

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.015

水分调亏对地下滴灌夏玉米田水热动态的影响*

邹慧¹ 黄兴法² 龚时宏³

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;
3. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048)

【摘要】 通过北京地区地下滴灌夏玉米田间试验,研究了前期不同程度水分亏缺对土壤水热和夏玉米冠层温度、株高、叶面积指数及产量的影响。结果表明:在20~60 cm土层,除重度亏水处理外,其他处理的土壤含水率均在高位平稳变化;在60~100 cm土层,丰水处理的土壤含水率最大;对不同深度的土层,轻度与中度亏水处理两者间的土壤含水率差异较小。受作物覆盖度和亏水程度的影响,拔节期各处理间土壤温度和冠层温度有明显差异;在较浅土层(距地表30 cm和50 cm处)中,拔节期之前丰水处理的土壤温度较低,拔节期之后各处理间差异逐渐减小;在较深土层(距地表80 cm处)中,水分亏缺程度越大,土壤温度越高。轻度亏水处理能获得较高的产量,中度亏水处理能提高水分利用效率。

关键词: 夏玉米 地下滴灌 调亏灌溉 水热动态 水分利用效率

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0072-06

Effects of Water Deficit on Soil Moisture and Temperature Regimes in Subsurface Drip Irrigated Summer Corn Field

Zou Hui¹ Huang Xingfa² Gong Shihong³

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract

In order to study the effects of regulated water deficit irrigation on soil moisture and temperature regimes in summer corn field of North China under subsurface drip irrigation, soil moisture and temperature, as well as canopy temperature, plant height, leaf area index, yield of summer corn in the whole growth stage were analyzed on the basis of a field experiment in Beijing. The results showed that the treatments, except for severe water deficit treatment, kept soil moistures in 20 ~ 60 cm soil layer within a high and stable range; soil moistures for the well-watered control were higher than that for other water deficit treatments in 60 ~ 100 cm soil layer; in all different soil layers, soil moistures had little differences for low and moderate water deficit treatments. Influenced by the degree of crop cover and water deficit, differences of soil temperatures and canopy temperatures among treatments were remarkable in the jointing stage; in upper soil layers (30 ~ 50 cm), soil temperatures for the well-watered control were lower than those for other water deficit treatments before the jointing stage, but the differences among treatments were reduced after that; in deeper soil layers (80 cm), the higher the deficit degree was, the higher the soil temperature would be. Finally, low water deficit treatment had higher corn yields, and moderate water deficit treatment greatly raised irrigation water use efficiency.

Key words Summer corn, Subsurface drip irrigation, Deficit irrigation, Soil moisture and temperature regimes, Water use efficiency

收稿日期: 2011-10-17 修回日期: 2012-02-14

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA100213)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11B02)

作者简介: 邹慧, 博士生, 主要从事节水灌溉、土地资源管理研究, E-mail: babybluezou@163.com

通讯作者: 黄兴法, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: huangxingfa@cau.edu.cn

引言

地下滴灌灌水过程主要靠毛管作用浸润土壤,灌溉水的运动方向与形式明显不同于地面灌溉。同时,由于地下滴灌直接而精确地将水分运送到作物根区,减少了土壤与外界的水分和潜热交换,对土壤的水热环境产生了影响^[1-3]。王建东等^[3-4]研究了滴灌灌水频率对玉米生长和土壤水热分布的影响。王洪源等^[5]根据滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响,提出了适宜的滴灌模式和灌水下限。目前,滴灌和调亏灌溉是应用较广的2种节水灌溉技术,把滴灌和调亏灌溉结合起来是滴灌研究的一个重要方向^[6]。但在地下滴灌条件下,考虑土壤水分亏缺对农田水热的调控作用,以此确定适宜北京地区地下滴灌夏玉米的最优调亏灌溉模式的研究相对较少。因此,研究地下滴灌不同亏水处理对土壤水热状况的影响是十分必要的。

本文在对北京地区地下滴灌夏玉米调亏灌溉试验的基础上,探讨地下滴灌不同亏水处理对土壤水热动态及夏玉米产量的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于2008年6月~10月期间在北京市大兴

区中国水利水电科学研究院试验基地的防雨棚下进行。该基地处于北纬39°39',东经116°15'。田间土壤0~100 cm深度为壤土,试验田土壤物理性状如表1,平均田间持水率和容重分别为30.58%和1.59 g/cm³。夏玉米于2008年6月份种植,种植行距为60 cm,株距为30 cm,7月28日每个小区均匀追施尿素225 kg/hm²,10月2日进行采收考种。为保证出苗和土壤初始含水率基本相同,在种植夏玉米以前,每个试验小区灌水1.5 m³。

试验设置4个处理(见表2,表中FC指田间持水率),每个处理设置3个重复,各处理小区随机布置。每个处理小区的尺寸为4.5 m×5 m。灌水采用Netafim滴灌带,额定流量为1.1 L/h,滴头间距为30 cm。滴灌带的布置间距为60 cm,滴灌带埋深为25 cm,每行玉米布置一条滴灌带。试验共设置3个调亏水平,分别为重度、中度、轻度亏水处理,以及1个丰水处理。水分调亏主要在夏玉米的出苗—拔节和拔节—抽穗两个阶段实施,此时土壤湿润层深度分别设定为40 cm和60 cm;4个处理的灌水上限分别选择为田间持水率的60%、75%、100%、100%,灌水下限分别选择为田间持水率的40%、50%、60%、75%。其余阶段,各处理采取统一的灌水控制上下限。

表1 试验地土壤物理性状

Tab.1 Soil physical properties of the experimental plot

参数	土层深度/cm					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
颗粒质量分数/%	0~0.002 mm	10.83	11.67	16.17	16.17	16.17
	0.002~0.05 mm	45.57	43.17	40.97	43.17	37.83
	0.05~1 mm	43.67	45.17	42.86	40.67	46.00
容重/g·cm ⁻³	1.41	1.61	1.65	1.65	1.63	
田间持水率/%	28.73	30.17	31.49	30.55	31.98	
饱和含水率/%	42.17	42.49	39.87	46.36	41.49	

表2 灌水处理设计

Tab.2 Irrigation treatments

夏玉米 生育期	湿润层深度/cm	丰水处理	轻度亏水处理	中度亏水处理	重度亏水处理
		灌水下限;灌水上限	灌水下限;灌水上限	灌水下限;灌水上限	灌水下限;灌水上限
播种—出苗	40	播前灌 67 mm	播前灌 67 mm	播前灌 67 mm	播前灌 67 mm
出苗—拔节	40	75% FC;FC	60% FC;FC	50% FC;75% FC	40% FC;60% FC
拔节—抽穗	60	75% FC;FC	60% FC;FC	50% FC;75% FC	40% FC;60% FC
抽穗—灌浆	60	75% FC;80% FC	75% FC;80% FC	75% FC;80% FC	75% FC;80% FC
灌浆—成熟	60	65% FC;80% FC	65% FC;80% FC	65% FC;80% FC	65% FC;80% FC

1.2 测试项目

(1)土壤含水率:根据土壤墒情监测规范,在每个小区中间安装1根长为100 cm的探管,埋设于滴

头的正下方,采用TDR土壤水分测定系统,每20 cm一层进行土壤水分连续测定,测量深度达100 cm。土壤水分每3 d测定一次,另外在每次灌水前天傍

晚和灌水后 12 h 各加测一次。

(2) 土壤温度: 采用中国科学院寒区与旱区环境工程研究所研制的土壤温度采集系统进行连续监测, 测量深度分别是滴灌带正上方 5 cm, 正下方 5、25、55 cm, 滴灌带埋深为 25 cm。

(3) 冠层温度: 在旺盛生长季节(7月中旬至收获), 选择晴朗天气, 使用美国 Raytek 公司生产的 ST60 便携式红外测温仪进行测定, 测定时间为 8:00 到 18:00, 每 2 h 测定一次。

(4) 株高、叶面积: 各小区选取 5 株代表株, 定期用尺子测定株高和叶面积, 每个生育期一次。测量同时选出能代表不同尺寸的叶片, 带回室内用 WinFolia 叶面积分析软件实测每个叶片的叶面积, 并根据皮尺测定叶片的长和宽, 计算实际叶面积和叶片长宽乘积的经验关系。按计算所得的叶面积系数法进一步计算每个阶段的叶面积指数。

(5) 产量: 试验考种时, 将各试验小区夏玉米采收后搓成玉米粒晒干, 然后分别称取质量。

2 结果与分析

2.1 不同深度全生育期内土壤含水率的动态变化

4 个处理在夏玉米生育期内的实际灌水情况见图 1。结合全生育期内不同深度土壤含水率动态变

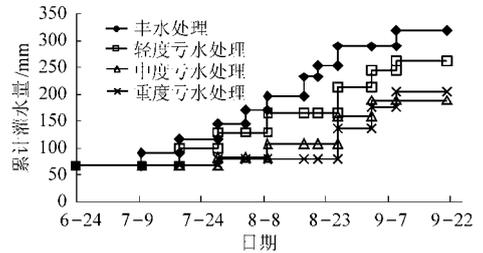


图 1 夏玉米累计灌水量

Fig. 1 Quantity of cumulative irrigation

化(图 2)进行分析, 发现受灌水和夏玉米生长状况的影响, 土壤水分变化沿时间可分为 4 个时期: 即缓慢消耗期、大量损耗期、相对稳定期和恢复期^[7-8]。苗期根系主要分布在表层, 此时为土壤水分缓慢消耗期, 各处理的土壤含水率均有所下降, 且下降速率相同。此时各小区灌水处理相同, 说明各小区土壤水分物理特性一致。在抽穗期(8月 20 日), 夏玉米的生长进入土壤水分大量损耗期, 重度亏水处理出现土壤供水不足。以 20~40 cm 土层的土壤含水率为例, 重度亏水处理达到全生育期最低值 15.59%, 此时丰水处理以及轻度、中度亏水处理分别为 25.6%、22.9%、22.2%。抽穗期为夏玉米营养生长旺盛阶段, 此时的水分胁迫将抑制营养体生长, 降低产量。在生育后期, 采取相同的灌水控制上下限后, 各处理土壤含水率的差异逐渐减小。

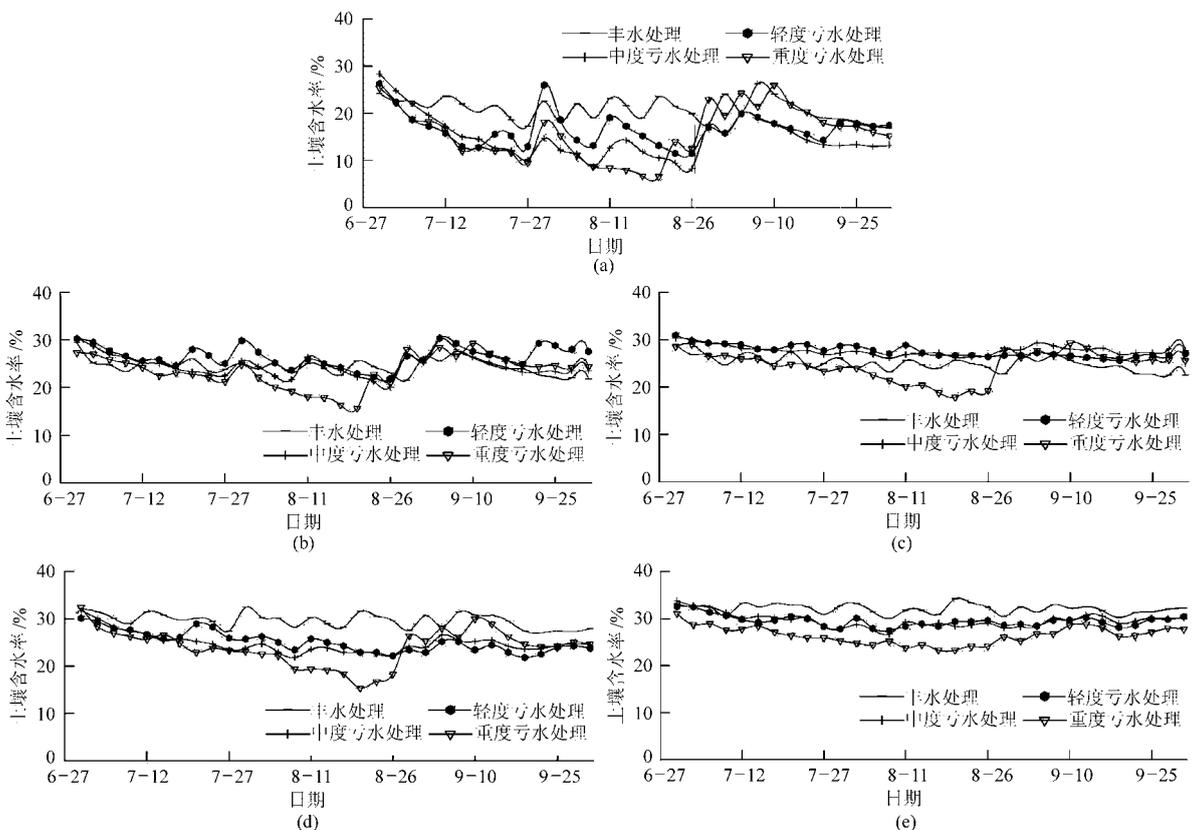


图 2 夏玉米生育期内不同深度土壤含水率变化曲线

Fig. 2 Soil moisture changes at different depths in summer corn growth period

(a) 0~20 cm (b) 20~40 cm (c) 40~60 cm (d) 60~80 cm (e) 80~100 cm

根据不同土层土壤水分的动态变化,土壤水分变化沿土壤剖面可分为3个层次:即土壤水分活跃层、渐变层和相对稳定层^[9]。受灌水和蒸发的影响,0~20 cm土层为土壤水分活跃层,土壤含水率升高和降低的速率均最大。丰水处理使得该层土壤含水率保持在一个较高的小幅度变化水平,亏水处理则使土壤含水率处于干湿交替变化的状态。20~40、40~60和60~80 cm土层为土壤水分渐变层,各处理土壤含水率变化幅度均较小。在20~40 cm和40~60 cm土层,除重度亏水处理外,其他处理的土壤含水率差异很小;在60~80 cm土层,丰水处理的土壤含水率较高。可见,当土壤初始含水率较低时,由于土壤湿润体形状近似以滴头为中心的圆形,亏水处理对20~60 cm土层土壤含水率的影响不明显,而当土壤含水率较高时,滴头下方的土壤含水率会不断增大,亏水处理对60~80 cm土层土壤含水

率的作用效果明显。80~100 cm土层为相对稳定层。与轻度、中度、重度亏水处理相比,丰水处理的土壤含水率显著高于其他各处理,全生育期平均土壤含水率分别高出9%、8%、21%,说明丰水处理明显促进了土壤水分向深层运移。这是由于丰水处理条件下,灌水过量,土壤水不能完全被玉米根系吸收,继续向深层运移。

2.2 不同深度全生育期内土壤温度的动态变化

图3为每天14:00时夏玉米田土壤温度全生育期动态变化情况。比较不同深度处土壤温度的变化特点,可以发现,在滴灌带正上方5 cm处,各处理差异较小。但在生育后期,丰水处理的土壤温度略低。由于此时水分处理相同,可以排除土壤水分对温度的调节作用,所以表层土壤温度主要受到了玉米生长状况的影响,这说明表层土壤温度可以反映植被覆盖状况。

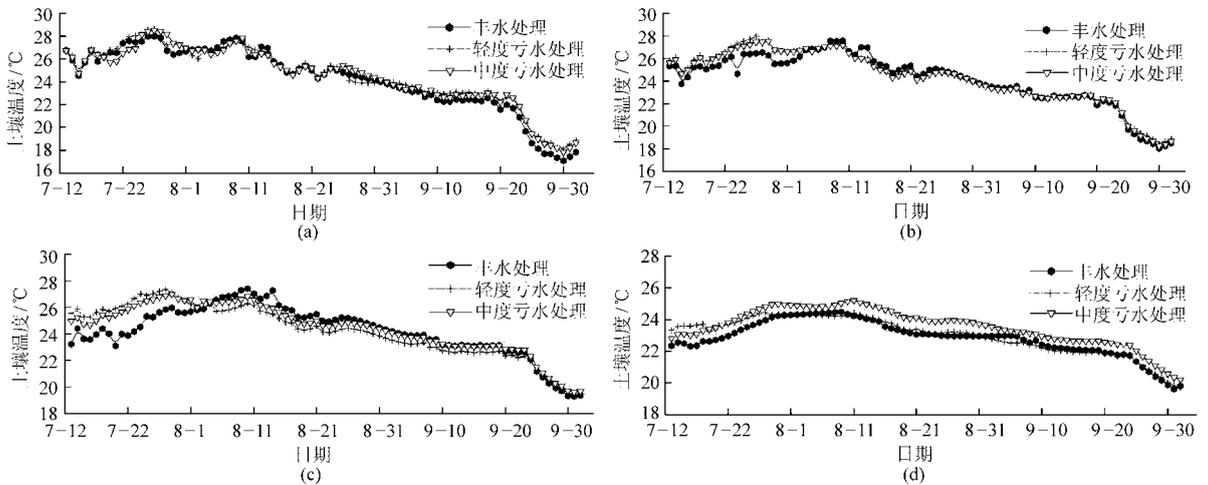


图3 夏玉米生育期内不同深度土壤温度变化曲线

Fig. 3 Soil temperature changes at different depths in summer corn growth period

(a) 滴灌带正上方 5 cm (b) 滴灌带正下方 5 cm (c) 滴灌带正下方 25 cm (d) 滴灌带正下方 55 cm

在滴灌带正下方 5 cm 和 25 cm 处,土壤温度总体变化趋势相似,只是在滴灌带正下方 25 cm (距地表 50 cm)处,各处理间土壤温度差异比较明显。土壤温度在不同生育期起主导作用的影响因子不同,各处理间土壤温度差异也会发生变化。在拔节期之前,丰水处理的土壤温度较低,这反映了土壤含水率对土壤温度的影响,即农田土壤含水率高时,土壤温度会偏低。在抽穗期,各处理间土壤温度的差异逐渐变小,丰水处理的土壤温度略高,这可能是由于:一方面,各处理在拔节期和抽穗期实施了灌水,形成了不同的土壤水分条件;另一方面,随着作物逐渐生长形成覆盖,土壤水分和农田覆盖率同时对土壤温度产生影响,削弱了土壤水分对土壤温度的影响。在抽穗期之后,各处理间土壤温度差异逐渐减小。

处理间土壤温度的差异明显。中度亏水处理使得夏玉米全生育期内土壤温度维持在中等、稳定水平,始终高于丰水处理。此处,中度亏水处理的土壤含水率低于其他两个处理,由于该处距地表较远,受植被和大气的的影响较小,土壤水分对土壤温度的变化起主导作用,且呈负相关。

2.3 不同生育期夏玉米冠层温度的变化

图4为夏玉米冠层温度在关键生育期的日变化情况。可以看出,各处理变化趋势一致,且在拔节期和抽穗期,重度亏水条件下夏玉米冠层温度最高;在灌浆期和成熟期,丰水处理条件下夏玉米冠层温度略低,各亏水处理间差异变小。夏玉米灌浆期前后,冠层温度变化规律发生变化,这是由于一方面,各处理采取了统一的灌水控制上下限,另一方面,夏玉米即将进入乳熟期,作物的生理特征,包括光合、蒸腾

在滴灌带正下方 55 cm (距地表 80 cm)处,不同

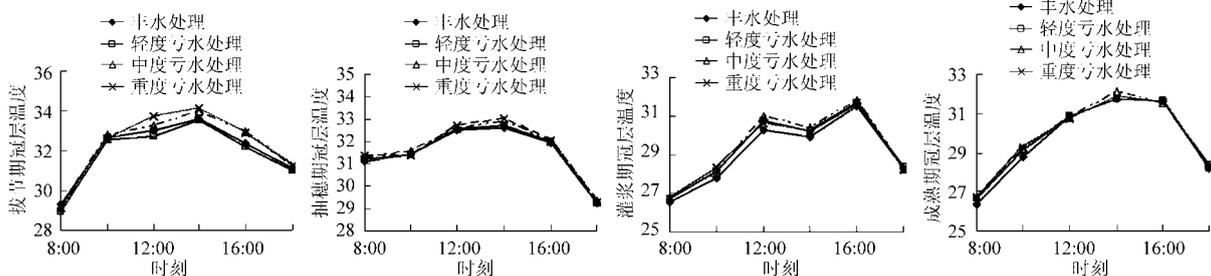


图4 夏玉米冠层温度日变化曲线

Fig.4 Daily canopy temperature changes of summer corn

等作用过程发生了明显变化。

2.4 夏玉米株高、叶面积在全生育期内的变化

图5为夏玉米关键生育期株高、叶面积的变化。各处理株高和叶面积指数变化趋势相同,其中轻度亏水处理的株高和叶面积指数均最高,株高比丰水处理、中度亏水处理、重度亏水处理分

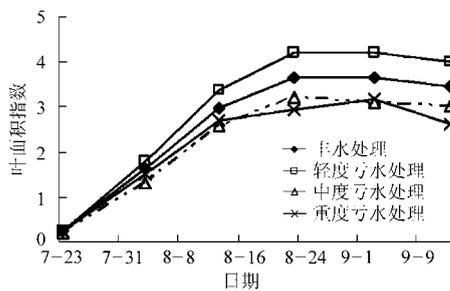
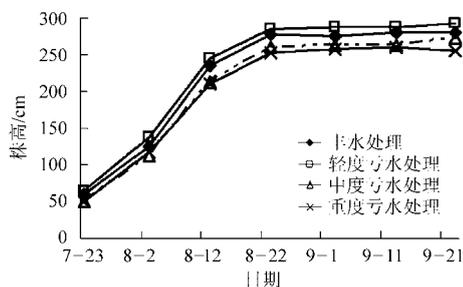


图5 夏玉米关键生育期内的株高和叶面积指数变化曲线

Fig.5 Plant height and leaf area index changes of summer corn in key growth period

2.5 夏玉米的产量分析

不同水分处理对土壤水热环境有不同的影响,从而最终形成不同的夏玉米产量。由表3可见,水分亏缺程度越大,产量越低。中度、重度亏水处理与丰水处理相比,产量分别下降了17.93%和12.06%,这说明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。

表3 各处理产量分析

Tab.3 Analysis of corn yields for different treatments

处理	产量 /kg·hm ⁻²	灌水量 /m ³ ·hm ⁻²	水分利用效率 /kg·m ⁻³
丰水处理	11 934	3 170	3.722
轻度亏水处理	11 654	2 621	4.400
中度亏水处理	10 934	1 888	5.740
重度亏水处理	10 746	2 050	5.240

灌溉水的利用效率是消耗单方水产出的产量,是衡量农业生产合理性的指标。亏水处理的水分利

别高出4.3%、7.8%、14.2%,叶面积指数分别高出13.5%、21.1%、41.6%。这主要因为在拔节期轻度亏水条件下,40~60 cm土层的土壤含水率较高,而该层为夏玉米拔节期的主要根系吸水层。另外,重度亏水条件下,夏玉米有明显的早衰现象。

用效率明显大于丰水处理,其中,中度亏水处理的水分利用效率最高。综合考虑产量和水分利用效率,轻度亏水处理能同时获得较高的产量和较高的水分利用效率。

3 结论

(1)在20~60 cm土层,除重度水分亏缺处理在抽穗期出现土壤供水不足外,其他处理土壤含水率均在高位平稳变化。在60~100 cm土层,丰水处理的土壤含水率显著高于水分亏缺处理。

(2)滴灌带正下方5 cm和25 cm处土壤温度变化规律相似,呈明显的季节性变化趋势,生育期不同,对土壤温度起主导作用的影响因子也不同。滴灌带正下方55 cm处,水分亏缺程度越大,土壤温度越高,土壤温度与土壤水分呈负相关。

(3)亏水处理提高了夏玉米的冠层温度,轻度亏水处理的夏玉米株高和叶面积最大。丰水处理的产量最高,但水分利用效率最低;中度水分亏缺处理的水分利用效率最高。

参 考 文 献

- 1 黄兴法,李光永. 地下滴灌技术的研究现状与发展[J]. 农业工程学报,2002,18(2):176~181.
Huang Xingfa, Li Guangyong. Present situation and development of subsurface drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 176~181. (in Chinese)
- 2 仵峰,彭贵芳,吕谋超,等. 地下滴灌条件下土壤水分运动模型[J]. 灌溉排水,1996,15(3):24~29.
Wu Feng, Peng Guifang, Lü Mouchao, et al. Mathematical model for soil water movement under subsurface drip irrigation [J]. Irrigation and Drainage, 1996, 15(3):24~29. (in Chinese)
- 3 王建东,龚时宏,马晓鹏,等. 地下滴灌条件下水热运移数学模型与验证[J]. 水利学报,2010,41(3):368~373.
Wang Jiandong, Gong Shihong, Ma Xiaopeng, et al. Verification and application of mathematical model for simulating water flow and heat transport in subsurface drip irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(3): 368~373. (in Chinese)
- 4 隋娟,龚时宏,王建东,等. 滴灌灌水频率对土壤水热分布和夏玉米产量的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(4):148~152.
Sui Juan, Gong Shihong, Wang Jiandong, et al. Effects of drip irrigation frequency on the distribution of soil water, soil temperature and maize grown in North China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4):148~152. (in Chinese)
- 5 王洪源,李光永. 滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(5):47~51.
Wang Hongyuan, Li Guangyong. Effect of drip irrigation model and irrigation start point on water consumption and yield of sweet melon [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 47~51. (in Chinese)
- 6 Pablo R G, O'Neill M K, McCaslin B D, et al. Evaluation of corn grain yield and water use efficiency using subsurface drip irrigation [J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2007, 30(1):153~172.
- 7 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,1998,14(4):82~87.
Kang Shaozhong, Shi Wenjuan, Hu Xiaotao, et al. Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize [J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 82~87. (in Chinese)
- 8 刘玉春,李久生. 毛管埋深和土壤层状质地对地下滴灌番茄根区水氮动态和根系分布的影响[J]. 水利学报,2009,40(7):782~790.
Liu Yuchun, Li Jiusheng. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrate dynamics and root distribution for drip fertigated tomato [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 782~790. (in Chinese)
- 9 张孝中,韩仕峰,李玉山,等. 渭北旱原土壤水分动态规律研究[J]. 干旱地区农业研究,1990(4):27~36.
Zhang Xiaozhong, Han Shifeng, Li Yushan, et al. The laws of soil water behaviors on Weibei rain fed highland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1990(4):27~36. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 61 页)

- 9 Liu Chao, Tang Fangping, Sun Sun. The PIV measurements on the flow fields in an unshrouded centrifugal pump [C] // Proceedings of the 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2004: 273~277.
- 10 Hamkins C P, Flack R D. Laser velocimetry measurements in shrouded and unshrouded radial flow impellers [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1987, 109(1): 70~78.
- 11 刘超, Deotte R E, Rashid K M. 离心泵叶轮内旋转流场激光测量研究[J]. 江苏农学院学报,1994,15(4):64~71.  
Liu Chao, Deotte R E, Rashid K M. Study on laser velocimeter measurements of rotational flow field in a centrifugal pump [J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1994, 15(4):64~71. (in Chinese)
- 12 冯旭松,金燕,刘超. 扩散导叶对贯流泵装置性能影响[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(4):344~348.  
Feng Xusong, Jin Yan, Liu Chao. Effects of diffusion guide vane on performance of tubular pump system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4):344~348. (in Chinese)