

火龙果色素生物活性及其提取纯化研究进展

Advances on bioactivity and separating methods of pitaya fruit pigment

段晓嫣^{1,2} 田艳^{1,2} 邓放明^{1,2}

DUAN Xiao-yan^{1,2} TIAN Yan^{1,2} DENG Fang-ming^{1,2}

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128; 2. 食品科学与生物技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410128)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. Food Science and Biotechnology of Hunan Provincial Key Labtory, Changsha, Hunan 410128, China)

摘要:综述火龙果色素的主要成分及基本理化性质,系统总结国内外火龙果色素的提取与纯化技术,简述火龙果色素的生物活性,分析火龙果色素研究中存在的问题,提出火龙果色素在实际应用中的方向。

关键词:火龙果;天然色素;甜菜苷;分离;生物活性

Abstract: This paper describes the main components and basic physical properties of the pigment of pitaya fruit, summarizes the extraction technology and purification technology at home and abroad. Gives a comprehensive introduction to the bioactivity of the pitaya fruit and analyzes the problems exist in the research of the pigment as well as the application of the pitaya fruit pigment in daily life.

Keywords: pitaya; natural pigment; betanin; extraction; bioactivity

火龙果 (*Hylocereus undulatus* Britt) 又名仙蜜果、青龙果、情人果等,属于仙人掌科植物^[1-2],原产于赤道附近的热带雨林地区,后传入东南亚国家及中国,在中国海南、湖南、福建、云贵地区、两广地区^[3]已开始引种试种。火龙果果实呈椭圆形,果皮表面有形如蛟龙龙鳞的肉质鳞片,故名火龙果;果皮色泽艳丽^[4],多为玫瑰紫;其口感清爽多汁,营养价值很高且植物性蛋白与膳食纤维含量丰富^[5]。常食用火龙果还可以改善便秘,辅助治疗糖尿病及高血脂症^[6-7]。

近年来,食用色素安全问题频频曝光,合成色素的使用已逐渐受限,天然色素的开发与应用成为世界多国的关注热点。美国、日本等发达国家天然色素的使用比例逐年递增^[8],而中国天然色素资源的开发与利用还未成熟。中国地

域辽阔,许多可用于色素提取的植物都能种植。火龙果含有丰富的天然色素,是天然色素的良好来源。目前国内外已有不少关于火龙果色素的研究报道,本文拟从火龙果色素的主要成分及其基本理化性质、提取与纯化方法、生物活性等方面进行综合评述,以为火龙果天然色素资源的有效开发利用及深入研究提供参考。

1 火龙果色素的主要成分与理化性质

1.1 主要成分及结构

火龙果果皮及果肉火龙果的果肉含有丰富的天然色素,其色泽多呈玫瑰紫^[9]。Florian C Stizing 等^[10]报道了火龙果中皮层组分及结构,其研究结果表明火龙果中皮层色素主要成分为甜菜苷,并分离得到 10 种 β -花青苷。 β -花青苷大部分为甜菜苷,基本发色基团为 1,7-二偶氮庚甲碱,其化学结构式见表 1 及图 1^[11]。

火龙果果皮及果肉色素均为甜菜苷类色素,二者具有相同的光谱特征,其最大吸收波长为 538 nm^[12]。甜菜苷类色素中 75%~80% 是甜菜苷,其余还有异甜菜苷、前甜菜苷等;自然条件下,游离甜菜红素和葡萄糖或葡萄糖醛酸结合成苷,属于吡啶类衍生物。其分子式为 $C_{24}H_{26}N_2O_{13}$ ^[13-14],分

表 1 甜菜花青素化学结构中 R_1 和 R_2 取代基各自对应的物质

Table 1 Substances from different substituent groups of R_1 and R_2 in betacyanins (from Figure 1)^[11]

R_1	R_2	名称
β -葡萄糖	H	甜菜苷
6-O-(丙二酰基)- β -葡萄糖	H	Phyllocactin
6-O-(3-羟基-3-甲基戊二酰基)- β -葡萄糖	H	Hylocerinin
2-O-(葡萄糖醛酸)- β -葡萄糖	H	苋菜红苷
H	β -葡萄糖	千日红素

基金项目:公益性行业(农业)科研专项资助(编号:201303079);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX2017B353)

作者简介:段晓嫣,女,湖南农业大学在读研究生。

通信作者:邓放明(1962—),男,湖南农业大学教授,博士。

E-mail: fmdenghnan@sina.com

收稿日期:2017—08—30

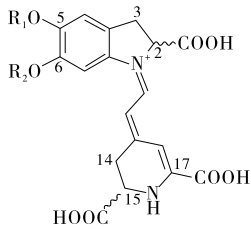


图1 甜菜花青素(betacyanins)化学结构式

Figure 1 Structure formula of betacyanins^[11]

子量为550.46^[13]。赵珍珍^[15]³⁹⁻⁴⁸对火龙果色素进行红外光谱分析,显示火龙果色素物质内均存在C—O—C键、C—O—H键、饱和C—H键、C—O键及芳环或杂环。

1.2 稳定性

1.2.1 光稳定性 天然色素通常在光照条件下不稳定,在强光环境中易降解褪色,不利于食品的加工、运输和保存^[16]。太阳光直射条件下的火龙果果皮色素和果肉色素最不稳定,散射光次之,黑暗环境对其影响不大^[17]。火龙果果肉色素光稳定性优于果皮色素;在光环境下火龙果果肉色素可稳定10 d左右,而果皮色素可维持稳定时间减半^[18]²⁸。此外,相比太阳光,蓝光、紫外光对火龙果色素稳定性影响更大,尤其在紫外光照射下的火龙果色素降解速率最快^[18]²⁷⁻²⁸^[19]。因此,在实际生产应用中,火龙果色素应尽量避免光线的直射(如采用避光材料对其进行包装),提高其色泽鲜艳度和持久时间。

1.2.2 热稳定性 火龙果色素加热易降解。在加热条件下,甜菜苷发生差向异构形成异甜菜苷,随着异甜菜苷比例的升高,色素色泽变浅,甚至褪色^[20]。宋珊珊等^[21]以白肉红皮火龙果为原料,探讨不同温度下火龙果果皮色素的稳定性,结果表明:火龙果果皮色素在室温及以下温度(5℃和25℃)时较稳定,存放24 h后变化不大;而在45℃和85℃的环

境下存放24 h后,色素残留率分别为原来的56%和15%;在85℃的环境中仅6 h后火龙果果皮色素褪为无色。张伟峰等^[19]对红肉火龙果果皮及果肉色素热稳定性的研究也得到了相似的结论。即,火龙果色素在温度<40℃时较稳定,温度>60℃时降解速率加快,温度达90℃时,色素易褪色。火龙果色素的热敏性是限制其在食品加工应用中的重要因素,因此在实际应用中,应避免对其进行高温长时间处理,或添加护色剂(如一定浓度的柠檬酸)对其进行护色。

1.2.3 酸碱稳定性 火龙果色素在弱酸性和中性条件下较稳定,在碱性环境中不稳定^[22]。火龙果色素随pH变化所发生的颜色变化与花色苷类色素不同,且在弱酸环境中稳定性较好,比花色苷类色素更具有开发价值和应用前景^[23]。张伟峰^[17]、余莉莉^[18]²⁶、王新广^[24]等的研究表明,在弱酸性和中性介质中,火龙果色素颜色呈亮紫红色;在强酸(pH<3)环境下色素颜色明亮度减弱,变为深紫红。在碱性环境中,火龙果色素由橙红逐渐变为淡黄色。叶丽君等^[25]对火龙果色素在不同pH条件下的降解动力学进行了研究,指出随pH值增大,火龙果色素的最大吸收波长增大;pH 2.0时,最大吸收波长(532 nm)略微蓝移;在pH 3.0~7.0的酸性到中性溶液中其最大吸收波长移动较小,基本稳定在536 nm附近;而在碱性区域移动较大,每个pH值单位波动约为2~6 nm。这是因为在强酸环境下,甜菜苷C₁₅发生脱氢反应生成脱氢甜菜苷。脱氢甜菜苷的最大吸收波长为488 nm,从而影响了色素溶液的最大吸收波长,火龙果色素溶液最大吸收波长蓝移;在碱性条件下甜菜苷中的酚羟基转化成含酚盐阴离子的化合物,导致酚羟基氧原子上的2对孤对电子增加到3对,使n→π共轭作用进一步加强,火龙果色素的最大吸收波长红移,其降解途径见图2^[26]。

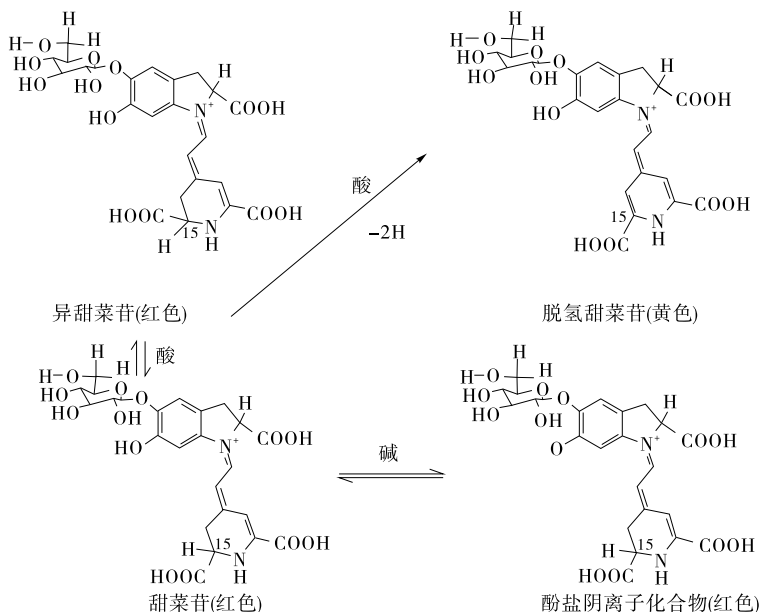


图2 火龙果色素(甜菜苷)的降解途径

Figure 2 Initial steps of betanin degradation pathways^[26]

1.2.4 金属离子 不同金属离子对火龙果色素稳定性影响不同,但目前在某些金属离子对其影响方面存在争议,需进行进一步的研究探讨。杜坚新等^[27]的研究表明, Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 使色素溶液颜色加深且颜色可保持稳定,但 Al^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Fe^{3+} 使色素溶液褪色,变成淡蓝色或黄绿色。赵珍珍^{[15]34-38}认为 Zn^{2+} 、 Ca^{2+} 会使色素溶液变得浑浊,与前者研究结果相悖。庄明珠等^[28]运用紫外可见分光光度计扫描技术,发现 Fe^{3+} 对色素的破坏可能与改变色素的结构有关,而 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 可能只是促进了色素的氧化,使其吸光值下降。总体来说,大多数学者均认为 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 对火龙果色素不利,而其他金属离子对火龙果色素的影响还需要进行进一步研究,以便进一步明确不同金属离子对火龙果色素稳定性的影响及具体反应机理。

2 火龙果色素的生物活性

2.1 抗氧化性

火龙果色素不仅具有诱人色泽,还具有一定的保健功能。火龙果色素溶液中富含甜菜红色素,目前已有相关报道证实甜菜色素能够起到一定的抗氧化作用。王标诗等^[29]以清除 DPPH· 为指标,在以 90% 的乙醇作提取溶剂,料液比为 1:16 (g/mL),温度为 25 °C 的条件下提取 180 min,所得火龙果色素的 DPPH· 清除率可达到 94.68%,清除 50% DPPH·、·OH 与 O_2^- 的有效浓度 (IC_{50}) 分别为 2.09, 46.0, 2.44 mg/mL,且清除能力与色素浓度呈正相关关系。陈冠林^{[30]63-64}建立动物模型,发现摄入火龙果果皮色素提取物的雌性大鼠血清和肝脏组织中的 SOD 和 GSH-Px 活性高于高脂模型组, T-AOC 也明显提高,说明红肉火龙果色素可有效提高大鼠机体的抗氧化能力。

甜菜色素中酚羟基具有较强抗氧化活性的基团,系统分析火龙果色素的结构十分必要,同时火龙果色素抗氧化的作用机理还需进行进一步探究。

2.2 降血脂作用

火龙果色素主要成分甜菜红素具有预防和治疗动脉粥样硬化的作用。陈冠林^{[30]64-65}报道,摄入火龙果果皮色素提取物的大鼠血清的总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量低于高脂模型组。王春丽等^[31]以红甜菜色素提取物喂养高脂血症大鼠,也得到相同结果。Murthy 等^[32]认为红甜菜在治疗糖尿病方面的作用是因为甜菜色素具有清除自由基的功能,从而降低糖尿病人的血糖以及血脂。

2.3 抗肿瘤及溶血作用

目前,国内外关于火龙果色素抗癌效果的研究与报道较少。烟利亚^{[33]63-76}通过体外细胞培养试验证实了红龙果红色素对人急性白血病细胞 HL-60 的增殖有显著抑制作用。另外, Kapadia 等^[34]发现甜菜红色素对小鼠的皮肤癌及肺癌有一定的抑制作用,其作用机理是甜菜苷可防止由二甲苯并蒽和对苯二甲酸所引发的肿瘤,有效抑制大鼠肺癌的发生。Tesoriere 等^[35]将离体红细胞在甜菜红溶液中培养一段时间,发现由氧化剂异丙基苯过氧化氢所造成的溶血作用明

显延缓。

3 火龙果色素提取技术研究进展

3.1 溶剂浸提法

溶剂浸提法是利用原料中组分在不同溶剂中溶解度差异,从而实现将组部分或全部分离的方法,是目前应用于天然色素提取的最广泛的方法之一。火龙果色素在不同有机溶剂体系中的溶解度也有所不同,水和有机溶剂以适当比例混合能将大部分或全部火龙果色素提取出来。其浸提率受提取温度、提取时间、提取溶剂 pH、提取溶剂种类及浓度等因素的影响。火龙果色素主要成分为甜菜苷,甜菜苷是一种极性较大的物质,易溶于水和可与水互溶的有机溶剂中(如水-乙醇体系、水-甲醇体系、水-丙酮体系),不溶于石油醚、苯酚、无水乙醇等有机溶剂。火龙果色素溶剂浸提法主要研究进展见表 2。

表 2 火龙果色素溶剂浸提法主要研究进展

Table 2 Advances in solvent extraction research

原料	最佳工艺参数	文献来源
白火龙果果皮	提取时间 80 min, pH 值 5.0, 提取温度 40 °C, 提取溶剂为蒸馏水	[36]
火龙果果肉	pH 值 6, 提取温度 50 °C, 提取时间 30 min, 提取溶剂为去离子水	[37]
红肉火龙果果皮	温度 30 °C, 时间 45 min, pH 值 6.5, 乙醇浓度 40 %	[38]
红肉火龙果果肉	温度 30 °C, 时间 45 min, pH 值 6.5, 乙醇浓度 30 %	[39]

总之,溶剂浸提法萃取剂价格较低、提取温度较温和、操作简单。但此法所得的火龙果色素产品纯度不高,耗时较长,且需进行二次或多次浸提,并存在提取剂残留、色素产品中含有果胶等杂质等问题。

3.2 超声波辅助提取法

超声波可与媒质产生相互作用,产生热作用、机械作用和空穴作用,在一定程度上破坏细胞壁结构,使细胞内物质快速溢出^[40-43]。从而细胞内成分更易进入溶剂,能有效提高提取率。目前已有学者利用超声波对火龙果色素进行提取(见表 3)。超声技术已广泛应用于蛋白质、多酚、多糖、黄酮、膳食纤维等天然有效成分提取,应用潜力广阔。与传统溶剂浸提法相比,超声辅助提取具有用时短、提取条件相对温和、提取效率更高的优势。

3.3 微波辅助提取法

微波辅助提取即微波萃取技术,指使用合适的溶剂在微波场中从天然植物、动物组织、矿物等中提取分离各化学成分的技术方法^[47]。其原理是:不同物质吸收微波的能力存在差异,在微波作用下,被作用基体物质的部分区域或萃取体系中的某些成分被选择性加热,使得被萃取物质与基体或体系分离,进入到微波吸收能力较差的萃取剂中^[48]。微波萃取技术具有高选择性、高提取效率、产品质量佳等优点。王娅玲等^[49]设计正交试验优化利用微波辅助萃取技术提取

表3 火龙果色素超声波辅助提取法主要研究进展

Table 3 Advances in ultrasonic-assisted extraction of pitaya fruit

原料	最佳工艺参数	文献来源
火龙果果肉	温度 40 ℃, 料液比 1 : 8 (g/mL), 超声频率 100 kHz, 超声时间 15 min, 提取 2 次	[44]
火龙果果皮	料液比 1 : 30 (g/mL), 超声频率 80 Hz, 温度 40 ℃, 超声时间 25 min	[45]
火龙果果皮	乙醇浓度 40%, 超声功率 300 W, pH 值为 4, 提取温度 30 ℃, 料液比 1 : 8 (g/mL), 提取时间 15 min	[46]

红肉火龙果果肉色素的工艺, 确定最佳提取工艺为: 料液比 1 : 50 (g/mL)、乙醇浓度 40%、微波功率 400 W、微波时间 60 s。李昌辉等^[50]以纯净水为提取溶剂、料液比 1 : 3 (g/mL)、微波功率 480 W 的条件下提取 80 s, 提取 3 次。相比传统溶剂提取法, 微波辅助萃取时间大幅度缩短, 仅需数十秒即可完成提取, 提高了生产效率; 且所得火龙果色素色泽鲜艳, 稳定性有所提高。

3.4 超临界 CO₂ 萃取法

超临界萃取技术是一种以超临界流体代替普通有机溶剂对特定组分进行提取和分离的新型技术, 为生物活性成分、天然色素、挥发油等的提取开辟了一条新道路。该技术具有无溶剂残留、萃取温度温和、CO₂ 易与萃取物迅速成为两相而分离、萃取高效快速、萃取物生物活性高等优点。超临界流体兼具气、液二者特点, 既有类似液体溶剂的密度、溶解能力, 又有与气体相似的高扩散性和低黏度^[51]。在超临界状态下, CO₂ 超临界流体有选择性地溶解极性、沸点、分子质量有差异的成分依次萃取出来, 再在常温常压下变成普通气体, 被萃取组分自动析出, 实现特定物质的分离提取。夹带剂的加入有助待萃取物脱离基物束缚, 有效提高超临界 CO₂ 对极性物质的溶解性和选择性^[52]。

近年来, 关于超临界流体提取技术在辣椒红素、玉米黄素、类胡萝卜素、花色苷等天然色素的萃取研究上已有报道。洪海龙等^[53]用超临界 CO₂ 技术有效提高了辣椒红素提取率, 且产品色价比有传统溶剂浸提法(70.1)高 3 倍多, 最高达 289.3。梁瑞红等^[54]研究表明超临界萃取法较传统有机溶剂提取法能得到更多紫草萘组分, 产品杂质更少。田密霞等^[55]运用响应面法优化了超临界 CO₂ 萃取蓝莓花色苷的工艺, 在 40 ℃、压力 28 MPa、液料比为 7 : 1 (mL/g) 的条件下萃取 60 min, 提取效果最好。同时, Farahnaz Fathordobady^[56]用超临界 CO₂ 萃取技术提取火龙果色素效果与溶剂法最优提取效果相当, 证明了超临界 CO₂ 萃取技术应用于火龙果色素提取的可行性。但目前国内外还尚未有用超临界 CO₂ 萃取技术提取火龙果色素的相关研究报道, 因此超临界 CO₂ 萃取技术提取火龙果色素的工艺参数及实用性有待进一步研究。

3.5 酶辅助提取法

近年来, 关于酶法辅助提取植物活性成分的报道越来越多。酶不仅具有专一性、高效性的特点, 作用条件温和, 利于植物活性成分的保留, 且无生物毒性, 无污染, 符合安全食品、绿色工业的时代要求。果胶酶、纤维素酶等可软化或分解植物细胞壁, 促进胞内成分流出, 增加待提取物与提取剂接触机会, 有效提高待提取生物活性成分的提取率^[57]。李颖畅等^[58]发现纤维素酶(酶用量 5 mg/g)使蓝莓花色苷提取率增加, 而果胶酶无此作用, 且这两种酶无协同作用。杨晓伟等^[59]用复合植物水解酶, 设计经正交试验优化葡萄皮花色苷的提取工艺, 在酶用量为 0.15%、提取温度 40 ℃、pH 3~4 的条件下, 提取 30 min 的效果与仅用乙醇溶剂提取法连续提取 2 次的效果相当, 有效缩短了提取的时间, 提高了生产效率。

酶法提取还可以与其他提取技术联用, 做到更快速高效提取生物活性物质。张慢等^[60]以紫薯为原料提取花青素, 体积分数为 0.1% 的盐酸乙醇溶液为提取剂, 按照 54 U/mL 的添加量添加纤维素酶, 在 100 W 超声功率下提取 33 min 提取效果最佳; 结果表明, 酶—超声波联用辅助提取效果比传统有机溶剂浸提法更省时且得率高; 同时, 花青素得率均高于微波法和超声波法, 分别提高了 32.4% 和 17.8%。熊建文等^[61]用酶辅助超声波提取火龙果多糖, 其结果表明最佳辅助酶是纤维素酶, 多糖得率达 16.61%。在生物活性物质提取新技术中, 酶的添加能够有效提高生物活性物质的得率, 缩短提取时间, 在食品功能性成分提取的应用中有着广阔前景。

4 火龙果色素的纯化技术研究

天然色素粗提液由于含有糖、果胶、脂肪、蛋白质及无机离子等多种杂质, 其溶解度、透明度、色价和品质不佳, 且稳定性较差。通常先用乙醚先去除火龙果色素粗提液中的脂肪及脂溶性物质后再对其进行纯化^[10-13]。

4.1 大孔树脂吸附法

目前, 大孔树脂吸附法是天然色素分离纯化使用最多的方法。大孔树脂吸附法不仅溶剂用量少、吸附量大高速、易解吸, 而且经济实惠、操作简便、可再生, 符合资源循环利用和两型社会的要求, 因此被广泛应用于天然色素提纯技术中。大孔吸附树脂能有效吸附色素, 经大孔吸附树脂处理后, 可有效去除色素粗提液中的杂质。龚敏等^[62-66]先后用多种型号大孔吸附树脂对火龙果色素的纯化做了筛选, 其结果均认为 S-8 型大孔吸附树脂效果最佳。但陈冠林^{[30]22-34}认为 HPD100 型大孔吸附树脂的纯化效果最好, 与上述学者的筛选结果不同。杨昌鹏等^[64]也认为在纯化火龙果果皮色素上, D101、D201 型大孔吸附树脂更合适。主要研究结果见表 4。

4.2 其他纯化分离方法

天然色素的纯化方法还有离子交换法、膜分离法、超滤法和酶法等, 但这些方法目前在火龙果色素纯化工艺的可行性和实用性还有待探究。舒娜等^[66]用 0.5% 的碱式氯化铝作

表 4 不同大孔吸附树脂纯化火龙果色素的研究比较

Table 4 Comparison on purification of pitaya fruit pigment by different macroporous adsorption

待浓缩物质	比较树脂型号	研究结果		文献来源
		最佳树脂型号	结论	
火龙果果皮色素粗提物	AB-8、NKA-9、S-8、D3520、X-5	S-8	S-8 型大孔树脂吸附效果最佳,色素液浓缩达 17 倍及以上,回收率达 93.4%	[62]
火龙果果皮果肉色素粗提物混合液	S-8、D201、AB-8	S-8	S-8 型大孔树脂吸附效果最佳,150 min 时吸附率可达 78.3%	[63]
火龙果果皮色素粗提物	D101、D201、D301、S-8、X-5	D101、D201	X-5 型大孔树脂吸附及解吸效果最好,但 D101、D201 型大孔树脂对火龙果果皮色素的分离富集效果更佳	[64]
火龙果果皮、果肉色素粗提物	HPD100、AB-8、HPD700、HPD722、HPD100A	HPD100	纯化后果皮色素色价是未纯化前的 5.39 倍,为 72.33;纯化后果肉色素色价是未纯化前的 6.2 倍,为 109.62	[30] ²²⁻³⁴
火龙果果肉色素粗提物	AB-8、NKA、D101、X-5、S-8、XDA-7、LSA-10、HPD-750 和 HPD-722	S-8	S-8 型大孔树脂的吸附和解吸能力最好,经过柱层析纯化所得色素产品,纯度为 40.9%	[33] ¹⁴⁻²⁶
火龙果果皮色素粗提物	S-8、AB-8、CAD-40、D101	S-8	纯化后色素色价提高了 4 倍	[65]

为凝聚剂,80 mg/kg 的聚丙烯酰胺作为絮凝剂去除火龙果色素粗提液中的果胶,使果胶含量降至原来的 8%。刘小玲^[12]、赵珍珍^{[15]39-48}均采用 ODSC-18 固相萃取小柱对火龙果色素进行纯化,也得到了较好的纯化效果。

5 展望

以火龙果果皮和果肉为原料提取天然色素可为火龙果资源利用和天然色素的开发与利用提供可行途径。目前,已研发出添加火龙果果皮红色素所制作出来的果冻产品,其色泽鲜艳,口感良好。另外,火龙果色素色泽鲜艳,可用于彩妆、染发剂等日化产品的研发。其甜菜红色素具有抗氧化、抗肿瘤、降血脂等生物活性,也可用于保健食品和抗衰老护肤品的研发。

目前,虽然火龙果果皮和果肉色素的提取技术已逐渐趋于成熟,但其纯化与分离技术还需进一步完善;同时,关于火龙果色素生物活性的作用机理也需进行更深层次的研究。火龙果色素对光、热、pH、某些金属离子等不稳定,在实际生产中,如何提高火龙果色素稳定性至关重要。因此,深入研究火龙果色素的降解机理、探索提高色素稳定性和维持其生物活性的方法是日后火龙果色素应用于日化、医疗、食品等实际生产中的基础,也是天然色素应用和发展的方向。

参考文献

- [1] 许伟东,廖剑铖,刘加健. 火龙果引种初报[J]. 中国南方果树, 2002, 31(1): 33-34.
- [2] 赵志平,杨春霞. 火龙果的开发与发展前景[J]. 中国种业, 2006 (2): 13-14.
- [3] 杨洪元,黄康晟. 火龙果红色素提取工艺及其性质研究[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(3): 151-152.
- [4] 李升峰,刘学铭,吴继军. 火龙果的开发与利用[J]. 食品工业科

- 技, 2003, 24(7): 88-89.
- [5] 李兴华. 21 世纪保健食品——火龙果[J]. 云南农业, 2001 (7): 14.
- [6] 吴修仁. 广东药用植物简编[M]. 广州: 广东教育出版社, 1992: 306.
- [7] CAI Yi-zhong, SUN Mei. Identification and distribution of simple and acylated betacyanins in the Amaranthaceae[J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(4): 1 971-1 976.
- [8] 石永峰. 国外天然色素研究进展[J]. 国外科技, 2003(10): 32-34.
- [9] 陈冠林,邓晓婷,胡坤,等. 火龙果的营养价值、生物学活性及其开发应用[J]. 现代预防医学, 2013, 4(11): 2 030-2 033.
- [10] STINTZING F C, ANDREAS S, CARLE R. Betacyanins in fruits from red-purple pitaya, Hylocereus polyrhizus(Weber) Britton&Rose[J]. Food Chemistry, 2002, 77(1): 101-106.
- [11] HERBACH K M, STINTZING F C, CARLE R. Betalain stability and degradation: structural and chromatic aspects[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(4): 41-50.
- [12] 刘小玲,许时婴,王璋. 火龙果色素的基本性质及结构鉴定[J]. 无锡轻工大学学报, 2003, 22(3): 62-66.
- [13] CAI Yi-zhong, SUN Mei, HAROLD C. Antioxidant activity of betalains from plants of the amaranthaceae[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(8): 2 288-2 294.
- [14] STRACK D, VOGT T, SCHLIEMANN W. Recent advances in betalain research[J]. Phytochemistry, 2003, 62(3): 247-269.
- [15] 赵珍珍. 红肉火龙果色素提取工艺优化及其化学成分分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [16] 惠秋沙. 天然色素的研究概况[J]. 北方药学, 2011, 8(5): 3-4.
- [17] 张伟锋. 台湾祥龙火龙果红色素提取和稳定性的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2004: 13-14.
- [18] 余莉莉. 火龙果果皮红色素提取、纯化、稳定性研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2012.

- [19] 张伟锋, 何生根. 火龙果果肉天然红色素的提取方法和条件[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2006, 19(4): 17-21.
- [20] 张玉霜, 许庆轩, 李红侠, 等. 甜菜色素种类分布和应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2015(24): 149-156.
- [21] 宋珊珊, 谭沙, 蔡国跃, 等. 火龙果果皮色素提取工艺及稳定性研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 121-125.
- [22] 邓育平. 火龙果果皮色素的提取与稳定性研究[J]. 现代农业科技, 2011(11): 315-321.
- [23] 刘小玲. 红龙果甜菜苷色素降解动力学研究[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(2): 44-47.
- [24] 王新广. 火龙果果皮色素的提取及稳定性研究[J]. 资源开发与市场, 2006, 22(1): 3-5.
- [25] 叶丽君, 邵伟琪, 王兴莉, 等. 不同 pH 值条件下火龙果色素的降解动力学[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 35-38.
- [26] STINTZING F C, CARLE R. Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food and in human nutrition[J]. Trends in Food Science and Technology, 2004, 15(1): 19-38.
- [27] 杜志坚, 于新. 火龙果红色素稳定性研究[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2003, 24(4): 79-83.
- [28] 庄明珠, 刘青茹, 李婉霞, 等. 多酚类物质和金属离子对火龙果果皮色素稳定性的影响[J]. 现代食品科技, 2011, 27(11): 1 320-1 324.
- [29] 王标诗, 王文青, 麦洁明, 等. 火龙果果皮色素的提取及其抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技, 2013(5): 234-238.
- [30] 陈冠林. 红肉火龙果色素提取、纯化及其抗氧化、降血脂作用的研究[D]. 广州: 广东药学院, 2013.
- [31] 王春丽, 张琳, 祖元刚, 等. 红甜菜甜菜红素降血脂作用的实验研究[J]. 食品工业, 2011(6): 12-14.
- [32] MURTHY K N C, MANCHALI S. Anti-diabetic potentials of red beet pigments and other constituents[J]. Red Beet Biotechnology, 2012(7): 155-174.
- [33] 烟利亚. 红龙果红色素稳定性及生物活性研究[D]. 厦门: 集美大学, 2011.
- [34] KAPADIA G J, TOKUDA H, KONOSHIMA T. Chemoprevention of lung and skin cancer by Beta vulgaris (beet) root extract[J]. Cancer Lett., 1996, 100(1/2): 211-214.
- [35] TESORIERE L, BUTERA D, ALLEGRA M. Distribution of betalain pigments in red blood cells after consumption of cactus pear fruits and increased resistance of the cells to ex vivo induced oxidative hemolysis in humans[J]. Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(4): 1 266-1 270.
- [36] 舒娜, 芮汉明. 火龙果果皮色素的提取和稳定性研究[J]. 粮油食品, 2003, 11(5): 10-12.
- [37] 梁彬霞, 赵文红, 白卫东, 等. 火龙果果皮色素提取工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2011, 12(6): 103-108.
- [38] 袁亚芳, 赵珍珍, 王威, 等. ‘红仙蜜’火龙果果肉色素浸提工艺的优化[J]. 福建农业学报, 2014, 29(3): 286-290.
- [39] 袁亚芳, 赵珍珍, 王威, 等. ‘红仙蜜’火龙果果皮红色素的提取工艺研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(1): 161-165.
- [40] 刘东红. 液态食品超声传播特性及品质超声检测技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 35-39.
- [41] 谷勋刚. 超声波辅助提取新技术及其分析应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007: 17-26.
- [42] CHENDKE P K, FOGLER H S. Macrosonics in industry: 4. Chemical processing[J]. Ultrasonics, 1975, 13(1): 31-37.
- [43] GONG Cui-ling, HART D P. Ultrasound induced cavitation and sonochemical yields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(5): 2 675-2 682.
- [44] 蓝培基, 黄迪南, 候敢. 超声波提取火龙果果肉红色素的初步工艺研究[J]. 广州化工, 2010, 38(11): 121-124.
- [45] 王娅玲, 李维峰, 曹海燕. 超声辅助提取火龙果果皮色素的研究[J]. 云南化工, 2015, 42(2): 14-17.
- [46] 周俊良, 沈佳奇, 韩秀梅, 等. 提取火龙果果皮红色素主要工艺的比较研究[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(1): 110-114.
- [47] 杨艳红, 戴富华, 刘慎, 等. 微波法提取红花黄色素的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2008, 29(8): 190-192.
- [48] 孙雪花, 齐广才, 刘珍叶, 等. 微波辅助提取紫甘蓝天然色素工艺优化[J]. 延安大学学报, 2010, 29(2): 68-70.
- [49] 王娅玲, 李维峰, 曹海燕. 超声辅助提取火龙果果皮色素的研究[J]. 云南化工, 2015, 42(2): 14-17.
- [50] 李昌辉, 朱贤东, 万小荣, 等. 火龙果果皮红色素的微波提取工艺[J]. 中国农学通报, 2008, 24(4): 139-143.
- [51] MASON T J. Sonochemistry and sonoprocessing: the link, the trends and (probably) the future[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2003, 10(4/5): 175-179.
- [52] 樊文乐. 超临界萃取中夹带剂的概述[J]. 食品添加剂, 2005, 2(1): 39-42.
- [53] 洪海龙, 贺文智, 索全伶. 红辣椒中辣椒红色素的提取工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2004(6): 19-21, 114.
- [54] 梁瑞红, 谢明勇, 施玉峰. 紫草色素超临界萃取与有机溶剂萃取之比较[J]. 食品科学, 2004(3): 130-132.
- [55] 田密霞, 李亚东, 胡文忠, 等. 响应面分析法优化超临界 CO₂ 萃取蓝莓花色苷工艺条件的研究[J]. 食品工业科技, 2016(1): 208-212.
- [56] FARAHNAZ Fathordobady. Effect on solvent type ratio on betacyanins and antioxidant activity of extract from Hylocereus polyrhizus flesh and peel by supercritical and extraction and solvent extraction[J]. Food Chemistry, 2016, 202: 70-80.
- [57] 邱斌, 陈卫平, 王青. 浸提法与添加果胶酶提取栀子黄色素的比较[J]. 食品工业, 2008(1): 29-31.
- [58] 李颖畅, 孟宪军. 酶法提取蓝莓果中花色苷的研究[J]. 食品工业科技, 2008(4): 215-218.
- [59] 杨晓伟, 薛红玮, 牟德华. 酿酒葡萄皮渣中花色苷提取工艺的优化[J]. 食品与机械, 2009, 25(2): 130-132.
- [60] 张慢, 潘丽军, 姜绍通, 等. 响应面法优化酶-超声波辅助同步提取紫薯花青素工艺[J]. 食品科学, 2014(10): 23-28.
- [61] 熊建文, 许金蓉, 张佳艳, 等. 酶法辅助超声波提取火龙果多糖及其抗菌活性[J]. 食品工业科技, 2015(17): 229-233, 238.
- [62] 龚敏, 陈清西. 大孔吸附树脂浓缩火龙果色素的研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(增刊): 44-46.
- [63] 杨洪元, 黄康晟. 火龙果红色素提取及其性质研究[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(3): 147, 151-152.
- [64] 杨昌鹏, 唐志远, 卢艺, 等. 火龙果果皮红色素的提取分离研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(1): 347-349, 496.
- [65] 宋珊珊, 吴天祥, 戚朱, 等. 大孔树脂纯化火龙果果皮色素工艺研究[J]. 食品科技, 2014, 39(4): 242-245.
- [66] 舒娜, 芮汉明. 凝聚剂和絮凝剂在火龙果色素提取中的运用[J]. 食品工业科技, 2003(5): 77-79.