

王子夕,王琳,吕晓阳,等. 基于生命周期评价方法的传统水稻和有机水稻种植系统碳足迹分析——以江苏省宜兴地区为例[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(11): 2200-2208.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.11.013

基于生命周期评价方法的传统水稻和有机水稻种植系统碳足迹分析——以江苏省宜兴地区为例

王子夕^{1,2}, 王琳^{1,3}, 吕晓阳^{1,3}, 杜晓睿¹, 邬彩霞¹, 李新娥¹, 刘大林¹

(1.扬州大学动物科学与技术学院,江苏扬州 225009; 2.中国国检测试控股集团股份有限公司,北京 100024; 3.扬州大学农业科技发展研究院/教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室,江苏扬州 225009)

摘要: 水稻是最重要的粮食作物,亦是温室气体的主要排放作物之一。本研究以中国江苏省宜兴地区的传统水稻和有机水稻种植为研究对象,以1 kg稻谷产量和1 hm²水稻面积为功能单位,采用生命周期评价法核算了农资投入、整地、插秧、大田生产和收割等过程温室气体排放潜势。结果表明,江苏省宜兴地区传统水稻种植过程中温室气体排放量高于有机水稻种植过程;不同功能单位下,传统水稻和有机水稻种植中温室气体排放贡献最大的均为CH₄,功能单位为1 kg水稻时,田间CH₄排放占比分别为91.82%和91.86%。此外,情景模拟结果表明,相对于秸秆100%还田,秸秆完全离田情况下,传统水稻CH₄和N₂O排放潜势减少;有机水稻种植系统的温室气体排放潜势随着牛粪施入比例增加而减少。本研究结果可为江苏地区水稻种植和秸秆利用过程碳核算提供一定的参考依据。

关键词: 水稻; 生命周期评价; 温室气体排放; 碳足迹

中图分类号: S511 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)11-2200-09

Carbon footprint analysis of traditional rice and organic rice planting systems based on life cycle assessment method: a case study in Yixing area in Jiangsu province

WANG Zixi^{1,2}, WANG Lin^{1,3}, LYU Xiaoyang^{1,3}, DU Xiaorui¹, WU Caixia¹, LI Xin'e¹, LIU Dalin¹

(1. College of Animal Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. China Testing & Certification International Group Co., Ltd., Beijing 100024, China; 3. Institute of Agricultural Science and Technology Development, Yangzhou University/Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agri-Product Safety, Ministry of Education, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Rice is the most important food crop, and is also one of the major sources for greenhouse gas emission. This study focused on the traditional and organic rice cultivation in Yixing of Jiangsu province of China as the research object. The functional units were 1 kg rice yield and 1 hm² rice area, and the life cycle assessment method was used to calculate the greenhouse gas emission potential of agricultural inputs, land preparation, transplanting, field production, and harvesting processes. The results showed that the greenhouse gas emission during traditional rice cultivation in Yixing of Jiangsu province was higher than that during organic rice cultivation. Under different functional units, CH₄ contributed the most to greenhouse gas emission in

both traditional and organic rice systems. When the functional unit was 1 kg of rice, the proportions of CH₄ emissions from the field were 91.82% and 91.86%, respectively. In addition, scenario simulation results indicated that compared to returning 100% of straw to the field, the potential for CH₄ and N₂O emissions decreased during traditional rice cultivation. The greenhouse gas emission potential of organic rice system

收稿日期: 2024-12-13

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(23)1036]

作者简介: 王子夕(2000-), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为草畜一体化系统的碳足迹核算。(Tel) 17851973620; (E-mail) zixiwww@126.com

通讯作者: 王琳, (E-mail) lynm1215@yzu.edu.cn

decreased as the proportion of cow manure application increased. The results in this study may provide a certain reference basis for carbon accounting in the process of rice planting and rice straw utilization in Jiangsu province.

Key words: rice; life cycle assessment; greenhouse gas emission; carbon footprint

农业是全球范围内由人类活动带来的温室气体排放总量的主要来源^[1]。农业活动产生了全球最大比例的非二氧化碳温室气体排放,约占所有人为温室气体排放量的10%~17%^[2-3]。然而,除了直接排放源,与农业活动紧密相关的化肥和农药的生产、农业机械的生产和运行,以及农场能源的使用,都会造成温室气体的排放^[4]。如果将这些间接来源也考虑在内,农业或与食品相关的温室气体排放可能额外占全球温室气体排放量的30%^[5]。此外,由于人口增长、人均卡路里摄入量的增加和饮食结构变化导致农产品消费量持续增加,源于农业的温室气体排放量预计将在未来30年内大幅增加,尤其是在亚洲、非洲和美洲等地区^[6]。

水稻在全球范围内被广泛种植,年产量约 5.05×10^8 t,占谷物总产量的28%^[7]。联合国粮食及农业组织(FAO)数据(2021年)显示,水稻种植过程中温室气体排放量占农业总排放量的10.1%,约占全球人为温室气体排放量的1.3%~1.8%。这些温室气体排放主要是由水稻种植过程中产生的甲烷排放造成的。水稻生产系统的温室气体排放量(非二氧化碳)高于其他谷物种植系统^[8],其增温潜值约为小麦或玉米的4倍^[9]。因此,要实现《巴黎协定》的气候目标,就必须在2030年前大幅减少来自农业活动的温室气体排放量,尤其要控制作为主要组成部分的水稻生产系统。

在全国现代农业发展版图中,江苏省占据重要位置,其耕地面积 4.76×10^6 hm^2 ,水稻种植面积约占耕地面积的一半,2022年稻谷产量为 1.90×10^7 t,位居全国第4名。本研究拟以中国江苏省宜兴地区的水稻种植为研究对象,针对有机水稻和传统水稻种植的生产原料的投入、种植管理措施以及产量等信息进行调研,采用生命周期评价方法,对比分析有机水稻和传统水稻种植系统的碳足迹,以期为南方水稻种植系统碳减排提供一定的参考依据。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

1.1.1 研究区域概况 西渚镇地处江苏省宜兴市西南部,地势南高北低,区域面积66.61 km^2 ,耕地面积3 126.67 hm^2 ,人均耕地面积0.11 hm^2 。其气候

为亚热带季风气候,具有四季分明、温和湿润、雨热同期的特点,适宜水稻、茶叶、果蔬等作物生长。该地年均温为15~16 $^{\circ}\text{C}$,夏季炎热潮湿,冬季较寒冷,偶有霜冻或降雪。年降雨量为1 200~1 400 mm,降雨多集中于春夏两季,尤其是6~7月的梅雨季。年日照时数约2 000 h,夏季多东南风,冬季多西北风。

1.1.2 数据来源 数据来源于2023年江苏省宜兴市西渚镇水稻基地传统水稻和有机水稻的实地调研数据,包括农业生产原材料(种子、农药、化肥等)、籽粒产量、秸秆利用等相关数据,水稻品种为南粳46。灌溉用电忽略;由于种植期间施肥、喷洒农药等产生的柴油消耗未知,故本研究只计算收割及运输柴油导致的温室气体排放。

1.2 研究方法

本研究以江苏省宜兴市西渚为研究对象,采用生命周期评价法,对生产1 kg或1 hm^2 传统水稻和有机水稻的碳足迹进行调研,并比较和选取最优种植方案及提出后续改善措施。国际标准ISO14040[国际标准化组织(ISO),1997]将生命周期评价分为4个步骤:目标与范围确定、清单分析、影响评价和结果解析。使用全球变暖潜能值(GWP)等效因子(根据联合国政府间气候变化专门委员会第6次评估报告,CO₂、CH₄和N₂O的全球变暖潜能值分别为1、27和273),将每种温室气体排放量转化为二氧化碳当量(CO₂-eq)。

本调研用地面积31.33 hm^2 ,种植期为6月中旬至11月上旬,约150 d。传统水稻施用氮磷钾(15:15:15)复合肥和尿素,使用杀虫剂、除草剂、杀菌剂等农药进行病虫害防治;有机水稻生产只在插秧前约10 d施用有机肥,后期不施用化肥和农药。秸秆还田设置4个梯度(秸秆还田率:100%、60%、30%、0),秸秆还田量分别取7 500 kg、4 500 kg、2 250 kg、0 kg,探讨不同的秸秆还田率对传统水稻温室气体排放量的影响。对有机水稻采用含氮量低的牛粪对鸡粪进行梯度替代(30%处理:30%牛粪+70%鸡粪;60%处理:60%牛粪+40%鸡粪;100%处理:牛粪完全替代鸡粪),探讨不同类型有机肥对有机水稻温室气体排放潜势的影响。

1.2.1 目标定义与系统边界 本研究的目的是评估江苏宜兴地区生产传统水稻和有机水稻的温室气

体排放量,即生产 1 kg 或 1 hm²水稻从农资投入到收割完成整个生产过程中温室气体的排放量。

本研究功能单位设为 1 kg 稻谷产量和 1 hm²水稻面积,以便于与其他地区水稻生产及其他饲料作

物的温室气体排放量作对比。

系统边界是“从摇篮到农场大门”,包括整地、插秧、种植和收割等种植环节,如图 1 所示。本研究中水稻生产的产物为稻谷和秸秆。

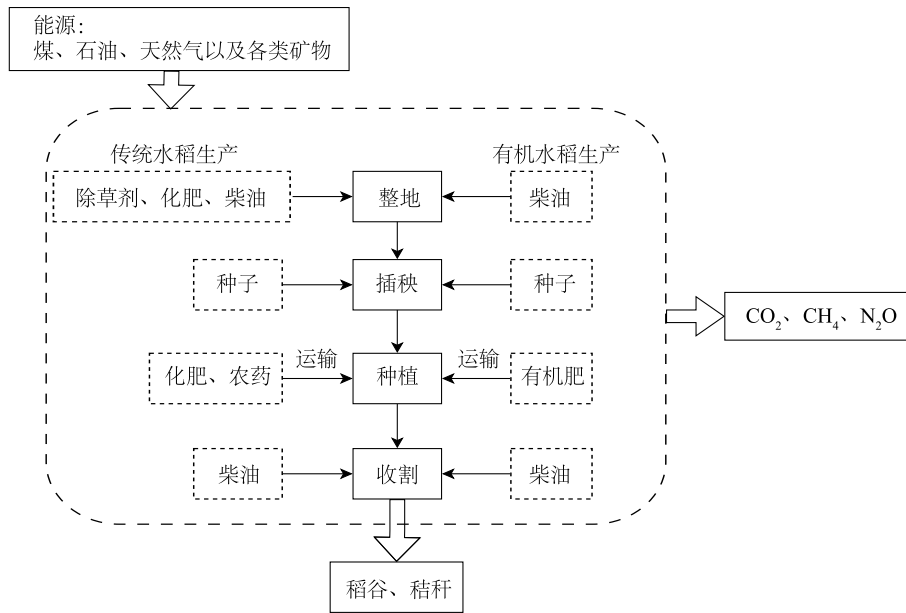


图 1 传统水稻和有机水稻生产的系统边界

Fig.1 System boundary of conventional and organic rice production

1.2.2 清单分析 本研究中,水稻生产的原材料投入、能源消耗和产量等数据通过实地调研获得,部分缺失的数据通过地方标准及相关文献补充。西渚镇传统水稻和有机水稻的投入和产出见表 1。

表 1 单位面积(1 hm²)与单位产量(1 kg)下传统水稻和有机水稻的农资投入和水稻产量

Table 1 Agricultural inputs and yields per unit area (1 hm²) and per unit yield (1 kg) of conventional and organic rice

类型	传统水稻		有机水稻	
	单位面积 (kg/hm ²)	单位产量 (g/kg)	单位面积 (kg/hm ²)	单位产量 (g/kg)
种子	75.0	5.0	75.0	10.0
氮肥	63.2	4.2	-	-
磷肥	63.2	4.2	-	-
钾肥	63.2	4.2	-	-
尿素	473.3	31.6	-	-
有机肥	-	-	7 500.0	1 000.0
柴油	18.9	1.3	9.5	1.3
除草剂	9.8	0.7	-	-
杀虫剂	2.6	0.2	-	-
杀菌剂	1.5	0.1	-	-
稻谷产量	7 500.0	-	3 750.0	-
秸秆产量	7 500.0	500.0	3 750.0	500.0

温室气体排放量计算方法参考 2006 年联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 国家温室气体清单指南。排放因子参考与本研究情况相似的前人文献,如表 2 所示。种子、除草剂、杀虫剂、杀菌剂的排放因子 (EF) 取自数据库 Ecoinvent 2.2; 氮肥、磷肥、钾肥、柴油的 EF 取自数据库 CLCD 0.7。水稻秸秆产量根据草谷比 1 : 1^[10] 计算。

表 2 农资投入的温室气体排放因子

Table 2 Greenhouse gas emission factors for agricultural inputs

温室气体排放源	排放因子 (kg/kg, CO ₂ -eq)	参考文献
水稻种子	1.84	[11]
氮肥	1.53	[11]
磷肥	1.63	[11]
钾肥	0.65	[11]
尿素	2.39	[12]
有机肥	0.11	[13]
除草剂	10.15	[11]
杀虫剂	16.61	[11]
杀菌剂	10.57	[11]
柴油	0.89	[11]

①水稻种植期间农资投入。

$$GHG_i = A_i \times EF_i \quad (1)$$

其中, GHG_i 表示生产原材料或其他投入的温室气体(GHG)排放量(kg, CO₂-eq); A_i 表示原材料或其他投入的使用量; EF_i 表示原材料或其他投入的温室气体排放因子; i 表示原材料/其他投入的类型。

②原材料运输的温室气体排放。

$$GHG_T = \sum (W_i \times D_i \times EF_T) \quad (2)$$

其中, GHG_T 表示原材料运输产生的温室气体排放量(kg, CO₂-eq); W_i 表示原材料重量(t); D_i 表示运输距离(km); EF_T 表示 7 t 卡车运输的排放因子 [0.140 2 kg/(t · km), CO₂-eq]。

表 3 为原材料运输距离和次数,除尿素和氮磷钾复合肥是外地运输而来,其他农资投入皆来自当地,故忽略不计。

表 3 原材料信息及运输距离、次数

Table 3 Raw material information, transportation distance and frequency

原材料类型	产地	运输距离(km)	运输次数(次)
尿素	江苏宜兴	36.6	2
复合肥	江苏常州	98.5	2
有机肥	江苏宜兴	36.6	1

③CH₄排放量。

$$E_{CH_4} = EF_i \times t \times 27 \quad (3)$$

式中, E_{CH_4} 为稻田 CH₄ 排放量(换算为 CO₂-eq); EF_i 为在种植方式 i 下 CH₄ 排放系数[kg/(hm² · d)]; t 为种植水稻的天数(d),本研究为 150 d; 27 为 100 年尺度下 CH₄ 对应 CO₂ 排放当量的全球增温潜势。

$$EF_i = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_0 \quad (4)$$

式中, EF_i 为修正后的稻田 CH₄ 日排放系数; EF_c 为不添加有机物时连续灌水稻田的基准排放系数,本研究采用推荐值 1.30; SF_w 为水稻种植期不同灌溉情况的换算系数,根据灌溉条件选择推荐值 0.78; SF_p 为种植前稻田不同灌溉处理的换算系数,因种植前超过 180 d 不灌水,故采用推荐值 0.68; SF_0 为添加不同种类和用量的有机物的换算系数。

$$SF_0 = (1 + \sum_i ROA_i \times CFOA_i)^{0.59} \quad (5)$$

$$ROA_i = Y \times 0.89 \times 0.001 \quad (6)$$

式中, SF_0 为添加不同种类和用量的有机物的换算系数; ROA_i 为添加有机物的比率,秸秆采用干

重,其他为鲜重(t/hm²); $CFOA_i$ 为有机物的换算系数,由于调研地在种植前 30 d 以上进行秸秆还田,故采用推荐值 0.29; Y 为水稻秸秆产量(kg/hm²); 0.89 为水稻秸秆的干鲜比; 0.001 为 kg 换算为 t 的系数。

④氮肥施用导致 N₂O 直接排放。

$$N_2O_{dir-N} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR}) \times EF_1 \quad (7)$$

$$E_{N_2O-dir} = N_2O_{dir-N} \times \frac{44}{28} \times 273 \quad (8)$$

式中, N_2O_{dir-N} 为稻田 N₂O 直接排放量(kg); F_{SN} 为水稻种植期年施用化肥量(kg); F_{ON} 为种植期有机肥(农家肥、堆肥、污泥污水等)的年施用量(kg); F_{CR} 为调研年份种植期地上部或地下部的作物残留物含氮量,包括作物固氮以及还田氮量(kg),本研究秸秆含氮率为 1%; EF_1 为氮施用导致稻田 N₂O 直接排放系数,本研究采用推荐值 0.01; E_{N_2O-dir} 为稻田 N₂O 直接排放量(换算为 CO₂-eq); 273 为 100 年尺度下 N₂O 对应 CO₂ 排放当量的全球增温潜势。

⑤大气沉降和淋溶径流导致的 N₂O 间接排放。

$$E_{N_2O-indir} = [N_2O_{(ATD)-N} + N_2O_{(L)-N}] \times 273 \quad (9)$$

$$N_2O_{(ATD)-N} = (F_{SN} \times Frac_{GASF} + F_{ON} \times Frac_{GASM}) \times EF_2 \quad (10)$$

$$N_2O_{(L)-N} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR}) \times Frac_{LEACH-(H)} \times EF_3 \quad (11)$$

$$N_2O_{(ATD)} = N_2O_{(ATD)-N} \times \frac{44}{28} \quad (12)$$

$$N_2O_{(L)} = N_2O_{(L)-N} \times \frac{44}{28} \quad (13)$$

式中, $E_{N_2O-indir}$ 为稻田 N₂O 间接排放量(换算为 CO₂-eq); $N_2O_{(ATD)-N}$ 为稻田氮挥发导致大气沉积产生的年 N₂O-N 排放量(kg); $N_2O_{(L)-N}$ 为稻田氮淋溶或径流产生的年 N₂O-N 排放量(kg); $N_2O_{(ATD)}$ 为稻田氮挥发在大气中沉积的年 N₂O 排放量(kg); $N_2O_{(L)}$ 为稻田氮淋溶或沉积产生的年 N₂O 排放量(kg); $Frac_{GASF}$ 为化肥氮以 NH₃ 和 NO_x 形式的挥发比例,本研究采用推荐值 0.1; $Frac_{GASM}$ 为有机肥氮以 NH₃ 和 NO_x 形式的挥发比例,本研究采用 0.2; EF_2 为大气氮沉积导致稻田 N₂O 间接排放系数,本研究为 0.01; $Frac_{LEACH-(H)}$ 为稻田淋溶和径流的氮损失比例,本研究为 0.3; EF_3 为氮溶淋和径流导致田间 N₂O 间接排放系数,本研究取 0.007 5。

⑥总温室气体排放量(GHG_{Total})。

$$GHG_{\text{Total}} = GHG_i + GHG_T + E_{\text{CH}_4} + E_{\text{N}_2\text{O-dir}} + E_{\text{N}_2\text{O-indir}} \quad (14)$$

2 结果与分析

2.1 不同功能单位下传统水稻和有机水稻生产中温室气体排放潜势

如表 4 所示,江苏宜兴地区单位面积和单位产量传统水稻的总温室气体排放量分别是 9 023.0 kg/hm² (CO₂-eq) 和 3 267.0 g/kg (CO₂-eq); 有机水稻的单位面积和单位产量碳排放量分别为 6 150.0 kg/hm² (CO₂-eq) 和 3 265.9 g/kg (CO₂-eq)。水稻生

产整个生命周期的温室气体排放涉及多个生产环节,包括整地、种植、栽培、收割、运输和田间排放在内的各个环节的温室气体排放量。田间CH₄排放是水稻生命周期温室气体排放的最大贡献者。传统水稻种植系统中,单位面积和单位产量的田间CH₄排放量分别占系统总温室气体排放量的 58.43% 和 91.82%,氮肥施用造成的 N₂O 排放量分别占 16.92% 和 3.12%; 有机水稻种植系统中,单位面积和单位产量的田间CH₄排放量分别占系统总温室气体排放量的 67.70% 和 91.86%,有机肥施用造成的 CO₂排放量分别占 13.41% 和 3.37%。

表 4 单位面积和单位产量传统水稻和有机水稻各种类型温室气体排放量及占比

Table 4 Greenhouse gas emissions and proportions of conventional rice and organic rice per unit area and per unit yield

温室气体	传统水稻				有机水稻			
	单位面积排放量 (kg/hm ² , CO ₂ -eq)	占比 (%)	单位产量排放量 (g/kg, CO ₂ -eq)	占比 (%)	单位面积排放量 (kg/hm ² , CO ₂ -eq)	占比 (%)	单位产量排放量 (g/kg, CO ₂ -eq)	占比 (%)
种子 CO ₂	138.0	1.53	9.2	0.28	138.0	2.24	18.4	0.56
氮肥 CO ₂	96.7	1.07	6.4	0.20	-	-	-	-
磷肥 CO ₂	103.0	1.14	6.9	0.21	-	-	-	-
钾肥 CO ₂	41.1	0.46	2.7	0.08	-	-	-	-
尿素 CO ₂	1131.2	12.54	92.5	2.83	-	-	-	-
有机肥 CO ₂	-	-	-	-	825.0	13.41	110.0	3.37
除草剂 CO ₂	99.6	1.10	6.6	0.20	-	-	-	-
杀虫剂 CO ₂	43.6	0.48	2.9	0.09	-	-	-	-
杀菌剂 CO ₂	15.9	0.18	1.1	0.03	-	-	-	-
农机耗油 CO ₂	16.8	0.19	1.1	0.03	8.4	0.14	2.2	0.07
运输耗油 CO ₂	10.1	0.11	0.7	0.02	38.5	0.63	5.13	0.16
氮肥施用 N ₂ O	1 526.8	16.92	101.8	3.12	-	-	-	-
有机肥施用 N ₂ O	-	-	-	-	685.3	11.14	91.4	2.80
N ₂ O 沉降	184.9	2.05	12.3	0.38	137.1	2.23	18.3	0.56
N ₂ O 淋溶	343.5	3.81	22.9	0.70	154.2	2.51	20.6	0.63
农田 CH ₄	5 271.8	58.43	2 999.9	91.82	4 163.5	67.70	2 999.9	91.86
总温室气体	9 023.0		3 267.0		6 150.0		3 265.9	

2.2 不同分配系数下水稻秸秆温室气体的排放潜势

本研究模拟了秸秆离田饲料化的情景下,不同分配系数(经济分配和质量分配)下水稻秸秆的温室气体排放潜势。如表 5 所示,按照经济分配,传统种植和有机种植模式下的水稻秸秆温室气体排放量

分别为 0.114 kg/kg (CO₂-eq) 和 0.058 kg/kg (CO₂-eq), 分别约为传统水稻和有机水稻总温室气体排放潜势的 3.5% 和 1.8%; 按照质量分配,传统种植和有机种植模式下的水稻秸秆温室气体排放潜势均为 2.035 kg/kg (CO₂-eq), 均约为传统水稻和有机水稻稻谷碳排放潜势的 1.65 倍。

表5 不同分配下单位产量传统水稻和有机水稻产物导致的温室气体排放量

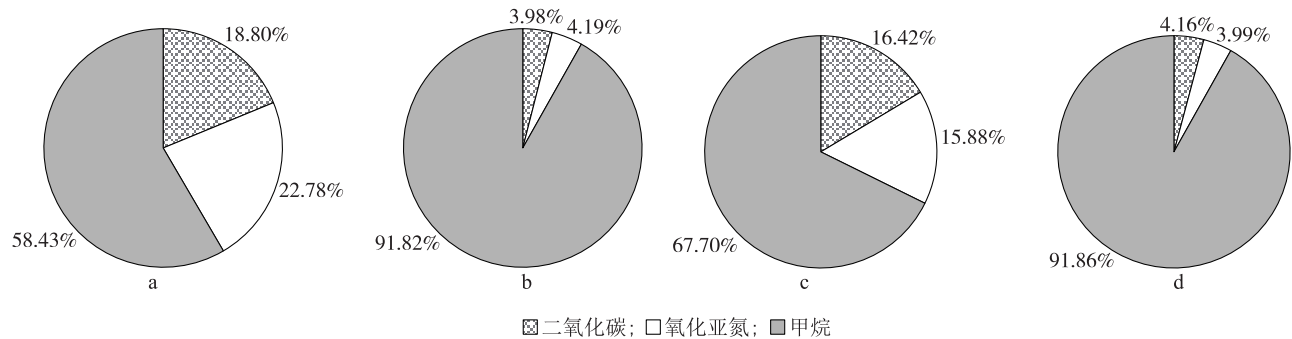
Table 5 Greenhouse gas emissions per unit yield of conventional rice and organic rice under different distributions

类别	经济分配		质量分配		单位产量水稻 总温室气体排放量 (kg/kg, CO ₂ -eq)
	秸秆(kg/kg, CO ₂ -eq)	稻谷(kg/kg, CO ₂ -eq)	秸秆(kg/kg, CO ₂ -eq)	稻谷(kg/kg, CO ₂ -eq)	
传统水稻	0.114	3.153	2.035	1.232	3.267
有机水稻	0.058	3.208	2.035	1.231	3.266

2.3 不同功能单位下不同温室气体在传统水稻和有机水稻生产中的贡献率

如图2所示,不同功能单位下,传统水稻和有机水稻生产中温室气体排放贡献最大的温室气体均为CH₄。由图2a、图2b可见,传统水稻的温室气体排放量仅次于CH₄的是N₂O,图2c、图2d显示,有机水

稻的温室气体排放量仅次于CH₄的是CO₂。与单位面积传统水稻相比,有机水稻生产中CH₄的排放量占比相对较大(67.70%);N₂O的排放量占比相对较小(15.88% vs 22.78%)。单位产量下,传统水稻和有机水稻生产中CH₄的排放量占比均为92.00%左右,CO₂与N₂O的排放量占比为4.00%左右。



a: 1 hm² 传统水稻生产过程中各类温室气体排放量占比; b: 1 kg 传统水稻生产过程中各类温室气体排放量占比; c: 1 hm² 有机水稻生产过程中各类温室气体排放量占比; d: 1 kg 有机水稻生产过程中各类温室气体排放量占比。

图2 各类温室气体在单位面积和单位产量传统水稻和有机水稻生产中的排放量占比

Fig.2 The proportion of emissions of various greenhouse gases in conventional and organic rice production per unit area and per unit yield

2.4 不同秸秆还田率下温室气体排放潜力的变化分析

如图3所示,在秸秆还田率分别为100%、60%、30%和0的条件下,单位面积传统水稻种植过程中温室气体排放潜力分别为9 023.0 kg/hm² (CO₂-eq)、7 968.3 kg/hm² (CO₂-eq)、7 089.0 kg/hm² (CO₂-eq)和6 085.3 kg/hm² (CO₂-eq)。随着秸秆还田率的减少,温室气体排放量降低。相对于秸秆100%还田,秸秆完全离田(即还田率为0)情况下,由于CH₄排放势和N₂O排放势减少,造成总温室气体排放势减少33%,CO₂排放势基本不变。

2.5 不同有机肥施用条件下温室气体排放潜力的变化分析

本研究中,我们模拟了用牛粪部分或完全替代鸡粪的情况下,有机水稻种植过程中温室气体增温

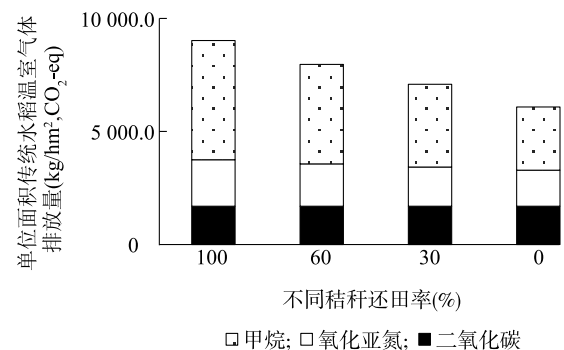


图3 不同秸秆还田率下单位面积传统水稻生产的温室气体排放量

Fig.3 Greenhouse gas emissions from conventional rice production per unit area under different straw returning rates

势的变化。如图4所示,有机水稻的温室气体排

放潜势随着牛粪替换比例增加而减少。替换比例分别为 30%、60% 和 100% 的情况下,单位面积有机水稻种植过程中总温室气体排放量分别减少 6.2%、

8.4% 和 9.8%,单位重量有机水稻种植过程中总温室气体排放量分别减少 1.6%、2.1% 和 2.5%。

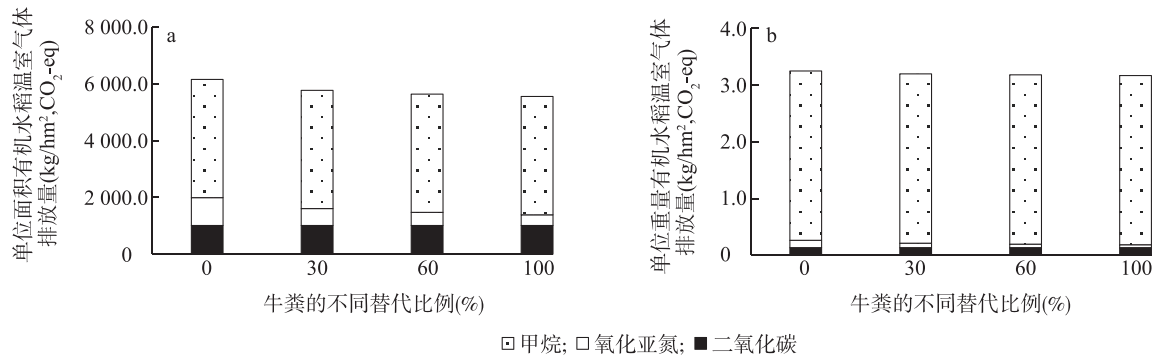


图 4 不同牛粪替代鸡粪率下有机水稻单位面积和单位产量有机水稻的温室气体排放量

Fig.4 Greenhouse gas emissions of organic rice per unit area and per unit yield under different cow manure substitution rates for chicken manure

3 讨论

由于水稻种植过程中会排放大量的甲烷,相比于玉米、小麦等其他作物,水稻种植造成的温室效应增温潜势更大。因此,评估不同地区或不同种植模式下水稻种植过程中温室气体的排放特征具有重要的意义。本研究评估了江苏宜兴地区传统水稻和有机水稻种植过程中温室气体的增温潜势,结果表明,该地区水稻种植过程中温室气体增温潜势处于一个相对较高的水平,其数值明显高于其他研究者的报道^[14]。然而,由于有机种植过程中避免使用化学肥料,本研究中单位面积有机水稻温室气体的增温潜势远低于传统水稻的增温潜势。总体而言,我们的研究结果与其他关于水稻种植排放的生命周期评价(LCA)研究结果基本一致。绝大多数研究中,功能单位设为 1 kg 水稻谷物,Brodt 等^[15]的研究结果表明,每 1 kg 精米的温室气体排放潜势为 1.47 kg (CO₂-eq),其中种植阶段的排放量占 69%。与世界其他地区的 LCA 研究结果相比,这个结果相对较低,主要是因为当地的精米产量很高。在本研究中,尽管在有机水稻种植过程中减少了化肥的投入,但由于其产量仅为传统水稻的一半,其单位产量的温室气体排放潜势未有大幅度减少。因此,这提示我们需要优化耕作实践,提高有机水稻产量来进一步减少其温室气体排放潜势。此外,其他 LCA 研究比较了传统水稻和有机水稻生产过程中温室气体排放

的结果,得出了与本研究类似的结论,即有机农业生产模式对环境的负面影响低于传统农业生产模式^[16-18]。

有研究结果表明,施肥与土壤中 N₂O 排放量的增加之间存在关联^[19-20],施用氮肥会立即增加 N₂O 排放量,这是因为土壤中微生物的氮供应量是 N₂O 排放量的决定因素,所以微生物在控制 N₂O 的生成方面起着根本性的作用^[20]。本研究中,在传统水稻种植模式下,田间 CH₄ 排放和氮肥投入造成的 N₂O 排放是水稻生命周期温室气体排放的主要贡献者。这些结果与 Wang 等^[21]的研究结果基本一致,他们发现华中地区稻田田间温室气体排放量约占温室气体排放总量的 89%。此外,Xu 等^[22]估算了中国 5 个典型稻区水稻生产的碳足迹,发现田间温室气体 (CH₄ 和 N₂O) 排放量约占温室气体排放总量的 80%。Koga 等^[23]在日本北部的研究结果表明,水稻生产的田间排放量约占温室气体排放总量的 77%。在有机水稻种植模式下,田间 CH₄ 排放、有机肥 CO₂ 和 N₂O 排放是主要贡献源。相对于传统水稻种植模式,有机水稻种植过程中投入了大量的有机肥料,肥料中的有机质在土壤微生物的作用下被分解,释放大量 CO₂,同时在硝化作用和反硝化作用下,土壤 N₂O 释放量增加。在实地调查中我们发现江苏宜兴地区有机水稻种植过程中会使用大量鸡粪。鸡粪是常见禽畜粪肥中养分含量较高的,能起到改变土壤性质、增强土壤肥力的效果^[24-27]。然而,即使在有

机种植模式中,过高的氮素投入仍会增加温室气体的排放量。因此,在满足水稻生长氮素需求的前提下,需要有效控制有机肥的投入量进而减少田间 N_2O 排放量。

农业生产产生了大量的作物残茬,作物残茬产量全球每年约 $4.0 \times 10^9 t^{[28]}$ 。作为秸秆产生量世界第一的大国,2005年中国秸秆生产量约 $8 \times 10^8 t^{[29]}$ 。越来越多的专家建议将作物残茬还田,以减少化学投入,增加土壤碳固存,提高作物产量 $^{[30-31]}$ 。然而,作物残留物的滞留无疑会导致更大的 CH_4 和 N_2O 排放量。本研究中,我们模拟了秸秆离田饲料化情景下,传统水稻田温室气体排放情况。结果发现,随着秸秆还田率的减少,温室气体排放量降低。相对于秸秆100%还田,秸秆完全离田(即还田率为0)情况下,由于 CH_4 排放和 N_2O 排放潜势减少,造成总温室气体排放潜势减少33%, CO_2 排放潜势基本不变。因此,秸秆离田饲料化会有效减少田间温室气体排放量,值得注意的是,秸秆饲料化对动物养殖阶段温室气体排放的影响需要进一步核算和探讨。

4 结论

本研究对江苏宜兴地区传统水稻与有机水稻种植的碳排放进行LCA研究,结果表明,2种水稻种植模式下单位面积温室气体排放潜势分别为 $9\ 023.0\ kg/hm^2$ (CO_2 -eq)和 $6\ 150.0\ kg/hm^2$ (CO_2 -eq),而单位产量温室气体排放量则相近(约 $3.27\ kg/kg$, CO_2 -eq)。田间 CH_4 排放是主要贡献源,在传统水稻和有机水稻生产系统中分别占总排放量的58.43%~91.82%和67.70%~91.86%。不同秸秆处理方式显著影响温室气体排放,秸秆完全离田可使传统水稻种植过程中温室气体排放总量降低33%,而采用牛粪替代鸡粪可使有机水稻单位面积和单位产量温室气体排放量分别减少6.2%~9.8%和1.6%~2.5%。

未来LCA研究可进一步结合区域气候-土壤-管理交互机制,构建动态模型量化不同农艺措施(如水分管理)对水稻生产全生命周期碳足迹的协同影响,并探索其在气候变化情景下的长期减排潜力与经济效益,为制定精准化低碳农业政策提供科学依据。

参考文献:

[1] ESMIZADE S, LANDI A, GILANI A, et al. Evaluating the a-

mount of carbonic greenhouse gasses (GHGs) emission from rice paddies [C]//GILKES R, PRAKONGKEP N. 19th world congress of soil science 2010. Brisbane: Australian Society of Soil Science Incorporated, 2011: 68-70.

- [2] BEACH R H, DEANGELO B J, ROSE S, et al. Mitigation potential and costs for global agricultural greenhouse gas emissions [J]. *Agricultural Economics*, 2008, 38(2): 109-115.
- [3] IPCC. Climate change 2014: synthesis report [R]. Geneva, Switzerland: IPCC Press, 2014.
- [4] WANG X, CHANG X Y, MA L B, et al. Global and regional trends in greenhouse gas emissions from rice production, trade, and consumption [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 101: 107141.
- [5] CRIPPA M, SOLAZZO E, GUIZZARDI D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions [J]. *Nature Food*, 2021, 2(3): 198-209.
- [6] MAZZETTO A M, FALCONER S, LEDGARD S. Carbon footprint of New Zealand beef and sheep meat exported to different markets [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 98: 106946.
- [7] FAO. FAOSTAT online database [EB/OL]. [2024-12-01]. <http://faostat.fao.org/data>.
- [8] DEVKOTA K P, BEEBOUT S E J, SUDHIR-YADAV, et al. Setting sustainability targets for irrigated rice production and application of the Sustainable Rice Platform performance indicators [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 92: 106697.
- [9] 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.
- [10] 李强, 杨文慧, 邹晨昕, 等. 滨海滩涂垦区主要大田作物生产碳足迹研究: 以江苏省盐城市为例 [J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(7): 188-198.
- [11] 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.
- [12] 何巧玲, 杨刚, 邹兰, 等. 油菜秸秆不同还田方式下水稻碳足迹分析 [J]. *西南农业学报*, 2022, 35(7): 1673-1679.
- [13] YODKHUM S, GHEEWALA S H, SAMPATTAGUL S. Life cycle GHG evaluation of organic rice production in northern Thailand [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 217-223.
- [14] 谭博特. 江苏省水稻生产生命周期评价及环境效应研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [15] BRODT S, KENDALL A, MOHAMMADI Y, et al. Life cycle greenhouse gas emissions in California rice production [J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 89-98.
- [16] GOMIERO T, PAOLETTI M G, PIMENTEL D. Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2008, 27(4): 239-254.
- [17] HE X Q, QIAO Y H, LIANG L, et al. Environmental life cycle assessment of long-term organic rice production in subtropical

- China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 880-888.
- [18] MEIER M S, STOESSEL F, JUNGBLUTH N, et al. Environmental impacts of organic and conventional agricultural products-Are the differences captured by life cycle assessment? [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 193-208.
- [19] BHATIA A, SASMAL S, JAIN N, et al. Mitigating nitrous oxide emission from soil under conventional and no-tillage in wheat using nitrification inhibitors [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3/4): 247-253.
- [20] DAS S, ADHYA T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 185-192.
- [21] WANG M X, XIA X F, ZHANG Q J, et al. Life cycle assessment of a rice production system in Taihu region, China[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2010, 17(2): 157-161.
- [22] XU X M, LAN Y. Spatial and temporal patterns of carbon footprints of grain crops in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 146: 218-227.
- [23] KOGA N, TAJIMA R. Assessing energy efficiencies and greenhouse gas emissions under bioethanol-oriented paddy rice production in northern Japan[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 967-973.
- [24] 卢青, 杨剑, 潘诗琴, 等. 莫能菌素在鸡粪中的降解规律及其对鸡粪堆肥微生物群落的影响[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(9): 2783-2797.
- [25] 赵华轩, 李尚民, 蒲俊华, 等. 鸡粪筒仓式反应器堆肥产品质量评估和经济效益分析[J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(5): 1159-1168.
- [26] 许俊香, 邹国元, 孙钦平, 等. 畜禽粪便 Cu、Zn 含量特征研究[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(11): 254-259.
- [27] 王瑞飞, 孔盈利, 魏艺璇, 等. 菌剂对鸡粪-生物炭堆肥理化性质和微生物群落结构的影响[J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(4): 966-977.
- [28] LAL R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. *Environment International*, 2005, 31(4): 575-584.
- [29] BI Y Y, GAO C Y, WANG Y J, et al. Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 211-217.
- [30] TURMEL M S, SPERATTI A, BAUDRON F, et al. Crop residue management and soil health: a systems analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 134: 6-16.
- [31] HUANG R, TIAN D, LIU J, et al. Responses of soil carbon pool and soil aggregates associated organic carbon to straw and straw-derived biochar addition in a dryland cropping mesocosm system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 576-586.

(责任编辑:陈海霞)