

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.020.

李美莲, 许进龙, 张河雄, 等. “双碳”目标下广西石漠化片区耕地绿色利用效率时空分异研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 365-374.

Li Meilian, Xu Jinlong, Zhang Hexiong, et al. Study on the Temporal and Spatial Differentiation of the Green Utilization Efficiency of Cultivated Land in Rocky Desertification Area of Guangxi Under ‘Dual Carbon’ Goals[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 365-374.

“双碳”目标下广西石漠化片区耕地 绿色利用效率时空分异研究

李美莲¹, 许进龙², 张河雄², 周久贺³

(1. 广西宏观经济研究院 经济研究所, 南宁 530004;

2. 华中师范大学 公共管理学院, 武汉 430079; 3. 中共桂林市委党校 经济学教研室, 广西 桂林 541000)

摘 要: [目的] 分析“双碳”目标下广西石漠化片区耕地绿色利用效率时空演变及其驱动因子, 为提升耕地绿色利用效率, 加强耕地生态保护等提供依据, 同时扩展耕地绿色利用效率研究边界、丰富研究内涵。[方法] 利用 Super-SBM 模型测算耕地绿色利用效率, 运用空间自相关和地理探测器等方法, 分析了其时空分异特征及驱动因子。[结果] (1) 广西石漠化片区耕地碳排放和面源污染得到初步控制, 耕地绿色利用效率均值由 2009 年的 0.88 稳步上升至 2021 年的 1.04, 增幅较小但效率值迈入有效水平; (2) 广西石漠化片区耕地绿色利用效率空间分异相对稳定, 总体维持南高北低的空间分异特征, 但南北差异呈缩小态势; (3) 广西石漠化片区耕地绿色利用效率具有显著的正空间相关性, 且呈强化趋势。局域空间格局以高高集聚型(HH)和低低集聚型(LL)为主, 高值区集聚于南部的河谷平原, 低值区连片于北部的高原—山地过渡带; (4) 广西石漠化片区耕地绿色利用效率的时空分异受自然地理要素和社会经济要素共同驱动, 但适度规模经营与其他生产要素的交互作用, 能够更好地推动耕地利用节本增效。单因子探测中, “种植业从业人员人均耕地规模”始终是影响力最强的因子, 同时交互因子探测中, 所有具备较强影响力的交互因子中均包含“种植业从业人员人均耕地规模”因子。[结论] 广西石漠化片区耕地绿色利用效率逐年小幅度提升并整体迈入有效水平, 受自然地理、社会经济多重因素影响, 其空间分布具有显著的正相关性并总体维持南高北低的分异特征。

关键词: 广西石漠化片区; 耕地绿色利用效率; Super-SBM 模型; 空间自相关; 地理探测器

中图分类号: F301.21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0365-10

Study on the Temporal and Spatial Differentiation of the Green Utilization Efficiency of Cultivated Land in Rocky Desertification Area of Guangxi Under ‘Dual Carbon’ Goals

Li Meilian¹, Xu Jinlong², Zhang Hexiong², Zhou Jiuhe³

(1. Guangxi Institute of Macroeconomic Research, Nanning 530004, China; 2. School of Public Administration, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 3. Economics Teaching and Research Office, the Party School of the Guilin Municipal Committee of the Communist Party of China, Guilin, Guangxi 541000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the spatiotemporal evolution and driving factors of green utilization efficiency of cultivated land in the stone desertification area in Guangxi under the ‘dual carbon’ target, and to provide a basis for improving the green utilization efficiency of cultivated land, strengthening the ecological protection of cultivated land, and to expand the research boundary and enrich the research connotation of green utilization efficiency of cultivated land. [Methods] The Super-SBM model was used to calculate the green utilization efficiency of cultivated land. The methods such as spatial autocorrelation and geographical detector were used to analyze its spatiotemporal differentiation characteristics and driving

收稿日期: 2023-11-28

修回日期: 2024-01-05

资助项目: 国家自然科学基金地区项目(72363001); 国家社会科学基金(21BMZ050); 国家社会科学基金西部项目(23XGL006)

第一作者: 李美莲(1989—), 女, 广西玉林人, 硕士, 助理研究员, 主要从事区域经济与资源环境研究。E-mail: 578501979@qq.com

通信作者: 周久贺(1985—), 男, 河南郸城人, 硕士, 副教授, 主要从事区域经济与资源环境研究。E-mail: 1811901508@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

factors. [Results] (1) The carbon emissions and non-point source pollution from cultivated land in the stone desertification area in Guangxi had been preliminarily controlled, and the average green utilization efficiency of cultivated land had steadily increased from 0.88 in 2009 to 1.04 in 2021. The increase was small, but the efficiency value had reached an effective level. (2) The spatial differentiation of green utilization efficiency of cultivated land in the stone desertification area in Guangxi was relatively stable, maintaining the spatial differentiation characteristics of high in the south and low in the north, but the north-south difference was narrowing. (3) The green utilization efficiency of cultivated land in the stone desertification area in Guangxi had significant positive spatial correlation and showed a strengthening trend. The local spatial pattern was mainly characterized by high-high agglomeration (HH) and low-low agglomeration (LL), with high-value areas agglomerating in the river valley plains in the south and low-value areas contiguous in the plateau-mountain transition zone in the north. (4) The spatiotemporal differentiation of green utilization efficiency of cultivated land in the stone desertification area in Guangxi was jointly driven by natural geographic factors and socio-economic factors. However, the interaction between moderate scale operation and other production factors could better promote cost-effective land use. In the single-factor detection, ‘per capita cultivated land scale of agricultural practitioners’ had always been the most influential factor. In the interaction factor detection, all influential interaction factors included the ‘per capita cultivated land scale of agricultural practitioners’ factor. [Conclusion] The green utilization efficiency of cultivated land in the stone desertification area in Guangxi had increased slightly year by year and had reached the effective level as a whole. Moreover, its spatial distribution had a significant positive spatial correlation and maintained the spatial differentiation characteristics of high level in the south and low level in the north due to the influence of natural geographic factors and socioeconomics factors.

Keywords: stone desertification area in Guangxi; green utilization efficiency of cultivated land; Super-SBM model; spatial autocorrelation; geographical detector

耕地是保障国家粮食安全的基础。鉴于人多地少的基本国情,中国耕地利用管理长期以保障农产品数量供给为导向,粮食产量连年增产,但同时也造成了农药化肥过量使用、耕地生态系统退化、温室气体排放量等问题^[1]。中国是全球农业碳排放第一大国,其中基于耕地利用的种植业碳排放占中国农业碳排放的 45.87%^[2]。2022 年,农业农村部、国家发展改革委联合印发《农业农村减排固碳实施方案》,将“种植业节能减排”“农田固碳扩容”等作为重点任务进行部署。耕地作为农业生产的基本要素,不仅是碳排放主体,更是固碳的重要单元,提高耕地利用效率、实现耕地利用的低碳化和绿色化,对于实现“碳达峰碳中和”目标、促进农业可持续发展等均具有重要意义。

受人口基数大、人均耕地少的双重约束,如何提高耕地利用效率、端稳 14 亿人饭碗,长期以来受到学者们的广泛关注。近年来,随着中国生态文明建设持续推进,耕地保护由单一的数量保护转向“数量、质量、生态”三位一体保护,学者们开始将绿色生态理念融入到耕地利用效率的概念中,并围绕耕地绿色利用效率展开了一系列研究,主要包括以下 5 个方面:(1) 概念内涵辨析。耕地利用效率常用以分析在维持当前投

入水平下耕地产出可增加的能力或维持当前产出水平下资源投入可减少的能力,耕地绿色利用效率则是耕地利用过程中以最低成本产生最显著的经济和生态效应^[3-4];(2) 测算体系构建。通常基于“投入、期望产出、非期望产出”3 个维度构建测算指标体系,投入指标包括化肥、农药、农膜等,期望产出指标包括粮食产量、农业总产值等,非期望产出指标包括农业面源污染排放量等^[5-6];(3) 测算方法探索。主要聚焦在随机前沿函数、超效率 SBM 模型和 DEA-Malmquist 模型等^[7-9];(4) 影响因素研究。多采用地理加权回归模型、Tobit 模型等,认为耕地绿色利用效率受社会经济和自然地理多重因素影响^[10-12];(5) 时空演变分析。研究尺度以省域、市域和城市群等各类大尺度的空间单元为主,各区域间的耕地绿色利用效率升降不一,存在空间非均衡性^[13-14]。

已有研究成果为提升耕地绿色利用效率提供了扎实的理论基础,但仍有以下 4 个方面值得深化:(1) 指标体系方面,多采用单一的农业污染物作为非期望产出,较少考虑耕地利用的碳排放和碳汇功能,难以体现日益复杂的农业污染现象;(2) 研究尺度方面,以宏观的省域、市域等为主,较少涉及微观尺度的

县域,不利于耕地利用的精细化管理。且鲜有关关注特殊生态脆弱区——广西石漠化片区,该片区生态区位重要,是红水河、左右江以及漓江等众多河流的发源地,但生态系统脆弱、水土流失严重、社会经济发展落后。同时由于农业人口占比高、人均耕地占有量小,陡坡耕种、高强度利用、化肥过度使用等不合理的耕地利用行为时有发生,加剧了该片区耕地质量退化。此外,石漠化片区亦是陆地生态系统碳循环的薄弱部分。该片区耕地绿色利用效率的提高,不仅关系到耕地生态保护、陆地生态系统碳循环改善,更关系到脱贫攻坚成果的巩固拓展;(3) 影响因素方面,侧重于单一层面的自然环境因子或社会经济因子,未能将两者同时纳入分析框架,且较少考虑影响因子的时空特征,不利于准确剖析耕地绿色利用效率时空分异的深层次原因;(4) 研究内容方面,鲜有关关注耕地利用绿色效率的空间相关性,忽略了耕地利用的外部性,不利于加强区域合作。

鉴于此,本文将从以下4个方面进行深化和拓展,这也是本文可能存在的创新点和边际贡献:(1) 测度指标体系构建上,基于“碳达峰碳中和”目标背景,将耕地碳汇量、碳排放分别作为期望产出和非期望产出;(2) 研究区域上,以县域作为研究尺度,聚焦当前研究中较少关注的特殊生态功能区、环境脆弱区、碳循环薄弱区——广西石漠化片区,并紧扣“双碳”目标提出具有针对性和操作性的政策建议;(3) 驱动因子的探索方法上,将自然环境因子和社会经济因子同时纳入分析框架,利用地理探测器分析单因子以及交互因子对耕地绿色利用效率的空间分异驱动作用;(4) 研究内容上,利用全局自相关和局部自相关分析耕地利用绿色效率的空间相关性和区域集聚特征。以期提升广西石漠化片区耕地绿色利用效率、助力石漠化防治、加强生态文明建设、巩固拓展脱贫攻坚成果、推进乡村振兴等提供指引和理论依据。同时,在理论层面进一步扩展耕地绿色利用效率研究边界、丰富研究内涵。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

广西石漠化片区位于桂西北、桂西南地区,东经 $104^{\circ}29'—110^{\circ}54'$,北纬 $21^{\circ}51'—26^{\circ}16'$,包括隆安县、马山县等35个县(区),总面积 10.02万 km^2 ,占广西总面积的42.2%。地势西北高、东南低,平均海拔 $1\,048\text{ m}$,地形以山地丘陵为主,喀斯特地貌发育典型。气候为亚热带湿润季风气候,年均气温 $21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $1\,250—2\,000\text{ mm}$ 。该片区生态区位和地理位置特殊,是珠江、湘江、漓江等水系主要发源

地,属重点生态功能区,西南部与越南接壤,陆地边境线长 795.5 km ,占广西陆地边境线的78%,少数民族人口占片区人口总数的81.62%。该片区社会经济发展落后,脱贫攻坚时期有25个国家扶贫开发重点县,其余均为自治区扶贫开发重点县,占广西贫困县的64.8%。生态环境脆弱,耕地贫瘠,人口密集,2021年总人口 $1\,020\text{ 万人}$,人地矛盾突出,坡耕地面积 202.82 万 hm^2 ,过度开垦等不合理的人类活动对片区生态系统造成巨大破坏,导致片区水土流失严重、石漠化问题严峻。根据岩溶地区第4次石漠化调查结果显示,广西石漠化面积达 105 万 hm^2 ,其中65.7%的石漠化面积集中在片区内的百色、河池两市。耕地利用强度大但效率低,2021年片区农作物播种面积 155.53 万 hm^2 ,占广西农作物播种面积的25.18%,粮食总产量 296.27 万 t ,占广西粮食总产量的21.37%,其耕地利用面临减污降碳和水土保持等多重任务。

因此,探究该片区耕地利用绿色效率的时空演变特征及其空间分异驱动因子,对于促进片区人地系统协调、助力石漠化防治、加强生态文明建设、巩固拓展脱贫攻坚成果、推进乡村振兴、稳固边疆安宁、实现各民族共同繁荣等,均具有十分重要和特殊的意义。

1.2 数据来源

行政区划界线来源于《滇桂黔石漠化片区区域发展与脱贫攻坚广西实施规划(2016—2020)》(桂开办[2018]13号),高程数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.scloud.cn>),坡度数据利用ArcMap中的Slope工具对高程数据进行处理而得。选取样本数据的时间跨度为2009—2021年,为保证研究数据的权威性和准确性,城镇化率、粮食总产量等基础的社会经济数据均来源于各市县统计年鉴,个别缺失值采用趋势外推法补齐。

2 研究方法

2.1 耕地绿色利用效率数值测算

结合已有文献^[3-4],本文将耕地绿色利用效率界定为“在耕地利用过程中,以绿色低碳理念为指引、传统投入要素为基础和新型投入要素为支撑,以最低成本产生最大化的社会、经济、生态效益期望产出和最小化的环境非期望产出”,在此基础上借鉴已有成果^[5-9],基于“投入-产出”视角构建广西石漠化片区耕地绿色利用效率评价指标体系。其中,投入指标包括土地、劳动力、机械等要素投入,分别用农作物总播种面积、种植业从业人员、农业机械总动力等指标表征;耕地不仅是碳排放的来源之一,而且具有强大的碳汇能力^[15],因此产出指标中,期望产出包括社会产出、经济产出、

生态产出,分别用粮食总产量、农业总产值、农业碳汇量等指标表征,非期望产出包括农业污染、碳排放,分别用农业面源污染排放和耕地碳排放量等指标表征。具体指标设置及数据来源详见表 1。

表 1 耕地绿色利用效率投入产出指标体系

Table 1 Input-output indicator system for green utilization efficiency of cultivated land

一级指标	二级指标	变量说明	数据获取方式	单位
投入	土地	农作物总播种面积	统计年鉴	万 hm ²
	灌溉	有效灌溉面积		万 hm ²
	劳动力	种植业从业人员		万人
	机械	农业机械总动力		万 kW
	农药	农药使用量		万 t
	化肥	农用化肥施用量		万 t
	农膜	农用塑料薄膜使用量		万 t
期望产出	社会产出	粮食总产量	统计年鉴	万 t
	经济产出	农业总产值		亿元
	生态产出	耕地碳汇量		万 t
非期望产出	碳排放	耕地碳排放	参照移明昊等 ^[17] 的成果计算	万 t
	农业污染	农业面源污染	参照罗家祺等 ^[18] 的成果计算	万 t

基于耕地绿色利用效率投入产出指标体系,采用 Super-SBM 模型测算广西石漠化片区耕地绿色利用效率,与传统的 DEA 模型相比,该模型考虑了要素的“松弛”影响,能够有效解决忽略非期望产出而导致耕地绿色利用效率评价结果偏差的问题,并且能够有效对决策单元进行排序和区分,计算公式如下^[19]:

$$\min \theta = \frac{\frac{1}{m} \sum_{z=1}^m \bar{x}_{zk}}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \bar{y}_{rk}^d + \sum_{q=1}^{s_2} \bar{y}_{qk}^b \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n w_j x_{zj} & z=1, 2, \dots, m \\ \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n w_j y_{rj}^d & r=1, 2, \dots, s_1 \\ \bar{y}^b \geq \sum_{j=1, \neq k}^n w_j y_{vj}^b & v=1, 2, \dots, s_2 \\ \bar{x} \geq x_k, \bar{y}^d \leq y_k^d, \bar{y}^b \geq y_k^b, \theta_j \geq 0 & j=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

式中:假设有 n 个由 m 个投入、 s_1 个期望产出、 s_2 个非期望产出构成的决策单元。 θ 为各县耕地绿色利用效率; n 为决策单元数; \bar{x} 、 \bar{y}^d 、 \bar{y}^b 分别为投入、期望产出与非期望产出的松弛量; x_{zk} 、 y_{rk}^d 、 y_{qk}^b 分别为经松弛量修正的第 k 个决策单元中最优的 z 要素投入值、 r 要素期望产出值、 v 要素非期望产出值; x_{zj} 、 y_{rj}^d 、 y_{vj}^b 分别为第 j 个决策单元的 z 要素投入值、 r 要素期望产出值、 v 要素非期望产出值; w 为权重系数。

2.2 耕地绿色利用效率趋势分析

采用一元线性回归分析法,计算广西石漠化片区 2009—2021 年耕地绿色利用效率的变化斜率,分析其长时间序列变化趋势,计算公式如下^[20]:

$$\beta_{\text{slope}} = \frac{T \times \sum_{i=1}^T (i \times G_T) - \sum_{i=1}^T i \sum_{i=1}^T G_i}{T \times \sum_{i=1}^T i^2 - \left(\sum_{i=1}^T i \right)^2} \quad (3)$$

式中: T 为年分数; $i=1, 2, 3, \dots$; G_i 为某一像元第 i 年的耕地绿色利用效率; β_{slope} 为各像元耕地绿色利用效率的变化斜率,若 $\beta_{\text{slope}} > 0$,则耕地绿色利用效率呈上升趋势,反之则呈下降趋势。

2.3 耕地绿色利用效率空间相关分析

运用空间自相关中的全局自相关,探究广西石漠化片区耕地绿色利用效率在不同空间单元之间是否存在相互影响和依赖,全局自相关一般采用莫兰指数来表征,其公式为^[21]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k w_{ij}} \quad (4)$$

式中: k 为空间单元数量; x_i 和 x_j 分别为第 i, j 个空间单元的耕地绿色利用效率; \bar{x} 为其平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵; s^2 为样本方差; I 为全局莫兰指数,其取值范围为 $[-1, 1]$,若大于 0 表示空间正相关,若小于 0 表示空间负相关,若等于 0 表示属性数据在空间上随机分布,不具有空间自相关。但莫兰指数只能衡量耕地绿色利用效率在整体空间上的相关性,无法表示内部单元之间的空间相关性和空间集聚、离散特征。对此,本文进一步运用空间自相关中的局部自相关,分析广西石漠化片区各县份之间耕地绿色利用效率的空间相关性和空间特征,其公式为^[22]:

$$I_m = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^k w_{ij} (x_j - \bar{x})}{s^2} \quad (5)$$

式中: I_m 为局部莫兰指数,其余变量含义与公式(2)

相同。根据局部莫兰指数,可将广西石漠化片区各县份之间耕地绿色利用效率的空间集聚类型划分为以下 4 种类型:HH(High-High),LH(Low-High),LL(Low-Low)和 HL(High-Low)。

2.4 耕地绿色利用效率驱动因子探索

运用地理探测器中的单因子探测和交互因子探测,揭示广西石漠化片区耕地绿色利用效率时空演变背后的驱动力,其公式为^[23]:

$$q=1-\frac{1}{k s^2} \sum_{h=1}^L k_h s_h^2 \quad (6)$$

式中: q 为驱动因子对耕地绿色利用效率的影响力; L 为变量 Y 或因子 X 的分层(分类或分区); k, s^2 分别为样本量和方差; k_h 和 s_h^2 分别为 h 区域的样本量

和离散方差。 q 的取值范围为 $[0,1]$, q 值越大说明驱动因子的影响力越强。耕地的利用生产同时受到自然地理条件和社会经济条件的制约和影响,自然地理条件是耕地利用的先天基础,从根本上影响耕地利用模式及资源供给能力,社会经济条件是耕地利用的重要后天因素,强烈影响着耕地利用的结构方式、技术水平以及要素投入等^[24-25]。本文借鉴相关学者研究成果^[7-11],并综合考虑研究区域特点以及指标数据的可获取性等,将城镇化率、人均生产总值、农林水事务支出等社会经济因子以及坡度、气温等自然地理因子,列为广西石漠化片区耕地绿色利用效率空间分异的待检验驱动因子(表 2)。

表 2 广西石漠化片区耕地绿色利用效率空间分异待检验驱动因子

Table 2 Spatial differentiation of green utilization efficiency of cultivated land in the rocky desertification area of Guangxi and the driving factors to be tested

驱动因子类型	因子表征	驱动因子名称	数据获取方式	单位
社会经济因子	城镇化水平	城镇化率(cz)	统计年鉴	%
	经济发展水平	人均生产总值(rs)		元
	财政投入水平	农林水事务支出(nz)		亿元
	农业技术水平	单位耕地面积农业机械总动力(nj)		kW/hm ²
	设施完善水平	有效灌溉率(gg)		%
	耕地资源禀赋	种植业从业人员人均耕地规模(ng)		人
自然地理因子	气温状况	年均气温(qw)	统计年鉴	℃
	降雨状况	年降雨量(jy)	ArcMap Slope 工具	mm
	海拔	高程(gc)		m
	坡度	坡度(pd)	ArcMap Aspect 工具	(°)

3 结果与分析

3.1 广西石漠化片区耕地绿色利用效率时空演变特征分析

从时间演变规律上看,由图 1 可知,2009—2021 年广西石漠化片区耕地绿色利用效率均值呈稳步上升趋势,由 2009 年的 0.88 上升至 2021 年的 1.04,变化斜率为 0.05,增幅仅 18.18%,但效率值迈入有效水平。表明广西石漠化片区耕地投入要素利用水平逐年提升,耕地碳排放和面源污染负效应得到初步控制,提升了耕地总体绿色利用效率水平。分阶段分析:2009—2017 年,广西石漠化片区耕地绿色利用效率均值变化率较高、提升幅度较快。该阶段,针对石漠化片区耕地利用问题,广西在石漠化地区实施了较为密集的土地整理和水土保持工程,包括大石山区土地整理项目、桂西五县土地整治重大工程、桂中农村土地整治重大工程、小型病险水库除险加固工程、石山地区地头水柜集雨灌溉工程等一系列工程,水土保持效果显著,石漠化治理成效明显^[26-27],农田水利设施和交通设施持续完善,片区耕地有效灌溉率由 2009 年的 30.41%提升

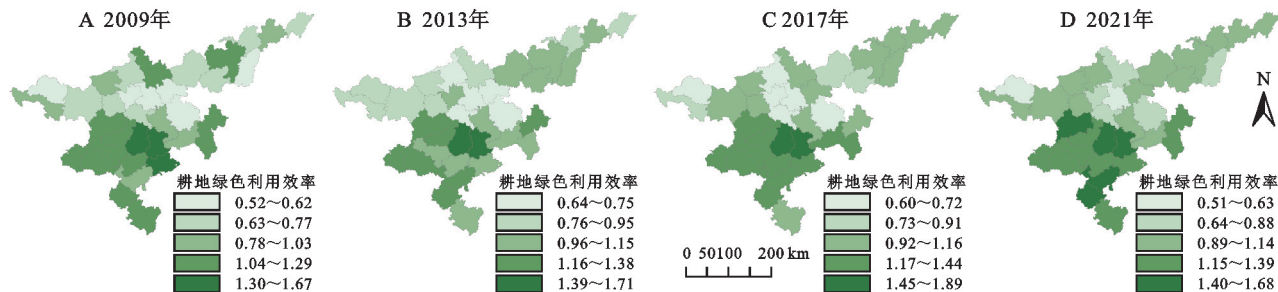
至 2017 年的 36.69%,同时,大力推广农业机械化,全面实施“千乡万村现代农机装备推进工程”“五十百万亿农机化推进工程”等,农业机械化水平持续提升,片区农业机械总动力由 2009 年的 699 万 kW 提高至 2017 年的 983 万 kW,粮食总产量由 301.52 万 t 增加至 337.42 万 t,耕地利用效率加快提升;2017—2021 年,较上一阶段,广西在石漠化地区实施的土地整理和水土保持工程有所减少,开始有重点地实施兴边富民土地整治重大工程、耕地提质改造(旱改水)工程,同时推进实施化肥使用量零增长行动,2021 年农用化肥施用量 52.26 万 t,较 2009 年减少了 8.13 万 t,减少率为 13.46%,因此该阶段耕地利用效率仍呈提升态势但趋势有所放缓。值得注意的是,目前广西石漠化片区耕地绿色利用效率仅比有效水平高 0.04,仍存在较大提升空间,且虽然农用化肥施用量得到有效控制,但农用塑料薄膜使用量、农药使用量仍呈增加态势,2021 年使用量分别达 10 444 t 和 10 178 t,较 2009 年分别提升 67.26%和 7.57%。

从空间演变规律上看,由图 2 可知,2009—2021 年期间,广西石漠化片区耕地绿色利用效率空间分异相

对稳定,总体维持南高北低的空间分异特征,但南北差异呈缩小态势。可能的原因包括以下几方面:一是广西石漠化片区的南部主要为百色市右江区、田阳区、田东县、平果市以及崇左市龙州县、大新县等,位于左右江河谷平原地带,地形较为平坦开阔,土壤相对肥沃,水热条件优越,耕地连片集中,农业种植自然资源环境良好,耕地产出效率较高。广西石漠化片区的北部主要为百色市隆林县、乐业县、西林县以及河池市天峨县、南丹县等,地形地貌以喀斯特山地丘陵为主,土层浅薄,海拔和纬度较高,水热条件较差,耕地破碎分散,农业种植自然资源环境较差,耕地产出效益偏低;二是广西石漠化片区的南部县份,由于地形地貌以及水热条件优势,农业基础较好,交通较为发达便利,且靠近广西首府南宁市,社会经济发展水平较高,耕地利用的机械化、集约化水平较高,技术、机械等现代农业生产要素投入的持续增加,一方面减少了农药、化肥等传统生产要素的投入,另一方面,提高了耕地的利用效率。广西石漠化片区的北部县份,社会经济发展较为落后,农田水利和道路等基础设施建设较为滞后,耕地利用较为粗放,导致耕地绿色利用效率偏低。但随着广西社会经济的全面发展,广西石漠化片区北部县份也得到了较快发展,农田水利设施日益完善,并且通过土地流转、耕地提质改造(旱改水)等土地综合整治,耕地的利用条件逐渐改善,耕地绿色利用效率逐年提升,与南部县份耕地绿色利用效率的差异也趋于缩小。

3.2 广西石漠化片区耕地绿色利用效率空间相关特征分析

基于公式(4),借助 GeoDa 软件计算出广西石漠



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图无修改,下图同。

图 2 2009—2021 年年广西石漠化片区耕地绿色利用效率空间分布变化

Fig. 2 Spatial distribution changes of green utilization efficiency of cultivated land in rocky desertification areas of Guangxi from 2009 to 2021

为进一步分析广西石漠化片区耕地绿色利用效率的局域空间集聚、离散特征,基于公式(5),借助 GeoDa 软件将 2009 年、2013 年、2017 年、2021 年广西石漠化片区耕地绿色利用效率的局域空间格局特征进行可视化呈现。由图 3 可知,研究期内,广西石漠化片区耕地绿色利用效率的局域空间格局特征主

化片区耕地绿色利用效率全局自相关 Moran's I 指数。由表 3 可得,研究期内,片区耕地绿色利用效率空间分布的全局自相关 Moran's I 指数均大于 0.5,并且 Z -Value > 1.96, p -Value < 0.01,各个年份均通过 1% 显著性检验,且 Moran's I 指数整体呈上升趋势,由 2009 年的 0.56 波动上升至 2021 年的 0.65,表明广西石漠化片区耕地绿色利用效率在空间上存在较为显著的正相关性,且相关性呈强化趋势。可能的原因:一是耕地利用存在外部性,当某一区域农业技术水平提高、水利设施改善、耕地污染减少时,会产生示范效应和连锁反应,带动周边区域耕地投入产出的改善;二是耕地具体利用政策的制定和实施,主要以市为单位,例如《化肥农药减量增效工作方案》等均由各市自主制定并分解到所辖的各个县具体落实,各市下辖县的耕地绿色利用效率可能存在“一高俱高、一低俱低”的状况,从而造成空间上的相关性。

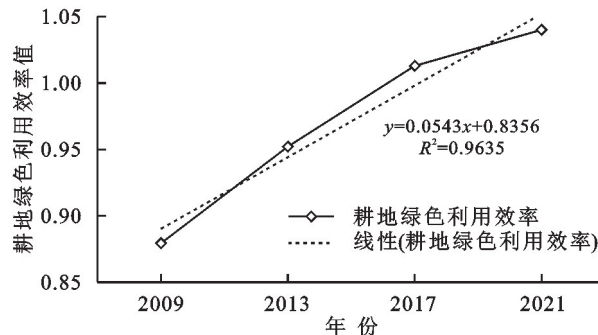


图 1 2009—2021 年广西石漠化片区耕地绿色利用效率均值年际变化

Fig. 1 Interannual variation of the average green utilization efficiency of cultivated land in the rocky desertification area of Guangxi from 2009 to 2021

要分为高高集聚型(HH)和低低集聚型(LL)两大类,呈现“中心高,四周高”以及“中心低,四周低”的空间关联集聚状态。从空间演变上看:研究期内,HH 型和 LL 型的空间位置变化较小,HH 型主要集中在片区的南部,行政区域主要为田阳区、田东县、平果市和隆安县。上述县份均位于右江河谷平原,水热条件优

越,地形平坦开阔,耕地集中连片,耕地产出效率较高,且田阳区、田东县、隆安县先后入选“热带果树(香蕉芒果)化肥农药减量增效示范”项目、广西化肥减量增效示范项目试点单位等,大力推广精准施肥、增施机肥、化肥减量和秸秆还田等绿色生产技术,耕地绿色利用效率持续提升;LL型主要集中在片区的北部,行政区域主要为凤山县、东兰县和金城江区,上述县份均位于云贵高原向广西山地丘陵过渡地带,海拔较高且喀斯特地貌广布,水热条件一般,耕地细碎分散,土层较为浅薄,耕地产出效率较低,加之人口密集,耕地利用较为粗放,农药、化肥等传统农业生产要素投入较高,如东兰县农用塑料薄膜使用量多年居高不下,2021年达749 t,高出广西石漠化片区平均水平151%。值得警惕的是,广西石漠化片区耕地绿

色利用效率局部空间 HH 型的单元较少且呈减少趋势,耕地绿色利用效率高值区的集聚特征并不明显,县域之间耕地绿色利用效率提升的协同机制有待进一步强化。

表3 2009—2021年广西石漠化片区耕地绿色利用效率 Moran's *I* 指数

Table 3 Moran's *I* index of green utilization efficiency of cultivated land in rocky desertification areas of Guangxi from 2009 to 2021

年份	Moran's <i>I</i> 指数	<i>p</i> -Value	Z-Value
2009	0.56	0.001	4.25
2013	0.51	0.001	3.92
2017	0.66	0.001	5.01
2021	0.65	0.001	4.89

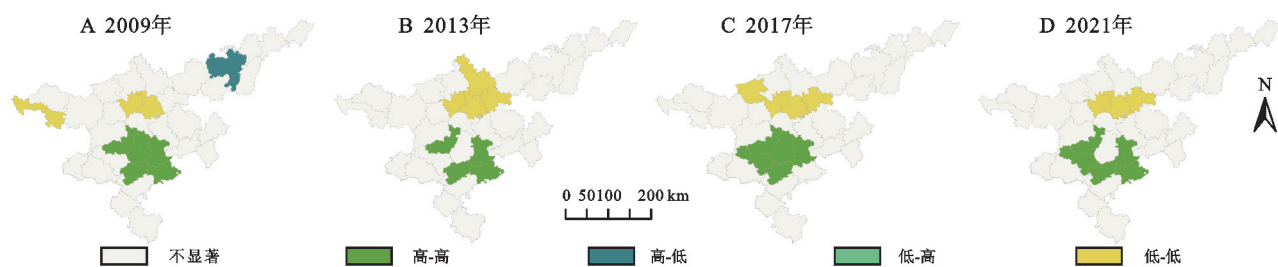


图3 2009—2021年广西石漠化片区耕地绿色利用效率局域空间相关特征

Fig. 3 Local spatial correlation characteristics of green utilization efficiency of cultivated land in rocky desertification areas of Guangxi from 2009 to 2021

3.3 广西石漠化片区耕地绿色利用效率驱动因子分析

由表4看出,广西石漠化片区耕地绿色利用效率的空间分布差异受自然地理要素和社会经济要素共同作用。从单因子看,研究期内,历年影响力排行前5的因子略有不同,但“种植业从业人员人均耕地规模(ng)”始终是影响力最强的因子, q 值始终维持在0.50以上,其次为“单位耕地面积农业机械总动力(nj)”,且 q 值呈稳步提升趋势,由2009年0.36逐年提升至2021年的0.67,表明规模化、机械化经营有利于提高耕地绿色利用效率。广西石漠化片区种植业从业人员人均耕地规模大的地区,主要为右江区、龙州县等耕地连片规模集中、农业人口大量转移的河谷平原县份。种植业从业人员人均耕地规模越大,表明耕地资源数量越多、耕地规模化经营的程度越高。耕地适度规模经营为现代农业科技的应用、化肥农药投入的减少、生产组织化的提升等奠定了基础,有利于推动农业现代化、促进耕地利用节本增效、减少农业面源污染、降低耕地碳排放等,进而提升耕地绿色利用效率^[28]。此外,单位耕地面积农业机械总动力越大,表明耕地农业机械化程度越高。农业机械化水平在一定程度上反映了区域农业创新水平,农业机械化的提升有利于降低劳动力成本和物质投入成本、提高耕地生产效率,进而提高耕地绿色利用效率^[29]。值

得注意的是,“单位耕地面积农业机械总动力(nj)”对于广西石漠化片区耕地绿色利用效率的影响逐年提升,表明农业现代科技在提高耕地利用效率、降低耕地污染排放等方面的作用日益凸显。

从交互探测的结果来看,自然地理要素和社会经济要素两两交互后对耕地绿色利用效率空间分异的影响力表现为双因子增强型,交互后驱动因子的 q 值均明显大于单因子,表明研究区域耕地绿色利用效率分异并非由单一因子决定,而是不同层面驱动因子交互作用的结果。历年影响力排行前5的交互因子略有不同,2009年影响力最大的交互因子为“种植业从业人员人均耕地规模(ng) \cap 有效灌溉率(gg)”,表明这一时期,经营规模程度、农业设施完善度对耕地绿色利用效率具有较大影响,但2013—2021年,交互因子“种植业从业人员人均耕地规模(ng) \cap 农林水事务支出(nz)”的影响因子逐年提升,且始终位列影响力榜首,农林水事务支出是乡村建设中的农林水基本支出和农业综合开发支出,包括耕地综合整治、农业设施建设、农业科技服务等。耕地绿色利用效率的提升,需要加大农业各方面的投入,同时,耕地规模经营化程度越高的地区,农业投入的成效产出也会越高。此外,“种植业从业人员人均耕地规模(ng)”与“单位

耕地面积农业机械总动力(nj)”“坡度(pd)”的交互因子,始终是影响力前 5 的交互因子,表明在平坦的耕地上进行规模化、经营化经营,有利于提升广西石漠化片区耕地绿色利用效率。值得注意的是,所有具备

较强影响力的交互因子中均存在“种植业从业人员人均耕地规模(ng)”驱动因子,再次表明耕地适度规模经营和其他生产要素的交互,能够更好地推动耕地利用节本增效、提升耕地绿色利用效率。

表 4 2009—2021 年广西石漠化片区耕地绿色利用效率主要驱动因子

Table 4 Main driving factors for green utilization efficiency of cultivated land in rocky desertification areas of Guangxi from 2009 to 2021

2009 年				2013 年				2017 年				2021 年			
单因子	q 值	交互因子	q 值	单因子	q 值	交互因子	q 值	单因子	q 值	交互因子	q 值	单因子	q 值	交互因子	q 值
ng	0.61	ng∩gg	0.85	ng	0.57	ng∩nz	0.87	ng	0.52	ng∩nz	0.94	ng	0.71	ng∩nz	0.95
nj	0.36	ng∩qw	0.83	nj	0.45	ng∩nj	0.82	nj	0.49	ng∩pd	0.93	nj	0.67	ng∩pd	0.89
qw	0.38	ng∩pd	0.82	qw	0.34	ng∩cz	0.82	jy	0.35	ng∩jy	0.84	gg	0.47	ng∩nj	0.86
gg	0.26	ng∩cz	0.79	pd	0.34	ng∩rs	0.80	nz	0.34	ng∩nj	0.81	qw	0.39	ng∩gg	0.84
cz	0.23	ng∩nj	0.78	rs	0.22	ng∩pd	0.79	gg	0.32	ng∩cz	0.81	pd	0.32	ng∩jy	0.84

注:受篇幅所限,本文仅列出影响力前 5 的单因子和交互因子。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 广西石漠化片区耕地碳排放和面源污染得到初步控制,耕地绿色利用效率均值由 2009 年的 0.88 稳步上升至 2021 年的 1.04,增幅较小但效率值迈入有效水平;(2) 广西石漠化片区耕地绿色利用效率空间分异相对稳定,总体维持南高北低的空间特征,但南北差异呈缩小态势;(3) 广西石漠化片区耕地绿色利用效率具有显著的正空间相关性,且呈强化趋势。局域空间格局以高高集聚型(HH)和低低集聚型(LL)为主,高值区集聚于南部的河谷平原,低值区连片于北部的高原—山地过渡带;(4) 广西石漠化片区耕地绿色利用效率的时空分异受自然地理要素和社会经济要素共同驱动,但适度规模经营与其他生产要素的交互作用,能够更好地推动耕地利用节本增效。单因子探测中,“种植业从业人员人均耕地规模”始终是影响力最强的单因子,同时交互因子探测中,所有具备较强影响力的交互因子中均包含“种植业从业人员人均耕地规模”因子。

4.2 建议

基于本文的研究结论以及所发现的问题,可得出如下政策启示:(1) 优化生产要素投入结构,减少耕地利用碳排放。加大农林水事务财政支出,探索实施“广西石漠化片区耕地利用节能减排”专项行动,提高机械、科技、管理、种植技术等现代生产要素在农业生产投入中的比重,积极推广测土配方施肥、秸秆还田、农膜回收利用等,并进一步扩大化肥农药减量增效示范项目,减少耕地利用碳排放;(2) 推动适度规模经营,显化耕地利用碳减排效应。耕地经营规模的扩大能够抑制耕地利用碳排放强度。建议将“实现耕

地连片规模经营”纳入广西当前耕地提质改造(旱改水)工程的考核验收指标,并积极总结推广“小田并大田”“连片耕种”“全域土地流转”等经验,充分利用“解决承包地细碎化试点工作”的契机,因地制宜探索承包农户按户连片经营的自种区、新型农业经营主体集中连片经营的租种区等方式,促进耕地规模经营;(3) 构建耕地保护联动机制,推动耕地利用协同减排。构建广西石漠化片区耕地保护联席制度,加强耕地固碳减排、绿色利用等方面的沟通和交流,探索片区跨流域耕地生态补偿机制、共建跨市耕地绿色利用节能减排合作示范区等,共同耕地绿色利用效率提升;(4) 加大重点区域保护力度,加强薄弱区域碳排放监测。广西石漠化片区北部耕地利用碳排放强度较高,是耕地绿色利用效率的薄弱区域。可适当提高耕地提质改造(旱改水)工程、全域土地整治项目以及化肥农药减量增效示范项目在该区域的比重,持续推动农田水利设施和交通设施的完善,改善耕地利用条件,并加强该区域耕地利用碳排放的动态监测,将该区域耕地利用节能减排纳入年度政府工作考评体系。

参考文献(References):

[1] 余威震,罗小锋.要素市场化对稻农测土配方施肥技术采纳行为的影响:基于资源禀赋异质性视角下的实证研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(6):1272-1281.
Yu W Z, Luo X F. Influence of factor marketization on rice farmers' adoption of soil testing formula fertilization technology: Empirical research based on perspective of resource endowment heterogeneity [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(6):1272-1281.

[2] 蔡景丽,顾佳艳,陈敏,等.2000—2020 年中国种植业碳排放驱动因素及预测分析[J].环境科学与技术,2023,46(2):159-167.

- Cai J L, Gu J Y, Chen M, et al. Drivers and prediction of carbon emissions in the China's planting industry from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,46(2):159-167.
- [3] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].*地理学报*,2022,77(3):534-546.
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis framework based on resource efficiency [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(3):534-546.
- [4] 柯楠,卢新海,匡兵,等.碳中和目标下中国耕地绿色低碳利用的区域差异与影响因素[J].*中国土地科学*,2021,35(8):67-76.
Ke N, Lu X H, Kuang B, et al. Regional differences and influencing factors of green and low-carbon utilization of cultivated land under the carbon neutrality target in China [J]. *China Land Science*, 2021,35(8):67-76.
- [5] 匡兵,范翔宇,卢新海.中国耕地利用绿色转型效率的时空分异特征及其影响因素[J].*农业工程学报*,2021,37(21):269-277.
Kuang B, Fan X Y, Lu X H. Spatial-temporal differentiation characteristics of the efficiency of green transformation of cultivated land use and its affecting factors in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021,37(21):269-277.
- [6] 张佳伊,张盼,鲁莎莎.喀斯特地区农村劳动力流失对耕地绿色利用的影响分析[J].*湖南农业大学学报:社会科学版*,2023,24(3):45-53.
Zhang J Y, Zhang P, Lu S S. Analysis of the impact of rural labor force loss on the green cultivated land utilization in the Karst areas of China[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Social Sciences*, 2023,24(3):45-53.
- [7] 杨斌,杨俊,王占岐,等.长江经济带耕地绿色低碳利用的时空格局及其成因分析[J].*中国土地科学*,2022,36(10):63-71.
Yang B, Yang J, Wang Z Q, et al. Spatial-temporal pattern and attribution of cultivated land green and low-carbon utilization in the Yangtze River economic belt[J]. *China Land Science*, 2022,36(10):63-71.
- [8] 卢新海,崔海莹,柯善淦,等.湖北省耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率的耦合协调及其驱动机制研究[J].*中国土地科学*,2022,36(8):75-84.
Lu X H, Cui H Y, Ke S G, et al. Coupling coordination and driving mechanism of green transition of farmland use and total factor productivity of grain in Hubei Province[J]. *China Land Science*, 2022,36(8):75-84.
- [9] 韦燕飞,祝文婷,周金凤,等.西江流域(广西段)耕地绿色利用效率的演变特征及驱动力分析[J].*国土资源科技管理*,2023,40(2):1-14.
Wei Y F, Zhu W T, Zhou J F, et al. Evolution characteristics and driving forces analysis of cultivated land green utilization efficiency in Xijiang River Basin(Guangxi section)[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2023,40(2):1-14.
- [10] 柯善淦,崔海莹,卢新海,等.耕地利用绿色转型的时空格局及其驱动机制研究:以湖北省为例[J].*中国土地科学*,2021,35(12):64-74.
Ke S G, Cui H Y, Lu X H, et al. Research on the spatial-temporal pattern and mechanisms of green transition of farmland use: A case of Hubei Province[J]. *China Land Science*, 2021,35(12):64-74.
- [11] 邢晓男.中国耕地绿色利用效率测度及影响因素研究[D].长春:吉林大学,2022.
Xing X N. Research on the Measurement and Influencing Factors of Green Use Efficiency of Cultivated Land in China[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [12] 范正根,邓超,范雨琪,等.“双碳”目标视角下耕地利用生态效率测度及其时空特征:以长江中下游粮食主产区为例[J].*生态经济*,2023,39(11):119-127.
Fan Z G, Deng C, Fan Y Q, et al. Measurement of eco-efficiency for cultivated land use and its spatial-temporal characteristics from the perspective of “double carbon” target: Taking the main grain producing areas in the mid and lower reaches of the Yangtze River as an example[J]. *Ecological Economy*, 2023,39(11):119-127.
- [13] 胡贤辉,蔺思琪,何庆,等.耕地细碎化、耕地经营规模对农户耕地利用生态效率的影响:以常德市为例[J].*中国土地科学*,2023,37(4):95-106.
Hu X H, Lin S Q, He Q, et al. Effects of cultivated land fragmentation and cultivated land operation scale on ecological efficiency of famers' cultivated land use: A case study of Changde City[J]. *China Land Science*, 2023,37(4):95-106.
- [14] 刘涛,尚晓菲,苏原原,等.“双碳”目标下黄河下游耕地绿色利用效率、收敛性与影响因素[J].*水土保持通报*,2023,43(1):291-299.
Liu T, Shang X F, Su Y Y, et al. Green utilization efficiency, convergence, and influencing factors of cultivated land in lower Yellow River under “Double Carbon” target[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):291-299.
- [15] 李强,高威,魏建飞,等.中国耕地利用净碳汇时空演进及综合分区[J].*农业工程学报*,2022,38(11):239-249.
Li Q, Gao W, Wei J F, et al. Spatiotemporal evolution and comprehensive zoning of net carbon sink in cultivated land use in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(11):239-249.
- [16] 许进龙,卢新海,黄天能,等.滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量时空演变及其驱动因子[J].*水土保持研究*,2023,30(6):406-414.

- Xu J L, Lu X H, Huang T N, et al. Temporal and spatial evolution of ecosystem carbon storage and its driving factors in the Yunnan-Guizhou-Guangxi rocky desertification area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(6):406-414.
- [17] 移明昊, 同庆武, 张定祥, 等. 吉林省耕地利用碳排放测度及其与粮食生产脱钩分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2023,44(4):45-56.
- Yi M H, Yan Q W, Zhang D X, et al. Measurement of carbon emission from cultivated land use and analysis of its decoupling from grain production in Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023,44(4):45-56.
- [18] 罗家祺, 金晓斌, 刘晶, 等. 2000—2020 年苏北地区农业生态效率变化及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2023,39(15):239-248.
- Luo J Q, Jin X B, Liu J, et al. Process and influencing factors of agricultural eco-efficiency in northern Jiangsu of China from 2000 to 2020[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023,39(15):239-248.
- [19] 乔保荣, 穆佳薇, 余国新. 农业生产性服务业对农业生态效率的空间效应研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2023,44(6):86-96.
- Qiao B R, Mu J W, Yu G X. Study on the spatial effect of agriculture productive services on agro-ecological efficiency[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023,44(6):86-96.
- [20] 王绍业, 倪用鑫, 彭华, 等. 近 20 年延河流域生长季产水系数时空变化特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2023,30(3):423-429.
- Wang S Y, Ni Y X, Peng H, et al. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of water yield coefficient in the growth season of Yanhe River Basin in the past 20 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(3):423-429.
- [21] 田云, 尹恣昊, 张惠杰. 我国农村能源碳排放时空格局、影响因素及空间溢出效应[J]. *中国农业科学*, 2023,56(13):2547-2562.
- Tian Y, Yi M H, Zhang H J. Spatial-temporal pattern, influencing factors and spatial spillover effect of rural energy carbon emissions in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023,56(13):2547-2562.
- [22] 李昱菡, 郑子成, 王永东, 等. 四川盆地丘陵区农业源甲烷排放时空变异特征及驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2022,29(5):178-184.
- Li Y H, Zheng Z C, Wang Y D, et al. Spatiotemporal variability of agricultural methane emissions in the hilly area of Sichuan Basin and its driving factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(5):178-184.
- [23] 崔晨曦, 孟凡浩, 罗敏, 等. 基于地理探测器的内蒙古耕地水资源短缺时空变化特征及驱动力分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2023,44(1):150-161.
- Cui C X, Meng F H, Luo M, et al. Spatio-temporal change characteristics and driving factors of cultivated land water shortage in inner Mongolia based on the geographic detector model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023,44(1):150-161.
- [24] 张英男, 龙花楼, 戈大专, 等. 黄淮海平原耕地功能演变的时空特征及其驱动机制[J]. *地理学报*, 2018,73(3):518-534.
- Zhang Y N, Long H L, Ge D Z, et al. Spatio-temporal characteristics and dynamic mechanism of farmland functions evolution in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(3):518-534.
- [25] 吴欣, 刘仕鑫, 赵立燕, 等. 黄河流域耕地利用效率评估及其提升路径研究[J]. *农业现代化研究*, 2022,43(4):702-714.
- Wu X, Liu S X, Zhao L Y, et al. Study on the improvement of farmland use efficiency in the Yellow River Basin from the perspective of high-quality development[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2022,43(4):702-714.
- [26] 黄天能, 许进龙, 唐红祥, 等. 基于 DEA 模型的广西石漠化治理效率评价[J]. *北部湾大学学报*, 2020,35(8):28-34.
- Huang T N, Xu J L, Tang H X, et al. Evaluation of Guangxi rocky desertification control efficiency based on DEA model[J]. *Journal of Beibu Gulf University*, 2020,35(8):28-34.
- [27] 谢凌凌, 许进龙, 臧俊梅, 等. 基于 Markov-FLUS 模型的广西土地利用变化模拟预测[J]. *水土保持研究*, 2022,29(2):249-254,264.
- Xie L L, Xu J L, Zang J M, et al. Simulation and prediction of land use change in Guangxi based on Markov-FLUS model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(2):249-254,264.
- [28] 祝伟, 王瑞梅. 城镇化对耕地利用强度的影响及中介效应分析[J]. *中国农业大学学报*, 2021,26(4):213-224.
- Zhu W, Wang R M. Effect of urbanization on agricultural land-use intensity and mediation analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021,26(4):213-224.
- [29] 贺青, 张俊飏, 张虎. 农业机械化对农业碳排放的影响: 来自粮食主产区的实证[J]. *统计与决策*, 2023,39(1):88-92.
- He Q, Zhang J B, Zhang H. The impact of agricultural mechanization on agricultural carbon emissions: An empirical study from major grain production regions[J]. *Statistics & Decision*, 2023,39(1):88-92.