

不同水分管理模式下氮肥和秸秆配施对稻田 CH₄ 排放的影响

李文涛^{1, 2}, 杨立杰^{1, 3}, 张丽莉^{1*}, 于春晓^{1, 2}, 武开阔^{1, 2}, 宋玉超¹,
宫平¹, 薛妍¹, 李东坡¹, 武志杰¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 沈阳化工研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110021)

摘要: 以东北潮棕壤为供试土壤, 通过室外水稻盆栽试验, 研究不同水分管理模式下氮肥和秸秆配施对稻田 CH₄ 排放的影响。在长期淹水 (CF) 和干湿交替 (AWD) 两种水分管理模式的基础上, 设置无氮肥对照 (CK)、单施秸秆 (S)、单施尿素 (U)、尿素 + 秸秆 (US) 4 个处理, 对水稻整个生长季 CH₄ 排放进行监测, 并测定不同生育期间土壤微生物量碳 (MBC) 含量以及收获后水稻产量。结果显示: AWD 模式下 CH₄ 累积排放量低于 CF 模式; 两种水分模式下 CK 与 U 处理 CH₄ 累积排放无显著差异, 添加秸秆处理 (S, US) CH₄ 累积排放量显著增加。CF 模式下 US 处理 CH₄ 累积排放量显著高于 S 处理, 但在 AWD 模式下正好相反。AWD 模式在降低 CH₄ 排放的同时并未显著降低水稻产量, 尿素的施用显著增加了水稻产量, 秸秆还田虽然对水稻产量无显著影响, 但它显著提高了土壤微生物量碳含量, 有助于培肥地力。与 CF 模式相比, AWD 模式显著降低了 CH₄ 排放, 同时, US 处理施在降低 CH₄ 排放和保证水稻产量的同时, 增加土壤 MBC 含量, 有助于培肥地力。因此, AWD 模式是东北潮棕壤发育的水田中较为优异的水分管理模式, U 和 US 处理是较为优异的施肥措施。

关键词: 长期淹水; 干湿交替; 秸秆还田; CH₄ 排放; 水稻产量

全球气候变暖是人类关注的热点问题之一, 大气中温室气体浓度的不断增加是导致全球气候变暖的主要原因^[1]。甲烷 (CH₄) 作为主要的温室气体之一, 其排放量占温室气体排放量的 18.3%^[2], 对全球的增温作用仅次于二氧化碳^[3]。在所有人类活动 CH₄ 排放总量中, 农业 CH₄ 排放占排放总量的 50% 左右^[4], 其主要来源于稻田水稻种植过程^[5]。全球稻田每年 CH₄ 排放量为 25 ~ 50 Tg, 占全球 CH₄ 排放总量的 10% 左右^[6]。我国作为世界上水稻第二种植大国, 稻田 CH₄ 排放约占农业源温室气体排放总量的 24%^[7]。因此, 探究稻田 CH₄ 的排放特征, 并采取相应措施减少稻田 CH₄ 排放, 对减缓气候变暖意义重大。

秸秆还田和水分管理等农艺措施对 CH₄ 排放

有显著影响^[8-11]。秸秆还田一方面缓解了秸秆大量焚烧带来的环境问题; 另一方面, 秸秆中含有大量有机物质, 可以提高土壤有机质含量, 培肥地力^[8, 12]; 但秸秆还田改变了土壤微生物和酶的活性, 同时秸秆本身含有大量有机碳, 可作为 CH₄ 产生的前体物质, 能显著增加稻田 CH₄ 的排放^[10, 13]。

水稻需水量高, 多在淹水条件下种植, 淹水条件下稻田土壤通气性差, 利于 CH₄ 的大量排放^[14], 同时, 长期淹水也造成水资源的大量损耗。据统计, 稻田灌溉用水约占农业用水量的 70%^[15]。为了节约水资源和减少 CH₄ 的排放, 稻田干湿交替灌溉 (alternative wetting and drying, AWD) 技术被广泛应用。AWD 是水稻生长期进行淹水-落干-复水-落干的灌溉方式^[11], 目前在江苏、浙江以及东南亚等地区广泛应用^[16]。AWD 模式下, 由于淹水-落干过程中土壤通气性增加, 促进了 CH₄ 的氧化作用, 能最终减少 CH₄ 的排放^[9]。Haque 等^[17]研究表明, 与持续淹水 (CF) 相比, AWD 能有效降低 48% 的 CH₄ 排放。Liao 等^[18]研究也表明 AWD 较 CF 稻田 CH₄ 排放降低 86% 左右。在我国广州双季稻种植区田间试验也表明, 与传统水分

收稿日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-02-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31971531); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA28090200); 辽宁省揭榜挂帅项目“黑土地旱田地力提升关键技术示范与推广”。

作者简介: 李文涛 (1994-), 硕士研究生, 研究方向为稻田土壤氮素转化及温室气体排放。E-mail: weaveli@163.com。

通讯作者: 张丽莉, E-mail: llzhang@iae.ac.cn。

管理相比,AWD 模式下早稻季和晚稻季 CH_4 排放分别有效降低 21% 和 42%^[19]。现有关于水稻干湿交替研究主要集中在南方双季稻,在北方单季稻研究较少。由于北方水稻种植制度及温度与南方稻田有很大差异,干湿交替下其 CH_4 排放的特征,有待于进一步研究。此外,秸秆还田为微生物提供了大量的碳源,促进了微生物活性,培肥地力的同时也增加了 CH_4 的排放^[8],在干湿交替模式下秸秆还田后 CH_4 排放会产生何种变化,是否与干湿交替发生交互效应,也值得进一步研究。

化学氮肥的施用在今农业中发生不可替代的作用。氮肥往往通过影响其他因素间接地影响 CH_4 排放。石生伟等^[20]研究表明,增施氮肥能抑制 CH_4 排放;但也有研究表明,氮肥的投入增加了 CH_4 排放^[18, 21],冯晓赟等^[22]研究表明,氮肥施用只略微增加了稻田 CH_4 排放,与对照并无显著性差异。关于施氮对 CH_4 排放的影响现在没有统一定论,但在不同水分管理模式下的研究表明,施氮肥条件下干湿交替处理显著低于长期淹水^[18]。施用氮肥作为一种提高作物产量的农艺措施,在田间常常与秸秆还田一起实施。传统灌溉下,秸秆还田与氮肥的配施提高了水稻产量,但也会增加 CH_4 的排放^[21],而干湿交替下秸秆与氮肥配施对 CH_4 的影响如何,却鲜有报道。因此本文以此为切入点,以东北潮棕壤性水稻土为供试对象,通过室外盆栽试验,研究不同水分管理模式对秸秆还田以及秸秆与尿素配施对稻田土壤 CH_4 排放的影响,探究不同水分模式、秸秆还田以及秸秆与尿素配施条件下 CH_4 的排放情况,以期减少稻田 CH_4 的排放提供参 考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在中国科学院辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站(43°31' N, 123°22' E)网室内进行,该地属暖温带湿润半湿润大陆性季风气候,年均降水量约 690 mm,年均温 7 ~ 8℃, >10℃活动积温 3300 ~ 3400℃,无霜期 146 ~ 166 d,耕作制度为一年一熟制。试验供试土壤为潮棕壤,取自沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站水稻试验基地长期不施肥处理 0 ~ 20 cm 土层。土壤全碳 16.01 g · kg⁻¹,全氮 1.36 g · kg⁻¹,有效磷 27.01 mg · kg⁻¹,速效钾 123.7 mg · kg⁻¹,铵态氮 19.7 mg · kg⁻¹,硝

态氮 23.28 mg · kg⁻¹, pH 6.73,土壤容重 1.06 g · cm⁻³。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

本试验为盆栽试验,于 2020 年 6 ~ 10 月进行。试验分两种水分模式,长期淹水(CF)和干湿交替(AWD),每种水分模式下 4 个处理:对照(CK)、单施秸秆(S)、单施尿素(U)、尿素+秸秆(US),两种模式共 8 个处理,每个处理重复 3 次,共 24 盆。试验每盆装土 10.51 kg(干土重 9 kg),种植水稻 2 穴,每穴 3 株,共 6 株。水稻于 6 月 17 日定植,10 月 27 日收获。尿素为氮肥,施氮量为 106.13 mg · kg⁻¹(N 225 kg · hm⁻²),基肥(6 月 17 日)、分蘖肥(8 月 4 日)和穗肥(8 月 25 日)按照 4:3:3 的比例施入。秸秆磨碎后随基肥一次性添加,添加量为 4.25 g · kg⁻¹(9000 kg · hm⁻²)。磷肥和钾肥分别为过磷酸钙和氯化钾,它们作为底肥一次性施入,施用量为 P₂O₅ 150 kg · hm⁻²、K₂O 185 kg · hm⁻²。

长期淹水处理,水稻生育期间始终保持 3 ~ 5 cm 水层,收获前晒田;干湿交替处理,每个处理盆中安装一个土壤水分张力计(海岸华亭仪器有限公司),用以监测 15 cm 处水势,水稻移栽前 7 d 保持 3 ~ 5 cm 水层,保证移栽成活,其后进行自然落干,待土壤负压计到达 -15 kPa 左右时进行复淹 3 ~ 5 cm,而后再进行落干,周而复始,直至收获。

1.2.2 样品采集与测定

水稻于 2020 年 6 月 17 日定植,分别于返青期(6 月 28 日)、分蘖期(7 月 25 日)、拔节期(8 月 11 日)、孕穗期(9 月 1 日)、灌浆期(9 月 23 日)、成熟期(10 月 27 日)采用五点取样法采集 0 ~ 10 cm 土层土壤,测定土壤微生物量碳(MBC)含量。

MBC 含量采用氯仿熏蒸法^[23]测定,称取 25 g 新鲜水稻土两份,一份氯仿熏蒸黑暗真空条件下处理 24 h,然后用 100 mL 0.5 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 浸提(土:水=1:4),另一份样品直接加入 100 mL 0.5 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 浸提。用 TOC 分析仪(Vario TOC Cube, Elementar, Germany)测定熏蒸和未熏蒸浸提样品,微生物生物量碳(MBC)的熏蒸系数为 0.45。

CH_4 排放采用静态箱法测定^[24]。静态箱由箱体和底座两部分组成,箱体为直径 30 cm 的透明有

机玻璃, 高 50 cm (拔节期后换为高 70 cm 箱体, 其余不变), 内部顶端安装小风扇以混匀气体; 底座由直径 31 cm 的有机玻璃制成, 中间有凹槽 (用以嵌合箱体, 采气时用水密封), 高 10 cm。在施肥后第一周每隔 2 d 采集气体 1 次, 每次复灌后 1 ~ 2 d 采集 1 次, 其余时间每隔 7 d 采集 1 次 (遇降雨天气适当调整采样时间), 直至收获。水稻整个生育周期连续采集 CH₄, 共采集气体 23 次。气体采集时间为每天 8:00 ~ 11:00, 采集气体时, 盖上箱体, 用水密封, 在随后的 0、30、60 min 采集箱内气体, 并实时记录箱内温度。每次采气用气密性良好的 50 mL 注射器采集 100 mL 气体装入真空采气袋 (大连海得科技有限公司), 采气结束后带回实验室测定。

采集的气体采用气相色谱仪 (Agilent 7890B, 美国) 分析测定。CH₄ 检测器为 FID (火焰离子化检测器), 温度为 250 °C, 载气为高纯氮气, 燃烧气体、辅助气体和尾吹气体分别为氢气、空气和普通氮气, 流量分别为 80、450 和 25 mL · min⁻¹; 柱箱温度为 60 °C^[21]。

1.3 计算方法

CH₄ 排放通量计算方程^[21]为:

$$F = \rho \times \frac{dc}{dt} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{V}{A} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中: F 为 CH₄ 的排放通量 (mg · m⁻² · h⁻¹); ρ 为 CH₄ 在标准状态下的密度 (CH₄ 为 0.714 kg · m⁻³); dc/dt 为采样过程中采样箱内气体的浓度变化率; P 为采样箱内气压; P_0 为标准大气压, 由于试验地区气压与标准大气压相当, 因此 P/P_0 值等于 1; V 表示密闭静态箱体体积 (m³); A 表示采样箱内土地面积 (m²); 273 为气态方程常数; T 为测定时采样箱内平均温度 (°C)。

CH₄ 累积排放量计算方程^[25]为:

$$CE = \sum \frac{(F_{i+1} + F_i)}{2} \times 24 \times (d_{i+1} - d_i)$$

式中: CE 为 CH₄ 累积排放量 (kg · hm⁻²); F_i 、 F_{i+1} 为相邻两次采样时期内的排放通量 (mg · m⁻² · h⁻¹); d_{i+1} 、 d_i 为相邻两次采样期的天数 (d)。

1.4 数据统计

数据采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 进行统计分析, 用 Duncan 法进行差异显著性检验 ($\alpha=0.05$), 采用 Origin 9.0 画图, 图表中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 CH₄ 排放特征

由图 1 可知, 2 种水分管理模式 (CF 和 AWD) 下, CK 和 U 处理呈现相同的排放趋势, 在整个水稻生育期, CH₄ 排放较低, 排放通量基本趋于零。CF 模式下添加秸秆处理 (S、US) 显著增加了稻田 CH₄ 排放, 且在水稻移栽后 18 和 53 d 出现明显的排放峰值, CH₄ 排放分别为 55.71、58.73、41.26、47.94 mg · m⁻² · h⁻¹; 而 AWD 模式下, 添加秸秆处理 (S、US) CH₄ 排放只有一个明显的峰值, 出现在水稻定植后第 18 d, 分别为 38.53、48.40 mg · m⁻² · h⁻¹, 和 CF 模式下的水稻第一个峰值同步出现, 之后 CH₄ 排放迅速降低, 于 38 d 后逐渐趋于零。从不同生育期来看, CH₄ 排放主要集中在水稻返青至拔节期。

在相同处理下, AWD 模式下的 CH₄ 累积排放量低于 CF 管理模式 (图 2), 说明干湿交替降低了稻田 CH₄ 的排放。CF 和 AWD 管理模式, CH₄ 累积排放量 U 与 CK 处理差异不显著, 但 U 较 CK 处理 CH₄ 累积排放量分别增加了 16.17、6.10 kg · hm⁻², 说明尿素的施用在一定程度上促进了 CH₄ 的排放; CF 模式下, 与单施秸秆处理 (S) 相比, 尿素与秸秆配施显著增加了 CH₄ 累积排放量, 而在 AWD 模式下正好相反, 说明在干湿交替模式下尿素与秸秆还田配施能减少 CH₄ 排放; 两种水分管理模式中 CK 与 S 处理、U 与 US 处理相比, 前者 CH₄ 累积排放量显著低于后者, 说明秸秆是影响 CH₄ 排放的重要因素。

2.2 水稻产量和 CH₄ 累积排放量变化行为

水分模式、秸秆还田和氮肥水平作用下的水稻产量和 CH₄ 累积排放量及其主效应分析如表 1 和表 2 所示。结果表明, 仅有氮肥水平对水稻籽粒产量有极显著影响 ($P<0.01$), 其余措施对水稻产量并无显著影响。N225 水平下水稻籽粒产量比 N0 条件下平均提高 56.2 g · 盆⁻¹。水分模式、秸秆还田以及两者的交互效应极显著影响 CH₄ 累积排放量, 虽然氮肥水平对其没有显著影响, 但水分模式、秸秆还田和氮肥水平三者之间的交互效应对累积排放量有极显著影响 ($P<0.01$)。与 CF 模式相比, AWD 横式的 CH₄ 累积排放量降低了 67.2%。未添加秸秆 (S0) 处理使 CH₄ 累积排放量降低了 92.2%。N225 施肥水平下较 N0 的 CH₄ 累积排放量增加了 12.50 kg · hm⁻², 但差异并不显著。

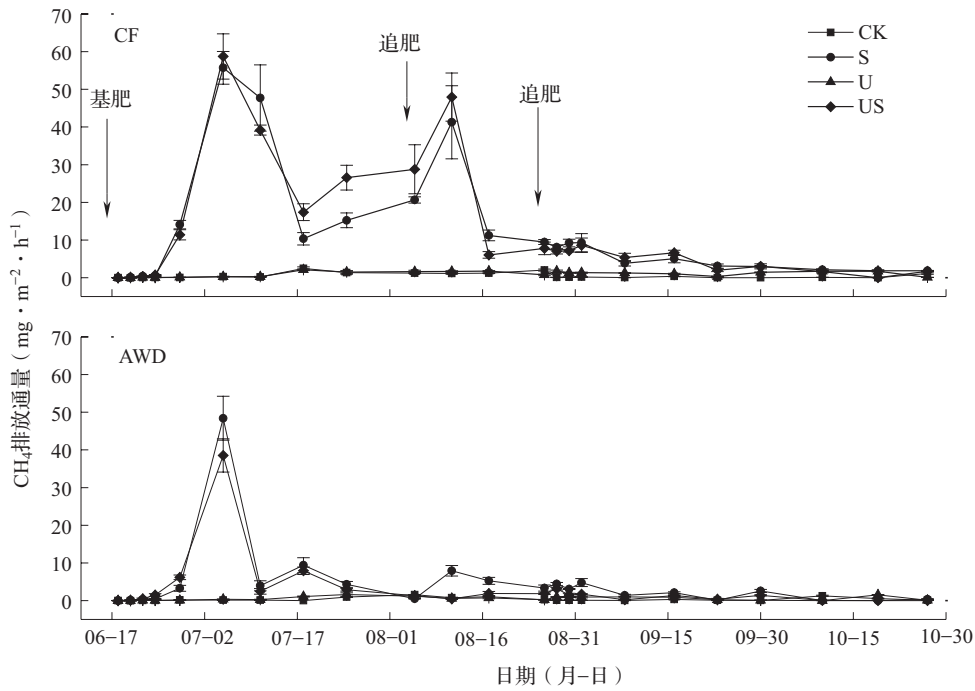


图1 不同水分模式下CH₄排放通量的变化

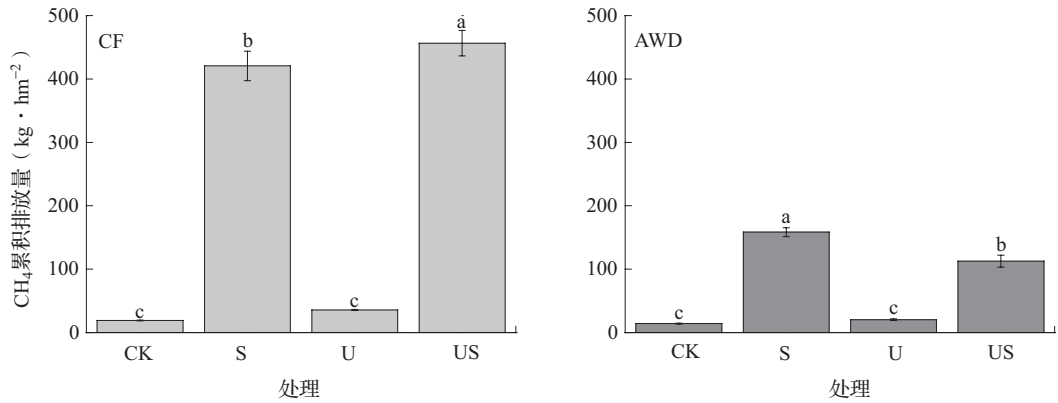


图2 不同水分模式下CH₄累积排放量

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

表1 水分模式、秸秆还田及氮肥水平作用下
水稻产量和CH₄累积排放量

	处理	水稻产量 (g · 盆 ⁻¹)	CH ₄ 累积排放量 (kg · hm ⁻²)
水分模式	CF	114.9 ± 8.5a	931.7 ± 35.6a
	AWD	112.9 ± 1.1a	305.5 ± 14.0b
氮肥水平	N0	85.9 ± 4.8b	612.3 ± 21.2a
	N225	142.1 ± 2.8a	637.6 ± 21.6a
秸秆还田	S0	115.9 ± 3.9a	89.0 ± 1.9b
	S1	112.0 ± 3.6a	114.8 ± 37.9a

注：不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。N225：施用尿素；N0：未施尿素；S1：秸秆还田；S0：未秸秆还田。下同。

表2 水分模式、秸秆还田及氮肥水平对水稻产量和
CH₄累积排放量的主效应及交互作用

效应	水稻产量	CH ₄ 累积排放量
水分模式	0.30	1085.30**
氮肥水平	250.86**	0.43
秸秆还田	1.20	3103.30**
水分模式 × 氮肥水平	1.00	23.52**
水分模式 × 秸秆还田	0.08	949.70**
氮肥水平 × 秸秆还田	0.52	2.97
水分模式 × 氮肥水平 × 秸秆还田	0.50	14.06**

注：* 表示显著相关 ($P<0.05$)；** 表示极显著相关 ($P<0.01$)。下同。

2.3 水稻生长季 CH₄ 排放通量与 10 cm 土层温度相关性分析

由水稻生长季 CH₄ 排放通量与 10 cm 土层温度的相关性 (表 3) 可以看出, 两种水分模式下 U 处理 CH₄ 排放通量与 10 cm 土层温度都未呈现相关性。CF 模式下除 U 外, 其他处理 CH₄ 排放通量与 10 cm 土层温度均呈显著相关, 其中 S、US 处理呈极显著相关, 说明长期淹水下 10 cm 土层温度显著影响 CH₄ 排放; AWD 模式下只有 S 和 US 处理与 CH₄ 排放通量呈显著相关, 这说明土层温度在干湿交替水分模式下对 CH₄ 排放的影响程度较 CF 模式有所降低, CH₄ 排放可能主要受到秸秆添加与干湿交替的影响。

表 3 水稻生长季 CH₄ 排放通量与 10 cm 土层温度的相关系数

指标	CF	CK	S	U	US
10 cm 土层温度		0.511 [*]	0.633 ^{**}	0.073	0.659 ^{**}
指标	AWD	CK	S	U	US
10 cm 土层温度		0.486	0.583 [*]	0.183	0.509 [*]

2.4 土壤微生物量碳 (MBC) 的变化

土壤 MBC 含量随水稻生育进程而变化 (表 4, 图 3)。两种水分模式下, CK 处理返青至孕穗期土壤 MBC 含量没有明显变化, 而灌浆期至成熟期迅速降低; CF 模式下 U 处理分蘖期 MBC 含量较返青期、拔节期和孕穗期明显增加, 而在 AWD 模式下 U 处理 MBC 含量和 CK 处理变化一致; 两种水分模式下, S 和 US 处理水稻各生育期土壤 MBC 的含量都处于较高水平, 其具体的变化是 S 和 US 处理返青期至拔节期土壤 MBC 含量呈现下降趋势, 而后增加至孕穗期, 又缓慢下降直至水稻成熟收获。综合所有处理来看, 水稻整个生育期, 土壤 MBC 含量与灌溉方式和秸秆添加密切相关, 而与施氮水平没有显著相关 (图 3), 这与影响 CH₄ 排放的因素是一致的 (表 2)。CF 较 AWD 模式土壤 MBC 含量提高了 16.4%; S1 较 S0 处理土壤 MBC 含量提高 29.9%, CH₄ 累积排放也有相同的增加趋势。

表 4 水稻生长季不同处理土壤微生物量碳含量 (mg · kg⁻¹)

水分模式	处理	返青期	分蘖期	拔节期	孕穗期	灌浆期	成熟期
CF	CK	289.9 ± 19.4b	303.5 ± 11.7c	296.2 ± 19.2a	307.7 ± 8.1b	203.0 ± 16.9b	173.3 ± 10.1a
	S	572.2 ± 38.5a	392.7 ± 35.1b	218.5 ± 10.3b	285.0 ± 5.1b	275.3 ± 17.6a	151.7 ± 2.4b
	U	246.4 ± 9.5b	441.2 ± 6.9a	245.7 ± 17.1b	281.9 ± 21.5b	135.0 ± 9.3c	79.4 ± 7.9d
	US	590.4 ± 43.1a	466.9 ± 8.3a	284.5 ± 14.1a	500.6 ± 30.7a	139.9 ± 12.4c	122.1 ± 9.0c
AWD	CK	315.9 ± 5.3c	278.4 ± 21.2b	264.3 ± 14.0c	339.4 ± 17.8a	117.7 ± 10.8c	75.7 ± 5.1b
	S	518.8 ± 20.2b	288.2 ± 20.6b	233.8 ± 11.1bc	284.7 ± 9.4c	54.5 ± 6.5c	57.1 ± 5.2bc
	U	269.1 ± 10.0d	273.3 ± 22.6b	288.8 ± 12.5ab	318.5 ± 34.1ab	68.5 ± 7.8b	50.8 ± 5.3c
	US	573.5 ± 21.9a	360.3 ± 21.7a	312.6 ± 16.3a	357.8 ± 18.4a	177.5 ± 13.3a	136.4 ± 16.0a

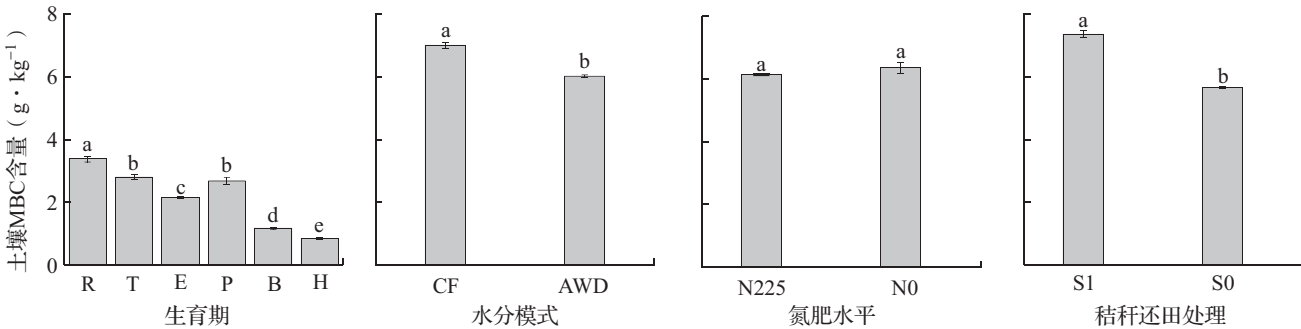


图 3 水稻生长季土壤微生物量碳含量

注: R: 返青期; T: 分蘖期; E: 拔节期; B: 孕穗期; P: 灌浆期; H: 成熟期。

3 讨论

3.1 不同水管理模式和施肥措施对 CH_4 排放的影响

秸秆还田与水管理显著影响 CH_4 的排放。与未施秸秆处理相比, 秸秆还田显著增加了水稻生长前中期 CH_4 的排放通量和累积排放量, 这与人研究结果一致^[8, 21, 26]。由于秸秆中含有大量有机碳, 秸秆还田后有机碳在微生物作用下分解, 为 CH_4 的产生提供了更多的有效碳源, 这些碳源中一部分在产 CH_4 菌的参与下产生大量 CH_4 , 致 CH_4 排放增加; 而随着水稻生育期的进行, 土壤中可利用的有机碳减少, 致使 CH_4 排放也降低, 导致水稻后期 CH_4 排放处于较低水平^[8, 10, 26]。AWD 模式下, U、US 处理中 CH_4 排放出现的第一个峰值与 CF 模式下基本相同 (图 1), 可能是因为水稻处在幼苗时期, 吸水量少, 干湿交替过程主要由大气蒸发控制, 导致落干过程缓慢, 而淹水过程时间长, 利于 CH_4 的产生。相较于 CF 模式, AWD 模式下各处理 CH_4 排放通量和累积排放量都较低, 这与 Liao 等^[18] 研究结果一致。这是由于淹水条件下, 土壤含氧量低, 形成的厌氧环境使得产 CH_4 菌活性增强, CH_4 氧化菌活性降低, 使 CH_4 排放增加^[9], 而干湿交替下, 在落干过程中常常造成土壤好氧环境, 这种环境使更多氧气进入土壤, 促进了 CH_4 的氧化作用, 最终减少了 CH_4 排放^[11]。冯晓赟等^[22] 研究表明, 单施尿素能增加稻田 CH_4 排放, 但与 CK 相比, 增加效果并不显著; 而尿素与秸秆配施则会显著增加 CH_4 排放。本试验结果与之一致, 试验中 2 种水分模式下, U 处理只在数值上增加了 CH_4 累积排放, 并未与 CK 处理有显著性差异, 这可能是因为尿素的施用, 一方面能促进水稻根系的生长发育, 进而增加根系分泌物, 为 CH_4 的产生提供更多的前体物质, 促进 CH_4 的排放^[27]; 另一方面由于尿素可以提高土壤中 CH_4 氧化菌的数量和活性, 促进 CH_4 氧化, 而抑制其释放, 所以又能够降低 CH_4 排放^[27], 两者共同作用导致了 CH_4 排放有促进但差异不显著。此外, US 处理的 CH_4 排放显著高于 CK 和 U 处理, 但与 S 处理相比, 两者在不同水管理模式下差异不同 (图 2), 这可能因为在 CF 模式下, 尿素的施用带来氮源, 促进了微生物对秸秆的分解, 为 CH_4 产生提供了充足的碳源, 使 CH_4 排放增多^[21], 且多于 S 处理; 而在 AWD

模式下, 土壤通气性增高, CH_4 氧化菌活性增强, 尿素的添加进一步提高了土壤中 CH_4 氧化菌的数量和活性, 使 CH_4 排放降低, 低于 S 处理。

研究表明, 稻田 CH_4 排放通量与温度有显著的相关性^[28]; 但也有研究认为, 稻田 CH_4 排放通量与温度不显著相关^[29]; 本研究 CF 模式下, 除 U 处理外, 其余处理 CH_4 排放通量都与 10 cm 土层温度显著相关; AWD 下, 只有 S 和 US 处理 CH_4 排放通量与 10 cm 土层温度显著相关。这是因为, 稻田土壤 CH_4 的排放受多种因子的综合影响, 土壤温度只有在其他因子相对稳定时才突显出来^[29]。由于尿素对甲烷的排放影响比较复杂^[22, 27], 使土壤温度对 CH_4 的影响相对减弱, 表现出此处理下土壤温度与 CH_4 排放没有相关性; 而 AWD 模式下, CK 和 U 处理的 CH_4 排放主要受到干湿交替水分模式的影响, 土壤温度的影响也相对减弱。

土壤 MBC 作为土壤有机碳中最活跃的组分, 与土壤碳转化存在密切关系, 其含量是衡量土壤肥力的重要指标^[30]。本研究中秸秆的添加提高了水稻各生育期土壤 MBC 的含量, 特别是尿素与秸秆配施提高最为显著, 这说明秸秆的施用有利于培肥地力, 而与尿素配施效果更好。吴家梅等^[31] 研究不同活性有机碳组分与 CH_4 排放的关系, 结果表明稻田土壤 MBC 含量与 CH_4 排放呈现显著正相关。图 3 中在水稻生育前中期 MBC 含量较高, 至灌浆期和成熟期已经处于较低水平, 这一点与 CH_4 排放相吻合。

3.2 不同水管理模式和施肥措施对水稻产量的影响

张鲜鲜等^[11] 和 Liao 等^[18] 研究表明, 轻度干湿交替 (土壤水势阈值 ≥ -15 kPa) 较常规灌溉水稻产量相对稳定或略微增加。本研究中两种水分模式下水稻产量较为稳定, 没有显著变化 (表 2), 与人研究一致。这可能是因为轻度干湿交替下, 淹水与落干的水分模式, 使有氧与无氧交替, 土壤硝化作用发生周期性变化, 土壤氮素形态由以铵态氮为主转变为铵态氮、硝态氮混合的状态, 极大地满足了水稻根系对氮素的选择性吸收^[11, 32]; 此外, 轻度干湿交替可以促进水稻灌浆, 在生殖生长阶段从茎叶向籽粒转运营养物质, 使水稻产量较为稳定或略微增加^[33]。较不施氮处理 (N0), N225 水平下水稻产量显著提高, 氮肥的施入, 满足了水稻对养分的需求, 显著增加了水稻的有效穗数、每穗实粒

数,使产量增加。与未添加秸秆处理相比,秸秆还田对水稻产量并没有显著影响,这与武开阔等^[21]大田试验结果相似,这可能是因为秸秆中多数为难分解的有机物质,秸秆添加后其有机物质需要长时间分解,在当季很少被吸收利用,导致水稻产量并未增加。

4 结论

干湿交替与长期淹水相比,CH₄排放量显著降低;两种水分模式下,秸秆添加导致稻田CH₄排放增加,尿素添加对CH₄排放没有显著影响,尿素与秸秆配施显著增加了CH₄排放。在长期淹水中,尿素与秸秆配施CH₄排放量要显著高于单施秸秆处理,而在干湿交替中,结果正好与之相反。说明秸秆还田与尿素配施时,干湿交替的水分管理模式下较为优异,能产生更少的CH₄。尿素的投入显著增加了水稻产量,干湿交替和秸秆还田对水稻产量没有显著影响,此外,秸秆还田显著增加了土壤微生物量碳的含量,有利于培肥地力。综上,在本试验条件下,干湿交替水分管理模式CH₄排放显著降低,是值得推荐的水分管理模式;干湿交替下,单施尿素和尿素与秸秆配施均能显著降低CH₄排放,提高水稻产量,两者均是较为优异的养分管理模式。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 谢立勇,许婧,郭李萍,等. 水肥管理对稻田CH₄排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. 中国农业生态学报, 2017, 25 (7): 958-967.
- [4] 卢廷超,徐培智,张仁陟,等. 保护性耕作模式下早稻田甲烷排放特征[J]. 南方农业学报, 2017, 48 (8): 1395-1401.
- [5] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, et al. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, and lakes in China: Synthesis and new estimate [J]. Global Change Biology, 2013, 19 (1): 19-32.
- [6] 何竹,薛利红,杨林章,等. 磷对稻田甲烷排放的影响及其可能机制[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (2): 445-450.
- [7] Bridgman S D, Cadillo-Quiroz H, Keller J K, et al. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales [J]. Global Change Biology, 2013, 19 (5): 1325-1346.
- [8] 杭玉浩,王强盛,许国春,等. 水分管理和秸秆还田对稻麦轮作系统温室气体排放的综合效应[J]. 生态环境学报, 2017, 26 (11): 1844-1855.
- [9] 李思宇,陈云,李婷婷,等. 水分养分管理对稻田温室气体排放影响的研究进展[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40 (6): 16-23.
- [10] 陈佳广. 秸秆还田对北方稻田甲烷排放的影响研究[J]. 农业科技与装备, 2015, (6): 9-13.
- [11] 张鲜鲜,周胜,孙会峰,等. 干湿交替灌溉对水稻生产和温室气体减排影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39 (11): 3873-3880.
- [12] 龚振平,颜双双,闫超,等. 寒地水稻秸秆还田和温度对稻田甲烷排放的影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46 (12): 8-15.
- [13] Xia L L, Wang S H, Yan X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 118-127.
- [14] 李香兰,徐华,李小平,等. 水分管理影响稻田甲烷排放研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (2): 221-227.
- [15] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [16] Lampayan R M, Rejesus R M, Singleton G R, et al. Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice [J]. Field Crops Research, 2015, 170: 95-108.
- [17] Haque M M, Kim G W, Kim S Y. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping [J]. Field Crops Research, 2016, 193: 133-142.
- [18] Liao B, Wu X, Yu Y F, et al. Effects of mild alternate wetting and drying irrigation and mid-season drainage on CH₄ and N₂O emissions in rice cultivation [J]. Science of the Total Environment, 2020, 698: 13414.
- [19] Liang K M, Zhong X H, Huang N R, et al. Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 46-57.
- [20] 石生伟,李玉娥,刘运通,等. 中国稻田CH₄和N₂O排放及减排整合分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43 (14): 2923-2936.
- [21] 武开阔,张丽莉,宋玉超,等. 稳定性氮肥配合秸秆还田对水稻产量及N₂O和CH₄排放的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (4): 1287-1294.
- [22] 冯晓赞,万鹏,李洁,等. 秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33 (6): 208-217.
- [23] Joergensen R G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EC} value [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28 (1): 25-31.
- [24] Gioacchini P, Nistri A, Marzadori C, et al. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36 (2): 129-135.
- [25] Wang J Y, Jia J X, Xiong Z Q, et al. Water regime-nitrogen fertilizer-straw incorporation interaction: field study on nitrous

- oxide emissions from a rice agroecosystem in Nanjing, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141 (2-3): 437-446.
- [26] 聂江文, 王幼娟, 田媛. 紫云英与化学氮肥配施对双季稻田 CH_4 与 N_2O 排放的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (3): 676-684.
- [27] 张广斌, 马静, 马二登, 等. 尿素施用对稻田土壤甲烷产生、氧化及排放的影响 [J]. 土壤, 2010, 42 (2): 178-183.
- [28] 王娟, 熊又升, 徐祥玉, 等. 土壤温度和氧化还原特性对冷浸田 CH_4 排放的影响 [J]. 2014, 53 (14): 3260-3264.
- [29] 徐华, 蔡祖聪, 李小平, 等. 冬作季节土地管理对水稻土壤 CH_4 排放季节变化的影响 [J]. 应用生态学报, 2000, 11 (2): 215-218.
- [30] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异 [J]. 生态学报, 2015, 35 (23): 7625-7633.
- [31] 吴家梅, 霍莲杰, 纪雄辉, 等. 不同施肥处理对土壤活性有机碳和甲烷排放的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37 (18): 6167-6175.
- [32] 陆大克, 段骅, 王维维, 等. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (8): 1362-1372.
- [33] Zhang H, Xue Y G, Wang Z Q, et al. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice [J]. Crop Science, 2009, 49 (6): 2246-2260.

Effects of combined application of nitrogen fertilizer and straw on CH_4 emission in paddy fields under different water management patterns

LI Wen-tao^{1, 2}, YANG Li-jie^{1, 3}, ZHANG Li-li^{*}, YU Chun-xiao^{1, 2}, WU Kai-kuo^{1, 2}, SONG Yu-chao¹, GONG Ping¹, XUE Yan¹, LI Dong-po¹, WU Zhi-jie¹ (1. Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Shenyang Chemical Research Institute Co. Ltd., Shenyang Liaoning 110021)

Abstract: This paper aimed to research the effects of nitrogen fertilizer combined with straw application on gaseous methane (CH_4) emission from paddy field under different water management patterns, and an outdoor rice pot experiment was conducted with aquatic brown soil in northeast China based on two water management patterns of continuous flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD), four treatments were set up: control (CK), straw (S), urea (U), urea+straw (US). CH_4 emissions were monitored throughout the rice growing season, and soil microbial biomass carbon (MBC) content during different growth periods and rice yield after harvest were determined. The results showed that the cumulative emission of CH_4 was lower in AWD than that in CF. There was no significant difference in CH_4 cumulative emission between CK and U treatments under the two water management patterns, while the CH_4 cumulative emission was significantly increased in the treatment with straw addition (S, US). The cumulative CH_4 emission of US treatment was significantly higher than that of S treatment under CF mode, but it showed the opposite pattern under AWD mode. The AWD mode didn't significantly reduce the yield of rice while reducing CH_4 emissions. The application of urea significantly increased the yield of rice. Although the straw returning to the field had no significant effect on the yield of rice, it significantly increased the soil MBC content, contributing to soil fertility. Compared with CF mode, AWD mode significantly reduces the emission of CH_4 . US reduces CH_4 emission and ensures rice yield in the AWD mode, and at the same time increases soil MBC content, which is conducive to soil fertility. Therefore, AWD is a better mode of water management in paddy fields with aquatic brown soil in northeast China, while U and US treatment are the better methods of fertilization.

Key words: continuous flooding; alternate wetting and drying; straw returning; CH_4 emission; rice yield