

DOI: 10.5846/stxb201405090921

刘水, 李伏生. 不同水氮条件下灌溉方式对玉米干物质质量和氮钾利用的影响. 生态学报, 2014, 34(18): 5249-5256.

Liu S, Li F S. Effect of irrigation method on dry mass and nitrogen and potassium utilization of maize under different water and nitrogen conditions. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5249-5256.

不同水氮条件下灌溉方式对玉米干物质质量 和氮钾利用的影响

刘 水, 李伏生*

(广西大学农学院, 南宁 530005)

摘要: 由于作物需水随生育期的变化, 分根区交替灌溉 (AI) 的节水效果也会随生育期而发生变化, 探明不同生育期分根区交替灌溉对玉米生长和水分养分利用的影响, 以期分为根区交替灌溉的实施和充分发挥其节水节肥效果奠定理论基础。通过盆栽试验, 在 2 种灌水水平 (正常灌水和轻度缺水) 和 2 种有机无机氮比例 (100% 无机氮和 70% 无机氮+30% 有机氮) 下, 以常规灌溉 (CI) 为对照, 分别研究苗期—灌浆初期、苗期—拔节期以及拔节期—抽雄期进行 AI 对玉米干物质质量、氮钾含量和吸收量以及土壤碱解氮和速效钾含量的影响。结果表明, 在轻度缺水和有机无机氮肥配施下, 与 CI 相比, 拔节期—抽雄期分根区交替灌溉玉米地上部和总干物质质量分别增加 29.6% 和 27.4%, 地上部和总 N 吸收量增加 50.7% 和 50.4%。与单施无机氮肥相比, 有机无机氮肥配施会在不同程度上增加地上部和总 N 吸收量, 但是一般降低土壤碱解氮和速效钾含量, 这说明在轻度缺水和有机无机 N 肥配施下, 拔节期—抽雄期进行分根区交替灌溉提高玉米总干物质质量和 N 吸收量。

关键词: 有机无机氮比例; 灌溉方式; 干物质质量; NK 利用; 玉米

Effect of irrigation method on dry mass and nitrogen and potassium utilization of maize under different water and nitrogen conditions

LIU Shui, LI Fusheng*

College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China

Abstract: Crop water requirement varies with the growth stage, so water-saving effect of alternate partial root zone irrigation (AI) also varies with the growth stage. Understanding the effect of alternate partial root-zone irrigation at different growth stages on maize growth and water and nutrient utilization can provide the theoretical foundation for the implement of alternate partial root zone irrigation and fully exerting its effect of saving water and fertilizer. Taking conventional irrigation (CI) as the control, this study has investigated the effects of AI respectively at seedling-early grain filling, seedling-jointing and jointing-tasselling stages on dry mass, nitrogen and potassium contents and uptakes of maize and available N and K contents in soil using a pot experiment under two irrigation levels (normal irrigation and mild water deficit) and two ratios of inorganic to organic N (100% inorganic N and 70% inorganic N + 30% organic N). Results indicate that under mild water deficit and combined application of organic and inorganic N fertilizer condition, AI at the jointing-tasselling stage increased shoot and total dry masses by 29.6% and 27.4%, and shoot and total N uptakes by 50.7% and 50.4%, respectively, if compared to CI. Combined application of organic and inorganic N increased shoot and total N uptakes to some extent, but generally reduced soil available N and K contents when compared to only inorganic N. Thus alternate partial root-zone irrigation at the jointing-tasselling stage could increase total dry mass and N uptakes under mild water deficit and combined

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U1033004); 国家 863 计划 (2011AA100504)

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

application of organic and inorganic N fertilizer.

Key Words: ratio of inorganic to organic N; irrigation method; dry mass; NK utilization; maize

分根区交替灌溉(简记 AI)是在作物整个生育期或某些生育期交替地对一半根区进行正常灌溉,而在另一半根区则不灌溉,通过干燥根系产生的 ABA 运送到叶片,调节气孔开度,降低植株蒸腾和土壤蒸发,从而达到节约灌水量和提高作物水肥利用效率的目的^[1-6]。杨启良等^[7]研究表明,与常规和固定沟灌相比,交替沟灌对玉米产量和植株氮含量分别提高 3.5% 和 7.16%、3.7% 和 7.1%。Li 等^[4]结果指出,与常规灌溉(CI)相比,分根交替灌溉节水 29.1%,总干物质量和冠层干物质量仅分别减少 6.3% 和 5.6%,而水分利用效率和氮肥表观利用率分别提高 24.3% 和 16.4%。韩艳丽和康绍忠^[8]研究表明,交替灌水方式较均匀灌水方式节水 27.6%,水分利用效率提高 5.3%,单位耗水量氮(N)、磷(P)利用效率也有所提高。Lehrsch 等^[9]研究了不同隔沟灌溉方式对玉米生长和硝态氮淋洗的影响,表明交替隔沟灌溉在维持作物产量的同时,可使土壤氮的吸收增加 21%。张芮等^[10]研究指出,苗期至拔节期水分胁迫对玉米产量影响甚微,持续或交替水分胁迫则显著降低产量。

目前有关不同生育时期分根区交替灌溉对作物生长研究亦有报导^[11]。农梦玲等^[12]将玉米不同生育期分根区交替灌溉和施肥水平结合起来进行研究,结果表明,与常规灌溉相比,苗期—拔节期根区局部灌溉总干物质降低不明显或略有增加,且不影响玉米对 NK 吸收量;而苗期—抽雄期根区局部灌溉明显降低玉米总干物质量和 NK 吸收量。在相同灌水方式下,中氮钾水平玉米干物质积累、水分利用效率和氮吸收利用较高^[13]。

由于作物需水随生育期的变化,分根区交替灌溉的节水效果也会随生育期而发生变化,为进一步探明不同生育期分根区交替灌溉对玉米干物质积累和 NK 利用的影响,本研究是在不同灌水水平和有机无机 N 比例条件下,研究了不同生育期分根区交替灌溉对玉米干物质质量、N、K 含量和吸收量以及土壤碱解氮和速效钾含量,以期分为根区交替灌溉充分发挥其节水节肥效果奠定理论基础,并为玉米合

理灌溉施肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

盆栽试验在广西大学农学院网室大棚中进行,供试土壤采自本校农科教学基地第四纪红色黏土发育的赤红土(典型强淋溶土,FAO-UNESCO 系统),其土壤质地是重黏土,田间持水量 29.0% θ_f (质量百分数),pH 4.77,有机质 18.2 g/kg,碱解 N 76.9 mg/kg,速效 P 29.1 mg/kg 和速效 K 128.0 mg/kg。供试作物为玉米(甜糯 518)。

1.2 试验方法

盆栽试验中灌水方式设常规灌溉(CI,每次对全部土壤均匀灌水),和不同时期分根区交替灌溉(AI)(AI₁、AI₂、AI₃,分别在苗期—灌浆初期(播后 21—56d)、苗期—拔节期(播后 21—31d)以及拔节期—抽雄期(播后 31—46d)进行 AI,即每次交替对 1/2 区域土壤灌水)。灌水水平设正常灌水(70%—80% θ_f , W₁)和轻度缺水(60%—70% θ_f , W₂)。有机无机氮(N)比例设 100%无机 N(F₁)和 70%无机 N+30%有机 N(F₂)。施纯 N 0.15 g/kg 土,无机 N 为尿素(分析纯,含 N46%),有机 N 用生物有机肥(含 N 2.82%、P₂O₅ 0.46%、K₂O 7.06%)供给,其用量以含 N 量计算。施 P₂O₅ 0.1 g/kg 土,施 K₂O 0.15 g/kg 土,磷肥用磷酸二氢钾(分析纯,含 P₂O₅ 52.2%,含 K₂O 34.6%),磷酸二氢钾中钾不足时,用氯化钾(分析纯,含 K₂O 60%)补足。所有肥料在装盆时全部作基肥施入。试验共 16 个处理,每个处理重复 3 次,共 48 盆,随机区组排列。

试验在聚乙烯塑料桶(高 23 cm、直径 30 cm)中进行,所有处理桶中间均用塑料薄膜隔开,以阻止两边水分交换,每桶两边各装入 7 kg 土,共 14 kg。播种前保持土壤水分含量为 80% θ_f 。2010 年 9 月 18 日每桶播 5 粒已催芽露白的玉米种子在塑料薄膜中央,9 月 29 日选择长势均匀玉米苗进行间苗,每盆在塑料薄膜中央保留 1 株玉米苗。控水前所有处理均采用常规灌溉方式灌水,并保持土壤含水量在

70%—80% θ_f 。4—5 片叶时(10 月 9 日)对供试玉米按上述试验设计进行控水处理后,不同水氮条件下 CI 处理用称桶质量法确定每次灌水量,而 AI 处理则按 CI 处理灌水量的 70%进行灌水,每次灌水量用量筒量取灌水量,并记录各处理每次灌水量。12 月 7 日(播后 80d)试验结束。

1.3 样品采集和测定

试验结束时,分别采集玉米地上部和根系,洗净,在 65℃ 下烘至恒质量,分别称地上部和根系干物质量,计算总干物质量。然后粉碎植株样品,用于测定植株养分含量。植株经 $H_2SO_4-H_2O_2$ 湿灰化法消煮后,用流动化学分析仪测定全氮,用火焰光度法测定全钾含量。地上部和根系养分吸收量分别用地上部和根系全 N 或全 K 含量与其干物质量相乘所得,总氮或钾吸收量为地上部和根系氮或钾吸收量之和。

试验结束时采集土样,采土前用采土区土壤擦拭土钻 1—2 次,分别在湿润区和干燥区 3 点采集 1—15 cm 土层土壤,充分混匀,装袋,带回室内风干,

磨碎后过 18 目筛备用。土壤碱解氮用 1 mol/L NaOH 碱解扩散法测定;速效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 法浸提后,用比色法测定;速效钾测定用 1 mol/L 中性 NH_4Ac 法浸提后,用火焰光度法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel2003 和 SPSS13.0 软件对试验数据进行分析,多重比较用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 玉米干物质量

表 1 表明, AI_1 处理地上部、根系和总干物质量分别比 CI 处理减少 9.6%—29.2%、10.0%—32.4% 和 11.9%—31.9%; AI_2 处理地上部、根系和总干物质量与 CI 处理之间的差异均不显著; F_1 下, AI_3 处理地上部、根系和总干物质量与 CI 处理之间的差异也不显著,而 F_2W_2 下, AI_3 处理地上部和总干物质量分别比 CI 处理增加 29.6% 和 27.4%。因此,在轻度缺水和有机无机氮肥配施下,拔节期—抽雄期进行分根区交替灌溉有利于增加玉米地上部和总干物质量。

表 1 不同水氮条件下灌溉方式对玉米干物质量的影响

Table 1 Effect of irrigation method on maize dry mass under different water and nitrogen conditions

有机无机 N 比例 Ratio of org. to inorg. N	灌水水平 Irrigation level	灌溉方式 Irrigation method	地上部干物质量 Shoot dry mass/ (g/株)	根系干物质量 Root dry mass/ (g/株)	总干物质量 Total dry mass/ (g/株)
F_1	W_1	CI	77.8±6.5abcde	6.0±0.8abcd	83.8±5.7abcde
		AI_1	61.2±3.2efg	5.4±0.4bcd	66.6±3.4efg
		AI_2	70.3±4.2cdef	7.4±0.6ab	77.7±4.3cdef
		AI_3	73.2±7.8bdef	6.3±1.1abcd	79.6±8.8bdef
		CI	65.8±1.9def	7.1±1.1ab	72.9±1.8def
	W_2	AI_1	59.5±1.9fg	4.8±0.5cd	64.2±1.4fg
		AI_2	66.9±2.9def	5.9±0.3abcd	72.8±3.1def
		AI_3	82.1±5.1abcd	7.8±0.5a	89.8±5.6abcd
		CI	88.2±5.7ab	6.9±0.5abc	95.1±5.4ab
F_2	W_1	AI_1	59.4±2.1fg	5.4±0.5bcd	64.8±2.6fg
		AI_2	84.2±6.3abc	6.6±0.2abcd	90.8±6.6abc
		AI_3	78.7±2.6abcd	6.4±0.5abcd	85.1±3.1abcd
		CI	69.6±6.7cdef	6.6±0.5abcd	76.3±7.1cdef
		AI_1	49.3±5.9g	4.6±0.3d	53.9±5.6g
	W_2	AI_2	74.9±2.7abcdef	5.7±0.8abcd	80.6±2.7abcdef
		AI_3	90.2±5.0a	7.0±0.4abc	97.2±4.8a
		CI	88.2±5.7ab	6.9±0.5abc	95.1±5.4ab
		AI_1	59.4±2.1fg	5.4±0.5bcd	64.8±2.6fg
		AI_2	84.2±6.3abc	6.6±0.2abcd	90.8±6.6abc
		AI_3	78.7±2.6abcd	6.4±0.5abcd	85.1±3.1abcd
		CI	69.6±6.7cdef	6.6±0.5abcd	76.3±7.1cdef

表中数值为平均值±标准误,同一列处理间字母不同者表示差异显著($P<5\%$),处理间字母相同者表示差异不显著($P>5\%$)。 F_1 : 100% 无机 N; F_2 : 70% 无机 N+30% 有机 N; W_1 : 正常灌水(70%—80% θ_f) 和 W_2 : 轻度缺水(60%—70% θ_f), θ_f 为田间持水量; CI 是常规灌溉; AI 是分根区交替灌溉, AI_1 、 AI_2 、 AI_3 分别是在苗期—灌浆初期、苗期—拔节期和拔节期—抽雄期进行 AI

Values are means ± standard errors; Different letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$), the same letters indicate no significant difference ($P>0.05$). F_1 : 100% inorganic N; F_2 : 70% inorganic N + 30% organic N; W_1 is normal irrigation (70%—80% θ_f , θ_f is field capacity) and W_2 is mild water deficit (60%—70% θ_f); CI is conventional irrigation; AI is alternate partial root-none irrigation, AI_1 , AI_2 and AI_3 represent that AI was respectively carried out at seedling-early grain filling, seedling-jointing and jointing-tasselling stages; The same symbols were used for the following tables

除 F_2CI 下 W_2 地上部和总干物质量分别减少 21.1% 和 19.8% 外,其他相同灌溉方式和施肥条件下, W_2 地上部、根系和总干物质量与 W_1 之间的差异均不显著。在相同灌溉方式和灌水水平条件下, F_2 地上部、根系和总干物质量与 F_1 之间的差异也不显著(表 1)。

2.2 玉米氮含量和吸收量

表 2 表明, F_1W_2 下 AI_1 处理地上部和根系氮(N)含量分别比 CI 处理增加 37.0% 和 50.0%, F_2W_2

下 AI_2 处理地上部 N 含量比 CI 处理增加 58.6%,而其他水氮条件下 AI 处理玉米地上部 N 含量与 CI 处理之间的差异不显著,玉米根系 N 含量比 CI 处理则略有增加。因此,在轻度缺水条件下, AI_1 和 AI_2 有利于增加于玉米地上部 N 含量。在相同灌溉方式和施肥条件下, W_2 处理地上部和根系 N 含量比 W_1 处理有所增加;与 F_1 相比, W_1AI_2 和 W_2AI_2 下 F_2 处理地上部 N 含量分别增加 54.1% 和 52.5%,而 F_2 根系 N 含量与 F_1 之间的差异不显著(表 2)。

表 2 不同水氮条件下灌溉方式对玉米氮含量和吸收量的影响

Table 2 Effect of irrigation method on N content and uptake of maize under different water and nitrogen conditions

有机无机 N 比例 Ratio of org. to inorg. N	灌水水平 Irrigation level	灌溉方式 Irrigation method	氮含量 N content/%		氮吸收量 N uptake/(mg/株)		
			地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	总量 Total
F_1	W_1	CI	1.51±0.03cd	1.28±0.17ab	1178.2±117.3cde	77.6±16.6ab	1255.8±102.5cde
		AI_1	1.54±0.08cd	1.45±0.02ab	937.5±29.0def	78.1±9.5ab	1015.7±30.5def
		AI_2	1.33±0.19d	1.02±0.18b	929.1±44.2def	73.4±13.1ab	1032.0±33.4def
		AI_3	1.31±0.08d	1.47±0.05ab	939.3±57.5def	102.5±13.8a	995.2±75.8ef
	W_2	CI	1.35±0.09d	1.02±0.07b	890.9±76.9ef	72.4±12.8ab	963.3±74.9ef
		AI_1	1.85±0.17bc	1.53±0.16a	1099.8±19.0de	71.1±2.5ab	1170.9±17.3de
		AI_2	1.58±0.20cd	1.28±0.10ab	1064.7±138.8def	74.0±7.2ab	1138.7±145.7def
		AI_3	1.54±0.10cd	1.25±0.17ab	1257.9±28.9cd	97.3±10.0ab	1355.1±38.9cd
F_2	W_1	CI	1.64±0.12bcd	1.01±0.09b	1458.6±154.6bc	71.4±15.0ab	1529.9±139.7bc
		AI_1	1.48±0.09cd	1.09±0.19ab	882.3±129.7ef	59.4±8.0b	941.7±137.7ef
		AI_2	2.05±0.17ab	1.17±0.05ab	1738.3±142.4ab	76.8±5.6ab	1815.1±144.5ab
		AI_3	1.51±0.13cd	1.21±0.14ab	1199.9±150.9cde	78.1±7.8ab	1277.9±156.5cde
	W_2	CI	1.52±0.17cd	1.01±0.13b	956.8±36.1def	66.5±4.8ab	1018.5±35.4def
		AI_1	1.52±0.06cd	1.43±0.05ab	733.8±36.2f	66.5±11.3ab	800.2±25.2f
		AI_2	2.41±0.16a	1.35±0.03ab	1802.1±86.1a	74.6±3.5ab	1876.7±83.5a
		AI_3	1.61±0.13cd	1.27±0.13ab	1442.3±52.2bc	89.5±13.6ab	1531.8±49.2bc

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($P<5\%$),处理间相同表示差异不显著($P>5\%$)

表 2 还表明,与 CI 处理相比, F_2W_1 下 AI_1 地上部和总 N 吸收量分别减少 39.5% 和 38.4%, F_2W_2 下 AI_2 处理地上部和总 N 吸收量分别增加 88.3% 和 84.3%, W_2 下 AI_3 处理地上部和总 N 吸收量分别增加 41.2%—50.7% 和 40.7%—50.4%,而其它条件下 AI 处理不显著影响地上部和总 N 吸收量。在相同水氮条件下, AI 处理根系 N 吸收量与 CI 处理之间的差异也不显著。因此,轻度缺水条件下,拔节期—抽雄期进行分根区交替灌溉有利于增加玉米地上部和总 N 吸收量。在相同灌溉方式和施肥条件下, F_2CI 下 W_2 处理地上部和总 N 吸收量显著低于 W_1 ,而 AI_3 下 W_2 处理地上部和总 N 吸收量显著高于 W_1 。相同水分条件下,仅 AI_2 处理时 F_2 处理地上部

和总 N 吸收量显著高于 F_1 ,其他水分条件下地上部和总 N 吸收量 F_2 略高于 F_1 或显著降低,而 F_2 处理根系 N 吸收量与 F_1 处理之间的差异不显著(表 2)。

2.3 玉米钾含量和吸收量

表 3 表明, AI 处理玉米地上部和根系钾(K)含量与 CI 处理之间的差异均不显著。相同灌溉方式和施肥水平下, W_2 玉米地上部和根系 K 含量与 W_1 之间的差异也不显著。相同水分条件下, F_2 处理在 W_1AI_1 、 W_2AI_1 和 W_2AI_3 下地上部 K 含量以及在 W_1CI 和 W_1AI_3 下根系 K 含量显著低于 F_1 处理,而在其他条件下地上部和根系 K 含量均有不同程度的减少,但差异不显著。

表 3 不同水氮条件下灌溉方式对玉米钾含量和吸收量的影响

Table 3 Effect of irrigation method on K content and uptake of maize under different water and nitrogen conditions

有机无机 N 比例 Ratio of org. to inorg. N	灌水水平 Irrigation level	灌溉方式 Irrigation method	钾含量 K content/%		钾吸收量 K uptake/(mg/株)		
			地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	总量 Total
F ₁	W ₁	CI	1.95±0.05abcde	2.27±0.07abc	1526.2±100.6ab	135.0±17.2abcd	1661.2±140.2ab
		AI ₁	2.21±0.03a	2.53±0.14a	1396.8±13.2ab	135.3±12.8abcd	1521.5±23.4abc
		AI ₂	2.02±0.01abcd	2.03±0.11bcdef	1417.7±31.1ab	150.1±15.7abc	1567.8±35.8ab
	W ₂	AI ₃	1.95±0.05abcde	2.36±0.10ab	1425.9±151.7ab	147.2±13.7abc	1573.1±176.3ab
		CI	2.15±0.08ab	2.32±0.05abc	1413.9±58.5ab	164.8±15.7ab	1578.8±70.8ab
		AI ₁	2.17±0.19a	2.41±0.08ab	1291.4±94.9bc	113.9±8.9cd	1405.4±88.6bc
		AI ₂	2.14±0.07ab	2.22±0.10abcd	1433.6±149.7ab	129.9±8.9abcd	1563.6±152.6ab
		AI ₃	2.08±0.05abc	2.17±0.08abcde	1724.5±130.0a	168.9±16.3a	1893.4±199.3a
	F ₂	CI	1.81±0.10cde	1.88±0.14def	1502.6±70.4ab	131.8±17.7abcd	1648.9±84.5ab
		AI ₁	1.74±0.10de	2.18±0.07abcde	1032.9±43.5cd	117.3±6.3cd	1150.2±49.9cd
		AI ₂	1.97±0.01abcde	1.88±0.08def	1535.9±33.5ab	122.9±2.9bcd	1660.7±36.7ab
		AI ₃	1.69±0.06e	1.72±0.18f	1332.5±67.0bc	109.4±1.3cd	1441.9±65.7bc
	W ₂	CI	2.01±0.05abcd	2.16±0.14abcde	1265.8±10.1bc	142.4±7.4abc	1406.6±20.3bc
		AI ₁	1.83±0.19bcde	2.07±0.07bcdef	894.7±82.5d	96.2±15.1d	990.9±70.0d
		AI ₂	1.89±0.03abcde	1.96±0.15cdef	1419.2±17.5ab	111.1±13.1cd	1530.4±20.0abc
		AI ₃	1.76±0.05de	1.83±0.09ef	1595.1±129.9ab	127.0±2.1abcd	1722.2±131.4ab

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($P<5\%$),处理间相同表示差异不显著($P>5\%$)

与 CI 相比, F₂ 时 AI₁ 处理地上部和总 K 吸收量分别减少 30.3% 和 29.9%, W₂ 时 AI₁ 处理根系 K 吸收量显著减少 31.7%, 而在其他水肥条件下 AI 处理玉米地上部、根系和总 K 吸收量变化不显著。因此, 在有机无机 N 肥配施条件下, 苗期—灌浆初期分根区交替灌溉不利于玉米 K 吸收量的增加(表 3)。在相同灌溉方式和施肥条件下, W₂ 处理地上部、根系

和总 K 吸收量与 W₁ 处理之间的差异不显著。与 F₁ 处理相比, 仅 W₁AI₁ 和 W₂AI₁ 下 F₂ 处理地上部和总 K 吸收量显著降低, 而其他水分条件下降低不显著(表 3)。

2.4 土壤碱解氮和速效钾含量

表 4 表明, 与 CI 相比, F₁W₂ 下 AI₁, AI₂ 和 AI₃ 处理土壤碱解 N 含量分别增加 22.2%, 16.1% 和

表 4 不同水氮条件下灌溉方式对土壤碱解氮和速效钾含量的影响

Table 4 Effect of irrigation method on soil available N and K contents under different water and nitrogen conditions

有机无机 N 比例 Ratio of org. to inorg. N	灌水水平 Irrigation level	灌溉方式 Irrigation method	碱解氮 Available N/(mg/kg)	速效钾 Available K/(mg/kg)
F ₁	W ₁	CI	86.9±6.8ab	139.2±2.9ab
		AI ₁	82.7±5.2abcd	118.7±4.3cde
		AI ₂	81.0±4.1abcd	139.1±2.7abc
		AI ₃	77.7±1.5abcd	127.8±3.6bcde
	W ₂	CI	72.5±6.8bcd	121.0±7.9bcde
		AI ₁	88.6±4.3a	140.4±7.4ab
		AI ₂	84.2±3.9abc	122.7±9.1 bcde
		AI ₃	81.7±2.2abcd	153.5±4.4 a
	F ₂	CI	68.1±1.3d	121.3±7.6bcde
	W ₁	AI ₁	70.8±5.1cd	123.6±4.5bcde
		AI ₂	69.7±0.9cd	117.2±4.2de
		AI ₃	72.5±2.6bcd	122.6±1.2bcde
	W ₂	CI	67.9±3.6d	129.1±4.4bcde
		AI ₁	70.0±4.5cd	137.4±6.2abcd
		AI ₂	67.5±7.7d	111.7±7.1e
		AI ₃	70.2±1.7cd	132.5±5.1bcd

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($P<5\%$),处理间相同表示差异不显著($P>5\%$)

12.7%,而在其他水肥条件下 AI 处理土壤碱解氮含量与 CI 处理之间的差异不显著。另外, W_2 处理土壤碱解氮含量与 W_1 处理之间的差异不显著。与 F_1 相比, F_2 处理土壤碱解 N 含量分别在 W_1CI 、 W_2AI_1 和 W_2AI_2 下降低 21.6%、21.1%和 19.8%,而在其他水分条件下仅略有降低(表 4)。

表 4 还表明,与 CI 相比, F_1W_1 下 AI_1 处理土壤速效 K 含量降低 14.8%, F_1W_2 下 AI_3 处理土壤速效 K 含量却增加 26.7%,而其他水肥条件下 AI 处理土壤速效 K 含量与 CI 处理之间的差异不显著。相同灌溉方式和施肥处理下,与 W_1 处理相比, AI_2 下 W_2 处理速效钾含量减少,而其他水氮条件下略有增加。另外, W_1AI_2 和 W_2AI_3 下 F_2 处理土壤速效钾含量比 F_1 处理分别减少 15.7%和 13.7%,而在其他水分条件下,它们之间的速效钾含量差异不显著(表 4)。

3 讨论

前人研究表明,与常规灌溉(CI)相比,分根区交替灌溉(AI)一般降低玉米干物质总量^[4,13-14]。本研究表明,与 CI 处理相比, AI_1 处理地上部、根系和总干物质质量均明显减少,但在 F_2W_2 下, AI_3 处理地上部和总干物质质量都有明显增加,原因可能是 AI_3 处理在拔节期—抽雄期进行分根区交替灌溉,适当的水分胁迫促进根系生长,提高吸水能力,减少叶片水分蒸腾,并可以保证植物光合作用的正常进行,后期恢复常规灌溉后,玉米生长有较强的补偿能力,从而促使玉米植株快速生长。说明轻度缺水和有机无机氮肥配施下, AI_3 处理有利于增加玉米地上部和总干物质质量。另外,与 F_1 相比, F_2 玉米地上部和总干物质质量一般提高,根系质量却略有降低,这与谷洁等^[15]的结论相似。

据报道,分根区交替灌溉有利于提高作物养分吸收^[11,16-17]。农梦玲等^[12]研究发现苗期—拔节期根区局部灌溉不降低玉米植株 N 含量,而苗期—抽雄期根区局部灌溉地上部 N 含量有所下降。本试验表明,不同生育期交替灌溉增加根系氮含量不显著,在轻度缺水(W_2)下, AI_1 、 AI_2 和 AI_3 处理均在不同程度上增加地上部 N 含量,且此条件下 AI_3 处理地上部和总 N 吸收量显著提高,这与 AI_3 处理促进玉米总干物质的原因相似。说明轻度缺水时 AI_3 处理有利于提高玉米地上部和总 N 吸收量。 AI_1 处理

玉米地上部和总 K 吸收量比 CI 处理明显降低,与农梦玲等^[12]的结果一致,他们也发现苗期—抽雄期根区局部灌溉会降低玉米对 K 的吸收量,说明苗期—灌浆初期交替灌溉(AI_1)不利于提高玉米对 K 的吸收。

刘小刚等^[18]研究表明,灌水量对玉米植株氮吸收量的影响不显著,本研究结果基本一致,但在 AI_3 处理时 W_2 玉米地上部和总氮吸收量显著高于 W_1 ,说明 AI_3 处理下轻度缺水有利于提高玉米地上部和总氮吸收量。另外,相同水分条件下,有机无机氮肥配施有利于玉米地上部 N 含量和吸收量的增加;反之,玉米植株 K 含量和吸收量有所减少。

余江敏等^[19]研究表明,在相同施肥水平下, AI 处理拔节期土壤碱解 N 比 CI 略高,而大喇叭口期和灌浆期土壤碱解 N 与 CI 处理相近。本研究表明, F_1W_2 下 AI_1 和 AI_3 处理土壤碱解 N 和速效 K 含量明显高于 CI 处理,说明在单施无机氮肥和轻度缺水下,苗期—灌浆初期(AI_1)和拔节期—抽雄期(AI_3)分根区交替灌溉不利于玉米从土壤中吸收 N 和 K。此外,相同水分条件下, F_2 处理土壤碱解 N 和速效 K 含量均显著低于 F_1 处理,因为有机氮一般要通过矿化作用转化为无机氮后才能被玉米吸收,但是这个过程需要较长时间,因此在短期的盆栽试验中施有机 N 肥对土壤碱解 N 的增加相对缓慢,但是 5 年后有机肥与有机无机肥配施处理土壤碱解 N 含量水平才全面超过无机 N 肥处理^[20],彭娜等^[21]和侯红乾等^[22]的研究结果也说明了这点。

4 结论

(1)在轻度缺水和有机无机氮肥配施下,拔节期—抽雄期分根区交替灌溉(AI_3)有利于玉米总干物质质量和总 N 吸收量的增加,而苗期—灌浆初期分根区交替灌溉不利于玉米 K 吸收的提高。

(2) AI_3 下轻度缺水和有机无机氮肥配施有利于玉米氮吸收总量的提高,从而降低土壤碱解 N 含量。

References:

- [1] Kang S Z, Pan Y H, Shi P Z, Zhang J H. Controlled root-divided alternative irrigation- Theory and experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 32(11): 80-86.
- [2] 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.
- [3] Buttar G S, Thind H S, Aujla M S. Methods of planting and irrigation at various levels of nitrogen affect the seed yield and water use efficiency in transplanted oilseed rape (*Brassica napus* L). *Agricultural Water Management*, 2006, 85(3): 253-260.
- [4] 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.
- [5] Liu X G, Zhang F C, Yang Q L, Tian Y F. Effects of controlled root-divided irrigation on transport and utilization of water and nitrogen in maize rootzone soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 62-67.
- [6] Liang H L, Li F S, Nong M L. Effects of alternate partial root-zone irrigation on yield and water use of sticky maize with fertigation. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 242-247.
- [7] Yang Q L, Zhang F C, Liu X G, Ge Z Y. Effects of different furrow irrigation patterns, water and nitrogen supply levels on hydraulic conductivity and yield of maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 15-21.
- [8] Han Y L, Kang S Z. Effects of controlled root-divided alternative irrigation on nutrient uptake in maize. *Irrigation and Drainage*, 2001, 20(2): 5-7.
- [9] Lehrsch G A, Sojka R E, Westermann D T. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yield. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6): 1266-1275.
- [10] Zhang R, Cheng Z Y, Li Y X. Effect of regulated deficit drip irrigation on growth characteristic and yield of plastic film mulched corn for seed. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 125-128.
- [11] Liu Y X, Li F S, Nong M L, Wei J Y, Wang J L. Effects of alternate partial root-zone irrigation on growth and nutrient content of the flue-cured tobacco during different growth period. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(6): 102-105, 109-109.
- [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] Li C X, Chen X F, Wang T L, Yang G F, Zheng S H, Wang M X. Effects of controlled alternative irrigation on water redistribution of root zoon and yield of maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 59-64.
- [15] Gu J, Li S X, Gao H, Li M L, Qin Q J, Cheng K. Effect of organic-inorganic fertilizers on the water use efficiency of crops in dry land. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(1): 142-145, 151-151.
- [16] Hu T T, Kang S Z, Li Z J, Zhang F C. Uptake and allocation of nitrogen from different root zones of maize under local irrigation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 105-113.
- [17] Hu T T, Kang S Z, Zhang F C. Effects of local irrigation on absorption and use of nitrogen from different root zones of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(11): 2290-2295.
- [18] Liu X G, Zhang F C, Tian Y F, Li Z J. Effects of irrigation and fertilization treatments on transfer and utilization of water and nitrogen in maize root zone. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(11): 19-24.
- [19] Yu J M, Li F S, Lei W J, Nong M L. Effect of partial root-zone irrigation and ratio of organic to inorganic N on maize water use and soil N and P contents. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 22-26.
- [20] Tang J W, Lin Z A, Xu J X, Qi J, Wang Y H. Effect of organic manure and chemical fertilizer on soil nutrient. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006, (3): 44-47.
- [21] Peng N, Wang K F. Effects of long-term integrated fertilization with organic manure and chemical fertilizers on soil nutrients. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(2): 310-313.
- [22] Hou H Q, Liu X M, Liu G R, Li Z Z, Liu Y R, Huang Y L, Ji J H, Shao C H, Wang F Q. Effects of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of china. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 516-523.

参考文献:

- [1] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 张建华. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论与试验. *水利学报*, 2001, 32(11): 80-86.
- [5] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 田育丰. 控制性分根区灌溉对玉米根区水氮迁移和利用的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 62-67.
- [7] 杨启良, 张富仓, 刘小刚, 戈振杨. 沟灌方式和水氮对玉米产量和水分传导的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 15-21.
- [8] 韩艳丽, 康绍忠. 控制性分根区交替灌溉对玉米养分吸收的影响. *灌溉排水*, 2001, 20(2): 5-7.
- [10] 张芮, 成自勇, 李有先. 水分亏缺对膜下滴灌制种玉米生长及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 125-128.
- [11] 刘永贤, 李伏生, 农梦玲, 韦建玉, 汪加林. 不同生育时期分根区交替灌溉对烤烟生长和氮钾含量的影响. *灌溉排水学报*, 2007, 26(6): 102-105, 109-109.
- [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] 李彩霞, 陈晓飞, 王铁良, 杨国范, 郑淑红, 王明霞. 控制性交替灌溉对玉米根系层水分再分布与产量的影响. 农业工程学报, 2007, 23(11): 59-64.
- [15] 谷洁, 李生秀, 高华, 李鸣雷, 秦清军, 程逵. 有机无机复混肥对旱地作物水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 142-145, 151-151.
- [16] 胡田田, 康绍忠, 李志军, 张富仓. 局部湿润方式下玉米对不同根区氮素的吸收与分配. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 105-113.
- [17] 胡田田, 康绍忠, 张富仓. 局部灌水方式对玉米不同根区氮素吸收与利用的影响. 中国农业科学, 2005, 38(11): 2290-2295.
- [18] 刘小刚, 张富仓, 田育丰, 李志军. 水氮处理对玉米根区水氮迁移和利用的影响. 农业工程学报, 2008, 24(11): 19-24.
- [19] 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. 土壤通报, 2011, 42(1): 22-26.
- [20] 唐继伟, 林治安, 许建新, 戚剑, 王云华. 有机肥与无机肥在提高土壤肥力中的作用. 中国土壤与肥料, 2006, (3): 44-47.
- [21] 彭娜, 王开峰. 长期有机无机肥配施对稻田土壤养分的影响. 湖北农业科学, 2009, 48(2): 310-313.
- [22] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 李祖章, 刘益仁, 黄永兰, 冀建华, 邵彩虹, 王福全. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516-523.