

乳化食品中油脂氧化分析及其货架期 评价方法的研究进展

李潇潇, 陈小威, 马传国

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要: 油脂氧化是导致乳化食品变质的主要原因。油脂中的不饱和脂肪酸发生氧化, 不仅会降低乳化食品的营养价值, 还会产生不良风味、有害成分, 进而影响乳化食品货架期和食用安全。相对于纯油体系, 以乳化形式存在的油脂在高油-水界面比下极易发生氧化, 缩短乳化食品的货架期。为明确乳化食品中油脂氧化分析及其货架期评价方法, 在介绍乳化食品中油脂氧化的基本过程的基础上, 综述了乳化食品中油脂氧化分析方法(过氧化值、共轭二烯值、硫代巴比妥酸值、茴香胺值、挥发性物质含量)以及货架期的评价方法, 为乳化食品中油脂氧化程度分析及其货架期预测提供参考。

关键词: 乳化食品; 油脂氧化; 氧化分析; 货架期评价

中图分类号: TS201.6; TS201.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2022)07-0103-06

Advance in oil oxidation analysis and shelf-life evaluation of emulsified foods

LI Xiaoxiao, CHEN Xiaowei, MA Chuanguo

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Oil oxidation is the critical factor for the deterioration of emulsified foods. The oxidation of unsaturated fatty acids in oil not only reduces the nutritional value of emulsified foods, but also produce undesirable flavors and harmful components, and affect the shelf-life and safety. Moreover, compared with the pure oil system, the high oil-water interfacial ratio further makes the emulsified oil highly prone to oxidation, which greatly shortens the shelf-life. Therefore, in order to clarify the oil oxidation analysis and the shelf-life evaluation methods of emulsified foods, based on the introduction of the basic process of oil oxidation in emulsified foods, the analysis method of oil oxidation of emulsified foods (peroxide value, conjugated diene value, thiobarbituric acid value, *p*-anisidine value, volatile compound content) and the evaluation methods of shelf-life were reviewed. It may provide guidelines for the analysis of oxidation degree and the prediction of shelf-life of emulsified foods.

Key words: emulsified foods; oil oxidation; oxidation analysis; shelf-life evaluation

乳化食品包括如沙拉酱、蛋黄酱等 O/W 型乳化食品以及黄油、人造奶油等 W/O 型乳化食品^[1]。相对于纯油体系, 乳化食品具有水相、油相和界面的多

相态属性, 同时水相中常伴随有各种促氧化因子(如金属离子、自由基等), 油水界面存在下的高比表面积极大促进了油脂中不饱和和双键与促氧化因子接触而加促诱发油脂氧化^[2-4], 导致乳化食品营养严重流失, 产生不良风味, 甚至生成有害物质, 降低食品质量安全^[5]。

鉴于乳化食品中油脂氧化的品质劣变与安全风险, 油脂氧化分析与评价受到国内外学者和从业人员的广泛关注。但我国对乳化食品中油脂氧化问题的研究相对于国外还存在较大的差距。而了解乳化

收稿日期: 2021-01-10; 修回日期: 2022-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31801461); 河南省科学研究自然科学基金项目(2018QNJH03)

作者简介: 李潇潇(1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程(E-mail) l2726396895@163.com。

通信作者: 马传国, 教授, 博士(E-mail) mcg@haut.edu.cn。

食品体系中油脂氧化的基本过程、检测分析方法以及货架期评价方法对其防控具有重要意义。基于此,本文重点介绍了乳化食品中油脂氧化分析方法以及其货架期评价方法,旨在为乳化食品中的油脂氧化程度分析和货架期预测提供参考。

1 乳化食品中油脂氧化的基本过程

乳化食品体系中的油脂氧化以界面区域的自氧化为主要途径(图1),即引发剂(如过渡金属、自由基等)诱导不饱和脂肪酸(LH)失去氢原子生成烷

基(L·),烷基与氧分子(O₂)迅速反应生成过氧化物自由基(LOO·),过氧化物自由基会与另一个LH反应生成初级氧化产物——氢过氧化物(LOOH)^[6];随着氧化的进行,不稳定的氢过氧化物在热、金属离子等的作用下生成烷氧基自由基(LO·),进而通过β分裂形成醛、酮、酸、酯等小分子次级氧化产物,甘油酯水解成游离脂肪酸以及环氧化物和聚合物等。

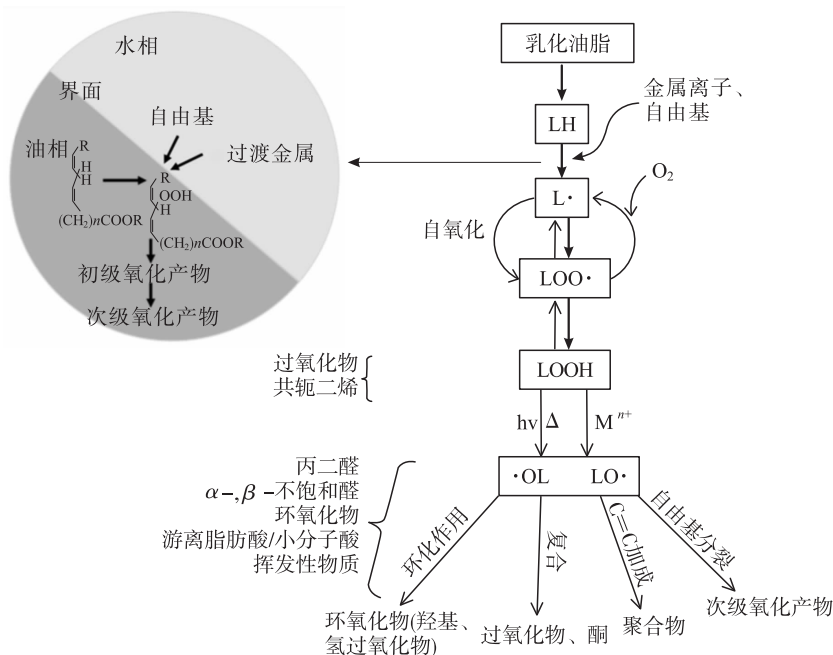


图1 乳化食品体系中油脂氧化过程

2 乳化食品中的油脂氧化分析方法

与纯油体系相似,评价乳化食品中的油脂氧化程度的方法大多数是建立在油脂氧化后所表现出来的化学、物理或者感官特性基础上的,现已采取多种油脂氧化产物分析方法,最普遍的是化学分析法,即通过测定油脂氧化产物(如氢过氧化物,α-β-不饱和醛,丙二醛,共轭二烯,环氧化物和羰基化合物

等)的增加量以及自由基变化分析乳化油脂氧化程度^[7],其中常用方法有过氧化值、共轭二烯值、硫代巴比妥酸值、茴香胺值、酸值、氧化稳定性指数以及挥发性醛和环氧化物含量等^[8-9]。这些方法均是针对油脂氧化进程中产生的氧化产物建立,各自存在一定的应用范围和使用局限性,如表1所示。

表1 乳化食品中的油脂氧化分析方法应用和局限性分析

分析方法	局限性	使用频率
过氧化值	适用于“新鲜”油脂和乳化油脂;敏感、有效性低	广泛使用
共轭二烯值	快速简便,但不能量化比较	学术界广泛使用
硫代巴比妥酸值	缺乏特异性和敏感性,易受样品颜色的干扰	广泛使用
茴香胺值	乳化体系中少有使用,有效性低	广泛使用
挥发性物质含量	需要建立标准方法	使用
氧化稳定性指数	高温(100~120℃)测量,体系结构被破坏,不适合低油含量体系	广泛使用
核磁共振、近红外光谱等	其他组分干扰较大	仅被学术界研究与使用

2.1 过氧化值(POV)

在油脂氧化初期,氢过氧化物(LOOH)的形成速度远大于其分解速度,因此可以通过测定过氧化值来评价油脂的氧化程度。由于氢过氧化物主要存在于初期氧化阶段,所以过氧化值的测定不适合氧化后期和氧化程度较高的乳化食品^[10]。过氧化值测定方法简单,被广泛应用于动植物油脂、乳化食品、含油食品等中氧化程度的评价。然而,氢过氧化物在高温(>60℃)下易分解,以及萃取、脱溶及转移过程中易被外源污染。1994年Shantha等^[11]提出硫氰酸铁法(FTC)测定含油食品的过氧化值。该方法样品用量少、灵敏度高、不需脱除溶剂、易于操作、快速,现已被广泛应用于乳化食品中油脂氧化的评价分析,但是此方法存在食品组分和结构影响检测结果准确性的风险。此外,检测过程需要防止Fe³⁺污染,且Fe²⁺离子溶液需现配现用^[12-13]。

2.2 共轭二烯值(CD)

油脂氧化产生的氢过氧化物通过共价键重排形成共轭二烯结构,该共轭二烯结构在234 nm紫外区具有强吸收,可通过比色法对比分析油脂氧化的程度,即共轭二烯值。由于共轭二烯值反映的是活泼自由基的数量,自由基在生成的同时也会与其他化合物反应生成较稳定的物质,所以共轭二烯值主要表征初始阶段的油脂氧化程度^[14]。Daoud等^[15]通过检测O/W型乳液中的共轭二烯值发现,共轭二烯值随着氧化程度的加深呈现先增加后降低的趋势,主要是因为初级氧化产物发生分解生成了次级氧化产物。该方法快速简便,被广泛应用于动植物油脂和乳化油脂氧化程度分析。尽管该方法可实现乳化食品中油脂氧化程度的快速检测分析,但不能量化比较,且易受到食品体系中自身存在的含共轭双键化合物(如胡萝卜素等)的干扰,目前更多地被学术界使用^[9]。

2.3 硫代巴比妥酸值(TBARS)

丙二醛(MDA)是典型的非挥发性次级氧化产物,该物质在酸性条件下能与两分子硫代巴比妥酸发生缩合反应,生成红色化合物,通过比色法可进行定量,被称为硫代巴比妥酸值(TBARS)法^[11]。由于丙二醛具有较好的稳定性,便于检测,该方法被公认为是反映油脂氧化程度的指标之一。Daoud等^[15]通过测定不同pH缓冲液O/W型乳液中的共轭二烯值和硫代巴比妥酸值发现,两者具有相同的变化趋势。但TBARS法缺乏特异性和敏感性,除丙二醛外硫代巴比妥酸还能与饱和醛、单烯醛和甘油醛等

生成黄色化合物,会干扰结果的准确性^[16-17]。

2.4 茴香胺值(p-AV)

油脂氧化产生的醛、酮类次级氧化产物含量可用茴香胺值表示,其数值越大,表明油脂氧化程度越高。茴香胺值的测定原理是通过油脂氧化产生的次级氧化产物(如 α - β -不饱和醛)与茴香胺发生反应生成黄色物质,该物质在350 nm处有特定吸收^[18]。研究表明,茴香胺值与总挥发性物质以及感官评分有很强的相关性^[19]。该方法被广泛应用于动植物油脂氧化程度的评价。由于油脂氧化的复杂性,仅单独使用初级与次级氧化产物测定结果不能完全反映实际氧化程度,所以常采用全氧化值(TOTOX,其值为4倍过氧化值与茴香胺值之和)来评价油脂氧化程度。然而,乳化食品中水的存在会导致茴香胺失活,一般认为该方法不太适用于乳化体系氧化程度分析。但也有报道改性的茴香胺值测定方法适用于乳化油脂氧化程度的分析,如Kargar等^[20]利用茴香胺值表征不同pH、不同浓度颗粒稳定的O/W型乳液中油脂氧化速率时,发现偏酸性环境、低颗粒浓度下油脂更易氧化而表现出更高的茴香胺值。

2.5 挥发性物质含量

丙醛和己醛等醛类化合物是油脂次级氧化产物中的主要挥发性物质。目前顶空气相色谱分析法(HS-GC)已被广泛用于乳化食品中油脂氧化挥发性物质含量的检测,作为油脂氧化程度的重要指标。HS-GC是基于一定条件下气相和固相处于动态平衡,通过测定密闭环境中基质上方气体中挥发性物质的含量进行分析,该方法具有快速、灵敏性好、精确度高、重现性好的优点,在各类食品的油脂氧化程度分析中被广泛使用。如Uluata等^[21]通过HS-GC检测水包磷虾油乳液中丙醛和己醛含量,发现丙醛生成速率快于己醛,能较好地评价磷虾油乳液的氧化程度。尽管如此,不同预处理对结果产生差异影响,仍需要建立标准方法^[22]。

2.6 氧化稳定性指数(OSI)

油脂氧化稳定性指数(OSI)或氧化诱导时间是通过高温加速诱导氧化快速测定油脂氧化稳定性的指标,主要采用Rancimat油脂氧化稳定测试仪进行检测,所以又被称为Rancimat法^[23]。该方法被广泛应用于动植物油脂、富含油脂食品等的氧化稳定性及其货架期预测分析。Di Giorgio等^[24]研究证实Rancimat法可用于O/W型乳液及其喷雾干燥油粉中油脂氧化稳定性的评价;Fruehwireth等^[25]利用该方法评价了乳化剂和抗氧化剂对人造奶油中油脂氧

化的影响。尽管如此,Rancimat 法也存在一定局限性,即高温下乳化体系结构被破坏,导致乳化食品氧化程度评价中体现不了物理结构的作用,不适合低含油量体系^[8,12]。

2.7 其他

乳化食品中油脂氧化检测的方法还有核磁共振(NMR)、近红外光谱(NIR)等,这些技术具有无损检测、精密度高、时间短等优点^[9]。Steltzer^[26]通过对比分析4种环氧化物测定方法(溴化氢、4-对硝基苄基吡啶、N,N-二乙基二硫代氨基甲酸酯与核磁共振)的准确性、灵敏性、可重复性以及氧化油脂分析的适用性,结果表明,核磁共振技术在检测环氧化物方面具有很大应用前景。但由于其他组分干扰较大、成本高等原因,目前这些方法仅被学术界研究和应用。需要注意的是,在油脂氧化过程中氧化产物的生成和分解处于一种动态平衡,而氧化产物的检测通常只能反映氧化过程中某一时刻的情况。所以仅根据单一氧化产物的测定并不能准确评估乳化食品中的油脂氧化程度,需要综合采用多种方法才能全面、准确地评价氧化状态^[8]。

3 乳化食品货架期评价

食品货架期是指食品在适当条件储存期间安全无害,且感官评价、理化指标和微生物指标及所含营养物质符合要求^[27]。近年来,乳化食品货架期预测模型的相关研究备受关注,考虑因素也从单一的温度延伸到多因素综合分析。当前常用的货架期预测模型包括基于温度的化学和微生物动力学模型、威布尔危险值模型(WLF)、Arrhenius模型和Z模型等^[27-29]。这些模型可预测不同含油食品的货架期,且均取得了良好的效果。由于温度对油脂氧化速率影响较为显著,所以常采用Arrhenius模型,通过加热诱导加速氧化(O/W型乳液常采取60℃或62℃,而W/O型乳液常采取35℃或37℃)来预测乳化食品的货架期^[29]。

Labuza等^[28]基于Arrhenius方程式建立温度-货架期模型,通过理化、微生物或感官指标等多种品质的衰变综合预测产品货架期,见式(1)。

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

式中: k 为反应速率常数; R 为摩尔气体常数,8.31 J/(K·mol); T 为绝对温度,K; E_a 为表观活化能,J/mol; k_0 为指前因子。

基于Arrhenius模型,可通过测量3个及以上温度下的品质劣变速率推断所需温度下的反应速率。目前Arrhenius模型已被成功地用于评估油脂和富

含油脂类食品氧化速率的温度依赖性。Buffo等^[30]利用Arrhenius模型建立了不同黏度饮料乳液保质期的动力学参数;蔡程晨等^[31]以猕猴桃籽油为原料制备微乳液,以过氧化值为稳定性评价指标,通过加速货架期检测和Arrhenius模型推导出氧化反应动力学模型为 $k = 652.3e^{-32763.8/RT}$,该模型预测猕猴桃籽油微乳液在25℃下的货架期为1491.53 h;Yoon等^[32]研究发现,不同乳饮料的 E_a 值在9~200 kJ/mol之间有很大变化,这归因于食品成分和环境因素的差异性。

在满足Arrhenius模型的温度范围内,可计算出氧化劣变速率或货架期随温度变化的简单指标,即 Q_{10} 值。 Q_{10} 值是指温度变化10℃食品物理或化学性质的变化率,可用式(2)表示。

$$Q_{10} = \frac{k_{T+10}}{k_T} = \frac{L_T}{L_{T+10}} \quad (2)$$

式中: k_T 和 L_T 为一定温度下的氧化速率常数和货架期; k_{T+10} 与 L_{T+10} 为温度升高10℃的氧化速率常数和货架期。

基于此,在已知 Q_{10} 和参考温度 T_{ref} 下的货架期,可以计算得到给定温度下的货架期。如:Noorannisa等^[33]利用该方法测定冰淇淋在不同温度下的货架期;Haushey等^[34]通过分析含有维生素C的O/W型乳液在37℃和45℃下氧化诱导时间,通过 Q_{10} 法推断出该乳液的货架期为208 d。

基于温度加速氧化诱导Arrhenius模型的主要优点在于可在较高温下采集数据,然后外推到低温下的货架期,可缩短监测时间,但缺点在于准确度受到诸多因素的影响,如需能够承受高温且不会引发氧化反应外的副反应,所以富油乳化食品加速货架期检测常在60℃以下进行,而鱼油在40℃以下进行^[6]。此外,诱导氧化过程中不应引起结构的崩溃(如人造奶油的相分离),这是因为随着温度的升高,除了油脂氧化反应速度增加外还会发生许多物质的物化变化,如结晶、脂质融化、玻璃相变化、相聚集或分离等等引起乳化食品的物理结构变化^[35]。所以在生产实践中,常常需要将加速氧化试验与常规货架期跟踪结合起来分析,以更精确地评价乳化食品的货架期^[29]。

4 结束语

乳化食品的氧化稳定性和货架期对于开发新型乳化食品和改善现有食品配方具有重要意义。乳化食品中油脂氧化过程中的产物主要有氢过氧化物、共轭二烯、醛酮类化合物及环氧化物等,可通过POV、CD、TBARS、 p -AV及挥发性物质含量等方法

进行分析检测。目前,乳化食品的货架期检测方法可分为实际货架期测试和加速货架期检测,其中后者被广泛选用。加速货架期检测需要选择合适的加速因子,随后根据 Arrhenius 方程计算 Q_{10} 值和相应的活化能,最终确定产品货架期。但是当前乳化食品中油脂氧化分析和货架期评估仍面临诸多挑战,如分析过程中诱导因子(如温度)改变体系微结构导致的货架期评估困难,运输、储存和销售环节的温度波动以及机械力破坏对乳化食品体系结构的影响,所以应加大对乳化食品中油脂氧化的分析与货架期评价方面的研究,以建立精准的乳化食品货架期评估方法。

参考文献:

- [1] MCCLEMENTS D J. Food emulsions: principles, practices, and techniques[M]. New York: CRC Press, 2015.
- [2] WARAHO T, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Mechanisms of lipid oxidation in food dispersions [J]. Trends Food Sci Technol, 2011, 22(1): 3-13.
- [3] BERTON - CARABIN C C, ROPERS M H, GENOT C. Lipid oxidation in oil - in - water emulsions: involvement of the interfacial layer[J]. Compr Rev Food Sci F, 2014, 13(5): 945-977.
- [4] HUANG X, AHN D U. Lipid oxidation and its implications to meat quality and human health [J]. Food Sci Biotechnol, 2019, 28(5): 1275-1285.
- [5] PAN J, TANG L, DONG Q, et al. Effect of oleogelation on physical properties and oxidative stability of camellia oilbased oleogels and oleogel emulsions[J/OL]. Food Res Int, 2021, 140: 110057 [2021-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110057>.
- [6] MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Lipid oxidation in oil - in - water emulsion: impact of molecular environment on chemical reaction in heterogeneous food system [J]. J Food Sci, 2000, 65(8): 1270-1282.
- [7] GALANO A, ALVAREZ - IDABOY J R. Computational strategies for predicting free radical scavengers' protection against oxidative stress: where are we and what might follow? [J]. Int J Quantum Chem, 2019, 119(2): 25665-25688.
- [8] KLOOSTER S, BOERKAMP V, LAZARIDI E, et al. Lipid oxidation in food emulsions: analytical challenges and recent developments[M]// Lipid Oxidation in Food and Biological Systems. Cham: Springer, 2022: 3-29.
- [9] KERRIHARD A L, PEGG R B, SARKAR A, et al. Update on the methods for monitoring UFA oxidation in food products [J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2015, 117(1): 1-14.
- [10] LAGUERRE M. Evaluation of the ability of antioxidants to counteract lipid oxidation: existing methods, new trends and challenges[J]. Prog Lipid Res, 2007, 46(5): 244-282.
- [11] SHANTHA N C, DECKER E A. Rapid, sensitive, iron - based spectrophotometric methods for determination of peroxide values of food lipids[J]. J AOAC Int, 1994, 77(2): 421-424.
- [12] WANG C, SUN C, LU W, et al. Emulsion structure design for improving the oxidative stability of polyunsaturated fatty acids[J]. Compr Rev Food Sci F, 2020, 19(6): 2955-2971.
- [13] CHEN B, 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]. Crit Rev Food Sci, 2011, 51(10): 901-916.
- [14] 孙月娥, 王卫东. 国内外脂质氧化检测方法研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2010, 25(9): 123-128.
- [15] DAOUD S, BOU - MAROUN E, WASCHATKO G, et al. Lipid oxidation in oil - in - water emulsions: iron complexation by buffer ions and transfer on the interface as a possible mechanism[J/OL]. Food Chem, 2020, 342(3): 128273 [2021-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128273>.
- [16] BARRIUSO B, ASTIASARAB I, ANSORENA D. A review of analytical methods measuring lipid oxidation status in foods: a challenging task[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2013, 236(1): 1-15.
- [17] DE LAS HERAS A, SCHOCH A, et al. Comparison of methods for determining malondialdehyde in dry sausage by HPLC and the classic TBA test [J]. Eur Food Res Technol, 2003, 217: 180-184.
- [18] KNIGHT J A, PIEOER R K, MCCLELLAN L. Specificity of the thiobarbituric acid reaction: its use in studies of lipid peroxidation[J]. Clin Chem, 1988, 34(12): 2433-2438.
- [19] STEELE R. Understanding and measuring the shelf - life of food [M]. Washington DC: Woodhead Publishing Limited, 2004.
- [20] KARGAR M, FAYAZMANESH K, ALAYI M, et al. Investigation into the potential ability of Pickering emulsions (food - grade particles) to enhance the oxidative stability of oil - in - water emulsions[J]. J Colloid Inter Sci, 2012, 366(1): 209-215.
- [21] ULUATA S, DURMAZ G, MCCLEMENTS D J, et al. Comparing DPPP fluorescence and UV based methods to assess oxidation degree of krill oil - in - water emulsions [J/OL]. Food Chem, 2020, 339:127898 [2021-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127898>.
- [22] JONSDOTTIR R, BRAGADOTTIR M, ARNARSON G. Oxidatively derived volatile compounds in microencapsulated fish oil monitored by solid - phase microextraction (SPME)

- [J]. *J Food Sci*, 2005, 70(7): 433–440.
- [23] VELASCO J, ANDERSEN M L, SKIBSTED L H. Evaluation of oxidative stability of vegetable oils by monitoring the tendency to radical formation. A comparison of electron spin resonance spectroscopy with the Rancimat method and differential scanning calorimetry[J]. *Food Chem*, 2004, 85(4): 623–632.
- [24] DI GIORGIO L, SALGADO P R, MAURI A N. Encapsulation of fish oil in soybean protein particles by emulsification and spray drying[J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 87: 891–901.
- [25] FRUEHWIRETH S, EGGER S, KURZBACH D, et al. Ingredient – dependent extent of lipid oxidation in margarine [J/OL]. *Antioxidants*, 2021, 10(1): 105 [2021 – 01 – 10]. <https://doi.org/10.3390/antiox10010105>.
- [26] STELIZER E T. Evaluation of chemical assays for determining hydroperoxides levels in oxidized lipids[D]. New Jersey: Rutgers University – New Brunswick, 2012.
- [27] HU M, JACOBSEN C. Oxidative stability and shelf life of foods containing oils and fats [M]. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [28] LABUZA T P, SCHMIDL M K. Accelerated shelf – life testing of foods[J]. *Food Technol*, 2005, 39(9): 57–64.
- [29] CALLIGARIS S, MANZOCCO L, ANESE M, et al. Shelf – life assessment of food undergoing oxidation: a review [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2016, 56(11): 1903–1912.
- [30] BUFFO R A, REINECCIUS G A. Shelf – life and mechanisms of destabilization in dilute beverage emulsions [J]. *Flavour Frag J*, 2001, 16(1): 7–12.
- [31] 蔡程晨, 朱式业, 熊武国, 等. 猕猴桃籽油微乳液的制备及货架期预测[J]. *食品与机械*, 2019, 35(4): 127–132.
- [32] YOON J W, AHN S I, KIM H N, et al. Qualitative characteristics and determining shelf – life of milk beverage product supplemented with coffee extracts [J]. *Korean Food Sci Anim Resour*, 2017, 37(2): 305–312.
- [33] NOORANNISA S, EKANTARI N. Stability of *Spirulina platensis* ice cream and shelf life prediction using accelerated shelf life test method based on physical and antioxidant analysis [C/OL]// The 3rd International Symposium on Marine and Fisheries Research. France: EDP Sciences, 2020: 03007 [2021 – 01 – 10]. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014703007>.
- [34] HAUSHEY L A, MOUSSA N. The shelf life of vitamin C in a W/O emulsion according to the Q_{10} method[J]. *Int J Phar Sci Rev Res*, 2015, 30: 33–39.
- [35] KARGAR M, SPYROPOULOS F, NORTON I T. Microstructural design to reduce lipid oxidation in oil – in – water emulsions [J]. *Procedia Food Sci*, 2011, 1: 104–108.

(上接第 87 页)

- [3] 马博, 张婷婷, 黎远成, 等. 麻疯树籽壳总黄酮的提取及其羟基自由基清除作用 [J]. *食品与机械*, 2014(5): 196–199.
- [4] 李玲, 李晓帆, 吴慧星, 等. 麻疯树种子中抗氧化活性成分的研究 [J]. *中草药*, 2010, 41(12): 1932–1936.
- [5] 李珊珊, 祁玉丽, 曲迪, 等. 西洋参果多糖的纯化及 DPPH 自由基清除活性研究 [J]. *特产研究*, 2019, 41(3): 8–11.
- [6] 那吉, 马娇, 张海芬, 等. 三种云南产鲜花醇提液对 ABTS 自由基的清除作用 [J]. *化学与生物工程*, 2019, 36(2): 47–50.
- [7] 岳超颖, 吴彝, 周君, 等. 红参多糖体外抗氧化的研究 [J]. *实验室科学*, 2019, 22(1): 49–52, 56.
- [8] 曹菲菲, 康鹏玲, 甄润英, 等. 紫甘蓝色素提取工艺及其抗氧化活性研究 [J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(15): 75–79.
- [9] 陈英, 朱科学, 彭伟, 等. 小麦胚活性肽体外抗氧化活性研究 [J]. *中国油脂*, 2010, 35(12): 16–19.
- [10] 宋家乐, 顾廉洁, 李雪梅, 等. 韩国产炒紫苏子甲醇提取物体外抗氧化及抗突变效果 [J]. *食品工业科技*, 2016(5): 76–79.
- [11] 周强. 甜茶鱼腥草多糖提取工艺、性质及活性研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
- [12] 严敏, 李崎, 顾国贤. 利用 DPPH 自由基清除率评价啤酒内源性抗氧化能力 [J]. *食品工业科技*, 2005, 26(8): 82–83, 87.
- [13] 陈炳阳, 岳荣彩, 刘芳, 等. 耳叶牛皮消中的苯乙酮类化合物及其抗氧化活性研究 [J]. *药学实践杂志*, 2013, 31(5): 351–354.
- [14] 卞伟明, 刘蓉飞, 杨帆, 等. 罗汉果花黄酮和多糖的提取与活性研究 [J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(10): 121–124.
- [15] 林为艺, 颜美秋, 吕圭源, 等. 铁皮石斛茎非多糖与粗多糖体内抗氧化活性的比较 [J]. *中药药理与临床*, 2016, 32(2): 138–141.
- [16] 韩娅婷, 谢惠, 邵佩兰, 等. 红枣色素的抗脂质过氧化作用 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(2): 35–39.