

基于鲢鱼头和鱼排制备鱼味美拉德反应物微胶囊热稳定性的研究

于德阳, 马俐珍

Thermal Stability of Fish Flavored Maillard Reactant Microcapsules Based on Catfish Head and Fish Steak

YU Deyang and MA Lizhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090076>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蓝圆鱼油微胶囊的制备工艺优化及其稳定性

Preparation technology optimization and stability of microcapsule of fish oil from *Decapterus maruadsi*

食品工业科技. 2017(24): 181-186

微胶囊化生姜、枸杞、栀子提取物的ACE抑制率、苦味及稳定性研究

ACE Inhibitory Rate, Bitterness and Stability of Microencapsulated Extracts of Ginger, Chinese Wolfberry and *Gardenia jasminoides*

食品工业科技. 2021, 42(22): 47-54

纳豆微胶囊的制备及其稳定性

Preparation and stability of the natto microcapsules

食品工业科技. 2017(22): 157-162

美拉德反应产物的制备及在混合油脂微胶囊中的应用

Preparation of Maillard Reaction Products and Its Application on Microencapsulation of Mixed Oil

食品工业科技. 2020, 41(19): 166-171,178

柚皮苷/柠檬苦素微胶囊的制备、结构分析及特性研究

Preparation, Structural Analysis and Properties of Naringin/Limonin Microcapsules

食品工业科技. 2021, 42(18): 209-217

pH依赖型植物基微胶囊的制备和体外释药研究

Study on the preparation and drug release of pH-dependent plant microcapsules in vitro

食品工业科技. 2017(13): 74-77



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

于德阳, 马俐珍. 基于鲶鱼头和鱼排制备鱼味美拉德反应物微胶囊热稳定性的研究 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 18–26. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090076

YU Deyang, MA Lizhen. Thermal Stability of Fish Flavored Maillard Reactant Microcapsules Based on Catfish Head and Fish Steak[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 18–26. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090076

· 研究与探讨 ·

基于鲶鱼头和鱼排制备鱼味美拉德反应物 微胶囊热稳定性的研究

于德阳, 马俐珍*

(天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300392)

摘要:以鲶鱼头和鱼排为基料, 经过高压浸提、酶解、发酵、美拉德反应得到美拉德反应产物 (Maillard Reaction products, MRPs), 并采用微胶囊包埋技术制备微胶囊粉剂。为了研究 MRPs 的微胶囊粉剂热稳定性, 将 MRPs (A 样品) 和微胶囊粉剂 (B 样品) 配制成溶液, 分别在 90、121、160 °C 下加热 20 min, 各样品依次记为 A1、A2、A3 和 B1、B2、B3 样品。对各组样品进行电子鼻、固相微萃取/GC-MS 和差示扫描量热仪 (DSC) 分析。电子鼻 PCA 分析结果, 从主成分 1 上看, MRPs 的 A 样品 (未经热处理) 与其经过热处理后的样品 A1、A2、A3 之间的距离较大, 而 B 样品与 B1、B2、B3 之间的距离较小; GC-MS 分析, A 样品和 B 样品经不同热处理会降低 MRPs 中的挥发性风味物质种类, 且受热温度越高, 这种降低的趋势越明显, 但经过微胶囊包埋的样品 B, 其挥发性风味物质的种类和相对质量浓度均明显高于 A 样品; DSC 分析结果表明, MRPs 经过微胶囊包埋后, 出现明显吸热峰时的温度比 MRPs 时的温度提高了 40 °C, 可有效地拓宽 MRPs 的释放温度。综上所述, MRPs 经微胶囊包埋技术处理后, 对热的稳定性明显提高。

关键词:微胶囊, 热稳定, 鲶鱼, 美拉德反应物, 风味物质

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)14-0018-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090076



本文网刊:

Thermal Stability of Fish Flavored Maillard Reactant Microcapsules Based on Catfish Head and Fish Steak

YU Deyang, MA Lizhen*

(College of Food Science and Biotechnology, Tianjin Agriculture University, Tianjin 300392, China)

Abstract: Catfish head/fish fillet was used as the base material, and Maillard reaction products (MRPs) were obtained through high-pressure extraction, enzymatic hydrolysis, fermentation, and Maillard reaction, and microcapsule embedding technology was used to prepare micro capsule powder. In order to study the thermal stability of the microcapsule powder of MRPs, MRPs (sample A) and microcapsule powder (sample B) were prepared into solutions and heated at 90, 121, and 160 °C for 20 minutes. Each sample was recorded as A1, A2, A3 and B1, B2, B3 samples. The samples of each group were analyzed by electronic nose, solid phase microextraction/GC-MS and differential scanning calorimeter (DSC). According to the PCA analysis results of the electronic nose, from the main component 1, the distance between the A sample of MRPs (not heat-treated) and the heat-treated samples A1, A2, A3 were relatively large, while the distance between sample B and B1, B2 and B3 was small. GC-MS analysis showed that the different heat treatments of A sample and B sample would reduce the types of volatile flavor substances in MRPs, and the higher the heating temperature, the more obvious this reduction trend, but after microcapsule embedding in sample B, the type and relative mass concentration of volatile flavor substances were significantly higher than that of sample A. According to DSC analysis, after MRPs was embedded in

收稿日期: 2021-09-07

基金项目: 天津市淡水养殖产业技术体系创新团队 (水产品加工岗位) 项目 (ITTFRS2021000)。

作者简介: 于德阳 (1984-) (ORCID: 0000-0001-5083-8619), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 24673750@qq.com。

* 通信作者: 马俐珍 (1963-) (ORCID: 0000-0003-2744-7171), 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工原理与技术, E-mail: Malizhen-6329@163.com。

microcapsules, the temperature at which an obvious endothermic peak appears was 40 °C higher than that of MRPs, could effectively broaden the release temperature of MRPs. In summary, after MRPs was processed by microcapsule embedding technology, the thermal stability was significantly improved.

Key words: microcapsules; heat stable; catfish; Maillard reactants; flavor substances

微胶囊技术具有使食品功能成分损失少、延长食品货架期、遮盖和减少异味等优点,微胶囊技术已经在食品的多个领域广泛使用^[1]。微胶囊技术主要是指利用天然或合成高分子材料对固体的、液体的或气体的芯材进行包覆形成一种具有半透性或密封囊膜的微型胶囊的技术^[2],它具有保护物质免受环境条件影响,延长挥发性物质存储时间,隔离不可混合的化合物等优点^[3]。

目前,关于微胶囊技术的相关报道很多,包含油脂微胶囊化、酶和微生物的微胶囊化、防腐剂的微胶囊化、甜味剂的微胶囊化、酸味剂的微胶囊化、着色剂的微胶囊化、营养强化剂的微胶囊化、香精香料的微胶囊化等。如 Wang 等^[4]将鱼油制成粉状微胶囊,并测定其氧化稳定性,证明微胶囊化具有明显的防止鱼油氧化的作用。苏阳等^[5]研究得出利用 β -环糊精为壁材,鱼油为芯材制备鱼油微胶囊的最佳工艺条件为:芯材壁材比为 1:7、搅拌时间 2 h、搅拌温度 45 °C,包埋率为 90.75%,电镜观察微胶囊具有典型的柱状结构,制备微胶囊,具有吸湿性低的优点,因此可以长期保存。万义玲等^[6]采用复凝聚法制备鱼油微胶囊,壁材选用壳聚糖、海藻酸钠,结果表明:反应温度 60 °C 下具有最佳的效率及产率。刘伟^[7]通过对河蚌进行酶解,再进行美拉德反应,最后对美拉德反应物进行微胶囊包埋,结果显示:调味料芯材已被很好包埋,形成了基本呈球形的微胶囊。DSC 分析表明微胶囊调味料的玻璃态转变温度为 58.71 °C,高于常温,因此微胶囊调味料在常温下性质稳定。王正云等^[8]通过复凝聚法对青鱼内脏鱼油进行微胶囊包埋,研究结果表明:结果表明制得的鱼油微胶囊产品品质较好,贮藏期可较未包埋的鱼油分别延长 6 d 以上。李颖杰等^[9]通过对鱼糜酶解蛋白亚铁螯合肽微胶囊工艺,结果表明:微胶囊能有效保护芯材不被氧化,并且由于微胶囊的缓释作用,可以有效发挥其芯材的活性物质,并延长作用时间,为小肽金属螯合物的有效利用提供了参考依据。Sarkar 等^[10]以瓜尔胶和阿拉伯胶为复合壁材制得的薄荷油微胶囊在食品中的应用效果比单独以阿拉伯胶为壁材得到的微胶囊效果好。从以上例子中可以看出,虽然对微胶囊的研究较多,但对于水产品,尤其是利用鲶鱼头和鱼排制备鱼味美拉德反应物再制备微胶囊,并对其热稳定性进行研究的报道较少,而这又是实际应用中急需解决的问题。

因此本试验以前期鲶鱼头和鱼排为基料经过高压浸提、酶解、发酵、美拉德反应得到 MRPs 作为芯

材,添加量为 8%,再添加 0.3% 吐温-80 作为乳化剂,以 12% 麦芽糊精和 0.16% 大豆分离蛋白作为复合壁材制备出乳化液,喷雾干燥得到微胶囊粉剂。再以 MRPs 和微胶囊粉剂为研究对象,研究其经不同温度加热处理后风味物质的变化,探讨微胶囊包埋技术对稳定 MRPs 的应用效果,为其达到更好的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

革胡子鲶鱼 (*Clarias gariepinus*), 体重 1000~1500 g, 体长 30~35 cm 天津市德仁农业发展有限公司提供; 复合蛋白酶(酶活 40 万 U/g) 南宁东恒华道生物科技有限公司; 风味蛋白酶(3.6 万 U/g) 南宁东恒华道生物科技有限公司; SHI-59(木糖葡萄糖菌+戊糖片球菌+植物乳杆菌) 意大利萨科公司; 无水葡萄糖 秦皇岛骊骅淀粉有限公司; D-木糖、VB₁、牛磺酸、半胱氨酸、半胱氨酸盐酸盐 河北华恒化工有限公司; 氢氧化钠 天津鹏坤化工有限公司; 苹果酸 潍坊英轩实业有限公司; 麦芽糊精 秦皇岛骊骅淀粉有限公司; 大豆分离蛋白 河南万邦实业有限公司; 吐温-80 广东润滑化工有限公司(以上材料均为食品级); 2-甲基-3-庚酮 分析纯, 美国 Sigma 公司。

Agilent7890A/5975C 气相色谱仪 美国 Agilent 公司; HeraclesII 超快速气相电子鼻 法国 Alpha M.O.S 公司; DSC200F3 差示扫描量热分析仪 德国 NETZSCH 公司; YX-18LM 高压灭菌锅 上海三神医疗器械有限公司; WND-100 高速组织捣碎机 浙江省兰溪市伟能达电器有限公司; ATY124 精密分析天平 日本岛津公司; THZ-98AB 恒温振荡器 上海一恒科学仪器有限公司; ZWY-240 全温型多振幅轨道摇床 上海智城分析仪器制造有限公司; DW-50 调温电热器 南通利豪实验仪器有限公司; SX-GO7102 节能箱式电炉 天津市中环实验电炉有限公司; SDX-1 全自动风冷速冻箱 天津市特斯特达食品机械科技有限公司; 101-0A 型电热鼓风干燥箱 天津市华仪盛达实验仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 酶解发酵液、美拉德反应产物、微胶囊乳化液和微胶囊粉剂的制备 根据前期试验所得酶解发酵液、美拉德反应产物、微胶囊乳化液和微胶囊粉剂的制备方法制备样品。

1.2.1.1 基于酶解液的发酵液 (Fermentation broth based on enzymatic hydrolysis, FBEH) 的制备 鲶鱼

头/鱼排用绞肉机绞碎得到鱼骨肉泥,在鱼骨肉泥中加入 2 倍重的蒸馏水进行高压蒸煮(120 ℃/2 h)得到高压浸提液,冷却至 55 ℃,加入 1200 U/g 的复合蛋白酶(以鱼骨肉泥的比例计算),55 ℃ 酶解 2 h 时再加入 720 U/g 的风味蛋白酶,继续酶解 1 h,灭酶(煮沸保持 10 min)后用双层纱布过滤得到分步酶解液。在分步酶解液中接种 SHI-59 发酵剂,接种量为 0.024%,发酵温度 34 ℃,发酵时间 53 h 得到 FBEH。

1.2.1.2 美拉德反应产物(Maillard Reaction products, MRPs)的制备 在美拉德反应体系中依次加入 40% FBEH、2.5% 酵母提取物、0.3% 甘氨酸、1% 木糖、2% 葡萄糖、0.5% 半胱氨酸盐酸盐、0.25% 半胱氨酸、0.2% 丙氨酸、0.2% 牛磺酸、0.3% VB₁, 首先用 10% 苹果酸溶液调节反应体系的 pH 为 5.5,在温度保持 100 ℃ 条件下,进行美拉德反应时间为 1 h,然后用 2 mol/L NaOH 调节体系的 pH 为 7.0,再继续反应 1.5 h,得到 MRPs。

1.2.1.3 微胶囊乳化液的制备 在 1 L 的烧杯中依次加入蒸馏水、0.3% 吐温-80(乳化剂)、12% 麦芽糊精(壁材)、0.16% 大豆分离蛋白(壁材),用磁力搅拌器在 60 ℃ 加热搅拌使其完全溶解,然后加入 8% MRPs(芯材),使总量为 500 g,用高速剪切乳化机在 8000 r/min 下剪切 2 min,最后形成均匀的微胶囊乳化液。

1.2.1.4 微胶囊粉剂的制备 将得到的微胶囊乳化液进行喷雾干燥,得到微胶囊粉剂,喷雾干燥的工艺条件为:进风温度 180 ℃,出风温度 80 ℃,风机速度 45.0 Hz,蠕动泵转速 300 mL/h,撞针时间 3 s,撞针间隔 8 s。

1.2.2 热稳定性实验 将 1.2.1.2 中制备的 MRPs 用蒸馏水稀释成浓度为 3% 的稀释液(A 样品);将 1.2.1.4 中制备的微胶囊粉剂用蒸馏水稀释成浓度为 4.79% 的稀释液(B 样品),根据微胶囊的包埋率(62.67%),使 A 样品和 B 样品两者稀释液中含有的 MRPs 量相等。

将 A 样品和 B 样品分装入试管中(每一种稀释液 12 管),分别在常温常压、90 ℃ 常压、121 ℃、0.12 MPa、160 ℃、常压下加热 20 min,具体试验设计方案和字母表示方法见表 1 所示。为了比较分析样品经不同温度加热处理后,其对热的稳定性,分别对样品进行电子鼻、GC-MS 分析,并对 MRPs 和微

胶囊粉剂进行 DSC 分析。

1.2.3 指标测定

1.2.3.1 包埋率的测定 褐色的类黑精是美拉德反应的重要产物,褐变程度提供了一个可视化的测量手段。褐变程度(A₄₂₀)测定根据文献 [11] 的方法加以修改测定吸光值。本试验的芯材是 MRPs,因此选用 420 nm 处吸光度值表示芯材含量,最终结果越大,则表明褐色产物的生成量越多^[12]。将微胶囊乳液在 12000 r/min 下离心 15 min,取上清液(未包埋的芯材)和微胶囊乳液分别稀释 10 倍,在 420 nm 波长处测吸光值。

$$\text{包埋率}(\%) = \left(1 - \frac{A_{420\text{上清液稀释液}}}{A_{420\text{微胶囊乳液稀释液}}} \right) \times 100$$

1.2.3.2 HeraclesII 超快速电子鼻分析 本试验参照陈援援等^[13]的方法并稍作修改,将处理后的 4 组稀释液,称取 7 g 样品于 20 mL 顶空样品瓶中,将样品在 55 ℃ 水浴锅中水浴 20 min,用 10 mL 进样针吸取顶空瓶中 5 mL 气体,手动进样注入电子鼻进样口中。试验条件:进样口温度 200 ℃,持续进样时间 40 s,捕集并分流速率 10 mL/min,柱温的程序升温方式 0.5 ℃/min 升到 100 ℃,1 ℃/min,100~200 ℃,采集时间为 140 s。

1.2.3.3 挥发性成分的 GC-MS 分析 参照雷虹^[14]的方法并做修改将 8 g 样品稀释液加入 20 mL 顶空样品瓶中,加 5 mL 的饱和 NaCl 溶液和 2 μL 的 2-甲基-3-庚酮溶液(1 μg/mL),放入转子后置于磁力搅拌器上,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 ℃ 下吸附 45 min 后拔出,萃取头在 GC 进样口(250 ℃)下解吸附 4 min。

GC 条件:TR-5 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,手动进样;升温程序:45 ℃ 保持 2 min,以 6 ℃/min 升温到 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 m/z;溶剂延迟时间为 1 min。风味化合物相对于 2-甲基-3 庚酮的含量,计算公式如下:

$$C = \frac{A_x \times C_0 \times V \times 1000}{A_0 \times m}$$

式中:C 为所测定的挥发性化合物浓度(μg/kg);A_x 为测定挥发性化合物的峰面积(AU·min);C₀ 为内标物的浓度(1 μg/mL);A₀ 为内标物的峰面积(AU·min);V 为内标物的进样量(μL);m 为所测定样品的质量(g)。

1.2.3.4 DSC 分析 用十万分之一的天平称分别称取 10 mg 左右的样品(样品 A 为 MRPs 液,样品 B 为微胶囊干粉)于 DSC 特制的铝盒中,封口后放入仪器中进行扫描。扫描条件以空铝盒为参比,氮气流

表 1 试验设计方案

Table 1 Experimental design scheme

组别	常温常压	90 ℃常压	121 ℃, 0.12 MPa	160 ℃常压	处理时间(min)
第1组	A、B	—	—	—	20
第2组	—	A1、B1	—	—	20
第3组	—	—	A2、B2	—	20
第4组	—	—	—	A3、B3	20

量为 60 mL/min, 空气流量为 20 mL/min, 以 10 °C/min 的扫描速率从 25 °C 升至 300 °C 结束, 绘制 DSC 曲线并进行分析。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 软件、Origin10.0 软件进行图表制作, 采用 IBM SPSS Statistics 19 软件进行显著性分析, PCA 分析, 差异显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 热处理后 MRPs 和微胶囊粉剂稀释液的电子鼻分析

电子鼻是气味特征分析中常用的仪器, 不同传感器对不同气味物质的灵敏性不同。电子鼻传感器中不同金属氧化物半导体型化学传感元件所对应的敏感物质类型不同^[15], 经过不同的温度处理后的稀释液主成分风味物质的种类和相对含量不同, 因此在传感器上呈现不同的气味感应信号^[16]。因此可以通过传感器比较不同气味的差异。

由图 1(a)可知, PC1、PC2 的方差贡献率分别为 75.62% 和 18.52%, 总贡献率为 94.14%, 说明在整体香气成分水平上各组样品中主成分可以很好地反映多指标信息^[17-18]。在主成分 1 上, 从距离上来看, MRPs 的 A 样品(未经热处理), 与其经过高温处理后的样品 A1、A2、A3 之间的距离很大, 说明 MRPs 经过热处理后的香气损失比例较大, 但 A1、A2、A3 之间的距离很近, 这一现象表明, MRPs 的热稳定性较差, 受热处理会显著影响它的香味成分, 也就是说, 如果将 MRPs 直接添加到某一肉制品或鱼糜制品中, 随着进一步的加热工序将会影响到 MRPs 作用的发挥。而经过微胶囊包埋后的稀释液 B, 与经过高温处理后的稀释液 B1、B2、B3 之间的距离相对较小, 说明经过高温处理后的香气损失比例较小, 微胶囊包埋可提高 MRPs 的热稳定性。在主成分 2 上, A、A1、A2、A3 都位于负向端, 而 B、B1、B2、B3 大部分都位于正向端^[19]。

判别因子分析(DFA)是在 PCA 的基础上, 对不同气味的信号数据进一步优化, 将气味数据的差异性扩大, 用少数的几个因子来描述多因素间的联系, 以达到用较少的因子去反映原数据大部分信息^[20]。由图 1(b)可知第 1 和第 2 主成分贡献率分别为 67.1% 和 25.5%, 总贡献率为 92.6%, 说明 DFA 表示样本的整体信息是可信的, 图中 A2、A3 距离较近较难区分, 结合 PCA 的分析可知, 可能是由于其耐热性差, 高温处理导致挥发性香气成分挥发严重, 而 B1、B2、B3 距离较远, 可以完全分开, 说明在加热过程中挥发性物质的峰度是逐渐减小的。

2.2 热处理对 MRPs 和微胶囊粉剂稀释液挥发性风味物质的影响

热处理对 MRPs 和微胶囊粉剂稀释液挥发性风味物质的影响结果见表 2 所示。从表 2 中可以看

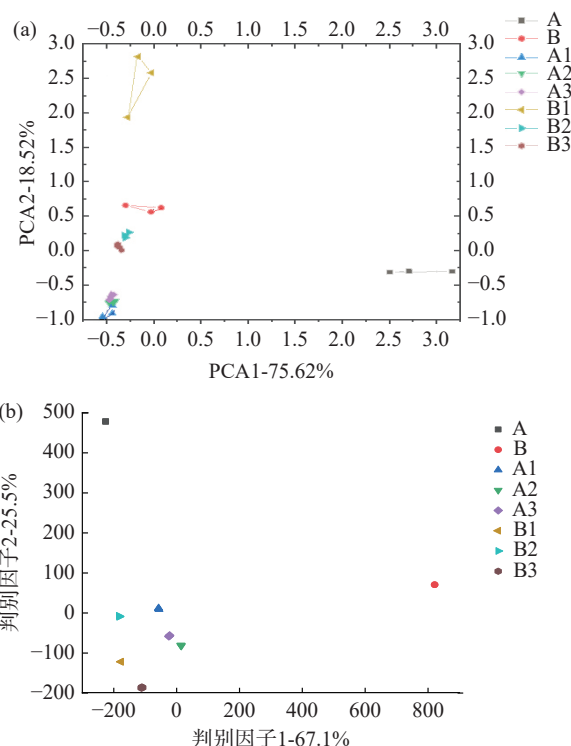


图 1 热处理对 MRPs 和微胶囊粉剂稀释液的 PCA 及判别因子(DFA)分析图

Fig.1 PCA and discriminant factor (DFA) analysis diagram of heat treatment on MRPs and microcapsule powder diluent

出, 从 8 组样品中共检出挥发性风味化合物有 7 大类 96 种, 其中酸类 18 种、胺类 13 种、吡嗪类 7 种、醇类 14 种、醛类 11 种、酮类 13 种、酯类 10 种。

分析发现, A 样品和 B 样品经不同热处理会显著降低 MRPs 中的挥发性风味物质种类, 且受热温度越高, 这种降低的趋势越明显, 如 A、A1、A2、A3 的挥发性风味物质依次降低为 41、30、25、16 种; B、B1、B2、B3 的挥发性风味物质种类依次降低为 44、42、34、27, 其中 A1、A2、A3 中的胺类分别为 15.60、1.23、0.59 $\mu\text{g/kg}$, 而 B1、B2、B3 胺类分别为 48.45、19.29、3.42 $\mu\text{g/kg}$, 可以明显看出 B3 样品的酸类、胺类等物质有明显降低现象^[21], 因为酸类和胺类挥发性比较强。同样热处理温度下, B 样品的挥发性物质种类及胺类均显著高于 A 样品。这是因为经微胶囊包埋后随着温度升高, 经热处理后油-水界面的蛋白质分子结构展开, 分子内部带电基团和氨基酸残基暴露, 界面蛋白紧密结合, 在油滴表面形成蛋白膜, 使得蛋白质分子结构伸展、松散, 分子柔性增强对芯材起到保护作用^[22-23]。

分析发现, A1、A2、A3 中的吡嗪类物质分别为 7.18、3.83、2.61 $\mu\text{g/kg}$ 而 B1、B2、B3 中吡嗪类物质分别为 9.86、11.32、10.26 $\mu\text{g/kg}$ 。A1、A2、A3 中的醇类物质分别为 6.89、4.68、1.70 $\mu\text{g/kg}$ 而 B1、B2、B3 中醇类物质分别为 9.35、5.98、3.59 $\mu\text{g/kg}$ 。

醛类物质气味阈值较低, 具有脂香气味, 是肉类香气的重要指标^[24], A1、A2、A3 中的醛类物质分别

表 2 热处理对 MRPs 和微胶囊粉剂稀释液的 GC-MS 分析结果
Table 2 GC-MS analysis results of heat treatment on MRPs and microcapsule powder diluent

编号	种类	化合物名称	相对质量浓度(μg/kg)							
			A	B	A1	A2	A3	B1	B2	B3
1	酸类(18种)	异戊酸	1.76	—	—	—	1.11	—	0.79	—
2		2-甲基丁酸	0.37	—	—	—	—	—	—	—
3		三氟乙酸	—	2.08	1.17	—	—	11.70	—	0.32
4		2-二甲基(乙烯基)硅氧基十三酸	—	0.34	—	—	—	—	—	—
5		亚硫酸	—	0.37	—	1.51	—	0.67	0.28	—
6		1,1-二甲基丙基-2-乙基己酸	—	0.51	—	—	—	—	—	—
7		全氟丙酸	—	—	3.17	0.35	—	—	—	—
8		膦酰乙酸	—	—	0.44	—	—	—	—	—
9		丁酸	—	—	0.87	1.51	—	—	—	—
10		3-环戊基丙酸	—	—	0.40	—	—	—	—	—
11		丁二酸	—	—	0.66	0.98	0.78	—	—	—
12		醋酸	—	—	—	2.84	—	0.75	—	—
13		2-氨基-6-甲基苯甲酸	—	—	—	0.70	—	—	—	—
14		异丁酸	—	—	—	0.39	—	—	—	—
15		富马酸	—	—	—	1.51	0.42	—	—	—
16		2-甲基丙酸	—	—	—	—	—	6.31	—	—
17		4-乙基苯甲酸	—	—	—	—	—	4.80	—	—
18		2-乙基丁酸	—	—	—	—	—	—	—	0.32
		合计	2.13	3.30	6.71	9.79	2.31	24.23	1.07	0.64
1	胺类(13种)	甲胺	14.18	12.34	—	—	0.33	6.76	5.53	1.45
2		N-甲基-2-羟基乙胺	0.51	—	—	—	—	—	—	—
3		N,N'-二甲基乙二胺	3.62	3.52	—	—	—	—	—	—
4		N-甲基单乙醇胺	3.62	3.4	—	—	—	—	—	—
5		草酰胺	3.11	2.76	—	—	—	1.13	0.99	1.66
6		异庚胺	—	8.78	—	—	—	1.54	—	—
7		1-苄环胺	—	0.99	—	—	—	—	1.03	—
8		2-辛胺	—	—	7.07	—	—	19.24	8.58	—
9		二苯乙胺	—	—	1.46	—	—	—	—	—
10		4-甲基-2-六胺	—	—	7.07	1.23	—	19.24	3.16	—
11		苯乙胺	—	—	—	—	0.26	—	—	—
12		1,2-丙二胺	—	—	—	—	—	0.54	—	—
13		乙酰胺	—	—	—	—	—	—	—	0.31
		合计	25.04	31.79	15.60	1.23	0.59	48.45	19.29	3.42
1	吡嗪类(7种)	2,5-二甲基吡嗪	5.57	6.67	2.55	1.74	1.67	6.32	4.52	4.20
2		2,6-二甲基吡嗪	5.57	6.67	2.55	1.74	—	0.43	4.52	4.20
3		2-乙基-6-甲基吡嗪	—	0.91	—	—	—	0.59	0.42	0.36
4		2-乙基-5-甲基吡嗪	—	0.91	—	—	—	0.59	0.42	0.36
5		2-甲基-3-甲硫基吡嗪	0.69	0.78	0.54	0.35	0.27	—	—	—
6		三甲基吡嗪	—	—	0.87	—	0.67	1.93	1.44	1.14
7		2,5-二甲基-3-(2-甲基丁基)吡嗪	—	—	0.67	—	—	—	—	—
		合计	11.83	15.94	7.18	3.83	2.61	9.86	11.32	10.26
1	醇类(14种)	2,5-二甲基-3-己醇	2.18	—	2.05	1.90	—	—	—	—
2		2-甲基-3-庚醇	1.61	1.77	1.55	1.12	0.97	1.55	1.32	1.12
3		5-壬醇	2.30	1.77	0.36	—	—	1.74	1.34	0.73
4		1,2-己二醇	0.47	0.88	—	—	0.35	0.64	—	—
5		2,2-二甲基-3-庚醇	0.36	—	—	0.35	—	—	—	—
6		芳樟醇	2.49	2.42	1.67	0.68	0.38	1.60	0.55	0.32
7		3,4-二羟基苯乙二醇	0.33	—	—	—	—	—	—	—
8		2,5-二甲基环己醇	0.36	—	—	—	—	—	—	—
9		1-庚醇	—	2.58	—	—	—	0.96	—	—
10		2-乙基-1-己醇	0.85	0.61	—	—	—	0.45	—	—
11		1-辛醇	—	1.17	—	—	—	0.65	—	—

续表 2

编号	种类	化合物名称	相对质量浓度(μg/kg)							
			A	B	A1	A2	A3	B1	B2	B3
12		1- 戊烯 -3- 醇	1.57	1.86	1.26	0.63	—	1.76	—	—
13		2- 呋喃甲醇	—	—	—	—	—	—	1.03	—
14		1-辛烯-4-醇	—	—	—	—	—	—	1.74	1.42
		合计	12.52	13.06	6.89	4.68	1.70	9.35	5.98	3.59
1	醛类(11种)	苯甲醛	1.39	0.92	0.55	0.48	0.33	0.80	0.31	0.21
2		苯乙醛	0.66	0.58	1.05	0.98	0.48	0.50	0.45	—
3		2,4-二羟基苯甲醛	1.86	1.72	—	—	—	1.52	—	—
4		2-丙基-2-庚烯醛	1.83	1.68	0.65	0.52	—	1.23	0.96	0.82
5		癸醛	0.59	0.52	—	0.49	—	0.38	0.28	0.20
6		3-甲基-丁醛	—	0.30	—	—	—	0.2	—	—
7		5- 甲基 -2- 噻吩甲醛	—	—	0.30	—	—	—	—	—
8		己醛	—	—	—	—	0.24	—	—	—
9		糠醛	—	—	—	—	—	—	0.35	—
10		庚醛	2.63	2.80	0.60	—	—	2.54	1.13	0.43
11		2,4-壬二烯醛	—	—	—	—	—	—	0.31	0.25
		合计	8.96	8.52	3.15	2.47	1.05	7.17	3.79	1.91
1	酮类(13种)	4-辛酮	0.62	0.67	0.46	0.35	0.31	0.45	0.43	0.22
2		2-甲基-4-辛酮	1.24	1.16	1.05	—	—	0.54	0.36	—
3		2,6-二甲基-4-庚酮	0.86	0.93	0.63	—	—	—	—	—
4		5-壬酮	8.48	5.27	5.33	4.32	0.35	2.54	1.94	0.86
5		2,2-二甲基-3-己酮	0.84	0.95	—	—	—	0.76	0.34	—
6		2,4-二甲基-3-庚酮	1.83	2.07	—	—	—	1.96	1.23	0.93
7		3-甲基-4-庚酮	2.05	1.95	—	—	—	1.86	1.55	1.18
8		二氢-5-丙基(3h)-呋喃酮	0.36	0.45	—	—	—	0.32	—	0.32
9		3- 乙基 -4-庚酮	—	0.51	—	—	—	—	—	—
10		2,3-丁二酮	—	—	0.61	0.56	—	—	—	—
11		1-(2,4,6-三羟基苯基)-乙酮	—	0.82	—	—	—	—	—	—
12		茴香酮	—	—	—	—	—	0.75	—	—
13		2-庚酮	—	—	—	—	—	—	0.67	0.21
		合计	16.28	14.78	8.08	5.23	0.66	9.18	6.52	3.72
1	酯类(10种)	甲酸庚酯	—	—	—	—	—	—	—	—
2		乙酸乙酯	0.36	—	—	—	—	—	—	—
3		戊酸丁酯	0.32	—	—	—	—	—	—	—
4		2- 丁基四氢呋喃化合物	0.36	—	—	—	—	—	—	—
5		异戊酸异丁酯	1.70	0.62	—	0.52	—	—	—	—
6		甲酸庚酯	—	2.58	—	—	—	2.33	1.95	1.67
7		氨基甲酸甲酯	—	3.47	—	—	—	3.20	2.30	0.63
8		异戊酸异丁酯	—	—	0.63	—	—	0.25	—	—
9		巴豆酸戊酯	—	—	—	—	—	—	—	—
10		氯甲酸己酯	—	0.85	—	—	—	0.76	0.52	0.36
		合计	2.74	7.52	0.63	0.52	—	6.54	4.77	2.66
		总计	79.50	94.91	48.24	27.75	8.92	114.78	52.74	26.20

注: 表中带“—”表示未检测到。

为 3.15、2.47、1.05 μg/kg 而 B1、B2、B3 中醛类物质分别为 7.17、3.79、1.91 μg/kg。新生成的 2,4-壬二烯醛, 具有明显的脂肪香气, 这可能是因为 MRPs 中含有的脂肪, 随着温度的升高加速了油脂的氧化降解, 形成了新的风味物质^[25-26]。

酮类物质由脂肪氧化和美拉德反应产生, 具有清香、奶油香及果香等令人愉快的香气^[27], 如新生成的 2-庚酮等。A1、A2、A3 中的酮类物质分别为 8.08、5.23、0.66 μg/kg 而 B1、B2、B3 中酮类物质分别为

9.18、6.52、3.72 μg/kg。醛类、酮类和醇类均比 A3 有明显增加趋势, 并有新的风味物质生成, 尤其是醇类和醛类。醇类化合物主要由脂质氧化降解产生, 大多数醇类化合物是由脂质氧化和蛋白质水解产生的。如 1-辛烯-3-醇为直链醇, 由脂质氧化降解产生, 有蘑菇香气; 芳樟醇有清香香气, 对美拉德反应物的整体香气有明显的修饰作用^[28]。

A1、A2、A3 中的酯类物质分别为 0.63、0.52、0 μg/kg 而 B1、B2、B3 中酯类物质分别为 6.54、4.77、

2.66 $\mu\text{g/kg}$ 。进一步分析发现 B、B1、B2、B3 样品中挥发性风味物质的相对质量总浓度分别为 94.91、114.78、52.74、26.20 $\mu\text{g/kg}$, 而 A、A1、A2、A3 样品中挥发性风味物质的相对质量总浓度分别为 79.50、48.24、27.75、8.92 $\mu\text{g/kg}$, B1、B2、B3 样品中挥发性风味物质的相对质量总浓度分别是相对应的 A1、A2、A3 的 2.38、1.90、2.94 倍。综上所述,MRPs 经微胶囊包埋后的样品 B 耐热性优于未经包埋的 MRPs(样品 A)。

2.3 对 MRPs 和微胶囊粉剂的差式量热扫描 (DSC) 分析

差示扫描量热仪(DSC)反映的是与热效应相关的物理或化学变化。在程序升温条件下,利用仪器中的热流传感器测量待测样品和参照物之间的热流差值来反映出相关的热效应。DSC 能分析微胶囊颗粒发生相变时的起始温度,并了解微胶囊产品的耐热情况^[29-30]。

MRPs(A 样品)的 DSC 曲线见图 2 所示。从图 2 中可以看出,其裂解温度范围为 110~150 $^{\circ}\text{C}$,明显的吸热峰出现时的温度是 115 $^{\circ}\text{C}$ 。当温度达到 120 $^{\circ}\text{C}$ 时,吸热完成。图 3 所示为以 MRPs 为芯材的微胶囊粉剂(B 样品)DSC 曲线,从图 3 中可以看出,其裂解温度范围为 120~300 $^{\circ}\text{C}$,明显的吸热峰出现时的温度是 155 $^{\circ}\text{C}$,在 180 和 250 $^{\circ}\text{C}$ 又分别出现两个拐点,出现明显吸热峰时的温度比 A 样品的温度提高了 40 $^{\circ}\text{C}$,这说明 MRPs 芯材经壁材包埋后可以保护挥发性物质,使其在加热过程中挥发速度减慢^[31]。一般来说,微胶囊内无定形物质因受热会发生玻璃化转变,热特性和力学特性、介电特性等会发生明显变化,只有当包埋基质处于玻璃态的内层受到足够的拉力,产生裂痕时才会导致风味包埋物的释放^[32],本试验的微胶囊壁材是麦芽糊精和大豆分离蛋白,这说明本试验所用的壁材种类和比例恰当,起到很好的包埋作用。从图 3 的对比热降解曲线可以看出,MRPs 的热降解曲线变化程度明显高于微胶囊变化曲线。综上所述,通过微胶囊包埋 MRPs 后,可有效地拓宽 MRPs 的释放温度,增加其在热释放领域的应用范围,因此热稳定性更好。

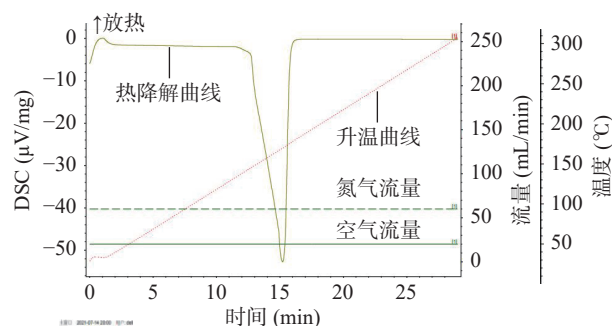


图2 MRPs(样品A)的DSC曲线图

Fig.2 Thermal degradation (DSC) curve of MRPs (sample A)

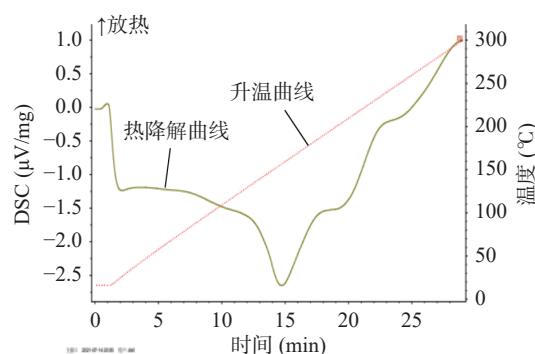


图3 以MRPs为芯材的微胶囊(样品B)DSC曲线图

Fig.3 Thermal degradation (DSC) curve of microcapsules with MRPs (sample B) as core material

3 结论

通过电子鼻的 PCA、DFA 分析可知,经微胶囊包埋后的稀释液 B2、B3 热稳定性优于其他稀释液,通过 GC-MS 测定不同稀释液的挥发性风味物质可知,在同样温度处理后,B1、B2、B3 样品的挥发性风味物质种类分别是 A1、A2、A3 样品的 1.4、1.36、1.69 倍;B1、B2、B3 样品的挥发性物质的质量浓度分别是 A1、A2、A3 的 2.38、1.9、2.94 倍。通过 DSC 的曲线图也可以看出,MRPs 的裂解温度范围为 110~150 $^{\circ}\text{C}$,以 MRPs 为芯材的微胶囊曲线图,其裂解温度范围为 120~300 $^{\circ}\text{C}$,出现明显吸热峰时的温度比 MRPs 时的温度提高了 40 $^{\circ}\text{C}$,因此,本试验以 MRPs 为芯材的微胶囊热稳定性优于未经包埋的 MRPs,使通过微胶囊包埋制备美拉德反应调味料得到更广泛的应用。本实验也有不足之处,由于选择的壁材种类有限,包埋率并不是太高,因此后续研究还应进一步探究,提高包埋率。

参考文献

- [1] 卢艳慧,李迎秋.微胶囊技术的研究进展及在食品行业中的应用[J].中国调味品,2021,46(3):171-174. [LU Yanhui, LI Yingqiu. Research progress of microencapsulation technology and its application in the food industry[J]. China Seasoning, 2021, 46(3): 171-174.]
- [2] 杨小兰,袁娅,谭玉荣,等.纳米微胶囊技术在功能食品中的应用研究进展[J].食品科学,2013,34(21):359-368. [YANG Xiaolan, YUAN Ya, TAN Yurong, et al. Research progress in the application of nano-microencapsulation technology in functional foods[J]. Food Science, 2013, 34(21): 359-368.]
- [3] XIAO Zuobing, LIU Wanlong, ZHU Guangyong, et al. A review of the preparation and application of flavour and essential oils microcapsules based on complex coacervation technology[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(8): 1482-1494.
- [4] WANG R, TIAN Z, CHEN L. A novel process for microencapsulation of fish oil with barley protein[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2735-2741.
- [5] 苏阳,匡立学,周金星,等.包络结合法制备 β -环糊精鱼油微胶囊[J].食品与发酵工业,2012,38(10):76-80. [SU Yang, KUANG Lixue, ZHOU Jinxing, et al. Preparation of β -cyclodextrin fish oil microcapsules by envelope binding method[J]. Food and

- Fermentation Industry, 2012, 38(10): 76–80.]
- [6] 万义玲, 洪鹏志, 邱彩虹. 鱼油(南海低值鱼)微胶囊化工艺的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(5): 120–125. [WAN Yiling, HONG Pengzhi, QIU Caihong. Study on the microencapsulation technology of fish oil (low value fish in South China Sea)[J]. Food Science, 2007, 28(5): 120–125.]
- [7] 刘伟. 超声波处理对河蚌肉酶解物美拉德反应的影响及其微囊化调味料制备[D]. 长春: 吉林大学, 2019. [LIU Wei. Effect of ultrasonic treatment on Maillard reaction of enzymatic hydrolysate of mussel meat and preparation of microencapsulated seasoning [D]. Changchun: Jilin University, 2019.]
- [8] 王正云, 展跃平, 钟川, 等. 复凝聚法青鱼内脏鱼油微胶囊的制备及其性能研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 155–161. [WANG Zhengyun, ZHAN Yueping, ZHONG Chuan, et al. Study on the preparation and properties of black carp viscera oil microcapsules with complex coacervation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(23): 155–161.]
- [9] 李颖杰, 林慧敏, 吕耿强, 等. 鱼糜酶解蛋白亚铁螯合肽微胶囊工艺及抗氧化研究[J]. 中国食品学报, 2017, 10(17): 116–120. [LI Yingjie, LIN Huimin, LU Gengqiang, et al. Study on the microcapsule technology and antioxidant of enzymatic hydrolyzed protein ferrous peptide of surimi[J]. Chinese Journal of Food Science, 2017, 10(17): 116–120.]
- [10] SARKARS, GUPTAS, VARIYAR P S, et al. Irradiation depolymerized guar gum as partial replacement of gum Arabic for microencapsulation of mint oil[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(4): 1685–1694.
- [11] BHINDER S, SINGH B, KAUR A, et al. Effect of infrared roasting on antioxidant activity, phenolic composition and Maillard reaction products of Tartary buckwheat varieties[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 240–251.
- [12] RAO M S, CHAWLA S P, CHANDER R, et al. Antioxidant potential of Maillard reaction products formed by irradiation of chitosan-glucose solution[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 83(2): 714–719.
- [13] 陈媛媛, 于德阳, 秦建鹏, 等. 外源抑制物对风干肠风味变化的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 215–225, 231. [CHEN Yuanyuan, YU Deyang, QIN Jianpeng, et al. Effects of exogenous inhibitors on the microbial community composition and flavor changes of air-dried sausage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 215–225, 231.]
- [14] 雷虹. 传统风干肉在风干和贮藏过程中品质及风味物质的变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018. [LEI Hong. Study on the quality and flavor changes of traditional air-dried meat during air-drying and storage[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.]
- [15] RAJAMAKI T, ALAKOMI H L, RITCANEN T A, et al. Application of an electronic nose for quality assessment of modified atmosphere packaged poultry meat[J]. Food Control, 2006, 17: 5–13.
- [16] 李迎楠, 刘文营, 张顺亮, 等. 反应时间对牛肉、牛骨美拉德反应产物风味品质的影响[J]. 肉类研究, 2016, 30(5): 1–5. [LI Yingnan, LIU Wenying, ZHANG Shunliang, et al. Effect of reaction time on the flavor quality of beef and beef bone Maillard reaction products[J]. Meat Research, 2016, 30(5): 1–5.]
- [17] 陈辰, 鲁晓祥, 张鹏, 等. 玫瑰香普通贮藏后货架品质的电子鼻结合 GC-MS 检测[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 313–320. [CHEN Chen, LU Xiaoxiang, ZHANG Peng, et al. Electronic nose combined with GC-MS detection of shelf quality of rose fragrance after ordinary storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(10): 313–320.]
- [18] 贡慧, 史智佳, 杨振, 等. 电子鼻快速检测不同煮制时间的酱牛肉风味[J]. 肉类研究, 2014, 28(11): 34–37. [GONG Hui, SHI Zhijia, YANG Zhen, et al. Electronic nose quickly detects the flavor of sauced beef with different cooking time[J]. Meat Research, 2014, 28(11): 34–37.]
- [19] 孙学颖, 辛晓琦, 刘建林, 等. 不同配料及发酵剂对羊肉发酵香肠滋味及香气成分的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 21–27, 36. [SUN Xueying, XIN Xiaoqi, LIU Jianlin, et al. Effects of different ingredients and starters on the taste and aroma components of fermented lamb sausage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(11): 21–27, 36.]
- [20] 邓龙, 刘雄飞, 刘贤标, 等. GC-MS-O 结合电子鼻对橄榄油挥发性成分的分析与鉴别[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 276–284. [DENG Long, LIU Xiongfei, LIU Xianbiao, et al. Analysis and identification of volatile components in olive oil by GC-MS-O combined with electronic nose[J]. Chinese Journal of Food Science, 2019, 19(5): 276–284.]
- [21] 孙丽平, 汪东风, 徐莹, 等. pH 和加热时间对美拉德反应挥发性产物的影响[J]. 食品工业科技, 2009, 4(30): 122–125. [SUN Liping, WANG Dongfeng, XU Ying, et al. The influence of pH and heating time on the volatile products of Maillard reaction[J]. Food Industry Science and Technology, 2009, 4(30): 122–125.]
- [22] 孙天颖, 程红, 陈珂玥, 等. 热处理对葵花分离蛋白结构特性的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(6): 69–71. [SUN Tianying, CHENG Hong, CHEN Keyue, et al. The effect of heat treatment on the structural characteristics of sunflower protein isolate[J]. Chinese Condiments, 2021, 46(6): 69–71.]
- [23] 陈艾霖, 刘璐, 宋春勇, 等. 热处理对罗非鱼分离蛋白乳液稳定性的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(5): 1–7. [CHEN Ailin, LIU Lu, SONG Chunyong, et al. Effect of heat treatment on the stability of tilapia protein isolate emulsion[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(5): 1–7.]
- [24] HERRERA JIMENEZ M, ESCALONA BUENDIA H, PONCE ALQUICIRA E, et al. Release of five indicator volatiles from a model meat emulsion to study phase contribution to meat aroma[J]. International Journal of Food Properties, 2007, 10(4): 807–818.
- [25] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 水浴复热时间对猪肉糜制品挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2018, 40(2): 186–191. [ZHANG Kaihua, ZANG Mingwu, ZHANG Zheqi, et al. Effect of reheating time in water bath on volatile flavor of minced pork products[J]. Food Science, 2018, 40(2): 186–191.]
- [26] 王强. 香肠脂肪氧化动力学特性及温度对其影响研究[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 130–133. [WANG Qiang. Study on the kinetic characteristics of sausage fat oxidation and the effect of temperature on it[J]. Food Science, 2013, 34(11): 130–133.]

- [27] TANAKA T, YAMAUCHI T, KATSUMATA R, et al. Comparison of volatile components in commercial Itohiki-Natto by solid phase microextraction and gas chromatography[J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2003, 50(6): 278–285.
- [28] 崔晓莹, 张庆永, 刘登勇, 等. 德州扒鸡关键挥发性风味物质分析[J]. *肉类研究*, 2019, 33(11): 50–54. [CUI Xiaoying, ZHANG Qingyong, LIU Dengyong, et al. Analysis of key flavor substances in Dezhou braised chicken[J]. *Meat Research*, 2019, 33(11): 50–54.]
- [29] 赵婕, 王明力, 汤翠, 等. 基于复合壁材的薏米糠油微胶囊制备及热稳定性研究[J]. *油脂深加工*, 2018, 43(3): 70–74. [ZHAO Jie, WANG Mingli, TANG Cui, et al. Preparation and thermal stability of barley bran oil microcapsules based on composite wall materials[J]. *Deep Processing of Oils and Fats*, 2018, 43(3): 70–74.]
- [30] 李孟强, 万涛, 彭长根, 等. 植物绝缘油中抗氧化剂的PDSC评价和选用[J]. *可再生资源*, 2021, 39(6): 711–715. [LI Mengqiang, WANG Tao, PENG Changgen, et al. PDSC evaluation and selection of antioxidants in plant insulating oil[J]. *Renewable Resources*, 2021, 39(6): 711–715.]
- [31] 蒋爱月, 马红俊, 宋国宝, 等. 甜橙油微胶囊的制备及其热释放研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(4): 753–759. [JIANG Aiyue, MA Hongjun, SONG Guobao, et al. Preparation of sweet orange oil microcapsules and study on heat release[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(4): 753–759.]
- [32] 赵学伟, 毛多斌. 玻璃化转变对食品稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2007, 28(12): 539–544. [ZHAO Xuwei, MAO Duobin. The effect of glass transition on food stability[J]. *Food Science*, 2007, 28(12): 539–544.]