

# 猪粪和秸秆替代部分化肥提高番茄营养品质 及挥发性风味物质种类和数量

孙娜<sup>1</sup>, 王丽英<sup>2,4†</sup>, 孙焱鑫<sup>1</sup>, 邹国元<sup>1\*</sup>, 黄绍文<sup>3\*</sup>

(1 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 2 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北石家庄 050051; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4 河北省肥料技术创新中心, 河北石家庄 050051)

**摘要:**【目的】研究猪粪和秸秆替代部分化肥对番茄果实营养品质和挥发性风味物质的影响, 为番茄优质栽培提供参考。【方法】在等氮磷钾条件下, 将猪粪(M)、秸秆(S)单独或配合替代化肥中1/4和1/2的氮素。在日光温室进行9年定位试验后, 于2018年取番茄果实样品, 分析不同施肥处理对果实营养品质、果实中挥发性物质种类和含量的影响。【结果】单独施用猪粪或者秸秆替化肥的处理不同程度地降低了番茄果实中果糖、葡萄糖和番茄红素含量, 但是对果实中硝酸盐、Vc和可滴定酸含量没有显著影响; 秸秆和猪粪配合替代1/2的化肥氮, 不会降低果实的营养品质, 而且可改善果实的风味。配合猪粪处理的果实中水果香味和花香味的挥发性物质的种类和含量增加, 如2-异丁基噻唑、 $\beta$ -紫罗兰酮、3-甲基-丁醇和3-甲基-丁醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮; 部分风味物质3-甲基-丁醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、3-甲基-丁醛、2-异丁基噻唑、 $\beta$ -紫罗兰酮和E-2-己烯醛含量随着猪粪替代比例的提高呈逐渐增加趋势。【结论】在长期等氮磷钾施肥条件下, 猪粪和秸秆配合替代1/2的化肥氮素, 不会降低番茄的营养品质, 还可提高番茄风味品质。猪粪有助于具有水果香味和花香味的挥发性物质在果实内的积累, 如2-异丁基噻唑、 $\beta$ -紫罗兰酮、3-甲基丁醇和3-甲基丁醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮, 且积累量以化肥、猪粪和秸秆配施效果最佳。在30余种挥发性物质中, 有12种挥发性物质受不同处理的影响超过预期平均贡献, 以E, E-6,10,14-三甲基-5,9,13-十五碳三烯-2-酮和2-甲基-4-戊烯醛最为显著。

**关键词:** 猪粪; 秸秆; 化肥替代; 营养品质; 番茄风味物质

## Substitution of 1/2 chemical N input with swine manure and straw increases the nutritional quality and species and contents of volatile substances in tomato fruit

SUN Na<sup>1</sup>, WANG Li-ying<sup>2,4†</sup>, SUN Yan-xin<sup>1</sup>, ZOU Guo-yuan<sup>1\*</sup>, HUANG Shao-wen<sup>3\*</sup>

(1 Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4 Fertilizer Technology Innovation Center, Shijiazhuang, 050051, China)

**Abstract:** 【Objectives】 We investigated the effect of partial substitution of chemical fertilizer with swine manure and straw on the nutritional quality and volatile substances of tomato fruit to provide basis for high quality tomato cultivation. 【Methods】 Swine manure and/or straw were applied with chemical fertilizer in ratio of total N input of 1/4 and 1/2. All treatments had the same amount of N, P and K input. The fruit nutrition, volatile species and their contents affected by treatments were analyzed after 9 years continuous application of the

收稿日期: 2019-09-10 接受日期: 2020-04-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0801400, 2016YED0201000); 北京市博士后科研活动经费资助(zz2019-40); 北京市农林科学院博士后科研基金(2018-zz-021); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJXC20180705, KJXC20180708); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-23-B02); 河北省农林科学院创新工程课题资助(2019-1-5-1)。

联系方式: 孙娜 E-mail: sunna11867@126.com; †王丽英为共同第一作者 E-mail: wangliyings@163.com

\*通信作者 邹国元 E-mail: gyzou@163.com; 黄绍文 E-mail: huangshaowen@caas.cn

fertilizers in a solar greenhouse. **【 Results 】** The use of swine manure or straw with chemical fertilizer significantly decreased the concentrations of fruit fructose, glucose and lycopene, but did not affect the concentrations of fruit nitrate, Vc and titratable acid. However, the combination of both manure and straw with chemical fertilizers not only did not decrease the nutrient quality, but also improved the fruit aroma. Treatments contained swine manure accumulated more fruity and floral aroma volatile species at higher concentrations, for instance 2-isobutylthiazole,  $\beta$ -ionone, 3-methylbutanol, 3-methylbutanal, 6-methyl-5-heptene-2-ketone and E-2-hexenal. Some of these volatiles, such as 3-methylbutanol, 6-methyl-5-heptene-2-ketone, 3-methylbutanal, 2-isobutylthiazole,  $\beta$ -ionone showed an upward tendency with increasing swine manure substitution ratio.

**【 Conclusions 】** Swine manure and straw substituted for 1/2 chemical N could improve tomato fruit aroma without significant decrease of nutrient quality under long-term substitution of swine manure and straw for chemical fertilizer. Swine manure benefits for the accumulation of more fruity and floral aroma volatile species at higher concentrations, for instance 2-isobutylthiazole,  $\beta$ -ionone, 3-methylbutanol, 3-methylbutanal, 6-methyl-5-heptene-2-ketone, especially when it combines with maize straw. More than 30 volatiles are detected in the fruit, and 12 of them are above the average contribution to the variation among treatments. E,E-6,10,14-trimethyl-5,9,13-pentadecatrien-2-one and 2-methyl-4-pentenal are the two volatiles with the highest contributions.

**Key words:** swine manure; straw; chemical fertilizer substitution; nutrition quality; tomato volatiles

不合理施肥问题在设施番茄种植中较为普遍。番茄种植在我国北方地区已通过保护地栽培实现了全年生产,多茬、复种栽培和大量化肥的使用造成土壤养分过量累积、土壤有机质含量降低、酸化板结和蔬菜减产等问题<sup>[1-2]</sup>。与单施化肥相比,增施有机肥和秸秆可以增加土壤有机碳、土壤微生物和酶活性,促进植株生长,改善作物品质<sup>[3-7]</sup>。陶云彬等<sup>[4]</sup>连续5年使用商品有机肥部分替代化肥施用,在减量施肥的同时提高了土壤有机质、枇杷果实产量、单果重和可溶性固形物含量。张茜等<sup>[7]</sup>在设施番茄大棚采用不同施肥措施(鸡粪、秸秆和尿素配施)的长期定位试验,发现土壤养分含量受到显著影响。增施有机肥和秸秆显著提高了土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量,有利于土壤保持稳定的pH,有效抑制土壤酸化。鉴于此,我国提出农业化肥使用量零增长、秸秆和畜禽粪便基本资源化利用的目标<sup>[8]</sup>,在不增加化肥使用的前提下促进有机肥的使用,提高土壤质量。

番茄品质包括糖酸、口感、香气、质感等在近年来受到广泛关注<sup>[9-10]</sup>。采用气相色谱-质谱联用仪技术已在番茄果实中检测到超过400种挥发性物质,大多含量很低,在pmol和nmol级别,其种类、浓度以及互作效应均可影响番茄果实风味<sup>[11-14]</sup>。Buttery<sup>[11]</sup>确定了29种对番茄风味影响显著的挥发性物质:顺-3-己烯醛、顺-3-己烯醇、己醛、1-戊烯-3-酮、3-甲基-丁醛、反-2-己烯醛(与E-2-己烯醛为同

一种物质, PubChem CID 为 5281168)、6-甲基-5-庚烯-2-酮、水杨酸甲酯、2-异丁基噻唑、 $\beta$ -紫罗酮、2-苯乙醇、反-2-庚烯醛(与E-2-庚烯醛为同一种物质, PubChem CID 为 5283316)、2-苯乙醛、 $\beta$ -大马酮、3-甲基-丁醇(与3-甲基-1-丁醇为同一种物质, PubChem CID 为 31260)、1-硝基-2-苯乙烷。其中前10种被认为是构成一个新鲜、成熟番茄的主要风味物质,其它挥发性物质则作为背景丰富和完整成熟番茄的风味、香气和口感<sup>[11,15]</sup>。Tieman等<sup>[10]</sup>对比398种现代、古老和野生番茄品种,发现现代品种番茄中13种风味相关的挥发性物质显著低于古老番茄品种,这些物质包括甲硫基丙醛、异戊腈、2-甲基-1-丁醇、3-甲基-丁醇、E-2-己烯醛、2-异丁基噻唑、1-辛烯-3-酮、 $\beta$ -紫罗酮、异戊酸、E,E-2,4-癸二烯醛、异戊醛、E-2-庚烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮。笔者认为这些物质含量的降低有可能是现代番茄品种风味降低的原因。

影响番茄果实风味物质的合成和代谢的因素有很多,如品种、施肥、水分、果实成熟度、栽培季节、储存条件(环境温度和储存时间)等<sup>[16-19]</sup>。考虑到运输、货架期和外观品质,现代番茄育种和栽培更多关注果实产量、抗病性和硬度等指标,而忽略了番茄的口感和风味。李恕艳等<sup>[19]</sup>发现施用适量精制有机肥有利于增加番茄果实可溶性固形物、Vc、风味物质的种类和数量(醛酮类、酯类、酰胺、羟胺和有机酸等)。李吉进等<sup>[20]</sup>发现施有机肥、化肥和不施肥措

施下番茄果实中积累的风味物质种类有差异。Bianchi 等<sup>[21]</sup>发现有机种植的番茄风味要优于传统的化肥种植。

我们在中国北方设施菜田土壤中,进行了不同量的猪粪和秸秆替代化肥的长期定位试验,分析了不同施肥处理对番茄风味物质种类和含量的影响。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验地情况

试验在河北省农林科学院大河实验站日光温室进行,该温室始建于2009年5月,长48 m、宽8 m(含0.5 m通道),供试土壤为粘壤质石灰性褐土。定位试验始于2009年8月,栽培制度为秋冬茬番茄和冬春茬黄瓜轮作。2009年试验前土壤理化性质:容重1.4 g/cm<sup>3</sup>,电导率185.4 μS/cm, pH 8.0,有机质含量9.1 g/kg,硝态氮、有效磷和速效钾含量分别为18.3、6.2和98.2 mg/kg<sup>[22]</sup>。

试验共设5个处理:全化肥氮(4/4CN)、3/4化肥氮+1/4猪粪氮(3/4CN+1/4MN)、2/4化肥氮+2/4猪粪氮(2/4CN+2/4MN)、2/4化肥氮+1/4猪粪氮+1/4秸秆氮(2/4CN+1/4MN+1/4SN)和2/4化肥氮+2/4秸秆氮(2/4CN+2/4SN),所有处理均为等量氮磷钾,不同处理肥料施用量见表1。试验根据氮肥替代量确定猪粪和秸秆施用量,磷钾肥则根据实际情况用化肥补齐。试验所用氮肥为尿素(46% N)、磷肥为过磷酸钙(16% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾肥为硫酸钾(51% K<sub>2</sub>O);猪粪N、P、K养分含量依次为16.7、2.8、4.3 g/kg;秸秆来源为玉米秸秆,N、P、K养分含量依次为7.5、0.4、5.0 g/kg。定植前,根据施肥处理的设计施入全部猪粪、秸秆(切碎撒入20~25 cm土层后覆土)、20%化肥氮、100%化肥磷和40%化肥钾,余下肥料分4次随

水追施。

每个处理3次重复,随机区组排列。每个小区面积为14.4 m<sup>2</sup>(2.4 m × 6 m),种植4行番茄,每行20株、行距为0.6 m、株距为0.3 m。相邻小区用4 mm厚PVC板隔开,深埋1 m,上缘高出土面5 cm。番茄植株在每年8月下旬定植,次年2月拉秧。2018年番茄种植品种为瑞克斯旺1404,所有处理均进行统一日常管理(除草、喷药、灌溉等)。

### 1.2 样品采集和分析

2018年12月25日在每个试验小区取15个番茄成熟果实,其中6个送至国家蔬菜工程技术研究中心测番茄果实中葡萄糖、果糖和番茄红素含量。测定方法:50 g新鲜果实样品加入100 mL水,匀浆后取2 mL于离心管中,10000 r/min离心30 min后将上清液用0.22 μm滤膜过滤,采用离子色谱法(Dionex™ ICS-5000+)测定滤液中葡萄糖和果糖含量。番茄红素含量采用HPLC(日本岛津LC-20A)测定,具体方法参照中华人民共和国农业行业标准NY/T 1651-2008《蔬菜及制品中番茄红素的测定—高效液相色谱法》。剩余果实送至中国农业科学院蔬菜花卉研究所蔬菜品质代谢平台测定挥发性物质的种类和含量,测试参考Wang等<sup>[23]</sup>的方法。在用液氮速冻、研磨之后取2.0 g粉末样品,加入0.6 g NaCl,50℃水浴平衡10 min后用2 cm的萃取头(50/30 μm DVB/Carboxen/PDMS; Supelco, Bellefonte, PA)在250℃老化10 min,之后快速插入顶空萃取瓶(插入深度3 cm,平衡40 min),取出萃取头插入气相色谱-质谱联用仪(Agilent/7890B-5977A; Agilent, Santa Clara, CA)进样口,在250℃下解吸10 min。气质联用仪测定条件:采用HT-5MS毛细管柱,载

表1 各施肥处理不同来源氮磷钾养分投入量[kg/(hm<sup>2</sup>·a)]

Table 1 Annual input of NPK nutrient from different fertilizer sources in each treatment

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer			猪粪 Swine manure			秸秆 Straw		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
4/4 CN	1050	229	934	0	0	0	0	0	0
2/4CN + 2/4 MN	525	51	661	525	178	273	0	0	0
3/4 CN + 1/4 MN	788	140	797	262	89	137	0	0	0
2/4 CN + 2/4 SN	525	168	234	0	0	0	525	61	700
2/4CN + 1/4 MN + 1/4 SN	525	109	447	263	89	137	262	31	350

注 (Note): 各处理的氮磷钾养分投入总量为 N 1050、P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup> The total input in all the five treatments were N 1050, P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup>; 每个处理代码中的分数表示氮源的比率 The fraction in treatment code represents the ratio of N source; CN—化肥氮 N from chemical fertilizer; MN—猪粪氮 N from swine manure; SN—秸秆氮 N from maize straw returning.

气为 He, 流速为 1 mL/min, 程序升温到 40℃, 保持 5 min, 之后以 2℃/min 升温到 120℃, 再以 10℃/min 升至 280℃, 保持 29 min。EI 离子源电子能量为 70 eV, 质量范围为 35~400 u。通过对比所检测出的挥发性物质与 100 μL 的内标 2-壬酮 (0.025 μL/mL) 的出峰面积和浓度, 计算挥发性物质相对含量。

每个小区另取 4 个番茄果实, 在北京市农林科学院植物营养与资源研究所实验室, 采用 2,6-二氯酚法测定 Vc 含量, 紫外分光光度法测定硝酸盐含量, 酸碱滴定法测定可滴定酸含量<sup>[24]</sup>。

### 1.3 数据分析

使用 SAS 统计软件包 (SAS Institute Inc., Cary NC, USA) 中的 PROC ANOVA、MEANS 和 LSD 对番茄营养品质指标进行方差分析,  $P < 0.05$  为处理间差异显著; 使用 Rstudio 1.2.1335 (Rstudio.Lnk) 软件中的 PCA 对番茄风味物质进行主成分分析, 并用 GGBILOT 和 FVIZ\_PCA\_BILOT 作主成分分析散点图。对于不同施肥处理所共有的 23 种挥发性物质, 用 R 软件中的 FVIZ\_CONTRIB 分析每种物质对 PC1 和 PC2 的贡献, 再对超过预期平均贡献的 12 种挥发性物质进行主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 猪粪和秸秆长期部分替代化肥对番茄营养品质的影响

长期不同施肥对番茄果实中葡萄糖、果糖和番茄红素含量的影响显著 (表 2)。4/4CN 处理的番茄果实含糖量最高; 3/4CN+1/4MN、2/4CN+2/4MN 和 2/4CN+2/4SN 处理的果实中果糖含量均显著低于该

处理, 以 3/4CN+1/4MN 处理最低, 果糖和葡萄糖含量分别为 9.7 和 10.7 mg/g; 2/4CN+1/4MN+1/4SN 处理与 4/4CN 处理相比, 果实中果糖含量没有显著差异, 葡萄糖含量则显著降低, 为 14.1 mg/g。4/4CN 处理的番茄红素含量为 0.47 mg/100 g, 显著高于其它 4 个处理; 其次是 2/4CN+1/4MN+1/4SN 处理, 果实中番茄红素含量为 0.40 mg/100g, 显著高于 3/4CN+1/4MN、2/4CN+2/4MN 和 2/4CN+2/4SN 处理。说明猪粪和秸秆分别部分替代化肥会降低番茄果实中的还原糖和番茄红素含量, 两者配合替代部分化肥较为合理。

不同处理番茄果实中硝酸盐、Vc 和可滴定酸含量差异不显著, 这表明猪粪和秸秆长期部分替代化肥施用对番茄果实中硝酸盐、Vc 和可滴定酸含量没有显著影响 (表 2)。

### 2.2 猪粪和秸秆长期部分替代化肥对番茄风味品质的影响

番茄果实中检测到的挥发性物质种类, 以 2/4CN+2/4MN 处理最多, 达 33 种; 3/4CN+1/4MN 和 2/4CN+2/4SN 处理最少, 为 30 种 (表 3)。果实中挥发性物质总量以 2/4CN+1/4MN+1/4SN 处理最高, 2/4CN+2/4SN 处理最低 (表 4)。

果实中所检测出的挥发性物质主要为醛类, 多至 13 种, 酮类次之 (7~9 种), 同时存在某些醇类和酯类, 以及其它物质如 2-乙基呋喃、2-异丁基噻唑、2,2-二甲基-丙酸酐和二甲基棕榈胺等。试验处理番茄果实中检测出的 E-2-己烯醛和 2-甲基-4-戊烯醛是含量最高的两种挥发性物质, 远远超过其它挥发性物质。目前这两种物质在番茄中的报道较少, E-2-己

表 2 不同施肥处理番茄果实营养品质指标及其方差分析

Table 2 Tomato fruit nutrition quality indexes and their analysis of variance

处理 Treatment	果糖 (mg/g) Fructose	葡萄糖 (mg/g) Glucose	可滴定酸 (%) Titratable acid	番茄红素 (mg/100g) Lycopene	Vc (mg/g)	硝酸盐 (mg/kg) Nitrate
4/4CN	14.2 a	16.1 a	0.47	0.47 a	134.4	133.3
2/4CN+2/4MN	11.6 bc	12.5 c	0.49	0.31 d	112.0	131.6
3/4CN+1/4MN	9.7 c	10.7 d	0.60	0.29 e	130.2	117.2
2/4CN+2/4SN	12.1 b	13.6 bc	0.59	0.33 c	139.2	112.1
2/4CN+1/4MN+1/4SN	12.3 ab	14.1 b	0.56	0.40 b	134.4	130.4
P 值 P value	0.0112	0.0002	0.4128	<0.0001	0.4456	0.4923

注 (Note): 各处理的氮磷钾养分投入总量为 N 1050、P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup> The total input in all the five treatments were N 1050, P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup>; 每个处理代码中的分数表示 N 源的比率 The fraction in each treatment code represents the ratio of N source; CN—化肥氮 N from chemical fertilizer; MN—猪粪氮 N from swine manure; SN—秸秆氮 N from maize straw returning. 同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

表 3 施肥处理番茄果实中各类挥发性物质的成分数量

Table 3 Compound number in each category of volatiles in tomato fruit under different treatments

处理 Treatment	醛类 Aldehydes	酮类 Ketones	醇类 Alcohols	酯类 Esters	其它 Others	共计 Total
4/4CN	12	8	2	2	7	31
2/4CN+2/4MN	13	9	3	4	4	33
3/4CN+1/4MN	12	7	3	2	6	30
2/4CN+2/4SN	11	8	3	2	6	30
2/4CN+1/4SN+1/4MN	12	9	2	3	6	32

注 (Note): 各处理的氮磷钾养分投入总量为 N 1050、P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup> The total input in all the five treatments were N 1050, P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup>; 每个处理代码中的分数表示 N 源的比率 The fraction in treatment code represents the ratio of N source; CN—化肥氮 N from chemical fertilizer; MN—猪粪氮 N from swine manure; SN—秸秆氮 N from maize straw returning.

表 4 猪粪和秸秆替代部分化肥后番茄果实中的挥发性物质含量

Table 4 Content of volatile compounds in tomato as affected by partial substitution of swine manure and straw for chemical fertilizer

挥发性物质 Volatiles	相对含量 Relative content (ng/g)				
	4/4CN	2/4CN+2/4MN	3/4CN+1/4MN	2/4CN+2/4SN	2/4CN+1/4MN+1/4SN
E-2-己烯醛 E-2-Hexenal	3019.5	2603.2	2889.3	2338.4	3770.4
2-甲基-4-戊烯醛 2-Methyl-4-pentenal	961.4	1482.8	1316.4	1399.7	1317.0
E-6,10-二甲基-5,9-十一二烯-2-酮 E-6,10-Dimethyl-5,9-undecadien-2-one	136.3	128.1	165.1	76.9	134.1
6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one	111.3	139.6	140.4	108.7	171.1
E-4-氧代-2-烯醛 E-4-Oxohept-2-enal	64.2	123.2	125.0	120.4	129.3
2,2-二甲基-丙酸酐 2, 2-Dimethylpropanoic anhydride	58.9	117.2	103.1	101.2	73.4
2-异丁基噻唑 2-Isobutylthiazole	89.6	92.5	97.1	55.4	104.1
E,E-2,4-己二烯醛 E,E-2,4-Hexadienal	45.0	51.9	31.5	46.3	29.5
3-甲基丁醇 3-Methylbutanol	26.2	56.3	31.4	21.4	33.7
1-十二烷醇 1-Dodecanol	27.1	51.6	27.9	68.8	45.7
β-紫罗兰酮 β-Ionone	38.9	32.6	43.5	20.4	47.1
壬醛 Nonanal	30.8	47.6	11.5	11.4	66.3
E,E-6,10,14-三甲基-5,9,13-十五碳三烯-2-酮 E,E-6,10,14-Trimethyl-5,9,13-pentadecatrien-2-one	37.4	21.2	31.4	13.7	29.1
草酸,烯丙基戊基酯 Oxalic acid, allyl pentyl ester	32.2	23.0	53.2	19.3	31.2
E-3,7-二甲基-2,6-辛二醛 E- 3,7-Dimethyl-2,6-octadienal	20.3	22.8	30.9	18.4	30.4
E-2-辛烯醛 E-2-Octenal	25.3	19.6	16.1	9.9	24.4
1-戊烯-3-酮 1-Penten-3-one	22.7	18.7	18.6	16.8	17.6
E-2-戊烯醛 E-2-Pentenal	18.2	16.6	16.6	15.8	14.1
2-乙基呋喃 2-Ethyl furan	11.3	21.1	14.9	12.1	16.1
3,3,6-三甲基-1,5-庚二烯-4-酮 3,3,6-Trimethyl-1,5-heptadien-4-one	14.2	14.9	12.4	12.9	13.6
3-甲基丁醛 3-Methylbutanal	6.6	11.4	14.0	5.6	8.6

续表 4 Table 4 continued

挥发性物质 Volatiles	相对含量 Relative content (ng/g)				
	4/4CN	2/4CN+2/4MN	3/4CN+1/4MN	2/4CN+2/4SN	2/4CN+1/4MN+1/4SN
癸醛 Decanal	16.5	28.9	8.0	5.6	21.0
2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛 2,6,6-Trimethyl-1-cyclohexene-1-carboxaldehyde	9.2	9.8	12.0	5.8	12.0
1-庚烯-3-酮 1-Hepten-3-one	6.6	8.0	0.0	5.8	7.0
2-甲基-2-丁烯醛 2-Methyl-2-butenal	0.0	7.6	0.0	0.0	0.0
E-2-庚烯醛 E-2-Heptenal	51.6	0.0	0.0	0.0	0.0
2,6-双(1,1-二甲基乙基)-2,5-环己二烯-1,4-二酮 2,6-Bis(1,1-dimethylethyl)-2,5-cyclohexadiene-1,4-dione	12.8	36.8	13.8	0.0	19.7
Z-2-十二烯醇 Z-2-Dodecenol	0.0	9.7	0.0	0.0	0.0
2-甲基-丙酸-丁基酯 2-Methyl-propanoic acid- butyl ester	0.0	29.2	0.0	0.0	16.1
乙酸乙酯 Ethyl acetate	0.0	22.2	0.0	0.0	0.0
乙酸-2-甲基-1-丁醇酯 Acetate-2-methyl-1-butanol	0.0	10.8	0.0	0.0	0.0
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	32.5	0.0	26.8	58.3	17.7
二甲基棕榈胺 Dimethyl palmitamine	32.0	0.0	0.0	0.0	0.0
N-吗啉甲基-异丙基硫醚 N-Morpholinomethyl-isopropyl-sulfide	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0
4-吗啉乙胺 4-Morpholineethanamine	53.4	0.0	0.0	0.0	0.0
4-甲基-1-(1-甲基乙基)-双环[3.1.0]己-2-烯 4-Methyl-1-(1-methylethyl)-bicyclo[3.1.0]hex-2-ene	0.0	0.0	52.3	46.2	84.4
3-甲基-6-(1-甲基亚乙基)-环己烯 3-Methyl-6-(1-methylethylidene)-cyclohexene	0.0	0.0	10.8	23.4	18.0
Z-2-庚烯醛 Z-2-Heptenal	0.0	42.5	40.4	0.0	41.6
辛酸 Octanoic acid	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2-乙基己酸 2-Ethylhexoic acid	0.0	0.0	0.0	39.2	0.0
2,6-双(1,1-二甲基乙基)-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮 2,6-Bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-4-methyl-2,5-cyclohexadien-1-one	0.0	31.2	0.0	24.9	22.9
5-甲基-3-庚炔 5-Methyl-3-heptyne	8.4	11.3	13.6	0.0	19.3
2-甲基-1-丁醇 2-Methyl-1-butanol	0.0	0.0	10.9	7.8	0.0
壬酸 Nonanoic acid	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
总计 Total	5018	5259	5314	4639	6303

注 (Note): 各处理的氮磷钾养分投入总量为 N 1050、P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup> The total input in all the five treatments were N 1050, P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup>; 每个处理代码中的分数表示 N 源的比率 The fraction in treatment code represents the ratio of N source; CN—化肥氮 N from chemical fertilizer; MN—猪粪氮 N from swine manure; SN—秸秆氮 N from maize straw returning.

烯醛是植物体内一种重要的绿叶挥发物质, 具有绿叶气息, 是植物对外界环境应答的信号分子, 有一定的抑菌作用<sup>[25]</sup>。2-甲基-4-戊烯醛对番茄风味的影响和贡献还不明确, 有报道在不同氮磷钾水平处理后樱桃番茄果实内检测到 2-甲基-4-戊烯醛, 并发现其

含量随着施氮量的增加呈逐渐增长趋势<sup>[26]</sup>。

本研究所有处理果实中有 23 种相同的挥发性物质, 说明遗传对番茄风味中挥发性物质种类的影响最重。不同处理果实中, 相同的 23 种挥发性物质的相对含量有所差异, 但还存在 7~10 种不同的挥发

性物质,表明猪粪和秸秆对番茄果实内挥发性物质有所影响。由于果实中挥发性物质合成和代谢复杂,施肥处理的影响并非简单地增加或减少挥发性物质的含量,因此,选取报道过的11类影响番茄风味的挥发性物质<sup>[10-11]</sup>,使用主成分分析法分析施肥处理对番茄风味物质种类和含量的影响。

在所检测出的挥发性物质中,2-异丁基噻唑是具有刺激性药味和番茄茎特有味道物质,E-2-戊烯醛、1-戊烯-3-酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮和β-紫罗兰酮是具有水果香味、甜味和花香味的物质,其中6-甲基-5-庚烯-2-酮则与果实整体风味和受欢迎度相关。水杨酸甲酯具有冬青油味道,3-甲基丁醛、2-甲基-1-丁醇和3-甲基-丁醇具有麦芽味和果仁味,E-2-庚烯醛具有油脂味<sup>[14-15,17,27-28]</sup>。如图1所示,不同施肥处理果实中11种挥发性物质含量差异的62.5%可以用PC1和PC2解释。图中代表不同处理的圆点和挥发性物质的向量在两个坐标轴PC1和PC2均有得分,在PC1或PC2坐标轴得分较高的处理和挥发性物质,说明该处理果实内的该种挥发性物质含量较高。4/4CN处理与1-戊烯-3-酮、E-2-庚烯醛和E-2-戊烯醛PC1负得分和PC2正得分较高,说明纯化肥处理有利于这3种物质在番茄果实中的积累;2-异丁基噻唑和β-紫罗兰酮同样在纯化肥处理果实中有一定积累。2/4CN+2/4SN处理增加了果实中水杨酸甲酯和2-甲基-1-丁醇含量,也有助

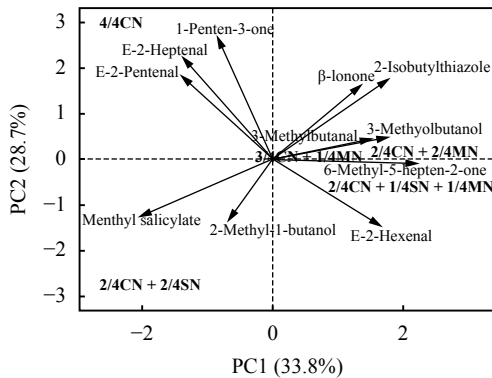


图1 番茄果实内11种显著影响番茄风味的挥发性物质的主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of 11 categories of volatiles that significantly affect tomato fruit flavor

[注 (Note): 各处理的氮磷钾养分投入总量为 N 1050、P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup> The total input in all the five treatments were N 1050, P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup>; 每个处理代码中的分数表示 N 源的比率 The fraction in each treatment code represents the ratio of N source; CN—化肥氮 N from chemical fertilizer; MN—猪粪氮 N from swine manure; SN—秸秆氮 N from maize straw returning.]

于果实中 E-2-己烯醛的积累。包含猪粪的处理 3/4CN+1/4MN、2/4CN+1/4MN+1/4SN 和 2/4CN+2/4MN 在图中分布较为集中,在 PC1 正得分较高,有利于提高果实中 2-异丁基噻唑、β-紫罗兰酮、3-甲基丁醇和 3-甲基丁醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮和 E-2-己烯醛含量,以 2/4CN+1/4MN+1/4SN 处理效果最好。在等氮磷钾处理中,随着猪粪施用比例的增加(4/4CN、3/4CN+1/4MN 和 2/4CN+2/4MN),果实内 3-甲基-1-丁醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、3-甲基丁醛、2-异丁基噻唑、β-紫罗兰酮和 E-2-己烯醛含量呈逐渐增加趋势。

对所有施肥处理所共有的23种挥发性物质对PC1和PC2的贡献率进行分析,贡献率越高的物质说明其受到施肥的影响越大(图2)。超过预期平均贡献(图中虚线表示)的有12种挥发性物质,由高到低依次为: E,E-6,10,14-三甲基-5,9,13-十五碳三烯-2-酮(E,E-6,10,14-Trimethyl-5,9,13-pentadecatrien-2-one)、2-甲基-4-戊烯醛(2-Methyl-4-pentenal)、β-紫罗兰酮(β-Ionone)、2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛(2,6,6-Trimethyl-1-cyclohexene-1-carboxaldehyde)、2-异丁基噻唑(2-Isobutylthiazole)、6-甲基-5-庚烯-2-酮(6-

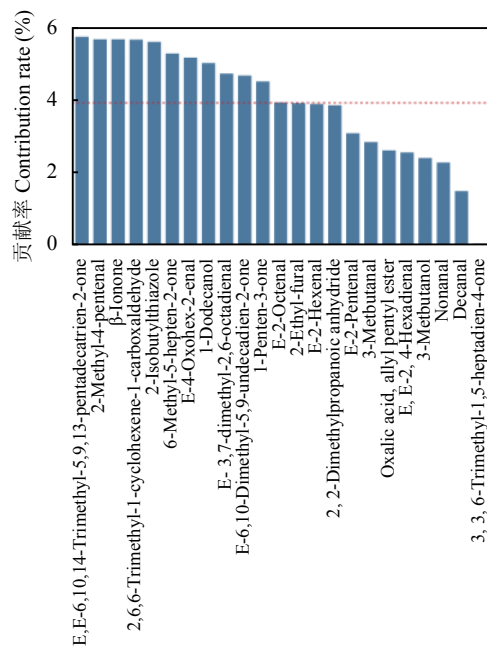


图2 番茄果实内共有的23种挥发性物质对主成分分析中PC1和PC2的贡献率

Fig. 2 Contribution of the 23 volatile compounds commonly presented in tomato fruit for the variability of PC1 and PC2 in principle analysis

[注 (Note): 虚线为预期平均贡献值

The dashed line indicates the expected average contribution.]

Methyl-5-hepten-2-one)、E-4-氧代-2-烯醛 (E-4-Oxohept-2-enal)、1-十二烷醇 (1-Dodecanol)、E-3,7-二甲基-2,6-辛二醛 (E-3,7-Dimethyl-2,6-octadienal)、E-6,10-二甲基-5,9-十一烯-2-酮 (E-6,10-Dimethyl-5,9-undecadien-2-one)、1-戊烯-3-酮 (1-Penten-3-one) 和 E-2 辛烯醛 (E-2-Octenal)。

将这 12 种挥发性物质进行主成分分析 (图 3), 不同施肥处理果实中 12 种挥发性物质含量差异的 68.3% 可以用 PC1 和 PC2 解释。相比秸秆半量替代和纯化肥处理, 包含猪粪的处理 (3/4CN+1/4MN、2/4CN+1/4MN+1/4SN 和 2/4CN+2/4MN) 有利于多种挥发性物质如 E-4-氧代-2-烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、 $\beta$ -紫罗兰酮和 2-异丁基噻唑的积累。4/4CN 处理有助于提高番茄果实中 1-戊烯-3-酮和 E, E-6,10,14-三甲基-5,9,13-十五碳三烯-2-酮的含量。2/4CN+2/4SN 处理和 1-十二烷醇均在 PC1 上负得分较高, 说明秸秆替代化肥后番茄果实中 1-戊烯-3-酮和 E, E-6,10,14-三甲基-5,9,13-十五碳三烯-2-酮的含量降低, 但是增加了 1-十二烷醇的含量; 2/4CN+2/4MN 处理果实内 2-甲基-4-戊烯醛、E-4-氧代-2-烯醛、1-十二烷醇和 6-甲基-5-庚烯-2-酮含量较高; 3/4CN+1/4MN 处理果实内 E-3,7-二甲基-2,6-辛二醛、2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛、2-异丁基噻唑、 $\beta$ -紫罗兰

酮、E-6,10-二甲基-5,9-十一烯-2-酮和 E-2 辛烯醛积累较高; 2/4CN+1/4MN+1/4SN 处理的果实内比猪粪单独替代处理的果实积累的挥发性物质更多, 且含量更丰富。在等氮磷钾处理中, 随着猪粪施用比例的增加 (4/4CN、3/4CN+1/4MN 和 2/4CN+2/4MN), 果实内 2-甲基-4-戊烯醛、E-4-氧代-2-烯醛、1-十二烷醇和 6-甲基-5-庚烯-2-酮含量呈逐渐增加趋势。

### 3 讨论

#### 3.1 番茄营养品质

试验中番茄果实营养品质指标果糖、葡萄糖和番茄红素在猪粪和秸秆替代后含量降低, 2/4CN+1/4MN+1/4SN 配施处理则与纯化肥处理的果糖无显著差异, 葡萄糖和番茄红素含量的差异小于另外 3 个处理与纯化肥处理的差异。以往关于有机肥等氮磷钾替代对番茄营养品质影响的研究较少, 张娜等<sup>[29]</sup>和万群等<sup>[30]</sup>发现在等氮磷钾条件下, 番茄果实内可溶性糖含量随着有机肥施用比例的增加而提高。本试验中番茄果实葡萄糖和果糖含量同样表现出随有机肥和秸秆施用比例的增加而提高的趋势。前人研究中涉及有机肥影响番茄红素的内容较少。适量施肥有助于番茄果实内番茄红素的积累<sup>[31]</sup>, 但施肥种类 (有机肥和化肥) 与品种对果实内番茄红素含量的影响有互作效应, 番茄品种 Amati 和 Robin 果实中的番茄红素在化肥施肥处理中含量更高, 而 Elpida 果实中番茄红素在有机肥处理中含量更高<sup>[32]</sup>。研究结果表明, 等氮磷钾条件下, 猪粪、秸秆和化肥配施比猪粪和秸秆单独替代更有助于番茄营养品质 (糖和番茄红素) 的积累。

本研究结果表明, 猪粪和秸秆长期部分替代化肥对番茄果实中硝酸盐、Vc 和可滴定酸含量没有显著影响。前人研究表明, 番茄果实中硝酸盐含量随着化肥施用比例的增加而提高<sup>[29-30, 33]</sup>, 本试验中等氮磷钾的 5 个处理果实中硝酸含量差异不显著, 但是纯化肥处理的硝酸盐含量最高, 达到 133.3 mg/kg。本试验结果中不同施肥处理对果实中 Vc 含量影响不显著, 前人研究中有有机肥对番茄果实中 Vc 含量影响结果并不一致, 有的试验结果显示施用有机肥处理的果实中 Vc 含量更高<sup>[30-32]</sup>, 有的试验结果显示有机肥和化肥处理果实中 Vc 含量无显著差异<sup>[33-35]</sup>。代顺冬等<sup>[36]</sup>认为施肥可通过影响 ATP 合成、卡尔文循环中酶活性、光合速率和 Vc 前体物质合成来影响果实

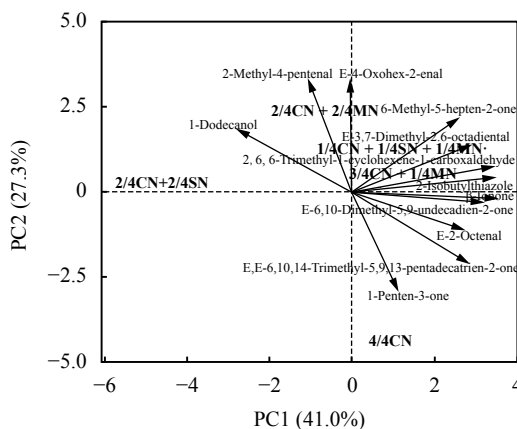


图 3 番茄果实内 12 种超过预期平均贡献值的挥发性物质的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of the 12 volatiles with contribution rate exceeding the expected average in tomato fruit

[注 (Note): 各处理的氮磷钾养分投入总量为 N 1050、P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup> The total input in all the five treatments were N 1050, P 229 and K 934 kg/hm<sup>2</sup>; 每个处理代码中的分数表示 N 源的比率 The fraction in treatment code represents the ratio of N source; CN—化肥氮 N from chemical fertilizer; MN—猪粪氮 N from swine manure; SN—秸秆氮 N from maize straw returning.]



中 Vc 含量;不同施肥量可以引起 Vc 合成和代谢酶(如 GMP—GDP-D-甘露糖焦磷酸化酶、APX—抗坏血酸过氧化物酶、MDHAR—单脱氢抗坏血酸还原酶等)活性及其基因表达量的改变,但植株自身调节能力使得在处理 3~5 天后这些酶活性和其基因表达趋于对照水平<sup>[37]</sup>,这有可能是本试验不同施肥处理果实中 Vc 含量无显著差异的原因。有机肥和秸秆替代对番茄果实可滴定酸含量的影响鲜有报道,研究中施肥对果实可滴定酸含量的影响并不一致,果实内可滴定酸含量随施肥量增加而升高<sup>[38]</sup>、降低<sup>[31]</sup>或没有显著变化<sup>[39]</sup>。Etienne 等<sup>[40]</sup>研究认为,氮肥主要通过影响植株生长从而间接影响果实内酸的含量,钾离子在细胞水平上影响有机酸的代谢和储存,磷肥则对果实内酸积累影响较小。果实内可滴定酸含量对施肥响应的不同结果可能是由于氮、钾肥共同影响。

### 3.2 番茄风味品质

番茄果实内的芳香物质以醛类和酮类为主,试验结果表明品种是影响芳香物质种类的重要因素,同一品种番茄不同施肥处理有 70%~77% 相同种类的挥发性物质;猪粪和秸秆替代在一定程度上影响番茄果实中挥发性物质种类(23%~30%)。

以往关于施肥对番茄果实风味品质影响的研究较少,且多为施肥量对番茄风味物质的影响<sup>[19]</sup>。Wright 等<sup>[38]</sup>的研究发现,大量施氮钾肥可以增加果实内部分风味物质的含量,包括己烯醛、苯乙醛、 $\beta$ -紫罗兰酮和 6-甲基-5-庚烯-2-酮。王玉涛<sup>[26]</sup>在盆栽番茄中发现随着施氮水平(2~36 mmol/L)的提高,1-戊烯-3-酮、己醛、顺-3-己烯醛、2-甲基-4-戊烯醛、E-2-己烯醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮等芳香物质含量均呈增加的趋势;3-甲基丁醛和 E, E-2,4-己二烯醛含量呈先增加后降低的趋势。关于有机肥替代对果实风味物质的影响在鸭梨和苹果上也有所报道,研究发现有机肥比化肥更有利于果实中风味物质种类和含量的增加<sup>[41-42]</sup>。

本试验结果表明,不同施肥处理对挥发性物质种类的积累具有偏向性,施用纯化肥处理果实中积累了更多的 1-戊烯-3-酮、E-2-庚烯醛和 E-2-戊烯醛,以及部分 2-异丁基噻唑和  $\beta$ -紫罗兰酮;秸秆半量替代化肥增加了果实中水杨酸甲酯、2-甲基-1-丁醇含量和 E-2-己烯醛;包含猪粪的处理(2/4CN+2/4MN、2/4CN+1/4MN+1/4SN 和 3/4CN+1/4MN)则积累了更多种类具有水果香味和花香味的物质,提高了果实中 2-异丁基噻唑、 $\beta$ -紫罗兰酮、3-甲基丁醇

和 3-甲基丁醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮含量,且以 2/4CN+1/4MN+1/4SN 处理效果最佳。这在以往研究中未见报道,该研究表明在施肥量相等的情况下,肥料种类、增施有机肥和秸秆可以改变番茄果实内挥发性物质种类和含量,提高番茄果实风味品质。

所有处理共有的挥发性物质受到施肥处理影响的程度不同,超过预期平均贡献的有 12 种,其中  $\beta$ -紫罗兰酮、2-异丁基噻唑、6-甲基-5-庚烯-2-酮和 1-戊烯-3-酮为已报道的显著影响番茄风味的物质。主成分分析结果同样显示了施肥处理对果实内挥发性物质种类积累的偏向性,以及猪粪对果实内风味物质种类和含量增加的有效性。另外 8 种挥发性物质目前对其在番茄中的贡献未见报道,如 E,E-6,10,14-三甲基-5,9,13-十五碳三烯-2-酮、2-甲基-4-戊烯醛、2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛和 E-4-氧代-2-烯醛等,考虑到这些物质受施肥处理影响较大,其对番茄风味品质的作用和贡献值得探讨,有助于为番茄风味品质的提高指明方向。

番茄风味物质现阶段的研究还有很多问题有待解决,如很多检测出的挥发性物质对番茄风味的贡献及意义不明确,挥发性物质与消费者在实际品尝时口感的关系,风味物质的合成和调节,以及有机肥的施肥处理是否与品种、环境存在互作效应等。

## 4 结论

在等量氮磷钾施肥条件下,猪粪和秸秆替代不同程度地降低了番茄果实的部分营养品质,如果糖、葡萄糖和番茄红素,但是对果实中硝酸盐、Vc 和可滴定酸含量没有显著影响。化肥、猪粪和秸秆配施后果实营养品质与纯化肥处理差异相对较小或无显著差异。

施肥处理对不同种类挥发性物质的积累具有偏向性,包含猪粪的处理有助于挥发性物质在果实内积累,如具有水果香味和花香味的物质 2-异丁基噻唑、 $\beta$ -紫罗兰酮、3-甲基丁醇和 3-甲基丁醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮,且以化肥、猪粪和秸秆配施效果最佳。在 30 余种挥发性物质中,有 12 种挥发性物质受不同处理影响超过预期平均贡献,以 E,E-6,10,14-三甲基-5,9,13-十五碳三烯-2-酮和 2-甲基-4-戊烯醛最为显著。

综合考虑番茄营养品质和风味品质,化肥、猪粪和秸秆配施处理 2/4CN+1/4MN+1/4SN 可以在基本

保持番茄营养品质的前提下, 增加番茄果实内挥发性物质的种类和含量, 提高番茄风味品质。

**致谢:** 感谢 2018 年博士后国际交流计划引进项目的资助; 感谢中国农业科学院蔬菜花卉研究所蔬菜品质代谢平台崔霞和王海敬的技术支持。

### 参 考 文 献:

- [1] 黄绍文, 金继运, 左余宝, 等. 农田土壤养分平衡状况及其评价的试点研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2000, (6): 14–19.  
Huang S W, Jin J Y, Zuo Y B, *et al.* Nutrient balance of agricultural soils and their evaluation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2000, (6): 14–19.
- [2] 高慧, 葛晓光. 不同肥料配施对设施番茄干物质分配及产量品质的影响[J]. *北方园艺*, 2005, (1): 38–40.  
Gao H, Ge X G. Effect of fertilizers application on dry matter distribution yield and fruit qualities of tomato in plastic tunnel[J]. *Northern Horticulture*, 2005, (1): 38–40.
- [3] Amanullah M M, Somasundaram E, Vaiyapuri K, *et al.* Poultry manure to crops—A review[J]. *Agricultural Reviews*, 2007, 28(3): 216–222.
- [4] 陶云彬, 杨佳佳, 章日亮, 等. 有机肥替代、化肥养分调控对土壤理化性状、枇杷果实品质和产量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(9): 1540–1541.  
Tao Y B, Yang J J, Zhang R L, *et al.* Effects of organic fertilizer substitution and fertilizer nutrient regulation on soil physical and chemical properties, fruit quality and yield of loquat[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(9): 1540–1541.
- [5] 刘春柱, 侯萌, 张晴, 等. 长期施入不同量有机肥对农田黑土土壤养分、产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(1): 44–53.  
Liu C Z, Hou M, Zhang Q, *et al.* Effect of long-term application of different amounts of organic fertilizer on black soil nutrients and yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(1): 44–53.
- [6] 李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 44–53.  
Li M, Zhang E P, Zhang S H, *et al.* Comparison of soil enzyme activities and microbial C metabolism in installed vegetable fields under long-term different fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 44–53.
- [7] 张茜, 张小梅, 梁斌, 等. 长期定位施肥对设施番茄土壤酶活性及土壤养分动态变化的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(1): 179–186.  
Zhang Q, Zhang X M, Liang B, *et al.* Effects of long-term fertilization on the dynamics of soil enzyme activity and soil nutrient under the greenhouse tomato-cultivating system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(1): 179–186.
- [8] 郑利杰, 张笑千, 王波. 化肥有机肥补贴政策演变过程及配套技术初探[J]. *世界环境*, 2018, (4): 30–35.  
Zheng L J, Zhang X Q, Wang B. Preliminary study of the evolution of NPKM subsidy policy and its supporting technologies[J]. *World Environment*, 2018, (4): 30–35.
- [9] Lin T, Zhu G, Zhang J, *et al.* Genomic analyses provide insights into the history of tomato breeding[J]. *Nature*, 2014, 46: 1220–1226.
- [10] Tieman D, Zhu G, Resende M F, *et al.* A chemical genetic roadmap to improved tomato flavor[J]. *Science*, 2017, 355(6323): 391–394.
- [11] Buttery R. Quantitative and sensory aspects of flavor of tomato and other vegetables and fruits[A]. Acree T, Teranishi R. Flavor science: sensible principles and techniques[C]. Washington D C: American Chemical Society, 1993. 259–286.
- [12] Wang L, Baldwin E A, Bai J. Recent advance in aromatic volatile research in tomato fruit: the metabolisms and regulations[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(2): 203–216.
- [13] Seymour G B, Taylor J E, Tucker G A. Biochemistry of fruit ripening[M]. London: Chapman and Hall, 1993.
- [14] Baldwin E, Goodner K, Plotto A. Interaction of volatiles, sugars, and acids on perception of tomato aroma and flavor descriptors[J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(6): S294–S307.
- [15] 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.
- [16] 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.  
Yang M H, Chen H L, Tang X W, *et al.* Comparative study on aroma compounds of tomato cultured in different seasons[J]. *China Vegetables*, 2009, 18: 8–13.
- [17] 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.  
Tang X W, Liu M C, Hao J, *et al.* Influences of regulated deficit irrigation on sensory quality and flavor components of tomato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(4): 970–977.
- [18] Bai J, Baldwin E A, Imahori Y, *et al.* Chilling and heating may regulate C6 volatile aroma production by different mechanisms in tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 60: 111–120.
- [19] 李想艳, 李吉进, 张邦喜, 等. 施用有机肥对番茄品质风味的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (2): 114–119.  
Li S Y, Li J J, Zhang B X, *et al.* Effect of different organic fertilizers application on tomato quality and flavor[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017, (2): 114–119.
- [20] 李吉进, 张青, 邹国元, 等. 施肥对番茄风味成分影响的 GCMS 分析[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(24): 244–248.  
Li J J, Zhang Q, Zou G Y, *et al.* Study on influence of organic manure and chemical fertilizers on the flavor substances of tomatoes using GCMS analysis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(24): 244–248.
- [21] Bianchi M T, Chambers I V E, Carey E E, *et al.* Effect of organic production and fertilizer variables on the sensory properties of pacchoi (*Brassica rapa* var. Mei Qing Choi) and tomato (*Solanum lycopersicum* var. Bush Celebrity)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(6): 981–988.
- [22] 荣勤雷. 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施菜田土壤团聚体微生物特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2018.  
Rong Q L. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic amendments on microbial characteristics of soil aggregates in

- greenhouse vegetable production[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [23] Wang L, Qian C, Bai J, *et al.* Difference in volatile composition between the pericarp tissue and inner tissue of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 42(1): e13387.
- [24] 王学奎. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- Wang X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [25] 陈书霞, 陈巧, 王聪颖, 等. 绿叶挥发物代谢调控及分子机理研究进展[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(8): 1545–1557.
- Chen S X, Chen Q, Wang C Y, *et al.* Progress in research on the metabolic regulation and molecular mechanism of green leaf volatiles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1545–1557.
- [26] 王玉涛. 氮、磷和钾营养对番茄风味物质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2006.
- Wang Y T. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium application on flavor compounds of fresh tomato fruits[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006.
- [27] Du X, Plotto A, Baldwin E, *et al.* Evaluation of volatiles from two subtropical strawberry cultivars using GC-olfactometry, GC-MS odor activity values, and sensory analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(23): 12569–12577.
- [28] 徐苏萌, 宋焕禄, 高艳明, 等. 不同基质配比对番茄风味成分的影响[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(15): 3689–3691.
- Xu S M, Song H L, Gao Y M, *et al.* Effects of different substrate formulas on flavor components of tomato[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(15): 3689–3691.
- [29] 张娜, 张天财, 张仲. 不同肥料配比对大棚番茄品质与产量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2010, 1(2): 260–261.
- Zhang N, Zhang T C, Zhang Z. Effect of different fertilizer ratio on quality and yield of greenhouse tomato[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2010, 1(2): 260–261.
- [30] 万群, 阳淑, 熊丙全. 有机肥和化肥不同配比对番茄产量、品质及土壤养分和微生物的影响[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(14): 158–161.
- Wan Q, Yang S, Xiong B Q. Effects of different ratio of organic fertilizer and chemical fertilizer on tomato yield, quality and soil nutrient and microorganism[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(14): 158–161.
- [31] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3): 538–547.
- Hao X Y, Gao W, Wang Y J, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and quality of tomato and soil nitrate leaching loss under greenhouse condition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 538–547.
- [32] 张恩平, 谭福雷, 王月, 等. 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, *et al.* 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.
- [33] 唐政, 李虎, 邱建军, 等. 有机种植条件下水肥管理对番茄品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 413–418.
- Tang Z, Li H, Qiu J J, *et al.* Effects of different water and manure management practices on quality and yield of tomato and  $\text{NO}_3^-$ -N accumulations in soil profile[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(2): 413–418.
- [34] Zoran I S, Nikolaos K, Ljubomir Š. Tomato fruit quality from organic and conventional production[J]. *Organic Agriculture Towards Sustainability*, 2014: 147–169.
- [35] Kumar R, Klein D, Krumbein A U K. Product quality of greenhouse tomatoes: effect of cultivars, organic N-fertilization and harvest time[J]. *European Journal of Horticultural Science*, 2007, 72(1): 46–51.
- [36] 代顺冬, 胡田田, 陈思, 等. 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实 Vc 含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (2): 26–31.
- Dai S D, Hu T T, Chen S, *et al.* Effects of water and fertilizers on vitamin C content in tomato under alternate partial root-zone irrigation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013, (2): 26–31.
- [37] 孙娜. 结果期短时期低氮处理对黄瓜生长、AsA 含量及代谢相关酶的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2012.
- Sun N. Effects of short-term low nitrogen supply on growth, AsA content and activity of AsA related enzymes in cucumber during fruit stage[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [38] Wright D H, Harris N D. Effect of nitrogen and potassium fertilization on tomato flavor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1985, 33: 355–358.
- [39] 楼安, 王平, 许俊香, 等. 有机种植中施肥量对番茄产量、品质和氮素利用的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(28): 250–254.
- Lou A, Wang P, Xu J X, *et al.* Effect of different organic fertilizer application levels on yield, quality and nitrogen utilization of tomatoes in organic cultivation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(28): 250–254.
- [40] Etienne A, Génard M, Lobit P, *et al.* What controls fleshy fruit acidity? A review of malate and citrate accumulation in fruit cells[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(6): 1451–1469.
- [41] 魏树伟, 张勇, 王宏伟, 等. 施有机肥及套袋对鸭梨果实风味品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1278–1285.
- Wei S W, Zhang Y, Wang H W, *et al.* Effect of organic fertilizer and bagging on fruit flavor quality of Yali pear[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(5): 1278–1285.
- [42] 王孝娣, 史大川, 宋焯, 等. 有机栽培红富士苹果芳香成分的 GC-MS 分析[J]. *园艺学报*, 2005, 32(6): 998–1002.
- Wang X D, Shi D C, Song Y, *et al.* GC-MS analysis of fruit aroma components of organic ‘Fuji’ apple[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(6): 998–1002.