文章编号:1000-7601(2019)04-0051-07 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.04.07

关键生育期不同灌溉量对甜高粱产量、品质及水分利用效率的影响

解婷婷[1], 单立山[1],苏培玺[2], 赵文智[3]

(1.甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070;2. 中国科学院西北生态环境资源研究院,寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室,甘肃 兰州 730000;
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 临泽内陆河流域研究站/内陆河流域生态水文重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘　要:在甘肃河西走廊荒漠绿洲区甜高粱总灌水量不变的前提下,以每次灌水量相同为对照,设拔节期~孕穗期增加 20%灌水量和开花期~成熟期减少 20%灌水量、拔节期~孕穗期增加 40%灌水量和开花期~成熟期减少 40%灌水量两个处理,研究关键生育期不同灌溉处理对甜高粱生长特性、生物产量、品质和水分利用效率的影响。结果表明:拔节期~孕穗期增加灌水量和开花期~成熟期减少灌水量,甜高粱的株高和茎秆直径均有所升高,且茎秆直径显著提高;同时也显著提高了甜高粱的茎秆和地上生物产量,且拔节期~孕穗期每次灌水 1 050 $m^3 \cdot hm^{-2}$和开花期~成熟期每次灌水 450 $m^3 \cdot hm^{-2}$(拔节期~孕穗期增加 40%,开花期~成熟期减少 40%灌水量)处理下最高,分别为 72.89 $t \cdot hm^{-2}$和 89.04 $t \cdot hm^{-2}$。甜高粱的糖分产量和乙醇产量也有所提高,拔节期~孕穗期每次灌水 1 050 $m^3 \cdot hm^{-2}$和开花期~成熟期每次灌水 450 $m^3 \cdot hm^{-2}$处理下也最高,其糖分产量为 12.47 $t \cdot hm^{-2}$,乙醇产量为 6 842.47 $L \cdot hm^{-2}$;水分利用效率在拔节期~孕穗期增加灌水量和开花期~成熟期减少灌水量处理下也显著提高。这说明在总灌水量不变的情况下,拔节期~孕穗期增大灌溉量 40%,开花期~成熟期减少灌溉量 40%有利于甜高粱生物产量和品质的提高,同时也实现了水分的高效利用。

关键词:甜高粱;灌溉量;生育期;产量;可溶性糖;乙醇产量;水分利用效率

中图分类号:S514　　**文献标志码**:A

Effects of different irrigation quantities at key growth stages on yield, quality and water use efficiency of sweet sorghum

XIE Ting-ting[1], SHAN Li-shan[1], SU Pei-xi[2], ZHAO Wen-zhi[3]

(1. *College of Forestry*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2. *Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions*, *Northwest Ecological and Environmental Resources Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*;
3. *Linze Inland River Basin Research Station/Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin*, *Northwest Ecological and Environmental Resources Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou*, *Gansu* 730000, *China*)

Abstract: By fixing the same amount of total irrigation for sweet sorghum throughout growth season in desert oasis region of Hexi corridor, with equal amount of water during every irrigation (CK) as control, two treatments including 1) increasing 20% of water in jointing stage-flagging stage and decreasing 20% of water in flowering-maturing stage, 2) increasing 40% of water in jointing stage-flagging stage and decreasing 40% of water in flowering-maturing stage, were set up. We studied the effect of variation in the irrigation quantity in key growth stages on the growth parameters, yield, quality, and water use efficiency. The aim was to provide the best water saving irrigation technology, which could be beneficial for increasing productivity and water use of sweet sorghum in the arid region. The results showed that compared with CK, the plant height and stem diameter were all increased and the stem diameter was significantly enhanced by increasing irrigation amount in jointing-booting stage and flowering-maturing

收稿日期:2018-05-03　　**修回日期**:2018-06-06

基金项目:甘肃农业大学学科建设基金项目(GAU-XKJS-2018-108,GAU-XKJS-2018-104);国家自然科学基金(31560135)

作者简介:解婷婷(1982-),女,陕西咸阳人,博士,主要从事植物生理生态研究。E-mail:xieting1026@126.com

通信作者:单立山(1975-),男,湖南衡阳人,硕士生导师,主要从事荒漠植物生理生态研究。E-mail:shanls@gsau.edu.cn

stage. The stem and aboveground biomass yield were also significantly enhanced under regulated deficit irrigation, and reached the highest values of 72.89 t · $hm^{-2}$and 89.04 t · hm^{-2}, respectively, with 1 050 m^3 · hm^{-2} of irrigation water each time in jointing-booting stage and 450 m^3 · hm^{-2} of irrigation amount each time in flowering-maturing stage; The sugar yield and ethanol yield also achieved the highest in this treatment with the value of 12.47 t · hm^{-2} and 6 842.47 L · hm^{-2}, respectively. Meanwhile, water use efficiency was increased with increasing irrigation amount in jointing stage-flagging stage and decreasing irrigation amount in flowering-maturing stage. This showed combination of increasing irrigation water by 40% in jointing stage-flagging stage and decreasing irrigation water by 40% in flowering-maturing stage enhanced biomass yield and quality of sweet sorghum without increasing total irrigation water usage, it also improved water use efficiency.

Keywords: sweet sorghum; irrigation amount; biomass yield; soluble sugar content; ethanol yield; water use efficiency

农业用水的消耗量超过了总淡水的三分之二[1],在全世界的许多地区,灌溉水已经被过度开采和过度使用[2],而且在干旱和半干旱地区农业生产中,为了获得较高的作物产量,当地农民一味地增加灌溉量,从而进一步造成水资源的浪费与短缺。因此,关于研究提高作物产量的最佳灌溉技术就显得尤为重要。目前,关于作物节水灌溉技术的研究已开展了较多的研究[3-5],如 Dminguez 等[6]研究表明,与整个生长时期持续干旱胁迫相比,营养生长阶段的亏缺灌溉使得玉米的籽粒产量提高了10%~20%。Du 等[7]研究得出,与常规灌溉相比,棉花根区交替灌溉可以显著提高其产量与品质。这些研究都表明,一定生育时期的水分亏缺有利于作物产量的提高。

甜高粱具有抗旱、耐涝、耐盐碱等优良特性,对土壤的适应能力很强,适合在新开垦的土地和低产田上种植。目前对甜高粱的研究主要集中在光合特性[8-9]、茎秆成分组成[10]、产量和含糖量[11-13]、遗传多样性和育种[14-16]等方面。甘肃河西走廊荒漠绿洲区光照资源充足,昼夜温差大,有利于甜高粱茎秆糖分的积累,同时该区盐碱地和沙荒地等边际性土地面积较大,已成为我国甜高粱种植的主要生产区域[17]。我们通过对该地区干旱胁迫下甜高粱的产量和水分利用效率的研究,发现中度干旱胁迫下甜高粱的茎秆生物产量显著提高,且其糖含量也增加[9]。然而,由于甜高粱的种植主要是用于饲料或者果葡糖浆的生产,在甜高粱的整个生育期中拔节期~孕穗期是茎秆生长的主要阶段,而开花期~成熟期是糖分积累的关键时期,因此,进一步研究甜高粱关键生育期的节水灌溉技术,对缓解我国干旱区水资源短缺,实现甜高粱产业的持续发展至关重要。本研究在河西走廊荒漠绿洲区,以每次灌溉量相同为对照,研究了拔节期~孕穗期增加灌水量和开花期~成熟期减少灌水量的不同处理对甜高粱产量、品质和水分利用效率的影响,以期获得合理的调亏灌溉方案,进而达到节水、高效、优产的目的。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于甘肃省河西走廊中部黑河中游临泽县北部绿洲边缘,绿洲外为巴丹吉林沙漠南缘延伸带,也称河西走廊沙漠,依赖黑河水,为典型的沙漠绿洲,属于干旱荒漠气候类型, 多年平均降水量 116.8 mm,年蒸发量 2 390 mm,为降水量的 20 多倍;年平均气温 7.6℃,最高气温 39.1℃,最低-27℃,≥10℃年积温为 3 088℃,无霜期 165 d;主风向为西北风,风沙活动集中在 3~5 月份,年均风速 3.2 m · s^{-1},大于 8 级大风日数年均为 15 d;年日照时数为 3 045 h;冻土深度 1.0 m 左右。干旱、高温和多风是其主要气候特点。地带性土壤为灰棕荒漠土。

1.2 试验设计

试验在中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站(39° 21′ N, 100° 02′ E, 1 400 m a.s.l.)进行,该区属于边缘绿洲,为灌溉风沙土。试验小区为用油毡、聚乙烯棚膜和砖及水泥修筑成 4 m×4 m 的防侧渗无底池,侧壁深 1.5 m。试验地土壤为灌溉风沙土,0~20 cm 土层土壤的容重为 1.47 g · cm^{-3},田间持水量为 20.95%。供试材料为甜高粱品种“BJ0601”。2016 年 4 月 25 日播种,采用宽窄行种植,宽行距 60 cm,窄行距 40 cm,株距 18 cm,密度为 11.12×10^4株 · hm^{-2}。出苗后待植株具有 3 片真叶时,进行间苗、定苗。

试验设计根据 2015 年干旱胁迫试验的结果制定,2015 年甜高粱在整个生育时期灌水 8 次,每次灌水定额为 750 m^3 · hm^{-2},总灌水量为 6 000 m^3 · hm^{-2}下的茎秆生物产量和糖分产量最高,2016 年在

总的灌水量不变的前提下,对不同生育阶段采取不同的灌水量处理,拔节期~孕穗期采取增加灌水量的措施,开花期~成熟期则降低灌水量,其它时期每次灌水定额均为 750 $m^3 \cdot hm^{-2}$,整个生育期试验设计如表 1,采取完全随机区组试验设计,每个处理重复 3 次。播种前施氮肥 112 $kg \cdot hm^{-2}$,磷肥 56 $kg \cdot hm^{-2}$,拔节期施氮肥 112 $kg \cdot hm^{-2}$,磷肥 56 $kg \cdot hm^{-2}$,开花期施氮肥 25 $kg \cdot hm^{-2}$。

表 1　甜高粱关键生育时期灌水量设计

Table 1　Treatments of regulated deficit irrigation amount on sweet sorghum growth stages

处理 Treatment	苗期 Seedling stage		拔节期~孕穗期 Jointing-booting stage		开花期~成熟期 Flowering-maturing stage	
	灌水定额 Irrigation amount /($m^3 \cdot hm^{-2}$)	灌水次数 time	灌水定额 Irrigation amount /($m^3 \cdot hm^{-2}$)	灌水次数 time	灌水定额 Irrigation amount /($m^3 \cdot hm^{-2}$)	灌水次数 time
CK	750	2	750	3	750	3
T1	750	2	900	3	600	3
T2	750	2	1050	3	450	3

1.3　观测项目与方法

1.3.1　土壤含水量的测定　每次灌溉后第 2 天对各处理小区进行土壤含水量测定,取 0~60 cm(甜高粱根系主要分布层)深各层土壤(20 cm 为 1 层)的土样使用烘干法测定土壤含水量,重复 3 次。

1.3.2　株高和茎秆直径的测定　收获期,于每个小区选取 10 株生长健康的甜高粱植株,分别对其株高和茎秆直径进行测定,茎秆直径测定的是甜高粱茎秆的第二节。

1.3.3　生物产量的测定　为了排除边际效应,每个小区取样面积为 9 m^2,对所有的甜高粱进行收获,称其鲜重,然后分别从中随机选取 10 株甜高粱,将每株的地上部分分为茎秆、叶片、穗分别进行计产,而后将其分别进行风干,鲜重生物产量经自然风干,在 80℃下烘干至恒重后(约 12 h)称取干重,计算干鲜比,最后得出单位面积甜高粱的地上各部分的生物产量鲜重、干重。

采用水量平衡法计算作物生育期的耗水量:

$$ET = R + B - F \pm Q + \Delta W \qquad (1)$$

式中,R 为降水量,采用附近气象观测场资料;B 为灌水量,通过水表读数得到;F 为地表径流, Q 为上移或下渗量,由于试验在防渗池进行,消除了地表径流的发生和水分上移或下渗的发生,$F = 0$,$Q = 0$;ΔW 为作物收获时与播种时土壤储水量之差,式中各单位均为 mm。

水分利用效率(WUE,$kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)的计算公式如下:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \qquad (2)$$

式中,Y 为甜高粱地上部生物产量($kg \cdot hm^{-2}$);ET 为整个生育期蒸散量(mm)。

1.3.4　糖分的测定　2015 年对生长季末收获的甜高粱经烘干后,称取干重,然后将茎秆、叶片样品分别进行粉碎,利用菲林试剂法[18]分别测定甜高粱茎秆和叶片中的可溶糖含量。

1.4　数据统计分析

通过可溶性总糖估算乙醇产量的公式如下[19]:

乙醇产量($L \cdot hm^{-2}$)= 干物质中可溶性糖(%)×干物质产量($t \cdot hm^{-2}$) ×0.51(糖分中乙醇的换算因子)×0.85(糖分中乙醇的制程效率)×1000/0.79(乙醇密度,$g \cdot mL^{-1}$)。

甜高粱的生物产量和品质的对比分析采用单因子方差分析(one-way ANOVA),同一指标不同处理之间的多重比较采用最小显著极差法(LSD 法),利用 SPSS15.0 软件进行,作图采用 Origin 7.0 软件。

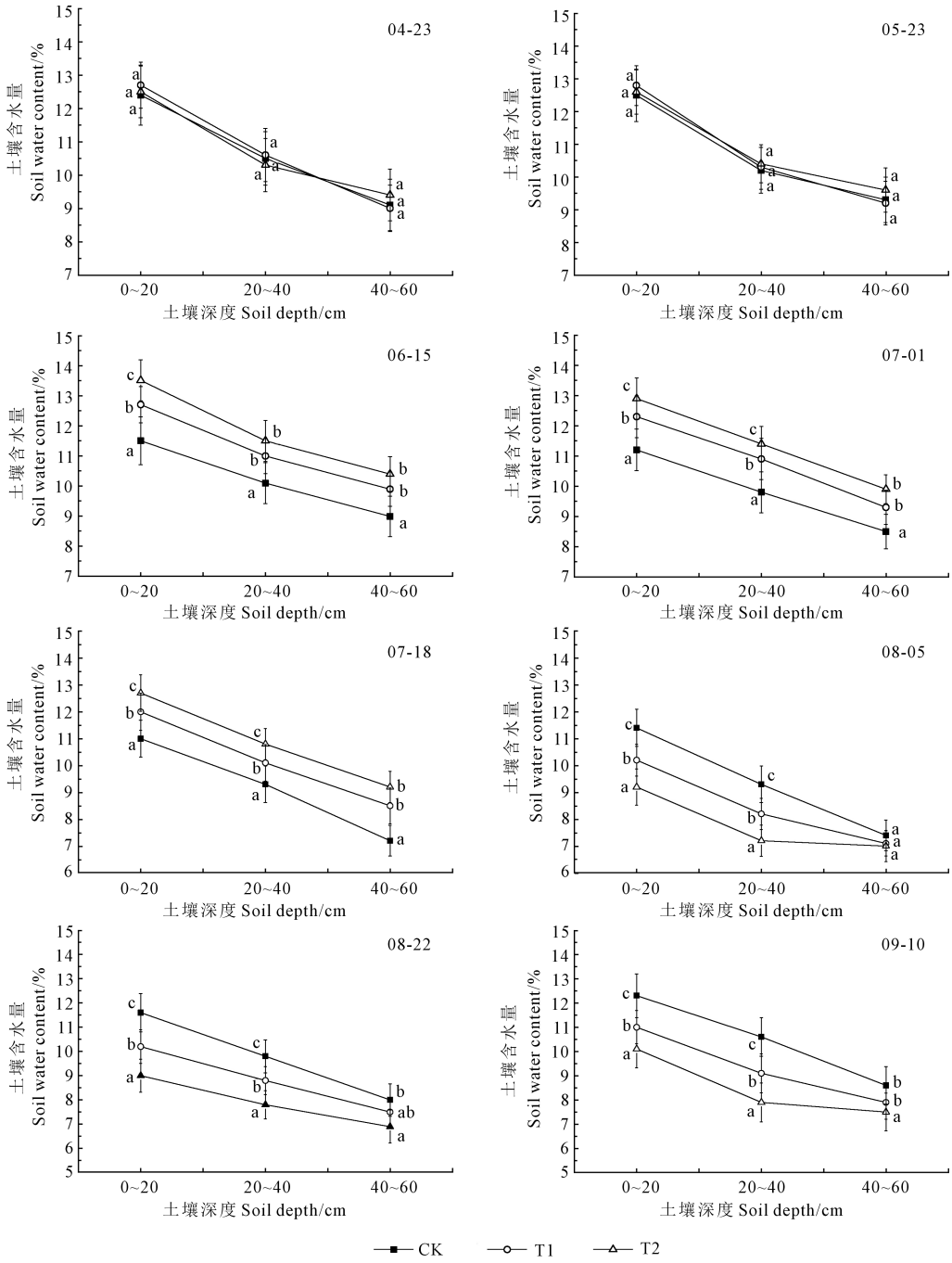
2　结果与分析

2.1　关键生育期不同灌溉量下土壤含水量的变化

从图 1 可以看出,在未进行灌水量处理前,三种处理下各层的土壤含水量不存在显著差异($P > 0.05$)。拔节期~孕穗期增加灌水量处理后(6 月 15 日、7 月 1 日和 7 月 18 日),随着灌水量增加,各层土壤含水量均有所增加,且 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤含水量不同处理间存在显著差异(除 6 月 15 日 20~40 cm 土壤层之外);开花期~成熟期减少灌水量处理后,随着灌水量减少,土壤含水量均有所降低,且 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的不同处理间土壤含水量均存在显著差异,而 40~60 cm 土层对照的土壤含水量显著高于 T2(除 8 月 5 日外)($P<0.05$)。

2.2　关键生育期不同灌溉量对甜高粱株高和茎粗的影响

从图 2 可以看出,收获期三种处理条件下甜高粱的株高分别为 267.9、272.1 cm 和 289.7 cm,与对照相比,T1 和 T2 处理下甜高粱的株高分别增加了 1.57%和 8.14%。方差分析表明,三种处理下甜高粱的株高不存在显著差异($P>0.05$);收获期 CK、T1 和 T2 处理下甜高粱的茎粗分别为 2.61、2.87 cm 和 2.89 cm,与对照相比,T1 和 T2 处理下分别增加了



注:同一土层不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same soil depth indicate significant differnce for different treatment ($P<0.05$).

图 1 甜高粱整个生育时期土壤含水量的变化

Fig.1 Change of soil water content during the whole growth period of sweet sorghum

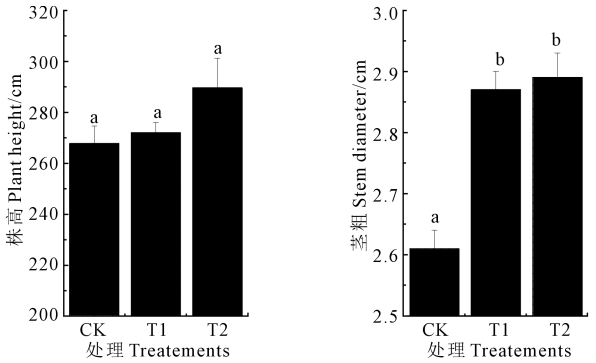
9.97%和 10.73%,差异性分析表明,T1 和 T2 处理下甜高粱的茎粗显著高于对照($P<0.05$)。

2.3 关键生育期不同灌溉量对甜高粱地上生物产量的影响

从表 2 可以看出,收获期甜高粱的茎秆和地上总生物产量鲜重最高的均为 T2,其值分别为 72.89 t·hm^{-2}和 89.04 t·hm^{-2},茎秆生物产量占地上总生物产量的 81.86%;与对照相比,T1 和 T2 处理下甜高粱的茎秆生物产量分别提高了 9.24%和 16.47%,地上总生物产量分别提高了 9.41%和 15.52%。方差分析表明:T2 处理下甜高粱的茎秆和地上总生物产量与对照存在显著差异($P<0.05$);而 T1 和 T2 处理之间不存在显著差异($P>0.05$)。

2.4 关键生育期不同灌溉量对甜高粱糖分产量的影响

对不同调亏灌溉方式下甜高粱的可溶性糖含量研究得出(图 3A),T2 处理下甜高粱茎秆和叶片中可溶性糖含量均最高,分别为 525.59 g·kg^{-1}和



注:不同字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different letters indicate significant differnce (P < 0.05), the same below.

图 2　不同灌溉处理下甜高粱的株高和茎粗

Fig.2　Plant height and stem diameter of sweet sorghum under regulated deficit irrigation

63.72 g · kg^{-1}。与对照相比,T1 处理下茎秆和叶片中的可溶性糖含量分别提高了 15.90%和 8.19%,T2 处理下分别提高了 31.27%和 12.91%。差异性分析表明,三种处理之间甜高粱的茎秆和叶片中可溶性糖含量均存在显著差异(P<0.05)。

通过计算得出,T2 处理下甜高粱的糖分产量也最高(图 3B),为 12.47 t · hm^{-2},其茎秆糖分产量占总的糖分产量的 97.99%;糖分产量最低的为对照,为 8.29 t · hm^{-2},茎秆糖分产量占总的糖分产量的百分比为 97.23%。差异性分析表明,T1、T2 处理下甜高粱糖分产量均显著高于对照(P<0.05)。

2.5　关键生育期不同灌溉量对甜高粱乙醇产量的影响

对不同调亏灌溉方式下甜高粱的乙醇生产力研究得出(图 4),T2 处理下甜高粱的乙醇产量也最高,

表 2　不同灌溉处理下甜高粱的地上生物产量/(t · hm^{-2})

Table 2　Above-ground biomass yield of sweet sorghum under regulated deficit irrigation

处理 Treatment	茎秆 Stem weight	叶片 Leaf weight	穗 Panicle weight	地上总生物产量 Above-ground biomass yield
CK	62.58±3.72a	11.61±0.66a	2.89±0.15a	77.08±4.19a
T1	68.36±2.12ab	12.86±0.61a	3.11±0.34a	84.33±2.74ab
T2	72.89±2.02b	12.65±0.57a	3.51±0.29a	89.04±2.42b

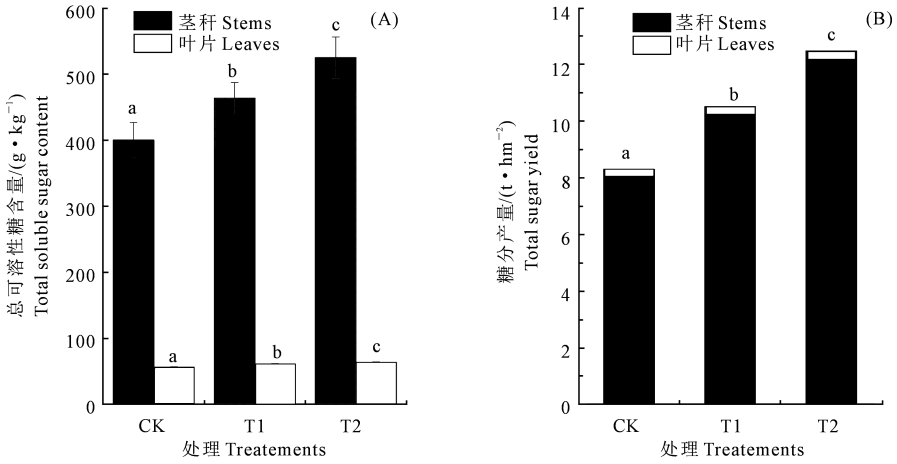


图 3　不同灌溉处理下甜高粱的可溶性糖和糖分产量

Fig.3　Total soluble sugar content and total sugar yield in the stems and leaves of sweet sorghum under regulated deficit irrigation

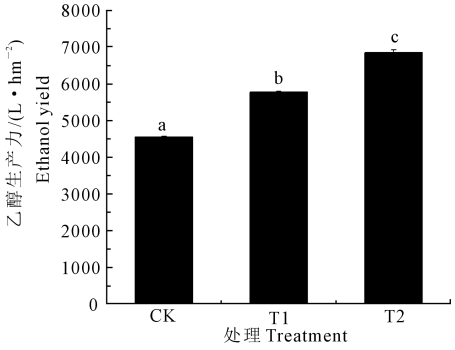


图 4　不同灌溉处理下甜高粱的乙醇生产力

Fig.4　Changes in calculated ethanol yields from sugar of sweet sorghum under regulated deficit irrigation

为 6 842.47 L · hm^{-2},比对照提高了 50.41%;T1 处理下乙醇产量比对照提高了 26.73%;差异性分析表明,三种处理间甜高粱的乙醇产量存在显著差异(P<0.05)。

2.6　关键生育期不同灌溉量对甜高粱水分利用效率的影响

对不同调亏灌溉处理下甜高粱的水分利用效率计算得出(图 5),T2 处理下甜高粱的水分利用效率最高,为 40.7 kg · m^{-3},对照的水分利用效率最低,为 36.1 kg · m^{-3}。与对照相比,T1 和 T2 处理下

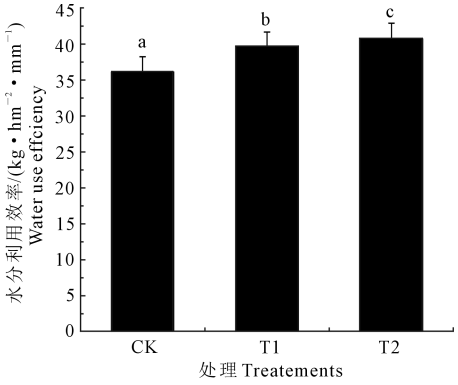


图 5 不同灌溉处理下甜高粱的水分利用效率

Fig.5 Changes in water use efficiency of sweet sorghum under regulated deficit irrigation

甜高粱的水分利用效率分别提高了 9.42% 和 12.74%。差异性分析表明,T1 和 T2 处理下甜高粱的水分利用效率均显著高于对照($P<0.05$)。

3 讨 论

植物在生长过程中受到干旱胁迫时,其体内生理代谢会发生变化,导致生长状况也随之变化[20]。Cui 等[21]研究得出,萌芽~叶片展开期和开花~坐果期,重度与适度的水分亏缺均使得新枝长度、新枝直径和花穗长显著降低;房玉林等[22]研究得出,水分亏缺有效抑制了酿酒葡萄副梢的发生和枝条生长量(冬季修剪量)也明显受到抑制。綦伟等[23]研究表明,适度干旱胁迫可以减少地上部营养器官的生长,提高葡萄的根冠比;严重干旱胁迫时葡萄新稍的生长受到了显著抑制,可见,在生育初期,适度的水分亏缺可以降低植物的营养生长。而在本研究中,在甜高粱的拔节期~孕穗期,增加灌溉量使得作物的株高和茎粗有所增加,且茎粗显著增加,这说明在拔节期~孕穗期这一阶段,增加灌水量有利于促进甜高粱的营养生长。

生育早期轻微的水分亏缺可以提高作物生育后期的抗旱能力,进而保持[24]或者甚至提高作物产量[25]。山仑等[26]研究也得出,一定生育阶段,一定程度的水分亏缺可使禾谷类作物在节约大量用水的同时获得较高产量。然而,生殖生长阶段水分亏缺却显著降低了植物的产量[25,27]。虽然众多研究得出适时适度的水分亏缺可以增加产量,但是水分亏缺在生产中有一定风险性,某些作物在某些生育时期轻度水分亏缺也可造成大幅度减产,如曾爱国[28]对玉米研究得出,随着灌水量降低,全膜垄作沟灌下玉米的产量显著降低,但土壤含水量在灌浆期的差异性却不显著,认为 5 175 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 可以作为石羊河流域全膜垄作沟灌条件下的适宜灌溉量,但灌浆中后期的最后一次灌水应考虑适当降低灌水量。因此确定作物适宜水分亏度是正确实施调亏灌溉的关键因素之一。本研究得出,在总的灌水量不变的情况下,拔节~孕穗期增加灌水量,开花~成熟期降低灌水量的处理显著提高了甜高粱的生物产量,这主要是因为拔节期是甜高粱营养生长的主要时期,该时期增加灌水量有利于甜高粱茎秆的快速生长,从而使得生物产量提高。

水分亏缺对各项品质指标的影响是调亏程度和调亏历时综合作用的结果[29],而且会随着作物种类和品质性状的不同而不同。部分根区水分亏缺可以增加加工番茄的固形物含量,进而提高它的食用性[30];马铃薯块茎生长后期至成熟期的调亏灌溉处理显著提高了适销块茎类的比例[31];Erdem 等[32]在对大田西瓜进行调亏灌溉试验中得出,适宜水分亏缺可提高果实可溶性固形物含量和糖含量,减小瓜皮厚度。然而,调亏灌溉处理下油菜的种子含油量显著降低[33];Kirda 等[34]研究得出调亏灌溉显著减小了番茄果实的大小。可见,调亏灌溉有时可以提高作物品质,有时又会对品质产生相反的影响。本研究得出,在总的灌水量不变的情况下,拔节期增加灌水量,开花期降低灌水量的调亏处理对甜高粱茎秆和叶片中糖分积累具有显著效果,这可能是因为自开花期开始,甜高粱由营养生长开始转入生殖生长,植株体内糖分开始迅速积累,这一时段适当的水分亏缺更有利于甜高粱植株糖分的积累。

4 结 论

与各生育时期灌溉量相同的处理相比,在关键生育时期不同灌水量条件下,甜高粱的茎粗显著增大,茎秆和地上生物产量显著提高,且显著提高了甜高粱的糖分以及水分利用效率。得出拔节期每次灌水 1 050 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 和开花期每次灌水 450 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 的处理,达到了在总灌水量不变的情况下增产、提高水分利用效率、改善品质的综合效应。

参 考 文 献:

[1] Chai Q, Gan Y, Turner N C, et al. Water-saving innovations in Chinese agriculture [J]. Advances in Agronomy, 2014,126(4):147-197.

[2] Gan Y, Siddique K H M, Turner N C, et al. Ridge-furrow mulching systems—an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments [J]. Advances in Agronomy, 2013, 118(1):429-476.

[3] Ma J, Huang G B, Yang D L, et al. Dry matter remobilization and compensatory effects in various internodes of spring wheat under water

stress [J]. Crop Science, 2014, 54(1):331-339.

[4] Xie K, Wang X X, Zhang R, et al. Partial root-zone drying irrigation and water utilization efficiency by the potato crop in semi-arid regions in China [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 134(2):20-25.

[5] 李燕山, 白建明, 许世坤, 等. 不同灌水量对膜下滴灌冬马铃薯生长及水分利用效率的影响[J]. 干旱地 区农业研究. 2015, 33(6): 8-13.

[6] Dominguez A, de Juan J A, Tarjuelo J M, et al. Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies formaize in a semi-arid environment [J]. Agricultural Water Management, 2012, 110(8):67-77.

[7] Du T S, Kang S Z, Zhang J H, et al. Water use and yield responses of cotton to alternate partial root-zone drip irrigation in the arid area of north-west China [J]. Irrigation Science, 2008, 26(2):147-159.

[8] 解婷婷, 苏培玺. 干旱区不同土地类型下甜高粱叶片光合特性和水分利用效率[J]. 中国农业科学,2011, 44(2):271-279.

[9] Xie T T, Su P X. Canopy and leaf photosynthetic characteristics and water use efficiency of sweet sorghum under drought stress[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2012, 59(2):251-261.

[10] Zhao Y L, Dolat A, Steinberger Y,et al. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel [J]. Field Crops Research, 2009, 111(1-2):55-64.

[11] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S,et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3):374-382.

[12] Mastrorilli M, Katerji N, Rana G. Productivity and water use efficiency of sweet sorghum as affected by soil water deficit occurring at different vegetative growth stages[J]. European Journal of Agronomy, 1999, 11(3-4):207-215.

[13] Tewt T L,Cobill R M, Richard E P. Evaluation of sweet sorghum and sorghum × sudangrass hybrids as feedstocks for ethanol production [J]. Bioenergy Research, 2008,1(2):147-152.

[14] Menz M A, Klein R R, Unruh N C,et al. Genetic diversity of public inbreds of sorghum determined by mapped AFLP and SSR markers [J]. Crop Science, 2004, 44(4):1236-1244.

[15] Barnaud A, Monique D, Eric G,et al. Local genetic diversity of sorghum in a village in northern Cameroon: structure and dynamics of landraces[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2007, 114(2): 237-248.

[16] Deu M, Sagnard F, Chantereau J, et al. Niger-wide assessment of in situ sorghum genetic diversity with microsatellite markers[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2008, 116(7):903-913.

[17] 韦瑛. 河西走廊甜高粱产业化发展前景及对策[J]. 中国糖料, 2015, 37(3):72-74.

[18] Hewit B R. Spectrophotometric determination of total carbohydrate [J]. Nature, 1958, 182(4630):246-247.

[19] Institution of Japan Energy. Hua Z Z, Shi Z P (Translators). Biomass Handbook [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2006: 166-167, 172.

[20] 孙宪芝, 郑成淑, 王秀峰. 木本植物抗旱机理研究进展[J]. 西北植物学报, 2007, 27(3):629-634.

[21] Cui N B, Du T S, Li F S, et al. Response of vegetative growth and fruit development to regulated deficit irrigation at different growth stages of pear-jujube tree [J]. Agricultural Water Management, 2009b, 96(8):1237-1246.

[22] 房玉林, 孙伟, 万力, 等. 调亏灌溉对酿酒葡萄生长及果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(13):2730-2738.

[23] 綦伟, 厉恩茂, 翟衡, 等. 部分根区干旱对不同砧木嫁接玛瓦斯亚葡萄生长的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4):794-799.

[24] Liu F L, Shahnazari A, Andersen M N, et al. Effects of deficit irrigation (DI) and partial root drying (PRD) on gas exchange, biomass partitioning, and water use efficiency in potato[J]. Scientia Horticulturae, 20006a,109(2):113-117.

[25] Perez-pastor A, Ruiz-sanchez M C, Domigo R. Effects of timing and intensity of deficit irrigation on vegetative and fruit growth of apricot trees [J]. Agricultural Water Management, 2014, 134(4):110-118.

[26] 山仑,徐萌.节水农业及其生理生态基础[J]. 应用生态学报,1991, 2(1):70-76.

[27] Vandoome B, Mathieu A S, Vanden E W, et al. Water stress drastically reduces root growth and inulin yield in Cichorium intybus (var. sativum) independently of photosynthesis [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(12):4359-4373.

[28] 曾爱国. 灌水量对全膜垄作沟灌玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2017, 35(2):207-212.

[29] Mpelasokap B S, Behboudian M H, Mills T M. Effects of deficit irrigation on fruit maturity and quality of 'Braeburn' apple [J]. Scientia Horticulturea, 2001, 90(3-4):279-290.

[30] Zegbe-Domínguez J A, Behboudian M H, Lang A, et al. Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in 'Petoprid processing tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) [J]. Scientia Horticulturea, 2003, 98(4):505-510.

[31] Shahnazari A, Liu F, Andersen M N, et al. Effects of partial rootzone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions [J]. Field Crops Research, 2007, 100(1): 117-124.

[32] Erdem Y, Yuksela N. Yield response of watermelon to irrigations shortage [J]. Scientia Horticulturae, 2003, 98(4):365-383.

[33] Ghobadi M,Bakhshandeh M, Fathi G, et al. Short and long periods of water stress during different growth stages of Canola (Brassica napus L.): effect on yield, yield components, seed oil and protein contents [J]. Journal of Agronomy, 2006, 5(2):336-341.

[34] Kirda C, Topcu S, Kaman H, et al. Grain yield response and N-fertiliser recovery of maize under deficit irrigation [J]. Field Crops Research, 2005, 93(2-3):132-141.