

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.038

发酵剂对羊肉香肠中蛋白、脂质代谢与风味物质的影响

王德宝 胡冠华 苏日娜 王政纲 赵丽华 靳 烨

(内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 通过接种清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌,将试验分为复合发酵剂(复配)组、单一清酒乳杆菌(单一)组,以自然发酵为对照,探究不同发酵剂对羊肉发酵香肠蛋白质、脂质代谢与挥发性风味物质形成的影响。结果表明:添加复合发酵剂促进香肠快速酸化,成熟结束复配组 pH 值降为 4.6,显著低于发酵肉制品要求安全 pH 值(5.3)及对照组、原料肉组($P<0.05$);pH 值下降促使复配组水分活度和亚硝酸盐残留显著低于单一、对照及原料肉 3 组($P<0.05$),且复配组红色色泽(a^*)优于其他组;香肠中游离脂肪酸含量呈增加趋势,成熟结束复配组单不饱和脂肪酸含量显著高于单一和对照两组($P<0.05$),对照组中饱和及单不饱和脂肪酸含量最高,说明复合发酵剂有助于单不饱和脂肪酸释放,而内源脂肪酶对饱和和多不饱和脂肪酸释放起到关键作用;蛋白分解表现为:发酵剂组蛋白质分解指数和游离氨基酸含量高于对照组,但差异不显著($P>0.05$);发酵剂组香肠检出 45 种风味物质,高于对照组 44 种,显著高于原料肉的 27 种($P<0.05$);复合发酵剂提高香肠中特征风味——3-甲基丁醛、己醛、庚醛、正壬醛等醛类含量。因此,添加复合发酵剂有助于缩短羊肉香肠发酵周期、改善色泽、提高香肠单不饱和脂肪酸含量及风味感官品质。

关键词: 羊肉香肠; 发酵剂; 代谢; 营养品质; 风味

中图分类号: TS251.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0336-09

Effects of Artificial Starter Cultures on Lipolysis, Proteolysis and Flavor Formation in Mutton Sausages

WANG Debao HU Guanhua SU Rina WANG Zhenggang ZHAO Lihua JIN Ye
(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: By inoculating *Lactobacillus sake* and *Staphylococcus xylose*, the experiment was divided into compound fermentation group, a single *Lactobacillus sake* group, and control by natural fermentation, the effect of different starter cultures on lipolysis, proteolysis and flavor formation in the fermented mutton sausages was explored. The results showed that the addition of compound starters promoted the rapid acidification of sausage, and the pH value of mixed group was reduced to 4.6, which was significantly lower than the safe acidity of the fermented meat products of 5.3 and other groups ($P<0.05$). The pH drop caused the water activity (a_w) and nitrite residue in the mixed group to be significantly lower than those in the single, control and raw meat groups ($P<0.05$), and the redness color (a^*) of the mixed group was the best. The content of free fatty acids in sausages was increased gradually. The content of monounsaturated fatty acids in sausages at the end of maturity was significantly higher than that in the single and control groups ($P<0.05$), and the contents of saturated and polyunsaturated fatty acids in the control group were the highest, all which indicated that the mixed starters contributed to the release of monounsaturated fatty acids, while endogenous lipase played a key role in the release of saturated and polyunsaturated fatty acids. The proteolysis showed that the proteolytic index (PI) and free amino acids content of the starter group were higher than those of the control group, but the difference was not significant ($P>0.05$). Totally 45 kinds of flavor substances were detected in the inoculated, which were higher than 44 kinds in the control group and 27 kinds of raw meat ($P<0.05$). The mixed starters

收稿日期: 2018-09-25 修回日期: 2018-10-31
基金项目: “双一流”学科创新团队建设人才培养项目(NDSC2018-13)、国家自然科学基金面上项目(31660439)、国家重点研发计划项目(2016YFE0106200)和内蒙古传统发酵食品加工与安全关键技术项目
作者简介: 王德宝(1989—),男,博士生,主要从事畜产品质量与安全研究,E-mail: 1184693714@qq.com
通信作者: 赵丽华(1971—),女,教授,主要从事畜产品安全生产研究,E-mail: 867051675@qq.com

improved the characteristic flavor content of the sausage, such as 3-methylbutanal, aldehyde, heptaldehyde, n-nonanal and other aldehydes. In summary, the addition of compound starters helped to shorten the fermentation period, increase the content of monounsaturated fatty acid, and improve the color and flavor sensory quality of sausages.

Key words: mutton sausages; microbial starters; metabolism; nutritional quality; flavor

0 引言

发酵香肠是指将绞碎的瘦肉与丁状脂肪及辅料混匀后灌入肠衣,经自然或添加外源发酵剂发酵、干燥成熟制成 pH 值低于 5.3 的一类发酵肉制品^[1-2]。微生物发酵剂较高产酸和快速促使香肠水分活度(a_w)下降能力有利于缩短香肠发酵成熟周期,抑制香肠中腐败及致病微生物生长繁殖,提高香肠卫生质量,改善香肠色泽和风味组成,延长产品货架期^[1]。发酵香肠典型品质及良好风味组成源于发酵成熟期间的理化、生化及微生物的变化,而这一过程蛋白及脂质氧化分解对香肠最终品质特性起到决定性作用^[2]。蛋白和脂质是发酵肉制品中营养因子和重要风味物质的主要来源,发酵成熟过程中,其被微生物酶及肉内源酶分解为游离氨基酸和脂肪酸,既可提供人体所需氨基酸和脂肪酸等营养因子,也易通过氧化、分解和 Strecker 反应及美拉德反应生成决定香肠品质的主要风味物质^[3]。周才琼等^[4]研究表明,微生物分泌的酶类可使酸性猪肉中氨基酸和脂肪酸降解为醛、酮、醇、酸等物质,形成发酵肉制品特有风味物质,如 3-甲基丁醛、二烯醛、葵酸乙酯等。JOHANSSON 等^[5]探究戊糖片球菌和木糖葡萄球菌对香肠中风味物质形成的结果表明,复合菌株易在成熟过程中促进风味前体物质——非蛋白氮和游离脂肪酸的生成,提高成熟后香肠中醛类、酮类、醇类及芳香烃等主要风味物质含量。徐玮东等^[6]探究清酒乳杆菌对风干猪肉香肠蛋白分解的影响,发现接种清酒乳杆菌有助于蛋白质分解。王德宝等^[7]探究表明,清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌微生物发酵剂对羊肉发酵香肠品质及安全性具有重要贡献,可提高成熟香肠中单不饱和和脂肪酸比例,降低香肠中有害生物胺及亚硝酸盐的含量。

本文选择清酒乳杆菌、木糖葡萄球菌为发酵剂,制作羊肉发酵香肠,探究不同复合发酵剂对羊肉发酵香肠蛋白质、脂质分解及风味物质形成的影响,以期为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 试验材料

原料肉:羊肉(肥瘦相间),源自内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特中旗苏尼特羊后腿及羊尾。肠

衣:20~25 mm 胶原蛋白肠衣。

发酵剂:清酒乳杆菌(*Lactobacillus sake*)、木糖葡萄球菌(*Staphylococcus xylosus*),由内蒙古农业大学肉品微生物实验室提供。

主要化学试剂:色谱纯茚三酮、氨基酸标品、37 种脂肪酸标品,购于美国 Sigma-Aldrich 公司;甲醇、正己烷及丙酮(色谱纯),购于上海安谱实验科技股份有限公司。

主要仪器:Master DHS 型动态顶空进样器,美国 Thermo 科技有限公司;GC-MS DSQ II 型单四极杆气相色谱质谱联用仪,美国 Thermo 公司;L-8900 型氨基酸自动分析仪,日本日立公司。

1.2 试验方法

1.2.1 发酵香肠制作

参照 ZHAO 等^[8]方法,试验配方为:羊肉(羊后腿肉 80%、羊尾肥膘 20%)、蔗糖 0.5%、食盐 2.5%、亚硝酸钠 70 mg/kg、葡萄糖 0.5%、硝酸钠 100 mg/kg、抗坏血酸 0.05%、发酵剂 1×10^7 cfu/g。工艺条件如表 1 所示。

表 1 发酵香肠加工工艺条件			
Tab.1 Fermented sausage processing conditions			
加工阶段	温度/℃	时间/h	相对湿度/%
腌制	4	12~15	90~95
发酵	24~25	70~72	90~95
干燥中期	14~15	70~72	80~85
成熟(干燥结束)	13~14	70~72	70~75
成品(真空包装)	-80		

1.2.2 试验设计

通过产生物胺试验,结果表明清酒乳杆菌有较好抑制组胺、腐胺等有害生物胺的能力;木糖葡萄球菌产脂酶能力较强,有助于增加前体为脂肪酸的特征风味物质;因此选择清酒乳杆菌和木糖葡萄球菌为本试验的发酵剂,在预试验及单因素模拟试验基础上,获得发酵剂清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌最佳复配比(菌体浓度比)为 1:2。并将试验分为 3 组,分别为:对照组(不加外源发酵剂)、单一组(清酒乳杆菌)和复配组(清酒乳杆菌+木糖葡萄球菌)。然后取原料肉及成熟后发酵香肠经真空包装后保存于-80℃,备用。

1.2.3 pH 值、 a_w 、色差、亚硝酸盐残留量、游离脂肪酸及氨基酸含量的测定

参照 GB 5009.237—2016《食品 pH 值的测定》、

GB 5009. 33—2016《食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》、GB 5009. 168—2016《食品中脂肪酸的测定》、GB 5009. 124—2016《食品中氨基酸的测定》测定香肠 pH 值、亚硝酸盐残留量、游离脂肪酸及氨基酸含量^[9-12]；使用 HD-3A 型智能水分活度仪、CR-410 型色差计测定香肠 a_w 、亮度 (L) 和红度 (a^*)。

1.2.4 蛋白质分解指数 (PI) 测定

参考 HUGHES 等^[13]方法,将 2 g 样品与 18 mL 蒸馏水加入 50 mL 离心管中,均质 2 min,5℃、100 r/min 离心 15 min,Whatman 1 号层析纸 (100 111 μm) 过滤上清液 2 次,记滤液体积 (V)。15 mL 滤液和 15 mL 10% TCA (三氯乙酸) 混合后静置 30 min,与上述同样条件下离心,Whatman 4 号层析纸 (100 427 μm) 过滤上清液,取 5 mL 滤液测定氮质量浓度 N_1 ,通过 $N_0 (0.2VN_1)$ 计算非蛋白氮质量,总氮质量为 N 。蛋白水解指数 PI 为 $N_0/N \times 100\%$ 。

1.2.5 风味测定

参照罗玉龙等^[14]方法略作修改,在 20 mL 样品瓶中加入 4 g 粉碎香肠样,将老化的萃取头插入样品瓶使石英纤维头暴露于样品上部空间,在 60℃ 条件下吸附 40 min 后拔出,萃取头在 GC 进样口 (250℃) 下解吸附 3 min。

挥发性风味成分 GC-MS (气相色谱-质谱) 测定的 GC 条件: TR-5 型毛细色谱柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm),载气为 He,载气流速为 1.0 mL/min,传输线温度 250℃,不分流进样,进样时间 1 min;升温程序:40℃ 保持 3 min,以 4℃/min 升温到 150℃,保持 1 min,再以 5℃/min 升温到 200℃,最后以 20℃/min 升至 230℃,保持 5 min。MS 条件:离子源温度 250℃,进样口温度 250℃,质量扫描范围 30~400 (质荷比)。

质谱数据经与 MEANLIB、NISTDEMO 和 Wiley Library 检索定性,将匹配度大于 800 作为鉴定依据。

1.3 数据处理

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。

2 结果与分析

2.1 不同发酵剂对羊肉发酵香肠理化品质的影响

由表 2 可知,原料肉灌肠后经发酵成熟 pH 值急剧下降,接种清酒乳杆菌 + 木糖葡萄球菌的复配组 pH 值显著低于对照组和原料肉 (5.80) ($P < 0.05$),但与单一组差异不显著 ($P > 0.05$)。NIE 等^[15]研究表明,复合发酵剂有助于促进糖酵解进程和乳酸等有机酸积累,加速香肠酸化速率,快速降低香肠 pH 值并缩短香肠发酵周期,这与本研究结果一致。表 2 表明,香肠在发酵成熟过程水分活度 (a_w) 急剧下降,复配组 a_w 显著低于其他两组 ($P < 0.05$),这是由于随着 pH 值下降并接近蛋白质等电点改变了肌球蛋白与水结合能力,从而促进成熟过程水分蒸发和 a_w 的快速降低^[1]。SUN 等^[16]研究表明,低 a_w 和 pH 值可显著抑制香肠中产生物胺及亚硝胺的肠杆菌等有害菌生长繁殖,说明利用复合发酵剂制作香肠可提高其品质和安全性能,延长香肠货架期。香肠亮度 L 与原料肉差异不显著,而香肠红度则显著高于原料肉 ($P < 0.05$),3 组从小到大表现为:对照组、单一组、复配组 ($P < 0.05$),这可能与低 pH 值促使亚硝酸盐与肌红蛋白结合形成亚硝基肌红蛋白有关,而香肠红度色泽 (a^*) 的提高^[17],使得香肠中亚硝酸盐残留量显著 ($P < 0.05$) 低于国家规定肉食品亚硝酸盐残留量标准 (30 mg/kg)^[18]。蛋白质水解在香肠发酵成熟过程至关重要,其分解产物寡肽及游离氨基酸是香肠重要风味前体^[19]。文献[20-21]研究表明,乳酸菌和葡萄球菌可代谢支链氨基酸 (如亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸) 生成对发酵香肠风味具有重要影响的 2-甲基丁醛和 3-甲基丁醛;相比原料肉,成熟后蛋白质分解指数 (PI) 显著升高,复配组 PI 最高而与其他组相比差异不显著,说明微生物发酵剂的蛋白质水解酶活性较弱,而蛋白质分解主要依赖于内源蛋白酶。这与 LORENZO 等^[22]研究表明内源性蛋白酶和氨基酸氨肽酶是肉中蛋白质分解的主要酶类的试验结果相一致。

表 2 不同发酵剂对成品羊肉香肠理化品质的影响

Tab.2 Effect of different starter cultures on physico-chemical quality of fermented mutton sausages

参数	组别			
	原料肉	对照组	单一组	复配组
pH 值	(5.80 ± 0.06) ^c	(4.87 ± 0.03) ^b	(4.66 ± 0.03) ^a	(4.60 ± 0.04) ^a
a_w	(0.97 ± 0.01) ^c	(0.80 ± 0.01) ^b	(0.79 ± 0.01) ^b	(0.76 ± 0.02) ^a
L	(43.84 ± 2.11) ^a	(39.53 ± 3.88) ^a	(42.81 ± 2.44) ^a	(43.00 ± 2.40) ^a
a^*	(7.66 ± 0.16) ^a	(20.41 ± 1.10) ^b	(24.58 ± 1.80) ^c	(32.68 ± 2.65) ^d
亚硝酸盐残留量/(mg·kg ⁻¹)	(70.00 ± 0.07) ^c	(15.03 ± 0.13) ^b	(14.78 ± 0.27) ^b	(12.60 ± 0.08) ^a
PI/%	(26.47 ± 2.31) ^a	(29.83 ± 1.50) ^a	(29.00 ± 0.25) ^a	(31.00 ± 2.69) ^a

注:同一行(列)不同小(大)写字母表示差异显著 ($P < 0.05$),相同则差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

2.2 不同发酵剂对羊肉发酵香肠中游离氨基酸的影响

由表 3 可知,原料肉中游离氨基酸(FAA)含量与对照、单一和复配 3 组差异不显著($P>0.05$)。经发酵成熟后,游离氨基酸(FAA)总量从大到小依次为复配组、单一组、对照组;必需氨基酸(EAA)从大到小依次为复配组、对照组、单一组,但差异不显著($P>0.05$)。综上表明,添加清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌对香肠中游离氨基酸组成无显著影响,这一结果与 CASABURI 等^[23]研究相一致。综合上述蛋白质分解指数测定结果,说明内源蛋白水解酶类活性远高于微生物发酵剂。正如文献[24-26]所报道,谷氨酸和天冬氨酸产生鲜味,甘氨酸和丙氨酸具有甜味,而精氨酸、亮氨酸、赖氨酸、缬氨酸和苯丙氨酸等氨基酸则会给香肠造成一定苦味。部分

引起苦味氨基酸可作为极具影响香肠风味的前体氨基酸,如亮氨酸、缬氨酸等,在相应转氨酶及脱羧酶存在条件下生成 2-甲基丁醛和 3-甲基丁醛及 3-甲基丁醇,且 3-甲基丁醛与硫化化合物反应可产生类似培根香味的物质^[20-21],可将苦味氨基酸转换为 2-甲基丁醛、3-甲基丁醛及 3-甲基丁醇等特征风味物质的发酵剂及其代谢途径,有待于进一步研究。精氨酸还是婴儿必需氨基酸,同时还具有多种独特的生理和药理作用,能提高机体免疫功能、促进机体蛋白质合成、保护肠胃黏膜,在临床营养治疗中发挥着重要作用^[27]。复配组甜味及鲜味氨基酸所占百分比(11.64%、26.67%)高于单一组(11.51%、26.35%)和对照组(11.19%、26.11%),说明添加复合发酵剂有利于改善香肠滋味。

表 3 不同发酵剂对羊肉香肠游离氨基酸组成的影响

指标		组别			
		原料肉	对照组	单一组	复配组
非必需氨基酸	天冬氨酸	(6.69±0.28) ^A	(6.87±0.30) ^A	(6.91±0.09) ^A	(6.97±0.15) ^A
	丝氨酸	(2.73±0.03) ^A	(2.73±0.06) ^A	(2.79±0.02) ^A	(2.76±0.07) ^A
	谷氨酸	(11.88±1.24) ^A	(11.84±0.69) ^A	(11.93±0.11) ^A	(12.17±0.30) ^A
	甘氨酸	(3.68±0.22) ^A	(3.57±0.21) ^A	(3.76±0.04) ^A	(3.80±0.06) ^A
	丙氨酸	(4.47±0.33) ^A	(4.45±0.12) ^A	(4.47±0.03) ^A	(4.55±0.05) ^A
	胱氨酸	(0.97±0.05) ^A	(0.90±0.07) ^A	(0.90±0.10) ^A	(0.82±0.15) ^A
	酪氨酸	(2.35±0.02) ^A	(2.27±0.05) ^A	(2.22±0.01) ^A	(2.32±0.06) ^A
	组氨酸	(2.39±0.12) ^A	(2.28±0.07) ^A	(2.34±0.10) ^A	(2.23±0.15) ^A
	精氨酸	(5.10±0.12) ^A	(4.95±0.22) ^A	(4.96±0.02) ^A	(5.01±0.12) ^A
	脯氨酸	(1.52±0.54) ^A	(1.76±0.59) ^A	(2.03±0.57) ^A	(1.68±0.84) ^A
必需氨基酸	异亮氨酸	(3.38±0.15) ^A	(3.51±0.30) ^A	(3.51±0.07) ^A	(3.58±0.16) ^A
	蛋氨酸	(1.86±0.12) ^A	(1.95±0.08) ^A	(1.96±0.14) ^A	(1.94±0.06) ^A
	亮氨酸	(6.40±0.24) ^A	(6.40±0.47) ^A	(6.48±0.04) ^A	(6.57±0.31) ^A
	苏氨酸	(3.38±0.34) ^A	(3.44±0.10) ^A	(3.49±0.02) ^A	(3.51±0.09) ^A
	苯丙氨酸	(3.03±0.16) ^A	(4.09±0.19) ^A	(3.06±0.03) ^A	(3.09±0.15) ^A
	赖氨酸	(6.67±0.46) ^A	(6.64±0.51) ^A	(6.73±0.03) ^A	(6.78±0.24) ^A
	缬氨酸	(3.22±0.01) ^A	(3.76±0.22) ^A	(3.74±0.06) ^A	(3.74±0.06) ^A
	色氨酸	(0.21±0.02) ^A	(0.25±0.03) ^A	(0.23±0.01) ^A	(0.24±0.02) ^A

2.3 不同发酵剂对羊肉发酵香肠中游离脂肪酸的影响

香肠中脂肪酸含量及组成与营养价值及风味物质形成密切相关。发酵剂与内源脂酶可将肉中中性脂肪及磷脂分解为短链挥发性脂肪酸、醛、酯等物质赋予发酵肉制品特有风味^[5],还可促进饱和脂肪降解、加速单不饱和脂肪酸(MUFA)和多不饱和脂肪酸(PUFA)的释放^[28];摄入适量 MUFA、PUFA 可有效预防心脑血管疾病,因而不饱和脂肪酸(UFA)具有重要的营养保健价值^[29]。由表 4 可知,发酵香肠

检出脂肪酸主要以肉豆蔻酸(C_{14:0})、硬脂酸(C_{18:0})、棕榈油酸(C_{16:1})、油酸(C_{18:1})及亚油酸(C_{18:2n6})、亚麻酸(C_{18:3n3})为主;对照、单一及复配 3 组中该 6 种脂肪酸总和约占各自脂肪酸总量 86.83%、85.53%、90.45%。

由表 4 可知,肉豆蔻酸(C_{14:0})和硬脂酸(C_{18:0})含量高于其他饱和脂肪酸(SFA),是组成饱和脂肪酸中重要脂肪酸。相比于原料肉中的 SFA 含量(209.59 mg/(100 g)),发酵成熟后 3 组香肠 SFA 呈现不同幅度增加,其中肉豆蔻酸(C_{14:0})增加幅度远

表 4 不同发酵剂对羊肉香肠游离脂肪酸组成的影响

指标		组别			
		原料肉	对照组	单一组	复配组
饱和脂肪酸 (SFA)	C _{10:0}	2.69 ^a	(4.27 ± 0.03) ^b	(4.88 ± 0.66) ^b	(3.14 ± 0.03) ^a
	C _{12:0}	1.81 ^a	(4.33 ± 0.02) ^d	(4.29 ± 0.03) ^c	(3.16 ± 0.01) ^b
	C _{14:0}	34.99 ^a	80.23 ^c	(80.40 ± 0.06) ^c	(57.21 ± 0.16) ^b
	C _{16:0}	(19.09 ± 0.02) ^c	(15.65 ± 0.88) ^b	(13.90 ± 0.13) ^a	(13.49 ± 0.16) ^a
	C _{18:0}	(149.43 ± 4.05) ^b	(145.89 ± 1.12) ^b	(133.42 ± 2.57) ^a	(149.70 ± 3.98) ^b
	C _{20:0}	(1.58 ± 0.12) ^a	(8.66 ± 0.39) ^c	(14.05 ± 1.07) ^d	(6.04 ± 0.41) ^b
单不饱和脂肪酸(MUFA)	C _{14:1}	(1.53 ± 0.06) ^a	(3.84 ± 0.28) ^c	(5.06 ± 0.07) ^d	(2.33 ± 0.02) ^b
	C _{16:1}	(18.39 ± 0.32) ^a	(52.62 ± 0.57) ^c	(60.49 ± 1.43) ^d	(34.04 ± 0.10) ^b
	C _{18:1}	(254.31 ± 6.44) ^a	(239.65 ± 23.95) ^a	(269.17 ± 32.60) ^a	(324.56 ± 26.54) ^b
	C _{20:1}	(3.68 ± 0.03) ^a	(7.27 ± 0.06) ^d	(4.97 ± 0.24) ^b	(6.54 ± 0.02) ^c
多不饱和脂肪酸(PUFA)	C _{18:2n6}	(43.63 ± 0.51) ^d	(11.97 ± 0.70) ^b	(11.59 ± 3.79) ^b	(7.74 ± 0.94) ^a
	C _{18:2n6T}	(5.88 ± 1.81) ^a	(11.49 ± 0.79) ^b	(19.22 ± 2.64) ^c	(12.86 ± 0.12) ^b
	C _{18:3n3}	(16.05 ± 0.02) ^a	(29.11 ± 5.48) ^c	(22.91 ± 0.59) ^b	(27.73 ± 0.03) ^c
	C _{18:3n6}	(0.88 ± 0.11) ^a	(4.73 ± 0.12) ^c	(3.30 ± 0.05) ^b	(4.63 ± 0.07) ^c
	C _{20:3n6}	12.89 ^a	(27.82 ± 0.10) ^c	(27.50 ± 0.70) ^c	(25.04 ± 0.38) ^b
	C _{20:4n6}	(0.38 ± 0.04) ^a	(2.29 ± 0.04) ^c	(1.69 ± 0.21) ^b	(1.72 ± 0.05) ^b
	C _{20:5n3}	(4.14 ± 0.04) ^a	(12.40 ± 0.23) ^c	(13.58 ± 0.60) ^d	(10.17 ± 0.02) ^b
SFA		(209.59 ± 0.72) ^a	(259.03 ± 0.41) ^d	(250.94 ± 0.75) ^c	(232.74 ± 0.77) ^b
MUFA		(277.91 ± 0.26) ^a	(303.38 ± 18.72) ^b	(339.69 ± 21.09) ^b	(367.47 ± 31.67) ^c
PUFA		(83.85 ± 0.36) ^a	(99.81 ± 2.49) ^c	(99.79 ± 1.33) ^c	(89.89 ± 0.23) ^b
总量		(571.35 ± 2.45) ^a	(662.22 ± 20.24) ^b	(690.42 ± 22.68) ^c	(690.10 ± 32.02) ^c

高于其他 SFA,是影响香肠与原料肉中 SFA 存在显著差异($P < 0.05$)的主要脂肪酸。此外,复配组香肠 SFA (232.74 mg/(100 g))显著低于对照组(259.03 mg/(100 g))、单一组(250.94 mg/(100 g))($P < 0.05$),这可能与发酵成熟过程清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌促使饱和脂肪酸去饱和和转化为 UFA 或被分解有关^[30]。

由表 4 可知,添加微生物发酵剂对香肠中单不饱和脂肪酸(MUFA)释放有显著影响;清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌复合发酵剂对 MUFA 释放贡献最为显著。MUFA 中油酸(C_{18:1})约占对照、单一及复配 3 组单不饱和脂肪酸的 78.99%、79.23%、88.32%,为影响 3 组香肠中 MUFA 组成存在显著差异($P < 0.05$)的主要脂肪酸,棕榈油酸(C_{16:1})次之,使得复配组 MUFA 含量显著高于原料肉和对照组,这与 EMANUELA 等^[31]研究相一致,可能与油酸主要位于甘油三酯的 sn-1 和 sn-3 位置有关,易被发酵剂所产生及内源脂肪酶水解而释放。油酸也是香肠中风味物质重要前体,加热过程其双键易被氧化形成过氧化物,进一步分解为阈值较低的羰基类(醛、酮)风味物质,如具有烤肉香味的 2-庚烯醛和油脂香味的 2-癸烯醛,BENET 等^[32]发现该类物质在熟猪肉火腿中含量较高。此外,MOTTRAMD^[33]

研究表明,棕榈油酸(C_{16:1})含量与肉风味显著正相关,其氧化分解产物为具有青草香味的 1-己醇。相比原料肉中 PUFA,3 组香肠均有不同幅度增加,差异从大到小表现为:对照组、单一组、复配组,但 3 组香肠中部分 PUFA 差异不显著或对照组略高,说明内源脂酶对香肠中 PUFA 释放起主要作用,这一结果与沈清武等^[28]研究相一致。相比原料肉 PUFA 组成,香肠中亚油酸、亚麻酸、花生四烯酸(C_{20:4n6})和二十碳五烯酸(C_{20:5n3})均有大幅上升;且香肠中特征、低阈值风味物质主要来自于 PUFA 中亚油酸、亚麻酸、花生四烯酸和二十碳五烯酸,如丙至癸醛、烯醛和二烯醛及酮类等羰基类风味物质^[34],这是由于不饱和脂肪酸中氧化断裂位点较多,易降解氧化为上述风味物质。

2.4 不同发酵剂对羊肉发酵香肠中风味物质形成的影响

香肠中风味物质主要源于蛋白质及脂质氧化分解,如氨基酸 Strecker 降解、脂质氧化及 Maillard 反应构成风味物质生成主要途径^[3]。由表 5 可知,3 组香肠与原料肉中特征风味组成存在较大差异。原料肉共检出风味物质 27 种,对照组为 44 种;发酵剂组 45 种,其中醛类 15 种、醇类 10 种、酯类 8 种、酮、酸、烷烃类各 2 种,萜类及其他为 6 种。组间比较可

表 5 不同发酵剂对发酵羊肉香肠中风味组成的影响(以单位质量吸收度表示)							
Tab.5 Effects of different starter cultures on flavor composition in fermented mutton sausages							
g ⁻¹							
类别	序号	中文名	分子式	组别			
				原料肉	对照组	单一组	复配组
醛类	1	戊醛	C ₅ H ₁₀ O		(1.10 ± 0.23) × 10 ^{7a}	(9.80 ± 0.40) × 10 ^{6a}	(1.29 ± 0.11) × 10 ^{7a}
	2	3-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O			(1.10 ± 0.30) × 10 ^{6a}	(2.60 ± 0.10) × 10 ^{6b}
	3	己醛	C ₆ H ₁₂ O	(1.60 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(6.24 ± 1.91) × 10 ^{7c}	(3.39 ± 0.18) × 10 ^{7b}	(7.70 ± 0.62) × 10 ^{7c}
	4	2-己烯醛	C ₆ H ₁₀ O	2.00 × 10 ^{5a}	(3.00 ± 0.20) × 10 ^{6c}	8.00 × 10 ^{5a}	(1.50 ± 0.50) × 10 ^{6b}
	5	庚醛	C ₇ H ₁₄ O	(3.15 ± 0.52) × 10 ^{7a}	(4.10 ± 0.81) × 10 ^{7a}	(4.58 ± 0.22) × 10 ^{7a}	(1.21 ± 0.09) × 10 ^{8b}
	6	反-2-庚烯醛	C ₇ H ₁₂ O	(8.30 ± 0.80) × 10 ^{6c}	(2.00 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(1.90 ± 0.80) × 10 ^{6a}	(3.20 ± 0.40) × 10 ^{6b}
	7	(E,E)-2,4-庚二烯醛	C ₇ H ₁₀ O		(2.30 ± 0.20) × 10 ^{6b}	(0.90 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(1.20 ± 0.10) × 10 ^{6a}
	8	反-2-辛烯醛	C ₈ H ₁₄ O	(1.90 ± 0.22) × 10 ^{7b}	(2.20 ± 1.00) × 10 ^{6a}	(1.40 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(2.70 ± 1.40) × 10 ^{6a}
	9	正壬醛	C ₉ H ₁₈ O		(4.41 ± 1.24) × 10 ^{7a}	(3.70 ± 0.44) × 10 ^{7a}	(5.39 ± 0.62) × 10 ^{7b}
	10	顺-6-壬烯醛	C ₉ H ₁₆ O		(5.00 ± 0.30) × 10 ^{6b}	(3.60 ± 0.50) × 10 ^{6a}	(1.77 ± 0.23) × 10 ^{7c}
	11	反式-2-癸烯醛	C ₁₀ H ₁₈ O	(4.30 ± 0.50) × 10 ^{6c}	(1.40 ± 0.60) × 10 ^{6a}	(1.00 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(2.60 ± 0.40) × 10 ^{6b}
	12	2-十一烯醛	C ₁₁ H ₂₀ O	(2.50 ± 0.20) × 10 ^{6b}	1.00 × 10 ^{6a}	5.00 × 10 ^{5a}	(5.00 ± 1.00) × 10 ^{5a}
	13	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	(6.94 ± 0.79) × 10 ^{7b}	(2.40 ± 0.30) × 10 ^{6a}	(1.90 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(2.30 ± 0.10) × 10 ^{6a}
	14	2-苯基乙醛	C ₈ H ₈ O		(1.10 ± 0.30) × 10 ^{6a}	(1.10 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(1.70 ± 0.20) × 10 ^{6a}
	15	4-异丙基苯甲醛	C ₁₀ H ₁₂ O	(2.00 ± 0.40) × 10 ^{6a}	(5.60 ± 1.40) × 10 ^{6b}	(3.40 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(2.80 ± 0.40) × 10 ^{6a}
醇类	16	乙醇	C ₂ H ₆ O		(2.27 ± 0.83) × 10 ^{7a}	(1.56 ± 0.11) × 10 ^{7a}	(2.40 ± 0.06) × 10 ^{7b}
	17	正丁醇	C ₄ H ₁₀ O		(2.20 ± 0.30) × 10 ^{6a}	(2.10 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(2.70 ± 0.10) × 10 ^{6a}
	18	正戊醇	C ₅ H ₁₂ O		3.50 × 10 ^{6a}	2.70 × 10 ^{6a}	6.30 × 10 ^{6b}
	19	1-戊烯-3-醇	C ₅ H ₁₀ O	(2.80 ± 0.80) × 10 ^{6c}	(9.00 ± 3.00) × 10 ^{5a}	1.20 × 10 ^{6a}	1.80 × 10 ^{6b}
	20	正己醇	C ₆ H ₁₄ O	(9.90 ± 1.80) × 10 ^{6b}	(5.20 ± 0.80) × 10 ^{6a}	(3.30 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(1.30 ± 0.05) × 10 ^{7b}
	21	2,3-丁二醇	C ₄ H ₁₀ O ₂		(9.10 ± 0.70) × 10 ^{6a}	(2.26 ± 0.07) × 10 ^{7b}	(1.99 ± 0.31) × 10 ^{7b}
	22	1-辛烯-3-醇	C ₈ H ₁₆ O	(6.50 ± 1.40) × 10 ^{6a}	(6.30 ± 2.20) × 10 ^{6a}	(4.50 ± 0.30) × 10 ^{6a}	(5.00 ± 0.30) × 10 ^{6a}
	23	正辛醇	C ₈ H ₁₈ O		(4.90 ± 1.00) × 10 ^{6b}	(2.90 ± 0.90) × 10 ^{6a}	(6.60 ± 0.70) × 10 ^{6c}
	24	苯乙醇	C ₈ H ₁₀ O	(7.80 ± 0.90) × 10 ^{6c}	(3.50 ± 0.30) × 10 ^{6b}	(3.90 ± 0.10) × 10 ^{6b}	(2.00 ± 0.20) × 10 ^{6a}
	25	4-异丙基苯甲醇	C ₁₀ H ₁₄ O	(3.51 ± 0.18) × 10 ^{7b}	(3.80 ± 0.60) × 10 ^{6a}	(3.00 ± 0.60) × 10 ^{6a}	(2.80 ± 0.40) × 10 ^{6a}
酯类	26	乙酸甲酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	(2.98 ± 0.69) × 10 ^{7b}	(2.90 ± 0.50) × 10 ^{6a}	(3.90 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(4.00 ± 1.30) × 10 ^{6a}
	27	乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂		(2.10 ± 0.80) × 10 ^{6a}	(1.60 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(4.40 ± 0.90) × 10 ^{6b}
	28	乳酸乙酯	C ₅ H ₁₀ O ₃	(1.34 ± 0.10) × 10 ^{8b}	(6.10 ± 0.70) × 10 ^{6a}	(8.30 ± 0.60) × 10 ^{6a}	(5.50 ± 0.70) × 10 ^{6a}
	29	己酸乙酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	(8.63 ± 1.54) × 10 ^{7c}	(2.60 ± 0.40) × 10 ^{6a}	1.60 × 10 ^{6a}	(4.40 ± 0.30) × 10 ^{6b}
	30	己酸-2-苯乙酯	C ₁₄ H ₂₀ O ₂	(5.18 ± 0.32) × 10 ^{7b}	(3.70 ± 0.80) × 10 ^{6a}	(3.2 ± 0.10) × 10 ^{6a}	3.60 × 10 ^{6a}
	31	辛酸甲酯	C ₉ H ₁₈ O ₂		(3.60 ± 0.60) × 10 ^{6a}	(4.60 ± 0.30) × 10 ^{6a}	(4.70 ± 0.20) × 10 ^{6b}
	32	辛酸乙酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	(3.50 ± 0.18) × 10 ^{7b}	(1.30 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(1.50 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(1.80 ± 0.20) × 10 ^{6a}
	33	8-甲基壬酸甲酯	C ₁₁ H ₂₂ O ₂		(1.10 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(1.70 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(1.30 ± 0.10) × 10 ^{6a}
酮类	34	3-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂	(4.50 ± 0.90) × 10 ^{6b}	(1.20 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(1.40 ± 0.10) × 10 ^{6a}	5.40 × 10 ^{6b}
	35	4-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂		(1.20 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(1.70 ± 0.20) × 10 ^{6a}	1.30 × 10 ^{6a}
酸类	36	乙酸	C ₂ H ₄ O ₂	(3.74 ± 0.10) × 10 ^{8b}	(1.16 ± 0.25) × 10 ^{7a}	(7.80 ± 0.50) × 10 ^{6a}	(1.58 ± 0.17) × 10 ^{7a}
	37	丁酸	C ₄ H ₈ O ₂	(1.50 ± 0.90) × 10 ^{6a}	(1.70 ± 0.90) × 10 ^{6a}	(1.70 ± 0.50) × 10 ^{6a}	(1.40 ± 0.50) × 10 ^{6a}
烷烃	38	邻异丙基甲苯	C ₁₀ H ₁₄		(1.39 ± 0.29) × 10 ^{7a}	(1.02 ± 0.02) × 10 ^{7a}	(1.19 ± 0.08) × 10 ^{7a}
	39	正十九烷	C ₁₉ H ₄₀	(1.31 ± 0.09) × 10 ^{7b}	(1.90 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(1.60 ± 0.10) × 10 ^{6a}	(1.40 ± 0.20) × 10 ^{6a}
萜类 及 其他	40	β-蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	(8.89 ± 0.52) × 10 ^{7b}	(1.65 ± 0.34) × 10 ^{7a}	(1.22 ± 0.04) × 10 ^{7a}	(1.25 ± 0.05) × 10 ^{7a}
	41	D-柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	(2.90 ± 0.07) × 10 ^{7b}	(3.06 ± 1.03) × 10 ^{7b}	(2.16 ± 0.10) × 10 ^{7a}	(1.52 ± 0.19) × 10 ^{7a}
	42	γ-松油烯	C ₁₀ H ₁₆		(7.50 ± 0.80) × 10 ^{6b}	(4.80 ± 0.30) × 10 ^{6b}	(2.20 ± 0.20) × 10 ^{6a}
	43	2-正戊基呋喃	C ₉ H ₁₄ O	(4.70 ± 0.30) × 10 ^{6a}	(5.67 ± 0.91) × 10 ^{7b}	(4.07 ± 0.34) × 10 ^{7b}	(5.79 ± 0.60) × 10 ^{7b}
	44	草蒿脑	C ₁₀ H ₂₀ O ₂		(7.00 ± 2.60) × 10 ^{6b}	(4.10 ± 0.30) × 10 ^{6a}	(4.40 ± 0.50) × 10 ^{6a}
	45	茴香脑	C ₁₀ H ₁₂ O	(3.20 ± 0.20) × 10 ^{6a}	(5.10 ± 1.40) × 10 ^{6b}	(8.30 ± 1.00) × 10 ^{6c}	(5.70 ± 1.00) × 10 ^{6b}

知,单一清酒乳杆菌发酵剂对香肠种风味相对含量影响较小;复合发酵剂可促进蛋白质、脂质分解,提供风味物质生成的前体,提高香肠中特征风味物质

含量,这一结果与上述蛋白质分解指数和脂肪酸组成变化及 JOHANSSON 等^[5]研究相一致。

较低阈值和呈现良好香气的醛类使其成为肉制

品中重要挥发性风味物质^[35]。香肠中含量较高的3种醛类:己醛具有青草味、庚醛和正壬醛呈现油脂香味,3种醛类的前体是亚油酸和亚麻酸^[36-37],而复配组亚油酸和亚麻酸含量高于对照、单一组与原料肉,较高含量的前体底物促使复配组中己醛、庚醛、正壬醛含量高于其他3组。3-甲基丁醛是一种低阈值、具有苹果香味、易与肉制品中硫化物形成类似培根风味的物质,是前体氨基酸形成重要风味中的一种,其前体为亮氨酸、缬氨酸等支链氨基酸^[21],结果表明3-甲基丁醛仅在发酵剂组中检出且复配组含量高于单一组,说明清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌有利于促进支链氨基酸通过Strecker降解向3-甲基丁醛的转变。由表5可知,苯甲醛是羊肉中主要芳香醛^[14],发酵香肠中含量较低,与香肠中4-异丙基苯甲醛可能均来自苯丙氨酸的Strecker降解^[38]。综上得出,添加清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌的复合发酵剂有助于促进香肠脂质及氨基酸向特征风味物质转变。

相比醛类,醇类风味阈值较高,原料肉中检出5种,香肠中为10种。对风味贡献较大的主要是1-辛烯-3-醇、1-戊烯-3-醇和苯甲醇,前两种又称为蘑菇醇,具有浓郁蘑菇香味,主要来源于花生四烯酸和亚油酸的脂质氧化^[39]。苯甲醇是重要芳香醇之一,常以酯类形式呈现并存在于玫瑰花油及香肠中。上述醇类在羊肉中含量高于香肠,说明这些特征香味醇类主要源自原料肉。酯类通常呈甜味和水果香味,阈值较低,其存在可使发酵香肠整体风味因短链酸类带来的尖刺感变得更加柔和。酯类中辛酸乙酯、己酸-2-苯乙酯等对香肠风味贡献较大,而这些酯类可能主要源于醛类物质氧化形成酸类与醇类酯化而成^[40]。相比香肠,原料肉中这些酯类含量最高。综上表明,发酵剂对醇类及酯类影响微小。

酮类化合物由氨基酸Strecker降解、脂肪酸氧化热降解及微生物分解代谢产生,其风味独特、阈值低,可赋予香肠干酪水果香味、花香,随着碳链增加风味愈加浓郁^[41]。发酵香肠中检出3-羟基-2-丁酮和4-羟基-2-丁酮,原料肉仅检出3-羟基-2-丁酮。3-羟基-2-丁酮由香肠中柠檬酸代谢产生二乙酸转化

而来,赋予香肠清香奶香味^[42]。复配组3-羟基-2-丁酮含量显著高于其他两组($P < 0.05$),与原料肉差异不显著($P > 0.05$),说明成熟过程中木糖葡萄球菌有助于代谢柠檬酸生成二乙酸最终转化为3-羟基-2-丁酮。

原料肉与发酵香肠检出酸类2种,分别为乙酸和丁酸,乙酸主要赋予香肠酸醋味,丁酸则可赋予香肠奶香风味。原料肉中乙酸含量显著高于3组香肠($P < 0.05$),而原料肉中丁酸与香肠间差异不显著($P > 0.05$)。

烷烃类阈值较高,仅检出邻异丙基甲苯和正十九烷,对香肠整体风味影响较小。香肠中还检出 β -蒎烯、D-柠檬烯、 γ -松油烯、2-正戊基呋喃、草蒿脑、茴香脑;原料肉中 β -蒎烯显著高于发酵香肠组,2-正戊基呋喃显著低于发酵香肠组;而 γ -松油烯和草蒿脑在原料肉中未发现。

3 结束语

探究了清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌对羊肉发酵香肠蛋白质、脂质分解及风味物质形成的影响。添加清酒乳杆菌与木糖葡萄球菌复合发酵剂有助于快速降低香肠pH值、 a_w ;可促进亚硝酸盐与肌红蛋白结合,使得香肠红度高于单一和对照组,并降低亚硝酸盐在香肠中残留量,使其低于国家食品安全规定的肉制品中亚硝酸盐最高残留标准(30 mg/kg)。蛋白质分解为游离氨基酸主要在于内源蛋白酶的作用,发酵剂促使亮氨酸等支链氨基酸向3-甲基丁醛的转变,有利于提高发酵香肠中3-甲基丁醛含量。内源酯酶对香肠中SFA和PUFA释放起主要作用,而复配发酵剂对MUFA释放起到关键作用。复合发酵剂可提高香肠中风味物质种类和特征醛类的相对含量。总之,添加复合发酵剂有助于快速降低香肠酸度和水分活度、缩短发酵周期、改善香肠色泽、降低香肠中亚硝酸盐残留量和提高香肠安全性;有助于提高香肠中MUFA相对含量,可促进支链氨基酸和多不饱和脂肪酸氧化分解为香肠中低阈值的特征风味物质——3-甲基丁醛、己醛、庚醛、正壬醛等醛类,提高香肠营养和风味感官品质。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] LORENZO J M, FRANCO D. Fat effect on physico-chemical, microbial and textural changes through the manufactured of dry-cured foal sausage lipolysis, proteolysis and sensory properties [J]. Meat Science,2012,92(4):704 – 714.

[3] FIDEL T. Proteolysis and lipolysis in flavor development of dry-cured meat products[J]. Meat Science, 1998,49(Supp. 1): 101 – 110.

[4] 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.

- ZHOU Caiqiong, DAI Xiaorong, DU Muying. Formation of volatile flavor components during sour meat processing [J]. Food Science, 2010, 31(7): 98–104. (in Chinese)
- [5] JOHANSSON G, BERDAGUÉ J, LARSSON M, et al. Lipolysis, proteolysis and formation of volatile components during ripening of a fermented sausage with *Pedioroccus pentosaceus* and *Staphylococcus xylosus* as starter cultures [J]. Meat Science, 1994, 38(2): 203–218.
- [6] 徐玮东, 丁一, 黄莉, 等. 不同接种量的清酒乳杆菌对风干肠理化特性及感官品质的影响 [J]. 中国调味品, 2013, 38(12): 19–23.
- XU Weidong, DING Yi, HUANG Li, et al. Effect of fermented sausage inoculated with different inoculum concentration of lactobacillus sake on physicochemical properties and sensorial quality [J]. China Condiment, 2013, 38(12): 19–23. (in Chinese)
- [7] 王德宝, 王晓冬, 康连和, 等. 不同发酵剂对发酵羊肉香肠有害生物胺及游离脂肪酸释放的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 73–79.
- WANG Debao, WANG Xiaodong, KANG Lianhe, et al. Effects of different starter cultures on the inhibition of harmful biogenic amine content and free fatty acids release of fermented sausages [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(9): 73–79. (in Chinese)
- [8] ZHAO L, JIN Y, MA C W, et al. Physico-chemical characteristics and free fatty acid composition of dry fermented mutton sausages as affected by the use of various combinations of starter cultures and spices [J]. Meat Science, 2011, 88(4): 761–766.
- [9] GB 5009.237—2016 食品安全国家标准 食品 pH 值的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [10] GB 5009.33—2016 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] GB 5009.124—2016 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [12] GB 5009.168—2016 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [13] HUGHES M C, KERRY J P. Characterization of proteolysis during the ripening of semi-dry fermented sausages [J]. Meat Science, 2002, 62(2): 205–216.
- [14] 罗玉龙, 赵丽华, 王柏辉, 等. 苏尼特羊不同部位肌肉挥发性风味成分和脂肪酸分析 [J]. 食品科学, 2017, 38(4): 165–169.
- LUO Yulong, ZHAO Lihua, WANG Bohui, et al. Analysis of volatile components and fatty acid composition in muscles from different anatomical locations of sunite sheep [J]. Food Science, 2017, 38(4): 165–169. (in Chinese)
- [15] NIE X H, LIN S L, ZHANG Q L. Proteolytic characterisation in grass carp sausage inoculated with *Lactobacillus plantarum* and *Pedioroccus pentosaceus* [J]. Food Chemistry, 2014, 145: 840–844.
- [16] SUN Q X, CHEN Q, LI F F, et al. Biogenic amine inhibition and quality protection of Harbin dry sausages by inoculation with *Staphylococcus xylosus* and *Lactobacillus plantarum* [J]. Food Control, 2016, 68: 358–366.
- [17] MAC DOUGALL D B, MOTTRAM D S, RHODES D N. Contribution of nitrite and nitrate to color and flavor of cured meats [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1975, 26(11): 1743–1754.
- [18] GB 2760—2007 食品添加剂使用卫生标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [19] BENITO M J, RODRÍGUEZ M, CÓRDOBA M G, et al. Effect of the fungal protease EPg222 on proteolysis and texture in the dry fermented sausage ‘salchichón’ [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85: 273–280.
- [20] SCHMIDT S, BERGER R G. Aroma compounds in fermented sausages of different origins [J]. LWT—Food Science and Technology, 1998, 31(6): 559–567.
- [21] STAHNKE M L H. Volatiles produced by *Staphylococcus xylosus* and *Staphylococcus carnosus* during growth in sausage minces [J]. LWT—Food Science and Technology, 1999, 32(6): 365–371.
- [22] LORENZO J M, CITTADINI A, BERMÚDEZ R, et al. Influence of partial replacement of NaCl with KCl, CaCl₂ and MgCl₂ on proteolysis, lipolysis and sensory properties during the manufacture of dry-cured lacón [J]. Food Control, 2015, 55: 90–96.
- [23] CASABURI A, ARISTOY M C, CAVELLA S, et al. Biochemical and sensory characteristics of traditional fermented sausages of Vallo di Diano (Southern Italy) as affected by the use of starter cultures [J]. Meat Science, 2007, 76(2): 295–307.
- [24] STEFANO S, ALESSANDRO P, MAURIZIO M, et al. Oligopeptides and free amino acids in Parma hams of known cathepsin b activity [J]. Food Chemistry, 2001, 75(3): 267–273.
- [25] GARCÍA I, DÍEZ V, ZUMALACÁRREGUI J M. Changes in nitrogen fractions and free amino acids during ripening of Spanish dried beef “cecina” [J]. Journal of Muscle Foods, 1998, 9(3): 257–266.
- [26] VIRGILI R, SCHIVAZAPPA C, PAROLARI G, et al. Proteases in fresh pork muscle and their influence on bitter taste formation in dry-cured ham [J]. Journal of Food Biochemistry, 1998, 22(1): 53–63.
- [27] EFRON D T, BARBUL A. Role of arginine in immunonutrition [J]. Journal of Gastroenterology, 2000, 35(12): 20–23.
- [28] 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.
- SHEN Qingwu, LI Pinglan. Effects of microbial enzymes and meat tissue enzymes on free fatty acids in dry fermented sausages [J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(12): 1–5. (in Chinese)
- [29] REGULAKA-ILOW B, ILOW R, KAWICKA A, et al. Evaluation of fatty acids daily intake and diets atherogenicity of

- dietetics students of Wroclaw Medical University [J]. *Rocz. Panstw. Zakl. Hig.*, 2013, 64(3):183–190.
- [30] BECK H C, HANSEN A M, LAURITSEN F R. Catabolism of leucine to branched-chain fatty acids in *Staphylococcus xylosus* [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2004, 96:1185–1193.
- [31] EMANUELA Z, SERGIO G, ALESSANDRA 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.
- [32] BENET I, GUÀRDIA M D, IBÁÑEZ 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.
- [33] MOTTRAMD S. Flavor formation in meat and meat products: a review [J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4):415–424.
- [34] FRANKEL E N. Lipid oxidation [M]. Bridgewater: The Oily Press, 2005:34–35.
- [35] 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, 7(16):209–251.
WU Na, WANG Xichang, TAO Ningping, et al. Contribution of lipid oxidation and degradation to the formation of aroma compounds in animal-derived foods [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 7(16):209–251. (in Chinese)
- [36] VARLET V, KNOCKAERT C, PROST C, et al. Comparison of odor active volatile compounds of fresh and smoked salmon [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(9):3391–3401.
- [37] NIETO G, BANON S, GARRIDO M D. Effect of supplementing ewes' diet with thyme (*Thymus zygis* ssp. *gracilis*) leaves on the lipid oxidation of cooked lamb meat [J]. *Food Chemistry*, 2011, 125(4):1147–1152.
- [38] PMGLIESE C, SIRTORI F, CALAMAI L, et al. The evolution of volatile compounds profile of “Toscano” dry-cured ham during ripening as revealed by SPME–GC–MS approach [J]. *Journal of Mass Spectrometry*, 2010, 45(9):1056–1064.
- [39] MURIEL E, ANTEQUERA T, PETRÓN M J, et al. Volatile compounds in Iberian dry-cured loin [J]. *Meat Science*, 2004, 68(3):391–400.
- [40] STAHNKE L H. Aroma components from dried sausages fermented with *Staphylococcus xylosus* [J]. *Meat Science*, 1994, 38(1):39–53.
- [41] 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.
- [42] MCSWEENEY P L H, FOX P F. Metabolism of residual lactose and of lactate and citrate [J]. *Cheese Chemistry Physics & Microbiology*, 2004(4):361–371.

(上接第 335 页)

- [24] BARTOLOME B, ESTRELLA I, HERNANDEZ M T. Interaction of low molecular weight phenolics with proteins (BSA) [J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(4):617–621.
- [25] VON S M, PIZONES RUIZHENESTROSA V M, AMR P. Green tea polyphenols- β -lactoglobulin nanocomplexes: interfacial behavior, emulsification and oxidation stability of fish oil[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35:505–511.
- [26] LIU W, SUN D, LI C, et al. Formation and stability of paraffin oil-in-water nano-emulsions prepared by the emulsion inversion point method[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 303(2):557–563.
- [27] WONG D W, CAMIRAND W M, PAVALATH A E. Structures and functionalities of milk proteins[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1996, 36(8):807–844.
- [28] KUHN K R, CUNHA R L. Flaxseed oil-whey protein isolate emulsions: effect of high pressure homogenization[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111(2):449–457.
- [29] 江连洲,陈思,李杨,等. 大豆分离蛋白-花青素复合物的制备及其蛋白结构与功能性质分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(10):20–27.
JIANG Lianzhou, CHEN Si, LI Yang, et al. Effects of complexation with anthocyanin on the structural and functional properties of denatured soybean protein[J]. *Food Science*, 2018, 39(10):20–27. (in Chinese)
- [30] CHANAMAI R, MCCLEMENTS D J. Impact of weighting agents and sucrose on gravitational separation of beverage emulsions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(11):5561–5565.
- [31] KLEMASZEWSKI J L, DAS K P, KANG Y J, et al. Effects of controlled sulfitolysis of bovine serum albumin on droplet size and surface area of emulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1990, 38(3):647–650.
- [32] SILVESTRE M P C, CHAIVASIT W, BRANNA R G, et al. Ability of surfactant headgroup size to alter lipid and antioxidant oxidation in oil-in-water emulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(6):2057–2061.
- [33] DUBEAU S, SAMSON G, TAJMIR-RIABI H A. Dual effect of milk on the antioxidant capacity of green, Darjeeling, and English breakfast teas[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(3):539–545.