

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

孙宇晴^{1,2}, 杨鑫^{1,2}, 郝利娜²

(1.成都理工大学 地球勘探与信息技术教育部重点实验室,
四川 成都 610059; 2.成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: [目的] 探究川藏铁路沿线 2010—2020 年生态脆弱性时空分布特征,厘清生态脆弱格局规律以及空间相关性,为沿线生态环境保护以及建后可持续发展工作提供科学依据。[方法] 以川藏线(雅安—新都桥段)为例,基于研究区实地特征和 SRP 模型选取与生态脆弱性密切相关的 15 个因子构建研究区生态脆弱性评价指标体系。综合运用空间主成分分析、空间自相关、热点分析、地理探测器等方法开展研究。[结果] ①时空分布上,研究区整体脆弱性由西向东呈递减分布,2010—2020 年生态状况整体向好,重度与极度脆弱区范围较小,占总面积的 3.95%,主要分布在康定市与天全县、泸定县的交界处,此处为高寒地带,冻融侵蚀最为严重; ②研究区生态脆弱性分布具有较强聚类特征,高低值集聚模式共存,西部为热点高度集聚区,东部为冷点高度集聚区; ③高程、年均气温、植被净初级生产力是导致研究区生态脆弱的主要因素。[结论] 川藏线(雅安—新都桥段)施工建设受降水和气温影响较大,地形复杂,要注意地质灾害防控并加强环境保护与生态维持。

关键词: SRP 模型; 川藏线; 生态脆弱性; 热点分析; 地理探测器; 驱动机制

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0201-08

中图分类号: X171

文献参数: 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[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 201-208. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.027; Sun Yuqing, Yang Xin, Hao Lina. Spatial and temporal differentiation and driving mechanism of ecological vulnerability along Sichuan-Tibet railway during 2010—2020 based on SRP model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 201-208.

Spatial and temporal Differentiation and Driving Mechanism of Ecological Vulnerability Along Sichuan-Tibet Railway During 2010—2020 Based on SRP Model

Sun Yuqing^{1,2}, Yang Xin^{1,2}, Hao Lina²

(1.Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of
Education, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2.College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal distribution characteristics of ecological vulnerability along Sichuan-Tibet railway from 2010 to 2020 was explored, and the pattern and spatial correlation of ecological vulnerability was clarified, in order to provide scientific basis for ecological environment protection and sustainable development after construction. [Methods] Taking the Sichuan and Tibet railway (Ya'an—Xinduqiao section) as an example, 15 factors closely related to ecological vulnerability were selected based on the field characteristics and SRP model to construct the ecological vulnerability evaluation index system. Spatial principal component analysis (PCA), spatial autocorrelation, hot spot analysis and geographic detector were used to carry out the research. [Results] ① In terms of spatial and temporal distribution, the overall vulnerability

收稿日期: 2021-05-06

修回日期: 2021-08-02

资助项目: 中国博士后科学基金第 13 批特别项目“重大工程背景下黄土高原生态地质环境脆弱性评价”(2020T130074); 中国博士后科学基金项目(二等)“近 50 年黑方台黄土滑坡与农作物更替时空耦合机制分析”(2017M622982)

第一作者: 孙宇晴(1997—), 女(汉族), 山东省济宁市人, 硕士研究生, 研究方向为“3S”技术与数字国土在生态环境方面的应用。E-mail: 1209433380@qq.com。

通讯作者: 杨鑫(1984—), 男(汉族), 宁夏回族自治区中卫市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事 3S 技术在地学中的应用等方面的研究。E-mail: yangxin2012@cdut.edu.cn。

of the study area decreased from west to east, and the ecological status of the study area improved from 2010 to 2020. The severe and extremely vulnerable areas were small, accounting for 3.95% of the total area, and mainly distributed in the junction of Kangding City, Tianquan County and Luding County, which was an alpine zone with the most serious freezing-thawing erosion. ② The distribution of ecological vulnerability in the study area has strong clustering characteristics, with high and low values co-existing. In the west, hot spots are highly concentrated, while in the east, cold spots are highly concentrated. ③ Elevation, average annual temperature and net primary productivity of vegetation were the main factors leading to ecological fragility in the study area. [Conclusion] The construction of the Sichuan-Tibet railway (Ya'an to Xinduqiao section) was greatly affected by precipitation and temperature, and the terrain was complicated. Therefore, attention should be paid to geological disaster prevention and control, environmental protection and ecological maintenance.

Keywords: SRP model; Sichuan-Tibet railway; ecological vulnerability; hotspot analysis; geodetector; driving mechanism

生态脆弱性是指生态系统在特定时空尺度下对外界扰动所具有的敏感性和恢复能力,是在遭受侵扰后表现出来的使系统朝着逆方向发展并难以恢复原状的自然属性^[1]。20世纪60—80年代,脆弱性研究已被很多国际学术计划与机构(IBM, MAB, IGBP等)提及并放于战略研究位置^[2-4]。现今国内外对于生态脆弱性的研究已取得大量成果,衍生出多种评价模型与方法,计算方法包括主成分分析法^[5]、层次分析法^[6-7]、模糊综合评价法^[8]、灰色关联法^[9]、熵权法^[10]、专家咨询法等^[11]。在评价模型方面,目前比较权威的评价模型包括PSR即“压力—状态—响应”概念模型、“暴露—敏感—适应”(VSD)评价整合模型、SRP即“生态敏感性—生态恢复力—生态压力度”评价概念模型等。其中SRP模型主要以生态系统稳定性的内涵为依据构建而成,其结构系统地涵盖了生态脆弱性的构成指标,已在生态脆弱性评价中得到广泛应用^[12]。生态脆弱性研究系统现今已发展的较为完善,但在研究区域选择上还存在不全面性。在以往研究中通常以行政区划、河流流域、山地高原、特定景观地带如自然保护区等为研究单位,针对国家重点道路沿线生态脆弱性的研究较少。而对于国家重点道路本身,铁路基础设施是国民经济的大动脉,道路能否安全运行至关重要^[13]。国家重点道路不属于通常的单一研究区域,其沿线地理空间特征是反映周边各地区自然与社会差异的关键。习近平总书记在对川藏铁路开工建设作出重要批示时强调,川藏铁路沿线地形地质和气候条件复杂,生态环境脆弱,修建难度非常之大。此外,沿线施工,会破坏原有的生态平衡,导致生态环境进一步受到威胁。以往关于川藏铁路的相关研究主要集中在选线的地质环境条件^[14-15]和沿线的地质灾害易发性等^[16]问题上,而对于沿线生态脆弱性的研究极少。为此,本文以川藏

线(雅安—新都桥段)为例,基于研究区实地特征选取与生态脆弱性密切相关的15个因子构建生态脆弱性评价指标体系,考虑到各个指标之间可能存在着相关性,通过空间主成分分析方法予以剔除,并根据选取的各个主成分的特征根得到其权重,建立最终的SRP评价模型^[17]。本研究基于地理学、数学、统计学等多学科,综合运用空间主成分分析、空间自相关、热点分析、地理探测器等研究方法,探究研究区2010—2020年生态脆弱性时空分布特征,厘清生态脆弱格局规律以及空间相关性,以期为沿线生态环境保护以及建后可持续发展工作提供科学的理论依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

川藏铁路地质环境极为复杂,为了使研究更具代表性和多样性,选取川藏铁路海拔地形相差较大、人类活动有明显差异的地域,比较各种特征因素对生态脆弱性的影响。为此,本次研究线路选取位于川西高原与四川盆地过渡地带的雅安至康定(新都桥)段,该段始于成雅铁路雅安站,向西经天全,越二郎山,跨大渡河,经泸定、康定,越折多山至新都桥站,路段长约248 km^[18]。研究区(29°48′—30°14′N, 101°25′—103°2′E)面积约6 800 km²。研究区地势西高东低,位于青藏高原东南缘川滇、巴颜喀拉、华南地块交汇处,属于印度板块俯冲并与欧亚板块碰撞的碰撞带东北侧,新构造运动剧烈,滑坡、泥石流等地质灾害频发^[19],主要行政区域为康定、泸定、雅安(宝兴、芦山、天全、荣经和雨城)的部分地区。2013年雅安市芦山县发生过7.0级地震,并且研究区内涉及多处环境敏感区^[18]。本文选取2010年(2013年4·20雅安地震与2014年11·22康定地震震前时间节点),2015年(震后时间节点),2020年(震后基本修复后时间节

点)为 3 个时间段,这期间显著的地质构造变化、环境保护建设以及经济格局的快速发展为区域内生态脆弱演变提供了良好的研究条件。

1.2 数据来源与处理

本文所需数据包括地形数据、气象数据、人文数据和其他植被、地灾等数据。地形数据包括高程、坡度和地形起伏度,由中科院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>)下载的分辨率为 12.5 m 的 DEM 数据提取获得,另外地震点基础数据也从该网站下载获取;气象数据包括年均气温、年均降水和干燥指数,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),并借助于 ANUSPLIN 工具以经纬度与高程作为协变量插值获取^[20]。人文数据主要是人口密度、人均 GDP,均从全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn/>)获取,并通过在 91 卫图中进行人工目视解译以及与研究区所在区县的统计年鉴进行比对,对原数据进行改善使其精度更高更符合研究区实地情况;植被覆盖度与土地利用类型数据通过 USGS 下载的 Landsat 影像分别进行 NDVI 计算和人机交互解译获取;土壤侵蚀强度和植被净初级生产力(NPP)分别采用土壤流失方程(RUSLE)^[21]和 CASA 模型^[22]计算,此处不再赘述;生物丰度是反映区域内生物多样性、生物物种数量多少的指数,由土地利用分类数据计算得出^[23-24]。最后基于双线性内插法将所有基础数据统一重采样为 30 m 空间分辨率数据,以便进行后续分析

2 研究方法

2.1 评价模型构建

SRP 模型即“生态敏感性—生态恢复力—生态压力度”概念模型,是一项专门用于评价某一特定区域生态脆弱性的综合评价模型。其中生态敏感性是指研究区生态环境对各种干扰的敏感程度,反映其抵御干扰的能力;生态恢复力是指在外来力量的干扰消除后,生态环境从退化状态恢复到原状的能力;生态压力度是指研究区内人类社会活动对生态环境带来的压力强度^[25]。针对研究区的实地特征,利用该模型选取与研究区域内生态脆弱性密切相关的指标,设置各不同指标的权重值,将所有权重值与指数的相乘结果再相加的方式,最终得出研究区生态脆弱性指标^[23]。根据该模型以及研究区自然与人文环境特征,选取 15 个指标,构建研究区生态脆弱性评价指标体系^[26](表 1)。

由于不同指标量纲不同,要进行指标之间的比较分析,就要制定一个统一的规则,因此要进行标准化

处理^[23]。本文指标整体分为定量指标和定性指标。定量指标采用极差法,根据各个评价指标对研究区生态环境的消极或积极影响,将其分为正向指标和负向指标(表 1)。

表 1 川藏线(雅安—新都桥段)生态脆弱性评价指标体系

目标层	准则层	要素层	指标层	指标性质
川藏线(雅安—新都桥)生态脆弱性	生态敏感性	地形因子	高程	负
			坡度	正
			地形起伏度	正
	生态敏感性	气象因子	年均气温	负
			年降水量	负
			干燥指数	正
	生态恢复力	植被因子	降雨侵蚀力	正
			土地利用类型	正
			土壤侵蚀强度	正
	生态恢复力	植被因子	地震强度	正
			植被净初级生产力(NPP)	负
			植被覆盖度	负
	生态压力度	社会因子	生物丰度	负
			人口密度	正
			GDP 密度	正

定量指标标准化公式为:

(1) 正向指标:

$$Y_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 10 \quad (1)$$

(2) 负向指标:

$$Y_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \times 10 \quad (2)$$

式中: Y_i 表示第 i 个初始指标的标准化值,范围为 1—10; X_i 表示第 i 个指标的数据值; X_{\max} , X_{\min} 分别表示 i 指标的最大和最小数据值。

对于定性指标,根据专家打分法和相关研究成果^[27-28],结合研究区实际特征采用分级赋值法对指标因子进行标准化处理(表 2),范围设为 0~10。

表 2 定性指标分等级赋值标准

指标	标准化赋值				
	2	4	6	8	10
土壤侵蚀强度	微度	轻度	中度	强烈	极强烈,剧烈
土地利用类型	水域,林地	草地	耕地	建设用地	未利用地

2.2 空间主成分分析

这里为了避免各指标之间相关性过大导致其对生态脆弱性评价结果重复影响或者指标与生态脆弱性相关性太小的问题,需要采用空间主成分分析法提取累计贡献率大于 85% 的前几个主成分作为替代指标进行分析。替代指标计算公式为:

$$W_j = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot Z_{ij} \quad (3)$$

式中: W_j 为第 j 个替代指标(主成分); Y_i 为第 i 个初始指标的标准化值; Z_{ij} 为第 i 个初始指标在第 j 个主成分所对应的特征向量; n 为初始指标个数^[29]。

2.3 生态脆弱性指数

通过由空间主成分分析法提取出的 6 个主成分计算研究区生态脆弱性指数(EVI)。

$$EVI = \sum_{j=1}^m W_j \cdot Q_j \quad (4)$$

式中: EVI 为该研究区生态脆弱性指数; W_j 为第 j 个主成分; Q_j 为第 j 个主成分的贡献率; m 为累计贡献率大于 85% 的前 6 个主成分个数。生态脆弱性指数越大, 表明该地区生态环境越脆弱; 反之, 该地区生态环境越好。

为了更直观地对研究区的生态脆弱性进行比较, 将 EVI 进行标准化处理, 计算公式为:

$$S_{EVI} = \frac{EVI - EVI_{\min}}{EVI_{\max} - EVI_{\min}} \times 10 \quad (5)$$

式中: S_{EVI} 为生态脆弱性指数标准化值, 取值范围为 0~10; EVI 为研究区生态脆弱性指数; EVI_{\max} 为研究区范围内生态脆弱性指数的最大值; EVI_{\min} 为最小值^[30]。参考专家知识与本研究区特征将生态脆弱性进行分级(表 3)。

表 3 川藏线(雅安—新都桥)生态脆弱性分级标准

生态脆弱性程度	等级	生态脆弱性指数标准化值
微度脆弱	I	<2.0
轻度脆弱	II	2.0~4.0
中度脆弱	III	4.0~6.0
重度脆弱	IV	6.0~8.0
极度脆弱	V	≥8.0

2.4 空间自相关

为了进一步对研究区生态脆弱性分布特点进行统计, 此处引入全局自相关 Global Moran's I 工具, 计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (i \neq j) \quad (6)$$

式中: n 为空间单元数量; W_{ij} 为空间权重矩阵; X_i , X_j 分别为属性特征 X 在空间单元 i 和 j 上的观测值 ($i \neq j$); I 系数取值范围为 $[-1, 1]$ 。当 $I < 0$ 且 $p < 0.05$, 代表空间负相关, 说明相邻空间单元的生态脆弱性不具备空间聚集性; 当 $I = 0$ 或约等于 0, 表示相邻空间单元的生态脆弱性不存在空间自相关性, 呈随机分布; 当 $I > 0$ 且 $p < 0.05$, 代表空间正相关, 说明相邻空间单元的生态脆弱性具有空间聚集性^[31]。

2.5 热点分析 (Getis-Ord G_i^*)

热点分析^[32]是反映空间聚集分布特征的一种方法, 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。该分析的空间实现通过 ArcGIS 10.5 环境中的 Getis-Ord G_i^* 统计工具作为载体。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。

$$G_i^* (d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} (d) X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (7)$$

为更直观反映区域冷热点分布特征对 $G_i^* (d)$ 进行标准化处理:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{var}(G_i^*)}} \quad (8)$$

式中: $W_{ij} (d)$ 为空间权重矩阵; $E(G_i^*)$ 和 $\text{var}(G_i^*)$ 分别是 G_i^* 的数学期望和变异数; 当 $Z(G_i^*)$ 为正且显著或当 $Z(G_i^*)$ 为负且显著时, 聚合被认为具有统计学意义。否则, 该特征被认为是对随机空间分布的响应^[33]。

2.6 地理探测器

地理探测器是一组用于探测空间变化并揭示其背后驱动机制的统计方法。包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测^[34]。本次研究选取分异及因子探测器和交互作用探测器来探究研究区生态脆弱性分布的影响因素^[35]。分异及因子探测器公式为:

$$P_{D,H} = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \quad (9)$$

式中: n 为区域的个数; L 是指标因子分类数; n_h , σ_h 分别为 h 层样本量与生态脆弱性的方差; $P_{D,H}$ 为驱动因子 D 对生态脆弱性 H 的因子解释力, 取值范围为 $[0, 1]$, 其值越大表示驱动因子 D 对该区域生态脆弱性的因子解释力越强^[5]。

交互探测器主要用于识别不同因子交互作用, 即评价因子 X_1 与 X_2 相互作用后是否会增强或减弱对研究区生态脆弱性的影响, 两因子之间的关系可分为以下 5 种(表 4)。

3 结果与分析

3.1 生态脆弱性时空分布特征

利用 ArcGIS 与 SPSS 软件实现研究区空间主成分分析, 既减少了数据量又能保留原始指标足够的有效信息。根据表 2 分级赋值标准将生态脆弱性分为 5 级, 生成 2010, 2015 和 2020 年的研究区生态脆弱性等级分布(图 1)。

表 4 交互作用探测器探测结果类型

判断依据	交互作用
$P(X_1 \cap X_2) < \min[P(X_1), P(X_2)]$	非线性减弱
$\min[P(X_1), P(X_2)] < P(X_1 \cap X_2) < \max[P(X_1), P(X_2)]$	单线性减弱
$P(X_1 \cap X_2) > \max[P(X_1), P(X_2)]$	双线性增强
$P(X_1 \cap X_2) = P(X_1) + P(X_2)$	相互独立
$P(X_1 \cap X_2) > P(X_1) + P(X_2)$	非线性增强

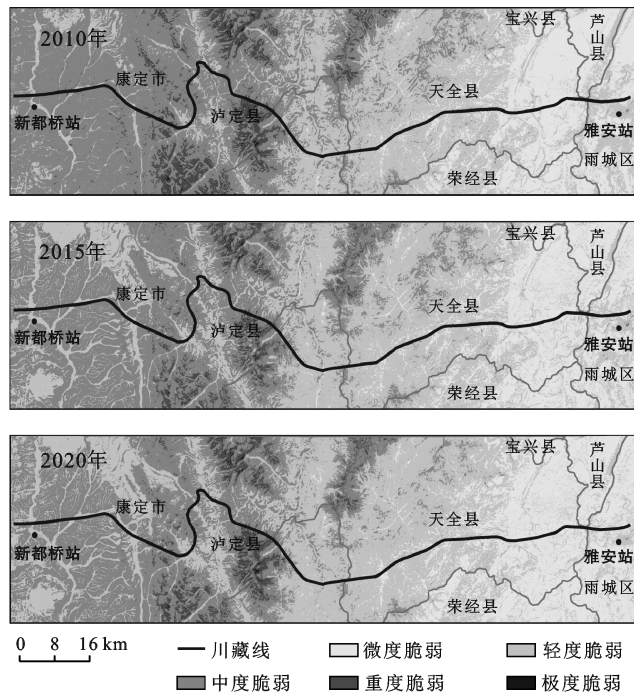


图 1 川藏线(雅安—新都桥)2010—2020 年生态脆弱性等级空间分布

从空间分布上来看,研究区生态脆弱性整体分布特征呈从西向东先递增后递减趋势。研究区西部比东部整体偏脆弱。重度和极度脆弱区主要分布在研究区内康定东部以及和天全县、泸定县的交界处,此处海拔偏高,常年积雪,冻融侵蚀最为严重。研究区内康定西部生态脆弱程度主要由轻度脆弱与中度脆弱组成,并大致通过沟谷河流将其分隔,有沟谷河流处脆弱性相对偏低,反之较高。研究区东部雅安各县区脆弱性以微度脆弱与轻度脆弱为主,其中天全县西部、荣经县西部与雨城区市区掺杂少许中度脆弱区。而研究区由西向东主要依次经过研究区内康定西部中度脆弱与轻度脆弱交叉区、康定与泸定交界处重度脆弱边缘区、泸定与天全西部轻度脆弱区,以及天全东部与雨城区微度脆弱区。其中,在线路经过康定与泸定交界处重度脆弱区附近时应注意环境保护。从时间分布上来看,整体属于向好趋势。中度脆弱区逐期减少,尤其是 2010—2015 年研究区内康定西北部与西南部和 2015—2020 年天全县北部减少较为明

显。研究区东部微度脆弱区范围逐期扩大,整体环境状况较好。研究区内重度脆弱与极度脆弱区在 2015—2020 年康定与泸定交界处重度范围有轻微增大,但整体来说从 2010—2020 年范围减小。

3.2 冷热点统计分析

在 Global Moran's I 工具中对 EVI 分布图进行分析,3 期 EVI 图都通过了这一显著检验,并显示正相关,具有较强聚类特征。在 3 幅图中, p 值为 0,均具有统计学意义,且 z 值得分非常高,其中 2020 年表现出最好的正自相关其 I 值为 0.65, z 得分为 172;其次是 2010 年, I 值为 0.64, z 值为 152;最后 2015 年正自相关性偏低相对偏低为 0.62,但 z 值也高达 136。在成功完成 Global Moran's I 检验后,将 3 期 EVI 分布图进行 Getis-Ord G_i^* 统计分析,基于 $Z(G_i^*)$,将研究区根据置信度分为 7 类区域(图 2)。

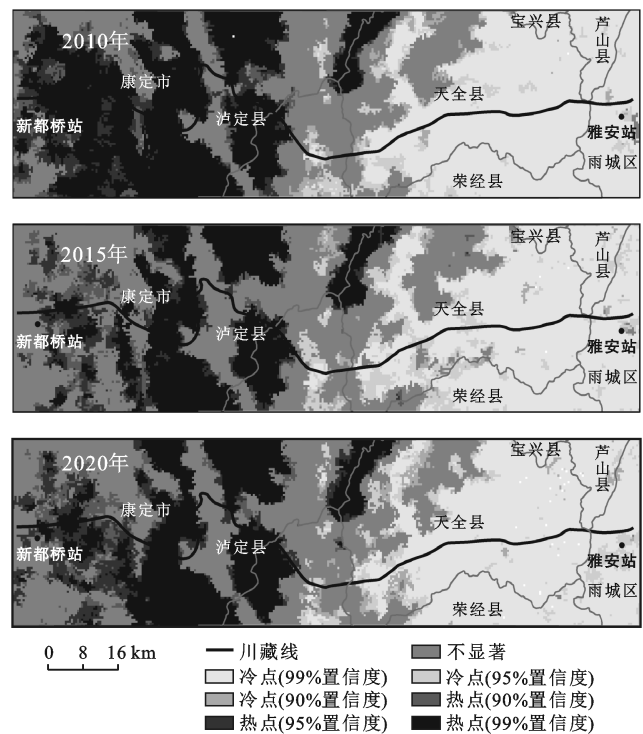


图 2 研究区 2010—2020 年生态脆弱性冷热点空间分布

从整体来看,研究区西部为热点聚集,东部为冷点聚集,西北与西南边缘以及中部地区聚集不显著。研究区自西向东大约依次经过无明显聚集特征区、高

值聚集区、无明显聚集特征区和低值聚集区。结合图 2 生态脆弱性分布不显著区主要以中度脆弱与轻度脆弱的交叉地域为主,尤其研究区中部的不显著区受复杂的地形地貌影响较大,导致同一地域脆弱性过于参差,呈随机分布。2010 与 2020 年冷热点分布相对比较相似,2015 年脆弱性较高地区范围明显较小,但整体趋势没有太大差异。

3.3 生态脆弱性驱动机制分析

前文中提取的 6 个主成分,虽不能完全代表所有初始因子,但大致包括了能对 EVI 构成影响的因素。因此,本次研究选取 7 个主要贡献因子作为自变量,生态脆弱性综合指数作为因变量导入地理探测器中进行分析,因子探测分析结果和交互作用探测结果分别如表 5—6 所示。由表 5 可知,虽然 3 个时间段内各因子对 EVI 的解释能力均有差异,但总体上高程、年均气温和 NPP 对生态脆弱的影响较大,年降水量、降雨侵蚀力和生物丰度解释力强度一般,地形起伏度

对 EVI 的影响较低。2015 年年降水量和降雨侵蚀力的影响力明显相比其他两年偏低,主要因为其年整体降雨偏少。研究区地处四川盆地西缘山地和川西高原的过渡地带,地势差异大,西部较高,处于高寒地带,尤其研究区内康定市与天全县、泸定县交界处冻融侵蚀较为严重,而东部较低,导致地域温差较大,进而对生态脆弱性的影响也较大。另外,研究区按地理位置属于亚热带气候,适宜植被生长,再加上地形多变,人类活动程度较小,所以植被覆盖较高,植被净初级生产力对整体生态脆弱性的影响也较高。交互探测器分析结果显示三年中地形起伏度和年降水量,地形起伏度与 NPP 以及降雨侵蚀力和地形起伏度,再加上 2020 年地形起伏度与生物丰度属于非线性增强,除此之外全为双线性增强关系(表 6)。而且单因子影响力较强的高程、年均气温和 NPP 在与其他因子交互后影响力依旧较强,更进一步得出其是研究区生态脆弱性主要驱动因子。

表 5 研究区 2010—2020 年各因子对生态脆弱性的解释力强度

年份	高程	地形起伏度	年均气温	年降水量	降雨侵蚀力	NPP	生物丰度
2010	0.67	0.09	0.65	0.32	0.30	0.62	0.25
2015	0.62	0.09	0.58	0.19	0.15	0.53	0.22
2020	0.63	0.09	0.6	0.3	0.27	0.59	0.36

表 6 研究区 2010—2020 年交互探测器分析结果

$X_1 \cap X_2$	2010 年		2015 年		2020 年	
	$P(X_1 \cap X_2)$	交互作用	$P(X_1 \cap X_2)$	交互作用	$P(X_1 \cap X_2)$	交互作用
高程 \cap 地形起伏度	0.75	双线性增强	0.70	双线性增强	0.72	双线性增强
高程 \cap 年均气温	0.71	双线性增强	0.65	双线性增强	0.68	双线性增强
高程 \cap 年降水量	0.69	双线性增强	0.65	双线性增强	0.67	双线性增强
高程 \cap NPP	0.73	双线性增强	0.67	双线性增强	0.70	双线性增强
高程 \cap 生物丰度	0.70	双线性增强	0.65	双线性增强	0.69	双线性增强
高程 \cap 降雨侵蚀力	0.69	双线性增强	0.64	双线性增强	0.66	双线性增强
地形起伏度 \cap 年均气温	0.72	双线性增强	0.65	双线性增强	0.68	双线性增强
地形起伏度 \cap 年降水量	0.48	非线性增强	0.36	非线性增强	0.46	非线性增强
地形起伏度 \cap NPP	0.74	非线性增强	0.66	非线性增强	0.72	非线性增强
地形起伏度 \cap 生物丰度	0.33	双线性增强	0.30	双线性增强	0.46	非线性增强
地形起伏度 \cap 降雨侵蚀力	0.48	非线性增强	0.32	非线性增强	0.45	非线性增强
年均气温 \cap 年降水量	0.66	双线性增强	0.60	双线性增强	0.62	双线性增强
年均气温 \cap NPP	0.74	双线性增强	0.66	双线性增强	0.70	双线性增强
年均气温 \cap 生物丰度	0.69	双线性增强	0.63	双线性增强	0.69	双线性增强
年均气温 \cap 降雨侵蚀力	0.66	双线性增强	0.59	双线性增强	0.61	双线性增强
年降水量 \cap NPP	0.65	双线性增强	0.58	双线性增强	0.62	双线性增强
年降水量 \cap 生物丰度	0.45	双线性增强	0.35	双线性增强	0.53	双线性增强
年降水量 \cap 降雨侵蚀力	0.35	双线性增强	0.21	双线性增强	0.35	双线性增强
NPP \cap 生物丰度	0.67	双线性增强	0.59	双线性增强	0.65	双线性增强
NPP \cap 降雨侵蚀力	0.64	双线性增强	0.56	双线性增强	0.62	双线性增强
生物丰度 \cap 降雨侵蚀力	0.43	双线性增强	0.30	双线性增强	0.52	双线性增强

4 讨论

(1) 研究区生态脆弱性空间分布整体呈由西向东递减趋势,时间上生态环境状况整体向好,符合一直以来国家政策对于生态建设与环境保护的支持。研究显示研究区存在严重生态脆弱区,与刘军会等^[36]划定的我国 18 个重点生态脆弱区之一,西南横断山生态脆弱区地理位置相符。其中康定东部以及泸定县和天全县交界处脆弱性最为严重,此处海拔最高,地形起伏度大,气温较低,冻融侵蚀严重,印证了前人得出的高寒地带容易形成生态脆弱区的结论。

(2) 研究区域内地形复杂,板块运动强,地质灾害因子可能相对研究区生态脆弱性分布较为重要。考虑到本研究地灾因子其中一项地质灾害分布融入进了土地利用数据,可能致使整体的地灾因子及其他因子在主成分分析后贡献率发生变化,这里将地质灾害分布从土地利用数据中提取出并设为新的独立因子,再次利用主成分分析对所有因子重新赋予权重并最后计算出生态脆弱性分布(图 3),观察其变化。

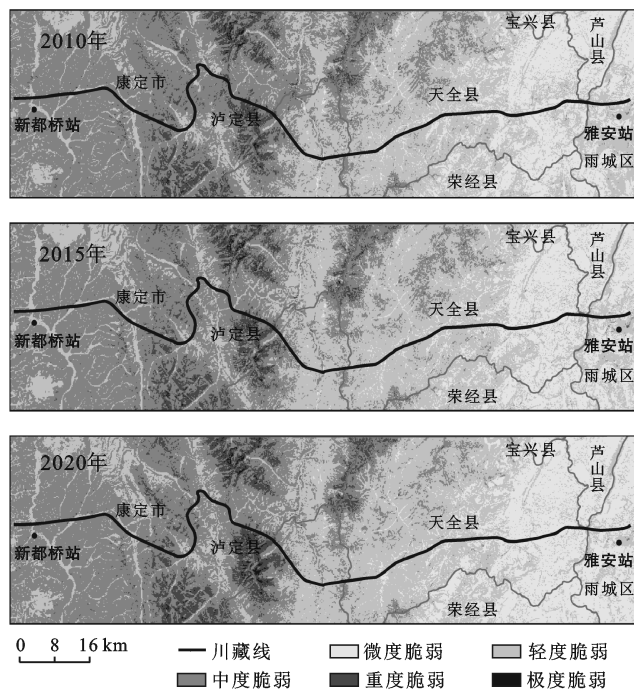


图 3 研究区突出地质灾害因子的生态脆弱性空间分布

由图 3 可知,整体来看,将地质灾害分布数据独立为一个因子后,研究区生态脆弱性分布特征未发生明显变化,脆弱性程度整体轻微增强,中度脆弱区面积增大。从时间分布来看,2010—2020 年,脆弱性呈递减趋势,与原生态脆弱性变化趋势相同。另外,研究区西部变化较东部更大,东部主要是极少部分微度脆弱转变为轻度脆弱,可能与东部雅安地区地灾点虽

密集但险情相对偏小有关,再加上雅安地区生态状况整体较好,使因子的轻微变化并不能发挥明显的作用。

(3) 关于生态脆弱性评价方法的选择,除了前文中提到的应用较广泛的几种研究方法外,在现今多学科交叉的研究环境下,基于深度学习与神经网络的生态脆弱性研究也已进入研究者的视野。之后可进一步改进研究方法使研究效果更准确、更符合实际。

5 结论

(1) 空间上,研究区整体脆弱分布为由西向东呈逐步递减趋势;时间上,由 2010—2020 年生态状况整体向好。重度与极度脆弱区范围较小,占总面积的 3.95%,主要分布在研究区中部偏西康定市与天全县、泸定县的交界处,此处为高寒地带,冻融侵蚀较为严重。研究区由西向东依次经过研究区内康定西部中度脆弱与轻度脆弱交叉区、康定与泸定交界处重度脆弱边缘区、泸定与天全西部轻度脆弱区,以及天全东部与雨城区微度脆弱区。在线路施工经过康定与泸定交界处重度脆弱区附近时应注意环境保护。由冷热点分析结果可知,EVI 分布有较强聚类特征,研究区东部雅安地区低值集聚较为明显,中部偏西为高值集聚区,而西部边缘与中部康定雅安过渡区生态脆弱呈随机分布。

(2) 影响研究区生态脆弱的主要驱动因子为高程、年均气温以及植被净初级生产力,研究区地处四川盆地西缘山地和川西高原的过渡地带,地势差异大,导致地域温差较大,进而加剧了对生态脆弱的影响。另外研究区地形多变,开发率较低,又地处亚热带季风气候,植被净初级生产力对生态脆弱的影响也较高。

综上所述,川藏线(雅安—新都桥段)施工建设在雅安地区受降水影响较大,在康定区受地形以及温差影响较大,在康定东部地形起伏度较高地区要注意地质灾害防控。川藏铁路建设带动周边地区经济发展的同时,环境保护与生态维持也是今后当地社会建设的工作重点。

[参 考 文 献]

- [1] 徐君,李贵芳,王育红.生态脆弱性国内外研究综述与展望[J].华东经济管理,2016,30(4):149-162.
- [2] Wu Shaohong, Dai Erfu, Huang Mei, et al. Ecosystem vulnerability of China under B₂ climate scenario in the 21st century [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (10):1379-1386.
- [3] Kirstin D. Exploring differences in our common future

- (s): The meaning of vulnerability to global environmental change [J]. Pergamon, 1992, 23(3):417-436.
- [4] 周永娟, 仇江啸, 王姣, 等. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2010, 30(24):6726-6733.
- [5] 王钰, 胡宝清. 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, 2018, 20(7):947-956.
- [6] Guo Bing, Zang Wenqian, Luo Wei. Spatial-temporal shifts of ecological vulnerability of Karst Mountain ecosystem—impacts of global change and anthropogenic interference [J]. Science of the Total Environment, 2020, 741: 140256.
- [7] 马真臻, 王忠静, 顾艳玲, 等. 中国西北干旱区自然保护区生态脆弱性评价: 以甘肃西湖、苏干湖自然保护区为例[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1):253-259.
- [8] 吴建寨, 李波, 张新时, 等. 天山北坡生态经济的脆弱性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4):859-865.
- [9] 郭婧, 魏珍, 任君, 等. 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, 2019, 39(3):191-199.
- [10] Zhao Jincai, Ji Guanxing, Tian Yuan, et al. Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method [J]. Ecological Indicators, 2018, 91:410-422.
- [11] 楚文海, 高乃云, 鄢贵权, 等. 西南岩溶山区水资源可持续利用评价指标选取及权重确定[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1):59-64.
- [12] 朱琪, 周旺明, 贾翔, 等. 长白山国家自然保护区及其周边地区生态脆弱性评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5):1633-1641.
- [13] 杨平, 杨国静, 曾永平. 川藏铁路简支梁桥地震易损性及适应性分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(12):51-57.
- [14] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3):445-468.
- [15] 张广泽, 蒋良文, 宋章, 等. 横断山区川藏线山地灾害和地质选线原则研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(2):21-24.
- [16] 李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等. 基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价[J]. 现代地质, 2017, 31(5):911-929.
- [17] 卢亚灵, 颜磊, 许学工. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析[J]. 资源科学, 2010, 32(2):303-308.
- [18] 罗运武, 韩鹏, 郑光玉, 等. 川藏铁路雅安至康定段环保选线研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(8):1-5.
- [19] 任洋, 王栋, 李天斌, 等. 川藏铁路雅安至新都桥段地应力特征及工程效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1):65-76.
- [20] 刘志红, Mcvicar T R, Van N, 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象, 2008(2): 92-100.
- [21] 陈峰, 李红波. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇南山区土壤侵蚀时空演变: 以云南省元阳县为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2):629-637.
- [22] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608, 644.
- [23] 李永化, 范强, 王雪, 等. 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, 2015, 35(11):1452-1459.
- [24] 王钰, 胡宝清. 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, 2018, 20(7): 947-956.
- [25] 乔青, 高吉喜, 王维, 等. 生态脆弱性综合评价方法与应用[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5):117-123.
- [26] 齐姗姗, 巩杰, 钱彩云, 等. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):224-228.
- [27] 贾晶晶, 赵军, 王建邦, 等. 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, 2020, 34(1): 34-41.
- [28] 南颖, 吉喆, 冯恒栋, 等. 基于遥感和地理信息系统的图们江地区生态安全评价[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4790-4798.
- [29] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 等. 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, 2011, 22(8):2084-2090.
- [30] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015, 35(21):7117-7129.
- [31] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 1980—2018 年祁连山南坡土地利用变化及其驱动力[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8):2699-2709.
- [32] Rossi B. Creating forest management units with hot spot analysis (Getis-Ord G_i^*) over a forest affected by mixed-severity fires [J]. Australian Forestry, 2019, 82(4):1678714.
- [33] 马世五, 谢德体, 张孝成, 等. 三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8512-8525.
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134.
- [35] 张泽, 胡宝清, 丘海红, 等. 桂西南喀斯特—北部湾海岸带生态环境脆弱性时空分异与驱动机制研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(3):456-466.
- [36] 刘军会, 邹长新, 高吉喜, 等. 中国生态环境脆弱区范围界定[J]. 生物多样性, 2015, 23(6):725-732.