环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.9
第40卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第9期
2019年9月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第9期 2019年9月
Vol. 40, No. 9 Sep., 2019

地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响

陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊*
(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 以位于西南大学农业部重庆紫色土生态环境重点野外科学观测试验站内的稻-油轮作为研究对象, 采用静态箱/气相色谱法, 对覆膜和对照(不覆膜)处理下稻油轮作 CO_2、CH_4 和N_2O排放特征进行了为期 1 a 的原位观测. 结果表明, 稻-油轮作农田 CO_2、CH_4 和N_2O排放通量均呈现出明显的季节变化, 且 2 种处理下这 3 种温室气体的季节变化模式相似. 覆膜处理下稻-油轮作农田全年 CH_4 排放量为$(46.14 \pm 13.40)\ kg \cdot hm^{-2}$, 相比于对照处理下的$(18.61 \pm 2.05)\ kg \cdot hm^{-2}$, 提高了 147.93% ($P < 0.05$), 但覆膜对 CO_2 和N_2O的排放影响并不显著, 覆膜及对照处理下 CO_2 年排放量分别是$(-47.54 \pm 2.11)\ t \cdot hm^{-2}$和$(-47.60 \pm 2.19)\ t \cdot hm^{-2}$, N_2O年排放量分别是$(18.94 \pm 4.74)\ kg \cdot hm^{-2}$和$(23.14 \pm 3.68)\ kg \cdot hm^{-2}$. 覆膜和对照处理下 GWP 值分别为 $-41.16\ t \cdot hm^{-2}$和 $-40.95\ t \cdot hm^{-2}$, 表现为大气温室气体的吸收汇, 但差异并不显著.

关键词: 稻-油轮作; 地膜覆盖; 温室气体; 排放通量; 全球增温潜势(GWP)
中图分类号: X144; X16 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)09-4213-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201901037

Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland

CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, LI Xiao-xi, HAO Qing-ju*
(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: A field experiment was conducted at the Key Field Station for Monitoring of Eco-Environment of Purple Soil of the Ministry of Agriculture of China at the farm of Southwest University in Chongqing. In the study, static chamber and gas chromatography methods were used to study the effects of plastic film mulching treatment on CO_2, CH_4, and N_2O emissions from rice-rapeseed rotation in situ for one year. A control experiment was also conducted without using the film. The CO_2, CH_4, and N_2O emission fluxes of the rotation showed obvious seasonal changes, and the seasonal variation patterns of these three greenhouse gases were similar under the two treatments. The CH_4 emission of the rotation under the plastic film mulching treatment was $(46.14 \pm 13.40)\ kg \cdot hm^{-2}$, or 147.93% ($P < 0.05$), compared with $(18.61 \pm 2.05)\ kg \cdot hm^{-2}$ for the control. However, the impact of plastic film mulching on CO_2 and N_2O emissions was not significant. The annual CO_2 emissions under the plastic film treatment and the control were $(-47.54 \pm 2.11)\ t \cdot hm^{-2}$ and $(-47.60 \pm 2.19)\ t \cdot hm^{-2}$, respectively, and the annual emissions of N_2O were $(18.94 \pm 4.74)\ kg \cdot hm^{-2}$ and $(23.14 \pm 3.68)\ kg \cdot hm^{-2}$, respectively. The rice-rapeseed rotation in the two experiments showed absorption and sinking of atmospheric greenhouse gases, although the difference was not significant. The global warming potential (GWP) values with the plastic film treatment and the control were $-41.16\ t \cdot hm^{-2}$ and $-40.95\ t \cdot hm^{-2}$, respectively.

Key words: rice-rapeseed rotation; plastic film mulching; greenhouse gas; flux; global warming potential (GWP)

随着大气温室气体浓度的不断升高, 特别是 CO_2、CH_4 和N_2O浓度的增加, 全球气温不断攀升, 并成为当今全球面临的一个重大挑战, 因此如何采取有效的温室气体减排措施也成为了当今各国学者的研究重点和热点[1]. 农田作为大气温室气体的一个重要排放源, 开展如何减少农田温室气体的排放研究具有重要意义[2].

覆膜是一种常用的农业管理措施, 已经被广泛应用于各种农业生产活动中. 目前已有大量研究报道了覆膜的优点, 如抑制杂草生长, 控制植物营养素的浸出[3], 提高土壤温度和土壤含水率, 降低土壤表面水分蒸发[4], 改善土壤营养元素的可利用性[5], 促进作物生长和提高作物产量等[6], 而土壤环境的改变可能会影响温室气体的产生和排放, 但目前国内外有关覆膜对农田温室气体排放的影响研究还较为少见[3,7]. 在我国, 有关覆膜对农田温室气体排放的影响研究主要集中在西北干旱和半干旱地区[7,8], 而在西南地区有关覆膜对农田温室气体排放的影响还鲜见报道[9]. 已有的研究报道有关覆膜对农田温室气体排放的影响并不完全一致, 有研究表明覆膜提高了旱地N_2O和 CH_4 的排放[3,7,8], 但也有研究表明覆膜降低了旱地 CO_2、N_2O或水田 CH_4 的排放[10~12]. 因此, 本文以西南地区典型稻-油轮作体系为研究对象, 探索地膜覆盖对稻田 CO_2、CH_4 和N_2O排放的影响, 以期为合理减排西南地区稻-油轮作温室气体提供更多的理论依据.

收稿日期: 2019-01-04; **修订日期**: 2019-04-14
基金项目: 重庆市基础研究与前沿探索专项(cstc2018jcyjAX0476); 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095)
作者简介: 陈世杰(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环, E-mail: 1334474898@qq.com
* 通信作者, E-mail: haoqingju@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验区位于西南大学重庆紫色土研究基地(东经106°26′,北纬30°26′,海拔230 m),该区域是典型的亚热带季风湿润气候;实验期间(2015-05~2016-04)气温和降水见图1,实验观测期间降水量为917.13 mm,主要集中在5~9月,占全年降水的76.70%;日均气温为0.27~32.50℃,年均气温为18.39℃,最高气温出现在8月,最低气温出现在1月.年均日照为1 276.7 h,年均无霜期为334 d.土壤是紫色砂岩岩石母质上发育的中性紫色水稻土,土壤基本理化性质为:pH 6.83,有机质23.51 $g\cdot kg^{-1}$,总氮0.57 $g\cdot kg^{-1}$,碱解氮78.61 $mg\cdot kg^{-1}$,全磷521.91 $mg\cdot kg^{-1}$,有效磷8.39 $mg\cdot kg^{-1}$,全钾8.40 $g\cdot kg^{-1}$,总磷65.46 $mg\cdot kg^{-1}$.

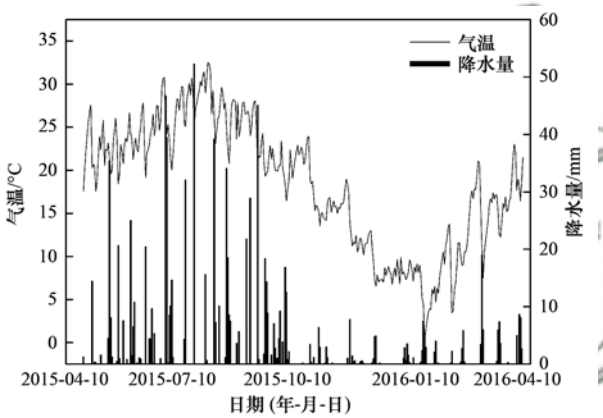


图1 日平均气温和降雨量的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes in daily for precipitation and daily mean air temperature

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

本实验进行了为期1 a(2015-05~2016-04)的观测,设有覆膜和不覆膜(对照)两种处理,并分别设置3个重复.在实验前先将小区内的土壤深翻3遍,并平整地块,垄长2.5 m,垄宽0.8 m,高0.15 m,垄间距为0.3 m.覆膜处理采用一整块0.005 mm厚聚乙烯透明膜覆盖在实验区,然后在每个垄面四周用泥土压实,水稻和油菜的生育期均全程覆盖,在休闲期则是收割水稻后没有将地膜移出稻田,等到油菜季对稻田进行翻耕时才移出地膜.2015年4月22日,对实验小区依次进行翻耕、施肥、覆膜和蓄水之后,在每个小区的中间两垄上分别按"品"字型埋入3个长50 cm,宽50 cm,高20 cm的不锈钢底座(水稻季底座内栽培4窝水稻,每窝两株;油菜季底座内栽培两窝油菜,每窝1株),底座上端有宽、深各3 cm的密封水槽.2015年4月22日,对实验小区依次进行翻耕、施肥、覆膜、蓄水之后,在每个小区的中间两垄上分别按"品"字型埋入3个长50 cm,宽50 cm,高20 cm的不锈钢底座(水稻季底座内栽培4窝水稻,每窝两株;油菜季底座内栽培两窝油菜,每窝1株),底座上端有宽、深各3 cm的密封水槽.已有研究表明,垄上是温室气体主要排放源,占据了温室气体排放量的80%~90%,而垄间温室气体排放量较少[12,13];另外由于本研究的采样箱底座尺寸为50 cm×50 cm×20 cm,而本研究根据当地的耕作方式,垄沟只有30 cm宽,不足以放置采样箱底座,因而未在垄沟放置采样箱.覆膜处理的实验小区在埋设底座时,先将地膜铺好,然后将需要埋设底座的地方留褶并在四周挖深约20 cm的细沟,将留有多余的地膜小心整理放入细沟,然后小心将底座压在地膜上,用土壤将底座周围压实,同时底座中央在覆膜前也需要多堆放一定的土,待底座放好后,隔着地膜将底座内土推平,使底座与垄面齐平.在水稻(或油菜)种植后,用适量的土壤将覆膜的破口处封住,垄面地膜(含底座内)除每窝水稻(或油菜)处留有十字小口以外,其余地方均保持平整完好,直到作物换茬时,重新将小区内土壤翻耕,并按照前面的方法铺设地膜.2015年4月24日移栽长势均匀的水稻幼苗,移栽行间距为25 cm×20 cm;2015年8月2日,收割水稻.2015年10月24日,对稻田进行翻耕(稻茬还田)、施肥、覆膜以及安放底座,覆膜和安放底座均与移栽水稻的操作一致.2015年10月25日移栽长势均匀的油菜幼苗,移栽行间距为25 cm×30 cm;2016年4月11号收割油菜.水稻和油菜季均以尿素作为氮肥、过磷酸钙作为磷肥、氯化钾作为钾肥,按照本地的耕作习惯,将3种肥料混合均匀后一次性均匀撒播,施肥量设置为:纯氮200 $kg\cdot hm^{-2}$;P_2O_5 200 $kg\cdot hm^{-2}$;K_2O 100 $kg\cdot hm^{-2}$.

1.2.2 气体采集与分析

本实验采用静态箱法来采集CO_2、N_2O和CH_4气体样品.在利用箱法采集陆地生态系统CH_4和N_2O气体时,为了避免罩箱期间温度过快升高对气体通量的不利影响,通常采用暗箱法[14].而观测的CO_2通量是净交换通量,需要植物同时进行光合作用和呼吸作用,因而应用明箱进行箱内气体的采集[15,16].静态暗箱(图2)设计成分节组合式标准箱,由顶箱,延长箱和底座组成,其顶箱和延长箱均由不锈钢制成,箱体尺寸为50 cm×50 cm×50 cm,同时为防止太阳辐射致使箱内温度升高,在箱

体外面覆盖一层白色棉被. 静态明箱由聚碳酸酯制成的一个整体采样箱(气体采样口位置与带有延长箱的暗箱相同), 尺寸为 50 cm × 50 cm × 100 cm, 与文献[15]中设计的箱体高度(65 cm × 65 cm × 90 cm)相似, 与文献[17, 18]中的设计高度相同. 两种采样法的顶箱上部均安装有两个轴流扇, 用于充分混合箱内气体, 侧面装有电源插头和气体样品采集口. 在进行气体样品采集前先将顶箱安放在不锈钢底座上(在采集N_2O和 CH_4 气体样品时, 视植株的生长情况而适当地增加延长箱), 底座四周的凹槽用水密封. 同时为了避免因过多的人为活动影响实验区环境而影响采样, 因此在采样点周围搭建木桥, 在进行气体样品采集时使用特氟龙 F46 采气管, 站在木桥上进行采样.

CO_2 与N_2O和 CH_4 气体样品在同一天进行采集, 每周采样一次(如遇下雨等天气视情况延期采样时间), 采样时间均为早上 09:00 ~ 11:00, 先使用静态暗箱法采集N_2O和 CH_4 气体, 在 30 min 的时间内每隔 10 min 采集一次样品, 共采集 4 个气体样品[19]. 然后再使用静态明箱法采集 CO_2 气体, 并通过缩短采样时间来消除罩箱期间温度快速升高对 CO_2 通量的不利影响. 由于冬夏季节温度差异较大, 因而在不同季节采用不同的采样时间间隔[16,18,20,21], 夏季每隔 1.5 min 采集一次样品, 冬季每隔 2 min 采集一次样品, 共采集 4 个气体样品. 样品全部采集完成后立即带回实验室, 并在 24 h 之内用 Agilent 7890A 气相色谱仪进行分析测定, CO_2 和 CH_4 用 FID 检测器测定浓度, N_2O用 ECD 检测器测定浓度, 具体分析方法及工作条件参见文献[22].

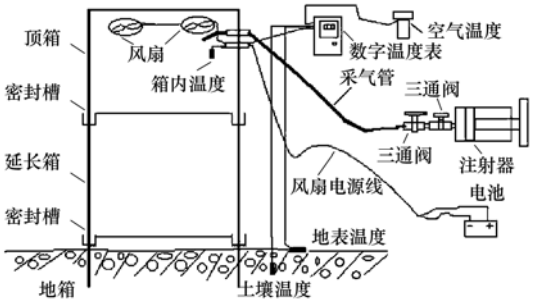


图 2　温室气体采样过程示意

Fig. 2　Greenhouse gas sampling process

1.2.3　气体排放通量及累积排放量

气体排放通量用公式表示:

$$F = H \times \frac{273}{273 + T} \times \frac{p}{p_0} \times \rho \times \frac{d_c}{d_t} \qquad (1)$$

式中, F 为排放通量[CO_2 和 CH_4, $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$; N_2O, $\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$], H 为箱内气体高度(cm), T 为采样期间箱内平均温度(℃), p 为采样时的大气压(Pa), p_0 标准状况下的大气压(Pa), ρ 为被测气体的密度($g \cdot m^{-3}$), dc/dt 为采样期间箱内气体浓度变化速率, 正值代表排放, 负值代表吸收.

通过内插累积法求得N_2O、CO_2 和 CH_4 的季节和全年排放总量[23].

1.2.4　全球增温潜势(GWP)

衡量不同温室气体(GHGs)对全球变暖的相对影响可用全球增温潜势(GWP)来进行估算. IPCC (2013)提供的数据表明, 在 100a 的时间尺度上, CH_4 和N_2O全球增温潜势分别是 CO_2 的 28 和 265 倍(IPCC, 2013).

$$GWP = 28f(CH_4) + 265f(N_2O) + f(CO_2) \qquad (2)$$

式中, $f(CH_4)$为 CH_4 净排放量(kg), $f(N_2O)$为N_2O 净排放量(kg), $f(CO_2)$为 CO_2 净排放量(kg).

1.2.5　数据处理

运用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析, 覆膜及对照处理下N_2O、CO_2 和 CH_4 的排放通量差异显著性采用配对 t 检验分析, 季节排放总量差异采用单因素方差分析.

2　结果与分析

2.1　CO_2 净排放通量的季节变化特征

从全年来看, 覆膜处理和对照处理的 CO_2 排放通量的季节变化趋势基本趋于一致(图 3). 在水稻季, 两种处理的 CO_2 吸收呈现出单峰型的变化趋势, 表现为在水稻生长前期, 吸收量较小; 随着水稻的生长发育和气温的逐渐升高, 吸收量逐渐增大, 在水稻生长后期吸收量又降低, 甚至在对照处理的水稻生长后期还呈现出对大气 CO_2 的净排放. 覆膜处理和对照处理在 7 月对大气 CO_2 的吸收达到最大, 分别为 (−2 347.82 ± 369.55) $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 和 (−1 969.01 ± 228.23) $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$. 在休闲季, 由于收割水稻时先只是将稻穗收割, 而植株依然生长在稻田中, 两周以后再将植株移出, 因此在水稻收割后的两周内, CO_2 排放通量仍然呈现为负值. 在油菜季, 覆膜处理下的 CO_2 的排放通量变化为(−2 110.33 ± 158.12) ~ (270.18 ± 90.83) $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, 对照处理的 CO_2 的排放通量变化为(−2 039.53 ± 89.47) ~ (313.37 ± 58.71) $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$. 两种处理下的 CO_2 排放通量均呈现出脉冲式变化, 在油菜生长前期, CO_2 吸收通量较小, 尔后快速升高, 但在油菜越冬的这段时间, CO_2 吸收通量迅速降低, 甚至还出现弱的净排放, 越冬过后又逐渐升高, 但在油菜生长后期又逐渐减小.

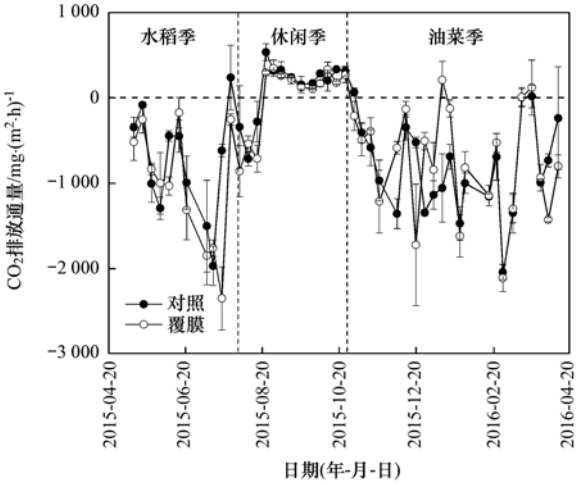
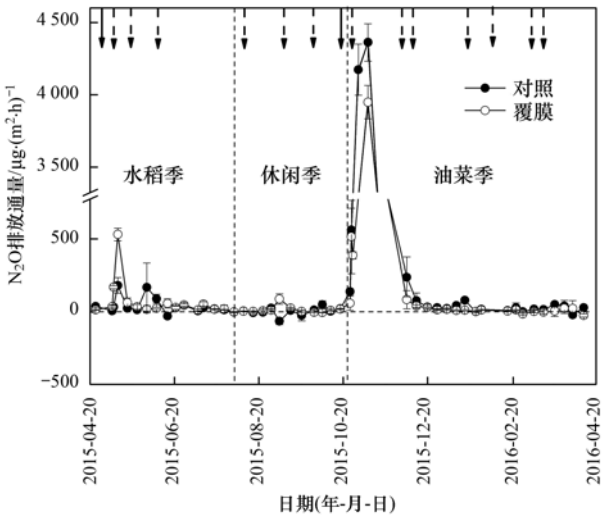


图 3 不同覆膜处理下稻-油轮作农田 CO_2 净排放通量

Fig. 3 Net ecosystem CO_2 exchange from the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

2.2 N_2O排放通量的季节变化特征

从全年来看，两种处理下N_2O通量具有相似的时间变化趋势(图4)，在水稻季和油菜季均呈现为明显的单峰型，且峰值均出现在水稻和油菜生长前期，大约施肥后两周左右. 在水稻季，覆膜及对照处理下，N_2O通量峰值分别为(530.66 ± 43.48) μg·(m²·h)⁻¹和(183.36 ± 53.49) μg·(m²·h)⁻¹，在油菜季，峰值分别为(3 949.25 ± 815.32) μg·(m²·h)⁻¹和(4 362.32 ± 829.45) μg·(m²·h)⁻¹，而在其它时期，N_2O通量都处于一个较低的排放水平，偶尔出现N_2O吸收现象.



实线箭头表示施肥，虚线箭头表示降水

图 4 不同覆膜处理下稻-油轮作农田 N_2O排放通量

Fig. 4 N_2O fluxes from the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

2.3 CH_4 排放通量的季节变化特征

从全年来看，覆膜处理和对照处理下的 CH_4 排放通量季节变化形式基本一致，但覆膜处理下的 CH_4 排放通量高于对照(图5). 在水稻季，覆膜和对照处理下 CH_4 排放通量均呈现双峰型，主峰出现在成熟期，CH_4 通量分别为(1.96 ± 0.64) mg·(m²·h)⁻¹和(0.85 ± 0.31) mg·(m²·h)⁻¹，次峰均出现在分蘖期，CH_4 通量分别为(0.72 ± 0.58) mg·(m²·h)⁻¹和(0.68 ± 0.33) mg·(m²·h)⁻¹. 在休闲期，对照处理下 CH_4 排放通量处于一个较低水平，变化范围为(0.038 ± 0.01) ~ (0.25 ± 0.12) mg·(m²·h)⁻¹，而覆膜处理下 CH_4 排放通量则呈现出一个相对较高的排放水平，变化范围为(0.22 ± 0.04) ~ (1.00 ± 0.25) mg·(m²·h)⁻¹. 在油菜季，在油菜移栽后的第 13 d，覆膜及对照处理均出现一个明显的 CH_4 排放峰，峰值分别为(2.82 ± 0.44) mg·(m²·h)⁻¹和(0.53 ± 0.23) mg·(m²·h)⁻¹，但是对照处理在油菜移栽后的第 83 d 又出现了一个更高的排放峰值(1.13 ± 0.13) mg·(m²·h)⁻¹. 而在油菜的其它生长时期，两种处理 CH_4 排放通量波动较小，排放通量也较低.

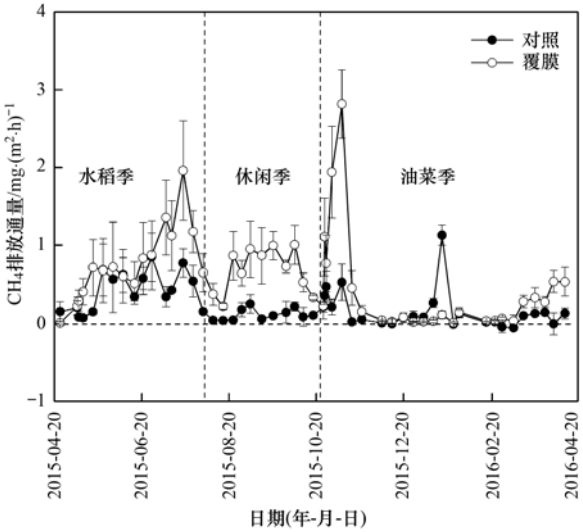


图 5 不同覆膜处理下稻-油轮作农田 CH_4 排放通量

Fig. 5 CH_4 fluxes from the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

2.4 不同时期 CO_2、N_2O和 CH_4 排放总量

不论是在水稻季、休闲季还是油菜季，覆膜和对照处理下 CO_2 及N_2O排放量均无显著性差异($P > 0.05$，表1). 水稻季和油菜季均表现为对大气 CO_2 的吸收，而休闲季则表现为对大气 CO_2 的排放. 在全年时间尺度上，水稻-油菜轮作农田表现为 CO_2 的汇，覆膜和对照处理下年 CO_2 吸收量分别为(47.54 ± 2.11) t·hm⁻²和(47.60 ± 2.19) t·hm⁻². 稻-油轮作农田在水稻季、休闲季和油菜季均表现为对大气N_2O的排放，N_2O的排放主要集中在油菜季，覆膜和对照处理油菜季N_2O的排放分别占全年

排放的 90.50% 和 94.81%. 覆膜和对照处理下 N_2O 年排放量分别为 (18.94 ± 4.74) kg·hm^{-2} 和 (23.14 ± 3.68) kg·hm^{-2}. 同 N_2O 相似，覆膜与对照处理在水稻季、休闲季及油菜季均表现为对大气 CH_4 的排放. 全年 CH_4 排放量分别为 (48.62 ± 15.39) kg·hm^{-2} 和 (18.61 ± 7.05) kg·hm^{-2}. 覆膜较对照处理在水稻季、休闲季、油菜季和全年 CH_4 排放量分别提高了 78.28%、567.09%、147.23% 和 147.93% ($P < 0.05$)，且覆膜处理改变水稻季、休闲季、油菜季的 CH_4 排放量间的季节差异性；在对照处理下，CH_4 排放主要集中在水稻季，而在覆膜处理下，水稻季、休闲季和油菜季间均没有显著性差异.

表 1　不同覆膜处理下全年及各时期 CO_2、CH_4 和 N_2O 的排放量[1)]

Table 1　Seasonal and annual accumulative emissions of CO_2, CH_4, and N_2O from the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

时期	CO_2/t·hm^{-2}		N_2O/kg·hm^{-2}		CH_4/kg·hm^{-2}	
	对照	覆膜	对照	覆膜	对照	覆膜
水稻季	−16.59 ± 0.55Ba	−18.54 ± 2.10Aa	1.04 ± 0.29Ba	1.45 ± 0.11Ba	10.82 ± 1.76Bb	19.41 ± 8.54Aa
休闲 季	2.50 ± 1.02Ca	0.72 ± 0.09Ba	0.16 ± 0.05Ba	0.35 ± 0.04Ba	2.37 ± 0.33Bb	15.81 ± 5.27Aa
油菜季	−33.50 ± 1.85Aa	−29.72 ± 4.04Aa	21.94 ± 3.64Aa	17.14 ± 4.80Aa	5.42 ± 0.08Bb	13.40 ± 1.58Aa
全年	−47.60 ± 2.19a	−47.54 ± 2.11a	23.14 ± 3.68a	18.94 ± 4.74a	18.61 ± 7.05b	48.62 ± 15.39a

1) 不同小写字母表示同种气体同一时期不同处理间的显著性差异，不同大写字母表示同种气体同一处理在不同时期的显著性差异 ($P < 0.05$)，下同

2.5　CO_2、N_2O 和 CH_4 的 GWP 和作物产量

表 2 为 2015 ~ 2016 年稻-油轮作农田全年及各时期 CO_2、N_2O 和 CH_4 在 100a 的时间尺度上所引起的 GWP. 水稻季和油菜季均体现为对温室气体的净吸收，而休闲季则表现为对温室气体的净排放，在全年时间尺度上，覆膜和对照处理的 GWP 值分别为 −41.16 t·hm^{-2} 和 −40.95 t·hm^{-2}，覆膜较对照处理 GWP 吸收量有所增加，但没有达到显著性差异. 另外，尽管未达到显著性差异水平，覆膜仍提高了水稻季和油菜季的作物产量.

表 2　不同覆膜处理下稻-油轮作农田作物产量和 GWP

Table 2　Crop yields and GWP in the rice-rapeseed rotation cropland under the different plastic mulching treatments

处理	时期	CH_4	N_2O	CO_2	GWP	产量
覆膜	水稻季	0.54Aa	0.39Ba	−18.54Aa	−17.61a	12.58a
	休闲季	0.44Aa	0.92Ba	0.72Ba	1.25a	—
	油菜季	0.38Aa	4.54Aa	−29.72Aa	−24.80a	1.95a
	全年	1.36a	5.02a	−47.54a	−41.16a	14.53a
对照	水稻季	0.30Bb	0.27Ba	−16.59Bb	−16.02a	11.45a
	休闲季	0.066Bb	0.43Ba	2.50Ca	2.61a	−
	油菜季	0.15Bb	5.81Aa	−33.50Aa	−27.54a	1.90a
	全年	0.52b	6.13a	−47.60a	−40.95a	13.34a

3　讨论

3.1　地膜覆盖对 CO_2 吸收的影响

在水稻季，覆膜和对照处理的 CO_2 吸收通量的峰值出现的时间均在 7 月，吸收峰值出现的原因一方面是水稻植株在这段时间生长较为旺盛；另外一方面是丰沛的降水和较高气温，为水稻植株的光合作用提供了良好的条件[18,20]. 在休闲季前期稻田表现为 CO_2 的净吸收，这是因为水稻收获后，植株并未移除稻田，仍能进行光合作用；而后期植株移除稻田后，缺少了植株的光合作用，则表现为对大气 CO_2 的净排放. 在油菜季，两种处理 CO_2 通量变化呈现脉冲式排放，这可能主要是因为油菜生长季天气变化较大所致，虽然整个冬季温度较低，但仍会出现温度较高的时候(图 1)，油菜在冬季时对大气 CO_2 的吸收受温度影响较大，所以 CO_2 吸收通量在冬天产生较大波动[18,24]. 虽然油菜生长后期已是春天，气温逐渐回升，但油菜此时已进入成熟期，生理活动逐渐减弱，因而对大气 CO_2 的吸收又逐渐降低.

有大量研究表明，土壤含水率、地下 5 cm 温度、太阳辐射量以及生物量是影响 CO_2 净通量主要影响因素[18,25,26]，本研究中覆膜处理与对照处理下土壤含水率(覆膜：33.77% ± 1.68%；对照：33.64% ± 0.69%)、地下 5 cm 温度(覆膜：18.77℃ ± 1.80℃；对照：18.65℃ ± 1.74℃)以及生物量(覆膜：32.10 t·hm^{-2} ± 1.53 t·hm^{-2}；对照：30.80 t·hm^{-2} ± 2.76 t·hm^{-2})均没有显著性差异，另外，覆膜与对照处理均在同一块试验田中进行，太阳辐射量相同，因而导致地膜覆盖对稻油轮作全年及各

季 CO_2 排放并没有太大影响.

3.2 地膜覆盖对N_2O排放的影响

覆膜和对照处理的N_2O排放峰值出现的时间均为施肥后两周左右，这与肖乾颖等[27]在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站的研究结果相同，一方面，田间水分含量充足，氮肥施用过后，为土壤中微生物的硝化和反硝化作用提供了充足的底物；另一方面，水稻和油菜在这一生育阶段内作物群小，生长缓慢，吸收氮肥能力较弱[28,29]，因而N_2O在这段时间排放较高. 休闲季N_2O的排放量比水稻季和油菜季低很多，可能是因为没有氮肥施加的缘故，导致土壤中微生物的硝化和反硝化反应缺乏底物.

覆膜和对照处理下N_2O的排放主要集中在油菜季，这主要与温度和土壤水分含量有关. 郑循华等[30]的研究指出温度低于5℃会抑制土壤微生物的硝化和反硝化作用，本研究实验地点处于亚热带地区，冬天气温较高(如图1)，基本都在5℃以上，因而不会抑制土壤微生物的活性；同时在油菜季田间土壤水分含量适中，适合土壤微生物的硝化和反硝化作用的进行，因而有利于土壤N_2O的产生和排放. 而水稻季时，稻田处于长期淹水状态，由于土壤孔隙充满水分，O_2 供应过低，而严格的厌氧环境则使反硝化作用进行彻底，从而生成 N_2，如图4所示，在水稻季出现多次N_2O负值，表现出对大气N_2O的吸收[31,32]. 本研究发现地膜覆盖降低了作物全年N_2O的排放量，但没有达到显著差异，与 Li 等[7]在阜康的研究结果不同，这主要是因为其研究地点处于干旱地带，地膜覆盖具有良好的保湿作用，而且在作物生育期进行了多次灌溉，从而对土壤理化性质产生了较大影响，进而改变了N_2O排放. 而在本研究中油菜季虽为旱作，但未进行灌溉，而且本研究处于亚热带地区，地膜覆盖的保湿作用也不明显. 农田管理方式以及气候的差异可能导致两种研究的结果不同. 本实验结果表明覆膜与对照处理的地下5 cm温度、土壤含水率、土壤无机氮[NO_3^--N(覆膜:17.31 mg·kg^{-1} ±1.40 mg·kg^{-1}；对照:18.91 mg·kg^{-1} ± 1.56 mg·kg^{-1})、NH_4^+-N(覆膜:19.22 mg·kg^{-1} ±0.44 mg·kg^{-1}；对照:18.35 mg·kg^{-1} ± 0.55 mg·kg^{-1})]均没有显著差异，这可能是造成本研究不同覆膜处理下N_2O的排放量未有显著差异的主要原因.

3.3 地膜覆盖对 CH_4 排放的影响

本研究中 CH_4 在水稻分蘖期出现排放峰值，这与很多研究结果一致[33~35]，一方面水稻在这一时期生长较为旺盛，水稻根际分泌大量的分泌物，为产甲烷菌提供了大量的新鲜基质，另一方面是水稻地上部分和地下部分良好的生长为土壤中产生的 CH_4 排放提供了通道. 另外，在水稻成熟期也出现了 CH_4 排放峰，这与张军科等[36]和于海洋等[37]的研究结果一致，这主要是因为水稻植株在这一时期处于成熟老化阶段，水稻植株根皮老化脱落，为产甲烷菌提供了丰富的新鲜有机碳源. 在油菜季，两种处理都在油菜生长前期出现了一个排放峰值，可能是因为这个时期土壤水分含量充足，气温也较高，从而为甲烷的产生和排放创造了良好的条件. 对照处理在油菜移栽后的第83d又出现了一个更高的峰值，这可能是因为在此次采样前连续几天的降雨，使得对照处理的土壤含水率大幅度上升(覆膜:33.42% ±0.24%，对照:38.46% ±2.31%；$P<0.05$)，造成了较为强烈的局部厌氧环境[38]，而在覆膜条件下，降雨对土壤表面扰动较小，土壤水分变化缓慢，因此覆膜处理的 CH_4 排放较为平缓.

地膜覆盖显著提高了全年及各季 CH_4 排放量，这与张怡等[39]在水稻季显著降低 CH_4 排放量不同，他们的研究指出，地膜覆盖有利于 O_2 向根际的输送，而且他们还发现覆膜处理下土壤微生物生物量(MBC)含量高于对照处理，意味着覆膜处理的好氧微生物生物量的增加，从而促进了 CH_4 在土壤中的氧化，因而降低了 CH_4 的排放，但本研究中 MBC(覆膜:254.32 mg·kg^{-1} ±25.52 mg·kg^{-1}，对照:315.86 mg·kg^{-1} ±40.88 mg·kg^{-1})结果与其相反，这可能就是本研究与其研究结果不同的主要原因. 而在旱季时与 Cuello 等[3]地膜覆盖显著提高 CH_4 排放量的研究结果一致. 覆膜处理在水稻季、休闲季和油菜季的 CH_4 排放量较对照处理要高，且达到了显著差异性($P<0.05$)，在水稻季主要是因为覆膜显著提高有机质含量(覆膜:30.35 g·kg^{-1} ±1.02 g·kg^{-1}；对照:25.70 g·kg^{-1} ±0.87 g·kg^{-1}；$P<0.05$)，为产甲烷细菌提供了反应底物. 在休闲季，对照处理仍然表现为大气 CH_4 的排放源，这主要是因为水稻收获后，没有立即翻耕土壤，排水条件较差，而重庆在8月时处于一个高温多雨的时节，降水丰沛，在10月又处于一个“华西秋雨”时节，同样也有丰沛的降水，使得土壤含水率较高，这有利于形成厌氧微区[40]. 对于覆膜处理，由于水稻收割后地膜依然覆盖在土壤表面，排水则更加困难，从而可能导致厌氧微区形成数量和面积更大，因而 CH_4 排放量显著高于对照处理. 尽管是旱作，但覆膜及对照处理下油菜季都表现为对大气 CH_4 的排放，这与目前已有的大量的研究结果是相反的，通常，在水旱轮作模式下旱季农田都表现为对大气

CH_4 的吸收[41,42]. 对于覆膜处理，造成这种现象的一个可能的原因就是油菜季地膜重新铺设后，地膜阻碍土壤与大气之间的气体交换，随着土壤呼吸作用不断在封闭地膜内进行，降低了 O_2 浓度，形成厌氧环境，促进产甲烷菌的生长和繁殖，而抑制甲烷氧化菌的活动，从而为 CH_4 的产生创造良好的条件，特别是在油菜生长前期(图 5)，CH_4 的排放呈现出上升趋势[3,43]. 但对于对照处理，目前还未找到合理的解释，有待于进一步研究.

4　结论

(1)不论是在水稻季、休闲季还是油菜季，覆膜和对照处理下 CO_2 及N_2O排放量均无显著差异性，表明地膜覆盖对 CO_2 和N_2O排放并没有显著影响.

(2)地膜覆盖显著增加了全年以及各季 CH_4 的排放量，表明覆膜会提高 CH_4 的排放.

(3)覆膜与对照处理下全年 GWP 值以及作物产量并无明显差异，表明覆膜对温室气体排放以及作物产量无显著影响.

参考文献：

[1] IPCC. Special report on emissions scenarios, working group Ⅲ, intergovernmental panel on climate[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] 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 Y M, Hu C S, Zhang J B, *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.

[3] Cuello J P, Hwang H Y, Gutierrez J, *et al*. Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation[J]. Applied Soil Ecology, 2015, **91**: 48-57.

[4] Mahrer Y, Naot O, Rawitz E, *et al*. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, **48**(2): 362-367.

[5] Li F M, Wang J, Xu J Z, *et al*. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2004, **78**(1): 9-20.

[6] Braun M, Bai Y G, McConkey B, *et al*. Greenhouse gas flux in a temperate grassland as affected by landform and disturbance [J]. Landscape Ecology, 2013, **28**(4): 709-723.

[7] Li Z, Zhang R, Wang X, *et al*. Effects of plastic film mulching with drip irrigation on N_2O and CH_4 emissions from cotton fields in arid land[J]. The Journal of Agricultural Science, 2014, **152**(4): 534-542.

[8] Nan W G, Yue S C, Huang H Z, *et al*. Effects of plastic film mulching on soil greenhouse gases (CO_2, CH_4 and N_2O) concentration within soil profiles in maize fields on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, **15**(2): 451-464.

[9] 石将来，郝庆菊，冯迪，等. 地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH_4 和N_2O排放的影响[J]. 环境科学，2017，**38**(11)：4790-4799.
Shi J L, Hao Q J, Feng D, *et al*. Effects of plastic film mulching on methane and nitrous oxide emissions from a rice-rapeseed crop rotation[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4790-4799.

[10] Berger S, Kim Y, Kettering J, *et al*. Plastic mulching in agriculture—friend or foe of N_2O emissions? [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, **167**: 43-51.

[11] Gao B, Ju X T, Su F, *et al*. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 112-124.

[12] 张怡，吕世华，马静，等. 水稻覆膜节水综合高产技术对稻田 CH_4 排放的影响[J]. 生态环境学报，2013，**22**(6)：935-941.
Zhang Y, Lü S H, Ma J, *et al*. Effect of high-yield rice planting technique integrated with plastic mulching for water saving on methane emission from rice fields [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(6): 935-941.

[13] Yu Y X, Jia H T, Zhao C Y. Evaluation of the effects of plastic mulching and nitrapyrin on nitrous oxide emissions and economic parameters in an arid agricultural field[J]. Geoderma, 2018, **324**: 98-108.

[14] 王跃思，王跃红. 中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测[M]. 北京：科学出版社，2008. 20-22.

[15] 朱咏莉，童成立，吴金水，等. 透明箱法监测稻田生态系统 CO_2 通量的研究[J]. 环境科学，2005，**26**(6)：8-14.
Zhu Y L, Tong C L, Wu J S, *et al*. Estimation of CO_2 fluxes from rice paddies based on transparent chamber measurement [J]. Environmental Science, 2005, **26**(6): 8-14.

[16] Gao M Y, Kong F L, Xi M, *et al*. Effects of environmental conditions and aboveground biomass on CO_2 budget in *Phragmites australis* wetland of Jiaozhou Bay, China [J]. Chinese Geographical Science, 2017, **27**(4): 539-551.

[17] 冯夕，江长胜，彭小乐，等. 轮作方式对冬水田温室气体排放的影响[J]. 环境科学，2019，**40**(1)：392-400.
Feng X, Jiang C S, Peng X L, *et al*. Effects of the crop rotation on greenhouse gases from flooded paddy fields [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 392-400.

[18] Zhang L H, Song C C, Nkrumah P N. Responses of ecosystem carbon dioxide exchange to nitrogen addition in a freshwater marshland in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Environmental Pollution, 2013, **180**: 55-62.

[19] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4, CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**(5): 842-844.

[20] Niu S L, Wu M Y, Han Y, *et al*. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe [J]. New Phytologist, 2008, **177**(1): 209-219.

[21] Aeschlimann U, Nösberger J, Edwards P J, *et al*. Responses of net ecosystem CO_2 exchange in managed grassland to long-term CO_2 enrichment, N fertilization and plant species[J]. Plant, Cell & Environment, 2005, **28**(7): 823-833.

[22] 张凯莉，郝庆菊，冯迪，等. 地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响[J]. 环境科学，2017，**38**(8)：3451-3462.
Zhang K L, Hao Q J, Feng D, *et al*. Effect of plastic film mulching on methane emission from a vegetable field [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3451-3462.

[23] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide

emissions from an irrigated rice of North India [J]. Chemosphere, 2003, **51**(3): 181-195.

[24] Chen C, Li D, Gao Z Q, *et al*. Seasonal and interannual variations of carbon exchange over a rice-wheat rotation system on the North China Plain[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, **32**(10): 1365-1380.

[25] Zhao L, Li Y N, Xu S X, *et al*. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO_2 exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau[J]. Global Change Biology, 2006, **12**(10): 1940-1953.

[26] 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 等. 亚热带稻田生态系统 CO_2 通量的季节变化特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 283-288.
Zhu Y L, Tong C L, Wu J S, *et al*. Seasonal characteristics of CO_2 fluxes from the paddy ecosystem in subtropical region[J]. Environmental Science, 2007, **28**(2): 283-288.

[27] 肖乾颖, 黄有胜, 胡廷旭, 等. 施肥方式对紫色土农田生态系统N_2O和 NO 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(2): 203-213.
Xiao Q Y, Huang Y S, Hu T X, *et al*. Effects of fertilization regimes on N_2O and NO emissions from agro-ecosystem of purplish soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(2): 203-213.

[28] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 控释肥料对覆膜栽培稻田N_2O排放的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 769-775.
Zhang Y, Lü S H, Ma J, *et al*. Effect of controlled release fertilizer on nitrous oxide emission from paddy field under plastic film mulching cultivation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(3): 769-775.

[29] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田N_2O排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(5): 598-602.
Huang Y, Jiao Y, Zong L G, *et al*. N_2O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physico-chemical properties [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, **22**(5): 598-602.

[30] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田N_2O产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 1-5.
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al*. Impacts of temperature on N_2O production and emission[J]. Environmental Science, 1997, **18**(5): 1-5.

[31] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤N_2O的产生机制及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2010, **41**(6): 1524-1530.
Sun Z Q, Hao Q J, Jiang C J, *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, **41**(6): 1524-1530.

[32] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和N_2O排放的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 207-213.
Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, *et al*. Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from permanently flooded rice fields in a Central Sichuan hilly area of Southwest China[J]. Environmental Science, 2006, **27**(2): 207-213.

[33] Peng S Z, Hou H J, Xu J Z, *et al*. Nitrous oxide emissions from paddy fields under different water managements in southeast China[J]. Paddy and Water Environment, 2011, **9**(4): 403-411.

[34] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO_2、CH_4 和N_2O排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(6): 758-764.
Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al*. A field study on CO_2, CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, **23**(6): 758-764.

[35] Qin Y M, Liu S W, Guo Y Q, *et al*. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in Southeast China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, **46**(8): 825-834.

[36] 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH_4 和N_2O排放的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1979-1986.
Zhang J K, Jiang C S, Hao Q J, *et al*. Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from agro-ecosystems in a purple paddy soil[J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 1979-1986.

[37] 于海洋, 杨玉婷, 马静, 等. 硝化抑制剂对覆膜稻田 CH_4 和 N_2O排放的影响[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(3): 461-467.
Yu H Y, Yang Y T, Ma J, *et al*. Effect of nitrification inhibitor application on CH_4 and N_2O emissions from plastic mulching rice fields[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(3): 461-467.

[38] Xu H, Cai Z C, Tsuruta H. Soil moisture between rice-growing seasons affects methane emission, production, and oxidation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, **67**(4): 1147-1157.

[39] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 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[J]. 生态学报, 2016, **36**(4): 1095-1103.
Zhang Y, Lü S H, Ma J, *et al*. Effects of water management in winter and of plastic film mulching during rice cultivation on CH_4 emission from paddy field in a hilly region of Central Sichuan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(4): 1095-1103.

[40] Takahashi S, Uenosono S, Ono S. Short- and long-term effects of rice straw application on nitrogen uptake by crops and nitrogen mineralization under flooded and upland conditions[J]. Plant and Soil, 2003, **251**(2): 291-301.

[41] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH_4、N_2O气体排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3655-3661.
Wang X Y, Zhang R Z, Cai L Q, *et al*. Emission characteristics of CH_4 and N_2O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3655-3661.

[42] 吕锦慧, 武均, 张军, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤 CH_4、CO_2 排放特征及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(12): 26-33.
Lv J H, Wu J, Zhang J, *et al*. Characteristics and influencing factors of soil CH_4 and CO_2 emissions under different tillage measures[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, **32**(12): 26-33.

[43] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 等. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5246-5256.
Luo X Q, Zhang A F, Chen H X, *et al*. Effects of plastic film mulching patterns and irrigation on yield of summer maize and greenhouse gas emissions intensity of field[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5246-5256.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2019

CONTENTS