

岩藻黄素与岩藻黄素-叶绿素复合体 (FCP)研究进展

李文军^{1,2}, 张超¹, 王文达³, 赵松浩³, 秦松^{1*}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要: 岩藻黄素又称岩藻黄质, 是广泛存在于海洋藻类中的一种光合色素, 为类胡萝卜素的含氧衍生物。岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体(FCP)是由岩藻黄素和叶绿素共同组成的高效捕光蛋白复合物。主要综述了岩藻黄素的理化性质、生物活性、和提取方法以及 FCP 的功能、结构和提取方法。

关键词: 岩藻黄素, 岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体, 生物活性, 提取

Progress on Fucoxanthin and Fucoxanthin-chlorophyll Protein(FCP) Complexes

LI Wen-jun^{1,2}, ZHANG Chao¹, WANG Wen-da³, ZHAO Song-hao³, QIN Song^{1*}

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA1102040300); 海洋公益性行业科研专项经费资助(20120527); 国家自然科学基金项目资助(41176144, 41376139); 国家科技支撑计划(2013BAB01B01)

作者简介: 李文军(1984—), 男(汉), 博士研究生, 研究方向: 海洋生物学。

* 通信作者

- 与探索, 2013(6):119-122
- [9] 孙斌. 食品安全管理存在问题及其对策研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(11):48-53
- [10] 徐志强. 浅议中国食品安全存在的弊端及对策[J]. 天津农业科学, 2012, 18(2):69-71
- [11] 李江华, 张蓓蓓, 赵苏, 等. 我国食品安全法律体系研究[J]. 食品科学, 2006, 27(10):613-616
- [12] 李名梁. 我国食品安全问题研究综述及展望[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2013, 13(3):46-52
- [13] 王家祺. 婴幼儿食品安全问题的法律体系构建[J]. 中国卫生产业, 2015, 12(34):40-42
- [14] 宫晓东. 浅析我国食品安全行政许可的政府监管问题[J]. 东方文化周刊, 2014(13):214-215
- [15] 丁国峰. 我国食品安全风险评估制度的反思和完善[J]. 江淮论坛, 2014(1):129-133, 139
- [16] 杜艳艳, 郭斌梅, 余文哲, 等. 发达国家食品安全监管体系及对中国的启示[J]. 全球科技经济瞭望, 2013(5):71-76
- [17] 罗瑜. 中国食品安全监管问题现状简析[J]. 消费导刊, 2015(9):13, 15
- [18] 宁立标, 刘勇. 论中国食物权保障的法律体系及其完善[J]. 贵州大学学报(社会科学版), 2013, 31(4):106-111
- [19] 李晗, 霍丽君. 完善食品安全法律体系的若干问题探析[J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(5):8-12
- [20] 王洪婧, 张建华, 王薇, 等. 我国食品安全领域的法律规制研究[J]. 中国卫生事业管理, 2015, 32(11):850-852
- [21] 李凤霞, 杨帅. 论中国食品召回法律体系的完善[J]. 经济研究导刊, 2013, 1(1):127-128
- [22] 周永刚, 王志刚. 基于国际比较视角下的我国食品安全监管体系研究[J]. 宏观质量研究, 2014, 2(2):74-81
- [23] 周宁馨, 苏毅清, 秦明, 等. 韩国食品安全监管的法律规制及其对中国的启示[J]. 世界农业, 2014(9):82-87
- [24] 储雪玲, 刘砚, 贺妍, 等. 食品安全监管国际经验概览[J]. 世界农业, 2015(12):43-46
- [25] 张素玮, 贫建民. 中国食品安全现状及发展对策[J]. 中国食品工业, 2013(5):56-58, 61
- [26] 张姚. 从发达国家经验看中国食品安全法制建设[J]. 现代交际, 2016(3):83-84

收稿日期: 2016-06-13

Abstract :Fucoxanthin is a carotenoid present in seaweeds. Fucoxanthin-chlorophyll protein (FCP) is efficient light-harvesting complex. The physical and chemical properties , bioactivity and extraction method of fucoxanthin were reported in this paper. The function , structure and extraction method of FCP were reported in this paper.

Key words :fucoxanthin ;fucoxanthin-chlorophyll protein complexes ;bioactivity ;extraction

岩藻黄素又称岩藻黄质,为无味、黄色、粉末状物质^[1],通常从硅藻、海带、羊栖菜、裙带菜等海藻中提取。属于类胡萝卜素中的叶黄素类^[2]。它含有羟基、羰基和羧基等官能团,具有独特的生物活性,例如:抗氧化活性、抗肥胖活性和抗癌活性等。在新型功能食品、海洋药物、保健品方面有很好的应用前景。在临床疾病的预防和治疗以及生物工程方面也表现出很好的发展潜力。岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体(FCP)是由岩藻黄素和叶绿素共同组成的一种高效捕光复合物,对藻类适应水环境中的弱光条件具有非常重要的意义。目前对岩藻黄素的理化性质、生物活性和提取纯化工工艺研究得都比较透彻。但是针对 FCP 的研究则较少,有待进行更为深入的研究。

1 岩藻黄素研究进展

1.1 岩藻黄素理化性质

1.1.1 岩藻黄素的物理性质

多分布于海带、褐藻、金藻、硅藻等藻类之中。为胡萝卜素的含氧衍生物,属于类胡萝卜素中的叶黄素类^[1],不溶于水,易溶于有机溶剂^[2]。常见结构的分子式为 $C_{42}H_{58}O_6$,分子量为 658.91 Da,密度为 1.09,熔点为 $166\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 168\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]。结构式,见图 1。

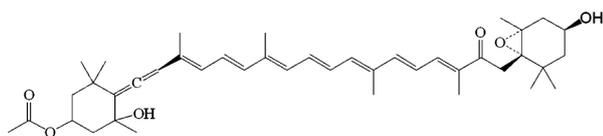


图 1 岩藻黄素分子式

Fig.1 The structure of fucoxanthin

1.1.2 岩藻黄素的化学结构与性质

岩藻黄素富含共轭双键和丙二烯结构,很强的抗氧化活性^[4-5]。而且它还含有羟基、羰基和羧基等官能团,具有独特的生物活性^[6]。岩藻黄素除了常见的结构外还有两种不常见的结构类型,分别是在颗石藻和棕囊藻中发现的 19'-丁酰氧基岩藻黄素以及在挪威 *Pelagococcus* 中发现的 19'-己酰氧基岩藻黄素^[7]。岩藻黄素很不稳定,容易被氧化或发生异构化,在强酸或强碱环境下都容易发生降解。在人体内岩藻黄素首先

会被水解成为岩藻黄素醇,进而形成其它代谢产物^[8]。

1.2 岩藻黄素生物活性

1.2.1 抗肥胖活性

抗肥胖活性是最早被发现的岩藻黄素生物活性之一^[2]。岩藻黄素可以通过多种途径来达到抗肥胖的目的。现在公认的岩藻黄素最直接的减肥机理是它可以促进线粒体白色脂肪组织 (White Adipose Tissue, WAT)中解偶联蛋白-1(UCP-1)的产生,而这种解偶联蛋白的作用是促进线粒体将能量以热量形式散发出来,而不是产生 ATP,从而消耗机体内储存的能量^[9]。Matsumoto 等在对小鼠进行实验时发现岩藻黄素可以通过抑制淋巴对甘油三酯的吸收来减少人体对能量的摄入^[10]。岩藻黄素可以通过促进或抑制和脂肪分解与合成相关基因的表达来起到减肥的作用。例如,促进中 $\beta 3$ 肾上腺素受体 mRNA 的表达、促进蛋白转化酶枯草溶菌素 9(PCSK9)mRNA 的表达、减少乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)mRNA 的表达^[11-12]等。岩藻黄素还可以通过促进酯解作用和脂肪氧化来对抗肥胖^[13]。Woo 等发现岩藻黄素的抗肥胖活性具有剂量效应,只有当摄入量为体重的 0.05 %时,才具有较好的减肥作用^[14]。

1.2.2 抗氧化活性

岩藻黄素属于类胡萝卜素,富含共轭双键,因此有较强的抗氧化作用,人们对它的抗氧化活性也进行了广泛、深入的研究。它具有很好的细胞保护作用,可以降低过氧化氢诱导的细胞损伤,因此可以用来治疗过氧化氢诱发的各种氧化应激反应疾病^[11-12]。岩藻黄素可以通过清除自由基来使细胞免受氧化损伤,清除 DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基的 IC_{50} 的值分别为 0.14 mg/mL 和 0.03 mg/mL^[13]。岩藻黄素可以显著地提高小鼠体内超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性^[15]。神经细胞的氧化损伤是阿尔茨海默病的发病原因之一^[16]。Kawee-ai 等提出鉴于岩藻黄素具有较好的抗氧化活性,它可以用来治疗阿尔茨海默病^[17]。岩藻黄素还可以抑制线粒体中丙二醛的产生,降低红细胞的溶血程度^[18]。

1.2.3 抗癌活性

目前,有很多关于岩藻黄素抗肿瘤活性的报道,

可抑制多种类型的肿瘤细胞。它可以选择性地攻击癌细胞,使正常细胞不受影响或者受较小的影响^[19]。宫颈癌是导致女性死亡的最常见的癌症之一,岩藻黄素可以有效地抑制 PI3K/Akt 信号通路,而该信号通路与宫颈癌的产生密切相关^[20]。岩藻黄素还具有 β -葡萄糖醛酸酶抑制活性,可以预防结肠癌的发生^[21]。另外岩藻黄素对肝癌、膀胱癌、前列腺癌、淋巴瘤等癌症也具有较好的抑制作用^[12]。目前关于岩藻黄素的抗癌机理研究的还不是很透彻,Wang 等认为岩藻黄素主要在癌细胞的细胞周期中发挥作用,使细胞周期停留在 G0/G1 期,进而阻断了癌细胞的增殖^[22]。Rengarajan 等认为岩藻黄素可以抑制癌细胞增殖,诱导癌细胞凋亡^[23]。

1.2.4 光保护作用

作为一种光合色素,光保护作用是岩藻黄素最重要的生物活性之一。它可以有效地减少紫外线照射对藻类带来的伤害。岩藻黄素与叶绿素共同组成的岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体(FCP)是许多藻类的主要捕光复合物^[24]。岩藻黄素将吸收的光能传递给叶绿素,并且能够转移过量的光能,避免对细胞造成伤害。在藻类的不同生长阶段,体内岩藻黄素的含量也不近相同^[25]。

1.2.5 其它生物活性

Lashmanova 等通过对果蝇和线虫的研究发现,岩藻黄素可以在一定程度上延长它们的寿命,并且对它们的生殖能力、活动能力和摄食量都有一定的影响^[26]。瘦素抵抗是 2 型糖尿病的最初发病原因之一,瘦素抵抗个体会抑制肝葡萄糖氧化,增加肝糖原贮备,并导致甘油三酯合成增加,减少肝糖产生及输出进而发展成为 2 型糖尿病。岩藻黄素可以通过改善瘦素抵抗来治疗糖尿病^[6]。岩藻黄素具有抗炎活性,对炎症细胞因子和炎症介质有抑制效果。可以改善由肥胖引起的脂肪细胞炎症^[27]。

1.3 岩藻黄素提取

1.3.1 溶剂浸提法

溶剂浸提法是最常用的岩藻黄素提取方法,利用岩藻黄素溶于有机溶剂的特性,用不同的有机溶剂或者多种有机溶剂的混合物来达到提取岩藻黄素的目的。常用的有机溶剂有乙醇、正己烷、丙酮等。Kanda 等人利用液态二甲醚从微藻中提取岩藻黄素,当提取温度为 25 °C、压力为 0.59 MPa、时间为 43 min 时,岩藻黄素的得率最大,为 390 $\mu\text{g/g}$ ^[28]。

1.3.2 超临界 CO₂ 萃取法

超临界 CO₂ 萃取法是一种环境友好型的岩藻黄素提取技术,在提取过程中只用到了乙醇这一种对环境无害的有机溶剂^[29]。而且与传统的溶剂浸提法相比,

超临界萃取的温度接近于室温,更适用于岩藻黄素热不稳定性的特点,能较好的保持岩藻黄素原有的生物活性^[12]。而且在超临界萃取过程中,对萃取效果有影响的因素只有压力和温度,因此,就实验的可重复性方面来讲,超临界萃取技术要优于其它提取方法^[30]。Quitain 等利用该方法从裙带菜中提取岩藻黄素,并对提取条件进行了优化,当提取压力为 40 MPa、温度为 40 °C、时间为 180 min 时,提取率达到最高为 80 %^[31]。

1.3.3 酶法提取

海洋藻类具有较厚的细胞壁,在提取岩藻黄素之前如果用酶先将藻类的细胞壁进行水解就能大大地提高提取的效率^[32]。酶法提取岩藻黄素分为单一酶提取法和复合酶提取法。李斌等分别采用纤维素酶、果胶酶及其组成的复合酶对提取海带中岩藻黄素的条件进行了探究。最终确定果胶酶法为最佳的提取方法,最佳提取条件是,加酶量为 20 000 U/kg,酶解时溶液 pH5.0、温度为 60 °C,时间为 90 min^[33]。秦云等利用复合酶法对提取海带中岩藻黄素的条件进行了优化,当加入复合酶(纤维素酶量:果胶酶量=1:1)的量为 0.30 %、时间为 80 min、溶液 pH5.0、温度为 50 °C 时提取效果最好,此时岩藻黄素得率为 18.30 mg/100 g(以湿质量计)^[32]。

1.3.4 微波辅助提取法

Xiao 等采用了一种新型的微波辅助方法来提取褐藻中的岩藻黄素,该方法与高速逆流色谱技术结合,从提取时间、温度、微波强度等方面对提取条件进行了优化,最优的提取条件为料液比为 1:15、温度为 60 °C、提取时间为 10 min、微波强度为 300 W,此时岩藻黄素提取率可以达到 90 %^[34]。

1.3.5 超声辅助提取

陈文佳等对海带中岩藻黄素的超声波辅助提取工艺进行了优化,研究结果表明抗氧化剂抗坏血酸的加入能够有效地提高岩藻黄素的提取率。当乙醇浓度为 70 %、温度为 70 °C、超声功率 180 W、时间为 80 min、液料比为 1:25 时提取效果最好^[35]。

1.4 岩藻黄素纯化

无论是经过溶剂浸提法、酶提取法还是超临界萃取法,得到的都只是岩藻黄素粗品,只有经过进一步的分离纯化才能得到岩藻黄素纯品。

1.4.1 高效液相色谱(HPLC)

高效液相色谱(HPLC)具有快速、检测灵敏、样品用量小、操作简便等特点^[36]。20 世纪 70 年代初期首次在 β -胡萝卜素的纯化、分析中得到应用,到目前为止是较为常用的纯化岩藻黄素的方法^[12,37]。在实际应用中

多采用反相高效液相色谱进行纯化、流动相通常为乙醇和水。温度设置在 27 °C, 流速为 1 mL/min^[38]。

1.4.2 薄层色谱法(TLC)

薄层色谱法是快速分离和定性分析少量物质的实验方法^[39]。它是一种固-液吸附薄层色谱分离法, 主要是利用各成分对同一吸附剂吸附能力不同来达到分离纯化的目的。Piovan 等利用薄层色谱法对裙带菜提取物中的岩藻黄素进行了纯化^[3]。

1.4.3 大孔树脂纯化法

该方法是利用大孔树脂对色素的吸附能力要大于对糖类其它物质的吸附能力来达到分离纯化的目的^[40]。刘丽平对 AB-8、D101、NKA-9、X-5、HP-2、HPD100、HPD300、HZ803 这 8 种大孔树脂的分离纯化效果进行了探究, 结果表明, D101 树脂能同时得到岩藻黄素和叶绿素两种物质, 有利于工业化生产。但是就岩藻黄素的纯度方面来讲, HZ803 树脂的分离效果更好^[41]。

2 岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体(FCP)研究进展

2.1 岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体组成

岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体(FCP)是一些海洋藻类中行使高效捕光功能的关键分子复合物, 它使得藻类能够在水中弱光环境下进行光合作用^[42]。岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体是硅藻和褐藻特有的捕光复合物, 因含有大量岩藻黄质 (fucoxanthin) 被称为 FCP (Fucoxanthin-chlorophyll protein)。硅藻中的 *Phaeodactylum tricorutum* (羽纹纲)、*Thalassiosira pseudonana* (中心纲)、*Cyclotella meneghiniana* (又名 *Cyclotella cryptica*, 中心纲) 和 *Chaetoceros gracilis* (中心纲) 是 FCP 研究较集中的 4 个代表性藻种。其中, 中心纲 (*T. pseudonana*) 和羽纹纲 (*P. tricorutum*) 各有一个藻种已得到全基因序列^[43]。根据其编码基因 lhcf、lher 和 lhcx 将相应的 FCP 蛋白单体分成 Lhcf、Lher 和 Lhex3 种。这 3 种蛋白在后续的分离中得到许多研究工作的验证。FCP 的 Lhcf 蛋白序列与高等植物 LHC 蛋白同源, 据推测可能也是有三段跨膜螺旋的膜蛋白。

FCP 活体硅藻中存在的状态为三聚体 (trimer) 和低聚体 (oligomer), 例如 *C. meneghiniana* 分离得到的 FCPa(trimer) 与 FCPb(oligomer) *C. gracilis* 中分离得到的 FCP-A(trimer) 和 FCP-B(oligomer)^[44]。除了 Fx 和 Chl a 外, FCP 中还含有 Chl c。基于 FCPa 的研究发现, Chl a、Chl c 和 Fx 比例为 4:1:4。但每个 FCP 单体中色素分子的具体数目存在争议。Ishihara 等通过研究

发现尽管硅藻 *Chaetoceros gracilis* 中与 FCP 相关的基因有 30 多个, 但是它的 FCP 复合物只有 3 种多肽成分组成。通过氨基酸序列测定和二维等电聚焦电泳分析得出其中主要的两种成分为 Fcp3 (Lhcf3) 和 Fcp4 (Lhcf4) 绝大多数色素就绑定在这两种多肽上。而且绑定在 FCP 上的叶绿素 a 的含量占到叶绿素 a 总量的 60%。与类囊体膜相比, FCP 复合物中岩藻黄素和叶绿素 C 的含量较高^[45]。Buchel 从硅藻 FCP 中分离得到了两种主要的多肽成分, 它们的分子量分别为 18 kD 和 19 kD^[46]。Gelzinis 等利用双色的二维电子光谱对 FCP 进行过研究, 研究发现 FCP 中存在两种不同类型的岩藻黄素^[26]。目前没有 FCP 蛋白的晶体结构报道, FCP 中色素组成的细节还需进一步的结构生物学研究。

2.2 FCP 中岩藻黄素(fucoxanthin, Fx)的功能研究

FCP 是硅藻和褐藻的主要捕光天线蛋白, 主要功能是捕获光能传递到两个光反应中心。FCP 中的叶绿素主要吸收红光和蓝紫光, 而 FCP 中 Fx 的功能主要体现在两个方面。首先, Fx 捕获蓝光和蓝绿光并将能量传递给 chl a。与其他色素分子不同, 处在不同蛋白质环境中的 Fx 会出现不同程度的红移, 从而加强对蓝绿光吸收, 为硅藻适应水中复杂光环境提供一种独特的竞争优势。基于 FCPa/b 的共振拉曼光谱实验发现, FCP 蛋白中 Fx 存在三种能态: Fx_{blue} 、 Fx_{red} 和 Fx_{green} 。双色二维电子光谱、线性二色光谱和 stark 光谱实验结果也提供了相关的证据^[47]。不同 Fx 吸收的能量直接传递给 chl a, 表现激发至 S_2 态的 Fx 分子, 经“ S_1/ICT ”态将能量传递给 chl a 分子, 其“ S_1/ICT ”态得到了偏振瞬态吸收光谱的实验证据支持。此外 Zigmantas 等还发现, Fx 中羰基的引入减小了“ S_1/ICT ”态和 S_2 态之间的能隙^[48]。这种结构使得蛋白中的类胡萝卜素分子在“ S_2 态”红移至“绿光区域”后, “ S_1/ICT ”态仍然有足够高的能量向 chl a 传递能量。

另一方面, 岩藻黄素在光保护 NPQ (Non-photochemical quenching) 机制中起到一定淬灭作用。Di Valentin 等发现对低温(1.8 K)磁场中的 FCP^[49]施加特定的共振微波场, 能诱导形成三线态胡萝卜素。但考虑岩藻黄素三线态无法直接由其自身单线态转化而成, 因此 Valentin 认为岩藻黄素通过淬灭 chlorophyll 三线态而获得自身的三线态, 进而推测岩藻黄素在非光化学淬灭中起到重要作用。而目前对于岩藻黄素参与叶绿素单重态传能的研究还较少, 硅甲藻黄素(diadinoxanthin)和硅藻黄素(diatoxanthin)组成的类胡萝卜素循环被认为是参与硅藻的 NPQ, 但是在分离纯化

FCP 的过程中,硅甲藻黄素和硅藻黄素极易丢失,大部分研究在类囊体膜或者 PSI 和 PSII 层次。

2.3 岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体的提取

Ishihara 等先利用反复冻融法对硅藻进行破壁处理,然后用蔗糖密度梯度离心法从硅藻中提取岩藻黄素,并对提取后所得物质组分进行了检测,单峰性表明提取的岩藻黄素是比较纯的^[45]。Gardian 等也用蔗糖密度梯度离心法从硅藻中提取了岩藻黄素,它们从一开始得到的 4 部分分离物中选择了呈现棕色的两部分进行 SDS-PAGE 电泳^[50]。它们的分子量在 17 kD ~19 kD 之间,与已经报道过的两个 FCP 组成多肽的分子量相同。Beer 等用离子交换层析法从 *C. meneghiniana* 分离到两种 FCP 组分,分子量为 18 kD 和 19 kD,而且色素组成尤其是硅甲藻黄素和硅藻黄素有明显的差异^[51]。尽管基因组测序后对于硅藻 FCP 的基因能够确定,但硅藻中不同 FCP 蛋白的氨基酸序列、色素组成、电荷性质等差异非常小,这可能是无法精细分离纯化和获得晶体结构突破的原因。

3 小结

岩藻黄素作为一种广泛存在于海洋藻类中的光合色素,不仅对藻类的生长和发育具有重要意义。而且还具有许多对人体有益的生物活性,比如:抗氧化活性、抗肥胖活性和抗癌活性等。因此,岩藻黄素在海洋药物、食品、保健品的发展中具有巨大的开发、利用前景。目前从海藻中提取岩藻黄素的方法有很多,比如:溶剂浸提法、超临界萃取法和超声辅助提取法等,通过以上方法得到粗品后可以用高效液相色谱法、薄层色谱法和大孔树脂法进行纯化,为岩藻黄素的开发、利用提供了可能。岩藻黄素-叶绿素蛋白复合体(FCP)是由岩藻黄素和叶绿素共同组成的一种高效捕光复合物,对藻类适应水环境中的弱光条件具有非常重要的意义,对于与人工仿生模拟光合作用,打造生物太阳能有机电池也是极有潜力的材料选择。而目前关于 FCP 的结构组成、能量传递途径和生物活性的研究还不够深入,有待进行更进一步的研究。

参考文献:

[1] Zhang H, Tang Y, Zhang Y, et al. Fucoxanthin: A promising medicinal and nutritional ingredient[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2015,2015:723515
 [2] Gammone M A, D’Orazio N. Anti-obesity activity of the marine carotenoid fucoxanthin[J]. Mar Drugs,2015,13(4):2196-2214
 [3] 张文源,高保燕,雷学青,等. 岩藻黄素的理化与生物学特性、制备技术及其生理活性研究进展[J]. 中国海洋药物,2015(3):81-95

[4] Komba S, Kotake-Nara E, Machida S. Fucoxanthin derivatives: synthesis and their chemical properties[J]. J Oleo Sci, 2015, 64(9):1009-1018
 [5] Zhang Y, Fang H, Xie Q, et al. Comparative evaluation of the radical-scavenging activities of fucoxanthin and its stereoisomers [J]. Molecules,2014,19(2):2100-2113
 [6] 彭娟,邓夏青,敖钰舒,等. 岩藻黄素抗肥胖和抗糖尿病活性研究进展[J]. 2015(9):314-325
 [7] 汪曙晖,薛长湖. 岩藻黄素的结构、性质和功能[J]. 食品工业科技,2010(6):408-410
 [8] Muradian K, Vaiserman A, Min K J, et al. Fucoxanthin and lipid metabolism: A minireview[J]. Nutr Metab Cardiovasc Dis, 2015, 25 (10):891-897
 [9] Maeda H. Nutraceutical effects of fucoxanthin for obesity and diabetes therapy: a review[J]. J Oleo Sci,2015,64(2):125-132
 [10] Matsumoto M, Hosokawa M, Matsukawa N, et al. Suppressive effects of the marine carotenoids, fucoxanthin and fucoxanthinol on triglyceride absorption in lymph duct-cannulated rats[J]. Eur J Nutr,2010, 49(4):243-249
 [11] Zheng J, Piao M J, Keum Y S, et al. Fucoxanthin protects cultured human keratinocytes against oxidative stress by blocking free radicals and inhibiting apoptosis[J]. Biomol Ther (Seoul), 2013,21(4): 270-276
 [12] 陈文佳,邵秀芝,赵祥忠,等. 岩藻黄素的分离纯化及生物活性的研究进展[J]. 食品工业,2011(10):78-81
 [13] Xia S, Wang K, Wan L, et al. Production, characterization, and antioxidant activity of fucoxanthin from the marine diatom *Odontella aurita*[J]. Mar Drugs,2013,11(7):2667-2681
 [14] Woo M N, Jeon S M, Shin Y C, et al. Anti-obese property of fucoxanthin is partly mediated by altering lipid-regulating enzymes and uncoupling proteins of visceral adipose tissue in mice[J]. Mol Nutr Food Res,2009,53(12):1603-1611
 [15] Ha A W, Na S J, Kim W K. Antioxidant effects of fucoxanthin rich powder in rats fed with high fat diet[J]. Nutr Res Pract, 2013, 7(6): 475-480
 [16] Pangestuti R, Vo T S, Ngo D H, et al. Fucoxanthin ameliorates inflammation and oxidative responses in microglia[J]. J Agric Food Chem, 2013,61(16):3876-3883
 [17] Kawee-Ai A, Kuntiya A, Kim S M. Anticholinesterase and antioxidant activities of fucoxanthin purified from the microalga *Phaeodactylum tricornutum*[J]. Nat Prod Commun,2013,8(10):1381-1386
 [18] 吴超,任丹丹,陈倩,等. 海带岩藻黄素对小鼠脂质过氧化抑制作用的影响[J]. 大连海洋大学学报,2011(5):428-431
 [19] Kumar S R, Hosokawa M, Miyashita K. Fucoxanthin: a marine carotenoid exerting anti-cancer effects by affecting multiple mechanisms[J]. Mar Drugs,2013,11(12):5130-5147
 [20] Ye G, Lu Q, Zhao W, et al. Fucoxanthin induces apoptosis in human cervical cancer cell line HeLa via PI3K/Akt pathway[J]. Tumour Biol,2014,35(11):11261-11267
 [21] Kawee-Ai A, Kim S M. Application of microalgal fucoxanthin for the

- reduction of colon cancer risk: inhibitory activity of fucoxanthin against beta-glucuronidase and DLD-1 cancer cells[J]. *Nat Prod Commun*,2014,9(7):921-924
- [22] Wang L, Zeng Y, Liu Y, et al. Fucoxanthin induces growth arrest and apoptosis in human bladder cancer T24 cells by up-regulation of p21 and down-regulation of mortalin[J]. *Acta Biochim Biophys Sin (Shanghai)*,2014,46(10):877-884
- [23] Rengarajan T, Rajendran P, Nandakumar N, et al. Cancer preventive efficacy of marine carotenoid fucoxanthin: cell cycle arrest and apoptosis[J]. *Nutrients*,2013,5(12):4978-4989
- [24] Gelzinis A, Butkus V, Songaila E, et al. Mapping energy transfer channels in fucoxanthin-chlorophyll protein complex[J]. *Biochim Biophys Acta*,2015,1847(2):241-247
- [25] 柳欣,左林子,黄春秀,等. 优势硅藻和定鞭金藻不同生长阶段光合色素比值变化[J]. *海洋环境科学*,2012(6):793-797
- [26] Lashmanova E, Proshkina E, Zhikrivetskaya S, et al. Fucoxanthin increases lifespan of *Drosophila melanogaster* and *Caenorhabditis elegans*[J]. *Pharmacol Res*,2015,100:228-241
- [27] Maeda H, Kanno S, Kodate M, et al. Fucoxanthinol, metabolite of fucoxanthin, improves obesity-induced inflammation in adipocyte cells[J]. *Mar Drugs*,2015,13(8):4799-4813
- [28] Kanda H, Kamo Y, Machmudah S, et al. Extraction of fucoxanthin from raw macroalgae excluding drying and cell wall disruption by liquefied dimethyl ether[J]. *Mar Drugs*,2014,12(5):2383-2396
- [29] Sivagnanam S P, Yin S, Choi J H, et al. Biological properties of fucoxanthin in oil recovered from two brown seaweeds using supercritical CO₂ extraction[J]. *Mar Drugs*,2015,13(6):3422-3442
- [30] Uddin M S, Sarker M Z, Ferdosh S, et al. Phyosterols and their extraction from various plant matrices using supercritical carbon dioxide: a review[J]. *J Sci Food Agric*,2015,95(7):1385-1394
- [31] Quitain A T, Kai T, Sasaki M, et al. Supercritical carbon dioxide extraction of fucoxanthin from *Undaria pinnatifida*[J]. *J Agric Food Chem*, 2013,61(24):5792-5797
- [32] 秦云,孟丽媛,王凤舞. 复合酶法提取海带岩藻黄素及其抗氧化活性分析[J]. *食品科学*,2013(16):279-283
- [33] 李斌,吴永沛,刘翼翔,等. 海带渣中岩藻黄素的酶法提取工艺研究[J]. *食品工业科技*,2014(21):192-196
- [34] Xiao X, Si X, Yuan Z, et al. Isolation of fucoxanthin from edible brown algae by microwave-assisted extraction coupled with high-speed countercurrent chromatography[J]. *J Sep Sci*, 2012, 35(17): 2313-2317
- [35] 陈文佳,邵秀芝,赵祥忠,等. 超声波辅助提取岩藻黄素的工艺优化[J]. *农业机械*,2011(20):168-171
- [36] Zhang Y W, Fan W W, Li H, et al. Simultaneous column chromatographic extraction and purification of abscisic acid in peanut plants for direct HPLC analysis[J]. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*,2015,1002:277-284
- [37] 李振,李爱芬,张成武. 硅藻金色奥杜藻色素的 HPLC 分析与超临界 CO₂ 萃取研究[J]. *天然产物研究与开发*,2012(6):814-818
- [38] Quitain A T, Kai T, Sasaki M, et al. Supercritical carbon dioxide extraction of fucoxanthin from *Undaria pinnatifida*[J]. *J Agric Food Chem*, 2013,61(24):5792-5797
- [39] Abdelwahab N S, Ali N W, Abdelkawy M, et al. Validated RP-HPLC and TLC-densitometric methods for analysis of ternary mixture of cetylpyridinium chloride, chlorocresol and lidocaine in oral antiseptic formulation[J]. *J Chromatogr Sci*,2016,54(3):318-325
- [40] Liu C, Liu R, Zhang P, et al. Separation of capsaicin from capsaicinoids by macroporous resin adsorption chromatography[J]. *J Sep Sci*, 2015,38(23):4141-4145
- [41] 刘丽平. 羊栖菜岩藻黄质的提取及理化性质研究[D].杭州:浙江理工大学,2012
- [42] Nagao R, Yokono M, Teshigahara A, et al. Light-harvesting ability of the fucoxanthin chlorophyll a/c-binding protein associated with photosystem II from the diatom *Chaetoceros gracilis* as revealed by picosecond time-resolved fluorescence spectroscopy[J]. *J Phys Chem B*,2014,118(19):5093-5100
- [43] Bowler C, Allen A E, Badger J H, et al. The *Phaeodactylum* genome reveals the evolutionary history of diatom genomes[J]. *Nature*, 2008, 456(7219): 239-244
- [44] Nagao R, Yokono M, Teshigahara A, et al. Light-harvesting ability of the fucoxanthin chlorophyll a/c-binding protein associated with photosystem II from the diatom *Chaetoceros gracilis* as revealed by picosecond time-resolved fluorescence spectroscopy[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2014, 118(19): 5093-5100
- [45] Ishihara T, Ifuku K, Yamashita E, et al. Utilization of light by fucoxanthin-chlorophyll-binding protein in a marine centric diatom, *Chaetoceros gracilis*[J]. *Photosynth Res*,2015,126(2/3):437-447
- [46] Buchel C. Fucoxanthin-chlorophyll proteins in diatoms: 18 and 19 kDa subunits assemble into different oligomeric states[J]. *Biochemistry*,2003,42(44):13027-13034
- [47] Premvardhan L, Bordes L, Beer A, et al. Carotenoid structures and environments in trimeric and oligomeric fucoxanthin chlorophyll a/c2 proteins from resonance Raman spectroscopy[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2009, 113(37): 12565-12574
- [48] Zigmantas D, Hiller R G, Sharples F P, et al. Effect of a conjugated carbonyl group on the photophysical properties of carotenoids[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2004, 6(11): 3009-3016
- [49] Di Valentin M, Büchel C, Giacometti G M, et al. Chlorophyll triplet quenching by fucoxanthin in the fucoxanthin-chlorophyll protein from the diatom *Cyclotella meneghiniana*[J]. *Biochemical and biophysical research communications*, 2012, 427(3): 637-641
- [50] Gardian Z, Litvin R, Bina D, et al. Supramolecular organization of fucoxanthin-chlorophyll proteins in centric and pennate diatoms[J]. *Photosynth Res*,2014,121(1):79-86
- [51] Beer A, Gundermann K, Beckmann J, et al. Subunit composition and pigmentation of fucoxanthin-chlorophyll proteins in diatoms: Evidence for a subunit involved in diadinoxanthin and diatoxanthin binding. *Biochemistry*, 2006, 45(43): 13046-13053

收稿日期 2016-02-26