

DOI: 10.11766/trxb202212180695

季国军, 纪洪亭, 程琨, 刘满强, 江瑜, 胡正锬, 张岳芳, 胡乃娟, 胡锋. 江苏水稻种植方式碳足迹和经济效益综合评价[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1042–1054.

Ji Guojun, Ji Hongting, Cheng Kun, Liu Manqiang, Jiang Yu, Hu Zhengkun, Zhang Yuefang, Hu Naijuan, Hu Feng. Carbon Footprint and Economic Benefits Analysis of Rice Planting Patterns in Jiangsu Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 1042–1054.

江苏水稻种植方式碳足迹和经济效益综合评价*

季国军^{1, 2}, 纪洪亭³, 程琨¹, 刘满强¹, 江瑜⁴, 胡正锬¹, 张岳芳⁵,
胡乃娟², 胡锋^{1†}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农业经济与发展研究所, 南京 210014; 3. 江苏丘陵地区南京农业科学研究所, 南京 210046; 4. 南京农业大学农学院, 南京 210095; 5. 江苏省农业科学院资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要: 系统分析水稻不同种植方式碳足迹及经济效益对水稻生产碳减排和发展低碳农业具有重要意义, 目前在省级尺度上关于不同水稻种植方式碳足迹和经济效益综合评价的研究尚少见报道。基于江苏水稻农情调查数据, 利用生命周期评价方法定量分析江苏水稻不同种植方式碳足迹及经济效益。结果表明, 2016—2020 年不同水稻种植方式单位面积碳足迹为 11.28~14.39 t·hm⁻², 单位产量碳足迹为 1.30~1.52 kg·kg⁻¹, 单位产值碳排放为 0.49~0.58 kg·yuan⁻¹, 单位面积碳足迹、单位产量碳足迹和单位产值碳足迹从大到小依次为抛秧水稻或手插水稻、机插水稻、直播水稻。机插水稻和手插水稻生产单位面积碳足迹随年份的增加呈下降趋势。机插水稻、手插水稻和直播水稻单位产量碳足迹随年份的变化呈下降趋势。不同水稻生产种植方式碳足迹中占比最大的是稻田甲烷排放, 其次为氮肥施用导致的碳足迹、稻田氧化亚氮排放和灌溉用电导致的碳足迹。氮肥和灌溉用电是影响不同水稻种植方式碳足迹差异的主要驱动因素。不同水稻种植方式总收益为 2.51×10³~2.75×10³ yuan·hm⁻², 资源投入成本为 1.88×10³~1.99×10³ yuan·hm⁻², 碳排放成本为 0.20×10³~0.25×10³ yuan·hm⁻², 考虑碳排放的净收益 (NL_{CO2}) 为 0.39×10³~0.64×10³ yuan·hm⁻²。机插水稻 NL_{CO2} 低于其他三种水稻种植方式, 这与机插水稻较高的总收益和较低的资源投入成本和较低的碳排放成本有关。综上所述, 仅考虑碳排放, 直播水稻是最为低碳的水稻种植方式, 综合碳排放和经济效益, 机插水稻优于手插、直播和抛秧水稻。

关键词: 水稻; 种植方式; 碳足迹; 经济效益; 生命周期评价

中图分类号: S19 文献标志码: A

Carbon Footprint and Economic Benefits Analysis of Rice Planting Patterns in Jiangsu Province

Ji Guojun^{1, 2}, Ji Hongting³, Cheng Kun¹, Liu Manqiang¹, Jiang Yu⁴, Hu Zhengkun¹, Zhang Yuefang⁵,
Hu Naijuan², Hu Feng^{1†}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Economy and Development, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Nanjing Institute of Agricultural Sciences

* 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2022308-1)资助 Supported by the Jiangsu Key Research and Development Plan: Modern Agriculture (No. BE2022308-1)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fenghu@njau.edu.cn

作者简介: 季国军(1972—), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 研究员, 主要从事可持续生态学研究。E-mail: 1679054641@qq.com

收稿日期: 2022-12-18; 收到修改稿日期: 2023-02-28; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-04-24

in Jiangsu Hilly Area, Nanjing 210046, China; 4. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 5. Institute of Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: 【Objective】 Little or no research has been done on the carbon footprint and economic benefits of different rice planting patterns at the provincial level. Thus, a systematic analysis of the carbon footprint and economic benefits of different rice planting patterns is of great significance for carbon emission reduction of rice production and the development of low-carbon agriculture. 【Method】 Based on the survey data of rice farming in Jiangsu Province, the carbon footprint and economic benefits of different rice planting patterns in Jiangsu Province were quantitatively analyzed by using the life cycle assessment method. 【Result】 The results showed that from 2016 to 2020, the carbon footprint per unit area, the carbon footprint per unit yield, and the carbon footprint per unit value were $11.28\text{--}14.39\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, $1.30\text{--}1.52\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.49\text{--}0.58\text{ kg}\cdot\text{yuan}^{-1}$, respectively. The carbon footprint per unit area, per unit yield and per unit output value of different rice production and planting patterns were in order of broadcasted seeding rice or manual transplanting rice, mechanical transplanting rice, direct seeding rice. The carbon footprint per unit area of mechanical transplanting rice and manual transplanting rice production showed a decreased trend with the increase of years. Also, the carbon footprint per unit yield of mechanical transplanting rice, manual transplanting rice, and direct seeding rice production showed a decreased trend with the increase of years. Methane emissions from rice fields accounted for the largest proportion, followed by carbon footprints caused by nitrogen fertilization, nitrous oxide emissions from rice fields and carbon footprints caused by irrigation electricity. Nitrogen fertilizer and irrigation electricity were the main driving factors affecting the regional differences in the carbon footprint of different rice planting patterns. The total income of different rice planting patterns was between $2.51\times 10^3\text{--}2.75\times 10^3\text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$, the resource input cost was $1.88\times 10^3\text{--}1.99\times 10^3\text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$, the carbon emission cost was $0.20\times 10^3\text{--}0.25\times 10^3\text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the net income (NI_{CO_2}) considering carbon emissions was $0.39\times 10^3\text{--}0.64\times 10^3\text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$. The NI_{CO_2} of mechanical transplanting rice was lower than that of manual transplanting rice, broadcasted seeding rice and direct seeding rice. This was mainly caused by the higher total income and the lower resource input cost and carbon emission cost of mechanical transplanting rice. 【Conclusion】 In conclusion, direct seeding rice was the lowest carbon emission rice planting pattern. Considering the carbon emission and economic benefits, machinal transplanting rice was superior to manual transplanting rice, direct seeding rice and broadcasted seeding rice.

Key words: Rice; Planting patterns; Carbon footprint; Economic benefits; Life cycle assessment

由温室气体排放引起的全球变暖问题已受到公众的广泛关注。农业是温室气体的重要来源，农业生产排放的温室气体约占全国温室气体排放总量的7%左右^[1]，作物生产碳排放占全国农业生产碳排放总量的45%^[2]。减少碳排放是农业生产中亟待解决的问题，而明确农业生产各环节碳足迹是解决此问题的先决条件，这对于减少温室气体排放，实现“碳达峰、碳中和”具有重要意义。

“足迹”分析方法是量化生产过程或活动对环境影响的重要方法^[3]。碳足迹是在生态足迹的概念基础上提出的，其定义为某种活动或者某种产品生命周期过程中温室气体排放量的指标^[4]。碳足迹已经被广泛应用于全球范围内与作物生产相关的碳投入的量化评价，从碳足迹视角研究农业生产的碳排放越来越受到国内学者的重视^[2]。在国家尺度上，王兴等^[5]利用碳足迹评价方法计算了2004—2014年中

国水稻生产的碳足迹及其变化趋势；严圣吉等^[2]分析了我国作物生产碳排放特征及其构成；Yan等^[6]基于农户调查，分析了我国水稻、小麦、玉米等作物生产碳足迹。在区域尺度上，陈中督等^[7-8]分析了长江中下游地区稻麦轮作模式碳足迹；黄晓敏等^[9]研究了2004—2013年东北三省主要粮食作物生产碳足迹。在省、市尺度上，张惠云等^[10]研究了2007—2017年吉林省水稻生产的碳足迹与水足迹时空变化特征；刘建君和陈红^[11]对黑龙江省水稻生产碳足迹进行分析；张传红等^[12]对江苏主要农作物碳足迹动态及其构成进行了研究；曹黎明等^[13]评价了上海市水稻生产的碳足迹。综上所述，以往的研究主要侧重不同区域间水稻生产碳足迹的对比分析或同一区域不同年际间水稻生产碳足迹或不同作物碳足迹的对比研究，而在省级尺度上关于不同水稻种植方式碳足迹及经济效益的研究尚未见报道。

江苏是水稻生产大省, 2020 年江苏水稻播种面积 220 万 hm^2 左右, 水稻总产量为 1 900 万吨左右^[14], 水稻播种面积和产量在全国均居前列。在全球气候变化多重挑战下, 确保粮食持续增产是江苏水稻生产的重点任务。在常规耕种技术和农机装备条件下, 确保耕种面积, 保障化肥和农药等农业化学品集约化投入, 是保障水稻连年丰产的主要措施, 这可能进一步提高水稻生产碳排放^[2]。农业“碳达峰、碳中和”背景下, 如何协调水稻持续高产与碳排放的矛盾, 助力江苏可持续性低碳绿色水稻产业发展成为学者研究的热点。因此, 本研究以江苏 13 个城市为研究区域, 利用生命周期评价法, 分析 2016—2020 年不同水稻种植方式碳足迹动态及经济效益, 为低碳水稻种植方式优化管理提供科学依据和理论支持。

1 材料与方方法

1.1 数据来源

数据来源于江苏 13 个地级市农技推广部门农情调度数据, 包括 2016—2020 年不同水稻种植方式(机插、手插、直播、抛秧)播种面积、籽粒产量、农资(种子、农膜、氮肥、磷肥、钾肥)、灌溉用电量、机械柴油消耗量。根据数据调研, 机械柴油费用=机械作业费 $\times 0.3$ 计算得出, 每年柴油单价数据来源于金投网油价数据库(<https://energy.cngold.org/>), 机械柴油用量=机械柴油费用/柴油单价。单位面积农膜用量从《全国农产品成本收益资料汇编》^[15]中获取。

1.2 碳足迹计算

参考 Li 等^[4]的方法计算水稻生产碳足迹(Carbon footprint, CF)。本研究碳足迹研究边界设为作物从播种到收获全过程中各项投入产生的温室气体排放, 主要来自三个方面:(1)种子、农膜、肥料投入产生的间接温室气体排放;(2)灌溉、机械作业产生的间接温室气体排放;(3)作物种植过程中土壤氧化亚氮(N_2O)、甲烷(CH_4)排放。参考 Li 等^[4]的计算方法计算水稻生产碳足迹, 其计算公式如下:

$$\text{CF} = \sum_{i=1}^n (\theta_i \times C_i) + Q_N \times (C_{\text{N-indirect}} + C_{\text{N-direct}}) \times \frac{44}{28} \times \text{CWP}_{\text{N}_2\text{O}} + \text{C}_{\text{CH}_4} \times \text{CWP}_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

式中, CF 为水稻生产单位面积碳足迹 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), θ_i 表示水稻生产中第 i 种农资投入量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), C_i 表示水稻生产中第 i 种农资的温室气体排放系数, 排放系数参考 Li 等^[4]的研究; Q_N 为水稻生产中纯氮投入量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), $C_{\text{N-indirect}}$ 、 $C_{\text{N-direct}}$ 、 C_{CH_4} 分别为间接氧化亚氮(N_2O)、直接 N_2O 及甲烷(CH_4)排放系数。 $\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}$ 和 GWP_{CH_4} 为 N_2O 和 CH_4 全球增温潜势值, 根据 IPCC 第五次评估报告, 在考虑气候—碳反馈时, CH_4 和 N_2O 全球增温潜势值分别为 34 和 298^[4]。

采用 Sun 等^[16]的方法计算了江苏省 13 个地级市机插水稻稻田 CH_4 排放系数: 首先建立江苏水稻播种面积、土壤性状(pH 和土壤容重)、水分管理 和土壤有机物料添加的空间网格数据集, 将开发的区域特定模型投影到农业区域的网格图上, 将空间数据输入模型模拟单位面积的每日 CH_4 排放量。根据每日通量和水稻生长期天数计算单位面积的季节性 CH_4 排放量^[17]。利用 Hang 等^[17]、Liu 等^[18]和张岳芳等^[19]的数据, 以机插水稻 CH_4 排放量为对照, 采用手插、直播和抛秧水稻 CH_4 排放量与机插水稻 CH_4 排放量的比值对手插、直播和抛秧水稻 CH_4 排放系数进行修正, 修正后手插水稻或抛秧水稻 CH_4 排放系数=机插水稻 CH_4 排放系数 $\times 1.09$, 直播水稻 CH_4 排放系数=机插水稻 CH_4 排放系数 $\times 0.71$ 。江苏省主要地区不同水稻种植方式甲烷排放系数见表 1。机插水稻直接 N_2O 和间接 N_2O 排放因子分别为 $0.0029 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[20]和 $0.0026 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[21], 手插水稻、直播水稻和抛秧水稻的直接 N_2O 排放系数分别为 $0.0027 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.0040 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.0027 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 间接 N_2O 排放系数分别为 $0.0025 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.0036 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.0025 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

参考陈中督等^[22]的方法计算单位产量碳足迹(CF_Y) 和单位产值碳足迹(CF_V), 计算公式如下:

$$\text{CF}_Y = \frac{\text{CF}}{Y} \quad (2)$$

$$\text{CF}_V = \frac{\text{CF}}{V} \quad (3)$$

式中, CF_Y 为水稻生产单位产量碳足迹 ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), CF_V 为水稻生产单位产值碳足迹 ($\text{t}\cdot\text{yuan}^{-1}$), Y 为水稻产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), V 为稻谷销售产值 ($\text{yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.3 经济效益分析

碳排放成本是指与温室气体排放导致的气候变暖相关的损害成本^[23]。参考 Xia 等^[23]的计算方法计算碳排放成本。资源投入成本包括农资投入成本、农事操作成本、人工成本和土地租金。总收益 ($10^3 \text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)、资源投入成本 ($10^3 \text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)、净收益 ($10^3 \text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)、碳排放成本 ($10^3 \text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)、考虑碳排放成本的净收益 (NL_{CO_2} , $10^3 \text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$) 计算如下:

$$\text{总收益} = \text{稻谷产量} \times \text{稻谷单价} + \text{政府补贴} \quad (4)$$

$$\text{资源投入成本} = \text{农资投入} + \text{农事操作} + \text{人工成本} + \text{土地租金} \quad (5)$$

$$\text{净收益} = \text{稻谷收益} - \text{资源投入成本} \quad (6)$$

$$\text{碳排放成本} = \text{CF} \times \text{C} \quad (7)$$

$$\text{NL}_{\text{CO}_2} = \text{净收益} - \text{碳排放成本} \quad (8)$$

式中, CF 为单位面积碳足迹, C 为每排放 1 t 温室气体导致的成本, 其值为 $174.3 \text{ yuan}\cdot\text{t}^{-1}$ ^[22]。

1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 进行数据整理, 采用 Origin 和 Microsoft Excel 软件进行作图。采用 SPSS 20.0 软件对经济效益数据进行方差分析, 对不同农资投入量与单位面积碳足迹进行回归分析, 利用标准化回归系数分析了不同农资投入对单位面积碳足迹的贡献大小。

表 1 江苏主要地区不同水稻种植方式播种面积和甲烷排放系数

Table 1 The planting area and CH₄ emission coefficients of different rice planting patterns in the main regions of Jiangsu Province

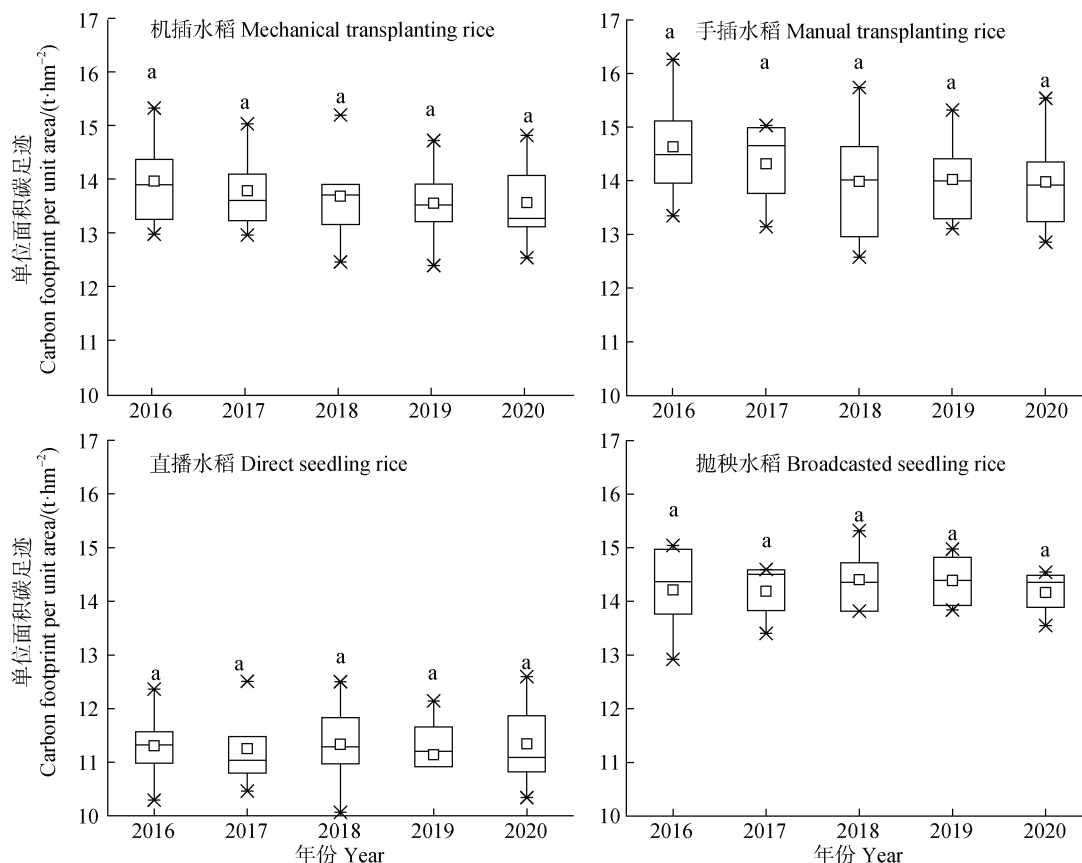
区域 Region	城市 City	机插水稻 Mechanical transplanting rice		手插水稻 Manual transplanting rice		直播水稻 Direct seedling rice		抛秧水稻 Broadcasted seedling rice	
		播种面积 Planting area/ (10^3 hm^2)	甲烷排放系数 CH ₄ emission coefficients/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	播种面积 Planting area/ (10^3 hm^2)	甲烷排放系数 CH ₄ emission coefficients/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	播种面积 Planting area/ (10^3 hm^2)	甲烷排放系数 CH ₄ emission coefficients/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	播种面积 Planting area/ (10^3 hm^2)	甲烷排放系数 CH ₄ emission coefficients/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
苏南 Southern Jiangsu	南京 Nanjing	58.13	232.62	14.80	253.10	10.51	164.64	0.00	253.10
	苏州 Suzhou	54.23	240.85	0.00	262.05	8.75	170.46	0.00	262.05
	无锡 Wuxi	20.93	248.71	0.00	270.61	19.39	176.03	0.00	270.61
苏中 Central Jiangsu	常州 Changzhou	48.33	251.70	2.34	273.86	7.01	178.15	0.00	273.86
	镇江 Zhenjiang	57.81	260.30	3.93	283.21	9.31	184.23	0.00	283.21
	泰州 Taizhou	146.41	242.30	12.80	263.63	18.81	171.49	7.09	263.63
苏北 Northern Jiangsu	扬州 Yangzhou	133.53	248.35	12.42	270.21	44.93	175.77	1.10	270.21
	南通 Nantong	116.41	270.39	3.17	294.19	40.51	191.37	11.45	294.19
	徐州 Xuzhou	63.26	245.40	87.68	267.00	12.11	173.69	0.58	267.00
苏北 Northern Jiangsu	淮安 Huaian	103.75	245.67	87.19	267.29	63.25	173.87	2.09	267.29
	盐城 Yancheng	198.57	251.00	24.37	273.09	156.17	177.65	12.91	273.09
	连云港 Lianyungang	78.75	254.22	32.25	276.60	53.07	179.92	34.17	276.60
	宿迁 Suqian	81.49	244.01	89.01	265.49	37.84	172.70	0.20	265.49

2 结果

2.1 江苏不同水稻种植方式碳足迹动态

2016—2020 年不同水稻种植方式平均单位面积碳足迹从大到小依次为抛秧水稻、手插水稻、机插水稻、直播水稻，其值分别为 14.39、14.20、13.67、11.28 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。尽管不同年份间单位面积碳

足迹差异不显著，但机插、手插水稻生产单位面积碳足迹随年份的变化呈下降趋势。2016 年机插水稻和手插水稻生产单位面积碳足迹分别为 13.89 和 14.55 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，到 2020 年该值分别降低至 13.54 和 13.94 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，降幅分别为 2.49% 和 4.14%。直播、抛秧水稻生产单位面积碳足迹在年际间变化不大（图 1）。



注：无相同小写字母表示碳足迹在年际间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters represent the significant differences in carbon footprint between years ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同水稻种植方式单位面积碳足迹动态变化

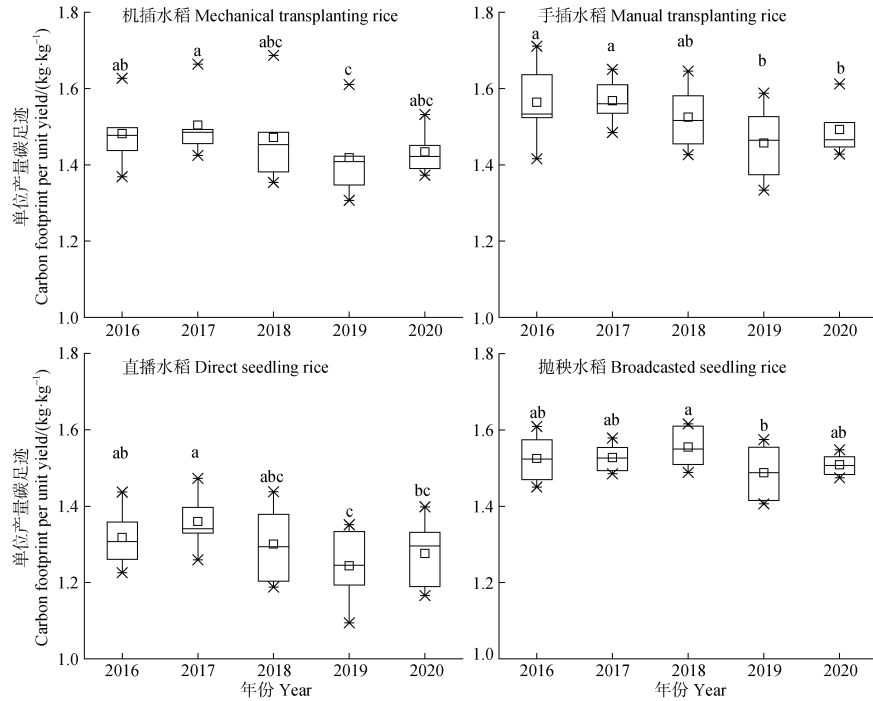
Fig. 1 The dynamic change of carbon footprint per unit area of different rice planting patterns

2016—2020 年不同水稻种植方式平均单位产量碳足迹从大到小依次为手插水稻或抛秧水稻、机插水稻、直播水稻，其值分别为 1.52、1.52、1.46、1.30 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。机插、手插和直播水稻单位产量碳足迹随年份的变化呈下降趋势，抛秧水稻单位产量碳足迹在年际间变化不大（图 2）。2016—2020 年不同水稻种植方式平均单位产值碳足迹从大到小依次为手插水稻、抛秧水稻、机插水稻、直播水稻，其值分别为 0.58、0.57、0.54、0.49 $\text{kg}\cdot\text{yuan}^{-1}$ 。不同水稻种

植方式单位产值的碳足迹在 2016—2018 年变化不大，2019 年达到最大值，2019 年机插、手插、直播和抛秧水稻单位产值碳足迹分别为 0.53、0.57、0.47 和 0.57 $\text{kg}\cdot\text{yuan}^{-1}$ ，之后显著下降至 0.46、0.49、0.42 和 0.51 $\text{kg}\cdot\text{yuan}^{-1}$ （图 3）。

2.2 江苏不同水稻种植方式碳足迹构成

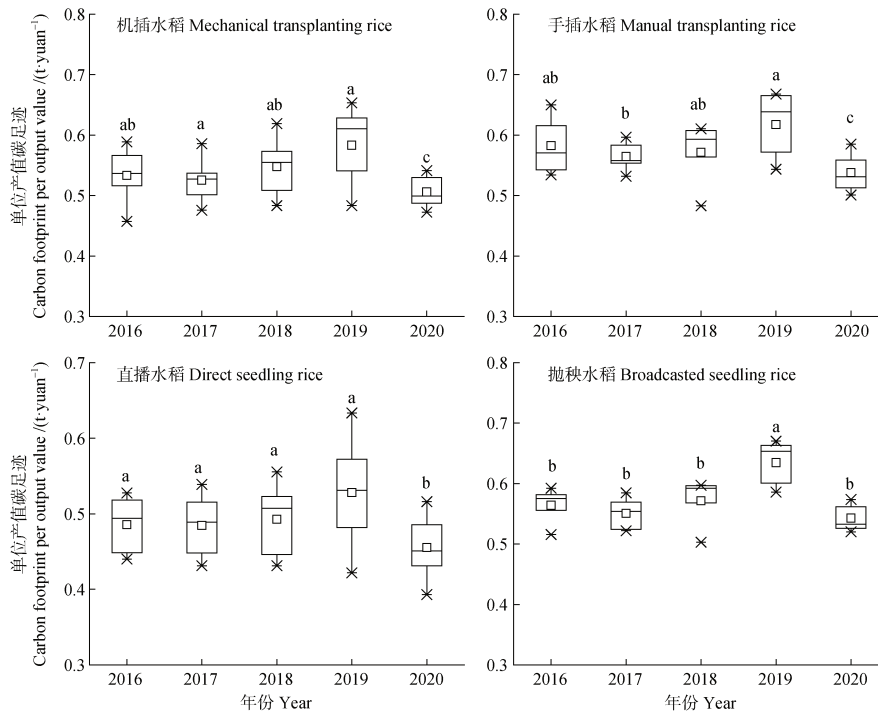
稻田温室气体直接排放 (CH_4 和 N_2O) 占水稻生产总碳足迹的比例达 67.9%~70.3%，其中 CH_4 排放为第一大排放源，占水稻生产总碳足迹的比例



注：无相同小写字母表示单位面积碳足迹在年际间差异显著($P < 0.05$)。Note: Different 10 wercase letters represent the significant differences in carbon footprint per unit area between years ($P < 0.05$) .

图 2 不同水稻种植方式单位产量碳足迹动态变化

Fig. 2 The dynamic change of carbon footprint per unit yield of different rice planting patterns



注：无相同小写字母表示单位面积碳足迹在年际间差异显著($P < 0.05$)。Note: Different 10 wercase letters represent the significant differences in carbon footprint per unit area between years ($P < 0.05$) .

图 3 不同水稻种植方式单位产值碳足迹动态变化

Fig. 3 The dynamic change of carbon footprint per unit output value of different rice planting patterns

达 53.1%~64.9%， N_2O 排放占水稻生产总碳足迹的比例为 5.4%~9.8%。农资投入导致的碳足迹占水稻生产总碳足迹的比例为 29.7%~37.0%。在农资投入中，氮肥施用导致的碳足迹占比达 17.1%~21.3%，其次为灌溉用电和机械柴油导致的碳足迹占比达 5.7%~7.1%和 2.3%~4.4%，种子、磷肥、钾肥、农膜、人力劳动导致的碳足迹占比较小。从种植方式看， CH_4 排放占水稻生产总碳足迹的比例从大到小依次为手插水稻、抛秧水稻、机插水稻、直播水稻；

N_2O 排放占水稻生产总碳足迹的比例从大到小依次为直播水稻、机插水稻、抛秧水稻、手插水稻；氮肥施用导致的碳足迹占水稻生产总碳足迹的比例从大到小依次为直播水稻、机插水稻、抛秧水稻、手插水稻；灌溉用电引起的碳足迹占水稻生产总碳足迹的比例从大到小依次直播水稻、手插水稻或机插水稻、抛秧水稻；机械柴油引起的碳足迹占水稻生产总碳足迹的比例从大到小依次机插水稻、直播水稻、抛秧水稻、手插水稻（图 4）。

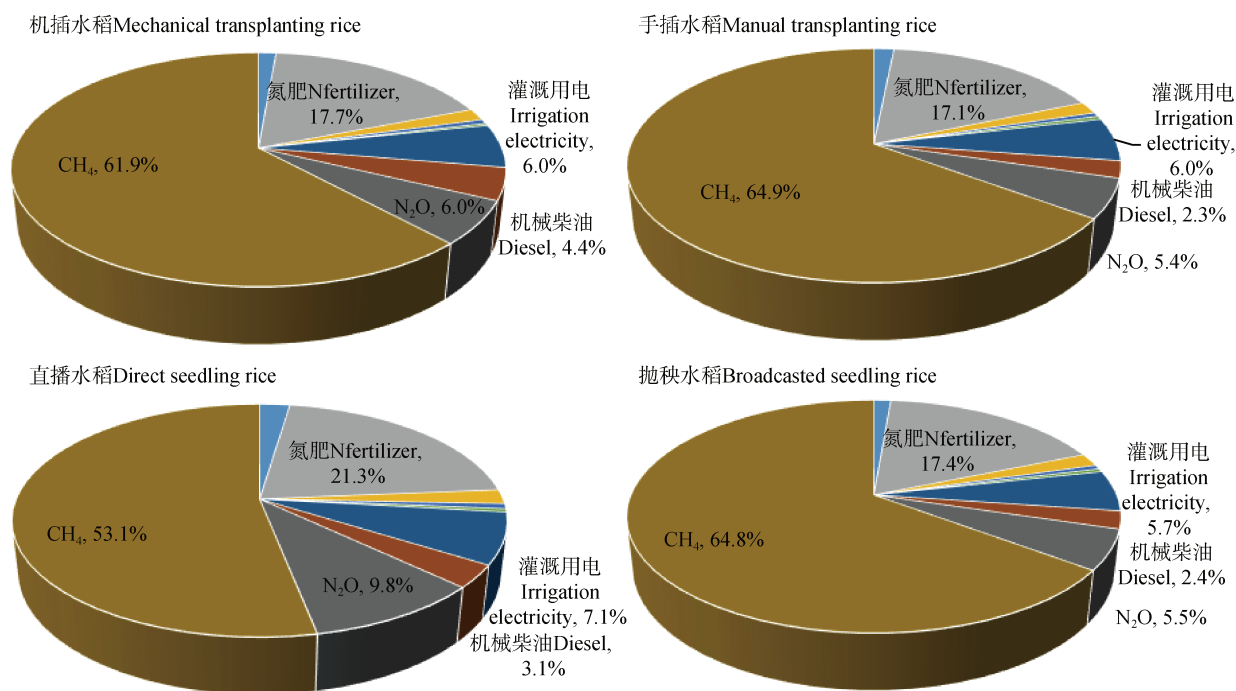


图 4 不同水稻种植方式碳足迹构成占比

Fig. 4 The percentage of carbon footprint components of different rice planting patterns

采用多元回归方法分析了影响不同水稻种植方式碳足迹的主要驱动因素。标准化回归系数表明，农资投入中，氮肥的标准化回归系数最大，其次为灌溉用电，因此氮肥和灌溉用电是影响水稻生产单位面积足迹的主要驱动因素（图 5）。

2.3 江苏不同水稻种植方式经济效益

不同水稻种植方式总收益为 $2.51 \times 10^3 \sim 2.75 \times 10^3$ yuan·hm⁻²，资源投入成本为 $1.88 \times 10^3 \sim 1.99 \times 10^3$ yuan·hm⁻²，净收益（NI）为 $0.58 \times 10^3 \sim 0.87 \times 10^3$ yuan·hm⁻²，碳排放成本为 $0.20 \times 10^3 \sim 0.25 \times 10^3$ yuan·hm⁻²，考虑碳排放的净收益（NI_{CO₂}）为 $0.39 \times 10^3 \sim 0.64 \times 10^3$ yuan·hm⁻²。不同水稻种植方式中，总收益、NI、NI_{CO₂} 从大到小依次为机插水

稻、抛秧水稻、手插水稻、直播水稻，资源投入成本从大到小依次为手插水稻、直播水稻、抛秧水稻、机插水稻，机插水稻碳排放成本低于手插和抛秧水稻（图 6）。

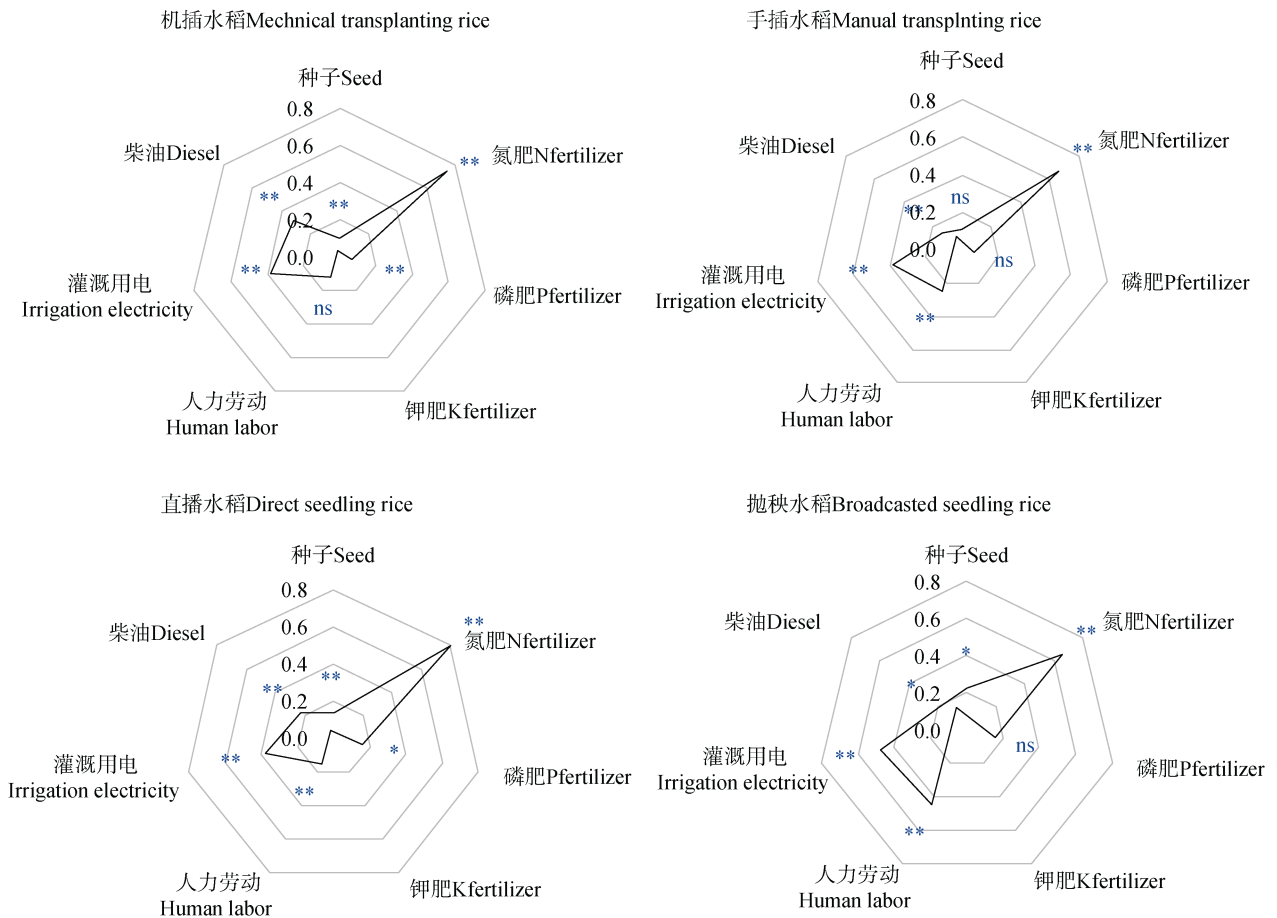
3 讨论

3.1 水稻种植方式对稻田碳足迹的影响

目前，在国家、区域、省级尺度上有关水稻碳足迹的研究较多^[5-13]。张传红等^[12]通过分析江苏主要农作物碳足迹动态得出，2016—2020 年江苏水稻生产单位面积碳足迹为 11.15 t·hm⁻²，水稻生产单位产量碳足迹为 1.36 kg·kg⁻¹。本研究中水稻生产单位

面积碳足迹和单位产值碳足迹与张传红等^[12]的研究结果相近。而王兴等^[5]基于 2004—2014 年水稻生产相关统计数据,核算了中国水稻生产碳足迹,结果表明江苏水稻生产单位面积碳足迹为 $7.41 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。Yan 等^[6]基于农户调查的中国作物生产碳足迹分析表明,江苏水稻生产单位产量碳足迹为 $0.80\sim 0.84 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。陈中督等^[7]通过分析长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹表明,水稻生产单位产量碳足迹为 $0.50 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从其他省市来看,曹黎明等^[13]通过分析上海水稻生产碳足迹表明,上海市水稻生产单位面积碳足迹为 $11.81 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,单位产量碳足迹为 $0.95 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。黄晓敏等^[9]测算了 2004—2013 年东北三省水稻生产碳足迹平均为 $2\ 463 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。刘建君和陈红^[11]对黑龙江省水稻生产碳足迹分析表明,黑龙江省水稻生产单位面

积碳足迹平均为 $1\ 895 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本研究结果与前人测算的水稻生产碳足迹有一定差异。造成差异的原因可能是研究边界、排放系数选取及数据来源差异等因素。例如陈中督等^[7]研究中农资投入排放系数主要源于中国生命周期数据库 (CLCD) 和 Ecoinvent 2.2 数据库,其氮肥的排放系数分别为 1.53 、 1.63 和 $0.65 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而本研究中研究边界氮磷钾肥排放系数选取参考陈舜等^[24]基于我国氮磷钾肥制造过程中的温室气体排放系数,其氮、磷、钾肥排放系数分别为 7.76 、 2.33 和 $0.66 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。王兴等^[5]研究忽略了 N_2O 的碳足迹。黄晓敏等^[9]、刘建君和陈红^[11]的研究其仅测算了间接碳足迹,未考虑稻田 CH_4 和 N_2O 等直接碳足迹。曹黎明等^[13]考虑了水稻生产种植过程和加工过程的碳足迹, CH_4 排放数据是通过单点试验测定。



注: **和*表示在 0.01 和 0.05 水平上差异显著; ns 表示在 0.05 水平上差异不显著。Note: The ** and * indicate that the differences are significant at 0.01 and 0.05 level, respectively. The ns indicate that the differences are not significant at 0.05 level.

图 5 不同水稻种植方式单位面积碳足迹与农资投入的关系

Fig. 5 The relationship between carbon footprint per unit area and agricultural inputs under different rice planting patterns

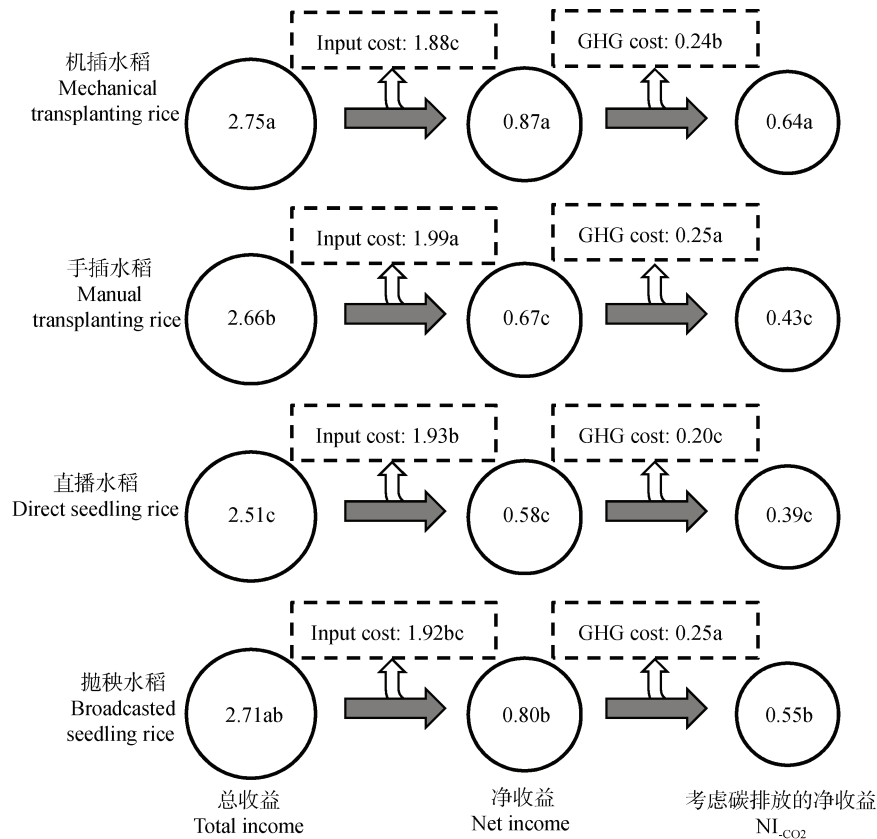


图 6 不同水稻种植方式经济效益分析

Fig. 6 Analysis of the economic benefits of different rice planting patterns

关于不同水稻种植方式稻田 CH_4 和 N_2O 排放的研究已有报道^[17-19]，然而有关不同种植方式对水稻生产碳足迹的研究较少。Hang 等^[17]和 Liu 等^[18]的研究表明，与机插水稻相比，手插水稻增加 CH_4 排放，降低 N_2O 排放，但两者差异不显著，直播水稻显著降低 CH_4 排放，而显著增加 N_2O 排放。基于前人数据^[17-19]，对不同水稻种植方式 CH_4 和 N_2O 排放系数进行修正，从而在区域尺度上体现不同水稻种植方式 CH_4 和 N_2O 的差异，进而更好地反映区域尺度上不同水稻种植方式碳足迹的差异。本研究表明，江苏不同水稻种植方式单位面积碳足迹为 $11.28 \sim 14.39 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，单位产量碳足迹为 $1.30 \sim 1.52 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，单位产值碳足迹为 $0.49 \sim 0.58 \text{ kg}\cdot\text{yuan}^{-1}$ ，单位面积碳足迹、单位产量碳足迹和单位产值碳足迹从大到小依次为抛秧水稻或手插水稻、机插水稻、直播水

稻。2016—2020 年机插、手插水稻单位面积足迹呈下降趋势。张传红等^[12]分析得出，2015—2019 年江苏水稻碳足迹呈较为明显的下降趋势。主要原因是自 2015 年农业农村部实施化肥施用量零增长行动以来，江苏持续推进化肥减量增效工作，实现化肥使用总量和强度持续“双减”。根据国家统计局数据，2020 年江苏化肥施用量和单位面积化肥施用量分别为 $280.75 \times 10^3 \text{ t}$ 和 $1385.12 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，较 2015 年分别降低 10.17% 和 7.99%^[25]。根据我们调研数据，江苏水稻单产随年份的增加呈增加趋势，因此机插和手插水稻单位产量碳足迹与单位面积碳足迹变化规律一致，呈下降趋势。不同水稻种植方式单位产值碳足迹在 2016—2018 年变化不大，在 2019 年升至最大值，2020 年显著下降，这可能与稻谷产值在年际间变化有关。以机插水稻为例，2016—2018 年

每公顷稻谷产值变化不大, 2019 年稻谷产值较前三年平均值下降 6.06%, 2020 年稻谷产值较前三年平均值增加 7.54%, 相对应的单位面积碳足迹在年际间变化幅度小于稻谷产值的变化幅度, 这导致 2019 年单位产值碳足迹较高, 而 2020 年单位产值碳足迹较低。稻田 CH_4 排放和氮肥施用导致的碳足迹是影响单位面积碳足迹的主要因素。根据前面分析, 水稻 CH_4 排放量从大到小依次为手插水稻或抛秧水稻、机插水稻、直播水稻; 抛秧水稻氮肥施用量 ($323.93 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 高于机插水稻 ($312.30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和直播水稻 ($312.51 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 因此直播、机插水稻碳足迹低于抛秧、手插水稻。综上所述, 在不考虑粮食安全的情况下, 直播水稻种植方式是较为低碳的稻作方式, 综合考虑水稻产量、生产效率与碳足迹, 机插水稻优于手插、直播和抛秧水稻。

3.2 水稻种植方式对稻田碳足迹构成因素的影响

稻田 CH_4 排放是水稻生产碳足迹的主要构成成分, 其占水稻生产碳足迹比例高达 50% 以上, 因此降低水稻生产碳足迹, 重点是降低 CH_4 排放^[1]。对四种水稻种植方式碳足迹构成分析表明, 稻田 CH_4 排放占水稻生产碳足迹的比例最高, 其值为 53.1%~64.9%, 本研究结果与陈中督等^[7]的研究结果 (65%) 相近, 但高于张传红等^[12] (54%) 和 Yan 等^[6]的结果, 低于曹黎明等^[13]的结果 (77%), 这与水稻生产中 CH_4 增温潜势值选取及测定方法有关。前人研究表明, 手插、机插水稻生产 CH_4 排放量均明显高于直播水稻^[19]。本研究中, 不同水稻种植方式 CH_4 排放占比表现为手插水稻、抛秧水稻、机插水稻差异较小, 而高于直播水稻。直播水稻减少 CH_4 排放的原因主要与水管理有关, 和移栽稻田保持淹水状态不同, 直播稻田土壤一般保持湿润状态, 这有利于直播稻早期立苗和根系生长, 这种湿润状态会让更多的空气进入土壤, 较高的土壤水势不利于 CH_4 产生而对 CH_4 氧化有利, 从而减少 CH_4 排放量^[19], 但水稻直播在减排 CH_4 的同时增加 N_2O 排放^[18-19, 26]。本研究表明, 直播稻田 N_2O 排放占总碳足迹的 9.8%, 高于机插、手插和抛秧水稻。水稻生产农资投入中, 氮肥投入导致的碳足迹占总碳足迹的 17.3%~21.3%, 其对单位面积碳足迹的贡献最大, 也是导致不同水稻种植方式碳足迹的主要驱动因素。本研究结果与张传红等^[12]的研究结果相近。氮肥施用影响稻田 CH_4 的产生、氧化等过程。

全球范围内的 Meta 分析研究结果表明, 跟不施氮相比, 适量施氮 (平均 $79 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 增加 CH_4 排放, 在 $100\sim 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量范围内, 施氮对 CH_4 排放的影响不显著, 进一步提高施氮量 (平均 $249 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 则会导致 CH_4 排放下降^[27]。然而根据本研究调研数据, 江苏不同水稻种植方式稻田平均施氮量为 $314 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较高的施氮量促进稻田 CH_4 排放^[28-29]。此外, 高的氮肥投入增加了稻田间接碳足迹。合理施用氮肥是减少农田碳排放的主要途径之一。随着新型高效肥料产品、精量高效施用方法与机具、硝化抑制剂、配套的栽培管理措施等创新与应用, 以及作物布局优化和用地养地结合等种植制度调整, 氮肥利用效率逐步提高, 可有效减少农田碳排放^[2]。灌溉用电产生的碳排放占水稻生产碳排放的 5.7%~7.1%, 在农资投入中灌溉用电产生的碳足迹对总碳足迹的贡献仅次于氮肥。刘建君和陈红^[11]研究认为, 黑龙江水稻生产碳足迹中灌溉用电占比 35.7%, 高于化肥 (19.4%) 和柴油 (15.4%)。相对于黑龙江, 江苏因其优越的气候条件, 其对灌溉的需求较小, 从而减少了灌溉用电导致的碳足迹。通过优化水分管理不仅能直接降低灌溉用电产生的碳足迹还能降低稻田 CH_4 排放。相比长期淹水灌溉, 间歇灌溉、湿润灌溉等节水灌溉方式的稻田 CH_4 排放量下降 32.9%~88.7%^[30]。中期烤田使稻田土壤通气状况变好, O_2 含量升高, 抑制了土壤中 CH_4 的产生, 促进了 CH_4 的氧化^[31], 从而降低 CH_4 排放; 中期烤田+后期间歇灌溉, 同样可有效减少 CH_4 排放^[32]。

3.3 不同水稻种植方式经济效益分析

对于种植户而言, 经济效益是决定他们是否采用技术措施的核心指标^[33]。作物生产不仅仅是单纯的作物种植活动, 还包括温室气体等排放过程, 传统的经济效益的评价中成本分析只关注农资、土地、人工等资源投入成本, 忽视了温室气体排放导致的环境成本。因此, 对技术措施的评价应综合考虑该技术措施的环境及经济效应^[34]。从总收益及资源投入成本的角度来看, 不同水稻种植方式总收益为 $2.51\times 10^3\sim 2.75\times 10^3 \text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$, 资源投入成本为 $1.88\times 10^3\sim 1.95\times 10^3 \text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中机插水稻的总收益最高, 资源投入成本最低。从碳排放成本的角度, 不同种植方式的碳排放成本为 $0.20\times 10^3\sim 0.25\times 10^3 \text{ yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中直播水稻的碳排放成本最

低, 其次是机插水稻。净收益和考虑碳排放成本的净收益从大到小依次为机插水稻、抛秧水稻、手插水稻、直播水稻。李杰等^[35]分析了江苏 2011—2014 年不同水稻种植方式净收益得出, 抛秧水稻的纯收益最高, 机插水稻次之, 手插水稻第三, 直播水稻最低。本研究与李杰等^[35]的研究结果基本一致, 而李杰等^[35]的研究未考虑碳排放成。因此, 若仅考虑碳排放, 直播水稻是最为低碳的水稻种植方式; 若综合考虑碳排放及经济效益, 机插水稻优于手插水稻、直播水稻和抛秧水稻。

3.4 江苏水稻种植方式生产布局和农艺管理措施优化

苏中和苏北地区是江苏水稻主产区。江苏水稻播种面积从大到小依次为苏北地区、苏中地区、苏南地区。机插水稻和直播水稻主要分布在苏中和苏北地区。本研究发现直播水稻在降低稻田碳足迹方面具有优势, 但直播水稻产量水平低于其他水稻种植方式, 因此在确保主粮供应充裕的情况下, 苏中和苏北适宜发展直播稻的区域适当增加水稻直播面积, 以降低水稻生产碳足迹。总体而言, 江苏水稻直播生产面临诸多问题, 制约了江苏直播水稻的进一步发展, 如水稻熟期类型品种选用不合理、播种质量粗放, 大田管理不当、群体发展缺乏规范指标和针对性的栽培措施、杂草危害严重等^[36]。通过开展直播稻适宜品种筛选、合理播期播量、全苗匀苗技术、精确肥水管理、杂草杂稻综合防除等关键技术与集成, 有利于江苏直播水稻可持续生产^[37]。机插水稻生产单位面积碳足迹从大到小依次为苏中地区、苏北地区、苏南地区。这与苏中和苏北地区较高的稻田 CH_4 排放量和氮肥施用量有关。苏中和苏北地区稻田 CH_4 平均排放系数高于苏南地区, 原因可能是江苏主要实行稻麦轮作, 苏中和苏北地区的小麦产量明显高于苏南地区, 较高的小麦秸秆还田量导致稻季 CH_4 排放量增加^[38]。此外, 苏南地区自 2018 年开展整体推进耕地轮作休耕以来, 稻油、稻绿肥等轮作模式面积逐步扩大, 这些轮作休耕模式在水稻种植前的秸秆还田量远低于稻麦轮作模式, 从而降低了稻季 CH_4 排放量^[39]。苏北和苏中地区较高的单位面积碳足迹还与两个区域较高的施氮量有关。根据本研究调研数据, 苏北、苏中和苏南地区稻田平均施氮量分别为 324.93、314.66 和 299.05 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此, 苏北和苏中地区机插水稻应

考虑优化氮肥管理、减少氮肥施用量, 降低碳足迹。此外, 从水稻产业链角度, 集成应用新型农业投入品及其高效施用技术、高产低排水稻品种、低碳减排技术、低碳农机等, 以获得更大的碳减排潜力^[40]。

4 结 论

本研究利用生命周期评价方法定量分析江苏水稻不同种植方式碳足迹动态及其构成。不同水稻生产种植方式单位面积碳足迹、单位产值碳足迹、单位产值碳足迹整体表现为抛秧水稻和手插水稻高于机插水稻, 直播水稻值最小。因此, 直播水稻是最为低碳的水稻种植方式。不同水稻生产种植方式碳足迹中占比最大的是稻田 CH_4 排放, 其次是氮肥施用导致的碳足迹、稻田 N_2O 排放和灌溉用电导致的碳足迹。农资投入中, 氮肥和灌溉用电是影响水稻生产单位面积足迹的主要驱动因素。综合碳排放和经济效益, 机插水稻优于手插、直播和抛秧水稻。

参考文献 (References)

- [1] Ministry of Ecology and Environment. The Second biennial update report on climate change of the People's Republic of China[EB/OL]. (2018-12-12) [2022-11-15]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/201907/P020190701765971866571.pdf>. [生态环境部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[EB/OL]. (2018-12-12) [2022-11-15]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/201907/P020190701765971866571.pdf>.]
- [2] Yan S J, Deng A X, Shang Z Y, et al. Characteristics of carbon emission and approaches of carbon mitigation and sequestration for carbon neutrality in China's crop production[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48 (4): 930-941. [严圣吉, 邓艾兴, 尚子吟, 等. 我国作物生产碳排放特征及助力碳中和的减排固碳途径[J]. *作物学报*, 2022, 48 (4): 930—941.]
- [3] Galli A, Wiedmann T, Ercin E, et al. Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a "Footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 100—112.
- [4] Li Y P, Wu W A, Yang J X, et al. Exploring the environmental impact of crop production in China using a comprehensive footprint approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153898.
- [5] Wang X, Zhao X, Wang Y Q, et al. Assessment of the carbon footprint of rice production in China[J].

- Resources Science, 2017, 39 (4): 713—722. [王兴, 赵鑫, 王钰乔, 等. 中国水稻生产的碳足迹分析[J]. 资源科学, 2017, 39 (4): 713—722.]
- [6] Yan M, Cheng K, Luo T, et al. Carbon footprint of grain crop production in China—based on farm survey data[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 130—138.
- [7] Chen Z D, Li F B, Feng J F, et al. Study on carbon footprint for rice-wheat rotation system in the lower reaches of Yangtze River—Based on the life cycle assessment[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40 (12): 81—90. [陈中督, 李凤博, 冯金飞, 等. 长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹研究——基于生命周期评价[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40 (12): 81—90.]
- [8] Chen Z D, Xu C C, Ji L, et al. Comprehensive evaluation for carbon and nitrogen footprints of rice-wheat rotation system in Middle Yangtze River Basin[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(7): 1125—1133. [陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 长江中游地区稻麦生产系统碳足迹及氮足迹综合评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (7): 1125—1133.]
- [9] Huang X M, Chen C Q, Chen M Z, et al. Carbon footprints of major staple grain crops production in three provinces of Northeast China during 2004—2013[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27 (10): 3307—3315. [黄晓敏, 陈长青, 陈铭洲, 等. 2004—2013年东北三省主要粮食作物生产碳足迹[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (10): 3307—3315.]
- [10] Zhang H Y, Qin L J, Jia L. Temporal and spatial characteristics of carbon footprint and water footprint in rice production in Jilin Province[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33 (6): 974—983. [张惠云, 秦丽杰, 贾利. 吉林省水稻生产的碳足迹与水足迹时空变化特征[J]. 浙江农业学报, 2021, 33 (6): 974—983.]
- [11] Liu J J, Chen H. Assessment of carbon footprint of rice production in Heilongjiang Province[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49 (8): 1667—1673. [刘建君, 陈红. 黑龙江省水稻生产碳足迹分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49 (8): 1667—1673.]
- [12] Zhang C H, Han L, Xie J N, et al. Carbon footprint dynamics and composition assessment of major crops production in Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2022, 14 (1): 110—119. [张传红, 韩露, 谢佳男, 等. 江苏省主要农作物碳足迹动态及其构成研究[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2022, 14 (1): 110—119.]
- [13] Cao L M, Li M B, Wang X Q, et al. Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (2): 491—499. [曹黎明, 李茂柏, 王新其, 等. 基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹[J]. 生态学报, 2014, 34 (2): 491—499.]
- [14] Jiangsu Municipal Statistics Bureau. Jiangsu Statistical Yearbook-2021[EB/OL]. (2021-10) [2022-10-24]. <http://tj.jiangsu.gov.cn/2021/indexc.htm>. [江苏省统计局. 江苏统计年鉴—2021[EB/OL]. (2021-10)[2022-10-24]. <http://tj.jiangsu.gov.cn/2021/indexc.htm>.]
- [15] Price Department of National Development and Reform Commission. National cost-benefit survey for agricultural product[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016—2020. [发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016—2020.]
- [16] Sun J F, Wang M H, Xu X R, et al. Re-estimating methane emissions from Chinese paddy fields based on a regional empirical model and high-spatial-resolution data[J]. Environmental Pollution, 2020, 265: 115017.
- [17] Hang X N, Zhang X, Song C L, et al. Differences in rice yield and CH₄ and N₂O emissions among mechanical planting methods with straw incorporation in Jianghuai area, China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 205—210.
- [18] Liu S W, Zhang Y J, Lin F, et al. Methane and nitrous oxide emissions from direct-seeded and seedling-transplanted rice paddies in southeast China[J]. Plant and Soil, 2014, 374 (1): 285—297.
- [19] Zhang Y F, Chen L G, Zhang C S, et al. Influence of rice mechanical planting methods on methane and nitrous oxide emissions from paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (14): 232—241. [张岳芳, 陈留根, 张传胜, 等. 水稻机械化播栽对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (14): 232—241.]
- [20] Yue Q, Wu H, Sun J F, et al. Deriving emission factors and estimating direct nitrous oxide emissions for crop cultivation in China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53 (17): 10246—10257.
- [21] Tian L L, Cai Y J, Akiyama H. A review of indirect N₂O emission factors from agricultural nitrogen leaching and runoff to update of the default IPCC values[J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 300—306.
- [22] Chen Z D, Xu C C, Ji L, et al. Carbon footprint analysis of double cropping rice production in the middle Yangtze River valley based on household surveys[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2018, 32 (6): 601—609. [陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 基于农户调查的长江中游地区双季稻生产碳足迹及其构成[J]. 中国水稻科学, 2018, 32 (6): 601—609.]
- [23] Xia L L, Ti C P, Li B L, et al. Greenhouse gas emissions and reactive nitrogen releases during the life-cycles of staple food production in China and their mitigation potential[J]. Science of the Total Environment, 2016, 556: 116—125.
- [24] Chen S, Lu F, Wang X K. Estimation of greenhouse gases

- emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (19): 6371—6383. [陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. *生态学报*, 2015, 35 (19): 6371—6383.]
- [25] National Bureau of Statistics. National Statistical Yearbook[EB/OL]. [2023-2-20]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>. [国家统计局. 中国统计年鉴[EB/OL]. [2023-2-20]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>.]
- [26] Tao Y, Chen Q, Peng S B, et al. Lower global warming potential and higher yield of wet direct-seeded rice in Central China[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36 (2): 24.
- [27] Linquist B, van Groenigen K J, Adviento-Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18 (1): 194—209.
- [28] Zhang X X, Yin S, Li Y S, et al. Comparison of greenhouse gas emissions from rice paddy fields under different nitrogen fertilization loads in Chongming Island, Eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 381—388.
- [29] Chen Z D, Chen F, Zhang H L, et al. Effects of nitrogen application rates on net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in double-rice cropping systems of the Southern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (24): 24781—24795.
- [30] Jiang Y, Carrijo D, Huang S, et al. Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: A global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2019, 234: 47—54.
- [31] Haque M M, Kim G W, Kim P J, et al. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping[J]. *Field Crops Research*, 2016, 193: 133—142.
- [32] Zhou S, Zhang X X, Wang C, et al. Research progress and prospects of water and crop residue managements to mitigate greenhouse gases emissions from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39 (4): 852—862. [周胜, 张鲜鲜, 王从, 等. 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39 (4): 852—862.]
- [33] Ji H T, Zhou W, Guo Z, et al. Comprehensive evaluation for the influence of substituting fertilizer by pig manure on agronomic effect, safety effect and economic benefit of rice[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37 (6): 1451—1459. [纪洪亭, 周炜, 郭智, 等. 猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻农学效应、安全效应及经济效益影响的综合评价[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37 (6): 1451—1459.]
- [34] Xia L L, Wang S W, Yan X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 118—127.
- [35] Li J, Yang H J, Sun T Q, et al. Analysis and application evaluation of rice yield and benefit under different planting methods in Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44 (9): 520—523. [李杰, 杨洪建, 孙统庆, 等. 江苏省不同种植方式水稻产量效益分析及应用评价[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44 (9): 520—523.]
- [36] Zhao B H, Dai Z Y, Xie C L, et al. Research and application progress and development strategy of direct seeding rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010, 38 (5): 13—15. [赵步洪, 戴正元, 谢成林, 等. 直播水稻的研究与应用进展及发展策略[J]. *江苏农业科学*, 2010, 38 (5): 13—15.]
- [37] Sun T Q, Yang H J, Li J, et al. Retrospect and disadvantages analysis of Jiangsu direct-sowing rice and its countermeasures[J]. *China Rice*, 2014, 20 (6): 5—9. [孙统庆, 杨洪建, 李杰, 等. 江苏直播稻发展历程回顾、弊端分析及其对策探讨[J]. *中国稻米*, 2014, 20 (6): 5—9.]
- [38] Zhang Y F, Zheng J C, Chen L G, et al. Effects of wheat straw returning and soil tillage on CH₄ and N₂O emissions in paddy season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18 (6): 2334—2338. [张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 麦秸还田与土壤耕作对稻季 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18 (6): 2334—2338.]
- [39] Yue Q, Wu S Y, Zhang Y F, et al. Life cycle assessment on greenhouse effects and economic benefits for different paddy rice-upland rotation systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41 (8): 1825—1835. [岳骞, 吴思远, 张岳芳, 等. 不同水旱轮作模式全生命周期温室效应及经济效益评价[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41 (8): 1825—1835.]
- [40] Zhang W J, Zhang Y, Deng A X, et al. Integrated impacts and trend analysis of rice cultivar renewal and planting technology improvement on carbon emission in China[J]. *China Rice*, 2021, 27 (4): 53—57. [张卫建, 张艺, 邓艾兴, 等. 我国水稻品种更新与稻作技术改进对碳排放的综合影响及趋势分析[J]. *中国稻米*, 2021, 27 (4): 53—57.]

(责任编辑: 卢 萍)