DOI: 10.5846/stxb201405090919
陆文娟,李伏生,农梦玲.不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米生理特性和水分利用的影响.生态学报,2014,34(18):5257-5265.
Lu W J, Li F S, Nong M L.Effects of alternate partial root-zone irrigation on physiological characteristics and water use of maize under different water and fertilizer conditions.Acta Ecologica Sinica,2014,34(18):5257-5265.

不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米生理特性和水分利用的影响

陆文娟,李伏生*,农梦玲
(广西大学农学院, 南宁 530005)

摘要:为探讨分根区交替灌溉(AI)条件下作物生理响应和水分利用情况,在不同水肥条件下,以常规灌溉为对照,研究了分根区交替灌溉(AI)对玉米总干物质量、水分利用和生理指标的影响以及这些指标在恢复正常灌水后的恢复补偿能力,以期为玉米实施分根区交替灌溉提供科学依据。盆栽试验包括 2 种氮磷(NP)肥水平,2 种灌溉方式和不同亏水水平,即拔节前期至中期(18d)进行正常灌水(70%—80% θ_f,θ_f是田间持水量)、轻度亏水(60%—70% θ_f)和中度亏水(50%—60% θ_f),拔节前期至中期处理后拔节中期至抽雄期(18d)进行正常灌水(70%—80% θ_f)和轻度亏水(60%—70% θ_f)。结果表明:与常规灌溉相比,拔节前期至抽雄期 AI 不显著影响玉米叶片叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖和脯氨酸含量,总干物质量和水分利用效率;与正常灌水相比,拔节前期至抽雄期轻度亏水也不显著影响上述指标;拔节前期至中期中度亏水降低玉米叶绿素含量和总干物质量,提高可溶性糖和脯氨酸含量,但是该处理在拔节中期至抽雄期恢复正常灌水后这些指标均恢复到一直正常灌水的水平。此外,施肥水平对各项指标的影响也不显著。因此,轻度亏水、低肥和拔节前期至抽雄期分根区交替灌溉结合可以节约灌水量和施肥量。

关键词:灌溉方式;施肥水平;亏水水平;生理指标;水分利用效率

Effects of alternate partial root-zone irrigation on physiological characteristics and water use of maize under different water and fertilizer conditions

LU Wenjuan, LI Fusheng*, NONG Mengling
College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530005, *China*

Abstract: To investigate the physiological characteristics and water use of maize under alternate partial root-zone irrigation (AI), taking conventional irrigation as the control, the effects of AI on total dry mass, water use and physiological indices of maize plants were investigated under different water and fertilizer conditions and how these responses were recovered to the control levels when full irrigation was resumed, so as to provide scientific basis for the implementation of alternate partial root-zone irrigation for maize plants. Pot experiment was carried out at two nitrogen (N) and phosphorus (P) levels, two irrigation methods and different water deficit levels, i.e. normal irrigation (70%—80% θ_f, θ_f is field capacity), mild water deficit (60%—70% θ_f) and medium water deficit (50%—60% θ_f) for 18d at the early to middle jointing stage, and mild water deficit (60%—70% θ_f) and normal irrigation (70%—80% θ_f) for 18d at the middle jointing to tasseling stages after the early to middle jointing stage. Results indicate that compared to conventional irrigation, AI at the early jointing to tasseling stages did not significantly affect leaf chlorophyll, caroteniod, soluble sugar and proline contents, total dry mass and water use efficiency. Compared to normal irrigation level, mild water deficit at the early jointing to tasseling stages did

基金项目:国家 863 计划(2011AA100504);国家自然科学基金重点项目(U1033004)
收稿日期:2014-05-09; **修订日期**:2014-08-11

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhenz@gxu.edu.cn

not affect these indices significantly, either. Medium water deficit at the early to middle jointing stage decreased leaf chlorophyll content and total dry mass and increased leaf soluble sugar and proline contents, but resuming medium water deficit to normal irrigation at the middle jointing to tasseling stages could recover these indices to the control level. In addition, the indices were not affected by fertilization level. Thus the combination of mild water deficit, low NP and AI at the early jointing to tasseling stages can save water amount and fertilizer rate.

Key Words: irrigation method; fertilization level; water deficit level; physiological index; water use efficiency

分根区交替灌溉(AI)是在作物某些生育期或全部生育期交替地对部分根区进行正常灌溉,而在其余根区则受到人为水分胁迫,通过调节气孔开度以减少植株"奢侈"蒸腾和降低土壤蒸发[1],而达到提高其水分利用效率(WUE)、节水、适产和优质的目的[2-4]。目前该技术在玉米、棉花、烤烟、葡萄、西红柿等多种作物上进行了试验研究和应用[5-11]。有研究表明,在合适土壤水分和施肥条件下,AI 可显著降低作物耗水量[12],生物量小幅度降低[5, 7]或略有增加[1,13],但能提高作物 WUE[14]和经济作物的内在品质[11]。也有研究表明,AI 对干物质积累的影响与氮肥供应形态有关,在铵态氮供应下 AI 使番茄总生物量显著降低或有降低的趋势[15]。此外,AI 处理作物叶片蒸腾速率虽有所下降,但光合速率却有所提高[16],同时叶片叶绿素含量[9]、类胡萝卜素、脯氨酸和丙二醛含量及超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性与常规灌溉之间的差异不显著,且恢复常规灌溉后上述生理指标能恢复到正常水平[17]。在分根区交替灌溉方式下,适量施肥可提高作物总干物质质量,而对作物耗水量影响不明显,但可以提高作物 WUE,起到以肥调水的作用[13-14]。但这些研究一般鲜少把分根区交替灌溉和不同氮磷水平、不同灌水水平以及将亏水处理恢复到正常灌水水平结合起来,研究作物在复水后的恢复补偿能力。因此,本文在不同水肥条件下,以常规灌溉为对照,研究分根区交替灌溉对玉米总干物质量、水分利用和生理指标的影响,以及这些指标在恢复正常灌水后的恢复补偿能力,以期为玉米实施分根区交替灌溉提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽试验在广西大学农学院网室大棚(网室大棚顶部为玻璃,以隔绝天然降雨,四周为防虫网)中进行,供试土壤采自本校试验基地第四纪红色黏土发育的水稻土改为旱地(已连续两年种植玉米),其土壤质地是重黏土,田间持水量为 30% θ_f(质量含水量),pH 为 6.63,有机质 16.3 g/kg,碱解氮(N)81.1 mg/kg(1 mol/L NaOH 碱解扩散法),速效磷(P)34.4 mg/kg(0.5 mol/L $NaHCO_3$ 法)和速效钾(K)158.5 mg/kg(1 mol/L 中性 NH_4Ac 法)。供试玉米品种为盛玉 9 号。供试氮肥用尿素(含 N46%),磷肥用磷酸二氢钾(含 P_2O_5 52%),钾肥用磷酸二氢钾(含 K_2O 34%)和氯化钾(含 K_2O 60%),所有肥料均用分析纯试剂。

1.2 试验方法

盆栽试验中灌溉方式设常规灌溉(CI,每次对盆内两侧土壤均匀灌水)和分根区交替灌溉(AI,交替对盆内 1/2 区域土壤灌水)。施肥水平设低 NP 肥(F_1,N 0.075 g/kg 土和 P_2O_5 0.05 g/kg 土)和高 NP 肥(F_2,N 0.15 g/kg 土和 P_2O_5 0.1 g/kg 土),所有处理均施 K_2O 0.10 g/kg 土。不同时期亏水水平包括拔节前期至拔节中期(播后 26—43d)正常灌水(W_1,70%—80% θ_f)、轻度亏水(W_2,60%—70% θ_f)和中度亏水(W_3,50%—60% θ_f)。经过前面不同水分处理后,拔节中期至抽雄期(播后 44—61d),将拔节前期至拔节中期中度亏水处理恢复至正常灌水处理,而灌溉方式和其它灌水水平不变,具体如表 1 所示。试验共 12 个处理,随机区组排列。分别在拔节中期(播后 43d)和抽雄期(播后 61d)进行破坏性采样,每个处理采 3 盆,每个时期采 36 盆,全部试验共 72 盆。

试验在塑料桶(上部开口直径 33 cm,底部直径 24 cm,高 23 cm)中进行,所有试验桶中间粘双层塑料薄膜,将试验用桶分为均等的两个部分,塑料薄膜两侧各装 6.0 kg 风干土,并各置放一内径 2cm 的

PVC 管用于供水(管的下半截均匀打数个小孔,底部与四周均有细塑料纱网布包裹),以防止土壤因灌水而引起的土壤板结。种植前各处理均灌水至 90% θ_f,并在土面塑料薄膜中部剪一个“U”型缺口,在玉米间苗时在薄膜隔开处用土加高分开,以防侧渗。

2009 年 9 月 14 日在每盆所剪的薄膜“U”型缺口处播入 5 粒已催芽露白的玉米种子,待长到 3 叶一心期,9 月 24 日进行间苗,每桶保留长势较均匀的植株 2 株。9 月 15 日—10 月 10 日,各桶均为常规灌溉,各桶土壤含水量保持在田间持水量的 70%—80%;10 月 11 日—10 月 28 日(播后 26—43d)、10 月 29 日—11 月 15 日(播后 44—61d)分别按照表 1 的水分处理进行水分控制。常规灌溉用称盆质量法确定灌水量,称盆质量间隔时间为 1d,AI 灌水量在玉米拔节前期-拔节中期为 70% 的 CI 灌水量,在玉米拔节中期-抽雄期 AI 灌水量为 85% 的 CI 灌水量,并记录每次各处理灌水量。各处理其它农业技术措施相同,试验于 11 月 16 日(抽雄期)结束。

表 1　盆栽试验处理

Table 1　Treatments for pot experiment

灌溉方式 Irrigation method	施肥水平 Fertilization level	灌水水平 Irrigation level/θ_f% 代号 Code	拔节前期至拔节中期 Early to middle jointing stage	代号 Code	拔节中期至抽雄期 Middle jointing to tasseling stage
AI	F_1	W_1	70—80	W_1W_1	70—80
		W_2	60—70	W_2W_2	60—70
		W_3	50—60	W_3W_1	70—80
	F_2	W_1	70—80	W_1W_1	70—80
		W_2	60—70	W_2W_2	60—70
		W_3	50—60	W_3W_1	70—80
CI	F_1	W_1	70—80	W_1W_1	70—80
		W_2	60—70	W_2W_2	60—70
		W_3	50—60	W_3W_1	70—80
	F_2	W_1	70—80	W_1W_1	70—80
		W_2	60—70	W_2W_2	60—70
		W_3	50—60	W_3W_1	70—80

θ_f:田间持水量 Field capacity,F_1:低 NP 肥 Low NP,F_2:高 NP 肥 High NP;CI:常规灌溉 Conventional irrigation,AI:分根区交替灌溉 Alternate partial root-none irrigation;W_1:正常灌水 Normal irrigation,W_2:轻度亏水 Mild water deficit,W_3:中度亏水 Medium water deficit

1.3　样品采集和测定

分别于 10 月 28 日(拔节中期)和 11 月 15 日(抽雄期)各处理取植株顶端第一片完全展开叶,作为待测样品,分别用湿抹布擦净、剪碎、混匀后装于封口袋内,用于下面各项指标测定。

叶片脯氨酸(Pro)含量测定用磺基水杨酸法,叶绿素(Chl)和类胡萝卜素(Car)含量测定用高俊凤方法[18]。可溶性糖(SS)含量测定用蒽酮比色法[19]。叶片脯氨酸、叶绿素、类胡萝卜素和可溶性糖含量用鲜样质量表示。

每次采样时,分别采集玉米地上部和根系,洗净在 105℃ 杀青 30 min,然后在 65℃ 下烘至恒质量。玉米地上部干物质量与根系干物质量之和为总干物质量。

水分利用效率(WUE,kg/m^3) = 总干物质量/耗水量

1.4　统计分析方法

试验不同处理各指标平均值的多重比较用 Duncan 法,如果不同处理小写字母不同者表示差异显著(P<5%),相同者则表示差异不显著(P>5%)。

2　结果与分析

2.1　生理指标

2.1.1　叶绿素(Chl)

玉米从拔节前期开始进行不同处理后 18d(拔节中期,下同),分根区交替灌溉(AI)叶片 Chl 含量与常规灌溉(CI)之间的差异不显著,高 NP 肥(F_2)叶片 Chl 含量较低 NP 肥(F_1)有所提高,但差异也不明显(图 1)。在 F_2CI 下,中度亏水(W_3)叶片 Chl 含量比正常灌水(W_1)降低 12.1%,而其它条件下不同

灌水水平叶片 Chl 含量之间的差异不明显。

拔节前期至中期中度亏水(W_3)后,拔节中期至抽雄期恢复正常灌水(W_1)后 18d(抽雄期,下同),$F_2W_3W_1$下,AI 叶片 Chl 含量比 CI 降低 24.8%,而其它条件下处理之间的 Chl 含量差异并不显著(图 1)。与一直正常灌水(W_1W_1)相比,一直轻度亏水(W_2W_2)不显著降低叶片 Chl 含量;W_3W_1叶片 ChI 含量在 CIF_2下显著提高 29.0%,在其它条件下不显著提高 11.9%—22.3%,这表明玉米拔节前期至中期进行中度亏水处理后,拔节中期至抽雄期恢复正常灌水,其叶片叶绿素含量可以恢复甚至超过正常灌水处理。此外,F_2叶片 Chl 含量与 F_1之间的除 CI W_3W_1外,其他条件下差异不显著。

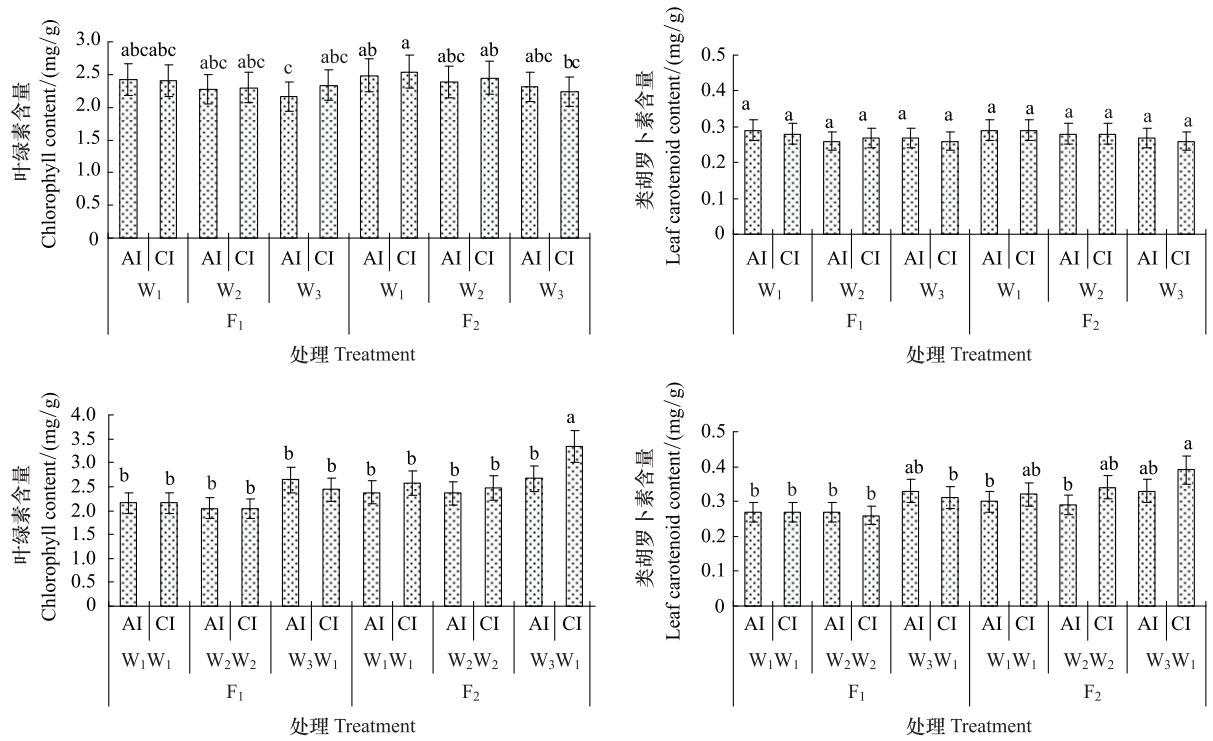

图 1 不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Fig.1 Effects of alternate partial root-zone irrigation on leaf chlorophyll and carotenoid contents of maize under different water and fertilizer conditions

图中数据点为平均值±标准误差,柱状图上不同小写字母,则表示处理之间差异显著($P<0.05$); F_1:低 NP 肥 low NP,F_2:高 NP 肥 high NP; CI:常规灌溉 conventional irrigation,AI:分根区交替灌溉 alternate partial root-zone irrigation;W_1:正常灌水 normal irrigation;W_2:轻度亏水 mild water deficit;W_3:中度亏水 medium water deficit

2.1.2 类胡萝卜素(Car)

拔节中期不同灌溉方式、施肥水平和灌溉水平叶片 Car 含量之间的差异均不显著(图 1)。由图 1 可知,抽雄期不同灌溉方式之间叶片 Car 含量的差异不显著。与 W_1W_1相比,W_2W_2的 Car 含量变化不显著,W_3W_1的 Car 含量提高 10.0%—22.2%,这表明玉米拔节前期至中期进行中度亏水处理后,拔节中期至抽雄期恢复正常灌水,其叶片类胡萝卜素含量可以恢复甚至超过正常灌水处理。与 F_1相比,F_2叶片 Car 含量有所增加,其中 CIW_3W_1下,F_2叶片 Car 含量比 F_1增加 25.8%,这表明此条件下增施肥料有利于类胡萝卜素的合成。

2.1.3 可溶性糖(SS)

拔节中期不同灌溉方式和施肥水平叶片 SS 含量之间的差异不显著(图 2)。F_2CI下,W_3叶片 SS 含量较 W_1提高 60.7%,而其它条件下各灌水水平叶片 SS 含量之间的差异不显著。

抽雄期 AI 叶片 SS 含量与 CI 之间的差异也不显著(图 2)。与 W_1W_1相比,F_1AI下 W_2W_2叶片 SS 含量提高 31.7%,而其它条件下 W_2W_2不显著提高叶片 SS 含量;F_2AI下 W_3W_1不显著降低叶片 SS 含量,而其它条件下 W_3W_1降低叶片 SS 含量 30.0%—

40.0%,这表明拔节前期至中期进行中度亏水后,拔节中期到抽雄期恢复正常灌水,其玉米叶片 SS 含量可恢复至一直正常灌水水平。CIW_2W_2下,F_2叶片 SS 含量比 F_1降低 31.9%,而其它条件下不同施肥处理叶片 SS 含量之间的差异不显著。

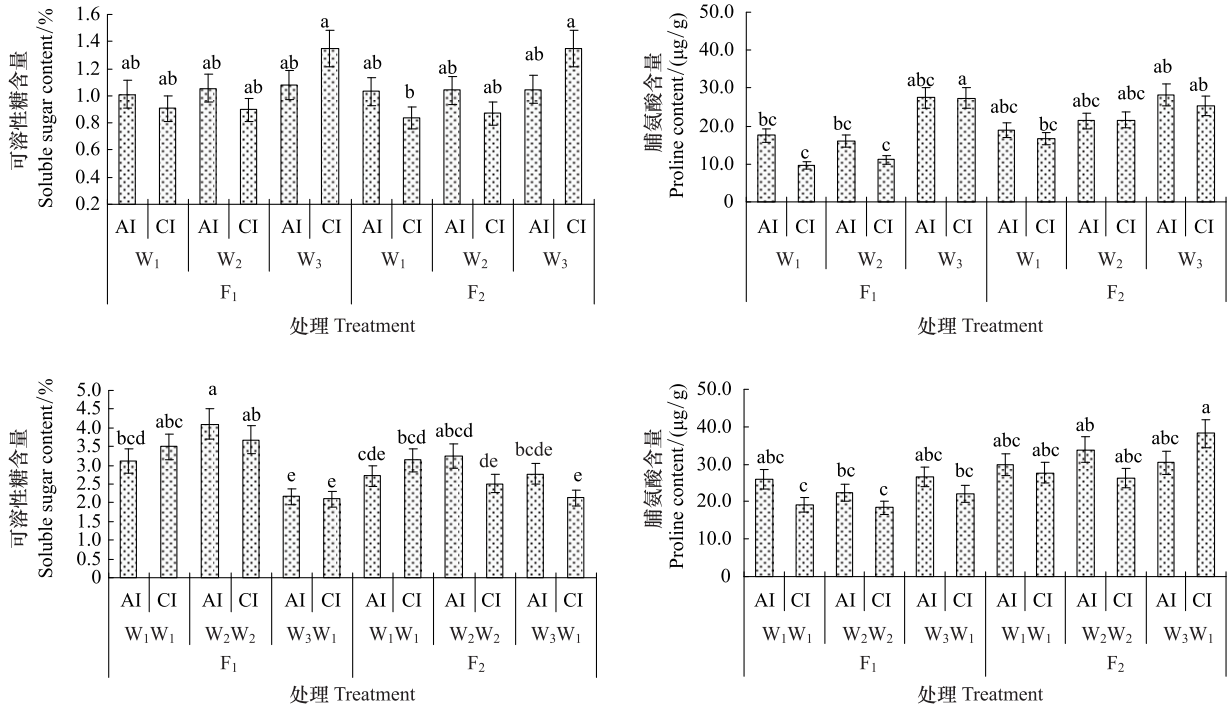

图 2　不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米叶片可溶性糖和脯氨酸含量的影响

Fig.2　Effects of alternate partial root-zone irrigation on leaf soluble sugar and proline contents of maize under different water and fertilizer conditions

图中数据点为平均值±标准误差,柱状图上不同小写字母,则表示处理之间差异显著($P<0.05$)

2.1.4　脯氨酸(Pro)

拔节中期施肥水平叶片 Pro 含量之间的差异不显著(图 2)。与 CI 相比,AI 叶片 Pro 含量有所提高,但差异不显著。与 W_1 相比,W_2 不显著影响叶片 Pro 含量,而 W_3 叶片 Pro 含量提高 1.5—2.9 倍。

抽雄期不同灌溉方式叶片 Pro 含量之间的差异不显著(图 2D)。与 W_1W_1相比,W_2W_2和 W_3W_1均不显著影响叶片 Pro 含量,这表明玉米拔节前期至中期进行中度亏水处理后,拔节中期至抽雄期恢复正常灌水,其叶片 Pro 含量可以恢复到正常灌水水平。CIW_3W_1下,F_2叶片 Pro 含量比 F_1提高 41.9%,而其它条件下不同施肥处理叶片 Pro 含量之间的差异不显著。

2.2　总干物质量

拔节中期不同灌溉方式即 CI 与 AI 间的总干物质质量差异不显著,但与 CI 相比,AI 的总干物质质量略有下降(图 3A)。施肥水平总干物质量之间的差异不显著。与 W_1 相比,W_2 不显著影响玉米总干物质量,而 W_3 降低玉米总干物质量 24.3%—47.8%。

抽雄期与 CI 相比,$F_2W_1W_1$下 AI 降低玉米总干物质量 27%,而其他条件下 AI 不显著降低总干物质量(图 3B)。与 W_1W_1相比,F_2CI 下 W_2W_2和 W_3W_1玉米总干物质量分别降低 24.9%和 22.9%,而其他条件下降低总干物质量不显著。此外,F_2玉米总干物质量较 F_1有所增加。

2.3　水分利用

拔节中期,与 CI 相比,W_1下 AI 显著降低玉米耗水量 18.6%—20.5%,W_2和 W_3下并不显著降低玉米耗水量(图 4A),但是任何水分条件下 AI 均不显著提高玉米水分利用效率(WUE)(图 4B)。与 W_1相比,W_2和 W_3处理降低玉米耗水量,但是也不显著提高 WUE。F_1和 F_2处理玉米耗水量和 WUE 之间的差异均不显著(图 4A 和图 4B)。

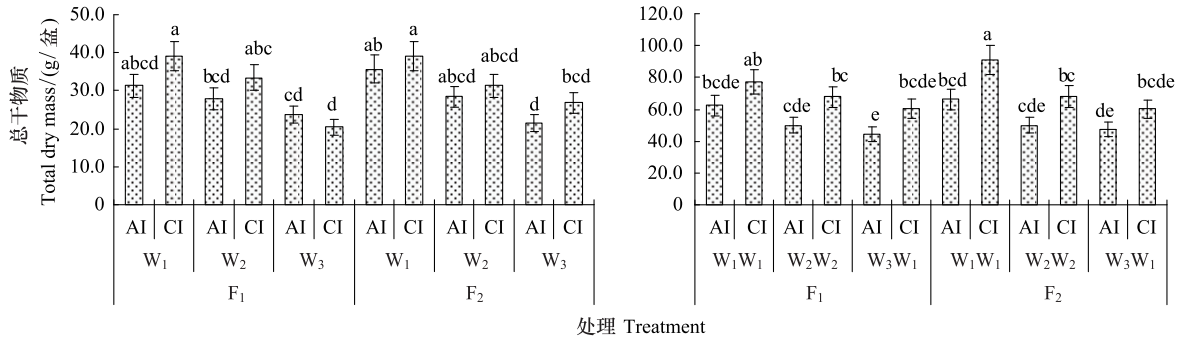

图 3 不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米总干物质量的影响

Fig.3 Effects of alternate partial root-zone irrigation on total dry mass of maize under different water and fertilizer conditions

图中数据点为平均值±标准误差,柱状图上不同小写字母,则表示处理之间差异显著($P<0.05$)

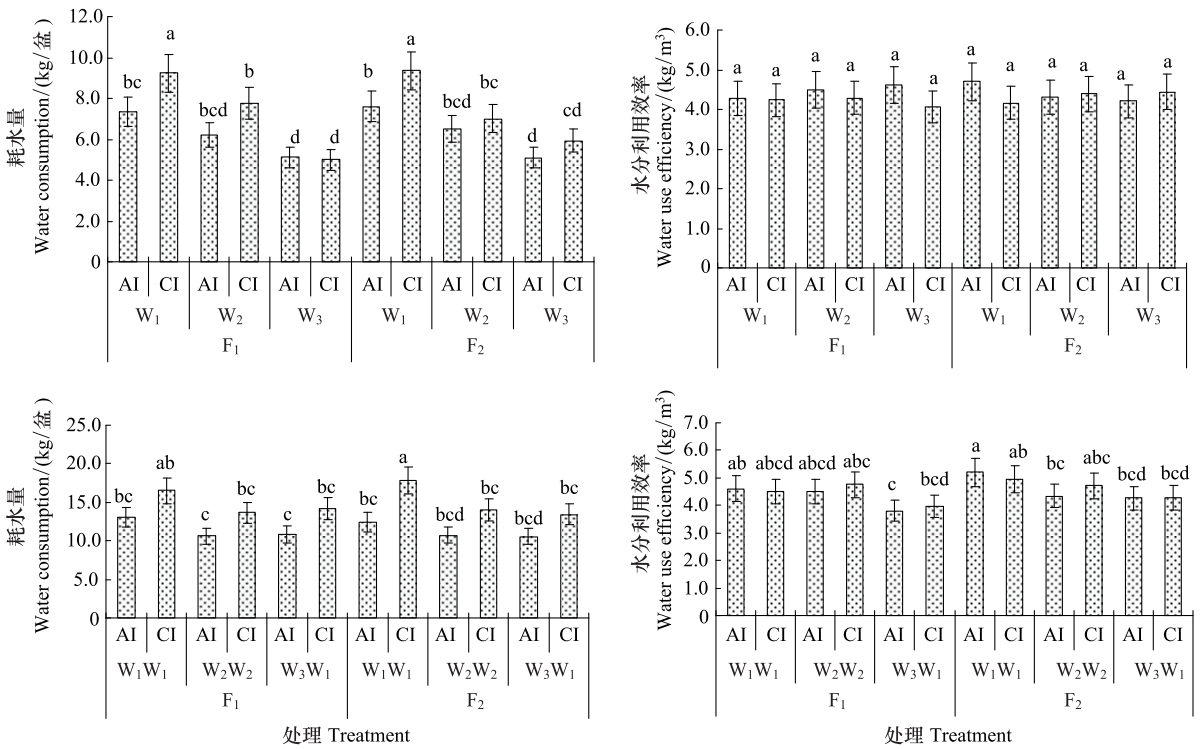

图 4 不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米水分利用的影响

Fig.4 Effects of alternate partial root-zone irrigation on water use of maize under different water and fertilizer conditions

图中数据点为平均值±标准误差,柱状图上不同小写字母,则表示处理之间差异显著($P<0.05$)

抽雄期,与 CI 相比,$F_2W_1W_1$下 AI 显著降低玉米耗水量 30.4%,其它条件下耗水量降低不显著(图 4C)。与 W_1W_1相比,除 F_2CI 下 W_2W_2和 W_3W_1玉米耗水量分别降低 21.5%和 24.7%外,其它条件下耗水量降低不显著。此外,F_1玉米耗水量与 F_2之间的差异也不显著(图 4C)。由图 4D 可知,AI 玉米 WUE 与 CI 之间的差异不显著,但是 W_1W_1下 AI 玉米 WUE 较 CI 有所提高。与 W_1W_1相比,F_1 AI 下 W_3W_1玉米 WUE 降低 17.47%,F_2AI 下 W_2W_2和 W_3W_1玉米 WUE 分别降低 16.6%和 17.8%,而其它条件下各灌水水平玉米 WUE 之间的差异不显著。这表明在玉米从拔节前期—抽雄期一直处于轻度亏水或在拔节前期—拔节中期受中度亏水后再在拔节中期—抽雄期恢复到正常灌水水平条件下对玉米进行分根区交替灌溉不利于与水分利用效率的提高。此外,F_2玉米 WUE 一般高于 F_1处理,但差异不显著。

3　讨论

3.1　玉米生理响应

分根区交替灌溉(AI)使作物部分根系处于正常的土壤水分状况,部分根系处于水分胁迫状况,当作物处于水分胁迫条件下时植株可通过自身的渗透调节作用降低植株水势,保持细胞水分以抵抗逆境。可溶性糖(SS)和脯氨酸(Pro)是玉米叶片中主要的渗透调节物质,当玉米受到干旱胁迫时叶片中 SS、Pro 含量会不同程度的增加,达到降低细胞渗透势,适应干旱胁迫的作用。有研究表明,对烤烟进行 AI 其叶绿素(Chl)与常规灌溉(CI)的相近,叶片可溶性糖含量较 CI 的有所提高[9];对玉米进行 AI 叶片 Chl、类胡萝卜素(CAR)含量较 CI 的降低不显著,可溶性糖(SS)脯氨酸(Pro)含量较 CI 的增加不明显,且恢复 CI 后上述各项指标能很快恢复到 CI 水平[17]。本研究表明,与 CI 相比,拔节前期至中期 AI 处理不显著影响玉米 Chl、CAR、SS 和 Pro 含量;玉米进行长时间(拔节前期至抽雄期)AI 也不显著影响玉米叶片 Chl、CAR、SS 和 Pro 含量,这与以往研究结果相类似[9,17]。

水分胁迫对玉米叶片 Chl 和 CAR 的合成有影响,随着胁迫程度的增加,Chl 含量呈下降的趋势[20],恢复正常灌水后 Chl 含量可恢复到正常灌水水平[21],水分胁迫初期玉米叶片 CAR 含量先上升后期下降[22]。渗透调节是植物耐旱和抵御干旱逆境的一种适应性反应,是一种主要的耐旱机制,当植物遇到水分胁迫时,植物体可主动积累 SS、Pro 等渗透调节物质,这些物质通过质量作用定律进行渗透调节,进而增强植株保水能力,起到降低渗透胁迫的作用。当玉米受到水分胁迫时其叶片 SS 含量较正常灌水的有所提高,复水后 SS 含量有所下降且接近正常灌水水平[21,23];叶片中 Pro 的积累呈上升的趋势[20-21],复水后 Pro 含量可恢复至正常灌水水平[21]。本研究中拔节中期与正常灌水(W_1)相比,轻度亏水(W_2)不显著降低叶片 Chl、CAR 的含量和不显著提高叶片 SS 和 Pro 含量;而中度亏水(W_3)除在高氮磷肥的常规灌溉(F_2CI)下叶片 ChI 含量显著降低 12.1%、SS 含量提高 60.7%、Pro 含量提高 1.5—2.9 倍外,而其他条件下叶片 Chl、CAR 下降、SS 含量增加均不显著。抽雄期与一直正常灌水(W_1W_1)相比,一直轻度亏水(W_2W_2)一般不显著影响叶片 Chl、CAR、SS 和 Pro 含量,而拔节前期至拔节中期中度亏水后复水,叶片 Chl、CAR、SS 和 Pro 含量可以恢复甚至超过一直正常灌水水平。这与以往研究结果相似[20-22]。

在适量施 N 范围内,玉米叶片 Chl 含量一般随着施 N 量的增加而增加,而地上部 SS 含量则随着供 N 量的增加而减少[24]。本试验条件下,拔节中期和抽雄期高、低 NP 肥玉米 Chl、CAR、SS 和 Pro 含量之间多数相近,这与上述研究结果不同,这可能由于本盆栽试验所用土壤养分含量较高,试验无论是施低氮磷肥还是高氮磷肥,土壤中养分均能满足玉米生长所需,故施肥水平的高低在本试验中对玉米叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖和脯氨酸含量的影响不明显。

3.2　玉米干物质积累和水分利用

梁海玲等[25]研究表明对玉米进行 AI 其总干物质质量减少,耗水量显著降低,而以干物质为基础的 WUE 多数提高。农梦玲等[11]在正常灌水水平和适合的氮钾水平在苗期—抽雄期 AI 降低玉米耗水量 31.0%—38.4%,总干物质质量则下降 34%,而 WUE 则略有提高。刘小刚等[14]通过对番茄的研究也表明,番茄进行 AI 其产量下降 5.08%—28.22%。在本研究中,与 CI 相比,对玉米进行短时间(拔节前期至中期)AI 后,除 W_1 下 AI 降低玉米耗水量 19.6%外,W_2 和 W_3 下并不显著降低玉米耗水量,总干物质量降低、WUE 增加均不显著;进行长时间(拔节前期至抽雄期)AI 后,除 $F_2W_1W_1$ 下 AI 降低玉米耗水量 30.4%和总干物质量 27%外,其它条件下耗水量和总干物质量降低不显著,玉米 WUE 增加也不显著。

对玉米进行亏水处理,玉米总干物质质量降低不明显或略有增加,可降低玉米耗水量,但对 WUE 的影响不显著[21]。本研究表明,拔节中期与 W_1 相比,W_2 和 W_3 处理降低玉米耗水量,W_2 不显著影响玉米总干物质量,而 W_3 显著降低总干物质量,但是 W_2 和 W_3 处理均不显著提高 WUE。抽雄期与 W_1W_1 相比,除 F_2CI 下 W_2W_2 和 W_3W_1 玉米耗水量和总干物质量降低显著外,而其它条件下耗水量和总干物质量降低不显著,因此各灌水水平玉米 WUE 之间的差异多数不显著,这与以往研究结果一致[21]。

韦彩会等[21]研究表明,施肥在一定程度上可提

高玉米干物质积累,WUE 增加不显著。农梦玲等[13]研究也表明,与低氮钾水平相比,中、高氮钾水平玉米总干物质明显提高 15.4%—63.5%。但本研究表明,较高 NP 肥处理的玉米总干物质质量和 WUE 比低 NP 肥处理仅有所增加,这与农梦玲等[13]的研究结果有所不同。薛亮等[26]通过对夏玉米交替灌溉施肥的水肥耦合效应研究表明,氮因素的产量效应为抛物线,其抛物线的顶点就是氮单因素对应的最高产量值,与其对应的便是氮因素的最适投入量。当投入量低于最适投入量时,随着投入量的增加,产量随之增加;到达最适投入量时产量最大;继续加大投入量,产量随之减小。而在本盆栽试验中,由于所用土壤养分含量较高,所施的低氮磷水平或许已经超出了其最适产量时的氮磷投入量,因而造成高、低两种氮磷水平间玉米总干物质增加不明显。

4 结论

(1)拔节前期至抽雄期分根区交替灌溉不显著影响玉米叶绿素(Chl)、类胡萝卜素(Car)、可溶性糖(SS)和脯氨酸(Pro)含量,总干物质量和水分利用效率(WUE)。

(2)拔节前期至抽雄期轻度亏水也不显著影响玉米各项指标。拔节前期至中期中度亏水显著降低玉米 Chl 含量和总干物质量,提高 SS 和 Pro 含量,但是在拔节中期至抽雄期复水后这些指标会恢复到正常灌水水平。

(3)施肥水平对玉米各项指标的影响也不显著。

因此,轻度亏水、低肥和拔节前期至抽雄期分根区交替灌溉结合可以节约灌水量和施肥量。

References:

[1] Chai Q, Yang C H, Chen G P. Effect of irrigation patterns on water consumption of wheat-corn intercropping in irrigated area in oasis. Arid Zone Research, 2012, 31(1): 105-110.

[2] Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S, Hu X T, Cai H J. The controlled alternative irrigation—a new approach for water saving regulation in farmland. Agricultural Research in the Arid Area, 1997, 15(1): 1-6.

[3] Kang S Z, Liang Z S, Pan Y H, Shi P Z, Zhang J H. Alternate furrow irrigation for maize production in an arid area. Agricultural Water Management, 2000, 45(3): 267-274.

[4] Kang S Z, Zhang J H. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2437-2446.

[5] Liang ZS, Kang SZ, Hu W, Zhang J H, Gao J F. Effect of controlled roots-divided alternative irrigation on water use efficiency. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1997, 13(4): 58-63.

[6] Liang ZS, Kang SZ, Zhang JH, Gao J F. Effect on water use efficiency and water saving by controlled root-divided alternative irrigation. Scientia Agricultura Sinica, 1998, 31(5): 88-90.

[7] Li F S, Liang J H, Kang S Z, Zhang J H. Benefits of alternate partial root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize. Plant and Soil, 2007, 295(1/2): 279-291.

[8] Kirda C, Cetin M, Dasgan Y, Topcu S, Kaman H, Ekici B, Derici M R, Ozguven A I. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. Agricultural Water Management, 2004, 69(3): 191-201.

[9] Wang Y F, Cai H Y, Zhang X H, Gao H J, Sun X H. Effects of root-divided alternative irrigation on physiological characteristics and yield of flue-cured tobacco. Agricultural Research in the Arid Area, 2006, 24(5): 93-98.

[10] Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z, Pan Y H, He L J. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(6): 26-32.

[11] Liu Y X, Li F S, Nong M L. Effects of alternate partial root-zone irrigation on water saving and quality regulating of flue-cured tobacco at different growth stages. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 16-20.

[12] Nong M L, Li F S, Liu S. Effects of partial root-zone irrigation and N, K levels on dry mass accumulation, water and nutrients use of maize. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1539-1545.

[13] Nong M L, Wei G Y, Li F S. Effect of partial root-zone irrigation at different growth stages on dry mass accumulation and water and nitrogen use of maize. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 115-120.

[14] Liu X G, Zhang Y, Zhang F C, Cai H J, Li Z J, Yang Q L, Yang J R. Effect of water and nitrogen supply on tomato yield and quality under alternative irrigation. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 283-287.

[15] Wang C H, Zhu P F, Shu L Z, Zhu J R, Yu H M, Zhan Y S, Yuan M. Effects of alternate partial root-zone irrigation and nitrogen forms on utilization and movement of nitrate in soil. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 92-101.

[16] Huang C Y, Li F S, Qin Q L, Huang C Z, Luo L F, Nong M L. Effect of partial root-zone irrigation on the growth and water use of sweet corn under two fertilization level. Water Saving Irrigation,

2004, (6): 8-11.

[17] Li F S, Wei C H, Zhang F C, Zhang J H, Nong M L, Kang S Z. Water-use efficiency and physiological responses of maize under partial root-zone irrigation. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1156-1164.

[18] Gao J F. Experimental Techniques of Plant Physiology. Beijing: World Publishing Company, 2000: 57-58, 101-103.

[19] Wang J Y, Ao H, Zhang J, Qu G Q. Experimental Techniques and Theory of Plant Physiology and Biochemistry. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2003: 11-13.

[20] Wang Y, Zhang J B, Zhang C Z, Chen J L. Effects of different irrigation treatments on water use efficiency, chlorophyll and proline concentration of corn. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(5): 41-44.

[21] Wei C H, Li F S, Xu C H, Nong M L, Yu J M, Luo H. Effect of regulated deficit irrigation and fertilization on dry matter accumulation and related physiological properties of maize. Agricultural Research in the Arid Area, 2010, 28(4): 76-84.

[22] Yang D G, Shen X Y, Zhao T H, Ma X F. Research progress related to maize physiology under drought stress. Crops, 2001, (5): 1-4.

[23] Guo X P, Guo F, Liu Z P, Hao S R. Effects of water stress and rewatering on photosynthetic rate and soluble sugar of maize. Journal of Maize Sciences, 2008, 16 (6): 68-70.

[24] Wang Y. Genotypic variation on N uptake and soluble sugar of three maize inbred lines in different nitrate treatments. Journal of Tianjin Agricultural College, 2003, 10(3): 1-4, 11.

[25] Liang H L, Wu X Y, Nong M L, Li F S. Effects of partial root-zoon irrigation on yield and water use efficiency of sticky maize under the integrated management of water and fertilizer. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30 (5): 109-114, 122-122.

[26] Xue L, Zhou C J, Lei Y L, Qiu L J, Li Z J, Wang L Q. Effects of water and nitrogen spatial coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize. Transactions of the CSAE, 2008, 24 (3): 91-94.

参考文献:

[1] 柴强, 杨彩红, 陈桂平. 灌溉方式对绿洲灌区小麦间作玉米耗水特性的影响. 干旱区研究, 2014, 31(1): 105-110.

[2] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 胡笑涛, 蔡焕杰. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1-6.

[5] 梁宗锁, 康绍忠, 胡炜, 张建华, 高俊凤. 控制性分根交替灌水的节水效应. 农业工程学报, 1997, 13(4): 58-63.

[6] 梁宗锁, 康绍忠, 张建华, 高俊凤. 控制性分根交替灌水对作物水分利用率的影响及节水效应. 中国农业科学, 1998, 31(5): 88-90.

[9] 汪耀富, 蔡寒玉, 张晓海, 高华军, 孙向辉. 分根交替灌溉对烤烟生理特性和烟叶产量的影响. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 93-98.

[10] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 潘英华, 何立绩. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益. 中国农业科学, 2000, 33(6): 26-32.

[11] 刘永贤, 李伏生, 农梦玲. 烤烟不同生育时期分根区交替灌溉的节水调质效应. 农业工程学报, 2009, 25(1): 16-20.

[12] 农梦玲, 李伏生, 刘水. 根区局部灌溉和氮、钾水平对玉米干物质积累和水肥利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1539-1545.

[13] 农梦玲, 魏贵玉, 李伏生. 不同时期根区局部灌溉对玉米干物质积累和水氮利用的影响. 玉米科学, 2012, 20(5): 115-120.

[14] 刘小刚, 张彦, 张富仓, 蔡焕杰, 李志军, 杨启良, 杨具瑞. 交替灌溉下不同水氮供给对番茄产量和品质的影响. 水土保持学报, 2013, 27(4): 283-287.

[15] 王春辉、祝鹏飞, 束良佐, 朱继荣, 于红梅, 詹雨珊, 袁梅. 分根区交替灌溉和氮形态影响土壤硝态氮的迁移利用. 农业工程学报, 2014, 30(11): 92-101.

[16] 黄春燕, 李伏生, 覃秋兰, 黄翠珍, 罗兰芬, 农梦玲. 两种施肥水平下根区局部灌溉对甜玉米水分利用的效应. 节水灌溉, 2004, (6): 8-11.

[18] 高俊凤. 植物生理学实验技术. 北京: 世界图书出版公司, 2000: 57-58, 101-103.

[19] 王晶英, 敖红, 张杰, 曲桂琴. 植物生理生化实验技术与原理. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003: 11-13.

[20] 王艳,张佳宝,张丛志,陈金林. 不同灌溉处理对玉米生长及水分利用效率的影响. 灌溉排水学报,2008,27(5):41-44.

[21] 韦彩会,李伏生,许春辉,农梦玲,余江敏,罗慧. 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. 干旱地区农业研究,2010,28(4):76-84.

[22] 杨德光,沈秀瑛,赵天宏,马秀芳. 玉米旱害生理研究进展. 作物杂志,2001,(5):1-4.

[23] 郭相平,郭枫,刘展鹏,郝树荣. 水分胁迫及复水对玉米光合速率及可溶性糖的影响. 玉米科学,2008,16(6):68-70.

[24] 王艳. 供氮方式对不同基因型玉米氮素吸收及可溶性糖的影响. 天津农学院学报,2003,10(3):1-4,11.

[25] 梁海玲,吴祥颖,农梦玲,李伏生. 根区局部灌溉水肥一体化对糯玉米产量和水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究,2012,30(5):109-114,122-122.

[26] 薛亮,周春菊,雷杨莉,邱临静,李志军,王林权. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究. 农业工程学报,2008,24(3):91-94.