# 非离子型表面活性剂对辣椒红色素复凝聚微胶囊稳定性影响的研究

杜艳丽，黄国清，孙兴丽，肖军霞

（青岛农业大学食品科学与工程学院，山东青岛 266109）

**摘要：**有研究表明，添加离子型表面活性剂可以增强复凝聚产物中聚电解质之间的相互作用以及增强所得微胶囊的稳定性。本文以大豆分离蛋白（SPI）和壳聚糖为壁材，采用复凝聚法制备辣椒红色素（PRP）微胶囊，以保留率为指标，研究了添加非离子型表面活性剂双乙酰酒石酸单甘油酯（DATEM，1%）、麦芽糊精（MD，6%）或蔗糖脂肪酸酯（SE，0.8%）对 PRP 的包埋效果及所得微胶囊对温度（60 ℃、80 ℃和 100 ℃）、光照（室外光、室内光与避光）和相对湿度（33%、58%和 98%）稳定性的影响。结果表明：添加非离子型表面活性剂对 PRP 的包埋率和包埋效率没有显著影响，但是 SE 显著增强了 PRP 微胶囊的稳定性，而 DATEM 和 MD 对 PRP 微胶囊的稳定性无显著有利影响。因此，添加适量非离子型表面活性剂是提高 PRP 复凝聚微胶囊的一种有效方法。

**关键词：**非离子型表面活性剂；辣椒红色素；大豆分离蛋白/壳聚糖复凝聚；微胶囊；稳定性

**文章篇号：**1673-9078(2017)1-166-172 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.1.026

# Effect of Non-ionic Surfactants on the Stability of Paprika Red Pigment Microcapsules Prepared by Complex Coacervation

**DU Yan-li, HUANG Guo-qing, SUN Xing-li, XIAO Jun-xia**

(College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** The addition of ionic surfactants has been reported to enhance the interaction between polyelectrolytes in coacervates and increase the stability of the resultant microcapsules. Paprika red pigment (PRP) microcapsules were prepared by complex coacervation of soybean protein isolate (SPI)/chitosan. Using retention rate as an indicator, the effect of non-ionic surfactants, including diacetyl tartaric acid ester of monoglyceride (DATEM, 1%), maltodextrin (MD, 6%), and sucrose ester (SE, 0.8%), on the microencapsulation performance and the stability of the resultant PRP microcapsules were studied at various temperatures (60 ℃, 80 ℃, and 100 ℃), light exposure (outdoor light, indoor light, and dim light), and relative humidity (33%, 58%, and 98%). The results indicated that the three non-ionic surfactants did not affect the microencapsulation efficiency or yield of PRP. However, the presence of SE significantly enhanced the stability of the PRP microcapsules, whereas DATEM and MD did not exert significantly beneficial effects. It was concluded that the addition of suitable amount of non-ionic surfactant was an effective method to improve the stability of PRP microcapsules prepared by complex coacervation.

**Key words:** non-ionic surfactants; paprika red pigment; soybean protein isolate/chitosan coacervation; microcapsule; stability

辣椒红色素（paprika red pigment，PRP）是一种天然食用色素，它安全无毒且具有众多营养保健功能，因此具有良好发展前景[1,2]。由于 PRP 为脂溶性，在加工中很难与其他基料混合均匀；另外，PRP 稳定性较差，极易发生氧化。因此，增强 PRP 的使用性及稳定性有利于拓展其应用范围[3~5]。微囊化是解决这一问题的方法之一，喷雾干燥是目前最常用的手段，已报导用于 PRP 微囊化的壁材有明胶、变性淀粉及糊精等[6~8]。但喷雾干燥法易造成 PRP 损失，这限制了喷雾干燥法在 PRP 微囊化中的应用。冷脱水工艺也已被用于 RPR 油树脂的包埋，但是该方法成本较高[9]。

复凝聚是一种利用两种带不同电荷的聚电解质之间的静电作用而达到包埋芯材目的的微囊化方法[10]。在复凝聚法制备微胶囊的过程中，壁材与芯材形成的 O/W 乳液体系属于热力学亚稳定体系，为了保持乳化体系的稳定性，可加入表面活性剂以进一步提高乳液的稳定性，进而增加微胶囊的贮藏性。已有学者就添

收稿日期：2016-01-27

基金项目：国家自然科学基金项目（31571890）；山东省自然科学基金项目（ZR2015CM037）

作者简介：杜艳丽（1990-），女，硕士研究生，研究方向：食品配料及稳态化技术

通讯作者：肖军霞（1977-），女，博士，教授，研究方向：食品配料及稳态化技术

加离子型表面活性剂对复凝聚反应及所得微胶囊稳定性的影响进行了研究。Li 等[11]发现，添加适量十二烷基磺酸钠可显著增强明胶与羧甲基纤维素纳之间的相互作用，并显著提高被包埋芯材的稳定性。与离子型表面活性剂不同，非离子型表面活性剂在水溶液中不发生电离，因此对复凝聚反应及所得微胶囊的稳定性可能会产生的影响。目前尚未见到这方面的报导。

本文作者前期对大豆分离蛋白（soybean protein isolate，SPI）/壳聚糖（chitosan，CH）复凝聚体系在 PRP 微囊化中的应用进行了较为系统的研究，发现该体系可在一定程度上提高 PRP 的稳定性[12,13]。已有报导显示非离子型表面活性剂可显著增加 SPI 的乳化活性。例如，张钊等[14]研究了几种食品添加剂对肉制品加工用 SPI 乳化性质影响，发现 0.2%的蔗糖脂肪酸酯（sucrose fatty ester，SE）能有效改善 SPI 的乳化能力；朱选等[15]在用喷雾干燥法制备 *β*-胡萝卜素时研究了卵磷脂对水解大豆蛋白和明胶乳化能力的影响，研究表明卵磷脂能改善这两种蛋白质体系的乳化性能；Fang 和 Dalgleish[16]发现低浓度磷脂可以提高 O/W 乳状液稳定性。

本文研究了三种非离子型表面活性剂，即双乙酰酒石酸单甘油酯（diacetyl tartaric acid ester of monoglyceride，DATEM）、麦芽糊精（maltodextrin，MD）和蔗糖脂肪酸酯（sucrose fatty ester，SE）对利用 SPI/壳聚糖复凝聚体系制备的 PRP 微胶囊稳定性的影响进行了研究，以期为进一步提高 PRP 微胶囊的稳定性提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

大豆分离蛋白（SPI，食品级），青岛天新食品添加剂有限公司；辣椒红色素（PRP，食品级），青岛市同兴天然色素科技有限公司；壳聚糖（食品级，80 mPa·s），山东金湖甲壳制品有限公司；双乙酰酒石酸单甘油酯（DATEM，食品级）和蔗糖脂肪酸酯（SE，食品级），河南正通化工有限公司；麦芽糊精（MD，食品级），德清三富食品有限公司；谷氨酰胺转氨酶（TG），泰兴市东圣食品科技有限公司；无水乙醇（AR），莱阳市康德化工有限公司；氢氧化钠（AR）和盐酸（AR），天津市广成化学试剂有限公司。

UV-2000 紫外可见分光光度计，上海尤尼科仪器有限公司；SPS401F 万分之一分析天平，平赛多利斯科学仪器有限公司；DL-5-B 低速大容量离心机，上海安亭仪器设备厂；Delta320 pH 计，梅特勒-托利多仪器公司；HH-2 数显恒温水浴锅，龙口市先科仪器公司；GZ120 悬臂式恒速强力电动搅拌机，江阴市保利科研器械有限公司；ZDG-0.25 真空冷冻干燥机，烟台冰轮股份有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 复凝聚法 PRP 微胶囊的制备

按照前期研究确定的条件制备 PRP 微胶囊[12,13]。按 PRP/SPI 比例 1:1.6（*m/m*）将 PRP 与 pH 为 8.0、质量浓度为 2.4%且含有 1% DATEM、6% MD 或 0.8% SE 的 SPI 溶液混合，以未加非离子型表面活性剂的 SPI 溶液为对照，于 65 ℃、12000 r/min 条件下搅拌 20 min 形成均匀 PRP 乳状液。将 PRP 乳状液冷却至室温，按 SPI:CH 质量比为 4:1 等体积加入 0.6%的 CH 溶液，用 10% NaOH 溶液调节混合液的 pH 到 6.3，水浴 25 ℃、300 r/min 搅拌 15 min 后冷却到室温得到微胶囊悬浮液，过滤、水洗得湿囊。将微胶囊悬浮液的 pH 调节至 6.0，按照 18.75 U/g SPI 的剂量加入谷氨酰胺转氨酶于 45 ℃下固化 3 h，最后过滤水洗得湿囊，经冷冻干燥得到 PRP 微胶囊。

#### 1.2.2 微胶囊包埋效率和产率的测定

包埋效率和产率的计算公式如下：

$$\text{包埋效率}\ (\%)=\left(1-\frac{\text{微胶囊表面PRP含量}}{\text{微胶囊中PRP总含量}}\right)\times 100$$

$$\text{包埋产率}\ (\%)=\frac{\text{微胶囊中PRP总含量}}{\text{所加入的PRP总量}}\times 100$$

1.2.2.1 PRP 含量的测定

PRP 的含量按以下公式计算[17~20]：

$$C=\frac{A\times f}{E\times m}$$

式中 C，PRP 的含量；A，吸光度值；f，稀释倍数；E，PRP 溶于乙醇，在波长 475 nm 处的消光系数；m，微胶囊样品的质量。

1.2.2.2 微胶囊表面 PRP 含量的测定

称取 0.10 g 微胶囊于试管中，加入 10 mL 无水乙醇后，500 r/min 涡旋震荡 1 min，室温下提取表面油。然后静置 5 min，取其上清液用无水乙醇稀释至适当倍数（f），然后用无水乙醇做对照，根据 1.2.2.1 中的方法计算微胶囊表面 PRP 的含量。

1.2.2.3 微胶囊中 PRP 总含量的测定

称取 0.10 g 微胶囊于试管中，加入 10 mL 无水乙醇，室温下 500 W 超声处理 20 min 左右，直至 PRP 被完全提取出来，此时下层为白色沉淀，上清液为红色的液体。静置 5 min 后取其上清液用无水乙醇稀释至适当倍数（f），以无水乙醇作对照，于 475 nm 处测

定吸光度，利用 1.2.2.1 中的方法计算 PRP 的总含量。

1.2.2.4 所加入 PRP 总量的测定

称取 0.10 g 微胶囊中需要加入 PRP 的总量于试管中，加入 10 mL 无水乙醇，室温下 500 W 超声处理 20 min。取出试管，静置 5 min，取其上清液用无水乙醇稀释至适当倍数（f），以无水乙醇作对照，于 475 nm 处测定吸光值，利用 1.2.2.1 中的方法计算所加入 PRP 的总量。

### 1.2.3 PRP 微胶囊贮藏稳定性的测定

1.2.3.1 PRP 微胶囊对加热的稳定性

将PRP微胶囊分别在不同温度下（60 ℃、80 ℃和100 ℃）室内光下保存，每隔2 h取一次样，共持续10 h，然后参照1.2.2.1中相应的方法测定PRP含量的变化，并按照下式计算PRP的保留率：

$$保留率（\%）=\frac{A_i}{A_0}\times 100$$

式中，$A_0$：起始时刻475 nm处测得的吸光度；$A_i$：处理i时刻后测得的吸光度。

1.2.3.2 PRP 微胶囊对光照的稳定性

将PRP微胶囊分别置于室外光、室内光及避光条件下保存，每隔7 d取一次样，共持续35 d，参照1.2.2.1测定PRP含量，并计算PRP的保留率。

1.2.3.3 PRP 微胶囊对湿度的稳定性

将PRP微胶囊分别在不同相对湿度（33%、58%和98%）下室温避光保存，每隔7 d取一次样，共持续35 d，参照1.2.2.1测定PRP含量，并计算PRP的保留率。相对湿度及对应的饱和盐溶液为：饱和$MgCl_2$溶液（相对湿度33%）；饱和NaBr溶液（相对湿度58%）；饱和$Na_2HPO_4$溶液（相对湿度98%）。

### 1.2.4 数据处理

每个试验重复3次，结果以 $\bar{x}\pm s$表示。采用SPSS 17.0（美国SPSS公司）进行统计分析。组间差异显著性分析采用方差分析（Analysis of Variance，ANOVA）中的Tukey HSD测试，显著水平$p<0.05$时认为差异显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 非离子型表面活性剂对 PRP 包埋效果的影响

添加三种离子型表面活性剂对 PRP 微囊化效果的影响如图 1 所示。由图 1 可知，三种表面活性剂对 PRP 微胶囊包埋效果的影响顺序为 1% DATEM>0.8% SE>6% MD，其中添加 1% DATEM 对微胶囊的包埋效果最好，包埋效率、产率分别为 96.21%和 90.68%，但与未添加表面活性剂的 PRP 微胶囊相比，三者对 PRP 包埋效果的影响差异并不显著（$p>0.05$）。这表明，添加这三种非离子型表面活性剂对 PRP 的包埋效果没有影响。

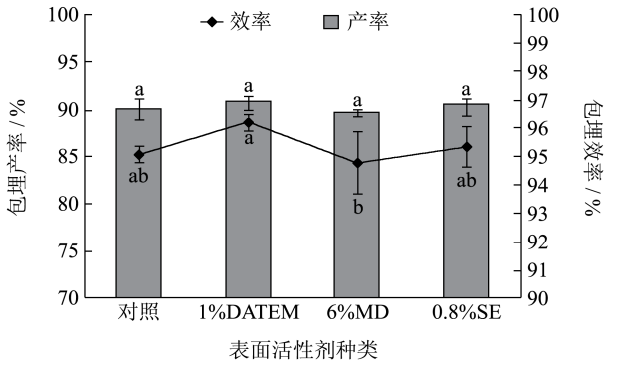



**图 1 添加非离子型表面活性剂对 PRP 微胶囊包埋效果的影响**

**Fig.1 Effect of the addition of non-ionic surfactants on the efficiency and yield of PRP microcapsules**

注：相同字母表示在$p<0.05$水平上差异显著。

### 2.2 非离子型表面活性剂对 PRP 微胶囊热稳定性的影响

添加非离子型表面活性剂对所得 PRP 微胶囊在 60 ℃、80 ℃和 100 ℃下稳定性的影响分别见图 2、图 3 和图 4 所示。

由图 2~4 可知，PRP 的热稳定性较差，尤其对高温非常敏感。随着在高温下贮藏时间的延长，所有微胶囊的 PRP 保留率均随之下降，且随着贮藏温度的升高，PRP 保留率急剧下降。以未添加任何非离子型表面活性剂的 PRP 微胶囊为例，在 60 ℃和 80 ℃下分别存贮 10 h 后，其保留率分别为 69.17%和 61.27%，当贮藏温度升至 100 ℃后，其保留率仅为 29.83%。

添加表面活性剂对 PRP 微胶囊的热稳定性有不同的影响。添加 DATEM 降低了微胶囊的热稳定性，且这种效应在高温时尤为明显。当在 60 ℃、80 ℃和 100 ℃下贮藏 10 h 后，PRP 的保留率分别为相应对照的 97.8%、96.5%和 78.64%，而添加 SE 则增强了微胶囊的稳定性，在上述三个温度下贮藏 10 h 后，PRP 的保留率分别为相应对照的 1.15 倍、1.01 倍和 1.22 倍，而添加 MD 对微胶囊中 PRP 的保留率无显著影响。

加热对胡萝卜素类物质的主要影响是引起异构化和降解[21]，氧气的存在会加速这一反应的进行[22]。目前尚无证据表明 SPI 和 CH 通过复凝聚反应在 PRP 表面形成的薄膜有隔热作用，因此我们可以推断，加入非离子型表面活性剂，尤其是 SE 可增强壁材的阻隔

性能，从而减少环境中氧气向微胶囊中的渗透，进而提高 PRP 的稳定性。

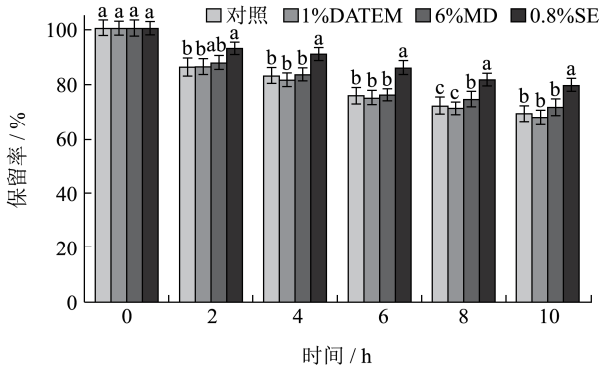



图 2 PRP 微胶囊在 60 ℃的稳定性

**Fig.2 Stability of PRP microcapsules at 60 ℃**

注：多重比较在同一时间的不同样品之间进行，相同字母表示在 $p$<0.05 水平上差异显著。下同。

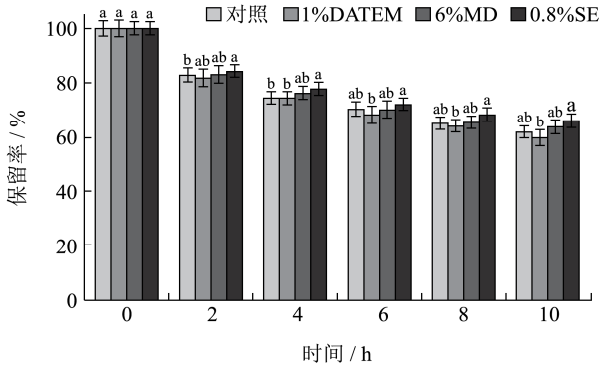



图 3 PRP 微胶囊在 80 ℃的稳定性

**Fig.3 Stability of PRP microcapsules at 80 ℃**

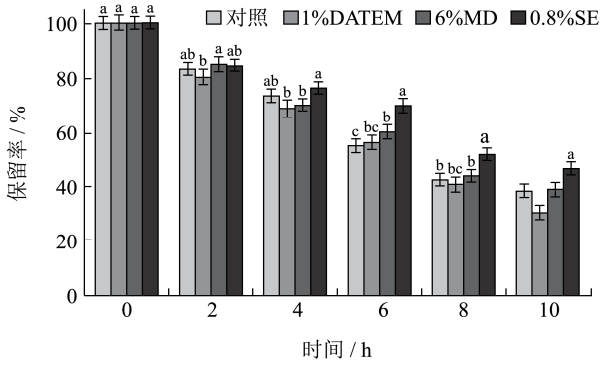



图 4 PRP 微胶囊在 100 ℃的稳定性

**Fig.4 Stability of PRP microcapsules at 100 ℃**

## 2.3 非离子型表面活性剂对 PRP 微胶囊在不同光照下稳定性的影响

添加非离子型表面活性剂对 PRP 微胶囊在室外光下稳定性的影响如图 5 所示。由图 5 可知，PRP 对光照极其敏感，随着贮藏时间的延长，所有微胶囊的 PRP 保留率均显著下降，这一结果与马嫄等[23]在 PRP 微胶囊化工艺研究中观察到的结果一致。尤其是对于未添加任何表面活性剂的对照及添加了 DATEM 的微胶囊，在室外光的照射下贮存 35 d 后，微胶囊中的 PRP 几乎完全损失。添加 MD 和 SE 显著提高了 PRP 微胶囊对室外光的稳定性，贮藏 35 d 后，两者的保留率分别为 8.43%和 26.58%。这说明添加非离子型表面活性剂，尤其是 0.8%的 SE 可以显著提高 PRP 微胶囊对强光照的稳定性。

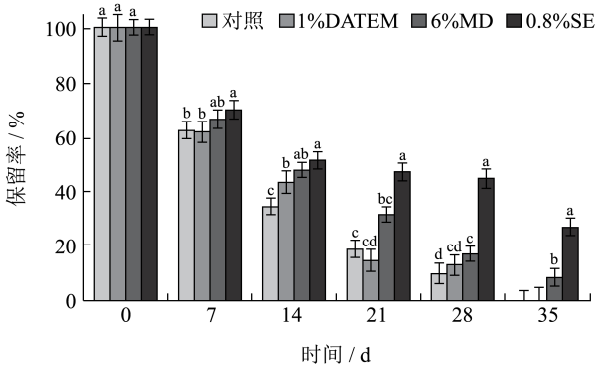



图 5 PRP 微胶囊在室外光下的稳定性

**Fig.5 Stability of PRP microcapsules against outdoor light**

添加了不同非离子型表面活性剂的 PRP 微胶囊在室内光贮藏条件下的稳定性如图 6 所示。与室外光相比（图 5），PRP 微胶囊室内光下的稳定性有了明显的提高，辣椒红色素保留率随贮藏时间的下降趋势变缓，这与马嫄等[23]和罗毅皓[24]观察到的结果一致。贮藏 35 d 后，未添加任何表面活性剂的微胶囊的 PRP 保留率下降至了 58.36%。添加 SE 显著的提高了微胶囊的稳定性，贮藏 35 d 后，其 PRP 的保留率达到了 65.93%，是对照的 1.13 倍。另外两种非离子型表面活性剂虽然也在一定程度上提高了 PRP 的保留率，但是效果并不显著（$p$>0.05）。

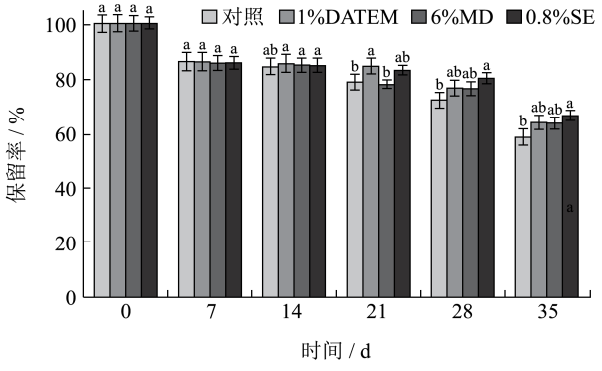



图6 PRP微胶囊在室内光下的稳定性

**Fig.6 Stability of PRP microcapsules against indoor light**

添加非离子型表面活性剂对 PRP 微胶囊在暗光下贮藏稳定性的影响如图 7 所示。与图 5 和图 6 比较，图 7 中各样品在避光条件下贮藏时，随着贮藏时间的延长，PRP 微胶囊保留率下降趋势减缓，PRP 损失最

少。这与冯岩[25]的复合凝聚法制备维生素 E 微胶囊的研究中，光照对微胶囊贮藏稳定性影响结论一致。这是因为 PRP 是光敏性物质，对光照敏感[7]，而避光则起到很好的保护作用。添加非离子型表面活性剂对 PRP 微胶囊在暗光条件下的稳定性与室内光条件下稳定性的影响一致，即添加 SE 显著提高了 PRP 的保留率，贮藏 35 d 后，其保留率达到了 79.54%，为对照组的 1.10 倍，而添加另外两者非离子型表面活性剂对微胶囊的稳定性无显著影响。这表明，添加 SE 后所形成的壁材可更加有效的减少光线与 PRP 的接触。

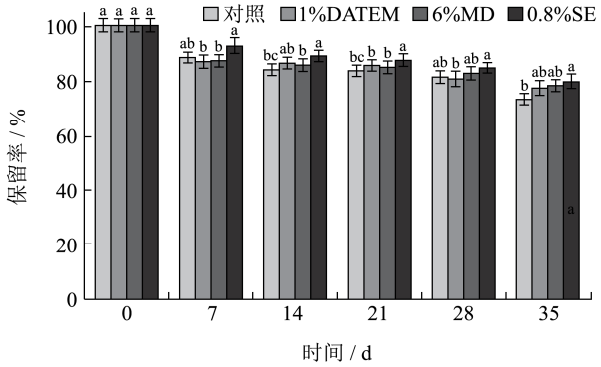



图 7 PRP 微胶囊在暗光下的稳定性

**Fig.7 Stability of PRP microcapsules against dim light**

## 2.4 非离子型表面活性剂对 PRP 微胶囊在不同相对湿度下稳定性的影响

添加了各种非离子型表面活性剂的微胶囊在 33%、53%和 98%下贮藏 35 d 过程中 PRP 保留率的变化分别如图 8、图 9 和图 10 所示。

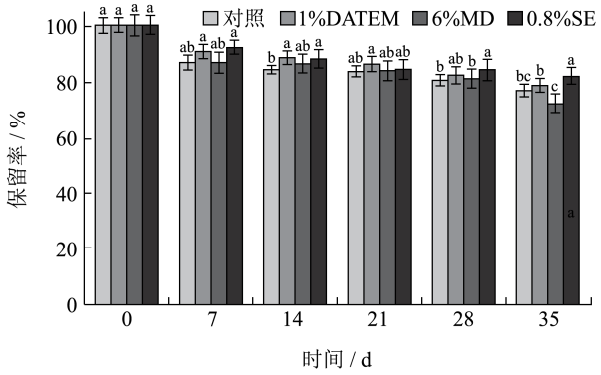



图 8 PRP 微胶囊在 33%相对湿度下的稳定性

**Fig.8 Stability of PRP microcapsules at 33% relative humidity**

由图 8、图 9 和图 10 可知，分别在上述三个相对湿度下贮藏 35 d 后，对照组微胶囊中的 PRP 保留率分别下降至了 77.00%、75.77%和 55.72%，表明 PRP 对高湿度也较为敏感，这与李柱等[26]观察到的现象一致。添加非离子型表面活性剂对微胶囊中 PRP 的稳定性有不同的影响，其中添加 SE 显著增强了微胶囊在低湿（33%）和高温（98%）条件下的稳定性，贮藏 35 d 后，两者的保留率分别是对照的 1.06 倍和 1.11 倍，但是对微胶囊在中湿（53%）环境下的稳定性无显著影响；另外两种非离子型表面活性剂对微胶囊在三种相对湿度条件下的稳定性均无显著影响（$p$>0.05）。

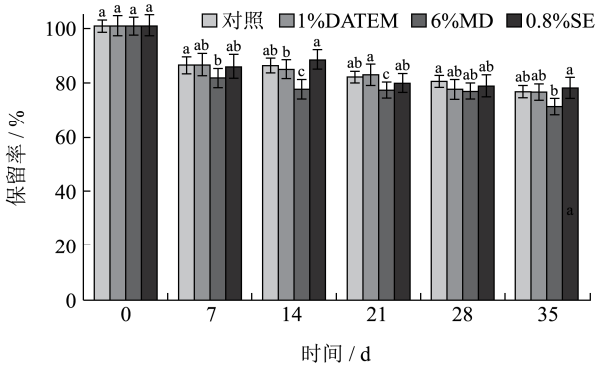



图 9 PRP 微胶囊在 58%相对湿度下的稳定性

**Fig.9 Stability of PRP microcapsules at 58% relative humidity**

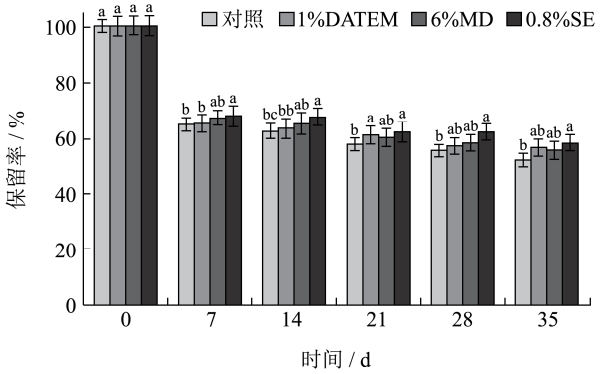



图 10 PRP 微胶囊在 98%相对湿度下的稳定性

**Fig.10 Stability of PRP microcapsules at 98% relative humidity**

本文所得复凝聚微胶囊中 PRP 对湿度的高敏感性可能与 SPI 的高持水性有关[27]，在高温度环境下，SPI 吸收大量水分，从而导致 PRP 发生损失。在实验过程中，我们也发现 PRP 微胶囊在 98%相对湿度贮藏 21 d 后，部分样品即开始出现长毛现象，这是因为在高湿环境下，壁材的渗透性、溶涨度和机械强度等都会发生变化，芯材物质的流失或者与外界物质的反应就容易发生，微胶囊的破坏程度会大大加剧，而且微胶囊颗粒的水分含量会显著增加，从而使得微胶囊稳定性急剧下降[25]。通过比较不同的非离子型表面活性剂对微胶囊稳定性的影响，我们认为添加 SE 可能增强了囊壁的阻隔性能，从而使得微胶囊中的水分含量有所降低，进而在一定程度上提高了微胶囊的稳定性，这一推论与热稳定性和光照稳定性观察到的结果一致。

## 3 结论

本文以大豆分离蛋白和壳聚糖作为复合壁材，将一定质量比的非离子型表面活性剂，包括 1%的双乙酰酒石酸单甘油酯、6%的麦芽糊精和 0.8%的蔗糖脂肪酸酯，添加到 SPI 溶液中，以谷氨酰胺转氨酶作为固化剂，通过复凝聚法制备辣椒红色素微胶囊，研究非离子型表面活性剂对复凝聚 PRP 微胶囊稳定性的影响。研究发现，添加非离子型表面活性剂对辣椒红色素包埋效果没有显著影响，但对微胶囊中 PRP 的稳定性有重要影响，其中添加 0.8%的 SE 显著提高了 PRP 微胶囊在高温、高湿及光照条件下的稳定性。因此，添加非离子型表面活性剂是提高复凝聚 PRP 微胶囊的一个重要措施。

## 参考文献


[1] 武占省,江英,赵晓梅.天然辣椒红色素的研究进展[J].中国食品添加剂,2004,6:22-25,68
WU Zhan-sheng, JIANG Ying, ZHAO Xiao-mei. Research progress on capsicum red pigment [J]. China Food Additives, 2004, 6: 22-25, 68

[2] Anal A K, Singh H. Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery [J]. Trends in Food Science and Technology, 2007, 18(5): 240-251

[3] 谭仁祥.植物成分功能[M].北京:科学出版社,2003
TAN Ren-xiang. Function of plant components [M]. Beijing: Science Press, 2003

[4] 周雯雯,李湘洲,张炎强.辣椒红色素的国内研究进展[J].云南化工,2005,32(5):52-54
ZHOU Wen-wen, LI Xiang-zhou, ZHANG Yan-qiang. Study progress on capsanthin [J]. Yunnan Chemical Technology, 2005, 32(5): 52-54

[5] 凌关庭.天然食品添加剂手册[M].北京:化学工业出版社,2000
LING Guan-ting. Natural food additives handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000

[6] 马嫄,柴志妮,孟晓,等.辣椒红色素微胶囊的制备[J].中国酿造,2008,24:72-74
MA Yuan, CHAI Zhi-ni, MENG Xiao, et al. Preparation of microcapsanthin [J]. China Brewing, 2008, 24: 72-74

[7] 唐永富,查勇,李积华,等.微胶囊化辣椒红色素工艺研究[J].食品科学,2009,30(20):207-210
TANG Yong-fu, ZHA Yong, LI Ji-hua, et al. Optimization of microencapsulation of paprika oleoresin [J]. Food Science, 2009, 30(20): 207-210

[8] 赵伟学,董旭丽,孙付有,等.一种制备辣椒红色素微胶囊的方法:中国, CN101921496A [P] 2010-12-22
ZHAO Wei-xue, DONG Xu-li, SUN Fu-you, et al. A method for preparation of microencapsulation of capsicumredpigment: China, CN101921496A [P] 2010-12-22

[9] Zilberboim R, Kopelman I J, Talmon Y. Microencapsulation by a dehydrating liquid retention of paprika oleoresin and aromatic esters [J]. Journal of Food Science, 1986, 51(5): 1301-1306

[10] de Kruif CG, Weinbreck F, de Vries R. Complex coacervation of proteins and anionic polysaccharides [J]. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 2004, 9(5): 340-349

[11] Li W G, Wu G, Chen H Z, et al. Preparation and characterization of gelatin/SDS/NaCMC microcapsules with compact wall structure by complex coacervation [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, 333(1-3): 133-137

[12] Huang G Q, Xiao J X, Qiu H W, et al. Cross-linking of soybean protein isolate-chitosan coacervate with transglutaminase utilizing capsanthin as the model core [J]. Journal of Microencapsulation, 2014, 31(7): 708-715

[13] Xiao J X, Huang G Q, Qiu H W, et al. Microencapsulation of capsanthin by soybean protein isolate-chitosancoacervation and microcapsule stability evaluation [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(1): 1-7

[14] 张钊,张效伟,王阳,等.提高大豆分离蛋白乳化能力的研究[J].中国油脂, 2008,33(6):19-23
ZHANG Zhao, ZHANG Xiao-wei, WANG Yang, et al. Improvement to emulsification capacity of soya protein isolate [J]. China Oils and Fats, 2008, 33(6): 19-23

[15] 朱选,黄慧敏,许时婴,等.卵磷脂在 β-胡萝卜素微胶囊化过程中的界面行为[J].中国食品学报,2003,3(3):36-40
ZHU Xuan, HUANG Hui-min, XU Shi-ying, et al. Lecithin in carotene microencapsulation process of interface behavior [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2003, 3(3): 36-40

[16] Yuan F, Dalgleish D G. Casein adsorption on the surfaces of oil-in-water emulsions modified by lecithin [J]. Colloids and Surfaces. B: Biointerfaces, 1993, 1(6): 357-364

[17] Rodríduez-Huezo M E, Pedroza-Islas R, Prado-Barragán L A, et al. Microencapsulation by spray drying of multiple emulsions containing carotenoids [J]. Journal of Food Science, 2004. 69(7): E351-E359

[18] Shu B, Yu W L, Zhao Y P, et al. Study on microencapsulation of lycopene by spray-drying [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(4): 664-669

[19] Schierle J, Bretzel W, Buhler I, et al. Content and isomeric ratio of lycopene in food and human blood plasma [J]. Food Chemistry, 1997, 59(3): 459-465

[20] 孙燕婷.大豆分离蛋白-壳聚糖复凝聚相及其载油微胶囊的制备和表征[D].青岛:青岛农业大学,2012
SUN Yan-ting. Preparation of oil-containing microcapsules based on soybean protein isolate-chitosan by complex coacervation and their characterization [D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2012

[21] van den Berg H, Faulks R, Fernando Granado H, et al. The potential for the improvement of carotenoid levels in foods and the likely systemic effects [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(7): 880-912

[22] Kanasawud P, Crouzet J C. Mechanism of formation of volatile compounds by thermal degradation of carotenoids in aqueous medium. 2. Lycopene degradation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1990, 38(5): 1238-1242

[23] 马嫄,付晓,孟晓,等.辣椒红色素微胶囊化的工艺研究[J].食品科技,2010,35(4):228-231
MA Yuan, FU Xiao, MENG Xiao, et al. Study on the capsanthin microencapsulation technology [J]. Food Science and Technology, 2010, 35(4): 228-231

[24] 罗毅皓.循化辣椒红色素的萃取及性质研究[J].安徽农业科学,2009,37(33):16453-16454,16506
LUO Yi-hao. Capsicum red pigment extraction and characterization [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(33): 16453-16454, 16506

[25] 冯岩.复合凝聚法制备维生素 E 微胶囊的研究[D].无锡:江南大学,2008
FENG Yan. Study on the microcapsulation of vitamin E by complex coacervation [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008

[26] 李柱,陈正行,罗昌荣.不同相对湿度下微胶囊化甜橙油释放的研究[J].食品科技,2005,3:11-13,26
LI Zhu, CHEN Zheng-xing, LUO Chang-rong. Release of microencapsulated sweet orange oil on different relative humidity condition [J]. Food Science and technology, 2005, 3: 11-13, 26

[27] Rhim J W, Lee JH, Ng P K W. Mechanical and barrier properties of biodegradable soy protein isolate-based films coated with polylactic acid [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(2): 232-238

（上接第 144 页）

[15] YANG Zhen, WANG Hai-yan, WANG Wei, et al. Effect of 10 MeV E-beam irradiation combined with vacuum-packaging on the shelf life of Atlantic salmon fillets during storage at 4 ℃ [J]. Food Chemistry, 2014, 145: 535-541

[16] Jaczynski J, Park J W. Physicochemical changes in alaska pollock surimi and surimi gel as affected by electron beam [J]. Journal of Food Science, 2004, 69(1): 53-57

[17] Hassan L, Meszaros A, Simon E, et al. Comparative studies on gamma radiation and high pressure induced effects on minced beef [J]. Acta Aliment, 2002, 31(3): 253-264

[18] Debusca A, Tahergorabi R, Beamer S K, et al. Physicochemical properties of surimi gels fortified with dietary fiber [J]. Food Chemistry, 2014, 148(2): 70-76

[19] Montgomery J L, Parrish F C, Olson D G. Irradiation and storage effects on aroma and color of raw beef patties in anaerobicor aerobic packaging [J]. Muscle Foods, 2000, 11(1): 19-33