DOI: 10.5846/stxb202203230719

李彤,贾宝全,刘文瑞,张秋梦.京津冀地区生态用地稳定性格局及其影响因素.生态学报,2022,42(24):9927-9944. Li T, Jia B Q, Liu W R, Zhang Q M.Spatial pattern of ecological land stability analysis and influencing factor in Beijing-Tianjin-Hebei Region. Acta Ecologica Sinica,2022,42(24):9927-9944.

京津冀地区生态用地稳定性格局及其影响因素

李 形^{1,2,3},贾宝全^{1,2,3,*},刘文瑞^{1,2,3},张秋梦^{1,2,3}

1 中国林业科学研究院林业研究所北京,北京 100091

2 国家林业和草原局林木培育重点实验室,北京 100091

3国家林业局城市森林研究中心,北京 100091

摘要:探索生态用地稳定性格局对动态背景下区域生态规划与管理具有重要意义。本文基于 2000、2010、2020 年京津冀地区生态用地数据基础,提取 2000—2010 和 2010—2020 年间稳定性生态用地,借鉴并应用生态用地稳定性指数予以衡量区域生态用地的时空稳定效应,并利用 AreGIS 平台空间统计工具对生态用地稳定性空间格局进行分析,最后基于地理探测模型对生态用地稳定性的影响机制及其区域差异进行探索。研究结果显示,(1)2000—2010 年和 2010—2020 年,京津冀地区稳定性生态用地稳定性的影响机制及其区域差异进行探索。研究结果显示,(1)2000—2010 年和 2010—2020 年,京津冀地区稳定性生态用地稳定性的影响机制及其区域差异进行探索。研究结果显示,(1)2000—2010 年和 2010—2020 年,京津冀地区稳定性生态用地稳定性的影响机制及其区域差异进行探索。研究结果显示,(1)2000—2010 年和 2010—2020 年,京津冀地区稳定性生态用地稳定性的影响机制及其区域差异进行探索。研究结果显示,(1)2000—2010 年和 2010—2020 年,京津冀地区稳定性生态用地稳定性指数分别为 90.85%和 83.86%,呈现"西北高、东南低"。生态用地稳定性指数等级结构显示前期极低稳定性和极高稳定性面积占绝对主导,后期极低、高和极高稳定性面积共同主导。生态用地稳定性指数空间格局呈现显著冷热点效应,热点区汇集在燕山-太行山山地林生态区和内蒙古草原生态区,冷点区集中在京津唐城市生态区和华北平原生态区。(3)整体研究区高程、坡度、地貌和土壤类型等地理要素解释力较高;平原区内温度因子解释力度最为突出,地理因素和社会经济因素的解释力度也均较显著;山区内国内生产总值、人口密度、居民点密度和道路密度等社会经济因素影响作用更加突出。

关键词:稳定性生态用地;生态用地稳定性指数;冷/热点分析;地理探测器

Spatial pattern of ecological land stability analysis and influencing factor in Beijing-Tianjin-Hebei Region

LI Tong^{1,2,3}, JIA Baoquan^{1,2,3,*}, LIU Wenrui^{1,2,3}, ZHANG Qiumeng^{1,2,3}

1 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

3 Urban Forest Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

Abstract: Exploring ecological land stability pattern is of great importance for regional ecological planning and management in the context of the dynamic development of urbanization. Based on the data on ecological land use in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2000, 2010, and 2020, we extracted the stable ecological land in 2000—2010 and 2010—2020. We used the ecological land stability index to describe the spatial and temporal dynamics of ecological land stability. At the same time, we analyzed the spatial pattern of the ecological land stability index. Finally, we utilized the geographical detection model to explore the influencing mechanism and regional differences in the ecological land stability. The results showed that: (1) the area of stable ecological land decreased in the two periods, which were more in Inner Mongolia Grassland Ecological Zone and Yan-Taihang Mountain Forest Ecological Zone. (2) Ecological land stability indexes were 90.85% and 83.86% in two periods, which were higher in the northwest and lower in the southeast. The area of the grade of stability,

收稿日期:2022-03-23; 网络出版日期:2022-07-29

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2020ZB008)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jiabaoquan2006@163.com

which is named extremely low and extremely high, was the most important from 2000 to 2010. The area of the class of stability, which is called extremely low, high, and extremely high, was similar from 2010 to 2020. The ecological land stability index had cold/hot spots. The area of the hot spots was more in Yan-Taihang Mountain Forest Ecological Zone and Inner Mongolia Grassland Ecological Zone. The area of the cold spots was more in Beingjing-Tianjin-Tangshan City Ecological Zone and North China Plain Ecological Zone. (3) In the study area, the explanation intensity of the elevation, the slope, the landform, and the soil factors was higher. In the plain area, the temperature had the highest explanatory power. The geographical and social-economic factors also had superior explanatory power; in the mountainous area, the influence of GDP, population density, settlement density, and road density was more pronounced.

Key Words: stable ecological land; ecological land stability index; cold/hot spot; geographic detector

新型城镇化建设和城市群空间规划的逐步落实不断引导着土地资源的转化^[1-2],并随之带来诸多生态环境问题^[3]。生态用地作为维护生态安全格局的重要屏障与改善人居环境的核心资源^[4],逐渐发展成为度量地区生态环境质量的关键指标^[5-6]。自作为自然环境中具有生态防护功能的空间要素被首次提出,这一概念的发展应用一直都在不断的摸索与尝试中前进。随着城镇化建设与经济发展,大量生态用地受到蚕食、开发与破坏,生态环境不断恶化,生态系统面临威胁。在此背景下生态用地的动态演进逐渐发展为诸多学者的重要研究课题,在探索实现有限生态用地生态效益最大化方面具有重要意义^[1]。而维持生态用地空间位置及 其属性不变的稳定性特征成为这一动态探索中的核心突破,其在维护区域生态系统良性循环方面的重要贡献不容置否。

景观稳定性作为度量景观动态特征的重要因子^[7],一直是理论生态学研究中重要且复杂的课题^[8]。目前关于景观稳定性的认识尚未统一,大多沿袭生态系统稳定性的模糊定义展开。然而随着气候变化、土地利用转移、生物多样性下降和人口骤增等全球问题的演化,生态变化研究逐渐深入,稳定性作为生态系统动态维持的关键特征^[9–10],具有广阔的发展前景与需求。

京津冀地区是中国的北部经济增长极和重点示范区^[11],同时也是生态建设亟待优化与完善的重点地区。 长期以来,区域内部有限的生态空间与强烈的生态需求之间矛盾突出^[12]。开展京津冀地区生态用地稳定性 研究,一方面对动态背景下的生态空间维持与优化具有现实意义,另一方面可为地区后续生态建设与规划工 作提供相关科学依据与参考。本文以 GLOBELAND30 数据为基础支撑,着眼于 2000—2010 年和 2010—2020 年两个时间序列下的京津冀地区生态用地变化现状,全面探究不同时段生态用地稳定性的空间异质规律,明 晰其驱动与制约因素,从而在一定程度上为后续生态规划、建设管理与实施工作提供支撑与指导。

1 研究数据与方法

1.1 研究区域

京津冀地区位于中国北部腹地,处东经 113°04′—119°53′,北纬 36°01′—422°37′,区域面积共计 21.73× 10⁴km²,占国土地面积总量的 2.2%。辖北京市、天津市以及河北省 11 个地级市,200 个县(区)、2947 个乡镇(街道)单元,是全国的政治经济中心、国际交往中心、文化中心和创新中心。区域内部地形呈西北高东南低,西北部为内蒙古草原生态区和燕山-太行山山地林生态区,中南部为京津唐城市生态区和华北坪区生态区(图 1)。京津冀地区为温带季风气候,年平均气温为 3—15℃,年平均降水量为 304—750mm。根据 2020 年第七次全国人口普查,京津冀地区人口总量共计 11036.93×10⁴人,占全国人口的 8.05%。截至 2020 年,京津冀地区国民经济总产值 86393.23×10⁸元。2014 年习近平总书记明确了京津冀协同发展作为国家重大战略的地位,开创了京津冀协同发展的新时代。2018 年 11 月中共中央、国务院明确提出要求以纾解北京非首都功能为"牛鼻子",推动京津冀协同发展。



图 1 行政区划及生态分区 Fig.1 Administrative zones & Ecological zones

1.2 数据来源及处理

论文基于 2000、2010、2020 年 GLOBALAND30 土地利用数据展开,数据空间分辨率为 30m,总体分类精度 85.72%, Kappa 系数为 0.82, 目前已在京津冀等地区生态研究工作中得到广泛应用并取得较好的效果^[13-15]。 覆盖京津冀地区的土地数据包括耕地、林地、灌木林地、草地、水体、湿地,不透水地表和裸土地8类用地,考虑 到大尺度数据在小尺度空间分析方面的不确定性,以及本地影像土地利用解译数据对分析精度验证的实用意 义,本文通过空间抽样并建立混淆矩阵全面评估研究区产品分类精度,结合 Google Earth Engine(GEE)软件平 台下高分影像目视判别工作,进一步验证并保障该数据在京津冀地区的精度水平,结果显示区域数据总体精 度为 80.63%, Kappa 系数为 0.72, 可见研究地区该产品具备较好的数据质量。地形数据为分辨率 30m 的 NASA 数字高程模型产品(DEM),本文基于水文分析与邻域分析获取其坡度、坡向与地形起伏度信息,地貌数 据来自中国科学院地理空间数据云网站;土壤数据取自世界土壤数据库 HWSD;气象数据包括京津冀地区及 其周边气象站点平均气温及降雨量年度数据,论文基于 ANUSPLIN 软件完成不同时间序列的气候插值;人口, 国内生产总值等社会经济空间数据来自行政单位统计年鉴以及中国科学院资源与环境科学数据中心提供的 空间分布栅格;各城市/农村居民点、公路、铁路线、国道和省道等交通干线、风景名胜区、自然保护区等交通信 息数据基于 OpenStreetMap(OSM)网站下载,并通过欧式距离和核密度计算工具进行处理;植被质量指数 (NDVI)和植被净初级生产力(NPP)来自中国科学院资源与环境科学数据中心提供的空间分布栅格数据和 MOD17A3HGF Version 6.0 产品。为了实现上述数据的统一度量,所有的空间栅格信息将统一转换为覆盖京 津冀地区且空间分辨率一致的空间栅格数据集以实施后续统计分析工作。

1.3 生态用地稳定性指数

目前的景观稳定性研究尚未形成统一的度量体系,不同形式下的方法评估多是基于生态系统的动态探索。本文着眼于不同时期生态用地类型的空间位置及其属性特征,将一定区域内生态用地各要素在时间尺度

上保持其属性不变的特性视作生态用地稳定性的基础内涵,从土地利用的视角来看,该属性即是生态用地自身的地类特征。在此基础上,本文将一定区域内生态用地类型随时间保持不变的面积比例作为生态用地稳定性指数的度量依据,具体的计算方法如下:

$$PSI = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i}{A} \times 100\%$$

式中, PSI 表示生态用地稳定性指数, A_i 表示在研究时段内研究区生态用地 *i* 类型保持地类属性不变的面积, 这里 *i* 分别代表森林、草地、灌木地和湿地, A 表示研究区域内生态用地所有类型面积总和, n 代表土地类型 的总数。生态用地稳定性指数 PSI 值越大,表明区域生态稳定性越高;反之,稳定性则越低。

表1 数据层的描述

Table 1 Description of data											
数据	描述	分辨率	来源								
Data	Description	Resolution Ratio	Source								
土地利用 Landuse	全球地表覆盖数据 GlobeLand30 全球地表覆盖 数据	30m 栅格	http://mulu.tianditu.gov.cn/mapDataAction.do? method=globalLandCover								
地理数据 Geographic data	高程(DEM)/坡度/坡度数据	30m 栅格	NASA 的 LP DAAC(Land Processes Distributed Active Archive Center)实 验室 https://lpdaac.usgs.gov/news/release-nasaDEM-data-products/								
	土壤数据	1000m 栅格	联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的 世界土壤数据库 Harmonized World Soil Database version 1.1, HWSD								
	地形起伏度数据	1000m 栅格	游珍,封志明,杨艳昭.中国地形起伏度公里网格数据集.全球变化数据 仓储,2018.DOI:10.3974/geodb.2018.03.16.V1 ^[16]								
	地貌数据	矢量数据	中国科学院地理空间数据云 http://www.gscloud.cn								
气候数据 Climate data	年均降水量,平均气温	1000m 栅格	数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家环境信息中心网站(NCEI)(NOAA-National Centers for Environmental Information, https://www.ncei.noaa.gov/)								
社会经济数据 Socio-economic data	人口密度、GDP	统计数据/1000m 栅格	行政单位统计年鉴/中国科学院资源与环境科学数据中心提供的空间 分布栅格数据								
交通数据 Traffic data	城市/农村居民点、公路、铁路 线、国道等交通干线、风景名 胜区、自然保护区	矢量数据	OpenStreetMap(OSM) 网站 (https://www.openstreetmap.org/#map1/4 5/ 47.428/22.676)								
植被质量数据 Plant data	植被质量指数(NDVI)	1000m 栅格	中国科学院资源与环境科学数据中心提供的空间分布栅格数据								
	植被净初级生产力(NPP)	500m 栅格	MOD17A3HGF Version 6.0 产品 (https://lpdaac.usgs.gov/product_ search/? view=listhttps://lpdaac.usgs.gov/product_search/? view=list)								

1.4 空间自相关

空间自相关可以直观地表达地理事物的空间关联与差异,通常用来衡量空间要素属性间的聚合或离散程度,包括全局自相关和局部自相关。全局空间自相关可以衡量区域整体的空间关联与差异程度,全局莫兰指数(Global Moran's I)是广泛用于衡量空间自相关程度的综合性评价指标,通常用Z值检验 Moran's I值的显著水平。具体计算如下:

Global Moran's
$$I = \frac{n \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} |x_i - \bar{x}| |x_j - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

$$Z = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{V_{ar}(I)}}$$

式中:x为空间单元i和j的属性值,w_{ii}是空间权重矩阵元素,n为单元数量。Moran's I范围为[-1,1],当I=

http://www.ecologica.cn

0,全局空间显著无关;*I*>0,正相关,空间要素聚合;*I*<0,负相关,空间要素离散。当Z值为正且显著时,表明存 在正的空间自相关,也就是说相似的观测值(高值或低值)趋于空间集聚;当Z值为负且显著时,表明存在负 的空间自相关,相似的观测值趋于分散分布;当Z等于0时,观测值呈独立随机分布。

局部空间自相关分析通过局部莫兰指数和局部 Getis-OrdGi*指数等实现。其中 Getis-OrdGi* 热点分析 利用距离权重矩阵的局域空间自相关类指标表征研究区域的高低值分布,即热点和冷点分布。该指标利用加 权特征值分析热点和冷点,在此基础上得到数据的集聚特征和空间分布。计算公式如下:

Getis-OrdGi^{*} =
$$\frac{\sum_{j=1}^{n} w_{ij} d(x_j)}{\sum_{j=1}^{n} X_j}$$

式中, X_j为空间区域单元 j 的属性值, w_{ij} 为空间权重矩阵, 若第 i 个和第 j 个单元之间的距离处于设定距离 d 时,则空间权重矩阵中的元素为 1, 否则为 0。

1.5 地理探测器

地理探测器模型是一种基于空间异质性理论的空间分析模型,可以定量地检测和识别空间分布属性及其 解释因素之间的各种相互作用,由风险探测器、因素探测器、生态探测器和交互探测器组成。本研究主要采用 因子检测和交互探测两个模块,对研究区域生态用地稳定性的内在机制进行解释。因子检测计算如下:

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

式中, $N 和 N_h$ 分别为研究区样本数; $\sigma^2 和 \sigma_h^2$ 为因素 A 在样本 h 内的离散方差。L 为研究区各因素的类型, q为探测因子的探测力值, $q \in [0,1]$, q 值越大,表示自变量 x 对属性 y 的解释力越强,反之则越弱。

交互探测模块识别不同自变量因子之间的交互作用,即评估因子 x_1 和 x_2 共同作用时是否会增加或减弱 对因变量 y 的解释力。交互探测类型可以划分为双因素增强 $q(x_1 \cap x_2) > Max(q(x_1)q(x_2))$ 、非线性减弱 $q(x_1 \cap x_2) < Min(q(x_1)q(x_2))$ 、非线性增强 $q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$ 、独立 $q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$ 和单因子非线性减弱 $Min(q(x_1)q(x_2)) < q(x_1 \cap x_2) < Max(q(x_1)q(x_2))$ 等五类。

2 结果与分析

2.1 稳定性生态用地的时空变化

2.1.1 生态用地总体变化

2000、2010 和 2020 年京津冀地区生态用地空间分布趋势一致(表 2),集中在内蒙古草原生态区和燕山-太行山山地林生态区,另有极少量散落于京津唐城市生态区和华北坪区生态区内的东部沿海地带。区域生态 用地总量整体先增后降,前期扩增 13.46×10⁴ hm²,后期缩减 5.46×10⁴ hm²。生态用地变动主要集中在内蒙古 草原生态区,这与该区域内密集的草地覆盖相关,草原生态系统相对森林具有不稳定、食物网简单以及人为干 扰性更强等特征,因而区域内的生态用地波动更加突出。各时期生态用地构成变化较小,林地和草地均占据 最高比重。各类生态用地转移均以林地和草地的流转最为显著,前期林草动态弱于后期。非生态用地组成变 化较生态用地更强,主要体现为耕地的持续缩减与建设用地的持续增长(图 2)。

2.1.2 稳定性生态用地时空变化

2000—2010 和 2010—2020 年京津冀稳定性生态用地环西北山区聚集,东部海域少量散布(图 3)。前期 稳定性生态用地总量共计 733.83×10⁴hm²,林草地在其中占绝对主导,比例达 99.33%,灌木林地和湿地面积比 例仅为 0.14%和 0.52%;后期稳定性生态用地减少至 688.71×10⁴hm²,林草面积优势占比高达 99.23%,灌木林 比重相对上一时段有所降低,湿地则相对增加,但二者面积比重仍不足 1%。两时段下稳定性生态用地减少 范围均集中在燕山-太行山山地林生态区范围内,该分区是京津冀地区生态用地资源的核心源地,因而必然是

	Table 2	able 2 Types of ecological land in different zones								
分区	类型	2000 4	年	2010 4	年	2020	年			
Zone	Type	面积/×10 ⁴ hm ²	比例	面积/×10 ⁴ hm ²	比例	面积/×10 ⁴ hm ²	比例			
京津唐城市生态区	林地	2.28	19.29%	3.10	24.50%	3.19	22.85%			
Beingjing-Tianjin-Tangshan Urban	草地	5.29	44.67%	3.72	29.37%	6.21	44.49%			
Ecological Zone	灌木林地	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%			
	湿地	4.26	36.04%	5.84	46.13%	4.56	32.66%			
	小计	11.83	100.00%	12.65	100.00%	13.97	100.00%			
华北平原生态区	林地	0.94	29.35%	1.03	31.31%	0.92	18.73%			
North China Plain Ecological Zone	草地	0.44	13.62%	0.40	12.12%	2.16	44.27%			
	灌木林地	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.04	0.84%			
	湿地	1.83	57.03%	1.86	56.57%	1.77	36.16%			
	小计	3.21	100.00%	3.28	100.00%	4.89	100.00%			
燕山-太行山山地林生态区	林地	403.28	56.86%	405.46	57.37%	407.91	57.68%			
Yan-Taihang Mountain Forest	草地	303.50	42.79%	297.84	42.14%	295.82	41.83%			
Ecological Zone	灌木林地	1.94	0.27%	2.37	0.33%	2.28	0.32%			
	湿地	0.59	0.08%	1.14	0.16%	1.19	0.17%			
	小计	709.31	100.00%	706.81	100.00%	707.20	100.00%			
内蒙古草原生态区	林地	12.44	14.91%	12.89	13.08%	11.77	13.12%			
Inner Mongolia Grassland Ecological Zone	草地	70.34	84.33%	83.99	85.29%	77.30	86.16%			
	灌木林地	0.41	0.49%	0.51	0.52%	0.42	0.47%			
	湿地	0.22	0.26%	1.09	1.11%	0.22	0.25%			
	小计	83.41	100.00%	98.49	100.00%	89.71	100.00%			
合计 Total		807.76	_	821.23	_	815.77	_			

表 2 不同分区生态用地组成



图 2 2000、2010、2020 年用地类型转移 Fig.2 Land use type transfer in 2000、2010、2020

http://www.ecologica.cn

140	ne 5 Types of s	table ecological failu	in unterent zones		
八反方	米里日	2000—	2010 年	2010-	-2020年
方区 Zone	突型 Type	面积/hm ²	比例	面积/hm ²	比例
京津唐城市生态区	林地	17683.2	27.04%	19381.14	27.48%
Beingjing-Tianjin-Tangshan Urban	草地	22583.52	34.54%	21633.48	30.67%
Ecological Zone	灌木林地	0	0.00%	0	0.00%
	湿地	25120.08	38.42%	29515.59	41.85%
	小计	65386.8	100.00%	70530.21	100.00%
华北平原生态区	林地	8795.07	38.75%	7375.95	40.79%
North China Plain Ecological Zone	草地	2651.4	11.68%	2040.03	11.28%
	灌木林地	0	0.00%	0	0.00%
	湿地	11251.08	49.57%	8667.72	47.93%
	小计	22697.55	100.00%	18083.7	100.00%
燕山-太行山山地林生态区	林地	3800370.69	58.65%	3595829.49	59.64%
Yan-Taihang Mountain Forest Ecological Zone	草地	2670576.39	41.21%	2421246.42	40.16%
	灌木林地	7602.39	0.12%	6167.61	0.10%
	湿地	1283.13	0.02%	6006.24	0.10%
	小计	6479832.6	100.00%	6029249.76	100.00%
内蒙古草原生态区	林地	113035.77	14.67%	87482.43	11.37%
Inner Mongolia Grassland Ecological Zone	草地	653663.43	84.86%	678761.91	88.24%
	灌木林地	2804.76	0.36%	962.37	0.13%
	湿地	800.01	0.10%	2009.88	0.26%
	小计	770303.97	100.00%	769216.59	100.00%
合计 Total		7338220.92	_	6887080.26	_

表 3 不同分区稳定性生态用地组成 Table 3 Types of stable ecological land in different zones



图 3 2000、2010、2020 年稳定性生态用地空间分布 Fig.3 Spatial distribution of stable ecological land in 2000、2010、2020

- 2.2 生态用地稳定性指数
- 2.2.1 生态用地稳定性指数时空动态特征

2000—2010年和 2010—2020年京津冀地区生态用地稳定性指数分别为 90.85%和 83.86%。不同生态分

区单元显示在 2000—2010 年间,内蒙古草原生态区生态用地稳定性指数居高,为 92.35%,燕山-太行山山地林生态区次之,京津唐城市生态区最低,为 55.26%。2010—2020 年间燕山-太行山山地林生态区稳定性指数最高,达 85.30%,华北平原生态区最低,为 55.13%(表 4)。在生态用地内部,不同地类属性的稳定性特征也极大程度上干预着生态效益的稳定发挥,通过京津冀地区各地类属性的稳定性指数统计来看,2000—2010 年和 2010—2020 年均呈现林地稳定性指数>草地>湿地>灌木林地(表 5)。

Table 4 Ecological land stability index in different zones											
分区 Zone	2000—2010 年/%	2010—2020 年/%									
京津唐城市生态区 Beingjing-Tianjin-Tangshan Urban Ecological Zone	55.26	55.74									
华北平原生态区 North China Plain Ecological Zone	70.62	55.13									
燕山-太行山山地林生态区 Yan-Taihang Mountain Forest Ecological Zone	91.35	85.30									
内蒙古草原生态区 Inner Mongolia Grassland Ecological Zone	92.35	78.10									
整体 Total	90.85	83.86									

表 4 不同分区生态用地稳定性指数

表 5 不同类型生态用地稳定性指数

Table 5	Stability	index of	f different	types	of	ecological	land

		•	••	,	
类型 Type	2000—2010 年/%	2010—2020 年/%	类型 Type	2000—2010 年/%	2010—2020 年/%
林地 Forest	94.04	87.82	灌木林地 Shrubland	44.38	24.76
草地 Grassland	88.24	80.94	湿地 Wetland	55.62	46.54

鉴于空间格局显示评价与后续影响机制研究的数据需求,在全面保证样本量全面足够的基础上,对京津 冀地区 5km×5km 网格单元生态用地稳定性指数空间关系进行系统分析,结果显示,燕山-太行山山地林生态 区和内蒙古草原生态区生态用地稳定性潜力更高。为进一步探索生态用地稳定性指数时空分异特征,基于自 然断点法划定统一标准实现对不同时期生态用地稳定性分级(图4),分级结果显示(表6)2000—2010年间, 极低稳定性和极高稳定性面积占主导比例,分别占比40.76%和44.43%;2010—2020年间极低稳定性面积占



图 4 生态用地稳定性指数等级分布 Fig.4 Class of ecological land stability index

比最高,为38.40%,低稳定性、中稳定性、高稳定性和极高稳定性占比分别为3.53%、6.98%、27.44%和23.64%。不同分区生态用地稳定性等级结构显示,京津唐城市生态区和华北平原生态区显示出极低稳定性等级的绝对比例优势特征,燕山-太行山山地林生态区和内蒙古草原生态区在2000—2010年间以极高稳定性面积占主导,在2010—2020年间则呈现高稳定性和极高稳定性面积共同主导。

Table 6 Class area of ecological land stability index											
八反方		2000—2	2010 年	2010—	-2020 年						
方 LA Zone	寺坂 Class	面积/hm ²	比例	面积/hm ²	2020年 比例 76.50% 5.93% 7.36% 5.56% 4.65% 91.92% 3.36% 2.52% 1.48% 0.72% 3.60% 2.37% 6.77% 46.61% 40.67% 2.74% 6.61% 21.45% 37.66%						
京津唐城市生态区	极低稳定性	2782500	83.56%	2547500	76.50%						
Beingjing-Tianjin-Tangshan Urban	低稳定性	117500	3.53%	197500	5.93%						
Ecological Zone	中稳定性	82500	2.48%	245000	7.36%						
	高稳定性	145000	4.35%	185000	5.56%						
	极高稳定性	202500	6.08%	155000	4.65%						
华北平原生态区	极低稳定性	5940000	95.08%	5742500	91.92%						
North China Plain Ecological Zone	低稳定性	65000	1.04%	210000	3.36%						
	中稳定性	62500	1.00%	157500	2.52%						
	高稳定性	80000	1.28%	92500	1.48%						
	极高稳定性	100000	1.60%	45000	0.72%						
燕山-太行山山地林生态区	极低稳定性	505000	4.51%	402500	3.60%						
Yan-Taihang Mountain Forest Ecological Zone	低稳定性	227500	2.03%	265000	2.37%						
	中稳定性	415000	3.71%	757500	6.77%						
	高稳定性	1872500	16.73%	5217500	46.61%						
	极高稳定性	8175000	73.02%	4552500	40.67%						
内蒙古草原生态区	极低稳定性	57500	2.87%	55000	2.74%						
Inner Mongolia Grassland Ecological Zone	低稳定性	20000	1.00%	132500	6.61%						
	中稳定性	67500	3.37%	430000	21.45%						
	高稳定性	217500	10.85%	755000	37.66%						
	极高稳定性	1642500	81.92%	632500	31.55%						
合计 Total	极低稳定性	9285000	40.76%	8747500	38.40%						
	低稳定性	430000	1.89%	805000	3.53%						
	中稳定性	627500	2.75%	1590000	6.98%						
	高稳定性	2315000	10.16%	6250000	27.44%						
	极高稳定性	10120000	44.43%	5385000	23.64%						

表 6 生态用地稳定性指数等级

2.2.2 生态用地稳定性指数空间分异规律

对京津冀生态用地稳定性指数进行空间统计(表7),2000—2010年和2010—2020年生态用地稳定性的 全局莫兰指数分别为0.914和0.889,显著性较高,可见京津冀地区生态用地稳定性呈现显著空间自相关,即 稳定性高值区和低值区呈聚集分布。

Table 7 Global Moran's I of ecological land stability index & significance											
	2000—2010 年	2010—2020年		2000—2010 年	2010—2020年						
全局莫兰指数	0.914	0.889	Р	0.000	0.000						
Global Moran's I			Z	122.18	118.78						

表 7 生态用地稳定性指数全局莫兰指数及显著性

为了进一步反映生态用地稳定性的空间集散现象,本文对 2000—2010 年和 2010—2020 年生态用地稳定性进行 Getis-Ord Gi*热点分析(图 5)。空间分异结果显示京津冀生态用地稳定性具有显著的冷热点效应。

42 卷

整体空间分布显示热点区汇集在燕山-太行山山地林生态区和内蒙古草原生态区,冷点区集中在京津唐城市 生态区和华北坪区生态区。两个时期生态用地稳定性冷热点空间动态显示,冷点区和热点区面积在 2010— 2020 年均较 2000—2010 年有所减少,分别缩减 42×10⁴ hm² 和 82×10⁴ hm²,相对应地非显著地区范围有所扩 大,可见生态用地稳定性的聚集效应在相对减弱(表 8)。

米坦日	2000-	—2010	2010—2020								
文型 Type	面积/hm ²	比例	面积/hm ²	比例							
不显著 Non-significant	4707500	—	5947500	_							
冷点(99%置信度)Hot spots(99%)	7440000	85.52%	6495000	78.44%							
冷点(95%置信度)Hot spots(95%)	857500	9.86%	1240000	14.98%							
冷点(90%置信度)Hot spots(90%)	402500	4.63%	545000	6.58%							
冷点区面积和 Total	8700000	100.00%	8280000	100.00%							
热点(90%置信度)Cold spots(90%)	3622500	38.66%	3697500	43.25%							
热点(95%置信度)Cold spots(95%)	5747500	61.34%	4557500	53.30%							
热点(99%置信度)Cold spots(99%)	0	0.00%	295000	3.45%							
热点区面积和 Total	9370000	100.00%	8550000	100.00%							

表 8 生态用地稳定性指数冷点/热点 Table 8 Cold spots/bot spots area of ecological land stability index



图 5 生态用地稳定性指数冷点/热点空间分布 Fig.5 Cold spots/hot spots of ecological land stability index

2.3 生态用地稳定性影响因素分析

2.3.1 影响因素分析

鉴于以往研究理论,本文收集并选取地理因素(高程 DEM、坡度 SLOPE、坡向 ASPECT、地形起伏度 LANDFORM、地貌 GEOMORPHOLOGY、土壤类型 SOIL、水域距离 EU_WATER),气候因素(温度 TEM、降水 PREP),社会经济因素(人口密度 POP、国内生产总值 GDP、道路密度 DE_ROAD、居民点密度 DE_SA)和植被因素(植被净初级生产力 NPP、植被质量指数 NDVI)共 16 个变量对 生态用地稳定性指数时空异质性的影响强度进行解释探索。为保证所选变量与生态用地稳定性的关联作用,



图 6 生态用地稳定性指数及其影响因素的相关性验证

Fig.6 Correlation of ecological land stability index & influencing factors

ST0010:2000—2010年生态用地稳定性指数;ST1020:2010—2020年生态用地稳定性指数;DEM:高程;SLOPE:坡度;ASPECT:坡向; LANDFORM:地形起伏度;GEOMORPHOLOGY:地貌;EU_WATER:水域距离;SOIL:土壤类型;DE_ROAD:道路密度;DE_SETTLEMENT:居民 点密度;POP:人口密度;GDP:国内生产总值;TEM:温度;PREP:降水;NDVI:植被质量指数;NPP:植被净初级生产力

本文运用因子探测模块对生态用地稳定性空间分布的驱动因子进行分析(图7),从地形地貌,气候,社会 经济,交通和植被方面揭示不同变量对生态用地稳定性指数的影响机制。研究发现 2000—2010 年和 20102020年京津冀地区生态用地稳定性对不同环境变量的 总体响应趋势趋于一致,整体表现为以高程、坡度、地貌 和土壤类型为代表的地理要素对生态用地的解释作用 最强,景区密度、人口密度和居民点密度等社会因素影 响强度次之,道路密度和植被净初级生产力因素是满足 0.05 显著水平下影响强度最弱的驱动因子。

生态用地稳定性受到外部因素的多重影响,各影响 因素间彼此存在交互关系。从交互探测模块分析结果 来看(图 8),两两因素交互作用主要表现为双因子增强 和非线性增强两种类型。由于地貌和土壤类型要素对 生态用地稳定性表现出较强的说服力,因而其与其他因 子间的交互作用均表现出极强的解释率,显著突出于其 他交互变量组合。



图 7 生态用地稳定性影响因素因子探测结果

Fig.7 Influence of ecological land stability index influencing factors

*P<0.05; **P<0.01;q: 探测因子的解释力

2.3.2 影响机制区域差异

不同影响因素的作用强度存在显著空间异质性,同一解释因子对不同区域的生态用地稳定性解释力不同。特别是地理因素表现出较为突出的区域差异,因而本文考虑针对具有显著地理差异的的平原区和山区分别展开驱动机制探索。基于不同生态单元,本文分别对由京津唐城市生态区和华北平原生态区构成的平原区以及由内蒙古草原生态区和燕山-太行山山地林生态区构成的山区进一步探索内部各要素成因与机制。首先同样对各分区进行影响因素的筛选与处理,结果显示平原区范围内地貌因子呈现出显著的非相关性,与坡向、水域距离和降水量因子被统一剔除(图9)。平原区因子探测结果显示,温度因子解释力度最为突出,高程、地



^{*} P<0.05; * * P<0.01

形起伏度、人口密度、国内生产总值和景区密度等因子的影响强度同样显著,值得注意的是,前期土壤类型因素的突出影响在后期显著降低。山区范围内各影响因子的相关性分析结果显示出景区密度与降水因子与生态用地稳定性不相关。因子探测结果显示,国内生产总值、人口密度、居民点密度和道路密度等社会经济因素在该区域的解释力度最为显著,地理因子解释强度的优势作用被削弱。



图 9 不同分区影响因素与生态用地稳定性指数的相关性验证 Fig.9 Correlation of ecological land stability index & influencing factors in different zones

不同分区影响因素间的交互作用同样呈现显著差异性(图 11),各因素交互类型以双因子增强和非线性 增强为主。平原区内景区密度作为解释作用最强的因子之一,在 2000—2010 年间因子与高程、温度和国内生 产总值等因子的交互作用最为突出,2010—2020 年间景区密度与温度与高程因子的交互影响同样显著。山 区范围内各因子的交互作用重点表现在人口密度、国内生产总值以及居民点密度与其他因子的交互作用。

3 讨论

3.1 保障生态用地稳定是京津冀地区实现生态系统稳定与可持续发展目标的基础工作

生态用地是区域生态系统服务功能的核心来源,其稳定性概念的提出一定程度上是对区域生态评估与规 划建设工作的极大完善。聚焦于此的用地研究着眼于生态用地阶段性变量的空间异质性展开,2000、2010、 2020年京津冀地区生态用地非稳定空间主要集中在社会经济更为发达的平原地带(图4),由此也进一步引 发对于高度城市化背景下生态用地稳定性建设工作必要性的深入思考。对于以京津冀平原为例的高发展、高 能耗、高污染以及高生态需求的城市化地区,内部生态空间规模有限,研究显示京津唐城市生态区和华北坪区 生态区内生态用地占比不足 5%(表2),然而该地区却承载了近 70%的城市人口,随着环境建设的推广以及生 态意识的普及,地区生态建设需求日益提升,有限的生态空间与迫切的生态需求矛盾逐渐演化为城市生态发





展的瓶颈所在,而稳定性建设是在高度关注与建设用地博弈规律基础上最大限度保障生态用地功能效益的突破口。兼顾数量与空间结构稳定特征的生态用地一方面保证了生态用地自身功能价值的最大化,有效弱化了 非生态空间对生态用地功能效益的掠夺;另一方面也顺应了当前城市生态空间规划的建设浪潮,一定程度上 避免了单一层面下对相关生态管理问题的忽视,对于全面推进国土空间规划实施与生态红线划定落实以及 "三生"空间管控建设等生态工作具有重要意义,也为探索高度社会承载力背景下的生态开发强度研究做出 贡献。

3.2 生态用地的尺度效应是稳定性建设工作的必要考量

测量多尺度景观动态是景观稳定性研究的核心议题^[17],缺乏空间或尺度的明确性会导致特定空间稳定 性的效益评估变得模棱两可。为充分检验京津冀地区生态用地稳定性的时空异质性特征,本文具体探索稳定 性特征最合适和最有意义的分析尺度。在全面保证样本量充足的基础上,选取 1km 网格、5km 网格、10km 网 格和乡镇街道单元4个候选尺度进行检验,最适宜尺度单元的筛选依据应遵循以下原则:首先前期数据鉴于 自身分辨率差异统一调整至 1km×1km 网格单元,稳定性尺度应在此基础上扩展以保证数据的全面可用性;其 次需保证京津冀地区生态用地稳定性空间格局的显著性,不同尺度空间规律明显随着尺度单元尺寸的增加弱 化,即尺度单元越大,显著性越低;最后基于地理探测器模型的数据量计算限制,1km 网格单元由于其庞大的 数据量不满足模型运行范畴,其他尺度单元内的驱动机制探索显示 5km 网格条件下显著性最高且非显著影 响因子最少。综合上述现状多方考量,本文以此作为京津冀地区生态用地稳定性研究的分析尺度,一方面在 符合显著性基础上最大限度提升可操作数据的精细水平,另一方面也在一定程度上避免了行政边界范围下相 关自然因素准确性的度量失衡。

3.3 生态用地稳定性的聚集效应为后续建设工作开拓思路

京津冀地区生态用地稳定性指数具有显著的聚集效应,由前文 Getis-Ord Gi*热点分析结果可知(图5), 研究区生态用地稳定性热点区集中在山区分布,冷点区聚集在平原区,显然生态用地资源丰富的山区稳定性 效益更佳,平原区由于生态用地规模匮乏且稳定性差,因而合理开展冷点区生态用地建设以及维持工作将是 后续生态效益稳定提升的关键。同时值得注意的是,2000—2010 年和 2010—2020 年研究区生态用地稳定性 非显著区域主要含括环冷热点交汇带沿岸以及天津沿海港湾区一带,参考有关影响因子的地理分布可知,地 理要素和社会经济因子在这一区域均存在显著的地区差异及动态波动,一方面,区域地处地貌交接沿线,自然 地理要素间的强烈差别驱使生态资源的非稳定分散,具体表现为山地-平原过渡带林草灌木地以及天津沿海







湿地间的强烈用地交换;另一方面,严格的行政区划边界强行将不同地势统一界定,也在一定程度上加剧了生态用地稳定性的非显著性,同时我们发现,在生态用地稳定性非显著聚集地所涉及县/区级单元内部,人口及国内生产总值等社会经济要素存在极端交替现象,强烈的社会因素交换必然带来生态空间的被动"活跃",由此间接加剧区域生态用地稳定性的非显著效应。

3.4 影响因素的区域差异直接干预地区生态建设工作重点

由于京津冀地区覆盖山地和平原地势结构,涉及强烈的地形对比,因而地理因素对生态用地稳定性的解释力度更加突出。本文在这一基础上分别对平原和山区内部影响因素的驱动机制进一步分析,结果显示不同

分区地理要素作用强度的优势均较研究区整体有所削弱。平原区内,温度与高程、地形起伏度、人口密度、国内生产总值和景区密度等因子的影响强度均作出突出贡献;而在山区社会经济因素的解释力度更为显著,地理因子解释强度进一步弱化(图11)。由平原向山区,自然因素解释率的减弱以及社会因素影响力的突出,一方面是由于平原区作为囊括北京市、天津市重要地区的核心地带,是京津冀地区城市经济与社会发展的重点地区,持续发展的城市化进程及相关社会经济影响对区域内生态效益发挥的指导作用毋庸置疑,同时平原整体地势平缓,以坡度和地形起伏度因子为代表的地理因素仍在该区域扮演着显著的解释角色,因而该范围呈现多因子协同作用的局面,由此后续平原区生态用地稳定性建设工作需建立在此基础上从多方视角综合考虑实施;另一方面,21世纪以来在京津冀协同发展的规划指导下,山区作为生态用地的核心源地,是京津冀重要的生态环境支撑区,承载着生态优先、绿色发展的目标任务,有关部门严格落实生态安全建设工作,持续实施"三北"防护林、京津风沙源治理,退耕还草还林、绿色矿山等系列工程,因此区域内部强烈的人为保护力度远远高于自然要素本身对于生态用地的稳定保障。

3.5 功能稳定性是后续生态用地稳定性研究的重要突破

在生态用地稳定性影响机制探索中,本文基于植被质量指数(NDVI)和植被净初级生产力(NPP)两因子 以促进实现生态用地规模与质量的空间链接,但显然在总体影响因素体系中,植被功能的作用效果并不突出。 作为体现生态用地功能价值的重要因子,解析其内在机制同样是探索生态用地景观稳定性特征的重要环节, 生态用地空间结构的稳定与否也极大程度上直接作用于生态质量等功能稳定性维持。后续的生态用地稳定 性研究中,基于景观功能出发的稳定性探索应是重点关注所在^[18],需从时间和空间尺度上着眼于生态功能的 稳定性能溢出效应,在空间结构与功能层面实现稳定机制的有效链接。

4 结论

本研究基于不同时段的生态用地数据基础对生态用地稳定性特征进行统一量化,系统分析其时空变化特征及空间分异规律,并对生态用地稳定性的具体影响因素驱动机制进行探索。研究发现:

(1)2000—2010 年和 2010—2020 年京津冀地区稳定性生态用地降低,集中分布在内蒙古草原生态区和 燕山-太行山山地林生态区。

(2)2000—2010 年和 2010—2020 年京津冀整体生态用地稳定性指数分别为 90.85% 和 83.86%。不同分 区单元生态用地稳定性指数呈现"西北高、东南低",燕山-太行山山地林生态区和内蒙古草原生态区高于其他 区域。不同等级生态用地稳定性指数显示前期极低稳定性和极高稳定性面积占主导,分别占比 40.76% 和 44.43%;后期极低、高和极高稳定性面积共同主导,分别占比 38.40%、27.44% 和 23.64%。生态用地稳定性指 数空间聚集特征显示出显著的冷热点效应,热点区域汇集在燕山-太行山山地林生态区和内蒙古草原生态区, 冷点区集中在京津唐城市生态区和华北坪区生态区。

(3)影响因素分析显示京津冀地区内部高程、坡度、地貌和土壤类型表现出极高的解释力,地貌类型要素 与其他因子的交互作用解释率较强。在平原区范围内,温度因子解释力度最为突出,地理因素(包括高程、地 形起伏度因子)和社会经济因素(包括人口密度、国内生产总值和景区密度等因子)也较为显著;景区密度与 温度和高程因子的交互影响更显著。山区范围内以国内生产总值、人口密度、居民点密度和道路密度为代表 的社会经济因素影响作用更加突出,地理因子解释强度的优势作用被削弱;人口密度、国内生产总值以及居民 点密度与其他因子的交互作用更强。

参考文献(References):

- [1] Alipbeki O, Alipbekova C, Sterenharz A, Toleubekova Z, Makenova S, Aliyev M, Mineyev N. Analysis of land-use change in shortandy district in terms of sustainable development. Land, 2020, 9(5): 147.
- [2] Da Silva R F B, Millington J D A, Moran E F, Batistella M, Liu J G. Three decades of land-use and land-cover change in mountain regions of the Brazilian Atlantic forest. Landscape and Urban Planning, 2020, 204: 103948.

[3]	Gray C,	Bilsborrow	R.	Stability	and	change	within	indigenous	land	use	in	the	Ecuadorian	Amazon.	Global	Environmental	Change,	2020,
	63: 1021	116.																

- [4] Hallett L M, Stein C, Suding K N. Functional diversity increases ecological stability in a grazed grassland. Oecologia, 2017, 183(3): 831-840.
- [5] He X Y, Liang J, Zeng G M, Yuan Y J, Li X D. The effects of interaction between climate change and land-use/cover change on biodiversityrelated ecosystem services. Global Challenges, 2019, 3(9): 1800095.
- [6] Ives A R, Carpenter S R. Stability and diversity of ecosystems. Science, 2007, 317(5834): 58-62.
- [7] Kuang W H. National urban land-use/cover change since the beginning of the 21st century and its policy implications in China. Land Use Policy, 2020, 97: 104747.
- [8] Li G Y, Jiang C H, Du J, Jia Y P, Bai J. Spatial differentiation characteristics of internal Ecological land structure in rural settlements and its response to natural and socio-economic conditions in the Central Plains, China. Science of the Total Environment, 2020, 709; 135932.
- [9] Li S N, Zhao X Q, Pu J W, Miao P P, Wang Q, Tan K. Optimize and control territorial spatial functional areas to improve the ecological stability and total environment in karst areas of Southwest China. Land Use Policy, 2021, 100: 104940.
- [10] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [11] Liu J X, Wang M L, Yang L C. Assessing landscape ecological risk induced by land-use/cover change in a county in China: A GIS-and landscapemetric-based approach. Sustainability, 2020, 12(21): 9037.
- [12] Lu Q, Zhao D, Wu S, Dai E F, Gao J B. Using the NDVI to analyze trends and stability of grassland vegetation cover in Inner Mongolia. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 135(3): 1629-1640.
- [13] Muchová Z, Tárníková M. Land cover change and its influence on the assessment of the ecological stability. Applied Ecology and Environmental Research, 2018, 16(3): 2169-2182.
- [14] Wang H, Zhang C, Yao X, Yun W, Ma J, Gao L, Li P.Scenario simulation of the tradeoff between ecological land and farmland in black soil region of Northeast China.Land Use Policy, 2022, 114: 105991.
- [15] O'Neill R V, Hunsaker C T, Jones K B, Riitters K H, Wickham J D, Schwartz P M, Goodman I A, Jackson B L, Baillargeon W S. Monitoring environmental quality at the landscape scale: using landscape indicators to assess biotic diversity, watershed integrity, and landscape stability. BioScience, 1997, 47(8): 513-519.
- [16] Pelorosso R, Apollonio C, Rocchini D, Petroselli A. Effects of land use-land cover thematic resolution on environmental evaluations. Remote Sensing, 2021, 13(7): 1232.
- [17] Prokopová M, Salvati L, Egidi G, Cudlín O, Včeláková R, Plch R, Cudlín P. Envisioning present and future land-use change under varying ecological regimes and their influence on landscape stability. Sustainability, 2019, 11(17): 4654.
- [18] Rutledge R W, Basore B L, Mulholland R J. Ecological stability: an information theory viewpoint. Journal of Theoretical Biology, 1976, 57(2): 355-371.
- [19] Shi M J, Wu H Q, Fan X, Jia H T, Dong T, He P X, Baqa M F, Jiang P G. Trade-offs and synergies of multiple ecosystem services for different land use scenarios in the Yili River valley, China. Sustainability, 2021, 13(3): 1577.
- [20] Talukdar S, Singha P, Shahfahad N, Mahato S, Praveen B, Rahman A. Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the lower Gangetic plain of India. Ecological Indicators, 2020, 112: 106121.
- [21] Tian Y Y, Jiang G H, Zhou D Y, Li G Y. Heterogeneity and regional differences in ecosystem services responses driven by the "Three Modernizations". Land Degradation & Development, 2020, 32(13): 3743-3761.
- [22] Wang S P, Lamy T, Hallett L M, Loreau M. Stability and synchrony across ecological hierarchies in heterogeneous metacommunities: linking theory to data. Ecography, 2019, 42(6): 1200-1211.
- [23] Wellmann T, Schug F, Haase D, Pflugmacher D, Van Der Linden S. Green growth? On the relation between population density, land use and vegetation cover fractions in a city using a 30-years Landsat time series. Landscape and Urban Planning, 2020, 202: 103857.
- [24] White H J, Gaul W, Sadykova D, León-Súnchez L, Caplat P, Emmerson M C, Yearsley J M. Quantifying large-scale ecosystem stability with remote sensing data. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2020, 6(3): 354-365.
- [25] Xystrakis F, Psarras T, Koutsias N. A process-based land use/land cover change assessment on a mountainous area of Greece during 1945-2009: Signs of socio-economic drivers. Science of the Total Environment, 2017, 587-588: 360-370.
- [26] Zhang D, Wang X R, Qu L P, Li S C, Lin Y P, Yao R, Zhou X, Li J Y. Land use/cover predictions incorporating ecological security for the Yangtze River Delta region, China. Ecological Indicators, 2020, 119: 106841.
- [27] Cao W, Wu D, Huang L, Pan M, Huhe T. Determinizing the contributions of human activities and climate change on greening in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China. Scientific Reports, 2021, 11: 21201.

[28]	邵明超,	宋宏利,	尚明,	何洪涛,	史宜梦.	多源土地覆着	疲数据类别-	一致性及責	景观格局差	差异性——	-以京津郭	冀区域为例.	生态学杂志,	2020,
	39 (11):	3881-388	39.											

- [29] 张能, 武廷海. 京津冀的城市地区识别与国际比较. 人类居住, 2018, (4): 58-64.
- [30] 陈宽,杨晨晨,白力嘎,陈瑜,刘锐,潮洛濛.基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响. 生态学报, 2021, 41 (12): 4963-4975.
- [31] 冯丽媛, 米文宝, 马国庆. 基于 CA-Markov 模型的宁夏沿黄生态经济带土地利用变化及模拟研究. 水土保持通报, 2019, 39(5): 218-222, 230-230.
- [32] 巩杰,孙朋,谢余初,钱大文,贾珍珍.基于移动窗口法的肃州绿洲化与景观破碎化时空变化.生态学报,2015,35(19):6470-6480.
- [33] 侯伟, 翟亮, 田莉, 乔庆华, 董泉. 基于 PSR 模型的景观人为干扰度综合分析——以北京市为例. 地理与地理信息科学, 2019, 35(6): 90-96.
- [34] 胡实,韩建,占车生,刘梁美子.基于地理加权回归模型的典型山地卫星反演降水产品降尺度研究.山地学报,2019,37(3):451-461.
- [35] 贾宝全, 王成, 邱尔发. 南京市景观时空动态变化及其驱动力. 生态学报, 2013, 33(18): 5848-5857.
- [36] 李奇虎. 基于土地利用数据库的景观格局分析[D]. 武汉: 华中师范大学, 2009.
- [37] 李锐.森林景观斑块耦合网络结构稳定性研究[D].长沙:中南林业科技大学, 2016.
- [38] 梁燕, 葛忠强, 马安宝, 杜振宇, 王清华. 森林生态系统稳定性研究进展. 山西林业科技, 2018, 47(4): 32-34, 60-60.
- [39] 刘治昆,陈达亮,陈毅青,钱军,黄文明,陈冬洋.海口市土地利用景观稳定性研究.林业与环境科学,2018,34(5):34-41.
- [40] 苏静雯. 基于 GIS 的土地利用变化与景观格局分析——以北京市密云区蔡家洼小流域为例[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- [41] 肖瑶,赵林,邹德富,刘世博,马露,应雪,刘艺阗.基于地理探测器的青藏高原多年冻土分布影响因子分析.冰川冻土,2021,43(1): 311-321.
- [42] 徐秋阳, 王巍巍, 莫罹. 京津冀地区景观稳定性评价. 生态学报, 2018, 38(12): 4226-4233.
- [43] 游珍,封志明,杨艳昭.中国地形起伏度公里网格数据集. 全球变化数据仓储,(2018-05). http://www.geodoi.ac.cn/edoi.aspx? DOI=10. 3974/geodb.2018.03.16.V1.
- [44] 张洪云. 基于控制-干扰-响应机制的湿地景观稳定性分析与评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2016.
- [45] 张金亭,赵瑞.基于地理加权回归的环渤海城市群房价影响因子研究.国土与自然资源研究,2019,(1):87-93.
- [46] 张思佳. 基于 RS/GIS 的长沙市土地利用和稳定性分析. 软件, 2018, 39(7): 124-129.
- [47] 左丽媛,高江波.基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因. 生态环境学报, 2020, 29(4): 686-694.