

# 调亏灌溉及施肥对玉米干物质积累 和相关生理性状的影响

韦彩会, 李伏生, 许春辉, 农梦玲, 余江敏, 罗 慧

(广西大学农学院, 广西南宁 530005)

**摘 要:** 通过盆栽试验, 在 2 种施肥水平下, 研究了拔节期和抽雄期 4 个水分亏缺水平, 即重度亏水 (SD, 40% ~ 50%  $\theta_f$ ,  $\theta_f$  为土壤田间持水量)、中度亏水 (MD, 50% ~ 60%  $\theta_f$ )、轻度亏水 (LD, 60% ~ 70%  $\theta_f$ ) 和正常灌水 (CK, 70% ~ 80%  $\theta_f$ ) 对玉米干物质积累、水分利用和相关生理性状的效应。发现施肥有利于玉米干物质积累, 拔节期和抽雄期 LD 均不会明显降低干物质总量或略有增加, 而 SD 明显降低干物质总量, 但水分亏缺和施肥水平对冠层水分利用效率的影响不明显。与 CK 相比, 两个生育时期 LD 对叶片叶绿素 (Chl)、可溶性糖 (SS)、脯氨酸 (Pro) 和丙二醛 (MDA) 含量以及超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性的影响较小; SD 明显降低 Chl 含量以及 SOD、POD 和 CAT 活性, 但明显增加 SS、Pro 和 MDA 含量。LD 复水后各项生理生化指标均能恢复至正常灌水水平, MD 复水后能在一定程度上恢复到正常灌水水平, 而 SD 复水后则不能。因此本试验玉米拔节期和抽雄期调亏灌溉以轻度亏水适宜。

**关键词:** 玉米; 水分亏缺; 施肥水平; 复水; 水分利用; 干物质积累; 生理性状

**中图分类号:** S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0076-09

调亏灌溉 (Regulated deficit irrigation, 简称 RDI) 是 20 世纪 70 年代中期提出的一种新的节水灌溉思路<sup>[1]</sup>, 它在农田水管理和作物栽培管理方面不失为目前最优的一种灌水策略。研究 RDI 下作物自身生理生化的动态变化过程、节水效应及其对产量或品质的影响有重要的理论和现实意义。目前国内外有关 RDI 对玉米等作物的影响进行了较多的研究<sup>[2-11]</sup>。康绍忠等<sup>[2]</sup>于 1998 年开始研究 RDI 对玉米生理指标以及水分利用效率的影响, 随后许多学者对作物的调亏灌溉展开了大量研究, 这些研究主要集中在玉米最佳亏水时期、最适亏水度以及亏水对玉米产量和品质的影响<sup>[3,4]</sup>。有关玉米调亏复水后的补偿效应也有研究报道, 主要研究农艺性状、光合作用、蒸腾速率等方面<sup>[5-7]</sup>, 较少涉及调亏复水前后渗透调节物质、膜脂过氧化作用以及酶促防御系统等研究, 特别结合不同施肥的研究报道更少。因此, 本文在 2 种施肥水平下, 研究了拔节期和抽雄期不同亏水水平对干物质积累、水分利用和相关生理性状的效应, 以期对玉米实施调亏灌溉提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验在广西大学农业资源与环境专业温网室内

进行。供试土壤采自广西大学农业实验基地第四纪红色粘土发育的赤红土, 经风干、碾碎, 并过 3 mm 筛, 土壤 pH 为 5.8, 碱解氮 (N) 69.7 mg/kg, 速效磷 (P) 24.4 mg/kg, 速效钾 (K) 87.5 mg/kg, 田间持水量为 24%, 供试玉米品种为万里 999。

### 1.2 试验设计与方法

盆栽试验设亏缺灌溉时期和强度以及施肥水平 3 个因素, 共 16 个处理, 随机区组排列。亏缺灌溉时期分别在玉米拔节期和抽雄期进行, 亏缺灌溉水平设 4 个水平, 即重度缺水 (SD, 40% ~ 50%  $\theta_f$ )、中度缺水 (MD, 50% ~ 60%  $\theta_f$ )、轻度缺水 (LD, 60% ~ 70%  $\theta_f$ ) 和正常灌水 (CK, 70% ~ 80%  $\theta_f$ ),  $\theta_f$  为土壤田间持水量。施肥设低肥 (F<sub>1</sub>) 和高肥 (F<sub>2</sub>) 2 个水平, F<sub>1</sub> 处理 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 分别为 0.075 g/kg 土、0.05 g/kg 土和 0.075 g/kg 土; F<sub>2</sub> 处理分别为 0.15 g/kg 土、0.10 g/kg 土和 0.15 g/kg 土。氮肥用尿素, P、K 肥施用磷酸二氢钾和氯化钾, 均用分析纯试剂。磷酸二氢钾用量计算以施 P 量为基准, 其供 K 肥不足时用 KCl 补足。试验在聚乙烯塑料盆 (上口内径 25 cm、下口内径 19.5 cm、高 15.5 cm) 中进行, 每盆装土 11.5 kg。各盆中置放一内径为 2 cm 的 PVC 管用 于供水 (管的下半截均匀打数十个小孔, 底部与四周

收稿日期: 2009-10-15

基金项目: 国家自然科学基金 (50869001); 国家 973 计划项目 (2006CB403406)

作者简介: 韦彩会 (1983—), 女, 广西罗城人, 硕士, 主要从事植物营养与水肥利用研究。

通讯作者: 李伏生 (1963—), 男, 湖南祁阳人, 博士, 教授, 博导, 主要从事植物营养与水肥利用理论与技术研究。E-mail: zhenz@gxu.edu.cn.

用细塑料纱布包裹,以防止因灌水而引起的土壤板结)。种植前各处理均灌至田间持水量的90%。

2007年9月20日每盆各播6粒已催芽种子,待长到两叶一心期,10月2日间苗,每桶留长势均匀的植株各两株。分别在10月21日至10月31日、11月16日~11月26日进行拔节期和抽雄期水分亏缺处理。在进行水分控制之前各处理灌水量控制在田间持水量的65%~80%的范围内。进行水分亏缺处理后灌水控制在各自设定的范围内,用称重法确定每次灌水量,苗期间隔3d称1次,拔节后间隔2d称1次,用量筒量取灌水量,并记下各处理的灌水量。各处理其它农业技术措施相同。

### 1.3 样品采集和测定

分别在拔节期、抽雄期进行水分亏缺处理前(10月17日,播后27d;11月13日,播后54d),水分亏缺处理后10d(10月31日,播后41d;11月26日,播后67d)和复水后10d(11月10日,播后51d;12月6日,播后77d),取下各处理植株顶端第一片完全展开叶,作为待测样品,每次采样各处理均取两盆。分别用湿抹布擦净、剪碎、混匀后装于封口袋内,并用液氮冷冻处理后迅速放于冰箱中,用于各生理指标的测定。

叶片叶绿素(Chl)、可溶性糖(SS)和脯氨酸(Pro)含量的测定分别用丙酮乙醇比色法、萘酚比色法和磺基水杨酸法<sup>[12]</sup>。叶片丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性的测定分别用硫代巴比妥酸法、氮蓝四唑(NBT)光化还原法和紫外法<sup>[13]</sup>。叶片过氧化物酶(POD)活性的测定参照愈创木酚法<sup>[14]</sup>。

12月8日试验结束,并分别采集玉米地上部和根系,洗净,105℃杀青30min后在65℃下烘至恒重,各处理重复2次。

### 1.4 统计分析方法

试验数据多重比较用Duncan法,用SPSS12.0程序中平均值比较中单因素方差分析进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 亏缺灌溉时期和强度以及施肥水平对玉米干物质积累和水分利用的影响

由表1可知,拔节期和抽雄期重度亏水(SD)明显降低玉米地上部、根系和总干质量,中度亏水(MD)在一定程度上降低了玉米地上部、根系和总干质量,而轻度亏水(LD)不明显降低玉米地上部、根系和总干质量或略有增加。与正常灌溉(CK)相比,

拔节期低肥(F<sub>1</sub>)处理MD和SD地上部干质量降低11.5%~20.4%,而LD则略有增加,高肥(F<sub>2</sub>)处理SD降低13.6%,而MD和LD略有降低;F<sub>1</sub>和F<sub>2</sub>处理MD和SD根干质量降低14.6%~25.4%,LD略有降低;F<sub>1</sub>处理SD和MD总干质量降低16.7%~28.9%,LD则略有增加;F<sub>2</sub>处理SD总干质量降低28.6%,而MD和LD仅有所降低。抽雄期F<sub>1</sub>和F<sub>2</sub>处理SD地上部干质量降低16.6%~21.2%,而MD和LD略有降低,MD和SD根干质量降低11.5%~22.8%,而LD略有降低;MD和SD总干质量降低7.7%~22.8%,而LD略有降低。

此外,施肥在一定程度上增加了玉米干物质积累。同等程度水分亏缺,拔节期和抽雄期F<sub>2</sub>处理地上部、根系和总干质量略高于F<sub>1</sub>处理(表1)。

不同程度水分亏缺处理玉米耗水量也降低(表1)。与CK相比,拔节期F<sub>1</sub>处理SD、MD和LD玉米耗水量分别降低24.1%、9.7%和2.0%,F<sub>2</sub>处理分别降低23.6%、8.9%和6.7%;抽雄期F<sub>1</sub>处理分别降低9.0%、6.2%和1.7%,F<sub>2</sub>处理分别降低14.6%、11.5%和7.0%。同等程度水分亏缺,拔节期和抽雄期F<sub>2</sub>处理玉米耗水量高于F<sub>1</sub>处理,但差异不明显(表1)。

玉米冠层水分利用效率(WUE)指单位耗水量所生产的玉米总生物量。由表1可见,不同程度水分亏缺处理玉米WUE差异不显著,施肥水平对玉米冠层WUE的影响也不明显。

### 2.2 不同时期水分亏缺及复水和施肥水平对玉米叶片化学成分的影响

水分亏缺处理前,两个生育时期各处理叶片叶绿素(Chl)、可溶性糖(SS)、脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量之间的差异均不显著(图1~2),说明亏水前各处理Chl、SS、Pro和MDA含量基本一致。

2.2.1 叶绿素 图1A结果表明,与CK相比,拔节期F<sub>1</sub>处理LD、MD和SD叶片Chl含量分别下降4.7%、19.5%和37.5%,F<sub>2</sub>处理分别下降2.1%、16.6%和32.3%,抽雄期F<sub>1</sub>处理分别下降10.9%、18.9%和48.4%,F<sub>2</sub>处理分别下降8.7%、12.9%和29.4%。这表明两个时期轻度水分亏缺Chl含量降低不明显,中度、重度水分亏缺均明显降低Chl含量,且F<sub>1</sub>较F<sub>2</sub>处理Chl含量降幅大,因而施肥可以减轻水分胁迫对Chl含量的影响,特别是后期这种促进作用尤为明显。而抽雄期水分亏缺处理较拔节期Chl含量降幅大,这可能与不同时期叶片生理活动的强弱有关。

表 1 亏缺灌溉时期和强度以及施肥水平对玉米干物质积累和水分利用的影响  
Table 1 Effect of water deficit at different growth stages and intensity and fertilization level on dry matter accumulation and water use of maize

亏水时期 Water deficit stage	施肥水平 Fertilization level	亏水水平 Water deficit level	地上部干质量 Shoot dry matter (g/plant)	根干质量 Root dry matter (g/plant)	总干质量 Total dry matter(g/plant)	总耗水量 Total water consumption (kg/plant)	水分利用效率 Water use efficiency (kg/m <sup>2</sup> )
拔节期 Jointing stage	F <sub>1</sub>	SD	48.0 ± 2.4c	7.3 ± 0.3c	55.3 ± 2.7e	23.0 ± 1.5b	2.4 ± 0.0a
		MD	56.9 ± 8.6abc	7.8 ± 0.3c	64.8 ± 8.3bcde	27.4 ± 2.1ab	2.4 ± 0.1a
		LD	69.3 ± 8.9ab	9.4 ± 0.6abc	78.7 ± 8.3abc	29.8 ± 1.0ab	2.6 ± 0.2a
	F <sub>2</sub>	SD	51.7 ± 4.6bc	7.9 ± 0.2bc	59.6 ± 4.8de	24.8 ± 4.2ab	2.4 ± 0.2a
		MD	69.0 ± 3.5ab	9.1 ± 0.4abc	78.1 ± 3.1abc	29.5 ± 1.9ab	2.7 ± 0.3a
		LD	70.1 ± 8.1ab	10.5 ± 1.5a	80.6 ± 6.6ab	30.3 ± 2.2ab	2.7 ± 0.0a
抽雄期 Tasseling stage	F <sub>1</sub>	SD	54.8 ± 4.4abc	7.4 ± 0.1c	62.2 ± 4.7cde	27.7 ± 1.8ab	2.3 ± 0.0a
		MD	63.6 ± 4.2abc	8.2 ± 0.3abc	71.8 ± 4.5abcde	28.5 ± 1.7ab	2.5 ± 0.3a
		LD	66.1 ± 5.9abc	9.4 ± 0.6abc	75.4 ± 6.6abcd	29.9 ± 2.7ab	2.5 ± 0.0a
	F <sub>2</sub>	SD	56.3 ± 1.7abc	8.2 ± 0.3bc	64.5 ± 2.0bcde	27.7 ± 1.9ab	2.3 ± 0.1a
		MD	66.9 ± 2.4ab	9.4 ± 0.4abc	76.3 ± 1.9abcd	28.7 ± 1.0ab	2.7 ± 0.1a
		LD	69.7 ± 6.0ab	10.4 ± 0.5ab	80.1 ± 5.5ab	30.1 ± 2.9ab	2.7 ± 0.1a
拔节 - 抽雄期 Jointing - tasseling stages	F <sub>1</sub>	CK	68.4 ± 1.8ab	9.4 ± 1.3abc	77.8 ± 3.1abc	30.4 ± 2.6ab	2.6 ± 0.1a
	F <sub>2</sub>	CK	72.9 ± 4.3a	10.6 ± 1.3a	83.5 ± 3.1a	32.4 ± 1.7a	2.6 ± 0.2a

注:表中数值为平均值 ± 标准误差(n=2),同一列不同小写字母,则表示处理之间差异显著(P<0.05)。SD、MD、LD和CK分别是重度亏水、中度亏水、轻度亏水和正常灌溉,F<sub>1</sub>和F<sub>2</sub>分别是低肥与高肥。下同。

Note: Values are means ± standard errors (n=2). Different letters in the same column indicate significant difference (P<0.05). SD, MD, LD and CK represent serious water deficit, medium water deficit, slight water deficit and normal irrigation, respectively. F<sub>1</sub> and F<sub>2</sub> represent lower fertilization and higher fertilization, respectively. The same for the following figures.

水分胁迫对叶片 Chl 含量的影响不仅表现在胁迫处理期间而且延续到恢复供水后。恢复正常供水 10 d 后,拔节期 F<sub>1</sub> 处理 LD、MD 和 SD 叶片 Chl 含量分别恢复到 CK 的 97.2%、83.7% 和 61.8%, F<sub>2</sub> 处理分别为 94.2%、88.1% 和 69.7%, 而抽雄期 F<sub>1</sub> 处理分别为 93.2%、89.6% 和 69.7%, F<sub>2</sub> 处理分别为 99.5%、91.5% 和 81.6%。这说明轻度亏水叶片受水分胁迫影响小, Chl 含量下降幅度小, 复水后恢复能力强; 中度亏水叶片受水分胁迫的损伤尚能恢复, 复水后恢复能力较强; 而重度亏水在一定程度上破坏了叶内细胞叶绿体的结构和功能, 因此不仅导致 Chl 含量的明显下降, 而且复水后其功能仍很难恢复, 恢复能力差。

2.2.2 可溶性糖 水分胁迫时, 植物体主动积累可溶性糖(SS)、脯氨酸(Pro)、甜菜碱、K<sup>+</sup> 等小分子物质, 这些物质通过质量作用定律进行渗透调节, 从而增强植株保水能力, 降低渗透胁迫<sup>[5,15-17]</sup>。图 1B 结果表明, 水分亏缺使叶片 SS 含量增加, 并随胁迫程度增强, SS 含量增加较大。与 CK 相比, 拔节期 F<sub>1</sub> 处理 LD、MD 和 SD 叶片 SS 含量分别增加 6.3%、

24.5% 和 34.9%, F<sub>2</sub> 处理分别增加 5.4%、32.3% 和 36.5%, 抽雄期 F<sub>1</sub> 处理分别增加 55.7%、111.4% 和 147.9%, F<sub>2</sub> 处理分别增加 63.8%、118.8% 和 163.8%。表 3 表明拔节期 LD 对 SS 含量的影响不明显, 而两个时期 MD 和 SD 均显著增加 SS 含量, 特别是抽雄期明显增大。复水 10 d 后, 各水分处理 SS 含量均可以恢复到正常灌水水平。此外, 由表 3 还可以看出, 随着生育进程的推进, 叶片 SS 含量呈下降趋势, 这可能与生育后期生长中心由营养生长向生殖生长转移, 同化利用率高, 物质转运快有关。

2.2.3 脯氨酸 水分胁迫时植物体内 Pro 的积累是普遍现象<sup>[5,15-17]</sup>。由图 2A 可见, 拔节期 F<sub>1</sub> 处理 LD、MD 和 SD 叶片 Pro 含量分别是 CK 的 1.1、2.6 和 5.0 倍, F<sub>2</sub> 处理分别是 CK 的 1.1、2.7 和 4.8 倍, 抽雄期 F<sub>1</sub> 处理分别是 CK 的 1.9、5.8 和 11.3 倍, F<sub>2</sub> 处理分别是 CK 的 1.2、5.2 和 10.6 倍。拔节期 LD 以及抽雄期 F<sub>2</sub> 处理 LD 对 Pro 含量的影响不明显, 而抽雄期 F<sub>1</sub> 处理 LD 以及所有 MD 和 SD 叶片 Pro 含量均成倍甚至成数倍增加。两个时期复水 10 d 后, 各处理 Pro 含量均恢复至正常灌水水平。

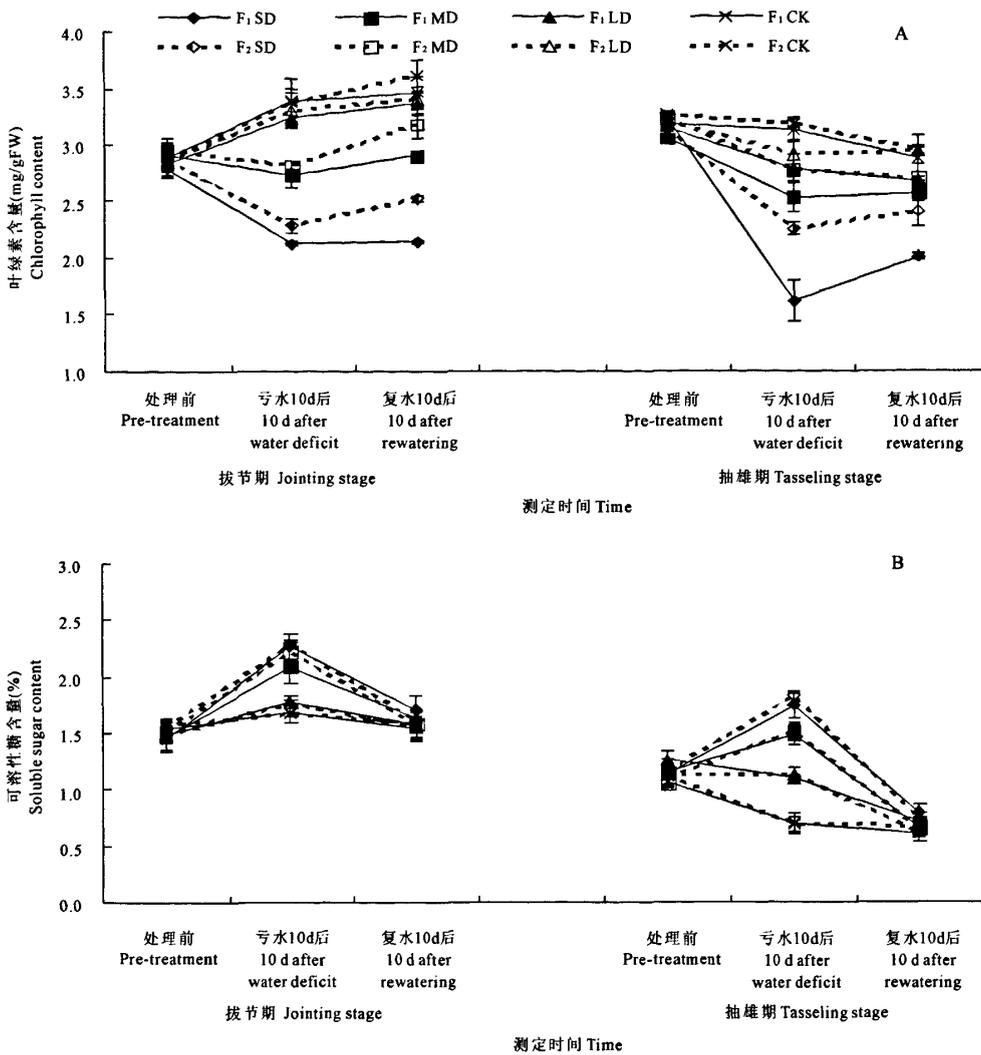


图1 不同时期水分亏缺及复水和施肥水平对玉米叶片叶绿素和可溶性糖含量的影响

Fig.1 Effect of water deficit and rewatering at different growth stages and fertilization level on leaf chlorophyll (Chl) and soluble sugar (SS) contents of maize

2.2.4 丙二醛 膜脂过氧化的次生产物丙二醛(MDA)是长期以来用于检测膜脂过氧化程度的一个公认指标。关于植物在逆境下的膜脂过氧化,大量的报道都趋于一致结论,即逆境能使MDA含量增加,破坏膜的结构与功能<sup>[16,18,19]</sup>。本试验也得到类似结果,水分亏缺均不同程度地增加MDA含量,与CK相比,拔节期F<sub>1</sub>处理LD、MD和SD叶片MDA含量分别增加49.7%、100.1%和168.7%,F<sub>2</sub>处理分别增加14.8%、73.3%和135.3%,抽雄期F<sub>1</sub>处理分别增加78.0%、184.4%和272.8%,F<sub>2</sub>处理分别增加31.9%、109.3%和202.4%(图2B)。这表明两个时期F<sub>2</sub>轻度水分亏缺对MDA含量的影响不明显,

而F<sub>1</sub>轻度、中度以及重度亏水MDA含量大量增加,膜脂过氧化伤害程度加重。复水10d后,所有处理MDA含量均有回落的现象,轻度亏水MDA含量恢复到正常灌水水平,但受中度、重度胁迫后不能恢复至正常灌水水平,MDA仍保持较高含量,膜脂过氧化伤害仍在延续。

### 2.3 不同时期水分亏缺及复水对两种施肥水平玉米叶片酶促防御系统的影响

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物内源防御活性氧自由基对细胞膜系统伤害的关键酶系统,在清除生物自由基上担负着重要的功能,SOD能将O<sub>2</sub><sup>-</sup>歧化成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,而

POD 和 CAT 可将  $H_2O_2$  进一步清除产生  $H_2O$ , 三者协同作用可使自由基维持在一个较低的水平, 从而避免膜伤害<sup>[19]</sup>。本文分别对这 3 种酶的活性进行了

测定, 水分亏缺处理前, 两个生育时期各处理 SOD、POD 和 CAT 活性之间的差异均不明显(图 3), 说明亏水前各处理 SOD、POD 和 CAT 活性基本一致。

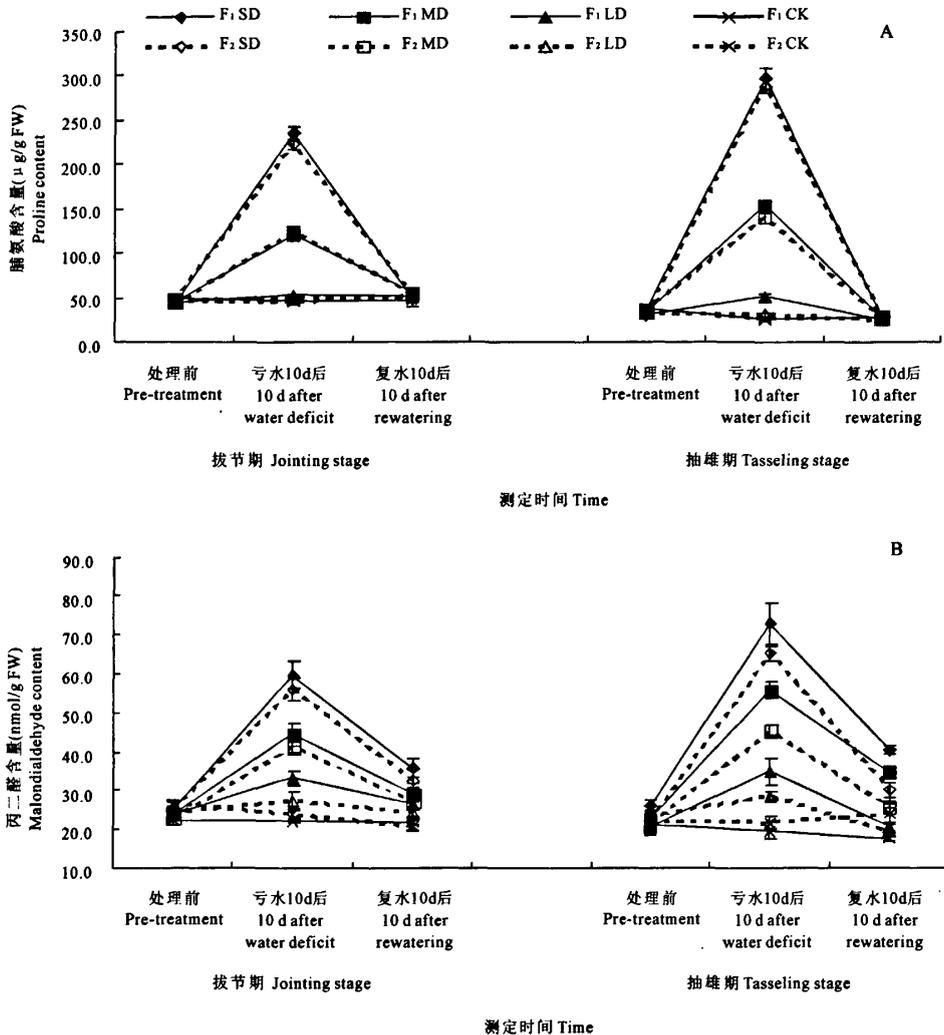


图 2 不同时期水分亏缺及复水和施肥水平对玉米叶片脯氨酸和丙二醛含量的影响  
 Fig.2 Effect of water deficit and rewatering at different growth stages and fertilization level on leaf proline (Pro) and malondialdehyde (MDA) contents of maize

2.3.1 超氧化物歧化酶 图 3A 结果表明, 拔节期和抽雄期不同程度的水分亏缺玉米叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性表现出不同的变化趋势, 拔节期轻度水分亏缺、抽雄期 F<sub>2</sub> 处理时轻度水分亏缺叶片 SOD 活性呈现出上升趋势, 而其余各处理 SOD 活性均呈下降趋势, 并随胁迫的加深降幅增大。拔节期 F<sub>1</sub> 处理 MD 和 SD 叶片 SOD 活性分别较 CK 下降 26.5%、44.8%, F<sub>2</sub> 处理分别下降 16.1%、41.5%, 抽雄期 F<sub>1</sub> 处理 LD、MD 和 SD 叶片 SOD 活性分别下降 2.4%、22.9%和 39.4%, F<sub>2</sub> 处理 MD 和 SD 分别下降

18.4%和 42.8%。复水 10 d 后, 各处理玉米叶片 SOD 活性均有不同程度的回升, 但受中度、重度水分亏缺的处理不能恢复至正常灌水水平。

2.3.2 过氧化物酶 随水分胁迫程度的增强, 拔节期和抽雄期叶片过氧化物酶(POD)活性降幅增大, 拔节期 F<sub>1</sub> 处理 LD、MD 和 SD 玉米叶片 POD 活性分别较 CK 下降 14.7%、26.1%和 50.6%, F<sub>2</sub> 处理除 LD 上升 1.5%, MD 和 SD 分别下降 23.3%和 48.9%, 抽雄期 F<sub>1</sub> 处理 LD、MD 和 SD 分别下降 14.5%、31.5%、52.7%, F<sub>2</sub> 处理分别下降 9.3%、31.8%、51.8%(图 3B)。

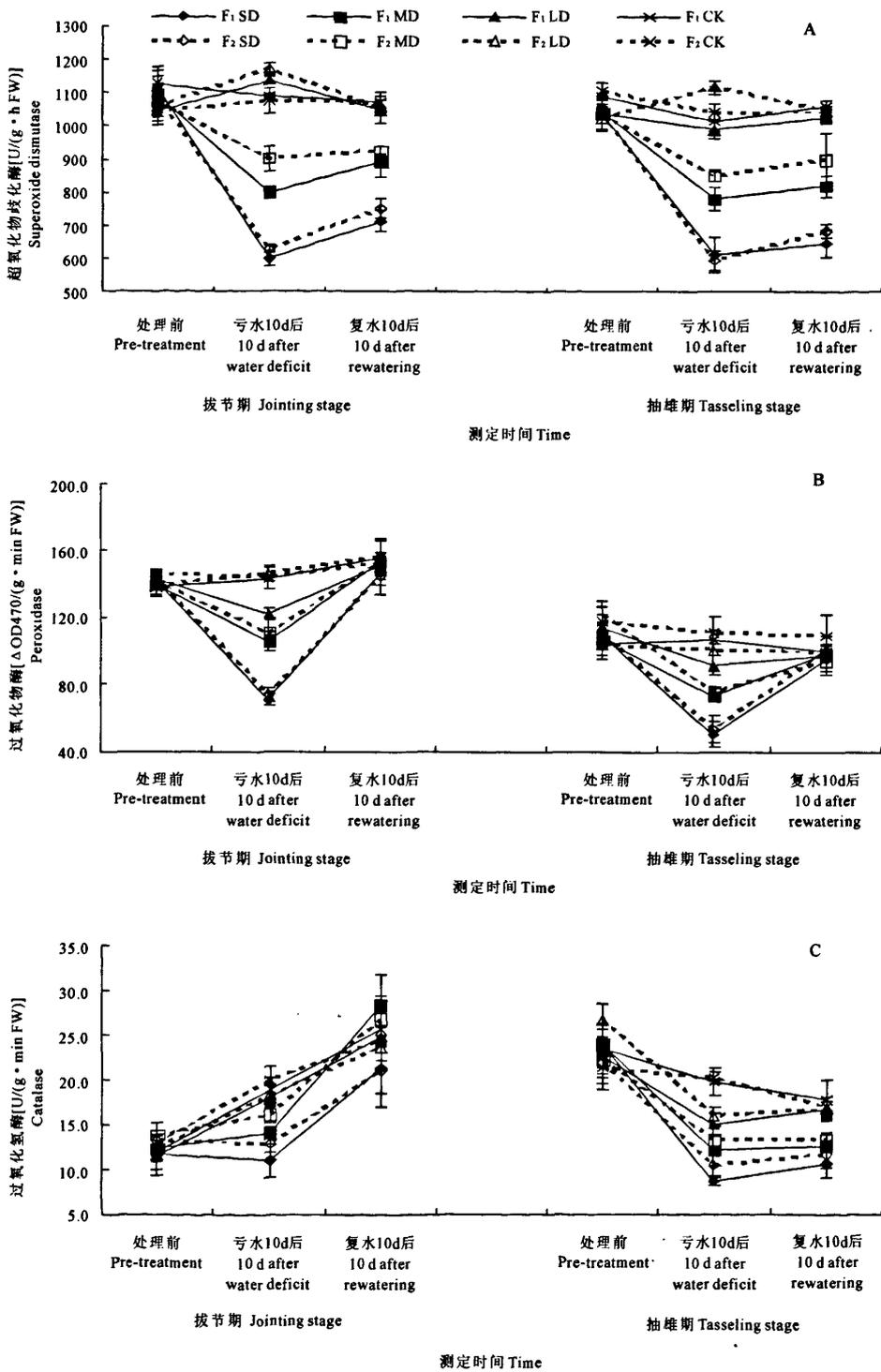


图 3 不同时期水分亏缺及复水和施肥水平对玉米叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性的影响

Fig.3 Effect of water deficit and rewatering at different growth stages and fertilization level on leaf superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities of maize

复水 10 d 后,各处理叶片 POD 活性均恢复到正常灌水水平,POD 受不同程度的水分胁迫其活性均相应下降,复水后又都能恢复到正常灌水水平,这表明 POD 对水分胁迫反应灵敏,受胁迫时其活性下降,而胁迫消除后又能及时恢复到正常灌水水平。

**2.3.3 过氧化氢酶** 随水分胁迫程度的增强,拔节期和抽雄期叶片过氧化氢酶(CAT)活性下降幅度增大。拔节期  $F_1$  处理 LD、MD 和 SD 叶片 CAT 活性分别较 CK 下降 5.8%、25.9% 和 42.1%, $F_2$  处理分别下降 8.7%、19.5% 和 35.7%,抽雄期  $F_1$  处理分别下降 24.1%、38.9% 和 56.1%, $F_2$  处理分别下降 20.8%、34.1% 和 48.0% (图 3C)。复水 10 d 后,拔节期各处理的 CAT 活性均恢复到正常灌水水平,而抽雄期受中度、重度水分亏缺处理叶片 CAT 活性未能恢复到正常灌水水平。这表明拔节期水分胁迫对玉米叶片 CAT 活性影响小,复水后恢复力强,而抽雄期受中度、重度亏水玉米叶片受伤较严重,复水 10 d 后,不能恢复至正常灌水水平,说明 CAT 在不同生育时期敏感度不同。

### 3 讨 论

#### 3.1 亏缺灌溉时期和强度以及施肥水平对玉米干物质积累和水分利用的影响

陈晓远等<sup>[20]</sup>发现,中度水分亏缺后充分供水,小麦生物量和产量都超过对照。郭相等<sup>[21]</sup>指出,玉米苗期调亏,复水后其需水量在拔节期、抽穗期均低于对照,只在灌浆期高于对照,而总需水量仍较非调亏处理有所下降。刘安能等<sup>[11]</sup>研究发现,施肥能显著提高玉米产量和水分利用效率,且高水条件施肥增产作用比低水条件显著。而胡明芳等<sup>[22]</sup>指出,在一定范围内,无论作物处于水分充足或胁迫状况下,施肥都能明显促进作物对水分的吸收与利用。本试验结果表明,两个生育时期轻度水分亏缺玉米干物质累积降低不明显甚至有所增加,而重度亏水玉米干物质总量明显降低,这与前人研究结果一致<sup>[3,11]</sup>,其原因可能是本研究重度亏水玉米叶片 Chl 含量下降,光合速率下降较多以及引起 MDA 积累、SOD 和 CAT 活性下降较多的结果。轻度、中度亏水的高肥处理玉米 WUE 略高于低肥处理,但是差异不显著。因此,拔节期和抽雄期应以轻度亏水为宜,并且亏水时间不宜太长<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 不同时期水分亏缺及复水以及施肥水平对玉米生理性状的影响

前人研究表明,不同程度水分胁迫会导致玉米叶片 Chl 含量下降,下降幅度次序为重度亏水、中度

亏水、轻度亏水;复水后,轻度亏水最易恢复,中度亏水次之,重度亏水最难恢复<sup>[16,23]</sup>。而 Pro、SS 和 MDA 含量随水分胁迫程度的增强而增大<sup>[15,16,18]</sup>。王娟等<sup>[19]</sup>指出,以 POD 对水分胁迫反应最为敏感,CAT 次之,二者均随水分胁迫的增强下降幅度增大,SOD 对水分胁迫表现最不敏感,在中度水分胁迫下仍保持上升趋势。本研究两个生育时期轻度亏水对玉米叶片 Chl、SS、Pro、MDA 含量及 SOD、POD、CAT 活性的影响较小,复水 10 d 后均能恢复至正常灌水水平,这表明轻度亏水对玉米生理生化指标影响小,复水后恢复能力强,这与以往试验结果相似<sup>[19,23,24]</sup>。而经受中度、重度亏水的玉米植株上述指标所受影响较大,复水作为对于干旱胁迫的一种行之有效的补救措施,但经受重度亏水的 Chl 含量不能恢复到正常灌水水平,这可能因为重度亏水的玉米植株叶内细胞叶绿体的结构和功能严重损坏,叶绿素含量明显下降,因而复水后其功能仍很难恢复。而复水 10 d 后,各处理 SS 和 Pro 含量均可恢复至正常灌水水平,说明它们的渗透调节能力是暂时的且可以逆转的,已建立的渗透调节能力复水后会消失,再受胁迫时仍会建立。两个生育时期经受中度、重度亏水后 MDA 含量、SOD 和 CAT 活性复水均不能恢复至正常灌水水平,而 SOD、CAT 活性得不到及时恢复,直接导致活性氧防御体系失去平衡,膜脂被迫加速过氧化进程,所以 MDA 含量一直保持很高的含量。

不同生育时期水分亏缺对玉米叶片的伤害程度不同<sup>[3]</sup>。李素美等<sup>[25]</sup>研究表明,土壤水分状况对夏玉米产量形成的影响有明显的阶段性,干旱对夏玉米生育后半期的影响强度大于前半期。本研究表明,同等程度的水分亏缺,玉米叶片各生理指标在抽雄期变化幅度较拔节期大,复水后其恢复能力也较弱,这表明抽雄期对水分亏缺表现较为敏感,受旱伤害严重。其原因是水分胁迫下植株生理生化代谢及活性氧代谢失调,从而引发一系列代谢紊乱,导致细胞死亡,造成复水后恢复能力差。

水分胁迫下作物生理生化响应还受土壤肥力的影响。孙群等<sup>[26]</sup>研究表明,玉米苗期施用适量 N 肥,可以有效地提高细胞保护酶活性尤其是 SOD 活性,这对于保持细胞膜结构的稳定性、防止膜脂过氧化有重要作用,而刘瑞显等<sup>[27]</sup>研究指出,干旱条件下施 N 不利于棉花光合性能的提高。张立新等<sup>[28]</sup>研究表明,水分胁迫时,施 K 显著提高 2 个玉米品种各时期的 SOD、POD 和 CAT 活性,但明显降低 MDA 含量。本研究也表明,同等程度的水平亏缺,

各生理生化指标变化幅度高肥较低肥小,受伤害较小,因此施肥可在一定程度上缓解水分胁迫对玉米植株造成的伤害,且在生育后期较为明显。

综上所述,轻度亏水对各项生理指标影响小,复水后有补偿效应,因此对玉米最终生物量的积累不会产生负效应。此外,施肥有利于缓解玉米水分亏缺下的生理伤害。

#### 参考文献:

- [1] Rawson H M, Turner N C. Irrigation timing and relationship between leaf area and yield in sunflowers[J]. *Irrigation Science*, 1983, 4(1): 167—175.
- [2] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 等. 调亏灌溉对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.
- [3] 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.
- [4] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(3): 24—27.
- [5] 王密侠, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 玉米调亏灌溉节水调控机理的研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2004, 32(12): 87—90.
- [6] 丁端峰, 蔡焕杰, 王 健, 等. 玉米苗期调亏灌溉的复水补偿效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3): 64—67.
- [7] 孟兆江, 卞新民, 刘安能, 等. 调亏灌溉对夏玉米光合生理特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 182—186.
- [8] Vamerali T, Saccomani M, Bona S, et al. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255: 157—167.
- [9] Cakir R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn[J]. *Field Crops Research*, 2004, 89: 1—16.
- [10] Oktem A, Simsek M, Oktem A G. Deficit irrigation effects on sweet corn (*Zea mays saccharata* Sturt) with drip irrigation system in a semi-arid region I. Water-yield relationship[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 61: 63—71.
- [11] 刘安能, 孟兆江. 玉米调亏灌溉效应及其优化农艺措施[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(3): 108—111.
- [12] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 145—206.
- [13] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 210—215.
- [14] 叶燕萍. 植物生理实验技术[M]. 广西大学教材, 2002: 34—41.
- [15] Bohnert H J, Jensen R G. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants[J]. *Trends Biotech*, 1996, 14: 89—95.
- [16] 阎 勇, 罗兴录, 张兴思, 等. 不同供水条件下玉米耐旱生理特性比较[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(9): 323—326.
- [17] 宋松泉, 王彦荣. 植物对干旱胁迫的分子反应[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(8): 1037—1044.
- [18] 李 萌, 田霄鹤, 李生秀. 花期前后不同干旱过程对玉米抗旱生理反应的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 26—30.
- [19] 王 娟, 李德全, 谷令坤. 不同抗旱性玉米幼苗根系抗氧化系统对水分胁迫的反应[J]. *西北植物学报*, 2002, 22(2): 285—290.
- [20] 陈晓远, 罗远培. 开花期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究[J]. *作物学报*, 2001, 27(4): 512—516.
- [21] 郭相平, 康绍忠, 索丽生. 苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J]. *灌溉排水*, 2001, 20(1): 25—27.
- [22] 胡明芳, 田长彦, 马英杰. 不同水肥条件下棉花苗期的生长、养分吸收与水分利用状况[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(3): 35—37.
- [23] 赵天宏, 沈秀瑛, 杨德光, 等. 水分胁迫及复水对玉米叶片叶绿素含量和光合作用的影响[J]. *杂粮作物*, 2003, 23(1): 33—35.
- [24] 洪法水, 张 帆. 玉米幼苗萎蔫过程中某些理化性质变化的研究[J]. *西北植物学报*, 1999, 19(1): 71—75.
- [25] 李素美, 东先旺, 陈建华. 不同土壤目标含水量对夏玉米光合性能及产量的影响[J]. *华北农学报*, 1999, 14(3): 55—59.
- [26] 孙 群, 梁宗锁, 王渭玲, 等. 氮对水分亏缺下玉米幼苗膜脂过氧化及光合速率的影响[J]. *西北农业学报*, 2001, 10(1): 7—10.
- [27] 刘瑞显, 郭文琦, 陈兵林, 等. 干旱条件下花铃期棉花对氮素的生理响应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1475—1482.
- [28] 张立新, 李生秀. 氮、钾、甜菜碱对水分胁迫下夏玉米叶片膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(3): 482—490.

## Effect of regulated deficit irrigation and fertilization on dry matter accumulation and related physiological properties of maize

WEI Cai-hui, LI Fu-sheng, XU Chun-hui, NONG Meng-ling, YU Jiang-min, LUO Hui  
(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530005, China)

**Abstract:** A pot experiment was carried out to study the effect of four water deficit levels during the jointing and tasseling stages of maize crop, i. e. serious water deficit(SD 40% ~ 50%  $\theta_f$ ,  $\theta_f$  is field water capacity), medium water deficit(MD, 50% ~ 60%  $\theta_f$ ), mild water deficit(LD, 60% ~ 70%  $\theta_f$ ) and normal irrigation(CK, 70% ~ 80%  $\theta_f$ ) on dry matter accumulation, water use and related physiological properties of maize under two fertilization levels. Fertilization was beneficial for dry matter accumulation of maize, LD treatment did not decrease or slightly increased total dry matter of maize, but SD treatment decreased total dry matter significantly at the jointing and tasseling stages, and any water deficit and fertilization level had no significant effect on canopy water use efficiency. Compared to CK, LD treatment had insignificant effect on leaf chlorophyll(Chl), soluble sugar(SS), proline(Pro) and malondialdehyde(MDA) contents, and superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD) and catalase(CAT) activities during the two growth stages. However, SD treatment declined the Chl content and SOD, POD and CAT activities greatly, but increased SS, Pro and MDA contents significantly. Rewatering can recover the physiological and biochemical indices to the levels of CK after suffering the LD treatment and the levels of CK to some extent after suffering the MD treatment, but it cannot recover them to the levels of CK after suffering the SD treatment. Thus mild water deficit during the jointing and tasseling stages is suitable for the regulated deficit irrigation of maize crop in this experiment.

**Keywords:** maize; water deficit; fertilization level; rewatering; water use; dry matter accumulation; physiological properties

(上接第 53 页)

## Soil moisture change of spring wheat field under different irrigation quantity

DU Hong-juan<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, LI Fu-sheng<sup>3</sup>, WANG Lian-xi<sup>2,4</sup>, CHE Jing-jing<sup>3</sup>, GUAN Jing-de<sup>3</sup>, ZHENG Fang<sup>1</sup>

(1. Wuzhong Meteorological Office, Wuzhong, Ningxia 751100, China;

2. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction of Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

3. Ningxia Institute of Meteorological Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

4. Nanjing Information Engineering University, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract:** The main purpose of this article is to show the variation of soil moisture of spring wheat field under the condition of different irrigation treatments. The experimental results show that: the probability of the variation of soil moisture on vertical direction under different irrigation treatments is the same, and the coefficients of variation of the probability of soil moisture become smaller and smaller as the depth increases; At the period of jointing which is in the highest need of water, all of the intensity of water consumption under different irrigation treatments achieve to the maximum during the whole period of spring wheat growth; From water-saving irrigation treatment T3 can obtain the best effect under different irrigation levels, because of the better using water and irrigation water and the best irrigation level. So that it can achieve the effect of water-saving irrigation.

**Keywords:** irrigation quantity; spring wheat; soil moisture