

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.024

# 覆膜方式对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响

冯浩<sup>1,2</sup> 刘晶晶<sup>1,3</sup> 张阿凤<sup>3,4</sup> 邹小阳<sup>2</sup> 陈海心<sup>3,5</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 5. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 采用静态暗箱-气相色谱法对关中平原小麦-玉米轮作(2014—2015年)农田温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放通量进行监测,并用净增温潜势(NGWP)和碳足迹2个指标评估不同覆膜方式对关中平原农田温室效应、作物生产碳足迹的分布和构成的影响。试验处理设置为不覆膜(CK)、半膜覆盖(BM)、垄作覆膜(LM)、全膜覆盖(QM)。结果表明,与CK处理相比,BM、LM、QM处理下作物年际总产量分别增加了9.0%、16.5%、26.6%;CO<sub>2</sub>的年际排放总量分别增加了33.9%、9.3%、31.6%,N<sub>2</sub>O的年际排放总量分别增加了22.9%、14.3%、47.1%,但CH<sub>4</sub>的年际吸收总量无显著性差异;NGWP分别增加了9.0%、16.7%、26.0%;LM、QM处理碳足迹较CK处理减少了33.2%、21.9%,而BM处理碳足迹与CK处理无显著差异;BM处理单位产量碳足迹较CK处理增加了16.3%,而LM处理较CK处理减少了13.1%,QM处理与CK处理无显著性差异。综合考虑不同覆膜方式的经济效应和环境效应,垄作覆膜更有利于关中平原小麦-玉米轮作系统的固碳减排。

**关键词:** 小麦-玉米;覆膜;温室气体;净增温潜势;碳足迹

**中图分类号:** S162.4<sup>+</sup>1; X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0180-10

## Effect of Film Mulching Patterns on Carbon Sequestration in Wheat – Maize Rotation System

FENG Hao<sup>1,2</sup> LIU Jingjing<sup>1,3</sup> ZHANG Afeng<sup>3,4</sup> ZOU Xiaoyang<sup>2</sup> CHEN Haixin<sup>3,5</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China  
3. Chinese National Academy of Water-saving Agriculture in Arid Region, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
4. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
5. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The greenhouse gases such as methane (CH<sub>4</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) were increased in atmospheric concentration since 1750, which attracted more and more attention regarding climate change. Agriculture activities contributed to the increase of greenhouse gas concentration in the atmosphere, resulting in high global warming potential, which was estimated to contribute about 47% ~ 58% of the total anthropogenic emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O. Film mulching is reported to be a significant agricultural factor which greatly affected greenhouse gas (GHG) emissions and the carbon footprint. The annual GHG emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) from a wheat – maize rotation system during 2014—2015 were monitored by using the static opaque chamber and gas chromatography technique in Guanzhong Plain of China. Four mulching treatments were no mulching (CK), semi-film mulching (BM), ridge-furrow planting with film mulching over ridge (LM) and whole film mulching (QM). Net global warming potential (NGWP) and carbon footprint were used to evaluate the effect of film mulching on GHG emissions and composition of carbon footprint production. The results showed that compared with CK, the BM, LM and QM treatments increased annual crop yield by 9.0%, 16.5% and 26.6%, respectively. Similarly, the BM, LM and QM treatments increased annual CO<sub>2</sub> emission by

收稿日期: 2016-08-08 修回日期: 2016-09-20

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102904)、国家自然科学基金项目(41301305)和西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(2014YB062、2452015355)

**作者简介:** 冯浩(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: nerewsi@vip.sina.com

33.9%, 9.3% and 31.6% and annual  $N_2O$  emission by 22.9%, 14.3% and 47.1%, respectively. However, annual  $CH_4$  emissions showed no significant difference compared with CK. In addition, NGWP was increased by 9.0%, 16.7% and 26.0%, respectively. The carbon footprint of LM and QM treatments was 33.2% and 21.9% lower than that of CK, while BM treatment showed no significant difference compared with CK. Compared with carbon footprint per unit crop yield of CK, that of BM treatment was increased by 16.3%, while that of LM treatment was decreased by 13.1%. Meanwhile, QM treatment showed no significant difference. Considering both the economic and environmental effects of different mulching treatments, ridge-furrow planting with film mulching over ridge in the wheat - maize rotation system was recommended for carbon sequestration and greenhouse gas reduction in Guanzhong Plain of China with the purposes of water saving and carbon sequestration.

**Key words:** wheat - maize; film mulching; greenhouse gas; net global warming potential; carbon footprint

## 引言

温室气体( $CO_2$ 、 $CH_4$ 和 $N_2O$ )大量排放是全球气候变暖及其引起的一系列环境问题的主要原因。2013年联合国环境规划署发布的《碳排放评估报告》指出,农业源温室气体排放量占全球温室气体排放总量的11%,已超过2020年的排放目标<sup>[1-2]</sup>。农业生态系统不仅是温室气体 $CO_2$ 、 $CH_4$ 和 $N_2O$ 的主要排放源,而且还是重要的固碳减排体系,具有很强的固碳潜力<sup>[3]</sup>。地膜覆盖是旱区农业获得高产稳产的重要手段,中国已成为覆膜种植面积最大的国家<sup>[4]</sup>。覆膜具有增温保墒、改善土壤性状和提高水分利用率等诸多优点<sup>[5-6]</sup>,不同的覆膜方式对土壤水热条件的影响存在差异。马忠明等<sup>[7]</sup>研究了不同覆膜方式对旱地土壤水分和温度的影响,发现全膜覆盖和半膜垄作覆盖的0~40 cm土壤含水量较半膜覆盖分别提高了10.61%和6.75%,全膜覆盖和半膜垄作覆盖的0~15 cm土温较半膜覆盖分别增加了1.96℃和1.18℃。土壤水分和土壤温度是温室气体排放与碳循环的关键驱动因子,在一定变化范围内与温室气体排放通量具有显著相关性<sup>[8-9]</sup>。陶丽佳等<sup>[10]</sup>通过马铃薯盆栽试验发现,覆膜促使土壤 $CO_2$ 排放量升高10.4%~94.5%, $CH_4$ 排放量降低5.1%~47.4%。NAN等<sup>[11]</sup>研究发现,覆膜处理的 $CO_2$ 和 $N_2O$ 浓度更高,而 $CH_4$ 浓度更低;覆膜明显促进土壤 $CO_2$ 和 $N_2O$ 排放潜势的提高,而阻碍 $CH_4$ 的排放。NISHIMURA等<sup>[12]</sup>研究了覆膜对菜地 $N_2O$ 气体排放的影响,发现覆膜促进了 $N_2O$ 的排放。目前,关于不同覆膜方式对农田温室效应的影响研究较少且多集中在对单一气体的研究方面。

碳足迹作为新的研究方法得到学术界认可,并成为气候变化领域的研究热点<sup>[13]</sup>。农业碳足迹能够系统地评价耕作、施肥、灌溉和收获等农业生产活

动过程中,由人为因素引起直接和间接的碳排放总量,定量测算农业生产活动对温室效应的影响<sup>[14]</sup>。然而,目前有关中国农田管理对大气温室效应和碳足迹贡献影响的文献中,大多为秸秆还田、免耕、有机肥施用等管理措施的相关研究结果,有关不同覆膜方式影响效应的报道较少。因此,本文以关中平原小麦-玉米轮作农田土壤为研究对象,通过设置不同覆膜方式处理,研究其对冬小麦-夏玉米生长季内土壤温室气体排放规律的影响,用净增温潜势(NGWP)和碳足迹2个指标评估不同覆膜方式下的固碳减排效应,优化田间管理措施,探寻关中平原最佳覆膜种植方式,以期为保障小麦、玉米高产、优质及农业固碳减排提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

田间试验位于陕西关中平原中部杨陵区,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。2014年10月份—2015年10月份总降水量为540.8 mm,年平均温度为14.3℃,试验站内土壤为壤土,0~1 m土层的平均田间持水率为23%~25%,凋萎系数为8.5%(均为质量含水率),播前0~20 cm土壤的有机碳含量为8.23 g/kg,全氮含量为0.95 mg/kg,土壤硝态氮含量为5.41 mg/kg,土壤铵态氮含量为1.35 mg/kg,有效磷( $P_2O_5$ )含量为20.91 mg/kg,速效钾( $K_2O$ )含量为287 mg/kg,pH值(水土质量比1:1)为8.32,土壤容重为1.43 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设不覆膜(CK)、半膜覆盖(BM)、垄作覆膜(LM)、全膜覆盖(QM)4个处理,试验区布置如图1所示。各处理重复3次,共12个小区,每个小区面积为10 m<sup>2</sup>(2 m×5 m),使用塑料薄膜(聚乙烯,膜厚0.008 mm,每平方米质量为

6 g)覆盖,实际使用半膜宽为0.4 m,垄膜宽为0.5 m(垄高15 cm),全膜宽为2.4 m。试验区周围设0.5 m宽的作物保护带。各处理施肥和灌水制度一致,以尿素和磷酸二氢钙作基肥,其他管理措施与当地一致。小麦(小偃22)于2014年10月15日播种(播种密度为187.5 kg/hm<sup>2</sup>),2015年6月6日收获。玉米(秦龙14)于6月11日播种,10月8日收获。各处理灌水和施肥时间及其用量如表1所示。

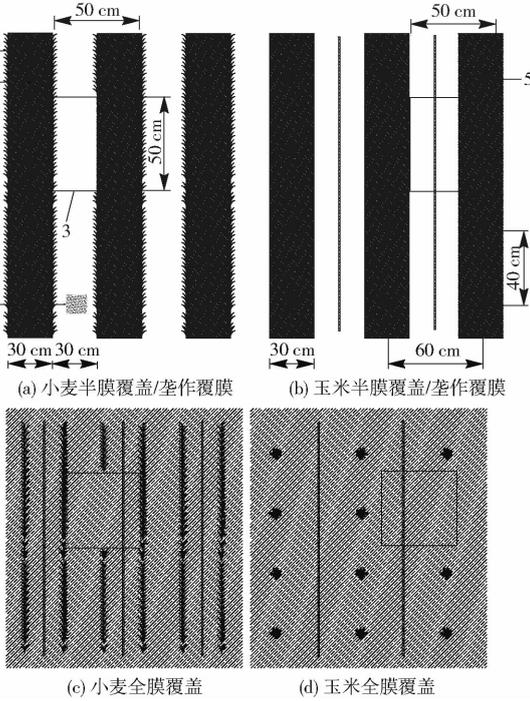


图1 试验布置示意图

Fig. 1 Sketches of experiment arrangement

1. 冬小麦 2. 滴灌带 3. 采气箱 4. 土壤 5. 夏玉米

表1 小麦-玉米季的灌水量和施肥量

Tab. 1 Fertilization rate and irrigation amount in wheat - maize growing season

日期	灌水量/mm	施肥量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
2014-10-15	0	120	100
2014-11-19	30	0	0
2015-03-15	30	0	0
2015-04-09	30	30	0
2015-06-10		225	90
2015-06-12	30	0	0
2015-08-02	30	0	0

### 1.3 测定项目和方法

#### 1.3.1 温室气体采集与测定

温室气体采用静态暗箱-气相色谱法进行采集和测定。采样箱由箱体和底座组成,箱体用PVC材料制成,覆有泡沫和反光材料,尺寸为50 cm × 50 cm × 50 cm,箱内安装搅匀气体的风扇和抽气接口,接口连接三通阀。底座用不锈钢制成,尺寸为

50 cm × 50 cm × 5 cm,底座内无作物,测定裸地土壤温室气体的排放。底座上面附有凹槽,采样之前槽内注水密封以隔绝箱外环境。气体采集时间为09:00—11:00之间。扣箱后立即用60 mL注射器采集样品,然后分别在扣箱后10、20、30 min时采样一次。每10 d采集一次,若施肥、灌溉或降水,则增加采样频率,一共增加采样3次,分别为2015年5月23日、7月16日、8月5日。采样结束后立即带回实验室用气相色谱仪(Agilent 7890 A型,美国安捷伦科技有限公司)进行分析,CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>使用氢火焰离子检测器(FID)测定,载气为氮气,柱温为80℃,检测器温度为200℃,流速为40 mL/min;燃气是氢气,其流速35 mL/min;助燃气是空气,流速350 mL/min。N<sub>2</sub>O使用电子捕获检测器(ECD),载气为氩甲烷,其柱温是65℃,检测器温度330℃,流速为30 mL/min。气体排放速率由4个连续样品浓度的斜率经过线性回归分析得出,排放通量计算式<sup>[14]</sup>为

$$F = H \frac{MP}{R(273 + T)} \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中  $F$ ——气体的排放通量,mg/(m<sup>2</sup>·h)

$H$ ——采样箱高度,m

$M$ ——气体的摩尔质量,g/mol

$P$ ——采样点气压,Pa

$R$ ——普适气体常数,取8.314 Pa·m<sup>3</sup>/(mol·K)

$T$ ——采样时箱内平均气温,℃

$\frac{dc}{dt}$ ——气体排放速率,μL/(L·min)

用内插法估算小麦、玉米生育期CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的排放总量。

#### 1.3.2 产量、温度及含水率测定

小麦收获后,在每个小区选取1 m<sup>2</sup>的样点进行单独收割,风干脱粒后称取籽粒质量并计算产量,最终结果以每公顷小麦产量(t/hm<sup>2</sup>)表示。试验区自动气象站测定每日最高、最低气温和降水量(图2),用地温计测定5 cm深处土壤温度、气密闭箱内空气温度,测定时间为密闭箱置于底座20 min后。采用TDR土壤水分速测仪测定土壤体积含水率,每个小区随机测3个点取平均值,用土壤孔隙度含水率(Water filled pore space, WFPS)表示,计算公式为

$$W_{FPS} = \theta_v / (2.65 - \gamma) \times 100\% \quad (2)$$

式中  $W_{FPS}$ ——土壤孔隙度含水率,%

$\theta_v$ ——土壤体积含水率,%

$\gamma$ ——土壤容重,g/cm<sup>3</sup>

#### 1.4 生态系统净交换量和净增温潜势计算

作物净初级生产力(NPP)作为表征植被活力的关键变量,不仅是有机体能量和物质流动的基础,关

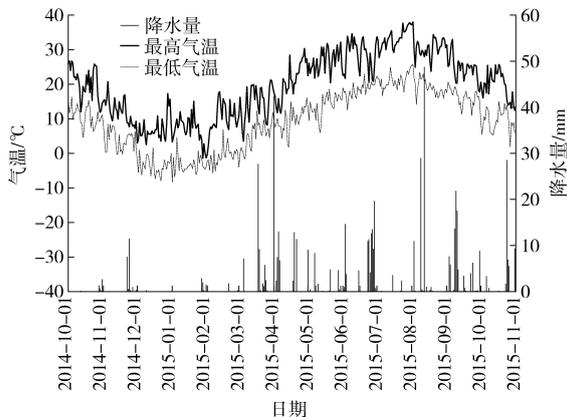


图2 小麦-玉米季的降水量、最低气温和最高气温

Fig.2 Daily precipitation and maximum and minimum air temperatures in wheat - maize growing season

系到生态系统对碳固定能力的强弱。生态系统净交换是指生态系统光同化作用与呼吸作用之间的平衡,表征了陆地生态系统吸收大气  $\text{CO}_2$  的能力。生态系统净交换量(NEE)的计算式<sup>[15-16]</sup>为

$$N_{EE} = R_H - N_{PP} \quad (3)$$

其中  $N_{PP} = 0.446W_{\max} - 0.00067$

式中  $N_{PP}$ ——净初级生产力(以碳等量( $\text{C}_e$ )计),  $\text{kg}/\text{hm}^2$

$W_{\max}$ ——作物收获后地上部分和地下部分生物量的总和,  $\text{kg}$

$R_H$ ——土壤  $\text{CO}_2$  排放量(以  $\text{C}_e$  计),  $\text{kg}/\text{hm}^2$

净增温潜势(NGWP)是参考土壤和生物量排放法(Soil and crop-based approach)<sup>[2]</sup>,由于本研究将物资和农事活动投入计入碳足迹进行评价,所以不再计入到增温潜势,则 NGWP 计算式为

$$N_{GWP} = G_{WP_{NPP}} + G_{WP_{\Delta SOC}} - G_{WP_{CHG_s}} \quad (4)$$

式中  $N_{GWP}$ ——净增温潜势,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 以  $\text{CO}_2$  当量计算

$G_{WP_{NPP}}$ ——净初级生产力的增温潜势,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 以  $\text{CO}_2$  当量计算

$G_{WP_{\Delta SOC}}$ ——试验前后有机碳含量变化的增温潜势,由于本试验只有一年可忽略不计

$G_{WP_{CHG_s}}$ ——土壤  $\text{CO}_2$ (秸秆部分全部以  $\text{CO}_2$  形式排放到大气中<sup>[17]</sup>)、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放总量的增温潜势,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 以  $\text{CO}_2$  当量计算

当  $N_{GWP} > 0$  时,表现为温室气体的汇,反之之源。

### 1.5 碳足迹评价方法与计算

碳足迹的边界为开始种植小麦到收获玉米结束(2014年10月份—2015年10月份),评价农资生产过程中(肥料和农药)的碳排放、农业活动中的能源

消耗(施肥、喷洒农药、耕作、收获、起垄和覆膜)、地膜生产过程中的碳排放、灌溉过程中的能源消耗(电力)、农田生态系统净交换量(NEE)表征生态系统的碳吸收及小麦和玉米生育期内  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量进行分析,评价不同覆膜方式对农田生态系统的固碳能力。

小麦-玉米轮作生长过程总碳足迹  $\text{CF}$  的计算式<sup>[18]</sup>为

$$C_F = \sum A_i E_{F_j} \quad (5)$$

式中  $A_i$ ——各农业投入的总量

$E_{F_j}$ ——相应的排放参数,正值表示碳消耗,负值表示碳吸收

作物生产单位产量碳足迹  $C_{F_y}$ (以  $\text{CO}_2\text{-C}_e$  计)<sup>[19]</sup>计算式为

$$C_{F_y} = \frac{C_F}{T_y} \quad (6)$$

式中  $C_{F_y}$ ——作物生产单位产量碳足迹,  $\text{kg}/\text{t}$

$T_y$ ——小麦和玉米的总产量,  $\text{t}/\text{hm}^2$

## 1.6 数据处理与分析

试验数据均取3次重复的平均值,采用 Microsoft Excel 2013 和 JMP 10.0 (SAS Institute, Cary, NC, USA, 2011) 统计软件进行处理和相关性分析,用 Duncan 法检验差异显著性( $\alpha = 0.05$ )。应用 OriginPro 9.0 软件对数据进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 $\text{CO}_2$ 排放通量的季节变化

从图 3a 和图 4a 中可以看出,各处理小麦-玉米生育期  $\text{CO}_2$  排放通量(以  $\text{CO}_2\text{-C}$  计)季节变化趋势与土壤温度变化规律相似,呈现3月份之前较低、4—8月份较高的趋势。CK 处理的  $\text{CO}_2$  排放通量在冬小麦生长季内基本低于覆膜处理,降水或灌溉使不同覆膜方式处理  $\text{CO}_2$  排放通量差异较大。进入8月份之后伴随温度降低和高频率降水各处理  $\text{CO}_2$  排放通量呈降低趋势(图3)。从表2可知小麦季各覆膜处理  $\text{CO}_2$  排放总量与 CK 处理存在显著性差异( $p < 0.05$ ),玉米季 QM 处理与 CK 处理存在显著性差异( $p < 0.05$ )。BM、LM、QM 处理下,小麦-玉米季  $\text{CO}_2$  排放总量较 CK 处理分别增加了 33.9%、9.3%、31.6%。

### 2.2 土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 排放和吸收通量的季节变化

由图 3b 可知,各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量(以  $\text{N}_2\text{O-N}$  计)在整个小麦-玉米生育期内变化趋势一致,在施肥或灌溉后共出现了4个小排放峰和1个大排放峰,由于小麦季温度较低在施肥或灌溉后只出现小

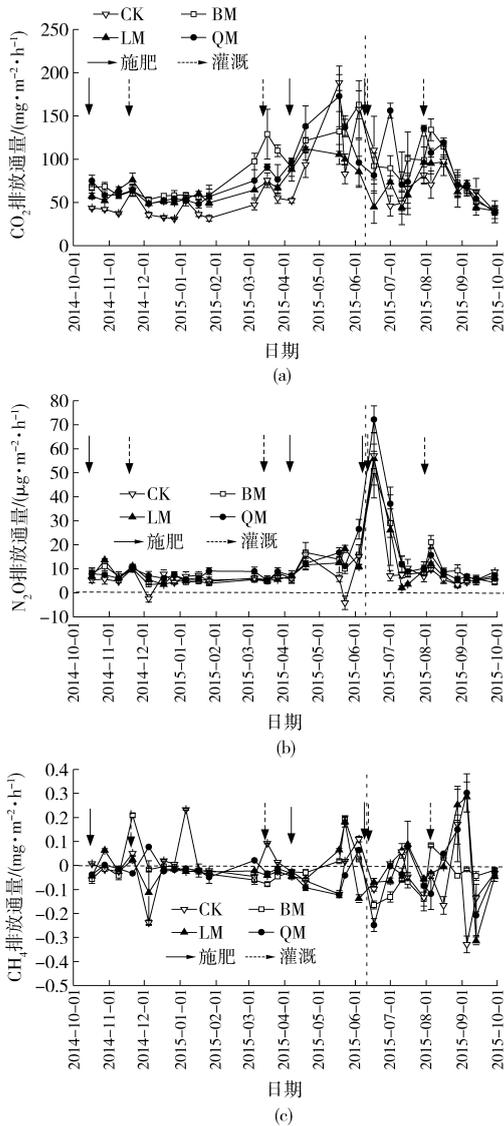


图3 小麦-玉米生长期不同覆膜方式  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  季节性排放通量

Fig. 3 Seasonal emission fluxes of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  under different mulching patterns during wheat - maize growing season

排放峰,且各处理间差异不明显。玉米种植后灌溉、施肥及高温使得各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量出现极大值,各处理差异较明显,最高的 QM 处理达到了  $72.3 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  (6月17日)。从小麦季  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量来看(表2),BM、LM、CK 处理间无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),QM 处理较 CK 处理显著增加 ( $p < 0.05$ )。玉米季 BM、QM 处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量较 CK 处理均显著增加 ( $p < 0.05$ )。总的来说,BM、LM、QM 处理下小麦-玉米季  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量较 CK 处理分别增加了 22.9%、14.3%、47.1%。

从图 3c 可知,小麦-玉米季土壤  $\text{CH}_4$  既有吸收特征又有排放特征,基本上呈现土壤  $\text{CH}_4$  的吸收现象。各处理  $\text{CH}_4$  通量(以  $\text{CH}_4\text{-C}$  计)在  $-0.33 \sim 0.3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  之间变化。灌溉和降水后出现  $\text{CH}_4$  排放现象,总结发现  $\text{CH}_4$  排放现象基本出现在

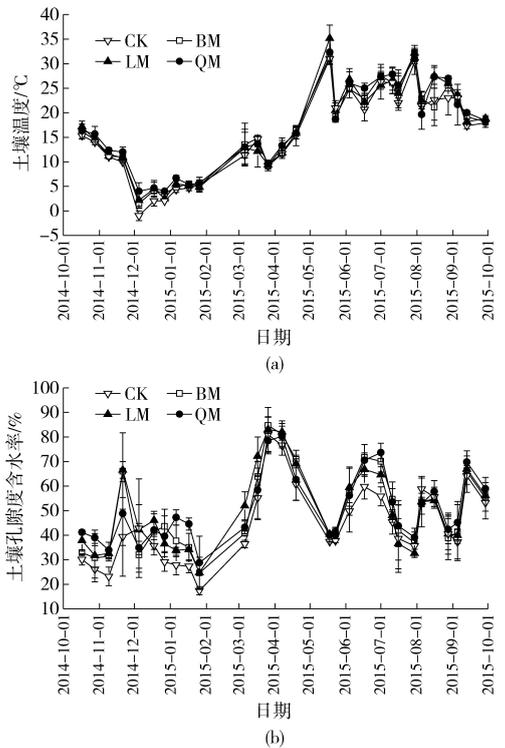


图4 不同覆膜方式土壤温度和土壤孔隙度含水率变化  
Fig. 4 Dynamics of soil temperature and soil WFPS under different mulching patterns

WFPS 大于 60% 时(图 4b)。由表 2 可知,小麦、玉米季各处理土壤均为  $\text{CH}_4$  的汇,小麦季各处理无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),而玉米季 LM、QM 处理较 CK 处理显著降低了  $\text{CH}_4$  的吸收。从年际  $\text{CH}_4$  吸收总量来看,各处理无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。

### 2.3 小麦、玉米产量和 NGWP 的变化

由表 2 可知,覆膜增加了作物产量,小麦季 LM 处理产量较 CK 处理显著增加,BM、QM、CK 处理小麦产量无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),玉米季 QM 处理产量较 CK 处理显著增加,BM、LM、CK 处理玉米产量无显著性差异 ( $p > 0.05$ ) (表 2)。相比 CK 处理,BM、LM、QM 处理的年际总产量分别增加了 9.0%、16.5%、26.6%。本试验 NGWP 主要取决于籽粒产量,各处理的净增温潜势均表现为温室气体的汇,且籽粒产量越多,固碳潜力越大,然而各处理间 NGWP 差异与产量差异一致。BM 处理小麦-玉米季 NGWP 与 CK 处理无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),LM、QM 处理小麦-玉米季 NGWP 较 CK 处理显著增加 16.7%、26.0%。

### 2.4 碳足迹的变化

从小麦-玉米季碳足迹分析可知,不同处理均表现为农田生态系统碳汇(表 3)。LM、QM 处理碳足迹较 CK 处理减少了 33.2%、21.9%,而 BM 处理碳足迹与 CK 处理无显著差异 ( $p > 0.05$ )。从图 5 的碳足迹构成可知,不同处理  $\text{CO}_2$  净交换量(NEE)占

总碳汇的99.2%~99.8%。BM、LM、QM处理总碳消耗量较CK处理增加了41.7%、51.7%、76.9%。碳消耗量的排放来源主要是肥料和地膜,其次是灌溉和N<sub>2</sub>O排放,分别占各处理总碳消耗量的33.1%~

58.6%和27.1%~40.7%、9.9%~17.5%和6.5%~8.6%。从图6可知,BM处理单位产量碳足迹较CK处理增加了16.3%,而LM处理较CK处理减少了13.1%,QM处理与CK处理无显著性差异( $p > 0.05$ )。

表2 不同覆膜方式的产量、温室气体排放总量和净增温潜势

Tab. 2 Yield, annual amount of greenhouse gas emissions and NGWP under different mulching patterns

作物	处理	产量/	CO <sub>2</sub> 排放总量(CO <sub>2</sub> -C)/	CH <sub>4</sub> 排放总量	N <sub>2</sub> O 排放总量(N <sub>2</sub> O-N)/	NGWP/
		(t·hm <sup>-2</sup> )	(kg·hm <sup>-2</sup> )	(CH <sub>4</sub> -C)/(kg·hm <sup>-2</sup> )	(kg·hm <sup>-2</sup> )	(kg·hm <sup>-2</sup> )
小麦	CK	6.58 ± 0.43 <sup>b</sup>	3 476 ± 380 <sup>d</sup>	-0.58 ± 0.20 <sup>a</sup>	0.38 ± 0.06 <sup>c</sup>	10 603 ± 696 <sup>b</sup>
	BM	6.84 ± 0.08 <sup>b</sup>	4 986 ± 127 <sup>a</sup>	-1.04 ± 0.26 <sup>a</sup>	0.47 ± 0.02 <sup>b</sup>	11 063 ± 112 <sup>b</sup>
	LM	7.83 ± 0.15 <sup>a</sup>	4 083 ± 345 <sup>c</sup>	-0.84 ± 0.13 <sup>a</sup>	0.46 ± 0.02 <sup>b</sup>	12 620 ± 248 <sup>a</sup>
	QM	6.80 ± 0.35 <sup>b</sup>	4 669 ± 327 <sup>b</sup>	-1.45 ± 0.23 <sup>a</sup>	0.56 ± 0.01 <sup>a</sup>	10 891 ± 565 <sup>b</sup>
玉米	CK	5.24 ± 0.71 <sup>b</sup>	1 945 ± 380 <sup>bc</sup>	-1.83 ± 0.27 <sup>b</sup>	0.32 ± 0.01 <sup>c</sup>	8 480 ± 1 179 <sup>b</sup>
	BM	6.03 ± 0.44 <sup>b</sup>	2 274 ± 173 <sup>ab</sup>	-1.49 ± 0.36 <sup>b</sup>	0.39 ± 0.04 <sup>b</sup>	9 735 ± 724 <sup>b</sup>
	LM	5.93 ± 0.56 <sup>b</sup>	1 843 ± 248 <sup>c</sup>	-0.33 ± 0.17 <sup>a</sup>	0.34 ± 0.04 <sup>bc</sup>	9 549 ± 911 <sup>b</sup>
	QM	8.16 ± 0.65 <sup>a</sup>	2 462 ± 207 <sup>a</sup>	-0.76 ± 0.26 <sup>a</sup>	0.46 ± 0.02 <sup>a</sup>	13 152 ± 1 053 <sup>a</sup>
年际	CK	11.81 ± 1.11 <sup>c</sup>	5 421 ± 143 <sup>c</sup>	-2.42 ± 0.32 <sup>a</sup>	0.70 ± 0.02 <sup>c</sup>	19 083 ± 1 822 <sup>c</sup>
	BM	12.87 ± 0.49 <sup>bc</sup>	7 260 ± 93 <sup>a</sup>	-2.54 ± 0.35 <sup>a</sup>	0.86 ± 0.08 <sup>b</sup>	20 799 ± 819 <sup>bc</sup>
	LM	13.76 ± 0.71 <sup>ab</sup>	5 926 ± 202 <sup>b</sup>	-1.18 ± 0.32 <sup>a</sup>	0.80 ± 0.03 <sup>b</sup>	22 269 ± 1 158 <sup>ab</sup>
	QM	14.95 ± 1.00 <sup>a</sup>	7 132 ± 274 <sup>a</sup>	-2.20 ± 0.21 <sup>a</sup>	1.03 ± 0.02 <sup>a</sup>	24 043 ± 726 <sup>a</sup>

注:同列不同字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

表3 不同覆膜方式的碳消耗

Tab. 3 Carbon cost of different mulching patterns

排放来源	项目	排放量	农业用量	碳消耗量(以CO <sub>2</sub> -C <sub>e</sub> 计)/(kg·hm <sup>-2</sup> )			
				CK	BM	LM	QM
肥料	N	1.52 kg/hm <sup>2</sup> [20]	375 kg/hm <sup>2</sup>	570	570	570	570
	P	0.2 kg/hm <sup>2</sup> [20]	190 kg/hm <sup>2</sup>	38	38	38	38
农药		4.88 kg/hm <sup>2</sup> [20]	14.8 kg/hm <sup>2</sup>	72.2	72.2	72.2	72.2
农业活动	耕作	15.2 kg/(hm <sup>2</sup> ·次)[21]	2次	30.4	30.4	30.4	30.4
	施肥	0.9 kg/(hm <sup>2</sup> ·次)[21]	3次	2.7	2.7	2.7	2.7
	喷洒农药	1.4 kg/(hm <sup>2</sup> ·次)[21]	5次	7	7	7	7
	收获	22.9 kg/(hm <sup>2</sup> ·次)[21]	2次	45.8	45.8	45.8	45.8
	起垄	0.25 kg/(人·d)[22]	4人	0	0	12	0
	覆膜	0.25 kg/(人·d)[22]	4人	0	14	14	10
	地膜	5.18 kg/kg[23]		0	397.8	497.3	746
灌溉	电力	0.92 kg/(kW·h)[24]		181.9	181.9	181.9	181.9
	N <sub>2</sub> O	298 kg/kg[25]		89.4	110.3	102.7	131.4
温室气体排放量	CH <sub>4</sub>	34 kg/kg[25]		-29.9	-35.5	-14.6	-27.3
	CO <sub>2</sub> 净交换量	NEE		-6 874.1	-6 761.5	-9 376.9	-8 960.8
总碳足迹	CF			-5 872.6 <sup>a</sup>	-5 332.5 <sup>a</sup>	-7 823.0 <sup>b</sup>	-7 158.2 <sup>b</sup>

### 3 讨论

#### 3.1 不同覆膜方式对温室气体排放的影响

覆膜可改善土壤水热状况,从而增强土壤微生物生长和活性<sup>[26]</sup>和其他影响土壤CO<sub>2</sub>通量的土壤性质,如土壤孔隙度<sup>[27]</sup>。土壤CO<sub>2</sub>排放通量趋势与气温、土壤温度变化趋势基本一致,且与土壤温度呈显著正相关(表4),而土壤水分状况对CO<sub>2</sub>产生与

排放的影响机制主要体现在土壤通气性和土壤溶解性有机质含量的变化方面,土壤过湿或过干都会抑制土壤微生物活动。在小麦和玉米生长期,不同覆膜方式处理均可促进CO<sub>2</sub>排放,因为覆膜改善土壤水热,从而增强土壤微生物活性,加速土壤有机质的分解<sup>[28]</sup>,且有利于植物根系和土壤微生物呼吸产生CO<sub>2</sub>,增加了土壤CO<sub>2</sub>浓度<sup>[29-30]</sup>,与本研究的结论一致。但有研究认为覆膜的物理阻隔大,从而降低

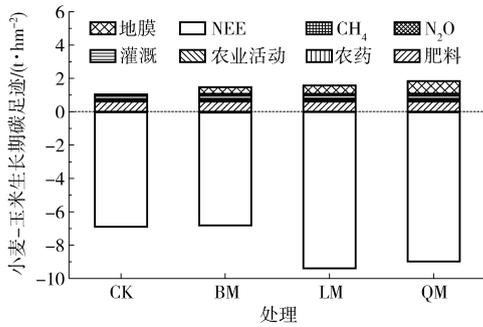


图5 不同覆膜方式的小麦-玉米季碳足迹构成

Fig. 5 Composition of carbon footprint of wheat - maize growing season under different mulching patterns

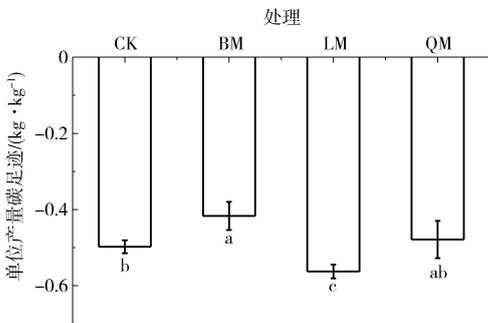


图6 不同覆膜方式的单位小麦-玉米产量的碳足迹

Fig. 6 Carbon footprint of per wheat - maize yield under different mulching patterns

表4 不同覆膜方式与土壤温度(5 cm)和土壤孔隙度含水量(10 cm)的相关系数

Tab. 4 Single Pearson correlation coefficient of each emission with soil temperature (5 cm) and WFPS (10 cm) under different mulching patterns

环境因子	CK			BM			LM			QM		
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
土壤温度	0.891 **	0.043	0.231	0.701 *	0.178	0.438	0.655 *	0.236	0.260	0.875 **	0.211	0.484
土壤湿度	0.227	-0.036	0.234	0.334	-0.056	0.407	0.229	-0.363	0.253	0.405	-0.293	0.576 *

注: \*表示在  $p < 0.05$  水平显著相关; \*\*表示在  $p < 0.01$  水平显著相关。

能增加土壤 N<sub>2</sub>O 的排放量<sup>[34]</sup>。NIAHIMURA 等<sup>[12]</sup> 研究发现,透过地膜的 N<sub>2</sub>O 通量比从水平方向扩散的更高, N<sub>2</sub>O 透过地膜排出,其通透性随周围环境温度的增加而增强,这可能是本研究中 QM 处理在小麦-玉米季 N<sub>2</sub>O 排放量高于其他处理的原因。

土壤 CH<sub>4</sub> 的产生是产甲烷菌与甲烷氧化菌共同作用的结果,而旱地一般认为是 CH<sub>4</sub> 的汇<sup>[35]</sup>。CH<sub>4</sub> 在土壤中的排放和吸收受农业管理措施和气候季节性变化规律的影响。CUELLO 等<sup>[28]</sup> 研究结果表明地膜覆盖减少了土壤 CH<sub>4</sub> 的吸收,因为地膜覆盖使土壤中氧气含量减少,微生物通常是在土壤厌氧条件下分解土壤中有有机物。本试验各处理在冬小麦返青期之前 WFPS 较低,基本处于 20% ~ 45% 之间。KHALIL 等<sup>[36]</sup> 试验发现,WFPS 对 CH<sub>4</sub> 氧化速率有显著影响,WFPS 为 30% 时土壤中 CH<sub>4</sub> 氧化速率最低。然而小麦季覆膜处理土壤对 CH<sub>4</sub> 的吸收与 CK 处理无显著性差异。相反,本试验玉米季高

了 CO<sub>2</sub> 排放通量<sup>[10,29,31]</sup>,本研究得出覆膜增加了 CO<sub>2</sub> 排放通量,这可能是由于膜的渗透性导致 CO<sub>2</sub> 排放增加。因此,与前人研究 CO<sub>2</sub> 排放通量的差异可能原因有两方面:一是覆膜土壤储存的高浓度 CO<sub>2</sub> 可能通过膜的渗透<sup>[12]</sup> 和水平扩散而进入大气<sup>[32]</sup>;二是未种植作物的气体采集区周围分布了少量作物根系,土壤 CO<sub>2</sub> 排放量的测定没有为温室气体效应提供一个可靠的估计,而该效应与 CO<sub>2</sub> 净排放量(植株根系光合作用和呼吸作用及土壤呼吸作用的净值)相关。

不同管理措施下 N<sub>2</sub>O 排放量与氮肥施用、土壤水分、土壤温度都呈正相关<sup>[31,33]</sup>,这与本研究结果一致(表4)。覆膜措施下,土壤的水热条件明显得到协同改善。此时,土壤微生物的活性和数量迅速增加,使得土壤硝化和反硝化过程加强,土壤中 N<sub>2</sub>O 产生和排放量也随之明显增加。此外,由于地表的覆盖,西北干旱半干旱地区土壤表层较为常见的干湿交替和冻融交替过程被有效地抑制,使得以此方式损耗的氮素减少,膜下的氮素得到一定程度地累积,在土壤水热条件较好时,土壤微生物过程加强,氮素作为反硝化过程的底物,该累积过程反倒有可

频率降水使各处理 WFPS 增加,土壤处于厌氧状态促进了甲烷菌分解有机物,丁维新等<sup>[37]</sup> 研究表明甲烷氧化率与土壤湿度呈负相关,这与本研究结果一致(表4)。因此,垄作的集水作用和覆膜的保水作用使得玉米季 LM、QM 处理显著减少了土壤 CH<sub>4</sub> 的吸收。

### 3.2 不同覆膜方式对 NGWP 的影响

赵自超等<sup>[2]</sup> 用土壤碳库排放法、生物量法、土壤和生物量排放法来评估硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果,其中土壤和生物量排放法综合考虑了温室气体和农田的作物产量。这里采用此方法评估不同覆膜方式之间对农田生态系统的固碳潜力,主要取决于 NPP,虽然各覆膜处理的 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 排放总量较 CK 处理有所增加,但其本身所占 NGWP 比重较小,这与刘巽浩等<sup>[38]</sup> 的研究结果一致。本试验将 NPP 移出农田部分的收获物(作物籽粒)作为固碳单元,故整个系统移出农

田部分越高(产量越高),固碳潜力越大。岳维云等<sup>[39]</sup>研究不同覆膜方式下冬小麦增产效应由大到小表现为:全膜覆土、膜侧(起垄覆膜侧播)、全膜穴播、露地,这与本试验冬小麦产量LM处理高于QM处理的结果一致。李尚中等<sup>[40]</sup>探求不同覆膜方式对旱地农田玉米产量的影响时产量结果由大到小为:全平膜穴播、宽平膜、膜侧(起垄覆膜侧播)、露地,这与本文的试验结果一致。各处理之间的籽粒产量差异与NGWP差异基本一致。CK、BM、LM和QM处理NGWP分别高达19 083、20 799、22 269、24 043 kg/hm<sup>2</sup>,相比赵自超等<sup>[2]</sup>的研究结果要高,这是因为灌溉、机械和肥料施用等农事活动所造成的CO<sub>2</sub>排放当量没有计入,而是把这一部分放入碳足迹来评价,且高籽粒产量和N<sub>2</sub>O排放是LM、QM处理下NGWP高于其他2个处理的原因所在。

### 3.3 不同覆膜方式对碳足迹的影响

许多研究在评价农田生态系统碳平衡时,只考虑了农业投入产生的碳足迹,而没有考虑土壤呼吸CO<sub>2</sub>排放量、生态系统净初级生产力以及农田生态系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放量<sup>[18-20,41]</sup>。本研究综合考虑这些方面全面系统地分析不同灌溉量对农田生态系统的碳平衡的影响。碳足迹是碳汇和碳源(总碳消耗量)的差值,本试验各处理NEE占碳汇的99.2%~99.8%。成功等<sup>[14]</sup>研究结果表明各处理NEE占碳汇的97.0%~99.7%。可见NEE是影响碳汇的最关键因子,而NEE主要受温度、降水等气候因子及农田管理措施影响<sup>[42]</sup>。徐昔保等<sup>[43]</sup>研究结果表明太湖流域典型稻麦轮作农田年NEE为-7 494~-7 853 kg/hm<sup>2</sup>。这与本研究NEE值(-5 332.5~-7 823 kg/hm<sup>2</sup>)结果相近。本试验中,相比CK处理,BM处理既增加了NPP也增加了土壤呼吸,使得生态系统碳足迹无显著差异,LM、QM处理显著增加了NPP,但土壤呼吸增加比例不大,从而减少了NEE。可见不同覆膜方式在不同程度上改善了土壤水热条件,活化土壤养分,促进作物

地上和地下部分的生长(即碳的固定)。从碳足迹的构成可知(图5),碳消耗的排放来源主要是肥料和地膜,主要原因是化肥本身在生产和运输的过程中需要消耗大量的化石燃料,另一方面化肥施用量相对较多,造成化肥部分的碳排放量相对最大<sup>[41]</sup>。覆膜虽增加了农田生态系统的碳汇,但在生产和使用过程中的碳消耗量占总碳消耗量的27.3%~40.9%。因此,高效利用地膜能有效减少碳消耗。LM处理显著减少了单位产量碳足迹,是因为较CK处理产量增加幅度小于碳足迹减小幅度。

## 4 结论

(1)覆膜的增温保墒作用促进水分消耗由物理过程向生理过程转化,由无效消耗向有效消耗转化,从而有效增加作物籽粒产量。不同覆膜方式改善土壤理化性质的程度不同,对作物的增产效应也不同,本研究半膜覆盖、垄作覆膜、全膜覆盖条件下作物年总产量较不覆膜处理分别增加了9.0%、16.5%、26.6%。

(2)覆膜处理小麦-玉米季CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放总量较不覆膜处理分别增加了9.3%~33.9%和14.3%~47.1%。各处理CH<sub>4</sub>吸收无显著性差异( $p > 0.05$ )。相关性分析表明,土壤温度和水分是影响温室气体排放的重要因素。

(3)净增温潜势(NGWP)和碳足迹2个指标评价时,结果存在差异。全膜覆盖处理NGWP较不覆膜处理显著增加了26.0%,垄作覆膜处理与全膜覆盖处理无显著性差异( $p > 0.05$ )。而半膜覆盖处理NGWP与不覆膜处理无显著性差异( $p > 0.05$ )。半膜覆盖处理单位产量碳足迹较不覆膜处理增加了16.3%,而垄作覆膜处理较不覆膜处理减少了13.1%,QM处理与CK处理无显著性差异( $p > 0.05$ )。因此,综合2个指标考虑不同覆膜方式的经济效应和环境效应,垄作覆膜处理更有利于关中平原小麦-玉米轮作系统的固碳减排。

## 参 考 文 献

- 1 UNEP. The global launch of the emissions gap report[R]. United Nations Environment Programme, Nairobi, 2013.
- 2 赵自超,韩笑,石岳峰,等. 硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 254-262.  
ZHAO Zichao, HAN Xiao, SHI Yuefeng, et al. Effect of nitrification and urease inhibitor on carbon sequestration and greenhouse gas emissions in winter wheat and summer maize rotation system in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 254-262. (in Chinese)
- 3 IPCC. Change in atmospheric constituents and in radioactive forcing[R]. Climate Change. The Physical Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2007.
- 4 邢旭光,赵文刚,马孝义,等. 覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 146-153. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150722&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150722&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.022.

- XING Xuguang, ZHAO Wen'gang, MA Xiaoyi, et al. Temporal stability of soil salinity in root zone of cotton under drip irrigation with plastic mulch[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 146 - 153. (in Chinese)
- 5 苏旺, 屈洋, 冯佰利, 等. 沟垄覆膜集水模式提高糜子光合作用和产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 137 - 145.  
SU Wang, QU Yang, FENG Baili, et al. Photosynthesis characteristics and yield of broomcorn millet under film mulching on ridge-furrow for harvesting rainwater model in semi-arid region of Northern Shaanxi[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 137 - 145. (in Chinese)
- 6 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[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 110 - 116.  
LIU Fang, LI Tian'an, FAN Xiaolin. Methane emission and its relationship with soil temperature and moisture during rice growth in film mulching upland rice field in South China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 110 - 116. (in Chinese)
- 7 马忠明, 白玉龙, 薛亮, 等. 不同覆膜栽培方式对旱地土壤水热效应及西瓜产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 514 - 522.  
MA Zhongming, BAI Yulong, XUE Liang, et al. Effects of different plastic film mulching methods on soil water and temperature as well as watermelon yield in loess dry land[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(3): 514 - 522. (in Chinese)
- 8 FLANAGAN L B, JOHNSON B G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(3-4): 237 - 253.
- 9 NORTON U, MOSIER A R, MORGAN J A, et al. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheat grass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(6): 1421 - 1431.
- 10 陶丽佳, 王凤新, 顾小小. 膜下滴灌对土壤 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 浓度的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 330 - 336.  
TAO Lijia, WANG Fengxin, GU Xiaoxiao. Influence of drip irrigation under plastic film mulching on concentration of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 330 - 336. (in Chinese)
- 11 NAN W G, YUE S C, HUANG H Z, et al. Effects of plastic film mulching on soil greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) concentration within soil profiles in maize fields on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(2): 451 - 464.
- 12 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.
- 13 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203 - 208.  
DUAN Huaping, ZHANG Yue, ZHAO Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 203 - 208. (in Chinese)
- 14 成功, 张阿凤, 王旭东, 等. 运用“碳足迹”的方法评估小麦秸秆及其生物质炭添加对农田生态系统净碳汇的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 604 - 612.  
CHENG Gong, ZHANG Afeng, WANG Xudong, et al. Assessment of wheat straw and its biochar effects on carbon sink in agricultural ecosystems using “carbon footprint” method[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(3): 604 - 612. (in Chinese)
- 15 OSAK M, SHIANN T, TADANO T, et al. Carbon - nitrogen interaction model in field crop production[J]. Plant and Soil, 1993, 155 - 156(1): 203 - 206.
- 16 RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71 - 90.
- 17 黄坚雄, 隋鹏, 高旺盛, 等. 华北平原玉米 II 大豆间作农田温室气体排放及系统净温室效应评价[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 66 - 74.  
HUANG Jianxiong, SUI Peng, GAO Wangsheng, et al. Effect of maize - soybean inter cropping on greenhouse gas emission and the assessment in North China Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(4): 66 - 74. (in Chinese)
- 18 LIU Q, LIU B, AMBUS P, et al. Carbon footprint of rice production under biochar amendment—a case study in a Chinese rice cropping system[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2016, 8(1): 148 - 159.
- 19 王占彪, 王猛, 陈阜. 华北平原作物生产碳足迹分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 83 - 92.  
WANG Zhanbiao, WANG Meng, CHEN Fu. Carbon footprint analysis of crop production in North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(1): 83 - 92. (in Chinese)
- 20 LAL R. Carbon emission from farm operations[J]. Environment International, 2004, 30(7): 981 - 990.
- 21 HILLIER J, HAWES C, SQUIRE G, et al. The carbon footprints of food crop production[J]. International Journal of Agricultural Sustainability, 2009, 7(2): 107 - 118.
- 22 YANG S H. Primary study on effect of C—O balance of afforestation trees in cities[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 1996, 9(1): 37 - 39
- 23 殷文, 史倩倩, 郭瑶, 等. 秸秆还田, 一膜两年用及间作对农田碳排放的短期效应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 716 - 724.  
YIN Wen, SHI Qianqian, GUO Yao, et al. Short-term response of farmland carbon emission to straw return, two-year plastic film

- mulching and intercropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(6): 716–724. (in Chinese)
- 24 MOSIER A R, HALVORSON A D, RETLE C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1584–1598.
- 25 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate change 2013: the physical science basis* [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- 26 SINGH H V. Soil carbon sequestration and rhizospheric microbial population in apricot orchards following plastic film mulching under cold arid region[J]. *International Journal of Horticulture*, 2013, 3: 35–41.
- 27 RETH S, GOCKEDE M, FALGE E. CO<sub>2</sub> efflux from agricultural soils in Eastern Germany—comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, 80(2): 105–120.
- 28 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.
- 29 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.
- 30 ZHAO Z M, ZHAO C Y, YILIHAMU Y, et al. Contribution of root respiration to total soil respiration in a cotton field of Northwest China[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(2): 223–228.
- 31 OKUDA H, NODA K, SAWAMOTO T, et al. Emission of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> and uptake of CH<sub>4</sub> 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.
- 32 俞永祥, 赵成义, 贾宏涛, 等. 覆膜对绿洲棉田土壤 CO<sub>2</sub> 通量和 CO<sub>2</sub> 浓度的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 155–160.  
YU Yongxiang, ZHAO Chengyi, JIA Hongtao, et al. Effects of plastic film mulching on soil CO<sub>2</sub> efflux and CO<sub>2</sub> concentration in an oasis cotton field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 155–160. (in Chinese)
- 33 XU Y C, SHEN Q R, LI M L, et al. Effect of soil water status and mulching on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission from lowland rice field in China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(3): 215–217.
- 34 白红英, 韩建刚, 张一平. 覆盖种植措施对农田土壤中 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(4): 394–396.  
BAI Hongying, HAN Jian'gang, ZHANG Yiping. Effects of mulching and planting on N<sub>2</sub>O discharge flux from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(4): 394–396. (in Chinese)
- 35 DALAL R C, ALLEN D E, LIVESLEY S J, et al. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review[J]. *Plant and Soil*, 2008, 309(1–2): 43–76.
- 36 KHALIL M I, BAGGS E M. CH<sub>4</sub> oxidation and N<sub>2</sub>O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH<sub>4</sub> concentrations[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(10): 1785–1794.
- 37 丁维新, 蔡祖聪. 土壤甲烷氧化菌及水分状况对其活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 94–97.  
DING Weixin, CAI Zucong. Mechanism of methane oxidation by methanotrophs and effect of soil moisture content on their activity [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(1): 94–97. (in Chinese)
- 38 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用—兼析中国集约农作碳效率(续)[J]. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(1): 1–7.  
LIU Xunhao, XU Wenxiu, LI Zengjia, et al. Missteps improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficient of China's intensive farming[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(1): 1–7. (in Chinese)
- 39 岳维云, 宋建荣, 赵尚文, 等. 不同覆膜方式对地温及冬小麦地上干物质累积规律的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(4): 133–139.  
YUE Weiyun, SONG Jianrong, ZHAO Shangwen, et al. Influence of film mulching on soil temperature and dry matter accumulation of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 133–139. (in Chinese)
- 40 李尚中, 王勇, 樊廷录, 等. 旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(5): 922–931.  
LI Shangzhong, WANG Yong, FAN Tinglu, et al. Effects of different plastic film mulching modes on soil moisture, temperature and yield of dryland maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(5): 922–931. (in Chinese)
- 41 史磊刚, 陈阜, 孔凡磊, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J]. *中国人口资源与环境*, 2011, 21(9): 93–98.  
SHI Leigang, CHEN Fu, KONG Fanlei, et al. Carbon footprint of winter wheat – summer maize cropping pattern on North China Plain[J]. *China Population Resources and Environment*, 2011, 21(9): 93–98. (in Chinese)
- 42 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制[J]. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2006, 36(A01): 210–223.  
LI Jun, YU Qiang, SUN Xiaomin, et al. Carbon exchange and its environmental regulation mechanism of farmland ecosystem in North China Plain[J]. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(A01): 210–223. (in Chinese)
- 43 徐昔保, 杨桂山, 孙小祥. 太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6655–6665.  
XU Xibao, YANG Guishan, SUN Xiaoxiang. Analysis of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) in the rice – wheat rotation agroecosystem of the Lake Taihu Basin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6655–6665. (in Chinese)