文章编号:1000-7601(2019)02-0044-08 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.02.07

灌溉施肥对河套灌区垄膜沟灌春玉米土壤水热运移的影响

李 成[1,3],冯 浩[2,3],董勤各[2,3]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探究灌溉施肥对河套灌区垄膜沟灌条件下土壤水热时空分布规律及春玉米产量的影响,于 2017 年 4-9 月,以春玉米"西蒙 6 号"为材料,通过 4 次垄膜沟灌试验,分别对比研究了 400 mm(I1),300 mm(I2),200 mm(I3)灌水和 600 kg·hm^{-2}磷酸二铵+300 kg·hm^{-2}尿素(F1),300 kg·hm^{-2}磷酸二铵+150 kg·hm^{-2}尿素(F2)施肥组合,即高水高肥(I1F1)、高水低肥(I1F2)、中水高肥(I2F1)、中水低肥(I2F2)、低水高肥(I3F1)、低水低肥(I3F2)等 6 个处理对土壤水分、温度时空变化的影响,并分析了春玉米产量及其水分利用状况。结果表明:整个生育期内各处理土壤温度和含水率受灌溉影响较大,每次灌溉后土壤温度显著降低,而土壤含水率显著升高;整个生长季内 300 mm 灌水处理不同土层土壤温度均最高,比 I3、I1 处理分别高 0.1℃、0.6℃;其中 I2F2 处理不同土层土壤含水率比 I1F1、I1F2 处理分别低 8.3%、9.2%,比 I2F1、I3F1、I3F2 处理分别高 1.6%、11.1%、14.1%,为作物生长发育提供了良好的水热环境。I2F2 水肥处理亦显著提高了玉米产量,与低水处理 I3F2 和 I3F1 相比分别提高了 33.80%和 21.95%,与高水处理(I1)无显著差异。因此,中水低肥处理适于春玉米垄膜沟灌种植模式在河套灌区的推广。

关键词:垄膜沟灌;春玉米;水热运移;产量;水分利用效率;河套灌区

中图分类号:S513;S275.3 **文献标志码**:A

Effects of irrigation and fertilization on water and temperature variation of spring maize under plastic-mulching ridge-furrow irrigation in the Hetao Irrigation District

LI Cheng[1,3],FENG Hao[2,3],DONG Qin-ge[2,3]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*,*Northwest A&F University*,*Yangling*,*Shaanxi* 712100,*China*;
2. *Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China*,*Northwest A&F University*,*Yangling*,*Shaanxi* 712100,*China*;
3.*Institute of Water and Soil Conservation*,*Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource*,*Yangling*,*Shaanxi* 712100,*China*)

Abstract: In order to better understand the spatial and temporal distribution of soil water,soil temperature,and the yield characteristics of spring maize under plastic-mulching ridge-furrow irrigation in the Hetao Irrigation District, 4 field irrigation experiments were conducted from April to September in 2017 to determine the effects of the following treatments: high water and high fertilizer (I1F1),high water and low fertilizer (I1F2), medium water and high fertilizer (I2F1), medium water and low fertilizer (I2F2),low water and high fertilizer (I3F1),low water and low fertilizer (I3F2) on soil moisture,soil temperature,water use efficiency and the yield of spring maize. The amount of irrigation water were 400 mm(I1),300 mm(I2) and 200 mm(I3), respectively. The two fertilization levels were 600 kg·hm^{-2} diamine phosphate plus 300 kg·hm^{-2} urea(F1), 300 kg·hm^{-2} diamine phosphate plus 150 kg·hm^{-2} urea (F2), respectively. The results showed that the irrigation had great influence on soil water and temperature properties. Soil temperature decreased significantly while soil water content increased significantly after each irrigation. The 300 mm of irrigation resulted in the highest soil temperature in every layer throughout the grow-

收稿日期:2018-02-28 **修回日期**:2019-03-14

基金项目:国家自然科学基金(51609237);"十三五"国家重点研发计划(2016YFC0400205);国家高技术研究发展计划(863 计划)(2013AA102904);中科院"西部之光"(XAB2015B04);中央高校基本科研业务费专项资金(2452016104)

作者简介:李成(1992-),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向为水土资源高效利用。E-mail: lcxinong@163.com

通信作者:董勤各(1982-),男,河南南阳人,博士,助理研究员,主要从事畦沟灌节水技术、土壤水盐运移模拟研究。E-mail: qgdong2011@163.com

ing season that was 0.1℃ and 0.6℃ higher than that of I3 and I1, respectively. The soil water content of I2F2 was 8.3% and 9.2% lower than that of I1F1 and I1F2, respectively and was 1.6%, 11.1% and 14.1% higher than that of I2F1, I3F1 and I3F2, respectively, which provided a good soil water and temperature environment for crop growth and development. The treatment of I2F2 also significantly improved the yield of maize that was significantly higher by 33.80% compared with I3F2 and 21.95% compared with I3F1, but, no significant difference over high water treatment I1. The soil water, soil temperature, yield of spring maize, and water use efficiency in I2F2 treatment were optimal for the production of spring maize under plastic-mulching ridge-furrow irrigation in the Hetao Irrigation District.

Keywords: plastic-mulching ridge-furrow irrigation; spring maize; water and temperature variation; yield; water use efficiency; the Hetao Irrigation District

内蒙古河套灌区是我国重要的粮油生产基地,但该区干旱少雨,蒸发强烈,气温变化幅度大,极易造成作物减产,严重影响灌区农业的可持续发展[1-2]。近年来,随着灌溉面积的增加和引黄配额的减少[3],当地水资源日益短缺,水污染状况日益加剧。因此,探索怎样缓解河套灌区农业亩均用水减少与气温变幅大所造成作物减产的问题,建立适宜河套灌区作物生长的良好水热环境具有重要实践意义。

土壤水热特性与农田耕作方式有直接关系。合理的耕作措施可以为作物生长发育创造适宜的水热环境,是保证作物持续高产、稳产的关键措施之一。有研究表明,地膜覆盖能够改善土壤的水热环境,降低土壤水分的无效蒸发和热量散失,提高作物产量[4-7]。由于覆膜的保温保墒抑盐特性[5,7-9],河套灌区春玉米广泛采用覆膜种植。沟灌是一种低成本高产出的资源节约型灌溉模式[10],由于其开沟培土以及前期不灌溉的特点,使得玉米根系更发达。此外,沟灌入渗效果好,灌水量相对较少且基本无深层渗漏,肥料被培土掩埋利于作物吸收,不易流失[11-12]。集覆膜与沟灌优点于一体的垄膜沟灌种植技术具有增温保墒、提高作物水分利用效率、促进作物生长发育的作用[4,9,13-17],具有良好的应用前景。马树庆等[18]研究表明,地膜覆盖可以提高田间土壤温度,使玉米生育期提前,提高光合产物积累量。马忠明等[19]研究表明,起垄覆膜较无膜对照处理 0~25 cm 土层土壤日平均温度提高 2.0℃,起垄覆膜种植模式具有明显的增温保墒作用。李波等[20]研究表明,河套灌区垄膜沟灌种植模式有利于番茄根区形成良好的水热环境,促进番茄生长发育,获得较高的产量。然而,鲜有针对河套灌区垄膜沟灌条件下土壤水热运移规律及春玉米产量特征的研究成果。

本研究采用垄膜沟灌种植技术,通过设置不同灌溉和施肥水平,分析不同处理对垄膜沟灌土壤水热运移特征的影响,研究土壤水热变化规律,明确河套灌区垄膜沟灌条件下春玉米产量特征,为提高河套灌区灌溉水利用效率、改善农田土壤水热环境、保障春玉米产量提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验田位于内蒙古巴彦淖尔市水利科学研究所曙光试验站(40°46″N,107°24″E),地面高程 1 039 m,属干旱半干旱气候区,全年日照充足,降水量集中,蒸发强烈,空气干燥,昼夜温差较大。试验站多年平均气温 7.8℃,降雨量 105 mm,蒸发量 2 306.5 mm。无霜期 160 d,年日照时数 3 156 h。试验区土壤属于黄河灌淤土,质地主要为沙壤土,耕层平均土壤容重 1.43 g·cm^{-3},土壤有机质质量分数 7.26 g·kg^{-1},全氮质量分数 105.36 mg·kg^{-1},速效磷质量分数 55.82 mg·kg^{-1},速效钾质量分数 120.49 mg·kg^{-1},土壤盐分质量分数 1.19 g·kg^{-1}。地下水埋深2.5 m 左右,0~100 cm 土层土壤田间持水量 26.96%。

1.2　试验设计

垄膜沟灌试验种植时间为 2017 年 4-9 月,供试作物为春玉米。垄沟规格:垄顶宽 50 cm,垄底宽 70 cm,垄高 20 cm,沟底宽 50 cm,垄长 13 m。设置 3 种灌水水平:400 mm(I1)、300 mm(I2)、200 mm(I3);2 种施肥水平(高肥、低肥),高肥为 600 kg·hm^{-2}磷酸二铵+300 kg·hm^{-2}尿素(F1),低肥(F2)施肥量减半。共 6 个处理,分别为高水高肥(I1F1)、高水低肥(I1F2)、中水高肥(I2F1)、中水低肥(I2F2)、低水高肥(I3F1)、低水低肥(I3F2)。每个处理 3 个重复,共计 18 个小区,每个小区 3 条垄沟。每列重复间留 2 m 宽小路,方便灌水与操作。

播前取土,测定初始土壤含水率、土壤容重等指标。

供试玉米品种为西蒙 6 号,地膜为高压聚乙烯膜,厚度 8 μm。每垄种植 2 行玉米,行距 40 cm,株距 30 cm。2017 年 4 月 25 日播种,播前施肥、起垄、覆膜,采用人工穴播,播种深度 5 cm。灌浆期追肥,高肥追尿素 150 kg · hm^{-2},低肥施肥量减半。灌水时间分别为 5 月 31 日、7 月 2 日、7 月 29 日、8 月 17 日。

1.3 测定指标与方法

土壤含水率与地温:采用 TRIME-TDR 时域反射仪测定含水率,测定深度分别为:0~10 cm,10~20 cm,20~40 cm,40~60 cm,60~80 cm,80~100 cm;每 7 d 测定 1 次,灌溉前后加测 1 次。地温计埋设在各小区垄背 5 cm,10 cm,15 cm,20 cm,25 cm 处,分别于 08∶00、14∶00、20∶00 读取地温计读数,每 3 d 读取 1 次。

植株生长状况及产量构成:株高、叶面积、茎粗、地上部干物质量、鲜重,分别在玉米出苗、拔节、抽雄、灌浆、成熟期测量。收获时每个小区随机取 10 个果穗,测定其产量、千粒重、穗粒数、穗长、直径、鲜重等。

采用水量平衡法计算全生育期春玉米耗水量,即蒸散量(evapotranspiration, ET,mm)

$$ET=\Delta W+P+I+G-R-F \quad (1)$$

式中,ΔW 为播种期与收获期土壤储水量之差(mm);P 为生育期有效降水量(mm),如果降雨量小于当日参考蒸发蒸腾量的 0.2 倍,视为无效降雨;I 为玉米生育期的灌水量(mm);G 为生育期地下水对作物根系的补给量(mm);R 为生育期地表径流量(mm),如试验区地势平坦则无地表径流产生;F 为生育期根区深层渗漏量(mm),假定降雨或灌溉先补给根系层土壤水分至田间持水量,多余的水分即为深层渗漏损失量,计算方法为:

灌水(或降水)前 100 cm 土层内有效土壤含水率+灌水量(或降水量)−田间持水量。

玉米水分利用效率(WUE,kg · hm^{-2} · mm^{-1})计算公式为:

$$WUE=Y/ET \quad (2)$$

式中,Y 为单位面积玉米产量,kg · hm^{-2}。

1.4 统计分析方法

试验数据采用 Excel 2016 进行数据整理,采用 Sigmaplot 12.0 绘图,并用 SPSS 对数据进行单因素方差分析,采用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉与施肥水平对垄膜沟灌土壤水分的影响

2.1.1 土壤水分垂向空间分布特征 图 1 为播种前与收获后各处理土壤体积含水率的垂向空间分布特征。由图 1 可知播前及收获后各处理土壤体积含水率由表层到深层逐渐增加。除 I1 灌水处理 80~100 cm 土层外,其它处理收获后各土层土壤体积含水率较播前均有所减少,I1 处理土壤体积含水率高于其它灌水处理,I3 处理最低。相同灌水不同施肥处理间土壤含水率相差较小。对比播前及收获后不同处理 0~100 cm 土层土壤贮水量可知,I1F1 和 I1F2 处理平均土壤含水率较播前分别增加 1.1% 和 4.0% ,而 I2F1、I2F2、I3F1、I3F2 处理分别减少 19.1%、17.8%、30.9%、24.2%,相差较大。

2.1.2 土壤水分时间变化特征 图 2 为 2017 年春玉米生育期内各土层不同处理土壤体积含水率随时间的变化过程。由图 2 可以看出,各土层土壤体积含水率的变化趋势较为一致,第 1 次灌水后含水率达到最大,之后变化较平缓。每次灌水后,不同处理间各土层土壤体积含水率先变大,之后逐渐减小。0~20 cm 土层全生育期内 I1 灌水处理土壤体积含水率较大,平均土壤含水率较 I2、I3 分别高 6.52%、12.39%,各灌水处理间 F2 施肥处理土壤体积含水率较 F1 大,各处理间相差较小。20~60 cm 土层全生育期内 I1 灌水处理土壤体积含水率最大,I3 最小,各灌水处理间 F2 施肥处理土壤体积含水率较 F1 大,不同处理间相差较大。60~100 cm 土层

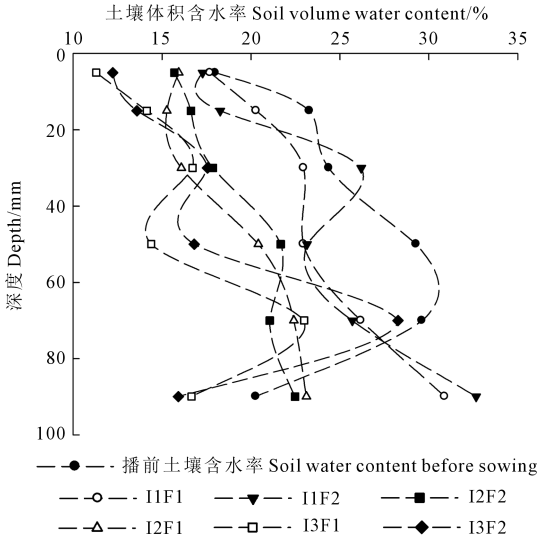
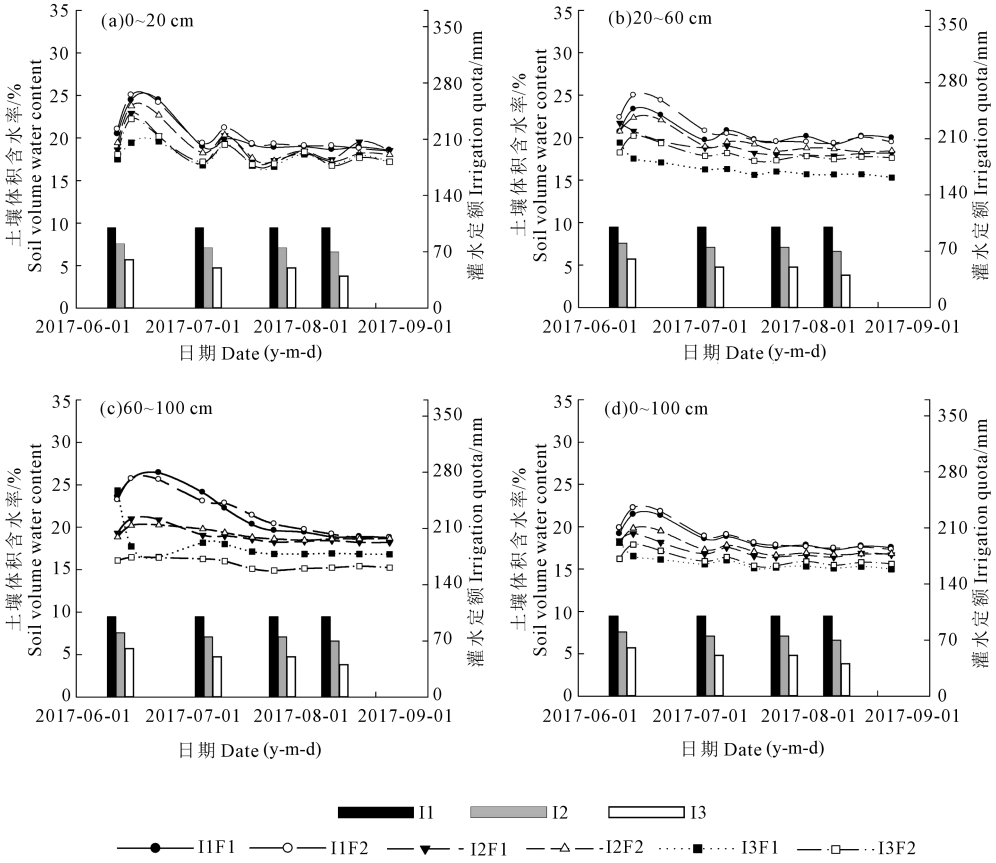


图 1 播前及各处理收获后不同土层土壤体积含水率的变化

Fig.1 Change of soil volume water content before sowind and after harvesting of each treatment in different soil layers



注:折线表示土壤体积含水率,柱状图表示灌水量。

Note: The dash lines are soil volume water content and the bars are the amount of irrigation.

图 2　春玉米生育期内各土层不同处理土壤体积含水率随时间的变化

Fig.2　Variation of soil volume water content with time in different soil layers under different treatments during spring maize growth season

全生育期内 I1 灌水处理土壤体积含水率最大,平均土壤含水率较 I2、I3 分别高 13.57%、29.32%,I3 最小;各灌水处理间 F2 施肥处理土壤体积含水率较 F1 大,不同灌水处理间相差较大。春玉米出苗-拔节期 0~100 cm 土层平均土壤体积含水率 I1F2 处理最大,且各灌水处理间差异较大,I1F2 较 I1F1、I2F1、I2F2、I3F1、I3F2 分别高 1.23%、9.58%、7.27%、19.65%、17.27%。灌浆成熟期 0~100 cm 土层各处理间土壤体积含水率相差不大,各灌水处理间 F2 施肥处理较 F1 大。全生育期 0~100 cm 土层 I2F2 处理土壤含水率比 I1F1、I1F2 处理分别低 8.3%、9.2%,比 I2F1、I3F1、I3F2 处理分别高 1.6%、11.1%、14.1%。

2.2　不同灌溉水平对垄膜沟灌土壤温度的影响

2.2.1　土壤温度的时空分布特征　土壤温度是影响作物生长发育的重要因素之一[21]。图 3 为 2017 年春玉米生育期内不同灌水处理平均土壤温度随时间的变化过程,经过单因素方差分析,各灌水处理间均无显著性差异。可以看出,不同灌水处理下土壤温度随时间变化趋势大致相同。玉米生长前期各处理土壤温度均较低,这与当地气温有关。春季多风且气温较低,之后土壤温度逐渐升高,拔节期、抽雄期土壤温度均处于较高状态,I2 处理高于其它处理,I1 处理最低。随着生育期的推进,各处理玉米叶面积逐渐增大,到达地面的太阳辐射减少,土壤温度逐渐降低,但 I2 处理仍处于最高,I1 处理低于其它处理。每次灌水后,各处理平均土壤温度明显降低。全生育期内, I2 灌水处理平均土壤温度最高,较 I3、I1 处理分别高 0.1℃、0.6℃,I1 处理最低。

图 4 为春玉米整个生育期内不同灌水处理间不同土层的平均土壤温度,经过单因素方差分析,各灌水处理间均无显著性差异。表层土壤(0~5 cm) I2 和 I3 灌水处理间差异不大,均高于 I1 灌水处理,分别高 0.3℃、0.4℃。5~20 cm 土层 I2 处理土壤温度均高于其他处理,较 I3、I1 处理分别高 0.3℃、0.7℃,I1 处理最低。20~25 cm 土层 I3 处理平均土壤温度最高,较 I2、I1 处理分别高 0.3℃、0.6℃,I1 处

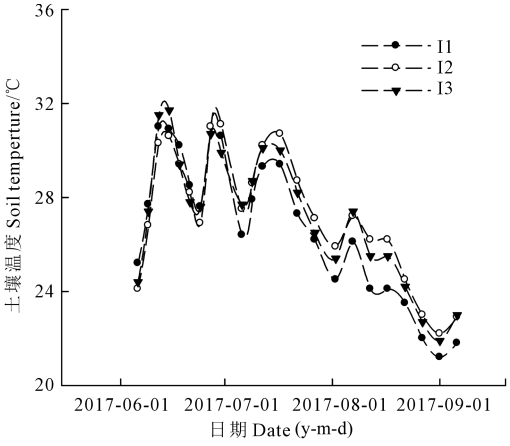


图 3 春玉米生育期内不同灌水处理平均土壤温度随时间的变化

Fig.3 Variation of soil average temperature with time under different irrigation treatments during spring maize growth season

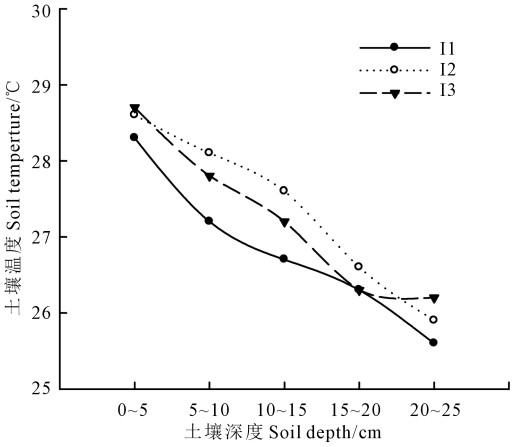


图 4 春玉米生育期内不同灌水处理平均土壤温度随深度的变化

Fig.4 Variation of soil average temperature with depth under different irrigation treatments during spring maize growth season

理最低。随着土层深度的增加,各灌水处理间平均土壤温度逐渐降低。由土壤温度的时空分布特征可知,土壤温度在时空上均为 I2 处理最高,I1 处理最低,这可能与灌溉水量及灌溉水的温度有关。

2.2.2 土层积温的时间变化特征 玉米 0~25 cm 深度土壤温度在适宜的范围内有利于作物的生长发育,土壤积温按 0~25 cm 土层中大于 10℃的有效积温计算。不同灌水处理下春玉米各生育期 0~25 cm 土壤积温和总积温的变化如表 1 所示。由表 1 可以看出不同灌水处理间不同生育期积温及总积温均表现出显著性差异。除苗期外,I2 处理积温显著高于其他处理,I1 处理积温最低。I2、I3 处理土壤积温较 I1 处理拔节期分别高1.04%、0.70%,抽雄期分别高 3.83%、2.44%,灌浆期分别高 5.58%、3.98%,成熟期分别高 4.61%、4.15%,总积温分别高 2.63%、2.11%。

2.3 垄膜沟灌土壤水热耦合效应

整个生长季各处理 0~100 cm 土层土壤体积含水率随时间动态变化趋势基本相同(图 2d),I1 灌水处理最高,同一灌水处理间 F2 施肥处理较 F1 高。由图 3 可知各处理土壤温度随时间的动态变化趋势相同。土壤温度和土壤含水率均随时间的变化呈现一定的波动,灌溉对其影响较大,每次灌溉后都出现较大波动。全生育期 4 次灌水,每次灌水后各处理土壤含水率都逐渐变大,然后又逐渐减小,无论是灌水前还是灌水后 I1 处理含水率都高于其他处理。每次灌溉后各处理土壤温度均下降,之后逐渐升高,无论是灌水前还是灌水后 I1 处理土壤温度都低于其他处理。

表 1 春玉米生育期内不同灌水处理土壤 0~25 cm 土层积温的变化/℃

Table 1 Variation of accumulated soil temperature in 0~25 cm layer under different irrigation treatments during spring maize growth season

处理 Treatment	苗期 Seeding	拔节期 Jointing	抽雄期 Heading	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing	总积温 Accumulated temperature
I1	346.8a	1291.5c	487.9c	577.3c	759.5c	3463c
I2	338.4c	1305.0a	506.6a	609.5a	794.5a	3554a
I3	344.4b	1300.5b	499.8b	600.3b	791.0b	3536b

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the same below.

表 2 不同处理对春玉米产量、耗水量(ET)及水分利用效率(WUE)的影响

Table 2 Effects of different treatments on grain yield, evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) of spring maize

处理 Treatment	穗行数 Kernel row number	行粒数 Kernel number per row	千粒重 1000-kernel weight/g	产量/(kg·hm^{-2}) Grain yield	ET/mm	WUE/(kg·hm^{-2}·mm^{-1})
I1F1	17a	44a	374.5a	14678a	449.23a	32.67a
I1F2	18a	43a	383.1a	14689a	447.88a	32.80a
I2F1	19a	41b	329.5b	12718a	393.69b	32.30a
I2F2	17a	39c	333.3b	12526a	390.88b	32.05a
I3F1	17a	39c	309.5b	10275b	301.34c	34.10a
I3F2	18a	38c	274.4c	9361c	286.30c	32.69a

2.4　垄膜沟灌春玉米产量及水分利用效率分析

不同水肥处理下玉米产量性状如表 2 所示。穗行数 I2F1 处理最高,各处理间无显著差异。行粒数 I1F1 处理最高,不同灌水处理间差异显著,同一灌水量下不同施肥处理间无显著性差异。千粒重 I1 灌水处理最大,I1F1 处理较 I2F1、I3F1 分别高 13.66%、21.00%,不同灌水处理间差异显著,同一灌水量下不同施肥处理间无显著性差异。I1 灌水处理产量最高,与 I2 灌水处理无显著性差异,均显著高于 I3 灌水处理,I1、I2 灌水处理间不同施肥处理无显著性差异,而 I3F1 处理产量则显著高于 I3F2 处理,其中 I1F2、I2F2 处理较 I3F2 处理分别增产 56.9%、33.8%。

整个生长季内各灌水处理间作物耗水量差异显著,I1 处理最高,I3 处理最低,同一灌水处理不同施肥处理间差异不显著。水分利用效率各处理间均无显著性差异。

3　讨　论

水热条件是影响作物生长发育,提高作物产量和水分利用效率的重要因素[22]。起垄能够增加土层的厚度,改善土壤通气条件,改变地表热量平衡,易于提高表层土壤温度。覆膜可以蓄水保墒,抑制蒸发,改善作物水分状况[9,23-27]。农田起垄覆膜后,地表接收太阳辐射面积增大,利于表层土壤温度提高及热量向深层土壤传递[24,28-33],且能明显增加地表温度,防止热量扩散,促进作物生长发育,提高作物产量[6,16,24,34-36]。

各处理 0~100 cm 土层土壤体积含水率均为收获后低于播种前。I1 灌水处理含水率高于其他处理,I3 灌水处理含水率最低,而不同施肥处理间相差较小。可见,灌水量是影响土壤体积含水率的主要因素,这与张忠学等研究结果类似[37]。由于河套灌区降雨量小,因此土壤含水率的时空分布主要受灌溉水量的影响[38]。各处理不同土层土壤水分动态变化规律整体相似。其中,0~20 cm、20~60 cm 土层土壤体积含水率随灌水呈现明显的变化,表层起伏更明显,而 60~100 cm 土层变化幅度较小,此结论与 Dong 等前期研究结果类似[39]。受灌水量影响,I1 灌水处理条件下,0~100 cm 土层体积含水率一直较高。由于后期作物耗水量增大,因此玉米生长后期 I3 灌水处理土壤体积含水率低于其他灌水处理。另外,各处理浅层土壤水分生育期内变化明显,深层土壤含水率基本不受灌溉的影响。

由土壤温度时空分布特征可知,整个生育期内土壤温度在时空上均为 I2 灌水处理最高,I1 灌水处理最低。同时,不同处理不同生育期的积温及总积温具有相同规律。随着土层深度增加,各处理土壤温度逐渐降低。各处理土壤温度和含水率受灌溉影响较大,每次灌溉后土壤温度逐渐降低,而土壤含水率逐渐升高。土壤温度的变化是太阳辐射平衡、土壤热量平衡和土壤热学性质相互作用共同影响的结果,灌水引起的土壤水分变化直接影响土壤热力学性质[21,28,36,40]。当土壤含水率增加时,其导热率变小,不利于土壤温度上升,土壤温度变化小[41-42],加之灌溉水为地下水,所以导致土壤温度降低。

春玉米 I1、I2 灌水处理间产量无显著差异,均显著高于 I3 灌水处理,各灌水处理间 F1、F2 施肥处理无显著差异,而 I3F1 产量显著高于 I3F2 处理。作物耗水量 I3 灌水处理最低,I1 灌水处理最高,同一灌水处理下不同施肥处理对作物耗水量无显著影响。I1 灌水处理条件下,千粒重显著高于其他灌水处理,I1、I2 灌水处理间不同施肥处理对其无显著影响,而 I3F1 处理显著高于 I3F2 处理。可见水分对春玉米产量性状的影响高于施肥,这与王鹏勃等[43]的研究结果一致。然而,当灌水量不足时,施肥量对作物产量影响显著。

有研究表明,灌溉增加了土壤体积含水率从而增加土壤热容量,进而影响土壤热传导和温度变化[44],导致土壤温度和土壤含水率呈负相关关系。本研究采用地膜覆盖技术,在增加土壤体积含水率的同时实现土壤温度的同步提高,减缓了其负相关性。综合土壤温度、土壤含水率及其对春玉米产量性状的影响,I2F2 处理在节水节肥的前提下既保证了适宜作物生长的水分和温度又保证了最终的水分利用效率和产量,对春玉米垄膜沟灌种植模式在河套灌区的推广具有一定的指导意义。

4　结　论

垄膜沟灌种植模式下各灌溉施肥处理的浅层土壤水分在春玉米生育期内变化明显,深层土壤水分基本不受灌溉的影响。整个生育期 0~100 cm 土层 I2F2 处理土壤含水率比 I1F1、I1F2 处理分别低 8.3%、9.2%,比 I2F1、I3F1、I3F2 处理分别高 1.6%、11.1%、14.1%。整个生长季内不同深度、不同生育

期土壤温度均为 I2 灌水处理最高,I1 处理最低。随着土层深度增加,土壤温度逐渐降低。整个生育期内各处理土壤温度和含水率受灌溉影响较大,每次灌溉后土壤温度显著降低,而土壤含水率显著升高。灌溉对土壤含水率及春玉米产量性状的影响高于施肥,垄膜沟灌种植模式减缓了土壤水分和温度的负相关性。

综上,垄膜沟灌种植模式下 I2F2 处理土壤含水率在整个生育期内都保持较高水平,土壤保温效果明显,为玉米生长提供了适宜的土壤水热环境。同时,I2F2 处理显著提高了玉米产量,与 I3F2 相比提高 33.80%,与 I3F1 相比提高 21.95%,与 I1 处理无显著差异。本研究为春玉米垄膜沟灌种植模式在河套灌区的推广提供了一定的理论依据。

参 考 文 献:

[1] 彭振阳,伍靖伟,黄介生.内蒙古河套灌区局部秋浇条件下农田水盐运动特征分析[J].水利学报,2016,47(1):110-118.

[2] 王海梅.高温胁迫对河套灌区玉米生理指标及产量构成要素的影响[J].干旱气象,2015,33(1):59-62.

[3] 孟春红,杨金忠.河套灌区秋浇定额合理优选的试验研究[J].中国农村水利水电,2002,(5):23-25.

[4] Liu X E,Li X G,Hai L,et al. How efficient is film fully-mulched ridge-furrow cropping to conserve rainfall in soil at a rainfed site [J]. Field Crops Research,2014,169:107-115.

[5] Wang H,Wang C,Zhao X,et al. Mulching increases water-use efficiency of peach production on the rainfed semiarid Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management,2015,154:20-28.

[6] 王有宁,王荣堂,董秀荣.地膜覆盖作物农田光温效应研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):134-136.

[7] 杜社妮,白岗栓.玉米地膜覆盖的土壤环境效应[J].干旱地区农业研究,2007,25(5):56-59.

[8] 张德奇,廖允成,贾志宽.旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):208-213.

[9] Ghosh P K,Dayal D,Bandyopadhyay K K,et al. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut [J]. Field Crops Research, 2006, 99 (2): 76-86.

[10] 方彦杰.旱地全膜双垄沟种植对土壤温度及玉米产量的影响[J].浙江农业科学,2012,1(7):942-944.

[11] 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):118-122.

[12] 任小龙,贾志宽,韩清芳,等.半干旱区模拟降雨下沟垄集雨种植对夏玉米生产影响[J].农业工程学报,2007,23(10):45-50.

[13] 马丽,李潮海,付景,等.垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响[J].生态学报,2011,31(23):7141-7150.

[14] 段喜明,吴普特,白秀梅,等.旱地玉米垄膜沟种微集水种植技术研究[J].水土保持学报,2006,20(1):143-146.

[15] 吕殿青,邵明安,王全九.垄沟耕作条件下的土壤水分分布试验研究[J].土壤学报,2003,40(1):147-150.

[16] 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.

[17] Choudhary V K,Bhambri M C,Pandey N,et al. Effect of drip irrigation and mulches on physiological parameters, soil temperature,picking patterns and yield in capsicum (*Capsicum annuum* L.)[J]. Archives of Agronomy & Soil Science,2012,58(3):277-292.

[18] 马树庆,王琪,郭建平,等.东北地区玉米地膜覆盖增温增产效应的地域变化规律[J].农业工程学报,2007,23(8):66-71.

[19] 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.

[20] 李波,屈忠义,王昊.河套灌区覆膜沟灌对加工番茄生长效应与品质的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):43-47.

[21] 陈继康,李素娟,张宇,等.不同耕作方式麦田土壤温度及其对气温的响应特征—土壤温度日变化及其对气温的响应[J].中国农业科学,2009,42(7):2592-2600.

[22] Yu K,Dong Q G,Chen H X,et al. Incorporation of pre-treated straw improves soil aggregate stability and increases crop productivity[J]. Agronomy Journal,2017,109(5):2253-2265.

[23] 李儒,崔荣美,贾志宽,等.不同沟垄覆盖方式对冬小麦土壤水分及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2011,44(16):3312-3322.

[24] 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.

[25] 任小龙,贾志宽,陈小莉.不同模拟雨量下微集水种植对农田水肥利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(3):75-81.

[26] Li X Y,Gong J D. Effects of different ridge:furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management,2002,54(3):243-254.

[27] Rahman M A,Chikushi J,Saifizzaman M,et al. Rice straw mulching and nitrogen response of no-till wheat following rice in Bangladesh[J]. Field Crops Research,2005,91(1):71-81.

[28] 任小龙,贾志宽,陈小莉,等.模拟降雨量下沟垄微型集雨种植玉米的水温效应[J].中国农业科学,2008,41(1):70-77.

[29] 杨封科.旱作春小麦垄膜沟种微集水种植技术研究[J].灌溉排水学报,2004,23(4):47-49.

[30] Zhang S,Li Q,Ying L,et al. Conservation tillage positively influences the microflora and microfauna in the black soil of Northeast China[J]. Soil & Tillage Research,2015,149:46-52.

[31] 王红丽,张绪成,宋尚有,等.西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J].中国农业科学,2013,46(5):917-926.

[32] 李荣,王敏,贾志宽,等.渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J].农业工程学报,2012,

28(2):106-113.

[33] 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.

[34] 蔡承智.不同地表处理下坡地土壤温度变化对玉米产量的影响[J].耕作与栽培,2001,(6):41-43.

[35] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.覆膜耕作方式对河套灌区土壤水热效应及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2016,32(20):108-113.

[36] 冯浩,刘匣,余坤,等.不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):192-202.

[37] 张忠学,张世伟,郭丹丹,等.玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J].农业机械学报,2017,48(9):206-214.

[38] Ren D, Xu X, Hao Y, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River basin: application to maize, sunflower and watermelon[J]. Journal of Hydrology, 2016, 532: 122-139.

[39] Dong Q G, Yang Y, Zhang T, et al. Impacts of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salinity, spring maize yield and water use efficiency in an arid saline area[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201(3): 268-277.

[40] 刘任涛,朱凡,陈林.降雨增加对沙质草地土壤温度的影响[J].土壤通报,2015,46(2):348-354.

[41] Hillel D. Introduction to environmental soil physics[J]. Soil Science, 2004, 170(12): 1051-1052.

[42] 皇甫红旺,晋华.含水率对土壤热物性参数影响的试验研究[J].节水灌溉,2016,(10):55-58.

[43] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等.水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2015,48(2):314-323.

[44] 常旭虹,赵广才,孟祥云,等.农牧交错区保护性耕作对土壤含水量和温度的影响[J].土壤,2006,38(3):328-332.

(上接第 9 页)

[60] Mousa W K, Adrian S, Jeffrey D, et al. An endophytic fungus isolated from finger millet (*Eleusine coracana*) produces anti-fungal natural products[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6: 1-16.

[61] Koltai H. Strigolactones´ ability to regulate root development may be executed by induction of the ethylene pathway[J]. Plant Signaling and Behavior, 2011, 6(7): 1004-1005.

[62] Barac T, Taghavi S, Borremans B, et al. Engineered endophytic bacteria improve phytoremediation of water-soluble, volatile, organic pollutants[J]. Nature Biotechnology, 2004, 22(5): 583-588.

[63] Berg G, Smalla K. Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere [J]. Fems Microbiology Ecology, 2009, 68(1): 1-13.

[64] 刘润进,唐明,陈应龙.菌根真菌与植物抗逆性研究进展[J].菌物研究,2017,(1):70-88.

[65] 于小娟,胡玉金,刘润进.真菌与植物共生机制研究进展[J].微生物学杂志,2017,37(1):98-104.

[66] Weaver J E. Root development of field crops[J]. Nature, 1926, 118 (118): 258-259.

[67] 张喜英.作物根系与土壤水利用[M].北京:气象出版社,1999.

[68] Welbank P J, Williams E D. Erratum: Root growth of a barley crop estimated by sampling with portable powered soil-coring equipment [J]. Journal of Applied Ecology, 1968, 5(2): 477.

[69] Bates G H. A device for the observation of root growth in the soil[J]. Nature, 1937, 139(3527): 966-967.

[70] Sanders J L, Brown D A. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions [J]. Agronomy Journal, 1978, 70(6): 1073-1076.

[71] Upchurch D R, Ritchie J T. Root observations using a video recording system in mini-rhizotrons [J]. Agronomy Journal, 1983, 75 (6): 1009-1015.

[72] 吴长高,罗锡文.计算机视觉技术在根系形态和构型分析中的应用[J].农业机械学报,2000,31(3):63-66.

[73] 胡秀娟,汤晓华.植物根系图象监测分析系统的设计[J].林业机械与木工设备,2003,31(11):24-25.

[74] 罗锡文,周学成,严小龙,等.基于 XCT 技术的植物根系原位形态可视化研究[J].农业机械学报,2004,35(2):104-106.

[75] 向子云,罗锡文,周学成,等.多层螺旋 CT 三维成像技术观测植物根系的实验研究[J].CT 理论与应用研究,2006,15(3):1-5.

[76] Schulz H, Postma J A, Dusschoten D V, et al. Plant root system analysis from MRI images[J]. Communications in Computer and Information Science, 2013, 359: 411-425.

[77] 温维亮,郭新宇,赵春江,等.作物根系构型三维探测与重建方法研究进展[J].中国农业科学,2015,48(3):436-448.

[78] 潘晓迪,张颖,邵萌,等.作物根系结构对干旱胁迫的适应性研究进展[J].中国农业科技导报,2017,19(2):51-58.

[79] Wright S F, Anderson R L. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 31(3-4): 249-253.

[80] Graham J H. What do root pathogens see in mycorrhizas? [J]. New Phytologist, 2001, 149(3): 357-359.