

DOI: 10.5846/stxb201909081873

杨蕙琳, 娄运生, 刘燕, 周东雪. 夜间增温品种混栽对稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 生态学报, 2021, 41(2): 553-564.

Yang H L, Lou Y S, Liu Y, Zhou D X. Effect of rice intercropping on CH_4 and N_2O emissions in a subtropical paddy field under nighttime warming. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 553-564.

夜间增温品种混栽对稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响

杨蕙琳^{1,2}, 娄运生^{1,2,*}, 刘 燕², 周东雪²

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/应用气象学院, 南京 210044

2 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

摘要: 夜间增温幅度大于白天是气候变暖主要特征之一。夜间增温对水稻生产及 CH_4 和 N_2O 排放的影响备受关注。品种混栽可提高水稻产量, 增强水稻植株抗性。增温或混栽单因子对稻田 CH_4 和 N_2O 排放影响已有报道, 但二者耦合如何影响水稻生产及稻田 CH_4 和 N_2O 排放, 尚不清楚。采用 2 因素随机区组设计, 通过田间试验研究了夜间增温下品种混栽对水稻产量、 CH_4 和 N_2O 综合增温潜势和排放强度的影响。夜间增温设 2 水平, 即对照 (CK, control) 和增温 (NW, nighttime warming); 品种混栽设 2 水平, 即混作 (I, intercropping), 单作 (M, monocropping), 混栽处理将主栽品种 (超级稻南粳 9108) 与次栽品种 (杂交稻深两优 884) 以 3:1 的比例种植。水稻生长期用铝箔反射膜覆盖水稻冠层进行被动式夜间增温试验 (19:00—6:00)。结果表明, 夜间增温或品种混栽均显著降低水稻植株分蘖数和生物量。品种混栽显著提高水稻产量, 而夜间增温则显著降低产量。品种混栽可缓解夜间增温对水稻产量的抑制作用。夜间增温下品种混栽处理稻田 CH_4 累计排放量在分蘖期、拔节—孕穗期、抽穗—扬花期和灌浆—成熟期比单作对照分别高 55.32%、45.89%、43.49 和 125.82%。夜间增温下品种混栽处理稻田 N_2O 累计排放量在分蘖期、拔节—孕穗期和抽穗—扬花期分别比单作对照高 64.44%、46.26% 和 42.07%。研究认为, 夜间增温下品种混栽显著提高稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量和累积排放量, 显著增加综合增温潜势 (GWP) 和排放强度 (GHGI)。

关键词: 品种混栽; 夜间增温; 水稻; 甲烷; 氧化亚氮; 排放通量

Effect of rice intercropping on CH_4 and N_2O emissions in a subtropical paddy field under nighttime warming

YANG Huilin^{1,2}, LOU Yunsheng^{1,2,*}, LIU Yan², ZHOU Dongxue²

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Asymmetric diurnal warming is one of the main characteristics of global climate change. The effects of nighttime warming on rice production, methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions in paddy field have received more attention. Intercropping can increase rice yield, and enhance rice resistance. Some reports have been available concerning nighttime warming or intercropping effects on CH_4 and N_2O emissions in rice fields, but it is still unclear regarding the effects of both coupling on the emissions in paddy field. We carried out a field experiment with a two-factor randomized block design to investigate the effect of intercropping on rice yield, CH_4 and N_2O global warming potential, and greenhouse gas emission intensity under nighttime warming. The experiment was performed at the Station of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China. The tested paddy soil was classified as Typic Stagnic Anthrosol. Warming was set at two levels—control and nighttime warming—and the degree of intercropping was set

基金项目: 国家自然科学基金 (41875177, 41375159)

收稿日期: 2019-09-08; 网络出版日期: 2020-11-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yunshlou@163.com

at two levels, i.e., intercropping and monocropping. Intercropping was achieved by transplanting at a ratio of 3:1 the main planting cultivar (super cv. Nanjing 9108) with the secondary planting cultivar (hybrid cv. Shenliangyou 884). During the rice-growing season, nighttime warming was achieved by covering the rice canopy with an aluminum foil reflective film at night (19:00—6:00). CH_4 emission was measured by the closed chamber method at 1-week intervals during the rice-growing period. The results showed that nighttime warming or intercropping significantly reduced tiller number and aboveground and root dry matter weight in rice. Intercropping significantly increased yield, while nighttime warming significantly reduced yield in rice. Intercropping could alleviate the inhibitory effect of nighttime warming on yield in rice. The CH_4 cumulative emission in the treatment with intercropping under nighttime warming was 55.32%、45.89%、43.49 and 125.82% higher than that monocropping at tillering stage, jointing—booting stage, heading—flowering stage, and filling stage. Under nighttime warming, N_2O cumulative emission in the treatment with intercropping at tillering stage, jointing—booting stage and heading—flowering stage was 64.44%、46.26%, and 42.07% higher than that monocropping. Intercropping significantly increased the fluxes and the cumulative emissions of CH_4 and N_2O and significantly increased the global warming potential and greenhouse gas emission intensity under nighttime warming.

Key Words: intercropping; nighttime warming; rice; methane; nitrous oxide; flux

IPCC 第五次评估报告指出,1880—2012 年全球地表平均温度升高了 0.85°C ,1951—2012 年全球平均地表温度的升温速率($0.12^\circ\text{C}/10\text{a}$)几乎是 1880 年以来升温速率的两倍,未来仍将持续变暖^[1]。由于地理、气候因子的交互影响,温度上升存在明显的季节及昼夜不对称性,即冬春季增幅显著高于夏秋季,夜间增幅显著高于白天^[2-3]。大气中温室气体浓度增加是气候变暖的重要原因。甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是两种主要温室气体,稻田是 CH_4 和 N_2O 的重要排放源^[4-6]。水稻是我国最重要的口粮作物,全国 60%以上的人口以稻米为主食,水稻种植面积约占全球的 20%,总产量约占全球 30%^[7-8]。因此,在稳定粮食生产的情况下,减少温室气体排放已成为水稻生产应对气候变化研究普遍关注的问题。

气候变暖对水稻生产及 CH_4 和 N_2O 的排放的影响日益受到人们关注。模拟温度升高导致热带、亚热带地区水稻分蘖数减少,生育期缩短,叶片衰老加快,生物量降低,有效穗数和穗粒数减少,导致籽粒产量下降^[9-12]。培养试验发现,在一定温度范围内, CH_4 产生量随温度升高而增加。硝化和反硝化作用的 N_2O 产生量均随温度升高而增加^[6,13-14]。田间模拟增温试验表明,增温可促进稻田 CH_4 和 N_2O 产生排放,但迄今有关田间增温试验的报道依然偏少,且多为短期试验,还需进一步开展研究^[15-17]。

气候变暖将使农业生产的不稳定性增加,增强农业生产的稳定性是应对气候变化的重要措施。生物多样性增加可使系统稳定性增强。研究发现,作物混合种植影响植株冠层、光能利用率、光合特性及生产力,增强作物抗病能力,可显著提高产量,促进高产稳产^[18-22]。物种多样性对土壤温室气体排放也有影响。据报道,人工湿地的温室气体排放随物种丰富度的增加而增加^[23];而自然湿地系统中,植物种群或物种丰富度增加,可提升固碳能力,显著减少氨挥发及温室气体排放^[24-25];也有学者认为,湿地挺水植物的物种数量对 CH_4 排放无显著影响^[26]。可见,目前有关物种多样性对温室气体排放的影响,尚无定论。此外,现有报道多基于自然湿地系统,而对人工稻田系统尚缺少关注。

有关夜间增温或品种混栽对水稻生产的影响已有报道,但二者耦合对水稻生产、稻田 CH_4 和 N_2O 排放、综合增温潜势及温室气体强度的影响,目前尚不清楚。因此,通过田间试验研究夜间增温下品种混栽对水稻生产及稻田土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响,对提高水稻生产应对和适应气候变化的能力有积极意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2018 年 5 月至 10 月在南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°N , 118.8°E)内进行。该站

地处亚热带湿润气候区,年均降水量 1100 mm,年均气温 15.6℃。供试土壤为潴育型水稻土,灰马肝土属,质地为壤质粘土,粘粒含量为 26.1%,pH 为 6.2(1:1 土水比),全碳、全氮的含量分别为 19.4、1.45 g/kg。供试水稻品种为南粳 9108(主栽,粳型常规稻,江苏省农业科学院选育)和深两优 884(次栽,籼型两系杂交稻,浙江勿忘农种业有限公司选育),两个品种平均产量分别为 9781.5 kg/hm² 和 8703.0 kg/hm²,株高分别为 96 cm 和 118 cm,全生育期分别为 153 d 和 132 d。供试氮磷钾肥料为高浓度复合肥(15—15—15)。

1.2 试验设计

采取两因素随机区组试验设计,夜间增温设 2 水平,即对照(CK, control)和增温(NW, nighttime warming)。品种混栽 2 水平,即混作(I, intercropping),单作(M, monocropping)。品种混栽,即主栽品种(南粳 9108)与次栽品种(杂交稻深两优 884)以 3:1 的比例栽植,混栽小区内 3 行粳稻和 1 行杂交稻混栽。试验设置 4 个处理,即(1)品种混栽+夜间增温(I+NW);(2)品种混栽+不增温(I+CK);(3)单作+不增温(M+CK);(4)单作+夜间增温(M+NW)。夜间增温处理,采用开放式被动增温方式,增温处理从水稻分蘖期开始,在小区四周安装高度可调式钢管支架(2 m×2 m×2 m),将铝箔反光膜固定于支架顶端,夜间(19:00—6:00)用铝箔反光膜覆盖水稻冠层,随水稻生长发育进程,及时调整钢管支架,使铝箔反光膜与水稻冠层之间的距离保持 0.3 m 左右。除特殊天气(降雨、大风等)外,每天于日落(19:00)人工覆盖反光膜,日出(次日 6:00)揭开反光膜。同时,用温度记录仪自动记录水稻冠层及 5 cm 土层温度。每处理重复 3 次,随机排列。小区面积为 2 m×2 m=4 m²。

水稻种子经消毒、浸种,在 35℃培养箱中催芽,于 2018 年 5 月 10 日播种、育苗。水稻幼苗于 6 月 9 日移栽,株行距为 20 cm×20 cm。前茬作物为冬小麦,试验田经耕作、整地,幼苗移栽前 1d 施肥,每小区施入复合肥(15—15—15)315 g,相当于氮磷钾(N—P₂O₅—K₂O)施用量均为 200 kg/hm²。水稻生长期保持水层厚度 5 cm,根据水层变化及降雨情况进行合理灌溉。7 月 27 日至 8 月 10 日晒田,而后灌溉复水,9 月 22 日停止灌溉直到 10 月 20 日收获。大田常规管理,病虫害防治依据田间实际情况进行。

1.3 测定方法

1.3.1 生物量及产量测定

在水稻主要生育期内,即分蘖期、拔节期、抽穗—扬花期、乳熟期、成熟期,分别采集植株样品,每个小区随机选取长势较一致的 3 株水稻,混栽小区选择主栽品种。采集的水稻植株样依根、茎、叶和穗部分开,稻根用自来水冲洗干净,分别称取鲜重,而后放入牛皮纸袋中于 105℃鼓风烘箱内杀青 20 min,之后将烘箱温度调至 70℃继续烘干至恒重并称取干重。

在成熟收获期内,每个小区选取有代表性的水稻植株作为采样区(0.5 m×0.5 m),采集稻穗后,先晒干,再用小型脱粒机脱粒后称重得到稻谷干重。选取少量稻粒置于烘箱烘至恒重,测定含水量。稻谷标准产量计算公式如下:

$$RY = DW / (1 - w) \quad (1)$$

式中,RY 代表水稻的标准产量,单位是 t/hm²;DW 表示稻谷烘干重量,单位 t/hm²;w 代表稻谷标准含水量(适合存放的含水量)。

1.3.2 气体采集与分析

采用密闭静态箱—气相色谱法测定稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量。自水稻移栽后 30d(7 月 8 日)至成熟收获期(10 月 20 日)每周采样 1 次,采样时间为上午 8:00—11:00。所用密闭静态箱由圆柱状 PVC 材料制作,底部半径为 8.5 cm。为尽量降低采样对大田试验环境干扰,在采样区域事先搭设栈桥。采气时将静态箱安置于事先固定于土壤中的底座上,通过大田淹水层密封以保证箱内气密性。密封后,接通电源驱动固定于箱顶部的微型直流风扇 15 s,以混匀箱内气体。而后分别于封箱后 0、15、30 min,用带有三通阀的 PVC 注射器采集箱内气样 50 mL,将所采气样注入事先抽成真空的玻璃瓶中,带回实验室,用气相色谱仪(Agilent 7890B)测定气样中 CH₄ 和 N₂O 浓度。色谱测定条件为:FID 检测器温度 200℃,柱箱温度 50℃,载气 N₂(流量校正不会影响

尾吹气或燃气流量), 空气和 H_2 流量分别为 400 mL/min 和 45 mL/min。在气样采集的同时, 记录箱内气温、环境气温及 5 cm 土温。 CH_4 和 N_2O 排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times H \times \frac{T}{T + t} \times 60 \times \frac{dc}{dt} \quad (2)$$

式中, F 表示甲烷和氧化亚氮的排放通量 ($mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); ρ 表示标准状态下的气体密度, 甲烷为 0.714 kg/m^3 , 氧化亚氮为 1.25 kg/m^3 ; H 为静态箱的气室高度 (m); T 表示理想气体标准状态下的空气温度, 一般为 273.15 K; t 表示采气时箱内的平均温度, 单位 $^{\circ}C$; dc/dt 表示目标温室气体浓度随时间变化的回归曲线斜率。

水稻不同生育期和全生育期 CH_4 和 N_2O 累积排放量计算公式为:

$$T = \sum \left[\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right] \times (D_{i+1} - D_i) \times 24 \times f \quad (3)$$

式中, T 表示温室气体累积排放量, 单位为 mg/m^2 ; F_{i+1} 与 F_i 分别是第 $i+1$ 次和 i 次采气时的平均气体排放通量, 单位为 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$; D_{i+1} 、 D_i 为第 $i+1$ 次和 i 次试验的时间 (d); f 表示单位换算系数, 无固定指定值。

1.3.3 全球增温潜势计算

全球增温潜势 (Global Warming Potential, GWP) 的计算, 是基于 IPCC 温室气体清单方法, 以 CO_2 作为参考气体 (CO_2 的 GWP 值为 1), 在百年尺度上, CH_4 和 N_2O 的 GWP 值分别是 CO_2 的 28 倍和 265 倍^[1], 其综合增温潜势的计算公式如下:

$$GWP = T_{CH_4} \times 28 + T_{N_2O} \times 265 \quad (4)$$

式中, GWP 表示全球增温潜势 (kg/hm^2), 即甲烷和氧化亚氮排放量的总 CO_2 当量; T_{CH_4} 表示水稻全生育期的 CH_4 累积排放量; T_{N_2O} 表示水稻全生育期的 N_2O 的累积排放量。

1.3.4 温室气体排放强度计算

温室气体排放强度代表单位产量内的全球增温潜势。计算公式如下:

$$GHGI = GWP / RY \quad (5)$$

式中, GHGI 是温室气体排放强度, 单位是 kg/t ; GWP 是全球增温潜势 (kg/hm^2); RY 是水稻的标准产量 (t/hm^2)。

1.3.5 数据处理与分析

采用统计分析软件 (IBM SPSS Statistics 21.0) 对不同处理的数据进行方差分析和多重比较 (LSD)。利用 Excel 2010 进行数据处理与绘图。

2 结果与分析

2.1 夜间增温下品种混栽对水稻生长的影响

从表 1 可看出, 品种混栽显著降低水稻地上部干重、地下部干重 (根干重) 及分蘖数。夜间增温条件下, 品种混栽处理 (I+NW) 使地上部干重、根干重、总干物质质量及分蘖数分别比对照 (M+NW) 减少 13.14%、59.54%、19.59% 和 10.43%。不增温条件下, 品种混栽处理 (I+CK) 使地上部、地下部、全株干重及分蘖数分别比对照 (M+CK) 降低 29.89%、37.46%、30.77% 和 2.66%。可见, 无论夜间增温与否, 品种混栽均显著降低地上部干重、根干重、总干物质重及分蘖数。

夜间增温也显著降低地上部干重、地下部干重、全株干物质重及分蘖数。品种混栽条件下, 夜间增温处理 (I+NW) 使地上部干重、地下部干重、全株干物质重及分蘖数分别比对照 (I+CK) 降低 9.46%、40.58%、12.64% 和 11.69%。粳稻净栽条件下, 夜间增温处理 (M+NW) 使地上部、地下部、全株干物质重及分蘖数分别比对照 (M+CK) 降低 26.92%、8.16%、24.79% 和 4.04%, 但根干重和分蘖数并没有达到显著性差异, 说明增温对地下部干重和分蘖数没有显著影响。品种混栽和夜间增温交互作用 (I×NW) 显著降低地上部干重、地下部干重和全株干物质重, 而对单株分蘖数没有显著影响。

表 1 夜间增温下品种混栽对水稻干物重及分蘖数的影响

Table 1 Effect of intercropping on rice growth parameters under nighttime warming

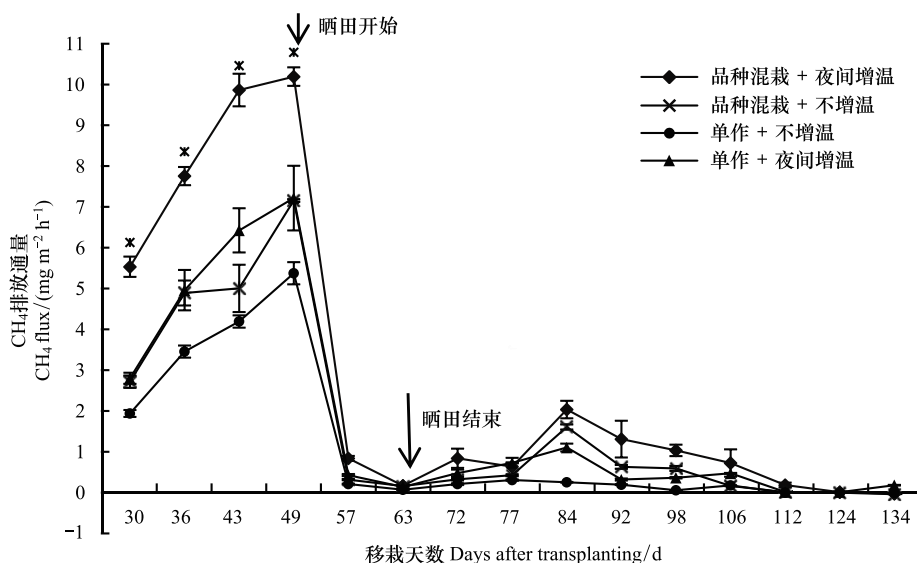
处理 Treatment	地上部干重 Shoot dry weight/(g/株)	地下部干重 Root dry weight/(g/株)	全株干重 Total plant dry weight/(g/株)	单株分蘖数 Tiller number/ (no/株)				
I+NW	16.46±0.11c	1.23±0.12c	17.69±0.10d	10.65±0.40b				
I+CK	18.18±0.29b	2.07±0.26b	20.25±0.22c	12.06±0.38a				
M+CK	25.93±0.14a	3.31±0.08a	29.25±0.18a	12.39±0.20a				
M+NW	18.95±0.47b	3.04±0.07a	22.00±0.41b	11.89±0.23a				
因子 Factors	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.
I	229.39	*	818.63	*	351.33	*	3.72	No
NW	165.58	*	108.43	*	191.43	*	5.51	*
I × NW	60.53	*	28.59	*	43.75	*	1.25	No

I+NW: 品种混栽+夜间增温, intercropping+nighttime warming; I+CK: 品种混栽+不增温, intercropping+non-warmed control; M+CK: 单作+不增温, monocropping+non-warmed control; M+NW: 单作+夜间增温, monocropping+nighttime warming。表中数据为 3 次重复平均值±标准误 (means±SE); 同一列数据标有不同字母表示处理间差异显著 ($P \leq 0.05$)

2.2 夜间增温下品种混栽对水稻CH₄排放通量的影响

图 1 表明, 整个水稻生长期, 不同处理的稻田土壤CH₄排放通量变化趋势基本一致, 均为低—高一低的变化趋势。水稻移栽后第 30 天内, CH₄排放通量较低, 之后逐渐上升, 至移栽后第 49 天达排放峰值, 之后排水晒田, 至第 63 天结束。晒田期间, CH₄排放通量急剧降低, 在第 63 天降至最低。晒田结束后复水, CH₄排放通量逐渐升高, 在第 84 天出现一个高峰, 成熟期停止灌水自然落干, 之后CH₄排放通量逐渐降低, 直至成熟收获, 排放量接近 0。

不同处理的水稻全生育期平均CH₄排放通量呈现为: I+NW>M+NW>I+CK>M+CK。夜间增温使稻田CH₄排放通量呈增加趋势。水稻移栽后第 30 天至 49 天 (拔节初期), 品种混栽条件下, 夜间增温处理 (I+NW) 的稻田CH₄排放通量的 4 次观测值, 比对照 (I+CK) 提高 184.74%、124.20%、135.99% 和 89.57%。而粳稻净栽条

图 1 夜间增温下品种混栽对水稻田CH₄排放通量变化过程的影响Fig.1 Effect of rice intercropping on seasonal variation of CH₄ fluxes in paddy field under nighttime warming

I+NW: 品种混栽+夜间增温, intercropping+nighttime warming; I+CK: 品种混栽+不增温, intercropping+non-warmed control; M+CK: 单作+不增温, monocropping+non-warmed control; M+NW: 单作+夜间增温, monocropping+nighttime warming

件下,夜间增温处理(M+NW)的稻田CH₄排放通量的4次观测值,分别比对照(M+CK)高44.36%、43.46%、53.14%和34.27%。同样,品种混栽也可明显提高稻田CH₄排放通量。夜间增温条件下,第30—49天内,品种混栽处理(I+NW)的稻田CH₄排放通量的4次观测值,分别高于净栽对照(M+NW)97.24%、56.29%、53.45%和41.18%。夜间不增温或常温条件下,品种混栽处理(I+CK)的稻田CH₄排放通量的4次观测值,分别高于净栽对照(M+CK)39.91%、41.40%、19.29%和33.16%。可见,品种混栽或夜间增温均明显提高稻田CH₄排放通量。

2.3 夜间增温下品种混栽对水稻不同生育期CH₄累积排放量的影响

由表2可见,不同处理的CH₄累积排放量在不同生育期所占比例基本一致。CH₄累积排放量在分蘖期最高,约占全生育期的61.41%—68.99%;拔节—孕穗期次之,占全生育期的18.28%—22.37%;抽穗—扬花期、灌浆—成熟期CH₄排放较少,分别占全生育期的4.58%—7.58%和4.06%—12.24%。

表2 夜间增温下品种混栽对水稻不同生育期CH₄累积排放量的影响

Table 2 Effect of intercropping on cumulative CH₄ emissions at rice growth stages under nighttime warming

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		拔节-孕穗期 Tointing-booting stage		抽穗-扬花期 Heading-flowering stage		灌浆-成熟期 Grain filling-maturity stage		全生育期 Total growth period	
	排放量 Emission/ (mg/m ²)	%	排放量 Emission/ (mg/m ²)	%	排放量 Emission/ (mg/m ²)	%	排放量 Emission/ (mg/m ²)	%	排放量 Emission/ (mg/m ²)	
I+NW	3893.06±49.56a	62.63	1136.27±13.83a	18.28	426.27±29.10a	6.86	760.75±26.24a	12.24	6216.35±45.10a	
I+CK	2262.48±47.26c	61.41	755.98±3.87b	20.52	272.07±11.52b	7.39	393.50±13.05b	10.68	3684.04±38.01c	
M+CK	1726.85±43.77d	68.99	559.86±25.08c	22.37	114.59±0.79c	4.58	101.64±1.71d	4.06	2502.94±59.63d	
M+NW	2506.48±121.43b	63.95	778.84±76.23b	19.87	297.08±21.05b	7.58	336.88±12.69c	8.60	3919.28±101.64b	
因子 Factors	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.
I	917.88	*	882.68	*	78.53	*	505.61	*	3415.42	*
NW	1443.07	*	1034.46	*	108.05	*	358.30	*	4401.16	*
I × NW	179.88	*	74.95	*	0.89	No	17.20	*	349.59	*

不同生育期内,品种混栽或夜间增温均显著提高CH₄累积排放量。品种混栽条件下,夜间增温(I+NW)处理的稻田CH₄累积排放量在分蘖期、拔节—孕穗期、抽穗—扬花期、灌浆—成熟期及全生育期,均高于不增温对照处理(I+CK)72.07%、50.30%、56.68%、93.33%和68.74%。粳稻净栽条件下,夜间增温处理(M+NW)的稻田CH₄累积排放量在上述生育期,分别比不增温对照处理(M+CK)增加45.15%、39.11%、159.26%和231.43%,全生育期增加56.59%。品种混栽均使稻田CH₄累积排放量显著增加。夜间增温条件下,品种混栽处理(I+NW)稻田CH₄累积排放量在上述生育期及全生育期,分别高于净栽对照处理(M+NW)55.32%、45.89%、43.49%、125.82%和58.61%。夜间不增温或常温条件下,品种混栽处理(I+CK)稻田CH₄累积排放量,在上述生育期比净栽对照处理(M+CK)分别增加31.02%、35.03%、137.44%和287.13%,全生育期则增加47.19%。可见,水稻整个生育期内,夜间增温或品种混栽均显著增加稻田CH₄累积排放量($P \leq 0.05$),与单因素作用相比,夜间增温和品种混栽交互作用(I×NW)显著提高稻田分蘖期、拔节—孕穗期、灌浆—成熟期和全生育期CH₄累积排放量,而在抽穗—扬花期则没有显著影响。

2.4 夜间增温下品种混栽对水稻N₂O排放通量的影响

从图2可知,水稻生长期內,不同处理稻田土壤N₂O排放通量季节变化,均呈现为低—高—低的变化趋势。水稻移栽后第30天开始,N₂O排放通量较低,移栽后第49天排放通量逐渐增加,至第63天达排放峰值。随后晒田结束复水,N₂O排放通量逐渐降低,渐趋于平缓,成熟期停止灌水自然落干,N₂O排放通量小幅上升。

品种混栽使N₂O排放通量显著增加。夜间增温条件下,水稻移栽后第57天至72天,品种混栽处理(I+NW)的稻田N₂O排放通量的3次观测值比粳稻净栽处理(M+NW)提高71.30%、25.08%和259.76%。移栽后第134天(成熟期),夜间增温条件下,品种混栽处理(I+NW)N₂O排放通量观测值高于粳稻净栽处理(M+

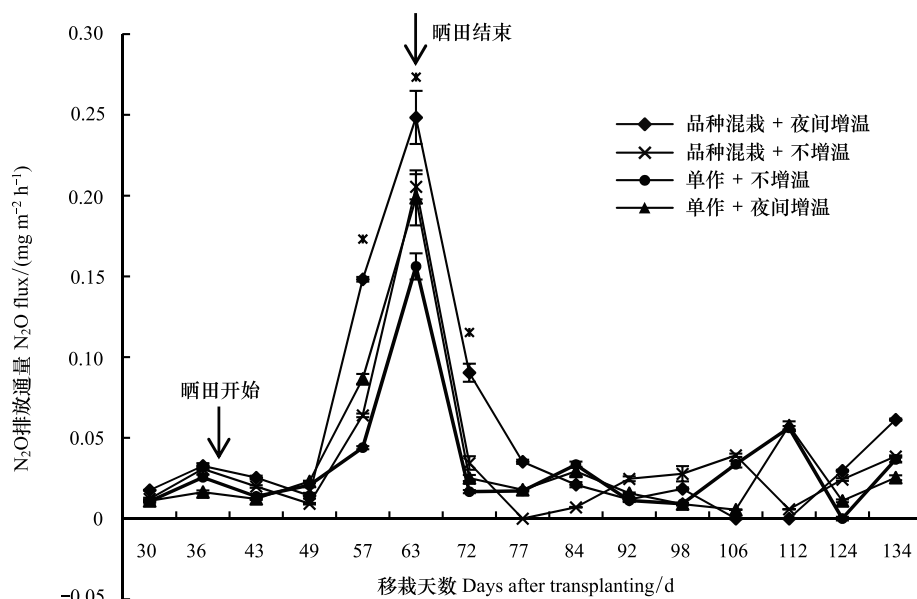


图2 夜间增温下品种混栽对水稻田N₂O排放通量变化过程的影响

Fig.2 Effect of rice intercropping on seasonal variation of N₂O fluxes in paddy field under nighttime warming

NW)142.13%。夜间不增温或常温条件下,移栽后第57天至72天,品种混栽处理(I+CK)比粳稻净栽处理(M+CK)的稻田N₂O排放通量的3次观测值,分别提高45.77%、31.57%和106.84%。移栽后第134天N₂O排放通量观测值品种混栽处理(I+CK)比净栽处理(M+CK)提高5.05%。

夜间增温对N₂O排放通量的影响在不同生育期存在差异。水稻移栽后第57天至72天(拔节后期,抽穗初期),品种混栽条件下,夜间增温处理(I+NW)的稻田N₂O排放通量的3次观测值与不增温处理(I+CK)相比,分别提高131.65%、20.90%和162.48%。粳稻净栽条件下,增温处理(M+NW)的稻田N₂O排放通量的3次观测值分别高于不增温处理(M+CK)97.13%、27.18%和50.91%。移栽后第134天,品种混栽条件下,增温处理(I+NW)N₂O排放通量比不增温处理提高59.33%。而在粳稻净栽条件下,夜间增温处理(M+NW)稻田N₂O排放通量比不增温处理(M+CK)降低44.67%。可见,品种混栽显著提高N₂O排放,夜间增温在水稻拔节—抽穗期显著促进N₂O排放,在成熟期,则降低粳稻净栽处理(M+NW)N₂O排放通量。

2.5 夜间增温下品种混栽对水稻不同生育期N₂O累积排放量的影响

由表3可见,N₂O累积排放量在拔节—孕穗期最高,约占全生育期排放量的47.47%—63.78%;其次是灌浆—成熟期,占全生育期的15.11%—29.65%;分蘖期和抽穗—扬花期N₂O排放较少,分别占全生育期的7.27%—10.18%和6.13%—12.75%。

夜间增温显著提高水稻全生育期N₂O累积排放量,但不同生育期存在差异。品种混栽条件下,夜间增温处理(I+NW)在分蘖期、拔节—孕穗期、抽穗—扬花期及全生育期的N₂O累积排放量,分别高于不增温对照处理(I+CK)20.02%、54.25%、171.13%和36.54%,但在灌浆—成熟期却低于不增温对照处理(I+CK)24.25%。粳稻净栽条件下,夜间增温处理(M+NW)稻田N₂O累积排放量,在拔节—孕穗期、抽穗—扬花期及全生育期,均高于不增温对照处理(M+CK)40.58%、2.85%和14.67%,在分蘖期和灌浆—成熟期低于不增温对照(M+CK)17.68%和10.64%。品种混栽显著促进对全生育期N₂O累积排放量。夜间增温条件下,品种混栽处理(I+NW)稻田N₂O累积排放量,在分蘖期、拔节—孕穗期、抽穗—扬花期及全生育期,分别高于净栽处理(M+NW)64.44%、46.26%、42.07%和33.46%,在灌浆—成熟期低于净栽处理(M+NW)12.73%。夜间不增温或常温条件下,品种混栽处理(I+CK)稻田N₂O累积排放量,在分蘖期、拔节—孕穗期、灌浆—成熟期及全生育期,分别比粳稻净栽对照处理(M+CK)提高12.78%、33.29%、2.94%和12.08%,抽穗—扬花期低于净栽对照处理

(M+CK)46.11%。可见,水稻整个生育期内,夜间增温或品种混栽均显著增加稻田N₂O累积排放量($P \leq 0.05$),但在不同生育期存在差异。进一步分析表明,夜间增温和品种混栽交互作用(I×NW)显著提高稻田分蘖期、拔节—孕穗期、抽穗—扬花期、灌浆—成熟期和全生育期N₂O累积排放量。

表 3 夜间增温下品种混栽对水稻不同生育期N₂O累积排放量的影响

Table 3 Effect of intercropping on cumulative N ₂ O emissions at rice growth stages under nighttime warming										
处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage		拔节-孕穗期 Tointing-booting stage		抽穗-扬花期 Heading-flowering stage		灌浆-成熟期 Grain filling-maturity stage		全生育期 Total growth period	
	排放量 Emission/ (mg/m ²)	%	排放量 Emission/ (mg/m ²)	%	排放量 Emission/ (mg/m ²)	%	排放量 Emission/ (mg/m ²)	%	排放量 Emission/ (mg/m ²)	
I+NW	11.33±0.37a	8.95	80.72±2.20a	63.78	15.40±0.60a	12.17	19.12±0.12c	15.11	126.56±1.83a	
I+CK	9.44±0.09b	10.18	52.33±1.77b	56.46	5.68±0.19c	6.13	25.24±0.84a	27.23	92.69±2.68b	
M+CK	8.37±0.03c	10.12	39.26±1.34c	47.47	10.54±0.50b	12.75	24.52±0.54a	29.65	82.70±2.37c	
M+NW	6.89±0.19d	7.27	55.19±2.86b	58.20	10.84±0.43b	11.43	21.91±0.60b	23.10	94.83±2.98b	
因子 Factors	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.
I	169.25	*	82.85	*	0.11	No	3.15	No	69.68	*
NW	0.95	No	109.31	*	120.55	*	56.05	*	84.76	*
I × NW	63.54	*	8.64	*	106.55	*	9.03	*	18.91	*

2.6 夜间增温下品种混栽对水稻综合增温潜势的影响

由表 4 可见,不同处理稻田CH₄增温潜势占综合增温潜势的比例均较高,约为 76.15%—83.84%;相反,N₂O增温潜势占综合增温潜势的比例均较低,约为 16.16%—23.84%。

表 4 夜间增温下品种混栽对稻田增温潜势的影响

Table 4 Effect of rice intercropping on global warming potentials in paddy field under nighttime warming						
处理 Treatment	CH ₄		N ₂ O		综合增温潜势 Total GWPs/ (kg/hm ²)	
	GWPs/ (kg/hm ²)	%	GWPs/ (kg/hm ²)	%		
I+NW	1740.58±12.63a	83.84	335.37±4.84a	16.16	2075.95±10.55a	
I+CK	1031.53±10.64c	80.77	245.62±7.09b	19.23	1277.15±4.75c	
M+CK	700.14±16.70d	76.15	219.15±6.28c	23.84	919.29±21.52d	
M+NW	1097.40±28.46b	81.37	251.31±7.88b	18.63	1348.71±36.09b	
因子 Factors	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.
I	697.61	*	69.68	*	619.95	*
NW	898.95	*	84.76	*	794.26	*
I × NW	71.40	*	18.91	*	71.84	*

夜间增温显著提高了稻田CH₄和N₂O增温潜势。品种混栽条件下,夜间增温处理(I+NW)稻田CH₄和N₂O的增温潜势及综合增温潜势,分别高于不增温对照处理(I+CK)68.74%、36.54%和62.55%。粳稻净栽条件下,增温处理(M+NW)稻田CH₄和N₂O增温潜势及综合增温潜势,分别比不增温对照处理(M+CK)升高56.77%、14.67%和46.71%。同样,品种混栽也显著提高了稻田CH₄和N₂O增温潜势。夜间增温条件下,品种混栽处理(I+NW)稻田CH₄和N₂O增温潜势及综合增温潜势,分别高于粳稻净栽处理(M+NW)稻田58.61%、33.45%和53.92%。不增温或常温条件下,品种混栽处理(I+CK)稻田CH₄和N₂O增温潜势及综合增温潜势,分别比净栽对照处理(M+CK)稻田提高47.36%、12.08%和38.93%。可见,夜间增温或品种混栽均显著增加稻田CH₄和N₂O增温潜势及其综合增温潜势($P \leq 0.05$)。夜间增温和品种混栽(I×NW)交互作用显著提高稻田CH₄和N₂O增温潜势及其综合增温潜势。

2.7 夜间增温下品种混栽对稻田排放强度的影响

从表 5 看出,夜间增温显著降低水稻标准产量。品种混栽条件下,夜间增温处理(I+NW)水稻的标准产量比不增温对照(I+CK)降低 16.64%。粳稻净栽条件下,夜间增温处理(M+NW)水稻的标准产量,显著低于不增温对照(M+CK) 21.49%。相反,品种混栽显著提高水稻标准产量。夜间增温条件下,品种混栽处理(I+NW)水稻标准产量,比净栽对照处理(M+NW)显著提高 20.14%。不增温或常温条件下,品种混栽(I+CK)处理水稻标准产量显著高于净栽(M+CK)处理 13.14%。夜间增温和品种混栽(I×NW)交互作用对水稻产量影响未达显著水平,品种混栽在一定程度上可缓解夜间增温对水稻产量的不利影响。

温室气体排放强度(Greenhouse gas emission intensity,简称排放强度)主要取决于标准产量和温室气体累积排放量。夜间增温显著提高稻田CH₄和N₂O排放强度。品种混栽条件下,夜间增温处理(I+NW)稻田的排放强度,显著高于不增温对照处理(I+CK) 95.72%。粳稻净栽条件下,夜间增温处理(M+NW)稻田的排放强度,显著高于不增温处理(M+CK) 86.96%。同样,品种混栽也显著提高稻田的排放强度。夜间增温条件下,品种混栽处理(I+NW)与净栽处理(M+NW)相比,稻田排放强度提高 28.62%。不增温或常温条件下,品种混栽处理(I+CK)稻田排放强度,显著高于净栽对照处理(M+CK) 22.86%。可见,夜间增温或品种混栽均显著提高稻田排放强度($P \leq 0.05$),但二者交互作用的影响未达显著水平。

表 5 夜间增温下品种混栽对水稻标准产量及温室气体排放强度的影响

Table 5 Effects of intercropping on rice yield and greenhouse gas emission intensity in paddy field under nighttime warming

处理 Treatment	标准产量 Grain yield/(t/hm ²)	温室气体排放强度 Greenhouse gas emission intensity/(kg CO ₂ -eq/t)		
I+NW	10.62±0.51b	196.39±9.62a		
I+CK	12.74±0.26a	100.34±2.04c		
M+CK	11.26±0.32b	81.67±0.48d		
M+NW	8.84±0.082c	152.69±5.44b		
因子 Factors	<i>F</i>	显著性 Sig.	<i>F</i>	显著性 Sig.
I	24.30	*	30.74	*
NW	47.06	*	220.57	*
I × NW	0.21	No	4.95	No

3 讨论

3.1 夜间增温下品种混栽对水稻生长的影响

夜间增温显著降低水稻植株分蘖数、地上部和根系干物质质量及产量(表 1,表 5)。原因在于,夜间增温下水稻生长发育受阻,干物质积累降低,叶片、茎秆衰老加快,颖花分化受抑,花粉萌发受阻,有效穗数降低,空秕率增加,产量下降^[9-11]。

品种混栽使水稻地上部和根系干物质质量、分蘖数显著降低,而产量显著增加(表 1,表 5)。原因在于,不同品种株高、株型等差异,使混栽水稻植株更有利于接收太阳有效辐射,提高光合速率,使有效穗数增加,产量提高^[27-33],但品种混栽可能因种间竞争,使植株生长受抑制,引起分蘖数、生物量下降。品种混栽表现为全株生物量和产量之间的反向变化机制,原因可能在于,(1)品种混栽所形成的生物群落存在补偿、互补和助长效应^[20],杂交稻可能比粳稻具有偏高的收获指数,从而使水稻产量增加;(2)水稻产量可能是由于有效穗数,每穗粒数,结实率和千粒重的增加而提高的;(3)水稻生物量地上部分为茎、叶和穗,可能对于茎叶干物质重降低,而穗干物质重升高。

品种混栽可缓解夜间增温对水稻产量的不利影响,原因可能在于,品种混栽存在互补效应,对水分、光照等资源的利用效率更高^[34];品种混栽形成特有系统,增强系统稳定性,改善不利于作物生长发育的环境,促进水稻稳产。

3.2 夜间增温下品种混栽对水稻CH₄排放的影响

稻田CH₄排放通量在水稻生育期存在2个峰值(图1),第一个峰值出现于水稻移栽后第49天,此时水稻处于分蘖盛期,春夏之交气温逐渐升高,随淹水时间的延长,极端厌氧环境形成,水稻分蘖加快,根系分泌增强,促进了产甲烷菌活动,CH₄排放随之升高,在移栽后第49天达到峰值。移栽后第63天晒田结束,复水灌溉,此时水稻处于拔节末期—抽穗初期,生长旺盛,CH₄排放通量逐渐升高,至移栽后第84天出现第二个高峰,但数值远低于第一个峰值,而后,CH₄排放通量持续下降维持较低水平。本试验中稻田全生育期CH₄排放量偏低,原因可能在于,一是采用中期晒田的水分管理方式,晒田改善了土壤通气性,提高了土壤氧化还原电位,覆水后闭蓄氧的存在抑制了CH₄的产生;二是供试稻田质地粘重,粘粒的物理保护减少了有机质分解,粘质土壤中气体扩散作用较弱不利于甲烷扩散,此外,粘质土壤的缓冲性强,有助于维持较高的氧化还原电位^[35]。

夜间增温下稻田CH₄排放通量和累积排放量增加(图1,表2),但显著降低水稻植株分蘖数、地上部和根系干物质量(表1),可能是由于,(1)温度升高使植株呼吸作用加强,引起CO₂浓度增加,O₂浓度减少,有利于土壤厌氧环境的形成^[14,36-38];(2)夜间增温使水稻植株分蘖提早凋萎,茎叶凋落物或根系脱落物为产甲烷菌提供较多有机物,促进CH₄产生排放;(3)稻田CH₄排放量与生物量成反比,生物量高的植株将较多的碳固定于植株中,以降低CH₄排放,反之亦然^[39]。品种混栽显著提高稻田CH₄排放通量和累积排放量(图1,表2),其原因可能为,品种混栽下光利用率提高,光合速率提高,根系分泌增强,促进产甲烷菌活性,有利于CH₄产生排放^[24],夜间增温和品种混栽。但也有学者认为,湿地生态系统物种多样性增加没有导致CH₄排放量增加^[26]。迄今关于混栽或物种多样性对稻田CH₄排放的影响研究报道较少,还需进一步研究。

3.3 夜间增温下品种混栽对水稻N₂O排放的影响

水稻整个生育期内,稻田N₂O排放通量呈单峰变化趋势(图2)。水稻移栽后,持续灌溉淹水状态降低N₂O产生排放。移栽后第49天排水晒田,干湿交替促进土壤硝化作用及反硝化作用,引起稻田N₂O产生排放升高^[40],至移栽后第63天(晒田结束)稻田N₂O产生排放达峰值。晒田结束并灌溉覆水,N₂O排放逐渐降低,并维持较低水平。成熟期N₂O呈现波动变化趋势,原因在于临近收获时停止灌溉,土壤表面逐渐干涸,破坏了淹水厌氧环境,干湿交替虽有利于土壤硝化细菌或反硝化细菌活动,但此时夏秋之交气温波动较大,引起N₂O排放呈波动趋势。本试验中N₂O排放因子偏高的原因可能是,中期晒田导致厌氧环境遭到破坏,促进土壤N₂O的产生排放;植株根系活力增强,泌氧能力提高,促进硝化细菌及反硝化细菌代谢有机物质,利于N₂O排放^[41];供试两个水稻品种生育期存在差异,通量观测延长至杂交稻成熟后4周,后期停止灌溉使N₂O排放增加,导致累积排放量提高。

夜间增温显著提高稻田N₂O排放通量和累积排放量(图2,表3),原因可能在于,增温促进了土壤N₂O产生相关微生物活性,使N₂O产生排放增加^[42-43]。N₂O排放较高的时期是拔节—孕穗期,与CH₄排放表现为消长关系^[44]。拔节—孕穗期是水稻生长关键期,此时处于排水晒田期间,土壤通气性改善,土壤氧化还原电位升高,促进了硝化和反硝化细菌活性,而抑制了产甲烷菌活性^[45]。品种混栽显著促进稻田N₂O排放(表3),原因可能在于,品种混栽下种间竞争使分蘖数减少,有效分蘖增加,氮素吸收消耗减少,土壤含氮量较高,硝化及反硝化细菌活性提高,促进N₂O产生排放;促进作物根系分泌物分泌量的提高,促进反硝化细菌的生长和繁殖,从而提高N₂O排放量,但相关作用机制或原因还需进一步深入研究。

4 结论

夜间增温下品种混栽显著抑制水稻生长发育,减少水稻分蘖数,降低干物质量。夜间增温显著降低产量,而品种混栽显著提高产量。夜间增温下品种混栽显著提高稻田CH₄、N₂O排放通量及累积排放量,显著提高全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)($P \leq 0.05$)。未来将进一步研究夜间增温下品种混栽对稻田土壤温室气体产生的影响机制及其应对措施。

参考文献 (References):

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 赵杰, 杜自强, 张红, 张霄羽, 赵虹. 中国季节性昼夜增温的不对称性及其对植被活动的影响. 生态学报, 2018, 38(11): 3909-3919.
- [3] Xu L, Myneni R B, Chapin III F S, Callaghan T V, Pinzon J E, Tucker C J, Zhu Z, Bi J, Ciais P, Tømmervik H, Euskirchen E S, Forbes B C, Piao S L, Anderson B T, Ganguly S, Nemani R R, Goetz S J, Beck P S A, Bunn A G, Cao C, Stroeve J C. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. Nature Climate Change, 2013, 3(6): 581-586.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 503-503.
- [5] Lou Y S, Meng Y, Ren L X, Wu L, Zhang Y W, Zhao S D, Zhu H W. Silicate application decreased methane emission from paddy soil under elevated UV-B radiation. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2016, 6(5): 662-669.
- [6] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统CH₄和N₂O排放. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [7] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732.
- [8] Ma J, Ma E D, Xu H, Yagi K, Cai Z C. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5): 1022-1028.
- [9] 魏金连, 潘晓华, 邓强辉. 夜间温度升高对双季早晚稻产量的影响. 生态学报, 2010, 30(10): 2793-2798.
- [10] 郑泽华, 娄运生, 左慧婷, 石一凡, 王颖. 施硅对夜间增温条件下水稻生长和产量的影响. 中国农业气象, 2018, 39(6): 390-397.
- [11] 董文军, 邓艾兴, 张彬, 田云录, 陈金, 杨飞, 张卫建. 开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究. 生态学报, 2011, 31(8): 2169-2177.
- [12] 张鑫, 陈金, 江瑜, 邓艾兴, 宋振伟, 郑成岩, 张卫建. 夜间增温对江苏不同年代水稻主栽品种生育期和产量的影响. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1349-1356.
- [13] Fey F, Conrad R. Effect of temperature on the rate limiting step in the methanogenic degradation pathway in rice field soil. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(1): 1-8.
- [14] Gaihre Y K, Wassmann R, Villegas-Pangga G. Impact of elevated temperatures on greenhouse gas emissions in rice systems: interaction with straw incorporation studied in a growth chamber experiment. Plant and Soil, 2013, 373(1/2): 857-875.
- [15] Yang B, Chen Z Z, Zhang M, Zhang H, Zhang X H, Pan G X, Zou J W, Xiong Z Q. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on the soil profile methane distribution and diffusion in rice - wheat rotation system. Journal of Environmental Sciences, 2015, 32: 62-71.
- [16] 王颖, 娄运生, 石一凡, 郑泽华, 左慧婷. 夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算, 生态学报, 2018, 38(14): 5099-5108.
- [17] Gaihre Y K, Wassmann R, Tirol-Padre A, Villegas-Pangga G, Aquino E, Kimball B A. Seasonal assessment of greenhouse gas emissions from irrigated lowland rice fields under infrared warming. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 184: 88-100.
- [18] 朱有勇, Hei L, 陈海如, 王云月, 汤克仁, 赵学谦, 周金玉, 涂建华, 李炎, 何霞红, 周江鸿, 孙雁, Mew T W. 利用抗病基因多样性持续控制水稻病害. 中国农业科学, 2004, 37(6): 832-839.
- [19] Bouws H, Finckh M R. Effects of strip intercropping of potatoes with non-hosts on late blight severity and tuber yield in organic production. Plant Pathology, 2008, 57(5): 916-927.
- [20] 施成晓. 冬小麦多品种间作对群体生长特性及产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [21] Cox C M, Garrett K A, Bowden R L, Fritz A K, Dendy S P, Heer W F. Cultivar mixtures for the simultaneous management of multiple diseases: tan spot and leaf rust of wheat. Phytopathology, 2004, 94(9): 961-969.
- [22] 朱有勇, 陈海如, 范静华, 王云月, 李炎, 范金祥, 杨仕生, 马光亮, 陈建斌, 李作森, 卢宝荣. 利用水稻品种多样性控制稻瘟病研究. 中国农业科学, 2003, 36(5): 521-527.
- [23] Sun H Y, Zhang C B, Song C C, Chang S X, Gu B J, Chen Z X, Peng C H, Chang J, Ge Y. The effects of plant diversity on nitrous oxide emissions in hydroponic microcosms. Atmospheric Environment, 2013, 77: 544-547.
- [24] 莫熠. 植物多样性对湿地温室气体排放的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [25] 蒋跃平, 于晨晨, 韩文娟, 王海, 罗斌, 施猛猛, 常杰, 葛滢. 植物多样性对湿地氨挥发和温室气体排放的影响. 杭州师范大学学报: 自然科学版, 2017, 16(5): 491-497.
- [26] 赵争艳. 人工湿地中植物多样性和基质对甲烷和氧化亚氮排放的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [27] 王旭. 水稻杂糯间作对稻田病虫害草害及产量的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.

- [28] Mille B, Fraj M B, Monod H, de Vallavieille-Pope C. Assessing four-way mixtures of winter wheat cultivars from the performances of their two-way and individual components. *European Journal of Plant Pathology*, 2006, 114(2): 163-173.
- [29] Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, Wang Y Y, Li Y, Chen J B, Fan J X, Yang S S, Hu L P, Leung H, Mew T W, Teng P S, Wang Z H, Mundt C C. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 2000, 406(6797): 718-722.
- [30] Akanda S I, Mundt C C. Effects of two-component wheat cultivar mixtures on stripe rust severity. *Phytopathology*, 1996, 86(4): 347-353.
- [31] 王秀娜, 段霞瑜, 周益林. 小麦品种多样性对白粉病及产量和蛋白质的影响. *植物病理学报*, 2011, 41(3): 285-294.
- [32] 刘红敏, 宁万光, 徐畅, 史洪中, 胡汉升. 不同品种水稻间作栽培对褐飞虱发生及水稻产量的影响. *江苏农业科学*, 2015, 43(4): 124-126.
- [33] 姜延涛. 田间品种多样性对小麦白粉病及其病原菌群体多样性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [34] Adu-Gyamfi P, Mahmood T, Trethowan R. Can wheat varietal mixtures buffer the impacts of water deficit? *Crop and Pasture Science*, 2015, 66(8): 757-769.
- [35] 蔡祖聪, 沈光裕, 颜晓元, 鹤田治雄, 八木一行, 阳捷行. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响. *土壤学报*, 1998, 15(2): 145-154.
- [36] Qaderi M M, Reid D M. Methane emissions from six crop species exposed to three components of global climate change: temperature, ultraviolet-B radiation and water stress. *Physiologia Plantarum*, 2009, 137(2): 139-147.
- [37] Tokida T, Fumoto T, Cheng W, Matsunami T, Adachi M, Katayanagi N, Matsushima M, Okawara Y, Nakamura H, Okada M, Sameshima R, Hasegawa T. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) and soil warming on CH₄ emission from a rice paddy field: impact assessment and stoichiometric evaluation. *Biogeosciences*, 2010, 7(9): 2639-2653.
- [38] Bahuguna R N, Solis C A, Shi W J, Jagadish K S V. Post-flowering night respiration and altered sink activity account for high night temperature-induced grain yield and quality loss in rice (*Oryza sativa* L.). *Physiologia Plantarum*, 2017, 159(1): 59-73.
- [39] 任丽新, 王庚辰, 张仁健, 段长麟, Khalil M A K, Shearer M J, Rasmussen R A, Dalluge R W. 成都平原稻田甲烷排放的实验研究. *大气科学*, 2002, 26(6): 731-743.
- [40] 孙会峰, 周胜, 陈桂发, 付子轼, 刘国兰, 宋祥甫. 水稻品种对稻田CH₄和N₂O排放的影响. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8): 1595-1602.
- [41] 傅志强, 黄璜, 朱华武, 陈灿. 水稻CH₄和N₂O的排放及其与植株特性的相关性. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2011, 37(4): 356-360.
- [42] 崔海玲. 增温和酸雨对大豆-冬小麦轮作农田N₂O排放的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [43] 柯琳. 模拟增温对华北平原长期免耕农田土壤N₂O排放通量影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013.
- [44] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 稻田CH₄和N₂O排放消长关系及其减排措施. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2123-2130.
- [45] 吴杨周. 模拟增温和降水减少对旱作农田土壤呼吸和N₂O通量的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.