

藻蓝蛋白稳定性及稳态化的研究进展

王晓真¹, 付聪¹, 董鸿春¹, 任丹丹^{1,2,3,4*}, 何云海^{1,2,3,4}, 汪秋宽^{1,2,3,4}

(1. 大连海洋大学食品科学与工程学院, 大连 116023; 2. 辽宁省水产品加工及综合利用重点实验室, 大连 116023; 3. 国家海藻加工技术研发分中心, 大连 116023; 4. 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心大连工业大学, 大连 116023)

摘要: 藻蓝蛋白是一种存在于蓝藻、红藻和隐藻中的具有光捕获功能的天然水溶性色素蛋白, 具有抗氧化、抗炎、抗癌、保肝和增强免疫力的特性。目前, 藻蓝蛋白广泛用作食品着色剂、化妆品添加剂、临床诊断和免疫化学荧光试剂。然而, 因藻蓝蛋白易受 pH、光、温度、外源性物质等因素的影响而变性、沉淀和变色, 使其在生产应用中受到限制, 影响了其应用范围。因此, 提高藻蓝蛋白的稳定性是扩大其工业生产应用的首要任务。本文对藻蓝蛋白的结构特性、稳定性影响因素及改善藻蓝蛋白稳定性的方法进行了综述, 以期为提高藻蓝蛋白稳定性, 拓展其应用范围提供理论参考。

关键词: 藻蓝蛋白; 结构; 稳定性; 稳态化

Research progress on the stability and homeostasis of phycocyanin

WANG Xiao-Zhen¹, FU Cong¹, DONG Hong-Chun¹, REN Dan-Dan^{1,2,3,4*},
HE Yun-Hai^{1,2,3,4}, WANG Qiu-Kuan^{1,2,3,4}

(1. College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Utilization of Liaoning Province, Dalian 116023, China; 3. Nation Research and Development Branch Center for Seaweed Processing, Dalian 116023, China; 4. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116023, China)

ABSTRACT: Phycocyanin is a natural water-soluble pigment protein with light-harvesting function that exists in cyanobacteria, red algae and cryptophytes. It has the properties of anti-oxidation, anti-inflammatory, anti-cancer, liver protection and immunity enhancement. Nowadays, phycocyanin is widely used as food coloring agent, cosmetic additive, clinical diagnosis and immunochemical fluorescent reagent. However, phycocyanin is susceptible to denaturation, precipitation and discoloration due to factors such as pH, light, temperature and exogenous substances, etc., which limits its application and affects its scope of application. Therefore, improving the stability of phycocyanin is the primary task to expand its industrial production and application. This paper reviewed the structural properties of phycocyanin, influence factors of stability, and methods for improving the stability of phycocyanin, in order to provide a theoretical reference for improving the stability of phycocyanin and expanding its scope of application.

KEY WORDS: phycocyanin; structure; stability; homeostasis

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(JL201909)、财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-50)

Fund: Supported by the Scientific Research Project of Education Department of Liaoning Province (JL201909), and the Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Affairs: National Modern Agricultural Industrial Technology System Funding (CARS-50)

*通信作者: 任丹丹, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋生物资源利用。E-mail: rdd80@163.com

*Corresponding author: REN Dan-Dan, Ph.D, Professor, College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China. E-mail: rdd80@163.com

0 引言

藻蓝蛋白(phycocyanin)是一种从微藻细胞中分离纯化后获得的光合色素蛋白复合体^[1],是叶绿素的辅助色素^[2]。藻蓝蛋白已广泛应用在多个领域,可作为天然着色剂应用于食品^[3]、作为添加剂应用于化妆品行业、也可作为营养补充剂应用于保健品行业^[4]。因其对荧光试剂的高度敏感性,也可用于免疫标记实验,作为抗体和受体的标记^[5]。此外,藻蓝蛋白有抗肿瘤、抗炎、抗氧化、调节免疫^[6]等生物活性,还可以被制成消炎剂、抗氧化剂等应用于医药行业。但由于藻蓝蛋白中蛋白质的聚集状态不同,容易降解,这种特性可能与很多因素有关,比如光照、温度、pH 和蛋白质浓度等^[7-8]。藻蓝蛋白对热和光的敏感性表现为颜色的消失和沉淀的出现,而且随着光照的加强和温度的升高,藻蓝蛋白的活性也随之下降甚至失活,从而造成藻蓝蛋白在应用时受到了很大的限制^[9]。有研究表明,可通过添加稳定剂、结构修饰、固定化和微胶囊化等方法来减缓藻蓝蛋白的降解速率^[10],从而提高藻蓝蛋白的稳定性。本文对藻蓝蛋白的结构特性、稳定性影响因素及提高稳定性的方法进行了综述,以期为提高藻蓝蛋白稳定性、拓展其应用范围提供理论参考。

1 藻蓝蛋白的结构特性

藻胆体(phycobilisomes, PBS)是一种光捕获复合物,

其吸收范围为 500~660 nm^[11],每个藻胆体都由称为藻胆蛋白(phycobiliprotein, PBP)的有色蛋白质组成。这些分子排列成天线状;吸收的能量被输送到光系统 II 的反应中心,效率高于 95%。因此,蓝藻可以利用红光、黄光、绿光及较小程度上的蓝光^[12]。它包含了蓝色的藻蓝蛋白(phycocyanin, PC, λ_{\max} =610~620 nm)、红色的藻红蛋白(phycoerythrin, PE, λ_{\max} =540~570 nm)和别藻蓝蛋白(allophycocyanin, APC, λ_{\max} =650~655 nm)等有色蛋白质(图 1^[13])。根据图 1 所示,可以了解到不同的藻胆蛋白是以特定的顺序组装,从而使能量能够单向高效地传递到反应中心,顺序依次是藻红蛋白、藻蓝蛋白再到别藻蓝蛋白最终传递向反应中心光系统 I(光系统 I, PS I)和 II(光系统 II, PS II)^[14]。

藻蓝蛋白是由一个开链四吡咯发色团-藻胆素共价连接到蛋白质分子构成的,而藻胆素色基的种类和数量的差异会导致藻蓝蛋白呈现出不同的颜色^[15]。发色团结构的变化会使藻蓝蛋白褪色和抗氧化活性丧失。藻蓝蛋白位于外周棒的末端,邻近是由别藻蓝素组成的核心圆柱体。其基本结构是由 α 和 β 2 个同源亚基组成的单体构成的^[11],这些单体齐聚成 $(\alpha\beta)_3$ 三聚体与 C_3 面对面形成对称,每两个 $(\alpha\beta)_3$ 形成一个 $(\alpha\beta)_6$ 。具有三重对称的六聚体结构^[16-17],六聚体进一步组装成棒状或芯柱状,非色素连接蛋白被隔离在三聚体、六聚体、棒或核心圆柱体中心的大孔中。

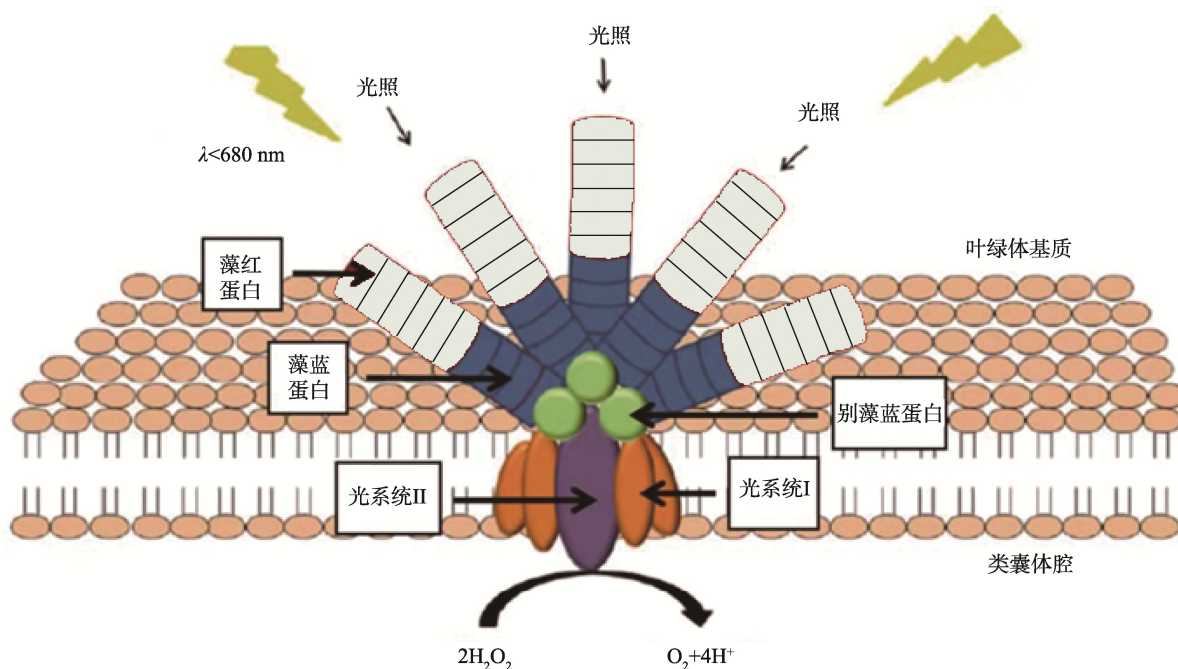


图 1 PBS 结构与生物功能模型

Fig.1 Structure and biological function model of PBS

蛋白质结构对藻蓝蛋白的稳定性关联度甚高, 促进了对发色团的保护作用。因此, 任何影响蛋白质稳定性和结构的因素都可能阻止或加速藻蓝蛋白的降解。与三聚体和单体相比, 六聚体结构更稳定, 对藻蓝蛋白具有更高的保护作用^[18]。藻胆素线性构象维持对于防止藻蓝蛋白降解也很重要^[19]; 当蛋白质发生变性时, 氢键网络的减少导致藻胆素分子从线性构象重新排列为环状构象, 导致颜色消褪^[20]。

2 藻蓝蛋白的稳定性研究

藻蓝蛋白是一种易溶于水的蛋白质-色素复合物。藻蓝蛋白的降解速率取决于蛋白质的聚集状态, 而聚集状态则受光、pH、温度等其他因素的影响。

2.1 pH 对藻蓝蛋白的稳定性影响

pH 是影响藻蓝蛋白在溶液中单体、三聚体、六聚体等低聚体中聚集和分解的主要因素。pH 发生改变, 藻蓝蛋白的带电性和解离性会跟着发生改变, 从而影响稳定性。当 pH 接近 7.0 时, 六聚体居多, 这是最稳定的结构, 避免了藻蓝蛋白的变性; 而在较高或较低 pH 下, 这种结构容易解离, 稳定性降低^[21]。pH 在偏酸或偏碱时, 会改变藻蓝蛋白发色团的构象, 改变其颜色, 影响其稳定性^[15,22]。任顺城等^[23]发现在 pH 4.0~7.0 时藻蓝蛋白的发色团构象保持稳定而显示亮蓝色, 而在 pH<4.0 或 pH>7.0 时, 蓝色转变为绿色, 且在 pH 2.5~3.0 时产生沉淀。

2.2 光照对藻蓝蛋白稳定性的影响

光照会破坏藻蓝蛋白的结构, 从而使与之连接的发色团构象不稳定而造成藻蓝蛋白的稳定性下降。藻蓝蛋白的稳定性随着光照强度的减弱而逐渐稳定, WU 等^[24]发现藻蓝蛋白在 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光强下的降解程度高于 $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下的。当藻蓝蛋白长时间暴露在光照条件下时, 往往会失去发色团, 从而失去颜色和稳定性^[25]。梁霄等^[26]选取 1500 Lx 的光照条件对藻蓝蛋白进行照射, 随着光照时间和强度的增长藻蓝蛋白的颜色逐渐变浅, 其保留率下降, 说明不仅光照强度会影响藻蓝蛋白的稳定, 光照时间同样也会对其稳定性产生影响。

2.3 温度对藻蓝蛋白稳定性的影响

温度升高会导致藻胆色素-藻蓝色素结构的延展反应, 使藻胆素的构象由线性向环状转变, 从而影响藻蓝蛋白的三维结构。藻蓝蛋白热稳定性的决定因素主要包括: 氢键数目、分数极性表面、二级结构含量和体表面积比的差异^[27]。MUNAWAROH 等^[28]发现藻蓝蛋白在 60 °C 时具有保持光谱强度的潜力, 但在 70 °C 及更高温度时开始下降, 说明该色素蛋白在加热过程中具有热不稳定性。有研究发现, 超过 40 °C 后藻蓝蛋白的结构会被破坏^[29-30]。BCKER

等^[31]确定了藻蓝蛋白三聚体、六聚体变性的中间点转变温度为 58.4 °C 和 60.9 °C; 在 40 °C 时藻蓝蛋白的吸光度和荧光光谱均无变化, 当温度大于 50 °C 时, 光谱随温度的增加而变化。藻蓝蛋白不仅对高温敏感, 同样在低温条件下, 其稳定性也不高。CHOI 等^[32]将藻蓝蛋白放置于 4 °C 下储存, 藻蓝蛋白的含量下降 10.39%, 稳定性降低。

2.4 其他因素

除上述因素会对藻蓝蛋白的稳定性产生影响外, 金属离子、添加剂等也会影响藻蓝蛋白发色团的构象。加入金属离子对藻蓝蛋白稳定性产生影响, 而加入乳化剂或发泡剂会在藻蓝蛋白周围形成气泡对其进行保护, 从而维持藻蓝蛋白的稳定性^[22]。张艳燕等^[33]发现在低浓度的 Mn^{2+} 、 Al^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 溶液中藻蓝蛋白稳定性较好, Na^{+} 、 Mg^{2+} 的浓度变化对藻蓝蛋白的稳定性影响不大, 而 Fe^{3+} 的浓度越高对藻蓝蛋白的稳定性越有利。一些有机试剂会降低藻蓝蛋白的稳定性, 赵冰冰等^[34]向藻蓝蛋白中添加不同浓度的添加剂, 发现其稳定性会随着乙醇、苯甲酸钠、柠檬酸的含量增加而下降, 其中柠檬酸对其影响较大。

3 提高藻蓝蛋白稳定性的方法

3.1 添加稳定剂

添加稳定剂是提高藻蓝蛋白稳定性最简单的方法。该方法易于应用, 不需要复杂或昂贵的设备, 但要求稳定剂安全性高、低毒无害, 且添加剂量较大。目前, 常用的稳定剂主要有糖、山梨糖醇、苯甲酸、叠氮化钠和二硫苏糖醇等。CHENTIR 等^[35]将聚乙二醇-4000、蔗糖和山梨醇添加到 0.5 mg/mL 的藻蓝蛋白溶液中, 聚乙二醇-4000 对藻蓝蛋白的热稳定效果最好, 山梨醇次之, 而且对藻蓝蛋白的保护效果随稳定剂浓度的增加而增强。FAIETA 等^[36]研究了热效应和等效热效应对藻蓝蛋白在水、不同浓度的蔗糖和海藻糖溶液中变色的影响。在恒温下, 颜色损失随着时间的增加而增加, 而随着溶质浓度的增加而减少。由此说明稳定剂的浓度与藻蓝蛋白稳定性呈正相关, 但长时间加热将会导致藻蓝蛋白稳定性降低。

在食品加工条件下, 可以通过添加蛋白质来提高藻蓝蛋白的稳定性。蛋白质可将藻蓝蛋白包裹起来, 从而提高藻蓝蛋白的稳定性^[37]。ZHANG 等^[38]将乳清蛋白和藻蓝蛋白在 pH 3.0、80 °C 条件下处理 1~20 min, 得到 10% 的乳清蛋白溶液可防止藻蓝蛋白聚集, 而且天然乳清蛋白比变性水解乳清蛋白更有效。

3.2 化学修饰

化学修饰是一种利用分子内或分子间双功能试剂将蛋白质表面的两个化学基团共价结合的技术, 以加强藻蓝蛋白的折叠结构, 提高其稳定性。甲醛、甲基乙二醛、丙

酸酯可与藻蓝蛋白交联, 稳定藻蓝蛋白的三四级结构, 从而提高藻蓝蛋白稳定性^[39-41]。还可通过蛋白质与多糖共价连接, 以保持扩展的四吡基结构, 从而保持色素的颜色。SELIG 等^[42]评价了甜菜果胶、瓜尔胶和可溶性大豆多糖对藻蓝蛋白的稳定作用, 结果表明甜菜果胶可稳定藻蓝蛋白, 维持其颜色, 并减少酶(如碱性蛋白酶、木瓜蛋白酶和菠萝蛋白酶)对蛋白的降解能力。

3.3 包埋技术

3.3.1 微胶囊包埋

微胶囊技术是将固体、液体、气体作为芯材, 然后用天然或合成的高分子材料作为壁材, 包裹形成半透性或密封的微小粒子的技术^[43]。用于包封的壁材须具有生物相容性、生物降解性、低毒性和低成本等特点。微胶囊技术可有效提高芯材的稳定性、溶解度和生物利用率。藻蓝蛋白微胶囊的制备方法有很多, 比如利用冷冻干燥法、喷雾干燥法、挤出封装法制备的藻蓝蛋白微胶囊耐热性好, 抗氧化活性高^[44-45]。不同的包衣材料对藻蓝蛋白稳定性也有影响, 其中以麦芽糊精和卡拉胶为包封材料的微胶囊的稳定性最好^[46]。吕晓玲等^[47]用空气悬浮包衣法制备藻蓝蛋白微胶囊, 测得在最佳条件下(进风温度 80 °C、芯壁材比 1:1.5、雾化压力 0.15 MPa、壁材中明胶含量 20%), 藻蓝蛋白的稳定性提高了 26.21%, 贮藏稳定性提高了 75.1%。SCHMATZD 等^[48]通过电喷涂技术用聚乙烯醇将藻蓝蛋白包封, 藻蓝蛋白-聚乙烯醇超细颗粒具有高度的耐热力, 其耐热温度可高达 216 °C, 并保持藻蓝蛋白的抗氧化活性。

3.3.2 脂质体包埋

脂质体是根据磷脂分子可在水相中形成稳定的脂双层膜的趋势而形成的微型泡囊, 不仅能有效提高内层包埋物质的稳定性、溶液分散性, 还能在递送运输体系发挥作用, 提高活性物质的功能作用, 其作为药物载体在疾病靶向给药治疗方面极有潜力。

可利用不同的材料对藻蓝蛋白进行包埋, 以提高其稳定性。CHUNG 等^[49]用壳聚糖制备藻蓝蛋白脂质体, 利用壳聚糖的亲水性使脂质体在溶液中分散均匀, 提高藻蓝蛋白的热稳定性。NOGUEIRA 等^[50]将大豆凝集素的氯仿溶液与三甲基甘氨酸、氯化镁、藻蓝蛋白进行水合, 形成藻蓝蛋白脂质体, 提高了蛋白质的稳定性和特异性, 及抗氧化性、抗炎与神经保护活性。SEYED 等^[51]在 70 °C 下, 利用二甘醇酯制备藻蓝蛋白脂质体, 发现制成的脂质体在沉积和悬浮颗粒方面具有很高的稳定性。

3.4 其他方法

提高藻蓝蛋白的稳定性还可通过高压等方法实现。高压使藻蓝蛋白形成一个更为紧凑的蛋白质结构, 并随二级结构的变化而聚集。ZHANG 等^[52]研究了高压处理对藻蓝蛋白、藻蓝蛋白乳清蛋白和藻蓝蛋白-卡拉胶混合物结构和

颜色稳定性的影响。高压处理藻蓝蛋白-乳清蛋白和藻蓝蛋白-卡拉胶在 pH 5.0 下形成有益的聚集体, 可以减少相应的藻蓝蛋白损失。这为提高藻蓝蛋白在光照条件下的贮藏稳定性提供了一条新的途径。

4 应用

藻蓝蛋白作为天然水溶性色素广泛应用于食品、化妆品和医药等行业。藻蓝蛋白不仅可以改善食品色泽, 还能增加食品的功能成分, 还具有刺激红细胞集落生成、补血、提高淋巴活性的作用。

4.1 在食品中的应用

由于藻蓝蛋白对光和热不稳定, 限制了其在烘焙食品中的应用, 目前其应用主要集中在乳制品、凝胶糖等食品中。MG 等^[53]将藻蓝蛋白添加到 pH 4.5 的酸奶中, 在 4 °C 条件下, 随着藻蓝蛋白浓度的增加, 酸奶的粘度随之升高, 使嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌分别在第 14 d 和第 21 d 显著下降, 藻蓝蛋白能增加酸奶的脱水率, 增强酸奶的口感。而 DEWI 等^[54]利用藻蓝蛋白微胶囊制备了凝胶糖, 以麦芽糊精和海藻酸钠为包衣材料制备藻蓝蛋白微胶囊, 再将藻蓝蛋白微胶囊分别以 0、1%、3% 和 5% 添加到温度 40 °C 的凝胶糖中, 添加 5% 藻蓝蛋白的微胶囊能产生明亮的蓝色, 而且藻蓝蛋白在凝胶糖加工过程中具有一定的持久性。

4.2 在医用领域的应用

藻蓝蛋白具有生物敏感性、生物相容性、生物可吸收性, 对人体具有低毒性, 可作为抗氧化剂、神经保护剂和胰腺抗癌剂, 也可以促进皮肤伤口愈合。MADHYASTHA 等^[55]利用藻蓝蛋白共轭银纳米颗粒显著降低了银纳米粒子的毒性, 增强了红细胞向创面的移动程度, 使伤口边缘细胞应激现象减少。MADHYASTHA 等^[56]从藻蓝蛋白 β 链中分离得到氰基肽 $\beta 2$, 它能清除血浆中的自由基, 增强铁还原能力, 抑制活性氧对 DNA 的损伤, 从而保持 DNA 的完整性。FERNÁNDEZ-ROJAS 等^[57]研究了 CD-1 雄性小鼠中藻蓝蛋白对顺铂(cisplatin, CP)诱导的线粒体功能障碍的预防作用, 研究表明, 藻蓝蛋白能减轻线粒体的异常反应。LIAO 等^[58]研究了藻蓝蛋白作为体内外的抗胰腺癌药物的治疗潜力, 研究表明, 藻蓝蛋白通过诱导细胞凋亡和自噬细胞死亡发挥抗胰腺癌活性的作用, 从而确定藻蓝蛋白是一种有前途的抗胰腺癌药物。

4.3 其他应用

藻蓝蛋白具有高荧光量子产量、高摩尔消光系数和大斯托克斯位移等优点, 优于目前使用的许多合成染料。现在藻蓝蛋白与免疫球蛋白、蛋白 A 及抗生素蛋白结合形成荧光探针。ZHENG 等^[59]将纯化的藻蓝蛋白荧光探针与发光二极管(light emitting diode, LED)-电荷耦合器(charge

coupled device, CCD) 荧光密度条定性检测系统兼容, 开发了一种相对灵敏的新型荧光检测方法, 用于检测藻蓝蛋白。该方法解决了传统纯化方法制备过程复杂、收集率低、数量不足的缺点, 可提供方便的定量信息, 在环境和食品安全研究中显示出快速检测的巨大潜力。

5 展 望

藻蓝蛋白作为一种天然色素, 在化妆品行业可用作着色剂、在食品方面可作为添加剂, 同时在医药方面可作为抗炎剂、抗氧化剂、抗癌剂、免疫调节剂及荧光检测探针。随着人们对藻蓝蛋白特性与功能认识的不断深入, 其应用前景越来越广泛。而稳定性已成为限制其应用的瓶颈, 因此稳定性问题的解决将有力促进藻蓝蛋白的应用范围及规模。目前, 虽然可以通过多种方式提高藻蓝蛋白的稳定性, 如调节 pH、添加稳定剂、交联剂或者对藻蓝蛋白进行封装处理, 但是藻蓝蛋白与稳定剂和食物基质的化学作用还需进一步探讨, 藻蓝蛋白的稳定剂是否会对食品的营养与感官等产生影响, 能否在食品加工生产条件下进行应用等问题还有待进一步研究。此外, 在藻蓝蛋白应用推广过程中, 还需解决高效提取与纯化技术, 深入探讨其生物利用率及生物活性作用及机制等问题。相信随着人们对藻蓝蛋白研究的不断深入, 藻蓝蛋白的市场应用将更为广阔。

参考文献

- 俞丽燕. 藻蓝蛋白的性质和提取技术研究进展[J]. 福建轻纺, 2020, (5): 46-51.
- YU LY. Research progress on the properties and extraction technology of phycocyanin [J]. Fujian Texti, 2020, (5): 46-51.
- MARKOU G, NERANTZIS E. Microalgae for high-value compounds and biofuels production: A review with focus on cultivation under stress conditions [J]. Biotechnol Adv, 2013, 31(8): 1532-1542.
- NICCOLAI A, VENTURI M, GALLI V, et al. Vegetable oils protect phycocyanin from thermal degradation during cooking of spirulina-based "crostini" [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 138: 110776.
- KUMAR D, DHAR DW, PABBI S, et al. Extraction and purification of C-phycocyanin from *Spirulina platensis* (CCC540) [J]. Indian J Plant Physiol, 2014, 19(2): 184-188.
- MOGANY T, KUMARI S, SWALAHA FM, et al. Extraction and characterisation of analytical grade C-phycocyanin from *Euhalothece* sp. [J]. J Appl Phycol, 2019, 31(3): 1661-1674.
- 郝帅, 秦玉, 王成涛. 功能食品藻蓝蛋白的生理活性研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(12): 1233-1240.
- HAO S, QIN Y, WANG CT. Research progress on the physiological activity of functional food phycocyanin [J]. J Food Sci Biotechnol, 2017, 36(12): 1233-1240.
- 鲁轶男, 张发宇, 胡淑恒, 等. 巢湖蓝藻藻蓝蛋白稳定性的实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(11): 1557-1562.
- LU YN, ZHANG FY, HU SH, et al. Experimental study on the stability of phycocyanin in *Chaohu cyanobacteria* [J]. J Hefei Univ Technol (Nat Sci Ed), 2017, 40(11): 1557-1562.
- HOU YH, YAN MH, WANG QF, et al. C-phycocyanin from *Spirulina maxima* as a green fluorescent probe for the highly selective detection of mercury(II) in seafood [J]. Food Anal Methods, 2016, 10(6): 1931-1939.
- FRATELLI C, BURCK M, AMARANTE M, et al. Antioxidant potential of nature's "something blue": Something new in the marriage of biological activity and extraction methods applied to C-phycocyanin [J]. Trends Food Sci Technol, 2020, 107: 309-323.
- PAN-UTAI W, KAHAPANA W, IAMTHAM S. Extraction of C-phycocyanin from *Arthrospira (Spirulina)* and its thermal stability with citric acid [J]. J Appl Phycol, 2018, 30(1): 231-242.
- SCHULZE P, BARREIRA LA, PEREIRA H, et al. Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production [J]. Trends Biotechnol, 2014, 32(8): 422-430.
- 高坤煌. 藻胆蛋白微胶囊的制备及其性质研究[D]. 厦门: 集美大学, 2014.
- GAO KH. Preparation and properties of phycobiliprotein microcapsules [D]. Xiamen: Jimei University, 2014.
- MING HL, CASTILLO G, OCHOA-BECERRA MA, et al. Phycocyanin and phycoerythrin: Strategies to improve production yield and chemical stability [J]. Algal Res, 2019, 42: 101600.
- FERNÁNDEZ-ROJAS B, HERNÁNDEZ-JUÁREZ J, PEDRAZA-CHAVERRI J. Nutraceutical properties of phycocyanin [J]. J Funct Foods, 2014, 11: 375-392.
- 梁霄. C-藻蓝蛋白光学特性与生物活性的稳定性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- LIANG X. Study on the stability of optical properties and biological activity of C-phycocyanin [D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- 任顺成, 曹悦, 李林政, 等. 天然食用色素藻蓝蛋白研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 203-208.
- REN SC, CAO Y, LI LZ, et al. Research progress of natural food pigment phycocyanin [J]. Food Res Dev, 2021, 42(7): 203-208.
- SUN L, WANG S, QIAO Z. Chemical stabilization of the phycocyanin from cyanobacterium *Spirulina platensis* [J]. J Biotechnol, 2006, 121(4): 563-569.
- KHANDUAL S, SANCHEZ E, ANDREWS HE, et al. Phycocyanin content and nutritional profile of *Arthrospira platensis* from Mexico: Efficient extraction process and stability evaluation of phycocyanin [J]. BMC Chem, 2021, 15(1). DOI: 10.1186/s13065-021-00746-1
- ZHENG JX, YIN H, SHEN CC, et al. Functional and structural properties of *Spirulina phycocyanin* modified by ultra-high-pressure composite glycation [J]. Food Chem, 2019, 306: 125615.
- BERNS DS, MACCOLL R. Phycocyanin in physical chemical studies [J]. Chem Rev, 1989, 89(4): 807-825.
- 徐润. 钝顶螺旋藻藻蓝蛋白储存稳定性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- XU R. Research of the storage stability of phycocyanin from *Spirulina platensis* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- LI Y, ZHANG Z, PACIULLI M, et al. Extraction of phycocyanin-A natural blue colorant from dried spirulina biomass: Influence of processing parameters and extraction techniques [J]. J Food Sci, 2020, 85(3). DOI: 10.1111/1750-3841.14842

- [23] 任顺成, 王凤雯, 曹悦, 等. 藻蓝色素稳定性的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 1-7.
REN SC, WANG FW, CAO Y, *et al.* Study on the stability of algae blue pigment [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2020, 41(6): 1-7.
- [24] WU HL, WANG GH, XIANG WZ, *et al.* Stability and antioxidant activity of food-grade phycocyanin isolated from *Spirulina platensis* [J]. Int J Food Prop, 2016, 19(9-12): 2349-2362.
- [25] MATHILDE M, SÉBASTIEN J, ALVA W, *et al.* Physicochemical factors affecting the stability of two pigments: R-phycoerythrin of *Grateloupia turuturu* and B-phycoerythrin of *Porphyridium cruentum* [J]. Food Chem, 2014, 150: 400-407.
- [26] 梁霄, 王成华, 卢鑫, 等. 钝顶螺旋藻 C-藻蓝蛋白的稳定性和荧光特性[J]. 现代食品科技, 2020, 36(6): 89-96.
LIANG X, WANG CH, LU X, *et al.* Stability and fluorescence characteristics of C-phycocyanin in *Spirulina platensis* [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36(6): 89-96.
- [27] FERRARO G, IMBIMBO P, MARSEGLIA A, *et al.* X-ray structure of C-phycocyanin from *Galdieria phlegrea*: Determinants of thermostability and comparison with a C-phycocyanin in the entire phycobilisome [J]. BBA-Bioenergetics, 2020, 1861(9): 148236.
- [28] MUNAWAROH H, DAROJATUN K, GUMILAR GG, *et al.* Characterization of phycocyanin from *Spirulina fusiformis* and its thermal stability [J]. J Phys Conf, 2018, 1013(1): 012205.
- [29] CHAIKLAHAN R, CHIRASUWAN N, BUNNAG B. Stability of phycocyanin extracted from *Spirulina* sp.: Influence of temperature, pH and preservatives [J]. Process Biochem, 2012, 47(4): 659-664.
- [30] MARTELLI G, FOLLI C, VISAI L, *et al.* Thermal stability improvement of blue colorant C-phycocyanin from *Spirulina platensis* for food industry applications [J]. Process Biochem, 2014, 49(1): 154-159.
- [31] BCKER L, HOSTETTLERR T, DIENER M, *et al.* Time-temperature-resolved functional and structural changes of phycocyanin extracted from *Arthrospira platensis/Spirulina* [J]. Food Chem, 2020. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.126374
- [32] CHOI WY, LEE HY. Kinetic analysis of stabilizing C-phycocyanin in the *Spirulina platensis* extracts from ultrasonic process associated with effects of light and temperature [J]. Appl Sci, 2018, 8(9): 1662.
- [33] 张艳燕, 陈必铤, 陈章捷. 蔷薇藻藻蓝蛋白的稳定性研究[J]. 亚热带植物科学, 2014, 43(2): 103-107.
ZHANG YY, CHEN BL, CHEN ZJ. Study on the stability of rose phycocyanin [J]. Subtrop Plant Sci, 2014, 43(2): 103-107.
- [34] 赵冰冰, 张发宇, 陈裕, 等. 四步盐析提取巢湖新鲜蓝藻中藻蓝蛋白及其稳定性[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2302-2308.
ZHAO BB, ZHANG FY, CHEN Y, *et al.* Four-step salting-out extraction of phycocyanin from fresh cyanobacteria in Chaohu Lake and its stability [J]. J Environ Eng, 2016, 10(5): 2302-2308.
- [35] CHENTIR I, HAMDI M, LI S, *et al.* Stability, bio-functionality and bio-activity of crude phycocyanin from a two-phase cultured *Saharian arthrospira* sp. Strain [J]. Algal Res, 2018, 35: 395-406.
- [36] FAIETA M, NERI L, SACCHETTI G, *et al.* Role of saccharides on thermal stability of phycocyanin in aqueous solutions [J]. Food Res Int, 2020, 132: 109093.
- [37] ZHANG S, ZHANG Z, DADMOHAMMADII Y, *et al.* Whey protein improves the stability of C-phycocyanin in acidified conditions during light storage [J]. Food Chem, 2021, 344. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128642
- [38] ZHANG Z, LI Y, ABBASPOURRAD A. Improvement of the colloidal stability of phycocyanin in acidified conditions using whey protein-phycocyanin interactions [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 105. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.105747
- [39] MUNAWAROH H, GUMILAR GG, ALIFIA CR, *et al.* Photostabilization of phycocyanin from *Spirulina platensis* modified by formaldehyde [J]. Process Biochem, 2020, 94: 297-304.
- [40] MARTELLI G, FOLLI C, VISAI L, *et al.* Thermal stability improvement of blue colorant C-phycocyanin from *Spirulina platensis* for food industry applications [J]. Process Biochem, 2014, 49(1): 154-159.
- [41] FUKUI K. Relationship between color development and protein conformation in the phycocyanin molecule [J]. Dyes Pigments, 2004, 63(1): 89-94.
- [42] SELIG MJ, MALCHIONE N, GAMALELDIN S, *et al.* Protection of blue color in a spirulina derived phycocyanin extract from proteolytic and thermal degradation via complexation with beet-pectin [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 74: 46-52.
- [43] YOU YI, CHENG SHASHA, ZHANG LI, *et al.* Rational modulation of the luminescence of upconversion nanomaterials with phycocyanin for the sensing and imaging of myeloperoxidase during an inflammatory process [J]. Anal Chem, 2020, 92(7): 5091-5099.
- [44] PURNAMA FNW, AGUSTINI TW, KURNIASIH RA. The effect of different temperature on the stability of phycocyanin on microcapsule *Spirulina platensis* [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020.
- [45] PURNAMAYATI L, DEWI EN, KURNIASIH RA. Phycocyanin stability in microcapsules processed by spray drying method using different inlet temperature [J]. Iop Conf, 2018, 116: 012076.
- [46] PRADEEP HN, NAYAK CA. Enhanced stability of C-phycocyanin colorant by extrusion encapsulation [J]. J Food Sci Technol, 2019, 56(10): 4526-4534.
- [47] 吕晓玲, 徐蕾然, 陈正函, 等. 空气悬浮包衣法制备藻蓝蛋白微胶囊[J]. 食品科技, 2013, 38(2): 260-263.
LV XL, XU LR, CHEN ZH, *et al.* Preparation of phycocyanin microcapsules by air suspension coating method [J]. Food Technol, 2013, 38(2): 260-263.
- [48] SCHMATZD A, DASILVEIRAMASTRANTONIOD J, COSTAJ AV, *et al.* Encapsulation of phycocyanin by electrospraying: A promising approach for the protection of sensitive compounds [J]. Food Bioprod Process, 2020, 119: 206-215.
- [49] CHUNG GY, SHIM KH, KIM HJ, *et al.* Chitosan-coated C-phycocyanin liposome for extending the neuroprotective time window against ischemic brain stroke [J]. Curr Pharm Design, 2018, 24(17): 1859-1864.
- [50] NOGUEIRA A, KOKUSZI L, CORDEIRO AP, *et al.* *Spirulina* sp. LEB 18-extracted phycocyanin: Effects on liposomes' physicochemical parameters and correlation with antiradical/antioxidant properties [J]. Chem Phys Lipid, 2021: 105064. DOI: 10.1016/j.chemphyslip. 2021. 105064
- [51] SEYED YA, SHAHIDI F, MOHEBBI M, *et al.* Preparation, characterization and evaluation of physicochemical properties of phycocyanin-loaded solid lipid nanoparticles and nanostructured lipid carriers [J]. J Food Meas Charact, 2018, 12(1): 378-385.

- [52] ZHANG Z, CHO S, DADMOHAMMADI Y, *et al.* Improvement of the storage stability of C-phycoerythrin in beverages by high-pressure processing [J]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 110: 106055.
- [53] MG A, SZ A, MG B. Phycocyanin-enriched yogurt and its antibacterial and physicochemical properties during 21 days of storage [J]. *LWT*, 2019, 102: 230–236.
- [54] DEWI EN, KURNIASIH RA, PURNAMAYATI L. The application of microencapsulated phycocyanin as a blue natural colorant to the quality of jelly candy [C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2018.
- [55] MADHYASTHA H, MADHYASTHA R, THAKUR A, *et al.* C-phycoerythrin primed silver nano conjugates: Studies on red blood cell stress resilience mechanism [J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2020, 194: 111211.
- [56] MADHYASTHA H, VATSALA TM. Cysteine-rich cyanopeptide beta2 from *Spirulina fusiformis* exhibits plasmid DNA pBR322 scission prevention and cellular antioxidant activity [J]. *Indian J Exp Biol*, 2010, 48: 486–493.
- [57] FERNÁNDEZ-ROJAS B, RODRÍGUEZ-RANGEL DS, GRANADOS-CASTRO LF, *et al.* C-phycoerythrin prevents cisplatin-induced mitochondrial dysfunction and oxidative stress [J]. *Mol Cell Biochem*, 2015, 406(1): 183–197.
- [58] LIAO G, GAO B, GAO Y, *et al.* Phycocyanin inhibits tumorigenic potential of pancreatic cancer cells: Role of apoptosis and autophagy [J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 1–12.
- [59] ZHENG Y, MO L, ZHANG W, *et al.* Phycocyanin fluorescent probe from *Arthrospira platensis*: Preparation and application in LED-CCD fluorescence density strip qualitative detection system [J]. *J Appl Phycol*, 2019, 31(2): 1107–1115.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



王晓真, 硕士研究生, 主要研究方向为海藻资源综合利用。

E-mail: www18018912083@163.com



任丹丹, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋生物资源利用。

E-mail: rdd80@163.com