

宋开付, 于海洋, 张广斌, 等. 川中丘陵区覆膜再生稻田 N₂O 排放规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1381–1387.

SONG Kai-fu, YU Hai-yang, ZHANG Guang-bin, et al. N₂O emissions from ratoon paddy fields covered with plastic film mulching in the hilly area of central Sichuan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1381–1387.

川中丘陵区覆膜再生稻田 N₂O 排放规律研究

宋开付^{1,2}, 于海洋^{1,2}, 张广斌¹, 徐 华¹, 吕世华³, 马 静^{1*}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 农业部西南山地农业环境重点实验室, 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘 要: 为明确覆膜再生稻田 N₂O 排放规律, 采用静态箱-气相色谱法原位观测了川中丘陵区覆膜条件下再生稻田的 N₂O 排放通量。试验设置覆膜单季中稻(SR)和覆膜中稻-再生稻(SR-RR)两个处理。结果表明: SR-RR 处理中稻季有两个明显的 N₂O 排放峰, 第一个排放峰出现时间较 SR 处理提前 13 d, 再生季出现 N₂O 排放最高峰, 峰值为 1 630.7 μgN·m⁻²·h⁻¹。全观测期内 SR-RR 处理 N₂O 排放量为 5.63 kgN·hm⁻², 其中再生季 N₂O 排放量为 2.35 kgN·hm⁻², 约占两季总排放的 42%。SR-RR 处理两季的 N₂O 排放总量比 SR 处理的单季排放量高 246%(*P*<0.05)。SR-RR 处理两季稻谷总产量为 10.4 t·hm⁻², 其中再生季产量为 1.89 t·hm⁻², 约占两季稻谷总产量的 18%, SR-RR 处理两季稻谷总产量比 SR 处理高出 22%(*P*<0.05)。SR-RR 处理单位产量的 N₂O 排放量为 0.54 kgN·t⁻¹, 较 SR 处理增加 184%(*P*<0.05)。研究结果为进一步研究覆膜再生稻田 N₂O 排放规律及寻求有效的减排措施提供数据支撑和科学依据。

关键词: 再生稻; N₂O 排放; 地膜覆盖; 稻田; 产量

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)06-1381-07 doi:10.11654/jaes.2018-1368

N₂O emissions from ratoon paddy fields covered with plastic film mulching in the hilly area of central Sichuan, China

SONG Kai-fu^{1,2}, YU Hai-yang^{1,2}, ZHANG Guang-bin¹, XU Hua¹, LÜ Shi-hua³, MA Jing^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Environment in Southwest Mountain Areas, Ministry of Agriculture, Institute of Soil Fertilizer, Sichuan Agriculture Sciences Academy, Chengdu 610066, China)

Abstract: To determine N₂O emissions patterns of plastic film mulching (PM) in ratoon paddy fields, this study used static chamber-gas chromatography to observe ratoon paddy fields in the hilly area of central Sichuan. The experiment was conducted with two treatments including film mulching of single rice (SR) and film mulching of single-ratoon rice (SR-RR). The results showed that there were two distinct N₂O emissions peaks in the SR-RR treatment in the main crop season, and the first appeared 13 days earlier than SR treatment, while the highest peak appeared in the ratoon season with a value of 1 630.7 μgN·m⁻²·h⁻¹. The N₂O emissions from the SR-RR treatment was 5.63 kgN·hm⁻² during the full observation period, and the N₂O emissions during the ratoon season was 2.35 kgN·hm⁻², which accounted for approximately 42% of the total emissions in the two seasons. The total amount of N₂O emitted from the SR-RR treatment in the two seasons was 246% higher than that of the SR treatment (*P*<0.05). The total rice yield of SR-RR in the two seasons was 10.4 t·hm⁻², and the yield of the ratoon season was 1.89 t·hm⁻², which accounted for 18% of the total rice yield in the two seasons. The grain yields in the two seasons were 22% (*P*<0.05) higher than that of the SR treatment. The N₂O emissions per unit of yield from the SR-RR treatment was 0.54 kgN·t⁻¹

收稿日期: 2018-11-01 录用日期: 2018-12-18

作者简介: 宋开付(1993—), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事农田温室气体排放及减排对策研究。E-mail: songkaifu@issas.ac.cn

*通信作者: 马 静 E-mail: jma@issas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300105); 农业部西南山地农业环境重点实验室开放基金(AESMA-OPP-2019002); 国家自然科学基金基金项目(41671241, 41571232); 中国科学院南京土壤研究所领域前沿项目(ISSASIP1652, ISSASIP1654)

Project supported: The National R&D Program of China(2017YFD0300105); The Open Project Program of Key Laboratory of Agricultural Environment in Southwest Mountain Areas, Ministry of Agriculture, P. R. China(AESMA-OPP-2019002); The National Natural Science Foundation of China(41671241, 41571232); The Knowledge Innovation Program of Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences(ISSASIP1652, ISSASIP1654)

grain, which was 184% higher than that of the SR treatment ($P < 0.05$). These results provide supporting data and a scientific basis for further analysis on the N_2O emissions rules of ratoon paddy fields covered with PM, as well as the search for effective emissions reduction measures.

Keywords: ratoon rice; N_2O emissions; plastic film mulching cultivation; paddy field; grain yield

全球气候变暖是世人给予广泛关注的全球性环境问题之一,导致全球变暖的温室气体浓度在大气中不断地增长也越来越受到重视。 N_2O 是一种重要的温室气体,它不仅可以使全球气温升高,还参与平流层中的光化学反应,破坏臭氧层^[1]。2016年大气 N_2O 浓度为 $0.33 \mu L \cdot L^{-1}$,是第一次工业革命前的122%^[2]。农业生产活动每年排放 N_2O (以N计)约410万t,占总人为源的59%^[3]。早期的研究认为稻田 N_2O 排放量小^[4],但近期研究发现稻田 N_2O 排放不可忽视^[5]。我国是世界最主要的植稻国之一,据联合国粮农组织(FAO)统计,我国水稻种植面积占世界的19%^[6],每年稻田 N_2O 排放量约8.8万t N^[7]。正确评估稻田 N_2O 排放量既能对未来气候变化条件下进一步研究全球变暖做好铺垫,又能为温室气体减排措施的制定提供数据支撑和科学依据。

再生稻是在单季稻基础上发展起来的一种水稻耕作模式,它利用收割后稻桩上存活的休眠芽,在适宜的水、温、光和养分等条件下,重新发苗抽穗,再收一季^[8]。早在上世纪30年代,我国就有关于再生稻的研究报道^[9]。据统计,我国南方单季稻作区适宜种植再生稻的面积约330万 hm^2 ,可比只种一季稻生产方式增产稻谷 9.9×10^7 t,其增产潜力巨大^[10]。目前,四川省中稻蓄留再生稻面积就达25万 hm^2 左右,然而因干旱等自然灾害限制了再生稻蓄留面积的进一步扩大,并增加了其单产的不稳定性。近年来,为应对季节性干旱对水稻造成的严重影响,覆膜栽培技术已在川中丘陵区得到广泛应用,且增产效果显著^[11]。

研究表明^[12],热量是影响再生稻高产稳产的主要气候因素,覆膜地下5 cm处土壤温度日平均值比无膜地下5 cm处土壤温度增高 $3.2 \sim 5.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。水稻覆膜栽培技术可以提高土壤温度,预防中稻移栽早期的低温冷害^[13]。因此,水稻覆膜栽培有利于单季中稻(头一季)在该地区蓄留再生稻(再生季),并可能实现它们的高产和稳产。由于头一季的生育期、施肥时间与施肥量均不同于传统的单季稻和双季稻,其稻田 N_2O 排放规律也肯定会发生改变。目前,国际上有关单季稻和双季稻的 N_2O 排放研究已有大量文献报道^[14-15],但关于头一季与再生季及全生育期的 N_2O 排放通量观

测目前还严重缺乏。

本研究通过田间原位试验,观测了水稻覆膜条件下川中丘陵区单季中稻及蓄留再生稻的 N_2O 排放通量,讨论了覆膜中稻蓄留再生稻 N_2O 排放的季节变化规律,旨在探明其对稻田 N_2O 排放的影响,为进一步研究覆膜再生稻田 N_2O 排放规律及寻求有效的 N_2O 减排措施提供数据支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于2017年稻季在四川省资阳市雁江区雁江镇响水村($104^\circ 34' E, 30^\circ 05' N$)进行。该地区年平均气温 $16.8 \text{ } ^\circ\text{C}$,年平均降水量 965.8 mm 。试验土壤为侏罗纪遂宁组母质发育红棕紫泥,全碳含量为 $34.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $2.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤pH为7.6。

供试水稻品种为早优73,试验共设2个处理,每个处理4次重复:(1)覆膜单季中稻(SR);(2)覆膜中稻-再生稻(SR-RR)。试验小区面积为 32.75 m^2 ($6.55 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),设4条厢面,5条厢沟。厢面宽 1.45 m 、长 5 m ,各厢沟长 5 m 、宽 15 cm 、深 15 cm 。SR处理所有肥料均作为基肥一次性均匀施于厢面上,水稻生长期不进行追肥,同时在厢面上均匀覆盖 0.004 mm 厚超微薄膜,地膜紧贴厢面;SR-RR除施加基肥外,还需施用促芽肥和发苗肥。水稻移栽采用三角稀植,用特制的打孔器在膜上打孔^[16],行窝距为 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$,每窝以三角形方式栽3穴,每穴1苗,苗间距 12 cm ,移栽密度为 $18 \text{ 穴} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[12]。水稻生长期保持厢沟有水,厢面无水,用塑料软管抽水进行田间灌溉。SR-RR处理头季稻收获后蓄留再生稻,留桩高度 40 cm 。各处理的育秧、移栽、收获、施肥时间及施肥量见表1。

1.2 田间样品采集

N_2O 样品采集用静态密闭箱法,箱体材料为不锈钢。箱A包括中段箱和顶箱两部分,高分别为 60 cm 和 70 cm ,底面积为 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$,中段箱顶部设有密封用水槽,用于水稻生长后期加层;箱B高 70 cm ,底面积为 $40 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。箱A放置于厢面正上方;箱B放置于厢沟。水稻生长期每隔 $4 \sim 7 \text{ d}$ 采一次样,采样时间为上午 $9:00 \sim 11:00$ 。采样前将密闭箱罩在预

表1 水稻生长期的试验设置和作物管理

Table 1 Experimental setup and crop management during the rice growing season

处理 Treatments	SR	SR-RR
基肥 Basal fertilizer	4月26日 283 kg·hm ⁻² 尿素 Urea 600 kg·hm ⁻² 过磷酸钙 Superphosphate 63 kg·hm ⁻² 氯化钾 Potassium chloride 15 kg·hm ⁻² 一水合硫酸锌 Zinc sulfate monohydrate	4月10日 283 kg·hm ⁻² 尿素 Urea 600 kg·hm ⁻² 过磷酸钙 Superphosphate 63 kg·hm ⁻² 氯化钾 Potassium chloride 15 kg·hm ⁻² 一水合硫酸锌 Zinc sulfate monohydrate
促芽肥 Bud fertilizer	—	7月25日 180 kg·hm ⁻² 尿素 Urea
发苗肥 Fertilizer for seed bed	—	8月10日 150 kg·hm ⁻² 尿素 Urea
育秧 Sprout cultivation	3月31日	3月15日
移栽 Transplantation	4月29日	4月13日
中稻季收获 Harvest in main crop season	8月19日	8月10日
再生季收获 Harvest in ratoon season	—	10月27日

先埋入小区土壤中的不锈钢底座(40 cm×40 cm×15 cm)上,底座顶端与厢面平齐(底座内盖有与底座同样大小的地膜)。静态箱密闭后用两通针将气体导入18 mL真空玻璃瓶中,每15 min采样一次,共采样4次。采集气体的同时,测定箱温和厢面下5 cm处土壤温度。取厢面新鲜土样于105 °C烘干测定土壤质量含水率。水稻成熟时,分别按试验小区收割、脱粒、晾晒、适当筛除空秕粒并除水分后称质量,计算水稻产量。降雨量数据来自于四川省资阳市气象局。

1.3 样品分析

样品 N₂O 浓度用带⁶³Ni 电子捕获检测器(ECD)的安捷伦气相色谱(Agilent 7890B)测定,色谱柱为80/100目的Porapak Q填充柱,柱箱温度60 °C,载气为95%氩气+5%甲烷,尾吹气流量5 mL·min⁻¹,检测器温度300 °C。N₂O标准气体由中国计量科学研究院提供。

1.4 数据处理

根据样品 N₂O 浓度与时间的关系变化曲线计算 N₂O 排放通量。N₂O 排放通量的公式计算如下:

$$F = \rho \times V/A \times dc/dt \times 273/T \quad (1)$$

式中: F 为 N₂O 排放通量, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下 N₂O-N 密度, $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为采样箱内有效体积, m^3 ; A 为采样箱覆盖的土壤面积, m^2 ; dc/dt 为单位时间内采样箱内 N₂O 浓度的变化, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; T 为采样箱内平均温度, K 。

试验小区由厢面和厢沟构成,通过箱 A 测得的气体排放通量(F_A)为厢面的气体排放通量,通过箱 B 测得的气体排放通量(F_B)为厢沟的气体排放通量,各处理的气体排放通量(F_i)为厢面和厢沟的气体排放通量与之对应面积的加权平均^[17],即:

$$F_i = (F_A \times S_A + F_B \times S_B) / S \quad (2)$$

式中: S_A 、 S_B 和 S 分别为试验小区厢面面积、厢沟面积和小区面积。

N₂O 排放通量用每次观测的4个重复的平均值及标准差表示, N₂O 季节排放量是将4个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再平均。处理间比较4个重复的平均值进行方差分析和多重比较。数据处理与分析均采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 20.0 完成。

2 结果与分析

2.1 降雨量和土壤水分含量

水稻生长期的降雨量和土壤含水率的季节变化如图1所示,水稻生长期的总降雨量为606 mm,日平均降雨量为3.08 mm;水稻生长期每个月都有一定的降雨,其中4、5月份降雨量较少,为43 mm和32 mm,7、8月份降雨量分别是173 mm和149 mm。在水稻生长期内最大土壤含水率为89.7%(5月1日),最小土壤含水率为52.3%(6月20日),水稻生长期平均含水率为68.9%。

2.2 稻田 N₂O 排放

稻田 N₂O 排放通量的季节变化如图2a所示。N₂O 排放主要集中在肥料施入土壤后较短时间内。SR 处理 N₂O 排放通量在水稻移栽后迅速上升,于5月5日达到排放最高峰613.7 $\mu\text{gN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,然后在13 d内下降到5.0 $\mu\text{gN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,5月30日出现另一 N₂O 排放峰,峰值为192.9 $\mu\text{gN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;水稻生长后半期 N₂O 排放集中在0~15.5 $\mu\text{gN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内波动。

SR-RR 处理 N₂O 排放通量的季节变化规律不同于 SR 处理。SR-RR 处理 N₂O 排放量主要集中在头季

稻抽穗成熟期和再生季。SR-RR处理水稻移栽后 N_2O 排放通量逐渐上升,4月22日出现 N_2O 排放高峰 $641.6 \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,略高于SR处理 N_2O 排放最高峰,且排放高峰出现的时间较SR处理提前13 d;拔节孕穗期 N_2O 排放通量仅在 $0\sim 13.5 \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内变化;抽穗成熟期于7月31日出现 N_2O 排放高峰,峰值为 $943.0 \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,SR处理拔节孕穗期和抽穗成熟期均未有 N_2O 排放峰出现;头季稻收割后3 d内 N_2O 排放通量迅速上升到 $1\ 630.7 \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,此后 N_2O 排放通量稳定在 $0\sim 7.4 \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围直至再生季收割(图2a)。

由表2可知,SR和SR-RR处理中稻季 N_2O 排放量差异显著($P<0.05$),SR-RR处理再生季 N_2O 排放量占两季总排放的42%,SR-RR处理两季的 N_2O 排放总量比SR处理的单季排放量高246%($P<0.05$)。

2.3 水稻产量及单位产量的 N_2O 排放量

SR-RR处理中稻季稻谷产量与SR处理相当($P>0.05$),分别为 $8.54 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8.52 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,SR-RR处理再生季稻谷产量为 $1.89 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,占两季总产的18%,SR-RR处理两季稻谷总产量比SR处理高22%($P<0.05$),单位产量的 N_2O 排放量增加184%($P<0.05$,表2)。

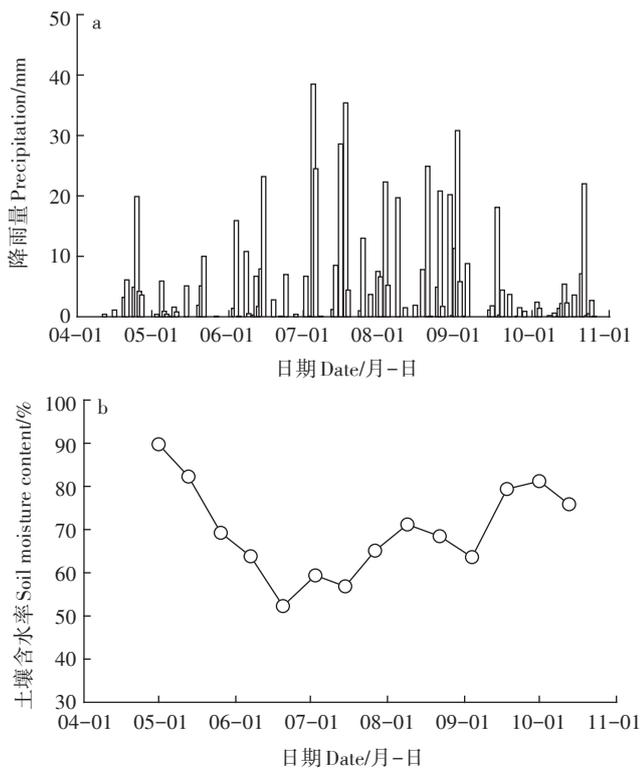


图1 水稻生长期降雨量和土壤含水率的季节变化

Figure 1 Seasonal variation of precipitation and soil moisture content during rice growing period

2.4 土壤温度与土壤水分含量对 N_2O 排放的影响

图2b为水稻生长期厢面下5 cm处土壤温度的季节变化。结果表明,全观测期内土壤温度总体表现为先上升后下降。SR处理水稻生长期的土壤温度在 $18.8\sim 28.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化;SR-RR处理中稻季土壤温度总体上呈上升趋势,8月4日达到最高温度为 $28.6 \text{ }^\circ\text{C}$,头季稻收割时土壤温度下降到 $26.4 \text{ }^\circ\text{C}$,再生季的前8 d,土壤温度略微上升了 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,之后迅速下降,后期的大部分时间保持在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,再生季收割时的土壤温度约为 $19 \text{ }^\circ\text{C}$ 。SR处理水稻生长期的季节平均土温为 $24.9 \text{ }^\circ\text{C}$,SR-RR处理中稻季和再生季的季节平均土温分别为 $24.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $23.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

相关分析表明(表3),SR处理 N_2O 排放通量与厢面5 cm处土温显著负相关($P<0.05$),SR-RR处理中稻季及再生季 N_2O 排放通量与土温均无显著相关性($P>0.05$)。SR处理 N_2O 排放通量与土壤含水率显著正相关($P<0.05$), N_2O 排放通量随着土壤含水率的增加而增大,SR-RR处理中稻季及再生季 N_2O 排放通量与土壤含水率均无显著相关性($P>0.05$)。

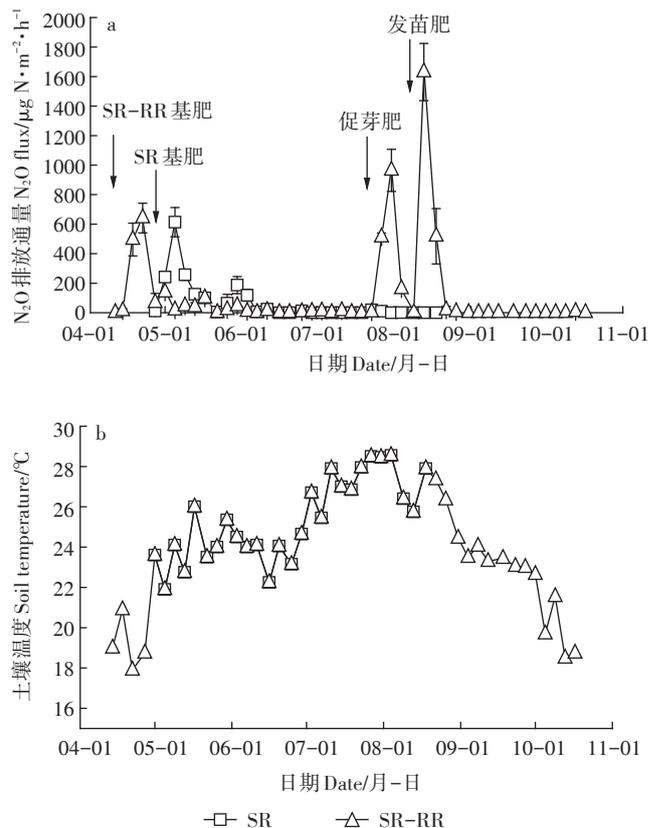


图2 稻田 N_2O 排放通量和土壤温度的季节变化

Figure 2 Seasonal variation of N_2O fluxes and soil temperature in rice paddy field

表2 N₂O 排放量、水稻产量及单位产量的 N₂O 排放量Table 2 Total N₂O emissions, rice grain yield and N₂O emissions per unit yield

处理 Treatments	中稻季 Main crop season		再生季 Ratoon season		单位产量的 N ₂ O 排放量 N ₂ O emissions per unit yield/ kgN ₂ O·t ⁻¹ grain
	N ₂ O 排放量 N ₂ O emissions/kgN·hm ⁻²	水稻产量 Rice yield/t·hm ⁻²	N ₂ O 排放量 N ₂ O emissions/kgN·hm ⁻²	水稻产量 Rice yield/t·hm ⁻²	
SR	1.62±0.10b	8.52±0.14a	—	—	0.19±0.02b
SR-RR	3.28±0.49a	8.54±0.07a	2.35±0.65	1.89±0.13	0.54±0.11a

注:同一列不同小写字母表示处理间存在显著性差异($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$).

表3 水稻生长期 N₂O 排放通量与土壤温度和土壤含水率的相关性系数Table 3 Correlation coefficients of N₂O fluxes with soil temperature and soil moisture content during rice growing period

处理 Treatments	N ₂ O 排放通量-土壤温度 N ₂ O flux-soil temperature		N ₂ O 排放通量-土壤含水率 N ₂ O flux-soil moisture content	
	中稻季 Main crop season	再生季 Ratoon season	中稻季 Main crop season	再生季 Ratoon season
SR-RR	0.011	0.365	-0.093	-0.351

注:*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上的显著相关性。

Note: * and ** respectively indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels.

3 讨论

土壤水分状况是影响农田 N₂O 排放的重要因素之一^[18-19]。硝化和反硝化作用被认为是农田土壤 N₂O 排放的最重要途径^[20-21]。土壤水分状况主要通过影响土壤通气性、氧化还原电位、土壤微生物有效性及有效氮(NH₄⁺、NO₃⁻)分布等,从而影响硝化、反硝化过程,进而对稻田 N₂O 排放产生影响^[22]。土壤水分含量的变化在一定程度上能反映出降雨量的多少,但从试验结果可以看出土壤水分含量的变化并未与降雨量的多少完全吻合,这可能与水稻在移栽和收获时对土壤水分含量的变化比较敏感^[23-24],田间需水量较大有关。SR 处理 N₂O 排放通量随着土壤含水率的增加而增大,颜晓元等^[25]室内培养试验也表明,当土壤含水量小于田间持水量时,N₂O 排放通量与土壤含水量呈正相关,此时硝化作用是 N₂O 的主要贡献者。土壤含水量较少时,土壤处于充氧状态,作为中间产物的 N₂O 排放量较少,硝化作用占主导地位;随着土壤水分含量的增加,形成的土壤厌氧环境逐渐增强,与硝化作用同时存在的反硝化作用速率加快,N₂O 产生量与排放量较多;当土壤含水量继续增加到土壤孔隙充满水时,虽然反硝化作用进一步加强,但生成的 N₂O 向大气中扩散严重受阻,在土壤中有足够的时间进一

步被还原为 N₂,N₂O 排放趋于减弱^[26-28]。

土壤温度是影响农田 N₂O 排放的另一重要因素,它主要通过控制土壤有机质分解速率和微生物代谢有关的酶活性来调节土壤 N₂O 释放^[29]。在一定温度范围内,土壤 N₂O 排放速率随土壤温度的升高而增加^[30],也有研究显示^[31-32],N₂O 排放通量的季节变化与土壤温度的关系不明显,影响 N₂O 排放的主要因素是土壤水分或养分状况。本试验结果表明,SR 处理 N₂O 排放通量与土壤温度呈负相关关系,这可能是由于肥料施入土壤后一段时间土壤温度降低造成的,此时肥料是影响 N₂O 排放的主要因素,化学肥料的施用是导致高 N₂O 排放的不可忽视的农业措施^[33]。

再生稻的种植改变了覆膜稻田中稻季的 N₂O 排放规律(图 2a)。SR-RR 处理的移栽时间比 SR 处理提前 16 d(表 1),其第一个 N₂O 排放高峰出现的时间也相应提前 13 d(图 2a)。SR-RR 处理在返青分蘖期(施肥后 12 d)出现 N₂O 排放高峰后,于抽穗成熟期(施肥后 6 d)出现 N₂O 排放最高峰,水稻移栽前的基肥和中稻季齐穗后促芽肥的施用导致中稻季稻田 N₂O 大量排放。而 SR 处理在整个水稻生长期只有一个 N₂O 排放高峰,该峰值与 SR-RR 处理在返青分蘖期的 N₂O 排放峰值相当,这与氮肥的用量密切相关。化学氮肥是影响农田 N₂O 排放最重要的因素之一^[34],施用化学氮肥显著增加土壤中 NH₄⁺、NO₃⁻含量,继而硝化作用和反硝化作用增强,促进土壤 N₂O 的产生与排放^[34]。中稻季,SR-RR 处理 N₂O 排放最高峰为 943.0 μgN·m⁻²·h⁻¹,SR 处理 N₂O 排放最高峰为 613.7 μgN·m⁻²·h⁻¹。以往文献报道^[17,35-36],覆膜稻田水稻生长期的 N₂O 排放最高峰在 100.6~1 310.7 μgN·m⁻²·h⁻¹,本试验两处理的 N₂O 排放通量的季节变化仍在此范围内。然而,SR-RR 处理中稻季 N₂O 排放总量显著高于 SR 处理,在基肥施用所引起的 N₂O 排放峰值相当的情况下,中稻季齐穗后促芽肥的施用导致 SR-RR 处理 N₂O 排放总量显著增加。Gregorich 等^[37]指出农田

N_2O 排放量随着氮肥施用量的增加呈线性增加。再生季,SR-RR处理于发苗肥施入稻田3 d后出现 N_2O 排放最高峰 $1\ 630.7\ \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,排放高峰过后一直维持在较低水平至再生季收割。综上可知,氮肥施入覆膜稻田3~12 d是硝化和反硝化作用的关键期,也是稻田 N_2O 排放的高峰期。化学氮肥施用仍是控制覆膜稻田 N_2O 排放的最主要因素。

由于覆膜的增温作用,再生稻可以提前移栽,避免了前期的坐蔸积温问题,使原来不适合种植再生稻的地区成为了可能。有研究^[38-39]指出,覆膜栽培明显加快中稻-再生稻生育进程,促使中稻季和再生季的成熟期提前,提高中稻-再生稻产量。本研究表明,与覆膜单季中稻相比,覆膜条件下种植再生稻,虽然增加了稻田 N_2O 排放量和单位产量的 N_2O 排放量,但它显著提高了水稻产量,可以保证水稻高产稳产。在未来气候变化条件下,进一步考虑施用控释肥或抑制剂以提高氮肥利用效率,减轻施肥对环境造成的污染,减少覆膜稻田 N_2O 排放。

4 结论

(1)覆膜中稻-再生稻的中稻季有两个明显的 N_2O 排放峰,基肥施入土壤出现 N_2O 排放峰,比常规覆膜水稻提前13 d,最高排放峰出现在促芽肥施入稻田后,峰值为 $943.0\ \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;中稻季 N_2O 排放总量为 $3.28\ \text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$,比常规覆膜水稻 N_2O 排放总量高($P<0.05$)。

(2)覆膜中稻-再生稻的再生季只有一个 N_2O 排放峰,出现在8月13日,峰值为 $1\ 630.7\ \mu\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,显著高于中稻季的排放峰值;再生季 N_2O 排放总量为 $2.35\ \text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$,约占两季排放总量的42%。

(3)覆膜中稻-再生稻的两季 N_2O 排放总量为 $5.63\ \text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$,比常规覆膜水稻高246%($P<0.05$)。

(4)覆膜中稻-再生稻的两季总产量为 $10.43\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,比常规覆膜水稻增产22%($P<0.05$);单位产量的 N_2O 排放量为 $0.54\ \text{kgN}\cdot\text{t}^{-1}$,比常规覆膜水稻增加184%($P<0.05$)。覆膜条件下种植再生稻可保证水稻高产稳产,具有一定推广应用前景。

参考文献:

[1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, 248(4960): 1217-1219.
 [2] WMO. Greenhouse gas bulletin No. 13. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2016[EB/OL]. (2017-10-30)[2018-10-31]. [https://library.wmo.int/doc_num.php?](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4022)

[explnum_id=4022](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4022).
 [3] IPCC. Stocker T F, Qin D H, Plattner G, et al. Climate change 2013: The physical science basis[EB/OL]. USA: Cambridge University Press, 2013[2018-10-31]. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf.
 [4] Buresh R J, Austin E R. Direct measurement of dinitrogen and nitrous oxide flux in flooded rice fields[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(3): 681-688.
 [5] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7-14.
 [6] Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO)[EB/OL]. 2016[2018-10-31]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.
 [7] Xing G X. N_2O emission from cropland in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(2/3): 249-254.
 [8] 熊洪, 冉茂林, 徐富贤, 等. 南方稻区再生稻研究进展及发展[J]. 作物学报, 2000, 26(3): 1-5.
 XIONG Hong, RAN Mao-lin, XU Fu-xian, et al. Achievements and developments of ratooning rice in south of China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(3): 1-5.
 [9] 孙晓辉. 再生稻研究和生产的情况及趋势[J]. 耕作与栽培, 1991(5): 1-3.
 SUN Xiao-hui. Situation and trend of ratooning rice research and production[J]. *Tillage and Cultivation*, 1991(5): 1-3.
 [10] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1702-1717.
 XU Fu-xian, XIONG Hong, ZHANG Lin, et al. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(9): 1702-1717.
 [11] 吕世华. 水稻覆膜节水综合高产技术[J]. 四川农业科技, 2012(3): 25.
 LÜ Shi-hua. High-yield rice planting technique integrated with plastic mulching for water saving[J]. *Science and Technology of Sichuan Agriculture*, 2012(3): 25.
 [12] 王友贞, 袁先江, 许浒, 等. 水稻旱作覆膜的增温保墒效果及其对生育性状影响研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 29-31.
 WANG You-zhen, YUAN Xian-jiang, XU Hu, et al. Effects of plastic film mulching on temperature increase and preservation of soil moisture and its responses to growth character of rice with dry-land cultivation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 29-31.
 [13] 王海鹏, 梁伟伶. 寒地覆膜水稻栽培技术初探[J]. 北方水稻, 2017(5): 23-25.
 WANG Hai-peng, LIANG Wei-ling. Preliminary study on cultivation techniques of ground cover rice in cold region[J]. *North Rice*, 2017(5): 23-25.
 [14] Ma J, Zhang G B, Xu H, et al. Effect of controlled-release fertilizer on mitigation of N_2O emission from paddy field in South China: A multi-year field observation[J]. *Plant & Soil*, 2013, 371(1/2): 473-486.
 [15] Yang Y T, Huang Q, Yu H Y, et al. Winter tillage with the incorporation of stubble reduces the net global warming potential and greenhouse gas intensity of double-cropping rice fields[J]. *Soil & Tillage*

Research, 2018, 183:19-27.

- [16] 吕世华, 任光俊, 张福锁. 山区水稻覆膜节水抗旱高产技术[J]. 四川农业科技, 2010(8):16-17.
LÜ Shi-hua, REN Guang-jun, ZHANG Fu-suo. Water-saving, drought-resistant and high-yield techniques of rice film mulching in hilly area[J]. *Science and Technology of Sichuan Agriculture*, 2010(8):16-17.
- [17] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 覆膜栽培及抑制剂施用对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5):830-837.
ZHANG Yi, LÜ Shi-hua, MA Jing, et al. Effects of cultivation pattern and inhibitor application on nitrous oxide emission from paddy fields[J]. *Soil*, 2013, 45(5):830-837.
- [18] Liu S W, Qin Y M, Zou J W, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(4):906-913.
- [19] Xiong Z Q, Xing G X, Zhu Z L. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2):146-155.
- [20] Baggs E. A review of stable isotope techniques for N₂O source partitioning in soils: Recent progress, remaining challenges and future considerations[J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2008, 22(11):1664-1672.
- [21] Wrage-Mönnig N, Horn M, Well R, et al. The role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide revisited[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: A3-A16.
- [22] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 农田土壤 N₂O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤, 2012, 44(6):881-887.
CAI Yan-jang, DING Wei-xin, XIANG Jian. Factors controlling N₂O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: A review[J]. *Soil*, 2012, 44(6):881-887.
- [23] 吕泽林, 钟顺清, 杨航. 再生稻高产稳产栽培技术研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(17):8886-8888.
LÜ Ze-lin, ZHONG Shun-qing, YANG Hang. Study on ratoon rice high and stable yield cultivation techniques[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2010, 38(17):8886-8888.
- [24] 蒋彭炎. 再生稻的生育特性与高产栽培要点[J]. 中国稻米, 1996(6):30-33.
JIANG Peng-yan. Growth characteristics and high yield cultivation of ratoon rice[J]. *China Rice*, 1996(6):30-33.
- [25] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 水分状况对水田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4):482-489.
YAN Xiao-yuan, SHI Shu-lian, DU Li-juan, et al. N₂O emission from paddy soil as affected by water regime[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4):482-489.
- [26] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N₂O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2010(6):1524-1530.
SUN Zhi-qiang, HAO Qing-ju, JIANG Chang-sheng, et al. Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010(6):1524-1530.
- [27] Heincke M, Kaupenjohann M. Effects of soil solution on the dynamics of N₂O emissions: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 55(2):133-157.
- [28] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N₂O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3):273-279.
ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impact of soil humidity on N₂O production and emission from rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3):273-279.
- [29] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 1(2):792-800.
ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. *Environmental Science*, 2014, 1(2):792-800.
- [30] Wrage N, Velthof G, Beusichem M, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(12):1723-1732.
- [31] Pereira J, Figueiredo N, Goufo P, et al. Effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide concentration on the emissions of methane and nitrous oxide from Portuguese flooded rice fields[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 80(12):464-471.
- [32] Cheng W, Yagi K, Sakai H, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on CH₄ and N₂O emission from rice soil: An experiment in controlled-environment chambers[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(3):351-373.
- [33] Dobbie K, McTaggart I, Smith K. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 104(D21):26891-26899.
- [34] SáNchezmartín L, Vallejo A, Dick J, et al. The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(1):142-151.
- [35] 于海洋, 杨玉婷, 马静, 等. 硝化抑制剂对覆膜稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3):461-467.
YU Hai-yang, YANG Yu-ting, MA Jing, et al. Effect of nitrification inhibitor application on CH₄ and N₂O emissions from plastic mulching rice fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(3):461-467.
- [36] Zhang G, Ma J, Yang Y, et al. Achieving low methane and nitrous oxide emissions with high economic incomes in a rice-based cropping system[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2018, 259:95-106.
- [37] Gregorich E, Rochette P, Vandenbygaart A, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 83(1):53-72.
- [38] 丰大清, 刘祥臣, 乔利, 等. 降解地膜与控释肥对再生稻生长及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3):1-7.
FENG Da-qing, LIU Xiang-chen, QIAO Li, et al. Effects of degradable mulching film and controlled-release fertilizer on growth and yield of ratoon rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(3):1-7.
- [39] 廖必长, 陈叶平, 季日鹤. 覆膜栽培对中稻-再生稻生育期及产量的影响[J]. 中国稻米, 2002, 8(1):27-28.
LIAO Bi-chang, CHEN Ye-ping, JI Ri-he. Effects of plastic film mulching on growth period and yield of main crop-ratoon rice[J]. *China Rice*, 2002, 8(1):27-28.