

有机营养液灌溉频次和灌水量对设施甜瓜产量、品质及肥水利用效率的影响

范兵华¹ 马乐乐¹ 任瑞丹¹ 何佳星¹ 哈密提·阿不都米吉提² 李建明^{1*}

(¹西北农林科技大学园艺学院/农业部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²博州农业技术推广中心, 新疆博乐 833400)

摘要 为研究高产优质甜瓜的有机管理模式,以甜瓜为试材,采用基质盆栽方式,设3种有机营养液灌溉频次(施用8次,每次每株750 mL, F_1 ; 施用12次,每次每株500 mL, F_2 ; 施用16次,每次每株375 mL, F_3)与2种单株灌水量(果实膨大前按120%日蒸腾蒸发量(ET)灌溉,之后按140%ET灌溉, W_1 ; 果实膨大前按140%ET灌溉,之后按160%ET灌溉, W_2),共6个试验处理,随机区组试验设计,研究了不同处理对设施甜瓜光合特性、产量、品质及肥水利用效率的影响。结果表明:少量多次施用有机营养液可以显著提高甜瓜叶片光合速率,低灌水量显著提高果实产量和水分利用效率;高灌水量和中等有机营养液灌溉频次可使肥料利用率达到最高;少量多次有机营养液施用且相对适宜的水分供给提高了果实品质。回归分析发现,甜瓜果实维生素C含量与有机营养液灌溉频次呈指数函数 $y=0.214e^{0.18x}$ ($R^2=0.851$) 相关。综合考虑产量、品质、水分利用效率等因素, F_3W_1 处理可在保证产量的前提下,提高果实品质,且水分利用效率最大,可以实现设施有机甜瓜肥水高效管理。

关键词 有机营养液; 灌溉频次; 光合作用; 产量; 品质; 肥水利用效率

Effects of irrigation frequency of organic nutrient solution and irrigation amount on yield, quality, fertilizer and water use efficiency of melon in facility. FAN Bing-hua¹, MA Le-le¹, REN Rui-dan¹, HE Jia-xing¹, Hamiti · Abudumijiti², LI Jian-ming^{1*} (¹College of Horticulture, Northwest A&F University/Key Laboratory of Protected Horticulture Engineering in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Bozhou Agricultural Technology Promotion Center, Bole 833400, Xinjiang, China).

Abstract: To investigate the organic cultivation mode for high-yield and high-quality melon, we measured the growth of melon that grown in pots with different conditions of organic nutrient solution and irrigation. There were three irrigation frequencies of organic nutrient solution (8-time application, each time 750 mL per plant, F_1 ; 12-time application, each time 500 mL per plant, F_2 ; 16-time application, each time 375 mL per plant, F_3) and two different irrigation amount per single plant (irrigating by 120% daily evapotranspiration (ET) before fruit enlargement, by 140%ET after fruit enlargement, W_1 ; irrigating by 140%ET before fruit enlargement, by 160%ET after fruit enlargement, W_2), following a randomized block trial design. The effects of those treatments on photosynthetic characteristics, yield, quality, fertilizer and water use efficiency of melon were investigated. The results showed that photosynthetic rate of melon leaves was significantly increased by more frequent and less amount of organic nutrient solution application. Fruit yield and water use efficiency were significantly improved under low irrigation condition. Fertilizer utilization was optimal under the treatments of high irrigation and medium organic nutrient solution frequency. Fruit quality was improved under less organic nutrient solution and relatively suitable water supply. A mathematical model of exponential function $y=0.214e^{0.18x}$ ($R^2=0.851$) could be used to quantify

本文由陕西省重点研发计划项目(2018TSL-XY-05-03)和国家大宗蔬菜产业技术体系项目(CARS-23-C05)资助 This work was supported by the Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2018TSL-XY-05-03) and National Vegetable Industry Technical System (CARS-23-C05).

2018-12-31 Received, 2019-03-19 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijianming66@163.com

the relationship between the vitamin C content of melon fruit and frequency of organic nutrient solution application. Considering the variables, such as yield, quality and water use efficiency, F_3W_1 treatment was recommended with the aim to improve fruit quality and optimal water use efficiency under promising yield, which could achieve high-yield and high-quality cultivation of organic melon in facilities.

Key words: organic nutrient solution; irrigation frequency; photosynthesis; yield; quality; fertilizer and water use efficiency.

甜瓜(*Cucumis melo*)是世界十大水果之一,我国甜瓜的种植面积最大,总产量超过全世界的一半^[1].甜瓜以其营养丰富、口感香甜深受广大消费者喜爱.当前,农产品风味品质及安全性日益受到人们的关注,因此有机甜瓜具有较广阔的消费前景和发展空间.

有机生产系统是采用一系列可持续发展的农业技术,遵循自然规律和生态学原理,协调好种植业和养殖业的平衡,实现经济效益、生态效益、社会效益的均衡发展^[2].今后有机种植方式和有机农产品将越来越受到种植者和消费者的青睐,这也是响应国家发展可持续农业的举措.前人也有关于有机甜瓜的研究,如宋世威等^[3-5]研究了有机和常规生产系统中甜瓜的生长发育和产量、甜瓜果实品质比较、氮素吸收差异等,乐建刚等^[6]研究了有机生产系统中甜瓜果实发育和糖分积累,其大多是对比有机生产系统和常规生产系统对甜瓜的不同影响,而关于有机营养液对甜瓜生长、品质及肥水利用效率的影响的研究尚不多见.本研究分析了有机营养液灌溉频次与灌水量的耦合效应对设施甜瓜光合特性、产量、品质及肥水利用效率的影响,旨在为设施甜瓜有机栽培和可持续发展提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地点与试验材料

本试验于2018年3—7月在西北农林科技大学北校区园艺场的大跨度非对称酿热大棚(国家专利号CN202890064U)内进行.供试材料为‘千玉6号’薄皮甜瓜,采用基质盆栽方式,花盆直径30 cm,每盆装5 kg基质.试验所用基质是由腐熟牛粪、菇渣和珍珠岩以3:3:4的体积比混合配制而成^[7].基质保理化性质为:容重 $0.37\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,持水孔隙45.1%,通气孔隙23.4%,总孔隙68.5%,pH 6.93,电导率(EC) $2230\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,速效氮含量 $2343.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $1026.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $2312.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质含量约 $210.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.试验所用有机营养液是将烘干后的腐熟粪肥与水按1:10的

质量比混合后搅拌,在有氧条件下浸提72 h后过滤得到猪粪、牛粪、羊粪浸提液,再按4:1:1体积比混合后稀释4.31倍^[8],其理化性质为:pH 7.02,EC值 $2036\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,速效氮含量 $242.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,速效磷含量 $52.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,速效钾含量 $476.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.有机营养液每次浸提均采用同一批发酵腐熟的原料,每次浸提过程严格控制一致,且均进行速效元素测定,最大限度减小不同浸提批次间有机营养液的差异.

1.2 试验设计与方法

3月18日进行穴盘播种育苗,4月20日待甜瓜幼苗长到两叶一心时,选取长势一致的植株进行定植,每盆定植一株,株行距为 $70\text{ cm}\times 40\text{ cm}$.每个花盆上覆盖锡箔纸以减少基质水分散失,定植缓苗10 d后,5月12日开始进行水分处理,7月13日拉秧.

试验设置有机营养液灌溉频次与灌水量两个因素,设3种有机营养液灌溉频次: F_1 (共施用8次,每次每株750 mL)、 F_2 (共施用12次,每次每株500 mL)、 F_3 (共施用16次,每次每株375 mL);两种单株灌水量: W_1 ,果实膨大前按120%日蒸腾蒸发量(ET)灌溉,之后按140%ET灌溉; W_2 ,果实膨大前按140%ET灌溉,之后按160%ET灌溉.随机区组试验设计,将有机营养液灌溉频次与灌水量二因素耦合得到6个处理: F_1W_1 、 F_2W_1 、 F_3W_1 、 F_1W_2 、 F_2W_2 及 F_3W_2 (表1),3次重复,每个处理选取8棵长势一致的壮苗进行指标测定.

ET值由自动连续作物耗水记录仪(国家专利号CN105699244 A)^[9]进行监测,可以实现智能控制、精准灌溉.灌溉时如遇阴雨天则不进行灌溉,直到晴天时再进行灌溉并记录灌水量.有机营养液施用从开花坐果期开始,5 d一次,每次500 mL,两个月共需6 L.所以,有机营养液的总灌溉量定为每株6 L,具体施用方法见表1,由于是液体肥,所以各处理施用有机营养液当天,除对应的有机营养液施用量外,灌水量应为日蒸腾蒸发量(ET)减去有机营养液灌溉量.

表 1 试验处理
Table 1 Experiment treatments

处理 Treatment	处理次数和用量 Handling times and amount	开花坐果期 Blossom and fruit setting stage	果实膨大期 Fruit expansion stage	采收期 Harvesting stage	灌水设定 Irrigation design (果实膨大前/后 Before/after fruit enlargement)
F ₁ W ₁	8 次 Eight times	2 次 Two times	4 次 Four times	2 次 Two times	120%ET/140%ET
F ₁ W ₂	(每次每株 750 mL 750 mL per plant per time)	(10 d 一次 10 d once)	(6 d 一次 6 d once)	(6 d 一次 6 d once)	140%ET/160%ET
F ₂ W ₁	12 次 Twelve times	3 次 Three times	6 次 Six times	3 次 Three times	120%ET/140%ET
F ₂ W ₂	(每次每株 500 mL 500 mL per plant per time)	(7 d 一次 7 d once)	(4 d 一次 4 d once)	(4 d 一次 4 d once)	140%ET/160%ET
F ₃ W ₁	16 次 Sixteen times	4 次 Four times	8 次 Eight times	4 次 Four times	120%ET/140%ET
F ₃ W ₂	(每次每株 375 mL 375 mL per plant per time)	(5 d 一次 5 d once)	(3 d 一次 3 d once)	(3 d 一次 3 d once)	140%ET/160%ET

ET：日蒸腾蒸发量 Daily evapotranspiration.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合指标测定 采用 Li-6800 便携式光合仪,在不同生育期(开花坐果期、果实膨大期、采收期)测定甜瓜叶片的光合特性(净光合速率、蒸腾速率).每个处理测定 3 株长势一致的壮苗,选取其顶部生长点以下第 4 片功能叶进行测量,并采样带回实验室测定叶绿素含量^[10].测量时间选择晴天 9:00—11:00.

1.3.2 果实产量和品质测定 每株甜瓜在主蔓 12~15 节子蔓留瓜 1 个,主蔓 25 节打顶.果实采收后用游标卡尺测量果实横纵径,并计算果形指数.果实硬度用硬度计测定,可溶性固形物用数显糖度仪 TD-45 测定,可溶性蛋白含量用考马斯亮兰染色法测定,维生素 C 含量用钼蓝比色法测定,还原性糖含量用 3,5-二硝基水杨酸法测定,可溶性总糖含量用蒽酮比色法测定^[10].

1.3.3 果实养分含量测定 果实成熟期每个处理取大小均一的果实,在 105 ℃ 下杀青 30 min 后,65 ℃ 烘至恒量,样品磨碎过 0.5 mm 筛后保存.用 H₂SO₄+H₂O₂ 消煮后再用 AA3 型高分辨自动化学分析仪(德国 SEAL 公司)测定果实全氮、全磷含量,用 Flame photometer410 型火焰光度计(英国 Sherwood 公司)测定全钾含量.

1.3.4 肥水利用效率 果实氮肥利用率(η)公式: $\eta = N_u/N_a$.式中: N_u 表示果实中全氮含量; N_a 表示营养液中速效氮含量.磷、钾肥利用率计算同氮肥利用率.灌溉水分利用效率(IWUE)是指单位灌水量下的作物产量(kg·m⁻³): $IWUE = Y/I$.式中:Y 为产量(kg);I 为灌溉量(m³).

1.4 数据处理

甜瓜果实品质评价应用模糊数学中的隶属函数值法^[11],隶属函数值计算公式: $R(X_i) = (X_i - X_{\min}) /$

$(X_{\max} - X_{\min})$.式中: X_i 为指标测定值; X_{\min} 、 X_{\max} 为所有处理某一指标的最小值和最大值.如果为负相关,则用反隶属函数进行转换,计算公式为: $R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$.以甜瓜果实硬度、可溶性固形物、可溶性蛋白、维生素 C、还原糖、可溶性总糖含量 6 个品质指标为依据(由于是薄皮甜瓜,所以硬度应用反隶属函数进行转换),计算各个指标的隶属函数值,并进行综合评价,综合得分是每个处理每一指标的隶属函数值乘以该指标的权重再求和.

采用 Excel 2007 和 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析.采用双因素(two-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较($\alpha = 0.05$),用 Pearson 法对甜瓜品质指标进行相关性分析.利用 Excel 2007 软件作图.图表中数据为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 不同有机营养液肥水处理对甜瓜叶片光合特性的影响

由表 2 可以看出,有机营养液肥水耦合对甜瓜光合作用有显著影响,从不同生育期看,甜瓜叶片蒸腾速率、净光合速率和叶绿素含量均呈现先升高后降低的趋势,在果实膨大期达到最大,此时甜瓜叶片光合强度最大.在果实膨大期,相同灌水量条件下,叶片净光合速率基本随着营养液灌溉频次的增加而增加,F₃W₂处理下的光合速率最大,达到 29.79 μmol·m⁻²·s⁻¹,显著高于其他处理(除 F₂W₂外),说明少量多次施用营养液可以显著提高甜瓜叶片光合速率;在相同有机营养液灌溉频次下,W₂处理下的叶片光合速率显著高于 W₁处理,说明 W₂处理可以显著提高叶片光合速率.不同有机营养液肥水耦合处理对甜瓜叶片蒸腾速率和叶绿素含量的影响规律与光合速率大致相似.不同处理甜瓜叶片的蒸腾

表 2 不同处理对甜瓜叶片光合特性的影响
Table 2 Effects of different treatments on photosynthetic characteristics of melon leaves

时期 Period	处理 Treatment	净光合速率 P_n ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	叶绿素含量 Chlorophyll content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FM}$)
开花坐	F ₁ W ₁	21.83±0.20a	0.01±0.00a	1.48±0.02a
果期	F ₂ W ₁	20.45±0.50abc	0.01±0.00a	1.20±0.01c
Blossom	F ₃ W ₁	20.86±0.50abc	0.01±0.00a	1.21±0.02c
and fruit	F ₁ W ₂	19.41±1.07bc	0.01±0.00a	1.34±0.00b
setting	F ₂ W ₂	19.07±0.48c	0.01±0.00a	1.52±0.06a
stage	F ₃ W ₂	21.27±0.25ab	0.01±0.00a	1.20±0.03c
果实膨	F ₁ W ₁	26.85±0.20bc	2.95±0.28bc	2.21±0.01c
大期	F ₂ W ₁	28.53±0.57ab	3.21±0.31abc	2.31±0.01bc
Fruit	F ₃ W ₁	25.43±0.73c	2.57±0.18c	2.59±0.07b
enlargement	F ₁ W ₂	27.73±0.97ab	3.10±0.12bc	2.27±0.13c
stage	F ₂ W ₂	29.79±0.84a	3.50±0.29ab	2.99±0.18a
	F ₃ W ₂	29.79±0.43a	4.03±0.30a	2.52±0.05bc
采收期	F ₁ W ₁	23.39±1.59a	0.02±0.00a	2.25±0.14bc
Harvest	F ₂ W ₁	22.19±0.53a	0.02±0.00a	2.57±0.07a
stage	F ₃ W ₁	22.79±1.78a	0.02±0.00a	2.01±0.02cd
	F ₁ W ₂	24.42±1.34a	0.02±0.00a	2.16±0.10bcd
	F ₂ W ₂	21.85±2.13a	0.02±0.00a	1.88±0.06d
	F ₃ W ₂	22.87±0.89a	0.02±0.00a	2.40±0.14ab

同列不同字母表示同一时期不同处理差异显著 ($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference among treatments for the same period at 0.05 level. 下同 The same below.

速率在开花坐果期和采收期差异不显著,叶绿素含量在其他时期规律不明显。

2.2 不同有机营养液肥水处理对甜瓜产量及其构成的影响

由表 3 可以看出,有机营养液肥水耦合对甜瓜果实横径、单果质量和产量有显著影响。F₂W₂处理甜瓜单果质量达到 497.06 g,其产量比其他处理高 1.1%~18.7%。相同灌水量时,W₁条件下,F₃处理的产量显著高于 F₁和 F₂处理,分别高 14.8%和 17.1%,表明少量多次施用有机营养液可以显著提高产量。W₂条件下,随着有机营养液灌溉频次的增多,甜瓜产量呈现先升高后降低的趋势,其中 F₂处理甜瓜产量最高,有机营养液灌溉频次过多或过少都不利于

产量的增加;相同有机营养液灌溉频次处理下,W₂处理的甜瓜产量显著高于 W₁处理(除了 F₃低灌水量处理的甜瓜产量显著高于高灌水量处理外),尤其是 F₂处理下,高灌水量的甜瓜产量比低灌水量高 17.8%。

2.3 不同有机营养液肥水处理对甜瓜果实品质的影响

由图 1 可以看出,有机营养液肥水耦合对甜瓜果实硬度、可溶性固形物、可溶性蛋白、维生素 C、还原糖、可溶性总糖含量均有显著影响。其中,就口感品质而言,在 W₁处理下果实硬度和可溶性固形物含量随着有机营养液灌溉频次的增加呈现逐渐降低的趋势,在 W₂处理下果实硬度先减小后增大,可溶性固形物含量变化相反;同一有机营养液灌溉频次处理下,口感品质变化规律不明显。

就营养品质看,可溶性蛋白和可溶性总糖含量变化规律基本一致,F₃W₁处理显著优于其他处理,同一水分条件下,可溶性蛋白和可溶性总糖含量随着有机营养液灌溉频次的增加呈现出先降低后升高的趋势,说明中等有机营养液灌溉频次不利于果实可溶性蛋白和可溶性总糖的积累;而在同一有机营养液灌溉频次下,W₂处理可溶性蛋白和可溶性总糖含量大体上高于 W₁处理,并未出现“稀释效应”。但对于果实还原糖和维生素 C 含量,W₁处理基本高于 W₂处理,表现出“稀释效应”,且相同水分条件下,维生素 C 含量随着有机营养液灌溉频次的增加而增加,充分说明少量多次有机营养液施用对果实维生素 C 的累积有积极作用。

对各品质指标与灌水量和有机营养液灌溉频次进行皮尔逊相关性分析,发现果实可溶性固形物含量与灌水量呈显著正相关,硬度与有机营养液灌溉频次呈显著负相关,可溶性总糖含量与有机营养液灌溉频次呈显著正相关,维生素 C 含量与有机营养液灌溉频次呈极显著正相关。进一步进行回归分析,

表 3 不同处理对甜瓜产量及其构成的影响
Table 3 Effects of different treatments on melon yield and its composition

处理 Treatment	纵径 Longituinal diameter (cm)	横径 Transverse diameter (cm)	果形指数 Fruit shape index	单果质量 Single fruit mass (g)	产量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
F ₁ W ₁	8.94±1.37a	9.53±1.96bc	0.94±0.03a	430.11±29.59bc	29.59±1.54bc
F ₂ W ₁	8.53±3.49a	9.34±1.14c	0.91±0.04a	420.91±14.75c	14.75±1.50c
F ₃ W ₁	9.32±1.02a	10.02±0.28a	0.93±0.01a	493.15±18.18ab	18.18±1.76ab
F ₁ W ₂	8.87±2.43a	9.67±0.76abc	0.92±0.02a	466.48±21.43abc	21.43±1.67abc
F ₂ W ₂	9.15±1.39a	9.89±1.22ab	0.93±0.01a	497.06±10.47a	10.47±1.78a
F ₃ W ₂	9.14±3.05a	9.34±0.65c	0.98±0.03a	473.26±19.03abc	19.03±1.69abc

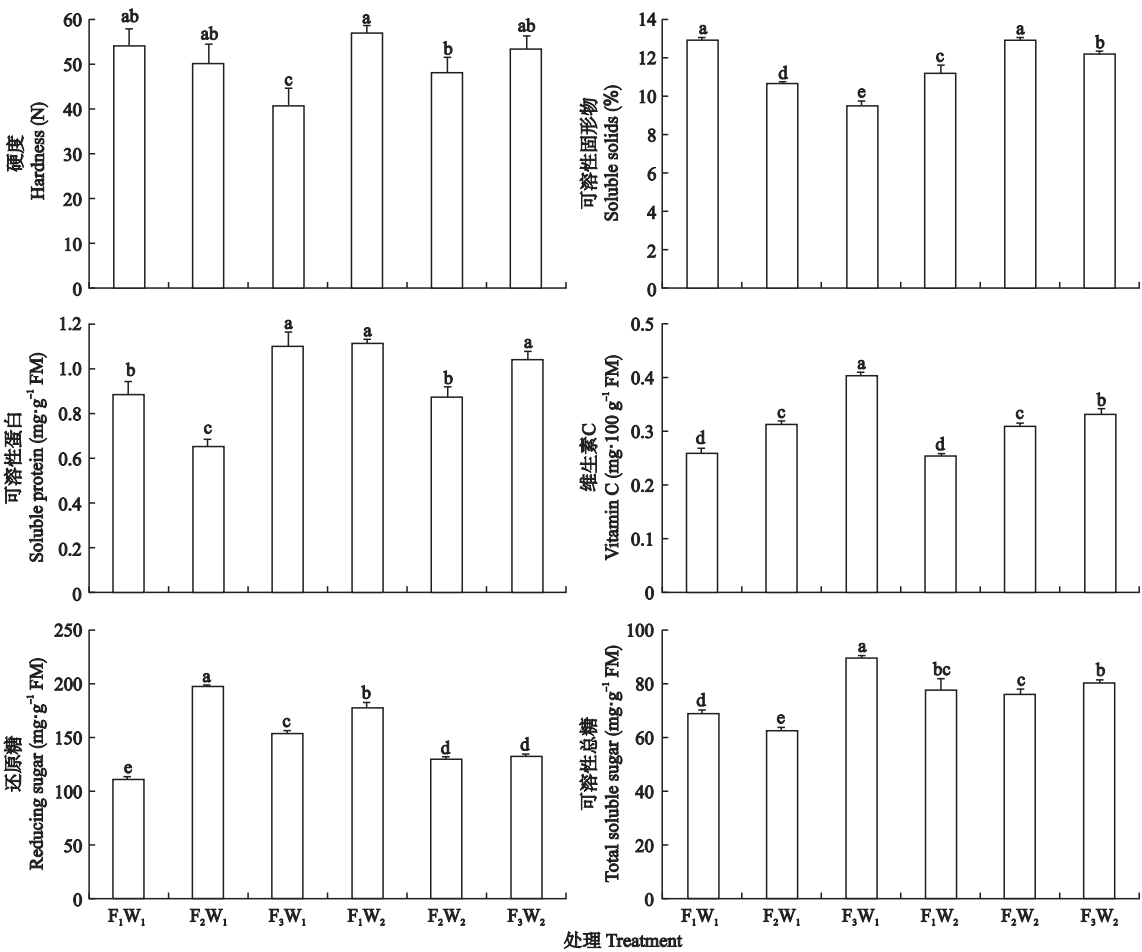


图 1 不同处理对甜瓜果实品质的影响

Fig.1 Effects of different treatments on quality of melon fruit.

不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

发现维生素 C 含量与有机营养液灌溉频次呈指数函数 $y=0.214e^{0.18x}$ ($R^2=0.851$)。

对不同处理甜瓜果实品质进行隶属函数值法评价(表 4),结果表明,甜瓜果实品质从好到差排列顺序为: $F_3W_1 > F_3W_2 > F_1W_2 > F_2W_2 > F_2W_1 > F_1W_1$ 。

2.4 不同有机营养液肥水处理对甜瓜肥水利用效率的影响

由表 5 可以看出, F_2W_2 处理甜瓜果实中氮、磷、钾肥利用率最高,显著高于其他处理,且 F_2W_2 处理的产量也最高,这说明果实产量形成与氮磷钾肥的

表 4 不同处理甜瓜果实各品质隶属函数值及综合得分

Table 4 Subordinate function values and comprehensive scores of melon fruit quality under different treatments

处理 Treatment	硬度 Firmness	可溶性 固形物含量 Soluble solid content	可溶性 蛋白含量 Soluble protein content	维生素 C 含量 Vitamin C content	还原糖含量 Reducing sugar content	可溶性 总糖含量 Total soluble sugar content	综合得分 Synthesis score	品质排序 Quality rank
F ₁ W ₁	0.17	0.99	0.51	0.02	0.00	0.23	0.28	6
F ₂ W ₁	0.41	0.33	0.00	0.39	1.00	0.00	0.39	5
F ₃ W ₁	1.00	0.00	0.98	1.00	0.50	1.00	0.76	1
F ₁ W ₂	0.00	0.50	1.00	0.00	0.76	0.58	0.51	3
F ₂ W ₂	0.54	1.00	0.47	0.37	0.21	0.51	0.47	4
F ₃ W ₂	0.21	0.78	0.83	0.52	0.26	0.67	0.54	2
变异系数 Variation coefficient	0.11	0.12	0.19	0.18	0.21	0.12		
权重系数 Weight coefficient	0.12	0.12	0.20	0.19	0.23	0.13		

表 5 不同处理对甜瓜肥水利用效率的影响
Table 5 Effects of different treatments on fertilizer and water utilization efficiency of melon

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount (L · plant ⁻¹)	水分利用 效率 Water use efficiency (kg · m ⁻³)	全氮含量 Total nitrogen content (mg · L ⁻¹)	全磷含量 Total phosphorus content (mg · L ⁻¹)	全钾含量 Total potassium content (mg · L ⁻¹)	氮肥利用率 Nitrogen utilization rate (%)	磷肥利用率 Phosphorus utilization rate (%)	钾肥利用率 Potassium utilization rate (%)
F ₁ W ₁	39.31	10.94b	14.77±0.48bc	5.12±0.01b	35.74±0.00bc	6.1±0.0bc	9.8±0.0b	7.5±0.0bc
F ₂ W ₁	39.36	10.69b	15.19±0.16bc	4.34±0.07cd	34.10±0.55c	6.3±0.0bc	8.3±0.0cd	7.2±0.0c
F ₃ W ₁	39.34	12.54a	14.49±0.57c	4.01±0.15d	33.21±1.18c	6.0±0.0c	7.7±0.0d	7.0±0.0c
F ₁ W ₂	44.42	10.50b	15.86±0.34b	4.64±0.10c	35.38±0.66bc	6.6±0.0b	8.9±0.0c	7.4±0.0bc
F ₂ W ₂	44.42	11.19ab	17.48±0.37a	5.97±0.11a	40.98±0.83a	7.2±0.0a	11.5±0.0a	8.6±0.0a
F ₃ W ₂	44.43	10.63b	14.26±0.46c	5.90±0.21a	37.60±0.98b	5.9±0.0c	11.3±0.0a	7.9±0.0b

吸收利用率有关.在同一水分条件下,F₂处理的肥料利用率均较高,说明有机营养液灌溉频次过多或过少都不利于果实养分吸收利用;在相同有机营养液灌溉频次条件下,W₂处理的肥料利用率比 W₁ 处理高,这可能是因为 W₁ 条件下植株根系养分过于富集不利于其吸收利用.

F₃W₁ 处理的水分利用效率显著高于其他处理,高 12.1%~19.4%.在 W₁ 条件下,F₃ 处理的水分利用效率显著高于 F₁ 和 F₂ 处理,且 F₁ 和 F₂ 差异不显著;在 W₂ 条件下,F₂ 处理的水分利用效率显著高于 F₁ 和 F₃ 处理,且 F₁ 和 F₃ 差异不显著.这说明在同一水分条件下,增加有机营养液灌溉频次可以有效提高水分利用效率.

3 讨 论

肥水是作物生长的两大关键因子,合理进行肥水调控有利于作物健康生长,具有增产效应;相反,肥水管理不当会严重影响作物正常生长发育甚至致其死亡,造成产量下降和经济损失^[12].滴灌肥水一体化技术的应用实现了施肥和灌溉的同步进行,高频施肥即高频灌溉,在灌溉水量一定的条件下,每次灌溉水量较少,肥水主要分布在浅层土壤中,有利于浅根系作物的生长^[13].陈平等^[14]研究表明,两天施肥 1 次可导致草的徒长;而对根系较深的作物,频率过高则不利于作物对肥水的吸收,同时表层土壤含水量长期保持在较高水平可能降低土壤的透气性,阻碍植株生长^[15].当灌溉频率较低时,单次灌溉量相对较多,灌溉周期长,一方面易引起土壤含水量的剧烈变化^[16],另一方面部分肥水渗透到根系层以下,肥水利用率下降,对植株生长不利^[17].因此,施肥频率过高或过低均不利于植株的生长^[15-18].

周艳等^[19]研究发现,施肥频率高的处理可以提高春小麦光合作用强度,本研究结果也表明,少量多

次施用有机营养液可以显著提高甜瓜叶片光合速率.这表明较高的施肥频率可以维持地上部分适宜的光合面积,有利于光合作用的进行,从而促进“源”合成更多的同化物向“库”运输,达到增产增收的效果.

有学者曾认为,多次少量的施肥方法能协调植物生长需求与土壤养分供给间的同步性,进而促进植物生长并提高产量^[20],李哲等^[21]研究发现,少量多次的高频施肥通过提高玉米百粒重从而达到增产效果.本研究结果也表明,在低灌水量条件下,少量多次施用有机营养液可以显著提高甜瓜产量.可能是因为低灌水量条件下,植株根际环境处于相对较干旱的状态,增加有机营养液灌溉频次(每次施用量少),更有利于甜瓜根系对养分的吸收利用,从而转化为产量的增加;在高灌水量条件下,随着有机营养液灌溉频次的增加,甜瓜产量先升高后降低,F₂W₂ 处理果实产量最高,这与孙丽丽等^[22]关于营养液滴灌频率对设施番茄生长与果实品质的影响研究结果基本一致.说明在本试验高灌水量条件下,有机营养液灌溉频率低,会导致基质养分亏缺,从而造成 F₁W₂ 处理果实产量低;有机营养液灌溉频率高则会使植株短时间内因养分过于充足而下渗,根系层无法充分吸收利用养分,也会导致养分吸收利用不足,从而导致产量降低.而 Lacascio 等^[23]的研究结果则认为,滴灌施肥的次数对番茄的产量和品质都没有影响.这可能与各自的试验条件不同有关,如营养液配方不同,与无机营养液相比,有机营养液肥效释放缓慢,植株根际养分状况会有很大差异,施肥频率的调控作用也会随之改变.因此,研究滴灌施肥频率与作物生长发育及产量的关系还应进一步考虑营养液配方的影响.

齐红岩等^[24]、刘明池等^[25]研究表明,随着灌溉周期的延长,亏缺灌溉可改善番茄果实的品质和口

感,且水分亏缺越厉害,效果越明显.本试验结果表明,在低灌水量条件下,随着有机营养液灌溉频次的增加(周期缩短),果实可溶性固形物含量显著降低,还原糖含量先升高后降低,这与前人研究结果基本一致.但在本研究中,可溶性蛋白含量先降低后升高,维生素 C 含量显著持续升高,可溶性总糖含量先降低再升高,这与前人研究结果不同.原因可能是他们的试验是在控制养分供给量一致的条件下,改变水分供应量,水分处于亏缺状态,使得番茄植株体内含水量减少,干物质积累增加.而本试验中, W_1 条件下的 3 个处理灌水量一致,有机营养液施用总量也相同,只是有机营养液灌溉频次改变,而且有机营养液的施用是根据甜瓜不同时期对养分的不同需求来设置的,更有利于甜瓜对养分的吸收,从而提高果实可溶性蛋白、维生素 C 和可溶性总糖含量.蔡东升等^[26]研究表明,适量的营养液供应量可以提高番茄果实品质;本研究结果也表明,灌水量适宜且有机营养液施用遵循少量多次的原则,更有利于改善甜瓜品质,这充分说明有机营养液灌溉频次与灌水量的耦合效应对甜瓜品质的影响显著.

周荣等^[27]发现,多次少量施氮可以提高氮肥利用率;席本野等^[28]研究发现,较高的施氮频率能够提高林分的氮吸收量;而本研究表明,在同一水分条件下中等有机营养液灌溉频次处理的肥料利用率均较高,说明有机营养液灌溉频次过多或过少都不利于果实养分的吸收利用,这可能因为前人研究只关注氮元素的吸收利用,忽略了其他元素对氮素吸收利用的影响.本研究结果还表明,在相同有机营养液灌溉频次条件下,高灌水量处理的肥料利用率大都比低灌水量处理高,这与邢英英等^[29]研究得出的增大灌水量可提高肥料偏生产力的结论相一致,原因可能是低水分条件下,植株根系盐离子浓度高,离子之间存在拮抗作用,导致植株对养分的吸收利用率低.李建明等^[30]研究发现,当灌溉量一定时,在一定范围内肥料的增施能提高作物对水分的吸收利用,这与本研究得出的在同一水分条件下增加营养液施用次数可以有效提高水分利用效率的结果相吻合,原因可能是增施肥料或增加有机营养液灌溉频次使植株生长旺盛,进而有利于根系对水分的吸收利用.

4 结 论

综合考虑甜瓜产量、品质 and 水分利用效率等因素, F_3W_1 处理即有机营养液按照施用 16 次,每次每株 375 mL,水分按照果实膨大前 120% ET 灌溉,之

后 140% ET 灌溉进行有机肥水管理,可在保证产量的前提下,提高果实品质,且水分利用效率最大,可以实现设施有机甜瓜肥水高效管理,为设施有机甜瓜高产优质栽培提供理论指导.

参考文献

- [1] Ma Y (马 跃). National melon variety test report. *China Watermelon and Muskmelon* (中国西瓜甜瓜), 2003(3): 44–48 (in Chinese)
- [2] Li W (李 伟). Barriers and countermeasures for promoting organic agriculture. *Management and Administration* (经营与管理), 2007(2): 41–42 (in Chinese)
- [3] Song S-W (宋世威), Philipp L, Yue J-G (乐建刚), et al. Analysis of plant growth, development and yield of muskmelon under organic and conventional production systems. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2006, **37**(3): 432–436 (in Chinese)
- [4] Song S-W (宋世威), Yue J-G (乐建刚), Philipp L, et al. Comparative study of fruit quality of muskmelon in organic and conventional farming systems. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)* (上海交通大学学报: 农业科学版), 2008, **26**(3): 212–217 (in Chinese)
- [5] Song S-W (宋世威), Philipp L, Ge T-D (葛体达), et al. Difference in nitrogen uptake by muskmelon in organic and conventional farming systems. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2009, **15**(2): 197–201 (in Chinese)
- [6] Yue J-G (乐建刚), Song S-W (宋世威), Philipp L, et al. Fruit development and sugar accumulation of muskmelon in organic farming system. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2007, **29**(4): 526–532 (in Chinese)
- [7] Wang P-B (王鹏勃), Li J-M (李建明), Ding J-J (丁娟娟), et al. Study on physical and chemical characteristics of compound substrate and effects on the growth of tomato seedling. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2014, **32**(5): 137–142 (in Chinese)
- [8] Zhang J-H (张钧恒), Ma L-L (马乐乐), Li J-M (李建明). Effects of all-organic nutrient solution and water coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2018, **51**(14): 2788–2798 (in Chinese)
- [9] Li J-M (李建明), Fan X-Y (樊翔宇), Yan F-F (闫芳芳), et al. Effect of different irrigation amount based on transpiration model on yield and quality of muskmelon. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2017, **33**(21): 156–162 (in Chinese)
- [10] Gao J-F (高俊凤). Instruction for Plant Physiology Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [11] Wei Y-S (魏永胜), Liang Z-S (梁宗锁), Shan L (山仑), et al. Comprehensive evaluation on alfalfa drought-resistance traits by subordinate function values analysis.

- Pratacultural Science* (草业科学), 2005, **22**(6): 33–36 (in Chinese)
- [12] Li L (李 丽). Advances in research on crop yield components under water and fertilizer regulation. *Xinjiang Farm Research of Science and Technology* (新疆农垦科技), 2016, **39**(9): 38–41 (in Chinese)
- [13] Dou C-Y (窦超银), Meng W-Z (孟维忠). Effects of fertigation frequency at fruiting stage on growth and yield of cucumber in greenhouse. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2018, **46**(7): 139–141 (in Chinese)
- [14] Chen P (陈 平), Dong J-X (董金旭), Zheng X-J (郑旋杰). Effects of fertilization frequency on growth character in green-turf of *Agrostis stolonifera* cultivar Yuexuan No.1 in summer. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2006, **22**(3): 285–288 (in Chinese)
- [15] Sui J (隋 娟), Gong S-H (龚时宏), Wang J-D (王建东), *et al.* Effects of drip irrigation frequency on the distribution of soil water, soil temperature and maize grown in North China. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(4): 148–152 (in Chinese)
- [16] Guo C (郭 琛), Qi T (祁 通), Hou Z-A (侯振安), *et al.* Effects of irrigation amount and frequency on the growth and yield of hybrid cotton under drip irrigation. *Xinjiang Agricultural Sciences* (新疆农业科学), 2010, **47**(9): 1872–1877 (in Chinese)
- [17] Li Y-F (栗岩峰), Li J-S (李久生), Rao M-J (饶敏杰). Effects of drip fertigation strategies and frequencies on yield and root distribution of tomato. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(7): 1419–1427 (in Chinese)
- [18] Yang M-Y (杨美燕), Yang X-Z (杨秀珍). Effects of nutrient solution concentration and fertilization frequency on the growth and flowering of *Saussurea bungeana* in soilless culture. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2013, **41**(8): 181–184 (in Chinese)
- [19] Zhou Y (周 艳), Li M-S (李明思), Lan M-J (蓝明菊), *et al.* Effect of the frequency of fertilizer application on the grain yield and growth of spring wheat under drip irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2011, **30**(4): 72–75 (in Chinese)
- [20] Assouline S. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**: 1630–1636
- [21] Li Z (李 哲), Qu Z-Y (屈忠义), Ren Z-S (任中生), *et al.* Nitrogen use efficiency and ammonia oxidation of corn field with drip irrigation in Hetao Irrigation District. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2018, **37**(11): 37–42, 49 (in Chinese)
- [22] Sun L-L (孙丽丽), Zou Z-R (邹志荣), Han L-R (韩丽蓉), *et al.* Effects of nutrition solution drip irrigation frequency on plant growth and fruit quality of greenhouse tomato. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2015, **43**(3): 119–124 (in Chinese)
- [23] Lacascio SJ, Hochmuth GJ, Rhoads FM, *et al.* Nitrogen and potassium application scheduling effects on drip-irrigated tomato yield and leaf tissue analysis. *Hortscience*, 1997, **32**: 230–235
- [24] Qi H-Y (齐红岩), Li T-L (李天来), Zhang J (张洁), *et al.* Effects of irrigation on sucrose metabolism, dry matter distribution and fruit quality of tomato under water deficit. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(7): 1045–1049 (in Chinese)
- [25] Liu M-C (刘明池), Kojima T, Tanaka M, *et al.* Effect of soil moisture on plant growth and fruit properties of strawberry. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2001, **28**(4): 307–311 (in Chinese)
- [26] Cai D-S (蔡东升), Li J-M (李建明), Li H (李惠), *et al.* Effects of nutrient solution supply amount on yield, quality and volatile matter of tomato. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(3): 921–930 (in Chinese)
- [27] Zhou R (周 荣), Hamdy A. Effects of N application rate and frequency on nutrient uptake of pepper. *Journal of Beijing Agricultural Engineering University* (北京农业工程大学学报), 1994, **14**(3): 24–28 (in Chinese)
- [28] Xi B-Y (席本野), Wang Y (王 烨), Jia L-M (贾黎明). Effects of nitrogen application rate and frequency on biomass accumulation and nitrogen uptake of *Populus tomentosa* under drip fertigation. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2017, **53**(5): 63–73 (in Chinese)
- [29] Xing Y-Y (邢英英), Zhang F-C (张富仓), Zhang Y (张 燕), *et al.* Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2014, **30**(21): 70–80 (in Chinese)
- [30] Li J-M (李建明), Pan T-H (潘铜华), Wang L-H (王玲慧), *et al.* Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2014, **30**(10): 82–90 (in Chinese)

作者简介 范兵华,女,1993年生,硕士研究生。主要从事设施园艺作物生理生态研究。E-mail: fanbinghua149@163.com

责任编辑 张凤丽

范兵华, 马乐乐, 任瑞丹, 等. 有机营养液灌溉频次和灌水量对设施甜瓜产量、品质及肥水利用效率的影响. 应用生态学报, 2019, **30**(4): 1261–1268

Fan B-H, Ma L-L, Ren R-D, *et al.* Effects of irrigation frequency of organic nutrient solution and irrigation amount on yield, quality, fertilizer and water use efficiency of melon in facility. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(4): 1261–1268 (in Chinese)