

不同烹饪方式对西兰花中维生素C和硝酸盐含量及体外模拟胃肠消化的影响

刘冬梅, 周若雅, 梁咏雪, 王 勇, 陈东坡, 周 鹏

Effect of Cooking Methods on Vitamin C and Nitrate and *in-Vitro* Digestion of Broccoli

LIU Dongmei, ZHOU Ruoya, LIANG Yongxue, WANG Yong, CHEN Dongpo, and ZHOU Peng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040099>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同解冻方式对速冻西兰花品质影响

Effect of Different Thawing Methods on Quality of Quick-frozen Broccoli

食品工业科技. 2020, 41(16): 266–270

不同预冷方式对西兰花货架期品质的影响

Effect of Different Precooling Methods on Shelf Life Quality of Broccoli

食品工业科技. 2020, 41(20): 266–272

预冷处理结合低温贮藏对西兰花贮藏品质的影响

Effect of Pre-cooling Treatment and Low Temperature Storage on Storage Quality of Broccoli

食品工业科技. 2021, 42(7): 302–310

不同光质对西兰花芽苗菜营养品质及抗氧化性的影响

Effects of Different Light Quality on Nutritional Quality and Antioxidant Activity of Broccoli Sprouts

食品工业科技. 2018, 39(23): 42–49

西兰花茎叶多肽的酶法提取及其增强免疫力功能研究

Immunomodulatory effects of the enzymatic extract polypeptide from broccoli stems and leaves

食品工业科技. 2017(11): 352–355

体外消化对三文鱼皮胶原低聚肽抗氧化活性的影响

Effect of *in Vitro* Digestion on Antioxidant Activity of Salmon Skin Collagen Oligopeptides

食品工业科技. 2021, 42(1): 317–321



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘冬梅,周若雅,梁咏雪,等.不同烹饪方式对西兰花中维生素 C 和硝酸盐含量及体外模拟胃肠消化的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 50–57. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040099

LIU Dongmei, ZHOU Ruoya, LIANG Yongxue, et al. Effect of Cooking Methods on Vitamin C and Nitrate and *in-Vitro* Digestion of Broccoli[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 50–57. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040099

不同烹饪方式对西兰花中维生素 C 和硝酸盐含量及体外模拟胃肠消化的影响

刘冬梅¹,周若雅¹,梁咏雪¹,王 勇²,陈东坡²,周 鹏^{1,*}

(1.江南大学,食品科学与技术国家重点实验室,江苏无锡 214122;
2.杭州老板电器股份有限公司,浙江杭州 311100)

摘要:为了探究易于西兰花消化吸收健康烹饪方式,采用体外模拟胃肠消化技术,探究了6种不同烹饪方式(蒸烤微一体机蒸制、烤制、微波、组合模式、电磁灶蒸制和电磁灶煮制)对西兰花中维生素C和硝酸盐保留率及吸收率的影响。结果表明,达到相同成熟度时,电磁灶煮制时间(1~3 min)最短,烤制时间(6~11 min)最长。另外,微波模式和蒸制(一体机蒸制和电磁灶蒸制)模式在维生素C的保留及消化方面较优,而烤制、组合模式及电磁灶蒸制的样品硝酸盐保留率及吸收率最好。因此,电磁灶蒸制模式(中高档蒸制)是最易于人体维生素C和硝酸盐消化吸收的西兰花烹饪方式。

关键词:西兰花,烹饪模式,体外消化,维生素C,硝酸盐

中图分类号:TS201.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2022)02-0050-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040099

本文网刊:



Effect of Cooking Methods on Vitamin C and Nitrate and *in-Vitro* Digestion of Broccoli

LIU Dongmei¹, ZHOU Ruoya¹, LIANG Yongxue¹, WANG Yong², CHEN Dongpo², ZHOU Peng^{1,*}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Hangzhou Robam Appliances Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: This study explored the effect of six different cooking methods (steaming, roasting, microwave, combined mode, inductor cooker steaming and inductor cooker) on the retention and absorption of vitamin C and nitrate of broccoli during *in-vitro* simulated gastrointestinal digestion, in search of healthy cooking technology which was easy to digestion and absorption. The results showed that the cooking time of the induction cooker (1~3 min) was the shortest while the one for roasting (6~11 min) was the longest in achieving the same maturity of broccoli. In addition, the samples treated with microwave or steaming had the highest retention and digestion of vitamin C, and the samples of roasted, combined mode or induction cooker steaming displayed the highest retention and absorption rate of nitrate. Therefore, inductor cooker steaming mode (P5 and P9) was considered the most suitable method in cooking broccoli to obtain the most appropriate digestion and absorption of vitamin C and nitrate.

Key words: broccoli; cooking mode; *in-vitro* digestion; vitamin C; nitrate

西兰花又称青花菜,属十字花科芸苔属甘蓝变种^[1]。因其维生素C、萝卜硫素、多酚类、黄酮类等抗氧化物质含量丰富,具有抗氧化、抗癌、防癌、降血糖等作用,又被称为“蔬菜皇冠”^[2-4]。此外,由于西兰花中含有丰富的维生素C和硝酸盐等物质,因此

能够有效地清除自由基,具有较强的抗衰老作用和降低罹患心血管疾病的风险^[4-5]。

西兰花通常需加热后食用,但加热方式的不同对蔬菜中营养物质的损失有显著的影响。Zeng^[6]研究发现西兰花在蒸制条件下维生素C的损失最小,

收稿日期: 2021-04-12

作者简介: 刘冬梅 (1991-),女,硕士研究生,研究方向:食品加工, E-mail: ldmtgyx@163.com。

* 通信作者: 周鹏 (1975-),男,博士,教授,研究方向:食品保鲜及食品加工, E-mail: zhoupeng@jiangnan.edu.cn。

为 14.3%, 其次为微波模式, 煮制影响最大, 维生素 C 损失高达 54.6%。袁定帅等^[7]对比了 4 种加热方式(蒸、炒、煮和微波)对西兰花中总酚、维生素 C 及总黄酮含量的影响, 发现煮制后食材中的抗氧化物质损失最多, 抗氧化能力最低; 这与 Jiménez-Monreal 等^[8]和 Bongoni 等^[9]研究结果一致。而 Nicoletta 等^[10]发现烤制对维生素 C、硫代葡萄糖苷和酚类物质保留效果优于蒸、煮和微波。可以发现, 在大多数研究中, 学者们对不同模式的烹饪大多控制为加热相同时间, 但加热速率的不同会使得相同时间下西兰花的成熟度并不一致, 因此导致各营养物质的保留率没有可比性。且这些研究模式主要是对比单一烹饪模式间的差异, 涉及到组合烹饪模式的研究较少。

与传统烹饪技术相比, 蒸烤微一体机集蒸、烤、微功能于一体, 根据食物的种类, 选择合理的加热方式与时间, 大大提升了烹饪的效率与质量, 具有较强实用性^[11]。而电磁灶打破了传统明火烹饪模式, 具有传热快、无有害气体、不产生热辐射等优点。维生素 C 是人体必需的营养素, 是重要的抗氧化剂, 对人体的正常代谢和发育起着不可或缺的作用。另外, 人体摄入的硝酸盐 81.2% 来自于蔬菜, 食物中大部分 NO_3^- 在口腔细菌的帮助下被缓慢转化成 NO_2^- , 未被还原的部分 NO_3^- 进入肠道、血液和其他组织, 逐渐转化为 NO_2^- , 在一氧化氮合成酶和多种还原性物质的作用下, 最终转化为具有扩展血管、改善血管功能等生理作用的一氧化氮(NO)。通过膳食硝酸盐-亚硝酸盐-NO 途径缓慢释放 NO 所带来的持续血管扩张作用, 在低氧分压状态下尤其具有重要意义^[12]。故本研究通过确定各烹饪模式下西兰花达到相同成熟度的烹饪时间, 以西兰花中维生素 C 和硝酸盐的保留率和消化吸收率为指标, 确定较优的烹饪模式, 以期为智能烹调蔬菜、提高西兰花营养吸收及开发西兰花相关菜品等提供参考与理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜西兰花 “绿鲜知”西兰花, 购于京东超市; 胃蛋白酶、胰酶、胆盐 Sigma 公司; L(+)-抗坏血酸标准品(纯度 $\geq 99\%$)、硝酸盐、偏磷酸、L-半胱氨酸、磷酸三钠、甲醇、氨缓冲溶液、亚铁氰化钾、硫酸锌、活性炭 国药集团化学试剂有限公司。

C930 蒸烤微一体机、9W70 电磁灶 杭州老板电器股份有限公司; TS22H1WG 不锈钢蒸锅 浙江爱仕达电器股份有限公司; TA-XT Plus 质构仪 英国 SMS 公司; E2695 Waters Alliance 高效液相色谱

上海沃特世科技有限公司; EL204 电子天平、PL2002 电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; KQ-400DE 型数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理 将购买的同一批新鲜无损的西兰花(选择同一位置)修整成花直径 3~3.5 cm, 茎长约 2 cm 且直径约为 1.5 cm 的小花, 每份样品称取 100 g。

1.2.2 烹饪工艺

1.2.2.1 蒸烤微一体机蒸制 将西兰花均匀的置于带孔不锈钢容器中间位置, 分别设置一体机蒸制温度为普通蒸 100 °C、高温蒸 120 °C 和 150 °C, 蒸制不同时间测定硬度值, 使西兰花达到相同成熟度, 加热结束后取出西兰花, 常温下冷却。

1.2.2.2 蒸烤微一体机烤制 将西兰花均匀的置于带孔不锈钢容器中间位置, 蒸烤微一体机的焙烤最高温度为 230 °C, 但由于蒸制温度最高设置为 150 °C, 为了区别高温蒸和焙烤, 设置焙烤温度为 150、200 和 230 °C, 烤制不同时间, 加热结束后取出西兰花, 常温下冷却。

1.2.2.3 蒸烤微一体机微波 用保鲜膜包裹住西兰花, 置于白色玻璃底盘中间位置加热, 由于微波模式只有 300、400、500、700 和 900 W 5 种功率模式, 设置微波功率分别为 300、500 和 900 W, 运行不同时间, 加热结束后取出西兰花, 常温下冷却。

1.2.2.4 蒸烤微一体机组合模式 将西兰花均匀的置于带孔不锈钢容器中间位置, 根据前期实验结果, 设置先蒸后烤(100 °C 蒸 3 min 再 200 °C 烤制不同时间)、先蒸后微波(100 °C 蒸 3 min 再 500 W 微波不同时间)和先烤后蒸(200 °C 烤制 3 min 再 100 °C 蒸制不同时间)模式, 加热结束后取出西兰花, 常温下冷却。

1.2.2.5 电磁灶蒸制和煮制模式 在蒸锅中添加 500 mL 水, 先采用电磁灶最大火力 P9 档加热 2 min 使水沸腾, 后放入样品(蒸制时将样品放入蒸篮中), 分别在 P1、P5 和 P9 档条件下蒸/煮制不同时间, 加热结束后取出西兰花, 常温下冷却。

1.2.3 成熟度确定 将 100 °C 蒸制不同时间的西兰花静置 3 min 后装在盘子中, 呈递给 8 名经过培训的感官评价员, 其中 2 名男性, 6 名女性, 品尝后对成熟度进行打分。打分选择 5 点标度法, 其中成熟度分为 3 分表示西兰花正常成熟, 小于 3 分表示过生, 大于 3 分表示过熟, 如表 1 所示。

表 1 西兰花成熟度感官评价标准

Table 1 Standards for sensory evaluation of broccoli maturity

成熟度	非常生	较生	正常熟	过熟	非常熟
分数(分)	1	2	3	4	5
感官方法	用手指小花茎的硬度, 弹性适中, 有一定的脆性, 表示正常成熟; 同时品尝西兰花, 感受西兰花的硬度和滋味。				

1.2.4 硬度测定 将所有蒸烤好的西兰花从箱体中拿出, 放入瓷盘中, 室温下静置 15 min 后, 切下 1 cm 长的茎, 将西兰花茎的切面朝下, 立即进行质构的测定。选用 P/2N 探头, 测试参数如下: 测前、测中及测后速度分别为 2.00、1.00 和 5.00 mm/s, 下压距离为 5.00 mm, 触发力 5.0 g。计算不同蒸制时间西兰花与参照样(100 °C 蒸制 6 min 样品)硬度的相关性 P 值, 一般 P 值大于 0.05 表明与参照样硬度差异不显著, P 值越大表明与参照样的成熟度越接近。

1.2.5 体外静态模拟胃肠消化 参考 Iore 等^[13]和傅志丰^[14]的方法并稍作修改, 具体测试方法如下。将各模式加热后达到正常成熟的西兰花冷冻干燥并磨成粉末, 取 1.5 g 的西兰花冻干粉置于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 去离子水匀浆, 定容至 50 mL 并用 12 mol/mL 的 HCl 将 pH 调节至 2.0。待 pH 稳定后立即加入 35 mg 胃蛋白酶(约 2500 U/mL), 置于 37 °C 酶反应器上反应 1 h。为模拟小肠的消化吸收, 首先将透析袋剪成 20 cm 的长度, 并向其中倾注 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液 20 mL, 然后取 30 mL 经胃消化后的消化液置于聚乙烯管中, 并将透析袋完全浸没在胃消化液中, 当透析袋外部溶液 pH 达到 5 时加入胰液素(4 g/L)和胆盐(25 g/L)混合溶液 5 mL, 并于 37 °C 条件下消化 2 h。消化结束后将透析袋取出, 用少量去离子水清洗透析袋表面, 得到两个组分溶液(透析袋外部和透析袋内部), 准确记录透析袋内的体积。将透析袋内部和外部样品迅速于 5000 ×g 离心 5 min。其中透析袋外部的消化液代表不能被小肠吸收的组分, 透析袋内部的消化液代表准备被小肠吸收的组分。样品离心后将上清液迅速置于-20 °C 冰箱冷冻贮存, 用于维生素 C 和硝酸盐的测定。

1.2.6 维生素 C 含量测定 参考《GB 5009.86-2016 食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定》第一法高效液相色谱法。根据下列公式计算 V_C 保留率和胃肠消化过程中的吸收率, 其中保留率为烹饪后样品中 V_C 保留率, 吸收率为小肠消化后透析袋内的保留率。

$$V_C \text{ 保留率} (\%) = \frac{\text{烹饪后样品中 } V_C \text{ 含量}}{\text{生鲜样品中 } V_C \text{ 含量}} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$$V_C \text{ 吸收率} (\%) = \frac{BC_{\text{digested}}}{BC_{\text{non-digested}}} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: BC_{digested} 表示酶解液中的 V_C 含量, mg/g;

BC_{non-digested} 表示酶解前样品中的 V_C 含量, mg/g。

1.2.7 硝酸盐含量测定 参考《GB 5009.33-2016 食品安全国家标准食品中硝酸盐和亚硝酸盐的测定》第三法蔬菜、水果中硝酸盐的测定中紫外分光光度法。

1.2.8 汁液损失测定 根据下列公式计算烹饪过程中的汁液损失。

$$\text{汁液损失} (\%) = \frac{\text{烹饪前样品的质量} - \text{烹饪后样品的质量}}{\text{烹饪前样品的质量}} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

1.3 数据处理

采用 SPSS20.0 对试验结果进行统计分析, 用 One-Way ANOVA 方法进行方差分析, 采用 Ducan's multiple range test 比较单个均值之间的差异, $P < 0.05$ 时表明结果间存在显著差异; 用 Origin 9.0 软件进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 西兰花成熟度参照样的确定

硬度是影响消费者对菜肴质量评价与可接受性的重要因素之一^[15-16]。使用蒸烤微一体机在 100 °C 下蒸制不同时间, 西兰花硬度值及成熟度的变化如表 2 所示。由表 2 可以看出, 随着加热时间的延长, 硬度值显著降低($P < 0.05$)。一方面, 温度的升高使得细胞死亡, 细胞原生质与细胞壁分离、细胞膜破裂, 一些营养物质如维生素、矿物质等流出细胞, 蔬菜变软^[15,17]; 另一方面果胶、半纤维素和纤维素是细胞壁的主要成分, 加热使植物性食品中果胶原变为可溶性果胶、部分半纤维素转变成可溶状态, 使硬度发生改变^[18-19]。因此硬度的变化能够表征西兰花的成熟度, 后续可以采用测定西兰花的硬度来判断是否达到正常成熟。

类似地, 如表 3 所示, 西兰花的成熟度也随着加热时间的延长而逐渐升高。当 100 °C 蒸制 6 min 时, 西兰花的成熟度为 3.0±0.3, 为正常成熟。因此, 后续确定各模式成熟度值时, 每次均测定 100 °C 蒸制 6 min 西兰花, 测定其硬度值为参照值, 计算不同加热时间与此参照值硬度值的显著水平(P 值), 最接近的为正常成熟。

2.2 不同模式西兰花成熟度的确定

2.2.1 蒸烤微一体机加热时间的确定 为了确定不同模式西兰花的成熟度, 我们选择蒸烤微一体机 100 °C 蒸制 6 min 为成熟度参照样品, 测试不同模式

表 2 西兰花硬度值变化

Table 2 Changes in broccoli hardness

处理时间(min)	0	2	4	6	8	10
硬度(g)	307.0±8.5 ^a	133.9±36.4 ^b	108.6±14.3 ^c	98.9±11.6 ^{bc}	82.3±5.5 ^{cd}	66.3±5.2 ^d

注: 同行不同小写字母表示存在显著性差异($P < 0.05$); 表 3 同。

表 3 西兰花成熟度变化
Table 3 Maturity changes of broccoli

加热时间(min)	4	5	6	7	8
感官评价成熟度	1.9±0.2 ^d	2.4±0.4 ^c	3.0±0.3 ^b	3.5±0.3 ^a	3.8±0.3 ^a

下加热不同时间西兰花硬度, 比较各模式样品与参照样成熟度(硬度)的显著水平(P 值)。

表 4 为不同烹饪模式时间的确定, 由于生鲜样品批次间存在差异, 因此每组模式开始时均会制备参照样(100 °C 蒸制 6 min 的西兰花)并与其比较硬度的 P 值来确定各模式的加热时间, 但后续参照组未呈现在表中。由表 4 可以看出, 随着温度、档位或功率的增大, 西兰花达到最适成熟度所需时间逐渐缩短。其中 900 W 微波所需时间最短, 仅需 50 s; 煮制加热相对于其它模式, 加热速率最快, 仅需 1.5~3 min; 烤制所需时间最长, 为 6~11 min, 这是由于与空气相比, 水的热容量大, 热传导性优于空气^[20~21]。

2.3 烹饪模式及胃肠消化对维生素 C 的影响

2.3.1 烹饪模式对西兰花维生素 C 保留率的影响
维生素 C(V_C)是人体需求较多却极易缺乏的水溶性维生素, 膳食中 90% 以上的 V_C 来源于蔬菜和水果^[22]。它是人体内一种重要的抗氧化剂, 对人体的正常代谢和发育起着不可或缺的作用^[23~24]。食物的加工烹饪过程是一个复杂的物理化学过程, 因此食物中营养成分很容易在烹饪过程中流失或破坏。 V_C 作为人体必需的重要维生素, 其保留率可以作为衡量烹饪加工对食物营养价值影响程度的重要指标之一。

对上述不同烹饪模式下成熟度一致的样品中 V_C 的保留率进行比较, 结果如图 1 所示。可以看出, 不同烹饪模式对西兰花中 V_C 保留率有明显的影响, 微波模式保留率最高, 为 84.3%~100.2%, 其中 500 W

微波的样品西兰花 V_C 保留率达到 100%; 其次是蒸箱蒸制和电磁灶蒸制模式, V_C 保留率分别为 83.5%~90.1% 和 73.5%~90.7%; 煮制模式的 V_C 保留率稍低, 保留率为 82.9%~85.5%; 烤制模式的 V_C 保留率最低, 明显低于其它几种加热模式, 保留率仅为 63.7%~72.5%。由不同蒸烤微组合模式即先蒸后烤、先蒸后微波和先烤后蒸对西兰花中 V_C 保留率的影响可以看出, 先蒸后烤和先蒸后微波加热的西兰花其 V_C 含量显著高于先烤后蒸模式($P<0.05$); 另外, 先蒸后烤和先蒸后微波样品中的 V_C 含量与 100 °C 纯蒸模式差异不显著($P>0.05$), 显著高于 200 °C 烤制模式($P<0.05$), 但显著低于 500 W 微波模式($P<0.05$); 先烤后蒸模式中西兰花中 V_C 含量高于 200 °C 烤制模式, 但低于 100 °C 纯蒸模式。对西兰花不同烹饪方式中 V_C 保留率进行对比分析可以看出, 除 500 W 微波的西兰花中 V_C 含量与生鲜西兰花无显著差异($P>0.05$), 其它各模式均会显著降低西兰花中 V_C 含量($P<0.05$)。这可能是由于微波主要是利用热辐射传热, 在加热过程中 V_C 的损失主要来源于加热氧化; 另外, 微波加热时间较短且在本实验中样品包裹保鲜膜减少了汁液损失, 故 V_C 保留率较好。类似地, Galgano 等^[25]对比蒸、煮、高压、微波及高压微波结合对西兰花中 V_C 保留率的影响, 发现微波处理后的样品 V_C 含量与新鲜样品无显著差异, 且 V_C 保留率均高于 90%。不同烹饪模式中, 烤制模式的 V_C 保留率均低于其他模式, 这可能是由于烤制时间较长(大于 5 min)、温度较高且汁液损失较多。

表 4 不同模式烹饪时间的确定
Table 4 Determination of cooking time in different models

模式	温度/功率/档位	时间(min)	汁液损失(%)	硬度(g)	P 值
蒸烤微一体机蒸制	100 °C	6	3.20	113.8±10.6	—
	120 °C	5	4.62	113.7±7.8	0.9827
	150 °C	4	5.76	115.6±8.7	0.7257
	150 °C	11	16.68	115.3±6.0	0.8987
蒸烤微一体机烤制	200 °C	7	17.34	111.5±9.5	0.7671
	230 °C	6	18.96	111.8±8.4	0.7190
	300 W	5	7.43	116.7±9.8	0.4032
	500 W	1.5	9.80	112.4±13.0	0.6914
微波	900 W	50 s	8.20	122.0±11.9	0.7509
	200 °C	2	4.55	112.8±7.6	0.5489
	100 °C	3	12.84	112.6±7.6	0.8756
	500 W	1	5.18	114.4±8.9	0.3836
先蒸后烤(先100 °C蒸制3 min后烤制)	P1	7	-0.56	117.8±8.3	0.6729
	P5	2.5	2.02	112.2±7.0	0.4555
	P9	2	0.58	115.4±7.7	0.6726
	P1	3	-7.50	115.8±9.4	0.9803
电磁灶蒸制	P5	1.5	-6.62	116.9±7.1	0.7828
	P9	1.5	-9.84	117.5±8.1	0.6956
电磁灶煮制					

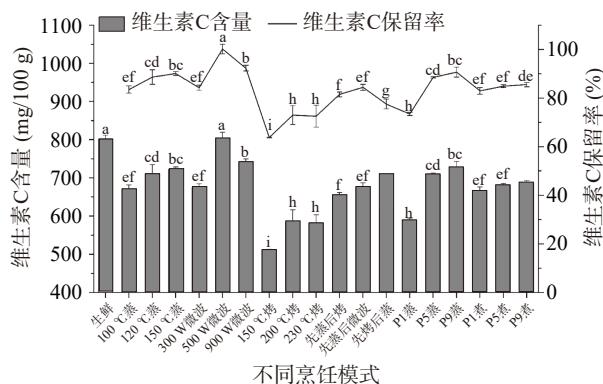


图 1 烹饪方式对西兰花维生素 C 保留率的影响

Fig.1 Effect of cooking methods on the vitamin C retention rate of broccoli

注: 同一指标不同小写字母表示存在显著性差异($P<0.05$); 图 2~图 4 同。

对比西兰花蒸烤微一体机蒸制、电磁灶蒸制和煮制模式, 可以发现, 电磁灶煮制的西兰花 V_C 含量较低, 显著低于微波和蒸制(蒸烤微一体机和电磁灶)的样品($P<0.05$), 可能是由于与蒸制相比, 煮制过程中食材与水充分接触, 热水不断的沸腾和搅拌加速了组织的软化和植物细胞的破裂, 进而加速了水溶性 V_C 的溶出^[26-27]。煮制对于蔬菜中 V_C 含量的影响要显著大于蒸制($P<0.05$), 这一结果在许多研究中都得到了验证^[25,28-30]。

2.3.2 烹饪模式对西兰花维生素 C 吸收量和吸收率的影响 目前关于人体营养摄入的建议, 大多基于研究中采用化学溶剂提取食品中活性成分而获得的数据, 未考虑活性成分在胃、肠道中的释放量及消化过程中可能发生的变化, 如在消化过程中可能发生降解转化和不完全释放^[31]。

为了模拟胃和小肠的生理条件(pH、温度和酶条件), 本项目采用了模拟体外静态胃肠消化的方法研究了不同烹饪方式对西兰花维生素 C 消化吸收量和吸收率的影响。不同烹饪方式加热后西兰花的 V_C 吸收量和吸收率如图 2 所示, 不同烹饪方式对西兰花中 V_C 吸收率影响较大。其中, 一体机蒸制和电磁灶蒸制两种模式 V_C 吸收量和吸收率最高, 吸收率分别为 7.1%~8.3% 和 4.7%~9.4%(P1 档稍低), 其次是煮制模式和微波模式。同样, 烤制模式的 V_C 吸收率最低, 仅为 2.5%~3.9%。且与烤相关的组合模式(先蒸后烤、先烤后蒸)的吸收率也较低, 分别为 5.7% 和 2.4%。

整体来看, 西兰花经模拟胃肠消化后其维生素 C 吸收率均较低, 约为 2.4%~9.4%, 这可能是由于 V_C 在胃肠消化过程中高 pH(pH 约为 7)下的低稳定性所致。Vallejo 等^[32] 研究了胃肠道消化在调节西兰花中生物活性物质的作用, 结果表明在胃肠消化结束后, V_C 损失高达 91%。李茹等^[31] 研究体外消化对胡萝卜苗中生物活性成分的影响, 发现体外胃消化对 V_C 的影响不显著, 而肠消化阶段的高 pH 降低了

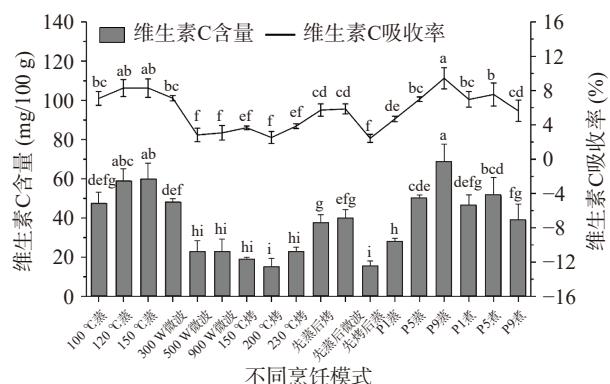


图 2 烹饪方式对西兰花维生素 C 吸收率的影响

Fig.2 Effect of cooking methods on the absorption rate of vitamin C in broccoli

维生素的稳定性。类似的, 经胃蛋白酶作用后, 石榴汁中 V_C 损失 29%, 而经胰酶胆盐消化后, 超过 80% 的 V_C 被降解^[33]。

对比 V_C 保留率可以看出, V_C 的吸收率与保留率的变化趋势并不完全一致, 保留率较高的模式其吸收率并不一定高, 如 500 W 微波的西兰花 V_C 保留率高达 100%, 但其消化吸收后的 V_C 含量仅为 $22.7 \pm 5.8 \text{ mg/100 g}$, 吸收率仅为 2.8%。这可能是由于不同烹饪模式导致食材的微观结构不同, 从而使其吸收率不同; 微波模式烹饪的西兰花微观结构破坏较小, 从而使其 V_C 保留率较高, 但不利于 V_C 的胃肠消化吸收。不同烹饪方式对营养物质在胃肠消化阶段的影响机制不同, 如食物原料中相对紧凑的空间结构使得其对蛋白酶作用的抵抗性较强, 当经过适宜的烹饪方式后, 引起组织部分展开, 使蛋白酶更容易进入水解位点^[34-35]。

2.4 烹饪模式及胃肠消化对硝酸盐的影响

2.4.1 烹饪方式对西兰花硝酸盐保留率的影响 近年来, 膳食硝酸盐对控制血压、改善心血管健康、提高运动能力方面的作用得到了认可, 而且已经被认为是一类新的植物化学物, 即含氮物, 成为深绿色蔬菜健康作用的重要化学基础^[36-38]。随着膳食结构的改善, 人们对蔬菜的需求量日益增加, 据报道人体摄入的硝酸盐 85%~90% 来自于蔬菜^[12,39]。图 3 表示不同烹饪方式下西兰花中硝酸盐含量变化。可以看出, 不同烹饪方式对西兰花中硝酸盐保留率有明显的影响, 其中微波模式和烤制模式硝酸盐保留率较高, 分别为 77.4%~102.2% 和 78.1%~94.8%; 组合模式中先蒸后烤和先烤后蒸样品中的硝酸盐保留率较高, 分别为 86.4% 和 87.7%; 而煮制模式硝酸盐保留率最低, 仅为 55.4%~56.3%, 显著低于其它四种加热模式($P<0.05$)。可能是由于微波和烤制过程没有水蒸气, 硝酸盐溶出较少, 而煮制过程与水充分接触, 硝酸盐溶出较多。类似的, Chetty 等^[40] 研究烹调对根类蔬菜硝酸盐含量的影响, 发现煮沸会使硝酸盐含量降低 23.30%~42.62%, 而烤制对其硝酸盐含量影响较

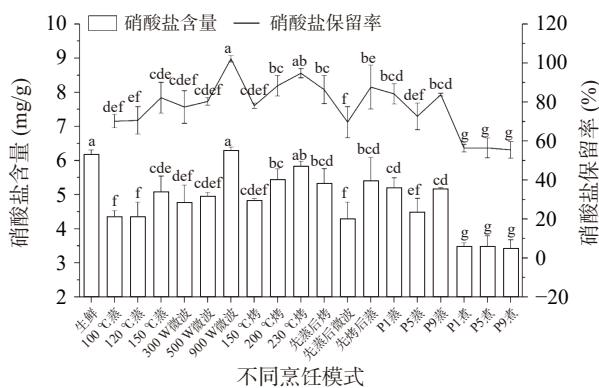


图 3 烹饪方式对西兰花硝酸盐保留率的影响

Fig.3 Effect of cooking methods on nitrate retention rate of broccoli

小; Prasad 等^[41-42]发现煮沸可使果类和叶类蔬菜的硝酸盐含量分别降低 25.25%~65.37% 和 47%~56%。另外, 蒸箱蒸制和电磁灶蒸制的样品中硝酸盐保留率分别为 70.2%~82.2% 和 72.6%~84.1%, 稍低于微波和烤制模式, 可能是由于随着蒸制时间增加, 水蒸汽逐渐增多, 蔬菜表面薄膜被破坏, 硝酸盐也会随着水蒸汽溶出。

2.4.2 烹饪方式对西兰花硝酸盐吸收量和吸收率的影响 西兰花中硝酸盐的消化吸收率为模拟胃肠消化后肠吸收的硝酸盐含量(即透析袋内样品)与消化前样品(即烹饪后样品)的比值。不同烹饪方式加热后西兰花的硝酸盐吸收量和吸收率结果如图 4 所示, 可以看出, 西兰花经不同模式加工及胃肠消化吸收后其硝酸盐含量都明显降低, 硝酸盐含量在 1.23~2.81 mg/g, 吸收率在 28.4%~73.3%。其中蒸箱蒸制和微波模式加热的西兰花其硝酸盐含量和吸收率较低, 含量分别为 1.23~1.80 和 1.52~1.81 mg/g, 吸收率约为 30%; 烤制、组合模式、电磁灶蒸制和电磁灶煮制的样品肠吸收后硝酸盐含量差异较小, 分别为 1.97~2.59、2.18~2.81、2.09~2.50 和 2.17~2.50 mg/g, 但由于消化前煮制样品中硝酸盐含量显著低于其它烹饪模式($P<0.05$), 因此其硝酸盐吸收率较高, 高达 62.8%~73.3%。由蒸烤微组合模式即先蒸后烤、先

蒸后微波和先烤后蒸模式对西兰花中硝酸盐吸收率的影响可以看出, 虽然三种模式的硝酸盐吸收率差异不明显, 但其硝酸盐含量有明显差异, 先蒸后烤模式含量最高, 其次是先烤后蒸模式, 先蒸后微波模式含量最低。另外, 对比图 3 和图 4 可以看出, 硝酸盐保留率和吸收率结果不完全一致, 如电磁灶煮制样品硝酸盐保留率显著低于其它烹饪模式($P<0.05$), 约为 55%, 但胃肠消化后其硝酸盐吸收量较高, 为 2.17~2.5 mg/g。这可能是由于不同烹饪模式导致食材的微观结构不同, 从而使其硝酸盐吸收率不同。

3 结论

烹饪方式对西兰花烹饪效率、 V_C 保留率和吸收率、硝酸盐保留率和吸收率都有明显影响。从烹饪效率来看, 西兰花达到相同成熟度时, 电磁灶煮制和微波烹饪方式所需时间最短, 分别为 1.5~3 min 和 50 s~1.25 min; 其次是电磁灶蒸制和一体机蒸制, 烤制所需时间最长, 需要 6~11 min。就 V_C 保留率而言, 微波模式保留率最高, 其次是蒸箱蒸和电磁灶蒸制模式, 煮制模式的保留率稍低, 而烤制模式的 V_C 保留率最低, 显著低于其它几种加热模式($P<0.05$)。对于 V_C 吸收率, 蒸箱蒸制和电磁灶蒸制(P5 档和 P9 档)两种模式 V_C 吸收率最高, 其次是煮制模式和微波模式, 烤制模式的 V_C 吸收率最低, 显著低于其它烹饪模式($P<0.05$)。对于硝酸盐保留率而言, 900 W 微波保留率最高, 其次是烤制模式、中低微波功率和蒸制(包括蒸箱蒸和电磁灶蒸)模式, 煮制模式的保留率最低。对于硝酸盐吸收量而言, 蒸箱蒸制和微波模式加热的西兰花其硝酸盐含量和吸收率较低, 烤制、组合模式、电磁灶蒸制和电磁灶煮制的样品肠吸收后硝酸盐含量差异较小, 其中先蒸后烤吸收量最多; 另外, 由于消化前煮制样品中硝酸盐含量显著高于其它烹饪模式($P<0.05$), 因此其硝酸盐吸收率较高, 高达 62.8%~73.3%。另外, 相同模式不同温度、档位或功率对其保留率和吸收率也会产生明显影响。综合来看, 电磁灶蒸制模式(中高档蒸制)是最易于人体 V_C 和硝酸盐消化吸收的烹饪方式。

参考文献

- [1] 叶保华, 赵继承, 朱胜龙. 鲜切西兰花贮藏保鲜技术研究[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(3): 18~21. [YE B H, ZHAO J C, ZHU S L. Studies on storing technology of fresh Brassica oleracea var. italica [J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(3): 18~21.]
- [2] 吴广辉, 毕韬韬. 西兰花营养价值及深加工研究进展[J]. 农产品加工, 2015, 21: 66~68. [WU G H, BI T T. Advances in nutritional value and deep processing of broccoli [J]. Farm Products Processing, 2015, 21: 66~68.]
- [3] 刘玉环, 杨德江, 冯九海, 等. 西兰花真空冷冻干燥的加工工艺及机理[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(10): 110~112. [LIU Y H, YANG D J, FENG J H, et al. Processing technology and mechanism of vacuum freeze-drying of broccoli [J]. Food and Fermentation Industries, 2008, 34(10): 110~112.]
- [4] 孙树杰, 王士奎, 李文香, 等. 中草药提取液对鲜切西兰花保

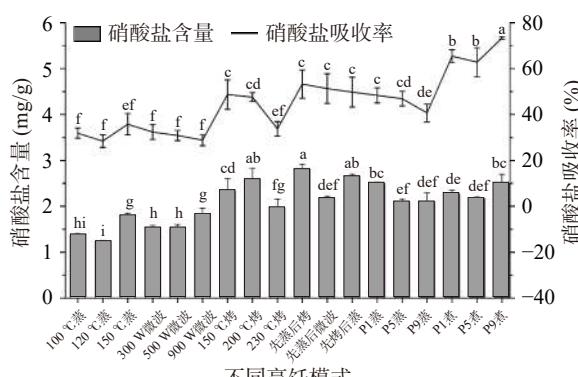


图 4 烹饪方式对西兰花硝酸盐吸收率的影响

Fig.4 Effects of cooking methods on nitrate absorption rate of broccoli

- 鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2012, 10(6): 283–387. [SUN S J, WANG S K, LI W X, et al. Effect of Chinese extract on fresh-keeping of broccoli[J]. Food Science, 2012, 10(6): 283–387.]
- [5] 袁定帅. 西兰花加工过程中营养品质及抗氧化特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017. [YUAN D S. Study on nutritional quality and functional characteristics of broccoli processing[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017.]
- [6] ZENG C. Effects of different cooking methods on the vitamin C content of selected vegetables[J]. Nutrition and Food Science, 1971, 43(5): 438–443.
- [7] 袁定帅, 陈洁, 赖晓芳. 热加工对西兰花营养品质及抗氧化性的影响[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2016(37): 91–95. [YUAN D S, CHEN J, LAI X F. Effect of thermal processing on the nutritional quality and antioxidant activity of broccoli[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2016(37): 91–95.]
- [8] JIMENEZ A M, GARCIA L, MARTINEZ M, et al. Influence of cooking methods on antioxidant activity of vegetables[J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(3): 97–103.
- [9] BONGONI R, VERKERK R, STEENBEKKERS B, et al. Evaluation of different cooking conditions on broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) to improve the nutritional value and consumer acceptance[J]. *Journal of Plant Foods for Human Nutrition*, 2014, 69(3): 228–234.
- [10] NICOLETTA P, EMMA C, CLAUDIO G, et al. Effect of different cooking methods on color, phytochemical concentration, and antioxidant capacity of raw and frozen brassica vegetables[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(7): 4310–4321.
- [11] 刘连超, 陈寅峰. 基于智能控制下的微蒸烤一体机[C]. 2018 年中国家用电器技术大会. 2018: 48–51. [LIU L C, CHEN Y F. Micro steaming and roasting integrated machine based on intelligent control[C]. 2018 China Home Appliance Technology Conference, 2018: 48–51.]
- [12] 孙威. 叶类蔬菜贮存过程中硝酸盐和亚硝酸盐的含量研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006. [SUN W. Nitrate and nitrite contents research of the leaf vegetable in storing process[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2006.]
- [13] IORE R, BARILLARI J, Rollin P. Comment on *in vitro* gastrointestinal digestion study of broccoli inflorescence phenolic compounds, glucosinolates, and vitamin C[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2004, 52(24): 7432–7433.
- [14] 傅志丰. 红薯叶多酚的溶剂提取, 消化性及体内降血脂作用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016. [FU Z F. Solvent extraction of polyphenoles from sweet potato leaves and study on its *in vitro* digestibility, *in vivo* antihyperlipidemic effects[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.]
- [15] 彭燕. 不同烹饪、配送方法对芹菜感官、营养和功能品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. [PENG Y. The effect of cooking and storage on sensorial, nutritional and functional properties of celeries[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.]
- [16] MNKENI A P, GIERCHNER K, MAEDA E E. Effect of blanching time and salt concentration on pectolytic enzymes, texture and acceptability of fermented green beans[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 1999, 53(4): 285–292.
- [17] DEKKER M, DEKKERS E, JASPER A, et al. Predictive modelling of vegetable firmness after thermal pre-treatments and steaming[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2014, 25: 14–18.
- [18] GONCALVES E M, PINHEIRO J, ALEGRIA C, et al. Degradation kinetics of peroxidase enzyme, phenolic content, and physical and sensorial characteristics in broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during blanching[J]. *Journal of Agricultural*, 2009, 57(12): 5370–5375.
- [19] GRY J, BLACK L, ERIKSEN F D, et al. EuroFIR-BASIS—a combined composition and biological activity database for bioactive compounds in plant-based foods[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2007, 18(8): 434–444.
- [20] 冯瑞红, 包玉龙, 王勇, 等. 蒸汽辅助烤制技术在肉类烹饪中的应用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 347–444. [FENG R H, BAO Y L, WANG Y, et al. Application of steam-assisted roasting in the quality of meat products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(8): 347–444.]
- [21] 周泓伶, 包玉龙, 刘冬梅, 等. 间歇性添加蒸汽对餐包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 90–98. [ZHOU H L, BAO Y L, LIU D M, et al. Effect of steam addition frequency on the quality of bread rolls[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(15): 90–98.]
- [22] LEE S K, KADER A A. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 20(3): 207–220.
- [23] NISSON J, STEGMARK, AKESSON B. Total antioxidant capacity in different pea (*Pisum sativum*) varieties after blanching and freezing[J]. *Food Chemistry*, 2004, 86(4): 501–507.
- [24] 戚浩彧. 烹饪对蔬菜中功能成分及其营养评价的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016. [QI H Y. Effect of cooking on functional component and nutrition assessment[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.]
- [25] GALGANO F, FAVATI F, CARUSO M, et al. The influence of processing and preservation on the retention of health-promoting compounds in broccoli[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72: 130–135.
- [26] 王萌蕾. 烹调和贮藏对果蔬有效营养和功能效价的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014. [WANG M L. Effect of cooking and storage on effective nutritional and functional values of fruits and vegetables[D]. Zhengzhou: Henan University of technology, 2014.]
- [27] BREWER M S, BEGUM S, BOZEMAN A. Microwave and conventional blanching effects on chemical, sensory, and colour characteristics of frozen broccoli[J]. *Journal of Food Quality*, 2010, 18(6): 479–493.
- [28] VOLDEN J, BORGE G I A, HANSEN M, et al. Processing (blanching, boiling, steaming) effects on the content of glucosinolates and antioxidant-related parameters in cauliflower (*Brassica oleracea* L. ssp. *botrytis*) [J]. *LWT-Food Science Technology*, 2009, 42(1): 63–73.

- [29] BERNHARDT S, SCHLICH E. Impact of different cooking methods on food quality: Retention of lipophilic vitamins in fresh and frozen vegetables[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(2): 327–333.
- [30] KOUBAA A, MIHOUBI N B, ABDELMOULEH A, et al. Comparison of the effects of four cooking methods on fatty acid profiles and nutritional composition of red mullet (*Mullus barbatus*) muscle[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2012, 21(5): 1243–1250.
- [31] 李茹, 朱毅. 体外模拟胃、肠消化对萝卜苗中活性物质、抗氧化功能及代谢差异物的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(4): 67–77. [LI R, ZHU Y. Effect of *in vitro* simulated digestion on active substances, antioxidant function and metabolic differences in radish seedlings[J]. Jurnal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(4): 67–77.]
- [32] VALLEJO F, GIL-IZPUIERDO A, PEREZ-VICENTE A, et al. *In vitro* gastrointestinal digestion study of broccoli inflorescence phenolic compounds, glucosinolates, and vitamin C[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(1): 7432–7433.
- [33] ANTONIO P V, ANGEL G I, CRISTINA G V. *In vitro* gastrointestinal digestion study of pomegranate juice phenolic compounds, anthocyanins, and vitamin C[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(8): 369–378.
- [34] GIRGIN N, EL S N. Effects of cooking on *in vitro* sinigrin bioaccessibility, total phenols, antioxidant and antimutagenic activity of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *Botrytis*)[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 37: 119–127.
- [35] 胡吕霖, 任思婕, 沈清, 等. 不同烹饪方式及体外模拟消化环境对鲤鱼蛋白质氧化及消化性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(20): 119–127. [HU L L, REN S J, SHEN Q, et al. Effect of different cooking treatments and *in vitro* digestion on protein oxidation and digestibility of sturgeon fillets[J]. *Food Science*, 2018, 39(20): 119–127.]
- [36] MILKOWSKI A, GARG H K, COUGHLIN J R, et al. Nutritional epidemiology in the context of nitric oxide biology: A risk-benefit evaluation for dietary nitrite and nitrate[J]. *Nitric Oxide*, 2010, 22(2): 110–119.
- [37] LUNDBERG J O, WEITZBERG E, GLADWIN M T. The nitrate-nitrite-nitric oxide pathway in physiology and therapeutics[J]. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2008, 7(2): 156–167.
- [38] 韩悦, 范志红, 朱瑞欣. 蔬菜中硝酸盐对心血管健康的改善作用[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(2): 87–91. [HAN Y, FAN Z H, ZHU R X. The effect of nitrate in vegetables on improving cardiovascular health[J]. *Food and Nutrition in China*, 2020, 26(2): 87–91.]
- [39] COREE W J, BREIMER T. Nitrate and nitrite in vegetables: A review[J]. *Literature Survey-Pudoc*, 1979, 39: 498–506.
- [40] CHETTY A A, PRASAD S. Flow injection analysis of nitrate-N determination in root vegetables: Study of the effects of cooking[J]. *Food Chemistry*, 2009, 116(2): 561–566.
- [41] PRASAD S, CHETTY A A. Flow injection assessment of nitrate contents in fresh and cooked fruits and vegetables grown in Fiji[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(8): 43–48.
- [42] PRASAD S, CHETTY A A. Nitrate-N determination in leafy vegetables: Study of the effects of cooking and freezing[J]. *Food Chemistry*, 2008, 106(2): 772–780.