DOI:10.12441/spyswjs.20230414003 [文章编号] 1673-1689(2025)06-0089-08

天然抗氧化剂及其衍生物对鳀鱼油的抗氧化作用研究

丁旭洋[1] 刘富俊[2] 阴法文[1,3,4,5*] 周大勇[1,3,4,5]

(1. 大连工业大学食品学院,辽宁 大连 116034; 2. 辽渔集团有限公司,辽宁 大连 116113; 3. 大连工业大学海洋食品加工与安全控制全国重点实验室,辽宁 大连 116034; 4. 大连工业大学国家海洋食品工程技术研究中心,辽宁 大连 116034; 5. 大连工业大学辽宁省海洋食品科学与技术重点实验室,辽宁 大连 116034)

摘要:【目的】评价和提升天然抗氧化剂及其衍生物对鳀鱼油的抗氧化作用。**【方法】**采用 60 ℃加速氧化模型,研究了植酸、茶多酚(tea polyphenol,TP)、迷迭香提取物、抗坏血酸棕榈酸酯、维生素 E、茶多酚棕榈酸酯(tea polyphenol palmitate,TPP)和竹叶提取物这 7 种天然抗氧化剂及其衍生物对鳀鱼油样品过氧化值(peroxide value,POV)、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid reactive substances,TBARS)值、自由基信号相对强度和脂肪酸组成等指标的影响。**【结果】**单一抗氧化剂 TPP 和复合抗氧化剂 TPP+TP 对鳀鱼油的抗氧化作用最强。**【结论】**虽然 TPP+TP 的抗氧化效果稍弱于 TPP,但由于 TP 的价格更低,通过抗氧化剂复配可以有效降低鳀鱼油加工和贮存期间的成本。该研究对鳀鱼油及其制品的实际生产具有重要意义。

关键词:抗氧化剂;茶多酚;茶多酚棕榈酸酯;鳀鱼油;抗氧化作用

Study on the Antioxidant Effects of Natural Antioxidants and Their Derivatives on Anchovy (*Engraulis japonicus*) Oil

DING Xuyang[1] *LIU Fujun*[2] *YIN Fawen*[1,3,4,5*] *ZHOU Dayong*[1,3,4,5]

(1. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 2. Liaoyu Group Limited Company, Dalian 116113, China; 3. State Key Laboratory of Marine Food Processing and Safety Control, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 4. National Engineering Research Center of Seafood, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 5. Liaoning Province Key Laboratory for Marine Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: [**Objective**] The aim of this study is to evaluate and improve the antioxidant effects of natural antioxidants and their derivatives on anchovy (*Engraulis japonicus*) oil. [**Method**] The 60 ℃ accelerated oxidation model was used to evaluate the antioxidant effects of phytic acid, tea polyphenols (TP), rosemary extract, ascorbyl palmitate, vitamin E, tea polyphenol palmitate (TPP), and bamboo leaf extract on anchovy oil based on the peroxide value (POV), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value, relative intensity of free radicals, and fatty acid composition. [**Result**] TPP (single antioxidant) and TPP+TP (composite antioxidant) demonstrated the strongest antioxidant effects on anchovy oil. [**Conclusion**] Although the antioxidant effect of TPP+TP is slightly weaker than that of TPP, because of the lower price of TP, the production cost during anchovy oil processing and storage can be effectively reduced by the combination of TPP and TP. The findings are of great significance to the actual production of anchovy oil and its products.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(32230080);大连市科技创新基金计划项目(2022JJ11CG008)。

通信作者:阴法文(1988—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事海洋油脂抗氧化研究。E-mail: yinfawen198@126.com

收稿日期:2023-04-14 **修回日期:**2023-05-04

Keywords: antioxidants; tea polyphenol; tea polyphenol palmitate; anchovy oil; antioxidant effect

在加工和流通过程中，鲣鱼油及相关制品因富含二十碳五烯酸（eicosapentaenoic acid，EPA）和二十二碳六烯酸（docosahexaenoic acid，DHA）等 ω-3 多不饱和脂肪酸（ω-3 polyunsaturated fatty acid，ω-3 PUFA），对氧气、热和光都较为敏感，易发生酮型酸败、氧化酸败和水解酸败[1]。其中，氧化酸败是导致鱼油酸败的主要原因，使其产生令人不愉快的气味。氧化酸败的方式主要包括自动氧化、酶促氧化和光敏氧化。自动氧化是油脂主要的氧化方式[2]，包括诱导、传递、终止 3 个阶段。自动氧化终止时生成的双聚物具有不稳定性，能够进一步分解或聚合产生醛、酸、酮、醇等不良化学物质[3]。

为有效保持和提升鱼油品质，添加抗氧化剂已成为鱼油抗氧化领域的研究重点和热点。近年来，随着合成抗氧化剂的副作用被证实[4]，天然抗氧化物质（多酚等）或其衍生物已被作为抗氧化剂添加到鱼油中。为了进一步提升抗氧化效果，可以将具有不同抗氧化机制的多种抗氧化剂组合加到油脂及其制品中，以发挥不同抗氧化剂的协同作用[5]。吕军伟等[6]基于 POV、TBARS 值和 DHA 含量的检测发现，组合使用维生素 E、迷迭香提取物和抗坏血酸棕榈酸酯可更有效提升 DHA 藻油的氧化稳定性。

作者采用油脂加速氧化模型，通过分析 POV、TBARS 值、自由基信号相对强度和脂肪酸组成等指标，从植酸、TP、迷迭香提取物、抗坏血酸棕榈酸酯、维生素 E、TPP 和竹叶提取物共 7 种天然抗氧化物及其衍生物中筛选出抗氧化能力最强的单一抗氧化剂。同时，将其与其他抗氧化物混合形成复合抗氧化剂，筛选出抗氧化能力最强的复合抗氧化剂。进一步比较这 2 种抗氧化剂对加速氧化鲣鱼油氧化稳定性的影响，为鲣鱼油加工和贮藏过程的品质提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

产自秘鲁的鲣鱼的粗制鲣鱼油：秘鲁 Tecnoiogica Da Alimeotos.S.A 公司；植酸、抗坏血酸棕榈酸酯、维生素 E：上海阿拉丁生化科技股份有限公司；TP：建明（中国）科技有限公司；迷迭香提取物：山东中森生物技术有限公司；TPP：广州市升彤贸易有限公司；竹叶提取物：江苏艾康生物医药研发有限公司。

1.2 仪器与设备

电热恒温干燥箱：HWS-24 型，上海一恒科学仪器有限公司；高速冷冻离心机：CF16RN 型，日本日立集团；气相色谱仪：Agilent 7890B GC-5977A 型，美国 Agilent 公司；旋转蒸发仪：SY-2000 型，上海亚荣生化仪器公司；酶标定量测定仪：Infinite200 NANO 型，瑞士 Tecan 公司；电子顺磁共振波谱仪：Bruker ER 4122SHQE 型，瑞士 Bruker 公司。

1.3 方法

1.3.1 加速氧化鲣鱼油样品的制备

制备 8 个试验组样品用于加速氧化鲣鱼油。其中，第 1 组是不含任何抗氧化剂的对照组鲣鱼油样品；第 2~8 组分别是添加植酸、TP、迷迭香提取物、抗坏血酸棕榈酸酯、维生素 E、TPP、竹叶提取物的鲣鱼油样品，参照 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》[7]中规定的最大添加量添加抗氧化剂，见表 1。

表 1 抗氧化剂的添加量

Table 1 Addition amounts of antioxidants

抗氧化剂	添加质量分数/（mg/kg）
植酸	200
TP	600
迷迭香提取物	700
抗坏血酸棕榈酸酯	200
维生素 E	400
TPP	600
竹叶提取物	500

将上述鲣鱼油样品置于 60 ℃烘箱中加速氧化，每 2 d 取样一次，直至第 6 天。通过检测 POV、TBARS 值、自由基信号相对强度，评价单一抗氧化剂对加速氧化鲣鱼油样品的抗氧化作用。

将抗氧化效果最佳的单一抗氧化剂分别与其他 6 种抗氧化剂复配，组成复合抗氧化剂，每种抗氧化剂的添加量均为国家标准规定的最大添加量的一半。参照上述试验步骤，评价复合抗氧化剂对加速氧化鲣鱼油样品的抗氧化作用。

1.3.2 POV的测定

参考GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》[8]中的方法检测POV。准确称取2.0 g鲳鱼油溶于30 mL氯仿-冰醋酸混合溶液（体积比2∶3）中，充分溶解后加入1 mL的1 g/mL淀粉指示剂和1 mL饱和碘化钾溶液。手动摇晃30 s，避光反应3 min，再加入100 mL去离子水。用2 mmol/L硫代硫酸钠标准溶液进行滴定，直至液体颜色完全消失，记录消耗的硫代硫酸钠标准溶液的体积。不添加鲳鱼油的空白试剂采用相同方法进行滴定，记录消耗的硫代硫酸钠标准溶液的体积。按照式（1）计算POV。

$$P_{OV}=\frac{(V-V_0)\times c\times 1\,000}{2\times m} \quad (1)$$

式中：

P_{OV}——POV，mmol/kg；

V——滴定鲳鱼油样品时消耗的硫代硫酸钠标准溶液体积，mL；

V_0——滴定空白试剂时消耗的硫代硫酸钠标准溶液体积，mL；

c——硫代硫酸钠标准溶液的浓度，mmol/L；

2——硫代硫酸钠和活性氧之间的转换系数；

m——鲳鱼油质量，g；

1 000——物质的量由摩尔折算为毫摩尔的换算系数。

1.3.3 TBARS值的测定

参照John等[9]的方法并稍加修改，检测鲳鱼油的TBARS值。准确称取0.1 g鲳鱼油与1 mL氯仿-乙醇溶液（体积比1∶1）混合，涡旋振荡，与2.5 mL混合溶剂充分混匀，混合溶剂为0.375 g/mL 2-硫代巴比妥酸（TBA）、15 g/mL三氯乙酸和10 mol/L盐酸。将上述溶液置于沸水浴中加热10 min，此时溶液呈现粉红色。取出后冷却至室温，于2 500 r/min离心10 min，吸取部分上清液于96孔板中，用酶标仪于532 nm处测定吸光度。将丙二醛浓度按照式（2）转换为TBARS值。

$$T_{BARS}=A_{532}\times 2.77 \quad (2)$$

式中：

T_{BARS}——TBARS值，mg/kg；

A_{532}——反应混合物在532 nm处的吸光度；

2.77——丙二醛浓度转换为TBARS值的转换系数，mg/kg。

1.3.4 自由基信号相对强度的测定

参照Chen等[10]的方法并稍加修改，检测鲳鱼油的自由基信号相对强度。将2 mL添加抗氧化剂的鲳鱼油样品和200 μL的56.40 mmol/L α-（4-吡啶基-1-氧）-N-叔丁基硝基酮（POBN）捕获剂加到5 mL的EP管中，置于100 ℃烘箱中加速氧化4 h。量取200 μL加速氧化样品于0.1 mm毛细管中，用电子顺磁共振波谱仪进行自由基信号扫描，监测POBN自由基信号的生成。扫描参数为：场调制频率100 kHz，调制幅度1×10^{-4} T，接收器增益30 dB，时间常数0.01 ms，转换时间40.96 ms，磁场中心强度0.335 T，扫描宽度0.1 T，X波段频率9.42 GHz，功率20 mW。

1.3.5 脂肪酸组成的测定

参照GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》[11]的方法，处理需要分析的鲳鱼油样品。称取5 mg鲳鱼油样品于10 mL圆底烧瓶中，加入200 μL的1 g/mL十一碳酸甘油三酯内标溶液和2 mL的2 g/mL NaOH水溶液，充分混合后于80 ℃条件下回流反应5 min，从回流冷凝器的上部加入2 mL体积分数14%的三氟化硼-甲醇溶液，继续回流2 min。停止加热后，将烧瓶取出并冷却至室温，加入1.5 mL正己烷，磁力搅拌10~20 s。再于4 ℃下以4 000 r/min离心1 min。收集含有脂肪酸甲酯的上层液体，转移至底部覆盖了无水硫酸钠的小瓶中，使用0.22 μm滤膜过滤后上样。

采用气相色谱进行脂肪酸的测定，具体参数为：初始温度100 ℃，保持13 min；以10 ℃/min的速率升温至180 ℃，保持6 min；以1 ℃/min的速率升温至215 ℃，保持20 min；以5 ℃/min的速率升温至230 ℃，保持12 min；载气为氮气，燃气为氢气和空气；进样口温度为270 ℃；检测器温度为280 ℃；采用分流进样，分流体积比为5∶1，进样量为1 μL。采用峰面积归一化法测定各脂肪酸的相对含量。

1.3.6 统计分析

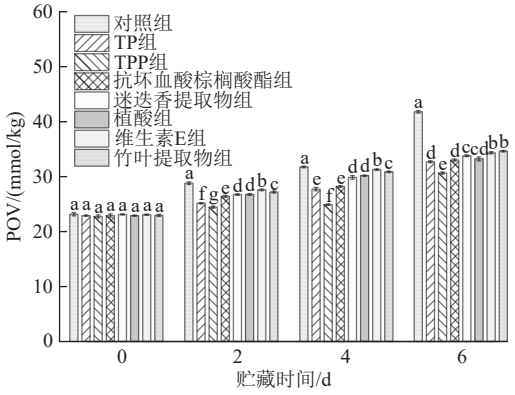
所有试验均重复测定3次，用Microsoft Excel 2016软件对试验数据进行整理，用Origin 9.1软件绘图。用SPSS 24.0软件的ANOVA法对数据进行差异性和相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 单一抗氧化剂对加速氧化鲢鱼油的抗氧化作用

2.1.1 单一抗氧化剂对鲢鱼油POV的影响

POV测定的是油脂中的氢过氧化物，是油脂的初级氧化产物，常被用来评价油脂的初级氧化程度[12]。在加速氧化过程中，添加不同单一抗氧化剂的鲢鱼油样品的POV的变化见图1。结果表明，所有单一抗氧化剂均能有效抑制初级氧化产物的生成。相较于对照组，TPP对初级氧化反应的抑制作用最强。60 ℃加速氧化6 d后，对照组、TP组、TPP组、抗坏血酸棕榈酸酯组、迷迭香提取物组、植酸组、维生素E组和竹叶提取物组鲢鱼油样品的POV分别为（41.78±0.21）、（32.70±0.16）、（30.64±0.19）、（32.99±0.19）、（33.78±0.15）、（33.23±0.36）、（34.33±0.19）、（34.62±0.13）mmol/kg。金清馨[13]研究了维生素E、葡萄籽提取物、二丁基羟基甲苯（BHT）、特丁基对苯二酚（TBHQ）、TP、TPP、抗坏血酸棕榈酸酯、迷迭香提取物这8种抗氧化剂对栀子果油氧化稳定性的影响，其抗氧化效果排序为：TPP>TBHQ>TP>迷迭香提取物>抗坏血酸棕榈酸酯>BHT>葡萄籽提取物>维生素E，与本研究结果一致。



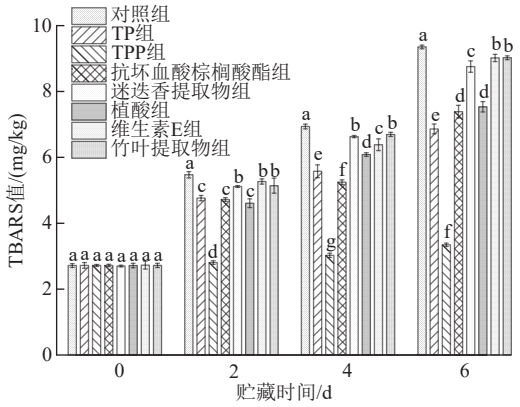
不同字母代表相同贮藏时间的样品之间存在显著性差异（P<0.05）。

图1 单一抗氧化剂对POV的影响

Fig. 1 Effects of single antioxidants on POV

2.1.2 单一抗氧化剂对TBARS值的影响

TBARS值反映的是油脂中的丙二醛水平，丙二醛是油脂的次级氧化产物，用来评价油脂的次级氧化程度[14]。在加速氧化过程中，添加不同单一抗氧化剂鲢鱼油样品的TBARS值的变化见图2。结果表明，所有单一抗氧化剂均能有效抑制次级氧化产物的生成。相较于对照组，TPP抑制鲢鱼油次级氧化反应的效果最佳。60 ℃加速氧化6 d后，对照组、TP组、TPP组、抗坏血酸棕榈酸酯组、迷迭香提取物组、植酸组、维生素E组和竹叶提取物组的鲢鱼油样品的TBARS值分别为（9.35±0.05）、（6.86±0.15）、（3.34±0.05）、（7.39±0.19）、（8.75±0.17）、（7.53±0.16）、（9.01±0.11）、（9.02±0.06）mg/kg。张媛媛等[15]研究发现，在牡丹籽油中添加质量分数0.02%的TPP，其抑制丙二醛生成的能力显著优于抗坏血酸棕榈酸酯、维生素E和β-胡萝卜素，与本研究结果一致。



不同字母代表相同贮藏时间的样品之间存在显著性差异（P<0.05）。

图2 单一抗氧化剂对TBARS值的影响

Fig. 2 Effects of single antioxidants on TBARS value

2.1.3 单一抗氧化剂对鲢鱼油自由基信号的影响

在油脂自动氧化过程中，EPA和DHA等不饱和脂肪酸失去一个氢原子形成不稳定的脂质烷基自由基，再与氧快速反应形成过氧自由基。该过氧自由基可以从另一个不饱和脂肪酸夺取烯丙位氢原子，形成氢过氧化物。另一个脂肪酸又形成新的脂质烷基自由基，继续进行自由基链式反应[16]。因此，自由基信号相对强度可以反映鲢鱼油的氧化程度。在加速氧化过程中，添加不同单一抗氧化剂鲢鱼油样品的自由基信号相对强度见图3。结果表明，热诱导4 h后，所有单一抗氧化剂均能有效抑制加速氧化过程中自由基的生成。相较于对照组，TPP抑制自由基生成的效果更好。油脂自动氧化通常是自由基链式反应，不饱和脂肪酸受到外界影响后会产生烷基自由基，可在空气中氧气的作用下转变为烷过氧自由基。烷过氧自由基不稳定，会结合氢原子来形成氢过氧化物。

而TPP含有大量的酚羟基，可以有效清除油脂中产生的烷氧自由基，达到抗氧化的效果[17]。类似地，Zhao等[18]研究发现，多酚及其衍生物（如TPP、没食子酸辛酯等）具有良好的抗氧化活性，可以有效减少自由基的生成，这是由于酚羟基可以有效阻止自由基的形成或中断它们的传播。

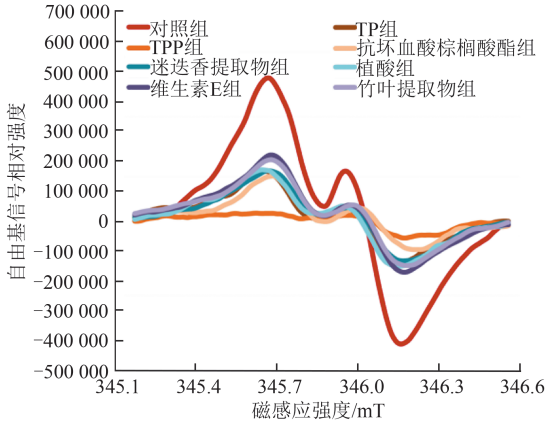


图3　单一抗氧化剂对自由基信号相对强度的影响

Fig. 3　Effects of single antioxidants on the relative intensity of free radicals

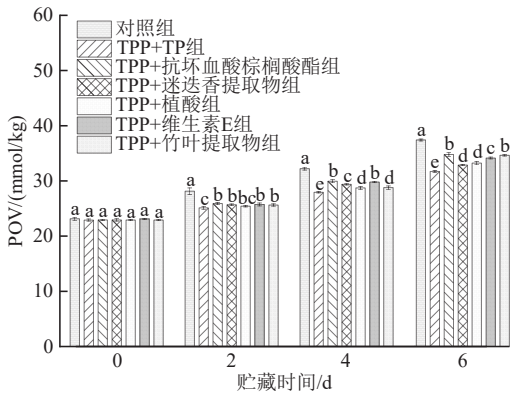
2.2　复合抗氧化剂对加速氧化鲢鱼油的抗氧化作用

2.2.1　复合抗氧化剂对鲢鱼油POV的影响

在加速氧化过程中，添加不同复合抗氧化剂鲢鱼油样品的POV的变化见图4。结果表明，所有复合抗氧化剂均能有效抑制初级氧化产物的生成。相较于对照组，TPP+TP组对初级氧化反应的抑制作用最强。60 ℃加速氧化6 d后，对照组、TPP+TP组、TPP+抗坏血酸棕榈酸酯组、TPP+迷迭香提取物组、TPP+植酸组、TPP+维生素E组、TPP+竹叶提取物组的POV分别为（37.41±0.18）、（31.71±0.17）、（34.78±0.33）、（32.86±0.11）、（33.22±0.31）、（34.15±0.16）、（34.63±0.13）mmol/kg。

2.2.2　复合抗氧化剂对鲢鱼油TBARS值的影响

在加速氧化过程中，添加不同复合抗氧化剂鲢鱼油样品的TBARS值见图5。经过加速氧化试验发现，添加复合抗氧化剂可有效抑制加速氧化鲢鱼油中次级氧化产物的生成。相较于对照组，TPP+TP组抑制鲢鱼油次级氧化反应的效果最佳。60 ℃加速氧化6 d后，对照组、TPP+TP组、TPP+抗坏血酸棕榈酸酯组、TPP+迷迭香提取物组、TPP+植酸组、TPP+维生素E组、TPP+竹叶提取物组的TBARS值分别为（8.63±0.07）、（5.29±0.05）、（7.59±0.02）、（6.41±0.02）、（5.49±0.03）、（8.04±0.04）、（8.15±0.05）mg/kg。

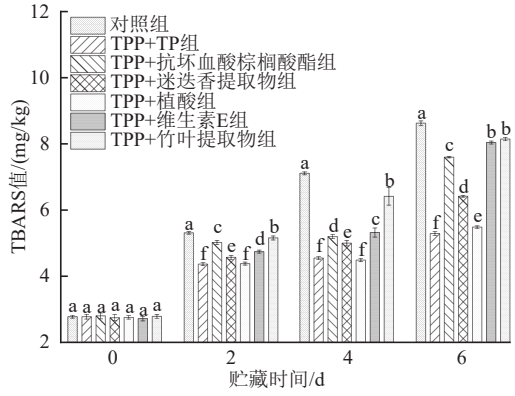


不同字母代表相同贮藏时间的样品之间存在显著性差异（P<0.05）。

图4　复合抗氧化剂对POV的影响

Fig. 4　Effects of composite antioxidants on POV

Pei等[19]比较了TPP与其他抗氧化剂（抗坏血酸棕榈酸酯、植酸、维生素E、竹叶抗氧化物、迷迭香提取物和TP）复配形成的二元复合抗氧化剂对60 ℃加速氧化DHA藻油的氧化稳定性的影响，结果表明添加复合抗氧化剂TPP和TP的试验组的TBARS值更低，表明该复合抗氧化剂可有效提升加速氧化过程中DHA藻油的氧化稳定性。此外，Wang等[20]也发现，TPP与TP组合可有效抑制南极磷虾油在提取过程中的氧化。



不同字母代表相同贮藏时间的样品之间存在显著性差异（P<0.05）。

图5　复合抗氧化剂对TBARS值的影响

Fig. 5　Effects of composite antioxidants on TBARS value

2.2.3　复合抗氧化剂对鲢鱼油自由基信号相对强度的影响

在加速氧化过程中，添加不同复合抗氧化剂鲢鱼油样品的自由基信号相对强度见图6。结果

表明，热诱导 4 h 后，所有复合抗氧化剂均能有效抑制加速氧化过程中自由基的生成。与 POV 和 TBARS 值的结果类似，TPP+TP 组对鲽鱼油中自由基生成的抑制作用最强。

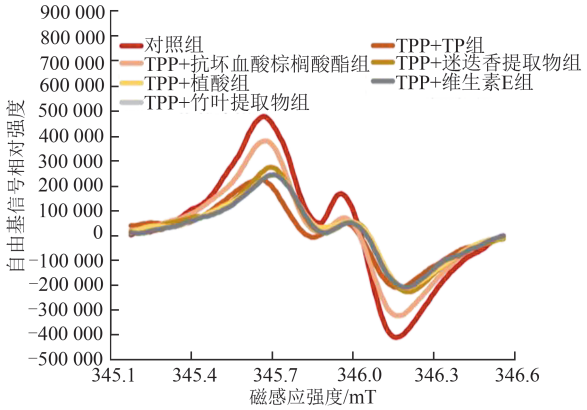


图 6 复合抗氧化剂对自由基信号相对强度的影响

Fig. 6 Effects of composite antioxidants on the relative intensity of free radicals

在 7 种抗氧化剂中，维生素 E、竹叶抗氧化物、迷迭香提取物、TP 和 TPP 通过清除自由基发挥作用；抗坏血酸棕榈酸酯通过猝灭单线态氧发挥作用；植酸通过螯合金属离子发挥作用。上述研究结果表明，在所有复合抗氧化剂中，抗氧化机理相同、极性不同的复合抗氧化剂 TPP+TP 表现出最强的抗氧化能力。鱼油中存在磷脂、游离脂肪酸和脂质氧化产生的极性产物等微量成分[21]，在鱼油中微量水分的作用下，抗氧化剂可以与鱼油中的这些微量成分结合形成缔合胶体（即反胶束），反胶束的油水界面是诱发脂质氧化的重要位置[22]。相较于对照组，复合抗氧化剂 TPP+TP 可以更有效地到达油水界面[22]，抑制脂质过氧化物的产生，因此表现出比其他复合抗氧化剂更强的抗氧化效果。

2.3 2 种优选抗氧化剂对加速氧化鲽鱼油的抗氧化作用比较

2.3.1 2 种优选抗氧化剂对鲽鱼油 POV 和 TBARS 值的影响

如图 7 所示，60 ℃加速氧化 6 d 后，对照组、TPP 组、TPP+TP 组的 POV 分别为（41.78±0.21）、（30.65±0.19）、（31.71±0.17）mmol/kg，相应的 TBARS 值分别为（9.35±0.05）、（3.34±0.05）、（5.29±0.06）mg/kg。结果表明，单一抗氧化剂 TPP 对鲽鱼油的抗氧化作用显著优于复合抗氧化剂 TPP+TP。

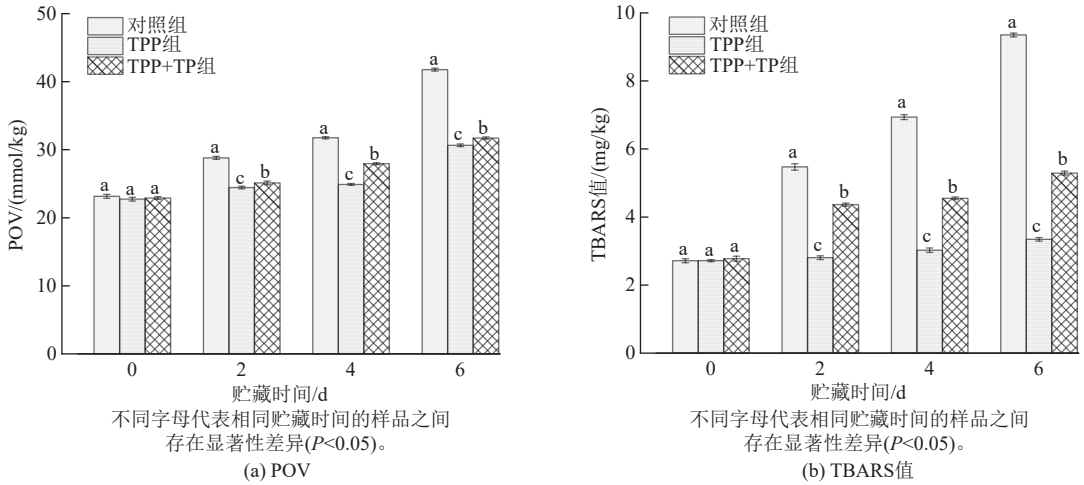


图 7 2 种优选抗氧化剂对 POV 和 TBARS 值的影响

Fig. 7 Effects of two optimum antioxidants on POV and TBARS value

2.3.2 2 种优选抗氧化剂对鲽鱼油脂肪酸组成的影响

如表 2 所示，与 POV 和 TBARS 值结果一致，单一抗氧化剂 TPP 对鲽鱼油中脂肪酸的抗氧化作用显著优于复合抗氧化剂 TPP+TP。该研究结果与一些研究中出现的协同抗氧化作用不同[23]，这可能与原料油的预处理和精炼工艺有关。Pei 等[19]研究发现，与复合抗氧化剂 TPP+TP 相比，TPP 对 DHA 藻油的抗氧化作用更强，而 TPP 对核桃油的抗氧化作用弱于复合抗氧化剂 TPP+TP。这 2 种不

同的抗氧化规律主要与油脂的加工方式有关。与核桃油相比，鲳鱼油和DHA藻油经过了精制工艺处理，其磷脂、游离脂肪酸和其他极性物质等成分大幅降低，导致磷脂和水形成的缔合胶体量大幅度降低，使TP不能有效地分散在DHA藻油和鲳鱼油中。

表2　抗氧化剂对脂肪酸组成的影响

Table 2　Effects of antioxidants on fatty acid composition　　单位：%

贮藏时间/d	组别	相对含量				
		EPA	DHA	饱和脂肪酸	单不饱和脂肪酸	多不饱和脂肪酸
0	对照组	50.27±0.46^{a}	31.23±0.31^{a}	9.25±0.33^{b}	7.52±0.36^{a}	83.03±0.37^{a}
	TPP组	51.13±0.56^{a}	30.23±0.25^{b}	9.43±0.28^{b}	7.23±0.46^{c}	83.34±0.52^{a}
	TP+TPP组	50.57±0.41^{a}	30.87±0.11^{a}	9.31±0.31^{b}	7.91±0.39^{c}	82.78±0.60^{a}
6	对照组	48.19±0.26^{c}	28.60±0.51^{c}	11.64±0.27^{a}	9.65±0.11^{c}	78.75±0.37^{d}
	TPP组	50.47±0.38^{a}	28.67±0.15^{c}	11.00±0.40^{a}	9.00±0.23^{d}	81.00±0.66^{b}
	TP+TPP组	49.30±0.23^{b}	28.67±0.21^{c}	11.05±0.20^{a}	9.08±0.15^{b}	79.87±0.48^{c}

注：同一列中不同字母代表脂肪酸相对含量存在显著性差异（P<0.05）。

3　结论

复合抗氧化剂TPP+TP通过调控脂质初级氧化反应和次级氧化反应，可有效维持鲳鱼油中多不饱和脂肪酸的水平，但其抗氧化作用稍弱于TPP。鉴于TP价格较低，通过与TPP复配使用可有效降低鲳鱼油加工和贮存过程中的生产成本。后续研究需要进一步优化复配比例，并评估其在长期贮存及不同加工条件下的普适性，以实现抗氧化效率与成本效益的最佳平衡。

参考文献

[1] 林新月，朱松，李玥. 拉曼光谱测定食品油脂的氧化[J]. 食品与生物技术学报，2017，36(6)：610-616.
LIN X Y，ZHU S，LI Y. Evaluation of edible oils oxidation by Raman spectroscopy[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2017，36(6)：610-616.(in Chinese)

[2] 张明成. 油脂氧化机理及抗氧化措施的介绍[J]. 农业机械，2011(8)：49-52.
ZHANG M C. Introduction of oxidation mechanism and anti-oxidation measures of oil and fat[J]. Farm Machinery，2011(8)：49-52.(in Chinese)

[3] 徐立荣. 食用油贮藏过程自动氧化变化规律研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2017.

[4] 裴雪晨，阴法文，钟旭，等. 没食子酸酯对核桃油及其乳液的抗氧化作用[J]. 食品与生物技术学报，2022，41(6)：91-97.
PEI X C，YIN F W，ZHONG X，et al. Antioxidative effects of gallic acid esters on walnut oil and its emulsion[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41(6)：91-97.(in Chinese)

[5] 刘贺，朱奕昊，刘亭亭，等. 天然抗氧化剂及协同作用研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版)，2021，34(5)：59-65.
LIU H，ZHU Y H，LIU T T，et al. Research progress on natural antioxidants and their synergistic effect[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition)，2021，34(5)：59-65.(in Chinese)

[6] 吕军伟，杨贤庆，林婉玲，等. 迷迭香的抗氧化活性及对藻油氧化稳定性影响的研究[J]. 中国油脂，2015，40(4)：79-83.
LYU J W，YANG X Q，LIN W L，et al. Antioxidant activity of rosemary and its effect on oxidation stability of algal oil[J]. China Oils and Fats，2015，40(4)：79-83.(in Chinese)

[7] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准：GB 2760—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定：GB 5009.227—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[9] JOHN L，CORNFORTH D，CARPENTER C E，et al. Color and thiobarbituric acid values of cooked top sirloin steaks packaged in modified atmospheres of 80% oxygen，or 0.4% carbon monoxide，or vacuum[J]. Meat Science，2005，69(3)：441-449.

[10] CHEN Q M，XIE Y F，XI J Z，et al. Characterization of lipid oxidation process of beef during repeated freeze-thaw by electron spin resonance technology and Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry，2018，243：58-64.

[11] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定:GB 5009.168—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[12] 闫馨月,贾亦佳,孙诗艳,等. 火麻油复合纳米乳液的制备及稳定性研究[J]. 食品与生物技术学报,2022,41(6):84-90.
YAN X Y, JIA Y J, SUN S Y, et al. Preparation and stability of hemp seed oil composite nano-emulsion[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 84-90.(in Chinese)

[13] 金清馨. 抗氧化剂对栀子果油氧化稳定性的影响[D]. 杭州:浙江农林大学,2019.

[14] 祁红学,刘秀萍,安静. 硫代巴比妥酸法测定鱼体肌肉中脂质过氧化物含量的方法优化[J]. 安徽农业科学,2017,45(10):91-92.
QI H X, LIU X P, AN J. Improvement of thiobarbituric acid reaction for the dertermination of lipid peroxidation in the muscles of fish[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(10): 91-92.(in Chinese)

[15] 张媛媛,程伟峰,杨雄伟,等. 最优混料设计法优化牡丹籽油的抗氧化剂配方[J]. 中国油脂,2022,47(7):109-115.
ZHANG Y Y, CHENG W F, YANG X W, et al. Optimization of antioxidant formula of peony seed oil by optimum mixture design[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(7): 109-115.(in Chinese)

[16] KAZUO M. Prevention of fish oil oxidation[J]. Journal of Oleo Science, 2019, 68(1): 1-11.

[17] HUNYADI A. The mechanism(s) of action of antioxidants: from scavenging reactive oxygen/nitrogen species to redox signaling and the generation of bioactive secondary metabolites[J]. Medicinal Research Reviews, 2019, 39(6): 2505-2533.

[18] ZHAO M T, LIU Z Y, LI A, et al. Gallic acid and its alkyl esters emerge as effective antioxidants against lipid oxidation during hot air drying process of *Ostrea talienwhanensis*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110551.

[19] PEI X C, YIN F W, ZHONG X, et al. Effects of different antioxidants and their combinations on the oxidative stability of DHA algae oil and walnut oil[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(8): 2804-2812.

[20] WANG Z W, LIU F J, LUO Y, et al. Effects of tea polyphenol and its combination with other antioxidants added during the extraction process on oxidative stability of Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil[J]. Foods, 2022, 11(23): 3768.

[21] CHEN B C, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Minor components in food oils: a critical review of their roles on lipid oxidation chemistry in bulk oils and emulsions[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2011, 51(10): 901-916.

[22] LAGUERRE M, BAYRASY C, PANYA A, et al. What makes good antioxidants in lipid-based systems? the next theories beyond the polar paradox[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(2): 183-201.

[23] 魏建林,左文杰,闵光,等. 茶多酚棕榈酸酯和迷迭香提取物复合抗氧化剂对葵花籽油的抗氧化效果研究[J]. 粮食储藏,2018,47(5):39-43.
WEI J L, ZUO W J, MIN G, et al. Study on antioxidant effect of tea polyphenols palmitate and rosemary extract composite antioxidants on sunflower oil[J]. Grain Storage, 2018, 47(5): 39-43.(in Chinese)

(责任编辑:闫林红)