

调亏灌溉对膜下滴灌苕蓝生长发育和产量的影响

周晨莉¹, 张恒嘉¹, 巴玉春², 李福强¹, 王璐¹

(1.甘肃农业大学水利水电工程学院,兰州 730070;2.民乐县洪水河管理处,甘肃 民乐 734500)

摘要: 2019年在河西绿洲冷凉灌区民乐县益民灌溉试验站进行了调亏灌溉对膜下滴灌苕蓝生长动态、产量和水分利用效率影响的大田试验研究。在苗期充分供水条件下,以全生育期充分供水(75%~85%的田间持水量)为对照,在营养生长期进行轻度、中度和重度水分调亏,在肉质根生长期进行轻度和中度水分调亏,在肉质根成熟期进行轻度水分调亏,分别测定了水分调亏苕蓝农艺性状的阶段性改变、干物质积累和分配、产量及水分利用效率。结果表明,在营养生长期和肉质根生长期对苕蓝进行中度和重度水分调亏、成熟期进行轻度水分调亏均会显著降低其株高、主根长、主根直径和叶面积指数($P<0.05$),而营养生长期和肉质根生长期对苕蓝进行轻度调亏其株高、主根长、主根直径和叶面积指数与对照处理间无显著差异($P>0.05$)。营养生长期以及肉质根生长期进行中度水分调亏和重度水分调亏会降低苕蓝干物质积累量,降幅为3.11%~15.67%,而轻度水分调亏则不会显著影响其干物质积累量。WT1和WT4处理的经济产量与对照无显著差异,其值分别为8 554.18,8 398.70 kg/hm²,其他各处理均导致苕蓝经济产量降低,降幅为6.89%~18.33%,WT4处理的水分利用效率和灌溉水利用效率最高,比对照提高7.91%和7.39%。因此,在营养生长期一肉质根生长期施加连续轻度水分调亏,其他生育期充分供水是实现河西绿洲冷凉灌区苕蓝节水高产高效灌溉制度。

关键词: 调亏灌溉;膜下滴灌;苕蓝;生长动态;产量;水分利用效率

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0193-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.029

Effects of Regulated Deficit Irrigation on Growth and Yield of *Isatis indigotica* Under Mulched Drip Irrigation

ZHOU Chenli¹, ZHANG Hengjia¹, BA Yuchun², LI Fuqiang¹, WANG Lu¹

(1.College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2.Administration of Hongshuihe River, Minle, Gansu 734500)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of regulated deficit irrigation on growth dynamics, yield and water use efficiency of *Isatis indigotica* under mulched drip irrigation in 2019 at Hexi oasis cold irrigation area of Yimin irrigation experimental station, Minle County. Under the condition of ensuring adequate water supply in seedling stage, full water supply in whole growth stage (75%~85% field water capacity) was taken as the control treatment. Mild, moderate and severe water deficit management was carried out in the vegetative stage, mild and moderate water deficit treatment was carried out in the fleshy root growth stage, and mild water deficit treatment was carried out in the fleshy root maturity stage. The periodical changes in agronomic traits, dry matter accumulation and distribution, yield and water use efficiency of *I. indigotica* were measured under different water deficit treatments. The results showed that the plant height, taproot length, taproot diameter and leaf area index of *I. indigotica* decreased significantly ($P<0.05$), on moderate and severe water deficit during vegetative stage and fleshy root growth stage and light water deficit during fleshy root maturity stage. There was no significant difference in plant height, taproot length, taproot diameter, and leaf area index with the control treatment between the vegetative stage and fleshy root growth stage under mild water deficit treatment ($P>0.05$). Moderate water deficit and severe water deficit in vegetative stage and fleshy root growth stage could reduce dry matter accumulation of *I. indigotica*. The decrease ranged from 3.11% to 15.67%. Mild water deficit treatment would not significantly affect

收稿日期:2019-12-18

资助项目:甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA073);国家自然科学基金项目(51669001)

第一作者:周晨莉(1995—),女,甘肃秦安人,硕士研究生,主要从事高效节水灌溉理论研究。E-mail: 1648607644@qq.com

通信作者:张恒嘉(1974—),男,甘肃天水人,博士,教授,博士生导师,主要从事作物水分高效利用与节水机理研究。E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn

dry matter accumulation. There was no significant difference between the economic yield of WT1 and WT4 with control treatment ($P>0.05$). Their values were 8 554.18 kg/hm² and 8 398.70 kg/hm². All other treatments reduced the economic output of *I. indigotica*. The decrease ranged from 6.89% to 18.33%. Water use efficiency (WUE) and irrigation water use efficiency (IWUE) in WT4 were the highest. Compared with the control treatment, it was improved by 7.91% and 7.39%. Therefore, applying continuous mild water deficit during the vegetative stage and the fleshy root growth stage and providing adequate water supply during the other growth stages is an optimal irrigation method with high efficiency, water saving, and high yield in the irrigation area of Hexi oasis cold irrigation area.

Keywords: regulated deficit irrigation; drip irrigation; *Isatis indigotica*; growth dynamics; yield; water use efficiency

菘蓝(*Isatis indigotica*)又名菘蓝,是我国传统的中药材,其叶(大青叶)和干燥根(板蓝根)均能入药,具有清热解毒、利咽止痛、凉血消炎等功效,是我国最常用的清热解毒之药^[1]。近年来药理学研究^[2]发现,菘蓝有明显的抗病毒活性,同时具有抗炎、抗肿瘤、抗癌、抗内毒素和增强免疫力等作用。

水资源匮乏严重制约了我国农业发展,也是限制北方干旱地区农业生产的重要因素^[3],发展高效节水农业有助于我国农业生产的可持续健康发展。调亏灌溉在20世纪70年代中期被首次提出^[4],是在作物的某一生育期进行水分胁迫,通过改变作物的光合产物向各组织器官的分配量,降低部分营养器官的生长量,增加了所需收获的经济产量,达到节水高效、增产的目的。冯泽洋等^[5]研究了调亏灌溉对滴灌甜菜生长和产量的影响发现,适时适度的水分调亏会提高甜菜抗旱能力,后期复水会出现补偿生长,防止水分过多造成甜菜植株徒长现象,在达到节水目的的同时保证甜菜稳产高产;还有研究^[6]表明,合理的调亏灌溉处理可增强番茄复水后作物的光合能力,在节约灌溉水量的同时,其水分利用效率得到提高;黄远等^[7]研究了调亏灌溉对塑料大棚甜瓜光合特性、果实产量和品质的影响发现,在果实膨大期施加轻度水分调亏,在不降低产量的情况下,改善甜瓜果实品质,提高水分利用效率;薛道信等^[8]的研究发现,采用膜下滴灌种植的马铃薯,在块茎形成期进行轻度水分胁迫,产量略有下降,但其收获指数、灌溉水利用效率以及水分利用效率等指标分别比对照提高11.30%,35.16%和29.04%;邓浩亮等^[9]的研究发现,在菘蓝苗期和肉质根成熟期进行轻度水分亏缺,其水分利用效率和灌溉水利用效率分别提高6.59%,1.23%和27.52%,8.41%,对产量影响不显著;谭勇等^[10]的研究发现,保证菘蓝的产量和品质兼优的水分胁迫处理是土壤含水量为45%~70%的田间持水量;王玉才等^[11]的研究发现,在菘蓝营养生长期—肉质根生长期轻度水分调亏,在不显著降低产量的同时,其水分利用效率和灌溉水利用效率分别提高7.32%和8.46%。

目前,甘肃、内蒙古、河北、陕西和山东等地^[12]是我国菘蓝的主要种植区。尽管菘蓝的适应性极强,对气候条件和土壤环境要求较低,但我国西北地区菘蓝的种植仍会面临干旱问题。水分胁迫不仅会影响菘蓝的生长发育,还会进一步影响菘蓝的产量。因此,适宜的种植技术和灌溉方式,可以在提高水分利用的同时提高菘蓝产量。本研究将调亏灌溉和膜下滴灌相结合,重点研究膜下滴灌调亏对菘蓝生长动态、干物质积累和分配、产量以及水分利用效率影响的变化规律,寻求最优的调亏程度和调亏生育期,为河西绿洲灌区菘蓝的高效节水及高产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2019年5—10月在张掖市民乐县益民灌溉试验站进行,该试验站位于甘肃省河西走廊东端(38°39'N,100°43'E),平均海拔1 970 m,属于典型的大陆性荒漠草原气候,多年平均降水量183~345 mm,年均蒸发量为1 638 mm,干燥度为5.85,年日照时间为2 932 h,年平均气温7.6℃,≥0℃积温3 500℃,≥10℃有效积温2 985℃。农田土壤类型属轻壤土,田间最大持水量约为24%,无霜期约为150 d,土壤容重约为1.46 g/cm³。该地区地下水位埋深较深,无盐碱化影响,具有降雨少且分布不均、河源来水不足导致供需矛盾突出及干旱频繁的特点。

1.2 试验材料

试验的菘蓝品种为甘肃农业大学中草药系自繁的粒大饱满、均匀优质的菘蓝种子,采用露地种植方式,于2019年5月4日播种,10月10日收获。播种量为33 kg/hm²,种植密度为83万株/hm²。播种前4天对试验用地进行机械翻耕30 cm,人工去除杂草,并分别施入220,330,120 kg/hm²的尿素(N含量为46%)、过磷酸钙(P₂O₅含量为12%,S含量为10%,Ca含量为16%)和源钾(K₂O含量为60%)作为基肥。平整土地后,进行滴灌带的铺设,每小区各铺设3条滴灌带(间距90 cm),滴头间距和灌水时滴头的

平均流量分别为 30 cm 和 2.4 L/h。铺设完滴灌带后用 120 cm 宽的无色地膜进行搭接式全膜覆盖,并覆盖 5 cm 厚的土层压盖。各小区间用 60 cm 宽的塑料薄膜隔开,防止小区间土壤水分相互渗流。

1.3 试验设计

试验采用单因素随机试验,将苕蓝的整个生育期划分为 4 个阶段:苕蓝苗期、营养生长期、肉质根生长期和肉质根成熟期。土壤水分设 4 个梯度,分别为:充分供水处理(75%~85%的田间持水量)、轻度水分调亏处理(65%~75%FC)、中度水分调亏处理(55%~65%FC)和重度水分调亏处理(45%~55%FC)。在苗期不进行水分调亏处理,在营养生长期分别设置轻度、中度和重度水分调亏处理,在肉质根生长期设置轻度和中度水分调亏处理,在肉质根成熟期只设置轻度水分调亏处理。本试验采用随机区组设计,设 6 个水分调亏处理和 1 个对照处理,每个处理进行 3 次重复,共 21 个小区,小区面积 13.5 m² (2.7 m×5.0 m),有效种植面积 283.5 m² (具体试验小区布置见图 1)。灌水方式为膜下滴灌,灌水量用水表计量。土壤水分控制到设计范围内,当计划湿润层的土壤水分降低到设计下限时,灌水到上限值。具体试验设计见表 1。

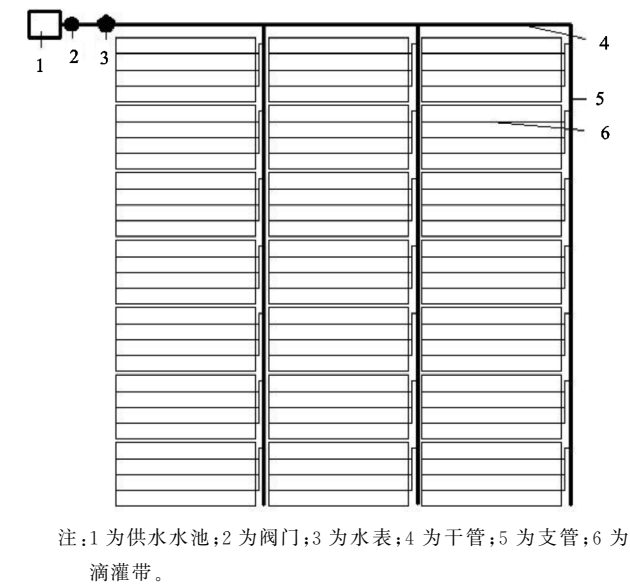


图 1 试验小区分布示意

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生长指标 每个生育期从各小区选取长势均匀的苕蓝植株 3 株分别测量各生长指标。用精度为 0.1 cm 的钢卷尺测定苕蓝株高和主根长,用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测定苕蓝主根直径,叶面积测量采用系数法^[13]。苕蓝叶面积指数(LAI)=单位面积上的苕蓝植株数(株)×单株苕蓝叶面积(m²)/单位土地面积(m²)。

1.4.2 干物质 每次取样时分别选取长势均匀的植株各 5 株测定不同生育期干物质积累量。将取样植株带回室内,用清水反复冲洗干净,用滤纸吸干多余

水分,将植株地上部分和根分开,杀青、烘干后称重。根冠比=苕蓝地下部分干重/苕蓝地上部分干重。苕蓝根分配指数=根干重/苕蓝植株干重,苕蓝叶分配指数=叶干重/苕蓝植株干重。

表 1 试验设计及控水方案					单位: %
处理	苗期	营养生长期	肉质根生长期	肉质根成熟期	
WT1	75~85	65~75	75~85	75~85	
WT2	75~85	55~65	75~85	75~85	
WT3	75~85	45~55	75~85	75~85	
WT4	75~85	65~75	65~75	75~85	
WT5	75~85	55~65	55~65	75~85	
WT6	75~85	65~75	75~85	65~75	
CK	75~85	75~85	75~85	75~85	

注: WT1 为营养生长期轻度缺水; WT2 为营养生长期中度缺水; WT3 为营养生长期重度缺水; WT4 为营养生长期轻度缺水、肉质根生长期轻度缺水; WT5 为营养生长期中度缺水、肉质根生长期中度缺水; WT6 为营养生长期轻度缺水、肉质根成熟期轻度缺水; CK 为全生育期充分供水。

1.4.3 产量和经济系数 苕蓝成熟收获时,在每个小区选取长势均匀的地方挖取单位面积(1 m²)的苕蓝,带回室内冲洗、晾干,最后换算成每公顷苕蓝总产量。

$HI=Y/Y_b$

式中: HI 为苕蓝经济系数; Y 为单位面积苕蓝经济产量(kg/hm²); Y_b 为单位面积苕蓝生物量(kg/hm²)。

1.4.4 水分利用效率和灌溉水利用效率

$WUE=Y/ET$ $IWUE=Y/I$

式中: WUE 为苕蓝水分利用效率(kg/(hm²·mm)); IWUE 为苕蓝灌溉水利用效率(kg/(hm²·mm)); Y 为苕蓝单位面积的产量(kg/hm²); ET 为苕蓝全生育期单位面积的耗水深度(mm); I 为苕蓝全生育期单位面积灌水深度(mm)。

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件对试验数据进行计算处理并绘图, SPSS 23.0 软件对试验数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉对苕蓝农艺性状的影响

2.1.1 调亏灌溉对苕蓝株高的影响 从表 2 可以看出,苕蓝苗期各处理下株高长势基本一致,无显著差异(P>0.05)。营养生长期充分灌溉处理 CK 株高最高(12.73 cm),营养生长期轻度水分调亏(WT1)、中度水分调亏(WT2)和重度度水分调亏(WT3)相比较为 WT1>WT2>WT3,这说明营养生长期进行水分调亏会抑制苕蓝株高的生长,且降幅随水分亏缺程度的增加而增大,与充分灌溉 CK 相比,WT1、WT2 和 WT3 植株株高分别显著降低 10.29%, 18.85% 和 26.39% (P<0.05)。肉质根生长期 WT1 较对照 CK 显著提

高 8.45%，WT2 较 WT5 显著提高 6.26%，说明对菘蓝水分调亏后复水会产生一定的补偿性生长效应。肉质根生长期复水后，由于水分亏缺的影响已经造成，所以各处理株高变化规律与肉质根生长期基本一致；WT1 和 WT6 处理肉质根成熟期的株高较肉质根生长期分别增长 17.09%和 8.44%，说明复水后再进行水分调亏仍会抑制株高生长。

表 2 不同调亏灌溉处理菘蓝株高变化

处理	单位:cm			
	苗期	营养生长期	肉质根生长期	肉质根成熟期
WT1	4.99a	11.42b	24.01a	28.96ab
WT2	6.18a	10.33c	22.07b	27.88b
WT3	4.90a	9.37d	18.21d	24.31d
WT4	5.13a	11.08bc	22.19b	27.79b
WT5	6.02a	10.56c	20.77c	24.91d
WT6	6.13a	12.16ab	23.77a	25.96c
CK	5.43a	12.73a	22.14b	29.13a

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.1.2 调亏灌溉对菘蓝主根长和主根直径的影响

从表 3 可以看出,各水分调亏处理菘蓝主根长和主根

表 3 不同调亏灌溉处理菘蓝主根长和主根直径变化

处理	苗期		营养生长期		肉质根生长期		肉质根成熟期	
	主根长/cm	主根直径/cm	主根长/cm	主根直径/cm	主根长/cm	主根直径/cm	主根长/cm	主根直径/cm
WT1	6.43a	0.34a	13.01a	0.76a	23.81ab	1.16a	31.28ab	1.92bc
WT2	6.81a	0.35a	11.34b	0.69bc	23.43ab	1.19a	30.07c	1.72d
WT3	6.41a	0.33a	9.98c	0.55d	20.51c	0.91c	26.86d	1.69d
WT4	6.57a	0.35a	12.06ab	0.75ab	22.12b	1.15a	31.41ab	1.97a
WT5	6.69a	0.31a	11.29b	0.68c	20.83c	1.03b	28.08d	1.71d
WT6	6.79a	0.30a	13.11a	0.77a	23.72a	1.17a	30.45bc	1.88c
CK	6.71a	0.34a	12.99ab	0.78a	23.59ab	1.21a	31.37ab	1.91bc

2.2 调亏灌溉对菘蓝叶面积指数的影响

由表 4 可知,随生育期的推移,各水分调亏处理菘蓝叶面积指数呈逐渐上升趋势。营养生长期和肉质根生长期是菘蓝生殖生长的旺盛时期,叶面积指数增幅较大,且肉质根生长期增幅最大,而苗期和肉质根成熟期相对较小。苗期菘蓝的各水分处理均为充分灌溉,其叶面积指数无显著差异($P>0.05$),均值为 0.15。营养生长期轻度水分调亏和充分灌溉叶面积指数处于同一水平,但中度水分调亏(WT2 和 WT5)和重度水分调亏处理(WT3)降低了菘蓝叶面积指数,较充分灌溉处理 CK 分别显著降低 15.91%,13.64%和 36.36%($P<0.05$),说明轻度水分亏缺对菘蓝叶面积生长无显著影响,而中度水分调亏和重度水分调亏则会抑制菘蓝叶面积增长,且抑制作用随水分调亏程度增大而加重。肉质根生长期 WT1、WT4、WT6 和 CK 无显著差异,CK 最高,WT3 叶面积指数最低,且 WT3 较 CK 显著降低 27.63%,说明营养生长期重度水分调亏会严重抑制菘蓝叶片生长,

直径从苗期到肉质根成熟期递增,且苗期和营养生长期生长缓慢,肉质根生长期生长迅速,主根长和主根直径增幅较大,肉质根成熟期根系继续生长,但较肉质根生长期增幅减小。苗期未进行水分调亏,各处理间主根长和主根直径均在同一水平上($P>0.05$)。营养生长期轻度水分调亏处理的 WT1、WT4 和 WT6 其主根长和主根直径与充分供水处理 CK 未表现出显著差异,而重度水分调亏 WT3 较 CK 处理显著降低($P<0.05$),分别降低 23.17%和 29.49%,说明轻度水分调亏不会明显抑制菘蓝根系的生长,重度水分调亏会严重抑制根系的生长发育。进入肉质根生长期后,重度水分调亏 WT3 主根长和和主根直径较营养生长期有所提高,但增幅较小;由于受连续中度水分调亏的影响,WT5 的主根长和主根直径较充分供水 CK 分别降低 11.70%和 14.88%,差异达显著水平。肉质根成熟期 WT1 和 WT4 主根长较充分供水 CK 无显著差异,WT4 主根直径较充分供水 CK 显著提高($P<0.05$)。这说明轻度水分调亏菘蓝主根长和和主根直径不会显著降低,反而对菘蓝根系生长有利。

单位:cm

即使在肉质根生长期复水后并未产生明显的补偿性生长。肉质根成熟期进行复水后,菘蓝叶面积没有显著性增加,叶面积指数变化规律与肉质根成熟期基本一致,其中 CK 叶面积指数最大(2.13)。

表 4 不同调亏灌溉处理菘蓝叶面积指数(LAI)变化

处理	苗期	营养生长期	肉质根生长期	肉质根成熟期
WT1	0.16a	0.43a	1.51a	2.11a
WT2	0.15a	0.37b	1.42b	1.82c
WT3	0.14a	0.28c	1.10c	1.51d
WT4	0.15a	0.43a	1.51a	2.06ab
WT5	0.15a	0.38b	1.39b	1.83c
WT6	0.16a	0.43a	1.50a	1.95b
CK	0.16a	0.44a	1.52a	2.13a

2.3 调亏灌溉对菘蓝干物质积累和分配规律的影响

2.3.1 调亏灌溉对菘蓝干物质积累的影响 菘蓝各生育期干物质积累变化见图 2。整个生育期菘蓝干物质累积速率呈现“S”形变化规律,苗期—营养生长期、肉质根生长期—肉质根成熟期菘蓝植株生长缓慢,干物质积累较慢,营养生长期—肉质根生长期菘

蓝植株生长旺盛,干物质积累迅速。随着苕蓝生育期的推移,干物质积累总量逐渐增大,肉质根成熟期达到最大。地上部分干物质积累呈现先增大后减小再增大的二次生长趋势,地下部分干物质积累呈逐渐增大的趋势,营养生长期—肉质根生长期增幅最大。营养生长期进行轻度水分调亏处理 WT1、WT4 和 WT6 总干物质积累量与 CK 处理无显著差异($P>$

0.05),而 WT2、WT3 和 WT5 比 CK 处理显著降低 20.76%,36.87%和 20.47%($P<0.05$)。肉质根生长期 WT6 处理总干物质积累量最高,为 20.91 g,与 WT1 和 CK 处于同一水平。肉质根成熟期 WT1 处理的总干物质积累量最高,与 WT4 和 CK 无显著差异,比 WT6 处理显著提高 11.94%,说明肉质根成熟期轻度水分调亏处理会导致干物质积累量减少。

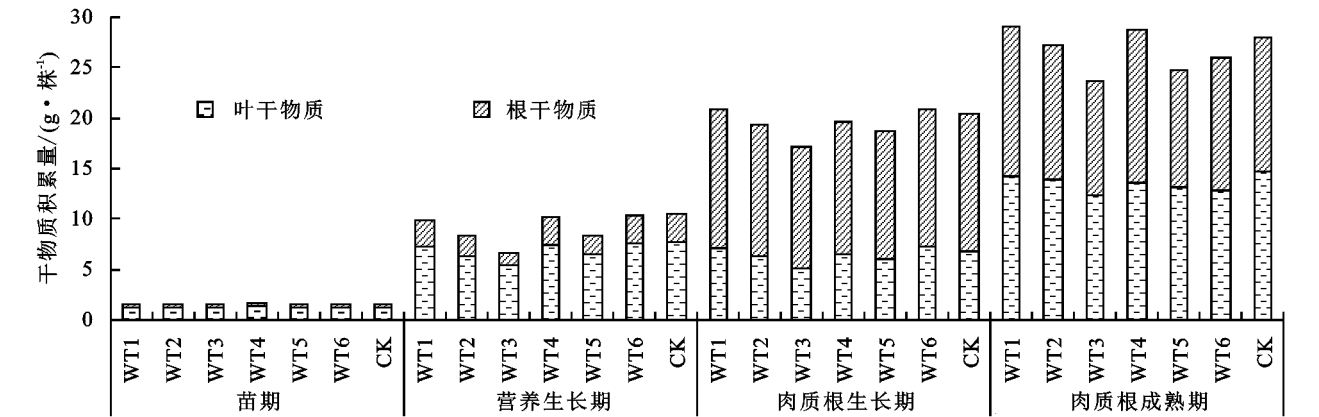


图 2 不同生育期调亏灌溉对苕蓝干物质积累量的影响

2.3.2 调亏灌溉对苕蓝干物质分配规律的影响 苕蓝全生育期根分配指数和叶分配指数变化见表 5。随着生育期的推进,各水分调亏处理根干物质分配指数先增大,在肉质根生长期达到最大值,然后逐渐减小,各水分调亏处理叶干物质分配指数先降低,在肉质根生长期最低,后逐渐增大。苗期未进行水分调亏处理,各处理间根、叶分配指数无显著差异($P>0.05$)。营养生长

期 WT3 处理根分配指数最小,比 CK 显著降低 42.68% ($P<0.05$),WT1、WT4 和 WT6 与 CK 处于同一水平。肉质根生长期 WT6 处理叶分配指数最高,为 34.58%。肉质根成熟期 WT4 根分配指数最高,比对照 CK 显著提高 10.66%,与 WT1 和 WT6 处理间无显著差异($P>0.05$),说明营养生长期和肉质根成熟期进行轻度水分调亏有利于提高苕蓝根干物质积累量。

表 5 不同生育期调亏灌溉对苕蓝干物质分配指数的影响 单位: %

处理	苗期		营养生长期		肉质根生长期		肉质根成熟期	
	根分配指数	叶分配指数	根分配指数	叶分配指数	根分配指数	叶分配指数	根分配指数	叶分配指数
WT1	19.11a	80.89a	27.02a	72.98c	65.95b	34.05a	50.83a	49.17c
WT2	19.88a	80.12a	24.16ab	75.84bc	67.43ab	32.57ab	48.86bc	51.14ab
WT3	15.69a	84.31a	18.47c	81.53a	69.87a	30.13b	47.88c	52.12a
WT4	19.02a	80.98a	26.52a	70.06c	66.62a	33.38b	52.51a	47.49c
WT5	17.33a	82.67a	23.48b	76.52b	67.90ab	32.10ab	47.12c	52.88a
WT6	18.83a	81.17a	27.23a	72.77c	65.42b	34.58a	50.35ab	49.65bc
CK	20.76a	79.24a	26.35a	73.65c	66.72b	33.28a	47.45c	52.55a

2.3.3 调亏灌溉对苕蓝根冠比的影响 从表 6 可以看出,全生育期根冠比呈先上升后下降的趋势,且肉质根生长期的增幅最大。苕蓝根冠比在苗期最低,均在 0.27 以下,且各处理间无显著差异($P>0.05$)。营养生长期 WT1、WT4 和 WT6 处理与 CK 间无显著差异,WT2、WT3 和 WT5 处理与 CK 相比分别显著降低 11.11%,36.11%和 13.89% ($P<0.05$),说明营养生长期轻度水分调亏不会造成苕蓝根冠比显著降低,而中度和重度水分调亏则会显著降低根冠比。肉质根生长期苕蓝根冠比最高,均在 1.93 以上,肉质根生长期 WT3 根冠比显著高于其他处理,与充分灌溉处理 CK 相比提高 16.00% ($P<0.05$),说明水分调亏

后复水可显著提高苕蓝根冠比。肉质根成熟期与肉质根生长期相比根冠比明显下降,肉质根成熟期 WT1 和 WT4 间根冠比无显著差异($P>0.05$),但较 CK 分别显著提高 14.44%和 23.33%,说明营养生长期和肉质根生长期轻度水分调亏向苕蓝根部分配较多光合产物,根干物质积累量增多,根冠比增大。

2.4 调亏灌溉对苕蓝产量和水分利用的影响

2.4.1 调亏灌溉对苕蓝产量、总生物量及经济系数的影响 由表 7 可以看出,营养生长期轻度水分调亏 WT1 苕蓝经济产量最高,为 8 554.18 kg/hm²,较充分供水对照 CK 未显著下降($P>0.05$),营养生长期—肉质根生长期连续轻度水分调亏处理 WT4 与

对照 CK 无显著差异,其值为 8 398.70 kg/hm²,说明肉质根生长期和营养生长期进行轻度调亏处理对菘蓝的经济产量影响不大。其他各生育期不同水分调亏均使菘蓝经济产量降低,与对照组 CK 相比,各处理间降幅为 6.89%~18.33%($P<0.05$)。处理 WT3 和处理 WT5 导致菘蓝经济产量较对照 CK 分别显著降低 18.33%和 18.10%($P<0.05$),说明中度和重度水分调亏会导致菘蓝经济产量显著下降。

表 7 不同调亏灌溉处理对菘蓝产量和经济系数的影响

处理	经济产量/ (kg·hm ⁻²)	增减 幅度/%	总生物量/ (kg·hm ⁻²)	增减 幅度/%	经济 系数	增减 幅度/%	总耗 水量/mm	灌水量/ mm
WT1	8554.18a	0.38	12637.75a	-0.09	0.6769bc	0.47	367.09bc	170.49ab
WT2	7623.76c	-10.54	11174.88b	-11.66	0.6822b	1.27	373.70b	163.00bc
WT3	6959.82d	-18.33	10350.15c	-18.18	0.6724c	-0.19	351.41d	145.41d
WT4	8398.70a	-1.44	12247.66a	-3.18	0.6857b	1.79	359.89cd	163.69bc
WT5	6979.25d	-18.10	10272.86c	-18.79	0.6794bc	0.85	361.75cd	156.15c
WT6	7934.63b	-6.89	11424.15b	-9.69	0.6945a	3.10	367.92bc	171.52ab
CK	8521.77a	—	12649.42a	—	0.6737c	—	393.85a	178.35a

全生育期充分供水处理 CK 菘蓝总生物量最高,为 12 649.42 kg/hm²,其他各水分调亏处理总生物量均有所下降,且水分调亏程度越大降幅越大。对照 CK 与 WT1、WT4 处理均未表现出显著差异($P>0.05$)。水分调亏 WT2、WT3、WT5 和 WT6 处理较充分供水对照 CK 总生物量显著降低($P<0.05$),各处理间降幅为 9.69%~18.79%,说明中度和重度水分调亏处理会造成菘蓝总生物量显著下降。WT1、WT2、WT4 和 WT5 处理间经济系数无显著差异($P>0.05$),比对照 CK 有所提高,增幅为 0.47%~1.79%($P<0.05$)。营养生长期轻度水分调亏、肉质根成熟期进行轻度水分调亏 WT6 处理经济系数最高,较对照 CK 提高 3.10%,差异显著($P<0.05$)。

2.4.2 调亏灌溉对菘蓝水分利用的影响 菘蓝全生育期充分供水对照 CK 耗水量和灌水量均最大(表 7),分别为 393.85,178.35 mm。其他各处理间总耗水量和灌水量较对照 CK 均显著降低($P<0.05$)。WT1、WT2 和 WT6 处理间耗水量和灌水量无显著差异($P>0.05$),WT4 处理总耗水量和灌水量比对照 CK 分别显著降低 8.62%和 8.22%($P<0.05$);WT5 处理总耗水量和灌水量比对照 CK 分别降低 8.15%和 12.45%,且差异显著($P<0.05$);营养生长期重度水分调亏 WT3 处理的总耗水量(351.41 mm)和灌水量(145.41 mm)处于最低水平,比对照 CK 分别显著降低 10.78%和 18.47%($P<0.05$)。

从图 3 可以看出,WT4 处理的水分利用效率(WUE)最高,WT1 处理次之,比对照 CK 分别显著提高

表 6 不同调亏灌溉处理菘蓝根冠比变化

处理	苗期	营养生长期	肉质根生长期	肉质根成熟期
WT1	0.24a	0.37a	1.94cd	1.03a
WT2	0.25a	0.32b	2.07b	0.96b
WT3	0.19a	0.23c	2.32a	0.92bc
WT4	0.24a	0.38a	2.00bc	1.11a
WT5	0.21a	0.31b	2.12b	0.89c
WT6	0.23a	0.37a	1.90d	1.01ab
CK	0.26a	0.36a	2.00bc	0.90bc

7.91%和 7.72%($P<0.05$),且 WT1 和 WT4 处理间无显著差异($P>0.05$);WT5 处理最低,比对照 CK 显著降低 10.82%($P<0.05$)。灌溉水利用效率(IWUE)WT4 处理最高,WT1 处理次之,比对照 CK 分别显著提高 7.39%和 5.00%($P<0.05$),WT5 处理最低,比对照 CK 显著降低 6.45%($P<0.05$)。说明适度水分调亏处理有利于提高菘蓝 WUE 和 IWUE。WT1 和 WT6 处理间 WUE 无显著差异,而 IWUE 差异显著,说明肉质根成熟期轻度水分调亏对菘蓝的 WUE 影响不显著,但对 IWUE 造成显著影响。

3 讨论

水资源匮乏是限制北方旱区农业发展最主要的环境因素,在提高水分利用效率的同时获得较高的产量是农业生产的重中之重^[14]。膜下滴灌栽培菘蓝可将水分和养分精准地输送到土壤中,降低土壤水分蒸发量,改善农田小气候^[15]。本研究发现,菘蓝营养生长期调亏灌溉对株高、主根长、主根直径、叶面积指数和根冠比均有影响,各处理间株高、主根长、主根直径和叶面积指数均表现为轻度水分调亏>中度水分调亏>重度水分调亏,这是由于菘蓝在营养生长期进行生理生长,水分调亏会对菘蓝植株的生长产生抑制作用。这与王玉才等^[11]研究结果一致。后期进行复水处理后,由于菘蓝的补偿性生长效应,其株高、主根长、主根直径与充分供水处理处于同一水平。

根冠功能平衡理论^[16]认为,受作物自身遗传特征的影响,作物根冠比在一定的外界条件下保持相对稳定。当作物受到外界环境胁迫时,为防止自身物种

的灭绝,作物将所汲取的营养自动分配给急需减轻胁迫程度的器官(如作物种子或果实)。有研究^[17]发现,根冠比的大小反映了植株抵抗干旱的能力,其值越大,植株对水分与养分的汲取能力越强,植株后期的抵抗干旱的能力也越强。本研究表明,营养生长期 WT1、WT4 和 WT6 处理根冠较 CK 无显著差异($P>0.05$),WT2、WT3 和 WT5 处理与 CK 相比分别降低 10.89%,36.59%和 14.28%($P<0.05$),说明营养生长期轻度水分调亏不会导致根冠比显著降低,其光合产物尽可能向根系转移,提高了苕蓝的抗旱能力;而营养生长期和肉质根生长期进行中度和重度水分调亏处理严重制约了苕蓝根系的营养生长,导致根系干物质积累量下降,进而造成根冠比显著降低,这与王玉才等^[11]研究结果一致。陈斐等^[18]研究发现,干旱胁迫对春小麦各器官分配指数的排序未出现显著影响,但对排序的变化时间节点有一定的影响,改变了持续时间。本研究发现,苕蓝全生育期干物质累积速率呈现“S”形的变化规律,这与王恩军等^[19]、何万春等^[20]对不同种植方式下干物质累积速率的变化规律基本一致。本试验结果表明,营养生长期进行轻度水分调亏的 WT1、WT4 和 WT6 处理总干物质积累量与 CK 处于同一水平,肉质根生长期 WT6 处理总干物质积累量最高,与 WT1 和 CK 无显著差异,说明营养生长期和肉质根生长期轻度水分调亏不会显著影响干物质积累量;肉质根成熟期 WT1、WT4 处理和 CK 处于同一水平,WT1 总干物质积累量最高,比 WT6 处理提高 11.94%,差异显著($P<0.05$),说明肉质根成熟期轻度水分调亏处理会导致干物质积累量减少。

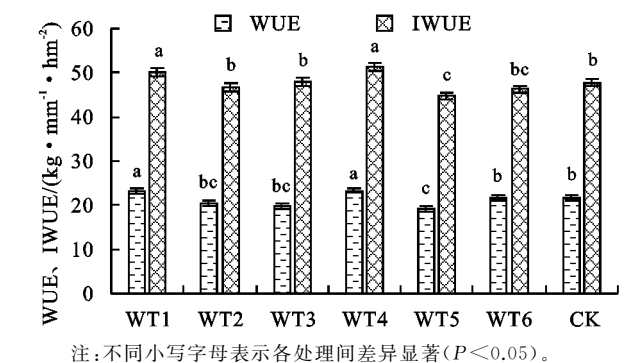


图3 不同调亏灌溉处理 WUE 和 IWUE

有研究^[21]发现,作物采用调亏灌溉技术可在提高水分利用效率的同时获得较高的产量,对作物的品质改善产生一定影响。本研究发现,苕蓝不同生育期调亏灌溉造成生物量不同程度的下降,且调亏程度越大,降幅越大,对照 CK 总生物量最大(12 649.42 kg/hm²),营养生长期和肉质根生长期轻度水分调亏 WT1 和 WT4 处理总生物量降幅不显著($P>0.05$),其余各处理均显著降

低,降幅为 9.69%~18.79%($P<0.05$)。这与闫曼曼等^[22]、李炫臻等^[23]的研究结果相似,充足的水分有利于生物量的积累,水分亏缺会抑制作物生长,导致作物生物量降低。经济产量占总生物量的比值称为作物的经济系数,在一定程度上体现了作物的生产水平^[24]。适宜的水分亏缺可提高作物的经济系数,但极度的水分亏缺会严重抑制作物生长,使经济产量与总生物量降低,导致经济系数下降。刘震等^[25]关于陇中半干旱区集雨雨灌对马铃薯干物质积累和产量的影响研究发现,有限补充灌溉对马铃薯有显著增产效果,提高马铃薯产量和生物量的同时提高了经济系数,且苗期补充灌溉对马铃薯产量的补偿效应最显著;时学双等^[26]研究表明,在春青稞不同生育期内,轻度至重度水分亏缺可提高作物经济系数和水分利用效率,但极度水分亏缺会导致最低的籽粒产量、经济系数和水分利用效率。本研究表明,在苕蓝全生育期轻度和中度水分调亏均可提高苕蓝的经济系数,与对照 CK 相比,增幅为 0.47%~3.10%($P<0.05$),而重度水分调亏则会降低经济系数。这是由于苕蓝中度和重度水分调亏导致其细胞壁坚硬,复水后难以恢复,造成生物量下降,降低了苕蓝的经济系数。

适时适度的调亏灌溉可以减少作物全生育期的总耗水量,提高水分利用效率,且对产量的影响不显著,以此来达到节水、高产高效的目的。张恒嘉等^[27]和王世杰等^[28]等分别对马铃薯和辣椒的研究结果表明,调亏灌溉在不显著影响产量的情况下,降低了全生育期总耗水量,提高了水分利用效率。本研究表明,WT1 处理苕蓝经济产量最高,与 WT4 处理和对照 CK 间无显著差异($P>0.05$);WT4 处理的水分利用效率(WUE)和灌溉水利用效率(IWUE)最高,比对照处理 CK 分别提高 7.91%和 7.39%,这是由于 WT4 处理在不显著影响苕蓝产量的情况下,降低了全生育期的耗水量,使水分利用效率得到提高。

4 结论

(1)苕蓝全生育期对照 CK 的叶面积指数始终处于最高水平,在营养生长期进行轻度调亏处理对其生长和叶面积指数均无显著影响($P>0.05$),而中度调亏使苕蓝植株生长和叶面积增长受到抑制,重度调亏会显著降低苕蓝生物量。

(2)整个生育期苕蓝干物质累积速率呈现“S”形的变化规律,营养生长期和肉质根生长期轻度水分调亏处理不会显著影响其干物质积累量,而中度水分调亏和重度水分调亏会降低干物质积累量。营养生长期对苕蓝进行中度和重度水分调亏会使苕蓝根冠比

显著降低,调亏越重,降幅越大。

(3)营养生长期轻度水分调亏 WT1 处理苕蓝经济产量最高(8 554.18 kg/hm²),较充分供水处理 CK 提高 0.38%,无显著差异($P>0.05$),营养生长期一肉质根生长期连续轻度水分调亏 WT4 处理与对照 CK 无显著差异,其值为 8 398.70 kg/hm²,其他各生育期不同水分调亏处理均使苕蓝经济产量降低。WT4 处理的 WUE 和 IWUE 最高,比对照 CK 显著提高 7.91%和 7.39%($P<0.05$)。

因此,综合产量和水分利用,河西绿洲灌区采用膜下滴灌种植的苕蓝最优调亏灌溉制度是营养生长期一肉质根生长期进行轻度水分调亏处理(65%~75%的田间持水量)。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会.中华人民共和国药典[M].2015 版(一部).北京:中国医药科技出版社,2015:21,205.
- [2] Du Z J, Liu H, Zhang Z L, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of Radix isatidis polysaccharide in murine alveolar macrophages[J].International Journal of Biological Macromolecules,2013,58:329-335.
- [3] 康绍忠,蔡焕杰.作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [4] Mitchell P D, Jerie P H, et al. The effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth, and yield[J].Journal of the American Society for Horticultural Science,1984,109(5):604-606.
- [5] 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.
- [6] Kuu H. The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment[J].Agricultural Water Management,2014,133(2):92-103.
- [7] 黄远,王伟娟,汪力威,等.调亏灌溉对塑料大棚甜瓜光合特性、果实产量和品质的影响[J].华中农业大学学报,2016,35(1):31-35.
- [8] 薛道信,张恒嘉,巴玉春,等.调亏灌溉对荒漠绿洲膜下滴灌马铃薯生长、产量及水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):109-116,132.
- [9] 邓浩亮,张恒嘉,李福强,等.河西绿洲苕蓝生长、光合特性及品质对膜下滴灌调亏的响应[J].水土保持学报,2018,32(3):321-327.
- [10] 谭勇,梁宗锁,董娟娥,等.水分胁迫对苕蓝生长发育和有效成分积累的影响[J].中国中药杂志,2008(1):19-22.
- [11] 王玉才,张恒嘉,邓浩亮,等.调亏灌溉对苕蓝水分利用及产量的影响[J].植物学报,2018,53(3):322-333.
- [12] 陈晓琴,于中南,方剑儒.张掖市人工种植板蓝根资源调查[J].北方药学,2013,10(2):81.
- [13] 柏军华,王克如,初振东,等.叶面积测定方法的比较研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2005,23(2):216-218.
- [14] Ledoigt G, Griffaut B, Debiton E, et al. Analysis of secreted proteaseinhibitors after water stress in potato tubers[J].International Journal of Biological Macromolecules,2006,38(3/5):268-271.
- [15] 雷舜,王抄抄,黄炎,等.分蘖期控制灌溉对土温及水稻干物质积累等的影响[J].华北农学报,2016,31(2):153-158.
- [16] 王树声,李春俭,梁晓芳,等.施氮水平对烤烟根冠平衡及氮素积累与分配的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):935-939.
- [17] 方锋,黄占斌,俞满源.保水剂与水分控制对辣椒生长及水分利用效率的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(2):78-81.
- [18] 陈斐,王润元,王鹤龄,等.干旱胁迫下春小麦干物质积累和分配及其模拟[J].干旱区研究,2017,34(6):1418-1425.
- [19] 王恩军,陈垣,韩多红,等.栽培方式对苕蓝农艺性状及产量和品质的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(11):1661-1670.
- [20] 何万春,何昌福,邱慧珍,等.不同氮水平对旱地覆膜马铃薯干物质积累与分配的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):175-182.
- [21] 刘小飞,李彪,孟兆江,等.隔沟调亏灌溉对冬小麦旗叶生理特性与产量形成的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):320-328.
- [22] 闫曼曼,郑剑超,张巨松,等.调亏灌溉对海岛棉生物量和氮素累积分配及产量的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(7):841-850.
- [23] 李炫臻,张恒嘉,邓浩亮,等.膜下滴灌调亏对绿洲马铃薯生物量分配、产量和水分利用效率的影响[J].华北农学报,2015,30(5):223-231.
- [24] 潘晓华,邓强辉.作物收获指数的研究进展[J].江西农业大学学报,2007,29(1):1-5.
- [25] 刘震,秦舒浩,王蒂,等.陇中半干旱区集雨限灌对马铃薯干物质积累和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):46-49.
- [26] 时学双,李法虎,闫宝莹,等.不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J].农业机械学报,2015,46(10):144-151,265.
- [27] 张恒嘉,李晶.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J].农业机械学报,2013,44(10):143-151.
- [28] 王世杰,张恒嘉,巴玉春,等.调亏灌溉对膜下滴灌辣椒生长及水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):31-38.