

魏昊泰, 李怡雪, 赵嘉诺, 等. 水分条件对不同发育阶段番茄果实外观、营养及风味品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(9): 1701-1710.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.09.014

水分条件对不同发育阶段番茄果实外观、营养及风味品质的影响

魏昊泰¹, 李怡雪¹, 赵嘉诺¹, 王 鹏¹, 王国帅¹, 罗石磊¹, 张国斌^{1,2}

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 省部共建旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为明确水分条件对不同发育阶段(绿熟期、转色期、成熟期)番茄果实外观品质及果肉和胎座的营养品质和风味品质的影响, 本研究以番茄品种 184 为材料, 通过基质盆栽方式, 设置基质相对含水量 85.1%~100.0% (T1)、70.1%~85.0% (T2) 和 55.1%~70.0% (T3) 3 个处理, 进行栽培试验, 分析水分条件对不同发育阶段(绿熟期、转色期、成熟期)番茄果实的外观品质及胎座和果肉营养品质、挥发性风味物质含量的影响。结果表明: 随着基质相对含水量的减少, 番茄的单果重和单株产量呈先上升后下降的趋势, 而水分利用效率呈增加趋势。随着果实的发育, 番茄果实硬度呈降低趋势, 而色光值呈上升趋势。果实成熟期 T2 处理果实硬度、色光值、果肉和胎座的可溶性糖含量和有机酸含量均较高, 而硝酸盐含量较低, 与 T1 和 T3 处理差异显著。成熟期 T2 处理番茄果肉和胎座中葡萄糖、果糖、苹果酸、草酸和酒石酸含量均高于 T1 和 T3 处理。电子鼻监测结果显示, 芳烃化合物传感器(W1C)、氮氧化合物传感器(W5S)、芳烃化合物及有机硫化物传感器(W2W)对番茄果肉和胎座中挥发性物质的响应值较高, 且 T2 处理果肉和胎座的传感器响应值较高。综上, 相对含水量 70.1%~85.0% 处理下, 番茄果实外观品质、果实硬度、可溶性糖含量和有机酸含量高, 硝酸盐含量低, 风味品质较好。本研究结果可为番茄高品质栽培及水分精准管理提供依据和参考。

关键词: 番茄; 水分条件; 果实品质; 挥发性风味物质

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)09-1701-10

Effects of irrigation level on apparent, nutritional and flavor qualities of tomato fruits at different development stages

WEI Haotai¹, LI Yixue¹, ZHAO Jianuo¹, WANG Peng¹, WANG Guoshuai¹, LUO Shilei¹, ZHANG Guobin^{1,2}

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

Abstract: In order to clarify the effects of water conditions on the apparent quality of tomato fruit and the nutritional quality and flavor quality of pulp and placenta at different development stages (green ripening stage, veraison stage and mature stage), tomato variety 184 was used as the material in this study. The effects of water conditions on the apparent quality

of tomato fruit at different development stages (green ripening stage, veraison stage and mature stage) and the nutritional quality and volatile flavor substance content of placenta and pulp were analyzed through potted cultivation experiment, and the relative water contents of the substrate were 85.1%–100.0% (T1), 70.1%–85.0% (T2) and 55.1%–70.0% (T3). The results showed that with the decrease of the relative water content of the substrate, the sin-

收稿日期: 2023-11-13

基金项目: 甘肃省科技厅技术创新引导计划(22CX8NA045); 甘肃省教育厅产业支撑引导项目(2021CYZC-45); 中央引导地方科技发展专项(ZCYD-2021-08)

作者简介: 魏昊泰(1999-), 男, 甘肃合作人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜逆境生理与品质调控的研究。(E-mail) mniwht11@163.com

通讯作者: 张国斌, (E-mail) zhanggb@gsau.edu.cn

gle fruit weight and yield per plant of tomato increased first and then decreased, while the water use efficiency increased. With the development of fruit, the hardness of tomato fruit showed a decreasing trend, while the color light value showed an increasing trend. At mature stage, the fruit hardness, color light value, soluble sugar content and organic acid content of pulp and placenta of T2 treatment were higher than those of other treatments, while the nitrate content was lower than those of other treatments, which was significantly different from those of T1 and T3 treatments. At mature stage, the contents of glucose, fructose, malic acid, oxalic acid and tartaric acid in tomato pulp and placenta of T2 treatment were higher than those of T1 and T3 treatments. The results of electronic nose monitoring showed that the response values of aromatic compound sensor (W1C), nitrogen oxide sensor (W5S), aromatic compound and organic sulfide sensor (W2W) to volatile substances in tomato pulp and placenta were relatively high, and the response values of T2 treated pulp and placenta were relatively high. In summary, under the treatment of relative water content of 70.1%–85.0%, the apparent quality, fruit hardness, soluble sugar content and organic acid content of tomato fruit were high, the nitrate content was low, and the flavor quality was good. The results of this study can provide a basis and reference for high-quality cultivation and precise water management of tomato.

Key words: tomato; irrigation level; fruit quality; volatile flavor substance

水是作物正常生长的基础物质,土壤水分供应水平不但影响作物的产量,还影响作物的品质^[1-2]。因此,生产过程中常通过灌溉来人为调控作物的产量和品质。番茄(*Solanum lycopersicum*)是三大世界性贸易蔬菜之一,中国已成为世界番茄产量最大的国家^[3]。前人关于水分对番茄产量和品质的影响已有较多研究。研究表明,适宜的水分条件可以提升番茄产量^[4],而适度的水分亏缺有利于提高番茄果实品质^[5],促进果实有机物和糖分积累^[6],改善果实色泽^[7]。

番茄果实的风味品质包括通过品尝感受到的酸、甜风味,还包括通过嗅觉感受到的番茄香味。番茄果实香味物质由挥发性醛类、醇类、酯类、酮类、萜类及硫化物等芳香物质组成^[8],果实中芳香物质的浓度和种类对果实风味有重要影响^[9-12]。不同的水分条件对番茄果实的芳香物质组分和含量有较大影响^[13-14]。一般认为,过高的水分含量会降低番茄果实中挥发性风味化合物的含量^[15],番茄果实中的营养物质和风味物质的浓度会随着水分亏缺程度的提高而增加^[16]。上述研究大多侧重于分析水分供给水平对番茄生长发育、产量以及果实营养品质的影响,而在水分供给水平对番茄果实发育过程中营养物质和风味物质的变化积累规律、果肉和胎座营养物质和风味物质的差异等方面的报道则较少。基于此,本试验以番茄品种 184 为试验材料,分析水分条件对不同发育阶段(绿熟期、转色期、成熟期)番茄果实外观品质及果肉和胎座的营养品质和风味品质的影响,旨在为番茄节水和高品质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 184 番茄。该品种是从以色列引进的优良番茄品种之一,具有抗病、高产、耐储运特征,单果重量在 150~200 g,果实圆整、大红色、色泽鲜艳、外观漂亮,是国内外极畅销的品种。

1.2 试验设计与处理

试验于 2021 年 3–8 月在甘肃农业大学玻璃温室内进行。3 月 2 日育苗,育苗期间,每天 8:00 浇水,待番茄苗长到五叶一心时(4 月 9 日),选取长势一致的健壮番茄幼苗定植至重量比 3:1 的蛭石与珍珠岩盆栽基质中。试验用盆钵规格为 26 cm×20 cm×20 cm,每盆种植 1 株,共 60 盆。定植后 7 d 内用 1/2 营养液缓苗,7 d 后用全营养液培养。营养液配方由华南农业大学研制,每 1 L 营养液含 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (590 mg)、 KNO_3 (404 mg)、 KH_2PO_4 (136 mg)、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (246 mg) 等大量元素和 H_3BO_3 (2.86 mg)、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.08 mg)、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (2.13 mg)、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.22 mg)、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ (40.02 mg)、 $\text{Fe-EDTA} \cdot \text{Na}_2\text{Fe}$ (20.00 mg) 等微量元素。试验期间温室白天平均气温为 28.9 °C,平均相对湿度为 60.1%,平均光照度为 8 560.1 lx;夜间平均气温为 19.9 °C,平均相对湿度为 80.3%。番茄植株 4 穗果时进行打顶处理。

番茄第二穗开花 50% 时开始进行水分处理,共设 T1(基质相对含水量为 85.1%~100.0%)、T2(基质相对含水量为 70.1%~85.0%) 和 T3(基质相对含水量为 55.1%~70.0%) 3 个处理,每个处理 20 株,处理 60

d. 每天16:00利用 TDR350 水分速测仪测定各处理基质含水量。当基质含水量达该处理的土壤水分含量下限时,进行灌水,每次灌溉量以灌溉后基质含水量达该处理的土壤水分含量上限为准。根据各处理水分上下限指标及试验盆直径、基质深度、基质容重、最大田间持水量等数据,即可得到各处理每次灌水量^[17],结合灌水次数可得总灌水量(表 1)。

表 1 不同处理的灌水量
Table 1 Irrigation water for different treatments

名称	基质相对含水量	单次灌水量 (L,1 盆)	单株总灌水量 (L)
T1	85.1%~100.0%	0.346	32.524
T2	70.1%~85.0%	0.346	25.258
T3	55.1%~70.0%	0.346	18.338

1.3 测定项目与方法

1.3.1 基质田间持水量的测定 使用 TDR350 水分速测仪(武汉汉林苑科技有限公司产品)测定基质含水量。

1.3.2 番茄产量指标的测定 各处理随机选取 3 株,每 7 d 采摘成熟果实,按株计量果实数量和产量^[18];利用各处理灌水总次数,分别乘以对应处理的单株单次灌水量,计算总灌水量。再根据产量与总灌水量的比值^[19],得到各处理水分利用效率(WUE)。

1.3.3 果实表型参数及硬度的测定 当番茄植株第 2 穗果实进入绿熟期(外部果皮白青色,果实坚硬)、转色期(果皮外表开始变色,呈青黄色)及成熟期(果实完全变红且变软)时,每处理随机选取第 2 穗 9 个番茄果实用于表型参数及硬度的测定,设 3 次重复。采用 SL-0122 型游标卡尺[上海美耐特实业(集团)有限公司产品]测量果实纵径与横径,计算果形指数(纵径与横径的比值)^[20];采用 GY-4-J 数显式水果硬度计(浙江托普云农科技股份有限公司产品)测定番茄果实硬度;采用 CR-10 色度计(日本 Konina Minolta Inc. 产品)测定番茄果皮的颜色参数 L^* (亮度)、 a^* (红绿色差)、 b^* (黄蓝色差),计算色光值 $[2\ 000\times a^*/L^*(a^{*2}+b^{*2})^{1/2}]$ ^[21]。

1.3.4 果实品质指标的测定 测定果实表型参数后,将果实果肉和胎座分离,采用 2,6-二氯酚靛酚法、蒽酮比色法、硝基水杨酸法、考马斯亮蓝 G-250 比色法和酸碱液滴定法测定果肉和胎座的可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、硝酸盐含量和有机酸含

量^[22];参照刘晓奇等^[23]的方法,采用高效液相色谱法测定番茄果实糖组分含量。使用的仪器为 Aglient series 1100 高效液相色谱系统(美国安捷伦公司产品),检测器为示差遮光检测器,色谱柱为 LC-NH₂(460 mm×250 mm,5 μm),柱温为 30 ℃,流动相为体积比 75:25 的乙腈与水混合液,流动相经超声波脱气 30 min,流速为 1.0 mL/min,样品进样体积为 20 μL。有机酸组分同样利用 Aglient series 1100 高效液相色谱系统测定,检测器为紫外检测器,检测波长 210 nm,色谱柱为 Hi-PiexH (300 mm×7.7 mm,5 μm),流动相为 0.2 mmol/L 磷酸二氢钠,柱温 25 ℃,流速 0.5 mL/min,样品进样体积为 10 μL。

1.3.5 番茄果实挥发性物质的测定 利用 PEN 3 型电子鼻(德国 AIRSENSE 公司产品)对绿熟期、转色期和成熟期番茄第 2 穗果实的果肉和胎座进行挥发性物质检测。PEN 3 型电子鼻具有 10 个化学传感元件组成的传感器阵列,可监测含硫化合物、氮氧化合物等香气相关物质(表 2)。传感器的信号响应表示为 G/GO ,其定义为挥发物的电导率(G)与纯空气的电导率(GO)之比^[24]。称取 5.0 g 样品置入 10 mL 进样瓶中,加入 1.5 g 无水硫酸钠后加热涡旋 5 min,然后将电子鼻的进样针头插入样品瓶,采用顶空吸气法进行测定。测定条件设置如下:传感器清洗时间 100 s,传感器归零时间 5 s,样品准备时间 5 s,进样流量 400 mL/min,检测时间 60 s。检测完成后系统进行清零和标准化,然后再进行下一次顶空采样和测定。

表 2 PEN3 型电子鼻传感器敏感物质
Table 2 Sensitive substances of PEN3 electronic nose sensor

编号	传感器	敏感物质
1	W1C	芳烃化合物
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨、芳香分子
4	W6S	氢化物
5	W5C	烯烃、芳族、极性分子
6	W1S	甲烷类
7	W1W	无机硫化物
8	W2S	醇类、部分芳香族化合物
9	W2W	芳烃化合物、有机硫化物
10	W3S	烷烃、脂肪族

1.4 数据分析

利用 Excel 软件对试验数据进行处理和图表制

作,利用 SPSS 22.0 软件及 Duncan's 多重比较法对处理间差异进行显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同水分条件对番茄果实产量与水分利用效率的影响

不同水分条件对番茄果实产量与水分利用效率的影响如表 3 所示。从表中可以看出,3 个处理番茄单果鲜重、单株产量和灌溉水分利用效率均存在显著差异。T3 处理下番茄的灌溉水分利用效率最高,T1 处理下水分利用效率最低。番茄单株产量和单果鲜重均是 T2 处理最高,T3 处理最低。T2 处理单果鲜重分别比 T1、T3 处理增加 6.25% 和 29.76%,单株产量分别比 T1、T3 处理增加 12.57%、29.02%。

2.2 不同水分条件对番茄果实外观品质的影响

在果实不同发育期,不同水分条件对番茄果实外观品质的影响如表 4 所示。绿熟期后,随着番茄果实的逐步成熟,同一处理下单果鲜重变化明显,处理间存在一定的差异。绿熟期 T1 处理和 T2 处理的单果鲜重分别比 T3 处理提高 12.55% 和 14.89%,增加显著,T1 处理和 T2 处理差异不显著;而转色期和成熟期 T2 处理的单果鲜重显著高于 T1 处理,T1 处理又显著高于 T3 处理。在果实发育的 3 个阶段,除成熟期 T2 处理果

形指数显著高于绿熟期 T3 处理,其他处理果形指数总体变化不大。

表 3 不同水平条件对番茄的果实产量与水分利用效率的影响
Table 3 Effects of different irrigation levels on fruit yield and water use efficiency of tomato

处理	单果鲜重 (g)	单株产量 (g)	灌溉水分利用效率 (g/m ²)
T1	45.92±0.81b	741.57±8.47b	22.97±0.27c
T2	48.79±1.07a	834.78±7.27a	33.18±0.29b
T3	37.60±0.97c	647.00±8.83c	35.43±0.49a

T1~T3 见表 1。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

随着果实的逐步成熟,3 个处理的番茄果实硬度均逐渐降低。绿熟期时 3 个处理间的硬度差异不显著;转色期时 T1 处理番茄硬度显著高于 T2 处理和 T3 处理。成熟期时 T1 处理和 T2 处理的果实硬度显著高于 T3 处理。

绿熟期时 3 个处理番茄果实色光值均为负值,处理间无显著差异;转色期时 T1 处理和 T2 处理的色光值分别比 T3 处理提高 22.97%、26.13%,增加显著;成熟期时 T2 处理色光值最高,果实最红,分别比 T1 处理和 T3 处理提高 7.06% 和 18.73%。

表 4 不同水分条件对番茄果实外观品质的影响

Table 4 Effects of different water conditions on the appearance quality of tomato fruit

时期	处理	单果鲜重 (g)	果形指数	硬度 (kg/cm ²)	色光值
绿熟期	T1	44.29±1.24bc	0.84±0.02ab	5.26±0.39a	-5.05±1.14f
	T2	45.21±0.92bc	0.83±0.03ab	5.27±0.31a	-4.12±1.23f
	T3	39.35±1.63d	0.79±0.03b	5.26±0.25a	-4.93±1.28f
转色期	T1	43.39±0.26c	0.87±0.02ab	4.23±0.24b	42.50±1.73cd
	T2	46.23±1.40b	0.88±0.02ab	3.53±0.24cd	43.59±1.41bc
	T3	37.11±0.61e	0.84±0.03ab	3.46±0.16cd	34.56±1.39e
成熟期	T1	45.92±0.81b	0.89±0.02ab	3.02±0.18e	45.30±1.53b
	T2	48.79±1.07a	0.90±0.06a	3.12±0.17de	48.50±0.99a
	T3	37.60±0.97e	0.87±0.02ab	2.56±0.16f	40.85±3.24d

T1~T3 见表 1,数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.3 不同水分条件对番茄果实营养品质的影响

绿熟期后,随着番茄果实的逐步成熟,各处理果肉中有机酸含量呈下降趋势,可溶性糖含量和硝酸盐含量呈逐渐上升趋势,而可溶性蛋白质含量总体呈先增后减的趋势(表 5)。在果实发育的 3 个时期,T2 处理番茄果肉有机酸含量均显著高于 T1 和 T3 处理,绿

熟期 T2 处理有机酸含量最高,达 2.19%。绿熟期 T2 和 T3 处理番茄果肉硝酸盐含量显著高于 T1 处理,转色期和成熟期 T2 处理番茄果实果肉硝酸盐含量显著低于 T1 和 T3 处理。在绿熟期和转色期,3 个处理的果肉可溶性蛋白质含量均无显著差异,成熟期 T1 处理的果肉可溶性蛋白质含量显著高于 T2 和 T3 处理。

绿熟期 T1 和 T2 处理果肉的可溶性糖含量无显著差异,均高于 T3 处理,转色期 T2 处理果肉可溶性糖含量分别比 T1 和 T3 处理显著提高 14.47% 和 21.85%,成熟期 T2 处理果肉可溶性糖含量分别比 T1 和 T3 处理显著提高 26.72% 和 19.12%。

绿熟期后,随着番茄果实的逐步成熟,果实胎座有机酸含量呈下降趋势,硝酸盐含量和可溶性糖含量总体呈上升的趋势,可溶性蛋白质含量呈先增加后稳定的变化趋势。在绿熟期和转色期,T1 处理番

茄果实胎座的有机酸含量高于 T2 和 T3 处理,而成熟期 T2 处理和 T3 处理胎座的有机酸含量高于 T1 处理。绿熟期 T2 和 T3 处理果实胎座硝酸盐含量高于 T1 处理,而转色期和成熟期 T2 处理果实胎座硝酸盐含量低于 T1 和 T3 处理。在 3 个发育期,T2 和 T3 处理果实胎座可溶性蛋白质含量均高于 T1 处理。绿熟期 T3 处理果实胎座可溶性糖含量高于 T2 和 T1 处理,而转色期和成熟期 T2 处理可溶性糖含量最高,其次为 T3 处理,T1 处理最低。

表 5 不同水分条件对番茄果实营养品质的影响

Table 5 Effects of different water conditions on the nutritional quality of tomato fruit

发育时期	处理	有机酸含量(%)		硝酸盐含量(μg/mg)		可溶性蛋白质含量(mg/g)		可溶性糖含量(mg/g)	
		果肉	胎座	果肉	胎座	果肉	胎座	果肉	胎座
绿熟期	T1	1.81±0.08b	2.51±0.04a	32.54±0.81h	32.51±0.81h	0.18±0.04c	0.16±0.03d	2.01±0.07g	1.92±0.09i
	T2	2.19±0.07a	2.20±0.04b	39.06±1.76g	39.00±1.72g	0.15±0.02c	0.28±0.06c	1.90±0.12g	2.46±0.06h
	T3	1.57±0.06c	2.16±0.03b	37.21±0.42g	37.23±0.41g	0.21±0.04bc	0.28±0.04c	1.56±0.04h	4.02±0.08d
转色期	T1	1.28±0.08de	1.52±0.08c	90.62±2.25e	93.21±1.76e	0.28±0.04ab	0.33±0.03c	3.80±0.05e	2.59±0.05g
	T2	1.71±0.11b	1.36±0.04d	82.74±1.12f	85.18±0.79f	0.30±0.03a	0.45±0.04b	4.35±0.06d	3.49±0.04e
	T3	1.27±0.07de	1.35±0.05d	96.76±0.85d	99.78±1.13d	0.34±0.03a	0.50±0.05b	3.57±0.04f	3.31±0.06f
成熟期	T1	1.21±0.05e	1.13±0.03f	149.11±4.59b	150.58±2.36b	0.28±0.05ab	0.31±0.04c	5.80±0.10c	5.81±0.04c
	T2	1.35±0.06d	1.27±0.06e	137.28±2.86c	143.71±0.76c	0.16±0.04c	0.48±0.05b	7.35±0.05a	7.50±0.04a
	T3	1.17±0.08e	1.22±0.04e	158.53±1.46a	171.34±0.77a	0.18±0.05c	0.59±0.07a	6.17±0.05b	6.30±0.07b

同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4 不同水分条件对番茄果实糖酸组分及含量的影响

绿熟期后,随着果实的逐步成熟,T1 处理和 T2 处理番茄果肉中葡萄糖含量和果糖含量总体呈增加趋势,T3 处理果肉葡萄糖含量和果糖含量呈减少趋势。从绿熟期至转色期果肉蔗糖含量总体呈增加趋势,而从转色期至成熟期,果肉蔗糖含量呈减少趋势。绿熟期和转色期 T1 处理和 T3 处理果肉葡萄糖含量和果糖含量高于 T2 处理,而成熟期 T2 处理果肉葡萄糖含量和果糖含量高于 T1 处理和 T3 处理。绿熟期 T2 处理果肉蔗糖含量高于 T1 和 T3 处理,而转色期和成熟期 T1 处理果肉蔗糖含量高于 T2 和 T3 处理(表 6)。

与果肉葡萄糖含量和果糖含量变化规律相一致,随着果实的逐步成熟,T1 处理和 T2 处理番茄胎座中葡萄糖含量和果糖含量总体呈增加趋势,T3 处理葡萄糖含量呈先增后减的趋势,而胎座果糖含量呈稳定下降趋势。T1 处理和 T2 处理胎座的蔗糖含量从绿熟期到成熟期呈先降后升的趋势,而 T3 处理胎座的蔗糖含量无显著变化。绿熟期和转色期 T3 处理胎座

葡萄糖含量最高,T2 处理次之,T1 处理最低,成熟期 T2 处理胎座葡萄糖含量显著高于 T1 和 T3 处理。绿熟期 T3 处理胎座果糖含量显著高于 T1 和 T2 处理,而转色期和成熟期 T1 和 T2 处理胎座果糖含量显著高于 T3 处理。绿熟期 T1 处理胎座蔗糖含量最高,T3 处理最低,转色期 T3 处理胎座蔗糖含量显著高于 T1 和 T2 处理,而成熟期胎座蔗糖含量则以 T2 处理最高,T3 处理次之,T1 处理最低(表 6)。

不同水分条件对番茄果实不同发育阶段果肉和胎座酸组分含量的影响如表 7 所示。从表中可以看出,绿熟期后,随着番茄果实的逐步成熟,T2 处理番茄果肉酒石酸含量不断升高,而 T1 处理和 T3 处理呈波动变化;果肉苹果酸含量和草酸含量呈升高的趋势;T1 处理果肉抗坏血酸含量呈增加趋势,而 T2 和 T3 处理抗坏血酸含量呈减少趋势;T1 处理和 T3 处理果肉柠檬酸含量呈增加趋势,而 T2 处理呈现先增后减的特征。绿熟期 T3 处理果肉酒石酸含量、抗坏血酸含量、草酸含量和柠檬酸含量均最高,T2 处理次之,T1 处理最低,T1 处理和 T3 处理果肉苹果

酸含量显著高于 T2 处理。转色期 T2 处理果肉酒石酸含量、草酸含量和柠檬酸含量最高,T3 处理次之,T1 处理最低,T1 处理和 T3 处理的果肉苹果酸含量显著高于 T2 处理,T1 处理果肉抗坏血酸含量显著

高于 T2 和 T3 处理。成熟期 T2 处理果肉酒石酸含量、苹果酸含量、草酸含量显著高于 T1 和 T3 处理,T1 处理果肉抗坏血酸含量仍显著高于 T2 和 T3 处理,而 T3 处理柠檬酸含量显著高于 T2 和 T1 处理。

表 6 不同水分条件对番茄果实糖组分含量的影响

Table 6 Effects of different water conditions on the sugar content of tomato fruits

发育时期	处理	葡萄糖含量(μg/g)		果糖含量(μg/g)		蔗糖含量(μg/g)	
		果肉	胎座	果肉	胎座	果肉	胎座
绿熟期	T1	12.21±0.03f	7.02±0.06i	15.03±0.05d	7.76±0.03f	0.71±0.03d	2.28±0.04a
	T2	8.85±0.06i	8.18±0.04h	12.11±0.03f	7.27±0.04g	1.26±0.03b	1.39±0.04b
	T3	15.93±0.07b	9.07±0.03g	18.20±0.04b	10.81±0.04c	1.02±0.05c	0.91±0.03d
转色期	T1	13.29±0.02e	10.39±0.03f	15.43±0.04c	10.09±0.04d	1.56±0.04a	0.50±0.04e
	T2	10.22±0.06h	11.07±0.04e	11.21±0.03g	10.32±0.05d	1.18±0.03b	0.57±0.04e
	T3	15.70±0.03c	13.04±1.22c	14.41±0.04e	8.70±0.08e	1.19±0.04b	1.11±0.05cd
成熟期	T1	13.64±0.03d	13.90±0.04b	17.92±0.03b	12.54±0.03b	1.27±0.03b	0.62±0.03e
	T2	18.93±0.02a	18.64±0.03a	18.93±0.04a	15.83±0.04a	0.85±0.04d	1.15±0.03c
	T3	11.34±0.03g	11.36±0.06d	9.20±0.05h	7.61±0.04f	0.73±0.06d	0.89±0.04d

同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 7 不同水分条件对番茄果实酸组分含量的影响

Table 7 Effects of different water conditions on the content of acid components in tomato fruits

发育时期	处理	酒石酸含量(μg/g)		苹果酸含量(μg/g)		抗坏血酸含量(μg/g)		草酸含量(μg/g)		柠檬酸含量(μg/g)	
		果肉	胎座	果肉	胎座	果肉	胎座	果肉	胎座	果肉	胎座
绿熟期	T1	0.059i	0.103g	0.058f	0.096f	0.206f	0.315e	0.167i	0.337i	0.047i	0.054h
	T2	0.097g	0.133f	0.022g	0.059h	0.274d	0.371d	0.283h	0.537h	0.241f	0.230e
	T3	0.480a	0.141e	0.054f	0.068g	0.313c	0.445b	0.428f	0.842e	0.279e	0.382d
转色期	T1	0.115f	0.137ef	0.130d	0.219c	0.525b	0.388c	0.316g	0.648g	0.108h	0.094g
	T2	0.191d	0.271c	0.112e	0.127e	0.217e	0.188f	0.450d	0.762f	0.392b	0.232e
	T3	0.175e	0.156d	0.132d	0.235b	0.224e	0.108h	0.441e	1.046c	0.385c	0.461c
成熟期	T1	0.067h	0.078h	0.245b	0.156d	0.578a	0.594a	0.560c	0.899d	0.115g	0.129f
	T2	0.284b	0.525a	0.263a	0.247a	0.141g	0.190f	0.951a	1.518a	0.361d	0.586b
	T3	0.216c	0.373b	0.236c	0.102f	0.122h	0.165g	0.671b	1.383b	0.444a	0.691a

数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

绿熟期后,随着番茄果实的逐步成熟,T2 处理和 T3 处理番茄胎座酒石酸含量呈增加趋势,而 T1 处理呈先增后减的趋势;T2 处理胎座苹果酸含量呈增加趋势,而 T1 和 T3 处理呈先增后减的特征;T1 处理抗坏血酸含量呈不断增加趋势,而 T2 和 T3 处理呈先减少后稳定或增加的特征;3 个处理胎座草酸含量呈不断增加的趋势;T1 和 T3 处理柠檬酸含量呈不断增加趋势,而 T2 处理前期稳定后期增加。绿熟期 T3 处理胎座酒石酸含量、抗坏血酸含量、草酸含量和柠檬酸含量同样均最高,T2 处理次之,T1 处理最低,而 T1 处

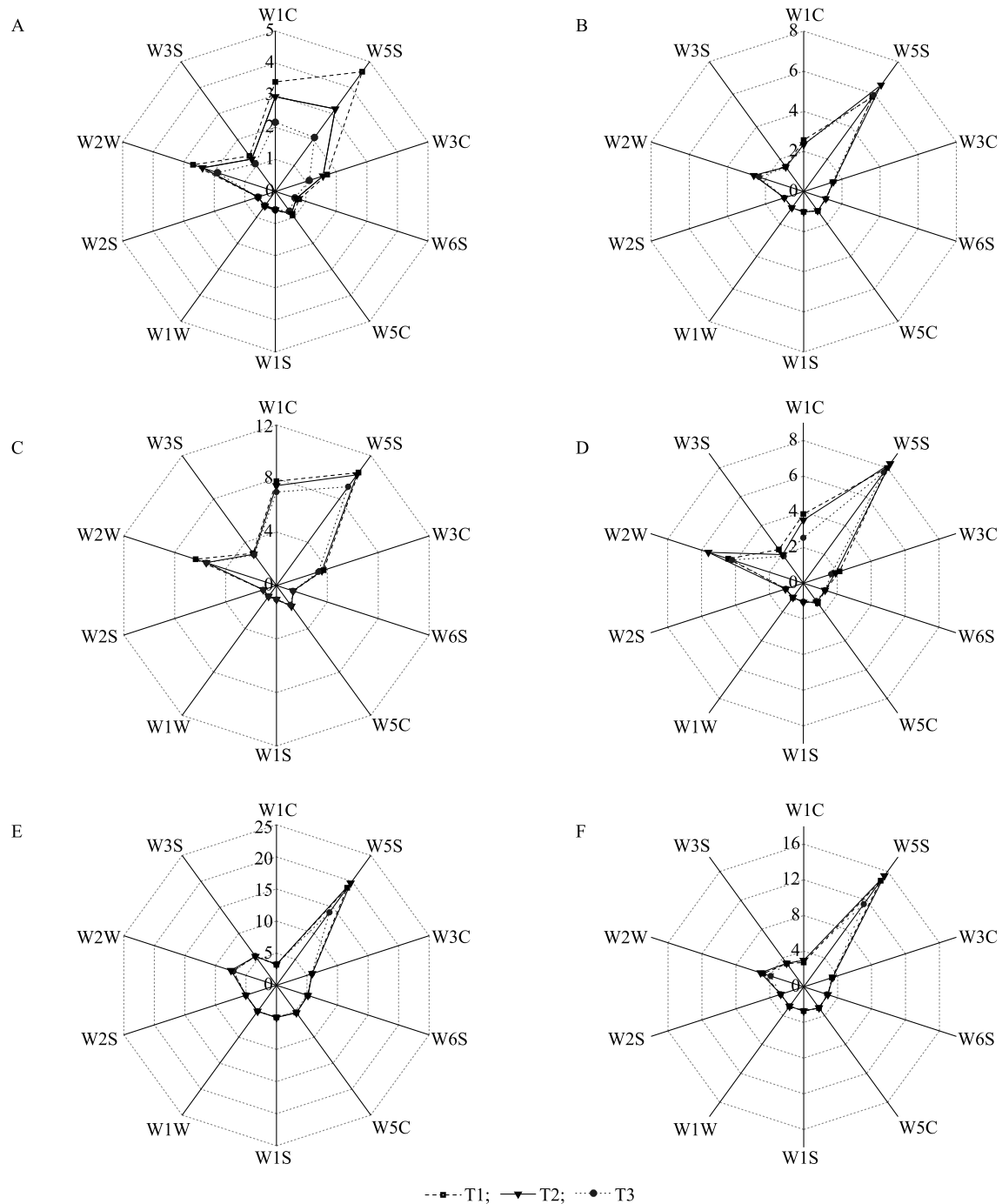
理胎座苹果酸含量显著高于 T2 处理和 T3 处理。转色期 T3 处理胎座苹果酸含量、草酸含量和柠檬酸含量最高,T2 处理的胎座酒石酸含量显著高于 T1 处理和 T3 处理,T1 处理胎座抗坏血酸含量显著高于 T2 和 T3 处理。成熟期 T2 处理胎座酒石酸含量、苹果酸含量、草酸含量显著高于 T1 和 T3 处理,T1 处理胎座抗坏血酸含量仍显著高于 T2 和 T3 处理,而 T3 处理胎座柠檬酸含量显著高于 T2 和 T1 处理。

2.5 水分条件对番茄果实挥发性物质的影响

不同发育阶段番茄果实果肉和胎座挥发性物质

电子鼻测定结果如图 1 所示。从图中可以看出,绿熟期番茄果肉 W5S 传感器响应值最高,其次是 W1C 和 W2W,且 3 种水分处理下果肉芳香物质含量与水分处理条件成正比(图 1A);转色期和成熟期各处理番茄果肉 W5S 传感器响应值均最高,其中

T1 处理与 T2 处理基本一致,均高于 T3 处理。此外,转色期和成熟期各处理番茄果肉 W2W 传感器亦有较高的响应值。上述结果表明,在番茄果实成熟中后期,充足的水分条件有助于果肉中氮氧化合物、芳香成分和有机硫化物等芳香物质合成。



A:绿熟期果肉;B:绿熟期胎座;C:转色期果肉;D:转色期胎座;E:成熟期果肉;F:成熟期胎座。

图1 不同水分条件对番茄果实挥发性物质的影响

Fig.1 Effects of different water conditions on volatile substances in tomato fruits

在番茄果实发育的 3 个时期,胎座芳香物质种类与番茄果肉的基本一致,氮氧化合物(W5S)、芳烃化合物和有机硫化物(W2W)传感器均有较高的响应值。T2 处理 W5S 传感器的响应值较高,T3 处理 W5S 传感器响应值相对较低。随着番茄果实的发育,各传感器的响应值均呈增加趋势,但增加幅度存在较大差异,其中,W5S 传感器的增加幅度最大。

3 讨论

土壤(或基质)水分状况可以直接影响作物的养分吸收、根系活力、物质分配、光合作用等过程,进而影响作物的产量和品质^[24-25]。水分利用效率是反映植物节水能力和适应逆境能力的重要指标^[26]。本试验中,当基质相对含水量保持在 70.1%~85.0% 时,番茄的单株产量和水分利用效率均保持较高的水平,说明该土壤水分含量有利于促进番茄光合作用、协调根冠比,进而提高番茄的产量和水分利用效率^[27]。

本试验发现,基质相对水分含量保持在田间最大持水量的 70.1%~85.0% 时,成熟期番茄果实硬度和色光值参数均较高,说明该处理生产的番茄果实有较好的外观品质,且有利于运输、储存、延长货架期、提高番茄商品价值。

滕林^[28]研究认为,当基质相对含水量为 80% 时,番茄果实的抗坏血酸含量、可溶性糖含量和有机酸含量均显著高于其他水分处理。刘杰等^[29]研究指出,在番茄果实发育过程中,有机酸含量呈先增加后减少的趋势,有机酸的快速积累和风味物质的形成主要在果实转色期,而可溶性蛋白质含量在果实发育过程中呈逐渐降低趋势,在完熟期达到最低值。本试验结果表明,成熟期相对水分含量 70.1%~85.0% 处理的番茄果实(果肉和胎座)可溶性糖含量和有机酸含量高于其他 2 个处理,而硝酸盐含量低于其他 2 个处理。因此,相对水分含量 70.1%~85.0% 的处理可以提升番茄果实的营养品质,这与刘杰等^[29]、王彦华等^[30]的研究结果相一致。

番茄果实中糖类物质是植株呼吸消耗和代谢的基础物质,其对果实甜度、有机酸、其他营养物质和芳香物质合成起着重要的作用^[31]。齐红岩等^[32]发现基质相对含水量是影响番茄果实甜度的

关键因素,较高的基质相对含水量会稀释果实内的糖分,降低果实甜度。本研究结果显示,成熟期相对含水量 70.1%~85.0% 处理的番茄果肉和胎座的果糖含量和葡萄糖含量及胎座的蔗糖含量均高于其他处理,这与岳东^[33]、齐红岩等^[34]的研究结果相一致,可能原因是相对含水量 70.1%~85.0% 的处理能增强番茄植株的光合能力及促进糖类物质的转化与代谢,进而提高糖类物质的累积量。

王蓉等^[35]研究发现,番茄果实的总酸含量在果实生长发育过程中呈下降趋势,而柠檬酸含量则随着番茄果实的发育而增加。本试验中,成熟期相对含水量 70.1%~85.0% 的番茄果肉和胎座酒石酸含量、苹果酸含量及草酸含量较高,柠檬酸含量和抗坏血酸含量中等,使得该处理下有机酸含量高于其他 2 个处理,进而导致番茄果实品质的提升。

番茄的芳香气味由多种挥发性物质组成,是风味的重要组成部分^[36]。电子鼻作为一种能够分析、识别和检测复杂嗅味和挥发性成分的人工嗅觉装置,可以通过吸附不同的气味分子并将感知的信号转化成可测量的物理信号来对气味进行综合信息的评价^[37]。从番茄果实中检测出的 400 多种挥发性物质中只有 20~30 种影响番茄香气,这些挥发性物质只有 16 种阈值浓度较高,属于番茄的主要特征香气物质^[38-40]。本试验发现,电子鼻响应值较高的 3 个传感器分别响应芳香成分、氮氧化合物、芳香成分和有机化合物。随着水分含量的降低,3 个传感器对绿熟期、转色期及成熟期的番茄胎座和成熟期番茄果肉的响应值呈先上升后下降趋势,且果肉中的芳香物质含量高于胎座,即相对含水量 70.1%~85.0% 处理的 3 类物质响应值最高,说明该水平条件有利于番茄芳香物质的合成及番茄风味品质的提高。

4 结论

基质相对含水量 70.1%~85.0% 处理能够增加番茄产量、水分利用效率,提升番茄外观品质和营养品质,使果实硬度、色光值、抗坏血酸含量、可溶性糖含量和有机酸含量均保持较高水平,而硝酸盐含量较低;W5S(氮氧化合物灵敏型)、W1C(芳烃化合物灵敏型)和 W2W(芳烃化合物和有机硫化物灵敏型)3 个传感器对番茄果肉和胎座的响应值较高。

综上,基质相对含水量70.1%~85.0%是番茄栽培适宜的水分条件,有利于实现高产,提高番茄的营养和风味品质。

参考文献:

- [1] 许健,张芮,黄彩霞,等. 设施葡萄不同生育期水分胁迫对产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报,2019,24(4):43-51.
- [2] 张芮,王旺田,吴玉霞,等. 水分胁迫度及时期对设施延迟栽培葡萄耗水和产量的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(1):155-161.
- [3] 马吉林,郝佳玉,姚旭东,等. 喷施不同钙硼肥对口感型番茄裂果和品质的影响[J]. 北京农学院学报,2023,38(3):65-69.
- [4] LIU H, LI H H, NING H F, et al. Optimizing irrigation frequency and amount to balance yield, fruit quality and water use efficiency of greenhouse tomato[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 226:105787.
- [5] 万书勤,闫振坤,康跃虎,等. 温室滴灌土壤基质势调控对番茄生长、品质和耗水的影响[J]. 灌溉排水学报,2019,38(7):1-9.
- [6] LI Y, SUN Y, LIAO S, et al. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 186:139-146.
- [7] PULUPOL L U, BEHBOUNDIAN M H, FISHER K J. Growth, yield, and postharvest attributes of glasshouse tomatoes produced under deficit irrigation[J]. *HortScience*, 1996, 31(6):926-929.
- [8] 李思. 有机液肥配施对番茄生长和果实风味品质的影响[D]. 银川:宁夏大学,2021.
- [9] TIEMAN D, BLISS P, MCINTYRE L M, et al. The chemical interactions underlying tomato flavor preferences[J]. *Current Biology*, 2012, 22(11):1035-1039.
- [10] OZCAN G, BARRINGER S. Effect of enzymes on strawberry volatiles during storage, at different ripeness level, in different cultivars, and during eating[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(2):C324-C333.
- [11] ASIF M H, LAKHWANI D, PATHAK S, et al. Transcriptome analysis of ripe and unripe fruit tissue of banana identifies major metabolic networks involved in fruit ripening process[J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14(1):1-15.
- [12] GÓMEZ E, LEDBETTER C A. Development of volatile compounds during fruit maturation: characterization of apricot and plum× apricot hybrids[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1997, 74(4):541-546.
- [13] 唐晓伟,刘明池,何洪巨,等. 新鲜番茄风味组分研究[J]. 食品科学,2007,28(2):28-30.
- [14] 王同林,叶红霞,郑积荣,等. 番茄果实中主要风味物质研究进展[J]. 浙江农业学报,2020,32(8):1513-1522.
- [15] SIMKIN A J, SCHWARTZ S H, AULDRIDGE M, et al. The tomato carotenoid cleavage dioxygenase 1 genes contribute to the formation of the flavor volatiles β -ionone, pseudoionone, and geranylacetone[J]. *The Plant Journal*, 2004, 40(6):882-892.
- [16] VEIT-KÖHLER U, KRUMBEIN A, KOSEGARTEN H. Effect of different water supply on plant growth and fruit quality of *Lycopersicon esculentum*[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1999, 162(6):583-588.
- [17] 李琨,郁继华,颜建明,等. 不同灌水下限对日光温室有机生态型无土栽培辣椒生长指标的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2011,46(2):41-44,52.
- [18] 杨鑫. CO₂浓度倍增下水分调控对番茄生理、产量及品质的影响机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [19] 张健利,王振华,宗睿,等. 水气互作对滴灌加工番茄生长及品质的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(2):453-461.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 岳宗伟,李嘉骁,孙向阳,等. 化肥有机肥配施对土壤性质、樱桃果实品质和产量的影响[J]. 浙江农业学报,2023,35(9):1-11.
- [23] 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.
- [24] 高新昊,张志斌,郭世荣,等. 日光温室番茄越夏栽培滴灌指标的研究[J]. 中国蔬菜,2004(6):11-13.
- [25] 牛帅科,魏建国,陈展,等. 葡萄不同生育期水分胁迫对生理指标的影响[J]. 河北果树,2019(4):18-20,23.
- [26] 朱军涛,李向义,张希明,等. 塔克拉玛干沙漠南缘3种荒漠植物光合特性的比较[J]. 干旱区地理,2012,35(1):171-176.
- [27] 夏秀波,于贤昌,高俊杰. 水分对有机基质栽培番茄生理特性、品质及产量的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(12):2710-2714.
- [28] 滕林. 番茄果实品质形成特征及其与环境关系的模拟研究[J]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [29] 刘杰,陈思,周振江,等. 不同生育阶段土壤含水率对番茄果实维生素C含量的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(8):72-80.
- [30] 王彦华,赵婷婷,李会佳,等. 番茄果实成熟时期维生素C含量的变化[J]. 湖北农业科学,2014,53(19):4641-4643,4646.
- [31] 肖玉明,卢晓鹏,黄成能,等. 水分胁迫对温州蜜柑果实品质及柠檬酸代谢相关基因表达的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2014,40(3):281-287.
- [32] 齐红岩,李天来,邹琳娜,等. 番茄果实不同发育阶段糖分组成和含量变化的研究初报[J]. 沈阳农业大学学报,2001,32(5):346-348.
- [33] 岳冬. 番茄果实主要风味特征成分测定及品质形成机理研究[J]. 南京:南京农业大学,2015.
- [34] 齐红岩,关小川,李岩,等. 嫁接对薄皮甜瓜果皮和果肉中主要酯类、游离氨基酸及酯类合成相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(9):1895-1903.

- [35] 王 蓉,田 园,杨 柳,等. 番茄果实不同发育时期有机酸组分及含量分析[J]. 中国蔬菜,2017(10):58-62.
- [36] BECKLES D M, HONG N, STAMOVA L, et al. Biochemical factors contributing to tomato fruit sugar content; a review[J]. Fruits, 2012,67(1):49-64.
- [37] 祝佳婧. 电子鼻传感器技术的研制进展[J]. 北京生物医学工程,2002,21(4):298-301.
- [38] RILEY J C, WILLEMOT C, THOMPSON J E. Lipxygenase and hydroperoxide lyase activities in ripening tomato fruit[J]. Postharvest Biology and Technology,1996,7(1/2):97-107.
- [39] KLEE H J. Improving the flavor of fresh fruits:genomics,biochemistry,and biotechnology[J]. New Phytologist,2010,187(1):44-56.
- [40] ZHANG J, ZHAO J T, XU Y, et al. Genome-wide association mapping for tomato volatiles positively contributing to tomato flavor[J]. Frontiers in Plant Science,2015,6:1042.

(责任编辑:石春林)