

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.004.

赵琪琛, 余敦, 王检萍. 九江市农地利用碳排放时空演变、影响因素及趋势预测[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 441-451.

Zhao Qichen, Yu Dun, Wang Jianping. Spatial and Temporal Evolution, Influencing Factors and Trend Prediction of Carbon Emissions from Agricultural Land Use in Jiujiang City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 441-451.

# 九江市农地利用碳排放时空演变、影响因素及趋势预测

赵琪琛, 余敦, 王检萍

(江西农业大学 国土资源与环境学院, 南昌 330045)

**摘要:** [目的]揭示九江市农地利用碳排放时空演变特征,探究其影响因素和未来变化趋势,进而为促进农业低碳发展提供理论依据和数据支撑。[方法]以九江市为例,基于农业物资投入、稻田种植、农田土壤利用、畜禽肠道发酵和畜禽粪便管理5类碳排放源测算2006—2020年农地利用碳排放量,分析其时空演变特征,利用LMDI模型探究影响因素,并采用ARIMA模型预测了2021—2025年的变化趋势。[结果](1)九江市农地利用碳排放总量呈先波动上升后持续下降的趋势,碳排放强度在2018年有所上升,其余年份均持续下降,各类碳源的贡献度为稻田种植>农业物资投入>农田土壤利用>畜禽粪便管理>畜禽肠道发酵。(2)研究期间,各县(市、区)的农地利用碳排放量呈“六升五降”的变化趋势,所有县(市、区)的碳排放强度均大幅下降,降幅均高于50%;碳排放总量的核密度曲线向右移动且趋于平缓,极化效应有所减弱。(3)农业经济水平对农地利用碳排放具有促进作用,农业生产效率、产业结构和劳动规模具有抑制作用,不同县(市、区)的影响因素有所差异。(4)趋势预测结果显示:永修县、都昌县等8个县(市、区)农地利用碳排放量在2020年之前达峰,修水县、德安县和共青城市在2021—2025年呈上升趋势。[结论]九江市农地利用碳排放有待进一步降低,未来应在保障粮食安全的前提下因地制宜地稳步推进农地利用碳减排。

**关键词:** 农地利用; 碳排放; 九江市

中图分类号: F323.2; X16

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0441-11

## Spatial and Temporal Evolution, Influencing Factors and Trend Prediction of Carbon Emissions from Agricultural Land Use in Jiujiang City

Zhao Qichen, Yu Dun, Wang Jianping

(College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the spatial-temporal evolution characteristics of carbon emissions from agricultural land use in Jiujiang City, explore its influencing factors and future trends, and then provide theoretical basis and data support for promoting low-carbon agricultural development. [Methods] Taking Jiujiang City as an example, we measured carbon emissions from agricultural land use from 2006 to 2020 based on five types of carbon emission sources: agricultural material inputs, paddy cultivation, agricultural soil use, livestock and poultry enteric fermentation and livestock and poultry manure management, analyzed its spatial and temporal evolution characteristics, explored the influencing factors using LMDI model, and predicted the change trend from 2021 to 2025 using ARIMA model. [Results] (1) The carbon emissions from agricultural land use in Jiujiang City showed a trend of fluctuating increase and then continuous decrease, the carbon emission intensity increased in 2018 and continued to decrease in the rest of the years, and the contribution of each carbon emission source followed the order: paddy cultivation> agricultural material input> agricultural soil use> livestock and poultry manure management>

收稿日期: 2022-08-29

修回日期: 2022-09-19

资助项目: 江西省社会科学基金(20GL08); 江西省高校人文社会科学研究项目(GL19128); 南昌市社科规划项目(GL202006); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ210453)

第一作者: 赵琪琛(1999—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源利用。E-mail: 2291896354@qq.com

通信作者: 余敦(1975—), 男, 江西安义人, 博士, 教授, 主要从事土地资源管理与利用研究。E-mail: jxauyd@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

livestock and poultry enteric fermentation. (2) During the study period, the carbon emissions from agricultural land use in all counties showed a trend of six up and five down. The carbon emission intensity of all counties decreased significantly, and the decrease was higher than 50%. The kernel density curve of carbon emissions shifted to the right and leveled off, and the polarization effect weakened. (3) The level of agricultural economy had a facilitating effect on carbon emissions from agricultural land use, while agricultural production efficiency, industry structure and labor scale had a suppressive effect, with different influencing factors in different counties. (4) The trend prediction results showed that carbon emissions from agricultural land use in eight counties, including Yongxiu County and Duchang County, reached to the peak by 2020, and carbon emissions from agricultural land use in Xiushui County, De'an County and Gongqingcheng City show an increasing trend from 2021 to 2025. [Conclusion] The carbon emissions from agricultural land use in Jiujiang need to be further reduced, and the carbon emission reduction from agricultural land use should be steadily promoted in the future under the premise of ensuring food security according to local conditions.

**Keywords:** agricultural land use; carbon emissions; Jiujiang City

近年来,随着社会经济的快速发展,以二氧化碳(CO<sub>2</sub>)为代表的温室气体排放量急剧增加,加速了全球气候变化进程,导致了冰川融化、海平面上升等一系列气候问题,严重威胁人类的生存与发展<sup>[1-2]</sup>。农业是国民经济的基础,同时也是温室气体排放的重要来源<sup>[3]</sup>。据统计,我国农业温室气体排放量约占全国排放总量的17%,其中农业排放的甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)分别占全国排放总量的50%和92%<sup>[4]</sup>,因此缓解农业碳排放势在必行。农地是农业活动的载体,从农地利用的角度开展碳排放研究对农业绿色、低碳、可持续发展以及实现“双碳”目标具有重要意义。

农地利用碳排放研究也逐渐成为学术界热点。目前,学者们从全球<sup>[5]</sup>、国家<sup>[6-7]</sup>、地区<sup>[8-9]</sup>、省域<sup>[10-12]</sup>、市县等<sup>[13]</sup>不同尺度进行了大量研究,研究内容主要涵盖以下4个方面:一是碳排放测算,主要方法有排放因子法、质量平衡法、实测法等<sup>[14]</sup>;二是碳排放影响因素,主要方法有LMDI模型<sup>[10]</sup>、STIRPAT模型<sup>[15]</sup>、空间计量模型等<sup>[16]</sup>;三是碳排放与粮食生产和农业经济发展之间的关系,如吴昊玥等<sup>[17]</sup>依托Tapio脱钩理论分析了我国粮食主产区耕地利用碳排放与粮食生产的脱钩效应,Wang等<sup>[18]</sup>利用环境库兹涅茨曲线(EKC)和脱钩模型对河南省农地利用碳排放与农业经济的关系进行验证;四是碳排放趋势预测,主要方法有灰色预测模型<sup>[11]</sup>、蒙特卡洛模拟等<sup>[19]</sup>。已有研究成果对农地绿色利用具有重要参考意义,但还存在以下拓展空间:(1)研究尺度多聚焦于国家、省域等中宏观尺度,对市、县等微观尺度开展深入探讨的研究则较少;(2)测算范围多考虑化肥、农药等农业物资投入方面,而忽略了农田土壤利用、稻田种植等产生的碳排放;(3)差分自回归移动平均(ARIMA)模型具有预测误差较小、精度较高的优

点<sup>[20]</sup>,而将其用于农地利用碳排放的研究鲜有。

九江市地处鄱阳湖平原,作为“赣北粮仓”,其农业基础条件良好,是传统粮食主产区和重要商品粮基地。随着农业的快速发展,其农业经济取得了巨大成就,但与此同时,化肥、农药等大量投入也使得农地高面源污染、高碳排放的特征趋势增强<sup>[21]</sup>。鉴于此,本文基于农业物资投入、稻田种植、农田土壤利用、畜禽肠道发酵和畜禽粪便管理5类碳源测算九江市2006—2020年的农地利用碳排放量并分析其时空演变特征,运用Kaya恒等式和LMDI模型探究影响因素,利用ARIMA模型预测2021—2025年的变化趋势,以期为促进九江市农地低碳利用、农业绿色发展提供理论依据,也为其他类似地区实现农业高质量发展提供决策参考。

## 1 研究区概况

九江市位于江西省北部,地理位置为113°57′—116°53′E,28°47′—30°06′N,总面积19 085 km<sup>2</sup>,占江西省面积的11.43%。属于亚热带季风气候,年平均温度16~17℃,年平均降水量1 300~1 600 mm。属于南方低山丘陵区,山地面积占16.4%,丘陵面积占44.5%。第三次全国国土调查显示,九江市耕地面积为26.29万hm<sup>2</sup>,占江西省耕地面积的9.66%。2020年九江市农林牧渔业产值为241.34亿元,占江西省农林牧渔业产值的10.37%。主要农作物有水稻、玉米、豆类、薯类等,主要畜禽有猪、牛、羊、兔、家禽等。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

2.1.1 农地利用碳排放测算 农地利用碳排放是指农民在从事农业生产活动中作用于农地而引发的碳

排放<sup>[22]</sup>。按照国家标准 GB/T21010—2017《土地利用现状分类》,农地包括耕地、园地、林地、草地(除其他草地)、农村道路、水库水面、坑塘水面、沟渠、设施农用地以及田坎。因此本文界定的农地利用碳排放测算范围主要包括以耕地、园地等利用为主的种植业和以牧草地、设施农用地利用为主的畜牧业产生的碳排放,参考相关文献<sup>[17,23-24]</sup>并归纳总结,具体测算农业物资投入、稻田种植、农田土壤利用、畜禽肠道发酵、畜禽粪便管理 5 类农地利用活动排放的 CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O。

参照《IPCC 国家温室气体清单指南》和《省级温室气体编制指南》,测算方法采用排放因子法,具体方法以及碳排放系数参考相关文献<sup>[11,23,25-28]</sup>。测算结果均以标准碳当量(C)显示,1 t CH<sub>4</sub> 所引发的温室效应相当于排放 28 t CO<sub>2</sub>(7.64 t C),1 t N<sub>2</sub>O 所引发的温室效应相当于排放 265 t CO<sub>2</sub>(72.27 t C)<sup>[2]</sup>。

(1) 农业物资投入。农业物资投入主要包括化肥、农药、农膜等农业物资在生产、使用过程中产生的碳排放;农业机械、灌溉消耗电力、柴油等而产生的碳排放;农地翻耕造成土壤有机碳流失引起的碳排放。测算方法参考文献<sup>[27-28]</sup>。

(2) 稻田种植。由于稻田中隔水层的存在,使土壤与大气隔离,形成有利于甲烷产生的厌氧环境。测算方法参考文献<sup>[25]</sup>。

(3) 农田土壤利用。农作物种植对土壤表层的破坏使得土壤中的温室气体流失到大气中,其中以氧化亚氮为主要气体。测算方法参考文献<sup>[23]</sup>,测算对象选取九江市种植面积相对较大的主要农作物,主要包括水稻、玉米、豆类、薯类等。

(4) 畜禽肠道发酵。畜禽肠道发酵主要是指畜禽在正常代谢过程中,寄生在其消化道内的微生物发酵饲料时产生的甲烷,测算方法参考文献<sup>[11]</sup>,<sup>[25]</sup>。

(5) 畜禽粪便管理。畜禽粪便管理主要是指畜禽粪便施入到土壤之前贮存和处理所产生的甲烷和氧化亚氮排放,测算方法参考文献<sup>[25-26]</sup>。

2.1.2 Kernel 密度估计 Kernel 密度估计是一种可以在不进行任何参数模型假设的情况下,用连续的概率密度曲线描述随机变量分布形态和特征的非参数估计方法,常用来描述研究对象空间分布的非均衡性<sup>[29]</sup>。本文采用 Kernel 密度估计分析九江市农地利用碳排放的动态演进特征,公式如下:

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

式中: $f(x)$  为农地利用碳排放的密度函数; $n$  为县(市、区)个数; $h$  为带宽; $x_i$  为各县(市、区)农地利用碳排放的观测值(kg); $\bar{x}$  为区域农地利用碳排放的平均值(kg); $K$

为核函数,选取应用范围较广的高斯核函数。

2.1.3 Kaya 恒等式和 LMDI 分解模型 把握不同因素对农地利用碳排放的影响效应,是制定碳减排对策的重要依据<sup>[10]</sup>。借鉴前人研究成果<sup>[30]</sup>,基于 Kaya 恒等式将农地利用碳排放的影响因素分解为农业生产效率、农业产业结构、农业经济水平和农业劳动规模 4 个方面,具体如下:

$$C = \frac{C}{GDP_T} \times \frac{GDP_T}{GDP_A} \times \frac{GDP_A}{P} \times P \quad (2)$$

$$E = \frac{C}{GDP_T} \quad (3)$$

$$S = \frac{GDP_T}{GDP_A} \quad (4)$$

$$L = \frac{GDP_A}{P} \quad (5)$$

式中: $C$  为农地利用碳排放总量(kg); $GDP_T$  为种植业和畜牧业生产总值(元); $GDP_A$  为农林牧渔业生产总值(元); $P$  为农业劳动规模,用农业从业人口数量(人)表示; $E$  为农业生产效率(kg/元); $S$  为农业产业结构; $L$  为农业经济水平(元/人),则有:

$$C = E \times S \times L \times P \quad (6)$$

LMDI 模型具有消除残差项、乘法分解与加法分解结果相一致、结果容易解释等优点,在温室气体排放研究领域应用广泛<sup>[31]</sup>。采用 LMDI 的加法分解形式对公式(6)进行取对数、加和分解,具体如下:

$$\Delta E = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln E_t - \ln E_0) \quad (7)$$

$$\Delta S = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln S_t - \ln S_0) \quad (8)$$

$$\Delta L = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln L_t - \ln L_0) \quad (9)$$

$$\Delta P = \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln P_t - \ln P_0) \quad (10)$$

$$\Delta C = \Delta E + \Delta S + \Delta L + \Delta P \quad (11)$$

式中: $\Delta E$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta P$  分别为农业生产效率、产业结构、经济水平和劳动规模对农地利用碳排放的贡献量(kg); $\Delta C$  为所有影响因素对农地利用碳排放的贡献总量(kg); $t$  为目标年( $t=1,2,3,\dots,n$ ), $0$  为基准年。

2.1.4 ARIMA 模型 ARIMA( $p, d, q$ ) 模型中的  $p, d, q$  分别为模型的自回归项阶数(AR 模型阶数)、差分阶数和移动平均项阶数(MA 模型阶数),其实质是在自回归移动平均模型的基础上针对非平稳序列进行  $d$  阶差分,以提高其预测精度,适用于非平稳时间序列的短期预测<sup>[32-33]</sup>。基本步骤为:(1) 对原始序列进行平稳性检验,对非平稳序列进行  $d$  阶差分,转化为平稳序列;(2) 根据原始序列或差分后序列的自

相关系数和偏相关系数确定  $p$  和  $q$  的取值范围;(3) 通过  $R^2$ , AIC 等指标选取最佳模型并进行残差检验判断模型的合理性;(4) 筛选出最优模型进行趋势预测。ARIMA 模型的一般表达式为:

$$y_t = c + \varphi_1 y_{t-1} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (12)$$

式中:  $y_t$  为  $t$  阶差分序列;  $c$  为常数项;  $\varphi_p$  为  $p$  阶 AR 模型拟合参数;  $\theta_q$  为  $q$  阶 MA 模型拟合参数;  $\varepsilon_t$  为  $t$  阶噪声序列。

## 2.2 数据来源与处理

本文数据主要涉及化肥、农药、农膜、农业机械总动力等农资投入量,水稻、玉米、豆类、薯类等农作物播种面积和产量,猪、牛、羊、兔、家禽等畜禽养殖量,以及农林牧渔生产总值、农业从业人口数量等,均来源于《九江市统计年鉴》(2007—2021年)、《江西省统计年鉴》(2007—2021年)。其中,化肥为折纯量;灌溉为有效灌溉面积;翻耕为农作物实际播种面积;农药、农膜、农业机械总动力以当年实际使用量为准;农作物播种面积和产量以当年实际情况为准;畜禽年平均饲养量根据出栏率进行调整,猪、兔、家禽等出栏率大于1的畜禽根据(当年出栏量×平均生命周期)/365调整,牛、羊等出栏率小于1的畜禽采用本年末存栏量和上年末存栏量的平均值调整<sup>[26]</sup>。九江市行政边界源自1:25万全国基础地理数据库(<https://>

[www.webmap.cn](http://www.webmap.cn)),考虑到市区(濂溪区、浔阳区和柴桑区)农用地较少,对其进行合并处理,最终得到11个县(市、区)。

## 3 结果与分析

### 3.1 农地利用碳排放时序特征

2006—2020年九江市农地利用碳排放总量及结构如图1所示。研究期间,九江市农地利用碳排放总量呈先波动上升后持续下降的变化趋势,总体增加了10.06万t,增长率为9.2%。具体分为两个阶段:2006—2018年碳排放量波动上升,由2006年的109.43万t增加至2018年的130.51万t,增长率为19.26%,随着农业的发展,农作物种植规模的扩大以及农药、化肥、农机等高碳排放农资投入的增加是引起碳排放量上升的主要原因;2019年和2020年碳排放量持续下降,2020年降低至119.49万t,相比2018年下降了8.44%,这与近年来农业节能减排、绿色发展等相关政策的出台,导致化肥、农药等投入量大幅降低,同时畜禽养殖规模有所减小密切相关。除2018年农地利用碳排放强度上升外,其余年份均逐年下降,由2006年的1558.67kg/万元降至2020年的498.62kg/万元,降低率为68.01%,这主要得益于对农业绿色发展的重视以及农业科技水平的提升,农业生产效率逐渐提高,农地利用方式向高效低碳化转变。

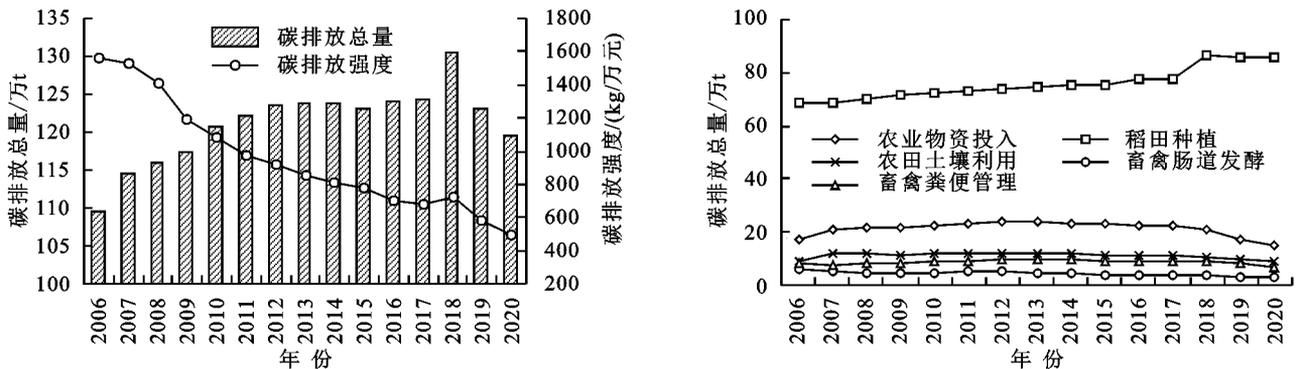


图1 2006—2020年九江市农地利用碳排放总量及结构

Fig. 1 Total and structure of carbon emissions from agricultural land use in Jiujiang City from 2006 to 2020

从不同碳源来看,碳排放量依次为稻田种植>农业物资投入>农田土壤利用>畜禽粪便管理>畜禽肠道发酵,年平均碳排放量分别为75.86,21.26,11.06,8.57,4.33万t,分别占总量的62.65%,17.56%,9.13%,7.08%,3.58%。所有碳源中,稻田种植的贡献度最大,且近年来比重仍在提高,2017—2018年碳排放量显著上升,从77.86万t增至86.41万t,且在2019年和2020年保持稳定,原因在于九江市中稻再生稻种植技术的全面推广,使得中季稻播种面积增加;其次是农业物资投入,2006—2018年碳排放量呈

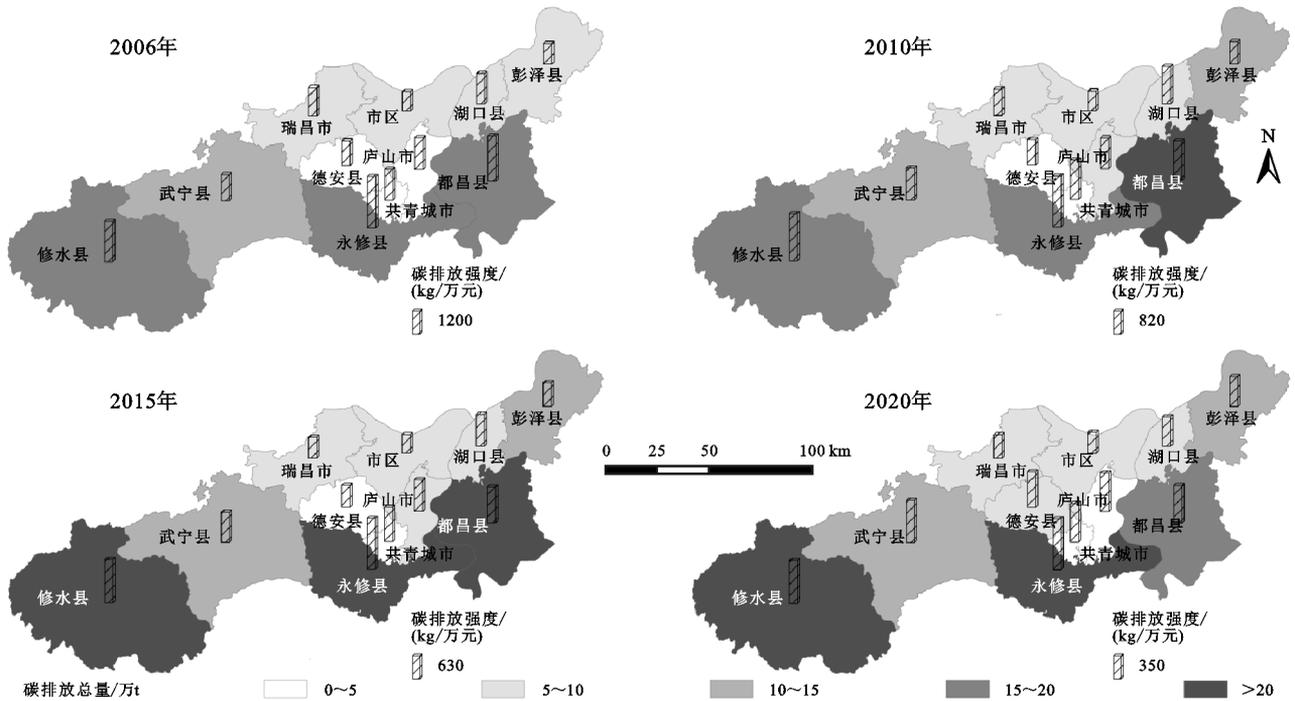
先上升后下降的趋势,变化相对稳定,在2013年达到峰值(23.65万t),但2018年后明显下降,从2018年的21.22万t降低到2020年的15.16万t,降低率为28.54%,主要原因是九江市化肥农药减量增效工作的推进,导致化肥、农药的投入大幅减少,2020年化肥、农药施用量与2018年相比分别降低了24.32%,54.12%;农田土壤利用碳排放量在2006—2007年上升幅度较大,由9.14万t增加到11.81万t,增长率为28.97%,在2010年达到峰值(11.98万t),此后则呈波动下降趋势,2020年降低至8.7万t;畜禽肠道发酵和粪便

管理碳排放量处于较低水平,且研究期间波动下降,2020年分别为3.30万t,6.43万t,与2006年相比分别降低了44.19%,18.64%,原因在于畜牧业结构的调整,减少了牛、羊等碳排放量较高的牲畜数量。

### 3.2 农地利用碳排放区域特征

2006—2020年九江市各县(市、区)农地利用碳排放量及强度如图2所示。受地区自然资源条件和社会经济水平影响,不同地区的农地利用碳排放量差异显著。高值区主要集中在九江市西部和南部的修水县、永修县和都昌县,均高于15万t,修水县作为九江市国土面积最大的县,其耕地资源丰富,农业规模较大,稻田种植碳排放量较高,同时畜牧业发达,生猪和山羊养殖数量多,使得畜禽肠道发酵和粪便管理

碳排放量也较高;永修县和都昌县地处鄱阳湖畔,地势平坦、水源充沛,水稻播种面积广,因此稻田种植碳排放量较高,同时化肥农药施用量以及农业机械化水平也较高,因此农业物资投入碳排放量也位于全市前列。庐山市、共青城市受自然资源禀赋限制,种植业和畜牧业发展程度不高,农作物播种面积以及畜禽养殖量较少,因此碳排放量较低。2006—2020年,各县(市、区)农地利用碳排放量呈“六升五降”的变化特征,武宁县、修水县、永修县、德安县、彭泽县和共青城市的碳排放量上升,其中彭泽县、德安县升幅最大,分别为61.16%,58.82%;市区、都昌县、湖口县、瑞昌市和庐山市的碳排放量下降,其中湖口县降幅最大,为17.13%。



注:基于标准地图服务系统下载的标准地图服务系统下载的审图号赣S(2023)010号的标准地图制作,底图未做修改。

图 2 2006—2020年九江市各县(市、区)农地利用碳排放量及强度

Fig. 2 Carbon emissions and intensity of agricultural land use by counties (cities and districts) in Jiujiang City from 2006 to 2020

九江市农地利用碳排放强度“南高北低”的空间特征明显。2020年排名前3位的依次是永修县(706.73 kg/万元)、修水县(595.12 kg/万元)和武宁县(583.70 kg/万元),究其原因,在于这些地区是粮食生产核心区域,水稻等粮食作物种植面积较大,同时牛、羊等高碳排牲畜养殖较多,在带来高农产品产出的同时也伴随着高碳排放;排名后3位的依次是市区(291.03 kg/万元)、瑞昌市(326.38 kg/万元)和湖口县(409.76 kg/万元),主要因为这些地区农业发展水平较低,农作物种植面积较小,且蔬菜、油料、药材等经济作物种植比例较大。2006—2020年,各县(市、区)农地利用碳排放强度均大幅下降,降幅均高于

50%,说明其农地资源低碳化利用水平得以提升。其中瑞昌市由2006年1360.57 kg/万元的降低到2020年的326.38 kg/万元,降幅最大,为76.01%;武宁县由2006年的1252.98 kg/万元降低到2020年的583.70 kg/万元,降幅最小,为53.42%。

### 3.3 农地利用碳排放动态演进

为进一步揭示2006—2020年九江市农地利用碳排放的变化特征,采用Kernel密度估计刻画农地利用碳排放总量以及各类碳源排放量的动态演进趋势(图3)。结果显示:(1)碳排放总量核密度曲线呈“一主一次”的双峰格局,说明地区存在一定的极化效应。主峰范围为(5~10)万t,意味着大多县(市、区)的碳

排放量位于该区间;次峰在 20 万 t 左右,其形成原因主要是修水县、都昌县和永修县的碳排放量较高,扩大了与其他县(市、区)的差异。研究期内核密度曲线向右偏移,次峰逐渐不明显,表明碳排放总量上升,地区之间的差异逐渐缩小。(2) 农业物资投入核密度曲线右侧的次峰逐渐消失,由双峰转为单峰,且峰值有所升高,原因在于化肥农药减量增效工作的开展,导致碳排放高值区转为低值区,呈低值聚集的特征。(3) 稻田种植核密度曲线始终维持“一主一次”的双峰特征,大多数县(市、区)碳排放量在 5 万 t 左右。研究期内曲线整体向右移动,说明碳排放量有所上升,这与水稻种植面积增加以及中季稻种植比例提升

有关。(4) 农田土壤利用核密度曲线呈单峰格局且范围较广,表明地区之间碳排放量虽然差异较大但并不存在极化现象。研究期内峰值先降低后升高,意味着地区之间碳排放量的差异先扩大后缩小,曲线向右偏移,说明碳排放量增加,这主要与农作物种植面积及产量增加有关。(5) 畜禽肠道发酵和畜禽粪便管理核密度曲线特征相似,均呈现“一主一次”的双峰格局,并且主峰与次峰的位置相隔较远,原因主要是修水县畜禽养殖规模远高于其他地区,使得碳排放量也高于其他地区。研究期内主峰均逐渐陡峭,由“矮宽峰”转向“高尖峰”,原因在于除修水县之外,其他县(市、区)畜禽养殖规模逐渐减小,碳排放量也呈现低值聚集的特征。

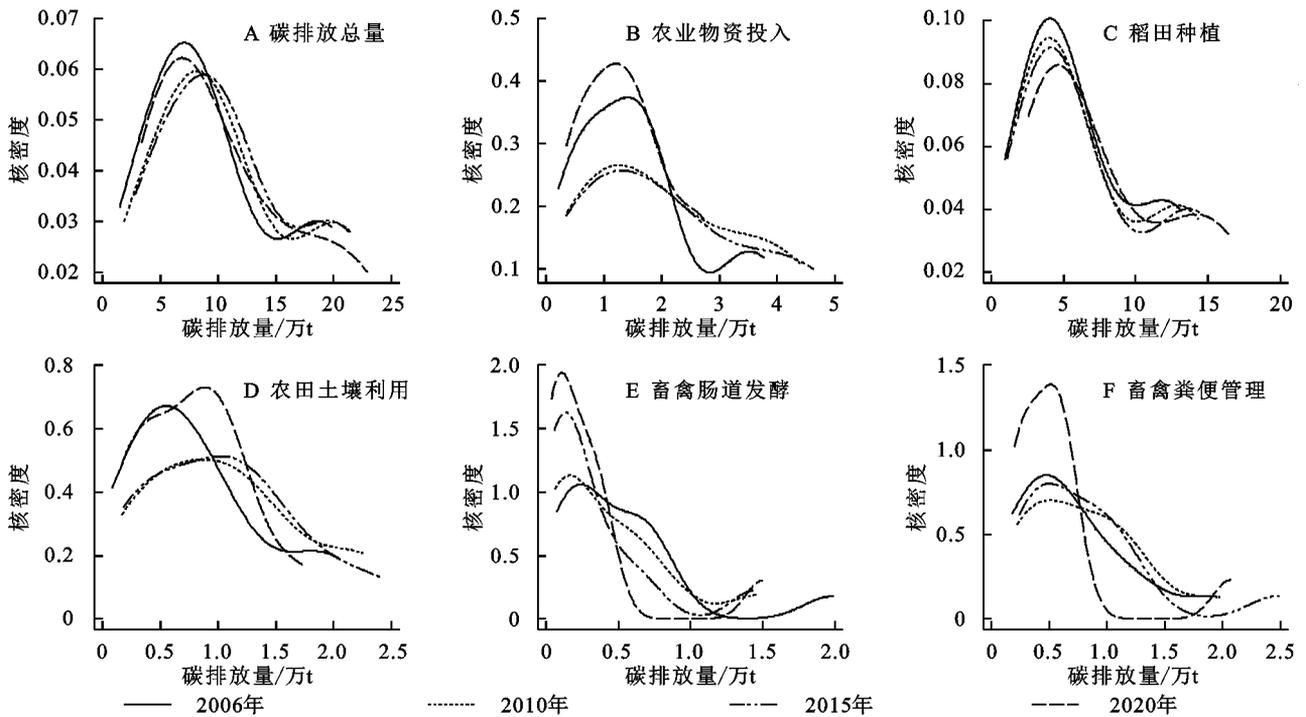


图3 2006—2020年九江市农地利用碳排放量的演进趋势

Fig. 3 Evolutionary trend of carbon emissions from agricultural land use in Jiujiang City from 2006 to 2020

### 3.4 农地利用碳排放影响因素分析

基于 LMDI 模型分解九江市农地利用碳排放的影响因素,结果见表 1。与 2006 年相比,2007—2020 年九江市农地利用碳排放量累计增加了 174.65 万 t。总体上看,农业经济水平对农地利用碳排放具有促进作用;农业生产效率、产业结构和劳动规模具有抑制作用,贡献量大小依次为农业生产效率>农业劳动规模>农业产业结构。

农业生产效率提升是农地利用碳排放减少的最主要因素。研究期间农业生产效率对碳减排的累计贡献量为 957.26 万 t,年均贡献量为 68.38 万 t,除 2018 年有所降低之外,其余年份均持续增加,说明随着农业科技的进步以及人们环保意识的转变,农业生产效率不断提高,抑制了农地利用碳排放。因此进一

步提升农业生产效率仍是九江市未来实现绿色低碳农业的突破口。

农业产业结构调整也是农地利用碳排放减少的影响因素之一。研究期间农业产业结构对碳减排的累计贡献量为 68.89 万 t,年均贡献量为 4.92 万 t,且呈波动性变化趋势,对碳减排的影响程度也呈先下降后上升再下降的倒“N”形趋势,在 2010—2012 年表现为碳增排效应。未来应在保障粮食安全的前提下继续优化调整农业产业结构,积极探索农业发展新模式,将农业“碳源”转变为“碳汇”。

农业经济水平提高是农地利用碳排放增加的最主要因素。研究期间农业经济水平对碳增排的累计贡献量为 1 366.11 万 t,年均贡献量为 97.58 万 t,且呈逐年增加趋势,表明农业经济水平对农地利用碳排

放的推动作用持续增强。农业作为关乎国计民生的基础产业,其经济发展将长期处于较高水平,通过限制发展以降低碳排放的做法显然行不通。因此,应从农业生产效率、产业结构和劳动规模等碳减排因素寻求着力点。

农业劳动规模减小是农地利用碳排放减少的关键因素。研究期间农业劳动规模对碳减排的累计贡献量为 165.31 万 t,年均贡献量为 11.81 万 t,且呈波动增加趋势,说明随着农业现代化进程的推进,农业劳动规模在波动减小。九江市农业从业人口由 2006 年的 98.54 万人降低到 2020 年的 81.44 万人,降低了 17.35%,表明农业生产对劳动力的依赖程度降低,农业发展的规模化、集约化有利于实现碳减排。

表 1 九江市农地利用碳排放影响因素的贡献量  
Table 1 Contribution of factors influencing carbon emissions from agricultural land use in Jiujiang City

万 t					
年份	$\Delta C$	$\Delta E$	$\Delta S$	$\Delta L$	$\Delta P$
2007	5.06	-2.46	-1.79	14.17	-4.87
2008	6.53	-11.10	-1.64	24.72	-5.44
2009	8.06	-30.30	-0.15	47.64	-9.13
2010	11.24	-42.50	1.38	64.15	-11.80
2011	12.67	-53.98	2.67	71.62	-7.64
2012	14.21	-61.38	0.69	86.10	-11.20
2013	14.48	-70.05	-1.83	99.41	-13.04
2014	14.45	-76.78	-1.92	105.55	-12.39
2015	13.68	-80.39	-5.08	112.69	-13.53
2016	14.58	-92.48	-11.05	131.82	-13.72
2017	14.79	-97.70	-14.74	138.75	-11.51
2018	21.08	-92.41	-17.25	144.55	-13.80
2019	13.75	-115.37	-11.17	155.72	-15.43
2020	10.06	-130.37	-7.00	169.23	-21.80
合计	174.65	-957.26	-68.89	1366.11	-165.31

各县(市、区)农地利用碳排放影响因素的分解结果如表 2 所示。与基期相比,各县(市、区)农地利用碳排放量均呈增加态势,其中累计增加量超过 40 万 t 的有彭泽县和永修县,意味着这两个县的碳排放量亟待控制,具有较大的碳减排潜力;而庐山市、瑞昌市累计增加量均低于 5 万 t,碳减排潜力较小。从影响因素来看,农业生产效率对各县(市、区)农地利用碳排放均表现为抑制作用,对修水县、永修县和都昌县的累计贡献量高于 150 万 t,对共青城市的贡献量最小,仅为 11.97 万 t;农业产业结构对德安县、彭泽县农地利用碳排放起促进作用,说明这些地区农业产业结构有待优化,对其他县(市、区)则为抑制作用;农业经济水平对各县(市、区)农地利用碳排放均为促进作用,对修水县、永修县和都昌县的累计贡献量超过 150 万 t,而对

共青城市、德安县、庐山市的累计贡献量低于 55 万 t;农业劳动规模对武宁县、共青城市农地利用碳排放表现为促进作用,原因是农业综合开发的大力推进以及农业生产效益的提升,使得该地区农业从业人口规模扩大(分别由 2006 年的 8.89,1 万人增加到 2020 年的 9.4,1.72 万人),对市区、都昌县、湖口县、彭泽县和瑞昌市的抑制作用较为明显,均超过 20 万 t。总体上看,不同县(市、区)农地利用碳排放的影响因素存在差异,未来碳减排应考虑地区差异精准施策。

表 2 九江市各县(市、区)农地利用碳排放影响因素的贡献量  
Table 2 Contribution of factors influencing carbon emissions from agricultural land use by counties (cities and districts) in Jiujiang City

县(市、区)	$\Delta C$	$\Delta E$	$\Delta S$	$\Delta L$	$\Delta P$
市区	5.46	-68.38	-23.30	124.38	-27.24
武宁县	14.81	-59.29	-10.08	80.44	3.74
修水县	19.36	-154.06	-0.98	189.42	-15.03
永修县	40.77	-163.56	-1.47	224.85	-19.04
德安县	11.96	-35.92	0.68	52.45	-5.24
都昌县	6.98	-223.76	-2.91	256.90	-23.26
湖口县	6.70	-59.94	-6.76	96.79	-23.39
彭泽县	48.86	-55.80	0.87	131.18	-27.39
瑞昌市	2.07	-86.52	-1.15	111.49	-21.75
共青城市	14.14	-11.97	-1.24	19.52	7.82
庐山市	3.54	-41.92	-1.39	53.96	-7.11

### 3.5 农地利用碳排放趋势预测及达峰分析

基于 2006—2020 年农地利用碳排放测算数据,借助 Stata 17 软件,经过多次计算和验证筛选出九江市以及各县(市、区)的最优 ARIMA 模型,对 2021—2025 年碳排放趋势进行预测,并根据预测结果进行碳达峰分析,结果见图 4。九江市农地利用碳排放 2018 年达峰,2020 年后呈下降态势,预计 2025 年降低到 111.61 万 t,比 2020 年降低 6.59%。大部分地区农地利用碳排放呈现良性发展态势,市区、武宁县、永修县等 8 个县(市、区)碳排放量在 2020 年后呈下降趋势,其中市区碳达峰年份(2008 年)最早,都昌县和湖口县 2010 年碳达峰,瑞昌市和庐山市 2013 年碳达峰,武宁县、永修县、彭泽县 2018 年碳达峰。按照历史发展规律,在现有政策和技术等外界因素不变的前提下,修水县、德安县和共青城市 2020 年后碳排放仍呈上升趋势,意味着如果不采取碳减排措施,这 3 个县(市、区)可能不会在 2030 年之前实现碳达峰的目标。因此,各县(市、区)应该根据自身农地利用特点制定碳减排政策,以确保在 2030 年之前均实现碳达峰,进而实现碳中和的目标。

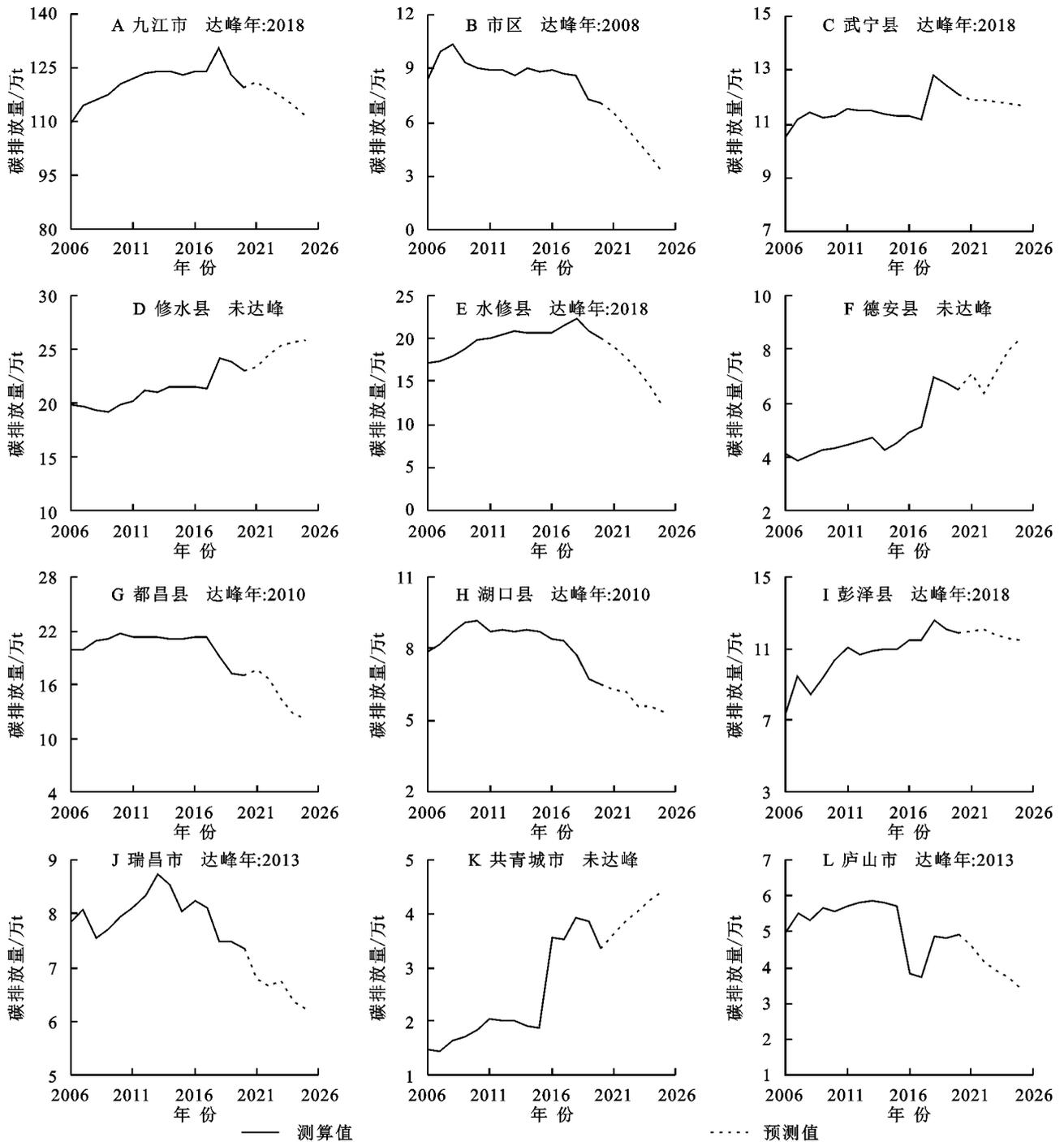


图4 2021—2025年九江市及各县(市、区)农地利用碳排放趋势预测

Fig. 4 Projected carbon emission trends of agricultural land use in Jiujiang City and counties (cities and districts) from 2021 to 2025

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文以九江市为例,精细刻画市县尺度下农地利用碳排放的演变特征、影响因素和未来趋势,以期为促进区域低碳协调发展、因地制宜制定可操作性强的减排控碳措施提供路径选择<sup>[34-35]</sup>。测算方法上,排放因子法是由 IPCC 提出的一种碳排放测算方法,其基本思路是依照碳排放清单列表,将各类碳源数据与排

放系数的乘积作为碳排放量<sup>[14]</sup>,该方法简单明确、易于理解,应用较为广泛。测算结果上,本文测算结果与前人研究<sup>[36]</sup>相比偏高,原因在于前人研究仅测算了农业物资投入产生的碳排放,而本文在此基础上还将稻田种植、农田土壤利用、畜禽肠道发酵以及畜禽粪便管理作为碳排放源,其中农业物资投入碳排放量与前人研究相似。

从碳排放结构来看,种植业碳排放占总量的90%左右,具有较大的减排潜力,而畜牧业仅占10%

左右,减排潜力较小。稻田种植是最大的农业碳源,约占碳排放总量的 60%,是今后农业碳减排的关键;农业物资投入是第二大碳源,近年来排放量有所下降,这与化肥农药减量增效工作的大力推进关系密切,但据统计数据,九江市近年来农作物单产也有所降低,因而九江市今后农业生产仍应以“增量提质”为首要目标,在保障粮食安全和经济发展的前提下,逐步实现碳减排。影响因素分析表明,农业经济水平提高对农地利用碳排放增加有较强的促进作用,这与李波等<sup>[4]</sup>研究结果一致,且这种促进作用逐年增强,说明九江市农地利用碳排放仍处于“EKC 曲线”拐点的左侧,未来农业经济水平提高仍是碳排放增加的主要推动力,从这个意义上讲,农地利用碳减排应当从农业生产效率、产业结构和劳动规模等方面寻找解决路径。

基于上述分析,提出以下农地利用碳减排对策:

(1) 加强农业科技创新,提升农业生产效率。根据各地区重点产业的不同,因地制宜加强农业科技创新,如永修县、都昌县应侧重“绿色高效”化肥、农药、农膜等新型生产要素以及“高产低排”新品种农作物的研发或引进,修水县需侧重探索低碳化畜禽养殖技术,优化畜牧品种、改良畜禽饲料,并通过加强地区间交流互动、联动协作,实现科技成果共享;同时在全市范围内推广测土配方施肥技术,实现土壤养分平衡,提高农资利用效率,确保在粮食稳产、增产的前提下,稳步推进减量增效工作。(2) 优化农业产业结构,转变农业发展模式。彭泽县、德安县农业产业结构表现为碳增排效应,须进一步优化,合理优化早、中、晚稻种植结构以及增加固碳农作物种植比例,适当调整农林牧渔产业结构,保持或增加林地等生态用地面积,提高农业系统的“碳汇”能力;修水县、武宁县等应科学处理畜禽粪便,通过有机肥生产、沼气资源开发等途径,提升粪便资源化利用水平,形成种养结合循环的农业新模式。(3) 提高农民综合素质,促进农业规模生产。开展农业先进技术培训、宣传绿色生产理念,培育新型农民主体;科学调控修水县、武宁县、共青城市等地区的农业劳动规模,通过加大政策、资金扶持力度,加强农机购置补贴、推广高效节能农机等渠道,促进农业机械化、规模化发展,降低农业对劳动力的依赖程度。

需要说明的是,农地利用碳排放受“双碳”等政策实施的影响较大,不同政策情境下的碳排放量有一定区别,但由于数据获取的限制,本文在趋势预测部分仅选取了简单易操作的模型,基于历史数据开展趋势分析,没有考虑政策的影响设定未来不同的发展情景,后续研究需要在这些方面做进一步的分析和探讨。

## 4.2 结论

(1) 2006—2020 年九江市农地利用碳排放量呈先波动上升后持续下降的变化趋势,总体增加了 10.06 万 t,增长率为 9.2%,2020 年达到 119.49 万 t。农地利用碳排放强度除 2018 年上升之外,其余年份均逐年下降,总体降低了 68.01%。稻田种植和农业物资投入是主要碳排放源,二者之和占碳排放总量的 80%左右。

(2) 不同县(市、区)农地利用碳排放水平差异显著,修水县、永修县和都昌县的碳排放量高于 15 万 t,庐山市、共青城市的碳排放量低于 5 万 t。研究期间,碳排放量呈“六升五降”的变化态势,其中彭泽县升幅最大,湖口县降幅最大。各县(市、区)农地利用碳排放强度均大幅下降,降低率高于 50%。县(市、区)之间碳排放总量的极化效应有所减弱,不同碳源的核密度曲线特征有所差异。

(3) 与基期相比,2007—2020 年农地利用碳排放累计增加 174.65 万 t,农业生产效率、产业结构和劳动规模对碳排放具有抑制作用,农业经济水平对碳排放具有促进作用。趋势预测结果显示,九江市农地利用碳排放于 2018 年达到峰值,有 8 个县(市、区)在 2020 年之前达到峰值,修水县、德安县和共青城市在 2020 年之后呈上升趋势,未来应进一步加强碳减排措施。

### 参考文献:

- [1] 田云,林子娟.长江经济带农业碳排放与经济增长的时空耦合关系[J].中国农业大学学报,2021,26(1):208-218.  
Tian Y, Lin Z J. Spatio-temporal coupling relationship between agricultural carbon emissions and economic growth in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of China Agricultural University, 2021,26(1):208-218.
- [2] 邱子健,靳红梅,高南,等.江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J].农业环境科学学报,2022,41(3):658-669.  
Qiu Z J, Jin H M, Gao N, et al. Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(3):658-669.
- [3] He Y Q, Zhu S Y, Zhang Y, et al. Calculation, elasticity and regional differences of agricultural greenhouse gas shadow prices[J]. Science of the Total Environment, 2021,790:148061.
- [4] 李波,张俊飏,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 B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2011, 21(8):80-86.
- [5] Hong C P, Burney J A, Pongratz J, et al. Global and

- regional drivers of land-use emissions in 1961—2017[J]. *Nature*, 2021,589(7843):554-561.
- [6] 韩会庆,王世尧,马庚,等.我国农业碳排放强度与农业经济空间相关性研究[J].*水土保持研究*,2018,25(5):269-274.  
Han H Q, Wang S Y, Ma G, et al. Analysis on spatial correlation between agricultural carbon emission densities and rural economy in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(5):269-274.
- [7] Liu M C, Yang L. Spatial pattern of China's agricultural carbon emission performance[J]. *Ecological Indicators*, 2021,133:108345.
- [8] 周思宇,郝凤明,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 S Y, Xi F M, Yin Y, 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.
- [9] Zhang L, Pang J X, Chen X P, et al. Carbon emissions, energy consumption and economic growth: Evidence from the agricultural sector of China's main grain-producing areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,665:1017-1025.
- [10] 张小平,王龙飞.甘肃省农业碳排放变化及影响因素分析[J].*干旱区地理*,2014,37(5):1029-1035.  
Zhang X P, Wang L F. Variations and influential factors of agricultural carbon emissions in Gansu Province [J]. *Arid Land Geography*, 2014,37(5):1029-1035.
- [11] 刘杨,刘鸿斌.山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2022,30(4):558-569.  
Liu Y, Liu H B. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022,30(4):558-569.
- [12] 张志高,袁征,刘雪,等.基于投入视角的农业碳排放与经济增长的脱钩效应分析:以河南省为例[J].*水土保持研究*,2017,24(5):272-278.  
Zhang Z G, Yuan Z, Liu X, et al. Decoupling analysis of agricultural carbon emissions and economic development based on input angle of view: taking Henan Province for example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2017,24(5):272-278.
- [13] 白义鑫,王霖娇,盛茂银.黔中喀斯特地区农业生产碳排放实证研究[J].*中国农业资源与区划*,2021,42(3):150-157.  
Bai Y X, Wang L J, Sheng M Y. Empirical study on carbon emission of agricultural production in Karst region of Guizhou Province[J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(3):150-157.
- [14] 刘明达,蒙吉军,刘碧寒.国内外碳排放核算方法研究进展[J].*热带地理*,2014,34(2):248-258.  
Liu M D, Meng J J, Liu B H. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. *Tropical Geography*, 2014,34(2):248-258.
- [15] 冉锦成,苏洋,胡金凤,等.新疆农业碳排放时空特征、峰值预测及影响因素研究[J].*中国农业资源与区划*,2017,38(8):16-24.  
Ran J C, Su Y, Hu J F, et al. Temporal and spatial characteristics, peak value forecast and influencing factors of agricultural carbon emissions in Xinjiang [J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017,38(8):16-24.
- [16] 周一凡,李彬,张润清.县域尺度下河北省农业碳排放时空演变与影响因素研究[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2022,30(4):570-581.  
Zhou Y F, Li B, Zhang R Q. Spatiotemporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emissions in Hebei Province at the county scale[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022,30(4):570-581.
- [17] 吴昊玥,黄瀚蛟,陈文宽.中国粮食主产区耕地利用碳排放与粮食生产脱钩效应研究[J].*地理与地理信息科学*,2021,37(6):85-91.  
Wu H Y, Huang H J, Chen W K. Decoupling effects between carbon emissions from cropland use and grain production in the Major Grain-Producing Areas in China [J]. *Geography and Geo-information Science*, 2021,37(6):85-91.
- [18] Wang Z J, Lv D H. Analysis of agricultural CO<sub>2</sub> emissions in Henan Province, China, based on EKC and decoupling[J]. *Sustainability*,2022,14(3):1931.
- [19] 褚力其,姜志德,任天驰.中国农业碳排放经验分解与峰值预测:基于动态政策情景视角[J].*中国农业大学学报*,2020,25(10):187-201.  
Chu L Q, Jiang Z D, Ren T C. Empirical decomposition and peak prediction of agricultural carbon emissions in China: From the perspective of dynamic policy scenarios[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020,25(10):187-201.
- [20] 徐丽,曲建升,李恒吉,等.西北地区居民生活碳排放现状分析及预测[J].*干旱区地理*,2019,42(5):1166-1175.  
Xu L, Qu J S, Li H J, et al. Analysis and prediction of household carbon emission in northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 2019,42(5):1166-1175.
- [21] 黄和平,王智鹏.江西省农用地生态效率时空差异及影响因素分析:基于面源污染、碳排放双重视角[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(2):412-423.  
Huang H P, Wang Z P. Spatial-temporal differences and influencing factors of agricultural land eco-efficiency in Jiangxi Province: Based on the dual perspective of

- non-point source pollution and carbon emission [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(2):412-423.
- [22] 田云,张俊飏,李波.湖北省农地利用碳排放时空特征与脱钩弹性研究[J].长江流域资源与环境,2012,21(12):1514-1519.  
Tian Y, Zhang J B, Li B. Research on spatial-temporal characteristics and decoupling elasticity in agricultural land use carbon emission in Hubei Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(12):1514-1519.
- [23] 李远玲,王金龙,杨伶.基于县域尺度的湖南省农业碳排放时空特征分析[J].中国农业资源与区划,2022,43(4):75-84.  
Li Y L, Wang J L, Yang L. Study on temporal and spatial characteristics of agricultural carbon emissions in Hunan Province at county scale[J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(4):75-84.
- [24] 吕斯涵,张小平.山东省农业净碳汇时空演化特征分析[J].水土保持学报,2019,33(2):227-234.  
Lü S H, Zhang X P. Spatial-temporal characteristics of agricultural net carbon sink in Shandong Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2):227-234.
- [25] 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 J S, Hu H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2012, 22(7):21-27.
- [26] 胡向东,王济民.中国畜禽温室气体排放量估算[J].农业工程学报,2010,26(10):247-252.  
Hu X D, Wang J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10):247-252.
- [27] 丁宝根,杨树旺,赵玉,等.中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J].中国土地科学,2019,33(12):45-54.  
Ding B G, Yang S W, Zhao Y, et al. Study on spatio-temporal characteristics and decoupling effect of carbon emission from cultivated land resource utilization in China[J]. China Land Science, 2019, 33(12):45-54.
- [28] 李波,杜建国,刘雪琪.湖北省农业碳排放的时空特征及经济关联性[J].中国农业科学,2019,52(23):4309-4319.  
Li B, Du J G, Liu X Q. Spatial-temporal characteristics and economic relevance of agricultural carbon emissions in Hubei Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(23):4309-4319.
- [29] 卢新海,刘瑞红,匡兵.湖北省耕地压力的区域差异及动态演进分析[J].农业工程学报,2019,35(23):266-272.  
Lu X H, Liu R H, Kuang B. Regional differences and dynamic evolution of cultivated land pressure in Hubei Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23):266-272.
- [30] 张志高,袁征,李贝歌,等.基于投入视角的河南省农业碳排放时空演化特征与影响因素分解[J].中国农业资源与区划,2017,38(10):152-161.  
Zhang Z G, Yuan Z, Li B G, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and factor decomposition on agricultural carbon emissions in Henan Province [J]. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(10):152-161.
- [31] 孟军,范婷婷.黑龙江省农业碳排放动态变化影响因素分析[J].生态经济,2020,36(12):34-39.  
Meng J, Fan T T. Research on affecting factors decomposition of agricultural CO<sub>2</sub> emission in Heilongjiang Province[J]. Ecological Economy, 2020, 36(12):34-39.
- [32] 谭秀娟,郑钦玉.我国水资源生态足迹分析与预测[J].生态学报,2009,29(7):3559-3568.  
Tan X J, Zheng Q Y. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7):3559-3568.
- [33] 孙斌,徐渭,薛建春,等.黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调预测[J].地球科学与环境学报,2021,43(5):887-896.  
Sun B, Xu W, Xue J C. et al. Prediction of coupling and coordination between urbanization and eco-environment of urban agglomerations in Yellow River Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(5):887-896.
- [34] 王少剑,谢紫寒,王泽宏.中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J].地理学报,2021,76(12):3103-3118.  
Wang S J, Xie Z H, Wang Z H. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO<sub>2</sub> emissions at the county level of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12):3103-3118.
- [35] 金贵,邓祥征,董寅,等.发展地理学视角下中国多维贫困测度及时空交互特征[J].地理学报,2020,75(8):1633-1646.  
Jin G, Deng X Z, Dong Y, et al. China's multidimensional poverty measurement and its spatiotemporal interaction characteristics in the perspective of development geography[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(8):1633-1646.
- [36] 张婷.江西省农地利用碳排放效应及碳减排对策研究[D].南昌:江西农业大学,2014.  
Zhang T. Research on Agricultural Land Use Carbon Emission Effect and Countermeasures to Reduce Emissions at Jiangxi Province[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014.