

灌水与覆膜对春玉米土壤温度、生育期和水分利用的影响

银敏华, 李援农, 谷晓博, 马朋辉, 张志昊

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

摘 要: 在移动式遮雨棚内, 采用子母桶栽土培法, 研究充分灌水(F)和调亏灌水(D)2 种灌水模式与拔节期揭膜(A)、抽雄期揭膜(B)和全生育期覆膜(C)3 种覆膜时长对春玉米整个生育期(苗期、拔节期、抽雄期和灌浆期)地下面下 5、10 cm 和 15 cm 深度处土壤温度、生育周期、干物质量、蒸散量和水分利用效率的影响。结果表明: 各生育期土壤温度的主导影响因子有差异; 5 cm 深度处土壤温度日变幅最大, 覆膜的增温效应主要体现在 0~10 cm 土层; 处理间(DB 和 FC)生育周期最大相差 8 d; 整个生育期中, 与全生育期覆膜处理相比, 拔节期揭膜处理和抽雄期揭膜处理累积降温对收获时春玉米干物质量的效应在 2012 年分别为 16.3 g·℃⁻¹和 60.2 g·℃⁻¹, 2013 年分别为 18.4 g·℃⁻¹和 61.8 g·℃⁻¹; 同一灌水模式下, 随覆膜时间的延长, 蒸散量减少, 与充分灌水处理相比, 调亏灌水处理在 3 种覆膜时长(A、B、C)下蒸散量在 2012 年依次减少 7.1%、6.6%和 4.3%, 2013 年依次减少 6.3%、6.2%和 5.4%; 调亏灌水和抽雄期揭膜均可获得较高的水分利用效率, 两年中处理间水分利用效率的极差(DB 处理和 FA 处理)分别为 0.12 g·mm⁻¹和 0.13 g·mm⁻¹。综合考虑土壤温度、生育周期和水分利用效率, 调亏灌水+抽雄期揭膜(DB)组合具有较好的节水增产效果。

关键词: 灌水模式; 覆膜时长; 土壤温度; 干物质量; 蒸散量; 春玉米

中图分类号: S513.01 **文献标志码:** A

Effects of irrigation and plastic film mulching on soil temperature, crop growing stages and water use of spring maize

YIN Min-hua, LI Yuan-nong, GU Xiao-bo, MA Peng-hui, ZHANG Zhi-hao

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

Abstract: In the movable rainproof shelter, spring maize (Longyu 58) was planted to study the effects of two irrigation modes including full irrigation (F) and regulated deficit irrigation (D), and three plastic film mulching durations including mulching till jointing stage (A), mulching till tasseling stage (B) and mulching all stages (C), on soil temperature at depths of 5, 10 cm and 15 cm, respectively, as well as growing cycle, dry mass, evapotranspiration and water use efficiency. Results showed that the leading factors for soil temperature at different growing stage varied. The temperatures at 5 cm were quite variable. Effect of increased temperature by plastic film mulching was mainly in 0 to 10 cm soil layer. The biggest difference in growth cycles between treatments (DB and FC) was 8 days. During the whole growth period, compared with mulching over all stages, the decreased soil temperature caused by mulching till jointing stage and mulching till tasseling stage contributed to the accumulations of dry mass by 16.3 g·℃⁻¹ and 60.2 g·℃⁻¹ in 2012, respectively, and 18.4 g·℃⁻¹ and 61.8 g·℃⁻¹ in 2013, respectively. Under the same irrigation mode, evapotranspiration became decreased with the increase of plastic film mulching duration. The evapotranspiration levels under regulated deficit irrigation at three kinds of plastic film mulching durations (A, B, C) were reduced by 7.1%, 6.6% and 4.3%, respectively, in 2012 and 6.3%, 6.2% and 5.4%, respectively, in 2013. Regulated deficit irrigation and

收稿日期: 2014-07-10
基金项目: 国家 863 计划项目(2011AA1005A4)
作者简介: 银敏华(1988—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉新技术研究。E-mail: 602287025@qq.com。
通信作者: 李援农(1962—), 男, 陕西大荔人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事节水灌溉新技术及 3S 技术应用研究。E-mail: liyuan-nong@163.com。

mulching till tasseling stage could obtain high water use efficiency. The increments between extreme values (DB and FA) in two years were $0.12 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$ and $0.13 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$, respectively. In conclusion, in consideration of soil temperature, growing cycle and water use efficiency, the treatment by regulated deficit irrigation and mulching till tasseling stage had possible effects in increasing yield and saving water.

Keywords: irrigation mode; plastic film mulching; soil temperature; dry mass; evapotranspiration; spring maize

热量是影响土壤微生物活性和作物生长过程的重要因子之一,土壤温度是土壤热状况的综合表现^[1-2]。多种因素诸如大气温度、近地面热平衡特征、土壤水分状况以及作物生育进程等均可影响土壤温度的时空分布^[3]。在农业生产实践中,了解耕层土壤温度的动态变化对于作物生理、生长的研究具有重要意义^[4]。土壤温度环境不仅直接影响作物根系、幼苗的生长和近地面大气的热量交换,同时对土壤水分、氮磷钾养分的迁移与转化均有直接或间接的影响^[5]。对喜温作物玉米而言,适宜的耕层土壤温度更是实现高产、优质、高效的重要环境因子。

合理利用地膜覆盖能够实现增温、保墒、增产、防止水土流失等多重功效^[6-8],在我国北方干旱半干旱地区被广泛应用,已成为一项重要的农业增产措施^[9-11]。然而长期的生产实践表明,地膜覆盖透水、透气性差的缺点可导致覆膜作物生长发育中后期出现不同程度的早衰现象,直接影响作物产量和品质的进一步提高^[12-14]。调亏灌溉是目前研究较广的一种节水灌溉技术,它开辟了一条调控水—土—植物—环境关系的有效途径,可实现节水高效、高产优质和增加总灌溉面积等多重目标^[15-16]。灌水模式和覆膜时长分别对土壤温度和作物生长的影响已有相当报道。研究发现,不同水分处理对土壤温度的影响差异较大,重度水分亏缺下土壤温度在全生育期始终较高^[17-18]。土壤温度受灌水过程、土壤含水率及作物冠层面积的影响较大,高频灌溉显著延迟气温对土壤温度的影响,具有平抑土壤温度的作用^[19]。膜下滴灌作物根层水热条件适宜,可促进根系的生长^[20],实现节水抑盐、优质增产的目标^[21]。不同作物在不同时期揭膜,其效果不尽相同。对棉花^[22]、玉米^[23]和马铃薯^[24]适时揭膜可有效降低耕层土壤温度,增加根系透气性,改善光合产物分配,延缓植株衰老并提高作物产量和水氮利用效率。

水、热是影响作物生长的两大重要因素,水热协同是实现作物高产高效的有力途径。目前关于灌水模式(水)与覆膜时长(热)共同作用对土壤温度和作物生长影响的研究较为鲜见。事实上,有效的灌溉方式结合与之相适应的农艺措施达到水热协同,有

助于实现农业生产的集成作用和综合效应。本文旨在探究灌水模式与覆膜时长对春玉米田土壤温度以及春玉米生育周期、蒸散量和水分利用效率的影响,同时揭示土壤温度对生物量形成的驱动机制,以期进一步完善地膜覆盖节水理论与技术应用研究。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

春玉米桶栽试验于 2012 年和 2013 年 4—8 月,在陕西杨凌西北农林科技大学教育部农业水土工程重点实验室试验站遮雨棚内进行。该区地处 $N34^{\circ}20'$, $E108^{\circ}24'$,海拔 521 m。供试土壤取自试验站 0~20 cm 耕层土壤,质地为壤土。其理化性状为:有机质含量 $11.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $14.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;硝态氮含量 $76.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $25.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $131.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;田间土壤持水率为 25% (质量含水率),pH 8.13。

供试春玉米品种为“隆玉 58”,采用子母桶栽土培法。子母桶栽土培法分母桶和子桶(均为塑料桶)。母桶内径 35 cm,高 32 cm,埋入地下,上沿高出地面 3 cm;子桶内径 32 cm,高 32 cm,置于母桶内。子桶底部均匀打有 7 个直径 10 mm 的小孔,并铺有纱网和细砂,以调节下层土壤通气状况和水分条件。子桶中装两根 $\Phi 25$ PVC 管用于灌水(管周围有小孔,管壁裹一层纱网)。每桶中纯 N、纯 P_2O_5 与干土的质量比分别为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。N 肥使用尿素,P 肥使用磷酸二氢钾,其中 N 肥分三次施入,1/3 基施,1/3 拔节追施,1/3 抽雄追施,追施是将 N 肥溶于水通过灌水实现。土壤经自然风干、磨碎,过 5 mm 筛后与磷酸二氢钾、基施尿素混合均匀,分层装入桶中(控制容重为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),每桶装土 19 kg。

1.2 试验设计

试验设灌水模式和覆膜时长 2 个因素。灌水模式(以控制土壤含水率占田间持水率 θ_f 的百分数表示)分全生育期充分灌水($75\% \theta_f \sim 85\% \theta_f$,记为“F”)和分生育期调亏灌水(苗期 $55\% \theta_f \sim 65\% \theta_f$,拔节期 $65\% \theta_f \sim 75\% \theta_f$,抽雄到成熟期 $75\% \theta_f \sim 85\% \theta_f$,记为

“D”);覆膜时长分拔节期揭膜(记为“A”)、抽雄期揭膜(记为“B”)和全生育期覆膜(记为“C”)。试验共 6 个处理,每个处理重复 9 次,合计 54 桶,随机区组排列。为保证出苗,播前各处理均控制土壤含水率为 90% θ_f 。每桶播 5 粒大小基本一致的饱满籽粒,三叶期定苗,每桶留 1 株。从播种到四叶期控制土壤含水率上下限为 85% θ_f 和 75% θ_f ,五叶期开始处理,其他管理按正常进行。2012 年 4 月 10 日播种,8 月 5 日收获;2013 年 4 月 4 日播种,7 月 31 日收获。

1.3 测定项目与方法

- (1) 利用 Type HH2 型土壤水分测定仪进行含水率的测定,严格控制各处理土壤含水率,当含水率降至或接近该处理水分下限即进行灌水,灌水至水分控制上限。用量筒精确量取所需水量,记录每次灌水量。
- (2) 从开始处理到成熟,每隔 3 天用曲管水银地温计测定地面下 5、10 cm 和 15 cm 深度处的土壤温度,测定时间为 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00。在防雨棚附近挂有温度计(1.5 m 高处),每次记录土壤温度的同时,读取当时的环境温度。
- (3) 收获时测定各处理春玉米总干物质质量(地上和地下部分)。
- (4) 观察并记录各处理的生育进程。

(5) 水分利用效率(WUE)为单位蒸散量所生产的总干物质质量。 $WUE = Y/ET$,式中, WUE 为作物水分利用效率($g \cdot mm^{-1}$), Y 为收获时总干物质质量(g), ET 为蒸散量(mm)。

本试验中处理个数随生育期推进逐渐变化,苗期为 2 个处理(覆膜条件下的充分灌水处理和调亏灌水处理,分别记为 F1 和 D1),拔节期为 4 个处理(覆膜条件下的充分灌水处理和调亏灌水处理,揭膜条件下的充分灌水处理和调亏灌水处理,分别记为 F1、D1、F2 和 D2),进入抽雄期后为 6 个处理(FA、FB、FC、DA、DB、DC)。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 软件对试验数据进行处理;DPS7.05 软件进行方差分析,多重比较用 Duncan 法,显著性水平为 $\alpha = 0.05$;采用 OriginPro8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下春玉米土壤温度的动态变化

2.1.1 苗期不同深度处土壤温度的日变化 地膜覆盖一个重要特点是能够提高土壤温度,特别是在作物生育前期能显著提高耕层土壤温度^[25]。图 1 为 2013 年苗期(5 月 10 日)测定的不同处理地面下 5、10 cm 和 15 cm 深度处土壤温度日变化过程。

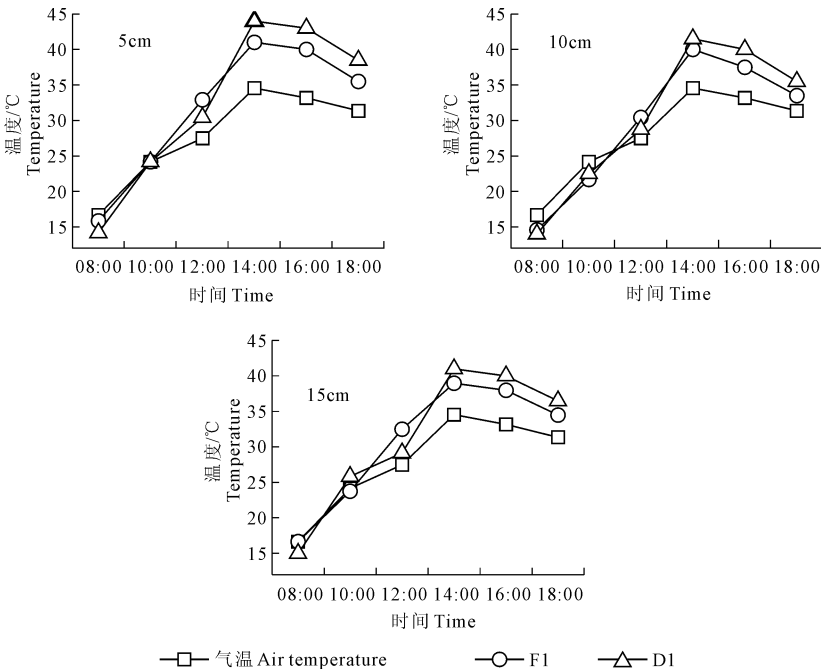


图 1 苗期各处理地面下 5、10 cm 和 15 cm 深度处土壤温度的日变化

Fig.1 Changes of daily soil temperatures at 5, 10 cm and 15 cm depths with each treatment at seedling stage

由图 1 分析知,各处理 3 个深度处土壤温度具有一致的变化趋势,8:00—14:00 土壤温度变化速率

是 3.7 ~ 5.1 $^{\circ}C \cdot h^{-1}$,为快速升温阶段;14:00—16:00 土壤温度变化速率是 0.5 ~ 1.3 $^{\circ}C \cdot h^{-1}$,为相

对稳定阶段;16:00—18:00 土壤温度逐渐下降,降温速率为 $1.8 \sim 2.3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 。各处理 3 个深度处土壤温度与气温的相对关系表现为 8:00—10:00 两者接近,10:00 之后土壤温度高于气温。与充分灌水处理(F1)相比,调亏灌水处理(D1)3 个深度处土壤温度的日变幅均较小,其中 5 cm 深度处差异最大,日变幅分别为 $14.2^{\circ}\text{C} \sim 45.0^{\circ}\text{C}$ (极差为 30.8°C) 和 $15.8^{\circ}\text{C} \sim 42.0^{\circ}\text{C}$ (极差为 26.2°C)。各处理 3 个土层深度处土壤温度与对应时刻气温差变幅表现为 $5\text{ cm} > 10\text{ cm} > 15\text{ cm}$,其中 F1 处理分别为 $-0.8^{\circ}\text{C} \sim 7.5^{\circ}\text{C}$, $-1.1^{\circ}\text{C} \sim 5.5^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.4^{\circ}\text{C} \sim 5.0^{\circ}\text{C}$;D1 处理分别为 $-2.5^{\circ}\text{C} \sim 10.5^{\circ}\text{C}$, $-1.7^{\circ}\text{C} \sim 7.0^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.7^{\circ}\text{C} \sim 6.8^{\circ}\text{C}$ 。对各处理三个深度处 14:00(温度最高)土壤温度和日平均土壤温度进行方差分析发现,两项指标均为 5 cm,显著高于 10 cm 和 15 cm,且后两者无显著差异,可见 0~5 cm 土层是土壤温度变化活跃层。

2.1.2 不同生育期地面下 5 cm 处土壤温度的日变化 在作物不同生育阶段,因受植被覆盖度、土壤水分状况、日照时间及气温等因素的影响,各处理土壤温度差异较大。图 2 为 2013 年各处理不同生育期地面下 5 cm 处土壤温度的日变化过程。

分析可知,苗期土壤温度变化较其他生育期显著,处理间日温差变幅为 $16^{\circ}\text{C} \sim 19.5^{\circ}\text{C}$ 。与充分灌水处理相比,调亏灌水处理的土壤温度日变幅较大,两者分别为 $19.0^{\circ}\text{C} \sim 35.0^{\circ}\text{C}$ 和 $18.0^{\circ}\text{C} \sim 37.5^{\circ}\text{C}$ 。方差分析发现,各处理日平均土壤温度受灌水模式的影响显著 ($F = 86.27$),说明灌水模式是影响苗期土壤温度变化的主要因素。

随生育期推进,各处理土壤温度日变幅减小,处理间差异也逐渐趋同。拔节期是全生育期处理间土壤温度差异最小的时期,日温差变幅为 $10.0^{\circ}\text{C} \sim 13.5^{\circ}\text{C}$ 。在拔节期,部分处理(拔节期揭膜处理)已揭膜,同时调亏灌水水平较苗期有所降低。一定水分条件下,各时刻覆膜处理的土壤温度均高于揭膜处理,变幅为 $0.5^{\circ}\text{C} \sim 2.0^{\circ}\text{C}$ 。调亏灌水时,覆膜处理的日平均土壤温度较揭膜处理提高 8.47% ;充分灌水时,覆膜处理的日平均土壤温度较揭膜处理提高 6.57% 。方差分析发现,日平均土壤温度受灌水模式和覆膜与否的影响均显著(分别为 $F = 34.73$ 和 30.03),而交互作用的影响不显著 ($F = 0.94$)。可见该期土壤温度的变化与灌水模式和覆膜与否均有关。

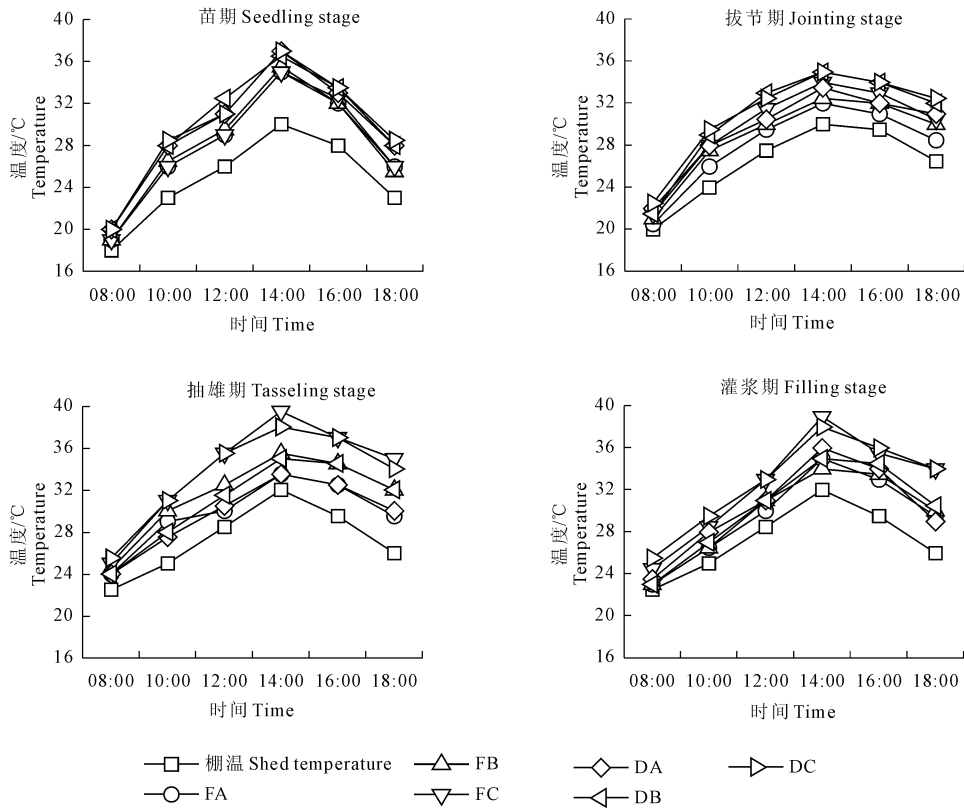


图 2 不同生育期地面下 5 cm 处土壤温度的日变化
Fig.2 Changes of daily soil temperatures at 5 cm depth during whole stages

抽雄期处理间土壤温度差异增大,日温差变幅为 9.5℃~14.5℃。此时,大部分处理(拔节期揭膜处理和抽雄期揭膜处理)已揭膜,同时调亏灌水恢复到充分灌水水平。一定水分条件下,各时刻覆膜处理的土壤温度均高于揭膜处理,最大相差 6℃,两种揭膜处理间土壤温度差异不显著。覆膜时长一定时,两种灌水模式的土壤温度差异较苗期和拔节期有所减小。方差分析发现,日平均土壤温度受覆膜与否的影响显著($F=43.54$),而灌水模式和交互作用的影响不显著(分别为 $F=1.91$ 和 0.88)。覆膜与否是影响该生育期土壤温度变化的主要因素。

灌浆期表层土壤温度受春玉米生长状况的影响,调亏灌水处理复水后产生补偿效应,使植株叶面

积指数与充分灌水处理无显著差异,处理间表层土壤温度也无显著差异。全生育期覆膜处理受覆膜高温和透气性差的影响,衰老加快,土壤温度高于两种揭膜处理,点温差最高达 4.5℃。与抽雄期类似,日平均土壤温度受覆膜与否的影响差异显著($F=92.97$),而灌水模式和交互作用的影响不显著(分别为 $F=0.91$ 和 1.58)。该期土壤温度仍主要与覆膜与否有关。

2.2 各处理春玉米的最高土壤温度和出现时间

拔节期是春玉米营养生长最旺盛的时期,此时适宜的水热环境十分重要。表 1 为拔节期(2012 年 6 月 9 日和 2013 年 6 月 6 日)各处理不同深度土壤温度的最高值和出现时间。

表 1 各处理不同土层深度的最高温度(℃)和出现时间													
Table 1 Maximal temperatures and their appearing times for each treatment at each soil depth													
处理 Treatment	2012						2013						
	5 cm		10 cm		15 cm		5 cm		10 cm		15 cm		
	最高 温度	出现 时间	最高 温度	出现 时间	最高 温度	出现 时间	最高 温度	出现 时间	最高 温度	出现 时间	最高 温度	出现 时间	
	Maximal temperature	Appearing time	Maximal temperature	Appearing time	Maximal temperature	Appearing time	Maximal temperature	Appearing time	Maximal temperature	Appearing time	Maximal temperature	Appearing time	
D1	42.5	14:00	41.0	16:00	39.0	16:00	41.6	14:00	39.0	16:00	38.5	16:00	
D2	40.0	14:00	38.5	16:00	38.0	16:00	37.5	14:00	36.0	16:00	37.0	16:00	
F1	39.5	14:00	37.5	16:00	38.4	16:00	37.0	14:00	37.5	16:00	38.0	16:00	
F2	34.0	14:00	35.5	16:00	37.2	16:00	35.5	14:00	33.0	16:00	35.0	16:00	

由表 1 分析知,2012 年和 2013 年各处理均表现为随土层的加深,土壤温度到达最高值的时间有所推迟,其中 5 cm 处土壤温度最高值均出现在 14:00,而 10 cm 和 15 cm 处土壤温度最高值均出现在 16:00,这可能与土壤热传导梯度有关。

一定覆膜时长下,与充分灌水处理相比,调亏灌水处理的土壤温度最高值较大,2012 年和 2013 年中,5 cm 处分别相差 7.6%~17.6% 和 5.6%~12.2%;10 cm 处分别相差 8.5%~9.3% 和 6.8%~9.1%;15 cm 处分别相差 1.6%~2.2% 和 1.3%~5.7%。一定灌水模式下,3 个深度处土壤温度最高值均表现为覆膜处理大于揭膜处理。方差分析发现,拔节期 5 cm 和 10 cm 深度处土壤温度最高值受覆膜与否的影响显著(2013 年 $F_5=28.52$, $F_{10}=21.63$;2012 年 $F_5=38.62$, $F_{10}=27.60$),而 15 cm 深度处土壤温度最高值受覆膜与否的影响不显著($F_{2012}=3.1$, $F_{2013}=4.4$)。可见覆膜的增温效应主要体现在 0~10 cm 土层范围,当深度大于 10 cm,增温效应不明显。

2.3 不同处理对春玉米生育周期的影响

春玉米在品种、播期、水肥、生长环境等因素相同的条件下,耕层土壤温度是影响其生育期长短和生育进程的主要因素。表 2 为 2012 年和 2013 年各处理春玉米的生育期周期。

两年的试验结果表明,覆膜的增温保墒作用可有效促进早期春玉米的生长(拔节期覆膜处理较揭膜处理提前 1~2 d)。与全生育期覆膜处理相比,适当时期揭膜可避免高温和透气性差等覆膜的缺点,有利于植株后期的生长。调亏灌水处理受前期亏水锻炼,抽雄期复水后产生补偿效应,一定程度上可延缓植株衰老。处理间(DB 和 FC)生殖生长持续时间(抽雄期和灌浆期)最大相差 9 d。延长生育周期,尤其是延长生殖生长周期,对于改善玉米穗部性状,提高籽粒产量和水氮利用效率具有重要作用^[13]。方差分析发现,生育周期受灌水模式和覆膜时长的影响均达到显著性差异(2012 年分别为 $F=22.50$ 和 56.41 ,2013 年分别为 $F=32.90$ 和 66.37),交互作用对全生育期持续时间的影响不显著(2012 年 $F=2.42$,2013 年 $F=3.17$)。

表 2 各处理春玉米的生育周期/d
Table 2 Growth cycles of spring maize under each treatment

时期 Stage	2012						2013					
	FA	FB	FC	DA	DB	DC	FA	FB	FC	DA	DB	DC
苗期 Seedling	42	42	42	41	41	41	43	43	43	42	42	42
拔节期 Jointing	28	27	27	29	27	28	27	26	26	28	26	26
抽雄期 Tasseling	25	27	24	26	27	25	24	26	23	26	27	25
灌浆期 Filling	17	19	16	18	22	16	16	18	15	17	20	16
全生育期 Whole growth stage	112 c	115 b	109 d	114 b	117 a	110 d	110 c	113 b	107 d	113 b	115 a	109 c

注:不同字母表示在 0.05 水平上差异显著,下表同。
Note: Different letters are significant difference at the 0.05 probability levels, and hereinafter.

2.4 各处理收获时干物质量、蒸散量和水分利用效率

表 3 为 2012 年和 2013 年各处理收获时的干物质量、蒸散量、水分利用效率和 *F* 检验值,结合各处理全生育期土壤温度(三个深度)累积日平均值进行分析(由于桶栽试验研究经济产量具有一定的局限

性,所以文中以收获时干物质量表示各处理土壤温度对春玉米生长的影响)。

分析可知,两年中灌水模式、覆膜时长均对收获时干物质量、蒸散量和水分利用效率有显著影响,而交互作用仅对蒸散量有显著影响。

表 3 各处理干物质量、蒸散量、水分利用效率和 *F* 检验值
Table 3 Dry mass, evapotranspiration, WUE and *F* value under each treatment

处理 Treatment	2012						2013					
	FA	FB	FC	DA	DB	DC	FA	FB	FC	DA	DB	DC
干物质量 Dry mass/g	223.6c	255.1a	195.6d	217.7cd	245.1b	190.2d	225.1c	259.6a	200.1d	218.4c	249.8b	192.0d
灌水模式(A) Irrigation mode			7.11						5.72			
覆膜时长(B) Plastic film mulching duration			45.06						41.55			
A × B			0.79						0.66			
蒸散量 Evapotranspiration/mm	522.2a	479.0b	453.8c	487.8b	449.3cd	434.9d	531.6a	486.1bc	461.4c	500.1b	457.9c	437.9d
灌水模式(A) Irrigation mode			10.21						8.04			
覆膜时长(B) Plastic film mulching duration			60.43						78.80			
A × B			7.32						5.66			
WUE/(g·mm ⁻¹)	0.43d	0.53b	0.43d	0.45c	0.55a	0.44cd	0.42d	0.53b	0.43cd	0.44c	0.55a	0.44c
灌水模式(A) Irrigation mode			54.55						48.08			
覆膜时长(B) Plastic film mulching duration			86.23						98.25			
A × B			0.52						0.31			

一定覆膜时长下,与充分灌水处理相比,调亏灌水处理的干物质量较小,除 FB 处理和 DB 处理外其余覆膜时长间均无显著性差异。2012 年整个生育期中,全生育期覆膜处理的土壤温度日平均值(31.9℃)高于拔节期揭膜处理(28.5℃)和抽雄期揭膜处理(30.0℃),与全生育期覆膜处理相比,两种揭膜处理累积降温对春玉米干物质量的效应分别为 16.3 g·℃⁻¹和 60.2 g·℃⁻¹;2013 年整个生育期中,全生育期覆膜处理的土壤温度日平均值(32.5℃)高于拔节期揭膜处理(29.7℃)和抽雄期揭膜处理(30.6℃),与全生育期覆膜处理相比,两种揭膜处理

累积降温对春玉米干物质量的效应分别为 18.4 g·℃⁻¹和 61.8 g·℃⁻¹。

与干物质量相同,处理间蒸散量表现为充分灌水处理大于调亏灌水处理,且同一灌水模式下,随覆膜时间的延长,蒸散量减少。2012 年中,与充分灌水处理相比,调亏灌水处理在 3 种覆膜时长下蒸散量依次减少 7.1%、6.6%和 4.3%;2013 年中,与充分灌水处理相比,调亏灌水处理在 3 种覆膜时长下蒸散量依次减少 6.3%、6.2%和 5.4%。处理间水分利用效率的总趋势表现为调亏灌水处理 > 充分灌水处理,抽雄期揭膜处理 > 拔节期揭膜处理和全生

育期覆膜处理,两年中处理间水分利用效率的极差(FA处理和DB处理)分别为 $0.12\text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $0.13\text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。

3 讨论

本研究采用桶栽以便有效地控制试验条件,但由于桶栽与大田实际环境差异较大,所得结论存在一定的局限性,因此采用子母桶栽土培法,以期试验结果更具有真实性。

不同深度处土壤温度对太阳辐射、气温变化的敏感度有差异。地膜覆盖的增温效果在 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层内最为明显,当深度大于 10 cm 时,其增温效果大大降低^[18,26]。随着土层加深,土壤温度到达最高值的时间相应后移,深度每增加 5 cm ,最高温度出现时间依次滞后约 1 h ^[18]。本研究也得出类似的结果,拔节期覆膜的增温效应主要体现在 $0\sim 5\text{ cm}$ 和 $5\sim 10\text{ cm}$ 两层。各处理 5 cm 处土壤温度最高值均出现在 $14:00$,而 10 cm 和 15 cm 处土壤温度最高值出现时间相同,均为 $16:00$,这可能是大田和桶栽的环境差异引起的,或是试验中测定的土壤温度深度不足导致的。

覆膜较高的土壤水分和温度条件可有效加快作物生育进程。张冬梅等^[27]研究发现,覆膜处理出苗较对照(露地)早 2 d ,拔节、抽雄、灌浆和成熟期平均较对照提前 $9\sim 13\text{ d}$ 。申丽霞等^[26]研究表明,地膜覆盖玉米的出苗期比对照提前 3 d ,生育进程为普通地膜>可降解地膜>露地对照,生育期相应缩短 $12,10,8\text{ d}$ 。本试验中,全生育期覆膜处理的生长周期较两种揭膜处理提前 $3\sim 8\text{ d}$,生殖生长周期较两种揭膜处理提前 $2\sim 9\text{ d}$,而生殖生长周期的延长,对于改善玉米穗部性状,提高籽粒产量和水氮利用效率具有重要作用。

不同水分处理对土壤水热环境的影响不同,而形成不同的产量和水分利用。水分亏缺程度越大,产量越低,拔节后的持续水分亏缺不利于产量的形成,轻度亏水处理与丰水处理相比,产量差异不明显,但可获得较高的产量和水分利用效率^[3,16,19]。本试验结果同样表明,玉米生长前期进行适度水分亏缺是科学合理的,在后期复水可产生补偿效应,与充分灌水处理相比,其最终干物质量无显著差异,但全生育期蒸散量明显降低,从而实现水分的高效利用。

不同作物在不同时期揭膜,其效果不尽相同。

研究发现,从维持土壤肥力、土壤生态条件以及农业可持续发展出发,不提倡全程和长期覆盖地膜,春小麦以播种后覆膜 $30\sim 60\text{ d}$ 为宜;冬小麦虽然覆膜 75 d 和 150 d 相差不显著,但为了减少冬季和春季土壤水分的蒸发损失,在覆膜 150 d 左右(拔节初期)时揭膜比较合适^[10]。综合夏玉米籽粒产量、耗水量和水分利用效率,抽雄期揭膜在不增加水分消耗的前提下增加了产量,进而提高了水分利用率^[13]。本试验结果发现,对春玉米而言,在抽雄期揭膜可趋利避害,是一种合理的覆膜时长。这主要是由于前期覆膜,有助于改善耕层土壤水热状况,减缓水分胁迫。抽雄期植株由营养生长转为生殖生长,是玉米籽粒形成的关键时期,此时气温较高,植株对氧的需求量加大,长期覆膜使根区土壤温度急剧升高,根际土壤通气性变差,造成根系早衰、活性下降,水分和养分利用效率降低。同时抽雄期作物冠层将地面遮盖,覆膜的减蒸作用基本结束,此时揭膜可有效降低作物耕层土壤温度、提高土壤透气性,同时可利用降水补充土壤水分含量。从环保角度考虑,在作物生长的一定时期揭膜可减少土壤的“白色污染”和对农田生态环境的破坏。

4 结论

1) 不同生育期土壤温度的主导影响因子有差异。苗期处理间土壤温度差异最大,灌水模式是影响该期土壤温度变化的主要因素;拔节期处理间土壤温度差异最小,土壤温度变化与灌水模式和覆膜与否均有关;抽穗期和灌浆期的土壤温度变化主要与覆膜与否有关。

2) 前期覆膜的增温保墒作用和调亏灌水复水后的补偿效应均可有效延缓植株衰老。处理间(DB和FC)生育周期最大相差 8 d ,生殖生长持续时间(抽雄期和灌浆期)最大相差 9 d 。

3) 与全生育期覆膜处理相比,拔节期揭膜处理和抽雄期揭膜处理累积降温对春玉米干物质量的效应在2012年分别为 $16.3\text{ g}\cdot\text{℃}^{-1}$ 和 $60.2\text{ g}\cdot\text{℃}^{-1}$,2013年分别为 $18.4\text{ g}\cdot\text{℃}^{-1}$ 和 $61.8\text{ g}\cdot\text{℃}^{-1}$ 。同一灌水模式下,随覆膜时间的延长,蒸散量减少。与充分灌水处理相比,调亏灌水处理在3种覆膜时长(A、B、C)下蒸散量在2012年依次减少 7.1% 、 6.6% 和 4.3% ,2013年依次减少 6.3% 、 6.2% 和 5.4% 。调亏灌水和抽雄期揭膜可获得较高的水分利用效率,两年中处理间水分利用效率的极差(FA处理和DB

处理)分别为 0.12 g·mm⁻¹和 0.13 g·mm⁻¹。

覆膜 + 亏水在春玉米生长前期起二元增温作用,揭膜 + 调亏后复水在春玉米生长后期起二元降温作用,综合考虑土壤温度、生育周期和水分利用效率,调亏灌水 + 抽雄期揭膜组合具有较好的节水增产效果。

参 考 文 献:

[1] Wang D, Shannon M C, Grieve C M, et al. Soil water and temperature regimes in drip and sprinkler irrigation, and implications to soybean emergence[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 43: 15-28.

[2] Kashyap P S, Panda R K. Effect of irrigation scheduling on potato crop parameters under water stressed conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 59(1): 49-66.

[3] 刘玉洁,李援农,潘 韬,等.不同灌溉制度对覆膜春玉米的耗水规律及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 67-72.

[4] Tsutomu Y, Mitsuhiro I, Ichiro K. Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2): 145-155.

[5] 买自珍,程炳文,王 勇,等.麦草与地膜覆盖对玉米田间生态环境及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 66-68.

[6] Niu J Y, Gan Y T, Zhang J W, et al. Post anthesis dry matter accumulation and redistribution in spring wheat mulching with plastic film[J]. *Crop Science*, 1998, 38(6): 1562-1568.

[7] 张 雷,牛建彪,赵 凡.旱作玉米提高降水利用率的覆膜模式研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 8-11, 17.

[8] 李 莎,李援农.种植模式和灌溉对冬小麦生长、产量及品质的影响[J]. *节水灌溉*, 2012, (3): 6-9.

[9] 程炳文,王 勇,罗世武,等.地膜玉米不同处理土壤水分和温度变化规律对产量的影响[J]. *玉米科学*, 2006, 14(1): 144-145, 148.

[10] 沈新磊,黄思光,王 俊,等.半干旱农田生态系统地膜覆盖模式和施氮对小麦产量和氮效率的效应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(1): 1-14.

[11] 李援农,李方红,雷雁斌.膜孔沟灌条件下春玉米水分利用效率研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(5): 84-87.

[12] 王同花,李援农.起垄覆膜沟播对冬小麦土壤水分利用效率及土壤温度的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2011, (1): 46-49.

[13] 蒋耿民,李援农,周 乾.不同揭膜时期和施氮量对陕西关中地区夏玉米生理生长、产量及水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1065-1072.

[14] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63(1): 79-86.

[15] Du T S, Kang S Z, Sun J S, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(1): 66-74.

[16] 王密侠,康绍忠,蔡焕杰,等.调亏对玉米生态特性及产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2000, 28(1): 31-36.

[17] 谭军利,王林权,李生秀.地面覆盖的保水增产效应及其机理研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(3): 50-54.

[18] 陈丽娟,张新民,王小军,等.不同土壤水分处理对膜上灌春小麦土壤温度的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 9-13.

[19] 邹 慧,黄兴法,龚时宏.水分调亏对地下滴灌夏玉米田水热动态的影响[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 72-77.

[20] 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等.沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 97-100.

[21] 杨鹏年,董新光,刘 磊,等.干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 90-95.

[22] 宿俊吉,邓福军,林 海,等.揭膜对陆地棉根际温度、各器官干物质积累和产量、品质的影响[J]. *棉花学报*, 2011, 23(2): 172-177.

[23] 贺润喜,王玉国,赵金鱼.不同生育期揭膜对旱地地膜覆盖玉米生理性状和产量的影响[J]. *山西农业大学学报*, 1999, 19(1): 16-18.

[24] 侯晓燕,王凤新,康绍忠,等.西北旱区民勤绿洲滴灌马铃薯揭膜效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4): 88-92.

[25] 王树森,邓根云.地膜覆盖增温机制研究[J]. *中国农业科学*, 1991, 24(3): 74-78.

[26] 申丽霞,王 璞,张丽丽.可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 111-116.

[27] 张冬梅,池宝亮,黄学芳,等.地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 99-102.