

DOI: 10.5846/stxb202205051243

张秋梦, 贾宝全, 李彤, 刘文瑞, 李晓婷. 中国生态用地稳定性空间分异及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(14): 5764-5775.

Zhang Q M, Jia B Q, Li T, Liu W R, Li X T. The spatial distribution and influencing factors of ecological land stability in China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5764-5775.

中国生态用地稳定性空间分异及其影响因素

张秋梦^{1,2,3}, 贾宝全^{1,2,3,*}, 李彤^{1,2,3}, 刘文瑞^{1,2,3}, 李晓婷⁴

1 中国林业科学研究院林业研究所, 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 1000914 清华大学建筑学院, 北京 100084

摘要:生态用地稳定性是生态用地数量与质量双重保护的重要载体。基于 2000、2010、2020 年的 GlobeLand30 土地利用数据, 借助地理信息系统 (GIS) 空间分析方法, 并应用生态用地稳定性指数, 揭示中国 2000—2020 年生态用地稳定性空间格局特征; 同时运用地理探测器, 探究中国生态用地稳定性的主要影响因素。主要研究如下: (1) 近 20 年中国生态用地面积总体减少了近 $7.44 \times 10^4 \text{ km}^2$, 以新疆西北部缩减最为明显; 同时, 耕地 (76.5%)、建设用地 (11.3%) 的侵占是生态用地缩减的主要原因。 (2) 近 20 年中国稳定性生态用地数量变化不大, 其空间分布与“胡焕庸线”较一致, 其中热点面积分布在“胡焕庸线”西北侧 (42.3%), 冷点面积在“胡焕庸线”东南侧 (21.2%); 以占稳定性总面积 53% 的高稳定等级的生态用地为主, 集中分布在生态脆弱的西部地区, 中 (24%)、低 (23%) 稳定等级数量相差不大, 多在人口密集、经济发达的中东部地区。 (3) 自然因素, 特别是年降水量与年日照时数, 对生态用地稳定性变化的影响最为显著; 同时自然与社会经济因素的交互作用, 相较单一影响因素对生态用地稳定性变化更具解释力。生态用地稳定性空间分异及其影响因素的深入探究, 能在动态背景下为保障生态保护红线、实现国土空间优化配置与规划提供科学依据, 有助于全面促进人地关系的可持续发展。

关键词:生态用地稳定性; 冷/热点分析; 影响因素; 地理探测器

The spatial distribution and influencing factors of ecological land stability in China

ZHANG Qiumeng^{1,2,3}, JIA Baoquan^{1,2,3,*}, LI Tong^{1,2,3}, LIU Wenrui^{1,2,3}, LI Xiaoting⁴

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

4 School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Ecological land use stability is an important carrier to maintain ecological land quantity and quality. Based on the land use data of GlobeLand30 in 2000, 2010 and 2020, GIS spatial analysis and ecological land use stability index, this paper revealed the spatial pattern characteristics of ecological land stability in China from 2000 to 2020. Meanwhile, the main influencing factors of ecological land use stability were explored by using Geodetector. Results showed that: (1) The overall area of ecological land in China has decreased by nearly $7.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ over the 20 years, with the most obvious reduction in northwest Xinjiang. The encroachment of farmland (76.5%) and construction land (11.3%) were the main reason for the reduction of ecological land. (2) The quantity of stable ecological land in China took little change in the past 20 years, whose spatial distribution was basically content with “Hu Line”, of which the hot spot area was distributed in the

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

收稿日期:2022-05-05; **网络出版日期:**2023-03-23

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

northwest side of the “Hu Line” (42.3%), and the cold spot area was on the southeast side of the “Hu Line” (21.2%); The high-stable ecological land area accounted for 53%, and there existed ecologically fragile western regions; there was little difference in the number of middle (24%) and low (23%) stability grades, and most of which were in the densely populated and economically developed central and eastern regions. (3) Natural factors, especially annual precipitation and annual sunshine duration, were playing the most significant impact on ecological land use stability change. At the same time, the interaction of natural and social economic factors, which became more powerful to explain the ecological land stability change than the single influence factor. The exploration of the spatial differentiation of ecological land stability and its influencing factors, which will provide a scientific basis for ensuring the red line of ecological protection, realizing the optimal allocation and planning of national space in a dynamic context, thus promoting the sustainable development of human-land relations.

Key Words: ecological land stability; cold/hot spot; influencing factors; Geodetector

土地作为一个自然社会经济复合生态系统,对人类生产、生活及生态环境建设具有重要意义^[1]。随着全球范围内生态问题不断涌现,以土地为载体的生态系统研究已成为国内外相关领域研究的热点^[1]。在各种土地类型中,生态用地具有涵养水源、保护土壤、防风固沙、调节气候、净化环境、保护生物多样性等生态功能,既是维持区域生态系统安全格局的重要载体,也为人类生存提供了必需的生态服务空间^[2-3]。随着我国社会经济不均衡发展 and 城市加速扩张,国内生产总值由改革开放时期的 0.4×10^4 亿提升到 2020 年的 101.6×10^4 亿,城镇化率由 17.9% 提高到 64.9% (数据来源于国家统计局, <http://www.stats.gov.cn/>), 生产建设对土地需求的日益旺盛,导致原有的生态用地被大量挤占和蚕食,许多地区出现生态用地数量不足、空间格局欠佳等问题^[4];同时大量具有特殊生态价值的土地(如湿地)丧失其生态功能,促使原本就脆弱的生态系统日趋恶化,加剧了区域生态系统脆弱性与破碎化,进而威胁区域生态平衡与生态安全^[5-7]。为扭转快速发展而引发的生态用地规模退化以及质量下降的不利局面,生态用地的动态特征、驱动机制以及数量结构与空间布局的合理配置等相关研究,逐渐成为了土地系统科学研究的热点议题。

近年来,研究聚焦于国家层面、区域尺度、城市视角等不同尺度,深入探讨生态用地的定义与分类^[8-10]。国内外学者已就生态用地数量与空间格局分布进行深入研究^[1,3-4],包括对未来数量及空间分布的预测^[11];关于生态用地的质量评价、生态效益评估以及生态服务价值估算也取得较多成果^[12-14],同时对生态用地变化的驱动因素分析也较为丰富^[5,15-16]。此外,生态用地与其他土地类型间的动态转换关系,特别是与建设用地和耕地间的矛盾及产生的生态影响^[12,17-19]也是近年来一大研究热点。综上所述可看出,关于生态用地研究的重心始终以时空动态变化为核心,力图揭示生态用地的时空格局变化的过程、动因以及减缓这种变化的实践措施^[20],而生态用地稳定性-既反映生态用地格局特征及生态过程的持续性,又能揭示区域土地利用方式与环境条件的协调程度,相较于生态用地的动态研究,目前生态用地的稳定性研究较少,且多集中在生态用地的数量稳定性^[20-21],而其功能(质量)的稳定性仍需努力探索。

基于此,本文拟以 GlobeLand30 数据为基础,运用地理信息系统(GIS)空间分析方法,并借助生态用地稳定性指数,分析我国生态用地稳定性的时空分异格局;同时采用地理探测器来定量探测识别影响生态用地稳定性的驱动力因素,以期从生态用地时空分布格局合理配置与优化开发的视角,为生态用地保护和高效利用提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究所用数据源自国家基础地理信息中心研制的 GlobeLand30 (<http://www.globallandcover.com/>) 2000 年、2010 年和 2020 年 30m 空间分辨率地表覆盖数据集^[22]。该数据集包含耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水

体、苔原、人造地表、裸地以及冰川和永久积雪 10 大类地表覆盖信息。在生态环境现状与前人研究的基础上^[23–25],本文研究区域的生态用地主要包括森林、草原、灌木地与湿地 4 类基础性用地,非生态用地主要包括耕地、人造地表和水体等地类。

驱动因子的有效选取是空间分异机制地理探测研究的关键。结合研究区具体实际情况与前人文献总结^[15–16,26–27],同时遵循数据的科学性、可获得性、可量化性原则,最终在县级行政区划单元上(暂不包括中国香港、澳门和台湾地区,共 2276 个)筛选出 2 大类项指标(表 1):①自然因素(年均气温、年降水量、年日照时数、海拔、坡度、地形起伏度);②社会经济因素(地区生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值、年末总人口、人均耕地面积)。其中,气象数据均来自中国气象科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn>),采用澳大利亚国立大学研发的 Anusplin 4.2 软件^[28]对其进行了空间插值,空间分辨率为 1000 m。地形高程数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘使命(SRTM)的数字高程模型(DEM)数据^[29],空间分辨率为 90 m;坡度与地形起伏度在 DEM 基础上计算得出。社会经济数据来源于《中国县域统计年鉴 2020》《各省份统计年鉴 2020》等数据。中国 2020 年人口密度分布数据源于 WorldPop(<https://www.worldpop.org>),分辨率为 1000 m。

中国生态功能区划来源于中国科学院生态环境研究中心,按地貌、水热组合、植被特征等自然条件划分为东部季风、西部干旱和青藏高寒 3 个生态大区;在生态大区的基础上,按生态系统类型、地理特征等自然条件更为细致地划分了 50 个生态区。重点生态功能区的边界来源于 2010 年国务院发布的《全国主体功能区规划》,它以所在区县的行政界限划定研究区,明确划分了 25 个国家重点生态功能区,总面积约为 3.86×10^6 km²,占到全国陆地总面积的 40.2%左右。生态功能区划和主体功能区划的界定,为划定全国生态保护红线奠定了基础^[30]。

表 1 中国生态用地变化的影响因子选取
Table 1 The influence factors of ecological land change in China

影响因素 Influencing factors	影响因子 Influencing factors	单位 Unit	变量编号 Variable number	影响因素 Influencing factors	影响因子 Influencing factors	单位 Unit	变量编号 Variable number
自然因素 Physical factors	年均气温	℃	X1	社会经济因素 Socioeconomic factors	地区生产总值	万元	X7
	年降水量	mm	X2		第一产业增加值	万元	X8
	年日照时数	h	X3		第二产业增加值	万元	X9
	海拔	m	X4		年末总人口	万人	X10
	坡度	°	X5		人均耕地面积	m ²	X11
	地形起伏度	/	X6				

1.2 研究方法

1.2.1 转移矩阵方法

土地利用转移矩阵可表征各土地利用类型变化的方向和数量结构特征,反映各地类之间的相互转换关系,进而了解转移前后各地类的结构特征^[31–32]。通过转移矩阵可有效表示出一定区域内某一时间段内的土地利用结构特征与功能类型的变化^[31]。公式如下^[32]:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中, S 代表土地利用面积, n 代表土地利用类型数量, i 和 j 分别代表研究初期与末期的土地利用类型,矩阵中的每一列元素代表转移后的 j 地类从转移前的各地类的来源信息,每一行元素代表转移前的 i 地类向转移后的各地类的流向信息。

1.2.2 生态用地稳定性指数

到目前为止,针对土地利用对景观稳定性影响研究尚不多见,且大多都是从生态系统稳定性方面表达景观的稳定性^[33—34],目前还没有一个被学界普遍认同的内涵与研究体系。贾宝全等的研究^[35—36]认为景观的稳定性应该是指在一定区域内不同景观要素在时间尺度上保持其本质属性不变的特性。从土地覆盖/土地利用的角度来看,稳定性可以用某区域内各类土地覆盖/土地利用类型保持不变的面积比例来衡量。为此,生态用地空间稳定性就是指一段时间内,生态用地在区域空间内保持其地类属性不变的特征^[35]。由此,计算方法如下^[36]:

$$PSI = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \times 100\% \quad (2)$$

式中,PSI 表示生态用地稳定性指数; A_i 表示在研究时间段内研究区域中生态用地覆盖 i 类型保持覆盖性质不变的面积,这里 i 分别代表森林、草地、灌木地和湿地, A 表示研究区域内各类土地覆盖的面积总和,文中为县级行政区划面积或所建渔网面积。PSI 值越大,表明区域生态用地稳定度越高;反之,则稳定度越低。

1.2.3 热点分析

热点分析用于探究各项服务特征值分布聚集度高低程度,热点和冷点分别代表统计上显著的高值空间聚集和低值空间聚集^[37]。本文采用热点分析(Getis-Ord G_i^*),它是一种基于距离全矩阵的局部空间自相关指标,用来测度中国生态用地稳定性指数中统计显著的热点和冷点空间分布^[18]。计算公式^[37]如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_j W_{ij} x_j}{\sum_j x_j} \quad (3)$$

式中, W_{ij} 为斑块 i 与斑块 j 之间的空间权重矩阵, x_j 为斑块 j 的属性值,这里为县级稳定性指数, n 是总的斑块数,这里指中国的县级行政单元数量。

1.2.4 地理探测器模型

地理探测器模型(<http://www.geodetector.org/>)可以用来探测地理要素空间分异性,是揭示地理要素背后驱动因子的一种新的统计学方法,包含风险、因子、生态、交互 4 个部分^[38]。本文采用其中的因子探测器及交互作用探测器。

因子探测器可度量不同因子对生态用地时空变化分异性,以探测其影响程度大小,公式^[38]如下所示:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中, q 是影响因子对生态用地变化的影响程度大小, L 为影响因子的样本数; N 和 N_h 分别为整个研究区和次级分区 h 样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别是整个研究区和次级分区生态用地变化的离散方差; q 的取值范围为 $[0,1]$,值越大则表明影响因子对研究区生态用地变化的解释力越强,反之则越弱。

交互作用探测器为判断不同影响因素之间的交互作用,即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时,对因变量的解释力是增加还是减弱,或是相互独立的。两个因子之间的关系可分为以下五类^[38]:

(1) $q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$, 表明因子 X_1 与 X_2 交互后非线性减弱;

(2) $\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$, 表明因子 X_1 与 X_2 交互后单因子非线性减弱;

(3) $q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$, 表明因子 X_1 与 X_2 交互后双因子增强;

(4) $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$, 表明因子 X_1 与 X_2 交互后相互独立;

(5) $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$, 表明因子 X_1 与 X_2 交互后非线性增强。

2 结果与分析

2.1 生态用地变化过程

2.1.1 生态用地总体变化过程

根据中国 2000、2010 与 2020 年三期土地利用数据(表 2),可看出近 20 年生态用地总面积整体呈缩小的趋势,共减少了 $7.44\times 10^4\text{ km}^2$,缩减幅度约为 1.34%,新疆西北部——古尔班通古特沙漠的降幅最为明显(图 1),与干旱气候条件、鼠害、线性工程建设与油田开采等人为活动密切相关^[39-41]。具体来看,2000—2010 年增加了约 $6.65\times 10^4\text{ km}^2$,2010—2020 年缩减了近 $14.09\times 10^4\text{ km}^2$ 。其中,除湿地面积呈持续增加态势外,森林、草地与灌木地均为前期增长、后期减少,而草地总体缩减了近 $9.71\times 10^4\text{ km}^2$,变化最为明显。近 20 年非生态用地总体上呈增加的趋势,增加了近 $7.43\times 10^4\text{ km}^2$,增幅较大。其中,耕地持续减少了 $6.49\times 10^4\text{ km}^2$ 左右,而水体与人造地表则分别持续增加了 $3.37\times 10^4\text{ km}^2$ 与 $13.03\times 10^4\text{ km}^2$,建设用地扩张最为明显。

表 2 中国 2000、2010 和 2020 年土地利用总体变化/($\times 10^4\text{ km}^2$)

Table 2 Land use overall change of China in 2000, 2010 and 2020

地类 Land types		2000 年	2010 年	2020 年	增 Increase(+) 减 Decrease(-)	
					2000—2010 年	2010—2020 年
生态用地 Ecological land	森林	215.45	216.32	216.18	0.87	-0.14
	草地	306.54	310.03	296.83	3.49	-13.2
	灌木地	8.75	11.03	9.93	2.28	-1.1
	湿地	4.46	4.47	4.82	0.01	0.45
	合计	535.2	541.85	527.76	6.65	-14.09
非生态用地 Non-ecological land	耕地	210.7	207.05	204.21	-3.65	-5.84
	水体	15.36	16.52	18.73	1.16	2.21
	人造地表	15.15	17.52	28.18	2.37	10.66
	其他	183.6	177.37	181.12	-6.23	3.75
	合计	424.81	418.15	432.24	-1.32	10.03

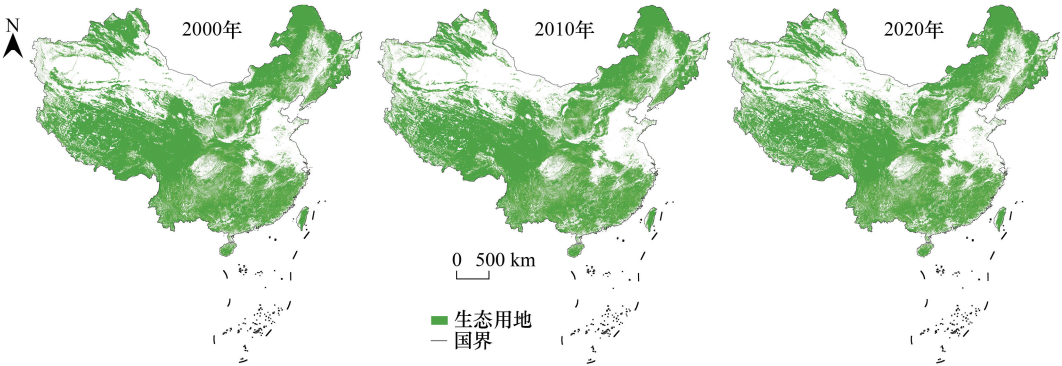


图 1 2000—2020 年中国生态用地空间分布

Fig.1 The space distribution of ecological land in China in 2000—2020

2.1.2 稳定性生态用地总体变化过程

本文借助生态用地稳定性指数来定量刻画生态用地空间稳定性。结果显示:从数量上来看,2010—2020 年的稳定性生态用地面积,较 2000—2010 年缩减了 0.12%,变化幅度不大。其中森林、草地与湿地均有不同程度地减少,草地缩减面积最大,达 $1\times 10^4\text{ km}^2$;灌木地则增加了近 $0.9\times 10^4\text{ km}^2$ (图 2)。从空间分布上来看(图 3),2000—2010 与 2010—2020 年两个时段的分布格局大同小异。西藏、内蒙古、青海和新疆位居前四位,

稳定性生态用地面积超过 $235 \times 10^4 \text{ km}^2$, 再加上四川和甘肃, 上述西部 6 省(区)稳定性生态用地总面积, 约占全国稳定性生态用地总量的 60% 左右; 东北部和中部地区分布最大分别在黑龙江和湖南, 而东部地区的天津、上海、江苏、北京等经济和人口聚集区则极为缺乏稳定性生态用地空间。总体上看, 稳定性生态用地数量呈现出“东南低, 西北高”的空间分布特点, 与人口“胡焕庸线”高度吻合。但从稳定性生态用地的地类质量来看, “胡焕庸线”西北侧区域是我国生态脆弱区的集中分布区, 主要以草地和灌木林为主, 但该线东南侧区域则主要以森林类型为主, 因此其地类质量要明显优于西北区域。

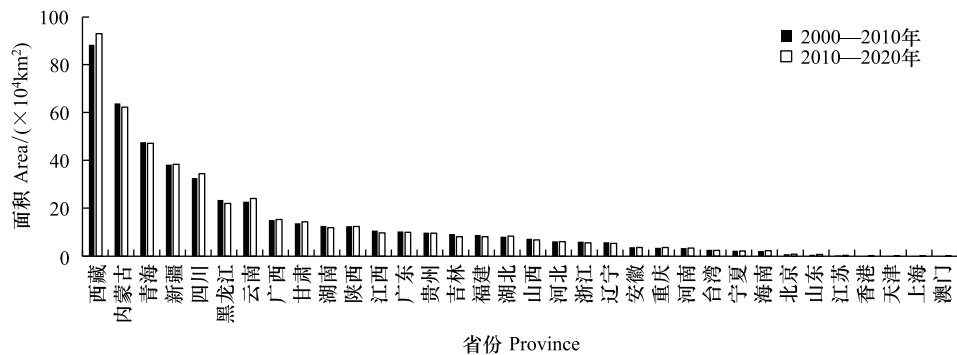


图 2 2000—2020 年中国稳定性生态用地变化

Fig.2 The stable ecological land change of China from 2000 to 2020

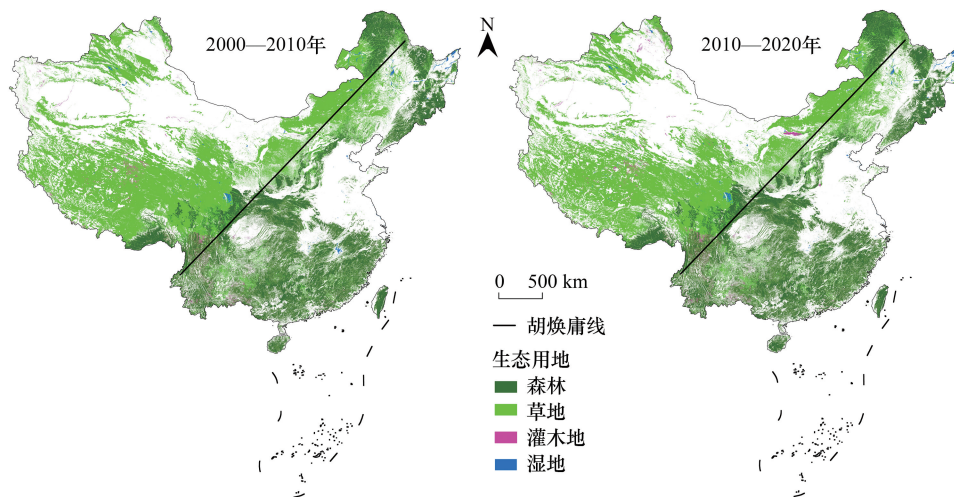


图 3 2000—2020 年中国稳定性生态用地分布

Fig.3 The space distribution of the stable ecological land in China from 2000 to 2020

2.2 生态用地稳定性指数动态

2.2.1 生态用地稳定性时空动态特征

由于原始影像 GlobeLand30 数据的空间分辨率为 30 m, 但由于整个中国按 30 m 进行栅格划分, 数据量过大导致 GIS 无法进行统计操作。由此, 以县级行政区域为单元, 本文进一步对 2000—2010 和 2010—2020 年两个时段内的稳定性指数进行了热点分析(图 4), 为探究生态用地稳定性冷热点分布与区域人口、经济发展等外在条件的关系。2000—2010 年与 2010—2020 年的生态用地稳定性冷、热点分布格局基本一致, 这既说明了冷热空间格局的稳定性高的事实, 也揭示了我国生态保护与生态建设的长期性。从空间分布来看, 生态用地稳定性冷热点分布在“胡焕庸线”两侧存在显著的空间异质性。近 20 年冷点面积占到全国稳定性生态

用地总面积的 21.2% 左右,主要在“胡焕庸线”东南侧的长三角经济圈、环渤海经济圈(除内蒙古)与川渝交汇处,是稳定性生态用地严重匮乏的地区;热点面积占到近 42.3%,约为冷点面积的 1 倍,分布在“胡焕庸线”西北侧的大兴安岭区域、青海省、四川西北部、青藏高原和新疆的和田地区、伊犁谷地与天山山脉等地,是稳定性生态用地分布最为丰富的地区。总体来看,目前国土空间总体处在生态用地稳定性指数较高的状态下,态势较好,但冷点区域面积占比并不低,且处在我国经济发达且人口集中的区域。因此,人地矛盾与生态问题仍将是未来较长一段时间内国土空间规划与生态建设中棘手的问题。

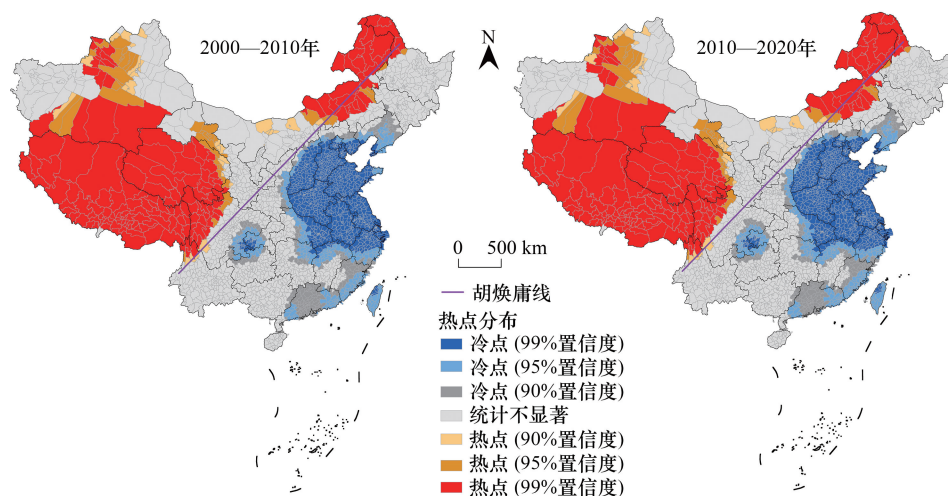


图 4 2000—2020 年中国生态用地稳定性热点分析

Fig.4 The hot spot analysis of ecological land stability in China in 2000—2020

2.2.2 生态用地稳定性指数的分级变化

为保证全国生态用地稳定性指数的连续性,本文以 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 渔网为单元(主要是在此标准下 100 km^2 的生态用地斑块个数仅占到斑块总个数的 0.37%,斑块保存完整性较好),利用稳定性生态用地占比,采用自然断点法得到稳定性生态用地分级评价结果(图 5)。2000—2020 年中国不同等级的稳定性生态用地变化甚小,以高稳定性等级为主,占到全国稳定性生态用地总面积的 53% 左右;低、中稳定性等级相差不大,占比分别为 23% 与 24%。高稳定性等级的生态用地面积是低、中稳定性等级的 1 倍多,侧面反映出生态用地

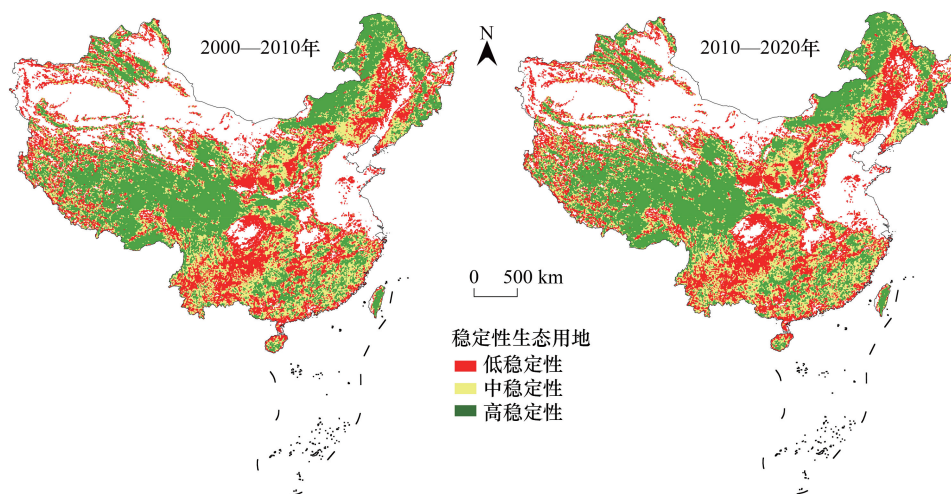


图 5 2000—2020 年中国稳定性生态用地分级分布

Fig.5 The distribution of stable ecological land classification in China from 2000 to 2020

的稳定性较高,但受外界影响的变化波动仍较大,值得警惕。2000—2010 年与 2010—2020 年两个时段的稳定性生态用地分布格局基本一致,差异甚小。不同等级的稳定性生态用地镶嵌分布,但还是可以看出,高稳定分级区域分布广泛,主要分布在西藏与青海的大部分地区,新疆西北部绿洲地区、内蒙古的东北部、四川的北部以及中国东南部的部分地区,地处我国生态脆弱区^[30],是我国生态保护与修复的重点区域,与我国重点生态功能区与国家生态保护相关工程实施关联密切^[42-44];同时,大部分高稳定生态用地多在经济相对欠发达且人口稀疏的西部地区,外部不合理、不合法的行为干扰相对较少。中稳定分级区在四川中部与中国东南地区分布较为明显,低稳定分级区在云贵两省以及中国中部地区分布较为明显。

2.3 生态用地稳定性的影响因素分析

基于探测结果,结合因子探测 q 值及显著性检验能够对无效因子与主导因子进行有效识别^[26](表 3)。结果可知:11 个探测因子的 q 值大小不一,且均通过 0.05 的显著性检验,表明众多因子均对生态用地稳定性变化具有不同程度的影响。其中, X_5 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 这 6 个驱动因子的 q 值均小于 0.1,说明这些因子对生态用地变化的解释力度较弱;剩余因子按 q 值大小排序为 X_2 (年降水量) $>X_3$ (年日照时数) $>X_4$ (海拔) $>X_6$ (地形起伏度) $>X_1$ (年均气温),其中 X_2 、 X_3 的 q 值明显高于其他因子,由此得知,年降水量与年日照时数是引起生态用地稳定性变化的重要驱动力,依据生态用地分布范围,降水量以及日照时数对森林、草地等的生长发育尤为重要;而 X_4 与 X_6 的 q 值也较高,表明全国复杂多样的地势地貌相对于其他因素对影响生态用地稳定性分布的解释力度更大,更为明显。此外结合指标层面与探测结果,表明影响全国生态用地稳定性变化的主要影响因素是自然因素,未来需加大保护自然环境的力度,以期实现生态用地的良好发展。

表 3 生态用地稳定性变化的因子探测结果

Table 3 The factor detection results of ecological land stability change

探测因子 Detecting factors	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
q	0.1085	0.6730	0.5847	0.2406	0.0278	0.1972	0.0115	0.0278	0.0086	0.0410	0.0048
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0454

交互作用探测结果表明(表 4), $X_{11} \cap$ 除 X_1 外的其他影响因子, $X_9 \cap X_3$ 、 X_4 、 X_6 , $X_5 \cap X_2$ 、 X_3 、 X_4 、 X_6 , $X_3 \cap X_6$ 存在非线性增强(不加 * 号),其他均呈双因子增强(加 * 号)。各因子两两交互作用后,双线性或非线性均加强了对生态用地稳定性的解释力度,说明稳定性生态用地演变与社会经济、与自然因子相互作用后关联性更强。但从交互产生的作用大小来看,可明显看出 X_2 年降水量和 X_3 年日照时数与其他影响因子交互后变化尤为显著,其解释力均接近或大于 0.6,如 $X_2 \cap X_3$ (0.856), $X_3 \cap X_6$ (0.836), $X_3 \cap X_4$ (0.825)…… $X_3 \cap X_{10}$ (0.597), $X_3 \cap X_7$ (0.588)。整个交互探测结果中, $X_7 \cap X_9$ 的交互作用最低(0.012)。研究区其他因子与年降水量、年日照时数的交互作用明显,可以得知气象要素决定着生态用地类型的生长与最初分布,在某种程度上会通过影响区域内生态群落的生长,从而对生态用地变化有着不容小觑的作用。社会经济因子对生态用地稳定性起到次要作用,其原因是经济快速发展、人口密度增加造成耕地及建设用地不断侵占生态用地,迫使生态用地的时空分布发生明显变化,使两因子间交互作用也较为显著。

3 讨论

3.1 生态用地与耕地、建设用地等其他地类间的相互转换是生态用地空间格局不稳定性根源

根据中国 2000—2020 年的生态用地与非生态用地间的转换情况(表 5),有 $18.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $2.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的生态用地分别流向耕地与建设用地,同时又存在 $14.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的耕地、 $0.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的建设用地分别转向生态用地,可看出生态用地与耕地间转换频繁,为死守耕地红线与提高耕地生产力而无序侵占质量较高的生态用地;同样,建设用地与生态用地间的矛盾也不容忽视。尤其是近年来城市的不断发展,对生态用地的侵占不断增强,生态用地的退化不利于当地生态系统的稳定结构和自我调节功能的维持,这与退耕还林还草等生态保

护政策相悖。此外,也可看出生态用地面积净变化是呈负增长的,由此表明外部环境变化对生态用地分布不稳定性的影响极为突出。因此,从长远看,如何正确处理人-地关系与生产-生态-生活关系,切实保护人类赖以生存的生态环境与巩固生态空间格局的稳定性,是人类迫切需要解决的问题^[21]。在科学构建国土空间规划与保障生态用地红线的新形势下,必须正确处理三生空间内部关系,协调好发展与保护的关系,严格管控生态用地面积与质量,以实现生态用地功能最大化发挥。

表 4 生态用地稳定性变化的交互探测结果

Table 4 The interaction detection results of ecological land stability change

双因子交互作用力 Interaction forces	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
X1	0.108 *										
X2	0.726 *	0.673									
X3	0.604 *	0.856 *	0.585								
X4	0.262 *	0.783 *	0.825 *	0.240							
X5	0.128 *	0.756	0.667	0.530	0.028						
X6	0.224 *	0.725 *	0.836	0.257 *	0.502	0.197					
X7	0.111 *	0.677 *	0.588 *	0.242 *	0.034 *	0.199 *	0.011				
X8	0.122 *	0.725	0.598 *	0.241 *	0.044 *	0.200 *	0.040 *	0.028			
X9	0.113 *	0.676 *	0.600	0.289	0.032 *	0.224	0.012 *	0.034 *	0.009		
X10	0.125 *	0.698 *	0.597 *	0.244 *	0.053 *	0.201 *	0.043 *	0.051 *	0.042 *	0.041	
X11	0.114 *	0.681	0.670	0.294	0.047	0.234	0.020	0.034	0.019	0.047	0.005

无 * 符号表示呈非线性增强,有 * 符号呈双因子增强

表 5 2000—2020 年生态用地与非生态用地间的转换面积/km²

Table 5 The conversion area between ecological land and non-ecological land from 2000 to 2020

土地利用类型 Land types	生态用地 Ecological land				非生态用地 Non-ecological land		
	森林	草地	灌木地	湿地	耕地	人造地表	水体
生态用地 Ecological lands	森林				76816.0	9662.7	7070.0
	草地				99974.2	16591.3	13790.6
	灌木地				3666.0	411.9	1211.3
	湿地				4516.3	621.3	7377.4
非生态用地 Non-ecological lands	耕地	73659.6	62742.1	2179.2	2889.8		
	人造地表	1113.3	1903.7	63.4	86.7		
	水体	2637.5	5352.2	283.2	3722.3		

3.2 生态用地稳定性保护是未来国土空间科学规划的重要参考因素

当前,中国生态环境保护已进入注重国土空间格局“源头”管控的新阶段,其中构建生态空间格局是管控的重要内容^[45]。近 20 年整个生态功能区划内稳定性生态用地面积占到生态功能区总面积的 46.4%。由于地形地貌、水热组合等的差异性,不同生态功能区划的稳定性生态用地分布差距较大,生态大区占比大小排序依次为:青藏高寒生态大区(62.2%)>东部季风生态大区(46.5%)>西北干旱生态大区(28.8%);50 个生态区的稳定性占比差异大,高达 90%,低至 6%(图 6)。就国家重点生态功能区而言,其稳定性生态用地总面积达 206.7×10⁴ km²,占到重点生态功能区总面积的 55.6%,反映出国家对整体生态用地的管控有力。同时,受不同功能区总面积、所处区位、用地结构等多种因素影响,不同区域稳定性生态用地面积占比也存在显著差异,高达 80%,低至 16%(图 6)。

生态功能区划与重点生态功能区中存在的稳定性占比低的区域,以及不同稳定性等级的生态用地存在显著空间异质性与地类质量差异(图 5),这都表明全国生态用地数量与质量的提高仍有待加强。基于此,须同时考虑从国家与省级尺度自上而下,与区县尺度自下而上视角来优化国土空间规划,稳定生态空间中的刚性

约束区域并适度扩大弹性区域,以保证生态空间数量与质量的稳定,形成保障国家与区域的生态安全和社会经济协调发展的空间格局^[46—47]。

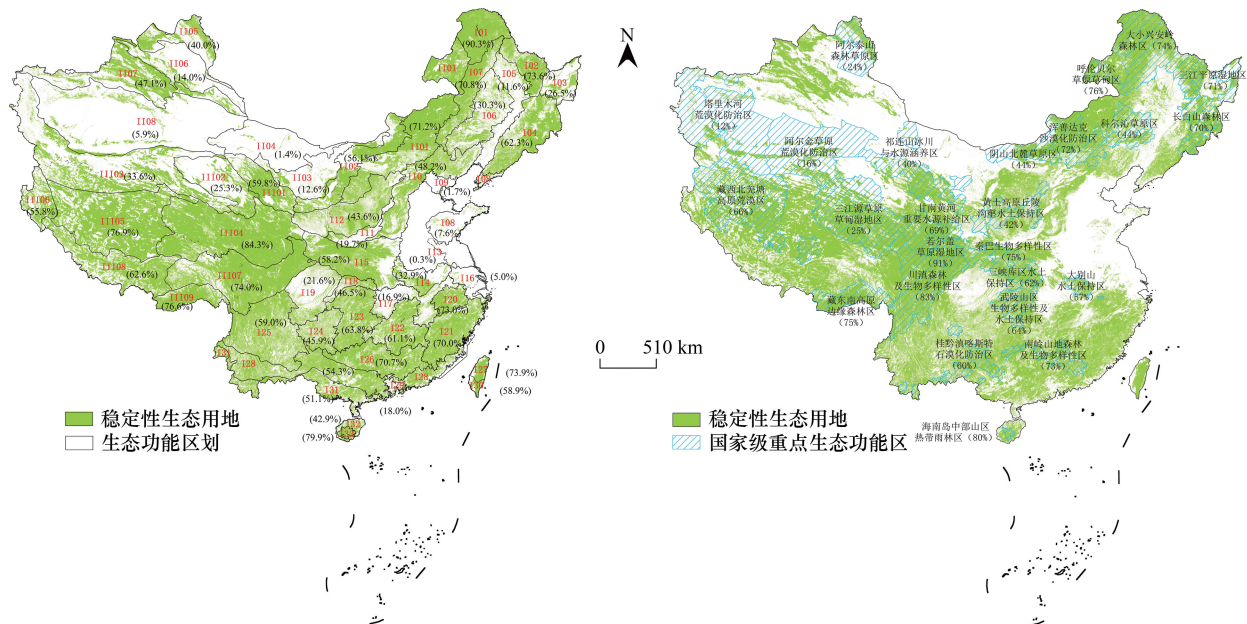


图6 中国2000—2020年生态功能区划与重点生态功能区内稳定性生态用地空间分布

Fig.6 The space distribution of stable ecological land in ecological function zoning and the key ecological functions in China from 2000 to 2020

3.3 新的国内、国际形势下,生态用地生态功能发挥之 路道长且艰

在近五十年来全球人口增长了1倍多,与社会经济增长了近5倍的大环境下(数据来源于世界银行开放数据库, <https://data.worldbank.org>),人类正在加速改变自然系统状态,从而导致生态系统服务的退化^[48]。受全球气候变暖的影响,“胡焕庸线”西北侧近几十年出现暖湿现象,但仍难以改变其“温凉干旱”的气候形态^[49—52];同时,这一区域属于后开发地区,也是我国矿产资源的集中分布区域。该区生态用地稳定性既受全球变化的深刻影响,又受资源开发破坏的巨大压力。因此,应大力建立并完善自然保护区、水源保护地、绿洲保护区等来保护生态环境,完善生态补偿、资源有偿使用、生态修复相关制度来预防因资源开采而加剧生态退化。“胡焕庸线”东南侧的生态空间、生产空间、生活空间结构性矛盾突出,如三大城市群,在5.1%面积的土地上养活了全国25.5%人口并贡献了全国39%的国内生产总值,重大国家战略发展区域——长江经济带,在21.5%的面积土地养活了全国42.9%人口并贡献了全国46.5%的国内生产总值(数据来源于国家统计局, <http://www.stats.gov.cn/>),同时我国重要的粮食产区——东北平原、长江中下游平原区,因建设用地与耕地侵占导致生态

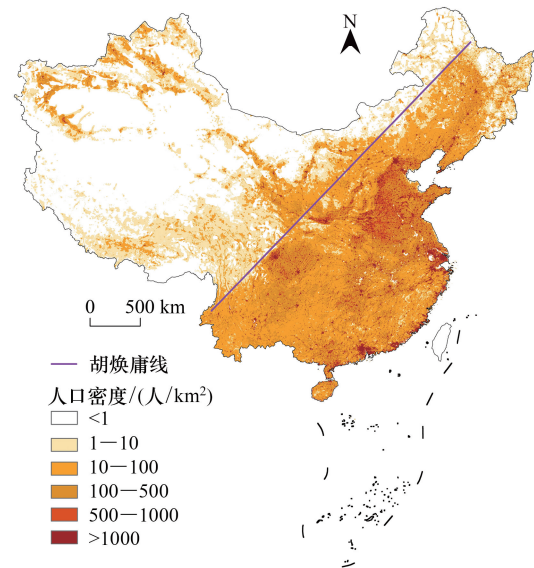


图7 2020年中国人口密度分布*

Fig.7 The population density distribution in China in 2020

尚缺中国台湾统计数据

用地空间结构破碎化严重。该区域主要面临着生态建设与经济发展和人民群众巨大生态需求的压力。为此,政府部门、相关法律条例等应依法管控建设用地与耕地无序占用生态用地的情况,严守生态保护红线;通过垂直绿化、屋顶绿化等技术提升,作为城市开发的生态功能补偿机制和手段,缓解人民的生态需求压力。

3.4 生态用地功能稳定性评价研究应是今后生态用地研究的重心所在

本文仅从数量方面对生态用地稳定性的时空演化格局进行了初步探索,从有无的视角初步解决了空间稳定性的问题,而对于稳定空间地块由于内在植被结构组成与演化所引起的功能稳定性差异还没有触及,而这应该成为今后生态用地稳定性研究的重心所在。传统的结构-功能研究难以揭示功能稳定性的宏观空间分布状况,但随着遥感手段从光学遥感到激光雷达,从大数据分析 with 人工智能技术的发展,这都为我们直接从空-天-地一体化视角开展生态用地功能稳定性研究提供了新的机遇。

4 结论

选取 2000、2010、2020 年三期 GlobeLand30 数据,基于 GIS 空间分析方法,借助生态用地稳定性指数,分析中国生产用地变化的总体特征与稳定性生态用地的时空格局;同时利用地理探测器识别影响生态用地稳定性变化的主导因子,主要结论如下:

(1) 2000—2020 年中国生态用地面积呈现小幅度缩减,其中草地面积减少最为明显;生态用地数量变化与耕地、建设用地间转换频繁密切相关。

(2) 稳定性生态用地面积变化不大,其中以草地减少幅度最明显,热点区域主要集中在“胡焕庸线”西北侧;近 20 年以高稳定性等级的生态用地为主,主要分布在中国生态脆弱的西部地区。

(3) 基于地理探测器的因子探测结果可以发现,主导因子是年降水量,贡献率最高;其次是年日照时数与海拔,这表明自然因素对生态用地变化的解释作用最强。在交互作用探测中,自然因素与社会经济因素的交互作用均呈现出非线性增强或双因子增强。

参考文献 (References):

- [1] 王静,王雯,祁元,何挺,吴瑞娟,陈媛媛. 中国生态用地分类体系及其 1996—2012 年时空分布. 地理研究, 2017, 36(3): 453-470.
- [2] 管青春,郝晋琛,石雪洁,高阳,王宏亮,李牧. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. 自然资源学报, 2018, 33(2): 195-207.
- [3] 璩路路,刘彦随,周扬,李裕瑞. 罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应——以井冈山为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3468-3481.
- [4] 李颖,冯玉,彭飞,陈树登. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变. 经济地理, 2017, 37(12): 180-189.
- [5] Song W, Deng X Z, Yuan Y W, Wang Z, Li Z H. Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain. Ecological Modelling, 2015, 318: 245-253.
- [6] 孙东琪,张京祥,朱传耿,胡毅,周亮. 中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析. 地理学报, 2012, 67(12): 1599-1610.
- [7] 龙花楼,刘永强,李婷婷,万军. 生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究. 经济地理, 2014, 34(5): 1-8.
- [8] 董雅文,周雯,周岚,周慧. 城市化地区生态防护研究——以江苏省、南京市为例. 城市研究, 1999(2): 6-8, 10.
- [9] 岳健,张雪梅. 关于我国土地利用分类问题的讨论. 干旱区地理, 2003, 26(1): 78-88.
- [10] 邓红兵,陈春娣,刘昕,吴钢. 区域生态用地的概念及分类. 生态学报, 2009, 29(3): 1519-1524.
- [11] 曾碧柯,刘友兆,周文丹. 基于 CLUE-S 和 Markov 模型的生态用地模拟研究. 农业科学研究, 2018, 39(4): 52-57, 63.
- [12] 吕立刚,周生路,周兵兵,戴靓,昌亭,鲍桂叶,周华,李志. 区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究——以江苏省为例. 地理科学, 2013, 33(12): 1442-1449.
- [13] 戴云哲,李江凤. 洞庭湖区生态用地生态服务价值时空演化的地形梯度效应. 水土保持研究, 2018, 25(3): 197-204.
- [14] 赵娜倩,师学义,璩路路. 晋城市“三生用地”效益动态评价. 水土保持研究, 2018, 25(5): 257-261.
- [15] 谢花林. 基于 Logistic 回归模型的区域生态用地演变影响因素分析——以京津冀地区为例. 资源科学, 2011, 33(11): 2063-2070.
- [16] 刘彦文,刘成武,何宗宜,周霞,韩冰华,郝汉舟. 基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素. 应用生态学报, 2020, 31(3): 987-998.
- [17] 杨清可,段学军,王磊,金志丰. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例. 地理科学, 2018, 38(1): 97-106.
- [18] 陈万旭,李江凤,曾杰,冉端,杨斌. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187.
- [19] 张秋梦,杨方社,李飞. 改革开放以来中国粮食生产空间重构. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1426-1438.

- [20] 高建,李彤,贾宝全,张秋梦,刘文瑞.生态用地空间稳定性及其格局分析——以咸阳市为例.生态学报,2022(23):1-14[2022-09-23].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220726.1544.077.html>.
- [21] 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分析.生态学报,2022(24):1-18[2022-09-23].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220728.1207.018.html>.
- [22] Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W W, Tong X H, Mills J. Global land cover mapping at 30 m resolution: a POK-based operational approach. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 103: 7-27.
- [23] 喻锋,李晓波,张丽君,徐卫华,符蓉,王宏.中国生态用地研究:内涵、分类与时空格局.生态学报,2015,35(14):4931-4943.
- [24] 张月朋,常青,郭旭东.面向实践的生态用地内涵、多维度分类体系.生态学报,2016,36(12):3655-3665.
- [25] 周朕,蒙古军,齐杨,彭福利.中国生态用地重要性及其格局优化研究进展.生态学杂志,2016,35(1):218-225.
- [26] 耿甜伟,陈海,张行,史琴琴,刘迪.基于GWR的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析.自然资源学报,2020,35(7):1714-1727.
- [27] Liu C, Xu Y Q, Lu X H, Han J. Trade-offs and driving forces of land use functions in ecologically fragile areas of northern Hebei Province: Spatiotemporal analysis. Land Use Policy, 2021, 104: 105387.
- [28] Sands P. Australia's Antarctic policy options. edited by Stuart Harris. Canberra: centre for resource and environmental studies, Australian national university, 1984. xxi+412 pp. British Yearbook of International Law, 1986, 56: 291.
- [29] Shortridge A, Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(6): 1576-1587.
- [30] 刘军会,邹长新,高吉喜,马苏,王文杰,吴坤,刘洋.中国生态环境脆弱区范围界定.生物多样性,2015,23(6):725-732.
- [31] Bell E J. Markov analysis of land use change—an application of stochastic processes to remotely sensed data. Socio-Economic Planning Sciences, 1974, 8(6): 311-316.
- [32] Shi G, Ye P, Ding L, Quinones A, Li Y, Jiang N. Spatio-temporal patterns of land use and cover change from 1990 to 2010: a case study of Jiangsu Province, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(6): 907.
- [33] 傅伯杰,陈利顶,马克明.景观生态学原理及应用.2版.北京:科学出版社,2011.
- [34] 彭保发,陈端吕,李文军,王亚力.土地利用景观格局的稳定性研究——以常德市为例.地理科学,2013,33(12):1484-1488.
- [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] 贾宝全,仇宽彪,马杰,李晓婷,刘秀萍,宋宜昊.北京城市森林结构特征及林木树冠覆盖动态变化研究.北京:中国环境出版集团,2019: 57-58.
- [37] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis, 2010, 24(3): 189-206.
- [38] 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.
- [39] 李杨,刘艳,张璞,尹育红.古尔班通古特沙漠NDVI时空变化特征.干旱区研究,2009,26(5):686-693.
- [40] 杨维康,刘伟,黄怡,乔洪海,徐文轩,夏参军,林杰,徐峰,David B. 古尔班通古特沙漠南缘大沙鼠的食性.干旱区地理,2011,34(6):912-918.
- [41] 王新军,赵成义,杨瑞红,李君.古尔班通古特沙漠南缘荒漠化过程演变的景观格局特征分析.干旱区地理,2015,38(6):1213-1225.
- [42] 高吉喜,刘晓曼,王超,王勇,付卓,侯鹏,吕娜.中国重要生态空间生态用地变化与保护成效评估.地理学报,2021,76(7):1708-1721.
- [43] 陈瑜琦,张智杰,郭旭东,吕春艳,汪晓帆.中国重点生态功能区生态用地时空格局变化研究.中国土地科学,2018,32(2):19-26.
- [44] Li G D, Fang C L, Wang S J. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China. Science of the Total Environment, 2016, 545/546: 609-620.
- [45] 高吉喜,徐德琳,乔青,邹长新,王燕,田美荣,王玥.自然生态空间格局构建与规划理论研究.生态学报,2020,40(3):749-755.
- [46] 张雪飞,王传胜,李萌.国土空间规划中生态空间和生态保护红线的划定.地理研究,2019,38(10):2430-2446.
- [47] 蒋大林,曹晓峰,匡鸿海,蔡满堂,黄艺,尹春燕.生态保护红线及其划定关键问题浅析.资源科学,2015,37(9):1755-1764.
- [48] 尹彩春,赵文武.应对气候和生态环境危机 促进全球可持续发展——UNEP与自然和谐共处报告简述.生态学报,2021,41(23):9536-9542.
- [49] 苏京志,温敏,丁一汇,郜永祺,宋亚芳.全球变暖趋缓研究进展.大气科学,2016,40(6):1143-1153.
- [50] 黄小燕,李耀辉,冯建英,王劲松,王芝兰,王圣杰,张宇.中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征.生态学报,2015,35(5):1359-1370.
- [51] 李栋梁,魏丽,蔡英,张存杰,冯建英,杨青,袁玉江,董安祥.中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望.冰川冻土,2003,25(2):135-142.
- [52] 张强,张存杰,白虎志,李林,孙兰东,刘德祥,王劲松,赵红岩.西北地区气候变化新常态及对干旱环境的影响——总体暖干化,局部出现暖湿迹象.干旱气象,2010,28(1):1-7.