

长江中游粮食主产区耕地碳源汇时空演化特征及驱动因素分析

吕添贵^{1,2}, 邱 蓉¹, 李泽英¹, 付舒斐², 赵 巧¹

(1. 江西财经大学财税与公共管理学院, 南昌 330013; 2. 江西财经大学应用经济学院(数字经济学院), 南昌 330013)

摘要: 辨识粮食主产区耕地碳源汇平衡特征及驱动因素, 对推动耕地低碳生产跃迁和稳固粮食安全至关重要。该研究基于碳源-碳汇双重视角测度 2005—2021 年长江中游粮食主产区耕地利用净碳汇量, 运用空间自相关、核密度估计和地理探测器等方法探究其时空演化特征及驱动因素, 并提出固碳减排策略。结果表明: 1) 长江中游粮食主产区耕地净碳汇总量从 2005 年 2 674.09 万 t 增加至 2021 年 3 757.58 万 t, 年均增幅 2.22%, 碳汇功能愈发凸显, 空间上各地市耕地净碳汇呈“低值区点状分散、高值区片状集聚”的差异分布态势; 2) 长江中游粮食主产区耕地净碳汇空间相关性存在“正集聚-负集聚-正聚集”交替变化规律, 整体和省域耕地净碳汇均存在扩散现象且区域差异有所增强; 3) 长江中游粮食主产区耕地净碳汇时空格局演化受耕地利用和农业经济因素影响显著, 其中, 耕地规模和农业机械化水平是关键主导因素且影响力区域异质性明显; 4) 应推动耕地规模化与机械化经营、科学量化物资投入及重视耕地生产主体素质培养, 带动长江中游粮食主产区耕地利用固碳减排。研究结果可为科学测度耕地碳源汇、完善耕地碳循环机制提供决策参考。

关键词: 碳; 耕地净碳汇; 时空演化特征; 驱动因素; 固碳减排路径; 长江中游粮食主产区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403144

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0251-11

吕添贵, 邱蓉, 李泽英, 等. 长江中游粮食主产区耕地碳源汇时空演化特征及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 251-261. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403144 <http://www.tcsae.org>

LYU Tiangui, QIU Rong, LI Zeying, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of carbon sources and sinks on cultivated land in the main grain producing areas in the Middle Reaches of the Yangtze River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 251-261. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403144 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农业系统温室气体占全球碳排放的 23%, 成为农业生产领域低碳减排的重大挑战, 中国作为积极应对气候变化的践行者, 致力于推动农业生产低碳转型以稳固增强农业生态系统碳汇能力^[1]。耕地系统作为农业生产的主要碳排放源, 同时兼具农作物碳吸收功能^[2], 尤其是粮食主产区耕地碳源-碳汇双重效应在农业低碳转型中发挥重要作用^[3]。因此, 科学测度粮食主产区耕地碳源汇, 分析其净碳汇水平变化及驱动机理, 可为实现“双碳”愿景下的耕地低碳生产跃迁和稳固粮食安全提供参考。

国内外学者围绕耕地碳源汇研究主题开展了广泛探讨, 构建涵盖“效应回算-演变评价-影响分析-管理调控”的综合研究脉络。在核算方法上, 多运用模型估算法和直接系数法^[4], 通过厘清耕地系统碳循环机制和关键参数进行核算。在评价内容方面, 从传统集中于农地利用碳排放及耕地农作物生命周期碳吸收, 发展为现有纳入土壤管理和秸秆处理等新要素^[5], 进而聚焦耕地碳源汇水平的构成解析^[6]、空间相关性测度^[7]以及区域差异性

分析^[8]等。在影响因素方面, 主要采用计量统计和分解分析法^[9], 地理探测器等统计学方法兼顾识别主导驱动因素并量化各因素相互作用得到有效应用^[10], 揭示了社会经济、农业技术与政策对耕地碳源汇的多重影响^[11-12]。在管理调控方面, 侧重基于不同农业低碳生产模式转型提出定制化建议^[13]。研究尺度从国家到省市^[14-15]层面均有涉及。综上, 已有研究为耕地碳源汇和碳效应的核算评价奠定了良好理论基础, 然而, 由于核算边界界定模糊和碳循环过程梳理尚未详尽, 导致耕地碳源碳汇和碳效应等研究交叉混淆。此外, 长江中游重要粮食生产区耕地利用系统内外碳效应较为复杂, 对其耕地碳源汇构成及机理空间异质性研究亟需深化, 从而能识别粮食主产区耕地碳循环重要机制, 进而响应耕地低碳增汇转型的现实需求。鉴于此, 本研究从耕地利用系统碳循环过程出发, 确定耕地碳源汇核算边界, 运用空间自相关和核密度估计分析长江中游粮食主产区 31 市 2005—2021 年耕地净碳汇的时空演变特征, 并运用 Pearson 相关性分析和地理探测器探究多因素对耕地净碳汇水平空间格局的综合作用, 以期为制定粮食主产区差别化耕地固碳减排政策提供参考。

1 理论分析框架

耕地是土地资源关键组成部分, 也是陆地生态系统碳库中最活跃角色, 既会在其投入和利用过程中释放碳,

收稿日期: 2024-03-21 修订日期: 2024-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(42261049); 国家社会科学基金(20BJY144); 江西省自然科学基金项目(20232BAB203061); 江西财经大学第十八届学生科研课题(20231014220028732)

作者简介: 吕添贵, 博士, 副教授, 硕士生导师。研究方向为资源环境保护。Email: lvtiangui@163.com

也会在培育农作物过程中吸收碳。作为受气候变化等自然因素以及耕种、施肥等人类农业管理活动多重影响的开放式系统，耕地的碳循环过程至关重要。由此，本研究借鉴生命周期界定方式，构建了耕地利用全过程碳效应来源、影响因素和温室气体类别的理论分析框架（图 1）。总体而言，耕地利用系统碳循环是碳以不同形式在大气碳库、作物碳库和土壤碳库之间循环往复的活动，涉及自然生产和人类活动。其中包括碳的吸收、排放和系统外转移 3 个环节^[16]，碳循环流动路线包括以下过程：

1) 碳的吸收过程：在全生长周期中，耕地农作物通过光合作用从大气中吸收二氧化碳，扣除呼吸作用消耗的部分，剩余部分转变为有机物并将其储存在农作物体内，形成碳汇。

2) 碳的排放过程：耕地利用具有碳源效应，在农业生产中各类农资使用、能源消耗、残留物处理等活动频繁，涉及化学品的大量投入，均会导致二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等温室气体排放。耕地利用系统碳源主要包括：①耕地利用过程中的农药农膜等物质投入、柴油电力等能源消耗和农业管理等产生碳排放；②稻田种植过程中产生 CH₄ 排放；③施用氮肥与秸秆还田直接产生 N₂O 排放，氮氧化物与氨挥发沉降及土壤氮淋溶或径流间接引起 N₂O 排放。

3) 碳的系统外转移过程：耕地利用系统内的部分碳储存在各类农作物中，其成为农产品及其制成品而被人类利用和消耗。为保证系统边界的完整性，将其相当的碳量定义为碳转移。

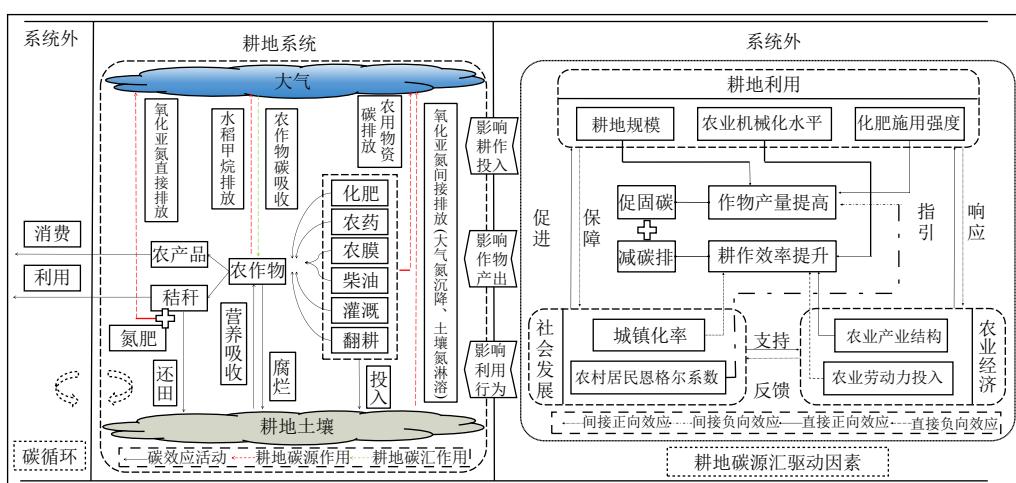


图 1 耕地碳源汇分析框架

Fig.1 Framework for analyzing carbon sources and sinks in cultivated land

综上，耕地碳源汇是基于人—耕地系统相互作用与制约而达到的动态平衡状态，并在新平衡状态下循环往复的发展过程。在此过程中，耕地利用系统保持着系统内部动态稳定，加以人类活动干预，基本呈现“净碳汇”良好态势^[17]。系统外的社会发展、农业经济和耕地利用子系统相互支持和响应，共同驱动作物产量提高以及耕作效率提升，以有效推动耕地固碳减排。其中，在社会发展方面，城镇化率的提高以及农村恩格尔系数的降低均促进了耕地有效流转和规模经营，进而对耕地净碳汇产生间接影响。在农业经济方面，减少农业劳动力投入以及调整农业产业结构，即种植业产值占农业总产值之比提高，可以有效优化耕作模式，提升耕地劳作效率，以此减少温室气体排放。在耕地利用方面，耕地规模扩大和化肥使用强度合理增强能够有效促进作物产量提高，进而促进耕地碳吸收；而农业机械化水平提高促进耕作生产各环节资源利用率提升，有助于减少过度消耗而产生的耕地碳排放。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

长江中游粮食主产区位于 26°03'N~32°38'N, 110°45'E~

118°21' E，涵括江西、湖南、湖北三省内 31 个城市（图 2）。区域耕地总面积约 11.30 万 km²，约占全国耕地总面积 9.25%，地形以平原和丘陵为主，农作物生长的水热条件优良，是中国重要粮食生产基地。

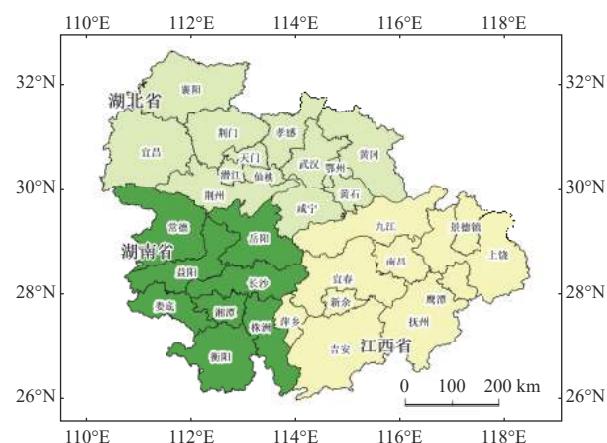


图 2 研究区示意

Fig.2 Schematic diagram of research area

2022 年，区域粮食总产量为 7 906 万 t，农业总产值达到 8 252 亿元，约占全国农业总产值 12%^[18]。然而，作为人口聚集区以及社会经济热点区，长江中游粮食主

产区耕地生产面临超地力开发与高致碳物资投入等现实问题, 导致区域耕地固碳减排任务尤为严峻。在此背景下, 响应“双碳”(Carbon) +城市群(Cities) +合作(Cooperation)的3C理念, 探讨区域性“双碳目标”的实现策略, 对稳步提升长江中游粮食主产区耕地净碳汇及助力实现农业低碳转型具有紧迫性。

2.2 耕地净碳汇核算

耕地净碳汇, 即碳吸收量与碳排放量之间的差值。计算式如下:

表1 耕地碳排放类别、测算公式及数据说明

Table 1 Classification, calculation formula, and data explanation of carbon emissions from cultivated land

碳源类别 Carbon source	测算公式 Measurement equation	公式说明 Description of the equation	参考文献 Reference source
农用物资排放 Agricultural material emission	$E_{\text{material}} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M E_{im} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M h_{im} \cdot \delta_m$	式中 E_{material} 为农用物资碳排放量 (t); E_{im} 、 h_{im} 分别为城市 i 因子 m 的碳排放量与各类农用物资(包括化肥、农药、农膜、农用柴油、农业灌溉和农业翻耕)量; δ_m 为因子 m 的碳排放系数, 文中 $m=6$ 。农用物资化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉、翻耕碳排放系数分别为 $0.8956 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $4.3941 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.18 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.5927 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $266.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $312.60 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$	[20]
水稻甲烷排放 Rice field methane	$E_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^I S_i \cdot f_i$ $E_{\text{N}_2\text{O}} = E_{\text{sd}} + E_{\text{si}}$ $E_{\text{sd}} = (N_{\text{fer}} + N_{\text{straw}}) \cdot e f_{\text{sd}}$	式中 E_{CH_4} 为稻田甲烷排放总量 (t); S_i 、 f_i 分别为城市 i 的水稻种植面积与对应排放系数。江西省、湖北省、湖南省水稻甲烷排放系数为 42.20 、 38.23 、 $35.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	[21]
土壤氧化亚氮排放 Nitrous oxide emissions from soil	$N_{\text{straw}} = \sum_{k=1}^K N_{\text{straw}-k}$ $N_{\text{straw}} = \sum_{k=1}^K \left[\left(\frac{Y_k}{H_k} - Y_k \right) \cdot r_k \cdot J \cdot b_k + \frac{r_k}{H_k} \cdot r_k \cdot g_k \cdot b_k \right]$ $E_{\text{si}} = E_{\text{atmos}} + E_{\text{leach}}$ $= (N_{\text{fer}} + N_{\text{straw}}) \cdot V \cdot e f_{\text{atmos}} + (N_{\text{fer}} + N_{\text{straw}}) \cdot L \cdot e f_{\text{leach}}$	式中 K 为农作物种类数, 文中 $K=13$; $N_{\text{straw}-k}$ 、 Y_k 分别表示作物 k 的秸秆还田氮输入量 (t) 和经济产量 (t); J 为秸秆还田率; H_k 、 g_k 、 b_k 、 r_k 为作物 k 的经济系数、根冠比、秸秆含氮率、经济产品部分的干物质重比。相关系数详见表2	[22]

2.2.2 耕地碳吸收测算

从耕地利用角度看, 耕地碳汇主要指农作物在生长过程中通过光合作用而吸收的二氧化碳量^[23], 估算公式为

$$S = \sum_{k=1}^K S_k = \sum_{k=1}^K \frac{c_k Y_k (1 - r_k)}{H_k} \quad (2)$$

式中 S 为耕地碳汇量 (t); S_k 为作物 k 的碳吸收量 (t); c_k 为作物 k 的碳吸收率; Y_k 为作物 k 的经济产量 (t); r_k 为含水率 (%)。相关系数详见表2。

表2 各农作物碳排放及碳吸收量核算参数

Table 2 Accounting parameters for carbon emissions and carbon absorption of various crops

作物类型 Crop type	根冠比 Root-crown ratio	经济系数 Economic coefficient	含水率 Moisture content/%	秸秆含氮率 Nitrogen content of straw	碳吸收率 Carbon sequestration rate
稻谷	0.125	0.45	12	0.0075	0.414
小麦	0.166	0.40	12	0.0052	0.485
玉米	0.170	0.40	13	0.0580	0.471
豆类	0.130	0.34	13	0.0181	0.450
薯类	0.050	0.70	70	0.0110	0.423
棉花	0.200	0.10	8	0.0055	0.450
麻类	0.200	0.36	15	0.0131	0.450
甘蔗	0.050	0.50	50	0.8300	0.450
花生	0.200	0.43	10	0.0182	0.450
油菜籽	0.150	0.25	10	0.0055	0.450
烟叶	0.200	0.55	85	0.0144	0.450
蔬菜	0.250	0.60	90	0.0080	0.450
瓜类	0.050	0.70	90	0.0110	0.450

2.3 空间自相关分析

探索性空间数据分析是揭示不同区域数据的结构性

$$C_{NS} = C_S - C_E \quad (1)$$

式中 C_{NS} 为耕地净碳汇量 (t); C_S 和 C_E 为耕地碳吸收量 (t) 与碳排放量 (t)。耕地净碳汇量的正负情况及大小, 反映了耕地系统的碳效应。

2.2.1 耕地碳排放测算

根据研究分析框架, 分别测算并汇总农用物资排放、稻田甲烷排放和土壤氧化亚氮排放 3 类, 得出耕地碳排放量。其中, 依据增温潜势系数将 CH_4 和 N_2O 排放量进行等量换算^[19], 以便后续比较与分析(表1)。

表1 耕地碳排放类别、测算公式及数据说明

Table 1 Classification, calculation formula, and data explanation of carbon emissions from cultivated land

碳源类别 Carbon source	测算公式 Measurement equation	公式说明 Description of the equation	参考文献 Reference source
农用物资排放 Agricultural material emission	$E_{\text{material}} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M E_{im} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M h_{im} \cdot \delta_m$	式中 E_{material} 为农用物资碳排放量 (t); E_{im} 、 h_{im} 分别为城市 i 因子 m 的碳排放量与各类农用物资(包括化肥、农药、农膜、农用柴油、农业灌溉和农业翻耕)量; δ_m 为因子 m 的碳排放系数, 文中 $m=6$ 。农用物资化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉、翻耕碳排放系数分别为 $0.8956 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $4.3941 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.18 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.5927 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $266.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $312.60 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$	[20]
水稻甲烷排放 Rice field methane	$E_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^I S_i \cdot f_i$ $E_{\text{N}_2\text{O}} = E_{\text{sd}} + E_{\text{si}}$ $E_{\text{sd}} = (N_{\text{fer}} + N_{\text{straw}}) \cdot e f_{\text{sd}}$	式中 E_{CH_4} 为稻田甲烷排放总量 (t); S_i 、 f_i 分别为城市 i 的水稻种植面积与对应排放系数。江西省、湖北省、湖南省水稻甲烷排放系数为 42.20 、 38.23 、 $35.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	[21]
土壤氧化亚氮排放 Nitrous oxide emissions from soil	$N_{\text{straw}} = \sum_{k=1}^K N_{\text{straw}-k}$ $N_{\text{straw}} = \sum_{k=1}^K \left[\left(\frac{Y_k}{H_k} - Y_k \right) \cdot r_k \cdot J \cdot b_k + \frac{r_k}{H_k} \cdot r_k \cdot g_k \cdot b_k \right]$ $E_{\text{si}} = E_{\text{atmos}} + E_{\text{leach}}$ $= (N_{\text{fer}} + N_{\text{straw}}) \cdot V \cdot e f_{\text{atmos}} + (N_{\text{fer}} + N_{\text{straw}}) \cdot L \cdot e f_{\text{leach}}$	式中 K 为农作物种类数, 文中 $K=13$; $N_{\text{straw}-k}$ 、 Y_k 分别表示作物 k 的秸秆还田氮输入量 (t) 和经济产量 (t); J 为秸秆还田率; H_k 、 g_k 、 b_k 、 r_k 为作物 k 的经济系数、根冠比、秸秆含氮率、经济产品部分的干物质重比。相关系数详见表2	[22]

和规律性的数据分析方法, 通常分为全局自相关和局部自相关两方面。本文采用全局自相关分析方法, 反映区域内耕地净碳汇量总联系程度和空间关联格局, 通过全局 Moran's I 指数反映该变量样本在区域空间内的时空演变规律^[24], 计算式为

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

式中 n 为区域数量; $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, x_i 和 x_j 分别代表 i 区域和 j 区域耕地净碳汇值 (t); W_{ij} 则表示邻接空间权重矩阵。

2.4 核密度估计

核密度估计是估计概率密度函数非参数方法, 可描述事物分布形态及演进特征, 用于探究统计数据非均衡的动态演进特征^[25]。本研究采用核密度探究研究区耕地净碳汇值动态分布和演进趋势, 借助波峰高度和宽度等指标分析集聚性和分散性特征。对于来自连续总体 X 的样本数据 x_1 、 x_2 、 $x_3\dots x_n$, 在任意一点处总体密度函数 $f_h(x)$ 的核密度估计可定义为

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (4)$$

式中 n 为观测数量; h 为带宽, 根据均方误差最小的原则选择最优带宽; K 为核函数, 采用最常用的高斯核函数。核密度愈大, 则表示数据集中程度愈高; 反之, 则

表示数据集中程度愈小。

2.5 Pearson 相关系数

采用 Pearson 相关系数来确定耕地净碳汇与各因子之间的相关性和方向性。Pearson 相关系数取值范围为 [-1,1]，绝对值越高，表示相关性越强。计算式如下：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中 r_{xy} 为耕地净碳汇与各因子的相关系数； x_i 表示第 i 个地级市的驱动因素指标， y_i 表示第 i 个地级市耕地净碳汇值 (t)； \bar{x} 和 \bar{y} 分别为驱动因素指标和耕地净碳汇值 (t) 的平均数。

2.6 地理探测器

地理探测器模型能够有效分析地理要素空间分异性各变量的影响程度。本文运用因子影响力探测和多因子交互探测功能^[26]，科学合理地探究耕地净碳汇时空格局成因^[27]。使用 K-means 聚类法对各影响因素指标进行离散化分级，计算各因素及各交互作用对耕地净碳汇水平影响力值 q ， q 的取值区间为 [0,1]， q 越大，表明因子对耕地净碳汇影响程度越高。其计算式为

$$q = \frac{N\sigma^2 - \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (6)$$

式中 N_h 为下一级区域样本单元数； N 代表整个研究区域样本单元数； L 为下一级研究区域个数； σ^2 代表整个研究区域耕地净碳汇平方差； σ_h^2 为下一等级研究区域的方差。

2.7 驱动因子指标体系构建

本文基于“社会发展—农业经济—耕地利用”框架，选取城镇化水平 (x_1)、农村恩格尔系数 (x_2)、农业产业结构 (x_3)、农村劳动力投入 (x_4)、耕地规模 (x_5)、农业机械化水平 (x_6) 和化肥施用强度 (x_7) 7 个因子，运用地理探测器方法探讨影响耕地利用净碳汇主导因素，为耕地利用固碳减排提供政策依据。

在社会发展方面，选取城镇化率和农村居民恩格尔系数作为表征指标。城镇化率反映人口角度的地区经济水平，在城镇化推进过程中，耕地数量质量、利用方式均受到很大影响。农村恩格尔系数从乡村振兴角度衡量乡村发展状况^[9]，其在一定程度上影响了耕地利用主体决策，即农村居民的农业生产情况。

在农业经济方面，选取农业产业结构和农业劳动力投入作为表征指标。农业产业结构体现农业产值结构侧重的不同，由于种植业兼具碳源和碳汇双重功能，种植业产值占农业总产值比例的不同会直接对净碳汇产生影响。农业劳动力投入反映耕地利用中的人员配置情况，与配套农用物资情况和生产经营模式关系密切^[15]。

在耕地利用方面，选取耕地规模、农业机械化水平和化肥施用强度作为表征指标。耕地面积直接决定农资投入和农作物产量，进而直接影响耕地碳源汇水平。农业机械化水平体现农业生产过程中农机使用状况，能够

直接反映耕地利用的技术普及程度。化肥施用强度表示地均农业化学化程度^[28]，化肥作为耕地碳排放主要来源的同时也具备一定的作物增产作用，通过化肥施用量和农作物总播种面积的比值表示。

2.8 数据来源

本文研究对象为长江中游粮食主产地区 31 个地级市（县），所用数据来自《江西统计年鉴（2006—2022 年）》、《湖南统计年鉴（2006—2022 年）》、《湖北统计年鉴（2006—2022 年）》、各地市统计年鉴、社会经济统计公报以及 EPS 数据统计平台 (<https://olap.epsnet.com.cn>)。其中灌溉为有效灌溉面积，化肥施用量为折纯量，翻耕为农作物实际播种面积，个别缺失数据采用均值插补、线性插补及趋势外推法补齐。

3 结果与分析

3.1 耕地碳源汇时空演进分析

3.1.1 耕地碳源汇时序变化特征

基于研究框架核算长江中游粮食主产区耕地碳源汇水平，绘制研究区耕地碳源汇情况表和演进过程。

由表 3、图 3 可知，长江中游粮食主产区耕地净碳汇量持续为正值，表明区域整体长期发挥碳吸收功能。2005—2021 年耕地净碳汇总量从 2 674.09 万 t 增长到 3 757.58 万 t，年均增速 2.22%，碳汇功能不断凸显。耕地净碳汇增长主要经历 3 个阶段。2005—2010 年为高速增长期，年均增幅为 3.61%，主要由碳吸收的增加驱动；2011—2015 年为稳步提升期，耕地净碳汇值增长约 2.73%，主要受碳排放快速减少影响；2016—2021 年为波动递增期，期间虽有两年的减少，但期末碳吸收的基数和增速显著超过碳排放，致使净碳汇水平的加速提升。在各市的净碳汇均值方面，均呈净碳汇效应，大多数低于 150 万 t，高于 200 万 t 的仅有襄阳、上饶、荆州、宜春、常德 5 个城市。

研究期内长江中游粮食主产区耕地碳源经历了“先波动上升、后持续下降”变化趋势，并于 2012 年达到峰值 3 392.18 万 t。此后，特别是研究期末五年内，碳源年均下降率达到 2.92%。从细分结构来看，各排放源贡献不一，发展趋势异同并存。其中，耕地土壤碳排放（氧化亚氮）占比最大，其次是农业物资碳排放，而水稻甲烷排放量占比最小。就各源头发展趋势而言，耕地土壤碳排放量发展轨迹先波动上升，期末有所下降；农用物资碳排放自 2013 年达到峰值后呈现下降态势；水稻甲烷排放量基数小且波动不明显。值得注意的是，三省耕地碳源时序变化趋势与区域整体大致一致，由于江西省氮肥施用量远低于其他两省，其耕地土壤碳排放量维持在较低水平。

在研究期内，长江中游粮食主产区耕地碳汇能力持续波动上升，总碳汇量从 5 782.24 万 t 增加到 6 583.73 万 t，年均增速 0.84%。2015 年前，碳汇量保持稳步上升，并达到峰值 6 970.65 万 t。此后，受耕地种植结构和农业布局调整影响，各类农作物种植面积和产量发生变化，导

致耕地碳汇量出现波动性下降。三省中湖北省耕地碳汇

量变化最为显著, 研究期内上涨了 401.79 万 t。

表 3 2005—2021 年长江中游粮食主产区耕地碳源汇情况

Table 3 Carbon source and sink situation of cultivated land in the main grain producing areas of the middle reaches of the Yangtze River from 2005 to 2021

年份 Year	碳源 Carbon source			碳汇 Carbon sink					
	农业物资碳排放量 Carbon emissions from agricultural materials/(10 ⁴ t)	水稻甲烷碳排放量 Methane emissions from rice fields/(10 ⁴ t)	土壤氧化亚氮排放量 Nitrous oxide emissions from soils/(10 ⁴ t)	碳源总量 Cultivated land carbon source/(10 ⁴ t)	增速 Growth/%	碳汇总量 Cultivated land carbon sink/(10 ⁴ t)	增速 Growth/%	净碳汇总量 Net carbon sink/(10 ⁴ t)	增速 Growth/%
2005	1 293.43	288.08	1 526.63	3 108.15	-	5 782.24	2 674.09	-	
2006	1 306.71	287.33	1 499.80	3 093.85	-0.46	5 920.16	2.39	2 826.32	5.69
2007	1 321.13	287.20	1 486.57	3 094.90	0.03	6 047.72	2.15	2 952.83	4.48
2008	1 351.80	288.43	1 503.89	3 144.12	1.59	6 189.54	2.35	3 045.42	3.14
2009	1 395.96	300.19	1 533.32	3 229.47	2.71	6 443.13	4.10	3 213.67	5.52
2010	1 412.54	304.32	1 632.48	3 349.35	3.71	6 537.60	1.47	3 188.25	-0.79
2011	1 432.95	305.27	1 640.54	3 378.76	0.88	6 566.64	0.44	3 187.88	-0.01
2012	1 450.52	309.93	1 631.73	3 392.18	0.40	6 889.83	4.92	3 497.65	9.72
2013	1 467.43	312.06	1 607.28	3 386.77	-0.16	6 895.65	0.08	3 508.88	0.32
2014	1 456.26	314.68	1 578.26	3 349.20	-1.11	6 946.28	0.73	3 597.08	2.51
2015	1 439.57	317.02	1 576.51	3 333.10	-0.48	6 970.65	0.35	3 637.55	1.13
2016	1 423.22	312.19	1 542.55	3 277.96	-1.65	6 647.46	-4.64	3 369.50	-7.37
2017	1 382.69	306.44	1 518.48	3 207.61	-2.15	6 746.54	1.49	3 538.93	5.03
2018	1 349.75	298.46	1 421.15	3 069.36	-4.31	6 614.04	-1.96	3 544.68	0.16
2019	1 316.85	292.50	1 356.49	2 965.84	-3.37	6 476.25	-2.08	3 510.41	-0.97
2020	1 294.16	295.09	1 304.38	2 893.63	-2.43	6 533.52	0.88	3 639.88	3.69
2021	1 284.99	292.42	1 248.74	2 826.16	-2.33	6 583.73	0.77	3 757.58	3.23

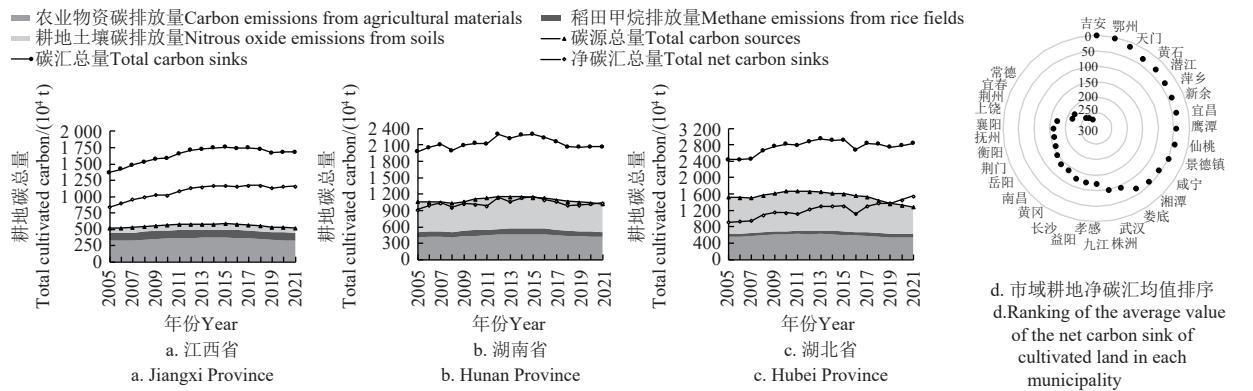


图 3 2005—2021 年长江中游粮食主产区耕地碳源汇演变

Fig.3 Evolution of carbon source and sink in cultivated land in the main grain producing areas of the middle reaches of the Yangtze River from 2005 to 2021

3.1.2 耕地净碳汇空间格局演变特征

为了更加直观展示长江中游粮食主产区耕地碳源汇水平时空动态演化过程, 选取 2005、2010、2015 和 2021 年为典型年份, 结合手动分类法并对分段数值进行统一分级, 将耕地净碳汇量由低到高分为低(负值)、中低(0 至 100 万 t)、中高(100 万 t 至 160 万 t)和高(160 万 t 以上)水平区 4 类, 分析长江中游粮食主产区耕地利用净碳汇水平空间分布格局(图 4)。

1) 整体分析: 图 4 揭示了研究区内各地市在耕地净碳汇水平上的显著差异, 空间格局上整体呈低值点状分散分布、高值片状集聚分布的空间分布特征。相对而言, 湖北省 13 市的平均耕地净碳汇水平高于江西 10 市和湖南 8 市。首先, 长江中游粮食主产区耕地净碳汇水平逐年整体上升, 表明耕地利用系统碳盈余优势的增强。其次, 特别是在 2010 至 2015 年间, 市级单元间的净碳汇值差异显著扩大。此外, 研究期末耕地净碳汇低水平地区逐渐减少至无, 即研究区全域耕地净碳汇值均为正

数, 发挥良好的耕地碳汇功能; 而耕地净碳汇高水平地区从 2005 的 3 市增长至 2021 年的 13 市, 呈现出空间集聚态势。

2) 演变分析: 2005 年至 2010 年间, 长江中游粮食主产区耕地净碳汇水平普遍提高, 特别是襄阳市、荆门市、岳阳市、抚州市、九江市和上饶市 6 市, 由中高水平区跃升为高水平区, 形成了西北-东南的条状高值聚集格局; 2010 年至 2015 年间, 该区域的净碳汇水平普遍达到中低水平及以上, 仅有吉安市为耕地净碳汇低水平地区, 且净碳排量由 7.32 万 t 减少为仅 1.37 万 t, 整体趋势向好。2015 年至 2021 年间, 研究区耕地净碳汇水平基本为中高水平及以上, 已无地市为低水平地区, 究其原因, 研究区各地市耕地碳排放量的显著减少和碳吸收量的适度增加。尤其是, 荆州、常德和宜春三市由于其良好的耕地生态和合理的农业投入, 始终保持在净碳汇的高水平区域, 并呈现出稳定的增长趋势。

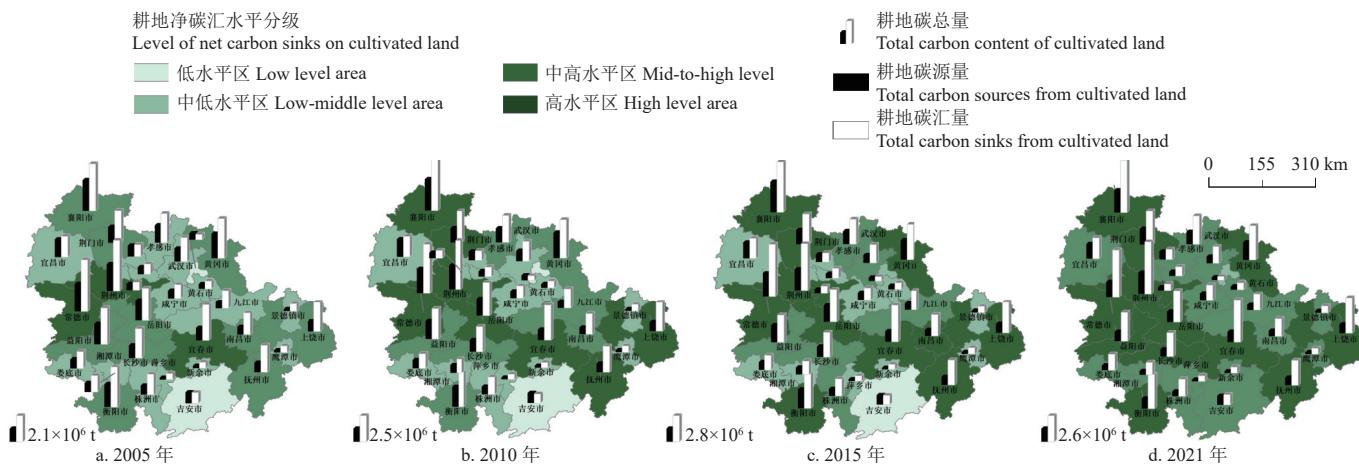


图 4 长江中游粮食主产区耕地碳排放、碳吸收与净碳汇空间分布

Fig.4 Spatial distribution of carbon emissions, carbon absorption, and net carbon sink from cultivated land in the main grain producing areas of the middle reaches of the Yangtze River

3.2 耕地净碳汇空间关联性分析

借助 Geoda 软件, 对 2005—2021 年长江中游地区耕地净碳汇进行全局自相关性检验, 得出 Global Moran's I 指数与显著性 P 值如表 4。

表 4 2005—2021 年长江中游粮食主产区耕地净碳汇水平
Global Moran's I 指数

Table 4 Global Moran's I index of net carbon sink level of cultivated land in the main grain producing areas of the middle Yangtze River from 2005 to 2021

年份 Year	Moran's I	P 值 P -value	年份 Year	Moran's I	P 值 P -value
2005	0.159	0.004	2014	-0.202	0.032
2006	0.202	0.001	2015	-0.235	0.022
2007	0.195	0.003	2016	-0.123	0.044
2008	-0.025	0.355	2017	-0.026	0.127
2009	-0.043	0.422	2018	0.129	0.005
2010	-0.163	0.064	2019	0.149	0.067
2011	-0.074	0.321	2020	0.168	0.031
2012	-0.168	0.084	2021	0.212	0.016
2013	-0.173	0.023			

结果表明, Global Moran's I 指数值介于 -0.235 至 0.212 之间, 呈波动变化, 有“先波动下降、后持续上升”态势。且基本通过 1% 的显著性检验, 表明长江中游粮食主产区耕地净碳汇存在一定空间自相关性, 但呈“正集聚-负集聚-正集聚”两种状态变化。从演变趋势来看, 2008—2017 年间, Moran's I 值持续为负值, 且在 2015 年达到最低值 -0.235, 耕地净碳汇呈显著空间负相关, 区域差

异显著。

而 2018 年后 Moran's I 值呈上升趋势, 且在研究期末 2021 年达到最高值 0.212, 空间相关性有所增强, 空间正相关集聚格局显现。这表明近年随着对农业固碳减排的认知日益深入, 各地陆续制定各类耕地保护政策与低碳农业发展规划促使耕地碳净碳汇发挥正向空间溢出效应, 以及区域内低碳交流合作的不断加强也带动了耕地净碳汇水平的集聚性逐渐提升。

3.3 耕地净碳汇演进趋势分析

为科学反映长江中游粮食主产区整体和各省局部耕地净碳汇的动态演进特征, 借助 Matlab 软件绘制核密度估计图, 纵坐标代表概率密度 (图 5)。

由图 5a 所示, 研究区整体耕地净碳汇核密度曲线中心有一定向右偏移趋势, 这应证了研究期内耕地净碳汇量有所上升。从主波峰和波峰数量看, 由研究期初的“低宽峰”演变为研究期末的“高尖峰”, 尽管主峰数量不变, 但侧峰隆起幅度变大且数量趋于稳定为 2 个, 多极分化现象显著。总体上看, 核密度函数变动区间变宽, 区间变化明显, 表明耕地碳净碳汇集聚度呈下降趋势, 差距分化态势增强。从分布延展性来看, 研究期内右拖尾现象增强, 说明区域整体净碳汇水平向高值方向的扩散趋势, 揭示了长江中游粮食主产区耕地净碳汇水平及其区域差异均不断提高。

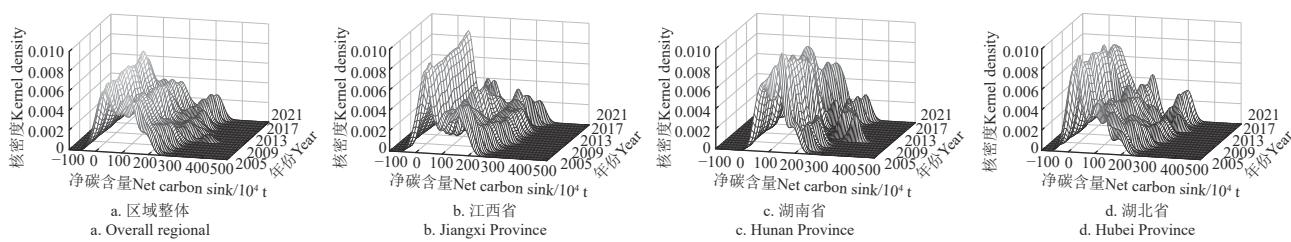


图 5 长江中游粮食主产区耕地净碳汇动态演进趋势

Fig.5 Dynamic evolution trend of net carbon sink in cultivated land in the main grain producing areas of the middle reaches of the Yangtze River

省域尺度上, 江西省核密度曲线变化情况与区域整体保持一致, 均波峰变多增高而变动区间变宽并右迁,

耕地净碳汇水平提高和扩散现象逐步凸显。湖南省核密度曲线中心有向左偏移趋势, 经历了“一主一侧”到“一

“主两侧”峰值的发展态势，期末3个峰值大概位于100万、270万和300万t位置处，且峰值高度差距较大，即耕地净碳汇空间非均衡性更加严重。湖北省核密度曲线同样经历了一样的波峰数量变化，但主峰值位置相对其他两个省份更靠左，且主峰峰值下降并宽度扩大，说明耕地净碳汇水平相对较低，且集聚性下降，在空间格局上愈发趋于分散。综上，区域整体和局部各省耕地净碳汇均存在整体扩散现象，逐渐演变为“一主两次”的波峰态势，即逐渐确定3个集聚高峰区间，形成三极分化格局。

3.4 耕地净碳汇驱动因素分析

3.4.1 主要驱动因子识别及作用分析

运用地理探测器对长江中游粮食主产区耕地净碳汇空间分异的驱动因子进行分析，运用Pearson相关系数确定驱动因子对耕地净碳汇的相关性和作用方向，结果如表5所示，所有探测因素均通过0.1%的显著性检验。由此可见，耕地利用和农业经济因素在耕地净碳汇空间格局驱动力较强，而社会发展因素对其影响相对较弱。

1) 耕地规模、农业机械化水平和化肥施用强度 q 值分别为0.583、0.497和0.468，是影响耕地净碳汇空间布

局的主导因素。结果表明，较大的耕地面积有助于提高耕作产量，进而有效增加耕地净碳汇量。同时，农业机械化水平的显著提升促进农业生产的低能耗和高效率，减排增汇作用明显。此外，化肥的合理施用对粮食增产具有显著促进作用。因此，基于土壤测试和作物营养需求的科学施肥，能积极影响耕地的碳效应。

2) 农业劳动力投入和农业产业结构 q 值分别为0.354和0.103，是影响长江中游粮食主产区耕地净碳汇空间格局的重要因素。一方面，农业生产经营模式由劳动力密集型向技术密集型转变，尽管劳动力投入的增加可能会伴随更多的农业物资使用，从而增加碳排放量，但技术密集型的经营模式能有效提高净碳汇。另一方面，种植业与畜牧业、渔业等相比具有较高碳汇功能，在农业产业中发挥特殊作用，农业产业结构变化对耕地净碳汇具有驱动作用。

3) 而城镇化水平和农村居民恩格尔系数的 q 值较低，分别为0.076和0.032，表明其驱动力相对较弱。提高城镇化水平和降低农村居民恩格尔系数均可有效促进过剩的农村劳动力向非农行业转移，间接推动农业生产的规模化和集约化，在一定程度上影响耕地净碳汇水平。

表5 长江中游粮食主产区耕地净碳汇空间格局驱动因子探测结果

Table 5 Results of driving factors for the spatial pattern of net carbon sink in cultivated land in the main grain producing areas of the middle reaches of the Yangtze River

因子 Index	城镇化水平 Urbanization rate x1	农村恩格尔系数 Engel's coefficient for rural inhabitants (x2)	农业产业结构 Agricultural industrial structure x3	农业劳动力投入 Volume of agricultural labor inputs x4	耕地规模 Cultivated land area x5	农业机械化水平 Agricultural mechanization level x6	化肥施用强度 Fertilizer application intensity x7
Pearson相关系数 Pearson correlation coefficient	0.038*	-0.121**	0.087**	-0.562*	0.802**	0.731**	0.611**

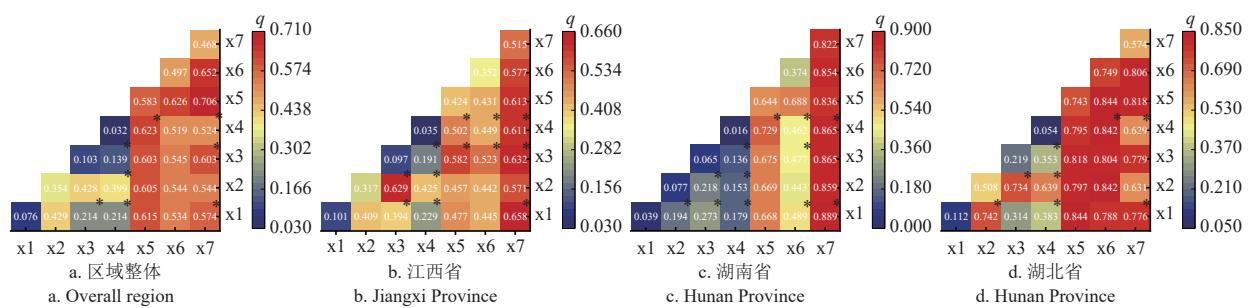
注: *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$ 。

Note: * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$.

3.4.2 驱动因子交互作用分析

从图6结果可知，不同的因子两两交互作用均增强，没有减弱或独立的情况。具体类型表现为双因子增强和

非线性增强。其中，有13个交互项表现为双因子增强，余下8个则皆为非线性增强，直接表明研究区耕地净碳汇是多个不同因子交互作用的结果。具体交互探测结果如图6a。



注: *为非线性增强，其余为双因子增强。

Note: * refers to nonlinear enhancement while the rest refer to bivariate enhancement.

图6 长江中游粮食主产区耕地净碳汇空间格局驱动因子交互探测结果

Fig.6 Results of driving factors for spatial pattern of net carbon sink in cultivated land in the main grain producing areas of the middle reaches of the Yangtze River

耕地规模和农业机械化水平与其他因子的交互作用对耕地净碳汇的空间格局具有显著影响， q 值均在0.5以上，验证了耕地面积和农业机械化水平是影响耕地净碳汇空间分异的主导因子。特别是，二者的交互作用 q 值

高达0.706，进一步证实了该协同效应在决定耕地净碳汇空间分异中的关键作用。值得注意的是，农村居民恩格尔系数与耕地规模、农业从业人员数、农业产业结构和城镇化水平因子之间交互作用呈现出非线性增强的特征，

表明农村恩格尔系数的关键交互因子对耕地净碳汇空间分异格局具有多重空间叠加交互效应。

3.4.3 驱动因素区域差异性分析

为探究不同驱动因子对长江中游粮食主产区耕地碳源汇空间分异格局影响, 消除地理位置跨度大以及各省份农业发展资源不均的影响, 分别计算研究期内江西省、湖南省和湖北省 3 个地区单因子及交互因子的决定力, 为后续制定差异化政策提供相关依据(图 6)。

1) 从各省份因子探测情况来看, 三省份耕地净碳汇的驱动因子影响程度与区域整体情况不尽一致, 但均受耕地规模、农业机械化水平和化肥施用强度的显著影响。其中, 导致江西省和湖南省耕地净碳汇区域差异的主导因子均为化肥施用强度, 其 q 值分别为 0.515 和 0.822, 明显高于其他因子。相对于其他两省, 湖北省耕地净碳汇空间分异格局并不存在唯一显著的主导因子, 耕地规模和农业机械化水平为影响力最大的 2 个驱动因子, 其 q 值分别为 0.743 和 0.749。值得注意的是, 农业从业人员数、农业产业结构、城镇化水平、农村居民恩格尔系数 4 因子对湖南省耕地净碳汇影响较小, q 值均小于 0.1。

2) 从因子交互作用结果来看, 三省份不同因子两两交互作用均为双因子增强和非线性增强, 这与区域整体情况一致, 说明三省耕地净碳汇空间变化是多因子共同作用的结果。其中, 从江西省交互因子探测结果来看, 农业产业结构和农村居民恩格尔系数因子具有较强协同性, 与其他因子的交互作用均为非线性增强。此外, 从湖南省各因子交互作用力来看, 化肥施用强度因子与其他各因子交互作用最大, q 值均在 0.8 以上, 说明化肥施用强度对湖南省耕地净碳汇空间分异格局起到决定性作用。最后, 湖北省各因子交互作用水平普遍高于另二省, 表明所选驱动因子对湖南省耕地净碳汇空间格局的解释力相对较高。

4 讨论

耕地是自然-人工充分交互的复杂系统, 其系统内碳源汇水平具有明显的阶段分化和空间分异性^[28]。因此, 本研究综合考量耕地系统的内外碳循环过程, 科学引用以往研究的碳排放与吸收系数, 将耕地碳源与碳汇有效衔接并进行合理测算, 揭示了长江中游粮食主产区耕地系统碳平衡的客观状态。在此基础上, 判断耕地净碳汇水平的时空演进过程及发展趋势, 丰富了净碳效应视角下的粮食主产区耕地碳源汇核算研究。此外还明确了驱动因素间的较强协同作用以及区域内部的差异性, 为理解耕地净碳汇作用机理提供了新的见解。

结果表明, 长江中游粮食主产区耕地净碳汇水平整体随时间呈波动上升态势, 其中耕地碳源先波动上升、后持续下降, 而耕地碳汇基本稳步提升。这揭示了该区域耕地利用正稳步向低碳化和绿色化转型, 与多位学者探讨的中国耕地利用系统呈碳盈余状态的研究结果一致^[3,12], 表明研究区域响应了全国耕地固碳减排加强的趋势。然而, 在空间关联性和演进趋势研究结果中, 均表

现出区域内耕地净碳汇水平空间差异不断扩大, 差距分化态势增强, 在一定程度上与区域农业协同发展愿景不符。长江中游粮食主产区具有相似的气候地理条件和耕地利用方式, 在后续发展中应积极加强区域内耕地净碳汇高值区的扩散效应, 如推广低碳耕作技术、开展绿色农业交流合作等。在驱动因素研究结果部分, 相较于已有研究成果^[7,19], 本研究不仅评估了各驱动因素对耕地净碳汇的独立贡献, 还深入探讨了这些因素之间的协同作用及其对空间分异格局的多重交互效应。其交互结果表明, 耕地规模和农业机械化水平的协同效应在决定耕地净碳汇空间分异中起关键作用, 这与张慧等^[29]的研究结果相似。基于以上耕地碳源汇分析结果, 并结合区域耕地利用的实际状况得出针对长江中游粮食主产区固碳减排策略。从驱动因素探讨方面提出效率促进建议, 从碳源结构剖析方面提出科学引领建议, 立足研究区交流合作实际提出人才带动建议。

值得注意的是, 尽管本研究以耕地碳源汇主题研究进行了补充和拓展, 但仍存在以下局限。一是以长江中游粮食主产区 31 市耕地研究对象, 虽可为中部粮食主产区合作实现双碳目标提供耕地助力, 但后续研究宜将东部和西部不同地理范围粮食主产区纳入进行横向比较, 以增强政策建议的普适性和实施性; 二是囿于核算结果区域可比性, 基础排放与吸收系数相对固定且未考虑多重碳效应, 仅考虑秸秆按比例还田措施的土壤氧化亚氮排放, 而忽视了产量提升的碳汇效果以及过去部分秸秆露天燃烧的碳排现象, 这些都是未来值得进一步研究的方向之一。

5 结论与建议

5.1 结论

1) 2005—2021 年内, 长江中游粮食主产区耕地净碳汇总量整体呈波动上升态势, 经历了“稳步提升—高速增长—波动递增”阶段; 从 2005 年 2 674.09 万 t 提高到 2021 年 3 757.58 万 t, 年均增速 2.22%, 碳汇功能不断凸显。研究区内部各地市在耕地净碳汇水平差异明显, 但相对差距逐渐缩小, 在空间格局上呈“低值区点状分散、高值区片状集聚”分布态势。

2) 从空间关联性演变规律来看, 长江中游粮食主产区耕地净碳汇存在空间自相关性, 全局 Moran's I 指数值介于 -0.235 至 0.212 之间且大多通过 1% 的显著性检验, 呈“正集聚-负集聚-正聚集”交替状态变化。从动态演进上看, 区域整体和局部各省耕地净碳汇均存在整体扩散现象, 演变为“一主两次”的三极分化格局, 随着时间推移耕地净碳汇水平及其区域差异均不断提高。

3) 长江中游粮食主产区耕地净碳汇驱动因素综合排序从大到小依次为: 耕地规模、农业机械化水平、化肥施用强度、农业从业人员数、农业产业结构、城镇化水平、农村居民恩格尔系数。其中耕地利用和农业经济因素对耕地净碳汇空间格局驱动力较强, 而社会发展因素影响相对较弱。此外, 交互探测结果应证耕地面积和农

业机械化水平是最大影响力的主要因子，省域间耕地净碳汇驱动因子影响力探测结果存在区域差异性。

5.2 建 议

根据上述研究结果，本文提出以下长江中游粮食主产区耕地固碳减排建议：

1) 推动耕地规模化与机械化经营，以效率促进耕地低碳转型。影响耕地净碳汇空间分异主导因素为耕地规模和农业机械化水平。一方面，支持襄阳市、娄底市、萍乡市等耕地相对零散地区进行整合建设，同时能够有效促进撂荒地复耕复种，提高耕地碳汇能力；另一方面，农业机械化作为农业技术进步表现之一，对耕地碳减排有着持续推动作用，尤其是在环保农业机械设施的降耗提效促产方面。此外，耕地规模化与机械化经营使得保护性耕作得以有效推行，包括少/免耕、多样性复合种植系统等固碳减排措施。

2) 科学确定化肥等物资投入，以科学引导耕地低碳利用。农用物资碳排放是耕地碳源的主要构成，且降低空间最大，化肥等物资投入与耕地生产情况的适配度。一是需大力推广测土配方施肥、秸秆资源化利用和有机覆盖养土等绿色生产技术，充分发挥技术驱动下的“高产高碳汇、低投低碳排”优势模式，特别是在受化肥施用强度主导驱动的湖南省内株洲市、湘潭市等地市重点实施化肥减量增效行动；二是应积极响应国家绿色种养循环试点工作，探索禽粪污和废旧农膜科学回收再利用的长效机制，协同耕地面源污染与温室气体排放。

3) 重视农业从业人员素养培养，以人才带动耕地低碳发展。长江中游粮食主产区具有优渥的耕种条件，但农业产业多依靠于农村，农户作为耕地最直接的使用主体，其低碳理念直接关乎耕地碳源汇转换过程。为此，在区域合作背景下，一是应立足武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体的合作交流优势，通过政府、科研机构和农业劳动力群体多重主体的齐力合作方式；二是建立区域农学人才培养和低碳技术共享平台，不断夯实农业科技创新核心基础，通过技术与人才溢出效应使耕地净碳汇区域差异降低。

[参 考 文 献]

- [1] 张林秀，白云丽，孙明星，等. 从系统科学视角探讨农业生产绿色转型[J]. 农业经济问题，2021(10): 42-50.
ZHANG Linxiu, BAI Yunli, SUN Mingxing, et al. Views on agricultural green production from the perspective of system science[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021(10): 42-50. (in Chinese with English abstract)
- [2] BENBI D K. Carbon footprint and agricultural sustainability nexus in an intensively cultivated region of IndoGangetic Plains[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 611-623.
- [3] 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 Qiang, GAO Wei, WEI Jianfei, 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*(Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 239-249. (in Chinese with English abstract)
- [4] 田云，尹恣昊. 中国农业碳排放再测算：基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. 中国农村经济，2022(3): 104-127.
TIAN Yun, YIN Minhao. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects[J]. Chinese Rural Economy, 2022(3): 104-127. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周思宇，郗凤明，尹岩，等. 东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素[J]. 应用生态学报，2021, 32(11): 3865-3871.
ZHOU Siyu, XI Fengming, YIN Yan, et al. Accounting and drivers of carbon emission from cultivated land utilization in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3865-3871. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李明琦，刘世梁，武雪，等. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素[J]. 生态学报，2018, 38(24): 8822-8834.
LI Mingqi, LIU Shiliang, WU Xue, et al. Temporal and spatial dynamics in the carbon footprint and its influencing factors of farmland ecosystems in Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8822-8834. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王莉，刘莹莹，张亚慧，等. 河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解[J]. 环境科学学报，2022, 42(12): 410-422.
WANG Li, LIU Yingying, ZHANG Yahui, et al. Spatial and temporal distribution of carbon source/sink and decomposition of influencing factors in farmland ecosystem in Henan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(12): 410-422. (in Chinese with English abstract)
- [8] 郑博福，梁涵，万炜，等. 江西省县域农业碳排放时空格局及影响因素分析[J]. 农业工程学报，2022, 38(23): 70-80.
ZHENG Bofu, LIANG Han, WAN Wei, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural carbon emissions at the county level in Jiangxi Province of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*(Transactions of the CSAE), 2022, 38(23): 70-80. (in Chinese with English abstract)
- [9] 任世鑫，李二玲，赵金彩，等. 黄河流域耕地利用碳排放时空特征及影响因素研究[J]. 中国土地科学，2023, 37(10): 102-113.
REN Shixin, LI Erling, ZHAO Jincai, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions from cultivated land use in the Yellow River basin and the influencing Factors[J]. China Land Science, 2023, 37(10): 102-113. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张玥，代亚强，陈媛媛，等. 中国耕地多功能耦合协调时空演变及其驱动因素[J]. 农业工程学报，2023, 39(7): 244-255.
ZHANG Yue, DAI Yaqiang, CHEN Yuanyuan, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of cultivated land multifunctional coupling coordination development in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*(Transactions of the CSAE), 2023, 39(7): 244-255. (in Chinese with English abstract)

- [11] 王若梅, 马海良, 王锦. 基于水-土要素匹配视角的农业碳排放时空分异及影响因素——以长江经济带为例[J]. 资源科学, 2019, 41(8): 1450-1461.
WANG Ruomei, MA Hailiang, WANG Jin. Spatial and temporal differences of agricultural carbon emissions and impact factors of the Yangtze River Economic Belt based on a water-land perspective[J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1450-1461. (in Chinese with English abstract)
- [12] 钱凤魁, 王祥国, 顾汉龙, 等. 东北三省农业碳排放时空分异特征及其关键驱动因素[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2024, 32(1): 30-40.
QIAN Fengkui, WANG Xiangguo, GU Hanlong, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics and key driving factors of agricultural carbon emissions in the three northeastern provinces of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(1): 30-40. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈国进, 陈凌凌, 金昊, 等. 气候转型风险与宏观经济政策调控[J]. 经济研究, 2023, 58(5): 60-78.
CHEN Guojin, CHEN Lingling, JIN Hao, et al. Climate Transition Risk and Macroeconomic Policy Regulation[J]. Economic Research Journal, 2023, 58(5): 60-78. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李波, 王春好, 张俊飚. 中国农业净碳汇效率动态演进与空间溢出效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12): 68-76.
LI Bo, WANG Chunyu, ZHANG Junbiao. Dynamic evolution and spatial spillover of China's agricultural net carbon sink[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 68-76. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王如如, 张郁, 房艳刚, 等. 农业生产转型视角的东北三省农业碳排放格局特征与作用机制[J]. 地理研究, 2023, 42(8): 2264-2282.
WANG Ruru, ZHANG Yu, FANG Yangang, et al. The pattern characteristics and mechanisms of agriculture carbon emissions from the perspective of agricultural production transition in Northeast[J]. China Geographical Research, 2023, 42(8): 2264-2282. (in Chinese with English abstract)
- [16] WU H, HUANG H, CHEN W, et al. Estimation and spatiotemporal analysis of the carbon-emission efficiency of crop production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 371: 133516.
- [17] 陆萍茹, 陈波. 碳减排目标下贵阳市土地利用结构优化分析[J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2023, 41(5): 18-25.
LU Pingru, CHEN Bo. Analysis of land use structure optimization in Guiyang under the goal of carbon emission[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 2023, 41(5): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- [18] 吕添贵, 付舒斐, 胡晗, 等. 农业绿色转型约束下耕地绿色利用效率动态演进及其收敛特征研究——以长江中游粮食主产区为例[J]. 中国土地科学, 2023, 37(4): 107-118.
LYU Tiangu, FU Shufei, HU Han, et al. Dynamic evolution and convergence characteristics of cultivated land green use efficiency based on the constraint of agricultural green transition: Taking the main grain producing areas in the middle reaches of the Yangtze River as an example[J]. China Land Science, 2023, 37(4): 107-118. (in Chinese with English abstract)
- [19] 贯君, 张少鹏, 任月, 等. 中国农业净碳汇时空分异与影响因素演进分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2): 1158-1170.
GUAN Jun, ZHANG Shaopeng, REN Yue, et al. Random forest model-assisted evaluation of spatiotemporal differentiation of China's agricultural net carbon sink and evolution of influencing factors[J]. China Environmental Science, 2024, 44(2): 1158-1170. (in Chinese with English abstract)
- [20] 何艳秋, 陈柔, 吴昊玥, 等. 中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1269-1282.
HE Yanqiu, CHEN Rou, WU Haoyue, et al. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1269-1282. (in Chinese with English abstract)
- [21] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 21-27.
MIN Jisheng, HU Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21-27. (in Chinese with English abstract)
- [22] 吴昊玥, 孟越, 黄瀚蛟, 等. 中国耕地利用净碳汇与农业生产的时空耦合特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 360-368, 376.
WU Haoyue, MENG Yue, HUANG Hanjiao, et al. Spatiotemporal coupling between the net carbon sequestration of cropland use and agricultural production in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 360-368, 376. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李园园, 鄢长军, 薛彩霞, 等. 陕西省保护性耕作净碳汇的时空演变及差异性分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 123-132.
LI Yuanyuan, XI Changjun, XUE Caixia, et al. Spatiotemporal evolution and distribution of net carbon sink under conservation tillage in Shaanxi Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Technology of the CSAE), 2022, 39(23): 123-132.
- [24] MORAN P A. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. Biometrika, 1950, 37(1): 17-23.
- [25] 张卓群, 张涛, 冯冬发. 中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(4): 67-87.
ZHANG Zuoqun, ZHANG Tao, FENG Dongfa. Study on regional differences, dynamic Evolution and convergence of carbon emission intensity in China[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2022, 39(4): 67-87. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese with English abstract)
- [27] 徐小雨, 董会忠, 庞敏. 东北三省农业碳排放效率时空演化特征及驱动因素分析[J]. 中国环境管理, 2023, 15(2):

- 86-97.
- XU Xiaoyu, DONG Huizhong, PANG Min. Analysis on the spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of agricultural carbon emission efficiency in three northeastern provinces of China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2023, 15(2): 86-97. (in Chinese with English abstract)
- [28] 贾雯霞, 张艳, 崔国屹. 汾河流域生态系统服务供需匹配关系研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(2): 15-23.
- JIA Wenxia, ZHANG Yan, CUI Guoyi. Research on the matching relationship between supply and demand of ecosystem services in the Fenhe River Basin[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 2023, 41(2): 15-23. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张慧, 张力文, 何正弘. 东北农区农业净碳汇时空分布及驱动因素[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 505-517.
- ZHANG Hui, ZHANG Liwen, HE Zhenghong. The spatiotemporal distribution and driving factors of agriculturalnet carbon sink in Northeast agricultural areas[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(3): 505-517. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal evolution and driving factors of carbon sources and sinks on cultivated land in the main grain producing areas in the Middle Reaches of the Yangtze River

LYU Tiangu^{1,2}, QIU Rong¹, LI Zeying¹, FU Shufei², ZHAO Qiao¹

(1. School of Public Finance & Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China; 2. School of Applied Economic (School of Digital Economics), Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China))

Abstract: Cultivated land has been the main source of carbon emissions during agricultural production. Especially, the function of carbon absorption by crops also has posed the dual impacts of carbon source or sink in major grain-producing areas. Therefore, the cultivated land can play an important role in the low-carbon transformation of agriculture. It is crucial to recognize the balance and driving factors of carbon sources and sinks in the cultivated land, in order to promote low-carbon production and food security. In this study, the internal and external carbon cycle of cultivated land was considered to measure the net carbon sink of cultivated land in the middle reaches of the Yangtze River from 2005 to 2021. A theoretical framework was proposed, according to the dual perspective of carbon sources and sinks. Spatial autocorrelation and kernel density estimation were applied to investigate the spatial and temporal evolution in different regions. Then, GeoDetector was applied to analyze the influence of the driving factors on carbon sequestration and emission reduction. The results show that: 1) The total net carbon sink of cultivated land increased from 26.7409 million tons in 2005 to 37.5758 million tons in 2021, with an average annual increase of 2.22%. There was a much more prominent function of the carbon sink. The net carbon sink of cultivated land was less than 1.5 million tons in most of the cities. In terms of spatial pattern, there was a significant variation in the net carbon sink of cultivated land in different cities, indicating "low-value point-like dispersion, high-value piece-like agglomeration". 2) The spatial correlation of net carbon sinks in the cultivated land was alternated into the "positive-negative-positive agglomeration". There was a diffusion pattern in the net carbon sinks of cultivated land in each province and the region as a whole. The regional differences were enhanced to deteriorate the spatial non-equilibrium. 3) The spatial and temporal pattern of the net carbon sink in the cultivated land was dominated by the cultivated land use and agricultural economic factors. Among them, the key dominant factors were the size of cultivated land and the level of agricultural mechanization. The influence of the driving factors shared the outstanding regional heterogeneity. A theoretical basis can be offered to promote the core and key areas of carbon sequestration and emission reduction in the cultivated land. 4) Some recommendations were proposed to promote the size and mechanization of cultivated land, the scientific quantification of material inputs, as well as the quality cultivation of producers, in order to realize carbon sequestration and emission reduction. The carbon cycle can also be determined to measure the carbon sources and sinks in the cultivated land, in order to improve the economic and ecological benefits of cultivated land use. The findings can provide decision-making references for pollution reduction, carbon sequestration, and sink enhancement in the cultivated land.

Keywords: carbon; net carbon sink on cultivated land; spatiotemporal evolution characteristics; influencing factors; carbon sequestration and emission reduction pathway; main grain producing areas in the middle reaches of the Yangtze River