

外源亚精胺对盐碱胁迫下番茄果实品质及挥发性成分的影响

徐炜南¹, 苏春杰¹, 胡立盼¹, 张 静^{1,2}, 胡晓辉^{1,*}

(1.西北农林科技大学园艺学院, 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学, 园艺实验教学中心, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 本实验以“金棚朝冠”番茄为试材, 研究外源喷施0.25 mmol/L亚精胺(spermidine, Spd)对75 mmol/L复合盐碱溶液(NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃、Na₂CO₃浓度为1:9:9:1, pH 8.6)胁迫下番茄果实产量、品质的影响, 利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术测定番茄果实挥发性物质成分和相对含量。实验分4个组: 正常营养液浇灌+0 mmol/L Spd (CK组); 正常营养液浇灌+0.25 mmol/L Spd (CS组); 75 mmol/L复合盐碱溶液+0 mmol/L Spd (S组); 75 mmol/L复合盐碱溶液+0.25 mmol/L Spd (SS组)。结果表明: 盐碱胁迫条件下, 喷施Spd可以显著提高番茄果实中VC、可溶性糖和番茄红素含量($P<0.05$), 降低果实中有机酸和硝酸盐含量($P<0.05$), 提高果实品质; 同时显著提高了番茄的单株产量与单果质量($P<0.05$), 保证番茄的高产。盐碱胁迫减少了果实挥发性物质数量和特征芳香物质的相对含量, 喷施Spd缓解了胁迫对挥发性物质的相对含量和数量的影响。因此, 盐碱胁迫条件下, 喷施Spd可以提高番茄果实品质、增强果香、增加产量、降低不利因素对番茄果实品质和产量的影响。

关键词: 盐碱胁迫; 亚精胺; 番茄; 品质; 挥发性物质

Effects of Exogenous Spermidine on Tomato Fruit Quality and Volatile Compounds under Salinity-alkalinity Stress

XU Weinan¹, SU Chunjie¹, HU Lipan¹, ZHANG Jing^{1,2}, HU Xiaohui^{1,*}

(1. Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwestern China, Ministry of Agriculture, College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Experimental Teaching Demonstration Center of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The study was designed to investigate the effects of spraying exogenous spermidine (0.25 mmol/L) on fruit yield, quality and volatile compounds in tomato cultivar Jinpengchaoguan. Plants were exposed to 75 mmol/L salinity-alkalinity stress $c(\text{NaCl}):c(\text{Na}_2\text{SO}_4):c(\text{NaHCO}_3):c(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 1:9:9:1$. Four treatments were performed: 0 mmol/L salinity-alkalinity plus 0 mmol/L Spd (CK), 0 mmol/L salinity-alkalinity plus 0.25 mmol/L Spd (CS), 75 mmol/L salinity-alkalinity plus 0 mmol/L Spd (S), and 75 mmol/L salinity-alkalinity plus 0.25 mmol/L Spd (SS). The results showed that applying 0.25 mmol/L Spd (SS) significantly improved fruit VC ($P < 0.05$), soluble sugar and lycopene contents and yields ($P < 0.05$). Under salinity-alkalinity stress the organic acid and nitrate contents were reduced significantly ($P < 0.05$). Headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS) was used to analyze the volatile substances of tomato fruits in different treatments. Our results illustrated that salinity-alkalinity stress could decrease the total number of volatile substances and the relative contents of characteristic aroma compounds, and this effect could be mitigated by spraying Spd. Therefore, spraying Spd can reduce the adverse effects caused by salinity-alkalinity stress, resulting in improved fruit quality and aroma, and increased fruit yield.

Key words: salinity-alkalinity stress; spermidine; tomato; quality; volatile compounds

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715014

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2017) 15-0082-07

引文格式:

徐炜南, 苏春杰, 胡立盼, 等. 外源亚精胺对盐碱胁迫下番茄果实品质及挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 82-88. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715014. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2016-07-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD0201005)

作者简介: 徐炜南(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为设施园艺植物生理生态。E-mail: xuweinan0817@163.com

*通信作者: 胡晓辉(1977—), 女, 教授, 博士, 研究方向为设施园艺植物生理生态。E-mail: hxxh1977@163.com

XU Weinan, SU Chunjie, HU Lipan, et al. Effects of exogenous spermidine on tomato fruit quality and volatile compounds under salinity-alkalinity stress[J]. Food Science, 2017, 38(15): 82-88. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715014. <http://www.spkx.net.cn>

土壤盐碱化是影响生态环境、制约农业生产的重要因素之一,其作用机理及调控机制已成为全球性的研究热点。我国盐碱土主要分布在西北、华北及东北等地区。土壤盐碱化对作物造成离子胁迫、渗透胁迫、高pH值胁迫等多重抑制效应,严重影响作物的产量、品质和效益^[1-2]。番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)在我国种植广泛,有着独特的风味品质^[3],是人们日常食用的一种水果型蔬菜。盐碱胁迫显著降低了番茄光合效率,严重抑制番茄生长、有机氮的矿化和固定^[4],严重影响了番茄品质与产量。

多胺(腐胺、精胺和亚精胺等)是阳离子特性的化合物,在调节植物生长发育、延缓衰老、增强生物和非生物胁迫抗性等方面发挥重要作用^[5]。外源喷施亚精胺(spermidine, Spd)能够缓解盐碱胁迫下对番茄幼苗的生长、光合作用、光合器官膜结构的稳定性等方面的影响^[6]。研究表明,盐胁迫下施用外源褪黑素可以显著提高番茄果实中可溶性糖、可溶性固形物、VC、 β -胡萝卜素含量,降低果实中有机酸和硝酸盐含量并增加了番茄果实中挥发性物质的含量和数量^[7],但关于盐碱胁迫下喷施Spd对番茄的产量和品质,特别是对果实挥发性物质成分影响的研究却鲜有报道。因此,本实验以番茄“金棚朝冠”为试材,通过叶面喷施Spd,利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)技术,探究盐碱胁迫下,喷施Spd对番茄产量、果实品质和挥发性物质成分的影响,为实际生产中利用Spd来缓解逆境胁迫,保证西北地区番茄优质生产提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验在陕西杨凌西北农林科技大学南校区园艺场进行。

供试番茄品种为“金棚朝冠”,由杨凌农城种业提供。采用穴盘育苗,幼苗第3片真叶充分展开时定植于塑料盆中(直径30 cm,高25 cm)。

复合盐碱溶液:浓度为75 mmol/L(NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 浓度比为1:9:9:1, pH 8.6)。采用浇灌方式,亚精胺溶液通过叶面喷施。实验设置4组:正常营养液浇灌+叶面喷施0 mmol/L Spd(CK组);正常营养液浇灌+叶面喷施0.25 mmol/L Spd(CS组);75 mmol/L复合盐碱溶液浇灌+叶面喷施

0 mmol/L Spd(S组);75 mmol/L复合盐碱溶液浇灌+叶面喷施0.25 mmol/L Spd(SS组)。各组番茄在开花期开始进行复合盐碱溶液处理和叶片喷施Spd处理,在盐碱胁迫条件下对相应处理植株每隔6 d进行叶面喷施0.25 mmol/L Spd处理。每个组重复3次,每个重复25盆,每盆定植1株,株行距为40 cm×70 cm,田间随机区组。植株采取单干整枝,每株留3穗果,病虫害防治及植株调整同一般管理,在果实成熟期(花后45 d左右)取生长部位和果实成熟程度相似的果实2 000 g进行品质指标测定。

实验所用试剂均为分析纯,由杨凌晓白化玻站提供。

1.2 仪器与设备

UV-1800型紫外分光光度计 日本岛津公司;SL3001N型电子天平、ISQ GC-MS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、SPME头(聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS), 75 μm) 美国Supelco公司;匀浆机 荷兰飞利浦公司。

1.3 方法

1.3.1 番茄果实品质测定

可溶性总糖含量:蒽酮比色法测定^[8];VC含量:钼蓝比色法测定^[8];有机酸含量:酸碱滴定法测定^[8];硝态氮含量:硫酸-水杨酸法测定^[9];番茄果实硬度:果实硬度计测定;番茄红素含量:参考张连富等^[10]的方法测定,以体积分数2%的二氯甲烷为溶剂,在502 nm波长处检测。

1.3.2 番茄单果质量及单株产量的测定

番茄果实采收期开始到结束,测定各个组对应的单株单果质量和单株产量,对各组达到商品成熟度的正常果实,用百分之一电子天平称量单果质量。番茄单株产量为每个组各株产量的累积值与株数的比值。

1.3.3 果实挥发性成分测定

1.3.3.1 顶空SPME取样

各组选取大小和成熟度一致的果实9个,每个果实随机切去1/3,打成果实匀浆称取15 g于40 mL样品瓶中,加入3 g无水氯化钠,立即用锡箔纸密封瓶口并旋紧瓶盖,置于45 $^{\circ}\text{C}$ 恒温磁力搅拌器上,磁力搅拌速率为300 r/min,平衡10 min,然后顶空SPME吸附30 min,立即插入色谱气化室,250 $^{\circ}\text{C}$ 解吸3 min,进行CG-MS分析^[11-13]。每个组3次重复,取其平均值。

1.3.3.2 GC-MS分析

参照常培培^[14]、杨明惠^[15]等方法,对色谱条件略做修改。

色谱条件: HP-INNOWAX弹性石英毛细管柱 (30 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; 载气为高纯氮气(纯度99.999%), 流速为1.0 mL/min。

质谱条件: 电离方式为电子轰击离子源; 电离能量70 eV; 离子源温度250 ℃; 选择性离子检测(selected ion monitor, SIM)扫描, 质量扫描范围35~500 u。

1.3.3.3 果实挥发性定性及定量分析

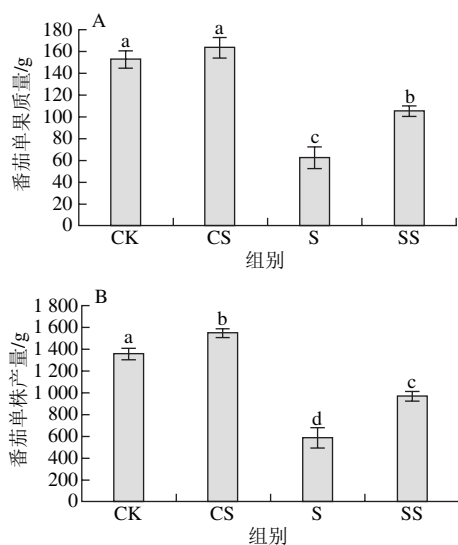
样品经过GC进行分离后, 形成不同的色谱峰。运用计算机检索并与图谱库(NIST 2011)的标准质谱图对照, 参考正反匹配度以及相关文献^[16-19], 当匹配度和纯度大于800(最大值1 000)的鉴定结果才予以报道。各组分质谱经NIST/WILEY(National Institute of Standards and Technology/WILEY for mass spectra of physiologically active compounds)检索及资料分析, 再结合有关文献进行人工图谱分析以确定各化学成分^[14,19-20]。

1.4 数据统计分析

利用SAS 9.1软件进行方差分析, 采用Duncan多重范围检验进行显著性分析, 并用Excel 2010软件进行绘图。数据表示为 $\bar{x} \pm s$ 。

2 结果与分析

2.1 外源Spd对盐碱胁迫下番茄单果质量及单株产量的影响



不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)。

图1 外源Spd对盐碱胁迫下番茄单果质量(A)及番茄单株产量(B)的影响

Fig. 1 Effect of exogenous spermidine on tomato single fruit weight (A) and average plant yield (B) under salinity-alkalinity stress

由图1可知, 盐碱胁迫下番茄单果质量和单株产量均显著降低 ($P < 0.05$), S组较CK组番茄单果质量和单株产量分别降低了58.7%和56.8%; 通过喷施Spd, SS组的单果质量和单株产量较S组分别提高了66.7%和64.4%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$)。非胁迫条件下, 喷施Spd对番茄单果质量无明显影响, 但CS组的单株产量较CK组显著增加了14.3% ($P < 0.05$)。喷施Spd可以缓解盐碱胁迫对番茄单果质量和单株产量的影响。

2.2 外源Spd对盐碱胁迫下番茄果实品质指标的影响

表1 外源Spd对盐碱胁迫下番茄品质指标的影响 ($n=3$)

Table 1 Effect of exogenous spermidine on tomato fruit quality under salinity-alkalinity stress ($n=3$)

组别	可溶性糖含量/%	有机酸含量/%	糖酸比	VC含量/(mg/100 g)	番茄红素含量/(μg/g)	硝态氮含量/(mg/kg)	果实硬度
CK	3.42±0.22 ^a	0.37±0.03 ^b	9.32±0.28 ^b	19.36±0.87 ^c	30.02±1.06 ^c	16.06±1.84 ^b	4.91±0.15 ^c
CS	3.78±0.38 ^a	0.42±0.04 ^{ab}	9.00±0.14 ^b	23.95±1.59 ^c	42.22±1.34 ^b	16.35±1.29 ^b	4.74±0.07 ^c
S	4.93±0.30 ^a	0.44±0.03 ^{ab}	11.20±0.40 ^a	40.15±1.91 ^b	56.21±2.97 ^a	24.98±1.70 ^a	9.56±0.36 ^a
SS	4.57±0.29 ^{ab}	0.50±0.02 ^a	9.16±0.20 ^b	49.40±2.84 ^a	53.17±3.06 ^a	24.56±2.27 ^a	7.15±0.31 ^b

注 VC含量和番茄红素含量以鲜果质量计。同列肩标字母不同表示有显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

由表1可知, 除S组番茄果实中有机酸含量较CK组相比差异不显著外, 其余指标均达显著性差异 ($P < 0.05$)。S组与SS组中可溶性糖含量较CK组分别提高了44.2%、33.6%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$); SS组有机酸含量较CK组显著提高了35.1%; 此外, S组较CK组番茄果实糖酸比显著提高了20.2%。非胁迫条件下, 喷施Spd对番茄果实中可溶性糖、有机酸的质量分数和糖酸比均无显著影响。盐碱胁迫提高了番茄果实的VC含量, S组中番茄果实VC含量较CK组高出107.4%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$); 胁迫条件下喷施Spd进一步提高了果实中VC的含量, 较S组显著增加了23.0%。在非胁迫条件下, 喷施Spd对番茄果实的VC含量影响较小。与CK组相比, 盐碱胁迫显著提高了果实中番茄红素的含量, 其中S、SS组较CK组分别提高了87.2%、77.1%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$), 胁迫条件下喷施Spd对番茄红素含量的影响较小。非胁迫条件下, 喷施Spd, CS组较CK组番茄红素含量显著提高了40.6% ($P < 0.05$)。

盐碱胁迫还显著提高了果实中硝态氮含量, S组与SS组的番茄果实硝态氮含量较CK组分别增加了55.5%、52.9%, 达差异显著水平 ($P < 0.05$); 喷施Spd对胁迫下番茄硝态氮含量无显著性影响。此外, 盐碱胁迫影响了番茄的果实硬度, S组较CK组果实硬度显著增加了94.7%, 喷施Spd, SS组较S组番茄果实硬度降低了25.2%, 达差异显著水平 ($P < 0.05$)。非胁迫条件下, 喷施Spd对番茄果实硬度无明显影响。盐碱胁迫下, 喷施Spd有效改善了番茄部分果实品质, 提高番茄抗氧化能力和耐逆性。

2.3 外源Spd对盐碱胁迫下番茄果实挥发性成分的影响

表 2 外源Spd对盐碱胁迫下番茄果实挥发性成分相对含量的影响 (n=3)
Table 2 Effect of exogenous Spd on semi-quantitative analysis of volatile components in tomato fruits under salinity-alkalinity stress (n = 3)

序号	挥发性物质成分	保留时间/min	正匹配度	反匹配度	相对含量/%			
					CK组	CS组	S组	SS组
1	3-甲基丁醛	2.59	851	871	0.18	0.26	0.13	0.21
2	1-戊烯-3-酮	2.96	859	872	0.51	0.56	3.87	2.26
3	戊醛	3.14	871	872	0.18	0.19	—	—
4	异戊醛	3.76	866	876	0.04	0.06	—	0.08
5	3-甲基丁醇	3.87	751	876	0.09	0.15	—	0.20
6	2-甲基丁醇	3.94	813	881	0.59	0.54	—	—
7	3,4-二甲基-1-己烯	4.01	869	885	0.45	—	—	—
8	反-2-戊烯醛	4.30	863	886	0.21	—	—	0.89
9	3-甲基-2-丁烯醛	4.32	772	886	—	0.21	—	—
10	正戊醇	4.69	866	886	0.29	0.25	0.87	0.67
11	3-己烯醛	5.10	768	887	—	0.09	—	—
12	正己醛	5.52	574	889	31.08	33.26	16.30	19.83
13	反-2-己烯醛	6.66	806	893	0.38	—	0.43	0.70
14	顺-2-己烯醛	7.01	726	893	24.06	24.50	38.26	35.71
15	六氢化1,3-苯并二氧戊环-2-酮	7.20	893	893	—	0.01	—	—
16	顺-2-壬烯醛	7.21	856	895	—	—	0.03	—
17	反-2-己烯-1-醇	7.30	837	896	0.13	—	—	0.18
18	正己醇	7.42	871	898	2.53	1.77	1.36	0.96
19	3-甲基庚基乙酸	7.64	878	898	0.17	—	—	0.06
20	顺-4-庚烯醛	7.81	762	899	—	—	0.04	0.03
21	4-甲基-2-己酮	7.97	858	900	0.05	—	—	0.05
22	2-乙基-4-戊烯醛	8.22	890	903	—	0.02	—	—
23	1-硝基戊烷	8.39	899	903	0.89	—	—	—
24	反,反-2,4-己二烯醛	8.66	875	905	—	—	—	0.21
25	1-乙基-5-甲基环戊烯	9.15	851	905	—	—	—	0.04
26	顺-2-庚烯醛	9.76	672	905	1.50	2.16	2.43	3.10
27	顺-2-壬烯醛	9.85	812	905	—	—	—	0.01
28	苯甲醛	10.28	913	913	0.72	—	1.09	0.67
29	5-乙基-2 (5H)-呋喃酮	10.47	910	913	—	0.04	—	—
30	1-辛烯-3-酮	10.74	909	918	0.35	0.32	0.40	0.40
31	2,4-辛二烯	10.80	918	918	—	—	1.02	0.96
32	1-辛烯-3-醇	10.87	835	922	0.01	—	—	—
33	6-甲基-5-庚烯-2-酮	11.02	922	923	6.10	5.91	4.40	5.36
34	2-戊基呋喃	11.14	868	924	0.45	0.45	0.77	0.99
35	反,反-2,4-庚二烯醛	11.26	648	924	—	—	0.60	—
36	6-甲基-5-庚烯-2-醇	11.27	924	925	0.38	0.34	0.21	0.24
37	R-2-辛醇	11.55	889	926	2.22	1.55	—	1.05
38	3-乙基-1,4-己二烯	11.87	860	929	0.37	0.36	—	0.62
39	苯乙醛	12.24	905	913	—	—	0.22	0.26
40	4-甲基-3-环己烯-1-甲醛	12.41	757	915	0.22	0.24	—	0.61
41	2-异丁基噻唑	12.53	840	916	3.57	3.33	4.26	3.91
42	顺-2,6-二甲基-2-反式-6-辛二烯	13.08	900	918	0.23	—	—	0.18
43	2-十一炔	13.21	917	919	—	—	—	0.08
44	反-2-辛烯醛	13.32	919	920	1.81	2.04	4.24	3.91
45	反-2-辛烯-1-醇	13.60	917	920	—	—	—	0.13
46	2-甲氧基苯酚	14.15	923	924	0.19	0.11	0.25	0.19
47	芳樟醇	14.60	899	927	0.16	—	—	0.10
48	壬醛	14.73	753	927	0.93	—	0.55	0.88
49	2,4-二甲基环己醇	14.90	824	929	0.01	—	—	—
50	2-亚丙基环丁烯	15.01	928	932	—	1.12	—	0.23
51	苯乙醇	15.02	843	933	0.49	—	—	—
52	2-苄基(苯甲基)异氰化	15.09	921	935	—	—	0.42	0.28

续表2

序号	挥发性物质成分	保留时间/min	正匹配度	反匹配度	相对含量/%			
					CK组	CS组	S组	SS组
53	反,顺-2,6-壬二烯醛	16.20	941	942	0.01	—	0.02	0.02
54	正辛酸	16.28	926	943	—	—	0.17	—
55	顺-壬烯醛	16.40	800	943	0.24	0.24	0.17	0.20
56	正癸醛	16.70	927	944	0.59	0.91	0.44	0.42
57	1-甲基-4-(1-甲基乙基)环己醇	16.95	792	948	—	0.09	—	—
58	水杨酸甲酯	17.38	894	950	4.19	0.72	—	0.70
59	β -环柠檬醛	18.13	904	956	0.35	0.31	—	0.24
60	3-甲基-3-(4-甲基-3-戊烯基)缩水甘油醛	18.46	804	959	0.15	0.10	—	0.11
61	顺-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	18.67	738	883	0.33	0.32	—	0.28
62	阿斯利多	18.97	807	884	—	0.04	—	0.03
63	反-2-癸烯醛	19.34	876	884	—	0.16	0.08	0.11
64	反-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	19.50	844	885	0.49	0.60	0.53	0.61
65	1-(苯基)-2-硝基乙烷	19.70	763	885	—	—	0.63	0.41
66	2,4-癸二烯醛	20.26	664	886	0.29	0.42	1.99	1.88
67	十一醛	20.60	885	886	0.08	0.06	—	0.04
68	2-甲氧基-3-(2-丙基)基苯酚	21.79	877	887	—	—	—	0.06
69	顺-2-甲氧基-4-(1-丙基)基苯酚	21.81	750	891	—	2.51	—	—
70	2-十一烯醛	22.13	835	892	0.12	0.20	0.04	0.07
71	癸酸乙酯	22.20	669	893	—	—	0.06	0.04
72	六氢假紫罗酮	23.10	896	896	0.01	0.01	—	0.01
73	十二醛	23.29	888	896	0.05	—	0.04	0.04
74	4-(2,6,6-三甲基-2-环己烯基)-3-丁烯-2-酮	23.62	761	898	0.03	0.03	0.04	0.04
75	香叶基丙酮	23.77	876	900	4.96	3.76	2.41	3.47
76	乙位紫罗兰酮	25.02	817	900	—	—	—	0.15
77	β -紫罗酮	25.05	769	901	0.35	0.22	—	—
78	4[2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4,1,0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮	25.13	901	901	0.08	0.04	0.02	0.03
79	6-甲基十八烷	25.56	855	901	—	0.09	—	0.02
80	反,反-6,10-二甲基-3,5,9-十一三烯-2-酮	27.48	898	902	0.04	0.06	—	0.02
81	月桂酸乙酯	27.67	895	903	—	0.34	—	—
82	2,6,10-三甲基十四烷	27.81	814	903	0.03	0.01	0.07	—
83	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛	30.38	899	907	—	0.91	—	—
84	新植二烯	31.40	907	907	0.07	—	—	—
85	植酮	31.47	904	908	0.05	0.02	0.08	0.02
86	3,7,11,15-四甲基己烯-1-醇	31.93	833	908	0.05	—	—	—
87	法尼基丙酮	32.31	909	909	0.11	0.11	0.06	0.05
88	雌二醇	32.59	900	910	—	—	0.03	—
89	棕榈酸	32.87	892	911	0.14	—	0.25	—
90	十六酸乙酯	33.21	906	913	0.03	0.01	0.08	0.03
总计					94.40	92.15	89.33	95.33

注：— 未检出。表4同。

由表2可知，4个组番茄果实中共检测出90种挥发性物质，其中醛类、烃类、醇类、酮类、酯类物质分别有33、9、16、14、4种，此外还检测出14种其他物质。CK、CS、S、SS组检测出的总挥发性物质的相对含量分别为94.40%、92.15%、89.33%和95.33%。表2可知，CK、CS、S、SS组分别检测出60、54、43、65种挥发性物质，S组比CK组少17种挥发性物质，喷施Spd增加了盐碱胁迫下果实挥发性物质的种类，SS组较CK、S组分别增加了5种和22种挥发性物质。各组番茄果实的挥发性物质种类和含量最多的均为醛类，酮类其次。

由表3可知，各组含有25种的共有挥发性物质，分别为：醛类10种、醇类3种、酮类8种、酯类1种和3种

其他物质。此外，各组共有物质总相对含量分别为：CK组80.01%、CS组81.61%、S组83.59%和SS组84.55%。4组除烃类物质外，各类别挥发性物质均包含多种共有挥发性物质。各组共有挥发性物质类别的相对含量由大到小排序为：醛类、酮类、其他类、醇类、酯类、烃类。

表3 外源Spd对盐碱胁迫下番茄果实4个组共有的各类挥发性成分的影响

Table 3 Effect of exogenous Spd on relative contents of common volatile components in four treatments under salinity-alkalinity stress

类别	种数	相对含量/%			
		CK组	CS组	S组	SS组
醛类	10	60.37	64.60	64.53	65.94
烃类	0	0.00	0.00	0.00	0.00
醇类	3	3.20	2.37	2.44	1.87
酮类	8	12.19	10.75	11.27	11.62
酯类	1	0.03	0.01	0.08	0.03
其他	3	4.21	3.89	5.28	5.09
总计	25	80.01	81.61	83.59	84.55

2.4 外源Spd对盐碱胁迫下番茄果实的特征效应化化合物的影响

表4 外源Spd对盐碱胁迫下番茄果实的特征香气成分及相对含量的影响
Table 4 Effect of exogenous Spd on relative contents of characteristic aroma components in tomato fruits under salinity-alkalinity stress

风味	挥发物质成分	相对含量/%			
		CK组	CS组	S组	SS组
苹果香	3-甲基丁醛	0.18	0.26	0.13	0.21
杏仁香	3-甲基丁醇	0.09	0.15	—	0.20
果香	3-己烯醛	—	0.09	—	—
果香	6-甲基-5-庚烯-2-酮	6.10	5.91	4.40	5.36
绿苹果香	2-己烯醛	0.38	—	0.43	0.70
	果香味含量总计	6.75	6.41	4.96	6.47
青草香味	正己醛	31.08	33.26	16.30	19.83
绿叶香	2-异丁基噻唑	3.57	3.33	4.26	3.91
冬青叶香	水杨酸甲酯	4.19	0.72	—	0.70
	青香味含量总计	38.84	37.31	20.57	24.44
玉簪花香	苯乙醛	—	—	0.22	0.26
玫瑰香气	苯乙醇	0.49	—	—	—
桂花香	β-紫罗酮	0.35	0.22	—	—
	花香味含量总计	0.84	0.22	0.22	0.26
刺激性气味	1-戊烯-3-酮	0.51	0.56	3.87	2.26
	特征香气含量总计	46.94	44.50	29.62	33.43

研究表明，番茄果实中含有16种特征效应化合物，本实验由于种植品种和方式的差异，各组共检测出12种番茄特征效应化合物（表4），CK、CS、S、SS组分别含有10、9、7、9种特征效应化合物，对检测出的特征效应化合物的香气类型进行分类可分为“果香型”、“青香型”、“花香型”3类，其中果香、青香、花香型特征效应化合物分别含有5、3、3种，还包含1种刺激性挥发性物质：1-戊烯-3-酮。盐碱胁迫下，S组与SS组番茄果实中均未检测出3-己烯醛、苯乙醇和β-紫罗酮；此外，S组

的特征香气化合物的相对含量较CK组减少了17.32%。喷施Spd，SS组除2-异丁基噻唑和1-戊烯-3-酮的相对含量下降外，其余特征效应化合物的相对含量较S组均有不同程度的提高，总的相对含量增加了3.81%，同时增加了特征效应化合物的种类。4组包含5种共有特征芳香化合物分别为：3-甲基丁醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、正己醛、2-异丁基噻唑、1-戊烯-3-酮。盐碱胁迫减少了番茄特征效应化合物的数目和相对含量，通过喷施Spd可以缓解盐碱胁迫对番茄特征效应化合物相对含量的不利影响，增加了番茄的果香、青香和花香，减少了番茄的刺激性味道，提高了番茄的风味品质。

3 讨论

土壤的盐碱化是植物面临的主要非生物胁迫之一，其严重影响了作物的生长、发育和产量，对作物生产造成了巨大的经济损失，极大地制约了农业的可持续发展^[21]。近年来，由于种植者的不合理灌溉、施肥，导致土壤盐渍化现象愈发严重，通过施用外源物质缓解胁迫对作物的伤害，提高作物品质和产量，已成为一种有效的措施^[22]。多胺参与调节植物的生长发育、细胞分化、果实成熟和衰老以及逆境胁迫响应等多种生理生化过程^[4]，Spd是植物体内常见的多胺类物质，具有延缓衰老、促进组织生长和发育、提高植株抗性的功效^[6]。

研究表明，对玉米叶片和根系喷施Spd，能提高玉米的根系活力，降低玉米根系中丙二醛的含量，改善玉米叶片和根系的生理功能，缓解淹水胁迫对玉米产量的不利影响^[23]。本实验中，盐碱胁迫显著降低了番茄的单果质量和单株产量，喷施Spd有效增加了盐碱胁迫下番茄的单果质量和单株产量（图1）；非胁迫条件下，喷施Spd，CS组较CK组的番茄单株产量也有显著提高（图1）。这说明喷施Spd可以缓解盐碱胁迫对番茄单果质量和产量的影响，在非胁迫条件下也可提高番茄的单株产量。

可溶性糖是番茄风味的重要组成部分，番茄果实的口感风味主要由糖、酸度共同决定^[24]。本实验中盐碱胁迫显著提高了番茄的可溶性糖的含量和糖酸比（表1）。非胁迫条件下，喷施Spd对番茄果实的可溶性糖、有机酸和糖酸比均无显著影响（表1）。齐红岩^[25]、刘明池^[26]等研究发现，水分胁迫提高了番茄中可溶性糖、有机酸含量，增加了果实的糖酸比，提高了番茄果实风味口感，随胁迫程度增加效果越明显。本实验结果表明，盐碱胁迫可能抑制了番茄根系对水分吸收、增加果实中糖分的积累，从而提高了番茄果实风味（表1）。盐碱胁迫下，喷施Spd增加了番茄产量、提高了番茄的口感、保证了番茄的品质。VC与番茄红素都是植物体内重要的抗氧化物质，具有有抗氧化、消除自由基、诱导细胞间信息传

递等功能^[24,27],番茄红素作为一种重要的类胡萝卜素,其含量与番茄果实着色和风味形成有重要关系^[28]。本实验中,盐碱胁迫显著增加了番茄果实中VC和番茄红素的含量($P<0.05$) (表1),这可能与植株抗逆境机制有关,胁迫下番茄VC含量与番茄单果质量和产量呈负相关与Dumas等^[29]的研究结果一致;喷施Spd进一步提高了VC含量并增加了番茄产量,番茄红素含量仍保持较高水平,说明喷施Spd提升了植株的抗氧化能力。由此可知,盐碱胁迫下喷施Spd能够促进番茄果实的着色,提高植株抗氧化能力。

硝酸盐含量是衡量蔬菜品质的一个重要指标。研究表明,人体从食用中摄入的硝酸盐大部分来源于蔬菜,硝酸盐在人体内很容易转化成亚硝酸盐,危害身体健康,园艺作物优质与安全生产已成为近年来人们研究的热点^[30]。由于在蔬菜栽培过程中不合理的灌溉、农药化肥的过量使用,导致了土壤的盐渍化严重,致使蔬菜中硝酸盐含量过高^[31]。本实验盐碱胁迫下硝态氮在番茄果实中大量积累;通过喷施Spd略微降低了番茄果实中硝态氮含量,但无明显影响(表1)。利用顶空SPME-GC-MS联用技术对番茄果实进行分析检测,检测出90种挥发性物质,其中包含醛类、烃类、醇类、酮类、酯类物质各33、9、16、14、4种,还检测出14种其他挥发性物质;各组检测出的挥发性物质的总相对含量分别为CK组94.40%、CS组92.15%、S组89.33%和SS组95.33%(表2)。已有研究表明,番茄果实风味除受其本身的遗传因素影响外,微量元素的施用也是影响其风味品质的重要因素^[28,32]。徐炜南等^[33]研究发现不同浓度硼处理改变了番茄果实芳香物质的种类组成和含量,适宜的硼浓度保证番茄拥有较好的风味品质。此外,研究表明脂肪酸是合成番茄芳香物质的主要前体之一,其主要包括油酸、亚麻酸、亚油酸等^[28]。在多种非生物逆境胁迫下,不饱和脂肪酸均有良好的调节作用^[34],同时不饱和脂肪酸对人体的健康也有积极的作用。本实验中,盐碱胁迫减少了番茄果实的挥发性物质数量和相对含量(表2、3),喷施Spd增加了番茄果实中挥发性物质的数量,显著提高了挥发性物质的相对含量($P<0.05$),保证了盐碱胁迫下番茄的风味品质。

番茄含有超过400种挥发性物质,组成结构主要是醇类、醛类、酮类、酯类等4类物质^[35],挥发性物质中含量大于1 nL/L只有30种^[36]。Buttery^[37]对含量大于1 nL/L的30种物质的含量、阈值、对数阈值单位进行了确定,这些成分中,有16种对数阈值大于0,这16种挥发性物质共同组成了番茄独特风味。Baldwin等^[38]认为这16种成分就是番茄的主要特征效应化合物。本实验共检测出12种特征效应化合物,分别为3-甲基丁醛、3-甲基丁醇、水杨酸甲酯、3-己烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、

2-己烯醛、正己醛、2-异丁基噻唑、苯乙醛、苯乙醇、 β -紫罗酮和1-戊烯-3-酮。将检测出的12种特征效应化合物的香气类型可以风味4类:果香、青香、花香型和刺激性味。Baldwin等^[38-39]研究不同挥发性成分对番茄整体风味的具体贡献时发现,牻牛儿苗酮与番茄的风味和甜味相关;乙醛、乙酮、 β -紫罗兰酮、乙醇以及顺-3-己醇等与酸味相关,顺-3-己烯醛、1-戊烯-3-酮与苦味具有相关性;顺-3-己烯醛和涩味关系较密切,而2,3-二甲基丁醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮与番茄风味、整体满意度、腐败味等相关联。在检测的12种特征效应化合物中,各组中相对含量最高的挥发性物质均为正己醛,其次为6-甲基-5-庚烯-2-酮,这两种物质对番茄的青香和果香贡献较大;盐碱胁迫下S组中2-异丁基噻唑、1-戊烯-3-酮的相对含量较CK组明显提高,而正己醛和6-甲基-5-庚烯-2-酮相对含量降低,其余特征效应化合物的相对含量也有不同程度的减少;喷施Spd则有效缓解了这种现象,增加了特征效应化合物的总相对含量,同时降低了2-异丁基噻唑、1-戊烯-3-酮的相对含量;非胁迫条件下,喷施Spd对番茄特征效应化合物的影响较小。本实验与甘霖等^[40]研究结果相似,其研究发现3%秸秆源品质改良因子对番茄果实喷施处理后,顺-3-己烯醛、反-2-己烯、6-甲基-5-庚烯-2-酮、水杨酸甲酯含量提高,酯、酮类物质增加;拌肥处理番茄果实芳香物质中顺-3-己烯醛、反-2-己烯、(E,E)-2,4-己二烯醛、水杨酸甲酯含量提高;两个处理中2-异丁基噻唑和1-戊烯-3-酮均有不同程度的下降。盐碱胁迫严重影响了番茄果实特征效应化合物的数量与相对含量,2-异丁基噻唑、1-戊烯-3-酮的增加严重影响了番茄的风味品质;喷施Spd缓解了盐碱胁迫的影响,对番茄特征效应化合物均有不同程度的改变,提高了番茄的风味品质。

4 结论

盐碱胁迫降低了番茄的单果质量和单株产量,减少了番茄果实中挥发性物质的相对含量和数量,而番茄果实中可溶性糖含量、有机酸含量、硝态氮含量、VC含量、番茄红素含量和硬度均有不同程度的增加。盐碱胁迫下,喷施Spd提高了VC含量,而番茄红素含量无明显变化,喷施Spd缓解了不利因素对番茄生长发育的影响;降低果实的硬度,提高了果实的口感;改变了果实中挥发性物质和特征效应化合物的组成和相对含量,减少了2-异丁基噻唑和1-戊烯-3-酮的相对含量,提高了果实的风味。综上所述,盐碱胁迫下喷施Spd可以提高番茄的产量,改善番茄的果实品质增加番茄的风味口味。

参考文献:

- [1] 郭伟, 王庆祥. 腐殖酸浸种对盐碱胁迫下小麦幼苗抗氧化系统的影响[J]. 应用生态学报, 2011(10): 2539-2545. DOI:10.13287/j.1001-9332.2011.0360.
- [2] 张丽, 徐志然, 胡晓辉, 等. 叶面喷施亚精胺对盐碱胁迫下番茄幼苗生长及其叶绿素合成前体含量的影响[J]. 西北植物学报, 2015(1): 125-130. DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.2015.01.0125.
- [3] BUTTERY R G, SEIFERT R M, GUADAGNI D G, et al. Characterization of additional volatile of tomato[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1971, 19(3): 524-529. DOI:10.1021/jf60175a011.
- [4] ZHANG Yi, HU Xiaohui, SHI Yu, et al. Beneficial role of exogenous spermidine on nitrogen metabolism in tomato seedlings exposed to saline-alkaline stress[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2013, 138(1): 38-49.
- [5] RANGAN P, SUBRAMANI R, KUMAR R, et al. Recent advances in polyamine metabolism and abiotic stress tolerance[J]. Biomed Research International, 2014, 2014: 239621-239630. DOI:10.1155/2014/239621.
- [6] HU Lipan, XIANG Lixia, ZHANG Li, et al. The photoprotective role of spermidine in tomato seedlings under salinity-alkalinity stress[J]. PLoS ONE, 2014, 9(10): e0110855. DOI:10.1371/journal.pone.0110855.
- [7] 杜天浩, 周小婷, 朱兰英, 等. 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201615012.
- [8] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 144-148; 199: 202-203.
- [9] 孙丽丽, 邹志荣, 韩丽蓉, 等. 不同营养液滴灌量对设施番茄生长、产量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 135-142. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.029.
- [10] 张连富, 丁霄霖. 番茄红素简便测定方法的建立[J]. 食品与发酵工业, 2001, 27(3): 51-55. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2001.03.014.
- [11] 张祖麟, 陈伟琪, 洪华生. 固相微萃取法的应用及其进展[J]. 环境科学进展, 1998, 7(5): 52-59.
- [12] 刘春香, 何启伟, 付明清. 番茄、黄瓜的风味物质及研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2003, 34(2): 193-198. DOI:10.3969/j.issn.1000-2324.2003.02.009.
- [13] 赖毅东, 宁正祥. 固相微萃取技术及其在食品挥发性物质分析中的应用[J]. 食品与机械, 2002(5): 36-38. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2002.05.017.
- [14] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201422042.
- [15] 杨明惠, 陈海丽, 唐晓伟, 等. 不同栽培季节番茄果实芳香物质的比较[J]. 中国蔬菜, 2009(18): 8-13.
- [16] 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, 2007: 9-13; 20-24; 30-32; 36-38.
- [17] 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. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2007.02.002.
- [18] 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, 2009, 58(2): 1106-1114.
- [19] 陈书霞, 林海军. 番茄果实不同发育阶段香气成分组成及变化[J]. 西北植物学报, 2010(11): 2258-2264.
- [20] 常培培, 张静, 杨建华, 等. 紫色番茄果实挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2014, 35(14): 165-169. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201414032.
- [21] 赵可夫, 范海. 盐生植物及其对盐渍生境的适应生理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 39-49.
- [22] 燕飞. 外源5-氨基乙酰丙酸(ALA)对盐胁迫下黄瓜幼苗生理调控效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014: 28-31.
- [23] 僧珊珊, 王群, 张永恩. 外源亚精胺对淹水胁迫玉米的生理调控效应[J]. 作物学报, 2013, 38(6): 1042-1050. DOI:10.3724/SP.J.1006.2012.01042.
- [24] 张林青. 盐胁迫下油菜素内酯对番茄产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2012(20): 23-25.
- [25] 齐红岩, 李天来, 曲春秋. 亏缺灌溉对设施栽培番茄物质分配及果实品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2004(2): 4-7. DOI:10.3969/j.issn.1000-6346.2004.02.004.
- [26] 刘明池, 张慎好, 刘向莉. 亏缺灌溉时期对番茄果实品质和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 12(21): 92-95. DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2005.z2.023.
- [27] 吕鑫, 侯丽霞, 张晓明, 等. 番茄果实成熟过程中番茄红素含量的变化[J]. 中国蔬菜, 2009(6): 21-24.
- [28] 刘明池, 郝静, 唐晓伟, 等. 番茄果实芳香物质的研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(5): 1444-1451. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2008.05.024.
- [29] DUMAS Y, DADOMO M, LUCCA D G, et al. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2003, 83(5): 369-382. DOI:10.1002/jsfa.1370.
- [30] 梁运红, 许广波, 依艳丽, 等. 水肥耦合效应对保护地辣椒果实中硝态氮含量的影响[J]. 节水灌溉学报, 2010(10): 53-55.
- [31] 周振江, 牛晓丽, 李瑞, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响[J]. 生态学报, 2013(7): 2139-2146. DOI:10.5846/stxb201201060029.
- [32] 李梅兰, 吴俊华, 李远新, 等. 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.
- [33] 徐炜南, 张鑫, 张静, 等. 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201616024.
- [34] 刘文献, 刘志鹏, 谢文刚, 等. 脂肪酸及其衍生物对植物逆境胁迫的响应[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1556-1565. DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2013-0498.
- [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. DOI:10.1021/jf040176a.
- [36] AZOUDANLOU R, DARBELLAY C, LUISIER J L, et al. Development of a model for quality assessment of tomatoes and apricots[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(2): 223-233. DOI:10.1016/S0023-6438(02)00204-9.
- [37] BUTTERY R G. Quantitative and sensory aspects of flavour of tomato and other vegetables and fruits[M]// ACREE T E, TERANISHI R. Flavor Science: Sensible Principles and Techniques. Washington DC: American Chemical Society, 1993: 259-285.
- [38] BALDWIN E A, SCOTT J W, SHEWMAKER C K, et al. Flavor trivia and tomato aroma: biochemistry and possible mechanisms for control of important aroma components[J]. Hortscience, 2000, 35(6): 1013-1022. DOI:10.1002/9781444302493.ch5.
- [39] BALDWIN E A, SCOTT J W, EINSTEIN M A, et al. Relationship between sensory and instrumental analysis for tomato flavor[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1998, 123(5): 906-915. DOI:10.17660/ActaHortic.2003.600.70.
- [40] 甘霖, 申琳, 生吉萍, 等. 秸秆源品质改良因子采前处理对番茄果实品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(4): 221-224.