

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.038.

武帅, 田冰, 顾世杰, 等. 植被覆盖度对生态脆弱性动态演变的影响——以河北省张家口为例[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 310-320.

Wu Shuai, Tian Bing, Gu Shijie, et al. The Influence of Vegetation Coverage on the Dynamic Evolution of Ecological Vulnerability: A Case Study of Zhangjiakou, Hebei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 310-320.

植被覆盖度对生态脆弱性动态演变的影响

——以河北省张家口为例

武帅^{1,2,3}, 田冰^{1,2,3}, 顾世杰^{1,2,3}, 杨洛祺^{1,2,3}, 胡引翠^{1,2,3}

(1.河北师范大学 地理科学学院, 石家庄 050024; 2.河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 石家庄 050024; 3.河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024)

摘要: [目的] 研究区域植被覆盖度变化对生态脆弱性时空格局演变的影响可为地区生态保护、资源合理开发利用、土地格局优化和可持续发展提供科学依据和有益借鉴。[方法] 以张家口地区为例, 首先采用序关系法、CRITIC 法和博弈论组合赋权法等方法探究张家口地区生态脆弱性时空演变特征, 然后在此基础上探求了植被覆盖度变化对生态脆弱性动态演变的影响。[结果] 2010—2019 年, 张家口地区生态脆弱性先升后降, 脆弱性较高地区集中在北部坝上和中西部地区, 脆弱性较低地区分布在东部和南部地区, 且空间集聚效应明显。9 年间植被覆盖度由低向高转变, 植被改善区面积增加了 7 807.77 km², 恶化区面积减少了 3 433.14 km²。植被恶化区主要分布在张家口中部城区和东部区域, 其余大部分地区均为植被改善区。植被改善区、恶化区与生态脆弱性升高、降低区域的变化趋势和空间分布格局基本一致。[结论] 张家口地区植被覆盖度与生态脆弱性关系密切, 二者之间呈现负相关关系, 区域植被覆盖度的增加能够降低其生态脆弱性。

关键词: 生态脆弱性; 张家口地区; 博弈论组合赋权法; 植被覆盖度; 土地利用类型

中图分类号: Q948; X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0310-11

The Influence of Vegetation Coverage on the Dynamic Evolution of Ecological Vulnerability: A Case Study of Zhangjiakou, Hebei Province

Wu Shuai^{1,2,3}, Tian Bing^{1,2,3}, Gu Shijie^{1,2,3}, Yang Luoqi^{1,2,3}, Hu Yincui^{1,2,3}

(1.School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2.Hebei

Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Shijiazhuang 050024,

China; 3.Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: [Objective] To study the influence of regional vegetation coverage changes on the spatial and temporal evolution of ecological vulnerability can provide scientific basis and useful reference for regional ecological protection, rational development and utilization of resources, optimization of land pattern and sustainable development. [Methods] Zhangjiakou region was taken as an example. The spatial and temporal evolution characteristics of ecological vulnerability in Zhangjiakou region were firstly explored by using the sequential relationship method, CRITIC method and game theory combination weighting method, and then the influence of vegetation coverage changes on the dynamic evolution of ecological vulnerability was explored on this basis. [Results] From 2010 to 2019, the ecological vulnerability of Zhangjiakou region rose and then fell, with higher vulnerability areas concentrating in the northern dam and the central and western regions, and lower vulnerability areas distributing in the eastern and southern regions, and the spatial clustering effect

收稿日期: 2023-05-04

修回日期: 2023-05-14

资助项目: 国家社会科学资助项目(20BJY047); 2022 年河北省研究生示范课程(15117544); 河北师范大学科技类重大专项基金(13117079)

第一作者: 武帅(1998—), 男, 河北承德人, 硕士生, 研究方向为脆弱性环境演变与生态脆弱性综合评价。E-mail: 2541249818@qq.com

通信作者: 田冰(1973—), 女, 天津人, 博士, 副教授, 主要从事脆弱环境演变与整治。E-mail: tianbing_1973@163.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

was obvious. The vegetation coverage changes from low to high level during the 9 years, the area of vegetation improvement zone increases by 7 807.77 km² and the area of deterioration zone decreases by 3 433.14 km². The deterioration zone was mainly located in the central urban area and the eastern area of Zhangjiakou, while most of the remaining areas were vegetation improvement zones. The changing trends and spatial distribution patterns of vegetation improvement areas, deterioration areas and ecological vulnerability increase and decrease areas were basically consistent. [Conclusion] The vegetation coverage of Zhangjiakou area is closely related to ecological vulnerability, and a negative correlation is shown between them. The increase of vegetation coverage can maintain water and soil, increase biodiversity, and improve the anti-disturbance ability of the ecosystem, thus reducing the ecological vulnerability of Zhangjiakou area.

Keywords: ecological vulnerability; Zhangjiakou region; game theory combination weighting; vegetation coverage; land use type

生态系统不仅是人类的生存和发展的物质基础,也是经济社会可持续发展的基石^[1]。随着社会经济的发展,人类活动对生态系统和气候变化影响的深度和广度不断扩大^[2],同时人口的快速扩张和资源的不合理开发与利用,导致生态系统恢复和自净能力持续下降,致使部分地区生态系统呈现日趋脆弱的态势^[3]。生态脆弱性是指在特定时空尺度下生态系统受到外部干扰而具有的敏感反应和恢复能力,是自然因素和人类活动共同影响的结果^[4-5]。生态脆弱性评价能够客观地分析生态系统状况并解释脆弱性的成因机理与变化规律^[6]。因此,对生态脆弱性进行科学评估是减缓生态退化,稳定生态系统和实现可持续发展的关键方法,同时对区域实现经济—生态—社会综合发展具有重要意义^[7]。

随着生态系统的变化和发展,生态脆弱性评估逐渐成为全球变化和可持续发展研究的重点^[8]。在研究区域上,多涉及生态脆弱区内的丘陵^[9]、河流^[10]、森林^[11]、农牧交错带^[12]、高寒区^[13]、干旱区^[14]和喀斯特等^[15]地区。研究方法主要采用层次分析法^[16]、熵权法^[17]、组合赋权法等^[18]方法对生态脆弱性进行评价,但这些方法均存在一定的局限性,如层次分析法过于依赖专家的经验,缺少对指标本身蕴含信息的分析^[19]。熵权法缺少对各指标横向的比较,忽略指标本身的重要程度。组合赋权法能够实现主观和客观的统一,有效综合二者优点。合理的组合方法是决定评价结果科学性的关键,目前主要组合方法有加法合成法^[20]和乘法合成法^[21],但其组合过程仅由主客观权重相加或相乘计算得到,合理性较弱。博弈论的基本思想是研究两个及两个以上因素在对抗局势中寻找一致或妥协,从而达到二者之间的均衡。该模型既考虑了决策者的意愿偏好又兼顾了客观数据对决策的贡献度,同时也为生态脆弱性评价中主客观组合赋权提供新思路^[22]。

张家口地区作为京津冀“四区”中重要的生态涵养区及主要节点城市之一,其生态状况与首都圈的联系极为密切,直接影响着首都圈生态系统稳定程度。特别是随着《京津冀协同发展生态环境保护规划》等政策的发布以及成为冬奥会举办地之一,对张家口地区的生态保护和建设提出了更大的挑战。近年来,以张家口地区为研究区进行生态系统研究逐渐成为重点和热点。如刘雅爱等^[23]基于PSR模型对张家口地区进行生态安全综合评价,结果表明随着时间推移张家口各县区生态安全指数呈增长趋势,坝上高原区平均生态安全指数高于冀西北地区。卓昭君等^[24]采用当量因子法估算张家口地区生态系统服务价值,并探讨植被覆盖度变化对研究区生态系统服务价值的影响,结果表明2000—2020年研究区生态系统服务价值随着植被覆盖度的增加而呈增大趋势。徐超璇等^[25]运用主成分分析法对张家口地区生态脆弱性时空变化与驱动因素进行分析,结果表明2008—2016年张家口地区生态脆弱性逐渐下降,植被覆盖度是张家口市生态脆弱性关键驱动因子之一。总体来看,虽然目前有关于生态脆弱性和植被覆盖度的相关研究,但缺少对于二者相互关系以及植被覆盖度如何影响张家口地区生态脆弱性时空演变的分析。植被覆盖度是指植被(包括叶、茎、枝)在地面垂直投影面积占统计区总面积的百分比,是衡量地表植被生长情况的重要指标和基础数据,也是区域生态系统变化的重要指示,能够衡量生态系统质量的整体状况^[26]。由于张家口地属半干旱地区,植被覆盖程度空间差异较大,且长期遭受风蚀和干旱等灾害的影响,而植被覆盖度的高低正是影响灾害产生的关键因素,本文认为需在开展生态脆弱性评价的基础上探讨植被覆盖度与生态脆弱性变化之间的关系。因此,分析张家口地区植被覆盖度的时空变化趋势并探求其与生态脆弱性的动态影响具有重要的现实意义。

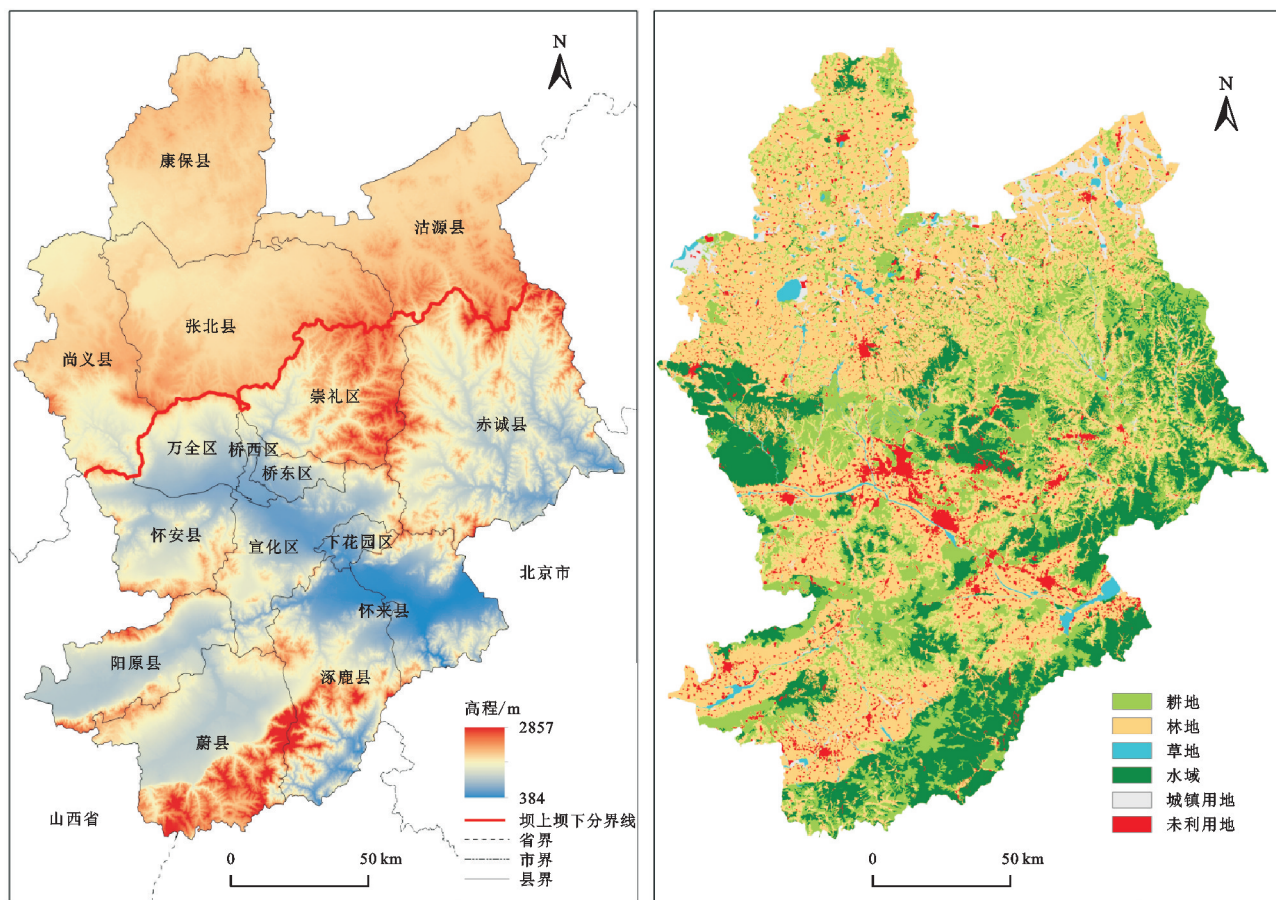
本文以张家口地区作为研究区,运用序关系法、CRITIC 法结合博弈论组合赋权法对张家口地区 2010—2019 年进行生态脆弱性评价,分析其生态脆弱性时空演变特征,并在此基础上探求植被覆盖度变化对生态脆弱性的动态影响,以期对张家口地区生态系统保护和资源合理开发利用提供科学依据,并为当地土地利用结构和生态空间格局优化提供参考。

1 研究区、数据与方法

1.1 研究区概况

张家口地区位于河北省西北部,地处东经 $113^{\circ}50'$ — $116^{\circ}30'$,北纬 $39^{\circ}30'$ — $42^{\circ}10'$,北临内蒙古,西临山西,南毗北京,是连接京津、沟通晋蒙的交通枢纽。全市下辖 6 区 10 县,截至 2022 年,人口为 407.46 万人,

地区生产总值为 1 775.2 亿元,产业结构以第三产业为主,其中,第三产业生产总值为 991.04 亿元,约占地区生产总值的 55.8%。该地区地势西北高、东南低,主要由坝上高原区坝下低中山盆地两大地貌类型构成。坝上高原地区属内蒙古高原南缘一部分,海拔在 1 400 m 左右,包括张北、沽源、康保和尚义 4 县。坝下地区地势西北高、东南低,海拔 500~1 000 m,包括蔚县、阳原县、怀来县、怀安县、涿鹿县和赤城县。张家口地区属温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期。植被地域性差异显著,坝上地区昼夜温差大,除部分地区分布少量森林外,其余大部分区域为耕地;坝下丘陵盆地地区多被开辟为耕地,自然植被较少,植被类型以灌木和草地为主^[25]。张家口地区高程与土地利用概况如图 1 所示。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 张家口地区高程与土地利用概况

Fig. 1 Elevation and land use in Zhangjiakou region

1.2 数据来源与预处理

本研究数据主要包括 2010 年、2015 年、2019 年张家口地区地形数据、气象数据、遥感数据、社会经济数据、土地利用数据以及其他数据。地形数据包括坡度和高程,由地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)提供,坡度数据根据数据高程模型(DEM)计算得到。

气象数据包括年平均降水、年平均气温和潜在蒸散

量。年平均降水和年平均气温数据由张家口地区及周边气象站点利用克里金插值计算获得。潜在蒸散数据由国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)的彭守璋^[27]团队提供的《中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集(1990—2021)》,利用 ArcGIS 10.8 将 NETCDF 文件处理为栅格数据,并计算干旱指数。

遥感数据包括归一化植被指数(normalized differ-

ence vegetation index, NDVI) 和植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP)。NDVI 和 NPP 数据均来源于美国地质调查局 (<http:// glovis.usgs.gov/>), NDVI 数据基于 MOD13Q1 数据集, 利用 ArcGIS 10.8 采用最大值合成法计算获得, 分辨率为 250 m。NPP 数据基于 MOD17A3 HGF 数据集, 利用 ArcGIS 去除无效值, 并调整比例因子后计算获得, 分辨率为 500 m。

社会经济数据由人口密度、人均 GDP、第二产业比重组成。人口密度数据来源于世界人口官网 ([www.worldpop.org/](http:// www.worldpop.org/)); 人均 GDP 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http:// www.resdc.cn>); 第二产业比重数据根据 2010—2020 年河北省统计年鉴计算获得。

其他数据分别由道路密度、水网密度、土地利用、生境质量指数和土壤侵蚀强度组成。道路和水网数据由 (<https:// www.openstreetmap.org/t>) 获取。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http:// www.resdc.cn>)。土地利用程度和生物丰度数据基于土地利用数据利用 ArcGIS 10.8 计算得到^[28]。生境质量指数数据由 Zenodo 官网 (<https:// zenodo.org>) 提供^[29]。土壤侵蚀强度数据根据通用水土流失方程 (RUSLE) 计算得到^[30]。

为同时兼顾研究结果的准确性与直观性以及方便计算, 统一将栅格数据分辨率转换为 300 m×300 m, 并将投影转换为 Asia North Albers Equal Area Conic, 中央经线更改为 116.3°, 双标准纬线更改为 37.3°和 41.0°。

1.3 研究方法

1.3.1 指标体系 张家口地区生态脆弱性包括自然影响脆弱性和人为影响脆弱性。自然影响脆弱性反

映张家口地区的自然环境特征, 包括水体、气象、地形、植被和土壤因子。其中水体因子为水网密度, 张家口地区风沙侵蚀和水土流失现象严重, 并且由于城镇化的发展, 使得河道断流以及湿地生态系统退化, 导致该地区水资源短缺; 气象因子包括年平均降水、年平均气温和干旱指数, 降水和气温是植被生长的决定性因素, 水热条件越好, 植被生长状况越好。因张家口地区坝上坝下海拔差异较大使得不同地区干旱状况空间异质性较强; 地形因子包括坡度和高程。阴山山脉横贯张家口中部地区, 地势起伏程度较大, 导致该地区地质灾害频发; 植被因子包括 NPP、生境质量指数和生物丰度。NPP 作为理想的生态指标能够反映研究区域的生态系统质量, 生境质量是生态系统正常运作的基础, 生物丰度能够反映该地区的物种多样性状况^[15,31]; 土壤因子包括土壤侵蚀强度。张家口地区水土流失、土地沙化灾害多发, 且地势起伏大, 使得该地区土壤侵蚀状况较为严重。

人为影响脆弱性是从社会经济与土地角度反映生态脆弱性, 体现张家口地区人类活动和社会经济发展对当地生态系统产生的干扰, 包括社会经济和土地因子。社会经济因子包括人口密度、人均 GDP、道路密度和第二产业比重, 其中, 人均 GDP 是衡量地区经济发展状况的宏观经济指标, 区域经济发展水平越高, 能够对生态保护投入的资金越多, 有利于促进当地生态保护与建设, 其余各因子均从社会经济发展、人类生产生活和产业结构调整等多方面影响生态脆弱性。土地因子包括土地利用程度, 其能够反映人类开发与利用土地的程度以及人类活动对土地利用和生态系统产生的压力^[32]。评价指标如表 1 所示。

表 1 指标体系
Table 1 Index system

准则层	因素层	指标层	指标性质	生态学意义
自然影响	水体	水网密度	负向	水资源丰富程度
		年平均降水	负向	水热条件
	气象	年平均气温	负向	水热条件
		干旱指数	正向	干旱程度
		高程	正向	地形地貌状况
	地形	坡度	正向	地形地貌状况
		植被净初级生产力	负向	植被生长状况
	植被	生境质量指数	负向	生境质量状况
		生物丰度	负向	生态系统活力(其值越高, 生态系统越稳定)
	土壤	土壤侵蚀强度	正向	土壤侵蚀状况
人为影响	社会经济	人口密度	正向	土地和生态系统承载的人口压力
		人均 GDP	负向	地区经济发展水平
		道路密度	正向	道路连接性(其值越高, 社会经济活动越频繁)
		第二产业比重	正向	第二产业规模
	土地	土地利用程度	正向	土地开发程度

由于不同数据量纲不同,本文采用极差变化法对指标进行标准化处理,公式如下:

正向指标:

$$R_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

负向指标:

$$R_i = (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (2)$$

式中: R_i 为指标标准化后的数值; x_i 为指标原始数据; x_{\max} 为指标最大值; x_{\min} 为指标最小值。

1.3.2 序关系法 序关系法作为一种主观赋权法,能够对层次分析法中的缺点进行改进,过程简洁清晰且无需一致性检验,计算过程如下:

(1) 确定指标序关系,确定指标相对于评价准则的重要程度为 $x_1 > x_2 > \dots > x_m$ 。

(2) 根据专家经验确定相邻指标 Y_{k-1} 与 Y_k 之间的相对重要性程度之比 r_k 的理性判断。

$$r_k = Y_{k-1} / Y_k \quad (3)$$

(3) 计算权重系数 w_k 。

$$w_k = (1 + \sum_{k=2}^m \prod_{k=2}^m r_k)^{-1} \quad (4)$$

$$w_{k-1} = r_k w_k \quad (5)$$

1.3.3 CRITIC 法 CRITIC 法作为一种客观赋权法,不仅考虑指标本身信息量的大小,还充分体现不同方案间的冲突性和差异性,使计算结果更科学客观^[33],公式如下:

(1) 数据标准化处理,见式(1)和式(2)。

(2) 标准矩阵 X 的各指标标准差和指标间相关系数分别为:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

$$\rho_{ij} = \text{cov}(X_i, X_j) / (\omega_i, \omega_j) \quad i, j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式中: ω_i 为第 i 个指标的标准差; ρ_{ij} 为第 i 个和第 j 个指标的相关系数; X_i 和 X_j 分别为矩阵 X 的第 i 列和第 j 列。

(3) 计算指标信息量 W_j 。

$$W_j = \omega_j \sum_{i=1}^n 1 - \rho_{ij} \quad (8)$$

(4) 计算指标客观权重 E_j 。

$$E_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (9)$$

1.3.4 博弈论组合赋权 为保证指标赋权的科学性和合理性,本研究在序关系法与 CRITIC 法的基础上,采用博弈集结模型确定指标权重。该方法通过极小化可能的权重与各个基本权重之间的各自偏差,在不同方法之间寻求平衡,从而使不同指标赋权法优势

互补,提高综合评价的科学性和可靠性^[34-35]。

使用 M 种方法分别得到 M 个生态脆弱性评价指标权重向量,构成权重向量集合 $w = \sum_{k=1}^M \alpha_k w_k^T$,式中: α_k 为线性组合系数; w 表示可能的权重向量集。根据博弈集合模型的思想,为寻找最优的权重向量,对上述 L 个线性组合系数 α_k 进行优化,从而使 w 和 w_k 的离差最小化,由此确定目标函数:

$$\min \left\| \sum_{k=1}^M \alpha_k w_k^T - w_i^T \right\| \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (10)$$

根据矩阵的微分性质将式(10)转变为最优化一阶导数条件的线性方程组为:

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T & \dots & w_1 w_\delta^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T & \dots & w_2 w_\delta^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_\delta w_1^T & w_\delta w_2^T & \dots & w_\delta w_\delta^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \\ \vdots \\ w_\delta w_\delta^T \end{bmatrix} \quad (11)$$

由上式求得优化组合系数 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M)$ 并对其进行归一化处理,即 $\alpha_k^* = \alpha_k / \sum_{k=1}^M \alpha_k$,最终得到组合权重 W 为:

$$W = \sum_{k=1}^M \alpha_k^* w_k^T \quad (12)$$

本研究基于序关系法和 CRITIC 法 2 个线性组合系数进行优化,权重计算结果见表 2。

表 2 指标权重

Table 2 Index weights

指标	序关系法	CRITIC 法	博弈论组合权重
水网密度	0.0136	0.0859	0.0305
年平均降水	0.0461	0.0911	0.0566
年平均气温	0.0384	0.1301	0.0599
干旱指数	0.0553	0.0304	0.0495
高程	0.0095	0.0668	0.0229
坡度	0.0113	0.0665	0.0242
植被净初级生产力	0.2142	0.0402	0.1735
生境质量指数	0.1487	0.0826	0.1333
生物丰度	0.1785	0.0818	0.1559
土壤侵蚀强度	0.0775	0.1029	0.0834
人口密度	0.0274	0.0178	0.0252
人均 GDP	0.0229	0.0178	0.0217
道路密度	0.0136	0.0386	0.0195
第二产业比重	0.0191	0.0661	0.0301
土地利用程度	0.1239	0.0814	0.1140

1.3.5 生态脆弱性评价模型 利用综合指数法计算张家口地区生态脆弱性指数(ecological vulnerability index, EVI),计算公式如下:

$$\text{EVI} = \sum_{i=1}^n w_j \times x_{ij} \quad (13)$$

式中: w_j 为指标权重; x_{ij} 为标准化后数值; n 为指标个数。根据现有的生态脆弱性评价的等级划分标准和张家口地区生态脆弱性现状^[25,36], 将 EVI 划分为 5 种等级, 分别为微度脆弱(0~0.2)、轻度脆弱(0.2~0.4)、中度脆弱(0.4~0.6)、重度脆弱(0.6~0.8)和极度脆弱(0.8~1)。

1.3.6 局部空间自相关 局部空间自相关能够表征一个区域与邻近区域属性值的相关程度^[37], 计算公式如下:

$$I = \frac{x_i - \bar{x}}{s^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (14)$$

式中: x_i 和 x_j 为第 i 个和第 j 个格网脆弱值; \bar{x} 为所有格网的脆弱性平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵; s 为矩阵各元素之和; n 为格网数量。通过将局部莫兰指数空间聚类可得到空间关联局部指标聚类图(LISA), 包括高一高聚集区、低—低聚集区、高一低聚集区、低—高聚集区和不显著 5 种聚集模式。

1.3.7 像元二分法 植被覆盖度和 NDVI 之间存在极显著的线性相关关系, 假设每个像元的 NDVI 值由植被和土壤两部分组成, 则其公式如下:

$$F_{vc} = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (15)$$

式中: F_{vc} 为植被覆盖度; $NDVI_{veg}$ 为植被覆盖部分的 NDVI 值; $NDVI_{soil}$ 为土壤部分(非植被覆盖部分)的 NDVI 值。本研究基于像元二分法计算结果将植被覆盖度划分为 5 种等级, 分别为低覆盖度(0~0.2)、较低覆盖度(0.2~0.4)、中覆盖度(0.4~0.6)、较高覆盖度(0.6~0.8)和高覆盖度(0.8~1)。

2 结果与分析

2.1 生态脆弱性时间演变特征

利用上述生态脆弱性评价模型, 对 2010—2019 年张家口地区生态脆弱性进行计算, 结果见表 3, 可看出该地区生态脆弱性呈先升后降的趋势, 整体上以轻度、中度和重度脆弱区为主, 三者总和占比分别为 91.49%, 90.5% 和 92.58%。从时间变化来看, 2010—2015 年, 张家口地区轻度、中度和极度脆弱区面积分别增加了 34.12 km², 697.32 km² 和 897.57 km², 占比分别提高了 0.08%, 1.88% 和 2.46%; 微度和重度脆弱区面积分别减少了 533.88 km² 和 1 052.46 km², 占比分别下降了 1.47% 和 2.95%; 其中, 中度和极度脆弱区面积增长较大, 脆弱性有所增加。2015—2019 年, 张家口地区微度、轻度和中度脆弱区面积分别增加了 593.1 km² 和 1 026.9 km², 496.62 km², 占比分别提高了 1.64%, 2.86% 和 1.44%; 重度和极度脆

弱区面积分别减少了 837.9 km² 和 1 356.39 km², 占比分别下降了 2.22% 和 3.72%; 其中, 微度和轻度脆弱区面积增加, 重度和极度脆弱区面积大幅减少, 脆弱性降低。

表 3 2010—2019 年张家口地区生态脆弱性面积变化

Table 3 Changes of ecological vulnerable area in Zhangjiakou region from 2010 to 2019

脆弱性 程度	2010 年		2015 年		2019 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
微度脆弱	2265.57	6.23	1731.69	4.76	2324.79	6.40
轻度脆弱	5903.82	16.24	5937.93	16.32	6964.83	19.18
中度脆弱	11768.85	32.38	12466.17	34.26	12962.79	35.70
重度脆弱	15580.35	42.87	14527.89	39.92	13689.99	37.70
极度脆弱	828.63	2.28	1726.2	4.74	369.81	1.02

2.2 生态脆弱性空间变化规律

2.2.1 生态脆弱性空间分布规律 2010 年、2015 年、2019 年张家口地区生态脆弱性空间分布如图 2 所示, 重度和极度脆弱区主要分布在张家口北部和中西部地区, 主要由于北部地区位于坝上地区, 海拔较高, 气候干旱, 生物种类和植被群落单一, 农业生产活动较为频繁, 且土层较薄, 易发生土壤风蚀和水土流失; 中西部地区位于中心城区附近, 人口密度大, 人类活动对当地生态系统的干扰较大, 因此, 该地区生态脆弱性较高。微度和轻度脆弱区主要分布在中东部和南部地区, 由于该地区多以林地、草地为主, 植被覆盖度高, 且人口稀少, 人类活动对生态系统干扰较弱, 因此, 该地区生态脆弱性较低。

2010—2015 年张家口地区整体生态脆弱性有一定程度的增加, 主要表现为北部坝上地区极度脆弱区面积扩大, 但西南部重度脆弱区面积略有减小。2015—2019 年, 北部极度脆弱区面积大幅度减小, 降为重度脆弱区。中部和西南部地区重度脆弱面积减小, 轻度和中度脆弱区面积扩大。西部、东部和南部地区微度和轻度脆弱区面积增加。随着 2015 年《张家口市生态经济发展规划》等政策的实施以及 2016 年《“十三五”生态环境保护规划》的印发, 张家口市政府加强了对生态系统的保护和治理, 使得当地生态脆弱性逐渐下降。总体上, 2010—2019 年中部和西南部地区生态脆弱性持续下降; 北部地区生态脆弱性虽先升后降, 但整体呈下降趋势。

2.2.2 生态脆弱性空间相关性 2010—2019 年张家口地区生态脆弱性空间集聚格局整体变化不大, 北部与中西部地区为高一高聚集区, 约占总面积的 35.1%, 南部与中东部地区为低—低聚集区, 约占总面积的 26.3%, 如图 3 所示。2010—2015 年, 张家口地区生态脆弱性空间集聚程度整体变化不大, 主要表现在中部和西

南部的高—高集聚区域逐渐缩小。2015—2019 年,高—高集聚区和低—低集聚区空间分布范围扩大,主要表现为北部、中南部和西南部的高—高集聚区以及西北部、南部和东部的低—低集聚区面积增加。

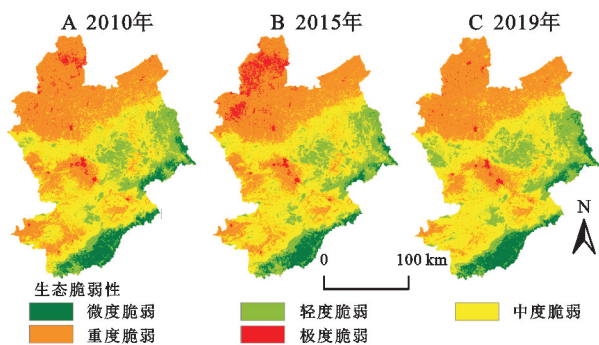


图 2 2010—2019 年张家口地区生态脆弱性分布

Fig. 2 Ecological vulnerability distribution in Zhangjiakou region from 2010 to 2019

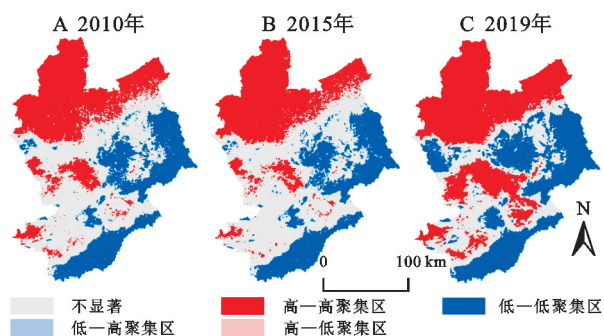


图 3 2010—2019 年张家口地区空间集聚图

Fig. 3 Spatial agglomeration map of Zhangjiakou region from 2010 to 2019

2.3 植被覆盖度动态变化特征

2.3.1 植被覆盖度时空演变特征 2010—2019 年,研究区植被覆盖度以较高覆盖度为主,各年份面积占比分别为 46.98%,43.95%和 56.65%,见表 4。其中,低、较低和中覆盖度面积占比分别减少了 0.14%,2.76%和 16.32%,较高和高覆盖度面积占比增加了 9.67%和 9.55%。2010—2015 年,中、较低和高覆盖度区域逐渐扩大,低覆盖度和较高覆盖度区域减少。2015—2019 年,较高和高覆盖度区域大面积增加,其余各等级面积持续减少。总体上,张家口地区植被覆盖度等级由低向高转变。

空间上,中部和西北部地区以低、较低和中覆盖度为主,其余地区以较高覆盖度和高覆盖度为主,如图 4 所示。由于中部地区人口集中,人类干扰强度大,西北部和西南部地区多发展农牧业,导致该地区植被覆盖度较低。其余地区由于人口稀少,受到人类干扰较弱,土地开发程度低以及相应的植被管理和保护政策,使得植被覆盖度较高。低覆盖度区域多为建设用地和耕地,高植被覆盖度区域多为林地和草地,

由此可见,土地利用类型的转变影响着植被覆盖度的时空变化。

表 4 2010—2019 年张家口地区植被覆盖度面积变化

Table 4 Changes of vegetation coverage in Zhangjiakou region from 2010 to 2019

植被覆盖度	2010 年		2015 年		2019 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
低覆盖度	98.82	0.27	86.04	0.23	46.44	0.13
较低覆盖度	1325.88	3.61	1581.93	4.30	311.47	0.85
中覆盖度	10812.33	29.41	11011.14	29.95	4811.85	13.09
较高覆盖度	17272.08	46.98	16158.87	43.95	20828.88	56.65
高覆盖度	7256.34	19.74	7927.47	21.56	10766.79	29.29

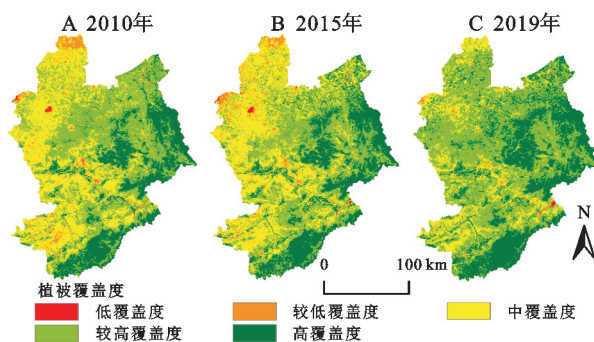


图 4 2010—2019 年张家口地区植被覆盖度分布

Fig. 4 Vegetation coverage distribution in Zhangjiakou region from 2010 to 2019

2.3.2 植被覆盖度空间动态演化 通过空间叠加分析将张家口地区 2010—2019 年植被覆盖度的等级变化进行分类,旨在反映张家口地区植被覆盖度的演变趋势,对识别当地生态脆弱性变化以及制定相应的生态系统管理和保护政策至关重要。分类标准分别为覆盖度等级升高视为植被改善区,覆盖度等级下降视为植被恶化区,覆盖度等级不变化视为不变区,如图 5 所示。

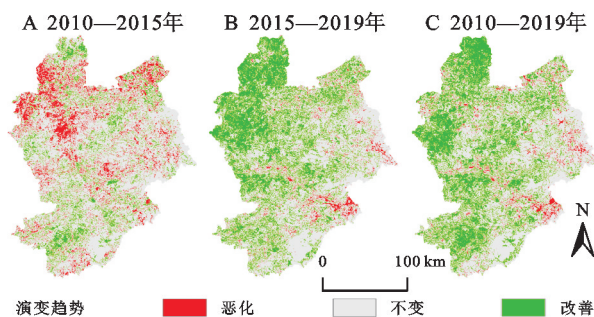


图 5 2010—2019 年张家口地区植被覆盖度空间变化

Fig. 5 Spatial changes of vegetation coverage in Zhangjiakou region from 2010 to 2019

2010—2019 年,改善区、不变区和恶化区面积占比分别为 34.64%,61.65%和 3.71%,改善面积大于恶化面积,约占总面积的 1/3,见表 5。2010—2019 年,植被改善区面积增加了 7 807.77 km²,恶化区面积减少了 3 433.14 km²。空间上,恶化区主要分在张家口中部城区和东部区域,其余大部分均为改善区。

2010—2015 年,植被恶化地区主要集中于张家口北部,占总面积的 12.7%;改善地区则在全市分散分布,占总面积的 12.94%。2015—2019 年,全市大部分地区植被覆盖度均逐渐改善,占总面积的 34.18%;恶化地区主要分布在城市及其周围等人口较密集地区,占总面积的 3.36%。由于河北省启动了“京津风沙源治理工程”,提出了生态修复和防风固沙等措施,治理了张家口地区土地荒漠化等问题,此外,三北防护林体系建设和退耕还林等工程的实施以及张家口市积极推进“人工林还林、天然林保护、特色林培育”等工程,加强了对生态系统的保护和管理,从而促进当地植被覆盖度增加。

2.3.3 植被覆盖度与土地利用类型的相互关系 植被覆盖度的变化和土地利用类型之间存在着密切的相互作用关系,土地利用类型可以影响植被覆盖度的空间分布和数量,土地利用类型的改变可能会破坏植被,例如,大规模的农业生产或城市建设可能导致植被覆盖度的减少。反之,植被覆盖度可以影响土地利用类型的稳

定性和变化趋势,例如,植被覆盖度的减少可能导致土地质量的下降,甚至土地沙化和水土流失等问题,从而限制了土地的可持续开发和利用。如表 6 所示,在高植被覆盖度区域,林地、耕地和草地的面积占比明显高于建设用地和未利用地,因此,建设用地和未利用地的生态脆弱性指数高于林地、耕地和草地区域(表 7)。在变化趋势上,2010—2019 年,各类土地利用类型面积占比在高植被覆盖度区域均有一定程度的增加,在低植被覆盖度区域有不同程度的减少,从而使得其对应类型的生态脆弱性指数整体下降。

表 5 2010—2019 年张家口地区植被覆盖度动态变化

Table 5 Dynamic changes of vegetation coverage in Zhangjiakou region from 2010 to 2019

年份	改善区		不变区		恶化区	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
2010—2015	4758.57	12.94	27337.86	74.36	4669.02	12.70
2015—2019	12566.34	34.18	22963.23	62.46	1235.88	3.36
2010—2019	12736.44	34.64	22665.06	61.65	1363.95	3.71

表 6 2010—2019 年不同植被覆盖度土地利用类型面积占比变化

Table 6 Changes of land use area proportion with different vegetation coverage from 2010 to 2019 %

土地利用 类型	低覆盖度			较低覆盖度			中覆盖度			较高覆盖度			高覆盖度		
	2010 年	2015 年	2019 年	2010 年	2015 年	2019 年	2010 年	2015 年	2019 年	2010 年	2015 年	2019 年	2010 年	2015 年	2019 年
耕地	0.002	0.001	0.001	1.127	1.600	0.039	16.366	16.626	5.494	26.039	23.611	31.325	3.838	5.368	9.310
林地	0	0.004	0	0.510	0.249	0.014	2.805	2.834	1.291	6.747	6.780	6.963	10.946	11.065	12.739
草地	0.001	0.004	0	0.858	0.986	0.048	7.496	7.227	3.535	11.426	11.146	14.344	4.651	4.862	6.645
水域	0.190	0.187	0.125	0.214	0.269	0.218	0.409	0.395	0.438	0.432	0.373	0.704	0.031	0.049	0.102
建设用地	0.046	0.020	0	0.636	0.751	0.415	1.793	2.070	1.770	1.299	1.355	2.175	0.075	0.097	0.231
未利用地	0.030	0.017	0	0.258	0.443	0.112	0.554	0.813	0.559	1.067	0.717	1.180	0.152	0.080	0.221

表 7 2010—2019 年张家口地区土地利用类型生态脆弱性指数

Table 7 Ecological vulnerability index of land use types in Zhangjiakou from 2010 to 2019

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2010	0.63	0.33	0.50	0.60	0.68	0.74
2015	0.64	0.35	0.52	0.61	0.68	0.75
2019	0.61	0.31	0.48	0.56	0.67	0.73

2.4 植被覆盖度与生态脆弱性动态演变关系

2010—2019 年张家口地区的植被改善区、不变区和恶化区与各脆弱性程度的面积占比变化趋势基本一致,见表 8。2010—2019 年,在植被改善区,微度、轻度和中度脆弱面积占比增加,分别提高 0.23%,4.2%和 4.64%,重度和极度脆弱面积占比大幅度降低,分别减少 6.8%和 2.28%。在植被不变区,其变化趋势与改善区一致,微度、轻度和中度脆弱面积占比分别提高 0.19%,2.45%和 2.62%,重度和极度脆弱面积占比分别下降 4.53%和 0.74%。在植被恶化区,除中度脆弱面积占比上升 2.94%外,其余脆弱区面积占比均下降,微度和轻度脆弱区面积占比下降趋势大

于重度和极度脆弱区。如图 2 和图 5 所示,在植被改善区,重度和极度脆弱区大多转变为轻度和中度脆弱区,而在植被恶化区,中度脆弱区大多向重度或极度脆弱区转变。

通过对生态脆弱性与植被覆盖度的相关分析可知,张家口地区生态脆弱性与植被覆盖度之间存在负相关(图 6),植被覆盖度的高低对生态脆弱性变化具有重要作用,植被覆盖度的减少会导致土地退化、水土流失加剧、土壤质量下降和生物多样性减少等问题,从而降低生态系统的抵御和修复能力,提高生态脆弱性。反之,植被覆盖度的增加不仅能够保持水土,防止土壤侵蚀,还可以提高物种多样性,并且为生

态系统提供氧气、净化空气、调节气候等重要功能,从而提高生态系统的抗干扰能力,降低生态脆弱性。综

上所述,植被覆盖度的变化与当地生态脆弱性状况息息相关。

表 8 2010—2019 年不同植被变化区生态脆弱性面积占比变化

Table 8 Changes of ecological vulnerability area in different vegetation change areas from 2010 to 2019

脆弱性程度	改善区			不变区			恶化区		
	2010	2015	2019	2010	2015	2019	2010	2015	2019
微度脆弱	1.83	1.40	2.06	8.85	6.82	9.04	4.07	1.77	3.06
轻度脆弱	7.63	7.16	11.83	20.62	21.08	23.07	24.16	22.84	23.32
中度脆弱	33.32	35.47	37.96	32.03	33.73	34.65	29.05	31.55	31.99
重度脆弱	53.61	48.34	46.81	36.95	35.14	32.42	40.82	40.71	40.22
极度脆弱	3.62	7.63	1.34	1.55	3.23	0.81	1.90	3.13	1.41

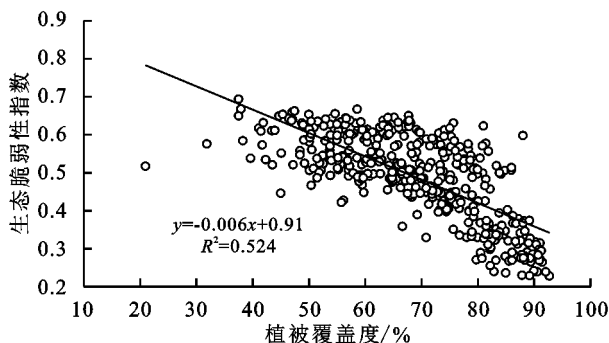


图 6 生态脆弱性指数和植被覆盖度相关性散点图

Fig. 6 Scatter plot of correlation between ecological vulnerability index and vegetation coverage

3 结论

(1) 2010—2019 年张家口地区生态脆弱性先升后降,整体呈下降趋势。其中,微度、轻度和中度脆弱区面积逐渐增加,重度和极度脆弱区面积减少。

(2) 脆弱性空间差异较大,中度、重度和极度脆弱区主要集中于北部坝上和中西部地区,微度和轻度脆弱区集中于东部和南部地区。脆弱性空间集聚效应强烈,高值和低值聚集区基本与脆弱性空间分布格局一致。

(3) 2010—2019 年,张家口地区植被覆盖度以较高覆盖度为主,各年份面积占比分别为 46.98%,43.95%和 56.65%,植被覆盖度等级随时间由低向高转变。

(4) 2010—2019 年,植被改善区、不变区和恶化区面积占比分别为 34.64%,61.65%和 3.71%,改善区面积大于恶化区面积,约占总面积的 1/3。其中,恶化区主要分布在张家口中部城区和东部区域,其余大部分地区均为改善区。2010—2019 年,植被改善区面积增加了 7 807.77 km²,恶化区面积减少了 3 433.14 km²。

(5) 张家口地区生态脆弱性与植被覆盖度之间呈负相关。植被改善区、不变区和恶化区与各脆弱性等级的面积占比变化趋势基本一致,且脆弱性提高和降低区域与改善区和恶化区的空间分布格局基本吻合。

参考文献 (References):

- [1] Tang Q, Wang J, Jing Z, et al. Response of ecological vulnerability to land use change in a resource-based city, China[J]. Resources Policy, 2021,74:102324.
- [2] 张学渊,魏伟,周亮,等.西北干旱区生态脆弱性时空演变分析[J].生态学报,2021,41(12):4707-4719.
Zhang X Y, Wei W, Zhou L, et al. Analysis on spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in arid areas of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12):4707-4719.
- [3] Guo B, Zang W Q, Luo W. 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.
- [4] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, et al. Using RS/GIS for spatiotemporal ecological vulnerability analysis based on DPSIR framework in the Republic of Tatarstan, Russia[J]. Ecological Informatics, 2022,67:101490.
- [5] 张学玲,余文波,蔡海生,等.区域生态环境脆弱性评价方法研究综述[J].生态学报,2018,38(16):5970-5981.
Zhang X L, Yu W B, Cai H S, et al. Review of the evaluation methods of regional eco-environmental vulnerability[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(16):5970-5981.
- [6] Wu X L, Tang S Y. Comprehensive evaluation of ecological vulnerability based on the AHP-CV method and SOM model: A case study of Badong County, China[J]. Ecological Indicators, 2022,137:108758.
- [7] Zou T, Chang Y, Chen P, et al. Spatial-temporal variations of ecological vulnerability in Jilin Province (China), 2000 to 2018[J]. Ecological Indicators, 2021,133:108429.
- [8] 魏明欢,胡波洋,杨鸿雁,等.山区县域土地利用变化对生态脆弱性的影响:以青龙满族自治县为例[J].水土保持研究,2018,25(6):322-328.
Wei M H, Hu B Y, Yang H Y, et al. Effects of land use transformation on ecological vulnerability in mountainous counties-Taking Qinglong Manchu Autonomous County as an example[J]. Research of Soil and Water

- Conservation, 2018, 25(6):322-328.
- [9] Wu J, Zhang Z, He Q, et al. Spatio-temporal analysis of ecological vulnerability and driving factor analysis in the Dongjiang river basin, China, in the recent 20 years [J]. Remote Sensing, 2021, 13(22):4636.
- [10] 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于 SPCA 和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析: 以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(7):2558-2572.
- Guo Z C, Wei W, Pang S F, et al. Spatio-temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in arid inland river basin based on SPCA and remote sensing index: A case study on the Shiyang river basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7):2558-2572.
- [11] 朱琪, 王亚楠, 周旺明, 等. 东北森林带生态脆弱性时空变化及其驱动因素[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11):3474-3482.
- Zhu Q, Wang Y N, Zhou W M, et al. Spatiotemporal changes and driving factors of ecological vulnerability in Northeast China forest belt[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11):3474-3482.
- [12] 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[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4):1175-1185.
- Huang Y, Cheng J, Wang P. Spatiotemporal evolution pattern and driving factors of ecological vulnerability in agro-pastoral region in northern China: A case of Yanchi County in Ningxia [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4):1175-1185.
- [13] Xia M, Jia K, Zhao W W, et al. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Ecological Indicators, 2021, 123:107274.
- [14] Lv X, Xiao W, Zhao Y, et al. Drivers of spatio-temporal ecological vulnerability in an arid, coal mining region in Western China[J]. Ecological Indicators, 2019, 106:105475.
- [15] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 等. 滇东南喀斯特区域生态脆弱性的时空演变及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6):2180-2190.
- Wang Q, Zhao X Q, Pu J W, et al. Spatial-temporal variations and influencing factors of eco-environment vulnerability in the karst region of Southeast Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6):2180-2190.
- [16] 陈枫, 李泽红, 董锁成, 等. 基于 VSD 模型的黄土高原丘陵沟壑区县域生态脆弱性评价: 以甘肃省临洮县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11):74-80.
- Chen F, Li Z H, Dong S C, et al. Evaluation of ecological vulnerability in gully-hilly region of Loess Plateau based on VSD Model: A case of Lintao county[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(11):74-80.
- [17] 李洪广, 周旭, 肖杨, 等. 基于 SRP 模型的西南喀斯特山区生态脆弱性时空变化特征[J]. 生态科学, 2021, 40(3):238-246.
- Li H G, Zhou X, Xiao Y, et al. Temporal and spatial changes of ecological vulnerability in southwestern karst mountains based on SRP model[J]. Ecological Science, 2021, 40(3):238-246.
- [18] 霍童, 张序, 周云, 等. 基于暴露—敏感—适应性模型的生态脆弱性时空变化评价及相关分析: 以中国大运河苏州段为例[J]. 生态学报, 2022, 42(6):2281-2293.
- Huo T, Zhang X, Zhou Y, et al. Evaluation and correlation analysis of spatio-temporal changes of ecological vulnerability based on VSD model: A case in Suzhou section, Grand Canal of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6):2281-2293.
- [19] 陈桃, 包安明, 郭浩, 等. 中亚跨境流域生态脆弱性评价及其时空特征分析: 以阿姆河流域为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12):2643-2657.
- Chen T, Bao A M, Guo H, et al. Ecological vulnerability assessment for a transboundary basin in Central Asia and its spatiotemporal characteristics analysis: Taking Amu Darya river basin as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(12):2643-2657.
- [20] 宁立新, 梁晓瑶, 程昌秀. 京津冀地区生态系统健康评估及时空变化[J]. 生态科学, 2021, 40(6):1-12.
- Ning L X, Liang X Y, Cheng C X. Spatiotemporal variations of ecosystem health of Jing-Jin-Ji region based on the PSR model[J]. Ecological Science, 2021, 40(6):1-12.
- [21] Li L, Cao R, Wei K, et al. Adapting climate change challenge: A new vulnerability assessment framework from the global perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 217:216-224.
- [22] 路遥, 徐林荣, 陈舒阳, 等. 基于博弈论组合赋权的泥石流危险度评价[J]. 灾害学, 2014, 29(1):194-200.
- Lu Y, Xu L R, Chen S Y, et al. Combined weight method based on game theory for debris flow hazard risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1):194-200.
- [23] 刘雅爱, 葛京凤, 梁彦庆, 等. 基于 PSR 模型的张家口地区生态安全综合评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3):270-274.
- Liu Y A, Ge J F, Liang Y Q, et al. Integrated assessment of ecological security in Zhangjiakou region of Hebei Province based on PSR model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3):270-274.
- [24] 卓昭君, 柯樱海, 洪剑明, 等. 2000 年以来张家口坝上高原生态系统服务价值及其变化[J]. 湿地科学, 2022, 20

- (2):162-175.
- Zhuo Z J, Ke Y H, Hong J M, et al. Ecosystem service values and their changes of Bashang plateau, Zhangjiakou since 2000[J]. *Wetland Science*, 2022, 20(2):162-175.
- [25] 徐超璇, 鲁春霞, 黄绍琳. 张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6):1288-1300.
- Xu C X, Lu C X, Huang S L. Ecological vulnerability and influencing factors of Zhangjiakou area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6):1288-1300.
- [26] 牟禹恒, 黄义忠, 梁睿, 等. 基于 MODIS NDVI 的文山州植被覆盖度及景观格局分析[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(1):174-180, 272.
- Mu Y H, Huang Y Z, Liang R, et al. Analysis of vegetation covering and landscape pattern in Wenshan based on MODIS NDVI[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(1):174-180, 272.
- [27] Peng S, Ding Y, Wen Z, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011—2100 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233:183-194.
- [28] 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.
- Wang Y, Hu B Q. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability of Xijiang river in Guangxi and its driving mechanism based on GIS[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(7):947-956.
- [29] Xu D, Yang F, Yu L, et al. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321:128948.
- [30] 谢怡凡, 姚顺波, 丁振民, 等. 退耕还林和地理特征对土壤侵蚀的关联影响:以陕西省 107 个县区为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(1):301-312.
- Xie Y F, Yao S B, Ding Z M, et al. The grain for green project, geographical features and soil erosion: taking 107 counties in Shaanxi Province as examples [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1):301-312.
- [31] 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 等. 基于地理探测器的山西省 2000—2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(1):312-322.
- Shao J H, Li J, Yan X G, et al. Analysis of Spatiotemporal variation characteristics and driving forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 based on geodetector[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(1):312-322.
- [32] 茹少峰, 马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价、空间分析及预测[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7):1722-1734.
- Ru S F, Ma R H. Evaluation, spatial analysis and prediction of ecological environment vulnerability of Yellow River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7):1722-1734.
- [33] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3):143-148, 162.
- Zhao S Q, Tang S F. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3):143-148, 162.
- [34] 汪磊, 黄其松. 基于博弈论组合赋权的西部地区生态脆弱性评价[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(3):318-322.
- Wang L, Huang Q S. Ecological vulnerability assessment of western region based on game theory combined weight[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(3):318-322.
- [35] 门业堃, 钱梦迪, 于钊, 等. 基于博弈论组合赋权的电力设备供应商模糊综合评价[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21):179-186.
- Men Y K, Qian M D, Yu Z, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of power equipment suppliers based on game theory and combination weighting[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21):179-186.
- [36] 刘佳茹, 赵军, 沈思民, 等. 基于 SRP 概念模型的祁连山地区生态脆弱性评价[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6):1573-1582.
- Liu J R, Zhao J, Shen S M, et al. Ecological vulnerability assessment of Qilian Mountains region based on SRP conceptual model[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 43(6):1573-1582.
- [37] 常溢华, 蔡海生. 基于 SRP 模型的多尺度生态脆弱性动态评价:以江西省鄱阳县为例[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(1):245-260.
- Chang Y H, Cai H S. Dynamic assessment of multi-scale eco-environmental vulnerability based on SRP model in Poyang County[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(1):245-260.