

基于农户调查的长江流域双季稻生产碳、氮足迹分析 ——以江西和湖南为例

陈中督 徐春春 纪龙 方福平

(中国水稻研究所, 311300, 浙江杭州)

摘要 量化分析作物生产碳、氮足迹可以有效帮助减少农业温室气体和活性氮排放。基于足迹理论和方法, 采用问卷调查方式定量研究长江流域水稻生产碳足迹和氮足迹大小及组成。研究表明, 水稻单位产量碳足迹和氮足迹分别介于 0.50~0.90kgCO₂-eq/kg 和 5.20~13.17gN-eq/kg, 其中 CH₄ 和 NH₃ 排放为主要贡献因子。种植规模与碳足迹和氮足迹呈现显著负相关关系, 与一般农户 (低于 0.7hm²) 水稻种植相比, 种粮大户 (高于 3.3hm²) 碳足迹和氮足迹分别降低了 33.8% 和 44.1%。在调研的稻田中发现, 53.1% 的地块肥料投入过量, 54.9% 的地块灌溉投入过量, 且产量较低, 存在着较大的节能减排潜力。提高农户的受教育水平和低碳绿色农业认知能够显著降低水稻生产碳、氮足迹。因此, 发展双季稻节肥节水技术, 提高农业机械运行效率, 构建规模化农作种植模式, 同时提升农户知识文化水平和加强低碳绿色农业知识的普及力度以及不同类型适应性行为的指导, 健全低碳绿色农业技术创新与推广机制, 有利于缓解中国长江流域双季稻种植区的气候变化和富营养化污染。

关键词 碳足迹; 氮足迹; 双季稻; 生态评价; 生命周期

农业是人为温室气体排放的主要贡献者之一, 特别是非 CO₂ 排放 (即 CH₄ 和 N₂O 排放量)^[1]。与此同时, 合成氮肥料在农业生态系统中得到广泛应用、农作物产量不断提高的同时, 也不可避免地导致多余的氮肥在空气、水和土壤中流失, 对生态系统和人类健康造成破坏性影响。目前, 足迹类指标的提出为农业资源消耗和环境污染影响程度提供了新的思路和方法^[2]。农业碳足迹指农产品在生育时期内直接和间接产生的温室气体总量, 其单位以全球增温潜势表述^[3]。碳足迹已经运用到各行各业, 方法较为成熟, 大到全球层面的环境影响评价, 小到某一作物生产过程中的温室气体排放。氮足迹的研究相对较少, 相关的定义及研究方法还处于前期探索阶段, 当前主要表述为人类活动中因资源消耗而排放到环境中的活性氮总量^[4]。

长江流域的双季稻生产在中国占有重要地位, 其中 2016 年湖南和江西两地双季稻播种面积为 5.77×10⁶hm², 占全国双季稻播种面积的 49.1%, 双季稻产量为 3.48×10⁷t, 占全国双季稻总产量的 50.2%。近 20 年来, 我国双季稻单产呈现显著增长趋势, 化肥等农资投入也出现增加的趋势, 从而进

一步带来温室气体排放的显著增加, 以及农业面源污染的加剧。一般认为, 稻田是 CH₄ 主要的排放源之一, 2010 年全球排放量达到 493~723 MtCO₂-eq, 而旱地是农业 N₂O 的主要排放源, 但稻田土壤对于排放亦有着不可忽视的作用^[5]。据估计, 我国稻田 N₂O 排放量约占全国农田 N₂O 排放总量的 22%。Gao 等^[6]通过模型模拟估计, 2007 年我国稻田 N₂O 排放量约为 3.57×10⁴t。现阶段, 国内外对农作物碳足迹的研究较多, 但基本上是基于生产投入统计数据, 基于农户大规模调研数据的双季稻碳足迹及其低碳减排策略的研究鲜见报道。另外, 现阶段我国还缺乏基于生命周期法对粮食作物生产的氮足迹分析研究, 而对双季稻生产的碳足迹和氮足迹进行定量评估对于缓解气候变化和减少环境污染至关重要。作者曾比较分析了长江中游地区稻麦轮作模式的碳、氮足迹情况, 但长江流域稻作模式以双季稻种植模式为主, 基于农户调查的长江流域双季稻生产碳、氮足迹分析显得尤为重要。因此, 本研究基于农户调研数据, 运用生命周期法评价分析长江流域双季稻生产碳、氮足迹大小及其构成, 并阐述其影响因素机制, 为我国合理农作制度构建提供数

作者简介: 陈中督, 研究方向为低碳稻作农作制, E-mail: chenzhongdu@caas.cn

方福平为通信作者, 研究方向为水稻产业经济和生态研究, E-mail: fangfuping@caas.cn

基金项目: 浙江省自然科学基金青年基金 (LQ21C130002)

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2022-12-28; 网络出版日期: 2023-02-16

据支持和理论指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源及研究边界

本研究以江西省和湖南省为调研区域, 该区域位于长江中游地区, 为典型的亚热带季风气候, 多年平均温度 16.4°C~18.5°C, 降水量 1081~1887mm, 年均无霜期大约为 272~300d。其中稻作期降水量达 800~1600mm, 丰富的气候资源适宜发展双季稻生产。此次研究问卷的发放对象是江西省和湖南省具有代表性的几个水稻主产县市的农户, 县市分别是江西省上高市泗溪镇、上高市锦江镇、萍乡市芦溪镇、萍乡市银河镇、鹰潭市余江县和南昌市进贤县, 湖南省常德市汉寿县、益阳市资阳区、衡阳市衡阳县和长沙市长沙县。问卷设计主要借鉴了“中国粮食作物碳足迹的时空变化格局”^[7]、“农户低碳减排技术采纳行为研究”^[8]和“江苏省水稻生产的碳排放结构特征和影响因素研究——基于农户生产投入和规模的视角”^[9]中关于水稻生产农户影响因素研究的问卷设计。调研分析了当地农户性别、受教育程度、水稻种植年限、家庭成员组成及水稻收入占总收入比例等基本问题; 农户的认知态度, 主要包括农户对气候变化认知、低碳农业的认知以及对于风险规避的态度; 户主水稻田块基本特征包括水稻面积占稻农总耕地面积的比例、机械化程度、稻田土壤肥力、农资投入情况及稻田灌溉用水保障程度等; 外部环境特征变量主要包括获得信贷的难易程度、政府补贴力度及技术服务支持力度等。共收获问卷 120 份, 有效问卷 106 份, 问卷合格率达 88%。问卷设计初稿形成后, 首先通过咨询中国农业大学农学与生物技术学院、湖南省农业科学院土壤肥料研究所、湖南省宁乡县农业技术推广中心等专家的意见, 针对问卷设计的专业知识、相关内容和术语做了修正; 其次, 2016 年 7 月底在浙江省杭州市富阳区湖塍村进行了 40 份预调查, 主要是检查问卷答案的可得性、稻农对所提问题的理解和接受等, 并通过 Cronbach's a 系数法做了信度分析, 通过内容效度法做了效度分析。Cronbach's a 系数都保持在 0.7 以上, 表明该问卷调查数据具有较好的内在一致性, 问卷调查结果可信度较高。

调查显示各个地区稻田种植以男性农户为主, 有 91 户, 占样本数的 85.8%。106 个调查样本中,

50 岁以上的农户数量偏多, 占比 70%。户主的平均受教育程度为 6 年, 初中文化程度, 水稻种植年限以 10~15 年和 15~20 年为主, 两者占到 69% 左右。稻农文化程度的高低和水稻种植年限成反比关系, 本调查也证明了这一点。调研农户早稻产量介于 5625~9000kg/hm², 晚稻 6120~11 000kg/hm²。早稻氮肥用量基本介于 135~180kg/hm², 占比 70%; 晚稻氮肥投入量介于 150~223kg/hm², 占比 65%。将种植规模分为一般农户 (低于 0.7hm²)、家庭农场 (0.7~3.3hm²) 和种粮大户 (高于 3.3hm²) 3 种类型, 其中一般农户有 40 户, 占比 37.7%, 家庭农场农户占比最少, 仅占比 12.3%。

本研究边界采用 LCA 评价法, 以水稻季播种到收获整个生育期为研究界限, 计算分析生育期内水稻生产温室气体排放和活性氮排放^[2,4]。温室气体排放源主要包括农资生产间接排放、田间农事操作耗损排放以及田间温室气体。直接排放双季稻的氮足迹包括 2 部分: (1) 各项农资投入 (如肥料、农膜、灌溉及其他机械柴油消耗等) 整个生产生命周期过程中的潜在活性氮排放; (2) 稻田活性氮损失量, 如稻田 NH₃ 挥发、N₂O 排放、稻田 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 淋失 (图 1)。

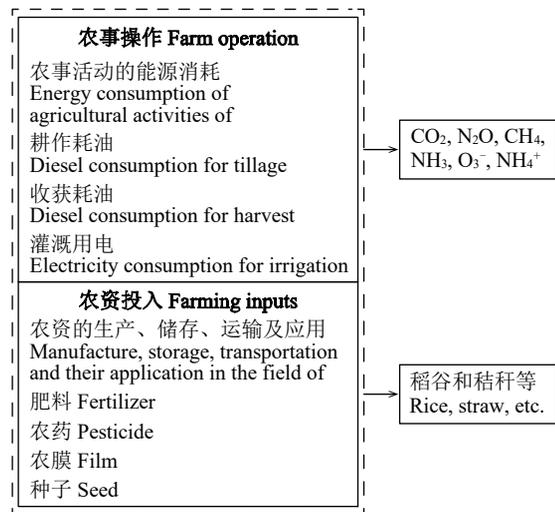


图 1 系统边界

Fig.1 The system boundary

1.2 双季稻碳足迹计算方法

碳足迹及稻田 CH₄ 计算方法主要参考文献 [10]。水稻碳足迹计算如下:

$$CF = \sum_{i=1}^n (\partial m_c)_i + CF_{CH_4} + CF_{N_2O} \quad (1)$$

$$CF_y = CF/Y \quad (2)$$

$$CF_b=CF/B \quad (3)$$

$$CF_v=CF/V \quad (4)$$

式中, CF 、 CF_y 、 CF_b 、 CF_v 分别表示早稻和晚稻生产单位面积、单位面积产量、单位面积生物产量和单位面积产值作物生产碳足迹; Y 指作物产量, B 指作物生物产量, V 指作物产值; n 和 d 分别表示作物生产过程中的农资投入和农事操作项目及其对应消耗量, m_c 为各个农资投入的碳排放参数, 主要源于中国生命周期数据库 (CLCD) 和 Ecoinvent 2.2 数据库 (表 1)。稻田 CH_4 排放量的计算方法参考 ISO/TS14067 碳足迹核算标准:

$$CF_{CH_4}=EF_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times 25 \quad (5)$$

$$EF_{i,j,k}=EF_C \times SF_w \times SF_p \times SF_o \quad (6)$$

$$SF_o=(1+\sum_i ROA_i \times CFOA_i)^{0.59} \quad (7)$$

$$ROA_i=Y \times 0.623 \times ISR_p \times 0.85 \quad (8)$$

式中, CF_{CH_4} 为甲烷排放引起的 CO_2 排放当量 ($kgCO_2\text{-eq}/hm^2$)。 $EF_{i,j,k}$ 和 $t_{i,j,k}$ 分别表示日排放量以及排放天数, 其中 i 、 j 、 k 分别代表不同的种植环境、田间用水状况以及有机物投入情况。本研究中 SF_w 和 SF_p 分别表示种植期间和种植前土壤水分用水状况的换算系数, 结合前人研究结果, 取值均为 1^[11], SF_o 为有机添加物类型和数量变化的换算系数, $CFOA_i$ 为不同土质之间的有机物转换系数, 由于本研究中未投入有机物, 因此取值为 1, ROA_i 为有机添加物的施用比率, Y 为水稻产量 (kg/ha), 0.623 为水稻草谷比, ISR_p 为稻谷的秸秆还田系数, 表示农户稻草还田占稻草产量的比例, 0.85 为水稻秸秆干重占鲜重的比值。

稻田 N_2O 排放量计算方法则根据农田纯氮使用量进行估算^[12]:

$$CF_{N_2O}=N \times \varepsilon \times 44/28 \times 298 \quad (9)$$

式中, CF_{N_2O} 为 N_2O 排放引起的 CO_2 排放当量, ε 为氮肥投入引起的 N_2O 直接排放的排放因子, 系数为 0.0073, 44/28 为 N_2O 与 N_2O-N 分子量之比, 298 为在 100 年尺度上将 N_2O 转化为 CO_2 的全球增温潜势。

1.3 双季稻氮足迹计算方法

双季稻生产氮足迹评价借鉴 CML 提供的方法, 在生命周期评价法 (环境管理——生命周期评价——要求和指南) 的基础上将不同形态的活性氮转化成富营养化潜势求和计算^[13]:

$$NF=\sum_{i=1}^n (\partial m_N)_i + NF_{NH_3} + NF_{N_2O} + NF_{NO_3^-} +$$

$$NF_{NH_4^+} \quad (10)$$

$$NF_y=NF/Y \quad (11)$$

$$NF_b=NF/B \quad (12)$$

$$NF_v=NF/V \quad (13)$$

式中, NF 、 NF_y 、 NF_b 、 NF_v 分别表示早稻和晚稻生产单位面积、单位产量、单位生物产量和单位产值作物生产氮足迹; m_N 表示某种农资的活性氮排放参数 (表 1)。稻田 NH_3 挥发、 N_2O 排放、稻田 NO_3^- 和 NH_4^+ 淋失产生的氮足迹值计算方法参考 ISO 14044^[14]:

$$E_{N_2O}=N \times \varepsilon \times 44/28 \times 0.476 \times 1000 \quad (14)$$

$$E_{V_{NH_3}}=N \times \Phi \times 17/14 \times 0.833 \times 1000 \quad (15)$$

$$NL_{NO_3^-}=N \times \sigma \times 62/14 \times 0.238 \times 1000 \quad (16)$$

$$NL_{NH_4^+}=N \times \gamma \times 18/14 \times 0.786 \times 1000 \quad (17)$$

式中, Φ 、 σ 、 γ 分别为 NH_3 挥发氮损失系数、 NO_3^- 淋溶系数和 NH_4^+ 淋溶系数, 系数分别为 0.338、0.305 和 0.339, 参数主要来源于我国《肥料流失系数手册》, 其中 44/28、17/14、62/14 和 18/14 分别为 N_2O 与 N_2O-N 、 NH_3 与 NH_3-N 、 NO_3^- 与 NO_3^-N 和 NH_4^+ 与 NH_4^+N 分子量之比, 0.476、0.833、0.238

表 1 农业投入资料的温室气体和活性氮排放系数
Table 1 Coefficients of GHG and reactive nitrogen emission of different material for agricultural production

项目 Item	碳排放系数 Carbon emission coefficient	氮排放系数 Nitrogen emission coefficient
柴油 Diesel	0.89kgCO ₂ -eq/kg	0.56gN-eq/kg
柴油燃烧 Diesel combustion	4.10kgCO ₂ -eq/kg	4.10gN-eq/kg
灌溉用电 Electricity for irrigation	0.82kgCO ₂ -eq/kW·h	0.76N-eq/kW·h
氮肥 N fertilizer	1.53kgCO ₂ -eq/kg	0.47gN-eq/kg
磷肥 P ₂ O ₅	1.63kgCO ₂ -eq/kg	0.36gN-eq/kg
钾肥 K ₂ O	0.65kgCO ₂ -eq/kg	0.03gN-eq/kg
农膜 Flim	22.72kgCO ₂ -eq/kg	12.02gN-eq/kg
杀虫剂 Insecticides	16.61kgCO ₂ -eq/kg	3.55gN-eq/kg
除草剂 Herbicides	10.15kgCO ₂ -eq/kg	4.49gN-eq/kg
杀菌剂 Fungicides	10.57kgCO ₂ -eq/kg	7.05gN-eq/kg
水稻种子 Rice seed	1.84kgCO ₂ -eq/kg	0.76gN-eq/kg

大部分农资投入的碳排放系数来自中国生命周期数据库 (CLCD v0.7, IKE Environmental Technology Co., Ltd., China), 农药和种子的换算系数来自 Ecoinvent v2.2 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Switzerland), 活性氮排放系数来自 IKE eBalance v3.0 (IKE Environment Technology Co., Ltd., China)
The conversion coefficients of CO₂ equivalent for most of inputs were from the Chinese Life Cycle Database (CLCD v0.7, IKE Environmental Technology Co., Ltd., China), pesticides and seeds which were from Ecoinvent v2.2 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Switzerland). The Nr emission factors (Nn) from IKE eBalance v3.0 (IKE Environment Technology Co., Ltd., China)

和 0.786 分别表示 N_2O 、 NH_3 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的富营养化系数^[15]。1000 为单位换算系数 (g/kg)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, 美国) 软件进行数据处理和统计分析。采用回归分析来揭示碳氮足迹大小与农户自身特征和环境变量之间的关系。

2 结果与分析

2.1 长江流域双季稻生产的碳足迹和氮足迹

图 2 显示了基于农户调查的长江流域双季稻生产碳足迹和氮足迹。在调研的稻田中, 长江流域早

稻生产单位产量碳足迹值为 $0.63\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, 最大值与最小值分别为 0.88 和 $0.49\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$; 单位生物产量碳足迹值为 $0.31\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, 最大值与最小值分别为 0.44 和 $0.24\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$; 单位产值碳足迹值为 $0.25\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$, 最大值与最小值分别为 0.35 和 $0.21\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$ 。长江流域晚稻生产单位产量碳足迹值、单位生物产量碳足迹值和单位产值碳足迹值与早稻相当。调研稻田中, 早稻平均单位产量氮足迹为 8.37gN-eq/kg , 最大值和最小值分别为 13.54 和 4.15gN-eq/kg ; 晚稻氮足迹稍高于早稻, 平均、最大和最小氮足迹分别为 8.49、15.90 和 3.59gN-eq/kg 。

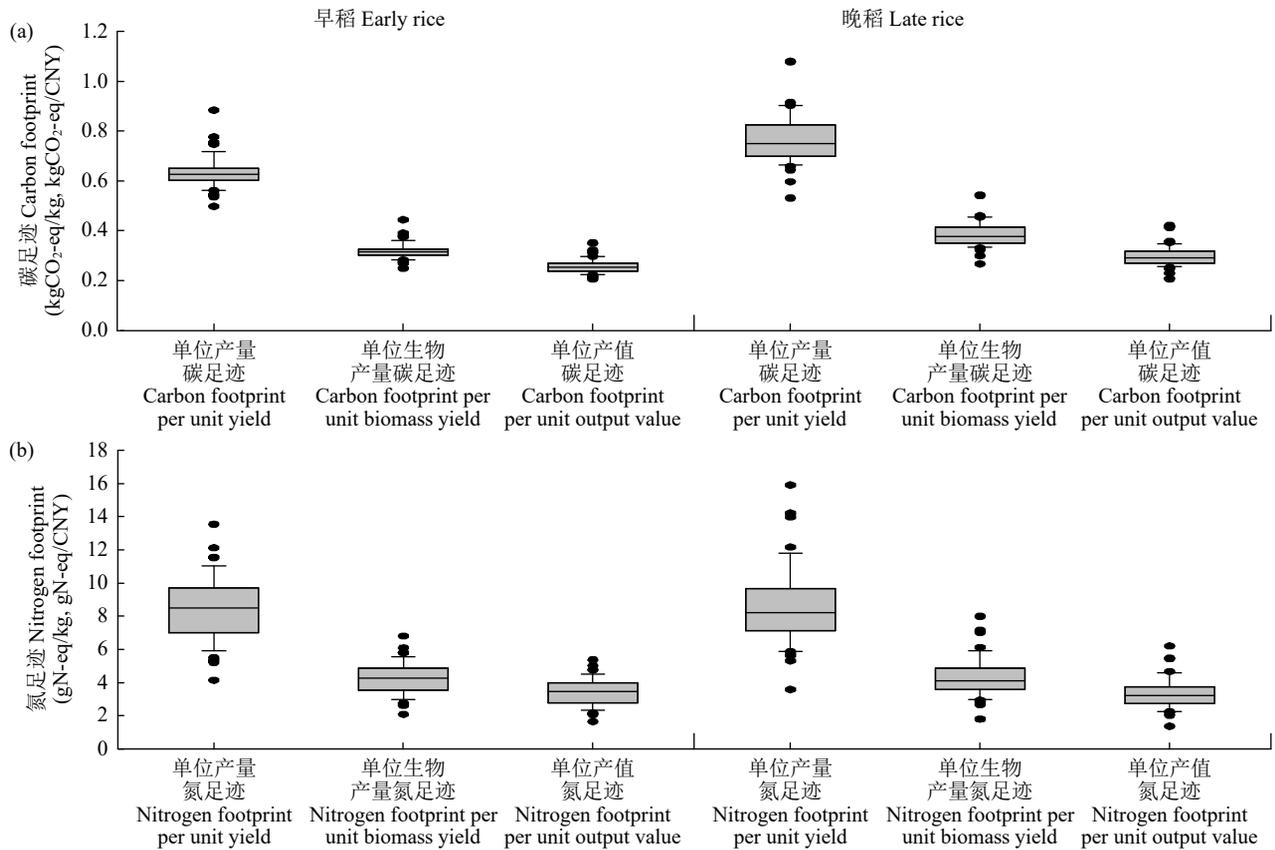


图 2 长江流域双季稻生产碳足迹和氮足迹

Fig.2 Carbon footprint and nitrogen footprint of double rice production in Yangtze River

从图 3 可以看出, 生育期内 CH_4 排放量为水稻碳足迹的最大来源, 分别占早稻、晚稻和双季稻总碳足迹的 63.3%、68.5%和 66.0%。农资投入温室气体排放是水稻总碳足迹的第二大贡献源, 分别占早稻、晚稻和双季稻的 31.8%、26.5%和 29.1%。稻田的 N_2O 排放量对早稻和晚稻的单位产量氮足迹影响较小。早、晚、双季稻的单位产量氮足迹分别是 8.37、8.49 和 8.43gN-eq/kg , 晚稻氮足迹较早稻氮

足迹有所提高, 增加幅度为 1.5%。水稻生产氮足迹主要贡献来源于田间 NH_3 挥发, 所占比例高达 95%, 早稻和晚稻 NH_3 挥发量相当。其次为稻田 NH_4^+ 的淋溶, 早稻、晚稻和双季稻所占氮足迹比例约为 2.4%。早稻、晚稻农资投入带来的氮足迹分别为 0.13、0.10 和 0.12gN-eq/kg 。稻田 NO_3^- 淋溶和 N_2O 排放所带来的活性氮损失量最低, 早稻和晚稻贡献度均不足 1%。

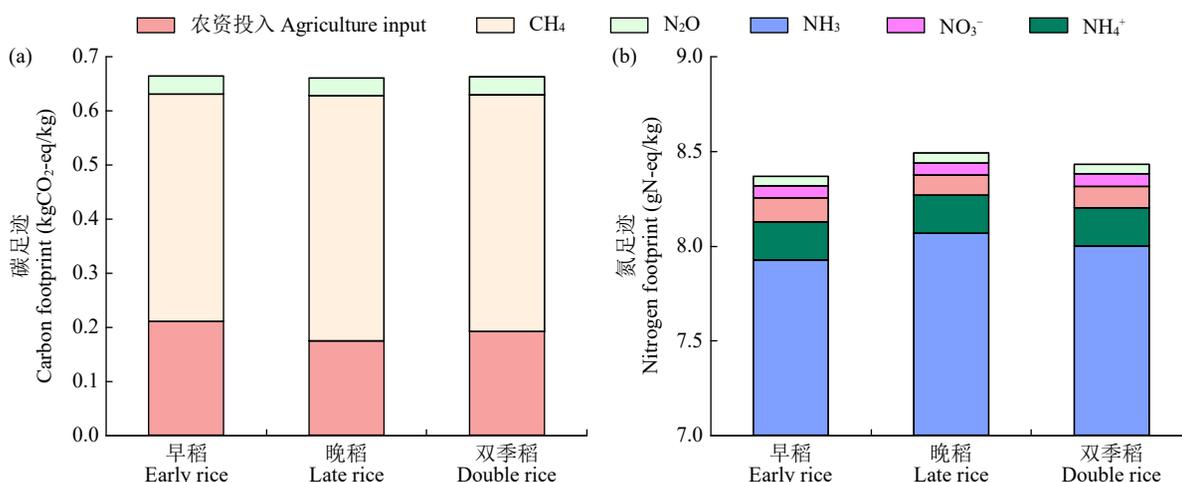


图 3 长江流域双季稻生产碳足迹和氮足迹构成
Fig.3 Mean proportions of the carbon footprint and nitrogen footprint of double rice in Yangtze River

2.2 长江流域双季稻生产间接碳排放和氮排放

从表 2 可以看出，早稻间接温室气体排放量比晚稻略大一些，双季稻、早稻和晚稻农业投入分别贡献了 2741.2、1445.0 和 1296.2kgCO₂-eq/hm² 的 CO₂ 排放量。其中，柴油投入造成的温室气体排放是农业投入温室气体排放总量中最显著的部分，早稻、晚稻和双季稻所占比例分别为 44.0%、47.0% 和 45.4%。与此同时，早稻生产农业机械操作带来的温室气体排放量较晚稻更多，提高了 4.2%。继柴油消耗之后，肥料是间接温室气体排放的第二大排放源，分别占到总间接排放量的 33.8%、42.4% 和 37.9%。不同形式合成肥料排放的温室气体表现为氮肥 > 钾肥 > 磷肥。农膜生产所带来的温室气体排在第 3 位，稍高于种子所产生的碳足迹，而由于农

膜可以重复利用，晚稻生产过程中不再产生由农膜引起的碳足迹。灌溉耗电所带来的温室气体排放量较低，早稻和晚稻分别为 21.5 和 29.4kgCO₂-eq/hm²。农药（除草剂、杀虫剂和杀菌剂）的温室气体排放量最低，早稻、晚稻和双季稻所占比例分别为 1.3%、1.8% 和 1.5%，其中，杀虫剂和杀菌剂所占比例较大。早稻间接氮排放稍大于晚稻间接氮排放，提高了 11.5%。与温室气体排放类似，柴油消耗的氮排放量也占农业投入总氮排放量的最大比例。其次为化肥投入，所占比例介于 11.7%~15.3%。不同形式的合成化肥的排放量与温室气体排放的顺序一致。早稻的种子和薄膜的氮排放量也高于晚稻的排放量。在 2 种水稻生产中，农药仍然是最不重要的氮排放源，在早期和晚稻产量中占比为 1% 左右。

表 2 长江流域双季稻生产间接碳排放和氮排放特征
Table 2 Characteristics of indirect carbon emissions and nitrogen (Nr) emissions of double rice production in Yangtze River

种类 Item	碳排放 Carbon emission (kgCO ₂ -eq/hm ²)			氮排放 Nr emission (gN-eq/hm ²)		
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	双季稻 Double rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	双季稻 Double rice
柴油 Diesel	635.9±157.9	608.8±147.6	1244.7±279.6	607.8±151.0	582.0±141.1	1189.8±267.3
氮肥 N	383.4±82.6	423.5±97.0	806.9±165.1	77.0±16.6	85.1±19.5	162.1±33.2
磷肥 P ₂ O ₅	39.5±19.4	53.9±29.4	93.5±44.4	21.7±10.6	29.6±31.8	51.3±35.6
钾肥 K ₂ O	66.2±28.0	72.1±28.6	138.2±52.2	3.0±1.3	3.3±1.3	6.3±2.4
灌溉 Irrigation	21.5±13.4	29.4±16.2	50.8±27.6	19.9±12.4	27.2±15.0	47.1±25.6
农膜 Film	164.4±33.1	—	164.4±33.1	87.0±17.5	—	87.0±17.5
种子 Rice seed	115.5±57.9	85.7±47.7	201.1±86.3	47.7±23.9	35.4±19.7	83.1±35.6
除草剂 Herbicides	2.0±0.8	3.5±2.1	5.4±2.2	0.9±0.4	1.5±0.9	2.4±1.0
杀虫剂 Insecticides	8.1±3.7	11.4±6.7	19.5±8.2	1.7±0.8	2.4±1.4	4.2±1.7
杀菌剂 Fungicides	8.6±3.9	8.1±3.9	16.6±7.0	5.7±2.6	5.4±2.6	11.1±4.7
总体 Total	1445.0±201.2	1296.2±207.8	2741.2±379.6	872.9±160.8	771.8±157.3	1644.3±291.7

2.3 长江流域双季稻不同种植规模碳足迹和氮足迹分析

不同种植规模的双季稻生产碳足迹和氮足迹情况见表 3。由表 3 可知，双季稻碳足迹、氮足迹与种植规模呈负相关性，即碳、氮足迹随着种植规模的增大而呈下降趋势。进一步将种植规模分为一般农户（低于 0.7hm²）、家庭农场（0.7~3.3hm²）

和种粮大户（高于 3.3hm²）3 种类型进行研究。双季稻单位产量碳足迹分别为 0.80、0.62、0.53kg CO₂-eq/kg，氮足迹分别为 12.04、9.67 和 6.73g N-eq/kg，不同种植规模之间存在显著差异。比较同种规模等级下发现，早稻和晚稻碳足迹大小相近，而氮足迹相差较大，晚稻氮足迹较早稻提高了 6.3%~17.8%，其中小规模差距较大。

表 3 长江流域水稻不同种植规模碳足迹和氮足迹
Table 3 Carbon and nitrogen footprints of double rice at different cropping scopes in middle and lower reaches of the Yangtze River

项目 Item	种植规模 Cropping scope		
	种粮大户 Large-scale grain planter (23)	家庭农场 Family farm (13)	一般农户 General farmer (40)
碳足迹 Carbon footprint (kgCO ₂ -eq/kg)	0.53±0.03c	0.62±0.05b	0.80±0.10a
氮足迹 Nitrogen footprint (gN-eq/kg)	6.73±1.53c	9.67±1.11b	12.04±1.13a

不同小写字母表示不同种植规模间的差异显著水平 ($P < 0.05$)

Different small letters indicate significant differences between farm size classes ($P < 0.05$)

2.4 长江流域双季稻氮肥投入量和灌溉用量对水稻产量的影响

长江流域水稻生产灌溉量、氮肥投入量与产量的关系如图 4 所示。水稻产量随着灌溉量和氮肥投入量的增加先升高后降低。当灌溉量和氮肥投入量分别达到 359.0mm 和 337.5kg/hm² 时，水稻产量达

到峰值。说明水稻生产的灌溉量、氮肥存在低投入高产量的最佳施用量。从图 4 中可以看出，约有 53.1% 的地块水稻氮肥投入超过最佳化肥施用量，54.9% 的地块水稻灌溉量超过最佳灌溉量，说明长江流域水稻生产部分农户存在氮肥和灌溉量投入过高，造成温室气体和活性氮排放增加的现象。

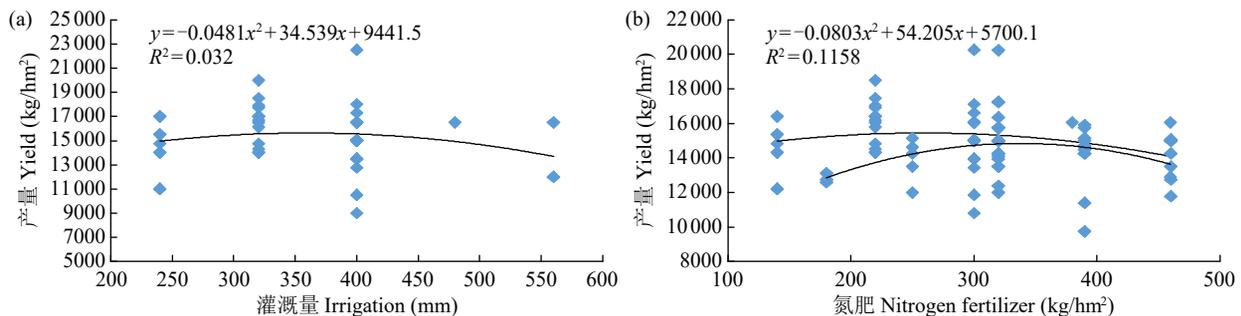


图 4 水稻产量与灌溉量和氮肥投入量的关系

Fig.4 Relationship of actual yield of rice and irrigation amount and N fertilizer input

2.5 稻农基本特征与碳氮足迹大小关系解析

采用回归分析法，对全部 112 个样本数据进行回归处理，结果如表 4 所示。由表 4 可知，农户年龄越大对增大碳氮足迹有正面促进作用，并通过显著性检验，原因可能在于年老的农户对农田偏向于粗放型管理、农资成本投入过大等。提高农户知识水平、扩大农场规模和提高机械化程度有利于减少碳氮足迹大小，主要在于农户受教育水平越高，对新事物的分析和理解更加透彻，也会更具有冒险精神，因此更可能采纳低碳绿色环保的农作技术。而农产规模越大，机械化程度越高，农田集约化程度

越高，单位面积的农资投入会相对较少，同时会在一定程度上提高作物产量。农户低碳绿色农业认知对降低碳足迹大小具有显著正向影响，稻农对低碳绿色农业认知能力每提高 1 个单位，对碳足迹和氮足迹降低贡献率分别为 5.3% 和 6.5%。这部分农户群体具有较强的社会责任感和使命感，在农技选择上会更加倾向于低碳绿色种植模式，从而减少作物生产碳氮足迹。从农业生态环境来看，土壤肥力状况和灌溉水平与碳氮足迹大小呈负相关，并且通过显著性检验，和预期相符。土壤肥力和灌溉条件越差，往往施用化肥量越多，机械耗能也越大，从而

在一定程度上提高作物生产碳氮足迹。技术支持对降低碳、氮足迹起到正向作用，并通过显著性检验。每提高一个技术支持单位，对碳足迹和氮足迹降低贡献率分别高达 6.1%和 6.0%。

表 4 基于回归模型的系数估计和边际效应分析
Table 4 Coefficient estimates and marginal effects of the Poisson regression model

解释变量 Explaining variable	碳足迹 Carbon footprint		氮足迹 Nitrogen footprint	
	回归系数 Coefficient of estimate	边际效应 Marginal effect	回归系数 Coefficient of estimate	边际效应 Marginal effect
性别 Gender	0.115(0.058)	0.018(0.009)	0.216(0.108)	0.033(0.017)
年龄 Age	0.061(0.031)*	0.009(0.005)*	0.044(0.022)**	0.007(0.003)**
教育 Education	-0.330(-0.165)*	-0.063(-0.032)**	-0.345(-0.173)*	-0.066(-0.033)*
耕作年限 Experience	-0.052(-0.026)	-0.008(-0.004)	-0.033(-0.017)	-0.005(-0.003)
耕作面积 Farm size	-0.053(-0.027)*	-0.008(-0.004)*	-0.067(-0.034)*	-0.010(-0.005)*
气候变化认知 Climate change awareness	-0.040(-0.020)	-0.006(-0.003)	-0.058(-0.029)	-0.009(-0.005)
低碳绿色认知 Low carbon awareness	-0.336(-0.168)*	-0.053(-0.027)**	-0.412(-0.206)*	-0.065(-0.033)*
风险规避意识 Risk aversion	-0.182(-0.091)	-0.028(-0.014)	-1.303(-0.652)	-0.201(-0.101)
农业收入比例 Farm income ratio	0.162(0.081)	0.026(0.013)	0.173(0.087)	0.027(0.014)
机械拥有量 Machinery ownership	-0.173(-0.087)*	-0.028(-0.014)*	-0.048(-0.024)*	-0.008(-0.004)*
土壤肥力状况 Soil fertility deficiency	-0.229(-0.115)*	-0.038(-0.019)**	-0.121(-0.061)*	-0.020(-0.011)*
灌溉条件 Sufficient water irrigation	-0.220(-0.110)***	-0.037(-0.018)**	-0.145(-0.073)**	-0.024(-0.012)**
信贷途径 Credit access	0.113(0.057)	0.019(0.010)	0.159(0.080)	0.027(0.014)
技术支持 Technical support	-0.350(-0.175)***	-0.061(-0.031)**	-0.341(-0.171)***	-0.060(-0.031)***

“*”、“***”、“****”表示各指标相关性达到显著水平 ($P < 0.05$)、($P < 0.01$)、($P < 0.001$)

“*”, “***” and “****” indicate that the correlation of each index reaches a significant level at $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectively

3 讨论

本研究得出，长江流域双季稻生产单位产量碳足迹和单位产值碳足迹分别为 0.63kgCO₂-eq/kg 和 0.25kgCO₂-eq/CNY，低于全国年均单位产量碳足迹 (0.89kgCO₂-eq/kg)^[16]，原因可能在于我国地缘辽阔，各省份气候资源和农资投入水平不尽相同。例如，我国北方地区降雨量较少，从而间接导致灌溉量的提高，无形中提高了灌溉用电带来的相关碳足迹。同时，长江流域因为其较好的光温水土资源，双季稻单位面积产量普遍高于其他稻作区。不同区域内因其种植制度、农作措施及社会经济的差别，导致该区域内的农作物的碳足迹也会出现显著差异^[17]。本研究表明，我国长江流域早稻和晚稻的氮足迹分别为 8.37 和 8.49gN-eq/kg，显著高于 Xue 等^[17]基于 LCA 方法计算的墨西哥谷物生产氮足迹 (2.65gN-eq/kg)，但低于 Pierer 等^[4]根据投入—产出法计算的奥地利谷物氮足迹大小。研究结果差异巨大主要来源于各研究单位对氮足迹计算方法的差别。此外，谷物生产过程中氮素排放和淋失的差异也是活性氮排放差异的一个主要原因。本研究发现，稻田 NH₃ 挥发是主要的氮足迹来源，与 Leip 等^[18]研究结果相似。在早稻和晚稻生育期，NH₃ 田

间挥发量随着氮肥施用量的增加呈线性增加的趋势^[19]。此外，晚稻生长季 NH₃ 挥发所产生的氮足迹对总氮足迹的贡献比早稻更大，这一趋势可归因于在晚稻生长季节后期的气温和土壤温度升高，促进了土壤脲酶活性，从而使水稻田里的土壤 NH₄⁺-N 浓度更高^[20]。本研究表明，降低稻田施氮量和提高氮肥利用率对降低双季稻氮足迹具有重要作用。研究^[21]发现，稻田氮循环涉及多种氮元素化学形式的复杂转化过程，氮污染造成的威胁比碳更严重。因此，有必要制定新的政策来促进和鼓励农业管理措施的改变。

本研究表明，长江流域水稻生产有 53.1% 的地块肥料投入过量，产量呈下降趋势。合成肥料是双季稻生产中农资投入碳足迹和氮足迹的主要排放源，占水稻季农资投入的 80% 以上。较低的施肥显然有利于减少温室气体和活性氮排放。Chen 等^[21]在湖南长沙长期氮肥优化试验表明，人工施氮量降低 20% 可以减少水稻上游生产环节的相关温室气体排放量，并减少稻田直接的活性氮损失。本研究指出，种植规模对双季稻碳、氮足迹的大小有显著影响，这与前人^[22]的研究结果类似。本研究结果指出种植规模大于 0.7hm² 的农场土壤固碳量要显著高于小规模种植农场 30% 以上。同时，也有相关研

究^[22]表明,低于 1hm²农场的总能量投入比 1~4hm²、4~10hm²和高于 10hm²的总能量投入要高,分别提高了 17%、21%和 34%。大规模种植有利于集约化管理的顺利进行,从而节约成本,提高水肥利用效率,促进低碳绿色农作制度的构建,可见种植规模化对实现绿色低碳农业具有积极作用。同时,农户受教育程度、对低碳绿色农业认知程度和获取技术渠道数量等对水稻生产碳足迹大小有重要影响。因此,通过强化对农户实施低碳绿色技术服务力度,进一步提升科技支撑作用,扩大科技研发力度,充分考虑技术实施地区的实际情况,因地制宜,积极形成从产品研发、技术转化到推广服务一整套的科技服务创新体系,从而打通从政府到工作人员再到农户的三道关卡。

从水稻生产的碳足迹和氮足迹构成来看,合成肥料和农机操作是双季稻生产中农资投入碳足迹和氮足迹的主要排放源。因此,长江流域水稻生产应优先考虑减少肥料和提高机械化效率,降低田间直接气体排放。通过采用配方施肥和缓控释肥等来提高肥料利用效率,减少肥料施用与排放。再者,恢复冬季绿肥种植,合理用地养地、部分替代化肥。本研究表明,规模化经营不仅仅能够实现利润的最大化,也能够大量减少温室气体和活性氮排放,从而实现经济和生态的双赢。今后,应结合长江流域多平原的天然地理环境优势,推进土地流转政策的实施,扩大生产经营规模,推进该地区水稻生产的规模化、机械化和现代化,做好农技补贴工作,确保及时、准确和到位。CH₄排放是水稻生产过程中的主要碳排放来源,因此减少田间灌溉水量可以有效减少 CH₄排放。大力推广水稻节水灌溉技术,研发农田新型高效节水灌溉技术,改善灌溉系统和灌溉技术,采用先进的调亏灌溉、蓄水型节水灌溉、膜下滴灌、根系分区交替灌溉等水肥一体化技术来提高水分利用效率,减少灌溉量。这些节肥、节水、减少农田 CH₄排放及机械化操作技术必将成为未来长江流域水稻生产应对气候变化和发展低碳农业的重要举措。

本研究数据来源于大规模的农户调查,采用生命周期评价法,较为全面地计算了水稻生产过程中的碳、氮足迹大小。但是,国内外对于足迹研究的系统边界存在一定的争议,本研究也不可避免,例如碳足迹计算中未考虑人力、畜力、机械磨损和土壤碳变化等;氮足迹研究中未考虑干湿沉降、生物

固氮、灌溉等环境氮输入。因此,双季稻碳足迹和氮足迹的计算结果与国内外学者存在一定的差异。另外,本研究根据文献^[10]的推荐方法,估计了稻田的 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放量,结果与实地测量相比,其价值不准确。然而,这是一种可靠的方法,用于估计在区域范围内的气体排放量。因此,需要进一步布置相关试验进行验证,从而提高数据准确性。

4 结论

需要通过优化合成肥料的施用来减少双季稻特别是晚稻的氮肥利用率。调整双季稻种植规模是平衡区域间双季稻碳足迹和氮足迹的可能措施。在农户层面,提高农户对低碳绿色农业的认知能显著降低碳、氮足迹,通过科技示范、技术服务推广能显著降低水稻生产碳、氮足迹。因此,在我国南方双季稻种植地区,有必要提高农户受教育水平,加强不同类型适应性行为的指导,采取肥料管理、提高机械化作业效率、节约灌溉等潜在措施来减缓气候变化,减少氮肥管理引起的环境污染。

参考文献

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- [2] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. 生态学报, 2015, 35(6): 1-17.
- [3] WRI. The greenhouse gas protocol initiative: the foundation for sound and sustainable climate strategies. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2009.
- [4] Pierer M, Winiwarter W, Leach A M, et al. The nitrogen footprint of food products and general consumption patterns in Austria. Food Policy, 2014, 49(1): 128-136.
- [5] Linquist B, Groenigen K J V, Adviento-Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. Global Change Biology, 2015, 18(1): 194-209.
- [6] Gao B, Ju X T, Zhang Q, et al. New estimates of direct N₂O emissions from Chinese croplands from 1980 to 2007 using localized emission factors. Biogeosciences, 2011, 8(10): 3011-3024.
- [7] Xu X, Lan Y. Spatial and temporal patterns of carbon footprints of grain crops in China. Journal of Cleaner Production, 2017, 146(10): 218-227.
- [8] 米松华, 黄祖辉, 朱奇彪, 等. 农户低碳减排技术采纳行为研究. 浙江农业学报, 2014, 26(3): 797-804.
- [9] 刘乃栋, 胡浩, 胡中应, 等. 江苏省水稻生产的碳排放结构特征和影响因素研究——基于农户生产投入和规模的视角. 安徽农业科学, 2014, 42(13): 4121-4124.
- [10] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories programme (Hayama, Kanagawa). Japan, 2006.

- [11] 肖玉. 中国稻田生态系统服务功能及其经济价值研究. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
- [12] 薛建福. 耕作措施对南方双季稻田碳、氮效应的影响. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [13] Xue J F, Pu C, Liu S L, et al. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in southern China. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 249-257.
- [14] ISO 14044. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. International Organization for Standardization, 2006.
- [15] Guinée J B, Gorrée M, Heijungs R, et al. Life cycle assessment: an operational guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2002.
- [16] Cheng K, Pan G X, Smith P, et al. Carbon footprint of China's crop production-an estimation using agro statistics data over 1993-2007. *Agriculture Ecosystems Environment*, 2011, 142: 231-237.
- [17] Xue X B, Landis A E. Eutrophication potential of food consumption patterns. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(16): 6450-6456.
- [18] Leip A, Weiss F, Lesschen J P, et al. The nitrogen footprint of food products in the European Union. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 152: 20-33.
- [19] Wang C, Zhou W, Li Z Z, et al. Effects of different nitrogen application rates on ammonia volatilization from paddy fields under double-harvest rice system. *Plant nutrition and fertilizer Science*, 2012, 18(2): 349-358.
- [20] Sutton M A, Oenema O, Erisman J W, et al. Too much of a good thing. *Nature*, 2011, 472(7342): 159-161.
- [21] Chen Z, Fu C, Zhang H, 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. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(24): 24781-24795.
- [22] Feng S, Tan S, Zhang A, et al. Effect of household land management on cropland topsoil organic carbon storage at plot scale in a red earth soil area of South China. *Journal of Agricultural Science*, 2011, 149: 557-566.

Carbon and Nitrogen Footprints of Double Rice Production in Yangtze River Based on Farm Survey Data ——A Case Study of Jiangxi and Hunan

Chen Zhongdu, Xu Chunchun, Ji Long, Fang Fuping

(China National Rice Research Institute, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract Quantifying the carbon footprint (CF) and nitrogen footprint (NF) of crop production can help identify key options to mitigate greenhouse gas and reactive nitrogen emissions from agriculture. Based on farmer's production survey data, the CF and NF of rice production in the Yangtze River were estimated. The results showed the CF and NF per unit yield for rice production in Yangtze River were 0.50-0.90kgCO₂-eq/kg and 5.20-13.17gN-eq/kg, respectively. The largest fraction of CF and NF of rice was the share of CH₄ emission and NH₃ volatilization, respectively. The scale of planting was negatively correlated with the CF and NF, and a decrease in the CF and NF were found in large sized farms (more than 3.3ha) by 33.8% and 44.1%, respectively, compared to smaller ones lower than 0.7ha. 53.1% of a field exposed to excessive fertilizer and 54.9% of a field exposed to excessive irrigation showed low yields. Improving farmers' education level and awareness of low-carbon and green agriculture could significantly reduce the CF and NF of rice production. Thus, developing technology that limits water and fertilizer consumption, as well as developing in farm machinery operation efficiencies and large scaled farms, strengthen the popularization of knowledge and culture level of farmers and low carbon green agriculture knowledge and guidance of different types of adaptive behavior; improve the innovation and promotion mechanism of low carbon green agriculture technology would be favorable toward mitigating climate change and eutrophication of double rice production in Yangtze River.

Key words Carbon footprint; Nitrogen footprint; Double rice cropping; Ecological assessment; Life cycle assessment