

大豆蛋白酶解产物的微胶囊化及理化性质表征

黄晓梅¹, 韦翠兰¹, 侯俊杰², 王忠合³, 骆兆娇¹, 王金梅¹

(1. 华南理工大学小麦和玉米深加工国家工程实验室, 广东广州 510640) (2. 广州王老吉大健康产业有限公司, 广东广州 510640) (3. 韩山师范学院食品工程与生物科技学院, 广东潮州 521041)

摘要: 令人难以接受的苦味和较强的吸湿性是限制大豆蛋白肽成为高品质食源肽的重要因素。本研究以大豆蛋白酶解产物(SPH)为芯材, 以大豆蛋白(SPI)-大豆多糖(SPSS)复合物为壁材, 通过喷雾干燥技术制备大豆蛋白酶解产物微胶囊, 优化其工艺, 并对微胶囊产品理化性质进行表征。结果表明, 微胶囊的芯材/壁材比例为 1/4, 壁材比例(SPI/SPSS)为 2/1, 微胶囊具有最佳的大豆蛋白酶解产物包埋效果, 包埋率达 50.92%、苦味降低 2.68 倍、吸湿性降低 1.61 倍。透射电镜结果显示, 微胶囊呈球形, 表面光滑、连续, 无孔洞或裂缝。红外分析结果证实 SPI 与 SPSS 之间发生了静电相互作用。大豆多糖与大豆蛋白因其大分子结构, 组合使用能提升包埋的结构稳定性, 也为 SPH 微胶囊产品作为功能性配料提供一定理论基础。

关键词: 大豆蛋白酶解产物; 微胶囊化; 喷雾干燥

文章编号: 1673-9078(2020)07-202-208

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.7.0977

Microencapsulation and Characterization of Soybean Protein Hydrolysates

HUANG Xiao-mei¹, WEI Cui-lan¹, HOU Jun-jie², WANG Zhong-he³, LUO Zhao-jiao¹, WANG Jin-mei¹

(1. National Engineering Laboratory of Wheat & Corn Further Processing, College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Guangzhou Wanglaoji Great Health Industry Co, Ltd, Guangzhou 510640, China)

(3. School of Life Science and Food Technology, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China)

Abstract: The unacceptable bitterness and strong hygroscopicity restrict the application of soybean protein hydrolysates in the food industry as food source peptides. In this study, soybean protein hydrolysates (SPH) was used as core material, and soybean protein (SPI)-soybean polysaccharide (SPSS) complex as wall material, and spray drying technology was used to prepare SPH microcapsules. The physical and chemical properties of the microcapsules were characterized. The core/wall ratio of the microcapsules was 1/4, and the wall material ratio (SPI/SPSS) was 2:1. The microcapsules had the best embedding effect. The embedding rate was 50.92%, the bitterness could be reduced by 2.68 times, and the hygroscopicity could be reduced by 1.61 times. The microcapsules were spherical in shape with a smooth, continuous surface and no holes or cracks. FTIR analysis confirmed that the electrostatic interaction occurred between SPI and SPSS. It is known that soybean polysaccharide and soybean protein are usually regarded as ideal delivery agents because of their macromolecular structure. The complexation of soybean polysaccharide and soybean protein could effectively improve the structural stability of SPH microcapsules. It also provides a theoretical basis for SPH microcapsules as functional ingredients.

Key words: soybean protein hydrolysates; encapsulation; spray drying technique

引文格式:

黄晓梅, 韦翠兰, 侯俊杰, 等. 大豆蛋白酶解产物的微胶囊化及理化性质表征[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 202-208

HUANG Xiao-mei, WEI Cui-lan, HOU Jun-jie, et al. Microencapsulation and characterization of soybean protein hydrolysates [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(7): 202-208

收稿日期: 2019-10-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目 (SCUT, 2019MS097); 广东省教育厅特色创新项目 (2015KTSX088)

作者简介: 黄晓梅 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 蛋白质加工与利用

通讯作者: 王金梅 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 蛋白质加工与利用

大豆蛋白酶解产物(SPH)必需氨基酸含量丰富且比例平衡,在营养食品配方(运动员,老年人等)的工业应用中具有重要意义。生物活性肽具有很多生理学益处,可以有效降低多种慢性疾病风险^[1]。然而,蛋白酶解产物的苦味可能严重限制这些产品在食品中的使用。苦味产生的主要原因是蛋白酶解产物同口腔中苦味受体(T2R)相互作用,同时疏水性氨基酸从蛋白质分子内部释放,引发氨基酸的组成和排列发生变化,导致疏水基团数量上升,即疏水性氨基酸的含量越高,其苦味强度越高^[2]。多肽疏水残基的掩蔽可能是一种脱苦的有效策略。此外,蛋白酶解物还具有很强的吸湿性和反应性^[3]。

微胶囊技术可以作为减少上述问题的可行方案^[4,5]。微囊化是将固体,液体或气体材料包装在不同载体的胶囊中的过程,已在食品工业中普及,其中喷雾干燥技术被广泛应用^[6,7]。此外,微胶囊的包埋率和稳定性在很大程度上取决于壁材的理化性质^[8,9]。食物蛋白,如大豆分离蛋白(SPI)和酪蛋白,可以作为良好的包埋壁材应用于蛋白酶解产物的微胶囊化,但普遍存在包埋率较低的问题^[10,11]。多糖也是进行微胶囊化的壁材的良好选择之一^[12,13],如麦芽糊精、 β -环糊精、果胶和壳聚糖等多糖已成功应用于微胶囊化过程,以减弱产品的苦味^[14-16]。有研究表明,由于阿拉伯胶具有良好的乳化能力和在水溶液中的低粘度,通过喷雾干燥用作微囊化中的包埋剂可有效减弱或掩盖水解酪蛋白的苦味,但在降低吸湿性方面无效^[17]。

基于蛋白与多糖之间可能存在较强的静电和疏水相互作用,蛋白-多糖复合物作为酶解产物的包封材料可能具有巨大潜力^[18]。例如,麦芽糖糊精和乳清蛋白的混合物通过喷雾干燥微囊化亚麻籽油,在储存期间能保护活性物质免于氧化^[19],从而改善了产品的稳定性。大豆多糖(SPSS)结构稳定,价格低廉,在食品工业中受到了极大的青睐,是载体基质的良好选择。本文以大豆酶解产物(SPH)为芯材,以SPI-SPSS复合物为壁材,通过喷雾干燥技术制备SPH微胶囊,优化其制备工艺并对其性质进行表征,以期减小SPH的苦味和吸湿性,为拓宽其应用范围提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

低温脱脂豆粕购买于山东禹王公司,通过杜马斯法测定其蛋白含量为 $48.43\% \pm 2.23\%$ ($N \times 5.71$, 湿基),用于制备大豆分离蛋白;碱性蛋白酶(Alcalase)由诺维信公司提供;大豆多糖(SSPS)由安徽盈合生物科技

有限公司提供;奎宁购买于南京博儒生物科技有限公司;福林酚试剂盒购买于北京鼎国公司;其他所有化学品均为分析级。

1.2 主要仪器设备

高速冷冻离心机 CR22GII, 日本 HITACHI 公司;冷冻干燥机 DELTA, 德国 CHRIST 公司;美国 OMNI 公司;透射电镜 TM3000, 日本 HITACHI 公司;紫外分光光度计 C40, 德国 IMPLIN 公司;杜马斯定氮仪 Rapid N CUBE, 德国 ELEMENTER 公司;傅立叶变换红外光谱仪 Nicolet Avatar360, 德国 BRUKER 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 大豆蛋白酶解产物(SPH)的制备

将低温脱脂豆粕(1:10, m/V)分散于去离子水中,调节 pH 7.5 搅拌,离心(8000 r/min, 20 min),取上清液,调节 pH 至 4.5, 4 °C 下静置;离心(6000 r/min, 15 min),加湿重 7 倍体积水缓慢搅拌重新分散样品,调节 pH 至 7.5;去离子水透析 48 h,冷冻干燥后获得 SPI。

将 SPI (4%, m/V) 分散于去离子水中, 4 °C 水化过夜,调节 pH 至 8.0 后加入碱性蛋白酶(酶与底物 1:100, m/m), 50 °C 水浴中酶解 4 h 后,调节其 pH 至 7.0,沸水灭酶,待冷却后离心(8000 r/min, 20 min),取上清液冷冻干燥获得 SPH。

1.3.2 大豆蛋白酶解产物的微胶囊化

配置 1% (m/V) SPI 溶液,水化后离心(8000 rpm/min, 10 min),取上清液水浴加热(90 °C, 20 min)后立即冷却,再加入 1% (m/V) SPH 溶液后混匀搅拌并调 pH 至 7.0,再加入、经过超声 10 min (150 W, 20 kHz) 的 1% (m/V) 大豆多糖(SSPS, pH 7.0),搅拌混匀得到 SPH-SPI-SSPS 复合溶液。

利用喷雾干燥法制备微胶囊时,芯材与壁材质量比、壁材质量比对微胶囊的功能性质以及对芯材包埋率有重要的影响。获得的 SPH-SPI/SSPS 复合溶液,以 600 mL/h 的固定速率供给溶液,并行模式进行,入口和出口空气温度分别为 150 °C 和 80 °C。获得的微胶囊产品在室温下避光。

1.3.3 包埋率的测定

包埋率的测定参考庄建鹏的方法,并稍做修改^[20]。取微胶囊样品配制 20 mg/mL 的溶液,溶解后将离心(8000 r/min, 10 min),取上清液,加适量的 20% 三氯乙酸(TCA)溶液,旋涡震荡后静置,离心(8000 r/min, 10 min),获得上清液。上清液蛋白水解物含量通过 Lowry 法进行测定。微胶囊包埋率定义为式 1。

$$\text{包埋率 (EE\%)} = \frac{\text{微胶囊中蛋白水解物含量} - \text{游离蛋白水解物含量}}{\text{微胶囊样品中蛋白水解物含量}} \times 100\%$$

(1)

1.3.4 微胶囊苦味的评价

通过浓度稀释法测定蛋白水解物苦味。配制一系列浓度的奎宁标准溶液,浓度分别为 0 、 4×10^{-6} 、 8×10^{-6} 、 1.2×10^{-5} 、 1.6×10^{-5} 、 2×10^{-5} 、 2.4×10^{-5} 、 2.8×10^{-5} 、 3.2×10^{-5} 、 3.6×10^{-5} 、 4×10^{-5} g/mL,各浓度对应的分值分为 0 、 1 、 2 、 3 、 4 、 5 、 6 、 7 、 8 、 9 、 10 分。对比样品 (2% m/V, g/mL) 与奎宁标准溶液,按照标准分值评价待测样品苦味。苦味越强,分值越高。共有 10 位感官评价员 (男性 5 人,女性 5 人) 参与评分。

1.3.5 微胶囊吸湿性

产品的吸湿性是评价产品稳定性的重要指标。微胶囊吸湿性的测定参照 Subtil 的方法,并稍做修改^[21]。将每种粉末的样品 (约 2 g) 置于培养皿中,在 25 °C 下,置于装有饱和 Na_2SO_4 溶液 (81% RH) 的气密塑料容器中。 1 周后,样品称重,吸湿性表示为吸水量 g/100 g 干燥固体。

1.3.6 微胶囊颗粒形貌观察

扫描电子显微镜 (SEM) 已应用于各种微胶囊系统的形态学研究^[22]。将微胶囊样品粉末洒在粘有双面胶的样品盘上,再用洗耳球吹掉浮粉,在真空下对样品进行 10 nm 喷金处理,扫描电镜工作电压为 10 kV。

1.3.7 傅里叶变换红外光谱

将 SPH 微胶囊样品与溴化钾按 $1:100$ 混合均匀后进行压片并测定红外光谱。测定范围为 $4000 \sim 400$ cm^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 壁材的选择

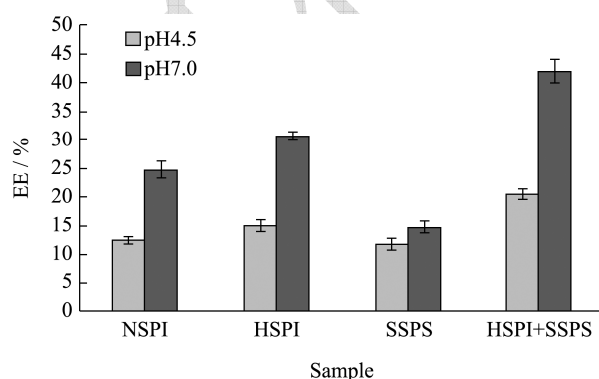


图1 不同壁材对 SPH 的包埋效果

Fig.1 The effect of different wall materials on embedding efficiency of SPH

注: 其中, NSPI 为天然大豆蛋白, HSPI 为 90 °C 热处理大豆蛋白。

本文研究了不同壁材对微胶囊包埋率的影响,结果如图 1 所示。从整体上看, pH 7.0 条件下较 pH 4.5 拥有更高的蛋白水解物包埋率,特别是壁材中含有 SPI 的微胶囊,这可能与分子间的相互作用有关。我们已知在中性条件下,溶液在喷干前是以可溶性复合物的形式存在的, SPI 和 SSPS 都单独带负电, SPI 颗粒和 SSPS 之间形成的复合物更像是通过弱相互作用将 SSPS 涂覆于 SPI 颗粒表面, SSPS 的包裹可明显降低蛋白质颗粒间的相互作用。而在酸性条件下, SSPS 不能有效地抑制蛋白质之间的聚集。

90 °C 加热处理后的蛋白包埋率更高,这与 Chen 等人^[23]研究结果一致,以 90 °C 加热处理后的蛋白为壁材的微胶囊的包埋率比以天然蛋白为壁材的微胶囊的包埋率高。类似现象也见于乳清浓缩蛋白 (WPC) 经过加热后,其包埋率明显高于未经处理的 WPC^[20]。这是因为当加热温度高于蛋白质变性温度时,其结构逐渐展开,使最初埋在分子内部的一些疏水基团暴露出来,蛋白通过疏水作用更有利于 SPH 的包埋。另一方面可能是由于热处理提高了蛋白质的乳化性和界面粘弹性,有助于微胶囊包埋率的提高。这可能是由于多糖与蛋白相互作用,抑制蛋白间的聚集,为蛋白提供空间稳定性。因此,在后续的实验中,壁材采用热处理 SPI 复合 SSPS 为原料,将进一步提升大豆蛋白酶解产物的包埋效果。

2.2 芯材/壁材比例对微囊化的影响

芯材/壁材比例对微胶囊包埋率、苦味与吸湿性的影响如图 2 所示。由图 2a 可知,微胶囊包埋率随着芯材/壁材比例的增大而逐渐降低。当芯材/壁材比例的为 $0.1 \sim 0.5$ 时,微胶囊具有较高的包埋率 ($56.43\% \sim 50.92\%$) 然而,随着芯材含量的继续增大,微胶囊包埋率逐渐减小。类似报道如庄建鹏等人^[20]利用乳清浓缩蛋白包埋乳清蛋白水解物,其包埋率仅为 $41.40\% \sim 62.41\%$ 。由图 2b 知,微胶囊苦味的变化与包埋率呈一定的反比关系,微胶囊包埋率越低,苦味值越高。这可能是微囊化阻止了苦味肽与味蕾的接触,有效地降低了大豆多肽的苦味。

蛋白质水解后,分子结构被破坏,大量亲水基团外露,导致大豆蛋白酶解物具有较高的亲水性。蛋白水解物的强吸湿性会引起不适当变化,包括在储存过程中会团聚、液化和发生霉变等,严重影响其生物活性^[24]。图 2c 为芯材/壁材比例对微胶囊吸湿性的影响情况。SPH 的吸湿性为 56.34 g/100 g,制成微胶囊后

吸湿性显著降低。随着芯材/壁材比例的增大,微胶囊的吸湿性增大。这在一定程度上与包埋率有关,包埋率越高,吸湿性越低。微囊化阻止了 SPH 与空气中水分的直接接触。与 Favaro-Trindade 等^[25]报道的利用明胶和大豆分离蛋白的混合物作为载体,对酪蛋白水解产物进行微囊化,其吸湿性明显降低的结果一致。

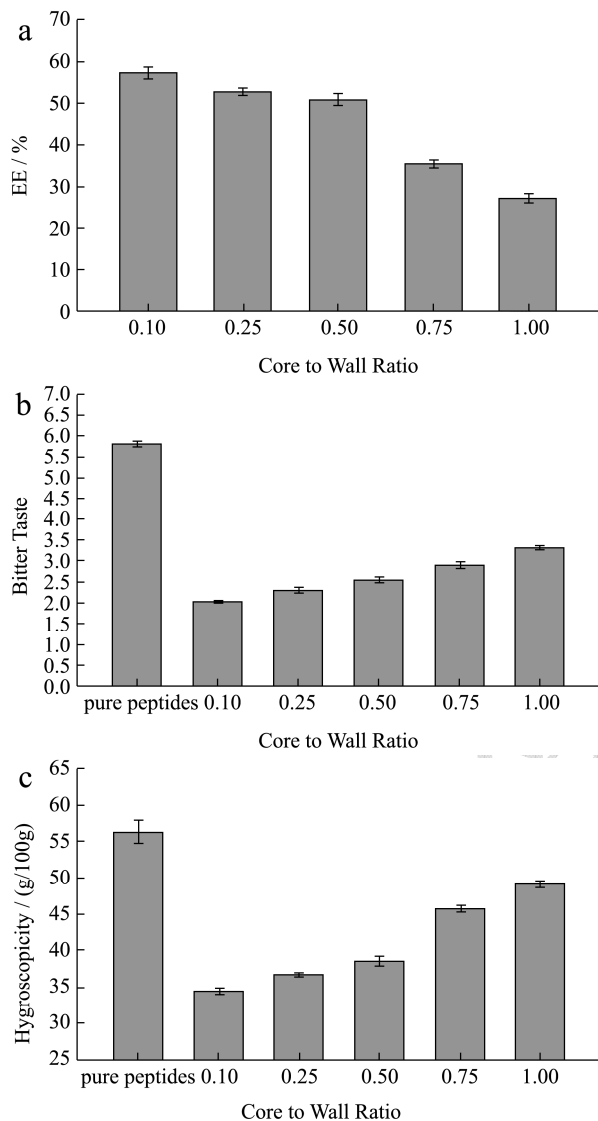


图2 芯材/壁材比例对微胶囊包埋率(a)与苦味(b)、吸湿性(c)的影响

Fig.2 Effect of core/wall ratio on microencapsulation efficiency (a) and bitterness (b)、microcapsule hygroscopicity (c)

2.3 壁材对微囊化的影响

壁材比例对微胶囊包埋率、苦味与吸湿性的影响如图3所示。如图3a所示,以单一SSPS和SPI为壁材的微胶囊的包埋率较低,分别为14.55%和29.86%。SPI和SSPS复合后,微胶囊包埋率显著提高,这表明复合壁材对SPH苦味的掩蔽效果强于单一壁材。这是因为微胶囊首先是SPI与蛋SPH在水相条件下混合,

并且热处理后的SPI部分空间结构展开,疏水基团暴露,与蛋白水解物发生疏水性结合,在蛋白水解物外部形成一层高聚物;其次,随着SSPS的加入,抑制了SPI之间的聚集,在蛋白外部通过静电作用,又形成一层高聚物保护层,能更有效的包埋SPH。随着SPI/SSPS复合比增大,微胶囊包埋率逐渐升高。这是因为蛋白浓度增大,有更多的疏水位点,更倾向于通过分子间的疏水作用将SPH包埋。图3b中显示微胶囊的苦味值变化规律与包埋率有一定关系,先降低后升高,SPH能有效包埋于SPI与SSPS中,降低苦味值。

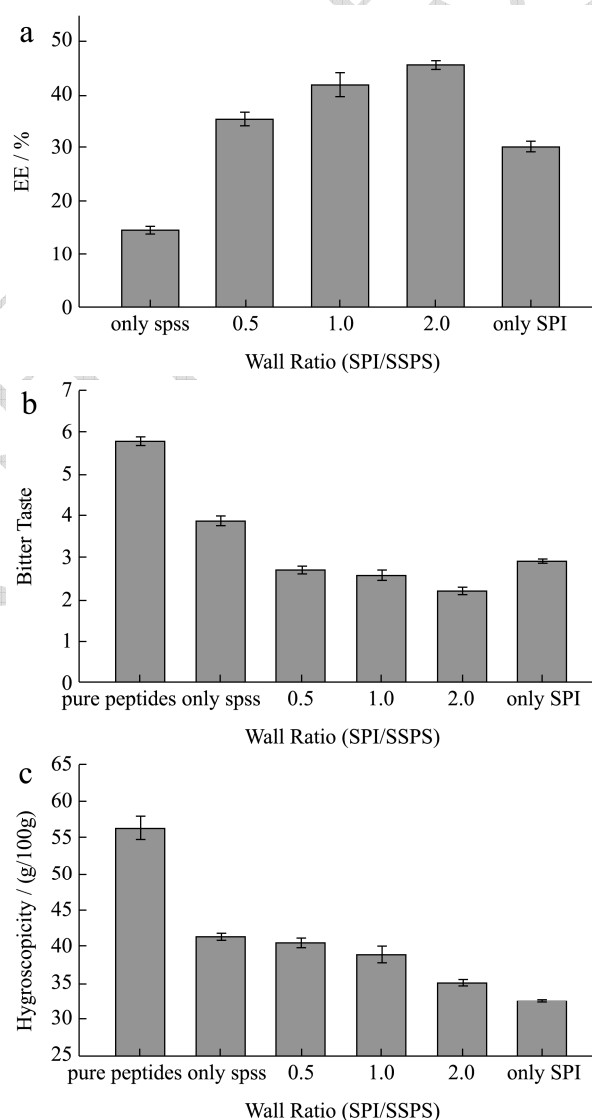


图3 壁材比例对微胶囊包埋率(a)与苦味(b)、吸湿性(c)的影响

Fig.3 Effect of wall ratio on microencapsulation efficiency (a) and bitterness (b)、microcapsule hygroscopicity (c)

图3c为壁材对微胶囊吸湿性的影响情况。如图所示,SPH经喷雾干燥微囊化后,其吸湿性明显降低且受壁材品种及比例的强烈影响。与单一SPI为壁材的

微胶囊相比,复合壁材微胶囊的吸湿性略微增大,这可能与微胶囊结构有关。将蛋白质溶液加热至其变性温度以上,冷却后与苦味肽结合,然后与离子多糖络合,形成双层结构,SSPS的加入可能导致微胶囊吸湿性的提高。Fang等人^[26]利用SSPS包埋橙油实验中得到类似的实验现象,研究发现SSPS可保护橙油中的柠檬烯免于氧化,但吸附了更多的水分。

2.4 SPH微胶囊的形貌观察

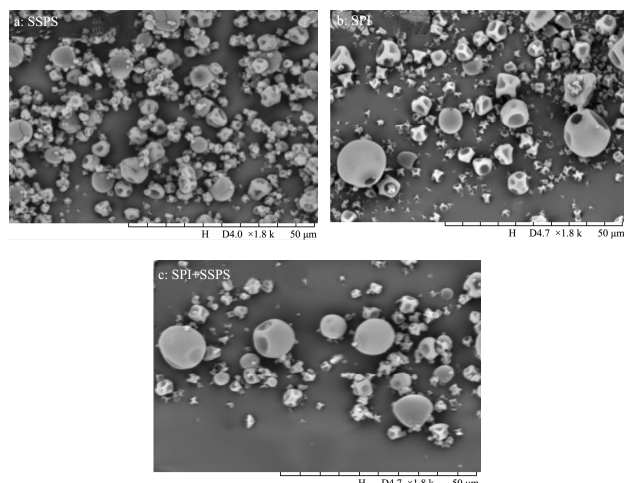


图4 喷雾干燥制备的蛋白水解物微胶囊的电镜扫描形态图

Fig.4 Electron microscopic scanning morphology of peptide microcapsules prepared by spray drying

图4为不同壁材制备的微胶囊的形貌观察图。由该图可知,微胶囊根据不同的壁材呈不同形态。微胶囊聚集现象较明显(图4a)。这是包埋技术中的主要问题之一,可能是由于多糖的存在^[27]。单一SPI和SSPS为壁材的微胶囊呈不规则状(图4a、b),表面凹陷较多,这可能是由于喷雾干燥过程中,瞬间高温导致蛋白液滴快速蒸发所致^[22],这些凹陷是颗粒的特征。图4b是以单一热处理SPI为壁材的微胶囊的形貌观察图;微胶囊表面仍有凹陷,但空洞较少,原因是加热使蛋白质部分结构打开,表现出更好的包埋特性。而以SPI和SSPS为复合壁材的微胶囊大多呈近似均匀的球型(图4c)。微胶囊表面是连续的、表面没有裂缝、孔隙或断裂,这些特征对于确保更有效地包埋和保留生物活性成分至关重要。壁材表面光滑,可能是因为复合后的壁材表现出更好的界面吸附性质^[20],复合壁材微胶囊样品物理性质得到改善,能够填充微胶囊的内部空间,保持水合作用,避免表面凹陷,并拥有更均匀的微粒壁。

2.5 SPM微胶囊的红外分析

为了研究SPI-SSPS复合物作为壁材对SPH包埋的机理,试图通过傅里叶变换红外光谱的方法来分析SPH、SPI、SSPS、SPH-SPI微胶囊、SPH-SSPS微胶囊以及SPH-SPI/SSPS微胶囊的结构特性,并探究SPI与SSPS之间的相互作用。

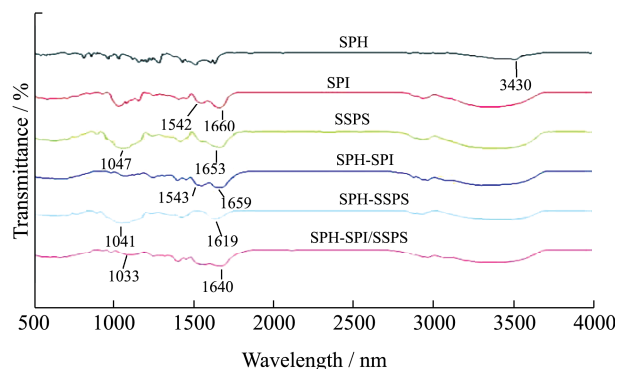


图5 大豆蛋白酶解产物微胶囊的红外光谱图

Fig.5 FT-IR spectra of SPH, SPI, SSPS, SPH-SPI microcapsules, SPH-SSPS microcapsules and SPH-SPI/SSPS microcapsules

如图5所示,SPI有 1542 cm^{-1} 和 1660 cm^{-1} 两个特征峰,分别为亚氨基弯曲振动和 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动,这与文献报道结果一致^[28]。SSPS的特征峰为 1047 cm^{-1} (鼠李糖半乳糖醛酸聚糖组分)和 1653 cm^{-1} (羧基伸缩振动)^[29]。将SPH制备成微胶囊后,SPH的特征峰 3430 cm^{-1} ($\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动)消失,微胶囊的特征峰显示为壁材(SPI或SSPS)的特征峰,说明SPH已被包埋于内部。在pH 7.0条件下制备的以SPI/SSPS为复合壁材的微胶囊,发现其 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动吸收峰发生蓝移,偏移为 1640 cm^{-1} ;而亚氨基弯曲振动吸收峰消失,表明SPI与SSPS之间发生了静电相互作用。Ye^[30]等人也证实了在pH 7.0条件下,蛋白质氨基酸残基可与阴离子多糖发生静电作用。

2.6 SPM微胶囊的储藏稳定性

将SPH和SPH微胶囊密封于铝箔袋中,在高温高湿储存条件下($45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 75% RH)放置一个月,其含水量的变化如图6a所示。由该图可知,微囊化技术能显著减小大豆蛋白酶解产物含水量。随着储存时间的延长,SPH和SPH微胶囊的含水量均增大,但大豆蛋白酶解产物微胶囊含水量的增幅十分微小。

图6b为储存过程中蛋白酶解产物包埋率的变化情况。由图可知,多肽包埋率随储存时间的延长而减小,但减小的趋势十分微小,30 d内总共仅下降了2.070%,表明微胶囊在储存过程中具有较好的稳定性。

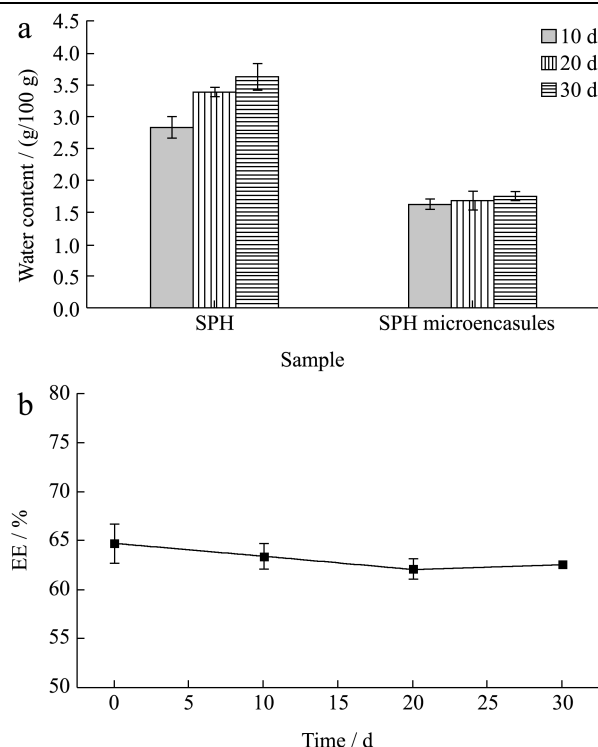


图6 SPH 和 SPH 微胶囊在储存过程中含水量(a)和包埋率(b)的变化

Fig.6 Changes in water content of SPH, SPH microcapsules (a) and embedding efficiency (b) during storage

3 结论

通过微胶囊制备工艺和性质表征实验,可以确定微胶囊的芯材/壁材比例为 1/4, 壁材比例 (SPI/SSPS) 为 2/1, 在该条件下制备的微胶囊具有最佳的包埋效果, 其包埋率为 50.918%、苦味降低 2.68 倍以及吸湿性降低 1.61 倍。红外分析实验结果显示微胶囊呈球形, 表面光滑、连续, 无孔洞或裂缝, 表明 SPI 与 SSPS 之间发生了静电相互作用。表明其具有良好的稳定性, 这同样也为提升 SPH 微胶囊产品作为功能性配料的产品竞争力提供一定理论基础。

参考文献

[1] Chen L, Remondetto G E, Subirade M. Food protein-based materials as nutraceutical delivery systems [J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(5): 272-283

[2] Raksakulthai R, Haard N F. Exopeptidases and their Application to reduce bitterness in food: a review [J]. Critical Review in Food Science and Nutrition, 2003, 43(4): 401-445

[3] Favaro-Trindade C S, Santana A S, Monterrey-Quintero E S, et al. The use of spray drying technology to reduce bitter taste of casein hydrolysate [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(4):

336-340

[4] Brannon-Peppas L. Controlled release in the food and cosmetics industries [J]. Food and Agriculture Organization of United States, 1993, 3: 42-52

[5] Shahidi F, Han X. Encapsulation of food ingredients [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1993, 33(6): 501-547

[6] Reineccius G A. Flavor encapsulation [J]. Food Review International, 1989, 5(2): 147-176

[7] Sagar V R, Kumar P S. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review [J]. Journal of Food Science and Technology, 2010, 47(1): 15-26

[8] 张亚婷.大豆蛋白酶解/糖基化接枝复合改性制备微胶囊壁材的研究[D].无锡:江南大学,2015

ZHANG Ya-ting. Research on microcapsule wall material preparation via soy protein isolate combined modification of enzymatic hydrolysis and glycosylation [D]. Wuxi: JiangNan University, 2015

[9] Goula A M, Adamopoulos K G. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(1): 35-42

[10] Daskaya-Dikmen C, Yucetepe A, Karbancioglu-Guler F, et al. Angiotensin-I-converting enzyme (ACE)-inhibitory peptides from plants [J]. Nutrients, 2017, 9(4): 316-334

[11] Landy P, Druaux C, Voilley A. Retention of aroma compounds by proteins in aqueous solution [J]. Food Chemistry, 1995, 54(4): 387-392

[12] Re' M I. Formulating drug delivery systems by spray drying [J]. Drying Technology, 2006, 24(4): 433-446

[13] Su Y L, Fu Z Y, Zhang J Y, et al. Microencapsulation of radix *Salvia miltiorrhiza* nanoparticles by spray-drying [J]. Powder Technology, 2008, 184(1): 114-121

[14] Fuchs M, Turchiuli C, Bohin M, et al. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(1): 27-35

[15] Lopez-Rubio A, Lagaron J M. Whey protein capsules obtained through electrospraying for the encapsulation of bioactives [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 13: 200-206

[16] Mendanha D V, Ortiz S E M, Favaro-Trindade C S, et al. Microencapsulation of casein hydrolysate by complex coacervation with SPI/pectin [J]. Food Research International, 2009, 42(8): 1099-1104

[17] Subtil S F, Rocha-Selmi G A, Thomazini M, et al. Effect of spray drying on the sensory and physical properties of

- hydrolysed casein using gum arabic as the carrier [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9): 2014-2021
- [18] Hosseini S M H, Emam-Djomeh Z, Sabatino P, et al. Nanocomplexes arising from protein-polysaccharide electrostatic interaction as a promising carrier for nutraceutical compounds [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 50: 16-26
- [19] Carneiro H C F, Tonon R V, Grosso C R F, et al. Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(4): 443-451
- [20] 庄建鹏. 乳清浓缩蛋白水解物的降胆固醇活性及微囊化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015
- ZHUANG Jian-peng. The study of the hypocholesterolemic activity and microencapsulation of whey protein concentrate hydrolysate [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015
- [21] Subtil S F, Rocha-Selmi G A, Thomazini M, et al. Effect of spray drying on the sensory and physical properties of hydrolysed casein using gum arabic as the carrier [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9): 2014-2021
- [22] Rosenberg M, Kopelman I J, Talman Y. A scanning electron microscopy study of microencapsulation [J]. Food Science, 1985, 50(1): 139-144
- [23] Chen F P, Li B S, Tang C H. Nano-complexation between curcumin and soy protein isolate: influence on curcumin stability/bioaccessibility and *in vitro* protein digestibility [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(13): 3559-3569
- [24] Lin S, Yang S, Li X, et al. Dynamics of water mobility and distribution in soybean antioxidant peptide powders monitored by LF-NMR [J]. Food Chemistry, 2016, 199: 280-286
- [25] Favaro-trindade C S, Santana A S, Monterrey-quintero E S, et al. The use of spray drying technology to reduce bitter taste of casein hydrolysate [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(4): 336-340
- [26] Fang X, Watanabe Y, Adachi S, et al. Microencapsulation of linoleic acid with low- and high-molecular-weight components of soluble soybean polysaccharide and its oxidation process [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2003, 67(9): 1864-1869
- [27] Blanco-Pascual N, Koldeweij R B J, Stevens R S A, et al. Peptide microencapsulation by core-shell printing technology for edible film application [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(9): 2472-2483
- [28] Liu Y Y, Zeng X A, Deng Z P, et al. Effect of pulsed electric field on the secondary structure and thermal properties of soy protein isolate [J]. European Food Research and Technology, 2011, 233: 841-850
- [29] Chen F P, Ou S Y, Tang C H, et al. Core-shell soy protein-soy polysaccharide complex nanoparticles as carriers for improved stability and sustained release of curcumin [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2016, 64: 5053-5059
- [30] Ye A. Complexation between milk proteins and polysaccharides *via* electrostatic interaction: principles and applications: a review [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2008, 43(3): 406-415

(上接第 56 页)

- [22] 兰天, 刘巍梦, 邹阳, 等. 不同浓度二甲双胍对大鼠脂肪代谢相关基因 Galectin-3、PPAR γ mRNA 及蛋白表达的影响[J]. 中国医院用药评价与分析, 2019, 19(11): 1299-1302
- LAN Tian, LIU Wei-meng, ZOU Yang, et al. Effects of metformin at different concentrations on the expression of galectin-3, PPAR γ mRNA and protein related to fat metabolism in rats [J]. Evaluation and Analysis of Chinese Hospital Medication, 2019, 19(11): 1299-1302
- [23] 高红丽, 李虹伟. 糖基化终末代谢产物及其受体与动脉粥样硬化的关系及抑制剂的研究进展[J]. 临床和实验医学杂志, 2016, 15(6): 610-613
- GAO Hong-li, LI Hong-wei. Relationship between glycosylation end products and their receptors and atherosclerosis and research progress of inhibitors [J]. Journal of Clinical and Experimental Medicine, 2016, 15(6): 610-613
- [24] Xu J, Nie M, Li J, et al. Effect of pioglitazone on inflammation and calcification in atherosclerotic rabbits: an 18F-FDG - PET/CT *in vivo* imaging study [J]. Herz, 2018, 43(8): 733-740