赵佳佳, 彭思怡, 郭海滨, 等. 酶解鸡汤微胶囊粉末的理化性质及贮藏期间特征气味释放研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 342−351. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120010
ZHAO Jiajia, PENG Siyi, GUO Haibin, et al. Physicochemical Properties of Enzymatic Chicken Soup Microcapsule Powder and the Release of Characteristic Odors during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 342−351. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120010

· 贮运保鲜 ·

酶解鸡汤微胶囊粉末的理化性质及贮藏期间特征气味释放研究

赵佳佳[1], 彭思怡[1], 郭海滨[2], 马玲君[1], 陈　芳[1], 胡小松[1], 季俊夫[1,*]
（1.国家果蔬加工工程技术研究中心, 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;
2.联合利华（中国）有限公司研发中心, 上海 200335）

摘　要: 酶解鸡汤气味易挥发造成食品品质降低，可通过构建微胶囊体系保护气味物质。本研究以酶解鸡汤为原料，利用喷雾干燥技术制备了三种样品：未包埋的酶解鸡汤粉末（EB）、以豌豆白蛋白为壁材的酶解鸡汤微胶囊粉末（BPA）和以豌豆白蛋白、刺云实胶为复合壁材的酶解鸡汤微胶囊粉末（BPAT）。比较了不同粉末物理性质和结构的差异，并研究了它们在贮藏和溶解过程中特征气味物质的释放特性。结果显示，与 EB 样品相比，BPA 和 BPAT 样品的粒径和水分含量均有所增加，而溶解度略有降低。具体而言，BPA 样品的粒径最大，为 51.58±0.08 μm；BPAT 样品的水分含量最高，为 6.14%±0.13%；而其溶解度最低，为 73.33%±2.88%。在贮藏期间，EB 样品的特征气味化合物出现了显著损失。尤其是 2-正戊基呋喃和 1-辛烯-3-醇，在贮藏初期均未被检测到。相比之下，BPA 和 BPAT 样品通过形成气味包埋的微胶囊体系，实现了气味物质的高保留和稳定释放。如 BPA 中己醛溶解后的释放量提高了 3.67 倍，为 7396.94 μg/L。BPA 样品对所选的大部分特征气味物质有保护作用，BPAT 样品则在保留 1-辛烯-3-醇方面表现更优。此外，研究发现粉末未溶解前的气味释放量明显小于溶解后的释放量，表明多数气味化合物在粉末内部得到了有效保护。总之，本研究证明了豌豆白蛋白和刺云实胶形成的微胶囊体系可以减少气味的逸散，为酶解鸡汤粉末的微胶囊化及特征气味物质的保护提供了新的理论依据。

关键词: 酶解鸡汤粉末, 微胶囊, 特征气味物质, 贮藏, 顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱法
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0342−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120010
本文网刊:

Physicochemical Properties of Enzymatic Chicken Soup Microcapsule Powder and the Release of Characteristic Odors during Storage

ZHAO Jiajia[1], PENG Siyi[1], GUO Haibin[2], MA Lingjun[1], CHEN Fang[1], HU Xiaosong[1], JI Junfu[1,*]
（1.National Engineering Research Center for Fruit and Vegetable Processing, College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2.Unilever Research & Development Center, Unilever (China) Co., Ltd., Shanghai 200335, China）

Abstract: The odor of enzymatic chicken broth is volatile, leading to reduced food quality. A microencapsulation system can be employed to protect the odor. In this study, enzymatic chicken broth was used as the raw material, and three different samples were prepared by spray drying technology: unencapsulated enzymatic chicken broth powder (EB), enzymatic chicken broth microcapsule powder (BPA) with pea albumin as the wall material, and enzymatic chicken broth microcapsule powder (BPAT) with pea albumin and aciculin as a composite wall material. The physical properties and structures of the different powders were compared, and the release characteristics of key odor compounds during storage and dissolution were investigated. The results indicated that, compared to the EB sample, the particle size and moisture

收稿日期: 2024−12−02
基金项目: 科技部“十四五”国家重点研发计划项目（2024YFD2101502）; 联合利华国际合作项目。
作者简介: 赵佳佳（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬功能组分递送体系构建, E-mail: 2601556366@qq.com。
*** 通信作者:** 季俊夫（1988−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 植物源新食品资源挖掘, E-mail: junfu.ji@cau.edu.cn。

content of the BPA and BPAT samples increased, while solubility slightly decreased. Specifically, BPA had the largest particle size (51.58±0.08 μm), whereas BPAT displayed the highest moisture content (6.14%±0.13%) and the lowest solubility (73.33%±2.88%). During storage, significant losses of key odor compounds were observed in the EB sample. In particular, 2-n-amylfuran and 1-octene-3-ol were not detected at the start of storage. In contrast, the BPA and BPAT samples formed an odor-encapsulating microcapsule system, which effectively maintained a high retention and stable release of odor compounds. For example, the release of hexanal in the BPA sample after dissolution increased by 3.67 times, reaching 7396.94 μg/L. The BPA samples exhibited protective effects on most of the selected key odor compounds, whereas the BPAT samples demonstrated better retention of 1-octene-3-ol. Additionally, the odor released from the powder before dissolution was significantly lower than that released after dissolution, suggesting that most odor compounds were effectively confined within the powder matrix. In conclusion, this study has demonstrated that the microcapsule system formed by pea albumin and aciculin could reduce odor evaporation, providing a new theoretical basis for the microencapsulation of enzymatically hydrolyzed chicken powder and the protection of its characteristic odor substances.

Key words: enzymatic hydrolysis of chicken soup powder; microcapsule; key odor substance; storage; headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry

鸡汤因其丰富的营养价值和卓越的风味特性而受到全球消费者的青睐[1]。为了进一步改善鸡汤的风味并提高其营养价值，酶解技术已被证实是一种安全且易于控制的方法[2]。通过使用适当的酶，不仅可以将蛋白质分解成氨基酸和多肽，从而显著提高肉类的营养价值，还能促进香气前体或中间体的生成，进一步改善鸡汤的风味和口感[3−6]。Liao 等[7] 采用复合蛋白酶成功制备了营养丰富、香气浓郁的酶解鸡汤，并通过顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS）技术分离鉴定出 9 种最关键的特征气味成分，包括己醛、庚醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、2-正戊基呋喃、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E)-2-癸烯醛和(E)-2-辛烯醛。但由于这些成分具有高挥发性，在生产、加工、运输和储藏过程中容易损失，从而影响鸡汤的品质[7]。

现如今，微胶囊技术已成为保护这些挥发性风味化合物、防止其损失和变质的有效手段[8−10]。将酶解鸡汤制成酶解鸡汤微胶囊粉末，有望在运输和储藏期间保持其风味稳定。壁材的性质在一定程度上影响着微胶囊粉末的最终效果[11]。豌豆白蛋白（Pea albumin）是一种 5~80 kDa 的低分子量水溶性蛋白质[12]，具有良好的水合能力和乳化性，能有效包裹水相和油相中的气味分子，减少气味物质散失[13−14]。Jansen-alves 等[15] 采用喷雾干燥的方法，利用豌豆蛋白作为壁材制备蜂胶微粒。研究发现，添加豌豆蛋白作为微胶囊的载体，不仅可以降低蜂胶的气味，还能保护其生物活性化合物。但豌豆蛋白在加工过程中对 pH、离子浓度和温度敏感，容易影响包埋体系的稳定性。为了克服这一问题，将豌豆蛋白与天然多糖结合是一种有效策略，多糖通过空间稳定机制和增加膜厚度、连续相粘度，能在较宽的 pH 和离子强度范围内提高包埋体系的功能性[16−18]。塔拉胶（Tara gum），也称刺云实胶，是从刺槐树种子中提取的一种天然胶质。它以其高凝胶强度和热稳定性而著称，能更好地保持包埋的气味物质，减少高温加工过程中的破坏，维持食品的原有气味[19−20]。因此，本研究利用植物蛋白与天然多糖的协同增效作用，创新性地构建了以豌豆白蛋白和刺云实胶为复合壁材的微胶囊体系，用于酶解鸡汤的包埋。该复合壁材有望突破单一壁材的环境敏感性，并达到贮藏期间延缓特征气味逸散，溶解时气味物质大量释放的目的，为酶解鸡汤的品质提升提供了新的研究思路。

本研究以复合蛋白酶酶解的鸡汤为基础原料，采用喷雾干燥技术，制备了未包埋的酶解鸡汤粉末（EB）、以豌豆白蛋白为壁材的酶解鸡汤微胶囊粉末（BPA）和以豌豆白蛋白、刺云实胶为壁材的酶解鸡汤微胶囊粉末（BPAT）。通过粒径、水分含量、堆积密度和溶解性等参数来表征粉末的物理性质，并使用热重分析法评估粉末的热稳定性。同时，通过荧光光谱和傅里叶变换红外光谱分析酶解鸡汤粉末中的分子间相互作用力。此外，研究还将三种粉末置于 80% 相对湿度环境中贮藏，以探究 9 种关键鸡汤特征气味在贮藏后及溶解后含量的变化，旨在评估添加蛋白和多糖后形成的保护体系对粉末气味释放的影响，为酶解鸡汤特征气味物质的保护提供研究基础与思路。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鸡胸肉　食品级，四川新希望六和股份有限公司；鸡油　食品级，山东泰和食品集团有限公司；复合蛋白酶（1.6×10^5 U/g）　食品级，诺维信生物技术有限公司；脂肪酶（2×10^4 U/g）　食品级，天野酶制剂（江苏）有限公司；豌豆　山西东方亮生命科技有限公司提供；刺云实胶　分析纯，上海源叶生物科技有限公司；正己烷　分析纯，上海泰坦科技股份有限公司；三水合醋酸钠、硫酸铵、盐酸　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；三（羟甲基）氨基甲烷（Tris）　分析纯，北京索莱宝科技有限公司；冰醋酸、氯化钠、2-甲基-3 庚酮　分析纯，上海麦克林生化科技有限公司。

RCT digital 2.07 磁力搅拌器　德国 IKA 公司; SCIENTZ-150 高压均质机　宁波新芝生物科技股份有限公司; BUCHI B–290 喷雾干燥机　瑞士步琦有限公司; LGJ-25D 真空冷冻干燥机　北京四环启航科技有限公司; YP K6002 电子天平　上海光正医疗仪器有限公司; YP202N 分析天平　上海天美天平仪器有限公司; TGL-16G 高速离心机　上海安亭科学仪器厂; HE83/02 水分测定仪　梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; LS I3 320 激光粒度分析仪　贝克曼库尔特公司; XMTD-82222 电热恒温鼓风干燥箱　上海精宏实验设备有限公司; STA449F3 Jupiter 热重分析仪　德国耐驰公司; 57348-U 固相微萃取头　美国 Supelco 公司; GC-MS 7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪、19091S-433 HP-5MS 色谱柱(30 m×250 μm×0.25 μm)　美国安捷伦科技有限公司; SPECTRUM 100 傅里叶变换红外光谱仪　美国 PkinElmer 公司; HWS-26 电热恒温水浴锅　上海一恒科学仪器有限公司; F55 稳态瞬态荧光光谱仪　英国爱丁堡公司。

1.2　实验方法

1.2.1　酶解鸡汤微胶囊粉末的制备

1.2.1.1　豌豆白蛋白的制备　参考以前的研究方法制备豌豆白蛋白[21]。首先,将豌豆磨成粉并过 60 目筛,得到生豌豆粉。然后,将生豌豆粉与正己烷按照 1∶3(m/v)的比例混合,搅拌 2 h(4 ℃)后静置以去除上清液,此步骤重复三次。经过三次处理后,将沉淀物风干得到豌豆脱脂粉。接着,将豌豆脱脂粉与醋酸盐缓冲液(0.05 mol/L, pH4.9)按照 1∶10(m/v)混合,在 4 ℃ 搅拌均匀后离心(10000×g, 30 min)取沉淀。将沉淀透析(10 kDa, 72 h)后离心(10000×g, 30 min)取上清液,并加入硫酸铵,使最终浓度为 608 g/L。在 4 ℃ 搅拌均匀后再次离心取沉淀,将沉淀复溶于 0.05 mol/L Tris 缓冲液中。最后,将样品透析(10 kDa, 72 h)并进行冷冻干燥,得到豌豆白蛋白。

1.2.1.2　酶解鸡汤的制备　参考以前的研究方法制备酶解鸡汤[7]。解冻后的鸡胸肉去除多余的结缔组织和脂肪组织,切成小块(1 cm×1 cm×1 cm),鸡肉块和超纯水按照 7∶13(m/v)的比例添加,在 55 ℃ 使用复合蛋白酶酶解 2 h(复合蛋白酶的添加量为鸡肉的 1.5%)。酶解结束后迅速升温至 100 ℃ 灭酶,然后保持微沸状态熬煮鸡汤 0.5 h。冷却后,去除大块鸡肉,过滤除去肉渣,得到酶解鸡肉样品。为更好地模拟传统鸡汤的特征气味成分,将解冻后的鸡油切成小块(5 cm×5 cm×5 cm),然后按照 1∶1(m/v)的比例将鸡油与超纯水混合,在 45 ℃ 使用脂肪酶酶解 1 h(脂肪酶的添加量为鸡油量的 0.05%)。酶解结束后迅速升温至 100 ℃ 灭酶,随后保持微沸 1 h。冷却后,取上层鸡油,按照 1∶6(v/v)的比例与酶解鸡肉样品混合得到酶解鸡汤。

1.2.1.3　酶解鸡汤微胶囊粉末的制备　对酶解鸡汤高压均质(1600 MPa)后直接进行喷雾干燥,制得纯鸡汤粉末(EB);在酶解鸡汤中添加 0.8% w/v 的豌豆白蛋白,高压均质后进行喷雾干燥,制得由豌豆白蛋白包埋的微胶囊鸡汤粉末(BPA);在鸡汤中添加 0.8% w/v 的豌豆白蛋白,4 ℃ 过夜后加入 0.8% w/v 的刺云实胶溶液(9∶1, v/v),高压均质后进行喷雾干燥,制得由豌豆白蛋白和刺云实胶共同包埋的微胶囊鸡汤粉末(BPAT)。喷雾干燥条件:入口温度为 170 ℃;出口温度为 80±2 ℃;喷雾气体流速为 601 L/h;雾化空气压力为 24 psi;进料速度为 7.5 mL/min(蠕动泵的泵速为 25%)。

1.2.2　酶解鸡汤微胶囊粉末基本指标测定

1.2.2.1　粉末的粒径测定　三种酶解鸡汤粉末粒径使用带有粉末测量模块的激光粒度仪测定,共设置 3 次平行。真空范围为 142.1~181.3 Pa,阴影度为 8%。样品运行 3 次,每次测定时间为 90 s。

1.2.2.2　粉末的水分含量测定　根据 GB/T 5009.3-2016[22] 中第一法—直接干燥法,使用水分测定仪测定三种不同壁材的微胶囊粉末水分含量,设置 3 次平行。放置的微胶囊粉末质量为 0.5 g,加热温度为 105 ℃。

1.2.2.3　粉末的堆积密度测定　三种酶解鸡汤粉末的堆积密度采用 Chang 等[23] 的方法测定,设置 3 次平行。取 1 g 粉末于 25 mL 量筒中,涡旋 1 min 后量取粉末的体积,根据以下公式计算粉末样品的堆积密度。

$$\rho(\mathrm{g/mL}) = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{V}}$$

式中:ρ 表示粉末的堆积密度, g/mL; m 表示称取样品的质量, g; V 表示样品涡旋后在量筒中的体积, mL。

1.2.2.4　粉末的溶解度测定　将 0.5 g 粉末样品溶解于 25 mL 水中,在 25 ℃ 下搅拌 1 min,吸取底部溶液 5 mL 于玻璃平皿中,将玻璃皿在 105 ℃ 下干燥至恒重。每组样品进行 3 次平行实验,溶解度计算公式如下:

$$\mathrm{S}(\%) = \frac{\mathrm{m_1}}{\mathrm{m_2}} \times 100$$

式中: S 为样品溶解度, %; m_2 为样品溶解前的质量, g; m_1 为吸取溶液干燥后的质量, g。

1.2.2.5　粉末的热重分析　三种酶解鸡汤粉末的热稳定性用热重分析仪进行测定。在氮气氛围下,称取适量粉末样品置于同步热重分析仪样品盘中,以 10 ℃/min 的升温速率将样品从 25 ℃ 加热到 600 ℃ 进行测定,并绘制对应热重损失趋势图。每组样品设置 3 次平行。

1.2.2.6　荧光光谱分析　使用 pH6.8 的 PBS 缓冲液配制 1 mg/mL 的粉末溶液,使用稳态瞬态荧光光谱

仪对其进行扫描，所有样品重复测定三次。荧光光谱扫描参数：激发波长为 280 nm；扫描范围为 290~450 nm；激发、发射狭缝宽度均为 5 nm。

1.2.3　微胶囊粉末在贮藏期间的性质及特征气味释放

1.2.3.1　粉末的吸湿性测定　三种酶解鸡汤粉末在 80% 相对湿度下贮藏期间的吸湿性通过重量法测定。称取 0.5 g 粉末于顶空瓶中，放置在已平衡湿度的干燥皿内贮藏 0~5 d，每天记录粉末的重量。吸湿性的计算公式如下：

$$H(\%) = \frac{m_b - m_a}{m_a} \times 100$$

式中：H 表示样品吸湿性，%；m_b 表示样品贮藏后的质量，g；m_a 表示样品的初始质量，g。

1.2.3.2　傅里叶变换红外光谱（Fourier transform infrared, FTIR）　用 FTIR 测定三种酶解鸡汤粉末在 80% 的相对湿度环境中贮藏 0、1、5 d 粉末的光谱图。取 2 mg 样品与 198 mg 溴化钾混合后充分研磨，使用压片机在 20 MPa 下保持 1 min 压制成片。FTIR 设置参数：波数扫描范围为 400~4000 cm^{-1}；扫描次数为 32 次；分辨率为 4 cm^{-1}。

1.2.3.3　粉末贮藏期间特征气味释放量测定　参考以前的研究方法[7]，利用 HS-SPME-GC-MS 测定酶解鸡汤粉末在相对湿度为 80% 环境下贮藏 0、1、2、3、4、5 d 顶空中特征气味释放情况。使用 2-甲基-3-庚酮水溶液（0.0001%，v/v）作为内标液。在顶空瓶中依次加入 1.5 g 样品、1.5 g 氯化钠和 150 μL 内标液，旋紧瓶盖后在 60 ℃ 下平衡 10 min。用固相微萃取头（50/30 μm DVB/CAR/PDMS，Stableflex，2 cm）富集样品气味，萃取时间为 30 min。萃取结束后，迅速将萃取头插入气相色谱-质谱仪（Gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）进样口，解析 5 min。最后，使用 GC-MS 对气味物质进行分析测定。每组样品设置 3 组平行。

气相参数：色谱柱为 HP-5MS（30 m×250 μm，0.25 μm）；进样口温度为 250 ℃；载气（氦气，99.999% 纯度）流速 1 mL/min，以不分流模式进样；进样量为 0.5 μL；程序升温，初始柱温 40 ℃，保持 2 min，之后以 10 ℃/min 升温至 60 ℃，保持 1 min，以 3 ℃/min 升温至 130 ℃，保持 1 min，以 12 ℃/min 升温至 210 ℃，保持 1 min，再以 4 ℃/min 升温至 230 ℃，保持 2 min，最后以 10 ℃/min 升温至 250 ℃，保持 2 min。

质谱参数：采用全扫描模式采集信号；扫描质量范围为 50~550 amu；采用 EI 电离；电子轰击能量为 70 eV；离子源温度 300 ℃。

根据总离子流色谱图（TIC）和与标准质谱库（NIST11）对检测到的各挥发性成分进行比对，选取匹配率高于 80% 的化合物进行分析。同时以 2-甲基-3-庚酮作为内标物计算样品中挥发性气味化合物的含量。

1.2.3.4　粉末溶解后特征气味释放量测定　将 0.5 g 酶解鸡汤粉末溶解在 3.5 mL 水中，在相对湿度为 80% 环境下贮藏 0、7、14 d，在顶空瓶中依次加入 0.5 g 样品、0.5 g 氯化钠、3.5 mL 水和 50 μL 内标，旋紧瓶盖后具体处理方法同 1.2.3.3。

1.3　数据处理

所有实验均设置 3 组平行，实验结果以平均值±标准偏差表示。采用 SPSS 17.0 进行显著性分析，使用 Excel、GraphPad Prism 进行绘图。两组数据之间的显著性差异表示为 $P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　三种酶解鸡汤粉末基本指标测定

2.1.1　物理指标测定　粒径是衡量粉末颗粒尺寸的基本指标。图 1 展示了 EB、BPA 和 BPAT 三种样品的粒径分布情况。结果显示，三种样品的粉末粒径均呈现单峰分布，表明其粒径较为均匀，没有明显的结块现象。具体来说，EB、BPA 和 BPAT 样品的平均粒径分别为 41.15±0.63、51.58±0.08 和 46.97±0.26 μm。其中，BPA 样品的粒径显著大于其他两种样品（$P<0.05$），这可能是由于豌豆白蛋白在高温干燥过程中发生了热变性，导致样品颗粒聚集变大[24]。相比之下，BPAT 样品中热稳定性更好的多糖刺云实胶减轻了高温对蛋白质的影响，因此其粒径相对较小。Liu 等[25] 的研究也发现，麦芽糖糊精与大豆分离蛋白或豌豆分离蛋白共喷雾干燥时，获得的颗粒粒径更小。

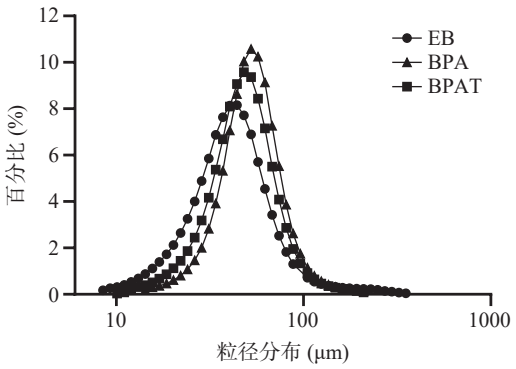


图 1　EB、BPA 和 BPAT 粉末的粒径分布图

Fig.1　Particle size distribution of EB, BPA and BPAT powders

经喷雾干燥后制备的三种酶解鸡汤粉末的一些基本物理性质如表 1 所示。三种粉末的堆积密度没有显著差异，这与 Kha 等[26] 的研究结果一致。BPA 和 BPAT 样品的溶解度略低于 EB 样品，但均大于 70%。BPAT 样品的水分含量最高，为 6.14%±0.13%，而 BPA 样品的水分含量最低，为 4.29%±0.39%。BPAT 样品较高的水分含量归因于其含有的刺云实胶，这是一种由多糖组成的植源性树胶，具有较高的亲水性[19]。然而，过高的含水量对粉末是不

表 1 EB、BPA 和 BPAT 粉末的粒径、水分含量、堆积密度和溶解度

Table 1 Particle size, moisture content, bulk density and solubility of EB, BPA and BPAT powders

样品	D_{10}(μm)	D_{50}(μm)	D_{90}(μm)	水分含量(%)	堆积密度(g/mL)	溶解度(%)
EB	20.48±0.29^{c}	39.17±0.63^{c}	62.52±1.70^{c}	4.75±0.54^{b}	0.59±0.02^{a}	90.67±0.81^{a}
BPA	31.04±0.08^{a}	49.98±0.09^{a}	77.51±0.21^{a}	4.29±0.39^{b}	0.62±0.01^{a}	78.33±1.44^{b}
BPAT	26.22±0.46^{b}	45.45±0.22^{b}	73.05±0.88^{b}	6.14±0.13^{a}	0.63±0.01^{a}	73.33±2.88^{b}

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

利的, 因为它会导致颗粒易团聚发粘, 降低流动性, 并可能引起粉末表面结构塌陷, 从而加速气味化合物的散失[27]。

2.1.2 热重分析 利用热重分析法对样品的热稳定性进行表征, 结果如图 2 所示。TG 曲线反映了样品质量随温度变化的轨迹, 曲线平台区为样品的热稳定区, 曲线下降处为样品失重区。DTG 曲线上的峰面积与样品质量变化成正比, 峰顶位置表示样品失重速率最快的温度点[28]。从图 2a 可见, 在 200 ℃ 以下, 三种粉末的失重曲线较为平稳, 表明在此温度范围内样品基本不发生分解。在 200~500 ℃ 之间, EB、BPA 和 BPAT 三种粉末开始热分解, 其总重量损失分别为 56.09%、59.59% 和 59.54%。在 500 ℃ 之后, 失重曲线再次趋于平稳, 表明分解过程已完全结束。图 2b 显示, 在 213 ℃ 和 295 ℃ 时, 粉末样品的失重速率达到最大值, 其中在 213 ℃ 时 EB 样品的质量变化小于其他样品。综合来看, 三种粉末的质量变化随温度的差异不大, 且失重速率的最大点无明显差异, 表明样品间的热稳定性差异较小。

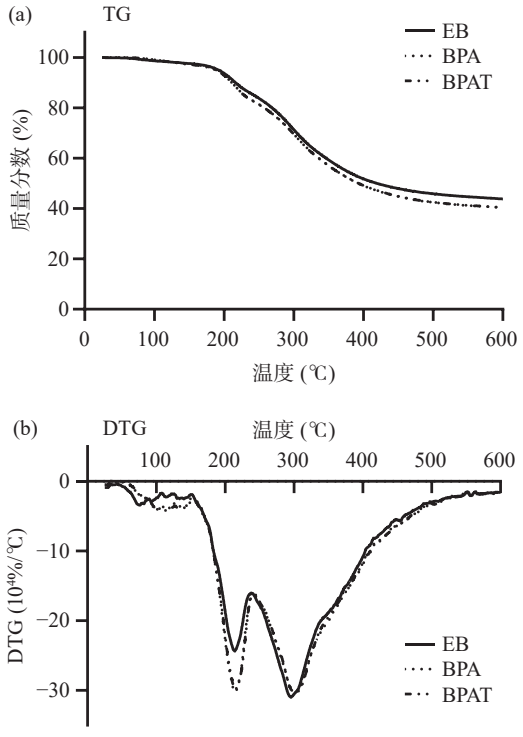


图 2 EB、BPA 和 BPAT 粉末的热重分析

Fig.2 Thermogravimetric analysis of EB, BPA and BPAT powders

注: (a)三种粉末的热重曲线图; (b)三种粉末的微分热重曲线图。

2.1.3 荧光光谱分析 三种酶解鸡汤粉末样品的荧光光谱图如图 3 所示。EB 粉末的最大发射波长为 348 nm, 而 BPA 和 BPAT 粉末的最大发射波长为 335 nm, 最大发射波长蓝移, 同时荧光强度增加。这种变化可能是由于酶解鸡汤中存在的物质与豌豆白蛋白、刺云实胶之间发生非共价相互作用, 这些相互作用使荧光基团进入了更加疏水的环境中, 改变了分子能级, 从而引起最大发射波长的蓝移[29]。BPA 和 BPAT 粉末荧光强度的明显升高表明, 粉末中的荧光基团从极性表面转移到了疏水内部[30], 进一步证实了与 EB 粉末相比, BPA 和 BPAT 粉末的稳定性更高。王林[31] 采用酪蛋白和 β-环糊精作为微胶囊包封壁材, 对黑果腺肋花楸花青素进行包封, 酪蛋白荧光强度的线性变化, 说明分子间相互作用的改变。Yuan 等[32] 采用酶解大豆分离蛋白纳米体系对姜黄素进行包封, 发现最大发射波长发生蓝移, 并伴随着荧光强度的增加。这说明姜黄素与酶解蛋白的疏水结构域发生结合, 从而有助于体系的稳定。

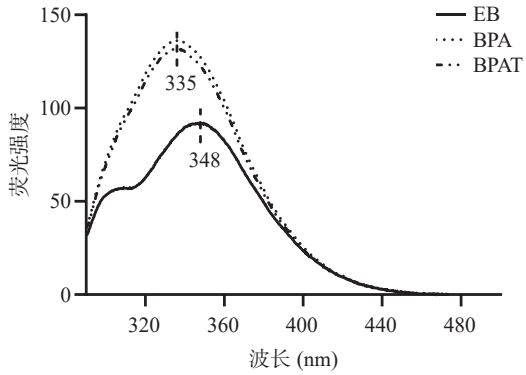


图 3 EB、BPA 和 BPAT 粉末的荧光发射光谱图

Fig.3 Fluorescence emission spectra of EB, BPA and BPAT powders

2.2 微胶囊粉末在贮藏期间的性质及特征气味释放情况测定

2.2.1 粉末贮藏期间的吸湿性 吸湿性是衡量酶解鸡汤粉末在储存过程中对水分的吸收能力, 是评价其稳定性的一个重要指标[33]。吸湿性较低意味着产品不易结块或变质。图 4 展示了在 80% 相对湿度条件下, 三种粉末吸湿性的变化情况。在贮藏期间, 所有粉末样品的吸湿性均呈上升趋势。具体来说, BPAT 样品的吸湿性在前 2 d 迅速上升, 之后增速减缓。而 EB 和 BPA 样品的吸湿性在第 2 d 至第 5 d 期间增长较快。最终, EB、BPA 和 BPAT 的吸湿性分别

为 40.67%、37.33%、37.33%。与 EB 粉末相比，BPA 和 BPAT 粉末的吸湿性显著降低(P<0.05)。在 0~5 d 贮藏期间内样品吸湿性呈现持续上升而无减缓现象，可能是因为粉末贮藏在较高的相对湿度环境下，样品和环境湿度相差大，导致难以在短时间内达到水分平衡状态。许多研究表明，喷雾干燥粉末中挥发性气味的释放速率受到环境相对湿度的显著影响[34]。随着环境相对湿度的增加，气味释放的速度也随之加快。与 EB 粉末相比，BPA 和 BPAT 粉末显示出较低的吸湿性，这表明它们的稳定性更高，可能对气味有更好的保护效果。

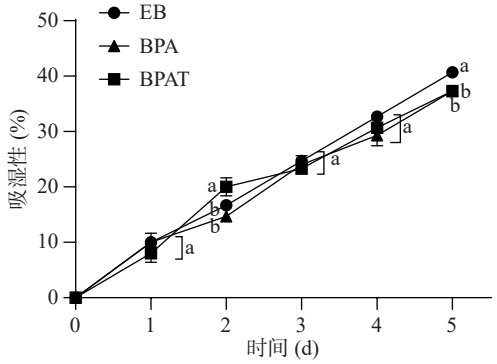


图 4　EB、BPA 和 BPAT 粉末在 80% 相对湿度下吸湿性的变化

Fig.4　Hygroscopic behavior of EB, BPA and BPAT powders under storage conditions of 80% relative humidity

注：不同字母表示同一时间不同处理组间差异显著(P<0.05)，未标注字母表示同一时间不同处理组间无显著差异，图 6~图 7 同。

2.2.2　傅里叶变换红外光谱　利用傅里叶变换红外光谱分析三种粉末在高湿度环境下贮藏 0、1 和 5 d 后的相互作用变化，结果如图 5 所示。样品中在 2963~3068 cm^{-1} 处的峰显示为不饱和碳上的-C-H 伸缩振动，主要基团为-CH_3；1633 cm^{-1} 处的波动归因于 C=C、C=N、N=N、N=O 等的伸缩振动以及苯环的骨架振动；850 cm^{-1} 处的峰对应于烯烃和芳烃的 C-H 面外弯曲振动[35−36]。各粉末样品在不同贮藏时间下的红外谱图未见明显差异，这可能是由于酶解鸡汤粉末中含有的化合物种类复杂，难以准确判断某一化合物是否成功被保护在粉末内部。研究发现，在 3400 cm^{-1} 附近的吸收峰对应-OH 的拉伸振动，通常峰值波数越低，表示氢键越弱，样品中的疏水相互作用越强[19]。EB、BPA 和 BPAT 粉末的-OH 伸缩振动的特征峰分别在 3390、3406 cm^{-1} 和 3406 cm^{-1}。与 EB 粉末相比，BPA 和 BPAT 粉末的-OH 伸缩峰值发生蓝移，表明这两种粉末的疏水性更强。蛋白质和多糖的加入为粉末提供了一定程度的疏水性，这对贮藏期间气味物质的保留具有积极影响[37]。

2.2.3　贮藏期间粉末的特征气味释放量　按照 Liao 等[7] 的研究结果，本研究选取了酶解鸡汤中的 9 种特征气味化合物，主要包括己醛、庚醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、2-正戊基呋喃、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-

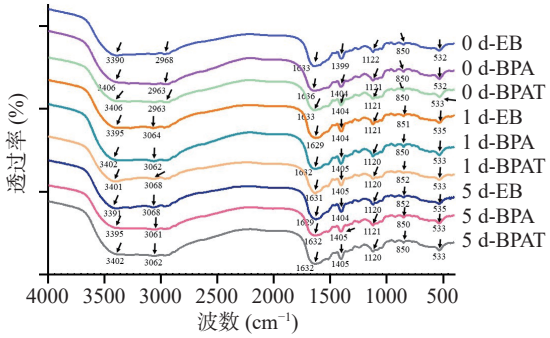


图 5　EB、BPA 和 BPAT 粉末在 80% 相对湿度下贮藏 0、1、5 d 的 FTIR 光谱图

Fig.5　FTIR spectra of EB, BPA and BPAT powders stored at 80% relative humidity for 0, 1 and 5 days

壬二烯醛、(E)-2-癸烯醛和(E)-2-辛烯醛，以探究在高湿度环境下贮藏后的粉末中关键挥发性化合物的释放变化。三种粉末均以鸡汤为芯材，通过喷雾干燥法制备。如图 6 所示，在贮藏初期(0 d)，不同样品中化合物含量存在显著差异。EB 样品中的多数化合物浓度极低，特别是易挥发的化合物如 1-辛烯-3-醇，在 EB 样品中未被检测到。相比之下，BPA 和 BPAT 样品则显示出较高的气味释放量。进一步分析所有化合物在贮藏期间的浓度变化，发现 EB 样品中整体化合物浓度也明显低于 BPA 和 BPAT 样品。这些结果表明，未经包埋处理的 EB 样品在喷雾干燥过程中气味成分损失较大，特征气味化合物的残留量极少。相反，经过豌豆白蛋白包埋的 BPA 和经过豌豆白蛋白和刺云实胶共同包埋的 BPAT 样品，在喷雾干燥后实现了气味成分的高保留，有效减少了喷雾干燥过程中挥发性化合物的热损失。金旭冉等[38] 以麦芽糊精、阿拉伯胶和 β-环糊精为壁材，通过喷雾干燥法制备姜气味微胶囊；Bangs 等[39] 研究了不同模型食品系统(包括基于大豆、酪蛋白和乳清蛋白)对挥发性气味化合物保留的影响。这些研究表明，由蛋白质和多糖形成的微胶囊外壳能有效保护气味物质，尤其在高温条件下，壁材的保护效果更为显著。

在 9 种特征气味化合物中，作为易挥发化合物，1-辛烯-3-醇在 BPA 和 BPAT 样品中也仅在前 4 d 被检测到，这表明 1-辛烯-3-醇在 4 d 内已完全从粉末基质扩散到空气中，这一结论得到了黄福宁[40] 研究的支持。对于除己醛、庚醛和 1-辛烯-3-醇之外的其他六种化合物，BPA 和 BPAT 样品在贮藏 5 d 后的浓度仍然较高。(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛和(E)-2-癸烯醛这三种关键的鸡汤气味物质在贮藏后期释放量较高，显示出较为稳定的化合物特性。特别是(E,E)-2,4-癸二烯醛，作为鸡汤中特征气味的最重要贡献者[7]，在 BPA 样品中从贮藏第 2 d 至第 5 d 均持续稳定释放。Han 等[41] 的研究发现，挥发性气味物质的同系物中，碳链越长，其被蛋白质保留的效果越强；徐思佳等[42]、Zhang 等[43] 的研究也表明，结构紧密的小分子气味物质难以与蛋白质内部

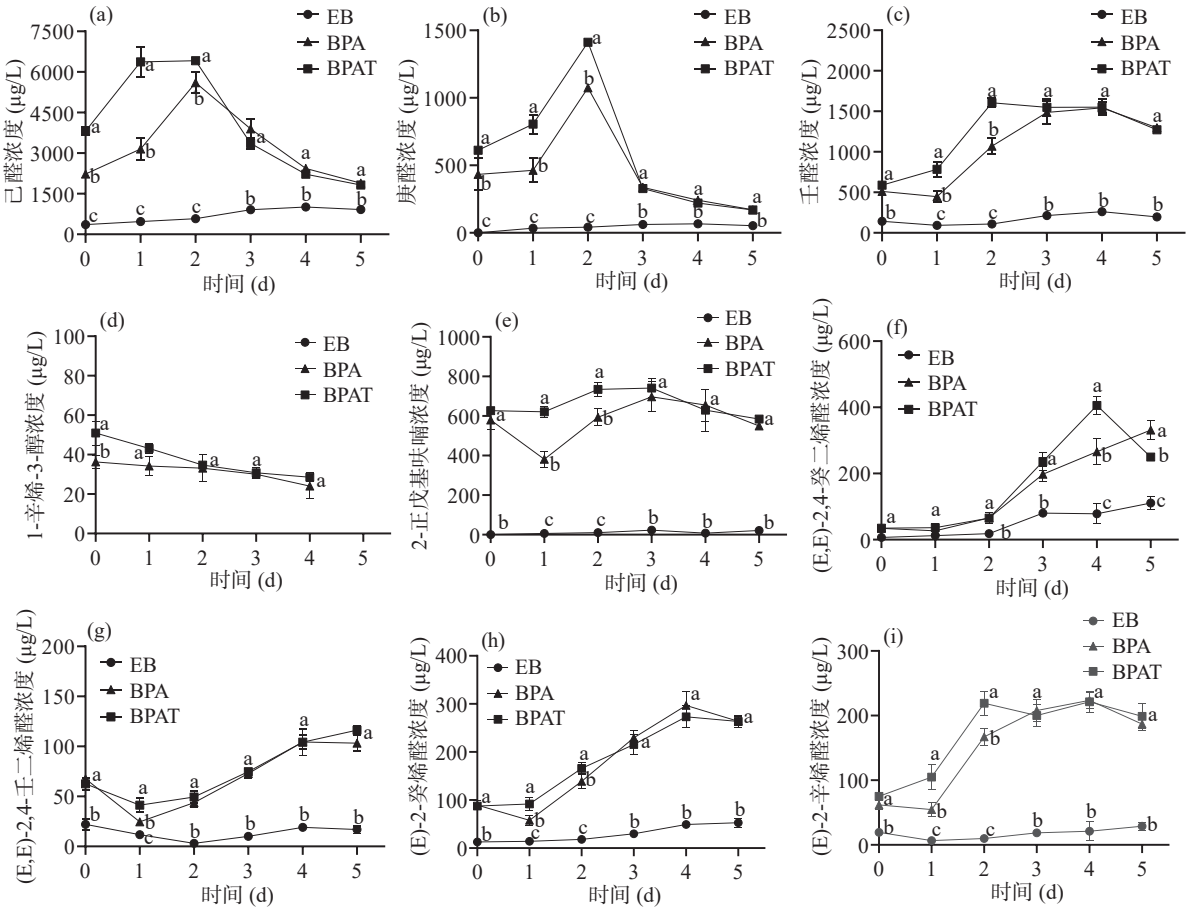


图 6　EB、BPA 和 BPAT 粉末在 80% 相对湿度下贮藏的特征气味释放量

Fig.6　Critical flavor release of EB, BPA and BPAT powders under storage conditions of 80% relative humidity

的疏水区域结合，因此被壁材保留的时间更短。这些研究结果与本文的发现一致。此外，BPAT 样品在不同贮藏时间的最大释放量均高于其他两种样品，可能是因为其粉末本身含有较多的气味物质，同时还受到刺云实胶亲水特性的影响[44]，使得吸收的水分子能更快渗透至粉末内部，因此气味释放量较高。然而，由于各化合物从粉末逸出的时间不同，且真实体系中存在许多未知变量，因此无法确切判断化合物是与其他化合物反应后消失，还是仅在粉末结构破坏后逐渐扩散至空气中。

2.2.4　粉末溶解后特征气味释放量　在高湿度环境下贮藏后，粉末溶解导致内部包埋的气味物质释放至顶空瓶上部。对溶解后逸出的 9 种特征气味物质进行分析，结果如图 7 所示。总体来看，BPA 和 BPAT 样品通过形成气味包埋的微胶囊体系，实现了气味物质的高保留。尤其是对己醛来说，BPA 中己醛溶解后的释放量较 EB 提高了 3.67 倍，为 7396.94 μg/L。样品溶解后大部分气味物质的浓度随贮藏时间的延长而降低，尤其在贮藏前期，降低速度明显高于贮藏后期。在贮藏 0 d 时，BPA 粉末溶解后释放的各化合物浓度一般都高于其他两种样品，即使经过 14 d 的贮藏，这一趋势依然存在，说明 BPA 样品对所选择的大部分特征气味物质有保护作用。例如，2-正戊基呋喃作为一种易被氧化的化合物[45]，在贮藏 7~14 d 范围内，BPA 样品中该化合物的释放稳定且释放浓度略高于其他两种样品。对于易挥发性物质 1-辛烯-3-醇，其被检测到的浓度从高到低依次为 BPAT、BPA 和 EB 样品，表明虽然 BPA 样品对大部分特征气味物质均能提供保护作用，但 BPAT 样品在保留 1-辛烯-3-醇方面具有优势。豌豆白蛋白、刺云实胶作为微胶囊壁材在酶解鸡汤周围形成了保护层，减少了气味成分的逸散[46−47]。BPAT 粉末对 1-辛烯-3-醇的保护优势可归因于多糖和蛋白质复合壁材对易挥发性气味物质的保留效果对易挥发性气味物质的保留效果优于单一壁材[48]。

结合图 6g 和图 7g 可知，以微胶囊形式存在的粉末，不论是以固体还是液态，BPAT 中(E,E)-2,4-壬二烯醛在贮藏前期(0~7 d)的浓度均呈上升趋势，表明贮藏前期粉末中某些化合物可能通过脂质氧化反应又重新生成了(E,E)-2,4-壬二烯醛[49]。类似地，在溶解后 BPA 和 BPAT 样品的贮藏后期，(E,E)-2,4-癸二烯醛也出现了缓慢上升的趋势，说明贮藏后期同样有新的(E,E)-2,4-癸二烯醛生成。金旭冉等[38] 的研究发现，在姜气味微胶囊的贮藏过程中，α-姜黄烯的含量也随着贮藏时间的延长而增加，是因为 β-倍半水芹烯等成分在一定条件下重排为 α-姜黄烯。这一结果与本文的研究结果相似。总体对比图 6 和图 7，可以发现气味包埋体系的构建使得未经贮藏的

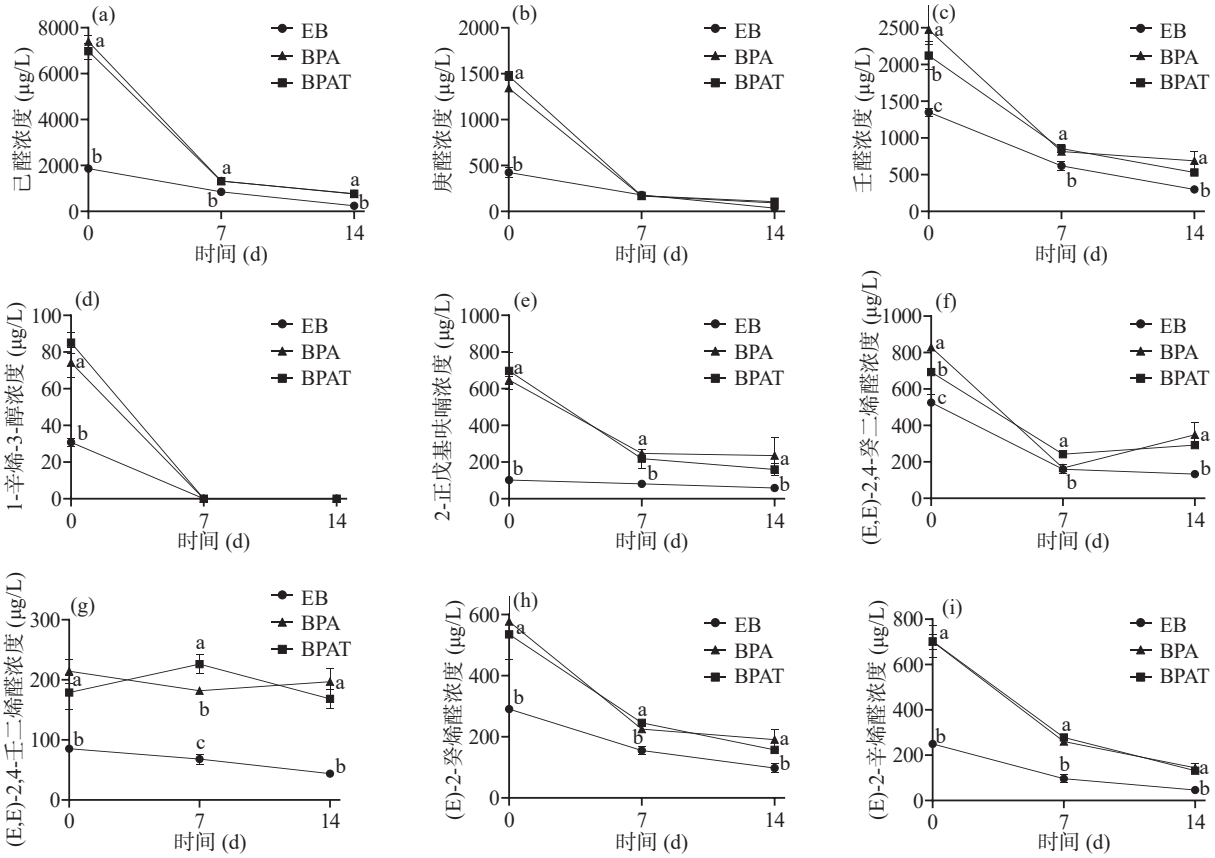


图 7　EB、BPA 和 BPAT 粉末溶解后贮藏 0、7、14 d 的特征气味释放量

Fig.7　Critical flavor release during the dissolution of EB, BPA and BPAT powders after 0, 7 and 14 days of storage

粉末在固体形态时的气味释放量显著低于溶解后的释放量。这一现象说明该体系在一定程度上实现了贮藏时延缓气味逸散，溶解时气味物质大量释放的目的。

3　结论

本文首次系统探讨了豌豆白蛋白和刺云实胶作为复合壁材对酶解鸡汤粉末理化性质和贮藏期间特征气味释放情况的影响。研究结果显示，三种样品的粉末粒径均呈单峰分布且粒径均一。与 EB 样品相比，BPA 和 BPAT 样品的粒径增大，水分含量和溶解度降低，稳定性增强。BPA 和 BPAT 样品由于形成了包埋体系，多数气味化合物被有效保护在粉末内部。BPA 粉末对所选的大部分特征气味物质有保护作用，而 BPAT 样品在保留 1-辛烯-3-醇方面表现更优。本研究为酶解鸡汤粉末的微胶囊化及特征气味物质的保护提供了新的理论依据，未来可进一步探索不同温度和 pH 条件下粉末的贮藏性能，为食品工业提供更全面的技术支持。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ JIN W, FAN X, JIANG C, et al. Characterization of non-volatile and volatile flavor profiles of *Coregonus peled* meat cooked by different methods[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100584.

［2］ DONG Z Y, LI M Y, TIAN G, et al. Effects of ultrasonic pretreatment on the structure and functionality of chicken bone protein prepared by enzymatic method[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125103.

［3］ KONG Y, YANG X, DING Q, et al. Comparison of non-volatile umami components in chicken soup and chicken enzymatic hydrolysate[J]. Food Research International, 2017, 102: 559−566.

［4］ 李瑞霞, 淡洁, 吕金潇, 等. 鸡肉蛋白源脂肪酶抑制肽的制备及影响因素[J]. 肉类研究, 2019, 33(8): 29−34. ［LI Ruixia, DAN Jie, LÜ Jinxiao, et al. Preparation of lipase inhibitory peptides from chicken myofibrillar protein and factors fnfluencing anti-lipase activity[J]. Meat Research, 2019, 33(8): 29−34.］

［5］ 侯钰柯, 陆逸峰, 蒋宇飞, 等. 肉杂鸡鸡骨架酶解工艺优化及其分析评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 232−242. ［HOU Yuke, LU Yifeng, JIANG Yufei, et al. Optimization and evaluation of enzymatic hydrolysis process of hybrid broilers skeleton[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 232−242.］

［6］ 吴江红. 特鲜浓缩鸡汤料配方及加工工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. ［WU J H. Study on formula and processing technologyof specially umami concentrated chicken soup[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.］

［7］ LIAO M, PENG S, GUO H, et al. The effect of enzymatic hydrolysis on the flavor improvement of chicken broth by characterizing key taste and odor-active compounds[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105054.

［8］ HU J, DU P, LIU S, et al. Comparative study on the effect of two drying methods on the guest encapsulation behavior of osmanthus flavor-2-hydroxypropyl-*β*-cyclodextrin inclusion complex[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2021, 36(1): 84−98.

[9] ROJAS-MORENO S, CÁRDENAS-BAILÓN F, OSORIO-REVILLA G, et al. Effects of complex coacervation-spray drying and conventional spray drying on the quality of microencapsulated orange essential oil[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(1): 650−660.
[10] PELLICER J A, FORTEA M I, TRABAL J, et al. Optimization of the microencapsulation of synthetic strawberry flavour with different blends of encapsulating agents using spray drying[J]. Powder Technology, 2018, 338: 591−598.
[11] 章智华, 钟舒睿, 彭飞, 等. 微胶囊壁材及制备技术的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 246−253. [ZHANG Zhihua, ZHONG Shurui, PENG Fei, et al. Progress in microcapsule wall materials and preparation techniques[J]. Food Science, 2020, 41(9): 246−253.]
[12] SHEN Q, LI J, SHEN X, et al. Linear and nonlinear interface rheological behaviors and structural properties of pea protein (vicilin, legumin, albumin)[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108500.
[13] BI S, PAN X, ZHANG W, et al. Non-covalent interactions of selected flavors with pea protein: Role of molecular structure of flavor compounds[J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133044.
[14] YANG J, de WIT A, DIEDERICKS C F, et al. Foaming and emulsifying properties of extensively and mildly extracted Bambara groundnut proteins: A comparison of legumin, vicilin and albumin protein[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107190.
[15] JANSEN-ALVES C, MAIA D S V, KRUMREICH F D, et al. Propolis microparticles produced with pea protein: Characterization and evaluation of antioxidant and antimicrobial activities[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 703−711.
[16] 许馨予, 杨鹤隽, 贾斌, 等. 大豆分离蛋白-高酯柑橘果胶-没食子酸复合 Pickering 乳液制备及其稳定性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 42−51. [XU Xinyu, YANG Hujun, JIA Bin, et. al. Preparation and stability analysis of soy protein isolate-high methoxyl citrus pectin-gallic acid pickering emulsion[J]. Food Science, 2022, 43(24): 42−51.]
[17] 沈可洁, 李兴飞, 华欲飞, 等. 豌豆分离蛋白/卡拉胶复合物乳液的性质研究[J]. 中国油脂, 2023, 48(2): 36−40. [SHEN Kejie, LI Xingfei, HUA Yufei, et al. Properties of emulsions stabilized by pea protein isolate /carrageenan complexes[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(2): 36−40.]
[18] 陈玲, 张立伟, 雷芬芬, 等. 乳清分离蛋白-黄原胶复合乳化剂制备南瓜籽油 O/W 型乳液及其稳定性[J]. 中国油脂, 2022, 47(12): 76−83. [CHEN Ling, ZHANG Liwei, LEI Fenfen, et. al. Preparation of pumpkin seed oil O/W emulsion by whey protein isolate-xanthan gum compound emulsifier and its stability[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(12): 76−83.]
[19] HUAMANÍ-MELÉNDEZ V J, MAURO M A, DARROS-BARBOSA R. Physicochemical and rheological properties of aqueous Tara gum solutions[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106195.
[20] CARPENTIER J, CONFORTO E, CHAIGNEAU C, et al. Microencapsulation and controlled release of α-tocopherol by complex coacervation between pea protein and tragacanth gum: A comparative study with arabic and tara gums[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102951.
[21] LI K, YUAN X, ZHAO J, et al. Covalent conjugate of pea protein induced by cyanidin-3-O-glucoside quinone: The structural formation and functional properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110047.
[22] 国家卫生和计划生育委员会. GB/T 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB/T 5009.3-2016 National food safety standard Determination of moisture in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[23] CHANG L S, OOI Y W, PUI L P. Production of enzymatic hydrolysed spray-dried honeydew melon (*Cucumis melo* L.) powder[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 10: 100364.
[24] WANG K, ARNTFIELD S D. Binding of carbonyl flavours to canola, pea and wheat proteins using GC/MS approach[J]. Food Chemistry, 2014, 157: 364−372.
[25] LIU Z, GE Y, LI S, et al. The properties of plant-based protein particles with co-spray drying agents[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 371: 111961.
[26] KHA T C, NGUYEN M H, ROACH P D. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(3): 385−392.
[27] CAPARINO O A, TANG J, NINDO C I, et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine* '*Carabao*' var.) powder[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(1): 135−148.
[28] HUNDRE S Y, KARTHIK P, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Effect of whey protein isolate and β-cyclodextrin wall systems on stability of microencapsulated vanillin by spray-freeze drying method[J]. Food Chemistry, 2015, 174: 16−24.
[29] 钱文文. 鼠李糖乳杆菌微胶囊的制备及其胞外多糖对小鼠肠道菌群的调节作用[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022. [QIAN W W. Preparation of *Lactobacillus rhamnosus* microcapsule and the regulation of extracellular polysaccharide on intestinal flora in mice [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022.]
[30] 崔方超, 李兰玲, 韩瑜娟, 等. 黄嘌呤氧化酶抑制剂微胶囊的制备[J]. 中国食品学报, 2024, 24(4): 223−234. [CUI Fangchao, LI Lanling, HAN Yujuan, et. al. Preparation of microcapsule preparation of xanthine oxidase inhibitor[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(4): 223−234.]
[31] 王林. 黑果腺肋花楸花青素微胶囊的制备及其活性研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2024. [WANG L. Preparation and activity research of aroniamelanocarpa anthocyanins microcapsules [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2024.]
[32] YUAN D, ZHOU F, SHEN P, et al. Self-assembled soy protein nanoparticles by partial enzymatic hydrolysis for pH-driven encapsulation and delivery of hydrophobic cargo curcumin[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106759.
[33] 邬帅帆. 鸡精调味料在干燥过程中香气变化的研究[J]. 现代食品, 2022, 28(11): 142−145. [WU Shuaifan. Study on the aroma change of chicken bouillon during the drying process[J]. Modern Food, 2022, 28(11): 142−145.]
[34] JUAREZ-ENRIQUEZ E, OLIVAS G I, ZAMUDIO-FLORES P B, et al. A review on the influence of water on food powder flowability[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(5): e14031.
[35] 郝威铭, 刘丽莉, 李媛媛, 等. 喷雾冷冻干燥风量对蛋清蛋白特性及结构的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 78−84,7. [HAO Weiming, LIU Lili, LI Yuanyuan, et al. Effect of air volume of spray freeze drying on properties and structure of egg white protein[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 42(3): 78−84,7.]
[36] MUHOZA B, XIA S, CAI J, et al. Gelatin and pectin com-

plex coacervates as carriers for cinnamaldehyde: Effect of pectin esterification degree on coacervate formation, and enhanced thermal stability[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 712−722.
[37] 袁欣, 王娅茹, 马玲君, 等. 基于粉体稳态化技术的风味物质控释研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 23288−23296. [YUAN Xin, WANG Yaru, MA Lingjun, et al. Research progress on controlled release of flavor compounds based on powder stabilization technology[J]. Food Science, 2024, 45(23): 23288−23296.]
[38] 金旭冉, 张剑, 王文亮, 等. 姜气味微胶囊制备与性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 112−118. [JIN Xuran, ZHANG Jian, WANG Wenliang, et al. Preparation and properties of ginger flavor microcapsules[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 112−118.]
[39] BANGS W E, REINECCIUS G A. Influence of dryer infeed matrices on the retention of volatile flavor compounds during spray drying[J]. Journal of Food Science, 1982, 47(1): 254−259.
[40] 黄福宁. 贵州小香鸡气味成分分析及炖煮鸡汤气味对比[D]. 天津: 天津科技大学, 2023. [HUANG F N. Analysis of flavor components of Guizhou Xiaoxiang chicken and comparison of flavor of stewed chicken soup[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023.]
[41] HAN Z, CAI M J CHENG J H, et al. Effects of microwave and water bath heating on the interactions between myofibrillar protein from beef and ketone flavour compounds[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(5): 1787−1793.
[42] 徐思佳, 毕爽, 张文涛, 等. 热处理对豌豆分离蛋白结合典型牛肉香气物质的影响及相互作用机制[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 28−35. [XU Sijia, BI Shuang, ZHANG Wentao, et al. Effect of heat treatment on the binding of pea protein isolate to typical beef aroma substances and their interaction mechanism[J]. Food Science, 2022, 43(19): 28−35.]
[43] ZHANG J, KANG D, ZHANG W, et al. Recent advantage of interactions of protein-flavor in foods: Perspective of theoretical models, protein properties and extrinsic factors[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 405−425.
[44] MA Q, HU D, WANG L. Preparation and physical properties of tara gum film reinforced with cellulose nanocrystals[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 86: 606−612.
[45] 单启梅, 罗瑞明, 杨波, 等. 不同贮藏期冷却滩羊肉煮制后挥发性气味物质的变化[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 265−271. [SHAN Qimei, LUO Ruiming, YANG Bo. Changes of volatile odor substances in chilled tan sheep meat stored for different periods and cooked[J]. Food Science, 2022, 43(6): 265−271.]
[46] 郑欣虹, 曾巧玲, 杜艳瑜, 等. 大黄鱼鱼卵磷脂-鱼油微胶囊贮藏过程中挥发性成分及稳定性分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(14): 173−179,186. [ZHENG Xinhong, ZENG Qiaoling, DU Yanyu, et al. Analysis of volatile flavor substances and stability of large yellow croaker roe phospholipids-fish oil microcapsules during storage process[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(14): 173−179,186.]
[47] 常馨月, 罗惟, 陈程莉, 等. 奇亚籽油微胶囊贮藏稳定性及缓释动力学[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 108−114. [CHANG Xinyue, LUO Wei, CHEN Chengli, et al. Study on storage stability and sustained-release kinetics of chia seed oil microcapsules[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9): 108−114.]
[48] MENG F B, LI J J, ZHANG Q, et al. Complex wall materials of polysaccharide and protein effectively protected numb-taste substance degradation of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(11): 4605−4612.
[49] 李佳钇, 方佳兴, 李亚隆, 等. 酶解大豆蛋白复合凝聚微胶囊的制备及其性质表征[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 1−7. [LI Jiayi, FANG Jiaxing, LI Yalong, et al. Preparation and characterization of hydrolyzed soy protein isolate microcapsules by complex coacervation[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 1−7.]