



不同颜色地膜和种植密度对春玉米田间地温、耗水及产量的影响

孙仕军, 朱振闯, 陈志君, 杨丹, 张旭东

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要:【目的】探求不同颜色地膜和种植密度对东北雨养区春玉米田间地温、耗水量、产量和降水利用效率的影响, 进一步挖掘旱作雨养玉米水分生产潜力。【方法】2016—2018 年开展了 3 种覆盖处理(裸地、透明地膜覆盖和黑色地膜覆盖)和 3 种种植密度(60 000、75 000 和 90 000 株/hm²)的栽培试验, 定位监测 0—25 cm 土壤耕层温度和 0—120 cm 土壤水分动态变化, 结合作物产量分析农田水分利用效率。【结果】在生育前期, 透明地膜覆盖处理土壤耕层积温显著高于黑色地膜覆盖处理, 黑色地膜覆盖处理土壤耕层积温显著高于裸地处理; 种植密度的增加使得玉米拔节期以后的土壤耕层积温下降; 从全生育期耗水量看, 黑色地膜和透明地膜覆盖处理间无显著差异, 但均显著低于裸地处理; 无论在平水年还是枯水年, 玉米耗水量均随种植密度的增加而增加; 黑色地膜覆盖玉米产量和水分利用效率显著提高, 平均较透明地膜分别高 4.3% 和 4.6%, 较裸地分别高 9.2% 和 13.3%; 在相同覆盖处理下, 产量和水分利用效率随着种植密度的增加而增加; 在高密度处理下, 地膜覆盖明显提高经济效益, 黑色地膜覆盖平均比透明地膜覆盖获得的利润多 807.82 元/hm²。【结论】黑色地膜覆盖结合高密度(90 000 株/hm²)栽培模式, 在保证玉米高产的基础上, 水分利用效率达到最高, 本研究可为东北雨养旱作玉米进一步挖掘降水生产潜力及增产增效提供参考。

关键词: 玉米; 地膜颜色; 耕层积温; 耗水; 产量; 水分利用效率; 经济效益

Effects of Different Colored Plastic Film Mulching and Planting Density on Soil Temperature, Evapotranspiration and Yield of Spring Maize

SUN ShiJun, ZHU ZhenChuang, CHEN ZhiJun, YANG Dan, ZHANG XuDong

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: 【Objective】Field experiments were conducted to explore the effects of different colored plastic film mulching and planting density on the topsoil temperature, evapotranspiration, grain yield of spring maize and precipitation utilization efficiency in the rain-fed area of Northeast China, in order to further tap the water production potential of dryland and rain-fed maize. 【Method】Complete combination field, including three types of mulching (non-mulching, transparent plastic film mulching and black plastic film mulching) and three planting densities (60 000, 75 000 and 90 000 plants/hm²), were conducted to monitor the topsoil temperature dynamics in 0–25 cm depths and the soil moisture dynamics in 0–120 cm depths, and to analyze the water use efficiency combined with grain yield of maize in 2016–2018. 【Result】The results showed that the accumulated temperature of the plough layer in the transparent mulching film treatment was significantly higher than that in the black mulching film, and the accumulated temperature of the plough layer in the black mulching film treatment was significantly higher than that in the non-mulching treatment

收稿日期: 2019-04-09; 接受日期: 2019-07-25

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2018YFD0300301)、辽宁省自然科学基金项目(20180550617)、国家公益性行业(农业)科研专项(201303125)

联系方式: 孙仕军, E-mail: sunshijun2000@yeah.net

in the early growth stages of maize. The increase of planting density reduced the accumulated temperature of the plough layer after jointing stage of maize. For the evapotranspiration of the growing season, there was no significant difference between the black plastic film mulching treatment and the transparent plastic film mulching treatment, but they were significantly lower than the non-mulching treatment. The evapotranspiration increased with the increasing of the planting density whether in the normal precipitation year or the dry year. Maize grain yields and water use efficiency were significantly improved in the black plastic film mulching treatment, with an average of 4.3% and 4.6% higher than that of the transparent plastic film mulching treatment, respectively, and 9.2% and 13.3% higher than that of the non-mulching treatment, respectively. Yield and water use efficiency increased in tandem with planting density under the same mulching treatment. The plastic film mulching significantly improved the economic benefits under high-density treatment, and the profit of the black plastic film mulching was 807.82 yuan/hm² more than that of the transparent plastic film mulching. 【Conclusion】 The cultivation mode of black plastic film mulching and high density (90 000 plants/hm²) combined treatment could improve the utilization rate of natural precipitation and achieve the highest water use efficiency on the basis of ensuring high grain yields. This paper provided a scientific and effective way to further tap the water and crop production potential in the dryland and rain-fed regions of China

Key words: maize; different colored plastic film; accumulated temperature of the plough layer; evapotranspiration; yield; water use efficiency; economic benefit.

0 引言

【研究意义】玉米是全球也是中国的第一大农作物,东北雨养区作为我国重要的玉米生产基地,其产量对保障我国粮食安全具有十分重要的作用^[1-2]。然而春季干旱少雨和低温冷害对东北春玉米的稳产构成了巨大挑战^[3-5]。因此,采取有效的栽培措施,提高水分利用效率和土壤温度,对保证东北雨养区玉米持续稳定增产具有重要意义。【前人研究进展】通过增加种植密度提高玉米单产,是当前玉米品种改良和栽培耕作技术创新的重要方向^[6]。适宜增加种植密度,有利于增加群体叶面积指数、干物质积累量,提高玉米产量和水分利用效率^[7-8]。然而种植密度过高会使单株玉米的生长空间受限,植株之间对水分、养分的竞争加剧,导致玉米产量下降^[9]。合理密植可使玉米群体与个体协调发展,是获得玉米高产的重要途径。大量研究表明,最佳种植密度取决于气候条件、土壤质量、品种特性、种植模式等多个因素^[10-12]。有研究指出,覆盖地膜具有抑制棵间蒸发、降低潜热消耗、改善土壤水热状况的作用^[13-15],在一定程度上缓解高密度种植时植株之间对于水、热的竞争压力,提高玉米的最佳种植密度^[16]。然而,覆盖不同颜色的地膜会对土壤水热状况产生不同的影响,从而影响作物的生长和产量。LIU 等^[17]对比分析不同颜色地膜覆盖处理对土壤水分的影响发现,第 1 年,黑色地膜覆盖处理的土壤含水量高于透明地膜覆盖处理,而第 2 年则相反。路海东等^[18]研究表明,与透明地膜覆盖相比,黑色地膜降低了土壤温度日变化,显著提高了玉米产量和水分

利用效率。FILIPOVIĆ 等^[19]研究表明,与透明地膜覆盖相比,黑色地膜覆盖能形成较高的土壤温度,加快作物生长和提高作物产量。【本研究切入点】至今为止尚未充分阐明不同颜色地膜覆盖对土壤水热状况和作物生长的影响,不同颜色地膜覆盖条件下种植密度对作物产量和水分利用效率的影响研究更是鲜有报道,需进一步开展研究,挖掘旱作雨养玉米水分生产潜力。【拟解决的关键问题】通过设置 3 种覆盖处理和 3 种种植密度,研究不同颜色地膜和种植密度对土壤温度、耗水及产量的影响,旨在为东北雨养区大幅提高玉米产量和经济效益提供理论和应用基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016—2018 年在辽宁省沈阳市沈阳农业大学水利综合试验场进行(41°44'N, 123°27'E, 海拔 44.7 m),属于温带大陆性季风气候。多年平均气温 8.0℃,无霜期 155—180 d,年平均日照时数 2 743 h,年平均降水量 702.9 mm,春玉米生长季节(5 月至 9 月)占总降雨量的 79%。试验区土质为潮棕壤土,平均土壤容重为 1.41 g·cm⁻³,田间持水率为 0.38 cm³·cm⁻³,凋萎系数为 0.18 cm³·cm⁻³。土质分布均匀,在该地区具有典型代表意义。试验期间,试验区平均地下水位埋深 4.5 m,其中最小地下水埋深 4.1 m,最大地下水埋深 5.0 m,水位变幅不大。2016 年玉米生育期间降水 789.6 mm,属丰水年;2017 年生育期间降水 301.5 mm,属枯水年;2018 年生育期间降水 557.5 mm,属平水年。3 年试验期间试验站月平均降水量和近 40

年的月平均降雨量（1979—2018）如图 1 所示；玉米生育期内日平均气温如图 2 所示。

1.2 试验设计

试验采用大垄双行种植方式^[20]（垄上行距为 40 cm，大垄间行距为 80 cm，垄高为 15 cm）（图 3），供试品种为良玉 99。采用裂区试验设计，主区为覆盖处理，分别为裸地（M0）、透明塑料地膜覆盖（M1）和黑色塑料地膜覆盖（M2），地膜规格为 120 cm×0.008 mm；副区为种植密度，分别为 60 000 株/hm²（D1）、75 000 株/hm²（D2）和 90 000 株/hm²（D3）。试验共有 9 个处理（表 1），每个处理重复 3 次，总

共 27 个试验小区，每个试验小区面积为 21.6 m²（3.6 m×6 m）。3 个试验年份玉米播种时间分别为 2016 年 5 月 1 日、2017 年 5 月 3 日和 2018 年 4 月 28 日，收获时间分别为 2016 年 9 月 27 日、2017 年 9 月 23 日和 2018 年 9 月 19 日。机械整地，人工覆膜（垄上覆膜，垄沟不覆膜，如图 3），通过株距来控制种植密度，3 种密度对应的株距分别为 28、22、19 cm。播种时一次性施入 243 kg N·hm⁻²、135 kg P₂O₅·hm⁻²和 117 kg K₂O·hm⁻²作为底肥，生育期内不追肥。除覆盖和密度不同外，其他田间管理措施均与农户种植相同。试验期内不灌溉，降雨为唯一补充水源。

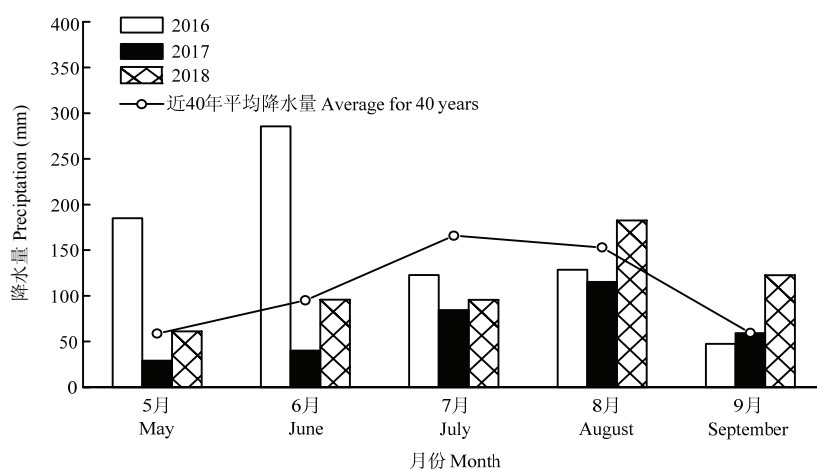


图 1 2016—2018 年和近 40 年玉米生育期内平均月降雨量分布

Fig. 1 Monthly rainfall distribution in 2016-2018 and annual monthly rainfall in the recent 40 years during the growing season

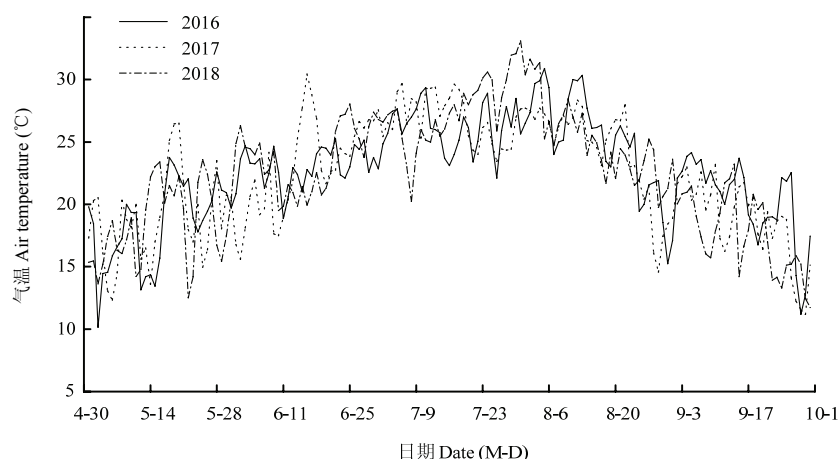


图 2 2016—2018 年玉米生育期内日平均气温

Fig. 2 Air temperature during the growing season in 2016-2018

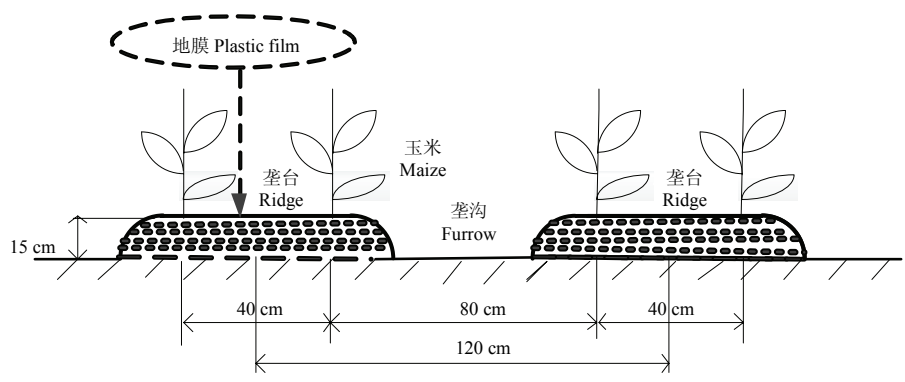


图 3 大垄双行种植模式图

Fig. 3 Schematic diagram of large-ridge-double-lines planting method

表 1 试验设计

Table 1 Field experimental design

覆盖处理	种植密度	处理编号
Mulching	Planting density (plants/hm ²)	Treatment
裸地	60000	M0D1
Non-mulching	75000	M0D2
	90000	M0D3
透明地膜覆盖	60000	M1D1
	75000	M1D2
	90000	M1D3
黑色地膜覆盖	60000	M2D1
	75000	M2D2
	90000	M2D3

1.3 测定项目与方法

1.3.1 耕层积温 采用套组曲管地温计测定 5、10、15、20 和 25 cm 土壤温度，于玉米出苗后每天的 6：00、14：00 和 18：00 进行观测。使用公式（1）计算耕层积温：

$$T_a = \sum(T_i - 8) \tag{1}$$

式中， T_a 为耕层积温（℃）； T_i 为第 i 天 0—25 cm 土壤平均温度（℃）。

1.3.2 玉米耗水量 2017 和 2018 年在播种前至收获期间使用 TDR 测定 0—120 cm 土层的土壤水分，每 7 d 测定 1 次，生育时期始末和降水后加测。作物耗水量采用水量平衡公式（2）计算^[21]：

$$ET = P + I - D + W_g - R + SWD \tag{2}$$

式中， ET 为耗水量（mm）； P 为生育期降水量（mm）； I 为灌溉量（mm）； D 为土壤排水量（mm）； W_g 为作物通过毛细管上升利用的地下水量（mm）； R 为表

面径流（mm）； SWD 为玉米全生育期 0—120 cm 土壤水分消耗量（mm）。本试验地区为雨养区，不进行灌溉、地下水埋深大于 4.0 m 且试验期间很少有极端降水，所以 I 、 W_g 、 D 和 R 为 0。

由于 2016 年土壤含水率测定土层较浅，本文只讨论了 2017 年和 2018 年作物耗水量和水分利用效率。

1.3.3 产量和水分利用效率 在收获时，每个小区随机选取 10 m² 的植株进行测产，并按 14% 籽粒含水量计算籽粒产量（kg·hm⁻²）。水分利用效率使用方程式（3）计算^[21]：

$$WUE = Y / ET \tag{3}$$

式中， WUE 为水分利用效率（kg·hm⁻²·mm⁻¹）， Y 为玉米籽粒产量（kg·hm⁻²）， ET 为整个生育期内的耗水量（mm）。

1.4 统计分析

本试验数据采用 Origin 2016 和 DPS 进行数据处理与统计分析，处理间的显著性检验采用 LSD 最小显著差异法（ $\alpha=0.05$ ）。

2 结果

2.1 不同处理对耕层积温的影响

将 2016—2018 年不同处理对玉米田间耕层积温的影响进行回归分析，结果如图 4 所示。不同覆盖处理土壤耕层积温表现为 $M1 > M2 > M0$ ，表明地膜覆盖可以提高土壤耕层积温，且透明地膜的增温效果优于黑色地膜。在同一覆盖处理下，耕层积温随着种植密度的增加呈下降趋势。2016—2018 年不同处理对玉米各生育时期耕层积温影响见图 5，地膜覆盖主要增加了玉米生育前期的土壤温度，在苗期，与 $M0$ 处理相比， $M1$ 和 $M2$ 处理的耕层积温在不同年份分别增加了

20.7%、9.7% (2016), 23.1%、8.7% (2017) 和 25%、8.8% (2018)。随着生育进程, 地膜覆盖效果减弱, 在拔节期, M1 处理和 M2 处理的耕层积温在 3 个试验年份分别增加了 7.1%、3.2% (2016), 7.8%、3.9% (2017) 和 10.5%、4.3% (2018)。2018 年灌浆期出现连续高温无雨极端天气, 使覆膜处理耕层积温显著高于裸地处理, 然而, 在正常年玉米抽穗期和灌浆期,

覆膜处理和裸地处理对耕层积温的影响差异不显著; 在成熟期, 不同覆盖处理间耕层积温差异性变大。从种植密度来看, 在苗期阶段, 不同种植密度对耕层积温的影响差异不显著。随着地面遮阴度的增加, 从拔节期到成熟期, 不同处理对耕层积温的影响均达到显著水平, 各生育时期一致表现为, 耕层积温随着种植密度的增加而下降。

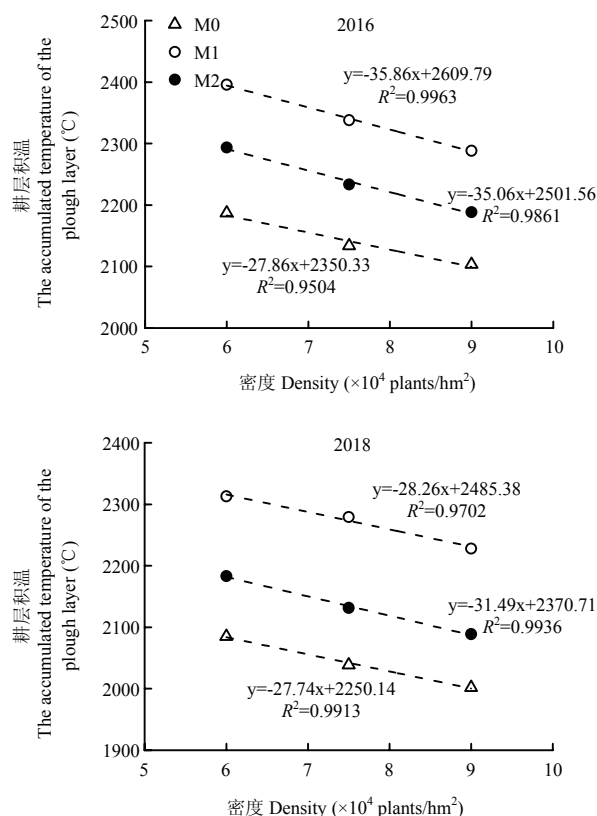


图 4 2016—2018 不同处理对玉米田间耕层积温的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on the accumulated temperature of the plough layer of maize in 2016-2018

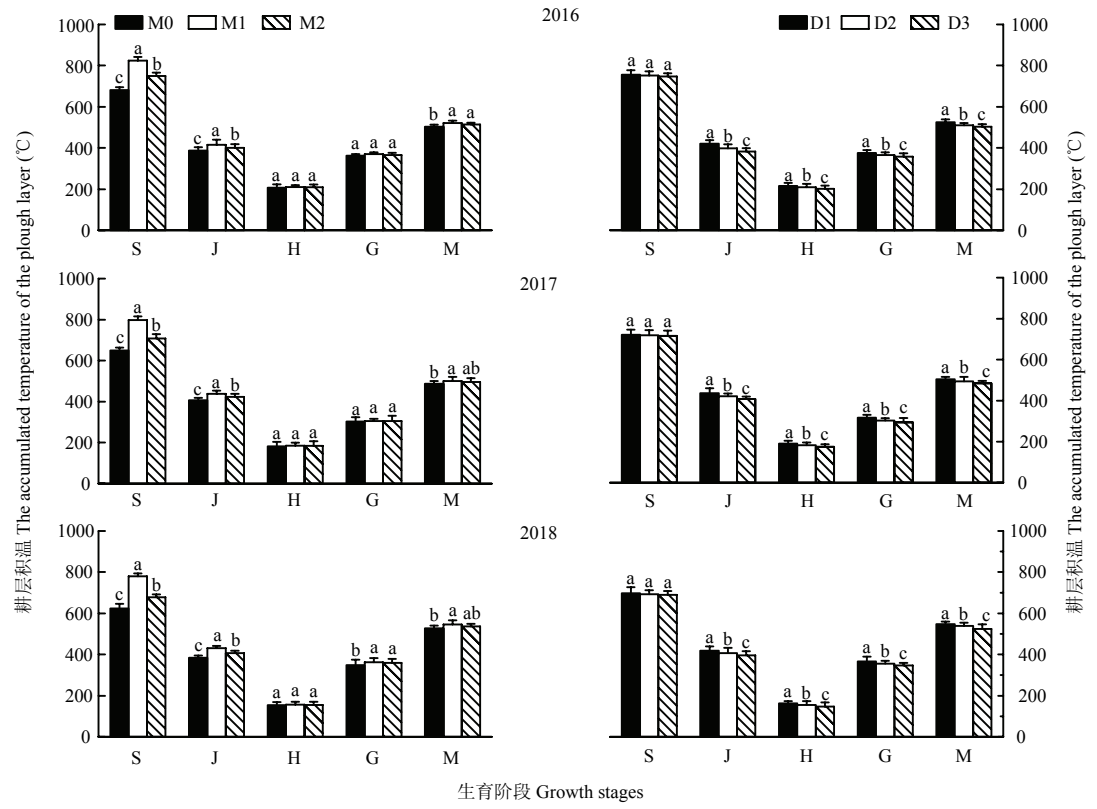
2.2 不同处理对玉米耗水量的影响

2017—2018 年不同处理对玉米耗水量回归分析如图 6 所示。从图中可以看出, M2 处理耗水量略高于 M1 处理, 2 个处理间差异不显著, 但均显著低于 M0 处理。在种植密度方面, 无论枯水年 (2017) 还是平水年 (2018), 同一覆盖处理下玉米耗水量均随着种植密度的增加而增加。图 7 为 2017—2018 年不同处理对玉米各生育时期耗水量的影响。结果表明, 在苗期, 不同覆盖处理玉米耗水量表现为 $M0 > M1 > M2$, 覆膜处理玉米耗水量显著低于裸地处理, 然而 2 种地膜处理间差异不显著; 在拔节期, 不同降水年型得到了不同的结果, 在 2017 年降雨量较少的情况下 (39 mm), 不同处理耗水量表现为 $M1 > M2 > M0$, 最大相差 9.5 mm, 差异显著; 2018 年降水量相对较

高时 (93 mm), 不同处理耗水量表现为 $M0 > M1 > M2$, 最大相差 3.2 mm, 差异不显著。在抽穗期, M2 处理耗水量显著高于 M0 和 M1 处理; 在灌浆期和成熟期, 均是 M0 处理耗水量最高。从种植密度来看, 在 2017 年, 苗期—拔节期玉米耗水量随着种植密度的增加而增加, 灌浆期—成熟期耗水量随着种植密度的增加而下降; 而 2018 年, 玉米苗期—抽穗期耗水量随着种植密度的增加而增加, 成熟期耗水量随着种植密度的增加而下降。

2.3 不同处理对玉米产量的影响

不同颜色地膜和种植密度对玉米产量均有显著影响 (表 2)。从表中可以看出, 与 M0 处理相比, M1 和 M2 处理玉米产量在不同年份分别增加了 4.0%、6.8% (2016), 4.1%、9.1% (2017) 和 6.0%、11.7%



S: 苗期 (2016.05.01-2016.06.12, 2017.05.03-2017.06.15, 2018.04.28-2018.06.11); J: 拔节期 (2016.06.13-2016.07.09, 2017.06.16-2017.07.11, 2018.06.12-2018.07.07); H: 抽穗期 (2016.07.10-2016.07.23, 2017.07.12-2017.07.24, 2018.07.08-2018.07.19); G: 灌浆期 (2016.07.24-2016.08.16, 2017.07.25-2017.08.15, 2018.07.20-2018.08.12); M: 成熟期 (2016.08.17-2016.08.27, 2017.08.16-2017.09.23, 2018.08.13-2018.09.19)。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

S: Seeding stage (2016.05.01-2016.06.12, 2017.05.03-2017.06.15, 2018.04.28-2018.06.11); J: Jointing stage (2016.06.13-2016.07.09, 2017.06.16-2017.07.11, 2018.06.12-2018.07.07); H: Heading stage (2016.07.10-2016.07.23, 2017.07.12-2017.07.24, 2018.07.08-2018.07.19); G: Filling stage (2016.07.24-2016.08.16, 2017.07.25-2017.08.15, 2018.07.20-2018.08.12); M: Mature stage (2016.08.17-2016.08.27, 2017.08.16-2017.09.23, 2018.08.13-2018.09.19). Different lowercase letters indicated significant differences under different treatments ($P < 0.05$). The same as below

图 5 2016—2018 不同处理对玉米各生育时期耕层积温的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on the accumulated temperature of the plough layer of maize in different growth stages in 2016-2018

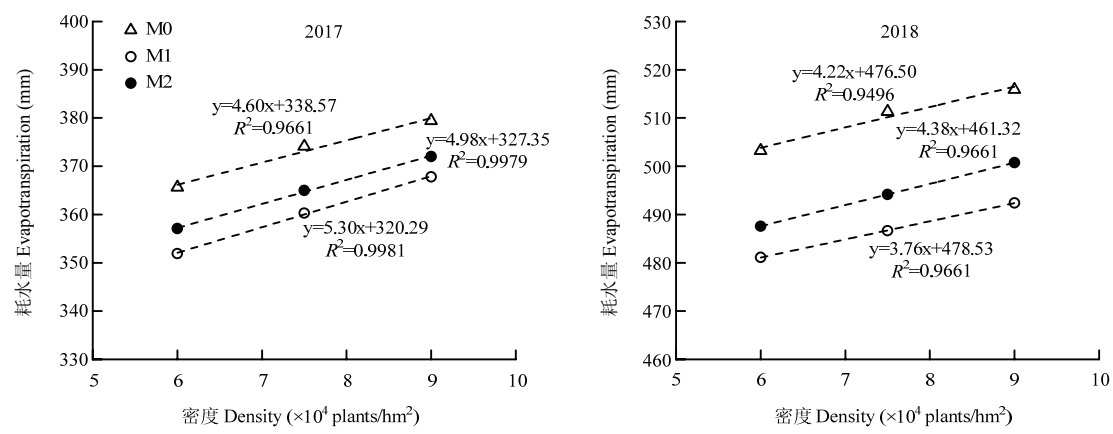


图 6 2017—2018 不同处理对玉米耗水量的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on evapotranspiration of maize in 2017-2018

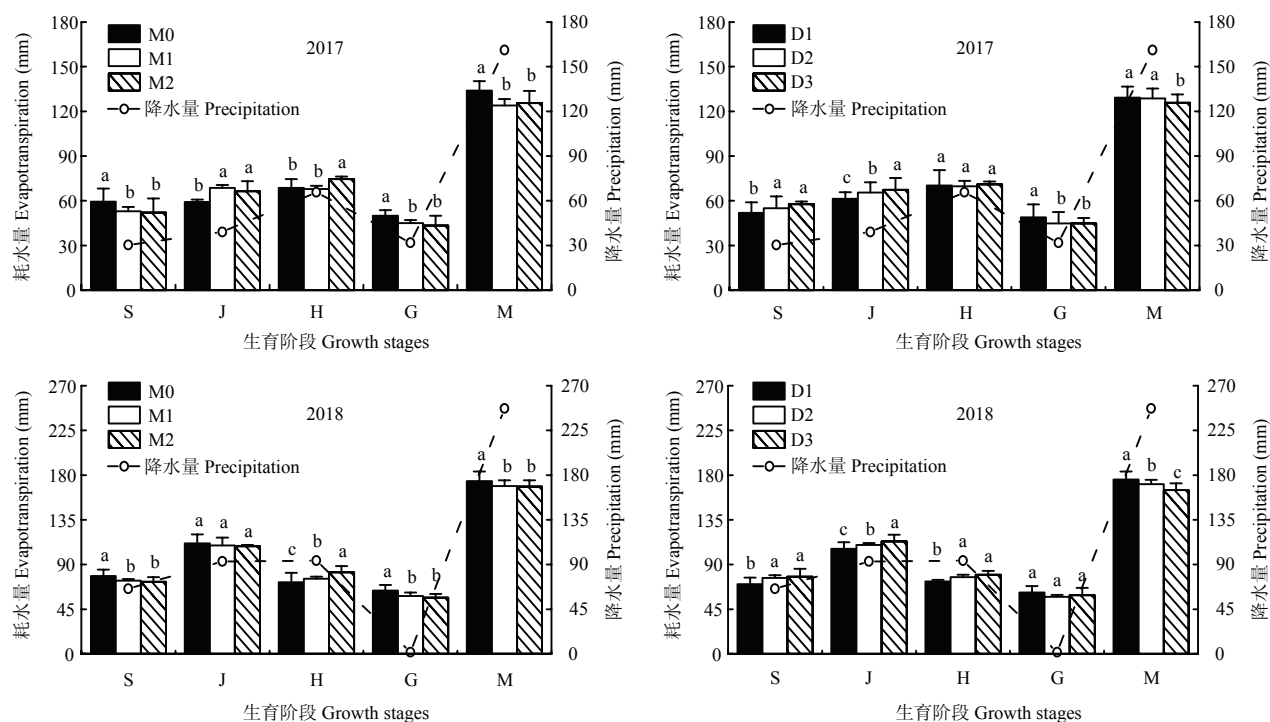


图 7 2017—2018 不同处理对玉米各生育时期耗水量的影响

Fig. 7 Effects of different treatments on evapotranspiration of maize in different growth stages in 2017-2018

表 2 2016-2018 不同处理对玉米产量的影响

Table 2 Effects of different treatments on maize grain yields in 2016-2018

处理 Treatment	2016	2017	2018
M0D1	10516.0±369.6b	10540.1±351.9b	9708.3±422.4b
M0D2	13086.0±511.7a	12124.1±565.3a	11032.8±307.8a
M0D3	12885.7±120.1a	12576.1±173.0a	11504.8±699.5a
均值 Mean	12162.6±1277.6B	11746.7±987.7C	10748.7±917.2C
M1D1	11426.6±126.4c	11024.6±254.1c	10346.8±428.3b
M1D2	12839.9±334.6b	12244.3±470.8b	11500.1±604.2a
M1D3	13687.2±743.2a	13419.8±265.9a	12306.4±246.9a
均值 Mean	12651.2±1071.6AB	12229.6±1079.4B	11384.4±938.0B
M2D1	11503.5±549.1c	11350.1±495.0b	10773.0±488.0c
M2D2	13201.7±621.4b	13300.7±267.4a	12101.8±326.9b
M2D3	14264.6±315.3a	13804.5±546.2a	13140.3±86.0a
均值 Mean	12989.9±1285.1A	12818.5±1189.1A	12005.0±1069.6A
M	*	**	*
D	**	**	**
M×D	*	ns	ns

不同小写字母表示种植密度间差异显著 ($P<0.05$, $n=3$); 不同大写字母表示覆盖处理间差异显著 ($P<0.05$, $n=9$); *, **分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关, ns 表示不显著。下同

Different lowercase letters indicate significant differences in planting density ($P<0.05$, $n=3$); Different uppercase letters indicate significant differences between mulching treatments ($P<0.05$, $n=9$); * and ** represent significant differences at 0.05 and 0.01 levels, ns indicate no significance. The same as below

(2018)。在透明地膜和黑色地膜覆盖处理下,玉米产量随种植密度增加而增加,均在高密度(90 000 株/hm²)时达到最大产量。从数值上看,M2D3 处理产量比 M1D3 处理在不同年份分别高 577.3、384.7 和 833.9 kg·hm⁻²。黑色地膜增产效果优于透明地膜,黑色地膜覆盖结合高密度(90 000 株/hm²)(M2D3)处理产量最高。在年际之间,2016 年玉米产量最高,不同处理产量同比 2017 年高 1.3%—3.9%,同比 2018

年高 8.2%—13.2%。

2.4 耕层积温、玉米耗水量与产量的关系

同一覆盖处理下,田间耕层积温和玉米产量呈现线性相关关系(图 8)。获得较高玉米产量的耕层积温较低,这主要受种植密度的影响。不同覆盖处理土壤耕层积温表现为 M1>M2>M0,然而玉米产量表现为 M2>M1>M0。表 3 为不同生育时期耕层积温对产量的通径分析,结果表明玉米苗期、拔

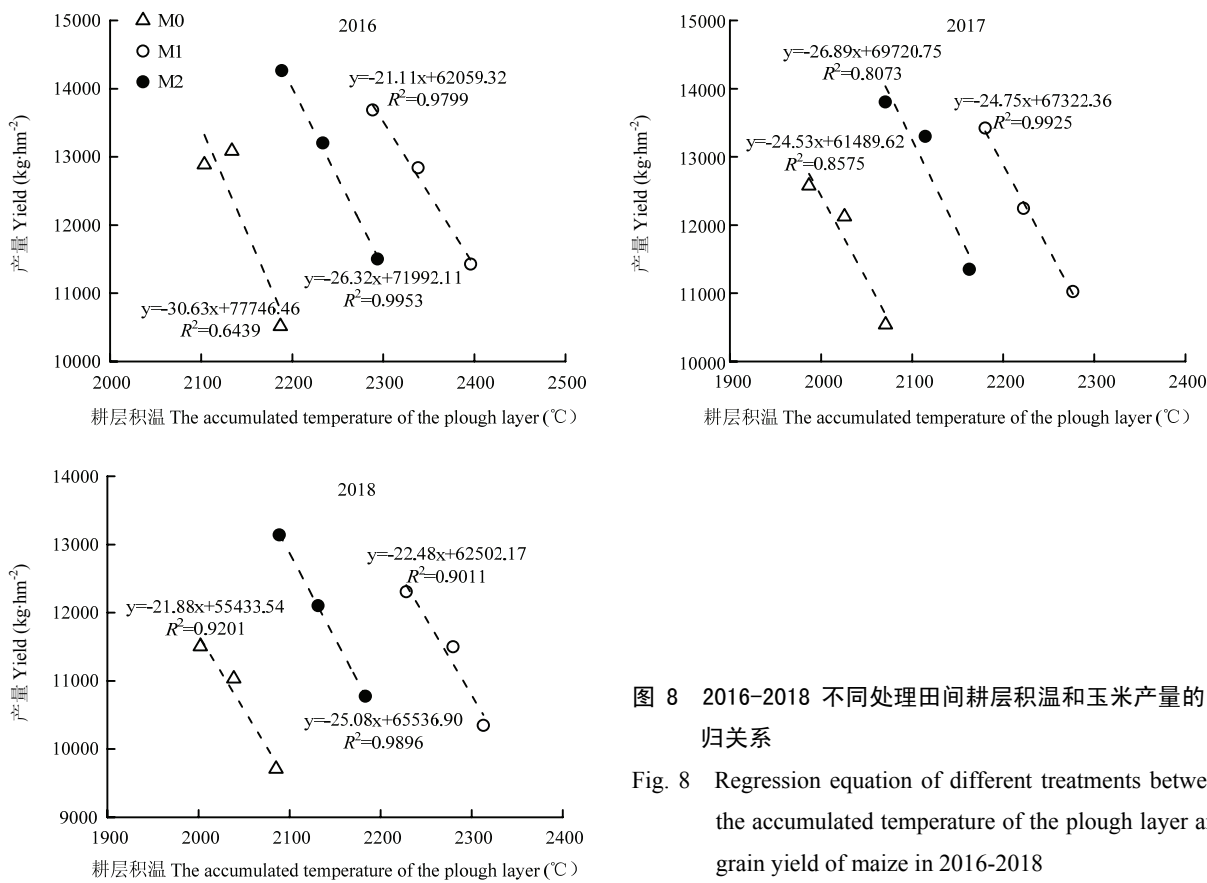


图 8 2016–2018 不同处理田间耕层积温和玉米产量的回归关系

Fig. 8 Regression equation of different treatments between the accumulated temperature of the plough layer and grain yield of maize in 2016–2018

表 3 不同生育时期耕层积温对产量的通径分析

Table 3 Path analysis of yield and accumulated temperature of maize in different growth stages

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					R ² 贡献率 Contribution rate R ²
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	
X ₁	0.23	0.9133		-0.4942	-0.093	-0.0296	-0.0686	0.2101
X ₂	-0.38*	-0.8244	0.5474		-0.0162	0.0228	-0.1107	0.3133
X ₃	0.31	-0.1982	0.4284	-0.0676		-0.0158	0.1597	-0.0614
X ₄	-0.22	-0.1632	0.1658	0.1154	-0.0191		-0.3209	0.0359
X ₅	-0.54**	-0.4220	0.1486	-0.2163	0.075	-0.1241		0.2279

X₁、X₂、X₃、X₄、X₅ 分别表示苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期耕层积温
X₁, X₂, X₃, X₄, X₅ indicate the accumulated temperature of the plough layer at the seedling stage, jointing stage, heading stage, filling stage and maturity stage, respectively

节期和成熟期耕层积温对产量的贡献率较大。苗期耕层积温对玉米产量具有正向作用，拔节期和成熟期耕层积温与玉米产量的相关性分别表现为显著和极显著的负效应。结合图 5 分析发现，与透明地膜覆盖和裸地相比，黑色地膜覆盖处理可以较好地提供适宜各生育期玉米生长的土壤温度，从而提高了玉米产量。

2017—2018 年不同处理耗水量和玉米产量的回归关系如图 9 所示。随着耗水量的增加，3 种覆盖处理下的玉米产量均逐渐增加，在 2017 年，3 种覆盖处理的增幅表现为 M2>M0>M1，在 2018 年，3 种覆

盖处理的增幅表现为 M2>M1>M0。不同生育期玉米耗水量对产量的通径分析见表 4。据表 4 可见，对玉米产量贡献率最大的是抽穗期耗水量，其对玉米产量表现为极显著正相关。该时期，M2 处理下耗水量显著高于 M0 和 M1 处理（图 7），这说明黑色地膜覆盖增加了玉米抽穗期耗水量，达到了玉米增产的效果。此外，拔节期耗水量对玉米产量具有显著的正效应，成熟期耗水量对玉米产量具有显著的负效应。结合图 7 分析发现，地膜覆盖实现玉米增产的部分原因是增加了玉米拔节期耗水量，减少了成熟期耗水量。

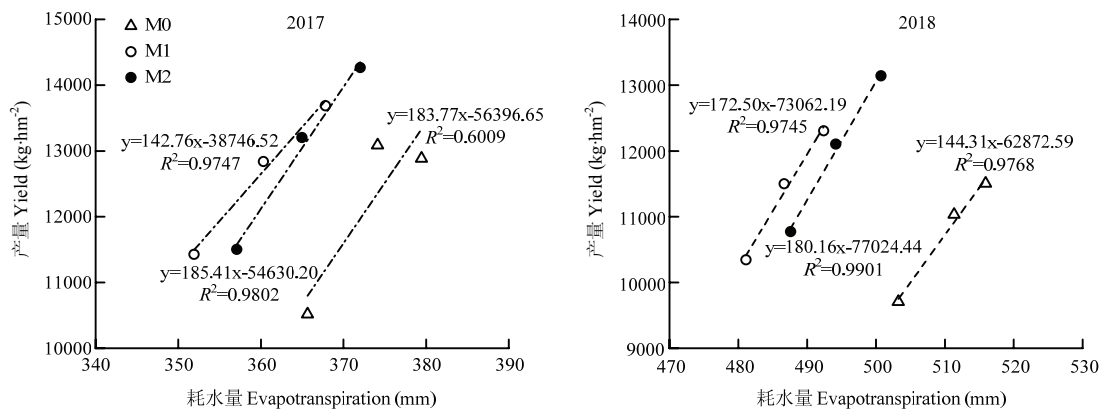


图 9 2017—2018 不同处理耗水量和玉米产量的回归关系

Fig. 9 Regression equation of different treatments between evapotranspiration and grain yield of maize in 2017-2018

表 4 不同生育时期玉米耗水量对产量的通径分析

Table 4 Path analysis of yield and evapotranspiration of maize in different growth stages

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					R ² 贡献率 Contribution rate R ²
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	
X ₁	0.33	0.4398		0.0328	-0.0611	-0.0655	-0.0162	0.1451
X ₂	0.72*	0.1175	0.1227		0.1051	0.1787	0.1937	0.0846
X ₃	0.74**	0.4075	-0.0659	0.0303		0.2213	0.1488	0.3016
X ₄	-0.41	0.2944	0.0897	-0.1983	-0.3724		-0.2254	-0.1207
X ₅	-0.70*	-0.2406	0.1988	-0.0894	-0.3064	-0.2641		0.1684

X₁、X₂、X₃、X₄、X₅ 分别表示苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期耗水量

X₁、X₂、X₃、X₄、X₅ indicate the evapotranspiration at the seedling stage, jointing stage, heading stage, filling stage and maturity stage, respectively

2.5 不同处理对水分利用效率的影响

3 种覆盖方式下，水分利用效率均随种植密度增加而增加（图 10）。种植密度每增加 1×10⁴ 株/hm²，M0、M1 和 M2 处理的水分利用效率分别提高了 1.66、1.99、2.00 kg·hm⁻²·mm⁻¹（2017）和 1.04、1.25、

1.44 kg·hm⁻²·mm⁻¹（2018），枯水年直线上升的斜率分别为平水年的 1.6、1.6 和 1.4 倍。2017—2018 年不同处理对水分利用效率的影响如表 5 所示。从表中可知，覆膜处理水分利用效率显著高于裸地处理，2 种覆膜处理分别以 M1D3 和 M2D3 水分利用效率最高，且

M2D3 处理的水分利用效率比 M1D3 处理在不同年份分别高 0.7 和 1.4 kg·hm⁻²·mm⁻¹。结果表明,覆盖地膜可以显著提高水分利用效率,且黑色地膜提高水分利用效率的效果优于透明地膜。

2.6 经济效益分析

表 6 给出了 2016—2018 年不同处理的经济效益。与裸地种植相比,地膜覆盖处理虽然增加了材料的投入和残膜回收的费用,但也增加了玉米产量收益。在覆膜处理下,利润随着种植密度的增加而

增加,与 D1 和 D2 处理相比,D3 处理在透明地膜覆盖下,不同年份分别增加了 3 316.97 元和 1 205.75 元(2016),3 532.32 元和 1 730.92 元(2017),2 835.27 元和 1 140.08 元(2018);在黑色地膜覆盖下,不同年份分别增加了 4 117.73 元和 1 550.50 元(2016),3 627.03 元和 656.12 元(2017),3 487.68 元和 1 511.58 元(2018)。结果表明,黑色地膜覆盖比透明地膜覆盖增收效应更明显,黑色地膜覆盖和 90 000 株/hm² 组合处理净收入最高。

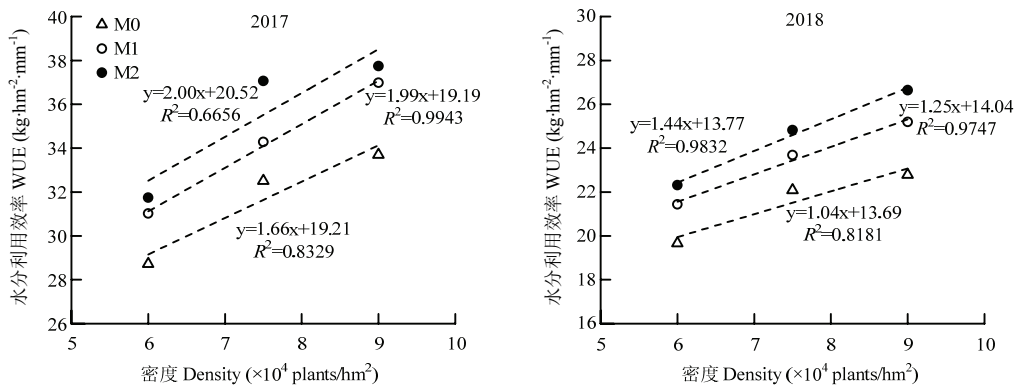


图 10 2017–2018 不同处理对水分利用效率的影响

Fig. 10 Effects of different treatments on water use efficiency of maize in 2017-2018

表 5 2017–2018 不同处理对玉米全生育期耗水量和水分利用效率的影响

Table 5 Effects of different treatments on evapotranspiration and water use efficiency of maize in 2017-2018

处理 Treatment	2017		2018	
	耗水量 ET (mm)	水分利用效率 WUE (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	耗水量 ET (mm)	水分利用效率 WUE (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
M0D1	366.0±7.5b	28.7±1.0b	493.8±12.7c	19.7±0.9b
M0D2	372.9±4.4a	32.5±1.5a	499.8±8.1b	22.1±0.6a
M0D3	373.2±10.5a	33.7±0.5a	504.8±14.0a	22.8±1.4a
均值 Mean	371.0±8.2A	31.6±2.4C	499.4±12.4A	21.5±1.7B
M1D1	355.3±7.4b	31.0±0.7c	482.7±11.4b	21.4±0.9c
M1D2	357.1±12.7b	34.3±1.3b	485.6±15.3ab	23.7±1.2b
M1D3	362.8±7.9a	37.0±0.7a	488.5±12.9a	25.2±0.5a
均值 Mean	358.4±10.5B	34.1±2.7B	485.6±13.1B	23.4±1.8A
M2D1	357.6±11.3b	31.7±1.4b	482.7±10.4c	22.3±1.0c
M2D2	358.8±6.4b	37.1±0.7a	487.5±12.5b	24.8±0.7b
M2D3	365.8±8.4a	37.7±1.5a	493.2±9.7a	26.6±0.2a
均值 Mean	360.7±8.9B	35.5±3.0A	487.8±11.7B	24.6±2.0A
M	**	**	**	**
D	*	**	**	**
M×D	ns	ns	ns	ns

表 6 2016—2018 不同处理经济效益分析

Table 6 Economic benefits under different treatments in 2016-2018 (yuan/hm²)

年份	处理	毛收入	种子	地膜	肥料/农药	人工/机械	净收入
Year	Treatment	Gross income	Seeds input	Film input	Fertilizer/Pesticide input	Labor/Mechanical input	Net income
2016	M0D1	16825.63	600	0	3075	1900	11250.63
	M0D2	20937.64	750	0	3075	1900	15212.64
	M0D3	20617.07	900	0	3075	1900	14742.07
	M1D1	18282.58	600	975	3075	2125	11507.58
	M1D2	20543.80	750	975	3075	2125	13618.80
	M1D3	21899.56	900	975	3075	2125	14824.56
	M2D1	18405.56	600	1125	3075	2125	11480.56
	M2D2	21122.79	750	1125	3075	2125	14047.79
	M2D3	22823.29	900	1125	3075	2125	15598.29
2017	M0D1	16864.16	600	0	3075	1900	11289.16
	M0D2	19398.50	750	0	3075	1900	13673.50
	M0D3	20121.71	900	0	3075	1900	14246.71
	M1D1	17639.44	600	975	3075	2125	10864.44
	M1D2	19590.83	750	975	3075	2125	12665.83
	M1D3	21471.76	900	975	3075	2125	14396.76
	M2D1	18160.22	600	1125	3075	2125	11235.22
	M2D2	21281.13	750	1125	3075	2125	14206.13
	M2D3	22087.25	900	1125	3075	2125	14862.25
2018	M0D1	15533.34	600	0	3075	1900	9958.34
	M0D2	17652.53	750	0	3075	1900	11927.53
	M0D3	18407.74	900	0	3075	1900	12532.74
	M1D1	16554.95	600	975	3075	2125	9779.95
	M1D2	18400.15	750	975	3075	2125	11475.15
	M1D3	19690.23	900	975	3075	2125	12615.23
	M2D1	17236.78	600	1125	3075	2125	10311.78
	M2D2	19362.88	750	1125	3075	2125	12287.88
	M2D3	21024.46	900	1125	3075	2125	13799.46

所有价格均根据当地市场价格确定 All prices are based on the local market

3 讨论

3.1 不同颜色地膜和种植密度对土壤温度的影响

春季低温冷害是东北雨养区作物生产的一个重要限制因素^[4]。RAMAKRISHNA 等^[22]研究认为，覆盖地膜可以提高土壤温度，促进作物生长，是一种增产增收的重要农艺措施。在本研究中，与裸地处理相比，覆膜处理显著提高了玉米苗期、拔节期以及成熟期的土壤耕层积温，且在玉米出苗—拔节期，透明地膜覆盖土壤耕层积温显著高于黑色地膜，这一结果与张琴^[23]的研究结果一致。这一发现是因为在生长前期玉米植

株冠层覆盖度小，地面能直接接收太阳辐射，而且与黑色地膜相比，透明地膜可以透过阳光，吸收更多的太阳辐射^[17,24]，从而使得透明地膜处理的土壤耕层积温显著高于黑色地膜处理。而在玉米生育中期，植株枝叶茂盛，强大的冠层结构阻碍了地面直接接受阳光的辐射，从而使得地膜的增温效果不明显。到了成熟收获期，植株叶片逐渐枯黄凋萎，群体透光度增加，覆膜增温效果显著。研究还发现，种植密度对土壤耕层积温有显著影响，从玉米拔节期开始，土壤耕层积温随着种植密度的增加而降低。这是因为对种植密度而言，地面遮荫度是影响土壤温度的主要因素，在苗

期,植株相对矮小,各密度处理间地面遮荫相差不大;到拔节期以后,高密度处理形成较大的冠层结构,致使地面遮荫度上升,从而土壤温度下降。

3.2 不同颜色地膜和种植密度对玉米耗水的影响

在雨养旱作地区,地膜覆盖能够降低土壤表面蒸发,改善土壤水分状况,有效提高玉米生育期土壤蓄水保水能力^[25-26]。本研究发现,覆膜处理的玉米耗水量显著低于裸地处理。这是因为地膜覆盖阻断了土壤水分的垂直蒸发和乱流,迫使膜下水分横向迁移,增大了水分蒸发的阻力,从而达到了蓄水保墒的目的^[27]。本研究中,玉米拔节期的耗水量在不同降水年型间表现存在差异,这一发现是因为覆膜的增温保墒效果在促进玉米生长的同时,加强了植株蒸腾作用,在 2017 年降雨量较少的情况下,作物耗水以蒸腾为主,从而导致耗水量高于裸地处理;而 2018 年降水较为充足时,土壤蒸发明显,覆膜的保水效果使其耗水量低于裸地处理。在玉米出苗—拔节期,透明地膜较强的增温效果使其玉米生长速度快于黑色地膜处理,剧烈的蒸腾作用使得透明地膜处理耗水量始终高于黑色地膜处理。张琳琳等^[12]研究认为,在玉米拔节—抽穗期,黑色地膜处理玉米生长会逐渐超过透明地膜处理,从而获得最大的干物质积累,这也解释了黑色地膜覆盖处理在抽穗期耗水量最大的原因。在生育后期,覆膜种植的玉米提前衰老,使得此时玉米耗水量低于裸地处理,这与王罕博等^[28]的研究结果一致。本研究发现,无论在枯水年还是平水年,玉米全生育期耗水量均随种植密度的增加而增加,该结果与张冬梅等^[29]的研究结果不同,这可能与玉米的品种和种植密度的设定范围有关。刘战东等^[30]研究认为,增加种植密度后作物耗水量的增加主要是由出苗—拔节期耗水量的增加所致,本研究得出相同的结论。这主要与该时期土壤水分供应充足,群体内植株间尚未形成水分的竞争有关。在成熟期,玉米植株蒸腾作用变小,同时高密度处理的植株覆盖和遮荫效果,减少了表层土壤水分的蒸发,从而使得耗水量随着种植密度的增加而下降。

3.3 不同颜色地膜和种植密度对玉米产量和水分利用效率的影响

地膜和种植密度是影响玉米产量和水分利用效率的重要因素^[8,13]。张琴^[23]研究发现,黑色地膜覆盖玉米产量和水分利用效率较透明地膜分别高 5.99%和 4.76%,较裸地分别高 25.60%和 34.24%。本研究也表明黑色地膜覆盖提高玉米产量和水分利用效率的效果优于透明地膜。主要是因为覆膜处理下玉米出苗—拔

节期较高的土壤温度可为种子发芽出苗创造良好的环境,一定程度上增加出苗率并防止春季低温冷害对幼苗的影响,然而透明地膜覆盖过高的土壤温度往往容易造成玉米生长过快,使得玉米体内营养出现逆差,生育期缩短,导致植株早衰而降低产量。黑色地膜覆盖较透明地膜覆盖能够降低土壤温度,延缓玉米根系和植株的衰老,使得玉米生殖生长时间延长,进一步促进玉米籽粒灌浆期光合物质的生产,从而提高了玉米百粒重和产量^[18]。并且,黑色地膜覆盖和透明地膜覆盖具有同样的保水保墒效果,并增加了玉米需水关键期耗水量,防止了高温和干旱对玉米生长的影响,从而获得最高的产量和水分利用效率。ANTONIETTA 等^[31]研究发现,玉米产量和水分利用效率随种植密度的增加而增加,本研究得出类似的结论。这是因为适当增加种植密度,能够形成更为强大的冠层结构,从而可以截获更多的光合有效辐射,进而增加玉米产量^[5],高密度种植增加了作物耗水量并降低了蒸发与蒸腾的比例,实现作物水分的高效利用。然而 REN 等^[10]研究认为随着植物密度的增加,玉米产量和水分利用效率呈先上升后下降的趋势。原因是高密度种植加剧了根系对养分、水分的竞争,减少了土壤水分储存,密度过大会导致玉米产量下降^[2]。

在东北雨养地区,降水年际变异和季节分布差异大,生育期降水量对不同处理玉米产量和水分利用效率有很大影响^[32]。3 年研究中,2016 年(丰水年),降水较为充足,较高的土壤蓄水使得玉米产量最高。2017 年(枯水年)降水量最少,但降水分布比较均匀,未对玉米生长造成较大水分胁迫,因此未造成玉米较大减产。而在 2018 年(平水年),降水量虽然高于 2017 年,但玉米产量却比 2017 年降低 6.8%—9.3%,主要原因有两个方面:一是 2017 年干旱导致 2018 年土壤底墒较差;二是在灌浆期出现高温无雨极端天气,对玉米灌浆过程造成影响,致使玉米减产。

此外,需要指出的是,农用地膜新国标(GB13735—2017)于 2017 年 10 月 14 日发布,2018 年 5 月 1 日正式实施,替换原国家标准 GB13735—1992。新标规定,地膜厚度不得小于 0.010 mm。本试验开始于 2016 年,采用当时的国家标准,地膜厚度为 0.008 mm,为保证试验连续性,2017 和 2018 年也采用此标准。

4 结 论

在东北雨养区,黑色地膜和透明地膜覆盖均能提

高土壤耕层积温,且透明地膜增温效果优于黑色地膜;从全生育期耗水量来看,黑色地膜和透明地膜覆盖处理均显著低于裸地处理,2种覆膜处理间无显著差异,同样具有较好的保水保墒效果;与透明地膜相比,黑色地膜覆盖较好地提供适宜各生育期玉米生长的土壤温度,从而获得最高的产量和水分利用效率,提高了经济效益。本研究中,种植密度的增加使得玉米拔节期以后的土壤耕层积温下降;玉米产量、全生育期耗水量、水分利用效率与种植密度同步增加,高密度处理获得最高的经济效益。综合研究表明,黑色地膜覆盖结合高密度(90 000株/hm²)栽培模式,可以更好地改善土壤水热状况,提高玉米产量和水分利用效率,具有蓄雨保水增产和提高经济效益的效果,是适宜雨养旱作地区春玉米高产栽培的模式。

References

- [1] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 赵明, 李潮海, 崔彦宏, 刘永红, 高聚林, 薛吉全, 王立春, 王璞, 陆卫平, 王俊河, 杨祁峰, 王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959.
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, ZHAO M, LI C H, CUI Y H, LIU Y H, GAO J L, XUE J Q, WNAG L C, WANG P, LIU W P, WANG J H, YANG Q F, WANG Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese)
- [2] 张琳琳, 孙仕军, 陈志君, 姜浩, 张旭东, 迟道才. 不同颜色地膜与种植密度对春玉米干物质积累和产量的影响. 应用生态学报, 2018, 29(1): 113-124.
ZHANG L L, SUN S J, CHEN Z J, JIANG H, ZHANG X D, CHI D C. Effects of different colored plastic film mulching and planting density on dry matter accumulation and yield of spring maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 113-124. (in Chinese)
- [3] 朱大威, 金之庆. 气候及其变率变化对东北地区粮食生产的影响. 作物学报, 2008, 34(9): 1588-1597
ZHU D W, JIN Z Q. Impacts of changes in both climate and its variability on food production in Northeast China. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(9): 1588-1597. (in Chinese)
- [4] 陈林, 杨新国, 翟德苹, 宋乃平, 杨明秀, 候静. 柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和玉米产量的影响. 农业工程学报, 2015, 31(2): 108-116.
CHEN L, YANG X G, ZHAI D P, SONG N P, YANG M X, HOU J. Effects of mulching with caragana powder and plastic film on soil water and maize yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 108-116. (in Chinese)
- [5] 宋振伟, 郭金瑞, 邓艾兴, 寇太记, 任军, 张卫建. 耕作方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响. 农业工程学报, 2012, 28(16): 108-114.
SONG Z W, GUO J R, DENG A X, KOU T J, REN J, ZHANG W J. Effects of surface tillage regimes on soil moisture and temperature of spring corn farmland in Northeast China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 108-114. (in Chinese)
- [6] 徐宗贵, 孙磊, 王浩, 王淑兰, 王小利, 李军. 种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2463-2475.
XU Z G, SUN L, WANG H, WANG S L, WANG X L, LI J. Effects of different planting densities on photosynthetic characteristics and yield of different variety types of spring maize on dryland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13): 2463-2475. (in Chinese)
- [7] NYAKUDYA I W, STROOSNIJDER L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 2014, 146: 280-296.
- [8] LI Z X, LIU K C, LIU C X, ZHANG X Q, LIU X, ZHANG H, LIU S C, WANG Q C, LI Q Q. Aboveground dry matter and grain yield of summer maize under different varieties and densities in North China Plain. *Maydica*, 2013, 58: 189-194.
- [9] SANGOI L, GRACIETTI M A, RAMPAZZO C, BIANCHETTI P. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. *Field Crops Research*, 2002, 79: 39-51
- [10] REN X M, SUN D B, WANG Q S. Modeling the effects of plant density on maize productivity and water balance in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2016, 171: 40-48.
- [11] KUCHARIK C J. Contribution of planting date trends to increased maize yields in the central united states. *Agronomy Journal*, 2008, 100(2): 328-336.
- [12] BURKEN D B, HARDING J L, MCGEE A L, HOEGEMEYER T C, KLOPFENSTEIN T J, ERICKSON G E. Effects of corn hybrid, plant density, and harvest time on yield and quality of corn plants. *Nebraska Beef Cattle Report*, 2013: 42-43.
- [13] 张杰, 任小龙, 罗诗峰, 海江波, 贾志宽. 环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(6): 14-19.
ZHANG J, REN X L, LUO S F, HAI J B, JIA Z K. Influences of different covering materials mulching on soil moisture and corn yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 14-19. (in Chinese)
- [14] WU Y, HUANG F Y, JIA Z K, REN X L, CAI T. Response of soil

- water, temperature, and maize (*Zea may* L.) production to different plastic film mulching patterns in semi-arid areas of northwest China. *Soil & Tillage Research*, 2017, 166: 113-121.
- [15] GAN Y T, SIDDIQUE K H M, TURNER N C, LI X G, NIU J Y, YANG C, LIU L P, CHAI Q. Chapter seven-ridge-furrow mulching systems: An innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments. *Advances in Agronomy*, 2013, 118: 429-476
- [16] LIU C A, JIN S L, ZHOU L M, JIA Y, LI F M, XIONG Y C, LI X G. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(4): 241-249.
- [17] LIU Q F, CHEN Y, LI W W, LIU Y, HAN J, WEN X X, LIAO Y C. Plastic-film mulching and urea types affect soil CO₂ emissions and grain yield in spring maize on the Loess Plateau, China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28150.
- [18] 路海东, 薛吉全, 郝引川, 高杰. 黑色地膜覆盖对旱地玉米土壤环境和植株生长的影响. *生态学报*, 2016, 36(7): 1997-2004.
- LU H D, XUE J Q, HAO Y C, GAO J. Effects of black film mulching on soil environment and maize growth in dry land. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(7): 1997-2004. (in Chinese)
- [19] FILIPOVIC V, ROMIC D, ROMIC M, BOROSIC J, FILIPOVIC L, MALLMANN F J K, ROBINSON D A. Plastic mulch and nitrogen fertigation in growing vegetables modify soil temperature, water and nitrate dynamics: Experimental results and a modeling study. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 100-110
- [20] SUN S J, CHEN Z J, JIANG H, ZHANG L L. Black film mulching and plant density influencing soil water-temperature conditions and maize root growth. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-12
- [21] HUANG Y L, CHEN L D, FU B J, HUANG J L, GONG J. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: Straw mulch and irrigation effects. *Agricultural Water Management*, 2005, 72: 209-222.
- [22] RAMAKRISHNA A, TAM H M, WANI S P, LONG T D. Effect of mulch on soil temperature moisture, weeds infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. *Field Crops Research*, 2006, 95: 115-125.
- [23] 张琴. 不同颜色地膜覆盖对玉米土壤水热状况及产量的影响. *节水灌溉*, 2017(4): 57-61.
- ZHANG Q. Effects of different color film mulching on soil moisture-heat and yield of maize. *Water Saving Irrigation*, 2017(4): 57-61. (in Chinese)
- [24] TARARA J M. Microclimate modification with plastic mulch. *HortScience*, 2000, 35(2): 169-180.
- [25] ZHAO H, WANG R Y, MA B L, XIONG Y C, QIANG S C, WANG C L, LIU C A, LI F M. Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rain-fed ecosystem. *Field Crops Research*, 2014, 161: 137-148.
- [26] WANG Y P, LI X G, ZHU J, FAN C Y, KONG X J, TURNER N C, SIDDIQUE K H M, LI F M. Multi-site assessment of the effects of plastic-film mulch on dry land maize productivity in semiarid areas in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 160-169.
- [27] ZHOU L M, LI F M, JIN S L, SONG Y J. How double ridges and furrows mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41-47.
- [28] 王罕博, 龚道枝, 梅旭荣, 郝卫平. 覆膜和露地旱作玉米生长与蒸散动态比较. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 88-94.
- WANG H B, GONG D Z, MEI X R, HAO W P. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 88-94. (in Chinese)
- [29] 张冬梅, 张伟, 陈琼, 黄学芳, 姜春霞, 韩彦龙, 刘恩科, 池宝亮. 种植密度对旱地玉米植株性状及耗水特性的影响. *玉米科学*, 2014, 22(4): 102-108.
- ZHANG D M, ZHANG W, CHEN Q, HUANG X F, JIANG C X, HAN Y L, LIU E K, CHI B L. Effects of planting density on plant traits and water consumption characteristics of dryland maize. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(4): 102-108. (in Chinese)
- [30] 刘战东, 肖俊夫, 于景春, 刘祖贵, 南纪琴. 春玉米品种和种植密度对植株性状和耗水特性的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 125-131.
- LIU Z D, XIAO J F, YU J C, LIU Z G, NAN J Q. Effects of varieties and planting density on plant traits and water consumption characteristics of spring maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 125-131. (in Chinese)
- [31] ANTONIETTA M, FANELLO D D, ACCIARESI H A, GUIAMET J J. Senescence and yield responses to plant density in stay green and earlier-senescing maize hybrids from Argentina. *Field Crops Research*, 2014, 155: 111-119.
- [32] CHEN C Q, LEI C X, DENG A X, QIAN C R, HOOGMOED W, ZHANG W J. Will higher minimum temperatures increase corn production in Northeast China? An analysis of historical data over 1965 to 2008. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1580-1588.

(责任编辑 杨鑫浩)