中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

中国西部地区生态用地稳定性及空间格局分析

邓诗语，刘少坤，黄李澄，陆汝成，卢盛权，邓　源

Ecological land stability and spatial pattern in western China

DENG Shiyu, LIU Shaokun, HUANG Licheng, LU Rucheng, LU Shengquan, and DENG Yuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20230397

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生态空间与生态用地国内研究进展

Research progress of ecological space and ecological land in China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1626–1636

多尺度下的南方山地丘陵区耕地质量空间自相关分析——以江西省黎川县为例

Multi-scale spatial autocorrelation analysis of cultivated land quality in China's southern hillside areas: A case study of Lichuan County, Jiangxi Province

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 263–273

基于土地生态要素分区的坝上生态用地生态服务价值分析

Analysis of ecological service value of ecological land of Bashang area based on ecological factor division

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(6): 903–915

基于SD的耕地与生态用地联合调配策略仿真与优选——以天津市为例

Development of strategies for joint allocation of cultivated land and ecological land in Tianjin based on system dynamics

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(3): 391–404

基于空间自相关的1975—2015年玛纳斯河流域耕地时空特征变化分析

Spatial distribution pattern and change characteristics analysis of cultivated land in the Manas River Basin from 1975 to 2015

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 887–899

减氮对华南地区甜玉米大豆间作系统产量稳定性的影响

Effect of nitrogen reduction on yield stability of sweet maize//soybean intercropping system in South China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1332–1343

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2025 年 1 月 第 33 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2025, 33(1): 127−142

DOI: 10.12357/cjea.20230397

CSTR: 32371.14.cjea.20230397

邓诗语, 刘少坤, 黄李澄, 陆汝成, 卢盛权, 邓源. 中国西部地区生态用地稳定性及空间格局分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(1): 127−142

DENG S Y, LIU S K, HUANG L C, LU R C, LU S Q, DENG Y. Ecological land stability and spatial pattern in western China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(1): 127−142

中国西部地区生态用地稳定性及空间格局分析*

邓诗语[1], 刘少坤[1**], 黄李澄[2], 陆汝成[1,3], 卢盛权[1], 邓 源[1]

(1. 南宁师范大学自然资源与测绘学院 南宁 530001; 2. 江西财经大学财税与公共管理学院 南昌 330013; 3. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室 南宁 530001)

摘 要: 中国西部地区是维护全国生态安全的重要屏障, 西部大开发战略实施 20 多年以来, 一系列重大生态建设工程使西部地区的生态状况和生态服务发生了重要变化, 西部地区生态稳定性格局的探索对宏观生态用地管理具有重要意义。本文基于西部地区土地利用/土地覆盖遥感监测数据对 2000—2020 年西部地区生态用地稳定性指数的时空动态变化进行分析。结果表明: 1) 2000—2020 年西部地区生态用地总量呈先下降后增加的趋势, 在 2000—2010 年生态用地面积减少 2 232.71 万 hm^2, 2010—2020 年面积增加 102.56 万 hm^2。两个时段的稳定性生态用地空间分布变化不大, 稳定性生态用地以草地与森林为主。2) 2000—2010 年和 2010—2020 年西部地区整体生态用地稳定性指数分别为 48.46% 和 53.68%。2000—2020 年生态稳定性指数存在显著聚集, 生态用地稳定性格局以高-高聚集区和低-低聚集区为主, 两种类型生态稳定性空间前后期分别占总面积的 48.17% 和 46.70%; 高-高聚集区、高-低异常值区面积呈增加趋势, 低-低聚集区、低-高异常值区呈下降的趋势。3) 冷点区域总面积减少 1 026 万 hm^2, 热点区域总面积增加 206 万 hm^2, 表明西部地区生态稳定性指数在缓慢提升的同时, 稳定性生态用地的集聚效应也有所提高。

关键词: 生态用地; 生态用地稳定性指数; 空间自相关; 冷/热点分析; 西部地区

中图分类号: X826

Ecological land stability and spatial pattern in western China*

DENG Shiyu[1], LIU Shaokun[1**], HUANG Licheng[2], LU Rucheng[1,3], LU Shengquan[1], DENG Yuan[1]

(1. School of Natural Resources and Surveying, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. School of Public Finance and Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China; 3. Key Laboratory of Environmental Evolution and Resource Utilization in the Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning 530001, China)

Abstract: Western China presents an important barrier to maintaining national ecological security. Since the Western Development Strategy was implemented over 20 years ago, major ecological construction projects have led to significant changes in the ecological conditions and services in the western region. Exploring the ecological stability patterns in the western region is important for macroecological land management. This study analyzed the spatiotemporal dynamic changes in the ecological land stability index in the western region from 2000 to 2020 based on remote sensing monitoring data of land use/land cover. The results showed the following: 1) From 2000 to 2020, the total amount of ecological land in the western region decreased and then increased. From 2000 to 2010, the

* 国家自然科学基金项目 (42061043) 和广西研究生教育创新计划项目 (YCSW2022407) 资助

** 通信作者: 刘少坤, 主要研究方向为土地资源可持续利用。E-mail: kunshow@163.com
邓诗语, 主要研究方向为土地经济与土地资源评价。E-mail: dengsy226@163.com

收稿日期: 2023-07-15 接受日期: 2023-11-14

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (42061043) and Guangxi Graduate Education Innovation Program Funding Project (YCSW2022407).

** Corresponding author, E-mail: kunshow@163.com

Received Jul. 15, 2023; accepted Nov. 14, 2023

ecological land area decreased by 2 232.71 ×10^4 hm^2; from 2010 to 2020, the area increased by 102.56×10^4 hm^2. The spatial distribution of stable ecological land did not change significantly during the two periods, with stable ecological land consisting mainly of grasslands and forests. 2) The overall ecological land stability indexes in the western region from 2000 to 2010 and 2010 to 2020 were 48.46% and 53.68%, respectively. There was a significant clustering of ecological stability indexes from 2000 to 2020. The ecological land stability pattern mainly comprised high-high and low-low clustering areas, accounting for 48.17% and 46.70%, respectively. Areas of high-high clustering and high-low outliers showed an upward trend, while low-low clustering and low-high outlier areas showed a downward trend. 3) The total cold spot area decreased by 1 026×10^4 hm^2, and the total hot spot area increased by 206×10^4 hm^2, indicating that, while the ecological stability index in the western region was slowly improving, the agglomeration effect of stable ecological land has also improved.

Keywords: ecological land; ecological land stability index; spatial autocorrelation; cold/hot spot analysis; western region

西部大开发战略是党领导人民推动东西部地区协调发展和最终实现共同富裕的重大举措, 自 2000 年 12 月由中共十五届五中全会通过《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十个五年计划的建议》以来, 西部地区经济获得了长足发展, 但随着西部大开发战略的推进, 西部地区的国土空间结构、生态用地布局的剧烈变化引致生态敏感性、脆弱性问题不断凸显, 西部地区作为中国“两屏三带”生态安全战略格局的重要组成部分, 是维护全国生态安全的重要屏障, 与国家生态安全问题紧密联系, 直至今日西部地区仍是我国发展、投入的重点, 对西部地区的生态稳定性进行合理测定对区域构建良好生态景观、维持生态系统稳定、保障国土空间安全具有重要意义。

生态用地的概念虽提出较晚, 但在内涵外延、分类体系、效益以及保护利用规划等方面具有较多的研究[1-2], 较多学者从生态用地的功能与利用特点出发, 探讨生态用地的定义与分类[3-4], Bailey[5] 将生态用地定义为复合生态系统中能够反映土地空间关系的地理单元, 董雅文等[6] 通过生态要素的空间定位与土地形态界定生态用地。

生态稳定性是生态系统存在和发展的前提, 也是组成生态系统的重要特征[7], 作为生态学重要的研究课题, 生态稳定性的概念较难量化, 但生态系统稳定性的测度成为了国内外学者较为关注的研究方向。从研究内容上看, 大多集中在生态系统稳定性识别与评价[8-10]、生态系统稳定性[11]、生态功能动态变化[12]、生态系统稳定性空间特征[13-15]、生态稳定性影响机制研究[16-18] 方面; 从研究方法来看, 一些学者基于数学方法对生态系统动态变化开展了研究[19-20], 也有学者引入热力学稳定性理论, 探索在复杂环境下生态稳定性的测度方法[21-22]; 有学者则将系统动力学方法应用于生态稳定性的评价中[23-24]。但由于生态系统自身结构、功能以及动态变化的复杂性与多样性, 至今还没有一个统一的标准来表达生态稳定性[25]。从研究尺度来看, 生态稳定性研究大多集中在中微观尺度, 总的来说, 基于生态学原理从生态系统本身展开的综合评价, 围绕抵抗力、恢复力、时间稳定性的三维系统进行时空特征分析以及驱动机制的相关工作。生态用地稳定性以生态用地为基础, 通过地类动态变化以及更强的空间解释性, 揭示生态空间稳定性格局与稳定性结构。

生态建设和环境保护在未来仍是西部大开发的重要任务和切入点, 目前关于西部地区生态用地稳定性研究较少, 为合理测定西部地区在大开发战略初至 2020 年的生态质量稳定性水平, 以西部地区 12 个省份七大生态服务功能分区生态空间为核心, 基于 3 期土地利用数据探索 2000—2010 年和 2010—2020 年两个时期西部地区生态用地稳定性指数的时空变化, 探索生态用地的变化趋势以及生态服务功能分区的生态建设的发展特点, 为进一步开展地区生态用地的微观保护提供较为明确的导向与科学支撑, 为推进西部地区生态文明建设, 促进土地合理利用提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文根据国务院西部开发办《关于西部大开发若干政策措施的实施意见》的划分标准将西部大开发战略所包含 12 省界定为中国西部地区 (图 1), 中国西部地区位于亚洲大陆中部, 地处印度洋板块与亚欧板块交合带, 行政区域包括重庆、四川、贵州、云南、西藏自治区、陕西、甘肃、青海、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、广西壮族自治区等 12 个省 (直辖市、自治区), 共 143 个地级单位 (下简称西部地区), 总面积 687.27 万 km^2, 占全国总面积的 71.4%, 具有地广人稀、地势落差巨大的特点。

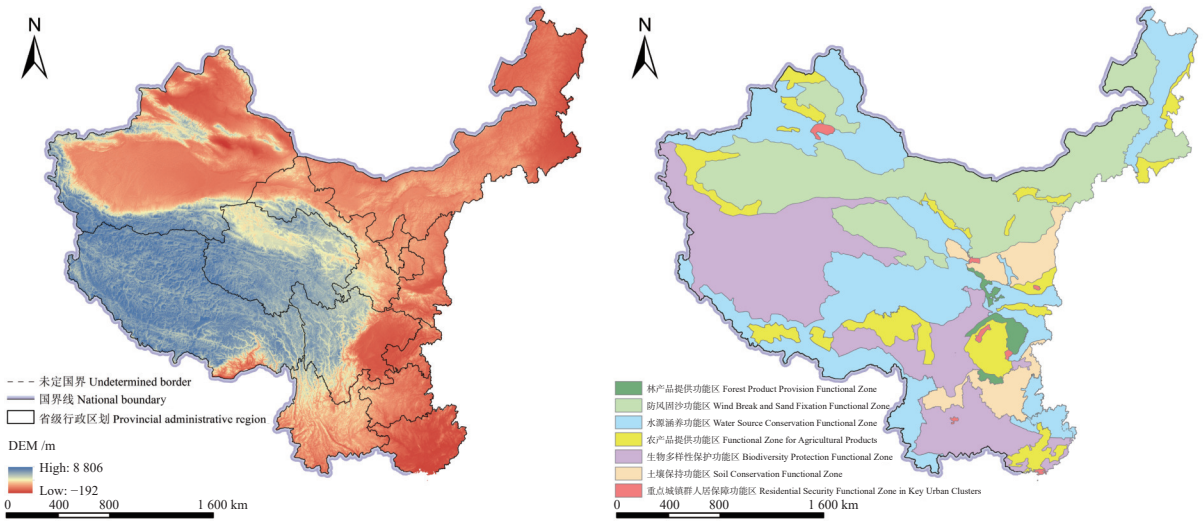

图 1　研究区及生态服务功能分区 [审图号为 GS(2025)0064 号]

Fig. 1　Administrative division and ecological protection function division [Censor code: GS(2025)0064]

西部地区包含国家生态环境部与中国科学院修编的《全国生态功能区划》中的九大功能区的七大区, 分别为水源涵养功能区、生物多样性保护生态功能区、土壤保持生态功能区、防风固沙生态功能区、农产品提供功能区、林产品提供功能区、重点城镇群人居保障功能区, 同时, 西部地区具有生态系统脆弱的特点, 随着城市化与工业化的发展, 尤其是西部大开发战略的进程中不合理的土地利用行为, 导致了生态环境退化、生态系统不稳定以及生态保护与经济发展难以协调等突出问题。

1.2　数据来源

研究所用土地利用数据为中国科学院地理科学与资源研究所基于覆盖全国的 Landsat-MSS、Landsat-TM/ETM、Landsat8遥感影像数据解译的全国 30 m 分辨率土地利用/土地覆被数据产品, 此数据采用土地利用/土地覆盖遥感监测数据, 选取 2000 年、2010 年、2020 年 3 期的土地利用数据, 主要土地利用类型分别为耕地、林地、草地、水域、城乡、工矿、居民用地、未利用地、海洋。本文根据研究区空间尺度, 将空间自相关所使用的基础矢量数据尺度选为 10 000 m×10 000 m 的矩形像元矢量, 此数据通过地理信息系统 ArcGIS 创建渔网工具制作生成。

1.3　生态用地界定、划分与数据处理

土地具有多功能性, 从功能来看土地从利用方式上可分为“三生空间”, 即生产用地、生活用地、生态用地 3 类, 在此之下的生态用地也具有多功能性, 主要的生态用地功能分别为水源涵养、土壤保持、防风固沙、洪水调蓄、河岸防护、生物多样性保护等, 生态用地的生态功能、生态系统的稳定性对国家经济和社会发展有着至关重要的意义。本文从生态用地功能角度出发, 将生态用地定义为: 以水源涵养、防风固沙、生物多样性保持等特定生态服务功能为主, 对维持的区域生态平衡与可持续发展起至关重要作用的地理空间类型。

目前学界对于生态用地的划分并不统一, 其分类标准也有较多讨论[26-28]。龙花楼等[3]将生态用地功能差异与人类活动-生态用地的影响反馈机制结合, 对生态用地分类体系作出了划分。张红旗等[29]将生态用地分为重点调节生态用地、一般调节生态用地和生态容纳用地等 3 大类, 重点调节生态用地以及一般调节生态用地为人类利用或可利用的生态用地, 具有重要的生态价值, 一般可被分为林地、草地、湿地和冰川 4 大类; 根据《湿地公约》对于湿地的定义, 以及才大伟等[30]对湿地分类标准的对比研究, 将湿地定义为天然或人工、长久或暂时性的水域。

中国科学院地理科学与资源研究所 30 m 分辨率土地利用/土地覆被数据的分类结果, 参照“人类活动-生态用地”影响反馈机理与生态功能差异的生态用地分类体系[3], 对生态用地进行分类, 分类结果如表 1 所示。对土地利用覆被数据掩膜提取西部地区研究区后进行重分类, 最终将 7 个一级类、26 个二级类土地信息分类为林地、草地、灌木林、湿地。

2　研究方法

2.1　生态用地稳定性指数

目前国内对于生态系统稳定性的研究较为全面系统, 基于斑块动态范式理论发展的景观稳定性是

表 1 中国西部地区生态用地稳定性及空间格局分析生态用地分类

Table 1 Ecological land classification for analysis of ecological land stability and spatial pattern in Western China

生态用地 Ecological land		非生态用地 Non-ecological land	
一级地类 First level land type	二级地类 Second level land category	一级地类 First level land type	二级地类 Second level land category
林地 Forest	有林地 Forest land	耕地 Cultivated land	水田 Paddy field
	疏林地 Sparse woodland		旱地 Dry land
	其他林地 Other woodland	城乡、工矿、居民用地 Urban and rural land, industrial and mining land, residential land	城镇用地 Urban land
草地 Grassland	高覆盖度草地 High coverage grassland		农村居民点 Rural residential area
	中覆盖度草地 Medium coverage grassland		其他建设用地 Other construction land
	低覆盖度草地 Low coverage grassland	未利用地 Unused land	沙地 Sand
湿地 Wetland	河渠 River		戈壁 Gobi
	湖泊 Lake		盐碱地 Saline-alkali land
	水库坑塘 Reservoir and pit		裸土地 Bare land
	永久性冰川雪地 Permanent glacier snow		裸岩石质地 Bare rocky gravel
	滩涂 Mudflat		其他(高寒荒漠、苔原等) Others (alpine desert, tundra, etc.)
	滩地 Beach	海洋 Sea	海洋 Sea
	沼泽地 Marshland		
灌木地 Shrubland	灌木 Shrubland		

生态景观保持结构与功能的能力, 作为生态系统研究的重要课题, 景观稳定性在学界仍缺乏统一且普遍认可的具体概念、研究与表征方式, 其研究大多基于生态系统的理论而开展[31]。景观稳定性指数是时间尺度上景观稳定性变化的指标, 生态用地稳定性指数国内已有学者开展相关研究[32-33], 是基于土地覆盖/土地利用的视角以特定区域一定时段的生态用地的面积变化在固定空间单元上的面积占比测算, 可衡量区域内生态用地稳定性情况, 其计算公式为:

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

式中: PSI 为生态用地稳定性指数; A_i 表示在特定时段固定空间单元中保持土地用地性质不变的生态用地面积; A 为研究区土地覆盖总面积; i 表示森林、草地、灌木林、湿地等地类; n 为土地利用覆盖类型总数。研究区的空间单元可以在确保空间分析样本充足的情况下选择不同级别的行政区域或地理单元, 此研究为 10 000 m×10 000 m 的矩形像元矢量。

2.2 空间自相关分析

2.2.1 全局空间自相关分析

空间自相关分析 (spatial autocorrelation analysis) 是理论地理学的基本方法之一, 空间自相关分析通常以 Anselin 提出的 Moran's I 指数和 Getis 系数作为基本测度, 能反映特定属性值在空间上存在的统计相关性, 可以揭示地理空间的某些图式和规律[34]。通常来说空间距离越近相关性越大, 空间自相关分为全局自相关与局部自相关。

全局空间自相关 (global indicators spatial autocorrelation) 是对属性值在整个区域的空间特征的描述, 而 Global Moran's I 指数用于反映空间邻接或空间邻近的区域单元观测值整体的相关性和差异程度, 一般用以研究地理要素的空间分布格局以及背后成因[35]。Moran's I 指数在−1~1 之间, 当 I>0 时, 表示空间要素呈正相关, 即生态用地稳定性指数较高的区域在地域空间上显著聚集; 当 I<0 时, 表示空间要素呈负相关, 即该地域空间生态用地稳定性指数在临近空间具有空间差异; 当 I=0 时, 表示空间不相关, 即各区域生态稳定性指数在空间上呈随机分布。Moran's I 指数通常将其解释为一个相关系数, 计算结果使用 z 值检验。计算公式如下:

$$I=\frac{n}{S_0}\times\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{2}$$

式中: I 为 Global Moran's I 指数; n 为空间要素总个数, 即 10 000 m×10 000 m 的矩形像元矢量数量; $(x_i-\bar{x})$ 和 $(x_j-\bar{x})$ 分别为第 i、第 j 个地理空间单元上特定属性值的观测值与平均值的误差量, x_i 为观测值即每个

地理空间单元的生态用地稳定性指数, $\bar{x}$为 x_i 的平均值; w_{ij} 为通过空间邻接和空间距离来确定的要素 i 和要素 j 空间权重矩阵, 本文采用反距离法进行空间自相关处理, 若某区域中 i 与 j 属于邻接关系, 则该值等于 1, 反之, 等于 0; S_0 为所有空间权重 (w_{ij}) 的和。

2.2.2　局部空间自相关分析

局部自相关 (local indicators spatial autocorrelation) 使用 Local Moran's I_i 指数衡量不同地区空间相关性, 是一种基于距离权重矩阵的局部空间自相关指标, 属于 Global Moran's I 指数的分解式, 能探测高值聚集和低值聚集[36]。当 I_i>0, 表明空间单元周围存在高-高或低-低的空间集聚区域; 当 I_i<0 时, 表明空间单元周围存在高-低或低-高的空间集聚区域。计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{m_0} \sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x}) \tag{3}$$

$$m_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n} \tag{4}$$

2.2.3　冷点/热点分析

冷点/热点分析 (cold/hot spot analysis) 通常采用 Getis 和 Ord 最早提出的G_i^*系数, 作为衡量特定属性值分布聚集度高或者低在空间上发生聚类的位置, 可以有效表征生态用地稳定性空间上的关联特征[37]。本文基于 ArcGIS 空间分析模块的热点分析工具 Getis-Ord G_i^*统计量对西部地区生态稳定性指数的空间格局冷热点进行识别。其计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_j^n w_{ij} x_j}{\sum_j^n x_j} \tag{5}$$

式中: n 为空间单元总数; w_{ij} 为通过空间邻接和空间距离来确定的要素 i 和要素 j 空间权重矩阵; x_j 为空间单元的特定属性值, 即每个空间单元的生态稳定性指数。

3　结果与分析

3.1　生态用地变化特征与分析

3.1.1　生态用地总量变化

从表 2 可以看出, 西部地区生态用地总量在 2000—2010 年减少 2 232.71×10^4 hm^2, 2010—2020 年面积增加 102.56×10^4 hm^2, 2000—2020 年间生态用地面积呈先下降后增长的趋势。非生态用地扩张, 从 2000 年的面积占比 38.83% 增长到 2020 年的 42.01%, 变动较大, 侧面反映了生态环境退化以及建设用地不断扩张的趋势。

由表 3 可知, 2000—2020 年各类型生态用地的面积变动较小, 林地除林产品提供功能区、重点城镇群人居保障功能区外面积均为先增后减; 各区的草地面积变化有较明显的地域特点, 林产品提供功能区、重点城镇群人居保障功能区草地先增后减, 防风固沙功能区、水源涵养功能区、生物多样性保护功能区草地先减后增, 农产品提供功能区、土壤保持功能区草地持续减少; 灌木林地在所有分区均为持续减少以及先增后减; 湿地在重点城镇群人居保障功能区持续减少, 林产品提供功能区、生物多样性保护功能区、土壤保持功能区持续增加, 防风固沙功能区、水源涵养功能区、农产品提供功能区先增后减。各生态服务功能区中生物多样性保护功能区生态用地减少面积最大, 为 14.29%, 减少面积 1 818.91×10^4 hm^2, 是生态用地变动的集中区域; 其次为防风固沙功能区, 减少 4.24%, 减少面积 313.64×10^4 hm^2; 重点城镇群人居保障功能区, 减少 1.90%, 减少面积 2.87×10^4 hm^2; 农产品提供功能区减少 1.18%, 减少面积 39.29×10^4 hm^2; 水源涵养功能区生态用地面积变化最小, 减少 0.01%; 林产品提供功能区和土壤保持功能区均为生态用地面积增加区域, 增幅分别为 1.83% 和 1.63%。2000—2020 年, 除生物多样性保护功能区、防风固沙功能区外其余分区生态用地面积变化较为稳定, 变化幅度保持在 2% 以下。

3.1.2　稳定性生态用地的时空变化

从图 2 可以看出, 两个时段的稳定性生态用地空间分布整体变化不大, 各生态服务功能区中均有分布。稳定性生态用地主要集中在研究区中部、南部与东北部, 西南部的水源涵养功能区、生物多样性保护功能区后期出现稳定性林地增加, 南部生物多样性保护功能区后期出现部分稳定性林地减少的情况, 北部及西北部的水源涵养功能区、防风固沙功能区在两个时段均有大面积的生态非稳定性用地, 东南部土壤保持功能区则出现后期稳定性灌木林减少的情况。

由表 4 可知, 2000—2020 年间, 稳定性生态用地总面积有较大增长。2010—2020 稳定性生态用地面积增长 3 505.91×10^4 hm^2, 稳定性生态用地以草地与森林为主, 2000—2010 年和 2010—2020 年分别占研究区总面积的 86.27% 与 85.20%, 是绝对的优势区; 灌木地与湿地面积小, 后期面积占研究区总面积的比例从 13.73% 升至 14.80%; 研究区总面积占比增长最大为湿地 (1.33%); 面积总量增长最多为草地 (2 118.36×10^4 hm^2), 其次为湿地 (642.48×10^4 hm^2)。表明西部地区

表 2 2000—2020 年各生态服务功能分区中生态用地与非生态用地面积变化

Table 2 Areas changes of ecological and non-ecological land in each ecological service function zone from 2000 to 2020

年限 Year	生态服务功能区 Ecological service function zone	生态用地 Ecological land		非生态用地 Non-ecological land	
		面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%
2000	林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	364.16	49.50	371.46	50.50
	防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	7 398.36	39.73	11 222.84	60.27
	水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	14 717.28	72.99	5 445.25	27.01
	农产品提供功能区 Functional Zone for Agricultural Products	3 321.78	50.83	3 213.41	49.17
	生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	12 726.22	74.29	4 404.56	25.71
	土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	2 391.11	65.59	1 254.37	34.41
	重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	151.30	49.21	156.17	50.79
	小计 Total	41 070.22	61.17	26 068.07	38.83
2010	林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	370.34	50.34	365.29	49.66
	防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	6 913.31	37.13	11 707.95	62.87
	水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	14 720.99	72.96	5 456.97	27.04
	农产品提供功能区 Functional Zone for Agricultural Products	3 311.58	50.67	3 223.87	49.33
	生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	10 936.72	63.84	6 195.45	36.16
	土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	2 432.63	66.73	1 213.04	33.27
	重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	151.95	49.42	155.53	50.58
	小计 Total	38 837.51	57.83	28 318.10	42.17
2020	林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	370.83	50.41	364.74	49.59
	防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	7 084.72	38.05	11 536.41	61.95
	水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	14 716.17	72.94	5 460.60	27.06
	农产品提供功能区 Functional Zone for Agricultural Products	3 282.49	50.23	3 252.62	49.77
	生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	10 907.31	63.67	6 224.33	36.33
	土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	2 430.12	66.67	1 215.11	33.33
	重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	148.43	48.31	158.83	51.69
	小计 Total	38 940.07	57.99	28 212.64	42.01

的生态文明建设取得一定成效, 生态稳定性空间增加。

从功能分区空间分异来看 (表 4), 水源涵养功能区在两个时期稳定性生态用地面积最大, 2000—2010 年和 2010—2020 年面积分别占总研究区的 37.27% 和 38.17%; 其次为生物多样性保护功能区, 两期分别占总研究区的 27.32% 和 29.11%。从各区内用地构成看, 林产品提供功能区的优势稳定性生态用地为林地, 其余 6 区的优势区均为草地; 稳定性草地面积在所有分区中区内占比最高的是防风固沙功能区, 两期占比分别为 88.58% 和 89.49%, 这与其功能区大部分地处内蒙古草原有关; 稳定性灌木林在所有分区中, 区内占比最高为林产品提供功能区, 两期占比分别为 25.87% 和 24.76%; 稳定性湿地在除防风固沙功能区以外的分区均为面积占比最低的地类, 稳定性湿地区内面积占比最低是土壤保持功能区, 最高为生物多样性保护功能区。林产品提供功能区主要以木材产出为主要生态功能, 林地为主要用地类型; 防风固沙功能区因其主要的生态服务功

表 3　2000—2020 年各生态服务功能分区生态用地分布

Table 3　Distribution of ecological lands in each ecological service function zone from 2000 to 2020

生态服务功能分区 Ecological service function region	用地类型 Land type	2000		2010		2020		20年间变化 Change past 20 years	
		面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%
林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	林地 Forest	138.29	37.98	143.66	38.79	151.31	40.80	13.02	9.42
	草地 Grassland	122.29	33.58	123.32	33.30	122.05	32.91	−0.25	−0.20
	灌木林地 Shrubland	97.26	26.71	95.99	25.92	89.90	24.24	−7.36	−7.56
	湿地 Wetland	6.32	1.73	7.36	1.99	7.57	2.04	1.25	19.83
	小计 Total	364.16	100.00	370.34	100.00	370.83	100.00	6.67	1.83
防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	林地 Forest	293.97	3.97	345.47	5.00	305.71	4.32	11.74	3.99
	草地 Grassland	6 511.85	88.02	5 949.32	86.06	6 192.10	87.40	−319.75	−4.91
	灌木林地 Shrubland	160.26	2.17	153.71	2.22	151.55	2.14	−8.71	−5.44
	湿地 Wetland	432.28	5.84	464.82	6.72	435.36	6.15	3.08	0.71
	小计 Total	7 398.36	100.00	6 913.31	100.00	7 084.72	100.00	−313.64	−4.24
水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	林地 Forest	3 607.13	24.51	3 692.23	25.08	3 673.71	24.96	66.58	1.85
	草地 Grassland	9 255.20	62.89	8 939.80	60.73	9 191.95	62.46	−63.25	−0.68
	灌木林地 Shrubland	1 094.82	7.44	1 153.12	7.83	1 086.45	7.38	−8.37	−0.76
	湿地 Wetland	760.13	5.16	935.83	6.36	764.06	5.19	3.92	0.52
	小计 Total	14 717.28	100.00	14 720.99	100.00	14 716.17	100.00	−1.11	−0.01
农产品提供功能区 Functional Zone for Agricultural Products	林地 Forest	682.71	20.55	846.46	25.56	837.14	25.50	154.42	22.62
	草地 Grassland	2 204.27	66.36	1 987.03	60.00	1 979.32	60.30	−224.95	−10.21
	灌木林地 Shrubland	275.81	8.30	312.92	9.45	307.17	9.36	31.35	11.37
	湿地 Wetland	158.99	4.79	165.17	4.99	158.86	4.84	−0.12	−0.08
	小计 Total	3 321.78	100.00	3 311.58	100.00	3 282.49	100.00	−39.29	−1.18
生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	林地 Forest	2 235.79	17.57	2 327.39	21.28	2 261.56	20.73	25.77	1.15
	草地 Grassland	8 448.70	66.39	6 294.91	57.56	6 306.28	57.82	−2 142.42	−25.36
	灌木林地 Shrubland	1 293.92	10.17	1 338.19	12.24	1 322.19	12.12	28.27	2.18
	湿地 Wetland	747.81	5.88	976.23	8.93	1 017.27	9.33	269.46	36.03
	小计 Total	12 726.22	100.00	10 936.72	100.00	10 907.31	100.00	−1 818.91	−14.29
土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	林地 Forest	539.35	22.56	568.67	23.38	568.20	23.38	28.85	5.35
	草地 Grassland	1 254.69	52.47	1 243.29	51.11	1 240.98	51.07	−13.71	−1.09
	灌木林地 Shrubland	574.93	24.04	597.69	24.57	597.18	24.57	22.25	3.87
	湿地 Wetland	22.14	0.93	22.98	0.94	23.77	0.98	1.63	7.34
	小计 Total	2 391.11	100.00	2 432.63	100.00	2 430.12	100.00	39.01	1.63
重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	林地 Forest	32.17	21.26	29.42	19.36	28.83	19.43	−3.34	−10.38
	草地 Grassland	103.74	68.56	108.39	71.33	105.90	71.34	2.16	2.08
	灌木林地 Shrubland	6.45	4.27	6.18	4.07	5.76	3.88	−0.69	−10.72
	湿地 Wetland	8.94	5.91	7.96	5.24	7.94	5.35	−1.00	−11.18
	小计 Total	151.30	100.00	151.95	100.00	148.43	100.00	−2.87	−1.90

能与气候条件, 以草地为主要地类; 湿地保护较为严格, 缺少适合乔木、灌木生长的气候条件, 因此, 除林产品提供功能区、防风固沙功能区外的其余 5 区, 稳定性生态用地面积占比基本为草地>林地>灌木林>湿地。

3.2　生态用地稳定性指数及其动态特征

从表 5 可以看出, 2000—2010 年和 2010—2020 年西部地区生态用地整体稳定性指数分别为 48.46% 和 53.68%。2000—2010 年间, 土壤保持功能区生态稳定性指数最高, 为 62.80%; 水源涵养功能区以 60.13% 次之; 最低为防风固沙功能区, 为 34.10%。2010—2020 年间, 生态稳定性指数最高的区域转为水源涵养功能区, 为 68.22%; 土壤保持功能区次之, 为 61.67%; 最低为防风固沙功能区。2000—2020 年, 水源涵养功能区、农产品提供功能区、生物多样性保护功能区和重点城镇群人居保障功能区的生态用地稳定性指数均呈上升趋势, 最高为农产品提供功能区, 涨幅 9.64%; 林产品提供功能区、防风固沙功

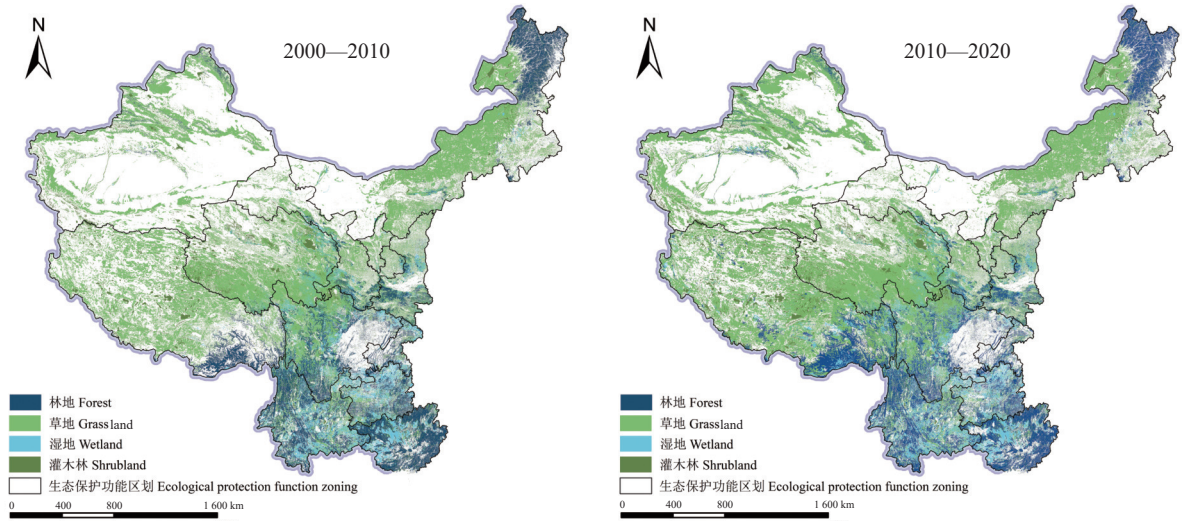

图 2 2000—2010 年和 2010—2020 年稳定性生态用地空间分布 [审图号为 GS(2025)0064 号]

Fig. 2 Spatial distribution of stable ecological land from 2000 to 2010 and from 2010 to 2020 [Censor code: GS(2025)0064]

能区和土壤保持功能区均有小幅下降, 分别减少 2.68%、1.66% 和 1.12%。2000—2020 年整体生态用地稳定性指数上升 5.22%, 但仍未超过 55%, 表明“十二五”以来生态文明基础仍然薄弱, 但西部整体生态文明发展态势良好, 整体生态稳定性指数有所提高。

水源涵养功能区、生物多样性保护功能区、土壤保持功能区 3 个生态保育类的功能分区的生态用地稳定性指数在两个时期均保持较高水平, 均在 50% 以上, 土地利用管理方式大多以保持现状、巩固其功能为原则对生态稳定性指数的维持产生了直接影响; 林产品提供功能区与重点城镇群人居保障功能区指数均为 40%~50%, 属于中等水平, 变化幅度小, 这可能由森林生态系统稳定协调性较高以及城市空间严格的土地用途管制导致; 2000—2010 年防风固沙功能区与农产品提供功能区两者相较于其他分区生态基础较为脆弱, 生态用地稳定性指数属于较低水平, 均处于 40% 以下。2010—2020 年期间, 两区呈现不同的趋势, 防风固沙功能区稳定性指数下降 1.66%, 农产品提供功能区的指数变化则出现了最大增幅 9.64%, 后者指数动态变化符合我国 2000—2010 年粗放式发展, 建设用地迅速扩张, 城市边界不断向外侵蚀耕地等其他地类的特点, 2010—2020 年稳定性上升迅速, 除生态保护的加强外, 城市经济发展对地类转型的影响也是主要原因, 经济建设不再以简单提高建设用地总量的模式而转为提高土地集约利用程度。

根据空间分析样本需求量以及操作可行性, 在 7 个生态服务功能区的基础上构建 10 000 m×10 000 m 的网格空间单元, 使用 ArcGIS 空间制表进行生态用地稳定性指数核算, 将核算结果以自然断点法分为 5 个等级, 其结果可见图 3 与表 6。由图 3 可知, 两个时段不同稳定性等级生态用地的空间格局大致相同, 极低稳定性用地集中在西北部与东部, 极高稳定性集中在中部、东南部与东北部; 低稳定性用地大多分布在西部与东北部, 东南部也有零星分布; 高稳定地区主要集中在整个南部, 东北部、西部均有零散分布; 而中稳定性用地则是在各个等级的用地类型间零散分布, 属于高稳定性生态用地与低稳定性生态用地的过渡区域。

根据表 6 可知, 2000—2010 年、2010—2020 年西部地区均以极低稳定性生态用地为主, 分别占比 37.03%、32.15%; 其次为极高稳定性用地, 占比分别为 18.29%、24.51%; 低稳定性占比分别为 16.83%、15.04%。中稳定性用地与高稳定性用地占比相近, 两个时段没有明显变化, 均为 13%~15%; 极高稳定性用地与高稳定性用地均有不同程度的增加; 极低稳定性、低稳定性、中稳定性则均有面积减少的情况。表明西部地区的生态建设有效提高生态用地空间稳定性, 稳定性生态用地结构也不断优化。

从各区的稳定性空间结构看, 各区的优势区与劣势区均有特点。2000—2010 年间, 极低稳定性用地在林产品提供功能区、防风固沙功能区、农产品提供功能区、生物多样性保护功能区、重点城镇群人居保障功能区均属于优势区。2010—2020 年间, 极低稳定性用地优势区发生了部分变化, 生物多样性保护功能区由极低稳定性用地的优势区转为极高稳定性用地的优势区, 极高稳定性用地在 2000—2010 年仅有水源涵养功能区属于优势区 (占比

表 4　2000—2020 年各生态服务功能分区中稳定性生态用地组成

Table 4　Composition of stable ecological land in each ecological service function zone from 2000 to 2020

时期 Period	生态服务功能分区 Ecological service function zone	森林 Forest		草地 Grassland		灌木地 Shrubland		湿地 Wetland		合计 Total /($\times10^4$ hm^2)	分区总占比 Proportion of each partition /%
		面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	本区内占比 Proportion in the region /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	本区内占比 Proportion in the region /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	本区内占比 Proportion in the region /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	本区内占比 Proportion in the region /%		
2000—2010	林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	132.31	38.63	115.49	33.72	88.61	25.87	6.10	1.78	342.51	1.05
	防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	251.67	3.96	5 624.36	88.58	116.21	1.83	357.36	5.63	6 349.61	19.51
	水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	3 149.66	25.97	7 620.18	62.83	842.08	6.94	515.63	4.25	12 127.55	37.27
	农产品提供功能区 Functional Zone for Agricultural Products	575.93	23.89	1 559.99	64.72	168.90	7.01	105.55	4.38	2 410.37	7.41
	生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	2 065.52	23.24	5 149.85	57.93	1 159.00	13.04	515.31	5.80	8 889.68	27.32
	土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	529.90	23.15	1 177.95	51.45	560.97	24.50	20.57	0.90	2 289.39	7.04
	重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	26.91	20.64	91.72	70.36	5.64	4.33	6.09	4.67	130.36	0.40
	合计(占比为研究区总占比) Total (proportion is the total proportion of the research area)	6 731.89	20.69	21 339.55	65.58	2 941.42	9.04	1 526.61	4.69	32 539.47	100.00
2010—2020	林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	127.67	39.55	109.75	34.00	79.91	24.76	5.47	1.69	322.79	0.90
	防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	207.36	3.43	5 405.51	89.49	85.34	1.41	342.16	5.66	6 040.36	16.76
	水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	3 426.67	24.90	8 667.13	62.99	958.15	6.96	707.11	5.14	13 759.06	38.17
	农产品提供功能区 Functional Zone for Agricultural Products	774.39	25.47	1 858.66	61.13	273.91	9.01	133.65	4.40	3 040.61	8.44
	生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	2 159.71	20.58	6 139.55	58.51	1 241.69	11.83	952.33	9.08	10 493.28	29.11
	土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	529.54	23.55	1 175.96	52.30	521.56	23.20	21.25	0.95	2 248.32	6.24
	重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	27.06	19.20	101.35	71.91	5.42	3.85	7.12	5.05	140.95	0.39
	合计(占比为研究区总占比) Total (proportion is the total proportion of the research area)	7 252.40	20.12	23 457.91	65.08	3 165.97	8.78	2 169.09	6.02	36 045.38	100.00

表 5　2000—2020 年各生态服务功能分区生态用地稳定性指数

Table 5　Ecological land stability index for different ecological service function zones from 2000 to 2020　　%

生态服务功能分区 Ecological service function zone	2000—2010	2010—2020	变化 Change
林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	46.56	43.88	−2.68
防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	34.10	32.44	−1.66
水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	60.13	68.22	8.09
农产品提供功能区 Functional Zone for Agricultural Products	36.88	46.53	9.64
生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	51.89	61.25	9.36
土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	62.80	61.67	−1.13
重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	42.41	45.85	3.45
整体 Whole	48.46	53.68	5.22

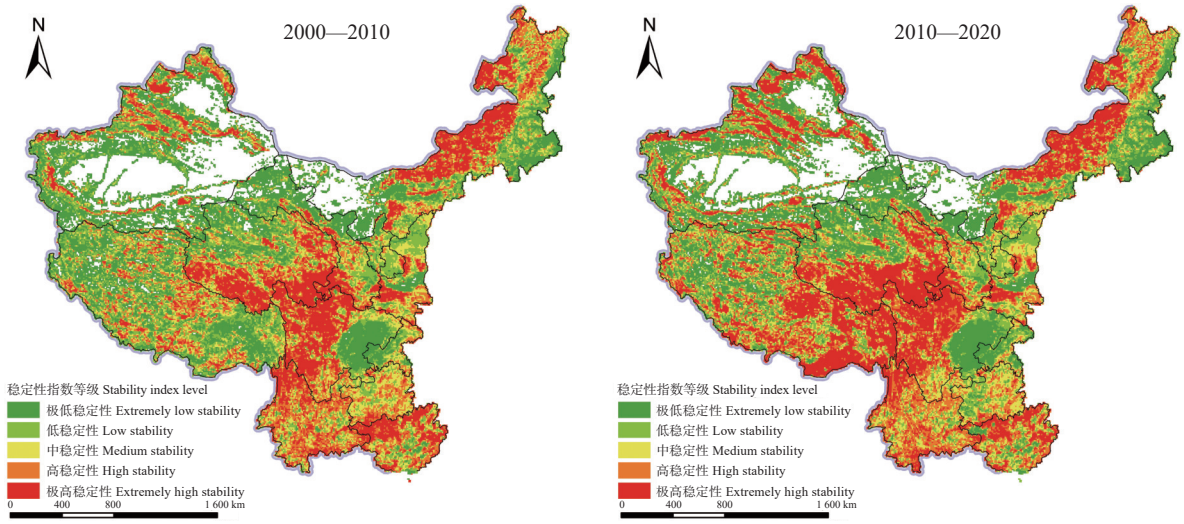

图 3 2000—2020 年生态用地稳定性指数等级分布 (审图号为 GS(2025)0064 号)

Fig. 3 Distribution of ecological land stability index levels from 2000 to 2020 [Censor code: GS(2025)0064]

26.38%), 低稳定性用地与高稳定性用地均无优势区。西部地区生态用地稳定性等级存在较为明显的两极分化, 两个时段中稳定性用地仅土壤保持功能区为优势区, 占比分别为 31.50% 和 34.20%。

3.3 生态用地稳定性空间格局分析

3.3.1 生态用地稳定性指数空间自相关分析

对西部地区进行生态用地稳定性空间格局统计分析, 全局空间自相关结果如表 7 所示, 2000—2010 年和 2010—2020 年 Moran's *I* 分别为 0.849 3 和 0.849 0, 且显著性较高, 表明研究区生态稳定性指数存在着显著聚集。

局部空间自相关分析结果如图 4 可知, 生态稳定性高-高聚类的区域主要集中在中部、东部及南部的水源涵养功能区与生物多样性保护功能区, 以及东北部的防风固沙功能区, 且在西部、西北部的水源涵养区有零星分布; 低-低聚类区主要集中在西北部水源涵养区与农产品提供功能区、北部防风固沙功能区、中部与西部农产品提供功能区以及中部的重点城镇群人居保障功能区; 不显著区域主要分布在西部生物多样性保护区与农产品保护区、东部与南部的土壤保持功能区、东北部水源涵养区, 东南部水源涵养区也有较大的面积占比。由表 8 研究区聚集类型统计结果可知, 高-高值聚集区 2010—2020 年面积增加 225×10^4 hm^2, 同比增长 1.40%; 高-低值异值区也存在相同的面积增长趋势; 低-低值聚集区 2010—2020 年面积减少 $1\ 232\times10^4$ hm^2, 同比减少 7.25%; 低-高值异值区呈面积减少趋势。

3.3.2 生态用地稳定性指数冷/热点分析

在聚类和异常值分析的基础上, 基于 ArcGIS 对西部地区进行热点分析, 探索生态用地稳定性指数在空间上的具体集聚情况, 结果如图 5、表 9 所示, 冷点热点区域分布与局部聚集空间分布相近, 显著性面积减少, 2000—2010 年和 2010—2020 年面积占比分别为 55.22% 和 54.03%; 非显著性面积占比分别为 44.78% 和 45.97%。冷点区域以 99% 置信度区间地区为主, 两个时期在整个研究区的面积占比均在 16% 以上; 热点区域在前期以 99% 的置信度区间地区为主, 面积占比 12.40%, 后期以 95% 的置信度区间地区为主, 面积占比 12.19%。区域面积动态变化方面, 冷点区域总面积减少 $1\ 026\times10^4$ hm^2, 热点区域总面积增加 206×10^4 hm^2, 表明西部地区生态稳定性指数在缓慢提升的同时, 稳定性生态用地的集聚效应也有所提高。

4 讨论

4.1 生态服务功能区类型对稳定性生态空间的分布有着重要的影响

生态服务功能区的划分体现了生态用地管理与规划的宏观方向, 生态稳定性指数的变化是生态用地的保护与建设的直接反映, 为更好地分析各生态服务功能分区生态稳定性指数变化, 对其进行了空间统计, 详见表 10。七大功能区划中, 林产品提供功能区与农产品提供功能区属于土地产品供给类空间, 主要位于川东部与西部、黄土高原中部与西部、桂中南部、西藏中西部、新疆西部与北部、内蒙古等地的粮食与林木主产区, 地形以低海拔平原丘陵及台地为主, 地势较为平坦, 土地产品供给类空间相邻或包含大多数重点城镇群人居保障功能区, 且从实

表 6　2000—2020 年各生态功能服务分区生态用地稳定性指数等级面积表

Table 6　Areas and percents of different ecological land stability levels for each ecological service function zone from 2000 to 2020

时期 Period	生态功能服务分区 Ecological service function zone	极低生态稳定性 Extremely low ecological stability		低生态稳定性 Low ecological stability		中生态稳定性 Medium ecological stability		高生态稳定性 High ecological stability		极高生态稳定性 Extremely high ecological stability		合计 Total /($\times10^4$ hm^2)
		面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	
2000—2010	林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	174.00	34.12	169.00	33.14	118.00	23.14	33.00	6.47	16.00	3.14	510.00
	防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	10 576.00	58.79	2 237.00	12.44	1 356.00	7.54	1 226.00	6.82	2 593.00	14.42	17 988.00
	水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	5 226.00	23.54	3 426.00	15.44	3 574.00	16.10	4 114.00	18.53	5 856.00	26.38	22 196.00
	农产品提供功能区 Functional Zone for Providing Agricultural Products	3 344.00	54.52	1 268.00	20.68	647.00	10.55	460.00	7.50	414.00	6.75	6 133.00
	生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	5 740.00	33.27	3 165.00	18.35	2 462.00	14.27	2 710.00	15.71	3 175.00	18.40	17 252.00
	土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	194.00	4.63	1 224.00	29.19	1 321.00	31.50	978.00	23.32	476.00	11.35	4 193.00
	重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	200.00	43.48	79.00	17.17	77.00	16.74	61.00	13.26	43.00	9.35	460.00
	合计 Total	25 454.00	37.03	11 568.00	16.83	9 555.00	13.90	9 582.00	13.94	12 573.00	18.29	68 732.00
2010—2020	林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	218.00	42.75	172.00	33.73	71.00	13.92	31.00	6.08	18.00	3.53	510.00
	防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	10 431.00	57.99	2 172.00	12.07	1 435.00	7.98	1 348.00	7.49	2 602.00	14.47	17 988.00
	水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	4 046.00	18.23	2 745.00	12.37	2 973.00	13.39	3 825.00	17.23	8 607.00	38.78	22 196.00
	农产品提供功能区 Functional Zone for Providing Agricultural Products	2 957.00	48.21	876.00	14.28	626.00	10.21	610.00	9.95	1 064.00	17.35	6 133.00
	生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	3 922.00	22.73	3 055.00	17.71	2 764.00	16.02	3 349.00	19.41	4 162.00	24.12	17 252.00
	土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	324.00	7.73	1 237.00	29.50	1 434.00	34.20	864.00	20.61	334.00	7.97	4 193.00
	重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	196.00	42.61	81.00	17.61	67.00	14.57	54.00	11.74	62.00	13.48	460.00
	合计 Total	22 094.00	32.15	10 338.00	15.04	9 370.00	13.63	10 081.00	14.67	16 849.00	24.51	68 732.00

表 7　2000—2020 年生态用地稳定性指数的全局空间自相关统计

Table 7　Global spatial autocorrelation statistics of ecological land stability index from 2000 to 2020

时期 Period	Moran's *I*	*Z*	*P*	聚类模式 Clustering pattern
2000—2010	0.849 3	312.665 1	0.000 0	聚集 Cluster
2010—2020	0.849 0	312.712 1	0.000 0	聚集 Cluster

际空间分布来看, 该类分区距人口较为密集的城镇较近, 人类活动对土地产品供给区类空间的影响较大, 尤其是城镇建设用地的不断扩张造成了一定的生态用地被侵蚀。林产品提供功能区稳定性指数下降 2.68%, 由于乱砍滥伐森林或毁林开荒等不合理的土地利用行为, 导致该区是稳定性下降最严重的分区, 出现了较为严重的生态失衡。农产品提供功能区在资源与环境双重压力的背景下, 土地利用开发

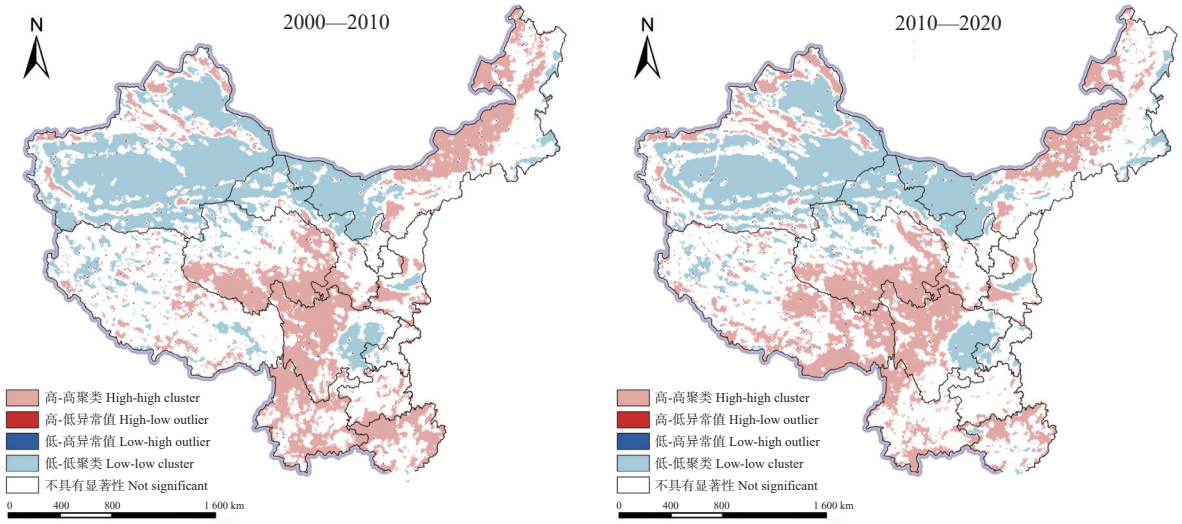

图 4 2000—2020 年生态用地稳定性局部聚集分析图 (审图号为 GS(2025)0064 号)

Fig. 4 Local aggregation of ecological land stability from 2000 to 2020 [Censor code: GS(2025)0064]

表 8 2000—2020 年各时段生态稳定性空间聚集类型统计

Table 8 Statistics of spatial aggregation types of ecological land stability from 2000 to 2020

区域类型 Region type	2000—2010		2010—2020		变化 Change	
	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%
高-高值聚集区 High-high cluster area	16 122	23.46	16 347	23.78	225	1.40
高-低值异值区 High-low outlier area	84	0.12	106	0.15	22	26.19
低-高值异值区 Low-high outlier area	106	0.15	77	0.11	−29	−27.36
低-低值聚集区 Low-low cluster area	16 986	24.71	15 754	22.92	−1 232	−7.25
不显著区 Not significant area	35 434	51.55	36 448	53.03	1 014	2.86

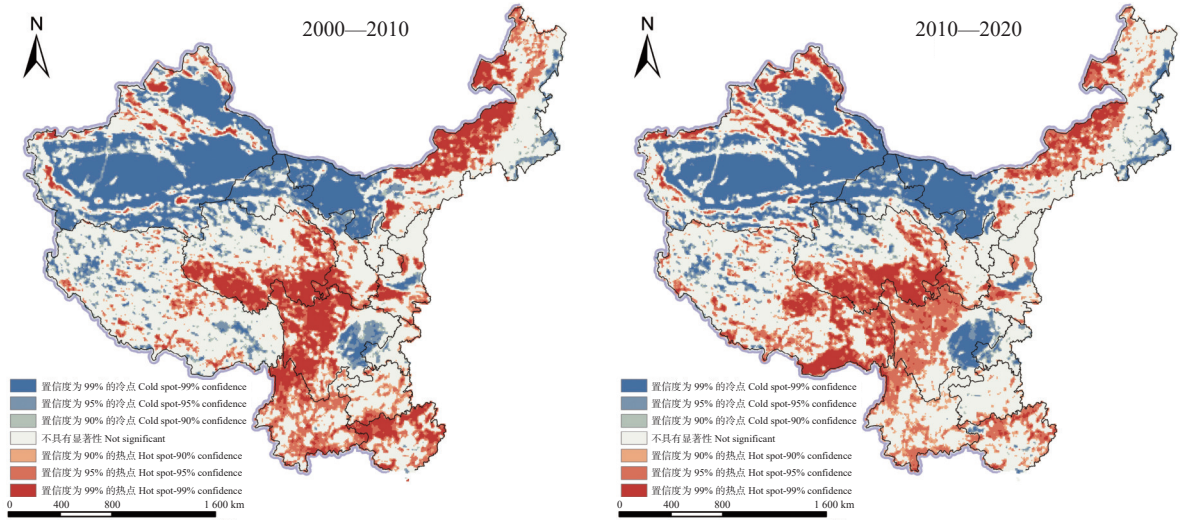

图 5 2000—2020 年生态用地稳定性指数冷点/热点空间分布 (审图号为 GS(2025)0064 号)

Fig. 5 Spatial distribution of cold/hot spots of ecological land stability index from 2000 to 2020 [Censor code: GS(2025)0064]

活动有所放缓, 2010—2020 年稳定性指数提高 9.64%, 但仍低于 50%。相对于东部地区, 西部地区土地产品供给类面积较少, 面积为 7 271.23×10^4 hm^2, 其占西部地区总面积的 10.83%。

土壤保持功能区、生物多样性保护功能区与水源涵养功能区属于生态保育类型空间, 主要位于西部地区中部、南部和西部, 在西部地区的西北与东北部也有零散分布, 是西部地区主要的生态用地分区, 占西部地区的 60.99%。该类分区以“保护”与“复育”为主要利用管理原则, 是西部地区重要的水土保

表 9　2000—2020 年生态用地稳定性指数冷点/热点统计

Table 9　Statistics of cold/hot spots of ecological land stability index from 2000 to 2020

置信类型 Confidence type	2000—2010		2010—2020	
	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	占比 Percent /%
不具有显著性 Not significant	30 776	44.78	31 596	45.97
置信度为99%的冷点 Cold spot-99% confidence	11 093	16.14	11 437	16.64
置信度为95%的冷点 Cold spot-95% confidence	5 530	8.05	4 387	6.38
置信度为90%的冷点 Cold spot-90% confidence	2 439	3.55	2 212	3.22
冷点地区面积合计 Total area of cold spots	19 062	27.73	18 036	26.24
置信度为90%的热点 Hot spot-90% confidence	3 582	5.21	3 998	5.82
置信度为95%的热点 Hot spot-95% confidence	6 792	9.88	8 376	12.19
置信度为99%的热点 Hot spot-99% confidence	8 520	12.40	6 726	9.79
热点地区面积合计 Total area of hot spots	18 894	27.49	19 100	27.79

表 10　2000—2020 年各生态服务功能区稳定性指数及空间统计

Table 10　Stability index and spatial statistics of each ecological service function zone from 2000 to 2020

生态服务功能分区 Ecological service function zone	面积 Area /($\times10^4$ hm^2)	面积占比 Area proportion /%	稳定性面积占比 Stability area proportion /%		稳定性指数 Stability index /%		低稳定性面积占比 Low stability area proportion /%		高稳定性面积占比 High stability area proportion /%	
			2000—2010	2010—2020	2000—2010	2010—2020	2000—2010	2010—2020	2000—2010	2010—2020
林产品提供功能区 Forest Product Provision Functional Zone	735.63	1.10	1.05	0.90	46.56	43.88	46.63	53.02	6.66	6.66
防风固沙功能区 Wind Break and Sand Fixation Functional Zone	18 623.50	27.73	19.51	16.76	34.10	32.44	68.80	67.67	20.51	21.21
水源涵养功能区 Water Source Conservation Functional Zone	20 184.32	30.05	37.27	38.17	60.13	68.22	42.86	33.64	49.39	61.59
农产品提供功能区 Functional Zone for Agricultural Products	6 535.60	9.73	7.41	8.44	36.88	46.53	70.57	58.65	13.37	25.61
生物多样性保护功能区 Biodiversity Protection Functional Zone	17 133.57	25.51	27.32	29.11	51.89	61.25	51.97	40.72	34.35	43.84
土壤保持功能区 Soil Conservation Functional Zone	3 645.59	5.43	7.04	6.24	62.80	61.67	38.90	42.82	39.88	32.86
重点城镇群人居保障功能区 Residential Security Functional Zone in Key Urban Clusters	307.50	0.46	0.40	0.39	42.41	45.85	90.73	90.08	33.82	37.72
总计 Total	67 165.71	100.00	100.00	100.00	48.46	53.68	55.12	48.29	32.99	40.09

持、生物物种与遗传多样性生态屏障。生态保育类型空间稳定性指数较高, 均在 50% 以上。2010 年 7 月中共中央及国务院印发《关于深化实施西部大开发战略的若干意见》, 明确提出 2010 年后西部大开发战略新十年的重点任务是加强生态环境建设, 重点推进生态区综合治理, 积极开展生态文明治理工作。水源涵养功能区和生物多样性保护功能区 2010—2020 年稳定性指数增长明显, 分别为 8.09% 和 9.36% (表 10), 其稳定性结构占比得到优化。主要表现为低稳定性空间减少以及高稳定性空间增加, 水源涵养功能区低稳定性空间减少 9.22%, 高稳定性空间增加 12.2%, 生物多样性保护功能区低稳定性空间减少 11.25%, 高稳定性空间增加 9.49%。土壤保持功能区则出现相反的趋势, 该区域中的黄河中游黄土高原、长江三峡库区等地生态系统脆弱, 存在着严重的水土流失, 而在其治理过程中出现的植被区水承载力超载以及人工治理缓慢等原因对地区生态稳定性指数的维持与提高也产生了一定的影响。

防风固沙功能区以沙漠与草原为主要地貌, 在地理空间上基本覆盖中国八大沙漠地区, 分布于新疆、内蒙古、青海省、宁夏, 占西部地区总面积 18.81%。我国西部地区的荒漠化较为严重, 从研究结果来看, 该区域的生态用地稳定性空间减少 309.25×10^4 hm^2, 减少面积占西部地区总面积的 2.75%。

该区两时期稳定性指数为所有分区中最低, 分别为 34.10% 和 32.44%, 均处于 40% 以下, 对西部地区整体生态稳定性提高有重要影响。2010 年后生态问题尤其是沙漠化荒漠化问题被高度重视, 虽然目前西部地区已逐渐形成网格治理、草甸灌木乔木搭配的防沙治沙模式, 但仍存在稳定性级别两极分化的现象, 应继续加强该区生态系统稳定性的维持与生态建设投入。

生态稳定性是生态系统中最为复杂的问题之一, 不同的生态功能分区所形成的生态稳定性格局是生态建设的基本导向。基于土地覆盖/覆被变化, 对各生态服务功能分区测算生态稳定性, 揭示了生态用地宏观规划对生态稳定性的影响机理, 较为客观地反映了西部地区生态用地稳定性的动态变化与各生态功能分区的生态建设特点, 可在一定程度上对科学制定宏观生态用地管制与规划等问题做出解释。值得注意的是, 目前生态系统多样性的理论研究还有待深入, 生态稳定性研究大多为单一视角下的工作, 而资源管控的日益加强以及生态保护建设需求的不断提高对生态用地稳定性评价提出了更高的需求, 为避免局部地区间生态稳定性失调, 注重地区生态稳定性动态变化与单一生态用地转移的作用机制, 明确地类流转对于宏观生态用地稳定性指数的作用机理, 是充分发挥生态服务功能区主体功能、促进地区生态保护的有效途径。

4.2 未来西部地区生态建设应重点围绕冷点区域开展

西部地区生态稳定性指数冷点区域 2000—2010 年和 2010—2020年占西部总面积的 27.73% 和 26.24%, 这表明西部地区有较多的空间仍处于低生态稳定性。在西部生态环境问题较为突出的地区, 形成了较为明显的生态稳定性指数低值聚类的情况, 这些地区生态治理难度大, 生态环境脆弱, 且仍有不断恶化与向外辐射的趋势。生态系统稳定性及生态服务功能的发挥与显现很大程度上取决于系统所处空间的稳定程度, 西部地区的经济发展与生态建设密不可分[38], 冷点区域应是未来西部地区生态环境建设的重点区域, 是提高生态稳定性的主要投入方向。西部生态稳定性冷点区域的生态建设对于提高地区生态稳定、提高环境质量与促进区域协调发展具有至关重要的意义。

从空间分布看, 冷点区域主要分布在研究区西北部农产品提供功能区、林产品提供功能区以及北部防风固沙功能区, 在西部生物多样性功能区零散分布, 在东北部和中部农产品提供功能区也有一定数量的面积分布。农产品提供功能区应因地制宜地采取农林结合、保护优先的管理原则, 摒弃能耗高、高污染的农业发展模式, 地方应积极引导农民降低有害化肥与农药的使用, 同时充分发挥主体生态服务功能, 保证农产品的有效供给。林产品提供功能区, 在符合国土空间规划多元体系管控要求的基础上, 深入挖掘林地潜力, 以保护生态环境为前提合理开发林地资源, 加强林草部门管理工作的衔接以及与其他生态服务功能区的统筹管理。防风固沙功能区, 根据居民点、耕地、草地等分布零散的特点调整农业结构, 干旱地区建立以绿洲为核心的绿洲边缘乔灌结合的防沙林带、外围沙丘固定等措施, 制定合理的畜牧承载量标准, 加强对轮牧等防治草地退化措施的监管, 加强对人工草地及饲料基地的投入建设, 从整体形成较为完善的治理体系从而达到提高区域生态稳定性的目的。目前我国生物多样性相关法律体系虽已初步建立, 但仍须进一步完善, 应在强调生物多样性生态价值的前提下, 统筹我国生物多样性保护法律体系, 制定相关的保护法律法规, 注重经济建设对生物多样性的不利影响, 促进生物多样性资源的合理开发, 建立以传统生物种类为中心与以生态系统为核心相结合的综合保护措施, 整改或停止危害生物多样性的开发建设项目。

5 结论

本文在对 2000—2020 年西部地区生态用地稳定性指数进行评估的基础上, 探究西部地区生态用地稳定性动态特征以及生态稳定性指数的空间分布特征。主要结论如下:

1) 2000—2020 年中国西部地区生态用地面积呈先减后增的趋势, 2000—2010 年间生态用地面积减少 2 232.71×10^4 hm^2, 2010—2020 年面积增加 102.56×10^4 hm^2。2000—2020 年两个时段的稳定性生态用地空间分布变化不大; 稳定性生态用地总量方面, 2010—2020 年面积增加 3 505.91×10^4 hm^2, 稳定性生态用地以草地与森林为主, 两个时段占研究区总面积超过 85%。从各区空间分异来看, 2000—2020 年间水源涵养功能区在稳定性生态用地面积最大, 其次为生物多样性保护功能区。

2) 2000—2010 年和 2010—2020 年西部地区整体生态用地稳定性指数分别为 48.46% 和 53.68%。生态稳定性指数的空间自相关分析显示, 2000—2020 年生态稳定性指数存在着显著聚集; 局部空间自相

关分析结果表明, 生态用地稳定性格局以高-高聚集区和低-低聚集区为主, 2000—2010 年占研究区总面积的 48.17%, 2010—2020 年面积占比 46.70%, 高-高聚集区、高-低异常值区面积呈增加趋势, 低-低聚集区、低-高异常值区呈下降的趋势。

3) 生态稳定性冷点区域总面积减少 $1\,026\times10^4$ hm^2, 热点区域总面积增加 206×10^4 hm^2。冷点区域主要分布在西北部农产品提供功能区、林产品提供功能区以及北部防风固沙功能区, 在西部生物多样性功能区零散分布, 在东北部和中部农产品提供功能区也有一定数量的面积分布, 热点区域则主要集中在中部林产品提供功能区与生物多样性保护功能区、南部生物多样性保护功能区和东北部防风固沙功能区, 同时在西部的生物多样性功能区也有零散分布。

参考文献　References

[1] 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[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3655−3665
ZHANG Y P, CHANG Q, GUO X D. Management-oriented ecological land's conception and multi-dimensional classification system in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3655−3665

[2] 费建波, 夏建国, 胡佳, 等. 生态空间与生态用地国内研究进展[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2019, 27(11): 1626−1636
FEI J B, XIA J G, HU J, et al. Research progress of ecological space and ecological land in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1626−1636

[3] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态用地分类初步研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 1−7
LONG H L, LIU Y Q, LI T T, et al. A primary study on ecological land use classification[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1): 1−7

[4] 喻锋, 李晓波, 张丽君, 等. 中国生态用地研究: 内涵、分类与时空格局[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4931−4943
YU F, LI X B, ZHANG L J, et al. Study of ecological land in China: conception, classification, and spatialtemporal pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4931−4943

[5] BAILEY R G. Integrated approaches to classifying land as ecosystems[J]. Publication-International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1981(28): 95−109

[6] 董雅文, 周雯, 周岚, 等. 城市化地区生态防护研究——以江苏省、南京市为例[J]. 现代城市研究, 1999, 14(2): 6−8, 10
DONG Y W, ZHOU W, ZHOU L, et al. Study on ecological protection in urbanized areas — Taking Jiangsu and Nanjing as examples[J]. Urban Research, 1999, 14(2): 6−8, 10

[7] 高翔, 黄娉婷, 王可. 宁夏沙坡头干旱沙漠自然保护区生态系统稳定性评估[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6381−6392
GAO X, HUANG P T, WANG K. Assessment of the ecosystem stability of Shapotou Arid Desert Nature Reserve in Ningxia, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6381−6392

[8] 张欣, 王志杰. 黔中喀斯特山地城市景观稳定性评价与特征分析[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5243−5254
ZHANG X, WANG Z J. Evaluation and characteristic analysis of urban landscape stability in Karst mountainous cities in the central Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5243−5254

[9] 傅丽华, 莫振淳, 彭耀辉, 等. 湖南茶陵县域生态空间网络稳定性识别与重构策略[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1409−1419
FU L H, MO Z C, PENG Y H, et al. Stability identification and reconstruction strategy of ecological space network at the county scale: a case study of Chaling County, Hunan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1409−1419

[10] 张磊, 李绍才, 缪宁, 等. 基于信息熵的四川盆周山地杉木生态系统稳定性评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(7): 79−88
ZHANG L, LI S C, MIAO N, et al. Evaluation of ecosystem stability assessment of Chinese fir plantations in western hill area around the Sichuan Basin based on entropy weight[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(7): 79−88

[11] 李霞, 杜世勋, 桑满杰, 等. 山西省自然保护区生态系统格局及稳定性变化趋势研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(2): 208−218
LI X, DU S X, SANG M J, et al. Study on the change trend of ecosystem pattern and stability of nature reserves in Shanxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(2): 208−218

[12] 王欠鑫, 曹巍, 黄麟. 青藏高原生态系统功能稳定性演化特征及分区[J]. 地理学报, 2023, 78(5): 1104−1118
WANG Q X, CAO W, HUANG L. Evolutionary characteristics and zoning of ecosystem functional stability on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(5): 1104−1118

[13] GENG S B, SHI P L, SONG M H, et al. Diversity of vegetation composition enhances ecosystem stability along elevational gradients in the Taihang Mountains, China[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 594−603

[14] FU H, YUAN G X, JEPPESEN E, et al. Multiple stabilizing pathways in wetland plant communities subjected to an elevation gradient[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 704−710

[15] 张秋梦, 贾宝全, 李彤, 等. 中国生态用地稳定性空间分异及其影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5764−5775
ZHANG Q M, JIA B Q, LI T, et al. The spatial distribution and influencing factors of ecological land stability in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5764−5775

[16] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 等. 鄱阳湖平原土地利用变化对生态网络稳定性影响的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 277−287
HUANG X Y, ZHAO X M, GUO X, et al. Simulation analysis of the effects of land use change on ecological network stability in Poyang Lake Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9): 277−287

[17] 王婷, 辛丽雨, 马铁帅, 等. 系统发育多样性对青藏高原高寒草甸的稳定性影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(12): 2368−2373
WANG T, XIN L Y, MA T S, et al. Effect of phylogenetic diversity on the stability of alpine meadows on the Tibetan

Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(12): 2368−2373

[18] SONG M H, ZONG N, JIANG J, et al. Nutrient-induced shifts of dominant species reduce ecosystem stability via increases in species synchrony and population variability[J]. Science of the Total Environment, 2019, 692: 441−449

[19] VAN DER HEIJDEN M G A, KLIRONOMOS J N, URSIC M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity[J]. Nature, 1998, 396(6706): 69−72

[20] LI H F, LI L F, SU F L, et al. Ecological stability evaluation of tidal flat in coastal estuary: a case study of Liaohe Estuary wetland, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108032

[21] 岳天祥, 马世骏. 生态系统稳定性研究[J]. 生态学报, 1991, 11(4): 361−366
YUE T X, MA S J. Ecosystem stability and its analysing model[J]. Acta Ecologica Sinica, 1991, 11(4): 361−366

[22] CHAKRABARTI C G, GHOSH K. Non-equilibrium thermodynamics of ecosystems: Entropic analysis of stability and diversity[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(17): 1950−1956

[23] DAS T, CHAKRABORTI S, MUKHERJEE J, et al. Mathematical modelling for phytoplankton distribution in Sundarbans Estuarine System, India[J]. Ecological Modelling, 2018, 368: 111−120

[24] ROSS S R P J, SUZUKI Y, KONDOH M, et al. Illuminating the intrinsic and extrinsic drivers of ecological stability across scales[J]. Ecological Research, 2021, 36(3): 364−378

[25] 马风云. 生态系统稳定性若干问题研究评述[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 401−407
MA F Y. Research advances on ecosystem stability[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 401−407

[26] 邓小文, 孙贻超, 韩士杰. 城市生态用地分类及其规划的一般原则[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 2003−2006
DENG X W, SUN Y C, HAN S J. General principles of urban ecological land classification and planning[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 2003−2006

[27] 王振健, 李如雪. 城市生态用地分类、功能及其保护利用研究——以山东聊城市为例[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 306−308
WANG Z J, LI R X. Classification, ecosystem service, protection and utilization of the urban ecological land — A case study of Liaocheng City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(6): 306−308

[28] 邓红兵, 陈春娣, 刘昕, 等. 区域生态用地的概念及分类[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1519−1524
DENG H B, CHEN C D, LIU X, et al. Conception and function classification of regional ecological land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1519−1524

[29] 张红旗, 许尔琪, 朱会义. 中国“三生用地”分类及其空间格局[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1332−1338
ZHANG H Q, XU E Q, ZHU H Y. An ecological-living-industrial land classification system and its spatial distribution in China[J]. Resources Science, 2015, 37(7): 1332−1338

[30] 才大伟, 陈敏. 湿地分类与土地利用现状分类标准对比分析[J]. 林业建设, 2015(5): 54−57
CAI D W, CHEN M. Comparative analysis between wetland classification and classification of current land use[J]. Forestry Construction, 2015(5): 54−57

[31] 张绘芳, 地力夏提·包尔汉, 朱雅丽, 等. 阿尔泰山森林景观格局的稳定性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 189−194, 353
ZHANG H F, DILIXIATI B E H, ZHU Y L, et al. Stability of forest landscape pattern in Altay Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 189−194, 353

[32] 高建, 李彤, 贾宝全, 等. 生态用地空间稳定性及其格局分析——以咸阳市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9843−9856
GAO J, LI T, JIA B Q, et al. Ecological land and its spatial stability analysis — Taking Xianyang City as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9843−9856

[33] 李彤, 贾宝全, 刘文瑞, 等. 京津冀地区生态用地稳定性格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 9927−9944
LI T, JIA B Q, LIU W R, et al. Spatial pattern of ecological land stability analysis and influencing factor in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 9927−9944

[34] ANSELIN L. Local indicators of spatial association — LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93−115

[35] MORAN P A P. The interpretation of statistical maps[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1948, 10(2): 243−251

[36] 董玉红, 刘世梁, 安南南, 等. 基于景观指数和空间自相关的吉林大安市景观格局动态研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1860−1871
DONG Y H, LIU S L, AN N N, et al. Landscape pattern in Da'an City of Jilin Province based on landscape indices and local spatial autocorrelation analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(11): 1860−1871

[37] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6161−6170
LIU Y Y, LIU X Y, ZHANG B, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6161−6170

[38] 朱永恒, 濮励杰, 赵春雨. 景观生态质量评价研究——以吴江市为例[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 182−187
ZHU Y H, PU L J, ZHAO C Y. Evaluation of landscape ecological quality—A case study in Wujing County[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(2): 182−187