

覆膜方式对旱作夏玉米产量和 温室气体排放的影响

杨睿,郑静,范军亮,张凯宝,廖振棋,
许新宇,赖珍林,白文强

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:在西北半湿润易旱区雨养条件下,研究了不同覆膜方式对夏玉米土壤水分、温度、生长、产量及温室气体排放的影响。以平作无覆盖为对照(CK),设置4种覆膜方式:垄沟种植垄覆白膜(T1)、垄沟种植垄覆黑膜(T2)、连垄沟播白膜全覆盖(T3)和连垄沟播黑膜全覆盖(T4)。结果表明:与平作无覆盖相比,地膜覆盖显著增加了表层土壤温度和土壤含水量,促进了夏玉米生长;T1、T2、T3、T4处理产量比CK分别增加了19.32%、8.88%、25.59%、29.61%,水分利用效率分别增加了25.95%、14.71%、41.22%、44.20%;各处理 N_2O 和 CO_2 排放趋势一致, N_2O 排放峰值出现在苗期,T1、T2、T3和T4处理 N_2O 各生育期排放总量分别比CK高178.26%、134.78%、334.78%、256.52%,T3与T4处理 CO_2 各生育期排放总量显著高于T1和T2处理,且各处理都显著高于CK; CH_4 排放无明显趋势,T1、T2、T3、T4处理都增加了 CH_4 吸收总量;T1、T2、T3、T4处理温室气体增温潜势(GWP)均显著高于CK,T3与T4处理GWP无显著差异,但都显著高于T2处理;T1、T2、T3、T4处理气体排放强度(GHGI)分别比CK高151.93%、124.65%、246.53%、186.90%,T3处理GHGI显著高于T4处理。综合考虑产量与温室气体排放,连垄沟播黑膜全覆盖为该地区旱作夏玉米绿色高效生产适宜的覆膜方式。

关键词:夏玉米;覆膜方式;连垄沟播;产量;温室气体

中图分类号:S513 **文献标志码:**A

Effects of different film mulching methods on greenhouse gas emissions and yield of dryland summer maize

YANG Rui, ZHENG Jing, FAN Junliang, ZHANG Kaibao, LIAO Zhenqi,
XU Xinyu, LAI Zhenlin, BAI Wenqiang

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education,
Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The effects of different film mulching methods on soil moisture, temperature, greenhouse gas emissions, growth and yield of dryland summer maize were explored in the semi-humid and drought-prone region of Northwestern China. This study set up a plat cultivation without mulching (CK) and four film mulching methods including white film-mulched ridge plus bare furrow (T1), black film-mulched ridge plus bare furrow (T2), continuous furrow mulched with white film (T3), and continuous furrow mulched with black film (T4). The results showed that film mulching significantly increased the surface soil temperature and soil water content and also promoted the summer maize growth compared with CK. Compared with CK, T1, T2, T3, and T4 increased maize yield by 19.32%, 8.88%, 25.59%, and 29.61%, and enhanced water use efficiency by 25.95%, 14.71%, 41.22%, and 44.20%, respectively. The emission trends of N_2O and CO_2 at different growth stages of summer maize were similar in different film mulching methods. The peak of N_2O emission occurred at the seedling stage, and the N_2O emissions of T1, T2, T3, and T4 treatments in each growth period were 178.26%, 134.78%, 334.78%, and 256.52% high-

er than CK, respectively. The total emissions of CO_2 of T3 and T4 in each period were significantly higher than those of T1 and T2, and that of each treatment was significantly higher than that of CK. There was no obvious trend in CH_4 emissions, but T1, T2, T3, and T4 all increased the total amount of CH_4 absorption. The greenhouse gas warming potential (*GWP*) of T1, T2, T3, and T4 were significantly higher than that of CK. There was no significant difference in *GWP* between T3 and T4, but all of them were significantly higher than that of T2. T1, T2, T3, and T4 increased the gas emission intensity (*GHGI*) by 151.93%, 124.65%, 246.53%, and 186.90% compared with CK, respectively, and the *GHGI* of T3 was significantly higher than that of T4. Comprehensively, considering maize yield and greenhouse gas emission, continuous furrow mulched with black film is more suitable for sustainable and high-efficient dryland summer maize production in this area.

Keywords: summer maize; film mulching methods; continuous furrow; yield; greenhouse gas

玉米是西北干旱、半干旱地区的主要粮食作物之一,然而,西北旱作区年降水稀少、年内分布不均的特点制约了玉米的水分高效利用和高产效应^[1-2]。垄沟集雨覆盖系统被广泛应用在干旱半干旱地区来加强农田土壤的储水能力^[3-4]。垄沟集雨系统可以使降雨顺垄流入沟中,增加降雨入渗,从而有效增加土壤水分^[5-7]。起垄可以增加农田的面积,使农田表面接受更多的太阳辐射,从而增加了土壤表层温度和热传递能力^[8-9]。大部分研究表明,覆盖在地表形成了一层屏障,尤其是气密性较强的地膜覆盖,能减少空气流动,从而有效阻止水分蒸发和热量散失,具有增温保温、保水保肥、增加作物产量等作用^[10-15]。然而也有研究表明,地膜覆盖保墒节水的作用不明显,白色地膜覆盖引起的高温会导致夏玉米早衰和减产^[16]。

随着近年来严重的全球变暖和气候异常问题,很多研究开始着重于垄沟集雨覆盖系统对于温室气体排放等环境效应的影响。温室气体主要包括 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等,而农田生态系统是温室气体排放的主要来源之一^[17]。垄沟集雨覆盖系统可以通过改变土壤的温度、水分、性质和肥力等因素来影响农田中的温室气体排放^[18]。涂纯等^[19]研究发现,地膜覆盖比不覆盖显著增加了土壤呼吸量,导致土壤 CO_2 释放显著增加。然而也有研究发现,在 2012 年和 2013 年的中国北方玉米农田,不覆膜处理下的土壤 CO_2 排放量比覆膜处理分别高出 35.4% 和 19.9%^[20]。张凯莉等^[21]认为,地膜覆盖不同程度地降低了土壤各土层 CH_4 的浓度。李志国等^[22]研究发现,与传统无膜漫灌相比,覆膜滴灌可以改变旱田传统无膜漫灌栽培土壤与大气 CH_4 的交换方向,促进土壤 CH_4 向大气的排放,同时使 N_2O 的排放量显著减小。倪雪等^[23]研究发现,地膜覆盖对 N_2O 排放通量有显著影响,春夏季覆膜可显著减少 N_2O 的排放量,而在秋季和冬季有相反的效果。由

此可见,地膜覆盖对农田温室气体排放的影响研究结果也不尽相同。

目前,国内对垄沟覆盖模式的研究多集中在垄沟集雨下不同覆盖方式的覆盖效应对比研究,而对于连垄种植模式少有研究,特别是不同颜色地膜覆盖对土壤水热状况、作物生长、水分利用效率和温室气体排放等综合影响研究还较少。本文研究了不同覆膜方式和地膜颜色对夏玉米生长、农田水热状况及产量、水分利用效率、温室气体排放的影响,以期探索适宜西北地区夏玉米生长的覆膜方式,为旱作夏玉米绿色高产高效生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年 6—10 月在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室节水灌溉试验站 ($108^\circ 24' \text{E}$, $34^\circ 20' \text{N}$) 进行。试验区属于暖温带季风半湿润气候区,海拔 524.7 m,年平均温度为 12.9°C ,多年平均降水量 580 mm (主要集中在 7、8、9 月),年平均蒸发量 1 500 mm。试验期间日平均气温为 22.74°C ,降雨量为 529.6 mm (图 1),整个生育期降雨分布较均匀。试验区的土壤质地是重壤土,0~100 cm 土层的田间持水量为 23%~25%,凋萎含水量为 8.5%,0~20 cm 土层的土壤 pH 值为 8.14,有机质含量为 $12.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮为 $0.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷为 $8.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮为 $55.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24]。

1.2 供试材料

试验所用地膜宽 100 cm,厚 0.008 mm。试验所用氮肥为尿素 ($\text{N} \geq 46\%$),磷肥为过磷酸钙 ($\text{P}_2\text{O}_5 \geq 16\%$),钾肥为农业用硫酸钾 ($\text{K}_2\text{O} \geq 51\%$)。供试玉米品种为郑单 958,为中熟品种,该品种具有高产稳产、适应性广的优点,在我国西北地区广泛种植。

1.3 试验设计

试验设置 5 个处理:(1)平作无覆盖(CK);

(2) 垄沟种植垄覆白膜(T1);(3) 垄沟种植垄覆黑膜(T2);(4) 连垄沟播白膜全覆盖(T3);(5) 连垄沟播黑膜全覆盖(T4)(图 2)。每个处理 3 个重复,随机区组排列,共 15 个小区。小区面积 25 m²(5 m×5 m),试验区周围布设 2 m 保护带,相邻 2 个小区间设 0.5 m 宽的隔离带。试验田按照氮肥 200 kg·hm⁻²、磷肥 120 kg·hm⁻²、钾肥 60 kg·hm⁻²在播种前一次性施入。夏玉米于 2019 年 6 月播种,10 月收获,行距 60 cm,株距 30 cm,南北向种植。出苗后及时间苗,生育期除草 1 次、施药除虫 2 次,未进行追肥和补灌。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤温度和水分 在各处理两行玉米之间土壤中连续安装了 5 个地温计,深度分别为 5、10、15、20、25 cm,在各生育期的 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 连续 3 d 分别观测土壤温度,其中垄沟种植的处理于垄上与沟内采样取平均值。

于夏玉米播种前、苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期采用土钻法在两行玉米中间分别测量 0~100 cm 土层土壤含水量,每隔 20 cm 取 1 个土样,其中垄沟种植的处理于垄上与沟内采样取平均值,用烘干法测定土壤含水量。

1.4.2 夏玉米生长指标 在夏玉米苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期,使用卷尺以及游标卡尺测定株高、茎粗和叶面积指数。将夏玉米植株分离为茎、叶、穗、果,105℃ 杀青 30 min,在 75℃ 下烘干至恒重,使用天平称重。

1.4.3 夏玉米产量 收获时各小区随机选取 10 株,3 次重复,共计 30 株,风干至籽粒水分质量分数为 14%时测定产量及其产量组成。收获指数(HI)是由玉米产量除以地上生物量。

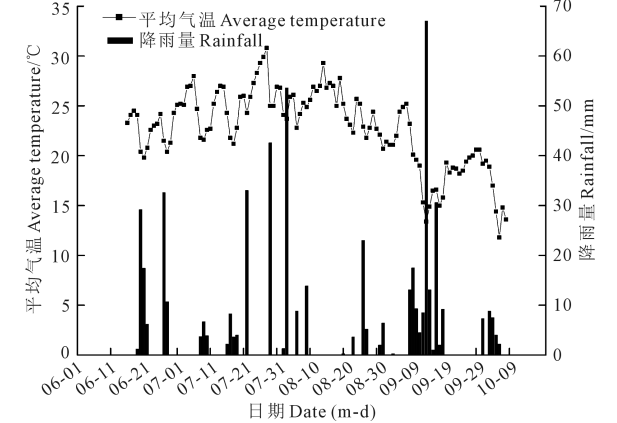


图 1 夏玉米生育期日平均温度和降雨量
Fig.1 Average daily temperature and rainfall during the growing season of summer maize

1.4.4 温室气体排放 土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 气体的采集和测定采用静态密闭箱法-气相色谱法。分别于夏玉米苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期在两行玉米中间采气,每次气体采集于上午 9:00—11:00 进行,其中垄沟种植的处理于垄上与沟内采样后取平均值。气体采集时将采样箱盖上 30 min,分别经过 0、10、20、30 min 用 50 ml 注射器从气体采集接口插入抽出 40 ml 气体注入到样品瓶保存。采样后立即将样品带回实验室分析。每次采集气体同步记录地表温度和箱内温度。样品采集完成后立即带回实验室用气相色谱仪(Trace GCUltra,美国 Thermo Scientific 公司)于 24 h 内分析完毕。计算农田温室气体排放通量(F)、温室气体增温潜势(GWP)和气体排放强度(GHGI)等温室气体排放指标。

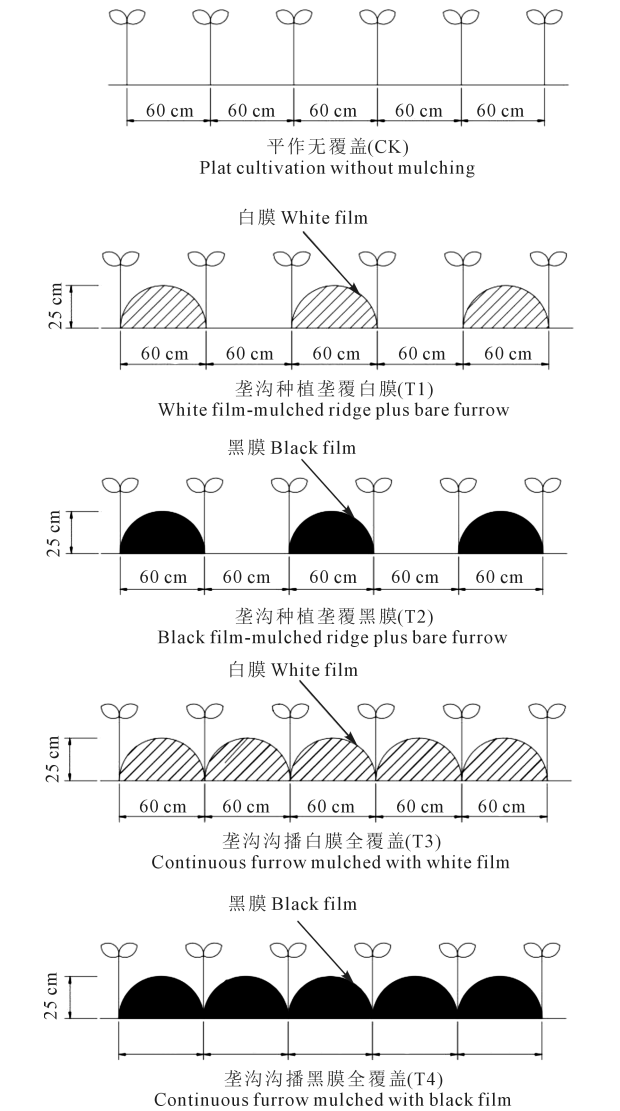


图 2 不同覆膜方式示意图
Fig.2 Schematic of different film mulching methods

$F = \rho \times 273 / (273 + T) \times 60 \times H \times dC / dt$ (1)

式中, F 为温室气体排放通量 (N_2O , $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; CH_4 , $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; CO_2 , $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), ρ 是各温室气体标准状况下的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), T 是采样过程中密闭箱内的平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), H 是采样箱的高度 (m), C 是温室气体的体积混合比, dC/dt 是采样过程中密闭箱内温室气体的浓度变化率 ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

$GWP = 28 \times R_c + 265 \times R_N$ (2)

$GHGI = GWP / W$ (3)

式中, GWP 为全球增温潜势 (以 CO_2 计, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); R_c 和 R_N 分别为 CH_4 和 N_2O 的各生育期排放量总和. $GHGI$ 为碳排放强度 ($\text{kg} \cdot 10^3 \text{kg}^{-1}$).

1.4.5 水分利用效率 水分利用效率 (WUE , $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) 为作物产量除以蒸散量 (ET , mm). ET 通过土壤水分平衡方程获得:

$ET = P + \Delta S$ (4)

式中, P 为降雨量 (mm); ΔS 是播种与收获之间土壤蓄水量的变化 (mm).

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行处理, 用 SPSS 20.0 软件进行数据分析, 方差分析采用最小显著差异 LSD 法进行, 采用 Origin 9.2 作图.

2 结果与分析

2.1 不同覆膜方式下旱作夏玉米土壤温度和土壤含水量

图 3 是各生育期土层深度分别为 5、10、15、

20 cm 和 25 cm 的土壤日平均温度, 受外界环境影响, 地表 5 cm 与 10 cm 温度变幅较大. 土层深度为 5 cm 的土壤 (图 3a), 日平均温度变化幅度最大, 各处理地温在生育前期差异较大, 苗期 T1、T2、T3、T4 处理 5 cm 土层深度的日平均温度分别比 CK 高出 15.69%、10.42%、29.20%、21.78%. 抽雄期与灌浆期差异有所减小, 而成熟期处理间差异比灌浆期略微增大. 10 cm 土层深度的土壤日平均温度变化与 5 cm 土层深度的土壤相似 (图 3b). 15、20、25 cm 土层深度的日平均温度 (图 3c~图 3e) 各处理间差异呈先增大后减小的趋势, 差异在拔节期达到最大, 除了成熟期, T1、T2、T3、T4 处理各生育期的地温均高于 CK. 整体看来, 在夏玉米多数生长期, 连垄覆膜与常规垄沟覆膜均能提高土壤温度, 并且连垄覆膜具有更好的增温效应. 白膜覆盖处理增温效果优于黑膜, 白膜覆盖最高比黑膜覆盖温度高 1.92 $^{\circ}\text{C}$, 但是这种优势随着生育期推进与土层加深会逐渐减弱, 在抽雄期与灌浆期, 15 cm 与 25 cm 土层黑膜覆盖日平均温度略高于白膜覆盖.

不同垄沟处理通过改变集流面而改变水分在沟内的分布, 进而影响雨水的下渗和蒸发, 起到改变土壤含水量的作用. 图 4 为夏玉米各生育期 0~100 cm 土层的土壤质量含水率变化. 苗期 (图 4b) 各垄沟覆盖集雨处理 0~100 cm 土层土壤含水率均高于 CK, 土壤含水率大小表现为 T3>T4>T1>T2>CK, 随着土层加深, 处理间差异逐渐减小. 拔节期 (图 4c) 各处理间土壤含水率差异较大, 并且随着土

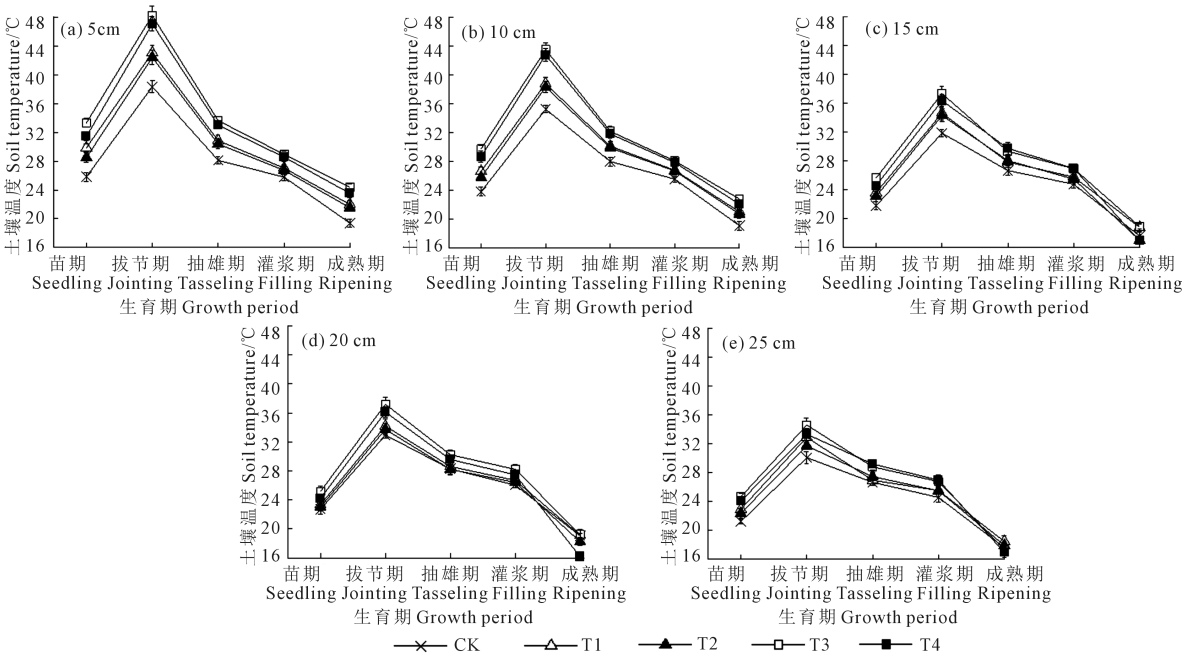


图 3 不同覆盖方式下夏玉米各生育期土壤日平均温度

Fig.3 Average daily soil temperature of summer maize fields at different soil depths

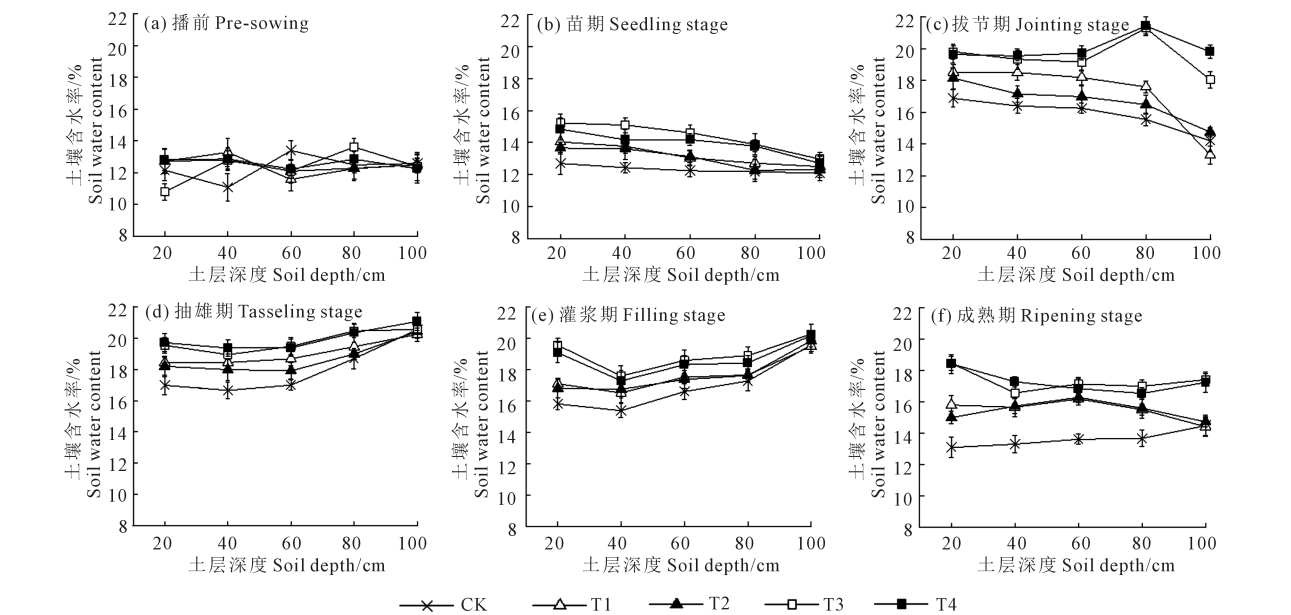


图 4 不同覆盖方式下夏玉米各生育期土壤含水量

Fig.4 Average daily soil water content of summer maize fields at different soil depths

层加深差异增大,土层深度为 100 cm 时处理间差异最大,与其他时期土壤含水率变化趋势有所不同,T1、T2、T3、T4 处理平均土壤含水率比 CK 高8.58%、5.30%、23.14%、26.29%。抽雄期(图 4d)与灌浆期(图 4e)各处理土壤含水率变化趋势基本一致,土壤含水率随土层深度增大先减后增,在 40~60 cm 土层处达到最低值,土层深度 100 cm 处土壤含水率最高,20 cm 土层处理间差异最大。抽雄期 T1、T2、T3、T4 处理平均土壤含水率比 CK 高 6.01%、4.06%、10.12%、11.12%,灌浆期 T1、T2、T3、T4 处理平均土壤含水率比 CK 高 4.25%、5.23%、12.10%、10.21%。成熟期(图 4f)不同起垄方式的土壤含水率差异较大,尤其是在土层 20 cm 处,连垄种植下的土壤含水率显著高于常规垄沟种植,T1、T2、T3、T4 处理平均土壤含水率比 CK 高 13.79%、13.43%、27.00%、26.63%。总体而言,不同起垄方式对土壤含水率的影响显著,连垄覆膜比常规垄沟覆膜具有更好的促进土壤含水量增加的作用,而不同颜色地膜的保水作用未见显著差异。

2.2 不同覆膜处理下旱作夏玉米生长与干物质积累

如表 1 所示,与 CK 相比,T1、T2、T3、T4 处理成熟期夏玉米株高分别增加了 2.40%、3.15%、3.89%、13.89%,茎粗分别增加了 14.71%、4.41%、15.69%、17.16%。其中 T3 和 T4 显著影响夏玉米的株高和茎粗,对夏玉米生长的促进作用大于 T1、T2,说明连垄沟播方式比常规垄沟覆膜种植对夏玉米生长的促

表 1 不同覆膜方式下夏玉米成熟期生长指标

Table 1 Growth indexes of summer maize at harvest under different film mulching methods

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter	叶面积指数/(m ² ·m ⁻²) Leaf area index
CK	267.40c	2.04c	2.125b
T1	273.83bc	2.34ab	2.36ab
T2	275.83bc	2.13bc	2.42ab
T3	277.80b	2.36a	2.47ab
T4	304.53a	2.39a	2.62a

注:同列不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。

Note: Different letters within same column mean significant difference among treatments, the same below.

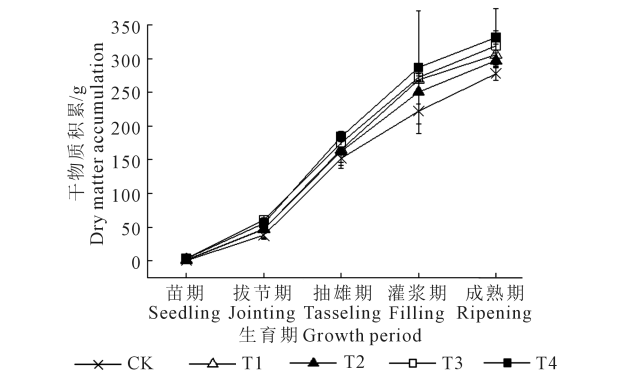


图 5 不同覆膜方式下夏玉米各生育期干物质积累

Fig.5 Dry matter accumulation at different growth stages of summer maize under different film mulching methods

进作用更明显。与 CK 相比,T4 显著增加了夏玉米成熟期的叶面积指数,T1、T2、T3、T4 处理的叶面积指数较 CK 分别增加了 11.25%、14.12%、16.42%、23.34%。

拔节期后,各处理的地上生物量积累速度最快,且 T1、T2、T3、T4 处理的地上生物量积累速度都高于 CK(图 5),T4 处理的地上生物量最大。与 CK 相比,T1、T2、T3、T4 处理干物质积累量分别增加了 10.15%、7.07%、14.94%、19.39%。

2.3 不同覆膜处理下旱作夏玉米产量与水分利用效率

由表 2 可知,各处理的穗长和百粒重都显著大于 CK 处理,而穗行数各处理之间无显著差异。此外,T4 处理的穗粗和行粒数也显著大于 CK 处理。除 T2 外,其余处理的产量均显著高于 CK,T1、T2、T3、T4 处理的产量比 CK 分别增加了 19.32%、8.88%、25.59%、29.61%。各处理之间的收获指数无显著差异。

由表 3 可知,CK 的 *ET* 显著高于各处理,T4 处理 *ET* 最小,为 478.70 mm。各处理中只有 T2 处理的水分利用效率与 CK 无显著差异,T1、T2、T3、T4 处理的水分利用效率比 CK 分别增加了 25.95%、14.71%、41.22%、44.20%。

表 2 不同覆膜方式对夏玉米产量及产量构成要素的影响

Table 2 Effects of different plastic film mulching modes on yield and its components of summer maize							
处理 Treatment	穗长/cm Ear length	穗粗/mm Ear thickness	穗行数 Ear rows	行粒数 Grains per row	百粒重/g 100-grain weight	产量/(kg·hm ⁻²) Grain yield	收获指数 Harvest index
CK	15.96c	48.88b	14.51a	35.89d	28.73c	8212.80c	0.53a
T1	17.02ab	49.21ab	14.67a	37.80bcd	31.81ab	9800.2b	0.58a
T2	16.80b	49.20ab	14.60a	36.25cd	30.41b	8941.8c	0.54a
T3	17.42ab	50.05ab	14.84a	38.72ab	32.31a	10314.67ab	0.58a
T4	17.90a	50.24a	14.88a	40.25a	31.99ab	10644.67a	0.58a

表 3 不同覆膜方式对夏玉米蒸散量(*ET*)及水分利用效率(*WUE*)的影响

Table 3 Effects of different plastic film mulching methods on <i>ET</i> and <i>WUE</i> of summer maize					
处理 Treatment	土壤贮水量 Water storage/mm		<i>ET</i> /mm	<i>WUE</i> /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	
	播前 Before sow	成熟期 Ripening stage			
CK	189.08a	208.94c	509.61a	16.11c	
T1	191.04a	237.65b	494.67bc	20.29ab	
T2	191.16a	236.95b	491.83bc	18.48bc	
T3	188.95a	265.26a	484.39bc	22.75a	
T4	193.10a	264.49a	478.70c	23.23a	

3 讨 论

水分和温度是玉米生长的两大主要因素,起垄和覆膜改善了土壤的水热条件。王凯瑜^[25]通过对垄沟集雨种植的研究发现,垄沟集雨系统对于 0~120 cm 土层的土壤具有增墒效果。王杰等^[26]研究表明,垄作覆膜可以增加降雨入渗,显著提高 0~20

2.4 不同覆膜处理下旱作夏玉米温室气体排放

由图 6 和表 4 可知,2019 年夏玉米生长季各处理 N₂O 排放趋势一致,峰值出现在苗期,施肥后,排放通量大小表现为 T3>T4>T1>T2>CK,T1、T2、T3 和 T4 处理的 N₂O 各生育期排放总量分别比 CK 高 178.26%、134.78%、334.78%、256.52%。T1、T2、T3 和 T4 处理的 CO₂排放趋势相似,共出现 2 次峰值,各生育期各处理的 CO₂排放总量均显著高于 CK,T3 与 T4 处理的 CO₂各生育期排放总量存在显著差异,且显著高于 T1 和 T2。各生育期 T1 与 T2 处理的 CO₂排放总量无显著差异。CH₄排放无明显趋势,T1、T2、T3、T4 处理较 CK 均增加了 CH₄吸收总量,其中 T3 处理的 CH₄吸收总量显著高于 CK。T1、T2、T3、T4 处理下的 *GWP* 均显著高于 CK,T3 和 T4 处理下的 *GWP* 无显著差异,但是都显著高于 T2。CK 的碳排放强度最低,所有处理的 *GHGI* 均显著高于 CK,T3 处理的 *GHGI* 显著高于 T4,T1、T2、T3、T4 处理的 *GHGI* 分别比 CK 高出 151.93%、124.65%、246.53%、186.90%。

cm 土壤水分,增大 0~200 cm 土层平均含水量。张守都等^[27]研究发现,覆膜可以增加土壤表层土壤含水率。本研究发现常规垄沟覆膜与连垄覆膜均能显著提高土壤含水量,并且白膜与黑膜具有相似的保水效果,然而连垄覆膜处理具有更好的保水保墒效果,这与周昌明等^[28]的研究结果一致。这是由于连垄方式比常规垄沟具有更好的集雨效果,并且保留了垄上覆膜的保墒效果。本研究发现,T3、T4 处理均能显著提高土壤表层温度。同种颜色地膜覆盖下,连垄覆膜比常规垄沟覆膜具有更好的增温效应,这是由于连垄覆膜方式下覆盖地膜的面积更广。而在同种起垄条件下,白色地膜与黑色地膜覆盖下地温差异在苗期~拔节期较大,白色地膜覆盖下土壤日平均温度较黑色地膜最多高出 1.92℃,主要是由于生育前期玉米冠层对阳光的遮挡最小,太阳辐射可以透过白色地膜到达地表,进而使地表温度升高,这与前人的研究结果一致^[29~30]。在抽雄期与

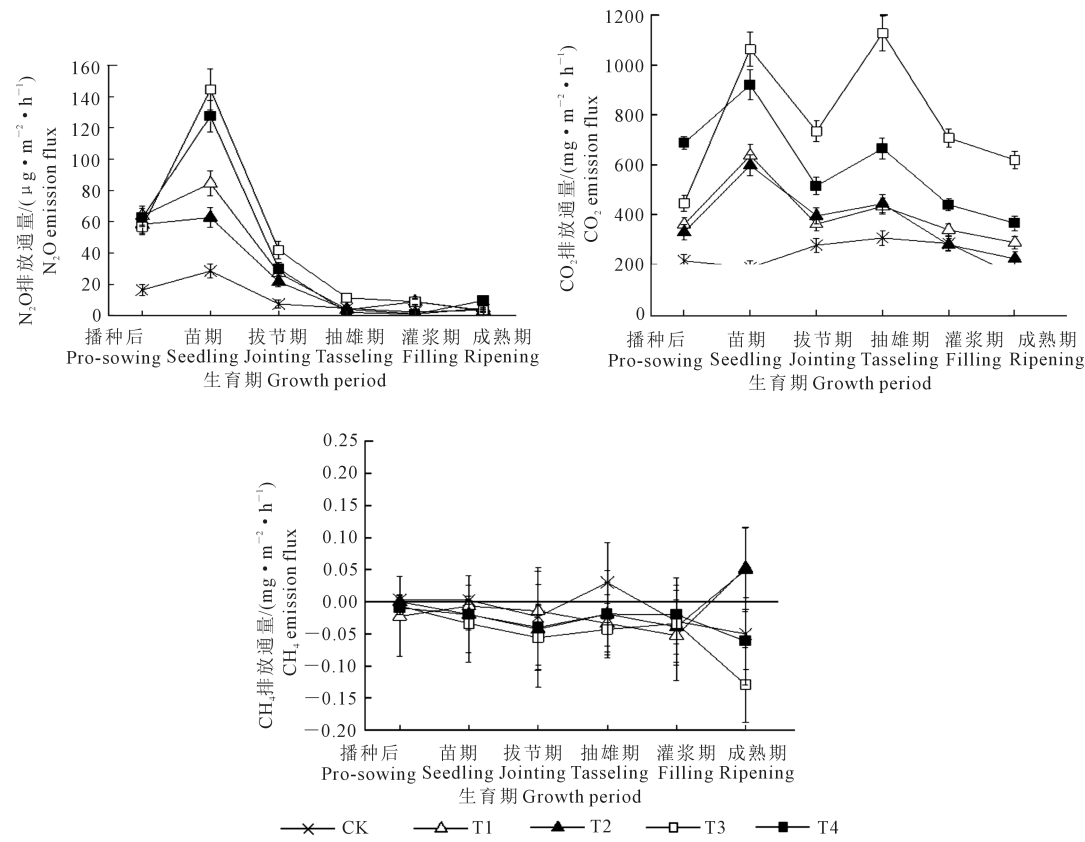


图 6 夏玉米不同生育期 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 排放通量

Fig.6 N_2O , CO_2 , and CH_4 emission fluxes at different growth stages of summer maize

表 4 不同覆膜方式对夏玉米农田温室气体排放的影响					
Table 4 Effects of different film mulching modes on greenhouse gas emissions from summer maize fields					
处理 Treatment	N_2O 排放总量/ $(kg \cdot hm^{-2})$ Total N_2O emissions	CO_2 排放总量/ $(t \cdot hm^{-2})$ Total CO_2 emissions	CH_4 排放总量/ $(kg \cdot hm^{-2})$ Total CH_4 emissions	GWP / $(kg \cdot hm^{-2})$	GHGI / $(kg \cdot 10^3 kg^{-1})$
CK	0.23d	5.75d	-0.23a	53.31d	6.49d
T1	0.64bc	9.41c	-0.35a	160.19bc	16.35bc
T2	0.54c	9.06c	-0.42a	130.39c	14.58c
T3	1.00a	19.09a	-1.18b	231.93a	22.49a
T4	0.82ab	13.74b	-0.68a	198.22ab	18.62b

灌浆期,因玉米冠层对阳光的遮挡,导致白色地膜的增温优势减弱甚至消失,而到了成熟期因叶片凋萎,白色地膜的增温效应又有所增强。由此可见,地膜覆盖是影响地温的主要原因,白色地膜的增温效应强于黑色地膜,但是过高的温度可能会导致玉米减产^[31]。

适宜的耕作措施可以促进夏玉米的种子萌发、植株生长、水分吸收和淀粉合成。本研究结果表明,起垄和覆膜处理有效提高了夏玉米成熟期的株高、茎粗、叶面积指数以及干物质积累,并且连垄黑膜下的夏玉米各项生长指标均为最优。申丽霞等^[32]研究结果表明,地膜覆盖可以促进玉米株高、叶面积的增加以及干物质的积累。李长春等^[33]研

究发现,全膜覆盖双垄沟播技术全面提高了雨水利用率和旱地玉米收成。本试验结果表明,T1、T2、T3、T4 处理的产量比 CK 分别增加了 19.32%、8.88%、25.59%、29.61%,水分利用效率分别增加了 25.95%、14.71%、41.22%、44.20%,与前人研究结果相似。T4 处理的产量最高,并且水分利用效率最高。

温度和水分都是影响农田温室气体排放的重要因子。土壤 N_2O 排放主要由硝化和反硝化反应产生。本研究结果表明,各处理的 N_2O 各生育期排放总量均显著高于 CK,与 Nishimura 等^[34]的研究结果基本一致,这是由于地膜覆盖下高温、湿润、低氧的环境有利于 N_2O 的产生。 CO_2 是一种最主要的温

室气体,其直接影响着全球气候变化^[35]。本试验中各生育期各处理的 CO₂ 排放总量显著高于 CK,主要是覆膜后的土壤温度升高,加快了土壤的呼吸速率。CO₂ 排放通量出现的 2 次峰值都是在降雨过后,说明 CO₂ 排放与土壤含水量紧密相关。夏玉米农田是 CH₄ 弱的汇,Cuello 等^[36] 研究认为覆膜形成的厌氧环境会减少 CH₄ 的吸收,这与本研究结果有所不同,本研究结果表明各处理 CH₄ 吸收量比 CK 都有所增加,可能原因是起垄覆膜的保温保水作用影响了土壤酶的活性和 CH₄ 氧化的能力。起垄覆膜集雨系统显著增加了夏玉米农田的 GHGI,其中 T1、T2、T3、T4 处理的 GHGI 分别比 CK 高出 151.93%、124.65%、246.53%、186.90%,表明垄沟覆膜系统虽然更有利于产量提高,但是却增加了碳排放强度,长期使用可能造成一定的环境危害。然而,连垄沟播黑膜全覆盖 GHGI 显著低于垄沟播白膜全覆盖。与前人研究结果相比,本研所得 GWP 和 GHGI 明显偏小,主要是由于仅在夏玉米各生育期中期测定了温室气体排放,取样次数少^[37]。因此,不同覆膜方式下全生育期温室气体排放的连续观测还有待于进一步研究。

4 结 论

1)地膜覆盖可以显著增加夏玉米农田表层土壤温度。与白膜覆盖相比,黑膜覆盖可以在保证玉米生长所需温度的同时略微降低温度,从而防止温度过高而导致玉米因生育期缩短而减产。4 种处理比 CK 土壤含水量均有所增加,而 T3、T4 处理由于连垄间形成的沟面积更小而具有更好的集水效果。

2)不同起垄覆盖种植方式对夏玉米生长影响显著。4 种覆膜处理成熟期株高、茎粗、叶面积指数、干物质积累量均有所增加,并且 T4 处理与 CK 之间差异显著。T4 处理的穗长、穗粗、行粒数、百粒重比 CK 显著增加,具有最高的产量,较 CK 增产 29.61%。T1、T2、T3、T4 处理的水分利用效率比 CK 分别增加了 25.95%、14.71%、41.22%、44.20%。

3)不同起垄覆盖种植方式促进了夏玉米农田的 CO₂、N₂O 排放、CH₄ 吸收以及夏玉米农田的 GHGI,其中 T1、T2、T3、T4 处理的 GHGI 分别比 CK 高 151.93%、124.65%、246.53%、186.90%,T4 的 GHGI 显著低于 T3。

综合考虑夏玉米产量与温室气体排放,连垄沟播黑膜全覆盖为该地区旱作夏玉米绿色高效生产适宜的覆膜方式。

参 考 文 献:

[1] Zheng J,Fan J L,Zhang F C,et al.Mulching mode and planting density affect canopy interception loss of rainfall and water use efficiency of dryland maize on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(5):794-808.

[2] 刘美含,史海滨,李仙岳,等.河套灌区玉米农田蒸散动态变化及其影响因子的通径分析[J].排灌机械工程学报,2018,36(11):1081-1086.

[3] Zhao H,Wang R Y,Ma B L,et al.Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfedecosystem [J]. Field Crops Research, 2014, 161(1385):137-148.

[4] Wang X K,Li Z B,Xing Y Y. Effects of mulching and nitrogen on soil temperature,water content,nitrate-N content and maize yield in the Loess Plateau of China [J]. Agricultural Water Management, 2015, 161(1):53-64.

[5] Zheng J, Fan J L, Zhang F C, et al. Throughfall and stemflow heterogeneity under the maize canopy and its effect on soil water distribution at the row scale [J].Science of the Total Environment, 2019, 660:1367-1382.

[6] 王琦,张恩和,李凤民.半干旱地区膜垄和土垄的集雨效率和不同集雨时期土壤水分比较[J].生态学报,2004,24(8):1816-1819.

[7] 赵冀.垄沟集雨种植覆盖比对土壤水温和春玉米光合效率的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.

[8] 王晓凌,陈明灿,李凤民,等.垄沟覆膜集雨系统膜垄保墒增温对马铃薯产量的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):11-16.

[9] 魏万成,戴飞,张锋伟,等.西北旱区玉米不同覆膜方式下土壤水热效应数值模拟研究[J].干旱地区农业研究,2020,38(1):13-21.

[10] 罗磊,李亚杰,姚彦红,等.旱地不同覆盖垄作种植对马铃薯生长、产量、品质 and 经济效益的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):194-199.

[11] 丁宗江,李仙岳,郭宇,等.干旱沙区降解膜覆盖的玉米生长与耗水规律[J].排灌机械工程学报,2018,36(11):1092-1097.

[12] 申胜龙,李援农,银敏华,等.秸秆量对垄沟二元覆盖夏玉米农田耗水及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):60-66.

[13] 王景才,李德明,王瑞英,等.半干旱区马铃薯黑膜覆盖增温增产效果[J].中国马铃薯,2015,29(3):150-152.

[14] Mo F, Li X Y, Niu F J, et al. Alternating small and large ridges with full film mulching increase linseed (*Linum usitatissimum* L.) productivity and economic benefit in a rainfed semiarid environment [J]. Field Crops Research, 2018,219:120-130.

[15] 杨世佳,陈瑾,张毅,等.不同颜色地膜覆盖对玉米土壤温度、杂草发生及玉米产量的影响[J].江苏农业科学,2019,47(22):92-96.

[16] 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.

[17] 李晓密.小麦-玉米轮作农田温室气体排放及其影响因素分析[D].北京:北京林业大学,2014.

[18] 谢立勇,叶丹丹,张贺,等.旱地土壤温室气体排放影响因子及减排增汇措施分[J].中国农业气象,2011,32(4):481-487.

[19] 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.

[20] Liu Q R, Liu X H, Bian C Y, et al. Response of soil CO₂ emission and summer maize yield to plant density and straw mulching in the North China Plain[J]. The Scientific World Journal, 2014, (2):1-8.