

有机肥浸提液灌溉频次和灌水量对甜瓜果实 芳香物质及纤维素含量的影响

范兵华, 马乐乐, 任瑞丹, 王归鹏, 丁明*, 李建明*

(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)

摘要:【目的】有机肥浸提液可随水灌溉, 研究灌溉频次和灌水量对甜瓜果实品质的影响, 为有机甜瓜优质高产提供技术支撑。【方法】甜瓜小区试验采用随水滴灌施肥方法。所用有机肥浸提液是由腐熟干猪粪、牛粪、羊粪分别与水按 1:10 质量比混合浸提 72 h 过滤后得到, 再将 3 种滤液以 4:1:1 体积比混合, 稀释 4.3 倍用于甜瓜施肥。试验设 3 个有机肥浸提液灌溉频次: 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)。单株灌水量设两个水平: W_1 为果实膨大前按日蒸腾蒸发量的 120% 灌溉, 之后按其 140% 灌溉, W_2 两个时期灌水量分别为日蒸腾蒸发量的 140% 和 160%。果实成熟后用 SPME-GC-MS 技术测定甜瓜果实挥发性物质成分和相对含量及纤维素含量。【结果】甜瓜果实中共检测出 71 种挥发性成分, 其总含量各处理从高到低顺序为 $F_2W_2 > F_1W_1 > F_3W_1 > F_1W_2 > F_3W_2 > F_2W_1$ 。6 个处理中, 共有挥发性物质为 21 种, 其含量从高到低顺序与挥发性物质总含量排序一致。在 W_1 下, 果实特征香气物质含量以 F_1 最高; 而在 W_2 下, 其含量随着有机肥浸提液灌溉频次的增加先升高后降低, 与前者变化趋势正好相反。相同有机肥浸提液灌溉频次条件下, 变化规律不明显。其中, F_2W_2 处理特征香气物质含量最高, 明显高于其他处理, 说明在本试验条件下, 中等有机肥浸提液灌溉频次及高灌水量有利于甜瓜果实特征香气物质的形成。而不同处理对果实纤维素含量的影响与前两者不同, 在低灌水量条件下, 随着有机肥浸提液灌溉频次的增加, 果实纤维素含量呈现先升高后降低的趋势; 在高灌水量条件下, 果实纤维素含量呈现升高的趋势。而随着灌水量的增加, 果实纤维素含量明显下降。其中, F_2W_1 处理的甜瓜果实纤维素含量最高, 为 1.3 mg/g, 显著高于其他处理, 高出 8.3%~227.5%。对不同处理甜瓜果实芳香物质及纤维素含量进行隶属函数值法评价, 综合排名顺序为 $F_2W_2 > F_1W_1 > F_3W_1 > F_3W_2 > F_2W_1 > F_1W_2$ 。并且 F_2W_2 处理的甜瓜产量最高, 达到 1.8 kg/m²。【结论】不同有机肥浸提液灌溉频次及灌水量处理对甜瓜果实各类挥发性物质及含量的影响与对果实特征香气成分及含量的影响规律一致。在本试验条件下, F_2W_2 处理可以同时兼顾甜瓜果实芳香物质含量、纤维素含量及产量, 为较优处理组合。

关键词: 甜瓜; 有机肥浸提液; 灌溉频次; 灌水量; 芳香物质; 纤维素; SPME-GC-MS

Effects of application frequency of organic fertilizer extract and irrigation amount on the content of aromatic substances and cellulose in melon fruits

FAN Bing-hua, MA Le-le, REN Rui-dan, WANG Gui-peng, DING Ming*, LI Jian-ming*

(College of Horticulture, Northwest A&F University/Key Laboratory of Protected Horticulture Engineering in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】The extraction solution of organic fertilizer is the form of realizing organic fertilizer application with water irrigation. The effects of irrigation frequency and irrigation amount on the quality of melon fruit were studied to provide technical support for the production of high quality and high yield organic melon. 【Methods】The melon plot experiment used the method of fertilizing with drip irrigation. The extracts of

收稿日期: 2019-07-08 接受日期: 2019-10-14

基金项目: 青海省科技计划项目 (2018-NK-123); 青海省蔬菜产业科技创新平台集成示范项目 (QNNKP-2018-03-01)。

联系方式: 范兵华 E-mail: fanbinghua149@163.com

* 通信作者 丁明 E-mail: 7442617@qq.com; 李建明 E-mail: lijianming66@163.com

organic fertilizer were extracted with mixing pig manure, cattle manure and sheep manure with water in a ratio of 1 : 10 for 72 h, and then filtered. The three filtrates were mixed in a ratio of 4 : 1 : 1 by volume and diluted by 4.3 times for melon fertilization. The experiment set up three irrigation frequency of organic fertilizer extract: 8 times of application, 750 mL per plant (F_1); 12 times of application, 500 mL per plant (F_2); 16 times of application, 375 mL per plant (F_3). There were two levels of irrigation: W_1 was 120% of the daily evapotranspiration before fruit expansion, and then 140% of the daily evapotranspiration. W_2 was 140% and 160% of the daily evapotranspiration. SPME-GC-MS was used to determine the volatile components, relative content and cellulose content of melon fruit after ripening. **【 Results 】** A total of 71 volatile components were detected in melon fruits, and the order of total content was $F_2W_2 > F_1W_1 > F_3W_1 > F_1W_2 > F_3W_2 > F_2W_1$. Among the six treatments, there were 21 kinds of volatile substances, and the order of their contents from high to low was the same as that of the total volatile substances. Under W_1 , the content of characteristic aroma substance in fruit was the highest in F_1 , while under W_2 , its content first increased and then decreased with the increase of irrigation frequency of organic fertilizer extract, which was opposite to the former. Under the same irrigation frequency of organic fertilizer extract, the change rule was not obvious. Among them, F_2W_2 treatment had the highest content of characteristic aroma substances, which was significantly higher than other treatments, indicating that the irrigation frequency of medium and high irrigation amount were beneficial to the formation of characteristic aroma in melon fruit. Under the condition of low irrigation amount, with the increase of irrigation frequency of organic fertilizer extract, the cellulose content of fruit increased first and then decreased; under the condition of high irrigation amount, the cellulose content of fruit increased. With the increase of irrigation amount, the cellulose content of fruit decreased significantly. Among them, the cellulose content of melon fruit treated with F_2W_1 was the highest, which was 1.3 mg/g, 8.3%–227.5% higher than other treatments. The content of aromatic substance and cellulose in melon fruit was evaluated by membership function method. The comprehensive ranking order was $F_2W_2 > F_1W_1 > F_3W_1 > F_3W_2 > F_2W_1 > F_1W_2$. The yield of muskmelon treated with F_2W_2 was the highest, reaching 1.8 kg/m². **【 Conclusions 】** The effect of irrigation frequency and irrigation amount of different organic fertilizer extracts on the volatile matter and content of melon fruit is consistent with the effect on the characteristic aroma components and content of melon fruit. Under the condition of this experiment, F_2W_2 treatment is the optimal in which the aromatic matter content, cellulose content and yield of melon fruit reach their most satisfying degree.

Key words: melon; organic fertilizer extract; irrigation frequency; irrigation amount; aromatic substances; cellulose; SPME-GC-MS

甜瓜因其特殊香味和含糖量高而得名,是广受大家喜爱的夏季消暑水果。甜瓜在我国已有 3000 多年的栽培历史,目前其栽培面积和产量均居世界第一^[1]。但施肥灌水不当等原因造成的甜瓜品质下降问题一直影响甜瓜生产。随着人们对甜瓜品质要求的日益提高和食品工业对天然风味物质需求量的增加,有关甜瓜果实芳香物质的研究引起国内外学者的关注。芳香物质是评价甜瓜果实品质优劣的重要指标之一,到目前为止,已从甜瓜中鉴定出逾 240 种挥发性物质,其中大约 90 种物质的合成代谢途径得到了鉴定。芳香物质是由不同挥发性物质组成的混合物,主要有酯类、酮类、醛类、醇类、含硫化合物和萜类化合物等 6 类^[2-3]。但是,某种果蔬的特征风味常由较少的几类挥发性物质甚至某一种化合物来决定,这类化合物被称为特征效应化合

物^[4-5]。研究认为,甜瓜的特征香气是由乙酸乙酯、乙酸丁酯、乙酸-2-甲基丙基酯、2-甲基丁酸乙酯和乙酸己酯等决定的^[6]。潜宗伟等^[7]研究发现,不同氮素供应水平显著影响甜瓜芳香物质的种类和含量。林多等^[8]研究发现,不同的钾素水平下,甜瓜的芳香物质含量差异显著,并且在钾含量为 240 mg/L 时最高。王锐竹等^[9]研究发现适量钾肥使甜瓜成熟果实中芳香物质成分更多,含量也更高。此外,蔡东升等^[10]研究发现,相比其他处理,每株番茄全生育期浇营养液 58.5 L 处理提高果实品质和芳香物质含量的效果最佳。说明不论甜瓜还是番茄,肥水管理对其果实芳香物质含量都有显著影响。

纤维素是一种不被消化吸收的物质,虽然不能被消化吸收,但有促进肠道蠕动和利于粪便排出等作用,从而起到减肥的效果,且对人体健康有着十

分重要的营养生理功能。过去认为纤维素是“废物”,2013年科学家认为它在保障人类健康、延长生命、防御疾病等方面有着重要作用。因此,纤维素成为继蛋白质、碳水化合物、水、脂类、矿物质、维生素之后的第七种营养素^[11-13]。近几年对植物中纤维素的研究也越来越多,人们希望寻找到天然的减肥保健产品,纤维素就具有这一功效。纤维素可分为水溶性和非水溶性两类,最常见的是非水溶性的,如粮食及蔬菜中的纤维,而最多见的可溶性纤维素是葡聚糖^[14]。刘耀娜等^[15]研究发现采前乙酰水杨酸处理显著提高了甜瓜果实采收时的纤维素含量。白晓航等^[16]研究表明,促进保鲜配方(enhanced freshness formulation, EFF)采后处理甜瓜,由于抑制了乙烯产生,进而导致与果实软化相关的酶活性受到抑制,使细胞壁中纤维素和果胶等分解减慢从而延长甜瓜保鲜期。目前,肥水管理对果实纤维素含量的影响尚未见相关报道。

前人^[7-10,15-16]研究了肥水管理对甜瓜果实芳香物质的影响及提高果实纤维素含量的方法,而关于有机肥浸提液和水的耦合对甜瓜果实芳香物质和纤维素含量的影响尚未见报道。本试验以千玉6号甜瓜为试验材料,对不同有机肥浸提液灌溉频次和灌水量条件下甜瓜果实中芳香物质及纤维素含量进行了研究,旨在为优质高产有机甜瓜栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

本试验于2018年3月—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^[17]。基质理化性质为:容重0.4 g/cm³、持水孔隙45.1%、通气孔隙23.4%、总孔隙68.5%、pH 7.0、电导率(EC)2230 μS/cm、速效氮含量2343.5 mg/kg、速效磷含量1026.7 mg/kg、速效钾含量2312.0 mg/kg、有机质含量约210.5 g/kg。试验所用有机肥浸提液是将晒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4.3倍^[18],其理化性质为:pH 7.0、EC值2036 μS/cm、速效氮

含量242.0 mg/L、速效磷含量52.1 mg/L、速效钾含量476.6 mg/L。提前计算好有机粪肥的用量,一次性购买后分别进行混匀,每次浸提过程严格控制一致,且均进行速效养分测定,最大限度减小不同浸提批次间有机肥浸提液的差异。

1.2 试验设计

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40 cm×70 cm(两个花盆中心之间的距离)。每个花盆上覆盖锡箔纸以减少基质水分散失,定植缓苗10天后,由于阴雨天气影响,直到5月12日才开始进行水分处理,7月13日拉秧。

试验设置有机肥浸提液灌溉频次与灌水量两个因素,设3种有机肥浸提液灌溉频次:F₁(共施用8次,每次每株750 mL)、F₂(共施用12次,每次每株500 mL)、F₃(共施用16次,每次每株375 mL)。设两种单株灌水量:W₁[果实膨大前按120%日蒸腾蒸发量(ET)灌溉,之后按140%ET灌溉];W₂(果实膨大前按140%ET灌溉,之后按160%ET灌溉)。将有机肥浸提液灌溉频次与灌水量二因素耦合得到6个处理:F₁W₁、F₂W₁、F₃W₁、F₁W₂、F₂W₂及F₃W₂(表1),3次重复。甜瓜田间管理正常,于开花后进行授粉并挂牌,标记好授粉时间。

日蒸腾蒸发量(ET)值由自动连续作物耗水记录仪(国家专利号CN105699244 A)^[19]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。西北农林科技大学园艺学院设施生理栽培课题组前期栽培试验中有机肥浸提液施用从开花坐果期开始,每5天一次,每次每株500 mL,两个月共需6 L。所以,本试验有机肥浸提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肥浸提液当天,除对应的有机肥浸提液施用量外,实际灌水量应为计算灌水量减去有机肥浸提液灌溉量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 挥发性物质测定 仪器与设备:SL3001N型电子天平、ISQ型GC-MS联用仪(美国Thermo Fisher Scientific公司);HP-INNOWAX弹性石英毛细管柱(30 m×0.25 mm,0.25 μm)、恒温磁力搅拌器(美国Troemner公司);SPME手动进样手柄、75 μm PDMS、固相微萃取头(美国Supelco公司);匀浆机

表 1 各处理有机肥浸提液施用次数和施用量 (mL/plant)

Table 1 Detailed application times, intervals and amount of organic extracts in each treatment

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount	开花坐果期 Blossom and fruit setting stage		果实膨大期 Fruit expansion stage		采收期 Harvesting stage		合计 Total	
		次数 Times	频次 (d) Interval	次数 Times	频次 (d) Interval	次数 Times	频次 (d) Interval	次数 Times	施用量 Amount
F ₁ W ₁	120%ET-140%ET	2	10	4	6	2	6	8	750
F ₁ W ₂	140%ET-160%ET								
F ₂ W ₁	120%ET-140%ET	3	7	6	4	3	4	12	500
F ₂ W ₂	140%ET-160%ET								
F ₃ W ₁	120%ET-140%ET	4	5	8	3	4	3	16	375
F ₃ W ₂	140%ET-160%ET								

注 (Note): F₁—分 8 次施肥 Organic leachate applied evenly in 8 times; F₂—分 12 次施肥 Organic leachate applied evenly in 12 times; F₃—分 16 次施肥 Organic leachate applied evenly in 16 times; W₁—灌溉日蒸发量的 120% 和 140% Irrigation amount was 120% and 140% of the daily ventilation; W₂—灌溉日蒸发量的 140% 和 160% Irrigation amount was 140% and 160% of the daily ventilation. ET—日蒸腾蒸发量 Daily transpiration evaporation.

(荷兰飞利浦公司)。

挥发性物质成分含量测定: 参照常培培等^[20]的方法, 对色谱条件略做修改。每个处理分别取同一天授粉且可闻到成熟甜瓜香味的果实, 用匀浆机打成匀浆。准确快速称取 5 g 甜瓜果肉匀浆于 40 mL 顶空瓶中, 并加入 1 g 氯化钠 (分析纯) 和一个转子, 同时加入 10 μL 0.04 μL/mL 的 3-壬酮标样于 40 mL 顶空瓶中, 立即用锡箔纸封口并盖上盖子, 置于 50℃ 恒温磁力搅拌器上, 磁力搅拌速率为 500 r/min, 平衡 10 min。然后顶空固相微萃取吸附 40 min, 立即插入色谱气化室, 解吸 2.5 min, 进行 GC-MS 分析。每个处理 3 次重复, 取平均值。

GC 条件: 色谱柱为 HP-INNOWAX 弹性石英毛细管柱 (60 m × 0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 250℃; 进样方式为不分流进样; 升温程序为 40℃ 保持 2.5 min, 10℃/min 升至 110℃, 然后以 6℃/min 升温至 230℃, 维持 8 min; 载气为高纯 He (99.999%); 流速 1.0 mL/min。MS 条件: 电离方式为电子电离 (EI); 电离电压 70 eV; 离子源温度 250℃; 质谱扫描质量范围 35~500 m/z。

1.3.2 纤维素含量测定 甜瓜果实打成匀浆后, 纤维素含量用蒽酮比色法测定^[21]。

1.4 数据处理

果实挥发性成分定性及定量分析: 样品经过 GC 进行分离后, 形成不同的色谱峰。运用计算机检索并与图谱库 (NIST 2011) 的标准质谱图对照, 参考正反匹配度以及相关文献^[22-25], 当匹配度和纯度

大于 800 (最大值 1000) 时的鉴定结果才予以报道。各组分质谱经 NIST/Wiley 检索及资料分析, 再结合文献^[26-27]进行人工图谱分析以确定各化学成分。果实中挥发性物质的定量分析采用内标法, 计算公式如下:

$$Z = (S1/S2 \times m \times 1000) / M$$

式中, Z 代表挥发性物质含量 (μg/kg); S1、S2 分别代表样品的峰面积、内标物的峰面积; m、M 分别代表内标物的质量 (μg)、样品的质量 (g)。

甜瓜果实芳香物质与纤维素含量的综合评价应用模糊数学中的隶属函数值法^[28], 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。以甜瓜果实芳香物质总含量、特征香气物质含量和纤维素含量为依据计算 3 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 ($\alpha = 0.05$), 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 不同处理对甜瓜果实芳香物质的影响

2.1.1 不同处理对总芳香物质构成的影响 不同处理甜瓜果实香气成分的总离子流图见图 1, 各处理甜

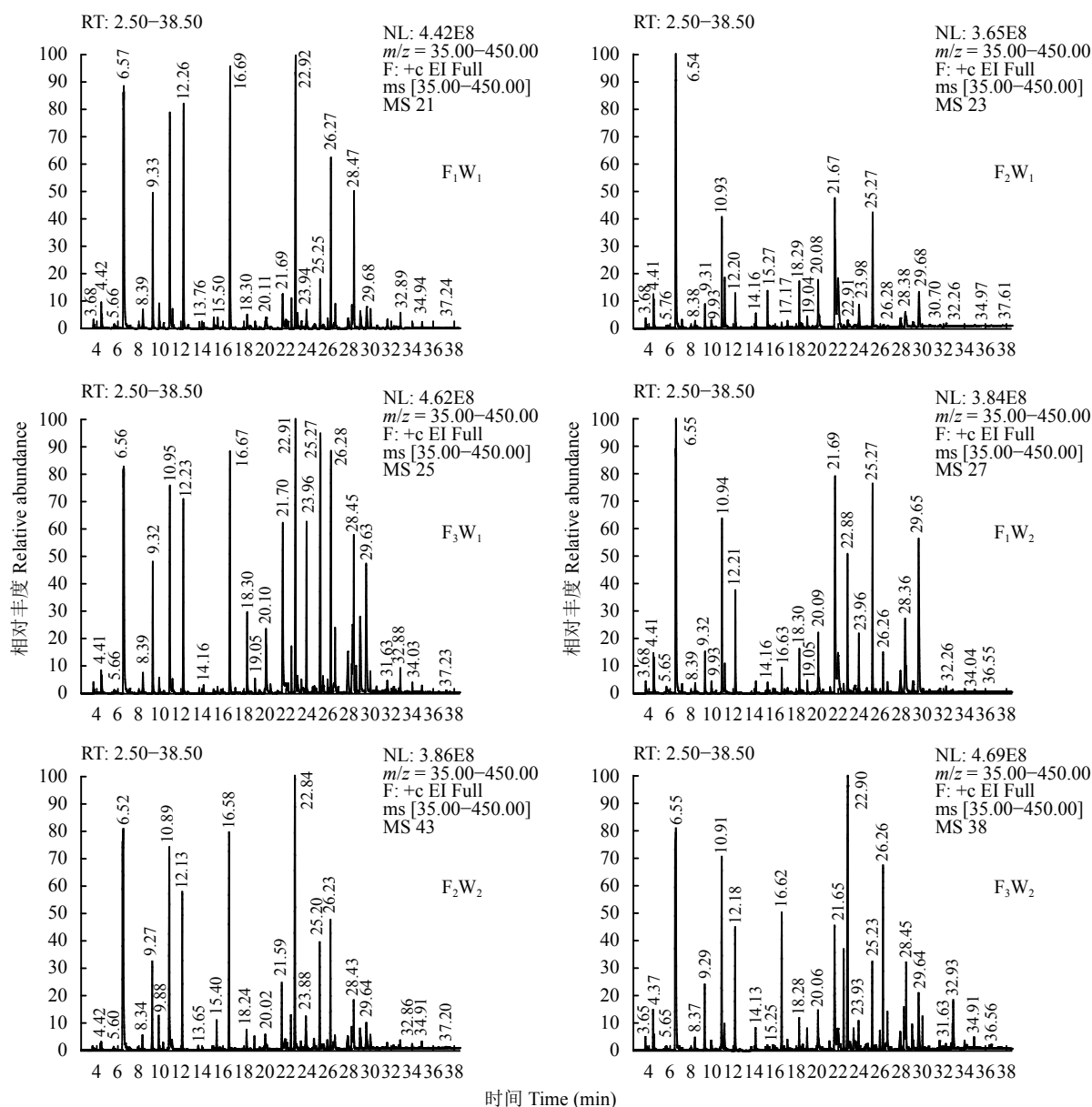


图 1 不同处理条件下甜瓜挥发性物质 GC-MS 总离子流图

Fig. 1 Total ion flow diagram of GC-MS for volatile substances in melon under different treatments

[注 (Note): F₁—分 8 次施肥 Organic leachate applied evenly in 8 times; F₂—分 12 次施肥 Organic leachate applied evenly in 12 times; F₃—分 16 次施肥 Organic leachate applied evenly in 16 times; W₁—灌溉日蒸发量的 120% 和 140% Irrigation amount was 120% and 140% of the daily ventilation; W₂—灌溉日蒸发量的 140% 和 160% Irrigation amount was 140% and 160% of the daily ventilation.]

瓜果实芳香物质成分及含量见表 2。6 个处理条件下, 甜瓜果实中共检测出 71 种挥发性物质, 各处理挥发性物质成分的总含量从高到低顺序依次为 F₂W₂ > F₁W₁ > F₃W₁ > F₁W₂ > F₃W₂ > F₂W₁。各处理下果实挥发性物质均为酯类化合物的种类及含量最多, 其次是醛类和醇类化合物, 这 3 类物质的总量占到甜瓜果实中所有芳香物质的 96% 以上。在本试验条件下, 6 个处理中均被检测出且相对含量高于 100 μg/kg 的组分有乙酸乙酯、乙酸丁酯、2-甲基丁基乙

酸酯、乙酸异丁酯、顺-3-壬烯-1-醇、乙醛、壬醛, 但这些芳香组分在各处理中的含量不同。千玉 6 号甜瓜检测出的酯类物质较多, 酯类物质是甜瓜中的主要香气成分^[29]。

6 个处理的甜瓜果实中都有其特有的香气成分, 即其他处理的果实中未被检测出的香气成分, 含量较低。说明不同有机肥浸提液灌溉频次与灌水量的耦合使得甜瓜果实中的挥发性物质成分发生了变化。与此同时, 各处理甜瓜果实的芳香物质含量也

表 2 各处理甜瓜果实挥发性成分种类及含量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Table 2 Kinds and contents of various volatile components in melon fruits of different treatments

类别 Category	F_1W_1		F_2W_1		F_3W_1		F_1W_2		F_2W_2		F_3W_2	
	种类 Kind	含量 Content	种类 Kind	含量 Content	种类 Kind	含量 Content	种类 Kind	含量 Content	种类 Kind	含量 Content	种类 Kind	含量 Content
酮类 Ketones	2	54.6	4	62.8	3	55.4	5	84.2	4	43.5	4	33.2
醛类 Aldehydes	8	998	10	2159	10	3073	12	2806	9	1994	7	1173
醇类 Alcohols	8	791	5	965	7	1726	7	1424	7	630	6	784
酯类 Esters	24	12531	13	4576	22	6769	21	6116	26	17266	19	7927
烃类 Hydrocarbons	2	304	2	104	3	283	3	263	3	212	3	279
其他 Other	1	111	0	0.00	0	0.00	2	16.70	4	173	2	38.8
总计 Total	45	14789	34	7867	45	11907	50	10710	53	20318	41	10234

注 (Note): F_1 —分 8 次施肥 Organic leachate applied evenly in 8 times; F_2 —分 12 次施肥 Organic leachate applied evenly in 12 times; F_3 —分 16 次施肥 Organic leachate applied evenly in 16 times; W_1 —灌溉日蒸发量的 120% 和 140% Irrigation amount was 120% and 140% of the daily ventilation; W_2 —灌溉日蒸发量的 140% 和 160% Irrigation amount was 140% and 160% of the daily ventilation.

存在一定差异,主要体现在醛类、醇类、烃类及酯类物质上。

2.1.2 不同处理对甜瓜果实各类挥发性物质种类及含量的影响 由表 2 可知, F_2W_1 处理的甜瓜果实中只检测出 34 种挥发性成分,而其他处理的甜瓜果实中均检测出不少于 40 种挥发性成分,其中 F_2W_2 处理检测出的挥发性成分最多,为 53 种。此外,在 6 个处理条件下甜瓜果实中均被检测出的挥发性成分有 21 种,简称共有挥发性物质,分别为 2 种酮类物质, 7 种醛类物质, 1 种醇类物质, 11 种酯类物质。而且这 21 种共有挥发性物质总含量在 6 个处理中从高到低顺序依次为 $F_2W_2 > F_1W_1 > F_3W_1 > F_1W_2 > F_3W_2 > F_2W_1$, 与挥发性物质总含量排序一致。而相对的不共有挥发性成分为 50 种,其中酮类物质 3 种,醛类物质 7 种,醇类 12 种,酯类物质 19 种及烃类物质 4 种和 5 种其他物质。

由表 2 结果还可以看出,不同有机肥浸提液灌溉频次及灌水量对各类挥发性物质的含量影响不同。在低灌水量条件下,果实挥发性物质种类及含量随着有机肥浸提液灌溉频次的增加先降低后升高,而在高灌水量条件下,果实挥发性物质种类及含量随着有机肥浸提液灌溉频次的增加先升高后降低,与前者变化趋势正好相反。相同有机肥浸提液灌溉频次条件下,果实挥发性物质种类及含量变化规律不明显。

2.1.3 不同处理对甜瓜果实特征香气成分含量的影响

从表 3 可以看出,甜瓜在不同有机肥浸提液灌溉频次及灌水量条件下,其特征香气成分含量有差

异。各处理乙酸乙酯含量均相对较高,其中 F_2W_2 处理的乙酸乙酯含量高与其他处理 27.4%~130.0%。在 W_1 条件下,各特征香气成分含量以 F_1 最高;而在 W_2 条件下,则以 F_2 最高,且 F_2W_2 处理的含量高出其他处理 53.6%~149.9%,甜瓜香气最浓厚。表明有机肥施用频次与灌溉水量之间有一定的相互作用。

2.2 不同处理对甜瓜果实纤维素含量的影响

由图 2 可以看出, F_2W_1 处理的甜瓜果实纤维素含量最高,为 1.3 mg/g,显著高于其他处理,提高 8.3%~227.5%,其次是 F_3W_1 处理和 F_3W_2 处理,且这两者间差异不显著。总的来讲,低灌水量条件下,甜瓜的纤维含量较高,且有机肥浸提液施用频次为 12 次时,果实纤维素含量较高。灌水量较高时 (W_2),果实纤维素含量较 W_1 条件下相同有机肥浸提液施用频次明显下降。

2.3 不同处理甜瓜果实芳香物质及纤维素含量的隶属函数值及综合得分

对不同处理甜瓜果实芳香物质及纤维素含量进行隶属函数值法评价 (表 4), 排名顺序为 $F_2W_2 > F_1W_1 > F_3W_1 > F_3W_2 > F_2W_1 > F_1W_2$ 。在本试验条件下 F_2W_2 处理可以同时兼顾甜瓜果实芳香物质含量及纤维素含量,为较优处理组合。

2.4 不同处理对甜瓜产量的影响

由图 3 可以看出, F_2W_2 处理甜瓜产量最高,达到 1.8 kg/m²,显著高于 F_1W_1 和 F_2W_1 。甜瓜产量在低灌水量条件下,当有机肥浸提液灌溉频次为 16 次时,可以明显提高甜瓜的产量。当灌溉量足够时,

表 3 不同处理对甜瓜果实特征香气成分含量的影响 (μg/kg)

Table 3 Effects of different treatments on characteristic aroma components and contents of melon fruits

处理 Treatment	乙酸乙酯 Ethyl acetate	乙酸丁酯 n-Butyl acetate	2-甲基丁酸乙酯 Ethyl-2-methylbutyrate	乙酸己酯 Hexyl acetate	(Z)-3-壬烯-1-醇 cis-3-Nonen-1-ol	总计 Total
F ₁ W ₁	2196	1905	44.5	2522.0	138	6807
F ₂ W ₁	3483	528	9.5	34.6	129	4184
F ₃ W ₁	1929	1003	12.7	1316.0	507	4767
F ₁ W ₂	3089	1077	21.2	147.0	605	4940
F ₂ W ₂	4437	3045	129.0	2675.0	170	10456
F ₃ W ₂	2506	1312	39.0	1292.0	134	5283

注 (Note): F₁—分 8 次施肥 Organic leachate applied evenly in 8 times; F₂—分 12 次施肥 Organic leachate applied evenly in 12 times; F₃—分 16 次施肥 Organic leachate applied evenly in 16 times; W₁—灌溉日蒸发量的 120% 和 140% Irrigation amount was 120% and 140% of the daily ventilation; W₂—灌溉日蒸发量的 140% 和 160% Irrigation amount was 140% and 160% of the daily ventilation.

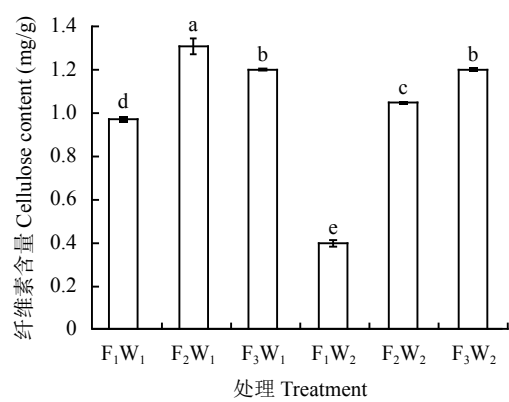


图 2 不同处理对甜瓜果实纤维素含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on cellulose content of melon fruit

[注 (Note): F₁—分 8 次施肥 Organic leachate applied evenly in 8 times; F₂—分 12 次施肥 Organic leachate applied evenly in 12 times; F₃—分 16 次施肥 Organic leachate applied evenly in 16 times; W₁—灌溉日蒸发量的 120% 和 140% Irrigation amount was 120% and 140% of the daily ventilation; W₂—灌溉日蒸发量的 140% 和 160% Irrigation amount was 140% and 160% of the daily ventilation. 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different small letters above the bars mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).]

有机肥浸提液施用的效果主要取决于总量, 施用频次的影响不再显著。

3 讨论

根据人体对不同化学结构香气物质的感官效果, 甜瓜芳香物质可分为果香型、青香型、醛香型、花香型等。果香型化合物是指具有成熟水果香气且伴有甜味的物质, 如乙酸丁酯、乙酸乙酯、己酸乙酯等各种酯类物质。青香型化合物指具有绿色

植物青香气, 能使人联想起刚采摘下来的青草或树叶的香气的物质, C6 及 C9 的醛类、醇类物质是青香型化合物的代表。醛香型化合物具有瓜类生臭味, C7~C12 的脂肪族醛类是醛香型化合物的重要代表。花香型化合物是指具有花香味的物质^[30]。本研究中各处理均检测出较多的果香型酯类化合物。

近年来, 国内外从氮素水平^[7]、钾素水平^[8]、有机硒肥^[23]、品种^[22, 31]等方面对甜瓜果实香气的研究较多, 本试验则研究不同有机肥浸提液施用频次及灌水量对甜瓜香气成分及含量的影响。研究发现不同有机肥浸提液施用频次与灌水量的耦合效应使得甜瓜果实中的挥发性物质成分及含量差异明显, 主要体现在醛类、醇类、烃类及酯类物质上, 且不同处理甜瓜果实中都有其特有香气成分。这与潜宗伟等^[7]研究发现不同氮素水平的甜瓜芳香物质成分及含量有显著差异的结论相一致。可能原因是两个试验均研究养分供应对甜瓜生长的影响, 进而影响到果实香气物质的形成, 说明养分供应量及供应方式可以改变甜瓜果实香气物质的形成。

本研究发现相同有机肥浸提液施用频次条件下, 高灌水量 (低 EC 值) 处理 F₂W₂、F₃W₂ 的甜瓜果实特征芳香物质含量分别高于低灌水量 (高 EC 值) 处理 F₂W₁、F₃W₁, 但 F₁W₁ 处理高于 F₁W₂ 处理。首先可能是由于产量带来的影响, W₁ 条件下, 甜瓜的平均产量为 1.6 kg/m², W₂ 条件下为 1.7 kg/m²。其次, 灌溉量的差异导致灌溉液中养分含量的变化, 也影响甜瓜合成芳香物质和纤维素的多寡^[32-33]。氮素作为营养液中的大量元素, 其水平下降 EC 值降低, 甜瓜的生长受阻导致大量养分分配到营养器官中, 甜瓜果实的芳香品质下降; 在高氮素水平下, 营养

表 4 不同处理甜瓜果实芳香物质及纤维素含量的隶属函数值及综合得分

Table 4 Membership function values and comprehensive scores of aromatic substances and cellulose content in melon fruits of different treatments

处理 Treatment	芳香物质总含量 Total aromatic substance	特征香气物质含量 Characteristic aroma substance content	纤维素含量 Cellulose content	综合得分 Comprehensive score	排序 Ranking
F ₁ W ₁	0.56	0.42	0.62	0.53	2
F ₂ W ₁	0.00	0.00	1.00	0.31	5
F ₃ W ₁	0.32	0.09	0.89	0.41	3
F ₁ W ₂	0.23	0.12	0.00	0.12	6
F ₂ W ₂	1.00	1.00	0.71	0.91	1
F ₃ W ₂	0.19	0.18	0.87	0.39	4
CV(%)	0.35	0.38	0.32		
权重系数 Weight coefficient	0.33	0.36	0.31		

注 (Note) : F₁—分 8 次施肥 Organic leachate applied evenly in 8 times; F₂—分 12 次施肥 Organic leachate applied evenly in 12 times; F₃—分 16 次施肥 Organic leachate applied evenly in 16 times; W₁—灌溉日蒸发量的 120% 和 140% Irrigation amount was 120% and 140% of the daily ventilation; W₂—灌溉日蒸发量的 140% 和 160% Irrigation amount was 140% and 160% of the daily ventilation.

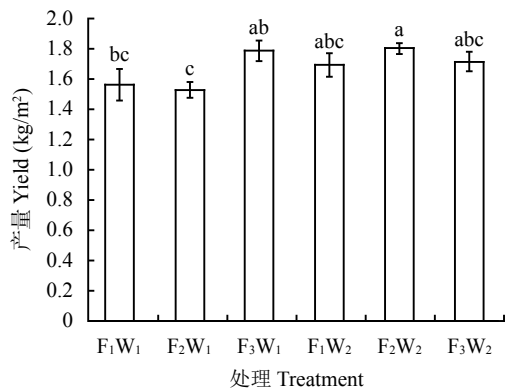


图 3 不同处理对甜瓜产量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on melon yield

[注 (Note) : F₁—分 8 次施肥 Organic leachate applied evenly in 8 times; F₂—分 12 次施肥 Organic leachate applied evenly in 12 times; F₃—分 16 次施肥 Organic leachate applied evenly in 16 times; W₁—灌溉日蒸发量的 120% 和 140% Irrigation amount was 120% and 140% of the daily ventilation; W₂—灌溉日蒸发量的 140% 和 160% Irrigation amount was 140% and 160% of the daily ventilation.]

液 EC 值高, 甜瓜品质变劣, 导致特征芳香物质的变化, 从而影响甜瓜的风味。因此, 在甜瓜生长过程中合理控制营养液的 EC 值, 才能保证甜瓜芳香风味。在本试验条件下 F₂W₂ 处理甜瓜的特征香气物质含量最高, 可以获得较多的特征香气物质。

纤维素是主要成壁物质之一, 它的含量与感官品质关系非常密切。纤维素含量高低直接影响果实的硬度, 含量过低, 果实绵软, 而含量过高, 果肉

会比较硬, 影响口感^[25]。本研究发现 W₁ 条件下随着有机肥浸提液施用频次的增加, 果实纤维素含量先升高后下降。而随着灌水量的增加, 果实纤维素含量下降。在本试验条件下, 为了提高甜瓜果实的质地品质, F₂W₁ 处理效果最佳, 其次是 F₃W₁ 处理和 F₃W₂ 处理。

果实的成熟是一个受遗传和生长发育等诸多因子调控的复杂过程。在该过程中, 会发生各种生理生化反应以及结构的变化, 影响果实的外观、质地和风味^[34]。芳香物质均起源于脂肪酸、葡萄糖、类胡萝卜素、苯丙氨酸和支链氨基酸等^[35], 这些前体物质由 CO₂ 经卡尔文循环形成葡萄糖后再经糖酵解、莽草酸途径和甲羟戊酸途径等不同代谢途径形成。有研究表明肥水供应可以改变果实中芳香物质组成^[36-40], 与本试验研究结果一致。这些研究中, 不同养分供应量及供应方式对果实中芳香物质组成影响各异, 这可能是因为各营养素对细胞不同代谢途径的影响不尽相同。与此同时纤维素降解转化成葡萄糖^[41], 为芳香物质合成提供前体物质, 两者共同决定果实品质。这也是本试验选择测定甜瓜果实芳香物质及纤维素含量, 从而筛选出较优肥水处理组合的原因。

4 结论

同时兼顾甜瓜果实的香气风味、纤维素含量及产量, 在本试验条件下, 有机肥浸提液施用 12 次,

每次每株 500 mL,果实膨大前后分别按 140% 和 160% 日蒸发量灌溉,此种施肥灌水管理可以明显增加果实中特征芳香物质的含量,果实中的纤维素含量适宜,而且产量最高。

参 考 文 献:

- [1] 马跃. 国家甜瓜品种试验报告 (2001—2002)[J]. 中国西瓜甜瓜, 2003, (3): 48—52.
Ma Y. National melon variety test report (2001—2002)[J]. China Watermelon and Muskmelon, 2003, (3): 48—52.
- [2] Jordán M J, And P E S, Goodner K L. Volatile components in aqueous essence and fresh fruit of cucumis melo cv. Athena (Muskmelon) by GC-MS and GC-O[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2001, 49(12): 5929—5933.
- [3] Kourkoutas D, Elmore J S, Mottram D S. Comparison of the volatile compositions and flavour properties of cantaloupe, Galia and honeydew muskmelons[J]. Food Chemistry, 2006, 97(1): 95—102.
- [4] 宋丽娟, 李雄伟, 陈琳, 等. 果实香气合成与遗传控制研究概述[J]. 果树学报, 2008, (5): 708—713.
Song L J, Li X W, Chen L, et al. A review on fruit aroma synthesis and its genetic control[J]. Journal of Fruit Science, 2008, (5): 708—713.
- [5] Wyllie S G, Leach D N, Wang Y, et al. Key aroma compounds in melons: their development and cultivar dependence[A]. ACS Symposium Series[C]. American Chemical Society, 1995, 596: 248—257.
- [6] And J C B, Grimm C C. Identification of volatile compounds in cantaloupe at various developmental stages using solid phase microextraction[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2001, 49(3): 1345—1352.
- [7] 潜宗伟, 陈海丽, 刘明池. 不同氮素水平对甜瓜芳香物质和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1451—1458.
Qian Z W, Chen H L, Liu M C. Effects of nitrogen fertilization on aromatic compounds and nutritional quality of melon fruits[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(6): 1451—1458.
- [8] 林多, 黄丹枫, 杨延杰, 陈宁. 钾素水平对网纹甜瓜矿质元素积累及果实品质的影响[J]. 华北农学报, 2007, (6): 1—4.
Lin D, Huang D F, Yang Y J, Chen N. Effects of potassium levels on mineral element accumulation and fruit quality of muskmelon in soilless medium culture[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, (6): 1—4.
- [9] 王锐竹, 王怀松, 贺超兴, 张志斌. 钾对厚皮甜瓜成熟果实中芳香物质构成及含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2009, (24): 24—29.
Wang R Z, Wang H S, He C X, Zhang Z B. Effects of different potassium dosage on aroma components and contents in muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruit[J]. China Vegetables, 2009, (24): 24—29.
- [10] 蔡东升, 李建明, 李惠, 等. 营养液供应量对番茄产量、品质和挥发性物质的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 921—930.
Cai D S, Li J M, Li H, et al. Effects of nutrient solution supply amount on yield, quality and volatile matter of tomato[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 921—930.
- [11] 王进卿. 膳食纤维的功能与应用[J]. 中国酿造, 2003, (5): 37—38.
Wang J Q. Function and application of dietary fiber[J]. China Brewing, 2003, (5): 37—38.
- [12] 陈霞. 膳食纤维的生理功能与特性[J]. 黑龙江农业科学, 2002, (2): 38—40.
Chen X. Physiological function and properties of natural cellulose[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2002, (2): 38—40.
- [13] 陆克峰, 杨海军. 膳食纤维在功能性食品中的应用及其发展前景[J]. 中国食物与营养, 2004, (3): 26—28.
Lu K F, Yang H J. Application of dietary fiber in functional foods and its development prospects[J]. Food and Nutrition in China, 2004, (3): 26—28.
- [14] 郑鹏然. 食用纤维素的功能及其卫生学评价[J]. 中国食品卫生杂志, 1996, (1): 33—34.
Zheng P R. The function of edible cellulose and its hygienic evaluation[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 1996, (1): 33—34.
- [15] 刘耀娜, 王毅, 毕阳, 等. 采前乙酰水杨酸处理对厚皮甜瓜果实成熟及软化的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(10): 1865—1875.
Liu Y N, Wang Y, Bi Y, et al. Effect of preharvest acetylsalicylic acid treatments on ripening and softening of harvested muskmelon fruit[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(10): 1865—1875.
- [16] 白晓航, 齐红岩, 吕德卿. EFF 和乙醇对采后薄皮甜瓜果实贮藏品质及相关生理指标的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(14): 262—267.
Bai X H, Qi H Y, Lü D Q. Comparative effects of enhanced freshness formulation and ethanol treatments on quality and related physiological indexes of postharvest oriental sweet melons (*Cucumis melo* var. *makuwa* Makino) during storage[J]. Food Science, 2014, 35(14): 262—267.
- [17] 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 番茄育苗基质理化特性及其对幼苗生长影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 137—142, 250.
Wang P B, Li J M, Ding J J, et al. Study on physical and chemical characteristics of compound substrate and effects on the growth of tomato seedling[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 137—142, 250.
- [18] 张钧恒, 马乐乐, 李建明. 全有机营养肥水耦合对番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2788—2798.
Zhang J H, Ma L L, Li J M. Effects of all-organic nutrient solution and water coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(14): 2788—2798.
- [19] 李建明, 樊翔宇, 闫芳芳, 等. 基于蒸腾模型决策的灌溉量对甜瓜产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 156—162.
Li J M, Fan X Y, Yan F F, et al. Effect of different irrigation amount based on transpiration model on yield and quality of muskmelon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 156—162.
- [20] 常培培, 梁燕, 张静, 等. 5 种不同果色樱桃番茄品种果实挥发性物质及品质特性分析[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 215—221.
Chang P P, Liang Y, Zhang J, et al. Volatile components and quality characteristics of cherry tomato from five color varieties[J]. Food Science, 2014, 35(22): 215—221.
- [21] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Gao J F. Instruction for plant physiology experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [22] 赵光伟, 徐志红, 孔维虎, 等. 3 个甜瓜品种果实香气成分的 HS-SPME/GC-MS 比较分析[J]. 果树学报, 2015, 32(2): 259—266.
Zhao G W, Xu Z H, Kong W H, et al. Analysis of aromatic compounds in three melon cultivars (*Cucumis melo* L.) by solid phase

- microextraction with GC-MS[J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(2): 259–266.
- [23] 夏美玲, 鲁秀梅, 任琴琴, 等. 有机硒肥对薄皮甜瓜香气成分和营养品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2018, 31(7): 7–12.
- Xia M L, Lu X M, Ren Q Q, *et al.* Effect of organic selenium fertilizer on aromatic compounds and nutritional quality of oriental sweet melon (*Cucumis melo* var. *makuwa* Makino)[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2018, 31(7): 7–12.
- [24] 林多, 黄丹枫, 杨延杰, 董梅. 营养液浓度对基质栽培网纹甜瓜生长和品质的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(2): 184–186.
- Lin D, Huang D F, Yang Y J, Dong M. Effects of nutrient levels on plant growth and fruit quality of muskmelon in soilless medium culture[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(2): 184–186.
- [25] Brummell D A, Cin V D, Crisosto C H, *et al.* Cell wall metabolism during maturation, ripening and senescence of peach fruit[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(405): 2029–2039.
- [26] 郝静. 番茄果实风味物质及其农艺影响因子的研究[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2007.
- Hao J. Study on flavor substances of tomato fruit and their agronomic influencing factors [D]. Beijing: MS Thesis of China Agricultural University, 2007
- [27] 唐晓伟, 刘明池, 何洪巨, 郝静. 新鲜番茄风味组分研究[J]. *食品科学*, 2007, (2): 28–30.
- Tang X W, Liu M C, He H J, Hao J. Study on aroma volatiles of fresh tomato cultivars[J]. *Food Science*, 2007, (2): 28–30.
- [28] 魏永胜, 梁宗锁, 山仑, 等. 利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性[J]. *草业科学*, 2005, 22(6): 33–36.
- Wei Y S, Liang Z S, Shan L, *et al.* Comprehensive evaluation on alfalfa drought-resistance traits by subordinate function values analysis[J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(6): 33–36.
- [29] Yabumoto K, Jennings W G. Volatile constituents of *Cantaloupe*, *Cucumis melo*, and their biogenesis[J]. *Journal of Food Science*, 1977, 42(1): 32–37.
- [30] Ortiz-Serrano P, Gil J V. Quantitative comparison of free and bound volatiles of two commercial tomato cultivars (*Solanum lycopersicum* L.) during ripening[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(2): 1106–1114.
- [31] 李国生, 焦自高, 陈子雷, 等. 不同厚皮甜瓜品种成熟果实香气成分的 GC-MS 分析[J]. *果树学报*, 2010, 27(4): 591–597.
- Li G S, Jiao Z G, Chen Z L, *et al.* Analysis of aromatic compounds in three muskmelon cultivars (*Cucumis melon*) by solid phase microextraction with GC-MS[J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27(4): 591–597.
- [32] 王艳丹, 方海东, 李建查, 等. 不同水肥管理对番茄品质和产量的影响[J]. *农学学报*, 2019, 9(6): 39–45, 50.
- Wang Y D, Fang H D, Li J C, *et al.* Effects of water and fertilizer management modes on quality and yield of tomato[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(6): 39–45, 50.
- [33] 樊丽琴, 吴霞, 李磊, 朱丹. 水肥管理对土壤盐分、硝态氮分布及番茄产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(11): 298–302.
- Fan L Q, Wu X, Li L, Zhu D. Effects of water and fertilizer management on salinity and nitrate-N distribution in soil and yield and quality of tomato[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(11): 298–302.
- [34] Giovannoni J J. Genetic regulation of fruit development and ripening[J]. *The Plant Cell Online*, 2004, 16(S1): 170–180.
- [35] Klee H J, Giovannoni J J. Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes[J]. *Annual Review of Genetics*, 2011, 45(1): 41–59.
- [36] Wright D H, Harris N D. Effect of nitrogen and potassium fertilization on tomato flavor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1985, 33(3): 355–358.
- [37] 李梅兰, 吴俊华, 李远新, 侯雷平. 不同供硼水平对番茄产量及风味品质的影响[J]. *核农学报*, 2009, 23(5): 875–878, 890.
- Li M L, Wu J H, Li Y X, Hou L P. Effects of boron application on yield and flavor quality of tomato fruit[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(5): 875–878, 890.
- [38] 侯雷平, 吴俊华, 李远新. 缺锰和多锰对番茄产量及风味品质的影响[J]. *核农学报*, 2010, 24(1): 83–87.
- Hou L P, Wu J H, Li Y X. The effects of lacking and overplus of manganese on the yield and the flavor quality of the fruit in the tomato[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(1): 83–87.
- [39] 侯雷平, 吴俊华, 李梅兰, 李远新. 供锌水平对番茄果实抗氧化性及风味品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 763–767.
- Hou L P, Wu J H, Li M L, Li Y X. Effects of Zn fertilization on antioxidative capacity and flavor quality of tomato fruit[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(3): 763–767.
- [40] 吴俊华, 侯雷平, 李远新, 李梅兰. 不同供铁水平对番茄产量及果实风味品质的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 154–157.
- Wu J H, Hou L P, Li Y X, Li M L. Effect of different iron concentrations on yield and flavor quality of fruit in tomato[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 154–157.
- [41] 赵博, 胡尚连, 龚道勇, 李会萍. 固体酸催化纤维素水解转化葡萄糖的研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(2): 555–567.
- Zhao B, Hu S L, Gong D Y, Li H P. New advances on hydrolysis of cellulose to glucose by solid acid[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(2): 555–567.