

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

黄 远 王伟娟 汪力威 许全宝 孔秋生 别之龙

华中农业大学园艺林学学院/园艺植物生物学教育部重点实验室, 武汉 430070

摘要 以充分灌水作为对照,在伸蔓期和果实膨大期对甜瓜品种‘情网’进行轻度和中度水分亏缺处理,研究调亏灌溉对塑料大棚栽培甜瓜光合特性、果实产量和品质的影响。结果表明:与充分灌水相比,果实膨大期轻度水分亏缺处理下光合速率变化不显著,蒸腾速率和气孔导度分别提高 8% 和 75%,单株灌水量减少 6%,水分利用效率和果实硬度分别提高 6% 和 10%,固酸比增大,产量无显著差异。与充分灌水相比,伸蔓期轻度、中度及果实膨大期中度水分亏缺处理下甜瓜果实产量分别降低 25%、24% 和 27%,水分利用效率分别降低了 19%、11% 和 18%。综合考虑亏缺处理对甜瓜各项指标的影响,果实膨大期进行轻度水分亏缺效果最佳,在不降低产量的情况下,显著改善甜瓜果实品质,提高水分利用效率,具有推广价值。

关键词 甜瓜; 节水灌溉; 调亏灌溉; 光合特性; 水分利用效率; 产量; 果实品质

中图分类号 S 652 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2016)01-0031-05

目前,全国农业灌溉年用水量约 3 700 亿 m^3 ,其利用效率只有 40% 左右,水分利用效率低和灌溉水浪费现象日益严重^[1]。作为一种重要的农业节水灌溉技术,自 20 世纪 70 年代以来,调亏灌溉被人们广泛关注^[2]。

依据作物生理生化受环境影响的特征,根据作物在不同时期对水分的需求及敏感程度的不同,调亏灌溉在其生长发育某一阶段减少灌溉用水,对植物造成一定的水分胁迫,增强植物的抗旱性,提高水分利用效率^[2]。近年来在鸭梨^[3]、杏^[4]、梨枣^[5]、橄榄^[6-7]、柑橘^[8]、葡萄^[9]、番茄^[10-11]、菜豆^[12]、辣椒^[13]、小麦^[14]、玉米^[15]、大豆^[16]、棉花^[17]等作物上的研究表明,适时适度的调亏灌溉不仅可增强复水后作物的光合能力和水分利用效率,还能改善作物的品质。Romero 等^[4]在杏上的研究表明,光合能力,特别是气孔导度和胞间 CO_2 浓度可作为选择最佳调亏灌溉模式的生理依据。

甜瓜是一种重要的园艺作物,在早春通常进行塑料大棚栽培,消费者对甜瓜品质的要求较高。前人在甜瓜调亏灌溉方面的研究较少^[18]。本研究基于 Zeng 等^[19]提出的甜瓜整个生育期以蒸发系数

(Kcp)为 1.00 的灌水标准,探讨甜瓜光合特性、果实产量和品质指标对不同调亏灌溉模式的响应规律,旨在为确定塑料大棚甜瓜适宜的节水灌溉模式提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验基地情况

试验地点为国家蔬菜改良中心华中分中心(华中农业大学)的塑料大棚。棚宽 6 m,长 45 m。试验地为粘壤质,在 0~30 cm 土层土壤容重密度和田间持水量分别为 1.36 g/cm^3 、32.9%。土壤肥力均匀。耕地施用三元复合肥(16-16-16)500 kg/hm^2 、有机肥 15 t/hm^2 。

1.2 试验材料及设计

甜瓜品种为‘情网’(日本阪田种苗公司),2010 年 3 月 5 日进行浸种催芽,移栽前开沟起垄,垄宽 80 cm,高 15~20 cm,沟宽 40 cm,4 月 4 日移栽,双行定植,甜瓜株距 45 cm,每垄 18 株。每垄为一小区,面积 4.86 m^2 (1.20 m \times 4.05 m),小区顺棚长方向横向排列。相邻两栽培垄中间间隔 1 条空垄作保护行,以防相互之间水分渗透。采用滴灌技术,每棵

收稿日期: 2015-02-15

基金项目: 国家西甜瓜产业技术体系(CARS-26-16);武汉市学科带头人计划项目(200951830556)

黄 远,博士,副教授. 研究方向:瓜类作物栽培生理. E-mail: huangyuan@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 别之龙,博士,教授. 研究方向:设施蔬菜生长发育调控与瓜类作物嫁接生理. E-mail: biezl@mail.hzau.edu.cn

植株的两侧均插有 2 根滴箭。采用吊蔓栽培,用塑料绳吊瓜蔓,单蔓整枝,人工授粉,定果后每株留 1 个瓜,主蔓生长至 25 片叶时摘心,其他管理如病虫害防治、果实采收等按照常规方法进行。

试验设置 2 个水分调亏阶段处理:伸蔓期(2010

年 4 月 23 日至 5 月 16 日)、果实膨大期(2010 年 5 月 23 日至 6 月 12 日);每个调亏阶段设置 $K_{cp}=3/4$ (轻度亏水,LD)与 $K_{cp}=1/2$ (中度亏水,MD) 2 个调亏程度处理, $K_{cp}=1$ 作为对照,共 5 种处理(表 1),每处理 3 次重复,随机排列。灌水量采用

表 1 甜瓜不同生育期调亏灌溉(灌溉量)方案

Table 1 Scheme of regulated deficit irrigation in different growth stages for melon (irrigation volume)

mm

处理 Treatment	伸蔓期(4月23日至5月16日) Vine growth stage(23 Apr.—16 May)	果实膨大期(5月23日至6月12日) Fruit expansion stage (23 May—12 June)
T ₁ (CK) Conventional irrigation	55.30	48.30
T ₂ 轻度(LD) Low water deficit	42.53	48.30
T ₃ 中度(MD) Moderate water deficit	29.75	48.30
T ₄ 轻度(LD) Low water deficit	55.30	37.50
T ₅ 中度(MD) Moderate water deficit	55.30	26.70

E₂₀型蒸发皿的水面蒸发量值控制。

1.3 试验观测项目及方法

1)蒸发皿蒸发量的测定。蒸发皿置于棚内中间位置,高度与作物冠层持平,每天上午 08:00 测定蒸发量。

2)灌水量的计算。 $I=A \times E_p \times K_{cp}$,式中 I 为灌水量; A 为小区面积, m^2 ; E_p 为连续 2 d 累积蒸发量值,mm; K_{cp} 为蒸发皿系数。

3)光合作用的测定。在果实膨大期(6月11日),自 09:00-11:00,采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型便携式光合仪测定从上至下第 4 片叶的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度。测定时叶温控制在 $28\text{ }^\circ\text{C}$, CO_2 浓度 $360\text{ }\mu\text{mol/mol}$,光量子通量密度 $800\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

4)单果质量和果实品质的测定。果实成熟后统一采收(授粉后 50 d),每小区随机选择 4 个果实测量单果质量,采用拓扑 GY-3 型硬度计测定果实硬度。然后每个果实采用四分法取 1 块果肉,每小区 4 块果肉等量混合,用榨汁机打成匀浆后测定品质。可溶性固形物含量测定采用 WYT-4 型手持折光

仪;可滴定酸含量测定使用氢氧化钠滴定法;果实中 Vc 含量测定采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[20]。

1.4 数据处理

使用 SAS 8.0 软件进行数据差异显著性测验(Duncan's 新复极差法, $P < 0.05$),作图采用 Excel 2003。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉对甜瓜光合作用的影响

如表 2,在伸蔓期与果实膨大期进行调亏灌溉处理,植株叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s)明显降低,水分胁迫程度越高降低幅度越大。叶片 P_n 、 T_r 等参数在不同的生育阶段对水分调亏的响应存在差异,伸蔓期甜瓜对水分亏缺响应较大,轻、中度亏缺处理 P_n 显著下降,与对照相比下降了 25% 与 43%;果实膨大期处理下, P_n 分别下降了 5% 和 27%。轻度水分亏缺下,甜瓜伸蔓期和果实膨大期 T_r 和 G_s 显著升高。 T_r 和 G_s 在中度水分亏缺时无显著变化。

表 2 调亏灌溉对甜瓜光合特性的影响

Table 2 Effect of regulated deficit irrigation on leaf photosynthesis of melon

处理 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Photosynthetic rate(P_n)	蒸腾速率/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Transpiration rate(T_r)	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol/mol}$) Inter-cellular CO_2 concentration(C_i)	气孔导度/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) Stomatal conductance(G_s)
T ₁ (CK)	15.03±0.48a	4.03±0.03bc	428.33±5.36a	132.33±15.93c
T ₂ (LD)	11.20±0.45b	6.74±0.23a	299.57±14.31c	295.67±10.33a
T ₃ (MD)	8.50±0.50c	3.84±0.05c	296.67±10.36c	138.00±5.13c
T ₄ (LD)	14.30±0.57a	4.37±0.13b	330.65±2.02b	231.67±6.94b
T ₅ (MD)	10.97±0.47b	3.68±0.13c	240.60±5.36d	119.00±2.08c

注:数据为平均值±标准误($n=3$),表中同一列相同字母表示经 Duncan's 新复极差法检测无显著差异($P < 0.05$)。下同。

Note: Data presented in the table are mean values ± SE ($n=3$). The different letters in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$ by Duncan's multiple-range test. The same as bellow.

2.2 调亏灌溉对甜瓜果实产量与水分利用率的影响

甜瓜果实产量与水分利用率显著受到调亏灌溉的影响(表3)。相比对照,甜瓜单果质量和果实产量除了在 T_4 (LD)处理下变化不显著外,其他处理均显著降低。 T_2 (LD)、 T_3 (MD)和 T_5 (MD)处理下

产量分别降低了25%、24%、27%。与对照相比,水分利用效率 T_4 (LD)处理下提高了6%, T_2 (LD)、 T_3 (MD)和 T_5 (MD)处理下分别下降了19%、11%、18%。不同调亏灌溉处理下灌水量不同, T_2 (LD)、 T_3 (MD)、 T_4 (LD)和 T_5 (MD)处理下,单株灌水量分别降低了7%、15%、6%和11%。

表3 调亏灌溉对甜瓜产量和水分利用效率的影响

Table 3 Effect of regulated deficit irrigation on fruit yield and water use efficiency of melon

处理 Treatment	单果质量/kg Single fruit weight	产量/(t/hm ²) Fruit yield	灌水量/mm Irrigation amount	单株灌水量/m ³ Irrigation amount per plant	水分利用效率/ (kg/(hm ² ·mm)) Water use efficiency
T_1 (CK)	2.30±0.08a	69.0±2.4a	120.36	0.040 12	573.28±30.38ab
T_2 (LD)	1.72±0.03b	51.6±0.9b	111.54	0.037 18	462.61±11.48c
T_3 (MD)	1.75±0.04b	52.5±1.2b	102.48	0.034 16	512.30±16.28bc
T_4 (LD)	2.30±0.10a	69.0±3.0a	113.31	0.037 77	608.95±37.28a
T_5 (MD)	1.67±0.03b	50.1±0.9b	106.59	0.035 53	470.03±8.17c

注:产量按照种植密度计算(30 000 株/hm²),水分利用效率=产量/灌水量。Note: Fruit yield was calculated according plant cultivation densities (30 000 plants/hm²), Water use efficiency=Fruit yield/Total irrigation amount.

2.3 调亏灌溉对甜瓜果实品质的影响

如表4所示,不同调亏灌溉阶段内各水分调亏处理均显著增加了果实硬度。果实硬度最大的处理为 T_3 (MD)与 T_4 (LD),比对照分别提高了9%和10%。在伸蔓期进行水分亏缺处理,甜瓜果实Vc含量增加达到显著水平,然而,果实膨大期的调亏处理显著降低了果实Vc的含量。

可溶性固形物含量不受调亏灌溉处理的影响,可滴定酸含量受到显著影响。除 T_2 (LD)处理外,其余处理均显著降低了可滴定酸含量, T_3 (MD)、 T_4 (LD)、 T_5 (MD)处理下可滴定酸含量均降低了17%。与对照相比, T_3 (MD)和 T_5 (MD)处理下固酸比显著增加,分别增加了16%和19%, T_2 (LD)和 T_4 (LD)处理下固酸比无显著变化。

表4 调亏灌溉对甜瓜果实品质的影响

Table 4 Effect of regulated deficit irrigation on fruit quality of melon

处理 Treatment	果实硬度/(kg/cm) Fruit firmness	可溶性固形物/°Brix Soluble solid (S)	可滴定酸/% Titratable acid (T)	固酸比 S/T	Vc/(mg/100 g) Vitamin C(FW)
T_1 (CK)	6.93±0.05	14.20±0.29a	0.06±0.001ab	260.44±12.00b	4.15±0.51b
T_2 (LD)	7.25±0.09b	14.59±0.26a	0.06±0.002a	242.02±10.42bc	7.33±0.51a
T_3 (MD)	7.53±0.11ab	14.35±0.08a	0.05±0.001b	303.41±14.91a	6.77±0.60a
T_4 (LD)	7.65±0.14a	14.13±0.24a	0.05±0.001b	279.24±13.19ab	3.22±0.10c
T_5 (MD)	7.28±0.14b	14.63±0.15a	0.05±0.001b	309.41±15.16a	2.39±0.15d

3 讨论

叶片光合作用是合成作物生长所需有机物质的重要生理过程,光合速率等生理指标对植物水分状况比较敏感。本研究表明,无论在伸蔓期或果实膨大期进行调亏处理,光合速率、胞间CO₂浓度均随水分胁迫程度的增加而降低,这与严巧娣等^[21]的结果一致。本研究中,亏缺处理下气孔导度未显著下降,因此,调亏灌溉下甜瓜光合能力的降低可能与水分亏缺后叶片光合产物输出减缓、光合产物积累增加,从而反馈抑制光合作用有关。在棉花上进行适时适度的调亏灌溉处理,与正常灌水处理比较,光合

速率未发现明显下降的现象,复水后光合速率反而增加,且光合产物有利于向经济产品运转与分配^[17]。本试验结果与孟兆江等^[17]对棉花的研究类似, T_2 (LD)与 T_4 (LD)处理在调亏处理结束后蒸腾速率、气孔导度均显著增加。在果实膨大期进行适当的水分亏缺,植株光合能力能够在处理结束后恢复正常,甚至超过正常灌水处理,对光合产物的形成和分配非常有利。

在一定程度上进行调亏灌溉会降低作物产量,已在梨枣^[5]、葡萄^[9]、小麦^[14]、棉花^[17]等作物上报道。本研究中, T_4 (LD)处理果实产量无明显变化,水分利用效率明显提高,其他处理显著降低了果实

产量和水分利用效率,导致这种差异的原因可能与灌水量有关, T_4 (LD)处理灌水量最大,植株的水分胁迫程度相对较小,光合性能在复水后迅速恢复,有利于增加果实产量,提高植株水分利用效率。

调亏灌溉可以明显提高果实硬度,硬度增加的原因在于水分亏缺下果实细胞分裂与生长受到限制,导致栅栏组织厚度增加、细胞排列密度增大^[5]。本试验中,水分亏缺显著增加了甜瓜果实硬度,其中最大的是 T_4 (LD)处理,这与前人的研究结果类似^[5],较高的果实硬度有利于果实的储存和运输,提高产品品质。在鸭梨上的研究表明^[3],调亏灌溉对果实可溶性固形物含量无显著影响,而在梨枣^[5]和番茄^[10]上的研究表明,调亏灌溉可显著提高果实可溶性固形物的含量。本试验研究表明,不同的调亏灌溉阶段与调亏灌溉程度处理下果实中可溶性固形物的含量无显著改变,但中度亏缺处理显著增加了固酸比,提高了甜瓜果实品质。相较于前人研究^[5,10],可溶性固形物含量无显著变化的原因可能与供试材料、调亏阶段和调亏程度不同有关。

本研究结果表明,维生素 C 和可滴定酸含量显著受调亏灌溉的影响,影响程度与处理时期有关。伸蔓期进行轻度水分亏缺处理显著提高了果实可滴定酸含量,然而,果实可滴定酸含量不受伸蔓期中度水分亏缺、果实膨大期轻度与中度水分亏缺的影响。本研究中,与正常灌水相比,果实维生素 C 含量在伸蔓期水分亏缺下显著提高,而在果实膨大期水分亏缺处理下显著降低。导致这一差异的重要原因可能是由于果实膨大期为甜瓜果实维生素 C 合成的敏感时期,调亏处理下维生素 C 的合成被抑制^[22]。

果实膨大期轻度水分亏缺对甜瓜单果质量、果实产量和可溶性固形物含量无显著影响,但果实硬度和固酸比显著提高,可滴定酸含量降低,能在一定程度上改善甜瓜果实品质,降低灌水量,提高植株的水分利用效率,复水后光合能力迅速恢复。伸蔓期轻度、中度,果实膨大期中度水分亏缺处理下,果实产量和水分利用效率显著降低。因此,果实膨大期进行轻度水分亏缺效果最佳,能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,具有一定推广价值。

参 考 文 献

- [1] 王玉宝,吴普特,赵西宁,等.我国农业用水结构演变态势分析[J].中国生态农业学报,2010,18(2):399-404.
- [2] GEERTS S,RAES D.Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas[J].Agricultural Water Management,2009,96:1275-1284.
- [3] 程福厚,李绍华,孟昭清.调亏灌溉条件下鸭梨营养生长、产量和果实品质反应的研究[J].果树学报,2003,20(1):22-26.
- [4] ROMERO P,BOTIA P.Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions[J].Environmental and Experimental Botany,2006,56:158-173.
- [5] 崔宁博,杜太生,李忠亭,等.不同生育期调亏灌溉对温室梨枣品质的影响[J].农业工程学报,2009,25(7):32-38
- [6] INIESTA F,TESTI L,ORGAZ F,et al.The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees[J].European Journal of Agronomy, 2009,30:258-265.
- [7] FERNANDES-SLIVA A A, FERREIRA T C, CORREIA C M, et al.Influence of different irrigation regimes on crop yield and water use efficiency of olive[J].Plant and Soil,2010,333: 35-47.
- [8] BALLESTER C, CASTEL J, EL-MAGEED T A, et al.Long-term response of 'Clementina de Nules' citrus trees to summer regulated deficit irrigation[J].Agricultural Water Management,2014,138:78-84.
- [9] ACEVEDO-OPAZO C, ORTEGA-FARIAS S, FUENTES S. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: an irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management,2010,97:956-964.
- [10] 刘明池,张慎好,刘向莉.亏缺灌溉时期对番茄果实品质和产量的影响[J].农业工程学报,2005,21(14):92-95.
- [11] KUŞÇU H, TURHAN A, DEMİR A O. The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment[J].Agricultural Water Management,2014,133:92-103.
- [12] WAKRIM R, WAHBI S, TAHI H, et al.Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water regulations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2005,106:275-287.
- [13] 陈平,杜太生,王峰,等.西北干旱区温室辣椒产量和品质对不同生育期灌溉调控的响应[J].中国农业科学,2009,42(9): 3203-3208.
- [14] ZHANG B C, LI M F, HUANG G B, et al.Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area[J].Agricultural Water Management,2006,79:28-42.
- [15] KANG S, SHI W, ZHANG J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation [J]. Field Crops Research,2000,67:207-214.
- [16] ROSADI R A B, SENGE A M, ITO K, et al.The effect of water stress in regulated deficit irrigation on soybean yield (*Glycine max* (L.) Merr.) [J]. Paddy and Water Environment,

2007, 5: 163-169.

- [17] 孟兆江, 卞新民, 刘安能, 等. 棉花调亏灌溉的生理响应及其优化农艺技术[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 80-84.
- [18] LI Y J, YUAN B Z, BIE Z L, et al. Effect of drip irrigation criteria on yield and quality of muskmelon grown in greenhouse conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109: 30-35.
- [19] ZENG C Z, BIE Z L, YUAN B Z. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis*

melon L.)[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(4): 595-602.

- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 246-248.
- [21] 严巧娣, 苏培玺. 不同土壤水分条件下葡萄叶片光合特性的比较[J]. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1601-1606.
- [22] LEE S K, KADER A A. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 20(3): 207-220.

Effects of regulated deficit irrigation on photosynthetic characteristics, fruit yield and quality of melon under plastic green house conditions

HUANG Yuan WANG Weijuan WANG Liwei XU Quanbao KONG Qiusheng BIE Zhilong

*College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University/
Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, Wuhan 430070, China*

Abstract Melon cv. ‘Qingwang’ was adopted to study the effects of regulated deficit irrigation on the photosynthetic characteristics, fruit yield and quality of melon under plastic house conditions. The treatments included the sufficient water supply during the whole growing period (control), low and moderate water deficits at the stages of vine-extending or fruit-expanding. The results showed that compared with the control, low water deficit treatment at the stage of fruit-expanding had no significant effect on the net photosynthetic rate and fruit yield, increased the transpiration rate and stomatal conductance by 8% and 75%, respectively, decreased the amount of irrigation water by 6%, increased the water use efficiency and fruit firmness by 6% and 10%, and increased the ratio of total soluble solid/titrable acidity. Compared with the control, low and moderate water deficit treatments at the stage of vine-extending and moderate water deficit treatment at the stage of fruit-expanding decreased fruit yield by 25%, 24%, 27%, respectively, and decreased water use efficiency by 19%, 11%, 18%, respectively. Comprehensively considering the effects of water deficit treatments on each indicator measured in melon, low water deficit treatment during the fruit-expanding stage can improve the fruit quality without reducing yield, and increase water use efficiency. Thus, low water deficit treatment during the fruit-expanding stage has the potential to be popularized.

Keywords melon; water-saving irrigation; regulated deficit irrigation; photosynthetic characteristics; water use efficiency; yield; fruit quality

(责任编辑: 张志钰)