

胡浩杰, 田双起, 赵仁勇, 等. 新资源可食用微藻的活性物质提取及其在食品中应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 390–396. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060048

HU Haojie, TIAN Shuangqi, ZHAO Renyong, et al. Research Progress on the Extraction of Active Substances from New Resource Edible Microalgae and Its Application in Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 390–396. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060048

· 专题综述 ·

# 新资源可食用微藻的活性物质提取及其在食品中应用研究进展

胡浩杰<sup>1</sup>, 田双起<sup>1,\*</sup>, 赵仁勇<sup>1</sup>, 张攀<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001;

2. 信阳碧园生物科技有限公司, 河南信阳 464300)

**摘要:** 与其它微藻相比, 作为新资源可食用的藻类具有丰富的蛋白质、藻多糖、脂质、虾青素和类胡萝卜素等活性物质, 因此了解新资源食品藻类活性物质和在食品保健中的应用有着重要的意义。本文主要从可作为新资源食品的雨生红球藻、盐藻、裸藻、蛋白核小球藻四种微藻阐述微藻生理活性物质成分、提取方法及其在医药保健和食品中的应用和发展现状以及对未来的期望, 旨在为学者研究作为新资源食品的藻类提供参考。

**关键词:** 可食用微藻, 新资源, 活性物质, 提取方法

中图分类号: TS213.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)02-0390-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060048



本文网刊:

## Research Progress on the Extraction of Active Substances from New Resource Edible Microalgae and Its Application in Food

HU Haojie<sup>1</sup>, TIAN Shuangqi<sup>1,\*</sup>, ZHAO Renyong<sup>1</sup>, ZHANG Pan<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Xinyang Biyuan Biotechnology Co., Ltd., Xinyang 464300, China)

**Abstract:** Compared with other microalgae, the edible algae as a new resource is rich in protein, algal polysaccharides, lipids, astaxanthin and carotenoids and other active substances. Therefore, it is of great significance to understand the new resource food algae active substance and its application in food health. This article mainly focuses on four types of microalgae: *Haematococcus pluvialis*, *Dunaliella salina*, *Euglena*, and *Chlorella vulgaris*, which can be used as new resource foods, to explain the components, extraction methods and applications of microalgae physiologically active substances and their applications and the development status in medicine, health care and food, as well as the expectations for the future, aim to provide a reference for scholars to study algae as a new resource food.

**Key words:** edible microalgae; new resource; active substance; method of extraction

微藻是一种个体体型微小, 生长繁殖速度快的单细胞藻类<sup>[1]</sup>。目前世界上已经发现微藻的种类有十多万种, 其中大多数微藻生活在海洋湖泊中, 约占海洋中生物物种的 40%<sup>[2]</sup>。微藻的生长范围极其广泛, 在热带、温带和南北两极的寒带都有其生长的痕迹<sup>[3]</sup>。微藻可以根据其自身生长所需能量的来源进

行分类, 有自养型、异养型和混合营养型微藻<sup>[4]</sup>。大多数微藻都是自养型的, 在有充足的二氧化碳和无机养分的条件下, 自养型微藻会通过光合作用来产生一些复杂的有机化合物, 如一些蛋白质、脂肪以及一些其它的碳水化合物。还有一些藻类是异养型的, 不能固定碳只能从外界摄取碳水化合物供自己生长所

收稿日期: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(31701636); 河南省现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(S2010-02-G06)。

作者简介: 胡浩杰(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 粮食资源转化与利用, E-mail: 18838928924@163.com。

\* 通信作者: 田双起(1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食资源转化与利用, E-mail: tianshuangqi@haut.edu.cn。

需<sup>[5]</sup>。具有自养和异养的双重性质的微藻是混合营养型微藻,这些藻类可以很具自身所处环境来适应异养型条件。

微藻含有大量的营养物质,在细胞的生命周期中发挥重要作用;它们包括简单的天然染料和一些表现高水平的生物活性营养物质。这些营养物质被自然包裹在细胞内,包括多糖、色素、蛋白质和多不饱和脂肪酸等<sup>[6]</sup>。Ljubic 等<sup>[7]</sup>研究表明,微藻在人工紫外线(UVB)的照射下进行培养,可以产生一种新型的天然维生素 D。本文主要从可作为新资源食品的雨生红球藻、盐藻、裸藻、蛋白核小球藻四种微藻阐述微藻生理活性物质成分、提取方法及其在医药保健和食品中的应用和发展现状,以及对未来的期望,旨在为学者研究作为新资源食品的藻类提供参考。

## 1 微藻的生物活性成分及功能

蛋白核小球藻、雨生红球藻、盐藻以及裸藻作为我国公告<sup>[8]</sup>新批准的四种新资源食品藻类,含有丰富的蛋白质、维生素 A、虾青素、多糖、脂质、胡萝卜素、生物素、维生素 C、叶酸、核黄素等营养物质,很大程度上增加了微藻单细胞的营养价值<sup>[9]</sup>。

微藻不仅具有独特生物活性物质和广泛的生理学特性,还具有一定的药理作用和功能特性。盐藻含有大量的胡萝卜素具有很好的营养价值,已有研究证明,此类胡萝卜素可以有效防癌、抗衰老和增强机体免疫能力<sup>[10]</sup>。雨生红球藻富含世界公认最强抗氧化剂之一的虾青素,其具有很好的抗炎症和抗细菌感染等作用<sup>[11]</sup>。蛋白核小球藻含有丰富且优质的蛋白质等营养成分,是很好的优质蛋白质来源。微藻中含有的脂质也使其成为一种具有很大潜力的生物柴油原材料<sup>[12]</sup>。

微藻中含有大量的蛋白质、脂质和复合糖可作为各种生物产品的原料<sup>[13]</sup>。微藻中长链不饱和脂肪酸、藻蛋白和色素具有显著的补充人体营养物质的保健功能<sup>[14-15]</sup>。因此,可以看出微藻在食品、能源、化工等不同领域越来越受重视,这也使得从微藻中提取生物活性物质成为现今研究热点。

## 2 新资源可食用微藻活性物质的提取方法

### 2.1 雨生红球藻

雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*)作为一种

单细胞淡水绿藻,其种属属于绿藻门、团藻目、红球藻属<sup>[16]</sup>。雨生红球藻的生长阶段一般可以分为两个阶段,第一阶段为营养生长阶段,第二阶段为生产虾青素阶段<sup>[17]</sup>。这种淡水生物有一个非典型的生命周期,它能在压力条件下从一个富含叶绿素和蛋白质的营养细胞状态变为包被状态,在这种状态下,雨生红球藻被一层厚厚的细胞壁包裹着,可以产生大量的次生代谢产物,包括类胡萝卜素和虾青素,尤其是虾青素在近年来引起了相当大的关注<sup>[18]</sup>。

目前已知并应用的提取方法有传统的萃取方法,如溶剂萃取法(有机溶剂萃取和无机溶剂萃取)、碱提酸沉法、酶解法等,近些年新型的提取方法有超临界萃取法、浊点萃取法、离子液体萃取法、超声辅助萃取、微波辅助萃取,还有几种方法相结合的,如低压超临界萃取法、超声辅助酶法提取等<sup>[19-23]</sup>。由表 1 可以看出, Mendespinto 等<sup>[18]</sup>对雨生红球藻的蛋白质的提取用的是碱浸提酸沉淀的方法,是将研磨破碎后的细胞用离心机离心后,在碱性的上清液中逐渐加入盐酸使蛋白质沉淀,得到的提取率为 73%。而同样是从雨生红球藻中提取蛋白质, Zhu 等<sup>[24]</sup>则是先将藻粉中的色素去除,然后再进行碱法浸提酸沉淀,这样得出的提取率可达到 81.36%。这样不仅可以得到更纯的蛋白质还可以提高其提取率。

雨生红球藻是最丰富的天然虾青素的来源之一,因此目前所应用的提取活性物质最多的是针对虾青素的提取。如表 1 所示,吴娇等<sup>[17]</sup>采用传统的提取方法对雨生红球藻的虾青素进行提取,先用研磨法对细胞壁进行破碎,然后用乙酸乙酯提取,固液比 1:50 g/mL,提取时间为 30 min,反复提取三到四次,最后得到的提取率为 91.41%。冯以明等<sup>[25]</sup>选用传统的溶剂提取法提取雨生红球藻的多糖,主要是采用乙醇和乙酸乙酯对藻类先进行脱脂处理,然后对多糖提取分离,这样可以显著提高多糖提取时的纯度。Molino 等<sup>[26]</sup>用安全溶剂丙酮和乙醇做萃取剂方法,研究表明经过机械预处理的藻粉在提取时的压力对最后的得率几乎没有影响,而随着温度的升高,虾青素的提取率会逐渐增加,当温度增加到最大值时,多次提取并且每次提取时间为 20 min,最后的总虾青素提取率可达到 99%。近几年有学者不断尝试和发

表 1 雨生红球藻活性物质的提取方法

Table 1 Extraction methods of active substances from *Haematococcus pluvialis*

提取物质	提取方法	溶剂	条件	提取率(%)	文献来源
蛋白质	碱提酸沉淀法	盐酸	盐酸逐步加入细胞破碎离心后的上清液中沉淀	73	Mendespinto等 <sup>[18]</sup>
	溶剂浸提法	乙酸乙酯	研磨法破碎细胞壁再用乙酸乙酯浸提	91.41	李春斌等 <sup>[17]</sup>
	超高压法	乙酸乙酯、乙醇的混合溶剂	用300 MPa压力处理在用混合溶剂提取两次	98	郭文晶等 <sup>[23]</sup>
虾青素	液体双相浮选法	食品级酒精和盐溶液混合物	二丙醇和硫酸铵1:1混合, 10 mg的藻粉浮选15 min	99.84	Khoo等 <sup>[27]</sup>
	低压超临界萃取法	共溶剂、乙醇	在55 °C、8 MPa下处理15 h	92	Cheng等 <sup>[28]</sup>
	复合酶法	乙酸-乙酸钠缓冲溶液	纤维素酶和果胶酶1:1、pH4.9温度49 °C酶解时间6 h	70.21	张晔等 <sup>[19]</sup>
多糖	溶剂浸提法	水和3%碳酸钠	先经乙醇和乙酸乙酯混合液脱脂,在经冷水、热水和3%碳酸钠溶液浸提萃取	69.8	冯以明等 <sup>[25]</sup>

现用更好更简单更环保的方法来提取生物中的活性物质。Khoo 等<sup>[27]</sup>就首次尝试用液体双向浮选法来提取雨生红球藻中的虾青素,液体双相浮选法是一种结合溶剂浮选和液体双相浮选工作原理的气泡辅助分离系统,液体双相浮选法由两个水相组成,目标化合物通过目标化合物在气泡上的选择吸附性从一个相萃取到另一个相的过程。由表 1 可知,提取雨生红球藻虾青素的方法还有张晔等<sup>[19]</sup>的复合酶法、郭文晶等<sup>[23]</sup>的超高压法和 Cheng 等<sup>[28]</sup>的低压超临界萃取法。从表 1 也可以看出新型的提取方法在提取率上明显比传统的提取方法要高,并且在提取速度上也有一定改善,在未来微藻市场的应用上会有很大的前景。

## 2.2 盐藻

盐藻(*Dunaliella salina*)又被称作杜氏盐藻,在种属分类上属绿藻门、团藻目、盐藻属,是一种体积小、生长速度快、有糖蛋白形成的包被的单细胞海洋经济藻类。盐藻对于极端环境有极好的耐受性,在高盐、高光、高温、低温下都能生存、生长<sup>[29]</sup>。盐藻是迄今为止发现的 $\beta$ -胡萝卜素含量最高的生物之一,因此盐藻中 $\beta$ -胡萝卜素的积累及提取技术的研究已成为近些年的研究开发盐藻的热点,并且随着市场的需求已经形成产业化。但是由于目前提取技术的限制,在提取胡萝卜素之后的盐藻藻渣中,依然含有一些如蛋白质、维生素、多糖等有用的成。

盐藻中 $\beta$ -胡萝卜素的含量丰富,其营养价值越来越受到人们的关注。孙协军等<sup>[30]</sup>就研究了盐藻中 $\beta$ -胡萝卜素的提取及其自由基的清除能力,用丙酮作为萃取剂,料液比为 1:250,在 40 °C 的条件下微波辅助提取 8 min,得到的 $\beta$ -胡萝卜素的得率为 1.13%。如表 2 所示, Marchal 等<sup>[31]</sup>也研究了用离心分布萃取的方法来提取盐藻中的 $\beta$ -胡萝卜素,以 5% 的二氯甲烷和油脂乙酸的混合液作为萃取剂,最后的得率占总 $\beta$ -胡萝卜素的 65%。Monte 等<sup>[32]</sup>运用膜过滤法对富含 $\beta$ -胡萝卜素的盐藻进行浓缩培养,然后使用低剪切离心将其最终浓缩,这样的提取方法不仅很大程度上降低了提取的成本,还减少了能耗使整个生产过程更加环保。除此之外,人们还对盐藻多糖、蛋白质以及叶绿体蛋白的提取都有一定的研究,戴军等<sup>[33]</sup>用热碱法提取杜氏盐藻多糖,先脱去盐藻的脂质和色素,当提取温度为 81 °C,提取液

pH 为 8.8,提取时间为 210 min,料液比为 1:16 时,最后的藻多糖得率为 8.88%。郭金耀等<sup>[34]</sup>用超声辅助的提取方法来提取蛋白质,先离心得到藻液的沉淀,蒸馏水复溶后,在超低温反复冻融几次,然后超声辅助提取 15 min,最后提取的物质和盐藻细胞的比率为 40%。

## 2.3 裸藻

裸藻(*Euglena gracilis*)在分类学中隶属于裸藻科、裸藻属,大多数生长在富含有机质的小型静水体中,它对不同的温度适应性较强,夏季冬季都能繁殖,夏季大量繁殖时往往会使水域呈现出绿色形成膜状的水华。裸藻是一种单细胞光合作用绿藻,存在于淡水和海水中,具有动植物的特征,裸藻可以通过鞭毛运动,含有丰富的营养物质,包括氨基酸、碳水化合物、维生素和矿物质等。因此它也被认为是一种功能性的营养补充剂。此外有大量研究表明裸藻的提取物具有抗菌、抗诱变、抗病毒以及抗肿瘤的药用特性。在 2013 年,国家卫计委发布新资源食品原料公告,按照有关规定,将裸藻批准为新资源食品,它比小球藻更适合做工业生产原料。

早在 1975 年我国就已经有人对裸藻的活性物质的提取进行研究,运用一般脂肪提取的方法来提取含有 $\alpha$ -生育酚的脂类,并建议将血色裸藻用作饲养鱼和家畜的饲料<sup>[35]</sup>。常见的多糖提取方法有很多,比如水提醇沉法、酸提法、碱提法超声辅助、微波辅助、酶辅助提取等<sup>[36-37]</sup>,但是运用在裸藻提取活性物质的研究却很少。由表 2 可知,栗晓庆等<sup>[38]</sup>研究碱法提取裸藻多糖时,先离心后加入无水乙醇出去裸藻内的脂质,然后在 50 °C 的条件下,在 0.6 mol/L 的氢氧化钠溶液种提取 3 h,处理后粗产品的得率是 42.35%。和植物类多糖提取的方法不同,微藻进行提取时往往会先进行研磨或者采用其它的手段将藻类的细胞壁给破碎,这样有利于活性物质的浸出和提高提取率。

## 2.4 蛋白核小球藻

世界上现已发现小球藻种类约有 10 个左右,小球藻作为一类普生性单细胞绿藻,其中在我国最常见的就是蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)和椭圆小球藻(*Chlorella ellipsoidea*),这些小球藻中蛋白核小球藻具有丰富的

表 2 盐藻和裸藻的活性物质的提取方法

Table 2 Extraction methods of active substances from *Dunaliella salina* and *Euglena*

藻类	提取物	提取方法	溶液	条件	提取率(%)	文献来源
裸藻	多糖	热碱法	0.6 mol/L 的氢氧化钠	在 50 °C 下提取 3 h	42.35	栗晓庆等 <sup>[38]</sup>
	$\beta$ -胡萝卜素	离心分布萃取法	二氯甲烷和油脂乙酸酯	分两种模式萃取,下流模式和顺流模式	65	Marchal 等 <sup>[31]</sup>
	多糖	热碱法	氢氧化钠溶液	在 81 °C 下,提取 210 min	8.88	戴军等 <sup>[33]</sup>
盐藻	蛋白质	超声辅助提取法	蒸馏水	冷冻冻融后,超声处理破碎后	40	郭金耀等 <sup>[34]</sup>
	叶绿体蛋白	冻融法	蔗糖溶液	先离心提取完整的叶绿体沉淀,再经过反复冻融提取叶绿体中的蛋白	21.8	贾岩龙等 <sup>[39]</sup>



蛋白质,并且具有的营养价值最高<sup>[40]</sup>。蛋白核小球藻在 2012 年作为第 19 号文件被公告批准为新资源食品,让人们对于藻类新资源食品有了更深一步的认识,也使人们越来越意识到藻类资源的重要性。作为新资源食品的蛋白核小球藻是一种高蛋白、低糖、低脂、维生素和微量元素全面的绿色营养源<sup>[41]</sup>,其提取物中的藻多糖和藻蛋白等活性物质已被学者证明具有很好的抗肿瘤、抗病毒感染、抗氧化、抗病原菌及增强机体免疫力的功能<sup>[42-43]</sup>。这也使蛋白核小球藻逐渐成为近几年的研究热点。

蛋白核小球藻作为优质蛋白质原料来源,学者对提取蛋白核小球藻的活性物质也有研究,并将提取的活性物质应用在食品中。目前国内的研究者在对蛋白核小球藻的活性物质提取的时候,最难实现工业化生产的是蛋白核小球藻的细胞壁的破碎处理<sup>[44]</sup>。岳敏等<sup>[45]</sup>研究表明,使用超声波的物理手段可以对破壁方法进行优化,使其能够大规模的生产和提高蛋白核小球藻的利用率。由表 3 可知,陈艺焯等<sup>[46]</sup>研究表明,在使用酶法辅助提取蛋白核小球藻的多糖物质时,当提取时的料液比为 1:30,提取时的时间为 93 min,提取酶浓度为 2% 的时,得到多糖的提取率为 6.13%。同时 Chen 等<sup>[43]</sup>也采用了超声辅助的方法对蛋白核小球藻多糖进行提取,通过对蛋白核小球藻多糖的抗氧化分析,得出其多糖具有潜在延长果蝇寿命的功能。桂林等<sup>[47]</sup>也用了超声辅助提取的方法研究了叶黄素在蛋白核小球藻的提取,用 1:40 的料液比在超声波辅助下破碎两次,每次破碎时间为 5 min。然后离心之后,在甲醇和二氯乙烷的混合溶液中提取,得到的叶黄素提取率占总叶黄素的 87.1%。由表 3 可以看出当用传统的有机溶剂萃取法时,蛋白核小球藻的蛋白质的提取率只有 55.24%,远低于蛋白核小球藻的总的蛋白含量,而运用超声、微波等一些物理手段进行辅助提取时,会明显提升其提取率。在张薇等<sup>[48]</sup>提出的蛋白核小球藻的发酵产油脂的方法中,其不仅研究了培养基组成,还对培养

条件对细胞的油脂积累的影响做了细致的分析。

### 3 微藻在食品中的应用

从人类的历史进程中可以发现,人类对食用微藻并不陌生,早在九世纪,非洲就有人食用节旋藻<sup>[51]</sup>。而现今微藻通常被作为营养添加剂进行销售,并称其为“超级食品”可以用作于制作“时尚”食品的配料。目前已经有非常多相关的报道表明了螺旋藻和小球藻等一些其它藻类作为原料用来生产面包、饼干、饮料、保健品、零食、奶昔、蔬菜汤、意大利面和酸奶。微藻添加到食品中可以影响食物的质地和口感。Lafarga 等<sup>[52]</sup>研究发现,适量的添加可食用微藻到面包中可以影响面包的颜色和质地,也会使面包具有特殊的风味。随着人们对微藻的营养保健和药理作用的深入认识,我国对微藻的开发和利用也越来越受重视,特别是在最近几年我国先后公告一些药食同源的新资源食品,其中有新公告的四种藻类新资源食品如表 4 所示。这些国家新批准的新资源食品藻类也将变的越来越受人们所重视。

#### 3.1 微藻在保健品中的应用

新资源食品藻类因其含有丰富的蛋白质、脂质、多糖、虾青素、维生素和胡萝卜素等活性物质,具有一定药理作用的潜力,使其在保健品中的应用十分广泛。目前市场上微藻的藻片和胶囊使世界上主要的微藻类保健产品,其生产设备简单,成本低,加工条件温和且不会破坏微藻内的活性物质,而广受加工厂的喜爱<sup>[53]</sup>。盐藻中含有丰富的 $\beta$ -胡萝卜素已经被广泛用于生产天然的着色剂和保健产品。雨生红球藻中含有丰富天然虾青素,约占其含量的 15% 左右。虾青素作为一种抗氧化剂的天然原料,具有抗衰老和提高机体免疫能力的药理作用。因此做成的藻片和藻胶囊都很受欢迎。除此之外,微藻还可以作为一种营养口服液来使用,研究已经证明小球藻细胞内含有一种生物活性成分,称为绿藻精,属于植物性生长因子,这种物质发现并成功提取,会使这种含有微藻生长因子的口服液在微藻藻片的市场中占据一定的份额。

表 3 蛋白核小球藻活性物质的提取方法

Table 3 Extraction methods of active substances from *Chlorella pyrenoidosa*

提取物质	提取方法	溶剂	条件	提取率(%)	文献来源
多糖	酶解法	蒸馏水	固液比1:30先用2%的酶处理然后在90℃下提取提取2 h,醇沉离心	6.13	陈艺焯等 <sup>[46]</sup>
叶黄素	超声辅助提取法	甲醇和乙腈	液固比40:1,在45℃的环境中56 W的功率超声16.5 min	0.15	黄星歆等 <sup>[49]</sup>
蛋白质	热碱法	20%的氢氧化钠溶液	固液比1:50,在55℃下提取1 h	55.24	胡守珍等 <sup>[50]</sup>

表 4 微藻类新资源食品

Table 4 Microalgae new resource food

序号	藻类名称	颜色	种属	成分含量(%)	食用量
1	雨生红球藻	红色或深红色粉末	绿藻门、团藻目、红球藻属	蛋白质 $\geq$ 15,总虾青素 $\geq$ 1.5,水分 $\leq$ 10,灰分 $\leq$ 15	$\leq$ 0.8 g/d
2	盐藻	标褐色粉末	绿藻门、团藻目、盐藻属	胡萝卜素含量 $\geq$ 8%	$\leq$ 15 mg/d(以 $\beta$ -胡萝卜素计)
3	裸藻	绿色	裸藻门、裸藻目、裸藻属	蛋白:20~55,水分 $\leq$ 7,灰分:4~8	$\leq$ 2 g/d
4	蛋白核小球藻	深绿或墨绿色粉末	绿藻目、小球藻属	蛋白质 $\geq$ 58,水分 $\leq$ 5,灰分 $\leq$ 5	$\leq$ 20 g/d

### 3.2 微藻在面制品中的应用

微藻除了可以制作保健食品外,还可以在普通食品中添加应用。将微藻及其提取物添加到普通食品中,不仅保留有微藻丰富的营养和生理保健功能,又具有普通食品的色香味。李家泳等<sup>[54]</sup>研究表明,制作饼干时,在配方中添加 1.04% 的蛋白核小球藻,饼干具有最高的感官评价,当添加的藻量过少时,制成的饼干颜色过浅、口感欠佳;而添加量过多时,制成的饼干颜色过深,且有很浓的海藻腥味。罗柳茵等<sup>[55]</sup>研究显示蛋白核小球藻作为添加剂用来制作面包,当在制作过程中添加 0.87% 的蛋白核小球藻时,添加有小球藻的面团发酵效率更高,制作而成的面包具有更好的弹性,并且在色泽、口感和形态方面都会比没有添加小球藻制作而成面包要好。小球藻的添加不仅可以有效的延缓面包的老化,而且还延长了面包的货架期<sup>[56]</sup>。日本早在上世纪七十年代就已经开始研究微藻类的食品,现已经研制出可安全食用的绿藻面条,并且已经开始批量生产。绿藻面条中微藻添加量在 0.1%~1% 左右,在面条中加入微藻不仅使其具有独特的口感风味和颜色,还会使面条的弹性和韧性得到改善。随着人们对微藻的日益关注,相信会有更多的人研究并开发出更多的微藻类面制品。

### 3.3 微藻在其它食品领域的应用

随着人们对微藻不断的开发利用,微藻目前在饮料行业也会有所应用,庞庭才等<sup>[57]</sup>研究显示,以小球藻粉为原材料,采用超声辅助提取藻多糖,再利用木瓜蛋白酶与中性蛋白酶进行水解藻蛋白,合并滤液后,按照相应的配方添加适量的柠檬酸、蜂蜜以及适量的白糖可以调制成为一种小球藻饮品。随着微藻在日本的发展和研究,其在本土也曾推出了一种用小球藻酿制的酒,使用小球藻的滤液会使酒在酿造的过程中,对酿酒原料的利用率有很大程度的提高。日本也曾以小球藻的热水浸提物为主要的原材料,再辅一些适量的蜂蜜和适量的梅汁配置成一种功能性的饮品。除此之外,微藻还可以作为制作糕点、茶、糖果等产品的辅料使用。

## 4 结语与展望

目前虽然有很多对微藻活性物质提取方法的研究,但大多都停留在传统萃取方法的基础上,选择合适的试剂进行提取。随着时代的不断发展,微藻工业化的发展注定向着更自动化更环保更低能耗的方向发展,这也说明在微藻提取方面还有着很大的进步空间,使人们去发现和寻找更加环保和更低能耗的方法来提取微藻的活性物质。研究已表明新资源食品藻类在保健产品和面包、面条等主食类产品中均有较好的应用,并且新资源食品藻类所具有的丰富活性物质使其在功能性食品中必然有着更广阔的应用前景。

### 参考文献

[1] SPOLAORE P, JOANNIS C, DURAN E, et al. Commercial applications of microalgae[J]. *Journal of Bioscience and Bioeng-*

*ineering*, 2006, 101(2): 87-96.

[2] 王雪青,苗惠,翟燕.微藻细胞破碎方法的研究[J].*天津科技大学学报*,2007,22(1):21-25. [WANG X Q, MIAO H, ZHAI Y. Study on the methods of alga cells fragmentation[J]. *Journal of Tianjing University of Science & Technology*, 2007, 22(1): 21-25.]

[3] 邹树平,吴玉龙,杨明德,等.微藻的综合开发利用[J].*水产科学*,2007,26(3):179-181. [ZOU S P, WU Y L, YANG M D, et al. Comprehensive exploitation and utilization of microalgae[J]. *Fisheries Science*, 2007, 26(3): 179-181.]

[4] PHONG W N, SHOW P L, LING T C, et al. Mild cell disruption methods for bio-functional proteins recovery from microalgae—Recent developments and future perspectives[J]. *Algal Research*, 2018, 31: 506-516.

[5] CHAVOSHI Z Z, SHARIATI M. Lipid production in *Dunaliella salina* under autotrophic, heterotrophic, and mixotrophic conditions[J]. *Biologia*, 2019, 74(12): 1579-1590.

[6] NUNES M C, GRA A C, VLAISAVLJEVIC S, et al. Microalgal cell disruption: Effect on the bioactivity and rheology of wheat bread[C]. *Algal Research*, 2020, 45: 101749.

[7] LJUBIC A, JACOBSEN C, HOLDT S L, et al. Microalgae *Nannochloropsis oceanica* as a future new natural source of vitamin D3[J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126627.

[8] 卫生部关于新资源食品的公告汇总[J].*食品与发酵工业*, 2011, 37(8): 60. [Summary of announcements from the Ministry of Health on new resource foods[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2011, 37(8): 60.]

[9] MUBARAK M, SHAIJA A, SUCHITHAR T V. Flocculation: An effective way to harvest microalgae for biodiesel production[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(4): 103221.

[10] NEHME R, ATIEH C, FAYAD S, et al. Microalgae amino acid extraction and analysis at nanomolar level using electroporation and capillary electrophoresis with laser-induced fluorescence detection[J]. *Journal of Separation Science*, 2017, 40(2): 558-566.

[11] KHOO K S, LEE S Y, OOI C W, et al. Recent advances in biorefinery of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121606.

[12] MORE P R, AAYA S S. A novel, green cloud point extraction and separation of phenols and flavonoids from pomegranate peel: An optimization study using RCCD[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(5): 103306.

[13] BHATTACHARYA M, GOSWAMI S. Microalgae—A green multi-product biorefinery for future industrial prospects[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 25: 101580.

[14] 刘新宁,张建明.可利用微藻的种类及其应用前景[J].*资源开发*, 2005, 21(1): 65-66,80. [LIU X N, ZHANG J M. Varieties and application foreground of available microalgae[J]. *Resource Development & Market*, 2005, 21(1): 65-66,80.]

[15] YEN H W, HU I C, CHEN C Y, et al. Microalgae-based biorefinery from biofuels to natural products[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 135: 166-174.

[16] 张卫明,张广伦,肖正春,等.雨生红球藻中虾青素的研究

- 与应[J]. *中国野生植物资源*, 2019, 38(2): 72-77. [ZHANG G L, XIAO Z C, ZHANG F L, et al. Study and application of astaxanthin in *Haematococcus pluvialis*[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2019, 38(2): 72-77.]
- [17] 李春斌, 吴娇, 李杨, 等. 雨生红球藻的培养及虾青素的提取与检测[J]. *大连民族大学学报*, 2019, 21(5): 406-411. [WU J, DIAO Q Y, BAI X, et al. Cultivation of *Haematococcus pluvialis* and extraction and detection of astaxanthin[J]. *Journal of Dalian Nationalities University*, 2019, 21(5): 406-411.]
- [18] MENDESPINTO M M, RAPOSO M F D J, BOWEN J, et al. Evaluation of different cell disruption processes on encysted cells of *Haematococcus pluvialis*: Effects on astaxanthin recovery and implications for bio-availability[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2001, 13(1): 19-24.
- [19] 张晔, 刘志伟, 谭兴和, 等. 响应面法优化复合酶提取雨生红球藻中虾青素的工艺[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(20): 87-92. [ZHANG Y, LIU Z W, TAN X H, et al. Optimization of multi-enzymatic extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* by response surface methodology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(20): 87-92.]
- [20] 钟玲, 余少冲, 李迎霞, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取雨生红球藻中虾青素工艺研究及其脂肪酸 GC-MS 分析[J]. *中药材*, 2010, 33(1): 140-142. [ZHONG L, YU S C, LEE Y X, et al. Study on supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* and its fatty acid GC-MS analysis[J]. *Chinese Medicinal Materials*, 2010, 33(1): 140-142.]
- [21] 白曼利, 王海琪, 伍菱, 等. 高速逆流色谱分离雨生红球藻中虾青素的工艺优化[J]. *激光生物学报*, 2018, 27(5): 460-466. [BAI M L, WANG H Q, WU L. Optimization and separation of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* by high-speed counter-current chromatography[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2018, 27(5): 460-466.]
- [22] 张言, 高定烽, 莫镜池, 等. 超声-低温双水相提取雨生红球藻中的虾青素[J]. *食品工业技术*, 2019, 40(4): 28-31. [ZHANG Y, GAO D F, MO J C. Ultrasonic-hypothermic aqueous phase extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(4): 28-31.]
- [23] 郭文晶, 张守勤, 张格. 超高压提取雨生红球藻中虾青素的工艺优化[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(5): 201-203. [GUO W J, ZHANG S Q, ZHANG G. Process optimization of ultra-high pressure extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(5): 201-203.]
- [24] ZHU Y, ZHAO X, ZHANG X, et al. Extraction, structural and functional properties of *Haematococcus pluvialis* protein after pigment removal[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 140: 1073-1083.
- [25] 冯以明, 李广生, 吴建东, 等. 雨生红球藻多糖的提取分离及理化性质研究[J]. *海洋科学*, 2012, 36(1): 17-22. [FENG Y M, LEE G S, WU J D, et al. Extraction and isolation of polysaccharides from *Haematococcus pluvialis* and their physicochemical characters study[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(1): 17-22.]
- [26] MOLINO A, RIMAURO J, CASELLA P, et al. Extraction of astaxanthin from microalga *Haematococcus pluvialis* in red phase by using generally recognized as safe solvents and accelerated extraction[J]. *J Biotechnol*, 2018, 283: 51-61.
- [27] KHOO K S, CHEW K W, OOI C W, et al. Extraction of natural astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* using liquid biphasic flotation system[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121794.
- [28] CHENG X, QI Z, BURDYNY T, et al. Low pressure supercritical CO<sub>2</sub> extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* demonstrated on a microfluidic chip[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 481-485.
- [29] 尹卫强, 刘颖芬, 李炳乾, 等. 国内杜氏盐藻综合利用的现状与发展趋势[J]. *盐业与化工*, 2013, 42(12): 1-3. [YIN W Q, LIU Y F, LEE B Q, et al. The status and prospects of comprehensive utilization of algae *Dunaliella salina* in china[J]. *Salt and Chemical Industry*, 2013, 42(12): 1-3.]
- [30] 孙协军, 潘龙飞, 李秀霞, 等. 盐藻 β-胡萝卜素提取及自由基清除能力研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(22): 246-251. [SUN X J, PAN L F, LEE X X, et al. Extraction technique and antioxidant activity of β-carotenoid from *Dunaliella salina*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(22): 246-251.]
- [31] MARCHAL L, MOJAAT M, FOUCAULT A, et al. Centrifugal partition extraction of beta-carotene from *Dunaliella salina* for efficient and biocompatible recovery of metabolites[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 134: 396-400.
- [32] MONTE J, BERNARDO J, MARTA S, et al. Development of an integrated process of membrane filtration for harvesting carotenoid-rich *Dunaliella salina* at laboratory and pilot scales[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 233: 116021.
- [33] 戴军, 王旻, 尹鸿萍, 等. 杜氏盐藻多糖提取工艺的优化[J]. *食品与发酵工业*, 2007(3): 123-127. [DAI J, WANG W, YIN H P, et al. Optimization of extraction technique of polysaccharides from *Dunaliella salina*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2007(3): 123-127.]
- [34] 郭金耀, 杨晓玲. 盐藻蛋白质的提取分离[J]. *食品科技*, 2010, 35(8): 232-235. [GUO J Y, YANG X L. Extraction and separation of *Dunaliella salina* protein[J]. *Food Science and Technology*, 2010, 35(8): 232-235.]
- [35] SECTION O A P, LABORATORY O P, INSTITUTE O H, et al. 裸藻中 α-生育酚的提取和测定[J]. *水生生物学集刊*, 1975, 5(3): 354-359. [SECTION O A P, LABORATORY O P, INSTITUTE O H, et al. Extraction and determination of α-tocopherol in freshwater alga *Euglena sanguinea*[J]. *Acta Hyarobiologica Sinica*, 1975, 5(3): 354-359.]
- [36] ALI M C, CHEN J, ZHANG H, et al. Effective extraction of flavonoids from *Lycium barbarum* L. fruits by deep eutectic solvents-based ultrasound-assisted extraction[J]. *Talanta*, 2019, 203: 16-22.
- [37] BA F, URSU A V, LAROCHE C, et al. *Haematococcus pluvialis* soluble proteins: Extraction, characterization, concentration fractionation and emulsifying properties[J]. *Bioresource Techno-*



- logy, 2016, 200: 147-152.
- [38] 栗晓庆, 吕俊平, 刘琪, 等. 裸藻多糖碱提工艺优化及其体外抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(9): 209-215. [LI X Q, LU J P, LIU Q, et al. Optimization of alga *Euglena sanguinea* extraction and antioxidant activities of paramylon *in vitro*[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(9): 209-215.]
- [39] 贾岩龙, 柴玉荣, 曲东京, 等. 杜氏盐藻完整叶绿体的分离及其蛋白提取[J]. 生物技术通报, 2008(3): 135-138. [JIA Y L, CAI Y R, QU D J, et al. Isolation of intact chloroplasts and comparison of methods for its protein extraction from *Dunaliella salina*[J]. Biotechnology Bulletin, 2008(3): 135-138.]
- [40] 汪世华, 胡开辉. 小球藻的研究开发进展[J]. 武汉工业学院学报, 2005, 24(3): 27-30. [HU K H, WANG S H. Development and progress of *Chlorella vulgaris*[J]. Wuhan Polytechnic University, 2005, 24(3): 27-30.]
- [41] 刘学铭, 梁世中. 小球藻的保健和药理作用[J]. 中草药, 1999, 30(5): 383-386. [LIU X M, LIANG S Z. Effects of *Chlorellis* use as a health care supplement[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 1999, 30(5): 383-386.]
- [42] 孔维宝, 李龙因, 张继, 等. 小球藻的营养保健功能及其在食品工业中的应用[J]. 食品科学, 2010, 31(9): 323-328. [KONG W B, LI L N, ZHANG J, et al. Healthcare functions and applications in food industry of *Chlorella*[J]. Food Science, 2010, 31(9): 323-328.]
- [43] CHEN Y, LIU X, WU L, et al. Physicochemical characterization of polysaccharides from *Chlorella pyrenoidosa* and its anti-ageing effects in *Drosophila melanogaster*[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 185: 120-126.
- [44] WAN X Z, LI T T, ZHONG R T, et al. Anti-diabetic activity of PUFAs-rich extracts of *Chlorella pyrenoidosa* and *Spirulina platensis* in rats[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 128: 233-239.
- [45] 岳敏, 赵熙宁, 宋亚楠, 等. 蛋白核小球藻超声波破壁方法的优化[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(10): 37-42. [YUE M, ZHAO X N, SONG YN, et al. Optimization study on the ultrasonic treatment for cell wall disruption of *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2018, 38(10): 37-42.]
- [46] 陈艺焯, 刘晓艳, 吴林秀, 等. 蛋白核小球藻多糖的酶解辅助提取及抗氧化活性[J]. 福建农业学报, 2016, 31(5): 508-514. [CHEN Y X, LIU X Y, WU L X, et al. Hot-water extraction of polysaccharides from *Chlorella pyrenoidosa* with cellulase[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2016, 31(5): 508-514.]
- [47] 桂林, 李琳, 胡松青, 等. 蛋白核小球藻中叶黄素提取工艺的研究[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(5): 71-74. [GUI L, LI L, HU S Q, et al. Study on extraction process of lutein from *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Food Research and Development, 2005, 26(5): 71-74.]
- [48] 张薇, 吴虹, 宗敏华, 等. 蛋白核小球藻发酵产油脂的研究[J]. 微生物学通报, 2008, 35(6): 855-860. [ZHANNNG W, WU H, ZONG M H, et al. Study on microbial oil production with *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Microbiology, 2008, 35(6): 855-860.]
- [49] 黄星歆, 丘泰球. 小球藻中叶黄素的超声提取工艺研究[J]. 粮油加工, 2010(2): 99-102. [HUANG X Q, QIU T Q. Study on ultrasonic extraction technology of lutein from *Chlorella*[J]. Cereals and Oils Processing, 2010(2): 99-102.]
- [50] 胡守珍, 毕生雷, 黄丽丽, 等. 热碱法提取异养小球藻蛋白质工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 212-217. [HU S Z, BI S L, HUANG L L, et al. Optimization of protein extraction from *Heterotrophic chlorella* using thermo-alkaline[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(9): 212-217.]
- [51] 庄秀国, 黄英明, 张道敬, 等. 小球藻高附加值生物活性物质“小球藻热水提取物”的研究现状与展望[J]. 生物工程学报, 2015, 31(1): 25-41. [ZHUANG X Y, HUANG Y M, ZHANG D J, et al. Research status and prospect on hot water extract of *Chlorella*: the high value-added bioactive substance from *Chlorella*[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2015, 31(1): 25-41.]
- [52] LAFARGA T, MAYRE E, ECHEVERRIA G, et al. Potential of the microalgae *Nannochloropsis* and *Tetraselmis* for being used as innovative ingredients in baked goods[J]. Lwt - Food Science and Technology, 2019, 115: 108439.
- [53] 李丽婷, 王蔡. 小球藻在食品中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(17): 341-346. [LEE L T, WANG C. Applications of *Chlorella* in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(17): 341-346.]
- [54] 李家泳, 刘锐, 刘晖, 等. 蛋白核小球藻韧性饼干加工工艺研究[J]. 食品工业, 2017, 38(3): 35-39. [LEE J Y, LIU R, LIU H, et al. The process technology of semi hard biscuit with *Chlorella pyrenoidosa*[J]. The Food Industry, 2017, 38(3): 35-39.]
- [55] 罗柳茵, 刘晖, 刘锐, 等. 蛋白核小球藻面包的加工工艺研究[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 148-154. [LUO L Y, LIU H, LIU R, et al. Processing technology of the *Chlorella pyrenoidosa* bread[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(3): 148-154.]
- [56] GRAA C, FRADINHO P, SOUSA I, et al. Impact of *Chlorella vulgaris* on the rheology of wheat flour dough and bread texture[J]. Lwt - Food Science and Technology, 2018, 89: 466-474.
- [57] 鹿庭才, 胡上英, 熊拯, 等. 小球藻保健饮料的研制[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 252-256, 285. [PANG T C, HU S Y, XIONG Z, et al. Study on the health drink of *Chlorella*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(7): 252-256, 285.]