

李丹,唐文群,陈静媛,等.合肥市县域农业碳排放时空特征[J].华中农业大学学报,2024,43(6):87-99.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.06.009

合肥市县域农业碳排放时空特征

李丹^{1,2},唐文群¹,陈静媛^{1,2},王诚¹,甘志强^{1,2},张云彬^{1,2}

1.安徽农业大学林学与园林学院,合肥 230036; 2.安徽农业大学低碳城乡规划设计创新研究院,合肥 230036

摘要 为探索县域层面农业碳排放量时空特征及其调控策略,以合肥市为例,将种植业与畜牧业生产过程中产生的温室气体作为主要碳源,从农业能源利用、农用物资投入、水稻种植和畜禽养殖4个层面构建碳排放量的测度指标体系,结合IPCC清单法构建农业碳排放计算模型,测算2003—2022年县域尺度下的合肥市农业碳排放量及碳排放强度,采用标准差椭圆和重心迁移模型、ArcGIS可视化方法分析其碳排放时空特征。结果显示:从农业碳排放总量和强度上看,合肥市县域农业碳排放量总量在121.338万~141.0324万t,总体呈“先缓慢上升达到峰值、后逐渐降低”的趋势;农业碳排放强度为0.482~2.358 t/万元,总体下降趋势明显;合肥市县域农业碳排放量在2003—2005年间多集中在庐江县、肥东县,南北差异稍小,2006—2022年呈现“北高南低”的空间格局,差异增大;碳排放强度的空间分布特征变化较大,在2003—2007年、2008—2017年、2018—2022年3个时间段内分别呈现“北高南低”“北低南高”“东北高西北低”的空间格局;从农业碳排放重心上看,合肥市农业碳排放重心整体向东北方向迁移,2003—2022年共计迁移约17.75 km。基于此,提出了合肥市县域层面农业碳减排措施。

关键词 农业碳排放;碳排放测算;碳减排;时空特征;合肥市;县域

中图分类号 S181 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2024)06-0087-13

农业碳排放是指农业生产过程中人为活动导致排放的温室气体,包括农业生产直接或间接产生的温室气体(如CO₂、CH₄、N₂O等)^[1]。据研究,农业温室气体的排放量约占全球总量的10%~12%,是仅次于工业的第二大排放源,被视为全球变暖的重要推动因素^[2]。中国是全球历史悠久的农业大国,同时也是世界农业大国。据世界银行数据库统计,2022年中国谷物产量超过6.33亿t,已连续30多年排名全球第一(<https://data.worldbank.org.cn>)。因此,探索农业碳减排的路径对于中国应对全球气候变化有重要作用。

近年来,农业碳排放研究主要侧重于农业碳排放量测算与时空特征、农业碳排放结构特征、农业碳排放强度等方面。目前最常见的农业碳排放量测算方法是基于IPCC清单的碳排放系数法(或碳排放因子法),优点在于适用尺度广,在充足农业数据的支撑下可用于多尺度的农业碳排放量测算^[3]。与其他行业相比,农业生产的多样性使其碳排放源也更具

复杂性^[4]。近年来我国农业碳排放总量呈上升趋势,由于不同区县在农业产业、耕作条件和农业生产方面差别较大,相应导致了农业碳排放有较大差异^[5-7],但因获取难度大且繁琐,大多研究停留在国家^[8-9]、地区^[10-11]、省域^[12-13]、市域^[14]层面,多用于指导宏观层面的农业碳排放管理调整政策制定^[15-16],而鲜见与农业活动关系更为密切的县域层面的农业碳排放研究,无法为日益精细化的农业管理提供支持。另外,农业碳排放量的测算及其特征虽然受到一些学者的关注^[17-18],但对农业碳排放量的时空变化特征的分析仍然需要充实和补充,利用标准差椭圆和重心转移模型深入刻画其空间路径转移,一定程度上充实了农业碳排放时空特征的研究^[19]。同时,缺少针对农业碳排放时空变化的针对性建议,需探索更深层次的农业碳排放规律及其应对策略^[20]。在农业碳排放结构方面,我国农业碳排放结构测算主要从种植业和畜牧业2个方面进行测算^[21]。相关研究指出种植业碳排放在农业碳排放总量中占有较

收稿日期:2024-09-21

基金项目:安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2023-RK024)

李丹,E-mail:lidan@ahau.edu.cn

通信作者:张云彬,E-mail:zhangyunbin@ahau.edu.cn

大比例^[22]。种植业在华东地区占比较大,其碳排放源主要包括水稻种植、农资投入和土壤翻耕^[23],其中化肥、农药、农膜等农业生产资料使用,以及农业机械使用过程中所带来的碳排放量最为显著^[24-25]。另外,畜牧业的碳排放也占据较大比例,当前有学者利用禽畜的年末出栏量作为饲养量开展了畜牧业碳排放的计算^[13,26-27]。

本研究选取县域农业经济发展水平及农业结构较为成熟的安徽省合肥市作为分析对象,采用联合国政府间气候专门委员会(IPCC)碳排放清单法对合肥市2003—2022年的农业碳排放量进行长时间段的全面测算和系统分析,以研究其时空变化特征,运用ArcGIS方法、标准差椭圆、重心迁移模型的方法探明合肥市县域农业碳排放量与强度的空间格局特征与变化情况;对农业碳排放的测算对象进行梳理和细分,在县域尺度上揭示农业碳排放时空特征,旨在为农业碳排放的精细测算及调控提供系统方法路径,为精细化的城乡土地和农业管理以及农业碳减排策略制定提供科学依据,以此响应国土空间开发与保护和碳达峰碳中和工作的实施。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

合肥市位于华东地区,截至2023年6月,合肥市总人口达1234.5万,城镇化率85.55%。合肥市农业资源丰富,据2022年统计数据显示,耕地面积约48.63万hm²,种植园面积约1.35万hm²,农业总产值306.2亿元,其中粮食产量294.23万t,棉花产量0.19万t,畜牧业总产值130.8亿元,其中肉类、水产品、牛奶产量分别为35.52万、23.86万、9.69万t。合肥市下辖瑶海区、庐阳区、蜀山区、包河区4个市辖区,长丰县、肥西县、肥东县、庐江县4个县及巢湖市。由于4个市辖区城市建成区占比较高,且据《2022年合肥市统计年鉴》数据显示,4个市辖区的第一产业产值仅占合肥市的2%,合肥市更多的农业活动在“四县一市”展开。因此研究区域排除4个市辖区,主要针对四县一市开展相关研究。现巢湖市隶属于原地级市巢湖市居巢区,于2011年被并入合肥市,因此,2011年以前的巢湖市数据取原巢湖市市辖区居巢区数据。

长丰县地势复杂多样,农作物种植丰富,据国家统计局安徽调查总队反馈,2023年长丰县杂粮种植面积和产量分别是2046.67 hm²和1.14万t,均居五

县(市)首位,全县杂粮种植面积和产量占全市96.8%和97.4%;肥西县耕地面积约12万hm²,2023年农林牧渔业总产值116.4亿元,位于五县(市)首位;肥东县一直以农业为主导,拥有丰富的土地资源,盛产小麦、水稻、玉米等谷物,全年完成农林牧渔业总产值138.9亿元,其中农业产值70.7亿元,牧业产值34.3亿元;庐江县耕地180 201 hm²,粮食种植面积131 940 hm²、总产75.98万t;巢湖市因第五大淡水湖得名,生态环境优渥,2023年农林牧渔业总产值完成78.7亿元,粮食总产量40.6万t,播种面积75 800 hm²。

1.2 数据来源

本研究的农业数据来自《中国县域统计年鉴》《安徽省统计年鉴》《合肥市统计年鉴》,部分数据来源于各县统计年鉴,从中获取测算的原始数据包括农作物种植面积、农资使用量、家禽饲养量、农业经济产值等。

1.3 农业碳排放量测算

据2022年《合肥市统计年鉴》,合肥市种植业、牧业、渔业、林业以及农业类服务业在第一产业总产值中的占比分别为81.9%、15.9%、0.9%、1.3%和0%。种植业与牧业两大产业占据了绝对的主导地位,合计占比高达97.8%,而其他产业在合肥市的农业结构中占比极小,对合肥市整体农业碳排放影响较小,因此,参照崔涵等^[28]的研究,将种植业和牧业作为农业碳排放源。同时为便于各类农业碳排放测算,参照田云等^[29]的方法,按照1t CH₄产生的温室效应相对于6.82 t C(25 t CO₂)产生的温室效应、1t N₂O相对于81.27 t C(298 t CO₂)的碳折算系数,将CH₄和N₂O排放量转化为标准碳排放量统一测算。

1)种植业碳排放量测算。种植业的碳排放源主要有水稻种植、农资投入和土壤翻耕。水稻种植过程中产生的CH₄排放,主要源于水灌稻田中的有机质在厌氧菌的作用下分解生成,这一过程产生的CH₄通过气泡形式释放至大气层,其排放量可能与土壤类型、湿度以及灌溉方法等因素密切相关;此外,农资投入也是碳排放的重要来源,包括化肥、农药、农膜的使用,以及灌溉和农业机械运行过程中释放的温室气体。在种植过程中,土壤的开垦也会增加N₂O的排放量^[24]。结合相关研究^[24-25,29],分别确定水稻种植、农资投入、土壤翻耕的碳排放系数(表1)。

种植业碳排放量计算公式如下:

$$C_{\text{crop}} = (T_a \times \delta_a + C_{\text{machinery}}) \times 10^{-7} \\ = (C_{\text{CH}_4} \times 6.82 + C_{\text{N}_2\text{O}} \times 81.27 + C_{\text{CO}_2}) \times 10^{-7} \quad (1)$$

$$C_{\text{machinery}} = (A_s \times D) + (P_{\text{machinery}} \times E) \quad (2)$$

式(1)~(2)中, C_{crop} 为种植业碳排放量(包括除农业机械运用产生的排放量外的农资投入、水稻种植、土壤翻耕), kg; $C_{\text{machinery}}$ 为农业机械运用过程产生的碳排放源, kg; δ_a 为各类别碳源的排放系数; T_a 为种植业各类别碳源因子实际物质投入量; A_s 为农作物总播种面积, hm^2 ; $P_{\text{machinery}}$ 为农业机械总动力, kW。 D 、 E 为转换系数, D 取值 $16.48 \text{ kg}/\text{hm}^2$, E 取值 $0.18 \text{ kg}/\text{kW}$, 10^{-7} 为单位转化系数^[24]。 C_{CH_4} 、 $C_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 C_{CO_2} 分别为 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 排放量, kg。其中灌溉的碳排放量取有效灌溉面积进行计算。

表1 种植业碳排放源及碳排放系数

Table 1 Carbon emission sources and their coefficients from crop cultivation

碳排放源 Carbon sources	气体 Gas	碳排放系数 Carbon emission coefficients
水稻种植 Paddy field planting	CH_4	早稻 Early rice: $167.50 \text{ kg}/\text{hm}^2$
		中稻 Middle-season rice: $512.40 \text{ kg}/\text{hm}^2$
		晚稻 Late rice: $276.00 \text{ kg}/\text{hm}^2$
农资投入 Agricultural materials inputs	CO_2	化肥 Chemical fertilizer: $0.89 \text{ kg}/\text{kg}$
		农膜 Agricultural film: $5.18 \text{ kg}/\text{kg}$
		农药 Pesticide: $4.93 \text{ kg}/\text{kg}$
		灌溉 Irrigation: $266.48 \text{ kg}/\text{hm}^2$
		水稻 Rice: $0.24 \text{ kg}/\text{hm}^2$
		小麦 Wheat: $1.22 \text{ kg}/\text{hm}^2$
土壤翻耕 Soil plowing	N_2O	大豆 Soybean: $0.77 \text{ kg}/\text{hm}^2$
		玉米 Maize: $2.53 \text{ kg}/\text{hm}^2$
		蔬菜 Vegetable: $4.21 \text{ kg}/\text{hm}^2$
		其他旱地作物 Other dryland crops: $0.95 \text{ kg}/\text{hm}^2$

2) 畜牧业碳排放量测算。在禽畜养殖过程中, 碳排放主要表现为 CH_4 和 N_2O 的排放, 其中, CH_4 的排放主要产生于动物肠道发酵过程以及粪便在堆放过程中形成的厌氧环境; N_2O 的排放则主要来源于禽畜粪便的管理环节^[30]。根据 IPCC 评估报告以及黄和平等^[21]的研究结果选取排放系数(表2)。另外, 相关研究认为猪、牛、羊、家禽、骆驼等是农业碳排放产生的主要牲畜种类^[31], 考虑到数据的可获取性以及合肥市畜牧业主要养殖禽畜种类, 选取猪、牛、羊、家禽作为计算对象。由于不同禽畜饲养周期不同, 出栏量或存栏量相差较大, 因此, 需要分类计算其数量。结合相关研究经验, 牛的平均饲养周期约为 $540\sim720 \text{ d}$, 牛数量以年末存栏量为准, 按照式(3)进行计算。猪、羊、家禽数量则需要将年末出栏量结合

饲养周期进行调整。猪、羊和家禽的平均饲养周期分别约为 200 和 $210\sim55 \text{ d}$ ^[32], 不足 365 d , 以年末出栏量为基础, 按照式(4)进行计算。

$$P_{\text{feed}} = H_{\text{end}} \quad (3)$$

$$P_{\text{feed}} = P_c \times \frac{O_{\text{end}}}{365} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, P_{feed} 为畜禽饲养量, 头; H_{end} 年末牛存栏量, 头; P_c 为猪、羊、家禽饲养周期, d; O_{end} 为年末猪、羊、家禽出栏量, 头。

畜牧业碳排放量计算公式如下:

$$C_a = P_{\text{feed}} \times \delta_a \times 10^{-7} = (C_{\text{CH}_4} \times 6.82 + C_{\text{N}_2\text{O}} \times 81.27) \times 10^{-7} \quad (5)$$

式(5)中, C_a 为畜牧业碳排放总量, kg; P_{feed} 为畜禽饲养量, 头; δ_a 为各类别碳源的排放系数; C_{CH_4} 、 $C_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 C_{CO_2} 分别为 CH_4 、 N_2O 、 CH_4 排放量, kg。

表2 畜禽养殖业碳排放源及碳排放系数

Table 2 Carbon emission sources and their coefficients from livestock breeding kg/(头·a)

碳排放源 Emission sources	气体 Gas	碳排放系数 Carbon emission coefficients
禽畜肠道发酵 Enteric fermentation	CH_4	牛 Cattle: 47.80 羊 Sheep: 5.00 猪 Pig: 1.00
		家禽忽略不计 Poultry ignored
	CH_4	牛 Cattle: 1.00 羊 Sheep: 0.16 猪 Pig: 3.50
禽畜粪便管理 Manure management		家禽类 Poultry: 0.02 牛 Cattle: 1.39 羊 Sheep: 0.33 猪 Pig: 0.53
	N_2O	家禽 Poultry: 0.02

3) 农业碳排放量测算。参考《IPCC 国家温室气体清单指南》中提供的方法以及相关研究, 构建农业碳排放量计算模型如下:

$$C_{\text{total}} = (\sum C_a + C_{\text{machinery}} + \sum C_{\text{crop}}) \times 10^{-7} \quad (6)$$

式(6)中, C_{total} 为种植业和畜牧业农业碳排放总量, 万 t; C_a 为畜牧业碳排放总量, kg; C_{crop} 为种植业碳排放量(包括水稻种植、农资投入、土壤翻耕), kg; $C_{\text{machinery}}$ 为农业机械运用过程中的碳排放源, kg。

1.4 碳排放强度测算

农业碳排放强度指单位农业增加值所产生的碳排放量, 农业碳排放强度越低表明在相同投入条件下的农业产出越高或产生的碳排放量越少, 越有利于农业低碳转型^[28]。为避免中间投入和转移价值的

影响,此处经济数据为各产业增加值。

$$\text{农业碳排放强度 } I_C = C \times 10^{-4} / P \quad (7)$$

式(7)中, I_C 为碳排放强度, t/万元; C 为碳排放量, kg; P 为各产业增加值(包括种植业增加值、畜牧业增加值、农牧业增加值), 万元; 10^{-4} 为单位转化系数。

1.5 标准差椭圆分析

标准差椭圆(standard deviation ellipse, SDE)是反映研究对象空间差异特征与时空演化过程的空间计量分析方法, 基本参数是重心、长轴、短轴。重心源于力学概念, 区域重心是指某一要素在研究区域内受力达到平衡的点, 可表示地理要素空间分布的相对移动轨迹^[33]。本研究利用标准差椭圆通过重心位置、长短轴等核心要素揭示合肥市农业碳排放分布在2003—2022年所表现出的中心性、方向性等特征。

对于重心空间区位年际移动距离的计算方法主要参考刘美娟等^[34]的研究成果。重心坐标、长短轴距离、椭圆面积均由ArcGIS中的标准差椭圆和平均重心工具计算:

$$L_{(j+1)-j} = R \times \sqrt{(y_{j+1} - y_j)^2 + (x_{j+1} - x_j)^2} \quad (8)$$

式(8)中, $L_{(j+1)-j}$ 表示重心空间区位移动距离;

$y_{j+1}, y_j, x_{j+1}, x_j$ 表示不同年份的重心坐标; R 为常数, 取 111.11 km。

2 结果与分析

2.1 合肥市农业碳排放时序特征

1) 合肥市农业碳排放总量特征。2003—2022年, 合肥市农业碳排放量呈先增后减的趋势, 峰值和拐点出现在2013年, 为141.032万t, 后逐年降低至2022年的133.066万t(图1)。总体上合肥市农业碳排放年总量增速较为平稳, 年均递增率仅为0.530%。值得注意的是, 2004年合肥碳排放总量环比增速为8.055%, 为近20年来环比增速最大的1年。

合肥市农业碳排放年总量变化可划分为2个阶段。第一阶段为2003—2013年, 碳排放量处于上升时期, 年均增幅为1.790万t, 年均递增率为1.575%。当时合肥市农业的发展重点是提高粮食产量和增加农业经济, 低碳农业尚处于起步阶段, 相关的低碳技术服务体系尚未建立。2005—2007年合肥市农业碳排放处于短暂的下降阶段, 这一时期由于高致病性禽流感疫情和饲料价格上涨等因素的影响, 合肥市牲畜养殖业受到明显冲击, 致使农业碳排放

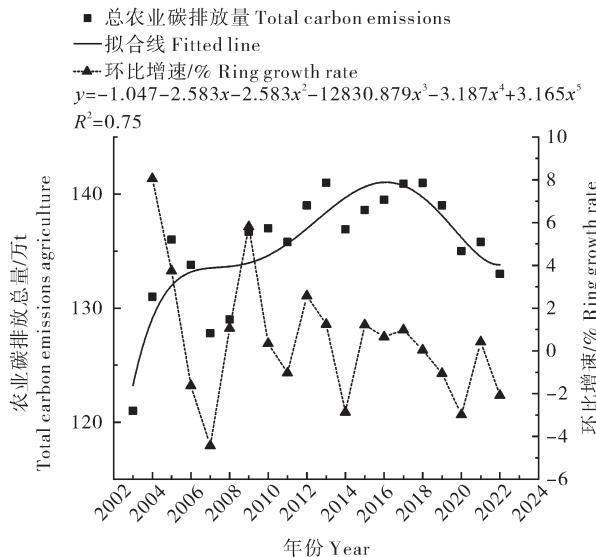


图1 2003—2022年合肥市农业碳排放总量

Fig.1 Total carbon emissions of agriculture in Hefei City from 2003 to 2022

总量持续降低。2014—2022年为第二阶段, 年均降幅为0.797万t。这可能是由于《中美气候变化联合声明》的发布, 我国提出于2030年左右二氧化碳排放达到峰值且努力早日达峰, 生态文明理念推动了全国低碳行动, 农业碳排放总量在一系列政策和措施下呈快速下降态势。

2) 合肥市农业碳排放强度特征。合肥市2003—2022年的农业碳排放强度(图2)总体下降趋势明显($R^2=0.962$)。2003—2022年, 农业碳排放强度逐年递减, 于2022年降至0.482 t/万元。合肥市农业碳排放强度环比增速变化较大, 为-23.451%~2.444%, 年平均降幅为7.791%。其中, 2007年碳排放强度环比增速最大, 为23.451%, 这是由于农牧业增加值相对于其他年份大幅增加, 该年农业碳排放量较前年减少5.936万t, 进而导致该年农业碳排放强度增速变化较大。

3) 合肥市农业碳排放结构特征。合肥市农业碳排放碳源主要包括水稻种植、农资投入、禽畜排放和土壤翻耕四大类(图3)。其中水稻种植碳源占比最大, 为74.13%, 平均农业碳排放量为100.481万t; 禽畜排放(12.747%, 17.266万t)、农资投入(8.553%, 11.591万t)、土壤翻耕(4.568%, 6.177万t)。从长时间段来看, 禽畜排放与土壤翻耕农业碳排放量以及占比变化较为稳定, 整体变化都较小, 由此, 可确定农业碳排放量变化的原因主要在于禽畜排放与水稻种植的变化。

2003—2022年禽畜排放碳排放量占总农业碳排

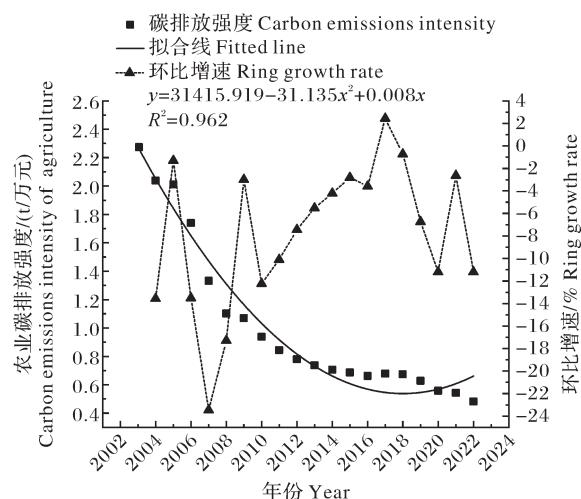


图2 2003—2022年合肥市农业碳排放强度

Fig.2 Carbon emissions intensity of agriculture in Hefei City from 2003 to 2022

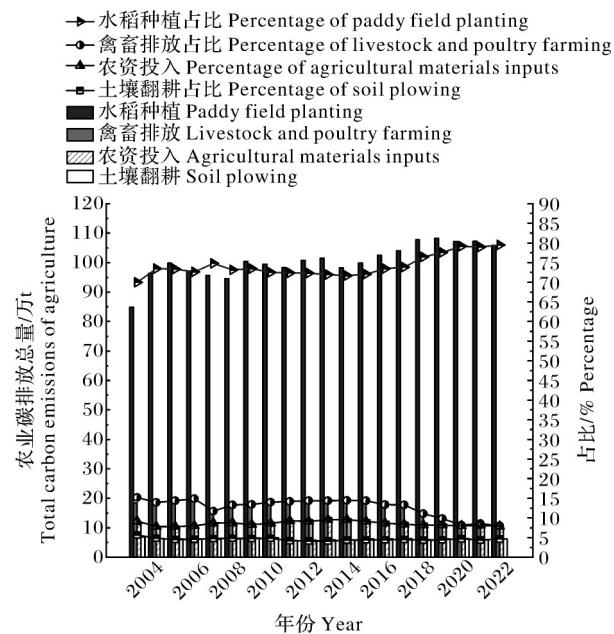


图3 2003—2022年合肥市农业碳排放来源

Fig.3 Sources of carbon emissions of agriculture in Hefei City from 2003 to 2022

放量比重波动较大,呈现先减再增再减的趋势,2013年为峰值,其碳排放量为20.26万t,占比12.747%,由2003年的15.182%下降至2007年的11.745%,再上升至2014年的14.432%后逐渐降低至2022年的8.010%,逐渐与农资投入碳排放量占比齐平。2003—2007年禽畜碳排放量降低主要归因于该时间段内高致病的禽流感致使饲养量减少;2007—2014年碳排放逐渐上升,这可能与相关鼓励政策有关,从2007年开始,国家对生猪标准化规模养殖场(小区)建设实施补助政策,饲养量得到大幅度提升;2014年

至今禽畜碳排放量逐渐降低,饲养量逐渐降低,这可能与2013年国务院颁布《畜禽规模养殖污染防治条例》,强调通过法律、经济、技术、行政等手段推进节能减排工作有关。

将种植业和畜牧业两大农业产业的碳排放量进行对比分析(图4),发现种植业碳排放量起伏变化较大,但整体呈现上升趋势。碳排放强度方面,种植业碳排放强度整体呈现显著的下降趋势($R^2=0.946$)(图5),由2003年的3.752 t/万元下降至2022年的0.633 t/万元,其环比增速亦呈下降态势。在2004年,环比增速呈现负值,为-19.325%,变化幅度最大。畜牧业碳排放量变化较为明显,2007—2022年呈先上升后下降趋势,2013年达到峰值。碳排放强度方面,由图6可知,畜牧业碳排放强度在2003—2022年整体呈现下降趋势($R^2=0.946$),由2003年的0.767 t/万元下降至2022年的0.129 t/万元。其碳排放强度环比增速逐年递减,由正转负,其中,2007年环比增速变化较大,为-36.366%。

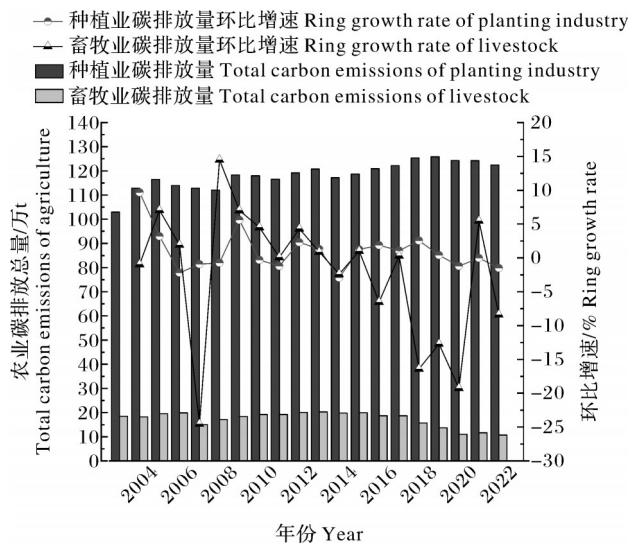


图4 2003—2022年合肥市种植业、畜牧业碳排放量

Fig.4 Total carbon emissions of planting industry and livestock in Hefei City from 2003 to 2022

此外,通过对比种植业碳排放强度与畜牧业碳排放强度得知,种植业的碳排放强度比畜牧业碳排放强度高。原因在于,相对于种植业畜牧业能提供更高的经济价值,主要体现在其产品(如肉类、奶类等)的市场需求和价格上,这些产品具有较高的附加值和市场需求,因此畜牧业在生产过程中可能会投入更多的包括饲料、能源等在内的资源,并得到更高的经济价值,相比之下,种植业虽具有一定的经济价值,但其产品(如粮食、蔬菜等)的市场需求和价格相

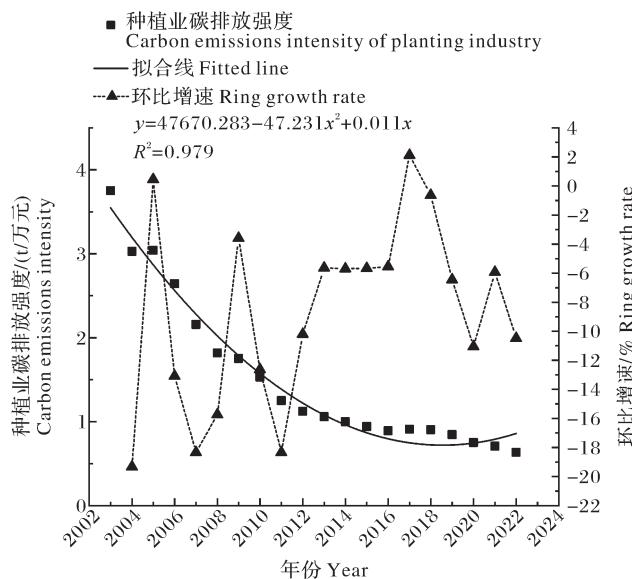


图 5 2003—2022 年合肥市种植业碳排放强度
Fig.5 Carbon intensity of farming in Hefei City from 2003 to 2022

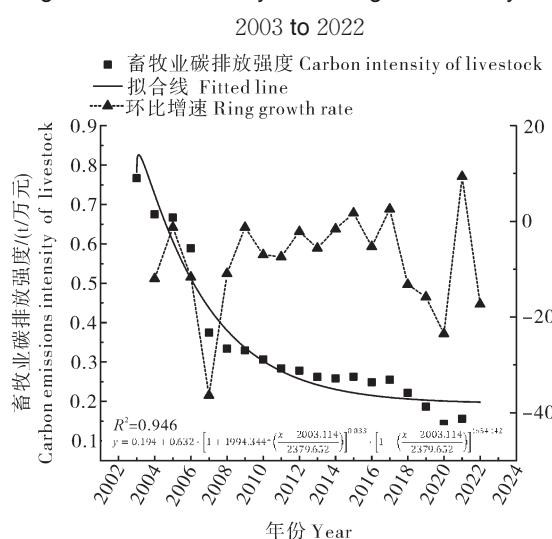


图 6 2003—2022 年合肥市畜牧业碳排放强度
Fig.6 Carbon intensity of livestock in Hefei City from 2003 to 2022

对稳定,且种植过程中相对较少地依赖高碳排放的生产资料。

2.2 合肥市县域农业碳排放空间特征

1) 合肥市县域农业碳排放空间格局分析。将研究区域内 2003—2022 年逐年碳排放量以及碳排放强度借助 ArcGIS 软件进行可视化分析,采用自然间断分层法,依据农业碳排放总量将合肥市划分为农业低碳排放区、中度碳排放区、较高碳排放区和高碳排放区(图 7);依据农业碳排放强度将合肥市划分为强度不明显区域、低强度区域、中强度区域、高强度区域(图 8)。

总体而言,合肥市县域农业碳排放量差异较为明显,经历了由升到降的长期演化进程,2003—2005 年无明显空间格局变化,2006—2022 年主要呈现“北部高、南部低”的空间格局。而农业碳排放强度的空间格局变化情况较大,2003—2007 年呈现“北部高、南部低”的空间格局,2008—2017 年呈现“北部低、南部高”的空间格局,2018—2022 年呈现“东北部高、西北部低”的空间格局。

分析各市县的农业碳排放量和强度变化情况,结果显示,长丰县 2003—2022 年农业碳排放量为 25.352 万~34.693 万 t,始终为高碳排放区和较高碳排放区,占合肥市农业碳排放的 19.336%~24.871%,占比较大。长丰县农业碳排放强度为 0.494~2.942 t/万元,变化较为明显;同时由图 8 可知,长丰县在 2011—2016 年农业碳排放强度虽处于低强度区域,但 2018—2022 年碳排放强度处于中强度区域,具体分析可知,该县农牧业增加值增长速度未与农业碳排放量增长速度相匹配,该县 2003—2022 年均种植中稻,禽畜的数量也逐渐减少,因此,后续需重点发展畜牧业,实现农业高质量发展。庐江县的农业碳排放量在 2003—2005 年处于高碳排放区,但该时段内碳排放强度较低,具体可能与该时段庐江县农牧增加值在 5 个县最高有关。2006—2022 年间庐江县农业碳排放量始终处于中度碳排放区和较高碳排放区,此时段该县相较于其他县农业机械碳排放量较大,同时该县在 2009—2017 年农业碳排放强度始终处于高强度区域,该时间段内农业生产效益低,自 2018 年后其碳排放强度有所降低,这可能与其农牧业增加值有关。巢湖市在几个县(市)中农业碳排放量持续保持最低水平,但 2018—2021 年期间处于高碳排放强度区域,根据碳排放分布数据可见,该市需侧重畜牧业发展,提高畜牧业经济水平。肥东县的农业碳排放量除 2003 年处于较高碳排放区,其余年份均处于高碳排放区,从数据分布可知,2003—2022 年该地选择种植中稻,虽中稻收益较高,更有经济价值,但中稻相对于早稻、晚稻种植的碳排放量最高;除此之外,该县在 2007—2011 年的畜牧业养殖数量比其他县都高,这也是肥东县在该时段农业碳排放强度处于低强度区域和强度不明显区域的原因。肥西县的农业碳排放量空间变化较为稳定,始终处于中度碳排放区和较高碳排放区,且碳排放强度处于不明显区域、低强度区域,观察具体数据得

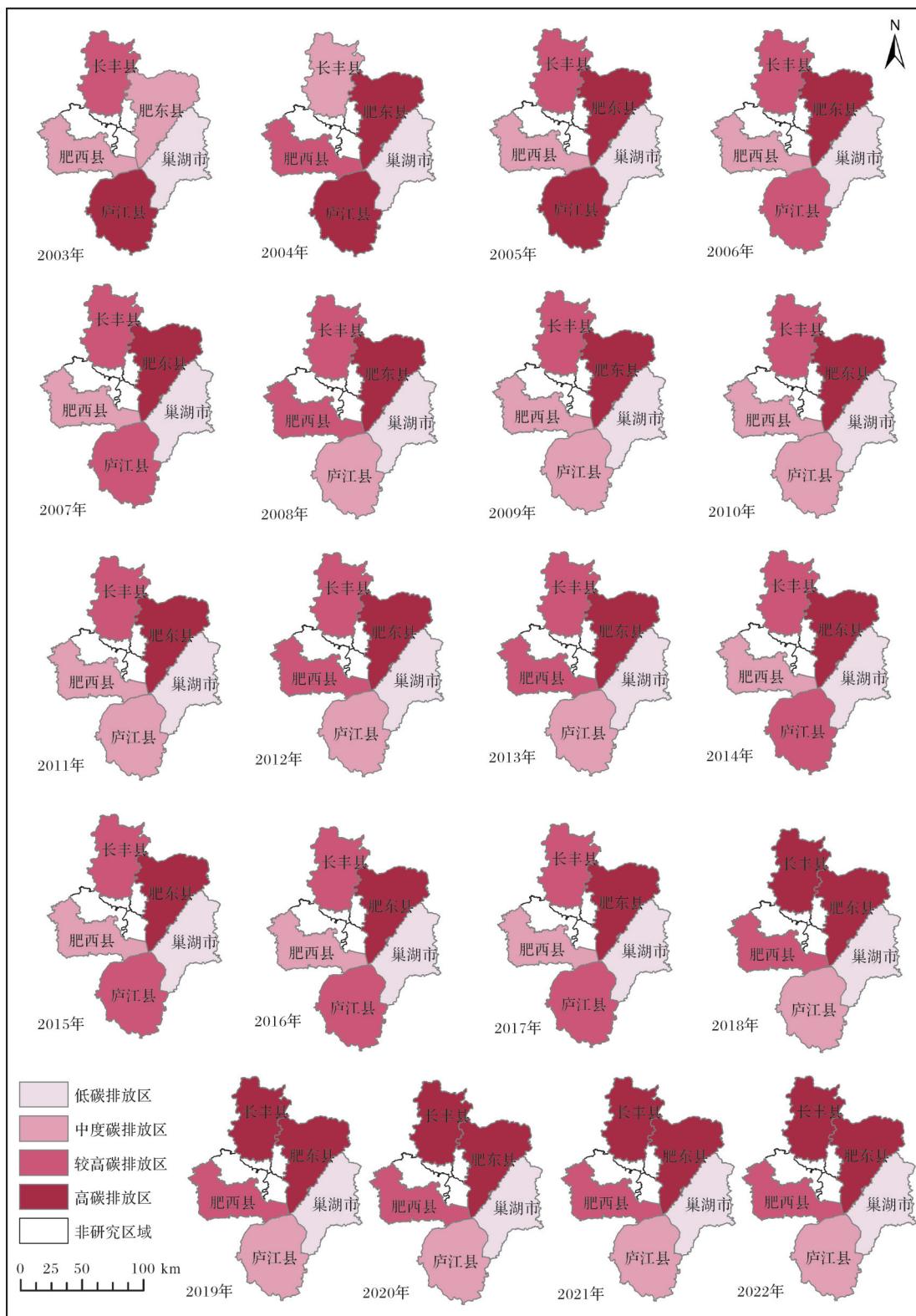


图7 合肥市2003—2022年农业碳排放量空间演变概况

Fig.7 Spatial evolution of agricultural carbon emissions at Hefei City from 2003 to 2022

知其农牧业增加值高,且农业发展较稳定,因此该县农牧业发展模式可为其他县市提供参考。肥西县一直推崇农业高质量发展,结合高标准农田建设,合理

布局配套建设育秧中心、烘干中心、全程机械化综合农事服务中心87个。先后进入国家农业现代化示范区、国家现代农业产业园创建名单,这也是肥西县农

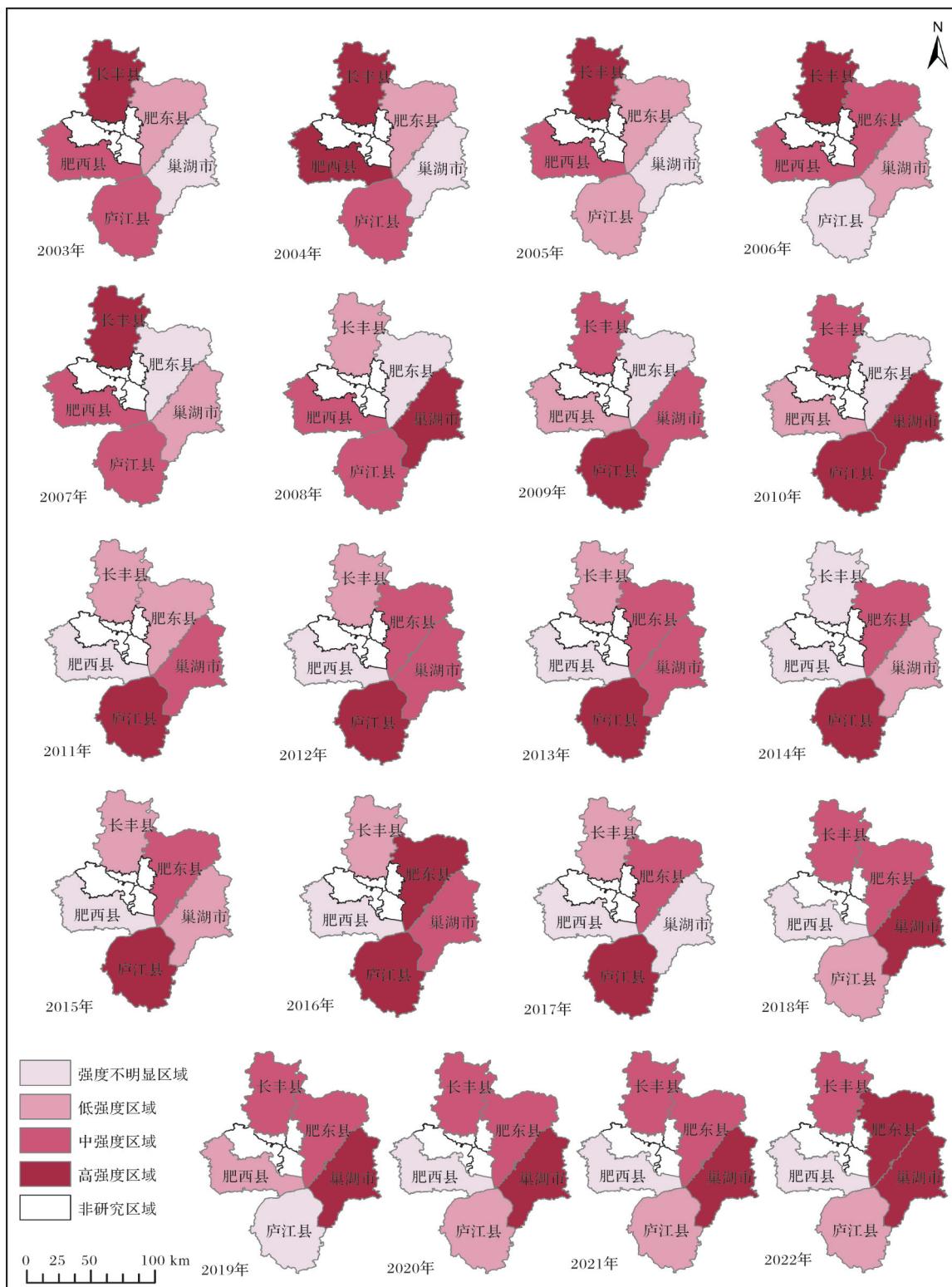


图8 合肥市2003—2022年农业碳排放强度空间演变情况

Fig.8 Spatial evolution of agricultural carbon emissions intensity at Hefei City from 2003 to 2022

业发展水平在合肥市各县(市)突出的原因。

2)合肥市县域农业碳排放空间迁移特征分析。为进一步揭示合肥市农业碳排放的迁移变化,采用

标准差椭圆(SDE)法得到2006、2010、2014、2018

和2022年的重心及标准差椭圆,农业碳排放标准差参数如表3所示,其可视化结果如图9所示。重

表3 碳排放标准差椭圆参数

Table 3 Ellipse parameters of carbon emissions standard deviation

年份 Year	重心转移 Moving of center of gravity			椭圆标准差 Ellipse of standard deviations		
	经度 Longitude	纬度 Latitude	距离/km Distance	长轴/km Major axis	短轴/km Minor axis	扁率 Flattening
2006	117°20'29"N	31°47'15"E	3.206	10.734	6.452	1.664
2010	117°19'59"N	31°47'15"E	1.013	10.694	6.433	1.663
2014	117°20'38"N	31°47'56"E	1.466	10.787	6.342	1.701
2018	117°21'34"N	31°49'13"E	2.924	10.434	6.560	1.591
2022	117°21'34"N	31°49'16"E	0.106	10.423	6.567	1.587

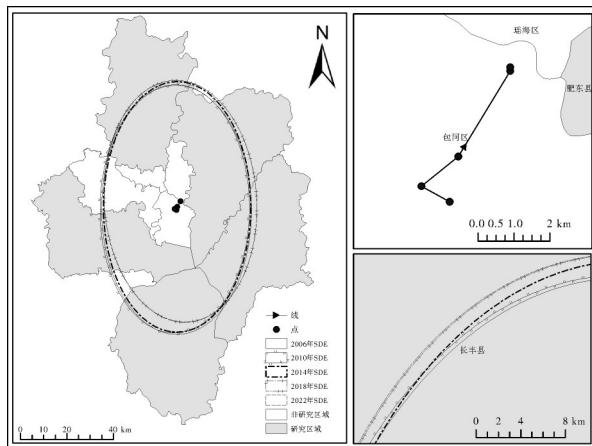


图9 合肥市2003—2022年农业碳排放标准差椭圆分布及重心移动轨迹

Fig.9 Ellipse distribution of standard deviation of agricultural carbon emissions and moving track of center of gravity in Hefei city from 2003 to 2022

重心迁移轨迹显示,合肥市农业碳排放重心整体向东北方向迁移,2003—2022年共计迁移约17.75 km。重心迁移方向方面,2003年重心在包河区境内,2006—2010年重心向西北方向迁移,2010—2022年向东北迁移,最终落在包河区与瑶海区行政边界交接处周围。重心移动速度方面,2013—2014年、2017—2018年移速明显高于其他年份。另外,2003—2004年、2007—2008年、2017—2018年移动距离均超过2 km。可见,农业碳排放重心逐渐向长丰县与肥东县迁移。长丰县和肥东县都是安徽省的重要农业县,2县销售的优势农产品包括虾仁、香肠、草莓等,这些产品的销售反映了2县对农业发展的重视及其成果。但农业的高速发展也带来农业碳排放量的增加和农业经济发展水平不稳定的问题。

深入分析其变化趋势,其椭圆方向逐渐向长丰县偏移,说明相对于肥东县,农业碳排放重心更加向长丰县偏移;同时由表3可知,2014年的扁率最大,表明合肥市农业碳排放重心偏移方向性更加明显。

3 讨论

本研究以合肥市为例,系统分析2003—2022年合肥市农业碳排放量、碳排放强度和县域农业碳排放时空特征,结果表明:

1)合肥市农业碳排放量呈先增后减的趋势;农业碳排放强度下降趋势明显。农业碳排放量为121.338万~141.032万t,年均递增率仅为-0.530%,增速总体上较为平稳。农业碳排放强度范围为0.482~2.358 t/万元,整体上环比增速较大,平均降幅为-7.791%。

2)合肥市农业碳排放量四大碳源占比从大到小分别为水稻种植、禽畜排放、农资投入和土壤翻耕。合肥市农业碳排放中水稻种植占比最大,为74.132%,平均农业碳排放量为100.481万t;其他三大碳源占比和碳排放量分别为:禽畜排放(12.747%,17.266万t)、农资投入(8.553%,11.591万t)、土壤翻耕(4.568%,6.177万t)。

3)合肥市各区(县、市)农业碳排放量2003—2005年无明显空间变化,2006—2022年主要呈现北高南低的空间格局;碳排放强度2003—2007年呈现北高南低的空间格局,2008—2017年呈现北低南高的格局,2018—2022年呈现东北高西北低的空间格局。

4)从重心迁移轨迹看,合肥市农业碳排放重心整体向东北方向迁移。2003—2022年共迁移约17.75 km,2003年农业碳排放重心在包河区境内,2006—2010年重心向西北方向迁移,2010—2022年向东北迁移,最终落在包河区与瑶海区行政边界交接处。重心移动速度方面,2013—2014年、2017—2018年移速明显高于其他年份。

我国碳排放治理体系尚不完善,碳排放核算体系尚待建立健全^[4],在碳排放系数选取、样本量等方面仍未形成有效一致结论,同时在农业碳减排方面

也缺少基于空间分异特征的精准调控路径^[35-36]。碳排放量方面,相关研究未考虑到不同禽畜的饲养周期,仅利用禽畜的年末出栏量作为饲养量进行计算^[13,26-27];常常未将家禽碳排放量纳入测算范围^[30,37],而本研究考虑到禽畜的饲养周期,对饲养量进行了精细调整,并将家禽碳排放也纳入计算,更加系统而精细地测算了农业碳排放。此外,相关研究在核算水稻种植碳排放量时未对水稻类型进行划分^[38],而本研究对于早、中、晚稻进行了细分,更加精细化考量了不同类型水稻的碳排放情况。农业碳排放强度可以用于衡量农业碳排放的水平^[39],可由地区农业碳排放量与该地区农牧业生产总值之比得到^[9],但农牧业生产总值并未考虑到中间投入和转移价值的影响,因此本研究选取的经济数据是农牧业产业增加值,因增加值能更准确地反映生产的规模和速度,并排除中间投入和转移价值的影响。从研究统计单元尺度而言,本研究的县域尺度测算能够为农业碳排放的精细测算路径提供参考。基于合肥市县域农业碳排放时空特征研究结果,本研究提出以下碳减排措施:

1)优化农业产业结构,发展低碳农业。根据市场需求和资源禀赋,调整和优化种植结构,发展适地适种的农作物和经济作物,减少低效益农作物的种植。分析调查的数据得知,合肥市整体种植业碳排放强度逐年递减,主要是由于中稻的种植面积增加,而中稻成本低价值高,拥有较高的农业增加值。除此之外,长丰县、肥东县、巢湖市均以中稻为主,肥西县也于2018年将水稻种植种类转换成中稻,这也与早、晚稻成本高,而中稻收益高有关,但通过碳排放系数得知,早稻与晚稻的碳排放系数是远小于中稻的,这也是导致种植业碳排放量高的原因之一。庐江县虽早稻、中稻、晚稻均有分布,但其早、中、晚稻种植量差别不大,导致其碳排放量及碳排放强度均高。因此,在制定农业可持续发展策略时,可以考虑不同水稻品种种植结构的变化及其对农业碳排放的影响,可通过以中稻为主,搭配少量早稻、晚稻,既可错开种植季节,也可减少碳排放量,同时对农业经济的影响也较小^[24]。

2)提高农业科学技术水平,推广生态农业、有机农业、水稻种植机械化等低碳农业技术。通过比对已收集的数据,长丰县的碳排放量最高,主要原因是其农资投入大,尤其是化肥与农膜的使用,远超其他县的使用量,因此该县需减少难降解农膜、农药以及

高污染化肥等排放物的使用,争取农业生产高效率和资源利用高效率,例如用粪肥、堆肥或有机肥替代高污染化肥等^[35]。

3)制定并完善农业碳排放测算和监测体系,明确农业碳中和的实施路径。建立完善的农业碳排放监管政策和指标体系,明确农业碳排放的量化标准和监测方法。每个地区农业基础与经济发展水平不同,需要根据每个区域的具体情况制定适合当地的有效减排政策^[37]。庐江县碳排放强度高的原因还在于其养殖业发展水平低下,该县忽视了养殖业带来的经济效益,其牛、猪、羊、家禽养殖数量远低于其他县,因此其农牧业增加值低,碳排放强度高,而畜牧业对农业碳排放的贡献较少,因此,该县可适当发展养殖业。

参考文献 References

- [1] 杨欣,张华,董玥.经济社会转型期武汉城市圈农业碳排放影响因素分解研究:基于农业投入视角[J].国土资源科技管理,2019,36(4):1-11.YANG X,ZHANG H,DONG Y.Study on the decomposition of influencing factors of agricultural carbon emission in Wuhan metropolitan area during economic and social transformation: from the perspective of agricultural input [J]. Scientific and technological management of land and resources,2019,36(4):1-11 (in Chinese with English abstract).
- [2] 郭朝先.2060年碳中和引致中国经济系统根本性变革[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(5):64-77.GUO C X.Carbon neutrality by 2060 leads to fundamental changes in China's economic system [J]. Journal of Beijing University of Technology (social sciences edition), 2021, 21(5): 64-77 (in Chinese with English abstract).
- [3] 胡永浩,张昆扬,湖南燕,等.中国农业碳排放测算研究综述[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(2):163-176.HU Y H,ZHANG K Y,HU N Y,et al.Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J].Chinese journal of eco-agriculture, 2023, 31 (2) : 163-176 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张俊魁,何可.“双碳”目标下的农业低碳发展研究:现状、误区与前瞻[J].农业经济问题,2022,43(9):35-46.ZHANG J B, HE K. Current situation, misunderstandings and prospects of agricultural low-carbon development under the targets of carbon peak and carbon neutrality [J]. Issues in agricultural economy, 2022, 43 (9) : 35-46 (in Chinese with English abstract).
- [5] 何艳秋,戴小文.中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究[J].资源科学,2016,38(9):1780-1790.HE Y Q,DAI X W. Phase characteristics and regional differences in agriculture carbon emissions in China [J]. Resources science, 2016, 38(9) :

1780-1790 (in Chinese with English abstract).

[6] 孟庆雷,殷宇翔,王煜昊.我国农业碳排放的时空演化、脱钩效应及绩效评估[J].中国农业科学,2023,56(20):4049-4066.MENG Q L, YIN Y X, WANG Y H. Spatial-temporal evolution, decoupling effect and performance evaluation of China's agricultural carbon emissions [J]. Scientia agricultura sinica, 2023,56(20):4049-4066(in Chinese with English abstract).

[7] 田云,尹杰昊.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 Y, YIN M H. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: basic status, dynamic evolution and spatial spill-over effects [J]. Chinese rural economy, 2022(3):104-127 (in Chinese with English abstract).

[8] 张学智,王继岩,张藤丽,等.中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施[J].环境科学与技术,2021,44(3):200-208.ZHANG X Z, WANG J Y, ZHANG T L, et al. Assessment of methane emissions from China's agricultural system and low carbon measures [J]. Environmental science & technology, 2021,44(3):200-208(in Chinese with English abstract).

[9] 王宝义.中国农业碳排放的结构特征及时空差异研究[J].调研世界,2016(9):3-10.WANG B Y. Structural characteristics and temporal and spatial differences of agricultural carbon emissions in China [J]. The world of survey and research, 2016 (9):3-10 (in Chinese).

[10] 褚迎港,曹海艳.长三角地区农业碳排放时空特征和脱钩弹性研究[J].特区经济,2024(3):51-55.CHU Y G, CAO H Y. Research on the characteristics of agricultural carbon emissions in the Yangtze River Delta Region and decoupling elasticity [J]. Special zone economy, 2024 (3): 51-55 (in Chinese with English abstract).

[11] 张颂心,王辉,徐如浓.科技进步、绿色全要素生产率与农业碳排放关系分析:基于泛长三角26个城市面板数据[J].科技管理研究,2021,41(2):211-218.ZHANG S X, WANG H, XU R N. Analysis on the relationship between science and technology progress, green total factor productivity and agricultural carbon emission: based on pan Yangtze River Delta 26 city panel data [J]. Science and technology management research, 2021, 41 (2):211-218 (in Chinese with English abstract).

[12] 冉锦成,马惠兰,苏洋.西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J].江西农业大学学报,2017,39(3):623-632.RAN J C, MA H L, SU Y. A study on agricultural carbon emission and carbon emission reduction potential in five provinces in Northwest China [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39 (3) : 623-632 (in Chinese with English abstract).

[13] 吴义根,冯开文.中国省际农业碳排放的时空分异特征及关联效应[J].环境科学与技术,2019,42(3):180-190.WU Y G, FENG K W. Spatial-temporal differentiation features and correlation effects of provincial agricultural carbon emissions in China [J]. Environmental science & technology, 2019, 42(3) : 180-190 (in Chinese with English abstract).

[14] 任惠芹,齐娅荣,王嘉怡,等.宁夏市域尺度下畜牧业碳排放时空演变及驱动因子研究[J].安徽农业科学,2024,52(10):80-84.REN H Q, QI Y R, WANG J Y, et al. Study on the spatial and temporal evolution of carbon emissions from animal husbandry and the driving factors at the municipal scale in Ningxia [J]. Journal of Anhui agricultural sciences, 2024, 52 (10):80-84 (in Chinese with English abstract).

[15] 赵爽,陈儒,姜志德.低碳试点政策对农业碳排放影响的实证研究:基于双重差分模型的检验[J].生态经济,2018,34 (12):22-28.ZHAO S, CHEN R, JIANG Z D. Empirical analysis of the low-carbon pilot policies' impact on agricultural carbon emissions based on DID model [J]. Ecological economy, 2018,34(12):22-28 (in Chinese with English abstract).

[16] 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 (in Chinese with English abstract).

[17] 王龙飞,王小艳,李柯,等.碳达峰背景下新疆农业碳排放量测算及强度分析[J].智慧农业导刊,2024,4(18):52-55. WANG L F, WANG X Y, LI K, et al. Quantity calculation and intensity analysis of agricultural carbon emissions in Xinjiang in the context of carbon peak [J]. Journal of smart agriculture, 2024,4(18):52-55 (in Chinese with English abstract).

[18] 王翠平,赵心雨,王以彤,等.辽宁省家畜生产碳排放量测算与分析[J].山东畜牧兽医,2024,45(8):4-7.WANG C P, ZHAO X Y, WANG Y T, et al. Calculation and analysis of carbon emissions from livestock production in Liaoning Province [J]. Shandong journal of animal science and veterinary medicine, 2024,45(8):4-7 (in Chinese).

[19] 彭宸,贾俊松,余清项,等.中国农业碳排放的时空演化及影响因素分析[J].环境科学研究,2024,37(6):1181-1192. PENG C, JIA J S, YU Q X, et al. Analysis of spatio-temporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emission in China [J]. Research of environmental sciences, 2024, 37 (6):1181-1192 (in Chinese with English abstract).

[20] LIU S T, JIA J S, HUANG H Z, et al. China's CO₂ emissions: a thorough analysis of spatiotemporal characteristics and sustainable policy from the agricultural land-use perspective during 1995—2020 [J/OL]. Land, 2023, 12 (6) : 1220 [2024-09-21].<https://doi.org/10.3390/land12061220>.

[21] 黄和平,李紫霞,黄懿,等.“双碳”目标下江西省农业碳排放量测算、影响因素分析与预测研究[J].生态与农村环境学报,2024,40(2):179-190.HUANG H P, LI Z X, HUANG D, et al. Research on the measurement, analysis and prediction of agricultural carbon emissions in Jiangxi Province under the “dual carbon” goals [J]. Journal of ecology and rural environment

ment, 2024, 40 (2) : 179-190 (in Chinese with English abstract).

[22] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国农业碳排放特征及影响因素研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(5): 56-62. HU W L, ZHANG J X, WANG H L. Characteristics and influencing factors of agricultural carbon emission in China [J]. Statistics & decision, 2020, 36(5): 56-62 (in Chinese with English abstract).

[23] 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 Y Q, CHEN R, WU H Y, 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).

[24] 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 B F, LIANG H, WAN W, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural carbon emissions at the county level in Jiangxi Province of China [J]. Transactions of CSAE, 2022, 38(23) : 70-80 (in Chinese with English abstract).

[25] 邓维忠, 许中坚. 湖南省农业碳排放特征及碳达峰分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(2): 206-217. DENG W Z, XU Z J. Characteristics of agricultural carbon emissions and carbon peak analysis in Hunan Province [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2024, 32(2) : 206-217 (in Chinese with English abstract).

[26] 顾沈怡, 邱子健, 詹永冰, 等. 我国畜牧业碳排放时空特征与趋势预测[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 705-714. GU S Y, QIU Z J, ZHAN Y B, et al. Spatial-temporal characteristics and trend prediction of carbon emissions from animal husbandry in China [J]. Journal of agro-environment science, 2023, 42(3): 705-714 (in Chinese with English abstract).

[27] 杨思存, 霍琳, 王成宝, 等. 基于STIRPAT模型的甘肃省农业碳排放特征分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1493-1502. YANG S C, HUO L, WANG C B, et al. Characteristics of agricultural carbon emissions in Gansu Province based on STIRPAT model [J]. Arid land geography, 2023, 46(9): 1493-1502 (in Chinese with English abstract).

[28] 崔涵, 王丙参, 周明生. 中国农业碳排放时空演进及驱动因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(7): 1097-1108. CUI H, WANG B C, ZHOU M S. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's agricultural carbon emissions [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2024, 32 (7) : 1097-1108 (in Chinese with English abstract).

[29] 田云, 张俊燧. 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 (in Chinese with English abstract).

[30] 张丽琼, 何婷婷. 1997—2018年中国农业碳排放的时空演进与脱钩效应: 基于空间和分布动态法的实证研究[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2022, 16(1): 78-90. ZHANG L Q, HE T T. Spatio-temporal of agricultural carbon emission and decoupling in China during 1997—2018: an empirical research based on spatial and distribution dynamics method [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (social science), 2022, 16 (1): 78-90 (in Chinese with English abstract).

[31] 王青青, 赵梦薇, 罗晶晶, 等. 安徽省农业碳排放时空变化分析与影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2024, 40(16) : 104-111. WANG Q Q, ZHAO M W, LUO J J, et al. Analysis of spatial and temporal variation of agricultural carbon emissions and influencing factors in Anhui Province [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2024, 40(16) : 104-111 (in Chinese with English abstract).

[32] 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 CSAE, 2010, 26 (10) : 247-252 (in Chinese with English abstract).

[33] 陈怡, 凌莉, 古圳威, 等. 陕西省碳排放时空格局演变及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2024, 44(4) : 1826-1839. CHEN Y, LING L, GU Z W, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions in Shaanxi Province [J]. China environmental science, 2024, 44(4) : 1826-1839 (in Chinese with English abstract).

[34] 刘美娟, 王蓓, 仲俊涛. 近30年来青海省人口: 经济: 粮食区域差异与空间格局[J]. 西北人口, 2021, 42(6): 113-124. LIU M J, WANG B, ZHONG J T. Population-economic-grain regional difference and spatial pattern of Qinghai Province in the past 30 years [J]. Northwest population journal, 2021, 42(6) : 113-124 (in Chinese with English abstract).

[35] 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]. Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2021, 42(3) : 150-157 (in Chinese with English abstract).

[36] 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]. Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2022, 43(4) : 75-84 (in Chinese with English abstract).

[37] 张志高, 刘青利, 张翠贞, 等. 河南省农业碳排放动态变化及预测研究[J]. 南方农业, 2017, 11(22): 24-28. ZHANG Z G, LIU Q L, ZHANG C Z, et al. Study on dynamic change and prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province [J]. South China agriculture, 2017, 11 (22) : 24-28 (in Chinese with English abstract).

nese).

[38] 沈达尊.农业生产经济效益的评价:第一讲农业生产经济效益的概念和评价指标[J].湖北农业科学,1983,22(10):34-37.SHEN D Z.Evaluation of economic benefits of agricultural production: the first lecture on the concept and evaluation index of economic benefits of agricultural production [J]. Hubei agricultural sciences, 1983,22(10):34-37 (in Chinese).

[39] 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]. China population, resources and environment, 2012,22(7):21-27 (in Chinese with English abstract).

Spatiotemporal characteristics of agricultural carbon emissions in counties of Hefei City

LI Dan^{1,2}, TANG Wenqun¹, CHEN Jingyuan^{1,2}, WANG Cheng¹, GAN Zhiqiang^{1,2}, ZHANG Yunbin^{1,2}

1. College of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. Innovation Institute for Low Carbon Urban and Rural Planning and Design,

Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract It is of great significance to study the spatiotemporal characteristics of agricultural carbon emissions and its strategies for realizing the target of carbon peak and carbon neutrality in China. Hefei City was used to study the spatiotemporal characteristics and regulation strategies of agricultural carbon emissions at the level of county. The greenhouse gases generated during the production process of planting and animal husbandry were used as the main carbon source to construct a measurement index system for carbon emissions from four levels including the utilization of agricultural energy, the input of agricultural material, the planting of rice, and the farming of livestock and poultry. A calculation model of agricultural carbon emission was constructed based on the IPCC inventory method. The agricultural carbon emission and carbon emission intensity of Hefei City at the level of county from 2003 to 2022 were calculated. The spatiotemporal characteristics of carbon emission were analyzed with standard deviation ellipse and center of gravity transfer model, ArcGIS visualization method. The results show that the total agricultural carbon emissions of counties in Hefei are 1 213 380-1 410 320 tons in terms of total agricultural carbon emissions and intensity, and the overall trend is “first slowly rising to the peak, and then gradually decreasing”. Agricultural carbon emission intensity is 0.482-2.358 tons/ten thousand yuan, and the overall downward trend is obvious; From 2003 to 2005, the agricultural carbon emissions of counties in Hefei were mostly concentrated in Lujiang County and Feidong County, with a slight difference between the north and the south. From 2006 to 2022, the spatial pattern of “high in the north and low in the south” increased. The spatial distribution characteristics of carbon emission intensity changed greatly, showing the spatial pattern of “north high and south low”, “north low and south high” and “northeast high and northwest low” in three time periods from 2003 to 2007, 2008 to 2017 and 2018 to 2022 respectively. From the agricultural carbon emission center of gravity, the agricultural carbon emission center of Hefei is northeast as a whole. From 2003 to 2022, the total migration was about 17.75 km. It will provide some references for calculating agricultural carbon emissions and the formulating policies of reducing agricultural carbon emissions in China.

Keywords agricultural carbon emissions; estimation of carbon emissions; carbon emission reduction; spatiotemporal characteristics; Hefei City; county level

(责任编辑:张志钰)