

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.032

覆膜和灌水量对农田水热动态和制种玉米生长的影响

赵引 毛晓敏 段萌

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 覆膜和节水灌溉是我国西北旱区应对水资源短缺、提高作物水分生产率的主要措施。为了探索覆膜与灌溉制度对农田水热和制种玉米生长的综合影响,揭示农田耗水及水分利用效率的变化规律,于2017年在中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站进行了制种玉米田间试验,设置覆膜与水分2个控制因素,覆膜分别为完全覆膜(M1)与不覆膜(M0)2个水平,水分设置W1、W2、W3、W4和W5 5个水平,分别为当地传统灌溉定额的100%、85%、70%、55%和40%,灌水方式为滴灌,共10个处理。结果表明:相同灌水条件下覆膜相对于不覆膜处理,可减少棵间蒸发,增高生育前期土壤温度,使株高和叶面积指数的增长速率高于不覆膜,提前7~10 d达峰值,增产达6.5%~44.6%,水分利用效率提高16.9%~50.4%。但覆膜可阻滞降雨入渗,以单次典型降雨32.4 mm为例,覆膜较不覆膜降雨入渗百分比降低22.4%。相同覆膜条件下,土壤贮水消耗量随着灌水量的减少而增多,因此土壤贮水量随着灌水量的增加而增加。灌水量越多,制种玉米株高、叶面积指数和最终干物质积累量越高,而水分利用效率则越低。覆膜条件下,W1处理产量最高,W3次之,且两者之间无显著性差异,水分利用效率则为W5处理最高,W3次之。M1W3处理可以在保证较高产量的同时,水分利用效率较M1W1提高17.6%。综上,在当地制种玉米生产中,虽然覆膜可能减少地表降水入渗,但可以使生育期提前、减少棵间蒸发,对于节水增产有一定的促进作用。

关键词: 制种玉米; 覆膜; 滴灌; 水热; 水分利用效率

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0275-10

Effects of Film Mulching and Irrigation Amount on Farmland Water – Heat Dynamics and Growth of Seed-maize

ZHAO Yin MAO Xiaomin DUAN Meng

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Film mulching and water-saving irrigation are the main measures to cope with water resources shortage and increase crop water productivity in the arid region of Northwest China. In order to explore the comprehensive influence of film mulching and irrigation system on farmland water and heat condition and seed-maize growth and reveal the variation of farmland water consumption and water use efficiency, field experiments of seed-maize were conducted at Shiyanghe Experimental Station for Water-saving in Agriculture and Ecology of China Agricultural University in 2017. The experiments involved ten treatments, i. e., two levels of film mulching, full-mulching (M1) and non-mulching (M0) and five irrigation amount levels of drip irrigation, i. e., W1, W2, W3, W4 and W5, respectively 100%, 85%, 70%, 55% and 40% of the local traditional irrigation quota. Results showed that compared with non-mulching, film mulching can reduce soil evaporation and increase soil temperature in early stage, which resulted in higher growth rate of plant height and leaf area index, and reached their maximum values by 7~10 d in advance, increased the yield of seed-maize by 6.5%~44.6% and the water use efficiency by 16.9%~50.4% under the same irrigation conditions. But film mulching can block rainfall infiltration. For example, when the rainfall was 32.4 mm, the percentage of rainfall infiltration into the soil was 22.4% less than that of non-mulched treatment. Under the same film mulching condition, the

收稿日期: 2018-03-15 修回日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679234, 91425302)

作者简介: 赵引(1993—),女,博士生,主要从事水文水资源研究,E-mail: zhaoyin0671@163.com

通信作者: 毛晓敏(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事水文水资源与农业水土工程研究,E-mail: maoxiaomin@cau.edu.cn

consumption of soil water storage was increased with the decrease of irrigation amount, thus the soil water storage was increased with the increase of irrigation amount. The higher irrigation amount was, the higher the plant height, the LAI and the total dry biomass were, while the lower the water use efficiency was. The yield of W1 was the highest and that of W3 was the second under the condition of film mulching, and there was no significant difference between them. While for the water use efficiency, W5 was the highest and W3 was the second. The M1W3 treatment can keep higher maize yield with water use efficiency enhanced by 17.6% compared with that of M1W1. In conclusion, although field mulching may reduce the infiltration of rainfall, it can advance the growth period and reduce soil evaporation, which enhanced yield and saved water in the production of local seed-maize to some extent.

Key words: seed-maize; film mulching; drip irrigation; water and heat; water use efficiency

0 引言

玉米是我国主要粮食作物之一,玉米播种面积和产量占粮食作物的比例由1980年的17.13%和19.53%增加到2016年的32.53%和35.63%^[1]。因此,确保玉米产量对维护我国粮食安全具有重要意义。地处我国西北干旱区的石羊河流域是制种玉米的重要生产基地,而该地区水资源匮乏,严重制约了当地农业的可持续发展,农业高效用水成为解决用水瓶颈、促进水资源可持续利用的关键。大量研究表明,地膜覆盖可以抑制土壤蒸发,增加土壤温度,促进作物生长、提高作物产量和水分利用效率^[2-4]。农作物的灌溉制度是为满足作物生长需要且又获得一定产量而制定的适时、适量的灌水方案。不同的灌溉制度与地膜覆盖技术结合,可实现既满足作物生长需要、又达到节水和高产的目的^[5-11]。研究表明,覆膜和调亏灌溉均可获得较高的玉米产量和水分利用效率^[6,9]。姬景红等^[5]认为覆膜亏水灌溉在保证较高的玉米产量的同时,比不覆膜亏水灌溉和覆膜充分灌溉分别提高灌溉水利用效率2.7倍和2.5倍。王婵等^[11]也得出相似的结论,认为全膜覆盖条件下适当的灌水量可提高制种玉米产量并获得较高的水分利用效率,产量除较全膜高灌水处理低7.4%外,较其他处理提高3.0%~68.7%,水分利用效率最高,提高8.9%~35.3%。于爱忠^[7]提出相同覆膜方式下适当减少灌水量是提高玉米水分利用效率的有效途径。覆膜与灌溉制度耦合效应的这些研究中多采用传统大水漫灌的灌水方式,然而随着地膜覆盖技术的推广,膜下滴灌技术在我国干旱和半干旱地区大面积应用。相关学者对膜下滴灌条件下的土壤水、盐、热动态^[12]、土壤蒸发和作物蒸腾耗水及作物生长规律^[13]等开展了一系列研究,但研究多集中于膜下滴灌条件下不同灌溉制度的对比,将不覆膜滴灌与膜下滴灌进行定量对比研究的报道较少。因此有必要在滴灌方式下,对覆膜与灌水量的耦合效应进行深入研究。本研究以石羊

河流域制种玉米为研究对象,采用滴灌的灌水方式,比较覆膜和不同灌水量对农田水热动态变化以及作物生长的耦合影响,探索覆膜与节水灌溉的综合作用,以期为我国水资源高效利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2017年4—9月在甘肃省武威市中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站(北纬37°52',东经102°52',海拔1581 m)进行。该站位于腾格里沙漠边缘,属于典型的大陆性温带干旱沙漠气候区。该地区多年平均降水量164 mm,多年平均蒸发量2000 mm,多年平均气温8℃,全年无霜期150 d左右,日照时长3000 h以上。该地区地下水埋深为40~50 m,试验地区0~100 cm土壤以粉砂壤土为主,土壤干容重1.53 g/cm³,田间持水率(体积)为32%。

1.2 试验设计

本试验供试制种玉米品种为甘鑫630。试验设置覆膜与水分2个因素,覆膜分别为完全覆膜(M1)与不覆膜(M0)2个水平,水分设置W1、W2、W3、W4和W5 5个水平,分别为当地传统灌溉定额的100%、85%、70%、55%和40%(当地传统灌溉定额为作物腾发量(ET_c)减去有效降雨量, ET_c 为参考作物腾发量(ET_0)与作物系数(K_c)相乘计算得到, ET_0 利用Penman-Monteith^[14]公式计算, K_c 参照文献^[15]),共10个处理(小区),每个小区面积为137.2 m²(长为24.5 m、宽为5.6 m)。完全覆膜处理的小区采用100 cm宽的透明塑料薄膜覆盖土壤,膜与膜间无缝隙并用土压盖。施肥按照当地经验,即播前施375 kg/hm²的磷酸二铵和375 kg/hm²的氮磷钾复合肥作为底肥,拔节期分3次施450 kg/hm²的尿素。父母本比例1:6,母本于2017年4月24日播种,父本于2017年5月4日播种。播种方式为南北穴播,行距40 cm,株距25 cm。

为保证不覆膜小区玉米的出苗率,分别于4月

26日和5月1日灌出苗水,而不覆膜小区在5月11日多灌一次出苗水。试验中采用滴灌的灌溉方式,滴灌带按“一管两行”布置,滴灌带间距为80 cm,滴头间距为30 cm,滴头流量为2.5 L/h。

1.3 试验监测指标与方法

1.3.1 土壤水分和温度

土壤含水率:采用 Trime-TDR 时域反射仪测定土壤体积含水率,每个小区分别在行间各布置3个测点,测定深度1.6 m(本研究中仅采用了60 cm土层以上的土壤含水率),测点垂向间距为20 cm,每隔7 d测定一次,灌水及降雨前后加测,并利用取土干燥法对测得值进行校正。

土壤温度:采用土壤温度记录仪(HZTJ1型)长期监测土壤温度。在M1W1、M0W1、M1W3、M0W3、M1M5和M0W5小区各布置一个测点,分别监测各测点地面以下10、20、40、80、120 cm深度处的土壤温度,每30 min自动记录一次数据,定期下载存储数据。

1.3.2 作物生长发育进程、生理指标和产量

生长发育进程:从制种玉米播种开始观测玉米生长发育性状,记录各个生育阶段的日期。

株高和叶面积指数:各试验小区随机选定具有代表性的3株制种玉米植株(母本),在生育期内每隔7 d用卷尺测量其株高及完全展开叶片的长度和最大宽度,以此推求其叶面积指数。具体计算公式为

$$S = Lb\beta \quad (1)$$

$$A = \sum S \quad (2)$$

$$LAI = A/B \quad (3)$$

式中 S ——单片叶面积, cm^2

L ——叶片长度, cm

b ——叶片最大宽度, cm

β ——折减系数,参照文献[16],取0.74

A ——单株叶面积, cm^2

B ——植株所占地表面积, cm^2

LAI ——叶面积指数, cm^2/cm^2

地上干物质累积量和产量:作物成熟后,选3株具有代表性的植株,从茎基部切断,获得完整的地上部,将其叶片、茎秆、果等器官装袋,置于105℃下杀青30 min,然后在85℃下干燥至恒质量,以考察干物质累积量。各试验小区随机选取一行制种玉米,连续取样10株,取样重复3次,测定其产量。

1.4 作物耗水量和水分利用效率

作物耗水量的计算采用水量平衡的方法。由于采用了滴灌(覆膜情况下为膜下滴灌)的节水灌溉方式,可忽略灌溉损失,认为灌溉入渗率为100%。

对于降雨入渗,通过选取典型单次降雨前后土壤水的增加量与当次降雨量的比值来计算覆膜与不覆膜对降雨入渗的影响^[17],即

$$i = \lambda/P \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad \lambda = \sum (w_{j1} - w_{j0})d \quad (5)$$

式中 i ——降雨入渗率, %

P ——降雨量, mm

λ ——降雨入渗量, mm

w_{j1} ——降雨后第 j 层土壤体积含水率, cm^3/cm^3

w_{j0} ——降雨前第 j 层土壤体积含水率, cm^3/cm^3

d ——土层厚度, mm

耗水量采用水量平衡公式计算,即

$$ET = Q + I + \Delta W \quad (6)$$

$$\text{其中} \quad Q = Pi \quad (7)$$

式中 ET ——时段内的耗水量, mm

Q ——时段内降雨入渗量, mm

I ——时段内灌溉量, mm

ΔW ——时段初与时段末土壤贮水量变化, mm

水分利用效率(WUE)计算公式为

$$WUE = Y/ET \quad (8)$$

式中 WUE ——水分利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$

Y ——单位面积制种玉米产量, kg/hm^2

1.5 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2016 处理数据,制作图表,SPSS 20.0 进行统计分析,并用 Duncan 新复极差检验法进行显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分动态变化规律

2.1.1 覆膜对土壤水分消耗的影响

图1a~1e为相同灌水条件下覆膜与不覆膜处理对0~60 cm土层贮水消耗量的影响,其中纵坐标60 cm土层贮水消耗量表示初始贮水量与当天贮水量的差值。在W1灌水条件下,覆膜处理土壤贮水消耗量较不覆膜少,这可能是因为W1充分灌水条件下,覆膜与不覆膜处理制种玉米生长状况均较旺盛,蒸腾作用相同,根系吸水消耗土壤中的水量相同,但覆膜可明显减少棵间蒸发,因此土壤贮水消耗量较不覆膜少。而在W2、W3、W4和W5灌水条件下,覆膜处理土壤贮水消耗量较不覆膜多,这可能是因为W2、W3、W4和W5条件下,灌水量少,土壤蒸发少,覆膜与不覆膜土壤蒸发无差异,但覆膜可阻滞降水入渗,增加土壤贮水的消耗。以2017年7月26日、27日(总降雨量为32.4 mm)的连续降雨为例,当降雨量为32.4 mm时,根据式(4)、(5)得到的

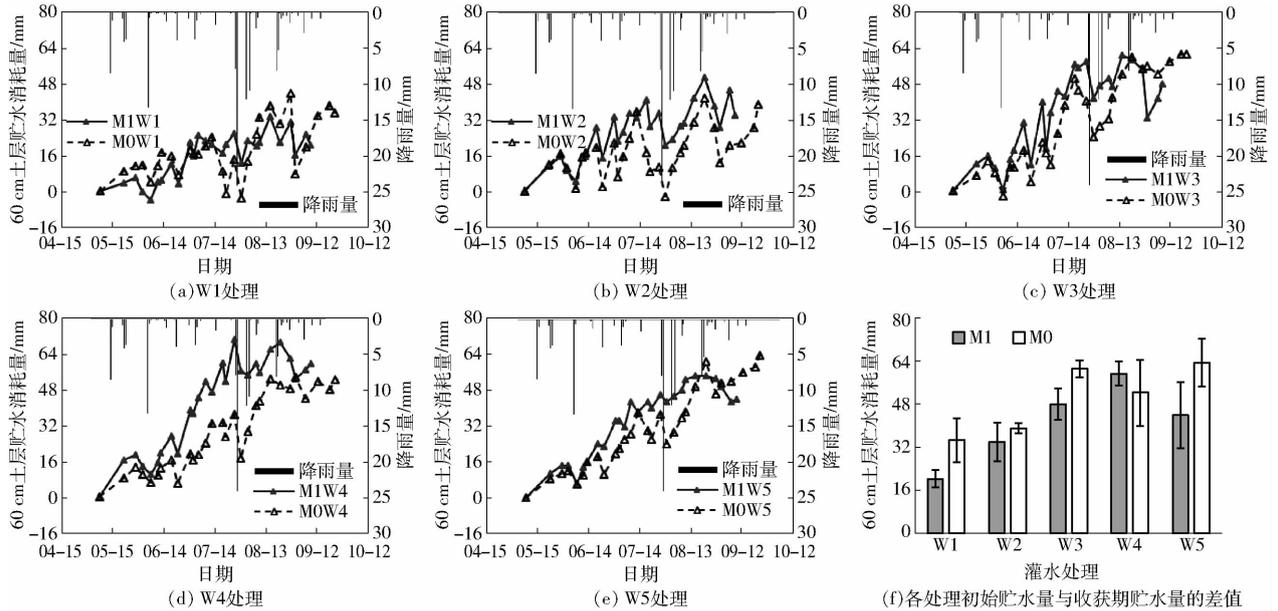


图1 不同处理0~60 cm 土层贮水消耗量的变化

Fig. 1 Changes of soil water storage consumption amounts in 0~60 cm soil layer under different treatments

覆膜处理降雨入渗百分比为 37.7%、不覆膜达 48.6%，覆膜较不覆膜降低 22.4%，因此导致 7 月下旬不覆膜处理土壤贮水消耗量明显降低。另外，在非充分灌水条件下覆膜促进制种玉米生长，根系吸水较多，也会使覆膜贮水消耗量增加。这一研究结果与大多数的研究^[18-19]类似，土壤贮水量在生育前期主要受土壤蒸发的影响^[20]，覆膜抑制土壤与大气之间的水分交换，减少土壤蒸发^[21-23]。随着作物植株冠层不断壮大，蒸腾作用占主导地位，覆膜作物蒸腾作用较强，耗水较多。土壤贮水量还与降雨量有关，覆膜可减少降雨量下渗，降低土壤含水量^[17, 24-25]。

2.1.2 灌水量对土壤水分消耗的影响

图 1f 表示不同灌水处理下初始与收获期 0~60 cm 土层贮水量的差值。整体上看，土壤贮水消耗量随着灌水量的减小而增多。当灌水量较少，不能满足作物生长需求时，会加大对土壤水分的消耗。在整个生育期内，覆膜处理 W2、W3、W4 和 W5 分别较 W1 多消耗土壤水分 67.5%、135.3%、191.9% 和 116.0%，不覆膜处理则分别多消耗 1.5%、58.6%、35.6% 和 64.5%。从图中还可以看出，除 W4 处理外，覆膜处理贮水消耗量较不覆膜少，这与图 1b~1e 的结果似乎矛盾，主要原因是图 1b~1e 显示的是贮水量消耗的过程。尽管在过程中贮水量的消耗一般呈现出覆膜较不覆膜的多，但最后接近成熟期时，由于覆膜制种玉米提前成熟，所以后期耗水明显减少，显示在图 1f 上反而表现出了覆膜较不覆膜少的特征。

2.2 土壤温度动态变化规律

太阳辐射和地表覆盖物是影响表层土壤温度的

主要因素。整体上看，土壤温度随着生育期的推进呈现先增加后减小的趋势。从播种到 7 月下旬，气温升高，降雨少，土壤增温快。7 月下旬之后，气温降低，降雨多，土壤温度降低。通过对土壤温度动态变化的分析，发现不同灌水处理下的温度变化趋势基本一致。由于篇幅所限，此处以灌水量处于适中水平的 W3 处理为例，分析覆膜与不覆膜的日均温差以及 M1W3 处理土层不同深度处的土壤温度在整个生育期的变化规律。

2.2.1 不同土层深度处覆膜与不覆膜温差随生育期的变化

图 2 为不同土层深度覆膜与不覆膜之间每日日平均温度的差值随生育期的变化规律。可以看出，在 7 月初之前，由于植株矮小，作物叶面积指数小，遮阴作用较小，塑料薄膜的透光率很高，地膜覆盖能把太阳能转化的热能汇集在土壤中，使覆膜处理的土壤温度显著高于不覆膜处理，10 cm 深处提高了 22.4%。许多研究者^[26-28]得出了一致的结论，认为在作物生长前期，塑料薄膜接收太阳辐射能量，会显著增加土壤温度。地膜对地温的影响与土层深度有关，土层越深，覆膜与不覆膜处理之间的温差越小，10、20、40、80、120 cm 深度土层的平均温差分别为 1.6、2.0、1.3、1.1、0.3℃。到达 7 月，覆膜处理的玉米叶面积指数升高（达 5.5 cm²/cm² 左右），冠层遮光作用大于不覆膜处理，且由于地膜遭到破损，覆膜与不覆膜处理的土壤温度比较接近，两者差异不显著^[25]，温差在 0℃ 波动，ZHANG 等^[28]也得出了类似的结论，认为是由于较高的土壤水分降低了土壤温度。可见地膜的保温作用主要表现在生育前期，生

育后期保温作用减弱,甚至出现了不覆膜处理的地温高于覆膜处理的现象。但也有研究表明^[24, 29],地膜在整个生育期保温效果都比较明显。

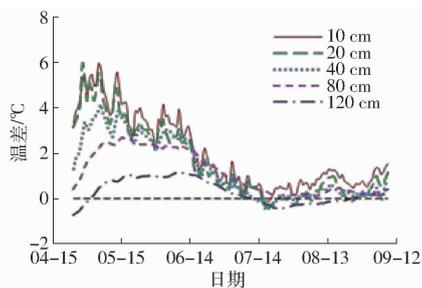


图 2 不同土层深度覆膜与不覆膜日均温差的变化
Fig. 2 Changes of mean daily temperature for treatments with mulching and non-mulching in different soil layers

2.2.2 不同土层深度处地温随生育期的变化

图 3 为不同土层深度处地温在整个生育期的变化情况。土壤温度随着土层深度的增加而减小,且这种差异随着生育期的进展逐渐减弱。可以看出,40 cm 以上土层的土壤温度较高,且温差不大,而 80 cm 和 120 cm 深度土壤温度较低,与 40 cm 以上土层相比温差相差较为明显,其中,10 cm 深处的地温曲线与 20 cm 深处的基本重合,这可能是因为浅层土壤温度受外界条件波动较大,产生监测误差导致。20 cm 深处的平均地温比 40 cm 增加了 4.8%。而 40 cm 深处的平均地温比 80 cm 增加了 11.9%,80 cm 深处的平均地温比 120 cm 增加了 12.1%。到达灌浆期,不同土层深度温度差异又逐渐减弱。

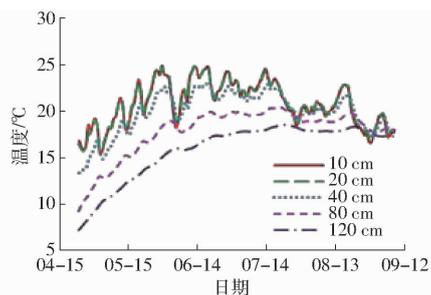


图 3 M1W3 处理不同土层深度处地温的变化
Fig. 3 Changes of soil temperature in different soil layers in M1W3

此外,土温的波动幅度也随深度的增加而减弱。这是由于土壤温度的波动变化主要与大气温度、灌水和降雨有关,土层越深,受到大气温度、灌水和降雨的影响越小,波动幅度越小。

2.3 制种玉米发育进程

耕层土壤温度是影响制种玉米生育期长短和生育进程的主要因素^[9]。覆膜明显增高生育前期土壤温度,使制种玉米生育进程加快,缩短生育期。表 1 表明,覆膜制种玉米出苗较不覆膜提前 7 d,拔节早 7 d,抽穗、灌浆和成熟分别早 10、14、17 d。覆膜制种玉米生育期达 137 d,较不覆膜缩短 14 d。王罕博等^[4]研究表明,覆膜可使玉米全生育期缩短 11 d,各个生育阶段平均提前 7 d。申丽霞等^[30]认为,覆膜玉米出苗、拔节、抽穗和灌浆较不覆膜分别早 4、6、10、10 d,全生育期缩短 12 d。这与本研究结果相似。

表 1 制种玉米生育期划分

Tab. 1 Partition of growth period of seed-maize

处理	播种	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
覆膜(M1)	4月24日—5月2日	5月3日—6月10日	6月11日—7月15日	7月16—31日	8月1—21日	8月22日—9月8日
不覆膜(M0)	4月24日—5月9日	5月10日—6月18日	6月19日—7月25日	7月26日—8月14日	8月15日—9月7日	9月8—22日

2.4 覆膜和灌水量对制种玉米株高的影响

图 4 为各处理下制种玉米植株株高的变化。可以看出,制种玉米株高在覆膜与不覆膜处理下大体随生育期的进展呈现相同的变化趋势,即从苗期开始,制种玉米株高增长迅速,到达抽穗期,株高趋于稳定。覆膜制种玉米的株高在苗期增长速率为 2.19 ~ 2.65 cm/d,拔节期为 2.71 ~ 3.27 cm/d,而不覆膜处理制种玉米的株高在苗期增长速率为 1.40 ~ 1.65 cm/d,拔节期为 1.80 ~ 2.48 cm/d,因此覆膜处理植株株高普遍高于不覆膜,并且提前 7 ~ 10 d 达到最大株高。这是由于生育前期覆膜处理有较高的土壤温度^[2, 31]。在 W1 和 W3 灌水条件下,覆膜与不覆膜的植株最大株高基本相同,而 W2、W4 和 W5 灌水条件下覆膜处理较不覆膜分别提高了 6.5%、

13.5% 和 10.0%。

拔节期之前,制种玉米植株较小,对水分的需求量也相对较小,各处理的株高长势状况基本没有差异,水分对玉米植株株高基本没有影响。随着植株的生长,植株对水分的需求增加。到达抽穗期,营养生长基本停止而转向生殖生长,作物株高趋于稳定,不同灌水条件下株高有了明显的差异,高水能够及时满足植株对水分的需求。灌水量越大,制种玉米株高越高^[32-33],覆膜处理 W1、W2 灌水条件下制种玉米的株高为 161 cm 左右,说明在覆膜条件下,W2 灌水处理对制种玉米的株高并无明显的影响,可以保证作物的良好生长;W3、W4 和 W5 灌水条件下,制种玉米株高显著降低,为 147 cm 左右,降低了 8.6%,与 W1、W2 处理相差 14 cm。而在不覆膜条

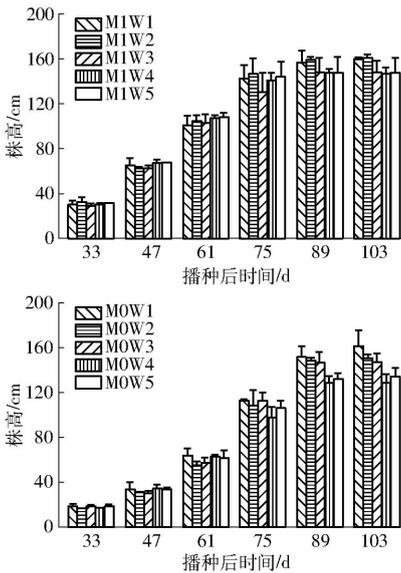


图4 覆膜和不覆膜处理不同灌水条件下制种玉米株高的变化

Fig. 4 Changes of seed-maize plant height for different irrigation treatments under mulching and non-mulching

件下, W1、W2、W3、W4 和 W5 灌水条件下的株高分别为 161、152、148、129、134 cm, W1、W2 与 W4、W5 之间具有显著性差异 ($P < 0.05$), 作物株高最大相差 27 cm 左右, 比覆膜处理高 13 cm。这说明高灌水条件下, 覆膜不覆膜对作物株高没有明显影响, 而在非充分灌水条件下, 覆膜有利于达到较高的株高水平。这说明地膜减弱了灌水量对株高的影响。

2.5 覆膜和灌水量对制种玉米叶面积指数的影响

图 5 为各处理制种玉米叶面积指数的变化情况。总体来说, 覆膜与不覆膜处理下制种玉米的叶面积指数随生育期的变化趋势一致, 即在苗期植株矮小, 植株间竞争小, 各水分处理叶面积指数差异很小, 叶面积指数缓慢增长。到达拔节期, 制种玉米叶面积指数增长迅速, 达到 $0.15 \text{ cm}^2 / (\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 左右, 在抽穗期, 由于植株迅速增长, 植株间竞争性强, 水分对叶片的干枯有较大影响, 因此各水分处理条件下叶面积指数有了明显的差异, 除 M1W1 处理叶面积指数有所增加外, 其余处理叶面积指数均有不同程度的降低。进入灌浆期后, 根部叶片干枯脱落, 叶面积指数开始大幅度下降。

覆膜比不覆膜生育期提前, 在苗期和拔节期, 覆膜处理叶面积指数始终高于不覆膜。覆膜处理抽穗期干叶片数开始增多, 叶面积指数下降, 但不覆膜处理叶面积指数达最大, 导致覆膜低于不覆膜处理, 并且 W2 和 W4 灌水条件下, 覆膜与不覆膜叶面积指数峰值基本相同, 而 W1、W3 和 W5 灌水条件下, 覆膜较不覆膜叶面积指数峰值高, 分别高 7.6%、3.8% 和 8.6%。W1、W2、W3、W4 和 W5 灌水条件

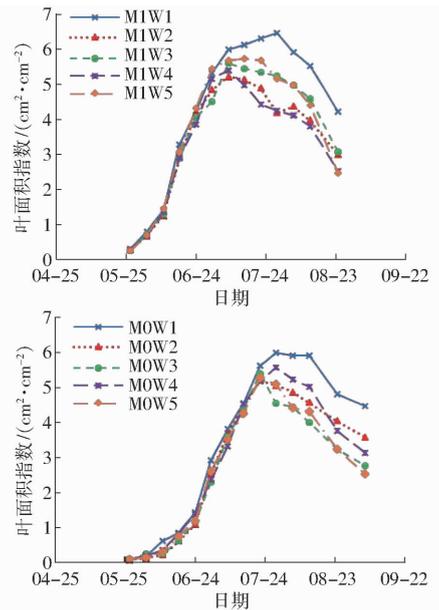


图5 覆膜和不覆膜处理不同灌水条件下制种玉米叶面积指数(LAI)的变化

Fig. 5 Changes of seed-maize leaf area index for different irrigation treatments under mulching and non-mulching

下, 覆膜玉米叶面积指数平均值比不覆膜分别提高了 28.3%、20.2%、40.6%、12.7% 和 42.8%。王罕博等^[4]认为叶面积指数在播种一个月后覆膜较露地处理高 110.2%, 李文彪等^[34]认为覆膜玉米的叶面积指数平均值比露地提高 40%, 这些结果与本文相似。

不同水分处理条件下, W1 处理的叶面积指数明显高于其他处理, 在覆膜条件下, W2 与 W4 处理叶面积指数比较接近, 而 W3 与 W5 较接近, W3 和 W5 的叶面积指数明显高于 W2 和 W4。不覆膜条件下则表现为 W2 和 W4 高于 W3 和 W5。可见, 水分对制种玉米叶面积指数的影响较大^[35]。

2.6 覆膜和灌水量对制种玉米最终干物质积累量和产量的影响

由表 2 可知, 相同灌水条件下, 覆膜处理制种玉米的干物质积累量和产量均高于不覆膜处理。W1、W2、W3、W4 和 W5 处理覆膜比不覆膜最终干物质积累量分别提高了 46.5%、30.0%、31.0%、31.5% 和 20.4%, W1、W2 处理下覆膜与不覆膜差异显著 ($P < 0.05$)。这一结论与王罕博等^[4]的结论相似, 其研究表明, 到 8 月后覆膜较不覆膜地上干物质质量高 14.8% ~ 20.7%。BU 等^[24]两年的研究表明, 与不覆膜处理的最终干物质积累量相比, 覆膜平均提高了 25.8%。杨长刚等^[36]则认为覆膜可提高小麦干物质积累量 67.7%。

在 W1 和 W3 灌水条件下, 覆膜比不覆膜显著增产 ($P < 0.05$), 增产率分别达 44.6% 和 33.1%。

表 2 制种玉米最终干物质累积量和产量

Tab. 2 Total dry biomass and yield of seed-maize

处理	最终干物质累积量/(t·hm ⁻²)	产量/(t·hm ⁻²)	M1 较 M0 增产率/%
M1W1	23.97 ^a	7.19 ^a	44.6
M0W1	16.36 ^{cd}	4.97 ^d	
M1W2	22.88 ^a	6.58 ^{abc}	24.8
M0W2	17.61 ^{cd}	5.28 ^{cd}	
M1W3	20.65 ^{abc}	6.83 ^{ab}	33.1
M0W3	15.77 ^{cd}	5.13 ^{cd}	
M1W4	17.89 ^{bed}	5.59 ^{bed}	24.5
M0W4	13.61 ^d	4.49 ^d	
M1W5	17.82 ^{cd}	5.68 ^{bed}	6.5
M0W5	14.79 ^d	5.33 ^{cd}	

注:表中同一列数字后的不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。

而在 W2、W4 和 W5 灌水条件下,覆膜与不覆膜产量增产不显著,增产率分别为 24.8%、24.5% 和 6.5%。覆膜可以提高作物产量,这一结果与前人的研究相似^[4,24,37-39]。但也有研究表明覆膜会使作物减产,刘胜尧等^[25]认为覆膜不利于降水入渗而导致水渍,使玉米产量减少 5.0%。

可以看出,在覆膜条件下,干物质累积量和产量基本随着灌水量的增加而增多。这与 LI 等^[35]的研究结果类似。W1 处理干物质累积量和产量与 W4 和 W5 具有显著性差异 ($P < 0.05$),W1 干物质累积量和产量较 W4 和 W5 平均值分别提高了 34.2% 和 28%。W3 处理的产量高于 W2,且与 W1 处理无显著性差异。在不覆膜条件下,各灌水处理之间干物质累积量和产量均无显著性差异。M0W1 处理的产量偏低,而 M0W5 处理偏高,这是因为在制种玉米收获季节,其他水分处理尚未完全成熟,只有 M0W5 处理籽粒已达最大。M0W1 处理整个生育期内土壤贮水消耗多,60 cm 土层贮水量较低,导致产量较低。而肖俊夫等^[40]认为高水分处理减产的原因是高水分条件下存在奢侈性耗水,导致作物减产,降低水分生产效率。

2.7 覆膜和灌水量对生育期内总耗水量的影响

如图 6 所示,在相同的灌水条件下,覆膜耗水量低于不覆膜,W1、W2、W3、W4 和 W5 灌水量下分别低 3.9%、1.8%、4.6%、3.3% 和 8.9%。这与多数研究结果一致^[4,41-43],在小麦、马铃薯的研究^[44]中也有相似的结论。但也有研究表明,覆膜可增加生育期内作物耗水量,李尚中等^[45]认为覆膜对耗水量的增加不明显,只增加了 5.0%,谢军红等^[46]认为地膜覆盖使耗水量增加 10.0%~20.8%,杨长刚

等^[36]则认为可增加 34% 左右。这可能与土壤初始含水率有关。

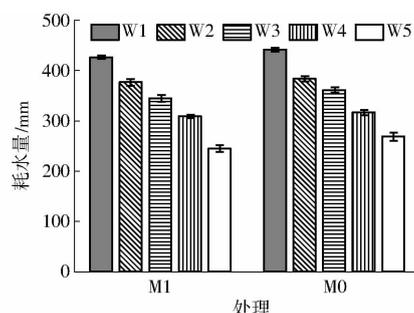


图 6 覆膜和不覆膜不同灌水条件下生育期内的总耗水量

Fig. 6 Total water consumption during growth period for different irrigation treatments under mulching and non-mulching

灌水量对作物耗水量的影响较大,耗水量随着灌水量的增加而增加。覆膜条件下,W2、W3、W4 和 W5 作物耗水量分别为 377.9、345.8、308.2、245.0 mm,与 W1 的 428.1 mm 相比,分别减少了 11.7%、19.2%、28.0% 和 42.8%。不覆膜条件下,W2、W3、W4 和 W5 作物耗水量分别为 384.9、362.6、318.9、369.1 mm,与 W1 的 445.2 mm 相比,作物耗水量分别减少了 13.6%、18.5%、28.4% 和 39.6%。

2.8 覆膜和灌水量对水分利用效率的影响

水分利用效率是作物高效用水的重要指标,节水灌溉的关键在于提高水分利用效率,保障作物常年可持续生产。覆膜提高了作物产量,降低了作物耗水,因此在相同灌水条件下,覆膜处理可提高水分利用效率,W1、W2、W3、W4 和 W5 分别提高 50.4%、27.1%、39.6%、28.8% 和 16.9% (图 7)。这与多数研究结果一致^[4,24,36-37]。

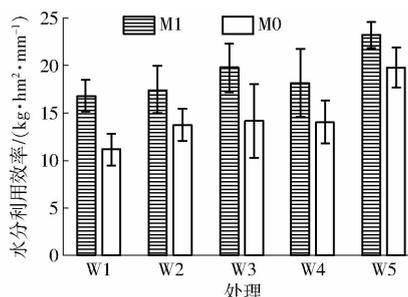


图 7 各灌水处理不同覆膜方式下的水分利用效率

Fig. 7 Water use efficiency under different irrigation treatments with different mulching patterns

可以看出灌水量对水分利用效率的影响较大。覆膜处理下,W5 相比 W1 可提高 38.0%,W3 可提高 17.6%,W2 和 W4 与 W1 的水分利用效率基本无变化。在不覆膜处理下,W5 比 W1 提高 77.4%,W2、W3 和 W4 处理的水分利用效率基本相同,相比 W1 提高了 25.2% 左右。可见,水分利用效率大体上随着灌水量的增加而降低。

3 结论

(1) 覆膜具有减少棵间蒸发、促进作物生长和根系吸水以及减少降水入渗率的作用,因此覆膜对土壤贮水消耗量在不同作物生育阶段、不同的灌水处理下可能表现出不同的影响。

(2) 地膜的保温作用主要表现在生育前期,生育后期保温作用减弱,甚至出现了不覆膜处理的地温高于覆膜处理的现象。地膜对地温的影响与土层深度有关,土层越深,覆膜与不覆膜处理之间的温差

越小。土壤温度随着土层深度的增加而减小,且这种差异随着生育期的进展逐渐减弱。土温的波动幅度也随深度的增加而减弱。

(3) 由于覆膜有助于增高制种玉米生育前期土壤温度,从而使株高和叶面积指数增长速率高于不覆膜,且使生育进程加快。另外,在相同灌水条件下覆膜处理可提高水分利用效率。而在相同覆膜情况下水分利用效率随着灌水量的增加而降低。采用覆膜和适度亏水处理(如试验中的 M1W3)可在提高水分利用效率的同时保证较高产量。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2017.
- 2 DONG B, LIU M, JIANG J, et al. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and un-mulched fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143(1): 93 - 101.
- 3 姜净卫,董宝娣,司福艳,等. 地膜覆盖对杂交谷子光合特性、产量及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(6): 154 - 158.
JIANG Jingwei, DONG Baodi, SI Fuyan, et al. Effect of different plastic mulching patterns on photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency of hybrid millet [J]. *Agricultural Research in the Dry Area*, 2014, 32(6): 154 - 158. (in Chinese)
- 4 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 Hanbo, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(22): 88 - 94. (in Chinese)
- 5 姬景红,李玉影,刘双全,等. 覆膜及膜下滴灌对玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. *节水灌溉*, 2015(3): 22 - 24, 27.
JI J H, LI Y Y, LIU S Q, et al. Effect of plastic film mulch and drip irrigation under plastic film mulch on growth and development of maize and water use efficiency[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(3): 22 - 24, 27. (in Chinese)
- 6 于爱忠,柴强. 供水与地膜覆盖对干旱灌区玉米产量的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(5): 778 - 786.
YU A Z, CHAI Q. Effects of plastic film mulching and irrigation quota on yield of corn in arid oasis irrigation area[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(5): 778 - 786. (in Chinese)
- 7 于爱忠. 供水与地膜覆盖对玉米农田土壤水热特征及水分利用效率的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2013.
YU Aizhong. Effects of plastic mulching and irrigation on soil thermal characteristics and WUE of corn [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 8 张厚华. 灌溉覆盖对玉米生理及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2001.
ZHANG Houhua. The influence of irrigation and mulching on maize physiology and yield [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2001. (in Chinese)
- 9 银敏华,李援农,谷晓博,等. 灌水与覆膜对春玉米土壤温度、生育期和水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4): 117 - 124.
YIN Minhua, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of irrigation and plastic film mulching on soil temperature crop growing stages and water use of spring maize [J]. *Agricultural Research in the Dry Area*, 2015, 33(4): 117 - 124. (in Chinese)
- 10 刘玉洁,李援农,李方红,等. 膜孔灌溉条件下玉米灌溉制度试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2006(6): 63 - 65.
LIU Yujie, LI Yuannong, LI Fanghong, et al. Irrigation schedule of corn of film hole irrigation [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2006(6): 63 - 65. (in Chinese)
- 11 王婵,赵向田,李久生,等. 灌水量及覆膜对河西地区制种玉米产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(8): 25 - 30.
WANG Chan, ZHAO Xiangtian, LI Jiusheng, et al. Effects of irrigation quota and plastic film mulching on yield of seed corn in Hexi area [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(8): 25 - 30. (in Chinese)
- 12 孙贯芳,屈忠义,杜斌,等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 144 - 152.
SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(12): 144 - 152. (in Chinese)
- 13 杨宏羽,李欣,王波,等. 膜下滴灌油葵土壤水热高效利用及高产效应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 82 - 88.
YANG Hongyu, LI Xin, WANG Bo, et al. Effect of drip irrigation under plastic film mulching on soil water-heat utilization and high yield of oil sunflower [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(8): 82 - 88. (in Chinese)
- 14 ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [C]. *FAO Irrigation & Drainage Paper 56*, 1998.

- 15 姜雪连. 西北旱区制种玉米父本母本耗水特性及蒸发蒸腾量估算方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
JIANG Xuelian. Characteristics of water consumption of female and male parents and evapotranspiration modeling of maize for seed production in an arid region of northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 16 LI S, KANG S, LI F, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(11): 1214 – 1222.
- 17 宋幽静. 西辽河平原区膜下滴灌对降雨入渗影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
SONG Youjing. Study on the drip irrigation under film effect on rainfall infiltration in the West Liao River Plain[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 18 王敏, 王海霞, 韩清芳, 等. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(7): 1249 – 1258.
WANG M, WANG H X, HAN Q F, et al. Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1249 – 1258. (in Chinese)
- 19 程宏波, 牛建彪, 柴守玺, 等. 不同覆盖材料和方式对旱地春小麦产量及土壤水温环境的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(2): 47 – 57.
CHENG H B, NIU J B, CHAI S X, et al. Effect of different mulching materials and methods on soil moisture and temperature and grain yield of dryland spring wheat in northwestern China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(2): 47 – 57. (in Chinese)
- 20 樊向阳, 齐学斌, 郎旭东, 等. 不同覆盖条件下春玉米田耗水特性及提高水分利用率研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(2): 60 – 64.
FAN X Y, QI X B, LANG X D, et al. A study on characteristics of water consumption and ways of raising water use efficiency for spring maize under different mulching[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(2): 60 – 64. (in Chinese)
- 21 RAMAKRISHNA A, TAM H M, WANI S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2): 115 – 125.
- 22 LI R, HOU X, JIA Z, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 101 – 109.
- 23 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 rainfed ecosystem[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 137 – 148.
- 24 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.
- 25 刘胜尧, 张立峰, 李志宏, 等. 华北旱地覆膜春玉米田水温效应及增产限制因子[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3197 – 3206.
LIU Shengyao, ZHANG Lifeng, LI Zhihong, et al. Effects of plastic mulch on soil moisture and temperature and limiting factors to yield increase for dryland spring maize in the North China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11): 3197 – 3206. (in Chinese)
- 26 GAN Y, SIDDIQUE K H M, TURNER N C, et al. Chapter seven—ridge-furrow mulching systems—an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 118: 429 – 476.
- 27 LIU Y, YANG S, LI S, et al. Growth and development of maize (*Zea mays* L.) in response to different field water management practices: resource capture and use efficiency[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 606 – 613.
- 28 ZHANG P, WEI T, CAI T, et al. Plastic-film mulching for enhanced water-use efficiency and economic returns from maize fields in semiarid China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 512.
- 29 霍轶珍, 郭彦芬, 韩翠莲, 等. 不同覆膜处理对土壤水热效应及春玉米产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 124 – 128.
HUO Yizhen, GUO Yanfen, HAN Cuilian, et al. Effect of different film mulching treatments on soil moisture, heat and spring maize yield[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 124 – 128. (in Chinese)
- 30 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 25 – 30.
SHEN Lixia, WANG Pu, ZHANG Lili. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(6): 25 – 30. (in Chinese)
- 31 LALITHA M, THILAGAM V K, BALAKRISHNAN N, et al. Effect of plastic mulch on soil properties and crop growth—a review. [J]. *Agricultural Reviews*, 2010, 31: 145 – 149.
- 32 田建柯, 张富仓, 强生才, 等. 灌水量及灌水频率对玉米生长和水分利用的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(9): 815 – 822.
TIAN Jianke, ZHANG Fucang, QIANG Shengcai, et al. Effects of irrigation level and frequency on growth and water use efficiency of maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Machinery Engineering*, 2016, 34(9): 815 – 822. (in Chinese)
- 33 魏永华, 陈丽君. 膜下滴灌条件下不同灌溉制度对玉米生长状况的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2011, 42(1): 55 – 60.
WEI Yonghua, CHEN Lijun. Influences of different irrigation schedules on growing status of maize with drip irrigation under plastic film[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 42(1): 55 – 60. (in Chinese)
- 34 李文彪, 郝翻身. 地膜覆盖对春玉米光合性能和产量构成的影响[J]. *北方农业学报*, 2004(4): 15 – 16.
LI Wenbiao, GAO Fanshen. Effects of film mulching on photosynthetic performance and yield composition of spring maize[J]. *Agricultural Science and Technology in Inner Mongolia*, 2004(4): 15 – 16. (in Chinese)

- 35 LI W L, LI W D, LI Z Z. Irrigation and fertilizer effects on water use and yield of spring wheat in semi-arid regions[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(1): 35 - 46.
- 36 杨长刚,柴守玺,常磊,等. 不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 661 - 671.
YANG Changgang, CHAI Shouxi, CHANG Lei, et al. Effects of plastic mulching on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat in arid region of northwest China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 661 - 671. (in Chinese)
- 37 CHEN Y, LIU T, TIAN X, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[J]. *Field Crops Research*, 2015, 172: 53 - 58.
- 38 ZHANG S, LI P, YANG X. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(1): 92 - 97.
- 39 LIU Q, YU C, LI W, et al. Plastic-film mulching and urea types affect soil CO₂ emissions and grain yield in spring maize on the Loess Plateau, China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28150.
- 40 肖俊夫,刘战东,南纪琴,等. 不同水分处理对春玉米生态指标、耗水量及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2010, 18(6): 94 - 101.
XIAO Junfu, LIU Zhandong, NAN Jiqin, et al. Effects of different moisture treatments on ecological index, water consumption and yield of spring maize[J]. *Maize Science*, 2010, 18(6): 94 - 101. (in Chinese)
- 41 ZHOU L M, LI F M, JIN S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41 - 47.
- 42 解文艳,周怀平,杨振兴,等. 不同覆盖方式对旱地春玉米土壤水分及作物生产力的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 128 - 133.
XIE Wenyan, ZHOU Huaiping, YANG Zhenxing, et al. Effect of different mulching patterns on soil moisture and crop productivity of spring maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 128 - 133. (in Chinese)
- 43 任新茂,孙东宝,王庆锁. 覆膜和种植密度对旱作春玉米产量和蒸散量的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 206 - 211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170127&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.027.
REN Xinmao, SUN Dongbao, WANG Qingsuo. Effects of plastic film mulching and plant density on yield and evapotranspiration of rainfed spring maize[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 206 - 211. (in Chinese)
- 44 秦舒浩,张俊莲,王蒂,等. 覆膜与沟垄种植模式对旱作马铃薯产量形成及水分运移的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 389 - 394.
QIN Shuhao, ZAHNG Junlian, WANG Di, et al. Effects of different film mulch and ridge-furrow cropping patterns on yield formation and water translocation of rainfed potato[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 389 - 394. (in Chinese)
- 45 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)
- 46 谢军红,柴强,李玲玲,等. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(8): 1558 - 1568.
XIE Junhong, CHAI Qiang, LI Lingling, et al. The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi-arid region of Loess Plateau of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(8): 1558 - 1568. (in Chinese)