

康馨樾, 陈泓帆, 毛竞竞, 等. 类球红细菌粗提物对贮藏期香肠挥发性风味物质和呈味氨基酸的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 353–362. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090096

KANG Xinyue, CHEN Hongfan, MAO Jingjing, et al. Effects of *Rhodobacter sphaeroides* Crude Extracts on Volatile Flavor Substances and Flavor Amino Acids of Sausages During Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 353–362. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090096

· 贮运保鲜 ·

类球红细菌粗提物对贮藏期香肠挥发性风味物质和呈味氨基酸的影响

康馨樾^{1,2}, 陈泓帆^{1,2}, 毛竞竞², 聂鑫^{1,3,*}, 刘达玉², 张 崑², 赵志平^{2,*}

(1. 四川旅游学院食品学院, 四川成都 610100;

2. 成都大学肉类加工四川省重点实验室, 四川成都 610106;

3. 成都医学院基础医学院, 四川成都 610500)

摘要: 为探究类球红细菌粗提物对香肠贮藏期挥发性风味物质及呈味氨基酸的影响, 在加工香肠时分别添加高、中、低浓度的类球红细菌粗提物, 以不添加类球红细菌粗提物的香肠作为对照, 利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术 (HS-SPME-GC-MS) 和氨基酸分析仪分别测定香肠贮藏 3 个月和 6 个月时的挥发性风味物质和游离氨基酸。结果表明, GC-MS 共检测出 36 种挥发性风味物质, 其中醇类 17 种、酯类 1 种、醛类 10 种、酸类 2 种、烷烃类 3 种、其它成分 3 种, 共有 8 种主体风味物质。多元统计分析表明, 贮藏 3 个月时, 添加类球红细菌粗提物香肠的醇类物质含量及种类低于对照组; 贮藏 6 个月时, 添加类球红细菌粗提物香肠的醇类物质含量高于对照组, 但醛类物质含量低于对照组, 且粗提物促进了唯一酯类物质己酸乙酯的生成。添加低浓度的类球红细菌粗提物降低了庚醛、辛酸等异味物质的含量。氨基酸分析表明, 类球红细菌粗提物提高了香肠鲜味和甜味氨基酸的占比。味觉活性值 (taste activity value, TAV) 分析表明, 组氨酸 TAV 值最大, 对香肠滋味影响最强。本研究为基于类球红细菌代谢物提升传统中式香肠风味品质提供了一定的理论依据和技术支撑。

关键词: 类球红细菌, 发酵提取物, 香肠, 挥发性风味物质, 氨基酸

中图分类号: TS255.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)12-0353-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090096



本文网刊:

Effects of *Rhodobacter sphaeroides* Crude Extracts on Volatile Flavor Substances and Flavor Amino Acids of Sausages During Storage

KANG Xinyue^{1,2}, CHEN Hongfan^{1,2}, MAO Jingjing², NIE Xin^{1,3,*}, LIU Dayu², ZHANG Yin², ZHAO Zhiping^{2,*}

(1. College of Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;

2. Meat Processing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

3. School of Basic Medical Sciences, Chengdu Medical College, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to test the effects of the crude extracts from *Rhodobacter sphaeroides* (CCRS) on the volatile flavor substances and flavor amino acids of sausages during storage, the sausages were respectively processed with addition of CCRS at higher, medium and lower concentrations. Sausage processed without addition of CCRS was used as control. The volatile flavor substances and free amino acids were respectively analyzed using headspace solid-phase micro-extraction gas chromatography mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and amino acid analyzer. The experimental results showed

收稿日期: 2022-09-13

基金项目: 四川省科技厅应用基础项目 (2022NSFSC1702); 宜宾市科技计划项目 (2021ZYCG015); 肉类加工四川省重点实验室开放基金 (22-R-10); 烹饪科学四川省高校重点实验室开放基金 (PRKX2022Z05); 川菜工业化四川省高校工程研究中心项目 (GCZX22-02); 四川旅游学院科研项目 (2022SCTUZD12)。

作者简介: 康馨樾 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: kangxinyue@163.com。

* 通信作者: 聂鑫 (1985-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: sichuanniexin@163.com。

赵志平 (1981-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: zhaozhiping@cdu.edu.cn。

that a total of 36 volatile flavor substances were detected by GC-MS, including 17 alcohols, 1 ester, 10 aldehydes, 2 acids, 3 alkanes and 3 other components, among which 8 substances were considered the main flavor substances. Multivariate statistical analysis showed that the content and types of alcohols in sausages added CCRS were lower than those in control after 3 months storage. After 6 months storage, the alcohol content in the sausages with CCRS was higher than that of the control. However, the aldehyde content of the sausages with CCRS was lower than that of the control. Moreover, the CCRS promoted the production of ethenyl hexanoate, which was the only one ester in the sausages. On the other hand, the addition of low concentration of CCRS reduced the content of heptaldehyde, octanoic acid and other odor substances. Amino acid analysis suggested that the CCRS increased the proportion of delicate and sweet amino acids. The taste activity value (TAV) analysis indicated that the histidine TAV value was the strongest and had the greatest impact on sausage taste. The present study would provide a theoretical basis and technical support for enhancing the flavor quality of Chinese traditional sausages based on the metabolites of *Rhodobacter sphaeroides*.

Key words: *Rhodobacter sphaeroides*; fermented extracts; sausages; volatile flavor substances; amino acids

香肠加工及贮藏过程中, 脂质氧化产生醛、酮和低级脂肪酸, 蛋白质降解为肽和游离氨基酸, 从而赋予香肠独特的风味^[1]。内源酶和微生物是决定传统中式香肠风味品质的重要因素。冯美琴等^[2]研究发现接种模仿葡萄球菌 NJ201 能提高发酵香肠酮类、酯类的含量, 有效促进香肠风味的形成。木糖葡萄球菌 YCC3 和植物乳杆菌 MSZ2 可提高香肠挥发性化合物含量^[3]。植物乳杆菌 X19-2D 加入羊肉发酵香肠可促进呈味氨基酸的释放, 从而改善发酵香肠的风味^[4]。张旭^[5]研究发现, 中性脂肪酶、酸性脂肪酶等内源酶可促进川式香肠醇类风味物质的生成。此外, 香肠加工过程中加入天然提取物也可改善风味特征, 如巴尔干式香肠加工过程中加入啤酒花提取物可降低由脂质氧化产生的挥发性化合物含量, 生成特定萜类风味化合物^[6]。羊肉香肠加工过程中加入沙葱提取物可增加 3-羟基-2-丁酮、3-甲基丁醛、己醛、辛醛、壬醛、二甲基二硫等挥发性风味物质的含量^[7]。

类球红细菌属光合细菌, 代谢产物富含辅酶 Q₁₀、类胡萝卜素、超氧化物歧化酶等抗氧化活性物质。辅酶 Q₁₀ 是一种类似于维生素的脂溶性苯醌, 也可作为保健食品原料^[8]。类胡萝卜素是天然色素, 具有清除自由基的能力^[9]。超氧化物歧化酶是抗氧化金属酶, 在机体氧化与抗氧化平衡中起到至关重要的作用^[10]。此外, 类球红细菌培养简单、易控, 可进行规模化生产^[11]。方立超^[11]研究发现类球红细菌具有良好的抗氧化作用, 并且安全无副作用。研究发现, 在白虾和罗非鱼膳食中加入类球红细菌提取物, 可提高其存活率^[12-13]。

香肠过度氧化会产生酸败味、哈喇味, 从而影响香肠的风味, 而抗氧化剂的合理使用, 也能影响香肠风味与滋味变化, 有助于香肠的贮藏^[14], 如茶多酚可减缓腊肉风味的衰减^[15]。类球红细菌粗提物具有良好的抗氧化特性, 可开发成抗氧化剂用于稳定香肠风味品质。类球红细菌粗提物可抑制香肠脂肪与蛋白质的氧化^[16], 但类球红细菌粗提物对香肠挥发性风味和游离氨基酸的影响尚未见报道。本研究将不同浓度类球红细菌粗提物加入香肠中, 探究其对贮藏期香肠挥发性风味和游离氨基酸的影响, 为基于类球红细

菌提取物提升香肠品质提供一定的理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

类球红细菌 *Rhodobacter sphaeroides* 2.4.1 (分离自海洋) 德国吉森大学 Gabriele Klug 教授惠赠; 猪肉 购自四川高金食品; 猪肠衣 购于十陵友谊市场; 氯化钠、盐酸、柠檬酸钠、乙酸钠、乙腈 均为分析纯, 成都市科隆化学品有限公司。

BCD-452WDPF 冰箱 青岛海尔集团; YP302N 型电子天平 上海菁海仪器有限公司; 5977A-7890B 型气相色谱-质谱联用仪(含 PAL3 自动进样器) 美国安捷伦公司; LC98-I AAA 型氨基酸分析仪 北京温分分析仪器技术开发有限公司; HC-2518 型台式高速离心机 湘仪设备有限公司; GR60DA 型立式自动压力蒸汽灭菌器 致微(厦门)仪器有限公司; SPH-2102C 型立式双层全温度恒温培养振荡器 上海程造仪器设备有限公司; Scientz-650E 型超声波细胞粉碎机 宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 类球红细菌培养及粗提物制备 类球红细菌 *Rhodobacter sphaeroides* 活化后以 2%(V/V) 接种于 RA 液体培养基中, 30 ℃ 微氧培养 48 h^[17], 共 6 L。将 6 L 培养液在 8000×g, 4 ℃ 条件下离心 10 min, 用生理盐水重悬后超声波破碎(每 2 L 培养液所含菌体, 用 35 mL 生理盐水重悬)。超声波破碎条件: 功率 325 W, 总时间 40 min; 超声波破碎后在 10000×g, 4 ℃ 条件下离心 20 min, 上清即为类球红细菌粗提物。粗提物成分主要为蛋白质(酶)、类胡萝卜素和辅酶 Q₁₀ 等成分^[18]。

1.2.2 香肠的制备 将 10 kg 肉切成细丝(肥瘦比为 3:7, 肉丝长 10 cm、宽 0.3 cm、高 0.3 cm), 加入 2.5% 食盐(w/w)混匀后分成 4 份, 每份 2.5 kg。按每 kg 分别加入 0、0.4、0.8 和 1.2 L 类球红细菌发酵液提取的粗提物, 命名为空白 A 组、D 组、C 组、B 组。每节香肠长 15 cm, 粗约 3.5 cm, 灌肠后进行智能仿天然风干(白天 12 ℃, 晚上 8 ℃, 相对湿度

70%~80%)。风干结束(风干 7 d, 香肠失水率达到 30%)后真空包装常温贮藏 3 个月和 6 个月; 贮藏 3 个月样品记为 A3、B3、C3 和 D3, 贮藏 6 个月样品记为 A6、B6、C6 和 D6。

1.2.3 挥发性风味物质的测定 GC-MS 检测: 将香肠切碎后, 精确称取 3 g 置于 15 mL 的顶空瓶中密封, 每组香肠 3 个平行。设置 CTC 自动进样器对香肠的前处理条件如下: 加热箱温度 60 °C, 加热时间 30 min, 抽取时间 30 min, 解析时间 5 min。

色谱、质谱条件参考张旭等^[19]实验条件。GC 条件: HP-5MS UI 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 压力 32.0 kPa; 流速 1.0 mL/min; 载气为 He 气, 不分流进样; 进样口温度 250 °C; 升温程序: 起始温度 40 °C, 保持 1 min, 以 3 °C/min 升至 85 °C, 保持 3 min, 再以 3 °C/min 升至 105 °C, 保持 2 min, 再以 12 °C/min 升至 165 °C, 再以 10 °C/min 升至 230 °C。MS 条件: 电子电离源(EI); 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 °C, 四级杆温度 150 °C; 检测器电压 350 V; 质量扫描范围(m/z): 40~500。

定性: 对化合物进行定性分析, 将所得到的数据在仪器中 NIST 14.L 谱库进行检索和匹配, 选择匹配程度高于 80% 的物质。同时结合参考文献以及相关网络数据库进行定性分析。

定量: 使用峰面积对总离子流色谱图归一化定量, 最终计算出各组分的相对含量。

1.2.4 游离氨基酸的测定 采用 LC98-I AAA 型氨基酸分析仪分别测定 8 组香肠游离氨基酸。

样品处理参考王卫等^[20]方法, 称取肉样 3 g 于水解管中, 加入 15 mL 6 mol/L 盐酸溶液, 混匀后冷冻 5 min, 密封后放入 110 °C 烘箱中水解 22 h, 冷却至室温, 水解液过滤至 50 mL 比色管中, 定容至 50 mL。移取 1 mL 滤液至 25 mL 尖底浓缩瓶, 45 °C 减压干燥后用 1 mL 水溶解; 再次减压干燥后用 1 mL pH2.2 的柠檬酸钠缓冲液溶解, 经 0.22 μm 水相滤膜过滤, 滤液即为待测液。取 200 μL 待测液加入衍生试剂于 40 °C 衍生 1 h, 然后加入 400 μL 正己烷混匀, 静置 10 min 分层后取下层液体测定。LC98-I AAA 型氨基酸分析仪测定条件: 流动相 A 为乙酸钠, 流动相 B 为乙腈, 氨基酸分析专用 ODS 柱(Inertsil ods-35 μm, 4.6 mm×250 mm), 柱温 40 °C, 波长 254 nm, 流速 1 mL/min。

1.3 数据处理

表格由 Microsoft Office Excel 软件完成, 采用 IMB SPSS Statistics 24 进行显著性分析, 采用 Origin 2017、SIMCA 14.1、TBtools、Canoco 5 分析作图。

2 结果与分析

2.1 贮藏期香肠挥发性风味分析

2.1.1 贮藏期香肠挥发性风味物质组成和含量 贮藏过程中, 香肠挥发性风味物质的数量发生了一定变化, 如图 1 所示。利用 GC-MS 从香肠中共检测出五

类挥发性风味物质, 包括醇类、酯类、醛类、酸类、烷烃类, 其中醇类、醛类为主要的风味物质。从图 1 可知, C3 挥发性风味物质种类数最少, 且无酸类物质。贮藏 3 个月时, 样品间醇类物质种类数差异最大。随贮藏时间的延长, 香肠挥发性风味物质的数量呈上升趋势, 在贮藏过程中, 挥发性化合物不断累积。与贮藏 3 个月相比, 贮藏 6 个月时, 各组香肠的醇类物质的数量均增加, 可能是随贮藏时间的延长, 脂肪酸氧化降解加剧^[21]。D6 香肠无酸类挥发性风味物质; A6 香肠无酯类挥发性风味物质, 可能是 A6 香肠酸酐与醇反应生成酯的过程受到抑制所致^[22]。B6 香肠检测出 9 种醇类物质, 高于其它组香肠, 可能是贮藏过程中, 其它组香肠醇类物质发生酯化、氧化反应, 而 B 组粗提物用量较高, 对酯化、氧化反应的抑制作用较强^[23]。醛类是传统中式香肠的第二大类挥发性风味物质^[24], 从图 1 可知, A、B、C 组的醛类风味物质数量随贮藏时间的增加而增加, 但 D 组香肠醛类物质种类减少, 可能是 D 组香肠醛类还原生成了醇^[25], D6 香肠中醇类种数的增加印证了这一推论。

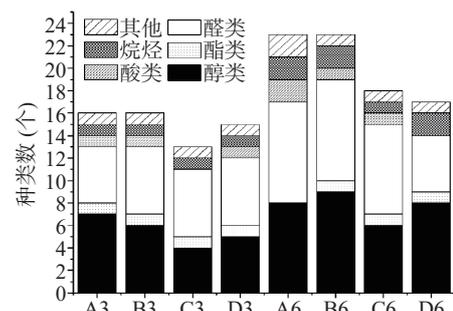


图 1 各组香肠不同挥发性成分种类差异

Fig.1 Differences of different volatile components in different groups of sausages

类球红细菌粗提物对香肠挥发性风味物质的种类和相对含量均产生了显著的影响, 结果如表 1 所示。GC-MS 共测出 36 种挥发性风味物质, 其中醇类 17 种、酯类 1 种、醛类 10 种、酸类 2 种、烷烃类 3 种、其它成分 3 种。

醇类物质来源广泛, 蛋白质水解、乳糖代谢、甲基酮还原、氨基酸代谢、脂质氧化产生的醛, 还原后均可生成相应的醇^[26]。贮藏 3 个月时, 类球红细菌粗提物降低了香肠中的醇类含量。贮藏 6 个月时, 香肠正己醇含量显著高于对照组($P < 0.05$), 且 D6 香肠中含量最高。2-壬烯-1-醇仅在 B6 香肠中被检出, 4-乙基-1-辛炔-3-醇、(-)-异松蒎醇仅在 A6 香肠中被检出。苯乙醇具有清香、甜、花香和玫瑰香气, 对丰富香肠风味有重要作用^[27], 仅在 D6 香肠中被检出。贮藏 3 个月时, 反-2-十一烯醇仅在 D3 香肠中被检出, 其具有霉味和湿润的泥土味^[28]。

酯类物质主要由肌肉组织中脂质氧化产生的醇和游离脂肪酸发生酯化反应形成的^[25], 己酸乙烯酯是唯一被检出的酯类物质, 具有令人愉悦的果香; A6 中未检出己酸乙烯酯, 可能归因于酸酐与醇生成酯的过

表1 香肠贮藏期挥发性风味组成及含量(%)
Table 1 Volatile flavor composition and content of different sausages during storage(%)

名称	RT	CAS	A3	B3	C3	D3	A6	B6	C6	D6
醇类										
正己醇	6.35	111-27-3	1.56±0.00 ^c	2.11±0.00 ^c	3.18±0.0 ^c	0.90±0.00 ^c	4.37±0.01 ^c	18.06±0.02 ^b	18.42±0.05 ^b	24.84±0.04 ^a
1-庚炔-3-醇	9.37	7383-19-9	4.57±0.00	-	-	-	-	-	-	2.82±0.00
1-辛烯-3-醇	10.38	3391-86-4	8.35±0.00 ^b	8.88±0.00 ^b	10.94±0.01 ^a	8.90±0.01 ^b	4.74±0.00 ^d	5.37±0.00 ^{cd}	6.26±0.01 ^c	9.37±0.00 ^a
3,5-辛二烯-2-醇	12.96	69668-82-2	0.75±0.00	0.57±0.00	-	0.71±0.00	0.47±0.00	0.27±0.00	-	-
反-2-十一烯醇	14.41	75039-84-8	-	-	-	1.23±0.01	-	-	-	-
3-甲基-1,6-庚二烯-3-醇	15.41	34780-69-3	3.92±0.00	-	2.92±0.00	-	-	-	-	-
正庚醇	10.05	111-70-6	0.59±0.00	0.59±0.00	0.82±0.00	-	0.71±0.00	1.01±0.00	1.04±0.002	1.31±0.00
顺-2-壬烯-1-醇	14.39	41453-56-9	0.87±0.00	1.29±0.01	-	-	-	-	-	-
4,5-二甲基-2-庚烯-3-醇	15.44	55956-37-1	-	4.18±0.01	-	4.38±0.01	6.56±0.00	5.29±0.01	4.56±0.01	2.77±0.00
环辛醇	14.31	696-71-9	-	-	-	-	-	-	0.45±0.00	0.41±0.00
2-壬烯-1-醇	14.464	22104-79-6	-	-	-	-	-	1.61±0.00	-	-
4-乙基-1-辛炔-3-醇	12.77	5877-42-9	-	-	-	-	0.42±0.00	-	-	-
(-)-异松蒎醇	13.25	27779-29-9	-	-	-	-	0.35±0.00	-	-	-
4-乙基环己醇	12.768	4534-74-1	-	-	-	-	-	0.32±0.00	-	-
4-甲基-4-硝基戊醇-1-醇	19.78	5215-92-9	-	-	-	-	-	0.58±0.00	-	1.57±0.00
4,4,6-三甲基-环己-2-辛烯-1-醇	28.88	1000144-64-7	-	-	-	-	0.37±0.00	0.40±0.00	0.30±0.00	-
苯乙醇	16.28	60-12-8	-	-	-	-	-	-	-	0.51±0.00
总量			19.06	17.61	17.85	16.13	18.00	32.90	31.02	43.60
酯类										
己酸乙酯	13.93	3050-69-9	6.42±0.02	8.35±0.00	7.15±0.01	9.56±0.00	-	7.71±0.00	7.68±0.01	6.27±0.01
醛类										
正己醛	4.38	66-25-1	50.99±0.01 ^a	47.76±0.05 ^a	50.93±0.03 ^a	49.06±0.02 ^a	33.14±0.02 ^b	27.51±0.03 ^b	27.28±0.03 ^b	15.44±0.01 ^c
庚醛	7.30	111-71-7	2.82±0.00 ^a	2.91±0.00 ^a	2.63±0.00 ^{ab}	3.01±0.00 ^a	2.31±0.00 ^{abc}	1.62±0.00 ^{cd}	2.02±0.01 ^{bcd}	1.41±0.00 ^d
反-2-辛烯醛	13.75	2548-87-0	5.47±0.02 ^a	3.65±0.00 ^{abc}	2.48±0.00 ^c	4.39±0.01 ^{ab}	3.67±0.00 ^{abc}	2.78±0.00 ^{bc}	2.20±0.00 ^c	1.90±0.00 ^c
壬醛	15.87	124-19-6	5.59±0.00 ^a	5.74±0.01 ^a	6.23±0.01 ^a	5.55±0.00 ^a	6.05±0.00 ^a	5.89±0.00 ^a	6.03±0.00 ^a	5.62±0.00 ^a
反式-2-壬醛	18.73	18829-56-6	0.65±0.00	-	0.57±0.00	0.75±0.00	0.91±0.00	0.67±0.00	0.66±0.00	0.54±0.00
(E,E)-2,4-壬二烯醛	10.83	5910-87-2	-	0.98±0.00	-	-	0.69±0.00	0.67±0.00	-	-
(E)-2-庚烯醛	9.38	18829-55-5	-	2.13±0.01	1.32±0.00	2.07±0.001	1.58±0.00	1.32±0.00	1.71±0.00	-
反式-2-癸烯醛	24.59	3913-81-3	-	-	-	-	0.79±0.00	0.66±0.00	0.54±0.00	-
2-十一烯醛	29.61	2463-77-6	-	-	-	-	0.41±0.00	0.41±0.00	0.37±0.00	-
桃醛	29.61	104-67-6	-	-	-	-	-	-	-	0.43±0.00
总量			65.52	63.17	64.15	64.82	49.55	41.52	40.810.41	25.34
酸类										
己酸	12.11	142-62-1	2.57±0.01	2.97±0.01	-	2.45±0.01	9.80±0.01	6.34±0.00	4.95±0.01	-
辛酸	20.40	124-07-2	-	-	-	-	0.39±0.00	-	-	-
总量			2.57	2.97	0.00	2.45	10.20	6.34	4.95	0.00
烷烃类										
1-氯戊烷	3.76	543-59-9	2.90±0.00 ^b	2.69±0.00 ^{bc}	3.23±0.00 ^{ab}	3.34±0.01 ^{ab}	2.16±0.00 ^c	3.25±0.00 ^{bc}	3.77±0.00 ^a	2.15±0.00
2,3-环氧-4,4-二甲基戊烷	3.20	53897-30-6	-	-	-	-	-	-	-	0.45±0.00
(Z)3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	12.50	74752-97-9	-	-	-	-	0.41±0.00	0.32±0.00	-	-
总量			2.90	2.69	3.23	3.34	2.58	3.58	3.770.04	2.60
其他										
氯甲基辛基醚	14.44	24566-90-3	-	-	-	-	-	-	0.73±0.00	1.10±0.00
2,4,6-三甲基吡啶	10.92	108-75-8	1.78±0.01	4.48±0.03	5.13±0.00	1.79±0.01	10.67±0.01	7.76±0.01	10.26±0.01	21.36±0.03
己酸酐	13.94	2051-49-2	-	-	-	-	9.09±0.01	-	-	-
总量			1.78	4.48	5.13	1.79	19.76	7.76	10.99	22.46

注:表中各组物质均检出时标注显著性,a、b、c字母不同表示显著性差异(P<0.05);-代表未检出。

程受到抑制^[22],也可能是生成的酯在脂肪酶的作用下发生酯交换反应,形成了醛^[29]。

醛类来源于甘油三酯的水解和脂肪酸氧化,如不饱和脂肪酸的氧化降解和氨基酸的Strecker降

解^[30]。醛类阈值较低,且风味有叠加作用,是肉类食品风味的重要来源,短链醛倾向于辛辣或酸性^[31]。贮藏3个月时,A3香肠中无(E)-2-庚烯醛检出,表明添加粗提物可能促进(E)-2-庚烯醛生成,(E)-2-庚烯醛

具有果香、芳香味,能丰富香肠风味^[32]。B3 香肠中有(E,E)-2,4-壬二烯醛检出。桃醛具有果香、芳香味,仅在 D6 香肠中被检出。正己醛和庚醛作为亚油酸氧化主要产物,是油脂不良气味和腥味的主要来源^[33-36]。D6 香肠中庚醛和正己醛含量显著低于对照组($P<0.05$),可能是粗提物中的类胡萝卜素使亚油酸氧化受到抑制^[37-39]。

己酸和辛酸作为中链酸(C6~C12)主要来自甘油三酯和磷脂的水解。己酸属于脂肪族化合物,来自脂质氧化^[40]。己酸作为饱和脂肪酸具有不愉快的椰肉油气味,对香肠风味有消极影响,降低香肠中的己酸含量对香肠风味有积极作用^[41]。贮藏 6 个月时,对照组香肠己酸含量最高,D6 香肠中没有检出,可能是粗提物中的类胡萝卜素抑制脂肪氧化,减少己酸含量。辛酸具有不愉快气味和脂肪臭^[42],仅在 A6 香肠中被检出,说明类球红细菌粗提物的添加对稳定香肠风味有重要作用。样品中共检测出 3 种烷烃,烷烃的感官阈值通常较高,对香肠整体的风味贡献不大。综上所述,D 组香肠有效降低了可能造成香肠异味的正己醛、庚醛、辛酸、壬醛的含量。

2.1.2 不同香肠贮藏期挥发性风味物质聚类热图分析 对挥发性风味物质进行聚类分析,以反映所有挥

发性风味成分的组间差异,结果如图 2 所示。从图中可以看出,D6 与其它组香肠差异显著,在聚类中单独分为一组。从聚类结果可以看出,贮藏 3 个月香肠的风味聚为一类,贮藏 6 个月香肠的风味聚为一类,可知贮藏时间对香肠风味的影响程度大于类球红细菌粗提物添加量影响程度。贮藏 3 个月时,C 组香肠与 A 组香肠聚为一类,D 组香肠与 B 组香肠聚为一类,表明贮藏 3 个月提取物添加量对风味影响非线性关系。D6 香肠中含量较高的风味物质是苯乙醇、桃醛;而 A6 香肠中含量较高的风味物质是辛酸、己酸酐。

2.1.3 贮藏香肠主体风味成分 感官阈值直接影响着挥发性成分对产品整体风味的贡献程度。ROAV ≥ 1 ,说明该组分为香肠中主体风味成分,对香肠风味有直接影响。0.1<ROAV<1 说明该组对香肠风味有修饰作用^[43]。经计算共检测出 8 种主体风味物质,包括正己醇、1-辛烯-3-醇、己酸乙酯、正己醛、庚醛、壬醛、反式-2-壬醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛,如表 2 所示。除 B3 香肠外,反式-2-壬醛对香肠香气贡献最大。1-辛烯-3-醇是贮藏 3 个月和 6 个月的主体风味成分,可赋予香肠蘑菇香气^[44],正庚醇在所有香肠中均起修饰作用,环辛醇和苯乙醇对香肠风味没有贡

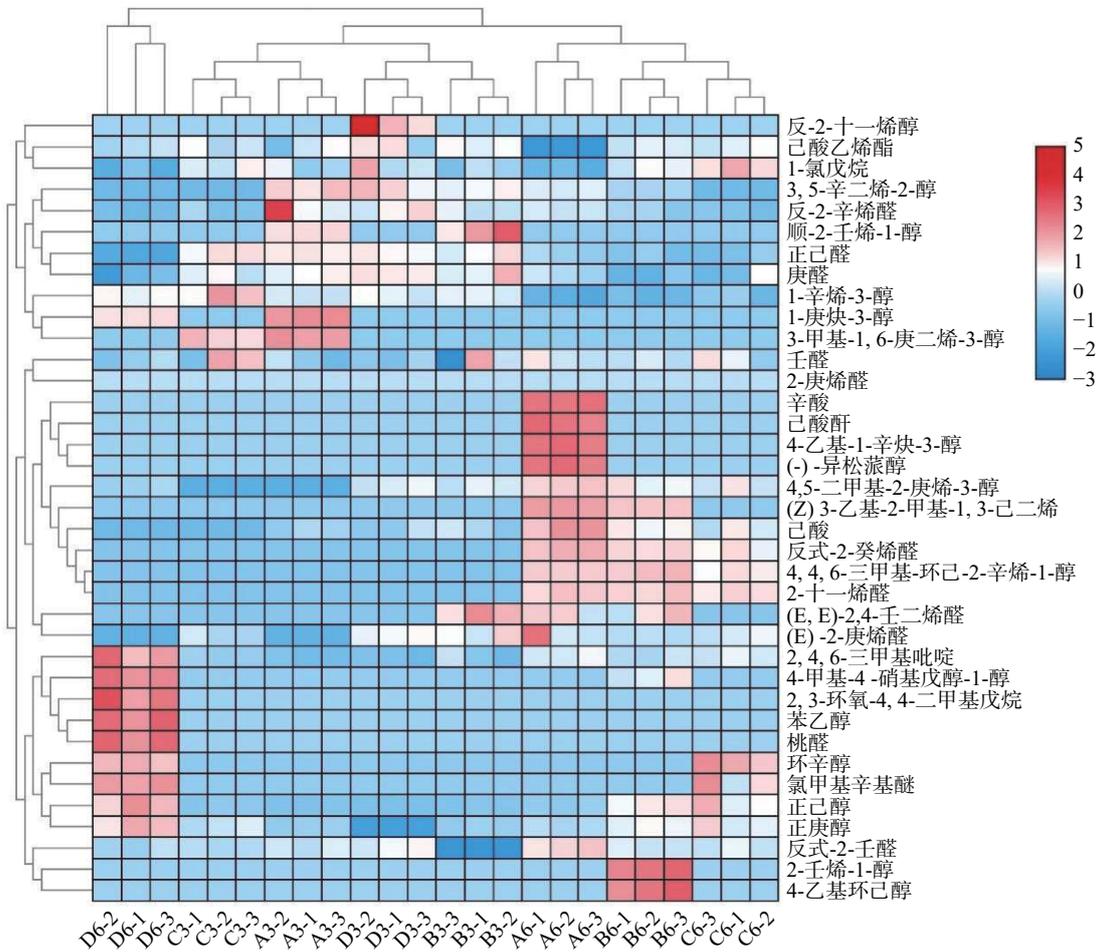


图 2 挥发性风味成分聚类热图

Fig.2 Cluster heat map of volatile flavor components

表2 香肠挥发性物质在水中阈值及 ROAV 值
Table 2 Threshold and ROAV values of sausage volatile substances in water

组别	阈值 ^[38] (mg/kg)	A3	B3	C3	D3	A6	B6	C6	D6
正己醇	0.2	0.08	0.13	0.18	0.16	0.88	0.88	0.90	1.50
1-辛烯-3-醇	0.01	8.34	10.65	12.49	3.38	5.24	5.24	6.14	11.35
正庚醇	0.023	0.25	0.31	0.41	0.22	0.43	0.44	0.44	0.69
环辛醇	10	-	-	-	-	-	0.00	0.00	0.00
苯乙醇	0.045	-	-	-	-	-	-	-	0.14
己酸乙酯	0.001	64.12	100.00	81.64	82.94	-	75.37	75.38	75.96
正己醛	0.21	2.42	2.73	2.77	1.13	1.28	1.27	1.27	0.89
庚醛	0.01	2.82	3.49	3.00	1.64	1.58	1.98	1.98	1.71
反-2-辛烯醛	0.061	0.90	0.72	0.46	0.43	0.45	0.35	0.35	0.38
壬醛	0.035	1.59	1.97	2.03	1.23	1.64	1.69	1.69	1.94
反式-2-壬醛	0.000065	100.00	-	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
(E,E)-2,4-壬二烯醛	0.0006	2.42	19.61	-	8.17	10.89	-	-	-
(E)-2-庚烯醛	0.75	-	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	-	-
反式-2-癸烯醛	0.15	-	-	-	0.04	0.04	0.04	-	-
桃醛	0.025	-	-	-	-	-	-	0.00	0.21
己酸	81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
辛酸	101	-	-	-	0.00	-	-	-	-

注: -代表未检出。

献。此外,正己醇仅在 D6 香肠中作为风味主体成分。除 A6 香肠外,己酸乙酯均作为香肠主体风味成分,且在添加类球红细菌粗提物香肠中的 ROAV 值远大于对照香肠,说明类球红细菌粗提物有利于己酸乙酯香气物质的生成,从而赋予香肠愉悦的果味。庚醛、壬醛是所有香肠的主体风味成分,反-2-辛烯醛在所有香肠中均作为修饰成分,(E,E)-2,4-壬二烯醛是 A 组香肠的主体风味成分,也是 B3、D3 香肠的主体风味成分。桃醛为长链醛,具有脂肪香、木香^[45],仅在 D6 香肠中起到修饰作用。

2.1.4 不同香肠挥发性风味主成分分析 以香肠不同时间段的挥发性风味物质作为数据源,进行主成分分析,结果如图 3 所示。根据各组香肠挥发性风味间的分布情况,判断不同香肠的挥发性风味物质是否有差异。贮藏 3 个月与 6 个月香肠的挥发性风味间距较远,表明随着贮藏时间的延长,香肠挥发性风味物质间有明显差异。贮藏 3 个月时,A、C 和 D 组香肠距离较近,且 A 和 D 组有重叠,说明 A、D 组香肠挥发性风味差异不显著;B 组香肠与其它组香肠挥发

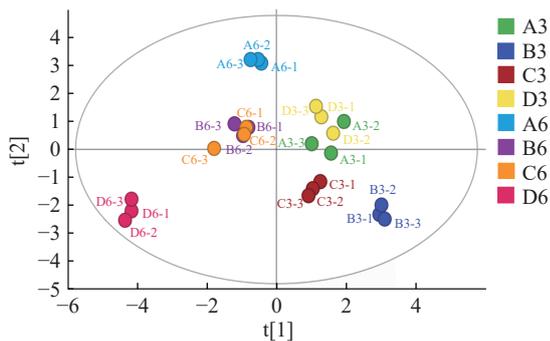


图3 香肠风味物质的 PCA 得分图

Fig.3 PCA score for the flavor substances from the sausages

性风味物质有显著差异。贮藏 6 个月时,A 组香肠和 D 组香肠分离明显,距离较远,但 B 组香肠与 C 组香肠样本点相互重合,说明添加类球红细菌粗提物后,香肠风味发生了明显变化,但中高添加量的香肠风味差异不大。由图 3 可知,A6 与 D6 香肠挥发性风味差异最大,且 D6 组香肠与所有香肠距离较远,与聚类热图结果一致。

2.1.5 贮藏时间和添加量对香肠挥发性风味物质的影响 为研究类球红细菌粗提物添加量和贮藏时间对香肠挥发性风味物质的影响,利用去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)探究了香肠的挥发性风味物质对香肠整体风味的影响程度,结果显示最长梯度为 0.95。因最长梯度小于 3,进一步选择 Redundancy analysis(RDA)线性模型分析,如图 4 所示。途中箭头代表不同的影响因素,其长短代表对香肠挥发性物质影响大小。类球红细菌粗提物的添加量与贮藏时间呈现钝角,说明贮藏时间和类球红细菌粗提物添加量与挥发性风味物质呈负相关,

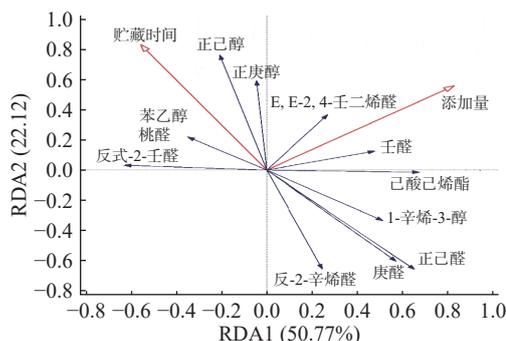


图4 香肠挥发性风味物质 RDA 线性模型分析

Fig.4 RDA linear model analysis for flavor substance from sausage

可能由于类球红细菌粗提物中含有辅酶 Q₁₀、类胡萝卜素等抗氧化活性物质, 减缓了香肠的脂质氧化和蛋白质降解^[46]。挥发性风味物质与贮藏时间射线的夹角及投影反映了贮藏时间因素对该挥发性风味物质影响的相关性和大小。正己醇、正庚醇、(E,E)-2,4-壬二烯醛、壬醛、己酸乙酯、1-辛烯-3-醇、正己醛、庚醛与类球红细菌粗提物的添加量呈锐角, 为正相关关系。

2.2 贮藏期香肠氨基酸变化

2.2.1 贮藏期氨基酸含量变化 香肠在贮藏后熟过程中, 蛋白质在内源酶和微生物来源酶的作用下被分解为多肽和游离氨基酸^[47]。贮藏 3 个月时, A3 香肠总氨基酸含量显著低于 B3 和 C3 香肠($P<0.05$), 但显著高于 D3 香肠($P<0.05$), 如表 3 所示。而贮藏 6 个月时, A6 香肠总氨基酸含量显著低于 D6 香肠($P<0.05$), 但显著高于 B6 和 C6 香肠。不同贮藏时间, 粗提物对总氨基酸含量影响相反。同时, 各组香肠必需氨基酸和非必需氨基酸的趋势与总氨基酸趋势一致, 表明类球红细菌粗提物的添加促进了蛋白质的水解。谷氨酸和天冬氨酸有利于鲜味滋味的表达^[48]。贮藏 3 个月时, B3 和 C3 香肠谷氨酸和天冬氨酸的含量显著高于 A3 香肠($P<0.05$), 说明类球红细菌粗提物促进了谷氨酸和天冬氨酸等鲜味氨基酸的产生, 可能是由于类球红细菌粗提物物中含有氨肽

酶, 促进了游离氨基酸的释放^[49]。但贮藏 6 个月时, A6 香肠谷氨酸和天冬氨酸的含量却显著高于 B6 和 C6 香肠($P<0.05$), 但显著低于 D6 香肠($P<0.05$)。2.2.2 贮藏期香肠游离氨基酸滋味评价 游离氨基酸是主要的呈味物质之一, 不同游离氨基酸具有不同呈味特性, 主要分为鲜味、甜味、苦味。游离氨基酸之间相互影响作用, 对香肠的滋味具有重要的影响。经过氨基酸 TAV 计算, TAV>1, 表明该氨基酸对样品滋味产生影响; TAV 值越大, 对滋味影响越大。从表 4 可以看出, 天冬氨酸、丝氨酸、苏氨酸、丙氨酸的 TAV 值较小, 对贮藏期香肠滋味影响较小。组氨酸在所有香肠中的 TAV 值均大于 1, 说明其对贮藏 3 个月和 6 个月的香肠滋味有较大的影响, 且随着贮藏时间的延长, 对香肠滋味的影响逐渐增大。组氨酸为苦味氨基酸, 加入少量提取物能降低组氨酸作用。谷氨酸、精氨酸、缬氨酸、蛋氨酸和苯丙氨酸仅对贮藏 6 个月的香肠滋味有较大影响, 且 D6 香肠中氨基酸 TAV 值均高于 A6 香肠。甘氨酸、酪氨酸、亮氨酸和异亮氨酸仅对 D6 和 A6 香肠有影响, 并且 D6 香肠 TAV 值大于 A6 香肠。脯氨酸和赖氨酸仅对 D6 香肠有一定的影响。由表 4 可知, 少量粗提物在贮藏 3 个月时能显著降低苦味氨基酸作用。由表 5 可知, 贮藏 3 个月时, 添加粗提物能显著增加鲜味和甜味氨基酸占比。

表 3 贮藏期氨基酸含量(mg/100 g)变化

Table 3 Changes of amino acid content (mg/100 g) during storage

峰名	A3	B3	C3	D3	A6	B6	C6	D6
天冬氨酸	11.410 ^c	17.549 ^b	18.864 ^a	11.973 ^c	56.432 ^B	24.560 ^C	22.340 ^D	71.034 ^A
谷氨酸	14.835 ^c	30.680 ^a	28.890 ^b	13.969 ^d	115.283 ^B	44.295 ^C	41.154 ^D	146.750 ^A
丝氨酸	13.314	55.048	25.284	20.078	97.858	38.274	37.370	123.594
甘氨酸	15.873	16.710	29.122	6.372	134.215	46.528	48.997	151.249
组氨酸	38.256	58.130	67.571	28.752	170.936	82.655	73.690	213.149
精氨酸	21.015	44.956	44.230	16.710	141.625	59.403	58.451	187.688
苏氨酸	26.490	58.757	52.220	22.025	108.013	82.581	78.922	246.031
丙氨酸	4.290	10.083	8.117	3.501	31.421	12.886	12.876	42.619
脯氨酸	49.902	88.019	78.067	38.536	279.652	127.882	126.285	326.562
酪氨酸	32.950	62.290	62.057	25.004	187.595	88.605	84.507	227.311
缬氨酸	23.826	34.256	43.015	14.871	114.686	49.535	44.865	134.881
蛋氨酸	24.819	40.152	37.699	13.824	108.636	48.940	45.035	133.275
异亮氨酸	57.657	22.351	30.238	12.165	117.885	43.413	51.795	132.982
亮氨酸	10.390	55.962	47.947	20.862	194.770	72.293	69.523	228.754
苯丙氨酸	41.860	88.268	84.391	36.568	246.264	123.794	115.770	301.458
赖氨酸	9.340	9.620	13.349	6.679	17.961	13.895	10.888	21.069
总量	396.228 ^c	692.830 ^a	671.060 ^b	291.889 ^d	2123.231 ^B	959.541 ^C	922.469 ^D	2688.407 ^A

注: 表中各组物质均检出时标注显著性; a、b、c 表示冷藏 3 个月香肠间的显著性差异($P<0.05$); A、B、C 表示冷藏 6 个月香肠间的显著性差异($P<0.05$)。

表 4 贮藏期香肠氨基酸 TAV 值

Table 4 The TAV value of sausage amino acids during refrigeration

氨基酸名称	A3	B3	C3	D3	A6	B6	C6	D6	滋味阈值 ^[50]	呈味特性 ^[50]
天冬氨酸	0.114	0.175	0.189	0.120	0.564	0.246	0.223	0.710	100	鲜味
谷氨酸	0.494	1.023	0.963	0.466	3.843	1.477	1.372	4.892	30	鲜味

续表 4

氨基酸名称	A3	B3	C3	D3	A6	B6	C6	D6	滋味阈值 ^[50]	呈味特性 ^[50]
总量	0.608	1.198	1.152	0.586	4.407	1.723	1.595	5.602		
丝氨酸	0.089	0.367	0.169	0.134	0.652	0.255	0.249	0.824	150	甜味
甘氨酸	0.122	0.129	0.224	0.049	1.032	0.358	0.377	1.163	130	甜味
苏氨酸	0.102	0.226	0.201	0.085	0.415	0.318	0.304	0.946	260	甜味
丙氨酸	0.072	0.168	0.135	0.058	0.524	0.215	0.215	0.710	60	甜味
脯氨酸	0.166	0.293	0.260	0.128	0.932	0.426	0.421	1.089	300	甜味
总量	0.551	1.183	0.989	0.454	3.555	1.572	1.566	4.732		
酪氨酸	0.362	0.685	0.682	0.275	2.061	0.974	0.929	2.498	91	苦味
缬氨酸	0.596	0.856	1.075	0.372	2.867	1.238	1.122	3.372	40	苦味
蛋氨酸	0.827	1.338	1.257	0.461	3.621	1.631	1.501	4.443	30	苦味
异亮氨酸	0.641	0.248	0.336	0.135	1.310	0.482	0.575	1.478	90	苦味
组氨酸	1.913	2.907	3.379	1.438	8.547	4.133	3.685	10.657	20	苦味
精氨酸	0.420	0.899	0.885	0.334	2.832	1.188	1.169	3.754	50	苦味
亮氨酸	0.055	0.295	0.252	0.110	1.025	0.380	0.366	1.204	190	苦味
苯丙氨酸	0.465	0.981	0.938	0.406	2.736	1.375	1.286	3.350	90	苦味
赖氨酸	0.467	0.481	0.667	0.334	0.898	0.695	0.544	1.053	20	苦味
总量	5.746	8.69	9.471	3.865	25.897	12.096	11.177	31.809		

表 5 贮藏期香肠不同呈味氨基酸占比(%)

Table 5 Proportion of different flavored amino acids in sausages during storage (%)

滋味氨基酸类别	A3	B3	C3	D3	A6	B6	C6	D6
甜味氨基酸	8.81	10.82	9.92	11.95	13.02	11.19	11.12	13.29
鲜味氨基酸	7.98	10.69	8.52	9.26	10.50	10.21	10.92	11.23
苦味氨基酸	83.22	78.49	81.56	78.80	76.48	78.59	77.95	75.48

3 结论

本研究利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)从添加类球红细菌粗提物香肠及对照香肠中共检测出 36 种挥发性风味物质,包括醇类 17 种,酯类 1 种,醛类 10 种,酸类 2 种,烷烃类 3 种及其它类。正己醇、1-辛烯-3-醇、己酸乙酯、正己醛、庚醛、壬醛、反式-2-壬醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛等为香肠的主体风味物质。贮藏 3 个月时,添加中浓度的类球红细菌粗提物降低了(E,E)-2,4-壬二烯醛的含量。贮藏 6 个月时,添加低浓度的类球红细菌粗提物香肠的挥发性风味与其它组差异最为显著。贮藏 3 个月时,添加类球红细菌粗提物减少了香肠醇类种类及含量。贮藏 6 个月,类球红细菌粗提物增加了醇类物质含量,但减少了醛类物质含量,促进了唯一酯类物质己酸乙酯的生成。添加少量粗提物可降低正己醛、庚醛、辛酸、壬醛的生成,抑制了香肠异味的产生。添加类球红细菌粗提物促进了谷氨酸和天冬氨酸等鲜味氨基酸的产生,提高了鲜味和甜味氨基酸占比,对改善香肠风味有正向作用。

因类球红细菌粗提物中含有蛋白质(酶)、类胡萝卜素、辅酶 Q₁₀ 等物质,基于蛋白质组学、代谢组学等多组学阐明类球红细菌粗提物调控香肠风味品质的机理是未来的研究方向。本研究为传统中式香肠品质改善提供了一定理论依据。

参考文献

- [1] 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 H, ZHAO B, WU Q R, et al. Changes 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.]
- [2] 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 M Q, ZHANG J, SUN J. Effect of *staphylococcus simulans* NJ201 inoculation on the quality and antioxidant of fermented sausage[J]. Food Science, 2021, 43(4): 105-112.]
- [3] JI W, JINNA H, XIN Z, et al. Improving the flavor of fermented sausage by increasing its bacterial quality via inoculation with *Lactobacillus plantarum* MSZ2 and *Staphylococcus xylosum* YCC3 [J]. Foods, 2022, 11(5): 736.
- [4] 郭文瑞,韩云飞,杨扬,等.植物乳杆菌对发酵香肠蛋白质分解及游离氨基酸的影响[J].中国食品学报,2021,21(4):209-215. [GUO W R, HAN Y F, YANG Y, et al. The effect of *Lactobacillus plantarum* on the protein decomposition and free amino acids of fermented sausage[J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(4): 209-215.]
- [5] 张旭.川式酱香腊肠加工过程中内源酶对风味形成的影响[D].成都:成都大学,2021. [ZHANG X. Effects of endogenous enzymes on flavor formation during the processing of Sichuan sauce-scented sausage [D]. Chengdu: Chengdu University, 2021.]
- [6] CARBALLO D E, ANDRÉS S, GIRÁLDEZ F J, et al. The effects of storage and hop extract on aroma and flavour compounds in Balkan-style sausages packed under a CO₂-containing anaerobic atmosphere[J]. Heliyon, 2020, 6(10): e05251.

- [7] ZHAO L, SUN X, WU J, et al. Effects of allium mongolicum regel and its extracts on the quality of fermented mutton sausages [J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(1): 169–178.
- [8] 田明, 王玉伟, 李瑞锋, 等. 辅酶 Q₁₀ 等 5 种原料的保健食品纳入备案制目录管理的情况分析及启示 [J]. *食品科学*, 2022, 43(15): 320–326. [TIAN M, WANG Y W, LI R F, et al. Putting five health food of raw materials including coenzyme Q₁₀ under directory management: Analysis and its complications [J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 320–326.]
- [9] 段卓, 郭浩昱, 刘也嘉, 等. 油菜籽中类胡萝卜素及其抗氧化研究进展 [J/OL]. *中国油脂*: 1–8 [2023-05-23]. doi: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210565. [DUAN Z, GUO H Y, LIU Y J, et al. Research progress on carotenoids and their antioxidant properties in rapeseed [J/OL]. *China Oils and Fats*: 1–8 [2023-05-23]. doi: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210565.]
- [10] 徐靖. 超氧化物歧化酶及其应用的研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2013, 34(12): 387–391. [XU J. Research progress in superoxide dismutase and its application [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(12): 387–391.]
- [11] 方立超. 光合细菌益生特性的实验研究 [D]. 重庆: 第三军医大学, 2005. [FANG L C. Study of probiotic properties of photosynthetic bacteria [D]. Chongqing: Third Military Medical University, 2005.]
- [12] SALWA T, DUANGPORN K, PATTAMARAT R, et al. Dietary supplementation with probiotic *Rhodobacter sphaeroides* SS15 extract to control acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND)-causing *Vibrio parahaemolyticus* in cultivated white shrimp [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2021, 186: 107585–107585.
- [13] CHIU K H, LIU W S. Dietary administration of the extract of *Rhodobacter sphaeroides* WL-APD911 enhances the growth performance and innate immune responses of seawater red tilapia (*Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture*, 2014, 418: 32–38.
- [14] 刘英丽, 于青林, 万真, 等. 发酵剂抗氧化活性对发酵肉制品品质的影响研究进展 [J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 302–312. [LIU Y L, YU Q L, WAN Z, et al. Research progress on effects of antioxidant activity of starter on quality of fermented meat [J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 302–312.]
- [15] 范代超, 易倩, 刘洋, 等. 抗氧化剂对川式腊肉低温冷藏中挥发性风味物质的影响 [J]. *食品科学*, 2012, 33(16): 266–273. [FAN D C, YI Q, LIU Y, et al. Effect of antioxidants on volatile flavor components in Sichuan traditional bacon during chilling storage [J]. *Food Science*, 2012, 33(16): 266–273.]
- [16] 聂鑫, 赵志平, 吉莉莉, 等. 类球红细菌粗提物对冷藏期四川腊肠脂肪和蛋白质氧化的影响 [J]. *食品与发酵科技*, 2021, 57(1): 12–16. [NIE X, ZHAO Z P, JI L L, et al. Effect of crude extract from *Rhodobacter sphaeroides* on lipid and protein oxidation of cold storage Sichuan sausage [J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2021, 57(1): 12–16.]
- [17] HU Z L, YU P, YUN T, CHEN G P. A powerful hybrid *puc* operon promoter tightly regulated by both IPTG and low oxygen level [J]. *Biochemistry Moscow*, 2010, 75(4): 519–525.
- [18] TANG K, ZHAO Z. Advances in the coenzyme Q₁₀ biosynthesis pathway in *Rhodobacter sphaeroides* and the enhancement of coenzyme Q₁₀ production based on metabolic engineering [J]. *Agricultural Biotechnology*, 2019, 8(4): 1–6, 13.
- [19] 张旭, 王卫, 白婷, 等. 四川浅发酵香肠加工进程中挥发性风味物质测定及其主成分分析 [J]. *现代食品科技*, 2020, 36(10): 274–283. [ZHANG X, WANG W, BAI T, et al. Determination and principal component analysis of the volatile flavor substances during the processing of Sichuan light fermented sausage [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(10): 274–283.]
- [20] 王卫, 张旭, 张佳敏, 等. 四川酱香型风干腊肠加工贮藏特性及其“浅发酵”特征研究 [J]. *食品工业科技*, 2020, 42(1): 82–88. [WANG W, ZHANG X, ZHANG J M, et al. The processing and storage characteristics of Sichuan sauce-flavored air-dried sausage and its characteristics of "shallow fermentation" [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 42(1): 82–88.]
- [21] 金文刚, 赵萍, 刘俊霞, 等. 基于气相-离子迁移色谱结合化学计量学分析大鲵肉烤制过程中挥发性风味成分 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(21): 231–239. [JIN W G, ZHAO P, LIU J X, et al. Volatile flavor components analysis of giant salamander (*Andrias davidiauns*) meat during roasting process based on gas chromatography-ion mobility spectroscopy and chemometrics [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(21): 231–239.]
- [22] 赖宏刚. 冷鲜鸡与酱卤制品辐照综合保鲜技术研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2017. [LAI H G. Study on irradiation comprehensive preservation technology of cold fresh chicken and sauce brine products [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.]
- [23] 粟桂蓉, 彭钰媛, 周璐璐, 等. 传统土家腊肉加工过程中风味物质研究 [J]. *食品科技*, 2017, 42(3): 118–123. [SU G R, PENG Y Y, ZHOU L L, et al. Changes of volatile flavor compounds in the process of traditional Tujia bacon [J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(3): 118–123.]
- [24] 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 S L, HUANG M, et al. Effect of palatase on lipid hydrolysis, lipid oxidation and sensory attributes of Chinese sausage [J]. *Food Science*, 2015, 36(1): 51–58.]
- [25] 余力, 贺雅非, 王兆明, 等. 不同解冻方式对伊拉兔肉挥发性风味物质的影响 [J]. *食品科学*, 2015, 36(22): 95–101. [YU L, HE Z F, WANG Z M, et al. Effect of different thawing methods on volatile flavor compounds of hyla rabbit meat [J]. *Food Science*, 2015, 36(22): 95–101.]
- [26] 吴彩云, 张晓荣, 徐怀德, 等. 益生菌发酵果蔬汁生物活性成分及功能特性研究进展 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21(12): 323–334. [WU C Y, ZHANG X R, XU H D, et al. Research progress on bioactive components and functional properties of fruit and vegetable juice fermented by probiotics [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(12): 323–334.]
- [27] ALVAREZ M G, GONZALEZ-BARREIRO C, CANCHO-GRANDE B, et al. Relationships between Godello white wine sensory properties and its aromatic fingerprinting obtained by GC-MS [J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(3): 890–898.
- [28] ANNAN N T, POLL L, PLAHAR W A, et al. Aroma characteristics of spontaneously fermented Ghanaian maize dough for kenkey [J]. *European Food Research and Technology*, 2003, 217(1): 53–60.
- [29] 陈春梅. 超声波辅助炖煮羊肉汤的工艺优化及风味分析 [D]. 扬州: 扬州大学, 2021. [CHEN C M. Optimization of the technology and flavor analysis of the stewed sheep meat soup with ultrasonic-assisted [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.]
- [30] 吴倩蓉, 周慧敏, 李素, 等. 风干肠贮藏过程中挥发性风味物质的变化及异味物质分析 [J]. *食品科学*, 2019, 40(20): 208–216. [WU Q R, ZHOU H M, LI S, et al. Changes in volatile flavour compounds during storage and analysis of off-flavour substances in air-dried sausage [J]. *Food Science*, 2019, 40(20): 208–216.]
- [31] CASABURI A, PIOMBINO P, NYCHAS G J, et al. Bacteri-

- al populations and the volatilome associated to meat spoilage[J]. *Food Microbiology*, 2015, 45: 83–102.
- [32] 齐琳, 王帅, 苏晨, 等. 乳酸菌发酵核桃酸乳不良气味的形成与分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(14): 234–241. [QI L, WANG S, SU C, et al. Formation and analysis of the off-flavor of walnut yoghurt fermented by lactic acid bacteria[J]. *Food Science*, 2022, 43(14): 234–241.]
- [33] LUDWIG V, BERGHETTI M R P, RIBEIRO S R, et al. The effects of soybean storage under controlled atmosphere at different temperatures on lipid oxidation and volatile compounds profile[J]. *Food Research International*, 2021, 147: 110483.
- [34] ESTÉVEZ M, MORCUENDE D, VENTANAS S, et al. Analysis of volatiles in meat from Iberian pigs and lean pigs after refrigeration and cooking by using SPME-GC-MS[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2003, 51(11): 3429–3435.
- [35] GUILLEN M D, GOICOECHEA E. Formation of oxygenated α , β -unsaturated aldehydes and other toxic compounds in sunflower oil oxidation at room temperature in closed receptacles[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(1): 157–164.
- [36] 简佳良, 蔡江佳, 何红萍, 等. 两种海洋甲壳动物挥发性物质的研究[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(9): 240–249. [LIN J L, CAI J J, HE H P, et al. Studies on volatiles substances in two species of marine crustacean[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2015, 15(9): 240–249.]
- [37] RAJAMANI K, BALASUBRAMANIAN T, THIRUGANASAMBANDAN S S. Bioassay-guided isolation of triterpene from brown alga *Padina boergeseni* possess anti-inflammatory and anti-angiogenic potential with kinetic inhibition of β -carotene linoleate system[J]. *LWT*, 2018, 93: 549–555.
- [38] 孙宝国, 陈海涛. 食用调香术[M]. 第3版. 北京: 化学工业出版社, 2016. [SUN B G, CHEN H T. Edible perfumery[M]. Third edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.]
- [39] GU Z, CHEN D, HAN Y, et al. Optimization of carotenoids extraction from *Rhodobacter sphaeroides*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(6): 1082–1088.
- [40] 刘春云, 赵鑫琦, 孔令茹, 等. 桑甚白兰地对风干肠挥发性风味成分及品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(6): 244–253. [LIU C Y, ZHAO X Q, KONG L R, et al. Effects of mulberry brandy on volatile flavor components and quality of air-dried sausage[J]. *Food Science*, 2023, 44(6): 244–253.]
- [41] 邓文辉, 赵燕, 李建科, 等. 游离脂肪酸在几种常见食品风味形成中的作用[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(11): 422–425. [DENG W H, ZHAO Y, LI J K, et al. The role of free fatty acid in the flavor of several common foods[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(11): 422–425.]
- [42] 刘丽丽, 杨辉, 荆雄, 等. 基于 GC-IMS 和电子鼻技术分析贮藏容器对凤香型白酒香气成分的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(4): 257–263. [LIU L L, YANG H, JING X, et al. Influence of different storage containers on the flavor of Fengxiang Baijiu composition based on GC-IMS and electronic nose technology[J]. *Food Science*, 2022, 43(4): 257–263.]
- [43] 徐梦婷, 邵淑贤, 陈静, 等. 不同茶树品种工夫红茶挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(1): 281–290. [XU M T, SHAO S X, CHEN J, et al. Analysis of volatile components and key aroma components in congou black tea of different tea varieties[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(1): 281–290.]
- [44] 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.
- [45] 宋泽, 徐晓东, 许锐, 等. 不同部位牛肉炖煮风味特征分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 206–214. [SONG Z, XU X D, XU R, et al. Analysis of flavor characteristics of stewed beef from different carcass parts[J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 206–214.]
- [46] ZHANG L, LIU L, WANG K F, et al. Phosphate limitation increases coenzyme Q₁₀ production in industrial *Rhodobacter sphaeroides* HY01[J]. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 2019, 4(4): 212–219.
- [47] HIERRO E, LORENZO D, ORDÓ EZ J. Contribution of the microbial and meat endogenous enzymes to the free amino acid and amine contents of dry fermented sausages[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1999, 47(3): 1156.
- [48] GARCA I, DEZ V, ZUMALACRREGUI J M. Changes in nitrogen fractions and free amino acids during ripening of Spanish dried beef "cecina"[J]. *Journal of Muscle Foods*, 2007, 9(3): 257–266.
- [49] MONICA, ARMENTEROS, MARIA-CONCEPCION, et al. Biochemical and sensory properties of dry-cured loins as affected by partial replacement of sodium by potassium, calcium, and magnesium[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(20): 9699–9705.
- [50] 王琴, 李洪军, 杨莉, 等. 直投式商业发酵剂对发酵香肠品质特性的影响[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1–12[2023-05-23]. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033804. [WANG Q, LI H J, YANG L, et al. Effect of direct-throwing commercial starter cultures on the quality characteristics of fermented sausages[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*: 1–12[2023-05-23]. doi: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033804.]