

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.001.

张亦清, 赵翔, 潘雨飘, 等. 湖北省 2009—2019 年主要生态用地的时空演变特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 417-426.

ZHANG Yiqing, ZHAO Xiang, PAN Yupiao, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Major Ecological Lands in Hubei Province from 2009 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 417-426.

湖北省 2009—2019 年主要生态用地的 时空演变特征及驱动因素

张亦清¹, 赵翔¹, 潘雨飘¹, 刘中秋², 尹峰³

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430072;

2. 武汉吉威空间信息技术研究院有限公司, 武汉 430014; 3. 湖北省空间规划研究院, 武汉 430070)

摘要: [目的] 研究生态用地的时空演变规律及驱动因素对优化湖北省生态安全格局、提升区域生态系统服务可持续供给能力和筑牢长江中游生态屏障具有非常重要的现实意义。[方法] 研究基于国土调查数据, 利用景观格局指数和地理探测器模型, 对湖北省 2009—2019 年主要生态用地的规模与结构、景观格局、时空变化特征和驱动因素进行了分析。[结果] (1) 湖北省生态用地的总量呈现上升趋势, 但主要生态用地的连片度下降、人类活动对生态用地干扰和侵蚀风险增大。(2) 城镇化和耕地开发等农业生产活动是生态用地流失的主要原因, 退耕还林(湖)和土地整治工程是湖北省补充生态用地的主要途径。(3) 斑块边缘密度、城镇化率和人均耕地面积等 6 个因子是湖北省生态用地变化的主要驱动因素。其中, 城镇化率与第一产业产值之间的交互作用能解释 86.6% 的生态用地变化, 表明城镇化和农业发展的综合作用是引发湖北省生态用地变化的主要原因。[结论] 湖北省生态用地总量趋好, 但生态用地的空间形态和人类生活及生产活动对生态用地造成的负面影响应重点关注, 未来需优化生态空间保护格局、提高农用地及建设土地利用效率, 筑牢长江中游生态屏障。

关键词: 生态用地; 空间格局; 用地转移; 景观格局; 地理探测器; 驱动因素; 湖北省

中图分类号: F301.24; Q149

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0417-10

Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Major Ecological Lands in Hubei Province from 2009 to 2019

ZHANG Yiqing¹, ZHAO Xiang¹, PAN Yupiao¹, LIU Zhongqiu², YIN Feng³

(1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University,

Wuhan 430072, China; 2. Wuhan Geoway Institute of Space Information Technology Co., Ltd.,

Wuhan 430014, China; 3. Spatial Planning Institute of Hubei Province, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] The analysis of the spatial and temporal evolution patterns and drivers of ecological lands is of great significance to optimize the ecological security pattern and enhance the sustainable supply of regional ecosystem services in Hubei Province. [Methods] Based on the land survey data, the area and structure, landscape pattern, spatial and temporal changes and drivers of major ecological lands in Hubei Province during 2009—2019 were analyzed by using the landscape pattern indices and Geodetector model. [Results] (1) The total area of ecological lands in Hubei Province showed a rising trend, while the contiguity of major ecological lands decreased during 2009—2019, and the risk of interference and erosion of ecological lands by human activities also increased at the same time. (2) Urbanization and agricultural production activities, such as the

收稿日期: 2022-08-25

修回日期: 2022-09-13

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(41971336); 国家重点研发计划(2018YFD1100801)

第一作者: 张亦清(1998—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用时空建模、景观生态学与可持续发展。E-mail: sameenzhang@whu.edu.cn

通信作者: 赵翔(1985—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 主要从事空间优化决策、土地利用时空建模研究。E-mail: zhaoxiang@whu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

development of arable land and orchard, were the main causes of ecological lands loss. On the other hand, forest (lake) rehabilitation and land consolidation project were the main ways to replenish ecological lands in Hubei Province. (3) The major drivers of ecological land change in Hubei Province included average annual precipitation, urbanization rate, per capita arable land area, gross value of primary industry, and edge density and landscape shape index of the ecological land patches. Among them, the interaction between urbanization rate and primary industry output could explain 86.6% of ecological land changes, indicating that the combined effect of urbanization and agricultural development was the main cause of ecological land changes in Hubei Province. [Conclusion] The total amount of ecological land in Hubei Province was improving. However, attention should be focused on the negative impacts of ecological land spatial patterns and human activities, such as living and production, on the ecological land. In the future, it is necessary to optimize the ecological space protection pattern, enhance the utilization efficiency of agricultural and built-up land, and build a solid ecological barrier in the middle reaches of the Yangtze River.

Keywords: ecological land; spatial pattern; land transfer; landscape pattern; Geodetector; driving factors; Hubei Province

湖北省是长江干流岸线最长的省份,也是南水北调中线工程的核心水源区。中部江汉平原上星罗棋布的湖泊、湿地和鄂西、鄂东山区连片的天然林草地提供了良好的水源涵养、生物多样性维护等生态功能,构成了长江中游重要的生态屏障^[1-2]。生态用地承载了生态系统的各种服务和功能,是区域生态安全的重要保障^[3-5]。然而,城镇化、工业化进程的快速推进和农业开发^[6]加剧了生态用地被侵占和蚕食的风险^[7],威胁区域生态安全格局^[8]。作为中部崛起的重要战略支点和长江经济带的核心省份,湖北省近年来城镇化和经济发展不断提速,给生态空间保护带来巨大压力^[9]。在落实长江大保护战略和长江经济带绿色发展的背景下,研究林地、草地、水域和湿地等主要生态用地的时空演变规律及驱动因素,对优化湖北省国土空间开发与保护格局、提升区域生态系统服务可持续供给能力、筑牢长江中游生态屏障,具有非常重要的现实意义。

生态用地通常被认为是具有生态要素的空间定位^[10]。由于研究目的不同,生态用地至今缺乏公认、统一的分类体系^[11]。现有研究主要从生态服务功能和国土空间用地管控两个视角界定生态用地的内涵。前者主要依据“泛生态功能论”,从生态服务功能的视角出发,将区域国土空间划分成包括耕地、林地、荒漠等在内的生态用地^[12-15],进而研究区域生态系统服务功能的时空动态演变规律及可持续供给能力^[16-17];后者则主要以用地管控和强调生态保护的视角,将兼具生产和生活功能的耕地和建设用地等排除在生态用地范畴以外^[18-19],根据国土空间各要素相互作用以及地域空间功能^[20],从三生空间的角度出发分析区域主要生态用地在人类生活与生产活动下的时空动态

响应和地区生态空间保护成效^[7,21]。

总体上看,现有研究大多从宏观视角出发,侧重于研究区域生态系统服务功能供需分析、价值评估、安全格局和生境质量,而从用地管控视角出发分析重要生态用地的时空格局、演变规律和驱动因素的研究相对较少;且现有研究主要关注典型流域、重点城市群和生态功能区^[7,16-17],研究结论难以为省域尺度生态空间优化管控和治理的政府决策需求提供全面且具有针对性的决策依据。目前对于湖北省生态用地的研究主要聚焦于“生活—生产—生态”三生空间的时空变化和预测模拟^[22],缺乏生态空间内不同生态用地的时空演变特征和驱动因素的分析与探讨。此外,现有关于生态用地时空演变的研究,特别是针对较大尺度的研究大多依赖于遥感数据进行分析^[23-24]。遥感数据“所见即所得”的技术特性无法将具有生产功能的园地等农业生产用地与林地区分,导致分析结果精度难以支持生态空间优化与管控的现实需要。

针对湖北省在长江中游及全国生态安全格局中的重要地位,面向湖北省生态空间优化管控和治理的政府决策需求,研究将基于权威、准确的国土调查数据^[19,25-27],重点分析湖北省近10年来在快速城镇化背景下主要生态用地的规模结构、景观格局、时空演变特征和驱动因素;为长江大保护战略的实施和湖北省的生态空间优化与保护提供可靠的决策依据和建议。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

湖北省国土总面积约 $1.859 \times 10^5 \text{ km}^2$,西、北、东以山地为主,分别被武陵山、大巴山、巫山、大洪山、大

别山环绕,中部为江汉平原,地势平坦。2009 年以来,全省城镇化和经济发展取得了重大成就:2019 年湖北省城镇化水平约 61%,较 2009 年提高了 15%;同期完成 GDP 总产值 4.58 万亿元,较 2009 年增长了 2.47 倍。湖北省是长江中游极其重要的生态屏障。根据《全国生态功能区划》和《湖北省生态功能区划》,全省总体上包括 7 个重要的生态功能分区(图 1)。其中,鄂西的秦巴山区、武陵山区是我国极重要的水源涵养、生物多样性和水土保持生态功能区;中部地区的江汉平原湿地则是我国极重要的洪水调蓄生态功能区;此外,鄂东的大别山区和鄂中北的大洪山区也是长江中游非常重要的水源涵养功能区;三峡库区则是长江流域极重要的土壤保持生态功能区。

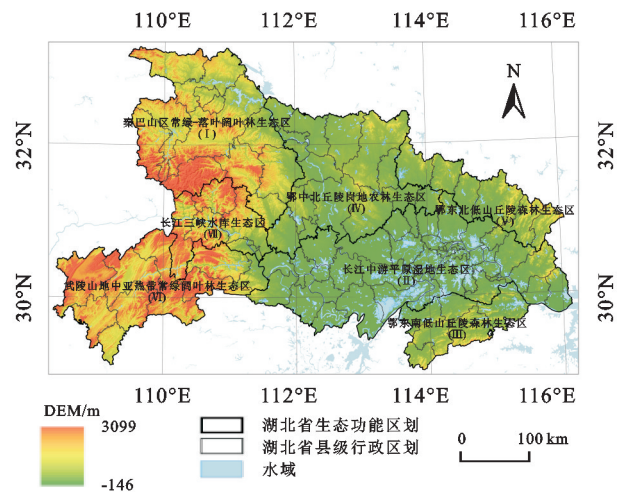


图 1 研究区地图

表 1 生态用地分类及其与“二调”“三调”用地分类的对照

主要生态用地类型		“二调”地类名称	“三调”地类名称
林地	有林地	有林地	乔木林地、竹林地
	灌木林地	灌木林地	灌木林地
	其他林地	其他林地	其他林地
草地	天然牧草地	天然牧草地	天然牧草地
	人工牧草地	人工牧草地	人工牧草地
	其他草地	其他草地	其他草地
水域	河流水面	河流水面	河流水面
	湖泊水面	湖泊水面	湖泊水面
	水库水面	水库水面	水库水面
湿地	坑塘水面	坑塘水面	坑塘水面
	沼泽地	沼泽地	森林沼泽、灌木沼泽、沼泽草地、沼泽地
	内陆滩涂	内陆滩涂	内陆滩涂

2.2 景观格局分析

景观格局指数是体现土地利用类型在空间分布差异和组合的量化指标^[29]。研究选取平均斑块面积(Mean Patch Size, MPS)、边缘密度(Edge Density, ED)对主要生态用地的斑块连片程度和形状复杂程度等方面进行评估。其中, MPS 用于度量生态用地

1.2 数据来源及处理

研究数据主要包括土地利用数据、基础地理信息数据、社会经济统计数据和气象数据 4 类。其中,土地利用数据来源于湖北省自然资源管理部门提供的第二次土地调查(基准时点为 2009 年末,以下简称“二调”)和第三次国土调查(基准时点为 2019 年末,以下简称“三调”)矢量数据库。通过叠加“二调”和“三调”的矢量地类图斑获取生态用地的时空变化信息,并将土地利用矢量图斑转换为 10 m×10 m 的栅格数据以满足景观格局分析的需要。DEM、道路网络等基础地理信息数据均来自于地理国情普查监测矢量成果数据库。社会经济类数据来源于湖北省及其下辖各市县的统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报。此外,通过湖北省主要气象站点插值获取全省年平均气温和降水等数据以满足生态用地时空变化驱动因素分析的需要。

2 研究方法

2.1 生态用地的界定

考虑到生态空间优化管控和治理的决策支持需求,参考王静^[15]、陈瑜琦等^[28]的研究,并结合湖北省的实际情况,将对水源涵养、水土保持、洪水调蓄、气候调节、净化环境和维持生物多样性等生态功能具有重要、积极作用的林地、草地、水域和湿地作为本研究的主要对象,分析人类活动对其时空演变的影响。此外,考虑到“二调”和“三调”的用地分类体系差异,定义衔接“二调”和“三调”用地分类的生态用地分类体系见表 1。

景观的连片程度,斑块面积越大、连片度越高则越有利于生态用地保护。此外,斑块边缘区域极易受到邻域人类活动干扰而不稳定,导致斑块类型发生转变^[30]。因此,使用 ED 度量人类生活与生产活动对生态用地的潜在干扰和侵蚀风险;ED 值越大,表明周边人类活动对生态用地的干扰越大。利用 Frag-

stats 4.2 软件完成景观格局指数计算,各指数的计算公式和内涵可参考文献^[31-32]。

2.3 地理探测器

利用地理探测器模型分析湖北省生态用地的时空变化驱动因素及其相互作用。地理探测器模型是探究地理现象背后驱动因子的一种非线性假设统计学方法^[33],并已在土地利用变化驱动因素分析等方面得到了成功应用^[24,34]。地理探测器模型利用 q 值度量各自变量对因变量 Y 的解释力,计算公式为:

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

式中: $h=1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层(分类或分区); N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, 其值越大表明该因子对 Y 的解释力越大。此外,地理探测器模型通过交互探测识别不同因子之间的相互作用,即双因子之间的交互作用是否会影响 Y 的解释力。双因子之间不同的交互探测判断条件及结果如表 2 所示。

3 结果与分析

3.1 湖北省主要生态用地的分布、规模与结构

2019 年末,全省林地、草地、水域和湿地 4 类主要生态用地的总面积约为 $1.129 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占全省国土总面积的 60.75%, 较 2009 年增加了 4 893.83 km^2 , 累计增长了 4.53%。从生态用地的空间分布上看:(1) 湖北省的林地主要集中分布在鄂西山区、鄂北和东南部丘陵地区;(2) 草地主要分布在汉江沿岸和咸宁市南部丘陵地区;(3) 水域主要以长江、汉江水系和江汉平原上的湖泊、水库和坑塘为主;(4) 湿地以内陆滩涂为主, 集中分布在江汉平原地区(图 2)。

表 2 交互探测结果判断

判断条件	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性增强
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

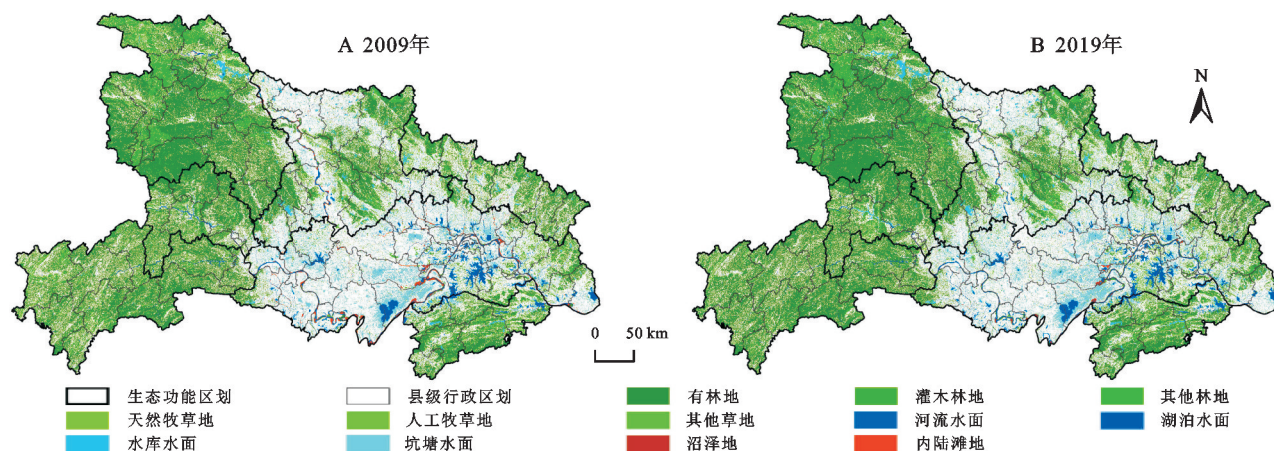


图 2 湖北省主要生态用地的空间分布

从生态用地的构成来看(表 3), 湖北省的生态用地以林地为主, 其次为水域, 两者在 2009—2019 年分别增长了 7.3% 和 7.7%。其中: 有林地累计增长了 6 031.4 km^2 , 对湖北省生态空间的扩张贡献最为显著, 表明全省林地保护工作成效明显。另一方面, 草地和内陆滩涂则出现了明显收缩态势, 分别减少了 2 030.64 km^2 和 741.8 km^2 , 较 2009 年分别累计减少了 68.3% 和 54.8%, 表明全省生态环境保护依然面临重大挑战。

图 3 展示了湖北省 7 个生态功能区的用地构成差异:(1) 秦巴山区(Ⅰ)、武陵山区(Ⅵ)和三峡库区(Ⅶ)3 个生态功能区的林地占比均超过 95%。表明林地在上述生态功能区中发挥着重要的生态系统服务调节和支撑功能, 构成了鄂西和长江中游重要的天然生态屏障。

(2) 鄂东南(Ⅲ)、鄂东北(Ⅴ)和鄂中北(Ⅳ)3 个丘陵岗地生态功能分区中, 林地占比超过 75%, 同时水域占比提高到了 20% 左右。(3) 中部平原湿地生态区(Ⅱ)以水域为主, 其占比超过了 55% 以上; 表明该区域水资源丰富, 是长江中游重要的水文调节和水源涵养区。2009—2019 年, 林地在各生态功能区的占比均有不同程度的增长, 湿地的占比则相对有所降低。

不同生态用地所承载的生态功能往往存在较大差异。县域单元内不同生态用地的比例结构通常也意味着其在区域生态系统和生态格局中的地位 and 角色不同。为反映省内不同县域单元主导生态用地类型的差异, 将生态用地中数量占比最高的类型作为该县域单元的优势生态用地, 并绘制其分布图见图 4。从县级尺度来看,

湖北省 103 个县单元的优势生态用地类型主要为林地和水域。图 4 中,绿色系的优势生态用地为林地,蓝色系的生态用地为水域。2009—2019 年,全省大部分县级单元的优势生态用地类型总体保持了稳定。其中:(1)鄂中北生态区(Ⅳ)中的宜城、钟祥和京山的林地占比有了较为明显的提高。(2)长江中游平原湿地生态区(Ⅱ)内长江沿岸的仙桃市、汉川市等地区水域占比呈现出上升的态势,武汉市和鄂州市等区域的水域占比则呈现了下降趋势。

3.2 主要生态用地的景观格局指数

2009—2019 年全省各类生态用地景观格局总体趋向于破碎化。由图 5 可知,湖北省林地的平均斑块面积大幅下降,边缘密度有所上升,表明林地连片度下降,破碎化趋势明显;反映了基础设施建设和农业开发等人类活动对林地的潜在干扰增强,加剧了林地未来流失和被其他用地侵蚀的风险。水域和湿地的景观格局指数变动相对较小,总体上呈现出与林地

一致的趋势,水域和湿地形态趋向破碎化,且边缘复杂化程度加剧,主要源于城乡发展和农业开发对于上述用地的潜在干扰增加。由于耕地后备资源开发等活动的开展,全省草地总面积减少较多,因此全省草地的平均斑块面积下降,边缘密度也呈现下降趋势。

表 3 2009—2019 年生态用地数量变化

生态用地	2009 年		2019 年		变化率/%
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	
林地	87448.81	80.9	93860.58	83.1	7.3
其中:有林地	70806.23	65.5	76837.63	68.0	8.5
草地	2973.62	2.8	942.98	0.8	-68.3
其中:其他草地	2953.37	2.7	939.01	0.8	-68.2
水域	16265.48	15.0	17518.99	15.5	7.7
其中:河流水面	3693.23	3.4	3647.17	3.2	-1.3
湖泊水面	2572.83	2.4	2693.58	2.4	4.7
坑塘水面	8052.24	7.5	8735.04	7.7	8.5
湿地	1352.52	1.3	610.72	0.5	-54.8
其中:内陆滩涂	1306.89	1.2	579.21	0.5	-55.7
合计	108039.44	100.0	112933.27	100.0	4.5

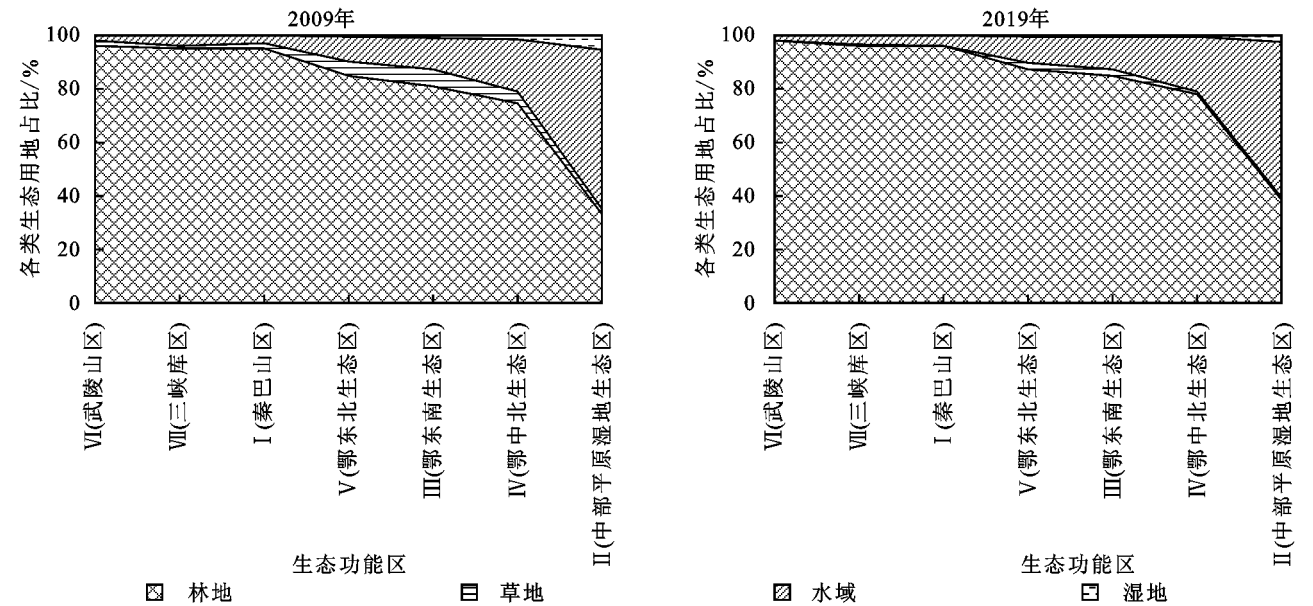


图 3 生态功能区内各类生态用地占比变化

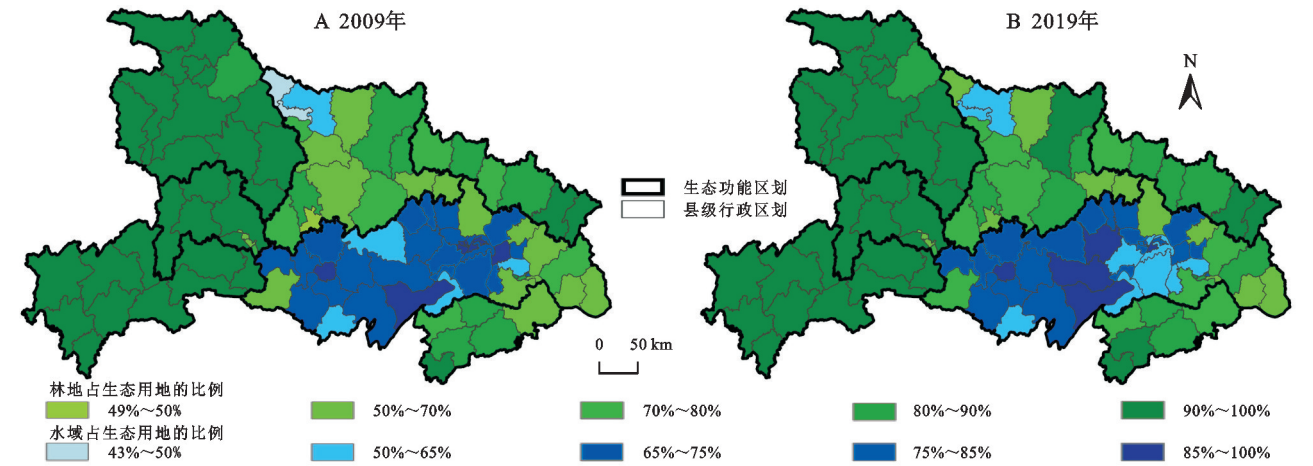


图 4 湖北省 2009—2019 年各县级行政区的优势生态用地

从生态用地景观格局指数的空间分布(图6)来看:成片分布的林地主要集中在秦巴山区,特别是神农架林区。但与2009年相比,该地区林地平均斑块面积大幅下降、边缘密度上升,表明近十年来人类活动对该区域林地的干扰加剧。鄂中北地区的草地由于农业空间的扩张导致其景观破碎化加剧,而鄂东南地区的草地破碎

化则是因为向林地的转换造成的。水域在武汉市附近边缘密度明显降低,平均斑块面积增大,表明在退耕还湖等政策的作用下,该区域水生态保护条件有所改善。在城市扩张、耕地开发和水产(小龙虾等)养殖的综合影响下,江汉平原的湿地平均斑块面积急剧下降、湿地景观格局破碎化趋势明显,湿地保护形势严峻。

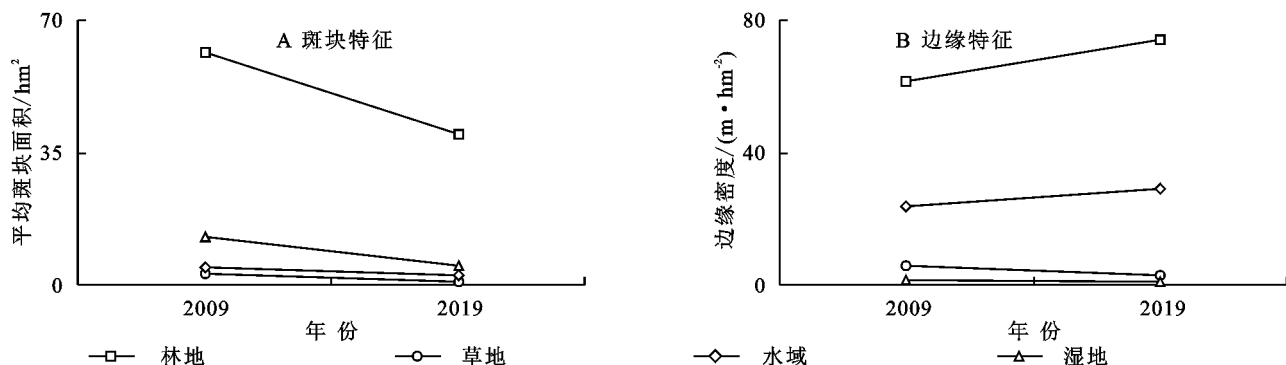


图5 平均景观格局指数变化

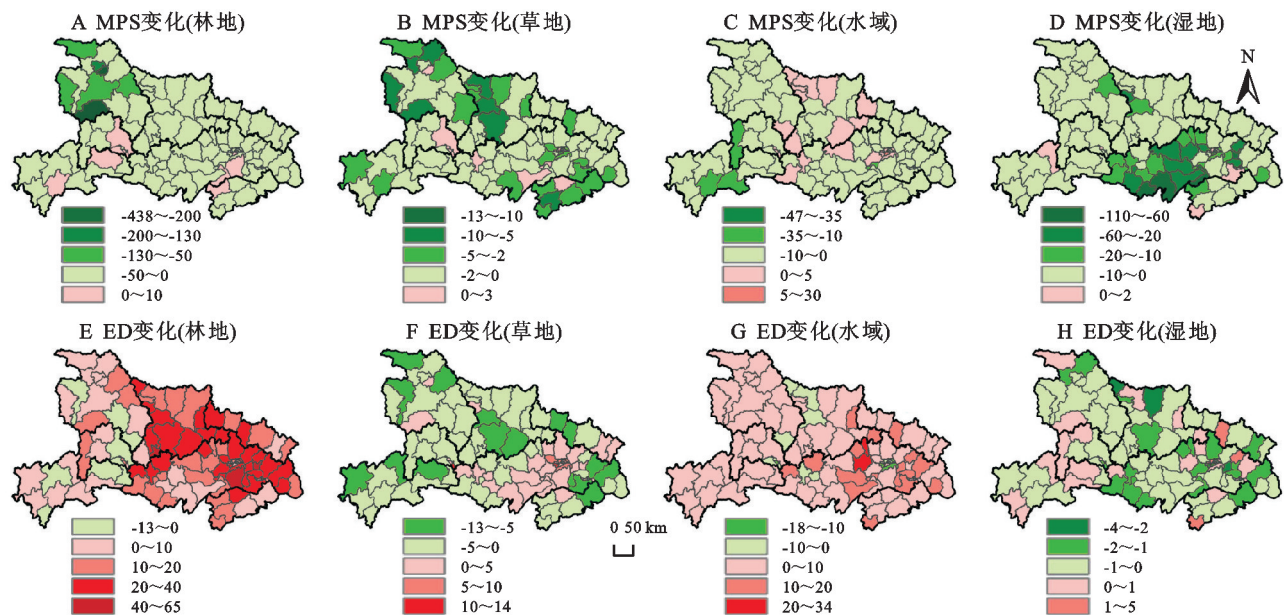


图6 湖北省2009—2019年主要生态用地的景观格局指数变化

3.3 生态用地时空动态分析

湖北省2009—2019年的土地利用转移矩阵见表4。从生态用地的流失去向来看,湖北省生态用地主要流向耕地和建设用地,流失类型主要为林地。转出为耕地和建设用地的林地面积分别为2 616.26 km², 1 728.92 km²。此外,分别有954.26 km², 782.39 km²水域转为耕地和建设用地。因此,城镇化和耕地开发确实一定程度上对湖北省生态空间形成了较大的挤占压力。在生态用地的流入方面,生态用地的主要来源也主要是耕地(53.51%)和建设用地(33.47%)。其中,耕地和建设用地分别占新增林地来源的54.64%, 13.14%。水域的主要来源为耕地,转入面积为2 127.08 km²。由此可见,2009—2019年,湖北省的退耕还林(湖)和农村

土地整治工作对生态用地保护的作用较为明显。

从生态用地转移的空间分布来看(图7),湖北省生态用地流出的热点区域主要分布在鄂中北丘陵岗地区的枣阳市、宜城市和钟祥市,主要为草地转出为耕地和园地,表明该区域农业生产活动对生态空间形成了挤压。生态用地转入的热点区域则主要分布在武汉市江夏区、蔡甸区、汉川市和嘉鱼县等武汉城市群地区。其中,江夏区和嘉鱼县主要为耕地转变为水域,蔡甸区和汉川市则主要为耕地转为林地,表明该区域退耕还林政策成效明显。

3.4 生态用地变化驱动因子探测

参考现有研究^[35-40]并结合湖北省的实际情况,从自然、区位、景观格局和社会经济4个方面选取了22个潜

在驱动因子,对湖北省生态用地的变化机制进行探测。其中,自然条件主要包括地形、气温和降水情况;区位条件用于度量人类活动对生态用地的干扰风险;景观格局指数则用于度量生态用地本身的景观特征对于生态用地保护的影响;社会经济条件主要用于反映城镇化等社会经济发展宏观因素对生态用地的影响。

表 4 湖北省 2009—2019 年土地利用转移矩阵 km²

土地利用		其他用地(2019 年)				生态用地(2019 年)				2009—2019 年
类型(2009 年)		耕地	园地	建设用地	未利用地	耕地	园地	建设用地	未利用地	减少
其他用地	耕地	—	1252.84	4536.61	167.02	6713.83	13.82	2127.08	13.20	14824.38
	园地	779.62	—	402.81	17.44	1191.75	41.80	67.66	0.81	2501.91
	建设用地	1611.48	139.02	—	32.26	1614.67	112.63	503.51	13.45	4027.04
	未利用地	145.20	14.00	95.86	—	542.84	49.60	14.82	0.33	862.65
生态用地	林地	2616.26	808.51	1728.92	71.73	—	147.68	489.58	13.70	5876.37
	草地	484.46	98.33	142.98	11.44	1664.22	—	59.46	2.97	2463.87
	水域	954.26	44.23	782.39	18.54	367.35	57.67	—	128.91	2353.34
	湿地	294.54	4.18	66.04	1.18	193.48	10.04	344.74	—	914.18
2009—2019 年新增		6885.83	2361.10	7755.60	319.61	12288.15	433.24	3606.85	173.38	—

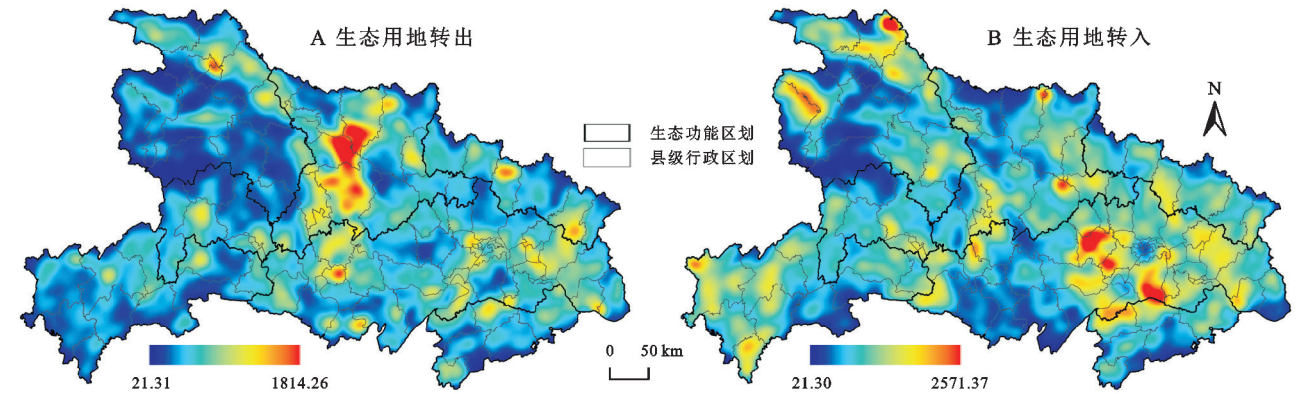


图 7 2009—2019 年生态用地转入、转出热点分析

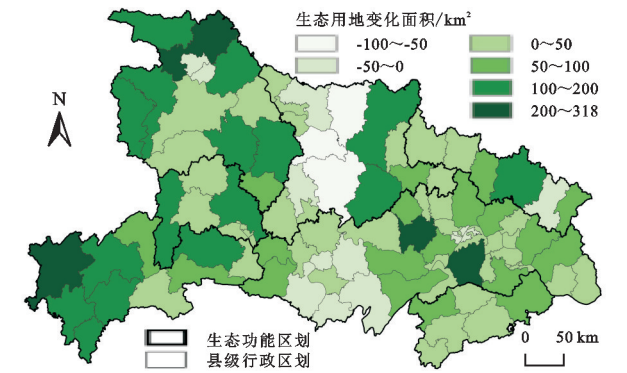


图 8 湖北省 2009—2019 年生态用地变化分布

以湖北省 103 个县级行政区作为基本分析单元,通过统计年鉴获取各单元的社会经济指标,并利用 GIS 和Fragstats 软件统计各单元的平均高程、气温、各类生态用地图斑与道路、居民点的平均距离和景观指数。其中,生态用地的景观格局指数按照林地、草地、水域和湿地 4 个一级类进行计算,并汇算其平均值。通过上述方法获得 103 个县级单元在 22 个维度上的潜在驱动因子数据,并以单元的生态用地总面积变化作为因变量(图 8),利用地理探测器模型探测湖北省 2009—2019 年生态用地变化驱动因素,结果见表 5。

表 5 因子探测结果

影响因素	特征指标		q 值	显著性
	变量编号	变量名称		
自然条件	A ₁	高程	0.229	0.270
	A ₂	坡度	0.140	0.446
	A ₃	年平均气温	0.124	0.496
	A ₄	年平均降水量	0.229	0.048 **
区位条件	B ₅	一级道路密度	0.160	0.157
	B ₆	二级道路密度	0.052	0.895
	B ₇	到一级道路的距离	0.200	0.437
	B ₈	到二级道路的距离	0.020	0.932
	B ₉	到农村居民点的距离	0.100	0.505
生态用地 景观特征	C ₁₀	平均斑块密度	0.165	0.233
	C ₁₁	景观形状指数	0.380	0.000 ***
	C ₁₂	边缘密度	0.393	0.000 ***
	C ₁₃	蔓延度指数	0.174	0.187
	C ₁₄	香农多样性指数	0.146	0.255
	C ₁₅	香农均匀度指数	0.149	0.252
社会经济条件	D ₁₆	常住人口变化量	0.090	0.815
	D ₁₇	城镇化率	0.296	0.007 ***
	D ₁₈	地方生产总值	0.124	0.431
	D ₁₉	第一产业产值	0.204	0.075 *
	D ₂₀	第二产业产值	0.189	0.101
	D ₂₁	第三产业产值	0.140	0.299
	D ₂₂	人均耕地面积	0.266	0.045 **

注: * 表示 $p < 0.1$; ** 表示 $p < 0.05$; *** 表示 $p < 0.01$ 。

由表 5 可知,年平均降水量(A_4)、景观形状指数(C_{11})、边缘密度(C_{12})、城镇化率(D_{17})、第一产业总值(D_{19})和人均耕地面积(D_{22})因子通过显著性检验,表明其对生态用地的变化分析具有较好的解释力。因子解释力从大到小依次为:边缘密度(0.393)>景观形状指数(0.380)>城镇化率(0.296)>人均耕地面积(0.266)>降水(0.229)>第一产业总值(0.204)。由图 9 可知,边缘密度、景观形状指数、人均耕地面积三者与生态用地变化的分布具有较为相似的空间布局。鄂西山区及丘陵地区生态用地得到有效保护,总量持续上升,但因其与农用地交错分布,导致生态用地景观边缘较为破碎,斑块之间干扰程度较大,易造成生态用地的流失。因此在土地整治过程中尽可能提高生态用地的连片度,有利于维护生物多样性和生态用地功能的完整性。另一方面,城镇化率、第一产业产值与生态用地变化呈现一定的负相关空间分布特征。例如,襄阳地区城镇化速度较快,其东部区域的生态用地减少趋势明显;此外,在农业产值较高的鄂中地区,农业种植和水产养殖业的发展给生态空间保护带来明显的压力。

对通过显著性检验的 6 个因子进行交互探测,结果见表 6。除了边缘密度和景观形状指数之间呈现出双因子增强作用,其余因子之间均表现为非线性增强作用,表明两个因子的叠加效用极大地增强了单因子对生态用地变化的影响。边缘密度和景观形状指数之间的双因子增强作用,进一步表明生态用地的景观格局对其变化的重要性。非线性增强结果的高值主要出现在第一产业与景观形状指数、边缘密度和城镇化率之间,表明产业结构、生态用地景观格局和地区城镇化发展水平相互作用,共同影响着湖北省生态用地的空间分异关系。根据单因子探测和因子交互探测结果,结合湖北省生态保护相关政策,湖北省生态用地时空演变的驱动机理可解释为:(1) 降水量是自然环境演化的先天条件之一,对生态用地变化起着不可替代的重要作用;(2) 生态用地自身的景观格局特征是影响生态用地时空变化非常重要的因素,边缘越复杂其受人类活动干扰侵蚀的风险也越大;(3) 城镇化、农业生产效率和耕地保护压力是影响生态用地变化的主要宏观社会经济因素,对生态保护产生了较大的压力。

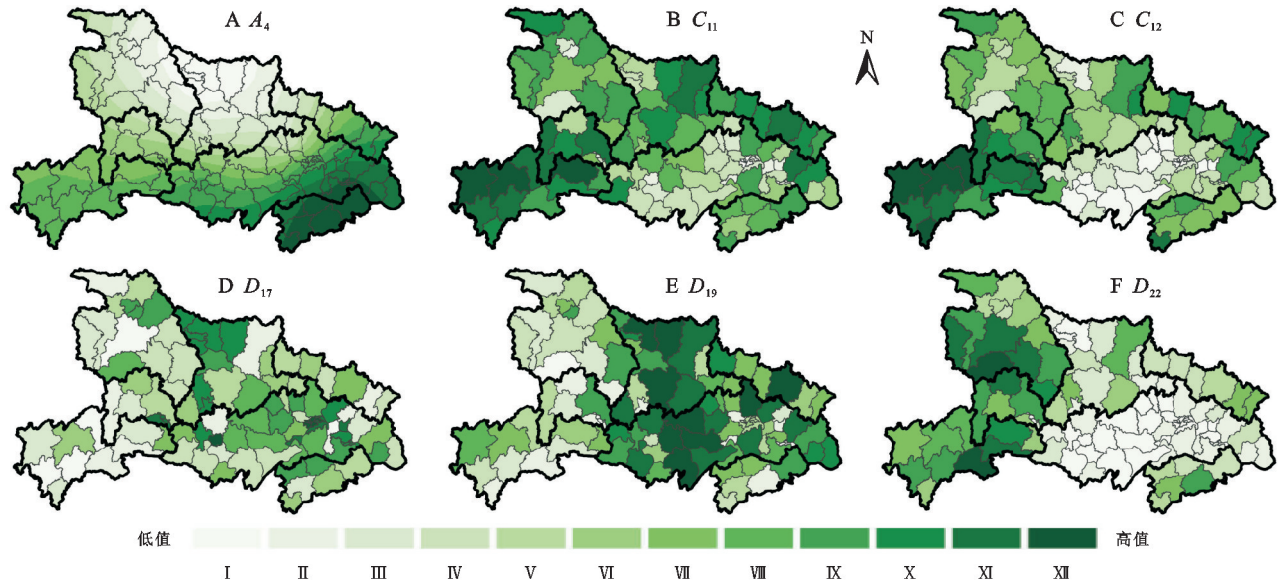


图 9 生态用地变化的主要驱动因子空间分布

表 6 交互探测结果

因子	降水	景观形状指数	边缘密度	城镇化率	第一产业总值
景观形状指数	0.735 ^N				
边缘密度	0.771 ^N	0.715 ^B			
城镇化率	0.784 ^N	0.699 ^N	0.781 ^N		
第一产业总值	0.771 ^N	0.840 ^N	0.809 ^N	0.866 ^N	
人均耕地面积	0.770 ^N	0.713 ^N	0.716 ^N	0.710 ^N	0.762 ^N

注: ^N 代表非线性增强, ^B 代表双因子增强。

4 结论与建议

4.1 结论

本文主要基于国土调查数据,利用景观格局指数

和地理探测器模型等方法对湖北省 2009—2019 年主要生态用地的规模结构、景观格局、时空变化和驱动因素进行了分析,研究结论如下:(1) 2009—2019 年,湖北省生态用地的总量呈现上升趋势。生态用地

构成方面,林地和水域是湖北省主要的生态用地类型,分别占生态用地的80%和15%以上。(2)全省主要生态用地,尤其是林地,呈现出破碎化景观格局特征,表明人类生活与生产活动对生态用地的干扰和潜在风险增大。(3)城镇化、耕地开发等活动是生态用地流失的主要原因;另一方面,得益于退耕还林(湖)和土地整治等工程的实施,耕地和农村低效建设用地成为湖北省补充生态用地的主要来源。(4)边缘密度、城镇化率和第一产业产值等6个因子是影响湖北省生态用地时空变化的主要驱动力。交互因子探测结果表明,城镇化率与第一产业产值之间的非线性增强作用体现出城镇化和农业开发是引发湖北省生态用地变化的主要因素。

4.2 政策建议

基于研究结论,提出湖北省生态空间保护和治理的建议如下:(1)科学合理编制国土空间规划,优化生态空间保护格局,保证生态红线的空间连片和功能完整,实现“生活—生产—生态”空间的协调有序发展。(2)依托全域土地综合整治等工程提高存量城乡建设用地利用效率和农用地产出水平,严控城镇化及农业发展对生态空间,特别是关键生态廊道和节点的侵蚀风险。(3)落实长江大保护战略,积极推进“退耕退湖退坑还湿”和“退耕还林(湖)”工程;根据不同生态功能区的生态本底条件,统筹考虑山水林田湖草沙生态系统特征及问题,开展针对性的生态系统修复工程,建设千里长江绿色廊道。(4)加强省际和省内外市、县政府间在生态保护方面的合作以实现对跨行政区重要生态功能区的协同治理、修复和发展保护,筑牢以“三江四屏千湖一平原”为骨架的长江中游生态屏障。

参考文献:

- [1] 吴英迪,蒙古军.中国自然资源生态服务重要性评价与空间格局分析[J].自然资源学报,2022,37(1):17-33.
- [2] 方露露,许德华,王伦澈,等.长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J].地理研究,2021,40(3):821-838.
- [3] Termorshuizen J W, Opdam P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development[J]. Landscape Ecology, 2009,24:1037-1052.
- [4] Tian C, Cheng L L, Yin T T. Impacts of anthropogenic and biophysical factors on ecological land using logistic regression and random forest: A case study in Mentougou District, Beijing, China[J]. Journal of Mountain Science, 2022,19(2):433-445.
- [5] Yao G, Li H, Wang N, et al. Spatiotemporal variations and driving factors of ecological land during urbanization: A case study in the Yangtze River's lower reaches [J]. Sustainability, 2022, 14(7): 4256.
- [6] 陈万旭,李江风,曾杰,等.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[J].地理研究,2019,38(9):2173-2187.
- [7] 高吉喜,刘晓曼,王超,等.中国重要生态空间生态用地变化与保护成效评估[J].地理学报,2021,76(7):1708-1721.
- [8] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J].地理研究,2021,40(4):1096-1110.
- [9] 崔家兴,顾江,孙建伟,等.湖北省三生空间格局演化特征分析[J].中国土地科学,2018,32(8):67-73.
- [10] 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].城市研究,1999,2(2):6-10.
- [11] 谭永忠,赵越,曹宇,等.中国区域生态用地分类的研究进展[J].中国土地科学,2016,30(9):28-36.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王静,王雯,祁元,等.中国生态用地分类体系及其1996—2012年时空分布[J].地理研究,2017,36(3):453-470.
- [16] 卫新东,张健,王筛妮,等.黄河流域2000—2020年生态用地格局变化与分异趋势[J].生态学杂志,2021,40(11):3424-3435.
- [17] 周婷,戚佳玲,徐之寒,等.长江经济带生态用地变化类型识别及驱动因素分析(英文)[J]. Journal of Resources and Ecology, 2021,12(2):175-191.
- [18] 岳健,张雪梅.关于我国土地利用分类问题的讨论[J].干旱区地理,2003,26(1):78-88.
- [19] 陈婧,史培军.土地利用功能分类探讨[J].北京师范大学学报:自然科学版,2005,41(5):536-540.
- [20] 金贵,王占岐,姚小微,等.国土空间分区的概念与方法探讨[J].中国土地科学,2013,27(5):48-53.
- [21] 邢晓露,郭岚,杨梅焕,等.低山丘陵区县域生态用地演变及生态服务价值响应[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):900-908.
- [22] 王旭,马博文,李丹,等.基于FLUS模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J].自然资源学报,2020,35(1):230-242.
- [23] 蒋好雨,陈荣蓉,杨朝现,等.西部平原区生态用地时空动态特征及环境效应[J].水土保持研究,2021,28(2):203-209.
- [24] 刘彦文,刘成武,何宗宜,等.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[J].应用生态学报,2020,31(3):987-998.
- [25] 尹娟,资本飞,阳利永,等.抚仙湖流域生态用地时空演变及其驱动因素[J].水土保持通报,2020,40(6):228-235.

- [26] 安国强,秦晓敏,许霄霄,等.山东省生态用地变化及驱动因素影响评价[J].中国农业资源与区划,2020,41(9):45-54.
- [27] 管青春,郝晋珉,石雪洁,等.中国生态用地及生态系统服务价值变化研究[J].自然资源学报,2018,33(2):195-207.
- [28] 陈瑜琦,张智杰,郭旭东,等.中国重点生态功能区生态用地时空格局变化研究[J].中国土地科学,2018,32(2):19-26.
- [29] 徐建英,樊斐斐,刘焱序,等.汶川县生态系统服务对景观格局及其变化的响应[J].生态学报,2020,40(14):4724-4736.
- [30] 张月,张飞,王娟,等.近40年艾比湖湿地自然保护区生态干扰度时空动态及景观格局变化[J].生态学报,2017,37(21):7082-7097.
- [31] 罗红,陈磊,姜运力,等.自然保护地整合优化的景观格局变化分析:以贵州省思南县为例[J].生态学报,2021,41(20):8076-8086.
- [32] 吴健生,罗可雨,赵宇豪.深圳市近20年城市景观格局演变及其驱动因素[J].地理研究,2020,39(8):1725-1738.
- [33] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [34] 张华玉,秦年秀,汪军能,等.广西海岸带土地利用时空格局及其驱动因子[J].水土保持研究,2022,29(3):367-374.
- [35] 李颖,冯玉,彭飞,等.基于地理探测器的天津市生态用地格局演变[J].经济地理,2017,37(12):180-189.
- [36] 黄木易,岳文泽,方斌,等.1970—2015年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J].地理学报,2019,74(9):1904-1920.
- [37] Zhang W, Wang L, Xiang F, et al. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 110: 105892.
- [38] 赖国华,胡宝清,李敏,等.桂西南—北部湾地区“三生”用地演变及其驱动力的地理探测[J].水土保持研究,2021,28(4):236-243.
- [39] Feng R, Wang F, Wang K, et al. Quantifying influences of anthropogenic-natural factors on ecological land evolution in mega-urban agglomeration: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao greater Bay area [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 125304.
- [40] Ruan W Q, Li Y Q, Zhang S N, et al. Evaluation and drive mechanism of tourism ecological security based on the DPSIR-DEA model [J]. Tourism Management, 2019, 75: 609-625.

(上接第416页)

- [28] 翟香,兰安军,廖艳梅,等.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域定量识别:以贵州省为例[J].水土保持研究,2022,29(6):322-329,343.
- [29] 廖艳梅,兰安军,尹林江,等.喀斯特山区农村居民点空间分布特征及其影响因素[J].水土保持研究,2021,28(6):233-241.
- [30] 刘炜,焦树林,安全,等.气候变化及人类活动对贵州省1998—2018年NDVI的影响[J].长江流域资源与环境,2021,30(12):2883-2895.
- [31] Liu Y, Li Y, Li S, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human factors [J]. Remote Sensing, 2015, 7(10): 13233-13250.
- [32] 吴奕,宋瑞鹏,张红卫,等.河南省降水量、地表水资源量变化趋势及演变关系[J].人民黄河,2021,43(11):92-96.
- [33] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [34] 刘曦,国庆喜,刘经伟. IBIS模拟东北东部森林 NPP 主要影响因子的敏感性[J].生态学报,2011,31(7):1772-1782.
- [35] 丁庆福,王军邦,齐述华,等.江西省植被净初级生产力的空间格局及其对气候因素的响应[J].生态学杂志,2013,32(3):726-732.
- [36] 闫立男,王新军,陈蓓等.稀疏植被净初级生产力时空变化及气象因素关系分析[J].测绘通报,2022(3):1-6.
- [37] 张继,周旭,蒋啸,等.贵州高原不同地貌区和植被类型水分利用效率的时空分异特征[J].山地学报,2019,37(2):173-185.
- [38] 林晓扬,蔡雄飞,王济,等.2000—2010年贵州省植被净初级生产力时空变化研究[J].环境保护科学,2015,41(2):91-95,136.
- [39] 冯婉,谢世友.长江流域片2000—2015年植被NPP时空特征及影响因子探测[J].水土保持研究,2022,29(1):176-183.
- [40] 顾羊羊,邹长新,乔旭宁,等.2000—2015年黔西南州植被覆盖时空变化及影响因素分析[J].生态与农村环境学报,2021,37(11):1413-1422.
- [41] 姜春,吴志峰,程炯,等.广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析[J].自然资源学报,2016,31(6):961-972.