

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.037.

崔宁波, 王婷, 董晋. “双碳”目标下东北黑土区耕地利用生态效率时空格局与演变趋势[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 335-344.

Cui Ningbo, Wang Ting, Dong Jin. Temporal-Spatial Pattern and Evolutionary Trend of Ecological Efficiency of Cultivated Land Use in Northeast Black Soil Areas Under the “Carbon Peak and Neutrality” Target[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 335-344.

# “双碳”目标下东北黑土区耕地利用生态效率 时空格局与演变趋势

崔宁波<sup>1</sup>, 王婷<sup>2</sup>, 董晋<sup>2</sup>

(1.东北农业大学 现代农业发展研究中心, 哈尔滨 150030; 2.东北农业大学 经济管理学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** [目的]探究东北黑土区耕地利用生态效率的时空格局和演变趋势, 将碳源与碳汇融入耕地利用过程, 这对于实现黑土减排增效和“双碳”目标至关重要。[方法]基于超效率 SBM 模型、核密度估计、探索性空间数据分析和空间插值工具等方法, 系统考察了 2006—2020 年东北黑土区耕地利用生态效率的时空特征与演进规律。[结果]黑土区耕地利用生态效率历经波动上升、显著下降和迅速回升 3 个阶段, 总体处于较高发展水平, 北部边缘城市的效率值明显高于中南部地区, 基期和末期区间两极分化局势尤为显著, 整体发展严重失衡; 黑土区耕地利用生态效率全局空间相关特性并不明显, 大致呈现“边缘—中心”空间扩散格局, 由南北两端高值集聚向内及四周递减, 而后形成多个块状高值区和低值分布带, 规模集聚优势未能得到充分发挥; 多数城市均存在不同程度的投入与产出冗余, 劳动力和化肥冗余问题较为严重, 碳排放冗余是造成黑土区耕地利用生态效率损失的普遍因素。[结论]优化要素配置和污染减排治理成为黑土利用重点改善方向, 也是提升黑土区耕地利用生态效率的关键路径。

**关键词:** 耕地利用生态效率; “双碳”目标; 超效率 SBM 模型; 时空格局; 东北黑土区

**中图分类号:** X322; F323.211

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)01-0335-10

## Temporal-Spatial Pattern and Evolutionary Trend of Ecological Efficiency of Cultivated Land Use in Northeast Black Soil Areas Under the ‘Carbon Peak and Neutrality’ Target

Cui Ningbo<sup>1</sup>, Wang Ting<sup>2</sup>, Dong Jin<sup>2</sup>

(1. Development Research Center of Modern Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. School of Economics and Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** [Objective] It is crucial for the goal of emission reduction and efficiency increase as well as ‘carbon peak and neutrality’ in black soil to explore the temporal and spatial pattern and evolutionary trend of the ecological efficiency of cultivated land use in the black soil areas of Northeast China, and to integrate carbon source and sink into the process of cultivated land utilization. [Methods] Based on the super-efficiency SBM model, kernel density estimation, exploratory spatial data analysis and spatial interpolation tools, this paper systematically investigated the spatio-temporal characteristics and evolution patterns of the ecological efficiency of cultivated land use in the black soil areas of northeast China from 2006 to 2020. [Results] The ecological efficiency of cultivated land use in the black soil areas had experienced three stages of fluctuating rise, significant decline and rapid recovery, generally at a high level of development. In addition, the efficiency value of the northern marginal cities was significantly higher than that of the central and southern areas. The polarization situation between the base period and the end of the period was particularly significant, and the overall development was seriously unbalanced. The overall spatial correlation characteristics of the ecological

收稿日期: 2023-02-07

修回日期: 2023-02-27

资助项目: 国家社会科学基金项目(23BJY188); 国家社会科学基金项目(20BJY149)

第一作者: 崔宁波(1980—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士, 主要研究方向为农业经济理论与政策研究。E-mail: 82890000@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

efficiency of cultivated land use in black soil areas were not obvious, generally presenting an ‘edge center’ spatial diffusion pattern, which decreased from the high value concentration at the north and south ends to the inside and around, and then formed a number of blocky high value areas and low value distribution belts. The scale agglomeration advantage was underutilized. Input and output redundancy existed to varying degrees in most cities. The problem of labor and fertilizer redundancy was relatively severe. Carbon emission redundancy was a common factor that causes the loss of ecological efficiency of farmland use in black soil areas. Optimizing the structure of factor allocation and paying attention to pollution emission reduction were important ways to improve the ecological efficiency of regional farmland use. [Conclusion] The optimization of factor allocation and pollution emission reduction control has become the key improvement direction of black soil utilization, and it is also the key path to improve the ecological efficiency of cultivated land utilization in black soil areas.

**Keywords:** ecological efficiency of cultivated land use; ‘carbon peak and neutrality’ target; super-efficiency SBM model; temporal and spatial pattern; black soil areas of northeast China

耕地是粮食生产的重要载体和核心基础,全方位夯实粮食安全根基,就要坚持最严格的耕地保护。黑土地作为耕地中的“大熊猫”,解决了我国超过10%以上人口的吃饭问题,成为东北地区保障国家粮食安全“压舱石”和“稳定器”的重要支撑。然而由于长期用养失衡,黑土垦殖利用逐渐偏离适度生产模式,耕地贫瘠化、土壤侵蚀化、生态污染化等问题日益凸显<sup>[1]</sup>,耕地利用“逆生态化”效应不断累积<sup>[2]</sup>,严重制约着黑土地的可持续发展,“中国人碗里装中国粮”的现实局面也将难以保持。2022年中央一号文件明确提出深入推进国家黑土地保护工程,落实“长牙齿”的耕地保护硬措施。过去以高物质投入为特征的黑土产出方式势必不可作为农田发展长久之计<sup>[3]</sup>,今后在保产量、稳产能的同时也要兼顾资源环境胁迫效应,协调好耕地高效利用与黑土生态建设的发展关系,逐步向耕地“生态化”“可持续化”利用转型。因此,将“生态”发展理念融入耕地利用分析框架契合当前形势所需和现实目标,研究如何提升区域耕地利用生态效率,对于实现黑土永续利用和筑牢大国粮仓至关重要。

耕地利用生态效率源于生态效率的应用与拓展,是权衡耕地利用综合投入水平与产出绩效的重要依据。已有学者围绕耕地利用生态效率的研究设计、内容拓展和方法应用等层面展开了诸多探讨,在研究设计上,既有研究逐渐形成了“投入+产出”的动态逻辑思维,将耕地利用各项物质投入和社会经济产出充分考虑在内<sup>[4-5]</sup>,随着耕地碳排放的生态负外部性日趋显化,学术界普遍将其视作耕地利用在环境维度上的非意欲产出<sup>[6-7]</sup>,也有学者基于面源污染和碳排放双重视角探析耕地利用效率的分布事实<sup>[8]</sup>。在研究内容上,学者们对耕地利用生态效率的内涵界定<sup>[9]</sup>、测度评价<sup>[10]</sup>、区域差异<sup>[11]</sup>、时空演化<sup>[12]</sup>和驱动因素等<sup>[13]</sup>方面进行了系统思考,探索层面由基础测度分

析向时空演变规律过渡深化,且近年来空间属性识别问题逐渐成为了主流方向,时空分布、空间差异及分散性等类研究较为客观系统<sup>[4,14]</sup>。在研究方法上,已有研究通过DEA,SBM-Undesirable和超效率SBM等方法量化比较区域耕地利用生态效率<sup>[15-17]</sup>,并借助Tobit,GWR等模型继而剖析其主要障碍因素<sup>[18-19]</sup>,研究发现经济水平、人口规模与劳动力等要素决定性较强<sup>[17]</sup>,农业科技投入、减排碳排放和农业污染控制可有效改善耕地利用生态效率<sup>[13]</sup>。

前沿研究成果较为丰富,为本文奠定了重要的理论基础和实践支撑,但在研究设计与视角层面上仍留有继续扩展和深化的空间。在研究尺度上,众多学者围绕国家、省、市等尺度探索耕地利用生态效率的现实状态与演进趋势,且近年来逐步聚焦到长江中下游、黄河流域及粮食主产区等地域,尚缺乏针对东北黑土地地区的特定考究。在度量体系上,现有指标选取通常将耕地生产要素投入与综合产出统一纳入,与农业、粮食生态效率的测度标准相似趋同,未能充分把握耕地利用的内核,耕地基础的承载作用难以有力彰显。在指标维度上,多数研究仅考虑到耕地利用碳排放的负生态外部性,尚未顾及耕地生态系统重要的固碳能力,导致无法全面考量耕地利用的碳效应,另外较少文献将碳源和碳汇进行有机衔接,结合“双碳”发展视角客观揭示区域耕地利用的真实状态与现实困境。

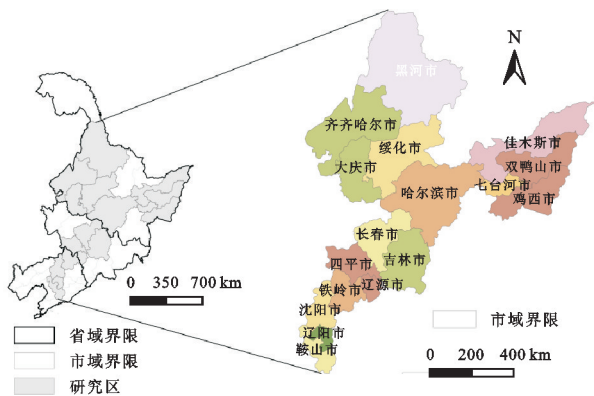
事实上,农业部门是实现“碳达峰”和“碳中和”阶段目标的重要领域,而耕地利用具有碳排放和碳吸收双重效应,使其在农业减排增汇方面扮演着重要角色。黑土地依托得天独厚的资源优势,拥有强大的碳收支功能和固碳减排潜力,成为“双碳”目标导向下的重要切入点。把握好耕地既是碳源又是碳汇的特质,充分发挥黑土利用的载体功能,将从减排与增汇双方向助力我国“双碳”目标的实现。为此,本文将“双

碳”发展要求融入耕地利用指导框架,客观衡量“双碳”目标背景下黑土区耕地利用生态效率的分布事实与演变格局,从界定黑土区耕地利用生态效率内涵出发,以地均投入产出指标搭建效率评价框架,运用超效率 SBM 模型定量测度 2006—2020 年黑土区耕地利用生态效率,基于核密度估计、探索性空间数据方法和空间插值工具刻画分析其在时空维度上的格局特征和演化趋势,并通过耕地投入产出冗余率揭示耕地利用失效原因与改进方向,以期促进黑土区耕地高效利用与生态文明建设相耦合、黑土持续经营与农业高质量发展相协调,也为谋略黑土利用规划布局 and “双碳”目标战略实施提供科学参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

东北黑土区是国家粮食安全和生态安全的核心保障区,主要分布于松嫩平原、三江平原和辽河平原一带,遍及黑龙江省、吉林省与辽宁省等行政区域,由集中连片的黑土、黑钙土和草甸黑土统一构成<sup>[20]</sup>。本文基于黑土分布特征,选取在松嫩平原和三江平原典型分布的部分划定城市,另外参考近年来黑土地保护利用重点遴选地区,鉴于地理实际与政策信息导向,选定如图 1 所示的 18 个地级市作为本文的研究单元,以此确保研究具有良好的代表性和科学性。



注:本图是根据自然资源部标准地图服务网站下载的审图号 GS (2022)1873号的标准底图截取制作。

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

### 1.2 研究方法

1.2.1 非期望超效率 SBM 模型 包含非期望产出的超效率 SBM 模型是由 DEA 模型衍生而来,同时兼备超效率 DEA 和 SBM 模型的所属优势,与传统 DEA 模型相比,有效克服了因径向与角度选择造成的结果偏差,并妥善考虑了非期望产出,消除了无法对非期望产出效率实施测度的功能缺陷,相较于 SBM-Undesirable 截面模型,该模型能更好地解决多

个决策单元(DUM)完全有效而无法区分比较的现实问题,更为准确客观地估量 DUM 效率值<sup>[21-22]</sup>。因此,本文运用非期望超效率 SBM 模型测度评价黑土区耕地利用生态效率,具体计算公式如下:

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma_i^- / x_{ik}}{1 + \frac{1}{n_1 + n_2} \left( \sum_{s=1}^{n_1} \gamma_s^d / y_{sk}^d + \sum_{s=1}^{n_2} \gamma_s^u / y_{sk}^u \right)}$$

$$\text{s.t.} = \begin{cases} x_k = X\lambda + \gamma^- \\ y_k^d = Y^d\lambda - \gamma^d \\ y_k^u = Y^u\lambda + \gamma^u \\ \gamma^- \geq 0, \gamma^d \geq 0, \gamma^u \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为耕地利用生态效率值; $m, n_1, n_2$  分别表示投入、期望产出和非期望产出变量的个数; $\gamma^-, \gamma^d, \gamma^u$  分别表示投入、期望产出和非期望产出的松弛变量; $x_k, y_{kd}, y_{ku}$  分别表示投入、期望产出和非期望产出向量; $X, Y^d, Y^u$  为相应的投入、期望产出和非期望产出矩阵, $\lambda$  表示权重向量。

1.2.2 非参数核密度估计 为探究黑土区耕地利用生态效率分布形态及地区差异动态演化轨迹,借助核密度分析对数据变量进行估计,其估计公式为:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (2)$$

式中: $N$  为样本单元总量; $h$  为带宽; $X_i$  为研究单元耕地利用生态效率值; $K(\cdot)$  为核函数。

1.2.3 探索性空间数据分析 采用 Global Moran's  $I$  指数从全域视角度量黑土区耕地利用生态效率空间关联性与分布特征,计算公式如下:

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

式中: $I$  为全局空间自相关系数; $n$  为样本单元的数量; $x_i$  和  $x_j$  分别表示研究区  $i, j$  的耕地利用生态效率值; $\bar{x}$  为效率观测平均值; $W_{ij}$  为空间权重矩阵。

1.2.4 空间插值方法 反距离权重法(IDW)是空间插值普适性强且计算简便的一种分析方法,基于地理学第一定律与空间相关原理,根据已知离散数据假定评估样本整体分布状况,常应用于土壤、气候和水环境等方向研究<sup>[23-24]</sup>,其表达式为:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$$

$$\lambda_i = (1/d_i^p) / \left[ \sum_{i=1}^n (1/d_i^p) \right] \quad (4)$$

式中: $Z(X_0)$  为待插值点的估计值; $Z(X_i)$  为插值点的实测值; $n$  为样本数量; $d_i$  为待插值点与样本点  $i$  之间的距离; $p$  为距离幂指数,通常默认取值为 2。



### 1.3 指标体系设计与数据说明

耕地利用期望以既定的耕地要素投入来获取最大的农业经济产出<sup>[25]</sup>,从生态视角考量黑土区耕地利用复合系统综合运行的结果,不仅意味着追求资源最小化和社会经济最大化的投入产出经过,还须兼顾黑土利用环境系统的正负反馈影响<sup>[14]</sup>,蕴含减排与增汇双重发展目标,寻求要素配置下耕地利用各子系统均衡发展的理想状态。为此,本文将黑土区耕地利用生态效率界定为:在一定生产技术条件下,通过科学有效的途径对单位耕地利用系统投入各项土地生产要素,以获取尽可能多的期望产出和尽可能少的非期望产出,是对黑土利用资源、社会经济与环境三维系统的综合映射。

根据耕地利用生态效率的内涵,基于“双碳”目标发展要求,并借鉴相关研究<sup>[7,10,12,26]</sup>,以低碳可持续发展的视角构建黑土区耕地利用生态效率评价指标体系,见表 1。结合黑土生产实际,投入指标层主要考虑了劳动、技术和资本等类生产要素;产出指标层包括期望产出和非期望产出两部分,同时耕地利用期望产出又涵盖经济、社会与环境 3 个复合维度,分别以地均农业总产值(狭义的农业)、地均粮食总产量和地均碳汇量予以表征,将地均面源污染和地均碳排放共同作为耕地利用非期望产出,表示耕地生产活动对区域农业生态环境的负面反馈。其中面源污染具体表现为化肥、农药等农业化学品使用带来的残留,以化肥中的氮磷、农药流失量表征污染,采用清单分析法进行核算,且主要参考赖斯芸<sup>[27]</sup>和陈敏鹏等<sup>[28]</sup>的有关研究。耕地碳汇量指主要农作物的碳吸收量,包括稻谷、玉米、小麦、豆类等,碳排放则体现为农业机械作业及化肥农药等投入品而诱发的耕地碳排放,具体测算方法以及各类碳源碳排放系数主要借鉴李波等<sup>[29]</sup>、West & Marland<sup>[30]</sup>、田云和张俊飏等<sup>[31]</sup>学者的研究。

研究基础数据主要源于 2007—2021 年《中国农村统计年鉴》《黑龙江统计年鉴》《吉林统计年鉴》《辽宁统计年鉴》以及所辖地市统计年鉴和统计公报等。为规避价格因素波动带来的误差,本文以 2006 年为基期,对农业产值进行平减处理,另外参照罗斯炫等<sup>[32]</sup>研究数据设置方式将农业从业人员和农业机械总动力通过农业总产值占比情况实施进一步修正,确保研究结果客观准确性与科学统一性。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕地利用生态效率时间格局演变趋势

2.1.1 总体演变特征 根据 maxDEA 软件工具测算出东北黑土区 2006—2020 年耕地利用生态效率值

(图 2)。从整体层面来看,2006—2020 年黑土区耕地利用生态效率处于较高发展水平,年均值为 0.921,2006—2014 年位于平稳发展阶段,2014—2020 年呈现波动下滑趋向,反映了黑土耕地质量等级较高,资源利用较为充分,但由于黑土利用过程中承压与破坏加剧,生态承载优势日渐趋弱,导致生态效益等期望产出份额下降。耕地利用生态效率均值在 2019 年降至 15 a 来最低水平为 0.738,表明现阶段黑土要素配置和环境规制仍存在一定的发展空间。

表 1 黑土区耕地利用生态效率评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of ecological efficiency of cultivated land use in black soil areas

指标类型	分类指标	具体指标	单位
投入指标	劳动投入	地均农业从业人员	人/hm <sup>2</sup>
	技术投入	地均农业机械总动力	kW/hm <sup>2</sup>
		地均有效灌溉率	%
期望产出指标	资本投入	地均化肥农药施用量	t/hm <sup>2</sup>
	经济产出	地均农业总产值	元/hm <sup>2</sup>
	社会产出	地均粮食总产量	t/hm <sup>2</sup>
	环境产出	地均碳汇量	t/hm <sup>2</sup>
非期望产出指标	环境污染	地均碳排放	t/hm <sup>2</sup>
		地均面源污染量	t/hm <sup>2</sup>

变异系数是衡量区间差异变化程度的重要指标,通过变异系数曲线变动可知,黑土区耕地利用生态效率内部差异大致经历了先缩小而后扩张的演变规律,2006—2014 年区间协调均衡度不断提升,总体上处于平缓发展时期,2014 年后,黑土区内各区市耕地利用生态效率变异幅度逐渐拉开,空间非均衡特征与离散行径越发明显,此外根据变异系数的等级划分标准,可进一步明确黑土区内耕地利用生态效率分布始终存在中等变异差别。

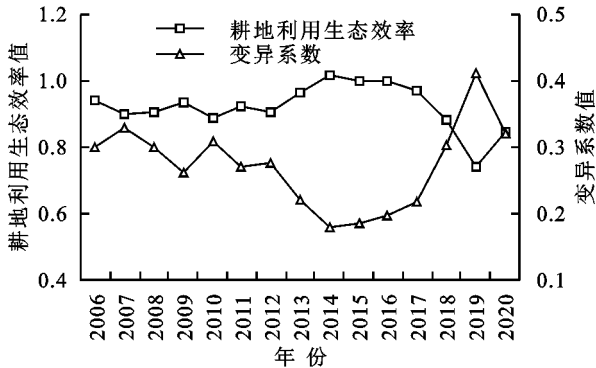


图 2 黑土区耕地利用生态效率均值及变异系数

Fig. 3 Average value and variation coefficient of ecological efficiency of cultivated land use in black soil areas

2.1.2 分地区演变特征 为揭示黑土区内城市耕地利用生态效率时间格局演化特征,基于 ArcGIS 自然断点分类法将黑土区耕地利用生态效率值按(0.376~

0.533], (0.533~0.740], (0.740~1.072], (1.072~1.206], (1.206~1.596]依次划分为由低到高 5 个等级区,考虑篇幅所限,本文仅绘制展示 2006 年、2011 年、2016 年和 2020 年的区位分布图(图 3)。

由图 3 可以看出,黑土区各期城市耕地利用生态效率差异显著,分布不均且均发生变动。2006 年黑土资源禀赋突出,耕地产出率偏高,域内 60.0%以上城市位于中等以上效率等级分布区。2006—2011 年区域耕地利用布局稳定,农田生产建设有序推进,整体上波动性不强,内部城市则呈两极趋势变动,主要表现为黑河、佳木斯、松原和辽源等地耕地利用生态效率逐渐降低,耕地投入产出结构相对失衡,难以兼顾绩效增长与生态优化,而大庆、绥化、鸡西和辽阳等地由良转优,黑土环境适配能力提高,辅之推动

地区农业产值和粮食产量逐步增长。2011—2016 年黑土区耕地利用生态效率总体呈攀升局势,尤以中部地区的松原、长春、辽源和吉林等市增长势头较为明显,究其原因在于农业技术发展的积极响应,地均机械覆盖和灌溉投入有效提升。此外,部分城市耕地利用疲惫,产出方式背离黑土繁养生息,如铁岭地均化肥投入量增长了 8.5%,单位面积耕地碳排放量随之上涨了 8.6%,对区域生态环境造成严重影响。2016—2020 年黑土全局占用形势不容乐观,多数城市均出现不同程度退化,且主要集中在中下游地带,可能由于区域农业经济发展相对滞后,耕地细碎化问题较为突出,加之黑土散布不均及粗放式生产经营等因素所致。

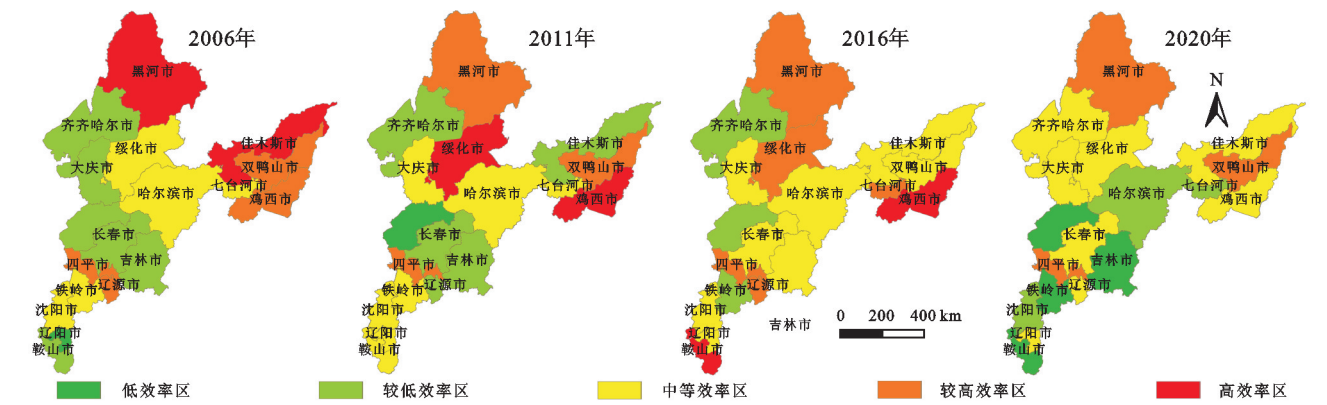


图 3 黑土区各市耕地利用生态效率分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of ecological efficiency of cultivated land use in cities of black soil areas

2.1.3 动态演进趋势 基于 2006—2020 年黑土区耕地利用生态效率的测算结果,运用 Matlab 软件绘制三维核密度曲线(图 4),综合反馈黑土区耕地利用生态效率的分布形态及演化轨迹。具体来看,核密度曲线演进特征主要体现在以下三方面:(1) 在位置变动上,2006—2020 年核密度曲线中心整体向右平移,移动尺度先增大而后缩小,表明近 15 年黑土区耕地利用生态效率水平趋向波动上升,这与黑土生产潜质和耕地保护力度密切相关,黑土地力肥沃,生态共容能力突出,近年我国颁布一系列黑土地保护条例,为用好养好黑土指明了方向。(2) 在形状演变上,2006—2020 年核密度曲线并未维持严格的单峰或双峰状态,大致呈现“双峰—单峰—双峰”的演进格局,可见耕地利用生态效率在基期和末期两阶段的分化局势较为明显,近年来区间差异不断扩张,农业发展对生态环境的牺牲代价惨重,黑土资源可持续利用受限。(3) 在峰度转变上,2006—2020 年核密度曲线逐步由宽峰向尖峰方向过渡,峰度变得愈发陡峭且主峰峰值呈波动上行态势,这表明了可能受黑土利用政

策调控和二产业转移驱动,在一定程度上减缓了黑土承载压力,效率低值区比重下降,但两极分化程度逐渐加深,整体发展严重失衡。

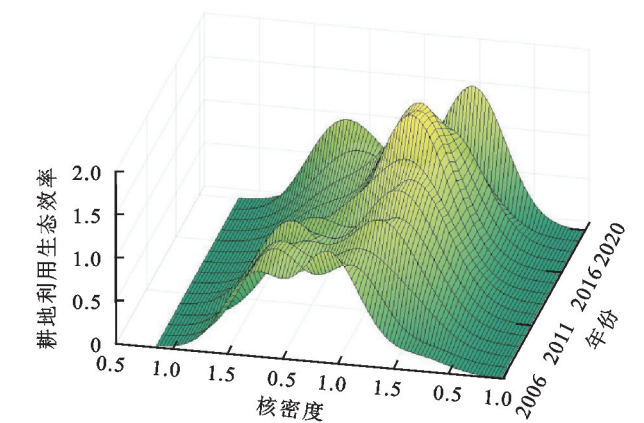


图 4 黑土区耕地利用生态效率核密度

Fig. 4 Kernel density curve of cultivated land use ecological efficiency in black soil areas

## 2.2 耕地利用生态效率空间格局演变趋势

2.2.1 空间关联特征 通过全局 Moran's I 指数来探析黑土区耕地利用生态效率总体空间格局分布特征,综合考量到地区经济发展和区位限制可能对耕地

利用行为产生叠加影响,借助 ArcGIS 和 Stata 软件构建经济地理距离矩阵,测算出 2006—2020 年黑土区 18 个城市单元耕地利用生态效率的 Moran's *I* 指数统计值(表 2)。由表 2 可见,黑土区多数年份耕地利用生态效率值未能通过统计检验,仅 2008 年、2010 年、2011 年、2012 年服从正态统计量 $|Z|>1.96$ , $p<0.05$  的分布条件,全局 Moran's *I* 指数显著,这说明黑土区耕地利用生态效率分布无明显空间相关性联系,邻近城市效率的空间关联态势并不明确。

2.2.2 空间集聚特征 为进一步探究黑土区耕地利用生态效率的空间集聚特征,基于 ArcGIS 软件平台中的空间插值工具,以 2006 年、2011 年、2016 年、2020 年为例,运用反距离权重法对比分析黑土区耕地利用生态效率的区间关联程度,具体表现如图 5 所示。

2006 年,黑土区耕地利用生态效率整体分布较为散乱,大致展现出分段带状式空间格局态势,分地区集聚现象并不明显且区间水平差异较大。具体而言,主要以北部地区黑河和东北部地区佳木斯两地为高值区向中下游片区过渡递减,西部齐齐哈尔等城市形成了一条鲜明的低值集聚带。2011 年,黑土区高值区增长趋势显著,呈圈层结构逐步向中部以东方向转移,中部和南部地区的耕地利用生态贡献率逐步提升。2016 年,各地区效率水平保持上涨趋势,由南北

两端高值集聚向内扩散转移,空间关联性增强,黑土区内部整体效率差异弱化。2020 年,北部地区表现出明显高值集聚现象,中部地区效率格局较为分散,而中部以南片区主要以四平、长春和辽源为空间高值中心向外辐射延伸,块状集聚特征更为明显。

表 2 黑土区耕地利用生态效率 Moran's *I* 指数统计  
Table 2 Moran's *I* Index statistical results of ecological efficiency of cultivated land use in black soil areas

年份	Moran's <i>I</i>	<i>p</i> 值	正态统计量 <i>Z</i>
2006	0.0704	0.4073	0.8287
2007	−0.0750	0.9185	−0.1023
2008	0.3050	0.0238	2.2609
2009	0.1404	0.2144	1.2416
2010	0.4070	0.0042	2.8606
2011	0.3267	0.0167	2.3932
2012	0.4770	0.0009	3.3190
2013	0.0673	0.4228	0.8016
2014	−0.1115	0.7212	−0.3569
2015	−0.0845	0.8667	−0.1679
2016	−0.2191	0.2992	−1.0382
2017	−0.2468	0.2343	−1.1892
2018	−0.1595	0.5321	−0.6248
2019	−0.3170	0.1103	−1.5968
2020	−0.2627	0.2061	−1.2644

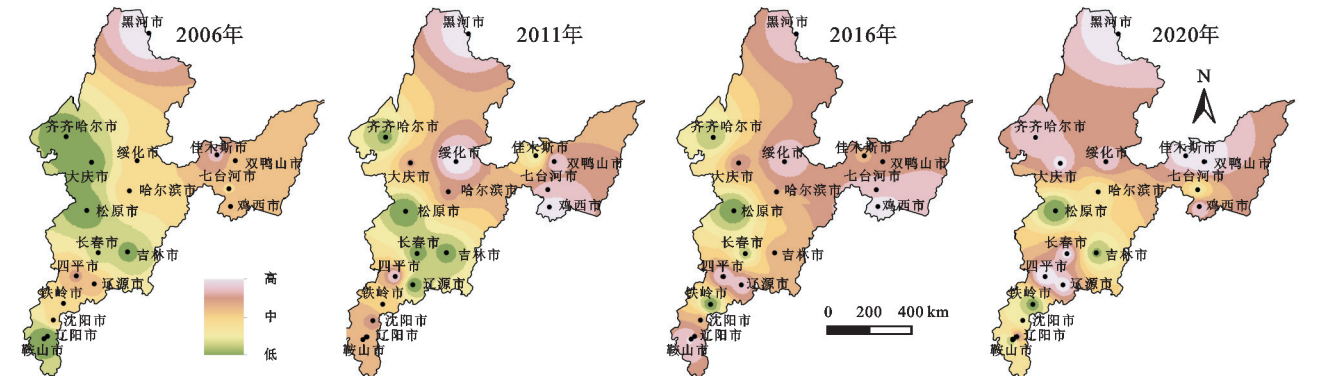


图 5 黑土区耕地利用生态效率空间集聚特征  
Fig. 5 Spatial agglomeration characteristics of ecological efficiency of cultivated land use in black soil areas

总体而言,2006—2020 年黑土区耕地利用生态效率逐渐呈“边缘—中心”空间扩散格局,大致表现为由南北两端高值集聚向内及四周递减,而后形成多个块状高值区和低值分布带,中部地区效率值总体处于较低发展水平。初期黑土区中上游城市碍于经济条件和社会人口等因素限制,农业基础设施水平较差、种植结构粗糙及经营规模相对落后,导致耕地利用生态转换率偏低。而近年来,大庆、绥化和齐齐哈尔等地农业科技趋向成熟发展,技术进步推动粮食产业集约规模化管理,耕地要素投入理性化增强,同时也对周边环境给予了最大关怀,有利于耕地利用生态效率的提升。四平市

耕地占用结构比较稳定,基础资源丰富,为地区粮食安全与生态安全提供了重要保障。伴随以四平市为核心增长圈层的显化,北部边缘高值区辐照规模逐渐收敛,区域内部两极分化局势显著,空间差距逐步扩张,这说明了当前黑土区未能充分发挥空间集聚优势,各地区可能存在信息流通不畅、合作机制不健全等往来壁垒,制约了区域整体粮食产能提升与农业绿色发展。中部以北地区得益于地理环境优越和政策长期扶持,耕地利用生态效率高值集聚效应持续深化,黑土治理重心逐渐转移到中部及南部片区,亟待推动区间城市模范作用,强化各主体绩效联动,加快



推进黑土区生态文明建设和农业高质量发展。

2.3 耕地利用生态效率松弛度分析

在运用超效率 SBM 模型评估黑土区耕地利用生态效率的基础上,从投入产出冗余视角分析区域效率状态的无效原因与改进方向。综合而言,2006—2020 年黑土区耕地利用生态无效率的原因主要在于劳动力、化肥农药等要素投入冗余和面源污染、碳排放等非期望产出冗余,且后者为核心因素(表 3)。具体来讲,农业机械与有效灌溉投入冗余水平相对较低,而劳动力和化肥等投入重度过剩,结果导致期望产出不足和碳排放过

量,耕地利用低碳转型面临挑战。以 2020 年为例,耕地利用生态效率中劳动力、农业机械、肥药和灌溉投入冗余率分别为 82.00%,3.52%,49.82,10.87%,而粮食产量和碳汇产出仍有 1.62%和 3.30%的潜力空间,地均面源污染和碳排放强度分别偏离效率前沿面 34.03%和 93.60%。由此可见,耕地要素错配和减排环保问题是造成黑土区耕地利用生态效率倾斜的主导原因,在资源约束趋紧的现实背景下,节约要素资本和环境污染治理成为黑土利用重点改善方向,也是增强耕地利用生态效率的关键所在。

表 3 黑土区耕地利用生态效率投入产出松弛度

Table 3 Input and output relaxation degree of ecological efficiency of cultivated land use in black soil areas									
年份	投入冗余率/%				期望产出不足率/%			非期望产出冗余率/%	
	劳动力	机械	肥药	灌溉	农业产值	粮食产量	碳汇量	面源污染	碳排放
2006	8.31	12.56	33.46	7.43	5.69	0.21	0.00	23.42	63.14
2007	25.71	20.08	51.52	7.73	9.94	1.71	0.05	9.49	19.56
2008	25.18	1.28	51.34	9.46	6.32	6.24	5.03	19.55	52.06
2009	12.29	1.95	43.51	7.28	7.45	6.56	5.39	40.42	82.18
2010	13.21	6.87	27.26	10.64	8.23	0.00	0.00	34.06	104.85
2011	8.00	6.51	19.67	10.45	9.00	1.22	0.00	59.59	124.19
2012	12.01	9.35	20.18	12.24	7.81	1.15	0.43	69.26	145.24
2013	14.24	1.68	11.37	2.20	11.43	5.06	3.80	26.05	76.39
2014	10.39	1.82	6.68	2.83	14.90	8.54	7.73	20.78	82.00
2015	3.00	1.74	3.99	4.40	13.90	10.82	10.19	36.30	107.95
2016	2.06	4.46	4.26	5.06	11.32	19.91	33.48	22.20	71.84
2017	11.73	6.76	9.04	13.65	11.46	8.73	8.47	12.40	34.57
2018	36.45	2.84	37.65	20.34	0.00	10.05	9.65	25.68	81.22
2019	103.79	2.37	60.31	27.37	0.00	3.31	4.00	62.33	157.61
2020	82.00	3.52	49.82	10.87	0.00	1.62	3.30	34.03	93.60
均值	24.56	4.80	28.67	10.13	7.83	5.68	6.10	33.04	86.43

2006—2020 年黑土区各市耕地利用生态效率的松弛情况如表 4 所示,由于研究期间黑河、双鸭山和四平等地均实现耕地利用有效状态,因此不纳入本表分析。总体上,北部和东部地区耕地生态状况较好,农地产出与面源污染、作物碳汇与碳排放之间发展关系相对均衡,中部和南部片区城市的资源有效利用率偏低,与上游地区存在较大差距。从投入角度看,黑土区各市均存在不同程度的过量投入,劳动力和化肥的冗余现象尤为显著,此外,齐齐哈尔和松原农业机械浪费情况较为严重,长春、鞍山和铁岭灌溉冗余率均高于 20%,仍有较大改进空间。从产出角度看,除鸡西外,各地区期望产出不足率普遍低下,可见期望供给不足并非城市耕地利用生态效率失衡的主要原因。在非期望产出维度上同样面临冗余问题,齐齐哈尔、佳木斯、吉林、松原、鞍山和铁岭等市面源污染冗余率均超过 10%,中下游城市碳排放量普遍过高,这意味着非期望产出过量是阻碍各市耕地利用生态效率提升的重要来源。

3 结论与讨论

3.1 结 论

本文基于“双碳”目标下黑土区耕地利用生态效率的现实内涵,采用考虑非期望产出的超效率 SBM 模型测度 2006—2020 年黑土区耕地利用生态效率水平,并对效率时空格局演变特征与改进方向进行分析。得出主要结论如下:

(1) 从时间演变特征来看,黑土区耕地利用生态效率大致历经波动上升(2006—2014 年)、显著下降(2014—2019 年)和迅速回升(2019—2020 年)3 个阶段,总体处于较高发展水平。黑土区各期城市效率差异显著,效率高值区主要聚集于北部边缘城市,效率低值区从中部偏西方向逐步向中下游地带转移。核密度函数表明基期和末期区间两极分化现象较为明显,整体发展严重失衡。(2) 从空间演变特征来看,黑土区耕地利用生态效率空间分布的全局相关特性并不明显,2006—2020 年黑土区耕地利用生态效率

总体呈“边缘—中心”空间扩散格局,大致表现为由南北两端高值集聚向内及四周递减,而后形成多个块状高值区和低值分布带,中部地区效率水平相对偏低,空间分异局势逐步扩张,区域规模集聚优势未能得到充分发挥。(3)从松弛情况来看,黑土区各市均存在不同程度的投入与产出冗余,劳动力和化肥的冗余现

象尤为显著,碳排放过量问题严峻,耕地生产要素投入和非期望产出冗余是区域耕地利用生态效率损失的主要原因,效率潜力的改进方向在于优化黑土资源配置和注重污染减排治理两方面,以黑土生态化建设为导向,严格把控耕地有效投入,从而推动“双碳”目标的发展进程。

表 4 黑土区各市耕地利用生态效率投入产出松弛度

Table 4 Input and output relaxation degree of ecological efficiency of cultivated land use in cities of black soil areas

地区	投入冗余率/%				期望产出不足率/%			非期望产出冗余率/%	
	劳动力	机械	肥药	灌溉	农业产值	粮食产量	碳汇量	面源污染	碳排放
哈尔滨	23.31	3.77	30.88	2.71	4.61	0.42	0.30	3.26	5.91
齐齐哈尔	51.58	29.00	70.51	8.63	0.00	0.70	0.00	10.23	9.60
鸡西	1.22	0.00	6.41	0.00	40.37	38.38	36.18	0.76	0.00
大庆	3.50	2.76	83.52	4.29	0.00	5.23	2.45	5.96	7.41
佳木斯	19.16	3.63	67.43	12.88	0.00	0.00	0.00	13.39	11.59
七台河	25.74	2.99	1.97	3.95	0.08	21.67	17.92	3.91	9.78
绥化	11.99	0.00	13.50	0.31	0.00	19.41	17.30	0.50	0.57
长春	40.07	3.06	6.76	20.46	0.00	0.00	0.00	9.61	28.41
吉林	31.65	5.71	27.17	15.71	0.00	0.00	0.00	12.13	34.82
辽源	9.20	6.03	0.00	13.36	0.00	6.57	2.37	6.13	30.17
松原	56.13	49.00	86.44	16.60	0.00	0.00	0.00	29.03	176.95
沈阳	19.51	0.00	23.77	7.76	14.60	0.00	0.00	7.95	50.81
鞍山	78.50	0.30	37.04	33.68	4.55	0.00	28.32	28.85	167.72
辽阳	16.99	9.02	40.51	9.93	12.40	0.00	0.00	8.23	69.98
铁岭	50.97	3.43	25.35	26.07	2.13	0.00	0.00	13.45	56.47

基于上述结论,得出如下启示:(1)重视黑土资源环境治理,筑牢耕地生态安全屏障。加强黑土区农业生态环境维护,推行绿色化耕地生产方式,对于资源环境承载能力趋弱的中部和南部地区而言,应搭建起智能环境监测平台,定期评估耕地发展状态,同时给予相应政策条例扶持,综合提高耕地利用生态绩效,推动区域农业高质量发展。(2)优化资源要素配置,促进黑土减排增效。根据松弛结果可知,投入和非期望产出冗余是拉低区域耕地利用生态效率值的主要因素,从投入视角来看,针对劳动力和肥药过度的现实问题,须因地制宜改进耕地投入结构,推动农村剩余劳动力流转就业,强化农地规模集约利用,降低化肥等投入品依赖性。从产出视角来看,中下游地带面临严重的面源污染和碳排放风险,应从关键源头把控,加大污染防治力度,摒弃传统重经济而轻生态的生产理念,发展低碳循环型农业经济,推动农业现代化建设。(3)构建区域协同管理体系,增强规模集聚优势发挥。由空间分析可见,黑土区内部分异局势显著,北部边缘城市效率辐射效应不足,区间分布结构较为散乱,理应进行分区精准施策,积极调动主体能动性,形成典型示范区进行对口产业帮扶,促进区域绩效联动、合作互惠、均衡发展。

3.2 讨论

东北黑土区是我国重要的粮食主产区和生态功

能区,为国家粮食安全和区域生态安全做出了重要贡献。本文结合“双碳”视角,对黑土区耕地利用生态效率进行综合考量,从时序和空间双重维度揭示了耕地利用生态效率的分布格局与演化趋势,并进一步分析了效率提升的优化路径,为黑土可持续利用和“双碳”目标实现提供参考,但在以下方面仍有待探讨:由于样本数据获取有限,碳汇贡献主要通过农作物的固碳量来体现,并未核算耕地土壤有机碳储量;在探究耕地利用生态效率的优化策略时,本文是在评价体系的基础上进行的冗余程度分析,后续可增设特定的驱动机制识别检验;基于研究结论,耕地碳排放与碳吸收效用均对耕地利用生态效率存在影响,农业领域“双碳”建设与耕地高效利用的发展关系是未来研究值得关注的重要方向。

参考文献:

[1] 王志刚.充分发挥科技创新在保护利用黑土地中的关键支撑作用[J].中国科学院院刊,2021,36(10):1127-1132.  
Wang Z G. Give full play to vital role of scientific and technological innovation in supporting protection and utilization of black soil[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021,36(10):1127-1132.

[2] 罗海平,潘柳欣,胡学英,等.我国粮食主产区粮食安全保障的生态代价评估:2000—2018 年[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):1-7.



- Luo H P, Pan L X, Hu X Y, et al. Assessment of ecological cost of food security in major grain producing areas in China: 2000—2018[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(1): 1-7.
- [3] 隋虹均, 宋戈, 高佳. 东北黑土区典型地域耕地生态退化时空分异: 以富锦市为例[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(9): 2277-2291.
- Sui H J, Song G, Gao J. Spatio-temporal differentiation of cultivated land ecological degradation in typical black soil regions of Northeast China: A case study of Fujin city[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(9): 2277-2291.
- [4] 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 M B, Zhang A L, Wen G H. 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.
- [5] 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 Z X, Wang X L, Li L, 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.
- [6] 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 X H, Kuang B, Li J. 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.
- [7] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 等. 中国耕地低碳利用绩效测算与时空分异[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1148-1163.
- Wu H Y, Meng Y, Huang H J, et al. Estimation and spatio-temporal divergence of the low-carbon performance of cropland use in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1148-1163.
- [8] 封永刚, 彭珏, 邓宗兵, 等. 面源污染、碳排放双重视角下中国耕地利用效率的时空分异[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(8): 18-25.
- Feng Y G, Peng J, Deng Z B, et al. Spatial-temporal variation of cultivated land's utilization efficiency in China based on the dual perspective of non-point source pollution and carbon emission[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(8): 18-25.
- [9] 张红梅, 宋戈. 黑龙江垦区耕地利用生态效率及其内部协调性[J]. *华中农业大学学报: 社会科学版*, 2019(4): 160-168, 178.
- Zhang H M, Song G. Eco-efficiency of cultivated land use and the internal coordination in Heilongjiang reclamation area[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2019(4): 160-168, 178.
- [10] 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时空格局与演变趋势[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(2): 50-60.
- Liu M B, Zhang A L, Wen G H. Temporal and spatial pattern and evolution trend of cultivated land use ecological efficiency in the main grain producing areas in the lower Yangtze region[J]. *China Land Science*, 2021, 35(2): 50-60.
- [11] Ke N, Zhang X P, Lu X H, et al. Regional disparities and influencing factors of eco-efficiency of arable land utilization in China[J]. *Land*, 2022, 11: 257.
- [12] 盖兆雪, 孙萍, 张景奇. 环境约束下的粮食主产区耕地利用效率时空演变特征[J]. *经济地理*, 2017, 37(12): 163-171.
- Gai Z X, Sun P, Zhang J Q. Cultivated land utilization efficiency and its difference with consideration of environmental constraints in major grain producing area [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(12): 163-171.
- [13] Yang B, Wang Z Q, Zou L, et al. Exploring the eco-efficiency of cultivated land utilization and its influencing factors in China's Yangtze River Economic Belt, 2001—2018[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294: 112939.
- [14] 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 G H, Liu M B, Hu X H, 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.
- [15] 戴劲, 彭文英, 连莉, 等. 基于 DEA 的东北黑土区耕地利用效率研究: 以嫩江县为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(6): 38-43.
- Dai J, Peng W Y, Lian L, et al. Analysis on cultivated land use efficiency based on DEA in black soils in northeastern China-A case study of Nenjiang County [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(6): 38-43.
- [16] 陈锦鸿, 蒋宏飞, 员学锋, 等. 陕西省城镇化与耕地利用生态效率耦合协调时空分析[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 338-346.
- Chen J H, Jiang H F, Yuan X F, et al. Spatial and temporal analysis of the coupled coordination of urbanization and ecological efficiency of cultivated land use in Shaanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4): 338-346.
- [17] 刘海龙, 王虎, 谢亚林, 等. 集中连片特困区耕地生态效率的时空演变特征及影响因素分析: 以吕梁山区为例[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 323-329.

- Liu H L, Wang H, Xie Y L, et al. Analysis for spatial and temporal evolution features and influencing factors of ecological efficiency of cultivated land in the concentrated contiguous destitute area: A case study of Lüliang mountain area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 323-329.
- [18] 崔宁波, 王欣媛, 于尊. 东北粮食主产区耕地生态效率评价及影响因素分析[J]. 生态经济, 2021, 37(7): 104-110.
- Cui N B, Wang X Y, Yu Z. Analysis ecological efficiency evaluation and influencing factors of cultivated land of grain production in northeast main production area[J]. Ecological Economy, 2021, 37(7): 104-110.
- [19] 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 L Y, Zhang R H, Pan Z C, 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.
- [20] 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 695-701.
- Wang J K, Xu X R, Pei J B, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695-701.
- [21] 卢新海, 杨喜, 陈泽秀. 中国城市土地绿色利用效率测度及其时空演变特征[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(8): 83-91.
- Lu X H, Yang X, Chen Z X. Measurement and temporal-spatial evolution characteristics of urban land green use efficiency in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(8): 83-91.
- [22] 汪艳涛, 张娅娅. 生态效率区域差异及其与产业结构升级交互空间溢出效应[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1276-1284.
- Wang Y T, Zhang Y Y. Regional difference of ecological efficiency and its interactive spatial spillover effect with industrial structure upgrading[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1276-1284.
- [23] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4684-4693.
- Ma H H, Yu T, Yang Z F, et al. Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4684-4693.
- [24] 程东亚, 李旭东. 贵州乌江流域气温与降水空间分布特征及其地形影响分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 246-252.
- Cheng D Y, Li X D. Analysis of spatial distribution of temperature and precipitation and its terrain impact of the Wujiang River Basin in Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 246-252.
- [25] 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 R T, Jiao H F. 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.
- [26] 叶浩, 濮励杰. 我国耕地利用效率的区域差异及其收敛性研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1467-1474.
- Ye H, Pu L J. Study on the cultivated land use efficiency between different regions of China and its convergence[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1467-1474.
- [27] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1184-1187.
- La S Y, Du P F, Chen J N. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(9): 1184-1187.
- [28] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 751-755.
- Chen M P, Chen J N, Lai S Y. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. China Environmental Science, 2006, 26(6): 751-755.
- [29] 李波, 张俊飏. 基于我国农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异研究[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 135-140.
- Li B, Zhang J B. Study on carbon effects and spatial differences based on changes in China's agricultural land use [J]. Economic Geography, 2012, 32(7): 135-140.
- [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: 217-232.
- [31] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1298-1309.
- Tian Y, Zhang J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1298-1309.
- [32] 罗斯炫, 何可, 张俊飏. 增产加剧污染: 基于粮食主产区政策的经验研究[J]. 中国农村经济, 2020(1): 108-131.
- Luo S X, He K, Zhang J B. The more grain production, the more fertilizers pollution? Empirical evidence from major grain-producing areas in China[J]. Chinese Rural Economy, 2020(1): 108-131.