

不同控水时段根区局部灌溉对玉米生理和水分利用效率的影响

傅丰贝, 陆文娟, 李伏生*

(广西大学农学院, 广西南宁 530005)

摘要:【目的】根区局部灌溉(PRI)是一种节水灌溉方法,包括分根区交替灌溉(AI)和固定部分根区灌溉或称部分根区干燥灌溉(PRD),其中PRD技术是在作物生育时期一半根区总不灌水,另一半根区充分灌水,AI技术则是在作物生育期内根据生育时期和土壤水分情况交替对根系两侧进行灌水。本文研究在不同施肥条件下,拔节前期至抽雄期不同时段采用PRI对玉米生理指标、干物质积累和水分利用效率(WUE)的影响,以期为玉米合理灌溉和施肥提供依据。【方法】采用盆栽方法,设3种灌溉方式为常规灌溉(每次对盆内全部土壤均匀灌水)、分根区交替灌溉(每次交替对盆内1/2区域土壤灌水)和固定部分根区灌溉(每次固定对盆内1/2区域土壤灌水);2种灌水量为正常灌水(70%~80% θ_f , θ_f 为田间持水量)和轻度亏水(60%~70% θ_f);2种施肥处理为100%化肥氮、80%化肥氮+20%有机氮。在拔节期至抽雄期进行12 d、24 d和36 d根区局部控水灌溉处理。分别测定玉米的光合速率、气孔导度、叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖和脯氨酸含量,总干物质质量、耗水量和水分利用效率。【结果】不同灌溉方式、灌水水平和有机无机氮比例处理对拔节中期、拔节末期和抽雄期玉米光合速率、气孔导度、类胡萝卜素含量、叶绿素含量和可溶性糖含量的影响不显著,灌水量对抽雄期脯氨酸含量的影响也不显著,表明控水持续时间长短,根区局部灌溉、轻度亏水和有机无机氮配施不会显著影响玉米生理指标。与常规灌溉相比,拔节前期至抽雄期3个控水时段根区局部灌溉对玉米总干物质质量和水分利用效率的影响虽不显著,但是显著降低了玉米耗水量,在正常灌水量和单施化肥氮条件下,拔节末期控水24 d和抽雄期控水36 d,根区局部灌溉可分别提高水分利用率24.4%和16.3%。此外,轻度亏水、有机无机氮配施(80%化肥氮+20%有机氮)对玉米生理指标、总干物质质量和水分利用率的影响也不显著。【结论】在正常灌水量和单施化肥氮条件下,在拔节期至抽雄期进行根区局部灌溉可显著降低玉米耗水量,而对玉米生理指标和总干物质质量无明显影响,因而显著提高玉米水分利用效率。

关键词: 根区局部灌溉; 轻度亏水; 有机无机氮比例; 玉米; 生理特性; 水分利用效率

中图分类号: S513.071

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2014)06-1378-09

Effects of partial root-zone irrigation at different water-control duration on physiology and water use efficiency of maize

FU Feng-bei, LU Wen-juan, LI Fu-sheng*

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: 【Objectives】Partial root-zone irrigation (PRI) is a water-saving irrigation method, including alternate PRI (AI) and fixed PRI (FI) or partial root-zone drying irrigation (PRD). With PRD, half of root-zone is fully irrigated while the other not irrigated during the growth stage of crop. With AI, the both sides of root-zone are alternatively irrigated depending on the growth stage and soil water condition. The effects of PRI at different water-control durations during the early jointing to tasseling stages on the physiological indices, dry matter accumulation and water use efficiency (WUE) of maize were investigated under different fertilization conditions, so as to provide scientific basis for rational irrigation and fertilization of maize. 【Methods】A pot experiment was conducted. Three

收稿日期: 2013-10-18

接受日期: 2014-07-17

基金项目: 国家“863”计划(2011AA100504); 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA05070403); 国家科技支撑计划项目课题(2012BAD05B03)资助

作者简介: 傅丰贝(1987—),女,广西桂平人,硕士,主要从事水肥资源高效利用和技术研究。E-mail: fufengbei2000@163.com

* 通信作者 Tel: 0771-3235314-806, E-mail: zhenz@gxu.edu.cn; lpfu6@163.com

irrigation methods with two irrigation levels each and two fertilization treatments were designed. The three irrigation methods include: conventional irrigation (soil was evenly watered), alternate PRI (the two halves of a pot soil was alternately watered) and fixed PRI (only half of the soil in the pot was watered); two irrigation levels include: conventional irrigation ($70\%-80\% \theta_f$, θ_f is field capacity) and mild water deficit ($60\%-70\% \theta_f$); two fertilization treatments were 100% chemical N and 80% chemical N + 20% organic N. The three water-control durations were 12, 24 and 36 days from the jointing stage to tasseling stage. The leaf photosynthetic rate, stomatal conductance, the contents of chlorophyll, carotenoid, soluble sugar and proline, total dry mass, water consumption and WUE of maize were measured. **【Results】** Different irrigation methods, irrigation levels and ratios of inorganic to organic N do not significantly affect leaf photosynthetic rate, stomatal conductance, contents of chlorophyll, carotenoid and soluble sugar of maize at the early and middle jointing stages and tasseling stage, and irrigation level does not significantly affect proline content of maize at the tasseling stage either, indicating that PRI, mild water deficit and combined application of inorganic and organic N do not significantly affect physiological indices. Compared to conventional irrigation, PRI at different water-control duration does not significantly affect total dry mass and WUE, but significantly reduces water consumption at the early jointing to tasseling stages in most cases. However, under normal irrigation ($70\%-80\% \theta_f$) and only chemical N treatment, PRI increases the WUE by 24.4% and 16.3% at 24 d (later jointing stage) and 36 d (tasseling stage) after water control, respectively. Moreover, mild water deficit ($60\%-70\% \theta_f$) and combined application of inorganic and organic N (80% chemical N + 20% organic N) does not significantly affect physiological indices, total dry mass and WUE. **【Conclusions】** Partial root-zone irrigation at the jointing to tasseling stages significantly reduces water consumption, while it has limited effect on physiological indices and total dry mass, thus it enhanced water use efficiency significantly under normal irrigation with only chemical N.

Key words: partial root-zone irrigation; mild water deficit; ratio of inorganic to organic N; maize; physiological index; water use efficiency

根区局部灌溉(PRI)是一种作物局部根系受旱时,既能控制蒸腾耗水、满足作物水分需求,又能发挥肥料最大肥效,并提高作物产量和品质的农田水分调控技术,包括分根区交替灌溉(AI)和固定部分根区灌溉(FI)或称部分根区干燥灌溉(PRD),其中PRD技术是在作物生育时期一半根区总不灌水,另一半根区充分灌水,而AI技术则是在作物生育期内根据生育时期和土壤水分情况交替对根系两侧进行灌水。目前PRI技术对多种作物生理、干物质积累、产量和水分利用效率(WUE)等方面的影响研究已取得不少进展。如与常规灌溉(CI)相比,AI降低甜玉米叶片蒸腾速率为 $17.5\% \sim 19.0\%$,但是提高叶片光合速率和WUE,分别为 $8.9\% \sim 18.3\%$ 和 $34.7\% \sim 43.5\%$ ^[1]。AI和PRD技术还可以节约灌水量,在不减产、稍减产或增产情况下,明显提高玉米、棉花和园艺作物WUE^[2-5]。轻度亏水使植株光合速率稍有降低^[6],降低耗水量^[7-11]。与正常灌水相比,拔节期和抽雄期轻度亏水对叶片叶绿素、可溶性糖、脯氨酸和丙二醛含量的影响较小^[8]。有机无机肥料配合施用明显提高水稻生育后期剑叶的光

合速率^[12],且有机无机氮配施烤烟叶绿素和类胡萝卜素含量等生理指标优于单施无机肥^[13],吴光磊^[14]和韩永超等^[15]也有相似的研究结果。与单施无机氮相比,有机无机氮配施提高玉米总干物质质量、耗水量以及WUE^[16]。但是有关在不同灌水条件下,根区局部灌溉结合不同比例有机无机氮对作物生理响应和水分利用的研究较少。因此本文在不同水肥条件下,通过盆栽试验研究了拔节期至抽雄期不同控水时段根区局部灌溉对玉米生理指标、干物质积累和水分利用的影响,以期对玉米合理灌溉和施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验在广西大学网室大棚内进行,供试土壤采自本校试验基地第四纪红色黏土发育的赤红土,其pH为6.2、碱解氮(N)85.0 mg/kg、速效磷(P)44.3 mg/kg、速效钾(K)为159.0 mg/kg,土壤质地为重黏土,装盆后土壤容重 1.31 g/cm^3 ,田间持水量(θ_f)为30%(质量百分数)。供试玉米品种为正大619。

1.2 试验方法

盆栽试验中 3 种灌溉方式包括常规灌溉(CI, 每次对盆内全部土壤均匀灌水)、分根区交替灌溉(AI, 每次交替对盆内 1/2 区域土壤灌水)和固定部分根区灌溉(FI, 每次固定对盆内 1/2 区域土壤灌水), 2 种灌水量包括正常灌水(W_1 , 70%~80% θ_f)和轻度亏水(W_2 , 60%~70% θ_f), 和 2 种施肥处理包括 100% 化肥氮(F_1)和 80% 化肥氮 + 20% 有机氮(F_2), 完全方案设计, 共 12 个处理, 每个处理重复 9 次, 共 108 盆。所有处理均施纯 N 0.15 g/kg 土、 P_2O_5 0.10 g/kg 土和 K_2O 0.15 g/kg 土。无机 N 肥为尿素(N 46%), 有机肥为生物有机肥(有机质含量 44.32%, N 2.82%、 P_2O_5 0.20%、 K_2O 5.86%), 磷肥为磷酸二氢钾(P_2O_5 52%)供给, 钾肥为磷酸二氢钾(K_2O 34%)和氯化钾(K_2O 60%), 所用无机肥料用分析纯试剂。全部有机无机肥料在装盆时作基肥施入。种植前各处理均灌水至田间持水量的 90%, 控水前所有处理均用常规灌溉方式灌水, 并保持土壤含水量在 70%~80% θ_f 。

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。为防盆内两边土壤水分侧渗, 所有试验桶内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, 并在塑料薄膜隔开处用土加高分开。盆两侧还各放置一内径 2 cm 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, 其可防止土壤因灌水而引起的土壤板结)。

2010 年 4 月 2 日每盆播入 5 粒已催芽露白的玉米种子在塑料薄膜隔开处, 待长到 3 叶一心期, 4 月 18 日进行间苗, 在塑料薄膜隔开处每桶保留长势较均匀的植株 2 株。从播后 29 d(5 月 1 日)开始, 在拔节期至抽雄期进行了不同控水时段 PRI 试验, 即 5 月 1 日(拔节前期)至 5 月 12 日(控水 12 d, 拔节中期)、5 月 1 日至 5 月 24 日(控水 24 d, 拔节末期)和 5 月 1 日至 6 月 5 日(控水 36 d, 抽雄期)。其中 5 月 1 日~5 月 12 日期间 AI 和 FI 的灌水量为常规灌溉的 70%, 5 月 13 日~6 月 5 日期间 AI 和 FI 的灌水量为常规灌溉的 80%。常规灌溉处理控制其土壤含水量为 70%~80% θ_f , 用称质量法测定其土壤含水率, 视天气情况, 每天或隔天称盆质量, 通过水量平衡法计算灌水量。试验于 6 月 6 日(播后 62 d)结束。

1.3 测定项目与方法

采样前一天, 用 6400 光合测定仪分别测定 5 月

11 日和 23 日植株顶端第一片完全展开叶和 6 月 4 日植株穗位叶光合速率和气孔导度, 测定温度与网室内温度一致, 使用红蓝人工光源, 光量子为 1500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 每次测定各处理 3 盆。

5 月 12 日、5 月 24 日和 6 月 5 日分别采集各处理玉米叶片进行测定, 脯氨酸(Pro)含量采用磺基水杨酸法、叶绿素(Chl)和类胡萝卜素(CAR)含量用高俊凤^[17]的方法, 可溶性糖(SS)含量用蒽酮比色法^[18], 每次各处理采集叶片均采集 3 盆。所采集的叶片全部称质量, 并加到后面的总干物质中。

5 月 13 日、5 月 25 日和 6 月 6 日分别采集各处理玉米地上部和根系样品, 每个处理采集 3 盆。样品洗净后, 放入烘箱中, 105℃ 杀青 30 min, 65℃ 下烘至恒重。地上部干物质质量与根系干物质质量之和为总干物质质量。水分利用效率(WUE)是总干物质质量与玉米耗水量之比。

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。

2 结果与分析

2.1 灌溉方式与水平和有机无机氮比例对玉米生理指标的影响

2.1.1 光合速率 表 1 表明, 拔节中期, 除 F_2W_2 时 AI 的光合速率比 CI 降低 32.9% 外, 其它条件下 AI 和 FI 的光合速率与 CI 之间的差异不显著。除 F_2AI 时 W_2 的光合速率比 W_1 降低 29.8% 外, 其他条件下与 W_1 之间的差异不显著, 不同有机无机氮比例之间的光合速率差异也不显著。拔节末期和抽雄期, 不同灌溉方式、灌水水平和有机无机氮比例之间的光合速率差异不显著, 这表明不管控水持续时间长短, 根区局部灌溉、轻度亏水和有机无机氮配施并不会明显影响叶片光合速率。

2.1.2 气孔导度 拔节中期, 灌溉方式和有机无机氮比例对叶片气孔导度无显著影响(表 1)。除 F_2AI 时 W_2 的气孔导度比 W_1 降低 55.3% 外, 其它条件下与 W_1 之间的差异不显著。拔节末期, 除 F_1W_2 下 AI 气孔导度比 CI 降低 57.5% 外, 其它条件下 AI 和 FI 的气孔导度与 CI 差异不显著。除 F_1AI 时 W_2 的气孔导度比 W_1 降低 51.4% 外, 其它条件下与 W_1 之间的差异不显著, 而有机无机氮比例也不显著影响气孔导度。抽雄期不同灌溉方式、灌水水平和有机无机氮比例气孔导度之间的差异均不显著。

表 1 不同处理下玉米光合速率和气孔导度

Table 1 The leaf photosynthetic rate and stomatal conductance of maize under different treatments

氮处理 N treatment	灌水水平 Irrigation level (% θ_f)	灌溉方式 Irrigation method	光合速率			气孔导度		
			Photosynthetic rate [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]			Stomatal conductance [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		
			拔节中期 Middle jointing	拔节末期 Later jointing	抽雄期 Tasseling stage	拔节中期 Middle jointing	拔节末期 Later jointing	抽雄期 Tasseling stage
100% 化肥氮 100% chem. N (W_1) (F_1)	70 ~ 80	AI	25.47 $\pm$ 0.61 ab	27.72 $\pm$ 0.96	25.20 $\pm$ 0.73	0.29 $\pm$ 0.02 ab	0.35 $\pm$ 0.00 ab	0.18 $\pm$ 0.00
		FI	24.34 $\pm$ 1.63 ab	28.45 $\pm$ 0.95	25.15 $\pm$ 1.05	0.22 $\pm$ 0.03 b	0.19 $\pm$ 0.01 bc	0.18 $\pm$ 0.02
		CI	22.30 $\pm$ 1.07 b	24.28 $\pm$ 0.86	25.03 $\pm$ 2.23	0.26 $\pm$ 0.06 ab	0.27 $\pm$ 0.07 abc	0.21 $\pm$ 0.04
	60 ~ 70 (W_2)	AI	24.62 $\pm$ 0.17 ab	26.77 $\pm$ 2.97	24.96 $\pm$ 0.80	0.27 $\pm$ 0.01 ab	0.17 $\pm$ 0.02 c	0.18 $\pm$ 0.01
		FI	25.76 $\pm$ 1.22 ab	24.93 $\pm$ 2.42	24.98 $\pm$ 0.96	0.27 $\pm$ 0.06 ab	0.22 $\pm$ 0.03 bc	0.18 $\pm$ 0.02
		CI	22.17 $\pm$ 1.08 b	28.28 $\pm$ 1.45	26.09 $\pm$ 1.10	0.18 $\pm$ 0.02 b	0.40 $\pm$ 0.06 a	0.24 $\pm$ 0.04
80% 化肥氮 + 20% 有机氮 80% chem. N + 20% org. N (F_2)	70 ~ 80 (W_1)	AI	25.41 $\pm$ 1.18 ab	28.96 $\pm$ 0.75	25.31 $\pm$ 1.26	0.38 $\pm$ 0.09 a	0.23 $\pm$ 0.04 bc	0.19 $\pm$ 0.02
		FI	28.19 $\pm$ 0.56 a	25.98 $\pm$ 0.70	26.31 $\pm$ 2.40	0.29 $\pm$ 0.06 ab	0.34 $\pm$ 0.08 ab	0.24 $\pm$ 0.04
		CI	27.59 $\pm$ 0.48 a	24.96 $\pm$ 2.40	25.40 $\pm$ 1.65	0.28 $\pm$ 0.04 ab	0.32 $\pm$ 0.06 abc	0.20 $\pm$ 0.01
	60 ~ 70 (W_2)	AI	17.86 $\pm$ 2.28 c	27.96 $\pm$ 2.05	23.03 $\pm$ 1.69	0.17 $\pm$ 0.04 b	0.27 $\pm$ 0.04 abc	0.16 $\pm$ 0.01
		FI	25.49 $\pm$ 1.10 ab	24.37 $\pm$ 0.62	25.35 $\pm$ 0.51	0.29 $\pm$ 0.05 ab	0.25 $\pm$ 0.022 bc	0.19 $\pm$ 0.02
		CI	26.63 $\pm$ 1.34 a	25.33 $\pm$ 0.87	26.32 $\pm$ 0.76	0.21 $\pm$ 0.01 b	0.32 $\pm$ 0.00 abc	0.20 $\pm$ 0.00

注 (Note): 表中数值为平均值 $\pm$ 标准误 Values are means $\pm$ standard errors. 同一列处理间小写字母不同者表示差异显著 ($P < 0.05$), 处理间字母相同或没有标字母都表示差异不显著 ($P > 0.05$) Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$), and the same letters or no letter labeled indicate no significant difference ($P > 0.05$). AI—分根区交替灌溉 Alternate partial root zone irrigation; FI—固定部分根区灌溉 Fixed partial root zone irrigation; CI—常规灌溉 Conventional irrigation.

2.1.3 叶绿素含量 拔节中期除 F_1W_2 时 FI 的叶片叶绿素含量比 CI 降低 9.8% 外,其它条件下 FI 和 AI 的叶绿素含量与 CI 差异不显著(表 2),而不同灌水水平和有机无机氮比例叶绿素含量之间的差异也不显著。拔节末期不同灌溉方式、灌水水平和有机无机氮比例叶绿素含量之间的差异均不显著。抽雄期除 F_1W_1 时 AI 和 FI 的叶绿素含量比 CI 分别降低 12.1% 和 13.6% 外,其它条件下 AI 和 FI 叶绿素含量与 CI 之间的差异不显著,而不同灌水水平和有机无机氮比例叶绿素含量之间的差异也不显著。

2.1.4 类胡萝卜素含量 拔节中期除 F_1W_2 时 FI 的类胡萝卜素含量比 CI 降低 14.3% 外,其它条件下 AI 和 FI 类胡萝卜素含量与 CI 之间的差异均不显著(表 2)。拔节末期和抽雄期,不同灌溉方式、灌水水平和有机无机氮比例间类胡萝卜素含量之间的差异均不显著。

2.1.5 可溶性糖含量 拔节中期不同灌溉方式、灌水水平和有机无机氮比例可溶性糖含量之间的差异均不显著(表 3)。拔节末期 F_1W_1 和 F_2W_2 下 AI 可

溶性糖含量比 CI 分别增加 76.1% 和 59.4%, F_1W_1 下 FI 可溶性糖含量比 CI 增加 64.4%。 F_1AI 时 W_2 可溶性糖含量比 W_1 降低 40.2%,而其它条件下与 W_1 差异不显著。与 F_1 相比, W_2AI 时 F_2 的可溶性糖含量增加 65.3%。抽雄期无论有机无机 N 比例如何, W_1 时, AI 和 FI 可溶性糖含量分别比 CI 平均降低 44.8% 和 32.5%。与 W_1 相比, F_1CI 和 F_2CI 下 W_2 可溶性糖含量分别降低 32.4% 和 35.6%。 F_1 与 F_2 可溶性糖含量之间的差异不显著。

2.1.6 脯氨酸含量 拔节中期 F_2W_2 下, FI 脯氨酸含量比 CI 高 130.3%; F_2FI 下, W_2 的脯氨酸含量较 W_1 提高 54.0%; W_2FI 下, F_2 的脯氨酸含量比 F_1 增加 81.6%(表 3)。拔节末期,与 CI 相比, F_1W_1 和 F_2W_2 下 AI 的脯氨酸含量分别提高 27.5% 和 31.9%, F_2W_2 下 FI 提高 28.2%。抽雄期 F_1W_2 下 AI 的脯氨酸含量比 CI 提高 25.7%; W_2AI 下 F_2 的脯氨酸含量较 F_1 低 33.7%,而灌水水平对脯氨酸含量的影响不显著。

表 2 不同处理下玉米叶绿素和类胡萝卜素的含量

Table 2 The leaf chlorophyll and carotenoid contents of maize under different treatments

氮处理 N treatment	灌水水平 Irrigation level (% θ_f)	灌溉 方式 Irrigation method	叶绿素 Chlorophyll (mg/g)			类胡萝卜素 Carotenoid (mg/g)		
			拔节中期	拔节末期	抽雄期	拔节中期	拔节末期	抽雄期
			Middle jointing	Later jointing	Tasseling stage	Middle jointing	Later jointing	Tasseling stage
100% 化肥氮 100% chem. N (F ₁)	70~80 (W ₁)	AI	2.78 ± 0.05 ab	3.04 ± 0.15	2.26 ± 0.05 bc	0.34 ± 0.01 ab	0.40 ± 0.02	0.32 ± 0.01
		FI	2.68 ± 0.08 ab	2.98 ± 0.11	2.22 ± 0.01 c	0.31 ± 0.01 bc	0.40 ± 0.02	0.32 ± 0.01
		CI	2.63 ± 0.07 ab	2.87 ± 0.07	2.57 ± 0.04 a	0.33 ± 0.01 abc	0.38 ± 0.00	0.35 ± 0.01
	60~70 (W ₂)	AI	2.82 ± 0.04 a	2.90 ± 0.13	2.52 ± 0.17 ab	0.35 ± 0.00 a	0.38 ± 0.02	0.35 ± 0.02
		FI	2.57 ± 0.11 b	2.85 ± 0.06	2.19 ± 0.08 c	0.30 ± 0.01 c	0.39 ± 0.01	0.31 ± 0.01
		CI	2.85 ± 0.07 a	2.95 ± 0.05	2.48 ± 0.07 abc	0.35 ± 0.02 ab	0.40 ± 0.01	0.34 ± 0.01
80% 化肥氮 +20% 有机氮 80% chem. N +20% org. N (F ₂)	70~80 (W ₁)	AI	2.63 ± 0.10 ab	3.03 ± 0.04	2.42 ± 0.11 abc	0.32 ± 0.01 abc	0.40 ± 0.00	0.33 ± 0.01
		FI	2.85 ± 0.07 a	3.00 ± 0.13	2.38 ± 0.09 abc	0.33 ± 0.01 abc	0.41 ± 0.02	0.33 ± 0.01
		CI	2.64 ± 0.06 ab	2.85 ± 0.07	2.32 ± 0.02 abc	0.33 ± 0.01 ab	0.39 ± 0.01	0.32 ± 0.01
	60~70 (W ₂)	AI	2.74 ± 0.08 ab	3.03 ± 0.02	2.24 ± 0.04 bc	0.33 ± 0.01 abc	0.40 ± 0.00	0.32 ± 0.01
		FI	2.73 ± 0.01 ab	2.94 ± 0.13	2.25 ± 0.09 bc	0.32 ± 0.01 bc	0.40 ± 0.02	0.32 ± 0.01
		CI	2.70 ± 0.05 ab	2.86 ± 0.02	2.27 ± 0.08 bc	0.33 ± 0.01 abc	0.39 ± 0.01	0.32 ± 0.01

注 (Note): 表中数值为平均值 ± 标准误, 同一列处理间小写字母不同者表示差异显著 ($P < 0.05$), 处理间字母相同或没有标字母都表示差异不显著 ($P > 0.05$) Values are means ± standard errors. Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$), and the same letters or no letter labeled indicate no significant difference ($P > 0.05$). AI—分根区交替灌溉 Alternate partial root zone irrigation; FI—固定部分根区灌溉 Fixed partial root zone irrigation; CI—常规灌溉 Conventional irrigation.

表 3 不同处理下玉米可溶性糖和脯氨酸的含量

Table 3 The leaf soluble sugar and proline contents of maize under different treatments

氮处理 N treatment	灌水水平 Irrigation level (% θ_f)	灌溉 方式 Irrigation method	可溶性糖 Soluble sugar (%)			脯氨酸 Proline (μg/g)		
			拔节中期	拔节末期	抽雄期	拔节中期	拔节末期	抽雄期
			Middle jointing	Later jointing	Tasseling stage	Middle jointing	Later jointing	Tasseling stage
100% 化肥氮 100% chem. N (F ₁)	70~80 (W ₁)	AI	1.11 ± 0.05	3.61 ± 0.60 ab	3.09 ± 0.13 bc	9.21 ± 1.10 b	13.82 ± 0.88 a	13.40 ± 0.11 b
		FI	0.92 ± 0.26	3.37 ± 0.32 abc	3.57 ± 0.35 b	13.25 ± 0.97 b	11.96 ± 0.19 abc	12.24 ± 0.92 b
		CI	0.63 ± 0.14	2.05 ± 0.21 d	5.47 ± 0.51 a	9.17 ± 0.22 b	10.84 ± 1.68 bc	13.82 ± 1.33 b
	60~70 (W ₂)	AI	1.22 ± 0.11	2.16 ± 0.41 cd	2.92 ± 0.06 bc	10.14 ± 1.43 b	11.68 ± 0.70 abc	17.41 ± 0.98 a
		FI	1.05 ± 0.46	2.75 ± 0.14 abcd	3.07 ± 0.52 bc	11.39 ± 2.51 b	13.12 ± 0.40 ab	12.90 ± 0.71 b
		CI	1.02 ± 0.28	2.14 ± 0.11 cd	3.70 ± 0.35 b	9.54 ± 2.51 b	11.57 ± 0.55 abc	13.85 ± 0.67 b
80% 化肥氮 +20% 有机氮 80% chem. N +20% org. N (F ₂)	70~80 (W ₁)	AI	0.69 ± 0.08	3.90 ± 0.23 a	2.64 ± 0.30 bc	7.46 ± 1.59 b	12.52 ± 0.87 ab	12.33 ± 0.33 b
		FI	0.82 ± 0.21	2.57 ± 0.28 bcd	3.41 ± 0.18 b	13.43 ± 3.46 b	12.02 ± 0.30 abc	12.30 ± 2.03 b
		CI	0.64 ± 0.03	2.76 ± 0.48 abcd	4.89 ± 0.06 a	10.22 ± 0.33 b	10.90 ± 0.41 bc	12.02 ± 1.05 b
	60~70 (W ₂)	AI	0.86 ± 0.17	3.57 ± 0.37 ab	2.13 ± 0.05 c	9.33 ± 3.28 b	13.19 ± 0.56 ab	11.55 ± 0.99 b
		FI	0.99 ± 0.21	3.24 ± 0.69 abcd	3.00 ± 0.33 bc	20.68 ± 3.18 a	12.82 ± 1.38 ab	12.95 ± 1.94 b
		CI	0.63 ± 0.15	2.24 ± 0.23 cd	3.15 ± 0.10 bc	8.98 ± 1.18 b	10.00 ± 0.41 c	11.45 ± 0.41 b

注 (Note): 表中数值为平均值 ± 标准误, 同一列处理间小写字母不同者表示差异显著 ($P < 0.05$), 处理间字母相同或没有标字母都表示差异不显著 ($P > 0.05$) Values are means ± standard errors. Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$), and the same letters or no letter labeled indicate no significant difference ($P > 0.05$). AI—分根区交替灌溉 Alternate partial root zone irrigation; FI—固定部分根区灌溉 Fixed partial root zone irrigation; CI—常规灌溉 Conventional irrigation.

2.2 灌溉方式与水平和有机无机氮比例对玉米总干物质质量的影响

拔节中期不同灌溉方式、灌水水平和有机无机氮比例总干物质质量之间的差异均不显著(图1)。拔节末期, F_2W_1 下 FI 总干物质质量比 CI 降低 17.2%; F_2AI 和 F_2CI 下 W_2 的总干物质质量比 W_1 分别降低 18.2% 和 15.3%, 而不同有机无机氮比例总干物质质量之间的差异不显著。抽雄期, 与 CI 相比, F_1W_2 下 AI 和 FI 总干物质质量分别降低 18.5% 和 17.2%, F_2W_1 下分别降低 13.8% 和 20.7%, F_2W_2 下分别降低 17.7% 和 19.4%。与 W_2 相比, F_1AI 、 F_2AI 和 F_2CI 下, W_2 的总干物质质量分别降低 14.6%、20.2% 和 16.4%, 而不同有机无机氮比例总干物质质量之间的差异不显著。

2.3 灌溉方式与水平和有机无机氮比例对玉米水分利用的影响

从表 4 可看出, 拔节中期、拔节末期和抽雄期不同有机无机氮比例耗水量之间的差异均不显著。拔节中期, 与 CI 相比, W_1 时 AI 和 FI 耗水量分别降低 22.4%~24.2% 和 22.9%~23.9%, W_2 时分别降低 17.1%~17.8% 和 14.6%~18.5%。拔节末期 W_1 时, AI 和 FI 耗水量比 CI 分别平均降低 18.5% 和 19.1%, W_2 时分别平均降低 17.5% 和 16.5%; F_1 下 W_2 的耗水量分别比 W_1 降低 8.8%~13.5%, F_2 下降 13.1%~14.0%。抽雄期 W_1 时 AI 和 FI 耗水量比 CI 分别平均降低 23.2% 和 23.4%, W_2 时分别平均降低 21.8% 和 22.4%; F_1 下 W_2 的耗水量比 W_1 降低 12.2%~12.9%; F_2 下降 17.5%~20.6%。

拔节中期不同灌溉方式、灌水水平和有机无机氮比例水分利用效率(WUE)之间的差异均不显著(表4)。拔节末期和抽雄期不同灌水水平和有机无机氮比例 WUE 之间的差异也不显著。 F_1W_1 时, 与 CI 相比, 拔节末期 AI 和 FI 的 WUE 分别提高 26.7% 和 22.1%, 抽雄期分别提高 16.2% 和 16.4%, 差异显著。其它条件下 AI 和 FI 的 WUE 差异不显著。

3 讨论与结论

本研究表明, 拔节前期至抽雄期不同控水时段根区局部灌溉对玉米生理指标的影响多不显著。Li 等^[19]研究表明, 拔节期和拔节期~抽雄期 AI 处理对玉米叶绿素、类胡萝卜素、脯氨酸和丙二醛含量的影响较小。汪耀富等^[20]研究表明, AI 与 CI 之间

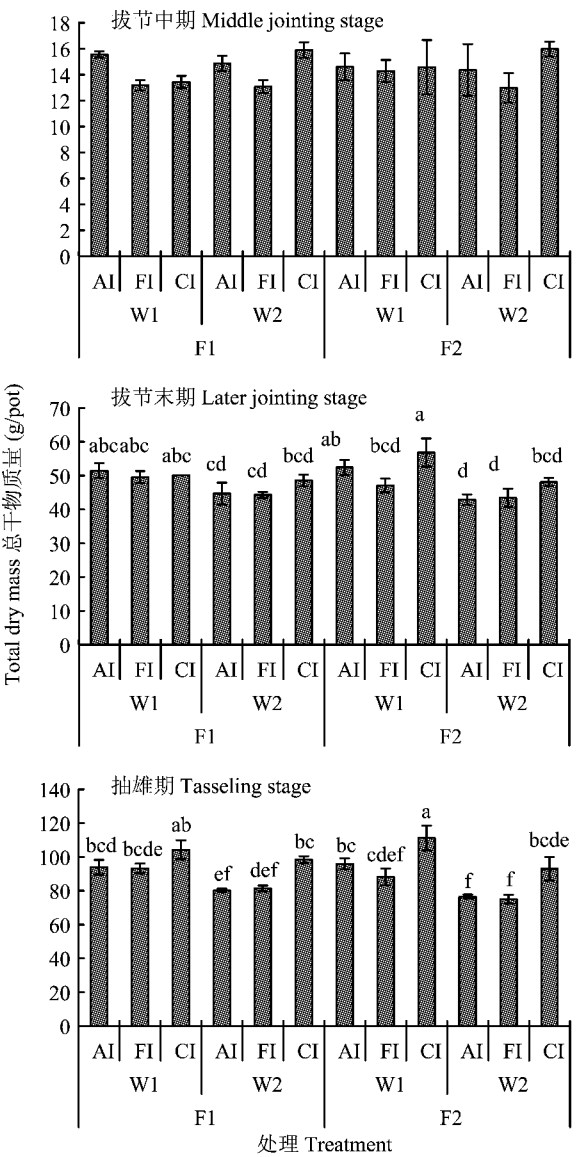


图1 不同处理下玉米总干物质质量

Fig.1 The total dry mass of maize under different treatments

[注 (Note): 图中数据点为平均值 ± 标准误差 Data points are means ± standard error. 柱状图上不同小写字母, 则表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 处理间字母相同或没有标字母都表示差异不显著 ($P > 0.05$) Different letters on the bar indicate significant difference ($P < 0.05$), the same letters or no letter labeled indicate no significant difference ($P > 0.05$). F_1 —100% 化肥氮 100% chemical N; F_2 —80% 化肥氮 + 20% 有机氮 80% chemical N and 20% organic N; W_1 —70%~80% θ_f ; W_2 —60%~70% θ_f ; AI—分根区交替灌溉 Alternate partial root zone irrigation; FI—固定部分根区灌溉 Fixed partial root zone irrigation; CI—常规灌溉 Conventional irrigation.

的烤烟叶绿素含量相近。Tang 等^[3]指出, 与常规灌溉相比, 根区局部灌溉棉花叶片前期气孔导度略有降低, 后期差异不显著, 这些研究结果与本研究相似。本研究还表明, 轻度亏水和有机无机氮配施对

玉米生理指标的影响也不显著。郑灵祥等^[21]研究指出,在轻度水分胁迫处理下,玉米叶片光合速率与叶绿素含量降幅不大,且气孔导度与光合速率的变

化趋势一致,与本研究结果相似。前人研究表明,有机无机 N 配施提高光合速率等生理指标^[12],与本研究结果有所不同。

表 4 不同处理下玉米耗水量和水分利用效率

Table 4 Water consumption and water use efficiency of maize under different treatments

氮处理 N treatment	灌水水平 Irrigation level (% θ_r)	灌溉方式 Irrigation method	耗水量 Water consumption (kg/pot)			水分利用效率 Water use efficiency (kg/m ³)		
			拔节中期 Middle jointing	拔节末期 Later jointing	抽雄期 Tasseling stage	拔节中期 Middle jointing	拔节末期 Later jointing	抽雄期 Tasseling stage
100% 化肥氮 100% chem. N (F ₁)	70~80 (W ₁)	AI	3.16 ± 0.07 d	9.45 ± 0.23 bc	17.03 ± 0.85 c	4.92 ± 0.07	5.45 ± 0.20 a	5.52 ± 0.07 a
		FI	3.20 ± 0.50 d	9.46 ± 0.29 bc	16.91 ± 0.97 c	4.12 ± 0.06	5.25 ± 0.16 abc	5.53 ± 0.17 a
		CI	4.01 ± 0.24 ab	11.68 ± 0.50 a	21.94 ± 0.68 a	3.37 ± 0.20	4.30 ± 0.19 d	4.75 ± 0.20 c
	60~70 (W ₂)	AI	3.71 ± 0.14 abcd	8.37 ± 0.12 c	14.96 ± 0.47 d	4.01 ± 0.04	5.35 ± 0.43 ab	5.37 ± 0.22 ab
		FI	3.53 ± 0.21 bcd	8.63 ± 0.25 c	14.73 ± 0.40 d	3.73 ± 0.15	5.12 ± 0.18 abc	5.53 ± 0.10 a
		CI	4.00 ± 0.05 abc	10.10 ± 0.19 b	19.27 ± 0.67 b	3.98 ± 0.12	4.82 ± 0.17 abcd	5.11 ± 0.09 abc
80% 化肥氮 +20% 有机氮 80% chem. N +20% org. N (F ₂)	70~80 (W ₁)	AI	3.43 ± 0.20 bcd	9.92 ± 0.66 b	17.27 ± 0.34 c	4.32 ± 0.51	5.31 ± 0.15 ab	5.55 ± 0.08 a
		FI	3.32 ± 0.22 cd	9.74 ± 0.37 b	17.33 ± 0.35 c	4.36 ± 0.49	4.83 ± 0.09 abcd	5.08 ± 0.19 abc
		CI	4.04 ± 0.45 ab	12.07 ± 0.68 a	22.77 ± 0.93 a	3.76 ± 1.03	4.70 ± 0.09 bcd	4.88 ± 0.13 bc
	60~70 (W ₂)	AI	3.56 ± 0.09 bcd	8.53 ± 0.19 c	14.25 ± 0.37 d	4.05 ± 0.57	5.02 ± 0.10 abc	5.37 ± 0.05 ab
		FI	3.56 ± 0.18 bcd	8.46 ± 0.19 c	14.25 ± 0.37 d	3.67 ± 0.37	5.14 ± 0.29 abc	5.26 ± 0.13 abc
		CI	4.25 ± 0.23 a	10.38 ± 0.22 b	18.07 ± 0.64 bc	3.78 ± 0.25	4.63 ± 0.05 cd	5.15 ± 0.36 abc

注 (Note): 表中数值为平均值 ± 标准误 Values are means ± standard errors. 同一列处理间小写字母不同者表示差异显著 ($P < 0.05$), 处理间字母相同或没有标字母都表示差异不显著 ($P > 0.05$) Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$), the same letters or no letter labeled indicate no significant difference ($P > 0.05$). AI—分根区交替灌溉 Alternate partial root zone irrigation; FI—固定部分根区灌溉 Fixed partial root zone irrigation; CI—常规灌溉 Conventional irrigation.

本研究表明,与常规灌溉 (CI) 相比,拔节前期至抽雄期根区局部灌溉对不同水肥条件下玉米总干物质质量和水分利用效率 (WUE) 的影响多不显著,但是显著降低玉米耗水量,而 F₁W₁ 时,拔节末期和抽雄期根区局部灌溉提高 WUE 分别为 24.4% 和 16.3%。与 CI 相比,拔节期 (10 天处理) 和拔节期~抽雄期 (49 天处理) AI 分别降低耗水量 10.6%~12.9% 和 31.7%~32.4%, 但是不明显降低玉米总干物质质量,因而分别提高玉米 WUE 10.4%~13.6% 和 41.2%~41.8%^[19],与本研究结果相似。Li 等^[22]也指出,在施肥和充分供水条件下,与 CI 相比,分根区交替灌溉节水 29.1%,而水分利用效率提高 24.3%。此外,轻度亏水和有机无机 N 配施对玉米总干物质质量和 WUE 的影响也不显著。孟兆江等^[23]研究表明,调亏处理玉米比正常灌水平均增产

25.24%, 节水 15.41%, 水分利用效率提高 45.05%。孟凯等^[24]研究指出,随着土壤水分含量的增加,有机无机肥配施处理春小麦、玉米、大豆 3 种轮作作物产量与水分利用效率相应提高,这与本研究结果有所不同。

因此,在正常灌水水平和单施化肥氮条件下,在拔节期至抽雄期进行根区局部灌溉显著降低玉米耗水量,而对玉米生理指标和干物质总量无明显影响,因而显著提高水分利用效率。

参考文献:

- [1] 黄春燕. 不同施肥条件下根区局部灌溉对甜玉米水分养分利用的影响[D]. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2005.
Huang C Y. Effects of partial root-zone irrigation on water and nutrients use of sweet corn under different fertilization condition

- [D]. Nanning: Ms thesis of Guangxi University, 2005.
- [2] Hu T T, Yuan L N, Wang J F *et al.* Antioxidation responses of maize roots and leaves to partial root-zone irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98 (1): 164-171.
- [3] Tang L S, Li Y, Zhang J H. Physiological and yield responses of cotton under partial root zone irrigation[J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2-3): 214-223.
- [4] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 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[J]. *中国农业科学*, 2000, 33 (6): 26-32.
- Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z *et al.* Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33 (6): 26-32.
- [5] Loveys B R, Dry P R, Stroll M *et al.* Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops [J]. *Acta Horticulturae*, 2000, 537: 187-197
- [6] Ismail M R, Burrage S W, Tarmizic H, Aziz M A. Growth, plant water relations, photosynthesis rate and accumulation of proline in young carrabolla plants in relation to water stress [J]. *Scientia Horticulturae*, 1994, 60: 101-114.
- [7] Iniesta F, Testi L, Goldhamer DA, Fereres E. Quantifying reductions in consumptive water use under regulated deficit irrigation in pistachio (*Pistacia vera* L.) [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95 (7): 877-886.
- [8] 韦彩会, 李伏生, 许春辉, 等. 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[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28 (4): 76-84.
- Wei C H, Li F S, Xu C H *et al.* Effect of regulated deficit irrigation and fertilization on dry matter accumulation and related physiological properties of maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (4): 76-84.
- [9] Cui N B, Du T S, Kang S Z *et al.* Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95 (4): 489-497.
- [10] Acevedo E, Hsiao T C, Henderson D W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status[J]. *Plant Physiology*, 1971, 48: 631-636.
- [11] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 梁银丽. 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 S Z, Shi W J, Hu X T *et al.* Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1998, 14 (4): 82-87.
- [12] 杨长明, 杨林章. 有机-无机肥配施对水稻剑叶光合特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2003, 22 (1): 1-4.
- Yang C M, Yang L Z. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on photosynthetic characteristics of rice flag leaves [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22 (1): 1-4.
- [13] 冯晓英, 黄建国, 袁玲, 等. 有机无机肥配施对烤烟生理特性及经济性状的影响[J]. *贵州农业科学*, 2011, 39 (11): 49-51.
- Feng X Y, Huang J G, Yuan L *et al.* Effect of combined application of organic manure and chemical fertilizers on physiological characteristics and economic traits of flue-cured tobacco[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2011, 39 (11): 49-51.
- [14] 吴光磊. 有机无机肥配施对玉米产量和品质的影响及生理基础[D]. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2005.
- Wu G L. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on yield and quality of maize and its physiological basis [D]. Tai'an Shandong: Ms thesis of Shandong Agricultural University, 2005.
- [15] 韩永超, 李静平, 冀红, 等. 不同施肥处理对膜下滴灌玉米光合特性和产量的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2012, 34 (3): 248-253.
- Han YC, Li JP, Ji H *et al.* Effects of different fertilizer treatments on photosynthetic characteristics and maize yield under mulched drip irrigation [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2012, 34 (3): 248-253.
- [16] 余江敏, 李伏生, 雷文杰, 农梦玲. 根区局部灌溉和有机无机氮比例对玉米水分利用和土壤氮磷含量的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42 (1): 22-26.
- Yu J M, Li F S, Lei W J, Nong M L. Effects of partial root-zone irrigation and ratio of organic and inorganic N on maize water use and soil N and P contents [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (1): 22-26.
- [17] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 世界图书出版公司, 2000.
- Gao J F. Experimental technology of plant physiology [M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2000.
- [18] 王晶英. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003.
- Wang J Y. Plant physiology and biochemistry experiment technology and principle [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2003.
- [19] Li F S, Wei C H, Zhang F C *et al.* Water-use efficiency and physiological responses of maize under partial root-zone irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 (8): 1156-1164
- [20] 汪耀富, 蔡寒玉, 张晓海, 等. 分根交替灌溉对烤烟生理特性和烟叶产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24 (5): 93-98.
- Wang Y F, Cai H Y, Zhang X H *et al.* Effects of root-divided alternative irrigation on physiological characteristics and yield of flue-cured tobacco[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24 (5): 93-98.
- [21] 郑灵祥, 王密侠, 寇明蕾, 等. 水分胁迫对夏玉米生理指标的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2010, 4: 43-46.
- Zheng X L, Wang M X, Kou M L *et al.* Effect of water stress on physiological indexes of the summer maize [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010, 4: 43-46.
- [22] Li F S, Liang J H, Kang S Z *et al.* Benefits of alternate partial

- root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize[J]. *Plant and Soil*, 2007, 295: 279–291.
- [23] 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.
- Meng Z J, Bian X B, Liu A N *et al.* Effect of regulated deficit irrigation on physiological and photosynthetic characteristics of summer maize and its optimized combination of agronomic techniques[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (3): 182–186.
- [24] 孟凯, 张兴义, 隋跃宇, 赵军. 黑土农田水肥条件对作物产量及水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13 (2): 119–121.
- Meng K, Zhang X Y, Sui Y Y, Zhao J. The crop yields and water use efficiencies under different water and fertilizer conditions in the field of Black soil [J]. *Chinese Journal of Ecology-Agriculture*, 2005, 13 (2): 119–121.