

聂梅梅, 肖亚冬, 张钟元, 等. 真空微波干燥中微波强度对胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素生物利用率的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 74-79. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090305

NIE Meimei, XIAO Yadong, ZHANG Zhongyuan, et al. Effects of Microwave Intensity on Carotenoid Bioavailability in Carrot and Pumpkin during Microwave Vacuum Drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 74-79. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090305

· 研究与探讨 ·

# 真空微波干燥中微波强度对胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素生物利用率的影响

聂梅梅, 肖亚冬, 张钟元\*, 李大婧\*, 宋江峰, 刘春泉, 刘春菊, 王晓燕, 江宁, 冯蕾  
(江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)

**摘要:**为明确真空微波干燥过程中, 微波强度对胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素生物利用率的影响, 本文采用静态体外模拟消化模型评价类胡萝卜素生物利用率的变化, 采用透射电镜 (TEM) 和光学显微镜观察细胞壁微观结构的变化。结果表明, 真空微波干燥后的胡萝卜和南瓜的细胞壁断裂, 有色体结构破坏严重。经体外模拟消化, 胡萝卜和南瓜消化液细胞结构破坏明显, 细胞壁破裂严重, 类胡萝卜素从细胞内部释放到消化液中的含量明显高于鲜样, 且类胡萝卜素生物利用率随微波强度的增加呈现先升高后降低的趋势。当微波强度为 9 W/g 时, 胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素的生物利用率较高, 其  $\beta$ -胡萝卜素生物利用率相比于鲜样分别显著提高了 12.02、24.2 倍 ( $P<0.05$ )。由此可知, 选择合适的微波强度有助于提高蔬菜中类胡萝卜素生物利用率。

**关键词:**真空微波干燥, 胡萝卜, 南瓜, 类胡萝卜素, 生物利用率

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)13-0074-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090305

## Effects of Microwave Intensity on Carotenoid Bioavailability in Carrot and Pumpkin during Microwave Vacuum Drying

NIE Meimei, XIAO Yadong, ZHANG Zhongyuan\*, LI Dajing\*, SONG Jiangfeng, LIU Chunquan, LIU Chunju, WANG Xiaoyan, JIANG Ning, FENG Lei

(Institute of Farm Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to understand the effect of microwave intensity on the bioavailability of carotenoids in carrot and pumpkin during microwave vacuum drying (MVD), the changes of carotenoid bioavailability were evaluated by static *in vitro* simulated digestion model, and the changes of cell wall microstructure were observed by transmission electron microscope (TEM) and optical microscope. The results showed that the cell walls of carrot and pumpkin were broken and the chromosomal structure was damaged seriously after MVD. After simulated digestion *in vitro*, the cell structure of the digestive juice of carrot and pumpkin was destroyed obviously, and the cell wall was broken seriously. The content of carotenoids released from the cells into the digestive juice was significantly higher than that of fresh samples. The bioavailability of carotenoids first increased and then decreased with the increase of microwave intensity. When the microwave intensity was 9 W/g, carotenoids in carrot and pumpkin had higher bioavailability, and the bioavailability of  $\beta$ -carotene significantly increased by 12.02 and 24.2 times compared with fresh samples ( $P<0.05$ ). Therefore, the appropriate microwave intensity is helpful to improve the bioavailability of carotenoids in vegetables.

**Key words:** vacuum microwave drying; carrot; pumpkin; carotenoid; bioavailability

收稿日期: 2020-09-29

基金项目: 江苏省现代农业-重点及面上项目 (BE2018382)。

作者简介: 聂梅梅 (1993-), 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 1148309350@qq.com。

\* 通信作者: 张钟元 (1983-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬加工与营养健康, E-mail: zzszy2012@163.com。

李大婧 (1976-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与综合利用, E-mail: lidajing@163.com。

类胡萝卜素是一种天然色素,研究表明其具有降低心血管疾病、抗氧化与保护视力等多种功能<sup>[1-2]</sup>。新鲜水果和蔬菜富含多种类胡萝卜素,是人们日常膳食中类胡萝卜素的主要来源,但研究发现新鲜水果蔬菜中类胡萝卜素在人体中的生物利用度不足 5%<sup>[3-4]</sup>。植物中的类胡萝卜素主要以结合蛋白的形式存在于叶绿体或色素母细胞等有色体结构中<sup>[5]</sup>,进一步经过细胞壁释放至消化系统中,被人体吸收利用。大量研究表明热加工过程对植物组织和细胞结构的破坏作用可能改变基质的渗透性,进而影响类胡萝卜素生物利用<sup>[6]</sup>。Bengtsson 等<sup>[7]</sup>研究表明蒸煮前均质处理,有利于甘薯细胞壁破裂和有色体的聚集,从而显著提高  $\beta$ -胡萝卜素生物利用度。Zhang 等<sup>[8]</sup>研究表明热风干燥增加胡萝卜和黄椒中类胡萝卜素释放量,原因是热风干燥导致细胞壁破裂;而西兰花中由于细胞体积小、细胞壁紧密结合,热加工中所受破坏小,因此其类胡萝卜素释放量较低。Palmero 等<sup>[9]</sup>研究表明热处理导致番茄的细胞壁解聚产生的细胞壁组分形成了屏障,从而降低其番茄红素的生物利用度。由此可见,加工过程中食物类胡萝卜素基质环境的变化,是影响类胡萝卜素的生物利用率重要因素。

真空微波干燥能较好地保留被干燥物料原有的色香味、维生素等热敏性营养成分或生物活性成分,显著提高和改善干燥产品品质,已在食品加工行业广泛应用<sup>[10-11]</sup>。研究发现,当压强、微波功率适当时,会使细胞壁破裂,营养素大量释放<sup>[11-12]</sup>。汪小婷等<sup>[13]</sup>研究发现增大真空度有利于提高类胡萝卜素保留率。此外,真空微波干燥可改变细胞壁多糖的亲水性,使细胞壁皱缩变形<sup>[14]</sup>,微波处理对果蔬细胞壁微观结构的影响正是类胡萝卜素生物释放所需条件,但与类胡萝卜素生物利用率的关系尚不明确。为了明确微波干燥过程中,不同微波强度条件下蔬菜中类胡萝卜素生物利用率的变化规律,本实验以富含类胡萝卜素的胡萝卜和南瓜为原料,基于细胞壁结构的变化,采用体外模拟消化法,探究不同微波强度对南瓜和胡萝卜类胡萝卜素保留率、生物利用率的影响,探讨食物加工方式对类胡萝卜素基质环境的作用进而对其生物利用的影响,以期类胡萝卜素高效生物利用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

胡萝卜品种‘心黑田五寸’、南瓜品种‘蜜本南瓜’

南京市孝陵卫集贸市场;  $\beta$ -胡萝卜素、叶黄素标准品 美国 Sigma 公司;丙酮、无水乙醇、盐酸、硫酸、氢氧化钠、氯仿、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、碳酸氢钠 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;甲醇、甲基叔丁基醚(MTBE) 色谱纯,美国天地有限公司。

VDM-1 型真空微波干燥设备 南京孝马机电设备厂;HZQ-F100 全温度振荡培养箱 太仓市华美生化仪器厂;CPA-125 电子天平 德国 Sartorius 公

司;RE52CS 旋转蒸发仪、B-226 恒温水浴锅 上海亚荣生化仪器厂;D10 氮气吹扫仪 杭州奥盛仪器有限公司;1200 高效液相色谱仪 美国安捷伦科技有限公司;E200MV 生物显微镜 南京尼康江南光学仪器有限公司;日立 H-7650 透射电子显微镜 日立高新技术公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 新鲜胡萝卜和南瓜经清洗、去皮(南瓜需去除瓜籽及瓜瓢)后切成厚度约为  $(7\pm 2)$  mm 的薄片,置于 95 度水中烫漂 40 s 灭酶后,取出沥干。

采用以微波间歇比为 1 的间歇加热方式,分别称取沥干后的胡萝卜和南瓜各 100 g,置于真空微波干燥设备中,真空度为 -90 kPa,分别设置四个不同微波强度为:6、9、12、15 W/g,将胡萝卜和南瓜干燥至干燥终点(水分含量约为 5%,以干基计算),装入不透光自封袋,置于干燥器中备用。

1.2.2 体外消化模型 本研究中使用的静态体外消化模型,根据文献稍微修改<sup>[15-16]</sup>。将胡萝卜和南瓜鲜样及不同微波强度处理后的样品,剪碎置于组织研磨机适配器中,置于组织研磨机中研磨 45 s(60 Hz)。首先配制人工胃液成分为:  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$ ,浓度分别为 10、3.5、3.6、50、14 mmol/L。准确称取 1 g 样品研磨物于 50 mL 试管中,加入 15 mL 胃液,用 1 mol/L 的 HCl 调节 pH 至  $2.00\pm 0.05$  后加入胃蛋白酶(21 mg/mL, 914 U/mg),样品通入氮气覆盖封口后,置于摇床(37 °C, 120 r/min)消化 1 h。再用 1 mol/L 的  $\text{NaHCO}_3$  调节溶液 pH 至  $6.9\pm 0.05$ ,随后加入 3 mL 的肠液(猪胰酶、猪胆盐浓度分别为 4.5 mg/mL、28 mg/mL、猪胰酶 250 U/mg),样品用氮气覆盖封口后置于摇床(37 °C, 120 r/min)消化 2 h。整个过程在暗处进行。

### 1.2.3 微观结构观察

1.2.3.1 光学显微镜观察 鲜样、真空微波处理后样品及经体外模拟消化后消化液的观察方法参考文献 [17] 的方法。

1.2.3.2 细胞壁过碘酸雪夫(PAS)染色 鲜样及真空微波处理后样品细胞壁 PAS 染色观察方法参考文献 [17] 的方法。

1.2.3.3 透射电镜测定 鲜样及真空微波处理后样品经体外模拟消化后消化液的透射电镜观察方法参考文献 [17] 的方法。

1.2.4 类胡萝卜素的生物利用率的测定 经模拟消化后得到消化液,经离心(4 °C, 10000×g, 20 min)后得到上层胶束。将胶束转入 250 mL 分液漏斗中,加入等体积混合提取液混匀静待分层,重复提取至下层无颜色。将提取液减压浓缩、氮气吹干,用 1 mL 正己烷复溶,经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后置于 -80 °C 冰箱,待液相分析。样品中类胡萝卜素经消化后的生物利用率按下式计算。

生物利用率(%)=C<sub>上层胶束</sub>×m<sub>消化液</sub>/m<sub>总</sub>×100

式中: C<sub>上层胶束</sub>为离心后上层胶束中提取的类胡萝卜素含量(μg/g); m<sub>消化液</sub>为总消化液的质量(g); m<sub>总</sub>为消化样品所测得的类胡萝卜素总质量(μg)。

1.2.5 类胡萝卜素保留率的测定 类胡萝卜素保留率测定参考文献 [13] 方法。

1.2.6 类胡萝卜素的提取与测定

1.2.6.1 类胡萝卜素的提取 准确称取适量的原料鲜样(对照组, CK)及真空微波干燥后样品, 剪碎后置于磨口锥形瓶中, 加入 40 mL 混合提取液(V(乙醇):V(正己烷):V(丙酮)=1:2:1)混匀, 置于 37 °C 恒温培养箱中静置过夜, 将提取液转移到圆底烧瓶中, 待提取液分层, 收集上层提取液, 经减压浓缩、氮气吹干后, 用 1 mL 正己烷复溶, 重复两次, 经 0.45 μm 有机滤膜过滤后置于-80 °C 冰箱备用, 待分析。

1.2.6.2 类胡萝卜素的 HPLC 条件 采用 1200 高效液相色谱仪(DAD 检测器)配备 YMC-C30 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm)检测样品中类胡萝卜素的含量; 设置进样量为 20 μL、柱温为 25 °C、流速为 0.6 mL/min; 流动相 A 为 V(甲醇):V(MTBE):V(水)=70:25:5、流动相 B 为 V(MTBE):V(甲醇):V(水)=85:10:5。

1.2.7 消化液黏度的测定 消化液黏度的测定方法参考文献 [17-18] 方法, 在室温的条件下采用 MCR 302 奥地利安东帕高级旋转流变仪测定消化液的黏度。

### 1.3 数据统计与分析

以上所有试验重复三次, 各试验结果均以“平均值(means)±标准差(SD)”表示。本试验采用 Origin9.0 软件绘制曲线, 采用 SAS 软件进行单因素方差分析及组间差异的 Duncan's 多重比较, P<0.05 表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 真空微波干燥对胡萝卜和南瓜细胞形态的影响

胡萝卜和南瓜鲜样的光镜图和 PAS 染色图如图 1 所示, 可以看出胡萝卜和南瓜的细胞形态差异显著。胡萝卜细胞大小、形状不一, 排列紧密, 有色体结构为红色梭状的结晶状态, 分布范围广; 南瓜细胞呈椭圆形, 体积较大, 有色体结构为球状, 分布于细胞壁内侧。PAS 染色后的多糖类物质被染成紫红色, 呈阳性。光学显微镜下可见胡萝卜和南瓜鲜样细胞完整, 排列紧密。与胡萝卜相比, 南瓜细胞壁多糖层较薄。Zdunek 等<sup>[19]</sup>研究表明, 较大植物细胞破坏所需的机械力较小。本研究南瓜细胞较大, 因此在加工过程中更易被破坏。

细胞壁是影响细胞内生物活性物质释放到胞外最重要的物理屏障<sup>[20]</sup>, 因此本试验对真空微波干燥处理后胡萝卜和南瓜进行染色处理, 观察其细胞壁变化。对比鲜样(图 1)可知, 经真空微波中强度(9 W/g)

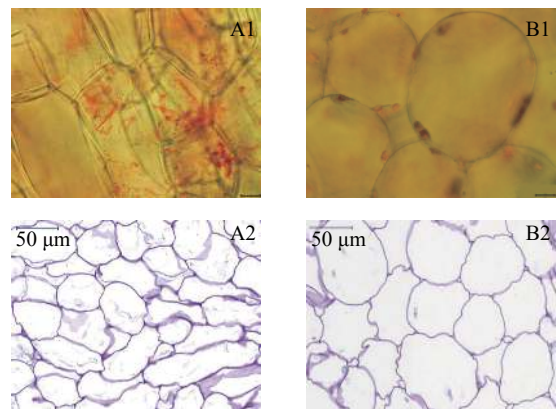


图 1 胡萝卜和南瓜鲜样的细胞形态(光学显微镜, 40×)

Fig.1 Cell morphology of carrot and pumpkin (Optical microscope, 40×)

注: A 代表胡萝卜, B 代表南瓜。1 为光镜图, 2 为 PAS 染色图; 图 2 同。

干燥后的胡萝卜细胞皱缩严重(图 2), 出现细胞壁断裂现象, 细胞排列更紧密。通过观察 PAS 染色图可知, 胡萝卜细胞壁染色变浅, 结构疏松, 细胞壁断裂严重, 视野中有大块空缺存在。真空微波干燥南瓜细胞形态变化与胡萝卜类似, 但细胞皱缩更显著。此外, 真空微波干燥后的胡萝卜和南瓜有色体结构破坏严重。图 2A1 中可见少量有色体结构, 分布于细胞壁内侧; 图 2B1 中未观察到完整的有色体结构。

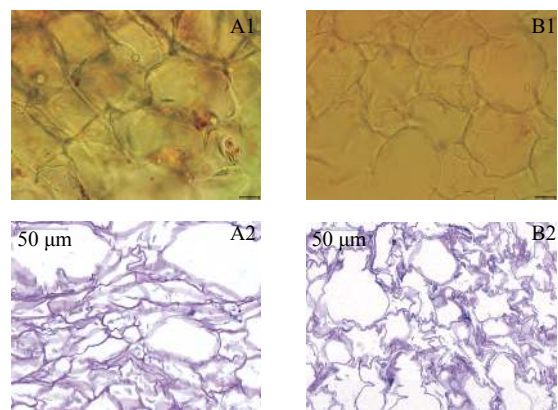


图 2 真空微波干燥后胡萝卜和南瓜的细胞形态(光学显微镜, 40×)

Fig.2 Cell morphology of carrot and pumpkin after vacuum microwave drying(Optical microscope, 40×)

### 2.2 微波强度对胡萝卜和南瓜消化微观结构的影响

2.2.1 消化液光学显微镜图 不同微波强度处理条件下的胡萝卜与南瓜消化液的光镜图如图 3 所示。观察胡萝卜鲜样消化液光镜图 3A1 可以发现, 鲜样的消化液光镜图中仍可以看到完整的细胞结构, 胡萝卜细胞内部晶状有色体结构破裂, 类胡萝卜素位于细胞壁内侧, 从细胞内释放到消化液中的含量较少, 大部分仍存留于细胞中。由图 3A2、A3 可知, 真空微波干燥后的胡萝卜经体外消化后, 细胞壁破裂严重, 很难找到完整的细胞结构, 类胡萝卜素从细胞内部释放到消化液中的含量明显高于鲜样。观察南瓜鲜样



消化液光镜图 3B1 可以发现, 南瓜细胞内球状有色体结构破坏严重, 类胡萝卜素在细胞内部呈不规则分布, 散落在南瓜细胞中, 与胡萝卜类似, 大部分类胡萝卜素仍保留于细胞中。由图 3B2、B3 可知, 干燥后的南瓜变化与胡萝卜类似, 细胞壁破坏严重, 释放到消化液中的类胡萝卜素含量升高。与鲜样相似, 释放到消化液中的类胡萝卜素并不是单独存在, 而是在其周围形成了新的结构网络, 这可能会影响类胡萝卜素的吸收利用。

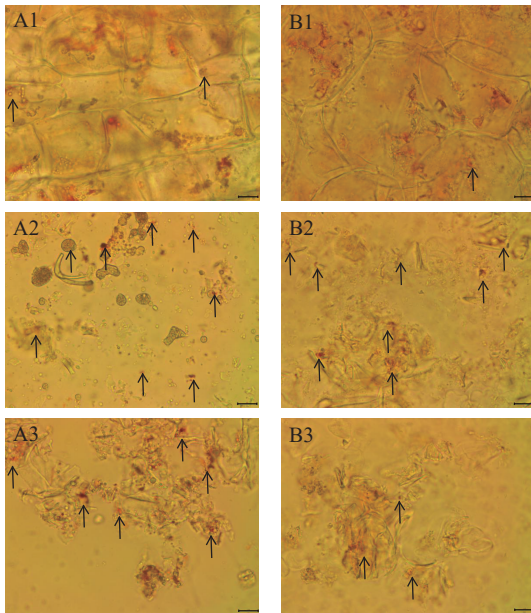


图 3 不同微波强度条件下胡萝卜和南瓜消化液的光学显微镜图(40×)

Fig.3 Photomicrographs of carrot and pumpkin digests under different microwave intensity(40×)

注: A 代表胡萝卜, B 代表南瓜; 1 代表鲜样, 2、3 分别代表微波强度为 9、15 W/g; 图 4 同。消化液中类胡萝卜素分布用箭头指出。

2.2.2 消化液透射电镜图 通过透射电镜(TEM)观察胡萝卜和南瓜细胞的细胞壁及有色体的结构特征。真空微波干燥对胡萝卜和南瓜消化液微观结构影响如图 4 所示。观察图 4A1 与图 4B1 可以发现胡萝卜和南瓜鲜样经消化后细胞壁仍较完整, 但细胞内侧膜结构与细胞壁间隙增大, 部分类胡萝卜素分布于新形成的聚集体内。其中, 胡萝卜细胞壁厚度不均匀, 内侧膜结构基本完全脱离细胞壁, 分散于细胞内部; 南瓜细胞壁厚度较均匀。真空微波干燥处理后的蔬菜细胞壁结构松散, 出现断裂, 膜结构完全从细胞壁内侧脱落, 形成新的聚集体内, 部分类胡萝卜素分布于新形成的结构内部, 与胡萝卜相比, 南瓜细胞壁降解现象更明显。微波强度为 9 W/g 时, 经体外消化后胡萝卜和南瓜消化液的透射电镜图如图 4A2 与 B2, 可以看出此时细胞壁降解严重, 无完整细胞壁结构, 视野中仅存在大面积絮状结构区域。

通过消化液的透射电镜图发现, 胡萝卜和南瓜鲜样经消化后细胞壁略有溶胀, 内侧膜结构脱落, 但

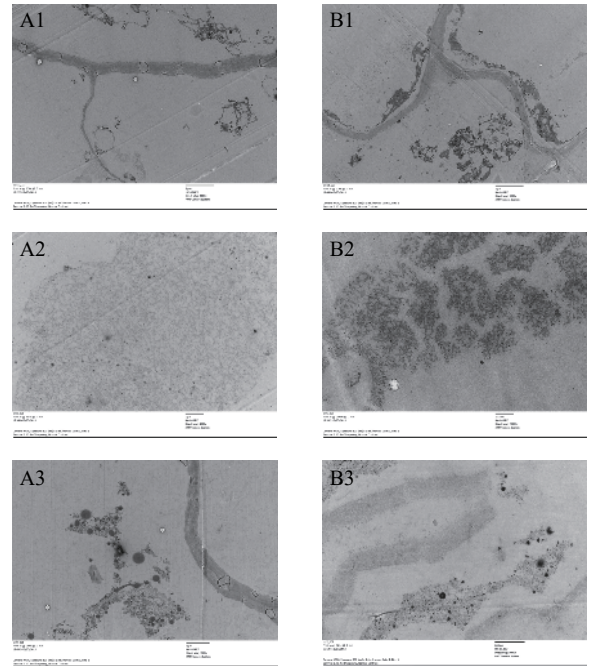


图 4 不同微波强度条件下胡萝卜和南瓜消化液的透射电镜图

Fig.4 Transmission electron micrograph of digested liquid of carrot and pumpkin under different microwave intensity

细胞内部结构并未完全被破坏, 仍有类胡萝卜素存在于膜结构中, 这与 Tydeman 等<sup>[21]</sup> 的文献报道类似。与鲜样相比, 真空微波干燥后的蔬菜细胞结构在消化过程中破坏明显, 发生细胞壁结构断裂、内侧膜结构脱落及大面积絮状结构等现象。这是因为真空微波干燥已经破坏了蔬菜细胞壁结构, 这种被破坏了的细胞结构在消化液的处理下进一步瓦解。

### 2.3 不同微波强度下胡萝卜和南瓜消化液黏度

消化液的黏度是影响活性物质生物利用度的重要影响因素。有研究发现细胞壁在高压均质过程中会形成网状结构, 阻碍类胡萝卜素从果蔬中高效释放<sup>[22-23]</sup>, 而未降解的细胞壁果胶会显著增加消化液的黏度, 降低消化酶的作用表面积, 抑制类胡萝卜素的胶束化, 进而降低其生物利用率<sup>[24]</sup>。因此本实验测定了不同微波强度处理后胡萝卜和南瓜消化液黏度值(表 1)。与鲜样相比, 真空微波干燥后的胡萝卜和南瓜消化液黏度显著下降( $P < 0.05$ ), 降幅分别为 67.7%~87.5%, 78.2%~83.8%。微波强度为 12 W/g 时, 胡萝卜和南瓜消化液黏度较高, 分别为  $1.93 \times 10^{-3}$ 、 $1.97 \times 10^{-3}$  Pa·s, 但不同微波强度处理的南瓜消化液黏度差异不显著( $P > 0.05$ )。

真空微波干燥后胡萝卜和南瓜的消化液黏度显著低于鲜样( $P < 0.05$ )。这是因为消化液黏度与未降解的细胞壁果胶含量有关, 微波的热效应与非热效应共同促进了果胶的降解, 破坏了原有的果胶链, 改变了果胶的结构, 使果胶的分子量降低, 果胶分子间作用力减小<sup>[25]</sup>, 从而导致消化液黏度下降, 这与真空微波干燥强度为 9 W/g 时, 南瓜中果胶含量降低结果一致<sup>[26]</sup>。此外, 体外消化后获得的南瓜鲜样消化液黏

表1 不同微波强度条件下胡萝卜和南瓜消化液的黏度( $\times 10^{-3}$  Pa·s)Table 1 The viscosity in digestive fluid of carrot and pumpkin under different microwave intensity ( $\times 10^{-3}$  Pa·s)

消化液	CK	6 W/g	9 W/g	12 W/g	15 W/g
胡萝卜	9.39±0.15 <sup>a</sup>	1.17±0.03 <sup>c</sup>	1.25±0.13 <sup>c</sup>	1.93±0.22 <sup>b</sup>	1.24±0.05 <sup>c</sup>
南瓜	11.31±2.54 <sup>a</sup>	1.83±0.04 <sup>b</sup>	2.17±0.16 <sup>b</sup>	1.97±0.03 <sup>b</sup>	2.47±0.77 <sup>b</sup>

注: 同行字母不同小写英文字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

度显著高于胡萝卜( $P<0.05$ ), 这是因为南瓜细胞壁中的可溶性果胶含量高于胡萝卜, 而可溶性果胶聚合物在某种程度上可以增加消化液的黏度<sup>[18,27]</sup>。

#### 2.4 不同微波强度对胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素保留率、生物利用率的影响

真空微波干燥对胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素保留率影响结果如表2所示, 结果表明随微波强度的升高, 胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素保留率呈现降低的趋势, 这与汪小娉等<sup>[13]</sup>的研究结果类似。不同微波强度对类胡萝卜素保留率有明显影响, 微波强度不同微波强度对类胡萝卜素保留率有明显影响, 微波强度9 W/g条件下, 胡萝卜中叶黄素的保留率比6 W/g显著降低21.51%( $P<0.05$ ),  $\alpha$ -胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素的保留率分别降低8.31%、11.66%。微波强度12与15 W/g差异不显著( $P>0.05$ )。真空微波干燥后的胡萝卜和南瓜中的类胡萝卜素的生物利用率高于鲜样, 这与图3消化液中类胡萝卜素的分布结果一致, 表明微波干燥处理有效提高类胡萝卜素的生物释放。胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素生物利用率随微波强度的增加呈现先升高后降低的趋势, 不同微波强度对类胡萝卜素生物利用率有明显影响。其中当微波强度为9 W/g时, 胡萝卜和南瓜中叶黄素、 $\alpha$ -胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素的生物利用率达到较高水平, 其 $\beta$ -胡萝卜素生物利用率相比于鲜样分别增加了12.02、24.2倍( $P<0.05$ )。

微波处理可有效地提高果蔬中类胡萝卜素从细胞中释放的比例, 生物利用率因果蔬种类、微波条件存在显著差异。本研究表明微波强度为9 W/g时, 细胞壁变形后形成的孔隙结构增多, 使蔬菜细胞结构

在消化过程中破坏明显, 细胞壁严重破裂, 导致类胡萝卜素从有色体结构中大量释放到消化液中, 同时, 真空微波干燥后消化液黏度显著降低, 这会增大消化酶的作用表面积<sup>[28]</sup>, 有利于形成胶束进而提高营养素的生物利用率。这与Zhang等<sup>[29]</sup>研究结果类似, 微波场能够穿透果蔬细胞壁对类胡萝卜素基质环境进行重排, 显著提高类胡萝卜素的生物利用率。此外, 研究表明真空微波干燥处理通过降解蔬菜细胞壁果胶, 导致降低了细胞壁的阻碍作用, 增加了类胡萝卜素的生物释放<sup>[30-31]</sup>。然而随着微波强度升高, 微波处理使物料内部分子运动加剧, 水分汽化速度随之增加<sup>[32]</sup>, 干燥产生的过高温度可能使物料内部形成一个新的物理屏障而阻碍类胡萝卜素的释放<sup>[33]</sup>。本研究结果表明真空微波干燥虽然降低了物料中类胡萝卜素的保留率, 但改善了其生物利用率。由此可见, 真空微波干燥通过调控类胡萝卜素基质环境提高其生物利用率, 这对于果蔬中生物活性物质高效利用具有现实意义。

### 3 结论

本文探究不同微波强度下胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素保留率、生物利用率变化规律。结果发现, 真空微波干燥后的胡萝卜和南瓜细胞壁断裂, 有色体结构严重破坏, 导致其类胡萝卜素的保留率降低。

经体外模拟消化, 真空微波干燥后胡萝卜和南瓜细胞结构明显破坏, 细胞壁破裂严重, 消化液黏度显著降低( $P<0.05$ ), 进而有利于胶束化的形成, 从而改善类胡萝卜素生物利用率。当微波强度为9 W/g时, 胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素的生物利用率达到较高水平。

表2 不同微波强度条件下胡萝卜和南瓜中类胡萝卜素的保留率、生物利用率

Table 2 Retention and bioavailability of carotenoids in carrot and pumpkin under different microwave intensities

微波强度(W/g)	叶黄素		$\alpha$ -胡萝卜素		$\beta$ -胡萝卜素		
	保留率(%)	生物利用率(%)	保留率(%)	生物利用率(%)	保留率(%)	生物利用率(%)	
胡萝卜	CK	100 <sup>a</sup>	3.65±0.09 <sup>d</sup>	100 <sup>a</sup>	0.95±0.18 <sup>b</sup>	100 <sup>a</sup>	0.85±0.15 <sup>c</sup>
	6	60.80±2.22 <sup>b</sup>	4.82±0.85 <sup>c</sup>	47.91±2.75 <sup>b</sup>	1.25±0.31 <sup>b</sup>	48.46±0.25 <sup>b</sup>	1.15±0.15 <sup>c</sup>
	9	47.72±1.48 <sup>c</sup>	14.52±0.25 <sup>a</sup>	43.93±8.02 <sup>b</sup>	11.21±0.16 <sup>c</sup>	42.81±7.74 <sup>b</sup>	11.51±0.26 <sup>a</sup>
	12	34.53±3.39 <sup>d</sup>	8.54±0.25 <sup>b</sup>	42.66±7.36 <sup>b</sup>	1.85±0.19 <sup>b</sup>	39.15±8.07 <sup>b</sup>	1.65±0.19 <sup>b</sup>
	15	33.91±3.23 <sup>d</sup>	8.14±0.15 <sup>b</sup>	40.06±3.39 <sup>b</sup>	1.15±0.02 <sup>b</sup>	36.54±5.08 <sup>b</sup>	1.15±0.15 <sup>c</sup>
南瓜	CK	100 <sup>a</sup>	4.85±0.16 <sup>c</sup>	100 <sup>a</sup>	0.45±0.15 <sup>d</sup>	100 <sup>a</sup>	0.51±0.15 <sup>c</sup>
	6	48.70±5.16 <sup>b</sup>	8.25±0.35 <sup>b</sup>	68.02±2.13 <sup>b</sup>	1.54±0.35 <sup>b</sup>	68.78±4.57 <sup>b</sup>	0.62±0.15 <sup>b</sup>
	9	23.73±6.14 <sup>c</sup>	24.55±0.55 <sup>a</sup>	60.95±8.82 <sup>bc</sup>	3.50±0.21 <sup>a</sup>	43.88±5.25 <sup>c</sup>	1.85±0.08 <sup>a</sup>
	12	24.36±2.37 <sup>c</sup>	2.56±0.26 <sup>d</sup>	52.82±2.00 <sup>cd</sup>	1.15±0.16 <sup>bc</sup>	40.07±2.13 <sup>c</sup>	0.75±0.08 <sup>b</sup>
	15	22.52±1.32 <sup>c</sup>	2.45±0.26 <sup>d</sup>	48.49±0.37 <sup>d</sup>	1.20±0.15 <sup>b</sup>	38.90±2.81 <sup>c</sup>	0.85±0.16 <sup>b</sup>

注: 同种原料不同处理间同列小写英文字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。



## 参考文献

- [1] Takashi Maoka. Carotenoids as natural functional pigments[J]. Springer Singapore, 2020, 74(Suppl): 1–16.
- [2] Liang X, Ma C, Yan X, et al. Advances in research on bioactivity, metabolism, stability and delivery systems of lycopene[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019: 93.
- [3] Failla M L, Thakkar S K, Kim J Y. *In vitro* bioaccessibility of beta-carotene in orange fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas*, Lam.)[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(22): 10922.
- [4] 白喜婷, 樊金玲, 朱文学, 等. 机械加工及油脂对南瓜类胡萝卜素生物接近度的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 3–9.
- [5] Schweiggert R M, Mezger D, Schimpf F, et al. Influence of chromoplast morphology on carotenoid bioaccessibility of carrot, mango, papaya, and tomato[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2736–2742.
- [6] Durante M, Lenucci M S, D'Amico L, et al. Effect of drying and co-matrix addition on the yield and quality of supercritical CO<sub>2</sub> extracted pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) oil[J]. Food Chemistry, 2014, 148: 314–320.
- [7] Bengtsson A, Brackmann C, Enejder A, et al. Effects of thermal processing on the *in vitro* bioaccessibility and microstructure of  $\beta$ -carotene in orange-fleshed sweet potato[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(20): 11090.
- [8] Zhang Z, Wei Q, Nie M, et al. Microstructure and bioaccessibility of different carotenoid species as affected by hot air drying: Study on carrot, sweet potato, yellow bell pepper and broccoli[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 357–363.
- [9] Palmero P, Lemmens L, Hendrickx M, et al. Role of carotenoid type on the effect of thermal processing on bioaccessibility[J]. Food Chemistry, 2014, 157(15): 275–282.
- [10] 李瑜, 许时婴. 微波真空干燥大蒜片数学模型边界条件[J]. 天然产物研究与开发, 2007, 19(4): 653–656.
- [11] 韩晓斌. 微波真空干燥保鲜技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2000.
- [12] Ashford D E. Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects[J]. Chemical Society Reviews, 2005, 34(2): 164–178.
- [13] 汪小婷, 宋江峰, 李大婧, 等. 真空微波干燥对南瓜主要类胡萝卜素的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 91–96.
- [14] Latorre M E, Plá M F D E, Rojas A M, et al. Blanching of red beet (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva*) root. Effect of hot water or microwave radiation on cell wall characteristics[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 50(1): 193–203.
- [15] Espinal-Ruiz M, Restrepo-Sanchez L P, Narvaez-Cuenca C E, et al. Impact of pectin properties on lipid digestion under simulated gastrointestinal conditions: Comparison of citrus and banana passion fruit (*Passiflora tripartita*, var. *mollissima*) pectins[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 329–342.
- [16] Nie M, Zhang Z, Liu C, et al. Hesperetin and hesperidin improved  $\beta$ -carotene incorporation efficiency, intestinal cell uptake, and retinoid concentrations in tissues[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2019, 67(12): 3363–3371.
- [17] 王晓燕. 真空微波干燥对胡萝卜和南瓜果胶特性及类胡萝卜素生物利用率的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [18] Moelants K R N, Cardinaels R, Jolie R P, et al. Relation between particle properties and rheological characteristics of carrot-derived suspensions[J]. Food & Bioprocess Technology, 2013, 6(5): 1127–1143.
- [19] Zdunek A, Umeda M. Influence of cell size and cell wall volume fraction on failure properties of potato and carrot tissue[J]. Journal of Texture Studies, 2005, 36(1): 25–43.
- [20] Palmero P, Lemmens L, Ribas-Agustí A, et al. Novel targeted approach to better understand how natural structural barriers govern carotenoid *in vitro* bioaccessibility in vegetable-based systems[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2036–2043.
- [21] Tydeman E A, Parker M L, Wickham M S, et al. Effect of carrot (*Daucus carota*) microstructure on carotene bioaccessibility in the upper gastrointestinal tract. 1. *In vitro* simulations of carrot digestion[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(17): 9847–9854.
- [22] Panozzo A, Lemmens L, Loey A V, et al. Microstructure and bioaccessibility of different carotenoid species as affected by high pressure homogenisation: A case study on differently coloured tomatoes[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 4094–4100.
- [23] Colle I, Buggenhout S V, Loey A V, et al. High pressure homogenization followed by thermal processing of tomato pulp: Influence on microstructure and lycopene *in vitro* bioaccessibility[J]. Food Research International, 2010, 43(8): 2193–2200.
- [24] Palmero P, Panozzo A, Colle I, et al. Role of structural barriers for carotenoid bioaccessibility upon high pressure homogenization[J]. Food Chemistry, 2016, 199: 423–432.
- [25] 梁瑞红, 王淑洁, 贺小红, 等. 微波降解果胶对其流变性质的影响及动力学[J]. 食品科学, 2017, 38(5): 1–6.
- [26] 张钟元, 聂梅梅, 肖亚冬, 等. 真空微波干燥过程中南瓜果胶性质变化与质构的关系[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 1–8.
- [27] Diaz J V, Anthon G E, Barrett D M. Conformational changes in serum pectins during industrial tomato paste production[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(18): 8453–8458.
- [28] Hedrén 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: 425–430.
- [29] Zhang Z, Wang X, Li Y, et al. Evaluation of the impact of food matrix change on the *in vitro* bioaccessibility of carotenoids in pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices during two drying processes[J]. Food & Function, 2017, 8: 4693–4702.
- [30] Lemmens L, Buggenhout S V, Oey I, et al. Towards a better understanding of the relationship between the p-carotene *in vitro* bio-accessibility and pectin structural changes: A case study on carrots[J]. Food Research International, 2009, 42(9): 1323–1330.
- [31] Jeffery J, Holzenburg A, King S. Physical barriers to carotenoid bioaccessibility. Ultrastructure survey of chromoplast and cell wall morphology in nine carotenoid-containing fruits and vegetables[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2012, 92(13): 2594.
- [32] Therdtthai, N, Zhou W B. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen)[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(3): 482–489.
- [33] 李宜祥, 热风 and 真空微波干燥处理对南瓜类胡萝卜素生物释放率的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.