

覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响

罗晓琦¹, 张阿凤², 陈海心¹, 冯浩^{1,3*}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 为探讨不同覆膜方式和灌溉对夏玉米农田产量和温室气体排放的影响, 本研究设计了雨养(R)和灌溉(I)这两个主处理, 对照(CK)、半膜覆盖(HM)和全膜覆盖(FM)这3个副处理, 利用静态暗箱-气相色谱法监测了2014和2015年土壤CO₂、CH₄和N₂O的排放通量, 并借助碳排放强度(GHGI)指标进一步评价了不同覆膜方式的固碳减排效果。结果表明, 与RCK相比, RHM和RFM在2014年增产作用不明显, 而2015年分别增加19.6%和26.8%; 与ICK相比, IHM增产作用不显著, 而IFM在2014和2015年均显著增产, 达到14.1%和55.8%。灌溉仅对2015年CO₂排放有显著促进作用($P < 0.01$), 同一主处理下覆膜方式对CO₂排放没有显著影响($P > 0.05$)。灌溉对CH₄吸收没有显著影响($P > 0.05$), 覆膜对CH₄吸收具有抑制作用。ICK相比RCK, N₂O排放量仅在2015年存在显著性差异, 显著减少了22.3%; 与RCK相比, RHM和RFM在2014年N₂O排放量差异不显著, 2015年分别显著降低了50.7%和51.4%; IHM和IFM与ICK相比, 2014年N₂O排放分别显著减少了47.5%和54.2%, 2015年分别减少了9.6%和52.2%。灌溉可以通过提高产量从而显著降低GHGI; 与RCK相比, RHM和RFM的GHGI仅在2015年显著降低, 分别达到60.1%和61.7%; 与ICK相比, IHM和IFM在2014年GHGI分别显著降低了39.7%和53.2%, 2015年分别降低了22.2%和67.5%, 即全膜覆盖降低GHGI的效果优于半膜覆盖。因此, 对夏玉米种植而言, 灌溉条件下全膜覆盖能保证作物高产稳产并降低农田碳排放强度。

关键词: 覆膜方式; 灌溉; 夏玉米; 产量; 温室气体; 碳排放强度

中图分类号: X14; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5246-11 DOI: 10.13227/j.hjcx.201804056

Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field

LUO Xiao-qi¹, ZHANG A-feng², CHEN Hai-xin¹, FENG Hao^{1,3*}

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of different treatments on yield and greenhouse gas emissions during the summer maize growing season, a two-year film mulching experiment was conducted in 2014 and 2015. In this experiment, the two main experimental factors were rainfed treatment (R) and irrigated treatment (I), and the secondary experimental factors included control treatment (CK), half film mulching treatment (HM), and full film mulching treatment (FM). The emissions of soil greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) were monitored using a static opaque chamber and chromatography method. Moreover, the greenhouse gas emissions intensity (GHGI) was used to evaluate the effect of carbon sequestration in different treatments. The results of this study showed that the yields of the RHM and RFM treatments did not differ significantly in 2014, but increased by 19.6% and 26.8%, respectively, in 2015 compared with that of RCK. The yield of IHM was not improved, and that of IFM significantly increased by 14.1% and 55.8% in 2014 and 2015, respectively, compared with that of ICK. The irrigated treatments only promoted CO₂ emissions in 2015 ($P < 0.01$), and all film mulching treatments (regardless of HM and FM treatments) had no effect on CO₂ emissions under rainfed and irrigated conditions ($P > 0.05$). Irrigated treatments had no effect on the absorption of CH₄ ($P > 0.05$), whereas the film mulching treatments had an inhibitory effect. Compared with values of RCK, the amount of seasonal N₂O emissions for ICK showed a significant difference in 2015 with a decrease of 22.3%. Compared with values of RCK, the amounts of N₂O emissions for RHM and RFM had no significant differences in 2014, but significantly decreased by 50.7% and 51.4% in 2015, respectively. Compared with ICK, IHM and IFM significantly decreased the amounts of N₂O emissions by 47.5% and 54.2% in 2014, and by 9.6% and 52.2% in 2015, respectively. The GHGIs of RHM and RFM were significantly reduced by 60.1% and 61.7% in 2015, respectively, compared with values of RCK, and the GHGIs of IHM and IFM were significantly reduced by 39.7% and 53.2% in 2014, and reduced by 22.2% and 67.5% in 2015, respectively, compared with that of ICK. This means that the effect of FM on reducing GHGI was better than that of HM. It was also found that the significantly reduced GHGI in irrigated treatments may be attributed to the increased yields.

收稿日期: 2018-04-08; 修订日期: 2018-05-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA102904); 国家自然科学基金项目(41301305)

作者简介: 罗晓琦(1993-), 女, 硕士, 主要研究方向为水土资源高效利用, E-mail: luoxq0903@163.com

* 通信作者 E-mail: nerewsi@vip.sina.com

Therefore, FM under irrigation conditions was recommended for summer maize for stabilizing the yield and reducing the GHGI.

Key words: film mulching patterns; irrigation; summer maize; yield; greenhouse gas; greenhouse gas emissions intensity

近年来大气中温室气体浓度不断上升,引起的气候变暖问题成为国内外学者关注的热点^[1]。CO₂、CH₄和N₂O是3种最主要的温室气体,在100 a时间尺度下CH₄和N₂O的增温潜势分别是CO₂的28倍和265倍^[1]。在我国,CH₄和N₂O排放主要来源于农业活动,分别占两者气体全国排放总量的56.62%和73.79%^[2]。能源活动和工业生产是大气CO₂的主要排放源^[2],而土壤CO₂排放也是全球碳循环的重要组成部分^[3]。因此,保证作物生产能力的同时有效减少农田温室气体排放,对于粮食生产和生态环境具有重要意义。

地膜覆盖作为一种有效的增温保墒技术,为干旱半干旱地区粮食的增产发挥了重要作用^[4]。Wang等^[5]的研究认为如果中国农田覆膜率增加5%,粮食产量将增加 4.33×10^6 t。也有研究表明,白色地膜覆盖会使得玉米生育期提前,后期出现早衰从而导致减产^[6]。路海东等^[7]的研究发现黑色地膜较普通白色地膜具有延缓玉米后期叶片衰老速度和促进产量的作用。李凤民等^[8]的研究认为覆膜增产与播前土壤有效水和后期降水有关,在降水不足时应提早揭膜或适时灌溉以缓解植物生长后期的水分亏缺,从而保证覆膜下作物高产稳产。在地膜覆盖对土壤水热及作物产量影响的研究较为成熟之后,覆膜对温室气体排放影响的研究得到越来越多的关注^[9]。Nan等^[10]的研究表明玉米种植期覆膜下土壤中CO₂和N₂O浓度显著高于裸地,覆膜下CH₄浓度显著低于裸地。而Berger等^[11]却认为覆膜促进了植物对N的吸收,从而减少土壤无机氮含量,抑制N₂O排放。Li等^[12]通过对新疆棉田覆膜滴灌试验发现,覆膜滴灌减少了土壤N₂O排放却增加了CH₄的排放。He等^[13]运用整合分析方法研究认为覆膜总是增加温室气体排放,且玉米单位产量的平均温室气体排放低于小麦。冯浩等^[14]利用碳足迹指标评价了不同覆膜方式下小麦-玉米轮作农田的固碳能力,结果表明全膜覆盖和垄作覆膜固碳能力显著提高。目前国内外关于覆膜对农田温室气体排放影响的研究多集中于雨养环境,雨养和灌溉条件下不同覆膜方式对产量和温室气体排放影响的研究有待加强。本文以关中平原夏玉米农田土壤为研究对象,在雨养条件和灌溉条件下设置不同覆膜方式试验处理,分析土壤水热变化、产量和温室气体

(CO₂、CH₄和N₂O)的排放规律,并用全球增温潜势和碳排放强度综合评价不同覆膜方式的固碳减排作用,以期为农田增产减排技术的推广提供技术和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验位于陕西杨凌,西北农林科技大学节水灌溉试验站(34°20′N,108°24′E,海拔高度521 m),属半干旱半湿润气候区,多年平均降水量为620 mm,多年平均气温为13.0℃,降雨主要集中在7~10月。试验站内土壤为壤土,试验初始时土壤(0~20 cm)有机碳含量为8.14 g·kg⁻¹,全氮含量为0.95 g·kg⁻¹,硝态氮含量为5.41 mg·kg⁻¹,铵态氮含量为1.35 mg·kg⁻¹,速效磷含量为20.91 mg·kg⁻¹,速效钾含量为134 mg·kg⁻¹,pH值为8.20(水土比1:1),田间持水量(体积含水率)为27.92%,土壤容重为1.37 g·cm⁻³。逐日气象资料由试验站内的气象站获取,试验期间的气温与降雨如图1所示。2014年和2015年玉米生长季降雨量分别为380.3 mm和283.9 mm。

1.2 试验设计

本试验采用随机区组试验设计,主处理分别为雨养(R)和灌溉(I),副处理分别为对照(CK)、半膜覆盖(HM)和全膜覆盖(FM),共6个处理(RCK、RHM、RFM、ICK、IHM、IFM),每个处理3个重复,共18个小区。每个小区面积为10 m²(2 m×5 m),小区之间设有0.5 m的保护行,试验区周围设有0.5 m宽的作物保护带。覆盖所用材料为白色塑料薄膜(聚乙烯,膜厚0.01 mm),玉米种植于膜下,出苗后开口。供试玉米品种为“秦龙11”,采用人工穴播,播种深度5 cm,株距40 cm,行距60 cm,每个小区播4行。2014年于6月19日播种,10月11日收获;2015年于6月11日播种,10月8日收获。每季作物播种前均施入基肥:氮肥(以N计)225 kg·hm⁻²,磷肥(以P₂O₅计)90 kg·hm⁻²,生育期内不追肥。灌溉处理分别在2014年的7月18日和8月1日、2015年的6月12日和8月2日进行灌溉,每次灌水量均为30 mm,灌溉方式为滴灌,覆膜处理滴灌管置于膜下。其他田间措施与当地保持一致。

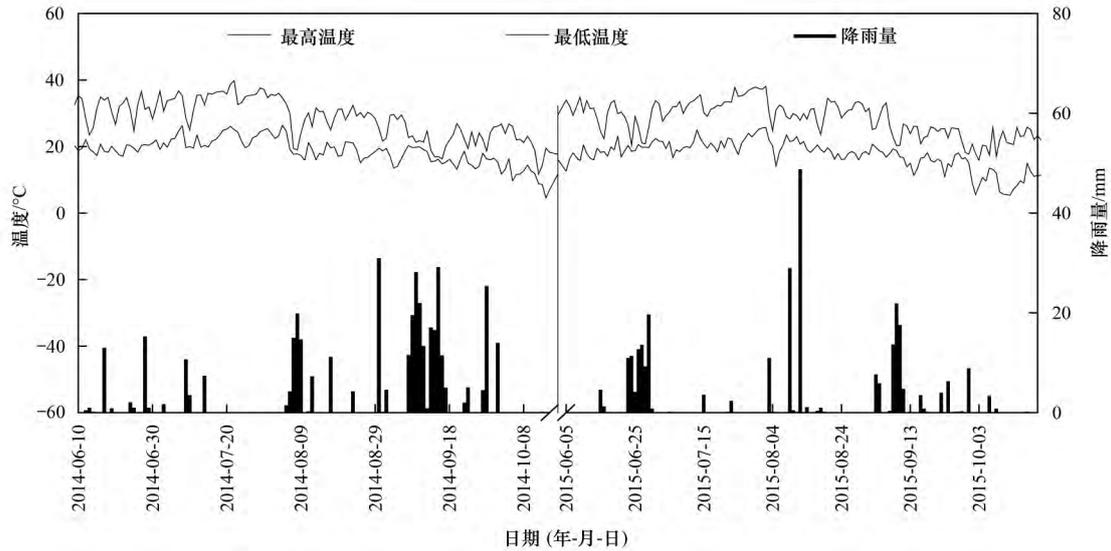


图1 玉米生长季日最高温、最低温和日降雨量

Fig. 1 Daily maximum air temperature, minimum air temperature, and precipitation during the maize growing season

1.3 项目测定与方法

1.3.1 产量、温度和水分测定

玉米收获时,随机选取小区代表平均长势 10 株玉米,人工脱粒测量重量换算成单位面积产量 ($t \cdot hm^{-2}$)。采集气体时,用水银温度计同时测定各小区土壤 0~5 cm 温度。TDR 时域水分速测仪测定 0~10 cm 表层土壤体积含水率,每个小区随机选取 3 点,取平均值。土壤孔隙含水量计算公式如下:

$$WFPS = \frac{\theta}{1 - \frac{\gamma}{2.65}} \times 100\%$$

式中, θ 为 0~10 cm 土层体积含水率(%); γ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)。

1.3.2 气体采集与测定

温室气体采集使用静态暗箱-气相色谱法,采样时间为上午 09:00~11:00,2014 年每月采集 1 次,2015 年每 10 d 采集 1 次,施肥、灌水和降雨后增加 1 次采样。具体采气方法、仪器说明、采样箱放置示意图及计算说明参照文献[14]。

1.4 全球增温潜势和碳排放强度

根据最新 IPCC 研究成果^[1],在 100 a 时间尺度下, CH_4 和 N_2O 的增温潜势分别是 CO_2 的 28 倍和 265 倍。由此,全球增温潜势(GWP)和碳排放强度(GHGI)计算公式如下:

$$GWP = 28 \times R_C + 265 \times R_N$$

$$GHGI = GWP/yield$$

式中, GWP 为全球增温潜势(以 CO_2 计, $kg \cdot hm^{-2}$), R_C 和 R_N 分别为 CH_4 和 N_2O 的季节排放

总量; GHGI 为碳排放强度(以 CO_2 计, $kg \cdot t^{-1}$); yield 为玉米产量($t \cdot hm^{-2}$)。

1.5 数据处理与分析

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,多重比较采用最小显著差异法 LSD,显著水平为 $P < 0.05$ 。所有数据均为 3 次重复,应用 Origin 9 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤水分和温度变化

各处理 0~10 cm 表层土壤孔隙含水率变化趋势基本一致[图 2(a)]。雨养和灌溉条件下覆膜处理含水率均普遍高于不覆膜处理,且全膜覆盖保水效果优于半膜覆盖。与 RCK 相比,RHM 和 RFM 两季玉米生育期内平均土壤含水率分别显著提高了 11.3% 和 13.4% ($P < 0.05$)。灌溉条件下,覆膜处理土壤含水率均保持较高水平,全膜覆盖高于半膜覆盖处理。2014 年播种后一段时间,土壤含水率较低,而 2015 年土壤水分状况较好。

土壤表层温度随玉米的生长总体呈降低趋势[图 2(b)],灌溉区不同覆膜方式下土壤表层温度均低于雨养区对应处理,即 $ICK < RCK$, $IHM < RFM$, $IFM < RFM$ 。雨养条件下,玉米生育前期覆膜增温效果显著,RHM 和 RFM 相比 RCK 土壤温度分别增加了 3~5℃ 和 3~8℃。与 ICK 比较,IHM 和 IFM 温度升高不明显。2014 年玉米生育前期土壤温度较高,在 25.7~36.5℃ 之间,2015 年在 20.4~34.0℃ 之间。综上,覆膜具有较好的保水增温效

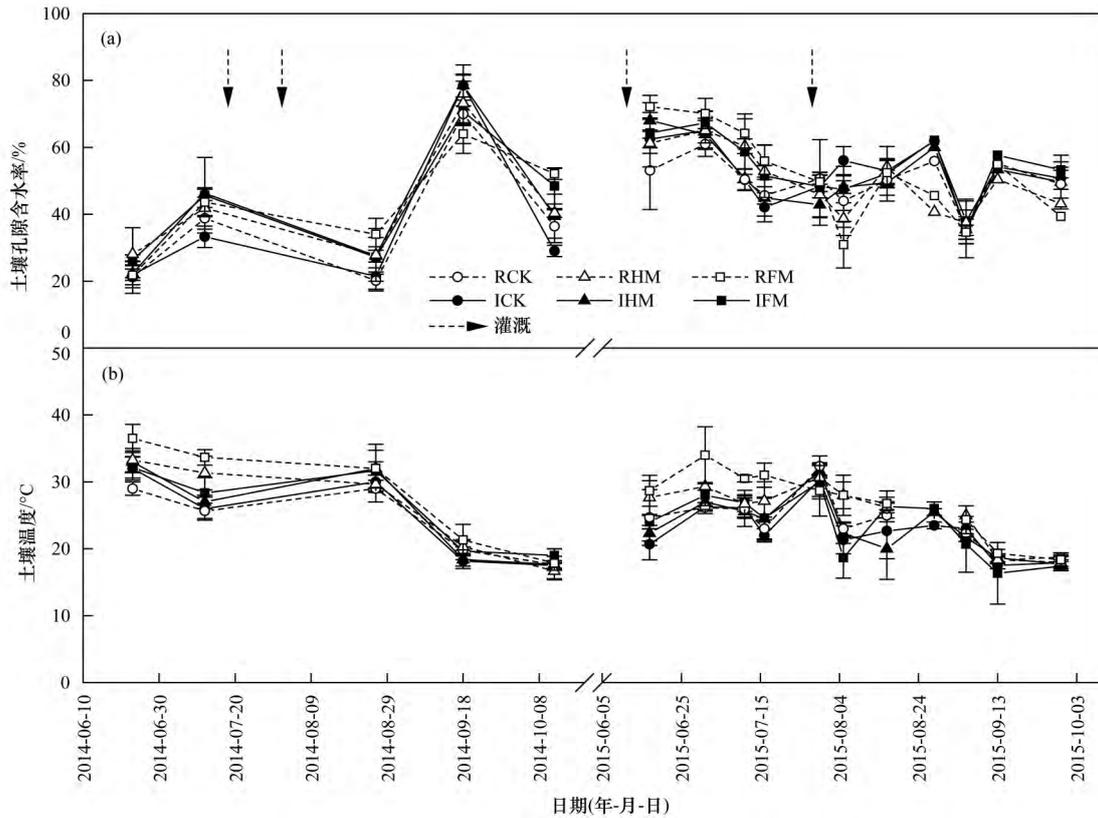


图 2 不同处理土壤温度和土壤孔隙含水率变化

Fig. 2 Dynamics of soil temperature and soil WFPS under different treatments

果,全膜覆盖优于半膜覆盖,灌溉条件下覆膜的增温作用没有雨养条件下显著.

2.2 不同处理下 CO₂、CH₄和N₂O排放特征

不同处理 CO₂ 排放变化趋势与土壤温度季节变化趋势基本一致 [图 2 (b) 和图 3 (a)]. 土壤 CO₂ 排放通量均在 7、8 月达到最大值 (以 CO₂-C 计), 在生育后期排放通量逐渐降低. ICK 与 RCK 相比 [图 4 (a)], 两季玉米生长期 CO₂ 排放量没有显著差异 (P > 0.05). 雨养条件下, 各处理 CO₂ 排放总量没有明显差异 (P > 0.05), 覆膜对 CO₂ 排放影响较小. 与 ICK 相比, IHM 和 IFM 处理 2014 年 CO₂ 排放总量分

别增加了 28.0% (P > 0.05) 和 40.5% (P < 0.05), 2015 年 IHM 和 IFM 分别增加了 15.5% 和 15.0% (P > 0.05), 且 IHM 和 IFM 之间没有显著差异. 2014 年土壤 CO₂ 排放整体高于 2015 年, 主要是因为 2014 年玉米营养生长阶段 (8 月 29 日前) 土壤温度整体高于 2015 年对应时期温度 [图 2 (b)], 使得 2014 年玉米营养生长阶段土壤 CO₂ 排放总量整体高于 2015 年 [图 3 (a)], 这与表 1 温度与土壤 CO₂ 排放呈显著正相关的结果一致. 2014 年灌溉对 CO₂ 排放没有显著影响 (P > 0.05) (表 2), 2015 年灌溉极显著促进了 CO₂ 排放 (P < 0.01). 覆膜方式对 CO₂ 排放并没有显

表 1 不同处理下温室气体排放与土壤温度 (5 cm) 和土壤孔隙含水率 (10 cm) 的相关系数¹⁾

Table 1 Single Pearson's correlation coefficient between greenhouse gas emission and soil temperature and water filled pore space (WFPS)

项目	RCK			RHM			RFM		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
土壤含水率	-0.481	0.385	-0.158	-0.369	0.379	0.278	-0.317	-0.211	0.449
土壤温度	0.536*	-0.258	0.075	0.746**	0.026	0.251	0.660**	-0.623*	0.400
项目	ICK			IHM			IFM		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
土壤含水率	-0.329	-0.201	-0.273	-0.129	-0.329	-0.476	-0.360	-0.048	0.363
土壤温度	0.499*	-0.435	-0.118	0.513*	-0.120	-0.007	0.845**	-0.059	0.100

1) * 表示在 P < 0.05 水平显著相关; ** 表示在 P < 0.01 水平显著相关

表 2 灌溉和覆膜方式对产量、温室气体排放、全球增温潜势和碳排放强度的三因素方差分析(P 值)¹⁾
Table 2 Two-way ANOVA of irrigation and film mulching patterns on yield, GHGs emission, GWP, and GHGI (P value)

年份	因素	产量	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GWP	GHGI
2014	灌溉	<0.001**	0.153	0.214	0.279	0.174	0.006**
	覆膜方式	0.110	0.278	0.005**	0.012*	0.170	0.140
	覆膜方式×灌溉	0.116	0.064	0.434	0.128	0.055	0.023*
2015	灌溉	0.002**	0.006**	0.328	0.366	0.322	0.062
	覆膜方式	<0.001**	0.541	0.094	<0.001**	<0.001**	<0.001**
	覆膜方式×灌溉	0.023*	0.380	0.348	0.006**	0.028*	0.021*

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关

著影响($P > 0.05$), 且灌溉和覆膜的交互作用对 CO₂ 排放影响不显著($P > 0.05$).

土壤 CH₄ 排放通量(以 CH₄-C 计)在 $-0.21 \sim 0.35 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的范围内波动[图 3(b)], 没有明显季节变化规律. 各处理吸收总量均表现为正值, 即为 CH₄ 的汇[图 4(b)]. 两季玉米生育期内, ICK 与 RCK 的 CH₄ 吸收量没有显著性差异($P > 0.05$), 即灌溉对 CH₄ 的吸收没有显著影响. 雨养条件下覆膜 CH₄ 吸收量稍有降低, 但作用不显著. 与 ICK 比较, IHM 和 IFM 在 2014 年 CH₄ 吸收总量分别显著减少了 77.9% 和 77.2% ($P < 0.05$), 2015 年分别减少了 7.9% ($P > 0.05$) 和 75.2% ($P < 0.05$), 且 IHM 和 IFM 差异不显著. 双因素方差分析结果进一步说明(表 2), 2014 年覆膜方式对 CH₄ 的吸收有极显著影响($P < 0.01$), 而 2015 年影响不显著($P > 0.05$).

不同覆膜方式下 N₂O 季节排放规律相同, 主要受施肥事件影响[图 3(c)]. 2014 年施肥后各处理均未出现较大 N₂O 排放峰(以 N₂O-N 计), 可能与土壤含水率较低影响氮素溶解有关. 2015 年土壤水分状况良好, 施肥后出现较大排放峰, 排放通量大小依次为 RCK > ICK > IHM > RHM > RFM > IFM. 由此可知, 覆膜能减少施肥后土壤 N₂O 的释放, 全膜覆盖作用优于半膜覆盖. 从生育期排放总量来看[图 4(c)], ICK 与 RCK 在 2014 年 N₂O 排放总量没有显著差异, 2015 年 ICK 相比 RCK 排放总量显著减少了 22.3% ($P < 0.05$). 雨养条件下, RHM 和 RFM 相比 RCK 在 2014 年 N₂O 排放总量分别减少了 10.2% 和 19.5% ($P > 0.05$), 2015 年分别减少了 50.7% 和 51.4% ($P < 0.05$). 灌溉条件下, IHM 和 IFM 相比 ICK 在 2014 年分别显著降低了 47.5% 和 54.2%, 2015 年分别降低了 52.2% ($P < 0.05$) 和 9.6% ($P > 0.05$). 对比两季玉米生育期土壤 N₂O 排放总量, 发现 2014 年整体低于 2015 年, 这与施肥

后土壤含水率有关.

2.3 产量、GWP 和 GHGI

与 RCK 相比, ICK 两季玉米产量分别增加了 13.6% 和 9.8% ($P < 0.05$, 表 3). RHM 和 RFM 相比 RCK, 2014 年产量没有增加反而有所减少, 2015 年分别增加了 19.6% ($P > 0.05$) 和 26.8% ($P < 0.05$). IHM 相比 ICK 在 2014 年和 2015 年产量均有增加但不显著($P < 0.05$). 而 IFM 相比 ICK 在 2014 年和 2015 年产量显著增加, 分别增加了 14.1% 和 55.8% ($P < 0.05$). 结合双因素方差分析结果(表 2), 灌溉对玉米产量有极显著提高作用($P < 0.01$). 2014 年由于前期降雨较少, 土壤含水率较低, 造成覆膜方式对产量没有显著影响($P > 0.05$). 2015 年土壤水分条件较好, 覆膜显著提高了玉米产量($P < 0.01$), 且全膜覆盖增产幅度大于半膜覆盖.

由表 3 可知, 在两季玉米生长期, ICK 与 RCK 在 2014 年 GWP 没有显著差异, 2015 年 ICK 比 RCK 显著降低了 26.1% ($P < 0.05$). 由双因素方差分析可知(表 2), 灌溉对 GWP 没有显著影响($P > 0.05$). 雨养条件下, 覆膜对 2014 年 GWP 没有显著影响($P > 0.05$), 2015 年 RHM 和 RFM 相比 RCK 的 GWP 分别减少了 51.5% 和 58.8% ($P < 0.05$). 灌溉条件下, 覆膜的 GWP 均比对照小, 且 IFM 为最小值. ICK 与 RCK 在 2014 年 GHGI 没有显著差异, 2015 年 ICK 比 RCK 显著降低了 32.0% ($P < 0.05$). 从双因素方差分析结果可知(表 2), 灌溉对 GWP 没有显著影响($P > 0.05$), 但它可以提高产量从而显著降低 GHGI. RFM 和 RHM 与 RCK 相比, GHGI 在 2014 年没有显著差异, 2015 年分别显著减少了 60.1% 和 61.7%. IFM 和 IHM 相比 ICK 在 2014 年 GHGI 分别降低了 53.2% 和 39.7% ($P < 0.05$), 2015 年分别降低了 67.5% ($P < 0.05$) 和 22.2% ($P > 0.05$). 因此, 地膜覆盖具

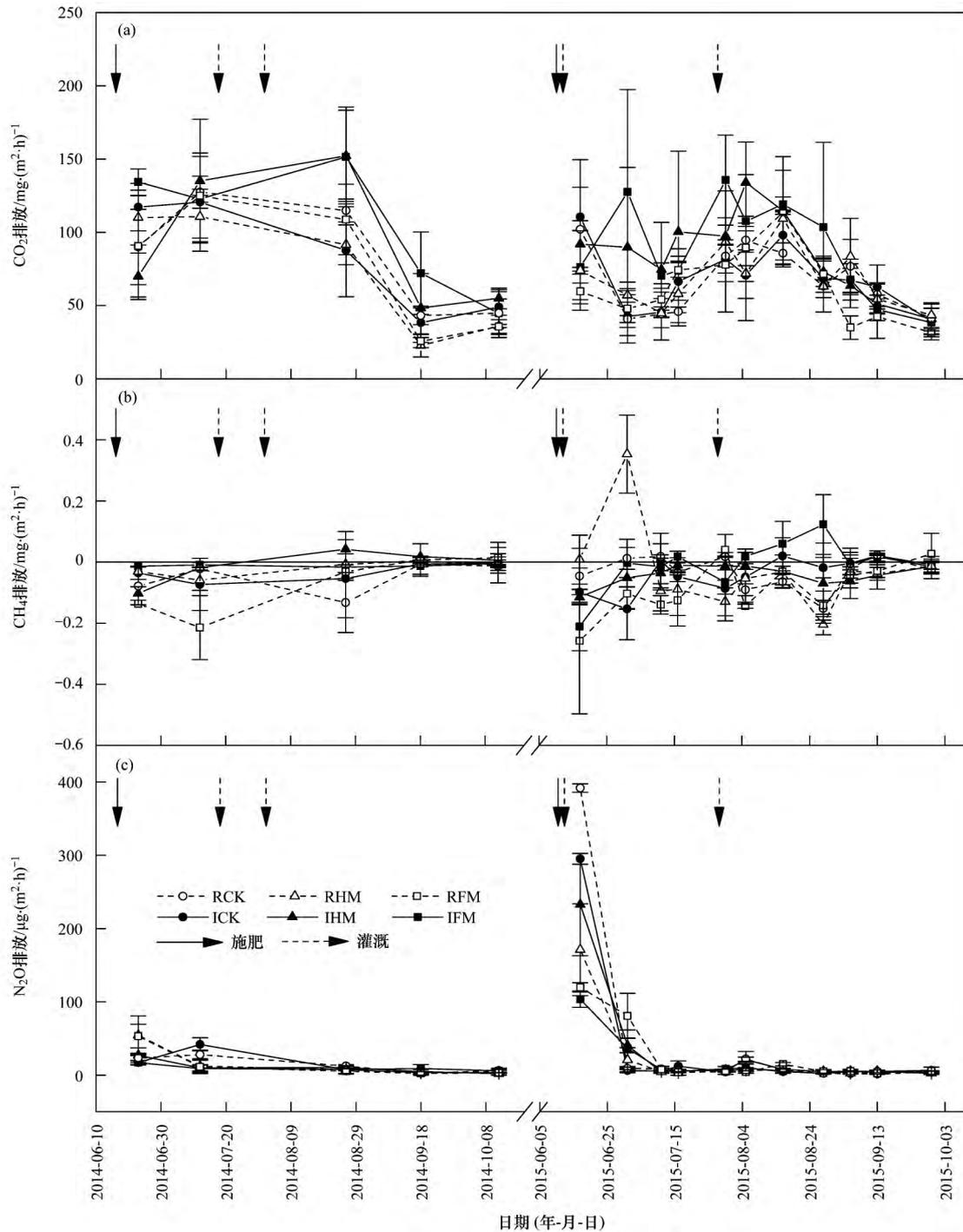


图3 不同处理下2014年和2015年夏玉米生长季农田CO₂、CH₄和N₂O排放通量

Fig. 3 Dynamics of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from the field during the summer maize growing seasons of 2014 and 2015 under different treatments

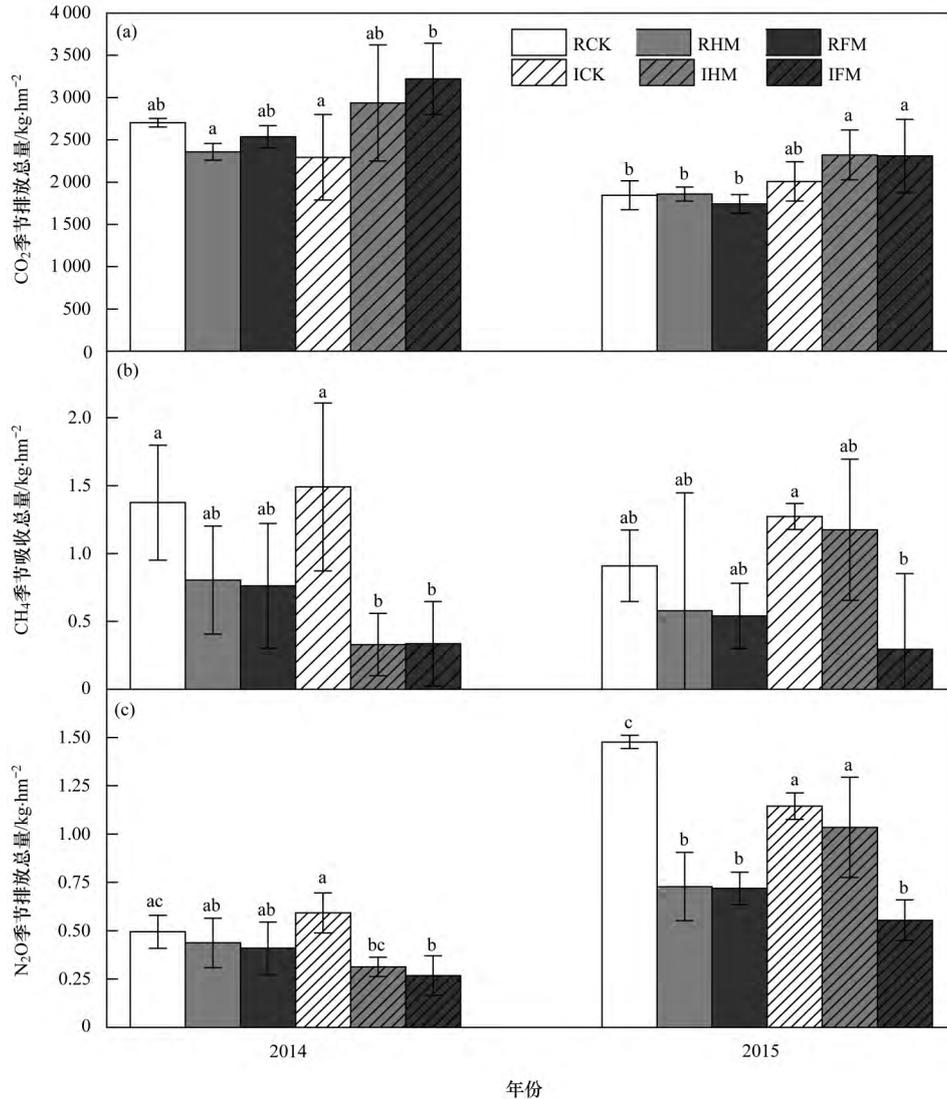
有显著降低 GHGI 的作用,且灌溉条件下全膜覆盖降低 GHGI 的效果最佳.

3 讨论

3.1 地膜覆盖和灌溉对土壤水热及玉米产量的影响

地膜覆盖通过抑制土壤与大气的蒸汽交换,减

少土壤蒸发,从而提高土壤表层水分含量^[15,16]. 覆膜增温效应的主要原因是地膜覆盖能消除土壤潜热交换、减弱显热交换和抑制夜间有效发射辐射^[17]. Liu 等^[18]的研究结果表明,玉米生育前期覆膜条件下土壤表层温度显著高于裸地 3~8℃,与本研究的結果一致. 灌溉条件下覆膜的增温效果没有雨养条



不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 不同处理下 2014 年和 2015 年 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的季节排放总量

Fig. 4 Cumulative emissions of CO₂, CH₄, and N₂O from the field during the summer maize growing seasons of 2014 and 2015 under different treatments

件下显著,这是因为土壤温度变化与土壤水分状况存在相互作用^[19],土壤水分较土壤颗粒具有较高的热容量和较低的热传导率,造成土壤含水率较高时温度变化较小^[20].本研究中,灌溉和地膜覆盖均能提高玉米产量,灌溉条件下全膜覆盖增产效果最佳.一方面,灌溉提高土壤含水量的同时适当降低了覆膜造成的高温现象^[21];另一方面,覆膜具有增温保墒作用,为作物生育前期提供良好水热条件,从而提高作物产量^[22,23].程宪国等^[24]认为播前有效水的多少对作物的出苗和生长状况非常重要,甚至决定产量的高低.本试验中,2014年土壤底墒欠佳,播后一段时间内降水较少,雨养区覆膜后土壤含水率低、温度高,发生“烤苗”现象,这可能是

2014年覆膜造成轻度减产的原因.而2015年播前底墒较好,覆膜保水作用得以发挥,产量显著增加.因此,地膜覆盖增产是有条件的,不仅与播前土壤水分有关,后期降水也会造成产量的差异^[8].

3.2 地膜覆盖和灌溉对温室气体排放的影响

土壤温度和水分是影响土壤 CO₂ 排放的两大主要非生物因素^[25,26].相关分析表明(表1),各处理土壤 CO₂ 排放与土壤温度显著正相关,与土壤含水率呈较低负相关,说明本试验中土壤 CO₂ 排放主要受温度影响.多数研究表明,地膜覆盖使得土壤表层温度升高,土壤中微生物活性增强,土壤呼吸速率加快,从而促进了土壤 CO₂ 的产生^[27].但也有研究表明覆膜降低了 CO₂ 排放通量^[28,29],主要原

因是薄膜阻碍了土壤与大气的交换作用,产生了产量大而排放小的现象. 本研究中覆膜对 CO₂ 的排放没有显著影响,可能是薄膜的增温效应和物理阻隔作用相互抵消的结果. 一般认为,在水分亏缺条件下,灌溉后土壤含水量的增加会促进根系呼吸及提高微生物活性,进而土壤呼吸增强^[30]. 但是土壤呼

吸与灌溉量并不是简单的线性关系,当灌水过多时,土壤孔隙含水率较大,形成的厌氧环境反而会抑制土壤呼吸^[31]. 本研究采用滴灌,由于灌水量低,对土壤结构的破坏较小,良好的透气性和土壤含水量促进了微生物活性与根系呼吸,从而使得土壤 CO₂ 排放增加^[32].

表3 不同处理对2014年和2015年夏玉米产量、全球增温潜势及碳排放强度的影响¹⁾

Table 3 Yield, GWP, and GHGI during the summer maize growing seasons of 2014 and 2015 under different treatments

年份	处理	产量/t·hm ⁻²	GWP/kg·hm ⁻²	GHGI/kg·t ⁻¹
2014	RCK	4.62 ± 0.33c	154.6 ± 20.3ab	33.4 ± 3.4a
	RHM	4.41 ± 0.35c	152.2 ± 40.4ab	34.2 ± 7.0ac
	RFM	4.55 ± 0.16c	175.4 ± 45.6ac	38.4 ± 8.8a
	ICK	5.25 ± 0.33a	191.1 ± 25.1a	36.3 ± 2.7a
	IHM	5.39 ± 0.20a	118.1 ± 26.8bc	21.9 ± 4.4bc
	IFM	5.99 ± 0.41b	99.2 ± 48.4b	17.0 ± 9.5b
2015	RCK	4.77 ± 0.34c	581.0 ± 5.0c	122.6 ± 8.6c
	RHM	5.71 ± 0.25ac	281.6 ± 99.8bd	48.9 ± 15.8bd
	RFM	6.05 ± 0.61a	239.4 ± 50.4bd	46.9 ± 11.8bd
	ICK	5.24 ± 0.71ac	429.3 ± 32.1a	83.4 ± 16.1a
	IHM	6.04 ± 0.44a	387.2 ± 119.8ad	64.9 ± 22.0ad
	IFM	8.16 ± 0.65b	219.7 ± 64.5b	27.1 ± 9.0b

1) 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

土壤水分含量是影响旱地土壤 CH₄ 吸收最主要的因素^[33],在一定程度内 CH₄ 氧化的能力随土壤含水率的升高而降低^[34]. 土壤温度主要通过影响 CH₄ 及 O₂ 的扩散速率和酶的活性进而影响 CH₄ 的氧化^[35],不同条件下 CH₄ 氧化的最适温度不同. 2014 年覆膜方式对 CH₄ 排放有极显著影响 ($P < 0.01$),而 2015 年没有显著影响. 这可能是 2014 年玉米营养生长阶段(8 月 29 日前)土壤含水率较低,此时土壤吸收 CH₄ 能力较强,而覆膜使得 CH₄ 和 O₂ 的扩散收到限制,从而抑制了甲烷营养菌的活性^[36]. 也有研究认为覆膜降低了土壤中 O₂ 的含量,形成的厌氧环境促进了 CH₄ 的产生,从而减少了 CH₄ 的吸收^[37].

土壤 N₂O 主要由硝化和反硝化反应产生,受土壤水分和温度的影响. 本研究中,各处理 N₂O 的排放与土壤水分和温度没有显著相关(表 1),说明水分和温度不是控制 N₂O 排放的主要因素. 两季玉米生长期,土壤 N₂O 排放高峰仅出现在施肥后,此时玉米根系尚未发育成熟,吸收利用氮素能力较低^[38],因而土壤硝化和反硝化作用强烈. 2014 年施肥后由于土壤含水率较低 N₂O 排放峰值较小,且当土壤含水率回升后也没有出现排放峰. 可能是因为此时玉米处于生长旺盛期,土壤中的有效氮被植物利用,从而减少 N₂O 产生的机会. 各处理 N₂O 排

放高峰期的排放量占全生育期排放总量的 64% ~ 91%,覆膜降低了施肥后 N₂O 的排放峰值,从而降低了 N₂O 的排放总量,这与 Li 等^[12] 和 Liu 等^[39] 的研究结果一致. 地膜覆盖的隔绝作用直接影响 N₂O 向大气排放,也对土壤温湿度和微生物环境产生间接影响. 多数学者认为,覆膜创造出的高温、湿润、低氧环境有利于 N₂O 的产生^[40~42]. Arrige 等^[43] 在第 40 d 揭除胡椒地薄膜时土壤出现了 N₂O 排放峰,即覆膜促进了 N₂O 的排放,在地膜移除后才能释放. 目前覆膜减少 N₂O 排放的原因主要有:首先,地膜覆盖后直接阻挡了大部分 N₂O 的排放^[44];其次,覆膜促进了根系前期生长,有利于植物 N 的吸收,降低土壤硝化和反硝化作用所需的氮源,从而减少 N₂O 排放^[11]. 因此,在不同气候、土壤、田间管理措施下,覆膜对土壤 N₂O 排放的影响不同.

3.3 地膜覆盖和灌溉对碳排放强度的影响

本研究采用碳排放强度(GHGI)综合评价不同处理的固碳减排效果. 结果表明,在一定降雨或水分管理条件下,覆膜具有显著降低 GWP 和 GHGI 的作用. 石将来等^[45] 的研究发现,稻-油轮作农田覆膜处理 CH₄ 和 N₂O 的综合 GWP 较不覆膜处理提高了 22.0%,与本研究结果相反,这可能是因为气候和种植作物不同所致. 灌溉对 GWP 没有显著影响(表 2),但在降雨较少时,灌溉能显著提高作物

产量,从而降低 GHGI,即灌溉通过保证作物高产稳产,从而降低 GHGI. 本研究中,覆膜降低了农田温室气体 GHGI,且灌溉条件全膜覆盖 GHGI 值最小,这一结论与 Li 等^[12]的研究结果一致. 冯浩等^[14]运用碳足迹方法研究发现,小麦-玉米轮作农田全膜覆盖时单位产量碳足迹与不覆膜处理没有显著差异. 因此,全面分析不同覆膜方式的全生命周期碳排放也是下一步的研究方向. 综合以上分析,覆膜有利于土壤水热状况,提高作物产量和降低碳排放强度,其中灌溉条件下全膜覆盖效果最佳.

4 结论

(1) 雨养条件下覆膜对玉米产量的影响与生育内降雨分布有关. 播种后一段时间内土壤较干旱且温度较高时,覆膜会造成轻度减产. 播种前后土壤水热状况较好时,两种覆膜方式均能提高产量. 灌溉条件下覆膜两季玉米产量均增加,全膜覆盖较半膜覆盖增产作用显著($P < 0.05$).

(2) 灌溉对 CO_2 排放的影响受气候条件影响较大,雨养和灌溉条件下不同覆膜方式对 CO_2 排放均没有显著影响($P > 0.05$). 灌溉对旱地 CH_4 吸收影响不显著($P > 0.05$),两种覆膜方式均能减少 CH_4 吸收. 灌溉对 N_2O 排放总量没有显著影响($P > 0.05$),覆膜通过降低施肥后 N_2O 排放峰从而显著降低排放总量($P < 0.05$).

(3) 灌溉通过提高产量从而显著降低碳排放强度(GHGI)($P < 0.01$). 雨养条件下覆膜对 GHGI 的影响受气候因素影响较大,灌溉条件下覆膜能降低 GHGI,且全膜覆盖 GHGI 低于其它处理. 因此,该研究认为灌溉条件下全膜覆盖技术是干旱半干旱地区保证作物高产稳产、实现固碳减排的有效途径.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [2] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7-20.
- [4] 王秀芬,陈百明,毕继业. 基于县域的地膜覆盖粮食增产潜力分析[J]. *农业工程学报*, 2005, **21**(11): 146-149.
Wang X F, Chen B M, Bi J Y. Analysis of potential of grain yield increase under film-mulching condition on a county scale [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, **21**(11): 146-149.
- [5] Wang Y P, Li X G, Zhu J, *et al.* Multi-site assessment of the effects of plastic-film mulch on dryland maize productivity in semiarid areas in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, **220**: 160-169.
- [6] Steinmetz Z, Wollmann C, Schaefer M, *et al.* Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 690-705.
- [7] 路海东,薛吉全,郭东伟,等. 覆黑地膜对旱作玉米根区土壤温湿度和光合特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(5): 129-135.
Lu H D, Xue J Q, Guo D W, *et al.* Effects of black plastic film mulching on soil temperature and humidity in root zone and photosynthetic characteristics of rainfed maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(5): 129-135.
- [8] 李凤民,鄢珣,王俊,等. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理[J]. *中国农业科学*, 2001, **34**(3): 330-333.
Li F M, Yan X, Wang J, *et al.* The mechanism of yield decrease of spring wheat resulted from plastic film mulching [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, **34**(3): 330-333.
- [9] Chen H X, Liu J J, Zhang A F, *et al.* Effects of straw and plastic film mulching on greenhouse gas emissions in Loess Plateau, China: A field study of 2 consecutive wheat-maize rotation cycles [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 814-824.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] He G, Wang Z H, Li S X, *et al.* Plastic mulch: Tradeoffs between productivity and greenhouse gas emissions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **172**: 1311-1318.
- [14] 冯浩,刘晶晶,张阿凤,等. 覆膜方式对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(4): 180-189.
Feng H, Liu J J, Zhang A F, *et al.* Effect of film mulching patterns on carbon sequestration in wheat-maize rotation system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(4): 180-189.
- [15] 王罕博,龚道枝,梅旭荣,等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(22): 88-94.
Wang H B, Gong D Z, Mei X R, *et al.* Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(22): 88-94.
- [16] Liu Q F, Chen Y, Liu Y, *et al.* Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of

- maize in the Loess Plateau, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **157**: 1-10.
- [17] 王树森, 邓根云. 地膜覆盖增温机制研究[J]. *中国农业科学*, 1991, **24**(3): 74-78.
Wang S S, Deng G Y. A study on the mechanism of soil temperature in creasing under plastic mulch [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1991, **24**(3): 74-78.
- [18] Liu Y, Shen Y F, Yang S J, *et al.* Effect of mulch and irrigation practices on soil water, soil temperature and the grain yield of maize (*Zea mays L*) in Loess Plateau, China [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, **6**(10): 2175-2182.
- [19] 宋振伟, 郭金瑞, 邓艾兴, 等. 耕作方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(16): 108-114.
Song Z W, Guo J R, Deng A X, *et al.* Effects of surface tillage regimes on soil moisture and temperature of spring corn farmland in Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(16): 108-114.
- [20] Hillel D. *Environmental Soil Physics* [M]. San Diego, CA: Academic Press, 1998.
- [21] 陶丽佳, 王凤新, 顾小. 覆膜滴灌对温室气体产生及排放的影响研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, **29**(3): 17-23.
Tao L J, Wang F X, Gu X X. Advance in studies on effect of mulched drip irrigation on production and emission of greenhouse gas [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, **29**(3): 17-23.
- [22] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat [J]. *Field Crops Research*, 1999, **63**(1): 79-86.
- [23] Bu L D, Liu J L, Zhu L, *et al.* The effects of mulching on maize growth, yield and water use in a semi-arid region [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, **123**: 71-78.
- [24] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 1996, **29**(4): 67-74.
Cheng X G, Wang D S, Zhang M R, *et al.* Effects of different soil moisture conditions on winter wheat growth and nutrient uptake [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, **29**(4): 67-74.
- [25] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, *et al.* Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**(1-4): 220-235.
- [26] Zhang L M, Yu G R, Sun X M, *et al.* Seasonal variations of ecosystem apparent quantum yield (α) and maximum photosynthesis rate (P_{max}) of different forest ecosystems in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **137**(3-4): 176-187.
- [27] 涂纯, 王俊, 刘文兆. 不同覆盖条件下旱作农田土壤呼吸及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, **18**(5): 1103-1110.
Tu C, Wang J, Liu W Z. Variation in soil respiration and its driving factors in rainfed winter wheat fields with different mulching measures [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, **18**(5): 1103-1110.
- [28] Li Z G, Zhang R H, Wang X J, *et al.* Carbon dioxide fluxes and concentrations in a cotton field in northwestern China: Effects of plastic mulching and drip irrigation [J]. *Pedosphere*, 2011, **21**(2): 178-185.
- [29] Okuda H, Noda K, Sawamoto T, *et al.* Emission of N₂O and CO₂ and uptake of CH₄ in Soil from a satsuma mandarin orchard under mulching cultivation in central Japan [J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 2007, **76**(4): 279-287.
- [30] 汤亿, 严俊霞, 孙明, 等. 灌溉和翻耕对土壤呼吸速率的影响[J]. *安徽农业科学*, 2009, **37**(6): 2625-2627, 2671.
Tang Y, Yan J X, Sun M, *et al.* Effects of the irrigation and tillage on soil respiration rate [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, **37**(6): 2625-2627, 2671.
- [31] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(9): 1764-1773.
Qi Y C, Guo S F, Dong Y S, *et al.* Advances in research on the effects of irrigation on the greenhouse gases emission and soil carbon sequestration in agro-ecosystem [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(9): 1764-1773.
- [32] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(12): 2420-2430.
Zhang Q B, Yang L, Wang J, *et al.* Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(12): 2420-2430.
- [33] 吴得峰. 黄土旱塬区减氮条件下氮素利用及温室气体排放特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Wu D F. Nitrogen utilization and GHG emissions under reduced nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [34] Whalen S C, Reeburgh W S, Kizer K S. Methane consumption and emission by Taiga [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, **5**(3): 261-273.
- [35] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对土壤氧化大气 CH₄ 的影响[J]. *生态学杂志*, 2003, **22**(3): 54-58.
Ding W X, Cai Z C. Effect of temperature on atmospheric CH₄ oxidation in soils [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, **22**(3): 54-58.
- [36] 王科. 土壤 CH₄ 氧化与土壤甲烷营养菌及主要研究方法[J]. *基因组学与应用生物学*, 2009, **28**(6): 1211-1218.
Wang K. Soil CH₄ oxidation and soil methanotrophs and its main researching techniques [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2009, **28**(6): 1211-1218.
- [37] 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.
- [38] 杨兰芳, 蔡祖聪. 施氮和玉米生长对土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(1): 100-104.
Yang L F, Cai Z C. Effects of N application and maize growth on N₂O emission from soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(1): 100-104.
- [39] Liu J L, Zhu L, Luo S S, *et al.* Response of nitrous oxide emission to soil mulching and nitrogen fertilization in semi-arid farmland [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **188**: 20-28.

- [40] Nishimura S , Komada M , Takebe M , *et al.* Contribution of nitrous oxide emission from soil covered with plastic mulch film in vegetable field [J]. *Journal of Agricultural Meteorology* , 2014 , **70**(2) : 117-125.
- [41] 朱咏莉,吴金水,韩建刚. 地膜覆盖对土壤中 N_2O 释放的影响[J]. *农业工程学报*, 2004 , **20**(3) : 222-225.
Zhu Y L , Wu J S , Han J G. Effects of clear plastic film mulching on soil N_2O discharge flux [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* , 2004 , **20**(3) : 222-225.
- [42] 韩建刚,白红英,曲东. 地膜覆盖对土壤中 N_2O 排放通量的影响[J]. *中国环境科学* , 2002 , **22**(3) : 286-288.
Han J G , Bai H Y , Qu D. Effects of clear plastic film mulch on the change of soil N_2O discharge flux [J]. *China Environmental Science* , 2002 , **22**(3) : 286-288.
- [43] Arriaga H , Núñez-Zofio M , Larregla S , *et al.* Gaseous emissions from soil biodesinfestation by animal manure on a greenhouse pepper crop [J]. *Crop Protection* , 2011 , **30**(4) : 412-419.
- [44] 高琳,潘志华,杨书运,等. 覆膜对旱地马铃薯田土壤温湿度及温室气体排放的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2017 , **31**(6) : 136-141.
Gao L , Pan Z H , Yang S Y , *et al.* Effect of different plastic film mulching methods on soil temperature-humidity and greenhouse gases emission in the rainfed potato field [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* , 2017 , **31**(6) : 136-141.
- [45] 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.