

# 调亏灌溉下氮肥管理对滴灌甜菜 产量及水氮利用的影响

周红亮<sup>1</sup>,张丽娟<sup>1</sup>,刘宁宁<sup>1</sup>,费聪<sup>1</sup>,  
苏继霞<sup>1</sup>,曾洲渊<sup>2</sup>,樊华<sup>1</sup>

(1.石河子大学农学院,新疆石河子 832003;2.吐鲁番市实验中学,新疆吐鲁番 838000)

**摘要:**以 Beta356 为试材,研究调亏灌溉下不同施氮量[纯氮 0 kg·hm<sup>-2</sup>(N0)、150 kg·hm<sup>-2</sup>(N1)、225 kg·hm<sup>-2</sup>(N2)]与基追比[播种前、叶丛期、块根膨大期施氮比例分别为 20:60:20(T1)、30:50:20(T2)、40:40:20(T3)]对甜菜生长特性、产量和水氮利用效率的影响。结果表明:在叶丛期和块根膨大期分别进行 50%和 30%田间持水量( $\theta_f$ )调亏灌溉基础上施 225 kg·hm<sup>-2</sup>氮肥的同时,增加基肥比例能够显著提高叶面积指数(124.39%~143.87%)和叶绿素含量(23.03%~119.80%);在糖分积累期进行 30% $\theta_f$ 调亏灌溉后施用氮肥对叶面积指数影响较小,但有利于提高叶片叶绿素含量。调亏灌溉后施氮使块根膨大期和糖分积累期干物质总量分别较对照提高了 34.08%~56.84%和 32.43%~76.26%,但两个施氮量处理间未达到显著差异。甜菜产量随施氮量和基肥比例增加分别升高和降低,含糖率随施氮量增加而降低。氮肥农学利用效率和灌溉水利用效率均在 N2T1 处理下最大,其中灌溉水利用效率较对照提高了 82.50%。施氮处理的产糖量和水糖比分别较对照显著提高了 31.66%~63.41%和 31.82%~63.64%。调亏灌溉下增加施氮量有利于提高产糖量,但增产不显著;3 种施用比例中基肥比例为 20%、叶丛期为 60%和块根膨大期为 20%时有利于提高甜菜含糖率和产糖量,同时具有较高的水糖比和氮肥利用效率。因此,在干旱区滴灌甜菜种植中以 T1(20:60:20)基追比模式下施用 150 kg·hm<sup>-2</sup>氮素对调亏灌溉具有一定的调节作用。

**关键词:**调亏灌溉;滴灌;甜菜;氮肥管理;产糖量

**中图分类号:**S275.6;S566.3;S143.1 **文献标志码:**A

## Effect of nitrogen management on yield and water and nitrogen utilization of sugar beet under regulated deficit irrigation

ZHOU Hongliang<sup>1</sup>, ZHANG Lijuan<sup>1</sup>, LIU Ningning<sup>1</sup>, FEI Cong<sup>1</sup>, SU Jixia<sup>1</sup>, ZENG Zhouyuan<sup>2</sup>, FAN Hua<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2. Turpan Experimental Middle School, Turpan, Xinjiang 838000, China)

**Abstract:** Beta 356 was used as test material and the effects of three nitrogen (N) application rates and three top dressing ratios on sugar beet growth physiological characteristics, yield, and water and fertilizer use efficiency under regulated deficit irrigation were studied. The results showed that when 225 kg·hm<sup>-2</sup> N fertilizer was applied on the basis of 50% and 30% of field water capacity ( $\theta_f$ ) under the regulated deficit irrigation at the canopy development and storage root development, respectively, the leaf area index (124.39%~143.87%) and chlorophyll content (23.03%~119.80%) were significantly increased by increasing the proportion of base fertilizer. Nitrogen application with 30% $\theta_f$  deficit regulation irrigation in sugar accumulation growth had little effect on leaf area index, but it was beneficial to increase chlorophyll content in leaves. The total amount of dry matter increased by 34.08%~56.84% and 32.43%~76.26%, respectively, in the storage root development and sugar accumulation growth com-

收稿日期:2019-12-10

修回日期:2020-10-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31660360,31771720);新疆生产建设兵团中青年科技创新领军人才计划(2018CB029);石河子大学国际科技合作推进计划(GJHZ201706)

作者简介:周红亮(1996-),男,贵州铜仁人,硕士研究生,研究方向为作物生理生态。E-mail:1677210531@qq.com

通信作者:樊华(1983-),女,新疆石河子人,教授,博士,主要从事作物生理生态方面研究。E-mail:fanhua@shzu.edu

pared with that in the control group, but the total amount of dry matter did not reach significant difference between the two treatments. The yield increased and decreased with increasing N application and the proportion of basic fertilizer, and the sugar content decreased with increasing N application. The agronomic efficiency and irrigation water use efficiency of N fertilizer were the highest under the treatment of N2T1, and the irrigation water use efficiency was increased by 82.50% compared with the control. The sugar yield and water-sugar ratio of the two N application treatments were increased by 31.66%~63.41% and 31.82%~63.64%, respectively. Under the condition of regulated deficit irrigation, increasing N application was beneficial to increasing sugar yield, but the yield was not significant. When the proportion of basal fertilizer was 20%, that of canopy development was 60% and that of storage root development was 20%, sugar content and sugar yield of sugar beet were improved, and water-sugar ratio and N utilization efficiency were higher. Therefore, the application of 150 kg · hm<sup>-2</sup> N in the model of T1 (20 : 60 : 20) had a certain regulatory effect on regulated deficit irrigation.

**Keywords:** regulated deficit irrigation; drip irrigation; sugar beet; nitrogen management; sugar yield

调节作物生长的农田水肥环境、提高水肥利用效率是当前我国北方旱区发展节水农业迫切需要解决的关键问题<sup>[1]</sup>。调亏灌溉(regulated deficit irrigation, RDI)于 20 世纪 90 年代由康绍忠等<sup>[2]</sup>引入大田作物研究中,其核心是利用植物自身对水分亏缺的应激性,主动降低营养器官的生长发育而调节光合产物向着生殖器官运移,从而抑制了营养器官的生长冗余,提高作物的经济系数<sup>[3]</sup>,是一种通过作物自身生理功能调节而达到节水的灌溉方式,其目的是在不影响作物产量的前提下通过调亏灌溉实现作物品质的改善<sup>[4]</sup>。氮是植物生长发育所必需的三大营养元素之一,施氮可以改变作物对氮素的吸收、积累与分配,进而影响作物叶面积指数、干物质积累和叶绿素含量,最终起到改善作物品质、提高产量的作用<sup>[5]</sup>。但近年来中国的农业生产系统严重依赖施用氮肥<sup>[6]</sup>,过量施用氮肥导致氮肥利用效率和产量降低<sup>[7]</sup>,增加了作物减产风险,甚至破坏农田生态环境,严重影响农田的可持续利用<sup>[8-9]</sup>。

如何提高作物水分和养分的利用效率,国内外学者进行了大量研究。Marziyeh 等<sup>[10]</sup>在玉米氮肥管理研究中发现,在 25%~50%田间持水量灌溉水平下,施用 80 kg · hm<sup>-2</sup>氮肥可使玉米的生物产量和水分利用效率(water use efficiency, WUE)达到最高;Nangare 等<sup>[11]</sup>研究表明,中度调亏灌溉促进西红柿果实发育,改善了西红柿的品质,但没有降低产量;胡家齐等<sup>[3]</sup>认为在辽西半干旱地区施氮 60 kg · hm<sup>-2</sup>同时花针期~结荚期采取中度调亏灌溉处理后的增产效应显著,调亏灌溉后增施氮肥使花生的产量增加了 13.09%,但显著降低 WUE 和氮肥利用效率(nitrogen use efficiency, NAE)。Li 等<sup>[12-13]</sup>研究发现,甜菜叶丛期中度调亏灌溉后(50% $\theta_f$ )干物质

积累量高于重度调亏灌溉处理(30% $\theta_f$ ),且重度调亏灌溉显著降低甜菜产量,中度调亏灌溉显著提高叶片的瞬时水分利用效率和灌溉水分利用效率。费聪等<sup>[14-16]</sup>研究表明,甜菜在 150 kg · hm<sup>-2</sup>施氮量和 3 : 7 的基追比下具有较好的干物质分配比例,生育前期地上部分干物质量大于地下部分,增加叶丛期追肥量后,地下部分的生长更快,但施氮量过低和过高都会显著影响甜菜干物质的分配比例。苏继霞<sup>[17]</sup>、董心久等<sup>[18]</sup>发现氮肥基追比为 5 : 5 时显著影响甜菜生长发育及产量构成因素,有利于提高甜菜品质。

目前大量学者针对作物灌水量、施氮量及其互作效应开展研究,然而有关调亏灌溉条件下作物氮肥管理的研究不多<sup>[3,15]</sup>,本试验基于甜菜不同生育时期调亏灌溉条件,研究不同施氮量与基追比对甜菜生长特性及产量和水氮利用效率的影响,旨在探讨甜菜节水减氮、提质增效途径,为干旱区滴灌甜菜种植中水氮高效利用提供支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2019 年 4—10 月在石河子大学农学院实验站内(44°32'N, 86°08'E)进行,海拔 428 m,无霜期 168~171 d,年日照时数为 2 721~2 818 h,≥10℃的活动积温为 3 570℃~3 729℃,年降水量 125.0~207.7 mm,属典型的温带大陆性气候。试验区的土壤为灰漠土,土壤质地为重壤土。在 0~40 cm 土层田间持水量为 19.97%,容重为 1.68 g · cm<sup>-3</sup>,耕层土壤有机质含量为 13.41 g · kg<sup>-1</sup>,速效钾 156.31 mg · kg<sup>-1</sup>、速效磷 25.45 mg · kg<sup>-1</sup>、全氮 0.77 g · kg<sup>-1</sup>,前茬作物为玉米。

### 1.2 试验设计

本研究采用大田控制方法控制不同生育时期 0~40 cm 土层深度的土壤水分,即在甜菜叶丛期设置

灌水下限为  $50\% \theta_f$  ( $\theta_f$  为田间持水量)、块根膨大期  $30\% \theta_f$ 、糖分积累期  $30\% \theta_f$ , 灌水上限均为  $90\% \theta_f$  进行调亏灌溉, 当每个小区埋设的 Watermark 水势仪所测定 0~40 cm 土层土壤含水量降到设定范围内, 结合烘干法校正后对该小区灌水至目标含水量。本次试验所需灌溉的水量参照韩占江<sup>[19]</sup>等人的计算方式确定。

$$m = 10 \times H \times \rho_b \times (\beta_i - \beta_j)$$

式中,  $m$  为所需灌水量 (mm);  $H$  为计划湿润土层深度 (在本试验中的计划湿润层深度为 40 cm);  $\rho_b$  为湿润层内的土壤容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\beta_i$  为本次试验的所需土壤含水量 (目标相对含水量  $\times$  田间持水量);  $\beta_j$  为灌溉前土壤含水量。灌水量由水表记录。

在进行调亏灌溉的基础上开展氮素施用量和氮素施用时期的控制试验。氮素施用量设 3 个水

平, 即甜菜生育期内分别施纯氮  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N0)、 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N1)、 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N2), 以不施氮处理 (N0) 为对照。氮素施用时期设 3 个水平, 即在播种前、叶丛快速增长期、块根膨大期追施比例分别为 20 : 60 : 20 (T1)、30 : 50 : 20 (T2)、40 : 40 : 20 (T3), 共计 7 个处理, 每处理重复 3 次。小区面积为  $3 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 18 \text{ m}^2$ , 各小区设置 1 m 的保护行, 磷钾肥施用量分别为  $\text{P}_2\text{O}_5$   $345 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$   $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 全部作为基肥施入, 氮肥为尿素 (含氮量 46%), 在播种前、叶丛期、块根膨大期三个时期按表 1 中处理组合在不同生育时期施入。株行距配置方式为  $50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  (行距为 50 cm, 株距为 20 cm), 滴灌带配置模式为“1 管 2”模式, 即 1 条毛管控制 2 行甜菜。各处理灌水量由水表记录, 其余管理同大田。

表 1 调亏灌溉下甜菜生育期内各处理尿素施用量/g

Table 1 Application amount of urea in each district during the growth period of sugar beet under regulated deficit irrigation

施氮量 Nitrogen	基追比 Ratio	播种前 Before sowing	苗期 Seedling stage	叶丛期 Canopy development	块根膨大期 Storage root development	糖分积累期 Sugar accumulation growth	总计 Total
N0		0	0	0	0	0	0
	T1	117.39	0	352.17	117.39	0	586.95
	T2	176.09	0	293.48	117.39	0	586.95
N1	T3	234.78	0	234.78	117.39	0	586.95
	T1	176.09	0	528.26	176.09	0	880.44
	T2	264.13	0	440.22	176.09	0	880.44
N2	T3	352.17	0	352.17	176.09	0	880.44

### 1.3 测定项目和方法

1.3.1 叶绿素含量测定 在各生育时期的每个处理内选取整齐一致的 3 片功能叶冷冻保存, 带回实验室称取 0.3 g 置入 50 ml 离心管中, 量取 10 ml 无水乙醇和 10 ml 丙酮避光浸提 48 h, 浸提结束后使用双光束紫外可见分光光度计 (UH5300, HITACHI) 分别在 663、645 nm 和 470 nm 的波长下测定 Chla、Chlb 和类胡萝卜素的吸光值, 叶绿素含量的相关计算公式如下<sup>[20]</sup>:

$$C_a = (12.7D_{663} - 2.69D_{645}) \times V / 1000W$$

$$C_b = (22.9D_{645} - 4.68D_{663}) \times V / 1000W$$

$$C_{\text{总}} = (20.0D_{645} + 8.02D_{663}) \times V / 1000W$$

$$Car = (1000D_{470} - 3.27C_a - 104C_b) / 229 \times V / 1000W$$

式中,  $C_a$ 、 $C_b$  分别为叶绿素 a、叶绿素 b 的浓度;  $C_{\text{总}}$  为总叶绿素浓度;  $Car$  为类胡萝卜素浓度;  $V$  为浸提液体积;  $W$  为浸提叶片质量;  $D_{663}$ 、 $D_{645}$  和  $D_{470}$  分别表示在该波长下的吸光值。

1.3.2 干物质质量、叶面积指数测定 在甜菜每个生育时期结束后各处理选取长势一致的 3 株进行破坏性取样, 将叶片、叶柄和块根分别称重装袋, 在

105℃烘箱中杀青 30 min, 杀青结束后 65℃烘干至恒重。叶面积使用 Li-3000 (Li-cor, 美国) 在各生育时期破坏性取样后将叶片带回实验室进行测定, 并根据相关公式计算叶面积指数 (leaf area index, LAI)<sup>[1]</sup>。

$LAI = (\text{单株叶面积} \times \text{单位面积有效株数}) / \text{单位面积}$

1.3.3 氮肥农学利用效率、灌溉水利用效率、产量和产糖量测定 在甜菜收获期内拔出块根后削去青头, 对各处理产量进行称重实测, 含糖率使用折光仪进行测定, 氮肥农学利用效率、灌溉水利用效率、水糖比、产糖量等参数的计算参考胡家齐<sup>[3]</sup>、Li<sup>[12]</sup> 的方法。

灌溉水利用效率 (irrigation water use efficiency, iWUE):  $iWUE = \text{块根产量} / \text{耗水量}$

氮肥农学利用效率 (nitrogen agronomic efficiency, NAE):  $NAE = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮产量}) / \text{施氮量}$

水糖比 = 产糖量 / 耗水量

产糖量 = 单位面积块根产量  $\times$  含糖率

## 1.4 数据处理与分析

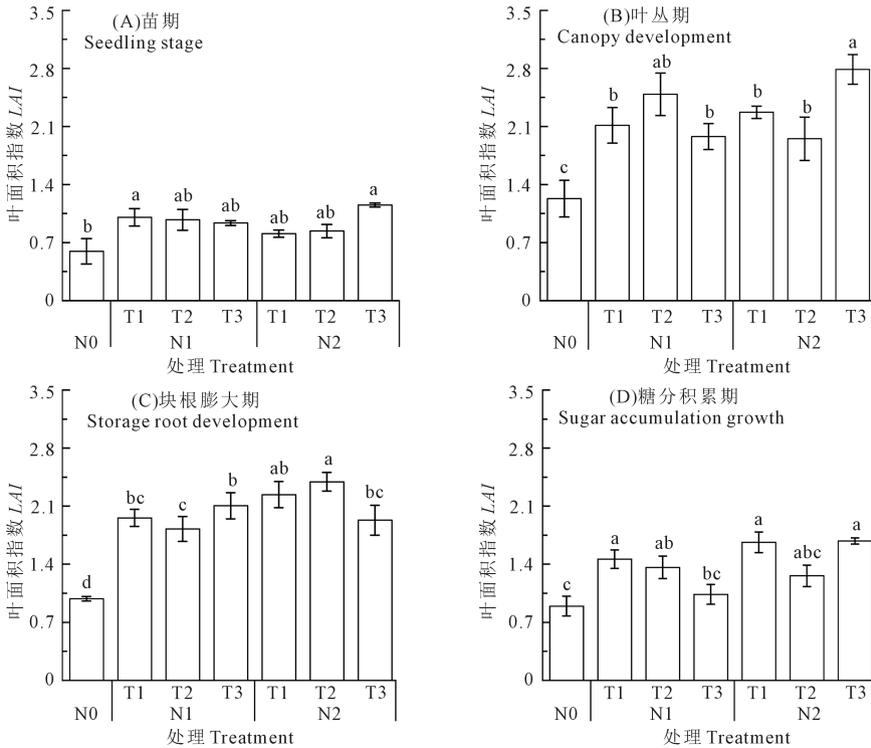
采用 Excel 2010 和 SPSS12.0 进行数据整理和统计分析,使用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行数据差异显著性检验 ( $P < 0.05$ ), 利用 Origin 2018 进行统计图绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜叶面积指数的影响

调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜叶面积指数产生了不同程度的影响(图 1)。在整个生育进程中呈先增后降的趋势。苗期(图 1A) N1、N2 处理间无显著差异,但较 N0 显著提高了 36.67% ~

91.67%;叶丛期(图 1B)和块根膨大期(图 1C)两个氮肥处理下的叶面积指数显著高于对照处理,叶面积指数最大值在两个生育时期分别出现在 N2 处理下的 N2T3、N2T2 处理,分别较对照处理提高了 124.39%和 143.88%,说明在叶丛期 50% $\theta_f$ ( $\theta_f$  为田间持水量)和块根膨大期 30% $\theta_f$  调亏灌溉后施氮肥能够提高甜菜叶面积,但增施氮肥后促进效果不显著;糖分积累期(图 1D)各氮肥处理的叶面积指数在基追比间差异不显著,但均在 T1 追肥模式下最高,分别为 1.46 和 1.66,较对照处理提高了 64.06%和 86.52%,表明在糖分积累期进行 30% $\theta_f$  的调亏灌溉条件后,氮肥能够显著改善水分胁迫条件下的叶面积指数,且在 T1 的基追模式甜菜保持较高的叶面积。



注:各处理中的不同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平下差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in each treatment indicate significant difference at  $P < 0.05$  level. The same below.

图 1 调亏灌溉下氮肥管理对滴灌甜菜叶面积指数的影响

Fig.1 Effects of nitrogen management on LAI of sugar beet under regulated deficit irrigation

### 2.2 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜叶绿素含量的影响

由表 2 可知,在调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜叶绿素含量影响各异,总体表现为随生育进程推进呈先增加后降低趋势,且随施氮量增加而增加。其中生育期内 N2T1 处理的叶绿素 a 含量最大,其在三个生育时期的含量分别为 1.45、1.64、1.42  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,较对照提高了 26.1%、115.8% 和 77.5%;叶绿素总含量在全生育期的变化趋势与叶绿素 a 基本一致。三个生育时期内叶绿素 b 含量均

在 N2T3 处理下最高,较对照提高了 15.38%、157.14%、42.86%。表明调亏灌溉下施用氮肥能够提高甜菜叶片中叶绿素含量,且叶绿素含量随施氮量增加而增加,在全生育期内 N2 施氮量的 T1 追肥模式下能够显著提高叶绿素 a 含量,在 T3 追肥模式下能显著提高叶绿素 b 含量。

### 2.3 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜干物质积累量的影响

调亏灌溉条件下的氮肥管理对滴灌甜菜干物质积累量产生不同程度的影响(图 2),全生育期表

现为增加趋势。苗期处理间干物质积累量显著高于对照,在 N1T1 处理下达到最大值(22.51 g),但各处理间的差异不显著,表明施基肥对甜菜苗期干物质积累量无显著影响。在叶丛期 N1T2 处理下的干物质积累量最大(286.76 g),且叶片、叶柄和块根均高于其它处理。在块根膨大期和糖分积累期甜菜干物质积累量基本一致,两个时期分别在 N1T1 (326.75g) 和 N2T3 (368.27) 处理下达到最大值,但处理间差异不显著,表明甜菜在中后期经历重度水分亏缺后会抑制根、叶柄、叶片的生长,施用氮肥不

能缓解水分亏缺带来的影响。在调亏灌溉条件下后三个生育时期地下部分干物质积累量远大于地上部分,说明干旱抑制冠层生长的同时加快了地下部分的干物质积累。

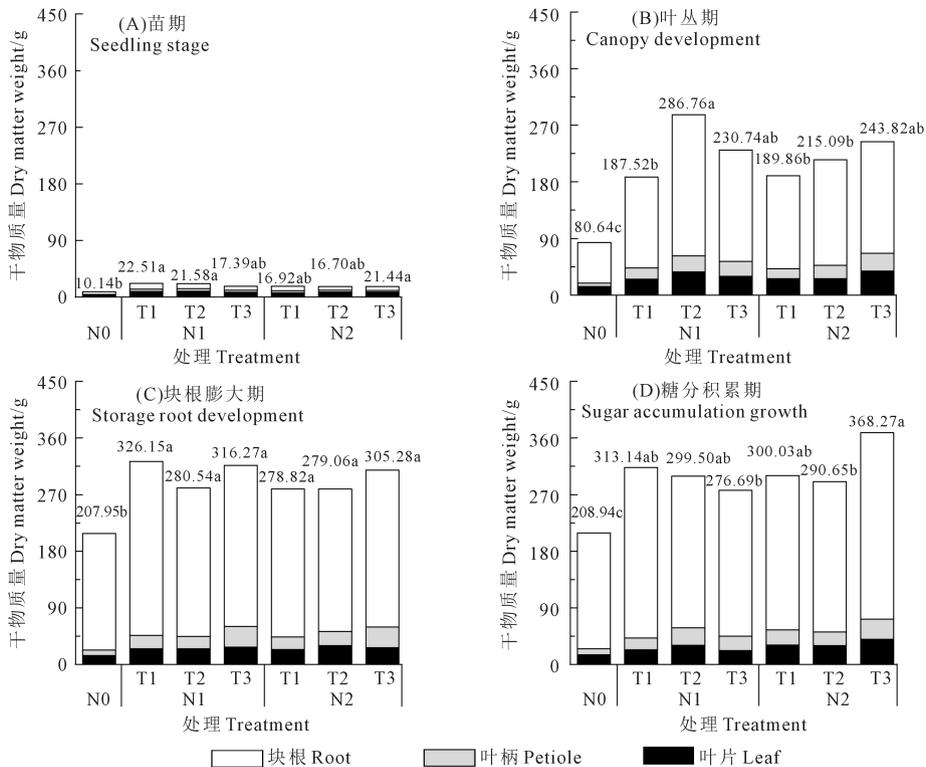
#### 2.4 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜根冠比的影响

调亏灌溉条件下滴灌甜菜根冠比随着生育时期推进呈增加趋势(图3)。苗期在 N2T3 处理下的根冠比最小(0.31),但在两氮肥处理下的 T1 基追模式下最大,分别为 0.51、0.48,在叶丛期内变化相反,

表2 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜叶绿素含量影响

Table 2 Effect of nitrogen management on chlorophyll content in beet under regulated deficit irrigation

施氮量 Nitrogen /(kg·hm <sup>-2</sup> )	基追比 Ratio	叶丛期/(mg·g <sup>-1</sup> ) Canopy development				块根膨大期/(mg·g <sup>-1</sup> ) Storage root development				糖分积累期/(mg·g <sup>-1</sup> ) Sugar accumulation growth			
		C <sub>a</sub>	C <sub>b</sub>	C <sub>总</sub>	Car	C <sub>a</sub>	C <sub>b</sub>	C <sub>总</sub>	Car	C <sub>a</sub>	C <sub>b</sub>	C <sub>总</sub>	Car
		N0	1.15d	0.39e	1.52c	0.35d	0.76e	0.21e	0.96d	0.35d	0.80d	0.28b	1.02c
N1	T1	1.23cd	0.40de	1.60bc	0.43c	1.27d	0.49b	1.67c	0.59b	1.35ab	0.27b	1.75a	0.50a
	T2	1.26bc	0.41cd	1.66b	0.44bc	1.29cd	0.42c	1.70c	0.54c	1.24bc	0.27b	1.36b	0.38d
	T3	1.40a	0.46a	1.89a	0.47ab	1.47b	0.45bc	1.83b	0.54c	1.11c	0.33ab	1.31b	0.38d
N2	T1	1.45a	0.43bc	1.88a	0.44bc	1.64a	0.46b	2.16a	0.63a	1.42a	0.37a	1.76a	0.45bc
	T2	1.32b	0.42c	1.71b	0.44bc	1.36c	0.38d	1.73c	0.54c	1.41a	0.35ab	1.75a	0.48ab
	T3	1.42a	0.45ab	1.87a	0.48a	1.62a	0.54a	2.11a	0.65a	1.34ab	0.40a	1.73a	0.43c



注:图中柱形图上方的数字表示植株的总干物质质量,小写字母表示在  $P < 0.05$  水平下的显著性。

Note: The number at the top of the bar chart represents the total dry matter mass of the plant, and the lowercase letter represents the significance at the  $P < 0.05$  level.

图2 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜干物质质量的影响

Fig.2 Effects of nitrogen management on the dry matter weight in drip irrigation under regulated deficit irrigation

N2T3 处理下的根冠比最大(3.54),且显著高于其它处理,说明在苗期甜菜生长受氮肥影响较小,根冠协调生长,但在叶丛期进行调亏灌溉后施氮促进了根系生长,增加了根冠比。块根膨大期和糖分积累期的根冠比均在 N0 处理下最大(5.76、7.84),且显著高于其它处理,但在 N1、N2 两个施氮量和三个基追比间差异均不显著,这说明在生育中后期进行调亏灌溉后施氮会促进根冠的物质积累,尤其对地下部分物质积累显著,但施用过多氮素并无显著促进作用。

## 2.5 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜产量和水氮利用的影响

调亏灌溉条件下,滴灌甜菜产量随着施氮量和播前施氮比例增加分别升高和降低(表 3),氮肥农学利用效率、灌溉水利用效率与产量变化趋势一致,都在 N2T1 处理达到最大,分别为  $117.24 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.24 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $17.10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,块根含糖率随着施氮量和播前施氮比例增加分别降低和升高,在 N1T1 处理最高(17.85%),各处理产糖量、水糖比均显著高出对照 31.66%~63.41%、31.82%~

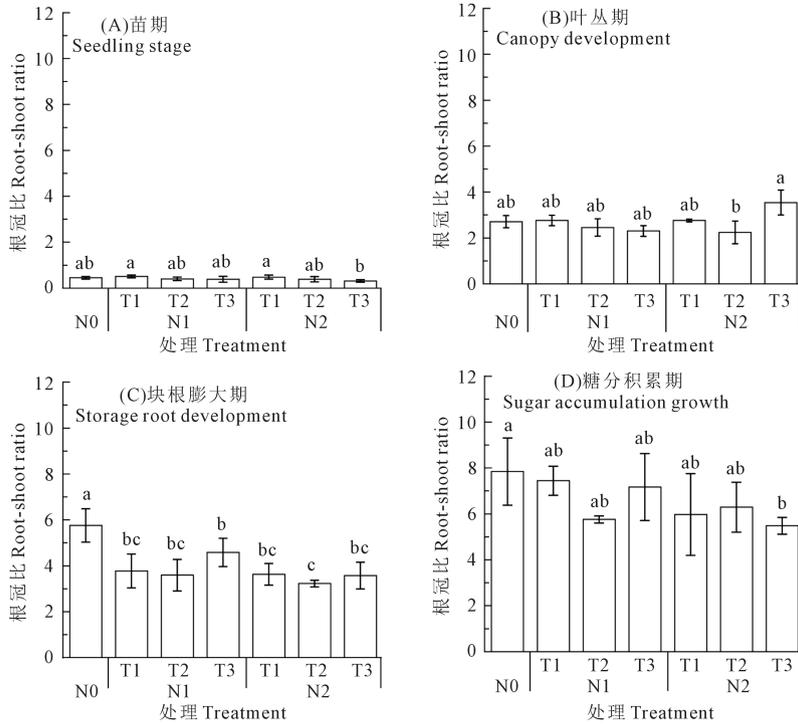


图 3 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜根冠比的影响

Fig.3 Effects of nitrogen management on root-shoot ratio of beet under regulated deficit irrigation

表 3 调亏灌溉条件下氮肥管理对滴灌甜菜产量品质的影响

Table 3 Effects of nitrogen management on yield and quality of beet under regulated deficit irrigation

施氮量 Nitrogen ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	基追比 Ratio	含糖率 Sugar content/%	产量 Yield $/(\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	产糖量 Sugar yield $/(\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	NAE $/(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$	iWUE $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水糖比 Water-yield ratio $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
N0		16.46bc	64.22d	10.55b	-	9.37d	1.54b
	T1	17.85a	93.63c	16.72a	0.20ab	13.66c	2.44a
	T2	16.19bc	85.44c	13.89a	0.14ab	12.47c	2.03a
	T3	17.29ab	82.34c	14.25a	0.12b	12.01c	2.08a
N1	T1	13.97d	117.24a	16.40a	0.24a	17.10a	2.39a
	T2	15.36c	111.83ab	17.24a	0.21ab	16.31ab	2.52a
	T3	17.02ab	97.17c	16.55a	0.15ab	14.18bc	2.41a
N2	N	**	**	**	ns	**	**
	T	**	*	*	*	*	*
	N×T	**	ns	ns	ns	ns	ns

注:NAE 表示氮肥的农学利用效率,iWUE 表示灌溉水利用效率。\* 表示在  $P<0.05$  水平下差异显著;\*\* 表示达到极显著水平。

Note: NAE in the table represents the agricultural utilization efficiency of nitrogen fertilizer, and iWUE represents the utilization efficiency of irrigation water. \* indicates significant difference at  $P<0.05$  level; \*\* denotes an extremely significant level.

63.64%,但在处理间无显著差异,表明在调亏灌溉下施用氮肥能提高块根产量、氮肥农学利用效率和灌溉水利用效率,但施用过多则会降低块根含糖率,对产糖量和水糖比的促进作用不显著。甜菜的含糖率在施氮量、基追比及互作间都达到了极显著水平,除氮肥利用效率外其余指标在施氮量、基追比处理内差异显著,但在施氮量与基追比的互作间无差异。

### 3 讨论

水肥供应是大田生产重要的调控因子,施用过量不仅会导致资源浪费,降低资源利用率,增加农业生产成本,而且会影响作物产量<sup>[21]</sup>,因而合理灌水与施肥是农业生产中节源增产、提质增效的关键因素。调亏灌溉条件下施用氮肥是通过影响作物叶片色素含量、叶面积等多种因素对植株光合能力造成影响而影响产量<sup>[22-23]</sup>,本研究结果表明,在叶丛期和块根膨大期进行 50% $\theta_f$  和 30% $\theta_f$  调亏灌溉基础上施 225 kg·hm<sup>-2</sup> 氮肥的同时增加基肥比例能够显著提高甜菜叶面积(124.39%~143.87%)和叶绿素含量(23.03%~119.80%)。在糖分积累期进行 30% $\theta_f$  调亏灌溉后施用氮肥对叶面积影响不显著,但使叶片保持较高的叶绿素含量。祁有玲<sup>[24]</sup>、Zheng 等<sup>[25]</sup> 研究表明,在冬小麦不同生育阶段进行调亏灌溉后均会抑制茎秆和叶片生长,使冠层结构发育不良,降低叶面积指数,但在施用氮肥后对叶面积和株高有明显的调节效应。李智等<sup>[26]</sup> 也表明调亏灌溉下在甜菜苗期和叶丛期适当提高施氮量,块根膨大期和糖分积累期适当减少施氮量,可以促进甜菜冠层生长,增加叶片叶绿素含量,防止后期叶片早衰,有利于后期同化物质向地下部分转移。但在本研究中,甜菜叶丛期和块根膨大期调亏灌溉后施氮显著提高了叶面积指数和叶绿素含量,尤其在重施基肥的 T3 处理下更显著,但在两施氮处理间未达到显著差异,这可能与水分条件有关,叶丛期是甜菜地上部分生长最旺盛时期,而块根膨大期是地下部分生长的关键时期,这两个时期内分别进行 50% $\theta_f$  和 30% $\theta_f$  调亏灌溉后对冠层和地下部分生长均产生了抑制作用,在施氮后一部分氮肥随水被运输至根系和冠层,一定程度上改善了因水分亏缺带来的影响,提高了叶面积和叶绿素含量,但由于水分运输效率及根系生长有限,过多氮肥无法被利用,致使两施氮量处理间差异不大,尤其在糖分积累期内这一影响更显著。

甜菜干物质积累是一个持续的过程,在充分灌

溉条件下地上部分生长速率会大于地下部分,导致根冠比较小,但在收获期总体干物质质量将会达到最大值<sup>[27-28]</sup>。本研究中,干物质质量、根冠比随生育进程推进而增加,块根膨大期和糖分积累期施氮处理间干物质总量差异不显著,分别较对照提高了 34.08%~56.84%和 32.43%~76.26%,在糖分积累期各处理根冠比达到最大,说明施氮可提高调亏灌溉条件下的甜菜干物质积累总量,尤其在块根膨大期和糖分积累期内重度调亏灌溉后施氮会促进地上、地下部分协同生长,但施用过多氮素作用不显著。这可能是甜菜生育中后期长时间进行重度调亏灌溉后使老叶受旱凋亡,施氮后促进新叶萌发生长补充了一部分的地上物质,而地下部分受限较小干物质持续积累,所以根冠比呈增加趋势而干物质积累总量在各处理间差异不大。前人在甜菜的试验中也有类似结论<sup>[18]</sup>。

有学者<sup>[2,4,27]</sup> 认为,在水分充足条件下施用过多氮肥易导致地上部分徒长,养分转移不均衡,对地下部分生长不利,但在水分胁迫下适量增施氮肥可以在一定程度上增大作物根系与土壤的接触面积,增加根长促使植株根系下扎吸收深层土壤中的水分,进而在一定程度上补偿了干旱所带来的影响。甜菜是收获营养器官块根的作物,在栽培中更需注意控制水肥对地下部分物质分配的影响。在本研究中,调亏灌溉下甜菜块根产量随施氮量增加而增加,含糖率随产量增加而下降,增加追肥施用比例增产效果显著,这与前人<sup>[15-17]</sup> 在甜菜的氮素运筹试验中结果一致。Wang 等<sup>[29]</sup> 在黄瓜的调亏灌溉研究中发现,一定氮肥范围内 WUE 随施氮量增加先升高后降低,NAE 随施氮量增加而降低,胡家齐等<sup>[3]</sup> 在花生的研究中也类似的结论,而在本研究中,NAE、iWUE 和水糖比均随施氮量升高而升高,但 NAE 和水糖比在两个氮肥处理间差异不显著,这可能与甜菜自身遗传特性相关,当甜菜的块根产量增加时,其含糖率降低,施用较多氮素虽提高了块根重,加快水分消耗,提高了水分利用效率,但对 NAE 和水糖比贡献较小。前人在小麦<sup>[30]</sup>、甜菜<sup>[17]</sup> 的氮肥运筹研究中发现,在基追比为 5:5 模式下对产量具有较显著的促进作用,费聪等<sup>[16,28]</sup> 也表明在 4:4:2 运筹模式下有利于提高干旱区滴灌甜菜块根产量,在本研究中,调亏灌溉下增加施氮量有利于提高产糖量,但增产效果并不显著,在三种运筹模式下 T1(基追比为 2:8 时)更有利于提高甜菜产糖量,也有较高的水糖比和 NAE,这与其他学者的研究结论略有差异。前人开展的氮素研究是在充分

灌溉下进行,适当在甜菜生育中后期补充一定氮素可加快冠层同化物质向根系转移,以达到增产效果,但在本试验中,进行调亏灌溉后需增加足够追肥量以保证甜菜在中后期依旧有较高的物质同化、转运能力,才可以在一定程度上缓解调亏灌溉对甜菜的影响。因此,在干旱区滴灌甜菜种植中推荐以 T1(20:60:20)基追比模式施用 150 kg·hm<sup>-2</sup> 氮肥可对调亏灌溉具有一定的调节作用。

#### 参考文献:

- [1] 刘小刚,孙光照,彭有亮,等.水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J].农业工程学报,2019,35(16):125-133.
- [2] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等.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,(4):3-5.
- [3] 胡家齐,夏桂敏,张柏纶,等.调亏灌溉与施氮对花生产量及水氮利用的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):187-193,199.
- [4] 冯泽洋,李国龙,李智,等.调亏灌溉对滴灌甜菜生长和产量的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(11):7-12.
- [5] 白文明,张伟丽,侯亚方,等.不同氮肥处理对莽麦干物质积累、农艺性状及产量的影响[J].中国农业大学学报,2019,24(2):38-47.
- [6] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers [J]. Nature, 2018, 555: 363-366.
- [7] Jin L B, Cui H Y, Li B, et al. Effects of integrated agronomic management practices on yield and nitrogen efficiency of summer maize in North China [J]. Field Crops Research, 2012, 134: 30-35.
- [8] 徐一兰,付爱斌,刘唐兴.不同氮肥运筹模式对双季稻植株生理特性和产量的影响[J].华北农学报,2019,34(3):155-163.
- [9] 侯云鹏,孔丽丽,李前,等.不同施氮水平对春玉米氮素吸收、转运及产量的影响[J].玉米科学,2015,23(3):136-142.
- [10] Marziyeh J S, Mohsen M D, Amin S, et al. Effect of irrigation regimes and nitrogen sources on biomass production, water and nitrogen use efficiency and nutrients uptake in coneflower (*Echinacea purpurea* L.) [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 358-367.
- [11] Nangare D D, Singh Y, Kumer P S, et al. Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis [J]. Agricultural Water Management, 2016, 171: 73-79.
- [12] Li Y Y, Fan H, Su J X, et al. Regulated deficit irrigation at special development stages increases sugar beet yield [J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3): 1293-1303.
- [13] Li Y Y, Liu N N, Fan H, et al. Effects of deficit irrigation on photosynthesis, photosynthate allocation, and water use efficiency of sugar beet [J]. Agricultural Water Management, doi: 10.1016/j.agwat.2019.105701.
- [14] Fei C, Su J X, Li Y Y, et al. Light-response characteristics of photosynthesis of drip-irrigated sugar beet under different nitrogen fertilizer managements [J]. Photosynthetica, 2019, 57(3): 804-811.
- [15] 费聪,耿青云,李阳阳,等.氮肥运筹对露播滴灌甜菜产量和块根糖质量分数的影响[J].西北农业学报,2015,24(11):101-106.
- [16] 费聪. 氮肥运筹对露播滴灌甜菜产量和品质的影响[D].石河子:石河子大学,2016.
- [17] 苏继霞,王开勇,费聪,等.氮肥运筹对干旱区滴灌甜菜氮素利用及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):72-75.
- [18] 董心久,杨洪泽,周建朝,等.不同灌溉量下氮肥施用时期对甜菜光合物质生产及产量的补偿作用[J].新疆农业科学,2018,55(4):635-646.
- [19] 韩占江,于振文,王东,等.调亏灌溉对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2009,20(11):2671-2677.
- [20] Arnon D I. Copper induced enzyme in isolated chloroplasts: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* [J]. Plant Physiology, 1949, 24(1):1.
- [21] 杨永辉,武继承,徐为霞,等.水氮运筹对小麦、玉米周年产量及水分利用的影响[J].河南农业科学,2019,24(11):1-12.
- [22] 郭亚宁,周建朝,王秋红,等.作物水氮耦合效应的研究进展[J].中国农学通报,2019,35(15):1-5.
- [23] 王磊,董树亭,刘鹏,等.氮肥管理对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):301-308.
- [24] 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.
- [25] Zheng L J, Ma J J, Sun X H, et al. Responses of photosynthesis, dry mass and carbon isotope discrimination in winter wheat to different irrigation depths [J]. Photosynthetica, 2018, 56(4): 1437-1446.
- [26] 李智,李国龙,孙亚卿,等.膜下滴灌水氮供应对甜菜氮素同化和利用的影响[J].植物生理学报,2019,55(6):803-813.
- [27] 夏桂敏,张柏纶,胡家齐,等.不同生育期连续调亏灌溉对花生生长及耗水过程的影响[J].沈阳农业大学学报,2018,49(2):180-187.
- [28] 费聪,王维成,李阳阳,等.氮肥运筹对滴灌甜菜叶片光合特性的影响[J].江苏农业科学,2016,44(12):227-229.
- [29] Wang H D, Li J, Cheng M H, et al. Optimal drip fertigation management improves yield, quality, water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 243: 357-366.
- [30] 周洁,王旭,朱玉磊,等.氮肥运筹模式对小麦茎秆抗倒性能与产量的影响[J].麦类作物学报,2019,39(8):979-987.