

入坛发酵对安岳坛子肉脂质代谢以及风味物质形成的影响

肖岚,李燮昕,鲜丹丹,刘妍佳,朱楠,熊敏*

(四川旅游学院 食品学院,四川 成都,610100)

摘 要 该文探究入坛发酵对坛子肉脂质代谢以及挥发性风味物质形成的影响,采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, gas chromatography-mass spectrometer)检测安岳坛子肉入坛前以及入坛发酵 20、40、60、75 d 的风味物质组成及其含量,测定脂肪酸组成及其含量。与入坛发酵前比较,发酵坛子肉中脂肪酶比活力升高,特别是发酵第 40 天和 60 天($P < 0.05$);发酵坛子肉酸价呈上升趋势,发酵第 75 天时酸价显著升高($P < 0.05$);发酵坛子肉过氧化值(peroxide value, POV)呈降低趋势,发酵第 75 天时极显著降低($P < 0.01$);发酵坛子肉 2-硫代巴比妥酸值(thiobarbituric acid, TBA)均显著升高($P < 0.05$)。发酵可促进坛子肉中游离脂肪酸含量增加($P > 0.05$),特别是发酵第 75 天时多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)含量极显著增加($P < 0.01$)。适当的发酵时间可促进坛子肉中特征风味的形成,比如正己醛、乙醇、1-辛烯-3-醇、3-羟基-2-丁酮、乙酸、乙酸乙酯、丙酸乙酯、正己酸乙酯、2,2,4,6,6-五甲基庚烷、2-正戊基呋喃、二甲基二硫。入坛发酵促进了坛子肉脂肪降解、氧化,有助于提高坛子肉 PUFA 含量及风味感官品质。

关键词 安岳坛子肉;风味物质;发酵;脂肪酸;动态变化

四川安岳坛子肉是将猪五花肉经过油炸之后再拌入香辛料,一层腌制萝卜丝一层肉入坛腌制发酵而形成的发酵肉制品,是一种历史悠久的传统肉制品,因入陶坛中腌制发酵而成名,故名坛子肉。安岳坛子肉具有浓郁的酱香风味,且脂肪部分晶莹剔透、肥而不腻,其典型品质及良好风味形成可能与入坛发酵过程中发生的一系列反应有关。廖定容^[1]对四川汉源罐罐肉的风味形成机理进行了初探,主要从蛋白质、脂肪、微生物、内源酶、美拉德反应、挥发性物质几个方面进行研究,结果发现罐罐肉独特的风味特征主要是通过蛋白质降解、脂肪水解氧化、美拉德与焦糖化反应共同作用而产生的。BOLZONI 等^[2]研究了不同发酵时间的 Parma 火腿在发酵过程中挥发性风味成分的变化,羰基化合物、酯、醇和醛是其主要挥发性风味成分。章建浩等^[3]研究了金华火腿传统工艺过程中挥发性风味物质的变化规律,高温成熟工艺过程中产生的大量羧酸构成其独特风味。王德宝等^[4]报道了发酵剂对羊肉香肠中蛋白质、脂质代谢与风味物质的影响,结果表明,添加复合发酵剂有助于提高香肠单不饱和脂肪酸含量及风味感官品质。陆应林^[5]对

南京板鸭加工过程中蛋白降解及风味物质进行了研究,结果表明,南京板鸭加工过程中共有 90 种化合物,成品南京板鸭中醛、醇、烃和酮类化合物含量较高。周才琼等^[6]分析了酸肉发酵过程中的风味物质,主要风味物质是癸酸乙酯和 2,4-癸二烯醛。以上研究提示,发酵肉制品典型品质及良好风味形成与发酵期间的微生物作用^[7]、蛋白质降解^[8-9]、氨基酸 Strecker 降解^[10]、脂肪的氧化和降解^[11-12]、美拉德反应^[13]密切相关。然而关于安岳坛子肉特征风味形成机理的研究报道比较鲜见,因此,本文选择安岳坛子肉入坛前以及入坛发酵 20、40、60、75 d 为研究对象,动态探究入坛发酵对坛子肉脂质代谢及风味物质形成的影响,以为安岳坛子肉风味形成的机制提供科学依据,也为安岳坛子肉的实际生产应用提供理论依据及数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

四川安岳坛子肉,委托安岳县普州坛子肉食品有限公司加工。

石油醚(沸程 30 ~ 60 ℃)、三氯甲烷、乙二胺四乙酸二钠(EDTA)、2-硫代巴比妥酸(TBA)等,均为分析纯;脂肪酶试剂盒,南京建成生物工程研究所。

1.2 仪器设备

Thermo Trace 1300 气相色谱,美国 Thermo 公司;

第一作者:博士,副教授(熊敏教授为通讯作者, E-mail: 123865637@qq.com)。

基金项目:四川省教育厅川菜发展研究中心项目(CC19Z05)

收稿日期:2019-07-10,改回日期:2019-09-10

Thermo scientific ISQ 质谱, 美国 Thermo 公司; PAL System 三合一进样器, 瑞士 CTC 公司; 100 μm PDMS 萃取纤维头, 美国 Supelco 公司; AUW220D 电子天平 (精度为 0.1 mg), 日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 坛子肉样品准备

委托安岳县普州坛子肉食品有限公司按照冬季生产的工艺流程制备坛子肉, 工艺流程如下:

猪五花肉 (四川三元杂交内江猪, 屠宰后排酸成熟, 采用五花肉作为原料, 切配成 500 g 左右的长条状) \rightarrow 晾干 (自然晾干, 夏季风干 1~2 h, 冬季风干 2~4 h, 肉块表面干爽为止) \rightarrow 油炸 (采用猪油进行油炸, 油温 160~180 $^{\circ}\text{C}$, 油炸 5~8 min, 表面微黄即可) \rightarrow 码味腌制 (将滤过油的肉均匀涂抹上食盐、白酒以及香辛料, 放置 2~3 h 即可入坛腌制发酵) \rightarrow 入坛发酵 75 d (一层腌制萝卜丝一层肉脯的方式入烧制的土坛中厌氧发酵, 水封隔绝空气)

取样: 分别在入坛前以及入坛发酵 20、40、60、75 d 各取 1 次样, 经真空包装后保存于 -80 $^{\circ}\text{C}$, 备用。

1.3.2 脂肪相关理化指标的测定

参照 GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》测定坛子肉总脂肪。参照 GB 5009.168—2016《食品中脂肪酸的测定》测定坛子肉游离脂肪酸含量。参照 GB 5009.229—2016《食品中酸价的测定》测定坛子肉酸价。参照 GB 5009.227—2016《食品中过氧化值的测定》测定坛子肉过氧化值。参照钟智豪^[14]的方法硫代巴比妥酸值的测定。脂肪酶活力采用南京建成的分脂肪酶试剂盒测定。

1.3.3 坛子肉挥发性物质 GC-MS 测定

参照叶芳艳等^[15]的方法。电离源 EI, 能量 70 eV, 倍增电压 1 400 V; 离子源温度 200 $^{\circ}\text{C}$, 接口温度 280 $^{\circ}\text{C}$, 四级杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$, 扫描范围 40~450 m/z , 间隔 0.3 s。采集到的质谱数据经与 MEANLIB、NIST-DEMO 和 WileyLibrary 数据库检索定性, 将匹配度大于 800 作为鉴定依据, 并采用峰面积归一化法分析各成分的相对含量。

1.3.4 数据处理

试验数据经 3 次平行试验后得到, 均以平均数 \pm 标准差表示, 采用 Excel 和 SPSS 19.0 统计软件对数据进行统计处理和显著性分析, 显著水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 入坛发酵对安岳坛子肉脂肪氧化相关指标的影响

如表 1 所示, 随着入坛发酵时间的延长, 总脂肪含量持续降低, 发酵第 75 天坛子肉中脂肪含量极显著低于入坛前坛子肉 ($P < 0.01$), 一方面可能与坛内萝卜丝吸附坛子肉的脂肪有关, 另一方面与坛子肉脂肪自身发生的降解、氧化有关。

酸价是衡量坛子肉中游离脂肪酸总量的重要指标, 而游离脂肪酸含量的高低与坛子肉的风味密切相关, 某些脂肪酸可直接贡献坛子肉风味, 大部分的脂肪酸则进一步反应生成醛、酮、酸等挥发性物质。由表 1 可知, 坛子肉在发酵过程中的酸价呈上升趋势, 特别是发酵后期, 发酵第 75 天坛子肉酸价显著高于入坛前坛子肉酸价 ($P < 0.05$), 脂质的降解可能与发酵期间微生物数量及其代谢产生的酯酶有密切关系。

由表 1 可知, 入坛前坛子肉 POV 较高, 入坛发酵坛子肉的 POV 降低了, 发酵第 75 天坛子肉的 POV 较入坛前极显著降低 ($P < 0.01$)。这是因为坛子肉在入坛前经高温油炸, 导致脂肪酸氧化形成一级氧化产物—氢过氧化物; 油炸后的坛子肉入坛发酵, 氢过氧化物在微生物等的作用下分解形成低分子二级脂质氧化产物, 如醛、酮、酸和羧基酸等 (通常称活性羰基物)^[16]。

TBA 是用于反映脂肪氧化终产物的指标, 其值越高说明脂肪氧化降解程度越大^[17]。由表 1 可知, 与坛子肉入坛发酵前比较, 发酵坛子肉的 TBA 均显著升高 ($P < 0.05$), 即发酵促进了坛子肉脂肪的氧化降解, 可能与脂肪酸降解产生醛类物质进一步氧化为醇和羧基酸等小分子物质有关。

脂肪酶是一类蛋白质, 坛子肉经高温油炸导致其脂肪酶变性从而丧失其生物活性, 故入坛前坛子肉中脂肪酶比活力未检出。其中, 发酵第 20 天坛子肉中脂肪酶比活力显著低于第 40 天和第 60 天发酵坛子肉 ($P < 0.05$), 结果提示, 入坛发酵可促进微生物大量繁殖产生脂肪酶。然而, 发酵第 75 天坛子肉中脂肪酶比活力却低于第 40 天和第 60 天发酵坛子肉 ($P > 0.05$), 这可能与发酵后期的温度升高, 微生物数量减少有关。

另外, 入坛发酵各阶段的坛子肉 POV 始终低于腌腊肉制品 GB/T 2730—2015 规定的限量 (0.5 g/100 g); 且始终低于肉类发出腐臭异味的 TBA 阈值 (5 mg MDA/kg)^[18], 安岳县普州坛子肉食品有限公司的企业标准是以此限量做为参考, 说明坛子肉具有较好的安全性。

表 1 发酵对坛子肉脂肪相关的理化指标影响

Table 1 Effects of fermentation on physicochemical indicators related to fat in jar meat

检测指标	发酵时间/d				
	入坛前	20	40	60	75
总脂肪	69.12 ± 0.94 ^{cB}	62.33 ± 0.83 ^{bcAB}	60.23 ± 5.04 ^{abAB}	57.23 ± 4.63 ^{abAB}	52.96 ± 7.77 ^{aA}
酸价/(mg KOH · kg ⁻¹)	0.36 ± 0.11 ^{aA}	0.44 ± 0.15 ^{aA}	0.50 ± 0.17 ^{aA}	0.70 ± 0.24 ^{aAB}	1.23 ± 0.44 ^{bB}
POV(以脂肪计)/[g · (100 g) ⁻¹]	0.34 ± 0.08 ^{bB}	0.27 ± 0.05 ^{bAB}	0.28 ± 0.06 ^{bAB}	0.25 ± 0.07 ^{abAB}	0.15 ± 0.03 ^{aA}
TBA/(mg 丙二醛 · kg ⁻¹)	0.25 ± 0.06 ^{aA}	0.55 ± 0.15 ^{bA}	0.61 ± 0.24 ^{bA}	0.59 ± 0.21 ^{bA}	0.69 ± 0.04 ^{bA}
脂肪酶比活力/[U · (min · g 蛋白) ⁻¹]	-	25.39 ± 3.85 ^{aA}	43.41 ± 8.11 ^{bA}	42.74 ± 6.33 ^{bA}	39.72 ± 11.37 ^{abA}

注:同行各组之间相比,不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)。“-”表示未在对应样品中检索到该物质。下同。

2.2 入坛发酵对安岳坛子肉中游离脂肪酸的影响

脂肪酸含量及组成对安岳坛子肉的风味具有重要作用。由表 2 可知,坛子肉在入坛发酵前以及入坛后各发酵阶段的脂肪酸主要以硬脂酸(C18:0)、棕榈酸(C16:0)、棕榈油酸(C16:1 n7)、油酸(C18:1 n9c)及亚油酸(C18:2 n6c)为主,其中硬脂酸和棕榈酸含量高于其他饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFA)。入坛发酵对坛子肉中游离脂肪酸组成及含量会产生较大影响,这与坛内微生物及其分泌的脂酶分解肉中性脂肪及磷脂有关^[19]。值得注意的是,入坛发酵第 75 天时,坛子肉中 SFA 总含量(30.66)较入坛前 SFA 总含量(38.90)显著降低($P < 0.05$),其中棕榈酸的含量极显著降低($P < 0.01$),是影响入坛前与入坛发酵第 75 天坛子肉中 SFA 总含量的主要脂肪酸,这可能与入坛发酵过程中的微生物促使饱和脂肪酸被分解或去饱和转化为不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acids, UFA)有关^[20]。另外,入坛前坛子肉中未检出丁酸(C4:0),而在入坛发酵坛子肉中检测出丁酸。

棕榈油酸以及油酸含量高于其他单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFA),是影响坛子肉中 MUFA 含量差异的主要脂肪酸。棕榈油酸以及油酸是熟猪肉火腿、香肠中的重要风味前体物质,加热可促进其被氧化、分解为阈值较低的醛类、醇类以及酮类风味物质,例如具有烤肉香味的 2-庚烯醛、青草香味的 1-己醇和油脂香味的 2-癸烯醛^[21]。由表 2 可知,坛子肉中 MUFA 含量呈波动变化,与入坛前坛子肉比较,差异不显著($P > 0.05$);然而,入坛发酵第 75 天坛子肉中 MUFA 含量显著高于发酵第 60 天坛子肉($P < 0.05$)。在发酵过程中,油酸含量呈先降低后升高的变化趋势,可能与油酸的 sn-1 和 sn-3 位置

有关,易被微生物分泌的脂肪酶水解^[22];其中,发酵第 75 天坛子肉中油酸含量显著高于发酵第 60 天坛子肉($P < 0.05$)。另外,入坛发酵第 75 天坛子肉中检出芥酸(C22:1n9),可能与坛内的腌制萝卜干有关。

与入坛前坛子肉比较,发酵坛子肉中多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)的种类以及含量均有变化。入坛前坛子肉中未检出二十碳五烯酸(C20:5n3)、花生四烯酸(C20:4n6)以及二十二碳六烯酸甲酯(C22:6n3),入坛发酵促进了此 3 种 PUFA 的形成。入坛后特别是入坛发酵第 75 天时,坛子肉中的 PUFA 含量显著高于入坛前坛子肉($P < 0.05$),特别是亚油酸和 γ -亚麻酸(C18:3n6)的含量均有极显著上升($P < 0.01$);亚油酸和 γ -亚麻酸作为风味前体物质,可在不同断裂位点降解氧化为丙酸、癸醛、烯醛和二烯醛及酮类等羰基类风味物质^[23],说明微生物对坛子肉中 PUFA 释放起主要作用,这一结果与江玉霞^[11]、沈清武等^[20]研究相一致。

2.3 入坛发酵对安岳坛子肉风味物质形成的影响

由表 3 可知,入坛前坛子肉与入坛发酵坛子肉中的挥发性物质种类存在较大差异,挥发性物质含量差异不显著($P > 0.05$)。坛子肉发酵第 40 天时,挥发性物质种类达到最大值,共检出 63 种挥发性物质,挥发性物质总数较入坛前多 24 种;随着发酵时间延长,坛子肉中检出的挥发性物质的种类在逐步减少,然而,发酵第 60 天坛子肉中挥发性物质的相对含量却达到最大值 85.89%。坛子肉中挥发性物质种类和含量的变化与其发酵过程密不可分,微生物代谢分泌脂肪酶、蛋白酶、酯酶等,从而促进坛子肉中脂肪、蛋白质、碳水化合物等大分子物质降解形成醛类、酮类、酯类等风味物质^[19],然而关于坛子肉发酵过程中的

微生态系统及其作用机理暂不明确,本课题组将在后续试验中深入研究。

表 2 入坛发酵对安岳坛子肉中游离脂肪酸的影响
Table 2 Effect of fermentation on free fatty acids in jar meat

脂肪酸种类		发酵时间/d				
		入坛前	20	40	60	75
饱和脂肪酸(SFA)	C4:0	—	0.05 ± 0.01 ^{aA}	0.05 ± 0.01 ^{aA}	0.15 ± 0.06 ^{bB}	0.08 ± 0.02 ^{aAB}
	C12:0	0.06 ± 0.01 ^{aA}	0.06 ± 0.01 ^{aA}	0.08 ± 0.02 ^{aA}	0.07 ± 0.01 ^{aA}	0.06 ± 0.01 ^{aA}
	C14:0	1.33 ± 0.13 ^{aA}	1.13 ± 0.06 ^{aA}	1.46 ± 0.24 ^{aA}	1.29 ± 0.35 ^{aA}	1.09 ± 0.24 ^{aA}
	C15:0	0.03 ± 0.01 ^{aA}	0.04 ± 0.01 ^{aAB}	0.02 ± 0.01 ^{aA}	0.02 ± 0.01 ^{aA}	0.07 ± 0.02 ^{bB}
	C16:0	24.84 ± 0.21 ^{bB}	23.04 ± 2.15 ^{bB}	25.20 ± 2.16 ^{bB}	24.81 ± 2.47 ^{bB}	17.63 ± 2.03 ^{aA}
	C17:0	0.20 ± 0.09 ^{aAB}	0.31 ± 0.04 ^{bB}	0.13 ± 0.03 ^{aA}	0.13 ± 0.06 ^{aA}	0.32 ± 0.05 ^{bB}
	C18:0	11.78 ± 0.32 ^{aA}	12.08 ± 1.04 ^{aA}	11.23 ± 1.07 ^{aA}	11.15 ± 1.37 ^{aA}	10.80 ± 1.37 ^{aA}
	C20:0	0.21 ± 0.06 ^{aA}	0.28 ± 0.08 ^{aA}	0.27 ± 0.03 ^{aA}	0.24 ± 0.08 ^{aA}	0.17 ± 0.03 ^{aA}
	C22:0	0.07 ± 0.02 ^{aA}	0.05 ± 0.01 ^{aA}	0.08 ± 0.01 ^{aA}	0.07 ± 0.01 ^{aA}	0.30 ± 0.08 ^{bB}
	C24:0	0.05 ± 0.01 ^{aA}	0.11 ± 0.06 ^{abA}	0.10 ± 0.02 ^{abA}	0.08 ± 0.02 ^{abA}	0.14 ± 0.03 ^{bA}
单不饱和脂肪酸(MUFA)	C14:1n5	0.02 ± 0.01 ^{aA}	—	0.02 ± 0.01 ^{aA}	0.01 ± 0.01 ^{aA}	0.02 ± 0.01 ^{aA}
	C16:1n7	2.55 ± 0.25 ^{aA}	1.80 ± 0.34 ^{aA}	2.54 ± 1.47 ^{aA}	1.38 ± 0.52 ^{aA}	2.50 ± 0.72 ^{aA}
	C17:1n7	0.26 ± 0.04 ^{abA}	0.30 ± 0.08 ^{bA}	0.14 ± 0.08 ^{aA}	0.20 ± 0.07 ^{abA}	0.16 ± 0.06 ^{aA}
	C18:1n9c	45.70 ± 2.41 ^{abA}	45.50 ± 3.52 ^{abA}	44.74 ± 4.21 ^{abA}	39.86 ± 2.16 ^{aA}	47.31 ± 4.17 ^{bA}
	C20:1	0.73 ± 0.08 ^{abAB}	0.78 ± 0.15 ^{bcAB}	0.75 ± 0.05 ^{bcAB}	0.54 ± 0.10 ^{aA}	0.94 ± 0.12 ^{cB}
	C21:1	0.47 ± 0.05 ^{aA}	0.71 ± 0.13 ^{bAB}	0.46 ± 0.10 ^{aA}	0.96 ± 0.13 ^{cB}	0.46 ± 0.10 ^{aA}
	C22:1n9	—	—	—	—	0.04 ± 0.01
	C24:1n9	0.05 ± 0.01 ^{aA}	0.06 ± 0.01 ^{aA}	0.07 ± 0.02 ^{aA}	0.20 ± 0.06 ^{bB}	0.05 ± 0.01 ^{aA}
	C18:2n6c	9.75 ± 2.29 ^{aA}	12.63 ± 1.82 ^{aA}	11.51 ± 2.01 ^{aA}	10.67 ± 1.82 ^{aA}	23.12 ± 1.32 ^{bB}
	C18:3n6	0.46 ± 0.11 ^{aA}	0.72 ± 0.15 ^{aA}	0.73 ± 0.13 ^{aA}	0.57 ± 0.05 ^{aA}	2.34 ± 1.15 ^{bB}
多不饱和脂肪酸(PUFA)	C20:2	0.07 ± 0.02 ^{aA}	0.08 ± 0.01 ^{aA}	0.09 ± 0.02 ^{aA}	0.09 ± 0.02 ^{aA}	0.16 ± 0.03 ^{bB}
	C20:3n6	0.18 ± 0.08 ^{aA}	0.21 ± 0.13 ^{aA}	0.22 ± 0.06 ^{aA}	0.19 ± 0.07 ^{aA}	0.30 ± 0.05 ^{aA}
	C20:4n6	—	—	—	—	0.03 ± 0.01
	C20:5n3	—	—	—	—	0.05 ± 0.01
	C22:6n3	—	0.02 ± 0.01 ^{aA}	0.02 ± 0.01 ^{aA}	0.04 ± 0.01 ^{aAB}	0.13 ± 0.07 ^{bB}
	SFA	38.90 ± 1.14 ^{bB}	37.10 ± 2.83 ^{bAB}	38.62 ± 2.94 ^{bB}	38.01 ± 3.63 ^{bAB}	30.66 ± 3.17 ^{aA}
MUFA		49.78 ± 2.33 ^{abA}	49.15 ± 3.45 ^{abA}	48.72 ± 4.85 ^{abA}	43.15 ± 2.49 ^{aA}	51.48 ± 4.25 ^{bA}
PUFA		10.46 ± 2.04 ^{aA}	13.64 ± 1.72 ^{aA}	12.57 ± 1.82 ^{aA}	11.56 ± 1.61 ^{aA}	26.13 ± 2.16 ^{bB}
总量		99.14 ± 5.48 ^{aA}	99.89 ± 8.00 ^{aA}	99.91 ± 9.61 ^{aA}	92.72 ± 7.72 ^{aA}	108.27 ± 9.57 ^{aA}

表 3 不同发酵时间坛子肉中挥发性风味物质归类分析

Table 3 Classification analysis of volatile flavor compounds in jar meat with different fermentation time

类别	入坛前		发酵第 20 天		发酵第 40 天		发酵第 60 天		发酵第 75 天	
	种类	相对含量/%	种类	相对含量/%	种类	相对含量/%	种类	相对含量/%	种类	相对含量/%
醇类	8	23.93 ± 5.77 ^{aA}	19	46.76 ± 7.11 ^{bB}	24	41.08 ± 6.55 ^{bB}	13	42.28 ± 5.81 ^{bB}	15	41.07 ± 5.77 ^{bB}
酮类	1	0.28 ± 0.06 ^{abA}	2	0.36 ± 0.14 ^{abA}	4	1.35 ± 0.36 ^{bA}	4	5.61 ± 1.21 ^{cB}	1	0.19 ± 0.04 ^{aA}
醛类	3	1.04 ± 0.45 ^{aA}	0	0	2	0.42 ± 0.2 ^{aA}	2	2.72 ± 0.71 ^{bB}	0	0
醚类	3	0.18 ± 0.04 ^{aA}	0	0	0	0	5	0.64 ± 0.22 ^{bB}	3	0.28 ± 0.1 ^{aAB}
酸类	2	3.89 ± 1.11 ^{bB}	2	1.49 ± 0.3 ^{aA}	3	2.42 ± 0.59 ^{aAB}	1	1.72 ± 0.72 ^{aA}	1	1.42 ± 0.35 ^{aA}
酯类	4	9.55 ± 2.73 ^{aA}	10	10.44 ± 3.7 ^{aA}	14	14.92 ± 4.31 ^{aA}	12	13.16 ± 4.79 ^{aA}	11	13.82 ± 5.72 ^{aA}
杂环化合物	0	0	0	0	0	0	1	0.31 ± 0.12 ^{aA}	1	0.22 ± 0.07 ^{aA}
碳氢化合物	15	29.94 ± 8.81 ^{bB}	17	19.76 ± 4.13 ^{aAB}	12	13.26 ± 3.27 ^{aA}	16	17.82 ± 3.91 ^{aAB}	10	12.82 ± 3.47 ^{aA}
含氮化合物	0	0	1	0.08 ± 0.03 ^{aA}	1	1.76 ± 0.53 ^{bA}	0	0	0	0
含硫化合物	3	4.04 ± 1.44 ^{cB}	1	0.08 ± 0.02 ^{aA}	2	0.19 ± 0.03 ^{aA}	2	1.63 ± 0.74 ^{bA}	1	0.25 ± 0.05 ^{aA}
酚类	0	0	0	0	1	0.05 ± 0.01	0	0	0	0
合计	39	72.85 ± 20.41 ^{aA}	52	78.97 ± 15.43 ^{aA}	63	75.45 ± 15.85 ^{aA}	56	85.89 ± 18.23 ^{aA}	43	70.07 ± 15.57 ^{aA}

由表 3、表 4 可知,发酵第 60 天坛子肉中醛类物质的相对含量极显著高于入坛前和发酵第 40 天坛子

肉($P < 0.01$),其余组间差异不显著($P > 0.05$)。在发酵肉制品中,醛类物质是被分离鉴定出的含量最丰富种类最多的挥发性风味物质之一^[24],具有较低阈值和良好香气,是肉制品中重要挥发性风味物质^[25]。然而,坛子肉中醛类物质的种类和相对含量却是较低的,如表4所示,入坛前坛子肉中检出3种醛类物质,分别是2-甲基丁醛、戊醛以及正己醛,戊醛具有果香和面包香,正己醛具有青草味;发酵坛子肉中醛类物质减少,第20天和第75天发酵坛子肉中未检出醛类物质,第40天和第60天发酵坛子肉中各检出2种醛类物质,分别是巴豆醛、正己醛以及乙醛、正己醛。发酵导致坛子肉中醛类物质减少,可能与醛类物质在发酵过程中参与美拉德反应生成相应的羧酸并进一步形成酯有关。

与醛类物质比较,醇类物质的种类和相对含量在坛子肉风味物质中占据绝对优势,入坛发酵促进坛子肉中醇类物质相对含量极显著增加($P < 0.01$)。坛子肉发酵第20天时其相对含量达到最高值,为46.76%;发酵第40天时其种类达到最高值,为24种。入坛发酵改变了坛子肉中醇类物质的种类和相对含量,这与发酵过程中某些化合物的降解以及脂肪酸氢过氧化物次级物的分解有关^[26]。醇类具有较高的风味阈值,其香味对肉制品风味的影响并不显著^[4],但对肉制品的风味有关键作用。乙醇在坛子肉中的相对含量最高,入坛前的相对含量为16.72%,可能与坛子肉使用白酒码味腌制有关;随后发酵过程中,乙醇相对含量升高,可能与坛内微生物分解萝卜丝中的碳水化合物进行乙醇发酵有关。在发酵第20、40、60天的坛子肉中检出了具有浓郁蘑菇香味的1-辛烯-3-醇,主要来源于花生四烯酸和亚油酸的脂质氧化,且发酵第40天时其相对含量高达0.34%。另外,发酵坛子肉中检出具有芳香气味的苯乙醇、苯甲醇、正庚醇、辛醇以及己醇,这可能会对坛子肉风味的形成具有一定作用。

酮类一般由氨基酸Strecker降解或是脂肪降解、氧化以及微生物分解代谢产生,具有花香、果实的香味、油味、脂肪味或奶酪味,碳链越长风味越浓郁^[27]。入坛前坛子肉中仅检出1种酮类物质,入坛发酵坛子肉中检出6种,可能正是它们对发酵坛子肉的特征风味形成有一定影响。3-羟基-2-丁酮具有清香、奶香味,在发酵第40天坛子肉中相对含量最高,为0.45%,而在入坛前坛子肉中未检出,说明发酵过程中的微生物有助于代谢柠檬酸生成二乙酸最终转化为3-羟基-2-丁酮^[28]。

入坛前与入坛发酵坛子肉中检出的酸类物质共4种,入坛前坛子肉中仅检出胱氨酸和乙酸,丙酸和丁酸

未检出;入坛前坛子肉中乙酸相对含量仅为0.53%,发酵第40天时达到最高值,为2.32%,可见发酵促进了乙酸的生成,而乙酸可以赋予坛子肉酸醋味。

坛子肉在发酵过程中其酯类物质的相对含量和种类是波动变化的,发酵第40天坛子肉中酯类物质种类(14种)及相对含量(14.92%)最高。酯类的形成与游离脂肪酸和脂类氧化产生的醇的酯化作用有关;此外,醛类会被氧化生成酸类进而发生酯化反应,因此,醛类的变化也可影响酯类的生成。酯类通常阈值较低,短链酯具有愉快的水果甜味,长链酯具有油脂味,有甲基支链的短链酯与成熟肉的风味特征有关^[29]。发酵坛子肉中含量较高的乙酸乙酯、丙酸乙酯、正己酸乙酯以及入坛前坛子肉中未检出的辛酸乙酯、庚酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、乳酸乙酯可能赋予了坛子肉特殊的风味。

入坛前坛子肉中检出15种碳氢化合物,相对含量高达29.94%,这可能与高温油炸过程中氢过氧化物裂解生成烃类物质有关;发酵坛子肉中碳氢化合物的种类及含量是波动变化的,但其含量却均低于入坛前,可能是碳氢化合物在发酵过程中进一步反应生成其他物质而导致的相对含量显著下降($P < 0.05$)。2,2,4,6,6-五甲基庚烷在坛子肉中相对含量最高的,发酵第20天坛子肉中的相对含量为11.19%,发酵第40天时为9.09%,发酵第60天时为11.91%,第75天时的相对含量为9.17%;在发酵坛子肉中相对含量较高且未在入坛前坛子肉中检出的碳氢化合物是正辛烷,发酵第40天时的相对含量最高,为2.29%。碳氢化合物阈值较高,一般认为对肉类风味的贡献不明显,但是含量较高的2,2,4,6,6-五甲基庚烷可能会对坛子肉的风味产生影响。

发酵坛子肉中检出2种杂环化合物,分别是2-甲基戊酸酐和2-正戊基咪唑,其中的2-正戊基咪唑是亚油酸的一种氧化产物,具有类火腿香味。含硫化合物检出4种,包括3,4-双(甲硫基)喹啉、二甲基硫、二甲基二硫和二甲基三硫,其中二甲基二硫在入坛发酵过程中的含量呈上升趋势,其表现出一种类似脏袜子味的不愉快的风味,是由含硫氨基酸经Strecker降解形成硫醇并进一步氧化形成的,还可进一步形成二甲基三硫^[30]。杂环化合物和含硫化合物阈值很低,可能对坛子肉特殊风味有影响。含氮化合物是由氨基酸降解而形成的,仅在发酵第20天的坛子肉中检测出4,6-二甲基嘧啶,在发酵第40天的坛子肉中检出N-乙基丙酰胺,其形成以及分解的具体途径有待进一步研究。

坛子肉发酵第40天时检出4-乙基苯酚,相对百分含量为0.05%,由于酚类化合物阈值较高,对风味影响较弱。

表 4 入坛发酵对安岳坛子肉风味组成及含量的影响

Table 4 Effect of fermentation on flavor composition and content of jar meat

种类	化合物名称	化学式	相对含量/%				
			入坛前	发酵第 20 天	发酵第 40 天	发酵第 60 天	发酵第 75 天
酸类	胱氨酸	$C_6H_{12}N_2O_4S_2$	3.36 ± 1.04	—	—	—	—
	乙酸	$C_2H_4O_2$	0.53 ± 0.07	1.38 ± 0.24	2.32 ± 0.56	1.72 ± 0.72	1.42 ± 0.35
	丙酸	$C_6H_{10}O_3$	—	—	0.04 ± 0.01	—	—
	丁酸	$C_4H_8O_2$	—	0.11 ± 0.06	0.06 ± 0.02	—	—
	正己烷	C_6H_{14}	3.37 ± 1.32	—	—	—	—
	庚烷	C_7H_{16}	6.13 ± 1.94	3.45 ± 0.83	—	—	—
	3-甲基庚烷	C_8H_{18}	4.08 ± 1.34	—	—	1.25 ± 0.47	—
	正辛烷	C_8H_{18}	—	2.09 ± 0.74	2.29 ± 0.83	2.07 ± 0.72	2.16 ± 0.58
	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	$H_{12}H_{26}$	10.90 ± 2.35	11.19 ± 1.74	9.09 ± 1.83	11.91 ± 1.87	9.17 ± 2.46
	癸烷	$C_{10}H_{22}$	0.26 ± 0.05	0.23 ± 0.07	0.19 ± 0.02	0.17 ± 0.04	0.15 ± 0.07
	甲苯	C_7H_8	0.89 ± 0.13	0.25 ± 0.06	—	0.25 ± 0.04	0.19 ± 0.05
	2-甲基-1,3-二噁烷	$C_5H_{10}O_2$	—	—	—	0.04 ± 0.01	—
	B-蒎烯	$C_{10}H_{16}$	0.06 ± 0.02	—	—	—	—
	乙基苯	C_8H_{10}	0.24 ± 0.64	0.19 ± 0.06	—	0.18 ± 0.08	—
	邻二甲苯	C_8H_{10}	—	0.24 ± 0.07	0.06 ± 0.01	—	—
烷烃类 化合物	间二甲苯	C_8H_{10}	0.40 ± 0.13	0.26 ± 0.07	0.09 ± 0.02	0.16 ± 0.07	0.10 ± 0.06
	1,2-二甲基环戊烷	C_7H_{14}	—	0.08 ± 0.02	—	—	—
	月桂烯	$C_{10}H_{16}$	0.13 ± 0.04	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01
	3-甲基十一烷	$H_{12}H_{26}$	0.16 ± 0.06	—	0.06 ± 0.02	—	—
	3,8-二甲基癸烷	$H_{12}H_{26}$	—	0.08 ± 0.03	—	0.06 ± 0.03	—
	对二甲苯	C_8H_{10}	0.44 ± 0.13	0.12 ± 0.06	—	0.32 ± 0.08	0.04 ± 0.01
	柠檬烯	$C_{10}H_{16}$	1.36 ± 0.47	0.56 ± 0.14	0.81 ± 0.25	0.71 ± 0.26	0.74 ± 0.16
	十二烷	$H_{12}H_{26}$	0.29 ± 0.05	0.13 ± 0.06	0.15 ± 0.08	0.10 ± 0.04	—
	1-氯辛烷	$C_8H_{17}Cl$	—	0.09 ± 0.03	0.13 ± 0.05	—	—
	苯乙烯	C_8H_8	1.23 ± 0.14	0.70 ± 0.13	—	0.44 ± 0.16	—
	环辛四烯	C_8H_8	—	—	0.28 ± 0.13	—	—
	苯并环丁烯	C_8H_8	—	—	—	—	0.18 ± 0.06
	4-异丙基甲苯	$C_{10}H_{14}$	—	—	—	0.05 ± 0.01	—
	邻-异丙基苯	$C_{10}H_{14}$	—	0.05 ± 0.01	—	—	—
	P-伞花烃	$C_{10}H_{14}$	—	—	0.07 ± 0.02	—	0.05 ± 0.01
醇类	六氯-1,3-丁二烯	C_4Cl_6	—	—	—	0.06 ± 0.02	—
	甲硫醇	CH_4S	3.81 ± 1.42	1.10 ± 0.71	—	—	—
	乙醇	C_2H_6O	16.72 ± 3.42	38.41 ± 4.61	30.93 ± 3.63	36.85 ± 4.13	32.18 ± 3.74
	正丙醇	C_3H_8O	—	0.28 ± 0.13	0.25 ± 0.09	0.42 ± 0.16	0.26 ± 0.05
	异丁醇	$C_4H_{10}O$	—	0.51 ± 0.13	0.61 ± 0.26	0.52 ± 0.21	0.60 ± 0.16
	正丁醇	$C_4H_{10}O$	—	0.06 ± 0.02	0.20 ± 0.07	—	0.42 ± 0.16
	桉叶油醇	$C_{10}H_{18}O$	0.74 ± 0.25	0.43 ± 0.14	0.71 ± 0.19	0.49 ± 0.05	0.80 ± 0.13
	异戊醇	$C_5H_{12}O$	1.19 ± 0.41	3.89 ± 0.84	3.92 ± 1.15	3.21 ± 1.02	4.22 ± 0.84
	1-戊醇	$C_5H_{12}O$	0.15 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.13 ± 0.04	0.09 ± 0.02	—
	2-庚醇	$C_7H_{16}O$	—	—	0.12 ± 0.04	—	0.09
	正己醇	$C_6H_{14}O$	—	0.21 ± 0.05	0.20 ± 0.07	0.28 ± 0.10	0.21 ± 0.08
	6-甲基-3-庚醇	$C_{18}H_{38}O$	—	0.08 ± 0.02	—	—	—
	辛醇	$C_{18}H_{38}O$	—	—	0.07 ± 0.01	—	—
	仲辛醇	$C_{18}H_{38}O$	—	—	0.12 ± 0.04	—	—
	1-辛烯-3-醇	$C_8H_{16}O$	—	0.12 ± 0.02	0.34 ± 0.08	0.10 ± 0.01	—
	正庚醇	$C_7H_{16}O$	—	0.16 ± 0.06	0.08 ± 0.02	—	0.56 ± 0.14
	2-甲硫基乙醇	C_3H_8OS	—	0.07 ± 0.02	0.09 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.11 ± 0.07
	芳樟醇	$C_{10}H_{18}O$	0.98 ± 0.13	0.23 ± 0.05	—	—	—
	2,3-丁二醇	$C_4H_{10}O_2$	—	0.26 ± 0.04	1.00 ± 0.24	0.04 ± 0.01	0.66 ± 0.14
	糠醇	$C_5H_6O_2$	—	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	—	0.08 ± 0.02
	3-甲硫基丙醇	$C_4H_{10}OS$	—	—	0.09 ± 0.02	—	0.12 ± 0.05
	苯甲醇	C_7H_8O	0.25 ± 0.08	0.31 ± 0.11	0.42 ± 0.13	0.08 ± 0.02	0.20 ± 0.05
	苯乙醇	$C_8H_{10}O$	—	0.37 ± 0.11	0.57 ± 0.14	0.13 ± 0.06	0.58 ± 0.14
	九甘醇	$C_{18}H_{38}O_{10}$	—	—	0.09 ± 0.02	—	—
	十一乙二醇	$C_{23}H_{48}O_{12}$	0.09 ± 0.03	—	—	—	—
	八甘醇	$C_{16}H_{34}O_9$	—	—	0.67 ± 0.21	—	—
	3,6,9,12,15-五氮杂十九烷-1-醇	$C_{14}H_{30}O_6$	—	—	0.01 ± 0.01	—	—
	六甘醇	$H_{12}H_{26}O_7$	—	0.10 ± 0.02	0.12 ± 0.04	—	—
	三缩四乙二醇	$C_8H_{18}O_5$	—	—	—	0.02 ± 0.01	—
	十一乙二醇	$C_{23}H_{48}O_{12}$	—	—	0.29 ± 0.03	—	—

续表 4

种类	化合物名称	化学式	相对含量/%				
			入坛前	发酵第 20 天	发酵第 40 天	发酵第 60 天	发酵第 75 天
醚类	1,3-丙二醇单乙醚	C ₅ H ₁₂ O ₂	—	—	—	—	0.03 ± 0.01
	4-烯丙基苯甲醚	C ₁₀ H ₁₂ O	—	—	—	—	0.16 ± 0.07
	八甘醇单正十二烷基醚	C ₂₈ H ₅₈ O ₉	0.06 ± 0.01	—	—	—	—
	18-冠醚-6	H ₁₂ H ₂₄ O ₆	0.03 ± 0.01	—	—	—	—
	六乙二醇单甲醚	C ₁₃ H ₂₈ O ₇	—	—	—	0.07 ± 0.02	—
	壬乙二醇单甲醚	C ₁₉ H ₄₀ O ₁₀	—	—	—	0.11 ± 0.03	—
	15-冠醚-5	C ₁₀ H ₂₀ O ₅	0.09 ± 0.02	—	—	—	—
	六乙二醇单十二醚	C ₂₄ H ₅₀ O ₇	—	—	—	0.18 ± 0.07	—
	18-冠醚-6	H ₁₂ H ₂₄ O ₆	—	—	—	0.13 ± 0.04	—
	12-冠醚-4	C ₈ H ₁₆ O ₄	—	—	—	0.15 ± 0.06	—
醛类	十甘醇单甲醚	C ₂₁ H ₄₄ O ₁₁	—	—	—	—	0.09 ± 0.02
	乙醛	C ₂ H ₄ O	—	—	—	2.67 ± 0.69	—
	2-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	0.31 ± 0.14	—	—	—	—
	戊醛	C ₅ H ₁₀ O	0.34 ± 0.13	—	—	—	—
	巴豆醛	C ₄ H ₆ O	—	—	0.33 ± 0.17	—	—
	正己醛	C ₆ H ₁₂ O	0.39 ± 0.18	—	0.09 ± 0.03	0.05 ± 0.02	—
含硫化化合物	二甲基硫	C ₂ H ₆ S	3.84 ± 1.36	—	—	1.39 ± 0.68	0.64 ± 0.24
	3,4-双(甲硫基)喹啉	C ₉ H ₇ N	0.14 ± 0.07	—	—	—	—
	二甲基二硫	C ₂ H ₆ S ₂	0.06 ± 0.01	0.08 ± 0.02	0.10 ± 0.01	0.24 ± 0.06	0.25 ± 0.05
	二甲基三硫	C ₂ H ₆ S ₃	—	—	0.09 ± 0.02	—	—
酮类	4-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂	—	—	—	5.16 ± 1.06	—
	3-辛酮	C ₈ H ₁₆ O	—	0.21 ± 0.08	0.37 ± 0.12	0.07 ± 0.02	0.19 ± 0.04
	3-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂	—	0.15 ± 0.06	0.45 ± 0.13	0.34 ± 0.12	—
	4-壬酮	C ₉ H ₁₈ O	0.28 ± 0.06	—	—	—	—
	2,3-辛二酮	C ₈ H ₁₄ O ₂	—	—	0.48 ± 0.10	—	—
	1,3,3-三甲基-二环[2.2.1]庚-2-酮	C ₁₀ H ₁₆ O	—	—	—	0.04 ± 0.01	—
	2-壬酮	C ₉ H ₁₈ O	—	—	0.05 ± 0.01	—	—
	乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂	8.18 ± 2.36	4.36 ± 1.83	4.97 ± 1.52	5.02 ± 2.28	5.37 ± 2.35
	丙酸乙酯	C ₅ H ₁₀ O ₂	0.85 ± 0.26	2.58 ± 0.74	4.00 ± 1.06	3.89 ± 1.27	4.22 ± 1.73
	乙酸异丁酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	—	0.05 ± 0.01	0.07 ± 0.02	—	—
酯类	丁酸乙酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.37 ± 0.05	0.24 ± 0.08	0.66 ± 0.14	0.26 ± 0.07	0.50 ± 0.13
	2-甲基丁酸乙酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	—	0.05 ± 0.01	0.18 ± 0.06	0.35 ± 0.14	0.13 ± 0.04
	异戊酸乙酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	—	—	0.06 ± 0.01	0.09 ± 0.02	0.05 ± 0.01
	乙酸异戊酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	—	—	0.22 ± 0.05	0.43 ± 0.13	0.24 ± 0.07
	正己酸乙酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	0.15 ± 0.06	1.36 ± 0.54	2.35 ± 0.73	0.60 ± 0.15	1.36 ± 0.83
	六-5-烯酸乙酯	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	—	—	0.15 ± 0.06	—	—
	庚酸乙酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	—	0.47 ± 0.13	0.60 ± 0.24	0.23 ± 0.07	0.34 ± 0.13
	乳酸乙酯	C ₅ H ₁₀ O ₃	—	—	0.87 ± 0.25	0.92 ± 0.27	0.95 ± 0.31
	L(-)-乳酸乙酯	C ₅ H ₁₀ O ₃	—	0.88 ± 0.24	—	0.70 ± 0.16	—
	辛酸乙酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	—	0.26 ± 0.05	0.54 ± 0.12	0.44 ± 0.15	0.49 ± 0.07
	癸酸乙酯	H ₁₂ H ₂₄ O ₂	—	0.19 ± 0.07	0.16 ± 0.04	0.23 ± 0.08	0.17 ± 0.05
	四乙基乙二醇单甲酯	C ₉ H ₂₀ O ₅	—	—	0.09 ± 0.01	—	—
酚类	4-乙基苯酚	C ₈ H ₁₀ O	—	—	0.05 ± 0.01	—	—
杂环类化合物	2-甲基戊酸酐	H ₁₂ H ₂₂ O ₃	—	—	—	0.31 ± 0.12	—
	2-正戊基呋喃	C ₉ H ₁₄ O	—	—	—	—	0.22 ± 0.07
	含氮	C ₅ H ₁₁ NO	—	—	1.76 ± 0.53	—	—
化合物	4,6-二甲基嘧啶	C ₆ H ₈ N ₂	—	0.08 ± 0.03	—	—	—

3 结论

安岳坛子肉是四川省资阳市安岳县特有的传统发酵肉制品,关于安岳坛子肉典型品质及特征风味形成机理的研究鲜有报道。为了全面了解入坛发酵对坛子肉脂质分解及风味物质形成的影响,本试验对发酵过程中的坛子肉脂质分解以及挥发性风味物质进

行检测,结果发现入坛发酵可促进坛子肉脂质降解、氧化,特别是对 PUFA 释放起到关键作用。入坛发酵可提高坛子肉中风味物质种类和相对含量。总之,入坛发酵有助于提高坛子肉中 PUFA 相对含量,促进脂肪酸氧化分解为坛子肉中的特征风味物质——正己醛、乙醇、1-辛烯-3-醇、3-羟基-2-丁酮、乙酸、乙酸乙酯、丙酸乙酯、正己酸乙酯、辛酸乙酯、庚酸乙酯、2-甲

基丁酸乙酯、乳酸乙酯、2,2,4,6,6-五甲基庚烷、2-正戊基呋喃、二甲基二硫。

参 考 文 献

- [1] 廖定容. 罐罐肉加工与贮藏过程中风味形成机理的初步研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [2] BOLZONI L, BARBIER G, VIRGILI R. Changes in volatile compounds of Parma ham during maturation[J]. *Meat Science*, 1996, 43:301–310.
- [3] 章建浩, 朱健辉, 王莉, 等. 金华火腿传统工艺过程挥发性风味物质的分析研究[J]. *食品科学*, 2004, 25(11): 221–226.
- [4] 王德宝, 胡冠华, 苏日娜, 等. 发酵剂对羊肉香肠中蛋白、脂质代谢与风味物质的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 336–344.
- [5] 陆应林. 南京板鸭加工过程中蛋白降解及风味物质的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [6] 周才琼, 代小容, 杜木英. 酸肉发酵过程中挥发性风味物质形成的研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(7): 98–104.
- [7] 沙坤. 新疆风干牛肉质量特征及风味形成机制的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [8] PETROVA I, AASEN I M, RUSTAD T, et al. Manufacture of dry-cured ham: A review. Part 1. Biochemical changes during the technological process[J]. *European Food Research and Technology*, 2015, 241(5): 587–599.
- [9] LORENZO J M, GOMEZ M, FONSECA S. Effect of commercial starter cultures on physico-chemical characteristics, microbial counts and free fatty acid composition of dry-cured foal sausage[J]. *Food Control*, 2014, 46: 382–389.
- [10] 郇延军, 周光宏, 徐幸莲, 等. 不同等级金华火腿风味特点研究[J]. *食品科学*, 2006, 27(6): 39–45.
- [11] 江玉霞. 金华火腿加工过程中蛋白质降解规律的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [12] 张建友, 赵瑜亮, 丁玉庭, 等. 脂质和蛋白质氧化与肉制品风味特征相关性研究进展[J]. *核农学报*, 2018, 32(7): 1417–1424.
- [13] 周一鸣, 贺利庆, 蒿婷凤, 等. 金华火腿加工过程中美拉德反应产物的形成与初探[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(7): 170–175.
- [14] 钟智豪. 减菌处理对草鱼片脂肪氧化及蛋白质氧化的影响和控制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [15] 叶芳艳, 左木林, 朱万龙, 等. HS-SPME-GC/MS 法分析中缅树鼩尿液的化学成分[J]. *兽类学报*, 2018, 38(1): 85–94.
- [16] KOUTINA G, JONGBERG S, SKIBSTED L H. Protein and lipid oxidation in Parma ham during production[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2012, 60(38): 9737–9745.
- [17] 刘笑笑, 华晶忠, 梁成云. 延边黄牛发酵牛肉干在贮藏期间颜色及氧化稳定性的研究[J]. *食品工业科技*, 2009, 30(6): 184–186.
- [18] NAKYINSIGE K, SAZILI A Q, AGHWAN Z A, et al. Development of microbial spoilage and lipid and protein oxidation in rabbit meat[J]. *Meat Science*, 2015, 108: 125–131.
- [19] JOHANSSON G, BERDAGU J, LARSSON M, et al. Lipolysis, proteolysis and formation of volatile components during ripening of a fermented sausage with *Pediococcus pentosaceus* and *Staphylococcus xylosus* as starter cultures[J]. *Meat Science*, 1994, 38(2): 203–218.
- [20] 沈清武, 李平兰. 微生物酶与肉组织酶对干发酵香肠中游离脂肪酸的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2004, 30(12): 1–5.
- [21] BENET I, GURDIA M D, IBANEZ C, et al. Analysis of SPME or SBSE extracted volatile compounds from cooked cured pork ham differing in intramuscular fat profiles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 393–399.
- [22] EMANUELA Z, SERGIO G, ALESSANDRO A B, et al. Lipolysis and lipid oxidation in fermented sausages depending on different processing conditions and different antioxidants[J]. *Meat Science*, 2004, 66(2): 415–423.
- [23] FRANKEL E N. Lipid Oxidation[M]. Bridgewater: The Oily Press, 2005: 34–35.
- [24] 吴娜, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 动物源食品中脂质氧化降解对香气物质形成的作用[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(7): 209–215.
- [25] RAES K, BALCAEN A, DIRINCK P, et al. Meat quality, fatty acid composition and flavour analysis in Belgian retail beef[J]. *Meat Science*, 2003, 65(4): 1237–1246.
- [26] 孙宝国. 食用调香术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [27] 郭黎洋. 山羊腿干腌发酵成熟工艺及脂质分解氧化、风味变化规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [28] 郭新, 卢士玲, 王斌, 等. 中国传统火腿风味分析研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(3): 18–21.
- [29] WOLF I V, PEROTTI M C, ZALAZAR C A. Composition and volatile profiles of commercial Argentinean blue cheeses[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(2): 385–393.
- [30] 乔发东, 马长伟. 宣威火腿加工过程中挥发性风味化合物分析[J]. *食品研究与开发*, 2006, 27(3): 24–29.

(下转第152页)