

果蔬色泽在热加工和非热加工技术中的变化研究进展

谢章荟, 高静*

(广东药科大学食品科学学院, 广东中山 528405)

摘要: 色泽是果蔬十分重要的表观属性, 与果蔬本身含有的天然色素高度相关, 是判断其品质是否发生变化的重要指标之一。热加工以及非热加工技术广泛应用于果蔬产品的加工。传统果蔬加工技术以热力去皮、热烫、碱液去皮、干燥、油炸等热加工技术为主, 加工中使用的高温易对果蔬的色泽品质造成不可逆转的影响。近年来, 新型热加工和非热加工技术逐渐被探索, 酶法去皮、红外线、超声波、脉冲电场、高压处理、低温等离子体等非热加工技术在果蔬加工维持色泽方面起到了积极的作用。然而目前综合两种加工技术对果蔬加工产品色泽影响的讨论和对比研究较少, 明确各法的原理、使用条件、工艺参数及优缺点对于加工高质量的果蔬产品具有重要意义。因此该研究概述了各色素的结构特征以及理化特性, 归纳和比较了热加工与非热加工技术的关键技术点和对果蔬色泽稳定性的影响, 讨论了影响果蔬色泽的关键因素, 最后对果蔬在加工过程中的应对的挑战提出了有关建议, 以期热加工与非热加工技术对果蔬的护色应用提供指导。

关键词: 果蔬; 热加工; 非热加工; 色泽; 稳定性; 综述

文章编号: 1673-9078(2024)05-299-312

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.5.0506

Research Progress on the Changes in Color of Fruits and Vegetables during Thermal and Non-thermal Processing

XIE Zhanghui, GAO Jing*

(College of Food Science, Guangdong Pharmaceutical University, Zhongshan 528405, China)

Abstract: Color is a very important apparent attribute of fruit and vegetable, which is highly related to the natural pigments contained in fruits and vegetables, and is one of the important indicators for judging whether their quality has changed. Thermal and non-thermal processing technologies are widely used in the processing of fruit and vegetable products. Traditional processing technology of fruit and vegetable are mainly thermal processing such as hot peeling, blanching, alkali peeling, drying and frying. The high temperature used in processing can easily cause irreversible effects on the color and quality of fruit and vegetable. In recent years, novel thermal and non-thermal processing technologies have been gradually explored. Non-thermal processing technologies such as enzymatic peeling, infrared treatment, ultrasonic treatment, pulsed

引文格式:

谢章荟,高静.果蔬色泽在热加工和非热加工技术中的变化研究进展[J].现代食品科技,2024,40(5):299-312.

XIE Zhanghui, GAO Jing. Research progress on the changes in color of fruits and vegetables during thermal and non-thermal processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 299-312.

收稿日期: 2023-04-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(22078070); 广东省基础与应用基础研究面上项目(2019A1515010640); 广东省教育厅重点项目(2022ZDZX4025)

作者简介: 谢章荟(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: sgsyxzh@126.com

通讯作者: 高静(1985-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品活性物质的分离提取及应用, E-mail: gaojing@gdpu.edu.cn

electric field, high-pressure treatment and cold plasma have played a positive role in maintaining the color of fruit and vegetable processing. However, currently there are fewer discussions and comparative studies on the impact of the two processing technologies on the color of processed fruit and vegetable products, and it is of great significance to clarify the principle, conditions of use, process parameters, and advantages and disadvantages of each method for processing high-quality fruit and vegetable products. Therefore, this paper outlines the structural characteristics and physicochemical properties of each pigment, summarizes and compares the key technical points of thermal and non-thermal processing technologies and their effects on the color stability of fruits and vegetables. Finally, some suggestions are put forward to address the challenges during the processing of fruit and vegetable, to provide guidance for the application of thermal and non-thermal processing technologies in color preservation of fruits and vegetables.

Key words: fruits and vegetables; thermal processing; non-thermal processing; color; stability; review

色泽在果蔬产品的生产加工中起着重要指示作用,可作为果蔬综合品质是否达到理想程度的外观指标,是果蔬分级的重要标准之一。果蔬呈色三要素分为光源(可见光)、物体(物体微观结构与色素组成)和人眼(或者其他感光设备),而每一种色泽是由色相、明度和饱和度进行表示的^[1]。包括 L^* (亮暗,+表示偏白,-表示偏暗)、 a^* (红绿,+表示偏红,-表示偏绿)、 b^* (黄蓝,+表示偏黄,-表示偏蓝)、 ΔE (总色差值)、 h° (色相)等指标。在果蔬加工过程中保持原料的原色是一种流行趋势,因此保持果蔬中天然色素成分的稳定性至关重要^[2]。果蔬产品鲜艳的色泽往往表明其含有较高的天然色素含量、营养价值与生物活性功能。因此,近年来越来越多的学者关注和研究不同加工方式对果蔬天然色素稳定性的影响^[3]。果蔬在加工过程中易因各种外源因素变化而导致如类胡萝卜素、叶绿素、花青素等天然色素降解,以及褐变现象的发生。

目前,应用于果蔬的加工技术可分为热加工技术与非热加工技术。热加工技术通过蒸发和热分解方式进行,传统果蔬加工以热加工为主,如热力去皮、热烫、干燥、油炸等,以确保微生物安全和/或酶失活^[4]。但是高温易引起营养物质分解、感官属性降低、色泽变暗、色素分解等,极大地限制了其应用。非热加工技术是在环境温度或亚致死温度下有效的保存处理,从而最大限度地减少对食品营养和质量参数的负面热效应^[5]。主要有红外线、超声波、脉冲电场、高压处理、低温等离子体等,具环保、处理速度快、营养损失小等优势,因此成为果蔬加工应用、绿色发展的新方向,但其仍处在不断发展的起步阶段,工业化应用程度低于热加工技术。现有的研究多集中在单独讨论热加工或是非热

加工技术对果蔬色泽的影响,结合讨论两类加工技术的原理、加工特点和比较色泽变化的研究还较为有限。

因此,本文综述了各色素的结构特征以及理化特性,阐述了常见的果蔬产品热加工技术和非热加工技术的加工特点,总结了不同加工方法对果蔬产品色泽的影响规律,概括了加工过程中影响果蔬产品色泽的关键因素,分析了现如今所面临的挑战,并展望了其未来发展趋势,以期对果蔬产品的热加工与非热加工技术提供参考。

1 果蔬中天然色素分类及性质

天然色素是一种可持续、高生物降解性的色素来源^[6],具有抗氧化、增强免疫系统、抗菌、调节身体内环境等生理功能。天然色素在果蔬中呈现各种色泽或无色,环境变化产生的生化反应可引起色泽的变化。由于来源不同,同一种天然色素可能会有不同的颜色和强度。果蔬中的天然色素根据其结构分为四大类:异戊二烯衍生物、卟啉衍生物、多酚类、酮类及醌类衍生物。由于天然色素的不稳定性,果蔬在加工过程中容易受如光照、温度、氧化、pH值等影响而发生褪色、变色等方面的变化,严重影响了果蔬产品的感官和营养品质。

1.1 异戊二烯衍生物类色素

异戊二烯衍生物类色素的分子间含有大量C=C的共轭体系,植物可通过类异戊二烯的次生代谢途径生成以异戊二烯为单位聚合而成的共轭双键长链色素,果蔬中以类胡萝卜素为代表^[2]。不考虑顺式和反式异构体的情况下,在食物中已经发现约100种类胡萝卜素^[7]。类胡萝卜素属脂溶性的色素,在400~500 nm波长范围内吸光性能强,能呈现出红、

橙、黄色。根据分子结构中是否含有氧原子，类胡萝卜素可分为不含氧即只含碳氢元素的胡萝卜素，如番茄红素、 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素；以及含氧的类胡萝卜素即其氧化衍生物，如玉米黄质、叶黄素、虾青素等。类胡萝卜素主要存在于深绿色或红黄色的蔬菜和水果中，如胡萝卜、甘薯、芒果、哈密瓜等，其特殊分子结构赋予了其减少氧化应激、视力保护、抑制癌细胞生长与增殖、保护心脏等多种重要功能^[8,9]。相关研究表明，光、热、氧、酸性条件使类胡萝卜素处在不稳定状态^[10]，易氧化降解或异构化，在 pH 值和水分含量较低时受影响程度更高，从而造成果蔬原料在加工过程中的褪色和风味劣变。

1.2 卟啉衍生物类色素

卟啉是一类由四个吡咯类亚基的 α - 碳原子通过次甲基桥 (=CH-) 互联而形成的大分子杂环化合

物，在果蔬中最具代表性的卟啉衍生物类色素为叶绿素。叶绿素是地球上含量最为丰富和重要的色素，可减少和清除自由基，削弱脂质防止其过氧化，安全性极高，因此广泛用于医疗、食品、化妆品等行业^[11-13]。高等植物中的叶绿素分为蓝绿色的叶绿素 a 和和黄绿色的叶绿素 b，比例为 3:1^[14]。叶绿素吸收大部分的红光和紫光但反射绿光因而呈现出绿色，在光合作用的光吸收中起核心作用。市面上常见的绿色果蔬如猕猴桃、苦瓜、豌豆、芹菜等均含有丰富的叶绿素，绿色程度即叶绿素含量的高低往往能客观反映果蔬营养品质的优劣，叶绿素的降低是绿色植物对外界不利环境最敏感的反应。在果蔬加工过程中由于叶绿素的性质不稳定，热、光、酸（3.5~5.0）、氧、酶等环境因子都易使叶绿素发生降解反应生成一系列分解代谢物^[15]。在加工和储存过程中可能发生的降解导致这些叶绿素成分转化为磷叶绿素和磷绿素，并通常伴随着从绿色到橄榄棕色的变化^[16]。

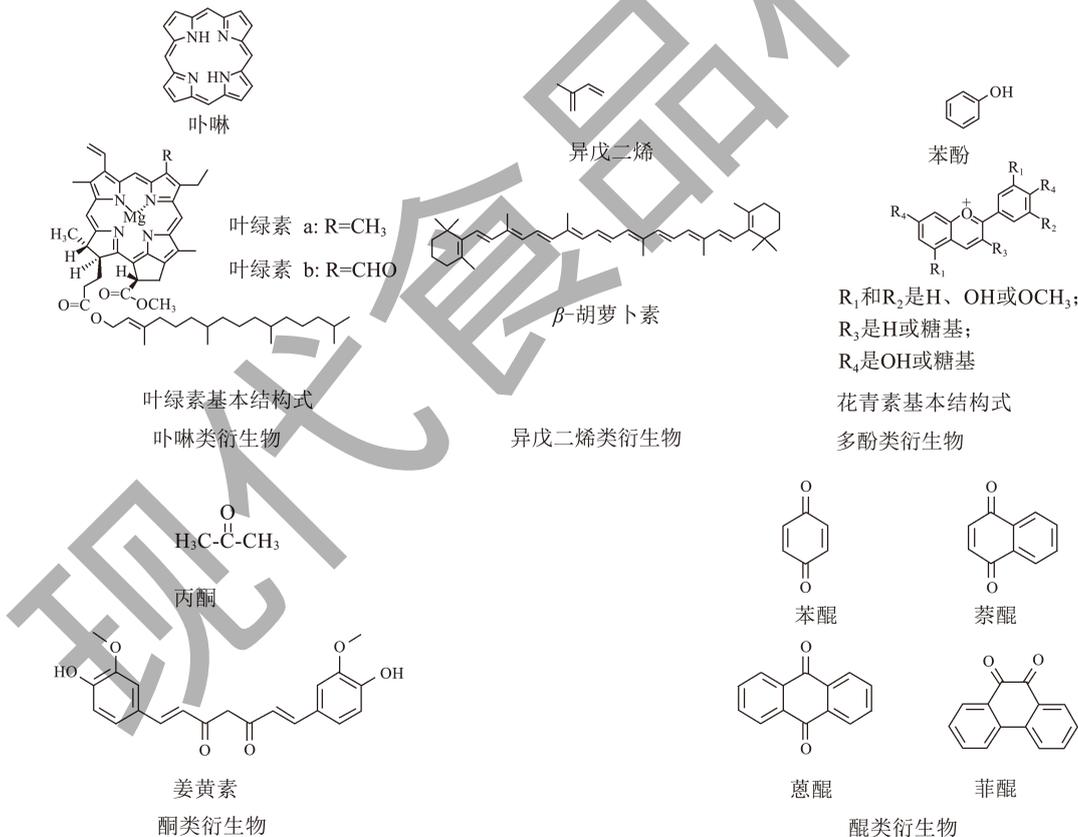


图 1 果蔬中天然色素的代表性物质与结构

Fig.1 Representative compounds and structures of natural colorants in fruits and vegetables

1.3 多酚类色素

多酚类物质是果实在生长代谢过程中的一种次生代谢产物，是所有含酚官能团物质的总称，因具

有多个酚基团而得名，基本碳架结构组成是 2- 苯基苯并吡喃和多羟基^[17]。食品中多酚类化合物有成为人类“第七大营养素”之称^[18]，具有抗氧化、降

血糖、增强免疫功能、抑制细菌与癌细胞生长等作用^[19]。多酚类物质可分为黄酮类、花青素类和单宁三大类^[20]。黄酮类物质为浅黄以至无色。单宁也称鞣酸,具有涩味、能与金属离子或氧化而产生黑色。花青素是一类水溶性植物色素,包括花青素类色素、花黄素类色素和儿茶素类色素三种类型,广泛存在于多种深红色、紫色和蓝色的蔬菜和水果中,如浆果、红色水果及蔬菜等^[21]。糖基化和酰基化产生了花青素的多样性^[22]。花青素易降解,pH、氧气、温度和光照等环境因素都会影响它们的稳定性,导致褪色或形成无色或棕色化合物^[21]。因此,以多酚类化合物为主要呈色色素的果蔬在加工过程中常发生酚类含量降低和色泽褐变的问题^[23],成为在果蔬加工工业中应用的瓶颈。

1.4 酮类及醌类衍生物类色素

酮及醌衍生物色素的种类较少。常见的酮类衍生物色素有红曲色素、姜黄素、甜菜红素等。红曲色素是红曲霉菌在代谢过程中产生的一类聚酮体化合物的混合物^[24],有红色系和黄色系两大类^[25],由羰基、醚键等官能团、共轭双键结构(-C=C-C=C-)发挥出降血脂、抗氧化、抗炎等作用^[26]。姜黄素是从姜科、天南星科中的一些植物根茎中提取的一种黄色二酮类化合物,现代医学研究发现其具有抗氧化、免疫调节、抗癌和预防阿尔茨海默病等作用^[27]。姜黄素易受到光、热、氧、酸、碱等因素降解,因此限制了其应用效果与使用范围^[28]。甜菜红素是水溶性含氮色素^[29],其来源包括甜菜根、苋菜和红肉火龙果等。研究表明光、热、氧、和pH值变化等因素都会影响其稳定性^[30]。醌类化合物是一类含有两个双键的六碳原子环状二酮结构的芳香族有机化合物,主要包括苯醌、萘醌、菲醌、蒽醌等类型。天然的醌类化合物多为橙色或橙红色结晶,少数呈紫色,是中草药^[31,32]、芦荟^[33]、核桃^[34]中重要的化学成分之一。果蔬褐变也和植物中多酚被多酚氧化酶氧化为醌类最终产生黑色素有关^[35]。

2 热加工技术对果蔬色泽的影响

热加工技术在果蔬加工中占据主要地位,以热能为基础,包括热力去皮、碱液去皮、热烫、干燥、油炸等,具体应用实例如表1所示。

2.1 热力去皮

热力去皮常将果蔬浸泡在高温的水或蒸汽中用

短时高温处理,表皮迅速升温,果皮膨胀破裂,与内部果肉组织分离,然后迅速冷却去皮。其通常会导​​致果蔬肉糊状、硬度降低和高剥离损失^[5]。Rock等^[36]研究了热力去皮对西红柿番茄红素损失的影响,指出果皮和“红层”(厚度为1.4~3.2 μm)作为废物的损失会导致80%~90%番茄红素含量的损失。类似的是,Ben等^[37]将黄柑橘在95℃热水漂烫10 min后观察到果皮从深橙色部分变色为淡橙色。这是因为发色团在高温的影响下解体导致的胡萝卜素在细胞脂质中溶解。同样,在另一研究中显示250℃蒸汽热力去皮的黄桃的类胡萝卜素含量与超声功率去皮和碱液去皮相比最低,为56.94 μg/g^[8]。过高的温度诱导类胡萝卜素异戊二烯结构的共轭双键受热分解和构象改变,使类胡萝卜素含量降低。热力去皮时高温产生的内部压力使果皮与果肉作为废物损失,同时色素易在高温下降解、结构改变,造成较大的色素损失。由此可知热力去皮需要精确控制时间和温度,最大程度地降低脱皮损失以减少色素、色泽的损失。

2.2 漂烫

漂烫是果蔬加工常见的预处理方式,其中热水漂烫由于操作简单、投入小、受热均匀等特点在果蔬漂烫处理中应用广泛^[54]。漂烫处理能够使多种酶失活、排除氧气、抑制酶促褐变保护果蔬色泽。Araújo等^[39]研究中98℃漂烫处理后的羽衣甘蓝总叶绿素保留率增加,褐变程度降低。西兰花也被证实在加热时颜色较低的叶绿素前体转化成了更为可见的绿色化合物,观察到绿色度的增加(-a*值)^[40]。然而高温或较长的处理时间也可能带来不必要的颜色改变^[55,56]。如刘小莉等^[41]用沸水热烫处理蓝莓得到的果汁中,花色苷在高温下溶出并与其他有机物形成络合物使果汁颜色加深。姜玉等^[42]也发现热水漂烫显著降低了毛豆中的叶绿素含量,这可能是因为叶绿素酶活性被激活,致使叶绿素形成水溶性脱植醇叶绿素进入水中导致含量下降。Shao等^[43]也报道了柑橘中的类胡萝卜素在蒸汽短时间烫漂时被热解。由此可知漂烫的高温也会破坏细胞结构,增强褐变反应以及色素分解^[57]。因此应用时需综合考虑果蔬天然色素性质、处理温度和处理时间,或是采用微波漂烫、欧姆漂烫等低处理强度的新型漂烫方式维持果蔬色泽。

表 1 热加工技术对果蔬色泽的影响

加工工艺	加工目的	加工条件	加工果蔬	加工产品	主要色素	色素色泽变化	参考文献
热力去皮	去除果实外皮	水浴($\geq 98^\circ\text{C}$, 15~60 s,)	西红柿	加工鲜果	番茄红素	果皮和“红层”损失, 番茄红素损失	[36]
		95°C , 10 min	柑橘	加工鲜果	类胡萝卜素	总色差增加, 果皮从深橙色变为淡橙色	[37]
		250°C , 3.5 min	黄桃	加工鲜果	类胡萝卜素	类胡萝卜素含量降低	[38]
漂烫	颜色保护	98°C 水, 1 min	羽衣甘蓝	加工鲜果	叶绿素	总叶绿素保留率提高 5%, 褐变程度降低	[39]
		沸水, 2 min	西兰花	加工鲜果	叶绿素	绿色度的增加 ($-a^*$ 值)	[40]
		沸水热烫 2 min	蓝莓	加工鲜果	花青素	L^* 值、 a^* 值下降, b^* 值为负	[41]
		95°C , 2 min	毛豆	加工鲜果	叶绿素	叶绿素的含量降低, 保留率仅为 58.9%	[42]
		100°C 蒸汽烫水 90 s	柑橘	加工鲜果	类胡萝卜素	类胡萝卜素被热解	[43]
热加工	去除果实外皮	NaOH: 4% 质量分数, 97°C , 30 s	番茄	加工鲜果	番茄红素	番茄红素的含量下降	[44]
		0.50 mol/L NaOH , 90°C , 120 s	桃子	加工鲜果	花青素	L^* 值下降, a^* 值增加, b^* 值减少, 呈褐色	[45]
		KOH: 18% 质量比, 95°C , 40 s	甜菜根	加工鲜果	甜菜红素	L^* 值显著降低, b^* 指数降低, 发红强度显著增加	[46]
		1.5 m/s , 70°C	金梨果	加工鲜果	类胡萝卜素	L^* 、 a^* 、 b^* 值均降低, 总类胡萝卜素含量最低	[47]
干燥	降低水分含量	$300\text{ W } 70^\circ\text{C}$, 500 W 90°C	蓝莓	加工鲜果	花青素	蓝值、色调角显著降低	[48]
		热风干燥: 65°C ; 微波干燥: 1 kW	甘蓝	加工鲜果	叶绿素	亮度值降低, 产生褐变或色泽加深	[49]
		80°C , 50 min	柿子	果蔬干	类胡萝卜素	色泽金黄、形状完整	[50]
油炸	降低果实水分含量, 给予金黄色色泽	烫水 1 min 后油炸至酥脆	深橘色红薯	加工鲜果	类胡萝卜素	类胡萝卜素保留率减少	[51]
		120°C 油炸 13 min	木瓜	果蔬干	类胡萝卜素	类胡萝卜素的降解率均增加	[52]
		170°C 油炸	红肉马铃薯	果蔬干	花青素	花青素含量损失 84%	[53]

表2 非热加工技术对果蔬色泽的影响

Table 2 Effect of non-thermal processing technology on the color of fruits and vegetables

加工工艺	加工目的	加工条件	加工果蔬	加工产品	主要色素	色泽变化	参考文献
酶法去皮	去除果实外皮	复合酶制剂(酶质量浓度为0.55%), 料液比1:5, pH值3.5、45℃、45 min	黄桃	加工鲜果	类胡萝卜素	果肉损失少, 色泽鲜艳	[62]
		酶质量浓度0.50 g/L, 45℃, 40 min, pH值3.5	黄桃	加工鲜果	类胡萝卜素	果肉损失少, 色泽鲜艳	[63]
		45℃, 酶质量浓度5 g/L, <200 min	梨	加工鲜果	花青素	L*值降低但a*值、b*值较为稳定	[64]
超声波处理	杀菌 辅助干燥 去除果实外皮	混合酶液(45℃, 3.1 g/L) 35 min	猕猴桃	加工鲜果	叶绿素	L*值仅次于手工去皮, a*值、b*值均高于其余方式	[65]
		60 W, 33 kHz, 20 min	樱桃	加工鲜果	花青素	总色差增加最少, 有效保持鲜红色	[66]
		35 kHz, 10 min/20 min/30 min	猕猴桃	加工鲜果	叶绿素	有利于保色, 叶绿素含量增加	[67]
		40 kHz, 2 700 W, 95℃下处理 60 s	番茄	加工鲜果	番茄红素	L*值均高于热水和碱液去皮, b*值均无显著性差异。番茄红素含量较高, 达到将近 35 MG/KG	[68]
红外处理	去除果实外皮 降低表面水分含量	5.25 W/cm ² , 75 mm, 56 s	红枣	加工鲜果	红枣色素	脱皮损失和颜色变化明显降低	[69]
		1.46~0.70 cm/s, 48 mm, 41~85 s, 0.56 m ³ /min, 0.6 kPa	番茄	加工鲜果	番茄红素	L*值略有下降。a*/b*值均高于0.9	[5]
		50℃, 2 m/s, 1 125 W, 12 cm, 1~4 μm	桑葚	加工鲜果	花青素	L*值降低, a*和b*值分别升高和降低, 色泽变黄橙色	[70]
脉冲电场(PEF)	预处理提高果汁产量 辅助干燥 观察类胡萝卜素影响	16 μs, 4.0 Hz	西红柿	果蔬汁	番茄红素	15-顺式番茄红素的含量增加了 63%~65%	[71]
		10 kJ/kg, 3 kV/cm	蓝莓	果蔬汁	花青素	果汁中花青素含量达到最大增量(55%)	[72]
		50、60、70℃, 10 V/cm, 100 μs, 10 Hz, 421 s	猕猴桃	加工鲜果	叶绿素	绿色指数随温度升高而降低	[73]
高压处理	提高果汁产量	0.38 kJ/kg, 200 kV/m	番茄	加工鲜果	类胡萝卜素	类胡萝卜素积累。L*值显著下降, h°值上升	[74]
		HPH: 246 MPa, 99℃, <1 s; HPP: 600 MPa, 46℃, 5 min	番茄	果蔬汁	类胡萝卜素	保持了β-胡萝卜素和总番茄红素的含量	[75]
		220 MPa/1、3、5次/20℃	黑加仑	果蔬汁	花青素	L*值增加, a*值降低, 花青素降解程度最高	[76]
低温等离子体	杀菌	HPH: 20 MPa, 10 min	南瓜	果蔬汁	类胡萝卜素	果汁中的类胡萝卜素浓度分别达到 90%~98%	[77]
		3 min, 5 cm ³ , 0.75 dm ³ /min	石榴	果蔬汁	花青素	花青素含量增加了 21%~35%	[78]
		45 kV, 20℃, 1 min	草莓	加工鲜果	花青素	花青素含量在第1天至第3天显著增强	[79]
		25 kV, 110 s	猕猴桃	加工鲜果	叶绿素	L*值最高, a*值最低, 色泽损失最小	[80]

2.3 碱液去皮

碱液去皮利用苛性钠对果蔬组织的腐蚀和降解作用将果皮脱除。该方法的去皮性能取决于操作参数,如温度、碱液浓度和处理时间^[53]。例如 Gao 等^[44]研究了碱液浓度以及处理时间对番茄中番茄红素降解和损失的影响,指出碱液浓度越高(4%~12%的质量浓度范围),果肉红色层损伤越严重,番茄红素含量越低。同样, Wang 等^[45]报道了桃子碱液去皮中处理时间、碱液浓度及温度都会对桃子的色泽造成影响。温度升高有利于碱液在桃子中扩散;碱液浓度升高,腐蚀性增大导致果皮中细胞壁的降解;处理时间偏短或是偏长都会造成桃子的果肉褐变,这归因于多酚氧化酶对酚类化合物的酶促褐变。类似的是, Okonkwo 等^[46]指出碱液浸渍使甜菜根的色泽显著变暗,黄度降低,样品表面呈现褐色。这可能与抗坏血酸降解或热加热引起的美拉德反应在果实表面形成暗化合物有关^[58]。因此,碱液去皮处理使得果蔬表面温度升高,热碱液扩散引发剥离区域的色素溶解以及果皮的脱落,导致抗坏血酸降解、美拉德反应或酶促褐变,形成深色化合物从而影响果蔬的色泽。

2.4 干燥

目前,应用于果蔬的干燥技术可分为热干燥技术和非热干燥技术。热干燥技术主要包括热风干燥、红外干燥、微波干燥等。非热干燥技术如真空冷冻干燥采用低温低压,可较好的保留天然色素和原料的新鲜度。热干燥过程涉及热和物质的传递,果蔬直接暴露在热、氧条件下不利于色泽品质的保持。例如金色浆果 (*Physalis peruviana* L.) 在 70 °C 下对流干燥处理后的色度值均降低且具褐变现象,褐变的产生是果实中多酚氧化酶在氧气存在下对酚类化合物的作用^[47]。蓝莓在较高的温度下干燥,存在细胞损伤导致的液体渗漏以及焦糖化反应,使得蓝值、色调角显著降低^[48]。各种干燥方式制备的脱水甘蓝亮度值均变小,长时间处在高温及微波功率过大的环境中会产生褐变、颜色加深甚至焦化现象^[49]。但相反的是,干燥可以形成 Amadori 化合物和美拉德反应产物加深色泽,由此提高了西红柿的适口性和外观价值^[59]。综合而言,热干燥技术多引发果蔬褐变或焦化反应加深色泽,并可能使天然色素发生降解,因此应对干燥温度和干燥时间进行优化。

2.5 油炸

油提供快速而均匀的传导热,油炸可赋予食品特有的风味和金黄色泽。例如低温真空油炸的柿子脆片整体颜色色泽均匀,呈诱人的金黄色^[50]。但油炸过程中非酶褐变(美拉德反应和焦糖化)和天然色素(类胡萝卜素、番茄红素、花青素等)的热降解常导致果蔬颜色的变化^[60]。Vimala 等^[51]研究中深橘色红薯油炸后胡萝卜素保留率减少,这是由加工过程中酶氧化程度的差异以及维生素 A 前体的浸出导致的。Soto 等^[52]报道了真空油炸使木瓜所有类胡萝卜素的降解率增加,其中番茄红素的降解率增加了 45%,这归因于油吸收使番茄红素的晶体结构溶解。Rytel 等^[53]也指出较高温度和较长时间的油炸处理会增加红肉马铃薯中花青素的损失量,具体表现为 150 °C 和 170 °C 下油炸花青素的损失率分别为 65% 和 84%。这是因为除了酶氧化影响外,花青素在高温下会迅速降解,出现共价键断裂、花青素糖苷的水解等现象^[61]。因此,油炸导致对热敏感的天然色素构型改变、降解,并引发褐变反应,但这种褐变反应的积极或者消极作用由物料原始色泽决定。

3 非热加工技术对果蔬色泽的影响

非热加工技术被认为是热加工技术的潜在替代方案,通过降低处理温度、处理时间等参数的处理强度实现对色泽色素的保持,在食品品质和安全性提高有着传统热加工技术无法比拟的优越性,包括酶法去皮、超声波、红外线、脉冲电场、高压、低温等离子体等,具体应用实例见表 2。

3.1 酶法去皮

酶法去皮是一种利用酶制剂在特定条件下除掉果蔬外皮的果蔬加工方法,通过酶解作用实现果肉和果皮的脱离。现已有研究表明使用酶液^[63]或是复合酶制剂^[62]对黄桃进行去皮处理均可良好保持其黄色的鲜艳色泽。酶法去皮也应用于红巴特利特梨的去皮,去皮后加工的工业果泥颜色质量增加,但该处理需要很长的处理时间(200 min)。酶促变色参数 a^* 的动力学模型指示酶浓度增加和温度升高时样品颜色变化增大^[64]。张群等^[65]采用了混合酶液对猕猴桃进行去皮处理,结果显示酶法去皮对果实颜色影响较小,果肉的亮度、绿值和黄值都较高,绿色特征得到保持。相对热力去皮、碱液去皮等含有高温过程的处理方式,酶法去皮处理条件温和可以

更温和、更有效地破坏细胞壁。处理过程中的酶浓度、溶液温度和 pH、处理时间至关重要^[81]，酶浓度、溶液温度过高、pH 过酸过碱或是处理时间过长都会果皮蜡质层和果胶等结构性多糖发生化学变化，使得果皮细胞壁刚度下降，果肉色素析出增加，从而影响果蔬的质构和色泽。

3.2 超声波处理

超声波在液体系统中应用的热机制、机械机制和空化机制作用可以发生各种物理、化学或生物反应，降低酶促和非酶促褐变，从而影响色泽^[82]。Muzaffar 等^[66]研究表明超声杀菌处理后的樱桃在储存期间可有效保持鲜红色。提到除超声的空化效应导致花青素降解外，产生的剪切力会破坏表皮的结构、产生孔洞，从而影响色泽。有研究表明，未经处理的猕猴桃在干燥后叶绿素降解 57%。而进行 20 和 30 min 的超声处理有助于增加叶绿素的含量，表明超声预处理对叶绿素含量有积极影响^[67]。同样，番茄经超声去皮后果实亮度提高，且番茄红素含量高达将近 35 mg/kg，超声产生的自由基虽然对番茄红素降解具有一定的促进作用但并未导致其黄色维管束的暴露^[68]。然而超声功率过大可能会导致色素的溶出甚至构象改变^[83]。综合来说，与常规的热处理相比，超声处理会产生自由基和声化学物质^[84]，声压的周期性变化和空化气泡的破裂均会加快酶活性降低或是丧失^[85]，降低色素损失和褐变。因此，超声功率和时间对果蔬色泽的变化起到决定性的作用。

3.3 红外线处理

红外线是波长为 0.75~1 000.00 μm 的不可见光^[86]。与传统加热方式相比，红外辐照技术具有能量利用率高、安全环保等多种优势，在果蔬灭菌、杀菌、干燥和去皮等加工领域中得到了广泛应用^[87]。Wang 等^[69]研究了红外去皮对红枣色泽的影响。与碱液去皮枣 ($\Delta E > 12.17$) 的总色差变化相比，红外去皮枣的颜色变化 ($\Delta E > 8.38$) 明显降低。其中红外辐射强度、加热时间、发射器间隙是关键加工参数。Vidarthi 等^[5]对番茄进行红外去皮，结果显示处理后番茄的平均亮度略有下降但脱色损失远低于碱液去皮番茄。并指出随着红外辐射停留时间的增加，番茄表面温度升高，发生的褪色可能归因于非酶促美拉德反应的褐变^[88]。刘启玲^[70]发现桑葚经辐射波长为 1~4 μm 的中短波红外干燥后，其

总花色苷含量较高可达 153.6~195.6 mg/100 g。总的来说，红外线处理具有低穿透深度的特点，加热速度快，传热效率高，因此对组织破坏性小，可解决热加工技术中物料受热时间长导致的天然色素降解以及褐变问题，较好地保持果蔬原料新鲜度、细胞结构以及热敏性色素成分。

3.4 脉冲电场处理

脉冲电场 (Pulsed Electric Fields, PEF) 以较高的电场强度 (10~50 kV/cm)、较短的脉冲宽度 (0~100 μs) 和较高的脉冲频率 (0~2 000 Hz) 对食品进行处理。用中等强度 PEF 处理的西红柿制备的果汁中 15-顺式番茄红素的含量增加了 63%~65%^[71]。类似的是 Pataro 等^[72]研究显示以较高的 PEF 能量 (10 kJ/kg) 对蓝莓进行预处理生产果汁可增加果汁中花青素含量，果汁中的花青素分布相似，证实了施用 PEF 后花青素未降解。PEF 预处理还可以影响干燥动力学，有效改善热干燥中物料受热不均匀的问题。较低温度 (50 $^{\circ}\text{C}$) 干燥时单独 PEF 预处理对猕猴桃颜色的影响最低^[73]。还有学者研究，经 PEF 处理后番茄的总类胡萝卜素浓度和类胡萝卜素单体浓度显著提高 23%~171%，这是由果实细胞结构完整性的丧失引起的，然而强烈的处理条件可能会诱导细胞氧化和褐变^[74]。相关研究指出，PEF 处理的外加电场会改变细胞膜的通透性^[44]，细胞中色素更易溶出但并不降解。但过高的处理强度会损害细胞活力和细胞壁的结构完整性。因此，电场强度和后处理存储条件是 PEF 可行应用的必要条件。

3.5 高压处理

高压处理是一种采用 50~1 000 MPa 压力处理食品的非热加工技术^[89]，主要包括高静压 (HHP)、高压加工 (HPP)、超高压 (UHP)、高压二氧化碳 (HPCD)、高压均质 (HPH)^[76]。商业化果蔬产品多以果酱、果泥和果汁的形式出现。Yan 等^[75]研究表明，两种高压技术 (HPH 和 HPP) 对加工番茄生产的番茄汁中总番茄红素含量和异构化程度无显著影响。但是提及高压会引起细胞破坏以及颗粒尺寸改变造成光的反射和吸收改变，导致色素渗出和颜色变化。Marszałek 等^[76]指出 HPH 均质化过程中氧气的参与引起的氧化反应会导致花青素的降解，但相反的是研究中的工艺条件引起的黑加仑果汁颜色变化大多很小 (总色差值在 0.49~3.33 范围内)。此外，Atencio 等^[77]以 HPH (20 MPa, 10 min) 条件加工

南瓜生产的南瓜汁亮度值和色调值均显著高于对照组,这可能是因为高压导致的细胞强烈机械破坏促进类胡萝卜素在水中释放及回收,使果汁更亮、更红、更黄。因此,高压处理可以显著改变果蔬的结构和质地,形成悬浮颗粒或是色素溶出影响呈色,也有可能因氧气参与引起酶促褐变和非酶褐变。

3.6 低温等离子体

低温等离子体(Cold Plasma, CP)技术是一种新兴的杀菌保鲜技术,兼具高能电子辐射、臭氧氧化和紫外光解3种作用^[90],可减少热影响对食品营养和质量特性的改变^[50]。大多数关于水果和果汁的研究都使用了空气或改良的大气^[91]。新鲜石榴汁经低温等离子体在时间3 min,样品容量5 cm³,气体流速0.75 dm³/min参数条件诱导后,花青素含量增加了21%~35%^[78]。鲜切草莓经45 kV DBD等离子体杀菌处理后花青素含量在第1天至第3天显著增强,花青素增强关键酶的活性也得到增强^[79]。解梦梦等^[80]使用低温等离子体对鲜切猕猴桃进行杀菌处理,结果显示110 s、25 kV处理组的猕猴桃片的色泽损失最小。其中叶绿素的损失可能是因为化学反应物质、带电粒子和低温等离子体产生的紫外光子破坏了共价键和细胞膜,从而促进了叶绿素的释放^[92]。虽然低温等离子体存在灭菌工艺参数、食品种类和激发装置等影响实验结果的不确定因素^[93],但是其低温短时杀菌、不会对新鲜果蔬的营养物质和感官特性产生负面影响的优势为其在果蔬加工的应用带来了巨大的潜力。

4 影响果蔬热加工与非热加工色泽的关键因素

对比归纳了热加工和非热加工技术的技术特点以及对果蔬色泽的影响规律,可知加工过程中的环境pH值、温度、酶、氧气以及果蔬原料特性和产品需求等因素决定了果蔬产品的呈色以及加工技术的选择。

4.1 环境pH值

果蔬加工时的pH值是呈色的关键因素。例如Koca等^[94]指出在漂烫过程中热烫液pH值的增加可以有效减少豌豆叶绿素a和叶绿素b的降解,其归因于叶绿素在碱性条件下会反应生成叶绿酸和叶

绿酸钠两种较稳定的绿色化合物保持绿色。类似的是Lee等^[95]研究发现在热加工时,pH值为2.0~3.0时制备的果酱中总花青素损失33%~35%,低于在pH值为3.5~4.0时损失的40%~48%。这表明较低的pH值可以保护花青素、减少热加工带来的影响。Lakshan等^[96]开发了一种含花青素的蓝豌豆花提取物饮料,饮料的L*、a*、b*值随着pH值从1到14的增加而下降,色泽由红色逐渐变为紫色最后变为蓝色。这是因为花青素的结构会因为pH值的升高改变,红色黄酮阳离子脱质化形成紫色中性醌类碱,最后再由于阴离子和天然醌类碱的存在,颜色变成蓝色^[97]。此外许多研究也表明pH值的不同对非酶褐变反应产物的降解有着不同程度的影响^[35]。因此控制果蔬加工环境的pH值是有利于保证果蔬色泽品质的。

4.2 温度

高温对大部分天然色素的稳定性都具有显著的影响。例如在含有葡萄提取物的模型饮料中,80℃下的总单体花青素降解率明显高于60℃和40℃处理,分别为 1.00×10^{-3} 、 4.84×10^{-4} 和 3.38×10^{-4} ^[98]。这说明在加工含花青素的果蔬时应优先采取低温短时操作,以避免或减少花青素的热降解。Soto等^[52]在研究中指出温度的升高使得类胡萝卜素的降解加快。其中 β -胡萝卜素会在高温下发生环氧化,破坏其稳定的结构形成中间物,从而导致碳链断裂生成香气物质^[99]。Cerreti等^[100]研究在25、40和60℃温度下处理姜黄素模型饮料后,姜黄素含量随处理温度的上升而逐渐下降。由此可见,高温易使天然色素出现降解和异构化,不利于果蔬色泽的保持。另外,温度的升高会加快酶促褐变中酚酶催化酚类物质形成醌及其聚合物的反应过程以及非酶褐变的反应速率。因此采用低温的非热加工技术或是调整热加工中的加工温度和时间可以更利于果蔬的色素保留以及褐变程度的降低。

4.3 酶

在果蔬加工过程中,果蔬内源性酶产生的酶促褐变以及外源性添加的酶均可产生色泽品质的变化。酶促褐变发生的基本条件是酚类物质、氧化酶和氧气的存在^[101,102],植物内蕴含的大量酚类物质在组织受损或处于逆境时,易被多酚氧化酶催化最终导致黑色或褐色物质的生成^[103]。除果蔬去皮外,复合酶以及酶制剂的使用还用于软化果实使色素溶

出。例如 Heffels 等^[104]施用的聚半乳糖醛酸酶和果胶裂解酶可增强富含花青素的浆果越桔的细胞壁降解程度,促进细胞中花青素的释放;Mäkälä 等^[105]采用聚半乳糖醛酸酶、果胶酶和 β -葡聚糖酶的酶制剂生产的黑加仑果的花青素的含量分别比非酶果汁中的相应值高了9倍。Pui 等^[106]优化使用纤维素酶制剂生产的菠萝蜜汁颜色比非酶处理的样品更黄,这可能是纤维素酶水解纤维素破坏细胞壁网络水解释放类胡萝卜素造成的。参与果蔬加工的酶实际为蛋白质,因此在实际应用中需要注意温度和pH值范围以及氧气的存在,或是设定最佳的反应条件使各种酶充分发挥作用。

4.4 其他因素

除上述因素外,氧气、原料性质、产品需求等因素也纳入色泽影响的范围。氧气影响酶促褐变、部分非酶褐变以及色素的稳定性,因此采用真空油炸、真空冷冻干燥等加工技术可减少氧气在加工环境中的含量,减少褐变反应,更好的保持色泽^[50,60,107]。有时果蔬原料的性质提供了加工技术的方向。成熟度高、饱满的果实如黄桃^[62,63],或是果皮不适宜食用的果蔬如猕猴桃等^[65]可选择热力去皮、酶法去皮等方式去除外皮;水分含量高的果蔬通常采取去除水分和保留水分两个加工方向,分别对应更适宜采用热加工以及非热加工技术。还有一个关键点在果蔬产品的品质需求。例如鲜切果蔬作为一种轻加工产品,对色泽和营养品质有着较高的要求。因此会优先选择如脉冲电场、低温等离子体处理等温度低、具有杀菌作用、利于保持色泽的非热加工技术;果蔬干的褐变代表了酥脆的口感,具一定程度的积极作用。因此即使在非热干燥技术可更好维持色泽的情况下,消费者也可接受有轻微褐变的热干燥产品。

5 结论与展望

传统的热加工技术在果蔬加工中被广泛应用,但其存在诸如导热速度慢、耗时长、营养物质损失较大、色素热降解等缺点。近年来超声波、红外线、脉冲电场、高压、低温等离子体等新兴非热加工技术悄然兴起。这些技术具有组织破坏性小、处理效率高、色泽色素保持良好等优势,但大多处于实验室探索研究阶段,商业化应用程度普遍偏低。

日前销售的果蔬产品多样化,各产品含有的天

然色素以及色泽品质需求并不相同。因此今后可以加深对天然色素物理化学性质、果蔬褐变机理以及热加工、非热加工技术原理的研究,系统分析分子结构和变化机制的相互关系,针对不同的果蔬产品,综合果蔬自身性质以及各技术的操作条件进行选择和优化,提高加工的整体质量(果蔬的色泽、风味、营养和质地等)。加工过程中的护色措施也应当引起重视。例如,在生物技术方面应用酶制剂等天然物质处理维持色泽;在化学技术方面,使用酸性溶液缓解色泽的不良变化;在物理技术方面,提倡在低温、真空环境下加工。此外,联合多种技术加工的探讨更具有研究的意义,从而可以更大程度地减少热加工技术对果蔬色泽和营养品质的不良影响,推动绿色安全的非热加工技术在果蔬加工中的应用。

参考文献

- [1] WANG L, SHI Y, WANG R, et al. Antioxidant activity and healthy benefits of natural pigments in fruits: a review [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(9): 4945.
- [2] 吕莹,陈芹芹,李旋,等.干燥对果蔬加工色泽影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(13): 368-377.
- [3] TAVARES I M C, SUMERE B R, GÓMEZ-ALONSO S, et al. Storage stability of the phenolic compounds, color and antioxidant activity of jambolan juice powder obtained by foam mat drying [J]. *Food Research International*, 2020, 128(C): 108750.
- [4] CANO-LAMADRID M, ARTÉS-HERNÁNDEZ F. Thermal and non-thermal treatments to preserve and encourage bioactive compounds in fruit- and vegetable-based products [J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3400.
- [5] VIDYARTHI S K, EL-MASHAD H M, KHIR R, et al. Tomato peeling performance under pilot scale catalytic infrared heating [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 246: 224-231.
- [6] FRIED R, OPREA I, FLECK K, et al. Biogenic colourants in the textile industry—a promising and sustainable alternative to synthetic dyes [J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(1): 13-35.
- [7] RIBEIRO J S, VELOSO C M. Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: a review [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106374.
- [8] 修伟业,黎晨晨,遇世友,等.类胡萝卜素生物学功能及提高其生物利用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(10): 406-415.
- [9] 高婧宇,谢龙莉,陈楠等.低共熔溶剂在类胡萝卜素提取上的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(1): 352-358.

- [10] AMORIM I S, ALMEIDA M C S, CHAVES R P F, et al. Technological applications and color stability of carotenoids extracted from selected Amazonian fruits [J]. Food Science and Technology, 2022, 42: e01922.
- [11] 郭艳华,张玉敏,李艾华,等.一种天然绿色素改性产物的光热稳定性研究[J].江汉大学学报(自然科学版), 2015, 43(4):303-307.
- [12] 孙婷,王峰.红曲色素在食品中的应用[J].农产品加工, 2019,18:70-72.
- [13] 陈蓉,詹志鹏,李万飞.菠菜中绿色素的提取及其稳定性研究[J].饮料工业,2011,14(5):18-21.
- [14] 温广宇,朱文学.天然植物色素的提取与开发应用[J].河南科技大学学报(农学版), 2003,2:68-74.
- [15] 胡宇微,孙红男,木泰华.提高叶绿素稳定性方法的研究进展[J].食品科技,2023,48(2):49-55.
- [16] AGARRY I E, WANG Z, CAI T, et al. Chlorophyll encapsulation by complex coacervation and vibration nozzle technology: characterization and stability study [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103017.
- [17] 袁莹,李乐,陈静霞,等.多酚类化合物的提取及功效研究进展[J].粮食与油脂,2018,31(7):15-17.
- [18] 凌关庭.有“第七类营养素”之称的多酚类物质[J].中国食品添加剂,2000,1:28-37.
- [19] 唐瑶,陈洋,曹婉鑫.多酚类化合物的分类、来源及功能研究进展[J].中国食物与营养,2016,22(3):32-34.
- [20] 左玉.多酚类化合物研究进展[J].粮食与油脂,2013,26(4):6-10.
- [21] BRAGA A R C, MURADOR D C, DE SOUZA MESQUITA L M, et al. Bioavailability of anthocyanins: gaps in knowledge, challenges and future research [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 68: 31-40.
- [22] RODRIGUEZ-AMAYA D B. Update on natural food pigments—a mini-review on carotenoids, anthocyanins, and betalains [J]. Food Research International, 2019, 124: 200-205.
- [23] ZHANG Z, LI J, FAN L. Evaluation of the composition of Chinese bayberry wine and its effects on the color changes during storage [J]. Food Chemistry, 2019, 276: 451-457.
- [24] 朱佳丽,敬璞.红曲红色素稳定性研究及光热降解动力学分析[J].食品与发酵科技,2017,53(5):49-53,79.
- [25] 王金宇,董文宾,杨春红,等.红曲色素的研究及应用新进展[J].食品科技,2010,35(1):245-248.
- [26] 玛合沙提·努尔江,包天雨,张添琪,等.红曲色素的生物活性及其作用机制研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(6):347-356.
- [27] NELSON K M, DAHLIN J L, BISSON J, et al. The essential medicinal chemistry of curcumin: miniperspective [J]. Journal of Medicinal Chemistry, 2017, 60(5): 1620-1637.
- [28] 罗晓莉,高彦祥.姜黄素及其微胶囊化技术研究进展[J].中国食品添加剂,2023,34(5):315-330.
- [29] FU Y, SHI J, XIE S Y, et al. Red beetroot betalains: perspectives on extraction, processing, and potential health benefits [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(42): 11595-11611.
- [30] ABEDI-FIROOZJAH R, PARANDI E, HEYDARI M, et al. Betalains as promising natural colorants in smart/active food packaging [J]. Food Chemistry, 2023, 424(30): 136408.
- [31] 王恒,李梦奇,李燊星,等.决明子总蒽醌提取物抗氟尿嘧啶致小鼠肝损伤的谱效关系[J].南方医科大学学报, 2023,43(5):825-831.
- [32] 王娜,黎天,尤宏争,等.甘肃3种中草药加工副产物中关键药效成分含量分析[J].中国饲料,2023,12:76-80.
- [33] 杨常碧,朱艳,唐萍,等.芦荟的生物活性研究进展[J].山东化工,2022,51(24):73-75.
- [34] 张唯,严成,陈亚利,等.核桃青皮萜醌类色素的超高压提取工艺优化[J].食品工业,2018,39(8):51-55.
- [35] 马烁,赵华.果蔬汁防褐变的研究进展[J].农产品加工, 2023,11:76-79,83.
- [36] ROCK C, YANG W, GOODRICH-SCHNEIDER R, et al. Conventional and alternative methods for tomato peeling [J]. Food Engineering Reviews, 2012, 4(1): 1-15.
- [37] BEN Z M, DHUIQUE-MAYER C, BELLAGHA S, et al. Effects of blanching on flavanones and microstructure of *Citrus aurantium* peels [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(11): 2246-2255.
- [38] 王凤昭,吕健,毕金峰,等.去皮方式对黄桃渗透脱水组合干燥特性及理化品质的影响[J].中国食品学报,2021, 21(9):121-129.
- [39] ARAÚJO A C, OLIVEIRA S M, RAMOS I N, et al. Influence of pretreatments on quality parameters and nutritional compounds of dried galega kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(5): 872-881.
- [40] ZHAN L, PANG L, MA Y, et al. Thermal processing affecting phytochemical contents and total antioxidant capacity in broccoli (*Brassica oleracea* L.) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 42(3): e13548.
- [41] 刘小莉,胡根河,陆卿卿,等.热处理条件对蓝莓汁中花色苷和加工特性的影响[J].中国食品学报,2016, 16(1):161-166.
- [42] 姜玉,程新峰,蒋凯丽.不同漂烫处理对冷冻毛豆仁品质的影响[J].食品工业科技,2017,38(5):108-113,119.
- [43] SHAO X, CHEN H, PAN H, et al. Effect of steam blanching on peelability and quality of *Citrus reticulata* Blanco [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(10): 3790-3797.
- [44] GAO R, YE F, LU Z, et al. A novel two-step ultrasound post-assisted lye peeling regime for tomatoes: reducing pollution while improving product yield and quality [J]. Ultrasonics

- Sonochemistry, 2018, 45: 267-278.
- [45] WANG W, WANG L, FENG Y, et al. Ultrasound-assisted lye peeling of peach and comparison with conventional methods [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 204-213.
- [46] OKONKWO C E, OJEDIRAN J O, BARIBEFE A V, et al. Microwave-assisted infrared dry-peeling of beetroot: peeling performance, product quality, and cell integrity [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102982.
- [47] NAWIRSKA-OLSZAŃSKA A, STEPIEŃ B, BIESIADA A, et al. Rheological, chemical and physical characteristics of golden berry (*Physalis peruviana* L.) after convective and microwave drying [J]. Foods, 2017, 6(8): 60.
- [48] ZIA M P, ALIBAS I. Influence of the drying methods on color, vitamin C, anthocyanin, phenolic compounds, antioxidant activity, and *in vitro* bioaccessibility of blueberry fruits [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101179.
- [49] 王红利,郁志芳.不同干燥方式对甘蓝理化性质和抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2020,41(21):81-86.
- [50] 盛金凤,雷雅雯,王雪峰等.低温真空油炸柿子脆片工艺优化及其品质分析[J].食品工业科技,2024,45(2):152-160.
- [51] VIMALA B, NAMBISAN B, HARIPRAKASH B. Retention of carotenoids in orange-fleshed sweet potato during processing [J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 48(4): 520-524.
- [52] SOTO M, DHUIQUE-MAYER C, SERVENT A, et al. A kinetic study of carotenoid degradation during storage of papaya chips obtained by vacuum frying with saturated and unsaturated oils [J]. Food Research International, 2020, 128: 108737.
- [53] RYTEL E, TAJNER-CZOPEK A, KITA A, et al. The influence of the production process on the anthocyanin content and composition in dried potato cubes, chips, and french fries made from red-fleshed potatoes [J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1104.
- [54] 林奕楠,陈树鹏,余洋洋,等.漂烫对三华李蜜饯加工过程中还原糖和品质的影响[J].农产品加工,2022, (14):36-40,44.
- [55] GANJLOO A, RAHMAN R A, OSMAN A, et al. Kinetics of crude peroxidase inactivation and color changes of thermally treated seedless guava (*Psidium guajava* L.) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4: 1442-1449.
- [56] VOLDEN J, BORGE G I A, BENGTSOON G B, et al. Effect of thermal treatment on glucosinolates and antioxidant-related parameters in red cabbage (*Brassica oleracea* L. ssp. *capitata* f. *rubra*) [J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 595-605.
- [57] 田金辉,许时婴,王璋.热烫处理对黑莓果汁营养成分和多酚氧化酶活力的影响[J].食品与发酵工业,2006, (4):133-137.
- [58] ISMAIL B B, LIU D, PU Y, et al. High-intensity ultrasound processing of baobab fruit pulp: effect on quality, bioactive compounds, and inhibitory potential on the activity of α -amylase and α -glucosidase [J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130144.
- [59] PAOLO D, BIANCHI G, MORELLI C F, et al. Impact of drying techniques, seasonal variation and organic growing on flavor compounds profiles in two Italian tomato varieties [J]. Food Chemistry, 2019, 298: 125062.
- [60] 贾瑶,吴兴壮.国内外果蔬真空油炸现状与发展趋势[J].食品研究与开发,2023,44(9):218-224.
- [61] 段邓乐,徐海燕,冯志强,等.蓝莓花青素的提取及其抗氧化活性和稳定性[J].食品研究与开发,2023, 44(12):137-143.
- [62] 董明,王金祥,徐昊,等.复合酶处理对金童5号黄桃去皮效果的影响[J].食品与机械,2013,29(1):205-208.
- [63] 袁洪燕,单杨,李高阳.黄桃酶法去皮的技术研究[J].中国食品学报,2010,10(1):151-155.
- [64] IBARZ A, PAGÁN J, GARVÍN A, et al. Enzymatic peeling and discoloration of Red Bartlett pears [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(3): 636-641.
- [65] 张群,舒楠,张维.不同去皮方法对猕猴桃去皮效果和品质的影响[J].湖南农业科学,2021,2:87-90,95.
- [66] MUZAFFAR S, AHMAD M, WANI S M, et al. Ultrasound treatment: effect on physicochemical, microbial and antioxidant properties of cherry (*Prunus avium*) [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2752-2759.
- [67] NOWACKA M, TYLEWICZ U, ROMANI S, et al. Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the main quality parameters of kiwifruit [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 71-78.
- [68] 王丽娟,宋思圆,姜鹏,等.不同去皮方法对番茄去皮效果和品质的影响[J].食品科学,2017,38(5):26-31.
- [69] WANG B, VENKITASAMY C, ZHANG F, et al. Feasibility of jujube peeling using novel infrared radiation heating technology [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 458-467.
- [70] 刘启玲,王庆卫.中短波红外干燥对桑葚干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响[J].食品工业科技, 2021,42 (12):39-45.
- [71] VALLVERDÚ-QUERALT A, ODRIOZOLA-SERRANO I, OMS-OLIU G, et al. Impact of high-intensity pulsed electric fields on carotenoids profile of tomato juice made of moderate-intensity pulsed electric field-treated tomatoes [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 3131-3138.
- [72] PATARO G, BOBINAITÈ R, BOBINAS Ć, et al. Improving the extraction of juice and anthocyanins from blueberry fruits

- and their by-products by application of pulsed electric fields [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(9): 1595-1605.
- [73] TYLEWICZ U, MANNOZZI C, CASTAGNINI J M, et al. Application of PEF-and OD-assisted drying for kiwifruit waste valorisation [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 77: 102952.
- [74] GONZÁLEZ-CASADO S, MARTÍN-BELLOSO O, ELEZ-MARTÍNEZ P, et al. Induced accumulation of individual carotenoids and quality changes in tomato fruits treated with pulsed electric fields and stored at different post-treatments temperatures [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 146: 117-123.
- [75] YAN B, MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I, COOPERSTONE J L, et al. Impact of thermal and pressure-based technologies on carotenoid retention and quality attributes in tomato juice [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(5): 808-818.
- [76] MARSZALEK K, WOŹNIAK Ł, KRUSZEWSKI B, et al. The effect of high pressure techniques on the stability of anthocyanins in fruit and vegetables [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(2): 277.
- [77] ATENCIO S, VERKEMPINCK S H E, BERNAERTS T, et al. Impact of processing on the production of a carotenoid-rich *Cucurbita maxima* cv. Hokkaido pumpkin juice [J]. *Food Chemistry*, 2022, 380: 132191.
- [78] KOVAČEVIĆ D B, PUTNIK P, DRAGOVIĆ-UZELAC V, et al. Effects of cold atmospheric gas phase plasma on anthocyanins and color in pomegranate juice [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 317-323.
- [79] LI M, LI X, HAN C, et al. Physiological and metabolomic analysis of cold plasma treated fresh-cut strawberries [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(14): 4043-4053.
- [80] 解梦梦,赵武奇,贾梦科,等.低温等离子体处理对鲜切猕猴桃片质构及理化特性的影响[J].*中国食品学报*,2021, 21(10):133-142.
- [81] ZHANG L, CHEN L, ZHOU C, et al. Advances in peeling techniques for tomato: a comprehensive review [J]. *Food Reviews International*, 2023, 236(2): 1-18.
- [82] 张莉会,汪超,廖李,等.超高压和超声对果蔬色泽和组织结构的影响及其在干燥中的应用[J].*保鲜与加工*,2020, 20(6):212-219.
- [83] 翁霞,刁全平.野菠菜叶绿素提取优化及其分散体系研究[J].*中国食品添加剂*,2023,34(6):130-137.
- [84] BERMÚDEZ-AGUIRRE D, MOBBS T, BARBOSA-CÁNOVAS G V. Ultrasound applications in food processing [M]. *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, 2011.
- [85] 程新峰,蒋凯丽,朱玉钢,等.超声波灭酶机制及其在食品加工中的应用[J].*食品工业科技*,2016,37(8):351-357.
- [86] 杨亮.苦瓜片热风与红外干燥特性及品质评价[D].重庆:西南大学,2019.
- [87] 周良付,赵茜茜,曲文娟,等.番茄去皮技术研究进展[J].*农产品加工*,2022, (5):72-76.
- [88] ANESE M, FALCONE P, FOGLIANO V, et al. Effect of equivalent thermal treatments on the color and the antioxidant activity of tomato puree [J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(9): 3442-3446.
- [89] 张学杰,叶志华.高压处理对鲜切果蔬品质与微生物影响的研究进展[J].*中国农业科学*,2014,47(21): 4328-4340.
- [90] 徐文慧,周锦云,蔡静,等.基于低温等离子体技术的果蔬生鲜杀菌保鲜研究进展[J].*浙江农业科学*,2020,61(1):121-124.
- [91] FERNANDES F A N, RODRIGUES S. Cold plasma processing on fruits and fruit juices: a review on the effects of plasma on nutritional quality [J]. *Processes*, 2021, 9(12): 2098
- [92] FERNÁNDEZ A, NORIEGA E, THOMPSON A. Inactivation of salmonella enterica serovar typhimurium on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology [J]. *Food Microbiology*, 2013, 33(1): 24-29.
- [93] 张关涛,张东杰,李娟,等.低温等离子体技术在食品杀菌中应用的研究进展[J].*食品工业科技*,2022,43(12):417-426.
- [94] KOCA N, KARADENIZ F, BURDURLU H S. Effect of pH on chlorophyll degradation and colour loss in blanched green peas [J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(2): 609-615.
- [95] LEE D J, LEE H, LEE S H, et al. Effects of jam processing on anthocyanins and antioxidant capacities of *Rubus coreanus* miquel berry [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2013, 22(6): 1607-1612.
- [96] LAKSHAN S A T, JAYANATH N Y, ABEYSEKERA W, et al. A commercial potential blue pea (*Clitoria ternatea* L.) flower extract incorporated beverage having functional properties [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019, 2019: 2916914.
- [97] FENGER J A, MOLONEY M, ROBBINS R J, et al. The influence of acylation, metal binding and natural antioxidants on the thermal stability of red cabbage anthocyanins in neutral solution [J]. *Food Function*, 2019, 10(10): 6740-6751.
- [98] SONG B J, SAPPER T N, BURTCH C E, et al. Photo- and thermodegradation of anthocyanins from grape and purple sweet potato in model beverage systems [J].*Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(6): 1364-1372.
- [99] 朱明明,樊明涛,何鸿举.类胡萝卜素降解方式的研究进展[J].*食品科学*,2017,38(11):308-317.
- [100] CERRETI M, LIBURDI K, DEL FRANCO F, et al. Heat and light stability of natural yellow colourants in model beverage systems [J]. *Food Additives & Contaminants*:

- Part A, 2020, 37(6): 905-915.
- [101] HODGES D M, TOIVONEN P M A. Quality of fresh-cut fruits and vegetables as affected by exposure to abiotic stress [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 48(2): 155-162.
- [102] SAENGNIL K, CHUMYAM A, FAIYUE B, et al. Use of chlorine dioxide fumigation to alleviate enzymatic browning of harvested 'Daw'longan pericarp during storage under ambient conditions [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 91: 49-56.
- [103] QIAO L, GAO M, WANG Y, et al. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis of cultivar differences provides insights into the browning mechanism of fresh-cut potato tubers [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 188: 111905.
- [104] HEFFELS P, BÜHRLE F, SCHIEBER A, et al. Influence of common and excessive enzymatic treatment on juice yield and anthocyanin content and profile during bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) juice production [J]. *European Food Research and Technology*, 2016, 243(1): 59-68.
- [105] MÄKILÄ L, LAAKSONEN O, KALLIO H, et al. Effect of processing technologies and storage conditions on stability of black currant juices with special focus on phenolic compounds and sensory properties [J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 422-430.
- [106] PUI L P, KONG I, KARIM R, et al. Optimization of juice production from "cempedak" (*Artocarpus integer*) fruit pulp liquefied with the aid of enzymes [J]. *British Food Journal*, 2021, 124(10): 3083-3093.
- [107] 邢晓凡,刘浩楠,姚飞,等.不同干燥方式对黄桃果干品质的影响[J].*食品工业科技*,2023,44(24):327-333.