

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.030

调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应

魏永霞^{1,2} 马瑛瑛¹ 刘慧³ 张雨凤¹ 杨军明¹ 张奕¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;

3. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 以玉米为研究对象, 进行测坑微区试验, 研究了地面滴灌条件下调亏灌溉对玉米植株与土壤水分分布、根长、根长密度、根数、产量以及作物水分利用效率的影响。试验于2016年分别设苗期轻度、苗期中度、拔节期轻度、拔节期中度、苗期中度拔节期轻度5个水分亏缺处理, 另设全生育期适宜灌水作为对照。结果表明, 各调亏处理的玉米冠部最终湿基含水率比对照处理增加-6.03%~4.61%、根部最终湿基含水率比对照处理增加1.30%~8.15%; 苗期轻度调亏处理, 产量比对照处理降低了7.89%、较对照处理节水8.26%、水分利用效率较对照处理提高0.33%; 苗期中度调亏处理, 产量比对照处理增加了5.20%、较对照处理节水16.71%、水分利用效率较对照处理提高26.25%; 拔节期轻度调亏处理, 产量较对照处理增加了1.49%、较对照处理节水14.07%、水分利用效率较对照处理提高18.27%; 拔节期中度调亏处理, 产量比对照处理降低了23.47%、较对照处理节水28.35%、水分利用效率较对照处理提高6.64%; 苗期中度拔节期轻度调亏处理, 产量比对照处理降低了28.13%、较对照处理节水38.54%、水分利用效率较对照处理提高16.94%。苗期中度处理与拔节期轻度处理是促进滴灌玉米节水增产的适宜水分亏缺处理, 其结果对指导黑龙江西部玉米制定合理的灌溉制度具有实质性意义。

关键词: 玉米; 调亏灌溉; 滴灌; 湿基含水率; 根系参数; 产量

中图分类号: S-3; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0252-09

Effects of Soil Water, Plant, Water Saving and Yield Increasing of Maize under Regulated Deficit Drip Irrigation

WEI Yongxia^{1,2} MA Yingying¹ LIU Hui³ ZHANG Yufeng¹ YANG Junming¹ ZHANG Yi¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China

3. College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Regulated deficit irrigation is through active exerting a certain degree of water stress artificially, exercising the crop drought resistance, affecting their physiological and biochemical process, in order to achieve the goal of saving water and increasing production. Taking maize as research object, the experiment was carried out in micro test pit area, and the influences on soil water distribution, root length, root length, root number, yield and crop water utilization efficiency were studied under drip irrigation on ground. Five different treatments (C1, C2, C3, C4 and C5) were set, which were slight and moderate regulated deficit in seeding and jointing stage, separately, and moderate regulated deficit in seeding stage while slight regulated deficit in jointing stage in 2016, and the whole growth period with suitable irrigation (CK) was set as control treatment. The result showed that the final water content of filtration cake in the crown of the maize was increased by -6.03% ~ 4.61% and 1.30% ~ 8.15% in the root. At the same time, the yield of C1, C4 and C5 was decreased by 7.89%, 23.47% and 28.13%, respectively, while that of C2 and C3 was increased by 5.20% and 1.49%, respectively, water use efficiency was improved by 0.33%, 26.25%, 18.27%, 6.64% and 16.94%, respectively, and five treatments saved 8.26%, 16.71%, 14.07%, 28.35% and 38.54% of water, respectively. The moderate treatment in seeding stage and the mild treatment in jointing stage were the appropriate water

收稿日期: 2017-08-11 修回日期: 2017-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD12B01)

作者简介: 魏永霞(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: wyx0915@163.com

通信作者: 刘慧(1981—),女,副教授,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

deficit treatments for maize under drip irrigation in water saving and production increasing. The result was of practical significance to guide the establishment of reasonable irrigation system for maize in western area of Heilongjiang Province.

Key words: maize; regulated deficit irrigation; drip irrigation; water content of filtration cake; root parameters; yield

0 引言

水分是限制玉米生长发育的主要逆境因子之一。适宜的水分胁迫对于作物生长表现出一定的正效应,在节水同时能够促进作物生长、提高产量、改善品质^[1-3]。然而,不合理的灌溉和水资源过度开发使得无效农业用水增加、生态环境恶化。因此,提升节水灌溉的技术和利用水平对于满足农业供水、节省灌溉总量、保证作物生长、维持生态环境可持续发展至关重要。与畦灌相比,滴灌技术不仅能够节约灌溉用水、提高水分利用效率,而且对作物增产具有积极正效应^[4]。王建东等^[5]认为在非充分灌溉条件下滴灌模式对提高作物产量较精细地面灌优势明显。基于以上因素,将调亏灌溉技术与滴灌技术结合研究对于生物节水意义重大。

植物通过输送水分来调控自身的水分平衡以满足生长发育的需求,构成自身的安全保证体系。研究植物优化调控水分平衡的潜力,对于充实土壤-植物-大气连续体(SPAC)、明确植物对环境的适应机制、挖掘高效用水的潜力具有重要意义^[6]。贮存于植物体内的水分对植物输送水分、抗旱性能、适应环境变化的自我调节能力具有重要影响^[7]。康绍忠等^[8]研究表明,调亏处理后气孔行为的变化以及光合和蒸腾耗水对气孔的反应差异是调亏灌溉节水增产的内在因素。BASTIAANSEN等^[9]研究表明,调亏灌溉可降低叶片气孔开度,减少作物生理耗水,提高叶片水分利用效率。FABIO等^[10]研究表明,调亏灌溉通过控制土壤水分影响作物根系生长,达到间接控制作物蒸腾作用的目的。目前,调亏灌溉技术在节水增产效应方面的研究已比较成熟,其中有大量研究从植物的气孔调节方面阐述了植物水分输送过程中的调控机制,但较少涉及植物贮水方面的指标,且有关调亏灌溉对植物湿基含水率影响的研究尚未见报道。

本研究以黑龙江西部种植玉米为对象,分别在苗期和拔节期进行测坑微区调亏灌溉试验,研究水分调控对植物湿基含水率的影响,分析水分胁迫条件下玉米植株及土壤水分分布与变化规律、根系生长及节水增产效应,旨在为指导黑土区农业高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2016年5—10月在黑龙江省水利科学研究院综合试验基地(126°36'35"E,45°43'09"N,总面积55 hm²)进行。试验地位于东北典型黑土带上,全年平均气温3.1℃,无霜期130~140 d,年降水量多介于400~650 mm;降水多集中在7—9月,约占全年的70%,多年平均水面蒸发量796 mm,属中热带大陆性季风气候。供试土壤主要为壤土,速效氮(N)质量比154.4 mg/kg,速效磷(P₂O₅)质量比40.1 mg/kg,速效钾(K₂O)质量比376.8 mg/kg,pH值为7.27。0~1 m土层内的平均田间持水率(占干土质量)为28.4%,土壤干容重为1.22 g/cm³。

1.2 试验设计

试验在自动感应式遮雨棚测坑(长250 cm、宽200 cm、深170 cm)内进行,测坑矩形,有底,隔绝了与外部的水分交换。供试作物为春玉米(强盛31号),5月9日播种,播前进行灌水、施肥、拌土、回填等处理,使各小区水分和养分状况相近。采用开沟起垄点种的方式,每坑4垄,每垄7穴,株行距28.5 cm×62.5 cm;灌水方式采用地面滴灌,一条毛管控制一垄作物,毛管长度与小区垄长相同。底肥514 kg/hm²,追肥330 kg/hm²,其中尿素与二胺的比例为2:1。调亏处理主要在苗期和拔节期进行,灌水量按计划湿润层(苗期45 cm、拔节期60 cm)内平均土壤含水率占田间持水率的百分比计算,当土壤含水率低于水分处理下限时灌水至上限。共设6个处理,每个处理3次重复,其中第6个处理全生育期内进行适宜灌水,作为对照处理。具体试验设计方案见表1。

表1 试验设计方案

Tab.1 Experiment design scheme

%

处理 编号	处理名称	不同生育阶段的水分处理 (占田间持水率的百分比)			
		苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期
C1	苗期轻度	60~70	70~80	70~80	70~80
C2	苗期中度	50~60	70~80	70~80	70~80
C3	拔节期轻度	70~80	60~70	70~80	70~80
C4	拔节期中度	70~80	50~60	70~80	70~80
C5	苗期中度、 拔节期轻度	50~60	60~70	70~80	70~80
CK	对照处理	70~80	70~80	70~80	70~80

1.3 测试项目与方法

(1) 冠部各器官湿基含水率

分别于苗期(播后 33 d)、拔节期(播后 57 d)、抽雄期(播后 73 d)、灌浆期(播后 91 d)、成熟期(播后 121 d)、收获时(播后 136 d)将取样的玉米植株从茎基部剪下,获得完整的冠部,然后将植株地上各部分分开,擦拭表面尘污后分别装入档案袋内立即称其鲜质量,105℃干燥 2~3 h 杀青,并在 80℃下干燥至质量恒定,用精度为 0.01 g 电子天平称取干质量,计算各器官湿基含水率。

湿基含水率计算方法为

$$\theta = (G_s - G_g) / G_s \times 100\% \quad (1)$$

式中 θ ——植株器官湿基含水率, %

G_s ——植株器官鲜物质量, g

G_g ——植株器官干物质量, g

(2) 根部参数

地上部分取样同时进行根系取样,根系取样面积为植株周围 60 cm × 60 cm,取样深度根据根系深度而定,尽量取到以肉眼看不见细毛根为止,然后将其浸泡在盆中,到土柱变得松散时冲洗根系,洗净后用无氮吸水纸吸干,测定根系条数。将根系放在背面贴有坐标纸的玻璃片上测其长度。将根系装在档案袋内称其鲜质量,80℃下干燥至恒质量,用精度为 0.01 g 电子天平称取干质量,计算根部湿基含水率。

(3) 根长密度

于灌浆期(播后 91 d)另选取有代表性植株进行根系取样,根系取样面积仍为植株周围 60 cm × 60 cm,沿四周垂直挖土,形成有根样的土柱,尽量挖至以肉眼看不见细毛根为止,沿土柱自上而下每隔 10 cm 取一土样,将土样用水浸泡、冲洗,洗净后用无氮吸水纸吸干。将粗根与细根分类,粗根直接测量其长度,细根先用精度为 0.000 1 g 电子天平称量总质量,然后选取一部分细根称其质量并同时测量其长度,按照质量比例法换算细根总长度,根长密度为单位土壤体积中的根长(单位:cm/cm³)。

(4) 土壤含水率

处理开始后每隔 5 d 采用干燥法逐层测定计划湿润层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)土壤含水率,取样点位于 2 条滴灌带中间位置处和滴头正下方,取其平均值,以确定灌水量。并于苗期逐层测定(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm)各处理灌水前(6月1日)后(6月3日)0~80 cm 深土层内土壤含水率。

灌水量计算方法为

$$W = RHA(W_s - W_0) \quad (2)$$

式中 W ——灌水量, m³

R ——土壤干容重, g/cm³

H ——计划湿润层深度(苗期 20 cm、其他生育期 60 cm), cm

A ——测坑面积, cm²

W_s ——设计含水率上限, %

W_0 ——灌前土壤实测含水率, %

玉米全生育期内耗水量计算方法为

$$ET = \Delta W + I \quad (3)$$

式中 ET ——耗水量, mm

ΔW ——播种前和收获后 0~60 cm 土层储水量变化

I ——计算时段内总灌溉量, mm

(5) 产量

玉米收获时每个测坑内随机选取 7 株(边行除外),风干后脱粒,测定穗粒质量、含水率,产量为质量含水率为 14% 的产量。

水分利用效率计算方法为

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

式中 WUE ——玉米水分利用效率, kg/m³

Y ——玉米产量, kg/hm²

1.4 数据处理

采用 Excel 对试验数据进行初步整理,用 Origin 7.5 进行图表绘制,用 SPSS 22.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 玉米植株冠部水分变化规律

植株体内水分状况因土壤水分的不同而有所差异,图 1 为不同水分亏缺处理下玉米植株在整个生育期内冠部含水率变化曲线。由图 1 可知,整个生育期内,不同水分亏缺处理的玉米植株其湿基含水率随生育历程均呈下降趋势,这与王娟等^[11]的研究结果相吻合,表明调亏灌溉不改变玉米冠部含水率变化的总体趋势。具体分析各生育阶段显示,不同处理的玉米植株冠部湿基含水率按由大到小的顺序,在苗期末表现为 C4、CK、C3、C1、C2、C5, C1、C2、C5 分别较对照处理降低 2.69%、4.11%、4.90%,差异不显著($P > 0.05$),说明苗期土壤水分亏缺处理对玉米植株湿基含水率表现出一定的影响,但影响不显著,这可能是因为苗期植株叶面积小且 2016 年多遇降雨阴天,作物蒸腾耗水小,加之作物面对不利干旱环境具有一定的自我调节能力,使得植株湿基含水率在适宜水分亏缺处理下降并不明显。拔节期,作物进入营养生长旺盛时期,叶面积迅速增大,气温升高,作物蒸腾量增大,植株湿基含水率逐渐降低,其对土壤水分亏缺的敏感度也相应增加,至拔节期末各处理玉米植株湿基含水率由大到小表现为

CK、C2、C1、C3、C4、C5, 处理 C1、C2 接近对照处理, 可能是因为拔节期复水后玉米植株根系吸收水分及各部位生长机制存在补偿效应, 处理 C3、C4、C5 分别低于对照处理 3.75%、4.87%、7.14%, 差异不显著 ($P > 0.05$)。随着生育阶段的推进, 玉米植株湿基含水率不断降低。至成熟期末, 处理 C1、C2 分别高于对照处理 3.63%、5.90%, 这可能是因为苗期适宜的水分亏缺延缓了作物的衰老^[12], 与对照处理相比, 细胞及植物组织老化减缓, 保水能力强, 植株含水率高, 作物抗旱性能强。

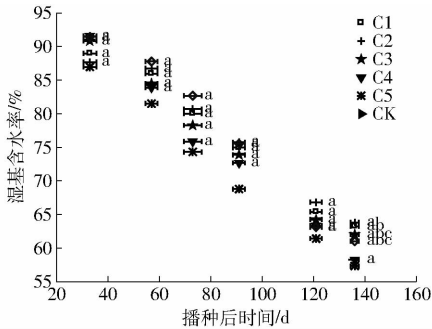


图 1 不同处理玉米植株冠部总含水率变化曲线
Fig. 1 Changing curves of total water content in crown of maize under different treatments

2.2 玉米植株冠部各构件水分分布及变化规律

植株体内水分分布状况及变化直接影响其营养生长与生殖生长。对不同水分亏缺处理下平均单株玉米冠部各构件在全生育期内的湿基含水率变化进行分析, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 随生育时期的推进, 叶片、茎秆、玉米穗的湿基含水率均呈下降

趋势, 各处理间表现出差异性, 但不同处理的变化趋势一致。生育期内, 雄湿基含水率基本保持不变, 各处理间无明显差异。具体分析各构件, 可以发现, 叶片和茎秆在苗期至拔节期下降较缓慢, 拔节期至抽雄期湿基含水率下降迅速, 这可能是因为苗期气温低、植株叶面积小、蒸腾量小, 进入拔节期后, 气温逐渐升高, 作物进入快速营养生长阶段, 叶面积不断增大, 作物蒸腾量大。后期, 叶片和茎秆湿基含水率降幅减小, 这可能是因为玉米进入灌浆期后, 随着籽粒灌浆的逐步进行, 叶片和茎秆的光合同化产物不断向籽粒输送, 叶片与茎秆细胞及组织呈现逐渐老化的趋势, 但细胞膜仍保持完整, 细胞具有保持水分的能力^[13], 使得叶片和茎秆湿基含水率降幅减小。从图 2 中不难发现, 灌浆期末, 苗期轻度、中度水分亏缺处理的玉米植株叶片、茎秆湿基含水率基本已达对照水平, 至成熟期, 叶片湿基含水率已超过对照水平 0.33%、0.49%, 茎秆湿基含水率已超过对照水平 0.79%、1.18%, 这与魏永霞等^[14]认为苗期调亏处理的玉米植株在灌浆期仍保持较高的伤流量相吻合, 表明苗期适宜水分亏缺处理延缓了作物衰老, 相比对照处理其细胞及组织老化减缓, 保水能力强, 湿基含水率大。生育期内, 玉米穗湿基含水率不断下降且降幅较大, 生殖生长过程中, 干物质逐渐在生殖器官中积累, 玉米籽粒的胚乳细胞不断被结构蛋白、淀粉、脂肪、贮藏蛋白等充实的过程中, 胚乳细胞逐渐失去活性, 保水能力大幅下降, 导致玉米穗湿基含水率下降幅度较大。

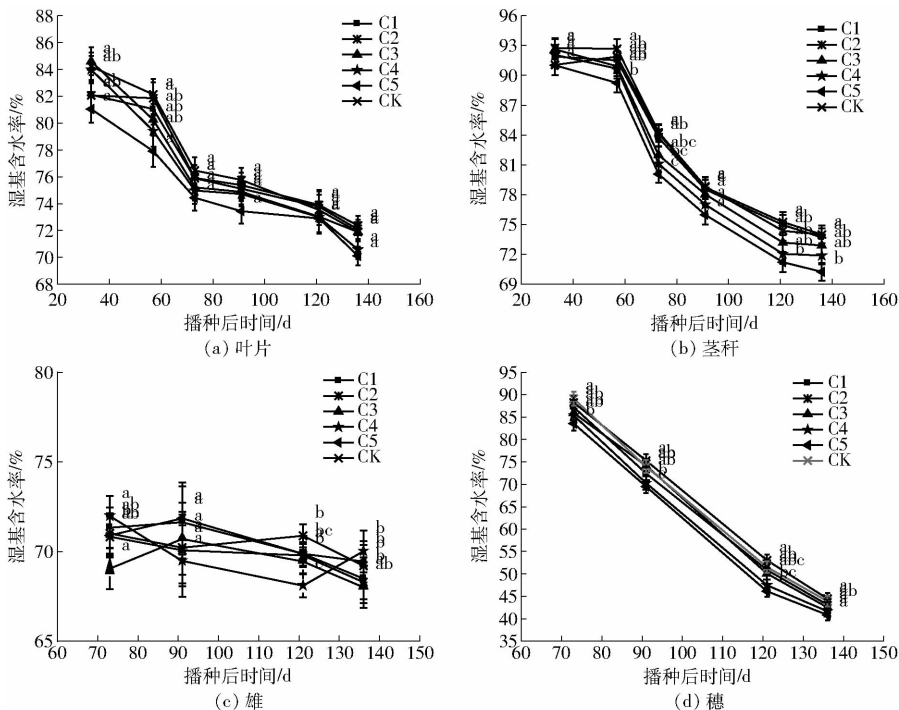


图 2 玉米植株冠部各构件湿基含水率变化曲线

Fig. 2 Changing curves of water content of filtration cake in crown of maize under different treatments

2.3 玉米植株根部水分变化规律

玉米强大的根系是支持地上部分生长并获得高产的基础,根部湿基含水率大小在一定程度上能表征其活力的大小,图3为不同水分亏缺处理下玉米植株在整个生育期内根部湿基含水率变化曲线。由图3可知,玉米植株根部湿基含水率随生育时期的推进呈逐渐下降的趋势,苗期至拔节期降幅较小,拔节期至抽雄期降幅较大,至灌浆期末下降至最低点,之后又出现回升现象,各处理间表现出差异性但总体变化趋势一致,均呈“V”型曲线变化,表明调亏灌溉并没有改变玉米根部生长的总体趋势^[14]。就不同处理而言,苗期末 C1、C2、C5 的根部湿基含水率分别较对照处理降低 3.61%、5.68%、5.50% ($P > 0.05$),表明苗期玉米根部湿基含水率与土壤含水率表现出相应的正相关关系,苗期为营养生长旺盛时期,土壤水分亏缺明显抑制地上部分生长的同时对根部生长也存在一定程度的影响。抽雄期为生殖生长旺盛时期,干物质大量累积,根部湿基含水率迅速下降。灌浆期末, C1、C2、C3、C4、C5 的根部湿基

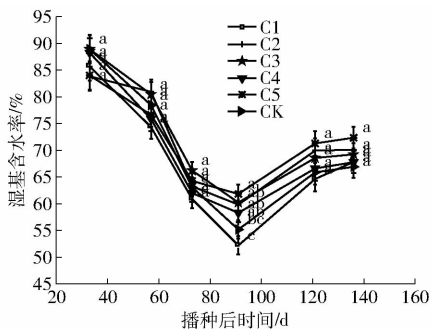


图3 不同处理玉米植株根部总含水率变化曲线

Fig.3 Changing curves of total water content in root of maize under different treatments

含水率较对照处理分别增加 -5.37%、8.45%、9.19%、5.64%、12.06%,差异不显著 ($P > 0.05$),处理间差异达到最大值。

2.4 单株玉米根系参数响应特征

调亏灌溉影响玉米植株根系的生长量及其生长形态。表2为不同调亏灌溉处理下单株玉米各生育期的根系总长与根数。整体来看,各水分亏缺处理玉米植株根系总长及根数呈现相同的变化趋势,均呈倒“V”型变化,全生育期内各水分亏缺处理的玉米植株根系总长与根数在灌浆期达到最大值。具体分析各处理,调亏期间土壤水分亏缺对玉米植株根系生长均表现出不同程度的抑制作用(C3、C5除外)。苗期(播后33d),C1、C2的根长较CK分别降低2.21%、9.72%,差异不显著 ($P > 0.05$),根数较CK分别降低11.76% ($P > 0.05$)、17.65% ($P > 0.05$);拔节期(播后57d),C1根长较CK下降12.42%、根数较CK下降13.51%,差异不显著 ($P > 0.05$),C2根长与根数较CK分别上升4.46%、8.11%,苗期进行水分亏缺处理、拔节期复水后其根系生长存在补偿效应,从C1、C2不难看出玉米根系复水补偿生长随水分亏缺程度加重其效果越显著,C4根长与根数较CK分别下降32.74%、32.43%,差异达显著水平 ($P < 0.05$),C3根长与CK相比增加0.99%、根数与CK相当;抽雄期根系进入快速生长阶段^[14],根系总长及根数不断增加,至灌浆期末(播后91d)达到最大值,C1、C2、C3、C4、C5、CK的根长分别为1668.59、2025.39、2096.54、1937.85、2444.70、1801.15 cm,根数分别为38、44、45、42、48、38条,C5的根长与根数分别较CK增加35.73%、26.32%,差异达显著水平 ($P < 0.05$),这

表2 各调亏处理根系参数

Tab.2 Root parameters of each regulated deficit treatment

根系参数	处理	播种后时间/d					
		33	57	73	91	121	136
根长/cm	C1	490.73 ^a	1213.09 ^d	1420.06 ^e	1668.59 ^f	1478.54 ^d	1353.31 ^d
	C2	453.04 ^b	1446.90 ^a	1588.70 ^b	2025.39 ^c	1784.77 ^b	1631.10 ^b
	C3	500.77 ^a	1398.83 ^{bc}	1666.55 ^a	2096.54 ^b	1678.88 ^c	1622.64 ^b
	C4	500.49 ^a	931.63 ^e	1446.98 ^d	1937.85 ^d	1500.48 ^d	1445.11 ^c
	C5	451.88 ^b	1417.25 ^b	1602.97 ^b	2444.70 ^a	1909.80 ^a	1785.28 ^a
	CK	501.82 ^a	1385.12 ^c	1471.56 ^c	1801.15 ^e	1483.79 ^d	1435.86 ^c
根数/条	C1	15 ^d	32 ^d	36 ^e	38 ^e	37 ^e	35 ^e
	C2	14 ^e	39 ^a	40 ^b	44 ^c	42 ^c	38 ^c
	C3	18 ^a	37 ^c	41 ^a	45 ^b	43 ^b	40 ^b
	C4	16 ^c	25 ^e	38 ^c	42 ^d	40 ^d	36 ^d
	C5	13 ^f	38 ^b	40 ^b	48 ^a	45 ^a	41 ^a
	CK	17 ^b	37 ^c	37 ^d	38 ^e	37 ^e	36 ^d

注:同一列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$),下同。

可能是由于 C5 的玉米植株根系一直受到缓慢的水分胁迫且根系比地上部有着更有效的渗透调节^[8], 通过渗透调节维持其细胞膨压促使根和胚轴延伸生长^[15], 使得根系吸水范围更广, 根系更发达, 根长与根数随之增加; 之后根系生长基本停止, 并随生育期不断推进, 根系逐渐衰老, 其根长与根数随之降低。

图 4 为灌浆期(播后 91 d)不同水分亏缺处理下平均单株玉米根系在 0~60 cm 土层中根长密度变化曲线。由图 4 可知, 灌浆期根长密度在 0~10 cm 土层最大, C1、C2、C3、C4、C5、CK 的根长密度分别为 0.75、0.93、0.94、0.87、1.09、0.81 cm/cm³, 这与乐章燕等^[16]认为拔节期和完熟期玉米根长密度在 10~20 cm 土层最大, 抽雄期和乳熟期 0~10 cm 土层最大相吻合。随土壤深度的增加, 根长密度逐渐减小, 40 cm 以上层间根长密度变化较大, 40 cm 以下层间根长密度保持较为平缓的变化趋势。处理间存在差异性, 但随着土层深度的增加, 处理间差异逐渐减小, 0~10 cm 土层 C1、C2、C3、C4、C5 的根长密度与 CK 相比分别增加了 -7.41% ($P > 0.05$)、14.81% ($P > 0.05$)、16.05% ($P > 0.05$)、7.41% ($P > 0.05$)、34.57% ($P < 0.05$), 而 40~50 cm 土层其根长密度较 CK 分别增加 -9.10%、13.64%、18.18%、9.09%、4.55%, 差异不显著 ($P > 0.05$), 这可能是由于本试验中采用地面滴灌灌水方式仅湿润根区附近土壤, 并且深层土壤透气性较差, 使得玉米根系较多的分布在 0~40 cm 土层而 40~60 cm

土层分布较少, 水分亏缺对浅层土壤根系生长发育影响较大, 前期土壤水分亏缺基本能促进玉米植株根系生长。

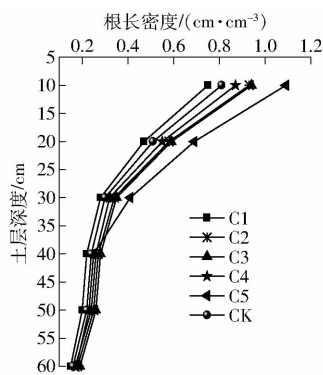


图 4 灌浆期 0~60 cm 土层内根长密度变化曲线

Fig. 4 Changing curves of root length density in 0~60 cm soil depth in filling stage

2.5 苗期 0~80 cm 深土层内土壤含水率变化特征

土壤水分变化沿土壤剖面可分为活跃层、渐变层、相对稳定层^[17], 图 5 为不同水分调亏处理期间灌水前后 0~80 cm 土层内土壤含水率变化趋势。总体来看, 不同水分亏缺处理的土壤含水率沿土壤深度增加均呈现出先增加后减小的趋势, 0~60 cm 土层内土壤含水率随土壤深度的加深不断增大, 60~80 cm 土层内土壤含水率出现降低现象, 调亏灌溉没有改变土壤含水率沿剖面变化的基本趋势。受灌水和土壤蒸发的影响, 0~20 cm 土层内含水率降低或升高的速率均最大^[18]。具体分析各处理, 不

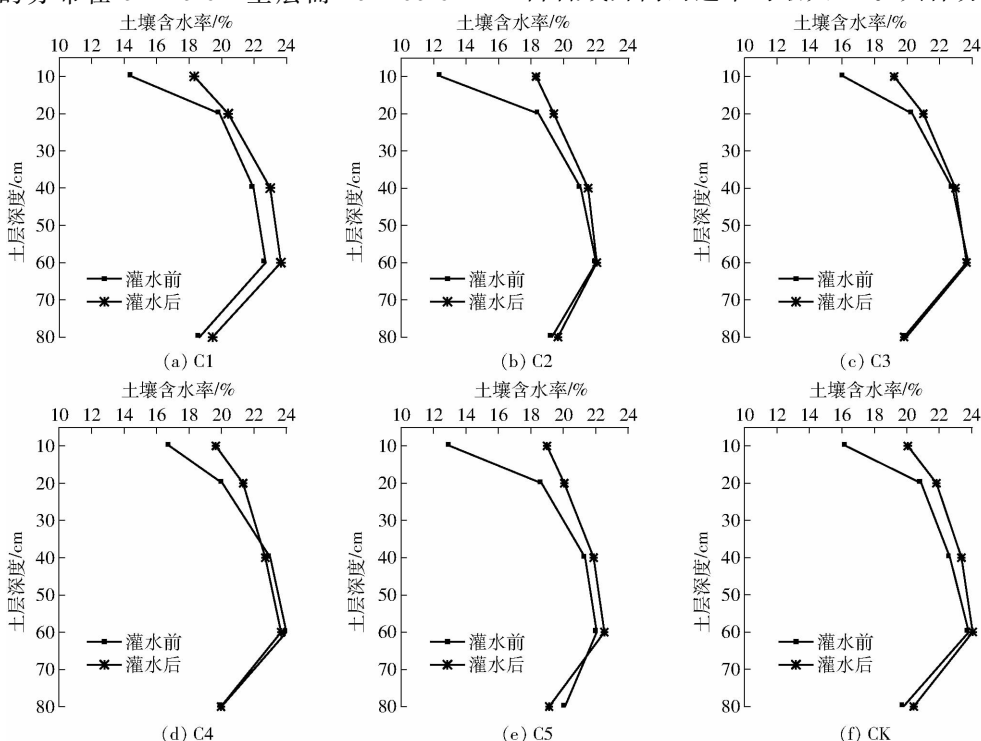


图 5 苗期各处理 0~80 cm 土层内土壤含水率变化特征

Fig. 5 Changing characteristics of soil moisture content in 0~80 cm soil depth in seeding stage under different treatments

难发现 0 ~ 20 cm 土层内, C1、C2、C5 的土壤含水率均表现出较低的大幅度变化特征, 而 C3、C4 的土壤含水率则表现出较高的小幅度变化特征, 这与邹慧等^[18] 研究结果相吻合。水分亏缺处理对 0 ~ 40 cm 土层内土壤含水率影响明显, 对 40 ~ 80 cm 土层内土壤含水率影响不明显。

2.6 各调亏处理的节水增产效应

调亏灌溉协调玉米根、冠生长, 促进光合同化产物向籽粒运转与分配, 降低作物阶段耗水量, 其正效应的最终结果主要表现在作物产量和水分利用效率方面。将不同处理玉米耗水量、产量、水分利用效率列于表 3, 可知, 各处理耗水量均低于对照处理, 由高到低依次为 CK、C1、C3、C2、C4、C5; C1 产量比 CK 略低, C2、C3 产量分别比 CK 增加 5.20%、1.49%; C4、C5 产量较 CK 分别减少 23.47%、28.13%; 作物水分利用效率均较对照处理有所提高, 提高幅度为 0.33% ~ 26.25%。说明适当的水分亏缺具有一定的正效应, 更有利于提高玉米产量和水分利用效率。

表 3 各调亏处理玉米生育期总耗水量、产量及水分利用效率

Tab.3 Total water consumption, yield and WUE in growth periods of maize under each regulated deficit treatment

处理	耗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
C1	4 750.53 ^b	14 357.34 ^d	3.02 ^d
C2	4 313.17 ^d	16 397.41 ^a	3.80 ^a
C3	4 449.65 ^c	15 820.69 ^b	3.56 ^b
C4	3 710.56 ^e	11 928.49 ^e	3.21 ^e
C5	3 182.44 ^f	11 202.88 ^f	3.52 ^b
CK	5 178.37 ^a	15 586.89 ^c	3.01 ^d

3 讨论

植物具有保持水分在体内不断流动以维持自身生长发育的能力, 当植物面对不利环境威胁时, 以植株体内水分状况的变化最为鲜明。玉米植株体内总含水率、冠部各器官含水率、根部含水率、根系形态指标、产量等因土壤含水率变化及灌水量的差异而产生不同的表达结果。

根、茎秆、叶片、穗等构件作为玉米植株重要的组成部分, 其湿基含水率在一定程度上可以表征各构件活力与干物质累积程度。然而, 以往学者在作物自然兴衰过程中分析其水分状况变化时多用湿基含水率这一指标来衡量其活力大小, 但对于在调亏灌溉这种特殊灌溉方式下作物本身及各构件湿基含水率变化的研究还未见报道。本试验以玉米为研究对象, 进行调亏灌溉试验, 研究了不同水分亏缺处理

下玉米植株各构件湿基含水率的变化。结果表明, 在作物整个生长期, 各调亏处理的玉米植株冠部、冠部各器官湿基含水率(雄除外)均随生育阶段的推进呈现逐渐降低趋势, 对比图 1 与图 2a 不难发现玉米植株冠部总湿基含水率下降较叶片湿基含水率迅速, 这与王娟等^[11] 认为夏玉米叶片含水率较植株含水率下降缓慢相一致。整体来看叶片和茎秆湿基含水率降幅较小, 玉米穗湿基含水率降幅较大, 这与要世瑾等^[19] 对小麦植株水分的监测结果一致。有研究表明杉木根部含水率与其根的生物量之间有正相关关系^[20], 本试验研究发现玉米植株根部湿基含水率从苗期到灌浆期随生育时期的推进逐渐降低, 至灌浆期降至最低点, 灌浆期到收获期又出现升高的变化趋势, 这种现象是由于玉米植株后期根系生长已基本停止但其吸收水分并未停止造成的, 还是因为根部湿基含水率与其生物量之间存在着某种显著的相关关系还有待进一步探讨。

调亏灌溉通过控制土壤含水率以达到控制作物根部与地上部分生长的目的。武阳等^[21] 的研究结果表明土壤水分胁迫复水后梨树在 20 ~ 60 cm 土层内根长密度与对照处理相比均显著提高, FERNANDEZ 等^[22] 认为滴灌促使果树根系向灌溉湿润区聚集, 本试验通过对灌浆期不同水分亏缺处理下玉米植株根长密度的测定发现调亏灌溉复水后基本能提高灌溉湿润区根长密度。此外, 本试验研究发现水分亏缺处理对 0 ~ 40 cm 土层内土壤含水率影响明显, 对 40 ~ 80 cm 土层土壤含水率影响不明显, 这与邹慧等^[18] 研究认为当土壤初始含水率较低时, 亏水处理对 20 ~ 60 cm 土层土壤含水率的影响不明显, 当土壤含水率较高时, 亏水处理对 60 ~ 80 cm 土层土壤含水率的作用效果明显稍有出入, 这可能是因为本试验中土壤含水率测定是在苗期进行的, 计划湿润层仅为 20 cm, 且使用地面滴灌的方法使得深层土壤含水率变化在处理间差异不明显。

与对照处理相比, 各水分亏缺处理均降低了作物耗水量, 提高作物水分利用效率, 这与马福生等^[23] 对温室梨枣树的研究结果一致。有人认为一定时期内适宜程度的水分亏缺对提高产量有利^[24-25], 但也有学者持不同观点^[26], 本试验研究结果表明适宜阶段适当的水分亏缺对提高作物产量具有积极的正效应, 这可能是由于水分调亏处理促进了干物质向果穗的转移与分配, 达到增加产量的目的。

4 结论

(1) 各水分亏缺处理的玉米植株随生育时期的

推进冠部湿基含水率均呈降低趋势,根部湿基含水率均先减小后出现回升现象,呈“V”形变化趋势,处理间存在差异性。苗期轻度、苗期中度、拔节期轻度、拔节期中度、苗期中度拔节期轻度处理的玉米与对照处理相比其冠部最终湿基含水率增加了3.61%、4.61%、1.64%、-4.46%、-6.03%,根部最终湿基含水率增加了1.38%、4.78%、3.47%、1.30%、8.15%。

(2)各水分亏缺处理的玉米植株叶片、茎秆、果穗等器官湿基含水率随生育时期的推进均呈降低趋势,处理间存在差异性。水分亏缺处理均降低了叶片、茎秆、果穗的湿基含水率,复水后至灌浆期苗期中度和苗期中度拔节期轻度处理的玉米果穗湿基含水率与对照处理相比分别增加1.81%、-6.02%,表明苗期中度水分调亏处理对促进玉米生育后期增

加产量有利,苗期中度拔节期轻度处理对玉米生长不利。

(3)土壤水分胁迫促进根系下扎以吸收更多的水分。相比对照处理而言,水分亏缺处理的玉米最终根长增加幅度为-5.75%~24.34%、最终根数增加幅度-2.78%~13.89%。

(4)适宜阶段进行适当的水分亏缺可提高作物产量和水分利用效率,各水分亏缺处理均能不同程度地降低作物耗水量、提高作物水分利用效率。相比对照处理而言,苗期中度处理和拔节期轻度处理的玉米耗水量分别降低16.71%、14.07%,产量分别增加5.20%、1.49%,水分利用效率分别提高26.25%、18.27%。苗期中度处理是促进滴灌玉米节水增产的最佳水分调亏处理,其次是拔节期轻度处理。

参 考 文 献

- 1 KANG Shaozhong, SHI Wenjuan, ZHANG Jianhua. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation[J]. *Field Crops Research*, 2000, 67(3): 207-214.
- 2 SARA A, ALEJANDRA N, SEBASTIAN B, et al. Regulated deficit irrigation in potted *Dianthus* plants: effects of severe and moderate water stress on growth and physiological responses[J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 122(4): 579-585.
- 3 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴管对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(2): 116-123.
- 4 KOU Dan, SU Derong, WU Di, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(2): 116-123. (in Chinese)
- 5 韦彦, 孙丽萍, 王树忠, 等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 67-72.
- 6 WEI Yan, SUN Liping, WANG Shuzhong, et al. Effects of different irrigation methods on water distribution and nitrate nitrogen transport of cucumber in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 67-72. (in Chinese)
- 7 王建东, 龚时宏, 许迪, 等. 灌水模式对冬小麦根系空间分布及多年产量的影响[J]. *水利学报*, 2011, 42(10): 1239-1246.
- 8 WANG Jiandong, GONG Shihong, XU Di, et al. Effects of irrigation models on the space distribution of root system and yield of winter wheat[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(10): 1239-1246. (in Chinese)
- 9 杨启良, 张富仓, 刘小刚, 等. 植物水分传输过程中的调控机制研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4427-4436.
- 10 YANG Qiliang, ZHANG Fucang, LIU Xiaogang, et al. Research progress on regulation mechanism for the progress of water transport in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4427-4436. (in Chinese)
- 11 LOUSTOU D, BERBINGER P, ROUMAGNAC P, et al. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. 1. Seasonal course of water flux through maritime pine[J]. *Oecologia*, 1996, 107(1): 33-42.
- 12 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.
- 13 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)
- 14 BASTIAANSEN W G, BANDARA K M. Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka[J]. *Irrig Sci*, 2001, 21: 1-15.
- 15 FABIO M D, RODOLFO A L, EMERSON A S, et al. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photo-synthesis of pot-grown coffee canephora Pierre[J]. *Trees*, 2002, 16: 555-558.
- 16 王娟, 郑国清. 夏玉米冠层反射光谱与植株水分状况的关系[J]. *玉米科学*, 2010, 18(5): 86-89.
- 17 WANG Juan, ZHENG Guoqing. Relationships between canopy reflectance and plant water status of summer maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(5): 86-89. (in Chinese)
- 18 郑丕晓. 作物生理学导论[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1992: 498-514.
- 19 LIM P O, KIM H J, GIL N H. Leaf senescence[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58: 115-136.
- 20 魏永霞, 马瑛瑛, 冯鼎瑞, 等. 调亏灌溉下滴灌玉米根冠生长与水分动态响应特征[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 180-188. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170723&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.023.
- 21 WEI Yongxia, MA Yingying, FENG Dingrui, et al. Characteristics of water dynamic response and growth of root and grown of maize under drip irrigation of regulated deficit irrigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,

- 48(7):180-188. (in Chinese)
- 15 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation & Drainage Papers 56, FAO, 1998.
- 16 乐章燕, 刘晶淼, 廖荣伟, 等. 土壤温湿度对玉米根系的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(6): 68-72.
LE Zhangyan, LIU Jingmiao, LIAO Rongwei, et al. Effect of soil temperature and humidity on different developmental periods of corn root[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(6): 68-72. (in Chinese)
- 17 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 rainfed highland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1990(4): 27-36. (in Chinese)
- 18 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/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 72-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120915&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.015.
ZOU Hui, HUANG Xingfa, GONG Shihong. Effects of water deficit on soil moisture and temperature regimes in subsurface drip irrigated summer corn field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 72-77. (in Chinese)
- 19 要世瑾, 杜光源, 牟红梅, 等. 基于核磁共振技术检测小麦植株水分分布和变化规律[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 177-186.
YAO Shijin, DU Guangyuan, MOU Hongmei, et al. Detection of water distribution and dynamics in body of winter wheat based on nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 177-186. (in Chinese)
- 20 吴志树. 4种林木幼苗含水率与生物量的关系研究[J]. 现代农业科技, 2014(21): 156-159.
WU Zhishu. Relationship between moisture content and biomass of four species of tree seedlings[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014(21): 156-159. (in Chinese)
- 21 武阳, 赵智, 王伟, 等. 调亏灌溉和灌溉方式对香梨树吸收根系重分布的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 244-251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170530&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.030.
WU Yang, ZHAO Zhi, WANG Wei, et al. Effect of regulated deficit irrigation and irrigation mode on fine roots redistribution of fragrant pear trees[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 244-251. (in Chinese)
- 22 FERNANDEZ J E, MORENO F, CABRERA F, et al. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees [J]. Plant and Soil, 1991, 133(2): 239-251.
- 23 马福生, 康绍忠, 王密侠, 等. 调亏灌溉对温室梨枣树水分利用效率与枣品质的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 37-43.
MA Fusheng, KANG Shaozhong, WANG Mixia, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water use efficiency and fruit quality of pear-jujube tree in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 37-43. (in Chinese)
- 24 TURNER N C. Plant water relations and irrigation management[J]. Agricultural Water Management, 1990, 17(1/3): 59-75.
- 25 XUE Q, MUSICK J T, DUSEK D A. Physiological mechanisms contributing to the increased water use efficiency in winter wheat under deficit irrigation[J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163(2): 154-164.
- 26 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24-27.
CAI Huanjie, KANG Shaozhong, ZHANG Zhenhua, et al. Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 24-27. (in Chinese)