

油脂化学

天然抗氧化剂对裂壶藻油氧化稳定性影响的研究

荣 辉¹, 吴兵兵^{1,2}, 杨贤庆¹, 李来好^{1,3}, 陈胜军¹, 吴燕燕¹, 郝淑贤¹, 胡 晓¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 国家水产品加工技术研发中心, 农业部水产品加工重点实验室, 广州 510300; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 3. 广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300)

摘要:采用 Schaal 烘箱法, 以过氧化值和 DHA 含量变化为油脂氧化稳定性的评价指标, 研究 5 种天然抗氧化剂对裂壶藻油氧化稳定性的影响。从中选择 3 种较优的天然抗氧化剂按一定比例复配得到复配天然抗氧化剂, 并研究其对裂壶藻油氧化稳定性的影响。结果表明: 5 种抗氧化剂均能提高裂壶藻油的氧化稳定性, 其中维生素 E、迷迭香酸、茶多酚对裂壶藻油的氧化稳定性的提升较大; 3 种天然抗氧化剂复配配方为维生素 E 与迷迭香酸、茶多酚复配比例为 2:1:2 时对裂壶藻油的氧化稳定性的提升最大, 在此条件下 15 d 后裂壶藻油的过氧化值为 (30.25 ± 0.57) mmol/kg, 且该配比下 DHA 含量为 (3.32 ± 0.12) g/100 g, 油脂的过氧化值低, DHA 含量高, 品质较好。

关键词:天然抗氧化剂; 裂壶藻油; 氧化稳定性; DHA

中图分类号: TS201.2; TQ646 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2018)07-0023-05

Effects of natural antioxidants on oxidation stability of *Schizochytrium* sp. oil

RONG Hui¹, WU Bingbing^{1,2}, YANG Xianqing¹, LI Laihao^{1,3},
CHEN Shengjun¹, WU Yanyan¹, HAO Shuxian¹, HU Xiao¹

(1. Key Lab of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture, National Research and Development Center for Aquatic Product Processing, South China Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province, Guangzhou 510300, China)

Abstract: With peroxide value and DHA content as the evaluation indexes of oil oxidation stability, the effects of five kinds of natural antioxidants on the oxidation stability of *Schizochytrium* sp. oil were studied by Schaal oven method. Three kinds of natural antioxidants were selected and complexed, and the effects of the complex natural antioxidants on the oxidation stability of *Schizochytrium* sp. oil were studied. The results showed that the five kinds of natural antioxidants could improve the oxidation stability of *Schizochytrium* sp. oil, in which vitamin E, rosmarinic acid and tea polyphenol had better effect on oxidation stability improvement. The effect of complex natural antioxidant vitamin E, rosmarinic acid and tea polyphenol (mass ratio 2:1:2) was the highest, the peroxide value of *Schizochytrium* sp. oil was (30.25 ± 0.57) mmol/kg after 15 d, and the DHA content was (3.32 ± 0.12) g/100 g, so the quality of the *Schizochytrium* sp. oil was good with low peroxide value and high DHA content.

Abstract: With peroxide value and DHA content as the evaluation indexes of oil oxidation stability, the effects of five kinds of natural antioxidants on the oxidation stability of *Schizochytrium* sp. oil were studied by Schaal oven method. Three kinds of natural antioxidants were selected and complexed, and the effects of the complex natural antioxidants on the oxidation stability of *Schizochytrium* sp. oil were studied. The results showed that the five kinds of natural antioxidants could improve the oxidation stability of *Schizochytrium* sp. oil, in which vitamin E, rosmarinic acid and tea polyphenol had better effect on oxidation stability improvement. The effect of complex natural antioxidant vitamin E, rosmarinic acid and tea polyphenol (mass ratio 2:1:2) was the highest, the peroxide value of *Schizochytrium* sp. oil was (30.25 ± 0.57) mmol/kg after 15 d, and the DHA content was (3.32 ± 0.12) g/100 g, so the quality of the *Schizochytrium* sp. oil was good with low peroxide value and high DHA content.

Key words: natural antioxidant; *Schizochytrium* sp. oil; oxidation stability; DHA

收稿日期: 2017-10-12; 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 广东省科技计划项目(2014A010107019); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2014TS24); 农业部水产品加工重点实验室开放基金项目(NYJG201407); 国家重点研发计划项目-生物产业共性技术标准研究项目(2016YFF0202300); 广东省农业标准化专项资金项目: 微藻中 DHA/EPA 标准品制备研究

作者简介: 荣 辉(1981), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事微藻油的提取及多不饱和脂肪酸的分离纯化研究(E-mail) ronghui8915@163.com。

通信作者: 杨贤庆, 研究员(E-mail) yxqgd@163.com。

微藻是一种十分重要的生物资源, 富含脂肪酸、氨基酸、多糖等多种生物活性物质, 是生产食品、药

品、高价值生物活性物质和生物柴油的重要来源^[1-3]。目前关于高价值微藻的筛选及培养、活性物质的提取等成为了研究热点^[4-6]。裂壶藻(*Schizochytrium*)是破囊壶菌科的一种单细胞海洋微藻。裂壶藻富含油脂及多不饱和脂肪酸,其中油脂含量可高达40%以上^[7-8]。裂壶藻油成分简单,二十二碳六烯酸(DHA)含量较高。DHA是 $\omega-3$ 系长链不饱和脂肪酸,对人体神经系统及大脑具有十分重要的功能,有“脑黄金”之称,可以促进婴幼儿视力及脑部发育,促进婴幼儿智力发育及记忆学习能力提高^[9-10]。

裂壶藻油中含有丰富的不饱和脂肪酸,在存储运输以及加工过程中常发生不同程度的氧化变质。抗氧化剂分为合成抗氧化剂和天然抗氧化剂,合成抗氧化剂有BHT(二丁基羟基甲苯)、TBHQ(叔丁基对苯二酚),目前有研究表明合成抗氧化剂可能具有潜在的毒性和致癌作用,因此天然抗氧化剂逐渐受到人们的青睐^[11-13]。目前关于天然抗氧化剂的应用,已经涉及到各种食用油,如菜籽油^[14]、花生油^[15]、葵花籽油^[16]、核桃油^[17]等。但关于微藻油中天然抗氧化剂的应用研究较少。本研究依据GB 2760—2014《食品添加剂使用标准》对5种天然抗氧化剂对裂壶藻油的氧化稳定性的影响进行了研究,并对3种较优的天然抗氧化剂进行复配组合,以得到对裂壶藻油具有较好效果的天然抗氧化剂配方,并利用GC-MS对实验过程中的DHA含量的变化进行研究。

1 材料与方法

1.1 实验材料

裂壶藻油:实验室自己分离纯化的裂壶藻藻种培养后获得藻泥经真空冷冻干燥制得裂壶藻藻粉,采用水酶法从裂壶藻干藻粉中提取油脂。

没食子酸(AR)、植酸(BR)、维生素E(纯度>50%)、茶多酚(纯度>98%)、迷迭香酸(纯度>98%),广州华屿欣实验器材有限公司;冰乙酸、碘化钾、可溶性淀粉、正己烷、三氯甲烷、三氟化硼-甲醇溶液,均为分析纯;硫代硫酸钠标准溶液;十一烷酸分析标准品(纯度>99.5%)。

DHG-9145A 电热恒温鼓风干燥箱, HWS24 电热恒温水浴锅, BS 224S 电子天平(德国 Sartorius 科学仪器有限公司), GCMS-QP2010 气相色谱-质谱联用仪(日本岛津公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 裂壶藻油脂肪酸组成分析

1.2.1.1 甲酯化

取裂壶藻油 200 mg, 加入体积分数为 14% 三氟化硼-甲醇溶液 5 mL, 加入十一烷酸 5 mg 作为内标物, 在 60 °C 水浴的条件下甲酯化反应 30 min, 冷却至室温, 分别加入 1 mL 正己烷和蒸馏水, 振荡 1 min, 静置分层后, 吸取上层有机层, 挥干溶剂, 用正己烷定容, 过 0.22 μm 有机滤膜后, 用 GC-MS 进行分析测定。

1.2.1.2 脂肪酸的 GC-MS 分析

GC 条件: DB-5MS 色谱柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 230 °C; 升温程序为 110 °C 保持 4 min, 以 10 °C/min 升温到 160 °C, 保持 1 min, 最后以 5 °C/min 升到 240 °C, 保持 15 min; 载气为氦气, 流量为 1.52 mL/min; 采用恒线速度, 分流比为 1:50; 进样量 1 μL 。

MS 条件: 离子源温度 200 °C; 电子能量 70 eV; 质量扫描范围(m/z) 40 ~ 550; 溶剂切除时间 3 min。

1.2.2 油脂加速氧化实验

采用 Schaal 烘箱法。将含有一定浓度抗氧化剂的裂壶藻油样品置于电热恒温鼓风干燥箱中, 温度条件为(62 \pm 1) °C。每隔 1 d 取出振荡 1 次, 每次持续约 10 s, 并交换样品在烘箱中的位置, 定期取样测定其过氧化值, 以不添加任何抗氧化剂作为空白对照组。根据 Arrhenius 公式, 油脂在 Schaal 法中存放 1 d 相当于油脂在常温下 1 个月的保质期^[18]。

1.2.3 天然抗氧化剂对裂壶藻油氧化稳定性的影响

精确称取天然抗氧化剂, 加入 1 g 裂壶藻油, 搅拌溶解配制成裂壶藻油抗氧化剂高浓度样品。因迷迭香酸、茶多酚、植酸均是水溶性抗氧化剂不易溶解在油脂中, 在制作裂壶藻油抗氧化剂高浓度样品时应加入 10 g 裂壶藻油并充分振荡以保证其完全溶解; 且最终制得的抗氧化剂高浓度样品中含高浓度植酸的裂壶藻油颜色略淡。然后分别取 20 g 裂壶藻油装入样品瓶中, 按照 GB 2760—2014《食品添加剂使用标准》按照一定比例加入裂壶藻油抗氧化剂高浓度样品。表 1 为天然抗氧化剂单独添加量。

表 1 天然抗氧化剂的单独添加量 g/kg

天然抗氧化剂	GB 2760—2014 天然抗氧化剂的最大添加量	实验中天然抗氧化剂的添加量
茶多酚	0.4	0.4
迷迭香酸	0.7	0.7
没食子酸	0.1	0.1
维生素 E	0.2	0.2
植酸	0.2	0.2

采用 Schaal 烘箱法加速油脂氧化, 定期取样测

定过氧化值,不添加任何抗氧化剂作为空白对照组。

1.2.4 过氧化值的测定

按照 GB 5009.227—2016 执行。

1.2.5 DHA 含量的测定和换算

按照 GB 5009.168—2016 执行。

1.2.6 数据处理

每组做 3 次平行实验,取平均值。表格以及复

配实验结果图用 Excel 2010 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 裂壶藻油的 GC-MS 分析

裂壶藻油经甲酯化后进行 GC-MS 分析,根据 GC-MS 联用仪获得质谱信息经数据库检索与标准谱图对照,并采用面积归一法定量了各种脂肪酸的含量,结果如表 2 所示。

表 2 裂壶藻油脂肪酸组成及含量

脂肪酸	含量	脂肪酸	含量
十二烷酸	0.39	亚麻酸	1.47
十四碳烯酸	0.69	花生四烯酸	0.70
十四烷酸	8.67	二十二碳烷酸	0.20
十五烷酸	2.79	亚麻酸	0.51
十六碳烯酸	0.35	二十碳五烯酸	7.72
十六烷酸	42.48	二十二碳六烯酸	32.06
十七烷酸	0.68	饱和脂肪酸	55.42
硬脂酸	0.21	不饱和脂肪酸	43.80
油酸	0.30		

由表 2 可知,裂壶藻油中 DHA 占总脂肪酸含量的 32.06%, 不饱和脂肪酸占总脂肪酸含量的 43.80%。说明裂壶藻油的营养价值高。

2.2 不同天然抗氧化剂对裂壶藻油氧化稳定性的影响

影响

不同天然抗氧化剂对裂壶藻油的氧化稳定性的影响见表 3,不同天然抗氧化剂裂壶藻油中 DHA 含量变化见图 1。

表 3 添加不同天然抗氧化剂的裂壶藻油过氧化值的变化

储藏时间/d	过氧化值/(mmol/kg)					
	对照	没食子酸	维生素 E	迷迭香酸	茶多酚	植酸
0	1.28 ± 0.79	1.28 ± 0.79	1.28 ± 0.79	1.28 ± 0.79	1.28 ± 0.79	1.28 ± 0.79
3	17.96 ± 0.82	11.79 ± 0.77	11.27 ± 0.67	9.37 ± 0.86	10.75 ± 0.63	12.58 ± 0.73
6	23.85 ± 1.07	19.21 ± 0.95	18.62 ± 0.73	15.84 ± 0.61	17.52 ± 0.67	20.71 ± 0.89
9	30.74 ± 1.14	25.34 ± 0.84	24.71 ± 0.55	21.36 ± 0.73	23.15 ± 0.91	27.43 ± 1.07
12	42.91 ± 0.86	31.64 ± 1.13	30.12 ± 0.71	26.54 ± 1.16	28.11 ± 0.71	33.48 ± 0.78
15	58.87 ± 1.23	37.42 ± 0.78	36.41 ± 1.16	33.12 ± 0.86	35.53 ± 1.16	40.59 ± 0.69

由表 3 可知,在强制氧化的情况下,无论是否添加抗氧化剂,裂壶藻油的过氧化值均随着储藏时间的延长而增加。在进行实验的 15 d 中,5 种天然抗氧化剂均对裂壶藻油有一定的抗氧化作用,抗氧化能力高低顺序为:迷迭香酸 > 茶多酚 > 维生素 E > 没食子酸 > 植酸。通过图 1 中 DHA 含量的变化可知,在整个实验过程中,DHA 含量不断减少。最终实验结束添加不同天然抗氧化剂的裂壶藻油 DHA 含量从高到低顺序为:迷迭香酸 > 茶多酚 > 维生素 E > 没食子酸 > 植酸,与过氧化值的分析相符合。天然抗氧化剂的结构有相似之处,如含有芳香环结构且至少含有一个羟基等。天然抗氧化剂的作用机理主要有自由基终止剂,还原剂,螯合剂,单旋态氧抑制剂。本研究所选用的没食子酸、茶多酚、迷迭香酸、维生素 E 等含有酚类结构,属于自由基终止剂,

植酸为螯合剂,本研究的目的是为延缓裂壶藻油的氧化。因此,自由基终止剂的抗氧化作用较好,本实验结果也表明植酸的抗氧化效果相对较差,符合本实验目的以及之前相关的研究结论^[19-20]。所以,本实验选择迷迭香酸、茶多酚、维生素 E 进行复配,进行下一步实验。

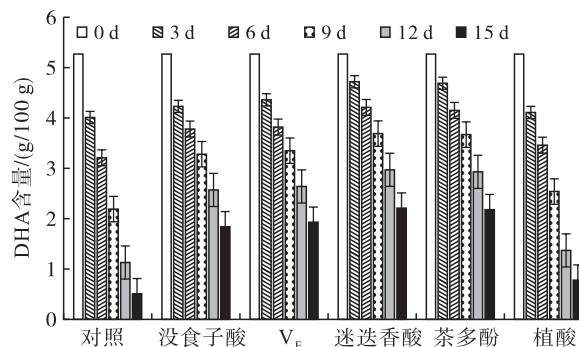


图 1 添加不同天然抗氧化剂的裂壶藻油 DHA 含量的变化

2.3 复配天然抗氧化剂对裂壶藻油氧化稳定性的影响

为找到最优的复配配方,以茶多酚、迷迭香酸、维生素 E 为研究对象,按表 4 的比例制得复配天然抗氧化剂,且抗氧化剂使用时各自用量占其最大使用量的比例之和不超过 1^[21],且配方中比例 1 指 0.1 g/kg。采用 Schaal 烘箱法加速油脂氧化,定期取样测定过氧化值,结果见表 5,不同复配天然抗氧化剂裂壶藻油 DHA 含量变化见图 2。由表 5 可知,7 种复配天然抗氧化剂对裂壶藻油均有一定的抗氧化作用,抗氧化能力的高低顺序为 G(维生素 E、迷迭香酸、茶多酚 2:1:2) > E(维生素 E、迷迭香酸、茶多酚 2:2:1) > D(维生素 E、迷迭香酸、茶多酚 2:1:1) > A(维生素 E、迷迭香酸、茶多酚 1:1:1) > C(维生素 E、迷迭香酸、茶多酚 1:2:1) > B(维生素 E、迷迭香酸、茶多酚 1:1:2) > F(维生素 E、迷迭香酸、茶多酚

1:2:2)。由单一天然抗氧化剂的实验可知迷迭香酸和茶多酚的抗氧化效果较好,但提升并不是特别明显,复配后配方 G 抗氧化效果相对于单一抗氧化剂提升较为显著。由图 2 可知,在实验过程中 DHA 含量均减少,其中配方 G 的 DHA 的氧化速度最慢,15 d 时 DHA 含量为(3.32 ± 0.12) g/100 g,这与过氧化值的分析相符合。

表 4 复配天然抗氧化剂配方

配方	维生素 E	迷迭香酸	茶多酚
A	1	1	1
B	1	1	2
C	1	2	1
D	2	1	1
E	2	2	1
F	1	2	2
G	2	1	2

表 5 添加不同复配天然抗氧化剂的裂壶藻油过氧化值的变化

储藏时间/d	过氧化值/(mmol/kg)								
	对照	A	B	C	D	E	F	G	
0	1.34 ± 0.97	1.34 ± 0.97	1.34 ± 0.97	1.34 ± 0.97	1.34 ± 0.97	1.34 ± 0.97	1.34 ± 0.97	1.34 ± 0.97	1.34 ± 0.07
3	18.97 ± 0.81	7.88 ± 0.69	9.03 ± 0.64	8.59 ± 0.82	7.16 ± 0.82	6.79 ± 0.84	9.95 ± 0.89	6.38 ± 0.76	
6	25.50 ± 1.13	14.17 ± 1.02	17.21 ± 1.21	15.38 ± 0.76	13.21 ± 0.98	11.75 ± 0.75	17.89 ± 0.99	11.12 ± 0.82	
9	34.50 ± 1.38	21.50 ± 1.05	25.25 ± 0.83	22.35 ± 1.14	19.36 ± 0.74	16.87 ± 1.21	26.03 ± 1.27	16.15 ± 0.77	
12	43.75 ± 1.05	28.79 ± 0.86	32.75 ± 0.79	30.50 ± 0.95	26.25 ± 0.87	24.25 ± 0.83	36.03 ± 1.18	23.08 ± 0.61	
15	59.50 ± 1.24	36.98 ± 1.31	39.28 ± 1.14	38.75 ± 1.17	33.37 ± 1.13	31.75 ± 1.04	45.75 ± 0.86	30.25 ± 0.57	

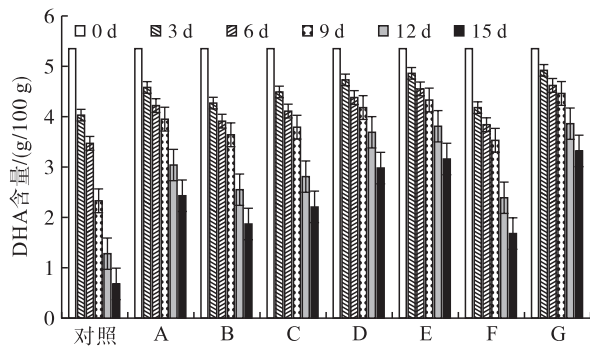


图 2 添加不同复配天然抗氧化剂的裂壶藻油 DHA 含量的变化

3 结论

本文研究了天然抗氧化剂对裂壶藻油的氧化稳定性的影响,结果表明天然抗氧化剂对裂壶藻油都有一定的抗氧化作用,其中迷迭香酸、维生素 E、茶多酚效果较好,对其进行复配,复配比例为维生素 E、迷迭香酸、茶多酚 2:1:2 时裂壶藻油氧化速度最慢,15 d 后过氧化值为(30.25 ± 0.57) mmol/kg。且该配比下 DHA 含量最终为(3.32 ± 0.12) g/100 g。该配比条件下裂壶藻油氧化速度最慢,DHA 氧化量最少,对于裂壶藻油的储存以及运输都有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] SPOLAORE P, JOANNIS - CASSAN C, DURAN E, et al. Commercial applications of microalgae [J]. J Appl Phys, 2006, 101(2): 87 - 96.
- [2] CHENG J, HUANG R, YU T, et al. Biodiesel production from lipids in wet microalgae with microwave irradiation biocrude production from algal residue through hydrothermal liquefaction [J]. Biol Technol, 2014, 151(1): 415 - 418.
- [3] 王蒙, 李纯厚, 戴明, 等. 以海洋微藻为原料提取生物燃料的研究进展与发展趋势 [J]. 南方水产, 2009, 5(2): 74 - 80.
- [4] 杨勋, 郝宗娣, 张森, 等. 营养元素和 pH 对若夫小球藻生长和油脂积累的影响 [J]. 南方水产科学, 2013(4): 33 - 38.
- [5] 刘平怀, 杨勋, 郝宗娣, 等. 产油微藻的分离鉴定及营养方式对其油脂积累的影响 [J]. 南方水产科学, 2013(6): 27 - 32.
- [6] KUMAR G, RICHA S, JAI G S, et al. Molasses - based growth and lipid production by *Chlorella pyrenoidosa*: a potential feedstock for biodiesel [J]. Int J Green Energy, 2016, 13(3): 320 - 327.

(下转第 31 页)

- 1 - 10.
- [5] YAN Y, WANG X, LIU Y, et al. Combined urea - thin layer chromatography and silver nitrate - thin layer chromatography for micro separation and determination of hard - to - detect branched chain fatty acids in natural lipids[J]. *J Chromatogr A*, 2015, 1425: 293 - 301.
- [6] YAN Y, WANG Z, GREENWALD J, et al. BCFA suppresses LPS induced IL - 8 mRNA expression in human intestinal epithelial cells[J]. *Prostaglandins Leukotrienes Essent Fatty Acids*, 2017, 116: 27 - 31.
- [7] YOSHIO H, TOLLIN M, GUDMUNDSSON G H, et al. Antimicrobial polypeptides of human vernix caseosa and amniotic fluid: implications for newborn innate defense[J]. *Pediatr Res*, 2003, 53(2): 211 - 216.
- [8] RAN R R, GLAHN R P, BAE S E, et al. Branched - chain fatty acids in the neonatal gut and estimated dietary intake in infancy and adulthood[J]. *Nestle Nutr Inst Workshop Ser*, 2013, 77: 133 - 143.
- [9] YAO L, HAMMOND E G. Isolation and melting properties of branched - chain esters from lanolin[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2006, 83: 547 - 552.
- [10] 国家药典委员会. 中国药典: 二部[J]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- [11] MIKOA R, VRKOSLAV V, HANUS R, et al. Newborn boys and girls differ in the lipid composition of vernix caseosa[J]. *PloS One*, 2014, 9(6): e99173.
- [12] STRANSKY K, JURSIK T. Simple quantitative transesterification of lipids 1. Introduction[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 1996, 98(2): 65 - 71.
- [13] BARNES C S, CURTIS R G, HATT H H. The saponification of wool wax and the recovery of the wax alcohols. Study in waxes. Part IV[J]. *J Appl Sci*, 1952, 3: 88 - 99.
- [14] DOWNING D T, KRANZ Z H, MURRAY K E. Studies in waxes. XIV. An investigation of the aliphatic constituents of hydrolysed wool wax by gas chromatography[J]. *Aust J Chem*, 1960, 13(1): 80 - 94.
- [15] 张珏, 华聘聘. 羊毛酸的提取[J]. *中国油脂*, 2000, 25(3): 56 - 58.
- [16] RISSMANN R, GROENINK H W W, WEERHEIM A M, et al. New insights into ultrastructure, lipid composition and organization of vernix caseosa[J]. *J Invest Dermatol*, 2006, 126(8): 1823 - 1833.
- [17] NARENDEN V, WICKETT R R, PICKENS W L, et al. Interaction between pulmonary surfactant and vernix: a potential mechanism for induction of amniotic fluid turbidity[J]. *Pediatr Res*, 2000, 48(1): 120 - 124.
- [18] YANG Z H, LIU S P, CHEN X D, et al. Induction of apoptotic cell death and in vivo growth inhibition of human cancer cells by a saturated branched - chain fatty acid, 13 - methyltetradecanoic acid[J]. *Adv Cancer Res*, 2000, 60: 505 - 509.
-
- (上接第 26 页)
- [7] 吕小义, 尹佳, 付杰, 等. 裂壶藻营养特性及其积累 DHA 的研究[J]. *食品工业*, 2016, 37(1): 222 - 225.
- [8] 武琼. 裂壶藻蛋白源抗氧化肽的制备分离及稳定性研究[D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2016.
- [9] KOLETZKO B. N - 3 fatty acids and pregnancy outcomes[J]. *Curr Opin Clin Nutr Metabolic Care*, 2005, 8(2): 161 - 166.
- [10] SMIT E N, OELEN E A, SEERAT E, et al. Breast milk docosahexaenoic acid (DHA) correlates with DHA status of malnourished infants[J]. *Arch Dis Child*, 2000, 82(6): 493 - 494.
- [11] OKEZIE I. Aroma assessment of potential prooxidant and antioxidant actions[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1996, 73(12): 1617 - 1625.
- [12] WHYSNER J, WANG C X, ZANG E, et al. Dose response of promotion by butylated hydroxyanisole in chemically initiated tumours of the rat forestomach[J]. *Food Chem Toxicol*, 1994, 32(3): 215 - 222.
- [13] 高原菊. 天然抗氧化剂对牡丹籽油氧化稳定性的影响[J]. *食品与机械*, 2014, 32(6): 153 - 155.
- [14] 李杰, 赵声兰, 陈朝银. 食用油天然抗氧化剂的研究与开发[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(2): 373 - 378.
- [15] 黄克, 崔春, 赵谋明, 等. 天然抗氧化剂的增效作用及其对花生油抗氧化效果研究[J]. *现代食品科技*, 2012, 28(9): 1139 - 1141.
- [16] 翟柱成, 吴克刚, 柴向华, 等. 天然抗氧化剂对葵花籽油抗氧化作用的研究[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(3): 148 - 150.
- [17] 周旭. 几种油溶性天然抗氧化剂在核桃油、葡萄籽油中的应用研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(3): 64 - 68.
- [18] 张桂雨. 裂殖壶菌 *Schizochytrium limacinum* 单细胞油脂的氧化稳定性及分离纯化[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2013.
- [19] 韩淑琴, 杜玉兰, 李志锐. 天然抗氧化剂在食用油中的应用与研究[J]. *保鲜与加工*, 2016, 16(3): 71 - 74.
- [20] 王茜茜, 袁建, 王立峰, 等. 三种天然抗氧化剂对菜籽油储藏稳定性影响的研究[J]. *中国油脂*, 2013, 38(1): 60 - 63.
- [21] 盛雪飞, 彭燕, 陈健初. 天然抗氧化剂之间的协同作用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(7): 414 - 421.