

文章编号: 1673-3193(2024)03-0391-11

# 玉米黄色素微胶囊在风味发酵乳中的应用

杨俊燕, 季海霞, 高莉, 石英, 郝瑞, 郝媛, 陈佳慧

(中北大学 化学与化工学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 本文使用超声辅助麦芽糊精(Malto Dextrin, MD)制备玉米黄色素(Maize Yellow Pigment, MYP)微胶囊, 以提高MYP的溶解度和稳定性, 对其进行了结构表征、理化测定和性能测定, 并将其应用于风味发酵乳。扫描电镜和傅里叶变换红外结果证实了微胶囊的形成, 粒径和电位结果证明了微胶囊为纳米级且稳定, 热重结果表明微胶囊提高了MYP的热稳定性; 最优条件下微胶囊中的包埋率为33.51%; 微胶囊的溶解度、稳定性明显提高, 微胶囊的抗氧化活性随着MYP的增加而增强, 微胶囊生物利用度明显提高( $P < 0.01$ ); 样品组与对照组酸奶相比, 分析的理化指标未显示显著差异( $p > 0.05$ )。本文研究表明所制备的MYP微胶囊可以增强MYP的溶解性、稳定性和缓释性, 可以用作酸奶中的着色剂和抗氧化剂。

**关键词:** 玉米黄色素; 微囊化; 风味发酵乳; 理化性质

**中图分类号:** TS206.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.03.017

**引用格式:** 杨俊燕, 季海霞, 高莉, 等. 玉米黄色素微胶囊在风味发酵乳中的应用[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 391-401.

YANG Junyan, JI Haixia, GAO Li, et al. Application of maize yellow pigment microcapsules in flavored fermented milk[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(3): 391-401.

## Application of Maize Yellow Pigment Microcapsules in Flavored Fermented Milk

YANG Junyan, JI Haixia, GAO Li, SHI Ying, HAO Rui, HAO Yuan, CHEN Jiahui

(School of Chemistry and Chemical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Ultrasound-assisted maltodextrin (MD) was used to prepare maize yellow pigment (MYP) microcapsules to improve the solubility and stability of MYP, and to characterize its structure, physico-chemical determination and performance determination, and to apply it to flavored fermented milk. The scanning electron microscopy and Fourier transform infrared results confirmed the formation of microcapsules. The particle size and potential proved that the microcapsules were nanoscale and stable. The thermogravimetric results showed that the microcapsules improved the thermal stability of MYP. Under optimal conditions, the embedding rate in microcapsules was 33.51%. The solubility and stability of microcapsules were significantly improved, the antioxidant activity of microcapsules increased with the increase of MYP, and the bioavailability of microcapsules was significantly increased ( $P < 0.01$ ). Compared with

**收稿日期:** 2023-08-22

**基金项目:** 山西省回国留学人员科研资助项目(2020-118); 医药生物技术山西省重点实验室开放课题基金资助(KF202002); 山西省研究生教育教学改革课题(2022YJG185); 山西省研究生创新项目资助(2022Y616, 2023KY604, 2023SJ203)

**作者简介:** 杨俊燕(1998-), 女, 硕士生, 主要从事天然产物的提纯的研究。

**通信作者:** 高莉(1980-), 女, 副教授, 博士, 主要从事天然产物的提纯与应用研究、分子生物学与生物材料、纳米生物效应与安全性研究。E-mail: gaoli@nuc.edu.cn.

the control yogurt, the physicochemical indicators analyzed in the sample group did not show significant differences ( $p>0.05$ ). This study shows that the prepared MYP microcapsules can enhance the solubility, stability and slow-release properties of MYP, and can be used as colorants and antioxidants in yogurt.

**Key words:** maize yellow pigment; microencapsulation; flavored fermented milk; physicochemical properties

## 0 引言

功能性食品的消费呈增长趋势,其中牛奶被定义为天然功能性食品。风味发酵乳为低粘度酸性乳制品,可以添加稳定剂、食品着色剂和调味剂<sup>[1]</sup>来生产更具吸引力的产品。

玉米黄色素(Maize yellow pigment, MYP)作为一种天然色素,因其预防黄斑变性、抗炎及其抗氧化特性等潜在的有益健康作用而备受关注,然而,其高度不饱和性质,对环境条件(包括光,氧气和pH值)高度敏感,使这种功能性颜料在食品工业中的应用变得困难<sup>[2]</sup>。研究表明,微胶囊化是提高MYP在食品基质中的稳定性和溶解度的常用方法<sup>[3]</sup>。

超声通过产生物理现象和空化效应来增强传质和两相之间的接触面积,而且空化作用可以提高两相混合的均匀性,降低粒径,提高包埋率和稳定性<sup>[4]</sup>。麦芽糊精(Malto Dextrin, MD)在酸性条件下稳定,溶解度高,成本低<sup>[5]</sup>。目前还没有关于富含MYP微粒作为着色剂和抗氧化剂成分的乳制品的研究。因此,本研究以MD为壁材,借助超声和冷冻干燥制备MYP微胶囊(MYP-MD),开发含有MYP-MD的风味发酵乳饮料,并评估最终产品的理化性能。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

MYP(本实验室提取制得),MD(索莱宝)、风味发酵乳(上海瑞橙),其它试剂均为分析级试剂,并从当地授权供应商处购买。

### 1.2 MYP的微囊化

参考Li等<sup>[6]</sup>的方法,在壁材质量浓度为15%、芯壁质量比为1:2、超声时间为10 min的最佳条件下,分别设置单因素壁材质量浓度为5%,10%,15%,20%和25%,芯壁质量比为1:6,1:4,1:2,1:1和2:1,超声时间为1,5,10,15和20 min。将麦芽糊精和玉米黄色素在磁力搅拌器中用60℃的水中溶解3 h。将麦芽糊精溶液冷却

至室温,4℃下保存24 h,以确保完全水化,将混合溶液进行超声。超声结束后,在-80℃下预冷冻12 h,再真空冷冻干燥48 h,最后避光保存。

### 1.3 结构表征

用双面胶带将样品固定在铜根上,喷金<sup>[7]</sup>后用扫描电子显微镜(SEM)观察MYP和MYP-MD的形貌,工作电压为20 kV,工作距离为6.0 mm。将MYP和MYP-MD分别与溴化钾混合研磨后压片,利用傅里叶红外光谱仪(FT-IR)在4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ 波数范围内扫描测得红外光谱图<sup>[8]</sup>。将样品用超纯水稀释后,使用Zeta电位与粒度分析仪分析尺寸和电位,使用热重分析仪(TG)在恒定升温速率(20℃/min,30~800℃,氮气流量为400 mL/h)下对MYP和MYP-MD进行热稳定性分析<sup>[9]</sup>。

### 1.4 理化测定

#### 1.4.1 包埋率(EE)和包埋产率(EY)的测定

参考韩英<sup>[10]</sup>的实验方法,在450 nm处测量吸光度,然后使用既定标准曲线计算MYP的质量浓度,既定标准曲线为 $y=19.300x-0.0326$ , $R^2=0.9996$ 。式中: $y$ 为吸光度, $x$ 为MYP的质量浓度(mg/mL)。

EE的计算公式为

$$E_E = \left(1 - \frac{T}{Y}\right) \times 100, \quad (1)$$

式中: $T$ 为MYP-MD表面的MYP质量浓度,mg/mL; $Y$ 为总MYP的质量浓度,mg/mL。

EY的计算公式为

$$E_Y = \frac{m}{m_1 + m_2} \times 100, \quad (2)$$

式中: $m$ 为MYP-MD的质量,g; $m_1$ 为MD的质量,g; $m_2$ 为MYP的质量,g。

#### 1.4.2 含水率(MC)的测定

参考GB5009.3-2016食品安全国家标准食品中水分的测定,含水率 $C_M$ 的计算公式为

$$C_M = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100, \quad (3)$$

式中: $W_0$ 为干燥前样品的质量,g; $W_1$ 为干燥后样品的质量,g。

### 1.4.3 溶解度的测定

参考张莉华等<sup>[11]</sup>的方法,溶解度  $S$  计算公式

$$S = \left[ 1 - \frac{(M_2 - M_1)}{M} \right] \times 100, \quad (4)$$

式中:  $M$  为样品的质量, g;  $M_1$  为培养皿的质量, g;  $M_2$  为培养皿和不溶物的质量之和, g。

### 1.4.4 流动性和堆积密度的测定

堆积密度( $\rho_T$ )和流动性测定参考姚泽晨等<sup>[12]</sup>的方法,流动性用休止角  $\theta$  表示。

$$\theta = \arctan\left(\frac{h}{r}\right), \quad (5)$$

式中:  $h$  为粉堆高度, cm;  $r$  为粉堆半径, cm。

$$\rho_T = \frac{m}{V}, \quad (6)$$

式中,  $m$  为样品质量, g;  $\rho_T$  为堆积密度, g/mL;  $V$  为样品散落紧实后的体积, mL。

### 1.4.5 吸湿潮解性的测定

称取一定量 MYP-MD, 放置在敞口培养皿中, 定期测定其质量。吸湿性的计算公式为

$$\text{吸湿性} = \frac{(m_i - m_0)}{m_0} \times 100, \quad (7)$$

式中:  $m_i$  为不同时期样品的质量, g;  $m_0$  为样品的初始质量, g。

## 1.5 性能测定

### 1.5.1 理化稳定性

参考黄涵年等<sup>[13]</sup>的方法并作修改。分别将 MYP-MD 和 MYP 放置在 4, 30, 40 和 50 °C 水浴下孵育 1, 3, 5 和 7 h; 分别将 MYP-MD 和 MYP 放置在黑暗和紫外下孵育 1, 3, 5 和 7 h; pH 为 2, 4, 6, 8, 10 和 12, 避光室温孵育 5 h; 分别加入质量分数 0.4% 的蔗糖、柠檬酸、Vc、氯化钠和质量分数 0.05% 的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Zn}^{2+}$ , 避光室温孵育 5 h 后, 测量 450 nm 处的吸光度以评估在温度、光照、pH、食品添加剂和金属离子条件下的稳定性。

$$\text{保留率} = \left[ 1 - \frac{\text{释放黄色素的质量浓度}}{\text{总黄色素的质量浓度}} \right] \times 100, \quad (8)$$

### 1.5.2 抗氧化活性

参考 Mehran 等<sup>[14]</sup>的实验方法并稍做修改。将 MYP 和 MYP-MD 溶于无水乙醇, 配制成 MYP 质量浓度分别为 16, 32, 64, 128, 256  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的待测液,

超声处理 2 h 释放 MYP, 4 °C 避光保存备用。

DPPH· 和 ABTS+· 自由基清除率的测定参考 Niknezhad<sup>[15]</sup> 和 Jia 等<sup>[16]</sup> 的研究方法, FRAP 法测  $\text{Fe}^{3+}$  还原力参考 Dai 等<sup>[17]</sup> 的研究方法。

$$\text{自由基清除率} = \left( 1 - \frac{A_2 - A_1}{A_0} \right) \times 100, \quad (9)$$

式中:  $A_0$  为空白组吸光度;  $A_1$  为对照组吸光度;  $A_2$  为样品组吸光度。

### 1.5.3 体外模拟胃肠道消化

1) 模拟消化吸收实验。参考 Su 等<sup>[18]</sup> 的方法并稍做修改。取 0.1 g MYP-MD 和 MYP 加到 10 mL 模拟胃液中, 使用恒温振荡器在 (37 ± 0.5) °C、100 r/min 的条件下震荡, 每 30 min 取出 1 mL 样液, 同时加入 1 mL 胃消化液。2 h 后用 1.0 mol/L NaOH 调节混合分散液 pH 至 7.0, 终止胃消化。加入 10 mL 模拟肠液, 相同条件下震荡, 每 30 min 取出 1 mL 样液, 同时加入 1 mL 肠消化液, 2.5 h 后结束反应。每组样液经 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜后于 450 nm 处测量吸光度来确定 MYP 的质量浓度, 并计算 MYP 的累积释放率(%)。

$$\text{累积释放率} = \frac{\text{释放MYP的质量浓度}}{\text{MYP的总浓度质量}} \times 100. \quad (10)$$

2) 生物可及性。模拟肠阶段之后, 将消化液以 4 000 r/min 的速度离心 10 min, 上清液在 450 nm 处测量吸光度。

$$\text{生物可及性} = \frac{C_1}{C_0} \times 100, \quad (11)$$

式中:  $C_1$  为上清液的 MYP 的质量浓度;  $C_0$  为 MYP 的初始质量浓度。

## 1.6 MYP 和 MYP-MD 掺入牛奶的制备

参考 Lima 等<sup>[19]</sup> 的方法。为了获得商业乳制品饮料(颜色标准)与样品小于 5 的  $\Delta E$  (表明样品之间的色差很小), 在白色风味发酵乳(空白组)中分别加入 2% 的 MYP-MD 和 1% 的 MYP (实验组)。将其 4 °C 避光冷藏, 定期分析其相关指标。

### 1.6.1 比色分析

使用手机软件实时取色器测定。 $\Delta E$  的计算公式为

$$\Delta E = \sqrt{(L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}, \quad (12)$$

式中:  $L^*$  为亮度;  $a^*$  为红绿度;  $b^*$  为黄蓝度。

### 1.6.2 酸度的测定

1) 牛奶滴定酸度的确定参照食品安全国家标准(GB5009.239-2016)中的酚酞指示剂法。计算公式为

$$X = \frac{(V - V_0)}{W} \times 100, \quad (13)$$

式中:  $X$  为酸度, °T;  $V$  为滴定 NaOH 的体积, mL;  $V_0$  为空白 NaOH 的体积, mL;  $W$  为奶的质量, g。

2) 活性酸度利用 pH 计测定。

### 1.6.3 浊度、粘度和脂质成分氧化的测定

浊度( $R$ )参考 Tamer 等<sup>[20]</sup>的方法。粘度使用动态粘度计在 30 r/min 时测量。脂质氧化参考刘琳琳<sup>[21]</sup>的方法进行研究。

$$R = \frac{A_1}{A_0}, \quad (14)$$

式中:  $A_1$  为上清液的吸光度;  $A_0$  为离心前的吸光度。

$$\text{脂质氧化} = A \times 4.15. \quad (15)$$

式中: 脂质氧化的单位为  $\mu\text{g/mL}$ ;  $A$  为吸光度。

## 1.7 数据处理与分析

所有实验重复 3 次, 结果以平均值(平均值 $\pm$ 标准差)表示。利用 Qrigin2022 进行图形绘制, 利用 SPSS24.0 进行显著性分析,  $P < 0.01$  表示显著极差异, 分析结果图中的不同小写字母表示组内差异显著  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 结构表征

#### 2.1.1 SEM 的表征结果

MYP-MD 是不规则的刚性固体(见图 1(c)、图 1(d)), 且形态表现为凝聚微胶囊, 可对包埋的 MYP 起到缓慢释放的效果。与 MYP(见图 1(a)、图 1(b))相比, MYP-MD 含有更多的碎片, 可能是由于超声处理产生的机械、空化和微射流效应所致, 还可能是由于冷冻后通过升华去除结晶冰形状的水而形成易碎和多孔结构。研究结果与 Romero 等<sup>[22]</sup>研究的通过用麦芽糖糊精冻干来封装浆果提取物的 SEM 结果一致。

#### 2.1.2 FT-IR 的表征结果

MYP-MD 的 FT-IR 显示游离叶黄素的特征峰在  $2927\text{cm}^{-1}$  处增强(见图 2), 表明  $-\text{CH}_2-$  酮基和苯环之间的拉伸得到加强。此外, 由于 MYP 与 MD

的结合,  $1031\text{cm}^{-1}$  处的葡萄糖苷键  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  拉伸, 吸收强度增强。此外, 由于 MYP 与 MD 的羰基和肽键基团的结合,  $\text{O}-\text{H}$  的吸收强度增强。因此, 静电相互作用是 MYP-MD 形成的主要机制。综上证明了微胶囊的形成, 结果与 Shi 等<sup>[23]</sup>的结果一致。

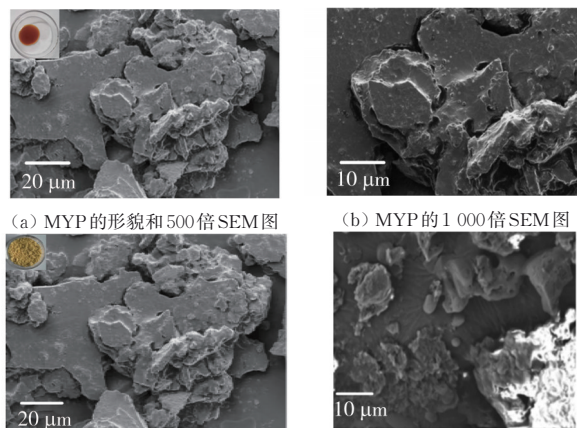


图 1 MYP 和 MYP-MD 的扫描电镜图

Fig. 1 SEM of MYP and MYP-MD

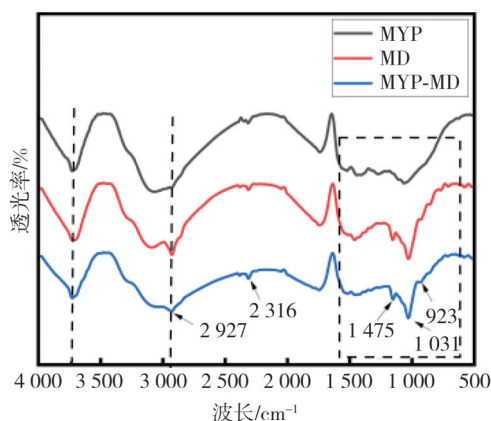
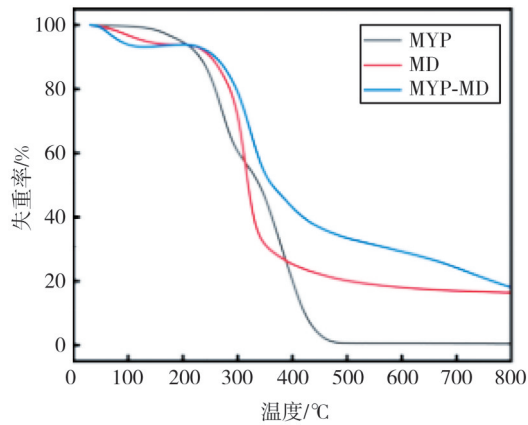


图 2 MYP、MD 和 MYP-MD 的 FT-IR

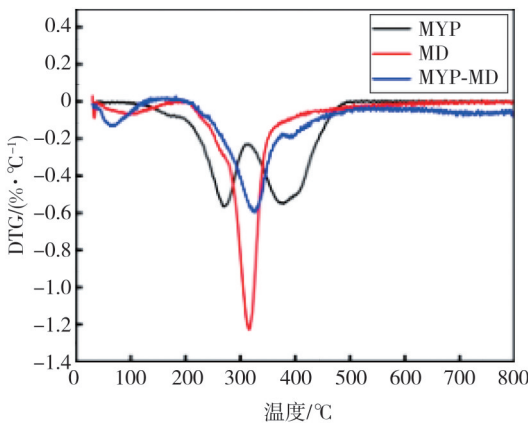
Fig. 2 FT-IR for MYP, MD and MYP-MD

#### 2.1.3 TGA 的表征结果

当温度升高到约  $475\text{ }^\circ\text{C}$  时, MYP 的质量损失为 98.98%, 表明 MYP 非常易挥发, 具有热不稳定的性质。MYP-MD 在  $130\text{ }^\circ\text{C}$  前的质量损失是由水的挥发引起的。 $210\text{ }^\circ\text{C}$  后开始表现出明显的质量损失(质量损失 90%), 可能是壁材破裂、芯材溢出和分解引起的。MYP 的 DTG 曲线中存在两个明显的失重点,  $270\text{ }^\circ\text{C}$  和  $380\text{ }^\circ\text{C}$  (质量损失 26% 和 44%), 可能是 MYP 分子链分解和热解引起的。MYP-MD 的质量损失发生在  $210\text{ }^\circ\text{C}$  以上, 且释放相对温和, 热稳定性提高。Dincer 等<sup>[24]</sup>以麦芽糊精作为壁材包裹火棘果粉的研究结果与本研究结果相当, 最佳超声条件(450 W, 1.5 h)可以促进热稳定性的检测。



(a) TGA图



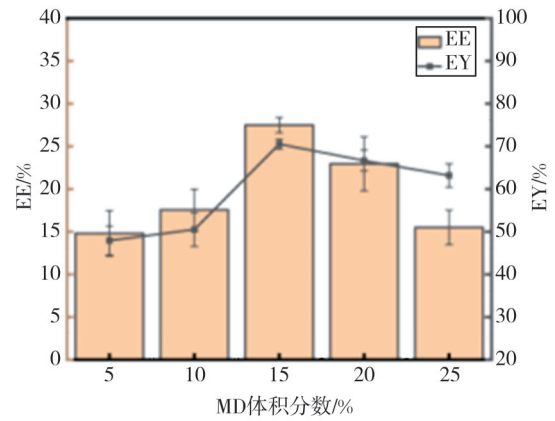
(b) DTG图

图 3 MYP、MD和MYP-MD的热稳定分析

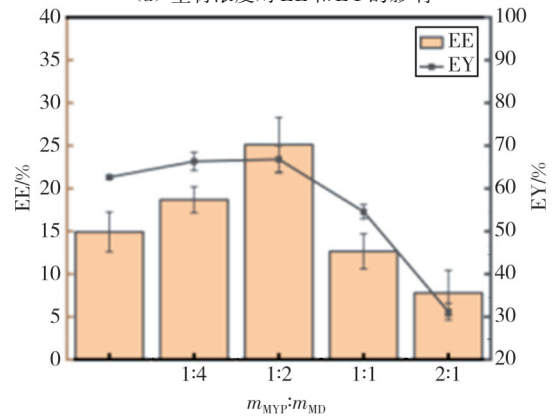
Fig. 3 Thermal stability analysis of MYP, MD and MYP-MD

### 2.2 包埋率 (EE) 和包埋产率 (EY)

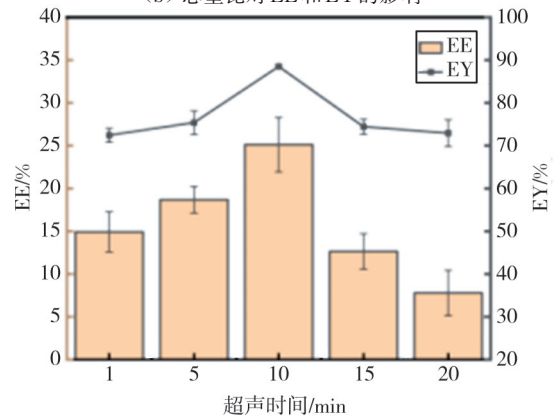
壁材体积分数、芯壁比和超声时间与EE和EY呈负相关。壁材体积分数为15%时,EY和EE最大分别为70.53%和27.5%(见图4(a)),这可能是当壁材体积分数较低时,绝大数MYP未被包封到,仅有小部分芯材包含进入壁材分子内部。添加量过高时,包合反应不能完全发生<sup>[25]</sup>。芯壁的质量比为1:4时,EY最大为88%,芯壁的质量比为1:2时,EE最大为33.51%(见图4(b))。前期包埋率和包埋产率低的原因同上,后期降低的原因可能是当芯材所占比例过大时,壁材不足以支撑芯材所需含量,故在芯壁比较大时包埋率和包埋产率反而降低<sup>[26]</sup>。10 min时最大EY和EE为88.52%和25.12%,超声时间持续增加至20 min,EY和EE分别下降至72.92%和7.79%(见图4(c)),这可能是由于适度的超声处理可以促进溶液的均匀性,从而有助于MYP-MD的形成。然而,由于超声产生空化效应,过度超声效应会破坏生物微胶囊<sup>[6]</sup>。



(a) 壁材浓度对EE和EY的影响



(b) 芯壁比对EE和EY的影响



(c) 超声时间对EE和EY的影响

图 4 不同条件对EE和EY的影响

Fig. 4 Effect of different conditions on EE and EY

### 2.3 理化测定

MYP-MD的吸湿性WGB<0.1%(见图5(a)),证明包埋有利于产品贮藏的稳定性,延长保质期。

MYP-MD的 $C_M$ 、 $S$ 、 $\theta$ 、 $\rho_T$ 、粒径和Zeta电位参数如表1所示。MYP-MD的 $C_M$ 为(3.82±0.98)% (要求 $C_M \leq 5\%$ )。 $\theta$ 为(43.80±0.71)° (30°~45°流动性较好), $S$ 为(96.74±0.07)%,溶解度较高, $\rho_T$ 为(0.47±0.04)g/cm<sup>3</sup>。MYP-MD表面光滑、粉末空隙中的空气量低,能够增加产

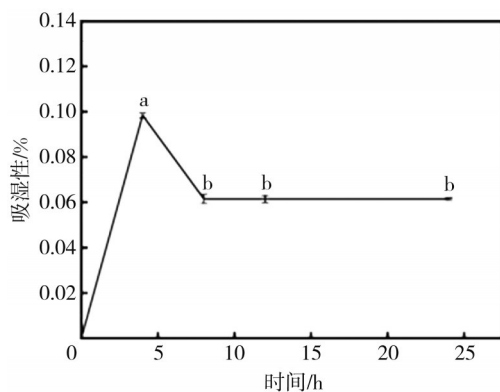
品的贮藏时间。平均粒径为 $(287.42 \pm 37.90)$  nm,符合微胶囊粒径要求;Zeta电位绝对值越大,分子状态相对越稳定;MYP-MD的电位为 $(-57.00 \pm 2.98)$  mV,稳定性相对较好<sup>[27]</sup>。

表1 MYP-MD的物理性质、粒径和Zeta-电位

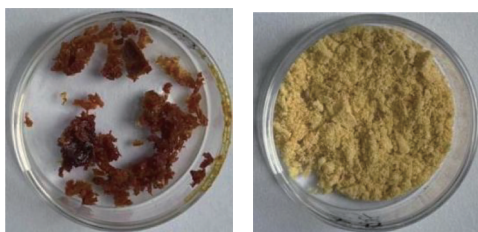
Tab. 1 Physical properties, particle size and Zeta-potential of MYP-MD

MYP-MD	
$C_M/\%$	$3.82 \pm 0.98$
$S/\%$	$96.74 \pm 0.07$
$\theta/(\circ)$	$43.80 \pm 0.71$
$\rho_T/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$0.47 \pm 0.04$
粒径/nm	$287.42 \pm 37.90$
Zeta电位/mV	$-57.00 \pm 2.98$

由图5(b)和图5(c)观察到MYP和MYP-MD之间有明显的形态差。MYP为橘红色半凝固膏状物, MYP-MD为黄色粉末,进一步验证了微胶囊的形成。



(a) MYP-MD的吸湿性



(b) MYP形貌

(c) MYP-MD的形貌

图5 MYP和MYP-MD的理化分析图

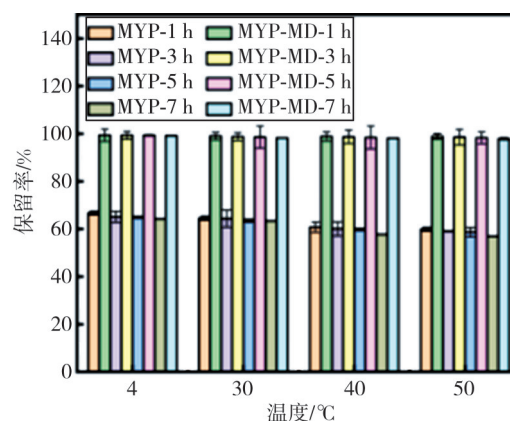
Fig. 5 Physicochemical analysis plots of MYP and MYP-MD

## 2.4 性能测定

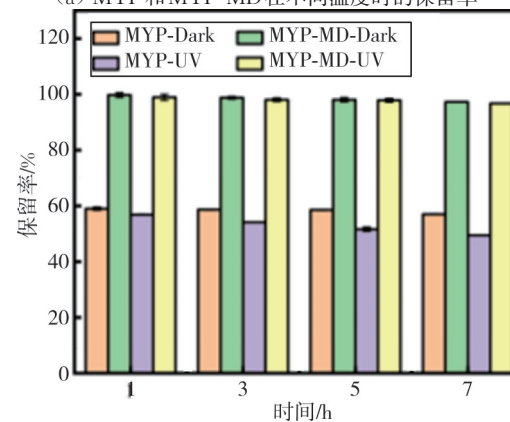
### 2.4.1 理化稳定性

将MYP和MYP-MD溶液放置在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下孵育7 h后,游离MYP中MYP的保留率分别为 $64.23\%$ 和 $56.94\%$ ,MYP-MD中MYP的保留率分别为 $99.2\%$ 和 $97.9\%$ (见图6(a)),且游离MYP的保留率下降幅度更大;将MYP和MYP-MD溶液放置在黑暗和紫外光下孵育7 h后,MYP和MYP-MD中MYP的保留率分别为 $57.04\%$ 和 $49.43\%$ ,以及 $97.28\%$ 和 $96.72\%$ (见图6(b));

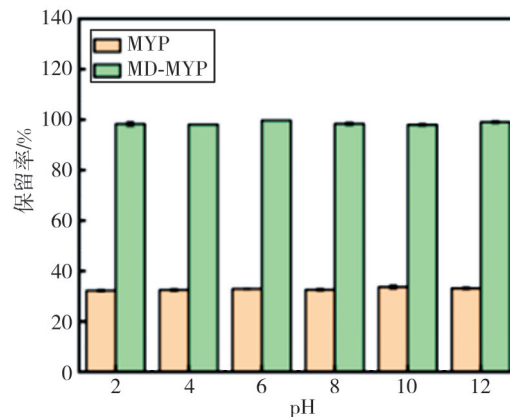
将MYP和MYP-MD溶液放置在pH为2.0和pH为12.0的条件下孵育后,MYP和MYP-MD的MYP保留率分别为 $32.26\%$ 和 $33.18\%$ ,以及 $98.29\%$ 和 $99.04\%$ (见图6(c));将MYP和MYP-MD溶液放置在添加不同食品添加剂的条件下孵育7 h后,MYP保留率为 $V_c(28.93\%) < \text{NaCl}(28.93\%) < \text{蔗糖}(34.60\%) < \text{柠檬酸}(35.52\%)$ (见图6(d)); $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 对MYP的稳定性影响最大,其次是 $\text{Zn}^{2+}$ 和 $\text{K}^{+}$ ,MYP在 $\text{Fe}^{2+}$ 中表现出更高的稳定性离子环境(见图6(e))。



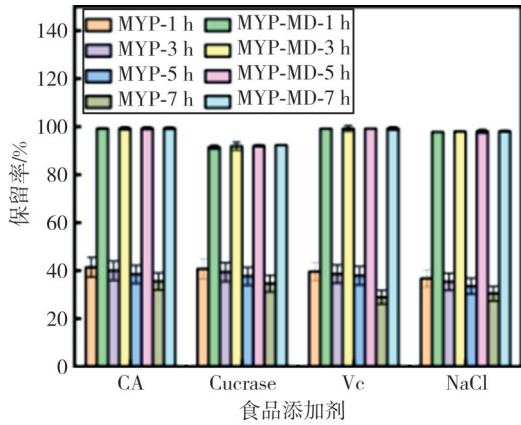
(a) MYP和MYP-MD在不同温度时的保留率



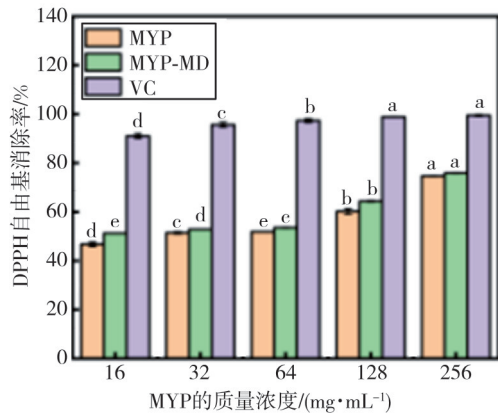
(b) MYP和MYP-MD在不同光照时的保留率



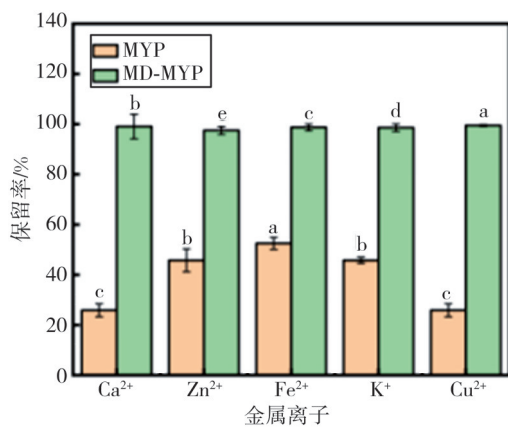
(c) MYP和MYP-MD在不同pH时的保留率



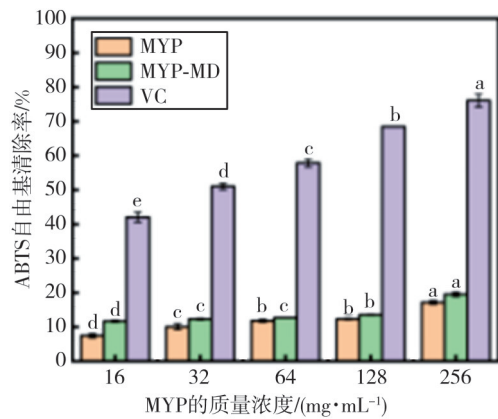
(d) MYP和MYP-MD在不同食品添加剂时的保留率



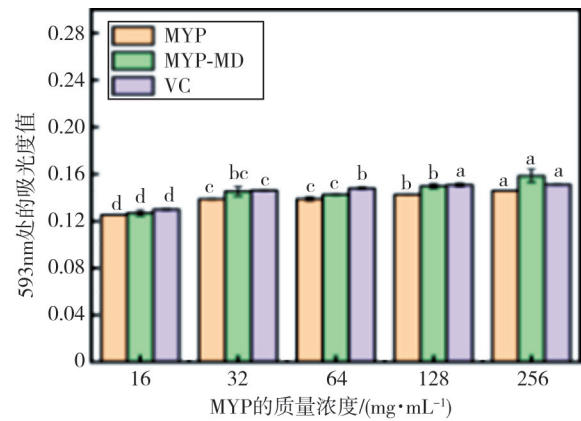
(a) DPPH·自由基清除率



(e) MYP和MYP-MD在不同金属离子时的保留率



(b) ABTS+·自由基清除率



(c) FRAP的抑制率

图 6 MYP和MYP-MD不同条件下的稳定性分析图  
Fig. 6 Stability analysis plots of MYP and MYP-MD under different conditions

综上所述, MYP-MD可提高MYP的稳定性<sup>[28]</sup>。

### 2.4.2 抗氧化特性

更强的抗氧化剂可以提供更多的电子来清除DPPH·和ABTS+·自由基。MYP和MYP-MD的自由基清除速率也取决于MYP的质量浓度(见图7(a)、图7(b)),两者相差不显著( $P>0.05$ ),表明MYP和MYP-MD的自由基清除能力相同,远低于阳性对照Vc。

593 nm处吸光度值越高,表明样品的还原力越大。MYP和MYP-MD的吸光度随着MYP质量浓度的增加而增加(见图7(c)),表明它们的浓度依赖于抗氧化能力,MYP-MD在各浓度下的吸光度值均比MYP大,表明包埋提高了MYP的抗氧化能力。

综上所述, MYP-MD可以提高MYP的抗氧化活性<sup>[11]</sup>。

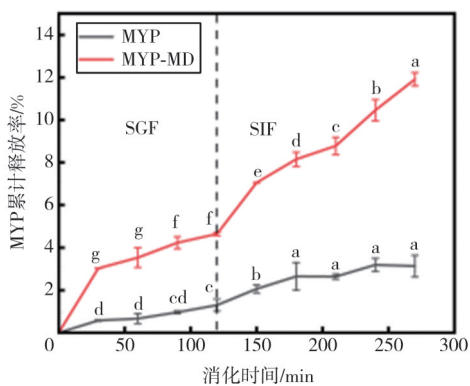
图 7 MYP、MYP-MD、Vc的抗氧化特性

Fig. 7 Antioxidant characteristics of MYP, MYP-MD and Vc

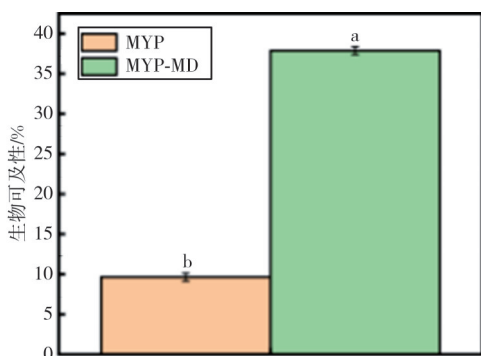
### 2.4.3 体外释放特性和生物利用度

120 min胃期的消化结果显示MYP和MYP-MD(释放率1.3%和4.64%)的MYP释放率均较低(见图8(a)),MYP-MD可能是胃蛋白酶和胃酸对MD的水解。在肠道期MYP的累计释放几乎不变(约1.83%),而MYP-MD(约7.27%)大幅提高,可能是胰酶含有淀粉酶分解了MD。此外,MYP-MD和MYP的生物可及性分别为37.87%和9.65%(见图

8(b)), MYP-MD明显较高。综上, MD可以成为疏水营养素的合适载体, 并增强体外释放<sup>[29]</sup>。



(a) 体外释放曲线



(b) 生物可及性

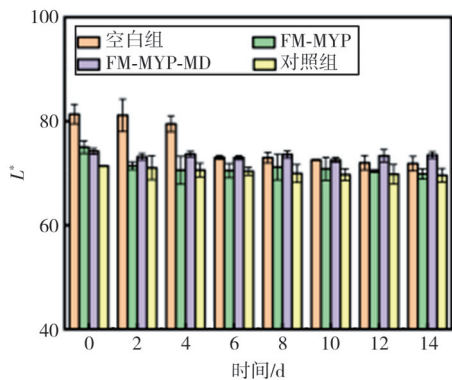
图8 模拟胃肠道条件下, MYP和MYP-MD的体外释放曲线和生物可及性

Fig.8 In vitro Release curves (a) and bioaccessibility (b) of MYP and MYP-MD undersimulated gastrointestinal conditions

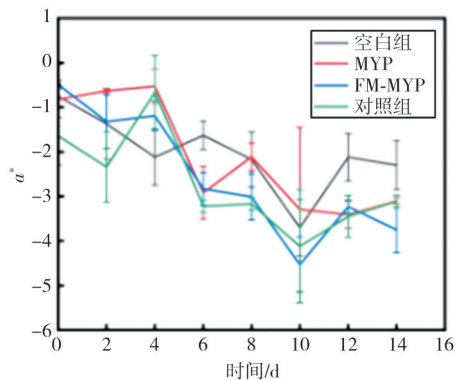
## 2.5 牛奶中的测定结果与分析

### 2.5.1 色泽

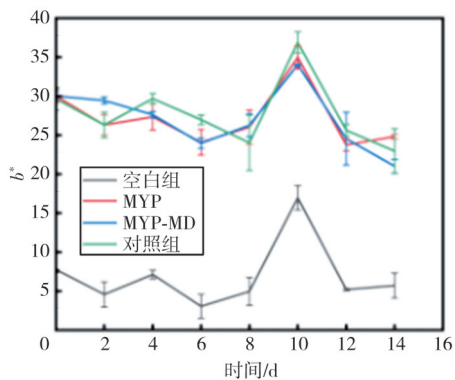
亮度  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 和  $\Delta E$ 值(见图9)随着储藏时间的延长而下降, MYP-MD的变化小于对照组, 说明色泽很稳定, 这可能是由于MYP-MD本身更稳定, 因而维护了牛奶的色泽<sup>[13]</sup>。



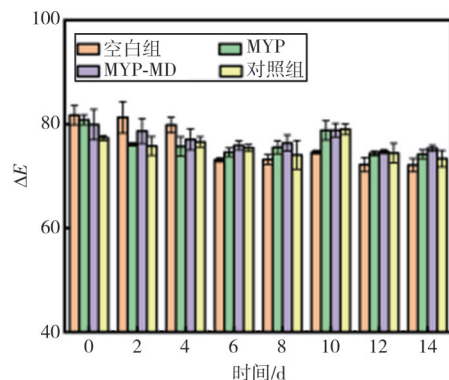
(a)  $L^*$



(b)  $a^*$



(c)  $b^*$



(d)  $\Delta E$

图9 色泽变化

Fig.9 Color price change

### 2.5.2 酸度

MYP-MD的酸度高于对照组(见图10(a)), 麦芽糖糊精可以通过乳酸菌发酵。pH值的最终变化(见图10(b))无显著差异( $P>0.05$ ), 表明MYP-MD对牛奶的品质特性没有显著影响。

### 2.5.3 浊度、粘度和脂质氧化

浊度(见图11(a))和粘度减小(见图11(b)), 样品牛奶脂质氧化上升(见图11(c))。但粘度、浊度和脂质氧化总体变化不显著( $p>0.05$ ), MYP-MD不会影响牛奶本身的脂化氧化, 且能在一定程度上抑制氧化。

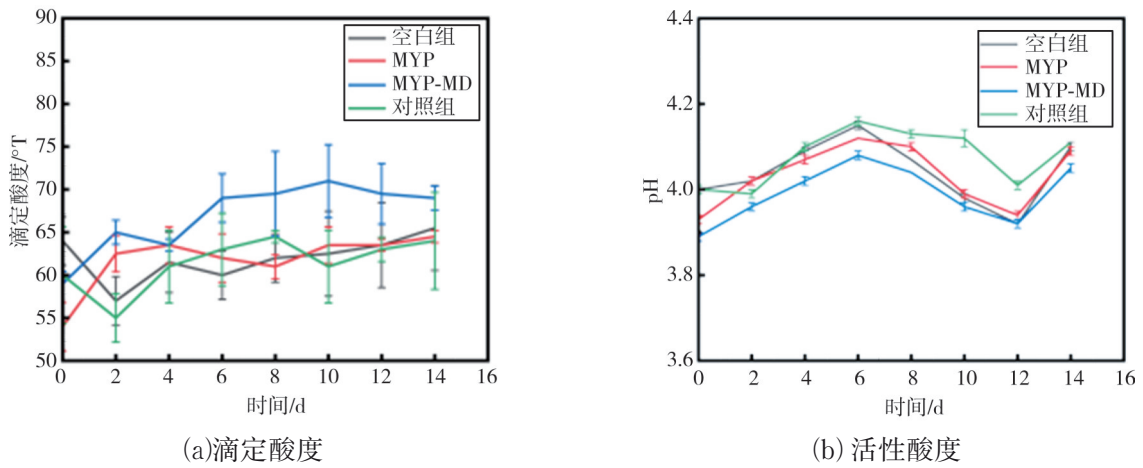


图 10 滴定酸度和活性酸度的变化

Fig. 10 Changes of titration acidity and active acidity

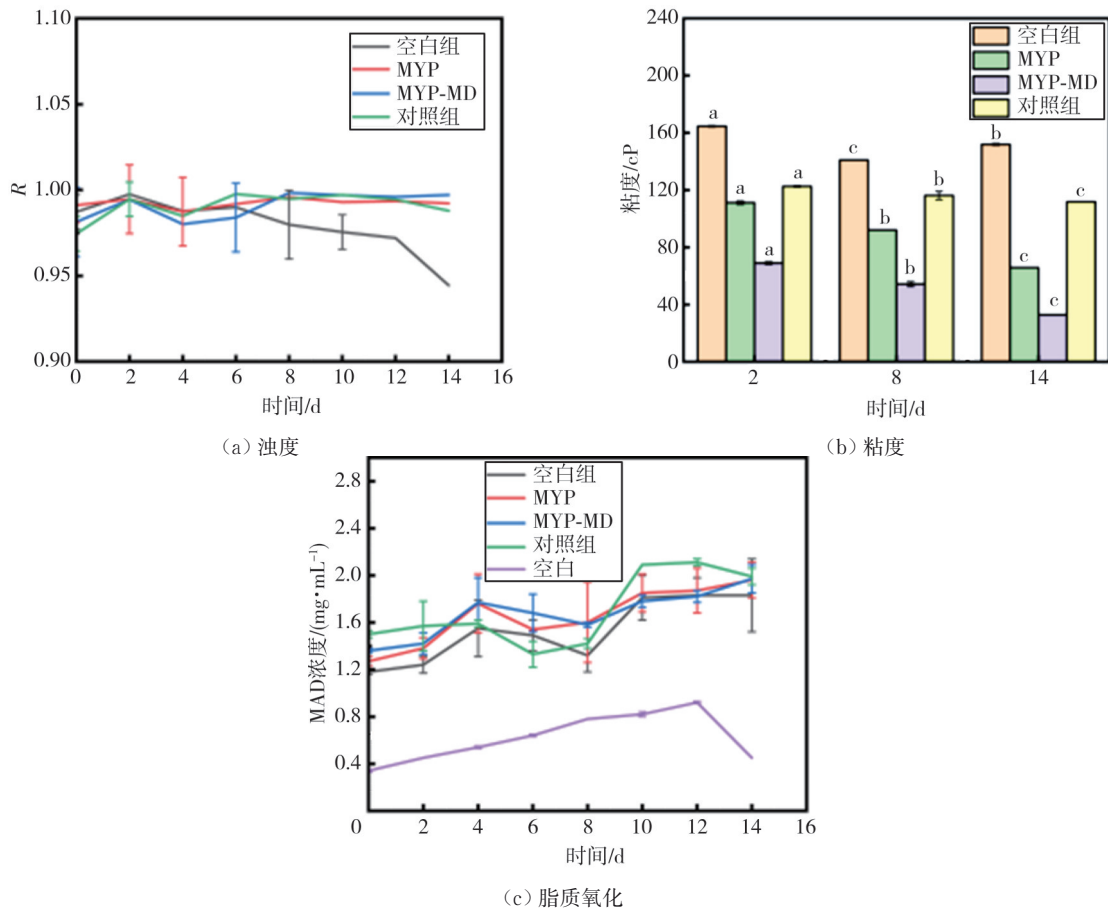


图 11 浊度、粘度和脂质氧化的变化

Fig. 11 Changes in turbidity, viscosity and lipid oxidation

### 3 结论

本文采用超声辅助冷冻干燥法制备 MYP-MD, 以提高 MYP 的溶解度和稳定性。1) 探讨了壁材体积分数、芯壁质量比和超声时间对包埋率的影响, 结果表明壁材体积分数 15%、芯壁质量

比 1:2、超声时间 10 min 时的包埋率最高。2) 证明了 MYP-MD 可以提高 MYP 的溶解度和理化稳定性。3) FT-IR 实验表明 MYP 成功地包裹在 MD 中。4) SEM 结果显示微胶囊的微观结构均呈不规则结构。5) MYP-MD 保留了较高的抗氧化、缓释性能和生物利用度。

MYP-MD 风味发酵乳提供了类似于商业产品的颜色以及稳定的浊度、粘度和酸度,这显示了微囊化天然色素在乳制品基质中的潜在用途。但是,本文 MYP-MD 未进行细胞毒性实验,后续可以对细胞进行分析研究。

#### 参考文献:

- [1] ARAB M, RAZAVI S H, HOSSEINI S M, et al. Production and characterization of functional flavored milk and flavored fermented milk using microencapsulated canthaxanthin[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2019, 114: 108373.
- [2] 赵文扬. 玉米蛋白粉中玉米黄色素和醇溶蛋白的提取技术研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
- [3] SHI Z X, KONG G Y, WANG F F, et al. Improvement in the stability and bioavailability of pumpkin lutein using  $\beta$ -cyclodextrin microcapsules [J]. *Food Science & Nutrition*, 2023, 11(6): 1-2.
- [4] LI X, ZHANG Z H, QIAO J, et al. Improvement of betalains stability extracted from red dragon fruit peel by ultrasound-assisted microencapsulation with maltodextrin [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 82: 105897.
- [5] XIAO Z B, XIA J Y, ZHAO Q X, et al. Maltodextrin as wall material for microcapsules: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 298: 120113.
- [6] LI J L, HOU X Y, JIANG L Y, et al. Optimization and characterization of Sichuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim) resin microcapsule encapsulated with  $\beta$ -cyclodextrin[J]. *LWT*, 2022, 171: 114120.
- [7] ZHANG X N, XU W Q, LI X, et al. Preparation of pH sensitive bacteriostatic W/O/W emulsion microcapsules[J]. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2023, 34(15): 1-14.
- [8] WOOJEONG KIM, YONG WANG, JITRAPORN VONGSVIVUT, et al. On surface composition and stability of  $\beta$ -carotene microcapsules comprising pea/whey protein complexes by synchrotron-FTIR microspectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2023, 426: 136565.
- [9] LIU Y S, JIANG J Z. Preparation of  $\beta$ -ionone microcapsules by gelatin/pectin complex coacervation [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 312: 120839.
- [10] 韩英. 玉米蛋白粉中黄色素的提取工艺及微胶囊化的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2014.
- [11] 张莉华, 许新德, 陈少军, 等. 微胶囊叶黄素理化性质及其稳定性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2007, 19: 94-97.
- [12] ZHANG Lihua, XU Xinde, CHEN Shaojun, et al. Studies on the physical and chemical of properties of microencapsulated lutein and its stability [J]. *Natural Product Research and Development*, 2007, 19: 94-97. (in Chinese)
- [12] 姚泽晨, 张根义. 植物乳杆菌微胶囊包载效果、物化性质及其胃肠道性能[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(14): 112-117.
- [13] YAO Zechen, ZHANG Genyi. Encapsulation effect, physical and chemical properties of *Lactobacillus plantarum* microcapsules and their gastrointestinal properties [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2019, 40(14): 112-117. (in Chinese)
- [13] 黄涵年, 阙斐, 宋昊. 花色苷稳定性及其微胶囊制备研究[J]. *保鲜与加工*, 2023, 23(6): 41-47.
- [14] HUANG Hannian, QUE Fei, SONG Hao. Study on anthocyanin stability and its microcapsule preparation [J]. *Storage and Process*, 2023, 23(6): 41-47. (in Chinese)
- [14] MEHRAN M, MASOUM S, MEMARZADEH M. Improvement of thermal stability and antioxidant activity of anthocyanins of *Echium amoenum* petal using maltodextrin/modified starch combination as wall material[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 148: 768-776.
- [15] NIKNEZHAD S V, DARZI G N, KIANPOUR S, et al. Bacteria-assisted biogreen synthesis of radical scavenging exopolysaccharide-iron complexes: an oral nano-sized nutritional supplement with high in vivo compatibility [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7: 5211-5221.
- [16] JIA N, QIAO H R, ZHU W, et al. Antioxidant, immunomodulatory, oxidative stress inhibitory and iron supplementation effect of *Astragalus membranaceus* polysaccharide-iron (III) complex on iron-deficiency anemia mouse model [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 132: 213-221.
- [17] DAI K, WEI Y, JIANG S, et al. Lab scale extracted conditions of polyphenols from thinned peach fruit have antioxidant, hypoglycemic, and hypolipidemic properties[J]. *Foods*, 2021, 11(1): 99-101.
- [18] SU Y, SUN M L, ZHAO M Y, et al. Enhancement of the physicochemical and in vitro release properties of lutein by gelatin/octenyl succinic anhydride (OSA)-modified starch composite as vehicles [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(1): 738-750.

- [19] LIMA E M F, MADALÃO M C M, DOS SANTOS W C, et al. Spray-dried microcapsules of anthocyanin-rich extracts from *Euterpe edulis* M. as an alternative for maintaining color and bioactive compounds in dairy beverages [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(9): 4147-4157.
- [20] TEL - MESSERY T M, ESMAT A, LÓPEZ - NICOLAS R, et al. Bioaccessibility and antioxidant activity of PCL - microencapsulated olive leaves polyphenols and its application in yogurt [J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(10): 4303-4315.
- [21] 刘琳琳. 黑芝麻黑色素铁复合物的制备工艺及生物学功效评价 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [22] ROMERO-GONZALEZ J, AH-HEN K S, LEMUS-MONDACA R. Total phenolics, anthocyanin profile and antioxidant activity of maqui, *Aristotelia chilensis* (Mol.) Stuntz, berries extract in freeze-dried polysaccharides microcapsules [J]. *Food Chemistry*, 2020, 313: 126115.
- [23] SHI Z X, KONG G Y, WANG F F, et al. Improvement in the stability and bioavailability of pumpkin lutein using  $\beta$ -cyclodextrin microcapsules [J]. *Food Science & Nutrition*, 2023, 11(6): 3067-3074.
- [24] DINCER E J, TEMIZ H. Investigation of physicochemical, microstructure and antioxidant properties of firethorn (*Pyracantha coccinea* Roemer var. *Lalandi*) microcapsules produced by spray-dried and freeze-dried methods [J]. *South African Journal of Botany*, 2023, 155: 340-354.
- [25] CHEN Y Z, YANG J, ZHANG G C, et al. Larvicidal activity and microencapsulation of tobacco (*Nicotiana tabacum*) extract on *Malacosoma neustria testacea* larvae [J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(4): 1763-1773.
- [26] WANG C J, CHANG T, ZHANG D L, et al. Preparation and characterization of potato protein-based microcapsules with an emphasis on the mechanism of interaction among the main components [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(7): 2866-2872.
- [27] 卢艳慧. 牡丹籽油微胶囊化及理化和稳定特性的研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- [28] ZHANG H, ZHU L S, SHAO Y C, et al. Microencapsulation of *Monascus* red pigments by emulsification/internal gelation with freeze/spray-drying: Process optimization, morphological characteristics, and stability [J]. *LWT*, 2022, 173: 114227.
- [29] SANTOS M B, DE CARVALHO M G, GARCIA-ROJAS E E. Carboxymethyl tara gum-lactoferrin complex coacervates as carriers for vitamin D3: Encapsulation and controlled release [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106347.