

河西绿洲膜下滴灌调亏对食用向日葵耗水特征、 光合特性及品质的影响

王璐¹, 张恒嘉¹, 巴玉春², 李福强¹, 周晨莉¹, 王泽义¹, 张德仲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:于2019年在张掖市益民灌溉试验站进行食用向日葵膜下滴灌调亏大田试验,探究在现蕾期、开花期和灌浆期充分灌溉条件下,苗期轻度—成熟期(轻度、中度)水分调亏、苗期中度—成熟期(轻度、中度)水分调亏、苗期重度—成熟期(轻度、中度)水分调亏处理分别对食用向日葵耗水、光合特性、品质及产量的影响,为河西绿洲冷凉灌区优质高产高效种植食用向日葵提供理论依据。结果表明:(1)苗期和成熟期食用向日葵的阶段耗水量、耗水模数、日耗水强度均随水分调亏程度增加而降低,与充分灌溉相比,苗期水分调亏处理阶段耗水量、耗水模数、日耗水强度降幅分别为10.10%~46.08%,7.57%~34.58%,10.68%~46.60%,成熟期水分调亏处理阶段耗水量、耗水模数、日耗水强度降幅分别为5.50%~30.29%,2.93%~16.72%,5.56%~30.34%,苗期重度水分调亏经后期复水补偿作用有限;(2)苗期重度和成熟期中度水分调亏显著降低食用向日葵叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率($P<0.05$),与充分灌溉相比,苗期重度水分调亏的降幅分别为40.30%~45.98%,43.99%~47.37%,38.20%~42.10%,成熟期中度水分调亏的降幅分别为14.23%~32.07%,15.98%~51.23%,10.02%~28.45%;(3)苗期中度—成熟期轻度处理品质最优,其粗脂肪含量与粗蛋白含量较充分灌溉分别显著提高10.84%,14.90%($P<0.05$)。(4)苗期中度—成熟期轻度水分调亏处理产量为4 145 kg/hm²,与对照CK处于同一水平,产量无明显降低情况,具有节水、调质作用。综合考虑食用向日葵耗水量、光合特性、品质及产量等指标,在其他生育期充分灌溉条件下,进行苗期中度—成熟期轻度水分调亏,作为当地食用向日葵节水优质最优调亏灌溉模式。

关键词:食用向日葵;水分调亏;耗水特征;光合特性;品质;产量;河西绿洲

中图分类号:S274.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0209-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.031

Effects of Drip Irrigation Deficit Adjustment Under Mulch on Water Consumption, Photosynthetic Characteristics, and Quality of Edible Sunflower in Hexi Oasis

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

ZHOU Chenli¹, WANG Zeyi¹, ZHANG Dezhong¹

(1.School of Water Resource and Hydropower, Gansu Agricultural University,

Lanzhou 730070; 2.Administration of Hongshuihe River, Minle, Gansu 734500)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for high-quality, high-yield, and high-efficiency planting of edible sunflower in the cold-cool irrigation area of Hexi Oasis, a field trial of edible sunflower with drip irrigation deficit adjustment under film mulch was conducted in 2019, Zhangye City Yimin Irrigation Experimental Station to explore the influence of adequate irrigation at the bud, flowering, and grouting stages treatment, the seedling stage (mild) — maturity stage (mild and Moderate) water deficit treatment, the seedling stage (moderate) — maturity stage (mild and moderate) water deficit treatment, and the seedling stage (severe) — maturity stage (mild and moderate) water deficit treatment on water consumption, photosynthesis, quality, and yield of edible sunflower. The results showed that: (1) The water consumption, water consumption modulus, and daily water consumption intensity of edible sunflowers at the seedling stage

收稿日期:2019-12-26

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:王璐(1995—),女,甘肃平凉人,在读硕士研究生,主要从事作物节水理论与技术研究。E-mail:1013743201@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,主要从事流域水土资源学、农田生态水文过程及作物水分高效利用与节水机理研究。E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn

and the mature stage decrease with the increase of water deficit. Compared with full irrigation, the water consumption, water modulus, and daily water intensity in the seedling stage decreased by 10.10%~46.08%, 7.57%~34.58%, 10.68%~46.60%, and in the maturing stage decreased by 5.50%~30.29%, 2.93%~16.72%, 5.56%~30.34%. The compensation effect of severe water regulation deficit during the later period was limited. (2) Severe water deficit at seedling stage and moderate water deficit at maturity stage significantly reduced net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of edible sunflower leaves. Compared with full irrigation, the declines of severe water deficit adjustment at seedling stage were 40.30%~45.98%, 43.99%~47.37%, 38.20%~42.10%, the declines of moderate water deficit adjustment at maturing stage were 14.23%~32.07%, 15.98%~51.23%, 10.02%~28.45%. (3) The quality of mild water deficit in seedling stage—moderate water deficit in maturing stage was the best, and its crude fat content and crude protein content were 10.84% and 14.90% higher than those of full irrigation. (4) The yield of mild water deficit in seedling stage—moderate water deficit in maturing stage was 4145 kg/hm², which is at the same level as the control CK. The yield was not significantly reduced. The treatment had the function of saving water and regulating quality. Taking indicators such as water consumption, photosynthetic characteristics and quality of edible sunflowers into account, under the conditions of full irrigation in other growth periods, moderate water deficit adjustment at the seedling stage and mild mature stage was adopted as the optimal water-saving deficit irrigation mode for local sunflowers.

Keywords: edible sunflower; water deficit adjustment; water consumption; photosynthetic characteristics; quality; yield; Hexi Oasis

向日葵属菊科,是我国继大豆、油菜籽、花生后的第四大油料作物,喜温耐旱,用途广泛。河西走廊地处西北干旱内陆河流域,具有丰富的光热和土地资源,食用向日葵已成为当地主要经济作物之一,然而当地水资源稀少,降水不足、蒸发强度大,农业灌溉方式不合理等导致水分利用效率不高,产量和品质较低,严重制约食用向日葵等产业可持续发展和经济效益提升。因此,在有限水资源情况下,如何进行节水增产,以水调质,探究最优灌溉方式,制定科学、合理灌溉制度,有效缓解当地农业需水压力成为目前亟需解决的科学问题。

国内外大量研究已表明,膜下滴灌调亏技术可在实际生产种植中推广应用,如 Henry 等^[1]、Greaves 等^[2]、Pérez 等^[3]、谭勇等^[4]、万文亮等^[5]、邵玺文等^[6]分别对洋葱、玉米、柠檬、苕蓝、马铃薯、黄芩等进行滴灌调亏,证明了合理的滴灌调亏技术具有减少作物耗水量、提高产量、改善作物品质的作用。目前,国内外对向日葵的研究^[7-8]主要集中在选育、栽培技术、施肥及灌溉制度对生长动态指标、产量及品质的影响等方面。蒋桂英等^[9]通过研究 4 种种植方式对土壤水分动态变化的影响表明,滴灌免耕能够防止土壤水分流失,改善土壤根区水分分布,提高复播油葵产量及水分利用效率,维持农田生态系统良好循环;吕雯等^[10]通过研究秸秆覆盖和地膜覆盖分别对油葵土壤水盐结构及产量的影响表明,秸秆地膜复合覆盖能够有效提高降水生产力及土壤保墒抑盐作用,改善油葵根层

土壤环境,提高生产效益;国世佳等^[11]通过研究施氮量对食用向日葵产量及品质的影响表明,综合考虑产量、品质、氮素吸收量及经济效益等指标,宜施加氮素 150 kg/hm²,其处理中向日葵籽粒中粗蛋白和粗脂肪含量均最高;王振华等^[12]通过研究不同滴灌定额对复播油葵的耗水、生长发育及产量的影响表明,中等灌溉定额 286 mm(即灌水量在苗期和灌浆期为 47.67 mm,在现蕾期和开花期为 95.33 mm)可以实现节水增产的双重目标。国内外对膜下滴灌调亏食用向日葵的研究^[13-14]仅在探讨对其生长形态和产量方面的影响,关于膜下滴灌调亏对食用向日葵生长发育、耗水量、光合特性、品质及产量的综合分析研究则更少。本研究采用膜下滴灌技术,以优选大小均匀且饱满的食用向日葵种子为研究对象,通过大田动态测定,分析探讨不同生育期的不同土壤水分梯度对食用向日葵耗水特性、光合特性及品质指标的影响,以期对河西绿洲冷凉灌区食用向日葵优质高产高效种植提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

向日葵膜下滴灌调亏试验在河西走廊典型荒漠绿洲冷凉灌区—甘肃省张掖市民乐县益民灌溉试验站(100°43'E,38°39'N)进行,该灌区海拔 1 970 m,光热资源丰富,蒸发强度大,昼夜温差大,气温变化剧烈,年平均气温 6.0℃,极端最高气温 37.8℃,极端最低气温-33.3℃,试验区多年平均总降水量 183~

285 mm,食葵全生育期总降水量 221.9 mm,有效降水量 166.1 mm(>5 mm),无霜期为 4—10 月,时长约为 109~174 d,年日照时间 3 000 h 左右,对促进作物光合作用、干物质积累、提高作物产量十分有利,但该灌区土壤干旱且降水不足,水资源短缺并且浪费严重,供需矛盾日益突出。试验用地属中壤土,土壤肥沃,田间持水量(θ_f)为 24%,土壤容重 1.46 t/m³,pH 7.22,地下水位较低,为 20 m 左右,无盐碱化现象。

1.2 试验材料与种植方式

供试向日葵品种为“SH361”,为保证出苗整齐,存活率高,选取大小一致的饱满种子,采用 70 cm 地膜进行平地全膜覆盖,一膜两行,株行距为 40 cm×55 cm,在膜下 5 mm 处铺设滴头间距 30 cm、且平均流量大小为 2.5 L/h 的滴灌带,为保持良好通风,在每个重复处理间设置间距为 80 cm 的通风行,在试验田四周设置排水沟以防田间积水横向入渗,施入足量的磷酸二铵(370 kg/hm²)、碳铵(147 kg/hm²)底肥,并在向日葵现蕾期、开花期施入适量的尿素(78 kg/hm²,含氮量 46%)。

1.3 试验设计

试验于 2019 年 4 月 15 日播种,2019 年 9 月 7 日收获,历时 146 天,采用单因素随机试验,将向日葵生育期按其生长特点划分为 5 个生育期:苗期(4 月 15 日至 6 月 12 日)、现蕾期(6 月 13 日至 7 月 9 日)、开花期(7 月 10 日至 7 月 29 日)、灌浆期(7 月 30 日至 8 月 13 日)和成熟期(8 月 14 日至 9 月 7 日)。本试验土壤水分控制设 4 个梯度,根据调亏程度和调亏生育期,共有 6 个调亏处理(T1~T6)和 1 个对照组(CK),均设 3 次重复,共 21 个小区,每个小区面积为 5 m×9 m,调亏处理分别在苗期和成熟期进行,现蕾期、开花期和灌浆期充分灌溉不作调亏处理,即 T1:苗期轻度调亏(65%~75% θ_f)、成熟期轻度调亏(65%~75% θ_f);T2:苗期轻度调亏(65%~75% θ_f)、成熟期中度调亏(55%~65% θ_f);T3:苗期中度调亏(55%~65% θ_f)、成熟期轻度调亏(65%~75% θ_f);T4:苗期中度调亏(55%~65% θ_f)、成熟期中度调亏(65%~75% θ_f);T5:苗期重度调亏(45%~55% θ_f)、成熟期轻度调亏(65%~75% θ_f);T6:苗期重度调亏(45%~55% θ_f)、成熟期中度调亏(55%~65% θ_f);对照组 CK:全生育期充分灌水(75%~85% θ_f),采用膜下滴灌灌水方式,用传统方式土钻取土,在温度适当烘箱中烘干称重后测得土壤含水量,使试验区计划湿润层土壤含水量控制在土壤水分设计上下限范围内,具体试验方案见表 1。

1.4 测定项目与测定方法

1.4.1 土壤水分 向日葵根系主要分布在 0—40 cm

耕土层中,在每个小区随机选择距滴灌带 6 cm 并在 2 株向日葵中间连线任意处分别钻取试验小区 0—80 cm 的 5 个土壤剖面土层土壤并测定其含水量,计划湿润层土壤内的水分可由 0—40 cm 内土壤土层水分平均值计算得出,作物对土壤水分的消耗量由 0—80 cm 内土壤土层水分变化来计算。在向日葵播种前土壤含水量应在籽粒播种前平整土地之后取土测量,播种后每隔 5~7 天取土测量,每次灌水后或降雨后应加测 1 次。当测得土壤含水量低于表 1 土壤水分设计下限时,应立即灌水到土壤水分设计上限。

表 1 试验设计方案					单位: %
处理	苗期	现蕾期	开花期	灌浆期	成熟期
T1	65~75	75~85	75~85	75~85	65~75
T2	65~75	75~85	75~85	75~85	55~65
T3	55~65	75~85	75~85	75~85	65~75
T4	55~65	75~85	75~85	75~85	55~65
T5	45~55	75~85	75~85	75~85	65~75
T6	45~55	75~85	75~85	75~85	55~65
CK	75~85	75~85	75~85	75~85	75~85

注:表中数字为土壤水分设计上下限(土壤含水量占田间持水量的百分数)。

耗水量采用水量平衡方程式计算:

$$E_T = 10 \sum_j r_j H_j (W_{j1} - W_{j2}) + M + P + K - C$$
式中: E_T 为向日葵各生育期阶段耗水量(mm); j 为土层编号; r_j 为第 j 层土壤容重(1.46g/cm³); H_j 为第 j 层土壤厚度(cm); W_{j1} 、 W_{j2} 为第 j 层土壤某时段始末土壤质量含水率(%); M 为某时段有效灌水量(mm); P 为某时段内有效降雨量(mm); K 为深层土壤对 0—80 cm 土层内的补给量(mm); C 为深层渗漏量(mm);试验区地下水埋深>20 m,无深层补给,故 $K=0$;设计灌水量为田间持水量的 85%,无深层渗漏,故 $C=0$ 。

耗水强度(mm/d)=耗水量/生育期天数
耗水模数(%)=阶段耗水量/全生育期耗水量

1.4.2 光合特性 在每个生育期水分调亏处理后,选定晴朗且无云无风天气在 9:00—18:00 进行食用向日葵光合指标测定,采用美国 Li—6400XT 便携式光合仪在光源 1 000 μ mol/(m²·s)下,每个小区选取 5 株生长良好植株顶端光照相同,位置相同的功能叶片进行叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)的测定,各处理取结果平均值。

1.4.3 品质 粗脂肪和粗蛋白分别采用凯氏定氮法和索式提取法进行测定。

1.5 数据分析

采用 Excel 2010 对采集的试验数据进行整理统

计计算并作相应的绘图,利用 SPSS 19.0 软件对各处理试验数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌调亏对食用向日葵耗水特征的影响

2.1.1 阶段耗水量 阶段耗水量反映向日葵不同生育期的耗水特性,主要与向日葵生育期生长特性和气候条件有关。由表 2 可知,膜下滴灌调亏向日葵阶段耗水量总体呈现先增后减,各水分调亏处理在开花期达到最大,均在 136.47 mm 以上,这是由于开花期营养生长和生殖生长同时进行,因此耗水最大,其余生育期耗水量从大到小依次为现蕾期、灌浆期、成熟期、苗期,耗水量分别在 113.72,57.96,40.71,32.62 mm

表 2 不同水分调亏处理食用向日葵耗水规律

处理	苗期			现蕾期			开花期			灌浆期			成熟期			全生育期		
	耗水量/ mm	耗水 模数/%	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水量/ mm	耗水 模数/%	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水量/ mm	耗水 模数/%	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水量/ mm	耗水 模数/%	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水量/ mm	耗水 模数/%	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水量/ mm	耗水 模数/%	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)
T1	54.39b	12.08b	0.92b	130.83a	29.05b	4.85a	147.66a	32.79c	7.38a	62.30a	13.83c	4.15a	55.19a	12.25a	2.21a	450.37a	100.00a	3.08a
T2	50.02b	11.72b	0.85b	128.10a	30.01a	4.74a	146.30a	34.28b	7.32a	61.15a	14.33b	4.08a	41.25c	9.66b	1.65c	426.82b	100.00a	2.92b
T3	40.14c	9.75c	0.68c	118.69b	28.84c	4.40b	139.83b	33.98bc	6.99b	58.89ab	14.31b	3.93b	53.98a	13.12a	2.16a	411.53b	100.00a	2.82b
T4	39.25c	9.78c	0.67c	120.32b	29.93a	4.45b	140.55b	35.02a	7.03b	59.21ab	14.75a	3.95b	42.18c	10.51b	1.69c	401.51c	100.00a	2.75c
T5	34.78d	8.85d	0.59d	114.43c	29.11c	4.24c	137.51c	34.98b	6.88b	58.58b	14.90a	3.91b	47.86b	12.17a	1.91b	393.16c	100.00a	2.69c
T6	32.62d	8.55d	0.55d	113.72c	29.81b	4.21c	136.47c	35.77a	6.82b	57.96b	15.19a	3.86b	40.71c	10.67b	1.63c	381.48d	100.00a	2.61d
CK	60.50a	13.07a	1.03a	132.27a	28.58c	4.90a	148.36a	32.06c	7.42a	63.22a	13.66c	4.21a	58.40a	12.62a	2.34a	462.75a	100.00a	3.17a

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 不同生育期耗水模数 由表 2 可知,向日葵不同水分调亏生育期的耗水模数变化规律大致相同,均呈抛物线趋势,由大到小依次为开花期(32.06%~35.77%)、现蕾期(28.58%~30.01%)、灌浆期(13.66%~15.19%)、成熟期(9.66%~13.12%)、苗期(8.55%~13.07%),这是由于苗期气温较低,植株矮小且生长缓慢,叶面积较小,因此耗水模数最小,现蕾期和开花期气温升高甚至达到最高,植株生长进程加快,耗水模数也随之升高且达到最大,后期营养生长变缓或停止,主要进行生殖生长,耗水模数逐渐下降。苗期对照 CK 耗水模数最大,为 13.07%,各水分调亏处理与对照 CK 均有显著差异($P<0.05$),且随着水分调亏程度的增加而显著下降,现蕾期除处理 T3、T5 外,其余处理与对照 CK 均有显著差异。中间生育期复水后,灌浆期对照 CK 最小,为 13.66%,对照 CK 与处理 T1 处于同一水平,无显著差异。成熟期处理 T3 最大,除处理 T1、T3 和 T5 与对照 CK 处于同一水平,无显著差异外($P>0.05$),其余处理均与 CK 有显著差异,因此成熟期轻度调亏对耗水模数无显著影响,中度水分调亏对耗水模数有显著影响。

2.1.3 不同生育期日耗水强度 由表 2 可知,向日葵不同水分调亏处理各生育期日耗水强度均呈现较为相似的规律分布,即前期增大,后期降低。各处理开花期

以上。与对照 CK 相比,苗期各水分调亏处理向日葵耗水量均显著下降($P<0.05$),其中,水分调亏处理 T1、T3 和 T5 较 CK 分别下降 10.10%,33.65%和 42.51%。现蕾期处理 T1、T3 和 T5 复水后耗水量较苗期显著增加,且处理 T1 与对照 CK 处于同一水平,处理 T3 和 T5 与对照 CK 均有显著差异,分别较对照 CK 下降 10.27%和 13.49%。成熟期对照 CK 耗水量最大,处理 T1、T3 与对照 CK 无显著差异($P>0.05$),且仅次于 CK,处理 T5 与 CK 有显著差异,且较 CK 下降 18.05%。成熟期处理 T1、T3 和 T5 与处理 T2、T4 和 T6 均有显著差异,且处理 T2、T4 和 T6 较处理 T1、T3 和 T5 分别下降 25.26%,21.86%和 14.94%。

日耗水强度最大,为 6.82~7.42 mm/d,在苗期最小,为 0.55~1.03 mm/d,同期对照 CK 日耗水强度最大,与其余水分调亏处理均有显著差异($P<0.05$),且处理 T1、T3 和 T5 较对照 CK 下降 10.68%,33.98%和 42.72%。后期复水后,灌浆期 T1 和 T2 与对照 CK 日耗水强度处于同一水平且大小次于 CK,其余处理均与对照 CK 有显著差异。成熟期对照 CK 日耗水强度最大,除与 T1、T3 无显著差异外($P>0.05$),与其余处理均有显著差异,处理 T2、T4 和 T6 与处理 T1、T3 和 T5 均有显著差异,且较处理 T1、T3 和 T5 下降 25.34%,21.76%和 14.66%。因此,不同生育期不同水分调亏处理对向日葵日耗水强度均有影响,并且日耗水强度随着水分调亏程度的增加而降低。其中,苗期轻度和中度水分调亏处理经后期复水日耗水强度与对照处理无显著差异,且大小仅次于对照,成熟期轻度水分调亏对向日葵日耗水强度无显著性影响,中度水分调亏则会显著降低向日葵日耗水强度。

2.2 膜下滴灌调亏对食用向日葵叶片光合气体交换参数的影响

2.2.1 净光合速率 由图 1 可知,不同水分调亏处理对向日葵各生育期的叶片净光合速率(P_n)均有影响,全生育期叶片净光合速率变化规律基本一致,总体上呈单峰曲线变化。苗期各处理与对照 CK 的叶

片净光合速率(P_n)均有显著差异($P<0.05$),且随着水分调亏程度增加其降低幅度越大,处理 T1、T3 和 T5 较对照 CK 的叶片净光合速率(P_n)降低幅度分别为 9.92%,27.85%和 45.98%。经过一段时间复水,出现补偿效应,灌浆期处理 T1、T2 与对照 CK 的 P_n 无显著差异($P>0.05$),且处理 T1 的 P_n 超过 CK,为 $25.83\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,处理 T3、T4 的 P_n 略低于对照,且较对照降低幅度为 7.58%,4.44%,处理 T5、T6 的 P_n 降低幅度最大,均显著低于该生育期对

照 CK 的 16.90%和 20.93%。成熟期处理 T1、T3 与对照 CK 的 P_n 处于同一水平,较对照 CK 分别下降 3.67%,5.24%,处理 T5 与对照 CK 的 P_n 差异显著,较对照 CK 降低幅度较大,为 22.97%,同期处理 T2、T4 和 T6 与处理 T1、T3 和 T5 的 P_n 差异显著,且较处理 T1、T3 和 T5 分别显著降低 10.96%,14.85%和 11.81%。因此,成熟期轻度水分调亏对向日葵叶片净光合速率无显著性影响,而中度水分调亏对向日葵叶片净光合速率影响作用较大。

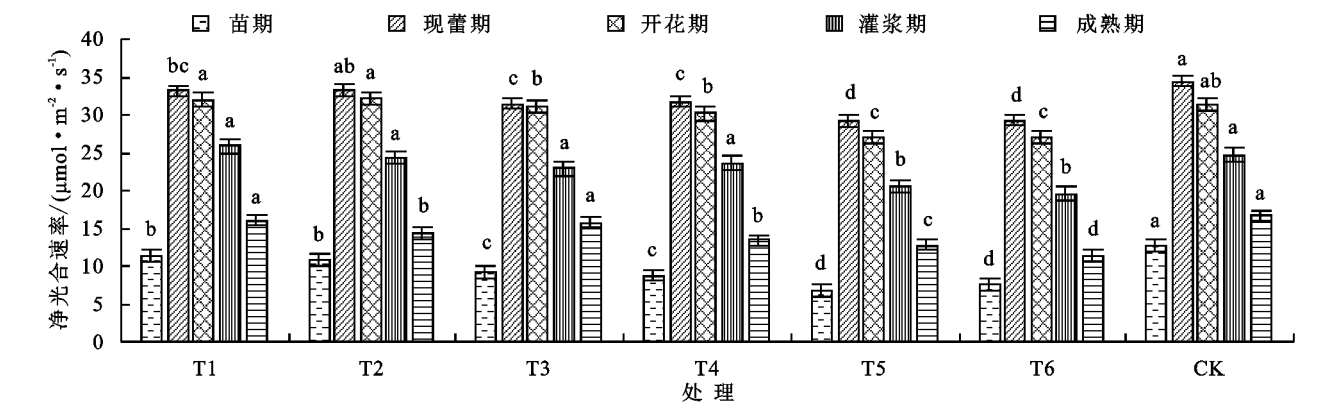


图1 水分调亏对食用向日葵叶片净光合速率的影响

2.2.2 气孔导度 气孔是植物叶片与大气进行气体交换的主要通道,其张开程度对光合作用、蒸腾作用和呼吸作用有直接影响。由图 2 可知,水分是影响气孔导度(G_s)的关键因子,不同时期的水分调亏均能显著影响气孔导度(G_s),且随着水分调亏程度增加,气孔导度(G_s)明显降低。苗期对照 CK 的 G_s 最大,与其余处理均有显著差异($P<0.05$),同期轻度水分调亏处理 T1、T2 的 G_s 较对照 CK 分别降低 15.59%,11.39%,同期中度水分调亏处理 T3、T4 的 G_s 较对照 CK 降低幅度可达 27.15%,30.31%,同期重度水分调亏处理 T5、T6 的 G_s 在该生育期内降低幅度最大,均分别显著低于同期对照 CK 的 47.37%,

43.99%。灌浆期不同水分调亏处理复水后, G_s 均产生不同程度的补偿效应,处理 T1 补偿效应尤为显著,高达 $0.92\text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,与同期对照 CK 处于同一水平且较 CK 上升 2.44%,除此之外,CK 与处理 T2、T3、T4 的 G_s 无显著差异($P>0.05$),与处理 T5、T6 的 G_s 均有显著差异,且处理 T5、T6 的 G_s 分别为 $0.65,0.67\text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。成熟期处理 T1、T3 与对照 CK 的 G_s 处于同一水平,且处理 T1 的 G_s 较对照 CK 上升 1.01%,处理 T5 的 G_s 较对照 CK 明显降低 43.19%,同期处理 T2、T4 和 T6 与处理 T1、T3 和 T5 的 G_s 差异显著,且较处理 T1、T3 和 T5 分别显著降低 16.81%,19.27%和 14.15%。

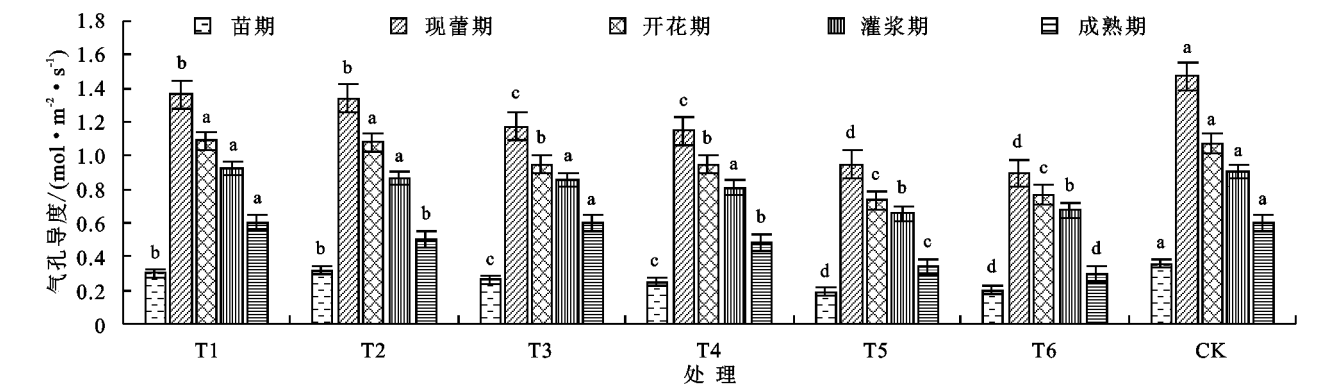


图2 水分调亏对食用向日葵叶片气孔导度的影响

2.2.3 蒸腾速率 由图 3 可知,不同时期水分调亏处理下向日葵叶片蒸腾速率(T_r)总体上呈现先增加后减小的变化规律,苗期和成熟期的不同水分调亏均使 T_r 呈降低趋势,且随着水分调亏程度的增加,降低

幅度越为显著,苗期下降趋势尤为明显。苗期处理轻度水分调亏处理(T1、T2)、中度水分调亏处理(T3、T4)和重度水分调亏处理(T5、T6)的 T_r 与同期对照 CK 相比差异显著($P<0.05$),且较 CK 分别降低 14.11%~

15.90%，26.51%~30.99%和 38.20%~42.10%，后期充分灌水后不同水分调亏处理的 T_r 均有一定程度复水补偿效应，灌浆期轻度(T1、T2)和中度(T3、T4)水分调亏处理的 T_r 与对照 CK 处于同一水平，且处理 T3、T4 的 T_r 补偿效应尤为显著，达 9.23、9.77 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，重度水分调亏处理(T5、T6)的 T_r 与对照 CK 相比差异显著，且较 CK 分别降低 22.53%，

25.54%。成熟期处理 T1、T3 的 T_r 与同期对照 CK 无显著差异($P>0.05$)，且处理 T1 的 T_r 较 CK 提高 2.04%，处理 T5 的 T_r 较对照 CK 降低幅度为 18.36%，差异显著，同期处理 T2、T4 和 T6 较处理 T1、T3 和 T5 的 T_r 降低幅度分别为 11.81%、12.50%和 12.35%，差异显著，因此苗期重度和成熟期中度水分调亏均对向日葵 T_r 有显著影响。

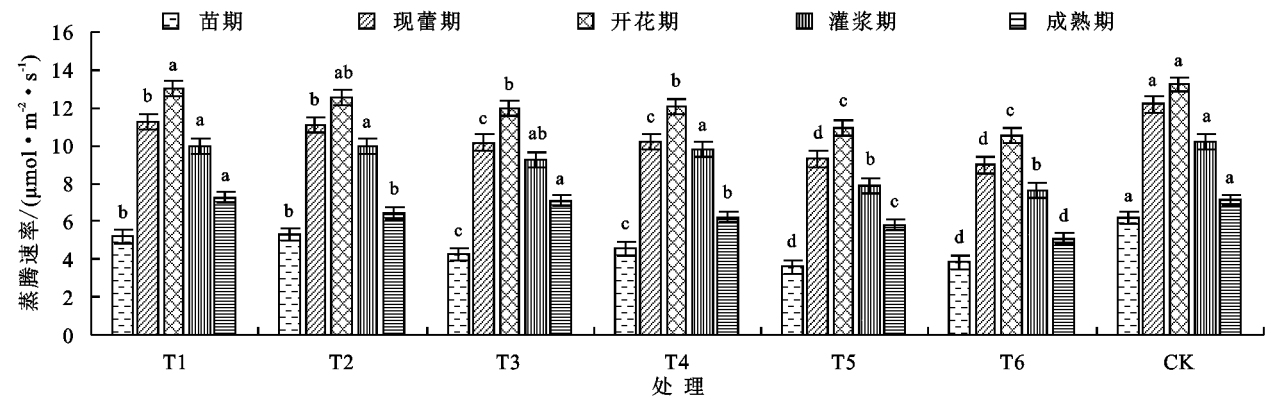


图 3 水分调亏对食用向日葵叶片蒸腾速率的影响

2.3 膜下滴灌调亏对食用向日葵品质的影响

2.3.1 粗脂肪 由图 4 可知，适度水分调亏可有效增加向日葵籽粒中粗脂肪含量，从而提高向日葵品质。处理 T1、T3 和 T5 粗脂肪含量较对照 CK 差异显著($P<0.05$)，处理 T1、T3 较 CK 增幅分别为 7.59%，9.78%，处理 T5 则较 CK 显著减少 6.19%。处理 T2、T4 和对照 CK 粗脂肪含量处于同一水平，无显著差异($P>0.05$)，处理 T6 粗脂肪含量最低，仅为 29.56%，这表明对向日葵进行苗期轻度、中度—成熟期轻度水分调亏处理有利于向日葵籽粒中粗脂肪的积累。

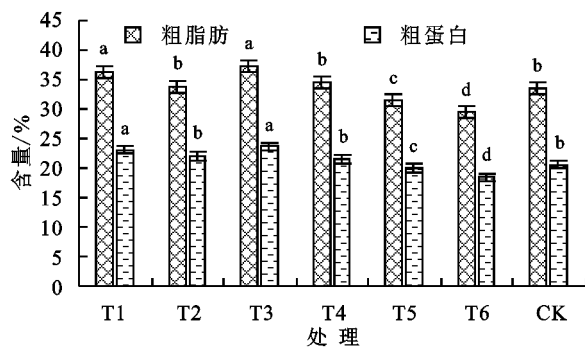


图 4 水分调亏对食用向日葵品质的影响

2.3.2 粗蛋白 处理 T1、T3 粗蛋白含量增加幅度最高(图 4)，较对照 CK 分别显著增加 12.13%，14.90% ($P<0.05$)，处理 T5 则较对照 CK 显著降低 7.67%，表明苗期重度水分调亏能够显著降低向日葵籽粒中粗蛋白含量，其余水分调亏均可增加向日葵籽粒中粗蛋白含量。处理 T2、T4 和 T6 较处理 T1、T3 和 T5 粗蛋白含量均有显著差异，且降幅为 8.87%~13.77%。这表明成熟期中度水分调亏处理不利于向日葵籽粒中粗蛋白含量提高。

2.4 膜下滴灌调亏对食用向日葵产量的影响

由图 5 可知，产量总体表现趋势为 $T1>CK>T3>T2>T4>T5>T6$ ，处理 T1 的产量最大，为 4 223 kg/hm^2 ，与对照 CK、T3 处于同一水平，且较 CK、T3 分别增产 0.98%，1.88%，处理 T5 与对照 CK 产量呈显著差异($P<0.05$)，且较 CK 降低 12.43%，表明苗期轻度—成熟期轻度水分调亏有明显的增产效应，苗期中度—成熟期轻度水分调亏对产量无显著影响，苗期重度—成熟期轻度水分调亏对产量增长十分不利；处理 T1、T3 和 T5 较处理 T2、T4 和 T6 均有差异，且较 T2、T4 和 T6 增产 5.26%，7.41%和 4.48%，表明成熟期中度水分调亏对产量的提高有显著影响。

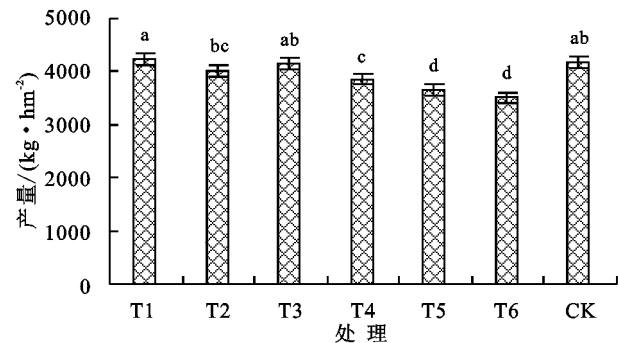


图 5 水分调亏对食用向日葵产量的影响

3 讨论

作物耗水量的变化规律与气候变化、土壤环境、农艺措施等有一定关系^[15-17]，各个生育期作物耗水量能直接代表作物需水特性及需水量的大小，并且能够反映各个生育期作物对水分的敏感程度，从而推断作物需水关键期和需水高峰期，对作物生长发育十分有利。本试验结果表明，食用向日葵苗期和成熟期阶段

耗水量随水分调亏程度的增加而减少,且水分调亏程度越大,耗水量越少,苗期调亏后期复水后,重度水分调亏处理始终与对照 CK 有显著差异,成熟期轻度调亏处理与对照 CK 处于同一水平,对向日葵耗水量大小无显著影响;从全生育期来看,苗期耗水最小,开花期耗水最大,后期耗水逐渐下降,这是因为苗期气温较低,营养生长缓慢,开花期营养生长最为旺盛,后期气温下降,由营养生长转变为生殖生长,因此阶段耗水量呈下降趋势,这与杨宏羽等^[18]和葛宇等^[19]对油菜的研究结论相似;但就总体而言,本文充分考虑了不同生育阶段向日葵耗水特性,在苗期和成熟期进行合理水分调亏,将满足向日葵正常生长后的多余水分调用到现蕾期、开花期等需水高峰期,从而实现节水增产的目的。

本试验发现,不同生育期耗水强度变化规律由大到小为开花期(约 7.12 mm/d)、现蕾期(约 4.54 mm/d)、灌浆期(约 4.01 mm/d)、成熟期(约 1.94 mm/d)、苗期(约 0.75 mm/d),且苗期轻度水分调亏日耗水强度降幅较小且后期复水产生补偿恢复效应与对照 CK 处于同一水平,无显著差异,而苗期重度水分调亏日耗水强度降幅最大,复水后也难以恢复。食用向日葵各个生育期耗水模数也有相似的变化规律,苗期气温低,植株生长缓慢,耗水模数最小,为 8.55%~13.07%,进入现蕾期和开花期时气温高,植株生长进程加快,耗水模数最大,为 28.58%~35.77%,灌浆期和成熟期营养生长停止,耗水模数也随之下降,为 9.66%~15.19%。苗期和成熟期耗水模数随水分调亏程度的增加而降低,但与耗水量和日耗水强度相比,在中间生育期复水后没有呈现较为规律的变化趋势,这是因为耗水模数由环境状况、全生育期和阶段耗水量以及生育期持续时间等诸多因子决定^[20]。

水分亏缺可造成植物叶片总叶面积下降,叶绿素含量降低,气孔关闭,光能和 CO₂ 吸收速率减缓,限制光系统(I、II)的光合电子传递和光合磷酸化,加强叶片淀粉水解酶活性,增加可溶性糖浓度,升高叶片水势,从而影响光合产物输出^[21-23]。大量研究^[24-26]发现,不同生育期水分调亏均可不同程度降低作物叶片净光合速率、蒸腾速率及气孔导度,且随水分调亏程度的增加,降幅越显著,后期复水也更难恢复到初始值。裴冬等^[27]研究发现,水分亏缺在降低叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 的同时,提前光合速率峰值,且蒸腾速率更易受气孔调节,较光合速率对水分更加敏感。本试验发现,从全生育期来看,食用向日葵叶片 P_n 、 G_s 和 T_r 呈单峰曲线变化,这与张会梅等^[28]对油菜的研究

结论相似,本试验还发现,食用向日葵苗期和成熟期进行水分调亏可显著降低叶片 P_n 、 G_s 和 T_r ,苗期轻度、中度水分调亏后期复水补偿效应机制较重度水分调亏明显。

食用向日葵籽粒中营养物质含量决定着籽粒利用价值和市场价格,因此在寻求最大产量、最优灌溉制度以及最好灌溉技术的同时,应该研究其对品质的影响。姜东燕等^[29]研究表明,土壤水分影响产量的同时也能影响籽粒品质,水分亏缺能够减少开花后的光合产物,导致灌浆物质降低,促使营养器官贮存物质向籽粒运移速率增加,使籽粒物质比重上升。本研究表明,苗期和成熟期适宜的水分调亏均能提高食用向日葵籽粒中粗脂肪和粗蛋白含量,且粗脂肪和粗蛋白含量随苗期水分调亏程度的增加而增大,而苗期过度水分胁迫则会降低粗脂肪和粗蛋白含量,这可能是因为苗期适宜水分亏缺会促进植株根系生长,向下深扎,后期复水产生补偿机制能够促使根系吸收大量土壤营养物质,对植株生长营养生长有利,成熟期水分用于维持植株生殖生长和营养生长,减缓叶片脱落速率,促进叶片光能吸收,保证光合产物积累,加大籽粒营养物质积累,需水较苗期多,这与邢英英等^[30]、郑建等^[31]、邓浩亮等^[32]分别对番茄、西瓜、葡萄的研究结论相似。

4 结论

(1)膜下滴灌调亏食用向日葵阶段耗水量总体呈现先增后减趋势,苗期和成熟期阶段耗水量、日耗水强度及耗水模数均随水分调亏程度的增加而降低,且苗期轻度水分调亏经后期复水阶段耗水量和日耗水强度与对照 CK 处于同一水平,苗期重度水分调亏后期复水虽产生一定补偿恢复效应,但阶段耗水量和日耗水强度仍较 CK 和其他处理降低幅度大,差异显著($P<0.05$)。

(2)苗期和成熟期不同水分调亏食用向日葵全生育期叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均呈单峰曲线变化,且在苗期和成熟期随水分调亏程度的增加而降低, P_n 降幅分别为 9.93%~45.98%和 3.67%~32.07%, G_s 降幅为 11.39%~47.37%和 0.24%~51.23%, T_r 降幅为 14.11%~42.10%和 0.39%~28.45%,苗期轻度、中度水分调亏后期复水补偿作用明显恢复,成熟期轻度水分调亏则对 P_n 、 G_s 和 T_r 无显著影响,而苗期重度、成熟期中度水分调亏均对 P_n 、 G_s 和 T_r 有显著影响。

(3)苗期和成熟期适宜的水分调亏均能提高食用向日葵籽粒中粗脂肪和粗蛋白含量,苗期重度和成熟

期中度水分调亏则会降低粗脂肪和粗蛋白含量。

(4) 苗期轻度—成熟期轻度水分调亏产量最大, 为 $4\ 223\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 苗期中度—成熟期轻度水分调亏能够在不降低产量的情况下, 提高食用向日葵的品质, 具有节水增产、以水调质的作用。

参考文献:

- [1] Henry E I, Ramalan A A, Ezekiel O. Effects of regulated deficit irrigation and mulch on yield, water use and crop water productivity of onion in Samaru Nigeria[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109: 16-169.
- [2] Greaves G E, Wang Y M. Effect of regulated deficit irrigation scheduling on water use of corn in southern Taiwan tropical environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 188: 115-125.
- [3] Pérez J G, Robles J M, García F, et al. Comparison of deficit and saline irrigation strategies to confront water restriction in lemon trees grown in semi-arid regions[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 164: 46-57.
- [4] 谭勇, 梁宗锁, 董娟娥, 等. 水分胁迫对苤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.
- [5] 万文亮, 郭鹏飞, 胡语妍, 等. 调亏灌溉对新疆滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 166-174.
- [6] 邵玺文, 韩梅, 韩忠明, 等. 水分供给量对黄芩生长与光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(10): 3214-3220.
- [7] 李城德, 尤艳蓉, 王德寿, 等. 食用向日葵品种三瑞 6 号及栽培技术[J]. *中国种业*, 2019(1): 81-82.
- [8] 张晓蒙, 张勇, 菅志亮, 等. 内蒙古河套灌区食用向日葵沟膜垄植生产技术研究[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(32): 63.
- [9] 蒋桂英, 魏建军, 刘建国, 等. 滴灌条件下免耕对复播油菜土壤水分利用及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 301-304.
- [10] 吕雯, 孙兆军, 陈小莉, 等. 地膜秸秆复合覆盖改善龟裂碱土盐特性提高油菜产量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 125-133.
- [11] 国世佳, 段玉, 张君, 等. 施氮量对食用向日葵产量及品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(2): 126-132.
- [12] 王振华, 郑旭荣, 宋常吉. 滴灌对北疆复播油菜耗水和生长的影响效应[J]. *核农学报*, 2014, 28(5): 919-928.
- [13] 杨黎, 魏占民, 徐大为, 等. 膜下滴灌不同水氮组合对向日葵生长及水氮利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(3): 50-55.
- [14] 云文丽, 李建军, 侯琼. 土壤水分对向日葵生长状况的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(2): 186-190.
- [15] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 6-12.
- [16] 王小静. 西北旱区作物需水量对气候变化的响应[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [17] 马鹏里, 杨兴国, 陈端生, 等. 农作物需水量随气候变化的响应研究[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(2): 348-353.
- [18] 杨宏羽, 李欣, 王波, 等. 膜下滴灌油菜土壤水热高效利用及高产效应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 82-88.
- [19] 葛宇, 何新林, 王振华, 等. 滴灌灌水量对复播油菜耗水特性和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(3): 111-113.
- [20] 王玉才, 张恒嘉, 邓浩亮, 等. 调亏灌溉下苤蓝耗水量变化特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 167-171.
- [21] 刘素军, 蒙美莲, 陈有君, 等. 水分胁迫下马铃薯叶片光合特性的变化及其响应机制研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(8): 29-38.
- [22] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 2902-2909.
- [23] 冯晓敏, 张永清. 水分胁迫对糜子植株苗期生长和光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(8): 1513-1521.
- [24] 王秋玲. 玉米叶片光合特性对干旱的响应及气孔导度模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2018.
- [25] 郝舒雪. 不同生育期水分胁迫及复水对番茄生理特性、品质及产量的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [26] 韩国君, 陈年来, 黄海霞, 等. 番茄叶片光合作用对快速水分胁迫的响应[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1017-1022.
- [27] 裴冬, 孙振山, 陈四龙, 等. 水分调亏对冬小麦生理生态的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 68-72.
- [28] 张会梅, 田军仓, 马波, 等. 膜下滴灌灌溉定额对油菜光合特性和水分生产效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3): 56-60.
- [29] 姜东燕, 于振文. 土壤水分对小麦产量和品质的影响[J]. *核农学报*, 2007, 21(6): 641-645.
- [30] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 713-726.
- [31] 郑健, 蔡焕杰, 陈新明, 等. 调亏灌溉对温室小型西瓜水分利用效率及品质的影响[J]. *核农学报*, 2009, 23(1): 159-164.
- [32] 邓浩亮, 孔维萍, 张恒嘉, 等. 不同生育期调亏灌溉对酿酒葡萄耗水及果实品质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1196-1205.