

番茄茎秆浸提液对番茄生长和风味品质的影响

李琦¹ 梅延豪¹ 刘齐¹ 徐晓东¹ 赵芳¹ 管彤彤¹ 武永军² 杨振超^{1*}

(1. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要 为探究番茄茎秆资源化应用技术及效果,本研究利用番茄茎秆有氧发酵浸提液(EX1)和番茄茎秆厌氧发酵浸提液(EX2)水培番茄,以山崎营养液处理为对照(CK),对番茄植株的生长形态、果实营养品质和挥发性物质等相关指标进行分析。结果表明:1)EX1和EX2处理的株高、茎粗、叶面积和生物量等指标低于CK处理,但番茄果实可溶性固形物、糖酸比、可溶性蛋白和维生素C等指标均优于CK处理,并以EX2处理表现最佳;2)EX1、EX2和CK处理检测到挥发性物质数量依次是39、34和27种;3)EX1、EX2和CK处理的挥发性物质总含量依次是1403.35、1931.10和1368.40 $\mu\text{g}/\text{kg}$;4)EX1、EX2和CK处理的番茄特征挥发性物质总量依次是953.82、1256.60和1055.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。说明单纯使用番茄茎秆浸提液水培番茄,虽然在生长上稍显弱势,但可显著改善果实营养和风味品质。本研究一定程度上使番茄茎秆得到了有效利用,也为其他蔬菜茎秆资源化技术提供理论参考,具有较为广阔的前景。

关键词 番茄茎秆; 浸提液; 水培; 番茄风味品质; 气相色谱-质谱联用

中图分类号 S641.2

文章编号 1007-4333(2021)04-0047-13

文献标志码 A

Effects of tomato stem compost extract on tomato growth and flavor quality

LI Qi¹, MEI Yanhao¹, LIU Qi¹, XU Xiaodong¹, ZHAO Fang¹, GUAN Tongtong¹,
WU Yongjun², YANG Zhenchao^{1*}

(1. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract In order to explore the application technology and effect of tomato stem recycling, tomato stem aerobic fermentation extract (EX1) and tomato stem anaerobic fermentation extract (EX2) were used to culture tomato in water, and Yamasaki nutrient solution was used as control (CK) to analyze the growth morphology of plant, fruit nutritional quality and volatile compounds of tomato. The results showed that: 1) The plant height, stem diameter, leaf area and biomass of EX1 and EX2 treatments were lower than those of CK treatment. The soluble solids, sugar acid ratio, soluble protein and vitamin C of EX1 and EX2 treatments were better than those of CK treatment, and EX2 treatment was the best; 2) The number of volatile compounds detected in EX1, EX2 and CK treatments were 39, 34 and 27, respectively; 3) The total contents of volatile compounds in EX1, EX2 and CK treatments were 1403.35, 1931.10 and 1368.40 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively; 4) The total amount of characteristic volatile compounds in EX1, EX2 and CK treatments were 953.82, 1256.60 and 1055.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively. The results showed that the growth of tomato in hydroponic culture with tomato stem extract was slightly weak, but the culture could significantly improve the fruit nutrition and flavor quality. In conclusion, this study, to a certain extent, provides method for the effective use of

收稿日期: 2020-08-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0201205-2);陕西省农业厅农业科技创新集成推广项目(NYKJ-2018-YL22);杨凌示范区农业科技示范推广项目(2017-TS-21)

第一作者: 李琦, 硕士研究生, E-mail: lq13289386001@163.com

通讯作者: 杨振超, 副教授, 主要从事设施农业工程环境研究, E-mail: yangzhenchao@nwsuaf.edu.cn

tomato stem, and a theoretical reference for other vegetable stem resource technology, which has broad prospects.

Keywords tomato stem; extract; hydroponics; flavor quality of tomato; GC-MS

随着蔬菜产业和设施农业的发展,蔬菜作物茎秆产量越来越大,未经适当处理一方面会造成环境污染,另一方面浪费有机质资源。据统计,我国蔬菜茎秆的年产量约 2.7 亿 t^[1],番茄占蔬菜总产量的 7%左右^[2],每年会产生大量的番茄茎秆。以往处理茎秆的方式是将各类茎秆粉碎后直接还田,这种方式不但收效甚微且具有传播病原菌的风险^[3]。而堆肥是处理茎秆最有效的一种利用途径,有研究表明番茄茎秆中含有丰富的矿质元素和有机物质^[4],且堆肥过程中微生物在可控条件下分解消耗茎秆中的有机物质,能够产生稳定、成熟、除臭、不含病原体 and 植物种子的有机质和腐殖酸^[5-6]。经过堆肥处理的番茄茎秆可实现变废为宝,既保护了生态环境,又将有机质资源合理应用。

近年来,番茄茎秆堆肥化研究已取得了一些进展。牛博宇^[7]以番茄茎秆有氧和厌氧 2 种堆肥产物栽培番茄,与普通基质栽培相比果实产量分别提高了 9.80%和 10.87%,且均提升了果实营养品质;辛鑫等^[8]用番茄茎秆有氧堆肥产物浸提液浇灌作物,与山崎营养液浇灌相比虽然产量稍低,但果实中的可溶性固形物、维生素 C 和可溶性蛋白含量分别提高了 30.89%、29.93%和 39.84%,达到了改善果实营养品质的效果;胡晓婷等^[9]研究表明,当番茄茎秆堆肥产物与土壤混配质量占比为 12.5%时,与普通基质栽培相比果实产量无显著性差异,且果实中挥发性物质和特征挥发性物质总含量分别提升了 81.00%和 24.80%,这显著改善了番茄果实风味品质。其他作物茎秆中也有过类似研究,王园园等^[10]研究发现当谷子茎秆的浸提液浓度低于一定范围时,可以促进谷子种子的萌发以及幼苗的生长;杨晓珍等^[11]研究发现,功能性堆肥及堆肥浸提液有利于黄瓜的生长,增强黄瓜叶片的光合作用,从而促进果实中营养物质的积累,可以显著提高黄瓜产量。以上研究都是在基质和土壤栽培中进行,利用番茄茎秆堆肥产物浸提液进行有机营养液水培的研究还少见报道。基质或土壤栽培中,植物根系环境难以控制,会产生连作障碍^[12];而水培可以精准调控植物根系环境,避免连作障碍,并且水培不受地域或地形限制,有利于实现自动化和智能化的管理模式^[13]。浸提液作为有机营养液还可以减少化肥使用,生产

出健康的绿色农产品。因此,本研究拟利用番茄茎秆堆肥产物浸提液水培番茄,通过分析植株的生长、果实的营养及风味品质,探究番茄茎秆堆肥产物浸提液作为水培有机营养液的使用效果,旨在为各类蔬菜茎秆资源化技术提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验番茄品种为‘华美 103’。番茄茎秆全部收集于杨凌五泉镇,经粉碎干燥后通过有氧和厌氧发酵,得到 2 种完全腐熟的堆肥产物。将两种腐熟的堆肥产物与清水按照质量比 1:5 比例混合,每隔 24 h 搅拌 1 次,持续浸泡 72 h,过滤后即成为有氧发酵产物浸提液和厌氧发酵产物浸提液。使用 Floesys 型流动分析仪(Systea,意大利)、M410 blue notes 型火焰光度计(Sherwood,英国)和 S-433D 氨基酸分析仪(日立,日本)测得 3 种营养液大量元素质量浓度(表 1)、微量元素质量浓度(表 2)和氨基酸质量浓度(表 3)。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 4—8 月在人工气候室内进行。采用水培方式,共设 EX1(整个生长期用有氧浸提液)和 EX2(整个生长期用厌氧浸提液)2 个处理,以山崎营养液作为对照(CK),重复 4 次。EX1、EX2 和 CK 处理的标准营养液 EC 值均调控到 2.0 ms/cm^[14],苗期使用 1/2 个标准浓度,生长期使用 1 个标准浓度。挑选长势优良和大小一致的番茄苗定值在水培槽中,并供氧 20 min/h。每周对营养液进行 1 次换新,用磷酸调节各处理营养液的 pH 到 6.0 左右。人工气候室环境为:光期 16 h,光强 270±2 μmol/(m²·s),温度 30 °C,湿度 60%;暗期 8 h,温度 20 °C,湿度 60%^[15]。植株管理按照常规方法进行。

1.3 测定项目与测定方法

1.3.1 番茄生长指标及产量测定

用卷尺、游标卡尺和 LI-3000C 便携式叶面积仪,测量株高、茎粗和番茄生长点向下第 4 片叶的叶面积;将植株鲜样置于烘箱,先在 110 °C 下杀青 1 h,然后在 60 °C 恒温下烘干至恒重,称量其重量即为该植株生物量;用 LI-6800 便携式光合仪测量番茄生长点向下第 4 片叶的光合;每个处理测量 4 株,并单

表1 各营养液大量元素种类和质量浓度

Table 1 Types and mass concentrations of macronutrients in each nutrient solution mg/L

大量元素 Macronutrients	有氧浸提液 Aerobic compost extract	厌氧浸提液 Anaerobic compost extract	山崎营养液 Yamasaki nutrient solution
硝态氮 Nitrate nitrogen	12.280	10.510	236.322
铵态氮 Ammonium nitrogen	140.000	80.000	19.251
速效磷 Available phosphorus	7.000	7.000	46.827
速效钾 Available potassium	580.851	663.829	328.566

表2 各营养液微量元素种类和质量浓度

Table 2 Types and mass concentrations of microelements in each nutrient solution mg/L

微量元素 Microelement	有氧浸提液 Aerobic compost extract	厌氧浸提液 Anaerobic compost extract	山崎营养液 Yamasaki nutrient solution
铁 Fe	0.500	0.790	20.000
锰 Mn	0.074	0.110	1.300
硼 B	0.610	0.690	2.860
锌 Zn	0.120	0.130	0.220
钼 Mo	0.012	0.009	0.020
铜 Cu	0.028	0.028	0.080

表3 各营养液氨基酸种类和质量浓度

Table 3 Types and mass concentrations of amino acids in various nutrient solutions mg/L

氨基酸种类 Types of amino acids	有氧浸提液 Aerobic compost extract	厌氧浸提液 Anaerobic compost extract	山崎营养液 Yamasaki nutrient solution
天冬氨酸 Asp	7.79	7.59	—
苏氨酸 Thr	2.71	2.92	—
丝氨酸 Ser	2.43	2.82	—
谷氨酸 Glu	6.63	7.66	—
甘氨酸 Gly	8.85	8.02	—
丙氨酸 Ala	3.79	4.09	—
缬氨酸 Val	1.85	1.84	—
胱氨酸 Cys	1.37	—	—
苯基丙氨酸 Phe	11.83	8.52	—
赖氨酸 Lys	1.70	1.99	—
精氨酸 Arg	2.03	1.94	—
脯氨酸 Pro	—	2.44	—
组氨酸 His	2.74	—	—
总计 Total	53.72	49.83	—

注：—表示未检测出该物质。下同。

Note: — indicates that the substance was not detected. The same below.

独记录前3穗果产量,根据株行距(30 cm×40 cm)推算亩产。

1.3.2 番茄果实营养品质指标测定

可溶性固形物及总酸含量采用日本 Atago 公司的 PAL-1 型手持折光显数仪测量,根据可溶性固形物与总酸含量的比值算出糖酸比;维生素 C、可溶性蛋白和硝态氮含量分别用钼蓝比色法、考马斯亮蓝 G20 染色法和水杨酸-硫酸法测定^[16]。所有的测量在每个处理中重复3次。

1.3.3 挥发性物质测定

利用固相微萃取-气相色谱-质谱联用(SPME-GC-MS)技术^[9,17],检测番茄果实中挥发性物质的种类及其含量,并用 R 语言将果实中各类挥发性物质的含量进行聚类分析生成热图。

样品采集:果实成熟时,经过筛选和检验,每个处理选择6个颜色和大小相同的果实。将果实洗净,破碎成果肉匀浆,直接装在密封的250 mL 样品瓶中,保存在-80℃超低温冰箱中,测定果实挥发性物质。所有的测量在每个处理中重复3次。

SPME 取样:在40 ml 样品瓶中放入5 g 果实样品,随即放入3 g 无水氯化钠(分析纯),再加入10 μL 0.04 μL/mL 的3-壬酮(色谱纯标样)。快速用锡箔纸封住瓶口拧紧瓶盖,在45℃、速率300 r/min 的恒温磁力搅拌器上平衡10 min。然后用顶空固相微萃取吸附40 min,迅速将吸附探头插进色谱气室,加热挥发3 min,进行GC-MS分析。

气相条件:进样口温度为250℃,进样方式用不分流进样,载气为高纯 He (99.999%),流速为1.0 mL/min;升温程序为40℃保持2.5 min,5℃/min 升至150℃,10℃/min 升至230℃,维持8 min。色谱柱为 HP-INNOWAX 弹性石英毛细管柱(60 m×0.25 mm,0.25 μm)

质谱条件:采用 ISQ 气相色谱-质谱联用仪。电离方式为电子电离,电离电压70 eV;检测器电压1 604 V;离子源温度240℃;传输线温度240℃;质量扫描范围35~450 amu。

挥发性物质的计算:各处理的样品经过气相进行分离后,各组分会产生不同的色谱峰,经过 NISEX1013 和 WILEY 质谱检索,定量分析作出鉴定。选取正反匹配度>800(最大值1 000)的鉴定结果^[18]。计算公式^[19]如下:

$$C = \frac{A_1}{A_2} \times \frac{W_1}{W_2}$$

式中: A_1 表示样品峰面积; A_2 表示内标峰面积; W_1 表示内标量,μg; W_2 表示样品量,g; C 表示挥发性物质含量,μg/g。

1.4 数据分析

用 Excel 2010 进行数据整理和图表制作,用 SPSS 23.0 中的 Duncan 新复极差法进行数据的方差分析($P \leq 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 各处理对番茄植株形态、光合、生物量及产量的影响

各处理在株高方面无显著性差异,但 CK 处理在茎粗、叶面积、生物量及产量方面均与 EX1 和 EX2 处理呈现出显著性差异。其中 CK 处理茎粗达到 11.02 mm,较 EX1 和 EX2 处理分别高出 19.39% 和 15.03%;CK 处理叶面积达到 27.42 cm²,较 EX1 和 EX2 处理分别高出 72.24% 和 65.67%;CK 处理生物量达到了 62.91 g,较 EX1 和 EX2 处理分别高出 93.03% 和 61.11%;CK 处理三穗果产量达到了 2 922.49 kg/667 m²,较 EX1 和 EX2 处理分别高出 48.08% 和 55.65%(表4)。CK 处理净光合速率显著高于其他处理,其净光合速率达到 17.761 2 μmol/(m²·s),较 EX1 和 EX2 处理分别高出 131.55% 和 132.46%;各处理之间蒸腾速率无显著性差异,可能是各处理所处环境的参数相同所致;CK 处理胞间 CO₂ 浓度显著低于其他处理,可能是 CK 处理净光合速率较高,消耗较多的胞间 CO₂,EX1 和 EX2 处理之间净光合速率基本相同,所以胞间 CO₂ 浓度无显著性差异;气孔导度方面 CK 处理显著大于其他处理,而 EX1 和 EX2 处理之间无显著性差异(表5)。综合来看,CK 处理植株长势与光合特性表现较好,可以提高生物积累量和产量。

2.2 各处理对番茄果实营养品质的影响

由表6可知,EX2 处理番茄果实中可溶性固形物含量显著高于 CK 和 EX1 处理,分别高出 37.59% 和 8.83%;各处理间总酸含量无显著性差异;EX1 和 EX2 处理糖酸比均显著高于 CK 处理,其中 EX2 处理比值最高,较 CK 处理高出 43.91%;EX2 处理可溶性蛋白的含量较 CK 和 EX1 处理分别提高了 66.87% 和 47.59%;各处理间硝态氮含量无显著性差异;EX2 处理维生素 C 含量显著高于 CK 和 EX1 处理,EX2 处理较 CK 和 EX1 处理分别提高了 35.16% 和 13.90%。综合来看,浸提液水培

番茄特别是厌氧浸提液可以提升番茄营养果实品质,但是相对于 CK 处理果实硝态氮含量有所升高,这与部分氨基酸如天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸和异亮氨酸等会降低果实硝酸盐含量的结果不同^[20],可能

是浸提液中的部分氨基酸在水中分解成了无机氮被植株吸收,导致了硝酸盐含量的上升,具体原因还有待探究。但各处理下番茄果实硝酸盐含量均未超过 432 mg/kg 的国家一级蔬菜硝酸盐限量标准^[21]。

表 4 各处理下番茄的形态、生物量和产量

Table 4 Tomato morphology, biomass and yield under different treatments

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	叶面积/cm ² Leaf area	生物量/g Dry weight	三穗果产量/(kg/667 m ²) Part of the production
EX1	85.20±0.95 a	9.23±0.16 b	15.92±0.58 b	32.59±2.98 b	1 973.59±18.12 b
EX2	84.20±0.40 a	9.58±0.27 b	16.55±0.83 b	39.05±0.75 b	1 877.65±28.71 b
CK	84.93±1.00 a	11.02±0.21 a	27.42±1.41 a	62.91±0.35 a	2 922.49±34.98 a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著(P≤0.05)。表 5 和 6 同。

Note: Different lowercase letters in each column indicate significant differences (P≤0.05). The same as in Table 5 and 6.

表 5 各处理下番茄的光合特性

Table 5 Photosynthetic characteristics of tomato under different treatments

处理 Treatment	净光合速率/ (μmol/(m ² ·s)) Pn	蒸腾速率/ (mol/(m ² ·s)) Tr	胞间 CO ₂ 浓度/ (μmol/mol) Ci	气孔导度/ (mol/(m ² ·s)) Gs
EX1	7.675 3±0.112 4 b	0.009 50±0.000 28 a	306.362 4±4.235 7 a	0.643 30±0.050 54 b
EX2	7.642 5±0.528 5 b	0.009 60±0.000 71 a	325.809 8±4.899 0 a	0.645 80±0.000 28 b
CK	17.761 2±0.984 2 a	0.010 80±0.000 49 a	286.461 0±6.762 4 b	0.890 50±0.082 38 a

表 6 各处理下番茄的果实营养品质

Table 6 Nutritional quality of tomato fruit under different treatments

处理 Treatment	可溶性 固形物/% Soluble solids	总酸/% Total acid	糖酸比 Sugar acid ratio	可溶性蛋白/ (mg/g) Soluble protein	硝态氮/ (mg/kg) Nitrate nitrogen	维生素 C/ (mg/100 g) Vitamin C
EX1	4.900±0.000 b	0.420±0.017 a	11.707±0.484 a	0.727±0.069 b	229.268±36.606 a	47.256±4.145 b
EX2	5.333±0.033 a	0.393±0.009 a	13.574±0.325 a	1.073±0.047 a	282.565±15.549 a	62.152±2.285 a
CK	3.867±0.033 c	0.410±0.029 a	9.432±0.549 b	0.643±0.177 b	232.931±60.169 a	39.464±2.761 c

2.3 各处理对番茄果实挥发性物质的影响

通过表 7 可知,CK、EX1 和 EX2 处理检测出挥发性物质共 41 种,包括醛类物质 21 种、醇类物质 7 种、酮类物质 6 种、酯类物质 2 种、烃类物质 1 种及 4 种未分类物质。其中只在 EX1 和 EX2 处理中检测出酯类和烃类物质。通过表 7 和表 8 可知,醛类

物质中 EX2 处理总含量最高,较 CK 处理增加 38.67%,正己醛、反-2-己烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛和反-2-辛烯醛在醛类物质中占比较大;酮类物质中,以 EX2 处理含量最高,较 CK 处理增加 4.43%,其中以 6-甲基-5-庚烯-2-酮与香叶基丙酮两种挥发性物质占比较大;醇类物质中 EX1 和 EX2 处理分别

表7 各处理下番茄果实挥发性物质成分分析

Table 7 Analysis of volatile components in tomato fruits under different treatments

挥发性物质成分 Volatile components	化学式 Chemical formula	保留时间/ min Retention time	SI	RSI	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) Content		
					EX1	EX2	CK
醛类							
正己醛	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	4.81	901	904	249.48 ± 12.58 c	325.82 ± 19.31 b	387.07 ± 7.11 a
反-2-己烯醛	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$	6.36	933	935	351.02 ± 13.08 b	447.77 ± 23.87 a	415.12 ± 18.61 ab
庚醛	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}$	7.88	868	878	7.70 ± 0.26 a	6.18 ± 0.36 b	3.87 ± 0.67 c
反-2-辛烯醛	$\text{C}_8\text{H}_{14}\text{O}$	13.03	866	867	107.96 ± 5.56 b	207.79 ± 5.20 a	43.50 ± 0.88 c
壬醛	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$	14.39	904	914	9.52 ± 0.38 a	9.75 ± 0.63 a	6.46 ± 0.42 b
反-2-壬烯醛	$\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}$	16.09	903	925	8.71 ± 0.74 a	9.33 ± 0.95 a	3.46 ± 0.46 b
癸醛	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}$	17.44	836	870	4.81 ± 0.70 a	5.49 ± 0.59 a	2.41 ± 0.23 a
β -环柠檬醛	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$	17.79	880	907	4.37 ± 1.13 a	5.82 ± 0.92 a	4.26 ± 0.75 a
(E)-柠檬醛	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$	19.20	922	925	3.59 ± 0.86 a	3.38 ± 1.04 a	5.33 ± 1.01 a
柠檬醛	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$	18.37	837	860	12.10 ± 1.08 a	11.48 ± 0.84 a	14.79 ± 1.01 a
反-2-癸烯醛	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	19.04	917	965	8.50 ± 1.16 a	14.31 ± 2.04 a	9.46 ± 3.11 a
(E,E)-2,4-癸二烯醛	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$	20.02	879	918	184.40 ± 23.57 b	305.54 ± 16.08 a	150.73 ± 20.64 b
反,反-2,4-庚二烯醛	$\text{C}_7\text{H}_{10}\text{O}$	11.59	804	843	0.97 ± 0.12 a	1.46 ± 0.31 a	1.86 ± 0.29 a
反-2-庚烯醛	$\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}$	9.70	937	958	40.67 ± 5.19 b	66.43 ± 2.21 a	—
正辛醛	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}$	11.19	819	837	3.70 ± 0.33 b	7.74 ± 0.48 a	—
4-甲基-3-环己烯-1- 甲醛	$\text{C}_8\text{H}_{12}\text{O}$	12.04	838	911	7.87 ± 1.22	—	—
反-2-戊烯醛	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}$	3.68	894	899	2.01 ± 0.38 b	3.85 ± 0.67 a	—
2-乙基-4-戊烯醛	$\text{C}_{11}\text{H}_{20}\text{O}$	4.34	802	849	0.73 ± 0.08	—	—
3-甲基-2-丁烯醛	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}$	4.03	839	892	0.85 ± 0.11	—	—
2-十一烯醛	$\text{C}_{11}\text{H}_{20}\text{O}$	21.83	832	903	2.43 ± 0.41 b	4.52 ± 0.46 a	—
十二醛	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}$	2.65	831	908	—	17.02 ± 1.12	—
酮类							
6-甲基-5-庚烯-2-酮	$\text{C}_8\text{H}_{14}\text{O}$	10.62	912	953	74.10 ± 7.23 a	95.00 ± 3.79 a	96.39 ± 8.57 a
香叶基丙酮	$\text{C}_{13}\text{H}_{22}\text{O}$	23.97	912	912	56.36 ± 3.83 b	93.21 ± 10.20 a	87.94 ± 4.69 a
β -紫罗兰酮	$\text{C}_{13}\text{H}_{20}\text{O}$	24.74	926	927	4.52 ± 0.33 a	6.55 ± 1.25 a	6.39 ± 0.42 a
法尼基丙酮	$\text{C}_{18}\text{H}_{30}\text{O}$	34.33	882	885	2.81 ± 0.52 b	2.93 ± 0.64 ab	4.67 ± 0.31 a
1-戊烯-3-酮	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}$	2.73	835	870	8.50 ± 0.43 a	7.71 ± 0.55 a	—
4-[2,2,6-三甲基-7- 氧杂二环[4.1.0]庚- 1-基]-3-丁烯-2-酮	$\text{C}_{13}\text{H}_{20}\text{O}_2$	24.81	879	905	2.23 ± 0.15 a	—	1.30 ± 0.21 b
醇类							
1-戊醇	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	3.92	853	903	2.93 ± 0.39 b	6.08 ± 0.64 a	2.73 ± 0.28 b
正己醇	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	6.87	861	873	32.56 ± 3.58 b	22.63 ± 1.69 b	44.84 ± 3.77 a
1-辛烯-3-醇	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}$	10.48	836	882	6.11 ± 0.25 a	4.42 ± 0.44 b	1.27 ± 0.37 c

表 7(续)

挥发性物质成分 Volatile components	化学式 Chemical formula	保留时间/ min Retention time	SI	RSI	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) Content		
					EX1	EX2	CK
					6-甲基-5-庚烯-2-醇	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}$	10.90
2-己炔-1-醇	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$	6.09	813	861	4.25 ± 0.58 ab	5.22 ± 1.40 a	1.49 ± 0.34 b
顺-3-己烯醇	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	6.59	924	938	34.56 ± 4.40 b	56.91 ± 2.90 a	—
反-2-辛烯-1-醇	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	13.32	828	874	1.47 ± 0.22	—	—
酯类							
辛酸甲酯	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_2$	14.97	858	897	3.05 ± 1.80	—	—
水杨酸甲酯	$\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$	17.06	925	931	68.40 ± 5.21 a	71.62 ± 4.05 a	—
烃类							
3-乙基-1,4-己二烯	C_8H_{14}	11.57	819	912	1.45 ± 0.29 a	0.82 ± 0.17 a	—
未分类							
2-异丁基噻唑	$\text{C}_7\text{H}_{11}\text{NS}$	12.13	915	930	22.87 ± 1.04 b	34.39 ± 2.88 a	19.03 ± 1.15 b
丁香酚	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_2$	21.52	927	933	—	29.58 ± 3.62 a	7.02 ± 1.09 b
2-正戊基呋喃	$\text{C}_9\text{H}_{14}\text{O}$	10.74	873	906	11.68 ± 1.34 b	22.52 ± 2.73 a	10.23 ± 1.05 b
愈创木酚	$\text{C}_7\text{H}_8\text{O}_2$	21.51	940	940	36.92 ± 11.93 a	—	12.98 ± 1.88 b
总计 Total					$1\ 403.35 \pm 60.45$ b	$1\ 931.10 \pm 38.96$ a	$1\ 368.40 \pm 59.01$ b

注:SI 和 RSI 分别表示正匹配度和反匹配度,最大值为 1 000,正反匹配度在 800 以上时,表示结果可信。同行数据后不同小写字母表示差异显著($P \leq 0.05$)。表 8 和 9 同。

Note: SI and RSI indicate positive match degree and inverse matching degree, respectively. And its maximum value is 1 000. When the positive and negative matching degree is above 800, the result is believable. Different letters in each line indicate significant differences ($P \leq 0.05$). The same as in Table 8 and 9.

表 8 各处理下番茄果实各类挥发性物质总含量和相对含量

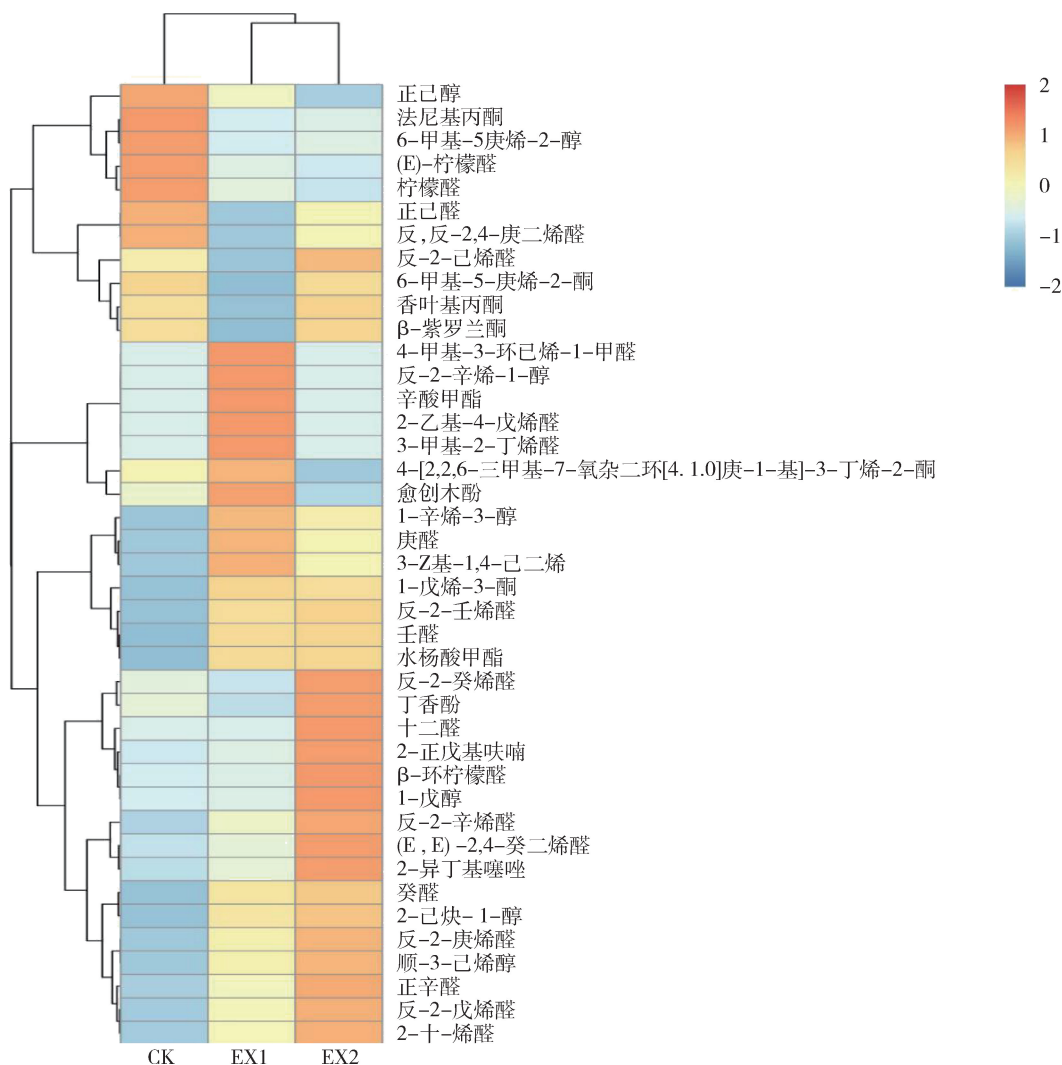
Table 8 Total volatile matter content and relative content of tomato fruits under different treatments

类别 Type	EX1		EX2		CK	
	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) Content	相对含量/% Relative content	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) Content	相对含量/% Relative content	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$) Content	相对含量/% Relative content
醛类 Aldehyde	$1\ 011.39 \pm 61.44$ b	72.07	$1\ 453.67 \pm 67.00$ a	75.18	$1\ 048.32 \pm 43.10$ b	76.61
酮类 Ketone	148.53 ± 6.03 b	10.58	205.40 ± 7.15 a	10.54	196.68 ± 2.94 a	14.37
醇类 Alcohol	99.05 ± 5.93 a	7.06	113.09 ± 6.22 a	5.76	74.12 ± 8.70 b	5.42
酯类 Ester	71.46 ± 9.48 a	5.09	71.62 ± 8.21 a	3.70	—	—
烃类 Hydrocarbon	1.45 ± 0.29 a	0.11	0.82 ± 0.17 a	0.42	—	—
未分类 Unclassified	71.47 ± 5.23 b	5.09	86.50 ± 2.64 a	4.40	49.27 ± 2.24 c	3.60
总计 Total	$1\ 403.35 \pm 60.45$ b		$1\ 931.10 \pm 38.96$ a		$1\ 368.40 \pm 59.01$ b	

较CK处理高出33.63%和52.58%，占比较大的是正己醇、顺-3-己烯醇、6-甲基-5-庚烯-2-醇；CK处理番茄果实中未检测出酯类物质，EX1和EX2处理酯类物质含量相当；烃类物质整体占比较低，对果实风味影响较小；EX1和EX2处理未分类物质的总含量均高于CK处理。EX1、EX2与CK处理果实中挥发性物质总含量依次为1403.35、1931.10和1368.40 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，其中EX2处理总含量较CK处理提高了41.12%，EX1处理总含量略高于CK处理。CK处理检测出27种挥发性物质，EX1和EX2处理分别检测出39和34种，均多于CK处理。表明浸提液水培番茄，对果实挥发性物质含量和种类有积极影响，利于提升果实香气品质。

2.4 各处理下番茄挥发性物质含量的聚类分析

利用R语言将3个处理中同一个挥发性物质含量进行标准化处理，定义在(-2,2)之间。图中小方格表示每个挥发性物质，其颜色表示该挥发性物质在3个处理中含量的差异程度。如图1所示，各挥发性物质之间，(E)-柠檬醛和柠檬醛关系最为接近，并且和法尼基丙酮、6-甲基-5-庚烯-2-醇构成一个聚类亚群；反，反-2,4-庚二烯醛和反-2-己烯醛关系较为接近、香叶基丙酮和 β -紫罗兰酮关系较为接近，并和6-甲基-5-庚烯-2-酮构成了一个聚类亚群；愈创木酚和4-[2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮比较接近，并且和4-甲基-3-环己烯-1-甲醛、反-2-辛烯-1-醇、辛酸甲酯、2-乙基-4-戊



越偏红色表示差异越大，越偏蓝色表示差异越小。

The more red the color, the greater the difference, the more blue the color is, the smaller the difference.

图1 各处理下番茄挥发性物质含量的聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of volatile compounds in tomato under different treatments

烯醛和 3-甲基-2-丁烯醛聚成一个亚群；β-环柠檬醛和 1-戊醇关系较为接近，并和十二醛、2-正戊基呋喃构成一个聚类亚群；反-2-庚烯醛和顺-3-己烯醇较接近，并和正辛醛、反-2-戊烯醛、2-十一烯醛聚成一个亚群。通过对各挥发性物质含量聚类分析可知，除香叶基丙酮、β-紫罗兰酮和 6-甲基-5-庚烯-2-酮构成了一个聚类亚群以外，其余亚群均为不同类别物质构成，说明浸提液处理相比对照处理对番茄挥发性物质含量产生了影响。

2.5 各处理对番茄果实中特征挥发性物质成分及其含量的影响

特征挥发性物质构成了番茄果实的主体风味。由表 9 可知，3 个处理下共检测出 17 种特征挥发性物质，EX1 和 EX2 处理均为 17 种，CK 处理为 12 种；3 个处理共有的成分为 12 种，分别是正己醛、反-2-己烯醛、壬醛、癸醛、(E)-柠檬醛、柠檬醛、反-2-癸烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、香叶基丙酮、β-紫罗酮、

法尼基丙酮和 2-异丁基噻唑。EX2 处理特征挥发性物质总含量最高，较 CK 处理增加 19.11%，EX1 处理总含量较 CK 处理降低 10.58%。番茄果实的特征挥发性物质具有花香、果香、青香和特殊气味。本研究中具有花香的特征挥发性物质是癸醛、香叶基丙酮、法尼基丙酮和 β-紫罗酮，β-紫罗酮还与番茄果实特有的果酸味有关，以 EX2 处理含量最高；6-甲基-5-庚烯-2-酮、反-2-己烯醛、壬醛和 2-异丁基噻唑这几种物质与果香味有关，2-异丁基噻唑是番茄果实中独有的挥发性物质，具有特殊番茄果香味^[22]，以 EX2 处理含量最高；6-甲基-5-庚烯-2-酮与番茄红素含量有关^[23]，影响番茄整体风味，以 CK 处理含量最高；具有青香的物质是正己醛、反-2-庚烯醛、反-2-戊烯醛、顺-3-己烯醇和水杨酸甲酯，正己醛与番茄果实的甜味相关，以 CK 处理含量最高。综合来看，厌氧浸提液处理的番茄果实特征挥发性物质的种类较多并且含量较高，可以使番茄果实香气浓郁，形成更好的风味。

表 9 各处理下番茄果实中特征挥发性物质成分及其含量

Table 9 Characteristic aromatic components and contents in tomato fruits under different treatments

特征挥发性物质成分 Volatile components	嗅觉描述 Olfactory description	含量/(μg/kg) Content		
		EX1	EX2	CK
正己醛	青香	249.48±12.58 c	325.82±19.31 b	387.07±7.11 a
反-2-己烯醛	果香	351.02±13.08 b	447.77±23.87 a	415.12±18.61 ab
壬醛	果香	9.52±0.38 a	9.75±0.63 a	6.46±0.42 b
癸醛	甜香、花香	4.81±0.70 a	5.49±0.59 a	2.41±0.23 b
(E)-柠檬醛	柠檬香	3.59±0.86 a	3.38±1.04 a	5.33±1.01 a
柠檬醛	柠檬香	12.10±1.08 a	11.48±0.84 a	14.79±1.01 a
反-2-癸烯醛	果香	8.50±1.16 a	14.31±2.04 a	9.46±3.11 a
反-2-庚烯醛	青香	40.67±5.19 b	66.43±2.21 a	—
反-2-戊烯醛	青香	2.01±0.38 b	3.85±0.67 a	—
6-甲基-5-庚烯-2-酮	甜香、果香	74.10±7.23 a	95.00±3.79 a	96.39±8.57 a
香叶基丙酮	香甜花香	56.36±3.83 b	93.21±10.20 a	87.94±4.69 a
β-紫罗酮	紫罗兰香	4.52±0.33 a	6.55±1.25 a	6.39±0.42 a
法尼基丙酮	微弱花香	2.81±0.52 b	2.93±0.64 ab	4.67±0.31 a
1-戊烯-3-酮	刺激性气味	8.50±0.43 a	7.71±0.55 a	—
顺-3-己烯醇	青香	34.56±4.40 b	56.91±2.90 a	—
水杨酸甲酯	冬青叶香	68.40±5.21 a	71.62±4.05 a	—
2-异丁基噻唑	果香	22.87±1.04 b	34.39±2.88 a	19.03±1.15 b
总计 Total		953.82±30.52 b	1 256.60±48.97 a	1 055.06±35.78 b

3 讨论

糖酸比主要影响番茄果实的口感,用可溶性固形物与总酸的比值衡量^[24-25]。本研究发现 EX1 和 EX2 处理中番茄果实的可溶性固形物含量和糖酸比均显著高于 CK 处理,其原因可能是浸提液含有多种氨基酸且速效钾含量较高。张恩平等^[26]研究得出钾元素会对番茄果实维生素 C 以及可溶性固形物含量产生较为明显的影响。王子宁^[27]研究得出肥料中加入少量氨基酸可以增加番茄果实可溶性固形物的含量进而增加糖酸比。有机物质腐熟后经水浸提,制成的有机营养液中,含有低分子量有机酸、游离氨基酸、糖和其他大分子物质等合成糖酸的直接前体,可以改善果实口感风味^[28]。这与本研究结果一致,表明浸提液配成的有机营养液由于氨基酸等有机成分的增加可以显著改善番茄果实口感。

植物中大多数化学反应依赖于酶的催化作用,可溶性蛋白含量在一定程度上代表了酶的活性水平^[29]。有研究利用碳氮双标记法证明氨基酸分子可以直接被植物吸收^[30-31],而合成可溶性蛋白的重要前体物质是各类氨基酸。浸提液中的氨基酸被番茄植株直接吸收利用,参与植株多样和复杂的生理活动,使 EX1 和 EX2 处理果实中的可溶性蛋白含量较高,这与王峻等^[32]的研究结果一致。刘伟等^[33]指出氨基酸在适宜范围内(氨基酸浓度不超过营养液总氮的 50%)可以提高番茄果实维生素 C 含量。作为植物的抗氧化剂,维生素 C 在清除自由基和保证植物合成过程的稳定性方面起着重要作用,营养物质和挥发性物质的合成都依赖于这种稳定状态^[34]。两种浸提液中少量的氨基酸和一定量的速效钾使得 EX1 和 EX2 处理的维生素 C 含量均高于 CK 处理。EX2 处理中番茄果实的糖酸比、可溶性蛋白含量以及维生素 C 含量均为最高,表明两种浸提液特别是厌氧浸提液水培番茄可以显著提高果实的营养品质。

成熟的番茄果实中,能鉴定出的挥发性物质近 400 余种,其主要是底物经一系列酶促反应而形成的化合物,分为酯类、醛类、酮类和醇类等^[35];其中对番茄风味有重要贡献的挥发性物质约 30 余种,被称为番茄果实的特征挥发性物质^[36]。本研究中,EX1 和 EX2 处理的挥发性物质和特征挥发性物质数量均高于 CK 处理;EX1 处理挥发性物质总含量和特征挥发性物质总含量与 CK 处理无显著性差

异;EX2 处理挥发性物质总含量和特征挥发性物质总含量均显著高于 CK 处理。有研究发现部分挥发性物质起源于脂肪酸和氨基酸等^[37]。而脂肪酸可以由可溶性糖通过多种反应产生,有机酸也包含脂肪酸的合成前体,参与这些反应的酶都是可溶性蛋白质^[38],说明糖酸和可溶性蛋白可以影响果实中挥发性物质的积累。Ma 等^[39]研究发现,挥发性物质的含量与维生素 C、可溶性蛋白质含量高度相关,表明有机营养液可能通过清除自由基和提高酶活性来影响番茄果实中挥发性物质的积累。结合前人研究以及各处理果实营养品质可以发现,可能是因为厌氧浸提液更好的改善了果实营养品质,增加了果实中可溶性固形物、维生素 C 和可溶性蛋白的含量,从而影响了与合成挥发性物质有关底物的形成和酶的活性,改变了挥发性物质的种类构成和物质含量。同时对 3 个处理所测得的挥发性物质含量进行聚类分析,发现大部分同一类物质没有被聚类到一起,这也表明了可能是挥发性物质形成的底物和有关酶的活性受到 EX1 和 EX2 中氨基酸等有机成分的影响^[22],导致 EX1、EX2 与 CK 中挥发性物质的种类构成和物质含量的不同。

4 结论

本研究采用浸提液水培番茄,在设施栽培中,水培可以突破地域限制、避免连作障碍,能更好的与现代化农业的自动化和智能化管理模式相结合。此次研究表明,2 种浸提液水培番茄可以有效改善番茄果实营养品质,并以厌氧浸提液处理下的番茄果实营养品质和风味最佳。同时本研究发现单纯的使用番茄茎秆堆肥浸提液水培番茄还存在着缺陷,与对照处理相比浸提液处理的番茄长势偏弱且生物积累量偏低。结合各营养液大量元素和微量元素分析可知,可能是因为 2 种浸提液中硝态氮和速效磷含量过少,造成养分供应不足^[40],具体原因还有待证实。浸提液营养元素的优化及对番茄的影响是下一步试验的参考方向,以期能够改善浸提液的营养成分及比例,达到稳产优质或高产优质的栽培效果。

参考文献 References

- [1] 杜鹏祥,韩雪,高杰云,陈清,李彦明.我国蔬菜废弃物资源化高效利用潜力分析[J].中国蔬菜,2015(7):15-20
- Du P X, Han X, Gao J Y, Chen Q, Li Y M. Potential

- analysis on high efficient utilization of waste vegetable resources in China[J]. *China Vegetables*, 2015(7): 15-20 (in Chinese)
- [2] 李天来. 我国设施蔬菜科技与产业发展现状及趋势[J]. 中国农村科技, 2016(5): 75-77
- Li T L. The current situation and trend of the development of protected vegetable technology and industry in China[J]. *China Rural Science & Technology*, 2016(5): 75-77 (in Chinese)
- [3] 孔涛, 李勃, 柯杨, 朱海云, 马瑜, 韩一诺, 李金凤, 文君凡, 张协. 蔬菜废弃物堆肥对设施蔬菜产量和土壤生物特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 157-160
- Kong T, Li B, Ke Y, Zhu H Y, Ma Y, Han Y N, Li J F, Wen J F, Zhang X. Effect of vegetables waste compost on protected vegetable yield and soil microbial property[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2017(5): 157-160 (in Chinese)
- [4] 耿凤展. 番茄秸秆高温堆肥基质对番茄生长影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015
- Geng F Z. Study on the effect of the aerobic compost of tomato residues on the growth of tomatoes[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015 (in Chinese)
- [5] Şevik F, Tosun İ, Ekinci K. The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks[J]. *Waste Management*, 2018, 80: 450-456
- [6] Sülük K, Tosun İ, Ekinci K. Co-composting of two-phase olive-mill pomace and poultry manure with tomato harvest stalks[J]. *Environmental Technology*, 2017, 38(8): 923-932
- [7] 牛博宇. 番茄茎秆废弃物发酵产物浸提液提取及在番茄上的应用技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018
- Niu B Y. Extraction of fermentation products from tomato stem wastes and application techniques in tomato [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018 (in Chinese)
- [8] 辛鑫, 贾琪, 李琦, 武永军, 杨振超. 不同电导率的有机营养液种植番茄效果分析[J]. 西北农业学报, 2019, 28(10): 1632-1638
- Xin X, Jia Q, Li Q, Wu Y J, Yang Z C. Effect of organic nutrient solution with different conductivity tomato growth and fruit quality[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, 28(10): 1632-1638 (in Chinese)
- [9] 胡晓婷, 陈丹艳, 牛博宇, 牟孙涛, 辛鑫, 武永军, 杨振超. 番茄秸秆堆肥提高番茄果实风味的适宜添加比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 611-619
- Hu X T, Chen D Y, Niu B Y, Mou S T, Xin X, Wu Y J, Yang Z C. The suitable percentage of tomato straw compost in graden soil for improvement of tomato flavor[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 611-619 (in Chinese)
- [10] 王园园, 董淑琦, 原向阳, 温银元, 宋喜娥, 杨雪芳, 郭平毅. 谷子茎秆水浸提液对其种子萌发及幼苗生长的自毒作用[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(6): 38-48
- Wang Y Y, Dong S Q, Yuan X Y, Wen Y Y, Song X E, Yang X F, Guo P Y. Autotoxicity effect of the water extracts of foxtail millet straw on seed germination and seedling growth [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(6): 38-48 (in Chinese)
- [11] 杨晓珍, 郝丹东, 孟静, 曹云娥. 功能性堆肥及其浸提液对设施黄瓜生长发育的影响[J]. 农业科学研究, 2014, 35(4): 33-38
- Yang X Z, Hao D D, Meng J, Cao Y E. The effect of compost and extracts on plant growth of cucumber in facility greenhouse[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 35(4): 33-38 (in Chinese)
- [12] 李邵, 杨洁, 田娟, 鲁少尉, 连青龙. 复合栽培不同基质对温室番茄生长及产量与品质的影响[J]. 农业工程技术, 2017, 37(10): 26-30
- Li S, Yang J, Tian J, Lu S W, Lian Q L. Effects of different substrates on growth, yield and fruits quality of different tomato varieties under the composite cultivation in greenhouse [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2017, 37(10): 26-30 (in Chinese)
- [13] 李雅旻, 刘厚诚. 水培蔬菜技术现状与发展趋势[J]. 农业工程技术, 2018, 38(28): 10-15
- Li Y M, Liu H C. Current situation and development trend of hydroponic vegetable technology[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2018, 38(28): 10-15 (in Chinese)
- [14] 辛鑫, 贾琪, 牟孙涛, 陈丹艳, 杨振超, 武永军. 不同有机营养液水培番茄效果分析[J]. 西北农业学报, 2019, 28(8): 1294-1301
- Xin X, Jia Q, Mou S T, Chen D Y, Yang Z C, Wu Y J. Effect analysis of hydroponic tomato with different organic nutrient solution[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, 28(8): 1294-1301 (in Chinese)
- [15] 陈丹艳. 植物工厂中光强、CO₂、营养液调控对生菜和番茄生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018
- Chen D Y. Effects of light intensity, CO₂, nutrient solution regulation on lettuce and tomato growth in plant factory[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018 (in Chinese)
- [16] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007
- Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M. *Guidance on Physiology and Biochemistry of Postharvest Fruits and Vegetables* [M].

- Beijing: China Light Industry Press, 2007 (in Chinese)
- [17] 岳钉伊, 张静, 赵建涛, 邹志荣. 增施 CO₂ 与 LED 补光对番茄果实品质及挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 124-130
Yue D Y, Zhang J, Zhao J T, Zou Z R. Effect of CO₂ enrichment and LED light supplementation on the quality and volatile compounds of tomato fruits[J]. *Food Science*, 2018, 39(1): 124-130 (in Chinese)
- [18] 徐炜南, 张鑫, 张静, 丁明, 甄爱, 常晓晓, 白永娟, 胡晓辉. 硼对‘金棚 1 号’番茄果实挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(16): 149-155
Xu W N, Zhang X, Zhang J, Ding M, Zhen A, Chang X X, Bai Y J, Hu X H. Effect of boron fertilizer on volatiles of ‘Jinpeng No. 1’ tomato fruit[J]. *Food Science*, 2016, 37(16): 149-155 (in Chinese)
- [19] 杜天浩, 周小婷, 朱兰英, 张静, 邹志荣. 褪黑素处理对盐胁迫下番茄果实品质及挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 69-76
Du T H, Zhou X T, Zhu L Y, Zhang J, Zou Z R. Effect of melatonin treatment on tomato fruit quality and volatile compounds under salt stress[J]. *Food Science*, 2016, 37(15): 69-76 (in Chinese)
- [20] 陈贵林, 高秀瑞. 氨基酸和尿素替代硝态氮对水培不结球白菜和生菜硝酸盐含量的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2): 187-191
Chen G L, Gao X R. Effect of partial replacement of nitrate by amino acid and urea on nitrate content of nonheading Chinese cabbage and lettuce in hydroponics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(2): 187-191 (in Chinese)
- [21] 马剑萍. 无公害蔬菜栽培技术及其检测标准[J]. 民营科技, 2016(5): 213
Ma J P. Cultivation technology and detection standard of pollution-free vegetables[J]. *Non-State Running Science & Technology Enterprises*, 2016(5): 213 (in Chinese)
- [22] Wang L B, Baldwin E A, Bai J H. Recent advance in aromatic volatile research in tomato fruit: The metabolisms and regulations[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(2): 203-216
- [23] Wang L B, Baldwin E A, Plotto A, Luo W Q, Raithore S, Yu Z F, Bai J H. Effect of methyl salicylate and methyl jasmonate pre-treatment on the volatile profile in tomato fruit subjected to chilling temperature[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 108: 28-38
- [24] Schouten R E, Woltering E J, Tijskens L M M. Sugar and acid interconversion in tomato fruits based on biopsy sampling of locule gel and pericarp tissue[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 83-92
- [25] 赵建涛, 张静, 张雅婷, 邹志荣. 红色和粉色樱桃番茄与大果番茄果实品质特性分析[J]. 食品科学, 2016, 37(16): 135-141
Zhao J T, Zhang J, Zhang Y T, Zou Z R. Analysis of fruit quality traits and volatiles in red and pink cherry and large-fruited tomato accessions[J]. *Food Science*, 2016, 37(16): 135-141 (in Chinese)
- [26] 张恩平, 谭福雷, 王月, 张淑红, 段瑜, 周芳. 氮磷钾与有机肥配施对番茄产量品质及土壤酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(10): 2059-2067
Zhang E P, Tan F L, Wang Y, Zhang S H, Duan Y, Zhou F. Effects of NPK fertilizers and organic manure on nutritional quality, yield of tomato and soil enzyme activities[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(10): 2059-2067 (in Chinese)
- [27] 王子宁. 氨基酸肥料与化肥配施对设施番茄产量与品质及氮素效应的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018
Wang Z N. Amino acid fertilizers and fertilizers applied to facilities study on yield and quality and nitrogen effect of tomato [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [28] Xiao X, Xi B D, He X S, Zhang H, Li D, Zhao X Y, Zhang X H. Hydrophobicity-dependent electron transfer capacities of dissolved organic matter derived from chicken manure compost [J]. *Chemosphere*, 2019, 222: 757-765
- [29] Kučerová K, Henselová M, Slovákova L, Hensel K. Effects of plasma activated water on wheat: Germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2019, 16(3)
- [30] Ge T, Song S W, Roberts P, Jones D L, Huang D F, Iwasaki K. Amino acids as a nitrogen source for tomato seedlings: The use of dual-labeled (¹³C, ¹⁵N) Glycine to test for direct uptake by tomato seedlings [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66(3): 357-361
- [31] Moran-Zuloaga D, Dippold M, Glaser B, Kuzyakov Y. Organic nitrogen uptake by plants: Reevaluation by position-specific labeling of amino acids[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 125(3): 359-374
- [32] 王峻, 马庆旭, 刘梦娇, 周静杰, 胡兆平, 吴良欢. 不同氨基酸以及赖氨酸与硝态氮不同配比对白菜生长和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 587-593
Wang J, Ma Q X, Liu M J, Zhou J J, Hu Z P, Wu L H. Effects of different amino acids and different ratios of lysine and nitrate on the growth and quality of Chinese cabbage

- (*Brassica pekinensis* L)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 587-593 (in Chinese)
- [33] 刘伟,陈殿奎,李式军. 氨基酸态氮对番茄产量、品质及风味的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(3): 399-403
Liu W, Chen D K, Li S J. Effects of amino-acid nitrogen on yield, quality and flavor of tomato[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(3): 399-403 (in Chinese)
- [34] Smirnoff N. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals[J]. *Free Radical Biology & Medicine*, 2018, 122: 116-129
- [35] Buttery R G, Takeoka G R. Some unusual minor volatile components of tomato[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(20): 6264-6266
- [36] Xu Y C, Barringer S. Comparison of tomatillo and tomato volatile compounds in the headspace by selected ion flow tube mass spectrometry (SIFT-MS)[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(3): C268-C273
- [37] 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
- [38] Chen J Q, Lü J, He Z S, Zhang F, Zhang S L, Zhang H P. Investigations into the production of volatile compounds in Korla fragrant pears (*Pyrus sinkiangensis* Yu) [J]. *Food Chemistry*, 2020, 302: 125337
- [39] Ma L L, Zhang J W, Ren R D, Fan B H, Hou L P, Li J M. Effects of different organic nutrient solution formulations and supplementation on tomato fruit quality and aromatic volatiles [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020: 1-13
- [40] 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 (in Chinese)

责任编辑:董金波