



不同再生稻栽培模式氮足迹及经济效益评估

李延实, 李成芳

Assessment of nitrogen footprint and economic profit under different ratooning rice cultivation modes in central China

LI Yanshi and LI Chengfang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20240005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价

Economic benefits and carbon footprint of a spring mung bean–summer maize cropping system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 910–919

不同杂交中稻品种在川南再生稻区的两季产量及头季稻米品质差异

Differences in the two–crop yields and main–crop rice qualities among different hybrid mid–season rice varieties in the ratooning rice region of southern Sichuan, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(7): 990–998

南方九省再生稻安全生长期及高温热害时空变化

Spatiotemporal changes in the characteristics of the safe growth period and high temperature damage of ratoon rice in nine southern provinces of South China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(12): 2061–2073

花生与玉米和芝麻间作的产量及经济效益分析

Yield and economic benefits of peanut intercropping with maize and sesame

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(8): 1285–1295

基于DNDC模型评估湖北省不同稻作系统不同管理措施温室气体排放的周年变化

Assessment of the annual greenhouse gases emissions under different rice–based cropping systems in Hubei Province based on the denitrification–decomposition (DNDC) model

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(9): 1480–1492

华北典型农田和畜禽场环境大气中活性氮化学组成和浓度变化特征

Atmospheric reactive nitrogen in typical croplands and intensive pig and poultry farms in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(7): 1043–1050



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20240005

李延实, 李成芳. 不同再生稻栽培模式氮足迹及经济效益评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(4): 582-591
LI Y S, LI C F. Assessment of nitrogen footprint and economic profit under different ratooning rice cultivation modes in central China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 582-591

不同再生稻栽培模式氮足迹及经济效益评估*

李延实, 李成芳**

(华中农业大学植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室 武汉 430070)

摘要: 有关不同栽培措施下再生稻田温室气体排放、碳足迹与产量变化研究已取得较大进展, 然而不同再生稻栽培模式氮足迹尚不明确。因此, 本研究通过大田试验, 采用生命周期法, 研究了不同再生稻栽培模式 [常规栽培模式 (CM) 和两个优化栽培模式 (OM1 和 OM2)] 对水稻产量、氮足迹与经济效益的影响。其中, CM 模式采用人工插秧、常规施肥、浅水淹灌、留茬高度 20 cm 与秸秆不还田等传统再生稻栽培技术, OM1 模式采用机插秧、一次性缓释肥施用、干湿交替、头季留茬高度 20 cm 与秸秆还田, OM2 模式采用机插秧、氮肥深施、干湿交替、头季留茬高度 40 cm 与秸秆还田配施腐熟剂。结果表明, OM2 再生季产量和稻季总产量最高, 较 CM 和 OM1 分别提高再生季产量 37.1% ($P<0.05$) 和 28.1% ($P<0.05$)、总产量 21.7% 和 12.5% ($P<0.05$)。对于再生稻氮足迹构成, OM2 具有最高间接活性氮排放。对于直接活性氮排放, 3 个模式 N_2O 排放无显著差异; 但对于头季稻 NH_3 挥发, OM2 比 CM 显著降低 14.4% ($P<0.05$)。因此, OM2 具有最低周年活性氮排放, 分别比 CM 和 OM1 显著降低 10.9% ($P<0.05$) 和 2.2% ($P<0.05$)。对于再生稻氮足迹, OM2 比 CM 和 OM1 分别显著降低 26.9% ($P<0.05$) 和 13.1% ($P<0.05$)。此外, OM2 经济效益最高, 分别较 OM1 和 CM 提高 20.9% 和 29.2%。本研究表明, OM2 模式是一项降低氮足迹和提高经济效益的可持续再生稻栽培模式, 值得在我国南方再生稻区推广。

关键词: 再生稻; 活性氮排放; 氮足迹; 经济效益

中图分类号: S314

Assessment of nitrogen footprint and economic profit under different ratooning rice cultivation modes in central China*

LI Yanshi, LI Chengfang**

(College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Significant progress has been made in studying greenhouse gas emissions, carbon footprints, and yield changes in ratooned rice fields across diverse cultivation practices. However, the nitrogen footprints of different ratooning rice cultivation methods remain unclear. Therefore, this field experiment used the life cycle assessment to study the effects of different ratooning rice cultivation modes [conventional cultivation mode (CM) and two optimized cultivation modes (OM1 and OM2)] on rice yield, nitrogen footprint, and economic outcomes. Among the three modes, the CM mode adopted traditional ratooning rice cultivation techniques, such as artificial transplanting, conventional fertilization, shallow flooding irrigation, stubble height of 20 cm, and excluding straw returning practices. The OM1 mode adopted mechanical transplanting, one-time application of slow-release fertilizer, dry-wet irrigation alternation, stubble height of 20 cm, and straw returning. The OM2 mode adopted mechanical transplanting, deep application of nitrogen fertilizer, dry-wet irrigation alternation, stubble height of 40 cm, and straw returning along with a decomposing agent. The results

* 国家重点研发计划项目 (2023YFD2301300) 资助

** 通信作者: 李成芳, 主要从事农业生态与耕作制度研究。E-mail: lichengfang@126.com

李延实, 主要从事稻田生态研究。E-mail: 2158085497@qq.com

收稿日期: 2024-01-03 接受日期: 2024-02-05

* The study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFD2301300).

** Corresponding author, E-mail: lichengfang@126.com

Received Jan. 3, 2024; accepted Feb. 5, 2024

showed that OM2 had the highest yield in the ratooning season and the total yield in the rice season, which increased the yield in the ratooning season by 37.1% ($P<0.05$) and 28.1% ($P<0.05$) and the total yield by 21.7% and 12.5% ($P<0.05$), respectively, in comparison to CM and OM1. OM2 had the highest indirect active nitrogen emissions. In the context of direct active nitrogen emissions, there were no significant differences in the N_2O emissions among the three modes. However, OM2 significantly reduced NH_3 volatilization by 14.4% ($P<0.05$) in comparison to CM for main crop. Therefore, OM2 had the lowest annual active nitrogen emissions, which were significantly lower than CM and OM1 by 10.9% ($P<0.05$) and 2.2% ($P<0.05$), respectively. The nitrogen footprint of OM2 was significantly lower than that of CM and OM1 by 26.9% ($P<0.05$) and 13.1% ($P<0.05$), respectively. OM2 had the highest economic benefit, which was 20.9% and 29.2% higher than OM1 and CM, respectively. This study showed that the OM2 is a sustainable ratooning rice cultivation mode that effectively reduces nitrogen footprint while enhancing economic benefits. The potential for promoting this mode is substantial in the ratooning rice area of southern China.

Keywords: Ratooning rice; Reactive nitrogen emissions; Nitrogen footprint; Economic benefits

再生稻是头季稻收获后,其稻桩上休眠芽在适宜条件下再长一茬的水稻(*Oryza sativa*)^[1]。我国适宜再生稻种植的面积约为1328万 hm^2 ,其中有564万 hm^2 适合种植再生稻而不适合种植双季稻,因此我国再生稻发展潜力大^[1-2]。目前,我国水稻种植模式处于转型时期,面临劳动力短缺、生产成本增长快、环境污染以及经济效益低等问题^[3]。转型时期种植再生稻具三方面的意义。首先,再生稻种植可降低劳动成本,缓解农忙以及减轻劳动强度^[4]。其次,发展再生稻有利于增加产量,促进农民增收,是精准扶贫的有效方法^[5]。最后,再生季的稻米品质更优,更满足市场需求,符合供给侧结构性改革的要求,能有力推动水稻绿色生产发展^[6]。因此,发展再生稻可使得总产不降低或增加基础上,降低劳动投入和生产成本,保障水稻生产经济效益。总之,发展再生稻对于促进水稻可持续生产和保障国家粮食安全具有重要意义。

目前,关于施肥、水分管理、头季留茬高度、头季收获期等栽培措施对再生稻生理性状及产量影响的研究已取得较大进展^[7-10]。此外,对再生稻的温室气体排放和碳足迹评估也有相关报道^[11-12]。但是,这些研究仅分析了再生稻与传统单、双季稻的差异,对不同再生稻模式氮足迹的比较尚不明确。当前水稻生产平均氮肥利用率不到35%,其中活性氮排放是造成水稻氮肥利用率低的重要原因^[13]。氮足迹是人类活动或农产品生产周期过程中排放的直接和间接活性氮的总量^[14],氮足迹的评估能为量化土壤氮循环中活性氮排放对农业生态系统影响提供一种新的思路和方法。目前,对氮足迹的研究主要集中在粮食消费方面,这使得政策制定者可以从粮食供需和区域角度制定减氮政策^[14-15],但有关再生稻氮足迹的评估较缺乏。

氮足迹的评价方法包括自上而下的投入产出法和自下而上的生命周期法^[16]。相比投入产出法,生命

周期法多适用于微观尺度^[16]。采用生命周期法对作物进行氮足迹评估已取得一定进展。季国军等^[17]评价不同稻田轮作模式下单位面积和产量氮足迹,并指出不同轮作模式的氮足迹存在区域差异。另外,在长江流域,基于农户调查的双季稻和水稻-小麦(*Triticum aestivum*)轮作氮足迹评价也有报道^[16,18]。但是,基于生命周期评价的再生稻模式氮足迹的研究较少,尤其是不同再生稻模式间的比较。华中地区作为再生稻适宜推广的地区和优势产区^[3],由于“机收再生稻丰产高效技术”的大力推广,从2010年开始,湖北省再生稻种植面积从0.7万 hm^2 增到22.0万 hm^2 ^[19],周年产量达到13 $t\cdot hm^{-2}$ 左右^[20],与双季稻持平。因此,为了进一步提高再生稻在该地区的发展,弥补再生稻氮足迹研究的不足,本研究对华中地区不同再生稻模式氮足迹和经济效益进行了评价,以期合理的再生稻栽培提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验始于2019年10月,本文选取2020年10月至2021年10月进行研究。试验点位于湖北省武汉市花桥镇郑公塔(115°28'E, 29°48'N)。试验点海拔20.1 m,属亚热带季风湿润气候,年平均气温18.6℃,年平均降水量1140.8 mm。试验地区是湖北省主要的双季稻栽培区。试验点土壤类型(沙壤土)为潜育土(联合国粮食及农业组织分类)。试验前土壤有机碳含量为18.15 $g\cdot kg^{-1}$,全氮含量为1.33 $g\cdot kg^{-1}$,全磷含量为1.33 $g\cdot kg^{-1}$,全钾含量为3.23 $g\cdot kg^{-1}$,铵态氮含量为7.98 $mg\cdot kg^{-1}$,硝态氮含量为4.37 $mg\cdot kg^{-1}$,速效磷含量为9.85 $mg\cdot kg^{-1}$,速效钾含量为85.35 $mg\cdot kg^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,设3个再生稻模式,即3个处理,每个模式3次重复。模式包括1个常规再生稻栽培模式(CM)和2个再生稻优化栽培模式(OM1和OM2)。3种模式的农艺管理措施详

见表 1。小区面积为 40 m² (5 m×8 m)。各模式头季肥料用量均为 180 kg(N)·hm⁻²、150 kg(K₂O)·hm⁻² 和 90 kg(P₂O₅)·hm⁻², 再生季均为 90 kg(N)·hm⁻²、45

kg(P₂O₅)·hm⁻² 和 90 kg(K₂O)·hm⁻²。各模式水稻秧苗 (25 d 秧龄) 均于 4 月下旬移栽, 栽插密度为 13.3 cm×30.0 cm, 每穴 3 株。

表 1 不同再生稻模式下农艺管理措施
Table 1 Agronomical management practices under various ratooning rice modes

模式 Mode	移栽方式 Transplantation method	肥料管理 Fertilizer management	水管理 Water management	留茬高度 stubble height (cm)	秸秆管理 Straw management
CM	人工插秧 Artificial transplanting	常规施肥 Conventional fertilization	持续淹水 Continuous flooding	20	不还田 No straw return
OM1	机插秧 Machine transplanting	一次性缓释肥料 One-time slow release fertilizer	干湿交替 Alternate wetting and drying	20	还田 Straw return
OM2	机插秧 Machine transplanting	氮肥深施 Deep application of nitrogen fertilizer	干湿交替 Alternate wetting and drying	40	还田+腐熟剂 Straw return with inoculants

对于 CM 模式, 全生育期肥料由尿素 (46% N)、过磷酸钙 (12% P₂O₅) 和氯化钾 (60% K₂O) 提供。头季氮肥按 5:3:2 的比例在苗期、分蘖期和抽穗期表施, 所有磷肥和钾肥在苗期一次性施用。再生季氮肥于头季稻抽穗后 15~20 d 和头季稻收割后 7 d 施用, 两次氮肥施用比例为 6:4; 磷肥和钾肥在头季稻收获后 7 d 施用一次。水稻生长期间, 除在头季稻分蘖盛期、头季稻收割前 10 d 和再生稻收割前 7 d 排水外, 田面保持 3~5 cm 水层。头季稻收获时, 稻茬高度保持在 20 cm。

相对于 CM 模式, OM1 模式在肥料类型、水分管理和头季秸秆处理等方面进行优化。头季以缓释肥 (15% N、7% P₂O₅ 和 10% K₂O, 贵州天宝丰原生态农业科技有限公司) 结合过磷酸钙、氯化钾作为基肥; 再生季肥料施用与 CM 模式一致。水稻移栽至返青期间, 稻田保持 3~5 cm 浅水层, 之后采用干湿交替方式灌溉, 即当 15 cm 土层土壤水势达到 -15 kPa 时^[21], 复水到 3~5 cm。在头季稻收获后, OM1 模式保持与 CM 模式相同的留茬高度 (20 cm), 且将秸秆粉碎并覆盖于稻桩行间。

OM2 模式相对于 CM 模式主要在肥料施用方式、灌溉方式、头季留茬高度、头季秸秆处理与绿肥种植等方面优化。OM2 模式在整个水稻生长季氮、磷、钾肥的类型、施用量和施用时间均与 CM 模式相同。头季 90 kg(N)·hm⁻²、150 kg(K₂O)·hm⁻² 和 90 kg(P₂O₅)·hm⁻² 作为基肥深施于 10 cm 土层, 肥料深施的具体方法详见 Liu 等^[22]。同时, 采用与 OM1 模式相同的干湿交替灌溉。头季稻收获时, 留茬高度为 40 cm; 将水稻秸秆粉碎与腐熟剂 (由沃宝生物科技有限公司生产, 30 kg·hm⁻²) 混合覆盖稻茬之间。在再生稻收获前 7 d (10 月中旬), 将油菜 (*Brassica napus*) 种子按 15 kg·hm⁻² 直接播种于水稻行间。在次年 4 月初, 油菜粉碎后翻入土壤。

1.3 N₂O 和 NH₃ 测定

土壤中活性氮主要以 N₂O 及 NH₃ 的形式排放。因此, 在本研究中测量 N₂O 排放及 NH₃ 挥发。田间 N₂O 通量采用静态密闭箱法测定^[23]。密闭箱直径 50 cm, 高度 50 cm 或 110 cm, 高度取决于水稻生长。箱由 PVC 材料制成, 用保温材料包裹。在箱顶部设置采样孔, 连接三通阀进行气体采样。在箱内部的顶部安装 1 个温度计和 4 个风扇, 分别用于测量箱内部温度和混合箱内气体。从水稻移栽后至再生稻收获, 每隔 7 d 采集一次气样。气样采集时间在上午 8:00—11:00, 于 0 min、10 min、20 min、30 min 采集, 并记录温度。采用注射器采集 25 mL 气体样品, 然后转移到 25 mL 真空玻璃瓶中。采用气相色谱仪测定 N₂O 浓度。根据 4 个样品线性关系计算 N₂O 排放通量^[24]。

NH₃ 挥发采用通气法测定^[25]。采样装置 (直径 11 cm、高 30 cm) 由 PVC 管制成, 并在测定当天放置在田间。将 2 块直径 11 cm、厚度 2 cm 的海绵浸泡在 25 mL 的甘油磷酸溶液中, 分别置于装置的上、下两层。下层海绵放置在距水面 10 cm 处, 用于吸收稻田挥发的 NH₃; 上层海绵放置在装置顶部下方 2 cm 处, 用于防止大气与装置之间 NH₃ 交换。于施氮后第 1 天、3 天、5 天、7 天、14 天测定 NH₃ 通量, 之后每隔半个月测定一次, 采样时间为上午 9:30。取样后, 将海绵放入 500 mL 塑料瓶中, 加入 300 mL 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液, 振荡 1 h。铵态氮的提取采用靛酚蓝比色法测定^[26]。NH₃ 的挥发通量测量方法参见 Liu 等^[22]。试验期间 N₂O 和 NH₃ 的累积排放量计算方法参见 Li 等^[23]。

1.4 氮足迹研究边界及估算方法

本研究采用生命周期法评价氮足迹, 其研究边界为再生稻系统从种子播种到收获整个生育期内所产生的直接和间接活性氮排放总和 (图 1)。

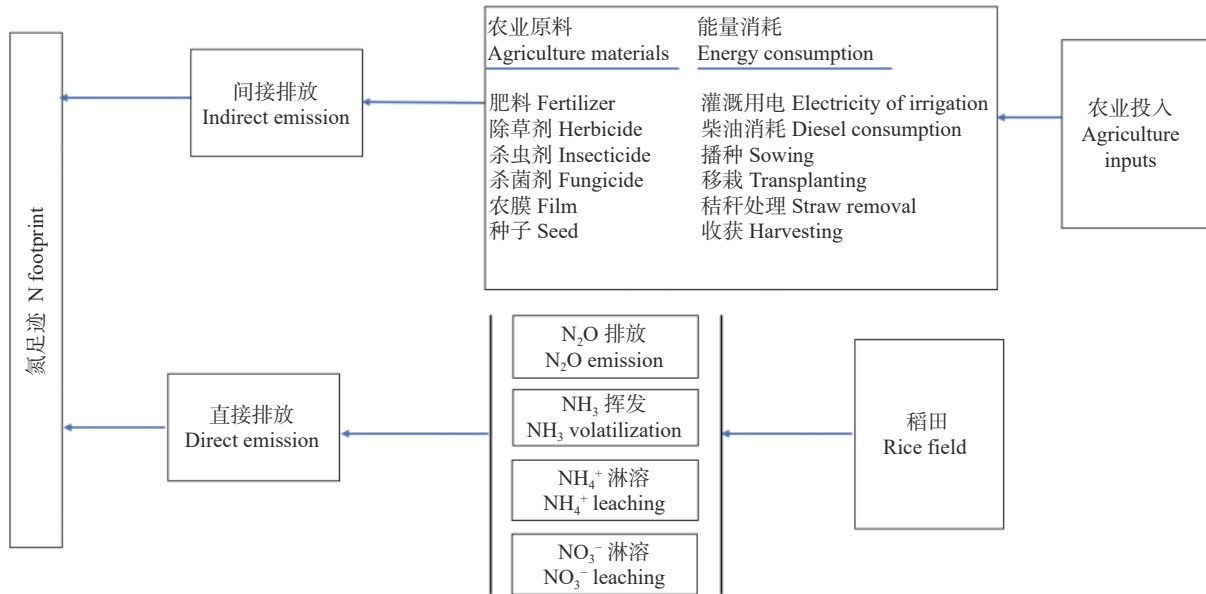


图 1 再生稻生产系统中氮足迹计算边界

Fig. 1 System boundary of nitrogen footprint in ratooning rice production system

直接活性氮排放包括 N₂O 和 NH₃ 的排放以及 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的淋溶。间接活性氮排放量为整个试验期间农业投入 (机械柴油、种子、化肥、农膜、农药等) 产生的总活性氮排放量。根据单位产量的总活性氮排放量计算氮足迹^[27], 如下所示:

$$NF = \frac{NE_{total}}{Y} \quad (1)$$

$$NE_{total} = NE_{indirect} + NE_{direct} \quad (2)$$

式中: NF 为氮足迹 [g(N-eq)·kg⁻¹]; Y 为水稻产量 (kg·hm⁻²); NE_{total} 为试验期间的总活性氮排放总量 [g(N-eq)·hm⁻²]; NE_{indirect} 是由农业投入引起的间接活性氮排放 [g(N-eq)·hm⁻²]; NE_{direct} 是由 NH₃ 挥发、N₂O 排放以及 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 淋溶产生的直接活性氮排放, 根据 ISO 14044 的方法计算 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的淋溶量, 并将施氮量转化为富营养化潜势加以估算^[16]。相关氮足迹计算公式如下所示:

$$NE_{indirect} = \sum_{i=1}^n Q_i \times J_i \quad (3)$$

$$NE_{direct} = NV_{NH_3} + NE_{N_2O} + NL_{NO_3^-} + NL_{NH_4^+} \quad (4)$$

$$NL_{NO_3^-} = FN \times \sigma \times 62/14 \times 0.238 \times 1000 \quad (5)$$

$$NL_{NH_4^+} = FN \times \gamma \times 18/14 \times 0.786 \times 1000 \quad (6)$$

式中: Q_i 为农资 i 的投入量 (kg·hm⁻²); J_i 为农资 i 的活性氮排放系数, 具体见表 2; NV_{NH₃} 为整个生产过程中由 NH₃ 挥发引起的活性氮排放 [g(N-eq)·hm⁻²]; NE_{N₂O} 为整个生产过程中由 N₂O 排放引起的活性氮排放

[g(N-eq)·hm⁻²]; NL_{NO₃⁻} 和 NL_{NH₄⁺} 分别是 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 淋溶造成的活性氮损失 [g(N-eq)·hm⁻²]。FN、σ、γ、62/14、18/14 分别为施氮量、NO₃⁻ 淋溶系数、NH₄⁺ 淋溶系数、NO₃⁻ 与 NO₃⁻-N 的分子质量比、NH₄⁺ 与 NH₄⁺-N 的分子质量比, σ 和 γ 源于《中国肥料淋溶系数手册》(2009 年); 0.238 和 0.786 分别为 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的富营养化系数。

表 2 农业投入资料的活性氮排放系数
Table 2 Reactive nitrogen emission coefficients of various materials for agricultural production

项目 Item	排放系数 Emission coefficient [g(N-eq)·kg ⁻¹]
柴油 Diesel	0.08×10 ⁻³
氮肥 N fertilizer	0.89×10 ⁻³
磷肥 P fertilizer	0.54×10 ⁻³
钾肥 K fertilizer	0.03×10 ⁻³
除草剂 Herbicide	4.49×10 ⁻³
杀虫剂 Insecticide	3.53×10 ⁻³
杀菌剂 Fungicide	7.00×10 ⁻³
农膜 Film	12.03×10 ⁻³
种子 Seed	0.76×10 ⁻³

1.5 经济效益分析

在水稻成熟时, 收割每个小区中央 8 m² 稻谷用于产量测定。经脱粒、烘干、称重后, 按籽粒含水率 13.5% 折算产量。

经济效益按产量收益扣除农业投入成本计算。产量收益为水稻产量乘以当地粮食价格。生产成本包括基于农资的成本 (农药、化肥、种子等)、人工成本、机械成本 (田间机械、水稻插秧机、收割机等)。

1.6 数据分析

试验数据采用 Excel 2016 进行分析处理。采用 SPSS 18.0 软件对所测指标进行单因素方差分析。采用最小显著差异法比较处理间平均值差异。

2 结果与分析

2.1 不同再生稻模式下水稻产量

本研究中,不同再生稻模式对头季、再生季和周年产量具有显著影响(表 3)。头季产量 OM1 和 OM2 比 CM 显著提高 8.8%~12.6% ($P<0.05$);再生季产量 OM2 显著高于其他模式 ($P<0.05$),比 CM、OM1 分别提高 37.1%、28.1%。因此,与 OM1 和 CM 相比,OM2 提高 12.5%~21.7% 的周年产量,其中 OM1 和 OM2 间的周年产量差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 不同再生稻模式下 NH_3 挥发与 N_2O 排放

在所有模式下,每次施氮后即出现 N_2O 排放和 NH_3 挥发通量峰值(图 2)。稻季 N_2O 通量变化范围为 $-1.0\sim 290.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。CM、OM1 和 OM2 模式 NH_3 通量范围分别为 $0.19\sim 10.65 \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.11\sim 9.50 \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.11\sim 5.89 \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 2b)。OM2

表 3 不同再生稻模式的水稻产量

Table 3 Rice yields under different cultivation modes of ratooning rice

模式 Mode	产量 Yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
	头季 Main crop	再生季 Ratooning crop	周年 Total
CM	7528±316b	4412±247b	11 940±562a
OM1	8194±280a	4722±148b	12 916±295b
OM2	8480±239a	6047±312a	14 527±509a

同列不同字母表示不同模式间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Different letters in a column mean significant differences among different modes at $P<0.05$ level.

模式平均 N_2O 排放通量较 CM 和 OM1 分别降低 23.5% 和 7.6%, OM2 模式平均 NH_3 挥发通量较 CM 和 OM1 分别降低 21.3% 和 6.9%。

再生稻栽培模式显著影响头季 NH_3 挥发,对再生季 NH_3 挥发无显著影响(表 4)。相比 CM 模式,OM1 和 OM2 模式头季 NH_3 挥发量显著降低 13.5%、14.4%。再生稻栽培模式对头季和再生季 N_2O 排放无显著影响。

2.3 不同再生稻模式下氮足迹及其构成

不同再生稻模式下氮足迹中间接活性氮排放占 2.6%~3.5%,直接活性氮排放占 96.5%~97.4%(表 5)。

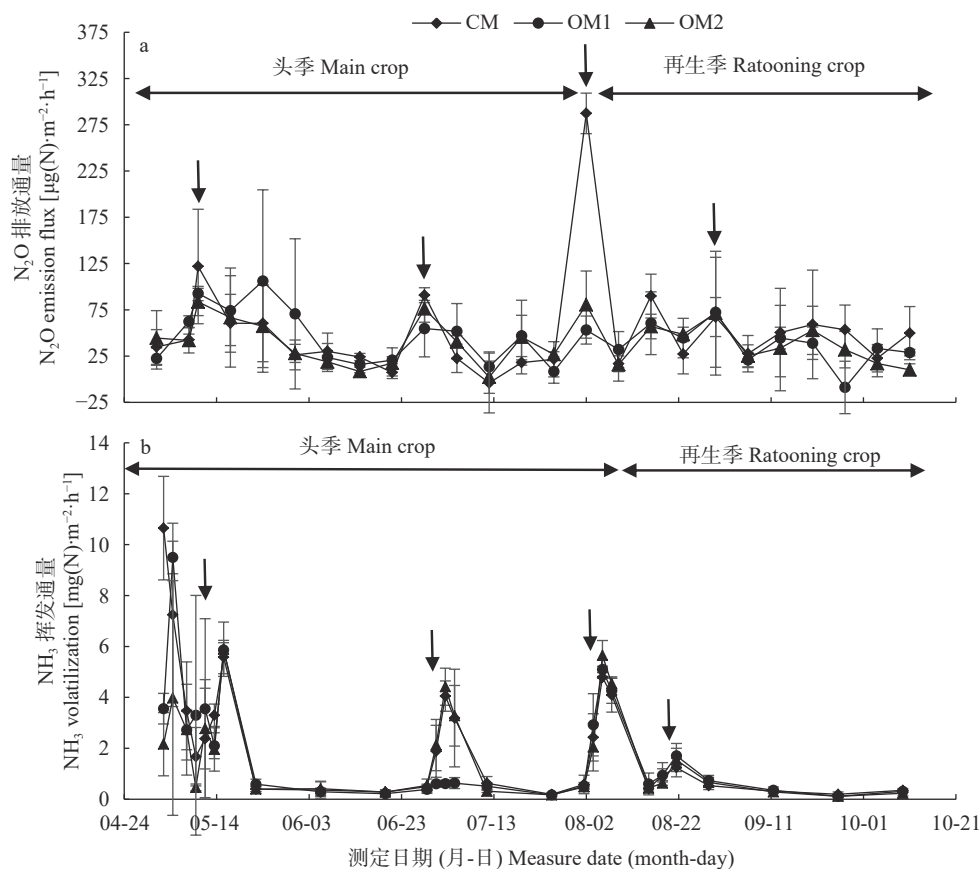


图 2 不同再生稻模式下 N_2O 排放通量 (a) 和 NH_3 挥发通量 (b) 的变化

Fig. 2 Changes in N_2O emission fluxes (a) and NH_3 volatilization fluxes (b) from ratooning rice under different cultivation modes

表 4 不同再生稻模式下 N₂O 和 NH₃ 的累积排放量
Table 4 Cumulative emissions of N₂O and NH₃ under different cultivation modes of ratooning rice
kg(N-eq)·hm⁻²

模式 Mode	头季 Main crop		再生季 Ratooning crop	
	N ₂ O	NH ₃	N ₂ O	NH ₃
CM	0.83±0.34a	29.29±2.09a	0.40±0.08a	4.89±0.19a
OM1	0.71±0.25a	25.33±2.20b	0.31±0.03a	5.64±1.35a
OM2	0.62±0.08a	25.08±1.43b	0.34±0.10a	4.82±0.96a

同列不同字母表示不同模式间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Different letters in a column mean significant differences among different modes at $P < 0.05$ level.

在间接活性氮排放中, 柴油占比最大, 为 31.3%~40.8%; 其次是氮肥, 为 28.8%~30.9%; 种子占比为 17.7%~19.8%; 磷肥、钾肥、除草剂、杀虫剂、杀菌剂和农膜占比为 12.6%~18.8%。在直接活性氮排放中, NH₃ 挥发占比最大, 为 89.1%~90.0%; N₂O 排放占比为 2.8%~3.2%; NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 淋溶总占比为 6.8%~8.1%。

表 5 不同再生稻模式下氮足迹变化
Table 5 Changes in nitrogen footprint under different cultivation modes of ratooning rice

氮足迹及其构成 Nitrogen footprint and its composition		CM	OM1	OM2
间接活性氮排放 Indirect reactive nitrogen emission [g(N-eq)·hm ⁻²]	柴油 Diesel	315.1	374.2	492.4
	氮肥 N fertilizer	311.1	280.4	347.1
	磷肥 P fertilizer	85.1	85.1	109.4
	钾肥 K fertilizer	8.6	8.6	9.9
	除草剂 Herbicide	10.5	8.4	13.3
	杀虫剂 Insecticide	4.9	4.9	4.9
	农膜 Film	72.2	7.0	7.0
	种子 Seed	191.4	191.4	213.7
	杀菌剂 Fungicide	8.4	8.4	8.4
	合计 Total	1007.3	968.4	1206.1
NH ₃ 挥发 NH ₃ volatilization [g(N-eq)·hm ⁻²]		34 175.7±2270.1a	30 968.0±1316.6ab	29 905.6±1211.8b
N ₂ O 排放 N ₂ O emission [g(N-eq)·hm ⁻²]		1233.2±262.7a	1021.8±224.9a	954.2±50.0a
NH ₄ ⁺ 淋溶 NH ₄ ⁺ leaching [g(N-eq)·hm ⁻²]		1199.3	1199.3	1199.3
NO ₃ ⁻ 淋溶 NO ₃ ⁻ leaching [g(N-eq)·hm ⁻²]		1397.5	1397.5	1504.8
周年活性氮排放 Annual reactive nitrogen emission [g(N-eq)·hm ⁻²]		39 013.0±2205.4a	35 555.0±1106.3b	34 770.0±1243.7b
氮足迹 Nitrogen footprint [g(N-eq)·kg ⁻¹ ·a ⁻¹]		3.27±0.04a	2.75±0.11b	2.39±0.08c

同行不同字母表示不同模式间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Different letters in a row mean significant differences among different modes at $P < 0.05$ level.

表 6 不同再生稻模式下的投入成本和经济效益
Table 6 Input costs and economic benefits of different ratooning rice modes

¥·hm⁻²

模式 Mode	成本 Cost									总计 Total	产量收益 Yield income	经济效益 Economic benefit
	农业资料 Agricultural materials			人工 Labor			机械 Machine					
	种子 Seed	农药 Pesticide	肥料 Fertilizer	育秧 Seedling culture	施肥 Applying fertilizer	喷药 Spraying	收获 Harvest	耕作 Tillage	移栽 Transplant			
CM	2700	1530	2199	2852	500	600	2400	1800	0	14581	29 849±1405c	15 468±1405c
OM1	2700	1530	4290	930	300	600	2400	1800	1200	15750	32 289±737b	16 539±737b
OM2	3150	1530	2419	930	500	600	2400	3600	1200	16329	36 318±1274a	19 989±1274a

同列不同字母表示不同模式间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Different letters in a column mean significant differences among different modes at $P < 0.05$ level.

3 讨论

3.1 不同栽培模式对再生稻产量的影响

再生稻优化栽培模式相对于 CM 模式提高了水稻产量,且 OM2 模式具有最高的再生季产量和周年总产量。这与不同模式间秧苗移栽方式、肥料运筹、水分管理和头季留茬高度等不同有关。首先,对于 OM2 模式,新鲜的油菜植株粉碎还田可以改善土壤物理结构,提高土壤速效氮、磷、钾含量^[28-29],从而提高水稻产量。其次,与 CM 模式的人工移栽相比,优化模式下机插能够提高水稻植株光温资源利用效率,降低病虫害发生,从而提高水稻产量^[30]。第三,优化模式的干湿交替灌溉(即当 15~20 cm 土壤水势为 -15 kPa 时稻田复灌)已被证明是减少温室气体排放同时提高水稻产量的有效途径^[31-33]。研究表明,干湿交替灌溉不影响水稻生理需水,即使在水分胁迫敏感阶段也是如此^[34]。此外,干湿交替灌水使籽粒灌浆期淀粉合成能力增强,从而促进籽粒发育^[35]。第四,OM1 模式缓释肥施用可以满足水稻植株在不同时期的氮素需求。有研究报道,施用缓释肥与干湿交替灌溉相结合,不仅可以增加水稻产量,而且能够提高水分利用效率^[36]。OM2 模式的氮肥深施可以促进氮肥与土壤的接触,有利于水稻根系对氮素的吸收,从而减少 NH₃ 挥发和氮淋溶损失,提高氮肥利用率和水稻产量^[22,37]。第五,OM2 模式下再生季产量高于其他两种模式,这可能是头季留茬高度不同造成的。在南方地区,头季留茬高度 40 cm 比留茬高度 20 cm 更能促进腋芽萌发^[38]。研究表明,与其他留茬高度相比,留茬高度为 40 cm 时‘丰两优香 1 号’可获得最高的再生季产量^[39]。第六,OM2 模式施用微生物腐熟剂可促进头季水稻秸秆腐解,提高土壤速效养分含量,从而提高再生季产量。

3.2 不同栽培模式对氮足迹及其构成的影响

相比 OM1 和 CM,OM2 模式具有最高的间接活性氮排放,这主要是由于种子和耕作机械等投入的增加(表 5)。3 种再生稻模式 N₂O 排放无显著差异。稻田 N₂O 排放主要受农艺措施的影响^[40]。与 CM 相比,OM2 模式油菜秸秆还田增加土壤硝化与反硝化的作用底物,进而促进稻田 N₂O 排放^[41];与此同时,OM2 模式采用的干湿交替灌溉能改善土壤通气性,从而导致更多的 N₂O 排放^[40,42]。然而,OM2 模式下氮肥深施可促进水稻氮素吸收,降低硝化与反硝化作用底物,降低 N₂O 排放^[37]。因此,OM2 模式下氮肥深施引起的 N₂O 减排可能抵消了秸秆还田和干湿交替灌溉引起的 N₂O 排放增加。此外,与 CM 模式相比,

OM1 模式下缓释肥释放的氮素可以满足水稻植株的需求^[43],进而降低硝化和反硝化反应底物浓度,最终减少了 N₂O 排放。另外,OM1 模式下干湿交替灌溉引起的 N₂O 排放增加可能被缓释肥料使用所抵消。因此,这使得本研究中不同再生稻模式间的 N₂O 排放无显著差异。

直接活性氮排放中的 NH₃ 挥发不仅占再生稻生产系统氮足迹的 80% 以上,而且是不同再生稻模式间氮足迹构成差异最大的部分。3 种再生稻模式中,优化模式比常规模式 NH₃ 挥发低,其中 OM2 模式 NH₃ 挥发最低(表 5)。优化栽培模式相对于 CM 模式头季 NH₃ 挥发量显著降低 13.5%~14.4%,其主要归因于头季氮肥优化管理。与 CM 模式采用常规施肥相比,OM2 模式采用氮肥深施。Liu 等^[22]指出,深施氮肥使得更多 NH₄⁺ 被土壤固定,进而降低了 NH₃ 挥发。同时,OM1 模式采用缓释肥料施用技术。先前研究表明,缓释肥施用后释放的氮素能有效匹配水稻生长需求,从而降低 NH₃ 挥发^[44]。然而,再生季 CM 和优化栽培模式之间 NH₃ 挥发没有显著差异(表 5),这一现象可能与再生季氮肥类型与施用量相同有关。

研究表明,不同种植系统中氮足迹主要来源于 NH₃ 挥发。如季国军等^[17]发现,在不同稻田轮作系统中,NH₃ 挥发占氮足迹的 52.2%~59.0%。同时,一项基于农户调查的双季稻氮足迹研究指出,NH₃ 挥发占氮足迹的 95%^[18]。本研究也表明,NH₃ 挥发是总活性氮排放的主要贡献者(表 5),这与上述研究结论类似。与旱地相比,稻田的淹水环境导致氧化还原电位较低,且其田面水 NH₄⁺ 浓度较高,这使 NH₃ 挥发成为稻田氮损失的主要途径^[22]。故在保证产量的条件下,减少华中地区再生稻稻田 NH₃ 挥发可以有效降低氮足迹。本研究中,氮足迹的变化范围为 2.39~3.27 g(N-eq)·hm⁻²(表 5),远低于我国南方双季稻 [10.47~10.89 g(N-eq)·hm⁻²]^[45]。这种差异意味着发展再生稻配合优化栽培措施相对于双季稻种植更有利于降低中国南方地区的氮足迹。

综上,虽然 OM2 模式具有最高的间接活性氮排放,但是大幅降低了 NH₃ 挥发,进而降低了总活性氮排放;同时,该模式具有最高的再生稻周年产量,因此氮足迹最低。以上结论表明,优化施肥方法(氮肥深施及缓释肥料)、采用机插秧、秸秆还田及配施腐熟剂和留茬高度 40 cm 等农艺管理措施可以有效地减少 NH₃ 挥发和提高水稻产量(表 3 和表 5),从而降低再生稻氮足迹。但是,在计算活性氮排放时,本研

究并未考虑由地表径流所引起的氮损失以及由能量消耗所产生的活性氮排放, 未来研究可补充该数据, 为再生稻氮足迹研究提供更有力的理论支撑。

3.3 不同栽培模式对再生稻经济效益的影响

经济效益是评价农业措施经济合理性的重要指标^[46]。虽然本研究中 OM2 模式投入成本最高, 但是 OM2 产量收益最高, 导致其具有最高的经济效益。这表明通过优化肥料运筹、水分管理、秸秆处理等农艺措施, 例如采用氮肥深施、干湿交替、秸秆还田配施腐熟剂, 可提高再生稻经济效益。前人研究表明, 与秸秆还田和持续淹水相比, 采用干湿交替以及秸秆还田配施腐熟剂可降低投入成本和产量收益, 提高经济效益^[33]; 氮肥深施较之氮肥表施可降低活性氮排放, 提高水稻氮素利用率和提高水稻产量收益, 进而提高稻田经济效益^[37]。同时, 与人工插秧相比, 机插秧可降低人工劳动成本, 提高水稻产量, 实现节本增效, 最终增加稻田经济效益^[47]。综上所述, OM2 模式经济效益最高, 但大田试验易受气候影响, 该模式的增产增收作用还需要进一步的验证。

4 结论

与 CM 模式相比, 优化栽培模式可以提高水稻产量, 减少 NH₃ 挥发, 降低氮足迹。其中, OM2 模式(插秧+氮肥深施+干湿交替+留茬高度 40 cm+秸秆还田配施腐熟剂)水稻产量最高, 氮足迹最低, 经济效益最高, 这表明 OM2 模式可作为降低氮足迹与提高水稻产量的可持续再生稻栽培模式在南方再生稻区推广。

参考文献 References

- [1] XU F X, ZHANG L, ZHOU X B, et al. The ratoon rice system with high yield and high efficiency in China: progress, trend of theory and technology[J]. *Field Crops Research*, 2021, 272: 108282
- [2] YUAN S, YANG C, YU X, et al. On-farm comparison in grain quality between main and ratoon crops of ratoon rice in Hubei Province, Central China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(15): 7259–7267
- [3] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考[J]. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(8): 845–850
PENG S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2014, 44(8): 845–850
- [4] 张建福, 肖晏嘉, 谢鸿光, 等. 影响水稻再生力 QTLs 位点与再生稻筛选体系研究进展[J]. *华南农业大学学报*, 2023, 44(6): 837–842
ZHANG J F, XIAO Y J, XIE H G, et al. Research progress on QTLs loci affecting rice retooing ability and screening system for ratoon rice[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2023, 44(6): 837–842
- [5] 江激宇, 张可, 王丽, 等. 再生稻经营规模对其生产效率的影响分析——基于安徽省再生稻种植户微观调研数据[J]. *云南农业大学学报(社会科学)*, 2021, 15(6): 107–112
JIANG J Y, ZHANG K, WANG L, et al. The influence of ratooning rice operation scale on its production efficiency: based on the micro-survey data of ratooning rice growers in Anhui[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science)*, 2021, 15(6): 107–112
- [6] 习敏, 涂德宝, 周永进, 等. 早熟籼稻低留茬机收再生丰产优质增效栽培技术[J]. *中国稻米*, 2023, 29(5): 93–95
XI M, TU D B, ZHOU Y J, et al. Cultivation technology of early Indica rice mechanized harvest with low stubble height for high yield, high quality and high efficiency in ratoon rice[J]. *China Rice*, 2023, 29(5): 93–95
- [7] HARRELL D L, BOND J A, BLANCHE S. Evaluation of main-crop stubble height on ratoon rice growth and development[J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(3): 396–403
- [8] SHAHRI M M, YAZDPOUR H, SOLEYMANI A, et al. Yield and yield components of ratoon crop of rice as influenced by harvesting at different plant height and time[J]. *Research on Crops*, 2012, 13(2): 408–411
- [9] ZHANG J W, LI W W, ZHOU Y, et al. Long-term straw incorporation increases rice yield stability under high fertilization level conditions in the rice-wheat system[J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(5): 1191–1197
- [10] ZHENG C, WANG Y C, YUAN S, et al. Heavy soil drying during mid-to-late grain filling stage of the main crop to reduce yield loss of the ratoon crop in a mechanized rice ratooning system[J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(1): 280–285
- [11] SONG K F, ZHANG G B, MA J, et al. Greenhouse gas emissions from ratoon rice fields among different varieties[J]. *Field Crops Research*, 2022, 277: 108423
- [12] XU Y, LIANG L Q, WANG B R, et al. Conversion from double-season rice to ratoon rice paddy fields reduces carbon footprint and enhances net ecosystem economic benefit[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152550
- [13] 肖小平, 李超, 唐海明, 等. 秸秆还田下减氮增密对双季稻田土壤氮素库容及氮素利用率的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(3): 422–430
XIAO X P, LI C, TANG H M, et al. Soil nitrogen storage and recovery efficiency in double paddy fields under reduced nitrogen dose and increased crop density[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(3): 422–430
- [14] PIERER M, WINIWARTER W, LEACH A M, et al. The nitrogen footprint of food products and general consumption patterns in Austria[J]. *Food Policy*, 2014, 49: 128–136
- [15] XUE X B, LANDIS A E. Eutrophication potential of food consumption patterns[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(16): 6450–6456
- [16] 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
- 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
- [17] 季国军, 纪洪亭, 程琨, 等. 江苏稻田轮作模式碳、氮足迹分析[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(3): 510–521
- JI G J, JI H T, CHENG K, et al. Analysis on carbon footprint and nitrogen footprint of paddy field rotation patterns in Jiangsu Province[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(3): 510–521
- [18] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 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[J]. 作物杂志, 2023(2): 229–237
- CHEN Z D, XU C C, JI L, et al. Carbon and nitrogen footprints of double rice production in Yangtze River based on farm survey data — A case study of Jiangxi and Hunan[J]. *Crops*, 2023(2): 229–237
- [19] YANG D S, PENG S B, QI M H, et al. Comparison of grain cadmium and arsenic concentration between main and ratoon crop in rice ratooning system[J]. *Food Chemistry*, 2023, 399: 134017
- [20] 王飞, 黄见良, 彭少兵. 机收再生稻丰产优质高效栽培技术研究进展[J]. 中国稻米, 2021, 27(1): 1–6
- WANG F, HUANG J L, PENG S B. Research and development of mechanized rice ratooning technology in China[J]. *China Rice*, 2021, 27(1): 1–6
- [21] DU X Z, HAO M, GUO L J, et al. Integrated assessment of carbon footprint and economic profit from paddy fields under microbial decaying agents with diverse water regimes in central China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 262: 107403
- [22] LIU T Q, FAN D J, ZHANG X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 80–90
- [23] LI C F, ZHANG Z S, GUO L J, et al. Emissions of CH₄ and CO₂ from double rice cropping systems under varying tillage and seeding methods[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 80: 438–444
- [24] ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, 15(4): 569–579
- [25] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205–209
- WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205–209
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- LU R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000
- [27] XU Q, HU K L, YAO Z S, et al. Evaluation of carbon, nitrogen footprint and primary energy demand under different rice production systems[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106634
- [28] SHEN J L, TANG H, LIU J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 188: 264–274
- [29] ASGHAR W, KATAOKA R. Different green manures (*Vicia villosa* and *Brassica juncea*) construct different fungal structures, including plant-growth-promoting effects, after incorporation into the soil[J]. *Agronomy*, 2022, 12(2): 323
- [30] CHEN J N, ZHANG R C, CAO F B, et al. Critical yield factors for achieving high grain yield in early-season rice grown under mechanical transplanting conditions[J]. *Phyton*, 2020, 89(4): 1043–1057
- [31] WANG Z Q, GU D J, BEEBOUT S S, et al. Effect of irrigation regime on grain yield, water productivity, and methane emissions in dry direct-seeded rice grown in raised beds with wheat straw incorporation[J]. *The Crop Journal*, 2018, 6(5): 495–508
- [32] MANEEPITAK S, ULLAH H, DATTA A, et al. Effects of water and rice straw management practices on water savings and greenhouse gas emissions from a double-rice paddy field in the Central Plain of Thailand[J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 107: 18–29
- [33] HAO M, GUO L J, DU X Z, et al. Integrated effects of microbial decomposing inoculant on greenhouse gas emissions, grain yield and economic profit from paddy fields under different water regimes[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150295
- [34] ZHANG W Y, YU J X, XU Y J, et al. Alternate wetting and drying irrigation combined with the proportion of polymer-coated urea and conventional urea rates increases grain yield, water and nitrogen use efficiencies in rice[J]. *Field Crops Research*, 2021, 268: 108165
- [35] DJAMAN K, MEL V, DIOP L, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation regime and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of irrigated rice in the Sahel[J]. *Water*, 2018, 10(6): 711
- [36] CAO X C, YUAN L, LIU X X, et al. Benefits of controlled-release/stable fertilizers plus biochar for rice grain yield and nitrogen utilization under alternating wet and dry irrigation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2021, 129: 126338
- [37] LIU T Q, LI S H, GUO L G, et al. Advantages of nitrogen fertilizer deep placement in greenhouse gas emissions and net ecosystem economic benefits from no-tillage paddy fields[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121322
- [38] 林文雄, 陈鸿飞, 张志兴, 等. 再生稻产量形成的生理生态特性与关键栽培技术的研究与展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 392–401
- LIN W X, CHEN H F, ZHANG Z X, et al. Research and prospect on physio-ecological properties of ratoon rice yield formation and its key cultivation technology[J]. *Chinese Journal*

- of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 392–401
- [39] 高长清, 王记安, 刘长兵, 等. 留桩高度对丰两优香 1 号再生稻生长及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2015(9): 9, 11
GAO C Q, WANG J A, LIU C B, et al. Effect of stubble height on growth and yield of Fengliangyouxiang No.1 ratooning rice[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(9): 9, 11
- [40] FENG Z Y, QIN T, DU X Z, et al. Effects of irrigation regime and rice variety on greenhouse gas emissions and grain yields from paddy fields in central China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 250: 106830
- [41] 邓桥江, 曹凑贵, 李成芳. 不同再生稻栽培模式对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1373–1380
DENG Q J, CAO C G, LI C F. Effects of different ratooning cultivation modes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1373–1380
- [42] FANGUEIRO D, BECERRA D, ALBARRÁN A, et al. Effect of tillage and water management on GHG emissions from Mediterranean rice growing ecosystems[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 150: 303–312
- [43] ZHANG Z S, CHEN J, LIU T Q, et al. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144: 274–281
- [44] LIU T Q, HUANG J F, CHAI K B, et al. Effects of N fertilizer sources and tillage practices on NH₃ volatilization, grain yield, and N use efficiency of rice fields in central China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 385
- [45] XUE J F, PU C, LIU S L, et al. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 249–257
- [46] SHENG F, CAO C G, LI C F. Integrated rice-duck farming decreases global warming potential and increases net ecosystem economic budget in central China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(23): 22744–22753
- [47] 叶鑫, 宫亮, 金丹丹, 等. 机插秧同步测深施肥对水稻产量形成和经济效益的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 429–437
YE X, GONG L, JIN D D. Effects of simultaneous lateral deep fertilization with mechanical transplanting on yield and economic benefit of rice in northern China[J]. *Chinese Journal of Soil science*, 2022, 53(2): 429–437