

限氧热泵干燥与油脂对 β -胡萝卜素生物接近度的影响

孙晓菲^{1,2} 朱文学² 李鑫玲² 樊金玲²

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013; 2. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023)

摘要: 胡萝卜富含维生素A原类胡萝卜素,但含水率较高,不宜储存。将其干燥制成脱水蔬菜可以有效地延长货架期、保留营养价值。利用体外消化模型评估了胡萝卜经CO₂源限氧热泵干燥后的 β -胡萝卜素生物接近度及油脂对其的影响。以低速离心得到的上清液中的 β -胡萝卜素释放率和超微过滤得到的胶束相中的 β -胡萝卜素胶束率为指标评估 β -胡萝卜素生物接近度。尽管干燥对胡萝卜中 β -胡萝卜素的保留率有消极影响,但对其生物接近度却有积极作用。尤其是以CO₂作为干燥介质可以极大地提高 β -胡萝卜素的保留率和生物接近度。油脂的添加使得新鲜胡萝卜和干制品中的 β -胡萝卜素释放率和胶束率都显著升高。

关键词: β -胡萝卜素; 限氧热泵干燥; 生物接近度; 体外消化

中图分类号: TS255 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)10-0274-06

Impact of Oxygen Limited Heat Pump Drying and Oil on Bioaccessibility of β -carotene in Carrots

Sun Xiaofei^{1,2} Zhu Wenxue² Li Xinling² Fan Jinling²

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Carrots contains high level of provitamin A carotenoids, especially β -carotene, which plays the function of antioxidation and scavenging free radicals in vivo. But they also have high level moisture content. This character negatively impacts the length of time that carrots can be stored. Dehydration of carrots can effectively increase storage time and retain nutrition. But in the drying process of carrots, the β -carotene degradation reaction rate would be significantly increased by destruction of tissue integrity, temperature rise, and contacting with light and oxygen, which could change the nutritional value of carrots. Carrots were dried by oxygen limited heat pump firstly, and then in vitro digestion model was used to evaluate the effect of different drying medium and oil on bioaccessibility of β -carotene in carrots during drying process. The bioaccessibility of β -carotene was measured by β -carotene release rate in supernatant by using low-speed centrifugation and β -carotene micellar rate in micelle phase by ultrafiltration. Although there was negative impact on β -carotene retention rate by drying process, there was positive impact on the bioaccessibility. Especially when CO₂ was used as a drying medium, it increased the retention rate and bioaccessibility of β -carotene significantly. In addition, there was significant increase in the release rate and micellar rate of β -carotene in fresh and dried carrots when oil was added. Anyhow, there was significant increase of bioaccessibility of carrots by heat pump drying and adding oil. This may enhance the bioavailability of human beings.

Key words: β -carotene; oxygen limited heat pump drying; bioaccessibility; in vitro digestion

收稿日期: 2016-03-24 修回日期: 2016-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171723)

作者简介: 孙晓菲(1982—),女,博士生,河南科技大学讲师,主要从事农产品加工研究,E-mail: sunxiaofei@haust.edu.cn

通信作者: 朱文学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工研究,E-mail: zwx@mail.haust.edu.cn

引言

类胡萝卜素是生物体的天然组分,由于人体不能自行合成类胡萝卜素,所以必须摄取此类食物。有证据表明类胡萝卜素在体内发挥着抗氧化、清除自由基的功能,经常食用富含类胡萝卜素的食物可以降低罹患癌症、退化性疾病和慢性病的风险^[1-4]。胡萝卜富含维生素和矿物质,特别是类胡萝卜素的含量很高,主要为 β -胡萝卜素(46.0 ~ 130.0 $\mu\text{g/g}$)^[5],是人类食物中维生素 A 的前体^[6]。胡萝卜在中国的大部分地区都有大面积的种植,并且产量高。但新鲜胡萝卜的含水率较高,不宜储存,如不及时食用便会腐烂,造成巨大浪费。因此将其干燥制成脱水蔬菜可以有效地延长货架期、保留风味及营养价值,便于运输和储存^[7-8]。

新鲜胡萝卜中的胡萝卜素是以晶体形态存在于细胞有色体的类囊体膜上,并常与膜蛋白结合。由于细胞的完整结构和脂蛋白等物质的保护作用而显示出较高的稳定性。胡萝卜干燥过程中,组织完整性被破坏、温度的升高、光与氧的接触都会显著提高 β -胡萝卜素的降解反应速率,使其营养价值发生改变^[9],主要表现在 β -胡萝卜素的保留率和生物利用上。如果采用传统的热风干燥方法, β -胡萝卜素将极易氧化损失,致使胡萝卜干制品色泽不佳,难以保证其天然品质和营养。HIRANVARACHAT 等^[10]的研究表明,热风干燥下胡萝卜中 β -胡萝卜素的保留率仅为 58% ~ 62% (温度 60 ~ 80 $^{\circ}\text{C}$);另一方面, β -胡萝卜素的生物利用过程有 4 个步骤,即食品基质充分消化释放 β -胡萝卜素、在胃中的乳化作用和小肠内胶束微粒的形成、小肠黏膜细胞的摄取、被转运至淋巴循环或在肝脏中转化为维生素 A 贮存^[11-12]。干燥作为食品加工方式的一种,势必会改变 β -胡萝卜素从食物基质中的释放程度,进而影响其在人体内的吸收和利用。因此合适的干燥方式对保留干制品的营养价值尤为重要。

限氧热泵干燥是以惰性气体代替常规空气作为干燥介质进行闭路循环,利用热泵系统进行除湿和介质加热的干燥形式,具有能量利用率高、干燥速率增加、无环境污染等特点^[13-15],特别是用惰性气体代替空气,可以避免胡萝卜中 β -胡萝卜素与氧气接触而发生氧化,提高其在干燥制品中的保留率。胡萝卜被摄食后,只有胶束部分的 β -胡萝卜素才能被小肠粘膜吸收,供人体利用。在体外消化实验中,常用 β -胡萝卜素从食物基质中释放到胃肠道后被包覆在脂质微粒中的胶束程度,即“生物接近度”来评估食物中 β -胡萝卜素的生物利用情况^[16]。限氧热

泵干燥作为一种加热的食品加工方式,极有可能引起胡萝卜中 β -胡萝卜素生物接近度的改变,进而影响其在人体内的生物利用率。

尽管大量文献报道了各种干燥方式和操作参数对食物中类胡萝卜素损失的影响,但鲜见对其生物接近度和生物利用率影响的报道。体外消化模型被认为是研究不同食物基质中生物活性成分的生物接近度的一种合适方法^[17],其最优之处在于用经济有效的方法屏蔽掉其他物质对 β -胡萝卜素生物接近度可能存在的影响^[18]。本文采用一种口腔、胃、肠道三步体外消化模型研究限氧热泵干燥胡萝卜对其 β -胡萝卜素生物接近度的影响,以及日常烹饪油脂对此法所得胡萝卜干制品中 β -胡萝卜素生物接近度的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

胡萝卜在当地商店购买;食用葵花籽油,中粮北海粮油工业有限公司。

猪 α -淀粉酶、胃蛋白酶、胰酶、胆汁提取物(均为生化级)、 β -胡萝卜素标准品(纯度 98%)购自 Sigma - Aldrich 公司;甲醇、乙酸乙酯(均为色谱纯)购自西陇化工有限公司;其他试剂均为分析纯。

1.2 样品处理

胡萝卜用去离子水清洗干净,削皮,切成大概 1 mm \times 1 mm \times 1 mm 的小丁,相当于咀嚼后的状态。分成每 10 g 一份进行热泵干燥处理。设置热泵干燥温度为 60 $^{\circ}\text{C}$,风速为 1.0 m/s,干燥介质分别为 CO_2 气体、 CO_2 与空气混合气体(氧气体积分数 10%)和空气。待干燥温度及风速稳定后,将样品放入物料盘中进行干燥,实时监测样品质量,直至达到含水率 10% 时停止干燥。将干燥后的样品于 95 $^{\circ}\text{C}$ 去离子水中复水 2 min,沥去表面水分。

为了研究日常烹饪油脂对热泵干燥所得胡萝卜干制品中 β -胡萝卜素生物接近度的影响,在部分样品中加入 2.5%、5.0%、10.0% 的葵花籽油。葵花籽油被报道不含任何 β -胡萝卜素^[19],添加量的选择在正常膳食油脂质量分数范围内(10% 以下)^[20]。每种处理重复 3 次。

1.3 体外消化

体外消化实验参照文献[21-22],并对其方法做了微小的调整。所有消化液现用现配^[21-22]。

将 10 g 新鲜胡萝卜样品或对应量的热泵不同干燥介质干燥后的样品置于三角瓶中,加入 5 mL 人造唾液(50 mmol/L NaCl、10 mmol/L KH_2PO_4 、2 mmol/L $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、40 mmol/L NaHCO_3),用

1 mol/L NaOH 调节 pH 值至 6.7,接着加入含 25 U 的 100 μ L 新鲜配置的 α -淀粉酶溶液,再加入 5 mL 人造唾液开始口腔消化阶段,三角瓶放于 37 $^{\circ}$ C 恒温摇床中 95 r/min 消化 1 min。在模拟胃阶段时,先用 1 mol/L HCl 调节 pH 值至 2.0,然后加入 5 mL 事先预热至 37 $^{\circ}$ C 的胃电解质溶液(51 mmol/L NaCl、14.8 mmol/L KCl、3.7 mmol/L KH_2PO_4 、10 mmol/L $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、3.4 mmol/L $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$),接着加入 2 mL 猪胃蛋白酶(40 mg/mL,胃蛋白酶溶于 0.1 mol/L HCl),充入 N_2 ,封口放入恒温摇床,于 37 $^{\circ}$ C、95 r/min 消化 1 h。取出三角瓶,用 0.9 mol/L NaHCO_3 调节 pH 值至 5.3,然后加入 9 mL 胆汁提取物-胰酶溶液(12 mg/mL 猪胆汁提取物、2 mg/mL 胰酶溶于 100 mmol/L NaHCO_3),用 1 mol/L NaOH 调节 pH 值至 7.5,充入 N_2 ,封口放入摇床于 37 $^{\circ}$ C、95 r/min 继续消化 2 h,模拟小肠消化过程。消化结束后,于 5 000 g 离心 20 min 得到上清液,用于分析 β -胡萝卜素从食物中释放出来的程度(释放率)。上清液过 0.22 μ m 滤膜得到胶束相,用于分析 β -胡萝卜素可能被小肠吸收的程度(胶束率)。所有的操作都应避光进行,每个样品重复 3 次。

1.4 胡萝卜样品中 β -胡萝卜素的提取

胡萝卜中 β -胡萝卜素的提取参照文献[23]。称取 1 g 新鲜胡萝卜样品或 0.1 g 干燥后胡萝卜样品置于研钵中,放入少量石英砂,用含 1 g/L BTH 的萃取剂(正己烷、乙醇、丙酮体积比 50:25:25)分数次研磨提取,直到萃取剂和胡萝卜渣都为无色。合并萃取液,加入 15 mL 蒸馏水和 1 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,振荡,静置分层;取分层后的上层有机相,待测。样品的提取和分析都应避光。

1.5 体外消化样品中 β -胡萝卜素的萃取

上一步体外消化实验中获得的上清液或胶束相中的 β -胡萝卜素用含 1 g/L BTH 的萃取剂(正己烷、乙醇、丙酮体积比 50:25:25)等体积提取,轻微振荡,避光静置分层,合并有机相,充入 N_2 于 35 $^{\circ}$ C 干燥浓缩,复溶于流动相中。

1.6 β -胡萝卜素的测定

β -胡萝卜素用反相 HPLC 进行分析(Agilent 1260 Infinity, 美国 Agilent Technologies 公司)。DAD 检测器的吸收光谱波长范围为 190 ~ 700 nm, β -胡萝卜素的检测波长为 450 nm。 β -胡萝卜素的分离采用 ZORBAX SB-C18 色谱柱(5 μ m, 250 mm \times 4.6 mm, Agilent),进样量为 10 μ L。用不同配比的甲醇(A)和乙酸乙酯(B)以 1.2 mL/min 的流速进行色谱柱的洗脱。0 ~ 15 min,90% ~ 85% A;15 ~ 30 min,85% ~ 70% A。 β -胡萝卜素的定量用标准曲

线计算,标准曲线由 β -胡萝卜素标品的 8 个质量浓度点构建,质量浓度范围 0 ~ 100 μ g/mL。

1.7 显微观察

使用倒置显微镜(Nikon ECLIPSE TS100-F)亮视野观察。对于新鲜胡萝卜样品,直接使用剃刀刀片尽可能薄地切取其截面,置于载玻片上观察。对于热泵干燥的样品,先在室温生理盐水中复水 15 min,捞出沥干表面水分后用剃刀刀片尽可能薄地切取截面,置于载玻片上进行观察。

1.8 统计分析

β -胡萝卜素体外生物接近度以从食物基质中转移至上清液和胶束相中的 β -胡萝卜素的百分比表示。即

$$n_1 = \frac{m_1}{m_3} \times 100\% \quad n_2 = \frac{m_2}{m_3} \times 100\%$$

式中 m_1 ——上清液中 β -胡萝卜素的质量比, μ g/g
 m_2 ——胶束相中 β -胡萝卜素的质量比, μ g/g
 m_3 ——胡萝卜样品中 β -胡萝卜素的质量比, μ g/g
 n_1 —— β -胡萝卜素释放率,%
 n_2 —— β -胡萝卜素胶束率,%

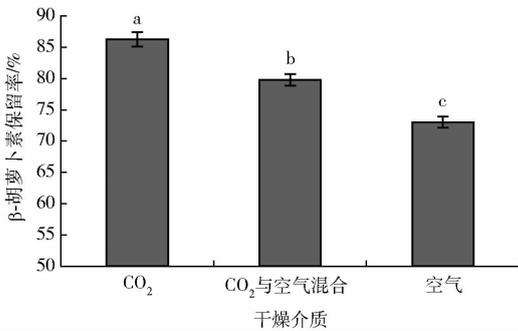
数据统计分析使用 SPSS 18.0 软件进行。数据以平均值 \pm 标准偏差形式给出,利用 Tukey's post hoc test 分析了平均值的方差,比较了组间的显著性差异。显著水平取 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同热泵干燥介质干燥后胡萝卜中 β -胡萝卜素保留率

干燥后胡萝卜中 β -胡萝卜素保留率就是其与干燥前新鲜胡萝卜中 β -胡萝卜素含量的百分比。在该研究中采取限氧热泵的干燥方式,以 CO_2 部分或全部代替空气作为干燥介质进行闭路循环,避免胡萝卜中 β -胡萝卜素与空气中氧接触而发生氧化和降解,期望提高干制品中 β -胡萝卜素保留。

从图 1 可以看出, β -胡萝卜素保留率随着干燥介质的不同而差异显著。干燥介质是空气时, β -胡萝卜素的保留率是 73.02%。将热泵中通入 CO_2 代替部分空气作为干燥介质后(氧气体积分数 10%),胡萝卜干制品中的 β -胡萝卜素保留率显著提高,达到 79.77%。继续将热泵中通入 CO_2 代替全部空气作为干燥介质, β -胡萝卜素保留率显著升高至 86.25%。可见,氧是影响 β -胡萝卜素降解的重要因素。热泵干燥胡萝卜时避免其与空气中氧的接触可以大大提高干制品中 β -胡萝卜素的保留率。这与先前的研究一致,HIRANVARACHAT 等^[9]的研究

图 1 不同热泵干燥介质下 β -胡萝卜素保留率Fig. 1 β -carotene retention rates of carrots under different heat pump drying mediums

表明,热风干燥胡萝卜片时 β -胡萝卜素的降解程度高于低压蒸汽干燥和真空干燥。

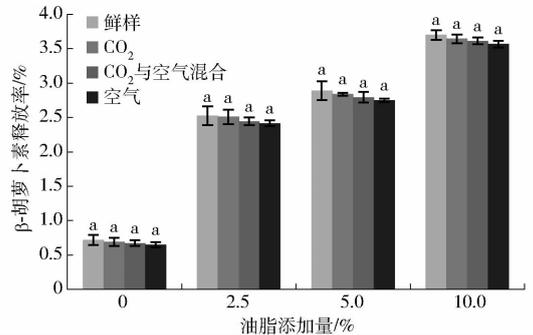
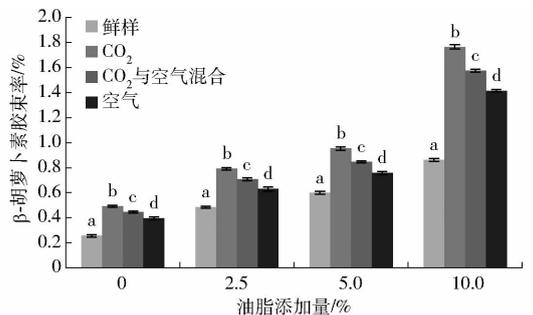
植物中天然存在的是全反式 β -胡萝卜素,由于存在大量不饱和结构,其性质非常活泼,高温时易被降解和形成同分异构体,尤其是存在氧气时也易发生氧化。异构化是氧化反应的第一个步骤,它导致 β -胡萝卜素双自由基产生,这就使其顺式键的两侧都易受到氧的攻击,然后内部破裂导致环氧化物的生成,这是 β -胡萝卜素氧化反应的最初产物。而后,由环氧化物再形成稳定的终产物,即阿朴胡萝卜酮和醛^[24]。氧不仅影响了 β -胡萝卜素的氧化过程,而且也影响其异构化反应。然而, β -胡萝卜素的异构化和氧化不仅导致其维生素 A 原的活性丧失,色泽变暗,而且其氧化产物可以通过诱导氧化应激反应显示细胞毒性和基因毒性效应^[25]。

2.2 不同热泵干燥介质对胡萝卜干制品中 β -胡萝卜素生物接近度的影响

样品经体外消化后,低速离心得到的上清液用于分析 β -胡萝卜素从食物基质中释放出来的程度,即释放率。但现在普遍认为, β -胡萝卜素的生物接近度是胶束相中的部分,所以利用 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜将上清过滤得到胶束相,测定并计算其中 β -胡萝卜素的胶束率,即生物接近度部分。

图 2 显示的是经过不同热泵干燥介质处理后,胡萝卜中 β -胡萝卜素的释放率。在同一油脂添加量的条件下,经空气、CO₂与空气混合气体、CO₂气体热泵干燥后的胡萝卜中 β -胡萝卜素释放率与未经干燥处理的新鲜胡萝卜中 β -胡萝卜素释放率无显著差异($P < 0.05$)。就干制品而言,虽然 CO₂介质干燥的 β -胡萝卜素释放率稍高于空气干燥的样品,但差异仍然不显著。但不同干燥介质对胡萝卜中 β -胡萝卜素胶束率,即生物接近度的影响趋势与释放率差异较大。如图 3 所示,在同一油脂添加量的条件下,经干燥处理的样品的 β -胡萝卜素生物接近度均显著高于未经干燥处理的新鲜胡萝卜。其中,

β -胡萝卜素生物接近度最高的是 CO₂介质干燥处理的样品,其次为 CO₂与空气混合气体处理的,最后是空气处理的样品,且三者之间差异显著,即新鲜胡萝卜的 β -胡萝卜素胶束率最低。从图 2 和图 3 中还可以看到,随油脂添加量的增加,新鲜胡萝卜和干制品中的 β -胡萝卜素释放率和胶束率都有不同程度的提高,但其值的大小顺序和差异显著性并未发生改变。

图 2 不同热泵干燥介质处理后胡萝卜中 β -胡萝卜素的释放率Fig. 2 β -carotene release rates of carrots under different heat pump drying mediums图 3 不同热泵干燥介质处理后胡萝卜中 β -胡萝卜素的胶束率Fig. 3 β -carotene micellar rates of carrots under different heat pump drying mediums

营养物生物接近度取决于食物基质的性质,它影响了物理、酶、化学消化过程的效率。 β -胡萝卜素从食物基质中的释放主要依靠细胞的瓦解,这发生在食物准备、加工和咀嚼过程中。释放后的限制性因素是 β -胡萝卜素在消化过程中的溶解度。所以, β -胡萝卜素在消化过程中从食物基质中的释放和随后混合进入亲脂胶束才是小肠细胞可利用成分形成的限制性因素^[26]。先前的研究证明类胡萝卜素的物理状态及其在植物材料中的定位会显著影响其从食物中的释放。SCHWEIGGERT 等^[27]认为,在芒果、木瓜、番茄和胡萝卜的有色体中,类胡萝卜素的物理存在形式有液态-结晶(或脂质-溶解)和固态结晶 2 种状态,前者的 β -胡萝卜素生物接近度大于后者。从图 4 可以看出,新鲜胡萝卜的类胡萝卜

素以针状固态结晶存在于细胞的有色体中。干燥过程中,胡萝卜细胞有色体上的类胡萝卜素接收热量,使其存在形式由固态结晶转变为液态-结晶,使得 β -胡萝卜素更容易被包被入胶束相中,从而提高其生物接近度。另外,干燥也可能影响了食物中存在的一些脂质成分,这些脂质成分可能与 β -胡萝卜素发生协作形成胶束共同体,即干燥可能通过促进 β -胡萝卜素和食品中脂质的混合形成更有利于吸收的胶束来提高生物利用率。与干燥时使用 CO_2 介质相比,空气中的氧会使食物中的脂质发生变化,这可能是导致利用空气作为干燥介质所得胡萝卜干制品中 β -胡萝卜素胶束率低于 CO_2 作为干燥介质的原因。

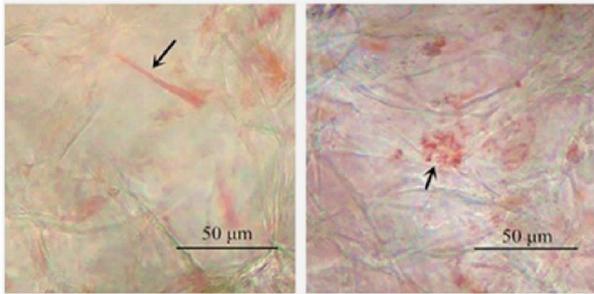


图4 新鲜胡萝卜样品和经热泵干燥胡萝卜样品的显微观察

Fig. 4 Light micrographs of fresh and heat pump drying treated carrot samples

2.3 油脂添加量对 β -胡萝卜素生物接近度的影响

为了研究膳食油脂对 β -胡萝卜素从基质向上清及胶束中转移的影响,分别向新鲜胡萝卜样品和不同干燥介质处理的胡萝卜样品中加入了2.5%~10.0%的葵花籽油。

从图5、6中可以看出,随着油脂添加量的增加,无论是新鲜胡萝卜还是不同干燥介质处理的胡萝卜样品,其 β -胡萝卜素的释放率和胶束率都显著升高,且释放率与胶束率显著相关($r = 0.779, P < 0.01$)。差异显著性分析表明($P < 0.05$),同一干燥条件处理下,10%油脂添加量条件下的样品中 β -胡萝卜素释放率和胶束率都显著高于2.5%和5.0%油脂添加量,而2.5%和5.0%油脂添加量条件下的样品中 β -胡萝卜素释放率和胶束率都显著高于无油脂添加,且二者彼此之间也差异显著。这个结果清晰地表明油脂对提高 β -胡萝卜素的生物接近度是必要的,这与先前的研究一致^[28]。

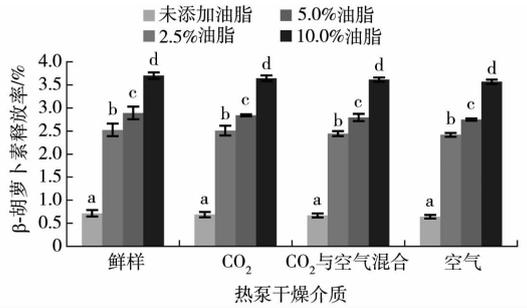


图5 不同油脂添加量下 β -胡萝卜素的释放率
Fig. 5 β -carotene release rates of carrots with different amounts of oil added

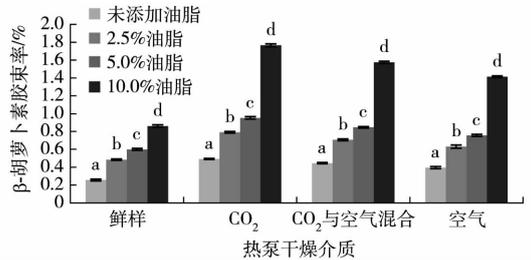


图6 不同油脂添加量下 β -胡萝卜素的胶束率
Fig. 6 β -carotene micellar rates of carrots with different amounts of oil added

伴随着食物基质的瓦解,释放出来的类胡萝卜素会混合形成胶束。这些胶束的形成依赖于一些因素,如肠道中脂肪的存在。类胡萝卜素是一种脂溶性营养素,膳食油脂通过提供疏水区域,以便类胡萝卜素在消化过程中溶解,促进其转运至脂质微粒中,便于小肠细胞吸收。同时,类胡萝卜素在消化过程中的溶解也是通过油脂促进胆盐和胰脂肪酶的分泌实现的,这是胶束所必需的^[29]。因此,摄取类胡萝卜素的同时摄取脂肪是被认为日常饮食中决定其吸收和生物利用率的关键。先前的体内实验已经证明日常饮食中的脂肪对提高类胡萝卜素生物利用率的重要性^[30]。

3 结束语

不同热泵干燥介质和油脂对胡萝卜中 β -胡萝卜素的生物接近度影响显著。胡萝卜经干燥加工后, β -胡萝卜素从结晶态转变为熔融态以及基质中脂质成分的影响也许是干燥制品的 β -胡萝卜素生物接近度显著高于新鲜胡萝卜的一个原因。虽然干制品胡萝卜中 β -胡萝卜素的保留率低于新鲜样品,但并不说明干燥加工食品比新鲜食品拥有较低的营养价值。另外,该研究还揭示了油脂对提高 β -胡萝卜素生物接近度的重要性。

参考文献

- Journal of the National Cancer Institute, 1995, 87(23): 1767 – 1776.
- 2 AI-DELAIMY W K, SLIMANI N, FERRARI P, et al. Plasma carotenoids as biomarkers of intake of fruits and vegetables: ecological-level correlations in the European prospective investigation into cancer and nutrition [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2005, 59(12): 1397 – 1408.
 - 3 KRITCHEVSKY S B. β -carotene, carotenoids and the prevention of coronary heart disease[J]. *Journal of Nutrition*, 1999, 129(1): 5 – 8.
 - 4 CHO E, SEDDON J M, ROSNER B, et al. Prospective study of intake of fruits, vegetables, vitamins, and carotenoids and risk of age-related maculopathy [J]. *Archives of Ophthalmology*, 2004, 122(6): 883 – 892.
 - 5 LIEN L, KRISTEL D V, MOELANTS K R N, et al. β -carotene isomerization kinetics during thermal treatments of carrot puree [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(11): 6816 – 6824.
 - 6 OLSON J A. Biological actions of carotenoids [J]. *Journal of Nutrition*, 1989, 119(1): 94 – 95.
 - 7 CHANDRA S, KUMARI D. Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 55(4): 552 – 561.
 - 8 王相友, 魏忠彩, 孙传祝, 等. 胡萝卜切片红外辐射干燥水分迁移特性研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 240 – 245.
WANG Xiangyou, WEI Zhongcai, SUN Chuanzhu, et al. Moisture transfer characteristic of carrot slices by infrared radiation drying [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 240 – 245. (in Chinese)
 - 9 LEMMENS L, VLEESCHOUWER K D, MOELANTS K R N, et al. β -carotene isomerization kinetics during thermal treatments of carrot puree [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(11): 6816 – 6824.
 - 10 HIRANVARACHAT B, SUVARNAKUTA P, DEVAHASTIN S. Isomerisation kinetics and antioxidant activities of β -carotene in carrots undergoing different drying techniques and conditions [J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(4): 1538 – 1546.
 - 11 THAKKAR S K, MAZIYA-DIXON B, DIXON A G O, et al. β -Carotene micellarization during in vitro digestion and uptake by Caco-2 cells is directly proportional to β -carotene content in different genotypes of cassava [J]. *The Journal of Nutrition*, 2007, 13(10): 2229 – 2233.
 - 12 YONEKURA L, NAGAO A. Intestinal absorption of dietary carotenoids [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2007, 51(1): 107 – 115.
 - 13 KHANUENGNIT C, NATTAPOL P, LAMUL W, et al. Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95: 491 – 498.
 - 14 STROMMEN I, EIKEVIK T M, ALVES-FILHO O, et al. Low temperature drying with heat pumps new generations of high quality dried products [C]//13th International Drying Symposium, 2002: 27 – 30.
 - 15 AVSEGUL G, GEORGE T, HUSEYIN G, et al. Advanced exergoeconomic analysis of a gas engine heat pump (GEHP) for food drying processes [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 91: 132 – 139.
 - 16 REBOUL E, RICHELLE M, PERROT E, et al. Bioaccessibility of carotenoids and vitamin E from their main dietary sources [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(23): 8749 – 8755.
 - 17 AGGETT P J, ANTOINE J M, ASP N G, et al. Process for the assessment of scientific support for claims on foods: consensus on criteria [J]. *European Journal of Nutrition*, 2005, 44(Suppl. 1): 1 – 30.
 - 18 ANTON B, MARIE L A, ULF S. In vitro bioaccessibility of β -carotene from heat-processed orange-fleshed sweet potato [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(20): 9693 – 9698.
 - 19 SALVIA-TRUJILLO L, QIAN C, MARTIN-BELLOSO O, et al. Modulating β -carotene bioaccessibility by controlling oil composition and concentration in edible nanoemulsions [J]. *Food Chemistry*, 2013, 139: 878 – 884.
 - 20 KNOCKAERT G, LEMMENS L, BUGGENHOUT S V, et al. Changes in β -carotene bioaccessibility and concentration during processing of carrot puree [J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(1): 60 – 67.
 - 21 HEDREN E, DIAZ V, SVANBERG U. Estimation of carotenoid accessibility from carrots determined by an in vitro digestion method [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2002, 56(5): 425 – 430.
 - 22 VERRIJSEN T A J, VERKEMPINCK S H E, CHRISTIAENS S, et al. The effect of pectin on in vitro β -carotene bioaccessibility and lipid digestion in low fat emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 49: 73 – 81.
 - 23 ZACCARI F, CABRERA M C, RAMOS A, et al. In vitro bioaccessibility of β -carotene, Ca, Mg and Zn in landrace carrots (*Daucus carota*, L.) [J]. *Food Chemistry*, 2015, 166: 365 – 371.
 - 24 PENICAUD C, ACHIR N, DHUIQUE-MAYER C, et al. Degradation of β -carotene during fruit and vegetable processing or storage: reaction mechanisms and kinetic aspects: a review [J]. *Fruits*, 2011, 66: 417 – 440.
 - 25 GAZIANO J M, JOHNSON E J, RUSSELL R M, et al. Discrimination in absorption or transport of β -carotene isomers after oral supplementation with either all-trans- or 9-cis- β -carotene [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1995, 61(1): 1248 – 1252.
 - 26 FAULKS R, SOUTHON S. Challenges to understanding and measuring carotenoid bioavailability [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2005, 1740(2): 95 – 100.
 - 27 SCHWEIGGERT R F, MEZGER D, SCHIMOF F, et al. Influence of chromoplast morphology on carotenoid bioaccessibility of carrot, mango, papaya, and tomato [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2736 – 2742.
 - 28 ORNELAS-PAZ J D J, FAILLA M L, YAHIA E M, et al. Impact of the stage of ripening and dietary fat on in vitro bioaccessibility of β -carotene in “Ataulfo” mango [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(4): 1511 – 1516.
 - 29 BOREL P. Factors affecting intestinal absorption of highly lipophilic food microconstituents (fat-soluble vitamins, carotenoids and phyosterols) [J]. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 2003, 41(8): 979 – 994.
 - 30 BROWN M J, FERRUZZI M G, NGUYEN M L, et al. Carotenoid bioavailability is higher from salads ingested with full-fat than with fat-reduced salad dressings as measured with electrochemical detection [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, 80(2): 396 – 403.