

聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 等. 紫云英还田对早稻直播稻田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2334–2341.

NIE Jiang-wen, WANG You-juan, WU Bang-kui, et al. Effect of Chinese milk vetch incorporation on greenhouse gas emissions from early-rice direct-seeding paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2334–2341.

紫云英还田对早稻直播稻田温室气体排放的影响

聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 刘章勇, 朱 波*

(长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心/湖北省涝渍灾害与湿地农业重点实验室, 湖北 荆州 434025)

摘 要:为研究早稻直播条件下冬种紫云英翻压还田对稻田 CH_4 与 N_2O 排放的影响。选取南方双季稻区稻田为研究对象, 采用静态暗箱-气相色谱法监测冬闲-双季稻, 不施氮肥 (CK); 冬闲, 早晚稻每季施氮 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_{200}); 冬种紫云英全量还田, 早晚稻均不施氮 (CMV); 冬种紫云英半量还田, 早晚稻每季施氮 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($\text{CMV} + \text{N}_{100}$) 等 4 个处理的 CH_4 与 N_2O 排放速率及其全球增温潜势 (GWP) 与单位粮食产量温室气体排放强度 (GHGI)。结果表明, 各处理 CH_4 排放峰主要在水稻种植初期至分蘖末期, 早稻与晚稻出现最大峰值的处理分别是 CMV ($105.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 和 $\text{CMV} + \text{N}_{100}$ ($52.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); N_2O 排放峰主要出现在田间水稻种植初期至分蘖及田间水分干湿交替阶段, 早稻晚稻最大峰值均为 N_{200} , 分别为 $717.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1\,065.57 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 与 N_{200} 相比, $\text{CMV} + \text{N}_{100}$ 增加了 CH_4 累积排放量, 减少了 N_2O 的排放, 且早稻季 CH_4 排放量低于晚稻季。与 CK 相比, 施肥对于稻田 GWP 并无显著影响, 其中 CH_4 对 GWP 的贡献可达 90% 以上; 与 N_{200} 相比, $\text{CMV} + \text{N}_{100}$ 增加了早稻季 GHGI, 降低了晚稻季 GHGI, 而对双季稻 GHGI 并无显著影响。综上, 早稻直播条件下紫云英还田配施氮肥虽然增加了稻田 CH_4 排放, 但降低了 N_2O 排放, 可降低晚稻田 GHGI。

关键词: 紫云英; 双季稻; CH_4 ; N_2O ; 全球增温潜势

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)10-2334-08 doi:10.11654/jaes.2018-0195

Effect of Chinese milk vetch incorporation on greenhouse gas emissions from early-rice direct-seeding paddy fields

NIE Jiang-wen, WANG You-juan, WU Bang-kui, LIU Zhang-yong, ZHU Bo*

(Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Hubei Key Laboratory of Waterlogging Disaster and Wetland Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: With the aim of studying the effect of paddy fields incorporating Chinese milk vetch on CH_4 and N_2O emissions, a static closed-chamber gas chromatography method was employed to measure CH_4 and N_2O emission fluxes, global warming potential (GWP), and greenhouse gas emissions intensity (GHGI) of southern double-cropped paddy fields in China under four different treatments. The treatments were fallow, double-cropped paddy field without nitrogen application (CK); fallow with $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen application in the first and second rice growing seasons (N_{200}); winter planting with Chinese milk vetch incorporation without nitrogen application (CMV); and winter planting with half Chinese milk vetch incorporation with $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen application in the first and second rice growing seasons ($\text{CMV} + \text{N}_{100}$). The results indicated that the CH_4 emission peaks with the four treatments mainly occurred from the early rice transplanting stage to the tilling end stage and $\text{CMV} + \text{N}_{100}$ ($52.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) and CMV ($105.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) had peak CH_4 emission values, respectively, in the early rice and late rice stages. N_2O emission peaks occurred in the early transplanting, tilling, and dry-wet alternation stages of the

收稿日期: 2018-02-05 录用日期: 2018-04-11

作者简介: 聂江文 (1992—), 男, 湖北崇阳人, 硕士研究生, 主要从事农业生态和作物生长模型研究。E-mail: 13437203646@163.com

*通信作者: 朱 波 E-mail: 1984zhubo@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31501274); 湖北省教育厅优秀中青年科技创新团队项目 (T201404); 主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心开放基金项目 (2015MS001); 中国科协青年人才托举工程项目 (YESS20160040); 十三五国家重点研发计划粮食丰产增效工程项目 (2016YFD0300208)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31501274); Excellent Science and Technology Innovation Team of Middle-aged and Young People in Hubei Education Department (T201404); Main Grain Crop Industrialization Cooperation Innovation Center Open Funding of Hubei (2015MS001); Association of Science and Technology Young Talent of China (YESS20160040); The National Key Research Program of the Thirteenth Five-year Plan (2016YFD0300208)

paddy fields, with the N_{200} N_2O emission peaking both in the early and late rice stages, respectively, at $717.7 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ and $1\ 065.57 \mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$. $CMV+N_{100}$ increased the cumulative emissions of CH_4 , yet reduced N_2O emissions, when compared with N_{200} , and CH_4 emissions during the early rice season were lower than those during the late rice season. At the same time, our results suggested that compared with CK, fertilization had no significant influence on the GWP of the paddy fields, and the contribution of CH_4 to GWP was more than 90%. Compared with N_{200} , $CMV+N_{100}$ increased the GHGI of early rice but decreased the GHGI of late rice. However, no significant influence on the GHGI of double-cropped rice was observed. In conclusion, although Chinese milk vetch residue incorporation in paddy fields with nitrogen application increased CH_4 emissions from the paddy fields, it reduced N_2O emissions and the GHGI of the late rice season under direct seeding conditions.

Keywords: Chinese milk vetch; double-cropped rice; CH_4 ; N_2O ; GWP

全球变暖主要是由大气中温室气体浓度增加引起的,而甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是大气中两种重要的温室气体。在100年时间尺度下, CH_4 和 N_2O 单位分子的增温潜能分别是 CO_2 的25倍和298倍^[1]。据统计,稻田是 CH_4 和 N_2O 的重要排放源之一^[2],稻田生态系统 CH_4 排放量约占全球人类活动 CH_4 总排放的12%~26%^[3],稻田生态系统 N_2O 排放量占我国农田总排放的7%~11%^[4]。因此,如何科学合理地制定稻田 CH_4 和 N_2O 减排措施,发展高产低碳的水稻生产技术已成为农田生态研究的热点问题。

农田养分与水分管理是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的两个重要因素^[5-7]。首先,大量单一化学氮肥的投入是造成氮素利用率低、 N_2O 排放大幅增加的主要原因^[8-9],而有机肥与无机氮肥配施被认为是可实现水稻高产^[10]、减肥减排的高效施肥措施之一^[11-12];朱波等^[13]发现黑麦草与氮肥配施增加了 CH_4 排放,但能减少 N_2O 排放,并且 CH_4 占总增温潜势的比例远高于 N_2O ;郭腾飞等^[14]认为秸秆还田增加了 CO_2 和 CH_4 排放,但减少了 N_2O 排放。研究表明^[6-7],相比持续淹水,秸秆还田条件下间歇灌溉和中期烤田都可提高水稻产量和降低稻田温室气体排放。因此,合理的施肥及灌溉措施对于温室气体减排有着极为重要的作用。紫云英(*Astragalus sinicus* L.)是我国南方稻区常见的冬季绿肥作物,翻压还田后可部分替代水稻季需要的氮素养分,提高氮素利用效率和水稻产量^[15]。而目前多数研究发现绿肥还田后,且 CH_4 的排放高峰期主要集中在绿肥还田后一个月内的淹水条件下^[12-13],针对这一现象并结合当地农作习惯,在早稻直播晚稻移栽的栽培措施下,研究南方双季稻区紫云英还田对稻田温室气体排放的影响,对于制定合理的温室气体减排施肥措施具有重要意义。

本研究拟通过大田试验条件下,比较早稻直播条件下冬种紫云英翻压还田对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排

放特征及全球增温潜势(GWP)和单位粮食产量温室气体排放强度(GHGI)的影响。以期为制定双季稻区温室气体减排的施肥措施和种植制度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年在湖南省华容县长江大学试验基地(东经 $112^{\circ}55'$,北纬 $29^{\circ}52'$)进行。当地气候为亚热带季风湿润气候,年均气温 $16 \sim 18^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 积温 $5000 \sim 5800^{\circ}C$,无霜期 $260 \sim 310$ d,年降雨量 $1200 \sim 1700$ mm。试验土壤为长江沉积物发育的紫潮泥水稻土。试验前土壤肥力指标:有机质 $49.2 g \cdot kg^{-1}$,全氮 $3.11 g \cdot kg^{-1}$,碱解氮 $273 mg \cdot kg^{-1}$,有效磷 $16.4 mg \cdot kg^{-1}$,速效钾 $69 mg \cdot kg^{-1}$,pH 7.7。

1.2 试验设计

试验采用田间小区试验,设4个处理:冬闲,水稻季不施氮肥(CK);冬闲,每季水稻施氮量 $200 kg \cdot hm^{-2}$ (N_{200});种植紫云英全量还田,水稻季不施氮肥(CMV);种植紫云英半量还田,每季水稻施氮量 $100 kg \cdot hm^{-2}$ ($CMV+N_{100}$)。紫云英鲜草全量还田量为 $3750 kg \cdot hm^{-2}$ 。3次重复,随机区组排列,小区面积为 $3.3 m \times 9 m = 30 m^2$,小区间田埂宽0.3 m,沟宽0.5 m。小区间做田埂并用塑料薄膜包裹,防止水肥串灌,避免小区之间相互污染。

1.3 供试材料及田间管理

试验氮肥为尿素,70%基施,30%追肥。磷肥为过磷酸钙,钾肥为氧化钾,早稻和晚稻的施肥量一致。磷钾肥在早晚稻插秧前施入,用量为 $75 kg \cdot hm^{-2}$ (P_2O_5)和 $100 kg \cdot hm^{-2}$ (K_2O),作为基肥一次性施入。紫云英品种为湘肥3号,2016年10月5日按 $37.5 kg \cdot hm^{-2}$ 播种量均匀撒播于冬种紫云英稻田小区中,盛花期测产,于早稻直播前7 d翻压。早稻品种为浙福7号,2017年4月10日浸种,4月13日按 $120 kg \cdot hm^{-2}$ 播

种量均匀撒播于小区中,7月12日收获。晚稻品种为隆香优130,2017年6月22日苗床播种,7月18日移栽,移栽密度为20 cm×20 cm,每穴2~3苗,10月14日收获。紫云英冬季生长期不施用任何肥料。双季稻生育期内地表温度及水层深度如图1和图2所示。其余稻田管理均按当地高产栽培措施进行。

1.4 样品采集与测定

于双季稻生长季内采用密闭式静态暗箱-气相色谱法测定田间温室气体的排放速率。气体采样箱由底座和采样箱组成,采样箱为有机玻璃,箱底高度为100 cm,长宽皆为45 cm,采样箱外部包有海绵和铝箔纸,防止太阳照射导致箱内温度变化过大。采样箱底座上部有水槽,底座高5 cm,在水稻直播或移栽后插入田间土壤。观测频率为每周1次,烤田期每周3次,时间均为8:00—11:00。采集气样时,将采样箱垂直安放在底座3 cm深的凹槽内并加水密封,扣箱后立即用30 mL注射器采集样品,然后分别在扣箱0、10、20 min采集样品。为防止人为扰动造成的误差,在田

间搭设木栈桥通往各试验小区中央的箱体底座。气体样中CH₄和N₂O浓度由气相色谱Agilent 7890A分析测定。CH₄检测器是FID(氢火焰离子化检测器),N₂O检测器是ECD(电子捕获检测器)。温室气体排放速率由该气体在箱中浓度随时间的变化率计算得出,气体排放通量计算公式如下:

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

式中: F 为排放速率,CH₄为mg·m⁻²·h⁻¹,N₂O为μg·m⁻²·h⁻¹;dc/dt为采样过程中箱内气体浓度随时间的变化率,CH₄为mL·m⁻³·h⁻¹,N₂O为μL·m⁻³·h⁻¹;h为箱体高度,1.0 m;ρ为标准状态下气体的密度,CH₄为0.714 kg·m⁻³,N₂O为1.964 kg·m⁻³;T为采样时箱内温度,℃。

在每次气样采集的同时,记录小区的水层深度及地表温度,并采集0~20 cm土壤样品,采用2 mol·L⁻¹ KCl浸提-靛酚蓝比色法测定铵态氮;采用双波长紫外分光光度法测定硝态氮。

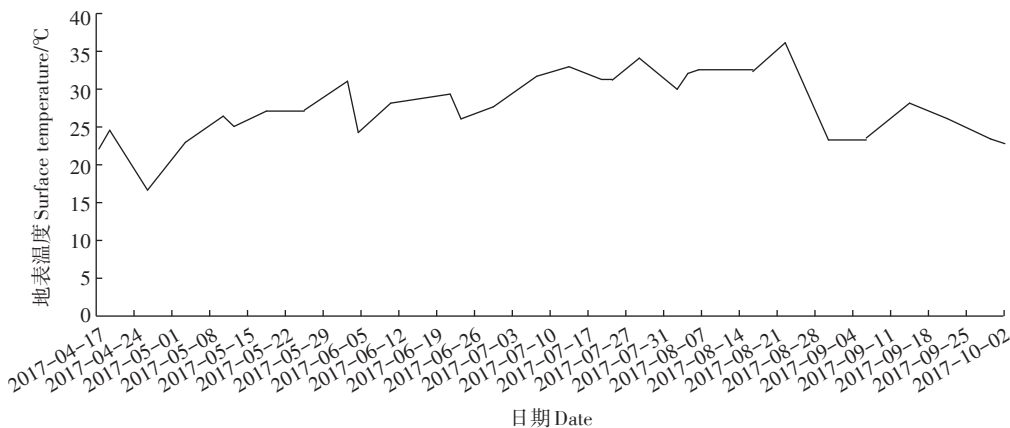


图1 双季稻生长季地表温度变化

Figure 1 Variation of surface temperature in growing season of double cropping rice

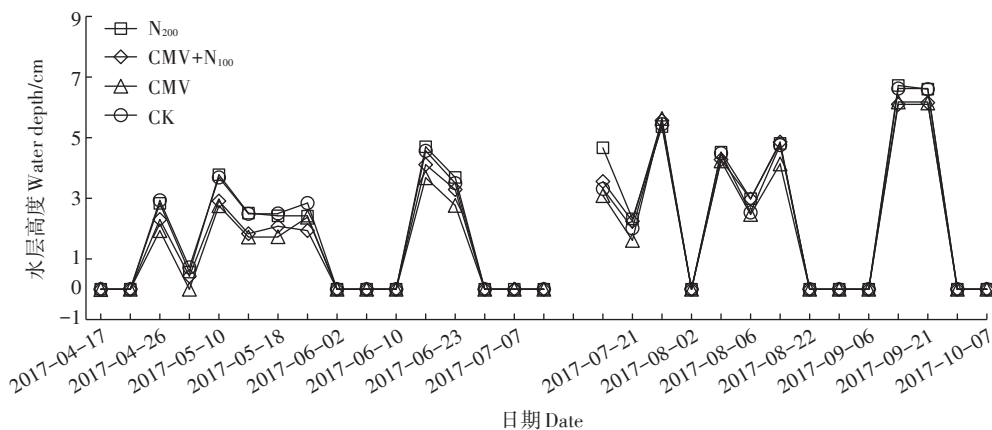


图2 水稻生长季水层深度变化

Figure 2 Variation of water layer depth in rice growing season

1.5 数据分析

以100年为尺度,单位质量 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势(GWP)分别是 CO_2 的25倍和298倍,可计算其温室气体排放二氧化碳当量(Carbon dioxide equivalent, CDE, 单位:kg,以 CO_2 计)。通过计算各处理 CH_4 和 N_2O 的GWP,结合水稻产量计算单位稻谷产量温室气体排放强度(GHGI)^[16]。

$$\text{GWP} = \text{CDE}(\text{CH}_4) + \text{CDE}(\text{N}_2\text{O}) \quad (2)$$

$$\text{GHGI} = \text{GWP}/\text{水稻产量} \quad (3)$$

式中:GWP为 CH_4 和 N_2O 二者排放量的总二氧化碳当量,kg,以 CO_2 计;GHGI为温室气体排放强度, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

利用Excel 2007和SPSS 19.0对试验数据进行整理、方差分析和作图, CH_4 和 N_2O 排放通量用每次观测所得的3个重复的平均值与标准偏差来表示。

2 结果与分析

2.1 土壤铵态氮和硝态氮浓度变化

土壤铵态氮和硝态氮是评价土壤供氮能力的重

要指标。从图3可以观察到,各处理稻田铵态氮与硝态氮浓度随时间的变化趋势基本一致。铵态氮浓度在早稻初期施肥后迅速降低,至施分蘖肥又迅速升高,后逐渐降低。晚稻移栽初期至收获期各处理土壤铵态氮浓度均呈逐渐降低的趋势,晚稻移栽初期 N_{200} 处理显著高于CK。各处理硝态氮均在早稻晚稻排干期出现较低的峰值,其余时期均处于较低水平。

2.2 CH_4 排放通量

由图4可见,各处理双季稻田 CH_4 排放的季节变化趋势基本一致,均表现为在早稻播种初期(1周内)出现峰值,晚稻移栽后至分蘖末期出现较大排放峰,其他水稻生育期趋于平稳,且晚稻排放峰值高于早稻 CH_4 排放峰值;早稻与晚稻出现最大峰值的处理分别为 $\text{CMV} + \text{N}_{100}$ 和 CMV ,为 $52.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $105.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.3 N_2O 排放通量

图5显示,各施肥处理稻田 N_2O 排放规律基本一致。除 N_{200} 处理在水稻分蘖期(覆水)及晒田期结束后覆水出现较大排放峰外(最大峰值为 $717.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),

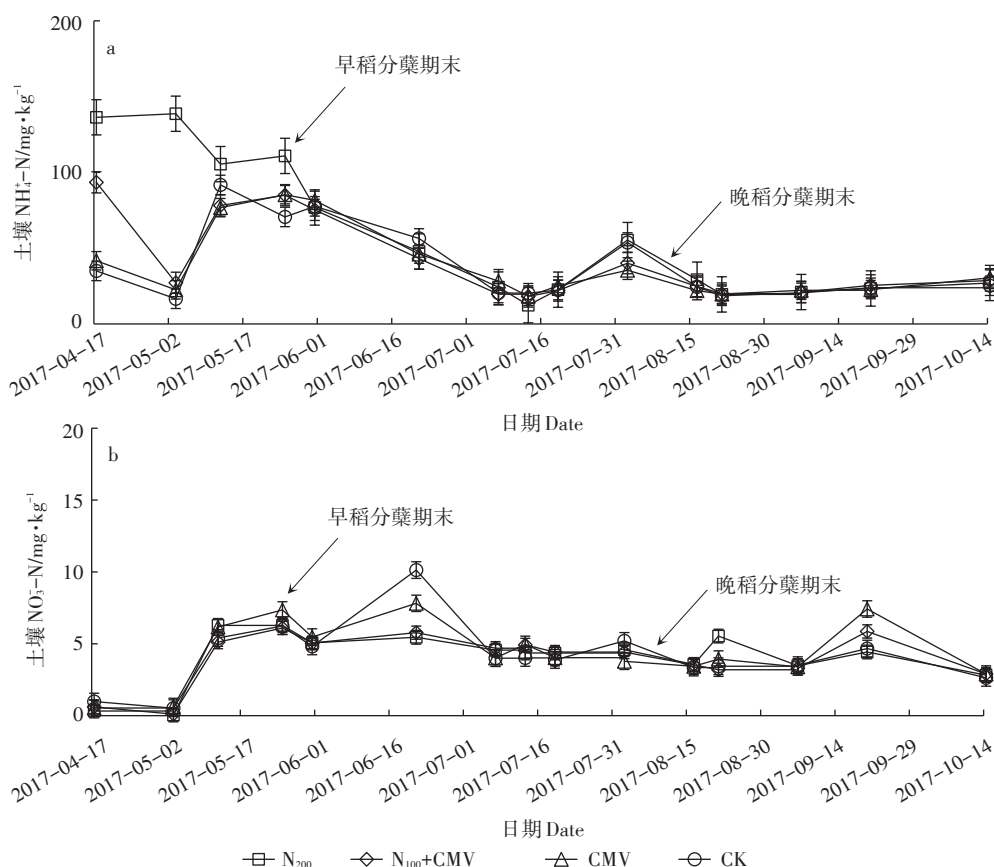


图3 不同施肥处理双季稻生长季铵态氮和硝态氮的变化

Figure 3 Variation of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in growth of double cropping rice with different fertilization treatments

各处理早稻季播种至收获均未出现较大峰值,而在早稻播种初期至分蘖期内,CMV与CK出现较多负排放现象。在晚稻移栽初期各处理 N_2O 排放出现峰值,最大峰值为 $1\,065.57\,\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (N_{200}),在晚稻晒田期及水稻生长末期稻田排干各处理出现小的排放峰,但在晚稻生长末期排干过程中,CK与CMV均出现了负排放现象。

2.4 CH_4 与 N_2O 的季节累积排放量

不同施肥处理对双季稻田 CH_4 和 N_2O 累积排放量有显著影响(表1)。早稻季CMV+ N_{100} CH_4 总累积排放量显著高于 N_{200} 和CK,但晚稻季和双季稻各处理无显著差异。晚稻季 CH_4 累积排放高于早稻季,占双季稻总量的69.25%~89.21%。早稻季和双季稻, N_{200} 处理 N_2O 累积排放量显著高于其余处理,分别达 $1.94\,\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3.05\,\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。此外,早稻季CMV处理 N_2O 累积排放量显著高于CK,而CMV+ N_{100} 与CK间无显著差异,说明与单施氮肥或单施紫云英相比,紫云英

与氮肥配施可在一定程度上降低早稻季 N_2O 的排放;各处理晚稻季累积排放量无显著差异。除 N_{200} 处理外,其余处理晚稻季 N_2O 的累积排放量可占双季稻累积排放量的56%以上。

2.5 紫云英还田对双季稻田GWP及GHGI的影响

以100年尺度来计算,单位质量的 CH_4 和 N_2O 增温效应分别是 CO_2 的25倍和298倍。以此为依据,根据上文中得到的 CH_4 与 N_2O 累计排放通量计算各处理的GWP(表2)。各处理 CH_4 所产生的温室效应无显著差异, N_{200} 处理双季稻两季 N_2O 所造成的温室效应显著高于其他处理,但其他处理间无显著差异。各处理间GWP并无显著差异,其中 CH_4 造成的温室效应远高于 N_2O 造成的温室效应,可达GWP的90.95%~97.01%。

结合GWP与水稻产量可计算生产单位水稻产量所造成的温室效应(GHGI),如表3所示,与CK相比, N_{200} 显著增加早稻、晚稻及双季稻总产量,增产率分别

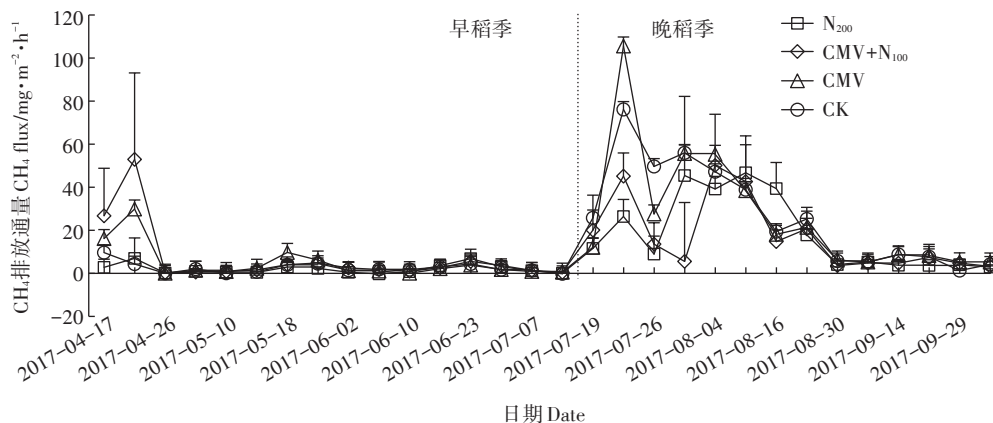


图4 不同施肥处理双季稻田 CH_4 排放速率

Figure 4 Rate of CH_4 emission from double cropping rice field with different fertilization treatments

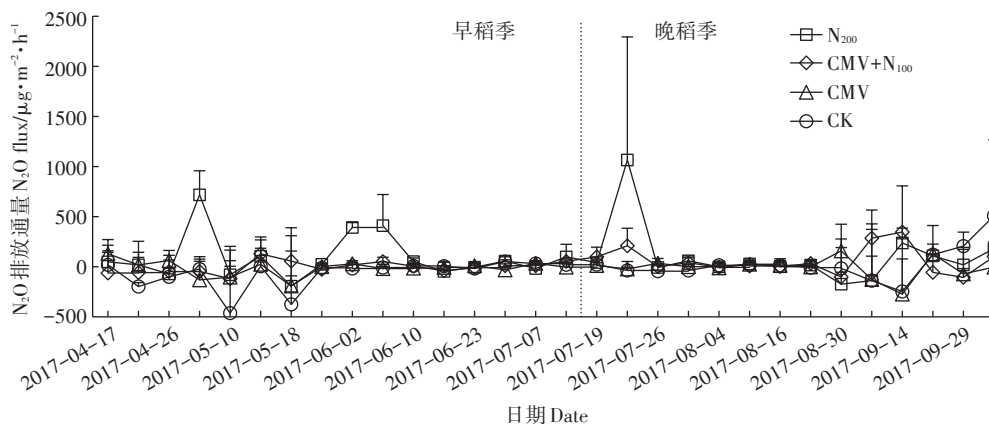


图5 不同施肥处理双季稻田 N_2O 排放速率

Figure 5 Rate of N_2O emission from double cropping rice field with different fertilization treatments

达27.45%、12.11%、17.79%,而CMV+N₁₀₀也显著增加早稻、晚稻及双季稻总产量,增产率分别达19.86%、10.58%、14.01%。与CK相比,CMV+N₁₀₀处理显著增加早稻季GHGI;晚稻季CMV+N₁₀₀处理GHGI显著低于CMV,而双季稻季各处理间并无显著差异。

3 讨论

稻田CH₄的排放除了与土壤中的养分有关外,还与田间水分管理措施相关^[16]。研究表明,大部分CH₄的产生是处于田间淹水状态^[17],而本研究中由于早稻季水稻种植方式为撒播,因而导致在水稻生长初期田间处于无水状态,降低了产CH₄菌的活性,最终导致早稻季CH₄排放峰值及排放量远低于晚稻季,这与朱

波等^[13]研究结果不一致,而与张岳芳等^[18]研究采用机械直播的种植方式可减少长江下游稻麦两熟区稻季CH₄排放的研究结果相一致。此外,早稻播种初期的温度低于晚稻移栽初期也是原因之一^[17]。早稻播种初期与晚稻移栽初期均出现峰值,至水稻生长后期无峰值出现的主要原因是绿肥还田与早稻根茬有机物的大量分解^[17],在产CH₄菌的参与下产生大量CH₄,这与朱波等^[13]、郭腾飞等^[14]研究结果相一致。与CK及N₂₀₀相比,紫云英还田(CMV、CMV+N₁₀₀)显著增加了早稻季CH₄的排放,主要源于紫云英还田增加了稻田中产CH₄菌的营养物质,进而导致CH₄的排放总量增加;而晚稻季各处理间CH₄排放无显著差异,可能是由于大部分紫云英秸秆在早稻季被分解,减少了产CH₄菌

表1 不同施肥处理双季稻田CH₄和N₂O累积排放量
Table 1 Accumulative emissions of CH₄ and N₂O in double cropping rice fields with different fertilization treatments

项目	处理	早稻/kg·hm ⁻²	占总的百分比/%	晚稻/kg·hm ⁻²	占总的百分比/%	双季稻/kg·hm ⁻²
CH ₄	N ₂₀₀	41.84±28.77b	11.46	323.21±85.3a	88.54	365.05±68.97a
	CMV+N ₁₀₀	120.36±15.88a	30.75	271.01±82.95a	69.25	391.37±98.32a
	CMV	90.46±51.58ab	17.86	416.05±70.96a	82.14	506.51±119.42a
	CK	51.14±13.08b	10.79	422.94±154.54a	89.21	474.08±159.04a
N ₂ O	N ₂₀₀	1.94±0.41a	63.50	1.11±0.59a	36.50	3.05±0.42a
	CMV+N ₁₀₀	0.31±0.23bc	21.18	1.15±0.2a	78.82	1.46±0.14b
	CMV	0.6±0.6b	43.66	0.77±0.41a	56.34	1.37±0.27b
	CK	0.09±0.2c	7.07	1.14±0.65a	92.93	1.23±0.84b

表2 不同处理对双季稻田综合温室效应(100年)的影响
Table 2 GWP in 100 years time frame from double rice system under different treatments

处理	CH ₄			N ₂ O			综合增温潜势-CO ₂ /kg CO ₂ ·hm ⁻²
	季节累积排放量/kg·hm ⁻²	温室效应-CO ₂ /kg CO ₂ ·hm ⁻²	占综合增温潜势百分比/%	季节累积排放量/kg·hm ⁻²	温室效应-CO ₂ /kg CO ₂ ·hm ⁻²	占综合增温潜势百分比/%	
N ₂₀₀	365.05±68.97a	9 126.24±1 724.13a	90.95	3.05±0.42a	908.45±124.98a	8.89	10 034.69±1 604.56a
CMV+N ₁₀₀	391.37±98.32a	9 784.14±2 458.05a	95.73	1.46±0.14b	436.69±40.46b	3.34	10 220.82±2 485.47a
CMV	506.51±119.42a	12 662.79±2 985.44a	96.88	1.37±0.27b	408.1±79.81b	3.34	13 070.88±2 920.66a
CK	474.08±159.04a	11 852.1±3 976.01a	97.01	1.23±0.84b	365.5±251.54b	2.99	12 217.6±3 873.16a

表3 不同施肥处理对双季稻产量及温室气体排放强度的影响
Table 3 Effects of different fertilization on yield and greenhouse gas emission intensity of double cropping rice

处理	早稻季		晚稻季		双季稻	
	产量/kg·hm ⁻²	早稻GHGI/kg·kg ⁻¹ ·a ⁻¹	产量/kg·hm ⁻²	晚稻GHGI/kg·kg ⁻¹ ·a ⁻¹	双季稻产量/kg·hm ⁻²	双季稻GHGI/kg·kg ⁻¹ ·a ⁻¹
N ₂₀₀	5 170.97±143.5a	0.32±0.12b	7 736.75±298.51a	1.08±0.24ab	12 907.72±439.47a	0.78±0.12a
CMV+N ₁₀₀	4 862.87±586.9a	0.64±0.02a	7 630.89±130.21a	0.93±0.27b	12 493.76±661.07a	0.81±0.16a
CMV	4 209.57±292.86b	0.57±0.29ab	6 462.89±275.79b	1.65±0.27a	10 672.46±104.71b	1.22±0.26a
CK	4 057.17±215.81b	0.32±0.07b	6 900.94±493.55b	1.56±0.44ab	10 958.11±383.63b	1.11±0.32a

注:同列数值后不同小写字母代表处理间差异达5%显著水平。下同。
Note: Values followed by different letters mean significantly different among different treatments at 5% level. The same below.

的营养物质。

稻田土壤中微生物硝化与反硝化过程都会有 N_2O 产生。稻田土壤复杂的水分变化状况可以影响到土壤氧化还原电位和微生物活性,从而导致氮素在稻田土壤中的动态变化受到影响^[19]。本研究中 N_2O 排放峰均出现在水稻移栽初期及稻田干湿交替阶段,主要是因水稻生长初期存在大量的硝化与反硝化底物,而一些研究表明,田间干湿阶段可导致 N_2O 大量的排放^[16,20],这与本研究结果相一致。与 N_{200} 相比,CMV+N₁₀₀降低了早稻、晚稻季 N_2O 的排放,可见与仅施化学氮肥相比,紫云英与氮肥配施可降低双季稻田 N_2O 的排放,这与朱波等^[13]、郭腾飞等^[14]、熊正琴等^[21] 研究结果相一致。此外,本研究发现在水稻生长季存在着较多的 N_2O 排放负值,且这些负排放主要出现在稻田持续淹水的条件下,可能存在两种原因:其一,王孟雪等^[16]研究发现,相比于间歇性灌水,持续淹水可降低稻田 N_2O 的排放,故在本研究中是由于灌溉强度过大,使得土壤水分过饱和, N_2O 排放下降。其二,持续性淹水条件下,稻田的灌溉水层也能吸收一定的 N_2O ^[22],从而导致稻田 N_2O 出现负排放。

大量研究发现,稻田中 CH_4 与 N_2O 排放存在一种消长的关系^[23-24],而又有一部分的学者研究发现这种消长关系并不存在^[25]。因此需要对稻田排放的 CH_4 与 N_2O 进行综合评价,本研究中,与 N_{200} 相比,紫云英还田显著降低了双季稻季 N_2O 排放,但增加了 CH_4 的排放,而各处理稻田 GWP 无显著差异。可见紫云英还田条件下稻田 CH_4 与 N_2O 存在着消长关系。此外,本研究中 CH_4 所造成的 GWP 占总 GWP 的 90% 以上, CH_4 的增温效应要远高于 N_2O ,这与朱波等^[13]、郭腾飞等^[14]、秦晓波等^[26] 研究结果相一致。虽然相比于 CH_4 的排放,水稻生长季稻田 N_2O 排放量低,但是并不能忽略其对环境所造成的影响。石生伟等^[27]通过比较 20 年和 500 年时间尺度下的不同平均施氮量稻田 CH_4 与 N_2O 所造成的温室效应,发现当施氮量处于较低水平 ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 时,稻田温室效应主要贡献来自于 CH_4 ,而当施氮量达到 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上时, N_2O 对于温室效应的贡献会高于 CH_4 。因此,鉴于 CH_4 与 N_2O 交互效应的存在,在制定稻田温室气体减排措施时,要综合考虑 CH_4 与 N_2O 产生和排放的形态,对其总的温室效应要进行充分权衡考虑。此外,本研究仅监测了紫云英还田后双季稻生长季的 CH_4 与 N_2O 排放,而未对冬季紫云英生长季的温室气体进行监测,缺乏双季稻区周年系统的评价,在未来的研究工作中应从周

年试验进行考虑。

4 结论

(1) 紫云英还田对双季稻田 CH_4 与 N_2O 排放季节特征无显著影响, CH_4 排放峰主要在水稻移栽初期至分蘖末期, N_2O 排放峰主要出现在田间水稻种植初期至分蘖及田间水分干湿交替阶段。

(2) 与仅施氮肥相比,紫云英还田与氮肥配施增加了 CH_4 累积排放量,减少了 N_2O 的排放,且早稻季 CH_4 排放量低于晚稻季。

(3) 与 CK 相比,施肥增加了双季稻的产量,但对于稻田 GWP 并无显著影响,其中 CH_4 对 GWP 的贡献可达 90% 以上,远高于 N_2O ; 与仅施氮肥相比,紫云英还田增加了早稻季 GHGI,紫云英与氮肥配施降低了晚稻季 GHGI,而对双季稻 GHGI 并无显著影响。

参考文献:

- [1] International Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[R/OL]. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment report/ ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment%20report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf), 2007; 11-17.
- [2] International Panel on Climate Change (IPCC). The supplementary report to the IPCC scientific assessment[R]. New York: Cambridge University Press, 1992.
- [3] International Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2007: Mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Computational Geometry*, 2007, 18(2): 95-123.
- [4] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. Quantifying direct N_2O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(37): 8030-8042.
- [5] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966-975.
- [6] 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.
CHENG Chen, YANG Xiu-xia, WANG Jian-jun, et al. Effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions under crop residue incorporation in double rice-cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 186-195.
- [7] 商庆银, 杨秀霞, 成 臣, 等. 秸秆还田条件下不同水分管理对双季稻田综合温室效应的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(2): 181-190.
SHANG Qing-yin, YANG Xiu-xia, CHENG Chen, et al. Effects of wa-

- ter regime on yield-scaled global warming potential under double rice-crop system with straw returning[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(2):181-190.
- [8] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9):3041-3046.
- [9] 武文明, 杨光明, 沙丽清. 氮肥对西双版纳地区稻田 N_2O 排放通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5):1876-1881.
- WU Wen-ming, YANG Guang-ming, SHA Li-qing. Impact of nitrogen fertilizer on N_2O flux from a paddy soil in Xishuangbanna, southwest China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5):1876-1881.
- [10] 刘红江, 郭智, 张丽萍, 等. 有机-无机肥不同配施比例对稻季 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5):808-814.
- LIU Hong-jiang, GUO Zhi, ZHANG Li-ping, et al. Effects of different combined application ratio of organic-inorganic fertilization on CH_4 and N_2O emissions in paddy season[J]. *Ecology and Environment*, 2016, 25(5):808-814.
- [11] Yang B, Xiong Z, Wang J, et al. Mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensities by substituting chemical nitrogen fertilizers with organic fertilization strategies in rice-wheat annual rotation systems in China: A 3-year field experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81:289-297.
- [12] Liu Y, Zhou Z, Zhang X, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity from the double rice system with integrated soil-crop system management: A three-year field study[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 116:92-101.
- [13] 朱波, 易丽霞, 胡跃高, 等. 黑麦草鲜草翻压还田对双季稻 CH_4 与 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12):241-245.
- ZHU Bo, YI Li-xia, HU Yao-gao, et al. Effects of ryegrass incorporation on CH_4 and N_2O emission from double rice paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(12):241-245.
- [14] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2):337-345.
- GUO Teng-fei, LIANG Guo-qing, ZHOU Wei, et al. Effect of fertilizer management on greenhouse gas emission and nutrient status in paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(2):337-345.
- [15] Zhu B, Yi L X, Hu Y G, et al. Nitrogen release from incorporated ^{15}N -labelled Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus*, L.) residue and its dynamics in a double rice cropping system[J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1):331-344.
- [16] 王孟雪, 张忠学, 吕纯波, 等. 不同灌溉模式下寒地稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2):95-100.
- WANG Meng-xue, ZHANG Zhong-xue, LÜ Chun-bo, et al. CH_4 and N_2O emissions from rice paddy field and their GWPs research in different irrigation modes in cold region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2):95-100.
- [17] Mer J L, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1):25-50.
- [18] 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.
- ZHANG Yue-fang, CHEN Liu-gen, ZHANG Chuan-sheng, et al. Influence of rice mechanical planting methods on methane and nitrous oxide emissions from paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(14):232-241.
- [19] 周胜, 宋祥甫, 颜晓元. 水稻低碳生产研究进展[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(2):213-222.
- ZHOU Sheng, SONG Xiang-fu, YAN Xiao-yuan. Progress in research on low-carbon rice production technology[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(2):213-222.
- [20] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10):2053-2060.
- CHEN Shu-tao, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Nitrous oxide emission from cropland and its driving factors under different crop rotations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10):2053-2060.
- [21] 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 Zheng-qin, XING Guang-xi, Tsuruta H, et al. Nitrous oxide emission from paddy soils as affected by incorporation of leguminous green manure and fertilization during double-cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5):704-710.
- [22] Minami K, Fukushi S. Methods for measuring N_2O flux from water surface and N_2O dissolved in water from agricultural land[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1984, 30(4):495-502.
- [23] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):578-584.
- XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effect of different fertilization practice on greenhouse gas emission from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):578-584.
- [24] 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.
- YI Qiong, PANG Yu-wan, YANG Shao-hai, et al. Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization[J]. *Ecology and Environment*, 2013, 22(8):1432-1437.
- [25] Zhang M, Li B, Xiong Z Q. Effects of organic fertilizer on net global warming potential under an intensively managed vegetable field in southeastern China: A three-year field study[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 145:92-103.
- [26] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):210-216.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under no-tillage conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6):210-216.
- [27] 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 等. 中国稻田 CH_4 和 N_2O 排放及减排整合分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14):2923-2936.
- SHI Sheng-wei, LI Yu-e, LIU Yun-tong, et al. CH_4 and N_2O emission from rice field and mitigation options based on field measurements in China: An integration analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(14):2923-2936.