

引用格式:

滕容, 彭美丹, 傅志强, 郑华斌, 周传嘉, 左锴, 张秋平. 不同水氮运筹模式对双季稻CH<sub>4</sub>排放及有机碳组分的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 1–9.

TENG R, PENG M D, FU Z Q, ZHENG H B, ZHOU C J, ZUO K, ZHANG Q P. Effects of different water and nitrogen management patterns on CH<sub>4</sub> emission and organic carbon components of double-cropping rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(6): 1–9.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 不同水氮运筹模式对双季稻CH<sub>4</sub>排放及有机碳组分的影响

滕容, 彭美丹, 傅志强, 郑华斌, 周传嘉, 左锴, 张秋平\*

(湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 为探究不同水分处理和施氮水平及其互作对双季稻CH<sub>4</sub>排放及土壤有机碳组分的影响, 本研究以早稻‘株两优819’和晚稻‘泰优390’为试验材料, 设置水分和氮肥双因素裂区试验, 以水分处理为主区, 设置常规灌溉(W<sub>1</sub>)、节水灌溉(W<sub>2</sub>)2个水平, 以氮肥处理为副区, 设置N<sub>0</sub>(0 kg/hm<sup>2</sup>)、N<sub>1</sub>(120 kg/hm<sup>2</sup>)、N<sub>2</sub>(150 kg/hm<sup>2</sup>)、N<sub>3</sub>(180 kg/hm<sup>2</sup>)4个水平, 对不同处理的CH<sub>4</sub>排放通量、累积排放量、土壤有机碳(SOC)、水溶性有机碳(WSOC)、微生物量碳(MBC)含量进行比较分析, 并对CH<sub>4</sub>排放通量与土壤有机碳组分含量进行相关性分析。结果表明: 相较于W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>处理有效降低了稻田CH<sub>4</sub>排放, W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>和W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>处理表现出较好的CH<sub>4</sub>减排效果; 而随着氮肥水平的增加, CH<sub>4</sub>排放呈上升趋势; W<sub>2</sub>促进了土壤有机碳组分的积累, 尤其在N<sub>2</sub>水平下, SOC、WSOC和MBC的含量最高, W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>处理的效果最显著; 稻田CH<sub>4</sub>排放与WSOC和MBC含量呈极显著正相关, 与土壤SOC含量相关性不显著。综合分析, 采用节水灌溉模式配施150 kg/hm<sup>2</sup>氮素处理能在有效减少稻田CH<sub>4</sub>排放的同时保持较高的土壤有机碳含量, 有利于湖南双季稻区水稻的绿色高效生产。

**关键词:** 双季稻; 水分管理; 施氮水平; CH<sub>4</sub>排放; 土壤有机碳组分

中图分类号: S511.06

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)06-0001-09

## Effects of different water and nitrogen management patterns on CH<sub>4</sub> emission and organic carbon components of double-cropping rice

TENG Rong, PENG Meidan, FU Zhiqiang, ZHENG Huabin, ZHOU Chuanjia, ZUO Kai, ZHANG Qiuping\*

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of different water treatments and nitrogen application levels and their interactions on CH<sub>4</sub> emissions and soil organic carbon components of double-cropping rice, this study used early rice ‘Zhuliangyou 819’ and late rice ‘Taiyou 390’ as test materials, and set up a two-factor split plot experiment with water and nitrogen fertilizer. Water treatment was the main area, with two levels of conventional irrigation(W<sub>1</sub>) and water-saving irrigation(W<sub>2</sub>), nitrogen fertilizer treatment was the sub-area, with the nitrogen amount of 0(N<sub>0</sub>), 120(N<sub>1</sub>), 150(N<sub>2</sub>), 180(N<sub>3</sub>) kg/hm<sup>2</sup>, CH<sub>4</sub> emission flux, cumulative emissions, soil organic carbon(SOC), soluble organic carbon(WSOC), and biomass carbon(MBC) contents of different treatments were compared and analyzed, and the correlation between CH<sub>4</sub> emission and soil organic carbon component content was analyzed. The results showed that compared with W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub> treatment effectively reduced CH<sub>4</sub> emissions from rice fields, and W<sub>2</sub>N<sub>1</sub> and W<sub>2</sub>N<sub>2</sub> treatments showed better CH<sub>4</sub> emission reduction effects; and with the increase of nitrogen fertilizer levels, CH<sub>4</sub> emissions increased. W<sub>2</sub> promoted the accumulation of soil organic carbon components. Especially at N<sub>2</sub> level, SOC, WSOC and MBC contents were the highest, and the effect of W<sub>2</sub>N<sub>2</sub> treatment was the most significant. There was a very significant positive correlation between CH<sub>4</sub> emissions from rice fields and WSOC and MBC contents, but no significant correlation with soil SOC content. Comprehensive analysis shows that Adopting water-saving irrigation model combined with 150 kg/hm<sup>2</sup>

收稿日期: 2025-02-25

修回日期: 2025-05-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300305)

作者简介: 滕容(1999—), 女, 湖南怀化人, 硕士研究生, 主要从事作物学研究, 2369469879@qq.com; \*通信作者, 张秋平, 博士, 副教授, 主要从事作物栽培与抗病分子机理研究, zhangqiuping@hunau.edu.cn

nitrogen treatment can effectively reduce CH<sub>4</sub> emissions from rice fields while maintaining high soil organic carbon content, which is conducive to green and efficient rice production in Hunan's dual-cropping rice region.

**Keywords:** double cropping rice; water management; nitrogen application level; CH<sub>4</sub> emissions; soil organic carbon components

甲烷(CH<sub>4</sub>)作为温室气体的重要组成部分,与气候变化密切相关。农业生产是大气CH<sub>4</sub>的主要来源之一,占全球人为CH<sub>4</sub>排放的50%<sup>[1]</sup>,其中,稻田被认为是CH<sub>4</sub>的主要来源之一,排放量占全球人为CH<sub>4</sub>排放量的20%<sup>[2-3]</sup>。因此,减少稻田CH<sub>4</sub>排放是缓解全球气候变化的有效方法之一。水分管理与氮肥施用是影响稻田温室气体排放的重要因素<sup>[4]</sup>。研究<sup>[5]</sup>发现,节水灌溉能显著减少稻田CH<sub>4</sub>排放量。与淹水灌溉相比,节水灌溉可通过改变土壤含水量,改善土壤的通气性,提高土壤的氧气供应量,从而减少稻田在厌氧条件下的CH<sub>4</sub>排放<sup>[6]</sup>。将淹水灌溉处理(淹水-烤田-复水-间歇灌溉)改为节水灌溉处理(控制灌溉、间歇灌溉或湿润灌溉)可有效降低稻田CH<sub>4</sub>排放量20%~30%<sup>[7-8]</sup>;氮肥施用量对稻田CH<sub>4</sub>排放量影响的研究结果尚无定论。有研究发现,与210 kg/hm<sup>2</sup>施氮处理相比,90 kg/hm<sup>2</sup>和150 kg/hm<sup>2</sup>施氮处理的CH<sub>4</sub>排放更少<sup>[9]</sup>。但也有研究发现,稻田CH<sub>4</sub>排放随着尿素用量的增加而上升<sup>[10]</sup>,适量减施氮肥能够减少稻田CH<sub>4</sub>的排放量<sup>[11]</sup>。因此,氮肥用量与CH<sub>4</sub>排放之间的关系较为复杂。适宜的水氮管理可以影响农田的碳氮循环,调整CH<sub>4</sub>的产生与排放状况<sup>[12-15]</sup>。当土壤的碳氮比(C/N)较高时,在外源氮的作用下,稻田CH<sub>4</sub>排放会显著增加<sup>[16-17]</sup>。有研究发现,不同灌溉方式及施氮水平下,稻田CH<sub>4</sub>排放通量与土壤水溶性有机碳(WSOC)和微生物量碳(MBC)含量呈正相关<sup>[17]</sup>,且土壤有机碳(SOC)的动态变化影响CH<sub>4</sub>排放<sup>[18]</sup>。由此可见,研究水氮互作对CH<sub>4</sub>排放和有机碳组分及其含量的影响,明确双季稻种植模式下CH<sub>4</sub>排放及其与水分管理和氮肥用量的关系对水稻绿色生产具有重要意义。

本研究以双季稻为研究对象,设置不同的水分管理模式和氮肥施用水平,旨在探究不同水氮运筹模式对水稻生育期内稻田CH<sub>4</sub>排放的影响及早、晚稻不同生育期土壤SOC、WSOC和MBC的含量变化,并分析稻田CH<sub>4</sub>排放通量与土壤SOC、WSOC和MBC含量的关系,以期为双季稻区构建适宜的水氮减排调控技术体系提供依据。

## 1 试验地概况

试验地点位于湖南省衡阳县西渡镇梅花村(26°58'47"N, 112°20'30"E),属亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,年平均气温约为18 °C,年降水量约为1 500 mm。试验田土壤理化特性为: pH 6.85, 有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为26.39、1.31、0.66、21.36 g/kg, 碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为144.07、17.60、166.44 mg/kg。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

早稻供试品种为‘株两优819’,晚稻为‘泰优390’。

### 2.2 试验设计

试验采用两因素裂区设计,主区设置常规灌溉(W<sub>1</sub>)和节水灌溉(W<sub>2</sub>)模式;裂区为氮肥用量,依据长江中游双季稻区推荐施肥用量<sup>[19]</sup>,设置N<sub>0</sub>(0 kg/hm<sup>2</sup>)、N<sub>1</sub>(120 kg/hm<sup>2</sup>)、N<sub>2</sub>(150 kg/hm<sup>2</sup>)、N<sub>3</sub>(180 kg/hm<sup>2</sup>)4个水平。共8个处理,每个处理均重复3次,24个小区。小区面积为35 m<sup>2</sup>,小区内划分3个宽度为2 m的厢面,厢与厢之间用宽20 cm、深15~20 cm的沟隔开。小区之间筑田埂,埂高30 cm,宽20 cm,并用黑色薄膜覆盖,两边设保护行,保证水肥互不干扰。

W<sub>1</sub>为间歇性灌溉,其特点在于:在返青期和分蘖期保持田间淹水状态,至分蘖期结束后进行中期晒田,孕穗期前实施干湿交替的灌溉,并在收获前一周进行田间排水。W<sub>2</sub>在移栽后保持3~5 cm水层,返青后只在沟内灌水,厢面自然露出,当沟内水落干后再灌水。氮肥选用尿素(N含量46%),磷肥选用过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量12%),钾肥选用氯化钾(K<sub>2</sub>O含量60%)。各处理的磷肥用量为75 kg/hm<sup>2</sup>,作为基肥一次性施用。钾肥用量150 kg/hm<sup>2</sup>,与氮肥一起按照基肥、分蘖肥、穗肥质量比为5:3:2的标准进行施用。早稻大田栽插时株行距为25 cm×13 cm,晚稻栽插时株行距为25 cm×11 cm,均为育苗移栽,每穴插2苗。两季秸秆均采用粉碎还田处理,病虫草防治管理工作按当地高产栽培模式进行。

## 2.3 样品采集与测定

### 2.3.1 CH<sub>4</sub> 气体

待水稻返青后, 采用静态暗箱法, 选择晴天 8:00—11:00 采集稻田 CH<sub>4</sub> 气体样品, 并采用气相色谱法对其进行测定和分析。每隔 7 d 取样 1 次, 直到水稻成熟。取样箱长、宽均为 50 cm, 高 120 cm, 底座在插秧后四壁插入稻田中, 并且使底座与土层保持齐平。箱体的周围用泡沫板覆盖并用胶带密封, 以在取样过程中保持箱内温度。在箱内安装一个 12 V 的风扇和温度传感器, 以保证箱内气体充分混合, 并在采样过程中记录箱内温度变化。取气箱扣上底座时需确认底部凹槽内有水, 保证箱内气体不与外界流通, 连接电源, 打开风扇, 使箱内气体及温度均匀。将 30 mL 的注射针筒与装有三通阀的取气箱连接并取样, 分别在箱体扣合后 0、10、20、30 min 采集气体样品, 每次采样时同步记录箱内实时温度。抽取到的气样及时采用 Agilent 7890A 气相色谱仪进行测定分析, 并按照公式(1)计算 CH<sub>4</sub> 排放通量, 按照公式(2)计算 CH<sub>4</sub> 累积排放量。

$$F = \rho \times 273 / (273 + T) \times H \times \Delta C / \Delta t \quad (1)$$

式中:  $F$  表示 CH<sub>4</sub> 排放通量 (mg/(m<sup>2</sup>·h));  $\rho$  表示标准大气压下的 CH<sub>4</sub> 密度 (0.714 g/L);  $T$  表示取气时箱内的平均温度 (°C);  $H$  表示取气箱高度 (m);  $\Delta C / \Delta t$  是取气箱内 CH<sub>4</sub> 的排放速率。

$$C = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中:  $C$  表示 CH<sub>4</sub> 气体排放总量 (mg/m<sup>2</sup>);  $n$  表示气体

检测总次数;  $i$  表示第  $i$  次检测;  $F$  为 CH<sub>4</sub> 排放通量 (mg/m<sup>2</sup>·h);  $t_{i+1} - t_i$  为相邻 2 次取气间隔天数 (d)。

### 2.3.2 土壤有机碳组分

水稻移栽返青后, 采气后采用五点取样法取耕作层 0~20 cm 深度的土壤样品 (每隔半个月取样 1 次), 将样本充分混匀, 挑去杂物, 采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳 (SOC) 和水溶性有机碳 (WSOC) 含量, 采用氯仿熏蒸培养法测定微生物量碳 (MBC) 含量。

## 2.4 数据统计与分析

采用 Excel 2019 软件进行数据整理及绘图; 采用 SPSS 26.0 进行方差分析, 选用 Duncan 法进行多重比较; 采用 Pearson 检验法进行相关性分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同水氮运筹模式对稻田 CH<sub>4</sub> 排放的影响

#### 3.1.1 CH<sub>4</sub> 排放通量

由图 1 可知, 各处理早、晚稻 CH<sub>4</sub> 排放通量分别为 0.34~16.48 mg/(m<sup>2</sup>·h) 和 0.97~38.60 mg/(m<sup>2</sup>·h)。早稻 CH<sub>4</sub> 排放通量在整个生育期出现了 3 个波峰, 分别为分蘖期、孕穗期和灌浆期; 晚稻 CH<sub>4</sub> 排放通量呈先升后降的趋势, 只有 1 个明显的排放高峰, 出现在分蘖期, 随后 CH<sub>4</sub> 排放通量不断下降, 持续稳定在较低水平。

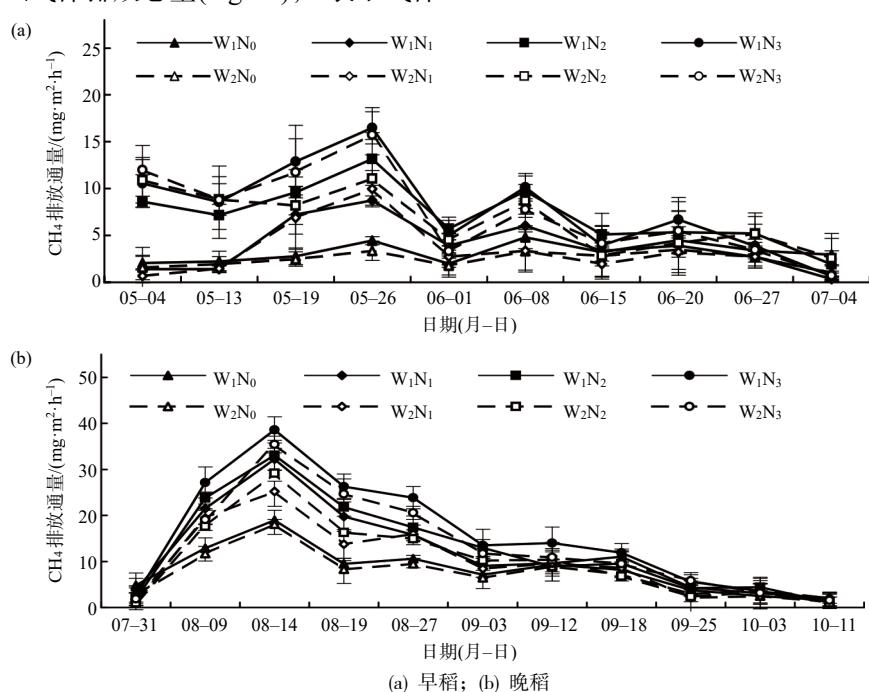


图 1 早稻和晚稻 CH<sub>4</sub> 排放通量动态变化

Fig.1 Dynamic changes in CH<sub>4</sub> emission fluxes from early season rice and late season rice

$W_2$ 的CH<sub>4</sub>排放通量明显低于 $W_1$ 的。早稻 $W_2$ 处理的平均CH<sub>4</sub>排放通量较 $W_1$ 减少了0.57 mg/(m<sup>2</sup>·h), 晚稻减少了1.86 mg/(m<sup>2</sup>·h)。比较早、晚稻不同施氮水平的CH<sub>4</sub>排放通量, 发现 $N_3$ 处理的排放量较高, 表明氮肥用量减少可以有效降低稻田CH<sub>4</sub>排放量。不同水氮处理的CH<sub>4</sub>排放主要集中在水稻生育前期,  $W_1N_3$ 的CH<sub>4</sub>排放通量最高。

### 3.1.2 CH<sub>4</sub>累积排放量

由表1可知, 水分对稻田CH<sub>4</sub>累积排放量具有显著或极显著影响。与 $W_1$ 相比,  $W_2$ 处理早稻季的CH<sub>4</sub>累积排放量减少了10.35%, 晚稻季则减少了15.27%。全年减少了13.85%。表明 $W_2$ 较 $W_1$ 更有利于降低CH<sub>4</sub>累积排放量。

表1 不同处理早、晚稻的CH<sub>4</sub>累积排放量

Table 1 Cumulative CH<sub>4</sub> emissions from early and late rice seasons with different treatments

处理	mg/(m <sup>2</sup> ·h)		
	早稻	晚稻	全年
$W_1$	(86.03±33.60)A	(214.73±50.56)A	(300.76±81.21)A
$W_2$	(77.13±33.96)B	(181.96±38.89)B	(259.09±69.90)B
$N_0$	(43.33±8.00)D	(137.21±8.49)C	(180.54±15.91)D
$N_1$	(58.23±11.24)C	(194.95±21.19)B	(253.18±29.12)C
$N_2$	(106.85±7.64)B	(205.99±26.12)B	(312.84±28.89)B
$N_3$	(117.92±10.35)A	(255.24±24.15)A	(373.16±31.08)A
$W_1N_0$	(48.64±4.52)cd	(143.24±6.83)e	(191.88±10.96)e
$W_1N_1$	(61.95±14.16)c	(212.58±8.48)c	(274.53±21.82)c
$W_1N_2$	(110.96±5.70)ab	(227.58±15.86)bc	(338.54±10.19)b
$W_1N_3$	(122.57±7.38)ab	(275.53±15.86)a	(398.10±20.08)a
$W_2N_0$	(38.02±7.41)d	(131.19±4.98)e	(169.21±11.29)e
$W_2N_1$	(54.50±8.58)c	(177.32±10.86)d	(231.82±16.58)d
$W_2N_2$	(102.73±7.92)b	(184.41±7.49)d	(287.14±9.98)c
$W_2N_3$	(113.26±12.17)a	(234.84±1.26)b	(348.10±12.14)b
W	*	***	**
N	***	***	***
W×N	ns	ns	ns

注:同列数据不同大写字母表示不同水分处理或不同氮肥用量处理间的差异有统计学意义, 不同小写字母表示水氮组合间的差异有统计学意义( $P<0.05$ ); \*、\*\*、\*\*\*分别表示变量的效应在0.05、0.01、0.001水平上显著, ns表示效应不显著。

施氮水平极显著影响CH<sub>4</sub>累积排放量。CH<sub>4</sub>累积排放量随施氮水平的下降而减少, 早、晚稻 $N_3$ 处理的均最高。与 $N_3$ 相比,  $N_2$ 、 $N_1$ 、 $N_0$ 的早稻累积排放量减少了9.39%~63.25%, 晚稻减少了19.30%~46.24%, CH<sub>4</sub>周年累积排放量降低了16.16%~51.62%, 表明减少氮肥用量有利于降低CH<sub>4</sub>累积排

放量。

从2个因素的互作效应来看, 虽然水氮运筹模式对CH<sub>4</sub>累积排放量无显著影响, 但在相同施氮水平下,  $W_2$ 处理的CH<sub>4</sub>累积排放量较低。如早稻 $W_2N_0$ 、 $W_2N_1$ 、 $W_2N_2$ 、 $W_2N_3$ 处理的CH<sub>4</sub>排放量较 $W_1N_0$ 、 $W_1N_1$ 、 $W_1N_2$ 、 $W_1N_3$ 处理分别减少了21.83%、12.03%、7.42%、7.60%, 晚稻季分别减少了8.41%、16.59%、18.97%、14.77%, 全年分别减少11.81%、15.56%、15.18%、12.56%。综上可知,  $W_2N_1$ 、 $W_2N_2$ 的减排效果较好, 节水灌溉模式配施氮肥有利于减少稻田CH<sub>4</sub>排放。

### 3.2 不同水氮运筹模式对土壤有机碳组分的影响

#### 3.2.1 土壤SOC含量

由表2可知, 水分对土壤SOC含量具有极显著影响。与 $W_1$ 相比,  $W_2$ 处理下早、晚稻土壤SOC含量分别提高了5.55%和10.75%, 双季稻土壤SOC含量均值提高了8.17%, 表明 $W_2$ 处理有利于土壤SOC的累积。氮肥水平对稻田土壤SOC也具有极显著影响。与 $N_0$ 相比,  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 水平的早稻土壤SOC含量分别增加了3.10%、5.53%、5.28%, 晚稻土壤SOC

表2 不同处理早、晚稻成熟期土壤有机碳的含量

Table 2 Soil organic carbon content in maturity stage of early and late rice with different treatments

处理	g/kg		
	早稻成熟期	晚稻成熟期	平均值
$W_1$	(16.58±0.60)B	(16.46±1.12)B	(16.52±0.84)B
$W_2$	(17.50±0.31)A	(18.23±0.58)A	(17.87±0.40)A
$N_0$	(16.47±0.86)C	(16.14±1.65)C	(16.31±1.25)C
$N_1$	(16.98±0.52)B	(17.36±0.49)B	(17.17±0.46)B
$N_2$	(17.38±0.50)A	(17.95±1.01)A	(17.66±0.71)A
$N_3$	(17.34±0.36)A	(17.93±0.86)A	(17.64±0.58)A
$W_1N_0$	(15.70±0.10)e	(14.64±0.20)d	(15.17±0.12)e
$W_1N_1$	(16.56±0.14)d	(16.94±0.14)c	(16.75±0.03)d
$W_1N_2$	(16.98±0.32)cd	(17.05±0.29)c	(17.01±0.08)c
$W_1N_3$	(17.08±0.26)c	(17.19±0.40)c	(17.14±0.29)c
$W_2N_0$	(17.24±0.24)bc	(17.64±0.15)b	(17.44±0.19)b
$W_2N_1$	(17.39±0.36)abc	(17.78±0.20)b	(17.59±0.12)b
$W_2N_2$	(17.78±0.23)a	(18.84±0.20)a	(18.31±0.06)a
$W_2N_3$	(17.60±0.21)ab	(18.67±0.23)a	(18.14±0.13)a
W	***	***	***
N	***	***	***
W×N	*	***	***

注:同列数据不同大写字母表示不同水分处理或不同氮肥用量处理间的差异有统计学意义, 不同小写字母表示水氮组合间的差异有统计学意义( $P<0.05$ ); \*、\*\*\*分别表示变量的效应在0.05、0.001水平上显著。

含量分别增加了7.56%、11.21%、11.09%，双季稻土壤SOC含量均值分别提高了5.27%、8.28%、8.15%。不同氮肥水平下N<sub>2</sub>的土壤SOC含量最大，N<sub>3</sub>的次之，表明合理增施氮肥有利于土壤SOC含量的积累。

不同水氮运筹模式下稻田土壤SOC含量为14.64~18.84 g/kg。2个因素的互作对早、晚稻季土壤SOC含量有显著或极显著影响。相同施氮水平下，W<sub>2</sub>处理的土壤SOC含量较W<sub>1</sub>的明显提高，早稻季W<sub>2</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>分别较W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>处理提高了3.04%~9.81%，晚稻季则

分别提高了4.96%~20.49%，周年平均土壤SOC含量增加了5.01%~14.96%。不同水氮运筹模式中，W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>处理的土壤SOC含量最大，W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>处理的次之，可见，采用节水灌溉适量配施氮肥更有利于促进土壤SOC含量的提高。

### 3.2.2 土壤WSOC含量

由表3可知，水分对土壤WSOC含量具有显著或极显著影响。早、晚稻季W<sub>2</sub>处理的WSOC含量分别较W<sub>1</sub>处理的提高了21.15%和11.57%，两季平均提高了15.97%。氮肥对稻田土壤WSOC含量具有极显著

表3 不同处理在水稻不同生育期的土壤水溶性有机碳含量

Table 3 Soil soluble organic carbon content in different rice growth stages under different treatments mg/kg

季节	处理	分蘖期	孕穗期	抽穗期	乳熟期	成熟期	均值
早稻	W <sub>1</sub>	(216.56±23.14)B	(230.37±21.40)B	(232.71±62.57)B	(288.39±65.45)B	(196.40±32.33)B	(232.89±35.55)B
	W <sub>2</sub>	(233.96±36.22)A	(285.50±34.67)A	(287.77±85.10)A	(361.41±64.05)A	(242.10±31.98)A	(282.15±44.76)A
	N <sub>0</sub>	(191.82±14.27)C	(228.72±20.98)C	(179.63±15.27)C	(237.58±47.72)C	(176.97±25.97)C	(202.95±19.70)D
	N <sub>1</sub>	(241.55±25.13)A	(254.02±25.89)B	(205.99±41.70)B	(303.16±38.07)B	(210.54±33.44)B	(243.05±29.95)C
	N <sub>2</sub>	(253.86±24.62)A	(286.08±36.16)A	(325.14±54.32)A	(383.77±51.29)A	(248.5±33.84)A	(299.47±37.92)A
	N <sub>3</sub>	(213.83±13.71)B	(262.91±53.47)B	(330.19±31.71)A	(375.09±39.88)A	(240.99±16.97)A	(284.60±23.71)B
	W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(183.97±12.34)d	(215.66±10.70)d	(180.63±8.31)e	(195.75±17.71)d	(155.54±12.74)f	(186.31±6.78)e
	W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(222.09±15.13)bc	(234.68±21.14)cd	(169.41±14.11)e	(272.98±10.49)c	(182.10±12.00)e	(216.25±7.10)d
	W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(236.41±15.35)b	(256.15±10.01)bc	(275.97±9.76)c	(340.18±22.69)b	(220.21±16.60)cd	(265.79±13.48)c
	W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(223.79±4.25)bc	(214.98±12.37)d	(304.83±21.91)b	(344.64±24.94)b	(227.74±5.69)c	(263.19±1.79)c
	W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(199.68±13.10)cd	(241.78±21.78)cd	(178.64±22.61)e	(279.41±11.41)c	(198.40±12.11)de	(219.58±9.68)d
	W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(261.00±14.64)a	(273.37±10.27)b	(242.58±11.49)d	(333.33±27.97)b	(238.98±15.03)bc	(269.85±6.12)c
	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(271.31±19.13)a	(316.01±21.94)a	(374.31±5.22)a	(427.35±19.08)a	(276.79±13.64)a	(333.16±3.00)a
	W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(203.87±12.42)cd	(310.85±10.09)a	(355.56±10.14)a	(405.54±23.93)a	(254.23±12.71)b	(306.01±5.14)b
	W	**	***	***	***	**	***
	N	***	***	***	***	***	***
	W×N	**	**	***	ns	ns	**
晚稻	W <sub>1</sub>	(253.85±65.47)B	(295.85±50.23)B	(220.89±50.59)B	(338.74±56.83)B	(259.86±27.59)B	(273.84±44.72)B
	W <sub>2</sub>	(317.10±50.44)A	(320.57±80.06)A	(239.05±50.85)A	(370.61±73.78)A	(280.24±26.92)A	(305.51±54.12)A
	N <sub>0</sub>	(221.77±39.21)B	(211.59±10.83)D	(180.87±8.86)C	(257.84±17.49)C	(237.72±14.28)C	(221.96±11.39)D
	N <sub>1</sub>	(242.71±47.91)B	(309.98±15.52)C	(188.91±13.84)C	(350.29±20.59)B	(265.94±26.96)B	(271.56±16.88)C
	N <sub>2</sub>	(348.57±27.75)A	(370.25±38.19)A	(294.97±18.90)A	(414.27±36.47)A	(291.92±22.38)A	(344.00±23.58)A
	N <sub>3</sub>	(328.86±33.54)A	(341.02±38.07)B	(255.13±18.46)B	(396.30±24.96)A	(284.63±15.24)AB	(321.19±21.13)B
	W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(187.64±14.13)e	(217.70±10.56)e	(175.53±9.55)e	(251.18±16.66)d	(230.00±11.57)b	(212.41±4.35)h
	W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(199.22±5.38)e	(320.06±13.53)cd	(176.97±3.32)e	(346.11±26.31)c	(246.32±12.77)b	(257.73±8.91)f
	W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(326.60±18.46)b	(338.63±22.50)c	(289.81±12.03)ab	(383.34±16.16)b	(277.60±19.45)a	(323.20±1.87)c
	W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(301.95±23.39)c	(307.03±10.03)d	(241.26±10.06)c	(374.32±7.99)bc	(285.54±20.97)a	(302.02±1.59)d
	W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(255.90±12.24)d	(205.48±8.35)e	(186.21±4.40)de	(264.50±18.81)d	(245.44±14.04)b	(231.50±5.67)g
	W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(286.20±6.00)c	(299.91±10.71)d	(200.84±6.36)d	(354.46±17.77)bc	(285.56±22.33)a	(285.39±7.68)e
	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(370.54±11.70)a	(401.88±11.82)a	(300.13±25.85)a	(445.20±13.94)a	(306.25±16.05)a	(364.80±9.37)a
	W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(355.76±9.62)a	(375.02±7.52)b	(268.99±13.18)b	(418.28±6.61)a	(283.72±11.78)a	(340.36±3.45)b
	W	**	***	**	***	*	***
	N	**	***	***	***	**	***
	W×N	ns	***	ns	**	*	*

注：同列数据不同大写字母表示不同水分处理或不同氮肥用量处理间的差异有统计学意义，不同小写字母表示水氮组合间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )；\*、\*\*、\*\*\*分别表示变量的效应在0.05、0.01、0.001水平上显著，ns表示效应不显著。

影响。不同施氮水平下,各生育期(除早稻分蘖期、抽穗期)N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>0</sub>土壤的WSOC含量均依次降低。与N<sub>3</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>0</sub>相比,N<sub>2</sub>处理下早、晚稻季的WSOC含量分别提高了5.22%~47.56%、7.10%~54.98%。不同处理双季稻整个生育期的土壤WSOC含量为155.54~445.20 mg/kg,乳熟期的含量较高。

从2个因素的互作效应来看,水氮运筹模式对土壤WSOC含量具有显著或极显著影响(分蘖期、抽穗期除外)。各生育期W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>处理的土壤WSOC含量

均最高,其早、晚稻季的WSOC含量分别较W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>、W<sub>2</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>和W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>处理提高了8.87%~78.82%和7.18%~71.74%。表明在W<sub>2</sub>灌溉模式下,配施150 kg/hm<sup>2</sup>氮肥有利于促进土壤WSOC的积累。

### 3.2.3 土壤MBC含量

由表4可知,水分管理和氮肥对土壤MBC含量影响极显著,W<sub>2</sub>处理早、晚稻各生育期的土壤MBC

表4 不同处理各生育期土壤微生物量碳含量

Table 4 Soil microbial biomass carbon content at different growth stages under different treatments mg/kg

季节	处理	分蘖期	孕穗期	抽穗期	乳熟期	成熟期	均值
早稻	W <sub>1</sub>	(396.32±95.97)B	(375.00±84.51)B	(404.15±81.12)B	(453.92±83.79)B	(514.36±98.50)B	(428.75±87.07)B
	W <sub>2</sub>	(425.97±75.63)A	(449.03±95.35)A	(459.27±98.28)A	(483.70±77.66)A	(551.16±99.49)A	(473.83±87.02)A
	N <sub>0</sub>	(296.77±42.56)C	(292.32±19.44)C	(290.62±17.86)C	(351.40±25.21)D	(398.25±21.34)D	(325.87±22.88)D
	N <sub>1</sub>	(374.47±15.11)B	(376.40±71.42)B	(441.04±43.17)B	(456.27±27.06)C	(496.43±29.62)C	(428.92±33.29)C
	N <sub>2</sub>	(492.49±20.79)A	(495.42±49.74)A	(505.79±39.28)A	(550.69±25.43)A	(642.18±21.54)A	(537.31±29.00)A
	N <sub>3</sub>	(480.87±18.51)A	(483.91±32.77)A	(489.41±32.83)A	(516.89±14.57)B	(594.17±27.54)B	(513.05±19.35)B
	W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(259.17±12.10)e	(278.49±12.46)e	(278.62±10.94)d	(332.30±14.35)f	(382.68±17.19)g	(306.25±9.81)g
	W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(368.31±11.40)c	(313.17±12.05)d	(404.17±14.89)c	(434.71±12.89)d	(474.40±14.30)e	(398.95±3.92)e
	W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(476.90±14.19)b	(451.54±14.20)c	(471.77±13.11)b	(530.79±14.33)b	(624.69±11.35)b	(511.14±5.48)c
	W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(480.90±17.90)ab	(456.78±15.88)c	(462.04±12.62)b	(517.89±17.07)b	(575.66±20.70)c	(498.65±14.37)c
	W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(334.36±11.89)d	(306.15±14.68)d	(302.62±15.69)d	(370.51±16.96)e	(413.82±10.74)f	(345.49±7.57)f
	W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(380.62±18.09)c	(439.63±24.72)c	(477.90±18.96)b	(477.83±16.45)c	(518.46±23.10)d	(458.89±7.83)d
	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(508.07±12.27)a	(539.29±14.47)a	(539.80±14.64)a	(570.58±14.95)a	(659.67±10.66)a	(563.48±4.23)a
	W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(480.84±23.16)ab	(511.04±15.00)b	(516.76±17.02)a	(515.89±15.38)b	(612.69±20.97)b	(527.44±10.40)b
晚稻	W	***	***	***	***	***	***
	N	***	***	***	***	***	***
	W×N	**	***	*	*	ns	*
	W <sub>1</sub>	(414.4±68.33)B	(444.45±97.43)B	(482.64±98.09)B	(625.18±91.46)B	(563.23±82.35)B	(505.98±85.46)B
	W <sub>2</sub>	(450.53±80.48)A	(480.12±91.41)A	(536.67±99.52)A	(659.34±80.55)A	(614.72±77.92)A	(548.28±84.70)A
	N <sub>0</sub>	(325.86±15.32)D	(335.54±19.25)D	(382.03±29.53)D	(516.79±31.79)D	(470.58±33.55)D	(406.16±23.24)D
	N <sub>1</sub>	(419.41±16.60)C	(421.88±38.11)C	(460.85±41.77)C	(628.88±27.63)C	(580.72±31.69)C	(502.34±28.60)C
	N <sub>2</sub>	(512.53±23.91)A	(556.27±13.38)A	(612.55±38.97)A	(727.10±30.65)A	(671.87±22.04)A	(616.06±21.69)A
	N <sub>3</sub>	(472.06±39.86)B	(535.45±23.02)B	(583.19±26.89)B	(696.27±10.77)B	(632.74±37.33)B	(583.94±22.50)B
	W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	(317.10±12.40)e	(322.51±16.05)f	(359.82±19.63)f	(490.26±14.10)f	(443.30±20.82)f	(386.60±9.78)g
	W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	(407.32±10.68)d	(388.65±12.54)d	(425.81±13.33)e	(609.25±25.49)d	(553.70±10.01)d	(476.95±10.08)e
	W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	(495.52±12.46)b	(549.99±13.49)a	(580.69±17.58)bc	(701.88±15.76)b	(654.14±10.58)b	(596.44±0.63)b
	W <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	(437.65±17.28)c	(516.64±10.64)b	(564.25±12.93)c	(699.31±12.45)b	(601.78±17.64)c	(563.92±3.85)c
	W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	(334.62±14.25)e	(348.56±12.64)e	(404.23±17.75)e	(543.31±14.72)e	(497.86±12.17)e	(425.72±10.33)f
	W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	(431.49±11.70)cd	(455.11±12.70)c	(495.88±22.40)d	(648.50±10.20)c	(607.73±14.90)c	(527.74±2.93)d
	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	(529.54±20.13)a	(562.54±12.14)a	(644.42±21.03)a	(752.32±13.86)a	(689.60±12.64)a	(635.69±4.58)a
	W <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	(506.47±11.03)ab	(554.26±12.24)a	(602.14±23.75)b	(693.22±10.35)b	(663.71±17.23)b	(603.96±6.98)b
	W	***	***	***	***	***	***
	N	***	***	***	***	***	***
	W×N	*	*	ns	*	ns	ns

注:同列数据不同大写字母表示不同水分处理或不同氮肥用量处理间的差异有统计学意义( $P<0.05$ );\*、\*\*、\*\*\*分别表示变量的效应在0.05、0.01、0.001水平上显著,ns表示效应不显著。

含量均高于 W<sub>1</sub> 的, 早、晚稻季分别较 W<sub>1</sub> 的提高了 10.51% 和 8.36%, 两季平均提高 9.35%。从不同施氮水平来看, 不同生育期均为 N<sub>2</sub> 水平的土壤 MBC 含量最高, N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>0</sub> 的土壤 MBC 含量依次降低, 与 N<sub>3</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>0</sub> 相比, N<sub>2</sub> 处理下早、晚稻季的土壤 MBC 含量分别提高了 4.73% ~ 64.88%、5.50% ~ 51.68%, 两季平均提高了 5.14% ~ 57.56%。

不同处理在双季稻整个生育期的土壤 MBC 含量为 259.17 ~ 752.32 mg/kg, 早稻成熟期的最高, 晚稻乳熟期的最高。2 个因素的互作对早稻土壤 MBC 含量的影响显著, 对晚稻土壤 MBC 含量则无显著影响, 但各个生育期的土壤 MBC 含量均以 W<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 处理的最高, 与 W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>、W<sub>2</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>2</sub>N<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub>N<sub>3</sub> 相比, 其早、晚稻季各生育期的土壤 MBC 平均含量分别提高了 6.83% ~ 83.99% 和 5.25% ~ 64.43%, 两季的平均含量提高了 5.99% ~ 73.08%。以上结果表明在 W<sub>2</sub> 灌溉模式下, 配施 150 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥有利于土壤 MBC 含量的提高。

### 3.3 双季稻 CH<sub>4</sub> 排放与土壤有机碳组分的相关性分析

对双季稻 CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤 SOC、WSOC 及 MBC 含量进行相关性分析, 结果如表 5 所示。双季稻 CH<sub>4</sub> 排放通量与 WSOC、MBC 含量均呈极显著正相关; WSOC、MBC 含量与 SOC 含量呈极显著正相关。由此可见, 本试验中, 土壤 WSOC、MBC 含量是影响稻田 CH<sub>4</sub> 排放的主要因素。

表 5 双季稻 CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤有机碳组分的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between CH<sub>4</sub> emission fluxes and soil organic carbon components in double-cropping rice

指标	CH <sub>4</sub> 排放通量	SOC 含量	WSOC 含量
SOC 含量	0.348		
WSOC 含量	0.634 <sup>**</sup>	0.807 <sup>**</sup>	
MBC 含量	0.776 <sup>**</sup>	0.732 <sup>**</sup>	0.968 <sup>**</sup>

注: \*\* 表示在 0.01 水平显著相关。

## 4 讨论

农田土壤水分状况是影响 CH<sub>4</sub> 排放的重要因素<sup>[20~21]</sup>。研究发现, CH<sub>4</sub> 排放通量随着灌水量的增加而增加<sup>[22]</sup>。本试验中, 水分对稻田 CH<sub>4</sub> 排放影响极显著。与 W<sub>1</sub> 处理相比, W<sub>2</sub> 处理可减少 CH<sub>4</sub> 排放通量。究其原因, 淹水条件下土壤孔隙被水分填充,

O<sub>2</sub> 在土壤中的扩散受到阻碍, 土壤环境由氧化状态逐渐向还原状态转变<sup>[23]</sup>。产甲烷菌是一种厌氧菌, 在厌氧环境下可分解土壤中的有机物, 产生 CH<sub>4</sub>, 导致稻田 CH<sub>4</sub> 大量排放<sup>[21]</sup>。而 W<sub>2</sub> 处理减少了灌水量, 改善了大气与土壤之间的空气交换, 增强了土壤的通气性, 从而优化土壤的好氧-厌氧环境, 抑制产甲烷菌的活性, 提升甲烷氧化菌的活性, 使产生的 CH<sub>4</sub> 被甲烷氧化菌吸收从而减少 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[24~25]</sup>。本试验中, 施氮水平对稻田 CH<sub>4</sub> 排放影响显著, CH<sub>4</sub> 排放量随着施氮水平的提高而增加。这与易琼等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。NYKÄNEN 等<sup>[27]</sup>认为氮肥的施用增加了土壤中氮素有效性, 进而提高产甲烷菌所需有机底物的供应量, 使得产 CH<sub>4</sub> 菌有较多可利用的底物, 从而增加 CH<sub>4</sub> 排放量。而随着施氮水平的提高, 水稻植株长势增强、根系通气性得到改善, 为土壤中的 CH<sub>4</sub> 通过水稻植株向大气传输提供了更有效的通道, 从而增加了 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[28~29]</sup>。同时, 水稻植株生长旺盛, 根系分泌物增加, 为产甲烷菌提供了丰富的底物, 提高了产甲烷菌的活性及群落丰度, 抑制了甲烷氧化菌的氧化作用, 进一步促进了 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[30~31]</sup>。本试验中, 水分和氮素的互作效应虽对 CH<sub>4</sub> 排放无显著影响, 但在相同施氮水平下, 节水灌溉 (W<sub>2</sub>) 处理中的 W<sub>2</sub>N<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 模式表现出较好的减排效果, 这可能是由于水分和氮肥的合理配合优化了土壤条件, 抑制了 CH<sub>4</sub> 的产生。综上, 水分管理和氮肥施用的合理搭配有助于减少稻田温室气体的排放。

土壤 SOC 是土壤有机碳库的重要组成部分, 也是碳库中最活跃的成分, 其含量由有机质的输入和矿化共同决定<sup>[32]</sup>, 常以土壤 MBC、WSOC 等进行表征<sup>[33]</sup>。有研究认为, 合理的水分和氮肥管理是影响土壤有机碳组分的关键因素, 二者协同可提高土壤碳库含量及碳库稳定性<sup>[34~35]</sup>。本试验结果显示, 水分和施氮水平对土壤有机碳组分 (SOC、MBC 和 WSOC) 的含量影响极显著, W<sub>2</sub> 模式下土壤水分减少, 有利于土壤有机碳组分的积累, 这与韩琳等<sup>[36]</sup>的研究结果一致。有研究<sup>[37~39]</sup>指出, 过量灌水会造成土壤 SOC 的淋洗, 导致土壤碳库损失。在轻度干旱胁迫下, 一些微生物会产生适应性生理响应, 如合成更多的胞外聚合物, 这一过程可增强碳的固持作用, 从而提高土壤有机碳组分含量<sup>[40~42]</sup>。而在不

同的氮肥处理下,低氮处理较高氮处理更有利于提高土壤SOC及WSOC含量<sup>[43-45]</sup>,减施20%氮肥条件下,土壤MBC含量最高<sup>[46]</sup>。本试验结果也显示, N<sub>2</sub>处理的土壤有机碳含量最高,表明适量施用氮肥能提高土壤有机碳的含量<sup>[47]</sup>。进一步分析表明,水氮互作对土壤有机碳组分的含量具有显著影响,表明合理的水氮管理不仅能够优化土壤的碳库储量,还能提高土壤微生物量碳和水溶性有机碳的占比,从而改善土壤健康状况和土壤碳循环。综上,优化水氮运筹模式可以提高土壤固碳能力。

相关性分析结果显示,CH<sub>4</sub>排放与土壤MBC和WSOC含量呈极显著正相关,与展茗<sup>[17]</sup>的研究结果相似,说明土壤中有机碳的增加,特别是微生物活性的增强和易溶解有机碳的增加,可能会直接导致CH<sub>4</sub>排放量增加;而土壤SOC含量与CH<sub>4</sub>排放无显著相关性,这可能是由于SOC中有机物的分解速率较慢,未能直接促进CH<sub>4</sub>的生成与排放。因此,尽管SOC对稻田排放存在一定的间接调控作用,但其效应主要是通过介导微生物活性炭的分解转化实现的。

## 5 结论

综合分析,水分管理和氮肥用量及其互作均能显著影响双季稻CH<sub>4</sub>的排放通量和有机碳含量,而MBC和WSOC含量与CH<sub>4</sub>排放通量呈极显著正相关。本试验条件下,采用节水灌溉模式配施150 kg/hm<sup>2</sup>氮素处理能在有效减少稻田CH<sub>4</sub>排放的同时,保持较高的土壤有机碳含量,有利于湖南双季稻区水稻的绿色高效生产。

## 参考文献:

- [1] WANG F, YUE Z Z, ZHAO D Y, et al. Improving energy and GHG performance of the rice-wheat rotation system: a life-cycle analysis based on a large-scale behavior investigation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120319.
- [2] 李圆圆,何平,茅桁.稻田水肥管理研究进展及思考[J].排灌机械工程学报,2023,41(8):825-832.
- [3] CHEN Y, LI S Y, ZHANG Y J, et al. Rice root morphological and physiological traits interaction with rhizosphere soil and its effect on methane emissions in paddy fields[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129: 191-200.
- [4] 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: 289-297.
- [5] HOU H J, PENG S Z, XU J Z, et al. Seasonal variations of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(7): 884-892.
- [6] 张忠学,陈鹏,陈帅宏,等.黑土区节水灌溉对各期肥料氮素在土壤中残留的影响[J].农业机械学报,2018,49(11):240-250.
- [7] 韩圣慧,张稳,陈冬婕,等.我国农业温室气体源汇现状与未来减排固碳对策[J].中国能源,2024,46(11):39-49.
- [8] 曹晓强,魏永霞,吴昱,等.不同灌溉模式寒区稻田温室气体排放与土壤矿质氮特征[J].农业机械学报,2022,53(9):305-313,333.
- [9] 苏荣瑞,刘凯文,王斌,等.江汉平原施氮水平对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放及水稻产量的影响[J].中国农业科技导报,2016,18(5):118-125.
- [10] 马艳芹,钱晨晨,孙丹平,等.施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J].农业工程学报,2016,32(S2):128-134.
- [11] 周文涛,龙文飞,毛燕,等.节水轻简栽培模式下增密减氮对双季稻田温室气体排放的影响[J].应用生态学报,2020,31(8):2604-2612.
- [12] LADHA J K, RADANIELSON A M, RUTKOSKI J E, et al. Steady agronomic and genetic interventions are essential for sustaining productivity in intensive rice cropping[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(45): e2110807118.
- [13] LEE S, PARK J, YIM Y. Genetic modification of rice for efficient nitrogen utilization[J]. *Plant Biotechnology Reports*, 2021, 15(5): 573-583.
- [14] 秦晓波,李玉娥,刘克樱,等.长期施肥对湖南稻田甲烷排放的影响[J].中国农业气象,2006,27(1):19-22.
- [15] 熊效振,沈壬兴,王明星,等.太湖流域单季稻的甲烷排放研究[J].大气科学,1999,23(1):9-18.
- [16] AERTS R, LUDWIG F. Water-table changes and nutritional status affect trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(11/12): 1691-1698.
- [17] 展茗.不同稻作模式稻田碳固定、碳排放和土壤有机碳变化机制研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
- [18] 王鸿飞,吴怡慧,张瑞,等.水稻秸秆添加对不同种稻年限黑土CH<sub>4</sub>排放特征的影响[J].土壤通报,2022,53(6):1421-1430.
- [19] 严如玉,甘国渝,赵希梅,等.我国水稻优势产区生产格局及施肥现状研究[J].中国稻米,2023,29(3):1-8.
- [20] 李海防,夏汉平,熊燕梅,等.土壤温室气体产生与

- 排放影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1781–1788.
- [21] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 294–298.
- [22] BRONSON K F, MOSIER A R. Effect of encapsulated calcium carbide on dinitrogen, nitrous oxide, methane, and carbon dioxide emissions from flooded rice[J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, 11(2): 116–120.
- [23] XU Y, ZHAN M, CAO C G, et al. Effects of irrigation management during the rice growing season on soil organic carbon pools[J]. Plant and Soil, 2017, 421(1): 337–351.
- [24] 曹金留, 任立涛, 陈国庆, 等. 水稻田烤田期间甲烷排放规律研究[J]. 农村生态环境, 1998(4): 1–4.
- [25] 李香兰, 徐华, 曹金留, 等. 水分管理对水稻生长期 CH<sub>4</sub> 排放的影响[J]. 土壤, 2007, 39(2): 238–242.
- [26] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1432–1437.
- [27] NYKÄNEN H, VASANDER H, HUTTUNEN J T, et al. Effect of experimental nitrogen load on methane and nitrous oxide fluxes on ombrotrophic boreal peatland[J]. Plant and Soil, 2002, 242(1): 147–155.
- [28] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2166–2172.
- [29] 上官行健, 王明星. 稻田 CH<sub>4</sub> 排放的控制措施[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5): 55–62.
- [30] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4294–4300.
- [31] 张作合, 李铁成, 张忠学, 等. 水炭运筹下稻田痕量温室气体排放与水氮利用关系研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 379–387.
- [32] 吕国红, 周莉, 赵先丽, 等. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 3384–3389.
- [33] 徐秋芳. 森林土壤活性有机碳库的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [34] 金兰淑, 郑佳, 徐慧, 等. 施氮及灌溉方式对玉米地土壤硝化潜势及微生物量碳的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 218–220, 226.
- [35] 郝海波, 许文霞, 侯振安. 水氮耦合对滴灌棉田土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(5): 860–875.
- [36] 韩琳, 张玉龙, 金烁, 等. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1625–1633.
- [37] 俞华林, 张恩和, 王琦, 等. 灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田土壤有机碳、全氮和籽粒产量的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 227–233.
- [38] 解怀亮, 王玉刚, 李彦, 等. 灌溉淋溶对土壤有机碳和无机碳及理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 188–193.
- [39] 王颜玉, 王文定, 郑梦瑶, 等. 施氮和灌溉处理对麦田土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(5): 1419–1426.
- [40] DE VRIES F T, GRIFFITHS R I, KNIGHT C G, et al. Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production[J]. Science, 2020, 368(6488): 270–274.
- [41] 黎雪, 张坐省, 党占平, 等. 干旱对土壤微生物的影响及其与碳动态的关系[J]. 山西农业科学, 2018, 46(3): 402–406.
- [42] COSTA O Y A, RAAIJMAKERS J M, KURAMAE E E. Microbial extracellular polymeric substances: ecological function and impact on soil aggregation[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1636.
- [43] 马晨蕾, 裴自伟, 李伏生. 灌溉方式及施氮对双季稻田甲烷排放及有机碳组分的影响[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(5): 41–49.
- [44] 蒋梦蝶, 何志龙, 孙赟, 等. 尿素和生物质炭对茶园土壤 pH 值及 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 196–204.
- [45] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土活性碳的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 554–559.
- [46] 史登林, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4117–4124.
- [47] DARBY F A, TURNER R E. Effects of eutrophication on salt marsh root and rhizome biomass accumulation[J]. Marine Ecology Progress Series, 2008, 363: 63–70.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗维