

专家论坛专栏

编者按:我国海藻资源丰富,海藻养殖业在世界上处于领先水平,总产量稳居世界第一。从海藻中提取制备的多糖、多酚等活性物质具有抗氧化、抗炎症、抗肿瘤、降血脂等多种功能特性。本期栏目特邀专家对岩藻黄质、岩藻多糖这两类重要的藻类提取物的功能特性及其在食品中的应用进行系统阐述,旨在为开发海洋藻类资源与食品提供有益借鉴。

(栏目策划:李 宁)

doi:10.12301/j.issn.2095-6002.2021.05.002

文章编号:2095-6002(2021)05-0009-17

引用格式:谭明乾,李佳璇,于潇婷.岩藻黄质的功能特性及其在食品中的应用[J].食品科学技术学报,2021,39(5):9-25.



TAN Mingqian, LI Jiaxuan, YU Xiaoting. Functional properties of fucoxanthin and its application in foods[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(5): 9-25.

岩藻黄质的功能特性及其在食品中的应用

谭明乾, 李佳璇, 于潇婷

(大连工业大学食品交叉科学研究院/食品学院/国家海洋食品工程技术研究中心/
海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁大连 116034)

摘要:岩藻黄质是一类含有特殊结构的丙二烯类胡萝卜素,具有抗氧化、抗癌、抗肥胖及抗糖尿病等生物活性和良好的营养与保健价值,已成为海洋食品营养功效因子研究与开发的热点之一。概述了岩藻黄质的来源及提取方法、代谢及吸收途径、稳定性和安全性等理化基础特性,并深入阐述其抗氧化、抗癌、抗肥胖、抗糖尿病、抗光损伤等功能特性及其在食品中的应用,尤其对岩藻黄质显著的抗肥胖和抗糖尿病活性进行了深入梳理与分析。岩藻黄质主要通过调节线粒体解偶联蛋白1来避免过多的脂肪堆积,通过调节致肥基因的表达起到抗肥胖的作用;而对于抗糖尿病活性主要是通过下调脂肪细胞 mRNA 的表达或上调小鼠骨骼肌上的葡萄糖载体,减少血糖和增加血浆中胰岛素的含量,进而有效调节血糖含量。希望这些信息为岩藻黄质研究人员提供参考,为岩藻黄质在食品产业进一步开发利用提供借鉴。

关键词:海藻;海藻活性物质;岩藻黄质;理化性质;功能特性

中图分类号: TS202.1

文献标志码: A

岩藻黄质(fucoxanthin),又称褐藻素、盐藻黄素,主要来源于褐藻、硅藻等浮游植物和牡蛎等海洋贝类,是自然界中存在的一种天然类胡萝卜素,是使褐藻类呈现出褐色的物质^[1]。岩藻黄质作为类胡萝卜素中叶黄素类的一种色素,约占类胡萝卜素总量的10%,其与叶绿体 a 中其他物质组成复合体参与光合

作用,被认为可以更高效地参与光捕获和光传递^[2]。岩藻黄质具有多种对人体有益的功能特性,因此岩藻黄质具有很大的市场开发前景。目前,岩藻黄质在北美、欧洲、东南亚、日本、中国、印度等国家和地区的市场规模保持在2.47%的年平均增长率,并有可能在未来规模进一步扩大,预计到2022年销量达到1.2亿

收稿日期:2021-08-13

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(31925031)。

第一作者:谭明乾,男,教授,博士生导师,主要从事海洋功能食品方面的研究。

美元^[3]。本文针对岩藻黄质的来源及提取方法、代谢及吸收途径、稳定性和安全性等基础特性,抗氧化、抗癌、抗肥胖、抗糖尿病、抗光损伤等功能特性,在食品中的应用进行概述,以期对岩藻黄质深入功效研究和产业应用提供参考。

1 岩藻黄质的理化基础特性

岩藻黄质,化学名为3-(乙酰氧基)-6',7'-二脱氢-5,6-环氧-5',6,6',7,8-六氢-3,5'-二氢基-8-氧代- β,β -胡萝卜素,分子式为 $C_{42}H_{58}O_6$,相对分子质量为658.91,其分子立体结构是在1990年被确定的^[4]。岩藻黄质单体为结晶性粉末,熔点166~168℃,密度约1.1 g/cm³,折射率1.563。与水溶性藻褐素(phycophaein)不同,岩藻黄质是一种脂溶性色素,颜色呈淡黄至褐色,易溶于乙醇、丙酮、正己烷等有机溶剂,现市售产品多为脂溶性粉末或油状物^[5]。

1.1 岩藻黄质的来源及提取方法

岩藻黄质主要来源于褐藻、微藻和硅藻,最早是1914年从褐藻科网地藻属、墨角藻属和海带属中分离得到^[3]。作为丙二烯类胡萝卜素,岩藻黄质在褐藻中含量最为丰富,目前已在南方团扇藻(*Padina australis*)、铜藻(*Sargassum horneri*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida*)等褐藻,及三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)、纤细角毛藻(*Chaetoceros gracilis*)、球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)等藻类中发现^[3,6]。

一般来说,从褐藻中提取岩藻黄质的主要方法包括溶剂浸提法、酶提取法、超声波辅助提取法和超临界流体提取法等(表1)。因岩藻黄质具有较高的不饱和度,所以提取过程需避光,并减少与空气接触。溶剂浸提法是最常用的岩藻黄质提取方法之一,多采用甲醇、乙醇、丙酮或者其他混合极性有机试剂作为溶剂。溶剂浸提法简单易行,实验步骤较为固定,重点在于提取剂的选择,应该尽量选取提取率高、成本低廉的试剂,目前大部分岩藻黄质的提取选用甲醇作为溶剂^[7-12]。而Agatonovic-Kustrin等^[13]发现从褐藻中提取岩藻黄质,乙醇作为提取溶剂具有更好的提取效果。此外,混合溶剂提取也展示出较好的提取率,例如尹宗美等^[14]利用体积比为6:1的正己烷和丙酮复合溶剂,对羊栖菜藻渣进行加热提取,岩藻黄质的提取率可达0.68 mg/g。

岩藻黄质主要存在于细胞内,细胞壁的通透性直接影响岩藻黄质的提取率,传统的有机试剂提取法由于不能充分破坏细胞壁,往往会导致提取效率不高,且长时间提取也不利于维持岩藻黄质的稳定结构。酶提取法采用不同酶对藻类等原料进行处理。原料细胞壁主要由纤维素和果胶组成,所以一般选取纤维素酶和果胶酶或复合酶进行提取。酶提取法具有无毒、可控性强等特点,提取条件比较温和,且能够进一步提高提取效率。李斌等^[15]以海带渣为原料,加入20 000 U/kg的果胶酶,在pH=5.0的条件下进行酶解,岩藻黄质得率为0.124%。李奕亭等^[16]通过复合酶法,在纤维素酶和果胶酶添加质量分数分别为7.5%和3%的条件下,从海带中提取岩藻黄质的得率最高。

随着科技进步,岩藻黄质的提取工艺也更加多样化,出现了超声辅助提取法。该方法省时节能,同时可以提高提取效率。赵鹏^[17]在常规有机溶剂提取法优化条件下,研究了超声波辅助法对岩藻黄质提取的影响,并获得较佳工艺条件为提取温度50.13℃、提取1 h,最大提取率为0.35 mg/g。除了时间、温度等因素会影响提取效率外,添加抗坏血酸也会有所影响。王乐等^[18]研究了通过超声波提取海带中岩藻黄质的工艺条件,结果表明添加质量分数为0.8%的抗坏血酸,岩藻黄质提取率为0.445 mg/g;而陈文佳^[19]研究也有相似的结果,在料液比为1:45 g/mL、提取温度为60℃、处理30 min,提取2次的条件下,提取效果最佳,可达0.442 mg/g。超声辅助提取法与传统有机溶剂提取法一样,提取率受溶剂的影响,研究发现采用90%乙醇和混合溶剂时提取率有所提高^[20-21]。

超临界流体提取法是一种以液体CO₂作为萃取溶剂,利用液体在超临界范围内兼具气液两性的性质,通过改变提取条件达到提取分离岩藻黄质的目的。此方法提取工艺简单、绿色环保,且提取过程对不稳定的岩藻黄质无不良影响。Guler等^[22]采取生物精炼的方法,按料液比1:200 g/mL加入甲醇,在35℃、20 MPa压力的条件下,以120 r/min的转速亚临界萃取60 min,得到岩藻黄质最高提取率可以达到0.690 mg/g。Roh等^[23]通过超临界CO₂萃取技术,以体积分数为3%的乙醇为夹带剂,在20 MPa的压力下,从裙带菜中提取出岩藻黄质,然而提取率较低,可能是与夹带剂浓度有关。在提高夹带剂的浓度后,提取率明显提高;Sivagnanam等^[24]采用无水乙醇从马尾藻中提取出岩藻黄质的提取率为

表1 岩藻黄质的提取方法及条件
Tab.1 Extraction method and conditions of fucoxanthin

提取方法	提取原料	提取溶剂	提取条件				提取率*/ (mg·g ⁻¹)	参考文献			
			提取 温度/°C	提取 时间/h	提取 次数	提取特点					
溶剂浸提法	海带	甲醇	60	1	2	从7种不同极性的有机试剂中选取甲醇为较佳提取溶剂		0.375	[7]		
	海带	φ=80% 甲醇	40	1	2	φ=80% 甲醇的提取效果可达到DMSO的提取效果且成本更低		0.556	[8]		
	鼠尾藻	φ=90% 甲醇	60	3.25	1	料液比1:33(g/mL)时提取效果最好		1.368	[9]		
	裙带菜	φ=95% 丙酮	55	2.5	3	料液比1:12(g/mL)时提取效果最好		0.382	[10]		
	角刺藻	甲醇	室温	>48	1			2.470	[11]		
	等鞭藻	甲醇	室温	>48	1			0.670	[11]		
	中华盒形藻	甲醇	室温	>48	1	避光提取,结束后放入40℃烘箱去除残留溶剂		0.440	[11]		
	骨条藻	甲醇	室温	>48	1			0.170	[11]		
	三角褐指藻	甲醇	室温	>48	1			0.020	[11]		
	海带	甲醇	室温	>48	1			0.007	[11]		
	羊栖菜	甲醇	室温	12	1	提取在氮气条件下进行		1.100	[12]		
	褐藻	乙醇	室温	0.25	5	提取前将新鲜原料用海水润洗3次		0.970	[13]		
	羊栖菜	复合溶剂	55	1	2	正己烷和丙酮按体积比6:1混合的复合溶剂提取效果更好		0.680	[14]		
酶提取法						酶	酶解 温度/°C	酶解 pH值	酶解 时间/h		
	海带渣	φ=95% 乙醇	55	1	1	果胶酶	60	5.0	1.5	1.240	[15]
	海带	φ=80% 乙醇	55	24	1	纤维素酶 果胶酶	50	5.0	1.5	1.471	[16]
超声波辅助提取法						超声 温度/°C	超声 时间/h	其他			
	海带	甲醇	53	2.05	1	50.13	1	45 Hz		0.35	[17]
	鼠尾藻	φ=80% 乙醇	40	0.5	2	52	0.5	添加ω=0.8%抗坏血酸		0.455	[18]
	海带	乙醇	60	0.5	2	60	0.5	添加ω=1%抗坏血酸		0.442	[19]
	裙带菜	φ=90% 乙醇	40	0.5	1	40	0.5	料液质量比1:10		1.362	[20]
	羊栖菜	乙醇丙酮	65	2	1	65	0.31	530 W		1.202	[21]
超临界流体提取法						提取压强/MPa					
	裙带菜	甲醇	35	1	1	20				0.690	[22]
	裙带菜	乙醇	50	0.83	1	20				0.000 007 53	[23]
	马尾藻	乙醇	45	2	1	25				0.770	[24]
	铜藻	φ=80% 乙醇	60	3	1	27.5				0.830	[25]
	裙带菜	乙醇	35	3	1	40				0.990	[26]

* 提取率以干质量计。

0.770 mg/g。在超临界流体提取法中,提取压力是影响提取率的最重要因素,严国富等^[25]和Kanda等^[26]分别在27.5 MPa和40 MPa的压力下得到的岩藻黄质的提取率为0.830 mg/g和0.990 mg/g。

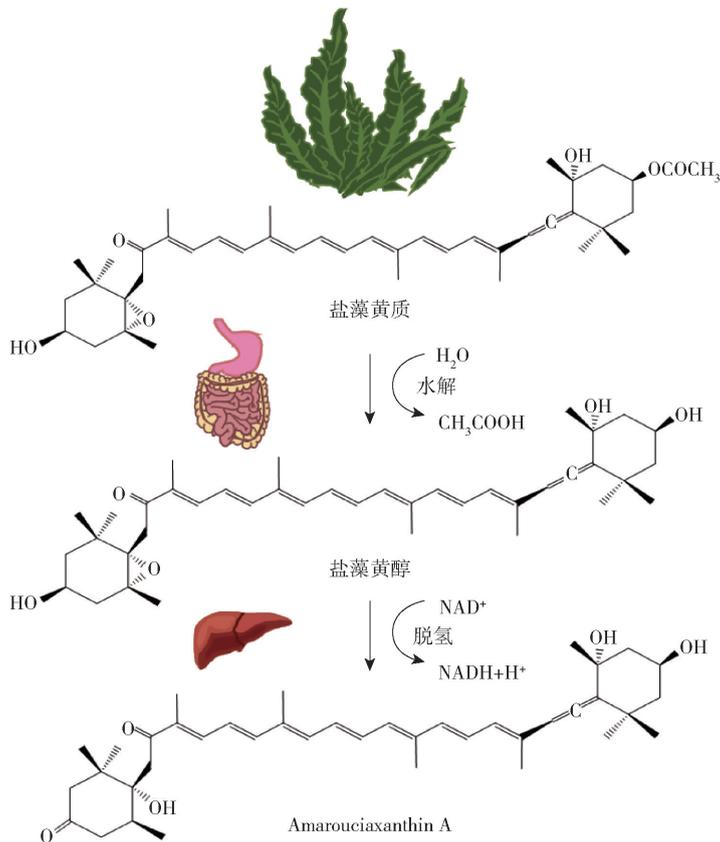
岩藻黄质来源广泛,原料充足,目前提取工艺中以有机溶剂提取法使用偏多,且提取率最高。有机溶剂提取法虽操作简便易行,但提取过程不容易维

持岩藻黄质的稳定,且有溶剂残留风险。而酶提取法虽可以破坏细胞壁、提高提取率,但成本较高。超声波辅助提取法和超临界流体提取法相比传统方法可以更好地提取岩藻黄质,但是提取条件较为复杂且技术限制比较多,因此,开发出简单高效、成本低廉的岩藻黄质提取方法是当前提取工艺的研究重点。

1.2 岩藻黄质的代谢及吸收途径

岩藻黄质在人体内消化、吸收、转运和代谢是一个比较复杂的过程,其主要初级代谢产物是岩藻黄醇和 Amarouciaxanthin A(图1)。作为一种疏水性的类胡萝卜素,岩藻黄质从食物基质中释放后与脂溶性微团结合^[27],经过胃肠道被胆固醇酶和脂肪酶消化,水解脱乙酰基成岩藻黄醇,通过淋巴液进入体循环,再在肝脏中进一步脱氢和异构化转化为结构

Amarouciaxanthin A^[28-29]。代谢产物岩藻黄醇和 Amarouciaxanthin A 在辅助因子烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NAD⁺)等作用下,进一步发生异构化、脱氢、氧化和脱甲基等酶反应,代谢为其他小分子化合物。与其他类胡萝卜素类似,岩藻黄质也可能通过促进高密度脂蛋白的配体B类一型清道夫受体(SR-B1)的扩散,从而在小肠的近半段的肠黏膜上皮细胞中被吸收^[30]。



NAD⁺: 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸; NADH: 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸的还原态

图1 岩藻黄质主要代谢过程及其产物

Fig. 1 Main process and derivatives of fucoxanthin metabolism

在动物学研究中,小鼠口服灌胃摄入岩藻黄质后,其组织和血清中均可以检测到岩藻黄醇和 Amarouciaxanthin A^[31]。有临床人体研究表明,在受试者每天摄入含有岩藻黄质 6.1 mg 的可食用褐藻裙带菜一周后,仅能在血清中检测到浓度为 0.8 pmol/L 的岩藻黄醇^[32]。岩藻黄素的药代动力学数据显示,岩藻黄素在人体内的生物利用度和代谢水平高于小鼠,这种小鼠体内和人体内岩藻黄质代谢的区别,可能跟小鼠代谢速率比人体快有关。Amarouciaxanthin A 通常储存在腹部白色脂肪组织中。还有研究表明,脂肪组织中岩

藻黄质、岩藻黄醇和 Amarouciaxanthin A 所占比例分别为 13%、32% 和 55%,由此可得 Amarouciaxanthin A 大部分会优先在脂肪组织中积累,而岩藻黄醇则在其他组织中,这可能是岩藻黄质可以达到减肥目的的主要原因^[33]。岩藻黄素的吸收率一般受食物基质组成的影响,它在大豆油和其他植物油中的溶解度很低,而岩藻黄质很容易溶解在中链三酰甘油(MCT)或鱼油中^[33]。目前,关于岩藻黄质及其代谢物在人体中的药代动力学研究还很少,阐明岩藻黄质在人体的代谢与吸收规律依然是一项挑战。

1.3 岩藻黄质的稳定性

岩藻黄质由于特殊的5,6-环氧和丙二烯键结构,而具有众多生理活性,但这样的分子结构使其化学结构在遇见光、热、空气及酸性等外界条件下不稳定^[2]。首先,岩藻黄质在光照及空气暴露条件下易分解,而在避光和绝氧贮存时稳定性有所提高。Zhao等^[34]研究发现,空气暴露导致岩藻黄质在25℃就可以发生氧化降解,而光照会引起全反式岩藻黄质形成,在13-顺式和13'-顺式发生突然降解断裂,形成9'-顺式岩藻黄质的分子构型。除了异构化外,岩藻黄质等类胡萝卜素还容易氧化,产生大量的短链羰基化合物;在某些情况下,生成一些挥发性化合物^[35]。其次,岩藻黄质在加热条件下也不稳定,但与其他抗氧化物质同时存在时会提高其稳定性,添加高浓度的抗坏血酸可以使岩藻黄质保持稳定;与对照组相比,加入质量分数为1%的抗坏血酸可以明显减缓岩藻黄质的降解和褪色^[36]。因为抗坏血酸本身具有较强的抗氧化作用,可以减慢和预防岩藻黄质被其他分子氧化。再者,岩藻黄质在酸性条件下极不稳定,相比之下,在碱性条件下较为稳定。在高pH值(pH=9、11和13)的情况下,岩藻黄质降解速率明显慢于酸性pH值(pH=1和3),研究发现岩藻黄质在pH=5~7的区间最为稳定^[37]。

岩藻黄质的不稳定性,限制了其在食品工业中的应用,主要表现为:1)岩藻黄质易受光、热、氧气等外界条件的影响,从而对含岩藻黄质类食品的加工、贮藏和运输的条件要求较为严苛;2)易受消化道中酸性pH值和胃蛋白酶等因素的影响,导致含岩藻黄质类食品经口腔摄入后在胃中易分解,不能完全发挥其作用,因此提高岩藻黄质胃液中稳定性也是当前研究的重点之一。

1.4 岩藻黄质的安全性

岩藻黄质的安全性虽然受到了研究者的关注,但目前大多研究还局限于动物实验研究。有研究表明,单次给雄性和雌性小鼠口服1000或2000mg/kg(以体质量计)的岩藻黄质后,没有引起小鼠的死亡和机体异常^[38]。而在重复剂量研究中,30d持续对小鼠按500、1000mg/kg的剂量口服灌胃,同样未发现小鼠健康的异常现象,小鼠肝、肾、脾等器官均无异常变化^[39-40]。大量研究表明岩藻黄质对啮齿动物是安全的,但其对人体安全性的研究报道目前非常有限。Ren等^[41]给受试者连续5周每天服用5mg岩藻黄质,并没有引起任何实验人群的异常反

应。另外一个临床试验中,在让肥胖女性受试者每天3次服用岩藻黄质(1.6、2.4、4.0、8.0mg/次)连续16周后,研究结果发现岩藻黄质能显著增加受试者的能量消耗,且没有对受试者有任何不良影响^[42]。此外,岩藻黄质可以从海带、裙带菜等可食用海藻中提取出来,这些海藻在东亚国家作为可食用藻类已有几个世纪的历史,因此岩藻黄质作为功能性食品的成分是基本安全的。

2 岩藻黄质的功能特性

岩藻黄质作为天然的类胡萝卜素,颜色呈现黄色至褐色,最初应用多以其颜色特性为主。而近年来国内外大量研究表明,岩藻黄质除了具有一般类胡萝卜素的基本共轭结构,即多烯烃骨架外,还含有单环氧基、联烯基等特殊基团,具有较强的抗氧化性,因而岩藻黄质具有增强人体免疫机能、发挥营养强化的辅助作用等功能特性,包括抗氧化、抗癌、抗肥胖、调节血糖等,在功能食品的研发与应用等领域受到越来越多的关注。

2.1 抗氧化活性

岩藻黄质具有优异抗氧化活性的生物活性,其抗氧化能力约是维生素E的13.5倍之多,可减少氧化诱导的细胞损伤或死亡,降低各种慢性疾病的患病机率。岩藻黄质除了具有一般类胡萝卜素的多烯烃骨架外,其特有单环氧基、联烯基等特殊基团,均具有较强的抗氧化能力^[43-44]。岩藻黄质的抗氧化活性与分子内氧原子数目有关,岩藻黄质分子中具有6个氧原子,尤其在缺氧环境下,对自由基的敏感程度更高^[45]。岩藻黄质可有效清除化学生成的自由基,包括1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)、2,2'-偶氮(2-甲基丙基脘)二盐酸盐(AAPH)和ABAP自由基等^[46]。

岩藻黄质对单线态氧(1O_2)具有较好的淬灭作用及清除能力^[47],其抗氧化作用机制见图2。岩藻黄质与 1O_2 的相互作用很大程度上是物理淬灭,涉及两分子之间的直接能量转移。 1O_2 的能量转移到岩藻黄质的多烯烃骨架上,形成岩藻黄质三线态和基态氧(3O_2),随后岩藻黄质三线态通过与周围溶剂的相互作用恢复到基态并释放能量^[48]。在此过程中,岩藻黄质将有害的 1O_2 淬灭,而本身的结构并未发生改变,可继续参与下一次 1O_2 的淬灭。岩藻黄质与自

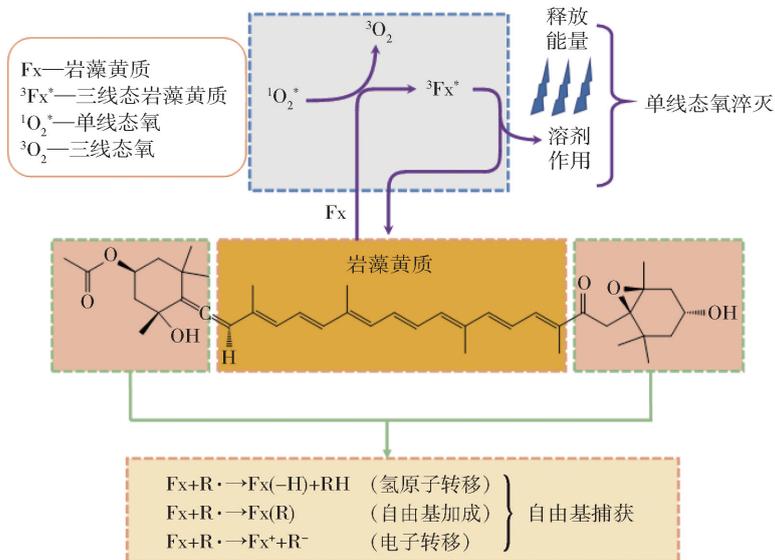


图2 岩藻黄质的抗氧化作用

Fig. 2 Anti-oxidant mechanism of fucoxanthin

由基之间的相互作用,主要通过3种途径进行,即氢原子转移、自由基加成和电子转移,最终实现自由基捕获的作用^[49]。

岩藻黄质优异的抗氧化活性已经被广泛地研究加以证实。Xia等^[50]从海藻中提取岩藻黄质,并利用对DPPH和ABTS自由基的清除能力测定其抗氧化活性,结果表明岩藻黄质有显著的抗氧化活性,且呈浓度依赖性,但与抗坏血酸相比活性略低。Neumann等^[46]借助鲁米诺化学发光体系来测定岩藻黄质和维生素K3的抗氧化能力,结果表明维生素K3在50 μg/mL时使发光降低了96%,而岩藻黄质降低了63%,说明岩藻黄质具有剂量依赖性的抗氧化活性但低于维生素K3。Li等^[51]发现岩藻黄质可减少维生素D2的氧化,证明其具有淬灭单线态氧的能力,同时发现,随着类胡萝卜素双键数量的增加,类胡萝卜素的猝灭速率常数增大。

关于岩藻黄质的抗氧化生物功效也被不断报道,最为代表性的就是岩藻黄质可以通过抑制肝细胞中氧化应激反应,可有效防止肝毒性损伤(见图3)。众所周知,过度饮酒造成的肝损伤会影响细胞氧化应激反应,降低Nrf2蛋白水平。岩藻黄质被证明可以以剂量依赖性的方式增加Nrf2蛋白及其下游目标蛋白水平,抑制核因子kappaB蛋白(NF-κB)表达,提高细胞抗氧化能力,进而最大限度地减少酒精引起的小鼠肝损伤。岩藻黄质主要是通过抑制活性氧(reactive oxygen species, ROS)和诱导腺苷酸激活蛋白激酶(AMP-activated protein kinase, AMPK)激

活产生来刺激肝细胞自噬^[52]。细胞自噬是通过去除细胞内受损细胞器和微生物病原体来保持细胞稳态和存活的过程,在肝损伤中起着至关重要的作用。ROS主要在线粒体中产生,包括超氧化物阴离子、羟基自由基和过氧化氢,早有研究证实过量的ROS可以参与氧化应激,造成细胞功能障碍甚至凋亡,而实验结果证明岩藻黄质可以明显抑制ROS对细胞造成的不良影响。其次,氧化应激反应在肝细胞中主要表现为AMPK信号系统,而岩藻黄质通过抑制ULK1激活AMPK磷酸化从而诱导肝细胞自噬,进而来保持肝细胞稳态,达到维持健康的目的。

2.2 抗癌活性

大量研究表明天然类胡萝卜素具有一定抗癌活性,其中岩藻黄质对前列腺、皮肤、十二指肠、肝脏等部位的癌变具有一定抑制效果。在15种可食用类胡萝卜素中,岩藻黄质抑制前列腺癌细胞的效果最佳,这与其5,6-环氧化物和烯键的特殊结构有关。岩藻黄质及其代谢产物可通过抑制癌细胞周期阻滞,从而使癌细胞活力降低,促进癌细胞凋亡和抑制癌细胞增殖。在早期研究中发现,岩藻黄质对人神经母细胞瘤GOTO细胞的抑制作用,主要是通过诱导细胞周期阻滞于G0/G1期,从而降低N-myc的基因表达^[53]。岩藻黄质可以通过诱导细胞凋亡产生ROS,降低抗细胞凋亡的Bcl-xL蛋白表达,触发caspase的裂解来减少两种人类白血病细胞系的细胞增殖^[54]。类似的结果也在前列腺癌PC-3细胞和宫颈癌HeLa细胞中发现,岩藻黄质诱导半胱氨

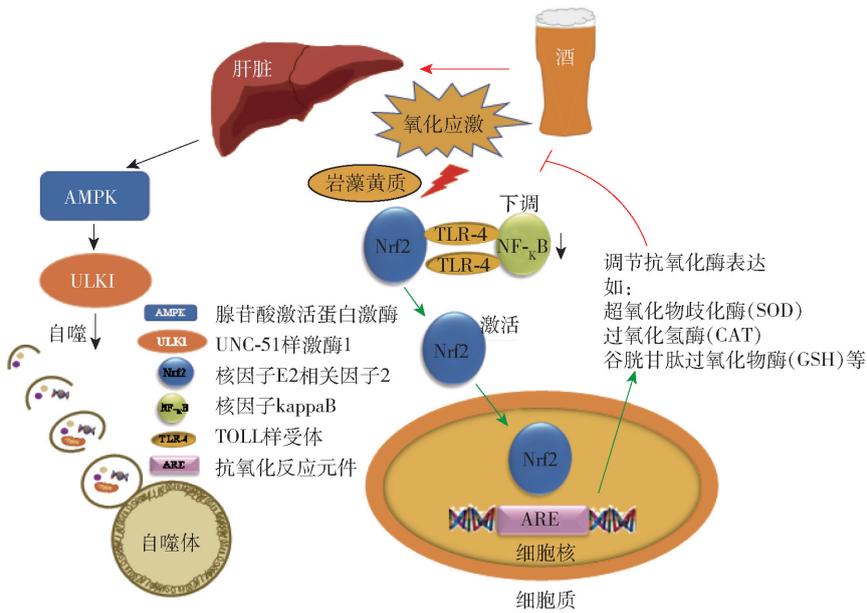


图3 岩藻黄质减少肝脏氧化应激机制

Fig. 3 Mechanism of fucoxanthin reducing oxidation of liver

酸蛋白酶依赖性且受 BAX/Bcl-2 蛋白调控的细胞凋亡^[55]。此外,岩藻黄质可诱导结肠癌细胞的 DNA 断裂,从而促进细胞凋亡,减少 Caco-2/HT-29/DLD-1 的增殖^[56]。除了对癌细胞的抑制,岩藻黄质也可通过对正常细胞的抑制达到抗癌的效果,如通过阻滞人淋巴内皮 HLEC 细胞 S 期抑制细胞增殖活力、通过改变细胞骨架结构抑制 HLEC 细胞迁移及成管能力、下调 VEGF-C 和 VEGFR3 的表达及抑制 NF- κ B/PI3K/Akt 信号通路从而抑制淋巴管新生^[57-60]。还有研究表明,当岩藻黄质与其他药物协同作用时,会展现更好地抗癌活性^[61]。岩藻黄质有可能成为抗肿瘤治疗药物的辅助营养品,因为它本身对正常细胞不会有毒害作用。

2.3 抗肥胖活性

目前关于岩藻黄质的抗肥胖活性研究是海洋天然活性物质研究领域的一个热点话题。岩藻黄质的抗肥胖活性可能是通过提高与能量消耗相关的蛋白和基因的表达实现的(见图4),主要涉及激活白色脂肪组织中的线粒体解偶联蛋白1(UCP1)表达、刺激 AMPK 通路抑制脂肪合成、提高 WAT 中 β 3 肾上腺素受体 mRNA 的表达、上调 SIRT1 蛋白促进脂肪分解和激活 PPAR γ 抑制脂肪细胞分化抑制脂肪细胞分化等途径。

2.3.1 提高 UCP1 在 WAT 中的表达

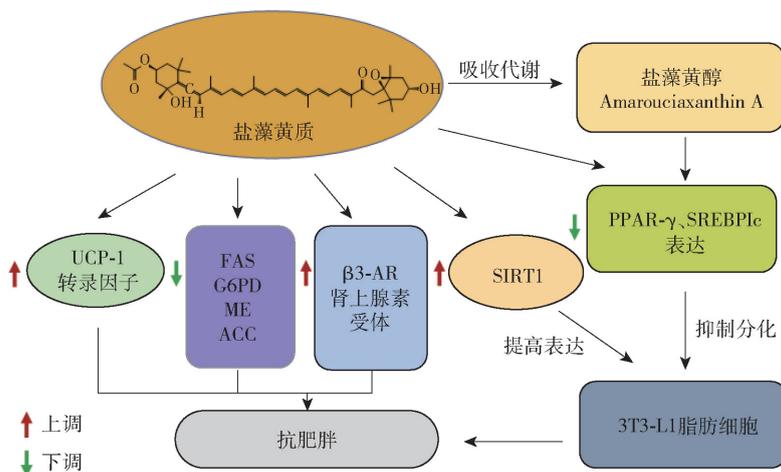
岩藻黄质可以激活白色脂肪组织中的线粒体解偶联蛋白1(UCP1),它是一类位于线粒体内膜上的

载体,可以将 H^+ 从线粒体内膜渗漏到线粒体基质中进而减少 ATP 的合成。现阶段已知 UCP 包括 UCP1、UCP2、UCP3、UCP4 等,其中 UCP1、UCP2 和 UCP3 结构比较相似且均存在于线粒体内膜。和 UCP1 相比,UCP2、UCP3 同样具有产热功能,但更多在调节脂肪酸氧化中起作用。目前研究表明,UCP1 一般在褐色脂肪组织(BAT)中表达,是新陈代谢中起到生热作用的关键分子,可以避免脂肪组织过度堆积,并在控制能量稳态起重要作用^[62]。一般成年人含有很少的褐色脂肪,UCP1 大多数存在于白色脂肪(WAT)中,所以通过诱导食物在 WAT 中产生 UCP1 成为一种备受关注的治疗肥胖的理想方法。

实验证明大鼠及小鼠摄取裙带菜中提取的脂质后,其腹部白色脂肪组织减少,尽管对照组小鼠的 WAT 中也有少量 UCP1 表达,但实验组小鼠能够明显检测到的 UCP1 蛋白及 mRNA 的信号。此外,实验组 WAT 中 UCP2 基因表达要低于对照组,表明白色脂肪的减少主要是依靠 UCP1 的产热作用而非 UCP2。另外,岩藻黄质和鱼油组合可以有效减弱糖尿病肥胖小鼠白色脂肪质量的增加,并增加 UCP1 的基因表达^[63]。

2.3.2 刺激 AMPK 通路抑制脂肪合成

第二种机制涉及岩藻黄质刺激 AMPK 通路,通过下调多种生脂酶的活性及相关基因的表达来调节脂肪酸的合成,通过显著增加 AMPK 蛋白酶磷酸化、下调脂肪酸合成酶蛋白(FAS)和降低乙酰辅酶



UCP-1: 线粒体解偶联蛋白 1, FAS: 脂肪酸合成酶, G6PD: 葡萄糖-6-磷酸脱氢酶, ME: 苹果酸酶, ACC: 乙酰辅酶 A 羧化酶, β 3-AR: β 3 肾上腺素受体, SIRT1: 去乙酰化酶蛋白 1, PPAR- γ : 过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 。

图 4 岩藻黄质抗肥胖活性机制

Fig. 4 Anti-obesity mechanism of fucoxanthin

A 羧化酶的活性,来调节脂肪酸的合成,并通过抑制葡萄糖-6-磷酸脱氢酶(G6PD)和苹果酸酶(ME)等酶活性和与脂肪生成相关的转录因子表达来减少脂质堆积。此外岩藻黄质还可以通过上调 SIRT1 促进脂肪分解,通过刺激肝脏生成二十六碳烯酸(DHA)来降低体内胆固醇水平。此外,岩藻黄质的吸收效率受其他食物组分的影响,特别是脂质类,因此岩藻黄质和鱼油、中链甘油三酯和扇贝磷脂结合后展现出极其有效的减肥作用。Woo 等^[64]发现岩藻黄质在小鼠体内可以有效下调脂肪酸合成酶(FAS)、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶(G6PD)和苹果酸酶(ME)的活性从而抑制脂肪合成。此外,在能量消耗过程中,腺苷活化蛋白激酶(AMPK)会降低乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)的活性,使其磷酸化从而抑制脂肪酸从头合成。

2.3.3 提高 WAT 中 β 3 肾上腺素受体 mRNA 的表达

基于目前的研究, β 3 肾上腺素受体(β 3-AR)主要在棕色脂肪组织和白色脂肪组织中存在,它可以提高 MCP1 mRNA 的表达并在棕色脂肪组织中发挥作用达到产热效果。Maeda 等^[65]在给肥胖小鼠喂食含有岩藻黄质的裙带菜脂质后发现,高浓度岩藻黄质饮食组的小鼠显著抑制体重,白色脂肪(WAT)中 β 3-AR 基因表达有所上升,这一结果被认为是岩藻黄质引起脂肪组织重量下降的原因之一。在高脂饲料喂养的小鼠中 MCP-1 蛋白的 mRNA 表达增加,然而在岩藻黄质饮食组小鼠中表达却正常,同时岩藻黄质饮食组小鼠的 β 3 肾上腺素受体的 mRNA 的表达发生上调。这些结果表明,饲料中添加岩藻

黄质可改善脂质代谢,因此有营养作用的富含岩藻黄质裙带菜脂质作为功能性食品应用于预防肥胖。

2.3.4 上调 SIRT1 蛋白促进脂肪分解

SIRT1 蛋白为 NAD^+ 依赖性组蛋白去乙酰化酶,最近有研究发现,SIRT1 在调节脂肪细胞分化中具有调节作用,而岩藻黄质可以显著上调 SIRT1 蛋白在分化的 3T3-L1 脂肪细胞的表达,进而促进脂肪分解减少脂肪重量^[66]。其机理是 SIRT1 在白色脂肪细胞中过度表达可以抑制与脂肪生成相关的表达受体。在分化的脂肪细胞,SIRT1 还可通过对脂肪细胞中 FoxO1 的去乙酰化作用来控制脂肪分解^[67]。此外,岩藻黄质及其衍生物使小鼠肝脏中二十二碳六烯酸(DHA)水平提高,对脂质代谢有促进作用,尤其是血液中胆固醇、甘油三酯及低密度脂蛋白的代谢,进而成为达到抗肥胖的作用。

2.3.5 激活 PPAR γ 抑制脂肪细胞分化

岩藻黄质和其代谢产物岩藻黄醇等可以抑制甘油-3-磷酸盐脱氢酶的活性,并激活调节致肥基因表达受体 γ (PPAR γ),起到抗肥胖的作用^[65]。脂肪细胞分化主要是指由前脂肪细胞转变为成熟脂肪细胞的过程,该过程中存在大量的因子表达,如过氧化物酶体增殖物激活受体(PPAR),其中 PPAR γ 被认为是调控前脂肪细胞分化的关键转录因子。肥胖大鼠每天服用岩藻黄质(1 mg/kg,以体质量计)8 周后,总胆固醇、甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇明显降低,高密度脂蛋白胆固醇显著增加,这是由于岩藻黄质可使脂肪组织和肝脏中与能量消耗和脂肪酸氧

化相关基因,包括 PPAR γ 和 PPAR α 上调,从而改善血脂情况^[38]。日本研究人员通过使用岩藻黄质及其代谢产物对 3T3-L1 细胞孵化后发现 PPAR γ 的表达均有所下调并抑制了甘油-3-磷酸盐脱氢酶的活性,所得结果呈现剂量依赖性抑制脂肪细胞分化^[62]。

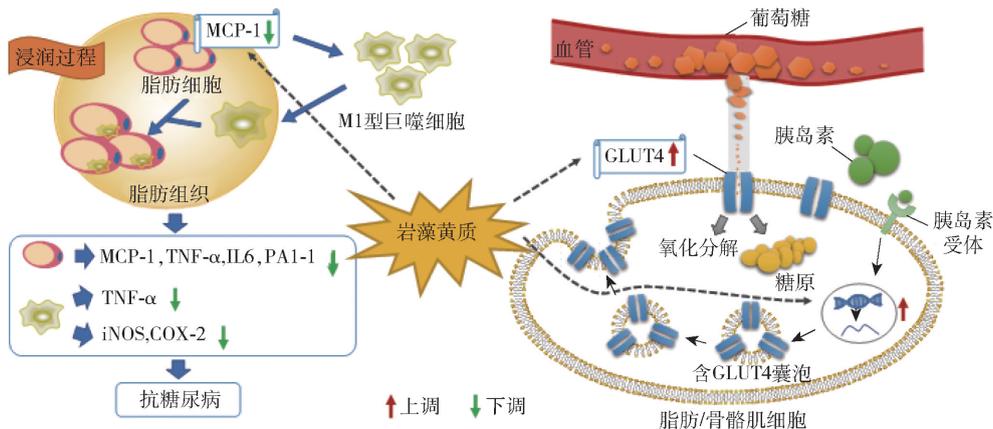
通过饮食调节的方法把岩藻黄质加入食品中,发现不会引起实验动物成瘾或其他任何副作用。还有实验观察,岩藻黄质和共轭亚油酸协同作用可以对肥胖大鼠有治疗作用,有效降低了血清三酰甘油、葡萄糖和瘦素水平,并通过调节白色脂肪中与脂质代谢有关的酶的表达来达到减肥的作用^[68]。

2.4 抗糖尿病活性

越来越多的研究表明,岩藻黄质具有潜在的抗糖尿病活性,可能对治疗糖尿病有显著功效。糖尿病是一种常见的内分泌代谢疾病,并已成为世界范围内的流行性疾病。岩藻黄质的抗糖尿病活性主要通过两种途径实现,即对白色脂肪组织产生的生物活性介质(称为脂肪细胞因子)的调节作用和促进葡萄糖转运体 4 (glucose transporter, GLUT4) 的表达以向细胞膜的转运进行的^[69]。

越来越多的研究表明,肥胖引起的慢性炎症与多种代谢疾病密切相关,其中就包括 2 型糖尿病^[70]。岩藻黄质可通过调节促炎性脂肪细胞因子的表达来改善胰岛素抵抗,对 2 型糖尿病患者的血糖水平具有一定调节作用(见图 5)。血糖通过血管运输到细胞内,在胰岛素作用下分解成糖原。长期的高脂饮食会使三酰基甘油在肥胖小鼠的脂肪组织

中大量积累,从而导致促炎性 M1 型巨噬细胞在脂肪组织内的浸润增加,其分泌的促炎性细胞因子可诱导脂肪组织炎症和胰岛素抵抗的发生^[71]。当脂肪细胞内储存的三酰基甘油达到一定限度时,脂肪细胞功能发生紊乱,分泌大量促炎性脂肪细胞因子,改变肌肉、肝脏和脂肪组织中胰岛素的敏感性,从而造成胰岛素抵抗^[65],这是 2 型糖尿病前期的一个重要指标。这些促炎性细胞因子主要包括单核细胞趋化蛋白 1 (monocyte chemotactic protein-1, MCP-1)、促炎性脂肪细胞因子 (TNF- α)、白细胞介素-6 (IL-6)、纤溶酶原激活剂抑制因子-1 (plasminogen activator inhibitor-1, PAI-1) 等。其中,脂肪细胞分泌的 MCP-1 可进一步诱导巨噬细胞浸润至白色脂肪组织并分泌大量 TNF- α 等^[72]。机体摄入的岩藻黄质可通过下调脂肪组织中 MCP-1 的表达,减少肥胖小鼠脂肪组织的巨噬细胞浸润,抑制促炎性脂肪因子的分泌,在肥胖动物模型中发挥其抗糖尿病功效^[73]。Maeda 等^[74]的研究显示,岩藻黄质可通过抑制 TNF- α 和 MCP-1 的表达来改善患糖尿病 KK-A y 小鼠的血糖水平。Hosokawa 等^[75]发现,喂食岩藻黄质可抑制 KK-A y 小鼠的白色脂肪中 MCP-1、TNF- α 、IL-6 和 PAI-1 mRNA 的表达,进而改善 KK-A y 小鼠的高血糖症。更有研究发现,岩藻黄质的代谢物岩藻黄醇不仅能抑制 3T3-F442A 脂肪细胞中 MCP-1 和 IL-6 mRNA 的表达和蛋白质产生,还可降低经棕榈酸处理 RAW 264.7 巨噬细胞中 TNF- α 诱导型一氧化氮合酶 (iNOS) 和环氧合酶-2 (COX-2) mRNA 的表达以及 TNF- α 的产生。因为,棕榈酸



MCP-1:单核细胞趋化蛋白,TNF- α :肿瘤坏死因子 α ,PAI-1:纤溶酶原激活物抑制物-1,IL6:白细胞介素6, iNOS:一氧化氮合成酶,COX-2:环氧合酶-2。

图5 岩藻黄质抗糖尿病活性机制

Fig. 5 Anti-diabetic activity mechanism of fucoxanthin

可激活巨噬细胞浸润至白色脂肪组织,刺激巨噬细胞分泌 TNF- α ,产生胰岛素抵抗^[28]。

糖尿病还与 GLUT4 的转运障碍有关^[76]。GLUT4 是脂肪细胞和骨骼肌细胞协助葡萄糖转运的主要蛋白^[77]。当摄取葡萄糖时,细胞膜上的 GLUT4 形成一个水性孔道,利用葡萄糖从细胞外顺浓度梯度进入细胞内,从而降低血液中葡萄糖含量^[78]。研究发现,岩藻黄质的抗糖尿病活性与其对肌肉组织中 GLUT4 表达的调节作用有关。Nishikawa 等^[79]的研究发现岩藻黄质的食用可促进轻度肥胖 2 型糖尿病 KK-Ay 鼠比目鱼肌中 GLUT4 从细胞质向细胞膜转运,同时增加趾长伸肌中 GLUT4 的表达,抑制小鼠血清中葡萄糖和胰岛素水平升高。进一步研究发现,岩藻黄质促进了位于调节 GLUT4 转位的胰岛素信号通路上游中胰岛素受体 mRNA 的表达及 Akt 磷酸化水平。Zhang 等^[80]发现岩藻黄质可有效激活肝脏和骨骼肌中 IRS-1/PI3K/AKT 信号通路的下游靶点 GLUT4,上调 GLUT4 mRNA 的表达,促进肝脏和骨骼肌对葡萄糖的摄取转化为糖原,在预防和治疗 2 型抗糖尿病中发挥功作用。此外,岩藻黄质还可以通过激活 AMPK 信号通路,促进 GLUT4 基因的转录,进而促进高脂饮食小鼠肌肉对血糖吸收的恢复,从而改善高血糖症状,预防糖尿病的产生^[78]。

另外岩藻黄质还可以通过调节胰岛素信号通路起到抗糖尿病的作用,在肥胖/糖尿病 KK-Ay 小鼠中,连续 27 d 摄入 0.1% 岩藻黄质可显著降低血糖水平和葡萄糖的耐受量^[74],而摄入 0.2% 岩藻黄质 2 周后也可以达到同样效果,证明岩藻黄质对治疗糖尿病具有剂量依赖性^[79]。有趣的是,岩藻黄质的降血糖作用仅在糖尿病模型小鼠中有效,而对健康的小鼠并没有观察到明显的降血糖作用^[65]。

2.5 抗光损伤活性

长期暴露于紫外光等强光下,人体的皮肤组织会产生不同程度的损伤。研究发现,岩藻黄质作为自然界中的类胡萝卜素能够有效地防止紫外光氧化对皮肤组织造成的辐射伤害,并且在皮炎模型中展示出可有效缓解瘙痒的作用^[81]。此外,岩藻黄质还具有一定护眼功能,尤其是因光氧化所致的眼内部疾病。人眼视网膜中含有多不饱和脂肪酸和高浓度氧,当高能量蓝光作用于视网膜时,产生的单线态氧和自由基会对视网膜产生过氧化损伤。因此通过膳

食摄入类胡萝卜素会帮助视网膜淬灭损伤性活性氧,抵抗氧化损伤。Chen 等^[82]研究发现,大鼠静脉注射岩藻黄质剂量为 0.5 ~ 5 mg/(kg d),或在紫外线 B(UVB)照射前用载具照射。丽丝胺绿色角膜表面染色显示 UVB 照射对角膜表面造成严重损伤,包括严重的上皮脱落和恶化的上皮光滑。组织病理学病灶检查显示促炎细胞因子水平,包括肿瘤坏死 TNF- α 和血管内皮生长因子(VEGF)显著升高。然而,岩藻黄质预处理可明显抑制 UVB 辐射引起的角膜病变保持角膜表面光滑,下调促炎细胞因子的表达,UVB 损伤引起的多形核白细胞浸润减少。此外,还观察到了经岩藻红素处理组中波紫外线照射后,有显著的上皮完整性保存作用和间质水肿的抑制效果。用岩藻黄质预处理可以通过抑制 TNF- α 和 VEGF 的表达,来预防 UVB 辐射引起的角膜疾病,进而阻断多形核白细胞浸润。另外,Chen 等^[83]还研究了岩藻黄质改善 UVB 诱导的角膜去神经和三叉神经疼痛的有益作用及其机制。岩藻黄质治疗可增强角膜核因子红细胞 2 相关因子 2 的表达。在 UVB 引起的神经紊乱后,用岩藻黄质治疗大鼠,观察到角膜典型的去神经支配和上皮脱落的抑制作用。此外,p38 MAP 激酶(pp38)活性磷酸化形式和胶质纤维酸性蛋白(GFAP)阳性神经细胞数量显著减少。UVB 诱导角膜炎后,岩藻黄质处理的大鼠,三叉神经节神经元中神经元选择性瞬时受体电位香草样蛋白 1(TRPV1)表达降低。炎症性疼痛的症状,包括睁眼困难和擦眼行为,在岩藻黄质治疗组也有所减少。总之,岩藻黄质对于抗光损伤,尤其是高能量蓝光引起的眼睛的过氧化损伤及其病变,有保护作用,值得深入开展研究。

3 岩藻黄质在食品中的应用

岩藻黄质是一类重要的脂溶性功能性化合物,存在于各种藻类、海洋浮游植物、水生贝壳类等动植物中,它不能在人体内合成,只能通过饮食摄入^[84]。大量研究表明,食用富含岩藻黄质的食品对人体有益,包括抗氧化、减肥、抗肿瘤、护眼等功效^[85]。近年来,关于岩藻黄质在食品行业中的应用,多数集中在其作为食品着色剂和活性成分添加剂,改善食品色泽的同时,赋予食品一定的功能特性。

3.1 改善食品色泽

岩藻黄质本身是一种天然色素,可使食品呈现

橙色,是人类常用的食品着色剂,在食品领域有着广泛的应用^[86]。近年来,岩藻黄质常用在黄油、馅饼、绿茶酥等焙烤食品的加工中,起到改善食品色泽的作用。Sasaki等^[87]发现,岩藻黄质能有效抑制鸡胸肉在烹调后冷却贮藏中的脂质过氧化反应,在预防鸡肉色泽发生变化的同时赋予鸡肉红色和黄色。岩藻黄质还可作为蛋黄着色剂,添加至家禽的饲料中,从而改善蛋制品的色泽^[88]。此外,为了降低腌肉过程中亚硝胺形成的风险,通常在腌制肉制品中添加岩藻黄质等天然色素,以减少亚硝酸盐的添加^[89]。

3.2 防止食品氧化变质

众所周知,自由基主导的脂肪酸和脂质氧化是造成食品变质的主要原因;超氧阴离子和羟基自由基等活性氧对油脂的氧化作用缩短了食品的保质期,引起食品行业的广泛关注^[90]。岩藻黄质可作为一种天然抗氧化剂添加到食品中,降低食品在加工和贮藏过程中脂质过氧化的发生概率^[91]。Sasaki等^[91]发现在鸡肉的加工过程中添加岩藻黄质,可有效抑制加工后鸡肉在冷藏过程中发生的脂质过氧化。Sellimi等^[92]的研究发现岩藻黄质同样可抑制鸡肉香肠在储藏过程中发生的脂质氧化,有效阻止了硫代巴比妥酸的生成。隋悦等^[93]发现岩藻黄质在氧化模型中可有效抑制鱼油和猪油中丙二醛的生成,最高抑制率分别为78.1%和80.9%,结果表明岩藻黄质可作为一种安全的天然抗氧化剂添加至食品中,以解决脂质氧化引起的变质问题。

3.3 开发减肥产品

岩藻黄质最为突出的生理活性便是抗肥胖活性,因此在开发的产品中,减肥产品居多。2006年,美国一家名叫AHD国际公司从褐藻中得到一种具有减肥功效的提取物质,并向市场高调推出并销售,其中这种有效的减肥产品主要物质就是岩藻黄质^[5]。英国Healtharena公司研发出了FucoXanThin系列减肥产品,经过宣传后便深受消费者喜爱,该公司宣称产品可通过天然物质来燃烧体内多余脂肪达到减肥效果^[5]。在我国目前也有相关产品的研发与销售,使用含有天然岩藻黄质的保健软胶囊,采用预防肥胖模型法对大鼠进行减脂实验,数据分析显示喂食岩藻黄质的大鼠,在体重和肾周脂肪重量上都与模型组相比有明显降低^[94]。此外,岩藻黄质与其他功能性成分复合的减肥产品也是市场开发的热门,一种岩藻黄质与石榴籽提取物复合的产品Xanthigen被证实对小鼠和人类有降脂的作用^[95]。除了

食品外,岩藻黄质还被制成水凝胶贴剂用于预防和治疗肥胖^[96]。

3.4 制作低GI食品

岩藻黄质作为胡萝卜素的一种,与其他类胡萝卜素一样具有潜在的抗糖尿病活性,可有效抑制血糖的升高,为其在低血糖生成指数(glycemic index, GI)食品的研发中创造条件。虽然糖尿病的发病率在逐年递增,但是有关岩藻黄质等类胡萝卜素在低GI食品中的应用仍显有报道。中岛绫香等^[97]研制了以玉米黄质、硅藻黄质、异黄素等作为有效成分的一类胡萝卜素混合物,可将其添加至高GI食品中一起食用,用于抑制血糖上升。张吉和等^[98]研制了一种以岩藻黄质、大豆卵磷脂和低聚果糖可溶性膳食纤维为主要原料的压片糖果。到目前为止还没有能够完全治愈糖尿病的方法,只能以控制为主^[99],利用岩藻黄质研发适合糖尿病患者食用的低GI食品仍是岩藻黄质在食品中应用研究的热点问题。

3.5 其他产品的开发

岩藻黄质具有独特的功能特性,常被应用于功能食品的研发。在鱼油制品的加工中,常将岩藻黄质包裹在其中,制成具有护眼功效的岩藻黄质鱼油软胶囊^[100]。Saravana等^[101]在中性条件下用κ-卡拉胶制备的富含岩藻黄质的海藻油纳米乳液,同样可用于具有护眼功效的食品、饮料的研发和加工。除此之外,近年来有研究发现,岩藻黄质添加到食品中,可使其在肿瘤干预中具有一定的潜在作用^[102]。张春毅等^[103]研制了一种抗痤疮的岩藻黄质琼胶寡糖组合物,所制备的抗痤疮的岩藻黄质琼胶寡糖组合物可以抑制痤疮丙酸杆菌和金黄色葡萄球菌这两种痤疮致病菌的生长,有效控制痤疮病情发展。

4 结论

岩藻黄质作为可食用藻类中含量最为丰富的类胡萝卜素饱受关注,是因为其具有许多对人体有益的生理活性,包括抗氧化、抗癌、抗肥胖、抗糖尿病和抗光损伤等功能,在开发功能保健食品中具有潜在的应用价值。目前,岩藻黄质加工成本较高,加工、贮藏过程易降解,严重限制了其在食品产业中的应用。因此,研发有效的提取方法和提高岩藻黄质稳定性是未来促进其应用于功能性食品的关键和重点。此外,近年来由于人们生活水平不断提高,营养过剩及不均衡导致肥胖、糖尿病成为全球范围内的

流行病,因此,发掘岩藻黄质抗肥胖及抗糖尿病活性依旧是科研人员的研究热点。岩藻黄质在体内的代谢途径及详细的抗肥胖及抗糖尿病活性分子机制,仍有待被进一步证明。希望本文总结的岩藻黄质研究进展为新的功能食品开发提供有价值的参考。

参考文献:

- [1] 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,2015,34(3):81-94.
ZHANG W Y, GAO B Y, LEI X Q, et al. Progress on physicochemical and biological properties, preparation techniques and physiological activities on fucoxanthin [J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2015, 34(3): 81-94.
- [2] 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,2010,31(6):408-410.
WANG S H, XUE C H. Chemical structure, properties and bioactivities of fucoxanthin [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(6):408-410.
- [3] LOURENCO-LOPES C, FRAGA-CORRAL M, JIMENEZ-LOPEZ C, et al. Biological action mechanisms of fucoxanthin extracted from algae for application in food and cosmetic industries [J/OL]. Trends in Food Science & Technology, 2021[2021-08-01]. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.012>.
- [4] ENGLERT G, BJERRNLAND T, LIAAEN-JENSEN S. 1D and 2D NMR study of some allenic carotenoids of the fucoxanthin series [J]. Magnetic Resonance in Chemistry, 1990, 28(1): 519-528.
- [5] 吴跃,林亲录,战鑫.岩藻黄质的功能特性及在食品工业中的应用[J].食品研究与开发,2012,10(33):203-206.
WU Y, LIN Q L, ZHAN X. The functional properties of fucoxanthin and its application in food industry [J]. Food Research and Development, 2012, 10(33): 203-206.
- [6] NOVIENDRI D, FITHRIANI D, HASRINI R F. Fucoxanthin, a xanthophyll from macro- and microalgae: extraction techniques, bioactivities and their potential application in nutra- and cosmeceutical industries [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 232: 03010.
- [7] 闫相勇,刘翼翔,吴永沛,等.海带岩藻黄素的提取及纯化工艺研究[J].中国食品学报,2014,14(3):115-121.
YAN X Y, LIU Y X, WU Y P, et al. Optimizing the processes of extracting and purifying fucoxanthin from *Laminaria japonica* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(3): 115-121.
- [8] 刘梁,勾明玥,张春枝,等.海带岩藻黄素提取工艺的优化[J].大连工业大学学报,2010,29(6):406-408.
LIU L, GOU M Y, ZHANG C Z, et al. Optimization on extraction of fucoxanthin from *Laminaria japonica* [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2010, 29(6): 406-408.
- [9] 李红艳,王璇璇,李晓,等.鼠尾藻中岩藻黄素的提取工艺研究[J].海洋科学,2018,42(2):71-77.
LI H Y, WANG X X, LI X, et al. Optimization of fucoxanthin extraction from *Sargassum thunbergii* [J]. Marine Science, 2018, 42(2): 71-77.
- [10] 周卫松,杨艳,刘明社.裙带菜中岩藻黄质的提取纯化工艺研究[J].食品工业科技,2015,36(3):260-265.
ZHOU W S, YANG Y, LIU M S. Extraction and purification of fucoxanthin from *Undaria Pinnatifida* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(3): 260-265.
- [11] FOO S C, YUSOFF F M, ISMAIL M, et al. Antioxidant capacities of fucoxanthin-producing algae as influenced by their carotenoid and phenolic contents [J]. Journal of Biotechnology, 2017, 241(1): 175-183.
- [12] TERASAKI M, HIROSE A, NARAYAN B, et al. Evaluation of recoverable functional lipid components of several brown seaweeds (*Phaeophyta*) from Japan with special reference to fucoxanthin and fucosterol contents [J]. Journal of Phycology, 2009, 45(4): 974-980.
- [13] AGATONOVIC-KUSTRIN S, KUSTRIN E, ANGOVE M J, et al. A screening method for cardiovascular active compounds in marine algae [J]. Journal of chromatography A, 2018, 1550: 57-62.
- [14] 尹宗美,王丹,石佳,等.羊栖菜藻渣中岩藻黄质制备技术及工艺优化[J].食品研究与开发,2017,38(15):134-139.
YIN Z M, WANG D, SHI J, et al. Study on extracting process of fucoxanthin from *Sargassum fusiforme* residue [J]. Food Research and Development, 2017, 38(15): 134-139.
- [15] 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].食品工业技术,2014,21(4):192-196.
LI B, WU Y P, LIU Y X, et al. Study on the enzymatic extraction of fucoxanthin from *Laminaria japonica* residue [J]. Science and Technology of Food Industry,

- 2014, 21(4): 192 - 196.
- [16] 李奕葶, 郭旭, 胡选生, 等. 酶解法制备岩藻黄素及其对不同来源糖苷酶抑制作用的研究 [J]. 中国食品添加剂, 2016, 148(6): 144 - 150.
LI Y T, GUO X, HU X S, et al. Study on enzymatic extraction and glycosidase inhibitory activity of fucoxanthin [J]. China Food Additives, 2016, 148(6): 144 - 150.
- [17] 赵鹏. 海带中岩藻黄素的提取与纯化工艺研究 [D]. 北京:北京化工大学, 2010.
ZHAO P. Study on extraction and purification of fucoxanthin from *Laminaria japonica* [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [18] 王乐, 李丽, 牟海津. 鼠尾藻岩藻黄素超声辅助提取及其纯化工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 141 - 146.
WANG L, LI L, MOU H J. Optimization of ultrasonic assisted extraction and purification of fucoxanthin from *Sargassum thunbergii* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(8): 141 - 146.
- [19] 陈文佳. 海带中岩藻黄素提取工艺优化及性质研究 [D]. 济南:山东轻工业学院, 2012.
CHEN W J. Optimization of extraction technology and properties of fucoxanthin from Kelp [D]. Jinan: Shandong Polytechnic University, 2012.
- [20] 裴钊, 徐小琴, 李强, 等. 超声提取裙带菜中岩藻黄素的工艺研究 [J]. 药物评价研究, 2013, 36(4): 285 - 288.
CHANG Z, XU X Q, LI Q, et al. Optimization of ultrasonic enhanced extraction of fucoxanthin from *Undaria pinnatifida* [J]. Drug Evaluation Research, 2013, 36(4): 285 - 288.
- [21] 刘丽平, 奚歆儿, 汪财生, 等. 超声波辅助提取羊栖菜中岩藻黄素的工艺优化 [J]. 浙江农业科学, 2012, 3(1): 380 - 384.
LIU L P, XI X E, WANG C S, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction of fucoxanthin from *Hizikia fusiforme* [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Science, 2012, 3(1): 380 - 384.
- [22] GULER B A, DENIZ IREM, DEMIREL Z, et al. A novel subcritical fucoxanthin extraction with a biorefinery approach [J]. Biochemical Engineering Journal, 2020, 153(3): 107403.
- [23] ROH M K, UDDIN M S, CHUN B S. Extraction of fucoxanthin and polyphenol from *Undaria pinnatifida* using supercritical carbon dioxide with co-solvent [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2009, 13(6): 724 - 729.
- [24] 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]. Marine Drugs, 2015, 13(6): 3422 - 3442.
- [25] 严国富, 王莅莎, 孙丽, 等. 超临界 CO₂ 萃取铜藻中岩藻黄质 [J]. 中国食品添加剂, 2018, 176(10): 115 - 119.
YAN G F, WANG L S, SUN L, et al. Extraction of fucoxanthin from copperalgae by supercritical CO₂ [J]. China Food Additives, 2018, 176(10): 115 - 119.
- [26] 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]. Marine Drugs, 2014, 12(5): 2383 - 2396.
- [27] HARRISON E H. Mechanisms involved in the intestinal absorption of dietary vitamin A and provitamin A carotenoids [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2012, 1821(1): 70 - 77.
- [28] MIYASHITA K, NISHIKAWA S, BEPPU F, et al. The allenic carotenoid fucoxanthin, a novel marine nutraceutical from brown seaweeds [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(7): 1166 - 1174.
- [29] AKIRA A, TATSUYA S, HIROSHI O, et al. Biotransformation of fucoxanthinol into Amarouciaxanthin A in mice [J]. Drug Metabolism and Disposition, 2004, 32(2): 205 - 211.
- [30] KIEFER C, SUMSER E, WERNET M F, et al. A class B scavenger receptor mediates the cellular uptake of carotenoids in *Drosophila* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(16): 10581 - 10586.
- [31] HASHIMOTO T, OZAKI Y, TAMINATO M, et al. The distribution and accumulation of fucoxanthin and its metabolites after oral administration in mice [J]. The British Journal of Nutrition, 2009, 102(2): 242 - 248.
- [32] ASAI A, YONEKURA L, NAGAO A. Low bioavailability of dietary epoxyxanthophylls in humans [J]. The British Journal of Nutrition, 2008, 100(2): 273 - 277.
- [33] GAMMONE M A, RICCIONI G, D'ORAZIO N. Carotenoids: potential allies of cardiovascular health? [J]. Food & Nutrition Research, 2015, 2015(59): 26762.
- [34] ZHAO D, KIM S M, PAN C H, et al. Effects of heating, aerial exposure and illumination on stability of fucoxanthin in canola oil [J]. Food Chemistry, 2014, 145(1): 505 - 513.
- [35] BENEVIDES C M J, VELOSO M C C, PAULA PEREIRA

- RA P A, et al. A chemical study of β -carotene oxidation by ozone in an organic model system and the identification of the resulting products [J]. Food Chemistry, 2011, 126(3): 927–934.
- [36] HII S L, CHOONG P Y, WOO K K, et al. Stability studies of fucoxanthin from *Sargassum Binderi* [J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2010, 4(10): 4580–4584.
- [37] WU H Y, LIM S J, WAN A W M, et al. Characterisation and stability of pigments extracted from *Sargassum binderi* obtained from Semporna, Sabah [J]. Sains Malaysiana, 2014, 43(9): 1345–1354.
- [38] D'ORAZIO N, EUGENIO G, GAMMONE M A, et al. Fucoxantin: a treasure from the sea [J]. Marine Drugs, 2012, 10(3): 6046–6016.
- [39] BEPPU F, NIWANO Y, SATO E, et al. *In vitro* and *in vivo* evaluation of mutagenicity of fucoxanthin (FX) and its metabolite fucoxanthinol (FXOH) [J]. The Journal of Toxicological Sciences, 2009, 34(6): 693–698.
- [40] BEPPU F, NIWANO Y, TSUKUI T, et al. Single and repeated oral dose toxicity study of fucoxanthin (FX), a marine carotenoid, in mice [J]. The Journal of Toxicological Sciences, 2009, 34(5): 501–510.
- [41] REN R, AZUMA Y, OJIMA T, et al. Modulation of platelet aggregation-related eicosanoid production by dietary F-fucoidan from brown alga *Laminaria japonica* in human subjects [J]. The British Journal of Nutrition, 2013, 110(5): 880–890.
- [42] ABIDOV M, RAMAZANOV Z, SEIFULLA R, et al. The effects of xanthigen in the weight management of obese premenopausal women with non-alcoholic fatty liver disease and normal liver fat [J]. Diabetes Obesity and Metabolism, 2010, 12(1): 72–81.
- [43] GUVATOVA Z, DALINA A, MARUSICH E, et al. Protective effects of carotenoid fucoxanthin in fibroblasts cellular senescence [J]. Mechanism of Ageing and Development, 2020, 189(36): 111260.
- [44] LIU C L, LIANG A L, HU M L. Protective effects of fucoxanthin against ferric nitrilotriacetate-induced oxidative stress in murine hepatic BNL CL.2 cells [J]. Toxicology in Vitro, 2011, 25(7): 1314–1319.
- [45] NOMURA T, KIKUCHI M, KUBODERA A, et al. Proton-donative antioxidant activity of fucoxanthin with 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) [J]. Biochemistry and Molecular Biology International, 1997, 42(2): 361–370.
- [46] NEUMANN U, DERWENSKUS F, FLAIZ FLISTER V, et al. Fucoxanthin, a carotenoid derived from *Phaeodactylum tricornutum* exerts antiproliferative and antioxidant activities *in vitro* [J]. Antioxidants, 2019, 8(6): 183–194.
- [47] MIYASHITA K, BEPPU F, HOSOKAWA M, et al. Nutraceutical characteristics of the brown seaweed carotenoid fucoxanthin [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2020, 686: 108364.
- [48] STAHL W, SIES H. Antioxidant activity of carotenoids [J]. Molecular Aspects of Medicine, 2003, 24(6): 345–351.
- [49] 张承越, 邓泽元, 李红艳. 类胡萝卜素清除超氧阴离子和氢过氧自由基活性[J]. 南昌大学学报(理科版), 2018, 42(2): 129–133.
- ZHANG C Y, DENG Z Y, LI H Y. A theoretical study of the scavenging activity of carotenoids with superoxide anion and peroxy radical [J]. Journal of Nanchang University(Natural Science), 2018, 42(2): 129–133.
- [50] XIA S, WANG K, WAN L, et al. Production, characterization, and antioxidant activity of fucoxanthin from the marine diatom *Odontella aurita* [J]. Marine Drugs, 2013, 11(7): 2667–2681.
- [51] LI T L, KING J M, MIN D B. Quenching mechanisms and kinetics of carotenoids in riboflavin photosensitized singlet oxygen oxidation of vitamin D2 [J]. Journal of Food Biochemistry, 2000, 24(6): 477–492.
- [52] JANG E J, KIM S C, LEE J H, et al. Fucoxanthin, the constituent of *Laminaria japonica*, triggers AMPK-mediated cytoprotection and autophagy in hepatocytes under oxidative stress [J]. BMC complementary and Alternative Medicine, 2018, 18(1): 97–107.
- [53] OKUZUMI J, NISHINO H, MURAKOSHI M, et al. Inhibitory effects of fucoxanthin, a natural carotenoid, on N-myc expression and cell cycle progression in human [J]. Cancer Letter, 1990, 55(1): 75–81.
- [54] ALMEIDA T P, FERREIRA J, VETTORAZZI A, et al. Cytotoxic activity of fucoxanthin, alone and in combination with the cancer drugs imatinib and doxorubicin, in CML cell lines [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2018, 59(1): 24–33.
- [55] CHUYEN H V, EUN J B. Marine carotenoids: bioactivities and potential benefits to human health [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(12): 2600–2610.
- [56] HOSOKAWA M, KUDO M, MAEDA H, et al. Fucoxanthin induces apoptosis and enhances the antiprolifera-

- tive effect of the PPAR γ ligand, troglitazone, on colon cancer cells [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2004, 1675(1): 113–119.
- [57] RAVI H, KURREY N, MANABE Y, et al. Polymeric chitosan-glycolipid nanocarriers for an effective delivery of marine carotenoid fucoxanthin for induction of apoptosis in human colon cancer cells (Caco-2 cells) [J]. *Materials Science & Engineering C*, 2018, 91(6): 785–795.
- [58] TERASAKI M, MATSUMOTO N, HASHIMOTO R, et al. Fucoxanthin administration delays occurrence of tumors in xenograft mice by colonospheres, with an anti-tumor predictor of glycine [J]. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 2018, 64(1): 52–58.
- [59] GALASSO C, CORINALDESI C, SANSONE C. Carotenoids from marine organisms: biological functions and industrial applications [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2017, 6(4): 96.
- [60] JIN Y, QIU S, SHAO N, et al. Fucoxanthin and tumor necrosis factor-related apoptosis-inducing ligand (TRAIL) synergistically promotes apoptosis of human cervical cancer cells by targeting PI3K/Akt/NF-kappaB signaling pathway [J]. *Medical Science Monitor*, 2018, 24(1): 11–18.
- [61] WANG Z, LI H, DONG M, et al. The anticancer effects and mechanisms of fucoxanthin combined with other drugs [J]. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, 2019, 145(2): 293–301.
- [62] MAEDA H, HOSOKAWA M, SASHIMA T, et al. Fucoxanthin from edible seaweed, *Undaria pinnatifida*, shows antiobesity effect through UCPI expression in white adipose tissues [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2005, 332(2): 392–397.
- [63] MAEDA H, HOSOKAWA M, SASHIMA T, et al. Dietary combination of fucoxanthin and fish oil attenuates the weight gain of white adipose tissue and decreases blood glucose in obese/diabetic KK–Ay mice [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(19): 7701–7706.
- [64] 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]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2009, 53(12): 1603–1611.
- [65] MAEDA H, HOSOKAWA M, SASHIMA T, et al. Anti-obesity and anti-diabetic effects of fucoxanthin on diet-induced obesity conditions in a murine model [J]. *Molecular Medicine Reports*, 2009, 2(6): 897–902.
- [66] PICARD F, KURTEV M, CHUNG N, et al. Sirt1 promotes fat mobilization in white adipocytes by repressing PPAR- γ [J]. *Nature*, 2004, 429(6993): 771–776.
- [67] CHAKRABARTI P, ENGLISH T, KARKI S, et al. SIRT1 controls lipolysis in adipocytes via FOXO1-mediated expression of ATGL [J]. *Journal of Lipid Research*, 2011, 52(9): 1693–1701.
- [68] HU X, LI Y, LI C, et al. Combination of fucoxanthin and conjugated linoleic acid attenuates body weight gain and improves lipid metabolism in high-fat diet-induced obese rats [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2012, 519(1): 59–65.
- [69] MIYASHITA K, HOSOKAWA M. Fucoxanthin in the management of obesity and its related disorders [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 36(1): 195–202.
- [70] FERNANDEZ-SANCHEZ A, MADRIGAL-SANTILLAN E, BAUTISTA M, et al. Inflammation, oxidative stress, and obesity [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2011, 12(5): 3117–3132.
- [71] 朱翠松, 杨瑜, 刘明斌, 等. 脂肪组织巨噬细胞在肥胖诱导的炎症和胰岛素抵抗中的作用 [J]. *复旦学报(医学版)*, 2019, 266(5): 177–122.
- ZHU C S, YANG Y, LIU M B, et al. The role of adipose tissue macrophages in obesity induced inflammation and insulin resistance [J]. *Fudan University Journal of Medical Sciences*, 2019, 266(5): 177–122.
- [72] DE TAEYE B M, NOVITSKAYA T, MCGUINNESS O P, et al. Macrophage TNF- α contributes to insulin resistance and hepatic steatosis in diet-induced obesity [J]. *American Journal of Physiology, Endocrinology and Metabolism*, 2007, 293(3): 713–725.
- [73] OKADA T, NISHIZAWA H, KURATA A, et al. URB is abundantly expressed in adipose tissue and dysregulated in obesity [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2008, 367(2): 370–383.
- [74] MAEDA H, KANNO S, KODATE M, et al. Fucoxanthinol, metabolite of fucoxanthin, improves obesity-induced inflammation in adipocyte cells [J]. *Marine Drugs*, 2015, 13(8): 4799–4813.
- [75] HOSOKAWA M, MIYASHITA T, NISHIKAWA S, et al. Fucoxanthin regulates adipocytokine mRNA expression in white adipose tissue of diabetic/obese KK–Ay mice [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2010, 504(1): 17–25.
- [76] 汪雪峰. GLUT4 研究进展 [J]. *国外医学(生理、病理科学与临床分册)*, 2003, 23(6): 602–604.

- WANG X F. The research of GLUT4 [J]. Foreign Medical Sciences · Section of Pathophysiology and Clinical Medicine, 2003, 23(6): 602 - 604.
- [77] 齐玫玫. GLUT4 表达调节与糖尿病相关问题研究 [J]. 当代医学, 2011, 17(26): 26 - 27.
- QI M M. The research on GLUT4 expression regulation and diabetes related issues [J]. Contemporary Medicine, 2011, 17(26): 26 - 27.
- [78] 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]. 现代食品科技, 2015, 31(9): 313 - 325.
- PENG J, DENG X Q, AO Y S, et al. Anti-obesity and anti-diabetic effects of fucoxanthin [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(9): 313 - 325.
- [79] NISHIKAWA S, HOSOKAWA M, MIYASHITA K. Fucoxanthin promotes translocation and induction of glucose transporter 4 in skeletal muscles of diabetic/obese KK-A(y) mice [J]. Phytomedicine, 2012, 19(5): 389 - 394.
- [80] ZHANG Y P, XU W, HUANG X Q, et al. Fucoxanthin ameliorates hyperglycemia, hyperlipidemia and insulin resistance in diabetic mice partially through IRS - 1/PI3K/Akt and AMPK pathways [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 48(1): 515 - 524.
- [81] NATSUME C, AOKI N, AOYAMA T, et al. Fucoxanthin ameliorates atopic dermatitis symptoms by regulating keratinocytes and regulatory innate lymphoid cells [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(6): 2180.
- [82] CHEN S J, LEE C J, LIN T B, et al. Inhibition of ultraviolet B-induced expression of the proinflammatory cytokines TNF- α and VEGF in the cornea by fucoxanthin treatment in a rat model [J]. Marine Drugs, 2016, 14(1): 13.
- [83] CHEN S J, LEE C J, LIN T B, et al. Protective effects of fucoxanthin on ultraviolet B-induced corneal denervation and inflammatory pain in a rat model [J]. Marine Drugs, 2019, 17(3): 152 - 166.
- [84] RUIZ-SOLA M A, RODRIGUEZ-CONCEPCION M. Carotenoid biosynthesis in *Arabidopsis*: a colorful pathway [J]. Arabidopsis Book, 2012, 10(1): 158 - 185.
- [85] LIU Y, QIAO Z, LIU W, et al. Oleic acid as a protein ligand improving intestinal absorption and ocular benefit of fucoxanthin in water through protein-based encapsulation [J]. Food & Function, 2019, 10(7): 4381 - 4395.
- [86] WANG C Y, CHEN X, NAKAMURA Y, et al. Fucoxanthin activities motivate its nano/micro-encapsulation for food or nutraceutical application: a review [J]. Food Function, 2020, 11(11): 9338 - 9358.
- [87] SASAKI K, ISHIHARA K, OYAMADA C, et al. Effects of fucoxanthin addition to ground chicken breast meat on lipid and colour stability during chilled storage, before and after cooking [J]. Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 2008, 21(7): 1067 - 1072.
- [88] AASE S A, OLAV H B, LIAAEN J A. Fucoxanthin metabolites in egg yolks of laying hens I [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 1998, 119(4): 963 - 974.
- [89] ALAHAKOON A U, JAYASENA D D, RAMACHANDRA S, et al. Alternatives to nitrite in processed meat: up to date [J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 45(1): 37 - 49.
- [90] KIM S K, PANGESTUTI R. Biological activities and potential health benefits of fucoxanthin derived from marine brown algae [J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2011, 64(1): 111 - 128.
- [91] CHU W L. Potential applications of antioxidant compounds derived from algae [J]. Current Topics in Nutraceutical Research, 2011, 9(3): 83 - 98.
- [92] SELIMI S, KSOUDA G, BENSLIMA A, et al. Enhancing colour and oxidative stabilities of reduced-nitrite turkey meat sausages during refrigerated storage using fucoxanthin purified from the Tunisian seaweed *Cystoseira barbata* [J]. Food Chemical Toxicology, 2017, 107(Pt B): 620 - 629.
- [93] 隋悦, 纪晓林, 孙一含, 等. 岩藻黄质的抗脂质氧化活性研究 [J]. 中国食品学报, 2020, 20(12): 265 - 276.
- SUI Y, JI X L, SUN Y H, et al. Study on anti-lipid oxidation activity of fucoxanthin [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(12): 265 - 276.
- [94] 胡春风, 宫平, 王旭, 等. 一种具有减脂功能的保健食品: CN102334688A [P]. 2012 - 02 - 01.
- [95] CHOI K M, JEON Y S, KIM W, et al. Xanthigen attenuates high-fat diet-induced obesity through down-regulation of PPAR γ and activation of the AMPK pathway [J]. Food Science & Biotechnology, 2014, 23(3): 931 - 935.
- [96] 韩超春, 庞遵庭. 一种用于预防及治疗肥胖的岩藻黄质水凝胶贴剂: CN105997957A [P]. 2016 - 10 - 12.
- [97] 中岛绫香, 铃木健吾, 菅原达也, 等. 血糖值上升抑制剂, 糖尿病抑制剂和食品组合物: CN112566647A

- [P]. 2021-03-26.
- [98] 张吉和, 沈家会, 蒋子华, 等. 岩藻黄素在压片糖果中的应用; CN106615551A [P]. 2017-05-10.
- [99] BATTAGLIA M, ATKINSON M A. The streetlight effect in type 1 diabetes [J]. *Diabetes*, 2015, 64(4): 1081-1090.
- [100] KODUVAYUR H S F, SURENDRARAJ A, JACOBS-EN C. Isolation of fucoxanthin from brown algae and its antioxidant activity: *in vitro* and 5% fish oil-in-water emulsion [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2018, 95(7): 835-843.
- [101] SARAVANA P S, SHANMUGAPRIYA K, GERENIU C R N, et al. Ultrasound-mediated fucoxanthin rich oil nanoemulsions stabilized by kappa-carrageenan: process optimization, bio-accessibility and cytotoxicity [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 55(7): 105-116.
- [102] CHUNG T W, CHOI H J, LEE J Y, et al. Marine algal fucoxanthin inhibits the metastatic potential of cancer cells [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2013, 439(4): 580-585.
- [103] 张春毅, 何雄飞, 王斐, 等. 抗痤疮的岩藻黄质-琼胶寡糖组合物, 制备方法及其应用; CN111529543A [P]. 2020-05-25.

Functional Properties of Fucoxanthin and Its Application in Foods

TAN Mingqian, LI Jiaxuan, YU Xiaoting

(Academy of Food Interdisciplinary Science/School of Food Science and Technology/National Engineering Research Center of Seafood/Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Fucoxanthin is a kind of marine allenic carotenoid with specific structure, which has several biological properties, including anti-oxidation, anti-cancer, anti-obesity and anti-diabetic, etc. It has high nutritional and health value. At present, it has become one of the hot issues in the research and development of marine food nutritional factors. The sources and extraction methods of fucoxanthin, the metabolic and absorption pathways, stability and safety, and other physicochemical properties are summarized, and the functional properties of fucoxanthin, such as anti-oxidation, anti-cancer, anti-obesity, anti-diabetic, and anti-photodamage, are described in depth. The application in food, especially the significant anti-obesity and anti-diabetic activity of fucoxanthin has been thoroughly explained and analyzed. Fucoxanthin mainly regulates mitochondrial uncoupling protein 1 to avoid excessive fat accumulation. In addition, fucoxanthin and its metabolites regulate the expression of fat genes to realize the anti-obesity effect. The anti-diabetic activity is mainly complied by directly down-regulating the expression of adipocyte mRNA or up-regulating the glucose carrier on the mouse skeletal muscle to reduce blood sugar and increase the content of insulin in plasma, which can effectively regulate the blood sugar levels. These information might provide theoretical references for fucoxanthin researchers and further development and utilization of fucoxanthin in the food industry.

Keywords: seaweed; bioactive seaweed substance; fucoxanthin; physicochemical property; functional property

(责任编辑:李 宁)