2005—2020 年黑龙江省松嫩平原耕地低碳利用效率时空格局演变及影响因素

张 慧[1], 何正弘[1], 张力文[1], 魏婉桐[1], 王诗雨[2], 马全旭[3]

(1.东北农业大学 公共管理与法学院, 黑龙江 哈尔滨 150000; 2.黑龙江省国土空间规划研究院, 黑龙江 哈尔滨 150000; 3.山西农业大学 生命科学学院, 山西 太谷 030801)

摘　要: [目的] 探究黑龙江省松嫩平原地区耕地低碳利用效率时空演变规律及影响因素,为保障国家粮食安全和低碳减排,实现农业可持续发展提供科学依据。[方法] 本研究借助超效率 SBM 模型测度 2005—2020 年黑龙江省松嫩平原地区 33 个县(市)耕地低碳利用效率,利用空间自相关和核密度估计方法分析各县(市)耕地低碳利用效率的时空格局演变特征,进而采用地理加权回归模型探究其影响因素。[结果] ①研究期内黑龙江省松嫩平原地区耕地低碳利用效率呈"升—降—升"演变态势,均值为 0.80,未达到最有效生产的前沿; ②从空间维度看,耕地低碳利用效率存在显著的正向空间相关性,且局部呈较强的高低值集聚分布态势,热点多核极化现象显著,主要分布于区域北部和南部;从时间维度看,耕地低碳利用效率表现出不同程度的极化特征,且内部差异呈逐渐缩小的演变趋势; ③从影响因素看,人均播种面积、单位耕地面积化肥使用量、农村居民人均可支配收入和涉农支出对耕地低碳利用效率具有正向影响,复种指数、单位耕地面积机械使用量及城镇化率对效率呈负向影响,人均 GDP 对耕地低碳利用效率在不同年份影响程度和方向存在差异。[结论] 黑龙江省松嫩平原地区耕地低碳利用效率整体呈上升趋势,且区域间存在明显差异,未来应优化资源配置效率,建立区域协同机制,发挥热点区域示范作用,助推各区域耕地低碳利用效率的提升。

关键词: 耕地利用效率; 低碳; 时空演变; 松嫩平原

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2024)03-0000-00　　**中图分类号:** F301.24

文献参数: 张慧, 何正弘, 张力文, 等.2005—2020 年黑龙江省松嫩平原耕地低碳利用效率时空格局演变及影响因素[J].水土保持通报,2024,44(3):-. Zhang Hui, He Zhenghong, Zhang Liwen, et al. Spatio-temporal evolution pattern and influencing factors of low carbon utilization efficiency of cultivated land in Songnen Plain, Heilongjiang Province during 2005—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3):-.

Spatio-temporal Evolution Pattern and Influencing Factors of Low Carbon Utilization Efficiency of Cultivated Land in Songnen Plain, Heilongjiang Province During 2005—2020

Zhang Hui[1], He Zhenghong[1], Zhang Liwen[1], Wei Wantong[1], Wang Shiyu[2], Ma Quanxu[3]

(1.*School of Public Administration and Law*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin Heilongjiang* 150000, *China*; 2.*Heilongjiang Provincial Institute of Land and Space Planning*, *Harbin Heilongjiang* 150000, *China*; 3.*College of Life Sciences*, *Shanxi Agricultural University*, *Taigu Shanxi* 030801, *China*)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal evolution pattern and influencing factors of low-carbon utilization efficiency of cultivated land in the Songnen Plain region of Heilongjiang Province were determined in order to provide a scientific basis for ensuring national food security and low-carbon emission reduction, and to realize sustainable agricultural development. [Methods] This study used the super-efficiency SBM model to measure the low-carbon utilization efficiency of cultivated land in 33 counties (cities) in the Songnen Plain region of Heilongjiang Province from 2005 to 2020. Spatial autocorrelation and kernel density methods were used to

收稿日期: 2023-07-13　　**修回日期:** 2023-11-20

资助项目: 国家自然科学基金(41402297);黑龙江省博士后资助项目"黑龙江省松嫩平原土壤砷空间分异特征及驱动力分析"(LBH-Z12032)

第一作者: 张慧(1976—),女(汉族),山东省济宁市人,博士,副教授,主要从事土地利用与规划研究。Email:2003zhanghui@163.com。

通信作者: 何正弘(1995—),男(汉族),甘肃省定西市人,硕士,主要从事土地利用与规划研究。Email:1051675690@qq.com。

analyze the spatio-temporal evolution characteristics and pattern of low-carbon utilization efficiency of cultivated land in various counties (cities). A geographically weighted regression model was use to determine the influencing factors of low-carbon utilization. [Results] ① During the research period, the low-carbon utilization efficiency of cultivated land in the Songnen Plain region of Heilongjiang Province exhibited an increasing-decreasing-increasing pattern, with an average value of 0.80, which did not reach the value needed for the most effective production; ② There was a significant positive spatial correlation with regard to the low-carbon utilization efficiency of cultivated land, and there were strong clustering distribution trends of high and low values in some areas. Multi-core polarization of hot spots was significant, mainly located in the northern and southern regions. Over time, the low-carbon utilization efficiency of cultivated land exhibited varying degrees of polarization characteristics, and the internal differences showed a gradual narrowing evolution trend; ③ From the perspective of influencing factors, the per capita sown area, the amount of fertilizer used per unit of cultivated land, the per capita disposable income of rural residents, and agricultural expenses had positive impacts on the low-carbon utilization efficiency of cultivated land. The multiple cropping index, the amount of machinery used per unit of cultivated land, and the urbanization rate had negative impacts on low-carbon utilization efficiency. The per capita GDP had different degrees and directions of impacts on the low-carbon utilization efficiency of cultivated land in different years. [Conclusion] The overall low-carbon utilization efficiency of cultivated land in the Songnen Plain region of Heilongjiang Province is on the rise, and there are significant differences between regions. In the future, it will be necessary to optimize resource allocation efficiency and to establish regional synergy mechanisms to promote the improvement of low-carbon utilization efficiency of arable land in various regions. The demonstration role of hot areas should also be encouraged.

Keywords: cultivated land use efficiency; low carbon; spatio-temporal evolution; Songnen Plain

耕地作为人类赖以生存和发展的最基本要素,是保障国家粮食安全和经济发展的关键,尤其对仅用全球 8%的耕地养活世界总人口 18%的中国而言[1],有着不可替代的作用。然而,随着经济的快速发展和城镇化进程的加速推进,耕地“非农化”“非粮化”日趋加剧,大量的耕地资源被消耗和占用,导致耕地有效供给规模不断降低[2]。在有限的耕地资源条件下,高强度、粗放型的生产方式释放出大量的二氧化碳,一定程度制约着区域生态系统的协调发展[3]。据国际能源署报告,2019 年中国碳排放量达到 9.83×10^9 t,约占全球碳排放总量的 28.8%,其中约有 8.67%的温室气体来源于农业生产活动[4]。在这一严峻的现实背景下,如何统筹兼顾粮食安全和低碳减排,实现耕地资源低碳高效利用已成为亟待解决的重要课题。基于此,深入分析耕地低碳利用现状和区域差异,系统探究耕地低碳利用效率的时空演变规律及影响因素,对于把握区域耕地利用发展方向具有重要的指导意义。

长期以来,耕地利用效率研究备受国内外学者关注,且成果显著。国外相关研究主要集中于农业生产效率或土地利用效率,并在效率测算、影响因素识别等方面进行了大量探讨。如 Quaye 等[5]使用生物、物理分析方法,测算加纳农业生产系统的效率及其未来的可持续性。Nagabhusanam N 等[6]利用肯德尔秩相关系数法对内洛尔区农业土地利用效率进行评价,并对其空间格局的变化规律进行探究。Nsiah 等[7]发现对于非洲国家而言,农业援助、农业基础设施、卫生设施和善治服务是农业利用效率增长的主要驱动力。国内耕地利用效率研究起步较晚,相关研究主要侧重于耕地利用效率的内涵理论构建、测度方法选取、时空演变特征和影响因素分析等方面。在内涵理论方面,大量研究从乡村振兴、农户分化、环境约束等多重视角丰富耕地利用效率的内涵体系与理论基础[8-10]。在测度方法方面,学者们普遍认为耕地利用效率是土地、资本、劳动力等多要素投入与耕地资源产出之间的经济效益关系[11-12],而数据包络分析可以有效处理多投入多产出的问题[12],因此,通常选择 DEA 模型以及在其基础上衍生的 CCR 模型[13]、非径向模型[14]等方法对耕地利用效率进行定量分析。在影响因素方面,不同层面的因素均会对耕地利用效率产生影响,学者们对耕地影响因素的分析大体分为两类,一类是从资源禀赋[15]、自然条件[11]、农业生产条件[16]、经济发展水平[17]等宏观层面分析,另一类主要围绕耕地流转[18]、家庭特征[19]、农户行为[20]等微观层面展开研究。

综上所述,现有研究较为系统地探讨了耕地利用效率的相关内容,为本研究的顺利开展提供可资借鉴

的理论基础和技术支撑，但在研究视角和研究内容方面尚有待补充和完善。研究视角方面，以往研究大多关注农业产量和经济产值等期望产出，忽略了耕地的生态保障功能，未将碳排放等污染物作为非期望产出纳入评价指标体系，难以准确揭示“低碳”视角下耕地利用的真实绩效。在研究尺度方面，目前研究主要集中在全国、省域、市域等宏观尺度，对县级和特定区域的研究相对不足[8,21]。然而，县域作为中国更微观的评价单元，又是农业生产最为集聚的单位[22]，从县级尺度进行耕地低碳利用效率评价可以更准确地把握其特质[23]。此外，耕地利用效率在不同区域和不同时期存在客观的空间异质性，然而目前对耕地利用效率动态演进规律和空间分异特征的研究仍然缺乏时空二维视角的探究和剖析[24]。鉴于此，本文从“低碳”视角出发，将耕地利用碳排放作为非期望产出纳入效率评价指标体系，运用超效率 SBM 模型测度 2005—2020 年黑龙江省松嫩平原 33 个县（市）耕地低碳利用效率，利用空间自相关模型、核密度估计分析各县（市）时空分异特征和演化趋势，进而采用地理加权回归模型（GWR）探究耕地低碳利用效率的影响因素，以期为保障国家粮食安全和低碳减排、实现农业可持续发展提供科学依据。

1　研究区概况

松嫩平原作为中国东北平原的主要组成部分，横跨吉林省、黑龙江省和内蒙古自治区东部，本文以黑龙江省行政范围内的松嫩平原（以下简称松嫩平原）为研究区。松嫩平原作为中国重要的商品粮基地和新型农业现代化重点试验区，位于黑龙江省西北部，地理范围为东经 127°51′20″至 126°13′56″，北纬 122°24′38″至 128°31′50″。该地区属于典型的黑土区，地形主要以台地和平原为主。土地总面积约 1.57×10^4 km²，占黑龙江省土地总面积的 33.21%。其中，耕地面积 8.31×10^4 km²，约占松嫩平原土地总面积的 52.83%。凭借其优越的耕地资源条件，2020 年松嫩平原地区粮食总产量达到 4.04×10^7 t，占黑龙江省粮食产量的 53.58%。因此，研究松嫩平原耕地低碳利用效率的时空格局演变规律及影响因素，对于保障国家粮食安全和维护社会稳定具有十分重要意义。

2　研究方法及数据来源

2.1　研究方法

2.1.1　超效率 SBM 模型　超效率 SBM 模型是一种基于数据包络分析的效率评价方法，相较于一般的径向 DEA 模型（径向 BCC/CCR），该模型不仅可以避免径向和角度度量引起的偏差，而且能够有效解决多个决策单元效率值为 1 而无法进一步比较问题[24]。具体计算过程主要借助 MaxDEA 8.0 软件完成。其基本原理如下：

$$\theta^* = \min \frac{1+\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{S_i^-}{X_{io}}}{1-\frac{1}{q+h}\left(\sum_{r=1}^{q}\frac{S_r^+}{y_{ro}^g}+\sum_{k=1}^{h}\frac{S_k^-}{y_{ko}^b}\right)} \tag{1}$$

$$s.t.\begin{cases} x_{ik} \geqslant \sum_{j=1,j\neq o}^{n}\lambda_j x_{ij} - S_i^- & (i=1,2\cdots m) \\ y_{ro}^g \geqslant \sum_{j=1,j\neq o}^{n}\lambda_j\, y_{rj}^g + S_r^g & (r=1,2\cdots q) \\ y_{ko}^b \geqslant \sum_{j=1,j\neq o}^{n}\lambda_j y_{kj}^b - S_k^b & (k=1,2\cdots h) \\ 1-\frac{1}{q+h}\left(\sum_{r=1}^{q}\frac{S_r^+}{y_{ro}^s}+\sum_{k=1}^{h}\frac{S_k^-}{y_{ko}^b}\right)>0 \\ (S^- \geqslant 0,\ S^g \geqslant 0,\ S^b \geqslant 0) \end{cases} \tag{2}$$

式中：θ^* 为决策单元的效率值；m 为每个决策单元投入；q 和 h 分别为耕地利用过程中的期望产出和非期望产出；S^-，S^g 和 S^b 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量；λ 为权重向量；其中 $x\in R^m$，$y^g\in R^q$，$y^b\in R^h$，矩阵 $X=[x_1,\cdots,x_n]\in R^{m\times n}$，$Y^g=[y_1^g,\cdots,y_n^g]\in R^{q\times n}$，$Y^b=[y_1^b,\cdots,y_n^b]\in R^{h\times n}$；当 $\theta^*\geqslant1$，说明决策单元为 DEA 相对有效，达到了最有效的生产前沿；当 $\theta^*<1$，说明存在效率损失现象，决策单元未达到最有效的生产前沿。

2.1.2　空间自相关模型　空间自相关是研究评价单元的观测值与其相邻空间上的观测值是否在地理上存在相关性。全局空间自相关用于研究变量在整个区域内的相关性趋势，使用全局 Moran’s I 指数来表示。表达式为：

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sigma^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}} \tag{3}$$

式中：I 为全局莫兰指数；n 为评价单元的个数；x_i 和 x_j 为评价单元 i，j 的观测值；$\bar{x}$ 为观测值均值；σ 为样本方差；w_{ij} 为空间权重矩阵，为探究松嫩平原地区各县（市）耕地低碳利用效率在地理空间上的联系，基于地理邻接关系，借助 GeoDa 软件构建空间权重矩阵，空间相邻县（市）的权重为 1，不相邻的为 0。

全局空间自相关描述了整个研究区域属性分布的自相关程度，但无法有效表达区域内部不同单元与相邻区域空间上的自相关水平。因此，运用 ArcGIS 10.2 软件热点分析 G_i^* 指数，揭示局部空间中的异质性特征，识别冷热点区域，表达式为：

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} W_{ij} X_j}{\sum_{i=1}^{n} X_i} \tag{4}$$

式中：W_{ij} 为空间权重矩阵；X_i，X_j 为评价单元 i，j 的观测值。如果 G_i^* 指数显著为正值，说明 i 周围的值高于均值，为热点区域；反之，如果 G_i^* 指数显著为负值，则说明 i 周围的值低于均值，为冷点区域。

2.1.3 核密度估计 核密度估计(kernel density estimation，KDE)是一种基于数据点分布形式揭示数据潜在模式和趋势的非参数统计方法。借助 Eviews 8.0 软件绘制核密度曲线，刻画耕地低碳利用效率动态特征。其函数表达式为：

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^{N} K\left(\frac{x_i - \bar{x}}{h}\right) \tag{5}$$

式中：N 表示样本个数；h 表示带宽；$K\left(\frac{x_i - \bar{x}}{h}\right)$表示核函数；$x_i$ 表示样本观测值，$\bar{x}$ 表示样本均值。

2.1.4 地理加权回归模型(GWR) 地理加权回归模型是一种利用空间变化关系建模的局部线性回归方法，将空间结构嵌入到线性回归模型中以研究空间关系的非平稳性，另外该模型在研究区域的每个位置生成一个描述局部关系的回归模型，从而有效解释变量的局部空间关系和空间异质性。因此，本文运用 ArcGIS 10.2 软件中地理加权回归模型(GWR)来探究耕地低碳利用效率的影响因素，表达式为：

$$y_i = \beta_o(u_i, \nu_j) + \sum_{k=1}^{t} \beta_k(u_i, \nu_j)(x_{ik}) + \xi_i \tag{6}$$

式中：$\beta_o(u_i, v_j)$为常数项；$\beta_k(u_i, v_j)$为各县(市)的回归参数；t 为各县(市)的个数；x_{ik} 为影响各县(市)耕地低碳利用效率的变量；ξ_i 为随机误差项。

2.2 指标选取和数据来源

2.2.1 耕地低碳利用效率的测度指标 耕地低碳利用效率本质上是指以尽可能少的耕地生产要素投入和尽可能小的碳排放代价获得最大化的期望产出。因此，本文基于耕地低碳利用效率内涵并参考已有研究[23,25-28]，遵循系统性、科学性、数据可得性原则，构建耕地低碳利用效率评价指标体系(表 1)。相较于传统耕地利用效率测度指标体系，该体系在产出指标设定时，考虑将耕地利用过程中产生的碳排放作为非期望产出变量，从而使效率评价更为科学合理。在生产投入方面，本文选取土地、劳动力和物质资本反映耕地利用过程的投入情况，具体选取粮食播种面积、农业从业人员、化肥施用量、农药施用量、农膜施用量、农业机械总动力和有效灌溉面积为表征指标。在期望产出方面，本文从经济和社会两个维度选取指标反映耕地利用的期望产出情况，具体选取农业总产值和粮食总产量为表征指标。在非期望产出方面，本文选取耕地生产过程中产生的碳排放总量作为评价指标，其中碳排放主要来源于耕地利用过程中翻耕、施肥、喷洒农药、农膜使用、机械和灌溉。计算公式如下：

$$E = \sum E_i = \sum (T_i \times \delta_i) \tag{7}$$

式中：E 是耕地利用碳排放总量(t)；T_i 和 δ_i 分别是各碳源的原始量和碳排放系数。参考现有研究[29-32]，各碳源排放系数如下：翻耕 312.6 (kg/km^2)，化肥 0.895 6(kg/kg)，农药 4.934 1(kg/kg)，薄膜 5.18 (kg/kg)，机械 0.18(kg/kg)，灌溉 20.476(kg/hm^2)。

表 1 耕地低碳利用效率评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of low carbon use efficiency of cultivated land

变量类型	变量名称	变量说明
生产投入	土地投入	农作物播种面积/10^3 hm^2
	劳动力投入	农业从业人员/(万人)
	化肥投入	化肥折纯量/t
	农药投入	农药施用量/t
	农膜投入	农膜施用量/t
	机械投入	农业机械总动力/10^4 kW
	灌溉投入	有效灌溉面积/10^3 hm^2
期望产出	经济产出	农业总产值/(10^4 元)
	社会产出	粮食总产量/(万 t)
非期望产出	碳排放产出	碳排放总量/t

2.2.2 耕地低碳利用的影响因素指标 耕地低碳利用效率除了受土地、劳动力、资本等投入因素的影响以外，还受到自然环境条件、耕地资源禀赋、农业生产条件、经济发展水平和城镇发展水平等外生环境变量的影响[25,28,33-34]。根据松嫩平原耕地利用现状和数据可得性原则，选取如下指标(表 2)：①自然环境条件：复种指数[35]。复种指数反映耕地利用的方式和强度；②耕地资源禀赋：人均耕地面积。人均耕地面积反映耕地利用活动的规模和潜力；③农业生产条件：单位耕地面积化肥施用量和单位耕地面积机械总动力[36]。这两个指标是目前衡量耕地利用过程中资本投入的代表性指标，增加单位耕地面积的化肥施用量和机械使用量可以提高生产率，但也可能伴随着非期望产出的增加，导致耕地低碳利用效率的降低；④经济发展水平：农村居民人均可支配收入和人均 GDP。文高辉等[22]、臧俊梅等[34]指出农民经济水平的提升会增强其生产要素的投入能力，同时对耕地低碳利用和保护意愿也随之增强，最终反映在耕地生产和利用实践行为中。⑤城乡发展水平：城镇化率。城镇化水平的提升有利用促进农民收入水平的提升和

素质的提高,促进农业规模化生产和农业现代化经营,但也可能导致农村劳动力外流,产生不利的影响[37]。⑥财政支农水平:涉农支出。长期以来财政支农政策倾向于农药、化肥、机械等农业生产资料补贴[27],这有利于改善农业经济的发展环境,促进农业的增长,但同时也会增加农业碳排放的风险。

表 2　耕地低碳利用效率影响因素指标选取及说明

Table 2　Selection and explanation of the factors of low-carbon utilization efficiency of cultivated land

变 量	具体指标	指标说明	均 值	最大值	最小值
自然环境条件	复种指数	农作物播种面积/耕地面积/%	1.00	1.97	0.60
耕地资源禀赋	人均播种面积	粮食播种面积/农业从业人员/(hm^2/人)	1.84	17.16	0.53
农业生产条件	单位耕地面积化肥使用量	化肥施用量/耕地面积/($t \cdot hm^{-2}$)	0.16	0.35	0.01
	单位耕地面积机械使用量	农业机械总动力/耕地面积/($kW \cdot hm^{-2}$)	3.23	7.31	0.86
经济发展水平	人均可支配收入	农村居民人均可支配收入/(万元)	0.86	2.46	0.11
	人均 GDP	人均国民生产总值/(万元)	2.61	26.61	0.24
城乡发展水平	城镇化水平	城镇化率/%	28.28	67.50	13.26
财政支农水平	涉农支出	涉农支出/(亿元)	6.25	36.99	0.03

2.2.3　*数据来源*　本文使用数据包括统计数据和行政区矢量数据。统计数据包括耕地低碳利用效率和影响因素数据,均来源于《黑龙江统计年鉴》(2006—2021 年)、《中国县域经济统计年鉴—乡镇卷》(2006—2021 年)以及各地市国民经济和社会发展统计公报,部分缺失数据采用插值法进行估计。为消除价格因素影响,本文以 2005 年为基期,对受价格变动影响的农业总产值数据进行平减处理。由于影响因素各指标之间量纲不同,故在估算前对各影响因素进行归一化处理以消除量纲。需要说明的是,哈尔滨市存在行政区划变动问题,双城区于 2014 年经国务院批复撤市设区,故为保证数据的一致性,2014 年后双城区依旧按照独立的研究单元进行研究。行政区矢量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)。

3　结果与分析

3.1　耕地低碳利用效率测度与结果分析

由图 1 可知,2005—2020 年松嫩平原地区耕地低碳利用效率整体上呈波动上升的趋势,均值为 0.80,未达到最有效的生产前沿,参考文高辉等[22]对洞庭湖平原耕地生态效率的研究结果,松嫩平原耕地低碳利用效率总体上处于中等发展水平,在资源集约与环境保护方面仍存在较大的提升空间,在今后发展过程中应注重资源配置效率,以获取更高的期望产出和更低的非期望产出。从各区域来看,耕地低碳利用效率变化差异明显,黑河市效率均值为 0.90,其投入产出效率相对于其他地区已达最优水平,但在不同年份间起伏较大,需要引起重视;哈尔滨市效率均值为 0.86,高于区域平均水平,该地区在经济发展水平、耕地资源禀赋、农业生产条件方面均有一定优势;绥化市效率均值为 0.81,其变化趋势与区域均值相近,表明在注重经济产出的同时,兼顾了对非期望产出的控制,应继续保持并适当调整各要素投入,使耕地利用方式更符合当地资源禀赋和发展要求[13];大庆市和齐齐哈尔市效率均值相等,为 0.75,明显低于区域平均水平,表明这些区域耕地投入要素仍未实现最优配置,存在要素错配现象,阻碍了地区耕地低碳利用效率的提升。

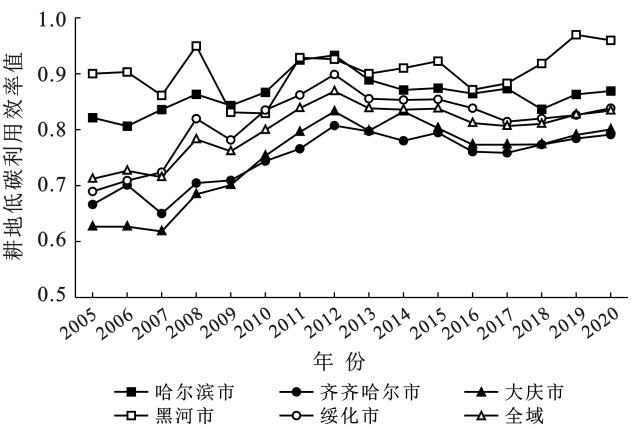

图 1　2005—2020 年松嫩平原地区各区域耕地低碳利用效率变化趋势

Fig.1　Trend of changes in low-carbon utilization efficiency of cultivated land in the Songnen Plain area during 2005—2020

从时间序列来看,2005—2020 年松嫩平原耕地低碳利用效率值总体上呈现“升—降—升”的演变趋势,表现出明显的阶段性特征:2005—2009 年为波动上升期,2009—2012 年为稳定上升期,这两段时期效率增加的原因可能是,自 2004 年全国开始实施农机

购置补贴政策以及2006年国家全面取消农业税等惠农政策以后，提高了农民经营耕地的积极性，引致农户加大了农业资本投入，进而导致松嫩平原地区耕地面积和粮食产量增加，耕地利用效率得到提升。2012—2017年为平稳下降期，一方面可能是由于规模报酬递减规律的存在，单纯依靠资源投入带来的效率提升遇到了“门槛效应”，增大农药化肥等物质资料难以继续提高耕地利用效率；另一方面可能因为随着工业科技水平的进步，农业机械得到有力发展的同时，机械运作消耗的柴油引起的碳排放增加，另外农户使用农药化肥的成本降低，引致农药化肥使用量增加并逐步替代农家肥，导致非期望产出增加。2017—2020年为稳定增长期，可能因为2017年十九大报告乡村振兴战略的提出，深化了农业供给侧结构性改革，将农村生态文明建设提升至国家战略地位，这些举措对耕地低碳利用效率提升产生了积极影响。同时，2017年1月黑龙江省十二届人大六次会议通过了《黑龙江省大气污染防治条例》，黑龙江省的生态环境保护受到了高度重视，在此背景下对耕地的粗放和不合理经营方式进行了严格整治，区域耕地利用效率得到稳步提升。

3.2 耕地低碳利用效率空间相关性分析

3.2.1 *全局空间格局演变特征分析* 为考察松嫩平原耕地低碳利用效率的空间关联性和差异性，运用空间自相关模型，借助GeoDa，Stata17.0软件对各年份地理邻接空间矩阵下各县(市)耕地低碳利用效率相关性进行检验。

结果显示(表3)，2005—2020年(2010年除外)耕地低碳利用效率的Moran’I指数均通过了1%或5%或10%显著性检验，且均为正，表明松嫩平原耕地低碳利用效率存在显著的正向空间相关性，即相邻县(市)耕地低碳利用效率在地理空间上不是随机分布的，而是呈现空间集聚特征。根据计划行为理论和空间溢出效应，相邻县(市)的生产投入行为、种植偏好以及农业政策对本区域种植行为和政策制定产生影响[24]，甚至相近的自然、社会条件，也会使相邻区域对于耕地资源的开发利用产生趋同现象，形成联动发展机制。从动态变化情况来看，Moran’I指数在研究期内呈“锯齿型”波动变化，从2005年的0.28下降至2020年的0.14，下降幅度约为52%，说明松嫩平原耕地低碳利用效率空间相关性处于波动下降态势，空间依赖性有所减弱。

3.2.2 *局部空间演变特征分析* 全局莫兰指数从全域视角揭示了松嫩平原耕地低碳利用效率的空间分异特征，为进一步探究耕地低碳利用效率局部格局演变规律以及明晰效率值在空间上的集聚状态，借助ArcGIS 10.2软件计算出2005，2009，2013，2017，2020年各县(市)耕地低碳利用效率的G_i^*指数，并采用自然断点法将其分为冷点区域、次冷点区域、次热点区域和热点区域。由图2可知，松嫩平原耕地低碳利用效率热点区域主要呈现“两核集聚”的分布态势，一个“极核”位于区域北部，主要集聚在嫩江市附近，该区域水热条件匹配状况较好，农业集约化水平较高，因而耕地低碳利用效率表现较好；另一个位于平原南部地区，主要分布在哈尔滨市及其周边县(市)，该地区作为黑龙江省经济中枢，经济发展水平和农业生产条件优越，耕地低碳利用效率相对较高；而冷点区域呈“单核”连片分布于区域西部，主要涵盖大庆市和齐齐哈尔多数县(市)，并随着时间推移覆盖范围向东延伸扩展，该区域农业基础设施薄弱、生产要素投入水平较低，发展潜力较大。

表3 2005—2020年松嫩平原地区耕地低碳利用效率全局Moran’s I指数

Table 3 2005—2020 Song Nen Plain area Low-carbon utilization efficiency global Moran’s I index

年份	Moran’ I	Z值	P值
2005	0.28	3.11	0.00
2006	0.15	1.79	0.04
2007	0.30	3.24	0.00
2008	0.18	2.03	0.02
2009	0.13	1.58	0.06
2010	0	0.31	0.38
2011	0.17	1.99	0.02
2012	0.11	1.36	0.09
2013	0.14	1.69	0.05
2014	0.13	1.57	0.06
2015	0.11	1.41	0.08
2016	0.26	2.88	0.00
2017	0.26	2.93	0.00
2018	0.15	1.83	0.03
2019	0.14	1.72	0.04
2020	0.14	1.68	0.05

总体而言，松嫩平原耕地低碳利用效率空间分异格局显著，高低值集聚特征明显。这可能是因为松嫩平原各县(市)经济发展水平差异逐渐缩小以及农业发展水平逐渐收敛，导致邻近县(市)间农户的种植偏好、生产利用技术逐渐趋同，在此背景下，邻近县(市)的耕地低碳利用效率最终收敛于同一稳定水平，形成地理上的集聚格局[22]；其次，在当前大力发展生态文明建设的背景下，各级地方政府在追求经济发展的同时，会积极学习和借鉴邻近高效率县(市)的农业生产

技术及绿色惠农政策,以实现耕地利用低碳化、绿色化发展。因此,应积极创建邻近县(市)间的协同机制,优化耕地利用生产的空间联动环境,发挥高值县(市)的示范带动作用,形成正向的集聚效应。

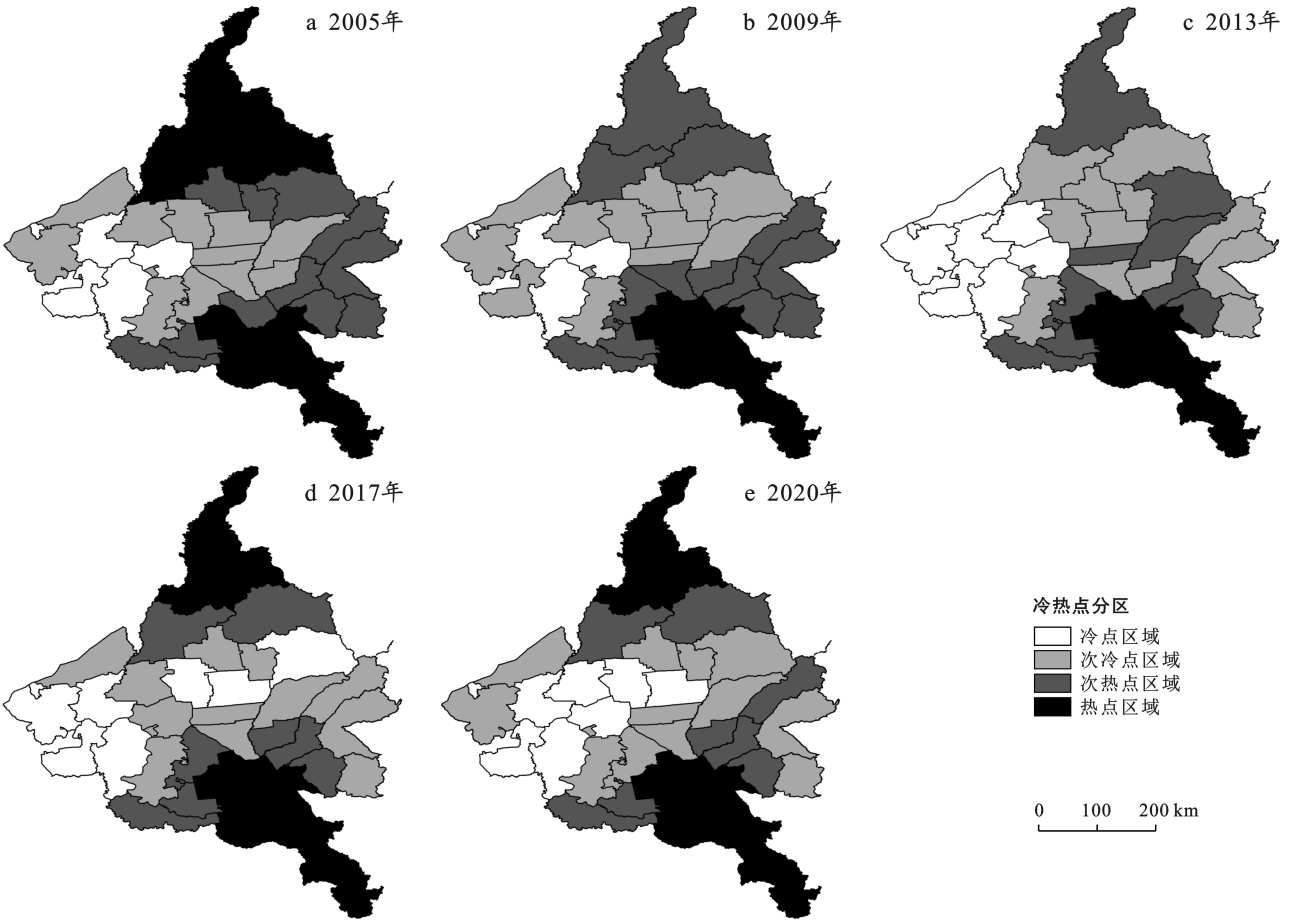

图 2　松嫩平原地区耕地低碳利用效率冷热点分布

Fig.2　Distribution of cold and hot spots of low carbon utilization efficiency of cultivated land in Songnen Plain

3.3　耕地低碳利用效率动态演进特征分析

为探究各县(市)耕地低碳利用的动态演进特征,运用 Stata17.0 软件,采用非参数核密度估计法对松嫩平原地区 2005,2009,2013,2017,2020 年耕地低碳利用效率进行估计。结果如图 3 所示。

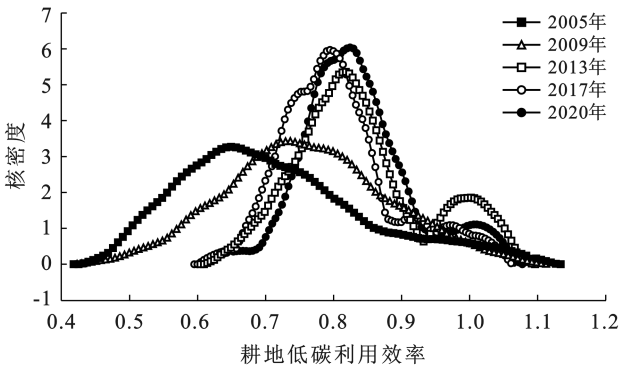

图 3　松嫩平原地区耕地低碳利用效率核密度

Fig.3　Kernel density map of low carbon use efficiency of cultivated land in Songnen Plain

(1) 从整体来看,松嫩平原耕地低碳利用效率核密度曲线重心在横轴上表现为右移态势,表明研究期内耕地低碳利用效率呈上升趋势,这与上文测算结果相一致。

(2) 耕地低碳利用效率存在不同程度的极化特征。从形状上看,2005 年和 2009 年核密度曲线呈现“单峰”形态,但 2009 年表现出了轻微的两极分化态势;到 2013 年曲线呈明显的“双峰”形态,表现出两极分化特征;随着时间推移,从 2017 年开始,曲线以“多峰”形态呈现,表现出多极分化特征。总体上,研究期内耕地低碳利用效率核密度曲线经历了“单峰—双峰—多峰”的演化态势,表现出不同程度的极化特征,该现象可能原因是各地区经济发展的不平衡,间接影响农业生产投入要素配置的不均衡,从而导致耕地低碳利用效率存在显著差异。

(3) 耕地低碳利用效率区域差异逐渐缩小。从曲线主峰高度来看,2005—2009 年核密度曲线峰度

较为扁平，从2013年开始，峰度急剧抬升，曲线由“宽峰型”向“尖峰型”转变，波峰更加陡峭，表明松嫩平原地区耕地低碳利用效率内部差异逐渐缩小，原因在于受到空间溢出效应的影响，相邻县(市)在探索多元耕作方式和农业生产结构过程中，逐渐实现了资源和农业生产技术共享，建立了区域协同发展关系。

3.4 耕地低碳利用效率影响因素分析

为进一步分析松嫩平原地区耕地低碳利用效率的影响因素，利用ArcGIS 10.2地理加权回归模型估算不同因素对各县(市)耕地低碳利用效率的影响贡献均值。由表4可知，2005，2009，2013，2017，2020年各年份拟合系数R^2分别为0.74，0.66，0.53，0.49，0.65，表明模型的整体拟合优度较好，所选因素可以解释耕地低碳利用效率总变异的49%～74%。从回归系数均值可看出，不同变量对耕地低碳利用效率的影响程度和方向存在较大差异，对耕地低碳利用效率的影响程度从大到小依次为农村居民人均可支配收入、涉农支出、人均播种面积、单位耕地面积机械使用量、单位耕地面积化肥使用量、城镇化率、人均GDP和复种指数。

(1) 自然环境条件对耕地低碳利用效率的影响。用复种指数表征自然环境条件。复种指数是耕地利用自然地理和气候条件的综合反映[24]。复种指数提高意味着耕地利用强度增加，可能会增加期望产出，但也会造成化肥、农药等高碳生产资料过度使用，增加碳排放。相较于其他因素，复种指数对耕地低碳利用效率影响最小且始终为负，可能原因是松嫩平原地区所处纬度较高，积温不足，生长期短，导致复种指数较低，对耕地低碳利用效率难以起到推动作用。今后可根据区域自然和经济社会情况，优化种植结构，依靠内涵挖潜提高耕地利用综合效率。

(2) 耕地资源禀赋对耕地低碳利用效率的影响。用人均耕地面积反映耕地资源禀赋状况。从全域来看，人均耕地面积对耕地低碳利用效率影响作用较强，研究期内回归系数均为正，表明人均耕地面积提高对耕地低碳利用效率具有正向促进作用。随着人均耕地面积的增加，可以促进农业劳动集约经营，提高劳动生产效率，进而提高耕地低碳利用效率，这与马林燕等[25]、冀正欣等[33]研究结果一致。另外也说明积极鼓励经营主体探索低碳、高效的经营模式，引导区域耕地规模化和集约化经营具有切实必要性。

(3) 农业生产条件对耕地低碳利用效率的影响。用单位耕地面积化肥使用量和单位耕地面积机械使用量表征农业生产条件。单位耕地面积化肥使用量回归系数均显著为正，且呈现降低趋势，由2005年的0.35下降到2020年的0.25，说明目前化肥施用量仍然是松嫩平原地区耕地利用效率提升的重要因素，这与罗冲等[38]得出化肥使用量的大幅增加是东北地区粮食持续增产的最重要影响因素结论相一致。可见化肥对松嫩平原地区粮食增产作用显著，但要合理控制化肥使用量，使其保持在规模报酬递增阶段，防止投入过多引起土壤板结、水体富营养化以及碳排量增加。单位耕地面积机械使用量对耕地低碳利用效率呈显著的负向影响，松嫩平原地区地势平坦、土地连片，适合进行机械化规模作业，但并不是农业机械投入越多耕地利用效率就会越高，过度的机械化投入会消耗大量的化石燃料，引起碳排放等非期望产出增加，从而抑制耕地利用效率值的提升。

(4) 经济发展水平对耕地低碳利用效率的影响。用农村居民人均可支配收入和人均GDP表征经济发展水平。农村居民人均可支配收入对耕地低碳利用效率影响力最大，且回归系数均为正，但随着时间推移，影响程度逐渐减弱。松嫩平原地区农村居民人均可支配收入由2005年的2774元上升至2020年的16172元。早年间农民收入较低且来源单一，主要依赖于农业种植，对耕地采取精耕细作，耕地低碳利用效率提升显著，但随着经济的发展，农民收入来源更为多元化，对农业的依赖程度降低，从而减少了对耕地的资金等投入，导致影响程度减弱。人均GDP对耕地低碳利用效率影响程度较小，且在不同的年份对效率的影响方向存在差异，2017年和2020年呈正向影响，其余年份为负向影响，可能因为早期经济发展对农业的促进主要通过提高机械化水平和增施农药化肥等“化石农业”模式，增加粮食产量的同时，导致非期望产出增加，但随着经济发展水平的提升以及农户低碳环保意识的增强，农业生产不再盲目追求农药、化肥等资源的高投入，而是通过合理配比和低碳化管理方式，减少资源浪费和环境污染，提高产值收益。

(5) 城乡发展水平对耕地低碳利用效率的影响。用城镇化率表示城乡发展水平。城镇化率对耕地低碳利用效率提升产生负向影响。一方面，城镇化进程的加速推进造成松嫩平原地区土地利用发展转型和变化，大量的耕地被占用和撂荒，导致耕地的有效供给规模不断降低，进而影响耕地利用效率。另一方面，由于松嫩平原部分地区以精耕细作的小农业生产为主，农业劳动力的数量直接影响耕地产出率，而城镇化水平的提高促使大量农业劳动力转移到非农业生产中，这种农业劳动力的非农化和兼业化对耕地利用产生不利影响。

(6) 财政支农水平对耕地低碳利用效率的影响。用涉农支出表示财政支农水平。涉农支出对耕地低碳利用效率提升起促进作用,这与刘涛等[39]研究结果一致。可能原因是,通过农业技术创新、设施建设和资源保护等方面的的投入,推动了农业生产条件的升级,有效提高了农业生产的效率和可持续发展水平。同时,针对耕地环境治理的投资在一定程度上减缓了农业对环境的负面影响,从而提高了耕地低碳利用效率。

表 4　GWR 模型估计结果

Table 4　GWR model estimation results

变 量	年份				
	2005	2009	2013	2017	2020
复种指数	−0.05	−0.09	−0.03	−0.06	−0.08
人均播种面积	1.70	0.74	0.21	0.35	0.11
单位耕地面积化肥使用量	0.32	0.39	0.27	0.28	0.25
单位耕地面积机械使用量	−0.91	−0.70	−0.30	−0.25	−0.12
农村居民人均可支配收入	2.84	1.04	0.12	0.29	0.18
人均 GDP	−0.15	−0.66	−0.17	0.11	0.02
城镇化率	−0.34	−0.16	−0.24	−0.17	0.02
涉农支出	1.04	0.99	0.65	0.18	0.29
常数项	3.79	0.68	0.33	−0.29	−0.28
R^2	0.74	0.66	0.53	0.49	0.65
Residual squares	10.90	10.60	10.60	8.81	5.34
Effective number	9.018	9.02	9.02	9.02	9.02
Sig.	0.67	0.67	0.67	0.61	0.47
AICc	87.13	86.23	86.21	80.13	63.57
R^2	0.65	0.55	0.38	0.31	0.54

4　结论与讨论

4.1　结 论

(1) 2005—2020 年,松嫩平原耕地低碳利用效率整体上呈波动上升趋势,均值为 0.80,未达到最有效生产的前沿;各地区耕地低碳利用效率均逐步提高,但发展非均衡性较强。

(2) 松嫩平原耕地低碳利用效率时空分异格局显著。从空间维度看,耕地低碳利用效率存在显著的正向空间相关性,且局部呈较强的高低值集聚分布态势,热点多核极化现象显著,主要分布于区域北部和南部,而冷点区域主要集聚于区域西部,并向东延伸扩展;从时间维度看,研究期内耕地低碳利用效率核密度曲线经历了“单峰—双峰—多峰”的演化态势,表现出不同程度的极化特征,同时曲线由“宽峰型”向“尖峰型”转变,内部差异呈逐渐缩小的演变趋势。

(3) 松嫩平原耕地低碳利用效率受多种因素的共同影响,人均播种面积、单位耕地面积化肥使用量、农村居民人均可支配收入和涉农支出对耕地低碳利用效率具有显著的正向影响,复种指数、单位耕地面积机械使用量及城镇化率对效率具有负向影响,人均 GDP 对耕地低碳利用效率在不同的年份影响程度和方向存在差异。

4.2　讨 论

在农业绿色转型的关键阶段和“双碳”目标的现实要求下,追求农业经济和耕地生态利用的协调可持续发展,既要充分考虑国家粮食安全的重大定位,又必须遵循经济社会的发展规律,走生态文明建设道路[22]。本研究结果显示,松嫩平原耕地低碳利用效率呈波动上升趋势,但整体效率水平并不高,这与现有研究结果基本一致[40],未来可考虑通过调整耕地生产要素配置结构,提高耕地规模集约化水平,探寻耕地生产力和碳排放之间的作用边界,实现耕地利用投入要素的“减量增效”。松嫩平原耕地利用的空间非均衡性格局折射出耕地利用过程中投入产出状况的差异[34],这主要源于各地区经济发展水平与政策管理存在差异,间接影响农业生产投入力度的不均衡,导致耕地低碳利用发展不尽相同,因此不同地区要因地制宜,充分发挥自身产业和资源优势,挖掘新动能,同时构建多元化生产要素交流机制,加大资源以及生产技术的共享,尤其对具备较好耕作技术和农业管理经验的热点区域来说,应充分发挥其示范带动作用,实现互动效应的最大化。另外,对于效率较低区域应优化耕地要素的投入结构,引进低碳耕作利用技术,将耕地利用与固碳减排相结合,不断缩小地区间耕地低碳利用效率非均衡程度。

松嫩平原耕地低碳利用效率受到自然环境条件、耕地资源禀赋、农业生产条件、经济发展水平和城乡发展水平等因素的综合影响。根据各影响因素的作用结果,松嫩平原各地区要大力推进乡村振兴,加大财政支农力度,不断提高农村居民人均收入增长速度,发挥好农民可支配收入及涉农支出等主导因素对效率的提升作用,同时在促进经济增长和产业结构升级过程中,要加强以工补农,以城带乡,构建工农互补、城乡协调发展新格局。此外,考虑到单位耕地面积机械投入力度对效率产生抑制作用,应合理控制机械要素投入强度,避免造成资源冗余与环境污染。

参考文献(References)

[1] 陶阳.“双碳”背景下粮食安全与农业固碳减排协同推进的问题与对策研究[J].现代农业,2023,48(1):59-63.
Tao Yang. Research on the problems and countermeasures of food security and agricultural carbon fixation and emission reduction under the background of “double car-

bon”[J]. Modern Agriculture, 2023,48(1):59-63.

[2] 谭永忠,何巨,岳文泽,等.全国第二次土地调查前后中国耕地面积变化的空间格局[J].自然资源学报,2017,32(2):186-197.
Tan Yongzhong, He Ju, Yue Wenze, et al. Spatial Pattern Change of the Cultivated Land before and after the Second National Land Survey in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(2): 186-197.

[3] Guo Liping, Lin Erda. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: A review of work in China [J]. Chemosphere-Global Change Science, 2001,3(4):413-418.

[4] 杨子贤,孙鑫,陈琦若,等.保定市农业碳排放的空间网络结构:基于社会网络分析法[J].农村经济与科技,2023,34(5):23-28.
Yang Zixian, Sun Xin, Chen Qiruo, et al. Spatial network structure of agricultural carbon emissions in Baoding City: Based on social network analysis [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2023,34(5):23-28.

[5] Quaye A K, Hall C A S, Luzadis V A. Agricultural land use efficiency and food crop production in Ghana [J]. Environment, Development and Sustainability, 2010,12(6): 967-983.

[6] Appanna B, Sujatha Y. Land use pattern and land use efficiency of the kurnool district, Andhra Pradesh [J]. Original Research Paper, 2022,12(12): 2249-555X.

[7] Nsiah C, Fayissa B. Trends in agricultural production efficiency and their implications for food security in subsaharan African countries [J]. African Development Review, 2019,31(1): 28-42.

[8] 王刚,廖和平,李涛,等.精准扶贫背景下贫困农户识别对耕地利用效率的影响:以重庆市石柱土家族自治县为例[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(1):1-9.
Wang Gang, Liao Heping, Li Tao, et al. The impact of poor farmer household identification on cultivated land use efficiency under the background of targeted poverty alleviation: A case study of sizhu county of Chongqing [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019,41(1): 1-9.

[9] 张军. 基于农户分化视角的欠发达地区耕地利用效率研究[D].贵州 贵阳:贵州财经大学,2022.
Zhang Jun. A Study on the Efficiency of Cultivated Land Utilization in Underdeveloped Areas from the perspective of grain-households differentiation [D]. Guizhou Guiyang: Guizhou University of Finance and Economics, 2022.

[10] 刘蒙罢,胡贤辉,文高辉.环境约束下的洞庭湖平原耕地利用效率动态演变特征分析[J].中国农业资源与区划,2022,43(4):108-118.
Liu Mengba, Hu Xianhui, Wen Gaohui. Analysis on the dynamic evolution characteristics of cultivated land use efficiency in the Dongting Lake plain under environmental constraints [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(4):108-118.

[11] 张立新,朱道林,谢保鹏,等.中国粮食主产区耕地利用效率时空格局演变及影响因素:基于 180 个地级市的实证研究[J].资源科学,2017,39(4):608-619.
Zhang Lixin, Zhu Daolin, Xie Baopeng, et al. Spatio-temporal pattern evolvement and driving factors of cultivated land utilization efficiency of the major grain producing area in China [J]. Resources Science, 2017,39(4): 608-619.

[12] 杨朔,李世平,罗列.陕西省耕地利用效率及其影响因素研究[J].中国土地科学,2011,25(2):47-54.
Yang Shuo, Li Shiping, Luo Lie. Study on the farmland use efficiency and its influencing factors in Shanxi Province [J]. China Land Science, 2011,25(2):47-54.

[13] 吴昊玥,黄瀚蛟,何艳秋,等.净碳排放约束下的中国耕地利用效率评价及空间关联研究[J].浙江农业学报,2019,31(9):1563-1574.
Wu Haoyue, Huang Hanjiao, He Yanqiu, et al. Evaluation and spatial correlation of cultivated land utilization efficiency under net carbon emission constraint of China [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019,31(9): 1563-1574.

[14] 赵育恒.中国耕地利用时空变化及其对粮食生产能力的影响[D].浙江 杭州:浙江大学,2020.
Zhao Yuheng. Spatio-temporal change of cultivated land use in China and its impact on grain production capacity [D]. Zhejiang Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[15] 周晓林,吴次芳,刘婷婷.基于 DEA 的区域农地生产效率差异研究[J].中国土地科学,2009,23(3):60-65.
Zhou Xiaolin, Wu Cifang, Liu Tingting. Study on productive efficiency difference of regional farmland based on DEA [J]. China Land Science, 2009,23(3): 60-65.

[16] 徐秋,雷国平,杨厚翔.黑龙江省耕地利用效率时空差异及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(12):33-40.
Xu Qiu, Lei Guoping, Yang Houxiang. Spatial-temporal difference and influencing factors of cultivated land use efficiency in Heilongjiang Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(12):33-40.

[17] 张荣天,焦华富.中国省际耕地利用效率时空格局分异与机制分析[J].农业工程学报,2015,31(2):277-287.
Zhang Rongtian, Jiao Huafu. Spatial-temporal pattern differentiation and its mechanism analysis of using efficiency for provincial cultivated land in China [J].

Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(2):277-287.

[18] 曲朦,赵凯,周升强.耕地流转对小麦生产效率的影响:基于农户生计分化的调节效应分析[J].资源科学,2019,41(10):1911-1922.
Qu Meng, Zhao Kai, Zhou Shengqiang. Effect of farmland transfer on wheat production efficiency: Analysis of adjustment effect based on household livelihood differentiation [J]. Resources Science, 2019, 41 (10): 1911-1922.

[19] 许恒周,郭玉燕,吴冠岑.农民分化对耕地利用效率的影响:基于农户调查数据的实证分析[J].中国农村经济,2012(6):31-39.
Xu Hengzhou, Guo Yuyan, Wu Guancen. Influence of farmers' differentiation on cultivated land use efficiency—An empirical analysis based on farmers' survey data [J]. Chinese Rural Economy, 2012(6):31-39.

[20] 梁流涛,翟彬,樊鹏飞.基于环境因素约束的农户土地利用效率及影响因素分析:以河南省粮食生产核心区为例[J].地理科学,2016,36(10):1522-1530.
Liang Liutao, Zhai Bin, Fan Pengfei. Household land use efficiency based on environment factor and its influence factors: A case of grain production core areas in Henan Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(10):1522-1530.

[21] 张荣天,陆建飞.基于 DEA-ESDA 模型的江苏县域耕地利用效率时空格局分析[J].江苏农业科学,2019,47(3):269-272.
Zhang Rongtian, Lu Jianfei. Analysis of temporal and spatial pattern of county cultivated land use efficiency in Jiangsu Province based on DEA-ESDAmodel [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019,47(3):269-272.

[22] 文高辉,刘蒙罢,胡贤辉,等.洞庭湖平原耕地利用生态效率空间相关性与空间效应[J].地理科学,2022,42(6):1102-1112.
Wen Gaohui, Liu Mengba, Hu Xianhui, et al. Spatial correlation and spatial effect of cultivated land use ecological efficiency in the Dongting Lake plain [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022,42(6):1102-1112.

[23] 吴郁玲,张佩,李佳.长江经济带耕地利用效率时空演变特征及提升路径研究[J].农业现代化研究,2021,42(4):579-588.
Wu Yuling, Zhang Pei, Li Jia. The spatio-temporal evolution characteristics and improvement paths of farmland utilization efficiency in the Yangtze River economic belt [J]. Research of Agricultural Modernization, 2021,42(4):579-588.

[24] 张玥,代亚强,陈媛媛,等.中国耕地低碳利用效率时空演变及其驱动因素[J].农业工程学报,2022,38(8):234-243.
Zhang Yue, Dai Yaqiang, Chen Yuanyuan, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of low-carbon use efficiency of cultivated land in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(8):234-243.

[25] 马林燕,张仁慧,潘子纯,等.中国省际耕地利用生态效率时空格局演变及影响因素分析:基于 2000—2019 年面板数据[J].中国土地科学,2022,36(3):74-85.
Ma Linyan, Zhang Renhui, Pan Zichun, et al. Analysis of the evolution and influencing factors of temporal and spatial pattern of eco-efficiency of cultivated land use among provinces in China: Based on panel data from 2000 to 2019 [J]. China Land Science, 2022,36(3):74-85.

[26] 刘蒙罢,张安录,文高辉.长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率区域差异与空间收敛[J].自然资源学报,2022,37(2):477-493.
Liu Mengba, Zhang Anlu, Wen Gaohui. Regional differences and spatial convergence in the ecological efficiency of cultivated land use in the main grain producing areas in the Yangtze Region [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(2):477-493.

[27] 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 Nan, Lu Xinhai, Kuang Bing, et al. Regional differences and inf luencing 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.

[28] 卢新海,匡兵,李菁.碳排放约束下耕地利用效率的区域差异及其影响因素[J].自然资源学报,2018,33(4):657-668.
Lu Xinhai, Kuang Bing, Li Jing. Regional differences and its influencing factors of cultivated land use efficiency under carbon emission constraint [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(4):657-668.

[29] 伍芬琳,李琳,张海林,等.保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J].生态学杂志,2007,26(12):2035-2039.
Wu Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26 (12):2035-2039.

[30] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,

2002,91(1/2/3):217-232.

[31] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. Global Change Biology, 2000,6(3):317-327.

[32] 李波,张俊飚,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
Li Bo, Zhang Junbiao, Li Haipeng. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2011,21(8):80-86.

[33] 冀正欣,王秀丽,李玲,等.南阳盆地区耕地利用效率演变及其影响因素[J].自然资源学报,2021,36(3):688-701.
Ji Zhengxin, Wang Xiuli, Li Ling, et al. The evolution of cultivated land utilization efficiency and its influencing factors in Nanyang Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(3):688-701.

[34] 臧俊梅,唐春云,王秋香,等.基于 Super-SBM 模型的广东省耕地利用效率空间非均衡性及影响因素研究[J].中国土地科学,2021,35(10):64-74.
Zang Junmei, Tang Chunyun, Wang Qiuxiang, et al. Research on spatial imbalance and influencing factors of cultivated land use efficiency in Guangdong Province based on super-SBM model [J]. China Land Science, 2021,35(10):64-74.

[35] 李俏,谷国锋,姚丽,等.黑龙江垦区耕地利用效率变化分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(4):30-35.
Li Qiao, Gu Guofeng, Yao Li, et al. The changes of cultivated land use efficiency in Heilongjiang Land Reclamation Area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016,30(4):30-35.

[36] 王宝义,张卫国.中国农业生态效率的省际差异和影响因素:基于 1996—2015 年 31 个省份的面板数据分析[J].中国农村经济,2018(1):46-62.
Wang Baoyi, Zhang Weiguo. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: An analysis based on panel data from 31 provinces in 1996—2015 [J]. Chinese Rural Economy, 2018(1):46-62.

[37] 朱梦凡,李敬锁.中国粮食主产区耕地利用效率区域差异及影响因素:基于 179 个地级市的实证研究[J].水土保持通报,2024,44(1):206-217.
Zhu Mengfan, Li Jingsuo, Regional differences in cultivated land utilization efficiency its influencing factors for major grain producing areas in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):206-217.

[38] 罗冲,姜博,张文琦,等.东北地区耕地利用效率时空差异及其影响因素分析[J].中国农业资源与区划,2017,38(10):38-44.
Luo Chong, Jiang Bo, Zhang Wenqi, et al. Analysis of cultivated land use efficiency and its influencing factors for Northeast China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(10):38-44.

[39] 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 Tao, Shang Xiaofei, Su Yuanyuan, 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.

[40] 徐秋,雷国平,杨厚翔.黑龙江省县域尺度耕地利用效率空间非均衡及其动态演变[J].资源开发与市场,2019,35(3):335-340.
Xu Qiu, Lei Guoping, Yang Houxiang. Spatial inequality and dynamic evolution of cultivated land use efficiency at county scale in Heilongjiang Province [J]. Resource Development & Market, 2019,35(3):335-340.