

春玉米覆膜垄作沟灌条件下土壤水热效应及对产量的影响

倪东宁¹, 史海滨¹, 李瑞平¹, 苗庆丰¹, 张作为¹, 彭遵原¹, 李茂华²

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古巴彦淖尔市磴口县水务局, 内蒙古 巴彦高勒 015200)

摘要:为探究河套灌区玉米覆膜垄作沟灌种植模式下土壤温度与含水率的变化规律、两者响应关系及对玉米产量的影响,以灌区玉米常规覆膜宽度(70 cm)及当地常见农用宽膜(110 cm)进行对比研究。结果表明:土壤温度变化主要受外界因素和含水率的影响,两种覆膜条件下土壤温度具有相同的日变化规律,且深层较表层土壤具有明显的滞后效应;玉米生育前期宽膜具有更好的保温效果,且表层 5、10 cm 处地温变化具有显著或极显著性差异;全生育期内 110 cm 较 70 cm 膜具有明显的保墒效果,5—25 cm 土壤平均含水率高 5.06%、6.83%、3.89%、5.28% 和 3.44%;各时刻不同土层与温度可以拟合为对数函数,但早晚相关性较差,说明此时段地温变化的机制更为复杂;玉米生育后期 5 cm 处土壤平均含水率与土壤温度呈现反比关系,20 cm 处呈现正比关系,且低水分条件下土壤温度变幅更大;生育期内玉米生长性状及产量指标也达到显著性水平,且 110 cm 较 70 cm 膜平均产量高 14.86%;研究成果可为灌区玉米覆膜垄作沟灌模式下适宜地膜宽度的选择提供科学依据。

关键词:河套灌区;玉米;覆膜;垄作沟灌;土壤温度;土壤含水率;产量

中图分类号:S513;S152.8

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0089-06

Effects of Plastic Mulching Ridge Tillage and Furrow Irrigation on Soil Moisture, Soil Temperature and Yield in Spring Maize Field

NI Dongning¹, SHI Haibin¹, LI Ruiping¹, MIAO Qingfeng¹,

ZHANG Zuowei¹, PENG Zunyuan¹, LI Maohua²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Water Administration of Bayannur Dengkou, Bayannur 015200, China)

Abstract: This study was conducted to discuss the variation in soil moisture and temperature, the response relationship, and maize yield while using plastic mulching ridge tillage and furrow irrigation in Hetao Irrigation District. A comparison study was carried out with respect to the conventional plastic mulching width (70 cm) of maize and local common agricultural wide film (110 cm). The results show that soil temperatures of two film widths present the same change rule, and temperature in the deep soil has a significant lag effect compared with the surface. The wider film has better effect on water-heat preservation at the early stage of maize growth. At the surface, the temperatures changes significantly or extremely significantly in 5 cm deep and 10 cm deep layers. The average moisture content of the 110 cm film in 5—25 cm depths increased by 5.06%, 6.83%, 3.89%, 5.28% and 3.44%, respectively, compared with the 70 cm film over the entire growth stage. The different soil layers and temperatures over time can be described by a logarithmic function, but correlation is poor earlier and later, the mechanism of temperature change is more complicated. The average soil moisture content and soil temperature in 5 cm depth showed an inverse relationship and is directly proportional to the late growth stage of maize in the 20 cm depth, while the soil temperature range is wider under the low moisture content condition. The maize growth characteristics and yield index also reach the significant level, and the yield of the 110 cm wide film increase by 14.86% compared with the 70 cm film. The results can provide a scientific basis for the selection of suitable plastic mulching width under planting practice of ridge tillage and furrow irrigation.

收稿日期:2015-04-10

修回日期:2015-04-27

资助项目:国家科技支撑计划项目“内蒙古河套灌区粮油作物节水技术集成与示范”(2011BAD29B03);国家自然科学基金资助项目“盐渍化地区农田养分流失机理与调控机制研究”(51269015);寒旱盐灌区覆盖秋浇后冻融土壤水热盐协同调控机制研究(51369018)

第一作者:倪东宁(1990—),男,内蒙古赤峰市人,硕士研究生,从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:ndn901021@163.com

通信作者:史海滨(1961—),男,山西太谷人,博士,教授,博士生导师,从事节水灌溉原理及应用方面的研究。E-mail:shi_haibin@sohu.com

Keywords: Hetao Irrigation District; maize; plastic mulching; ridge tillage and furrow irrigation; soil temperature; soil moisture content; yield

土壤的水、热条件是影响作物生长和产量形成的重要因素^[1];土壤温度是表征土壤热量状况的关键指标之一,其通过对作物根系层土壤水温和根系吸水性能等的影响,改变根系的水力导度及土壤水的运动特性,进而影响作物的生长发育^[2];地膜覆盖后,有效的将太阳能转化为热能,调节和改善了作物根区环境,有利于种子的萌发及作物前期的生长发育^[3];许多专家学者针对地膜覆盖进行了大量的试验研究,李毅等^[4]指出地膜覆盖后,与地表之间形成的饱和水汽层通过对温度变化的影响,间接的影响了土壤热传导的速度和方式,使得土壤温度随时间和深度的变化规律更为复杂;由于地膜覆盖阻断了土壤与大气间的直接联系,从而有效抑制了土壤水分的蒸发,使得根层有效保蓄水分,提高了水分利用效率^[5-8];部分学者也从宏观上对地膜覆盖对植物生理生化指标影响进行了分析研究^[9-11];此外国内外专家也针对地膜覆盖进行了模型的模拟研究,Mahrer 等^[12]建立了透明塑料膜盖层的热平衡方程,从理论上对覆膜条件下的水热运移问题进行了研究;吴从林等^[13]建立了地膜覆盖下 SPAC 系统的水热耦合运移模型。可见,地膜覆盖后土壤内部形成了独立的水热循环系统,对土体与大气的水分和热量的交换进行了有效的控制,从而变化机制也更为复杂。

由于覆膜后保温、保墒、抑盐的特性,河套灌区玉米广泛采用覆膜种植,但近些年来产量普遍不高。玉米沟灌由于开沟培土及生育前期不灌溉,使得玉米根系更发达,此外沟灌灌水量相对较少,且入渗效果好,基本无深层渗漏现象,且肥料都被培土掩埋不易流失,有利于作物吸收利用,产量较高^[14],达到了节水增产的效果,在河套灌区有较好的应用前景。为便于对比研究和成果的推广,本研究在灌区玉米种植常规覆膜宽度(70 cm)基础上,增加当地种植蜜瓜垄作沟灌常用标准 110 cm 宽农膜覆膜种植,对玉米全生育期内两种覆膜宽度下的土壤温度及含水率变化规律进行试验研究,同时对其生长特性和增产效应进行分析,进而对不同覆膜宽度对水热迁移规律及玉米生产特性的影响有进一步的了解和认识,为灌区玉米适宜覆膜宽度的选择提供科学的理论依据,以便在水热变化规律的基础上更好的开展农业生产实践,保证灌区农业的正常运转。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2014 年在内蒙古河套灌区磴口县坝楞村示范区进行,该地区属典型的温带大陆性季风气候;该地区多年平均气温 7.6℃,日照时数 3 180 h,作物

光合有效辐射 $1.68 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$,年均降雨量 142.1 mm,蒸发量 2 346.4 mm,无霜期 130 d 左右。试验区土壤质地为砂质黏壤土、黏壤土和粉质黏壤土,0—100 cm 土壤平均容重 1.48 g/cm^3 ;耕作层凋萎系数为 8%左右,田间持水量为 21.4%,地下水位平均在 2.5 m 以下。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 玉米种植采用当地常规品种科河 28,全生育期 125 d 左右,抗性好、适应性广。地膜为磴口县当地生产的 0.008 mm 聚乙烯吹塑农用地膜。

试验设置垄上种植两行、三行玉米的种植模式,播种前进行平地、耙地疏松表层土壤,采用内蒙古农业大学自行研制的一体式开沟机进行开沟起垄,沟断面规格为沟顶宽 60 cm、沟底宽 40 cm,沟深 30 cm;玉米垄上覆膜,覆膜宽度分别为 70 cm,110 cm,垄幅宽分别为 40 cm,80 cm,净膜宽 50 cm,90 cm;由于试验区春季多风沙,覆膜后每隔 250 cm 进行膜上压土防风。70 cm 膜垄上种 2 行玉米,行距 40 cm,株距 28 cm;110 cm 膜垄上种植 3 行玉米,行距 40 cm,株距 28 cm,种植深度均为 2.5 cm;试验设计 3 个重复,试验小区随机排列种植,两种种植方式下土壤水肥条件一致,玉米播种时(4 月 21 日)施底肥 450 kg/hm^2 (磷酸二铵+尿素);按当地常规灌溉制度,玉米灌第一水时施肥 450 kg/hm^2 (尿素),灌第二水时施肥 300 kg/hm^2 (尿素),其他各次灌水均不施肥,玉米第三水开始灌溉。

1.2.2 测定项目与方法 土壤含水率的测定采用土钻在垄上玉米行间定点取土,取 3 个重复,采用烘干称重法测定;地温采用意大利产 145-20 型数显地温计进行监测,于玉米生长的每个关键生育期在玉米行间上午 8:00 开始至晚 20:00 每隔 2 h 对 5,10,15,20,25 cm 土层进行定时定点监测,每个处理读取 3 个重复,地温监测和土壤含水率测定的时间一致,具体时间为 5 月 31 日、6 月 18 日、7 月 10 日、7 月 19 日、8 月 7 日、8 月 28 日。各处理玉米株高、叶面积取具有代表性的 3 株用钢尺定株测量,生育期每 7 d 测量一次;玉米成熟期,各处理沿垄长方向分别在首部、中间和尾部等面积选取 3 个测试区测定玉米产量,各测试区单打单收,玉米产量、百粒重为 3 个测试区的平均值,穗粒数和穗长各处理均选具有代表性的 10 株进行测定。

2 结果与分析

2.1 两种覆膜宽度下地温的日变化规律

以玉米拔节期(阴天)和抽雄吐丝期(晴天)地温

日变化为例(图 1),两种覆膜宽度下的日变化趋势基本一致,且环境条件是影响地温变化的重要因素,随气温升高或太阳辐射的增强 5 cm 处地温 8:00 开始至 16:00 达到峰值,之后逐渐降低;10 cm 处地温峰值出现在 18:00,具有明显的滞后现象;由于随气温升高表层土体对热量的吸热程度逐渐大于散热,15—25 cm 土层地温 8:00 至 10:00 呈现下降趋势,之后呈现增温趋势,但总体来说变化相对平缓,没有明显峰值出现;当地表温度低于大气温度时,两者形成温

度梯度,使得土壤热量向空气中传导,进入散热过程,而深层土壤受外界因素影响较小,在温度的驱使下继续增温,20:00 时 5—15 cm 地温回落,15—25 cm 土层继续增温。

2.2 两种覆膜宽度下全生育期内地温日变化规律

由地温日变化规律知,表层 5—10 cm 土层地温变幅较大,而深层相对稳定,且滞后效应明显。现以各个生育期 5—10 cm 土层平均地温变化为例,分析两种覆膜宽度对各生育期地温变化规律的影响。

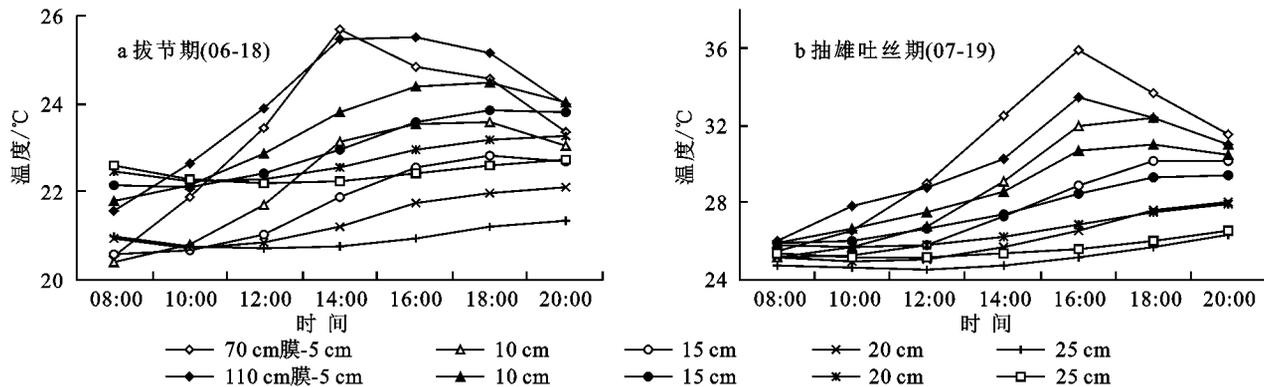


图 1 地温日变化曲线

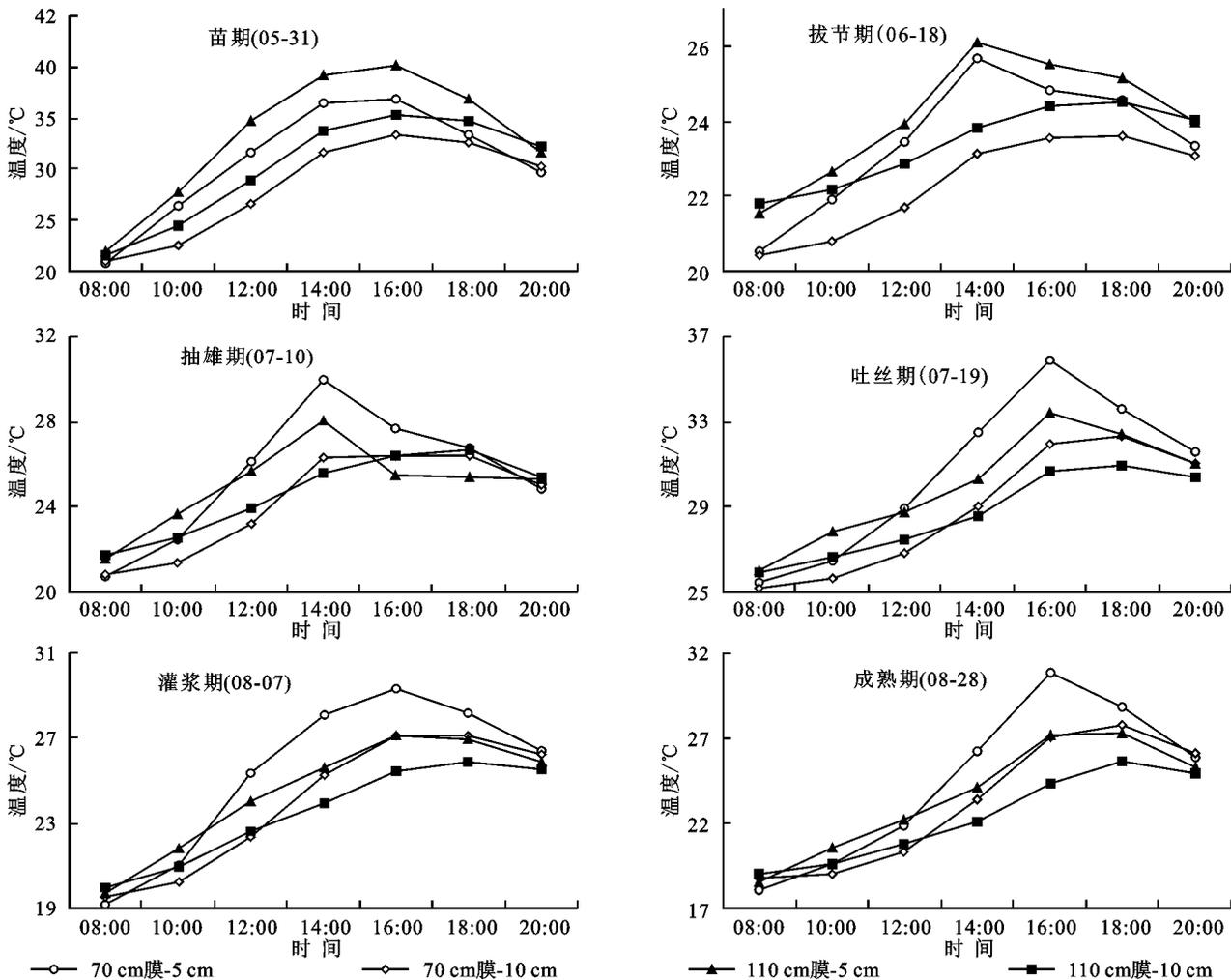


图 2 两种覆膜宽度下不同生育期 5—10 cm 地温日变化规律

对两种覆膜宽度下地温日变化用独立 2 样本 t 检验, 检验差异显著性。由检验结果知, 玉米苗期(5 月 31 日) 5 cm, 10 cm 处 t 值分别为 7.169, 8.862, $t >$ 临界 5.959_(6,0.001), 差异极显著; 玉米拔节期(6 月 18 日), 5 cm 处 t 值为 8.555 $>$ t 临界 5.959_(6,0.001), 差异极显著, 10 cm 处 t 值为 2.973 $>$ t 临界 2.447_(6,0.05), 差异显著, 而其他生育期内均未达到显著性水平。由图 2 地温日变化规律可知, 全生育期每日 8:00—10:00 宽膜地温显著高于窄膜, 此时地温主要受大气温度的影响, 宽膜更好的调节了地表土壤与大气之间的热交换; 玉米苗期至拔节期, 作物植株较小, 地面能充分接受阳光辐射, 且 110 cm 宽膜增温、保温效果更为显著, 各时段 5, 10 cm 处平均土层温度较窄膜高 0.4~3.6℃ 和 0.65~2.3℃, 增温幅度高 0.3~1.5℃ 和 0.2~1.45℃。玉米抽雄期开始, 宽膜覆盖条件下玉米长势好, 枝叶的遮阴作用阻碍了地面直接接受阳光辐射, 每日 12:00 左右开始宽膜地温显著低于窄膜, 而灌区 7 月, 8 月份气温较高, 降低了高温对玉米生长的危害; 16:00—20:00, 表层 5 cm 处地温整体处于降温阶段, 而 10 cm 处地温表现出先升后降, 但窄膜 5 cm 处降温幅度明显大于宽膜, 这是膜内温度与大气温度间的温度差不同所致, 温差越大, 短时间内降温幅越大; 5—10 cm 处地温在 10:00—12:00 前后具有明显的交集, 且 10 cm 处具有明显的滞后性, 这主要受光照强度及温度梯度的作用所致。总体来说, 玉

米生长前期随覆膜宽度增加, 增温效果显著, 而在玉米生长后期, 由于环境温度、水肥等适宜的条件保证了玉米的正常生长, 且生育后期生长发育接近末期, 受覆膜宽度条件影响减弱。

2.3 两种覆膜宽度下不同深度土层温度变幅及变异性

耕作层不同土层深度温度的变化与作物的生长有着密切的联系, 因此研究和分析耕作层不同深度土壤的日变幅及变异程度情况, 对掌握其变化规律以及适时灌溉具有重要的指导意义。以 7 月 19 日(晴朗无云)地温日变化为例分析不同土层深度日变幅特征, 表层 5 cm 地温变幅最大, 分别为 10.45℃ 和 7.45℃, 随土层加深依次减小, 且同一土层 70 cm 膜一天内变幅较 110 cm 膜变化显著, 平均大 0.55~3℃; 各时段不同深度间土壤温度变幅最大值出现在 16:00, 而此时表层 5 cm 土层温度达到峰值; 将各时刻不同土层深度与对应温度拟合为对数函数式, 发现 10:00—16:00 相关性均较好, 而早 8:00 和晚 20:00 相关性相对较差, 表明早晚土壤温度随土壤深度的变化的规律性不强, 因为此时土壤分别处于由散热向吸热以及由吸热向散热过程转化的阶段, 地温变化机制更为复杂。通过经典统计分析方法分析后发现, 随时间变化, 土壤温度由表层至深层变异性逐渐减弱(表 1), 且 70 cm 膜覆盖较 110 cm 膜覆盖条件下变异性更强, 5 cm, 10 cm 处达到中等变异程度, 而其他土层均表现出弱变异性。

表 1 两种覆膜宽度下各土层温度变化统计特征值

处理	统计值	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm
70 cm 膜	平均值/℃	30.64	28.86	27.53	26.14	25.13
	标准差/%	383	301	221	127	69
	Cv /%	12.5	10.4	8	4.9	2.7
110 cm 膜	平均值/℃	29.96	28.67	27.59	26.54	25.62
	标准差/%	262	207	150	89	48
	Cv /%	8.7	7.2	5.4	3.4	1.9

2.4 生育期不同土层含水量变化规律

从整个生育期来看, 两种覆膜宽度下土壤含水率变化规律一致, 生育期内随着玉米的生长耗水量增强, 各土层含水率有不同程度的减小, 但全生育期内 110 cm 膜 5—25 cm 平均土层含水率较 70 cm 膜分别高 5.06%, 6.83%, 3.89%, 5.28%, 3.44%, 差异显著($p < 0.05$); 对比分析发现, 玉米拔节至抽雄吐丝之前各土层含水率差异较小, 而玉米苗期及抽雄吐丝以后的关键生育期内差异较大, 110 cm 膜较 70 cm 膜覆盖条件下 5—25 cm 土层含水率分别提高 4.16%~18.79%, 8.01%~13.86%, 5.45%~14.15%, 2.08%~14.12%, 0.69%~13.11%, 说明 110 cm 地膜覆盖的提墒、保水作用更为显著。

2.5 各生育期内不同土层温度与含水量的响应关系

地温变化与土壤水分状况之间存在着相互作用和响应关系; 玉米生育前期, 受太阳辐射强烈, 宽膜具有显著的增温效果, 一日内各土层平均温度显著高于窄膜, 且同一土层深度比较平均地温与含水率呈现正相关, 苗期、拔节期 5—25 cm 土层宽膜较窄膜含水率分别高 5.08%~12.61%, 0.12%~3.42%, 地温高 0.45~1.72℃, 0.55~1.48℃。

玉米抽雄吐丝期后植株生长茂盛, 地表直接接收太阳辐射量减小, 地温受覆膜宽度的影响减弱。有研究表明, 套种农田中地膜覆盖后土壤的热通量在 20 cm 处达到最大^[15], 基于此研究成果, 本文主要对玉米生育后期 5 cm 和 20 cm 土层处水热响应关系进行研究分析。

由图3,4可知,表层5 cm处平均含水率宽膜显著高于窄膜,各生育期分别高4.43%,18.78%,4.16%,12.57%,差异性显著($p < 0.05$),而平均地温较窄膜分别低0.49℃,0.68℃,0.9℃,0.87℃,平均含水率与地温呈现反比关系;原因是此时土体表层温度变化主要受外界因素影响,受土壤水分含量影响较小。随土层深度增加,外界因素对地温变化影响减弱,宽膜各生育期20 cm处土壤平均含水率较窄膜高0.74%,7.92%,14.12%,2.08%,平均地温高0.62℃,0.41℃,0.04℃,0.44℃,平均含水率与地温呈现正比关系,说明此时地温变化主要受土壤含水量的影响。

同时研究发现,抽雄期10,15 cm处平均含水率与地温同样呈现正比关系,之后逐渐呈现反比关系,而25 cm处呈现出相反的变化特征,这是因为随生育期延长,覆膜功能影响逐渐消失,土壤含水率成为影响地温变化的主导因素。通过经典统计分析发现,全生育期内窄膜5—25 cm土层平均地温的变异强度明显大于宽膜,由上文知全生育期内宽膜各土层平均含水率显著高于窄膜,说明土壤含水量越小对地温变幅的影响越大。

2.6 两种覆膜宽度下玉米生长性状和产量对比

不同覆膜宽度下,玉米根系区的水热条件不同,宽膜在各生育期内更好的满足了玉米生长所需的土壤水热条件;出苗期,宽膜较窄膜出苗时间提前3~4 d,一次性出苗率为99.2%,而窄膜仅为85.6%,后经补苗

才保全苗,且生育前期生长较慢。全生育期来看,宽膜玉米长势及生产性状均优于窄膜(表2),表中数据均为各项测定指标的平均值;经方差检验,两种覆膜宽度下玉米全生育期内玉米株高、叶面积指数(LAI)变化呈现显著性水平;玉米收获前通过考种结果表明:玉米穗长、产量呈现显著性水平,穗粒数呈现极显著水平,而百粒重差异不显著,宽膜玉米平均增产14.86%。

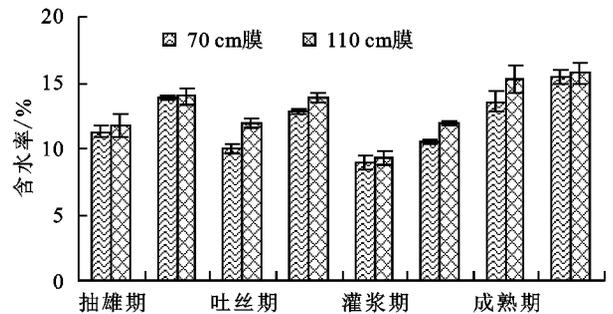


图3 两种覆膜宽度下5 cm,20 cm处土壤平均含水率

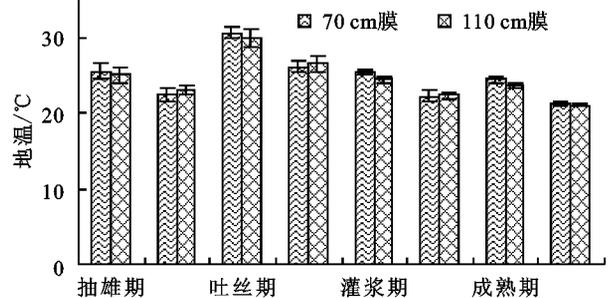


图4 两种覆膜宽度下5 cm,20 cm处土壤平均温度

表2 两种覆膜宽度下玉米生产性状

参数	株高	LAI	穗长/cm	穗粒数/(粒/穗)	百粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
70 cm 膜	201.42	6.76	18.8	540.6	37.22	8225.22
110 cm 膜	213.26	7.51	19.5	659.6	38.37	9447.52
显著性检验 t 值	3.214*	2.747*	2.488*	3.663**	3.790	5.412*

注:表中*表示具有显著性差异,**表示具有极显著性差异。

3 讨论与结论

在北方干旱半干旱地区,春播时期极易遭受低温冷害和干旱的危害,玉米作为典型的喜温性作物,适宜的土壤水热条件是保证种子的萌发和前期生长的必要条件。地膜覆盖后,阻断了与外界的水热交换,与露地相比有效的增加了生育期的积温,改善了土壤墒情,尤其在作物生育前期,增温保墒效果明显^[8,16]。研究发现,玉米生育前期两种覆膜宽度下各土层地温差异明显,5,10 cm处各时段地温变化达到显著或极显著性差异,且110 cm宽膜增温、保温效果更为显著,各时段5,10 cm处平均土层温度较窄膜高0.4~3.6℃和0.65~2.3℃,增温幅度高0.3~1.5℃和0.2~1.45℃,而生育后期差异不显著($p > 0.05$),说

明宽膜在玉米苗期发挥了更显著的增温作用,保证了玉米的出苗率和苗期的生长的土壤温度要求;生育后期,覆膜的增温效果因作物覆盖逐渐丧失^[17]。同时研究发现玉米拔节至抽雄吐丝之前各土层含水率差异不显著,而玉米苗期及抽雄吐丝以后的关键生育期内差异显著($p < 0.05$),因为宽地膜覆盖的垄幅面积大,相对蒸发面积较小,保墒效果更好。玉米苗期和抽雄吐丝后的关键生育期阶段,由于灌水较少,且蒸发强烈,地膜覆盖的保墒作用使得土壤含水率保持在一定的安全范围内,保证了玉米的出苗率和关键生育期正常生长所需水分条件。

地温的变化主要受外界因素和土壤水分状况的影响,在外界因素影响下表层土壤温度增温快、变幅大,而深层土壤温度变化具有明显的滞后效应且变化

平缓^[4],由表层至深层土壤温度变异性逐渐减弱;土壤含水率是影响地温变化的又一重要因素,在土壤热容量与热传导率的影响下,造成含水率越低的土壤的温度变幅越大^[18]。研究发现,玉米全生育期内宽膜 5—25 cm 平均土壤含水率显著高于窄膜($p < 0.05$),而土层平均地温的变异强度低于窄膜;玉米生育后期 5 cm 土层平均含水率与土壤温度呈现反比关系,20 cm 土层呈现正比关系,而其他土层随生育期延长同样表现出一定的响应关系,这与龚雪文^[15]等的研究结果有一定的一致性;通过将各时刻不同土层深度与对应温度拟合为对数函数式,发现 10:00 至 16:00 相关性均较好,而早晚土壤温度随土壤深度的变化的规律性不强,说明此时地温变化机制更为复杂^[19]。

适宜的农艺措施和种植模式是保证农业增产增收的重要措施,研究表明,垄作沟灌条件下,两种覆膜宽度下玉米在全生育期内的生产性状指标达到显著或极显著性差异,且 110 cm 膜覆盖条件更好的改善了玉米田的水热条件,玉米平均增产 14.86%,值得在河套灌区推广,这也为灌区玉米垄作沟灌覆膜适宜宽度的选择提供理论依据。

由于本试验是在盐碱地这一特殊环境下进行,而覆膜技术在一定程度上抑制了盐分的积累,有利于玉米的生长发育和产量的形成,但本试验中尚未涉及两种覆膜宽度下盐分运移特性,此外由于残膜带来的白色污染问题较为严重,给农业生产带来了不利影响,今后的研究中应该增加可降解膜作为对照加以分析研究,因此需进一步改进。

参考文献:

- [1] 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(2/3): 115-125.
- [2] 刘世荣,温远光,王兵,等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京:中国林业出版社,1996.
- [3] 潘渝,郭谨,李毅,等. 地膜覆盖条件下的土壤增温特性[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(2): 130-134.
- [4] 李毅,王文焰,门旗,等. 宽地膜覆盖条件下土壤温度场特征[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(3): 32-36.
- [5] 李明思,康绍忠,杨海梅. 地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 49-54.
- [6] Li F M, Wang P, Wang J, et al. Effects of irrigation before sowing and plastic film mulching on yield and water uptake of spring wheat in semiarid Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2): 77-88.
- [7] 李尚忠,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.
- [8] 段义忠,亢福仁. 不同覆盖材料对旱地马铃薯土壤水热状况及其水分利用效率的影响[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(5): 55-59, 66.
- [9] 张永涛,汤天明,李增印. 地膜覆盖的水分生理生态效应[J]. *水土保持研究*, 2001, 8(3): 45-47.
- [10] 郑和祥,郭克贞,郝万龙. 作物生长指标与土壤水分状况及地温关系研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 210-212, 216.
- [11] 梁李宏,梅新,林锋,等. 低温胁迫对腰果幼苗叶片组织结构和生理指标的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 317-320.
- [12] Mahrer Y. Temperature and moisture regimes in Soils mulched with transparent polyethylene [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48(2): 362-367.
- [13] Wu C L, Chau K W, Huang J S. Modelling coupled water and heat transport in a soil-mulch-plant-atmosphere continuum(SMPAC)system [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(2): 152-169.
- [14] 雷廷武,肖娟,詹卫华,等. 沟灌条件下不同灌溉水质对玉米产量和土壤盐分的影响[J]. *水利学报*, 2004, 35(9): 118-121.
- [15] 龚雪文,李仙岳,史海滨,等. 番茄、玉米套种膜下滴灌条件下农田地温变化特征试验研究[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 1-13.
- [16] 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.
- [17] 张治,田富强,钟瑞森,等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 44-51.
- [18] Hillel D. *Environmental Soil Physics*[M]. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1998.
- [19] 李兴,程满金,勾芒芒,等. 黄土高原半干旱区覆膜玉米土壤温度的变异特征[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(1): 218-222.