

# 灌溉定额对膜下滴灌春玉米土壤水热空间分布及产量的影响

王克全<sup>1,2</sup>,王国栋<sup>1,2</sup>,梁 飞<sup>1,2\*</sup>,曾胜和<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农垦科学院 农田水利与土壤肥料研究所,新疆 石河子 832000; 2. 农业部作物高效用水石河子科学观测实验站,新疆 石河子 832000)

**摘要:** 为了确定新疆膜下滴灌春玉米适宜的灌溉定额,设置了4 200(T1)、4 800(T2)、5 400(T3)、6 000(T4) m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 4种灌溉定额进行田间小区灌溉试验,利用ET-60测定仪测定各处理下的土壤水分和土壤温度状况,研究了不同灌溉定额对膜下滴灌春玉米土壤水热空间分布及产量的影响。结果表明,玉米根系土壤湿润区随灌溉定额的增大而增大,当灌溉定额为4 800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,仅能保持滴头下玉米根层10~30 cm土壤水分状况良好。土壤水分在水平方向运移距离较短,湿润区范围较小。灌溉定额在5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,在垂直方向10~60 cm、水平方向0~30 cm土层均能保持较好的土壤水分状况,但当灌溉定额为6 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时会出现土壤水分的无效深层下渗,因此灌溉定额为5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>较适宜。土壤温度的空间分布状况与土壤水分的分布状况具有较强的负相关性,即土壤水分高的土层区域土壤温度较低,灌溉定额越大,对根系土壤温度的影响区域就越大。各灌水处理下的土壤温度分布在垂直方向上总体呈由高到低的变化趋势,其中,30~60 cm深度范围各灌水处理下水平方向分布较均匀,各灌水处理土层温度大小为T1>T2>T3>T4。穗干质量、茎干质量、叶干质量以及生物量总体随灌溉定额增大而增大,灌溉定额过低不利于玉米干物质积累。穗长、穗粗、行粒数和百粒质量与灌溉定额总体呈正相关,各处理穗行数无显著差异,籽粒产量也随着灌溉定额的增大而增大,灌溉定额为5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>的处理产量最高,达18 697.5 kg/hm<sup>2</sup>。根据拟合的产量与灌溉定额的关系曲线,当灌溉定额为5 867 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,理论产量最高,可达19 798 kg/hm<sup>2</sup>。  
**关键词:** 灌溉定额; 新疆; 膜下滴灌; 春玉米; 水热分布; 产量

中图分类号: S275.6;S513      文献标志码: A      文章编号: 1004-3268(2017)11-0025-06

## Effects of Irrigating Quota on the Farmland Soil Water-Heat Spatial Distribution and Yield of Spring Maize under Mulched Drip Irrigation

WANG Kequan<sup>1,2</sup>, WANG Guodong<sup>1,2</sup>, LIANG Fei<sup>1,2\*</sup>, ZENG Shenghe<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science, Shihezi 832000, China; 2. Experimental Station for Crop Water Use of Ministry of Agriculture, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** In order to ascertain the suitable irrigating quota under mulched drip irrigation for spring maize in Xinjiang, a field plot irrigation experiment with 4 irrigating quota treatments[4 200(T1), 4 800(T2), 5 400(T3), 6 000(T4) m<sup>3</sup>/ha] was carried out. Soil moisture and temperature of all treatments were measured by ET-60 to study the effects of different irrigating quotas on the spatial distribution of soil water-heat and yield. The results showed that the soil humid area of maize roots increased with the irrigating quota. When the irrigating quota was 4 800 m<sup>3</sup>/ha, soil moisture under 10 to 30 cm of maize root was in good condition. The spread of soil moisture in the horizontal direction was relatively short, and the wet area was small. When the irrigation quota was 5 400 m<sup>3</sup>/ha, soil moisture condition showed good in

收稿日期:2017-05-09  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(31460550);兵团科技攻关与成果转化计划项目(2016AC008)  
作者简介:王克全(1983-),男,河南宁陵人,助理研究员,硕士,主要从事节水灌溉技术研究。E-mail:120753380@qq.com  
\* 通讯作者:梁 飞(1984-),男,河北张北人,副研究员,在读博士生,主要从事滴灌施肥技术研究。E-mail:liangfei3326@126.com

both the vertical direction from 10 to 60 cm and the horizontal direction from 0 to 30 cm. When the irrigation quota was 6 000 m<sup>3</sup>/ha, water would move into deep soil layer ineffectively. Hence the suggested irrigation quota was 5 400 m<sup>3</sup>/ha. The spatial distribution of soil temperature had a strong negative correlation with the distribution of soil moisture, and the soil temperature would be impacted in more scale under higher irrigating quota. Distribution of soil temperature in the vertical direction under different irrigation treatments showed an overall trend of ranging from high to low, and the temperature in the horizontal direction of 30—60 cm was equally distributed which was T1 > T2 > T3 > T4. Dry weight of spike, stem, leaves and above-ground biomass increased with the irrigation quota, and low irrigating quota was harmful to the accumulation of maize dry matter. The spike length, ear diameter, row grains and 100-grain weight were positively correlated with the irrigation quota, however, ear rows of all treatments showed no obvious difference. The yield increased with the increase of irrigation quota. When the irrigating quota was 5 400 m<sup>3</sup>/ha, spring maize had the highest production of 18 697.5 kg/ha. According to the fitted curve of yield and irrigation quota, when the irrigation quota is 5 867 m<sup>3</sup>/ha, the theoretical yield is the highest, reaching 19 798 kg/ha.

**Key words:** irrigating quota; Xinjiang; mulched drip irrigation; spring maize; water-heat distribution; yield

土壤水分和温度是影响作物生长的重要土壤环境参数,为农田节水研究中的主要评价指标,对农业节水的生产决策起到重要作用<sup>[1]</sup>。灌溉可调整土壤中的水、肥、气、热等环境参数,土壤水热是作物生长必需的环境因素<sup>[2-4]</sup>,与土壤类型、耕作方式<sup>[5]</sup>、栽培和灌溉管理措施等有关。土壤水热变化直接影响到土壤呼吸、养分分解等,对作物生长有着显著影响<sup>[6-9]</sup>。李彩霞等<sup>[10]</sup>研究表明,与常规沟灌相比,交替隔沟灌溉具有控墒调温作用,有利于根区土壤水分的高效利用,促进根区土温的均匀分布。膜下滴灌技术是覆膜与滴灌技术相结合的高效节水灌溉技术,近 20 a 来在新疆得到大面积推广应用,玉米膜下滴灌技术是北疆地区针对实际生产需求,在棉花膜下滴灌技术的基础上发展而兴起的,是对粮食作物灌溉方式的一次改革。然而,滴灌条件下,的土壤水、热分布与传统灌溉条件下有较大差异,不同滴灌灌溉定额和灌水频率对土壤水热分布及产量必然产生不同影响。已有研究<sup>[11-13]</sup>表明,春玉米抽雄期以前实施的滴灌各处理中,高频滴灌下土壤平均含水率和不同深度土壤基质势波动幅度较小,高频滴灌下土壤水分能保持在一个比较稳定的范围;土壤温度受灌水过程、土壤含水率及作物生育阶段的影响较明显,滴灌能显著延迟气温对土壤温度的影响。张昊等<sup>[14]</sup>研究表明,膜下滴灌条件下,玉米土壤水分运移变化多在 60 cm 土层以上,0~20 cm 土层变化最为明显。新疆地处西北干旱区,常年干旱少雨,土壤水热分布状况受灌溉定额的影响较大,而当前灌溉定额对新疆膜下滴灌玉米土壤水热空间分布状况的影响研究还鲜见报道,为此,于 2016 年在新疆地区开展膜下滴灌玉米田间小区灌溉试验,研究不同灌溉定额对膜下滴灌玉米根层土壤水热空间分布状况及产量的影响,为揭示膜下滴灌玉米土壤水热

特征对滴灌灌溉定额的响应机制提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2016 年 5—9 月在农业部作物高效用水石河子科学观测实验站进行。区域属典型干旱半干旱大陆性气候,降水稀少、空气干燥、光热集中,年均气温 6.5~7.2℃,多年平均降雨量 115 mm,蒸发量 1 942 mm。实验站内安装有自动气象站,可获得每日气象数据。实验田为灌耕灰漠土,地力均匀,耕层土壤有机质含量 7.14 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 34.30、18.00、130.50 mg/kg, pH 值为 8.2, 0~60 cm 土层土壤平均容重 1.60 g/cm<sup>3</sup>, 平均田间持水率 17.7%, 平均饱和含水率 20.73%, 凋萎含水率 9.73%; 2016 年度玉米生育期(5—9 月)内有效降雨量为 124 mm, 最高温度 39.9℃, 最低温度 13.9℃, 平均温度 22.4℃。

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为郑单 958。试验设 4 个灌溉定额水平: 4 200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T1 处理)、4 800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T2 处理)、5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T3 处理)、6 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T4 处理), 随机区组设计, 每个处理重复 3 次, 共 12 个小区, 小区规格为 20 m×5.5 m, 采用 80 cm+30 cm 宽窄行种植, 株距 14.4 cm, 种植密度 12.5 万株/hm<sup>2</sup>, 一膜一管 2 行种植模式, 单翼迷宫式滴灌带布置于窄行中间, 滴头间距 30 cm, 滴头流量为 2.0 L/h, 各小区内种植 10 行作物, 外侧 2 行为保护行。滴灌处理采用单独施肥装置, 每个小区分别装有独立的水表和压力表。灌水时间、灌水量和肥料(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别为 300、90、45 kg/hm<sup>2</sup>) 施用比例及次数按照生育时期进行分配(表 1、表 2)。其他田间管理措施与常规管理模式保持一致。

表 1 各滴灌处理玉米主要生育时期的灌水量 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>

处理	灌溉定额	出苗期	拔节期	小喇叭口期	大喇叭口期	抽雄期	开花期	籽粒建成期	乳熟期	蜡熟期
T1	4 200	270	508	508	508	508	508	508	452	430
T2	4 800	310	580	580	580	580	580	580	520	490
T3	5 400	350	652	652	652	652	652	652	588	550
T4	6 000	388	725	725	725	725	725	725	650	612

表 2 各滴灌处理玉米主要生育时期的施肥量 kg/hm<sup>2</sup>

施肥种类	出苗期	拔节期	小喇叭口期	大喇叭口期	抽雄期	开花期	籽粒建成期	乳熟期
尿素	0	82	82	90	82	82	72	55
磷酸一铵	36	36	46	46	46	27	18	18
硫酸钾	0	18	27	27	37	23	18	14

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水率与土壤温度 每个试验小区采用 3 根智墒 ET-60 土壤水分温度管式测定仪(北京东方润泽生态公司)实时(每 2 h 存储 1 次数据)测定土壤水分状况(体积含水率)和土壤温度,第 1 根测管靠近滴头,第 2 根水平方向距离滴头 15 cm,第 3 根水平方向距离滴头 30 cm,在每个测管垂直下方 10、20、30、40、50、60 cm 深度处各布置 1 个水分温度传感器。

1.3.2 干质量 收获期每个小区随机取 10 株玉米植株,在实验室洗净烘干,105 ℃ 杀青,80 ℃ 烘干,称量穗干质量、茎干质量、叶干质量等生物量指标。

1.3.3 产量及产量构成因素 成熟期每小区选取一膜两行,果穗全部收获,计产(含水率按 14% 计),

考种,选定 20 株测定穗长、穗行数、行粒数、穗粗、百粒质量等产量构成指标。

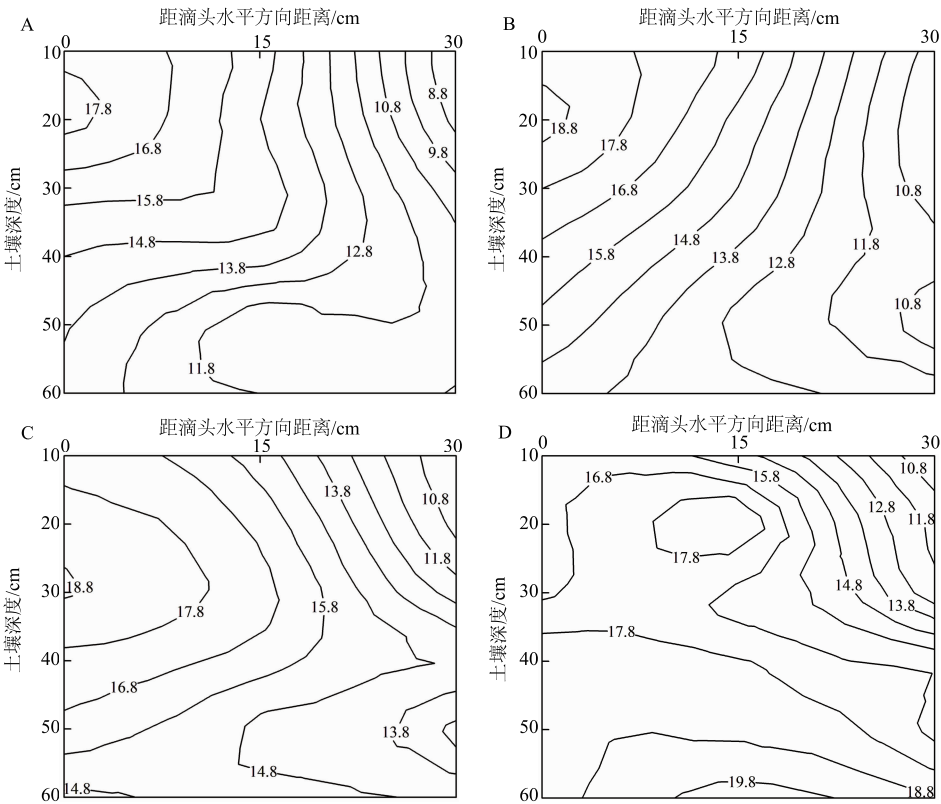
1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 16.0 对试验数据进行方差分析和差异显著性检验(α = 0.05, LSD 法);图表采用 Origin 8.6 绘制。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理下土壤水分空间分布状况

为明确不同灌溉定额处理下土壤水分的空间分布状况,选取膜下滴灌春玉米大喇叭口期灌水后 1 d 垂直方向上 10~60 cm 土层、水平方向上 0~30 cm 土层的土壤含水率进行分析。各处理下灌水后的土壤含水率分布状况如图 1 所示。由图 1 可知,各处



A、B、C、D 分别代表 T1、T2、T3、T4 处理,下同

图 1 各处理灌水后 10~60 cm 土层土壤含水率(%)的空间分布状况

理滴头下垂直方向上 10 ~ 30 cm 土层土壤含水率均较高,4 个处理之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ),说明在这一土层内灌水量对水分垂直方向上的运移影响较小;而在水平方向上,土壤含水率较高(大于 16%)的覆盖范围随着灌水量的增加而越来越大。较低灌溉定额的 T1、T2 处理只能保持水平方向 15 cm 范围内土壤处于较高的水分状况,而水平方向超过了 15 cm 的土壤含水率较低,不利于作物的生长发育,T3、T4 处理无论是垂直方向上还是水平方向上,土壤均具有较好的水分状况,土壤含水率处于田间持水量的 80% ~ 90%,为作物生长提供了较好的水分环境。30 ~ 60 cm 深度土层无论是垂直方向上还是水平方向上土壤含水率均随灌水量的增加而增加,除 T4 处理外,其他处理土壤含水率随土壤深度逐渐变小,其中 T3、T4 处理在 30 ~ 50 cm 土层差异较小,而在 50 cm 以下土层 T4 处理土壤含水率继续增高。

较高的灌水定额增加了土壤水分的下渗能力, T4 处理灌水定额过大而产生了土壤水分的深层渗漏,故 T3 处理(灌溉定额 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)能够使玉米根层垂直方向上 10 ~ 50 cm、水平方向上 0 ~ 30 cm 土层保持较好的水分状况,且没有出现水分的深层渗漏,为较适宜的灌溉定额。

2.2 不同灌水处理下土壤温度空间分布状况

土壤温度是关系作物生长的重要土壤环境参数,土壤温度过高或过低都会直接影响到作物根系

的生长发育,进而影响地上植株的生长,最终导致作物产量降低。地膜覆盖与滴灌技术结合有效增加了土壤温度,抑制了土壤水分蒸发,明显改善了土壤水热条件,同时灌水对土壤温度的调节作用也较为明显,灌水定额的大小对土壤温度的分布具有重要影响<sup>[3,15-16]</sup>。图 2 为膜下滴灌春玉米大喇叭口期不同灌水处理下灌水 1 d 后垂直方向上 10 ~ 60 cm 土层、水平方向上 0 ~ 30 cm 土层土壤温度的空间分布状况,从各处理下土壤温度的分布情况来看,灌溉对土壤温度分布的影响比较明显。随着水分在土壤中的运移差异,土壤温度的分布情况也有所不同。由于灌溉水为井水,水温不足 15 ℃,在高温季节滴灌湿润区范围内对春玉米根层土壤温度有调节作用,4 种灌水处理下的浅层(10 ~ 30 cm)土壤温度分布在垂直方向上总体呈由高到低的变化趋势,这是由于灌水结束后,土壤水分不断向下运移和消耗,浅层土壤温度受气温(当日最高气温 31.1 ℃,最低气温 18.7 ℃)影响较大,故灌水后土壤温度较高,水平方向上则是距离滴灌带水平距离越远,土壤温度越高,这与上述不同灌水处理下土壤水分的分布状况具有很大的相关性,说明灌溉对土壤具有降温的作用,土壤温度随土壤含水率的增大逐渐降低。各灌水处理下 30 ~ 60 cm 深度范围内水平方向上温度分布较均匀,土层温度大小总体上表现为 T1 > T2 > T3 > T4,垂直方向上,各处理土温分布状况随土层深度

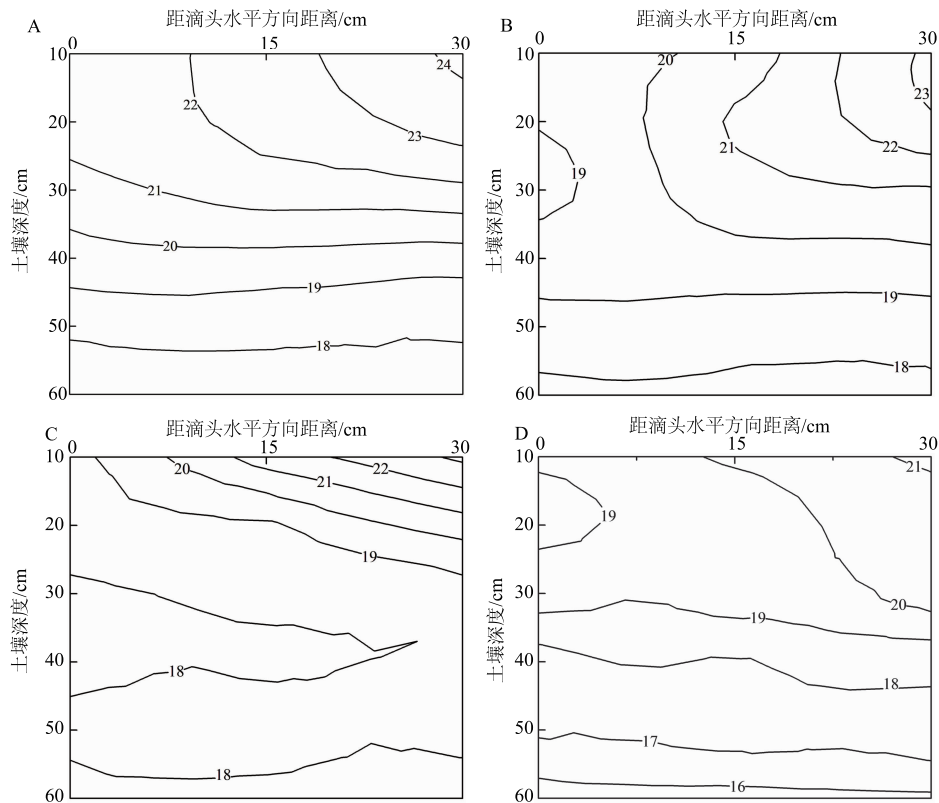


图 2 各处理灌水后 10 ~ 60 cm 土层土壤温度(℃)的空间分布状况

增加而降低,T4 处理最低达 16 ℃,这可能是由于 50 ~ 60 cm 土层温度较低,T4 处理灌水定额较高,水分渗漏至该土层,导致土壤温度更低,这对玉米根系生长发育将产生不利影响,而 T3 处理 50 ~ 60 cm 土层土壤温度与 30 ~ 50 cm 土层相差不大,土壤温度分布状况较好,有利于玉米的生长。

2.3 不同灌水处理对春玉米产量及生物量的影响

由表 3 可见,穗长、穗粗、行粒数均以 T1 处理最小,与 T2、T3、T4 处理存在显著差异,而 T2、T3、T4 处理间无显著差异;百粒质量以 T1 处理最小,T3 处理最大,T3 与 T4 处理差异不显著,但 T3 处理显著高于 T1、T2 处理;4 个处理下的穗行数无显著差异。说明灌水对穗长、穗粗、行粒数和百粒质量有较大影响,

各籽粒产量构成指标均随着灌水定额的增加总体呈增长趋势,T3 处理下产量构成指标总体表现最高。

T3、T4 处理穗干质量差异不显著,但显著高于 T2、T1 处理,这说明灌溉定额的高低对穗干质量的影响较大,穗干质量随灌溉定额的升高而增大;T2、T3、T4 处理茎干质量差异不显著,但显著高于 T1 处理,可见,T1 处理对茎秆干物质积累产生了不利影响;T2 处理叶片干质量最高,与 T3、T4 处理差异不显著,但显著高于 T1 处理;生物量与穗干质量的表现一致,均随灌溉定额的升高而增大,T1、T2、T4 处理间差异显著,T3 处理与 T2、T4 处理差异均不显著;各干质量指标与灌溉定额总体上呈正相关,灌溉定额过低不利于玉米干物质积累。

表 3 不同灌水处理下玉米的产量和生物量指标

处理	灌溉定额/ (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数/个	行粒数/个	百粒质量/g	穗干质量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	茎干质量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	叶干质量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	生物量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	籽粒产量/ (kg/hm <sup>2</sup> )
T1	4 200	12.93b	4.38b	13.95a	29.30b	36.16b	15 200c	5 812b	6 462bc	27 474c	16 102.5c
T2	4 800	13.93a	5.07a	14.25a	30.30a	36.83b	21 175b	8 672a	8 043a	37 890b	17 082.0b
T3	5 400	13.94a	5.05a	14.18a	30.75a	38.97a	24 437a	8 045a	7 450ab	39 932ab	18 697.5a
T4	6 000	13.84a	4.96a	13.90a	30.75a	37.97ab	26 037a	8 020a	7 183ab	41 240a	18 028.8ab

注:同列不同字母表示处理间在 5% 水平上差异显著。

玉米籽粒产量随灌水定额的增加呈抛物线形增长趋势,T3 处理产量最高,T1 处理显著低于 T2、T3、T4 处理,T2 处理与 T4 处理差异不显著,但显著低于 T3 处理,T4、T3 处理间无显著差异。以籽粒产量为因变量(Y),灌溉定额为自变量(X),得到拟合回归方程为: $Y = -18\,063 + 12.907X - 0.001\,1X^2$ ,  $R^2 = 0.89$ 。灌溉定额为 5 867 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时,理论产量最高, $Y_{\max} = 19\,798\text{ kg/hm}^2$ 。因此,从籽粒产量情况来看,该地区滴灌春玉米适宜灌溉定额应该介于 5 400 ~ 6 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

3 结论与讨论

玉米作为公认的高耗水作物,其根层土壤水热状况对植株的生长发育和生理作用具有重要影响,最终决定了产量的高低,而土壤水热分布状况与灌溉定额的大小密切相关。本试验通过设置不同灌溉定额的灌水处理,研究其对滴灌玉米土壤水热分布状况的影响,当灌溉定额低于 4 800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时,仅能保持滴头下玉米根层垂直方向 10 ~ 30 cm 土壤水分状况良好,土壤水分在水平方向运移距离较短,湿润区范围较小。灌溉定额在 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 以上时,在垂直方向 10 ~ 60 cm、水平方向 0 ~ 30 cm 土层均能保持较好的土壤水分状况,但灌溉定额过高 ( $\geq 6\,000\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) 会出现土壤水分的无效深层下

渗,因此灌溉定额为 5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 较适宜。土壤温度的空间分布状况与土壤水分的分布状况具有较强的负相关性,即土壤水分高的土层区域土壤温度较低。灌溉定额越大,对根系土壤温度的影响区域就越大,这与上述不同灌水处理下土壤水分的分布状况具有很大的相关性,说明灌溉对土壤具有降温作用,土壤温度随土壤含水率的增大而逐渐降低,这与李彩霞等<sup>[10]</sup> 的研究结论基本一致,但王建东等<sup>[11]</sup> 研究表明,灌溉在一定程度上具有保温作用,这可能与灌溉水源温度和气温的差异有关。

本研究结果表明,滴灌玉米穗干质量、茎干质量、叶干质量以及地上部分总生物量总体上均随灌溉定额的增大而增大,灌溉定额过低不利于玉米干物质积累。从籽粒产量构成指标来看,穗长、穗粗、行粒数和百粒质量与灌溉定额的增加总体呈正相关,籽粒产量也随着灌溉定额的增大而增大,与 T4 处理相比,T3 处理平均籽粒产量增加 3.7%,这说明适宜的灌溉定额有利于玉米增产,灌溉定额过高反而不利于产量的提高,这与前人的研究结果<sup>[12]</sup> 吻合。根据拟合的产量灌溉定额关系曲线,当灌溉定额为 5 867 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时,理论产量最高,可达 19 798 kg/hm<sup>2</sup>。

(下转第 41 页)