

DOI: 10.20103/j.stxb.202306051183

沙清泉, 黄麟, 樊江文, 张良侠, 朱彤, 沈梦琦. 青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险时空动态及其驱动机制. 生态学报, 2024, 44(19): 8726-8736.

Sha Q Q, Huang L, Fan J W, Zhang L X, Zhu T, Shen M Q. Spatio-temporal dynamics and their driving mechanisms of the landscape ecological risk along the Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8726-8736.

青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险时空动态及其驱动机制

沙清泉^{1,2,3}, 黄麟², 樊江文², 张良侠^{1,*}, 朱彤¹, 沈梦琦¹

1 中国气象局生态系统碳源汇开放重点实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044

2 陆地表层格局与模拟重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 科学评估交通基础设施生态环境影响是当前研究的热点。选取景观生态风险指数作为道路生态环境效应评估指标, 基于土地利用、遥感、气象、地形和社会经济等数据, 评估了 1990—2020 年青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险的时空变化特征, 并结合最优参数地理探测器模型分析了景观生态风险的驱动因子。结果表明, 青藏铁路格-拉段沿线地区整体景观生态风险较低, 并呈现明显的东北部最高、中部较高而西南部最低的空间分布格局, 且距铁路中心线越近, 景观生态风险越高; 青藏铁路格-拉段建设后, 景观生态风险呈微弱上升态势, 景观生态风险指数由建设前的 0.29 上升到建设后的 0.30; 同时, 在青藏铁路格-拉段修建和运营期, 沿线地区景观生态风险呈现持续增加态势, 景观生态风险指数上升速率约为 0.40%/a, 且有沿铁路呈点和轴状扩散的趋势; 景观生态风险的驱动因子主要为植被覆盖度、降水和海拔 ($q > 0.44$), 其次为气温、经济发展和人口密度 ($q > 0.13$), 且植被覆盖度与海拔和与温度的交互作用对景观生态风险的解释力最高 ($q > 0.61$), 但在铁路运营期, 经济发展和夜间灯光对景观生态风险的贡献率呈现增加趋势。这表明, 青藏铁路格-拉段建设和运营带来的人类活动强度增加, 加剧了青藏铁路格-拉段沿线地区的生态风险。研究结果可以深化对陆路交通生态环境影响的认识, 为国家制定合理的道路修建策略提供科学依据。

关键词: 景观生态风险; 时空变化; 生态影响; 地理探测器; 青藏铁路

Spatio-temporal dynamics and their driving mechanisms of the landscape ecological risk along the Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway

SHA Qingquan^{1,2,3}, HUANG Lin², FAN Jiangwen², ZHANG Liangxia^{1,*}, ZHU Tong¹, SHEN Mengqi¹

1 Key Laboratory of Carbon Source and Sink, China Meteorological Administration (ECSS-CMA), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The scientific evaluation of the eco-environmental impacts of transportation infrastructure constitutes a hot research topic today. Numerous studies have emphasized how land-based transportation infrastructure profoundly alters ecosystem structures and functions, particularly in ecologically fragile regions. As the world's highest and longest plateau railway, this region serves as an exemplary case study for elucidating the ecological ramifications of road construction and operation. Using a landscape ecological risk index, this study investigated the spatio-temporal patterns of landscape

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2600100)

收稿日期: 2023-06-05; 网络出版日期: 2024-07-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglx@nuist.edu.cn

ecological risk along the Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway from 1990 to 2020 according to land use, remote sensing, meteorological, topographic, and socioeconomic data. Subsequently, the underlying driving forces were analyzed utilizing the optimal parameters-based geographical Geodetector model. The results showed an overall low landscape ecological risk along the Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway, and the highest, moderate, and lowest risk in the northeast, middle, and southwest regions, respectively. Meanwhile, the closer to the railway centerline, the higher the landscape ecological risk, particularly in urban areas. The landscape ecological risk increased slightly after the construction of the railway, with the risk index increasing from 0.29 to 0.30, with a growth rate of approximately 0.40%/a, with the expansion pattern displaying point- and axis-aligned characteristics. Moreover, the increasing trend of landscape ecological risk is particularly pronounced in the northeastern, southwestern edge, and central regions. Simultaneously, the urban and non-urban areas overall showed a decreasing and an increasing trend in risk, respectively. The landscape ecological risk was mainly controlled by vegetation cover, precipitation, and elevation ($q > 0.44$), followed by temperature, economic development, and population density ($q > 0.13$). The interaction of vegetation cover with elevation and temperature had the highest explanatory power ($q > 0.61$). Though the socio-economic factors are secondary to the natural factors, their contributions increased during the operation period as characterized by a rise of the explanatory power by economic development and nighttime lights. These together indicate that the ecological risk along Qinghai-Tibet Railway has been accelerated by increasing human activities during the construction and operation periods. The study's insights are pivotal for comprehending the ecological impacts of terrestrial transportation systems and formulating road construction strategies in China to mitigate adverse ecological effects, especially in ecologically fragile and sensitive areas. We recommend establishing ecological buffer zones along the route to promote ecological restoration and protection, alongside the implementation of a robust ecological environment monitoring system to regulate and intervene in potential ecological risks, thereby maintaining the ecological barrier status of Qinghai-Tibet Plateau region.

Key Words: landscape ecological risk; spatio-temporal variation; ecological impact; Geodetector; Qinghai-Tibet Railway

交通基础设施的修建和运营对生态环境具有深远的影响。大量研究表明,陆路交通基础设施会显著改变生态系统结构与功能,如增加自然景观的破碎度、侵占和破坏动植物的栖息地、道路致死和阻隔物种的迁徙等,对生态脆弱地区的影响尤其明显^[1-6]。首先,道路建设会破坏地表植被和土壤结构,改变其原有的生态功能,进而可能加剧水土流失、路域荒漠化和土地退化。例如,基于野外调查和遥感监测的相关研究表明,青藏铁路及附属设施占用对道路两侧缓冲区内的植被具有明显的破坏作用,导致植被生物量和丰富度显著下降^[4-7]。其次,道路建设形成的干扰廊道会分割自然景观和破碎物种生境,进而对动植物产生阻隔和过滤作用。例如,在印度尼西亚婆罗洲地区,交通基础设施导致道路网络 1 km 缓冲区内的景观连通度急剧下降,景观连通度指数由 89% 下降到 55%^[1]。在青藏高原地区,青藏铁路的建设导致其 60 km 缓冲区内的景观破碎度增加了 50%^[2]。因此,正确评价和全面分析交通基础设施产生的生态影响,可以最大限度地了解和缓解道路对自然生态系统所产生的负面效应,对生物多样性保护和维持生态系统完整性具有重要的指导意义。

目前针对交通基础设施对生态环境影响评价的研究,主要采用单一指数法和综合指数法。单一指数法通过分析单一生态要素指标的变化,反映交通基础设施对生态环境的影响^[2,6-8],如以青藏铁路为研究对象利用归一化植被指数^[6,9]、以长湘公路走廊带为研究对象利用景观破碎度指数^[10]、以常州市为研究对象利用景观连通度指数^[11]等。然而,由于生态环境的系统性和复杂性,采用单一指数法难以体现交通基础设施对生态环境的整体影响。相对而言,综指数法基于多种单一指数或指标,利用统计方法获取能够反映生态系统面对外界不利干扰时的风险或脆弱性综合指数,能够反映交通基础设施对生态环境的综合影响^[12-17]。综合指数法可进一步划分为两大类:第一类主要基于 EIA、SEA、压力-状态-响应和生态环境敏感性等评估框架,结合研究区实际情况,从生态系统结构和功能、社会和环境等方面构建综合评价指标体系,采用层次分析法、专家打分法、模糊数学法或人工神经网络等方法计算得到一个生态敏感性、风险或脆弱性综合指数^[4,12-15]。然而,由于评价尺度和目的不同,目前尚缺乏统一、公认的指标体系和多因素耦合方法。第二类选取能同时反映景观

结构和生态过程变化特征的景观生态风险指数^[16,18-19],可以更加直接和有效地评估道路对生态环境影响的空间异质性,是深入认识道路基础设施生态环境效应的重要发展方向。

青藏高原位于我国西部,被称作“世界第三极”,是全球环境变化的敏感区^[20]和生态脆弱带^[21]。青藏铁路修建在敏感且脆弱的高海拔生态系统,是研究道路的建设及运营对生态环境效应影响的理想区域^[9]。本研究以青藏铁路格-拉段为研究对象,选取景观生态风险指数为道路生态环境效应评价指标,通过评价沿线地区 1990—2020 年景观生态风险的时空格局,并结合最优参数地理探测器探讨自然因素和社会经济因素对景观生态风险的影响机制,以期揭示青藏铁路格-拉段的修建和运营对周边生态环境的影响。本研究可以深化对陆路交通生态环境影响的认识,为铁路沿线生态可持续发展和环境保护与修复重建工程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青藏高原(25°59'37"N — 39°49'33"N, 73°29'56"E — 104°40'20"E)是地球纬度最低、海拔最高和形成时代最新的高原,总面积约 254 万 km²,平均海拔大于 4000 m。该区属高山高原气候,年均温大于 0 °C,年均降水量在 400 mm 左右。主要土地利用类型为草地和森林,面积占分别为 59.16%和 10.20%^[22]。青藏铁路是青藏高原最重要的区域性交通主干道之一,也是世界上海拔最高且穿越冻土最长的铁路。本研究主要关注格尔木至拉萨段(简称“格-拉段”),该路段东起青海省格尔木市,西至西藏自治区拉萨市,全长约 1142 km(图 1)。格-拉段始建于 2001 年 6 月,建成于 2005 年 10 月,于 2006 年 7 月投入运营。

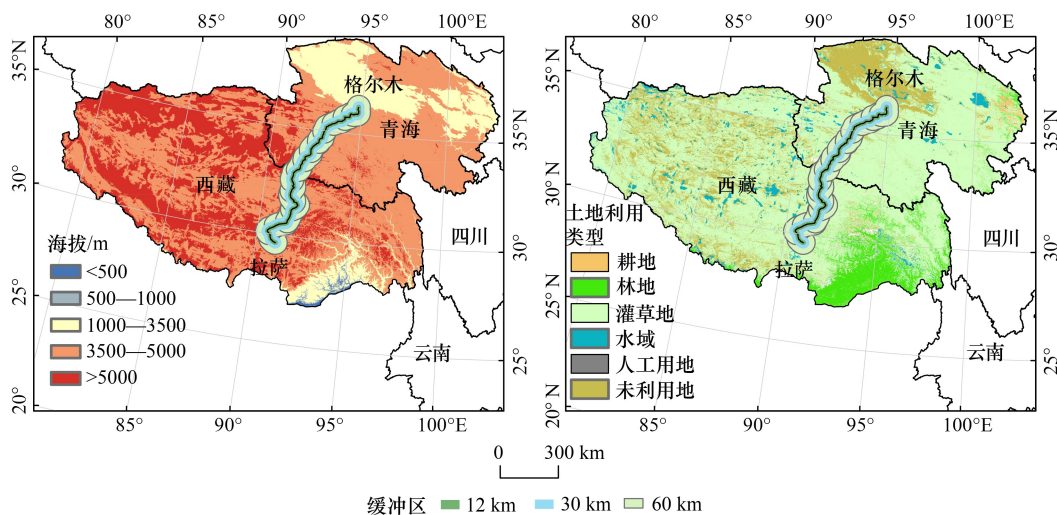


图 1 青藏铁路格-拉段空间分布

Fig.1 Spatial distribution of Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet Railway

1.2 数据来源与预处理

本研究采用的数据包括气象、遥感、社会经济、土地利用和其他数据,数据来源和预处理如下。

1.2.1 气象数据

气象数据主要包括 1990—2020 每 5 年的年均气温和年降水量。该数据由基于青藏高原及其周边气象观测站的气温和降水数据(来自国家气象局网站, <http://data.cma.cn/>),利用澳大利亚国立大学开发的 ANUSPLIN 4.4 软件中的薄盘样条法进行空间插值得到,空间分辨率为 1 km。

1.2.2 遥感数据

遥感数据主要为 1990—2020 每 5 年的归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI),该数据由美国航空航天局网站(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)提供的 GIMMS 和 MODIS(MOD13A3)获取,空间分

分辨率分别为 $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$ 和 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 均重采样至 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。年 NDVI 采用最大值合成法提取得到。

1.2.3 社会经济数据

社会经济数据包括 GDP、人口密度、人造夜间灯光分布和铁路空间分布。其中, 1990—2020 每 5 年的 GDP 和人口密度数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km 。1990—2020 年每 5 年的人造夜间灯光分布数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/>), 空间分辨率为 1 km 。铁路空间分布数据来源于 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>)。

1.2.4 土地利用数据

1990—2020 每 5 年的土地利用数据来源于地球大数据科学工程数据共享服务系统全球 30 m 地表覆盖精细分类产品 V1.0 (<https://data.casearth.cn/>), 空间分辨率为 30 m , 是本研究时段 (1990—2020 年) 可公开获取的最高分辨率土地利用数据。本研究将土地利用数据重分类为未利用地、水域、耕地、灌草地、林地和人工用地六类。

1.2.5 其他数据

其他数据包括数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、坡度、起伏度和冻土分布。DEM 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km 。坡度和起伏度均由 DEM 计算得到。1990—2020 每 10 年冻土分布数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/>), 空间分辨率为 1 km 。

1.3 景观生态风险指数

景观生态风险指数 (Ecological Risk Index, ERI) 反映了在自然或人为因素影响下, 景观格局与生态过程相互作用破坏维持自身结构和功能的程度^[23-24], 由反映生态系统内部脆弱的景观脆弱指数 F_i 和反映生态系统外部干扰的景观干扰指数 E_i 计算得到^[16,23,25-28]:

$$ERI = \sum_{i=1}^N \frac{S_{ki}}{S_k} \times \sqrt{F_i \times E_i} \quad (1)$$

式中, N 为研究单元内景观类型的数量; S_{ki} 表示研究单元 k 中景观类型 i 的面积; S_k 表示研究单元 k 的面积。关于 S_k 的取值, 前人研究受数据源或研究范围限制大多选取 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ ^[29] 或更大 (如 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ ^[16]) 的值, 仅有少部分研究选取 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ ^[17] 或更小 (如 $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$ ^[30]) 的值, 本研究依据研究区内的景观特点以及可获取数据的空间分辨率, 将 S_k 取值为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 相较前人研究本研究尺度相对精细。参考相关前人研究^[25,27], 结合研究区实际情况, 本研究将不同土地利用类型的脆弱度由低到高进行了以下排序: 人工用地 < 林地 < 灌草地 < 耕地 < 水域 < 未利用地, 并依次赋值 1、2、3、4、5、6。在此基础上, 对不同数值进行归一化获取得到相应土地利用类型的 F_i 值。 E_i 通过对景观类型 i 的景观破碎度 (C_i)、景观分离度 (S_i) 和景观优势度 (D_i) 进行加权平均计算得到:

$$E_i = a \times C_i + b \times S_i + c \times D_i \quad (2)$$

$$C_i = \frac{NP_i}{CA_i} \quad (3)$$

$$S_i = \frac{\sqrt{NP_i \times CA_i}}{2CA_i} \quad (4)$$

$$D_i = 0.5 \times \frac{NP_i}{NP_i} + 0.5 \times \frac{CA_i}{CA_i} \quad (5)$$

式中, a 、 b 、 c 表示 C_i 、 S_i 和 D_i 的权重, 参照前人相关研究^[16,23], 分别取值 0.5、0.3 和 0.2; NP_i 为景观类型 i 的斑块数量; CA_i 为景观类型 i 的总面积。

本研究利用自然断点法将景观生态风险划分为低风险 ($ERI < 0.28$)、较低风险 ($0.28 \leq ERI < 0.40$)、中等风险 ($0.40 \leq ERI < 0.58$)、较高风险 ($0.58 \leq ERI < 0.81$) 和高风险 ($ERI \geq 0.81$) 这五类。相较其他分类

方法,自然断点法能使每一组内部的相似性最大,而外部组与组之间的相异性最大^[31-32],能更加客观地得到景观生态风险的分级结果。

1.4 道路影响范围的确定

研究道路建设及运营对生态环境的影响和评价,需要确定道路的影响范围。参照相关前人研究^[26],本研究通过沿青藏铁路格-拉段建立系列缓冲区,分析不同缓冲区内 ERI 的特征和变化趋势,进而确定青藏铁路格-拉段对景观生态风险的影响范围。结果表明,青藏铁路格-拉段沿线不同缓冲区 ERI 年均值在空间上大致呈三个变化趋势,1—8 km 内 ERI 随缓冲区增大而降低,9—12 km 内 ERI 相对稳定,13—60 km 内 ERI 趋于平稳(图 2)。这意味着超过 12 km 后,青藏铁路格-拉段可能不会对 ERI 产生影响。鉴于上述实验结果,并参考其他相关研究结果^[2,5,26],本研究设定青藏铁路格-拉段对景观生态风险影响的范围为 12 km。

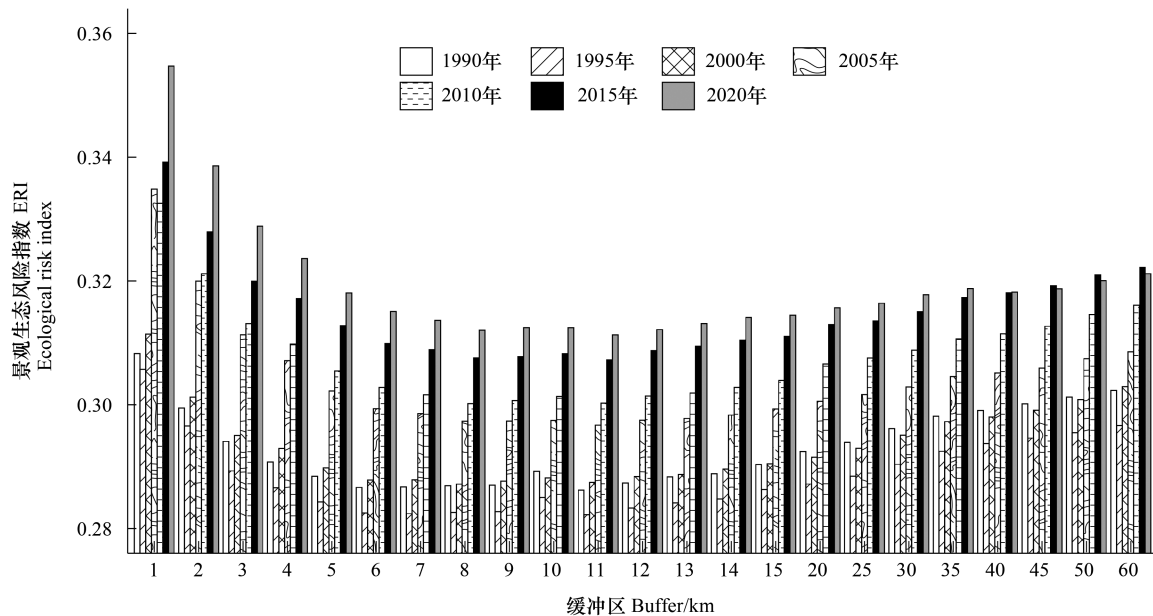


图 2 青藏铁路格-拉段周围景观生态风险

Fig.2 Landscape ecological risk index around Qinghai-Tibet Railway

1.5 驱动因子分析

本研究基于最优参数地理探测器,对青藏铁路格-拉段景观生态风险空间格局的控制因子及各因子之间的交互作用进行了定量分析。地理探测器是一种用于探测空间分异性以及揭示背后驱动力的统计学方法,主要包含因子探测器、交互探测器、风险区探测器和生态探测器四个部分^[33]。其中因子探测器用于探测各因子对因变量空间分异性的解释力;交互作用探测器用于识别不同因子的交互作用对因变量的解释力;风险区探测器用于判断子区域间是否存在显著性差异;生态探测器用于比较不同因子对因变量的空间分布影响是否存在显著性差异。参考前人相关研究^[2,34-35],结合青藏铁路沿线实际情况,同时考虑数据的可获取性,本研究从植被、气候、社会经济和地形四个方面选取 10 个控制因子,包括 NDVI、年降水量、年均气温、冻土分布、人造夜间灯光分布、人口密度、经济发展、海拔、坡度和地形起伏度。其中,经济发展因子参考相关前人研究^[36-37]以人均 GDP 来表征。利用因子探测器和交互探测器分析研究区景观生态风险的驱动因子及其交互作用。

值得注意的是,运用地理探测器模型需要首先将空间数据离散化,但以往研究大多依靠主观经验采用单一的数据分类方法进行数据离散化。例如,黄土高原生态脆弱性评估研究^[37]和交通网络对景观格局影响研究^[19]中均仅采用自然断点分类法,喀斯特地区土壤污染风险的评估研究^[38]中仅采用等间距分类法离散化,城市土壤重金属污染评估研究中仅采用 K-means 分类法,盗窃犯罪易发地的识别研究^[39]中仅采用分位数分类法。这可能会导致数据离散化情况较差,进而不能准确定量评估空间尺度效应。为解决这一问题,本研究

利用了最优参数地理探测器模型^[40],采用了相等间隔分类、自然断点分类、分位数分类、几何分类和标准差分类 5 种分类方法,将分类等级设置为 3—7 类,筛选 q 值最大的驱动因子分类方法和分类等级作为地理探测器分析的最优参数。该方法可以进一步提取地理特征和解析空间变量包含的信息,显著提高空间分析的精度和驱动因子的显著性。

2 结果与分析

2.1 青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险空间分布及其时间变化特征

青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险整体较低(图 3 和 4),低风险面积占比超过 60%,且呈现东北部最高、中部较高而西南部最低的空间格局(图 3)。其中,较高和高风险面积占比不超过 9%,主要分布在铁路东

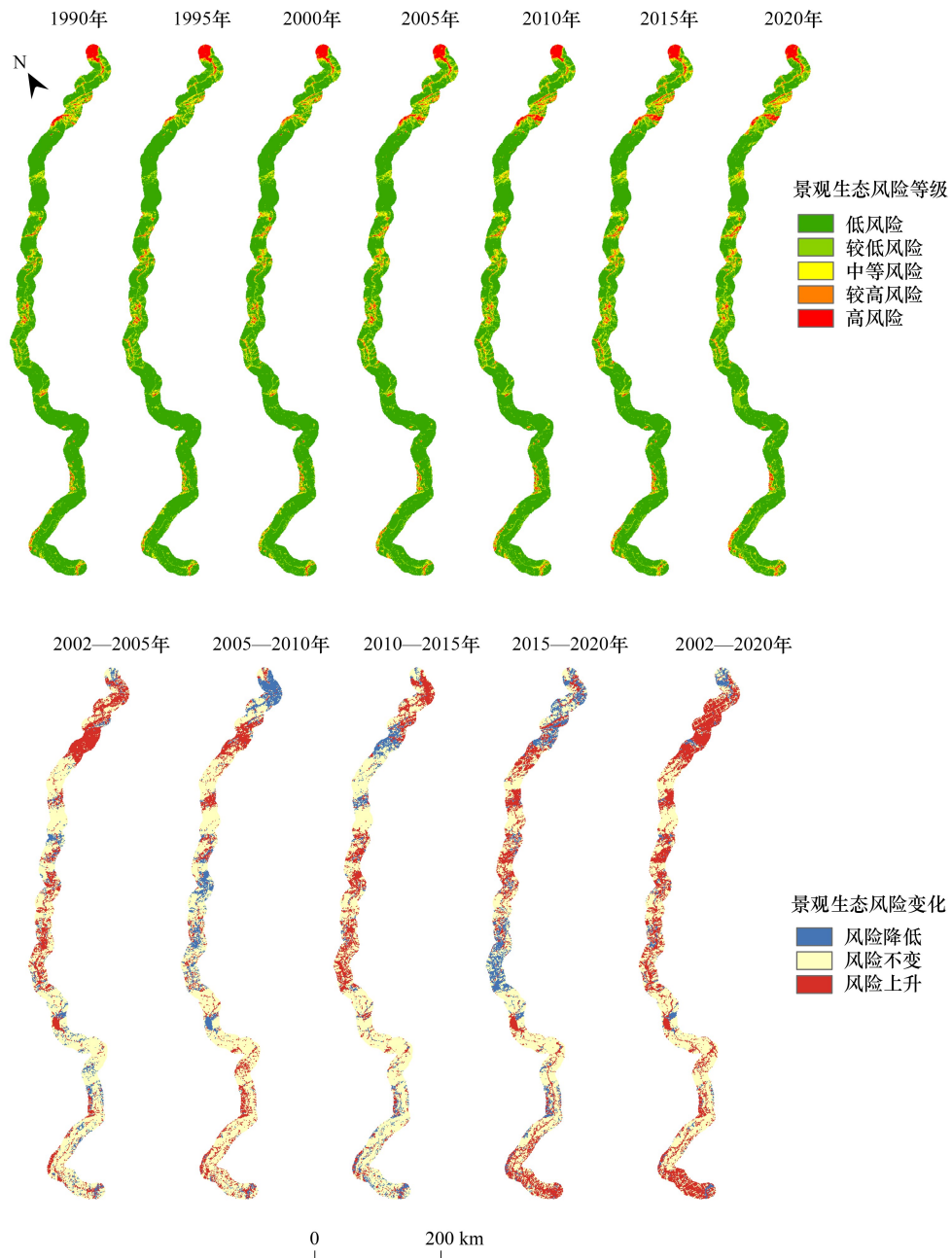


图 3 青藏铁路格-拉段景观生态风险分级和变化

Fig.3 Risk classification and change of landscape ecology on Qinghai-Tibet Railway

北部和中部地区,如格尔木市、唐古拉山镇和安多县;低风险和较低风险面积占比超过 80%,主要分布在铁路的中部边缘和西南部,如那曲县和当雄县等。此外,距离铁路中心线越近,景观生态风险越高(图 2 和 3)。

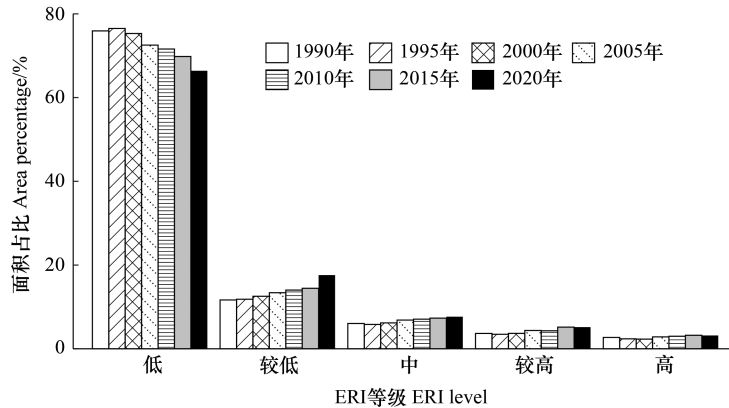


图 4 青藏铁路格-拉段景观生态风险不同等级面积占比

Fig.4 The proportion of the area of Qinghai-Tibet Railway landscape ecological risk level

青藏铁路格-拉段修建之后,沿线景观生态风险呈现微弱上升趋势,ERI 由建设前(1990—2000年)的 0.29 上升到建设后(2000—2020年)的 0.30。在铁路运营期,景观生态风险指数以 0.40%/a 的速率上升,这表明沿线生态环境遭到破坏的风险在不断加剧。同时,在青藏铁路格-拉段修建和运营期(2000—2020年),铁路沿线大部分区域景观生态风险呈现持续增加态势,主要表现为低风险面积占比 0.60%/a 的幅度下降;较低风险、中等风险和较高风险面积占比呈现微弱上升趋势;高风险面积占比 1.40%/a 的幅度上升(图 4)。其中,东北部、西南部边缘和中部部分地区景观生态风险加剧趋势尤为显著,且有沿铁路中心呈点状和线状扩散的趋势。景观生态风险维持不变的地区呈现零星分布,且分布在距离铁路较远的区域。此外,格尔木市和拉萨市中心城区的景观生态风险呈现明显的下降趋势,青藏铁路格-拉段中心线附近的景观生态风险上升趋势更加显著(图 3)。

2.2 青藏铁路格-拉段景观生态风险时空变化的驱动因子分析

图 5 所示,青藏铁路格-拉段各控制因子对景观生态风险的影响力较稳定。其中, q 值排名前三的始终为 NDVI、降水和海拔, q 多年均值分别为 0.53、0.51 和 0.49,远高于其他指标; q 值相对较低的始终为经济发展、温度和人口密度, q 多年均值分别为 0.20、0.20 和 0.18;冻土分布、人造夜间灯光分布、坡度和起伏度对景观生态风险的解释力最弱, q 值均小于 0.10。这表明,铁路沿线景观生态风险主要受植被覆盖度、降水量和地形条件控制。同时,各指标对景观生态风险的影响存在相互作用,主要表现为双因子和非线性增强作用(图 6),且与非线性增强相比,双因子增强作用对于青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险空间分布的解释力更大。其中,在铁路运营前(1990—2005年)NDVI 与海拔的双因子增强作用对于青藏铁路格-拉段沿线的景观生态风险具有最大的解释力, q 值均超过 0.63;而在铁路运营后(2010—2020年),具有最大解释力的交互作用变为 NDVI 与温度(2010—2015年)和 NDVI 与冻土分布(2020年)。此外,所有因子间均存在相互作用,NDVI 与各因子交互作用均具有较强的解释力, q 值均超过 0.54,其中 NDVI 与降水、温度和海拔的交互作用始终排名前三。这说明青藏铁路格-拉段沿线的景观生态风险主要受 NDVI 与降水、温度和海拔的交互作用控制。

此外,青藏铁路格-拉段建设后社会经济因素对景观生态风险的解释力在增加,而自然因素对景观生态风险的解释力在下降。其中,2005—2020年经济发展和人造夜间灯光分布的 q 值较 1990—2000年分别上升了 16%和 22%。而海拔和降水的 q 值分别下降了 13%和 10%。这表明随着青藏铁路格-拉段的建设和运营,人类活动对景观生态风险的影响逐步增大。

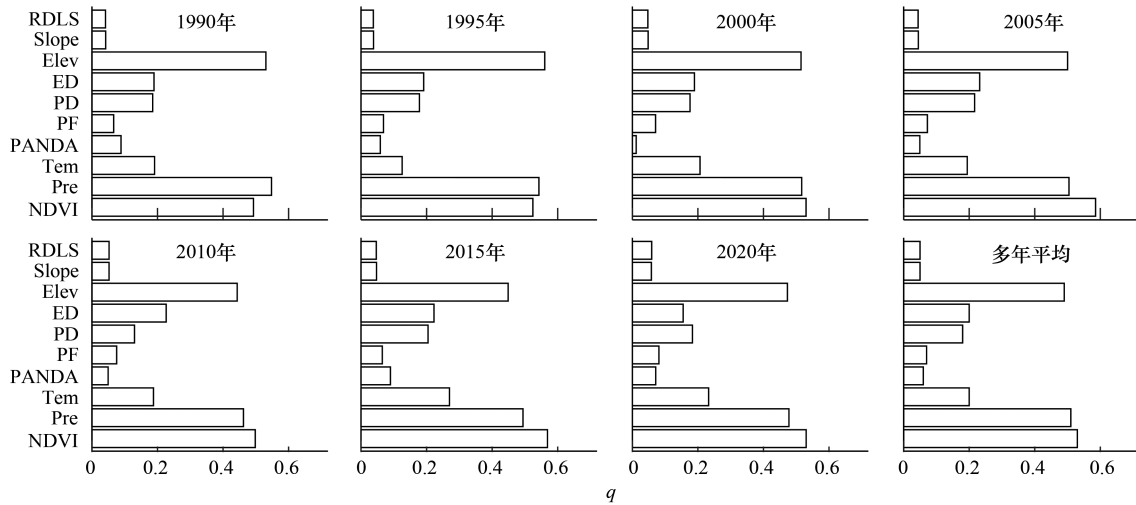


图 5 青藏铁路格-拉段景观生态风险因子探测

Fig.5 The factor detection for landscape ecological risk in Qinghai-Tibet Railway

NDVI:归一化植被指数,Pre:降水,Tem表示温度,PANDA:人造夜间灯光分布,PF:冻土分布,PD:人口密度,ED:经济发展,Elev:海拔,Slope:坡度,RDLS:地形起伏度

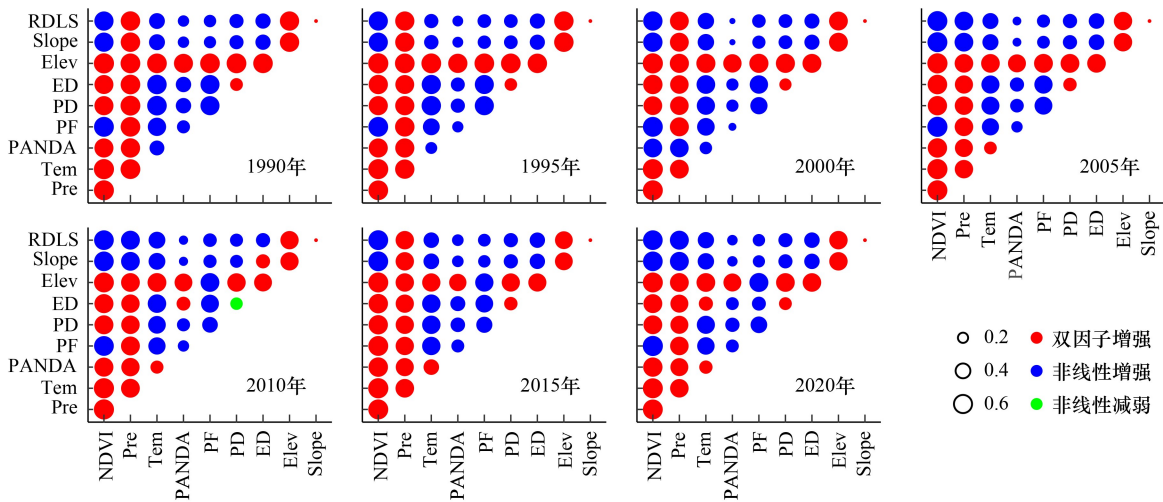


图 6 青藏铁路格-拉段景观生态风险因子交互作用探测

Fig.6 The interaction detection for landscape ecological risk in Qinghai-Tibet Railway

图例数值表示因子交互作用的解释力,颜色表示交互作用的种类

3 讨论

3.1 时空格局与控制因子分析

本研究发现青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险整体处于较低水平,这与过去有关青藏铁路沿线生态风险评价的结果一致^[9]。这主要是因为研究区地处青藏高原,植被类型较单一,道路简单稀疏,人类活动的强度和广度相对较低^[41-42]。然而景观生态风险存在较强的空间异质性,呈现明显的由东北部最高、中部较高而西南部最低的空间分布格局,与陈辉等^[4]选取雪灾、旱灾、崩塌滑坡等生态风险指标,利用人工神经网络对该区进行的生态风险分析结果一致,也与 Miao 等^[2]针对该地区景观破碎度的研究结果也一致。同时,距离铁路

越近景观生态风险越高,这与李延森等^[5]和马超等^[6]在青藏铁路沿线的研究结果一致。这可能是因为铁路作为线性景观要对原有土地利用的分割作以及铁路吸引沿线地区人口聚集带来的较高的土地利用改变程度,导致越靠近铁路中心线,景观斑块数目越多,景观破碎度、景观分离度和景观干扰度均较大。此外,城市区域的景观生态风险较高,可能是由于铁路和市区道路交叉形成复杂路网,导致景观破碎和分离严重,景观干扰指数较高,景观生态风险偏高。

从时间变化趋势来看,本研究发现青藏铁路格-拉段修建后整体景观生态风险呈上升态势,这与 Miao 等^[2]的研究相似。原因可能是铁路修建之后,伴随着人类活动的强度和范围增大,景观类型发生改变,景观破碎化程度加剧且景观分离度增加,导致景观生态风险上升。同时,在空间格局上,景观生态风险有沿铁路中心在较落后地区呈点状扩散而在较发达地区呈线状扩散的趋势,这与张懿理等^[26]和董仁才等^[15]的研究一致,同时也符合陆大道^[43]提出的区域经济发展“点-轴系统”理论模型。这可能是因为较落后地区,如当雄县和色尼区,铁路的聚集和辐射作用仅局限于城镇中心附近,形成点状格局,随着距离增大而衰减;在较发达地区,如格尔木市和拉萨市的核心城区,铁路的聚集和辐射作用增强,形成轴状格局^[26]。此外,景观生态风险的变化趋势在城市和非城市间存在显著差异,其中城市核心区域表现为减小趋势,而非城市区域表现为增加趋势,这与 Mo 等^[16]对北京市主要道路路网和 Lin 等^[17]对福建省闽江上游地区主要道路路网的研究结果相一致。这可能是因为城市核心区域,随着城市的建设和扩张,其他景观类型逐步向人工用地转变,首先引起景观脆弱指数呈现下降趋势;其次,随着人工用地斑块的扩大,景观破碎度和分离度减小,导致景观干扰指数呈现下降趋势,最终引发景观生态风险下降。而在非城市区域,因主要景观类型为草地或森林,道路修建和运营带来的人工用地扩张直接引起景观破碎度的急剧增大,进而加剧了景观生态风险。

从控制因子来看,本研究发现植被覆盖度、降水和海拔是控制青藏铁路格-拉段沿线景观生态风险空间格局的最主要因子,且自然因素为主要控制因子,社会经济因素为次要控制因子,这与陈辉等^[4]和 Zhang 等^[44]的研究结果一致。同时本研究还发现铁路沿线的景观生态风险主要受植被覆盖度与海拔、温度和降水的交互作用控制,这与 Miao 等^[2]和郭兵等^[45]的研究结果相一致。温度和降水是影响该地区植被生长发育和植被覆盖的重要因子,同时海拔也在一定程度上决定植被生长和分布状况^[46]。例如,研究区东北部年降水量较少,主体景观为高寒荒漠,植被覆盖度较差,易发生崩塌滑坡,景观生态风险相对较高;西南部主要位于山谷中,年均温较高,降水量较大,主体景观为高寒草甸,植被覆盖度较高,景观生态风险较低。此外,青藏铁路格-拉段建设后,吸引沿线地区人口聚集,进而提高了人类活动强度、促进区域经济发展以及加快城镇扩张速率^[47],直接带动了当地人均 GDP 的增加,使社会经济因素(如经济发展和人造夜间灯光分布)对景观生态风险的解释力呈现较大幅度增加的趋势(16%和 22%)。这表明铁路建设带来的人类活动强度增加,加剧了青藏铁路格-拉段沿线的景观生态风险。

3.2 研究展望

相较于已有研究,本研究选取景观生态风险指数作为道路生态风险评价指标,并通过缓冲区敏感性实验确定了道路对生态风险的影响范围,能较好地反映青藏铁路格-拉段对沿线地区景观结构和生态过程变化的影响。从控制因子来看,本研究采用最优参数地理探测器模型对景观生态风险的控制因子进行分析,可以更有效地定量识别各控制因子及其交互作用对景观生态风险的解释力。同时,本研究采用综合指数法的景观生态风险指数模型,不仅可以有效地评估青藏铁路格-拉段沿线的生态环境效应,解决单一指标难以反映交通基础设施对生态系统影响的复杂性和整体性等问题,且与前人研究结果相一致^[2,4,9,15],说明景观生态风险指数模型在评价青藏铁路沿线的适用性。然而,本研究仍存在一些不确定性。首先,本研究采用青藏铁路格-拉段沿线长时间序列的土地利用数据来计算景观生态风险指数,没有考虑气候和社会经济变化对土地利用改变的影响;其次,本研究景观生态风险指数的重要指标之一景观脆弱度指数的计算依赖于专家经验,存在一定的主观性和不确定性。未来研究应深入探讨气候和社会经济因素与该地区土地利用变化的关系,并加强针对不同地区 and 不同生态风险评价指标的对比研究,以降低生态敏感地区陆路交通基础设施生态环境效应评估的不确定性。

青藏高原是我国“两屏三带”生态安全格局的重要组成部分^[48],在保障水资源供应、水源涵养、生物多样性保护、碳收支平衡等方面发挥着重要作用^[49],生态地位极其重要。但该地区是我国典型生态脆弱区^[21],多年冻土面积占比约为 40%^[50],对人类活动和气候变暖极为敏感^[20]。尽管本研究发现青藏高原格-拉段沿线地区整体景观生态风险较低,但是铁路的修建和运营会导致景观生态风险呈上升态势,景观格局破碎化程度加剧。这表明青藏高原地区交通基础设施的建设会带来物种栖息地的丧失,生境连通性的降低以及水系连通度的破坏,导致生态系统脆弱性增加,降低生态屏障功能。此外近几十年来青藏高原地区气候变暖的趋势明显^[50],冻土融化会严重威胁该地区道路路基的安全性和稳定性。因此,本研究建议未来在青藏高原地区进行交通基础设施建设之前,应进行生态环境评估和气候变化模拟;在交通基础设施修建过程中,尽量以桥代路和修建生态廊道,以提高物种栖息地连通性和保持水系连通度,尽可能降低对自然生态系统的干扰;在交通基础设施运营期,应在沿线地区建立生态缓冲区^[51],促进生态恢复和保护,同时建立健全生态环境监测体系,对可能产生的生态风险进行调控和干预,以维护青藏高原地区的生态地位。

4 结论

采用基于综合指数法的景观生态风险指数模型,定量评价了青藏铁路格-拉段沿线地区 1990—2020 年景观生态风险的时空格局及其驱动机制。整体上,该地区景观生态风险保持相对较低水平,但空间异质性显著,呈现出东北部较而西南部较低的分布格局;同时,越靠近铁路中心线,景观生态风险越高,且城市区域的景观生态风险显著高于非城市区域。在铁路建设和运营期内(2000—2020 年)景观生态风险整体呈上升态势,城市区域呈下降趋势,而非城市区域呈上升趋势。从景观生态风险的控制因子来看,自然因素为主控因子,景观生态风险主要受植被覆盖度与降水、温度和海拔的交互作用控制;尽管社会经济因素为次要因子,但其对景观生态风险的解释力在铁路运营期呈显著增加态势。本研究结果表明,青藏高原地区交通基础设施的修建和运营会加剧沿线地区的生态风险。

参考文献(References):

- [1] Alamgir M, Campbell M J, Sloan S, Suhardiman A, Supriatna J, Laurance W F. High-risk infrastructure projects pose imminent threats to forests in Indonesian Borneo. *Scientific Reports*, 2019, 9: 140.
- [2] Miao Y, Dai T Q, Yang X Z, Song J P. Landscape fragmentation associated with the Qingzang Highway and its influencing factors—a comparison study on road sections and buffers. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1): 59-67.
- [3] Trombulak S C, Frissell C A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 18-30.
- [4] 陈辉,李双成,郑度.基于人工神经网络的青藏公路铁路沿线生态系统风险研究. *北京大学学报:自然科学版*, 2005, 41(4): 586-593.
- [5] 李延森,周金星,吴秀芹.青藏铁路(格拉段)修建对沿线植被生态系统及其弹性的影响. *地理研究*, 2017, 36(11): 2129-2140.
- [6] 马超,崔培培,钟广睿,孟梦,杨城,马雯思.气候变化和工程活动对青藏铁路沿线植被指数时空变化的影响. *地理研究*, 2021, 40(1): 35-51.
- [7] Wang G J, Gillespie A R, Liang S H, Mushkin A, Wu Q B. Effect of the Qinghai - Tibet Railway on vegetation abundance. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(19/20): 5222-5238.
- [8] Rao Y H, Zhang J J, Xu Q, Wang S Q. Sustainability assessment of road networks: a new perspective based on service ability and landscape connectivity. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 40: 471-483.
- [9] 杨城,邢艳秋,马超.青藏铁路沿线 NDVI 的人类活动和气候变化响应. *测绘科学*, 2022, 47(4): 137-145.
- [10] 孙国庆,邹滨,姜晓璐,邱永红.公路走廊带景观破碎度的空间分异研究. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(8): 106-109.
- [11] 王甜,卢付强,李祖政.基于遥感数据的常州市植被景观连通度研究. *森林与环境学报*, 2021, 41(2): 188-197.
- [12] Igondova E, Pavlickova K, Majzlan O. The ecological impact assessment of a proposed road development (the Slovak approach). *Environmental Impact Assessment Review*, 2016, 59: 43-54.
- [13] Li X G, Wang W, Li F, Deng X J. GIS based map overlay method for comprehensive assessment of road environmental impact. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1999, 4(3): 147-158.
- [14] Laurance W F, Arrea I B. Roads to riches or ruin? *Science*, 2017, 358(6362): 442-444.
- [15] 董仁才,孙晓泽,李春明,刘涛,苟亚青.青藏铁路沿线生态环境敏感性评价 GIS 模型. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 2093-2098.
- [16] Mo W B, Wang Y, Zhang Y X, Zhuang D F. Impacts of road network expansion on landscape ecological risk in a megacity, China: a case study of Beijing. *The Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1000-1011.

- [17] Lin Y Y, Hu X S, Zheng X X, Hou X Y, Zhang Z X, Zhou X N, Qiu R Z, Lin J G. Spatial variations in the relationships between road network and landscape ecological risks in the highest forest coverage region of China. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 392-403.
- [18] 毕恺艺, 牛铮, 黄妮, 寇培颖. 道路网络对景观生态风险的影响——以“中国-中南半岛经济走廊”为例. *中国科学院大学学报*, 2019, 36(3): 347-353.
- [19] 陆晴, 刘根林, 闫冰, 赵东升. 道路网络对景观格局及景观生态风险的影响——以瑞兴于地区为例. *生态学杂志*, 2022, 41(11): 2236-2244.
- [20] 赵正姬, 张云龙, 李婷, 吕一河, 王聪, 伍星. 基于空间距离指数的青藏高原生态敏感性综合评价及时空演变分析. *生态学报*, 2022, 42(18): 7403-7416.
- [21] 陈云, 李玉强, 王旭洋, 姚彩萍, 牛亚毅. 中国生态脆弱区全球变化风险及应对技术途径和主要措施. *中国沙漠*, 2022, 42(3): 148-158.
- [22] 张懿铨, 刘林山, 王兆锋, 摆万奇, 丁明军, 王秀红, 阎建忠, 许尔琪, 吴雪, 张炳华, 刘琼欢, 赵志龙, 刘峰贵, 郑度. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征. *科学通报*, 2019, 64(27): 2865-2875.
- [23] Gong J, Yang J X, Tang W W. Spatially explicit landscape-level ecological risks induced by land use and land cover change in a national ecologically representative region in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(11): 14192-14215.
- [24] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评估研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664-677.
- [25] Zhang X B, Shi P J, Luo J. Landscape ecological risk assessment of the Shiyang River Basin. *Bian F, Xie Y, Cui X, Zeng Y. International Conference on Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 98-106.*
- [26] 张懿铨, 刘林山, 摆万奇, 郑度, 李双成, 阎建忠. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响——以格尔木至唐古拉山段为例. *地理学报*, 2002, 57(3): 253-266.
- [27] Xie H L, Wang P, Huang H S. Ecological risk assessment of land use change in the Poyang Lake Eco-economic Zone, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(1): 328-346.
- [28] Di X H, Wang Y D, Hou X Y. Ecological risk caused by land use change in the coastal zone: a case study in the Yellow River Delta High-Efficiency Ecological Economic Zone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, 17: 012068.
- [29] 傅微, 吕一河, 傅伯杰, 胡维银. 陕北黄土高原典型人类活动影响下景观生态风险评估. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 290-299.
- [30] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 安静. 流域景观结构的城市化影响与生态风险评估. *生态学报*, 2011, 31(12): 3432-3440.
- [31] Köhl M, Lister A, Scott C T, Baldauf T, Plugge D. Implications of sampling design and sample size for national carbon accounting systems. *Carbon Balance and Management*, 2011, 6(1): 10.
- [32] North M A. A method for implementing a statistically significant number of data classes in the jenkins algorithm. 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Tianjin, China. *IEEE*, 2009: 35-38.
- [33] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [34] 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.
- [35] Wei Y Q, Lu H Y, Wang J N, Wang X F, Sun J. Dual influence of climate change and anthropogenic activities on the spatiotemporal vegetation dynamics over the qinghai-tibetan plateau from 1981 to 2015. *Earth's Future*, 2022, 10(5): e2021EF002566.
- [36] 刘波, 张璐然, 王文鹏, 孙成文, 董四方. 我国城市工业用水效率与经济发展水平的秩匹配度原理及特征解析. *水资源保护*, 2024, 40(2): 64-71.
- [37] 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成. 黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析. *环境科学*, 2022, 43(9): 4902-4910.
- [38] Tao H, Liao X Y, Li Y, Xu C D, Zhu G H, Cassidy D P. Quantifying influences of interacting anthropogenic-natural factors on trace element accumulation and pollution risk in Karst soil. *The Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137770.
- [39] 张延吉, 庄宇丹, 邓伟涛, 郭华贵. 盗窃犯罪易发地的构成、影响及其区域异质性: 基于地理探测器方法. *地理研究*, 2022, 41(11): 2884-2896.
- [40] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, Xu C D. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [41] 徐新良, 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 30年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化. *地理研究*, 2008, 27(4): 829-838, 974.
- [42] 张颖, 章超斌, 王钊齐, 杨悦, 张艳珍, 李建龙, 安如. 气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究. *草业学报*, 2017, 26(5): 1-14.
- [43] 陆大道. 关于“点-轴”空间结构系统的形成机理分析. *地理科学*, 2002, 22(1): 1-6.
- [44] Zhang X, Wang J, Gao Y, Wang L X. Variations and controlling factors of vegetation dynamics on the Qingzang Plateau of China over the recent 20 years. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1): 74-85.
- [45] 郭兵, 孔维华, 姜琳, 范业稳. 青藏高原高寒生态区生态系统脆弱性时空变化及驱动机制分析. *生态科学*, 2018, 37(3): 96-106.
- [46] 刘月, 安德帅, 徐丹丹, 朱建琴. 垂直带谱上植被群落对气候变化响应的研究进展. *生态科学*, 2022, 41(3): 245-251.
- [47] Han D Q, Attipoe S G, Han D X, Cao J M. Does transportation infrastructure construction promote population agglomeration? Evidence from 1838 Chinese County-level administrative units. *Cities*, 2023, 140: 104409.
- [48] 王晓峰, 勒斯木初, 张明明. “两屏三带”生态系统格局变化及其影响因素. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2138-2148.
- [49] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 樊杰, 王小丹, 郑华, 赵文武, 吴飞. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306.
- [50] 程国栋, 赵林, 李韧, 吴晓东, 盛煜, 胡国杰, 邹德富, 金会军, 李新, 吴青柏. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响. *科学通报*, 2019, 64(27): 2783-2795.
- [51] Liu S L, Dong Y H, Deng L, Liu Q, Zhao H, Dong S. Forest fragmentation and landscape connectivity change associated with road network extension and city expansion: a case study in the Lancang River Valley. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 160-168.