

刘晓奇, 肖雪梅, 王俊文, 等. 水分亏缺对日光温室基质栽培番茄果实营养和风味品质的影响[ J ]. 江苏农业学报, 2021, 37( 2 ): 443-453.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.022

# 水分亏缺对日光温室基质栽培番茄果实营养和风味品质的影响

刘晓奇<sup>1</sup>, 肖雪梅<sup>1,2</sup>, 王俊文<sup>1</sup>, 唐中祺<sup>1</sup>, 武玥<sup>1</sup>, 刘泽慈<sup>1</sup>, 张丹<sup>2</sup>, 郝继华<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为探明提高番茄品质的水分调控机制, 在日光温室基质栽培条件下, 以番茄( *Solanum lycopersicum* )品种 181 为材料, 设置 4 个不同灌水处理, 以田间最大持水量 90% 和 75% 为上、下限灌溉作为对照(正常灌溉), 分别以正常灌溉量的 80%、60% 和 40% 作为轻度水分亏缺(T1)、中度水分亏缺(T2)和重度水分亏缺(T3)处理。结果表明, 轻度水分亏缺和中度水分亏缺均能够提高番茄的风味品质, 其中轻度水分亏缺下番茄果实可溶性糖和有机酸含量分别比对照提高 12.81% 和 10.34%, 而中度水分亏缺处理可溶性糖含量提高 20.60%, 轻度水分亏缺和中度水分亏缺处理番茄果实的糖酸比分别增加 2.33% 和 20.70%。中度水分亏缺处理挥发性物质的种类为 70 种, 含量为 3 706.62  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; 轻度水分亏缺处理挥发性物质的种类为 60 种, 含量为 3 090.11  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; 对照挥发性物质的种类为 57 种, 含量为 2 236.64  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。番茄水分亏缺处理增加了具有花香气味的特征性挥发物质  $\beta$ -紫罗兰酮的含量, 在中度水分亏缺处理中  $\beta$ -紫罗兰酮的含量最高。同时在对照番茄果实中检测到具有焦糖气味的 2-甲基丁醇和具有苹果香味的顺-3-己烯醇 2 种特征性挥发物质, 而在 3 个水分亏缺处理中均没有检测到。中度水分亏缺处理可溶性固形物、果实硬度、单果干物质含量、番茄红素含量、维生素 C 含量较对照分别增加了 18.80%、27.34%、5.89%、13.30% 和 14.49%。综合各个指标, 中度水分亏缺即 60% 正常灌水量可显著提高番茄果实的风味和营养品质, 并达到生理节水的效果, 可作为日光温室基质栽培高品质番茄的灌溉制度。

**关键词:** 番茄; 日光温室; 基质栽培; 水分亏缺; 营养品质; 风味品质

**中图分类号:** S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)02-0443-11

## Effects of water deficit on nutrition and flavor qualities of tomato fruits cultivated by substrate in solar greenhouse

LIU Xiao-qi<sup>1</sup>, XIAO Xue-mei<sup>1,2</sup>, WANG Jun-wen<sup>1</sup>, TANG Zhong-qi<sup>1</sup>, WU Yue<sup>1</sup>, LIU Ze-ci<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>2</sup>, YU Ji-hua<sup>1,2</sup>

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Tomato (*Solanum lycopersicum*) variety 181 was used as the test material under the condition of substrate culture in the solar greenhouse to study the regulatory mechanism of water in improving tomato qualities. Four different irrigation treatments were set, among them, 90% and 75% of the field maximum moisture capacity were set as the upper limit and lower limit of irrigation respectively and were used as CK (normal irrigation). 80%, 60% and 40% of the normal irrigation amount were used as mild water deficit treatment (T1), moderate water deficit treatment (T2) and severe water deficit treatment (T3). The results showed that, mild water deficit treatment and moderate water deficit treatment

收稿日期: 2020-07-20

基金项目: 甘肃农业大学科技创新基金(国重实验室开放基金)项目(GSCS-2020-12); 中央引导地方科技发展专项(ZCYD-2020-5); 国家大宗蔬菜产业体系项目(CARS-23-C-07); 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA513)

作者简介: 刘晓奇(1994-), 男, 河北秦皇岛人, 硕士, 研究方向为设施园艺学。(E-mail) 2833231739@qq.com

通讯作者: 肖雪梅, (E-mail) xiaoxm@gsau.edu.cn

tion treatments were set, among them, 90% and 75% of the field maximum moisture capacity were set as the upper limit and lower limit of irrigation respectively and were used as CK (normal irrigation). 80%, 60% and 40% of the normal irrigation amount were used as mild water deficit treatment (T1), moderate water deficit treatment (T2) and severe water deficit treatment (T3). The results showed that, mild water deficit treatment and moderate water deficit treatment

could improve the flavor quality of tomatoes, and the soluble sugar content and organic acid content in tomato fruits under mild water deficit treatment increased by 12.81% and 10.34% compared with that of control, respectively. Under the treatment of moderate water deficit, the soluble sugar content increased by 20.60% compared with that of control. Ratio of fruit sugar to fruit acid in tomatoes under mild water deficit treatment and moderate water deficit treatment increased by 2.33% and 20.70% respectively. There were 70 types of volatile substances with a content of 3 706.62  $\mu\text{g}/\text{kg}$  under moderate water deficit treatment, while under mild water deficit treatment, there were 60 types of volatile substances with a content of 3 090.11  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . There were 57 types of volatile substances with a content of 2 236.64  $\mu\text{g}/\text{kg}$  under CK treatment. The content of  $\beta$ -ionone (a characteristic volatile substance with floral odor) was increased under water deficit treatment of tomato, and was the highest under the treatment of moderate water deficit. Meanwhile, two characteristic volatile substances such as 3-methyl-butanol with caramel odor and cis-3-hexenol with apple flavor were detected in the tomato fruits under control treatment, but were not detected under three other treatments of water deficit. The soluble solids content, fruit firmness, dry matter content of single fruit, lycopene and vitamin C contents under moderate water deficit treatment increased by 18.80%, 27.34%, 5.89%, 13.30% and 14.49% respectively, compared with the control treatment. Based comprehensive consideration of all the indexes, moderate water deficit (60% normal irrigation amount) treatment can improve the flavor and nutritional qualities of tomato fruits significantly and achieve physiological water-saving effect, which can be used as the irrigation system for the cultivation of high-quality tomatoes by substrate in solar greenhouse.

**Key words:** tomato; solar greenhouse; substrate culture; water deficit; nutritional quality; flavor quality

中国的水资源相对匮乏,农业又是需水量极高的产业<sup>[1]</sup>。在传统的大水漫灌方式下生产的蔬菜产品品质较差、产业化水平低,制约了蔬菜的加工利用<sup>[2]</sup>。在获得高产、高效生产的同时提高水分利用效率和蔬菜产品品质成为今后中国蔬菜产业发展中重要研究方向<sup>[3]</sup>。

番茄是中国西北地区日光温室栽培的主要特色经济蔬菜之一。近年来番茄种植面积不断扩大,产品供应已经基本满足了市场的需求,番茄生产的目也由过去仅仅关注产量逐渐转向注重果实品质的提高和绿色生产,以促进番茄产业的可持续发展。尤其是人们越来越注重番茄的风味<sup>[4]</sup>。相对于野生种,栽培种的遗传多样性大幅减少,一些风味基因也随之消失<sup>[5]</sup>。另外栽培技术、管理措施也极大地影响番茄的品质。许多研究结果表明水分和肥料是影响园艺产品品质和品质的重要因素<sup>[6]</sup>。郭海涛等<sup>[7]</sup>的研究结果表明亏缺灌溉提高了成熟期番茄果实中可溶糖含量、有机酸含量及糖酸比。刘明池等<sup>[8]</sup>通过试验发现亏缺灌溉提高了樱桃番茄果实维生素 C 含量、可溶性固形物含量,并明显提高了水分的利用效率。但供试番茄品种大多是普通番茄品种,且测定的品质指标比较单一,不够深入,不能够全面、系统地反映水分亏缺对番茄营养和风味品质的影响。

本研究以番茄高糖品种 181 为材料,研究不同水分亏缺程度对日光温室基质栽培番茄营养、风味

品质及产量的影响,以期建立适合中国国情的水分管理制度,为番茄高品质栽培提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验以高糖品种 181 番茄为试验材料。

### 1.2 试验设计

试验于 2019 年 9 月至 2020 年 4 月在甘肃省兰州市榆中县李家庄田园综合体六区 3 号日光温室内进行。2019 年 9 月 15 日播种,11 月 2 日定植,定植后进行正常水分管理,在第一穗果坐住时(果实直径 1 cm)进行不同程度水分亏缺灌溉处理。试验共设 4 个处理:对照(CK)灌水下限为田间最大持水量的 75%,每次灌水至田间最大持水量的 90%<sup>[9]</sup>;轻度水分亏缺(T1)、中度水分亏缺(T2)、重度水分亏缺(T3)处理与 CK 同时进行灌溉,灌溉量分别为 CK 的 80%、60%、40%。在水分处理过程中,用 TRIME PICO 32 土壤水分温度传感器实时监测基质含水量,灌水量由水表读出,压力由回水装置控制。灌水量计算公式: $M=S \times r \times h \times Q \times (q_1 - q_2)$ <sup>[10]</sup>,式中  $M$  为计划灌溉量( $\text{m}^3$ ), $S$  为试验小区面积( $3.6 \text{ m}^2$ ), $r$  为基质容质量( $583.91 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), $h$  为计划湿润层深度( $0.3 \text{ m}$ ), $Q$  为田间最大持水量(76.55%), $q_1$ 、 $q_2$  分别代表灌水上、下限。灌水量计算结果见表 1。

### 1.3 测定项目与方法

当第 7 穗番茄果实坐果后摘心,选取第 3 穗果

实进行取样。在每个小区内随机选择 6 个成熟度一致的番茄果实,其中 3 个果实用于测定外观品质,剩余的 3 个果实用匀浆机打碎混匀后,用于测定营养和风味品质。每处理重复 3 次。

表 1 不同处理每次灌水量

Table 1 Irrigation amount under different treatments every time

处理	小区灌水量 (L)	每处理灌水量 (m <sup>3</sup> )
CK	72.50	0.290
T1	58.00	0.232
T2	43.50	0.174
T3	29.00	0.116

CK:对照,灌水下限为田间最大持水量的 75%,每次灌水至田间最大持水量的 90%,T1、T2、T3 分别为轻度水分亏缺、中度水分亏缺、重度水分亏缺,灌水量分别为对照的 80%、60%、40%。

**1.3.1 外观品质测定** 使用 GY-4 数显式水果硬度计测定果实硬度。使用 1/10 000 精度电子天平称量番茄果实鲜质量,然后 105 ℃ 杀青 15 min 后,80 ℃ 烘干至恒质量,称量并记录干物质质量。使用游标卡尺测量果实横径、纵径,并计算果形指数,果形指数为纵径与横径之比<sup>[11-12]</sup>。番茄色泽指标采用 KONIC MINOLTA 色差计测定,仪器中  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  分别代表亮暗程度、红绿程度、黄蓝程度。 $L^*$  数值为 0 时为黑,100 时为白; $a^*$  正值时为红,负值时为绿; $b^*$  正值时为黄,负值时为蓝<sup>[13]</sup>。色光值计算公式为:色光值 =  $2\,000 \times a^* / L^* (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}}$ 。

**1.3.2 营养品质测定** 使用 PAL-1 手持式折射计测定可溶性固形物含量,维生素 C 含量、可溶性蛋白质含量、硝酸盐含量分别采用钼蓝比色法、考马斯亮蓝法、水杨酸法测定<sup>[11-12]</sup>。采用碱液滴定法和蒽酮比色法测定有机酸含量和可溶性糖含量<sup>[11-13]</sup>,并计算糖酸比。番茄红素的提取参照 T/CCCMHPIE1.28-2018 的方法,稍加改动,使用高效液相色谱(HPLC)法测定含量<sup>[14]</sup>。

**1.3.3 风味品质测定** 番茄糖组分和有机酸组分均采用高效液相色谱法测定。番茄挥发性物质含量采用顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用法(HS-SPME-GC-MS)测定。

**1.3.3.1 测定可溶性糖含量的色谱条件** 色谱柱:LC-NH2 (460 mm×250 mm);检测器:示差折光检测器;流动相:乙腈:水 = 75:25(体积比),流动相经超声波脱气 30 min;流速:1.00 ml/min;柱温:30 ℃;进样量:20 μl<sup>[14]</sup>。

**1.3.3.2 测定有机酸含量的色谱条件** 色谱柱:Hi-

PiexH (300.0 mm×7.7 mm);检测器:紫外检测器;检测波长:210 nm;流动相:10 mmol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;柱温:50 ℃;流速:0.4 ml/min;进样量:20 μl<sup>[14]</sup>。

**1.3.3.3 测定挥发性物质的色谱和质谱条件** 色谱条件:选用 DB-WAX 弹性石英毛细管柱(20 m×0.18 mm,0.18 μm);进样口温度:250 ℃;载气:高纯氦气,流速 1.0 ml/min。质谱条件:电子电离(electro nionization,EI);离子源温度:200 ℃<sup>[15]</sup>。

**1.3.4 产量测定** 待番茄成熟后,分批次采收 1~7 穗果,称量记录每处理单果质量和单株果数,并换算成产量<sup>[15]</sup>。

## 1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 软件分析数据、Origin8.5 作图,利用 SPSS 20.0 软件 Duncan's 新复极差法进行方差分析,显著性水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分亏缺处理对番茄外观品质的影响

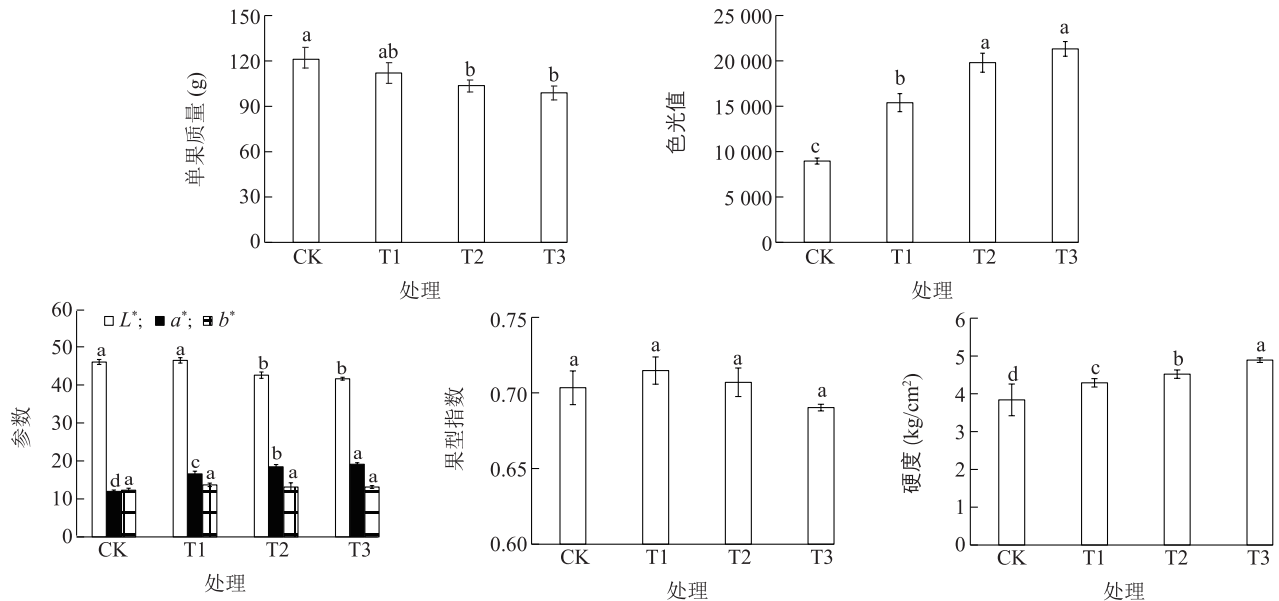
如图 1 所示,不同水分亏缺处理对番茄的大小有显著影响。随灌水量的降低,番茄的单果质量逐渐下降。对照番茄单果质量为 121.10 g,T2、T3 处理单果质量分别为 103.70 g、98.93 g,均显著低于 CK,比 CK 分别降低了 14.37%、18.31%。 $a^*$ 、 $b^*$  值均为正值,说明番茄品种 181 成熟时果实颜色是红色。4 个处理间  $a^*$  值均存在显著差异, $b^*$  值均不存在显著差异。CK 和 T1 处理的番茄果实  $L^*$  值显著高于 T2 和 T3 处理。随着灌水量的减少,各处理色光值逐渐升高,T1、T2、T3 处理色光值均显著高于 CK,比对照分别高出 71.71%、108.83%、137.81%。不同水分亏缺处理下番茄果型指数均在 0.70 左右,其大小顺序为 T1>T2>CK>T3,但各处理之间不存在显著差异。随水分亏缺程度的加重,番茄果实的硬度呈现逐渐上升的趋势,T1、T2 和 T3 处理番茄果实的硬度均显著高于 CK,分别提高 11.72%、17.71%和 27.34%。

### 2.2 不同水分亏缺处理对番茄营养品质的影响

如表 2 所示,番茄果实干物质含量随灌水量的减少有小幅度的升高,但处理间不存在显著差异,其范围在 10.18 g 至 10.93 g 之间。随着亏水程度的加重,维生素 C 含量变化呈现先升高后降低的趋势,T1 处理最高,T3 处理最低,T1 处理比 CK 高 38.35%,T3 处理比 CK 低 15.29%。可溶性蛋白质含量在 2.3 mg/kg 至 5.0 mg/kg 范围内,T2 处理含量最高,显著高

于 CK, 比 CK 提高 117.39%。番茄红素含量、硝酸盐含量的变化趋势相同, 均随着水分亏缺程度的加重而逐渐增加。T2、T3 处理番茄红素含量均显著高于

CK, 比 CK 分别高出 13.30%、15.24%。不同处理间硝酸盐含量均存在显著差异, T1、T2、T3 处理分别比 CK 显著高出 11.49%、49.94%、81.20%。



CK、T1、T2、T3 见表 1 注。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 1 不同水分亏缺处理对番茄果实单果质量、色泽、果形指数和硬度的影响

Fig.1 Effects of different water deficit treatments on single fruit weight, color, fruit shape index and hardness

表 2 不同水分亏缺处理的番茄营养品质

Table 2 Nutritional qualities of tomatoes under different water deficit treatments

处理	单果干物质含量 (g)	维生素 C 含量 (mg/g)	硝酸盐含量 (mg/kg)	可溶性蛋白质含量 (mg/kg)	番茄红素含量 (mg/kg)
CK	10.18±0.30a	0.61±0.07bc	97.74±1.77c	2.3±0.3c	36.1±0.3b
T1	10.36±0.74a	0.85±0.02a	108.93±2.08c	3.6±0.3b	36.5±1.0b
T2	10.78±0.38a	0.70±0.06ab	146.55±5.19b	5.0±0.3a	40.9±0.9a
T3	10.93±0.43a	0.52±0.01c	177.10±3.10a	3.7±0.3b	41.6±0.9a

CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

## 2.3 不同水分亏缺处理对番茄果实风味品质的影响

2.3.1 不同水分亏缺处理对番茄果实可溶性糖和各糖组分的影响 如表 3 所示, 番茄果实可溶性糖含量随水分亏缺程度的加重呈现先升高后降低的趋势, T1、T2 处理可溶性糖含量显著高于 CK, 较 CK 处理分别增加 12.81%、20.60%, T3 处理可溶性糖含量显著低于 CK, 较 CK 降低 5.03%。不同水分亏缺处理葡萄糖含量均比果糖含量略高, 且这 2 种单糖含量远高于蔗糖含量。果糖和葡萄糖含量随着水分亏缺程度的加重呈现先升高后降低的趋势, T2 处理果糖、葡萄糖含量最高, 分别为 2.47%、2.83%, 并且显著高于其他处理, 分别比 CK 高出 9.29%、12.30%。T3 处理果糖、葡萄糖含量显著低于其他处理, 比 CK 分别降低

3.98%、3.97%。番茄果实中蔗糖含量随着水分亏缺程度的加重呈现逐渐降低的趋势, 且处理间均存在显著差异。T1、T2、T3 处理较 CK 分别降低 16.76%、44.32%、65.13%。

表 3 不同水分亏缺处理番茄果实可溶性糖和各糖组分含量

Table 3 Contents of soluble sugar and sugar components in tomato fruits under different water deficit treatments

处理	可溶性糖含量 (%)	果糖含量 (%)	葡萄糖含量 (%)	蔗糖含量 (%)
CK	3.98±0.04c	2.26±0.01b	2.52±0.03bc	0.051 9±0.000 4a
T1	4.49±0.03b	2.28±0.03b	2.62±0.04b	0.043 2±0.003 1b
T2	4.80±0.03a	2.47±0.05a	2.83±0.07a	0.028 9±0.002 8c
T3	3.78±0.02d	2.12±0.05c	2.37±0.05d	0.018 1±0.001 5d

CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。



2.3.2 不同水分亏缺处理对番茄果实有机酸和各酸组分的影响 如表 4 所示,番茄果实中有机酸含量随灌水量的减少呈现先增加后降低的趋势,T1 处理有机酸含量最高,为 0.64%,比 CK 高出 10.34%。T2、T3 处理有机酸含量均比 CK 低,分别降低 6.90%、32.76%。番茄成熟果实中含量最高的有机酸是柠檬酸,除此之外还含有较多的苹果酸、琥珀酸、乙酸、酒石酸、草酸。在 6 种酸中除乙酸含量在不同处理间均不存在显著差异外,其余 5 种酸含量均随灌水量的降低呈现先升高再降低的总趋势。其中柠檬酸、琥珀酸 T1 处理含量最高,苹果酸、酒石酸、草酸 T2 处理含量最高。T1 处理柠檬酸含量最

高为6 142.04 mg/kg,比 CK 显著高出 4.61%;T2、T3 处理柠檬酸含量显著低于 CK,分别降低 5.86%、29.68%。T1 处理琥珀酸含量显著高于 CK,比 CK 显著增加 2.41%;T2、T3 处理显著低于 CK,比 CK 分别降低 35.42%、28.55%。各处理苹果酸含量在 593.81 mg/kg至 918.87 mg/kg之间,T2 处理含量最高,比 CK 高出 18.88%,T1 处理与 CK 无显著差异,T3 处理显著低于 CK。T1、T2、T3 处理草酸含量和酒石酸含量均显著高于 CK,草酸含量分别比 CK 提高 33.20%、63.70%、45.28%,酒石酸含量分别比 CK 高出 37.30%、131.46%、9.23%。

表 4 不同水分亏缺处理下番茄果实有机酸和酸组分含量

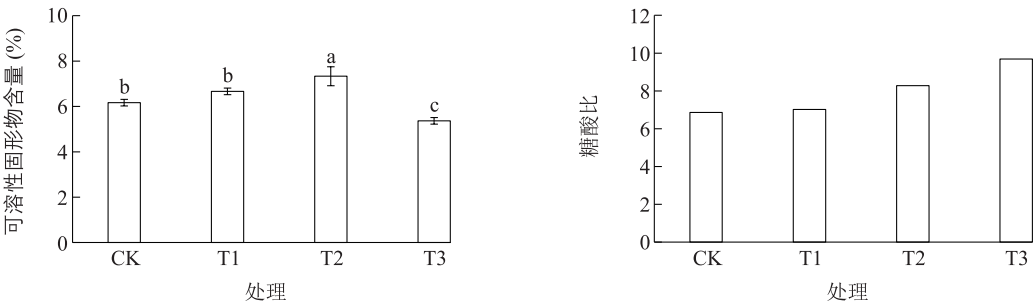
Table 4 Contents of organic acids and acid components in tomato fruits under different water deficit treatments

处理	有机酸含量 (%)	柠檬酸含量 (mg/kg)	苹果酸含量 (mg/kg)	琥珀酸 (mg/kg)	乙酸含量 (mg/kg)	酒石酸含量 (mg/kg)	草酸含量 (mg/kg)
CK	0.58±0.02b	5 871.51±12.49b	772.95±23.49b	708.553±5.10b	85.51±3.71a	61.96±1.17d	14.82±0.11d
T1	0.64±0.02a	6 142.04±75.43a	794.34±11.62b c	725.61±4.12a	85.44±4.11a	85.07±0.36b	19.74±0.02c
T2	0.54±0.03b	5 527.55±5.97c	918.87±9.95a	506.29±3.89c	86.60±2.08a	143.41±0.57a	24.26±0.02a
T3	0.39±0.02c	4 182.76±118.64d	593.18±1.38c	457.55±2.56d	84.50±5.17a	67.68±1.84c	21.53±0.10b

CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.3.3 不同水分亏缺处理对番茄果实可溶性固形物含量和糖酸比的影响 如图 2 所示,番茄果实可溶性固形物含量随灌水量的减少呈现先增加后降低的趋势,T2 处理可溶性固形物含量最高,为 7.33%,

比 CK 显著高出 18.80%。番茄果实的糖酸比随水分亏缺程度的加重逐渐增大。T1、T2、T3 处理糖酸比分别比 CK 增加 2.33%、20.70%、41.25%。



CK、T1、T2、T3 见表 1 注。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 2 不同水分亏缺处理对番茄果实可溶性固形物含量和糖酸比的影响

Fig.2 Effects of different water deficit treatments on soluble solids content and sugar-acid ratio of tomato fruits

2.3.4 水分亏缺对番茄果实挥发性物质的影响  
2.3.4.1 水分亏缺对番茄果实挥发性物质数量和含量的影响 如表 5、表 6 所示,各处理的番茄果实挥发性物质中醇类物质含量最高,之后依次是醛类、酯类、酮类等物质。CK 果实检测出 57 种挥发性物质,总含量为2 236.64 μg/kg,T1、T2 处理随灌水量的减

少挥发性物质种类和含量均呈现增加趋势。T2 处理挥发性物质含量和种类均最高,分别为 70 种、3 706.62 μg/kg;T1 处理挥发性物质种类和含量分别为 60 种、3 090.11 μg/kg;T3 处理番茄挥发性物质的种类和含量比 CK 略低,分别仅为 56 种、2 223.75 μg/kg。各处理中醇类物质相对含量最高,占总含

量的 50% 以上, CK、T1、T2、T3 处理醇类物质分别占 64.15%、56.25%、54.69%、53.48%; 随着灌水量的减少, 醇类物质所占比例也逐渐下降。而醛类物质所占比例 CK、T1、T2、T3 处理依次为 26.33%、27.55%、29.16%、31.12%, 酯类物质所占比例分别

为 6.56%、8.02%、8.65%、11.05%。醛类物质和酯类物质相对含量随水分亏缺程度的加重而逐渐升高。酮类物质和其他类物质总和相对含量均是随灌水量减少呈现先升高后降低的趋势, 在 T2 处理时相对含量最高, 分别为 4.64%、2.85%。

表 5 不同水分亏缺处理番茄果实挥发性物质含量

Table 5 Contents of volatile matter in tomato fruits under different water deficit treatments

处理	挥发性物质含量(μg/kg)							总计
	醇类	醛类	酯类	酮类	酸类	酚类	其他物质	
CK	1 442.82	588.97	146.71	29.10	10.59	7.72	10.72	2 236.64
T1	1 738.07	851.32	247.83	173.36	11.25	32.52	35.76	3 090.11
T2	2 027.31	1 080.73	320.69	172.13	59.26	30.63	15.88	3 706.62
T3	1 189.33	691.96	245.68	56.18	33.99	3.05	3.55	2 223.75

CK、T1、T2、T3 见表 1 注。

表 6 不同水分亏缺处理番茄果实挥发性物质数量

Table 6 Amount of volatile matter in tomato fruits under different water deficit treatments

处理	挥发性物质数量(种)							总计
	醇类	醛类	酯类	酮类	酸类	酚类	其他物质	
CK	16	16	6	10	3	2	4	57
T1	18	17	5	11	2	2	5	60
T2	16	20	8	14	3	3	6	70
T3	16	16	6	9	3	2	3	56

CK、T1、T2、T3 见表 1 注。

2.3.4.2 水分亏缺对番茄挥发性物质成分及其含量的影响 由表 7 可知, 不同水分亏缺条件下番茄果实特征香气成分及含量存在较大差异。4 个处理番茄果实均含有特征性挥发性物质顺-3-己烯醇、苯乙醇、正己醛、反-2-己烯醛、1-戊烯-3-酮 5 种物质, 另外还检测出 6 种特征性挥发物质出现在不同的处理之中。2-甲基丁醇、顺-3-己烯醛在 CK 中检测到, 而 β-紫罗兰酮仅在 CK 中未检测到; 反-2-庚烯醛在 T2 处理中检测到, 含量为 25.95 μg/kg。CK、T1 处理检测出 2-异丁基噻唑, CK、T1、T2 处理检测出 6-甲基-5-庚烯-2-酮。

4 个处理番茄果实共检测出 105 种挥发性物质, 仅分别在 CK、T1、T2、T3 处理中检测到的物质分别有 9 种、7 种、13 种、4 种, 这些物质分别占各处理总挥发性物质含量的 1.05%、1.20%、1.78%、0.95%。在 4 个处理中都有检测出的挥发性物质有 26 种, 这 26 种物质之和分别占 CK、T1、T2、T3 处理的 94.63%、90.18%、90.22%、89.56%。

从表 7 中可以看出, 4 个处理共有的 26 种挥发

性物质含量均随着灌水量的降低呈现先升高后降低的趋势, 其中除愈创木酚、丁香酚、乙酸乙酯、苯丙酮、苯乙酮、1-戊烯-3-酮、反, 反-2, 4-己二烯醛 7 种物质含量在 T1 处理中最高外, 其余 19 种物质的含量均在 T2 处理中最高。而乙醇、正己醇、苯甲醇、反-2-甲基-2-丁烯醛、反-4-氧合己醛、苯乙酮、丁香酚、愈创木酚在 T3 处理中含量最低, 另外 18 种物质在 CK 中含量最低。

## 2.4 不同水分亏缺处理对番茄产量的影响

如表 8 所示, 随着灌水量的降低, 番茄的单株产量、产量均呈现下降趋势。CK 的产量最高, 显著高于 T2、T3 处理, 但与 T1 处理无显著性差异。T3 处理产量最低, 较 CK 减产 34.44%。单株结果数 T1 处理最多, 为 27.14 个, 显著多于 T2 和 T3 处理, 但与 CK 无显著差异。CK、T1、T2、T3 处理灌水量分别为 0.357 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>、0.298 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>、0.234 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>、0.170 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 水分利用效率分别为 22.38 kg/m<sup>3</sup>、25.30 kg/m<sup>3</sup>、27.73 kg/m<sup>3</sup>、31.88 kg/m<sup>3</sup>。T1、T2、T3 处理水分利用效率较 CK 分别提高 11.30%、23.90%、42.49%。

表7 不同水分亏缺处理番茄果实挥发性物质成分

Table 7 Aroma components in tomato fruits under different water deficit treatments

挥发性物质	分子式	保留时间 (min)	挥发性物质含量(μg/kg)			
			CK	T1	T2	T3
乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	9.43	369.80	459.57	572.97	106.42
2-甲基丁醇	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	20.58	15.32	—	—	—
正戊醇	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	22.52	3.14	6.20	8.74	6.51
顺-2-戊烯醇	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	29.78	7.39	10.00	—	17.54
正己醇	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	27.07	270.74	297.40	329.25	197.40
顺-3-己烯醇	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	27.54	732.86	831.07	963.86	769.89
反-2-己烯醇	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	29.38	23.32	54.82	71.19	49.42
顺-2-己烯醇	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	29.78	0.65	—	—	—
正庚醇	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	31.49	3.94	4.55	—	4.88
异辛醇	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	32.91	1.80	—	12.14	3.21
顺-4-庚烯醇	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	33.54	1.44	2.77	4.94	2.93
顺-5-辛烯醇	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	38.12	0.94	—	2.02	—
糠醇	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	39.83	4.69	—	19.36	1.99
苯甲醇	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	45.73	1.91	4.99	6.15	0.80
苯乙醇	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	46.63	1.12	1.32	2.28	1.81
四氢吡喃-2-甲醇	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	47.84	3.75	—	—	0.21
2-甲基戊醇	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	18.10	—	0.84	—	—
异戊醇	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	20.66	—	23.52	—	21.12
反-3-己烯醇	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	27.54	—	12.48	16.16	—
2-己醇	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	29.77	—	1.12	—	—
2-乙基己醇	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	32.91	—	2.84	2.77	—
壬醇	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	39.82	—	7.99	—	—
2-庚醇	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> O	25.68	—	12.78	—	—
正辛醇	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	23.91	—	3.82	—	4.51
环戊醇	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	25.57	—	—	1.46	—
2-乙基丁醇	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	25.93	—	—	13.48	—
6-甲基庚醇	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	35.84	—	—	0.45	—
正十五烷醇	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	29.16	—	—	—	0.69
正己醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	18.58	108.67	157.30	211.94	114.17
反-2-甲基-2-丁烯醛	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	15.22	16.79	10.81	16.84	9.34
反-3-己烯醛	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	17.19	59.86	74.95	97.24	60.71
顺-3-己烯醛	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	18.27	0.13	—	—	—
反-2-己烯醛	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	20.85	333.25	496.10	582.13	366.02
辛醛	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	23.92	1.58	—	—	3.17
顺-2-戊烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	25.68	2.16	—	—	—
1-萘甲醛	C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O	27.95	0.55	—	—	—
壬醛	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	28.68	15.07	22.14	34.26	21.93
苯甲醛	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	34.44	5.39	10.37	12.07	5.55
反,反-2,4-己二烯醛	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	29.25	7.58	11.06	10.59	8.16

续表 7 Continued 7

挥发性物质	分子式	保留时间 (min)	挥发性物质含量(μg/kg)			
			CK	T1	T2	T3
糠醛	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	31.80	15.22	—	50.06	16.30
反-4-氧合己醛	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	37.25	1.74	3.32	3.35	1.69
5-羟甲基糠醛	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	42.24	17.53	12.43	—	55.81
10-十一烯醛	C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O	40.72	1.33	—	—	—
2,5-二呋喃甲醛	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	48.31	2.14	—	0.58	—
甲基丙烯醛	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O	31.18	—	0.18	—	—
反-2-辛烯醛	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	30.38	—	9.43	10.35	5.12
反,反-2,4-庚二烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	31.89	—	11.06	—	—
反-4-癸烯醛	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	44.20	—	1.62	—	—
橙花醛	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	40.71	—	2.00	2.91	—
香叶醛	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	42.23	—	6.78	5.10	—
反,反-2,4-癸二烯醛	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	44.20	—	0.54	3.86	—
顺-2-甲基-2-丁醛	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	15.23	—	—	16.84	—
反-2-戊烯醛	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	15.75	—	—	2.11	0.46
反-2-甲基-4-戊烯醛	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	18.20	—	—	0.44	1.35
顺-4-庚烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	21.74	—	—	1.72	—
反-2-庚烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O	25.64	—	—	25.95	—
癸醛	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	33.22	—	—	7.67	—
顺-2-己烯醛	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	20.06	—	28.60	—	21.71
顺-4-癸烯醛	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	34.98	—	—	1.56	0.47
甲基异丁酮	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	11.73	0.19	—	—	—
1-戊烯-3-酮	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	12.30	1.71	39.01	36.31	21.86
2-甲基-3-甲基乙基环戊酮	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	23.72	0.21	—	8.99	1.55
2-辛酮	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	22.38	0.88	1.02	—	—
6-甲基-5-庚烯-2-酮	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	26.25	8.95	24.00	33.79	—
苯乙酮	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	39.64	1.77	2.73	2.69	1.63
反,反-3,5-辛二烯-2-酮	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	41.63	3.51	—	5.26	—
邻羟基苯乙酮	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	44.07	3.29	7.02	8.98	5.17
香叶基丙酮	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	45.15	5.29	17.20	31.48	9.63
苯丙酮	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	46.42	3.30	9.23	8.03	6.19
3-辛酮	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	23.82	—	0.85	1.13	—
1-辛烯-3-酮	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	24.56	—	1.49	1.93	0.84
DDMP 吡喃酮	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	36.77	—	67.47	7.92	—
β-紫罗兰酮	C <sub>13</sub> H <sub>20</sub> O	47.44	—	3.33	4.19	3.21
3-羟基-2-丁酮	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	24.30	—	—	8.99	—
羟基丙酮	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	24.91	—	—	20.21	6.08
乙酸乙酯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	8.06	0.95	60.01	24.73	35.53
4-羟基丁酸内酯	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	38.88	0.68	—	—	—
4-羟基丁酸乙酯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	38.87	—	1.15	4.30	1.09
乙酸己酯	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	23.14	0.78	13.22	1.10	—



续表 7 Continued 7

挥发性物质	分子式	保留时间 (min)	挥发性物质含量(μg/kg)			
			CK	T1	T2	T3
乙酸叶醇酯	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	25.24	3.83	4.99	5.50	—
甲酸辛酯	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	35.76	2.70	—	7.18	—
苯基香豆甲酯	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	42.63	137.77	168.54	268.16	179.78
己酸乙烯基酯	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	39.99	—	—	2.41	9.70
2-己酮酸甲酯	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	47.82	—	—	7.37	—
甲酸-2-乙基丁酯	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	25.94	—	—	—	15.95
丙醇环己酯	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	25.24	—	—	—	3.63
丁香酚	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	44.73	4.07	20.68	16.95	2.16
愈创木酚	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	45.47	3.64	11.85	11.24	0.89
间甲酚	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	48.76	—	—	2.45	—
乙酸	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	31.17	7.80	—	46.50	25.87
糠酸	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	40.00	0.62	—	—	—
己酸	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	44.80	2.17	6.24	7.92	5.92
异戊酸	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	39.99	—	5.01	4.85	1.36
17-十八炔酸	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	27.95	—	—	—	0.85
8,10,11-二十碳三烯酸	C <sub>20</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	37.68	—	1.36	—	—
1-硝基戊烷	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	25.95	2.23	14.13	—	—
2-异丁基噻唑	C <sub>7</sub> H <sub>11</sub> NS	29.46	4.66	19.80	—	—
5-甲基呋喃	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	36.46	1.84	—	9.77	3.01
十九烷	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	26.43	—	—	0.30	0.37
2-环丙基丙烷	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	18.08	2.00	—	—	—
六甘醇单十二醚	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub> O <sub>7</sub>	47.09	—	0.37	—	0.17
5-甲基-1-庚烯	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	13.39	—	0.11	0.20	—
3-甲基-1,5 辛二烯	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>	24.16	—	—	0.61	—
2,6,10-三甲基十四烷	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	26.34	—	—	0.58	—
2-丁基 1-甲基吡咯烷	C <sub>9</sub> H <sub>19</sub> N	32.11	—	—	4.43	—

CK、T1、T2、T3 见表 1 注。—表示未检出。

表 8 不同水分亏缺处理对番茄产量和水分利用效率的影响

Table 8 Effects of different water deficit treatments on yield and water use efficiency of tomatoes

处理	单株产量(g)	单株结果数(个)	产量(kg/m <sup>2</sup> )	灌水量(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	水分利用效率(kg/m <sup>3</sup> )
CK	3 022.24±133.82a	25.71±1.06ab	7.99±0.35a	0.357	22.38
T1	2 850.57±36.90 a	27.14±1.40a	7.54 ±0.10a	0.298	25.30
T2	2 454.19±106.19b	23.43 ±1.32b	6.49±0.28b	0.234	27.73
T3	1 981.18±139.60c	20.29 ±0.81c	5.42±0.51c	0.170	31.88

CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同一列不同小写字母表示在 0. 05 水平上差异显著。

3 讨论

果实硬度是影响番茄生产效益和品质的重要指标<sup>[16]</sup>。本试验中番茄果实硬度随着水分亏缺程度的加重逐渐增大,说明水分亏缺可以增加果实的硬

度,这与钟韵等<sup>[17]</sup>对苹果果实的研究结果一致。色泽是番茄果实的重要外观品质,色泽鲜艳的果实更能够吸引消费者<sup>[18]</sup>,番茄中的番茄红素是一种重要的抗氧化物质<sup>[19]</sup>。含有较多的番茄红素不仅可以增强番茄的风味品质还可以改善番茄的色

泽,使番茄拥有更好的外观品质。本试验中番茄果实中番茄红素含量随灌溉量的降低逐渐增加,番茄果实的色光值也逐渐增加。说明水分亏缺可以增加番茄的番茄红素含量,提高色光值。这与郭艳红等<sup>[20]</sup>的研究结果略有差异,这可能是番茄品种不同和栽培方式的差异所致。

糖代谢是影响风味形成和果实营养的重要决定因素,果实中所含糖的种类、数量及比率对果实的色泽、风味和其他营养成分均有重要的影响,是决定果实品质和商用价值的重要因素<sup>[21-22]</sup>。由于果糖的甜度是蔗糖的 1.75 倍,因此改变果实中蔗糖与果糖之间的比例就能够改变番茄果实的风味。本试验中,中度水分亏缺和轻度水分亏缺均提高了番茄果实中果糖和葡萄糖含量,但降低了蔗糖含量。原因可能是水分亏缺影响了糖代谢相关酶的活性和基因表达,从而改变了果糖、葡萄糖和蔗糖的含量和比例,但这有待进一步研究。有机酸的组分及其含量能在很大程度上影响果实的风味品质。依据有机酸分子碳架来源不同,可将果实分成三大类型:柠檬酸型、酒石酸型和苹果酸型<sup>[23]</sup>。本试验结果表明番茄果实中含量最高的有机酸组分是柠檬酸,与徐新娟<sup>[24]</sup>的测定结果一致,因此番茄属于柠檬酸型果实。6 种酸组分中除乙酸外,其余 5 种有机酸含量均随灌水量的减少呈现先升高后降低的趋势。柠檬酸、琥珀酸在轻度水分亏缺时含量最高,而苹果酸、酒石酸、草酸在中度水分亏缺时含量最高。这与李晓彬等<sup>[25]</sup>在苹果上的研究结果一致。

适宜的糖、酸含量以及糖酸比是番茄果实风味品质形成的基础<sup>[26-30]</sup>。有研究结果表明,糖酸比在 6.0 以上时,番茄果实风味较佳<sup>[31-32]</sup>。本试验中,随灌水量的减少,番茄果实的糖酸比增加,且糖酸比均大于 6.0。轻度水分亏缺和轻度水分亏缺处理在糖、酸含量均增加的情况下,糖酸比较对照增加,而重度水分亏缺处理虽然糖酸比最高,但糖、酸含量均低于对照,说明适度的水分亏缺可有效提高番茄果实的风味。

香气是番茄风味的重要组成部分,由多种挥发性芳香物质组成,番茄风味很大程度上取决于果实挥发性物质的种类和含量<sup>[33]</sup>。前人从番茄果实中共检测出 400 多种挥发性物质<sup>[34]</sup>,其中对番茄香气有重要贡献的有 20~30 种。芳香物质含量与阈值浓度比值的对数大于 0 的 16 种是番茄的主要特征香

气物质<sup>[35-38]</sup>。本试验共检测出挥发性物质 105 种,其中番茄特征香气物质有 11 种,未检测到  $\beta$ -大马酮、2-甲基丁醛、1-硝基-2-乙基苯、2-苯乙醛和 3-甲基丁醛,这可能与品种及栽培条件有关。2-甲基丁醇赋予番茄果实焦糖味,顺-2-己烯醇赋予果实苹果香味<sup>[17]</sup>,这 2 种特征性物质均只在对照中检测到,说明水分亏缺对这 2 种挥发性物质生成起到了抑制作用,导致这 2 种特征香气物质未在水分亏缺处理中检测到。而具有花香气味的  $\beta$ -紫罗兰酮在除了对照之外的 3 个水分亏缺处理中均能检测到,且含量高低顺序为 T2>T1>T3,说明一定程度的水分亏缺处理对  $\beta$ -紫罗兰酮的产生有促进作用,但严重水分亏缺会降低  $\beta$ -紫罗兰酮含量。

番茄中醇类物质大多具有青草香味,醛类、酯类物质大多具有果香味,酮类物质则有较浓的花香味。本研究发现随水分亏缺程度的加重,番茄果实中醇类物质相对含量逐渐下降,而醛类物质和酯类物质相对含量逐渐上升,酮类物质与其他类物质总和相对含量则呈现先升高后降低趋势,在 T2 处理时相对含量达到最大。这说明水分亏缺处理可以使番茄果实呈现出更浓郁的花香味。这与唐晓伟等的<sup>[6]</sup>研究结果基本一致。究其原因可能是因为水分亏缺影响了挥发性物质前体的合成以及相关代谢酶的活性,从而改变了挥发性物质种类与含量。

## 4 结 论

与正常灌溉相比,轻度水分亏缺(80%对照灌水量)和轻度水分亏缺(60%对照灌水量)处理均不同程度提高了番茄果实的品质,而重度水分亏缺(40%对照灌水量)处理对番茄品质有负面影响。其中,中度水分亏缺处理在不影响番茄果形指数和色泽的基础上,显著增加了果实中可溶性蛋白质、可溶性糖、维生素 C 和番茄红素含量,提高了糖酸比,增加了特征挥发性物质的种类和含量,并较对照的水分利用效率提高了 25.8%,是最优的水分亏缺处理。因此,中度水分亏缺即 60%正常灌水量可作为日光温室基质栽培高品质番茄的灌溉制度。

## 参考文献:

- [1] PHENE C J, HUTMACHER R B, DAVIS K R, et al. Water fertilizer management of processing tomatoes [J]. Acta Horticulture, 1990, 277: 137-193.

- [2] 曾燕舞. 水氮处理对两种蔬菜品质和土壤水氮资源利用影响的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [3] 张志斌. 关于我国设施蔬菜生产可持续发展的探讨[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 15-17.
- [4] 韩扬眉. 更好吃的番茄要回来了[J]. 农村·农业·农民(A版), 2019(6): 42-43.
- [5] 曹 华. 高端优质鲜食番茄品种及关键栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2018(4): 99-102.
- [6] 唐晓伟, 刘明池, 郝 静, 等. 调亏灌溉对番茄品质与风味组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 970-977.
- [7] 郭海涛, 邹志荣, 杨兴娟, 等. 调亏灌溉对番茄生理指标、产量品质及水分生产效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007(3): 133-137.
- [8] 刘明池, 刘向莉. 亏缺灌溉对番茄果实品质和产量的影响[J]. 中国蔬菜, 2005(S1): 46-48.
- [9] 李向文, 颜建明, 吕 剑, 等. 灌水下限对日光温室番茄生长及生理指标的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(5): 69-74, 81.
- [10] 吕 剑. 日光温室基质栽培越冬茬番茄灌水下限研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [11] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 张 洋, 郁继华, 唐中祺, 等. 不同时段株间补光对日光温室番茄产量及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 430-437.
- [13] 王利群, 戴雄泽. 色差计在辣椒果实色泽变化检测中的应用[J]. 辣椒杂志, 2009, 7(3): 23-26, 33.
- [14] 柳帆红, 肖雪梅, 郁继华, 等. 不同时段补光对日光温室番茄营养与风味品质的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(4): 570-578.
- [15] 魏守辉, 肖雪梅, 郁继华, 等. 日光温室不同时段补光对番茄果实品质及挥发性物质影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 188-196.
- [16] 杨生保, 唐亚萍, 杨 涛, 等. 加工型番茄果实硬度特异材料的果实特性及果肉组织特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 285-290.
- [17] 钟 韵, 费良军, 曾 健, 等. 根域水分亏缺对涌泉灌苹果幼树产量品质和节水的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 78-87.
- [18] 徐丽丽, 申晓青, 单 素, 等. 园艺作物果实皮色遗传研究进展[J]. 分子植物育种, 2015, 13(11): 2655-2662.
- [19] 高慧君, 明家琪, 徐 娟, 等. 园艺植物中类胡萝卜素合成与调控的研究进展[J]. 园艺学报, 2015, 42(9): 1633-1648.
- [20] 郭艳红, 张 凯, 陈年来, 等. 水氮耦合对黑河中游加工番茄产量和品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(1): 65-69.
- [21] EL HADI M A, ZHANG F J, WU F, et al. Advances in fruit aroma volatile research[J]. Molecules, 2013, 18(7): 8200-8229.
- [22] 吕英民, 张大鹏, 严海燕. 糖在苹果果实中卸载机制的研究[J]. 园艺学报, 1999, 26(3): 3-8.
- [23] 李庆余. 氮素形态调控番茄果实氮和有机酸代谢的分子生理机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [24] 徐新娟. 氮素形态对番茄果实生长和有机酸代谢动态变化的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [25] 李晓彬, 汪有科, 赵春红, 等. 水分调控对梨枣果实品质与投入产出效益的影响分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 818-822.
- [26] 张 敏, 黎 东. 利用高效液相色谱法测定食品中五种糖的含量[J]. 现代食品, 2019(1): 107-109.
- [27] 刘广洋, 刘中笑, 张延国, 等. 乙烯利和追肥处理对番茄品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5): 121-126.
- [28] 董 环, 娄春荣, 王秀娟, 等. 氮、钾运筹对设施番茄产量、果实硝酸盐含量及土壤硝态氮含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 378-383.
- [29] 刘中良, 高俊杰, 谷端银, 等. 有机肥替代化肥对土壤环境和番茄品质的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(2): 357-363.
- [30] 樊丽琴, 吴 霞, 李 磊, 等. 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.
- [31] 王丹丹, 齐连芬, 张庆银. 日光温室不同施肥量对番茄果实品质的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(3): 71-75, 87.
- [32] 陈 思, 牛晓丽, 周振江. 水肥供应对番茄果实糖酸含量的影响[J]. 节水灌溉, 2013(9): 18-22.
- [33] BECKLES D M, HONG N, SAMOVAR L, et al. Biochemical factors contributing to tomato fruit sugar content: A review[J]. Fruits, 2012, 67(1): 49-64.
- [34] KLEE H J. Improving the flavor of fresh fruits: genomics, biochemistry, and biotechnology[J]. New Phycologist, 2010, 187(1): 44-56.
- [35] ZHANG J, ZHAO J, XU Y, et al. Genome-wide association mapping for tomato volatiles positively contributing to tomato flavor[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 1042.
- [36] 王利斌, 李雪晖, 石珍源, 等. 番茄果实的芳香物质组成及其影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 291-300.
- [37] BALDWIN E A, SCOTT J W, EINSTEIN M A. Relationship between sensory and instrumental analysis for tomato flavor[J]. J Am Soc Hortie Sci, 1998, 123(5): 906-915.
- [38] TIEMAN D M, ZEIGLER M, SCUM ELLS E A, et al. Identification of loci affecting flavor volatile missions in tomato fruits[J]. J Exp Bot, 2006, 57(4): 887-896.

(责任编辑: 张震林)