

桑椹多酚对广式腊肠风味的影响

候雨雪^{1,2}, 刘学铭², 程镜蓉^{2*}, 朱明军^{1,3*}

(1. 华南理工大学生物科学与工程学院, 广东广州 510006) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

(3. 喀什大学生命与地理科学学院, 叶尔羌绿洲生态与生物资源研究高校重点实验室, 新疆喀什 844000)

摘要: 植物多酚因能有效抑制肉制品的过氧化近年来备受关注, 然而由此造成肉制品风味的变化还鲜有报道。鉴于此, 将不同剂量的桑椹多酚提取物(0.5 g/kg 和 1.0 g/kg)加入到肉糜中, 制成广式腊肠, 分析多酚添加前后广式腊肠的挥发性风味、游离脂肪酸、游离氨基酸的组成和含量变化, 以及桑椹多酚对广式腊肠感官评价的影响。研究发现, 添加桑椹多酚后, 腊肠中挥发性风味物质由空白组的 49 种减少到 32 种, 腊肠游离脂肪酸的含量明显下降。值得注意的是, 由于蛋白质水解增强, 添加桑椹多酚后, 腊肠中呈味氨基酸(Glu 和 Arg)的释放得到促进。储藏末期(10 d), 添加 1.0 g/kg 桑椹多酚的腊肠游离氨基酸的含量达到 5904.91 mg/100 g, 较对照组提高了 10.82%。总体而言, 桑椹多酚的添加会抑制腊肠中某些挥发性风味物质的形成, 抑制腊肠中的肉腥味, 促进呈味氨基酸的释放, 但对腊肠游离脂肪酸组成的影响并不显著。

关键词: 广式腊肠; 桑椹多酚; 挥发性风味物质; 游离脂肪酸; 游离氨基酸

文章编号: 1673-9078(2022)08-236-246

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.8.1107

Effect of Mulberry Polyphenols on the Flavor of Cantonese Sausage

HOU Yuxue^{1,2}, LIU Xueming², CHENG Jingrong^{2*}, ZHU Mingjun^{1,3*}

(1.School of Biology and Biological Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

(2.Sericultural and Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of functional foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural products processing, Guangzhou 510610, China) (3.College of Life and Geographic Sciences, The Key Laboratory of Ecology and Biological Resources in Yarkand Oasis at Colleges & Universities under the Department of Education of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashi University, Kashi 844000, China)

Abstract: Plant polyphenols have recently attracted attention because of their effective inhibition of peroxidation in meat products; however, the resulting flavor changes have rarely been reported. In view of this, different doses of mulberry polyphenol extracts (0.5 and 1.0 g/kg) were added to Cantonese sausages, and the changes in the compositions and amounts of volatile flavor substances, free fatty acids, and free amino acids were studied. The effect of mulberry polyphenol on the sensory components of Cantonese sausages was also investigated. The results showed that after the addition of mulberry polyphenols, the number of volatile flavor substances in Cantonese sausages decreased from 49 to 32, and free fatty acid content decreased significantly. It is worth noting that owing to enhanced proteolysis, the addition of mulberry polyphenols promoted the release of taste-active amino acids (Glu and Arg) in Cantonese sausages. At the end of storage (10 days), the free

引文格式:

候雨雪,刘学铭,程镜蓉,等.桑椹多酚对广式腊肠风味的影响[J].现代食品科技,2022,38(8):236-246,+52

HOU Yuxue, LIU Xueming, CHENG Jingrong, et al. Effect of mulberry polyphenols on the flavor of cantonese sausage [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(8): 236-246, +52

收稿日期: 2021-10-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(3197161371); 清远市科技计划项目(DZXQY031); 广东省农业科研项目和农业技术推广项目(2020KJ103; 2021KJ103); 广州市科技计划项目(201807010080); 广东省农业科学院协同创新中心项目(XT202227); 广东省农产品加工技术研发中试公共服务平台产业支撑能力提升与服务体系建设“粤财农〔2021〕170号”资助项目

作者简介: 候雨雪(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物学, E-mail: yxhou97@163.com

通讯作者: 程镜蓉(1988-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: chengjingrong@gdaas.cn; 共同通讯作者: 朱明军(1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 发酵工程, E-mail: mjzhu@scut.edu.cn

amino acid content of Cantonese sausages with 1.0 g/kg of mulberry polyphenols added reached 5904.91 mg/100 g, which was 10.82% higher than that of the control. In general, the addition of mulberry polyphenols inhibited the formation of some volatile flavor substances, suppressed the unpleasant pork smell, and promoted the release of taste-active amino acids but had little effect on the composition of free fatty acids in Cantonese sausages.

Key words: Cantonese sausage; mulberry polyphenols; volatile flavor substances; free fatty acids; free amino acids

随着人们生活水平的提高,人们对肉制品的需求不再简单地停留在营养物质的摄取上,而是更加注重肉制品产品的风味和健康。广式腊肠是一种传统的风味肉制品,风味物质的组成和含量对其质量有很大的影响^[1];广式腊肠风味主要来源于原辅料自身的风味,蛋白质和脂质的降解与氧化^[2]以及微生物分泌的胞外酶引起的生化反应等^[3]。研究表明,适度的水解与氧化有助于产品特征风味物质的形成,但是过度氧化会导致某些不愉快气味甚至有害物质的合成,对腊肠风味产生不利影响^[4]。为了控制肉制品的氧化,腊肠的制作过程中常常会加入硝酸盐等抗氧化剂^[5]。然而,由于存在潜在的遗传毒性和致癌风险,传统的抗氧化剂(如亚硝酸钠)逐渐被人们所摒弃,人们开始尝试从植物成分中寻找天然氧化调控策略来提高产品的品质与安全^[6]。植物多酚是一种植物的次级代谢产物^[7],具有良好的抗菌、抗氧化等生物活性^[8],近年来备受人们关注。Nowak 等^[5]将樱桃中和黑醋栗中提取的酚类物质分别加入到猪肉香肠中,发现二者均可有效延长香肠中的保质期。Qin 等^[9]将葱种子中提取的多酚加入到哈尔滨香肠中,发现干香肠的脂质和蛋白质氧化得到了抑制,香肠的色泽稳定性得到了提高。然而植物多酚对肉制品的氧化抑制作用究竟如何影响产品的风味还鲜有研究。

桑椹是一种天然浆果类植物,富含多酚类物质,挂果期短,易腐烂^[10],目前主要以水果、果汁、果酒或果酱的形式流通于市面,附加值较低。从桑椹中提取的多酚不仅储存时间长,且附加值较高。风味是决定消费者选择取向的主要决定因素^[11]。前期研究发现,将桑椹中提取的酚类物质加入到广式腊肠中,可以有效缓解腊肠的氧化,同时赋予产品一定的抗氧化活性^[12]。然而,桑椹多酚的加入是否会对腊肠的风味造成影响,造成怎样的影响,目前还不得而知。鉴于此,本研究尝试将桑椹多酚加入到腊肠中,试图通过分析腊肠挥发性风味物质、游离脂肪酸和游离氨基酸等的变化来解析桑椹多酚在腊肠风味品质调控中的作用,以期植物多酚在新型肉制品开发中的应用提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

本研究中桑椹多酚源于桑椹(大10品种),由课题组分离提纯得到,具体方法参照向荣的研究^[13],总酚含量为:320.31 mg GAE/g。猪里脊肉、板油、白砂糖、食用盐等腊肠制作的原辅料均购自广州华润万家超市,甲醇、异丙醇、正己烷、NaOH、Na₂SO₄等气相色谱-质谱联用仪使用的试剂均为色谱纯或优级纯,购自天津市科密欧化学试剂有限公司,内标物十七酸购于美国Sigma oldrich公司,C7~C40正构烷烃购于坛墨质检标准物质中心。其他试剂均为分析纯,购自广州齐云生物试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

T25D均质机,德国IKA集团;TGL-16M冷冻高速离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;氨丙基硅胶固相萃取柱,德国Simon公司;50/30 μm DVB/CAR PMDS固相微萃取探头,美国sigmaaldrich公司;6980N-5975B气象色谱-质谱联用仪,美国安捷伦公司;全自动氨基酸分析仪,日本日立公司;斩拌机,广东东菱电器有限公司;绞肉机,广州旭众食品机械有限公司;热泵干燥机,广东微而信实业有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 广式腊肠的制作

广式腊肠的制作参考Xiang等^[12]的方法,稍加改动。广式腊肠配方如下:瘦肉(800 g)、肥肉(200 g)、食盐(30 g)和白酒(20 g)。其中,空白组不加入任何抗氧化剂,阳性对照组加入0.1 g/kg亚硝酸钠,实验组分别加入0.5 g/kg桑椹多酚和1.0 g/kg桑椹多酚。将瘦肉与调料混合,在搅拌机中搅拌10 min后,加入肥肉,继续搅拌10 min后灌肠,用草绳将腊肠分成每段10~15 cm的小节,将气泡扎破,排除其中的空气。腊肠先在20℃热泵烘烤2 h(湿度50%),然后50℃烘烤36 h(前30 h湿度为40%,后6 h湿度为30%)。分别在腊肠成熟后(第0 d)及储藏10 d后取样,储存于-80℃。

1.3.2 挥发性风味物质的测定

将腊肠粉碎并混匀,准确称取腊肠 2 g 置于 20 mL 萃取瓶中,用固相微萃取探头插入样品上方,80 °C 萃取 60 min。随后收回探头,迅速将探头插入 GC-MS 进样口,在进样口 270 °C 下解析 5 min。

色谱条件:DB-5MS 色谱柱;进样口温度:270 °C,不分流;载气为氦气,流速 1 mL/min;程序升温:起始温度 35 °C,保持 5 min,然后以 4 °C/min 的速率升温至 130 °C,保持 3 min,再以 8 °C/min 的速率至 200 °C,保持 3 min,最后以 12 °C/min 的速率升温至 250 °C,保持 5 min,运行总时间 52.67 min。

质谱条件:EI 离子源,离子源温度 230 °C,四级杆温度 150 °C,扫描质量范围:30~450 u。

1.3.3 挥发性风味物质的定性和定量分析

定性分析:未知挥发性化合物与检索谱库匹配,并使用 C7~C40 正构烷烃混合标样进行 GC-MS 分析,记录保留时间,计算各化合物的卡瓦茨保留指数(RI),并与参考文献作对比,从而确定化合物的种类。RI 的计算公式:

$$RI = 100n + \frac{100(t_x - t_n)}{t_{n+1} - t_n} \quad (1)$$

式中:

t_n 和 t_{n+1} ——分别为碳原子数为 n 和 $n+1$ 的正构烷烃的出峰时间, min;

t_x ——被分析的风味化合物的出峰时间, min。

定量分析:使用峰面积(AU×10⁶/g)对挥发性风味物质进行定量分析。

1.3.4 游离脂肪酸的测量

1.3.4.1 脂肪的提取

将广式腊肠中肥丁与瘦肉部分分离后分别绞碎,用于脂肪的提取。称取一定量样品(肥丁 5 g 或瘦肉 10 g),用滤纸(中速定性滤纸,直径 18 cm)包好,放入到纤维素滤纸筒中,后者置于索氏抽提杯中,加入 120 mL 石油醚(沸程为 30~60 °C)和沸石后,于索氏抽提仪中进行脂质提取。待脂肪抽提完毕后,将抽提杯放入通风橱中,待石油醚挥发完毕后,剩余的液体即为脂肪。

1.3.4.2 游离脂肪酸的分离

游离脂肪酸的分离参考孙为正^[3]的方法,称取脂质 100 mg,用氯仿溶解,然后经氨丙基硅胶固相萃取柱(Simon)吸附,用 3 mL 氯仿异丙醇(2:1, V/V)洗脱中性脂肪,然后加入 2%乙酸-乙醚溶液洗脱游离脂肪酸,将洗脱下来的游离脂肪酸用 N₂ 吹干。

1.3.4.3 脂肪酸甲酯化

向分离出的游离脂肪酸中加入十七酸内标物,加入 2 mL 2% NaOH-CH₃OH 溶液(m/V),60 °C 水浴

30 min(每 10 min 震荡一次);随后加入 2 mL 14% BF₃-CH₃OH 溶液,60 °C 水浴 2 min 后取出,用流动水降至室温。加入 2 mL 正己烷(色谱级)和 5 mL 饱和 NaCl 溶液,颠倒均匀后,离心(10000 r/min, 5 min)分层。吸取 2 mL 上清液至装有 1 g 无水 Na₂SO₄ 的离心管中,摇匀,离心(10000 r/min, 3 min),用 1 mL 一次性注射器吸取上清液,经过有机滤膜过滤后转移至上样瓶中,空白对照组 1 mL 正己烷(色谱级)。

1.3.4.4 气相色谱-质谱条件

色谱条件:DB-HeavyWax 色谱柱;进样口温度:260 °C,分流比 20:1;载气为氦气,流速 1 mL/min;程序升温:起始温度 45 °C,保持 1 min,然后以 12 °C/min 的速率升温至 140 °C,保持 0 min,再以 3 °C/min 的速率至 230 °C,保持 11 min,运行总时间 49.92 min。

质谱条件:EI 离子源,离子源温度 230 °C,四级杆温度 150 °C,扫描质量范围:10~450 u。

1.3.5 游离氨基酸含量的测量

称取 4 g 样品,加入 20 mL 5% 5-磺基水杨酸(m/V),均质两次(7000 r/min, 40 s),离心(4 °C, 10000 r/min, 15 min),取 4 mL 上清液与 4 mL 石油醚混合,旋涡震荡 40 s,除去有机上层,用一次性注射器吸取液体,过 0.22 μm 水相滤膜,使用全自动氨基酸分析仪测量游离氨基酸含量。

1.3.6 感官评价

感官评价参考 Xu 等^[10]的方法,总共有 11 名感官评价人员。满分为 7 分。

1.4 数据处理及统计分析

试验结果以平均值±标准差表示,通过 SPSS 对数据进行分析,通过 Origin 作图。

2 结果与讨论

2.1 桑椹多酚对广式腊肠中挥发性风味物质的影响

通过将 GC-MS 识别的风味物质与检索谱库对比,计算卡瓦茨保留指数,并与保留指数作对比,在 8 组腊肠中总共鉴定出 58 种挥发性风味物质(详见表 1),主要包括 18 种醛、3 种酮、6 种醇、6 种酸、17 种酯、6 种烷烃、1 种醚和 1 种呋喃。这些化合物主要源于碳水化合物代谢、蛋白质和脂质的水解与氧化、微生物代谢以及香料中的风味物质^[4]。

在 0 d,桑椹多酚组的风味物质含量(尤其是醛类

物质)明显小于对照组和亚硝组。蛋白质和脂质氧化是风味物质形成的重要途径。酸和醛类物质,如辛酸、己酸、壬酸、己醛和壬醛,主要来自脂质自氧化,在香肠的特殊风味形成中发挥着重要作用^[15]。其中,己醛含量是肉制品脂质氧化的重要指标,它可以准确地反映挥发性风味成分中脂肪的氧化状态^[16],从表1中的数据可以看出,在储藏末期(10 d),添加1 g/kg 桑椹多酚的样品未检测到己醛,而空白对照组检测到的己醛含量达 40.89 AU×10⁶/g 腊肠,这说明桑椹多酚对腊肠脂质氧化的抑制作用是减少挥发性风味物质的积累的重要成因。Munekata 等^[16]将啤酒渣提取物、板栗叶提取物、花生皮提取物等天然抗氧化剂添加到猪肉香肠中,发现天然抗氧化剂显著降低了己醛的含量($p<0.001$)。值得注意的是,亚硝酸盐也被认为可以抑制肉制品的氧化^[17],然而本研究中添加亚硝酸钠的样品风味物质含量显著高于多酚组。这一方面可能源于二者对产品氧化程度的抑制效应存在差异^[12];另一方面,微生物内源酶引起的生化反应也是风味物质形成的重要途径^[18],桑椹多酚具有广谱抑菌性^[13],可能会抑制微生物某些内源酶的分泌,造成产品整体风味物质的形成和积累受到限制。

这也可以从腊肠中醛类物质的变化得以证实。醛类物质的积累主要源于微生物的代谢作用;肉制品中微生物可以将蛋白质降解为游离氨基酸,后者在微生物氨基转移酶的作用下被转化成 α -酮酸, α -酮酸作为中间体,可进一步转化成对应的醛^[14]。在0 d,空白组(未添加抗氧化剂)和亚硝酸钠组的腊肠中的醛类物质的含量明显的少于10 d的腊肠,而桑椹多酚组的腊肠中醛类物质含量在储藏期变化不明显。

在储藏期间,十四烷酸、十六碳烯酸含量显著上升,这些物质同样源于脂质氧化^[14]。然而,较储藏初期相比,储藏末期(第10 d)酸类物质的种类减少,这可能是因为酸类物质在储藏期中参与了酯类物质的形成。与该推测结果相一致,在储藏过程中,腊肠样品酯类物质的含量显著提高。酯类物质是腊肠香味的重要来源^[19],经过10 d的储藏期后,大部分酯类物质含量呈现上升的趋势,可能是因为腊肠的储藏过程中,脂肪氧化产生的羧酸类物质与腊肠制作过程中加入的乙醇发生了酯化反应,生成了脂类物质。尽管如此,整个储藏期间,桑椹多酚组的酸类物质含量明显少于空白对照组,这进一步说明桑椹多酚对腊肠脂质氧化的抑制作用限制了挥发性风味物质中酸类物质的积累。

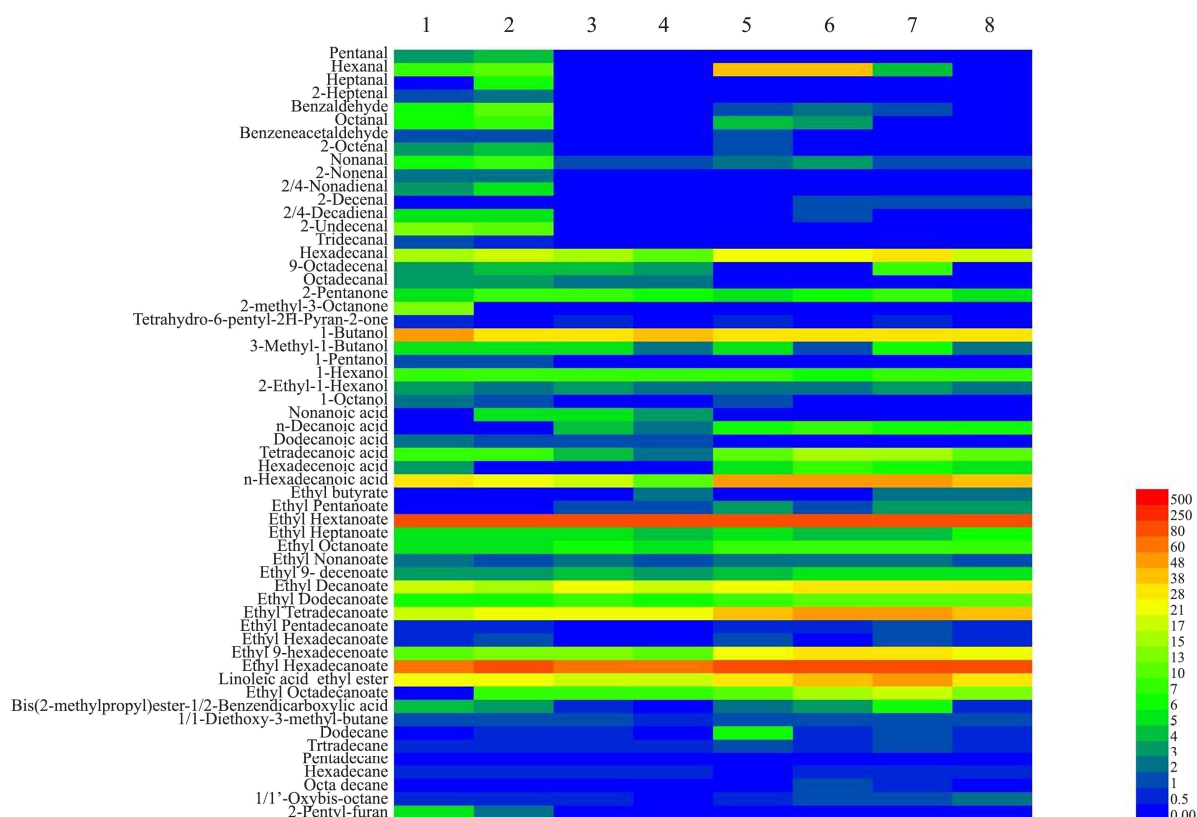


图1 广式腊肠中挥发性风味物质的丰度

Fig.1 The abundance of volatile flavor compounds of Cantonese sausages

注: 1~8 依次为空白组 0 d、0.1 g/kg 亚硝酸钠 0 d、0.5 g/kg 桑椹多酚 0 d、1.0 g/kg 桑椹多酚 0 d、空白组 10 d、0.1 g/kg 亚硝酸钠 10 d、0.5 g/kg 桑椹多酚 10 d、1.0 g/kg 桑椹多酚 10 d。

表 1 广式腊肠中挥发性风味物质的含量 (AU×10⁶/g)Table 1 The volatile compounds in Cantonese sausages (AU×10⁶/g)

匹配项名称	RT/min	0 d				10 d				保留指数(计算)	保留指数*	
		空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚	空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚			
醛类	戊醛	5.98	3.83±3.31 ^{Aa}	3.86±1.78 ^{Aa}	-	-	-	-	-	693.94	704	
	己醛	9.93	7.54±2.16 ^{Aa}	11.50±3.36 ^{Ab}	-	-	40.89±4.70 ^{Bb}	46.44±9.44 ^{Bb}	4.66±0.56 ^{Aa}	-	798.12	802
	庚醛	14.54	-	6.69±2.73 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	900.23	913
	2-庚醛	17.02	1.71±0.70 ^{Aa}	2.50±0.45 ^{Ab}	-	-	-	-	-	-	956.78	963
	苯甲醛	17.23	6.14±1.49 ^{Ba}	10.1±1.33 ^{Bb}	-	-	1.29±0.49 ^{Aa}	1.95±0.40 ^{Aa}	1.62±0.63 ^{Aa}	-	961.55	964
	辛醛	18.98	6.72±0.56 ^{Ba}	8.49±1.76 ^{Bb}	-	-	4.27±0.48 ^{Ab}	3.78±0.33 ^{Aa}	-	-	1001.66	1005
	苯乙醛	20.72	1.79±0.23 ^{Ab}	1.33±0.05 ^{Aa}	-	-	1.45±0.29 ^{Aa}	-	-	-	1044.17	1043
	2-辛烯醛	21.26	3.62±0.40 ^{Ba}	4.63±1.73 ^{Aa}	-	-	1.78±0.03 ^{Aa}	-	-	-	1057.50	1058
	壬醛	23.10	6.87±0.48 ^{Bb}	8.62±1.49 ^{Bc}	1.64±0.13 ^{Ba}	1.42±0.12 ^{Aa}	2.08±0.18 ^{Ab}	3.31±0.46 ^{Ac}	1.25±0.18 ^{Aa}	1.39±0.39 ^{Aa}	1102.71	1102
	2-壬醛	25.24	2.59±0.27 ^{Aa}	2.84±0.47 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	1159.11	1156
	2,4-壬二烯醛	27.34	3.18±0.59 ^{Aa}	4.90±2.07 ^{Ab}	-	-	-	-	-	-	1214.67	1210
	2-癸烯醛	28.97	-	-	-	-	-	1.89±0.38 ^{Ab}	1.27±0.18 ^{Aa}	1.4±0.07 ^{Aa}	1258.57	1259
	2,4-癸二烯醛	31.23	5.41±1.07 ^{Aa}	5.18±1.15 ^{Ba}	-	-	-	1.41±0.28 ^{Aa}	-	-	1318.30	1325
	2-十一碳烯醛	33.12	14.81±2.18 ^{Ab}	12.39±2.38 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	1366.31	1350
	十三醛	37.30	0.98±0.10 ^{Ab}	0.65±0.12 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	1508.23	1517
	十六醛	43.15	16.58±2.04 ^{Ab}	17.33±1.64 ^{Ab}	15.48±1.15 ^{Ab}	12.79±1.07 ^{Aa}	21.38±1.43 ^{Bb}	26.61±1.37 ^{Bc}	31.16±1.29 ^{Bd}	17.49±1.77 ^{Ba}	1812.22	1818
	9-十八醛	46.34	3.77±0.51 ^{Ab}	4.33±0.60 ^{Ab}	3.94±0.33 ^{Ab}	3.48±0.36 ^{Aa}	-	-	8.86±0.84 ^{Ba}	-	1991.19	1995
	十八醛	46.66	2.92±0.69 ^{Ab}	3.60±0.54 ^{Ab}	2.48±0.37 ^{Aa}	2.27±0.21 ^{Aa}	-	-	-	-	2015.07	2037
酮类	2-戊酮	5.63	5.69±2.16 ^{Aa}	8.14±0.64 ^{Ab}	8.18±1.76 ^{Ab}	6.34±0.69 ^{Ab}	5.34±0.74 ^{Aa}	6.85±1.57 ^{Ab}	8.15±1.07 ^{Ab}	5.68±1.00 ^{Aa}	679.17	682
	2-甲基-3-辛酮	18.20	14.19±0.63 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	983.77	985	
	6-戊基-2H-四氢吡喃-2-酮	36.89	0.84±0.08 ^{Ab}	-	0.69±0.07 ^{Aa}	-	0.80±0.09 ^{Ab}	-	0.70±0.04 ^{Aa}	-	1491.13	1493
醇类	正丁醇	5.05	55.81±16.18 ^{Ab}	37.24±2.61 ^{Aa}	36.08±5.35 ^{Aa}	39.85±1.73 ^{Ba}	34.33±5.17 ^{Aa}	31.86±2.28 ^{Aa}	37.60±3.8 ^{Aa}	34.17±3.14 ^{Aa}	655.15	663
	3-甲基-1-丁醇	7.33	4.90±0.67 ^{Ab}	4.81±1.63 ^{Bb}	5.53±1.72 ^{Ab}	2.54±0.15 ^{Ba}	5.41±0.58 ^{Ab}	1.83±0.14 ^{Aa}	6.20±0.79 ^{Ab}	2.11±0.29 ^{Aa}	731.02	726
	1-戊醇	8.65	1.73±0.40 ^{Aa}	1.52±0.36 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	765.08	764
	1-己醇	13.08	9.33±0.79 ^{Bb}	8.38±0.32 ^{Ba}	9.73±0.64 ^{Bb}	8.26±0.69 ^{Aa}	8.27±0.34 ^{Ab}	6.26±0.99 ^{Aa}	7.87±0.68 ^{Ab}	7.16±0.84 ^{Aab}	868.03	865
	2-乙基-1-己醇	20.02	3.33±0.43 ^{Bb}	2.48±0.38 ^{Aa}	3.01±0.09 ^{Ab}	2.33±0.2 ^{Aa}	2.21±0.37 ^{Aa}	2.40±0.19 ^{Aa}	3.04±0.38 ^{Ab}	2.08±0.45 ^{Aa}	1027.02	1029
1-辛醇	21.78	2.08±0.15 ^{Ba}	1.77±0.77 ^{Aa}	-	-	1.40±0.49 ^{Aa}	-	-	-	1070.11	1070	
酸类	壬酸	29.09	-	5.41±1.54 ^{Aa}	5.35±1.83 ^{Aa}	3.71±0.74 ^{Aa}	-	-	-	-	1261.72	1278
	癸酸	33.08	-	-	4.53±0.39 ^{Ab}	2.74±0.59 ^{Aa}	6.44±0.32 ^{Aa}	8.13±1.38 ^{Aa}	6.42±1.56 ^{Aa}	6.19±1.94 ^{Ba}	1365.20	1357

续表 1

匹配项名称	RT/min	0 d				10 d				保留指数(计算)	保留指数*
		空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚	空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚		
十二烷酸	38.32	2.68±0.35 ^{Ab}	1.55±0.76 ^{Aa}	1.17±0.28 ^{Aa}	0.97±0.13 ^{Aa}	-	-	-	-	1557.14	1562
十四酸	41.93	8.55±1.3 ^{Ab}	7.22±0.15 ^{Ab}	3.86±1.21 ^{Aa}	2.51±1.27 ^{Aa}	12.55±1.13 ^{Ba}	16.50±2.07 ^{Bb}	15.69±1.82 ^{Bb}	11.41±1.68 ^{Ba}	1749.74	1756
十六碳烯酸	45.45	3.18±0.53 ^{Aa}	-	-	-	5.35±0.77 ^{Bab}	7.16±1.24 ^{Ac}	6.83±1.26 ^{Abc}	4.96±0.42 ^{Aa}	1933.772	1915
十六烷酸	45.78	35.6±6.57 ^{Ac}	23.04±9.79 ^{Ab}	18.55±4.97 ^{Aab}	12.49±3.94 ^{Aa}	48.89±5.61 ^{Bab}	58.42±9.85 ^{Bb}	58.17±8.71 ^{Bb}	42.25±3.66 ^{Ba}	1955.22	1960
丁酸乙酯	10.00	-	-	-	2.18±0.24 ^{Aa}	-	-	2.28±0.07 ^{Aa}	2.53±0.28 ^{Ab}	799.89	779/798
戊酸乙酯	14.47	-	-	1.14±0.63 ^{Aa}	1.15±0.27 ^{Aa}	3.76±0.88 ^{Ab}	1.48±0.49 ^{Aa}	3.49±0.50 ^{Bb}	3.25±1.24 ^B	898.81	900
己酸乙酯	18.76	96.40±13.32 ^{Aab}	84.46±13.19 ^{Aa}	114.85±11.54 ^{Bb}	97.72±12.56 ^{Aab}	84.1±6.36 ^{Aa}	81.46±16.77 ^{Aa}	97.65±10.02 ^{ab}	105.21±14.22 ^{Ab}	996.67	998
庚酸乙酯	22.78	5.60±0.23 ^{Ac}	4.84±0.32 ^{Ab}	4.87±0.31 ^{Ab}	4.11±0.25 ^{Aa}	5.36±0.21 ^{Aab}	4.67±0.3 ^{Aa}	4.66±0.57 ^{Aa}	6.27±1.18 ^{Bb}	1094.64	1068
辛酸乙酯	26.54	4.98±0.68 ^{Aa}	5.13±0.94 ^{Aa}	5.87±0.70 ^{Aa}	5.01±0.15 ^{Aa}	7.32±0.73 ^{Ba}	7.13±0.62 ^{Ba}	7.85±1.36 ^{Bab}	8.66±0.49 ^{Bb}	1193.21	1196
壬酸乙酯	30.16	2.78±0.62 ^{Ab}	1.86±0.16 ^{Aa}	2.36±0.17 ^{Ab}	1.55±0.08 ^{Aa}	2.3±0.21 ^{Ab}	1.98±0.09 ^{Aab}	2.03±0.28 ^{Aab}	1.91±0.32 ^{Ba}	1290.55	1296
9-癸酸乙酯	33.86	3.53±0.28 ^{Aab}	3.16±0.57 ^{Aa}	3.97±0.41 ^{Ab}	3.38±0.22 ^{Aa}	4.69±0.27 ^{Ba}	5.13±0.15 ^{Bab}	5.65±0.43 ^{Bb}	5.48±0.76 ^{Bb}	1385.03	1390
癸酸乙酯	34.13	16.89±2.12 ^{Aa}	15.45±1.41 ^{Aa}	22.03±1.96 ^{Ab}	19.97±1.06 ^{Ab}	26.72±1.42 ^{Ba}	30.42±0.81 ^{Bab}	34.22±3.25 ^{Bb}	31.36±4.62 ^{Bb}	1392.07	1396
酯类 十二烷酸乙酯	38.97	6.72±0.72 ^{Aa}	6.73±0.35 ^{Aa}	7.65±0.56 ^{Ab}	6.76±0.49 ^{Aa}	9.65±0.71 ^{Ba}	12.19±0.58 ^{Bb}	12.64±0.65 ^{Bb}	10.58±1.77 ^{Ba}	1588.79	1581
十四酸乙酯	42.59	20.69±2.27 ^{Aa}	24.47±1.96 ^{Ab}	25.2±1.23 ^{Ab}	22.84±2.28 ^{Aab}	40.33±3.41 ^{Ba}	57.01±4.32 ^{Bb}	53.05±2.77 ^{Bb}	39.89±3.16 ^{Ba}	1784.08	1794
十五酸乙酯	44.65	0.57±0.06 ^{Ab}	0.61±0.07 ^{Ab}	0.28±0.24 ^{Aa}	-	0.70±0.26 ^{Aa}	0.93±0.10 ^{Bb}	1.17±0.16 ^{Bc}	0.63±0.09 ^{Aa}	1886.06	1880
十六酸乙酯	45.21	0.82±0.12 ^{Aa}	1.02±0.03 ^{Ab}	-	-	1.02±0.31 ^{Aa}	-	1.23±0.42 ^{Aa}	0.93±0.28 ^{Aa}	1917.95	1927
十六碳烯酸乙酯	45.94	12.42±1.37 ^{Aab}	14.29±1.57 ^{Ab}	13.26±1.24 ^{Aab}	12.11±1.26 ^{Aa}	23.65±1.72 ^{Ba}	34.74±2.29 ^{Bb}	33.87±3.57 ^{Bb}	23.86±2.88 ^{Ba}	1965.65	1975
十六酸乙酯	46.25	64.46±7.22 ^{Aa}	86.71±6.38 ^{Ac}	76.54±6.21 ^{Ab}	69.29±6.28 ^{Aab}	128.59±6.96 ^{Ba}	184.4±12.78 ^{Bb}	167.65±10.65 ^{Bb}	130.87±18.46 ^{Ba}	1985.81	1994
亚油酸乙酯	48.33	21.72±7.31 ^{Aa}	21.17±2.52 ^{Aa}	20.64±1.9 ^{Aa}	17.57±1.82 ^{Aa}	33.85±1.61 ^{Ba}	44.54±3.26 ^{Bb}	50.96±7.46 ^{Bb}	35.37±4.5 ^{Ba}	2148.62	2155
十八酸乙酯	48.72	-	9.19±0.73 ^{Ab}	8.67±0.79 ^{Aab}	7.99±0.76 ^{Aa}	12.03±2.62 ^{Aa}	16.25±0.85 ^{Bab}	20.13±8.39 ^{Ab}	13.33±2.29 ^{Ba}	2179.87	2191
邻苯二甲酸二异丁酯	44.06	4.38±1.47 ^{Bb}	3.34±2.65 ^{Ab}	0.68±0.33 ^{Aa}	-	2.13±0.48 ^{Aa}	3.45±0.28 ^{Aa}	6.85±3.18 ^{Bb}	0.88±0.06 ^{Aa}	1857.29	1877
1,1-二乙氧基-3-甲基-丁烷	16.70	1.28±0.12 ^{Ab}	1.19±0.14 ^{Ab}	1.59±0.10 ^{Ac}	0.85±0.11 ^{Aa}	1.85±0.73 ^{Aa}	1.27±0.34 ^{Aa}	1.60±0.26 ^{Aa}	1.42±0.32 ^{Aa}	949.45	955
烷烃类 十二烷	26.70	-	0.84±0.20 ^{Aa}	0.76±0.18 ^{Aa}	-	5.86±2.46 ^{Ab}	0.90±0.12 ^{Aa}	1.19±0.29 ^{Aa}	0.92±0.2 ^{Aa}	1197.31	-
十四烷	34.33	0.59±0.12 ^{Aa}	0.56±0.31 ^{Aa}	0.80±0.20 ^{Aa}	0.73±0.08 ^{Aa}	1.04±0.44 ^{Aa}	0.77±0.15 ^{Aa}	1.02±0.20 ^{Aa}	0.88±0.13 ^{Aa}	1397.15	236.21
十五烷	37.03	0.47±0.03 ^{Ba}	-	-	-	0.41±0.02 ^{Ab}	0.43±0.04 ^{Ab}	0.33±0.02 ^{Aa}	-	1496.38	-
十六烷	39.12	0.49±0.07 ^{Aa}	0.92±0.40 ^{Ab}	0.76±0.12 ^{Aab}	0.56±0.05 ^{Aa}	0.44±0.09 ^{Aa}	0.77±0.08 ^{Abc}	0.84±0.09 ^{Ac}	0.63±0.05 ^{Ab}	1595.57	-
十八烷	42.73	-	-	-	-	-	0.98±0.18 ^{Aa}	0.88±0.17 ^{Aa}	-	1791.13	-
醚类 正辛基醚	40.23	0.67±0.16 ^{Ab}	0.69±0.25 ^{Ab}	0.56±0.06 ^{Aab}	0.40±0.07 ^{Aa}	0.72±0.14 ^{Aa}	1.26±0.20 ^{Ab}	1.49±0.15 ^{Bb}	2.59±0.27 ^{Bc}	1658.25	1657
咪喃类 2-戊基咪喃	18.39	4.82±2.21 ^{Ab}	2.78±0.81 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	988.22	991

注: AU (Abundance units) 表示峰面积; RT (Retention time) 表示保留时间; a-c 表示在同一储藏期, 不同腊肠间游离脂肪酸含量差异的显著性; A、B 表示相同的处理下, 不同储藏期的腊肠间游离脂肪酸含量的显著性, 不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$); *保留指数来源为 <https://webbook.nist.gov/>。

表2 广式腊肠中游离氨基酸含量 (mg/100 g 腊肠)

Table 2 The free amino acid contents (mg/100 g sausage) of Cantonese sausages

项目	0 d				10 d				
	空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚	空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚	
必需氨基酸	Lys	72.87±1.43 ^{Ab}	66.08±0.93 ^{Aa}	71.73±0.67 ^{Ab}	71.33±1.87 ^{Ab}	83.1±0.50 ^{Bb}	79.74±0.44 ^{Ba}	89.9±1.48 ^{Bc}	89.17±2.08 ^{Bc}
	Phe	47.17±0.46 ^{Abc}	40.81±0.51 ^{Aa}	45.96±0.56 ^{Ab}	48.64±1.42 ^{Ac}	49.87±0.32 ^{Bb}	46.32±0.31 ^{Ba}	54.65±0.92 ^{Bc}	57.96±3.42 ^{Bc}
	Met	27.79±3.73 ^{Aa}	27.88±0.33 ^{Aa}	30.41±0.3 ^{Aa}	30.34±1.04 ^{Aa}	28.66±0.30 ^{Aa}	32.41±0.74 ^{Bb}	32.03±2.70 ^{Ab}	36.38±1.28 ^{Bc}
	Thr	45.47±0.51 ^{Ac}	39.27±0.69 ^{Aa}	43.37±0.56 ^{Ab}	45.58±1.44 ^{Ac}	47.10±0.18 ^{Bb}	45.59±0.68 ^{Ba}	51.93±0.64 ^{Bc}	54.04±1.18 ^{Bd}
	Ile	46.40±0.70 ^{Ab}	41.48±0.52 ^{Aa}	47.16±0.54 ^{Ab}	49.41±1.45 ^{Ac}	48.48±0.36 ^{Ba}	46.82±0.52 ^{Ba}	53.97±0.73 ^{Bb}	57.91±1.73 ^{Bc}
	Leu	70.16±0.67 ^{Ab}	63.00±0.93 ^{Aa}	69.64±0.90 ^{Ab}	71.35±2.08 ^{Ab}	72.76±0.46 ^{Ba}	70.71±0.57 ^{Ba}	79.6±1.08 ^{Bb}	83.00±2.32 ^{Bc}
	Val	48.92±0.89 ^{Ab}	45.84±0.64 ^{Aa}	50.03±0.65 ^{Abc}	51.26±1.50 ^{Ac}	51.86±0.35 ^{Ba}	52.59±0.71 ^{Ba}	57.69±0.83 ^{Bb}	61.47±1.33 ^{Bc}
	∑EAA	358.78±6.23 ^{Ab}	324.35±4.04 ^{Aa}	358.28±4.12 ^{Ab}	367.9±10.74 ^{Ab}	381.83±2.40 ^{Ba}	374.17±3.63 ^{Ba}	419.77±5.23 ^{Bb}	439.95±12.94 ^{Bc}
非必需氨基酸	Gly	58.02±0.58 ^{Ab}	55.35±0.72 ^{Aa}	60.05±0.69 ^{Abc}	60.71±2.11 ^{Ac}	61.54±0.36 ^{Ba}	60.59±0.35 ^{Ba}	66.52±0.80 ^{Bb}	69.81±1.43 ^{Bc}
	Ala	161.02±2.07 ^{Aa}	160.96±2.55 ^{Aa}	170.53±2.11 ^{Ab}	172.14±5.69 ^{Ab}	166.60±1.03 ^{Ba}	173.25±1.20 ^{Bb}	181.28±2.52 ^{Bc}	191.66±3.52 ^{Bd}
	Pro	25.45±0.12 ^{Aab}	24.6±0.25 ^{Aa}	25.37±0.37 ^{Aab}	25.55±0.81 ^{Ab}	25.22±0.13 ^{Aa}	27.35±0.40 ^{Bb}	27.23±0.35 ^{Bb}	28.62±0.64 ^{Bc}
	Tyr	38.93±0.31 ^{Ab}	34.86±0.66 ^{Aa}	38.37±0.53 ^{Ab}	39.5±1.15 ^{Ab}	40.31±0.35 ^{Ba}	38.68±0.39 ^{Ba}	43.17±0.63 ^{Bb}	45.88±2.01 ^{Bc}
	Ser	52.94±0.56 ^{Ab}	46.00±0.70 ^{Aa}	53.04±0.65 ^{Ab}	53.63±1.67 ^{Ab}	56.59±0.28 ^{Ba}	55.12±0.49 ^{Ba}	62.51±0.89 ^{Bb}	64.64±1.36 ^{Bc}
	Cys	1.32±0.86 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	-
	Asp	1.37±0.10 ^{Ab}	0.73±0.05 ^{Aa}	0.87±0.11 ^{Aa}	0.72±0.08 ^{Aa}	1.79±0.15 ^{Bb}	0.86±0.03 ^{Ba}	1.65±0.14 ^{Bb}	0.98±0.06 ^{Ba}
	Glu	82.26±1.17 ^{Ac}	72.76±1.48 ^{Aa}	79.06±1.41 ^{Ab}	77.71±1.72 ^{Ab}	92.30±0.50 ^{Bb}	88.63±0.53 ^{Ba}	101.11±1.57 ^{Bc}	99.55±1.81 ^{Bc}
	∑NEAA	421.31±4.66 ^{Ab}	395.27±6.24 ^{Aa}	427.28±5.60 ^{Ab}	429.95±13.03 ^{Ab}	444.34±2.43 ^{Ba}	444.48±3.23 ^{Ba}	483.46±6.63 ^{Bb}	501.14±10.48 ^{Bc}
	其它氨基酸	Arg	48.81±0.63 ^{Ac}	43.39±0.74 ^{Aa}	46.76±0.63 ^{Ab}	46.21±1.22 ^{Ab}	51.91±0.38 ^{Ba}	50.62±0.41 ^{Ba}	55.83±0.94 ^{Bb}
Tau		166.62±1.37 ^{Aa}	180.94±3.97 ^{Ab}	184.97±1.6 ^{Ab}	180.22±5.51 ^{Ab}	179.23±0.84 ^{Ba}	190.54±1.68 ^{Bb}	191.3±3.02 ^{Bb}	202.16±2.75 ^{Bc}
PEA		23.55±1.33 ^{Aa}	27.42±1.95 ^{Bb}	26.69±0.12 ^{Ab}	30.25±1.72 ^{Ac}	23.01±1.07 ^{Aa}	22.79±1.02 ^{Aa}	26.37±1.28 ^{Ab}	31.49±0.88 ^{Ac}
a-AAA		13.85±0.10 ^{Aa}	-	-	-	-	-	-	-
Cit		-	7.19±0.07 ^{Ba}	-	-	5.77±0.03 ^{Aa}	6.15±0.20 ^{Abc}	5.84±0.17 ^{Aab}	6.22±0.27 ^{Ac}
a-ABA		6.84±0.02 ^{Bc}	5.78±0.06 ^{Ab}	5.47±0.06 ^{Aa}	5.76±0.11 ^{Ab}	5.41±0.03 ^{Aa}	5.75±0.37 ^{Aa}	5.55±0.07 ^{Aa}	6.43±0.52 ^{Ab}
Cysthi		2.98±1.64 ^{Aa}	2.20±0.51 ^{Aa}	2.50±0.11 ^{Aa}	2.29±0.27 ^{Aa}	1.03±0.02 ^{Aa}	2.30±0.57 ^{A^bc}	1.58±0.75 ^{Aab}	3.47±0.88 ^{Ac}
b-Ala		15.97±0.19 ^{Bb}	14.38±0.3 ^{Aa}	13.94±0.28 ^{Aa}	13.8±1.07 ^{Aa}	12.75±0.68 ^{Aa}	14.61±0.11 ^{Ab}	13.82±0.92 ^{Ab}	14.9±0.80 ^{Ab}
b-AiBA		7.44±0.07 ^{Aa}	7.94±0.09 ^{Ba}	7.37±0.58 ^{Aa}	7.47±1.79 ^{Aa}	6.00±1.27 ^{Aa}	7.69±0.09 ^{Aa}	6.90±1.40 ^{Aa}	7.38±1.53 ^{Aa}
g-ABA		0.76±0.02 ^{Aa}	0.77±0.02 ^{Aa}	0.77±0.02 ^{Aa}	0.87±0.03 ^{Ab}	0.81±0.01 ^{Bb}	0.77±0.01 ^{Aa}	0.81±0.01 ^{Bb}	0.97±0.02 ^{Bc}
EOHNH2		9.44±0.43 ^{Aa}	12.56±0.71 ^{Ac}	10.47±0.31 ^{Ab}	11.07±0.60 ^{Ab}	11.37±0.2 ^{Ba}	13.32±0.36 ^{Ab}	11.43±0.37 ^{Ba}	13.34±0.53 ^{Bb}

续表 2

项目	0 d				10 d			
	空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚	空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚
Hyls	2.57±0.62 ^{Ab}	1.43±0.03 ^{Aa}	1.55±0.02 ^{Aa}	1.46±0.02 ^{Aa}	1.60±0.01 ^{Ab}	1.61±0.04 ^{Bb}	1.53±0.02 ^{Aa}	1.54±0.02 ^{Ba}
Orn	2.79±0.47 ^{Ab}	1.87±0.06 ^{Aa}	2.31±0.04 ^{Aa}	2.29±0.08 ^{Aa}	2.50±0.12 ^{Ac}	2.02±0.04 ^{Ba}	2.28±0.08 ^{Ab}	2.14±0.06 ^{Aab}
3Mehis	25.53±0.46 ^{Ab}	23.31±0.49 ^{Aa}	25.31±0.42 ^{Ab}	25.73±0.68 ^{Ab}	27.18±0.18 ^{Ba}	26.86±0.17 ^{Ba}	29.99±0.54 ^{Bb}	30.74±0.67 ^{Bb}
其它氨基酸								
Ans	122.81±1.92 ^{Aa}	148.48±2.43 ^{Ac}	143.95±2.54 ^{Abc}	140.83±5.47 ^{Ab}	135.29±0.65 ^{Ba}	147.09±1.87 ^{Ac}	140.35±1.36 ^{Ab}	146.44±3.01 ^{Ac}
Car	4018.25±93.27 ^{Aa}	4398.59±98.04 ^{Ab}	4299.84±74.95 ^{Ab}	4266.92±145.31 ^{Ab}	4036.89±16.94 ^{Aa}	4321.6±54.92 ^{Ac}	4184.78±49.28 ^{Ab}	4439.59±75.46 ^{Ad}
Hypro	1.94±0.26 ^{Aa}	1.54±0.63 ^{Aa}	1.81±0.79 ^{Aa}	1.63±0.33 ^{Aa}	1.56±0.16 ^{Aa}	1.28±0.21 ^{Aa}	1.53±0.32 ^{Aa}	1.52±0.12 ^{Aa}
ΣFAA	5250.25±102.89 ^{Aa}	5597.4±116.98 ^{Ab}	5559.27±90.99 ^{Ab}	5534.66±183.04 ^{Ab}	5328.48±22.05 ^{Aa}	5633.66±67.32 ^{Ab}	5583.09±69.24 ^{Ab}	5904.91±99.97 ^{Bc}

注: ΣNEAA 表示总非必需氨基酸含量; ΣFAA 表示总游离氨基酸含量; ΣEAA 表示总必需氨基酸含量; a-c 表示在同一储藏期, 不同腊肠间游离脂肪酸含量差异的显著性; A、B 表示相同的处理下, 不同储藏期的腊肠间游离脂肪酸含量的显著性; -表示未检出该物质; 不同字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

2.2 桑椹多酚对广式腊肠中游离脂肪酸含量

的影响

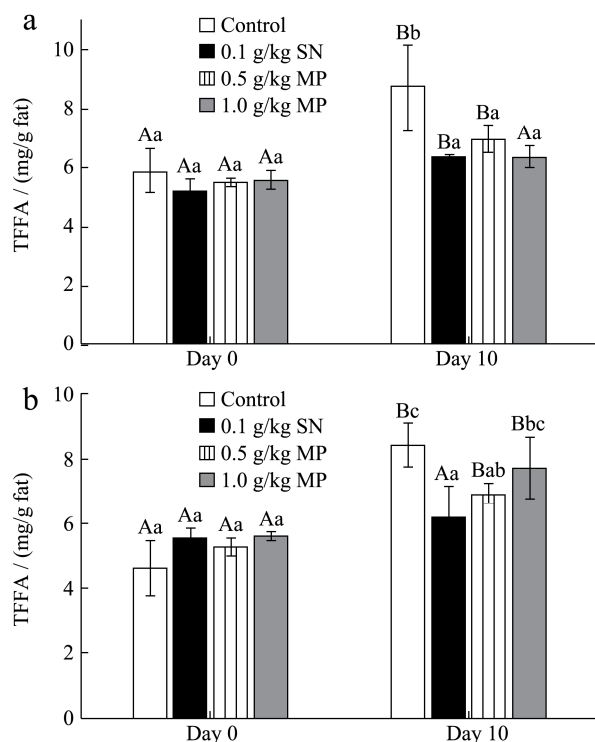


图2 广式腊肠中瘦肉部分(a)和肥丁部分(b)总游离脂肪酸含量(mg/g 脂肪)

Fig.2 The total free fatty acid (TFFA) contents of muscle tissue (a) and fat tissue (b) in Cantonese sausages (mg/g fat)

注: SN表示亚硝酸钠; MP表示桑椹多酚; a~c表示在同一储藏期,不同腊肠间游离脂肪酸含量差异的显著性; A、B表示相同的处理下,不同储藏期的腊肠间游离脂肪酸含量的显著性,不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

图2a和图2b分别表示的是腊肠瘦肉和肥丁部分总游离脂肪酸的含量。从图中的数据可以看出,经过了10 d的储藏期后,腊肠的游离脂肪酸含量显著提高。具体来说,在储藏初期(0 d),样品总游离脂肪酸含量在4.61~5.58 mg/g脂肪,经过10 d的储藏后,总游离脂肪酸含量增加至6.18~8.78 mg/g脂肪,该结果与孙为正^[3]的研究结果相似。肌肉内源酶系统在游离脂肪酸的产生中发挥着重要的作用^[20],游离脂肪酸的增加主要源于脂质水解酶的作用。其他发酵肉制品(如西班牙马肉火腿肉^[21]、干熏鹅肉^[22]等)中也有过类似报道,在Lorenzo^[21]的研究中,在西班牙马肉火腿肉的总游离脂肪酸含量由原始材料的433.7 mg/100 g脂肪在发酵成熟后期增加到2655.5 mg/100 g脂肪。肌肉部分和肥丁部分的MUFA(单不饱和脂肪酸)和PUFA(多不饱和脂肪酸)经过10 d的储藏期后,均显著提

高,这与总游离脂肪酸的变化是相似的,这表明经过10 d的储藏期,不饱和脂肪酸的生成速度大于降解速度。

游离脂肪酸在肉制品风味形成中具有重要的作用。肉制品中脂质降解后形成游离脂肪酸,后者在氧化条件下进一步形成风味物质^[23]。棕榈酸、硬脂酸、油酸和亚油酸是腊肠中主要的游离脂肪酸。花生四烯酸只在肌肉部分检测出,肥丁部分未检测出花生四烯酸,这两者之间的差异可能是由于磷脂酶活力的不同造成的^[3,24]。

在0 d,空白对照组样品的总游离脂肪酸含量与亚硝组和桑椹多酚组并无显著差异($p > 0.05$)。然而,在储藏末期(10 d),未添加抗氧化剂组的总游离脂肪酸含量在各组中最高。游离脂肪酸是脂肪水解和氧化的关键产物,其含量主要取决于其自身的形成和分解速率^[25]。亚硝酸钠和桑椹多酚可能通过抑制脂质水解和氧化,从而减缓了游离脂肪酸的积累。尽管添加亚硝酸钠和桑椹多酚的腊肠游离脂肪酸含量上存在显著差异,但是二者在游离脂肪酸种类上未表现出明显差别,这表明桑椹多酚的添加主要影响脂质的水解和氧化的速度,但不会造成游离脂肪酸种类上的差异。

2.3 桑椹多酚对广式腊肠中游离氨基酸的影

响

腊肠储藏期游离氨基酸含量的变化结果如表3所示。肉制品中游离氨基酸的含量主要取决于pH、盐浓度、微生物的组成和加工条件(时间、温度和水活度),而这些参数主要是通过影响氨肽酶活力来控制蛋白质的水解和游离氨基酸的释放^[26]。

由表3中的数据可以看出,添加桑椹多酚的腊肠中,大多数游离氨基酸的含量显著高于空白对照组($p < 0.05$),这说明桑椹多酚的加入可能会促进蛋白质的水解。与此相似,Cheng等^[27]研究中也指出桑椹多酚会与肉蛋白相互作用,促使蛋白质结构展开,影响蛋白质的功能性质。在各组中,除肌肽等个别氨基酸外,储藏末期(10 d)的腊肠中大多数游离氨基酸含量显著高于储藏初期(0 d)。Santos等^[28]的研究结果也表明,随着储藏时间的延长,干发酵香肠中的游离氨基酸含量呈上升趋势。在10 d的储藏期后,添加了桑椹多酚的腊肠必需氨基酸、非必需氨基酸与空白对照组相比,均显著提高,尤其是1.0 g/kg桑椹多酚组。这再次表明桑椹多酚促进了腊肠中游离氨基酸的释放。除了蛋白质的氧化降解,肉制品中蛋白质在内源酶作用下的水解是形成游离氨基酸的重要途径^[18]。

在内源酶（如钙蛋白酶和组织蛋白酶）的作用下，蛋白质被初步分解，产生中等大小的肽，然后这些肽进一步被细菌肽酶水解成游离氨基酸^[18]。从该角度上说，桑椹多酚可能是通过影响内源酶、细菌肽酶的代谢从而影响腊肠中蛋白质的降解，促进了游离氨基酸的释放。同时，蛋白质氧化会造成氨基酸侧链的改变，也会造成氨基酸含量的下降，多酚可能是因为通过抑制蛋白质氧化，进而降低氨基酸侧链的修饰，从而提高了腊肠中游离氨基酸的含量^[28]。

从储藏末期氨基酸的组成来看，Ala、Arg、Ans、Glu、Lys 是腊肠中主要的氨基酸。其中，Ala、Glu 和 Arg 是肉制品中主要的呈味氨基酸。Arg 会影响干腌肉制品的风味^[28]，Ala 可以带来甜味^[18]，Glu 可以带来鲜美的味道。在储藏初期（0 d），添加桑椹多酚组腊肠的 Glu 和 Arg 含量显著低于空白对照组；然而，随着储藏期的延长，桑椹多酚组的 Glu 和 Arg 逐渐积累，在储藏末期显著高于空白对照组。这表明，在腊肠的储藏过程中，桑椹多酚促进了 Glu 和 Arg 这两种呈味氨基酸的释放。这可能是因为前期加工过程中桑椹多酚与肉蛋白的结合提高了蛋白质的结构稳定性，蛋白质的降解与水解受到了抑制；然而，随着储藏期的延

长，桑椹多酚逐渐被释放和降解，造成蛋白质更多活性位点的暴露，因此蛋白质的水解作用得到增强^[29]。

2.4 感官评价

对广式腊肠的感官评价如表 3 所示，由于亚硝酸钠具有护色和发色的功能，使腊肠呈现亮红色，没有添加亚硝酸钠的空白组腊肠颜色暗红，而添加了桑椹多酚的腊肠呈暗紫色，与传统的腊肠颜色差别较大。但是，添加 1.0 g/kg 桑椹多酚组的气味得分要显著地高于空白对照组，感官评价小组成员普遍反映添加了桑椹多酚之后的腊肠的肉腥味比空白组和亚硝酸钠组低，这可能是因为桑椹多酚本身的气味可以掩盖肉的味道，Xu 等^[10]的研究也得出了相似的结果。相关研究指出，己醛是兔肉中腥味的主要来源^[30]，表 1 和图 1 的结果表明桑椹多酚可以显著降低腊肠中己醛的含量，这可能是添加桑椹多酚组腊肠腥味得到改善的重要原因。桑椹多酚总体的可接受度虽然低于亚硝酸钠组，但是显著高于空白对照组。总体来说，桑椹多酚的添加虽然会对广式腊肠的色泽产生不利的影响，但是会对腊肠的感官特性产生一定的有利影响。

表 3 广式腊肠的感官评价

Table 3 The sensory analysis of Cantonese sausages

项目	空白组	0.1 g/kg 亚硝酸钠	0.5 g/kg 桑椹多酚	1.0 g/kg 桑椹多酚
颜色	4.36±0.92 ^a	6.73±0.47 ^b	3.64±0.92 ^a	3.64±1.03 ^a
气味	4.64±1.12 ^a	5.09±1.14 ^{ab}	5.09±1.22 ^{ab}	5.73±0.9 ^b
滋味	5.09±1.22 ^a	5.64±1.12 ^a	5.36±1.29 ^a	5.36±1.43 ^a
质构	5.45±1.04 ^a	5.18±1.17 ^a	4.45±0.93 ^a	4.45±1.21 ^a
整体可接受性	4.73±1.01 ^a	6.09±0.94 ^b	4.91±1.38 ^a	5.18±1.17 ^{ab}

注：同行右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $p < 0.05$ ）。

3 结论

本文首次探究了桑椹多酚对广式腊肠风味的影响。研究发现，桑椹多酚可能会通过抑制脂质、蛋白质氧化和水解来改变腊肠风味物质的组成和含量。桑椹多酚的添加虽然未能使广式腊肠呈现原有的晶莹剔透的外观，抑制某些挥发性风味物质的产生，但是可以通过抑制己醛等腥味物质的产生从而弱化腊肠中的肉腥味。具体而言，添加桑椹多酚后腊肠中游离脂肪酸的合成和积累受到了限制，但呈味氨基酸（如Glu和Arg）的释放得到了显著提高。在储藏末期（10 d）添加了0.5 g/kg桑椹多酚的腊肠的Glu、Arg含量分别达到了101.11、55.83 mg/100 g腊肠。该研究结果有助于丰富人们关于植物多酚对肉制品品质的影响的认识，指导食品工作者合理地将植物多酚作为一类天然肉制品

氧化调节剂用于食品加工。

参考文献

- [1] Sun W Z, Zhao Q Z, Zhao H F, et al. Volatile compounds of Cantonese sausage released at different stages of processing and storage [J]. Food Chemistry, 2010, 121(2): 319-325
- [2] Tang R Y, Luo J, Wang W, et al. Rutin's natural source Flos sophorae as potential antioxidant and improver of fungal community in Chinese sausages [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 101: 435-443
- [3] 孙为正.广式腊肠加工过程中脂质水解、蛋白质降解及风味成分变化研究[D].广州:华南理工大学,2011
SUN Weizheng. Studies on lipolysis, proteolysis and flavor compounds during of processing of Cantonese sausage [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011

- [4] Jayawardana B, Liyanage R, Lalantha N, et al. Antioxidant and antimicrobial activity of drumstick (*Moringa oleifera*) leaves in herbal chicken sausages [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 64(2): 1204-1208
- [5] Nowaka A, Czyzowska A, Efenbergera M, et al. Polyphenolic extracts of cherry (*Prunus cerasus* L.) and blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) leaves as natural preservatives in meat products [J]. Food Microbiology, 2016: 142-149
- [6] Zhang J, Wang Y, Pan D D, et al. Effect of black pepper essential oil on the quality of fresh pork during storage [J]. Meat Science, 2016, 117: 130-136
- [7] 孔庆军. 葡萄科植物中天然多酚类化合物研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012
KONG Qingjun. Studies of polyphenols from vitaceous plants [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012
- [8] Cao Y G, Xiong Y L. Chlorogenic acid-mediated gel formation of oxidatively stressed myofibrillar protein [J]. Food Chemistry, 2015, 180: 235-243
- [9] Qin L G, Yu J, Zhu J M, et al. Ultrasonic-assisted extraction of polyphenol from the seeds of *Allium senescens* L. and its antioxidative role in Harbin dry sausage [J]. Meat Science, 2021, 172: 108351
- [10] Xu L, Zhu M J, Liu X M, et al. Inhibitory effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenol on the lipid and protein oxidation of dried minced pork slices during heat processing and storage [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 91: 222-228
- [11] Muriel E, Antequera T, Petró M J, et al. Volatile compounds in Iberian dry-cured loin [J]. Meat Science, 2004, 68(3): 391-400
- [12] Xiang R, Cheng J R, Zhu M J, et al. Effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenols as antioxidant on physiochemical properties, oxidation and bio-safety in Cantonese sausages [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 116: 108504
- [13] 向荣. 桑椹多酚对广式腊肠品质及其蛋白质氧化调控机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020
XIANG Rong. Studies on the mechanism of mulberry polyphenols on the quality and protein oxidation of Cantonese sausage [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020
- [14] Chen Q, Hu Y Y, Wen R X, et al. Characterisation of the flavour profile of dry fermented sausages with different NaCl substitutes using HS-SPME-GC-MS combined with electronic nose and electronic tongue [J]. Meat Science, 2021, 172: 108338
- [15] Chen Q, Kong B H, Han Q, et al. The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in Harbin dry sausages and its flavour development [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 77: 389-396
- [16] Munekata P, Domínguez R, Franco D, et al. Effect of natural antioxidants in Spanish salchichón elaborated with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix [J]. Meat Science, 2017, 124: 54-60
- [17] Ledezma-Zamora K, Sánchez-Gutiérrez R, Ramírez-Leiva A, et al. Residual nitrite in processed meat products in Costa Rica: method validation, long-term survey and intake estimations [J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130082
- [18] Chen Q, Kong B H, Han Q, et al. The role of bacterial fermentation in the hydrolysis and oxidation of sarcoplasmic and myofibrillar proteins in Harbin dry sausages [J]. Meat Science, 2016, 121: 196-206
- [19] 周慧敏, 赵冰, 吴倩蓉, 等. 黑白胡椒腊肠贮藏期中气味活性物质演变及异味分析[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 162-171
ZHOU Huimin, ZHAO Bing, WU Qianrong, et al. Change of odour activity compounds and analysis of off-flavour substances for black and white pepper-sausage in storage [J]. Food Science, 2020, 41(24): 162-171
- [20] Maria-Jos Motilva F T A J. Assay of lipase and esterase activities in fresh pork meat and dry-cured ham [J]. Zeitschrift für Lebensmittel - Untersuchung und Forschung, 1992, 195(5): 446-450
- [21] Lorenzo J M. Changes on physico-chemical, textural, lipolysis and volatile compounds during the manufacture of dry-cured foal "cecina" [J]. Meat Science, 2014, 96(1): 256-263
- [22] Wang Y, Jiang Y T, Cao J X, et al. Study on lipolysis-oxidation and volatile flavour compounds of dry-cured goose with different curing salt content during production [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 33-40
- [23] Olivares A, Navarro J L, Flores M. Effect of fat content on aroma generation during processing of dry fermented sausages [J]. Meat Science, 2011, 87(3): 264-273
- [24] 姚昕, 秦文, 齐春梅, 等. 花生四烯酸的生理活性及其应用[J]. 粮油加工与食品机械, 2004, 5: 57-59
YAO Xin, QIN Wen, QI Chunmei, et al. Physiological activity and application of arachidonic acid [J]. Machinery for Cereals Oil and Food Processing, 2004, 5: 57-59
- [25] Zhao B, Zhou H M, Zhang S L, et al. Changes of protein oxidation, lipid oxidation and lipolysis in Chinese dry sausage with different sodium chloride curing salt content [J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 328-337

(下转第52页)

