水肥调控下糯玉米生长、产量和水分利用效率研究

周英捷[1,2],傅丰贝[1],李伏生[1*]
(1.广西大学农学院,广西 南宁 530005;2.河内农业大学农学院,越南 河内)

摘　要: 通过盆栽试验,研究了 7 个不同生育期亏水组合和 4 种施肥水平对糯玉米生长、总干物质量、干子粒产量和水分利用效率(WUE)的影响。结果表明,与正常灌水相比,中肥水平时拔节前期~孕穗期中度亏水明显降低总耗水量而不显著影响糯玉米总干物质量、干子粒产量和 WUE,但是该处理 WUE 稍高于其它亏水处理。与不施肥相比,施肥明显增加糯玉米孕穗期和开花期叶面积、总干物质量和 WUE,并缩短玉米开花至吐丝天数为 0.7~1.0 d,其中中肥水平时总干物质量、干子粒产量、WUE_t(以干物质为基础)和 WUE_s(以干子粒产量为基础)分别提高 37.7%、50.0%、33.1%和 45.1%。因此,中肥水平时(N、P_2O_5、K_2O 分别为 0.25、0.10、0.25 $g\cdot kg^{-1}$)糯玉米拔节前期~孕穗期进行中度亏水效果较好。

关键词: 糯玉米;施肥水平;水分亏缺;总干物质量;产量;水分利用效率
中图分类号: S513.071; S513.06　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-7601(2014)03-0114-05

Research on the growth, yield and water use efficiency of sticky maize under water and fertilizer regulation

ZHOU Ying-jie[1,2], FU Feng-bei[1], LI Fu-sheng[1]
(1. *College of Agriculture*, *Guangxi University*, *Nanning*, *Guangxi* 530005, *China*;
2. *Faculty of Agronomy*, *Hanoi University of Agriculture*, *Hanoi*, *Vietnam*)

Abstract: In order to provide scientific basis for rational irrigation and fertilization of sticky maize, through the pot experiment and 7 combinations for water deficit at different growth stages, and 4 fertilization levels, have researched the impacts on growth, gross dry mass, dry seed yield and water use efficiency (WUE) of sticky maize. The results showed that: Under medium fertilization level, compared to normal irrigation, the medium water deficit at early joining to booting stage will be significantly reduced the total water consumption volume, but did not significantly reduce the total dry mass, dry seed yield and WUE. However, this treatment had slightly higher WUE than other water deficit treatments. Compared to no fertilization, the fertilization will be significantly increased the leaf areas at the booting and flowering stages, total dry mass, yield and WUE, also reduced 0.7 to 1.0 day from flowering stage to silking stage. And medium fertilization increased total dry mass, dry seed yield, WUE_t(on the basis of total dry mass) and WUE_s(on the basis of dry seed yield) were increased 37.7%, 50.0%, 33.1% and 45.1%, respectively. Therefore, medium water deficit from early joining to booting stage had better effect on sticky maize under medium fertilization level(N, P_2O_5, and K_2O was 0.25 $g\cdot kg^{-1}$, 0.10 $g\cdot kg^{-1}$ and 0.25 $g\cdot kg^{-1}$, respectively).

Keywords: sticky maize; fertilization level; water deficit; gross dry mass; yield; water use efficiency

以往研究表明,不同亏水时期和程度对作物生长、干物质积累或产量以及水分利用效率(WUE)的影响不同[1-2]。与正常灌水相比,苗期中轻度亏水不明显降低玉米叶面积和干物质积累[3],拔节期中轻度亏水明显降低叶面积和干物质积累[4],灌浆期中轻度亏水不明显降低叶面积,但是明显降低干物质积累[5]。白向历等[6]研究表明,不同时期水分胁迫均降低玉米子粒产量,以抽雄吐丝期水分胁迫减产最严重,拔节期次之,苗期最小。王密侠等[7]指出,与正常灌水相比,玉米拔节期中轻度亏水和轻度亏水处理灌水量分别降低 4%和 3%,子粒产量分别降低 3%和 1%。不同水分亏缺程度下,施肥对作物生长、干物质积累或产量以及 WUE 的影响不同[8-10]。如邢英英等[4]研究指出,低氮时,玉米苗

收稿日期: 2013-10-26
基金项目: 国家 863 计划(2011AA100504);国家自然科学基金(50869001)
作者简介: 周英捷(1975—),男,越南河内人,博士/讲师,主要从事植物营养与水肥利用研究。E-mail:catiep@hua.edu.vn。
* **通信作者:** 李伏生,E-mail:zhenz@gxu.edu.cn;lpfu6@163.com。

期、拔节期、灌浆期和成熟期亏水时叶面积分别降低 15.8%、25.3%、7.2% 和 15.9%;中高氮时,苗期和拔节期亏水叶面积下降较多,复水后补偿效应也不明显。低水条件下,施肥处理玉米 WUE 均较低,而中水条件下,中低肥时玉米 WUE 较高[11]。以往研究主要集中在某生育期水分亏缺或与施肥水平结合对作物生长、干物质积累和 WUE 的影响,而不同生育期亏水组合与施肥水平相结合对作物的影响这方面研究较少。本文通过盆栽试验,研究了不同生育期亏水组合与施肥水平对糯玉米叶面积、生育期天数、总干物质量和 WUE 的影响,以为糯玉米合理灌溉和施肥提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点和材料

本试验在广西大学农学院温网室内进行。供试土壤采自本校农业试验站第四纪红色粘土发育的赤红壤,经风干、碾碎,并过 5 mm 筛,其土壤 pH 为 5.3,有机质 14.9 $g\cdot kg^{-1}$,碱解氮(N)31.24 $mg\cdot kg^{-1}$(1 $mol\cdot L^{-1}$ NaOH 碱解扩散法),速效磷(P)33.64 $mg\cdot kg^{-1}$(0.5 $mol\cdot L^{-1}$ $NaHCO_3$ 法),速效钾(K)100.0 $mg\cdot kg^{-1}$(1 $mol\cdot L^{-1}$中性 NH_4Ac 法),田间持水量为 29.8%(质量百分数)。供试玉米品种为桂糯 518,由母本 DW613 和父本 YL611 杂交,经过自交 5 代育成。

1.2　试验设计

试验设 7 个不同生育期亏水组合和 4 种施肥水平,共 28 个处理,每个处理重复 3 次,共 84 盆,随机区组排列。7 个不同生育期亏水组合见表 1,各时期亏水组合来自我们以前试验的相对最好组合[12],表 1 中各水分亏缺处理未提及的生育期均进行正常灌水。拔节前期正常灌水、轻度亏水和中度亏水分别为 65% ~ 75% θ_f(θ_f 为田间持水量,下同),55% ~ 65% θ_f 和 45% ~ 55% θ_f,拔节后期 – 孕穗期正常灌水、轻度亏水和中度亏水分别为 70% ~ 80% θ_f,55% ~ 65% θ_f 和 45% ~ 55% θ_f,孕穗期 – 抽雄期正常灌水和轻度亏水分别为 70% ~ 80% θ_f 和 55% ~ 65% θ_f。施肥水平设不施肥(F_0);低肥(F_1,N、P_2O_5、K_2O 分别施 0.15、0.05、0.15 $g\cdot kg^{-1}$),中肥(F_2,N、P_2O_5、K_2O 分别施 0.25、0.10、0.25 $g\cdot kg^{-1}$),高肥(F_3,N、P_2O_5、K_2O 分别施 0.35、0.15、0.35 $g\cdot kg^{-1}$)。氮肥用尿素(含 N 46%),其中 56% 氮肥作基肥、24% 作追肥和 20% 作攻穗肥;磷肥用磷酸二氢钾(含 P_2O_5 52%),全部用作基肥;钾肥用磷酸二氢钾(含 K_2O 34%)和氯化钾(含 K_2O 60%)供应,其中 56% 钾肥作基肥、24% 作追肥和 20% 作攻穗肥。

表 1　糯玉米不同生育期亏水处理

Table 1　Water deficit treatments at different growth stages of sticky maize

亏水处理 Water deficit treatment	拔节前期 Early joining stage	拔节后期 ~ 孕穗期 Later joining ~ booting stage	孕穗期 ~ 抽雄期 Booting ~ tasseling stage
I_0	65% ~ 75% θ_f	70% ~ 80% θ_f	70% ~ 80% θ_f
I_1	45% ~ 55% θ_f	45% ~ 55% θ_f	55% ~ 65% θ_f
I_2	45% ~ 55% θ_f	45% ~ 55% θ_f	70% ~ 80% θ_f
I_3	45% ~ 55% θ_f	55% ~ 65% θ_f	70% ~ 80% θ_f
I_4	55% ~ 65% θ_f	45% ~ 55% θ_f	55% ~ 65% θ_f
I_5	55% ~ 65% θ_f	55% ~ 65% θ_f	55% ~ 65% θ_f
I_6	55% ~ 65% θ_f	55% ~ 65% θ_f	70% ~ 80% θ_f

试验用聚乙烯塑料桶(上部开口内径 35 cm,底部内径 26 cm,高 29 cm)中进行,每桶装土 20 kg。桶内旁边各置放两个内径 2 cm 的 PVC 管用于供水(管上打小孔用于渗水,底部与四周均有细塑料纱网布包裹),这样可以防止土壤因灌水而引起的土壤板结。

2011 年 4 月 6 日每盆各播 6 粒已催芽种子,待长到两叶一心期,4 月 15 日间苗,每桶留长势均匀植株 2 株。其中 4 月 28 日开始拔节前期控水,5 月 7 日结束(播种后 22 ~ 31 d);5 月 8 日开始拔节后期 ~ 孕穗期控水,5 月 17 日结束(播种后 32 ~ 41 d);5 月 18 日开始孕穗期 ~ 抽雄期控水,5 月 27 日结束(播种后 42 ~ 51 d)。各处理水分控制之前土壤水分保持在 65% ~ 75% θ_f 的范围内,水分处理后按表 1 进行水分控制。用称质量法确定每次灌水量,苗期间隔 3 d 称 1 次,拔节前期以后隔 2 d 称 1 次,用量筒量取灌水量,并记下各处理灌水量[13]。6 月 26 日试验结束。

此外,由于盆栽试验玉米自然授粉较困难,需要人工授粉,人工授粉方法见文献[12]。

1.3　测定项目和方法

叶面积分别在拔节期、孕穗期和开花期量每张

绿叶长度与最大宽度,并将它们相乘再乘以经验系数 0.75[14],然后将所有叶片面积相加获得。根据每次桶质量变化计算耗水量,总耗水量是从播种至收获的耗水量。当雄花开放 10%时为开花期开始,雌穗丝出现时为吐丝期开始,并计算出苗至开花天数以及开花至吐丝天数。

玉米收获后采集各处理鲜穗、地上部和根系,然后将它们放入烘箱在 105℃杀青 30 min 后于 65℃烘干至恒质量,并将地上部干物质量和根系干物质量相加得到总干物质量。干子粒产量是从烘干玉米穗中将子粒脱下,重新烘干称重获得。水分利用效率分别用下述公式计算[15]:

以干物质为基础的水分利用效率

$$WUE_t(\mathrm{kg\cdot m^{-3}}) = \frac{\text{总干物质量}}{\text{耗水量}}$$

以干子粒产量为基础的水分利用效率

$$WUE_s(\mathrm{kg\cdot m^{-3}}) = \frac{\text{干子粒产量}}{\text{耗水量}}$$

1.4 统计分析

试验数据方差分析用 SPSS 17.0 统计软件程序中通用线性模型单因素变量法进行分析,包括不同生育期亏水组合(简称水分亏缺)、施肥水平以及两者之间的交互效应。多重比较用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 水分亏缺与施肥水平对糯玉米叶面积的影响

表 2 方差分析结果表明,不同生育期亏水组合(以下简称水分亏缺)对糯玉米拔节期和孕穗期叶面积的影响不显著,但对开花期叶面积的影响显著($P<0.05$)。相同施肥条件下,与正常灌水(I_0)相比,除 F_1 时 I_1 处理以及 F_2 时 I_1、I_2、I_3 和 I_4 处理显著降低开花期叶面积外,其它条件下,亏水处理不显著降低开花期叶面积。施肥水平对糯玉米各生育期叶面积的影响显著,相同水分条件下,与不施肥(F_0)相比,糯玉米拔节期、孕穗期、开花期叶面积分别提高 1.5%~4.9%、21.0%~24.3%和 40.0%~43.6%。此外,施肥水平与水分亏缺交互作用之间对糯玉米各生育期玉米叶面积的影响不显著($P>0.05$)。

2.2 水分亏缺与施肥水平对糯玉米生育期天数的影响

表 2 方差分析结果表明,施肥水平对糯玉米出苗至开花天数的影响显著,而水分亏缺和水分亏缺与施肥水平之间交互作用对糯玉米出苗至开花天数的影响不显著。与 I_0 相比,F_1 时 I_1 处理缩短糯玉米出苗至开花天数 2.1 d,其它条件下,亏水处理不显著影响出苗至开花天数。

玉米开花至吐丝时间长短会影响雄粉活力、雌穗授粉效率及穗子粒数,进而影响玉米产量。由表 2 看出,水分亏缺、施肥水平以及它们之间的交互作用糯玉米开花至吐丝时天数的影响显著或极显著($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。与 I_0 相比,F_1 时 I_6 处理缩短玉米开花至吐丝天数 1.5 d、F_2 和 F_3 时 I_1 处理分别延长玉米开花至吐丝天数 1.6 d 和 1.5 d,而其它条件下,亏水处理则不显著影响糯玉米开花至吐丝天数。与 F_0 相比,F_1、F_2 和 F_3 处理糯玉米开花至吐丝天数分别缩短 0.7 d、1.0 d 和 1.0 d。

2.3 水分亏缺与施肥水平对糯玉米总干物质量和产量的影响

表 3 方差分析结果表明,水分亏缺和施肥水平对糯玉米总干物质量的影响极显著和显著($P<0.01$或 0.05),而它们之间交互作用对糯玉米总干物质量的影响不显著($P>0.05$)。与 I_0 相比,F_2 时 I_1、I_3、I_4、I_5 和 I_6 处理明显降低糯玉米总干物质量,而其它条件下,亏水处理则不显著影响糯玉米总干物质量。与 F_0 相比,F_1、F_2 和 F_3 处理糯玉米总干物质量分别提高 25.9%、37.7%和 19.5%(表 3)。

施肥水平对糯玉米干子粒产量的影响显著($P<0.05$),与 F_0 相比,I_0 时 F_1 和 F_2 处理糯玉米干子粒产量分别提高 64.7%和 65.8%;I_2 和 I_5 时 F_2 处理分别提高 64.2%和 48.9%;I_6 时 F_1 和 F_2 处理分别提高 63.5%和 78.4%,不同亏水处理时 F_1,F_2 和 F_3 干子粒产量分别提高 41.9%、50.0%和 6.2%,而其它条件下,施肥并不明显增加糯玉米干子粒产量。水分亏缺、水分亏缺与施肥交互作用对糯玉米干子粒产量的影响不显著($P>0.05$),说明不同亏水处理糯玉米干子粒产量与 I_0 之间差异不明显。

2.4 水分亏缺与施肥水平对糯玉米耗水量和水分利用效率的影响

表 3 方差分析结果表明,水分亏缺、施肥水平以及它们之间的交互作用对糯玉米总耗水量的影响均极显著($P<0.01$)。与 I_0 相比,F_0 时 I_1 处理,F_1 时 I_1 和 I_2 处理,以及 F_2 时 I_1 至 I_6 处理糯玉米总耗水量分别降低 7.3%、10.8%、9.0%、15.0%、9.7%、9.1%、16.5%、12.5%和 8.6%,而其它条件下,亏水处理不显著影响糯玉米总耗水量。与 F_0 相比,I_0 时 F_1 和 F_2 处理糯玉米总耗水量分别增加 7.3%和 12.7%;I_3 和 I_6 时 F_3 处理糯玉米总耗水量分别降低 7.0%和 9.2%;而其它条件下,施肥并不明显增加或降低糯玉米总耗水量。

表 2　水分亏缺与施肥水平对糯玉米叶面积和生育期天数的影响

Table 2　Effect of water deficit and fertilization level on leaf area and days of growing stage to sticky maize

施肥水平 Fertilization level(FL)	水分亏缺 Water deficit (WD)	叶面积 Leaf area/cm²			出苗至开花天数/d Days from seedling to flowering	开花至吐丝天数/d Days from flowering to silking
		拔节期 Joining stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage		
F_0	I_0	1145 ± 50 c	1865 ± 81 g	2611 ± 137 e	55.8 ± 0.3 a	1.7 ± 0.3 abc
	I_1	1171 ± 19 bc	2036 ± 43 fg	2822 ± 75 e	53.7 ± 1.0 c	2.7 ± 0.3 a
	I_2	1148 ± 33 c	1919 ± 88 fg	2645 ± 118 e	54.7 ± 0.5 abc	1.8 ± 0.3 abc
	I_3	1218 ± 6 abc	2126 ± 49 ef	2969 ± 59 e	54.0 ± 0.1 abc	2.5 ± 0.2 ab
	I_4	1202 ± 36 abc	1859 ± 48 g	2836 ± 112 e	55.2 ± 0.3 abc	1.7 ± 0.3 abc
	I_5	1214 ± 33 abc	2060 ± 41 fg	2733 ± 96 e	54.3 ± 0.3 abc	2.7 ± 0.4 a
	I_6	1184 ± 35 abc	2025 ± 84 fg	2723 ± 65 e	55.0 ± 0.7 abc	2.5 ± 0.4 ab
F_1	I_0	1229 ± 21 abc	2459 ± 25 abcd	4173 ± 41 ab	54.5 ± 0.5 abc	1.8 ± 0.2 abc
	I_1	1229 ± 28 abc	2370 ± 54 bcd	3655 ± 112 d	54.5 ± 0.2 abc	1.3 ± 0.2 bcd
	I_2	1220 ± 36 abc	2403 ± 81 abcd	3986 ± 72 abcd	54.8 ± 0.4 abc	1.2 ± 0.4 bcd
	I_3	1196 ± 28 abc	2418 ± 75 abcd	4020 ± 124 abcd	53.6 ± 0.7 c	1.4 ± 0.5 abcd
	I_4	1283 ± 27 abc	2535 ± 52 abc	4105 ± 153 ab	54.3 ± 0.3 abc	2.5 ± 0.6 ab
	I_5	1324 ± 46 a	2603 ± 75 a	3978 ± 137 abcd	54.7 ± 0.6 abc	1.8 ± 0.5 abc
	I_6	1209 ± 31 abc	2408 ± 60 abcd	3858 ± 109 bcd	55.0 ± 0.4 abc	0.3 ± 0.3 d
F_2	I_0	1230 ± 68 abc	2594 ± 75 ab	4292 ± 89 a	54.5 ± 0.5 abc	0.7 ± 0.2 cd
	I_1	1241 ± 35 abc	2457 ± 64 abcd	3807 ± 103 bcd	53.7 ± 0.6 c	2.3 ± 0.7 ab
	I_2	1208 ± 27 abc	2428 ± 35 abcd	3881 ± 77 bcd	54.3 ± 0.2 abc	1.0 ± 0.4 cd
	I_3	1189 ± 25 bc	2426 ± 35 abcd	3788 ± 145 bcd	54.5 ± 0.4 abc	1.0 ± 0.4 cd
	I_4	1236 ± 21 abc	2461 ± 27 abcd	3887 ± 126 bcd	54.0 ± 0.3 bc	1.5 ± 0.3 abcd
	I_5	1207 ± 49 abc	2407 ± 63 abcd	3920 ± 92 abcd	54.7 ± 0.5 abc	0.8 ± 0.4 cd
	I_6	1210 ± 25 abc	2486 ± 35 abcd	4055 ± 108 abc	54.7 ± 0.5 abc	0.8 ± 0.4 cd
F_3	I_0	1206 ± 60 abc	2458 ± 127 abcd	4051 ± 209 abc	54.3 ± 0.3 bc	0.8 ± 0.3 cd
	I_1	1148 ± 45 c	2303 ± 80 de	3684 ± 131 cd	55.0 ± 0.5 abc	2.3 ± 2.6 ab
	I_2	1159 ± 37 bc	2313 ± 70 cde	3826 ± 103 bcd	55.4 ± 0.5 ab	1.2 ± 0.4 bcd
	I_3	1164 ± 47 bc	2344 ± 92 cd	3884 ± 135 bcd	55.5 ± 0.4 ab	0.8 ± 0.3 cd
	I_4	1246 ± 39 abc	2483 ± 35 abcd	3900 ± 113 bcd	54.5 ± 0.3 abc	1.0 ± 0.0 cd
	I_5	1248 ± 59 abc	2472 ± 107 abcd	4049 ± 86 abc	55.2 ± 0.4 abc	0.8 ± 0.3 cd
	I_6	1234 ± 30 abc	2441 ± 48 abcd	3808 ± 138 bcd	55.5 ± 0.2 ab	1.3 ± 0.4 bcd
显著性检验 (*P* 值) Significant level (*P* value)	施肥水平(FL)	0.035	< 0.001	< 0.001	0.037	< 0.001
	水分亏缺(WD)	0.124	0.259	0.048	0.200	0.009
	FL × WD	0.853	0.062	0.074	0.293	0.011

注:表中数值为平均值 ± 标准差,同一列不同小写字母者表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Values are average ± standard errors, different small letters in the same column are significantly different($P < 0.05$). The same as below.

施肥水平对糯玉米以干物质为基础水分利用效率(WUE_t)和以干子粒产量为基础的水分利用效率(WUE_s)的影响极显著($P < 0.01$)。相同水分条件下,各施肥处理均比不施肥处理提高糯玉米 WUE_t(表 3)。与 F_0 相比,I_0 时 F_1、F_2 和 F_3 处理糯玉米 WUE_t 分别提高 26.7%、40.9%和 30.8%,I_1 时分别提高 20.2%、25.6% 和 20.8%,I_2 时分别提高 19.5%、48.9%和 25.9%,I_3 时分别提高 25.8%、33.2%和 22.0%,I_4 时分别提高 21.1%、27.1%和 25.0%,I_5 时分别提高 14.9%、26.3%和 27.3%,I_6 时分别提高 21.4%、31.3%和 17.6%。不同亏水处理时 F_1、F_2 和 F_3 的平均 WUE_t 分别提高 21.2%、33.1%和 23.7%。

与 F_0 相比,I_0 时 F_1 和 F_2 处理糯玉米 WUE_s 分别提高 54.2%和 47.7%,I_2 时 F_2 处理提高 54.5%;I_3 时 F_1 处理提高 42.1%;I_5 时 F_2 处理提高 50.0%;I_6 时 F_1 和 F_2 处理分别提高 61.2%和 72.4%,而其它条件下,施肥并不明显影响糯玉米 WUE_s(表 3)。

此外,水分亏缺以及施肥水平与水分亏缺之交互作用对糯玉米 WUE_t 和 WUE_s 的影响不显著(表 3),说明亏水处理 WUE_t 和 WUE_s 与正常灌溉之间的差异不显著。

表 3 水分亏缺与施肥水平对糯玉米总干物质量、子粒产量和水分利用的影响

Table 3 Effect of water deficit and fertilization level on total dry mass, seed yield and water use efficiency of sticky maize

施肥水平 Fertilization level(FL)	水分亏缺 Water deficit (WD)	总干物质量 Total dry mass /(g·plant^{-1})	干子粒产量 Seed yield /(g·plant^{-1})	总耗水量 Water consumption /(L·plant^{-1})	WUE_t /(kg·m^{-3})	WUE_s /(kg·m^{-3})
F_0	I_0	53.9 ± 3.3 ghi	18.4 ± 1.3 hijk	16.9 ± 0.5 cdef	3.18 ± 0.12 h	1.07 ± 0.07 cd
	I_1	52.1 ± 2.0 hi	19.8 ± 0.9 efghijk	15.7 ± 0.2 hi	3.32 ± 0.09 gh	1.25 ± 0.04 abcd
	I_2	50.4 ± 1.1 i	17.9 ± 1.1 ijk	16.1 ± 0.4 efghi	3.13 ± 0.002 h	1.10 ± 0.08 cd
	I_3	56.2 ± 0.4 ghi	20.0 ± 1.0 defghijk	17.4 ± 0.1 bc	3.22 ± 0.01 h	1.14 ± 0.06 bcd
	I_4	54.1 ± 0.5 ghi	20.7 ± 0.4 cdefghijk	16.2 ± 0.1 defghi	3.32 ± 0.01 gh	1.27 ± 0.02 abcd
	I_5	58.9 ± 4.6 efghi	19.0 ± 0.9 fghijk	16.7 ± 0.1 cdefgh	3.50 ± 0.25 fgh	1.12 ± 0.04 bcd
	I_6	54.7 ± 1.9 ghi	16.7 ± 2.6 jk	16.9 ± 0.3 cdefg	3.23 ± 0.06 h	0.98 ± 0.16 d
F_1	I_0	73.5 ± 3.1 bcd	30.3 ± 3.0 a	18.1 ± 0.3 ab	4.03 ± 0.11 bcde	1.65 ± 0.14 a
	I_1	65.0 ± 5.6 cdefg	26.1 ± 4.0 abcdefghi	16.2 ± 0.4 defghi	3.99 ± 0.25 bcdef	1.58 ± 0.21 ab
	I_2	62.5 ± 8.4 defgh	22.0 ± 3.7 abcdefghijk	16.5 ± 0.7 cdefgh	3.74 ± 0.35 efg	1.30 ± 0.17 abcd
	I_3	70.8 ± 1.9 bcd	28.6 ± 1.0 abcd	17.4 ± 0.2 bc	4.05 ± 0.10 bcde	1.62 ± 0.06 a
	I_4	69.5 ± 2.4 bcde	26.4 ± 2.0 abcdefghi	17.2 ± 0.2 bcde	4.02 ± 0.11 bcde	1.52 ± 0.12 abc
	I_5	70.6 ± 1.5 bcd	27.3 ± 4.1 abcdefg	17.5 ± 0.2 bc	4.02 ± 0.05 bcde	1.54 ± 0.22 abc
	I_6	67.0 ± 0.4 cdef	27.3 ± 0.6 abcdefg	17.0 ± 0.1 bcdef	3.92 ± 0.03 cdef	1.58 ± 0.04 ab
F_2	I_0	85.7 ± 4.6 a	30.5 ± 2.9 a	19.0 ± 0.2 a	4.48 ± 0.18 ab	1.58 ± 0.14 ab
	I_1	67.9 ± 3.4 cde	26.6 ± 0.7 abcdefgh	16.2 ± 0.3 defghi	4.17 ± 0.12 bcde	1.63 ± 0.02 a
	I_2	80.4 ± 4.7 ab	29.4 ± 0.5 abc	17.2 ± 0.2 bcde	4.66 ± 0.32 a	1.70 ± 0.03 a
	I_3	74.4 ± 0.8 bc	27.5 ± 2.0 abcdef	17.3 ± 0.3 bcd	4.29 ± 0.09 abcd	1.57 ± 0.09 ab
	I_4	67.3 ± 1.5 cdef	26.4 ± 0.9 abcdefghi	15.9 ± 0.2 fghi	4.22 ± 0.12 abcde	1.64 ± 0.04 a
	I_5	74.1 ± 3.2 bcd	28.3 ± 0.7 abcde	16.7 ± 0.1 cdefgh	4.42 ± 0.17 abc	1.68 ± 0.05 a
	I_6	74.2 ± 2.1 bc	29.8 ± 1.2 ab	17.4 ± 0.2 bc	4.24 ± 0.07 abcde	1.69 ± 0.05 a
F_3	I_0	67.3 ± 4.1 cdef	21.2 ± 3.3 bcdefghijk	16.1 ± 0.6 efghi	4.16 ± 0.11 bcde	1.28 ± 0.15 abcd
	I_1	63.5 ± 4.5 cdefg	21.4 ± 2.4 bcdefghijk	15.7 ± 0.3 ghi	4.01 ± 0.21 bcde	1.34 ± 0.13 abcd
	I_2	63.4 ± 3.5 cdefg	18.6 ± 3.4 ghijk	16.0 ± 0.5 fghi	3.94 ± 0.15 cdef	1.14 ± 0.21 bcd
	I_3	63.7 ± 3.2 cdef	16.0 ± 4.0 jk	16.2 ± 0.3 defghi	3.93 ± 0.13 cdef	0.97 ± 0.23 d
	I_4	66.4 ± 2.8 cdef	24.6 ± 1.5 abcdefghij	15.9 ± 0.4 fghi	4.15 ± 0.11 bcde	1.53 ± 0.10 abc
	I_5	71.8 ± 1.4 bcd	23.2 ± 4.9 abcdefghijk	16.5 ± 0.1 cdefgh	4.33 ± 0.05 abc	1.38 ± 0.29 abcd
	I_6	58.6 ± 3.8 fghi	15.7 ± 4.5 k	15.3 ± 0.6 i	3.80 ± 0.11 def	0.99 ± 0.26 d
显著性检验 (*P* 值) Significant level (*P* value)	施肥水平(FL)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	水分亏缺(WD)	0.014	0.532	< 0.001	0.259	0.373
	FL × WD	0.183	0.580	0.004	0.602	0.648

注：WUE_t 是以干物质为基础的水分利用效率，WUE_s 是以干子粒产量为基础的水分利用效率。

Note: WUE_t is water use efficiency on the basis of total dry mass, WUE_s is water use efficiency on the basis of dry seed yield.

3 讨论与结论

本研究表明，与正常灌水相比，中肥水平时拔节前期～孕穗期中度亏水(I_2)明显降低总耗水量而不显著影响糯玉米总干物质量、干子粒产量、WUE_t 和 WUE_s，但是该处理 WUE_t 和 WUE_s 稍高于其它亏水处理。以往研究表明，当拔节期至成熟期土壤相对含水率为 60% θ_f 时(轻度亏水)，玉米单株生物量降低 17.8%，子粒产量降低 3.9%，而以子粒产量为基础的 WUE 提高 13.6%[16]。韦彩会等[13]发现，拔节期和抽雄期轻度亏水处理玉米干物质总量下降或增加不明显，而 WUE 增加也不明显。寇明蕾等[17]指出，当苗期和拔节期土壤相对含水率大于 55% 时，夏玉米干物质积累下降不明显，且复水后产生明显的补偿效应，并提高 WUE。刘树堂等[18]认为，玉米营养生长阶段轻度亏水不显著降低叶面积和干物质积累，这些研究结果与本研究结果相似。此外，除拔节期到孕穗期中度亏水结合孕穗期～抽雄期轻度亏水(I_1)处理明显延长平均糯玉米开花至吐丝天数，而其它亏水处理不显著延长开花至吐丝天数。这可能是 I_1 处理长时间亏水会影响糯玉米雌雄穗分化和生长，从而延长开花至吐丝天数。而白向历等[6]指出，苗期和拔节期水分胁迫 7 d 并不明显延迟开花至吐丝天数。

(下转第 126 页)

冬小麦生长的影响[J].西北农业学报,2010,19(12):41-47.
[6] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
[7] 刘合明,杨志新,刘树庆.不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨[J].生态环境,2008,17(5):2046-2049.
[8] 徐明岗,于 荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.
[9] 潘福霞,鲁剑巍,李小坤,等.不同施肥量对绿肥产量和养分积累的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(2):158-162.
[10] 童朝阳,韩丽梅,鞠会艳,等.大豆专用肥对轮作、连作大豆土壤酶活性和有效养分的影响[J].土壤肥料,2001,(3):17-29.
[11] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993,155/156:399-402.
[12] 焦 彬,顾申荣,张学上.中国绿肥[M].北京:农业出版社,1986:188-189.
[13] 张学上,封金玲,赵俊杰.几种豆科绿肥作物不同生育期养分和品质的变化对压青肥效的影响[J].陕西农业科学,1980,(5):6-9,28.
[14] McCauley A M, Jones C A, Miller P R, et al. Nitrogen fixation by pea and lentil green manures in a semi-arid agroecoregion: effect of planting and termination timing[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012,92(3):305-314.
[15] 李 婧,张达斌,王 峥,等.施肥和绿肥翻压方式对旱地冬小麦生长及土壤水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):136-142.
[16] 彭 琳,彭祥林,卢宗凡.塿土旱地土壤硝态氮季节性变化与夏季休闲的培肥增产作用[J].土壤学报,1981,18(3):212-222.
[17] 樊 军,郝明德,党廷辉.旱地长期定位施肥对土壤剖面硝态氮分布与累积的影响[J].土壤与环境,2000,9(1):23-26.
[18] Malhi S S, Johnston A M, Loeppky H, et al. Immediate effects of time and method of alfalfa termination on soil mineral nitrogen, moisture, weed control, and seed yield, quality, and nitrogen uptake[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007,30(7):1059-1081.

(上接第118页)

本研究表明,与不施肥(F_0)相比,施肥明显提高糯玉米孕穗期和开花期叶面积、总干物质量、干子粒产量、WUE_t 和 WUE_s,并缩短玉米开花至吐丝天数为0.7~1.0 d,其中中肥水平(F_2)处理糯玉米总干物质量、干子粒产量、WUE_t 和 WUE_s 分别提高37.7%、50.0%、33.1%和45.1%。陈静静等[11]认为,施氮显著增加玉米产量和WUE。詹其厚和陈杰[19]也指出,水氮配合可以提高玉米WUE 70%左右。此外,与不施肥处理相比,施肥处理缩短糯玉米开花至吐丝期天数。因此,中肥水平时(N、P_2O_5、K_2O 分别为0.25、0.10、0.25 $g\cdot kg^{-1}$)糯玉米拔节前期~孕穗期进行中度亏水效果较好。

参 考 文 献:

[1] 鲍巨松,杨成书,薛吉全,等.不同生育时期水分胁迫对玉米生理特性的影响[J].作物学报,1991,17(4):261-266.
[2] 祁有玲,张富仓,李开峰.水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响[J].应用生态学报,2009,20(10):2399-2405.
[3] 石 喜,王密侠,姚雅琴,等.水分亏缺对玉米植株干物质累积、水分利用效率及生理指标的影响[J]. 干旱区研究,2009,26(3):238-242.
[4] 邢英英,张富仓,王秀康.不同生育期水分亏缺灌溉和氮营养对玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(6):1-6,11.
[5] 谭国波,赵立群,张丽华,等.玉米拔节期水分胁迫对植株性状、光合生理及产量的影响[J]. 玉米科学,2010,18(1):96-98.
[6] 白向历,孙世贤,杨国航,等.不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J].玉米科学,2009,17(2):60-63.
[7] 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.
[8] Ogola J B O, Wheeler T R, Harris P M. Effects of nitrogen and irrigation on water use of maize crops[J]. Field Crops Research, 2002,78(2/3):105-117.
[9] Pandey R K, Maranville J W, Admou A. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: Ⅰ. Grain yield and yield components[J]. Agricultural Water Management, 2000,46(1):1-13.
[10] Pandey R K, Maranville J W, Chetima M M. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: Ⅱ. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction [J]. Agricultural Water Management, 2000,46(1): 15-27.
[11] 陈静静,张富仓,周罕觅,等.不同生育期灌水和施氮对夏玉米生长、产量和水分利用效率的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(1):89-95.
[12] 周英捷,梁燕菲,李伏生.不同时期亏水对糯玉米产量和水分利用的影响[J].玉米科学,2012,20(2):119-123.
[13] 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.
[14] 李余良,郑锦荣,胡建广,等.水分胁迫对甜玉米主要农艺性状及产量的影响[J].中国农学通报,2008,24(9):217-221.
[15] 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[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1539-1545.
[16] 陈倩倩,范阳阳,郝影宾,等.不同土壤水分含量对玉米气孔发育过程和蒸腾耗水量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):76-79,95.
[17] 寇明蕾,王密侠,周富彦,等.水分胁迫对夏玉米耗水规律及生长发育的影响[J].节水灌溉,2008,(11):18-21.
[18] 刘树堂,东先旺,孙朝辉,等.水分胁迫对夏玉米生长发育和产量形成的影响[J].莱阳农学院学报,2003,20(2):98-100.
[19] 詹其厚,陈 杰.水肥配合对玉米产量及其利用效率的影响[J].土壤肥料,2005,(4):14-18.