粉末状预乳化番茄红素的制备

倪浩亮[1]，孙清瑞[1,2]，张连富[*1,3]

(1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 黑龙江八一农垦大学 食品学院，黑龙江 大庆 163319；3. 国家功能食品工程技术研究中心，江南大学，江苏 无锡 214122)

摘要：番茄红素是存在于番茄及其制品中的天然食用色素，因其具有多种生理活性而备受关注。但由于番茄红素不溶于水，其应用受到很大限制。对真空加热涂膜法制备粉末状预乳化番茄红素进行了研究，以粉末中番茄红素的水分散性、保留率和溶解速度为指标，通过单因素和正交实验研究了物料因素和操作因素对粉末状预乳化番茄红素的影响，确定其最佳制备工艺：复配乳化剂为蔗糖酯和单甘酯，质量复配比为 3:5，用量为总质量的 4.5%，涂膜时间 1.5 min，涂膜温度 150 ℃，赋形剂可为糖粉、麦芽糊精或变性淀粉。按上述工艺制备的粉末状预乳化番茄红素中番茄红素质量分数可以达到 3.35%，粉末色泽自然，溶解速度快，水分散性、乳液稳定性良好，其中顺式番茄红素占总番茄红素质量的 58.53%。

关键词：番茄红素；粉末；预乳化；水分散性

中图分类号：S 641.2　**文献标志码**：A　**文章编号**：1673—1689(2015)10—1033—07

Preparation of Pre-Emulsified Lycopene Powder

NI Haoliang[1]，*SUN Qingrui*[1]，*ZHANG Lianfu*[*1,3]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 3. National Engineering Technology Rsearch Center for Functional Food, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Lycopene is a natural food colorant existing in tomatoes and tomato-based foods. It has attracted much attention due to its various physiological activities but the poor water-solubility limits its utilization in food technology. A vacuum heating and emulsifying system was herein used to prepare the pre-emulsified lycopene powder. The ingredients and the technology were investigated via single factor and orthogonal experiments using lycopene water dispersibility as evaluation index. The optimal processing parameters were as follows: the sample was heated to 155 ℃ and kept for 1.5 min, and a composite emulsifier including sucrose ester and glycerol monostearate at the ratio of 3:5 was used with a dosage of 4.5%. At the same time, sugar powder and/or maltodextrin and/or modified starch could be used as an excipient. The content of lycopene reached 3.35% and the powder possessed dark-red color, fast dissolution, good solubility and emulsion stability and the cis-isomers took up to 58.53 % of total lycopene.

Keyword: lycopene, powder, pre-emulsified, water dispersibility

收稿日期：2014-10-08

基金项目：国家自然科学基金项目(31171724)；国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD33B05)。

* **通信作者**：张连富(1967—)，男，河北唐山人，工学博士，教授，主要从事功能性食品研究。E-mail：lianfu@jiangnan.edu.cn

番茄红素是存在于番茄及其制品中的天然食用色素,具有多种生理功能。它能通过抗氧化作用,抑制氧化游离基,降低发生肿瘤的危险性,研究表明番茄红素对预防前列腺癌、肺癌、胃癌效果显著,对结肠癌、食道癌等多种癌症也有预防作用[1-3]。此外,番茄红素还能有效抑制和清除自由基,防止外界辐射、紫外线对皮肤的损害,具有延缓衰老的作用。目前,欧盟和英国许可使用的色素中包括番茄红素。

番茄红素是脂溶性色素,其强烈的疏水结构使其不溶于水,极大的限制了番茄红素在水基食品体系中的应用[4]。目前改善番茄红素水分散性的方法主要有固体分散技术[5-6]、微胶囊技术[7-9]、包合物技术[10-11]、固体纳米技术[12-13]、微乳技术[14-15]。但是这些方法存在的一定缺陷:(1) 由于对番茄红素颗粒的破碎程度不够,颗粒较大,在使用时产品中的番茄红素易于沉降,所以能够稳定悬浮在水中的番茄红素质量分数过低(0.02%~0.3%),造成其使用成本过高,难以在实际生产中使用。(2)番茄红素微乳制剂中番茄红素的质量分数达到 1%~3%, 但该产品是一种水剂, 不适合应用在粉末状产品如固体饮料中,且水剂体积大,重量大,不易运输储存。(3)溶剂残留问题。(4)制备过程中番茄红素降解严重。

作者采用真空加热涂膜法,以粉末中番茄红素的水分散性、保留率和溶解速度为指标,通过单因素实验和正交实验,对粉末状预乳化番茄红素制备工艺进行研究,旨在开发一种水分散性良好,番茄红素含量高,溶解速度快,使用方便性符合实际生产需要的粉末状番茄红素产品,从而进一步拓宽番茄红素的应用领域。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

番茄红素标品 (纯度≥90%):Sigma 公司产品;番茄红素(纯度≥90%):华北制药厂产品;中链甘油三酸酯: 浙江建德千岛精细化工有限公司产品;吐温 40:润华食品添加剂有限责任公司产品;蔗糖脂肪酸酯、聚甘油脂肪酸酯:上海三菱化学产品;分子蒸馏甘油酯:中鼎添加剂有限公司产品;麦芽糊精:西王食品股份有限公司产品;糖粉:实验室自制产品;β-环糊精: 河北百味生物科技有限公司产品;辛烯基琥珀酸淀粉:德清三富食品有限公司产品。

集热式磁力加热搅拌器:常州迈科诺仪器有限公司产品;电子分析天平:上海梅特勒-托利多仪器有限公司产品;高效液相色谱仪:北京创新通恒科技有限公司产品。紫外/可见分光光度计:尤尼柯(上海)仪器有限公司产品。

1.2 实验方法

1.2.1 单因素实验 取一定量番茄红素、油、乳化剂和抗氧化剂投入容器中,开启真空系统使真空度达到-0.09 MPa,充入氮气驱赶氧气并再次开启真空系统,将容器浸入一定温度的导热油中旋转一定时间,之后容器停止旋转并冷却,与赋形剂水溶液混合预乳化,10 000 r/min 下剪切乳化,之后冷冻干燥 72 h,将产品转移到充满氮气的容器中储存。

乳化剂种类对产品的影响:乳化剂分别选定为吐温 40、蔗糖酯、聚甘油脂肪酸酯、蔗糖酯/单甘酯,乳化剂用量为质量分数 4%,涂膜温度 150 ℃,涂膜时间 1.5 min,赋形剂为变性淀粉,测定产品的 *M*值。

乳化剂用量对产品的影响:乳化剂选定为蔗糖酯:单甘酯=1:1、乳化剂用量分别选定为质量分数 1%、2%、3%、4%、5%、6%、8%、10%, 涂膜温度 150℃,涂膜时间 1.5min,赋形剂为变性淀粉。测定产品的 *M* 值。

涂膜温度对产品的影响:乳化剂为 *m*(蔗糖酯):*m*(单甘酯)=1:1,乳化剂用量为质量分数 4%,涂膜温度分别选定为 130、140、150、160、170 ℃,涂膜时间 1.5 min,赋形剂为变性淀粉,测定产品的 *M* 值和保留率。

涂膜时间对产品的影响:乳化剂为 *m*(蔗糖酯):*m*(单甘酯)=1:1,乳化剂用量为质量分数 4%,涂膜温度选定为 150 ℃, 涂膜时间分别选定为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 min,赋形剂为变性淀粉,测定产品的 *M* 值和保留率。

赋形剂对产品的影响:乳化剂为 *m*(蔗糖酯):*m*(单甘酯)=1:1,乳化剂用量为质量分数 4%,涂膜温度选定为 150 ℃,涂膜时间选定为 1.5 min,赋形剂分别选定为糖粉、β-环糊精、麦芽糊精、变性淀粉。测定产品的溶解速度和 *M* 值。

1.2.2 正交试验 根据单因素实验结果,选择影响粉末状预乳化番茄红素的各主要因素做正交实验,以粉末中番茄红素的水分散性为指标,进行 4 因素 3 水平 $L_9(3^4)$正交试验,确定最优组合。

1.2.3 番茄红素标准曲线的制备 准确称取番茄红素标准品 2.5 mg，用 5 mL 乙酸乙酯充分溶解，溶液定容至 25 mL，得到 100 μg/mL 溶液，然后准确量取 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mL 该溶液稀释定容至 2 mL，得到 30、35、40、45、50 μg/mL 的一系列标准溶液。色谱条件：YMC carotenoid 色谱柱（250 mm×4.6 mm，5 μm），采用梯度洗脱，流动相 A：v（甲醇）：v（乙腈）=25:75，流动相 B：MTBE，流量：1.0 mL/min，0~20 min 为 A 相，20~40 min 内，v（A）：v（B）=45:55，柱温：30 ℃，检测波长：472 nm，进样量：20 μL。以标准溶液浓度为横坐标，峰面积为纵坐标作图，得到番茄红素标准曲线：y=166 575x+138 682 R^2=0.999 6。

1.2.4 番茄红素质量分数的测定 准确称取 1.000 g 粉末，溶于水后用乙酸乙酯萃取，萃取多次至萃取液无色，将萃取液合并后稀释，在波长 472 nm 下用高效液相检测，记录峰面积，根据标准曲线计算番茄红素质量分数，记为 a 值（mg/g）。

1.2.5 水分散性的测定 准确称取 1.000 g 粉末，用 50 mL 水溶解后过滤，准确量取 1mL 滤液，用乙酸乙酯萃取，萃取多次至萃取液无色，将萃取液合并稀释，在波长 472 nm 下用高效液相检测，记录峰面积，根据标准曲线计算番茄红素质量分数，记为 b 值（mg/g），按如下公式计算番茄红素水分散性。

$$M=(b/a)\times 100\%$$

b 为产品溶解后滤除不溶物后，可分散在水中的番茄红素的量（mg/g）；a 为产品中番茄红素的质量分数（mg/g）。

1.2.6 番茄红素保留率测定 按下式计算：

$$P=(a/c)\times 100\%$$

P 为保留率（%）；a 为产品中番茄红素质量分数（mg/g）；c 为产品中番茄红素理论质量分数（mg/g）。

1.2.7 粉末溶解速度的测定 分别选用糖粉、β-环糊精、麦芽糊精、变性淀粉作为赋形剂制备样品。准确称取 1.000 g 粉末置于 100 mL 烧杯中，加入 100 mL 不同温度的水，水温分别选定为 25、60、80 ℃，记录粉末全部溶解所需时间。

1.2.8 紫外/可见光谱鉴定番茄红素结构变化 用紫外/可见分光光度计对预乳化番茄红素中的番茄红素乙酸乙酯提取液进行 UV-Vis 光谱扫描。与全反式番茄红素的 UV-Vis 光谱扫描图进行比较。确定处理后的样品中是否含有顺式异构体。

1.2.9 番茄红素异构体组成的 HPLC 分析 按 1.2.3 的色谱条件检测加工前后番茄红素顺反异构情况。

2 结果与分析

2.1 乳化剂种类及其配比的选择

由于粉末溶解后是 O/W 型乳化体系，故应选择 HLB 值较大的乳化剂。吐温 40、蔗糖酯、聚甘油脂肪酸酯为现在较为常见的 O/W 型乳化剂，并且蔗糖酯常与单甘酯复配使用。作者考察了这 3 种乳化剂单独使用以及蔗糖酯与单甘酯复配使用对粉末 M 值的影响。

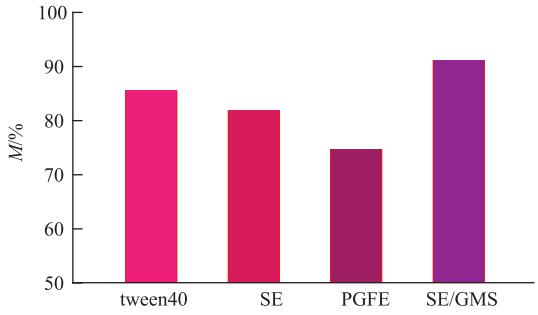


图 1 乳化剂种类对粉末 *M* 值的影响

Fig. 1 Effect of emulsifiers on *M* values of the pre-emulsified lycopene powder

由图 1 知，乳化剂的选择对粉末有较大的影响。蔗糖酯与单甘酯复配的乳化效果最佳，水分散性最好，这是因为单甘酯的亲水基团是线性的，而蔗糖酯的亲水基团是环形的，它们在界面上吸附形成“复合物”，定向排列紧密，形成很强的油水界面膜，可以防止番茄红素结晶析出，抑制粉末溶解后油滴聚结，从而增加番茄红素水分散性及乳液的稳定性。因此，实验接着对蔗糖酯与单甘酯复配比例进行了考察。

由图 2 知，增加复配乳化剂中单甘酯的比例，可提高番茄红素水分散性，M 值增大。当蔗糖酯与单甘酯复配质量比为 1:1 时，乳化效果最佳，水分散性最好，原因是此时单甘酯的线性亲水基团与与蔗糖酯的环形亲水基团构象互补达到最佳，再增加单甘酯的比例时，最佳构象被破坏，乳化效果下降，粉末水分散性变差，故蔗糖酯：单甘酯质量比以 1:1 左右为宜。

2.2 乳化剂用量对粉末的影响

由图 3 知，乳化剂质量分数对 M 值有一定的影响，M 值随着乳化剂用量的增大先增大后趋于平

稳。当乳化剂质量分数小于 4%时,*M* 值随着乳化剂用量增加而增加,原因是乳化剂形成的油水界面膜强度不断增大,番茄红素油滴被充分包裹,更好的分散在水中。当乳化剂质量分数大于 4% 时,*M* 值变化趋于平缓。综合考虑成本,故乳化剂质量分数以 4%左右为宜。

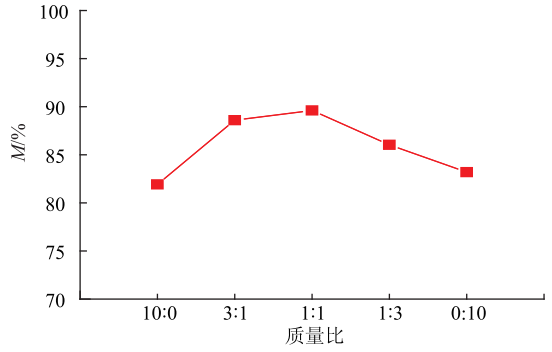


图 2 乳化剂配比对粉末 *M* 值的影响

Fig. 2 Effect of emulsifier ratios on *M* values of the pre-emulsified lycopene powder

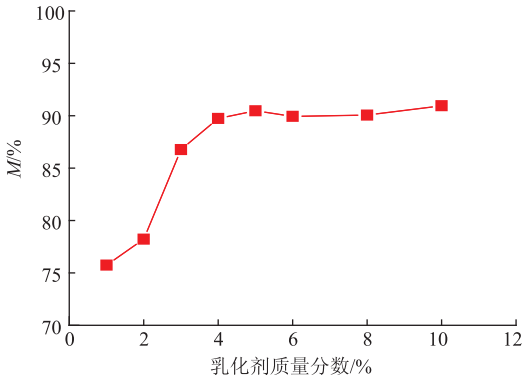


图 3 乳化剂用量对粉末 *M* 值的影响

Fig. 3 Effect of emulsifier dosages on *M* values of the pre-emulsified lycopene powder

2.3 涂膜温度和涂膜时间的选择

由图 4 知,随涂膜温度的升高,粉末在水中的分散性呈现先上升后下降趋势。当温度小于 150 ℃时,*M* 值不断增大, 原因是番茄红素溶解度与温度呈正比[16],随着温度升高,番茄红素在油中溶解度上升,与乳化剂充分混匀,乳化效果更佳。当温度大于 150 ℃时,*M* 值开始下降,原因可能是在实验真空度以及涂膜温度下,单甘酯和油部分挥发,导致乳化效果的下降,所以 *M* 值降低。另外,粉末中番茄红素保留率随涂膜温度的升高持续下降,在 170 ℃时仅剩 64%,150 ℃时粉末中番茄红素保留率为 71%,综合考虑涂膜温度对 *M* 值和番茄红素保留率的影响,涂膜温度选择 150 ℃左右为宜。

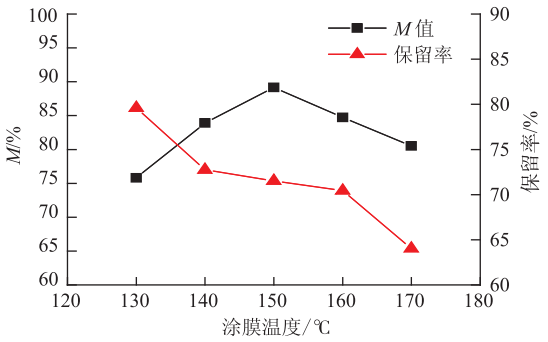


图 4 涂膜温度对 *M* 值和番茄红素保留率的影响

Fig. 4 Effect of heating tempreture on pre-emulsified lycopene powder

由图 5 知,随着涂膜时间的增加,粉末在水中的分散性呈现先上升后下降趋势,当涂膜时间小于 1.5 min 时,*M* 值呈上升趋势,随着涂膜时间的增加,番茄红素逐渐溶于油中,并与乳化剂充分混合并且在 1.5 min 达到最佳的乳化效果,此时 *M* 值最大。当涂膜时间超过 1.5 min 时,*M* 值开始下降,这可能是因为在实验真空度以及涂膜温度下,单甘酯和油部分挥发,导致乳化效果的下降,所以 *M* 值降低。另外,粉末中番茄红素保留率随涂膜时间的增加持续下降,在 3 min 时仅剩 55.02%,而 1.5 min 时粉末中番茄红素保留率为 74.39%,综合考虑涂抹时间对 *M* 值和番茄红素保留率的影响,涂膜时间选择 3 min 左右为宜。

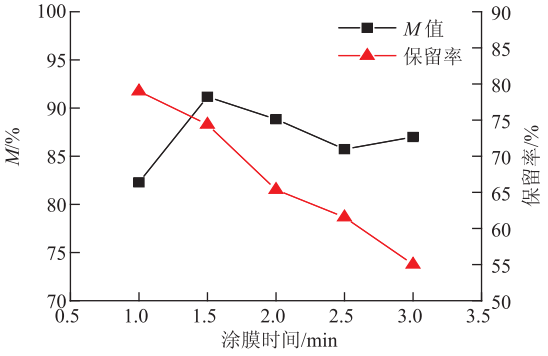


图 5 涂膜时间对 *M* 值和番茄红素保留率的影响

Fig. 5 Effect of heating time on pre-emulsified lycopene powder

2.4 赋形剂对溶解速度的影响

由表 1 可知,样品的溶解速度均随着水温的升高而逐渐加快,当水温为 25 ℃时,以 β-环糊精为赋形剂所制备的样品溶解速度较慢,其他 3 种样品均

能较快溶解，当水温为 80 ℃时，以糖粉、麦芽糊精、变性淀粉为赋形剂所制备的样品均能快速溶解，而以 β–环糊精为赋形剂所制备的样品溶解时间相对较长。通过测定 *M* 值，4 种赋形剂对 *M* 值影响均不大。综合考虑，糖粉、麦芽糊精、变性淀粉均可作为赋形剂使用，在应用时，可视具体情况选用。

表 1　赋形剂对粉末溶解时间的影响

Table 1　Effect of excipients on dissolution time of the powder

赋形剂	溶解时间/s			*M* 值
	25 ℃	60 ℃	80 ℃	
糖粉	31	12	5	88.60
β–环糊精	>180	92	42	89.74
麦芽糊精	47	12	8	90.40
变性淀粉	49	35	16	90.10

2.5　正交实验

按表 2 设计的 9 组实验结果见表 3。通过比较极差 *R* 值得大小可以判断不同因素所起作用的大小，比较 *K* 值的大小可以判断该因素不同水平对实验的影响程度。

表 2　正交试验因素水平表 $L_9(3^4)$

Table 2　Factors and levels of the orthogonal experiments

水平	乳化剂质量比	乳化剂质量分数/%	涂膜温度/℃	涂膜时间/min
1	5:3	3.5	145	1.0
2	1:1	4.0	150	1.5
3	3:5	4.5	155	2.0

表 3　正交实验表及结果

Table 3　Design and the results of the orthogonal experiments

试验号	*A* 乳化剂质量比	*B* 乳化剂质量分数/%	*C* 涂膜温度/℃	*D* 涂膜时间/min	*M*/%
1	1	1	1	1	77.03
2	1	2	2	2	90.21
3	1	3	3	3	87.01
4	2	1	2	3	87.82
5	2	2	3	1	76.59
6	2	3	1	2	87.68
7	3	1	3	2	90.30
8	3	2	1	3	87.79
9	3	3	2	1	83.03
1	254.25	255.16	252.51	236.65	
2	252.09	254.59	261.06	268.19	
3	261.13	257.72	253.90	262.63	
R	3.01	1.05	2.85	10.51	

对上述结果进行方差分析，结果见表 4。

表 4　正交试验方差分析结果

Table 4　Results of variance analysis

因素	偏差平方和	自由度	*F* 比	*F* 临界值	显著性
乳化剂配比	14.823	2	7.981	19.000	
乳化剂用量	1.857	2	1.000	19.000	
涂膜温度	14.055	2	7.568	19.000	
涂膜时间	188.915	2	101.717	19.000	*
误差	1.857	2			

注：“*”表示差异显著（$p<0.05$）

极差分析和方差分析结果表明，4 种因素对 *M* 值的影响大小依次为 *D*>*A*>*C*>*B*，即涂膜时间>乳化剂质量>涂膜温度>乳化剂质量分数，其中，涂膜时间对 *M* 值影响最显著，最佳反应组合为 $A_3B_3C_2D_2$，工艺确定为：乳化剂为 *m*（蔗糖酯）:*m*（单甘酯）=3:5、乳化剂质量分数 4.5%，涂膜温度 150 ℃，涂膜时间 1.5 min。按此最佳组合方案 $A_3B_3C_2D_2$ 作验证试验，经 3 次重复试验，*M* 值为 90.95%，与正交试验结果相符，表明正交试验得出的最佳工艺符合实际。

2.6　粉末状预乳化番茄红素的质量改善

番茄红素性质不稳定，极易发生氧化变质。在初期实验中，通过对产品中番茄红素的保留率进行测定，发现该值仅为 30.03%。低保留率降低了产品中番茄红素的实际含量，提高了生产成本。因此有必要对工艺进行优化，提高番茄红素的保留率。通过对加工过程中各个阶段番茄红素保留率的考察，结果发现在涂膜阶段番茄红素降解最为严重，保留率为 42.69%，最终产品中番茄红素仅剩 30.03%，说明经过涂膜阶段，番茄红素降解近 60 %，之后的步骤番茄红素降解了 12.66%。因此实验对如何提高涂膜阶段番茄红素的保留率进行了研究。

由表 4 知，通过对加热过程引入真空系统，减少体系中的氧气，可以有效降低涂膜过程中番茄红素的氧化降解，保留率提高到 62.53 %。在此基础上接着考察了充入氮气对保留率的影响，结果发现，充入 1 次 N_2，保留率可达到 72.73 %，多次充入 N_2 对保留率影响不大，故充入 N_2 次数以 1 次为宜。TBHQ 是油脂中常用的抗氧化剂，为了进一步提高番茄红素保留率，向油中添加了 0.2 g/kg（以油相质

量计)的 TBHQ 的作为抗氧化剂,结果发现,添加 TBHQ 后,涂膜后番茄红素保留率进一步提高,可达到 80.87%。在优化工艺后,对最终产品中番茄红素的保留率进行了测定,测 3 次取平均值,番茄红素保留率为 74.70%,经过改善,最终产品中番茄红素质量分数可达 3.35%。

2.7 紫外可见光谱鉴定番茄红素结构变化

番茄红素的高度不饱结构使其在加工的过程中容易发生氧化降解和顺反异构化反应。经热处理制备得到的番茄红素制品中发现了顺式异构体,尤其在高温处理过程中番茄红素异构化非常明显。因此对样品中番茄红素的结构变化进行了分析。

由图 6 可知,在 λ=400~550 nm 区段,加工后番茄红素的特征光谱与全反式番茄红素特征光谱基本一致,但是峰位发生了紫移,且在波长 361 nm 处出现了一处较强的吸收峰,这都与顺式番茄红素的光谱图特征一致。说明处理后的产品中番茄红素结构发生了变化,出现了顺式异构体。

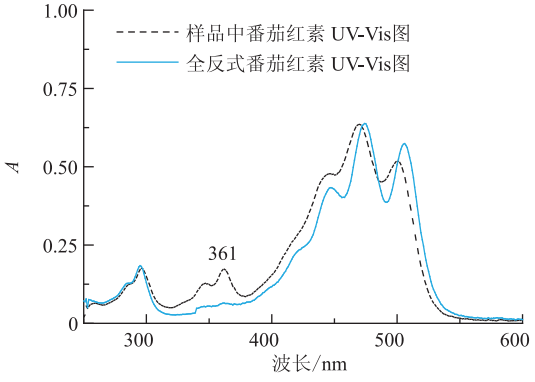


图 6 含番茄红素样品处理前后紫外/可见光吸收光谱

Fig. 6 UV-Visible spectrum of lycopene samples before/after processing

2.8 番茄红素异构体组成的 HPLC 分析

为了进一步确定顺式番茄红素种类及含量,用 HPLC 对加工前后番茄红素进行分析。图 7 中峰 1 表示全反式番茄红素,保留时间为 30.76 min,图 8 中峰 4 保留时间为 30.825 min, 与峰 1 保留时间基本相同,可以认定其为全反式番茄红素,峰 2、3 分别表示 13-Z 和 9-Z 番茄红素[17-18],其余峰暂无文献确切相关报道。因此,番茄红素在加工过程中其结构发生了异构化,与 UV-Vis 光谱图分析结果一致。通过谱图计算, 顺式番茄红素的质量分数为 58.53%,反式番茄红素质量分数为 41.47%。

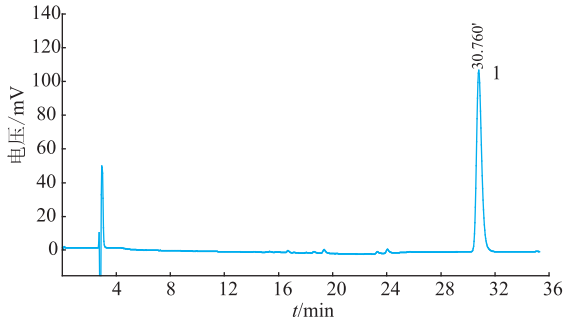


图 7 加工前番茄红素 HPLC 图

Fig. 7 HPLC of all-trans lycopene

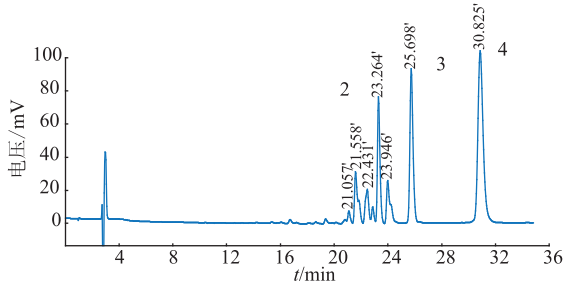


图 8 加工后番茄红素 HPLC 图

Fig. 8 HPLC of lycopene in powder

2.9 样品应用稳定性

取一定量样品溶于水中并稀释到所需浓度,采用 Zetasizer nano ZS 纳米分析仪测定样品的 Z-均粒径与粒径分布,每个样品测量 3 次,取均值;散射角为 90°,在温度(25±0.1)℃的条件下保存 3 min。

样品溶解后乳液其 Z-Average 粒径为 211.5 nm,PDI 为 0.332。样品溶解后粒度分布较均匀,稳定性良好。

3 结 语

采用真空加热涂膜制备工艺,通过对粉末状预乳化番茄红素制备所用配料种类、用量及制备工艺的研究,确定了其最佳生产工艺:乳化剂为 *m*(蔗糖酯):*m*(单甘酯)=3:5、乳化剂质量分数 4.5%,涂膜温度 155 ℃,涂膜时间 1.5 min,赋形剂可为糖粉、麦芽糊精或变性淀粉。所制备的产品番茄红素含量可以达到 3.35%,粉末色泽自然,溶解速度快,水分散性、乳液稳定性良好, 顺式番茄红素占比可达 58.53%。此外,生产工艺操作简单,应用前景广阔。

参考文献：

[1] Clinton S K. Lycopene：chemistry，biology，and implications for human health and disease [J]. **Nutrition Reviews**，1998，56(2)：35-51.
[2] Gerster H. The potential role of lycopene for human health [J]. **Journal of the American College of Nutrition**，1997，16(2)：109-126.
[3] Giovannucci E，Ascherio A，Rimm E B，et al. Intake of carotenoids and retino in relation to risk of prostate cancer [J]. **Journal of the National Cancer Institute**，1995，87(23)：1767-1776.
[4] 陈伟，丁霄霖. 番茄红素化学和生物学特性[J]. 粮食与油脂，2002(7)：47-49.
CHEN Wei，DING Xiaolin. Lycopene：Chemical and Biological Properties[J]. **Cereals & Oils**，2002(7)：47-49.(in Chinese)
[5] 吕文莉，戎飞，平其能. 番茄红素 - 泊洛沙姆 188 固体分散体的制备及溶出度和生物利用度研究 [J]. 中国药科大学学报，2009(6)：514-518.
LV Wenli，RONG Fei，PING Qineng. Preparation，dissolution and bioavaiability of lycopene Poloxamer 188 solid dispersion[J]. **Journal of China Pharmaceutical University**，2009(6)：514-518.(in Chinese)
[6] 武花花. 包埋技术在天然产物中的应用研究[D]. 北京：北京化工大学，2010.
[7] 唐颖，龚秋翼，钱俊青. 番茄红素纳米微囊冻干技术的研究[J]. 食品与发酵工业，2010(3)：80-83.
TANG Ying，GONG Qiuyi，QIAN Junqing. Research on freeze-drying of lycopene nano-microcapsules [J]. **Food and Fermentation Industries**，2010(3)：80-83.(in Chinese)
[8] Rocha G A，Fá varo-Trindade C S，Grosso C R F. Microencapsulation of lycopene by spray drying：Characterization，stability and application of microcapsules[J]. **Food And Bioproducts Processing**，2012，90(1)：37-42.
[9] Chiu Y，Chiu C，Chien J，et al. Encapsulation of lycopene extract from tomato pulp waste with gelatin and poly(γ -glutamic acid) as carrier[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**，2007，55(13)：5123-5130.
[10] 安翠翠，朱文杰，孙海松. 番茄红素环糊精包合片剂的研制[J]. 食品工业科技，2009(2)：189-192.
AN Cuicui，ZHU Wenjie，SUN Haisong. Manufacture of tablets of complex lycopene and mixed-cyclodextrin [J]. **Science and Technology of Food Industry**，2009(2)：189-192.(in Chinese)
[11] Vertzoni M，Kartezini T，Reppas C，et al. Solubilization and quantification of lycopene in aqueous media in the form of cyclodextrin binary systems[J]. **International Journal of Pharmaceutics**，2006，309(1)：115-122.
[12] 曹雯丽，金琰，张连富. 响应面法优化番茄红素纳米分散体的制备工艺[J]. 食品与发酵工业，2009(7)：91-95.
CAO Wenli，JIN Yan，ZHANG Lianfu. Optimization of the preparation of lycopene nanodispersions using surface response methodology[J]. **Food and Fermentation Industries**，2009(7)：91-95.(in Chinese)
[13] 田艳燕，段相林，常彦忠. 番茄红素脂质体的制备[J]. 食品科学，2007(4)：128-132.
TIAN Yanyan，DUAN Xianglin，CHANG Yanzhong. Preparation of Lycopene Liposomes[J]. **Food Science**，2007(4)：128-132.(in Chinese)
[14] 闫圣坤，张连富. 番茄红素微乳化体系的制备[J]. 食品工业科技，2012(2)：322-325.
YAN Shengkun，ZHANG Lianfu. Preparation of lycopene microemulsion system [J]. **Science and Technology of Food Industry**，2012(2)：322-325.(in Chinese)
[15] Lopes L B，Vandewall H，Li H T，et al. Topical delivery of lycopene using microemulsions：enhanced skin penetration and tissue antioxidant activity[J]. **Journal of Pharmaceutical Sciences**，2010，99(3)：1346-1357.
[16] 李伟. 番茄红素的纯化、性质研究及微胶囊化[D]. 无锡：江南大学，2002.
[17] Re R，Fraser P D，Long M，et al. Isomerization of lycopene in the gastric milieu [J]. **Biochemical and Biophysical Research Communications**，2001，281(2)：576-581.
[18] Ferruzzi M G，Nguyen M L，Sander L C，et al. Analysis of lycopene geometrical isomers in biological microsamples by liquid chromatography with coulometric array detection[J]. **Journal of Chromatography. B：Biomedical Sciences and Applications**，2001，760(2)：289-299.