

## 不同水旱轮作模式全生命周期温室效应及经济效益评价

岳骞, 吴思远, 张岳芳, 盛婧, 郭智, 陈丹艳, 汪超, 徐向瑞, 王鑫, 宗焦

### 引用本文:

岳骞, 吴思远, 张岳芳, 盛婧, 郭智, 陈丹艳, 汪超, 徐向瑞, 王鑫, 宗焦. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1433>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

*农业环境科学学报*. 2021, 40(8): 1829–1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

#### 厢作免耕下生态种养对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响

陈璐, 陈灿, 黄璜, 任勃, 王忍, 梁玉刚, 周晶

*农业环境科学学报*. 2021, 40(6): 1354–1365 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015>

#### 不同遮阴处理下施肥对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

*农业环境科学学报*. 2021, 40(2): 464–472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

#### 延长烤田时间减少紫云英翻压稻田甲烷排放

王赢, 林余涛, 杨文斌, 王家嘉, 左双宝, 宋朝辉, 周楠楠

*农业环境科学学报*. 2022, 41(8): 1836–1845 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1448>

#### 有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

*农业环境科学学报*. 2021, 40(9): 2039–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.

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.



开放科学 OSID

# 不同水旱轮作模式全生命周期温室效应及经济效益评价

岳骞<sup>1</sup>, 吴思远<sup>1,2\*</sup>, 张岳芳<sup>1</sup>, 盛婧<sup>1</sup>, 郭智<sup>1</sup>, 陈丹艳<sup>2</sup>, 汪超<sup>3</sup>, 徐向瑞<sup>4</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 宗焦<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 金陵科技学院园艺园林学院, 南京 210038; 3. 江苏龙环环境科技有限公司, 江苏 常州 213000; 4. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要:**以不同水旱轮作稻田为研究对象,对比分析不同轮作模式温室气体排放特征,挖掘关键影响因素,并将温室效应和成本-收益计量相结合,通过综合评价筛选环境友好、经济效益高的轮作模式。基于大田小区试验,设置休闲-水稻、紫云英-水稻、小麦-水稻、油菜-水稻、青饲小麦-水稻、蚕豆-水稻6种水旱轮作处理,采用静态箱-气相色谱法,于2020年6月—2021年5月进行CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放原位监测,通过结构方程模型挖掘影响CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的关键因素,采用全球增温潜势和成本-收益计算方法,评价不同轮作制度的环境和经济效应。结果表明:不同水旱轮作模式CH<sub>4</sub>累积排放量为95.6~173.3 kg·hm<sup>-2</sup>,排放量与冬茬秸秆还田量和水稻产量有关;N<sub>2</sub>O累积排放量为1.5~2.5 kg·hm<sup>-2</sup>,受施氮量、冬茬秸秆还田量、水稻产量和土壤有机质含量影响。增加氮肥施用量不仅可增加N<sub>2</sub>O排放量,而且会导致土壤有机质含量的降低;冬茬秸秆还田量、水稻产量的变化会导致CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的此消彼长,即秸秆还田量和水稻产量与CH<sub>4</sub>排放量呈正相关,而与N<sub>2</sub>O排放量呈负相关。青饲小麦-水稻轮作模式的经济效益为10 139元·hm<sup>-2</sup>,高于其他轮作模式。对比单位经济效益的温室气体排放量发现,尽管青饲小麦-水稻轮作模式周年N<sub>2</sub>O排放量最高、土壤固碳量低,但其单位经济收益的温室气体排放量仍最低(0.41 kg CO<sub>2</sub>e·元<sup>-1</sup>);紫云英-水稻轮作分别比油菜、小麦、休闲、蚕豆与水稻的轮作方式低51%、33%、20%和4%。不同水旱轮作方式下的稻田周年温室效应有显著差异,紫云英-水稻轮作的综合温室效应(3.1 t CO<sub>2</sub>e·hm<sup>-2</sup>)显著低于小麦-水稻轮作(5.4 t CO<sub>2</sub>e·hm<sup>-2</sup>)。研究表明,与其他轮作模式相比,紫云英-水稻和蚕豆-水稻轮作在保证较高经济收益的同时温室气体排放量相对较低,冬茬秸秆还田量、绿肥还田生物量是环境效应和经济效益协同的重要影响因素。

**关键词:**水旱轮作;CH<sub>4</sub>;N<sub>2</sub>O;水稻;经济效益;结构方程模型

**中图分类号:**S181;S344.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2022)08-1825-11 **doi:**10.11654/jaes.2021-1433

## Life cycle assessment on greenhouse effects and economic benefits for different paddy rice–upland rotation systems

YUE Qian<sup>1</sup>, WU Siyuan<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Yuefang<sup>1</sup>, SHENG Jing<sup>1</sup>, GUO Zhi<sup>1</sup>, CHEN Danyan<sup>2</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>, XU Xiangrui<sup>4</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, ZONG Jiao<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2. College of Horticulture, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210038, China; 3. Jiangsu Longhuan Environmental Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, China; 4. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the characteristics of greenhouse gas emission from paddy fields based on different paddy rice–

收稿日期:2021-12-09 录用日期:2022-02-28

作者简介:岳骞(1990—),女,博士,助理研究员,从事农业生态研究。E-mail:yueqian2@hotmail.com

\*通信作者:吴思远 E-mail:siyuan981227@163.com

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41907073);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)3185)

**Project supported:** The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (41907073); Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund(CX(20)3185)

upland rotation systems and explored their key influencing factors by evaluating the effects and cost benefit of the greenhouse and comprehensively assessing the best rotation system with friendly environment and high economic benefit. In the field experiment, six rotation systems such as fallow-paddy rice, Chinese milk vetch-paddy rice, wheat-paddy rice, oilseed rape-paddy rice, green forage wheat-paddy rice, and broad bean-paddy rice were set up. Field CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions were monitored from June 2020 to May 2021 using static chamber-gas chromatographic techniques, and the driving factors for CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions were analyzed using structural equation model. In addition, the environmental and economic effects of different rotation systems were evaluated. The cumulative CH<sub>4</sub> emission from paddy-upland rotation ranged from 95.6 kg·hm<sup>-2</sup> to 173.3 kg·hm<sup>-2</sup>, and the CH<sub>4</sub> emission intensity was related to winter straw returning amount and rice yield. The cumulative N<sub>2</sub>O emission ranged from 1.5 kg·hm<sup>-2</sup> to 2.5 kg·hm<sup>-2</sup> and was affected by nitrogen application rate, winter straw returning amount, rice yield, and soil organic matter. Besides, nitrogen fertilizer application did not only increase N<sub>2</sub>O emissions but also led to the reduction of soil organic matter. The change in winter straw returning amount and rice yield had contrary effects on annual CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O cumulative emission, which had a positive correlation with CH<sub>4</sub> emission and a negative correlation with N<sub>2</sub>O emission. Green forage wheat-paddy rice rotation had the highest economic income with a value of 10 139 yuan·hm<sup>-2</sup> and was higher than that of other rotations. Despite generating the highest N<sub>2</sub>O emission and having weak soil carbon sequestration capacity, the greenhouse gas emissions per unit economic benefit of green forage wheat-paddy rice rotation was the lowest with a value of 0.41 kg CO<sub>2</sub>e·yuan<sup>-1</sup>. The value of Chinese milk vetch-paddy rice rotation decreased by 51%, 33%, 20%, and 4% compared with that of oilseed rape, wheat, fallow and broad bean-paddy rice rotation, respectively. Paddy-upland rotations significantly affected the greenhouse effect for paddy field, and the global warming potential of Chinese milk vetch-paddy rice rotation (3.1 t CO<sub>2</sub>e·hm<sup>-2</sup>) was significantly lower than that of wheat-paddy rice rotation (5.4 t CO<sub>2</sub>e·hm<sup>-2</sup>). Compared with other rotation systems, Chinese milk vetch-paddy rice and broad bean-paddy rice rotation systems could both ensure high economic benefits and relatively low greenhouse gas emissions. Winter straw returning amount and green manure biomass were the important factors to realize the synergy of environmental effects and economic benefits.

**Keywords:** paddy-upland rotation; CH<sub>4</sub>; N<sub>2</sub>O; paddy rice; economic benefit; structural equation modeling

水稻是我国主要的粮食作物之一,我国水稻种植面积约占全球水稻种植面积的23%<sup>[1]</sup>。在水稻种植生产过程中,其田间管理活动产生的大量温室气体会加速全球变暖,同时全球增温也会反作用于农业生产,影响粮食安全、生态环境以及物种多样性。CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O是重要的温室气体<sup>[2]</sup>,稻田的淹水管理是农业CH<sub>4</sub>的主要排放源之一,同时稻田采取的干湿交替管理也会大幅增加N<sub>2</sub>O的排放<sup>[3-4]</sup>。据统计,稻田CH<sub>4</sub>周年排放量占全球CH<sub>4</sub>排放总量的7%~17%,稻田排放的N<sub>2</sub>O也占到我国农田氮肥直接排放N<sub>2</sub>O总量的7%~11%<sup>[5]</sup>。

水旱轮作是水稻生产的重要模式,在粮食产量连增的背景下,研究“藏粮于地、藏粮于技”的可持续轮作技术模式是实现作物持续稳产与增产的重要基础。稻麦轮作是我国传统且重要的农业生产体系之一,轮作面积保持在467万hm<sup>2</sup>以上,主要集中在我国长江流域。但由于水稻种植品种的改变,水稻迟收、小麦迟播逐渐成为常态,再加上土壤耕地的退化,造成小麦季经济效益大幅下降。因此,向绿肥-水稻、经济作物-水稻轮作等模式的转变不仅可解决农业发展的突出矛盾,而且可推进农业供给侧改革,实现稻田提质增效的双赢目标。但水旱轮作模式的改变会对生态环境效益产生影响,使生态环境效益随之发生变化<sup>[6]</sup>。

不同水旱轮作方式对稻田周年CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放有着重要的影响差异<sup>[7]</sup>。张岳芳等<sup>[8]</sup>指出由于旱作季施肥差异,水旱轮作旱作季种植的不同作物N<sub>2</sub>O排放量表现为油菜>冬小麦>黑麦草>休闲>紫云英,随着施肥量的增加,土壤CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量也增多。不同水旱轮作方式中的旱作季作物,由于其不同的根系形态与根际分泌物特征,对土壤养分活化、微生物活动均有显著影响。张顺涛等<sup>[9]</sup>的研究表明长江中下游地区油菜-水稻轮作的稻谷产量较小麦-水稻轮作增幅4.6%~17.3%。水稻季产量的影响差异,也会间接影响水稻季CH<sub>4</sub>的排放。黄耀等<sup>[10]</sup>发现稻田CH<sub>4</sub>日排放通量与水稻干物质积累呈正相关关系,CH<sub>4</sub>排放的季节总量随水稻产量水平的提高而增加。此外,不同水旱轮作方式的生物量输入(秸秆、根系等)与输出(秸秆、籽粒等)也决定整个系统的碳氮养分收支平衡状态<sup>[11-12]</sup>。

目前针对水旱轮作温室气体排放的研究较多,但大多研究只关注单季的温室效应<sup>[8,13]</sup>,或者只对少数轮作模式进行生态效益评价<sup>[9,14-15]</sup>,而综合评价多种轮作模式的周年温室效应以及环境、经济效益的研究鲜少,不同水旱轮作模式的优势生态服务功能尚不够明确。因此,本研究主要监测休闲-水稻、紫云英-水

稻、小麦-水稻、油菜-水稻、青饲小麦-水稻、蚕豆-水稻6种轮作方式的周年 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放特征,评估不同水旱轮作方式的温室效应及经济效益,并分析水旱轮作对土壤环境的影响,通过结构方程模型分析田间管理措施、土壤性质等因素对水旱轮作生态效益的影响,挖掘影响水旱轮作 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的主要驱动因素,为下一步不同水旱轮作可持续生产能力评估工作打下基础,也为不同水旱轮作方式的温室气体排放评估提供数据基础,以及为稻田温室气体减排提供科学理论和决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

本试验在江苏省南京市溧水区白马镇江苏省农科院溧水植物科学基地( $31^{\circ}36'N$ ,  $119^{\circ}11'E$ )进行,该地属北亚热带向中亚热带的过渡区,气候温和,四季分明,年均气温 $15.5^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量 $1\ 036\ \text{mm}$ ,年均湿度 $78\%$ ,日照 $2\ 145\ \text{h}$ ,无霜期 $237\ \text{d}$ 。田间试验依托于2017年10月开展的稻田不同冬季作物轮茬培肥技术研究。试验土壤类型为水稻土,质地为壤土,基本理化性质:pH 6.2,有机质 $16.6\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,总氮 $0.87\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,总磷 $0.24\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮 $13.1\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷 $11.8\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $89.2\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。温室气体监测时

间为2020年6月25日—2021年5月16日,试验期间的日均温和日降水量见图1。

### 1.2 试验设计

本研究设置6个水旱轮作模式处理,分别为休闲-水稻(CK)、紫云英-水稻(T1)、小麦-水稻(T2)、油菜-水稻(T3)、青饲小麦-水稻(T4)、蚕豆-水稻(T5),每个模式设置3个小区重复。试验采用大田小区试验,共18个小区,小区面积均为 $35\ \text{m}^2$ ,具体小区布置方案见图2。试验以南粳9108为供试水稻品种,栽插规格为 $25\ \text{cm}\times 13\ \text{cm}$ ;小麦品种为宁麦16,撒播,播种量为 $225\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;紫云英播种量为 $60\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;蚕豆品种为丰邦1号,栽种规格为 $80\ \text{cm}\times 20\ \text{cm}$ ;油菜品种为秦油10号,栽种规格为 $50\ \text{cm}\times 25\ \text{cm}$ 。

水稻季田间管理措施按照当地高产栽培技术进行,冬季轮茬作物按各自常规管理进行,详见表1。对于田间水管理,本研究只保证了外界水分输入的一致性,未考虑田间水分条件改变对温室气体排放的影响。各处理具体水管理方式:水稻季为前期浅水、中期搁田、后期干湿交替的模式;冬季均无灌水,完全靠雨养。

### 1.3 样品采集与测定分析

#### 1.3.1 气样采集与分析

采用静态箱-气相色谱法测定农田 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 气

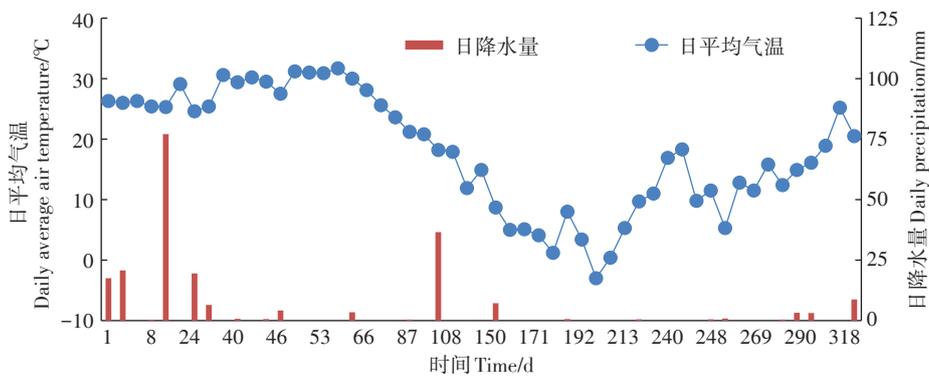


图1 试验期间的日均温和日降水量(2020.06.25—2021.05.16)

Figure 1 Seasonal patterns of daily average air temperature and precipitation during field experiment (2020.06.25—2021.05.16)

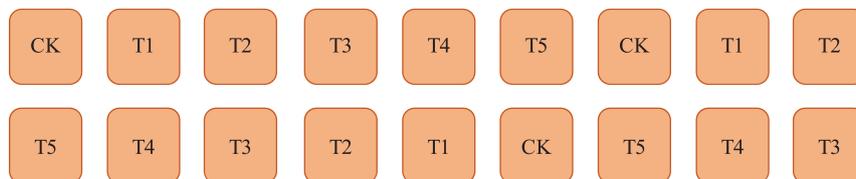


图2 试验处理各小区布置示意图

Figure 2 Schematic diagram of plot layout for experimental treatment

表1 不同水旱轮作方式的田间管理信息

Table 1 Field management practices for different paddy rice-upland rotation systems

试验处理 Treatment	轮茬方式 Rotation mode	冬季 Winter season	水稻季 Paddy rice season
CK	休闲-水稻	休闲,不施肥	N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O施用量分别为270、135、135 kg·hm <sup>-2</sup> ,6月14日移栽,10月12日收获
T1	紫云英-水稻	N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O施用量均为45 kg·hm <sup>-2</sup> ,5月22日翻压还田	
T2	小麦-水稻	N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O施用量分别为270、90、90 kg·hm <sup>-2</sup> ,6月1日收获,秸秆粉碎还田	
T3	油菜-水稻	N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O施用量分别为270、90、90 kg·hm <sup>-2</sup> ,5月22日收获,秸秆粉碎还田	
T4	青饲小麦-水稻	N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O施用量分别为270、90、90 kg·hm <sup>-2</sup> ,5月8日收割,秸秆不还田	
T5	蚕豆-水稻	N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O施用量均为45 kg·hm <sup>-2</sup> ,5月22日收获,秸秆粉碎还田	

体排放。静态箱箱体材料为PVC,规格为50 cm×50 cm×50 cm,整个箱身由一层泡沫和铝箔覆盖,用以隔热、减少传导与反射光。每个试验小区固定1个采样底座,底座上部有5 cm深的凹槽,采集气体时加水密封。同时,采样箱内顶部装有12 V小风扇以充分混匀箱内气体,并留有一孔插温度计以观测箱内温度,箱体中部安装抽气孔,用于气体采集。采样起始日为2020年6月25日,采样频率为每周1次;此外在施肥后第1、3、5天分别增加一次采样监测。采样时间为当日上午8:00—10:00,分别在静态箱放置后的第0、10、20、30分钟时采集,共4次。均匀收集气体,抽出约50 mL气样保存于气体采样袋中,及时带回实验室分析。

CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O浓度通过气相色谱仪(Agilent 7890A GC,美国)测定。分析CH<sub>4</sub>的检测器为FID,分析N<sub>2</sub>O的检测器为ECD,关于气相色谱仪的参数设置、工作条件设置详见文献[8]。静态箱法测定气体排放通量的方法参考文献[16],具体公式为:

$$F_c = \rho \times \frac{dc}{dt} \times h \times \frac{T_0}{T_0 + T_c} \times 60$$

式中: $F_c$ 为温室气体排放通量,排放通量的单位CH<sub>4</sub>为mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,N<sub>2</sub>O为μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $\rho$ 为标准状态下气体密度,kg·m<sup>-3</sup>; $dc/dt$ 为静态箱气室内温室气体的初始浓度变化率,m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>·min<sup>-1</sup>; $h$ 为静态箱的净高度,m; $T_c$ 为静态箱气室内的温度,℃; $T_0$ 为标准状态下的气温,273 K;60为时间单位转换系数。

不同轮作方式的周年CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O全球增温趋势(Global warming potential,  $GWP$ , t CO<sub>2</sub>e·hm<sup>-2</sup>)和单位收益排放强度( $GHGI$ , kg CO<sub>2</sub>e·元<sup>-1</sup>)计算方法参考文献[17],具体公式为:

$$GWP = E_{CH_4} \times 28 + E_{N_2O} \times 265$$

$$GHGI = GWP/I$$

式中: $E_{CH_4}$ 和 $E_{N_2O}$ 分别为CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的累积排放量,

kg·hm<sup>-2</sup>; $I$ 为各轮作模式的周年单位面积效益,元·hm<sup>-2</sup>;28和265分别是100年尺度下CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的全球增温潜势<sup>[18]</sup>。

### 1.3.2 土壤样品采集与指标分析

土壤样品采集于2021年冬茬作物收获前。土壤样品采集使用S形布点采样法,取土壤表层(0~15 cm)样,多点混合,用四分法对角取适量混合样,标记后带回实验室待测。

监测指标包括土壤有机质、全氮、碱解氮、总磷、有效磷、速效钾等。有机质采用稀释热法(NY/T 1121.6—2006);全氮采用自动定氮仪法(NY/T 1121.24—2012);碱解氮采用碱解扩散法(LY/T 1228—2015);总磷采用碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ632—2011);有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法(HJ 704—2014);速效钾采用乙酸铵提取法(NY/T 889—2004)。

### 1.3.3 植株样品采集与指标分析

在旱作季,于绿肥压青前和其他作物收获前,对不同轮茬作物进行割方测产,在每个小区中选择具有代表性的1 m<sup>2</sup>样方,准确收集整个样方的植株,称量其鲜质量;然后随机选取适量植株样品带回实验室进行含水率、全氮、全磷、全钾含量测定。

植株样品粉碎后经浓硫酸-双氧水消煮,氮、磷养分采用全自动流动分析仪(SKALAR San++)测定,钾养分采用火焰光度计法(NY/T 2420—2013)测定。

在水稻季,于水稻成熟收获前,测定每个小区的水稻籽粒实际产量。

### 1.4 周年经济效益分析

在经济效益分析中,考虑了不同轮作模式下种子、农药、肥料、机械、灌水、人工等费用成本,相应单价参照中国农资网(<http://www.ampcn.com/>)。农产品价格参照2021年国家收购指导价:稻谷按优质稻价格约2.8元·kg<sup>-1</sup>计;小麦价格按2.3元·kg<sup>-1</sup>计;油菜籽

粒价格按4.9元·kg<sup>-1</sup>计;青饲小麦价格参照青饲料紫花苜蓿价格(约2000元·t)和粗蛋白含量(约16%)进行折算,青饲小麦粗蛋白含量约10%,则青饲小麦价格以1.2元·kg<sup>-1</sup>计;蚕豆经济产物价格按8.0元·kg<sup>-1</sup>计。

### 1.5 水旱轮作温室效应的关键影响因素

通过结构方程模型(Structural equation modeling, SEM)研究水旱轮作温室气体排放的关键影响因素。SEM是通过线性方程来表示观测变量与潜在变量之间的关系,能将两个或多个结构模型联合起来,实现对多元关系进行建模的统计框架。多元关系指变量之间直接和间接相互作用的总和。通过R语言,采用Lavaan功能包<sup>[9]</sup>,综合考虑土壤性质(pH、有机质、全氮、碱解氮、总磷、有效磷、速效钾)、养分还田量(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O)、冬茬秸秆还田生物量、化肥用量(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O)等潜在影响因素,建立结构方程模型,挖掘影响水旱轮作CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O气体排放的关键影响因素。

### 1.6 数据统计与分析

数据采用Microsoft excel 2016进行整理、分析、计算以及相应的图表绘制;利用IBM SPSS Statistics 22对不同种植模式间各因素的差异显著性( $P<0.05$ 表示差异显著)进行单因素方差分析,采用Duncan法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水旱轮作方式的周年CH<sub>4</sub>排放特征

水旱轮作方式下的CH<sub>4</sub>排放主要集中在水稻季,约占周年排放总量的98%~99%(表2)。在水稻季,前期由于持续淹水管理,同时伴随大量的冬季作物秸秆还田,所有处理CH<sub>4</sub>排放通量均表现出先快速升高,随后逐渐下降的趋势,其中T2处理CH<sub>4</sub>日排放通量最高,可达39 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>(图3)。水稻在落干期时,所有处理的CH<sub>4</sub>排放通量均急剧下降,且有负值出现。

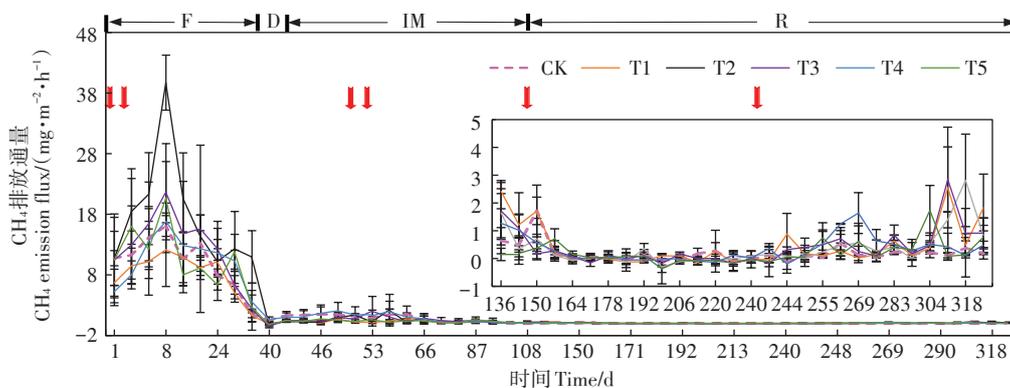
表2 不同水旱轮作稻田的温室气体排放特征

Table 2 Greenhouse gas fluxes for paddy rice-upland rotation systems

试验处理 Treatment	CH <sub>4</sub> 累积排放量 Cumulative CH <sub>4</sub> emission/(kg·hm <sup>-2</sup> )			N <sub>2</sub> O累积排放量 Cumulative N <sub>2</sub> O emission/(kg·hm <sup>-2</sup> )			周年增温潜势 GWP/ (t CO <sub>2</sub> e·hm <sup>-2</sup> )
	水稻季 Paddy rice season	冬季 Winter season	周年 Annual	水稻季 Paddy rice season	冬季 Winter season	周年 Annual	
CK	116.9±6.6ab	1.0±0.4a	117.9±6.7ab	1.1±0.2b	0.4±<0.1c	1.5±0.2c	3.7±0.2ab
T1	93.9±20.3b	1.7±0.1a	95.6±20.3b	1.3±0.2b	0.5±<0.1bc	1.8±0.2bc	3.1±0.5b
T2	171.4±5.8a	2.0±0.7a	173.3±6.5a	1.5±0.3ab	0.7±0.1ab	2.2±0.4ab	5.4±0.2a
T3	138.2±67.1ab	1.5±0.5a	139.6±67.4ab	1.5±0.2ab	0.9±0.1a	2.4±0.2a	4.5±1.9ab
T4	122.2±14.1ab	1.6±0.6a	123.8±13.7ab	1.9±0.3a	0.6±0.1bc	2.5±0.2a	4.1±0.4ab
T5	111.0±22.7ab	0.9±0.6a	112.0±22.7ab	1.5±0.1ab	0.5±<0.1c	2.0±0.1ab	3.7±0.6ab

注:不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.



F表示持续淹水;D表示落干;IM表示间歇淹水;R表示雨养;红色箭头代表相应时间段进行施肥管理。下同  
F indicates continuous flooding; D indicates drainage; IM indicates intermittent flooding; R indicates rain fed; The red arrow represents the fertilization management. The same below

图3 不同水旱轮作方式的CH<sub>4</sub>排放通量季节变化

Figure 3 Seasonal variation of CH<sub>4</sub> fluxes for different paddy rice-upland rotation systems

随水稻进入间歇淹水期,  $\text{CH}_4$  日排放通量无较大波动, 各处理的  $\text{CH}_4$  排放通量也无明显差异, 8月下旬后大部分时期的  $\text{CH}_4$  日排放通量处于  $0\sim 2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  之间。不同水旱轮作模式下水稻季  $\text{CH}_4$  累积排放量具有显著差异(表2), T1 处理排放量最低, 为  $93.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 显著低于 T2 处理。总体来说, 不同轮作模式周年  $\text{CH}_4$  累积排放量由高到低依次为  $\text{T2}>\text{T3}>\text{T4}>\text{CK}>\text{T5}>\text{T1}$ 。

在旱作季,  $\text{CH}_4$  日排放通量较低, 且不同轮作方式的  $\text{CH}_4$  排放通量日变化趋势相似。旱作初期, 因为施肥和温度的影响, 各处理的  $\text{CH}_4$  排放通量较高; 随着温度的逐渐降低,  $\text{CH}_4$  排放通量降低, 且趋近于 0。随后在 2021 年 4 月中旬和 5 月上旬, 部分处理再次出现  $\text{CH}_4$  排放高峰, 原因可能与强降雨有关。不同轮作模式的旱作季  $\text{CH}_4$  累积排放总量中, T2 处理累积排放量最高 ( $2.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), T5 处理最低 ( $0.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 但两处理间无显著差异。

不同轮作模式的周年  $\text{CH}_4$  累积排放量也具有显著差异(表2), 与水稻季累积排放量规律相似, T1 处理的  $\text{CH}_4$  周年累积排放总量最低 ( $95.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 显著低于 T2 处理的  $173.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。总体上, 小麦、油菜、青饲小麦、蚕豆与水稻轮作的  $\text{CH}_4$  周年总累积排放量分别比紫云英-水稻轮作增加 80%、45%、28% 和 17%。

## 2.2 不同水旱轮作方式的周年 $\text{N}_2\text{O}$ 排放特征

不同轮作方式的周年  $\text{N}_2\text{O}$  排放趋势如图 4 所示, 水旱轮作方式的周年  $\text{N}_2\text{O}$  排放主要集中在水稻季, 约占总量的 62%~76%(表2)。在水稻季秧苗移栽后, 由于施基肥的原因,  $\text{N}_2\text{O}$  日排放通量有小幅上升, 随后保持在较低的排放水平。当水稻进入落干期, 从厌氧状态快速转变为好氧状态, 有利于土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,

各处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量在此时急剧上升, 达到峰值, 排放通量在  $145.0\sim 450.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  范围内; 随后  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量开始下降。水稻进入间歇淹水期, 各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量在两次施肥后略有升高, 穗肥后  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量始终保持在较低水平, 低于  $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。总体上, T2、T3 和 T5 处理的水稻季  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量相同, 为  $1.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 无明显差异, 而 T4 处理显著高于 CK 和 T1 处理。

在整个旱作季, CK、T1 和 T5 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  日排放通量处于较低水平, 分别维持在  $-6.3\sim 102.5$ 、 $2.5\sim 97.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $3.3\sim 191.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  之间。原因可能是冬季温度低, 平均温度只达到  $10.5\text{ }^\circ\text{C}$ ; 另外 CK 不施肥、T1 和 T5 处理施氮量低 ( $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 也是造成冬季无明显  $\text{N}_2\text{O}$  排放高峰的原因。其他处理由于氮肥的施用, 种植前期的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量有一定幅度的增加, 但随后也趋于平稳。同样在 2021 年 5 月初, 部分处理出现一个  $\text{N}_2\text{O}$  排放高峰, 可能是由于受到强降雨的影响。由表 2 可知, 水旱轮作中的旱作季  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量大小顺序依次为  $\text{T3}>\text{T2}>\text{T4}>\text{T1}=\text{T5}>\text{CK}$ , 由于施肥的差异, CK 处理显著低于 T2 和 T3 处理, T1 处理显著低于 T3 处理。

不同水旱轮作模式的周年  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量有显著差异(表2), 表现为  $\text{CK}(1.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})<\text{T1}(1.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})<\text{T5}(2.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})<\text{T2}(2.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})<\text{T3}(2.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})<\text{T4}(2.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ , 其中 CK 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  周年累积排放总量显著低于除 T1 处理外的其他处理, 水稻与青饲小麦、油菜、冬小麦、蚕豆和紫云英等作物轮作的  $\text{N}_2\text{O}$  周年排放总量依次比 CK 增加 68%、57%、47%、34% 和 19%。

## 2.3 不同水旱轮作方式的周年增温潜势

由表 2 可知, 水旱轮作稻田的周年增温潜势高低

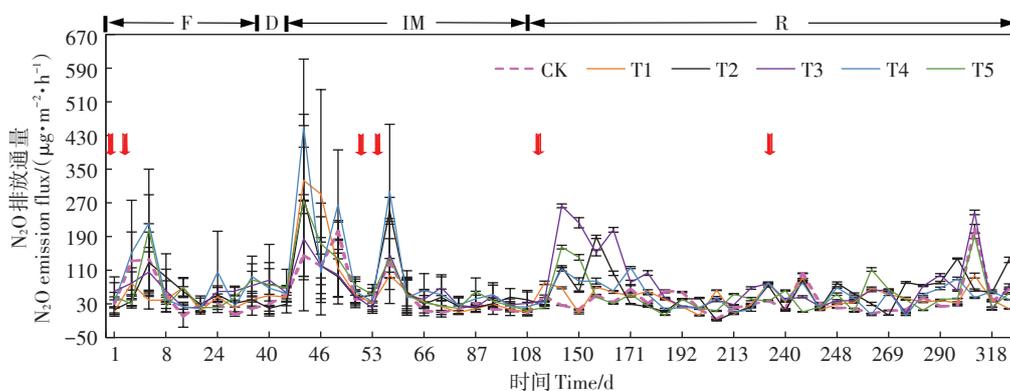


图4 不同水旱轮作方式的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量季节变化

Figure 4 Seasonal variation of  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes for different paddy rice-upland rotation systems

顺序为T2(小麦-水稻)>T3(油菜-水稻)>T4(青饲小麦-水稻)>CK(空闲-水稻)=T5(蚕豆-水稻)>T1(紫云英-水稻),T2处理的周年增温潜势最大,达到5.4 t CO<sub>2</sub>e·hm<sup>-2</sup>,较T1处理(3.1 t CO<sub>2</sub>e·hm<sup>-2</sup>)显著增加约74%。

#### 2.4 不同水旱轮作方式的周年经济效益

对于周年经济效益来说(表3),T4处理最高,达到10 139元·hm<sup>-2</sup>,是最低效益T3处理的1.6倍。与T2处理相比,T1处理的周年经济效益降低15.2%(1 291元·hm<sup>-2</sup>),但却可减少2.3 t CO<sub>2</sub>e·hm<sup>-2</sup>的排放效应(表2)。水旱轮作方式下的水稻产量为8 148(T4)~8 854(T2) kg·hm<sup>-2</sup>,各处理间无显著差异。

从单位收益排放强度来看,T4处理最低,为0.41 kg CO<sub>2</sub>e·元<sup>-1</sup>,T3处理最高,高达T4处理的2.2倍。紫云英-水稻轮作的单位收益排放强度分别比油菜、小麦、休闲、蚕豆与水稻的轮作方式低51%、33%、20%和4%。总体上,相比于CK处理,T1处理能够降低周年增温潜势(降幅为16.2%),提高周年效益(增幅为4.4%),同时也降低了单位收益排放强度(降幅为19.6%)。

#### 2.5 不同水旱轮作方式对土壤性质的影响

经过轮作周年种植后(2020年6月—2021年5月),各轮作处理的土壤理化性质无处理间的显著差异(表4),但T3处理的有机质、全氮、总磷、有效磷含量均处于较高水平;T1处理的碱解氮含量相对较高,为15.1 mg·kg<sup>-1</sup>;T5处理的速效钾含量最高,达到102.7 mg·kg<sup>-1</sup>。

与2017年试验前土壤有机质含量相比,经过3a的连续轮作后,各处理的有机质含量均有一定程度的增加,其中T1处理的有机质增加量高于T2处理,但总体上,T3处理的有机质增加最多,约4.5 g·kg<sup>-1</sup>。各处理pH均略有下降,但整体无显著差异。土壤全氮在3a时间尺度上暂未表现出差异。土壤的总磷、有效磷、速效钾含量经过连续轮作后均一致提高,增幅分别高达83%(T3)、110%(T3)和15%(T5)。

#### 2.6 水旱轮作温室气体排放的关键影响因素

如图5所示,水旱轮作模式对全球变暖影响的周年增温潜势主要受CH<sub>4</sub>累积排放量的影响,回归系数(*b*值)为0.99(*P*<0.001),周年N<sub>2</sub>O累积排放量的*b*值为0.06(*P*<0.001)。水旱轮作稻田的N<sub>2</sub>O周年排放通

表3 不同水旱轮作方式的作物产量与周年经济效益

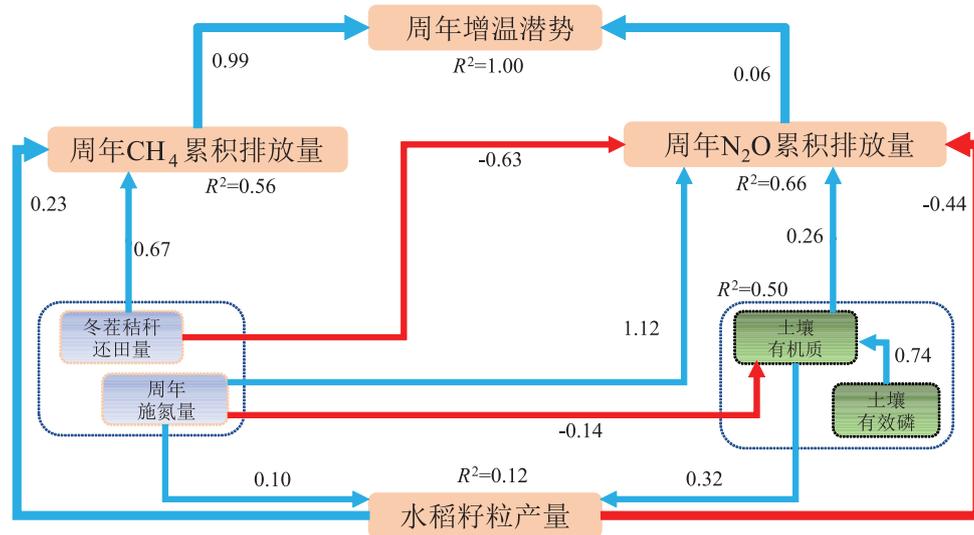
Table 3 Crop yield and annual economic benefits for paddy rice-upland rotation systems

试验处理 Treatment	冬季 Winter season			水稻季 Paddy rice season			周年效益 Annual benefit/ (元·hm <sup>-2</sup> )	单位收益排放 强度 GHG/ (kg CO <sub>2</sub> e·元 <sup>-1</sup> )
	成本 Cost/ (元·hm <sup>-2</sup> )	产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	产值 Income/ (元·hm <sup>-2</sup> )	成本 Cost/ (元·hm <sup>-2</sup> )	稻谷产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	产值 Income/ (元·hm <sup>-2</sup> )		
CK	0	—	—	16 305	8 290a	23 212	6 907a	0.56±0.12a
T1	4 020	—	—	16 305	8 398a	23 516	7 211a	0.45±0.08a
T2	8 640	3 763±409	8 655	16 305	8 854a	24 791	8 502a	0.67±0.15a
T3	9 465	1 486±630	7 281	16 305	8 824a	24 708	6 222a	0.91±0.52a
T4	8 640	9 814±943	11 777	16 305	8 148a	22 816	10 139a	0.41±0.02a
T5	8 520	1 082±109	8 656	16 305	8 683a	24 313	8 147a	0.47±0.13a

表4 不同水旱轮作方式下的土壤理化性质

Table 4 Soil physical and chemical properties under different paddy rice-upland rotation systems

试验处理 Treatment	pH	有机质 Soil organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Available nitrogen/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	总磷 Total phosphorus/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
试验前(2017年) Before experiment	6.2±0.2	16.6±3.2	0.8±0.1	13.1±1.5	0.24±0.01	11.8±2.2	89.2±3.8
CK	6.0±0.3a	18.7±2.7a	0.7±0.2ab	10.4±3.3a	0.37±0.08a	14.8±6.3a	95.2±10.5a
T1	6.0±0.4a	20.7±2.8a	0.8±0.1ab	15.1±2.9a	0.40±0.06a	17.4±5.6a	98.0±7.0a
T2	5.8±0.5a	20.1±1.1a	0.8±0.1ab	14.7±2.3a	0.41±0.03a	23.4±4.8a	95.0±2.2a
T3	5.6±0.4a	21.1±1.6a	0.9±0.1a	13.6±1.9a	0.44±0.05a	25.3±7.3a	92.3±13.1a
T4	5.7±0.2a	18.9±0.5a	0.7±0.1ab	12.1±4.0a	0.40±0.03a	19.3±3.4a	85.3±4.9a
T5	5.6±0.1a	19.2±0.4a	0.7±0.1b	13.2±3.6a	0.39±0.02a	20.4±7.7a	102.7±8.1a



蓝色线表示正相关关系,红色线表示负相关关系

The blue line indicates a positive correlation and the red line indicates a negative correlation

图5 水旱轮作模式的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放驱动因素

Figure 5 Driving factors for CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in paddy rice-upland rotation system

量与多种因素有关:与周年施氮量(重要影响因素, $b$ 值为1.12, $P<0.001$ )、土壤有机质含量( $b$ 值为0.26, $P<0.1$ )呈正相关关系;与秸秆还田量( $b$ 值为-0.63, $P<0.05$ )和水稻产量( $b$ 值为-0.44, $P<0.01$ )呈负相关关系。而周年CH<sub>4</sub>累积排放量主要受冬季作物秸秆还田量( $b$ 值为0.67)的影响,其次是受水稻产量( $b$ 值为0.23)的影响,均为正相关关系。对于水稻产量,整个结构方程的 $R^2$ 为0.12,主要与土壤有机质和周年施氮量有关。土壤有机质含量与土壤有效磷含量呈正相关关系,但与周年施肥量( $b$ 值为-0.14)存在一定负相关关系。

### 3 讨论

#### 3.1 水旱轮作对农田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响

不同水旱轮作方式对稻田CH<sub>4</sub>排放具有显著影响,5种水旱轮作处理的周年CH<sub>4</sub>累积排放量为95.6~173.3 kg·hm<sup>-2</sup>,与已有研究的监测结果相似(91.6~283.3 kg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[8,13]</sup>,其中小麦-水稻轮作具有最高的CH<sub>4</sub>排放通量,与胡安永等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。水旱轮作稻田CH<sub>4</sub>排放主要集中在水稻季,因为秸秆还田和淹水环境可以迅速激发产甲烷菌生长,促使大量CH<sub>4</sub>产生并排放<sup>[21-22]</sup>。因此,由于大量的冬茬秸秆还田,小麦-水稻、油菜-水稻轮作相比于休闲-水稻均不同程度地增加了CH<sub>4</sub>周年累积排放量,这与黄太庆等<sup>[13]</sup>、唐海明等<sup>[12]</sup>、张岳芳等<sup>[8]</sup>的研究结果相同。稻田CH<sub>4</sub>排放是由土壤中的产甲烷菌和氧化菌共同控制,

在秸秆持续还田约3 a后,土壤肥力明显提高,促进了水稻根系和植株生长,进一步促进了氧气的输送,使土壤含氧量迅速增加,因此氧化菌快速增长,将CH<sub>4</sub>氧化为CO<sub>2</sub>,最终使得CH<sub>4</sub>排放量显著下降<sup>[14,21]</sup>。另外,冬茬作物秸秆的C/N也会影响稻田CH<sub>4</sub>排放量,还田秸秆的C/N越高,能源物质越丰富,土壤微生物的活性就越高,从而提高了CH<sub>4</sub>的排放速率<sup>[14,23]</sup>。紫云英(C/N:14)、蚕豆(C/N:17)的水旱轮作都表现出很低的周年CH<sub>4</sub>累积排放量。值得注意的是,紫云英-水稻轮作下稻季CH<sub>4</sub>累积排放量低于休闲-水稻轮作,原因可能是紫云英翻压还田促进了水稻植株根系发育及通气组织形成,促使CH<sub>4</sub>被氧化<sup>[14]</sup>。除了秸秆C/N的影响外,CH<sub>4</sub>排放量还可能与豆科作物培肥作用有关,稻田土壤肥力显著提高,水稻的植株和根系生长旺盛,激发了氧化菌的快速增长,将更多的CH<sub>4</sub>氧化为CO<sub>2</sub>,从而降低CH<sub>4</sub>排放量。此外,张岳芳等<sup>[8]</sup>和DONG等<sup>[22]</sup>在研究中还发现,在环境条件都适宜的情况下,氮肥的施用也可能影响稻田土壤氧化CH<sub>4</sub>的量,氮肥的使用促进了植物根系的快速生长,使得根际分泌物和土壤可溶性有机物增加,间接为喜好有机物料的产甲烷菌提供了良好的生长底物<sup>[14]</sup>,导致CH<sub>4</sub>排放量增加。SUN等<sup>[24]</sup>研究发现CH<sub>4</sub>排放量与土壤容重呈负相关关系,高容重的土壤通常较重且致密,可保护有机物免受微生物分解<sup>[25]</sup>。农田土壤水分、关键酶等因素对温室气体排放也具有重要影响,作者前期研究结果已发现轮作种植系统的CH<sub>4</sub>排放

与土壤充水孔隙率(WFPS)呈正相关关系,而 $N_2O$ 排放与WFPS呈负相关关系<sup>[8]</sup>,在本研究中并未做相应的指标监测。

水旱轮作 $N_2O$ 周年累积排放量的范围为1.5(休闲-水稻)~2.5(青饲小麦-水稻) $kg \cdot hm^{-2}$ ,与已有研究结果一致<sup>[26-27]</sup>。 $N_2O$ 累积排放量主要受施氮量影响,施氮较多会使局部土壤氮含量过高,促进土壤氮循环微生物活动,导致 $N_2O$ 大量排放<sup>[8]</sup>。相比于休闲-水稻轮作,稻麦、稻油轮作会使农田 $N_2O$ 排放显著增加1.5~3.7倍<sup>[13,27]</sup>。但前人研究也发现,不施肥的休闲-水稻轮作模式的旱作季 $N_2O$ 排放量可能大于紫云英-水稻轮作模式,其原因可能与紫云英将土壤氮素转变为有机氮有关<sup>[8,28]</sup>。另外,ALBANITO等<sup>[29]</sup>分析得出施肥次数增多也会导致 $N_2O$ 排放增加。在水稻季,尽管施肥量相同,青饲小麦-水稻轮作的 $N_2O$ 累积排放量显著高于休闲-水稻、紫云英-水稻轮作,可能因为小麦季收获后残留在土壤中的肥料氮会影响水稻生长季的 $N_2O$ 排放<sup>[28]</sup>。不同轮作方式的根际状态差异也会影响耕层土壤的微环境,进而影响土壤氮循环相关微生物的活动,导致不同水旱轮作方式的 $N_2O$ 排放呈现显著差异<sup>[27]</sup>。例如,ZHANG等<sup>[30]</sup>发现紫云英-水稻长期轮作条件下,土壤根际细菌群落中的优势菌群主要是具有植物促生根瘤菌的不动杆菌(31%~41%)和假单胞菌(14%~28%),而在休闲-水稻轮作中此类菌的占比不超过5%。FANG等<sup>[31]</sup>研究发现紫云英-水稻轮作显著增加了土壤有机质含量和潜在硝化活性。此外,水旱轮作方式中,水稻季稻田淹水方式也会影响 $N_2O$ 排放,干湿交替的环境会改变土壤结构和通气性,好氧与厌氧状态的频繁交替循环也会加速土壤氮的循环,从而促进了土壤 $N_2O$ 的排放,因此间歇淹水管理条件下的 $N_2O$ 排放量会高于持续淹水管理<sup>[32]</sup>。

### 3.2 水旱轮作的可持续性分析

农业活动的温室气体减缓可概括为两类,分别为固碳(汇)和减排(源)。由于大量的秸秆还田,水旱轮作系统在长期种植后均表现出土壤有机质含量提高(表4),但这也直接加速了 $CH_4$ 的排放(图5)。逯非等<sup>[33]</sup>估算出我国稻田秸秆还田每年可引起 $CH_4$ 增排约22.4 Tg(以C计),而秸秆还田的固碳潜力为10.5 Tg,可见秸秆还田增排 $CH_4$ 的温室效应会大幅抵消土壤固碳的减排效益。科学的秸秆还田是减排的关键,可实现既能提高稻田固碳潜力,又能降低稻田温室气体排放。农田土壤秸秆等有机物质投入过高,会加速因土壤有机物质矿化导致的土壤养分大量流失,投入

过低则可能出现土壤肥力、农田生产力下降<sup>[11]</sup>。例如,YANG等<sup>[34]</sup>通过大田试验得出小麦-水稻轮作系统中,相比于作物秸秆半量还田,全量还田虽然明显提高土壤的有机质含量,但也增加了水稻季土壤硝态氮的淋溶。不同轮作方式的生物量输出也决定了整个系统的碳氮养分收支平衡状态。小麦-水稻、油菜-水稻、青饲小麦-水稻3种轮作方式均为一年两熟,具有较高的经济效益,但长期的高强度生物量(包括秸秆与籽粒)输出会加速土壤矿化,且年施氮量达到 $540 kg \cdot hm^{-2}$ ,也会造成一定的环境污染风险。但本研究暂未综合分析碳、氮等养分输出对温室气体排放的影响。此外,油菜-水稻轮作可提高后茬水稻的产量及养分积累量,因为油菜强大的根系结构可改善土壤性质和土壤微生物菌群,而且油菜后期脱落的叶片会将大量的氮、磷、钾养分归还到土壤系统中<sup>[9]</sup>。由于油菜的培肥增产功能,油菜(绿肥)-水稻也是较常见的轮作方式,但实际生产中,在油菜作为绿肥情况下,很多农户都是按常规施肥管理油菜,翻压还田后,常造成油菜季所有养分都作用到水稻季,而水稻季又未实施相应的减氮措施,最终使水稻季养分过剩,造成前期秧苗僵化、后期植株倒伏现象,同时也造成温室气体排放增加、农田面源污染等环境问题<sup>[9,11,28]</sup>。青饲小麦-水稻是本研究中经济效益最高的轮作方式,其单位收益排放强度也最低,但其土壤固碳能力相对较弱。

相对于其他轮作方式,紫云英-水稻、蚕豆-水稻轮作具有较低的温室效应,土壤固碳能力也高于休闲-水稻轮作方式。豆科作物-水稻轮作模式具备增强土壤碳、氮储存及改善土壤性质的功能,其对土壤健康和环境质量的改善可能会抵消甚至超过 $CO_2$ 排放造成的影响<sup>[28]</sup>。但绿肥生物量还田也需配套相应技术才能达到优良培肥的作用,过多的绿肥生物量还田不仅对水稻增产无用,还可能造成作物后期贪青迟熟、倒伏或土壤养分流失等问题<sup>[11,35]</sup>。聂良鹏等<sup>[35]</sup>的报道指出,豫南稻区紫云英翻压量为 $22\ 500 kg \cdot hm^{-2}$ 时,配合化肥减施20%的培肥效果最优。唐先干等<sup>[36]</sup>在江西地区研究发现,紫云英还田 $22\ 500 kg \cdot hm^{-2}$ +减量20%化肥处理既能保障早稻产量,又能有效增加稻米整精米率、降低垩白粒率。而王赞等<sup>[15]</sup>在江西的试验却得出, $37\ 500 kg \cdot hm^{-2}$ 紫云英+减量20%化肥才能实现水稻产量提高以及稻米品质提升的双重目标。可见,紫云英最优还田量与土壤背景性质也有密切的关系,土壤肥力较差的情况下绿肥培肥能力可能更明显。对于长江中下游地区,由于水稻生育期长,紫云

英播种时期推迟,加上温度降低,紫云英很难达到理想的生物量,这也大幅降低了紫云英的培肥能力,因此长江下游绿肥紫云英的种植需要更精准的科学配套种植技术<sup>[37]</sup>。综上所述,轮作模式的可持续发展需要考虑生态环境、土壤健康、经济效益等因素,归一化分析不同轮作方式的供给服务、调节服务、支持服务和文化服务,明确不同轮作方式的最优生态系统服务功能,为决策者合理布局种植结构提供科学的理论与实践支撑。

## 4 结论

(1)紫云英-水稻轮作能够明显降低稻田水旱轮作的温室效应,周年增温潜势( $3.1 \text{ t CO}_2\text{e} \cdot \text{hm}^{-2}$ )显著低于小麦-水稻轮作( $5.4 \text{ t CO}_2\text{e} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),而且单位收益排放强度也较低,分别比油菜、小麦、休闲、蚕豆轮作减少51%、33%、20%和4%。青饲小麦-水稻轮作具有最高的经济收益,单位收益排放强度也最低( $0.41 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot \text{元}^{-1}$ ),但周年 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量最高,土壤固碳能力低于其他轮作模式。

(2) $\text{CH}_4$ 累积排放量主要与冬茬还田生物量有关,小麦、油菜、青饲小麦、蚕豆轮作的稻田 $\text{CH}_4$ 周年累积排放量分别比紫云英轮作增加80%、45%、28%和17%; $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放量主要受施氮量、冬茬秸秆还田量及土壤有机质影响,种植青饲小麦、油菜、冬小麦、蚕豆和紫云英的 $\text{N}_2\text{O}$ 周年排放量依次比休闲增加68%、57%、47%、34%和19%。

### 参考文献:

- [1] 张丽. 南方典型稻作系统绿肥和秸秆还田对温室气体排放特征和环境效应的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2018:2. ZHANG L. Integrative effects of green manure and straw incorporation on greenhouse gas emissions and environmental performance under the typical rice cropping systems in southern China[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2018:2.
- [2] LASHOF D A, AHUJA D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. *Nature*, 1990, 344(6266):529-531.
- [3] CAI Z C, XING G X, YAN X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196:7-14.
- [4] XU H, XING G X, CAI Z C, et al. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49:23-28.
- [5] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [6] 熊丽萍, 吴家梅, 纪雄辉, 等. 水旱轮作系统中土壤 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4):863-871. XIONG L P, WU J M, JI X H, et al. A review on soil  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from paddy-upland rotation systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4):863-871.
- [7] ZHANG Y M, HU C S, ZHANG J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):966-975.
- [8] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9):1521-1526. ZHANG Y F, ZHENG J C, CHEN L G, et al. Effects of different upland crops cultivation on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions during upland-growing season from paddy rice-upland crop rotation field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9):1521-1526.
- [9] 张顺涛, 鲁剑巍, 丛日环, 等. 油菜轮作对后茬作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(14):2852-2858. ZHANG S T, LU J W, CONG R H, et al. Effect of rapeseed rotation on the yield of next-stubble crops[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(14):2852-2858.
- [10] 黄耀, SASS R L, FISHER F M. 水稻物质生产对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(4):150-154. HUANG Y, SASS R L, FISHER F M. Contribution of rice biomass production to  $\text{CH}_4$  emission from irrigated paddy soils[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1999, 18(4):150-154.
- [11] 张维理, KOLBE H, 张认连, 等. 农田土壤有机碳管理与有机质平衡算法[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2):332-345. ZHANG W L, KOLBE H, ZHANG R L, et al. Soil organic carbon management and farmland organic matter balance method[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2):332-345.
- [12] 唐海明, 肖小平, 帅细强, 等. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(5):1481-1489. TANG H M, XIAO X P, SHUAI X Q, et al. Effects of different winter covering crops cultivation on methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emission fluxes from double-cropping paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(5):1481-1489.
- [13] 黄太庆, 马煜春, 熊正琴, 等. 不同种植制度对稻田旱作季节 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6):519-523. HUANG T Q, MA Y C, XIONG Z Q, et al.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from paddy field during the upland crop growing season in relation to cropping pattern[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6):519-523.
- [14] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 长江中下游稻区不同水旱轮作模式和氮肥水平对稻田 $\text{CH}_4$ 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14):2484-2499. LIU S W, YIN M, CHU G, et al. Effects of various paddy-upland crop rotations and nitrogen fertilizer levels on  $\text{CH}_4$  emission in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(14):2484-2499.
- [15] 王赞, 徐昌旭, 周国朋, 等. 连续种植翻压紫云英减施化肥对江西早稻产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10):1735-1745. WANG Y, XU C X, ZHOU G P, et al. Effects of long-term incorporation of milk vetch combined with reduction of chemical fertilizer on yield, quality and soil fertility of early

- rice in Jiangxi[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(10):1735-1745.
- [16] ALTOR A E, MITSCH W J. Methane flux from created riparian marshes: Relationship to intermittent versus continuous inundation and emergent macrophytes[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(3):224-234.
- [17] 岳骞. 基于文献统计和案例观测的农业温室气体计量及减排潜力评估[D]. 南京:南京农业大学, 2018:67-68. YUE Q. Quantifying greenhouse gas emissions and the mitigation potential in agriculture with literature statistics method and case study[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2018:67-68.
- [18] PACHAURI K, MEYER A. Climate change 2014: Synthesis report[J]. *Environmental Policy Collection*, 2014, 27(2):408.
- [19] ROSSEEL Y. Lavaan: An R package for structural equation modeling [J]. *Journal of Statistical Software*, 2012, 48(2):3.
- [20] 胡安永, 孙星, 刘勤. 太湖地区不同轮作模式对稻田温室气体(CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1):99-106. HU A Y, SUN X, LIU Q. Effects of different rotation systems on greenhouse gas(CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) emissions in the Taihu Lake region, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1):99-106.
- [21] 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*, 2015, 18(1):194-209.
- [22] DONG W J, GUO J, XU L J, et al. Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: Field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 64(2):289-297.
- [23] 刘启明, 朱艺贞, 焦玉佩, 等. 生态恢复红壤区土壤微生物活性的对比研究[J]. *地球与环境*, 2015, 43(4):420-424. LIU Q M, ZHU Y Z, JIAO Y P, et al. Comparative study on microbial activity of red soil from ecological restoration zone[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(4):420-424.
- [24] 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.
- [25] AHMAD S, LI C F, DAI G Z, et al. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 106(1):54-61.
- [26] 熊丽萍, 吴家梅, 纪雄辉, 等. 水旱轮作系统中土壤CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4):863-871. XIONG L P, WU J M, JI X H, et al. A review on soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy-upland rotation systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4):863-871.
- [27] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(2):207-213. JIANG C S, WANG Y S, ZHENG X H, et al. Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of southwest China[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2):207-213.
- [28] 杨滨娟, 黄国勤. 双季稻田冬种紫云英“双减双增”绿色高效循环农业模式[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(16):51-56. YANG B J, HUANG G Q. A green and efficiency recycling agriculture mode of winter-planting milk vetch with “Double-Reduction and Double-Increment” in double-season rice fields[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2018, 46(16):51-56.
- [29] ALBANITO F, LEBENDER U, CORNULIE R T, et al. Direct nitrous oxide emissions from tropical and sub-tropical agricultural systems: A review and modelling of emission factors[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):44235.
- [30] ZHANG X X, ZHANG R J, GAO J S, et al. Thirty-one years of rice-rice-green manure rotations shape the rhizosphere microbial community and enrich beneficial bacteria[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104:208-217.
- [31] FANG Y, WANG F, JIA X B, et al. Distinct responses of ammonia-oxidizing bacteria and archaea to green manure combined with reduced chemical fertilizer in a paddy soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(4):1613-1623.
- [32] ZOU J W, LU Y Y, HUANG Y. Estimates of synthetic fertilizer N-induced direct nitrous oxide emission from Chinese croplands during 1980-2000[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 158(2):631-635.
- [33] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷减排[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1):99-108. LU F, WANG X K, HAN B, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1):99-108.
- [34] YANG S Q, WANG Y S, LIU R L, et al. Improved crop yield and reduced nitrate nitrogen leaching with straw return in a rice-wheat rotation of Ningxia irrigation district[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):1-8.
- [35] 聂良鹏, 郭利伟, 郑春风, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤理化性状和水稻产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(27):65-69. NIE L P, GUO L W, ZHENG C F, et al. Planting and incorporation of Chinese milk vetch coupled with chemical fertilizer application: Effects on the physical and chemical characters of paddy soil and rice yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(27):65-69.
- [36] 唐先干, 徐昌旭, 谢金水, 等. 紫云英还田与化肥减施对早稻影响的综合评价[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(10):1-8. TANG X G, XU C X, XIE J S, et al. Comprehensive evaluation of effects of Chinese milk vetch returning to field and chemical fertilizer reduction on early rice[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(10):1-8.
- [37] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 豆科绿肥和化肥氮对双季稻田氧化亚氮排放贡献的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(5):704-710. XIONG Z Q, XING G X, TSURUTA H, et al. Nitrous oxide emissions from paddy soils as affected by incorporation of leguminous green manure and fertilization during double-cropping rice-growing season[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5):704-710.

(责任编辑:李丹)