

干燥对果蔬加工色泽影响的研究进展

吕莹^{1,2}, 陈芹芹¹, 李旋¹, 胡佳星¹, 毕金峰^{1,2,*}

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193; 2. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 色泽是影响果蔬食品感官品质的重要因素, 鲜艳且稳定的色泽不仅给人良好的视觉享受, 更能促进食欲, 提高产品市场价值。本文首先概括果蔬中天然色素的种类及性质, 明确热、非热及联合干燥技术对果蔬色泽的影响规律, 揭示色素降解产物对产品品质的影响机制, 并对果蔬干燥护色的调控技术进行综述, 以期为果蔬干燥产品的护色提质提供理论基础。

关键词: 果蔬; 天然色素; 干燥; 色泽; 护色技术

Recent Progress in Research on the Effect of Drying on the Color of Processed Fruits and Vegetables

LÜ Ying^{1,2}, CHEN Qinqin¹, LI Xuan¹, HU Jiaying¹, BI Jinfeng^{1,2,*}

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;
2. Food Science College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Color is an important factor affecting the sensory quality of fruit and vegetable (FV) products. The vibrant and stable color of FV products can give people a good visual enjoyment, which can in turn promote consumers' appetite and increase the market value of the products. This paper summarizes the types and properties of natural colorants in FV, clarifies the effects of thermal and non-thermal drying technologies and their combination on the color of FV products, reveals the influence mechanism of colorant degradation products on the products' quality, and reviews the color preservation technologies of dried FV. We hope that this review could provide a theoretical basis for the color preservation and quality enhancement of dried FV products.

Keywords: fruits and vegetables; natural colorants; drying; color; color preservation technologies

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220802-022

中图分类号: TS255.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 13-0368-10

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220802-022. <http://www.spkx.net.cn>

LÜ Ying, CHEN Qinqin, LI Xuan, et al. Recent progress in research on the effect of drying on the color of processed fruits and vegetables[J]. Food Science, 2023, 44(13): 368-377. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220802-022. <http://www.spkx.net.cn>

色泽在果蔬食品的生产加工中具有重要的指示作用, 其可以表征果蔬内部发生各种生化反应的程度。此外, 色泽是食品的一个重要感官指标, 它可对滋味和风味特征进行视觉引导, 并影响消费者对食品的偏好、可接受性和最终选择。如图1所示, 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)和肉眼(或者其他感光设备), 而每一种色泽均可由色相、

亮度和饱和度表示。目前, 在果蔬加工过程中保持原料的本色是一种流行趋势, 因此保持果蔬中天然色素成分的稳定性至关重要。然而, 果蔬中较高的含水量为组织内酶促反应、营养物质代谢以及不良微生物(如细菌、霉菌和酵母)的繁殖提供了有利条件, 进而导致微生物发酵和色素降解的发生^[1]。针对这种情况, 干燥似乎是一种比较适宜的果蔬加工方法^[2]。通过干燥处理后的产品

收稿日期: 2022-08-02

基金项目: 中国农业科学院农产品加工研究所创新工程项目(CAAS-ASTIP-2022-IFST)

第一作者简介: 吕莹(1994—)(ORCID: 0000-0001-6814-5474), 女, 博士研究生, 研究方向为果蔬加工与品质调控。

E-mail: 18810517203@163.com

*通信作者简介: 毕金峰(1970—)(ORCID: 0000-0001-8664-8788), 男, 研究员, 博士, 研究方向为果蔬食品制造与营养科学。E-mail: bijinfeng2010@163.com

便于运输、易贮藏、货架期长,并可较好地保持理化品质和微生物稳定性。但由于色素性质多不稳定,容易在干燥过程中发生氧化和降解。因此,近年来越来越多的学者关注和研究不同护色手段对果蔬干燥及贮藏过程中色泽的影响^[3],这对于果蔬产品的提质具有重要意义。本文主要综述果蔬中常见的天然色素种类,分析总结不同干燥技术对色泽稳定性、色素降解产物对产品品质的影响,并阐述目前常见的果蔬护色手段,以期对果蔬护色及提高干燥产品的综合品质提供理论基础。

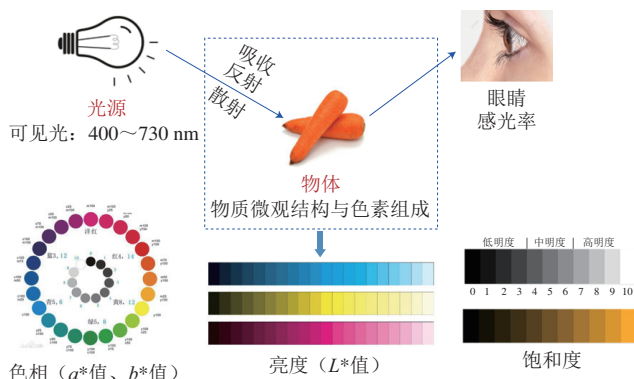


图1 果蔬呈色三要素与色泽表达

Fig. 1 Three elements of color and color expression of fruits and vegetables

1 果蔬中天然色素种类及其性质

色素是在果蔬中呈现各种色泽,或无色但能引起生化反应间接导致变色的物质。目前,食品中的天然色素(着色剂)约占全球食品着色剂市场的36%^[4]。这是因为它们不仅可以被安全地生物降解^[5],且具有抗癌、抗氧化和抗菌活性^[6]。果蔬中的天然色素根据其结构主要分为四大类:卟啉衍生物、异戊二烯衍生物、多酚类衍生物、酮及醌衍生物。

1.1 卟啉衍生物

卟啉是一类由4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,具有解毒、抗病等生物活性,且多以与金属离子配合的形式存在于自然界中。果蔬中最主要的卟啉衍生物为叶绿素,其在呼吸、光合作用等生命活动过程中均发挥重要作用。高等植物叶绿体中的叶绿素主要有叶绿素a($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$)和叶绿素b($C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$)两种,其中叶绿素a呈蓝绿色,叶绿素b呈黄绿色,这是叶绿素吸收红光和紫光而反射绿光造成的。市面上常见的绿色果蔬中均含有丰富的叶绿素,如猕猴桃、菠菜、黄瓜、韭菜等^[2,7]。然而,叶绿素并不是很稳定,易在干燥过程中受到光、酸碱度、氧、酶等作用而发生分解^[8]。游离叶绿素对光照很敏感,在氧气参与下叶绿素卟啉环和吡咯链

发生分解而造成褪色。此外,叶绿素降解速率与氧气浓度呈正相关,且在叶绿素酶作用下,叶绿素结构中的植醇键被催化水解生成脱植叶绿素。相关研究表明,叶绿素酶在80℃以上活性降低,100℃时完全失活^[9]。

1.2 异戊二烯衍生物

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,其中以类胡萝卜素为代表。根据类胡萝卜素组成元素的不同,可将其分为胡萝卜素和叶黄素(含氧)^[10]。类胡萝卜素是一类具有潜在健康益处的呈红色、橙色或者黄色的色素^[11-12],广泛存在于果蔬等植物的茎、叶、花和果实中。目前,在自然界中已经鉴定出700余种类胡萝卜素化合物,其中,番茄红素、 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素等具有抗氧化、抗癌活性的单体成分多存在于番茄、枸杞、胡萝卜、南瓜、辣椒等黄色系果蔬中^[10,12-14]。由于类胡萝卜素含有3~15个共轭双键使其具有高度不饱和的性质,因此其极易在光、热、氧条件下发生降解和氧化反应,从而造成果蔬原料在加工过程中的褪色和风味劣变^[11]。

1.3 多酚类衍生物

多酚享有“第七类营养素”的美誉^[15],已被证实具有显著的生理活性和营养保健功能^[16]。该类物质的呈色范围较广,如苹果中的槲皮素和咖啡酸为黄色,李子中的单宁酸和绿原酸多为褐色^[16-17]。而花青素(包括天竺葵色素、矢车菊色素、飞燕草色素、芍药色素、牵牛花色素和锦葵色素)是普遍存在于杨梅、蓝莓和樱桃等红色系果蔬中的水溶性天然色素,其呈色范围由红(酸性)到蓝(碱性),主要受到植物细胞液pH值的影响。除呈色外,多酚类物质如单宁酸和芦丁等也赋予柿子、苹果和葡萄等水果独特的酸涩口感^[18]。然而,多酚类衍生物的化学性质极不稳定,容易受到金属离子、氧气、温度、pH值、光照等环境因素的影响^[19]。因此,以该类化合物为主要呈色物质的果蔬原料在干燥过程中多发生褐变和酚类含量降低的问题^[20]。值得注意的是,甜菜红素是一类与花青素呈色接近(紫红色和鲜红色)且难分辨的吡啶类化合物,不属于酚类衍生物,其结构中的酚羟基和环状胺基使甜菜红素同样具有还原性和抗氧化活性,主要存在于火龙果、红甜菜和苋菜中^[21]。

1.4 酮及醌衍生物

酮及醌衍生物色素的种类较少,其中姜黄素是一种典型的但在植物界中十分稀少的二酮类色素,可从姜科等植物的根茎中提取。姜黄素为橙黄色结晶粉末,味苦、难溶于水,在果蔬食品生产中主要用于罐头制品、糕点、果汁的着色^[22]。此外,姜黄素具有显著的降血脂、抗肿瘤和抗氧化等生理作用^[23]。醌类化合物是一类分子中具有不饱和环二酮结构的天然色素,有苯醌、萘醌、菲醌、蒽醌4种类型。天然醌类多以黄色和橙红色

(少数紫色)晶体的形式存在,许多中草药、红枣、芦荟和大葱中均含有丰富的醌类化合物^[24-25]。将鲜切的苹果和桃子于自然条件下放置一段时间后,其切面会发生一定程度的褐变。这种褐变反应也是由酚类化合物在氧气和酶作用下转化为醌类化合物而形成。

部分果蔬中的色素成分如表1所示,各类色素的代表性物质与结构如图2所示。

表1 果蔬中主要的天然色素成分
Table 1 Major natural colorants in fruits and vegetables

物质类别	来源	成分名称	参考文献
叶啉衍生物	绿色系: 猕猴桃、苹果、菠菜、黄瓜、韭菜等	叶绿素a、叶绿素b	[2,7]
异戊二烯衍生物	橙黄色系: 土豆、番茄、枸杞、胡萝卜、南瓜、辣椒等	番茄红素、β-胡萝卜素、α-胡萝卜素、叶黄素、植物烯、辣椒红素	[10,12,14]
多酚类衍生物	红色系: 苹果、桃子、杏、樱桃、李子、石榴、葡萄、杨梅、蓝莓、洋葱等	原花青素、花青素、槲皮素、咖啡酸、儿茶素、芦丁、单宁酸、绿原酸、新绿原酸、没食子酸、	[15-18]
酮衍生物	黄色系: 郁金块根、姜黄根茎	姜黄素	[22-23]
醌衍生物	棕色系: 枣、芦荟、苹果、桃子、葱	酸枣色素、芦荟苷、芦荟大黄素、红葱乙素	[24-25]

2 干燥技术对果蔬色泽的影响

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、热泵干燥、红外干燥、微波干燥、压差闪蒸联合干燥等;非热干燥技术主要包括微波干燥和真空冷冻干燥,还有新兴的等离子体干燥和非热闪蒸干燥等^[26-27]。

2.1 热干燥技术

热干燥技术是目前普遍应用于果蔬行业的脱水技术,操作流程简单且能耗较低,但该类技术会使果蔬中的天然色素直接暴露在热、氧和光条件下,造成色素破坏和降解,显著降低干燥产品及其在贮藏过程中的感官品质和营养品质。例如,胡萝卜中的类胡萝卜素在热风干燥和微波干燥过程中发生受热降解而使产品的红值降低^[28];蓝莓经热干燥后,其亮度(L^* 值)和色调角显著降低,这是因为较高的干燥温度造成细胞表面损伤和花青素损失^[29]。相反的是,Paolo等^[30]发现热干燥技术会改善番茄滋味(适口性)并加深产品色泽,能够促进消费者的食欲,这主要由于氨基酸与葡萄糖引起的美拉德反应(非酶反应)和酶促褐变。Li Xuan等^[31]也报道了高绿原酸含量(75.45 g/100 g)的苹果片经热风干燥后色泽更红(高红度(a^* 值)),这可能与绿原酸的羟基化、耦合氧化和聚合褐变有关。然而,山药片在热风干燥下(50~70 °C)的亮度不断下降,且褐变后的黑棕色表面使产品的可接受度降低^[32]。综合来说,热干燥技术多会使果蔬原料中的天然色素发生降解并引发褐变反应。然而,这种褐变反应的积极或者消极作用是由物料原始色泽所决定。因此,热干燥技术对于果蔬色泽品质的效果不仅受到干燥方式的影响,更受到原料特性(包括原始色泽、天然色素含量等)的影响。

2.2 非热干燥技术

非热干燥技术解决了热干燥中物料受热时间长和天然色素含量下降的问题,可较好地保持果蔬原料新鲜度、

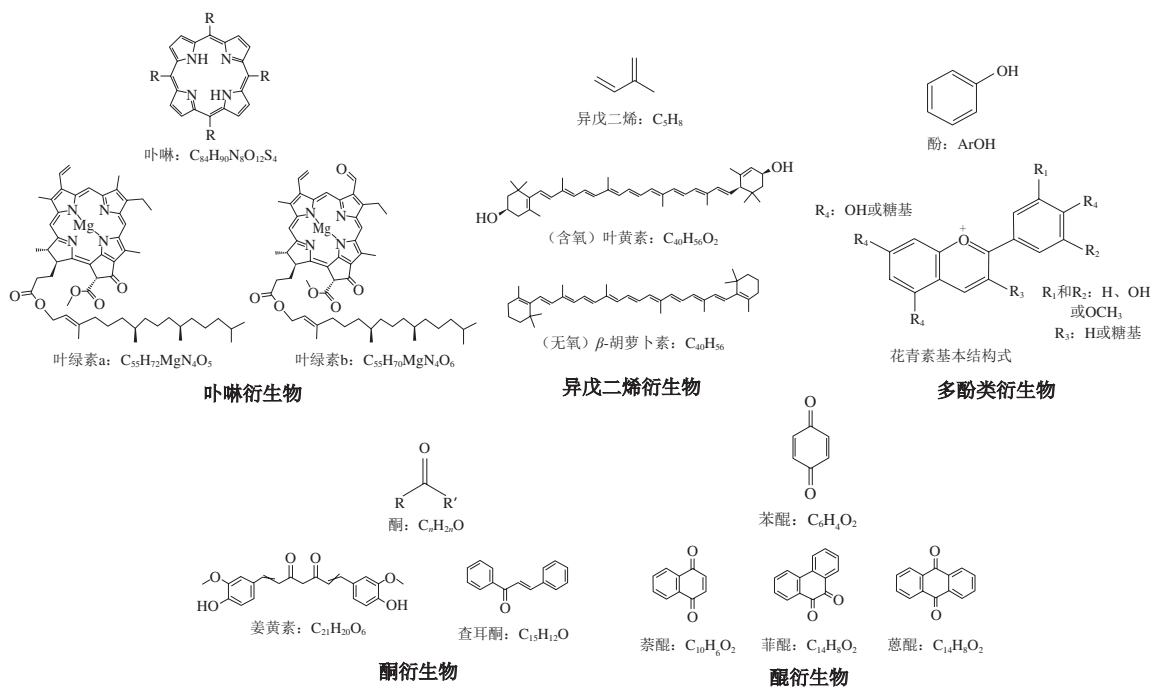


图2 果蔬中天然色素的代表性物质与结构

Fig. 2 Representative compounds and structures of natural colorants in fruits and vegetables

细胞结构以及热敏性成分含量^[33]。其中,真空冷冻干燥技术不仅能够维持原料原有结构基础上保留营养物质及其生物利用率,并且可维持产品的滋味、香气和风味,是行业中干燥食品和药品的优选方法^[34]。对于色泽品质,由于真空冷冻干燥技术在干燥过程中采用低温和低压条件,因此不会引起果蔬内部的非酶褐变反应,样品具有更高的亮度。Torres等^[35]报道了真空冷冻干燥处理的葡萄皮可用于改善葡萄的亮度,并且真空冷冻干燥是保持甜椒和蓝莓色泽品质最适宜的干燥方法^[36]。这些研究结果表明真空冷冻干燥技术对于维持甚至提高紫红色系果蔬的色泽品质具有显著作用。这是因为真空冷冻干燥的低温低氧干燥也可以较好地保留果蔬中的花青素含量。如陈沁雯等^[37]发现经真空冷冻干燥工艺处理后玫瑰茄中的总花青素含量高达1 556.54 mg/100 g,色泽最为鲜艳;普红梅等^[38]也报道了真空冷冻干燥可使紫色马铃薯中花青素的损失率低至9.66%,保持了马铃薯鲜艳的紫色。相反的是,对于南瓜、胡萝卜和沙棘等黄色系果蔬,真空冷冻干燥技术会导致物料明显的褪色^[14,39]。这是物料物理结构较好保留、色素成分不易积累和类胡萝卜素的分布改变以及自动氧化降解、光降解和酶降解等因素造成的^[40]。因此,原料的质量和呈色色素种类对冻干果蔬色泽的变化具有决定性作用。真空冷冻干燥除受到原料特性的限制外,也是一种昂贵和耗时的脱水方法,这使其在食品工业中的应用往往受到限制^[41]。目前真空冷冻干燥技术常与其他预干燥或前处理联合,并已成功应用于胡萝卜、苹果和菌菇等原料的干制,以实现节能提质的目的^[39,42]。等离子体干燥和非热闪蒸干燥技术是两种行业内新兴的非热干燥技术。这两种方法主要解决了真空冷冻干燥耗能大的问题,且也能较好地控制样品干燥过程中的热量传递,有效防止热敏成分的降解。但目前对放电等离子体的研究主要集中在对果蔬的杀菌效果方面,并成功研制了等离子体杀菌-干燥一体机;而目前关于非热闪蒸干燥技术对果蔬干燥护色方面的研究鲜有报道,主要集中在生产特种药品和食品添加剂方面。

2.3 联合干燥技术

联合干燥是指按照优势互补原则将两种或多种干燥技术联合的果蔬干燥方式^[41]。按照联合的时间段,可将联合干燥分为并联和串联(更普遍)两种形式。并联式是指同时间不同干燥技术组合对原料进行干燥,串联式是按照时间先后,采用不同干燥技术分阶段对原料进行脱水。联合干燥与单一干燥相比具有明显优势,该技术基本可以满足“生产优质果蔬和高效减能”的原则,适用于含有热敏性色素和营养成分的物料、操作灵活且环保。目前,文献中报道的有关联合干燥对果蔬色泽品质大多为积极影响。如Chao Erpeng等^[39]的研究表明

远红外辐射-冻干联合干燥赋予籽用南瓜更好的色泽及更高的 β -胡萝卜素和抗坏血酸含量。陈君琛等^[42]采用热风(60℃、20 min)-真空联合干燥(55℃)对杏鲍菇进行干燥,结果表明该处理下杏鲍菇呈浅黄色(L^* 值为58.36)、色泽均匀,能耗较单一真空干燥减少57%。而王军等^[43]研究发现经热风-微波联合干燥所得番薯片 L^* 、 a^* 值和黄度(b^* 值)分别为72.86、11.02和38.65,产品褐变不明显且 β -胡萝卜素保留率高。此外,以微波作为预干燥手段也可有效地防止果蔬在后期干燥过程中的褐变问题,并在山楂、龙眼和甘蓝等蔬菜中得到良好应用。总地来说,与鲜样相比,果蔬无论经过何种干燥后色差值均会发生显著变化,这是因为干燥过程引起了物料细胞结构的变化,导致色素被破坏和改变。而联合干燥技术能有效地缓解这些问题。尽管如此,应用联合干燥也需要控制更多的参数,而这些参数间的相互影响作用尚不明确,可能会出现不可预测的问题。因此,针对每种原料中色素的特性,选择适宜的联合干燥技术和参数十分必要。为保护紫薯干燥产品中的花青素,程晶晶等^[44]对比分析了热风、微波联合干燥顺序对紫薯片综合品质的影响。结果表明,经热风-微波联合干燥处理后紫薯片较微波-热风联合干燥具有更高的花青素含量,且工艺耗能更低。而在探究联合干燥参数方面,陈君琛等^[42]以色泽明亮度和感官评分等为评价指标,采用三因素二次通用旋转组合设计优化了热风-真空联合干燥杏鲍菇的工艺参数。

3 色素降解产物对干燥果蔬品质的影响

果蔬中天然色素在干燥过程中的降解不仅会影响产品的色泽,而且会改变其他感官和营养品质。

3.1 卟啉衍生物降解

叶绿素是植物界中卟啉色素的典型代表物,其在干燥过程中可通过过氧化物酶的作用氧化生成羟基叶绿素和叶绿素酸酯^[45]。此外,叶绿素也可在C13处发生外聚反应以形成叶绿素 a' 、氧化生成羟基叶绿素^[45]或者受热生成焦叶绿素、脱镁叶绿素和焦脱镁叶绿素^[46]。值得注意的是,许多果蔬中(如青花菜、香蕉)的叶绿素过氧化物酶活性与处理温度呈正相关,说明热干燥降低叶绿素含量是由于相关酶活力的升高。但现有的研究结果表明叶绿素在干燥过程中的降解产物同样具有明显的生理活性。如菠菜中色泽为橄榄褐色的脱镁叶绿素不仅可以赋予样品油润的色泽,而且具有良好的抗氧化和抗炎活性^[47]。此外,焦脱镁叶绿素可作为治疗肿瘤疾病的光敏剂,脱镁叶绿酸可提高叶绿素的生物利用率。而关于绿色的叶绿素酸酯和羟基叶绿素对于果蔬品质的影响鲜有报道。尽管如此,叶绿素在干燥过程中的不断降解(叶绿素含量降低)会导致果蔬色泽饱和度下降,

褐变度升高或者不断黄化,显著影响产品的感官、营养品质及消费者可接受度。

3.2 异戊二烯衍生物降解

类胡萝卜素是典型存在于果蔬中的异戊二烯色素,其在干燥中不可避免地受到光降解和热降解,且难以控制^[48]。根据C=C双键断裂的位置不同,可生成不同物质。若其降解产物保留有较多的共轭双键,则也可保留原类胡萝卜素的性质。如番茄红素在C5-C6和C5'-C6'双键位置发生断裂仍可合成鲜红的胭脂素^[48]。普遍来说,类胡萝卜素在干燥过程中可通过氧化降解生成C9-C13类降异戊二烯香气物质^[49]。朱明明等^[48]报道, β -胡萝卜素(红紫色至暗红色)在高温下首先发生环氧化,形成 β -胡萝卜素-5,6-环氧化物和 β -胡萝卜素-5,8-环氧化物,而后进一步导致碳链断裂生成 β -紫罗兰酮(淡黄色至黄色)、二氢猕猴桃内酯(无色至淡黄色)和 β -环柠檬醛(无色)等香气物质。深绿色蔬菜和玉米中的叶黄素和新黄质则同样受光和热降解生成黄色的异构化产物、环氧化物或含醛基和酮基的衍生物^[50-51]。尽管这些类胡萝卜素降解产物大多赋予了果酒类产品浓郁的香气和怡人的色泽,但在胡萝卜等干制品中却被鉴定为不良风味成分,严重降低了产品的感官品质。此外,虽然Lü Ying^[14]和Rojas^[49]等报道了干燥过程会使胡萝卜和南瓜中的类胡萝卜素总量降低10%~30%,但Gurak等^[52]发现 β -紫罗兰酮等C13类降解产物仍具有抗氧化、降血脂、抗癌活性等生理功能。因此,类胡萝卜素经过干燥过程而生成的降解产物对产品的感官品质(风味和色泽)和营养品质(类胡萝卜素保留率)多具有不良影响,表现为显著降低了产品的 a^* 、 b^* 值及色泽饱和度,不利于该类产品的风味、食用品质和货架期,但对产品的生理功能需根据各产物的特性加以区分鉴定和评价。

3.3 多酚类衍生物降解

苹果、桃子和梨等果肉以白色和淡黄色为主的果蔬中通常含有大量的酚类化合物。在大多数干燥过程中,酚类化合物易与氧气和多酚氧化酶反应生成醌并发生聚集反应形成黑棕色沉淀,后续降解生成黑色素等邻苯醌类化合物,从而降低果蔬的色泽品质^[31]。这些酚类物质包括咖啡酸(黄色)、绿原酸(褐色)、没食子酸(白色)和儿茶素(白色)等^[53]。Derardja等^[54]也发现杏在褐变12 h后,其中总酚、黄酮和 o -二苯酚含量降低率可达50%~80%。因此,在果蔬干燥过程中应采取物理(如低温、低氧)、化学(如无机盐)和生物(如乳酸菌、蛋白酶)等手段避免酶促褐变的发生^[53]。此外,除受氧气和酶的作用,酚类物质在干燥过程中也易受热发生降解褪色。如Ozkan等^[55]报道了热风干燥葡萄皮19 h

会使其中的花青素含量降低35%~39%。目前确定的花青素受热降解途径有两种:一是花青素的C3苷发生水解生成花青素苷元,然后苷元发生水合反应并异构化生成查耳酮(淡黄色)及其同分异构体;二是花青素生成假碱葡萄糖苷后开环生成查耳酮糖苷,查耳酮糖苷脱去糖苷生成查耳酮及其异构体,后续可继续降解为小分子酚酸和含苯环醛类^[56-57]。此外,在热加工过程中,各花色苷组分之间可以发生相互转化降解,生成的单羟基苯甲醛等物质(淡黄色至淡红色)降低了果蔬清除自由基的能力,也会对人体细胞有刺激性作用^[57]。综上,干燥过程同样会使多酚类衍生物色素失去原有鲜艳的色泽,并使样品色泽饱和度、抗氧化活性及人体消化吸收水平降低,说明多酚类衍生物色素的降解产物不仅降低了干燥产品的综合品质,更可能对消费者健康存在安全隐患。因此,在干燥富含酚酸的果蔬原料时,应尽量采取低温低氧和可钝化酶活性的干燥和前处理技术。

3.4 酮及醌衍生物降解

植物中的姜黄素遇光不稳定,可在干燥过程中受光降解生成香草醛(白色至淡黄色)、2-羟基-香茅兰乙酮(黄棕色)、原儿茶醛(白色)、乙酰阿魏酮、反式阿魏酸和顺式阿魏酸(黄色)等香气成分^[58],主要应用于香料的合成。其中原儿茶醛和阿魏酮也具有清除自由基活性、保护心肌细胞和抗肝病的生理功效。而阿魏酸在阿魏、当归、川芎、升麻、酸枣仁等中药材中含量较高,是这些中药的有效成分之一,因此,姜黄素的降解产物可被分离并应用于医学领域。而对于富含姜黄素的姜黄根茎,干燥会使产品褐变度升高,亮度下降,但更利于姜黄中生理活性物质的提取、贮藏和运输等。醌类色素属于稳定性较高的天然色素,不易受到干燥过程中光、热和氧的影响。然而,蒽醌类色素对食品基质的pH值要求比较高,容易引起食品体系褪色或者浑浊。施惠等^[59]报道了枣红色素只有在pH 11附近时才能保持好的色泽稳定性。而对于醌类色素(如酸红枣素或者红葱乙素)的降解产物和活性,在国内外相关报道较少。

由此可见,吡啉衍生物、异戊二烯衍生物和酮衍生物的部分降解产物均会对果蔬产品的理化、营养和功能方面产生提质影响,而酶参与的多酚类色素降解产物多会对产品品质产生不良影响。干燥技术的选择也会影响天然色素的降解路径和产物。因此,针对色素特性,通过适宜的干燥技术得到目标降解产物和优质干燥产品十分必要。

果蔬在干燥过程中生成的色素降解产物如表2所示,代表性色素的可能降解路径如图3所示。

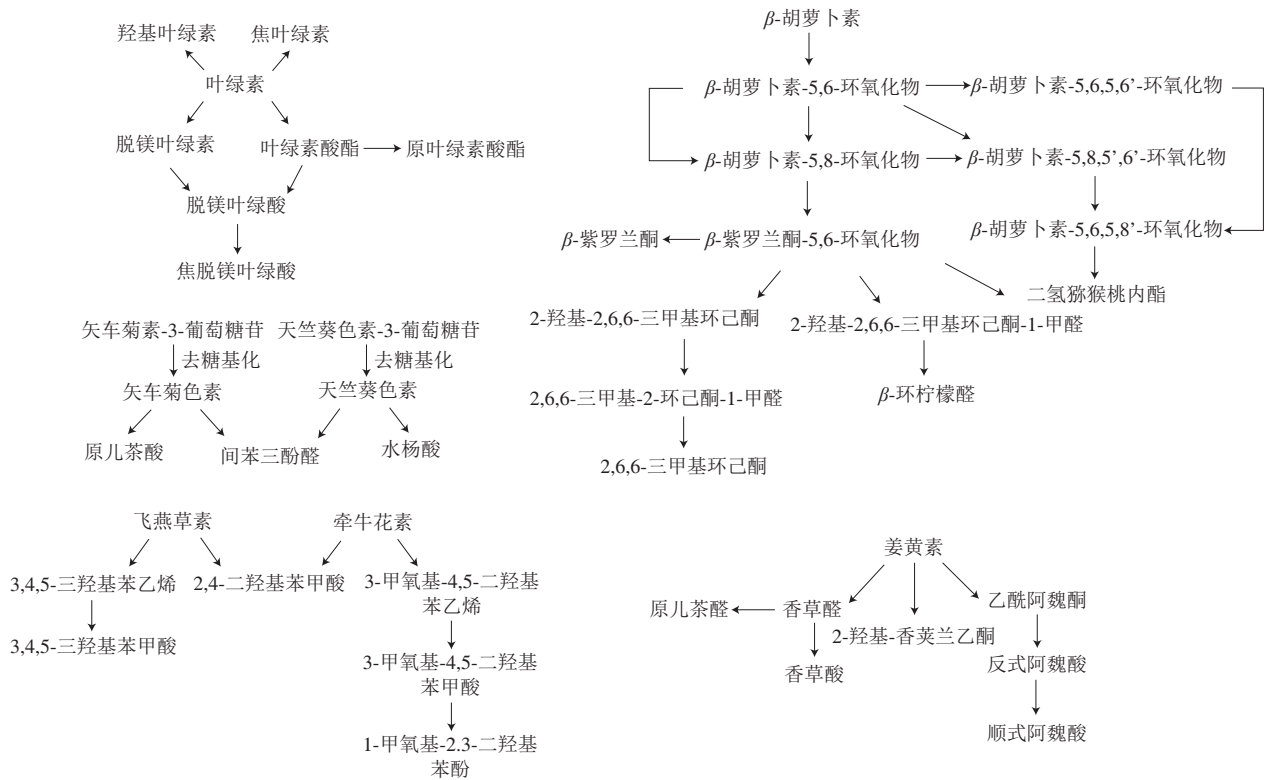


图3 叶绿素^[46]、β-胡萝卜素^[47]、花青素^[57]与姜黄素^[58]在干燥过程中的可能降解路径

Fig. 3 Possible degradation pathways of chlorophyll^[46], β-carotene^[47], anthocyanin^[57], and curcumin^[58] during drying process

表2 果蔬在干燥过程中生成的色素降解产物

Table 2 Degradation products of natural colorants in fruits and vegetables during drying process

来源	产物名称及作用	产物色泽	参考文献
卟啉衍生物	脱镁叶绿素(茶叶油润的色泽、抗氧化、抗炎)、焦脱镁叶绿素(治疗肿瘤疾病的光敏剂)、脱镁叶绿酸(利于提升叶绿素的生物利用率)	橄榄褐色	[45-47]
	叶绿素酸酯、羟基叶绿素	绿色	
异戊二烯衍生物	紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯、环柠檬醛、异弗尔酮、β-大马酮等C9-C13降异戊二烯化合物	无色、淡黄色或黄色	[48-52]
多酚类衍生物	黑素、邻苯醌类化合物、小分子酚酸和醛类	黑棕色、淡黄色	[31,56-57]
酮及醌衍生物	香草醛、香草酸、2-羟基-香荚兰乙酮、原儿茶醛、乙酰阿魏酮、反式阿魏酸和顺式阿魏酸	白色、淡黄色、黄棕色	[58-59]

4 果蔬在干燥过程中的护色方法

根据果蔬在护色过程中是否被加热，可将护色方法分为热处理技术与非热处理技术。

4.1 漂烫护色技术

目前，漂烫技术主要分为水溶液漂烫(包括纯水和抗氧化剂水溶液)、水蒸气漂烫、微波漂烫和超声波辅助漂烫等^[60]，是国内外最常见的应用于果蔬护色方面的热处理技术。其中，超声波辅助漂烫是指将超声波技术与水溶液漂烫或者微波漂烫技术相结合，可以更为显著地提高干燥效率。漂烫技术的护色原理是钝化果蔬中的酶活性、去除果蔬组织中的氧气，抑制酶促褐变^[54]。

Kriia等^[61]的研究表明，苹果在经60℃的5%柠檬酸溶液漂烫3 min后再进行微波干燥所产生的色差值(4.68)、褐变度(24.85)最低，白度最高(70.06)。漂烫技术处理时间短，较为环保且耗能少，但由于温度过高也会造成热敏性成分如酚类化合物的降解。此外，在水溶液漂烫过程中，果蔬中的水溶性维生素和矿物质也会浸出到水中，降低了产品的营养品质。

4.2 冻融护色技术

冻融是一项成熟应用于肉制品的提质技术，近年来受到学者们的广泛关注，并被应用于果蔬原料的前处理加工。冻融技术的原理是将原料置于-20~-80℃条件下进行冷冻后并使其融化，可反复进行多次冻融过程，该处理破坏了原料的细胞结构，利于果蔬提质和干燥节能。对于干燥产品的色泽品质，冻融预处理不属于常规的护色手段，但可以利用冻融过程中酚类物质的酶促褐变反应获得色泽较暗且较深的产品^[39]。Zhang Long等^[62]研究发现冻融处理利于藕片在红外线和对流干燥中形成粉红色表面，显著改善了产品的色泽品质。Chao Erpeng等^[39]对远红外干燥籽用南瓜的研究也表明冻融处理使样品色泽变得更红。因此，这种预处理方法只适用于小部分色泽偏白且酚类物质含量较高的原料。而对于大部分果蔬物料，如桔梗菜^[62]和胡萝卜^[63]，冻融破坏组织细胞会加速酚类物质的流出与褐变反应，明显降低产品的

色泽品质。针对这种情况,目前比较有效的解决方式是将冻融与超声波等手段联合,降低样品中的氧气含量与褐变程度^[63-64]。如Xu Xin等^[63]报道了经超声-冻融联合预处理的冻干秋葵与鲜样相比具有更小的色差值和更低的褐变度。冻融技术操作简单方便,但容易造成蛋白质变性。因此,此法不适宜于牛油果、椰子等蛋白质含量较高的果蔬。

4.3 渗透护色技术

渗透是另一种已成熟应用于香蕉、苹果、辣椒、胡萝卜等果蔬干燥的非热前处理技术,需根据原料风味、质构和色泽等特性选择适宜的渗透剂。目前,国内外常用的渗透剂主要以糖和糖醇、抗氧化剂及盐为主,还包括甘油和蜂蜜等甜味剂。护色原理是改变果蔬细胞结构、去除氧气,并增强原料基质的结构和抗氧化活性。糖和糖醇类渗透剂主要包括蔗糖、葡萄糖、果糖、麦芽糖、甘露糖醇和山梨糖醇等,多应用于水果的预处理。赵红伟等^[64]的研究表明蔗糖溶液造成的渗透性脱水改善了芒果的褐变,并在后续的真空冷冻干燥过程中改善样品的色泽。此外,渗透在果蔬内部的糖也可和氨基酸在热干燥过程中发生美拉德反应,促进产品风味并加深红色系果蔬原料的色泽。而Prosapio等^[65]报道糖醇类渗透剂更优于糖类,这是因为糖醇不仅可以降低产品的能量,而且可以减少渗透剂结晶和微生物腐败。抗氧化剂类渗透剂主要包括抗坏血酸和柠檬酸等低pH值有机酸。它们不仅可以保护类胡萝卜素等天然色素不被氧化降解,也可以抑制原料中多酚氧化酶、过氧化物酶活性,显著改善因酶促褐变引起的果蔬变色。Chuyen等^[66]发现木鳖果经抗坏血酸和柠檬酸预处理并在70℃下进行热风干燥后的色泽较佳,且保留了较高的类胡萝卜素含量(136.3 mg/100 g和126.9 mg/100 g)和2,2-联氮-双(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)阳离子自由基清除能力(10.91 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ 和10.14 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ (以Trolox当量计))。盐类渗透剂主要包括氯化钠、氯化钾和氯化钙,多应用于蔬菜的预处理。钙盐能够与水果中的果胶相互作用,产生果胶酸钙,这有助于稳定细胞结构,减少干燥过程中的组织软化。因此,盐类常与糖及抗氧化剂类渗透剂结合使用,在不改变果蔬细胞结构的前提下提高产品的色泽品质。如刘丽娜等^[67]的研究表明,将双孢菇放入含有0.04 g/100 mL抗坏血酸、0.2 g/100 mL柠檬酸、0.3 g/100 mL氯化钙和0.2 g/100 mL氯化钠的混合护色剂中浸泡10 min后再进行热风干燥,干制品的 L^* 值可达到80,护色效果最好。渗透技术处理过程时间较短,对物料组织结构影响小,但此技术只适合于部分对滋味和风味有特殊要求的产品制作,无法满足市场产品的全部需求。

4.4 新兴护色技术

新兴护色技术主要包括超声波技术、辐射技术、

脉冲电场技术等。这些前处理技术均可以显著缩短果蔬的干燥时间,从而保留原料内部更多的天然色素成分及含量。

超声波技术的特点是可以透过空化作用快速高效地在果蔬组织中传递能量,使褐变酶和微生物失活,并在原料内部形成微孔通道,保留色素。Li Lu等^[68]发现李子经过超声波处理再经过热泵干燥后的总色差值与对照组相比显著降低了22.63%,且李子的色差值随超声强度的增加而降低,说明超声波处理有利于李子的保色。同样地, Li Yuanhui等^[69]也发现超声波辅助真空干燥的山楂比真空干燥山楂显示出更高的色泽保持率、更高的总黄酮含量及1,1-二苯基-2-苦基肼自由基清除能力。乙醇-超声联合处理也常被应用于果蔬的干燥护色。如Granello等^[70]研究发现用乙醇-超声联合预处理香蕉片10 min后再进行热风干燥,会使香蕉片具有更诱人的色泽($L^*=63.27$ 、 $b^*=29.32$)、更高的酚类化合物含量和抗氧化活性。这可能是由于乙醇-超声联合预处理显著缩短了干燥时间,保留了香蕉中更多的活性成分^[70]。而Martins等^[71]研究发现,加入乙醇(15 min)会使热风干燥土豆片的 L^* 值显著降低。这是因为乙醇可以减少细胞壁的厚度并改变其组成,扩大了色素与氧化酶的接触面,促进了褐变反应。因此,此法的护色效果也受到原料特性、超声波和乙醇处理时间的影响。长时间超声波产生的热量也对果蔬的热敏性营养成分造成不利影响,需根据不同原料特性进行参数优化。

远红外辐射技术是另一种应用于果蔬提质的新型前处理技术。远红外辐射射线的热量可以直接均匀地转移到被干燥物料的中心,不会造成物料表面和细胞的大幅度破坏。此外,由于远红外辐射的传热效率高,有效减少了干燥时间和耗能,且改善了热敏性色素受热分解的情况。Liu Ziliang等^[72]研究发现,远红外辐射加热辅助脉冲真空干燥可以较好地保持蓝莓中的花青素含量及色泽品质;而Deng Lizhen等^[73]研究发现远红外辐射联合热风干燥技术可以使红辣椒在70℃和80℃干燥条件下 L^* 值分别显著上升9.61%和2.68%。但远红外辐射波长透入深度小,对物料前处理要求较高,只适用于薄层物料。

脉冲电场处理属于新兴的非热食品加工方法,其技术原理是在电极之间产生电场,有效防止由于原料温度过度升高而诱发的色素物质降解和褪色,此外,脉冲电场也可以使酶失活,从而抑制果蔬产品色泽的变化^[74]。该技术处理时间短、操作简单,但是脉冲电场处理对果蔬色泽的影响很大程度取决于原料特性和处理条件。该技术目前在热风干燥菠菜和枸杞、真空干燥胡萝卜和喷雾干燥辣椒粉等产品的护色方面得到了良好的应用。但由于电极周围的电化学反应可能会导致原料发生金属污染、脂质氧化反应和蛋白质变性,因此不适合脂质和蛋白质含量较高的果蔬原料。

目前, 为进一步加强对于干燥产品的护色提质效果, 通常会将两种或者多种护色技术联合应用。例如, 超声-渗透联合技术已成功应用于干燥胡萝卜、李子和草莓等果蔬的色泽与营养品质改善; 漂烫-脉冲电场-超声联合技术可使微波-真空干燥蔓越莓的多酚、花青素和类黄酮含量更高, 色泽和口感更好; 而脉冲电场 (2.8 kV/cm、750 p)-渗透 (55 °C、60 min) 联合处理使热风干燥枸杞的色泽得到更好的保留, 总酚含量和抗氧化能力更高。

热处理技术与非热处理技术果蔬在护色过程中的应用如表3所示。

表3 果蔬在干燥过程中的护色方法
Table 3 Color preservation methods of fruits and vegetables during drying process

是否有热源	护色方法	机理	参考文献
是	漂烫 (水溶液、水蒸汽、微波)	钝化酶活性; 去除氧气	[54:60-61]
否	冻融	促进酶促褐变, 使样品色泽加深	[39:62-64]
否	渗透 (糖和糖醇、抗氧化剂、盐)	改变细胞结构; 去除氧气; 增强抗氧化性; 抑制多酚氧化酶、过氧化物酶活性	[64-67]
否	超声波、超声波-乙醇、远红外辐射、脉冲电场	改变细胞结构与色素分布; 去除氧气; 钝化酶活性; 保护色素不被降解	[68-74]

5 结语

干燥果蔬产品鲜艳的色泽往往表明其具有较高的天然色素含量、营养价值与生物活性, 因而赋予其更高的消费者接受度与满意度。干燥果蔬的色泽是由原料特性、天然色素种类与性质 (包括降解产物)、干燥方法与前处理技术共同决定的, 应根据不同的原料特性与产品需求, 一对一选择适宜的干燥方法与工艺参数。目前存在的问题是缺乏对护色后果蔬产品在贮藏期间综合品质变化的跟踪与研究, 以及人体对护色果蔬产品中色素的代谢、转运和吸收过程的研究, 同时缺少相应的临床试验等。今后的研究应重点关注以下几个方面: 1) 明确果蔬中不同类型色素在干燥环境下的降解机制。广泛关注食品基质、色素性质与结构的多样性及复杂性; 明确色素成分之间的内在联系, 以及在不同干燥条件及贮藏期间的降解路径; 有必要实别、量化有毒的色素中间产物、代谢物或干燥副产物, 评估对消费者健康的风险。2) 建立干燥及护色技术参数数学模型。针对果蔬原料特异性, 采用适当的数学模型, 快捷优化干燥及护色技术参数, 提高加工效率, 保护果蔬的综合品质和预测有毒残留物等。3) 开发新型护色联合干燥技术。推动创新型技术在果蔬干燥领域的发展, 尝试多种创新型技术联合实现“优势互补”, 以获得更高色泽品质的果蔬干燥制品。同时, 改善创新型实验室规模联合干燥设备, 实现工业化生产。

参考文献:

- [1] XU B, TILIWA E S, YAN W, et al. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: a review[J]. Food Research International, 2022, 152: 110744. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110744.
- [2] KRISHNAN K R, RAYAGURU K, NAYAK P K. Ultra-sonicated vacuum drying's effect on antioxidant activity, TPC, TFC and color of elephant apple slices[J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100629. DOI:10.1016/j.fbio.2020.100629.
- [3] TAVARES I M D 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: 108750. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108750.
- [4] PHAN K, RAES K, SPEYBROECK V V, et al. Non-food applications of natural dyes extracted from agro-food residues: a critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 301: 126920. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.126920.
- [5] FRIED R, OPREA L, FLECK K, et al. Biogenic colourants in the textile industry: a promising and sustainable alternative to synthetic dyes[J]. Green Chemistry, 2022, 24: 13. DOI:10.1039/d1gc02968a.
- [6] PRABOWO C P S, EUN H, YANG D, et al. Production of natural colorants by metabolically engineered microorganisms[J]. Trends in Chemistry, 2022, 4(7): 608-626. DOI:10.1016/j.trechm.2022.04.009.
- [7] 洪军, 张开放, 李倩, 等. 韭菜叶绿素的提取, 稳定性及微胶囊制备的研究[J]. 中国食品添加剂, 2021(9): 66-72. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2021.09.010.
- [8] 闫震, 聂继云, 程杨, 等. 水果、蔬菜及其制品中叶绿素含量的测定[J]. 中国果树, 2018(2): 59-62; 72. DOI:10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2018.02.018.
- [9] 黄持都, 胡小松, 廖小军, 等. 叶绿素研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2007(3): 92-96. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2007.03.023.
- [10] 徐昌杰, 张上隆. 植物类胡萝卜素的生物合成及其调控[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(1): 64-70. DOI:10.13592/j.cnki.ppj.2000.01.027.
- [11] 朱明明, 樊明涛, 何鸿举, 等. 类胡萝卜素降解方式的研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 308-317. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201711048.
- [12] MENG F, LI Y, LI S, et al. Carotenoid biofortification in tomato products along whole agro-food chain from field to fork[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 296-308. DOI:10.1016/j.tifs.2022.04.023.
- [13] LÓPEZ-GÁMEZ G, ELEZ-MARTÍNEZ P, MARTÍN-BELOSO O, et al. Pulsed electric field treatment strategies to increase bioaccessibility of phenolic and carotenoid compounds in oil-added carrot purees[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130377. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130377.
- [14] LÜ Ying, BI Jingfeng, CHEN Qin, et al. Discoloration investigations of freeze-dried carrot cylinders from physical structure and color-related chemical compositions[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(12): 5172-5181. DOI:10.1002/jsfa.11163.
- [15] 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): 10.
- [16] 郭崇婷, 李旋, 毕金峰, 等. 疏果活性成分、功能特性及其应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 41(11): 303-309. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190702-024.
- [17] 王何柱, 朱勇, 朱怡, 等. 不同花色芸豆种皮酚类化合物组成及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 204-210. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190509-093.

- [18] 陈佳歆, 周沫, 毕金峰, 等. CO₂脱涩对柿果理化特性, 酚类成分及抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 28-35. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181023-265.
- [19] ZHU Y, LV J, GU Y, et al. Mixed fermentation of Chinese bayberry pomace using yeast, lactic acid bacteria and acetic acid bacteria: effects on color, phenolics and antioxidant ingredients[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 163: 113503. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113503.
- [20] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.10.054.
- [21] 肖默艳, 黄燕芬, 王东伟, 等. 甜菜红素提取、纯化、稳定性及抗氧化活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 304-311. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.051.
- [22] 袁鹏, 陈莹, 肖发, 等. 姜黄素的生物活性及在食品中的应用[J]. 食品工业科技, 2012, 33(14): 371-375. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.14.052.
- [23] 狄建彬, 顾振纶, 赵笑东, 等. 姜黄素的抗氧化和抗炎作用研究进展[J]. 中草药, 2010, 41(5): 854-857. DOI:10.7501/j.issn.0253-2670.2010.5.2010005055.
- [24] 李培, 陈少明. 超声波辅助萃取芦荟中蒽醌类化合物工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2010(11): 5867-5869.
- [25] 李月, 段文娟, 王晓, 等. 高速逆流色谱技术分离纯化红葱中的萜醌类化合物[J]. 天然产物研究与开发, 2016(12): 1911-1914.
- [26] 沈静, 王敏, 冀晓龙. 果蔬干制技术的应用及研究进展[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(3): 95-97.
- [27] SONG J, CHEN Q, BI J, et al. GC/MS coupled with MOS e-nose and flash GC E-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods[J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127201. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127201.
- [28] POLAT S, GUCLU G, KELEBEK H, et al. Comparative elucidation of colour, volatile and phenolic profiles of black carrot (*Daucus carota* L.) pomace and powders prepared by five different drying methods[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130941. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130941.
- [29] 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. DOI:10.1016/j.fbio.2021.101179.
- [30] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125062.
- [31] LI Xuan, WU Xinye, BI Jinfeng, et al. Polyphenols accumulation effects on surface color variation in apple slices hot air drying process[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 108: 421-428. DOI:10.1016/j.lwt.2019.03.098.
- [32] SAHOO M, TITIKSHYA S, ARADWAD P, et al. Study of the drying behaviour and color kinetics of convective drying of yam (*Dioscorea hispida*) slices[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 176: 114258. DOI:10.1016/j.indcrop.2021.114258.
- [33] 王允圃, 刘玉环, 阮榕生, 等. 食品热加工与非热加工技术对食品安全性的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(7): 463-467.
- [34] FAN K, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Recent developments in high efficient freeze-drying of fruits and vegetables assisted by microwave: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(8): 1357-1366. DOI:10.1080/10408398.2017.1420624.
- [35] TORRES C D, DÍAZ-MAROTO M C, HERMOSÍN-GUTIÉRREZ I, et al. Effect of freeze-drying and oven-drying on volatiles and phenolics composition of grape skin[J]. Analytica Chimica Acta, 2010, 660(1/2): 177-182. DOI:10.1016/j.aca.2009.10.005.
- [36] PARK J H, KIM C S. The stability of color and antioxidant compounds in paprika (*Capsicum annuum* L.) powder during the drying and storing process[J]. Food Science and Biotechnology, 2007, 16(2): 187-192. DOI:10.1080/087559120701225037.
- [37] 陈沁雯, 林胜岚, 刘斌雄, 等. 不同干燥方法对玫瑰茄品质的影响及其花青素的提取工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(8): 75-82. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2020.08.012.
- [38] 普红梅, 杨万林, 李燕山, 等. 不同干燥方式对彩色马铃薯干片色泽和花青素含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2019(3): 58-62.
- [39] CHAO Erpeng, TIAN Jianjun, FAN Liuping, et al. Drying methods influence the physicochemical and functional properties of seed-used pumpkin[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130937. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130937.
- [40] NI J, DING C, ZHANG Y, et al. Impact of different pretreatment methods on drying characteristics and microstructure of goji berry under electrohydrodynamic (EHD) drying process[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 61: 102318. DOI:10.1016/j.ifset.2020.102318.
- [41] 毕金峰, 冯舒涵, 金鑫, 等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 414-421. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2022.02.0414.
- [42] 陈君琛, 杨艺龙, 翁敏劼, 等. 即食杏鲍菇热风-真空联合干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 331-338. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.14.041.
- [43] 王军, 程晶晶, 牛亚冰. 番薯片热风与微波联合干燥特性及品质评价[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 138-142; 147. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.02.019.
- [44] 程晶晶, 王军, 王崇. 紫薯片热风与微波联合干燥特性及品质评价[J]. 食品科技, 2015(10): 39-44.
- [45] KAO T H, CHEN C J, CHEN B H. An improved high performance liquid chromatography-photodiode array detection-atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry method for determination of chlorophylls and their derivatives in freeze-dried and hot-air-dried *Rhinacanthus nasutus* (L.) Kurz[J]. Talanta, 2011, 86: 349-355. DOI:10.1016/j.talanta.2011.09.027.
- [46] KIDMOSE U, EDELENBOS M, NØRBÆK R, et al. 8-Colour stability in vegetables[M]// MACDOUGALL D B. Colour in food. Sawston: Woodhead Publishing, 2002: 179-232. DOI:10.1533/9781855736672.179.
- [47] KANG Y R, PARK J, JUNG S K, et al. Synthesis, characterization, and functional properties of chlorophylls, pheophytins, and Zn-pheophytins[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 943-950. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.11.079.
- [48] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201711048.
- [49] ROJAS M L, SILVEIRA I, AUGUSTO P E D. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin[J]. Food and Bioprocess Processing, 2020, 119: 20-30. DOI:10.1016/j.fbp.2019.10.008.
- [50] 李大婧, 刘志凌, 刘春泉. 叶黄素酯和叶黄素的光热降解动力学[J]. 江苏农业学报, 2008(1): 97-98. DOI:10.3969/j.issn.1000-4440.2008.01.021.
- [51] 肖亚冬, 李大婧, 刘春泉. 冻干甜玉米粒贮藏过程中玉米黄质稳定性分析[J]. 食品科学, 2014, 35(6): 229-233. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201406049.
- [52] GURAK P D, MERCADANTE A Z, GONZÁLEZ-MIRET M L, et al. Changes in antioxidant capacity and colour associated

- with the formation of β -carotene epoxides and oxidative cleavage derivatives[J]. Food Chemistry, 2014, 147: 160-169. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.09.106.
- [53] 沈金玉, 黄家音, 李晓莉. 果蔬酶促褐变机理及其抑制方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(6): 150-155. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2005.06.048.
- [54] DERARDJA A E, PRETZLER M, KAMPATSIKAS I, et al. Polyphenol oxidase and enzymatic browning in apricot (*Prunus armeniaca* L.): effect on phenolic composition and deduction of main substrates[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 196-206. DOI:10.1016/j.crfs.2021.12.015.
- [55] OZKAN K, KARADAG A, SAGDIC O. The effects of different drying methods on the *in vitro* bioaccessibility of phenolics, antioxidant capacity, minerals and morphology of black 'Isabel' grape[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 158: 113185. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113185.
- [56] CAVALCANTI R N, SANTOS D T, MEIRELES M A A. Non-thermal stabilization mechanisms of anthocyanins in model and food systems: an overview[J]. Food Research International, 2011, 44(2): 499-509. DOI:10.1016/j.foodres.2010.12.007.
- [57] 彭斌, 李红艳, 邓泽元. 食品中花青素在热加工中的降解及其机制研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(10): 3851-3858.
- [58] 冯生光, 覃耿垚, 刘红霞, 等. 姜黄素降解产物的分离鉴定及姜黄素的稳定性考察[J]. 沈阳药科大学学报, 2009(5): 361-365.
- [59] 施惠, 田益玲. 枣红素的提取及稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(5): 186-189. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2011.05.054.
- [60] ZHU X, HEALY L E, SEVINDIK O, et al. Impacts of novel blanching treatments combined with commercial drying methods on the physicochemical properties of Irish brown seaweed *Alaria esculenta*[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130949. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130949.
- [61] KRIAA K, NASSAR A F. Comparative study of pretreatment on microwave drying of Gala apples (*Malus pumila*): effect of blanching, electric field and freezing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 113693. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113693.
- [62] ZHANG Long, YU Xiaojie, ARUN S M, et al. Effect of freeze-thaw pretreatment combined with variable temperature on infrared and convection drying of lotus root[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112804. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112804.
- [63] XU Xin, ZHANG Lei, FENG Yabin, et al. Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the quality characteristics of the dried product[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105300. DOI:10.1016/j.ultsonch.2020.105300.
- [64] 赵红伟, 曹彬彬, 张谐天, 等. 渗透方式对真空冷冻干燥芒果细胞结构及品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 50-57. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021070226.
- [65] PROSAPIO V, NORTON I. Simultaneous application of ultrasounds and firming agents to improve the quality properties of osmotic + freeze-dried foods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 402-410. DOI:10.1016/j.lwt.2018.05.068.
- [66] CHUYEN H V, ROACH P D, GOLDING J B, et al. Effects of pretreatments and air drying temperatures on the carotenoid composition and antioxidant capacity of dried gac peel[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016, 41(6): e13226. DOI:10.1111/jfpp.13226.
- [67] 刘丽娜, 王安建, 李玉爽. 双孢菇的非硫护色及热风干燥方式的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(12): 303-306. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.12.058.
- [68] LI Lu, YU Yangyang, XU Yujuan, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the drying characteristics and quality properties of Sanhua plum (*Prunus salicina* L.)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110653. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110653.
- [69] LI Yuanhui, WANG Xuecheng, WU Zhenfeng, et al. Dehydration of hawthorn fruit juices using ultrasound-assisted vacuum drying[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 68: 105219. DOI:10.1016/j.ultsonch.2020.105219.
- [70] GRANELLA S J, BECHLIN T R, CHRIST D. Moisture diffusion by the fractional-time model in convective drying with ultrasound-ethanol pretreatment of banana slices[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 76: 102933. DOI:10.1016/j.ifset.2022.102933.
- [71] MARTINS A F L, VIEIRA É N R, LEITE JÚNIOR B R D C, et al. Use of ultrasound and ethanol to improve the drying of yacon potato (*Smallanthus sonchifolius*): effect of chemical and thermal bleaching[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 162: 113448. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113448.
- [72] LIU Ziliang, XIE Long, ZIELINSKA M, et al. Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102948. DOI:10.1016/j.ifset.2022.102948.
- [73] DENG Lizhen, YANG Xuhai, MUJUMDAR A S, et al. Red pepper (*Capsicum annum* L.) drying: effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure[J]. Drying Technology, 2018, 36(8): 893-907. DOI:10.1080/07373937.2017.1361439.
- [74] JIANG J, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145: 111300. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111300.