DOI:10. 13880/j. cnki. 65-1174/n. 2026. 23. 016 文章编号:1007-7383(2026)05-0623-09

水分管理对干旱区滴灌甜菜耗水特征和产量的影响

郝雨辰[1],张丽娟[2],陈浩[1],李想[1],张彦朋[1],樊华[1*]
(1 石河子大学农学院,新疆 石河子 832003;2 定西市农业科学研究院,甘肃 定西 743000)

摘要:本研究旨在探讨水分管理对干旱区滴灌甜菜耗水特征、水分利用效率和产量的影响,明确该区高效水分管理模式。以甜菜品种 Beta 796 和 KWS 3410 为试验材料,开展以甜菜出苗后第一次灌水时间和生育期灌水量为变量的裂区设计,依据土壤水分下限设置 3 个出苗后第一次灌水时间,分别为 T1(70%FC,FC 为田间持水量)、T2(60%FC)和 T3(50%FC),3 个灌水量处理分别为 I1(120%充分灌溉)、I2(100%充分灌溉)和 I3(80%充分灌溉),以 T2I2 处理作为对照,分析灌水时间和灌水量对滴灌甜菜产量和水分利用效率的影响。结果表明,2 个甜菜品种生育期的耗水量均表现为 T1>T2>T3,I1>I2>I3,其中 T3I3 处理耗水量较其他处理降低 2. 25%~20. 38%。水分处理对甜菜品种的产量和水分利用效率影响各异,其中 Beta 796 品种 T3 处理的产量和水分利用效率分别较 T2 处理显著增加 12. 4%和 17. 19%,灌水量处理均表现为 I1>I2>I3;KWS 3410 品种 T1 和 T3 处理的产量较 T2 处理显著增加 4. 84%和 2. 67%,T3 水分利用效率较 T2 增加 6. 81%,灌水量处理均表现为 I3>I1>I2。熵权 TOPSIS 综合评价模型结果显示,Beta 796 的最优组合处理为 T3I3,KWS 3410 的最优组合处理为 T3I1。因此,适当延迟出苗后第一次灌水时间可以提高滴灌甜菜水分利用效率,对于干旱区作物春季用水矛盾具有一定缓解作用。

关键词:甜菜;灌水时间;灌水量;产量;水分利用效率
中图分类号:S566. 3 **文献标志码**:A

Effect of water management on water consumption characteristics and yield of drip-irrigated sugar beet in arid regions

HAO Yuchen[1], ZHANG Lijuan[2], CHEN Hao[1], LI Xiang[1], ZHANG Yanpeng[1], FAN Hua[1*]
(1 Agricultural College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2 Dingxi Academy of Agricultural Sciences, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: The aim of this study is to explore the effects of water management on water consumption characteristics, water use efficiency, and yield of drip-irrigated sugar beets in arid regions, and to determine the optimal irrigation management model. This experiment used two sugar beet varieties with different water sensitivity, Beta 796 and KWS 3410, as experimental materials. A two factor randomized block experiment was conducted with the first irrigation time and irrigation amount during the growth period of sugar beet after emergence as variables. Three different first irrigation times were set up based on the lower limits of soil moisture, namely T1 (70% FC, FC is field water holding capacity), T2 (60% FC), and T3 (50% FC). Three irrigation treatments were I1 (120% full irrigation), I2 (100% full irrigation), and I3 (80% full irrigation). With the T2I2 treatment serving as the control, it studied the effects of irrigation time and amount on drip irrigation sugar beet yield and water use efficiency. The results showed that the water consumption during the growth period of both sugar beet varieties is T1>T2>T3, I1>I2>I3, with T3I3 treatment reducing water consumption by 2. 25% to 20. 38% compared to other treatments. The effects of water treatment on the yield and water use efficiency of sugar beet varieties vary. Among them, the yield and water use efficiency of Beta 796 variety treated with T3 increased significantly by 12. 4% and 17. 19%, respectively, compared to T2 treatment. Among irrigation amount treatments, the order is I1>I2>I3. The yield of KWS 3410 varieties treated with T1 and T3 increased significantly by 4. 84% and 2. 67% compared to T2 treatment, and the water use efficiency of T3 increased by 6. 81% compared to T2 treatment. Among irrigation treatments, the order is I3>I1>I2. The results of the entropy weight TOPSIS comprehensive evaluation model show that the optimal combination treatment for Beta 796 is T3I3, and the optimal combination

收稿日期:2025-11-17
基金项目:国家自然科学基金项目(32360534)
作者简介:郝雨辰(2000—),女,硕士研究生,专业方向为作物生理生态。
*通信作者:樊华(1983—),女,教授,从事作物栽培理论与技术研究,e-mail:fanhua@ shzu. edu. cn。

treatment for KWS 3410 is T3I1. Therefore, delaying the irrigation time appropriately can improve the water use efficiency of drip irrigated sugar beets, which has a certain alleviating effect on the spring water shortage of crops in arid areas.

Key words: sugar beet; irrigation time; irrigation amount; yield; water use efficiency

甜菜(*Beta vulgaris* L.)是全球重要的糖料作物之一,提供世界 30%的糖产量[1]。新疆作为我国甜菜主产区之一,光热资源优势明显,但是受地理环境的影响,水资源短缺且干旱程度季节分布差异显著是限制该区农业发展的主要因素[2]。新疆甜菜一般在四月份播种,此时大田用水矛盾突出,如何结合灌溉制度调整,实现作物节水增产的同时缓解新疆大田作物春季用水矛盾,对于降低干旱造成的作物产量损失具有重要意义。

水分是影响干旱区甜菜生长的关键因素,灌水时间和灌水量作为核心调控手段,直接影响甜菜生长的各项生理过程。适宜的灌水时间可以改善土壤墒情,促进作物出苗及生长,苗期适度控水能促进根系深扎,增强吸水吸肥及抗旱能力,提高作物的水分利用效率[3]。灌水量直接影响作物生长发育、光合特性及干物质积累等[4]。有研究表明,增加灌水量和灌溉次数可提高甜菜的叶面积指数、耗水量和产量,但降低了水分利用效率[5-6];缺水则会导致甜菜气孔关闭、光合下降,抑制甜菜生长与产量形成[7]。也有研究[8]发现,若将土壤水分控制在适当水平,可以显著提高甜菜产糖量和水分利用效率,实现较高的经济效益。在一定条件下,推迟灌水时间可以提高甜菜吸水吸肥和抗旱能力[9]。新疆伊犁部分甜菜种植区因苗期过早灌水导致根系下扎不足,块根地上部分比例过高,含糖率降低[10]。此外,我国甜菜品种多为国外引进,不同品种间农艺性状差异显著,对水分胁迫的抗逆能力也存在较大差异[11],因此找出一种适应我国新疆地区环境条件的甜菜水分管理措施尤为重要。

目前大量学者针对甜菜灌水频率、单一生育阶段或全生育期的灌水定额等方面开展研究,有关甜菜出苗后第一次灌水时间与灌水量互作方面的结果不多。本试验研究水分管理对甜菜耗水特征、产量和水分利用效率的影响,旨在探讨干旱区滴灌甜菜高效水分管理模式,为干旱区滴灌甜菜水分精准管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 4—10 月在新疆维吾尔自治区石河子气象局乌兰乌苏农业气象试验站(44°17′N, 85°49′E)进行,该地位于准噶尔盆地南缘,天山北坡带中心位置,海拔 468.5 m,属于典型的温带大陆性气候,冬季寒冷,夏季炎热,全年降水较少,年降雨量 230.8 mm,年蒸发量 1 605.9 mm。试验地土壤类型为灰漠土,质地为壤土,0~40 cm 土壤容重为 1.29 g·cm^{-3},田间持水量为 21.6%,耕层有机质为 7.10 g·kg^{-1},速效磷 18.11 mg·kg^{-1},速效钾 130.45 mg·kg^{-1},碱解氮 34.32 mg·kg^{-1},前茬作物为苜蓿。

1.2 试验材料

选取在新疆地区广泛种植且生育期一致的甜菜品种 Beta 796 和 KWS 3410[12]作为试验材料。

1.3 试验设计

试验采用裂区设计,依据土壤水分下限设置 3 个出苗后第一次灌水时间,分别为提前灌水 T1(70%FC,FC 为 0~60 cm 土层平均田间持水量)、常规灌水 T2(60%FC)和延迟灌水 T3(50%FC),借助土壤水分平衡法确定灌水量,3 个灌水量处理分别为 I1(120%充分灌溉)、I2(100%充分灌溉)和 I3(80%充分灌溉),以 T2I2 处理作为对照。共 9 个处理,3 次重复。水分管理如图 1 所示。

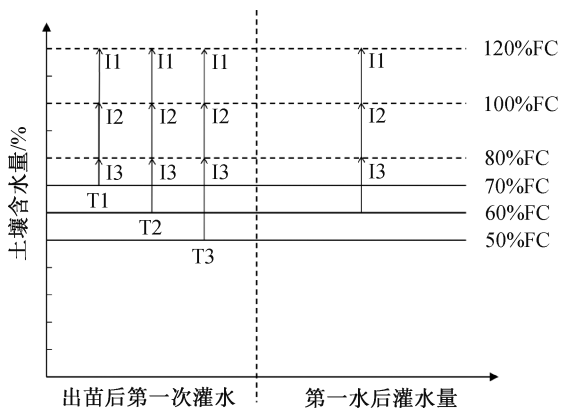


图 1 水分管理示意图

Figure 1 Water management diagram

出苗之后第一次灌水时间依据土壤含水率来确定,通过预埋的水分传感器 Watermark(Spectrum, Illinois, USA),每隔 2 天采集 1 次数据,定期监测 0~60 cm 土层的土壤水势,根据水分特征曲线计算土壤含水量[13-14],分别在土壤含水量达到田间持水量(FC)的 70%、60%、50%时,进行出苗后第一次灌

水时间处理。在首次灌溉完成后,当 T 处理土壤含水率分别下降至 60%FC 时进行第二次灌溉,后续 T 处理的灌水时间与 T2I2 一致,即当 T2I2 处理土壤含水率下降至 60%FC 时进行灌水。I1 和 I3 处理的灌水量,则分别按照 I2 处理灌水量的 120%与 80%来确定。I2 处理净灌水量(D,mm)借助土壤水分平衡法计算,公式如下:

$$D = \sum \frac{1\ 000(FC_i - \theta_i)}{\Delta z}, \tag{1}$$

式中:FC_i 与 θ_i 分别为灌溉前第 i 层土壤的田间持水量以及体积含水量($cm^3 \cdot cm^{-3}$),Δz 为第 i 层土壤的厚度(m)。

试验为大田控制试验,小区面积为 4 m×5 m,株行距配置方式为 20 cm×50 cm。使用 1 管 2 行的滴灌模式供应甜菜水分,各小区之间设置 2 m 的隔离带,防止不同水分处理间相互影响。在播种之前每公顷土地按照大田种植常规施肥量 150 kg N、147 kg P_2O_5 和 105 kg K_2O,作为基肥一次性施入[15]。除了水分管理由表 1 所示外,各处理在其他田间管理措施上均保持一致。

表 1　滴灌甜菜各处理灌水量

Table 1　Irrigation amount of beet under drip irrigation

处理		出苗水/mm	叶丛期/mm	块根膨大期/mm	糖分积累期/mm
灌水时间	灌水量				
T1	I1	97.00	713.00	235.00	145.00
	I2	97.00	641.00	225.00	145.00
	I3	97.00	565.00	210.00	145.00
T2	I1	97.00	618.50	235.00	145.00
	I2	97.00	560.00	225.00	145.00
	I3	97.00	501.50	210.00	145.00
T3	I1	97.00	545.00	235.00	145.00
	I2	97.00	499.00	225.00	145.00
	I3	97.00	453.00	210.00	145.00

2 个甜菜品种于 2021 年 4 月 21 日进行播种,4 月 26 日滴灌 52 mm 出苗水,5 月 4 日出苗。为确保甜菜有较高的出苗率,于 5 月 10 日再次补灌 45 mm,一直到进行水分处理之前,不再进行任何灌溉操作。各处理的首次灌溉时间分别为 T1(6 月 8 日)、T2(6 月 17 日)和 T3(6 月 23 日)。首次灌溉之后,各处理在 6 月 23 日(T1 第二次灌溉)、7 月 6 日(T2、T3 第二次灌溉)、7 月 20 日、8 月 5 日、8 月 24 日、9 月 13 日进行灌溉。10 月 10 日对甜菜进行收获。

1.4　试验观测指标与测定方法

1.4.1　耗水量测定

作物耗水量的估算采用土壤水分平衡法[16],具体计算公式如下:

$$ET_a = I + (R - R_0) - D_p - D_s, \tag{2}$$

式中:ET_a 为实际作物耗水量(mm);I 表示灌溉总量(mm);R 为观测期内自然降水量;R_0 代表地表径流量(mm);D_p 为深层渗漏量(mm);D_s 为 0~60 cm 土层储水量变化量(mm)。鉴于试验田块地势平整,地表径流系数趋近于零,依据灌溉制度设计,每次灌溉后根区(0~60 cm)土壤含水量均控制在田间持水量(FC)以内或等同水平,因此排除深层渗漏发生的可能性,最终简化的耗水量计算公式为:$ET_a = I+R-D_s$。结合土壤水势传感器监测数据、灌溉记录和气象数据进行作物耗水量的动态估算。

1.4.2　耗水模系数和耗水强度测定

耗水模系数(WCP)作为表征作物生育阶段耗水特征的关键指标,通过以下公式进行计算:

$$WCP = \frac{ET_i}{ET_a} \times 100\%, \tag{3}$$

式中:WCP 为某生育阶段耗水量占全生育期的比例(%);ET_i 为特定生育阶段的累计耗水量(mm);ET_a 为甜菜全生育期总耗水量(mm)。

采用耗水强度(DWC)指标对阶段性水分消耗速率的量化分析,其计算方法为:

$$DWC = \frac{ET_i}{d}, \tag{4}$$

式中:DWC 为单位时间的耗水速率($mm \cdot d^{-1}$);ET_i 为该生育阶段的总耗水量(mm);d 为对应生育阶段的持续天数(d)。甜菜生育阶段划分为苗期(苗龄 30~40 d)、叶丛快速生长期(苗龄 40~80 d)、块根膨大期(苗龄 80~130 d)、糖分积累期(苗龄 130~180 d)。

1.4.3　水分利用效率测定

水分利用效率(WUE)作为衡量作物对水资源利用效能的重要参数,其计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{ET_a}, \tag{5}$$

式中:WUE 为每消耗 1 mm 水量时,单位面积所产出的作物产量($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$);$Y$ 为单位面积产量($kg \cdot hm^{-2}$);ET_a 为作物生育期内的耗水量(mm)。

此外,产糖水分利用效率($SWUE$)则用于专门评估以产糖为目标的作物生产过程中,水资源转化为糖产量的效率,其计算方式如下:

$$SWUE = \frac{SY}{ET_a}, \tag{6}$$

式中:$SWUE$ 为每消耗 1 mm 水量,单位面积上所产出的糖量($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$);$SY$ 为单位面积产糖量

($kg\cdot hm^{-2}$);ET_a 为作物耗水量(mm)。

1.4.4 产量及产糖量的测定

在甜菜收获期,每个小区选取 1.5 m^2 的区域,拔出该区域内的所有甜菜进行称重。每个小区从拔出的块根中随机选取 9 株,使用锤度计测定块根蔗糖含量。产糖量的具体计算公式如下:

$$SY = Y \times 含糖率(\%), \tag{7}$$

式中:SY 为甜菜产糖量($t\cdot hm^{-2}$);Y 为甜菜产量($t\cdot hm^{-2}$)。

1.4.5 综合评价方法

试验采用基于熵权法的 TOPSIS 评价模型对不同甜菜种植模式进行综合评价,以产量、产糖量、水分利用效率和产糖水分利用效率 4 个方面作为评价内容,对 9 个评价对象(T1I1、T1I2、T1I3、T2I1、T2I2、T2I3、T3I1、T3I2、T3I3)进行排序。

1)首先对 9 个评价对象($x_i, i=1,2,3,\cdots,n$)和 4 个评价指标($x_j, j=1,2,3,\cdots,n$)构建原始数据矩阵(8)。随后对指标进行标准化处理,一般选择指标正向化,由于本研究中的评价指标均为正向指标,故可略去正向化处理,使用式(9)对各项评价指标进行标准化处理。

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix}, \tag{8}$$

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(x_{ij})^2}}, \tag{9}$$

式中:x_{ij} 为第 i 个评价对象在 j 项评价指标下的平均后的测量值。

2)根据式(10)—式(12)确定评价指标的权重

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}}, \tag{10}$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n} b_{ij}\ln b_{ij}, \tag{11}$$

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{1}^{m}(1-e_j)}, \tag{12}$$

式中:b_{ij} 为第 i 个评价对象在 j 指标下的概率值;e_j 为 j 指标的信息熵值;w_j 为 j 指标的权重。

3)根据式(13)、式(14)将归一化矩阵与各评价指标的权重相乘得到了加权矩阵(z_{ij}^*)。之后根据式(15)使用加权矩阵确定了各评价指标的正、负理想解(Z^+和 Z^-)。

$$z_{ij} = w_j \times a_{ij}, \tag{13}$$

$$w_{ij}^* = \begin{bmatrix} a_{11}\times w_1 & \cdots & a_{1m}\times w_j \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1}\times w_1 & \cdots & a_{nm}\times w_j \end{bmatrix}, \tag{14}$$

$$\begin{cases} z_{ij}^{*+} = \max\limits_{n,m}(z_1^{*+}, z_2^{*+}, \cdots, z_m^{*+}), \\ z_{ij}^{*-} = \min\limits_{n,m}(z_1^{*-}, z_2^{*-}, \cdots, z_m^{*-}). \end{cases} \tag{15}$$

4)最后,根据式(16)、式(17)使用正、负理想解确定了各评价对象的欧式距离(D^+和 D^-)和相对接近度(RC),根据 RC 值的大小对各处理进行排序,RC 值越大表明处理越好。

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_j (z_{ij}^* - z_j^{*+})^2}, \\ D_i^- = \sqrt{\sum_j (z_{ij}^* - z_j^-)^2}, \end{cases} \tag{16}$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}. \tag{17}$$

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2021(Microsoft Office)软件对原始数据进行处理,使用 SPSS 27.0(IBM Statistics)软件进行 Duncan 法差异显著性分析($P<0.05$),使用 Origin 2024 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

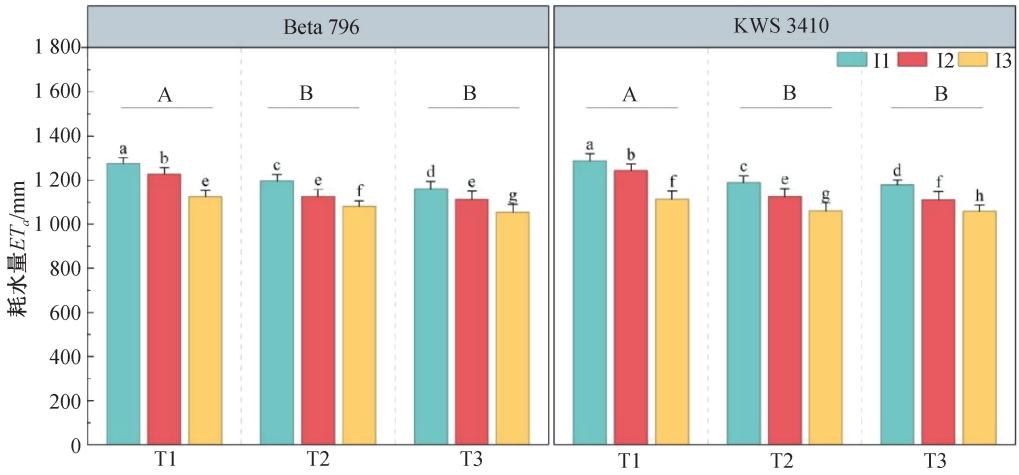
2.1 不同水分管理甜菜耗水量的变化特征

2 个甜菜品种耗水量均随出苗后第一次灌水时间推迟逐渐降低,表现为 T1>T2>T3;同一灌水时间处理下,随着灌水量减少,甜菜耗水量逐渐降低,表现为 I1>I2>I3。甜菜品种 Beta 796 和 KWS 3410 均在 T3I3 处理耗水量最小,较常规水分管理 T2I2 分别降低了 6.42%和 9.14%($P<0.05$)(图 2)。

2.2 不同水分管理甜菜耗水模系数和耗水强度的变化特征

随着甜菜生育进程的推进,耗水模系数(*WCP*)呈下降趋势。随着第一次灌水时间推迟 *WCP* 不断降低,与 T2 相比,T3 处理 Beta 796 和 KWS 3410 分别降低了 16.56%和 11.63%。同一灌水时间条件下,*WCP* 随灌水量减少不断下降,表现为 I1>I2>I3。上述趋势在叶丛期较为明显(图 3)。

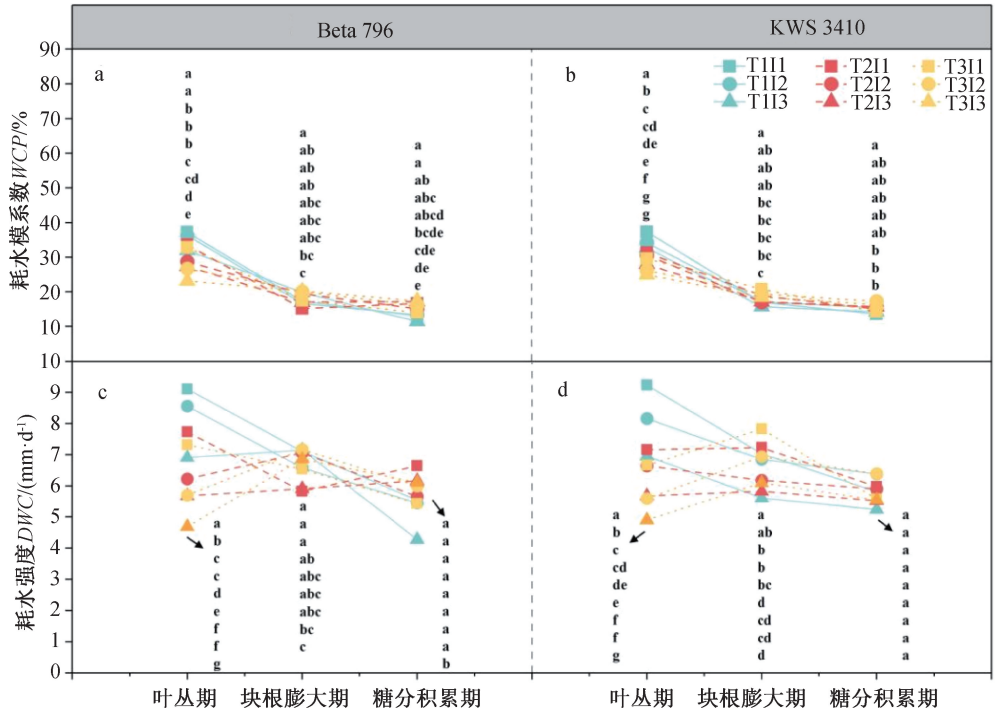
甜菜耗水强度(*DWC*)随第一次灌水时间的推迟,叶丛期表现为 T1>T2>T3,块根膨大期表现为 T2>T3>T1。同一灌水时间条件下,*DWC* 随灌水量减少不断下降,叶丛期和块根膨大期均表现为 I1>I2>I3。糖分积累期各处理之间差异不显著(图 3)。



不同字母表示在 $P<0.05$ 差异显著,其中小写字母代表同一品种不同水分处理间耗水量的差异,大写字母代表同一品种在不同灌水时间下耗水量的差异。

图 2　不同水分管理对甜菜耗水量的影响

Figure 2　The effect of different water management on water consumption of sugar beet



a、b 分别为 Beta 796、KWS 3410 在不同生育时期耗水模系数;c、d 分别为 Beta 796、KWS 3410 在不同生育时期耗水强度;不同小写字母表示同一性状不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$)。

图 3　不同水分管理对甜菜耗水强度和耗水模系数的影响

Figure 3　The effects of different water management on daily water consumption and water consumption percentage of sugar beet

2.3　不同水分管理甜菜水分利用效率和产量的变化特征

第一次灌水时间、灌水量及其互作对水分利用效率(*WUE*)、产糖水分利用效率(*SWUE*)、产量和产糖量影响显著。*WUE* 和 *SWUE* 均随第一次灌水时间推迟不断提高。与 T2 相比,T3 处理条件下 Beta 796 品种分别提高了 17.19% 和 16.02%,KWS 3410 分别提高了 6.81% 和 9.75%。同一灌水时间条件下,*WUE* 和 *SWUE* 随着灌水量的增加在 I3 处理达到最大值。Beta 796 品种产量和产糖量分别在 T3I3 处理和 T3I1 处理达到最大值。KWS 3410 品种产量和产糖量均在 T3I1 处理达最大值。灌水时间对 2 个品种甜菜含糖率无显著影响(表 2)。

表 2 不同水分管理对甜菜产量和水分利用效率的影响

Table 2 The effects of different water management on sugar beet yield and water use efficiency

品种	灌水时间	灌水量	水分利用效率 /(kg·hm^{-2}·mm^{-1})	产糖水分利用效率 /(kg·hm^{-2}·mm^{-1})	产量 /(t·hm^{-2})	含糖率 /%	产糖量 /(t·hm^{-2})
Beta 796	T1	I1	105.79±0.69g	18.60±0.12e	91.02±0.60cd	17.62±0.52a	16.01±0.11d
		I2	119.69±2.73f	19.23±0.44e	97.27±2.22bc	16.11±0.33c	15.63±0.36de
		I3	130.39±0.59e	21.15±0.10d	92.49±0.42cd	16.28±0.84c	15.00±0.07de
	T2	I1	146.10±1.00cd	24.27±0.17c	114.23±0.78a	16.63±0.54bc	18.98±0.13ab
		I2	140.98±7.16d	24.14±1.23c	100.39±5.10b	17.18±0.62ab	17.19±0.87c
		I3	130.65±8.71e	21.99±1.47d	86.68±5.78d	16.82±0.48abc	14.59±0.97e
	T3	I1	152.75±1.66bc	26.17±0.29b	113.96±1.24a	17.11±0.36ab	19.52±0.22a
		I2	157.29±9.54b	26.21±1.59b	109.86±6.67a	16.73±0.42bc	18.31±1.11bc
		I3	179.50±7.93a	29.31±1.30a	114.84±5.08a	16.32±0.61c	18.75±0.83ab
KWS 3410	T1	I1	118.51±6.45e	20.74±1.13c	103.41±5.63bc	17.52±0.16a	18.09±0.99bc
		I2	138.20±4.34d	21.06±0.66c	114.40±3.59b	15.23±0.52e	17.43±0.55c
		I3	166.42±20.25ab	28.37±3.45a	115.25±14.03b	17.06±0.36ab	19.65±2.39b
	T2	I1	145.56±7.77cd	22.93±1.22bc	112.93±6.03b	15.81±0.38de	17.79±0.95bc
		I2	146.53±4.16cd	24.95±0.71b	104.53±2.97bc	17.09±0.54ab	17.8±0.51bc
		I3	156.26±9.55bc	25.16±1.54b	100.29±6.14c	16.14±0.48cd	16.15±0.99c
	T3	I1	174.88±3.45a	29.20±0.58a	128.60±2.54a	16.72±0.39b	21.47±0.42a
		I2	139.18±3.40d	23.08±0.57bc	97.03±2.37c	16.64±0.36bc	16.09±0.39c
		I3	164.83±7.86ab	27.88±1.33a	100.61±4.80c	16.95±0.57ab	17.02±0.81c
灌水时间 T			**	**	**	ns	**
灌水量 I			**	**	**	*	**
灌水时间×灌水量 T×I			**	**	**	**	**

注:T、I 分别表示灌水时间、灌水量;不同小写字母表示同一品种不同水分处理间各指标的差异;* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.001$ 水平的差异显著,ns 表示无显著差异。

2.4 不同生育时期甜菜耗水强度与产量和水分利用效率的相关性分析

基于 2 个甜菜品种不同生育时期耗水强度与产量和水分利用效率进行回归拟合(图 4),2 个甜菜品种叶丛期耗水强度与水分利用效率呈显著负相关($P<0.05$)。结果表明,推迟出苗后第一次灌水时间增加灌水量,降低了叶丛期耗水强度,有利于提高叶丛期水分利用效率。

2.5 不同甜菜水分管理模式的综合评价

选取各处理甜菜的产量、产糖量、水分利用效率和产糖水分利用效率 4 项正向评价指标对不同水分管理模式进行评价,先利用熵权法进行客观赋权,再通过 TOPSIS 模型进行综合评价。

根据相关计算公式得到不同水分管理与正、负理想解的欧式距离(D^+和 D^-)及相对贴近度(RC),RC 值越大表明处理越好,根据 RC 值的大小对各处理进行排序,各水分管理对 Beta 796 影响表现为 T3I3>T3I1>T3I2>T2I1>T2I2>T1I2>T1I3>T2I3>T1I1,对 KWS 3410 影响表现为 T3I1>T1I3>T3I3>T2I1>T2I2>T1I2>T2I3>T1I1>T3I2。

3 讨论

3.1 水分处理对甜菜耗水特征的影响

水分是限制作物生长发育和产量的关键因子[17-18]。灌水量的减少并不总是降低作物产量,适度的水分亏缺能够减少茎和叶的生长冗余,促进光合同化物向最终产物的转移,有利于增产[19],因此适宜的灌溉制度能够在节约农业用水的基础上保证作物产量和品质不受影响。本试验结果表明,延迟出苗后第一次灌水时间与减少灌水量显著降低甜菜生育期的总耗水量,但是延迟出苗后第一次灌水时间和减少灌水量仅对叶丛期耗水模系数和耗水强度影响显著,对甜菜其他生育时期耗水特征的影响并不显著。这与党建友等[20]的研究结果一致,随着冬小麦越冬前灌水时间的延迟,其耗水量不断减少,此外,王振华等[5]的研究表明,随灌水定额的减少,甜菜耗水量逐渐降低。

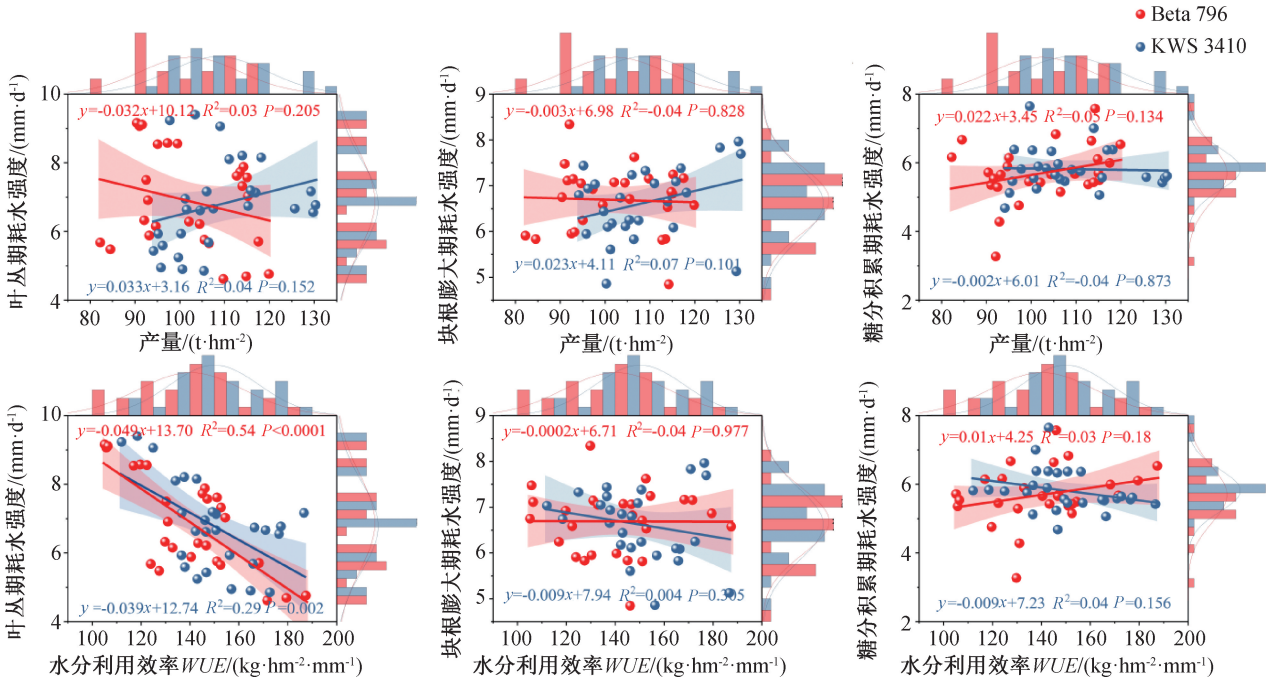


图 4　叶丛期、块根膨大期和糖分积累期耗水强度与产量和水分利用效率的相关性分析

Figure 4　Correlation analysis of daily water consumption during the leaf cluster stage, root enlargement stage and sugar accumulation stage with yield and water use efficiency

表 3　不同水分管理的熵权 TOPSIS 评价模型

Table 3　Entropy-weighted TOPSIS evaluation model for different water management

品种	灌水时间	灌水量	加权标准化矩阵				正负理想解距离		相对接近度	排序
			水分利用效率 *WUE*	产糖水分利用效率 *SWUE*	产量 *Y*	产糖量 *SY*	D_i^+	D_i^-	C_i	
Beta 796	T1	I1	0	0	0.039	0.080	0.444	0.089	0.167	9
		I2	0.038	0.016	0.096	0.059	0.403	0.120	0.229	6
		I3	0.067	0.063	0.053	0.023	0.406	0.109	0.211	7
	T2	I1	0.110	0.141	0.250	0.247	0.158	0.394	0.714	4
		I2	0.096	0.138	0.124	0.146	0.249	0.255	0.506	5
		I3	0.068	0.084	0	0	0.439	0.108	0.197	8
	T3	I1	0.128	0.188	0.247	0.278	0.107	0.436	0.803	2
		I2	0.140	0.189	0.210	0.209	0.128	0.379	0.748	3
		I3	0.201	0.266	0.255	0.234	0.043	0.481	0.917	1
KWS 3410	T1	I1	0	0	0.057	0.117	0.421	0.130	0.236	8
		I2	0.051	0.010	0.155	0.078	0.377	0.182	0.325	6
		I3	0.123	0.232	0.163	0.208	0.164	0.373	0.695	2
	T2	I1	0.069	0.067	0.142	0.100	0.329	0.199	0.376	4
		I2	0.072	0.128	0.067	0.100	0.339	0.190	0.360	5
		I3	0.097	0.135	0.029	0.004	0.423	0.169	0.285	7
	T3	I1	0.145	0.258	0.282	0.315	0	0.516	1	1
		I2	0.053	0.071	0	0	0.471	0.089	0.159	9
		I3	0.119	0.218	0.032	0.054	0.365	0.256	0.412	3

甜菜不同生育时期耗水强度差异显著,本研究发现随着生育进程的推进,T3 处理甜菜耗水强度呈现先增加后降低的趋势,而 T1 和 T2 处理则表现为逐渐降低的趋势。这与赵经华等[21]在玉米上的研究结果不同,不同水分处理春玉米耗水量、日耗水强度和耗水模系数均表现为先升高后降低的变化趋势,这可能与作物的生物学特性有关。甜菜是直根系作物,苗期是甜菜根系构型建成的关键期,当土壤水分降至田间持水量的 50%~60%(T3 处理)时进行首次灌溉,干旱胁迫信号会诱导甜菜将更多的光

合产物分配给根系,进而促进根系下扎,增强了甜菜中后期吸收深层土壤水的能力,这种“趋水性”生长策略是对干旱环境的有效适应[22]。

3.2 水分处理对甜菜产量和水分利用效率的影响

水分利用效率是综合反映作物对水分利用程度的量化指标,能直观反映不同水分处理对甜菜生长的影响[23]。本研究发现,水分管理模式显著影响甜菜产量和水分利用效率,不同品种表现各异。甜菜品种 Beta 796 的产量随出苗后第一次灌水时间的延迟和灌水量的增多而提高,水分利用效率随灌水时间的延迟和灌水量的减少而上升,KWS 3410 则呈现不规则的变化趋势。2 个甜菜品种的产量和水分利用效率分别在 T3I3 和 T3I1 处理达到最大值。由此说明,减少灌水量并不总是降低作物产量,灌水量过高可能导致甜菜叶丛生长过旺,减少干物质向块根中的分配,影响甜菜块根的膨大;还会增加块根青头比率,在机器收获清缨时造成损伤率过大,进而降低收获产量。此外,甜菜品种在相同水分管理条件下的水分利用效率不同,王子骞[24]发现,对新冬 22 号和新冬 18 号 2 个小麦品种在拔节期和灌浆期之间进行调亏灌溉,随着灌水量的增加,前者水分利用效率呈下降趋势,后者水分利用效率先增加后降低,这与本研究结果较为一致。

本试验中水分处理可能引起甜菜生育进程的差异,由于作物生育进程主要受温度驱动,因此我们认为相同积温条件下甜菜耗水特征的差异,主要是由水分处理引起的。有关水分处理对甜菜生育进程的影响有待进一步研究。此外,本试验结论在壤土条件下具有一定的适用性,由于不同区域光热资源、降水格局及土壤质地差异显著,未来需结合多生态区进一步验证水分管理策略在甜菜上的应用效果。

4 结论

适当推迟出苗后第一次灌水时间同时进行亏缺灌溉(T3I3)降低甜菜叶丛期耗水强度和耗水模系数,耗水量较对照处理 T2I2 降低 7.78%,Beta 796 的产量和水分利用效率分别较对照提高 14.4%和 27.32%,KWS 3410 的产量与 T2I2 差异不显著,但是水分利用效率较对照提高 12.49%。结合熵权 TOPSIS 评价模型对不同水分管理进行评价发现,Beta 796 品种的最优组合处理为 T3I3,KWS 3410 品种的最优组合处理为 T3I1。综上所述,通过调控出苗后第一次灌水时间和生育期灌水量,当土壤水分降至 50%田间持水量时进行亏缺灌溉(80%实际耗水量),能够优化甜菜叶丛期耗水特征,实现节水增产的同时有效缓解干旱区春季农业用水矛盾。

参考文献(References)

[1] 常晓,张云龙,徐翎清,等. 不同氮素形态配比对甜菜氮同化关键酶的影响[J]. 作物杂志,2025(1):235-242.
Chang Xiao, Zhang Yunlong, Xu Lingqing, et al. Effects of different nitrogen form ratio on key enzymes of nitrogen assimilation in sugar beet[J]. Crops, 2025(1): 235-242.

[2] 周红亮,张丽娟,刘宁宁,等. 调亏灌溉下氮肥管理对滴灌甜菜产量及水氮利用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(6):159-166.
Zhou Hongliang, Zhang Lijuan, Liu Ningning, et al. Effect of nitrogen management on yield and water and nitrogen utilization of sugar beet under regulated deficit irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 159-166.

[3] 柳斌辉,王变银,陈朝阳,等. 春一水灌溉时间对冬小麦产量和生长特性的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(S2):122-128.
Liu Binhui, Wang Bianyin, Chen Chaoyang, et al. Effect of irriogation time in spring on yield and growth characteristics of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40 (S2): 122-128.

[4] 张佳丽,路希,李建明. 灌溉量与有机营养液配方耦合对设施番茄产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2025,36(5):1431-1439.
Zhang Jiali, Lu Xi, Li Jianming. Influence of coupling irrigation volume and organic nutrient solution formula on yield, quality, and water utilization efficiency of greenhouse tomatoes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(5): 1431-1439.

[5] 王振华,杨彬林,谢香文,等. 灌溉制度对膜下滴灌甜菜产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(8):158-166.
Wang Zhenhua, Yang Binlin, Xie Xiangwen, et al. Effects of different irrigation regimes of drip irrigation under plastic film on sugar beet yield and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2019, 35(8): 158-166.

[6] Topak R, Süheri S, Acar B. Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield, quality and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey[J]. Irrigation Science, 2011, 29(1): 79-89.

[7] Fabeiro C, Martín de Santa Olalla F, López R, et al. Production and quality of the sugar beet (*Beta vulgaris*

L.) cultivated under controlled deficit irrigation conditions in a semi-arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2003, 62(3): 215-227.

[8] 樊福义,苏文斌,宫前恒,等. 高寒干旱区膜下滴灌对甜菜产质量及水分利用效率的影响[J]. 中国糖料, 2015,37(6):18-20.
Fan Fuyi, Su Wenbin, Gong Qianheng, et al. Effect of drip irrigation under film mulching on yield, sugar content and water use efficiency of sugarbeet in cold arid area[J]. Sugar Crops China, 2015, 37(6): 18-20.

[9] 张吉立,冀金凤,王宁,等. 补灌与施肥对甜菜干物质积累、产糖量及养分吸收的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2):441-445.
Zhang Jili, Ji Jinfeng, Wang Ning, et al. Effects of supplemental irrigation and fertilization on dry matter accumulation, sugar production and nutrient uptake in *Beta Vulgaris* L.[J]. Soils, 2023, 55(2):441-445.

[10] 贺碧微,刘珣,艾依肯,等. 新疆部分甜菜糖业公司原料生产技术需求情况的调研报告[J]. 中国糖料, 2017,39(3):33-34,39.
He Biwei, Liu Xun, Ai Yiken, et al. Investigation report on technology demand of raw materials production of partial beet sugar companies in Xinjiang[J]. Sugar Crops China, 2017, 39(3): 33-34,39.

[11] 陈润仪,贺泽霖,贾也纯,等. 干旱胁迫对甜菜生长的影响及甜菜抗旱育种研究进展[J]. 中国糖料, 2021, 43(3):54-60.
Chen Runyi, He Zelin, Jia Yechun, et al. Effect of drought stress on sugar beet growth and progress of breeding for drought tolerance[J]. Sugar Crops China, 2021, 43(3): 54-60.

[12] 牛海生,王赓起,孟新伟,等. 塔额垦区引进甜菜品种适应性及产质量评价[J]. 中国糖料, 2018, 40(4): 32-33,35.
Niu Haisheng, Wang Gengqi, Meng Xinwei, et al. Evaluation of adaptability, yield and quality of introduced sugarbeet varieties in tarcheng prefecture[J]. Sugar Crops China, 2018, 40(4):32-33,35.

[13] Marković M, Kočar M M, Barač Ž, et al. Field performance evaluation of low-cost soil moisture sensors in irrigated orchard.[J]. Agriculture, 2024, 14(8):1239.

[14] Varble J L, Chávez J L. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado[J]. Agricultural Water Management, 2011, 101(1): 93-106.

[15] 董心久,甜菜节本稳产机械化栽培技术规程. 新疆维吾尔自治区[S]. 新疆农业科学院经济作物研究所, 2020-11-25.

[16] Pradhan S, Sehgal V K, Das D K, et al. Effect of weather on seed yield and radiation and water use efficiency of mustard cultivars in a semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2014, 139: 43-52.

[17] 彭霄,蒲甜,杨峰,等. 灌水时间和灌水比例对单套作玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21):3763-3772.
Peng Xiao, Pu Tian, Yang Feng, et al. Effects of irrigation time and ratio on yield and water use efficiency of maize under monoculture and intercropping[J]. Chinese Journal of Agricultural Sciences, 2019, 52(21): 3763-3772.

[18] Zhou H L, Wang L, Xu P J, et al. Increasing nitrogen supply during limited irrigation improves drip-irrigated sugar beet growth, yield, and net return in arid areas[J]. Field Crops Research, 2024, 319:109646.

[19] 刘志良,李晓爽,曹彩云,等. 春灌一水时间对冬小麦灌浆特性和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8):1296-1304.
Liu Zhiliang, Li Xiaoshuang, Cao Caiyun, et al. Effects of time of spring one irrigation on the grain filling characteristics and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1296-1304.

[20] 党建友,裴雪霞,王姣爱,等. 灌水时间对冬小麦生长发育及水肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10):2745-2750.
Dang Jianyou, Pei Xuexia, Wang Jiaoai, et al. Effects of irrigation time on the growth and water-and fertilizer use efficiencies of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2745-2750.

[21] 赵经华,袁如芯,王金茂,等. 不同灌水处理对春玉米土壤水分、耗水特征及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5):1-7,15.
Zhao Jinghua, Yuan Ruxin, Wang Jinmao, et al. Developing optimal drip irrigation schedule for alfalfa production in desert using the HYDRUS-1D model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 1-7,15.

[22] Yan F L, Liu X Q, Bai W Q, et al. Multi-objective optimization of water and nitrogen regimes for drip-fertigated sugar beet in a desert climate[J]. Field Crops Research, 2022, 288:108703.

[23] Chen Q, Chang L, Han F X, et al. Straw strip mulching boosts potato yields by enhancing soil moisture and water use efficiency[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16:1659236.

[24] 王子骞. 调亏灌溉对新疆滴灌冬小麦生长发育及其产量的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2025.

(责任编辑:唐慧　郭芸婕)