

黑松露不同预处理温度对中式香肠品质的影响

王 琪^{1,2,3}, 瞿 静^{1,4}, 刘琨毅³, 黄元相^{2*}, 陈 韬^{1*}

(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 昆明 650201; 2. 昆明高上高食品有限公司, 昆明 650201; 3. 宜宾职业技术学院五粮液技术与食品工程学院, 宜宾 644003; 4. 楚雄医药高等专科学校科技信息处, 楚雄 675000)

摘 要: 目的 探究黑松露不同预处理温度对中式香肠品质的影响。**方法** 将黑松露添加到中式香肠中, 采用不同温度对黑松露进行预处理, 考察其对中式香肠品质的影响。**结果** 直接添加黑松露在中式香肠中, 可引起脂类水解, 使酸价与 b^* 值显著升高($P<0.05$), L^* 值、硬度、弹性、咀嚼性及感官评分显著降低($P<0.05$), 对 a^* 值和内聚性无显著影响($P>0.05$)。当 60 °C 处理黑松露 30 min 后添加到中式香肠中, 感官品质最好, 与空白组(未添加黑松露)相比挥发性化合物相对含量差异显著。通过正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)发现 2 种挥发性化合物相对含量显著降低[变量权重重要性(variable importance in projection, VIP)>1.0, Student t 检验的 $P<0.05$ 和差异倍数(fold change, FC)<0.5], 29 种挥发性化合物相对含量显著增加(VIP>1.0, $P<0.05$, FC>2)。**结论** 当黑松露 60 °C 处理 30 min 添加到中式香肠中, 在不影响中式香肠感官品质的前提下改善了中式香肠的风味, 为工业化中式香肠品质的改善提供了一定的理论依据。

关键词: 中式香肠; 黑松露; 脂肪酶; 品质特征

Effects of different pretreatment temperatures of *Tuber melanosporum* on the qualities of Chinese sausage

WANG Qi^{1,2,3}, QU Jing^{1,4}, LIU Kun-Yi³, HUANG Yuan-Xiang^{2*}, CHEN Tao^{1*}

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Kunming Gaoshenggao Food Co., Ltd., Kunming 650201, China; 3. College of Wuliangye Technology and Food Engineering, Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003, China; 4. Scientific Information Division, Chuxiong Medical College, Chuxiong 675000, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of different pretreatment temperatures of *Tuber melanosporum* on the qualities of Chinese sausage. **Methods** *Tuber melanosporum* was added to Chinese sausage and pretreated at different temperatures to investigate its effects on the qualities of Chinese sausage. **Results** The addition of *Tuber melanosporum* in Chinese sausage could cause lipid hydrolysis, significantly increase acid value and b^* values ($P<0.05$), significantly reduce L^* values, hardness, springiness, chewiness and sensory score ($P<0.05$), but had no significant effects on a^* values and cohesiveness ($P>0.05$). When *Tuber melanosporum* was treated at 60 °C for 30 min and added

基金项目: 云南农业大学科研发展基金项目(KX900127000); 云南农业大学第十五届学生创新创业行动基金项目(2022ZKY349)

Fund: Supported by the Scientific Research and Development Fund of Yunnan Agricultural University (KX900127000), and the 15th Student Innovation and Entrepreneurship Action Fund Project of Yunnan Agricultural University (2022ZKY349)

***通信作者:** 黄元相, 工程师, 主要研究方向为肉制品加工与品质控制。E-mail: 414380262@qq.com

陈 韬, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品质控制和畜产品加工。E-mail: chentao63@163.com

***Corresponding author:** HUANG Yuan-Xiang, Engineer, Kunming Gaoshenggao Food Co., Ltd., Chenggong Industrial Park, Kunming 650201, China. E-mail: 414380262@qq.com

CHEN Tao, Ph.D, Professor, College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, No.452 Fengyuan Road, Kunming 650201, China. E-mail: chentao63@163.com

to Chinese sausage, the sensory qualities were the best, and the relative content of volatile compounds were significantly different from that of the blank group (without the addition of *Tuber melanosporum*). The orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) showed that the relative content of the 2 kinds of volatile compounds decreased significantly [variable importance in projection (VIP)>1.0, P of Student t test <0.05 and fold change (FC)<0.5] and the relative content of the 29 kinds of volatile compounds increased significantly (VIP>1.0, P <0.05, FC>2). **Conclusion** When *Tuber melanosporum* is added to Chinese sausage after being treated at 60 °C for 30 min, the flavor of Chinese sausage can be improved without affecting the sensory qualities of Chinese sausage, which provides a certain theoretical basis for improving the qualities of industrial Chinese sausage.

KEY WORDS: Chinese sausage; *Tuber melanosporum*; lipase; qualities characteristic

0 引言

中式香肠是将原料肉经过斩拌,加入白酒、香料、糖、盐等腌制后灌入肠衣中,再经烘烤或自然晾干的一种肉制品^[1],深受消费者喜欢。目前,中式香肠的研究主要集中在加工工艺^[2]、外源酶添加^[3]、发色技术^[4]、降脂方法^[5-6]、降盐方法、优良菌种的筛选及应用^[7]、风味物质的形成^[8]和亚硝酸盐^[4,9]、生物胺^[10]、杂环胺^[11]等有害物质的形成与控制等方面。中式香肠通过高温烘烤可以短期产出,但是缺点是风味较传统发酵香肠欠佳。因此,提高中式香肠的风味是急需解决的问题。

黑松露(*Tuber melanosporum*)是一种药食两用的野生食用菌^[12]。云南是我国黑松露的主要产地^[13],所产黑松露营养丰富、风味独特,含有脂肪 2.2%、蛋白质 21.6%、碳水化合物 62.70%及多种对人体健康有益的活性成分^[14],例如,其碳水化合物中具有大量的生物活性成分菌多糖,具有抗炎、抗氧化的作用^[15]。另外, MARTIN 等^[16]报道黑松露含约 7500 个蛋白质编码基因,其中上调的基因多为脂肪酶和多铜氧化酶的编码基因。黑松露富含脂肪酶,可以作为天然的外源脂肪酶原料添加到中式香肠中,促进脂类的水解和氧化,提高香肠的风味;而直接将黑松露加入中式香肠中,会导致香肠出现内部结构松散、表面油腻、不易烘干等不良现象。因此,需要对黑松露中的脂肪酶进行灭活处理,而采用热处理灭酶的方法简单易行。目前关于黑松露添加到中式香肠中的研究鲜有报道,彭珏^[17]仅提出了一种黑松露香肠的制备方法,但并未探究黑松露对香肠品质的影响。故本研究以云南黑松露为研究对象,对云南黑松露进行不同温度的预处理,测定黑松露中式香肠的理化指标,并进行感官审评,以期探究黑松露对中式香肠品质和挥发性化合物的影响,为黑松露中式香肠的开发奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜猪后腿肉和背膘、食盐、白糖、味精、白酒、饮用水等原辅料(云南省昆明市当地超市);人造蛋白肠衣(梧

州神冠蛋白肠衣有限公司);黑松露(云南省昆明市高上高有限公司);石油醚、乙醚(分析纯,重庆川东化工有限公司);三氯乙酸(分析纯,广东光华科技股份有限公司);乙二胺四乙酸(分析纯,天津光复科技发展有限公司);硫代巴比妥酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);异丙醇(色谱纯,美国 Sigma 公司);D-异抗坏血酸钠(食品级,江西省德兴市百勤异 VC 钠有限公司);亚硝酸钠(食品级,四川金山制药有限公司);油酸、苯、甲苯、吡啶、醋酸铜、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠(分析纯,天津市风船化学试剂有限公司);三油酸甘油酯(分析纯,上海源叶生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

U-2910 紫外分光光度计(日本日立公司);HI 9024 pH 计(意大利 HANNA 仪器公司);C/705 手动灌肠机(意大利 La Minerva 公司);30 型烟熏炉(诸城兴和机械有限公司);CR-400/100 色差仪(日本美能达公司);TA-XT plus 质构仪(上海奥豪斯公司);HC-3018 台式高速冷冻离心机(科大创新股份有限公司);GZX-GF101-3-BS 电热鼓风干燥箱(上海跃进医疗器械有限公司);AR224CN 电子分析天平(精度为 0.0001 g,美国 Agilent 公司);WHY-2 水浴恒温振荡器(金坛市大地自动化仪器厂);T25-Basc 高速匀浆机(德国 IKA 公司);顶空固相微萃取手柄、50/30 μm 碳分子筛/聚二乙烯苯/聚二甲基硅氧烷(CAR/PDMS/DVB)微萃取头(美国 Supelco 公司);7890B-5973MSD 气相色谱质谱联用仪、DB-5MS 毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μm)、5977B 质谱仪(美国 Agilent 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 黑松露香肠的制作工艺流程

制作配方:以原料肉的总质量为 100%计,肥瘦比为 3:7;添加辅料:白砂糖 8%、食盐 2%、味精 0.2%、饮用水 8%、高度白酒 3%、D-异抗坏血酸钠 0.12%、亚硝酸钠 0.018%、经预处理后的黑松露 2%。

工艺流程:原料肉及黑松露的预处理 $\rightarrow$ 拌料 $\rightarrow$ 腌制 $\rightarrow$ 灌肠 $\rightarrow$ 烘烤 $\rightarrow$ 冷却 $\rightarrow$ 包装。

操作要点:将瘦肉剔除明显筋腱放在绞肉机内绞碎,

孔径要求 1 cm, 背膘切成 0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm 的方丁。将辅料和经过预处理的黑松露加入, 拌料并腌制 2 h, 灌入直径 20 mm 的人造胶原蛋白肠衣中, 以细针刺孔排气后打结, 放入已经预热好的烘箱, 52 °C 烘烤 48 h, 取出冷却至室温后真空包装备用, 同时取样测定相关指标。

1.3.2 黑松露预处理实验

挑选直径 3 cm 的干黑松露用 2 倍质量 40 °C 的纯净水发泡 30 min, 每隔 5 min 搅拌一次, 保证吸水一致, 待充分吸水完毕后打成 3 mm 左右的颗粒备用。然后将黑松露分别放置在 60、70、80、90 °C 下恒温水浴加热 30 min 后按 2% 添加到中式香肠中。同时设置空白组(不添加黑松露)和对照组(添加未经热处理的黑松露), 测定黑松露中式香肠的相关指标。实验重复 3 次。

1.3.3 脂肪酶活力的测定

采用铜皂法测定脂肪酶活力^[18]。配制一系列不同浓度(0、2、4、6、8、10、12 mmol/L)的油酸/甲苯溶液, 分别取 4 mL 于锥形瓶中, 加入 1 mL 显色剂(5% 醋酸铜溶液, 用吡啶调节 pH 为 6.1), 搅拌 3 min, 离心后取上层有机相在 710 nm 处测定吸光度, 用未加油酸的作为空白, 建立脂肪酸的标准曲线。

取经发泡后的黑松露, 用预冷的 4 °C 蒸馏水清洗, 再用滤纸吸干, 称重 5.00 g, 加入 50 mL 4 °C 蒸馏水中, 用高速匀浆机作用 2 min, 再用离心机以 4000 r/min 的速度离心 20 min, 离心后取上清液即为粗酶液。取 3 mL、50 mmol/L、pH 6.5 的磷酸盐缓冲溶液和 1 mL 三油酸甘油酯于水浴中 37 °C 恒温 5 min, 然后注入 0.1 mL 粗酶液, 搅拌 15 min, 立即加入 8 mL 苯, 继续搅拌 2 min, 终止反应, 同时萃取生成的脂肪酸。将溶液转移至离心试管中, 在 4000 r/min 下离心 10 min, 有机相和水相分层澄清。取上层有机相 4 mL 于试管中, 加入 1 mL 显色剂, 充分搅拌 3 min 后在 710 nm 处测其吸光度(optical density, OD)值。以不含粗酶液的空白溶液为参比, 对照脂肪酸标准曲线, 求得脂肪酸的浓度。

脂肪酶活力单位定义为: 在一定条件下, 每分钟释放出 1 μmol 脂肪酸的酶量定义为 1 个脂肪酶活力单位(U)。脂肪酶活力 X 的计算公式见式(1), 每个样品测定 3 次。

$$X = \frac{CV}{TV} \quad (1)$$

式(1)中: X 为脂肪酶活力, U/mL; C 为脂肪酸浓度, μmol/mL; V 为脂肪酸溶液的体积, mL; T 为作用时间, min; V' 为酶液的用量, mL。

1.3.4 酸价的测定

取 20 g 样品, 参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中第一法指示剂滴定法进行测定。每个样品测定 3 次。

1.3.5 色泽的测定

将样品切成薄片, 用保鲜膜轻压被侧面除去气泡, 然后采用 CR-400/410 色差仪(D65 光源、测量直径 8 mm)测

定, 记录样品的明度值(L^* 值)、红度值(a^* 值)和黄度值(b^* 值)^[19]。每个样品测定 6 次, 取平均值。

1.3.6 质构的测定

香肠质构采用 TA-Xt plus 食品质构仪测定, 将成品香肠切成 20 mm 厚的圆柱型, 分别测定其硬度、弹性、内聚性、咀嚼性等指标, 4 次测定取其平均值。测定参数: 探头类型: P/36R, 测量模式: TPA, 形变量 50%, 测试速度 2 mm/s, 测试距离 10 mm, 受压时间 12 s, 两次循环间隔时间 5 s^[20]。每个处理准备 3 根香肠进行剖面质地的分析。

1.3.7 挥发性化合物的检测与分析

测定感官品质最好的处理组(60 °C 组)与空白组的挥发性化合物。

(1)样品的预处理: 参照王丽等^[21]安福火腿的预处理方法, 采用顶空固相微萃取法提取样品中的挥发性化合物。将固相微萃取头(50/30 μm CAR/PDMS/DVB)在气相色谱进样口 250 °C 老化 2 h, 取 3.0 g 样品置于 20 mL 顶空瓶中, 将老化后的萃取头插入样品瓶顶空部分, 于 60 °C 吸附 30 min, 吸附后的萃取头取出后插入气相色谱进样口, 于 250 °C 解吸 3 min, 同时启动仪器采集数据。

(2)气相质谱法测定样品的色谱条件参照李玲等^[22]测定香肠时所用条件: 色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 载气为 He, 载气流速 1 mL/min; 柱流量 1.0 mL/min; 恒压 53.5 kPa; 样口温度 250 °C; 程序升温: 30 °C 保持 5 min, 2 °C/min 升温至 60 °C 保持 3 min, 再以 4 °C/min 升温至 130 °C 保持 3 min, 最后 10 °C/min 升温至 280 °C。而质谱条件参照肖岚等^[23]对安岳坛子肉的测定方法: 电离方式为电子电离源(electron impact ion source, EI); 电子能量 70 eV; 界面温度 250 °C; 离子源温度 200 °C; 检测电压 2000 V; 扫描范围 33~600 amu。以上实验重复 6 次。

(3)挥发性化合物的鉴定: 测得的质谱数据经过与 NIST/EPA/NIH 数据库的数据对比分析, 确定挥发性化合物的结构及 CAS 号。

1.3.8 感官评定

感官评分由 9 名(5 女 4 男)食品专业人员组成感官评分小组, 小组成员按照 GB/T 22210—2008《肉与肉制品感官评定规范》进行培训。样品随机编号, 感官评分标准参照 GB/T 23493—2009《中式香肠》进行修改, 如表 1 所示。

1.4 数据处理

采用 SPSS 25.0 和 OriginPro 2018C 软件进行数据分析与图形绘制, 结果以平均值±标准偏差表示。采用 SIMCA 软件(Umetrics, Sweden Version 14.1)进行正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)并得出变量权重重要性(variable importance in projection, VIP)排序值^[24], 选取 VIP>1.0 的挥发性化合物进行火山图的绘制。

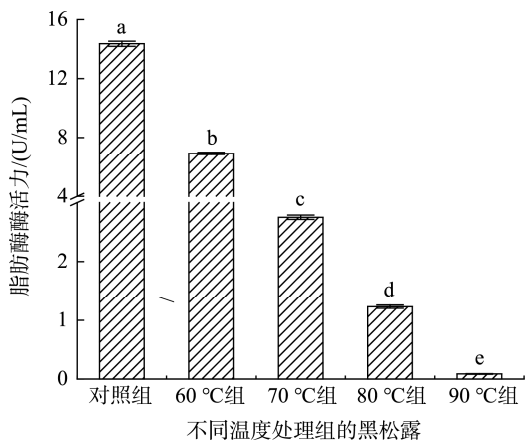
表 1 中式香肠感官评分标准
Table 1 Sensory score standards of Chinese sausage

指标	评分标准	分值/分
组织状态	肠衣干燥, 紧包肉馅, 肠体饱满有弹性, 组织紧密, 切面平整, 无气孔	8~10
	肠衣较柔软, 部分肉馅与肠衣分离, 切面较平整, 有裂隙但不明显, 气孔少见	5~7
	肠衣湿润柔软, 包裹肉馅较松散, 切面不平整, 有明显裂隙, 中间有软化现象, 气孔较多	1~4
色泽	肉馅有光泽, 脂肪为白色, 发色均匀	8~10
	部分肉馅有光泽, 脂肪略显白色, 发色较均匀	5~7
	整个肉馅无光泽, 灰暗无色, 脂肪发黄	1~4
香气	香气浓郁, 脂肪无酸败味, 无异味	8~10
	香气一般, 脂肪有轻微酸败味, 无异味	5~7
	香气较弱, 脂肪有较重酸败味, 有异味	1~4
滋味	多滋鲜美, 有黑松露香肠独特风味, 无哈喇味	8~10
	多滋鲜美, 黑松露香肠风味不突出, 略有哈喇味	5~7
	滋味不好, 没有香肠的风味, 明显哈喇味	1~4

2 结果与分析

2.1 不同温度处理的黑松露中脂肪酶活力测定结果

由图 1 可知, 黑松露脂肪酶活力随着预处理温度的升高而显著降低($P<0.05$), 表明 30 min 的热处理能降低黑松露脂肪酶活力, 温度越高效果越显著。其主要原因是高温会导致酶失活以及变性^[25]。



注: 不同小写字母表示显著性差异($P<0.05$), 下同。

图 1 不同温度处理的黑松露脂肪酶活力($n=3$)
Fig.1 Effects of different treatment temperatures of *Tuber melanosporum* on lipase activities ($n=3$)

2.2 不同温度处理的黑松露对中式香肠酸价的影响

脂类可被水解为游离脂肪酸, 游离脂肪酸再被进一步氧化成醛、酮等化合物, 醛、酮是肉制品香味的主要贡献者^[26]。适度的脂类氧化可以提高香肠的风味, 而氧化过度又会引起酸败, 影响香肠的感官^[27]。黑松露中式香肠中的脂肪在黑松露脂肪酶的作用下降解产生游离脂肪酸的程度可以用酸

价来衡量。如图 2 所示, 随着处理黑松露的温度升高, 香肠的酸价逐渐降低, 并显著低于对照组($P<0.05$), 说明黑松露脂肪酶在经过热处理后会降低脂肪酶的活性。80、90 °C组香肠的酸价与空白组无显著差异($P>0.05$), 说明黑松露脂肪酶被完全钝化。60 和 70 °C组的香肠酸价适中, 说明黑松露脂肪酶没有被全部钝化, 对脂类有一定程度的水解作用, 可能有利于提高黑松露中式香肠的风味。

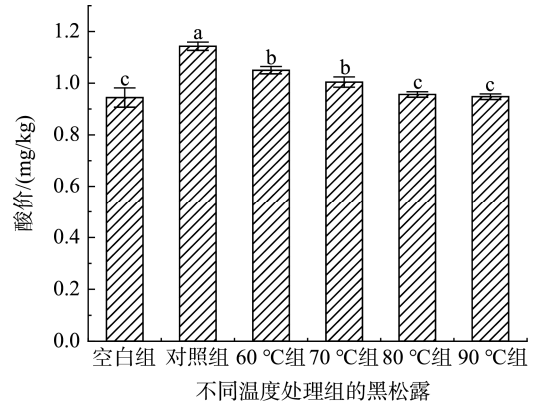


图 2 不同温度处理的黑松露对中式香肠酸价的影响($n=3$)
Fig.2 Effects of different treatment temperatures of *Tuber melanosporum* on acid values of Chinese sausage ($n=3$)

2.3 不同温度处理的黑松露对中式香肠色泽的影响

香肠的色泽是体现香肠品质的一个重要指标, 如表 2 所示。添加黑松露的中式香肠 L^* 值显著低于空白组($P<0.05$), 原因可能是黑松露本身呈黑色, 使得添加了黑松露的香肠内部切面色泽较空白组整体偏暗沉。6 个处理组 a^* 值没有显著差异($P>0.05$), 说明添加黑松露对香肠的 a^* 值影响不大。随着黑松露处理温度的升高, b^* 值显著降低的趋势, 原因可能是黑松露脂肪酶使香肠中脂肪分解为甘油和脂肪酸, 在 O_2 作用下发生脂类氧化, 而脂类氧化产物的颜色导致 b^* 值升高^[28]。综上所述, 添加黑松露不影响中式香肠的 a^* 值, 对 L^* 值和 b^* 值有一定影响。

表 2 不同温度处理的黑松露对中式香肠色泽的影响(n=6)
Table 2 Effects of different treatment temperatures of *Tuber melanosporum* on the color and lustre of Chinese sausage (n=6)

分组	<i>L</i> *值	<i>a</i> *值	<i>b</i> *值
空白组	60.75±0.26 ^a	8.20±3.03 ^a	7.70±2.23 ^d
对照组	49.64±0.62 ^b	7.49±1.59 ^a	13.27±2.32 ^{ab}
60 °C组	44.77±0.74 ^d	7.53±3.23 ^a	15.59±2.88 ^a
70 °C组	46.81±0.25 ^c	5.83±0.77 ^a	12.05±3.29 ^{bc}
80 °C组	41.12±0.88 ^e	6.35±2.45 ^a	9.60±3.09 ^{cd}
90 °C组	49.57±0.36 ^b	6.63±0.94 ^a	11.22±1.89 ^{bc}

注：同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)，下同。

2.4 不同温度处理的黑松露对中式香肠质构的影响

香肠的质构是反应香肠的品质指标之一，优质的香肠应该具有一定弹性、紧密的组织结构、适中的硬度、良好的咀嚼性等特性。本研究从硬度、弹性、咀嚼性、内聚性 4 个方面对香肠进行分析，结果如表 3 所示。随着黑松露处理温度的升高，硬度基本呈先上升后下降的趋势。60、70 °C 组的硬度与空白组无显著差异($P>0.05$)。对照组硬度最低，80 °C 组硬度最大。6 个处理组内聚性均无显著差异($P>0.05$)。咀嚼性是硬度、弹性、内聚性 3 个指标的综合反映^[29]，对照组咀嚼性数值最低，80 °C 组咀嚼性数值最高；而 60、70 °C 组的咀嚼性与空白组无显著差异($P>0.05$)。综上所述，对黑松露进行 60、70 °C 的热处理不影响中式香肠的质构。

2.5 不同温度处理的黑松露对中式香肠的感官影响

感官评定考察消费者对香肠最直观的感受，是衡量消

费者购买意愿的重要指标。实验从组织状态、色泽、香气、滋味 4 个方面对不同处理组黑松露中式香肠进行评分，结果如表 4 所示。在组织状态方面，随着黑松露处理温度的升高，评分逐渐增加。80 和 90 °C 组与空白组无显著差异($P>0.05$)。对照组组织状态最差，香肠内部松散油润、切面不齐、肠体柔软湿润、出现明显的裂痕。在色泽方面，60、70、80、90 °C 组无显著差异($P>0.05$)，对照组色泽最差。在香气方面，60 °C 组的评分与对照组无显著差异($P>0.05$)，而显著高于其他组($P<0.05$)；在滋味方面，60 °C 组的评分要显著高于其他组($P<0.05$)，说明一定程度的脂类水解对香肠的香气、滋味形成有积极的影响，过度的脂类水解会导致香肠形态、色泽不佳等品质问题。综合评分，60 °C 组与空白组无明显差异($P>0.05$)，并显著高于其他组($P<0.05$)。综上所述，添加黑松露对中式香肠的色泽无影响，对组织状态、香气、滋味有明显的影

2.6 黑松露对中式香肠挥发性化合物的影响

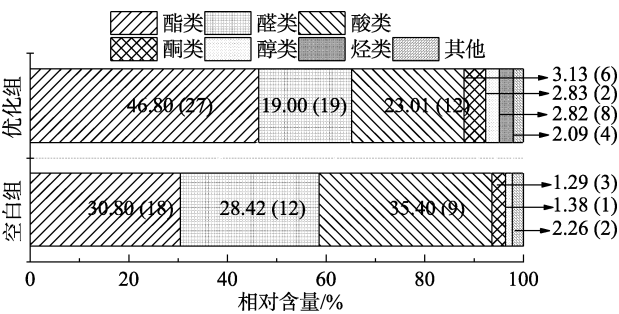
通过理化及感官评定分析得出 60 °C 处理组为最优的黑松露预处理温度，故重点分析空白组(B)和优化组(T60)中式香肠挥发性化合物的组成及相对含量，结果见图 3 和表 5。由图 3 可见，空白组中共鉴定出 45 种挥发性化合物，其中酯类 18 种，醛类 12 种，酸类 9 种，酮类 3 种，醇类 1 种，其他类 2 种。优化组共鉴定出 79 种挥发性化合物，其中酯类 27 种，醛类 20 种，酸类 12 种，酮类 6 种，醇类 2 种，烃类 8 种，其他类 4 种。

表 3 不同温度处理的黑松露对中式香肠质构的影响(n=3)
Table 3 Effects of different treatment temperatures of *Tuber melanosporum* on textures of Chinese sausages (n=3)

分组	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g
空白组	35198.32±1654.82 ^{bc}	0.56±0.01 ^a	0.49±0.04 ^a	8434.52±1752.39 ^b
对照组	16894.69±659.09 ^d	0.35±0.06 ^b	0.38±0.10 ^a	2501.26±645.93 ^c
60 °C组	32113.70±1182.10 ^c	0.58±0.05 ^a	0.39±0.06 ^a	6538.30±1362.41 ^b
70 °C组	32076.90±5804.64 ^c	0.58±0.01 ^a	0.39±0.09 ^a	6968.59±1104.75 ^b
80 °C组	63685.70±401.70 ^a	0.58±0.01 ^a	0.43±0.03 ^a	14330.94±4346.26 ^a
90 °C组	40511.86±649.60 ^b	0.57±0.02 ^a	0.50±0.05 ^a	12465.17±2458.60 ^a

表 4 不同温度处理的黑松露对中式香肠感官评分的影响(n=9)
Table 4 Effects of different treatment temperatures of *Tuber melanosporum* on sensory scores of Chinese sausages (n=9)

分组	组织状态/分	色泽/分	香气/分	滋味/分	综合评分/分
空白组	8.20±0.05 ^a	8.97±0.05 ^a	7.07±0.05 ^d	6.77±0.05 ^d	31.00±0.09 ^a
对照组	4.29±0.28 ^d	6.66±0.31 ^c	8.18±0.08 ^a	7.80±0.12 ^b	26.92±0.29 ^d
60 °C组	6.36±0.22 ^c	7.47±0.16 ^b	8.26±0.07 ^a	8.69±0.06 ^a	30.77±0.23 ^a
70 °C组	6.81±0.24 ^b	7.47±0.37 ^b	7.60±0.07 ^b	6.64±0.07 ^d	28.52±0.49 ^c
80 °C组	7.93±0.13 ^a	7.44±0.11 ^b	7.34±0.09 ^c	6.67±0.05 ^d	29.39±0.18 ^b
90 °C组	8.19±0.16 ^a	7.53±0.07 ^b	7.13±0.07 ^d	6.91±0.09 ^c	29.77±0.20 ^b



注: 括号内的数字表示挥发性化合物的种类。
图 3 中式香肠挥发性化合物的组成及相对含量
Fig.3 Composition and relative content of volatile compounds in Chinese sausage

表 5 中式香肠中挥发性化合物的相对含量(n=6)
Table 5 Relative content of volatile compounds in Chinese sausage (n=6)

化合物种类	化合物名称	相对含量/%	
		空白组	优化组
酯类化合物	(Z)-9-十八烯-4-内酯	0.43±0.27	0.34±0.07
	苯乙酸乙酯	0.18±0.05	1.48±0.26
	丁二酸二乙酯	0.09±0.09	0.09±0.04
	2-甲基丁酸乙酯	0.68±1.04	0.84±0.20
	异戊酸乙酯	0.42±0.39	5.26±0.87
	癸酸乙酯	4.74±1.64	3.03±0.69
	月桂酸乙酯	0.44±0.07	0.30±0.04
	E-11-十六烯酸乙酯	0.75±0.81	0.27±0.03
	9-癸酸乙酯	0.45±0.14	0.27±0.06
	烟酸乙酯	0.05±0.04	0.07±0.01
	庚酸乙酯	1.03±0.63	0.92±0.08
	棕榈酸乙酯	7.07±5.67	3.19±0.99
	己酸乙酯	3.68±1.75	3.21±0.41
	壬酸乙酯	2.99±0.94	2.04±0.18
	辛酸乙酯	5.95±2.18	3.61±0.40
	异丁酸乙酯	0.39±0.57	5.44±3.79
	十四酸乙酯	1.17±0.08	0.55±0.03
	棕榈酸缩水甘油酯	0.29±0.20	—
	乙酸异戊酯	—	0.45±0.14
	糠酸乙酯	—	0.01±0.00
	3-壬烯酸乙酯	—	0.05±0.01
	烯丙基十一烷酸酯	—	0.04±0.01
	苯甲酸乙酯	—	0.25±0.07
醛类化合物	乙酸乙酯	—	3.42±1.14
	7-呋喃-2-基庚酸甲酯	—	0.02±0.01
	异己酸乙酯	—	0.46±0.40
	戊酸乙酯	—	0.84±0.27
	乳酸乙酯	—	10.35±3.19
	2-十一烯醛	4.69±2.77	3.57±1.08
	苯甲醛	0.67±0.59	0.47±0.47
	顺-4,5-环氧-(E)-2-癸醛	0.99±0.71	0.36±0.07
	癸醛	0.55±0.37	0.46±0.18
	正庚醛	1.85±1.66	1.12±0.70
	十六醛	0.26±0.14	0.16±0.02
	壬醛	7.77±2.85	4.54±0.45
其他化合物	正辛醛	3.97±1.07	1.81±0.43
	正十五碳醛	0.04±0.02	0.07±0.03

表 5(续)			
化合物种类	化合物名称	相对含量/%	
		空白组	优化组
醛类化合物	反式-2-壬醛	1.80±0.62	0.25±0.07
	2,4-壬二烯醛	0.14±0.11	—
	2-癸烯醛	5.69±2.11	—
	2,4-癸二烯醛	—	1.50±0.67
	2-庚醛	—	0.51±0.44
	反-2-辛烯醛	—	1.00±0.21
	5-羟甲基糠醛	—	2.05±1.40
	2-苯基巴豆醛	—	0.49±0.10
	顺-11-十六碳醛	—	0.07±0.01
	糠醛	—	0.23±0.25
	十三醛	—	0.08±0.02
	十一醛	—	0.26±0.06
	月桂醛	—	0.15±0.04
	月桂酸	0.29±0.15	0.14±0.03
	己酸	0.79±0.05	0.87±0.39
	癸酸	0.11±0.04	0.14±0.01
酸类化合物	棕榈酸	10.59±6.73	6.85±1.14
	正十五酸	0.10±0.03	0.07±0.01
	肉豆蔻酸	1.01±0.92	0.38±0.04
	反式-13-十八碳烯酸	13.93±14.35	6.22±10.4
	共轭亚油酸	7.05±6.20	—
	壬酸	1.53±1.15	—
	顺式-9-十六烯酸	—	0.40±0.09
	十七烷酸	—	0.10±0.01
	亚麻酸	—	0.23±0.08
	硬脂酸	—	6.75±2.16
酮类化合物	辛酸	—	0.86±0.24
	5-十二烷基二氢-2(3H)-呋喃酮	0.08±0.03	0.10±0.03
	2-十九烷酮	0.08±0.02	0.05±0.01
	戊基酮	1.21±1.61	—
	5-十四烷基二氢-2(3H)-呋喃酮	—	0.05±0.02
	5-乙基-5H-呋喃-2-酮	—	0.10±0.03
	4-甲基-2,4,6-环庚烯-1-酮	—	2.66±0.25
	5-甲基-2-己酮	—	0.17±0.05
	苯乙醇	1.38±0.73	1.76±0.73
	1-辛烯-3-醇	—	1.07±0.72
醇类化合物	1-乙氧基-4,4-二甲基-2-戊烯	—	1.03±0.21
	5-甲基辛基-苯	—	0.01±0.01
	6,9-十七二烯	—	0.01±0.01
	正庚基苯	—	0.75±0.38
	戊基苯	—	0.56±0.24
	1,1-二乙氧基-3-甲基丁烷	—	0.04±0.01
	1,1-二乙氧基乙烷	—	0.41±0.09
	1,1,3-三乙氧基丙烷	—	0.01±0.02
	2-正戊基呋喃	1.46±1.30	1.26±0.69
	吡啶	0.80±0.84	—
其他化合物	3-甲基苯甲醚	—	0.05±0.01
	2,6-二甲基吡嗪	—	0.45±0.18
	2-甲基-6-乙基吡嗪	—	0.33±0.48

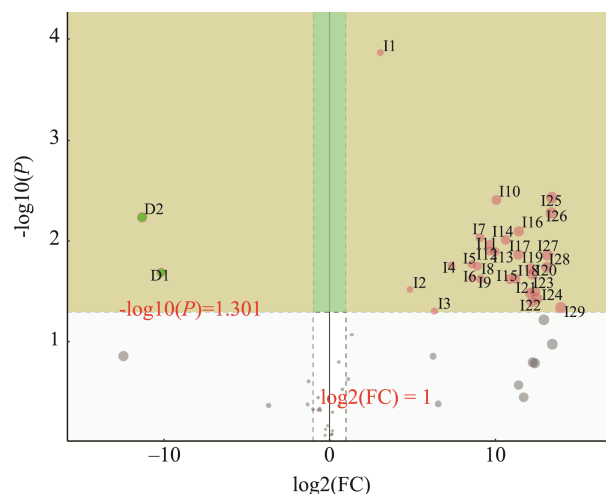
注: —表示未鉴定到此种挥发性化合物。

OPLS-DA 是一种有监督的判别分析方法, 本研究使用有监督的 OPLS-DA 载荷图来研究哪些挥发性化合物可以用来分辨中式香肠是否添加了黑松露。在鉴定挥发性化合物的标志物时必须满足 3 个条件: 挥发性化合物 $VIP > 1.0$, Student t 检验的 $P < 0.05$ 和差异倍数(fold change, FC) > 2 或 < 0.5 。由图 4 可知, 通过 OPLS-DA 分析发现 2 种化合物相对含量显著降低 [$VIP > 1.0$, $P < 0.05$, FC (T60/B) < 0.5], 包括 2,4-壬二烯醛、棕榈酸缩水甘油酯。有 29 种化合物显著增加 [$VIP > 1.0$, $P < 0.05$, FC (T60/B) > 2], 包括苯乙酸乙酯、苯甲酸乙酯、十三醛、十一醛、2,4-癸二烯醛、月桂醛、亚麻酸、辛酸、5-甲基-2-己酮等化合物。由表 5 和图 3、图 4 可知, 酯类、醛类、酮类是中式香肠的主要风味物质, 这些化合物主要是由碳水化合物代谢、蛋白质水解、脂类水解和氧化、美拉德反应和 Strecker 降解以及香料产生的^[30]。其中脂类的水解和氧化是产生香肠风味的主要途径之一。直链醛、酮及相应的醇、酸、酯和烷烃都是来源于脂类的氧化^[31]。

酯类在中式香肠所有挥发性风味化合物中含量最高, 以乙酯类化合物为主。乙酯类的化合物主要呈水果、蜂蜜、脂肪香气, 是中式香肠主要风味物质。例如, 乙酸乙酯呈香蕉或苹果香, 己酸乙酯呈菠萝香, 乳酸乙酯呈脂肪香^[3]。由表 5、图 3 和图 4 可知, 空白组和优化组的中式香肠中都形成了大量乙酯类化合物, 这也与封莉等^[3]的研究结果一致。优化组的酯类化合物较空白组, 相对含量增加了 16.00%, 种类减少了 1 种, 新增了 10 种, 其中苯乙酸乙酯、苯甲酸乙酯、戊酸乙酯、糠酸乙酯、7-呋喃-2-基庚酸甲酯、烯丙基十一烷酸酯、3-壬烯酸乙酯、乙酸异戊酯 8 种酯显著增加 [$VIP > 1.0$, $P < 0.05$, FC (T60/B) > 2]。其中, 苯甲酸乙酯呈水果香, 苯乙酸乙酯呈蜂蜜香, 乙酸异戊酯呈梨香, 戊酸乙酯呈苹果香, 这些都是有利于优化组的香肠风味的形成^[32]。值得注意的是, 优化组中乳酸乙酯的含量最高, 达到 10.35%, 乳酸乙酯呈脂肪香, 这可能也是优化组感官评分香气最高的原因之一。

醛类是中式香肠中第二大类挥发性化合物, 主要源于不饱和脂肪酸的氧化和氨基酸的降解。例如, 己醛、庚醛和壬醛分别是亚油酸、n-6 和 n-9 多不饱和脂肪酸氧化的产物^[33]; 香肠中肌肉蛋白降解为游离氨基酸, 又转化为 α -酮酸, α -酮酸作为重要的中间体, 可以直接或间接地代谢成相应的醛类^[34]。醛类虽然具有较低阈值, 但是对中式香肠香气的贡献很大^[35]。普遍认为 5~10 个碳的醛可以提供油脂的香味。例如, 壬醛具有脂肪香和花香, 癸醛呈黄油香气^[36]。由表 5、图 3 和图 4 可知, 优化组较空白组醛类相对含量降低了 9.42%, 种类减少了 2 种, 新增了 10 种, 其中十三醛、十一醛、2,4-癸二烯醛、月桂醛、顺-11-十六碳醛、2-苯基巴豆醛、反-2-辛烯醛 7 种醛显著升高 [$VIP > 1.0$, $P < 0.05$, FC (T60/B) > 2]。十一醛、月桂醛、十三醛、2,4-癸二烯醛均有强烈脂肪香气, 2-苯基巴豆醛呈花香、蜜甜香、可可香气^[37]。空白组和优化组中壬醛含量最高, 是由油酸氧化形成^[38]。空白组和优化组共有的醛类化合物, 优化组相对

含量均低于空白组(除正十五碳醛), 说明醛类有可能发生分解或重排, 导致优化组增加了较多的长链醛和支链醛。



注: D1: 2,4-壬二烯醛; D2: 棕榈酸缩水甘油酯; I1: 苯乙酸乙酯; I2: 糠酸乙酯; I3: 5-甲基辛基-苯; I4: 7-呋喃-2-基庚酸甲酯; I5: 烯丙基十一烷酸酯; I6: 1,1-二乙氧基-3-甲基丁烷; I7: 3-甲基苯甲酯; I8: 3-壬烯酸乙酯; I9: 5-十四烷基二氢-2(3H)-呋喃酮; I10: 十七烷酸; I11: 十三醛; I12: 顺-11-十六碳醛; I13: 5-乙基-5H-呋喃-2-酮; I14: 月桂醛; I15: 5-甲基-2-己酮; I16: 十一醛; I17: 苯甲酸乙酯; I18: 亚麻酸; I19: 1,1-二乙氧基乙烷; I20: 乙酸异戊酯; I21: 顺式-9-十六烯酸; I22: 2,6-二甲基吡嗪; I23: 2-苯基巴豆醛; I24: 戊基苯; I25: 1-乙氧基-4,4-二甲基-2-戊烯; I26: 反-2-辛烯醛; I27: 辛酸; I28: 戊酸乙酯; I29: 2,4-癸二烯醛。

图 4 空白组和优化组挥发性化合物在 OPLS-DA 中贡献的火山图
Fig.4 Volcano plot of the contribution of volatile components in blank group and optimization group in OPLS-DA

酸类化合物是由脂类中甘油三酯和磷脂经内源酶、黑松露脂肪酶水解产生的, 少部分来自于微生物代谢^[28]。虽然酸类对香肠的风味贡献不大, 但是脂肪酸是许多芳香族化合物的前体, 而中链和长链的游离脂肪酸进一步被氧化, 可产生额外的挥发性化合物^[39]。由表 5、图 3 和图 4 可知, 优化组较空白组的酸类化合物相对含量降低 12.39%, 种类减少了 2 种, 新增 5 种, 其中亚麻酸、辛酸、顺式-9-十六烯酸、十七烷酸 4 种酸显著升高 [$VIP > 1.0$, $P < 0.05$, FC (T60/B) > 2]。空白组棕榈酸、反式-13-十八碳烯酸、共轭亚油酸的含量相对较高, 优化组棕榈酸、反式-13-十八碳烯酸、硬脂酸的含量相对较高。值得注意的是, 优化组的反式-13-十八碳烯酸较空白组降低了一半, 新生成的硬脂酸为牛油香气, 这些都表明优化组香肠风味的提高。

酮类化合物通常认为是美拉德反应的产物或者醛类化合物的进一步氧化。由表 5、图 3、4 可知, 优化组较空白组酮类化合物相对含量增加 1.84%, 种类减少了 1 种, 新增了 4 种, 其中 5-十四烷基二氢-2(3H)-呋喃酮、5-甲基-2-己酮、5-乙基-5H-呋喃-2-酮 3 种酮显著升高 [$VIP > 1.0$, $P < 0.05$, FC (T60/B) > 2], 可

能这也是优化组醛类化合物相对含量下降的原因之一。酮类对香肠的香气也是有贡献的,主要是呈奶香味^[40]。

由表5、图3、图4可知,醇类化合物优化组较空白组新增1种醇类,为1-辛烯-3-醇,可能来源于脂肪代谢,具有类似蘑菇的香气^[30],也可能是黑松露中特有的挥发性成分^[41]。

烃类化合物通常是由过氧化物在脂类氧化过程中分子重排而产生的。它们的检测阈值高,并不是味道的主要贡献者^[42]。由表5、图3和图4可知,空白组中烃类化合物未检测到,优化组检测到8种,相对含量为2.83%,其中5-甲基辛基-苯、1,1-二乙氧基-3-甲基丁烷、1,1-二乙氧基乙烷、戊基苯、1-乙氧基-4,4-二甲基-2-戊烯5种烃类化合物显著增加[VIP>1.0, $P<0.05$, FC (T60/B)>2]。说明优化组香肠存在一定程度脂类氧化,但是相对含量较低并没有引起过度氧化。另外,由表5、图3和图4可知,优化组较空白组减少了吡啶,新增了2种吡嗪化合物,其中具有焦香味的2,6-二甲基吡嗪相对含量显著升高[VIP>1.0, $P<0.05$, FC (T60/B)>2]。说明了黑松露的添加为香肠风味的形成提供风味前体物,这对中式香肠的风味提高也是有益的。

3 结论与讨论

本研究将经过预处理的黑松露添加到中式香肠中,因黑松露脂肪酶可促使脂类水解产生一系列挥发性物质^[16],进而改善了中式香肠的风味。当黑松露60℃处理30 min后添加在中式香肠中,不会影响香肠质构、色泽、酸价,且感官评分达到最好,通过正交偏最小二乘判别分析,较空白组有29种挥发性化合物相对含量显著增加[VIP>1.0, $P<0.05$, FC (T60/B)>2],2种显著降低[VIP>1.0, $P<0.05$, FC (T60/B)<0.5]。虽然黑松露60℃处理30 min后添加到中式香肠中促使香肠脂类水解并产生令人愉悦的挥发性物质,进而改善了香肠的品质特征,但脂类水解会影响中式香肠的组织形态,因此后续可考虑适当降低脂肪含量(降低原料肉肥瘦比)或适当添加部分脂类替代物^[43-44]。

综上,本研究既可改善中式香肠的风味,也可解决直接将黑松露加入中式香肠中造成的香肠内外油腻、组织结构松软、烘不干等不良现象,为工业化中式香肠品质的改善提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 唐宏刚,朱培培,肖朝耿,等. 着色剂对中式香肠营养、风味成分的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(12): 2405-2413.
TANG HG, ZHU PP, XIAO CG, *et al.* Effect of colorant on the nutrientsal ingredient and flavor compound of Chinese sausage [J]. J Nucl Agric Sci, 2019, 33(12): 2405-2413.
- [2] 林哲寅,林河通. 墨鱼香肠的配方研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(7): 2102-2108.
LIN ZY, LIN HT. Study on the formula of cuttlefish sausage [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(7): 2102-2108.
- [3] 封莉,邓绍林,黄明,等. 脂肪酶对中式香肠脂肪降解、氧化和风味的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(1): 51-58.
FENG L, DENG SL, HUANG M, *et al.* Effect of palatase on lipid hydrolysis, lipid oxidation and sensory attributes of Chinese sausage [J]. Food Sci, 2015, 36(1): 51-58.
- [4] ASADUZZAMAN M, OHYA M, KUMURA H, *et al.* Searching for high ZnPP-forming edible bacteria to improve the color of fermented meat products without nitrite/nitrate [J]. Meat Sci, 2020, 165: 108109.
- [5] 安攀宇,汪静心,肖岚,等. Plackett-Burman 试验设计联用 Box-Behnken 响应面法优化脂肪替代物的制备[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 255-264.
AN PY, WANG JX, XIAO L, *et al.* Optimization of the preparation of fat substitutes using Plackett-Burman design combined with Box-Behnken response surface methodology [J]. Food Sci, 2020, 41(10): 255-264.
- [6] MARTIN C, LANGE C, MARETTE S. Importance of additional information, as a complement to information coming from packaging, to promote meat substitutes: A case study on a sausage based on vegetable proteins [J]. Food Qual Prefer, 2021, 87: 104058.
- [7] 曹辰辰. 传统中式香肠中优良菌种的筛选及其对发酵香肠抗氧化和品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
CAO CC. Screening of strains with excellent properties form traditional Chinese sausage and their effect on antioxidat and quality of fermented sausages [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [8] FLORES M, PEREA-SANZ L, LÓPEZ-DÍEZ JJ, *et al.* Meaty aroma notes from free amino acids and thiamine in nitrite-reduced, dry-fermented, yeast-inoculated sausages [J]. Food Chem, 2021, 361: 129997.
- [9] 叶阳,王洋,袁先铃,等. 低硝中式香肠中复合抗氧化剂的配方优化[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(3): 54-59.
YE Y, WANG Y, YUAN XL, *et al.* Formulation optimization of compound antioxidants in Chinese sausage with low nitrite [J]. Storage Process, 2018, 18(3): 54-59.
- [10] DIAS I, LARANJO M, POTES ME, *et al.* Autochthonous starter cultures are able to reduce biogenic amines in a traditional portuguese smoked fermented sausage [J]. Microorganisms, 2020, 8(5): 686.
- [11] YANG DD, JING J, ZHANG Z, *et al.* Accumulation of heterocyclic amines across low-temperature sausage processing stages as revealed by UPLC-MS/MS [J]. Food Res Int, 2020, 137: 109668.
- [12] 国琦,梁双敏,葛长荣,等. 黑松露多糖提取工艺优化及体外抗氧化活性分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 1-11.
GUO Q, LIANG SM, GE CR, *et al.* Optimization of extraction process and *in vitro* antioxidant activity of tuber sinense polysaccharide [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(12): 1-11.
- [13] 白宏芬,施庭有,李向梅,等. 楚雄州块菌资源保护及产业化发展经营对策研究[J]. 中国食用菌, 2018, 37(3): 74-79.
BAI HF, SHI TY, LI XM, *et al.* Research on the strategy of truffle resources protection and industrialized management in Chuxiong [J]. Edible Fungi China, 2018, 37(3): 74-79.
- [14] 游金坤,汤昕明,陈正启,等. 云南产2种块菌营养成分分析比较[J]. 科技创新导报, 2015, 12(32): 250-254.
YOU JK, TANG XM, CHEN ZQ, *et al.* Nutrient analysis of two tuber huidongense from Yunnan [J]. Sci Technol Innov Her, 2015, 12(32): 250-254.
- [15] 李晓凤,杨兵,张华琦. 云南野生黑松露营养价值评定[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 157-161.
LI XF, YANG B, ZHANG HQ. Evaluation of nutritional value of natural black truffle grown in Yunnan [J]. Food Res Dev, 2018, 39(11): 157-161.
- [16] MARTIN F, KOHLER A, MURAT C, *et al.* Perigord black trufflegenome uncovers evolutionary origins and mechanisms of symbiosis [J]. Nature, 2010, 464(7291): 1033-1038.
- [17] 彭玥. 一种黑松露香肠及其制备方法: 中国, CN110024971A[P]. 2019-07-19.
PENG Y. The invention relates to black truffle sausage and a preparation method thereof: China, CN110024971A [P]. 2019-07-19.
- [18] 江慧芳,王雅琴,刘春国. 三种脂肪酶活力测定方法的比较及改进[J]. 化学与生物工程, 2007, 24(8): 72-75.
JIANG HF, WANG YQ, LIU CG. Comparison and improvement of three determination methods for lipase activity [J]. Chem Bioeng, 2007, 24(8): 72-75.
- [19] 李静. 不同氧化程度的脂肪对四川香肠成熟过程中品质影响的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
LI J. Effects of oxidized lipid with different levels on physico-chemical

- properties and sensory characteristics of Sichuan sausage during ripening [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [20] MELODY JL, LONERGAN SM, ROWE LJ, *et al.* Early postmortem biochemical factors influence tenderness and water-holding capacity of three porcine muscles [J]. *J Anim Sci*, 2004, 82(4): 1195–1205.
- [21] 王丽, 刘光宪, 张德权, 等. 安福火腿游离脂肪酸、风味物质及氨基酸分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(16): 236–242.
- WANG L, LIU GX, ZHANG DQ, *et al.* Analysis of free fatty acids, flavor substances and amino acids in Anfu Ham [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(16): 236–242.
- [22] 李玲, 张敬竟, 王桂瑛, 等. 宣威火腿与金华火腿中游离脂肪酸组成比较分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(15): 225–229.
- LI L, ZHANG JJ, WANG GY, *et al.* Comparative analysis of fatty acid composition in Xuanwei ham and Jinhua ham [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(15): 225–229.
- [23] 肖岚, 李燮昕, 鲜丹丹, 等. 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[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 140–147.
- XIAO L, LI XX, XIAN DD, *et al.* Effects of fermentation on lipid metabolism and flavor substance formation in anyue jar meat [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(24): 140–147.
- [24] AHN HS, YEOM J, YU J, *et al.* Convergence of plasma metabolomics and proteomics analysis to discover signatures of high-grade serous ovarian cancer [J]. *Cancers*, 2020, 12(11): 3447.
- [25] 张庆冬. 外切型肝素酶的发现、催化机制研究以及应用[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- ZHANG QD. Discovery of exolytic heparinases and their catalytic mechanism and potential application [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [26] WANG M, WANG C, YANG C, *et al.* Effects of *Lactobacillus plantarum* C7 and *Staphylococcus warneri* S6 on flavor quality and bacterial diversity of fermented meat rice, a traditional Chinese food [J]. *Food Res Int*, 2021, 150: 110745.
- [27] 田甜, 张雅琳, 潘攀, 等. 微生物复合发酵剂对香肠的食用安全性分析[J]. *食品工业*, 2020, 41(6): 329–333.
- TIAN T, ZHANG YL, PAN P, *et al.* Analysis of food safety of compound fermenting agent on sausage [J]. *Food Ind*, 2020, 41(6): 329–333.
- [28] XU L, CHENG J, LIU X, *et al.* Effect of microencapsulated process on stability of mulberry polyphenol and oxidation property of dried minced pork slices during heat processing and storage [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 100: 62–68.
- [29] 刘恩岐, 巫永华, 张建萍. 外源酶促进香肠发酵成熟及其感官品质的研究[J]. *食品工业*, 2015, 36(6): 105–109.
- LIU ENQ, WU YH, ZHANG JP. Research on accelerating ripening of fermented sausage by adding exogenous enzymes and its sensory evaluation [J]. *Food Ind*, 2015, 36(6): 105–109.
- [30] 刘英丽, 万真, 杨梓妍, 等. 乳酸菌对萨拉米香肠风味形成的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 273–282.
- LIU YL, WAN Z, YANG ZY, *et al.* Recent progress in understanding the contribution of lactic acid bacteria to flavor formation in Salami: A review [J]. *Food Sci*, 2020, 41(23): 273–282.
- [31] XU Y, LIU Y, JIANG C, *et al.* Determination of volatile compounds in turbot (*Psetta maxima*) during refrigerated storage by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Sci Food Agric*, 2014, 94(12): 2464–2471.
- [32] 马宁. 酱香型习酒特征香气成分鉴定及香气协同作用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
- MA N. Study on key aroma compounds and perceptual interaction among odorants in soy sauce aroma type Xi Baijiu [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.
- [33] CANO-GARCÍA L, RIVERA-JIMÉNEZ S, BELLOCH C, *et al.* Generation of aroma compounds in a fermented sausage meat model system by *Debaryomyces hansenii* strains [J]. *Food Chem*, 2014, 151: 364–373.
- [34] CHEN Q, KONG B, 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 Sci*, 2016, 121: 196–206.
- [35] 冯美琴, 张杰, 孙健. 模仿葡萄球菌接种对发酵香肠品质及氧化稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 43(4): 105–112.
- FENG MQ, ZHANG J, SUN J. Effect of staphylococcus simulans NJ201 inoculation on the quality and antioxidant of fermented sausage [J]. *Food Sci*, 2021, 43(4): 105–112.
- [36] 汪卓琳. 酵母制品风味物质分析及形成机理研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
- WANF ZL. Analysis and formation mechanism of flavor substances in yeast products [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.
- [37] 孙文佳. 食盐替代物与乳酸链球菌素在低钠盐郫县豆瓣发酵中的应用研究[D]. 成都: 西华大学, 2021.
- SUN WJ. Study on the application of salt substitute and Nisin in the fermentation of low-sodium Pixian broad bean paste [D]. Chengdu: Xihua University, 2021.
- [38] TANIMOTO S, KITABAYASHI K, FUKUSIMA C, *et al.* Effect of storage period before reheating on the volatile compound composition and lipid oxidation of steamed meat of yellowtail *Seriola quinqueradiata* [J]. *Fish Sci*, 2015, 81(6): 1145–1155.
- [39] ANSORENA D, GIMENO O, ASTIASARÁN I, *et al.* Analysis of volatile compounds by GC-MS of a dry fermented sausage: Chorizo de Pamplona [J]. *Food Res Int*, 2001, 34(1): 67–75.
- [40] 杨滔, 张晓东, 刘红梅, 等. 不同发酵剂对发酵猪肉香肠品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(1): 101–109.
- YANG T, ZHANG XD, LIU HM, *et al.* Effect of different starters on the quality of fermented pork sausage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(1): 101–109.
- [41] 周雪, 袁鹏宇, 安霜, 等. 基于 ¹H-NMR 及 GC-MS 的中国块菌及其共生云南松的代谢物分析[J]. *菌物学报*, 2022, 41(1): 105–123.
- ZHOU X, YUAN PY, AN S, *et al.* Analysis of metabolites of *Tuber sinense* and its symbiotic *Pinus yunnanensis* based on ¹H-NMR and GC-MS [J]. *Mycosystema*, 2022, 41(1): 105–123.
- [42] SHAHIDI F, RUBIN LJ, D'SOUZA LA. Meat flavor volatiles: A review of the composition, techniques of analysis, and sensory evaluation [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 1986, 24(2): 141–243.
- [43] 曹云刚, 李颖, 郭安琪, 等. 绿茶提取物添加及脂肪替代对低脂猪肉香肠品质及脂质氧化稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(4): 94–99.
- CAO YG, LI Y, GUO ANQ, *et al.* Incorporation of green tea extract and partial replacement of fat to modify the quality and lipid oxidative stability of reduced-fat pork sausage [J]. *Food Sci*, 2021, 42(4): 94–99.
- [44] 徐敬欣, 张帅, 常婧瑶, 等. 以多糖为基质的脂肪模拟物替代动物脂肪在法兰克福香肠中的应用[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(9): 85–93.
- XU JX, ZHANG S, CHANG JY, *et al.* Application of polysaccharide-based fat mimetics to replace animal fat in Frankfurters [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(9): 85–93.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

作者简介



王 琪, 博士研究生, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。

E-mail: 2861919171@qq.com



黄元相, 工程师, 主要研究方向为肉制品加工与品质控制。

E-mail: 414380262@qq.com



陈 韬, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品质控制和畜产品加工。

E-mail: chentao63@163.com