

夏天龙,时红,时元智,等]. 不同播栽方式对稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(21):208–215.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.21.031

# 不同播栽方式对稻田 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及产量的影响

夏天龙<sup>1</sup>,时红<sup>2</sup>,时元智<sup>1</sup>,洪大林<sup>1</sup>,冯中华<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210029;

2. 江西省灌溉试验中心站,江西南昌 330201)

**摘要:**水稻田是甲烷( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等温室气体的主要排放源,在不同水稻播栽方式下,温室气体排放量有差异。设置直播(DS)、人工插秧(AT)、抛秧(SP)和机械插秧(MT)等4种播栽方式,利用静态箱-气相色谱法对双季稻生育期内  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放通量进行监测,分析温室气体在全生育期的排放规律,并用全球增温潜势(GWP)与温室气体排放强度(GHGI)2个指标来综合评价不同水稻播栽方式的减排效益。结果表明,早稻  $\text{CH}_4$  排放主要集中在分蘖期至拔节孕穗期,晚稻  $\text{CH}_4$  的排放峰提前到返青期且峰值明显增大,晚稻  $\text{CH}_4$  排放对总 GWP 的贡献达 69.5%~82.3%;全生育期  $\text{N}_2\text{O}$  的增温潜势仅占总 GWP 的 3.5%~8.2%。在早稻 DS 处理下,  $\text{CH}_4$  的累计排放量最低(26.05 kg/hm<sup>2</sup>),其次为 SP 处理(36.20 kg/hm<sup>2</sup>);在晚稻 SP 处理下,  $\text{CH}_4$  的累计排放量比其他处理低 42.2%~60.2%。AT 处理的全年产量比其他组高 8.1%~10.6%,但温室气体排放量明显较高。SP 处理的 GHGI 比 AT 处理减少了 45.6%,比 DS 处理减少了 33.1%。综合考虑碳减排和作物稳产,抛秧为最优的播栽方式。

**关键词:**双季稻田;不同播栽方式;温室气体;产量;全球增温潜势

**中图分类号:**S352.5;S511.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)21-0208-07

水稻为我国的主要粮食作物,2021 年种植面积约为 3 000 万 hm<sup>2</sup>, 约占全球水稻种植面积的 18.5%<sup>[1]</sup>。据统计,我国稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  年排放量分别达到 700 万 t<sup>[2]</sup> 和 19 万 t<sup>[3]</sup>。过去的稻田温室气体排放研究主要针对人工移栽等传统播栽方式,但近年来随着农村劳动力转移以及农业机械化的发展,耗时费力的人工育秧—插秧方式正逐步被轻简栽培方式所取代。与传统播栽方式相比,轻简栽培方式对土壤的扰动程度不同,可能引起微生物群落结构和功能多样性的改变<sup>[4]</sup>,从而导致温室气体排放量的差异。基于此,有必要开展不同播栽方式下稻田温室气体排放研究,探索水稻高产低碳的种植模式。

已有研究表明,土壤水分状况、温度、pH 值、施肥等因素均会对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放产生影响<sup>[5-6]</sup>。

此外,播栽方式不同会引起稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放差异,适宜的播栽方式可改善稻田土壤结构以及通气性,进而降低稻田土壤微生物的数量和活性,减少温室气体排放<sup>[7]</sup>。已有研究表明,抛秧播栽模式的全球增温潜势(GWP)明显低于移栽模式<sup>[8]</sup>,而直播的稻田  $\text{CH}_4$  排放量和 GWP 显著低于机械插秧<sup>[9]</sup>。国内外针对直播与人工移栽的温室气体排放差异,指出直播方式相对于人工移栽方式能显著降低  $\text{CH}_4$  排放量,同时会不同程度增加  $\text{N}_2\text{O}$  排放量<sup>[10-11]</sup>。

目前,基于多种播栽方式对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放进行研究的报道还较少,特别是在粮食安全与碳达峰、碳中和背景下,针对南方典型稻作区,亟待开展结合作物产量进行高产低碳综合分析的研究。

鄱阳湖平原是我国重要的双季稻作区,本研究利用静态箱-气相色谱法,研究不同播栽方式对鄱阳湖平原典型双季稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放量及产量的影响,旨在提出适宜该区域的稻田高产量、低温室气体排放的播栽方式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验于 2017 年在江西省灌溉试验中心站(115°58'E,28°26'N)水稻试验田进行。该试验站位

收稿日期:2021-12-06

基金项目:国家自然科学基金(编号:51709180);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号:Y917013)。

作者简介:夏天龙(1997—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事农田高效灌排技术及环境效应研究。E-mail:774822609@qq.com。

通信作者:时元智,博士,高级工程师,主要从事农田水碳过程与温室气体研究。E-mail:yzshi@nhri.cn。

于鄱阳湖平原,属亚热带季风性气候。2017 年早稻季平均气温为 25.0 ℃,温度呈上升走势,返青期最低温度为 10.9 ℃,黄熟期最高温度为 31.7 ℃。晚稻生长季的平均温度为 26.4 ℃,温度呈波动下降趋势,返青期气温最高,为 34.0 ℃,黄熟期气温最低,为 13.8 ℃。早、晚稻生长季的总降水量分别为 505.5、363.7 mm,早稻生长季降水量的 52.7% 集中在拔节孕穗期至乳熟期,晚稻生长季降水量的 82.0% 集中在返青期和分蘖期。试验田土壤容重为 1.36 g/cm<sup>3</sup>,土壤类型为水稻土,有机质、氮、磷、钾含量分别为 1.74、0.82、0.25、1.18 g/kg。

## 1.2 试验设计

本研究设直接播种(DS)、人工插秧(AT)、机械插秧(MT)、抛秧(SP)4 种播栽方式。在各播栽方式下,水稻播种、栽种、收割日期及生育期时长见表 1。DS 播种模式的播种量为 13 kg/hm<sup>2</sup>;AT 模式的插秧行距×株距=23.3 cm×13.3 cm;SP 种植模式的栽植密度为 35 株/m<sup>2</sup>;MT 模式使用富来威 2Z-455 型水稻插秧机插秧,栽插平均行距为 26.9 cm,株距为 13.3 cm。早稻于 25 d 秧龄时移栽,晚稻于 15 d 秧龄时移栽。

表 1 不同试验小组播种/移栽、收获日期及生育期时长

稻季	播栽方式	播种/移栽时间 (月-日)	收获时间 (月-日)	生育期时长 (d)
早稻	DS	04-03	07-17	105
	AT	04-24	07-17	84
	SP	04-24	07-17	84
	MT	04-24	07-17	84
晚稻	DS	07-25	11-01	99
	AT	07-29	11-01	95
	SP	07-29	11-01	95
	MT	07-28	11-01	96

试验为大田试验,各小区面积为 100 m<sup>2</sup>。早稻品种采用中嘉早稻 17,晚稻品种采用 H 优 518。播种/移栽前翻耕稻田土壤。田间水分管理采用间歇灌溉模式,各小区用水表控制灌排水量,田埂用塑料薄膜覆盖,防止水肥流失。氮肥用量为 180 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>,早、晚稻氮、磷、钾肥料来源分别为尿素、钙镁磷肥、氯化钾。其中磷肥用量(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为 90 kg/hm<sup>2</sup>,均作基肥施用,基肥、分蘖肥、穗肥中氮肥施用质量比为 3:3:4,基蘖肥、穗肥中钾肥施用质量比为 7:3。基肥施用时间为水稻播栽前 1 d,分蘖肥施用时间为水稻播栽后 5~7 d,穗

肥施用时间为叶龄余数为 1~2 张叶时。

## 1.3 样品采集与监测

采用静态箱-气相色谱法测定 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放通量。静态箱结构分为不锈钢底座和箱体,底座用于固定箱体,箱体长、宽、高皆为 50 cm,当水稻株高接近 50 cm 时,通过叠加相同尺寸的双向开口箱体,使箱体高度增加到 100 cm。气体采集时间为 08:00—11:00,按照 0、10、20、30 min 的间隔采集气体,同时记录箱内温度;每隔 5~7 d 观测 1 次,抽样完成后立即通过气相色谱仪(Agilent7890b)测定气体浓度。

## 1.4 数据的处理与分析

温室气体排放通量的计算方法<sup>[12]</sup>见如下公式:

$$F = \rho H \frac{dC}{dt} \cdot \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中: $F$  为气体排放通量,mg/(m<sup>2</sup>·h); $\rho$  为标准状态下的温室气体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $H$  为采样箱净高,m; $\frac{dC}{dt}$  为气体浓度随时间的变化率; $T$  为箱内温度,℃;

$$c = \sum_{i=1}^n \left( 24D \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \quad (2)$$

式中: $c$  为温室气体总排放量,kg/hm<sup>2</sup>;  $i$  为采样次数; $n$  为总采样次数; $D$  为相邻采样相隔时间,d。

全球增温潜势表示单位质量的温室气体在某个时间尺度上的累计辐射强迫;温室气体排放强度(GHGI)指单位质量水稻生产产生的全球增温潜势。CO<sub>2</sub> 作为参考气体,CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的排放量通过 GWP 值转换为 CO<sub>2</sub> 当量(CO<sub>2</sub>-eq)。在 100 年尺度下,单位质量 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的 GWP 分别为 CO<sub>2</sub> 的 28、273 倍<sup>[13]</sup>,GWP、GHGI 的计算公式分别如下:

$$\text{GWP} = 28 \times F_{\text{CH}_4} + 273 \times F_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

式中:GWP 为增温潜势(以单位面积的 CO<sub>2</sub> 当量计算,下同),kg/hm<sup>2</sup>;  $F_{\text{CH}_4}$  为 CH<sub>4</sub> 总排放量,kg/hm<sup>2</sup>;  $F_{\text{N}_2\text{O}}$  为 N<sub>2</sub>O 总排放量,kg/hm<sup>2</sup>。

$$\text{GHGI} = \frac{\text{GWPs}}{Y} \quad (4)$$

式中:GHGI 为温室气体排放强度(以 CO<sub>2</sub> 当量计算,下同),kg/kg; GWP 为早晚稻增温潜势之和,kg/hm<sup>2</sup>;  $Y$  为早晚稻总产量,kg/hm<sup>2</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同播栽方式下稻田 CH<sub>4</sub> 的排放规律

由图 1 可见,在不同播栽方式下,早、晚稻的 CH<sub>4</sub> 排放通量走势基本一致,各处理的 CH<sub>4</sub> 排放通

量在分蘖期内达到最大值后,迅速下降,拔节期后一直维持低的排放水平。根据表 2 可以看出,生长期 CH<sub>4</sub> 排放规律的不同之处主要在于水稻早期生长阶段的排放程度,各处理晚稻的 CH<sub>4</sub> 排放量占生育期累计排放量的主体地位,占比为 75.7%~88.2%。

从生育期来看,早稻的 CH<sub>4</sub> 排放主要集中在水稻植株生长阶段的分蘖期到拔节孕穗期,4 种播栽方式的平均排放通量为 27.20 mg/(m<sup>2</sup>·h)。在分蘖期内的不同处理下,CH<sub>4</sub> 排放有 2~3 个峰值,过峰后迅速变为低排放状态,在抽穗开花末期,各处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量到达 1 个小高峰,其余时间的 CH<sub>4</sub> 排放通量均维持在较低水平(图 1)。早稻季首个 CH<sub>4</sub> 排放峰值在分蘖前期,不同播栽方式的平均排放通量为 3.43 mg/(m<sup>2</sup>·h),主要因为这段时间气温上升至水稻的最适生长温度,土温升高也增强了产甲烷菌的整体活性。分蘖期 CH<sub>4</sub> 的排放达到早稻生育期的峰值,4 种播栽方式的最大平均排放

通量为 9.91 mg/(m<sup>2</sup>·h)。晒田后,CH<sub>4</sub> 通量迅速下降至较低水平,主要是由于晒田行为增加了土壤通气性,破坏了甲烷菌生存繁殖所需的严格厌氧环境。在拔节初期,AT、SP 处理下的 CH<sub>4</sub> 通量有明显回升,AT 的最高排放通量达到 12.44 mg/(m<sup>2</sup>·h)。在 6 月,随着降水和气温的增加,田面淹水状况增多,小幅增强了产甲烷菌活性,使得 CH<sub>4</sub> 通量略微升高。晚季稻的 CH<sub>4</sub> 排放也呈现出先高后低的变化趋势,但排放峰出现的时间较早稻明显提前。在分蘖前期,CH<sub>4</sub> 排放通量便迅速上升到峰值,4 种不同播栽方式的平均 CH<sub>4</sub> 排放通量为 51.45 mg/(m<sup>2</sup>·h)。在水稻分蘖末期进行晒田处理后,土壤的通气性大幅提升,土壤有效氧供应得到改善,导致 CH<sub>4</sub> 排放通量迅速下降。在拔节期复水施肥后,各处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量开始回升,但由于间歇灌溉模式水层控制及反复落干晾晒,甲烷菌的繁殖、气体排放回升程度受限。

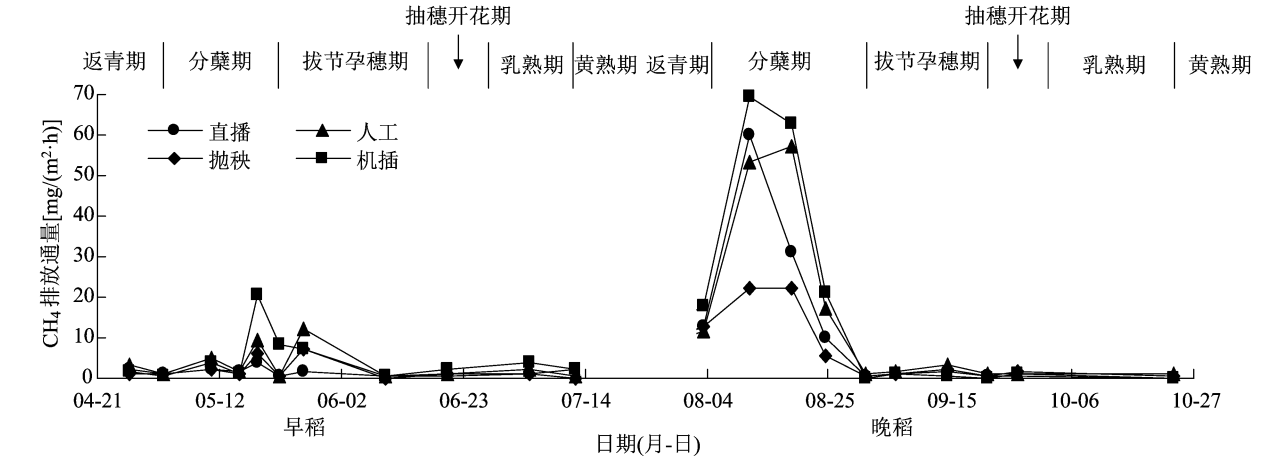


图1 CH<sub>4</sub> 排放通量的变化

在不同播栽方式下,CH<sub>4</sub> 的排放差异较明显。早稻总 CH<sub>4</sub> 排放量从低到高排序为 DS、SP、AT、MT。早稻平均 CH<sub>4</sub> 排放量为 49.49 kg/hm<sup>2</sup>,DS 处理比平均排放量低 47.4%。AT、MT 处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量峰值明显高于其他处理,在早稻季分蘖期,AT、MT 处理的最 CH<sub>4</sub> 排放通量分别达到 9.35、20.56 mg/(m<sup>2</sup>·h),晚稻季 AT、MT 处理的最 CH<sub>4</sub> 排放通量分别达到 56.94、69.72 mg/(m<sup>2</sup>·h)。早、晚稻季分蘖期 AT、MT 处理的 CH<sub>4</sub> 排放量比其他处理高,AT 处理的累计排放量分别占早稻季、晚稻季、总排放量的 31.8%、29.4%、29.8%,MT 处理的累计排放量分别占早稻季、晚稻季、总排放量的 36.7%、33.9%、34.4%。在 SP 处理下,晚稻 CH<sub>4</sub> 排放通量峰值明显低于其他处理。早稻季的最高 CH<sub>4</sub> 排放通量为

7.01 mg/(m<sup>2</sup>·h),晚稻季的减排效果显著,最高 CH<sub>4</sub> 排放通量为 22.40 mg/(m<sup>2</sup>·h),晚稻 SP 播栽方式的累计 CH<sub>4</sub> 排放量比其他处理低 42.2%~60.2%。由于直播稻不存在返青期,所以 DS 处理 CH<sub>4</sub> 排放峰值较其他处理稍有提前和集中,分蘖前期的 CH<sub>4</sub> 排放量仅次于 MT 处理,为 60.18 mg/(m<sup>2</sup>·h),但从晚稻累计排放量上看,DS 处理的排放量分别比 AT、MT 处理减少了 20.6%、31.2%(表 2)。

表 2 不同播栽方式下稻田 CH<sub>4</sub> 的累计排放量

稻季	CH <sub>4</sub> 的累计排放量(kg/hm <sup>2</sup> )			
	DS	AT	SP	MT
早稻	26.05	62.97	36.20	72.72
晚稻	194.88	245.58	112.59	283.12
合计	220.93	308.55	148.79	355.84

## 2.2 不同播栽方式下稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放规律

由图 2 可以看出,早稻、晚稻稻田中  $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量呈波浪式,在水稻种植/移栽初期, $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量普遍较低,到分蘖后期上升到第 1 个峰值;在拔节孕穗初期, $\text{N}_2\text{O}$  排放出现谷值,之后保持波动。不同播栽方式的  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量见表 3,可见各处理间年际累计  $\text{N}_2\text{O}$  排放量无明显差异,AT、SP、MT 处理的年际累计  $\text{N}_2\text{O}$  排放量为  $1\,325.09 \sim 1\,361.36 \text{ g/hm}^2$ ,DS 处理略高于其他 3 种处理,为  $1\,621.48 \text{ g/hm}^2$ 。

对于早稻而言,各  $\text{N}_2\text{O}$  处理在整个生育期内有

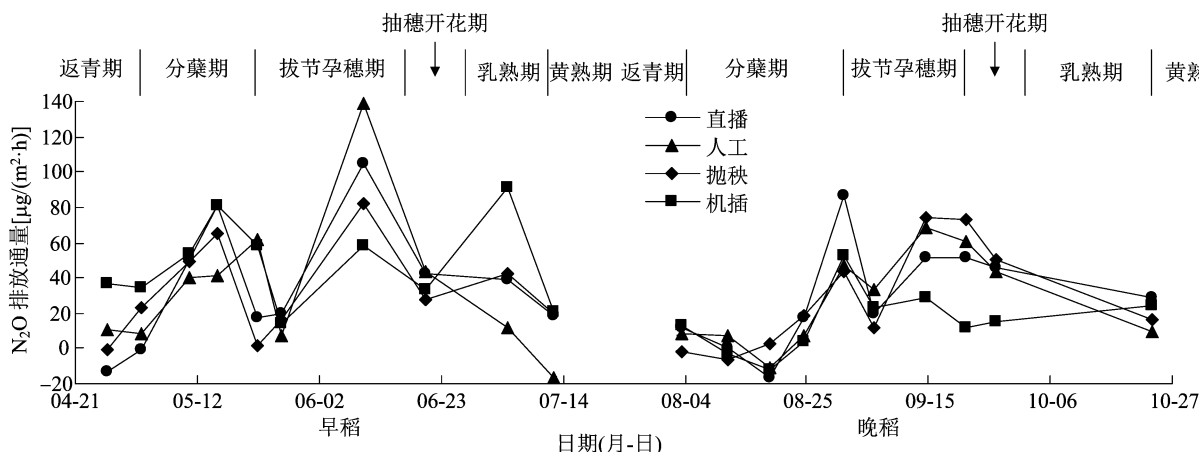


图2  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的变化

早稻季各处理之间的  $\text{N}_2\text{O}$  排放规律差异较小,DS 与 SP 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量契合程度较高,在返青初期都为微量的负排放,峰值出现频次与时期都较契合,主要集中于拔节孕穗末期,DS、SP 处理的最高  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰值分别为  $105.27$ 、 $82.22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,在分蘖末期也有较高的排放通量,其余时间  $\text{N}_2\text{O}$  呈微量排放甚至吸收状态。在 AT 处理下, $\text{N}_2\text{O}$  排放主要集中在拔节期与抽穗开花期,这 2 个时期的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量占晚稻季累计排放量的  $62.1\%$ ,略高于其他处理。在 MT 处理下, $\text{N}_2\text{O}$  排放主要发生在分蘖末期、乳熟期,这 2 个时期排放量对累计排放量的贡献相近。在晚季稻 SP 处理下, $\text{N}_2\text{O}$  排放通量在返青后 7 d 到达最低值  $-6.88 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,DS、AT 和 MT 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量在返青后 14 d 达到最低值,排放通量为  $-16.56 \sim -10.75 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在拔节孕穗初期,各处理均监测出  $\text{N}_2\text{O}$  的排放峰,DS 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量为  $87.22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,另外 3 种处理间的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量差异不大,为  $43.60 \sim 52.77 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。从拔节孕穗期至收获期, $\text{N}_2\text{O}$  的累计排放量呈 SP 处理( $503.03 \text{ g/hm}^2$ ) > DS 处理( $465.94 \text{ g/hm}^2$ ) > AT 处理( $454.01 \text{ g/hm}^2$ ) > MT

2~3 个排放峰,较明显的峰值分别出现在分蘖末期、拔节孕穗末期。DS、AT、SP 处理的最高排放通量在拔节孕穗末期,而 MT 处理的高排放峰在乳熟期,排放通量为  $91.42 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在晚稻生育前期, $\text{N}_2\text{O}$  的排放通量较低,在分蘖前期甚至呈现为  $\text{N}_2\text{O}$  的汇。在分蘖末期,各处理达到第 1 个  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰,至拔节孕穗初期复水后, $\text{N}_2\text{O}$  排放通量迅速下降到谷值,在拔节末期,各处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量有不同程度的上升。

处理( $232.20 \text{ g/hm}^2$ ),分别占晚稻累计排放量的  $80.3\%$ 、 $59.4\%$ 、 $78.6\%$ 、 $62.8\%$ (表 3)。由计算结果可看出,在间歇灌溉模式下,晚稻分蘖末期后为  $\text{N}_2\text{O}$  的主要排放时期,而该时期 MT 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量相对较小。

表 3 不同播栽方式下稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的累计排放量

稻季	$\text{N}_2\text{O}$ 累计排放量( $\text{g/hm}^2$ )			
	DS	AT	SP	MT
早稻	837.12	783.77	733.62	955.37
晚稻	784.37	577.59	626.77	369.72
合计	1 621.48	1 361.36	1 360.39	1 325.09

## 2.3 不同播栽方式下早、晚稻产量分析

早稻实际产量中 DS、SP、MT 处理的产量为  $6\,327.43 \sim 6\,445.78 \text{ kg/hm}^2$ ,其中 DS 处理的产量最高,SP 处理的产量最低;AT 处理的产量为  $7\,233.70 \text{ kg/hm}^2$ ,相较于其他播栽方式的增产效益为  $12.2\% \sim 14.3\%$ ,主要由于 AT 处理秧苗成活率高,种植密度均匀,后期维护全面等因素产生了增产效益。晚稻产量呈 AT 处理( $7\,947.11 \text{ kg/hm}^2$ ) > SP 处理( $7\,719.65 \text{ kg/hm}^2$ ) > MT 处理( $7\,713.70 \text{ kg/hm}^2$ ) >

DS 处理( $7\,276.58\text{ kg/hm}^2$ ), AT 处理仅比 SP 处理增产 3%, 结合产量对比结果可知, AT 处理的优势在晚季稻期并不明显, 可能是由于晚季稻秧苗在早期具有生长环境带来的优势, 在一定程度上弥补了其他播栽方式对产量造成的影响(图 3)。各稻季 AT 处理的产量都最高, AT 处理的早季稻具有较高的穗粒数, 平均为 139.7 粒/穗, 晚季稻具有较高的有效穗数, 为 376.7 万穗/ $\text{hm}^2$ 。在早、晚季稻产量数据中, SP 与 MT 处理的产量数据非常相近。均呈早稻产量低的特征, 早稻 SP 处理的穗粒数较少, 平

均为 78.7 粒/穗; 早稻 MT 处理的结实率低于各处理平均水平, 为 73.0%。由此可见, 在不同播栽方式中, AT 处理具有一定的增产效果, 而 SP 与 MT 处理之间的产量受播栽方式的影响较小。DS 处理受外界环境影响, 使得其产量具有一定的波动性, 呈早稻较高、晚稻较低的现象, 晚稻产量下降可能是由于生长环境或培养方式的影响, 穗粒数为 135.8 粒/穗, 其他处理的穗粒数为 152.4 ~ 155.8 粒/穗(图 3)。

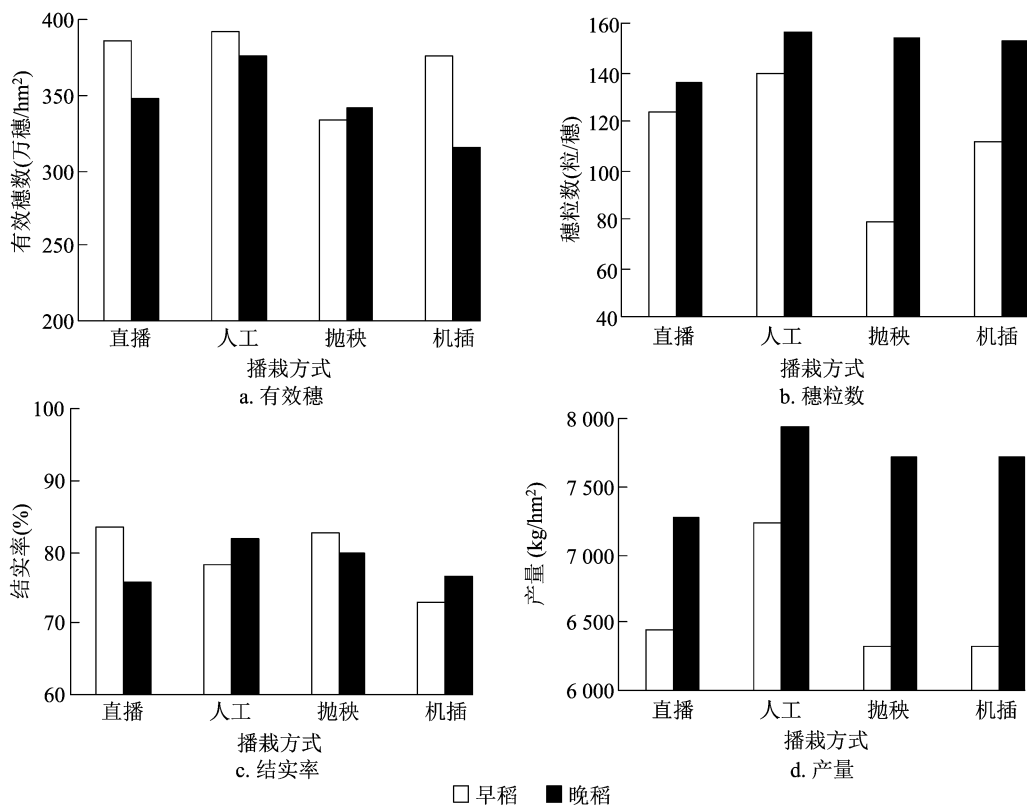


图3 不同播栽方式的早晚稻产量

## 2.4 不同播栽方式下 GWP、GHGI 的分析

如表 4 所示, 在 4 种播栽方式下, 双季稻田的 GWP 范围为  $4.5 \sim 10.3\text{ t/hm}^2$ ; 在不同处理下,  $\text{CH}_4$  排放量的  $\text{CO}_2$  当量占 GWP 的主要部分,  $\text{N}_2\text{O}$  占比明显较小; 晚稻的  $\text{CH}_4$  排放量皆大于早稻, 因此温室效应的贡献主要来源于晚稻, 各处理晚稻的  $\text{CH}_4$  增温潜势占总 GWP 贡献的 69.5% ~ 82.3%。

在早晚稻生育期内, 各处理的 GWP、GHGI 由小到大依次为 SP 处理、DS 处理、AT 处理、MT 处理, 其中 DS 处理、SP 处理的  $\text{CH}_4$  排放量明显低于其他处理, 弥补了  $\text{N}_2\text{O}$  较高排放量带来的减排劣势。SP 处理的 GHGI 相比 AT 处理减少了 45.8%, 比 DS 处理

减少了 33.3%。MT 处理的 GWP 大部分来源于晚稻的  $\text{CH}_4$  排放量, 占该播栽方式 GWP 的 76.8%。

## 3 讨论

关于不同播栽方式对稻田温室气体排放及全球增温潜势的影响, 张岳芳等的研究结果显示, 相较于人工移栽, 直播播栽方式能显著减少稻田的  $\text{CH}_4$  排放量, 而  $\text{N}_2\text{O}$  排放会相对增加<sup>[9-11]</sup>。张岳芳等研究发现, 机械插秧的 GWP 值高于人工移栽, 而直播显著增加了  $\text{N}_2\text{O}$  排放量<sup>[9]</sup>, 这是因为  $\text{N}_2\text{O}$  排放与  $\text{CH}_4$  排放程度存在此消彼长的关系, 充足的土壤水分可为产甲烷菌的繁殖提供厌氧环境, 从而促进

表 4 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 全球增温潜势

播栽方式	早稻				晚稻				GWP <sub>s</sub> (kg/hm <sup>2</sup> )	GHGI (kg/kg)
	CH <sub>4</sub> 的 增温潜势 (kg/hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O 的 增温潜势 (kg/hm <sup>2</sup> )	GWP (kg/hm <sup>2</sup> )	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	CH <sub>4</sub> 的 增温潜势 (kg/hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O 的 增温潜势 (kg/hm <sup>2</sup> )	GWP (kg/hm <sup>2</sup> )	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )		
DS	729.42	228.53	957.95	6 445.78	5 456.60	214.13	5 670.73	7 276.58	6 628.69	0.48
AT	1 763.20	213.97	1 977.09	7 233.70	6 876.29	157.68	7 033.97	7 947.11	9 011.06	0.59
SP	1 013.71	200.28	1 213.99	6 327.43	3 152.48	171.11	3 323.58	7 719.65	4 537.58	0.32
MT	2 036.22	260.81	2 297.04	6 332.16	7 927.30	100.93	8 028.24	7 713.70	10 325.27	0.74

CH<sub>4</sub> 的产生与累积,同时促进反硝化作用,将土壤中 N<sub>2</sub>O 还原为 N<sub>2</sub><sup>[14-16]</sup>,而在低水位条件下,反硝化作用会随水分含量的减少而减弱,从而相应地缩短 N<sub>2</sub>O 的扩散时间,降低 N<sub>2</sub>O 被还原为 N<sub>2</sub> 的概率,间接提高 N<sub>2</sub>O 的排放量。目前国内外有关抛秧播栽方式对稻田 CH<sub>4</sub> 排放影响的研究较少,在本试验中,SP 处理的 CH<sub>4</sub> 累计排放量明显低于 AT、MT 处理,与谭雪明等的研究结果<sup>[8]</sup>一致。在水稻生育期进行适宜晒田作业可减少温室气体排放,但实际减排效果因试验状况而异。直播方式与抛秧播栽方式的 CH<sub>4</sub> 排放量受稻田水位、晒田操作影响较大,可能是因为直播方式下的水稻根系在生育前期生长动态较活跃,不定根数、不定根总长度、根体积、根干质量等指标增长较快<sup>[17]</sup>,根系泌氧能力较强,根际氧化区范围广,土壤 CH<sub>4</sub> 产生层逐渐向深层转移<sup>[4,18]</sup>,从 CH<sub>4</sub> 的植物通气组织排放途径和二次氧化程序上都形成了生育后期 CH<sub>4</sub> 减排效果。另一方面,直播水稻与抛秧水稻在移栽环节中没有或在很小程度上对土壤进行扰动,维持了土壤毛孔的连贯程度和通气性,减少了土壤根系层甲烷菌生存密度。直播稻生育期较提前,植物生长情况与移栽方式相比较提前,植物体内部通气组织作为 CH<sub>4</sub> 从土壤层到大气的主要通道<sup>[18-19]</sup>,在一定程度上增强了生育前期直播处理下水稻的 CH<sub>4</sub> 运输能力,而产甲烷菌和甲烷氧化菌的丰度及其活性也会影响 CH<sub>4</sub> 释放<sup>[20]</sup>。前期淹水土壤氧化还原电位较低,给甲烷菌繁殖提供了有利条件<sup>[9]</sup>,此时 CH<sub>4</sub> 生产处于高峰时期,CH<sub>4</sub> 运输速度超过了该时间段根际泌氧能力,因此形成了较提前且集中的排放峰。SP、DS 处理在生长后期通过晒田、间歇灌溉模式控制,凭借土壤结构优势,厌氧环境被迅速破坏,因此晒田期排放仍低于 MT、AT 处理。国内外部分研究者指出,适宜的土壤耕作措施有利于提高晚稻生育期土壤微生物

物活度<sup>[21]</sup>,改变土壤原有通气结构,从而降低 CH<sub>4</sub> 的氧化程度,提高排放量,通过影响土壤的均匀度也会影响 N<sub>2</sub>O 的产生与排放<sup>[22-24]</sup>。相似地,关于机械插秧和人工插秧具有较高的 CH<sub>4</sub> 累计排放量,一定程度上是由于在移栽环节不同程度地改变了土壤结构,使土壤通气性不同程度地降低,利于厌氧型甲烷菌生存繁殖,并且在实际种植操作方面,该 2 种播栽方式水稻根系区分布与其他 2 种处理不同,特别是机械插秧,秧苗根部深度一般为 1.5 ~ 2.0 cm,部分地区实际深度达到 4.31 cm<sup>[25]</sup>,由于土地平整度受到客观因素的限制,加上预防漂苗减产的综合考虑,秧苗深度较深,导致根系区整体中心偏下,便于释放更深层土壤微生物所产生的气体。N<sub>2</sub>O 排放峰出现时间主要集中在晒田期、复水施肥阶段,这是因为控制灌溉稻田复水施肥阶段中,土壤存在大量 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N,为反硝化作用产生 N<sub>2</sub>O 提供充足氮源<sup>[11,26]</sup>,Zou 等的研究发现,水稻田在间歇灌溉模式下,N<sub>2</sub>O 累计排放量与氮肥施入量呈明显的线性关系<sup>[27]</sup>。N<sub>2</sub>O 排放时期主要为早晚稻的分蘖末期、拔节孕穗期及之后成熟的时期,这些时期的共同特点是田间水位控制较低,而土壤水分的降低会提高土壤呼吸强度对温度的敏感性<sup>[28]</sup>。间歇灌溉模式土壤含水量适中,提供了良好的气体运输条件,不仅提高了氧化还原电位、增强了硝化细菌和反硝化细菌的活性,而且增大了土壤颗粒孔隙,促进闭蓄态 N<sub>2</sub>O 的释放<sup>[29]</sup>。白小琳等在 0 ~ 14 d 内观测到晚稻 N<sub>2</sub>O 与 CH<sub>4</sub> 的正相关排放阈值<sup>[22]</sup>,本研究并没有观测到,可能是晚季稻田初期具有较高的温度及淹水条件,使 CH<sub>4</sub> 的生成和排放量迅速增加并保持高通量排放,提前达到了抑制 N<sub>2</sub>O 的程度。此外,稻田温室气体排放与土壤微生物数量种类以及活性密切相关,栽培方式对土壤微生物群落结构和功能多样性的影响主要体现在直播方式和

机械插秧方式具有最高的土壤微生物 OTUs 的丰富度和丰度表现,并且微生物群落结构显著不同于移栽和抛秧<sup>[4]</sup>,这与本试验晚稻 N<sub>2</sub>O 排放情况相符合,本试验晚稻 N<sub>2</sub>O 排放中 AT 与 SP 处理也具有较一致的排放走势。

由本研究结果可以看出,双季稻 CH<sub>4</sub> 排放主要来自晚稻,晚稻 GWP 贡献大于早稻。N<sub>2</sub>O 对水稻生育期的 GWP 贡献较小<sup>[8-9,30]</sup>,本试验中仅占 3.5%~8.2%,因此温室气体减排仍然以控制 CH<sub>4</sub> 排放为主<sup>[31]</sup>。双季稻以 SP 处理的减排效果显著,总生育期 GWP 比 DS、AT 和 MT 处理低 31.5%~56.1%。在产量方面,AT 处理始终具有最高经济效益,DS 处理更易受外界气候和种植期间人工维护的影响,MT 处理产量与抛秧播栽方式接近。因此计划产出量较高的稻作区可考虑人工插秧,而在结合节能减排以及稳定增产的角度,抛秧播栽方式为最优方法。

## 4 结论

在本试验中,4 种播栽方式的 CH<sub>4</sub> 累计排放量为 148.79~355.84 kg/hm<sup>2</sup>,N<sub>2</sub>O 的累计排放量为 1 325.09~1 621.48 g/hm<sup>2</sup>。早稻季的 CH<sub>4</sub> 总排放量呈 MT 处理>AT 处理>SP 处理>DS 处理,晚稻季呈 MT 处理>AT 处理>DS 处理>SP 处理,其中晚稻 SP 处理的 CH<sub>4</sub> 总排放量比其他处理低 42.2%~60.2%。在水稻生育期,AT、SP、MT 处理的 N<sub>2</sub>O 累计排放量为 1 325.09~1 361.36 g/hm<sup>2</sup>,DS 处理为 1 621.48 g/hm<sup>2</sup>。N<sub>2</sub>O 的 GWP 贡献较小,因此从减排角度出发,主要考虑 CH<sub>4</sub> 排放的影响。早稻产量中,AT 处理与其他处理间差异较大,AT 处理比其他处理增产 12.2%~14.3%。晚稻产量呈 AT 处理>SP 处理>MT 处理>DS 处理,AT 处理较 SP 处理的增产效果不明显,仅为 3%。早晚稻的 GHGI 为 MT 处理>AT 处理>DS 处理>SP 处理。

## 参考文献:

- [1] FAO. Crops and livestock products of FAOSTAT[DB/OL]. (2021-03-19) [2021-10-15]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/QCL>.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Yue Q, Wu H, Sun J F, et al. Deriving emission factors and estimating direct nitrous oxide emissions for crop cultivation in China [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(17): 10246-

10257.

- [4] 林小兵,时红,武琳,等. 栽培方式对红壤性稻田土壤微生物群落结构和多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2206-2214.
- [5] 成臣,杨秀霞,汪建军,等. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 186-195.
- [6] 李帅帅,张雄智,刘冰洋,等. Meta 分析湖南省双季稻田甲烷排放影响因素[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 124-132.
- [7] 邵美红,孙加焱,阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 181-187.
- [8] 谭雪明,黄山,熊超,等. 不同栽培模式对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(12): 341-344.
- [9] 张岳芳,陈留根,张传胜,等. 水稻机械化播栽对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 232-241.
- [10] Liu S W, Zhang Y J, Lin F, et al. Methane and nitrous oxide emissions from direct-seeded and seedling-transplanted rice paddies in southeast China[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 285-297.
- [11] Mohanty S, Swain C K, Sethi S K, et al. Crop establishment and nitrogen management affect greenhouse gas emission and biological activity in tropical rice production [J]. Ecological Engineering, 2017, 104(PtA): 80-98.
- [12] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis by IPCC WG I [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [13] IPCC. AR6 Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [14] Kumar A, Nayak A K, Mohanty S, et al. Greenhouse gas emission from direct seeded paddy fields under different soil water potentials in Eastern India [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 228: 111-123.
- [15] 彭程琳,崔远来,才硕,等. 水肥管理对鄱阳湖流域稻田温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 85-93.
- [16] 李金秋,邵晓辉,邵晓辉,等. 水肥管理对热带地区双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3458-3471.
- [17] 刘红江,蒋银涛,陈留根,等. 不同播栽方式对水稻根系生长及产量形成的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(2): 310-316.
- [18] 沈学良,田光蕾,周元昌,等. 水稻生物学特性对稻田甲烷排放的影响[J]. 农学学报, 2020, 10(2): 75-80.
- [19] 张晓艳,马静,李小平,等. 稻田甲烷传输的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(2): 181-187.
- [20] 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 CH<sub>4</sub> 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14): 2484-2499.
- [21] 汪洋,杨殿林,王丽丽,等. 农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 340-352.
- [22] 白小琳,张海林,陈阜,等. 耕作措施对双季稻田 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 282-289.
- [23] 胡慧娴,袁丹,曾佳瑞,等. 植物排放 N<sub>2</sub>O 研究进展[J]. 中国

赖 宁,耿庆龙,信会男,等. 有机肥替代部分化学氮肥对南疆超晚播冬小麦产量、氮磷吸收利用及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学,2022, 50(21):215–220.

doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2022.21.032

# 有机肥替代部分化学氮肥对南疆超晚播冬小麦产量、氮磷吸收利用及土壤肥力的影响

赖 宁<sup>1,2</sup>,耿庆龙<sup>1,2</sup>,信会男<sup>1,2</sup>,李永福<sup>1,2</sup>,李 娜<sup>1,2</sup>,范贵强<sup>3</sup>,陈署晃<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所,新疆乌鲁木齐 830091; 2. 新疆农业科学院农业遥感中心,新疆乌鲁木齐 830091;

3. 新疆农业科学院粮食作物研究所,新疆乌鲁木齐 830091)

**摘要:**为探索南疆超晚播冬小麦有机肥替代部分化学氮肥的适宜比例,采用田间小区试验,以新冬 20 号为研究对象,设置单施化肥(CF)、有机肥替代 20% 氮肥(NMF1)、有机肥替代 40% 氮肥(NMF2)、有机替代 60% 氮肥(NMF3)等 4 个试验处理,研究不同有机氮替代化肥氮比例对南疆超晚播冬小麦产量、氮磷养分吸收利用及土壤肥力的影响。结果表明,南疆超晚播冬小麦有机肥替代部分化学氮肥适宜比例应为 20%,相比单施化肥,有机肥替代 20% 化学氮肥(NMF1)条件下,超晚播冬小麦生物量和产量分别提高了 7.21% 和 6.54%,氮、磷养分总吸收积累量分别提高 9.88% 和 37.91%,氮、磷肥料偏生产力均提高了 6.54%,同时 0~10 cm 土层土壤中有机质含量提高了 9.23%,全氮含量提高了 15.15%,碱解氮含量提高了 21.69%,速效磷含量提高了 28.16%。

**关键词:**有机氮替代比例;超晚播冬小麦;产量;养分吸收利用;土壤肥力

**中图分类号:**S512.106 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2022)21–0215–06

南疆是新疆维吾尔自治区重要的棉花优势产区,种植面积大,长期连作会导致连作障碍发生,对

棉田生态环境造成一定负面影响<sup>[1]</sup>。棉花收获后种植冬小麦是棉田重要的倒茬方式,由于南疆棉花在 10 月中下旬才收获完毕,棉花茬小麦只能在 10 月下旬至 11 月上中旬播种,较适期播种(9 月中下旬至 10 月上旬)晚近 30 d。相关研究表明,超晚冬播小麦具有节水的优点<sup>[2]</sup>,这对于缓解南疆水资源短缺具有重要意义,然而超晚播冬小麦易出现出苗率低而不稳、苗弱、根系发育和分蘖差<sup>[3]</sup>,影响产量。采取一定的栽培措施,以弥补晚播对小麦个体、群体生长的负面影响,对提高超晚播小麦产量,保障粮食安全具有重要意义。

收稿日期:2021–12–24

基金项目:新疆农业科学院科技创新重点培育专项(编号:kjkcpy–003);国家重点研发计划(编号:2018YFD0200406);农业农村部耕地质量保护专项“耕地质量监测评价”。

作者简介:赖 宁(1985–),男,陕西安康人,硕士,副研究员,主要从事土壤肥料与农业信息技术研究与应用。E-mail:441270771@qq.com。

通信作者:陈署晃,硕士,研究员,主要从事土壤肥料与农业信息技术研究与应用。E-mail:chensh66@163.com。

生态农业学报(中英文),2021,29(2):345–354.

[24]韩 上,武 际,李 敏,等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(2):276–284.

[25]任艳军. 北方水稻机械插秧技术要点[J]. 北方水稻,2014,44(2):55–56.

[26]刘时光,王晓玲,王元涛,等. 稻田土壤氧化亚氮产生潜势、反硝化功能基因丰度和群落结构的垂直分布[J]. 环境科学学报,2020,40(3):1040–1050.

[27]Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. Quantifying direct N<sub>2</sub>O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China:dependence on water regime[J]. Atmospheric Environment, 2007,41(37):8030–8042.

[28]Gutiérrez M E, Gil – Sotres F, Leirós M C, et al. Sensitivity of soil respiration to moisture and temperature[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2013,13(2):445–461.

[29]成 臣,曾勇军,杨秀霞,等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(6):1887–1895.

[30]石生伟,李玉娥,万运帆,等. 不同氮、磷肥用量下双季稻田的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放[J]. 环境科学,2011,23(7):1899–1907.

[31]Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice – cropping systems: a 3 – year field measurement in long – term fertilizer experiments[J]. Global Change Biology, 2011,17(6):2196–2210.