

引用格式:

陈敏, 尹明雨, 奚印慈, 柳泽琢也, 松冈亮辅, 王锡昌. 沙拉酱对胡萝卜中活性物质体外消化的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(1): 119–126.

CHEN M, YIN M Y, XI Y C, TAKUYA Y, MAMORU K, WANG X C. Effect of mayonnaise on the in vitro digestion of active substances in carrots[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(1): 119–126.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 沙拉酱对胡萝卜中活性物质体外消化的影响

陈敏, 尹明雨, 奚印慈, 柳泽琢也, 松冈亮辅, 王锡昌\*

(1.上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

**摘要:** 以胡萝卜为原料, 与沙拉酱复配成质量比为 6 : 1(T1)、4 : 1(T2)、2 : 1(T3)的胡萝卜沙拉样品, 以不加沙拉酱的胡萝卜为对照(CK), 采用体外静态 INFOGEST 消化模型, 评估胡萝卜沙拉中主要活性物质( $\beta$ -胡萝卜素、总酚和 V-C)的生物可及性和消化特性。结果显示: 除 CK 和 T3 的 V-C 外, 活性物质含量经胃消化后均急剧下降, 经肠道消化后又上升; 添加沙拉酱明显提高了  $\beta$ -胡萝卜素、总酚和 V-C 的稳定性和生物可及性, T3 组中 3 种生物活性物质在模拟消化过程中较稳定, 生物可及性较高; 各组的平均粒径  $D[3,2]$  和粒径分布强度均先增大, 在模拟胃消化阶段消化 60 min 时最大, 随后减至最小, T3 组的  $D[3,2]$  在模拟消化过程中较小(0.13~5.03  $\mu\text{m}$ )。可见, 沙拉酱可提高胡萝卜中  $\beta$ -胡萝卜素、总酚和 V-C 的生物可及性, 并具有较好的消化特性, 其中以 T3 组效果较佳。

**关键词:** 胡萝卜; 沙拉酱; 活性物质;  $\beta$ -胡萝卜素; 总酚; V-C; INFOGEST 消化模型; 生物可及性; 消化特性

中图分类号: TS201.4; TS255.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)01-0119-08

## Effect of mayonnaise on the in vitro digestion of active substances in carrots

CHEN Min, YIN Mingyu, XI Yinci, TAKUYA Yanagisawa, MAMORU Kimura, WANG Xichang\*

(College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The bio-availability and digestive properties of the main active substances( $\beta$ -carotene, total phenols and V-C) in carrot salad were assessed using an in vitro static INFOGEST digestion model in this study. Raw carrots and mayonnaise were used to prepare the carrot salad samples with mass ratios of 6 : 1(T1), 4 : 1(T2), 2 : 1(T3), and carrots without mayonnaise as control(CK). The results showed that except for V-C in CK and T3, the contents of the active substances decreased sharply after gastric digestion, and then increased after intestinal digestion. The addition of salsa significantly improved the stability and bio-availability of  $\beta$ -carotene, total phenolics and V-C in carrots. The three bioactivities of the T3 sample were relatively stable during the simulated digestion process, with a highest bio-availability. The average particle sizes of each group  $D[3,2]$  and particle size distribution from the simulated oral cavity to the simulated intestinal digestion stage first showed an increasing trend, and it was the largest in the simulated gastric digestion stage at 60 min of digestion, and then decreased to the minimum. The average particle size  $D[3,2]$  of the T3 sample was smaller in the simulated digestion process(0.13-5.03  $\mu\text{m}$ ). In summary, mayonnaise improves the bio-availability of  $\beta$ -carotene, total phenols and V-C in carrots and helps making better digestive characteristics with the optimal effect in the T3 sample.

**Keywords:** carrot; mayonnaise; active substances;  $\beta$ -carotenoid; total phenols; V-C; INFOGEST digestion model; bio-availability; digestion characteristics

收稿日期: 2022-06-15

修回日期: 2024-02-05

基金项目: 海丘研合作研究项目(D-8006-12-0034)

作者简介: 陈敏(1997—), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事植物活性成分研究, 1599244055@qq.com; \*通信作者, 王锡昌, 博士, 教授, 主要从事水产加工研究, xcwang@shou.edu.cn

胡萝卜是全球十大蔬菜之一,广泛分布于中国华北、华中、西北和东北等地区,年产量高达908万<sup>[1]</sup>。胡萝卜中的 $\beta$ -胡萝卜素、纤维素和钙果胶酸酯等物质具有保护眼睛、促进代谢和降低胆固醇等功能<sup>[2]</sup>。但胡萝卜因具有令人难以接受的特殊风味而受到排斥,且在消化过程中受多种生化条件(消化酶、强酸和振荡蠕动)的影响易降解损失,无法充分发挥其生理活性,这些因素都限制了胡萝卜产业的发展<sup>[3]</sup>。

沙拉酱是一种口感顺滑的调味料,可以赋予食品特殊的风味而增加人们的食欲<sup>[4]</sup>。沙拉酱主要是由食用油、鸡蛋和白醋制成<sup>[5]</sup>,富含优质脂肪(DHA/EPA 磷脂)、必需氨基酸等多种活性成分<sup>[6]</sup>,具有较高的营养价值<sup>[7-8]</sup>。《中国沙拉酱行业监测与投资前景研究报告(2021版)》显示:2020年中国沙拉酱行业市场规模达5000亿元,占全国调味料市场份额的7%。中国沙拉酱行业发展仍处于初期阶段,深入研究沙拉酱的食用价值,有利于创新沙拉酱系列产品开发,提升沙拉酱的市场竞争力,驱动中国沙拉酱行业的快速发展<sup>[7]</sup>。

$\beta$ -胡萝卜素、总酚和V-C作为胡萝卜中主要的活性物质,具有清除体内自由基、改善氧化应激水平和预防心脑血管疾病等生理活性。然而,这些活性物质因自身的结构特性,其在体内的消化吸收利用率较低。有研究<sup>[9-11]</sup>指出,脂类和蛋白质等物质的添加可以改善这些生物活性物质利用率低的问题。笔者以香甜味沙拉酱和上海三红胡萝卜为原料,将其按不同比例复配制作胡萝卜沙拉,利用INGOGEST体外消化模型<sup>[8]</sup>,研究在模拟消化阶段沙拉中胡萝卜的 $\beta$ -胡萝卜素、总酚和V-C的稳定性及其生物可及性,并观察样品的消化特性,旨在为提高胡萝卜中主要活性物质的生物可及性和沙拉酱的食用价值提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与主要试剂

丘比牌香甜味沙拉酱由杭州丘比食品有限公司提供;上海三红胡萝卜购自上海临港新城卜蜂莲花超市; $\beta$ -胡萝卜素(纯度>97%)、胆盐、植物总酚试剂盒(R30360)和维生素C试剂盒(R22195)均购自上海源叶生物科技有限公司; $\alpha$ -淀粉酶(1500 U/g)

购自上海吉至生化科技有限公司;胃蛋白酶(3000 U/mg)购自上海麦克林生化科技有限公司;脂肪酶(猪胰,30000 U/g)购自北京沃凯生物科技有限公司;胰酶(2000 U/g)购自天津希恩思奥普德科技有限公司;尼罗红(纯度 $\geq 95\%$ )购自北京索莱宝科技有限公司;游离脂肪酸试剂盒(AKFA008C)和植物原花青素试剂盒(BC1350)购自上海煦余生物科技有限公司;其余相关化学试剂均购自国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

JR18-300搅拌机,浙江苏泊尔股份有限公司产品;4℃冰箱,艾本德(上海)国际贸易有限公司产品;HWS-24电热恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司产品;CC-4224-01恒温振荡水浴锅,北京建强伟业科技有限公司产品;Five Easy PlusTMFE28 pH计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产品;H2050R高速冷冻离心机,长沙湘仪有限公司产品;RV10旋转蒸发仪,德国IKA集团产品;UV-1800PC紫外可见分光光度计,中国上海美普达公司产品;1260高效液相色谱仪,美国Agilent公司产品;MS600F光学显微镜,上海名兹精密仪器有限公司产品;MS3000激光粒度分析仪,英国马尔文仪器有限公司产品;LSM710 NLO激光共聚焦显微镜,德国徕卡股份公司产品。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品制备

参照李超超等<sup>[12]</sup>的方法并稍作修改制备样品。新鲜胡萝卜切片,放入搅拌机中搅碎为当量直径约5 mm的颗粒。称取50 g胡萝卜碎置于包裹锡箔纸的150 mL烧杯中,将胡萝卜和沙拉酱按质量比为6:1(T1)、4:1(T2)、2:1(T3)的比例混匀,以不加沙拉酱的胡萝卜为对照(CK)。

#### 1.3.2 模拟体外消化

参照BRODKORB等<sup>[8]</sup>的方法,配制唾液模拟液(SSF)、胃液模拟液(SGF)和肠液模拟液(SIF)。

取胡萝卜沙拉样品50 g置于150 mL棕色三角瓶中,加入37℃孵育了10 min的50 mL SSF溶液,置于恒温振荡水浴锅(100 r/min、37℃)中振荡5 min,模拟口腔消化。消化结束后取样分析。

取口腔消化产物 50 mL, 用 5 mol/L HCl 和 5 mol/L NaOH 调节 pH 至  $2.0 \pm 0.2$ , 加入 50 mL SGF 溶液, 置于恒温振荡水浴锅(180 r/min、37 °C)中振荡 2 h, 模拟胃消化。在消化 30、60、120 min 时取样分析。

取胃消化 120 min 产物 50 mL, 用 5 mol/L HCl 和 5 mol/L NaOH 调节 pH 至  $7.0 \pm 0.2$ , 加入 50 mL SIF 溶液, 置于恒温振荡水浴锅(150 r/min、37 °C)中振荡 2 h, 模拟肠道消化。在消化 30、60、120 min 时取样分析。

### 1.3.3 测定指标及方法

模拟口腔、胃、肠道消化阶段的终端消化产物经离心后取中间层的液体 1 mL, 参照 PHAN 等<sup>[13]</sup>的方法测定  $\beta$ -胡萝卜素; 采用总酚试剂盒和 V-C 试剂盒检测总酚和 V-C 含量。参照齐小敏等<sup>[14]</sup>的方法并稍作修改, 测定消化产物的平均粒径, 用  $D[3,2]$  表示颗粒的平均粒径。参照廖一等<sup>[15]</sup>的方法, 采用正置光学显微镜观察消化产物的微观结构; 参照 DING 等<sup>[16]</sup>的方法, 采用荧光显微镜观察消化产物的微观结构。参照 ALMINGER 等<sup>[17]</sup>的方法计算  $\beta$ -胡萝卜素、总酚和 V-C 的生物可及性。

### 1.3.4 数据统计分析

数据运用 SPSS 19.0 进行正态分布检验, 符合正态分布的采用 Duncan's 法进行多重比较。运用

Prism 6.0(GraphPad)绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同消化阶段胡萝卜沙拉中 $\beta$ -胡萝卜素含量的变化

$\beta$ -胡萝卜素在体外消化过程中的含量变化如表 1 所示。在体外消化阶段, 不同样品组中  $\beta$ -胡萝卜素的含量都发生了较大的变化, 经胃消化后均急剧下降, 经肠道消化后又上升。经口腔消化后, 样品组中  $\beta$ -胡萝卜素的质量浓度为 2.68~3.39 mg/mL, 添加沙拉酱的试验组中  $\beta$ -胡萝卜素含量均低于 CK 的, 且 T1、T2、T3 的  $\beta$ -胡萝卜素含量依次降低, 说明经口腔消化后沙拉酱添加量与  $\beta$ -胡萝卜素含量呈负相关。经胃消化后, 样品组中  $\beta$ -胡萝卜素的质量浓度为 0.18~0.51 mg/mL, 比口腔消化阶段的下降了 80.97%~94.69%, 添加沙拉酱的试验组中  $\beta$ -胡萝卜素含量均高于 CK 的, 且 T1、T2、T3 的  $\beta$ -胡萝卜素含量依次增加, 说明经胃消化后沙拉酱添加量与  $\beta$ -胡萝卜素含量呈正相关。在肠道消化后, 样品组中  $\beta$ -胡萝卜素的质量浓度为 0.34~0.91 mg/mL, 较胃消化阶段的增加了 78.43%~96.55%, 添加沙拉酱的试验组中  $\beta$ -胡萝卜素含量均显著高于 CK 的, 且 T1、T2、T3 的  $\beta$ -胡萝卜素含量依次增加, 说明经肠道消化后  $\beta$ -胡萝卜素含量与沙拉酱添加量呈正相关。

表 1 不同体外消化阶段胡萝卜沙拉消化产物中主要活性物质的含量

处理	$\beta$ -胡萝卜素含量			总酚含量			V-C 含量		
	口腔	胃	肠道	口腔	胃	肠道	口腔	胃	肠道
CK	(3.39±0.12)a	(0.18±0.05)c	(0.34±0.30)c	(2.16±0.01)ab	1.00±0.02	(1.57±0.03)c	(0.060±0.005)ab	(0.049±0.002)a	(0.045±0.003)c
T1	(3.15±0.04)ab	(0.29±0.02)bc	(0.57±0.03)b	(2.30±0.02)a	1.05±0.04	(1.61±0.04)c	(0.071±0.003)ab	(0.035±0.003)b	(0.052±0.003)bc
T2	(2.88±0.04)bc	(0.43±0.04)ab	(0.78±0.04)ab	(2.21±0.02)a	1.15±0.05	(1.78±0.03)b	(0.073±0.004)a	(0.053±0.005)a	(0.059±0.001)ab
T3	(2.68±0.11)c	(0.51±0.06)a	(0.91±0.04)a	(2.01±0.08)b	1.08±0.05	(1.97±0.04)a	(0.050±0.010)b	(0.058±0.003)a	(0.070±0.004)a

同列数据后不同字母示处理间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

### 2.2 不同消化阶段胡萝卜沙拉中总酚含量的变化

在体外消化过程中的总酚含量变化如表 1 所示。在整个体外消化阶段, 不同样品组中总酚含量变化的趋势与  $\beta$ -胡萝卜素含量变化的趋势一致。经口腔消化后, 样品组中总酚质量浓度为 2.01~2.30 mg/mL, 且 T1、T2、T3 的总酚含量依次降低, 说明经口腔消化后沙拉酱添加量与总酚含量呈负相关。经胃消化后, 样品组中总酚质量浓度为 1.00~1.15 mg/mL, 相比口腔阶段的降低了

46.27%~54.35%。肠道消化阶段结束后, 样品组中总酚质量浓度为 1.57~1.97 mg/mL, 较胃消化阶段的增加了 53.33%~82.41%, T3 和 T2 中总酚含量均显著高于 CK 的, 且 T1、T2、T3 的总酚含量依次增加, 说明经肠道消化后总酚含量与沙拉酱添加量呈正相关。

### 2.3 不同消化阶段胡萝卜沙拉中 V-C 含量的变化

V-C 在体外消化过程中的含量变化如表 1 所

示。在整个体外消化阶段, T3的V-C含量逐渐上升; CK的V-C含量逐渐下降, T2和T3的V-C含量变化的趋势均与 $\beta$ -胡萝卜素含量变化的趋势一致。经口腔消化后, 样品组中V-C质量浓度为0.050~0.073 mg/mL。经胃消化阶段, 样品组中V-C质量浓度为0.035~0.058 mg/mL, 相比口腔消化阶段V-C的含量, 除T3的增加了16.00%外, 其他的降低了18.33%~50.70%, T3组中V-C质量浓度最高, 为(0.058 $\pm$ 0.003) mg/mL。肠道消化结束后, 样品组中V-C的质量浓度为0.045~0.070 mg/mL, 相比胃消化阶段的V-C, 除CK的降低了8.16%, 其他的增加了11.32%~48.57%, T2和T3组中V-C含量均显著高于CK的, 且T1、T2、T3的V-C含量依次增加, 说明经肠道消化后V-C含量与沙拉酱添加量呈正相关。

#### 2.4 不同消化阶段胡萝卜沙拉中主要活性物质的生物可及性

由表2可知, 样品组中 $\beta$ -胡萝卜素、总酚和V-C的生物可及性均随沙拉酱添加量的增加而增加, 说明3种活性物质的生物可及性均与沙拉酱的添加量呈正相关, 且T2和T3中此3种活性物质的生物可及性均显著高于CK的。样品中3种活性物质的生物可及性存在明显差异, 其中,  $\beta$ -胡萝卜素的生物可及性为7.96%~22.94%, 添加沙拉酱的3个试验组中 $\beta$ -胡萝卜素的生物可及性是CK的1.8~2.9倍; 总酚的生物可及性为28.78%~37.57%, 是3种活性

物质中最高的; V-C的生物可及性为11.13%~17.13%。该结果与3种活性物质在胃、肠道消化后的稳定性情况一致。

表2 体外消化阶段胡萝卜中不同活性物质的生物可及性  
Table 2 Bio-availability of different active substances in different samples at vitro digestion phases

处理	生物可及性/%		
	$\beta$ -胡萝卜素	总酚	V-C
CK	7.96c	28.78c	11.13c
T1	14.24b	29.57c	13.00bc
T2	19.06ab	32.68b	14.63ab
T3	22.94a	37.57a	17.13a

同列数据后不同字母示处理间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

#### 2.5 胡萝卜沙拉的体外消化特性

##### 2.5.1 消化产物的粒径

从表3和图1可知, 在模拟消化过程中3组样品的 $D[3,2]$ 均先增大, 在胃消化阶段消化60 min时最大, 之后又减小到最小; 3组样品的粒径分布的强度也均先增加, 胃消化阶段最强, 随后又减弱。在口腔消化阶段, 3组样品的 $D[3,2]$ 为0.17~1.86  $\mu\text{m}$ , 随沙拉酱添加量的增加,  $D[3,2]$ 显著减小。在胃消化阶段, 前30 min样品的 $D[3,2]$ 开始大幅度增加,  $D[3,2]$ 为4.01~5.02  $\mu\text{m}$ ; 在胃消化60 min时, 样品的 $D[3,2]$ 达到最大值, 为5.03~7.70  $\mu\text{m}$ , 均在5  $\mu\text{m}$ 以上, 粒径分布强度最强; 在胃消化结束时, 样品的 $D[3,2]$ 减小到3.67~6.92  $\mu\text{m}$ ; 在整个胃消化阶段, T3的 $D[3,2]$ 最小(3.67~5.03  $\mu\text{m}$ )。在肠道消

表3 不同沙拉酱配比胡萝卜沙拉在体外消化过程中的平均粒径 $D[3,2]$

处理	$D[3,2]/\mu\text{m}$						
	口腔	胃消化 30 min	胃消化 60 min	胃消化 120 min	肠道消化 30 min	肠道消化 60 min	肠道消化 120 min
T1	(1.86 $\pm$ 0.09)a	(5.02 $\pm$ 0.16)a	(7.70 $\pm$ 0.04)a	(5.33 $\pm$ 0.12)b	0.14 $\pm$ 0.03	(0.10 $\pm$ 0.00)b	(0.06 $\pm$ 0.01)b
T2	(0.66 $\pm$ 0.06)b	(4.54 $\pm$ 0.01)b	(7.03 $\pm$ 0.01)b	(6.92 $\pm$ 0.00)a	0.18 $\pm$ 0.00	(0.13 $\pm$ 0.01)ab	(0.12 $\pm$ 0.00)a
T3	(0.17 $\pm$ 0.01)c	(4.01 $\pm$ 0.01)c	(5.03 $\pm$ 0.01)c	(3.67 $\pm$ 0.03)c	0.24 $\pm$ 0.03	(0.16 $\pm$ 0.01)a	(0.13 $\pm$ 0.01)a

同列数据后不同字母示处理间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

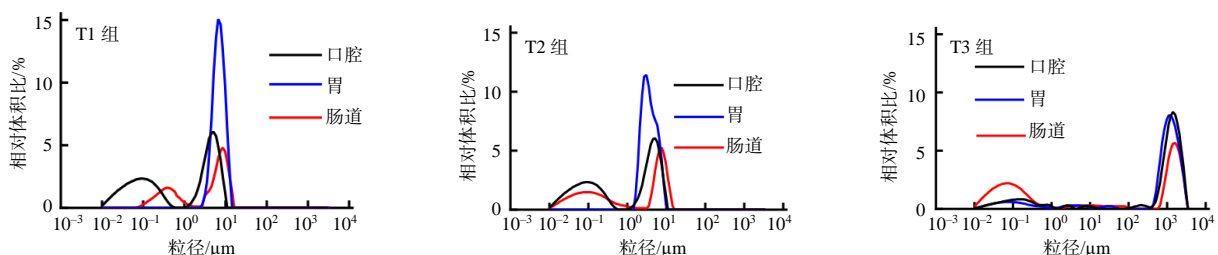


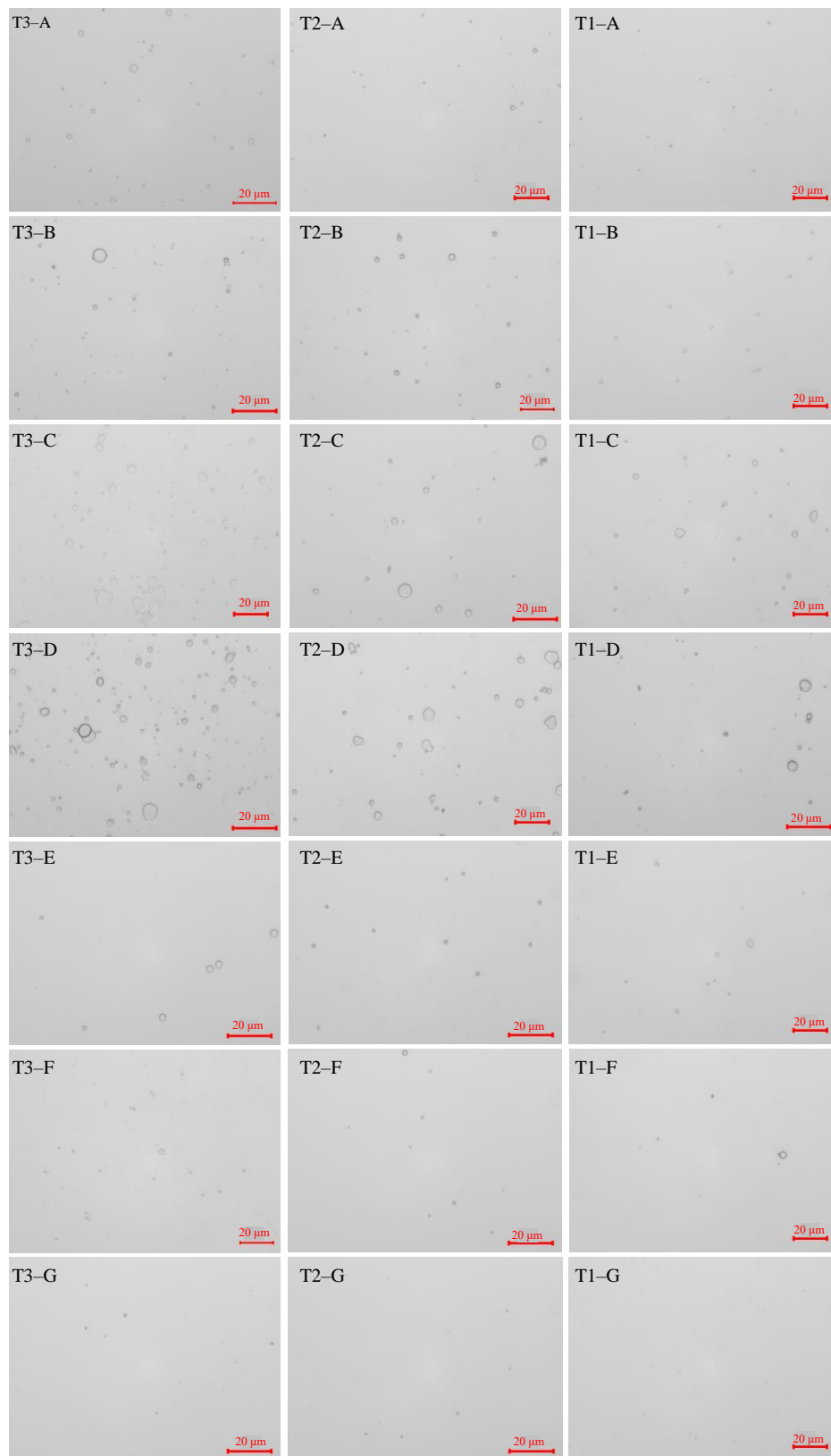
图1 不同沙拉酱配比胡萝卜沙拉在体外消化过程中的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of carrot salad with different salad dressing ratios during in vitro digestion

化阶段, 样品的  $D[3,2]$  逐渐变小 ( $<0.3 \mu\text{m}$ ), 粒径分布强度减弱, 在肠道消化结束时,  $D[3,2]$  降至最小, 仅为  $0.06\sim 0.13 \mu\text{m}$ 。

### 2.5.2 消化产物的形态学特征

由图 2 可知, 3 组样品的消化产物外观状态整体呈先聚集后分散的趋势。从口腔消化到胃消化阶



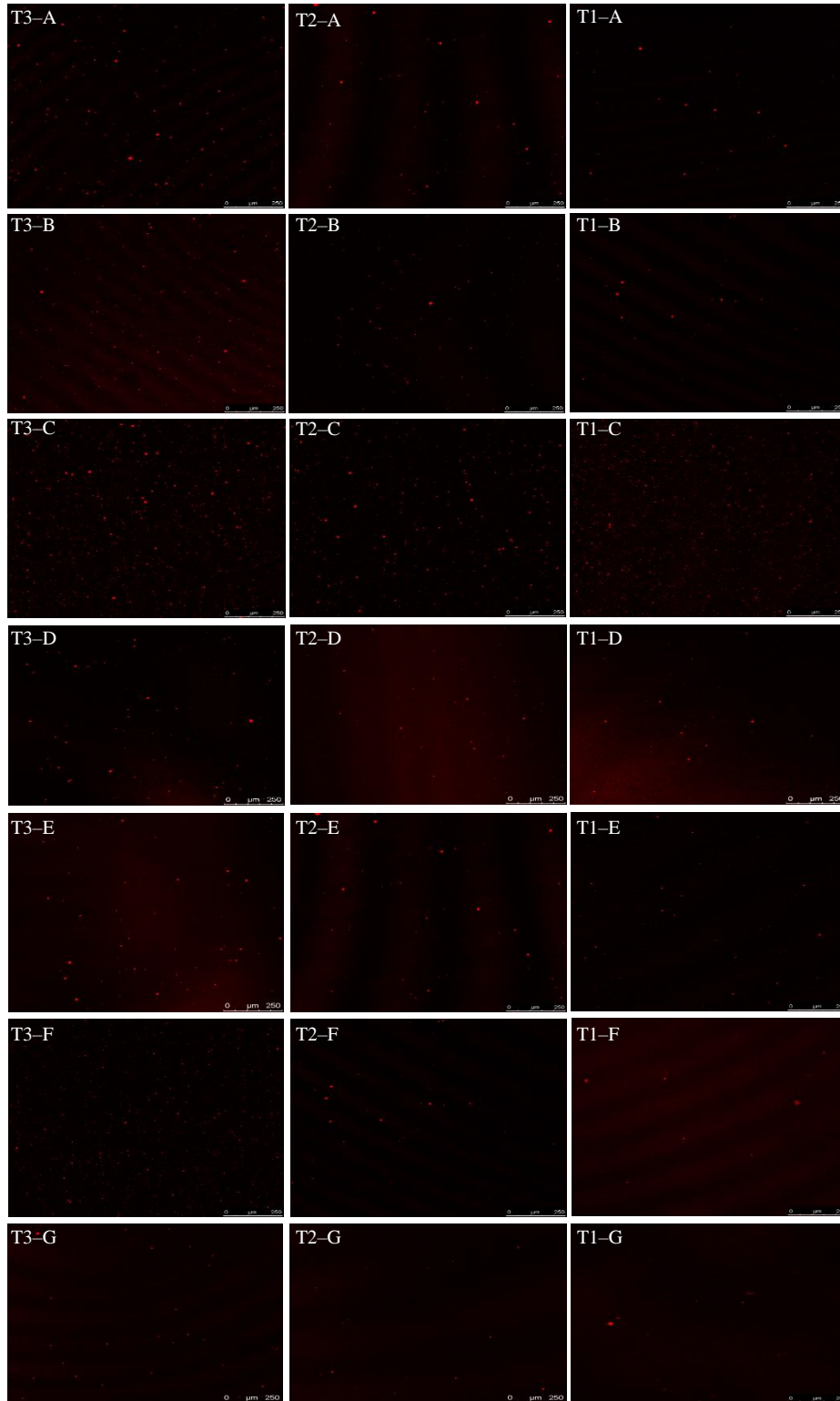
A 模拟口腔消化阶段的产物; B、C、D 模拟胃消化 30、60、120 min 的产物; E、F、G 模拟肠道消化 30、60、120 min 的产物。

图 2 光学显微镜观察到的不同消化阶段胡萝卜沙拉消化产物的结构

Fig.2 Structure of carrot salad digestion products at different stages of digestion as observed by light microscopy

段, 3 组样品消化产物中的液滴呈聚集状态, 液滴数量变多, 到胃消化结束时, 液滴大面积聚集, 其中, T3 组中的液滴聚集效应最强; 而在肠道消化阶段, 3 组样品消化产物中的液滴逐渐呈分散状态,

液滴数量变少, 到肠道消化结束时, 液滴大部分被分散, 且 T3 组被分散的液滴较多。对样品中的脂质进行染色, 结果如图 3 所示。红色的液滴即为油滴, 油滴的变化情况与图 2 中液滴的变化情况相似。



A 模拟口腔消化阶段的产物; B、C、D 模拟胃消化 30、60、120 min 的产物; E、F、G 模拟肠道消化 30、60、120 min 的产物。

图 3 荧光显微镜观察到的不同消化阶段胡萝卜沙拉消化产物的结构

Fig.3 Structure of carrot salad digestion products at different stages of digestion as observed by fluorescence microscopy

### 3 结论与讨论

本研究中,采用模拟体外静态 INFOGEST 消化模型,探究沙拉酱对胡萝卜中  $\beta$ -胡萝卜素、总酚和 V-C 的生物可及性和消化特性的影响。在模拟体外消化过程中,沙拉酱提高了胡萝卜中  $\beta$ -胡萝卜素、总酚和 V-C 的稳定性和生物可及性, T3 组中 3 种活性物质的含量较高,生物可及性也较高。其中,在胃消化阶段,沙拉酱提高了  $\beta$ -胡萝卜素、总酚和 V-C(T1 的 V-C 除外)的稳定性,这可能是由于样品在消化酶的作用下,沙拉酱中的大分子(主要是脂肪)被消化分解,一些具有表面活性功能的脂质消化产物(主要是脂溶性成分,如磷脂)吸附在植物活性成分的表面形成“保护膜”<sup>[18-19]</sup>所致;而从胃消化阶段到肠道消化阶段,3 种植物活性成分的含量升高,这可能是由于模拟肠液中的主要成分是胰酶和胆盐,能消化分解吸附在植物活性成分表面的物质,破坏活性成分与蛋白质、多糖等大分子形成的交联结构,有助于促进植物活性成分的释放而形成混合胶束<sup>[10,20]</sup>所致。这与 YAO 等<sup>[9]</sup>采用 INDOGEST 模型探究不同类型赋形剂乳液对菠菜中类胡萝卜素生物可及性影响的结果一致。

在模拟消化阶段,添加沙拉酱的样品的消化特性均发生了明显变化,其中, T3 组中消化产物的液滴聚集效应更强,被水解的液滴较多,且在口腔和胃消化阶段  $D[3,2]$  最小,表现出较好的消化特性。从口腔到胃消化阶段,3 组样品的  $D[3,2]$  增大,粒径分布强度增强,消化产物中液滴均发生大量聚集,这可能是在胃中强酸性条件( $\text{pH}=2.0\pm 0.2$ )和强机械作用(180 r/min)下样品表面正电荷减少,液滴之间的静电斥力较弱而发生聚集及部分蛋白质发生变性聚集的缘故<sup>[21]</sup>。在肠道消化结束后,  $D[3,2]$  和粒径分布强度均下降,消化产物液滴都均匀分散,这可能是由于模拟肠液中的胆盐和胰酶对样品进一步消化所致。

综上, T3 组在改善胡萝卜中  $\beta$ -胡萝卜素、总酚和 V-C 的生物可及性和消化特性方面效果较佳,在日常膳食中要合理利用并分配沙拉酱和胡萝卜的用量和比例,在保证人体健康的条件下,最大程

度发挥胡萝卜中营养素对人体的生物活性。

#### 参考文献:

- [1] 马桂花. 胡萝卜生产中存在的问题及对策[J]. 北方园艺, 2012(18): 84-85.
- [2] 余熠杨, 邓源喜, 徐情, 等. 胡萝卜的营养保健功能及其开发应用进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(17): 129-131.
- [3] MARHUENDA-MUÑOZ M, HURTADO-BARROSO S, TRESSERRA-RIMBAU A, et al. A review of factors that affect carotenoid concentrations in human plasma: differences between Mediterranean and Northern diets[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2019, 72(1): 18-25.
- [4] 张彩霞, 奚印慈, 柳泽琢也, 等. 沙拉酱风味鱼糜制品制备及其挥发性物质分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 112-118.
- [5] 尹明雨, 柳泽琢也, 松冈亮辅, 等. 香甜味沙拉酱脂肪酸差异与品质相关性研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(14): 70-75.
- [6] 唐史杰, 尹明雨, 松冈亮辅, 等. 市售沙拉酱游离氨基酸组成的主成分分析与层次聚类分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 222-228.
- [7] 吴芳英. 沙拉酱的研究现状及进展[J]. 绿色科技, 2019(20): 156-158.
- [8] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.
- [9] YAO K F, MCCLEMENTS D J, YAN C, et al. In vitro and in vivo study of the enhancement of carotenoid bioavailability in vegetables using excipient nanoemulsions: impact of lipid content[J]. Food Research International, 2021, 141: 110162.
- [10] 郗雪娇, 程亚, 曾茂茂, 等. 食品多酚与蛋白相互作用及其对多酚生物可利用性影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(8): 232-237.
- [11] 张晨曦, 董露, 卢雨洁, 等. VC 脂质体水凝胶的制备及其消化特性研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(2): 80-88.
- [12] 李超超, 增田泰伸, 木村守, 等. 食用香甜味沙拉酱对  $\beta$ -胡萝卜素吸收的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(3): 188-192.
- [13] PHAN M A T, BUCKNALL M P, ARCOT J. Co-ingestion of red cabbage with cherry tomato enhances digestive bioaccessibility of anthocyanins but decreases carotenoid bioaccessibility after simulated in vitro gastro-intestinal digestion[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125040.

- [14] 齐小敏, 任晓敏, 李梅, 等. 肌原纤维蛋白结合态羧甲基赖氨酸的体外消化特性[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 10–16.
- [15] 廖一, 孙禹凡, 彭新辉, 等. 紫苏油多层乳液的制备及乳液油脂体外消化特性[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 58–65.
- [16] DING M Z, LIU L J, ZHANG T, et al. Effect of interfacial layer number on the storage stability and in vitro digestion of fish oil-loaded multilayer emulsions consisting of gelatin particle and polysaccharides[J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127686.
- [17] ALMINGER M, AURA A M, BOHN T, et al. In vitro models for studying secondary plant metabolite digestion and bioaccessibility[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(4): 413–436.
- [18] PAPAS A M. Antioxidant Status, Diet, Nutrition, and Health[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [19] YI J, LI Y, ZHONG F, et al. The physicochemical stability and invitro bioaccessibility of beta-carotene in oil-in-water sodium caseinate emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 19–27.
- [20] MALAKI NIK A, WRIGHT A J, CORREDIG M. Micellization of beta-carotene from soy-protein stabilized oil-in-water emulsions under in vitro conditions of lipolysis[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(9): 1397–1407.
- [21] LIN L, TAO N P, SU H, et al. Migration of nutrients and formation of micro/nano-sized particles in Atlantic salmon(*Salmo salar*) and bighead carp(*Aristichthys nobilis*) head soups[J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100646.

责任编辑: 邹慧玲  
英文编辑: 柳正

(上接第42页)

- [22] 王余龙, 蔡建中. 水稻籽粒受容活性及其控制途径 II. 籽粒含水率与<sup>14</sup>C光合产物分配及转化的关系[J]. 江苏农学院学报, 1990, 11(4): 27–31.
- [23] 蔺万煌, 萧浪涛, 吴顺. 早籼稻籽粒灌浆动态与稻米垩白形成关系的研究[J]. 中国农学通报, 2002, 18(1): 13–16.
- [24] XIE Q, XU J K, HUANG K, et al. Dynamic formation and transcriptional regulation mediated by phytohormones during chalkiness formation in rice[J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 308.
- [25] 黄英金, 张宏玉, 郭进耀, 等. 水稻耐高温逼熟的生理机制及育种应用研究初报[J]. 科学技术与工程, 2004, 4(8): 655–658.
- [26] 宋丽莉, 赵华强, 朱小倩, 等. 高温胁迫对水稻光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(22): 13348–13353.
- [27] 张文怡, 白涛, 何东, 等. 抽穗期高温胁迫对水稻花药花粉和光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(4): 379–385.
- [28] YAMAKAWA H, HIROSE T, KURODA M, et al. Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray[J]. Plant Physiology, 2007, 144(1): 258–277.
- [29] SHI W J, YIN X Y, STRUIK P C, et al. High day- and night-time temperatures affect grain growth dynamics in contrasting rice genotypes[J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(18): 5233–5245.
- [30] PANDEY M K, RANI N S, MADHAV M S, et al. Different isoforms of starch-synthesizing enzymes controlling amylose and amylopectin content in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(6): 1697–1706.
- [31] TIAN Z X, QIAN Q, LIU Q Q, et al. Allelic diversities in rice starch biosynthesis lead to a diverse array of rice eating and cooking qualities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(51): 21760–21765.
- [32] LEE S K, HWANG S K, HAN M, et al. Identification of the ADP-glucose pyrophosphorylase isoforms essential for starch synthesis in the leaf and seed endosperm of rice(*Oryza sativa* L.)[J]. Plant Molecular Biology, 2007, 65(4): 531–546.
- [33] TANG X J, PENG C, ZHANG J, et al. ADP-glucose pyrophosphorylase large subunit 2 is essential for storage substance accumulation and subunit interactions in rice endosperm[J]. Plant Science, 2016, 249: 70–83.

责任编辑: 毛友纯  
英文编辑: 柳正