

# 调亏灌溉下滴灌玉米根冠生长与水分动态响应特征

魏永霞<sup>1,2</sup> 马瑛瑛<sup>1</sup> 冯鼎瑞<sup>1</sup> 熊建<sup>1</sup> 张雨凤<sup>1</sup> 张翼鹏<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 以玉米为试验材料,在自动感应式遮雨棚下,采用测坑微区试验方法,研究黑龙江西部滴灌条件下调亏灌溉对作物根冠生长、干物质分配特征、根冠比、耗水特征及植株伤流量的影响。以土壤相对含水率(占田间持水率的百分数)为控制上下限,设置5个水分调亏处理,分别为苗期轻度(60%~70%FC)处理,苗期中度(50%~60%FC)处理,拔节期轻度(60%~70%FC)处理,拔节期中度(50%~60%FC)处理,苗期中度、拔节期轻度处理,另设全生育期保持适宜土壤水分(70%~80%FC)作为对照。试验结果表明,调亏灌溉不改变玉米根部和冠部生长的原有总趋势,也不改变冠部各器官生长的基本趋势,但是显著地增大了作物根冠比( $R/S$ ),复水后根、冠补偿生长效应明显,促进光合同化产物向生殖器官的运转与分配,增大了生育后期干物质向果穗的分配率。苗期中度处理和拔节期轻度处理的玉米,在调亏期间使根系维持较高的根质量,水分胁迫复水后根系活力明显提高,其伤流量表现出超补偿效应,在灌浆期仍保持较高的伤流量并且在生育后期仍保持有较高的根冠比( $R/S$ ),是协调玉米根冠生长关系的适宜水分调亏处理。

**关键词:** 玉米; 调亏灌溉; 干物质分配率; 根冠比; 伤流量; 耗水量

**中图分类号:** S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0180-09

## Characteristics of Water Dynamic Response and Growth of Root and Crown of Maize under Drip Irrigation of Regulated Deficit Irrigation

WEI Yongxia<sup>1,2</sup> MA Yingying<sup>1</sup> FENG Dingrui<sup>1</sup> XIONG Jian<sup>1</sup> ZHANG Yufeng<sup>1</sup> ZHANG Yipeng<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** The experiment with micro plots under automatically inductive type of rain preventing condition was carried out to analyze the influence of regulated deficit irrigation on root and crown growth, characteristics of dry matter distribution, water consumption, root – shoot ratio and the wound flow of maize plant. Choosing the relative water content (the percent of field water-holding rate) of soil as the upper and lower controlling limits, five treatments of water deficit were set, which were respectively the mild treatment (60%~70%FC) and the moderate treatment (50%~60%FC) at seedling stage, the mild treatment (60%~70%FC) and the moderate treatment (50%~60%FC) at jointing stage, moderate treatment at seedling stage and mild treatment at jointing stage, and the appropriate water content (70%~80%FC) was set as control in the whole growth period. The result showed that the regulated deficit irrigation did not change the total tendency of growth of root and crown of maize and the basic tendency of the growth of different organs in crown, but it increased the root – shoot ratio of plant and the distribution ratio of dry matters to ear in later stage of growth obviously, accelerated the transportation and distribution of photoassimilate to reproductive organs and enhanced the compensatory growth of root and crown after rehydration. The mild and moderate treatments at seedling stage of maize sustained higher root quality during deficit period, remarkably increased the root activity after rehydration, showed super compensatory effect of wound flow, kept higher wound flow at filling stage and sustained higher root – shoot ratio in later growth period, which was the appropriate water deficit treatment for coordinating the relationship of the growth of root and crown of maize.

**Key words:** maize; regulated deficit irrigation; distribution rate of dry matter; root – shoot ratio; wound flow; water consumption

收稿日期: 2016-11-24 修回日期: 2016-12-14

基金项目: “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

## 引言

玉米是黑龙江省四大主要粮食作物之一,干旱缺水和水土流失严重制约着该区玉米产业的发展。该区水资源已无法满足农业和生态系统可持续发展的需求,因此,发展高效的节水灌溉技术与制定合理的灌溉制度已成为黑龙江省农业生产应对水资源短缺、优化农业用水配置的必然选择。

地面滴灌作为一种重要的节水灌溉技术,由于其仅局部湿润作物根区附近土壤,具有不破坏土壤结构、不致使土壤表层板结、减少土壤无效蒸发和杂草对土壤水分的消耗等优点,对促进作物生长、增加产量、提高水分利用效率具有重要意义。相对地面灌溉方式而言,滴灌方式土壤水分入渗更加均匀且规律明显<sup>[1]</sup>。韦彦等<sup>[2]</sup>的研究结果表明,滴灌比畦灌节水 25.9%,增产 11.6%,水分利用效率提高 49.9%。王建东等<sup>[3]</sup>研究了灌水模式对冬小麦根系空间分布及多年产量的影响,结果表明滴灌模式下作物产量多年连续稳定的几率大于地面精细灌溉,且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。国外也进行了较多的相关研究<sup>[4-6]</sup>。

作物调亏灌溉(Regulated deficit irrigation, RDI)理论自 20 世纪 70 年代中后期提出以来,已成功应用于果园、玉米、小麦、棉花、烟草等大田作物<sup>[7-12]</sup>,其基本思想是依据作物的遗传和生理特性,在特定生长阶段人为主动施加一定程度的水分胁迫,通过调节根冠比控制营养器官的生长,改变干物质在营养器官和生殖器官间的分配比例<sup>[13]</sup>,增加产量,提高水分利用效率<sup>[14]</sup>。根与冠构成了作物的整体功能系统,二者结构和功能的最优匹配对提高作物水分利用效率具有重要意义。前期根冠比较大后期根冠比较小有利于促进冬小麦生长遗传特性的发挥,增加生育后期冠层生物量的累积<sup>[13]</sup>。通过对土壤水分状况的人为调节,使根系吸水与作物蒸腾量达到最优匹配,根、冠处于最佳功能平衡状态,干物质更多的向产量部分转化和分配,对增加产量具有重要意义。孟兆江等<sup>[12]</sup>研究表明,适宜阶段适当的水分亏缺对根系生长具有明显的促进效应,可维持较高的根干质量,复水后有不同程度的根系补偿生长效应或有延缓根系衰亡的作用。迄今,国内外学者对调亏灌溉已做了不少研究,其中关于调亏灌溉对作物根冠生长影响的研究也较多,但是在地面滴灌这种特殊灌溉方式下有关调亏灌溉对玉米全生育期内根冠动态响应特征的研究甚少,且有关玉米调亏复水后的补偿效应研究主要在农艺性状、光合作用、

蒸腾速率方面,较少涉及调亏复水前后伤流量等的研究。

康绍忠等<sup>[7]</sup>和王密侠等<sup>[15]</sup>研究表明,苗期中度亏水(50%~60%的田间持水量)、拔节期轻度亏水(60%~70%的田间持水量)的灌溉方案增加了产量同时显著提高了水分利用效率,抽雄期以后不宜进行调亏灌溉。孙继鹏等<sup>[16]</sup>对黑龙江西部玉米进行了调亏灌溉试验,结果表明苗期中度水分亏缺为最佳的灌水处理模式。本文在以上试验的基础上,从根、冠整体功能出发,对黑龙江西部玉米苗期和拔节期进行测坑微区调亏灌溉试验,研究水分亏缺条件下玉米生长的自适应调节能力,调亏灌溉的正效应及调亏灌溉结束复水后根、冠功能的补偿生长效应。分析根、冠关系对水分条件变化的响应特征与规律,以期合理制定和评价黑龙江西部大田玉米节水高产用水方案提供理论依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2016 年 5—10 月份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,海拔高度 137 m,总面积 55 hm<sup>2</sup>)进行。试验地位于东北典型黑土带上,年平均气温 3.1℃,无霜期 130~140 d,年降水量多介于 400~650 mm 之间;降水多集中在 7—9 月份,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) 154.4 mg/kg,速效磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 40.1 mg/kg,速效钾(K<sub>2</sub>O) 376.8 mg/kg, pH 值为 7.27。0~1 m 土层内的平均田间持水率(质量分数)为 28.4%,土壤干容重为 1.22 g/cm<sup>3</sup>。

### 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,株行距为 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/hm<sup>2</sup>,追肥 330 kg/hm<sup>2</sup>,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 0~45 cm、拔节期 0~60 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 Experimental design scheme %

处理 编号	处理名称	不同生育阶段的水分处理 (占田间持水量的百分比)			
		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 观测指标与方法

(1)土壤含水率:处理开始后每隔5d采用烘干法逐层测定计划湿润层(0~10cm、10~20cm、20~40cm、40~60cm)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,以确定灌水量和灌水时间,灌水前后加测。

(2)地上部分干质量:分别于苗期(播后33d)、拔节期(播后57d)、抽雄期(播后73d)、灌浆期(播后91d)、成熟期(播后121d)、收获时(播后136d)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2~3h杀青,并在80℃下干燥至质量恒定,用精度为0.01g电子天平称取干质量。

(3)根部干质量: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60cm×60cm,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装入档案袋,80℃下干燥至质量恒定,用精度为0.01g电子天平称取干质量。

(4)伤流量:分别于拔节期(播后57d)、抽雄期(播后73d)、灌浆期(播后91d)每小区选取长势一致的植株3株,当天18:00在距地面10cm处将玉米割断,套上已称量( $W_1$ )的装有脱脂棉的自封袋密封,并用皮筋将其扎紧,12h后取下称量( $W_2$ ),伤流量(g/株)为 $W_2$ 与 $W_1$ 之差。另外,在抽雄期采用同样方法于当天06:00开始,每隔12h收集一次伤流量,直至收集不到为止。

### 1.4 计算方法

#### 1.4.1 灌水量

$$W = \gamma HA(W_s - W_0) \quad (1)$$

式中  $W$ ——灌水量,  $m^3$

$\gamma$ ——土壤干容重,  $g/cm^3$

$H$ ——计划湿润层深度,  $cm$

$A$ ——测坑面积,  $cm^2$

$W_s$ ——设计含水率上限, %

$W_0$ ——灌前土壤实测含水率, %

#### 1.4.2 干物质分配率

干物质分配率为各器官干物质质量与植株冠部干物质总量的百分比。

#### 1.4.3 阶段耗水量

试验小区内的作物耗水量采用水量平衡法计算。由于试验在自动感应式遮雨棚测坑内进行,且测坑矩形有底,因此生长季内降水量、地表径流量、地下水补给量可忽略不计。另外,由于灌水前后0~60cm土层未达到田间持水量,所以深层耗水量可忽略不计。因此,耗水量计算公式可简化为

$$ET_i = \Delta W + I \quad (2)$$

阶段耗水强度计算式为

$$C_i = ET_i / d_i \quad (3)$$

阶段耗水模系数计算式为

$$R_i = ET_i / ET \times 100\% \quad (4)$$

式中  $ET_i$ ——阶段耗水量,  $mm$

$\Delta W$ ——计算时段0~60cm土层储水量变化量

$I$ ——计算时段内灌水量,  $mm$

$C_i$ ——阶段耗水强度,  $mm/d$

$d_i$ ——阶段生长天数,  $d$

$R_i$ ——阶段耗水模系数, %

$ET$ ——全生育期总耗水量,  $mm$

### 1.5 数据处理

试验数据采用Excel进行初步整理,用Origin 7.5制图,用SPSS 22.0进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米冠部、根部干物质积累动态特征

土壤水分状况对作物生长有着显著影响,图1为不同生育阶段不同水分亏缺条件下玉米冠部、根部干物质累积生长动态曲线。地上干物质积累是反映作物生产能力的一个重要指标,是构成作物经济产量的基础<sup>[14]</sup>,由图1a可以看出,不论土壤水分如何变化,随着玉米生育时期的推进,冠部干物质累积均呈现出明显的“S”型曲线递增趋势,这与周新国等<sup>[17]</sup>的研究结果一致,表明调亏灌溉并没有改变玉米冠部生长的总体趋势。但具体分析各生育阶段显示,各处理干物质质量在苗期结束快进入拔节期时表现为:CK≈C3≈C4>C1>C2≈C5,处理C1、C2分别比对照降低22.99%、46.31%,表明苗期玉米干物质质量增长与干旱的抑制程度表现出相应的负相关关系,这是由于苗期为玉米营养生长期,而水分胁迫抑制了此阶段的营养生长。拔节期各处理干物质质量

呈现出与苗期相同的变化趋势,处理 C1、C2、C3、C4、C5 比对照 CK 分别降低了 17.88%、13.10%、26.70%、44.18%、48.26%,但是各处理间的这种差异相对于苗期有所降低,到抽雄期处理 C2、C3 基本已达对照水平,这是由于水分亏缺复水后玉米生长存在超补偿效应,且这种补偿生长一直延续到抽雄期。至成熟期, C5 处理的干物质量比对照降低 37.67%,差异达极显著水平 ( $P < 0.01$ ),说明生育期连续水分胁迫不利于玉米冠部干物质积累; C1、C4 比对照有所降低, C3 处理接近对照, C2 处理超

过对照水平,说明适时适度的水分亏缺可延缓后期叶片衰老,有利于光合产物向生殖器官分配,进而提高玉米籽粒产量。

图 1b 显示,各处理根部干物质累积生长动态变化特征与冠部呈现出相似的规律,且呈倒“V”型曲线,表明水分调亏期间也没有改变玉米根系生长的总体趋势。

### 2.2 单株玉米各器官干物质分配特征

对调亏灌溉条件下平均单株玉米各器官的干物质质量分配与累积进行分析,结果如图 2 所示。

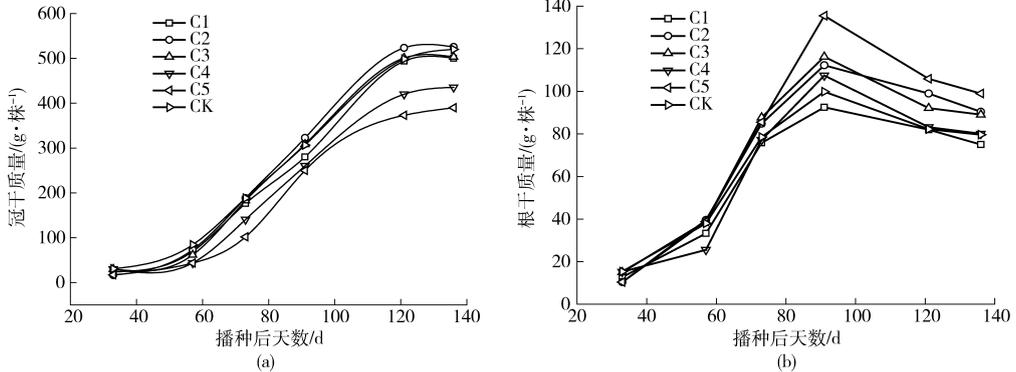


图 1 不同处理的玉米冠部和根部干物质积累动态曲线

Fig. 1 Dynamic curves of accumulation of dry matters in root and crown of maize under different treatments

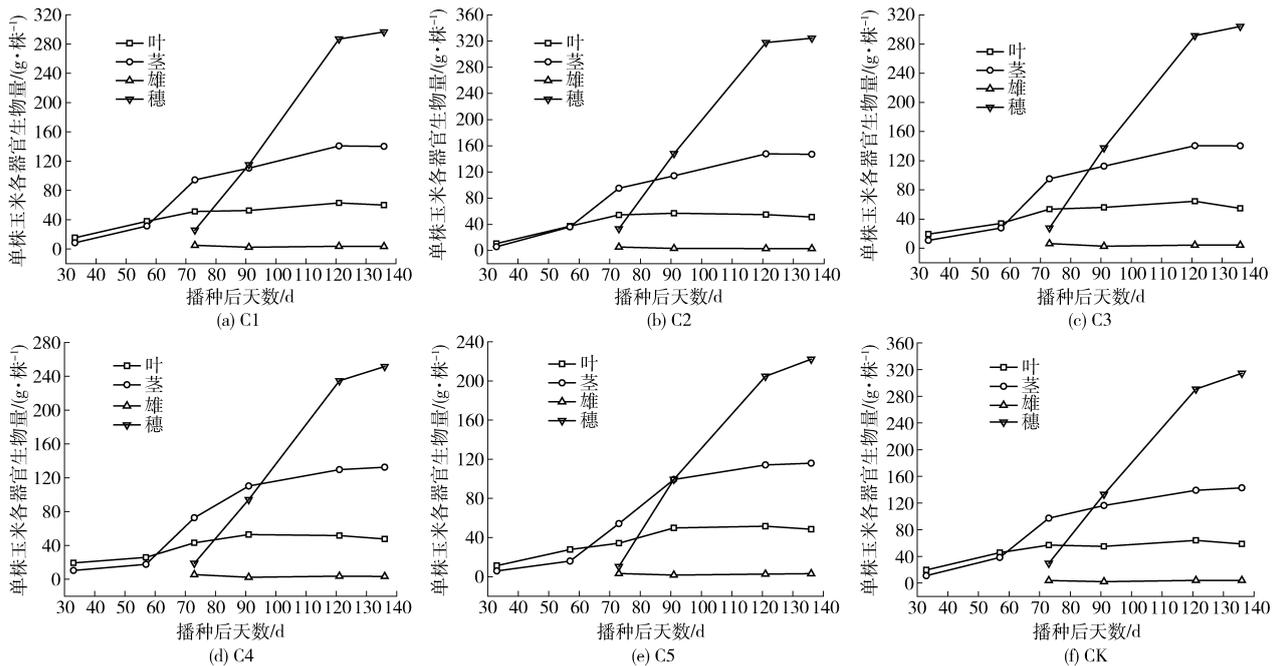


图 2 玉米各器官的干物质积累动态曲线

Fig. 2 Accumulation curves of dry matter in each organ of maize

不同水分处理单株玉米各器官的干物质累积呈现出相同器官具有相同的变化趋势且各处理之间差异明显,表明调亏灌溉在不改变冠部生长总体趋势的同时也不改变单株玉米各器官生长的基本趋势,水分调亏有利于光合产物向籽粒的运转与分配<sup>[18]</sup>。在播后 73 d,各处理在玉米抽雄期的叶片干质量都

已达到最大值,随着叶片的衰老与光合产物向生殖器官的转移<sup>[17]</sup>,其在干物质累积中所占的比例逐渐减小;茎干质量在拔节期之后进入快速增长阶段,灌浆期达到最大值,之后基本保持不变,比例下降;雄干质量保持稳定至成熟期(播后 136 d)略有降低;玉米穗干质量在生物量累积中的比例逐渐增大;播

种 121 d 以后,玉米各器官干物质质量都趋于稳定。这与周新国等<sup>[17]</sup>的研究在时间上稍有出入,可能是由于苗期调亏处理的玉米,若后期充分供水,生育阶段将有所延长所致<sup>[19]</sup>。

由表 2 可知,随着玉米生育期的推进,叶片光合作用的产物不断向籽粒运输,且逐步衰败,使得干物质在叶片中的分配率逐渐降低,C2 处理在成熟期(播后 136 d)叶片的干物质分配率最低。光合作用产物储存在茎中的干物质质量随生育期推进不断调运到籽粒库,呈现出先增大后减小的变化趋势,拔节期

(播后 57 d)C5 处理茎分配率显著低于对照水平;抽雄期(播后 73 d)玉米开始进入营养生长和生殖生长并进阶段,光合产物开始逐渐向籽粒运输,各水分处理的干物质在茎中的分配率差异不显著。雄的干物质分配率呈下降趋势,至成熟期,各处理之间差异不显著。抽雄期以后籽粒的干物质分配率不断上升,成熟期(播后 136 d)C2 处理略高于对照、C3 处理接近对照,显著高于 C4、C5 处理,可见滴灌条件下适时适度的水分亏缺在节约灌水量的同时有利于光合产物向籽粒的分配与积累。

表 2 各器官的干物质分配率

Tab. 2 Distribution rate of dry matters in different organs

%

器官	处理	播种后天数/d					
		33	57	73	91	121	136
叶片	C1	64.56 <sup>a</sup>	54.76 <sup>bc</sup>	29.01 <sup>b</sup>	18.77 <sup>ab</sup>	12.71 <sup>a</sup>	11.98 <sup>ab</sup>
	C2	65.33 <sup>a</sup>	50.80 <sup>c</sup>	28.87 <sup>b</sup>	17.68 <sup>b</sup>	10.49 <sup>b</sup>	9.74 <sup>c</sup>
	C3	64.10 <sup>a</sup>	55.00 <sup>bc</sup>	29.32 <sup>ab</sup>	18.14 <sup>ab</sup>	12.85 <sup>a</sup>	10.85 <sup>bc</sup>
	C4	64.76 <sup>a</sup>	59.43 <sup>ab</sup>	30.77 <sup>ab</sup>	20.37 <sup>a</sup>	12.33 <sup>ab</sup>	10.95 <sup>abc</sup>
	C5	65.72 <sup>a</sup>	63.66 <sup>a</sup>	33.48 <sup>a</sup>	19.88 <sup>ab</sup>	13.82 <sup>a</sup>	12.44 <sup>a</sup>
	CK	63.88 <sup>a</sup>	54.36 <sup>bc</sup>	30.33 <sup>ab</sup>	17.95 <sup>ab</sup>	12.87 <sup>a</sup>	11.28 <sup>ab</sup>
茎	C1	35.44 <sup>a</sup>	45.24 <sup>ab</sup>	53.51 <sup>a</sup>	39.39 <sup>ab</sup>	28.49 <sup>a</sup>	28.04 <sup>a</sup>
	C2	34.67 <sup>a</sup>	49.20 <sup>a</sup>	50.55 <sup>a</sup>	35.40 <sup>b</sup>	28.23 <sup>a</sup>	27.98 <sup>a</sup>
	C3	35.90 <sup>a</sup>	45.00 <sup>ab</sup>	52.04 <sup>a</sup>	36.48 <sup>ab</sup>	28.07 <sup>a</sup>	27.88 <sup>a</sup>
	C4	35.24 <sup>a</sup>	40.57 <sup>bc</sup>	51.83 <sup>a</sup>	42.45 <sup>a</sup>	30.88 <sup>a</sup>	30.45 <sup>a</sup>
	C5	34.28 <sup>a</sup>	36.34 <sup>c</sup>	53.20 <sup>a</sup>	39.69 <sup>ab</sup>	30.61 <sup>a</sup>	29.76 <sup>a</sup>
	CK	36.12 <sup>a</sup>	45.64 <sup>a</sup>	51.78 <sup>a</sup>	37.96 <sup>ab</sup>	27.93 <sup>a</sup>	27.45 <sup>a</sup>
雄	C1			2.80 <sup>c</sup>	0.80 <sup>ab</sup>	0.73 <sup>ab</sup>	0.70 <sup>ab</sup>
	C2			2.91 <sup>c</sup>	1.00 <sup>a</sup>	0.59 <sup>b</sup>	0.58 <sup>b</sup>
	C3			3.43 <sup>b</sup>	0.85 <sup>ab</sup>	0.86 <sup>a</sup>	0.83 <sup>a</sup>
	C4			3.98 <sup>a</sup>	0.92 <sup>a</sup>	0.88 <sup>a</sup>	0.80 <sup>a</sup>
	C5			3.11 <sup>bc</sup>	0.66 <sup>b</sup>	0.69 <sup>ab</sup>	0.77 <sup>ab</sup>
	CK			2.07 <sup>d</sup>	0.70 <sup>b</sup>	0.84 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>
穗	C1			14.70 <sup>abc</sup>	41.06 <sup>abc</sup>	58.07 <sup>a</sup>	59.28 <sup>a</sup>
	C2			17.67 <sup>a</sup>	45.92 <sup>a</sup>	60.69 <sup>a</sup>	61.70 <sup>a</sup>
	C3			15.21 <sup>bc</sup>	44.54 <sup>ab</sup>	58.22 <sup>a</sup>	60.44 <sup>a</sup>
	C4			13.44 <sup>c</sup>	36.26 <sup>c</sup>	55.91 <sup>a</sup>	57.80 <sup>a</sup>
	C5			10.21 <sup>d</sup>	39.77 <sup>bc</sup>	54.88 <sup>a</sup>	57.03 <sup>a</sup>
	CK			15.83 <sup>ab</sup>	43.39 <sup>ab</sup>	58.35 <sup>a</sup>	60.49 <sup>a</sup>

注:同一列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

### 2.3 玉米全生育期内根冠比动态变化特征

调亏灌溉可有效调整作物营养生长与生殖生长的关系,调节光合产物在根冠间的分配比例。图 3 为不同水分胁迫处理在各生育期结束时测定的玉米根和冠的干物质质量之比( $R/S$ )。从总体上看,各处理的  $R/S$  随生育阶段的推进均呈下降趋势(C5 处理除外),至成熟期趋于稳定。这说明前期根冠比较大后期根冠比较小,有利于玉米生长遗传特性的表现,促进生育后期冠层生物量的累积,以形成最大的经济产量。从不同生育阶段看,水分亏缺基本可

提高  $R/S$ ,且随着调亏度的加剧, $R/S$  呈增大趋势。苗期,轻度处理(C1)、中度处理(C2、C5)  $R/S$  分别较对照增加 8.00% ( $P > 0.05$ )、26.00% ( $P < 0.05$ );  $R/S$  最大值出现在拔节期 C5 处理,比同期 CK 处理增加 98.40%,差异达极显著水平( $P < 0.01$ );抽雄期  $R/S$ ,C1 比对照略高,C2、C3 较对照分别增加 7.10%、14.29%,差异不显著,C4 较对照增加 30.95%,差异达显著水平,C5 比对照增加 97.60%,差异达极显著水平;成熟期  $R/S$ ,C1、C2、C3 分别较对照增加 0.20%、14.53%、11.52%,差异

不显著, C4 较对照增加 20.00%, 差异达显著水平, C5 比同期对照增加 98.79%, 差异达极显著水平; 对比收获时测得的各处理  $R/S$ , 不难发现, 前期适宜的水分亏缺可延缓后期根系衰老, 具有较高的根系活力, 相比成熟期保持较高的  $R/S$ 。这说明当玉米在苗期发生水分亏缺时, 尽管根系和冠层生长均受到一定限制, 但在其对水分调亏的自适应性、水分调亏的后效性及水分调亏结束复水后的根冠补偿生长效应的多重作用下, 根系从土壤中获得的水分被优先满足于根系生长发育的需求, 使根系受害较地上部分减轻, 根冠比增大; 同时表明生育早期适宜程度的水分亏缺可促进玉米遗传特性的表达<sup>[13]</sup>, 增进玉米根系在生育前期获得更大干物质分配的优先权, 从而控制地上部分旺长, 提高植株抗倒伏能力。

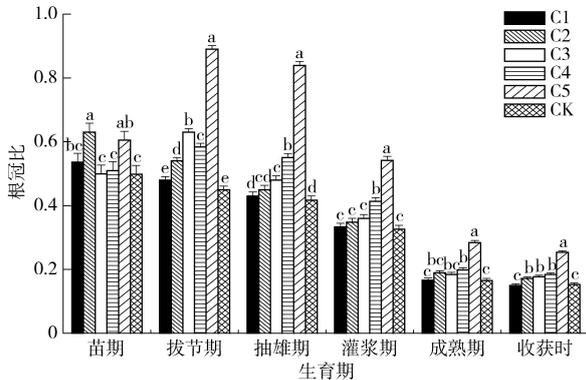


图 3 不同水分条件下的根冠比 ( $R/S$ ) 变化

Fig. 3 Variation of root-shoot ratio under different moisture contents

## 2.4 玉米各生育期耗水特征

控制阶段耗水量是提高水分利用效率的生理基础。表 3 为不同水分亏缺处理下玉米各生育期的耗水量 ( $ET_i$ )、耗水强度 ( $C_i$ )、耗水模系数 ( $R_i$ )。整体来看, 各调亏处理玉米阶段耗水量表现出相似的变化规律, 均呈“V”形变化, 全生育期内抽雄期—灌浆期各处理的耗水量最低。就不同处理而言, 水分亏缺使得阶段耗水量在一定程度上均较对照有所降低, 且水分亏缺程度越大, 耗水量越低。由于土壤持续干旱缺水形成的叠加效应明显<sup>[20]</sup>, 处理 C5 在调亏期间的耗水量显著低于其他处理, 复水后其阶段耗水量仍显著低于 CK。处理 C1、C2、CK 耗水强度在拔节期—抽雄期达最大值, 分别为 4.70、4.23、4.84 mm/d。抽雄期—灌浆期, 处理 C3 耗水强度达峰值, 为 4.44 mm/d, 处理 C5 各生育阶段耗水强度均低于其他处理。各处理耗水模系数在苗期—拔节期最大, 为 29.66% ~ 35.31%, 这可能是由于苗期—拔节期阶段历时长, 地表冠层覆盖率低, 土壤无效蒸发强所致; 抽雄期—灌浆期最小, 为 13.79% ~ 18.94%; 灌浆期—成熟期是籽粒产量形成的关键时

表 3 各生育期耗水特征

Tab. 3 Characteristics of water consumption at each growth stage

参数	处理	苗期—	拔节期—	抽雄期—	灌浆期—
		拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期
$ET_i/\text{mm}$	C1	140.95 <sup>b</sup>	117.45 <sup>b</sup>	85.10 <sup>a</sup>	131.55 <sup>c</sup>
	C2	130.98 <sup>b</sup>	105.76 <sup>c</sup>	65.53 <sup>b</sup>	129.05 <sup>c</sup>
	C3	124.08 <sup>c</sup>	86.89 <sup>d</sup>	84.30 <sup>a</sup>	149.71 <sup>b</sup>
	C4	131.02 <sup>bc</sup>	71.15 <sup>e</sup>	51.18 <sup>c</sup>	117.71 <sup>d</sup>
	C5	111.32 <sup>d</sup>	57.81 <sup>f</sup>	49.84 <sup>e</sup>	99.28 <sup>e</sup>
	CK	155.80 <sup>a</sup>	120.93 <sup>a</sup>	87.81 <sup>a</sup>	153.24 <sup>a</sup>
$C_i/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	C1	3.92 <sup>b</sup>	4.70 <sup>b</sup>	4.48 <sup>a</sup>	3.56 <sup>c</sup>
	C2	3.64 <sup>c</sup>	4.23 <sup>c</sup>	3.45 <sup>b</sup>	3.49 <sup>c</sup>
	C3	3.45 <sup>c</sup>	3.48 <sup>d</sup>	4.44 <sup>a</sup>	4.05 <sup>b</sup>
	C4	3.64 <sup>c</sup>	2.85 <sup>e</sup>	2.69 <sup>e</sup>	3.18 <sup>d</sup>
	C5	3.09 <sup>d</sup>	2.31 <sup>f</sup>	2.62 <sup>e</sup>	2.68 <sup>e</sup>
	CK	4.33 <sup>a</sup>	4.84 <sup>a</sup>	4.62 <sup>a</sup>	4.14 <sup>a</sup>
$R_i/\%$	C1	29.66 <sup>b</sup>	24.72 <sup>a</sup>	17.91 <sup>ab</sup>	27.69 <sup>d</sup>
	C2	30.36 <sup>b</sup>	24.52 <sup>a</sup>	15.19 <sup>d</sup>	29.92 <sup>c</sup>
	C3	31.75 <sup>c</sup>	19.52 <sup>c</sup>	18.94 <sup>a</sup>	29.78 <sup>a</sup>
	C4	35.31 <sup>a</sup>	19.17 <sup>c</sup>	13.79 <sup>e</sup>	31.72 <sup>b</sup>
	C5	34.97 <sup>a</sup>	18.16 <sup>d</sup>	15.66 <sup>cd</sup>	31.20 <sup>b</sup>
	CK	30.08 <sup>b</sup>	23.35 <sup>b</sup>	16.95 <sup>bc</sup>	29.60 <sup>c</sup>

期, 作物对缺水的敏感程度最大, 作物耗水量明显增加, 耗水模系数较前期有所提高, 为 27.69% ~ 31.72%。

## 2.5 土壤含水率动态变化特征

农业生产中, 灌溉水只有转化为土壤水才能为作物吸收利用。对生育期内 0 ~ 60 cm 深土壤平均含水率的连续动态变化进行分析, 结果如图 4 所示。总体来看, 灌水初期土壤水分消耗较剧烈, 后期趋于平缓, 且在播后 55 ~ 73 d 土壤水分消耗最剧烈, 这可能是因为此段时期当地平均气温高、日照时数多、太阳辐射量大, 土壤无效蒸发耗水大, 同时玉米生长进入拔节期, 生理耗水增加, 在二者的综合影响下使得此阶段的土壤水分消耗在全生育期内最大。不同处理间土壤含水率变化差异明显, 调亏期间低水分处理玉米植株的蒸腾耗水量和株间土壤蒸发量均小于对照处理, 各调亏处理的土壤水分消耗均缓于对照。

## 2.6 玉米茎伤流量变化特征

图 5 为不同水分胁迫处理下玉米植株在拔节期、抽雄期、灌浆期测得的伤流量。由图 5 可知, 抽雄期伤流量达到最大值。拔节期复水后, 处理 C1、C2 根系活力有所提高, 其伤流量分别比对照高 2.57%、3.50%, 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 拔节期亏缺处理的玉米植株伤流量均低于对照 (CK), 处理 C3 比对照低 17.46%, 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 处理

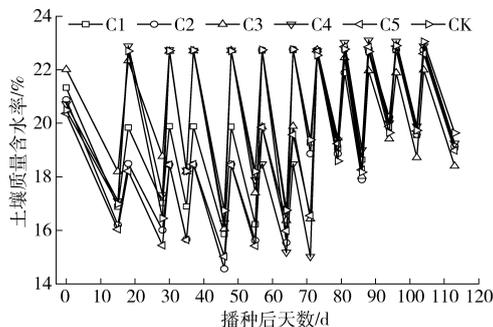


图4 生育期内不同处理0~60 cm 土层土壤含水率变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of soil water contents in 0~60 cm soil layer under different treatments during growth period

C4、C5 分别比对照低 28.63%、30.04%，差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。抽雄期复水后，除 C5 外，其他处理的伤流量均高于对照，说明补偿生长一直延续到抽雄期，处理 C5 可能是因为一直受到缓慢的水分胁迫，加之根系比地上部有着更有效的渗透调节作用<sup>[7]</sup>，过量的碳水化合物满足根系生长而抑制地上部生长明显，叶面积减小，蒸腾能力减弱，伤流量降低。灌浆期，处理 C1、C2、C3 的伤流量相比对照均有所增加，增幅为 2.97%~12.54%，处理 C4 尽管在抽雄期复水后表现出了一定的补偿生长，但是由于拔节期为营养生长旺盛时期，中度的水分亏缺加速了叶片的老化，致使叶片蒸腾能力减弱，伤流量在灌浆期低于对照处理。对比抽雄期—灌浆期伤流量变幅，不难发现处理 C1、C2、C3 伤流量降低幅度低于对照处理。这说明玉米植株生长前期经受适宜程度的水分亏缺，在复水后其蒸腾存在明显的补偿效应，对根系的生长速率具有促进作用，在籽粒灌浆期仍保持较高的根系活力，以形成最大的经济产量。

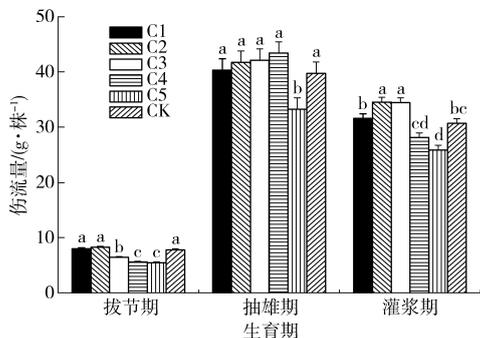


图5 不同水分条件下伤流量变化

Fig. 5 Variation of wound flow under different moisture contents

## 2.7 抽雄期复水后各调亏处理玉米的伤流量昼夜变化特征

图6为抽雄期不同水分调亏处理单株玉米伤流量昼夜动态变化特征。通过连续收集4d(7月22

日—7月25日)内伤流量变化可以看出，玉米植株在割掉地上部后第1天，白天(06:00—18:00)收集伤流量较少，夜间(18:00—06:00)收集伤流量达到4d内最大值，此后收集到的伤流量持续减少，这是因为白天随着大气温度的升高，水分不断被蒸发，土壤中可利用的水分逐渐减少，夜间随着土壤温度降低，土壤含水率略有回升<sup>[21]</sup>，使得根系对土壤水分的汲取在白天维持在较低水平，夜间十分活跃，从而玉米伤流量在夜间大于白天。就不同处理而言，处理 C1、C2、C3、C4 在 24 h 内收集的伤流量均大于对照水平，占总伤流量的 60% 左右，且胁迫程度越重，复水后伤流量越大，补偿效应越明显，处理 C5 收集的伤流量低于其他处理，可能是因为苗期、拔节期连旱，对冠层生长的抑制作用明显，叶面积减小，蒸腾拉力减弱，伤流量降低。72 h 后各处理伤流基本停止，但处理 C2、C3、C5 可延续较长时间，84 h 后仍可采集到较少的伤流量。

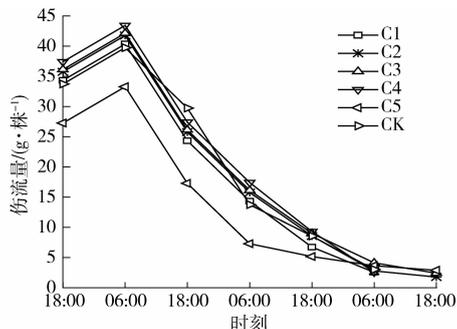


图6 抽雄期伤流量昼夜变化动态曲线

Fig. 6 Diurnal variation curves of wound flow at anthesis stage

## 3 讨论

玉米不同生育期根与冠的生长、干物质积累与分配、耗水量及伤流量因其自身的遗传特性和不同生育阶段灌水量的不同而表现出一定的差异。研究发现，生育期内灌水量对生产一季作物后田块土壤含水率的影响不明显，这说明土壤水分的无效消耗随着灌水量的增多不断增加，而调亏灌溉不但能够减少株间土壤蒸发量，且在水分亏缺时段内显著抑制蒸腾强度，复水后表现出显著的补偿效应，以弥补水分亏缺期间造成的生物产量的不足，有效减少了土壤水分的无效消耗。

作物根冠生长受遗传因素控制，且环境变化影响遗传特性的表达。本研究表明，水分亏缺期间作物根冠生长均受到抑制，复水后干物质超补偿积累，且有利于向生殖器官的运转与分配，这与孟兆江等<sup>[18]</sup>对夏玉米的研究结果一致。各处理玉米的根冠比变化趋势一致，均随生育期的推进不断降低，这

与杨贵羽等<sup>[13]</sup>对冬小麦的研究结果一致。调亏处理均可不同程度增大玉米的根冠比,这与孟兆江等<sup>[12]</sup>对棉花的研究结果一致。

玉米植株伤流量与其根系活力呈现正相关关系,缩小抽雄期—灌浆期伤流量减幅对延缓根系衰老以形成最大的经济产量具有重要作用<sup>[22]</sup>。本研究表明,水分胁迫复水后根系活力明显提高,其伤流量表现出超补偿效应,这与赵伟杰等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。有研究表明水分胁迫加速了作物的衰老<sup>[24]</sup>,但也有学者得出了相反的结论<sup>[24]</sup>,本试验中苗期调亏处理的玉米在灌浆期仍保持较高的伤流量,这与郭相等<sup>[19]</sup>认为苗期调亏处理能在生长后期保持较高的根系活力相吻合。以往对于玉米伤流量的研究集中在对其日变化和一日昼夜内个体间伤流量差异的研究,但对其连续昼夜变化特征的研究还未见报道,本试验通过对抽雄期连续4 d内昼夜伤流量的收集发现,24 h内玉米植株伤流量夜间大于白天,24 h后呈持续下降趋势,这种现象是因为阴雨天气昼夜温差小,夜间土壤含水率回升不明显导致伤流量夜间仍低于白天,还是因为夜间土壤含水率回升增加的伤流量本身不足以抵消因植株自愈和根压消失减少的伤流量还有待进一步探讨。

研究作物阶段耗水特征,并结合高效的灌溉技术措施对减少农业生产用水、提高水分利用效率具有重要的现实意义。本研究表明,不同处理玉米在各生育阶段的耗水强度变化趋势表现出一定的差异,这可能与不同的灌水处理影响玉米的生育进程有关<sup>[20]</sup>。

## 4 结论

(1)各调亏处理玉米冠部生长均遵从“S”型曲线增长,根系生长均呈倒“V”型曲线变化,但各处理

间差异显著。与对照相比,调亏处理的玉米冠部最终干物质量增加了-25.07%~1.07%、根部最终干物质量增加了-5.74%~24.36%,表明调亏灌溉不改变玉米冠部和根部生长的总体趋势,但能影响其数量。

(2)各调亏处理单株玉米冠部相同器官生长均表现出相同的变化趋势,处理间存在差异性。苗期中度处理的玉米在播种后73、91、121、136 d,其干物质量向果穗的分配率较对照分别增加11.62%、5.83%、4.01%、2.00%,拔节期轻度处理的玉米其干物质量向果穗的分配率接近对照处理,表明调亏灌溉不改变单株玉米各器官生长的基本趋势,但适宜的水分调亏处理有利于干物质向果穗的转移与分配。

(3)调亏灌溉基本可提高根冠比,且随水分调亏度的加重,根冠比明显增大。成熟期,苗期中度处理和拔节期轻度处理的玉米仍保持有较高的根冠比,与同期对照相比,根冠比分别增加14.55%、11.52%,苗期、拔节期连旱处理可显著抑制玉米的营养生长,与同期对照相比,根冠比增加72.12%,差异达极显著水平( $P < 0.01$ )。

(4)各调亏处理均能减缓土壤水分消耗速率,降低作物耗水量。苗期轻度、苗期中度、拔节期轻度、拔节期中度、苗期和拔节期连旱处理的玉米其耗水量依次比对照组降低8.26%、16.71%、14.07%、28.35%和38.54%。

(5)复水对调亏处理玉米植株伤流量的补偿作用显著。苗期中度、拔节期轻度处理的玉米植株复水后根系活力明显提高,其伤流量表现出超补偿效应,在灌浆期仍保持较高的伤流量,与同期对照组相比,分别增加12.54%、12.28%,是协调滴灌玉米根冠生长关系的适宜水分调亏处理。

## 参 考 文 献

- 1 赵波,王振华,李文昊. 滴管方式及定额对北疆冬灌棉田土壤水盐分及次年棉花生长的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(6):139-148.  
ZHAO Bo, WANG Zhenhua, LI Wenhao. Effects of winter drip irrigation mode and quota on water and salt distribution in cotton field soil and cotton growth next year in northern Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(6):139-148. (in Chinese)
- 2 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.  
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)
- 3 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.  
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)
- 4 KARKANIS A, BILALIS D, EFTHIMIADOU A. Tobacco (*Nicotiana tabacum*) infection by branched broomrape (*Orobanche ramosa*) as influenced by irrigation system and fertilization under east Mediterranean conditions[J]. Advances in Agronomy,2007,6:397-402.
- 5 SHARMASARKA F C, SHARMASARKAR S, MILLER S D, et al. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets[J]. Agricultural Water Management,2001,46:241-251.
- 6 CETIN O, BILGEL L. Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton[J]. Agricultural Water Management,

- 2002,54:1-15.
- 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 孟兆江,贾大林,刘安能,等. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2003,19(4):66-69.  
MENG Zhaojiang, JIA Dalin, LIU Anneng, et al. Effects of regulated deficit irrigation on physiological mechanism and water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(4):66-69. (in Chinese)
- 9 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)
- 10 阿吉艾克拜尔,邵孝侯,钟华,等. 调亏灌溉及其对烟草生长发育的影响研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):171-174.  
HAJIAKBAR, SHAO Xiaohou, ZHONG Hua, et al. Regulated deficit irrigation and its effects on growth of tobacco[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2006,34(2):171-174. (in Chinese)
- 11 孟兆江,卞新明,刘安能,等. 棉花调亏灌溉的生理响应及优化农艺措施[J]. 农业工程学报,2007,23(12):80-84.  
MENG Zhaojiang, BIAN Xinming, LIU Anneng, et al. Physiological responses of cotton to regulated deficit irrigation and its optimized agronomic techniques[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(12):80-84. (in Chinese)
- 12 孟兆江,段爱旺,王晓森,等. 调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4):99-104. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160414&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160414&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.014.  
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, WANG Xiaosen, et al. Effects of regulated deficit irrigation on growth relation of root and shoot in cotton[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):99-104. (in Chinese)
- 13 杨贵羽,罗远培,李保国. 苗期土壤含水率变化对冬小麦根、冠生物量累积动态的影响[J]. 农业工程学报,2004,20(2):83-87.  
YANG Guiyu, LUO Yuanpei, LI Baoguo. Influence of different soil water in seeding stage on root and shoot biomass accumulation of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE,2004,20(2):83-87. (in Chinese)
- 14 刘安能,孟兆江. 玉米调亏灌溉效应及优化农艺措施[J]. 农业工程学报,1999,15(3):107-112.  
LIU Anneng, MENG Zhaojiang. Effects of regulated deficit irrigation and optimized agronomic measures of corn[J]. Transactions of the CSAE,1999,15(3):107-112. (in Chinese)
- 15 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]. 西北农业大学学报,2000,28(1):31-36.  
WANG Mixia, KANG Shaozhong, CAI Huanjie, et al. The effect of regulated deficit irrigation on ecological characteristics and yield of corn[J]. The Journal of Northwest Agricultural University,2000,28(1):31-36. (in Chinese)
- 16 孙继鹏,魏水霞,王艳阳. 黑龙江西部玉米调亏灌溉的节水增产效应[J]. 农机化研究,2016,38(4):180-184.  
SUN Jipeng, WEI Yongxia, WANG Yanyang. Effects of regulated deficit irrigation of maize on water-saving and yield-increasing in western Heilongjiang Province[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(4):180-184. (in Chinese)
- 17 周新国,李彩霞,强小嫚,等. 喷灌条件下液膜覆盖对玉米干物质积累及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(11):43-48.  
ZHOU Xinguo, LI Caixia, QIANG Xiaoman, et al. Effects of liquid film mulching on dry matter accumulation and water use efficiency of maize with sprinkler irrigation[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(11):43-48. (in Chinese)
- 18 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报,1998,14(4):88-92.  
MENG Zhaojiang, LIU Anneng, PANG Hongbin, et al. Studied on physiological mechanism and indices of regulated deficit irrigation in summer maize[J]. Transactions of the CSAE,1998,14(4):88-92. (in Chinese)
- 19 郭相平,康绍忠. 玉米调亏灌溉的后效性[J]. 农业工程学报,2000,16(4):58-60.  
GUO Xiangping, KANG Shaozhong. After-effect of regulated deficit irrigation (RDI) on maize[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(4):58-60. (in Chinese)
- 20 董平国,王增丽,温广贵,等. 不同灌溉制度对制种玉米产量和阶段耗水量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(9):822-828.  
DONG Pingguo, WANG Zengli, WEN Guanggui, et al. Effects of irrigation schedule on water consumption and yield of seed maize[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2014,32(9):822-828. (in Chinese)
- 21 刘炳成,刘伟,杨金国,等. 湿分层土壤中热湿迁移与水分蒸发的试验研究[J]. 工程热物理学报,2004,25(6):1004-1006.  
LIU Bingcheng, LIU Wei, YANG Jinguo, et al. Experimental studies on heat and moisture transfer and soil water evaporation under natural condition[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2004,25(6):1004-1006. (in Chinese)
- 22 孙庆全,胡昌浩,董树亭,等. 我国不同年代玉米品种生育全程根系特性演化的研究[J]. 作物学报,2003,29(5):641-645.  
SUN Qingquan, HU Changhao, DONG Shuting, et al. Evolution of root characters during all growth stage of maize cultivars in different eras in China[J]. Acta Agronomica Sinica,2003,29(5):641-645. (in Chinese)
- 23 赵伟杰,李翠,周达,等. 水分胁迫后复水对糜子根冠功能的补偿效应[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(1):45-52.  
ZHAO Weijie, LI Cui, ZHOU Da, et al. Compensation effects of rewatering on root and shoot functions of broom corn millet after water stress[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition,2016,44(1):45-52. (in Chinese)
- 24 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.