DOI: 10.5846/201808151746
宋开付,杨玉婷,于海洋,张广斌,徐华,吕世华,马静.川中丘陵区覆膜栽培再生稻对 CH_4 排放的影响.生态学报,2019,39(19): - .
Song K F, Yang Y T, Yu H Y, Zhang G B, Xu H, Lv S H, Ma J.Effects of plastic film mulching cultivation of ratoon rice on CH_4 emissions in the hilly area of central Sichuan.Acta Ecologica Sinica,2019,39(19): - .

川中丘陵区覆膜栽培再生稻对 CH_4 排放的影响

宋开付[1,2],杨玉婷[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:为探讨覆膜栽培再生稻对 CH_4 排放的影响,采用静态箱-气相色谱法观测了川中丘陵区 2016 和 2017 年覆膜条件下再生稻田的 CH_4 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 处理中稻季提前出现 CH_4 排放峰,再生季 CH_4 排放量少,约占两季总排放的 8%—10%。全观测期内 SR-RR 处理两季的 CH_4 排放总量为 103—306 kg/hm^2,比 SR 处理的单季排放量高 11%—16%(P>0.05)。SR-RR 处理两季稻谷总产量为 10.2—10.4 t/hm^2,比 SR 处理高出 19%—22%(P<0.05)。SR-RR 处理单位产量的 CH_4 排放量为 9.9—30.1 kg/t、,比 SR 处理减少 6%(P<0.05)。覆膜条件下种植再生稻,可保证水稻高产稳产,减少单位产量的 CH_4 排放量,值得推广。

关键词:再生稻;CH_4 排放;地膜覆盖;稻田;产量

Effects of plastic film mulching cultivation of ratoon rice on CH_4 emissions in the hilly area of central Sichuan

SONG Kaifu[1,2], YANG Yuting[1,2], YU Haiyang[1,2], ZHANG Guangbin[1], XU Hua[1], LV Shihua[1], 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 investigate the effects of plastic film mulching (PM) of ratoon rice on CH_4 emissions, CH_4 fluxes from ratoon paddy fields under PM in the hilly area of central Sichuan in 2016 and 2017 were observed by static chamber-gas chromatography. The experiment was conducted with two treatments: film mulching single rice (SR) and film mulching ratoon rice (SR-RR). The results showed that the peak of CH_4 emissions appeared earlier in the main crop season in the SR-RR treatment, and CH_4 emissions in the ratoon season was lower, accounting for approximately 8% — 10% of the total amount in the two seasons. The total CH_4 emissions of the SR-RR treatment in the two seasons was 103 — 306 kg/hm^2 during the full observation period, which was 11% — 16% higher than that of the SR treatment (P>0.05). The total yield of the SR-RR treatment during the two rice seasons was 10.2—10.4 t/hm^2, which was 19% —22% (P<0.05) higher than that of the SR treatment. The CH_4 emissions per unit of yield from the SR-RR treatment was 9.9 to 30.1 kgCH_4/t grain, which was 6% lower than that of the SR treatment (P<0.05). Planting ratoon rice under PM can ensure high and stable yield of rice and reduce CH_4 emissions per unit of yield, which is worth popularizing.

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);国家自然科学基金项目(41671241, 41571232);中国科学院南京土壤研究所领域前沿项目(ISSASIP1652, ISSASIP1654)
收稿日期:2018-08-15; **网络出版日期**:2019-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jma@ issas.ac.cn

Key Words: ratoon rice; CH_4 emission; plastic film mulching cultivation; paddy field; 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,导致温室效应的温室气体浓度在大气中不断地增长也越来越受到重视。CH_4是重要的温室气体,对温室效应的贡献达 15%,其增温效应仅次于 CO_2[1]。CH_4在大气中的浓度已由工业革命前的 0.722 μL/L 上升到 2011 年的 1.807 μL/L[2],增幅达 150%。稻田是大气 CH_4的重要排放源,其年排放量约为 33—40 Tg[2]。正确评估稻田 CH_4排放量既能对于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[3]。早在上世纪 30 年代,我国就有关于再生稻的研究报道[4]。据统计,我国南方单季稻作区适宜种植再生稻的面积约 3.3×10^6 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[5]。四川省再生稻种植面积达 2.5×10^5 hm^2左右,然而因干旱等自然灾害限制了再生稻种植面积的进一步扩大,增加了单产的不稳定性。近年来,为应对季节性干旱对水稻造成的严重影响,覆膜技术在川中丘陵区得到广泛应用[6]。

研究表明[7-8]:热量是影响再生稻高产稳产的主要气候因素,膜下 5 cm 土温日平均值比无膜地下 5 cm 土温增高 3.2—5.6 ℃。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。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 CH_4排放规律可能也会发生改变。目前,国际上有关单季稻和双季稻的 CH_4排放研究已有大量文献报道[9-10],但关于头一季与再生季及全生育期的 CH_4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再生稻稻田 CH_4排放通量,旨在探明覆膜再生稻稻田 CH_4排放规律,为准确评估中国稻田的 CH_4排放量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于 2016—2017 年稻季在四川省资阳市雁江区雁江镇响水村(104°34′E,30°05′N)进行。该地区年平均气温 16.8℃,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 g/kg,全氮含量为 2.8 g/kg,土壤 pH 为 7.6。

供试水稻品种为旱优 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 m×5 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。水稻移栽采用三角稀植,行窝距为 40 cm×40 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 穴/m^2。SR 处理所有肥料均作为基肥一次性均匀施于厢面上,水稻生长期间不进行追肥,同时在厢面上均匀覆盖 0.004 mm 厚超微薄膜,地膜紧贴厢面泥土平铺压实,保留到水稻收获;SR-RR 处理除施加基肥外,还需施用促芽肥和发苗肥。水分管理为水稻生长期保持厢沟有水,厢面无水。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

CH_4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 cm×40 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 cm×10 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—7 天采一次样,采样时间为上午 9:00—11:00。采样前将密闭箱罩在预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。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 5 cm 处土温。取厢面土样于 105℃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、适当筛除空秕粒除水分后称重,计算水稻产量。降雨量数据来自于四川省资阳市气象局。

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	2016-4-25, 2017-4-26	2016-4-6, 2017-4-10
	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	—	2016-7-19, 2017-7-25　180 kg/hm^2 尿素 Urea
发苗肥 Fertilizer for seed bed	—	2016-8-12, 2017-8-10　150 kg/hm^2 尿素 Urea
育秧 Sprout cultivation	2016-3-27, 2017-3-31	2016-3-11, 2017-3-15
移栽 Transplantation	2016-4-28, 2017-4-29	2016-4-9, 2017-4-13
中稻季收获 Harvest in main crop season	2016-8-20, 2017-8-19	2016-8-10, 2017-8-10
再生季收获 Harvest in ratoon season	—	2016-10-20, 2017-10-27

1.3　样品分析

样品 CH_4 浓度用带氢火焰离子化检测器(FID)的安捷伦气相色谱(Agilent 7890B)测定,柱箱温度 60℃,空气流量 400 ml · min^{-1},氢气燃气流量 45 ml · min^{-1},尾吹气流量 5 ml · min^{-1},载气用氮气,检测器温度 300℃。CH_4 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 CH_4 浓度与时间的关系变化曲线计算 CH_4 排放通量。CH_4 排放通量的公式计算如下[11]:

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

式中,F 为 CH_4 排放通量(mg m^{-2} h^{-1});ρ 为标准状态下 CH_4 密度(0.714 kg/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 CH_4 浓度的变化(μL L^{-1} 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)代表厢面的气体排放通量,通过箱 B 测得的气体排放通量(F_B)代表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[10],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。

CH_4 排放通量用每次观测的 4 个重复的平均值表示,CH_4 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年际差异明显(图 1):2016 和 2017 年水稻生长期的总降雨量分别为 732 和 606 mm,日降雨量为 3.77 和 3.08 mm;2016 年每月都有相当量的降雨,其中 6 和 7 月份降雨量最高,分别是 167 和 211 mm,10 月份降雨最少为 17 mm;与 2016 年相比,2017 年水稻生长期降雨相对较少,5 和 6 月份降雨量仅为 32 和 79 mm。2016 年最大土壤含水率为 109.2%(7 月 5 日),最小土壤含水率为 66.1%(8 月 23 日),水稻

生长期平均含水率为 82.0%;2017 年最大土壤含水率为 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%。

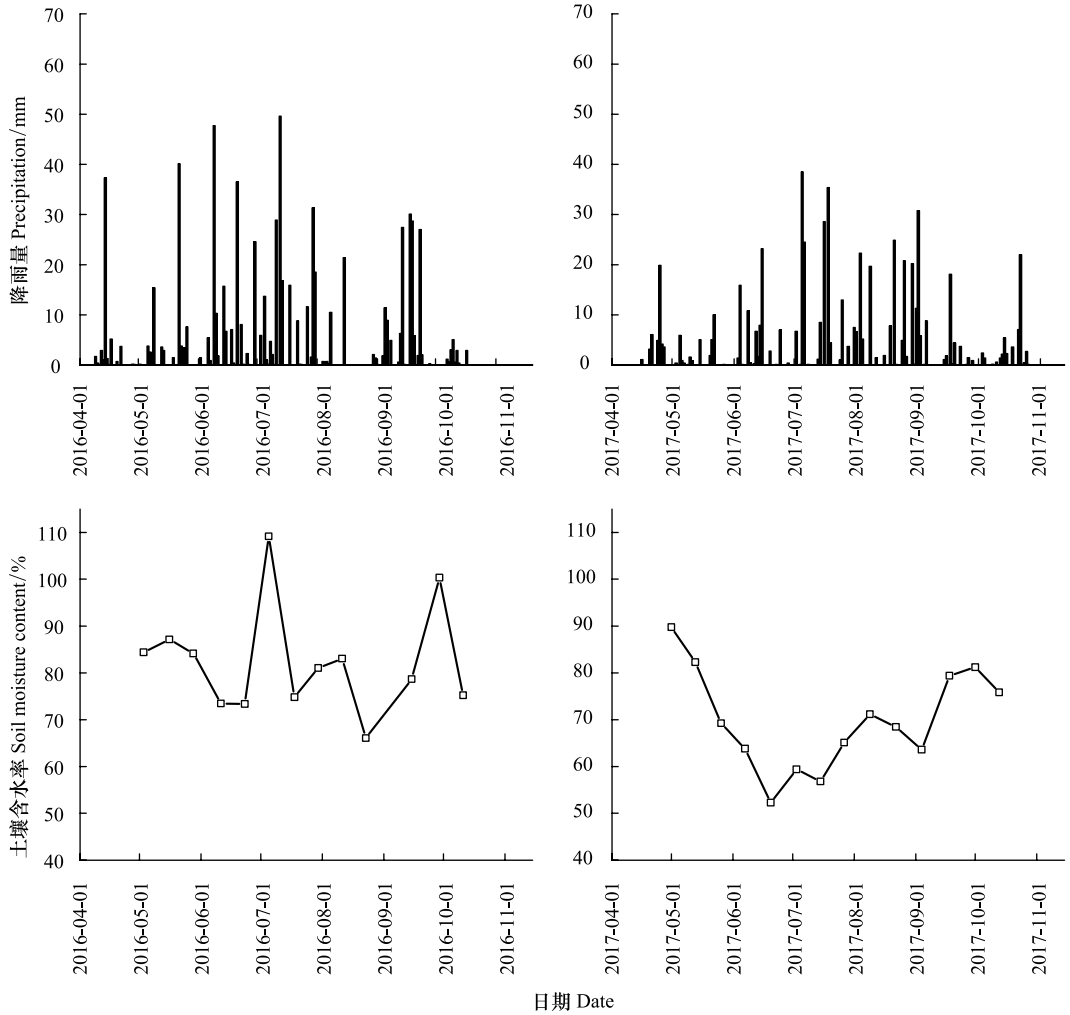

图 1 水稻生长期降雨量和土壤含水率的季节变化

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

2.2 稻田 CH_4排放

稻田 CH_4排放通量的季节变化如图 2a、2b 所示,2016 年 CH_4排放通量明显大于 2017 年,可能是由于降雨量年际变化较大的原因。2016 年,SR 处理 CH_4排放通量在水稻移栽后 18 天内稳定在 2.2—3.9 mg m^{-2} h^{-1}范围内;之后逐渐上升,于 6 月 23 日达到排放最高峰 33.0 mg m^{-2} h^{-1},然后在 4 天内迅速下降到最高峰值的一半左右;拔节孕穗期及抽穗成熟期 CH_4排放通量分别在 9.5—16.2 mg m^{-2} h^{-1}和 5.2—13.4 mg m^{-2} h^{-1}范围内波动(图 2a)。2017 年,SR 处理 CH_4排放通量在水稻移栽后缓慢上升,于 5 月 26 日达到排放最高峰 9.4 mg m^{-2} h^{-1},之后 4 天内快速下降到 2.0 mg m^{-2} h^{-1};水稻生长后半期 CH_4排放通量在 0.9—3.9 mg m^{-2} h^{-1}范围内波动(图 2b)。与 2016 年相比,2017 年 5、6 月份降雨量明显减少,CH_4排放最高峰出现时间比 2016 年提前了一个月,其值也明显低于 2016 年的最高峰值;2017 年水稻分蘖盛期、拔节孕穗期及抽穗成熟期的 CH_4排放通量均小于 2016 年同时期的 CH_4排放通量(图 2a、2b)。

SR-RR 处理 CH_4排放通量的季节变化规律不同于 SR 处理。2016 年,SR-RR 处理水稻移栽后即观测到 7.7 mg m^{-2} h^{-1}的 CH_4排放,略高于 SR 处理在水稻移栽时的 CH_4排放通量;之后 SR-RR 处理 CH_4排放通量在 3.1—15.7 mg m^{-2} h^{-1}之间波动,于 6 月 15 日达到 CH_4排放最高峰 16.6 mg m^{-2} h^{-1},比 SR 处理最高峰值出现时间

提前 8 天,且此峰值仅为 SR 处理 CH_4 排放最高峰值的一半;SR-RR 处理头季稻的抽穗成熟期 CH_4 排放通量在 6.6—12.9 mg m^{-2} h^{-1}范围内波动,略高于 SR 处理相应生育期内的 CH_4 排放通量;头季稻收获后 21 天内,SR-RR 处理 CH_4 排放通量先从 9.1 mg m^{-2} h^{-1}略微上升到 9.6 mg m^{-2} h^{-1},再迅速下降到 0.1 mg m^{-2} h^{-1},之后一直在 0.1—0.4 mg m^{-2} h^{-1}范围内波动,直至再生季收获(图 2a)。与 2016 年不同,2017 年 SR-RR 处理 CH_4 排放主要集中在头季稻生长前期,5 月 9 日即达到 CH_4 排放最高峰 19.8 mg m^{-2} h^{-1},此最高峰出现时间比 SR 处理提前 17 天,且峰值高一倍;尽管水稻移栽后短时间内 SR-RR 处理出现很高的 CH_4 排放通量,但其头季稻的生长后半期的 CH_4 排放通量仅在 0.2—1.5 mg m^{-2} h^{-1}范围内变化,远低于 SR 处理相应生育期内的 CH_4 排放通量;SR-RR 处理再生季初期的 CH_4 排放通量由 0.3 mg m^{-2} h^{-1}上升到 1.6 mg m^{-2} h^{-1}再下降到 0.7 mg m^{-2} h^{-1},之后大部分时间在 0.1—0.7 mg m^{-2} h^{-1}范围内波动(图 2b)。

由表 2 可知:SR-RR 和 SR 处理中稻季的 CH_4 排放量相当(P>0.05),SR-RR 处理再生季的 CH_4 排放量约占两季总排放的 8—10%,SR-RR 处理两季的 CH_4 排放总量比 SR 处理的单季排放量高 11%—16%(P>0.05)。

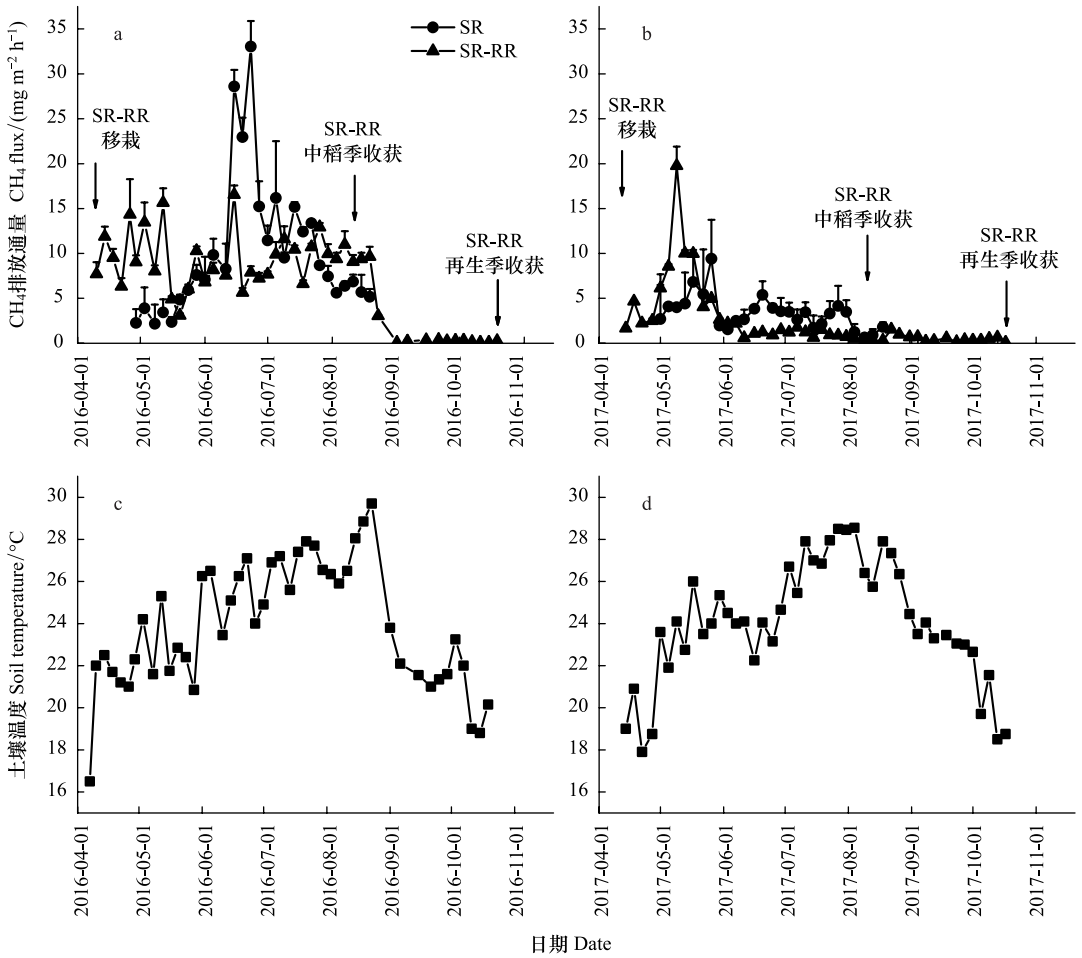

图 2　稻田 CH_4 排放通量和土壤温度的季节变化

Fig.2　Seasonal variation of CH_4 fluxes and soil temperature in rice paddy field

2.3　水稻产量及单位产量的 CH_4 排放量

2016 年,SR-RR 处理中稻季的稻谷产量明显高于 SR 处理(P<0.05),SR-RR 处理再生季稻谷产量为 1.10 t/hm^2,占两季总产的 11%,SR-RR 处理两季稻谷总产量比 SR 处理高 19%(P<0.05),单位产量的 CH_4 排放量减少 6%(P>0.05,表 2)。2017 年,SR-RR 处理中稻季稻谷产量与 SR 处理相当(P>0.05),SR-RR 处理再生季稻谷产量为 1.89 t/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 CH_4 排放量减少 6%($P<0.05$,表 2)。

表 2 CH_4 排放量、水稻产量及单位产量的 CH_4 排放量

Table 2 Total CH_4 emissions, rice grain yield and CH_4 emissions per unit yield

年份 Years	处理 Treatments	中稻季 Main crop season		再生季 Ratoon season		中稻季+再生季 Main crop season +Ratoon season		单位产量的 CH_4 排放量 CH_4 emissions per unit yield/ $kgCH_4$/t grain
		CH_4 排放量 CH_4 emissions/ (kg/hm^2)	水稻产量 Rice yield/ (t/hm^2)	CH_4 排放量 CH_4 emissions/ (kg/hm^2)	水稻产量 Rice yield/ (t/hm^2)	CH_4 排放量 CH_4 emissions/ (kg/hm^2)	水稻产量 Rice yield/ (t/hm^2)	
2016	SR	275±20a	8.58±0.12b	—	—	275±20a	8.58±0.12b	32.0±0.31a
	SR-RR	276±21a	9.08±0.30a	30.4±3.1	1.10±0.07	306±29a	10.17±0.37a	30.1±2.88a
2017	SR	89±1a	8.52±0.14a	—	—	89±1b	8.52±0.14b	10.5±0.04a
	SR-RR	95±2a	8.54±0.07a	8.4±2.6	1.89±0.13	103±1a	10.43±0.06a	9.9±0.01b

同一列不同小写字母表示同年处理间存在显著性差异($P<0.05$)

两因素方差分析的结果表明,除了水稻产量外,稻田 CH_4 排放量和单位产量的 CH_4 排放量均存在明显的年际差异,其中 2017 年 CH_4 排放量和单位产量的 CH_4 排放量显著低于 2016 年。两处理间的 CH_4 排放量和水稻产量均表现为差异性显著,SR-RR 处理的两季 CH_4 排放量和水稻总产分别显著高于 SR 处理单季中稻 CH_4 排放量和水稻产量,且处理与年份之间无交互效应(表 3)。

表 3 处理和年份对 CH_4 排放量、水稻产量及单位产量 CH_4 排放量影响的两因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA of treatment (T) and year (Y) for the effects on CH_4 emissions, rice grain yield and CH_4 emissions per unit yield

因子 Factors	自由度 *df*	CH_4 排放量 CH_4 emissions/kg/hm^2			水稻产量 Rice yield/t/hm^2			单位产量的 CH_4 排放量 CH_4 emissions per unit yield /($kgCH_4$/t grain)		
		ss	F	P	ss	F	P	ss	F	P
处理 T	1	1524.38	7.41	0.03	9.21	409.42	0.00	4.95	4.71	0.06
年份 Y	1	113271.07	550.68	0.00	0.03	1.29	0.29	1305.63	1240.62	0.00
处理×年份 T×Y	1	240.58	1.17	0.31	0.08	3.35	0.11	1.31	1.25	0.30
模型 Model	3	115036.03	186.42	0.00	9.31	138.02	0.00	1311.89	415.53	0.00
误差 Error	8	1645.56			0.18			8.42		

2.4 土壤温度

图 2c 和 2d 为 2016 和 2017 年水稻生长期厢面 5 cm 深处土壤温度的季节变化:两年的结果均表明,全观测期内土壤温度有先升后降的趋势,最高温度分别出现在 2016 年 8 月 23 日和 2017 年 8 月 4 日,分别为 29.7℃和 28.6℃;再生季的前 7—12 天,土壤温度略微上升了 3℃左右,之后迅速下降,后期的大部分时间保持在 20℃左右。SR-RR 处理中稻季和再生季的平均土温分别为 24.4—24.6℃和 22.9—23.6℃,SR 处理水稻生长期的平均土温为 24.9—25.3℃。

相关分析表明,2016 年 SR-RR 处理再生季的 CH_4 排放通量与 5 cm 处土温显著正相关($P<0.05$)。2017 年的 CH_4 排放通量与土壤温度无显著相关性($P>0.05$)。

表 4 水稻生长期 CH_4 排放通量与土壤温度的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of CH_4 fluxes with soil temperature during rice growing period

年份 Years	处理 Treatments	相关系数 Correlation coefficients	
		中稻季 Main crop season	再生季 Ratoon season
2016	SR	0.315	—
	SR-RR	0.162	0.792**
2017	SR	−0.327	—
	SR-RR	−0.204	0.424

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

3　讨论

稻田 CH_4 排放存在较大的年际变化,2017 年的 CH_4 排放总量比 2016 年少 66%左右(表 2)。而以往覆膜稻田的研究结果[12-15]也表明,CH_4 排放年际差异最大可达 4 倍。水分对稻田 CH_4 的产生起着决定性的作用,CH_4 产生所需的厌氧环境在很大程度上取决于土壤水分状况[16]。土壤水分直接影响土壤通透性、呼吸作用,氧化还原电位、土壤有机物分解随之发生变化[17]。只有当水分阻止了氧的扩散从而形成严格厌氧环境时,才能产生 CH_4。本试验中 CH_4 排放的年际差异主要受土壤水分含量的影响,而土壤水分含量一般受降雨量的控制,由降雨导致的土壤水分变化可以促进覆膜稻田 CH_4 排放,有研究表明,土壤 CH_4 的产生量随土壤水分含量的增加而增加[16-18]。2016 年降雨多于 2017 年,尤其是 5、6 月份(图 1),相应地,2016 年土壤含水率明显高于 2017 年(图 1),从而,2016 年的 CH_4 排放量大于 2017 年。CH_4 的产生是在极端厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果[19-21],较大的土壤含水率可为稻田 CH_4 的产生和排放创造良好的环境条件。

土壤温度是影响稻田 CH_4 排放季节变化的重要因素之一[22],当不存在稻田 CH_4 排放的其他限制因子时,在 18—31℃范围内,稻田 CH_4 排放量随土壤温度的升高而增大[23]。徐华等[24]认为土壤产甲烷菌活性、土壤有机质分解速率、土壤 CH_4 产生和向大气传输速率皆随土壤温度的升高而增加。有关土壤温度对稻田 CH_4 排放季节变化的影响报道不一,另一些研究未观测到整个水稻生长期土壤温度与稻田 CH_4 排放通量的相关性[25-26]。本试验中除 2016 年再生季 CH_4 排放通量与土壤温度呈显著正相关外,其他水稻生长季均未观测到 CH_4 排放通量与土壤温度的显著相关性,可能存在影响稻田 CH_4 排放的其他限制因子。

再生稻的种植改变了覆膜稻田中稻季的 CH_4 排放规律(图 2a、2b)。与 SR 处理相比,SR-RR 处理水稻的插秧时间提前 16—19 天(表 1),其 CH_4 排放最高峰出现的时间也相应提前 8—17 天(图 2)。单季稻 CH_4 排放最高峰通常出现在水稻分蘖拔节期[27-29]。2016 年,SR 处理 CH_4 排放最高峰值相当于 SR-RR 处理的两倍左右,整个稻季 CH_4 排放通量的变化幅度为 31 mg m^{-2} h^{-1}(图 2)。有研究表明[12-15],覆膜稻田的 CH_4 排放最高峰值在 9—24 mg m^{-2} h^{-1}范围内,CH_4 排放季节变化幅度为 9—24 mg m^{-2} h^{-1}。与以往覆膜稻田研究结果相比,中稻-再生稻头季的 CH_4 排放比较稳定,最高峰值为 17—20 mg m^{-2} h^{-1},季节变化幅度为 13—20 mg m^{-2} h^{-1}(图 2)。

SR-RR 处理再生季的生育期为 71—78 天(表 1),约为头季生育期的 47%—53%;而再生季的 CH_4 排放量为 8.4—30.4 kg/hm^2(表 2),仅为头季稻 CH_4 排放量的 9%—11%。中稻-再生稻的再生季 CH_4 排放量较少,这很可能与再生季土壤温度下降和水稻植株的生物量有关。我们 2016 年的研究结果表明,SR-RR 处理再生季的土壤温度先上升再下降,大部分时间保持在 20℃左右(图 2c);相应地,再生季的 CH_4 排放通量也呈先升后降趋势,大部分时间保持在较低水平(图 2a);再生季的 CH_4 排放通量与土壤温度呈显著正相关(表 3)。2017 年也观测到 SR-RR 处理再生季的 CH_4 排放通量与土温同时出现先升后降趋势(图 2b、2d),但可能由于 2017 年水分的影响更大,所以两者未呈现显著相关性(表 3)。此外,再生季水稻植株生物量的减少极有可能影响稻田 CH_4 排放量。大量研究表明水稻植株是 CH_4 传输的主要途径[30-33],CH_4 排放与水稻植株高度呈正比[34]。再生稻是利用头季稻收割后稻桩上存活的休眠芽再生形成的一季水稻,再萌发的水稻植株矮于头季稻[35-37],生物量明显减少[38-39],通过植株排放的 CH_4 也相应较少。

覆膜稻田在四川省被推广应用面积达 70000hm^2[12],以本试验得到的增产效果和 CH_4 排放量进行初步估算,相对于常规覆膜栽培而言,中稻-再生稻完全替代单季稻可使四川省每年水稻增产 1.1×10^5—1.3×10^5 t,同时增加水稻生长期 CH_4 排放 1.0—2.2 Gg。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,使得原来不适合种植再生稻的地区成为了可能。廖必长、丰大清等[40-41]研究表明,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,覆膜条件下种植再生稻,不仅可以保证水稻高产稳产(增产 19%—22%),同时减少 6%的单位产量的 CH_4 排放量。综

合来看,全球气候变暖愈演愈烈,我国春旱日益严重,覆膜条件下种植再生稻可以达到节水、抗旱、增产、减排的良好效果,是一种十分值得推广的水稻种植模式。

4 结论

与覆膜单季稻相比,覆膜中稻-再生稻的整个中稻季稻田 CH_4 排放比较平稳,提前出现 CH_4 排放高峰,排放总量与常规覆膜水稻相当;再生季 CH_4 排放量少,大部分时间维持在较低的水平。中稻-再生稻两季稻谷总产显著高于常规覆膜水稻,其 CH_4 排放总量也比常规覆膜水稻高,但其单位产量的 CH_4 排放量显著小于常规覆膜水稻。综合来看,覆膜条件下种植再生稻不但能保证水稻高产稳产,还可以减少单位产量的 CH_4 排放量,具有一定推广应用前景,是值得推荐的水稻栽培方式。

参考文献(References):

[1] Hansen J E, Lacis A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change. Nature, 1990, 346(6286): 713-719.

[2] IPCC. Summary for policymarkers//-Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013

[3] 熊洪, 冉茂林, 徐富贤, 洪松. 南方稻区再生稻研究进展及发展. 作物学报, 2000, 26(3): 297-304.

[4] 孙晓辉. 再生稻研究和生产的情况及趋势. 耕作与栽培, 1991, (5): 1-3, 6-6.

[5] 徐富贤, 熊洪, 张林, 朱永川, 蒋鹏, 郭晓艺, 刘茂. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1702-1717.

[6] 吕世华, 曾祥忠, 任光俊, 张福锁. 水稻覆膜节水综合高产技术. 四川农业科技, 2009, (2): 23-24.

[7] 李义珍, 黄育民, 陈子聪, 蔡亚港, 黄海明. 再生稻丰产技术研究. 福建省农科院学报, 1991, 6(1): 1-12.

[8] 王友贞, 袁先江, 许浒, 曹秀清. 水稻旱作覆膜的增温保墒效果及其对生育性状影响研究. 农业工程学报, 2002, 18(2): 29-31.

[9] Yang Y T, Huang Q, Yu H Y, Song K F, Ma J, Xu H, Zhang G B. Winter tillage with the incorporation of stubble reduces the net global warming potential and greenhouse gas intensity of double-cropping rice fields. Soil and Tillage Research, 2018, 183:19-27.

[10] Zou, J W, Huang Y, Jiang, J Y, Zheng X H, Sass R L. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(2): GB2021-.

[11] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 106-142.

[12] 张怡, 吕世华, 马静, 徐华, 袁江, 董瑜皎. 水稻覆膜节水综合高产技术对稻田 CH_4 排放的影响. 生态环境学报, 2013, 22(6): 935-941.

[13] 张怡, 吕世华, 马静, 徐华, 袁江, 董瑜皎. 冬季水分管理和水稻覆膜栽培对川中丘陵地区冬水田 CH_4 排放的影响. 生态学报, 2016, 36(4): 1095-1103.

[14] Zhang G B, Ma J, Yang Y T, Yu H Y, Song K F, Dong Y J, Lv S H, Xu H. Achieving low methane and nitrous oxide emissions with high economic incomes in a rice-based cropping system. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259, 95-106.

[15] 于海洋, 杨玉婷, 马静, 徐华, 吕世华, 袁江, 董瑜皎. 硝化抑制剂对覆膜稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 生态环境学报, 2017, 26(3): 461-467.

[16] 颜晓元, 蔡祖聪. 淹水土壤中甲烷产生的影响因素研究进展. 环境科学进展, 1996, 4(2): 24-32.

[17] 刘芳, 李天安, 樊小林. 华南地区覆膜旱种稻田甲烷排放及其与土壤水分和温度的关系. 农业工程学报, 2013, 29(2): 110-116.

[18] Xu Y C, Shen Q R, Li M L, Dittert K, Sattelmacher B. Effect of soil water status and mulching on N_2O and CH_4 emission from lowland rice field in China. Biology and Fertility of Soils, 2004, 39(3): 215-217.

[19] 李茂柏, 张建明, 程灿, 曹黎明. 稻田甲烷排放影响因素及减排措施研究进展. 上海农业学报, 2010, 26(3): 118-121.

[20] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 王明星. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展. 土壤通报, 2004, 35(5): 663-669.

[21] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理. 大气科学, 1998, 22(4): 600-612.

[22] 孙会峰, 周胜, 付子轼, 陈桂发, 刘国兰, 宋祥甫. 高温少雨对不同品种水稻 CH_4 和 N_2O 排放量及产量的影响. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3540-3547.

[23] Khalil M A K, Rasmussen R A, Wang M X, Ren L X. Methane emissions from rice fields in China. Environmental Science and Technology, 1991, 25(5):979-981.

[24] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 土壤 Eh 和温度对稻田甲烷排放季节变化的影响. 农业环境科学学报, 1999, 18(4): 145-149.

[25] Cicerone R J, Shetter J D, Delwiche C C. Seasonal variation of methane flux from a California rice paddy. Journal of Geophysical Research Oceans,

1983, 88(C15):11022-11024.

[26] Lindau C W, Bollich P K, Delaune R D, Patrick Jr W H, Law V J. Effect of urea fertilizer and environmental factors on CH_4 emissions from a Louisiana, USA rice field. Plant and Soil, 1991, 136(2):195-203.

[27] 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈壬兴, 上官行健, Kogge M, Heyer J, Papen H, 金继生, 李老土. 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放. 大气科学, 1997, 21(2): 231-237.

[28] Cai Z C, Xing G X, Shen G Y, Xu H, Yan X Y, Tsuruta H, Yagi K, Minami K. Measurements of CH_4 and N_2O emissions from rice paddies in Fengqiu, China. Soil Science and Plant Nutrition, 1999, 45(1): 1-13.

[29] 马二登, 马静, 徐华, 蔡祖聪, 八木一行. 麦季稻秆还田方式对后续稻季 CH_4 排放的影响. 生态环境学报, 2010, 19(3): 729-732.

[30] Hosono T. Studies on methane flux from rice paddies and the mechanism of methane emission through rice plants. Tsukuba, Ibaraki: National Institute of Agro-Environmental Sciences, 2000.

[31] Holzapfelpschorn A, Conrad R, Seiler W. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil. Plant and Soil, 1986, 92(2): 223-233.

[32] Tokida T, Cheng W G, Adachi M, Matsunami T, Nakamura H, Okada M, Hasegawa T. The contribution of entrapped gas bubbles to the soil methane pool and their role in methane emission from rice paddy soil in free-air [CO_2] enrichment and soil warming experiments. Plant and Soil, 2013, 364(1/-2): 131-143.

[33] Zhang G B, Yu H Y, Fan X F, Ma J, Xu H. Carbon isotope fractionation reveals distinct process of CH_4 emission from different compartments of paddy ecosystem. Scientific Reports, 2016, 6: 27065.

[34] Ding A, Willis C R, Sass R L, Fisher F M. Methane emissions from rice fields: Effect of plant height among several rice cultivars. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13(4): 1045-1052.

[35] 王记安, 高长清, 谢春甫, 刘红萍, 刘华曙, 刘长兵,汪新胜,乐菊,汤汉华,林忠辉,王伟刚,郑明,李拥军. Y 两优 2 号在孝感作再生稻栽培表现及高产栽培技术. 杂交水稻, 2014, 29(4): 33-35.

[36] 黄志刚, 屠乃美, 江巨鳌, 秦鹏, 黄泽春. 留桩高度对培两优 210 再生稻产量和源库性状的影响. 生态学报, 2009, 29(8): 4572-4579.

[37] 傅志伟. '晶两优华占'作机收再生稻高产栽培技术. 福建农业科技, 2017, (7): 29-30.

[38] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, Wu P P, Liu J J, Xu Y C, Shen Q R, Zou J W, Guo S W. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments. Global Change Biology, 2011, 17(6): 2196-2210.

[39] Huang Y, Sass R, Fisher F. Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH_4 emission. Global Change Biology, 1997, 3(6): 491-500.

[40] 丰大清, 刘祥臣, 乔利, 李彦婷, 赵海英, 余贵龙, 黄华, 刘明成, 许金友, 范学军. 降解地膜与控释肥对再生稻生长及产量的影响. 中国农学通报, 2017, 33(3): 1-7.

[41] 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. 耕作与栽培, 2001, (5): 25-26.