

# 干旱区大田玉米膜下滴灌土壤水热效应研究

齐智娟<sup>1,3</sup>, 冯浩<sup>1,2</sup>, 张体彬<sup>1</sup>, 杨爱峥<sup>4</sup>, 周立峰<sup>2</sup>

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 土壤水热状况是影响干旱区作物产量的主要因素, 围绕膜下滴灌土壤水热运移情况, 以河套灌区玉米为研究对象, 开展了 2 年的田间试验, 研究了膜下滴灌条件下不同覆膜耕作方式对土壤水热运移规律的影响。试验设垄作全膜(LQ)、垄作半膜(LB)、平作全膜(PQ)和平作半膜(PB) 4 个处理, 采用烘干法测定 0—120 cm 土壤含水量, ECH<sub>2</sub>O—5TE 探头测定 0—120 cm 土壤温度。试验结果表明: 在苗期, 0—20 cm 土层 LQ 土壤含水率较 LB、PQ 和 PB 分别提高了 14.4%、23.8% 和 26.9%; 拔节期, 0—40 cm 土层 LQ 含水率较 LB 提高了 32.6%, PQ 较 PB 提高了 5.8%; 抽雄期 0—60 cm 土层垄作土壤含水率明显高于平作, 而 60—120 cm 土壤含水率差异不明显; 成熟期 0—80 cm 土层 LQ 土壤含水率较 LB、PQ 和 PB 分别提高了 18.1%、11.2% 和 21.5%。分析 0—70 cm 土层平均土壤温度发现, LQ 的温度明显高于半膜覆盖的处理, 2014 年和 2015 年 LQ 土壤温度较 LB 分别增加 0.44、1.16 °C, 较 PQ 分别增加 0.93、0.22 °C, 较 PB 分别增加 1.22、1.37 °C。2 年的试验验证了不同覆膜耕作方式下, 随土层深度的增加, 土壤温度变化趋于平缓。垄作全膜可以提高土壤温度, 增大土壤含水率, 有效防止垄体土壤温度的散失, 为作物生长提供良好的水热状态, 促进作物增产。

**关键词:** 膜下滴灌; 垄作; 地温; 土壤水分

中图分类号: S275.6; S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2017)01-0172-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.029

## Soil Moisture and Thermal Effect of Maize Under Mulched Drip Irrigation in Arid Area

QI Zhijuan<sup>1,3</sup>, FENG Hao<sup>1,2</sup>, ZHANG Tibin<sup>1</sup>, YANG Aizheng<sup>4</sup>, ZHOU Lifeng<sup>2</sup>

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100; 2. Institute of Water Saving Agricultural in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. College of Water Conservancy Hydraulic and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030)

**Abstract:** Soil moisture and thermal condition were two key factors for crop production in Arid Region. The effects of different plastic film and tillage modes under mulched drip irrigation on the spatial variation of soil moisture and heat transfer were studied by the 2-year field experiment in Hetao Irrigation District. The experiment designed 4 treatments which included ridge tillage with full film mulching (LQ), ridge tillage with half film mulching (LB), flat tillage with full film mulching (PQ) and flat tillage with half film mulching (PB). Soil moisture in 0—120 cm profile was measured by drying method. Soil temperature was checked by ECH<sub>2</sub>O at the soil layer of 0—120 cm. The results showed that compared to LB, PQ and PB, LQ increased soil water contents by an average of 14.4%, 23.8% and 26.9% in 0—20 cm respectively at seedling stage. At jointing stage, LQ and PQ enhanced the same parameter by up to 32.6% and 5.8% than LB and PB in 0—40 cm respectively. The soil water content of ridge tillage in 0—60 cm was significantly higher than flat tillage during heading stage, however there was no significant different in 60—120 cm. Finally, LQ in 0—80 cm increased soil water content by 18.1%, 11.2% and 21.5% compared to LB, PQ and PB at maturing stage, respectively. Average soil temperature in 0—70 cm soil layers was significant higher in full film mulching than half film mulching. Compared to LB, PQ and PB, soil temperature of LQ increased 0.44 °C and 1.16 °C, 0.93 °C and 0.22 °C, 1.22 °C and 1.37 °C in 2014 and 2015 respectively. The changes of soil tem-

收稿日期: 2016-08-30

资助项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划项目)(2013AA102904); 国家自然科学基金项目(51509238)

第一作者: 齐智娟(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤水热运移研究。E-mail: qzj8866@sina.com

通信作者: 冯浩(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: nercwsi@vip.sina.com

perature were tented to be steady with increasing soil depth. Ridge tillage with full film mulching method could significantly increase soil temperature, enhance the soil water content and had obvious effects on restraining the loss of heat. It was clear that the optimal mulch and tillage strategies were beneficial to form better soil moisture and temperature environment and then increased crop yield.

**Keywords:** mulched drip irrigation; ridge tillage; soil temperature; soil moisture

河套灌区是我国重要的粮经作物生产基地,水分问题是这一地区农业发展的核心问题。灌区地处干旱半干旱地区,年均降雨分布不均,夏季高温干热,蒸发强烈,易造成作物缺水减产<sup>[1]</sup>。探索一种适宜于灌区作物生长的有效的耕作栽培模式具有重要的现实意义。研究表明,膜下滴灌技术具有调节表层土壤温度,缩小土层昼夜温差,降低土壤水分的无效蒸发和热量散失的作用<sup>[2-5]</sup>。地膜覆盖措施和垄作耕作方式相结合,可以改变微地形,增温保墒,促进作物生长<sup>[6-11]</sup>。李仙岳等<sup>[12]</sup>通过设置不同类型地膜覆盖处理,结果表明,播种到出苗期间地膜覆盖处理保温效果明显,导致提前出苗,并且在出苗到现蕾期地膜覆盖处理的保水、保温效果远远优于无膜处理,产量也有大幅提高。张绪成等<sup>[13]</sup>对间套作模式下覆膜垄沟种植农田水热及产量效应进行研究,结果表明,全膜覆盖使 4 a 试验期 0—200 cm 土层土壤水分增加了 100 mm 以上,该种植模式对土壤水分年际平衡无显著负面影响,并可有效提高土壤温度,这一效果在干旱年份(2011 年)尤其突出。Cook 等<sup>[14]</sup>研究覆膜对土壤理化性质及土壤温度的影响,结果表明,全膜覆盖种植能够显著改善土壤水分状况,使土壤储水量尤其是作物生育前期的土壤储水量逐年增加,为旱作区作物生长创造好的水分条件,促进高产。前人有关河套灌区土壤水热效应的相关研究不多,对于在灌区采用覆膜垄作改变微地形来改善土壤水热条件、防止无效蒸发的研究更少。本研究针对玉米需水特性和当地降水特点,通过研究不同覆膜耕作方式对土壤水分、温度和玉米产量的影响,确定适宜灌区的玉

米种植模式,进一步提高玉米水分利用效率。采用滴灌起垄覆膜种植,改变耕作方式和覆膜方式,实现有效利用灌区丰富的光热资源,减少土壤水分无效蒸发,进一步改善土壤水热效应,满足玉米需水要求,提高玉米的产量。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

2014—2015 年在内蒙古河套灌区曙光试验站(40°46' N, 107°24' E)开展了玉米膜下滴灌试验,该试验站地处干旱半干旱气候带,典型温带大陆性气候,降水量集中,日照充足,蒸发强烈,日温差较大。站内多年平均气温 6.9 °C,降雨量 142.1 mm,蒸发量 2 306.5 mm,年日照时数 3 189 h。试区土壤属于黄河灌淤土,质地主要为沙壤土,耕层土壤平均容重 1.40 g/cm<sup>3</sup>,土壤有机质含量 7.26 g/kg,全氮含量 105.36 mg/kg,速效磷含量 55.82 mg/kg,速效钾含量 120.49 mg/kg,土壤含盐量 1.19 g/kg,地下水埋深 2.0 m 左右。0—120 cm 土壤田间持水量 23.85%,土壤容重 1.49 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计及测定方法

供试作物为玉米(西蒙 6 号),在膜下滴灌条件下,设置 2 个地膜覆盖度(半膜、全膜)和 2 种耕作方式(平作、垄作),共 4 个处理,采用宽窄行的种植模式,窄行和宽行距分别为 20 cm 和 80 cm,玉米株距 30 cm,在窄行中间布置滴灌带,滴灌带间距 100 cm,滴头间距 30 cm。垄作处理垄高 20 cm,垄宽 40 cm,垄间距 100 cm。具体种植模式见图 1。每个处理设置 4 个重复,共计 16 个小区,小区面积 4 m×12 m。

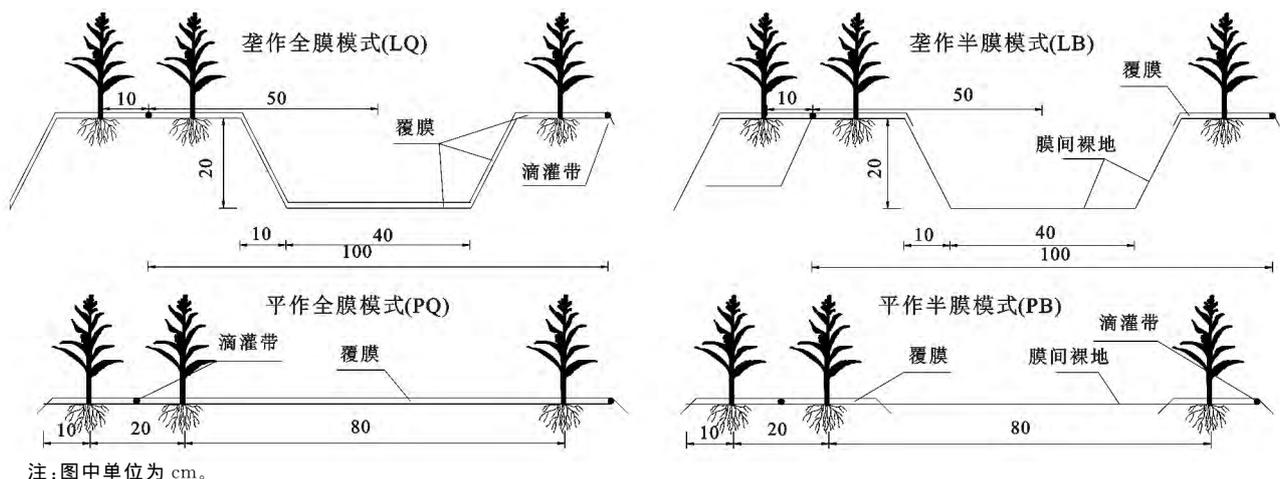


图 1 膜下滴灌种植模式

播种时间 2014 年为 4 月 24 日,2015 年为 4 月 28 日,播种深度 5 cm,分别于 2014 年 9 月 4 日和 2015 年 9 月 5 日收获。试验观测时间为每年 4 月下旬开始到 9 月初结束,观测期内气温变化以及降雨、灌溉、蒸发情况见图 2,其中,2014 年和 2015 年玉米生育期总降雨量分别为 76.6 mm 和 24.5 mm,总灌溉量分别为 135 mm 和 346 mm。

2014—2015 年在各处理试验小区内埋设 ECH<sub>2</sub>O—5TE 土壤水分、温度动态监测系统实时监测土壤含水率和温度变化,监测时期从播种前开始到收获后结束,每 1 h 测定 1 次,数据采集仪自动记录。探针埋设在滴头下方,最窄边向上垂直插入土壤中,埋设深度为 10,30,55,85,110 cm,分别监测 0—20,20—40,40—70,70—100,100—120 cm 土层土壤水分、温度动态变化。以作物全生育期不同深度土层温度的监测数据计算平均地温和积温,采用每日 24 h 各时刻平均值计算不同深度土层地温的日变化。

ECH<sub>2</sub>O—5TE 探头在垂直剖面只有 5 个观测点,以烘干法计算各处理土壤含水率的垂直分布,各生育期含水率取该生育期内各次测量的平均值。

取土层次分别为 0—10,10—20,20—30,30—40,40—60,60—80,80—100,100—120 cm,共 8 个层次。此外,在玉米种植前、灌水前后及作物收获时,利用土钻采集 0—120 cm 深度土样,取土深度为 0—20,20—40,40—70,70—100,100—120 cm,烘干法测定土壤含水率,对 5TE 探头进行标定。对各处理表层 0—25 cm 的地温采用地温计进行观测,埋设深度为 5,10,15,20,25 cm,观测时间为每天 8:00—20:00,每 2 h 观测 1 次,以作物苗期气温和表层土壤地温的观测数据对气温与表层土壤温度之间的关系进行说明。

玉米收获期取小区中间 2 行测产,记录穗数,收获后随机选取 20 个果穗记录穗行数、穗粒数,脱粒后称量籽粒重量,50 °C 烘干至恒重,计算千粒重。

玉米水分利用效率(WUE, kg/(hm<sup>2</sup> · mm))计算如下:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (1)$$

式中:Y 为单位面积玉米产量(kg/hm<sup>2</sup>);ET 为玉米生育期耗水量(mm)。

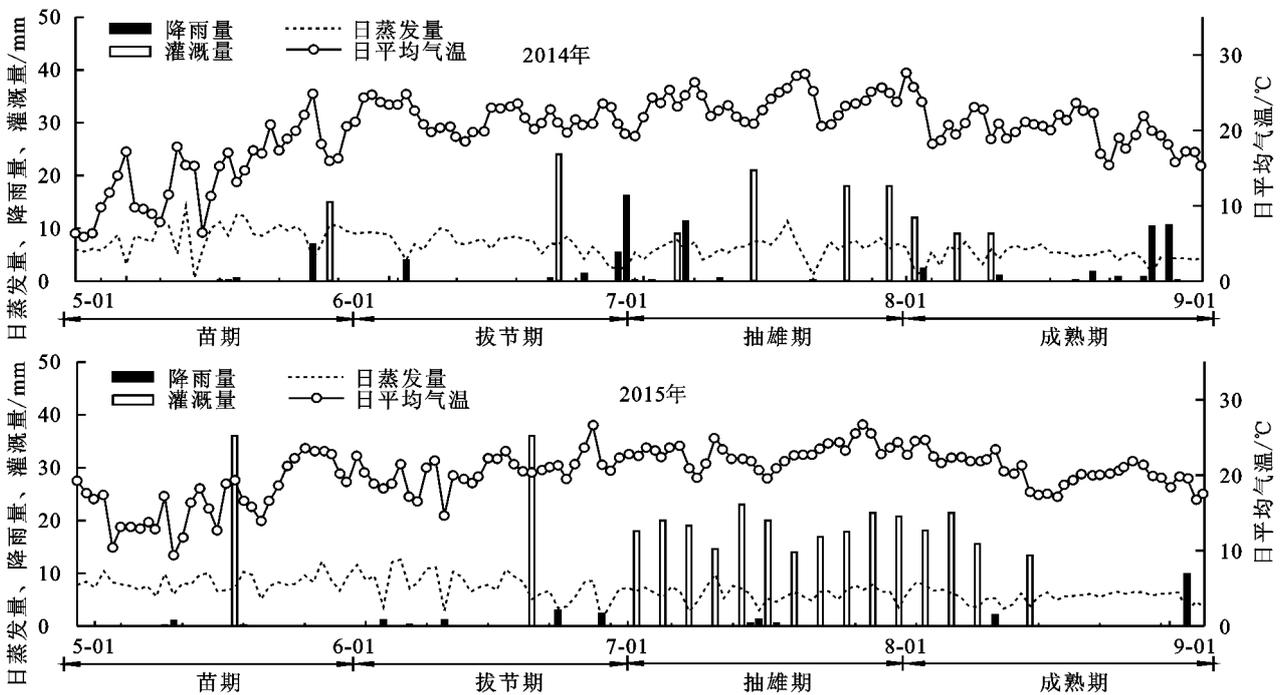


图 2 玉米生长季内 2014 年和 2015 年降雨量、蒸发量、灌水量和气温

### 1.3 数据统计分析

本试验数据采用 R3.1.0 软件进行数据处理与统计分析,多重比较基于最小显著差数法(least significant difference,LSD),采用 SigmaPlot12.0 绘制图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 覆膜耕作方式对土壤水分变化的影响

#### 2.1.1 生育期内土壤含水率垂直分布特征

2014 年和 2015 年观测期内,膜下滴灌不同覆膜耕作方式

玉米生育期 0—120 cm 土层土壤含水率的垂直分布特征基本一致。以 2014 年为例,从图 3 可以看出,表层土壤含水率较低,不同覆膜耕作方式下土壤含水率的垂直变化趋势相同。

在幼苗期,不同处理 0—20 cm 土壤水分差异明显,LQ 土壤含水率明显高于其他 3 种处理,较 LB、PQ 和 PB 分别提高了 14.4%,23.8%和 26.9%,PQ 和 PB 处理间无明显差异。由于苗期玉米根系较少,

主要吸收表层土壤水分,对深层土壤含水率几乎没有影响,各处理间深层土壤含水率的差异主要由覆膜耕作方式的不同所引起。分析 20—120 cm 土层中土壤水分垂直变化可以看出,各处理间土壤含水率接近,变化不明显,说明玉米苗期不同覆膜耕作方式对深层土壤含水率影响较小。

拔节期,降水量较少,各处理土壤含水率受降水影响也较小,此时作物生长旺盛,根系对水分吸收量大,LQ 在 0—40 cm 土层含水率较大,起到了较好的保水作用;而这一阶段随着太阳辐射增加和地表温度升高影响,地表蒸发量增大,大量土壤水分从 LB 和 PB 处理膜间裸地散失,造成土壤含水率相对较低。全膜处理与半膜处理表现出较大差异,0—40 cm 土

层 LQ 含水率较 LB 提高了 32.6%,PQ 较 PB 提高了 5.8%,LQ 较 PQ 提高了 12.5%。

抽雄期,作物根系继续向深层土壤扩展,作物耗水量急剧增加,0—60 cm 土层垄作处理土壤含水率明显高于平作处理,60—120 cm 土壤含水率差异不明显,由于抽雄期降雨量较多,2 个半膜处理均受降雨影响较大,土壤含水率差异不大。

成熟期,降雨和土壤水分消耗是影响土壤水分的垂直分布的重要因素,0—20 cm 表层土壤各处理间土壤含水率差异明显,而 80 cm 以下各处理无明显区别。垄作的蓄水保墒和覆膜的集雨抑蒸效果明显,0—80 cm 土层 LQ 土壤含水率较 LB、PQ 和 PB 分别提高了 18.1%,11.2%和 21.5%。

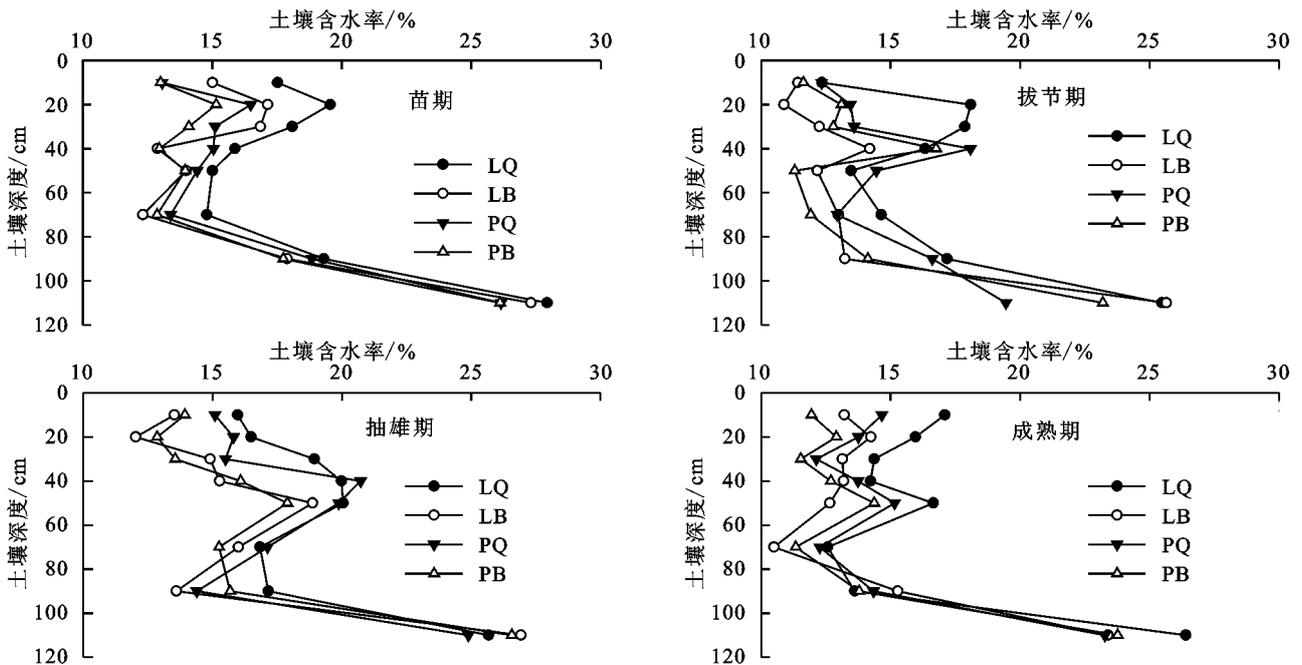


图 3 不同覆膜耕作方式下玉米不同生育期 0—120 cm 土壤含水率的垂直变化(2014 年)

2.1.2 生育期内土壤储水量变化特征 以 2014 年为例,分析滴灌条件下不同覆膜耕作方式玉米各时期 0—40,40—120 cm 土层土壤储水量的变化。从图 4 可以看出,深层土壤储水量变化幅度小于浅层,各处理土壤储水量在苗期最高,成熟期最低,同一生长阶段不同处理间土壤储水量差异明显。

在 0—40 cm 土层,苗期至拔节期由于降雨较少,且作物耗水量逐渐增大,各处理土壤储水量明显下降,此时 LQ 土壤储水量最高,依次为 PQ、PB 和 LB。拔节期至抽雄期,降雨和灌溉在满足作物需水的同时也使土壤水分得到补充,各处理土壤储水量均有增加,大体趋势相同。与拔节期相比,抽雄期 LQ 储水量较 LB 增加明显,这是因为抽雄期气温较高,垄作半膜土面蒸发较大,土壤含水率较低,全膜覆盖土壤储水量明显高于半膜覆盖处理。在成熟期,各处理 0—40,40—120 cm 储水量均有减少,达到全生育期

的最低点,以全膜处理的表层储水量减少最为明显,0—120 cm 土层储水量由高到低依次为 LQ、PQ、PB 和 LB。成熟期 0—40 cm 土层垄作全膜土壤储水量较垄作半膜增加了 8.91%,平作全膜土壤储水量较平作半膜增加了 15.53%,与垄作处理相比,平作处理全膜和半膜土壤储水量差距较大。

2.2 覆膜耕作方式对土壤温度变化的影响

2.2.1 不同土层土壤温度变化及耕层积温变化 表 1 为 2014 年和 2015 年作物全生育期内各土层日平均温度。可以看出,不同覆膜、耕作方式对土壤日平均温度产生了明显的影响。在垄作条件下,半膜覆盖膜间裸地表层土壤热量散失明显,与半膜覆盖相比,全膜覆盖可以显著提升 0—20 cm 土层平均温度,随着土层深度增加增温幅度逐渐降低。这是由于全膜覆盖能有效减少垄面长波辐射,从而增加地面净辐射量,同时膜内封闭环境可以有效防止热量从膜间裸地

散失。在平作条件下,2014 年半膜覆盖和全膜覆盖之间,0—20,40—70 cm 土层平均温度差异不显著,而 20—40 cm 土层平均温度差异显著,各土层平均温度均明显低于平作条件下不同覆膜方式的相应土层,其中平作半膜处理各土层保温效果最差。然而,在 2015 年,相同耕作方式下,半膜覆盖和全膜覆盖处理不同深度土层土壤温度差异显著,主要是因为试验区连续两年降雨量过少,为了满足作物需水要求,在 2015 年作物需水高峰期采用高频灌溉,各处理土壤含水量始终保持在较高的水平,耕作方式对土壤含水量和温度的影响有限,而相对半膜覆盖,全膜覆盖对表层土壤的保温抑蒸效果明显,促进热量向深层传递。结合两年数据可以发现,干

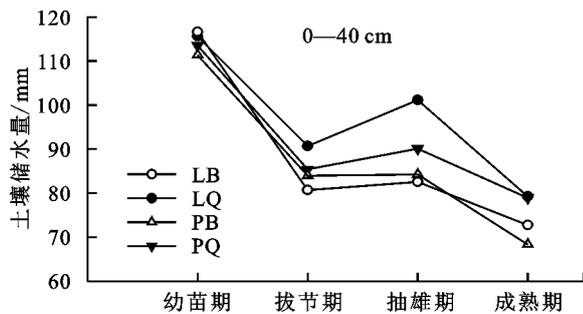


图 4 不同覆膜耕作方式下玉米生育期土壤储水量的变化(2014 年)

表 1 不同覆膜耕作方式下不同土层土壤日均温度变化  
单位:℃

年份(年)	处理	0—20 cm	20—40 cm	40—70 cm	0—70 cm
2014	LB	22.86b	22.05a	20.19a	21.48a
	LQ	23.93a	22.45a	20.24a	21.92a
	PB	22.62c	21.07c	19.16c	20.70b
	PQ	22.79b	21.69b	19.31b	20.99b
2015	LB	21.28b	20.44b	18.01b	19.54b
	LQ	22.80a	21.14a	19.12a	20.70a
	PB	21.06b	19.85c	17.79b	19.33b
	PQ	22.54a	20.99a	18.84a	20.48a

注:不同字母表示处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

玉米耕层 0—20 cm 土壤温度在适宜范围时利于作物生长,其土壤积温按 0—20 cm 土层大于 10 ℃有效温度计算。不同覆膜耕作方式下玉米耕层土壤积温变化如表 2 所示。玉米抽雄期和成熟期土壤积温明显高于苗期和拔节期,这是因为玉米抽雄、拔节期光照强烈导致土壤地温偏高,但是玉米封垄之后,由于平作与平作对短波的反射率和农田有效辐射相差甚微,所以处理间差异主要由覆膜方式决定。2014—2015 年玉米生育期土壤总积温变化趋势相同,平作全膜土壤总积温最高,2 个生长季内 LQ 较 PQ 生育期总积温分别提高了 5.7%和 4.0%,PQ 较 PB 分别提高了 2.6%和 4.4%,这是由于平作增厚了土壤疏松土层,改善了通气条件,改变了地表热量平衡,与平作相比平作更有易于提高表层温度,此外,全膜覆盖有效增加地表净辐射量,膜内积聚热量较多,与半膜覆盖相比,增温效果明显。

旱条件下,耕作措施较覆膜方式对地温的影响更为明显;水量充沛条件下,覆膜措施较耕作方式对地温的影响更为明显。2014 年和 2015 年土壤日平均温度的变化均以 LQ 最高、PB 最低,随土层深度的增加土壤温度逐渐下降。分析 0—70 cm 土层平均土壤温度可以看出,平作全膜处理保温效果最好,土壤温度明显高于半膜覆盖处理,2014 年和 2015 年 LQ 土壤温度较 LB 分别增加 0.44 ℃和 1.16 ℃,较 PQ 分别增加 0.93 ℃和 0.22 ℃,较 PB 分别增加 1.22 ℃和 1.37 ℃。综上所述,平作处理可以有效提高土壤表层温度,有利于热量向深层土壤传递;表层土壤温度越高,全膜覆盖与半膜覆盖的保温效果越明显,同时覆膜处理间差异越大。

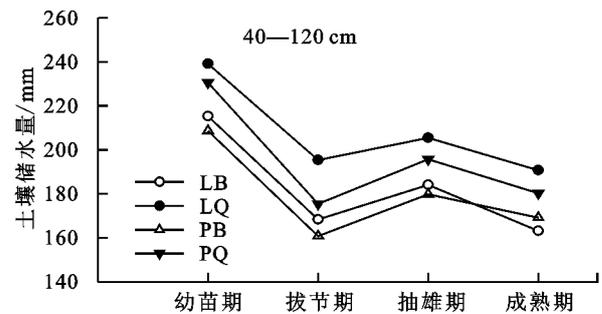


表 2 生育期内不同覆膜耕作方式下土壤耕层积温的变化  
单位:℃

年份(年)	处理	苗期	拔节期	抽雄期	成熟期	总积温
2014	LB	672b	745c	808b	778b	3003b
	LQ	691a	795a	858a	819a	3164a
	PB	646c	749c	770c	750c	2915c
	PQ	645c	761b	807b	778b	2992b
2015	LB	493b	777c	827b	833c	2930b
	LQ	520a	835a	865a	880a	3102a
	PB	464c	752c	819c	822c	2857c
	PQ	499b	804b	832b	849b	2984b

2.2.2 生育期内土壤温度日变化 选用作物全生育期每日 24 h 各时刻平均值对不同土层深度地温进行日变化分析(图 5)。图 5 中不同处理土壤温度日变化具有相同的趋势,0—20,20—40 cm 的日变化幅度较大,40—70 cm 变化趋于平缓,随深度增加地温逐渐减小,且深层土壤温度随太阳辐射的变化具有明显的滞后性。0—20 cm 土壤最低温度出现在 8:00 左右,最高温度在 18:00 左右,温度变幅为 19.86~26.71 ℃;20—40 cm 土壤温度波动曲线变化平缓,最低温度出现在 14:00 左右,温度变幅为 20.59~22.87 ℃;40—70 cm 土壤温度平稳递增或减小,温度变幅为 19.05~20.25 ℃。不同深度土壤温度极值出现的时刻不同,呈现向后推移的趋势,随土壤深度增加温度波动范围逐渐减小。图 5 中 0—20,20—40,40—70 cm 土层平作土壤平均温度较平作分别提高了 5.6%,2.4%和 3.5%,不同耕作措施的增温效果明显不同。

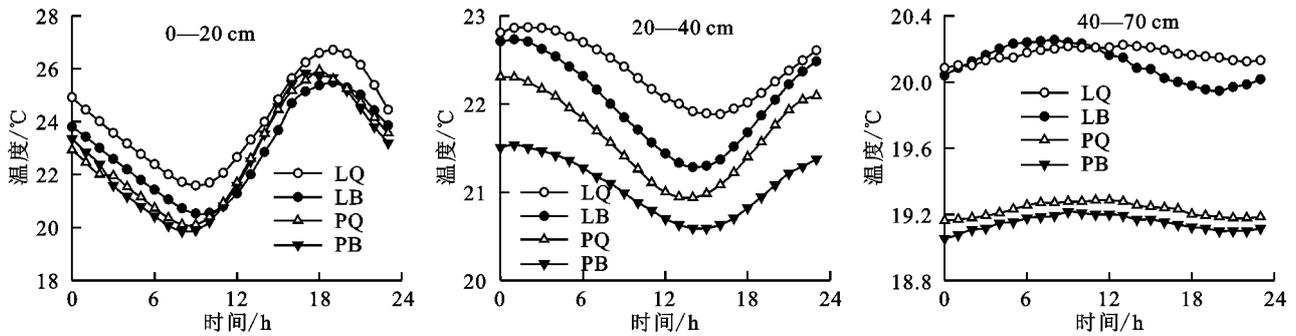


图 5 不同覆膜耕作方式下 2014 年土壤温度日变化

在相同土层深度,不同覆膜耕作方式对土壤温度日变化有明显影响。以 0—20 cm 土层温度变化为例,8:00—18:00 之间,各处理都处于升温过程,土壤最高温度依次为 LQ(26.71 °C)>PQ(25.93 °C)>PB(25.72 °C)>LB(25.47 °C)。垄作全膜处理较平作处理温度增长较快,而垄作半膜处理由于受覆盖方式影响,除垄顶外,20 cm 以上土层垄肩均暴露在外,受气温影响大,温度上升趋于平缓。20:00 以后垄作由于起垄增大了散热,温度下降速度也呈现较快的趋势,垄作处理和平作处理的温差逐渐缩小。

表 3 不同覆膜耕作方式下气温与表层土壤温度关系(2014—2015 年)

处理	回归方程	R <sup>2</sup>
LB	$Y=0.2192X_1+0.3251X_2-0.0118X_1X_2-2.7283$	0.8830
LQ	$Y=0.7868X_1+1.0728X_2-0.0352X_1X_2-11.8614$	0.8346
PB	$Y=0.2792X_1+0.4221X_2-0.0122X_1X_2-3.526$	0.8859
PQ	$Y=0.5715X_1+0.8627X_2-0.0231X_1X_2-9.0526$	0.8579

注:Y(地温)(X<sub>1</sub> 土层深度 5 cm≤X<sub>1</sub>≤25 cm),X<sub>2</sub>(气温)。

由图 5 可知,0—20 cm 土层地温日变幅较大,说明表层土壤温度受外界环境影响较大。通过对 2014 年和 2015 年不同覆膜耕作处理下,表层土壤不同深度地温和气温进行多元线性回归分析,建立不同深度土层地温和气温之间的关系(见表 3),为今后试验区域土壤表层温度测量提供理论参考。其中 Y 为土壤温度,X<sub>1</sub> 为土层深度(5 cm≤X<sub>1</sub>≤25 cm),X<sub>2</sub> 为气温,随气温和土层深度的变化,土壤温度发生波动。

#### 2.4 覆膜耕作方式对产量和水分利用效率的影响

分析 2014—2015 年玉米产量和水分利用效率结果(表 4)看出,不同覆膜耕作方式下玉米产量差异明显。2014 年、2015 年 LQ 产量最高,较 PQ、PB 和 LB 分别增产 9.14%,26.10%,42.63%和 2.14%,27.29%,41.66%。各处理水分利用效率表现为 LQ>PQ>PB>LB,2014 年和 2015 年 LQ 较 PQ 水分利用效率提高了 1.21%和 4.02%,PQ 较 PB 提高了 22.75%和 19.71%,PB 较 LB 水分利用效率提高了 8.38%和 17.46%。从 2014—2015 年产量变化可以看出,全膜覆盖和垄作种植模式能使作物更好的利用田间土壤水分,显著促进玉米产量的增加。综合分析,垄

作地表昼夜温差比平作大,有益于干物质的积累,促进作物的生长发育和产量的形成,达到增产效果;全膜覆盖比半膜覆盖的蓄水、保墒效果更好,在半膜覆盖条件下,平作处理利用土壤水分的效果更好。

### 3 讨论

本文试验结果表明,垄作覆膜在白天对土壤的增温作用明显,夜间温度最低值与白天最高值相比呈现相反趋势,这与前人研究结果一致<sup>[15-16]</sup>。这是由于垄作改变了微地形,增加土壤表面积,升温、散热速度快,增加了土壤的昼夜温差<sup>[17]</sup>。垄作全膜覆盖方式在作物生长前期效果明显,作物生长旺盛,后期出现早衰现象,耗水量减少,与垄作半膜之间的差异逐渐缩小;而平作条件下,前期作物生长较慢,后期生长需要消耗大量水分,导致土壤储水量降低,同时半膜处理土面蒸发量大,含水率较低,平作全膜和半膜处理间差异逐渐增大<sup>[18-20]</sup>。

表 4 不同覆膜耕作方式下玉米产量和水分利用效率对比

处理	2014 年		2015 年	
	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )
LB	10925c	31.06d	11857b	30.08d
LQ	15583a	40.21a	16797a	39.10a
PB	12357b	33.83c	13196b	32.06c
PQ	14277a	39.29b	16445a	38.29b

垄作处理采用半填半挖式起垄,垄作全膜操作简便,随时起垄随时覆膜,保水保墒效果好;垄作半膜只在垄台覆盖地膜,垄肩暴露在外,覆盖效果不如全膜好<sup>[21]</sup>。试验中采用 5TE 温度探针与地温计相结合的方法测定地温。5TE 探针在埋设时要求 2 个传感器的距离应大于 20 cm,不适合监测表层土壤温度,而地温计埋设深度为 5—25 cm,故采用地温计监测 5—25 cm 土层土壤温度的变化;由于玉米根层深度位于 60—80 cm,地温计受埋深限制,不能准确表达玉米生育期内深层土壤温度变化,故采用 5TE(埋深 20—120 cm)监测数据对作物生育期内地温变化规律进行说明。

由于采用地温计观测土壤温度耗时费力,且受气象条件影响难以做到逐日观测,不能准确表达作物全

生育期的地温变化情况,本文尝试建立气温与表层土壤之间的关系,弥补野外试验中表层土壤温度数据难以获取的缺点。由于苗期作物郁闭度基本为零,作物遮蔽对表层土壤温度影响较小,本文选择苗期对表层土壤地温与气温之间的关系进行说明(表 3),而该时期 8:00—20:00 日平均气温在 20.06~29.15℃ 之间,不能代表作物全生育期内的气温变化,当气温高于温度极值时,所得到的地温值偏低;当气温低于温度下限时,所得到的地温值偏高。在后续的试验中,可考虑不同气温、太阳辐射条件下不同土层土壤温度的变化,完善地温与气温二者之间的关系,为灌区气温和地温研究提供参考依据。

#### 4 结论

(1)不同覆膜耕作方式下土壤含水率垂直变化趋势相同,表层土壤含水率较低,深层土壤含水率逐渐增大。受作物生长耗水影响,不同生育时期各土层土壤含水率波动情况不同,作物生长前期浅层土壤含水率变化明显,深层变化不大,作物生长后期深层土壤含水率发生变化,垄作全膜在各生育期均可明显增加耕层土壤含水率和储水量,具有明显的保墒抑蒸效果。

(2)2014 年和 2015 年土壤日平均温度的变化均以 LQ 最高、PB 最低,随土层深度的增加土壤温度逐渐下降,土壤温度变化趋于平缓,与半膜覆盖相比,全膜覆盖提高了土壤温度,其保温效果明显。不同处理土壤温度日变化具有相同的趋势,0—20 cm 和 20—40 cm 土层的日变化幅度较大,40—70 cm 土层变化幅度较小,随深度增加土壤温度波动范围逐渐减小。垄作处理白天会积聚更多的热量,有效提高土壤表层温度,并将温度有效传递到垄沟和土壤深层,但夜间垄体散热更快,全膜覆盖可有效防止土壤温度的散失,提高作物耕层温度,为作物提供适宜的生长条件。

(3)2014 年和 2015 年作物产量和水分利用效率均以 LQ 最高,其后依次为 PQ、PB 和 LB。全膜覆盖比半膜覆盖的蓄水、保墒效果更好,垄作处理能使土壤表面积增大,提高土壤耕层温度的同时增大土壤含水率,促进作物生长发育和产量的形成,提高作物产量。

参考文献:

[1] 冯兆忠,王效科,冯宗炜. 河套灌区秋浇对不同类型农田土壤氮素淋失的影响[J]. 生态学报,2003,23(10):2027-2032.

[2] 汤文光,肖小平,唐海明,等. 不同种植模式对南方丘陵旱地土壤水分利用与作物周年生产力的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(18):3606-3617.

[3] 高世铭,张绪成,王亚宏. 旱地不同覆盖沟垄种植方式对马铃薯土壤水分和产量的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(1):249-256.

[4] 王颖慧,蒙美莲,陈有君,等. 覆膜方式对旱作马铃薯产

量和土壤水分的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(3):147-152.

- [5] 马忠明,杜少平,薛亮. 不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响[J]. 生态学报,2011,31(5):1295-1302.
- [6] 张俊鹏,冯棣,郑春莲,等. 咸水灌溉对土壤水热盐变化及棉花产量和品质的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(9):161-167.
- [7] 宋振伟,郭金瑞,邓艾兴,等. 耕作方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(16):108-114.
- [8] 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.
- [9] Zhang Z, Tian F Q, Zhong R S, et al. Spatial and Temporal pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(1):44-51.
- [10] Zhou L M, Li F M, Jin S L. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affects soil water temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research,2009,113(1):41-47.
- [11] Ramakrishna A, Tam H M, Wania 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.
- [12] 李仙岳,彭遵原,史海滨,等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(2):97-103.
- [13] 张绪成,王红丽,于显枫,等. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J]. 中国农业科学,2016,49(3):468-481.
- [14] Cook H F, Valdes G S B, Lee H C. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L. [J]. Soil & Tillage Research,2006,91(1/2):227-235.
- [15] 张晓平,方华军,杨学明,等. 免耕对黑土春夏季节温度和水分的影响[J]. 土壤通报,2005,36(30):313-316.
- [16] 何立谦,张维宏,杜雄,等. 土下覆膜与适宜灌水提高冬小麦水分利用率[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊 1):94-104.
- [17] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. European Journal of Agronomy,2009,31(4):241-249.
- [18] Zhang S L, Li P R, Yang X Y, et al. 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.

(下转第 185 页)

比例在 40% 或 50% 的施肥处理显著提高氮素利用率,比普通氮肥处理提高了 24.80%~103.87%。脲醛肥料价格比普通尿素高,不合理的脲醛比例不但不增加收入,还减少收入,合适的脲醛氮素比例能增加小麦栽培的纯收入,其中脲醛氮所占比例在 40% 或 50% 施肥处理比普通氮肥处理增收 1 350~1 591 元/hm<sup>2</sup>。综合考虑不同处理在氮素利用率、增产、增收等上的效果,在黄淮海地区中高产田小麦生产中,建议脲醛氮占总氮 40%~50% 进行配比施用,将取得较好的肥料效果。

## 参考文献:

- [1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [2] 刘新宇,巨晓棠,张丽娟,等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2):296-303.
- [3] 吕云峰. 脲甲醛缓释肥料[J]. 磷肥与复肥,2009,24(6):8-10.
- [4] 段路路,范宾,王寅,等. 脲醛缓释肥料红外光谱分析及养分释放特性研究[J]. 化肥工业,2010,37(3):16-22.
- [5] Jiang J, Hu Z, Sun W, et al. Nitrous oxide emissions from Chinese cropland fertilized with a range of slow-release nitrogen compounds[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2010,135(3):216-225.
- [6] Fan X H, Li Y C. Nitrogen release from slow release fertilizers as affected by soil type and temperature [J]. Soil Science Society of America Journal,2010,74(5):1635-1641.
- [7] Ni B,Liu M,Lü S. Multifunctional slow-release urea fertilizer from ethylcellulose and superabsorbent coated formulations[J]. Chemical Engineering Journal,2009,155(3):892-898.
- [8] 王春梅,赵贵哲,刘亚青,等. 含氮、磷包膜缓释肥的制备及其缓释性能研究[J]. 植物营养与肥料学,2010,16(4):1027-1031.
- [9] 谷佳林,徐凯,付铁梅,等. 不同密闭材料硫包衣尿素氮素释放特性及对夏玉米生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(3):630-637.
- [10] Ni B,Liu M,Lü S, et al. Novel slow-release multielement compound fertilizer with hydroscopicity and moisture preservation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2010,49(10):4546-4552.
- [11] 段路路,张民,刘刚,等. 缓控释肥料在不同介质中的养分释放特性及其肥效[J]. 应用生态学报,2009,20(5):1118-1124.
- [12] 曲均峰,傅送保,操斌,等. 脲醛缓释肥在菠萝上的效应研究[J]. 化肥工业,2013,40(3):64-66.
- [13] 黄丽娜,樊小林. 脲甲醛肥料对小白菜产量和氮肥利用率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(11):42-46.
- [14] 解永军,邵明升,王红,等. 脲醛缓释肥料在水稻上的应用研究[J]. 磷肥与复肥,2015,30(4):51-52.
- [15] 张务帅,陈宝成,李成亮,等. 控释氮肥控释钾肥不同对比对小麦生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(3):178-183.
- [16] 王晓琪,朱家辉,陈宝成,等. 控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(4):178-182.
- [17] 陈宝成,李峰,丁济娜,等. 一种测定脲醛缓释肥田间养分释放规律的方法:中国,201510050354.1[P]. 2015-04-29.
- [18] 郭伟,陈红霞,张庆忠,等. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响[J]. 生态环境学报,2011,20(3):425-428.
- [19] Zhang S X, Li Q, Lu Y, et al. Conservation tillage positively influences the microflora and microfauna in the black soil of Northeast China[J]. Soil & Tillage Research,2015,149(6):46-52.
- [20] Chivenge P P, Murwira H K, Giller K E, et al. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils[J]. Soil & Tillage Research,2007,94(2):328-337.
- [21] 明广辉,罗毅,孙林,等. 覆膜对农田降水入渗的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(4):1-4.

(上接第 178 页)