

调亏灌溉对夏玉米根冠生长关系的调控效应

李彪^{1,2}, 孟兆江^{1,2}, 段爱旺^{1,2}, 刘祖贵^{1,2}, 刘小飞^{1,2}, 申孝军^{1,2}, 常晓^{1,2}

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南新乡 453002; 2.农业部作物需水与调控重点开放实验室,河南新乡 453002)

摘要:以夏玉米(*zea may* L. cv.)为试验材料,采用防雨棚下桶栽土培方法,进行调亏灌溉(Regulated deficit irrigation, RDI)对根、冠生长的影响研究,旨在寻求适宜的水分调亏阶段和调节亏水度,为建立节水高产、优质高效作物 RDI 模式提供技术参数。试验采用二因素随机区组设计,设置 4 个水分调亏阶段:三叶~拔节(I),拔节~抽穗(II),抽穗~灌浆(III),灌浆~成熟(IV);每个调亏阶段设置 3 个水分调亏度:轻度调亏(L)、中度调亏(M)和重度调亏(S),土壤相对含水率分别为 60%~65% FC(Field capacity)、50%~55% FC 和 40%~45% FC;设全生育期保持适宜土壤水分(75%~80% FC)作为对照(CK)。分别在水分调亏期间和复水后测定各处理根系参数和地上干物质质量。结果表明,玉米生长中、后期水分调亏具有促进根系发育和减缓根系衰亡的“双重效应”,反映出玉米根系在生育后期比生育前期对水分适应能力强的特性。玉米根冠比(R/S)受水分影响最大的阶段是三叶~拔节期,受水分影响最小的阶段是灌浆期;拔节~抽穗期水分调亏期间能显著增大 R/S,复水后分配到冠层与根系的物质比较平衡,维持较为适宜的 R/S,表明此阶段为通过 RDI 调控玉米 R/S 的适宜阶段。玉米三叶~拔节期水分调亏改善了穗部性状,表明在作物营养生长阶段的适度水分调亏有利于作物生殖生长。RDI 可以有效调控根/冠生长关系,提高经济产量。

关键词:夏玉米;调亏灌溉;根冠生长;根冠比;补偿效应

中图分类号:S274;S513 **文献标志码:**A

Effect of regulated deficit irrigation on growth relation of root to shoot in summer maize

LI Biao^{1,2}, MENG Zhao-jiang^{1,2}, DUAN Ai-wang^{1,2}, LIU Zu-gui^{1,2},
LIU Xiao-fei^{1,2}, SHEN Xiao-jun^{1,2}, CHANG Xiao^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China;

2. Key and Open Laboratory of Crop Water Requirements Regulation, Ministry of Agriculture, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: The effects of different deficit irrigation strategies on such morphological parameters as root and shoot in pot-grown maize (*zea may* L. cv.) plants were experimentally investigated in different growth phases during the growing seasons of 2013 and 2014 under rain-proof shelter condition in Huang-huai-hai Plain in China to evaluate how such strategies could be safely used and offered theories basis for the establishment of Regulated Deficit Irrigation(RDI) model for water-saving, high-yield, high quality and efficiency in crops. A two-factor randomize-block design was applied. The first factor was different stages of water deficit, including three leaves-stem elongation stage (I), stem elongation-ear emergence stage (II), ear emergence-filling stage (III), and filling-maturing stage (IV). The other factor was different degree of water deficit with three levels by soil relative water content, which included light deficit (L), moderate deficit (M) and severe deficit (S) at stages of water deficit I to IV, corresponding soil relative water content were 60%~65% FC (Field Capacity), 50%~55% FC and 40%~45% FC, respectively. Totally, 12 water deficit treatments with six replicates were designed and applied. Additionally, an appropriate irrigation treatment (75%~80%FC) during whole growing season with twenty-four replicates was designed as control (CK). Such morphological parameters as root dry weight, root weight density and root

收稿日期:2017-06-26

修回日期:2017-09-08

基金项目:河南省科技攻关计划项目(152102110003);中国农业科学院科技创新工程专项

作者简介:李彪,男,河南洛阳人,主要从事作物水分生理与高效用水研究。Email:18146505869@163.com

通信作者:孟兆江(1958-),男,河南桐柏人,研究员,博士,主要从事作物高效用水理论与技术研究。E-mail:zhaojiang_meng@aliyun.com

length density, plant height, leaves area, ear characters and total shoot dry matter weight were measured synchronously in all water treatments during water stress period and after re-watering, respectively. The results indicated that there were differences in effects of RDI on growth of roots and shoots in maize plants due to both phenological stages and degree of water deficit. A moderate water deficit (50%~55%FC) applied at stem elongation-ear emergence phases reduced significantly plant height, promoted plants to grow robustly and prevented plants from late lodging and increased yield. There were a positive effect on root growth and an effect on delaying senescence of root system in water deficit period at middle or later phases in maize plants growth, which reflected that the adaptability of root systems to water deficit was stronger at later stage than that at early stage. The influence of water status on the ratio of root to shoot (R/S) was the maximal at three leaves-stem elongation stages and the least at filling stage. Water deficit applied at stem elongation-ear emergence stages increased significantly R/S. The matter distribution between the root systems and shoots was balance after re-watering, and a appropriate value of R/S was retained, which indicated that stem elongation-ear emergence stages was a suitable phase to regulate R/S by using RDI. Water deficit applied at three leaves-stem elongation stages improved ear characters in maize, which indicated an appropriate water deficit at vegetative growth phases benefited for promoting reproductive growth. It is believed that RDI can effectively coordinate the relation of root to shoot and then increase grain yield in maize.

Keywords: maize; regulated deficit irrigation; growth of root and shoot; ratio of root to shoot; compensatory effect

黄淮海地区是我国最重要的商品粮基地,是我国除吉林省外第二个玉米优势产区。近几年来,黄淮海夏玉米每年的种植面积在 $1.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 左右,约占全国的 40%^[1]。尽管夏玉米生产季节雨热同期,但这一地区的水资源严重不足,水资源占全国水资源总量的 7.6%,人均水资源量和地均水资源量仅占全国平均值的 22.5%和 19.8%,水资源的可持续利用问题已成为黄淮海区域经济发展的战略性问题,这一问题的解决在很大程度上要依靠农业节水。因此,发展节水灌溉,提高水分利用效率,直接减少利用地下水灌溉的用水量,是解决黄淮海平原农业缺水问题的重要途径。在此背景下,研究调亏灌溉(Regulated deficit irrigation, RDI)条件下作物形态的发育特征,无疑对调亏灌溉的相关理论和实践都具有积极意义。

作物生长发育的实质是形态发育尤其是根冠生长关系的外在表现,不同水分条件下形态的生长发育动态与表征,是形态结构及其功能的具体体现,直接关系到人们对作物水分关系的正确认识和对农田水分调控措施的合理制定与实施^[2]。关于土壤水分对作物根冠生长的影响^[2-14]以及根系与地上部的关系^[15]的试验研究已有不少报道。但是,以夏玉米为试验对象的相关文献较少,而且,已有相关研究的条件与方法不同,存在试验的区域性差异,所得结果也不尽一致,并且多限于全生育期某一固定控制水分或某一阶段水分亏缺期间(静水)条件下的数据分析,而关于 RDI 条件下,即在不同

生育阶段、不同水分(变水)调亏度及复水后对根冠生长的“后效性”影响研究资料较少。本文以黄淮海平原地区主要粮食作物夏玉米为材料,将水分调亏阶段和水分调亏结束复水后阶段视为一个连续的过程,从植株形态发育尤其是根冠生长关系的角度研究夏玉米对不同生育阶段不同程度水分调亏的适应性、水分调亏的正效应、水分调亏的后效性和水分调亏结束复水后的根冠生长补偿效应,丰富作物对 RDI 响应的整体性理论,为该地区夏玉米调亏灌溉模式的建立提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于 2013 年 6-9 月和 2014 年 6-9 月,在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场大型启闭式防雨棚下进行。试验场位于黄淮海平原河南省新乡市东北郊,东经 $113^\circ 53'$ 、北纬 $35^\circ 19'$,属典型的暖温带半湿润半干旱地区。多年平均降雨量 580 mm;年平均气温 13.5°C ;年平均积温 $5\ 070^\circ\text{C}$;年日照时数 2 497 h;无霜期 220 d;潜在蒸散量 $2\ 000 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。试验用土壤质地为轻沙壤土,基础养分含量为:有机质 $18.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $2.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $15.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $72.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $101 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤容重为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;田间持水量为 24%(质量含水率)。

1.2 供试材料

以夏玉米(*zea may* L.)为试验材料,选用品种为

郑单 14,由河南省农业科学院玉米研究所培育与提供。

采用盆栽土培法,盆为圆柱形,分母、子盆,母盆内径 31.0 cm,高 38 cm,埋入土中,上沿高出地面 5.0 cm;子盆内径 29.5 cm,高 38 cm。子盆底部铺 5 cm 厚的砂过滤层,以调节下层土壤通气状况和水分条件。为防止土壤表面水分过量蒸发和土壤板结,子盆两侧各放置直径 3 cm 的 PVC 细管用于供水(细管周围有小孔,用密质纱网包裹防堵塞)。取大田 0~20 cm 表土,过筛装盆,每子盆装干土重 28 kg,土壤质地为壤土,基础养分含量为有机质 9.3 g·kg⁻¹,全氮 0.98 g·kg⁻¹,碱解氮 44.02 mg·kg⁻¹,速效磷 6.2 mg·kg⁻¹,速效钾 112 mg·kg⁻¹;土壤容重为 1.34 g·cm⁻³,田间持水率为 26%(质量含水率)。每盆混入 200 g 优质农家肥,全生育期每盆施 N 3.0 g, P₂O₅ 0.85 g, K₂O 1.2 g,其中 N 素 1/2 拔节追施,1/2 孕穗追施。精选种子,于 6 月 14 日浸后播种,每盆 5 粒,出苗后至三叶一心期定苗,每盆 1 株,并开始水分处理。

1.3 试验设计

采用二因素随机区组设计,设置 4 个水分调亏阶段:三叶~拔节(Ⅰ),拔节~抽雄(Ⅱ),抽雄~灌浆(Ⅲ),灌浆~成熟(Ⅳ);每个生育阶段设置 3 个水分调亏度(土壤相对含水率,即土壤含水率占田间持水率的百分数);轻度调亏(L),中度调亏(M)和重度调亏(S),土壤相对含水率上、下限分别为 60%~65% FC(Field capacity)、50%~55% FC 和 40%~45% FC;共 12 个处理组合,重复 9 次;设对照(CK,相对含水率 75%~80% FC)24 盆;其中 6 次重复用于试验过程中取样分析,其余 3 次重复用于成熟期测定穗部性状和籽粒产量。水分调亏阶段灌水按处理设计水平(低于下限灌至上限),其余阶段按 CK 水平(75%~85% FC)控制水分。三叶期开始水分处理,用电子磅称质量法测定土壤含水率,用水量平衡法确定蒸发蒸腾量,每天或隔天称量,当盆内土壤水分低于设计标准时用量杯加水,记录每次加水量,由水量平衡方程计算各时期总的耗水量。试验共用母、子盆各 132 个,子盆置于母盆内,便于称量而不粘泥土。玉米植株排列行距 60 cm,株距 31 cm,群体密度 53 763 株·hm⁻²。

1.4 测定项目与方法

(1)分别在夏玉米三叶~拔节(Ⅰ),拔节~抽雄(Ⅱ),抽雄~灌浆(Ⅲ),灌浆~成熟(Ⅳ)等生育阶段水分调亏结束前取样,每个水分处理每次取 3 株(盆),进行根系参数和干物质质量等测定;各水分

调亏阶段复水后的取样分析统一在灌浆期进行。

(2)根系参数调查采用整盆冲洗法,将盆灌满水浸泡 24 h 后,冲洗泥土并用 0.50 mm 网筛过滤,接着浸泡于 1%刚果红溶液中 3 min,取出后用冷水冲洗,再浸泡于 95%的乙醇溶液中 3 min,用水冲洗后,活根染成红色或淡红色,死根和其它杂质为褐色或无色,拣出死根和杂质。

(3)根系干质量采用干燥称量法测定,将采集的根系样品洗净,用无氮吸水纸吸干装袋,并标记密封,带回实验室,放入干燥箱,在 90℃、鼓风条件下烘 30 min,然后降温至 75℃干燥至质量恒定。

(4)地上干物质采用干燥称量法测定,剪取植株地面以上部分,称鲜质量;放入干燥箱,在 105℃下杀青 30 min;然后降温至 80℃干燥至质量恒定。

(5)成熟期测定植株最终的果穗性状和产量,并取其平均值。

1.5 数据处理与分析

将所得数据分类整理,取 2 年平均值,采用 Excel 2007 和 DPS v 7.05 分析软件处理与分析。

2 结果与分析

2.1 RDI 对根系的调控作用

图 1 是不同生育期水分调亏阶段结束前测定的各处理玉米根系参数(测定时间:苗期 7 月 15 日;拔节期 8 月 5 日;抽雄期 8 月 15 日;灌浆期 9 月 15 日)。从图 1A 可以看出,在苗期(Ⅰ)和拔节期(Ⅱ)水分调亏期间,根系干质量均随调亏度加重呈下降趋势,轻(L)、中(M)和重(S)度调亏处理根系干质量与 CK 差异均达极显著水平($P<0.01$),说明玉米生长前期水分亏缺强烈抑制了根系的生长发育;而在玉米抽雄期(Ⅲ)和灌浆期(Ⅳ)水分调亏有利于增加根干质量,其中,Ⅲ期轻度调亏根干质量增加不显著($P>0.05$),中、重度调亏根干质量增加达显著水平($P<0.05$);Ⅳ期各调亏处理增加根干质量均达极显著水平($P<0.01$)。说明玉米生长中、后期水分调亏具有促进根系发育和减缓根系衰亡的“双重效应”,反映出玉米根系在生育后期比生育前期对水分适应能力强的特性。

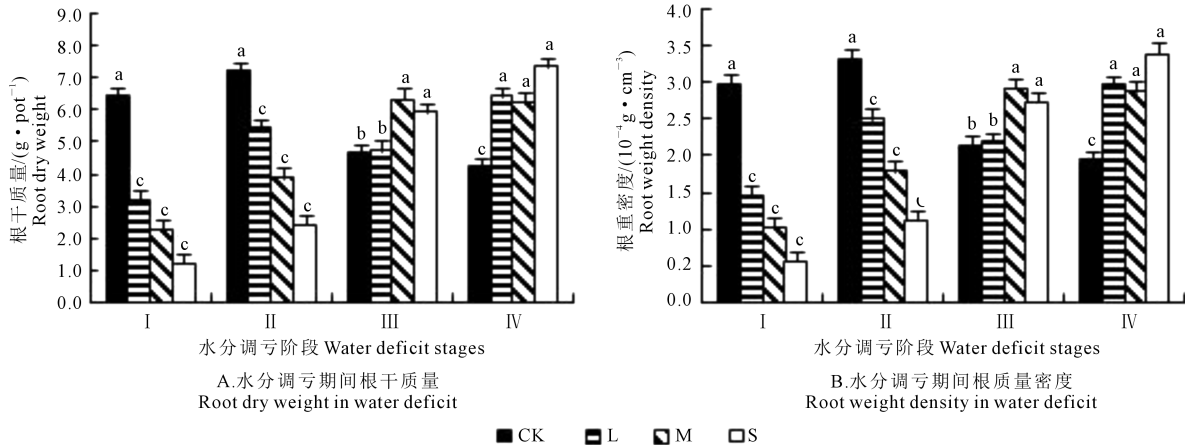
夏玉米各生育阶段根干质量随土壤水分变化的拟合模型可表示为:

$$y = bx + a \quad (1)$$

式中, y 表示根干质量, x 表示土壤相对含水率(%), a 为回归截距, b 为线性回归系数。从拟合模型参数(表 1)可以看出,生育阶段Ⅰ和Ⅱ根干质量与土壤水分呈线性显著正相关,而生育阶段Ⅲ和Ⅳ根干

质量与土壤水分呈线性显著负相关。方程中回归直线的斜率表示根干质量对土壤水分变化的敏感程度,即回归直线斜率越大,表示根干质量对水分调亏越敏感。由此也可以看出,I、II 期根干质量对

水分调亏敏感(回归直线斜率分别为 0.1672 和 0.1600),III 和 IV 期次之(回归直线斜率分别为 0.0533和 0.0930)。



注:CK-对照;L-轻度调亏;M-中度调亏;S-重度调亏。I-三叶~拔节;II-拔节~抽穗;III-抽穗~灌浆;IV-灌浆~成熟;同一水分调亏阶段内图柱上标有不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)或差异极显著($P<0.01$);下同。
Note: CK-Control; L-Light stress; M-Moderate stress; S-Severe stress. I-Three leaves~stem elongation; II-Stem elongation~ear emergence; III-Ear emergence~filling; IV-Filling~maturity. Within the same water stress stage, different lowercase letters marked on bars stand for significant differences among treatments at 5% level($P<0.05$), or at 1% level ($P<0.01$), the same below.

图 1 水分调亏期间夏玉米根系参数变化

Fig.1 Variation of root system parameters of summer maize in water stress period

由图 1 还可以看到,盆栽条件下水分调亏对玉米根质量密度(图 1B)的影响与根质量呈相似规律。

表 1 夏玉米不同生育阶段根干质量与水分状况的关系模拟
Table 1 Simulation of relationship between root dry weight and relative soil water at different growth stages in summer maize

生育阶段 Growth stages	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	斜率 Slope
I	$y=0.1672x-7.588$	$R^2=0.8975^*$	0.1672
II	$y=0.1600x+5.650$	$R^2=0.9971^{**}$	0.1600
III	$y=-0.0533x+8.887$	$R^2=0.6685^*$	-0.0533
IV	$y=-0.0930x+12.11$	$R^2=0.8133^*$	-0.0930

注: I-三叶~拔节; II-拔节~抽穗; III-抽穗~灌浆; IV-灌浆~成熟; *表示统计差异显著($P<0.05$), **表示统计差异极显著($P<0.01$);下同。
Note: I-Three leaves~stem elongation; II-Stem elongation~ear emergence; III-Ear emergence~filling; IV-Filling~maturity. * mean statistically significant at the 0.05 level by T-test; ** mean statistically significant at the 0.01 level by T-test, the same below.

图 2 是各水分调亏处理复水后(均恢复充分供水)于灌浆期(9 月 15 日)测定的夏玉米根系主要参数。图 2A 显示,苗期(I)轻度调亏(L)根干质量与对照(CK)无明显差异($P>0.05$),中度调亏(M)根系干质量比对照降低 17.66%,差异达显著水平($P<0.05$);重度调亏(S)根干质量比 CK 增加 36.76%,差异达极显著水平($P<0.01$)。结合图 1A 分析可

见,苗期适度调亏复水后根系有补偿或超补偿生长效应,最终根干质量接近或超过 CK,即苗期适度水分调亏对根系生长具有正效应。在拔节期(II)不同程度水分调亏根干质量均较 CK 增加,其中,轻度调亏(L)增加 58.73%,差异达极显著水平($P<0.01$),中度调亏(M)增加 2.05%、重度调亏(S)增加 10.47%,与 CK 差异不显著($P>0.05$)。说明此阶段水分调亏复水后根系也具有“反冲”生长和减缓根系衰亡的双重作用。抽雄期(III)水分调亏复水后对根系的正效应得以进一步加强,其中,轻度水分调亏根干质量比 CK 增加 12.3%,差异不显著($P>0.05$);中、重度调亏根干质量分别比 CK 增加 104.52%和 71.87%,差异均达极显著水平($P<0.01$)。说明此阶段适度水分调亏复水后具有较强补偿生长能力和减缓根系衰亡的作用。灌浆阶段(IV)不同程度水分调亏处理复水后维持了调亏期间的正效应,最终根干质量均比 CK 显著增加(27.7%~51.7%)。根据水分调亏结束前和复水后的两次测定(图 1 和图 2)数据计算,在抽雄期(III)以前,CK 根质量减少了 1.61~2.38 g,而各水分调亏处理的根干质量都是增加的,其中,轻度调亏(L)增加 0.73~2.29 g,中度调亏(M)增加 1.1~3.61 g,重

度调亏(S)增加 2.45~5.43 g。显然,在玉米抽雄期以前水分调亏对根系有“补偿生长”和“延缓衰老”

的双重效应。灌浆期水分调亏处理复水后临近成熟,在时间上已无补偿生长的余地。

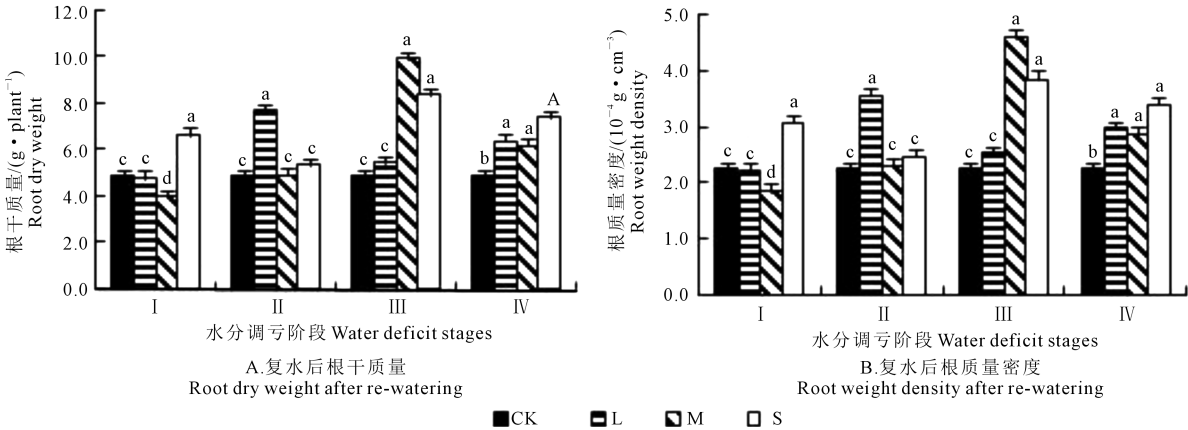


图 2 复水后夏玉米根系参数变化

Fig. 2 Variation of root system parameters in summer maize after re-watering

表 2 是不同水分调亏处理复水后根干质量相对增长速率(RGR)。相对增长速率表示单位干物质质量在单位时间内质量的增加(单位为 g · g⁻¹ · d⁻¹),其计算公式为:

$$RGR = (\ln w_2 - \ln w_1) / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中,RGR 为相对增长速率(Relative growth rate),w₁、w₂ 分别为各处理水分调亏结束前和复水后前后两次测定的根干质量(g · pot⁻¹),t₁、t₂ 分别为调亏结束前和复水后测定根干质量的日期。从表 2 中可见,I、II、III 期适度水分调亏复水后,RGR 随调亏度增加呈提高趋势。IV 期水分调亏复水后进入成熟期,根质量基本无复水后的增长过程,故未计算其复水后的 RGR。

表 2 不同水分调亏处理复水后夏玉米根质量相对增长速率/(g · g⁻¹ · d⁻¹)

Table 2 Relative growth rate of root dry weight under different treatment after re-watering

生育阶段 Growth stages	CK	L	M	S
I	-0.0046	0.0067	0.0095	0.0272
II	-0.0064	0.0057	0.0040	0.0128
III	0.0006	0.0023	0.0073	0.0056
IV	-	-	-	-

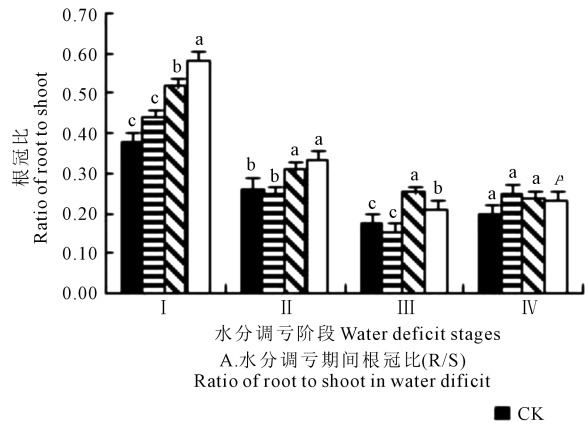
2.2 RDI 对玉米根冠比的调控作用

图 3A 是各生育期不同水分调亏阶段结束前(测定时间:苗期 7 月 15 日;拔节期 8 月 5 日;抽雄期 8 月 15 日;灌浆期 9 月 15 日)测定的夏玉米的根和冠的干物质质量之比(R/S)。从全生育期看,在灌浆期以前各处理的 R/S 随生育期的推进均呈下降趋势,进入灌浆阶段略有回升。说明随着根系的生长发育,吸收水分和养分能力增强,促进了地上

部分生长发育,R/S 逐渐下降,到灌浆期前达最小值,以形成最大的经济产量。这与冬小麦的情况基本一致^[7, 8]。从不同生育阶段看,水分变化显著影响干物质在根、冠间的分配比例,水分调亏基本可增大 R/S(II、III 阶段 L 调亏例外);在 I 阶段随水分调亏度加重,R/S 呈明显增大趋势,表明此阶段水分调亏促进根系生长,降低干物质分配到叶冠的比例;R/S 最大值出现在 I 期的重度调亏(S),比同期 CK 增加 54.9%,差异达极显著水平(P<0.01);轻度调亏(L)R/S 比 CK 增加 16.6%,但差异不显著(P>0.05);中度调亏(M)R/S 比 CK 增加 36.9%,差异达显著水平(P<0.05)。II 期轻度水分调亏处理(L)R/S 比同期 CK 降低 5.3%,差异不显著(P>0.05);中(M)和重(S)度调亏 R/S 分别比同期 CK 增加 17.6%和 27.5%,差异均达显著水平(P<0.05)。III 期轻度水分调亏处理(L)R/S 比同期 CK 降低 12.0%,差异不显著(P>0.05);中(M)和重(S)度水分调亏处理 R/S 分别比 CK 增加 43.8%和 22.1%,前者差异达极显著水平(P<0.01),后者差异达显著水平(P<0.05)。IV 期各水分调亏处理的 R/S 均较 CK 增加,增加幅度为 19.0%~25.8%,但差异不显著(P>0.05)。说明当出现一定程度水分亏缺时,根系吸水困难,根系从土壤中获得的水分被优先保证根系生长发育需求,使根系受害较地上部分轻,故 R/S 增大;同时表明在夏玉米生育前期(拔节以前)实施适度的水分调亏有利于增强根系的发育,控制地上部分旺长,提高植株抗旱能力。

夏玉米不同生育阶段 R/S 与土壤水分状况关系的拟合模型及其参数如表 3。从拟合模型参数可以看出,I 阶段 R/S 与土壤水分状况呈线性显著负

相关,即土壤水分越高,R/S 越低,反之亦然;其余阶段线性相关不显著。而回归直线的斜率表示 R/S 对土壤水分变化的敏感程度,即回归直线斜率越大,表示 R/S 对水分调亏越敏感。由此也可以看



出,I 期 R/S 对水分调亏最为敏感(回归直线斜率为 -0.007);随生育期的推移,R/S 对水分调亏的敏感性越来越小。这一结果与管秀娟等^[2]和杨贵羽等^[9]所做的冬小麦试验结果一致。

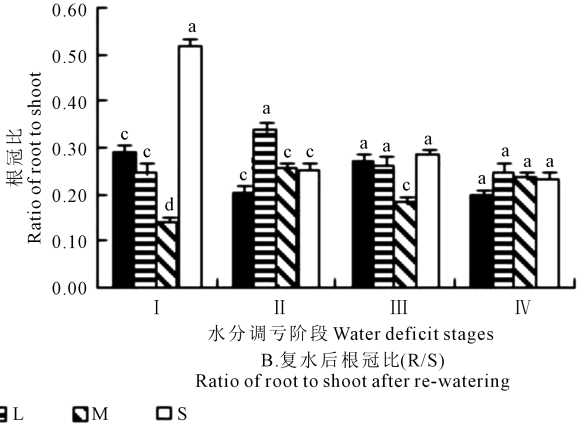


图 3 RDI 对夏玉米根冠比的影响

Fig.3 Effect RDI on R/S in summer maize

表 3 夏玉米不同生育阶段 R/S 与土壤水分状况的关系模拟
Table 3 Simulation of correlation between R/S and relative soil water content

生育阶段	回归方程	相关系数	斜率
Growth stages	Regression equation	Correlation coefficient	Slope
I	$y = -0.007x + 0.9308$	$R^2 = 0.9987^{**}$	-0.007
II	$y = -0.0027x + 0.4646$	$R^2 = 0.7947$	-0.0027
III	$y = -0.0021x + 0.3338$	$R^2 = 0.4091$	-0.0021
IV	$y = -0.001x + 0.2933$	$R^2 = 0.3464$	-0.0010

图 3B 是各阶段水分调亏处理复水后于灌浆期(9 月 15 日)测定的 R/S。总体上看,复水后 I、II 阶段各水分调亏处理 R/S 呈下降趋势,尤其是调亏期间 R/S 增加明显的 I 期轻(L)、中(M)度调亏处理复水后 R/S 下降幅度明显。说明复水后分配到冠部干物质比例增大,地上补偿生长明显,故 R/S 下降。具体分析各生育阶段,多数水分调亏处理较 CK 有增大 R/S 的趋势(但 I 期轻、中度调亏和 III 期中度调亏例外);同时显示,不同时期、不同程度水分调亏的后效性明显不同。I 期轻度调亏 R/S 比 CK 降低 16.1%,但差异不显著($P>0.05$);中度调亏 R/S 比 CK 降低 51.6%,差异达极显著水平($P<0.01$);说明此阶段轻、中度调亏复水后冠部“反冲生长作用”大,故 R/S 降低;而重度调亏 R/S 基本维持了调亏期间的较高水平,较 CK 增加 77.7%,差异达极显著水平($P<0.01$);说明此阶段的重度调亏复水后冠部“反冲生长作用”有限。II 期轻度调亏 R/S 比 CK 提高 63.8%,差异达极显著水平($P<0.01$);中、重度调亏 R/S 分别比 CK 提高 24.4%和 24.0%,但差异不显著($P>0.05$)。这说明此期调亏复水后分配到冠

部与根部的物质较平衡,因而保持了调亏期间增大 R/S 的效应。III 期轻、中度调亏 R/S 均较 CK 降低,其中,轻度调亏降低 4.7%,差异不显著($P>0.05$),中度调亏降低 33.6%,差异达显著水平($P<0.05$);重度调亏 R/S 较 CK 有提高,但差异不显著($P>0.05$)。说明此阶段中度水分调亏复水后冠部“补偿生长效应”明显。比较图 3A 和图 3B 发现,R/S 受水分影响最大的阶段是 I 期(苗期-拔节期),受水分影响最小的阶段是 IV 期(灌浆-成熟期)。这与葛体达等的研究结果不尽一致^[17]。II 期水分调亏期间能显著增大 R/S,复水后分配到冠部与根部的物质较平衡,维持较为适宜的 R/S,此阶段为通过 RDI 调控 R/S 的适宜阶段。由于 IV 期调亏复水后夏玉米即进入成熟期,故各水分调亏处理的 R/S 基本无变化。

上述试验研究结果表明,RDI 具有有效调控 R/S 的功效,可以根据不同根、冠关系的调控目标,在不同生育阶段、实施不同程度的水分调亏,使根、冠结构和功能实现最佳匹配。

2.3 RDI 对玉米生殖生长的调控作用

表 4 显示:出苗-拔节阶段(I)水分调亏有利于提高穗部各性状;拔节-抽穗阶段(II)的轻度调亏(L)可提高穗部各性状;抽穗-灌浆阶段(III)水分调亏产量性状均降低;灌浆-成熟阶段(IV)水分调亏对穗长无不利影响,但穗粒数和粒质量均降低。因此,苗期-拔节期(I)是水分调亏改善穗部性状的适宜阶段。

表 4 RDI 对夏玉米果穗性状的影响
Table 4 Effect of RDI on the ear characteristics of summer maize

调亏阶段 Water deficit stages	穗长 Ear length/cm				穗粒数 Ear kernel number				穗粒质量 Ear kernel weight/g			
	CK	L	M	S	CK	L	M	S	CK	L	M	S
I	14.7	16.8	16.4	16.3	300.8	353.3	371.5	401.1	62.0	69.4	86.6	95.6
II	14.7	15.4	14.3	12.5	300.8	307.7	296.0	211.0	62.0	72.8	56.3	47.3
III	14.7	13.7	11.1	9.9	300.8	240.5	236.5	205.0	62.0	56.3	50.4	50.9
IV	14.7	15.6	14.7	15.7	300.8	274.3	298.8	281.5	62.0	58.1	54.9	42.9

3 结论与讨论

作物正常的生长发育是地上部光合与地下部根系吸收水分和养分相统一的反馈过程,强大的根系吸收促进地上部的光合作用,而充足的光合产物又会为根系的生长提供必需的营养物质,二者共同组成了一个完整的光合生产系统^[19]。实现作物的高产与优质,不仅需要有良好的“叶-光系统”,而且需要有发达的“根-土系统”^[20]。因此,研究 RDI 对玉米根、冠关系的调控规律,不仅丰富作物生理与栽培学内容,还为水资源不足地区作物水分高效利用提供理论依据。本试验表明,玉米生长中、后期水分调亏具有促进根系发育和减缓根系衰亡的“双重效应”,反映出玉米根系在生育后期比生育前期对水分适应能力强的特性。这对于植株根系吸收深层水分与养分,促进作物后期的灌浆与籽粒形成起着关键的作用。

不同土壤水分不仅影响根系发育及形态结构,还会改变植株器官的生长进程,特别是根冠比(R/S)。Smucker 等指出^[21],在水分胁迫下,光合产物优先分配给根系,根冠比加大;反之,则根冠比减小。冯广龙研究指出^[22],水分胁迫下,根冠比(R/S)增大,胁迫后复水,R/S 降低,根冠生长发育可部分得到恢复。传统认为,较大的根系和根冠比有利于植物抗旱。但是由于过分庞大的根系会影响地上部的生物量,进而影响适宜产量的形成,因此从某种意义上说,作物根系不仅存在数量上而且存在质量上的冗余^[23]。所以,在缺水条件下建立合理的 R/S 对提高水分利用效率和产量具有重要意义。本研究发现,夏玉米植株根冠比(R/S)受水分影响最大的阶段是三叶-拔节期(I),受水分影响最小的阶段是灌浆期(IV);这与葛体达等的研究结果不尽一致^[17]。拔节-抽穗期(II)水分调亏期间能显著增大 R/S,复水后分配到冠层与根系的物质比较平衡,维持较为适宜的 R/S,因此认为此阶段为通过 RDI 调

控 R/S 的适宜阶段,协调根系与冠层的光合产物分配比例,优化二者平衡关系,从而提高水分利用效率和经济产量。

参 考 文 献:

[1] 高如泰,陈焕伟,李保国,等. 夏玉米生长期黄淮海平原土壤水氮利用效率模拟分析[J]. 农业工程学报,2006,22(6):33-37.

[2] 管秀娟,赵世伟,王俊振,等. 不同生育期干旱对冬小麦根冠生长发育的影响[J]. 华北农学报,2001,16(4):71-76.

[3] 吕丽华,李谦,董志强,等. 灌水方式和灌溉量对冬小麦根冠结构的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(11):1537-1544.

[4] 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2013,21(3):282-289.

[5] 武荣,李援农. 水氮耦合对冬小麦根系分布和根冠比及产量的影响[J]. 南方农业学报,2013,44(6):963-967.

[6] 金善宝. 中国小麦[M]. 北京:农业出版社,1996:162-166.

[7] 孟兆江,段爱旺,王景雷,等. 调亏灌溉对冬小麦根冠生长影响的实验研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(4):37-41.

[8] 单长卷,杨文平,张胜利. 土壤干旱对济麦 21 根、冠生长的影响[J]. 河南农业科学,2009,(2):31-33.

[9] 杨贵羽,罗远培,李保国,等. 不同土壤水分处理对冬小麦根冠生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(3):103-109.

[10] Hsiao T, Xu L R. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water Transport[J]. Journal Experimental Botany, 2000, 51(350):1595-1616.

[11] 杨书运,严平,梅雪英,等. 土壤水分亏缺对冬小麦根系的影响[J]. 麦类作物学报,2007,27(2):309-313.

[12] 乔振江,蔡昆争,骆世明.低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响[J]. 生态学报,2011,31(19):5578-5587.

[13] 齐伟,张吉旺,刘鹏,等. 干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交种产量和根系生理特性的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(1):48-52.

[14] 李文尧,张岁岐,丁圣彦,等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J].生态学报,2010,30(19):5140-5150.

[15] 高志红,陈晓远,罗远培.不同土壤水分条件下冬小麦根、冠平衡与生长稳定性研究[J]. 中国农业科学,2007,40(3):540-548.