

蚕蛹油的提取、营养组成及生物活性研究进展

刘宇李华*

(扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127)

摘要: 蚕蛹油的提取技术、营养价值和生物活性是蚕蛹油走向市场的关键因素。作者综述了常见蚕蛹油提取方法的优缺点, 蚕蛹油中主要营养成分的种类、含量及功能, 蚕蛹油的生物活性及其在食品中的应用现状, 以为蚕蛹油的工业化生产和在健康食品中的高值化利用提供理论依据。

关键词: 蚕蛹油; 提取方法; 营养组成; 生物活性

Research Progress on the Extraction, Nutritional Composition, and Bioactivities of Silkworm Pupa Oil

LIU Yu LI Hua*

(College of Tourism and Cuisine, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The extraction techniques, nutritional values, and bioactivities of silkworm pupa oil are key to its successful market adoption. The author summarizes the advantages and disadvantages of common extraction methods for silkworm pupa oil, and details the main nutritional and bioactive components, their respective concentrations, and functional properties. Additionally, the author discusses the bioactivities of silkworm pupa oil and its current applications in the food industry. In order to provide a theoretical foundation for its industrial production and high-value utilization in functional and healthy food sectors.

Keywords: silkworm pupa oil; extraction methods; nutritional composition; bioactivities

蚕属于节肢动物门昆虫纲鳞翅目, 其完整生命周期由卵、幼虫、蛹和成虫 4 个阶段组成^[1]。蚕蛹是蚕的蚕茧缂丝后留下的蛹体, 是蚕桑产业的主要副产物之一。作为我国传统的药食同源昆虫, 蚕的营养和药用价值极高, 在《本草纲目》《齐民要术》《日华子本草》中均有记载^[2]。中国是养蚕大国, 蚕的产量占世界总产量的 70% 以上^[3]。然而长期以来, 蚕蛹的主要用途仅限于动物饲料或被丢弃, 导致资源浪费及环境污染。因此, 开发和利用蚕蛹资源不仅可以提升其经济价值, 还具有促进蚕蛹食品发展和改善公共健康的重要意义。

蚕蛹油是蚕蛹经提取精炼制得的金黄色透明液体, 富含油酸、亚油酸和 α -亚麻酸等不饱和脂肪

酸及磷脂和生育酚, 具有抗氧化、降血脂、修复损伤器官、抗菌等生物活性^[4-5]。常见的蚕蛹油提取方法包括溶剂萃取法、超声波辅助提取法、微波辅助萃取法、超临界 CO₂ 萃取法和水媒法, 采用物理和化学相结合的方法可以提高提取效率, 提升蚕蛹油的品质。作者综述了蚕蛹油的提取工艺、营养组成和生物活性, 及其在食品领域中的应用, 以为蚕蛹资源的高值化利用和蚕蛹油产业的进一步发展提供依据。

1 蚕蛹油的提取与制备

1.1 溶剂萃取法

溶剂萃取法是根据相似相溶的原理, 利用有机溶剂浸提蚕蛹中的油脂, 具有工艺简单、生产成

通信作者: 李华(1976—), 男, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 主要从事生物体活性成分的分离、纯化与功能评价研究。

E-mail: lihua216@yzu.edu.cn

收稿日期: 2024-03-19 修回日期: 2024-04-15

本低的特点^[6]。由表1可知,影响蚕蛹油提取率的关键因素包括溶剂的种类及用量、浸提的时间及温度等。提取蚕蛹油的常用有机溶剂为正己烷、乙酸乙酯和石油醚,原因在于这3种溶剂溶解油脂以及在物料中的扩散性能较好。固液比在1 g:20 mL至1 g:4 mL时,有利于物料与溶剂的充分接触,并加大油脂在物料与溶剂之间的浓度差,增加提取率。通常,蚕蛹油提取温度为40~50 °C,提取时间为2~3 h。温度升高可以加快溶剂及油脂分子的扩

散速度,提高提取效率;但温度过高,可能会因溶剂挥发造成提取率下降。然而,采用溶剂萃取法的提取时间较长,存在有机溶剂和杂质残留、异味等问题,必须经过脱胶、脱酸、脱色和脱臭等精制处理来提升油脂品质^[7]。刘军等^[8]评估了精制处理对蚕蛹油氧化稳定性的影响,发现在精制过程中,伴随着自身抗氧化成分的损失,蚕蛹油的氧化稳定性下降,尤其是脱色阶段损失最为严重。

表1 蚕蛹油溶剂萃取工艺的比较

Table 1 Comparison of solvent extraction process of silkworm pupa oil

溶剂	工艺	蚕蛹油提取率/%	参考文献
正己烷	固液比1 g:4.6 mL,浸提时间2.5 h,浸提温度43 °C	22.65	[9]
	固液比1 g:4 mL,浸提时间2 h,浸提温度40 °C	23.34	[10]
	固液比1 g:8 mL,浸提时间2 h,浸提温度40 °C,振荡频率120 r/min	24.49	[11]
	固液比1 g:6 mL,浸提时间3 h,浸提温度40 °C,振荡频率160 r/min	25.96	[12]
	固液比1 g:14 mL,浸提时间2 h,浸提温度50 °C	28.17	[13]
	固液比1 g:7 mL,浸提时间2 h,浸提温度50 °C	29.28	[14]
乙酸乙酯	固液比1 g:8 mL,浸提时间2 h,浸提温度38 °C	33.00	[15]
	固液比1 g:14 mL,浸提时间2 h,浸提温度50 °C	26.04	[13]
石油醚	固液比1 g:10 mL,浸提时间2 h,振荡频率160 r/min	25.00	[16]
	固液比1 g:4 mL,浸提时间9~12 h,浸提温度80 °C	30.58	[17]
6号白电油	固液比1 g:20 mL,浸提时间6 h,浸提温度40 °C	31.70	[18]
	固液比1 g:5 mL,浸提时间4 h,浸提温度60 °C,翻滚60次	21.87	[19]
氯仿-甲醇(体积比2:1)	固液比1 g:14 mL,浸提时间2 h,浸提温度50 °C	28.29	[13]

1.2 超声波辅助提取法

超声波辅助提取法是利用超声波辐射压强产生的多级效应原理,使油脂和溶剂能够快速融合,进而提取油脂^[20]。与传统溶剂萃取法相比,超声波辅助提取法具有省时及油脂提取率高等优点^[21]。研究表明,影响蚕蛹油提取率的主要因素有超声波功率、浸提温度、浸提时间、底物质量浓度等^[22]。超声波辅助提取法常与其他方法搭配使用,例如:结合石油醚萃取,蚕蛹油提取率达30.85%,时间从8 h缩短到37 min^[23];结合水酶法,蚕蛹油提取率高达90.20%。采用超声波辅助提取法所得蚕蛹油的脂肪酸组成与传统溶剂萃取法基本一致,且色泽呈现出明亮的黄色,气味纯正,感官品质更佳^[24]。

1.3 微波辅助萃取法

微波辅助萃取原理是通过电磁波辐射产生热量,引起细胞内温度突然升高,这可能会导致

细胞结构的破裂,从而促进油的快速释放,进而提高油脂萃取效率^[25]。微波辅助萃取法与前两种萃取方法相比,具有设备简单、成本低、提取时间更短,并能提高油脂中总酚含量等优点^[26]。微波辅助萃取蚕蛹油能明显提高提取效率,陈颖娣等^[27]在常温常压下以正己烷为溶剂,采用微波技术仅需50 s便可萃取出蚕蛹油,且提取率为28.10%,与索氏提取法(31.19%)和超临界CO₂萃取法(31.43%)效果相近。而Hu等^[25]利用响应面法确定蚕蛹油最佳提取工艺为:乙醇与正己烷体积比1:1、微波功率360 W、固液比1 g:7.5 mL、微波时间29 min,在此条件下对蚕蛹油中的油脂进行提取,蚕蛹油提取率达30.16%,同时具有良好的氧化稳定性。

1.4 超临界CO₂萃取法

超临界CO₂萃取法是以超临界CO₂为萃取剂,通过调节萃取温度、压力、时间及CO₂流量来分离

油脂的一种新型环境友好技术^[28-29]。此技术的优势在于不会残留有毒溶剂,可以极大程度保留油脂中的天然生物活性成分,提高油脂品质^[30]。Girijal 等^[31]用响应面法优化桑蚕蛹油的超临界 CO₂ 萃取工艺,发现在萃取温度 45 °C、萃取压力 20.3 MPa、萃取时间 2.42 h、CO₂ 流量 24 L/h 时,油脂提取率为 30.10%,显著高于溶剂萃取法提取率(25.82%)。刘军^[32]通过超临界 CO₂ 萃取技术优化提取柞蚕蛹中的油脂,当萃取温度 50 °C、萃取压力 30 MPa、萃取时间 1 h、CO₂ 流量 40 L/h 时,油脂提取率达 28.48%,分别是索氏提取法和超声波辅助索氏提取法的 1.10 倍和 1.06 倍;进一步研究发现使用超临界 CO₂ 萃取的蚕蛹油中总酚质量分数最高为 100.89 mg/kg, α -亚麻酸质量分数最高为 35.21%,若以总酚和 α -亚麻酸质量分数评估蚕蛹油的品质,则超临界 CO₂ 萃取法提取的油品质较好。总体而言,超临界 CO₂ 萃取法提取蚕蛹油的效率和品质优于传统方法。由于超临界 CO₂ 萃取设备成本高且操作复杂,在大规模工业化生产中受到限制。

1.5 水媒法

水媒法是指以水为主要溶剂的绿色油脂萃取方法的总称,主要包括水酶法、盐水法和乙醇水提法^[33]。张道平等^[34]采用胰蛋白酶通过水酶法提取蚕蛹油,在温度 50 °C、pH 8.5、酶添加质量分数 2.0%、时间 4 h 的优化条件下,蚕蛹油提取率为 23.55%。然而,传统的水酶法在提取油脂的过程中会出现乳化现象,使蚕蛹油的提取率降低,并且由于酶的使用成本高限制了其工业化应用^[35]。基于成本、提取率和油脂品质等多方面考虑,盐水法和乙醇水提法更受研究者的关注。研究显示,乙醇和氯化钠极性高,添加适量的乙醇或氯化钠可以达到较好的破乳效果,使提取率升高^[36]。

盐水法或乙醇水提法是指以氯化钠或乙醇水溶液为介质的一种油脂提取方法。这 2 种方法的原理是将氯化钠或乙醇作为破乳剂加入水相,使油水乳化体系失去稳定,有利于减少乳状液的形成^[37-38]。Tangsanthatkun 等^[39]使用盐水法提取冷冻桑蚕蛹中的油脂,通过响应面法优化的工艺条件为:氯化钠质量分数 1.7%、固液比 1 g:3.3 mL、提取时间 119 min,在此工艺下获得了高产量和高

品质的油脂。钦凌宇等^[40]采用乙醇水提法,在乙醇体积分数 40%、固液比 1 g:7 mL、提取温度 50 °C、pH 9.0、提取时间 3 h 条件下,蚕蛹油提取率高达 90.76%,并且该方法提取的油脂在酸值和过氧化值上均优于正己烷浸提法。因此,盐水法和乙醇水提法是绿色高效、操作方便且提取率高的新型油脂提取技术。

目前蚕蛹油的提取方法主要有溶剂萃取法、超声波辅助提取法、微波辅助萃取法、超临界 CO₂ 萃取法和水媒法。随着市场需求不断增加,传统技术已无法满足工业化生产需求,迫切需要开发更多新方法。

2 蚕蛹油的营养组成

2.1 脂肪酸

脂肪酸是蚕蛹油的重要组成成分,包括饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸,蚕蛹油的脂肪酸组成是评价其品质的关键因素之一。表 2 汇总了近 15 年来蚕蛹油的相关研究,可见脂肪酸组成主要受提取方法、品种及地域等因素的影响。例如,在同一地区提取的桑蚕蛹油,采用微波辅助萃取法得到的油脂中 α -亚麻酸的相对含量高于超声波辅助提取法得到的油脂。同时,使用超临界 CO₂ 萃取法得到的蚕蛹油中,不饱和脂肪酸相对含量通常超过传统溶剂萃取法提取的油脂。此外,不同蚕蛹品种之间的脂肪酸组成差异明显,例如柞蚕蛹油中的不饱和脂肪酸相对含量普遍高于桑蚕蛹油。地域差异亦为影响脂肪酸组成的一个重要因素,研究表明,温带与热带地区提取的蚕蛹油在脂肪酸饱和度上存在明显差异。蚕蛹油的营养和保健价值主要体现在含有较高比例的不饱和脂肪酸,尤其是油酸、亚油酸和 α -亚麻酸,其质量之和占总脂肪酸质量的 70% 以上。油酸可以降低人体低密度脂蛋白水平,预防动脉粥样硬化; α -亚麻酸是合成对智力有益的二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)等长链多不饱和脂肪酸的重要前体,在预防糖尿病、心血管疾病及降血糖、降血压和保护神经元方面发挥着重要作用,是蚕蛹油具有多种生物活性的物质基础^[41]。因此,蚕蛹油作为一种富含不饱和脂肪酸,尤其是 α -亚麻酸的新型

表2 蚕蛹油的主要脂肪酸组成
Table 2 Major fatty acid composition of silkworm pupa oil

提取方法	物种	产地	主要脂肪酸质量分数/%									参考文献
			棕榈酸 C16:0	棕榈油 酸C16:1	硬脂酸 C18:0	油酸 C18:1	亚油酸 C18:2	α -亚麻酸 C18:3	饱和 脂肪酸	不饱和 脂肪酸	多不饱和 脂肪酸	
溶剂萃取法	桑蚕蛹	四川	23.06	1.08	4.68	28.17	3.86	38.08	29.92	70.08	41.94	[23]
		无锡	23.55	0.99	5.20	35.69	4.12	29.53	28.75	71.25	33.64	[40]
		重庆	22.63	2.31	1.17	35.43	2.92	20.17	35.64	64.36	23.09	[42]
		镇江	21.07	1.36	7.52	32.52	6.56	30.96	28.59	71.41	37.52	[43]
		广东	22.04	0.92	6.84	33.91	5.48	30.81	28.89	71.11	36.28	[44]
		广西	31.53	0.77	5.31	14.79	5.59	30.46	48.04	51.96	36.35	[45]
		浙江	21.67	0.82	5.05	27.32	6.33	38.47	26.72	73.28	44.80	[46]
		山东	18.24	0.18	8.16	35.69	6.20	26.93	29.82	70.18	33.13	[47]
		日本	24.20	1.70	4.50	26.00	7.30	36.30	28.80	71.20	43.60	[48]
			柞蚕蛹	广东	17.25	3.42	2.23	29.15	7.14	40.28	20.33	79.67
	蓖麻蚕蛹	重庆	21.15	1.88	8.08	11.59	10.28	43.41	28.41	71.59	53.69	[49]
		印度	21.68	0.43	5.47	11.10	14.23	39.47	29.41	70.59	54.07	[50]
超声波辅助提取法	桑蚕蛹	四川	22.99	1.02	6.43	34.14	3.50	31.58	29.76	70.24	35.08	[23]
微波辅助萃取法	桑蚕蛹	四川	23.18	1.07	4.69	28.32	3.88	38.25	28.36	71.64	42.13	[25]
超临界CO ₂ 萃取法	桑蚕蛹	安徽	22.77	0.60	6.69	26.01	5.90	38.02	29.46	70.54	43.92	[51]
		山东	18.81	0.21	7.66	35.86	6.00	28.03	28.85	71.15	34.03	[47]
		广东	23.91	1.28	4.60	34.45	6.13	29.18	28.96	71.04	35.31	[52]
	柞蚕蛹	沈阳	19.92	4.77	1.99	30.97	6.89	34.27	22.51	77.49	41.16	[51]
		辽宁	15.13	3.33	1.79	24.62	6.03	39.75	17.56	82.44	54.49	[53]
	蓖麻蚕蛹	广西	27.79	0.94	4.90	9.13	6.46	50.52	32.96	67.04	56.98	[54]
天蚕蛹	内蒙古	16.95	1.71	5.60	25.97	12.13	0.47	24.57	75.43	47.75	[53]	
水媒法	桑蚕蛹	无锡	23.10	0.96	5.36	35.33	4.30	29.93	28.46	71.54	34.23	[40]
		泰国	26.00	0.98	6.78	36.84	4.25	24.85	32.78	67.22	29.10	[39]

食用昆虫油脂资源,将成为食品工业中很有前景的功能性食用油。

2.2 磷脂

磷脂是细胞膜的重要组成部分,在细胞生理功能中发挥着重要作用。蚕蛹油磷脂中含有质量分数35%的磷脂酰乙醇胺、质量分数30%的磷脂酰胆碱、质量分数17%~20%的溶血磷脂酰胆碱、质量分数12%的溶血磷脂酰乙醇胺以及少量的磷脂酰肌醇、磷脂酸和磷酸酰丝氨酸^[13]。磷脂酰乙醇胺是所有哺乳动物细胞中的主要磷脂之一,具有多种生理功能,对预防糖尿病、心血管疾病等具有重要作用^[55]。研究表明,蚕蛹油中的磷脂质量分数与蚕蛹性别和品种相关,通常雌蚕蛹的磷脂质量分数高于雄蚕蛹。Wang等^[44]研究了桑蚕蛹与柞蚕蛹中的磷脂质量分数,结果显示桑蚕蛹油

磷脂质量分数(2.69%)是柞蚕蛹油磷脂质量分数(1.96%)的1.37倍。蚕蛹油中丰富的磷脂种类不仅提高了其营养价值,同时也增强了其作为优质油脂的潜力。

2.3 生育酚

生育酚是食用油中一种重要的天然亲脂性抗氧化剂^[56]。石威等^[13]以柞蚕蛹为原料提取油脂并鉴定生育酚种类,发现柞蚕蛹油中主要存在4种形式的生育酚: α -生育酚、 γ -生育三烯酚、 β -生育酚和 γ -生育酚。Wang等^[44]研究表明,柞蚕蛹油中生育酚质量分数为382.56 $\mu\text{g/g}$,其中 α -生育酚质量分数为255.00 $\mu\text{g/g}$;桑蚕蛹油中生育酚质量分数为371.65 $\mu\text{g/g}$,其中 α -生育酚质量分数为205.38 $\mu\text{g/g}$ 。由此可知,柞蚕蛹油和桑蚕蛹油中生育酚质量分数相近,但 α -生育酚质量分数差异

较大。目前,有关蚕蛹油生育酚的研究较少,亟待对其结构和功效进行深入分析。

2.4 甾醇

甾醇是具有天然生理活性的化合物。蚕蛹油中总甾醇质量分数为 7 556~19 860 mg/kg,其中胆甾醇质量分数最高,占总甾醇质量的 65% 以上,其次是 β -谷甾醇,此外还存在微量的豆甾醇^[44]。国内外研究表明,蚕蛹品种和提取方式对蚕蛹油中甾醇质量分数有较大影响。例如,Wang 等^[44]研究发现,柞蚕蛹油的甾醇质量分数(20.15 mg/g)高于桑蚕蛹油的甾醇质量分数(17.15 mg/g)。石威等^[13]以柞蚕蛹为研究对象,采用溶剂萃取法提取蚕蛹油,并用气相色谱-质谱联用分析甾醇质量分数,发现用氯仿-甲醇(体积比 2:1)萃取得到的柞蚕蛹油中甾醇质量分数(19.85 mg/g)最高,其次是正己烷和乙酸乙酯萃取得到的甾醇,质量分数分别为 15.87 mg/g 和 16.16 mg/g。蚕蛹油的高胆固醇与现在人们的健康饮食观念不符,因此朱林韬等^[57]利用物理吸附法来降低胆固醇,结果表明,中性氧化铝作为吸附剂可以有效降低蚕蛹油中的胆固醇,脱除率可达 54.76%,且对蚕蛹油的感官品质和理化性质无显著影响。Zhao 等^[43]通过酶促反应改变蚕蛹油脂肪酸组成和分布,从而得到了富含不饱和脂肪酸的新型结构性脂质,且蚕蛹油中饱和脂肪酸质量分数从 41.04% 下降到 20.11%,不饱和脂肪酸质量分数从 61.12% 上升到 77.88%。

3 蚕蛹油的生物活性

蚕蛹油中丰富的营养成分赋予了其多种生物活性,包括抗氧化、降血脂、护肝、修复胃及肾脏和抗菌等。

3.1 抗氧化活性

蚕蛹油中的多种生物活性成分(如磷脂和生育酚)是优良的天然抗氧化剂^[58]。一般采用 ABTS 自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力、铁离子还原能力、总酚含量和总类胡萝卜素含量评价其抗氧化活性。用不同方法提取的蚕蛹油抗氧化活性存在一定差异,刘军等^[8]研究表明,超临界 CO₂ 萃取的蚕蛹油的铁离子还原能力(131.19 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$)明显优于溶剂萃取的蚕蛹油

(52.53 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$),其主要原因是超临界 CO₂ 萃取法可以极大程度保留蚕蛹油的生物活性成分。类似地,Hu 等^[25]研究发现,微波辅助提取桑蚕蛹油的总酚质量分数(78.36 mg/kg)远远高于溶剂萃取的桑蚕蛹油(42.76 mg/kg),清除 DPPH 自由基效果较好,具有更强的抗氧化活性。此外,蚕蛹油的抗氧化能力也与贮藏时间相关,吴宝祥等^[45]比较了贮藏过程中桑蚕蛹油的总抗氧化能力,最初贮藏阶段蚕蛹油的 DPPH 自由基清除能力(IC₅₀=52.00 mg/mL)和 ABTS 自由基清除能力(IC₅₀=156.81 mg/mL)均优于其他贮藏阶段。蚕蛹油中生育酚的存在对氧化稳定性具有积极作用,并且蚕蛹油中存在的磷脂可能会使生育酚的抗氧化能力增强,二者之间的相互作用还有待进一步研究。

3.2 降血脂活性

蚕蛹油中油酸和 α -亚麻酸含量非常丰富,油酸和 α -亚麻酸均属于不饱和脂肪酸,可作用于人体心血管系统,降低低密度脂蛋白水平并生成高密度脂蛋白,从而起到降血脂和预防心血管疾病的作用^[59]。Luo 等^[60]通过研究蚕蛹油调控肝细胞胆固醇代谢发现,蚕蛹油中多不饱和脂肪酸的降脂机制是通过 LXR α /PPAR-ABCA1/ABCG1-CYP7A1 信号通路实现的,可促进细胞内的胆固醇代谢,进而转化为胆汁酸排出细胞外。这些转录因子在维持胆固醇平衡、调节脂质代谢以及降低动脉粥样硬化方面发挥着重要作用。

3.3 护肝活性

蚕蛹油能提高肝脏超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶的水平,从而起到保护肝脏的作用^[61]。Long 等^[62]用蚕蛹油喂养小鼠,发现蚕蛹油能够显著降低小鼠肝脏指数、血清丙氨酸氨基转移酶和天冬氨酸氨基转移酶水平,表明蚕蛹油可通过抑制氧化应激介导的 NF- κ B 信号通路来减轻乙酰氨基酚诱导的小鼠急性肝损伤。类似地,Liao 等^[63]研究发现,用桑蚕蛹油喂养大鼠能明显改善高脂饮食诱导的大鼠肝脏脂肪变性,采用苏木精-伊红染色并对大鼠肝脏进行组织学分析,证实了蚕蛹油有助于防止高脂大鼠的肝脏组织结构发生改变,对肝脏具

有保护作用。这些研究结果揭示了蚕蛹油具有护肝活性,在应用于功能性护肝产品方面具有潜在价值。

3.4 其他活性

除了上述生物活性外,蚕蛹油还具有修复胃及肾脏损伤和抗菌等作用。不饱和脂肪酸对胃黏膜和胃组织具有保护作用^[64]。Long等^[65]以盐酸/乙醇诱导小鼠形成胃溃疡,观察蚕蛹油的保护作用,发现蚕蛹油治疗组中的血清抗氧化剂,如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、谷胱甘肽过氧化物酶、生长抑素和血管活性肠肽的水平显著升高,蚕蛹油中的不饱和脂肪酸通过减少胃酸分泌和提高胃液pH来修复胃黏膜损伤。周静等^[66]探讨了蚕蛹油对庆大霉素引起大鼠肾脏损伤的保护作用。连续7d灌胃不同剂量(0~8 mg/(kg·d))的蚕蛹油后,低剂量(2~4 mg/(kg·d))蚕蛹油与对照组相比可显著降低血清中尿素氮和肌酐含量,有效减缓肾脏的氧化性损伤。另外,体外试验表明,桑蚕蛹油对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有显著的抑制作用,其中在300 μg/mL剂量下对金黄色葡萄球菌的最大抑制圈直径为14 mm^[67]。Saviane等^[68]通过热压榨法分别提取黑水虻和桑蚕蛹中的油脂,发现2种昆虫油脂对革兰氏阳性菌(枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌)均具有高度抑制性,其中由于桑蚕蛹油中长链不饱和脂肪

酸(油酸、亚油酸和 α -亚麻酸)含量较高,抗菌活性更强。由此可见,蚕蛹油可以作为新型的潜在抗菌剂,但还需要进行体内试验研究其抗菌活性。

4 蚕蛹油在食品中的应用

蚕蛹作为一种优质蛋白质和脂质来源的食用昆虫,国家卫生健康委员会已批准将其作为新资源食品名单中唯一的昆虫类食品^[69]。随着对蚕蛹油的深入研究,以蚕蛹油活性成分作为食品原料的产品越来越多。Karnjanapratum等^[70]将蚕蛹粉添加到面包酱中并测定其营养价值,结果表明蚕蛹蛋白质和蚕蛹油可以作为面包酱中蛋白质和脂肪的替代来源。Patil等^[71]以葵花籽油和桑蚕蛹油为主要原料,研制出一种新型蛋黄酱,其亚油酸含量和氧化稳定性更高,不仅色泽黄亮,而且营养丰富。基于蚕蛹油的营养价值和生物活性,其在食品工业中的应用范围广泛,可用在面制品、肉制品、奶制品、糖果、饮料、食用油及保健品中(见表3~4)。在面制品中,蚕蛹油能增强面食的营养价值。在肉制品中,它不仅能提升营养品质,还可改善风味和口感。将蚕蛹油应用于奶制品(如蚕蛹油奶片)中,可显示出其降低血脂和改善肝功能的潜力。此外,蚕蛹油还用于制作糖果和健康饮料,可提供必需脂肪酸和增强产

表3 以蚕蛹油为原料的专利产品

Table 3 Patented products using silkworm pupa oil as raw material

专利产品	产品主要成分	专利公开号	参考文献
一种蚕蛹 α -亚麻酸凝胶糖果及其生产工艺	蚕蛹油、紫苏籽油、亚麻籽油、明胶、甘油、山梨糖醇液、麦芽糖醇液、桑叶多糖	CN110973328A	[72]
一种能够降低血脂的蚕蛹油奶片	奶粉、蚕蛹油	CN108094551A	[73]
一种促进婴儿生长发育的小球藻山茶油及其制备方法	山茶籽仁、小球藻、蚕蛹油、纤维素酶、蛋白酶、乳铁蛋白、纯苏打粉、乙酸	CN106281644A	[74]
一种蚕蛹面条及其制备方法	面粉、蚕蛹粉、蚕蛹油、食盐、花椒粉、白酒、大蒜、水	CN105325868A	[75]
一种猴头菇贡糕的制备工艺	糯米粉、面粉、黑豆冻干粉、猴头菇冻干粉、山楂冻干粉、L-阿拉伯糖、奶粉、蚕蛹油、麻油、核桃仁	CN105029219A	[76]
一种鲫鱼补气蛋白粉饮品及制备方法	花生米、鲫鱼肉、奶粉、银耳超微粉、蚕蛹油、冬寒菜、蚂蚱腿、南姜、豆腐果、沙拉酱、青梅干、菠萝叶、响铃草、玉美人、马蹄叶、黄芩、石斛、纯净水适量、营养添加剂	CN104188022A	[77]
一种含蚕蛹蛋白肉饼的配方	蚕蛹蛋白质、洋葱、胡萝卜、盐、鸡精、胡椒粉、料酒、蚕蛹油	CN103783110A	[78]
一种含蚕蛹蛋白肉丸的配方	蚕蛹蛋白质、水、蛋清、湿淀粉、精盐、葱汁、姜汁、鸡精、蚕蛹油、胡椒粉	CN103783542A	[79]
一种盐霜玫瑰西瓜子及其制备方法	西瓜子、女贞子、罗汉果、葛花、茯苓、松针、烟梦花、岩椒草、椰根、椰子汁、醪糟汁、绿豆、玫瑰花、食盐、蚕蛹油、营养保健液	CN103549530A	[80]

品的健康效益。蚕蛹油还因其辅助降血脂功能应用于保健品领域。蚕蛹油的这些应用不仅丰

富了产品种类,还提升了产品的健康价值和市场竞争能力。

表 4 以蚕蛹油为原料的保健食品

Table 4 Health foods using silkworm pupa oil as raw material

保健食品	主要原料	保健功能	批准文号
绿脉牌蚕蛹油红花油维生素 E 软胶囊	蚕蛹油、红花油、维生素 E、明胶、甘油、纯化水	辅助降血脂	国食健注 G20080210
福丽尔牌蚕蛹提取物软胶囊	蚕蛹油、明胶、甘油、纯化水	辅助降血脂	国食健注 G20200272
金道堂牌清褥软胶囊	亚麻籽油、纳豆冻干粉、海洋鱼低聚肽粉、蚕蛹油、蜂蜡、明胶、甘油、牛奶巧克力棕、纯化水	辅助降血脂	国食健字 G20150684

5 展望

目前,蚕蛹油的主要提取方法包括溶剂萃取法、超声波辅助提取法、微波辅助萃取法、超临界 CO₂ 萃取法和水媒法。已经证明这些方法可以从蚕蛹中有效提取富含脂肪酸、磷脂、生育酚和甾醇的蚕蛹油,显示出蚕蛹油在抗氧化、降血脂和保护肝脏方面的潜力。然而,这些方法也存在效率低、能耗高和可能影响营养成分完整性的问题。随着科技的进步和市场需求的不断增长,未来研究需要聚焦于开发新型绿色高效的提取技术,例如通过加压液体提取、脉冲电场技术和射频技术等创新方法,提高提取效率和降低能耗,同时保护蚕蛹油中的活性成分。

在成分分析和生物活性探索方面,更精细的化学分析和生物效能测试将有助于深入探究蚕蛹油的健康益处。对蚕蛹油中主要活性成分如磷脂和生育酚的作用机制进行系统研究,不仅可以推动蚕蛹油在食品和保健品领域中的应用,还可发挥其在预防和治疗如神经退行性疾病等方面的潜力。此外,利用现代生物技术,如蛋白质组学和代谢组学,可以更深刻地探讨蚕蛹油的生物活性,明确其对人体健康的具体作用。

随着市场对天然和功能性食品需求的日益增长,蚕蛹油的开发与应用将迎来新的商业机遇。未来的产品开发应集中在如何将蚕蛹油的健康益处转化为具体产品,如抗炎、抗氧化和降血脂的保健食品,这需要跨学科合作并利用新兴技术来实现,从而更好地开发蚕蛹油的市场潜力,为消费者提供更多健康选择。

参考文献

[1] TORRES K S, SAMPAIO R F, FERREIRA T H B, et al.

Development of cookie enriched with silkworm pupae (*Bombyx mori*) [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(2): 1540-1548.

[2] 周志峰. 物理改性对蚕蛹蛋白功能特性及酶解特性的影响[D]. 镇江:江苏科技大学, 2017.

[3] 季晓娇, 闫文杰, 张婧婕, 等. 蚕蛹蛋白制备应用与功能特性的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 277-283.

JI X J, YAN W J, ZHANG J J, et al. Preparation, application and functional properties of silkworm pupa protein: a review [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(18): 277-283. (in Chinese)

[4] WU X L, HE K, VELICKOVIC T C, et al. Nutritional, functional, and allergenic properties of silkworm pupae [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(8): 4655-4665.

[5] HERMAN R A, YAN C H, WANG J Z, et al. Insight into the silkworm pupae: modification technologies and functionality of the protein and lipids [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 129: 408-420.

[6] DIMITRIJEVIĆ S, MILIĆ M, TADIĆ V, et al. Black cumin essential oil as a valuable source of bioactive compounds: evaluation of the conventional vs. modern extraction technique [J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2024, 37: 101390.

[7] 刘战霞, 贾文婷, 杨慧, 等. 南瓜子加工利用研究进展 [J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(3): 1-7.

LIU Z X, JIA W T, YANG H, et al. Research progress of pumpkin seed processing and utilization [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(3): 1-7. (in Chinese)

[8] 刘军, 郑翠翠, 廖森泰, 等. 精制对蚕蛹油抗氧化活性的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(4): 51-56.

LIU J, ZHENG C C, LIAO S T, et al. The effect of refining processes on antioxidant activity of silkworm pupa oil [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(4): 51-56. (in Chinese)

- [9] 孟陆丽,程谦伟. 蚕蛹油的提取及其氧化稳定性分析[J]. 湖北农业科学,2017,56(3):535-537.
MENG L L, CHENG Q W. Analysis of the extraction and antioxidation stability of silkworm pupa oil[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(3):535-537. (in Chinese)
- [10] 张研宇,李建科. 蚕蛹油提取、精炼及其脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂,2010,35(6):76-79.
ZHANG Y Y, LI J K. Extraction, refining and fatty acid composition analysis of silkworm chrysalis oil[J]. China Oils and Fats, 2010, 35(6):76-79. (in Chinese)
- [11] 蔡沙,何建军,施建斌,等. 蚕蛹油的提取及其组分分析[J]. 食品与发酵工业,2015,41(8):239-243.
CAI S, HE J J, SHI J B, et al. The extraction technology and component analysis of chrysalis oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(8):239-243. (in Chinese)
- [12] 张丽丽,章玉萍,赵萍,等. 正己烷浸提法提取蚕蛹油工艺的优化研究[J]. 中国蚕业,2016,37(1):31-35.
ZHANG L L, ZHANG Y P, ZHAO P, et al. Optimization of extraction technology of silkworm pupa oil by n-hexane extraction[J]. China Sericulture, 2016, 37(1):31-35. (in Chinese)
- [13] 石威,庞道睿,邹宇晓,等. 柞蚕蛹油中的脂类物质组成分析[J]. 蚕业科学,2019,45(2):269-277.
SHI W, PANG D R, ZOU Y X, et al. Analysis on lipid composition of *Antheraea pernyi* pupal oil[J]. Science of Sericulture, 2019, 45(2):269-277. (in Chinese)
- [14] 马林林,杜英武,强西怀,等. 蚕蛹油萃取剂的筛选及提取工艺条件优化[J]. 蚕业科学,2012,38(6):1142-1146.
MA L L, DU Y W, QIANG X H, et al. Screening of extraction solvents for silkworm pupa oil and optimization of extraction process conditions [J]. Science of Sericulture, 2012, 38(6):1142-1146. (in Chinese)
- [15] ZHAO L N, WU B X, LIANG S Y, et al. Insight of silkworm pupa oil regulating oxidative stress and lipid metabolism in *Caenorhabditis elegans*[J]. Foods, 2022, 11(24):4084.
- [16] 高艳慧. 柞蚕蛹蛋白的提取及加工特性的优化[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [17] 侯清娥,王录军,赵宪林,等. 蚕蛹油的碱炼工艺研究[J]. 农产品加工,2016(5):26-29,32.
HOU Q E, WANG L J, ZHAO X L, et al. Study on the alkali-refining process of silkworm pupa oil[J]. Farm Products Processing, 2016(5):26-29,32. (in Chinese)
- [18] 张瑞,邢军,张海玉. 蚕蛹中油脂最佳提取工艺技术研究[J]. 食品工业,2012,33(7):1-4.
ZHANG R, XING J, ZHANG H Y. Study on the optimum extraction processing technology of silkworm oil [J]. The Food Industry, 2012, 33(7):1-4. (in Chinese)
- [19] 蒋芳,林海涛,钱爱芬,等. 6号白电油对蛹油提取工艺的研究[J]. 丝绸,2018,55(10):21-26.
JIANG F, LIN H T, QIAN A F, et al. Studies on extraction process of pupal oil with No. 6 white mineral oil[J]. Journal of Silk, 2018, 55(10):21-26. (in Chinese)
- [20] JIA Z, WAN L T, HUANG Z X, et al. Quality evaluation of Hainan robusta coffee bean oil produced by ultrasound coupled with coconut oil extraction[J]. Foods, 2023, 12(11):2235.
- [21] THILAKARATHNA R C N, SIOW L F, TANG T K, et al. A review on application of ultrasound and ultrasound assisted technology for seed oil extraction[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(4):1222-1236.
- [22] 左振宇,喻放,黄艳鸿,等. 蚕蛹超声辅助常温脱脂工艺条件优化[J]. 生物技术通报,2016,32(2):158-164.
ZUO Z Y, YU F, HUANG Y H, et al. The optimization of ultrasound-assisted mesothermal degreasing process of silkworm pupa[J]. Biotechnology Bulletin, 2016, 32(2):158-164. (in Chinese)
- [23] 胡滨,陈一资,李诚,等. 响应面法优化超声波辅助提取蚕蛹油的工艺研究[J]. 中国粮油学报,2016,31(2):44-51.
HU B, CHEN Y Z, LI C, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of silkworm pupa oil applying response surface methodology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(2):44-51. (in Chinese)
- [24] 贾俊强,吴琼英,杜金娟,等. 超声波辅助水酶法提取蚕蛹油工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 食品科学,2014,35(16):52-57.
JIA J Q, WU Q Y, DU J J, et al. Optimization of ultrasonic-assisted aqueous enzymatic extraction and fatty acid composition of silkworm pupae oil [J]. Food Science, 2014, 35(16):52-57. (in Chinese)
- [25] HU B, LI C, ZHANG Z Q, et al. Microwave-assisted extraction of silkworm pupal oil and evaluation of its fatty acid composition, physicochemical properties and antioxidant activities [J]. Food Chemistry, 2017, 231:348-355.
- [26] SHARMA M, DADHWAL K, GAT Y, et al. A review on newer techniques in extraction of oleaginous flaxseed constituents [J]. OCL-Oilseeds and Fats, Crops and Lipids, 2019, 26:14.
- [27] 陈颖娣,余丹,汪红富,等. 蚕蛹三种不同方法提取的比

- 较研究[J]. 食品科技, 2010, 35(3): 194-196, 199.
- CHEN Y D, YU D, WANG H F, et al. Investigation on silkworm oil extractions in three different ways[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(3): 194-196, 199. (in Chinese)
- [28] ANUSHA V, SIVAKUMAR P. A review on supercritical fluid extraction[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2023, 42(41): 1-12.
- [29] 张朵朵, 牛鹏飞, 葛鑫禹, 等. 超临界 CO₂ 萃取羊肉油脂及其脂肪酸组成的变化[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(7): 37-43.
- ZHANG D D, NIU P F, GE X Y, et al. Supercritical CO₂ extraction of mutton fat and changes in its fatty acid composition [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(7): 37-43. (in Chinese)
- [30] LI L, CHEN M Y, ZENG Y, et al. Application and perspectives of supercritical fluid technology in the nutraceutical industry [J]. Advanced Sustainable Systems, 2022, 6(7): 2200055.
- [31] GIRIJAL S, NIDONI U, RAMACHANDRA C T, et al. Supercritical fluid extraction of pupae oil from mulberry silkworm (*Bombyx mori* L.) [J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2019, 8(3): 4507-4513.
- [32] 刘军. 柞蚕蛹油不饱和脂肪酸提取及其微胶囊制备[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2023.
- [33] 杨瑞金, 倪双双, 张文斌, 等. 水媒法提取食用油技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 308-314.
- YANG R J, NI S S, ZHANG W B, et al. Summarization on vegetable oil extraction technology by aqueous medium method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 308-314. (in Chinese)
- [34] 张道平, 苏小建, 何星基, 等. 采用酶解法提取蚕蛹油脂的工艺条件优化[J]. 蚕业科学, 2013, 39(4): 828-831.
- ZHANG D P, SU X J, HE X J, et al. Process optimization for silkworm pupa oil extraction through enzymatic hydrolysis[J]. Science of Sericulture, 2013, 39(4): 828-831. (in Chinese)
- [35] 叶展, 徐勇将, 刘元法. 食用植物油脂制取与精炼技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(6): 1-12.
- YE Z, XU Y J, LIU Y F. Research progresses on technologies for edible vegetable oil's preparation and refining[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 1-12. (in Chinese)
- [36] 王亚娟, 范亚苇, 李静, 等. 冻融破乳方法对水代法提取油茶籽油的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(3): 8-11.
- WANG Y J, FAN Y W, LI J, et al. Effects of freeze-thaw demulsification methods on aqueous extraction of oil-tea *Camellia* seed oil[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(3): 8-11. (in Chinese)
- [37] CRUZ S, YOUSFI K, PÉREZ A G, et al. Salt improves physical extraction of olive oil [J]. European Food Research and Technology, 2007, 225(3): 359-365.
- [38] 杜宇, 张文斌, 杨瑞金, 等. 乙醇水提法提取葡萄籽油及其品质分析[J]. 中国油脂, 2019, 44(5): 8-12, 42.
- DU Y, ZHANG W B, YANG R J, et al. Extraction of grape seed oil by aqueous ethanol method and its quality [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(5): 8-12, 42. (in Chinese)
- [39] TANGSANTHATKUN J, PEANPARKDEE M, KATEKHONG W, et al. Application of aqueous saline process to extract silkworm pupae oil (*Bombyx mori*): process optimization and composition analysis[J]. Foods, 2022, 11(3): 291.
- [40] 钦凌宇, 杨瑞金, 华霄, 等. 乙醇水提法提取蚕蛹油研究[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(9): 85-91.
- QIN L Y, YANG R J, HUA X, et al. Study on extraction of silkworm oil with aqueous ethanol extraction [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(9): 85-91. (in Chinese)
- [41] HĂBEANU M, GHEORGHE A, MIHALCEA T. Nutritional value of silkworm pupae (*Bombyx mori*) with emphases on fatty acids profile and their potential applications for humans and animals[J]. Insects, 2023, 14(3): 254.
- [42] 谢盛莉, 张宇昊, 马良, 等. 蚕蛹油和蚕蛹蛋白组成及潜在过敏原分布研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(1): 31-37.
- XIE S L, ZHANG Y H, MA L, et al. Compositions of silkworm pupa oil and protein and potential allergen distribution[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(1): 31-37. (in Chinese)
- [43] ZHAO X Y, WANG X D, LIU X, et al. Structured lipids enriched with unsaturated fatty acids produced by enzymatic acidolysis of silkworm pupae oil using oleic acid [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2015, 117(6): 879-889.
- [44] WANG W F, XU L, ZOU Y X, et al. Comprehensive identification of principal lipid classes and tocopherols in silkworm (*Antheraea pernyi* and *Bombyx mori*) pupae oils[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2020, 122(2): 280-287.
- [45] 吴宝祥, 梁舒韵, 朱立宏, 等. 贮藏时间及缂丝工艺对桑蚕蛹蛋白质和脂肪酸组成及蛹油体外抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 49-56.

- WU B X, LIANG S Y, ZHU L H, et al. Effects of storage time and silk reeling on protein and fatty acid composition of silkworm pupa and *in vitro* antioxidant activity of silkworm pupa oil[J]. Food Science, 2021, 42(19): 49-56. (in Chinese)
- [46] 于少芳, 卢红伶, 陈琳, 等. 不同品种家蚕蚕蛹脂肪酸组分分析[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(6): 1197-1199, 1243.
YU S F, LU H L, CHEN L, et al. Analysis of fatty acid composition of different silkworm pupae[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2021, 62(6): 1197-1199, 1243. (in Chinese)
- [47] 林春梅, 周鸣谦. 不同方法提取蚕蛹油的GC-MS分析[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(1): 112-116.
LIN C M, ZHOU M Q. Analysis of extraction and fatty acid composition analysis of chrysalis oil with GC-MS[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(1): 112-116. (in Chinese)
- [48] TOMOTAKE H, KATAGIRI M, YAMATO M. Silkworm pupae (*Bombyx mori*) are new sources of high quality protein and lipid[J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 2010, 56(6): 446-448.
- [49] 龙悦, 黄先智, 丁晓雯, 等. 木薯蚕蛹油中脂肪酸成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(4): 188-191.
LONG Y, HUANG X Z, DING X W, et al. Analysis of fatty acid in eri silkworm pupa oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(4): 188-191. (in Chinese)
- [50] RAY M, GANGOPADHYAY D. Effect of maturation stage and sex on proximate, fatty acid and mineral composition of eri silkworm (*Samia ricini*) from India[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 100: 103898.
- [51] PAN W J, LIAO A M, ZHANG J G, et al. Supercritical carbon dioxide extraction of the oak silkworm (*Antheraea pernyi*) pupal oil: process optimization and composition determination[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2012, 13(2): 2354-2367.
- [52] ZOU Y X, HU T G, SHI Y, et al. Silkworm pupae oil exerts hypercholesterolemic and antioxidant effects in high-cholesterol diet-fed rats[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(7): 2050-2056.
- [53] 岳冬梅, 李树英, 张建, 等. 天蚕蛹的营养成分含量及氨基酸组成分析[J]. 蚕业科学, 2017, 43(3): 479-485.
YUE D M, LI S Y, ZHANG J, et al. Analysis on nutritional content and amino acid composition of *Antheraea yamamai* pupa[J]. Science of Sericulture, 2017, 43(3): 479-485. (in Chinese)
- [54] 潘文娟, 方婷婷, 廖爱美, 等. 不同蚕蛹油中脂肪酸的性状及组分分析[J]. 食品科学, 2011, 32(4): 148-151.
PAN W J, FANG T T, LIAO A M, et al. Character and fatty acid composition of silkworm pupal oil[J]. Food Science, 2011, 32(4): 148-151. (in Chinese)
- [55] PATEL D, WITT S N. Ethanolamine and phosphatidylethanolamine: partners in health and disease[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2017, 2017: 4829180.
- [56] MA G Q, WANG Y Y, LI Y F, et al. Antioxidant properties of lipid concomitants in edible oils: a review[J]. Food Chemistry, 2023, 422: 136219.
- [57] 朱林韬, 彭展彬, 曾艺涛, 等. 降低蚕蛹油中胆固醇的方法研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(13): 219-223.
ZHU L T, PENG Z B, ZENG Y T, et al. Methods for the reduction of cholesterol in silkworm chrysalis oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(13): 219-223. (in Chinese)
- [58] CUCINIELLO R, DIMEO F, FILOSA S, et al. The antioxidant effect of dietary bioactives arises from the interplay between the physiology of the host and the gut microbiota: involvement of short-chain fatty acids[J]. Antioxidants, 2023, 12(5): 1073.
- [59] 王丽芳, 李建科, 吴晓霞. 蚕蛹油多不饱和脂肪酸和 α -亚麻酸对HepG2细胞胆固醇代谢的影响[J]. 营养学报, 2016, 38(4): 351-355, 360.
WANG L F, LI J K, WU X X. Effect of silkworm pupa oil polyunsaturated fatty acids and α -linolenic acid on cholesterol metabolism in HepG2 cells[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2016, 38(4): 351-355, 360. (in Chinese)
- [60] LUO Y, WANG L F, LV Y Z, et al. Regulation mechanism of silkworm pupa oil PUFAs on cholesterol metabolism in hepatic cell L-02[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(4): 1418-1425.
- [61] 龙兴瑶. 蚕蛹油对消化系统炎症的预防作用及机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [62] LONG X Y, SONG J J, ZHAO X, et al. Silkworm pupa oil attenuates acetaminophen-induced acute liver injury by inhibiting oxidative stress-mediated NF- κ B signaling[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(1): 237-245.
- [63] LIAO A M, ZHANG J, THAKUR K, et al. Beneficial effects of silkworm (*Bombyx mori*) pupal oil on serum and hepatic lipid parameters in high fat diet fed rats[J]. Journal of Insects as Food and Feed, 2023, 9(1): 109-118.
- [64] NEVE N, VLAEMINCK B, GADEYNE F, et al. Promising perspectives for ruminal protection of

- polyunsaturated fatty acids through polyphenol-oxidase-mediated crosslinking of interfacial protein in emulsions [J]. *Animal*, 2018, 12(12):2539-2550.
- [65] LONG X Y, ZHAO X, WANG W, et al. Protective effect of silkworm pupa oil on hydrochloric acid/ethanol-induced gastric ulcers[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(6):2974-2986.
- [66] 周静, 曾艳, 杨柳, 等. 蚕蛹油对庆大霉素致大鼠肾脏损伤的保护作用[J]. *中国老年学杂志*, 2019, 39(2):391-394.
- ZHOU J, ZENG Y, YANG L, et al. Protective effect of silkworm chrysalis oil on renal injury induced by gentamicin in rats[J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2019, 39(2):391-394. (in Chinese)
- [67] RAMAPPA V K, SINGH V, SRIVASTAVA D, et al. Fabrication of mulberry leaf extract (MLE)-and tasar pupal oil (TPO)-loaded silk fibroin (SF) hydrogels and their antimicrobial properties [J]. *3 Biotech*, 2023, 13(2):37.
- [68] SAVIANE A, TASSONI L, NAVIGLIO D, et al. Mechanical processing of *Hermetia illucens* larvae and *Bombyx mori* pupae produces oils with antimicrobial activity[J]. *Animals*, 2021, 11(3):783.
- [69] 周亚西, 王点点, 段昊, 等. 蚕蛹的功能活性及其在保健食品中的应用进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(15):241-251.
- ZHOU Y X, WANG D D, DUAN H, et al. Functional activity of silkworm pupae and its application progress in health food in China [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(15):241-251. (in Chinese)
- [70] KARNJANAPRATUM S, KAEWTHONG P, INDRIANI S, et al. Characteristics and nutritional value of silkworm (*Bombyx mori*) pupae-fortified chicken bread spread [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):1492.
- [71] PATIL A R, JAGANMOHAN R, MEENATCHI R. Physio-chemical properties and oxidative stability of microencapsulated silkworm pupae oil enriched mayonnaise [J]. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2023, 13(4):176-183.
- [72] 刘隽彦, 李森, 孙继红. 一种蚕蛹 α -亚麻酸凝胶糖果及其生产工艺:CN110973328A[P]. 2020-04-10.
- [73] 苏忠. 一种能够降低血脂的蚕蛹油奶片:CN108094551A[P]. 2018-06-01.
- [74] 余方成, 叶六韬, 叶松柏. 一种促进婴儿生长发育的小球藻山茶油及其制备方法:CN106281644A[P]. 2017-01-04.
- [75] 孙强. 一种蚕蛹面条及其制备方法:CN105325868A[P]. 2016-02-17.
- [76] 吴祚生. 一种猴头菇贡糕的制备工艺:CN105029219A[P]. 2015-11-11.
- [77] 金海元, 刘刚, 王银生, 等. 一种鲫鱼补气蛋白粉饮品及制备方法:CN104188022A[P]. 2014-12-10.
- [78] 苗露, 郝再彬, 李霞, 等. 一种含蚕蛹蛋白肉饼的配方:CN103783110A[P]. 2014-05-14.
- [79] 苗露, 郝再彬, 李霞, 等. 一种含蚕蛹蛋白肉丸的配方:CN103783542A[P]. 2014-05-14.
- [80] 许正财. 一种盐霜玫瑰西瓜子及其制备方法:CN103549530A[P]. 2014-02-05.

(责任编辑:史润东东)