究成果。对比各种评价方法均有各自的缺点,其中模糊评价法对评价指标的反应不灵敏,层次分析法的主观性较强,如颜世伟等(2018)选取4项评价指标利用层次分析法进行了生态脆弱性研究,得到结果缺乏客观性。吴春生等(2018)利用模糊评价方法与层次分析法相结合对黄河三角洲进行了生态脆弱性评价,有效降低了人为主观作用太强的缺点。郭婧等(2019)采用熵权灰色关联法研究得出脆弱性与自然生态环境状况和资源禀赋对生态脆弱性有显著效果,但是该方法存在计算过程过于繁琐、操作困难等缺点。有些学者探索了通过人工神经网络模型来评价生态系统的脆弱性的方法(李双成等,2005),虽然人工神经网络模型具有定权客观、量纲无需统一等优点,但是存在选取的指标面临着无数据支撑的缺点。

目前生态脆弱性评价方法中空间主成分分析法得到广泛应用,空间主成分分析法在较大程度上保留原指标的基础上,将多个相关联评价指标通过降维处理得到几个少量的综合评价指标,能有效地避免人为主观随意的影响,提高了评价指标的客观性(付刚等,2018;雷嫦,2021)。由于选择的研究区和反映脆弱性角度的差异,使脆弱性评价方法和指标体系构建尚未统一,因此,在脆弱性定量评价模型及参数筛选方法方面还需进一步研究(刘正佳等,2011)。

本文运用空间主成分分析法(SPCA)和地理探测器(GeoDetector)对鄂伦春地区2000、2010、2020年3期生态脆弱性进行评价,以期探讨鄂伦春地区生态脆弱性空间分布、时空演变特征和空间分布驱动因子,为鄂伦春地区生态脆弱性研究和生态环境保护 and 可持续发展提供科学依据。

2 研究区概况

研究区地处内蒙古自治区呼伦贝尔市东北部,大兴安岭南麓,北与黑龙江省呼玛县以伊勒呼里山为界,东与黑龙江省嫩江县隔江相望,南与莫力达瓦达斡尔族自治旗、阿荣旗接壤,西与根河市、牙克石市为邻(图1)。研究区分布有森林生态系统、草原生态系统、湿地生态系统、农田生态系统和城市生态系统。森林生态系统主要在研究区东北部4个乡镇和乌鲁布铁镇东北部地区;草原生态系统和湿地生态系统主要分布在相对低海拔、河流水系两侧呈交叉分布;农田生态系统以研究区西南部地区乌鲁布铁镇西南部、大杨树镇和古里乡地区;城市生态主要分布在阿里河镇南部旗政府所在地和大杨树镇,其中大杨树镇被称为“中国北方第一镇”。鄂伦春地区属于寒温带半湿润大陆性季风气候,四季变化显著年均气温在 $-2.7\sim-0.8^{\circ}\text{C}$,年降水量 $459.3\sim 493.4\text{ mm}$ 。区内分布暗棕壤土、暗色草甸土、棕色针叶林土、沼泽土、石质土、粗骨土、黑土等7个土类,暗棕壤土分布最广泛,占研究区总面积的43.65%,主要分布在研究区中东部地区,其次为棕色针叶林土,占调查区总面积的30.07%。土地利用类型主要为林地,占研究区总面积的77.15%,耕地占8.7%,草地占8.07%,其他土地占6.08%。地貌类型主要以山地丘陵为主,其中中海拔中起伏山地占47.79%、低海拔小起伏山地占19.71%、低海拔冲积平原占18.71%、低海拔丘陵占9.59%、低海拔中起伏山地占4.20%。

3 评价指标体系与评价方法

3.1 评价指标的选择及预处理

SRP概念模型生态敏感性—生态恢复力—生态压力度(Ecological Sensitivity—Ecological Recovery—Ecological Pressure Model)是一项依据生态系统稳定性而用于评价某一特定地区生态脆弱性而构建

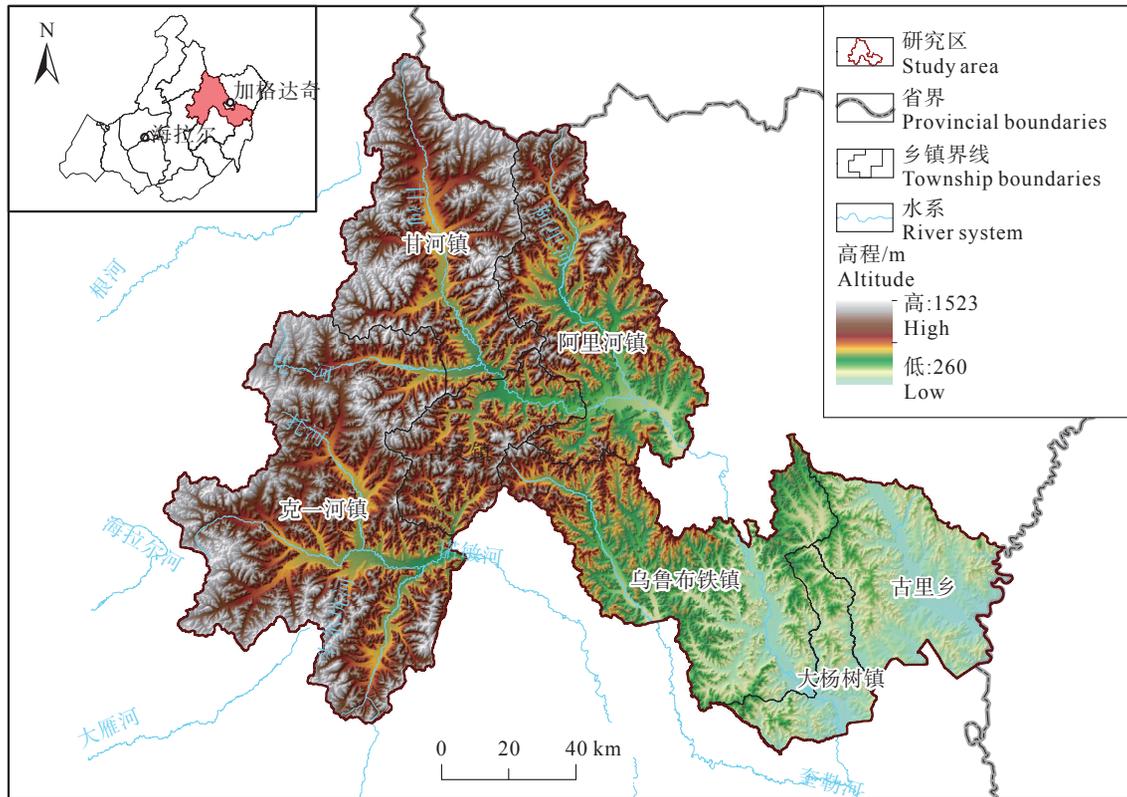


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of study area

的一种综合性评价模型(Zhang et al., 2013)。系统内部具有不稳定的框架结构,对于外界干扰会表现出敏感性,同时会因缺乏应对能力而向不利于自身发展的方向演变,学者普遍认为 SRP 模型涵盖了生态脆弱性的构成要素,同时,随着评估方法的不断完善,该模型的应用也日趋广泛,在进行生态脆弱性评价的研究中应用广泛(李永化等, 2015)。结合鄂伦春地区生态脆弱性的主要成因,遵循生态脆弱性评价指标的客观性、独立性、代表性、科学性和可操作性原则,以生态恢复力、生态压力度和生态敏感性为指标层选取 14 项指标,构建了适宜当地的评价模型。生态恢复力是指生态系统受到外界干扰下的自我调节能力和恢复能力,与生态系统自身的内部结构有关(张霞等, 2020),恢复能力越大,生态系统恢复到平衡状态的可能性越大,脆弱性越小(雷嫦, 2021)。生态恢复力指标选取 NDVI、生物丰度、景观多样性指数和蔓延度指数作为评价因子。生态压力度指生态系统受到社会经济和人类胁迫等外界干扰的压力,受外界干扰的程度越大,

生态脆弱性就越高(张慧琳等, 2020)。生态压力度指标选取人口密度和人均 GDP 数据。生态敏感性是指生态系统受到外界环境和内部环境干扰的反应敏感程度(杨海娟等, 2012),受区域本身生态系统的类型和特征影响,敏感性较高的区域,生态环境遭受破坏的可能性越大,生态环境往往越脆弱。生态敏感性指标选取地形因子、地表因子和气象水文因子,地形因子选取海拔、坡度、地形起伏度指标,地表因子选取土地利用类型、水土流失率和土壤类型。

本次研究共选取 14 项指标,遥感影像数据和 DEM 数字高程数据从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获得,其中遥感影像数据选取 2000、2010、2020 年 6—9 月 landsatTM/OIL 数据作为基础数据,利用 ENVI5.3 和 ArcGIS10.7 软件对获取的遥感影像进行辐射定标、大气矫正、镶嵌融合、裁剪等处理,空间分辨率为 30 m;归一化植被指数利用处理好的遥感数据计算所得,为负向指标;生物丰度参考《生态环境状况评价技术规范》(HJ192—

2015), 利用土地利用类型数据计算所得, 为负向指标; 景观多样性和蔓延度指数利用土地利用类型通过 Fragstats4.3 软件计算所得, 其中景观多样性指数为正向指标, 蔓延度指数为负向指标; 高程、坡度和地形起伏度根据 DEM 数据利用 ArcGIS10.7 软件裁剪、计算获得, 均为正向指标; 水土流失率通过降雨、土地利用类型、土壤类型等一系列数据计算所得, 为正向指标; 3 期土地利用类型数据从全球地表覆盖数据 GlobeLand30 (<http://www.globallandcover.com/>) 上获取, 空间分辨率为 30 m, 为定性指标; 各类行政界线和土壤类型数据从当地自然资源部门收集, 其中评价用的土壤数据为定性指标; 年均气温、年均降水量、人口密度、人口 GDP 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心资源环境科学数据注册与出版系统 (<https://www.resdc.cn/DOI>), 空间分辨率为 1 km, 其中年均气温、年均降水量为负向指标, 人口密度、人口 GDP 为正向指标。

植被归一化指数 (NDVI) 利用 Landsat 遥感影像数据采用公式 (1) 获得, 式中 NIR 为近红外波段, R 为红外波段。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

生物丰度可以反应区域内的生物种类的丰富程度。参考《生态环境状况评价技术规范》(HJ192-2015) 标准和吴滢 (2020) 的研究, 利用土地利用类型计算生物丰度指标, 公式如下:

$$H = A_{bio} \times (0.35 \times A_r + 0.11 \times A_a + 0.28 \times A_w + 0.21 \times A_g + 0.04 \times A_r + 0.01 \times A_u) / E$$

$$A_{bio} = 100 / A_{max} \quad (2)$$

式中: A_{max} 为生物丰度处理前的最大值; A_{bio} 为归一化系数; A_r 为林地面积; A_a 为耕地面积; A_w 为水域面积; A_g 为草地面积; A_r 为建设用地面积; A_u 为未利用地面积; E 为研究区总面积。

景观多样性指数能反映景观斑块类型的复杂程度, 值越大表示景观类型越丰富, 表示人为活动

干扰大 (傅伯杰, 1995; 宋豫秦和曹明兰, 2010), 见计算公式 (3)。

$$SHDI = - \sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i) \quad (3)$$

式中: SHDI 为蔓延度指数; n 表示景观类型数量; P_i 表示 i 类景观类型所占面积。

蔓延度指数能反映景观的联通性, 值越大表示景观连通性越好, 景观破碎程度越低 (邬建国, 2007; 付扬军等, 2019), 见计算公式 (4)。

$$CONTAGE = - \sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i) \quad (4)$$

式中: CONTAGE 为蔓延度指数; n 表示景观类型数量; P_i 表示 i 类景观类型所占面积。

水土流失率作为生态脆弱性的重要指标被诸多学者选用 (李永化等, 2015; 李向伟, 2020), 水土流失计算采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 模型, 见公式 (5)。

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (5)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖度因子; P 为水土保持措施因子。

地形起伏度是一个区域地形特征的一个宏观性的指标, 起伏度越大, 生态脆弱性越强, 见计算公式 (6)。

$$RDLS = \{[\text{Max}(H) - \text{Min}(H)] \times [1 - P(A)/A]\} / 500 \quad (6)$$

式中: RDLS 为研究区内的地形起伏度; $\text{Max}(H)$ 和 $\text{Min}(H)$ 分别为研究区内最高海拔和最低海拔; $P(A)$ 为研究区内平地的面积, 本文所指平地是坡度小于 5° 区域; A 代表研究总面积 (田湘云等, 2022)。

定性指标为土地利用类型和土壤类型, 土地利用类型是参考前人相关研究成果 (马骏等, 2015; 贾晶晶等, 2020) 的基础上结合研究区特征定性指标进行分级赋值, 土壤类型是按照各类土壤的可蚀性 K 值分级赋值 (安宏锋等, 2016), 见表 1, 之后利用公式 (7) 进行数据标准化。

表 1 土地利用类型和土壤类型赋值分级标准

Table 1 Grading standards for assignment of land use types and soil types

赋值标准	2	4	6	8	10
土地利用类型	林地、水域	草地	耕地	建设用地	裸地
土壤类型	暗棕壤	沼泽土	棕色针叶林土	草甸土	黑土

3.2 生态脆弱性评价方法

生态脆弱性评价方法包括评价指标数据标准化、生态脆弱性评价模型以及生态脆弱性分级方法,具体方法如下:

3.2.1 评价指标数据标准化。

各类评价指标差异较大,具有不同的单位量纲且数据来源和数据均不一样,为了评价指标具有合理性和可比性,本文对原始数据进行标准化处理。本文评价指标类型有正向和负向两种性质,其中定性指标先采用分级赋值法标准化,参照前人(雷波等, 2013)的研究,对土地利用类型和土壤类型进行无量纲化处理,对于不同类型赋不同值,最后再进行指标的标准化。正向指标采样公式(7)进行标准化,负向指标采样公式(8)进行标准化(马骏, 2014; 田丰收等, 2019)。

$$\text{正向指标标准化计算公式: } Z_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

$$\text{负向指标标准化计算公式: } Z_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

公式中 Z_i 为第 i 个指标标准化后的值; X_i 为第 i 个原指标值; X_{\max} 为第 i 个指标最大值; X_{\min} 为第 i 个指标最小值。

3.2.2 生态脆弱性评价模型。

本文通过计算生态脆弱性指数(EVI)对鄂伦春地区生态脆弱性进行分析与评价(黄方等, 2003; Li et al., 2006; Wang et al., 2008; 廖炜等, 2011; 艾沙江·艾力等, 2019)。为减少评价指标间的相关性,文中对标准化后的数据采用 Arcgis 空间主成分分析法进行综合分析,通过分析挑选出少数几个指标最大限度的保留大多数指标所反映的空间信息(邓伟等, 2016)。本文选取了累计贡献率大于 85% 的几个主成分作为计算生态脆弱性指数(EVI)的指标,贡献率计算公式(9)如下:

$$A_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (9)$$

式中 A_i 为第 i 个主成分贡献率, λ_i 为第 i 个主成分特征值。

生态脆弱性指数(EVI)计算公式(10)如下:

$$\text{EVI} = \sum_{i=1}^n Y_i \times A_i \quad (10)$$

式中: EVI 为生态脆弱性指数, Y_i 为第 i 个主成分, A_i 为第 i 个主成分贡献率。

3.2.3 生态脆弱性分级方法。

为了便于直观地比较研究区生态脆弱性程度,结合其他学者相关研究,根据鄂伦春地区区域生态现状特征,利用 2000、2010、2020 年 3 期的生态脆弱性评价结果运用 ArcGIS 中自然断点分级法计算出各年度分级标准,求出 3 年的平均值作为本地区最终的生态脆弱性分级标准(刘正佳等, 2011; 张龙等, 2014; 刘慧和师学义, 2020),见表 2。

3.3 生态脆弱性时空演变格局

利用 ArcGIS10.7 软件将 3 期的生态脆弱性评价结果栅格文件转换为矢量文件进行融合处理、使用叠加分析中的相交工具对 3 年的矢量文件进行叠加运算,得到 3 期生态脆弱性变化图斑,用“2000 年生态脆弱性等级-2010 年生态脆弱性等级-2020 年生态脆弱性等级”表示 3 期变化类型(邓华等, 2016; 刘佳茹等, 2020)。

3.4 生态脆弱性空间分布驱动因子分析方法

生态脆弱性空间分布特征受多种因素影响,影响因素之间会存在相似的分布规律。刘婷(2019)根据其遵循的相关规律,利用地理探测器(GeoDetector)研究自变量对因变量的解释程度,分析自变量与因变量在空间分布上的相似性(王钰和胡宝清, 2018; 王鹏等, 2019)。

地理探测器(GeoDetector)是中国科学院地理

表 2 鄂伦春地区生态脆弱性分级标准

Table 2 Grading standards for ecological vulnerability in Oroqen Region

脆弱性分类	脆弱性等级	脆弱性分级标准	生态特征
生态良好区	I	<0.07	生态功能完善, 抗外界能力和自我恢复能力强, 生态脆弱性低
轻度脆弱区	II	0.07~0.21	生态功能较完善, 抗外界能力和自我恢复能力较强, 生态脆弱性较低
一般脆弱区	III	0.21~0.40	生态功能一般, 抗外界能力和自我恢复能力较弱, 生态脆弱性较高
中度脆弱区	IV	0.40~0.69	生态功能出现缺陷, 抗外界能力和自我恢复能力弱, 生态脆弱性高
重度脆弱区	V	>0.69	生态功能严重退化, 抗外界能力和自我恢复能力差, 生态脆弱性极高

科学与资源研究所王劲峰和徐成东(2017)提出的探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法。地理探测器(GeoDetector)包括分异及因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器和生态探测器4种。本文主要采用分异及因子探测器分析鄂伦春地区生态脆弱性空间分布驱动因子, q 值越大说明驱动因子影响力越大,在特定情况下, q 值为1表示自变量的空间分异完全,而 q 值为0表示自变量的空间分布是随机的(叶妍君等,2018)。

分异及因子探测:探测Y的空间分异性;探测某自变量X多大程度上解释了属性Y的空间分异,用 q 值度量,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \quad (11)$$

式中: q 表示评价指标因子对生态脆弱性的解释程度, q 值越大表示指标因子对生态脆弱性的解释力越强,反之越弱; n 为样本数; L 为指标分类数; n_h 为层样本量; σ_h^2 为 h 层的生态脆弱性指数的方差; σ^2 为全区生态脆弱性指数的方差。

4 结果与分析

4.1 鄂伦春地区生态脆弱性整体特征

利用ArcGIS10.7软件中多元分析-主成分分析工具对2000年、2010年和2020年3期14项指标进行主成分分析提取累积贡献率大于85%以上的5项主成分(表3),将指标进行降维简化,在尽可能保留原有数据信息的基础上选取少数综合因子来代替原有较多变量,得到3期研究区生态脆弱性评价的综合因子。2000年第1主成分中人口、景观多样性、生物丰度贡献较大;第2主成分中土壤类型

贡献率最大;第3主成分中坡度和人口贡献率较大;第4主成分中土壤侵蚀、土地利用类型和生物丰度贡献较大;第5主成分中蔓延度指数和景观多样性贡献率大。2010年第1主成分中人口、景观多样性、生物丰度、高程贡献较大;第2主成分中土壤类型贡献率最大;第3主成分中坡度和土壤侵蚀贡献率较大;第4主成分中坡度和土壤侵蚀贡献较大;第5主成分中蔓延度指数、景观多样性和GDP贡献率大。2020年第1主成分中人口、蔓延度指数、生物丰度、高程贡献较大;第2主成分中土壤类型贡献率最大;第3主成分中坡度和土壤侵蚀贡献率较大;第4主成分中坡度、人口和GDP贡献较大;第5主成分中坡度、GDP贡献率大。根据主成分分析结果,利用公式(8)得到鄂伦春地区2000、2010、2020年3期生态脆弱性指数,标准化后如图2a、c、e所示,根据生态脆弱性分级标准对3期生态脆弱性分级如图2b、d、f。

鄂伦春地区2000—2020年3期生态脆弱性整体规律呈“先向好,后转差”的特征,空间上呈“东南部高,西北部低”的分布格局,在整个研究区生态良好区和轻度脆弱区占主导地位。根据3期生态脆弱性分级图(图2d~f)计算出鄂伦春地区生态脆弱性等级面积统计结果如图3所示,按乡镇统计结果如图4所示,3期生态脆弱性等级以生态良好区和轻度脆弱区为主,生态良好区2000—2020年分布面积分别为8205.61 km²、10284.80 km²、4266.41 km²,在2000—2010年间生态良好区明显增加,面积占比从37.81%增加到了47.39%,生态环境有所改善,但在2010—2020年间,分布面积大幅下降,分布面积仅剩19.66%,总体上呈恶化趋势;轻度脆弱区分布

表3 各年度主成分分析结果

Table 3 Results of principal component analysis in each year

年份		主成分				
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
2000	特征值 λ	0.103	0.046	0.021	0.014	0.012
	贡献率A/%	45.148	20.082	9.162	6.297	5.431
	累积贡献率/%	45.148	65.230	74.392	80.688	86.119
2010	特征值 λ	0.095	0.043	0.025	0.017	0.014
	贡献率A/%	41.948	19.108	11.182	7.448	6.143
	累积贡献率/%	41.948	61.056	72.238	79.686	85.829
2020	特征值 λ	0.115	0.050	0.033	0.023	0.017
	贡献率A/%	43.046	18.758	12.253	8.527	6.464
	累积贡献率/%	43.046	61.804	74.057	82.584	89.048

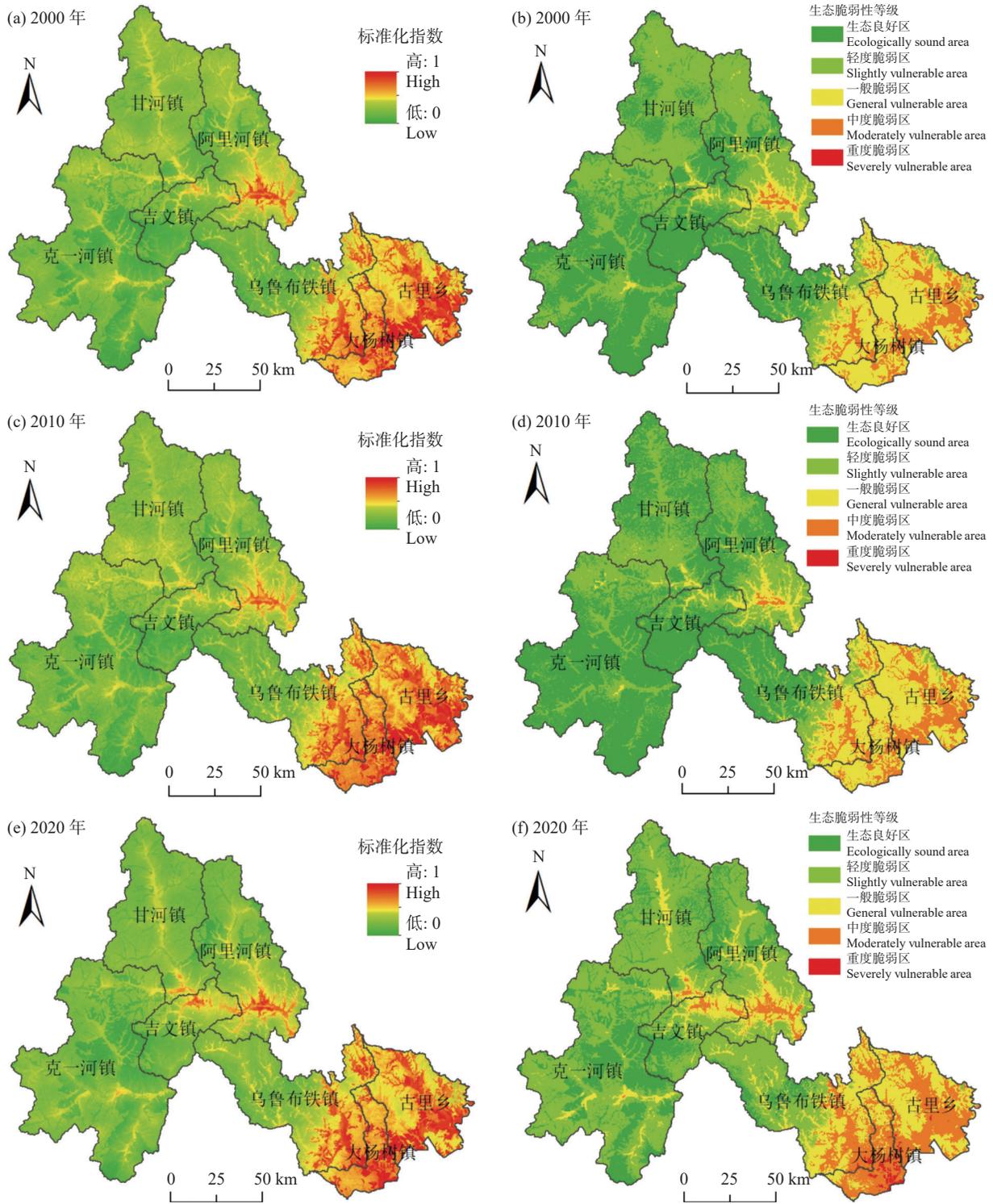


图 2 鄂伦春地区 2000—2020 年 3 期生态脆弱性标准化指数及等级图

Fig.2 Standardized index and grade map of ecological vulnerability of three periods from 2000 to 2020 in Oroqen Region

面积在前 10 年间从 8170.53 km² 下降到 6063.03 km², 面积占比从 37.65% 到 27.94%, 后 10 年分布面积又增加到 10259 km², 占研究区总面积的 47.27%, 总体

上呈恶化趋势; 一般脆弱区在 3 期中分布面积大致相当, 分布面积分别为 3873.66 km²、3759.00 km²、4013.72 km², 占研究区面积的 17.85%、17.32% 和

18.49%，主要分布在研究区中甘河镇、克一河镇、吉文镇、阿里河镇和乌鲁布铁镇大部地区；中度脆弱区 2000—2020 年分布面积分别为 1452.83 km²、1595.80 km²、3051.61 km²，分布面积逐年增加，分别占研究区面积的 6.69%、7.35%、14.06%，生态呈持续恶化状态，具体分布在阿里河镇南部、乌鲁布铁镇东南部、大杨树镇和古里乡；在 2000—2010 年间研究区内未分布重度脆弱区，但在 2010—2020 年间重度脆弱区增加了 111.72 km²，占研究区面积的 0.51%，在乌鲁布铁镇、大杨树镇和古里乡南部耕地集中区零星分布，生态状态有明显恶化趋势。脆弱性高的区域，生态稳定性差，当受到人类不合理活动影响时，容易产生生态环境问题，是生态环境保护和恢复建设的重点，需要加强对当地生态环境保护力度(马一丁等, 2017)。

4.2 鄂伦春地区生态脆弱性时空演变特征

为研究鄂伦春地区 3 期生态脆弱性等级时空演化特征，利用 ArcGIS10.7 软件叠加分析中的相交工具得到 3 期生态脆弱性时空变化类型图(图 5)，并绘制 2000—2010 年和 2010—2020 年生态脆弱性等级转化桑基图(图 6)。鄂伦春地区生态脆弱性时空演变总体特征为“先向好，后转差”的特征，在 2000—2010 年间生态环境呈转好趋势，部分土地从轻度脆弱区转变为生态良好区(图 6a)。在 2010—2020 年间呈转差趋势，生态脆弱性等级较 2010 年明显转差，生态脆弱性从良好转化为轻度脆弱的面积大幅增加(图 6b)。在研究区西北部地区生态脆弱性等级从生态良好区转化为轻度脆弱区或一般脆弱区，该区域属于林区，植被茂密，海拔较高，人口密度低，人类活动对环境的影响小。研究区中阿

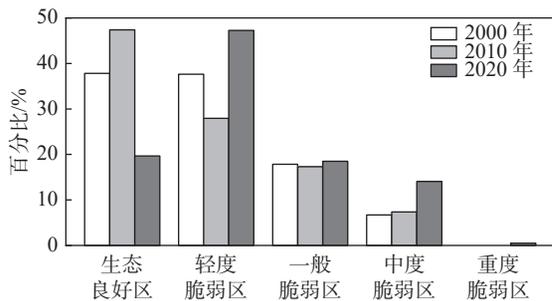


图 3 各年度生态脆弱性等级占比
Fig.3 Proportion of ecological vulnerability grades in each year

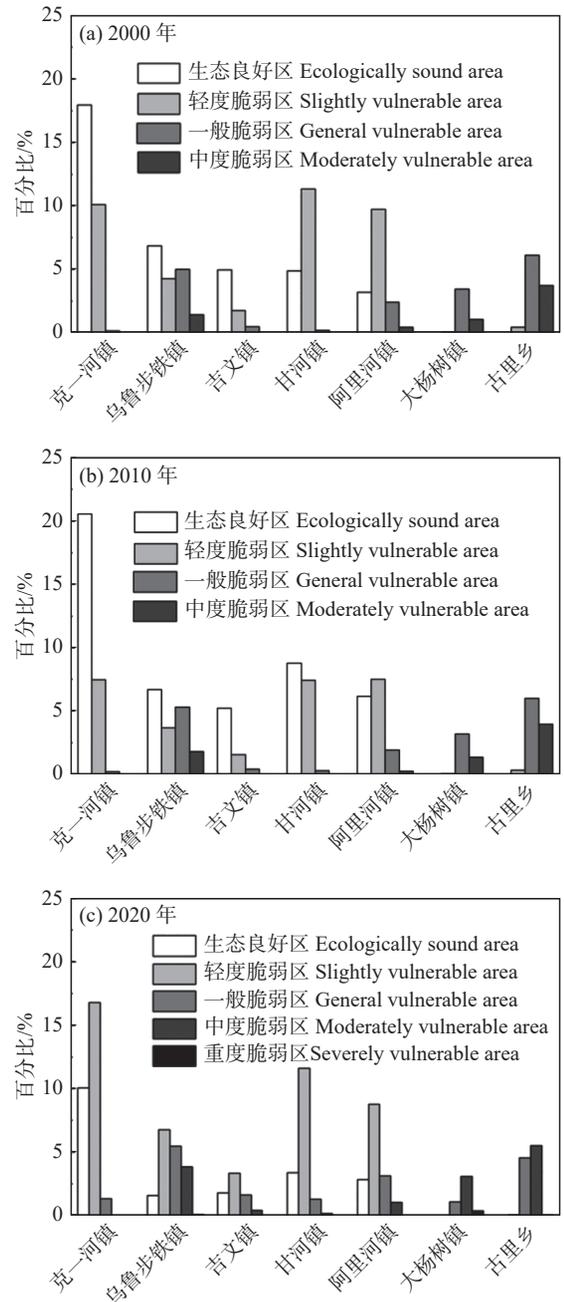


图 4 各年度生态脆弱性等级按乡镇统计
Fig.4 Statistics of ecological vulnerability levels of township in each year

里河镇南部和东南部地区生态脆弱性等级从一般脆弱区或中度脆弱区向中度脆弱区或重度脆弱区转化，该区域内人口居住密集，土地利用类型主要以耕地为主，人为影响导致该区域内生物种类单一化较严重，植被覆盖较研究区西北部疏松，年均降雨量较其他地区相对较高，随着农业活动及种植模式单一和城镇化进程的影响对环境的破坏程度日

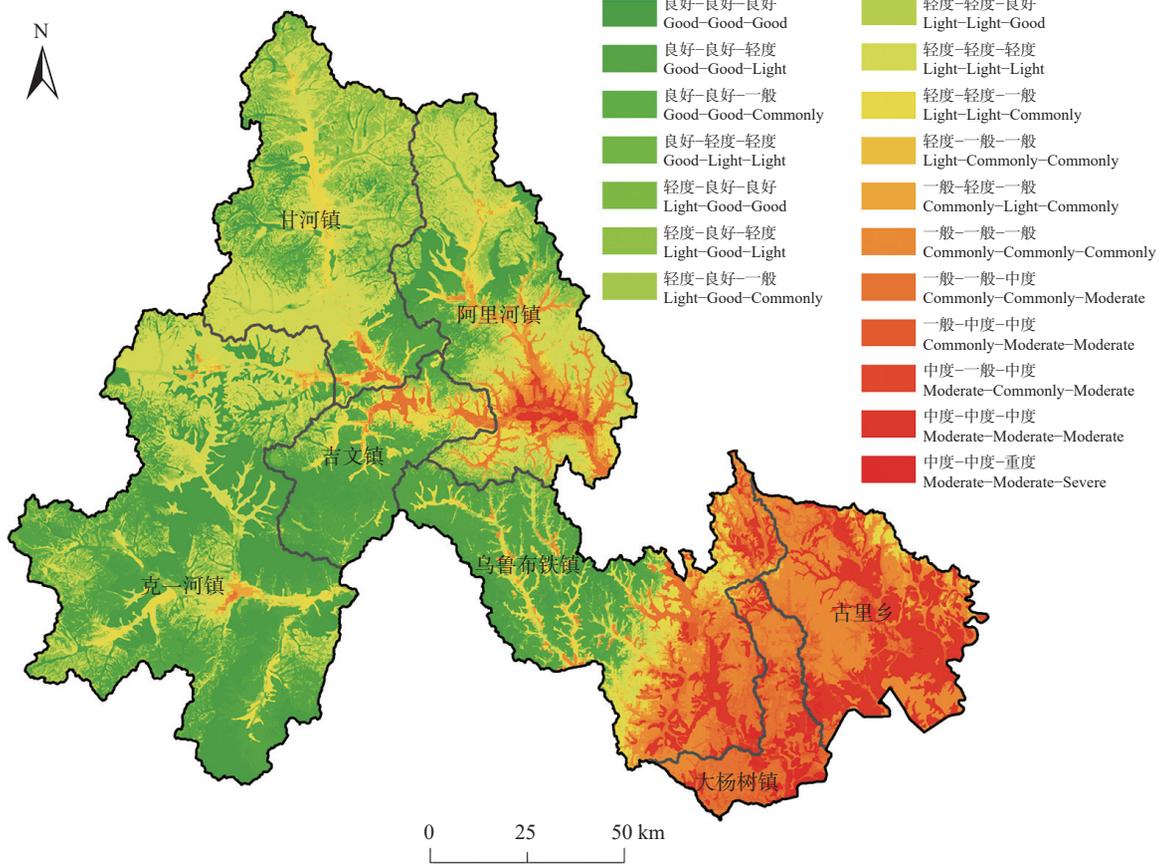


图 5 鄂伦春地区生态脆弱性时空变化类型
Fig.5 Types of spatiotemporal changes in ecological vulnerability in the Oroqen Region

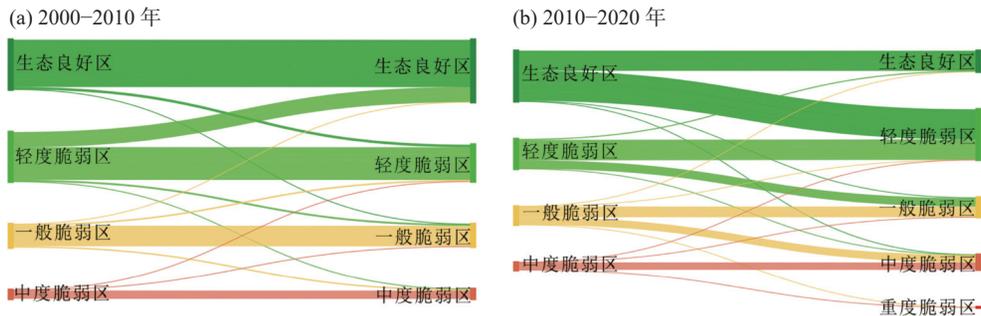


图 6 鄂伦春地区 3 期生态脆弱性等级转移变化
Fig.6 Shifts of ecological vulnerability grades in the Oroqen Region in three phases

益加大,生态环境状况需要引起关注。

4.3 鄂伦春地区生态脆弱性空间分布驱动因子分析

通过地理探测器(GeoDetector)中分异及因子探测器分析 2000、2010、2020 年 3 期鄂伦春地区影响生态脆弱性空间分布格局的驱动因素结果可知(表 4),鄂伦春地区生态脆弱性空间分布特征总体上受生物丰度(D2)、景观多样性指数(D3)、高程

(D5)、人口密度(D13)等因素影响, q 值均大于 0.5, 土地利用类型(D9)、土壤类型(D10)、年均气温(D11)对当地生态脆弱性也有一定驱动作用。从图 7 可以看出在 2020 年影响生态脆弱性空间分布驱动因子除上述因子外蔓延度指数(D4)和年均降水量(D12)也有较强的驱动作用, q 值分别为 0.737 和 0.568, 在 3 期生态脆弱性空间分布驱动因子中

坡度 (D6)、地形起伏度 (D7)、水土流失率 (D8) 驱动因子对鄂伦春地区生态脆弱性空间分布的影响低。

表 4 鄂伦春地区生态脆弱性空间分布驱动因子探测 q 值统计

Table 4 Detection q value statistics of spatial distribution driving factors of ecological vulnerability in Oroqen Region

驱动因子	q 值		
	2000	2010	2020
归一化植被指数NDVI(D1)	0.199*	0.264*	0.260*
生物丰度(D2)	0.564*	0.586*	0.672*
景观多样性指数(D3)	0.682*	0.716*	0.742*
蔓延度指数(D4)	0.343*	0.404*	0.737*
高程(D5)	0.651*	0.700*	0.712*
坡度(D6)	0.085*	0.075*	0.075*
地形起伏度(D7)	0.217*	0.202*	0.200*
水土流失率(D8)	0.064*	0.060*	0.060*
土地利用类型(D9)	0.380*	0.410*	0.378*
土壤类型(D10)	0.370*	0.400*	0.354*
年均气温(D11)	0.432*	0.516*	0.484*
年均降水量(D12)	0.221*	0.243*	0.568*
人口密度(D13)	0.659*	0.671*	0.583*
人均GDP(D14)	0.420*	0.328*	0.085*

注: *表示通过0.05的显著性检验。

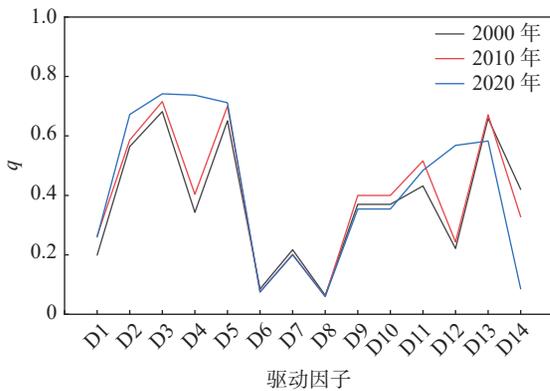


图 7 2000—2020 年鄂伦春地区驱动因子 q 值变化
Fig.7 Change of q value of driving factor in Oroqen Region from 2000 to 2020

5 讨 论

鄂伦春地区从 20 世纪产业结构从狩猎业转变为农牧业以来,当地生态环境面临脆弱化的风险。结合当地实际情况,遵循生态脆弱性评价指标的客观性、独立性、代表性、科学性和可操作性原则,以生态恢复力、生态压力度和生态敏感性为指标层选取 14 项指标对鄂伦春地区 2000 年、2010 年、2020 年 3 期生态脆弱性进行了评价。评价结果显示鄂

伦春地区 3 期生态处于生态良好区和一般脆弱区,空间上分布规律“东南部高,西北部低”的分布格局。生态环境中度—重度脆弱区主要分布区域与城镇分布区域和连片耕地分布区域一致。在 10 年间鄂伦春地区生态脆弱性演变规律为 2000—2010 年间生态环境向良好趋势发展,这与 2000—2010 年国务院批准实施的《东北、内蒙古等重点国有林区天然林保护工程实施方案》即“天然林保护工程一期”息息相关。在 2010—2020 年间生态环境呈恶化态势。

鉴于以上情况,本文通过地理探测器 (GeoDetector) 中分异及因子探测器分析了 2000、2010、2020 年 3 期鄂伦春地区影响生态脆弱性空间分布格局的驱动因素发现当地生态脆弱性受自然因素和人为影响共同驱动的结果,其中生物丰度 (D2)、景观多样性指数 (D3)、人口密度 (D13)、土地利用类型 (D9)、蔓延度指数 (D4) 等因素与人类活动密切相关,高程 (D5)、年均降水量 (D12)、土壤类型 (D10)、年均气温 (D11) 为自然因素。

随着经济社会的发展和产业结构从狩猎业转变为农牧业的影响,对生态环境的破坏不断加大。据统计,鄂伦春自治旗 2000 年、2010 年和 2020 年 GDP 分别为 8.5 亿、38 亿、68.3 亿,当地经济在近 20 年间得到飞速发展。2000 年到 2020 年建筑用地面积逐渐增加,从 86 km² 增加到 125 km²,随着经济发展当地城镇化速率不断加快,加上近几年村村通工程道路的建设等人类活动,对生态环境的造成了一定的破坏,加剧了景观破碎程度,从而导致了 2010 年到 2020 年间的生态脆弱化的加剧。

除了人为因素外研究区自然条件对生态环境的变化也起到了关键作用。从驱动因子分析中得知自然因素里主要驱动因子为高程 (D5) 对当地生态脆弱性影响最大,年均降水量 (D12)、土壤类型 (D10)、年均气温 (D11) 也具有一定的驱动作用。

6 结 论

本文基于 SRP 模型,利用 GIS 主成分分析法和地理探测器 (GeoDetector) 对鄂伦春地区 2000—2020 年 3 期生态脆弱性空间分布特征、时空演变和驱动因子进行了全面分析,得到以下结论:

(1)空间分布方面:生态脆弱性整体规律呈“先

向好, 后转差”的特征, 空间上呈“东南部高, 西北部低”的分布格局。生态良好区和一般脆弱区在 3 期生态脆弱性空间分布中表现为先减后增的趋势, 一般脆弱区分布面积在 3 期大致保持相当, 中度—重度生态脆弱性地区主要分布在阿里河镇南部、乌鲁布铁镇东南部、大杨树镇和古里乡分布, 重度脆弱区只在 2020 年中分布, 面积为 111.72 km², 占研究区面积的 0.51%, 主要分布在乌鲁布铁镇、大杨树镇和古里乡南部地区, 主要受常年耕作和城镇化加速发展导致该区域生态脆弱性呈加剧趋势。

(2) 时空演变方面: 通过分析评价近 20 年来鄂伦春地区生态脆弱性得出, 鄂伦春地区生态脆弱性在 2000—2010 年间生态环境呈向良好发展趋势, 土地从轻度脆弱区转变为生态良好区。在 2010—2020 年间生态持续恶化, 生态脆弱性等级较 2010 年明显恶化, 生态脆弱性演变规律总体上从良好向脆弱转化, 生态环境形式严峻。

(3) 驱动因子方面: 通过 GIS 和地理探测器 (GeoDetector) 对鄂伦春地区生态脆弱性空间分布驱动因子进行了系统分析, 总结为鄂伦春地区生态脆弱性空间分布主要受生物丰度 (D2)、景观多样性指数 (D3)、高程 (D5)、人口密度 (D13) 等因素影响, 在 2020 年除以上因素外还受蔓延度指数 (D4) 和年均降水量 (D12) 两个因素影响较大。坡度 (D6)、地形起伏度 (D7)、水土流失率 (D8) 驱动因子对鄂伦春地区生态脆弱性空间分布的影响低。鄂伦春地区生态脆弱性受人为活动和自然因素共同驱动导致。

致谢: 感谢在论文撰写过程中提供帮助的项目组成员, 特别感谢两位匿名审稿专家和期刊编辑提出的宝贵修改意见。

References

- Aishajiang Aili, Xu Hailiang, Yuan Kaiye. 2019. Assessment of the effects of artificial restoration measures in abandoned gold mining area in Altay Mountains using PCA and monitoring data[J]. *Arid Land Geography*, 42(2): 288–294 (in Chinese with English abstract).
- An Hongfeng, Xu Hao, An Ning, Wang Zhiming, Zuo Siyi. 2016. Comprehensive Evaluation of Eco-environmental Vulnerability in Karst Mountain Areas—Central Region of Guizhou Province as An Example[J]. *Environmental Impact Assessment*, 38(4): 51–56 (in Chinese with English abstract).
- Deng Hua, Shao Jing'an, Wang Jinliang, Gao Ming, Wei Chaofu. 2016. Land use driving forces and its future scenario simulation in the Three Gorges Reservoir Area using CLUE-S model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 71(11): 1979–1997 (in Chinese with English abstract).
- Deng Wei, Yuan Xingzhong, Sun Rong, Zhang Yuewei. 2016. Eco-vulnerability Assessment Based on Remote Sensing in the argo-pastoral Ecotone of North China[J]. *Environmental Science & Technology*, 39(11): 174–181 (in Chinese with English abstract).
- Fu Boming. 1995. Landscape diversity analysis and mapping[J]. *Acta Ecologica Sinica*, (4): 345–350 (in Chinese with English abstract).
- Fu Gang, Bai Jiade, Qi Yue, Yan Bing, He Jing, Xiao Nengwen, Li Junsheng. 2018. Ecological vulnerability assessment in Beijing based on GIS spatial analysis[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 34(9): 830–839 (in Chinese with English abstract).
- Fu Yangjun, Shi Xueyi, He Juan. 2019. The spatio-temporal evolution characteristics of landscape fragmentation in Fenhe River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 34(8): 1606–1619 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jing, Wei Zhen, Ren Jun, Zhou Huakun, Shi Yan. 2019. Analysis on ecological vulnerability in highcold and povertystricken mountainous areas based on entropy and gray correlation methods[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(3): 191–199 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fang, Liu Xiangna, Zhang Yangzhen. 2003. GIS-based eco-environmental vulnerability evaluation in west Jilin Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, (1): 95–100 (in Chinese with English abstract).
- Jia Jingjing, Zhao Jun, Wang Jianbang, Gao Chao, Chang Ruoying. 2020. Ecological vulnerability assessment of Shiyang River basin based on SRP model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 34(1): 34–41 (in Chinese with English abstract).
- Lei Bo, Jiao Feng, Wang Zhijie, Liu Yuanxin, Zhu Letian. 2013. Eco-environment vulnerability assessment of typical small watersheds in different vegetation zones of loess hilly area[J]. *Journal of Natural Disasters*, 22(5): 149–159 (in Chinese with English abstract).
- Lei Chang. 2021. Dynamic Assessment of Environmental Vulnerability in Karst Mountain City Based on SRP Model—Taking Guiyang City as an Example[D]. Guiyang: Guizhou Normal University (in Chinese with English abstract).
- Li A N, Wang A S, Liang S L, Zhou W C. 2006. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS—A case study in the upper reaches of Minjiang River, China[J]. *Ecological Modelling*, 192: 175–187.
- Li Shuangcheng, Wu Shaohong, Dai Erfu. 2005. Assessing the fragility of ecosystem using artificial neural network model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, (3): 621–626 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiangwei. 2020. Rapid monitoring of soil and water loss in Beijing Based on MODIS data[J]. *Yangtze River*, 51(S2): 41–44 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract).
- Li Yonghua, Fan Qiang, Wang Xue, Xi Jianchao, Wang Shiyang, Yang Jun. 2015. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability under the frequency of natural hazard based on SRP Model: A case study in Chaoyang County[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35(11): 1452–1459 (in Chinese with English abstract).
- Liao Wei, Li Lu, Wu Yijin, Shi Zihua. 2011. Land use change and eco-environmental vulnerability evaluation in the Danjiangkou reservoir area[J]. *Journal of Natural Resources*, 26(11): 1879–1889 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hui, Shi Xueyi. 2020. Spatio-temporal evolution and zoning of ecological vulnerability of Jingle County[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 36(1): 34–43 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiaru, Zhao Jun, Shen Simin, Zhao Yanjun. 2020. Ecological vulnerability assessment of Qilian Mountains region based on SRP conceptual model[J]. *Arid Land Geography*, 43(6): 1573–1582 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ting. 2019. Temporal and Spatial Pattern Changes and Driving Force Analysis of Ecological Environment Vulnerability in Panzhihua City[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhengjia, Yu Xingxiu, Li Lei, Huang Mei. 2011. Vulnerability assessment of eco-environment in Yimeng mountainous area of Shandong Province based on SRP conceptual model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(8): 2084–2090 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jun, Li Changxiao, Wei Hong, Ma Peng, Yang Yujing, Ren Qingshui, Zhang Wen. 2015. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(21): 7117–7129 (in Chinese with English abstract).
- Ma Jun. 2014. Dynamic Evaluation of Ecological Vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Section, China[D]. Chongqing: Southwest University (in Chinese with English abstract).
- Ma Yiding, Fu Xiao, Tian Ye, Wang Chenxing, Wu Gang. 2017. Analysis of the ecological vulnerability of the coal-electricity base area in Xilinguole League[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(13): 4505–4510 (in Chinese with English abstract).
- Song Yuqin, Cao Minglan. 2010. Landscape ecological security assessment of Beijing City based on RS and GIS[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(11): 2889–2895 (in Chinese with English abstract).
- Tian Fengshou, Liu Xiping, Yuan Weipeng. 2019. Ecological risk assessment of farmland non-point source pollution in Hotan Prefecture, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 42(2): 295–304 (in Chinese with English abstract).
- Tian Xiangyun, Zhang Chao, Chen Qi, Shi Xiaorong, Wang Yan. 2022. Relief degree of land surface and its influence on the soil erosion in rocky desertification area of southeast Yunnan[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 37(3): 162–170 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. 2017. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116–134.
- Wang Peng, Liu Xiaopeng, Wang Yajuan, Han Xiaoja, Wen Shengqiang. 2019. Ecological migration process and the evaluation of its ecosystem service value in Loess hilly and gully region: A case study of Haiyuan County, Ningxia[J]. *Arid Land Geography*, 42(2): 433–443 (in Chinese with English abstract).
- Wang S Y, Liu J S, Yang C J. 2008. Eco-Environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China[J]. *Pedosphere*, (2): 171–182.
- Wang Xiaodan, Zhong Xianghao. 2003. Approaches to concept of vulnerability of ecology and environment[J]. *Mountain Research*, 21(S1): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yu, Hu Baoqing. 2018. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability of Xijiang River in Guangxi and its driving mechanism[J]. *Journal of Geo-information Science*, 20(7): 947–956 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chunsheng, Huang Chong, Liu Gaohuan, Liu Qingsheng. 2018. Assessment of ecological vulnerability in the Yellow River Delta using the fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(13): 4584–4595 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jianguo. 2007. Landscape Ecology—Pattern, Process, Scale and Hierarchy[M]. Beijing: Higher Education Press, 95–110 (in Chinese).
- Wu Ying. 2020. Spatiotemporal Differentiation of Ecological Vulnerability in Hefei City Based on PSR Model[D]. Hefei: Hefei University (in Chinese with English abstract).
- Yan Shiwei, Jiang Liwei, Zhang Yueying. 2018. Evaluation of ecological vulnerability of Yijinhuluo Banner based on AHP[J]. *Forest Resources Management*, (6): 45–49 (in Chinese with English abstract).
- Yang Haijuan, Wen Xiaojin, Liu Yanxu, Wen Wen. 2012. Effects of landuse on ecological restoring force in Qinling Mountainous Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 32(4): 261–266 (in Chinese with English abstract).
- Ye Yanjun, Qi Qingwen, Jiang Lili, Zhang An. 2018. Impact factors of grain output from farms in Heilongjiang reclamation area based on geographical detector[J]. *Geographical Research*, 37(1): 171–182 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huilin, Wu Pansheng, Hou Yanjun. 2020. Ecological vulnerability assessment and its temporal and spatial changes in Wutai Mountain Area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 36(8): 1026–1035 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Song Ge, Meng Fei, Wang Xuwei. 2014. Spatiotemporal variation analysis of the land ecological vulnerability in Ning'an City, Heilongjiang Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 21(2): 133–137, 143 (in Chinese with English abstract).

abstract).

Zhang R G, Xia L, Heathman G C, Yao X Y, Hu X L, Zhang G C. 2013. Assessment of soil erosion sensitivity and analysis of sensitivity factors in the Tongbai-Dabie mountainous area of China[J]. *Catena*, 101: 92-98.

Zhang Xia, Zhou Zhongfa, Zhu Changli, Ma Guoxuan, Chen Quan. 2020. Coupling relation between ecological vulnerability and economic poverty in karst mountain area—A case study at Libo County of Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 40(5): 227-233 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

艾沙江·艾力, 徐海量, 苑增焯. 2019. 基于主成分分析法和监测数据的阿尔泰山采金废弃矿区人工恢复措施效益分析[J]. *干旱区地理*, 42(2): 288-294.

安宏锋, 徐浩, 安宁, 王之明, 左思艺. 2016. 喀斯特山区生态环境脆弱性综合评价——以贵州省黔中地区为例[J]. *环境影响评价*, 38(4): 51-56.

邓华, 邵景安, 王金亮, 高明, 魏朝富. 2016. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J]. *地理学报*, 71(11): 1979-1997.

邓伟, 袁兴中, 孙荣, 张跃伟. 2016. 基于遥感的北方农牧交错带生态脆弱性评价[J]. *环境科学与技术*, 39(11): 174-181.

付刚, 白加德, 齐月, 闫冰, 贺婧, 肖能文, 李俊生. 2018. 基于 GIS 的北京市生态脆弱性评价[J]. *生态与农村环境学报*, 34(9): 830-839.

付扬军, 师学义, 和娟. 2019. 汾河流域景观破碎化时空演变特征[J]. *自然资源学报*, 34(8): 1606-1619.

傅伯杰. 1995. 景观多样性分析及其制图研究[J]. *生态学报*, (4): 345-350.

郭婧, 魏珍, 任君, 周华坤, 师燕. 2019. 基于熵权灰色关联法的高寒贫困山区生态脆弱性分析——以青海省海东市为例[J]. *水土保持通报*, 39(3): 191-199.

黄方, 刘湘南, 张养贞. 2003. 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*, (1): 95-100.

贾晶晶, 赵军, 王建邦, 高超, 常若莹. 2020. 基于 SRP 模型的石羊河流域生态脆弱性评价[J]. *干旱区资源与环境*, 34(1): 34-41.

雷波, 焦峰, 王志杰, 刘源鑫, 朱乐天. 2013. 黄土丘陵区不同植被带典型小流域生态脆弱性评价[J]. *自然灾害学报*, 22(5): 149-159.

雷嫦. 2021. 基于 SRP 模型的贵阳市生态环境脆弱性动态评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学.

李双成, 吴绍洪, 戴尔阜. 2005. 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*, (3): 621-626.

李向伟. 2020. 基于 MODIS 数据的北京市水土流失快速监测[J]. *人民长江*, 51(S2): 41-44.

李永化, 范强, 王雪, 席建超, 王诗阳, 杨俊. 2015. 基于 SRP 模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究——以辽宁省朝阳县为例[J]. *地理科学*, 35(11): 1452-1459.

廖炜, 李璐, 吴宜进, 史志华. 2011. 丹江口库区土地利用变化与生态

环境脆弱性评价[J]. *自然资源学报*, 26(11): 1879-1889.

刘慧, 师学义. 2020. 静乐县生态脆弱性时空演变与分区研究[J]. *生态与农村环境学报*, 36(1): 34-43.

刘佳茹, 赵军, 沈思民, 赵彦军. 2020. 基于 SRP 概念模型的祁连山区生态脆弱性评价[J]. *干旱区地理*, 43(6): 1573-1582.

刘婷. 2019. 攀枝花市生态环境脆弱性时空格局变化及驱动力分析[D]. 成都: 成都理工大学.

刘正佳, 于兴修, 李蕾, 黄玫. 2011. 基于 SRP 概念模型的沂蒙山区生态环境脆弱性评价[J]. *应用生态学报*, 22(8): 2084-2090.

马骏, 李昌晓, 魏虹, 马朋, 杨予静, 任庆水, 张雯. 2015. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. *生态学报*, 35(21): 7117-7129.

马骏. 2014. 三峡库区重庆段生态脆弱性动态评价[D]. 重庆: 西南大学.

马一丁, 付晓, 田野, 王辰星, 吴钢. 2017. 锡林郭勒盟煤电基地开发生态脆弱性评价[J]. *生态学报*, 37(13): 4505-4510.

宋豫秦, 曹明兰. 2010. 基于 RS 和 GIS 的北京市景观生态安全评价[J]. *应用生态学报*, 21(11): 2889-2895.

田丰收, 刘新平, 原伟鹏. 2019. 新疆和田地区耕地面源污染生态风险评价[J]. *干旱区地理*, 42(2): 295-304.

田湘云, 张超, 陈棋, 史小蓉, 王妍. 2022. 滇东南石漠化地区地形起伏度对水土流失的影响[J]. *西北林学院学报*, 37(3): 162-170.

王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 72(1): 116-134.

王鹏, 刘小鹏, 王亚娟, 韩晓佳, 温胜强. 2019. 黄土丘陵沟壑区生态移民过程及其生态系统服务价值评价——以宁夏海原县为例[J]. *干旱区地理*, 42(2): 433-443.

王小丹, 钟祥浩. 2003. 生态环境脆弱性概念的若干问题探讨[J]. *山地学报*, 21(S1): 21-25.

王钰, 胡宝清. 2018. 西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究[J]. *地球信息科学学报*, 20(7): 947-956.

邬建国. 2007. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 95-110.

吴春生, 黄狮, 刘高焕, 刘庆生. 2018. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价[J]. *生态学报*, 38(13): 4584-4595.

吴滢. 2020. 基于 PSR 模型的合肥市生态脆弱性时空分异研究[D]. 合肥: 合肥学院.

颜世伟, 蒋丽伟, 张月莹. 2018. 基于层次分析法的伊金霍洛旗生态脆弱性评价[J]. *林业资源管理*, (6): 45-49.

杨海娟, 温晓金, 刘焱序, 文雯. 2012. 秦岭土石山区土地利用程度对生态恢复力的影响评价[J]. *水土保持通报*, 32(4): 261-266.

叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 张岸. 2018. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析[J]. *地理研究*, 37(1): 171-182.

张慧琳, 吴攀升, 侯艳军. 2020. 五台山地区生态脆弱性评价及其时空变化[J]. *生态与农村环境学报*, 36(8): 1026-1035.

张龙, 宋戈, 孟飞, 王学伟. 2014. 宁安市土地生态脆弱性时空变化分析[J]. *水土保持研究*, 21(2): 133-137, 143.

张霞, 周忠发, 朱昌丽, 马国璇, 陈全. 2020. 喀斯特山区生态脆弱性与经济贫困的耦合关系——以贵州省荔波县为例[J]. *水土保持通报*, 40(5): 227-233.