

类胡萝卜素的提取分析进展综述

沈雯, 周翔宇, 孔羽*

上海辰山植物园, 上海市资源植物功能基因组学重点实验室, 上海

Email: *kongyu1982@163.com

收稿日期: 2021年7月5日; 录用日期: 2021年8月7日; 发布日期: 2021年8月16日

摘要

类胡萝卜素是一类广泛存在于植物中的色素, 作为各种激素的前体支持光合作用, 并通过为水果花卉等提供特有的颜色使得植物授粉和种子分散等关键功能成为可能。目前国际公认类胡萝卜素是提高人体免疫能力的物质, 也是一种抗氧化剂, 可淬灭单线态氧, 能消除羟自由基, 是脂类过氧化反应的断链抗氧化剂, 在细胞和细胞膜中和脂类结合而有效的抑制脂类的氧化。关于其生物学功能的综述较多, 但提取分析方面较少, 本文就类胡萝卜素的来源、提取分析等方面的研究进展进行综述, 以期天然保健品的开发、应用和推广提供理论依据。

关键词

类胡萝卜素, 来源, 提取, 分析

Review on the Extraction and Analysis of Carotenoids

Wen Shen, Xiangyu Zhou, Yu Kong*

Shanghai Key Laboratory of Plant Functional Genomics and Resources, Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai

Email: *kongyu1982@163.com

Received: Jul. 5th, 2021; accepted: Aug. 7th, 2021; published: Aug. 16th, 2021

Abstract

Carotenoids are pigments widely found in plants, they act as precursors of various hormones to support photosynthesis, and make pollination and seed dispersal, and other key functions possible by providing unique colors for fruits and flowers. At present, it is internationally recognized

*通讯作者。

文章引用: 沈雯, 周翔宇, 孔羽. 类胡萝卜素的提取分析进展综述[J]. 食品与营养科学, 2021, 10(3): 252-257.

DOI: 10.12677/hjfn.2021.103029

that carotenoids can improve the immune capacity of the human body and are also antioxidants, which can quench singlet oxygen effectively and eliminate hydroxyl free radicals. As a chain-breaking antioxidant in lipid peroxidation reaction, carotenoids can bind to lipids in cells and cell membranes and effectively inhibit lipid oxidation. There are many reviews that focus on the biological functions more than the extraction and analysis of carotenoids. In this paper, the research progress on the source, extraction, and analysis of carotenoids was reviewed in order to provide the theoretical basis for the development, application, and popularization of natural health products.

Keywords

Carotenoids, Sources, Extraction, Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

类胡萝卜素是一种广泛存在于自然界中的脂溶性色素，高等植物、藻类和一些微生物均可以产生类胡萝卜素[1]。类胡萝卜素属于四萜类化合物家族，形成植物花、叶和果实的黄色、橙色或者红色。类胡萝卜素的结构从化学元素组成的角度可主要分为两个亚类，即胡萝卜素和叶黄素。胡萝卜素是纯碳氢化合物， β -胡萝卜素是最常见的胡萝卜素，而叶黄素由氢、碳和一个或多个含氧官能团组成，在植物中常见的叶黄素是叶黄素、黄质、新黄质、紫黄质、玉米黄质。前者是维生素 A 的前提物质，后者是人视网膜组织的组成物质，对人眼视觉功能的发挥起到重要作用[2]。于植物自身而言，类胡萝卜素在植物新陈代谢和生长发育过程中均发挥重要作用为类胡萝卜素在光合作用中起辅助色素的作用，是植物光保护的关键组分之一[3]；类胡萝卜素作为萜类生物合成途径的一部分，与其他重要途径共享前体，一些类胡萝卜素为植物激素 ABA、独脚金内酯以及 β -环柠檬醛等信号分子的合成前体物质，从而在植物发育和应激反应中发挥作用 ABA 和独脚金内酯的生物合成提供了底物[4] [5]。类胡萝卜素是植物尤为重要的色素成分，不仅是决定水果、蔬菜内在营养品质的重要指标，也是影响果实外观品质和花卉观赏价值的重要因素[6]。于人和动物而言，类胡萝卜素具有重要的生理活性，被称为“人体健康的保护伞”，虽然一些动物通过取食在体内积累相当高含量的类胡萝卜素，但是人类和动物都不能自身合成类胡萝卜素，仅能通过饮食摄取。流行病学等相关研究表明，类胡萝卜素具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤和增加细胞与细胞间的缝间联接交流、延缓衰老等功能，富含类胡萝卜素的饮食与降低癌症、心血管疾病、骨质疏松症、糖尿病、与年龄有关的黄斑变性、白内障以及艾滋病毒感染等传染病的发病率有关[7]-[12]；目前，类胡萝卜素在制备保健品、营养补充剂、食品颜色添加剂、抗癌药物以及一些预防和治疗黄斑变性药物等方面有着广泛的应用。本文就类胡萝卜素的来源、提取及分析方面的研究进展进行综述，以期为天然保健品的开发、应用和推广提供理论依据。

2. 类胡萝卜素的来源

植物，特别是作物中类胡萝卜素的组分和含量研究分析的较多，差异也很大。目前，已从自然界中分离出超过 750 种不同的类胡萝卜素，约 500 种结构被完全鉴定[13]。类胡萝卜素仅在绿色高等植物、藻类和一些微生物(细菌、真菌)中可自行合成，动物自身不能生物合成类胡萝卜素，但可以通过取食在体内积累类胡萝卜素。

类胡萝卜素在叶绿体或有色体如黄色或红色组织中进行生物合成, 结构以 C_{40} 类异戊二烯萜及其衍生物为主, 少数细菌可合成 C_{30} 、 C_{45} 或 C_{50} 结构。简单来讲, 类胡萝卜素的生物合成可以看作是以来自甲羟戊酸途径(mevalonate, MVA)或 2-C-甲基-D-赤藻糖醇-40 磷酸(2-C-methyl-D-erythritol-4-phosphate, MEP)途径的异戊烯基焦磷酸盐(isopentenylidiphosphate, IPP, C_5)为起始, IPP 在异构酶的作用下可以生成二甲基丙烯基二磷酸(dimethylallyldiphosphate, DMAPP), 三个 IPP 分子和一个 DMAPP 在 GGPS 的催化下合成 20 个碳原子的牻牛儿基牻牛儿基二磷酸(geranylgeranyl diphosphate, GGPP), 两个 GGPP 分子在植物烯合成酶(PHY)等的作用下缩合成八氢番茄红素, 八氢番茄红素再在不同蛋白酶的作用下, 经脱氢、异构化、环化、羟基化、环氧化等转变为其它类胡萝卜素。

人类所需的类胡萝卜素主要是从新鲜水果和蔬菜中获取的。其中, 在人类饮食中常见的是: α/β -胡萝卜素、番茄红素、叶黄素、玉米黄质、 α -隐黄质、 β -隐黄质、虾青素等。 α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素主要来自于黄橙色蔬菜和水果, 如胡萝卜、芥蓝、芥菜叶、冬瓜、大蒜叶、羽衣甘蓝、菠菜、甜红椒、杏、哈密瓜。番茄红素则主要来自于番茄、西瓜、红肉木瓜和番石榴和红色或粉色的葡萄柚等。玉米黄质广泛存在于柑橘类水果和玉米中; 叶黄素 β -隐黄质主要来自于橙色水果, 如柑橘、橘子、桃、葡萄柚、柿子、蕃茄的果实和黄叶石竹等。叶黄素主要来自于深绿色蔬菜, 如羽衣甘蓝、菠菜、南瓜、卷心菜、西兰花、玉米[14] [15]。蔬菜水果的不同品种中主要的类胡萝卜素类型也不相同, 比如, 黄色辣椒中主要由叶黄素、 α/β -胡萝卜素组成, 而红色的辣椒中则主要是辣椒红素。

自然界花瓣颜色的主要色素是类胡萝卜素、花青素, 通常色素种类及含量是决定花色形成的最主要的因子, 类胡萝卜素的组成决定了花瓣呈现浅黄、黄、橘色或者红色[16]。因此, 花瓣也是我们获取是类胡萝卜素的途径之一。花瓣中主要的类胡萝卜素是叶黄素类。黄色花多含有大量的叶黄素及其环氧化物和痕量的胡萝卜素, 橘色花中一般胡萝卜素是其主要的类胡萝卜素成分。比如, 黄色的菊花中富含叶黄素及其环氧化物[17], 万寿菊舌状花中的叶黄素可占类胡萝卜素总量的 88%以上, 且万寿菊颜色越深, 其含量相对越高, 叶黄素含量的不同是造成万寿菊花色由白色到深橙色变化的关键[18] [19]。除万寿菊外, 金盏菊、百合等花色由黄色至深橙色主要是由于所含类胡萝卜素种类及含量变化。橘色的桂花中主要含有 α/β -胡萝卜素[20]。

3. 类胡萝卜素的提取

类胡萝卜素作为一种脂溶性色素, 难溶于水, 易溶于丙酮、石油醚、氯仿、四氢呋喃等有机溶剂, 且在高温、高光照等条件下极不稳定, 因此, 其提取主要包括有机溶剂法、超临界流体提取、酶催化反应法和基于有机溶剂的超声波或微波辅助提取等。

有机溶剂法是比较传统的、应用广泛的类胡萝卜素提取方法。丙酮、石油醚、正己烷、无水乙醇、BHT 等有机试剂是常用的提取溶剂。王岁楼[21]等以丙酮 - 石油醚(3:7, V/V)为提取溶剂提取辣椒中的 β -胡萝卜素, 最佳条件下 β -胡萝卜素提取率可达 4.31 mg/g。吴英详[22]等采用正乙烷 - 无水乙醇 - 丙酮(2:1:1)萃取法对“迷你红柚”果实发育过程中的类胡萝卜素进行了快速提取。

超临界流体技术作为绿色化学的一种, 在类胡萝卜素化学中的应用日益广泛, 包括类胡萝卜素的分离、提取、微胶囊制备加工以及色谱分析等各个方面。CN108465268B [23]报道了一种利用超低温临界技术从枸杞中萃取玉米黄质的方法, 其萃取过程关键的两个步骤: 首先, 与 CO_2 流量和时间相关的萃取过程, 得到溶有玉米黄质的超临界状态下 CO_2 ; 其次, 温度 $35^\circ C \sim 60^\circ C$ 至少 3 个温区范围内, 利用超临界流体, 从混合物中将玉米黄质分离并获得。Filho 等[24]采用超临界 CO_2 从一种皮坦加冻干果肉中提取类胡萝卜素, 在温度为 $60^\circ C$, 压力为 250 bar 条件下总类胡萝卜素提取率为 5474 $\mu g/g$, 其中约 66%是番茄红素, 32%为玉米黄质。赵亚平等[25]报道了超临界 CO_2 预处理除去部分杂质对溶剂萃取获得高含量胡

萝卜素具有重要作用,以含量为10%的胡萝卜素提取物为原料,在温度为60℃,压力为20 bar条件下胡萝卜素含量从原料10%预浓缩到16.7%,预浓缩物经过正己烷低温溶解分离后,获得含量高达56.7%的粉末状胡萝卜素。

酶催化反应法主要是利用生物酶破坏细胞壁结构从而将物质较温和地释放出来,周翔宇等[26]采用复合酶法提取蛹虫草类胡萝卜素,结果显示:纤维素酶-果胶酶(2:1)、酶解温度50℃、酶解时间45 min、pH=4、酶浓度为0.5%时蛹虫草类胡萝卜素的提取率可达3796.23 μg/g,与传统酸热提取法相比提取率得到显著提高。Lefebvre等[27]用纤维素酶和果胶酶联合预处理工业番茄废料后得到的富含番茄红素的树脂,其最佳条件为纤维素酶-果胶酶(1:1)、酶解温度40℃、酶解时间5 h、酶:基质比0.2 mL/g、溶剂:基质比5 mL/g、萃取时间1 h,得到了番茄红素浓度为11.5 mg/g的油树脂。

基于有机溶剂的超声波或微波辅助提取是在各种分析前处理中被广泛应用的方法,能够提高效率。比如,施佳男等[28]采用超声波法提取“牛心柿”果皮中类胡萝卜素,最佳提取条件为提取溶剂丙酮与水乙醇体积比为1:1、超声温度为50℃、超声时间为45 min、料液比为1:25 (g:mL)类胡萝卜素的提取得率为2.938 mg/g,且抗氧化活性水平较高。倪玉洁等[29]采用采用超声辅助提取福橘果皮中的类胡萝卜素,结果在液料比、超声功率和温度分别为59:1 (mL/g)、240 W和50℃、提取次数2次、提取时间10 min条件下福橘果皮总类胡萝卜素提取量达到 0.747 ± 0.027 mg/g。

此外,莫秋思等[30]报道了应用高压脉冲电场(PEF)破壁技术提取耐辐射奇球菌中类胡萝卜素的结果,电场强度30 kV/cm、处理时间30 s、脉宽3 μs,可有效提取耐辐射奇球菌中类胡萝卜素,提取量达79.13 μg/g。

4. 类胡萝卜素的分析

目前,分检测析类胡萝卜素的方法很多,主要包括紫外分光光度法(UV)、薄层色谱(TLC)、高效液相色谱法(HPLC)、超高效液相色谱法(UPLC)、液相色谱-质谱联用法(LC-MS/MS)等。

紫外分光光度法主要用于对混合物或提取物中总类胡萝卜素量的初步测定,薄层色谱法和由其发展出的高效薄层色谱法、棒状薄层色谱法等可对类胡萝卜素进行粗略分析,单精确度不高。杨万政等[31]采用紫外分光光度法对4种不同类型沙棘油的类胡萝卜素含量进行测定。张志强等[32]研究了薄层扫描法测定万寿菊中叶黄素含量的方法,以硅胶G薄层板为固定相,石油醚-氯仿-丙酮(12:5:4)为展开剂,扫描波长445 nm,参比波长700 nm,该方法具有良好的稳定性。

高效液相色谱法具有分离效能高、分析速度快、样品用量少等优点,是目前类胡萝卜素应用最广泛的分析方法,包括正相色谱法和反相色谱法。比如,王红梅和张琳[33]采用正相高效液相色谱法 Inertsil SIL-100A 色谱柱、以正己烷:乙酸乙酯=70:30 (V:V)为流动相测定万寿菊中玉米黄质和叶黄素含量。陈敏等[34]采用反相高效液相色谱法 ODS-C18 色谱柱、以甲醇-乙腈-二氯甲烷-正己烷(15:40:20:20, V/V)为流动相,等度洗脱测定枸杞中玉米黄素、β-胡萝卜素、玉米黄素双棕榈酸酯3组分的含量;已有红柚、番茄、橙色大白菜、茶树、茴香、菠菜、胡萝卜、烤烟、马铃薯薯肉、枸杞、菊花、万寿菊、芒果等植物类胡萝卜素测定的报道[22] [35]-[40]。

液相色谱-质谱联用法等串联质谱分析技术使类胡萝卜素定性定量化学更加精确。于雪丹等[41]利用高效液相色谱串联质谱法对花椒树和北京花椒果实类胡萝卜素进行定性和定量检测,结果发现花椒树和北京花椒果实分别含12种和7种类胡萝卜素、花椒树类胡萝卜素积累量随果实发育时序变化显著升高,且花椒树中类胡萝卜素主要成分为β-胡萝卜素,果实显色程度与其积累量增加显著正相关。

5. 展望

随着类胡萝卜素的应用开发,越来越多的新型绿色环保技术将被应用于类胡萝卜素的工业化、大规

模生产, 而保持生物活性、不易受热分解、稳定性强、提取率高则一直是技术研究的关键。同时, 在倡导“绿色化学”的今天, 安全、高效的检测方法开发将会成为类胡萝卜素产业发展的重要组成部分。

参考文献

- [1] Lerfall, J. (2016) Carotenoids: Occurrence, Properties and Determination. In: Caballero, B., Finglas, P.M. and Toldrá, F., Eds., *Encyclopedia of Food and Health*, Elsevier, Kidlington, 663-669. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00119-7>
- [2] Olson, J.A. (1994) Needs and Sources of Carotenoids and Vitamin A. *Nutrition Reviews*, **52**, S67-S73. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1994.tb01389.x>
- [3] Niyogi, K. (2000) Safety Valves for Photosynthesis. *Current Opinion in Plant Biology*, **3**, 455-460. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(00\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(00)00113-8)
- [4] Nambara, E. and Marion-Poll, A. (2005) Abscisic Acid Biosynthesis and Catabolism. *Annual Review of Plant Biology*, **56**, 165-185. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144046>
- [5] Sun, T., Yuan, H., Cao, H., Yazdani, M., Tadmor, Y. and Li, L. (2018) Carotenoid Metabolism in Plants: The Role of Plastids. *Molecular Plant*, **11**, 58-74. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.09.010>
- [6] 陶俊, 张上隆. 园艺植物类胡萝卜素的代谢及其调节[J]. 浙江大学学报, 2003, 29(5): 585-590.
- [7] Astorg, P. (1997) Food Carotenoids and Cancer Prevention: An Overview of Current Research. *Trends in Food Science & Technology*, **8**, 406-413. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(97\)01092-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01092-3)
- [8] 韩雅珊. 类胡萝卜素的功能研究进展(综述) [J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(1): 5-10.
- [9] Rao, A.V. and Rao, L.G. (2007) Carotenoids and Human Health. *Pharmacological Research*, **55**, 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2007.01.012>
- [10] Meyers, K.J., Mares, J.A., Igo Jr., R.P., Truitt, B., Liu, Z., Millen, A.E., Klein, M., Johnson, E.J., Engelman, C.D., Karki, C.K., Blodi, B., Gehrs, K., Tinker, L., Wallace, R., Robinson, J., LeBlanc, E.S., Sarto, G., Bernstein, P.S., San-Giovanni, J.P. and Iyengar, S.K. (2014) Genetic Evidence for Role of Carotenoids in Age-Related Macular Degeneration in the Carotenoids in Age-Related Eye Disease Study (CAREDS). *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **55**, 587-599. <https://doi.org/10.1167/iovs.13-13216>
- [11] Saini, R.K., Nile, S.H. and Park, W. (2015) Carotenoids from Fruits and Vegetables: Chemistry, Analysis, Occurrence, Bioavailability and Biological Activities. *Food Research International*, **76**, 735-750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.047>
- [12] Milani, A., Basirnejad, M., Shahbazi, S. and Bolhassani, A. (2017) Carotenoids: Biochemistry, Pharmacology and Treatment. *British Journal of Pharmacology*, **174**, 1290-1324. <https://doi.org/10.1111/bph.13625>
- [13] Rodriguez-Amaya, D.B. (2016) Food Carotenoids: Chemistry, Biology, and Technology. John Wiley & Sons, West Sussex. <https://doi.org/10.1002/9781118864364>
- [14] Rodriguez-Concepción, M., Avalos, J., Bonet, M.L., Boronat, A., Gomez-Gomez, L., Hornero-Mendez, D., Limon, M.C., Meléndez-Martínez, A.J., Olmedilla-Alonso, B., Palou, A., Ribot, J., Rodrigo, M.J., Zacarias, L. and Zhu, C.A. (2018) Global Perspective on Carotenoids: Metabolism, Biotechnology, and Benefits for Nutrition and Health. *Progress in Lipid Research*, **70**, 62-93. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2018.04.004>
- [15] Maiani, G., Castron, M.J.P., Castata, G., Toti, E., Cambrodon, I.G., Bysted, A., Granado-Lorencio, F., Olmedilla-Alonso, B., Knuthsen, P., Valoti, M., Bohn, V., Mayer-Miebach, E., Behnillian, D. and Schlemmer, U. (2009) Carotenoids: Actual Knowledge on Food Sources, Intakes, Stability and Bioavailability and Their Protective Role in Humans. *Molecular Nutrition & Food Research*, **53**, S194-S218. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200800053>
- [16] Zhu, C., Bai, C., Sanahuja, G., Yuan, D., Farré, G., Naqvi, S., Shi, L., Capell, T. and Christou, P. (2010) The Regulation of Carotenoid Pigmentation in Flowers. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **504**, 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2010.07.028>
- [17] Kishimoto, S., Maoka, T., Nakayama, M. and Ohmiya, A. (2004) Carotenoid Composition in Petals of Chrysanthemum (*Dendranthema grandiflorum* (Ramat.) Kitamura). *Phytochemistry*, **65**, 2781-2787. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.08.038>
- [18] Philip, T. and Berry, J.W. (1975) Nature of Lutein Acylation in Marigold (*Tagetes erecta*) Flowers. *Journal of Food Science*, **40**, 1089-1090. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1975.tb02275.x>
- [19] 胡可. 菊花花朵中类胡萝卜素含量和花色关系的初步分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [20] Han, Y., Wang, X., Chen, W., Dong, M., Yuan, W., Liu, X., et al. (2014) Differential Expression of Carotenoid-Related Genes Determines Diversified Carotenoid Coloration in Flower Petal of *Osmanthus fragrans*. *Tree Genetics*

- & *Genomes*, **10**, 329-338. <https://doi.org/10.1007/s11295-013-0687-8>
- [21] 王岁楼, 谢雯丽. 红辣椒中类胡萝卜素提取方法及工艺条件优化研究[J]. 农产品加工, 2020(11): 39-41+48.
- [22] 吴英详, 黄成能, 龚江美, 黄建英, 潘腾飞. 基于 HPLC 法的‘迷你红柚’果实中类胡萝卜素组成分析[J]. 热带作物学报, 2021, 42(2): 546-552.
- [23] 卓林双. 一种超低温临界萃取技术的生产工艺[P]. 中国专利, CN201810700189.3, 2018-08-31.
- [24] Filho, G.L., De Rosso, V.V., Meireles, M.A.A., Rosa, P.T.V., Oliveira, A.L., Mercadante, A.Z. and Cabral, F.A. (2008) Supercritical CO₂ Extraction of Carotenoids from Pitanga Fruits (*Eugenia uniflora* L.). *The Journal of Supercritical Fluids*, **46**, 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.02.014>
- [25] 赵亚平, Iftihan, 谭慧君, Mulugeta, G., 孙明华, 黄书成. 超临界 CO₂ 萃取浓缩天然胡萝卜素和纯化维生素 K 研究 [C]//中国化工学会超临界流体技术专业委员会. 第十二届全国超临界流体技术学术及应用研讨会暨第五届海峡两岸超临界流体技术研讨会论文摘要集. 大连: 中国化工学会, 2018: 2.
- [26] 周翔宇, 樊桂灵, 邓扬龙, 李玉锋. 复合酶法提取蛹虫草类胡萝卜素工艺优化及其抗氧化能力测定[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 80-89.
- [27] Lefebvre, T., Destandau, E. and Lesellier, E. (2021) Sequential Extraction of Carnosic Acid, Rosmarinic Acid and Pigments (Carotenoids and Chlorophylls) from Rosemary by Online Supercritical Fluid Extraction-Supercritical Fluid Chromatography. *Journal of Chromatography A*, **1639**, Article ID: 461709. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461709>
- [28] 施佳男, 许佳玉, 薛岩伟, 黄佳瑜, 周春华. 柿果皮类胡萝卜素超声提取工艺优化及功能测定[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2021, 42(2): 93-98+104.
- [29] 倪玉洁, 马文霞, 谢倩, 叶清华, 何淑敏, 张静芳, 董浩, 陈清西. 超声辅助提取福橘果皮类胡萝卜素的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 162-167.
- [30] 莫秋思, 刘文佳, 应南娇. 响应面法优化高压脉冲电场提取类胡萝卜素工艺[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集. 西安: 中国食品科学技术学会, 2020: 385-386.
- [31] 杨万政, 曹秀君, 李金淑, 曾鸣, 周珊珊, 魏小刚. 紫外分光光度法测定沙棘油中总类胡萝卜素方法改进[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2009, 18(3): 5-8.
- [32] 张志强, 唐道城, 张乃湛, 梁顺祥. 薄层扫描法测定万寿菊中叶黄素的含量[J]. 化学世界, 2009, 50(9): 536-539.
- [33] 王红梅, 张琳. 正相高效液相色谱测定万寿菊中玉米黄质和叶黄素方法研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(2): 186-188.
- [34] 陈敏, 李赫, 马文平, 戴蕴青. 反相高效液相色谱法测定枸杞中类胡萝卜素及酯类化合物[J]. 分析化学, 2006, 34(z1): 27-30.
- [35] 姜欣, 杨成, 马璐璐, 张建, 王陈强, 张连富. 热处理对不同颜色番茄中类胡萝卜素异构化和降解的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(3): 65-73.
- [36] 马帅, 王若凡, 陈霖, 孟艳, 卢倩倩, 张鲁刚. 不同产地的两种橙色大白菜类胡萝卜素积累差异分析[J]. 西北农业学报, 2021, 30(3): 395-405.
- [37] 陈丽, 坤吉瑞, 王静, 童华荣. HPLC-PDA 法分析不同茶树品种类胡萝卜素香气前体[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 193-198.
- [38] 赵显峰, 潘丽莉, 孟晶, 王茵, 江月仙, 荫士安. 高效液相色谱法测定蔬菜中类胡萝卜素组分[J]. 卫生研究, 2008, 37(2): 228-230.
- [39] 张春秋, 刘杰, 谢开云, 段绍光, 卞春松, 庞万福, 金黎平. 高效液相色谱法测定马铃薯薯肉中类胡萝卜素[J]. 食品科学, 2008, 29(4): 302-305.
- [40] Ma, X., Zheng, B., Ma, Y., Xu, W., Wu, H. and Wang, S. (2018) Carotenoid Accumulation and Expression of Carotenoid Biosynthesis Genes in Mango Flesh during Fruit Development and Ripening. *Scientia Horticulturae*, **237**, 201-206. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.009>
- [41] 于雪丹, 张川红, 郑勇奇, 夏新合, 黄磊. 2 种花椒果实类胡萝卜素成分与果色关系[J]. 林业科学研究, 2021, 34(1): 71-79.