

植物油反式脂肪酸形成途径及调控研究进展

梁蔓竹¹, 胡雨萌¹, 李振源¹, 黄雪港¹, BELLO Zaki Abubakar², 郭 芹^{1,*}, 王 强^{1,*}

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193;

2. 乌斯玛努·丹福迪沃大学农业推广与农村发展系, 尼日利亚 索科托 840101)

摘 要: 反式脂肪酸 (*trans* fatty acids, TFAs) 对人体健康的危害已经引起各界高度关注, 而植物油是人们日常摄入TFAs的主要来源, 了解植物油TFAs形成以实现其精准调控至关重要。近年来, 有研究对TFAs在不同植物油中的生成含量进行探究, 以及在不同TFAs异构体形成途径及调控机理方面也取得了突破性进展, 但鲜有进行系统全面的综述。本文主要从不同种植物油TFAs种类和含量、形成机理、调控措施及调控机理等方面进行系统梳理, 以期为人们日常植物油TFAs摄入以及植物油TFAs后续研究提供参考。

关键词: 反式脂肪酸; 植物油; 形成机理; 控制方法; 生成含量

Research Progress on the Formation Pathway and Regulation of *Trans* Fatty Acids in Vegetable Oils

LIANG Manzhu¹, HU Yumeng¹, LI Zhenyuan¹, HUANG Xuegang¹, BELLO Zaki Abubakar², GUO Qin^{1,*}, WANG Qiang^{1,*}

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

2. Department of Agricultural Extension and Rural Development, Faculty of Agriculture, Usmanu Danfodiyo University, Sokoto 840101, Nigeria)

Abstract: *Trans* fatty acids (TFAs) have attracted considerable attention from all sectors of the community. As vegetable oils are the major source of TFAs in the daily diet, it is essential to understand the formation of TFAs in vegetable oils for accurate regulation. In recent years, a number of studies have explored the amount of TFAs generated in different vegetable oils and breakthroughs have been made in understanding the formation pathways and regulatory mechanisms of different TFAs isomers, but a systematic and comprehensive review has not yet been conducted. In this review, a systematic summary of the types and contents of TFAs in different vegetable oils, their formation mechanisms, regulatory measures and mechanisms is presented, with a view to providing references for people's daily intake of TFAs through vegetable oils as well as subsequent research on TFAs in vegetable oils.

Keywords: *trans* fatty acids; vegetable oils; formation mechanism; control methods; generated amount

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240507-036

中图分类号: TS221

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 23-0329-09

引文格式:

梁蔓竹, 胡雨萌, 李振源, 等. 植物油反式脂肪酸形成途径及调控研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 329-337.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240507-036. <http://www.spkx.net.cn>

LIANG Manzhu, HU Yumeng, LI Zhenyuan, et al. Research progress on the formation pathway and regulation of *trans* fatty acids in vegetable oils[J]. Food Science, 2024, 45(23): 329-337. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240507-036. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2024-05-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32472474);

新疆维吾尔自治区重点研发计划项目 (2021B02003; 2021B02003-4; 2021B02003-3);

中国农业科学院农产品加工研究所“国之大者”重点科技行动专项 (G2022-IFST-03)

第一作者简介: 梁蔓竹 (1999—) (ORCID: 0009-0001-7989-2851), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮油加工原料与品质学。

E-mail: lzm9619@163.com

*通信作者简介: 郭芹 (1985—) (ORCID: 0000-0002-9806-3119), 女, 研究员, 博士, 研究方向为粮油加工与综合利用。

E-mail: guoqin2010y1@163.com

王强 (1965—) (ORCID: 0000-0001-8275-3185), 男, 研究员, 博士, 研究方向为植物蛋白结构与功能调控。

E-mail: wangqiang06@caas.cn

(表1), 其含量随着加热时间和温度增加而增加。研究者对市售大豆油(0.22~1.88 g/100 g)、菜籽油(1.24~1.94 g/100 g)、花生油(0.17~0.61 g/100 g)、玉米油(0.08~2.21 g/100 g)、葵花籽油(0.05~1.23 g/100 g)、橄榄油(0.04~0.19 g/100 g)、亚麻籽油(0.12~0.24 g/100 g)、米糠油(0.39~2.13 g/100 g)等TFAs含量^[32-43]进行了分析, 发现不同种植物油TFAs含量主要与其加工工艺和脂肪酸组成有关, 如菜籽油、玉米油和葵花籽油等大宗植物油由于多不饱和脂肪酸含量较高, 在传统加工过程中需要高温精炼, 会导致成品油中TFAs含量偏高; 而花生油、橄榄油中UFAs以单不饱和脂肪酸为主, TFAs含量相对较低, 且花生油和亚麻籽油的生产加工逐步向精准适度加工方向发展, 这种加工方式将使TFAs含量更低。此外, 同种植物油中TFAs含量与其原料品种和品质也有一定关系。

植物油中TFAs含量随其加热温度的升高而增加, 但其变化幅度与脂肪酸组成有关。花生油因其油酸含量较高而整体不饱和度相对较低, 加热后(180~220 °C) TFAs含量变化较小(0.37~1.08 g/100 g); 亚麻籽油因其脂肪酸不饱和度高, 在加热后TFAs总量可达0.25~4.20 g/100 g, 极端条件下(260 °C、8 h)反式亚麻酸总量可达54.11 g/100 g, 不适合高温烹饪使用; 其余大宗植物油在加热后TFAs均有所上升(葵花籽油0.04~1.74 g/100 g, 玉米油0.07~2.01 g/100 g, 菜籽油0.14~2.88 g/100 g, 大豆油0.02~1.97 g/100 g, 橄榄油0.04~3.16 g/100 g, 米糠油1.14~3.21 g/100 g), 温度继续升高(>240 °C) TFAs含量会大幅增长, 达1.16~3.21 g/100 g^[32-43]。根据不同植物油TFAs含量可知, 油酸含量较高的植物油更适用于煎、炒、烹、炸等较高温(240 °C以下)的烹饪, 而亚麻酸含量较高的植物油则应当尽量避免或减少高温加热使用, 因此在日常烹饪过程建议植物油加热温度控制在180 °C以下, 从而降低TFAs的摄入。

2 植物油中反式脂肪酸的形成机理

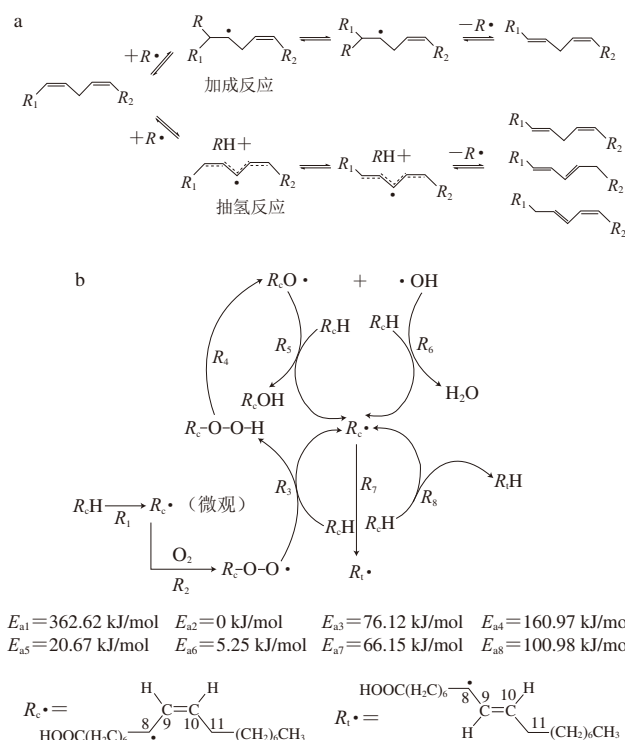
2.1 自由基机理

自由基机理为植物油顺式UFAs向反式转化的普遍机制, 原理为C=C经过碳自由基中间体过渡形成饱和键, 可以实现空间和结构上的自由旋转, 从而由顺式结构异构化为反式结构(图2)。自由基机理包含氧化异构机理、抽氢异构机理、加成异构机理及直接异构机理, 其中氧化机理是碳自由基与O₂结合, 生成过氧化自由基发生环化和重排反应; 抽氢反应机理为一个烯丙基或双烯丙基氢作为自由基被提取出来, 随着C—C键旋转, 脂肪酸自由基被来自周围环境的氢原子中和, 重建C=C, 实

现顺式向反式的异构化; 加成反应为催化自由基加入到C=C键中的一个, 自由基加合物进行C—C键旋转, 自由基催化剂再解离完成异构化; 直接异构机理为C=C双键直接断裂后旋转生成反式结构。以上4种形式的反应可以通过氧气、高温、催化剂或氢气条件等加速C=C由顺式结构旋转为反式结构(图2)。

植物油UFAs中油酸由于结构简单, 相关研究较为完善。在日常烹饪中油酸异构反应主要由氧和热引起, 研究表明氧化反应的中间体可以引发并参与油酸热致异构反应, 结合活化能(*E_a*)计算发现R_c—O—O—H是氧化机制中一种非常重要的中间体, 且O—O键的断裂(160.97 kJ/mol)是异构反应的控速步骤^[44-45]。对比油酸、亚油酸和亚麻酸的异构反应发现, 反式油酸的活化能高于反式亚油酸, 且反应速率常数在100~220 °C均小于反式亚油酸^[46], 而反式亚油酸在250 °C的形成速率高于反式亚麻酸^[47]。但是反式亚油酸和反式亚麻酸的形成较为复杂, 目前关于其自由基异构机理的研究仍有待进一步完善。同时有研究对UFAs异构化反应中的自由基进行捕捉和定量^[48], 但尚未有突破性进展。

综上所述, TFAs生成的自由基机理是一种普遍认可的机制, 可解释不同气氛条件、催化剂或添加剂条件下顺反异构化机制, 为植物油体系中TFAs的控制研究提供了良好的指导作用, 但仍需完善对自由基中间体结构的捕捉和表征。



a.加成反应机制和抽氢反应机制^[49]; b.氧化反应机制^[45]。

图2 自由基引发脂肪酸异构化的可能反应途径

Fig. 2 Possible reaction pathways of free radical-initiated isomerization of fatty acids

2.2 质子转移机理

近年, 质子转移异构机理被提出解释UFAs异构化, 主要原理为: 植物油中UFAs在高温下, C—H之间的作用力减小, C=C中的其中一个碳上的氢原子向另一个碳转移, 增加了C=C的键长, 形成过渡态和中间体。在C=C的另一个质子转移完成后, 该双键会重建, 形成单反式异构体, 单反式异构体积累到一定量, 就会激活其余双键的异构化, 从而通过质子转移机制形成多反式异构体。Li Changmo等^[50]通过振动谱频计算和量子化学计算阐述及验证了热诱导油酸反式异构化的质子转移机理, 发现该反应中有两个过渡态 (ts1和ts2) 及两个中间体 (im1和im2), 并说明生成C_{18:1-9*r*}异构体主要经历的是C9→C10的质子转移, 在生成ts1和im1的过程中H9逐渐转移到C10, 通过过渡态实现了双键的旋转, 之后通过im2和ts2完成了双键的重建, 从而生成反式构型。对比发现亚油酸反式异构质子转移机制与反式油酸异构类似, 共有2条反应途径, C9和C13的碳氢键解离能低于C10和C12, 这表明C9和C13的质子转移可能更容易, 且发现决定异构化反应速度的关键步骤是ts1的形成^[51] (图3a)。Guo Qin等^[38]提出了通过质子转移形成反式亚麻酸的6种异构化途径, 同样遵循上述反应过程。

该研究发现亚麻酸的质子转移更容易发生在C9→C10、C12→C13和C16→C15处, 经过能垒分析发现所提出的亚麻酸6条质子转移途径可以很好地解释亚麻籽油加热过程中反式亚麻酸异构体的形成比例 (图3b)。观察不同脂肪酸反式异构化的质子转移活化能 (表2、3), 发现活化能最高的步骤 (即决速步骤) 均为ts1, 而亚油酸的活化能低于油酸, 更容易发生异构化反应。

质子转移机理作为一种在顺反异构化过程中被提出的新机制目前研究较少, 大多停留在对UFAs单独存在的体系进行研究, 而缺少在不同催化剂或添加剂条件下的体系研究, 同时质子转移异构机制的中间体结构也未见捕捉和明晰的报道, 需要进一步补充和完善。

表2 生成反式油酸^[50]和反式亚油酸^[51]的质子转移反应能垒
Table 2 Proton transfer reaction energy barriers for the generations of *trans* oleic acid^[50] and *trans* linoleic acids^[51]

反应	$\Delta E/$ (kJ/mol)					计算机组	
	反应物	ts1	im1	im2	ts2		生成物
C _{18:1-9<i>r</i>} →C _{18:1-9<i>r</i>}	0	294.5	278.9	267.2	286.1	-7.6	Gaussian 09 W B3LYP/ 6-311++G**
C _{18:2-9<i>c</i>,12<i>c</i>} →C _{18:2-9<i>c</i>,12<i>r</i>}	0	286.4	269	257.8	271.6	-6.2	
C _{18:2-9<i>c</i>,12<i>r</i>} →C _{18:2-9<i>c</i>,12<i>r</i>}	-6.2	275.4	259.6	248.9	262	-13.2	Gaussian 03 B3LYP/ 6-311++G**
C _{18:2-9<i>c</i>,12<i>c</i>} →C _{18:2-9<i>c</i>,12<i>c</i>}	0	284.2	273.4	256.7	278.4	-7.8	
C _{18:2-9<i>c</i>,12<i>r</i>} →C _{18:2-9<i>c</i>,12<i>r</i>}	-7.8	271.9	259.9	248.4	262.4	-13.2	

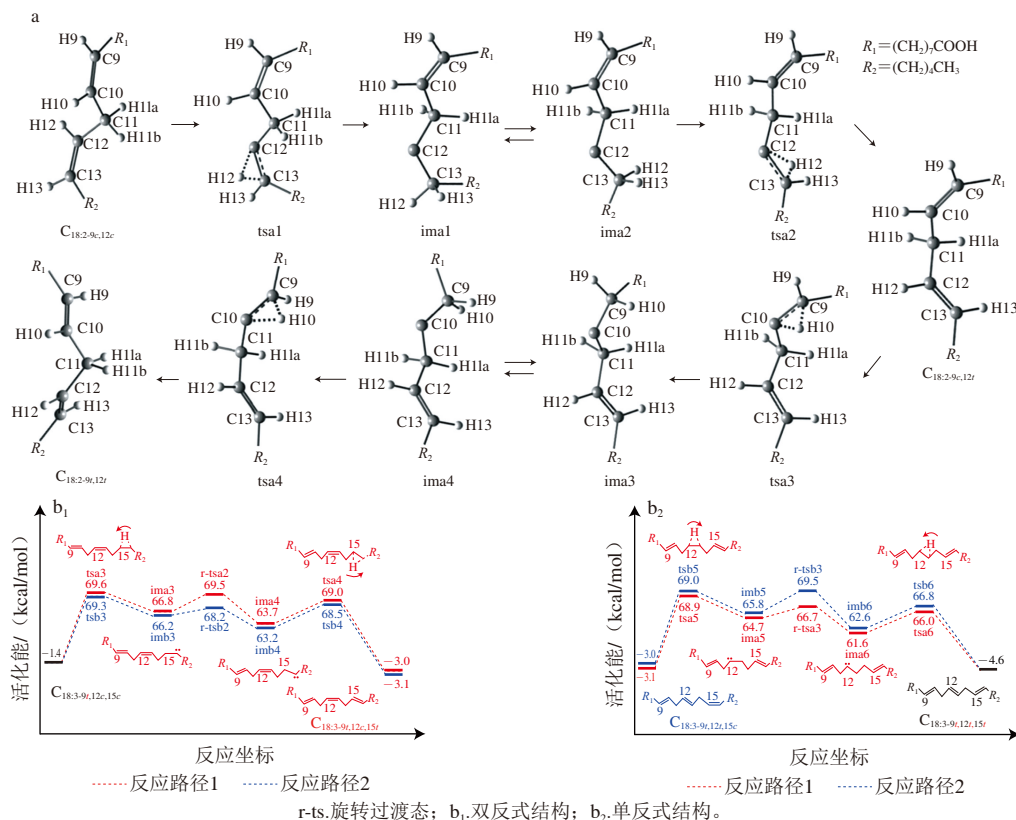


图3 脂肪酸质子转移异构化的可能反应途径 (亚油酸) (a)^[51]及反应能垒变化 (亚麻酸) (b)^[38]示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of possible reaction pathways for proton transfer isomerization of fatty acids (linoleic acid) (a)^[51] and changes in reaction energy barrier (linolenic acid) (b)^[38]

表3 生成反式亚麻酸^[38]的质子转移反应能垒
Table 3 Proton transfer reaction energy barriers for the generation of *trans* linolenic acids^[38]

反应	$\Delta E/(\text{kJ/mol})$						计算机组
	反应物	ts1	im1	r-ts	im2	ts2	生成物
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{c}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},13\text{c},15\text{c}}$	0	71.1	67.1	69.6	64.5	70.2	-1.4
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{c}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{f}}$	-1.4	69.6	66.8	69.5	63.7	69	-3
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{c}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{f}}$	-3.1	68.9	64.7	66.7	61.6	66	-4.6
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{c}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{c}}$	0	71	69.6	72.3	64.9	69.3	-1.6
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{c}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{c}}$	-1.6	69.5	65.4	68	62.9	68.7	-3
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{f}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{f}}$	-3	69	65.8	69.5	62.6	66.8	-4.6
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{c}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},13\text{c},15\text{f}}$	0	71.7	68.4	72.3	64.5	69	-1.6
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{f}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{f}}$	-1.6	69.5	68.1	70.6	63.6	68.6	-3.2
$\text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{f}} \rightarrow \text{C}_{18:3-9\text{c},12\text{c},15\text{f}}$	-3.2	68	64	66.6	61.3	67.1	-4.6

3 植物油中反式脂肪酸的调控

3.1 改进加工工艺

3.1.1 优化现有工艺

植物油的加工过程通常包括原料预处理、提油、精炼及后续的包装和储藏，其中温度、压力、湿度等对TFAs的形成影响较大。在保证植物油品质前提下，减少植物油中TFAs的生成，在工业上会通过优化加工设备的措施进行改进。在提油阶段目前工业上主要使用单螺杆榨油机进行压榨，但液压压榨相比于螺杆压榨其优点在于油料在压榨过程中没有相互摩擦而导致发热的过程，减少TFAs生成。精炼脱臭阶段目前工厂中常见的脱臭设备为板式脱臭塔，由于其结构特点使植物油在更高的脱臭温度下会暴露更长时间，通过升级优化采用软塔-板塔-软塔组合式脱塔可使脱臭过程中生成的TFAs含量小于0.9 g/100 g^[52]或将脱臭塔与脱色组合可使TFAs含量降低76%^[53]，而采用组合塔和独立填料塔相结合的形式可控制TFAs生成量小于0.3 g/100 g，达到“零反”的标准^[54]。近年来也有研究发现双塔双温脱臭塔相较传统的软塔脱臭可以有效降低4种常见植物油中的TFAs，同样达到“零反”标准^[39]。除此之外，烹饪设备也会影响TFAs的形成，比如使用微波炉油炸比传统油炸装置更有助于对TFAs进行控制。因此使用加热温度低、加热时间短的加工设备可减少植物油加工阶段TFAs的生成。

加工设备可以对植物油加工过程中产生的TFAs起到一定程度上的控制作用，但是如果要求更加有效地降低TFAs需要配合调整工艺参数等方法。首先包括对原料压榨参数的优化，有研究对比不同压榨工艺后制得的芝麻油，发现冷榨后无明显TFAs生成，而热榨后则有所检出，说明植物油在压榨过程中可以通过冷榨减少该阶段

的TFAs生成^[55]。其次直接对脱臭参数进行优化也可以控制TFAs的形成，其中脱臭时间、脱臭温度和蒸汽压力对植物油TFAs的含量影响较大，而蒸汽速率对TFAs无显著影响。有研究发现在210~230℃脱臭100 min以下，植物油中TFAs含量小于0.3 g/100 g且可以达到脱臭要求标准^[56-57]。此外，对比不同烹饪方式，蒸相对于煮、煎和炸所产生的TFAs会较少，主要是因为蒸的温度较低（100℃）^[58]。同时有研究将几种热加工方式进行对比，发现油炸和微波处理对TFAs含量有显著影响^[59]。对于烹饪温度来说，将植物油加热到普通烹饪温度（不高于180℃）时对TFAs生成的影响最小，建议应避免将油加热到非常高的温度（220℃以上）^[17]。在加工设备和加工工艺同步优化的情况下，可一定程度减少植物油TFAs的生成。

3.1.2 新型加工方法

近年，研究人员也在积极开发植物油新型加工方法以达到减少植物油中TFAs生成的效果。比如有研究对脱臭中的蒸发环节进行改进，在脱臭加工中用氮气^[60]、乙醇蒸汽等气体^[61]代替传统气体，避免了植物油通过氧化反应生成TFAs。以及采用“多级自动蒸发”等新型脱臭技术^[62-63]，非热法对植物油用高压静电场进行精炼^[64-65]，采用相对较低的温度和较短时间达到脱臭效果，并控制植物油质量。已经在生产中有所应用的是酶法精炼，串联连续流酶反应器酶法脱酸，以及酶法脱胶、脱蜡、酶法脱酸、漂白和低温精制^[66-67]。同时液-液萃取法消除了精炼植物油的漂白和除臭步骤，且没有检测到TFAs^[68]。以上方法有些已应用于实际生产加工过程，而有些则仍停留于研究阶段。如何平衡油脂质量、生产成本和减少TFAs还有待进一步研究和实践。

3.2 添加抗氧化剂

除优化加工技术外，添加抗氧化剂是一种高效方便的抑制TFAs形成的方法^[69]。目前抗氧化剂包括合成抗氧化剂（特丁基对苯二酚（*tert*-butyl hydroquinone, TBHQ）、2,6-二叔丁基对甲酚等）及天然抗氧化剂（ δ -生育酚、芝麻酚、白藜芦醇等）两大类，能不同程度抑制植物油加热过程TFAs的积累，为TFAs的调控研究提供了新的研究思路^[70-72]。但是目前由于合成抗氧化剂如TBHQ等本身具有致癌性等缺点，开始逐渐被多酚类物质、迷迭香提取物和L-抗坏血酸棕榈酸酯（*L*-ascorbyl palmitate, *L*-AP）等天然抗氧化剂取代。有研究表明1.0 g/kg的迷迭香提取物可以使TFAs含量降低9.3%，而0.1 g/kg叶黄素可以使TFAs降低16.4%^[73]。同时

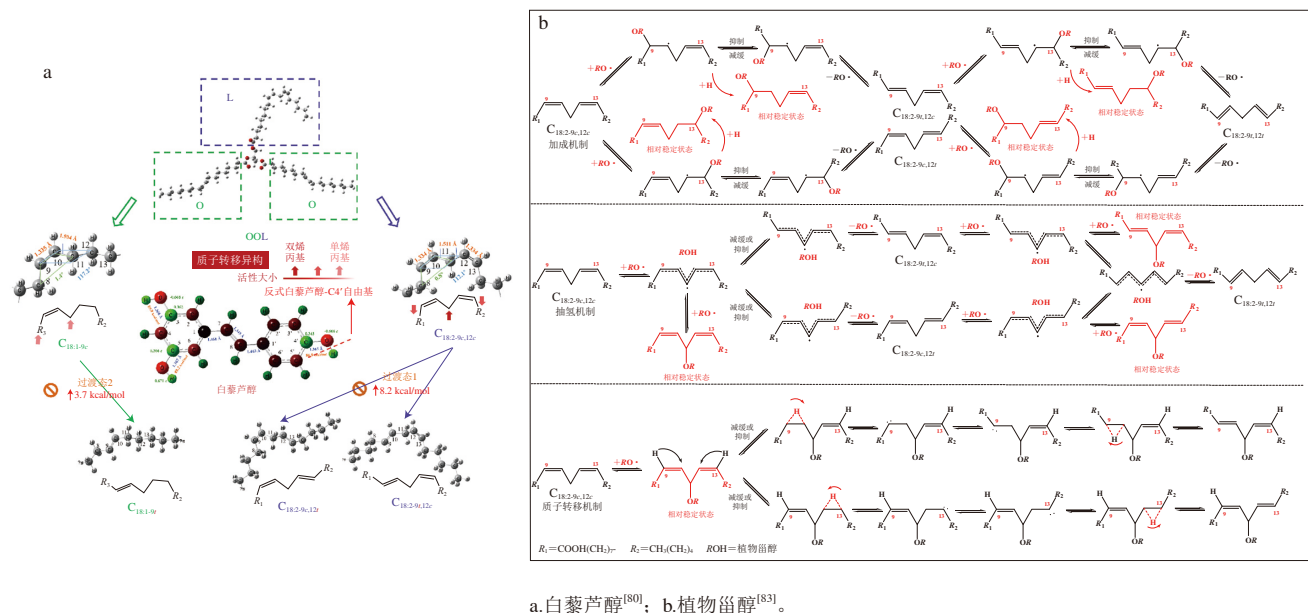


图4 抗氧化剂抑制植物油中TFAs生成机理

Fig. 4 Inhibition mechanism of TFAs formation in vegetable oils by antioxidants

添加剂的浓度以及反应条件均会影响其对植物油中TFAs的作用,如一定浓度范围内抗氧化剂可以起到抑制TFAs的效果,而高于该范围则可能诱导TFAs的形成,如谷胱甘肽(0.1%~0.4%)和 Fe^{3+} (0.1%~0.2%)^[74]。对比不同抗氧化剂抑制TFAs效果发现白藜芦醇 $<\alpha$ -生育酚 $<\text{L-AP}$ ^[75]。除此之外,也有研究将几种天然抗氧化剂加入到甘油二酯油中,发现其也能降低TFAs的含量^[76]。

抗氧化剂通过自由基机制和质子转移机制抑制植物油脂脂肪酸中的顺反异构化,如通过还原催化反应^[77]、阻止体系中自由基的生成^[78]以及清除自由基^[79],或通过质子转移机制升高异构反应能垒^[80]。植物油在日常烹饪条件下,抗氧化剂会与过氧化物相互作用中断植物油的氧化异构,从而抑制TFAs的生成。抗氧化剂抑制TFAs生成会有2种可能的机制,第一种是抗氧化剂与植物油脂脂肪酸链上的烯丙基自由基结合形成稳定的化合物,增加了脂肪酸不饱和和双键的位阻,防止了键的旋转从而抑制TFAs的生成;第二种机制是抗氧化剂与植物油中脂肪酸链上的烯丙基位结合,产生空间位阻效应增加双键旋转的难度,从而抑制植物油发生异构化反应。如白藜芦醇在花生油中以质子转移机制抑制反式油酸和亚油酸的生成(图4a),其主要作用于脂肪酸的双烯丙基位,首先抑制花生油中 $\text{C}_{18:2-9c,12r}$,之后是 $\text{C}_{18:2-9r,12c}$,最高可使TFAs的生成速率降低至原来的1/1 000^[80-81],同时有研究表明白藜芦醇也可以通过抽氢机制和质子转移机制抑制反式亚麻酸的生成,使异构反应能垒升高0.42%~14.30%^[82]。而植物甾醇作为新资源食品也

被发现花生油中有抑制TFAs生成的效果,并推测其抑制机制与白藜芦醇类似^[83](图4b)。

对于其在产业上的应用来说,合成抗氧化剂添加风险大,可能会对人体健康造成不良影响;而天然抗氧化剂大多数靠从天然动植物中提取,添加成本较高。在成本上无法做到成本与健康的平衡,应当对不同种的抗氧化剂对植物油的影响进行多方面的评估,从而在植物油产业生产中达到最佳的TFAs抑制效果。

4 结语

植物油中TFAs的含量、生成和控制关系植物油营养健康性,其种类、生成途径、形成机理及控制措施等问题受到国内外学者的广泛关注和研究。通过对不同种类成品植物油和烹饪条件下加热后植物油TFAs含量进行对比,发现其TFAs的生成含量与植物油本身脂肪酸组成和加工工艺条件有关,应当减少在高温下长时间的烹饪以减少植物油中TFAs的生成;通过对TFAs两种生成机理以及不同种TFAs控制方法进行研究,发现植物油的新型加工方法将有助于减少TFAs在加工环节的产生,添加抗氧化剂是一种简单高效调节TFAs的方法,但其安全性仍有待探究。综上所述,目前对TFAs生成仍有待进一步研究其动力学过程,以及探究出不同种植物油的安全烹饪条件;而关于TFAs形成机理的研究仍有待进一步深入揭示氧气和光照等条件对植物油中TFAs的影响机理,同时对现提出的生成机理的中间产物进行定性、定量分析,从而进一步指导对TFAs的控制研究。当前对植物油中TFAs

的控制研究较为分散, 没有对植物油生产加工及后续烹饪全过程中TFAs含量变化及控制的研究, 仍有待进一步加强。解决植物油中TFAs的问题, 需将上述问题进一步深入研究, 以得到更加具有实用性的结论。

参考文献:

- [1] VALENZUELA C A, BAKER E J, MILES E A, et al. Eighteen-carbon *trans* fatty acids and inflammation in the context of atherosclerosis[J]. *Progress in Lipid Research*, 2019, 76: 101009. DOI:10.1016/j.plipres.2019.101009.
- [2] MICHELS N, SPECHT I O, HEITMANN B L, et al. Dietary *trans*-fatty acid intake in relation to cancer risk: a systematic review and meta-analysis[J]. *Nutrition Reviews*, 2021, 79(7): 758-776. DOI:10.1093/nutrit/nuaa061.
- [3] WENDEU-FOYET G, BELLICH A, CHAJÈS V, et al. Different types of industry-produced and ruminant *trans* fatty acid intake and risk of type 2 diabetes: findings from the NutriNet-Santé prospective cohort[J]. *Diabetes Care*, 2023, 46(2): 321-330. DOI:10.2337/dc22-0900.
- [4] LI D, ZHENG H Y, TONG Y Q, et al. Prospective association between *trans* fatty acid intake and depressive symptoms: results from the study of women's health across the nation[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2020, 264: 256-262. DOI:10.1016/j.jad.2020.01.010.
- [5] GRANADOS N, AMENGUAL J, RIBOT J, et al. Distinct effects of oleic acid and its *trans*-isomer elaidic acid on the expression of myokines and adipokines in cell models[J]. *British Journal of Nutrition*, 2011, 105(8): 1226-1234. DOI:10.1017/S0007114510004885.
- [6] STACHOWSKA E, DOŁĘGOWSKA B, CHLUBEK D, et al. Dietary *trans* fatty acids and composition of human atheromatous plaques[J]. *European Journal of Nutrition*, 2004, 43(5): 313-318. DOI:10.1007/s00394-004-0479-x.
- [7] BERDEAUX O, BRETILLON L. *Trans* isomers of alpha-linolenic acid and platelet build-up in humans[J]. *Oilseeds, Corps, Fats & Lipids*, 2000, 7(1): 44-49.
- [8] ACAR N, CHARDIGNY J M, BONHOMME B, et al. Long-term intake of *trans* (*n*-3) polyunsaturated fatty acids reduces the b-wave amplitude of electroretinograms in rats[J]. *The Journal of Nutrition*, 2002, 132(10): 3151-3154. DOI:10.1093/jn/131.10.3151.
- [9] MOZAFFARIAN D, ARO A, WILLETT W C. Health effects of *trans*-fatty acids: experimental and observational evidence[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2009, 63(Suppl 2): S5-S21. DOI:10.1038/sj.ejcn.1602973.
- [10] LI J, RAO H, BIN Q, et al. Linolelaidic acid induces apoptosis, cell cycle arrest and inflammation stronger than elaidic acid in human umbilical vein endothelial cells through lipid rafts[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2017, 119(7): 1600374. DOI:10.1002/ejlt.201600374.
- [11] WAN L T, LI T, YAO M Y, et al. Linoelaidic acid gavage has more severe consequences on triglycerides accumulation, inflammation and intestinal microbiota in mice than elaidic acid[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 22: 101328. DOI:10.1016/j.fochx.2024.101328.
- [12] GUO Q, LI T, QU Y, et al. New research development on *trans* fatty acids in food: biological effects, analytical methods, formation mechanism, and mitigating measures[J]. *Progress in Lipid Research*, 2023, 89: 101199. DOI:10.1016/j.plipres.2022.101199.
- [13] NAGPAL T, SAHU J K, KHARE S K, et al. *Trans* fatty acids in food: a review on dietary intake, health impact, regulations and alternatives[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(12): 5159-5174. DOI:10.1111/1750-3841.15977.
- [14] ALI ABD EL-AAL Y, MOHAMED ABDEL-FATTAH D, EL-DAWY AHMED K. Some biochemical studies on *trans* fatty acid-containing diet[J]. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 2019, 13(3): 1753-1757. DOI:10.1016/j.dsx.2019.03.029.
- [15] 赵元元, 胡本伦, 贾才华, 等. 煎炸油中反式脂肪酸和极性化合物检测方法及防控措施研究进展[J]. *中国油脂*, 2021, 46(4): 84-91. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.04.018.
- [16] GUILLOCHEAU E, LEGRAND P, RIOUX V. *trans*-Palmitoleic acid (*trans*-9-C_{16:1}, or *trans*-C_{16:1 n-7}): nutritional impacts, metabolism, origin, compositional data, analytical methods and chemical synthesis. a review[J]. *Biochimie*, 2020, 169: 144-160. DOI:10.1016/j.biochi.2019.12.004.
- [17] BHAT S, MAGANJA D, HUANG L P, et al. Influence of heating during cooking on *trans* fatty acid content of edible oils: a systematic review and meta-analysis[J]. *Nutrients*, 2022, 14(7): 1489. DOI:10.3390/nu14071489.
- [18] 姚梦莹, 梁倩, 崔岩岩, 等. 不饱和脂肪酸经氧化反应形成反式脂肪酸机理研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(2): 170-178. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2020.02.029.
- [19] WALLIS J G, BENGTSSON J D, BROWSE J. Molecular approaches reduce saturates and eliminate *trans* fats in food oils[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 908608. DOI:10.3389/fpls.2022.908608.
- [20] TEMKOV M, MUREȘAN V. Tailoring the structure of lipids, oleogels and fat replacers by different approaches for solving the *trans*-fat issue: a review[J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1376. DOI:10.3390/foods10061376.
- [21] CHOPRA S, ARORA C, MALHOTRA A, et al. Industrially produced *trans* fat: usage, health implications, global and Indian regulations[J]. *Indian Journal of Public Health*, 2021, 65(1): 71-75. DOI:10.4103/ijph.ijph_851_20.
- [22] XIANG F, DING C X, WANG M, et al. Vegetable oils: classification, quality analysis, nutritional value and lipidomics applications[J]. *Food Chemistry*, 2024, 439: 138059. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.138059.
- [23] 张建树, 王强, 刘红芝, 等. 脂肪酸、VE、甾醇与植物油脂稳定性的关系研究进展[J]. *中国油脂*, 2011, 36(10): 38-41.
- [24] 俞乐. 国产橄榄油的组成特征、抗氧化性质及其鉴别评价[D]. 无锡: 江南大学, 2021. DOI:10.27169/d.cnki.gwqgu.2021.001894.
- [25] 郑畅, 杨涓, 周琦, 等. 高油酸花生油与普通油酸花生油的脂肪酸、微量成分含量和氧化稳定性[J]. *中国油脂*, 2014, 39(11): 40-43. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2014.11.012.
- [26] HUANG Y, LIU C S, HUANG F H, et al. Quality evaluation of oil by cold-pressed peanut from different growing regions in China[J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(6): 1975-1987. DOI:10.1002/fsn3.2813.
- [27] LI Y J, LIANG M Z, LI T, et al. Green process for the preparation of resveratrol-containing high oleic acid peanut oil[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 100: 106604. DOI:10.1016/j.ultsonch.2023.106604.
- [28] 贺凡, 郭芹, 顾丰颖, 等. 11 种品牌玉米油脂脂肪酸及异构体的主成分分析[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(2): 190-196. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.2.029.
- [29] LI Z Y, XIANG F, HUANG X G, et al. Properties and characterization of sunflower seeds from different varieties of edible and oil sunflower seeds[J]. *Foods*, 2024, 13(8): 1188. DOI:10.3390/foods13081188.
- [30] 赖玉萍, 姜福全, 黄思苑, 等. 亚麻籽油的营养成分、功能活性及应用研究进展[J]. *中国油脂*, 2022, 47(8): 109-115. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210389.
- [31] 谢亚萍, 张建平, 王利民, 等. 亚麻籽油营养特性、感官评价及主要挥发性物质分析[J]. *中国油脂*, 2023, 48(7): 103-108. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220387.

- [32] CUI Y M, HAO P F, LIU B J, et al. Effect of traditional Chinese cooking methods on fatty acid profiles of vegetable oils[J]. Food Chemistry, 2017, 233: 77-84. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.04.084.
- [33] 杨明, 邵鹏, 沈甘霓, 等. 加热过程中植物油品质变化规律的研究[J]. 分析仪器, 2018(2): 138-146. DOI:10.3969/j.issn.1001-232x.2018.02.027.
- [34] HISHAMUDDIN E. Assessment of *trans* fatty acid levels in refined palm-based oils and commercial vegetable oils in the Malaysian market[J]. Journal of Oil Palm Research, 2022, 34(1): 129-138. DOI:10.21894/jopr.2021.0029.
- [35] 刘玉兰, 陈莉, 胡爱鹏, 等. 脱臭工艺条件对葵花籽油综合品质影响的研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(10): 1-7. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2018.10.001.
- [36] 刘媛媛, 李鹏飞, 杨瑞金, 等. 水酶法提取葵花籽油工艺及机理[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 151-156; 163. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.24.027.
- [37] ALBRAND P, JULCOUR C, VEYRINE F, et al. Sunflower oil hydrogenation mechanisms and kinetics[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 129854. DOI:10.1016/j.cej.2021.129854.
- [38] GUO Q, LI T, QU Y, et al. Molecular formation mechanism of *trans* linolenic acid in thermally induced α -linolenic acid[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 130: 109595. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109595.
- [39] LIU X J, ZHOU S M, JIANG Y R, et al. Optimization of deodorization design for four different kinds of vegetable oil in industrial trial to reduce thermal deterioration of product[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2021, 98(4): 475-483. DOI:10.1002/aocs.12453.
- [40] CHERIF A, SLAMA A. Stability and change in fatty acids composition of soybean, corn, and sunflower oils during the heating process[J]. Journal of Food Quality, 2022, 2022(1): 6761029. DOI:10.1155/2022/6761029.
- [41] SHEIKH H, SAYEED S A. Effect of adding polyphenolic fractions on the acrolein and *trans* fatty acid contents during deep frying and heating of corn oil[J]. Pakistan journal of agricultural sciences, 2021, 58(3): 977-984. DOI:10.21162/PAKJAS/21.529.
- [42] 马齐兵, 包李林, 熊巍林, 等. 精炼对菜籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(6): 16-18; 35. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2018.06.004.
- [43] 刘春梅, 刘玉兰, 黄会娜, 等. 不同脱臭工艺和条件对菜籽油综合品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(4): 46-53. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2020.04.009.
- [44] TSUZUKI W. *Cis-trans* isomerization of carbon double bonds in monounsaturated triacylglycerols via generation of free radicals[J]. Chemistry and Physics of Lipids, 2010, 163(7): 741-745. DOI:10.1016/j.chemphyslip.2010.06.006.
- [45] CHENG N N, ZHANG J J, YIN J M, et al. Computational and experimental research on mechanism of *cis/trans* isomerization of oleic acid[J]. Heliyon, 2018, 4(9): e00768. DOI:10.1016/j.heliyon.2018.e00768.
- [46] 李元元. 高温下亚油酸甘油三酯反式脂肪酸生成机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 33.
- [47] CHRISTY A A. Thermally induced isomerization of trilinolein and trilinoelaidin at 250 °C: analysis of products by gas chromatography and infrared spectroscopy[J]. Lipids, 2009, 44(12): 1105-1112. DOI:10.1007/s11745-009-3363-x.
- [48] LU H M, LI Y F, QIU J. Characterization of the evolution of free radicals and TALAs in linseed oil during heat treatment[J]. Heliyon, 2024, 10(6): e27168. DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e27168.
- [49] TZENG Y Z, HU C H. Radical-induced *cis-trans* isomerization of fatty acids: a theoretical study[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2014, 118(25): 4554-4564. DOI:10.1021/jp502434t.
- [50] LI C M, ZHANG Y B, LI S, et al. Mechanism of formation of *trans* fatty acids under heating conditions in triolein[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(43): 10392-10397. DOI:10.1021/jf402854b.
- [51] LI A, YUAN B F, LI W M, et al. Thermally induced isomerization of linoleic acid in soybean oil[J]. Chemistry and Physics of Lipids, 2013, 166: 55-60. DOI:10.1016/j.chemphyslip.2012.12.003.
- [52] 左青, 左晖. 油脂精炼工艺和设备的改进实践[J]. 中国油脂, 2020, 45(10): 22-27. DOI:10.12166/j.zgyz.1003-7969/2020.10.005.
- [53] 刘文剑. 茶油的脱臭工艺与反式脂肪酸[J]. 江西食品工业, 2010(4): 25-27. DOI:10.3969/j.issn.1674-2435.2010.04.009.
- [54] 王月华, 杜雁冰, 刘红, 等. 营养玉米油及其关键精炼工艺技术[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(5): 9-11. DOI:10.3969/j.issn.1672-5026.2014.05.003.
- [55] 赵丹, 汪学德, 马宇翔. 不同工艺芝麻油的品质研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(3): 50-53. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2018.03.012.
- [56] ÖZDIKICIERLER O, YEMIŞÇIOĞLU F, BAŞARAN N, et al. Multi-factor optimization of canola oil deodorization parameters and evaluation of linolenic acid isomerization kinetics during pilot-scale deodorization[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(1): 604-619. DOI:10.1007/s11694-020-00667-y.
- [57] 李洁艳, 闫军剑, 翟栋良. 精炼工艺对玉米油反式脂肪酸的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(6): 25-27. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.06.006.
- [58] HUANG J H, ZHAO Z M, SHAO L Y, et al. Steaming, boiling after pre-frying, and stir-frying influence the fatty acid profiles and oxidative stability of soybean oil blended with docosahexaenoic acid algal oil[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2021, 98(7): 747-756. DOI:10.1002/aocs.12511.
- [59] TRIPATHI P, GUPTA E, PURWAR S, et al. Processing induced *trans* fatty acid quantification analysis of selected edible oils and their probable outcome[J]. Current Science, 2022, 123(12): 1455. DOI:10.18520/cs/v123/i12/1455-1461.
- [60] YU D Y, DONG T Y, ZHANG L, et al. Effects of different deodorization methods on the oxidation of sterol components in rice bran oil[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134568. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134568.
- [61] YANG C, WANG C M, WANG M, et al. A novel deodorization method of edible oil by using ethanol steam at low temperature[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(2): 394-403. DOI:10.1111/1750-3841.15578.
- [62] JAMOUISSI B, JABLAOUI C, HAJRI A K, et al. Thermomechanical autovaporization (MFA) as a deodorization process of palm oil[J]. Foods, 2022, 11(24): 3952. DOI:10.3390/foods11243952.
- [63] JAMOUISSI B, JABLAOUI C, HAJRI A K, et al. Deodorization process of vegetal soybean oil using thermomechanical multi-flash autovaporization (MFA)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 167: 113823. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113823.
- [64] TAVAKOLI A, ALI SAHARI M, BARZEGAR M, et al. Deodorization of sunflower oil by high voltage electric field as a nonthermal method sunflower oil refining by electric field[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(10): 4363-4378. DOI:10.1111/1750-3841.16312.
- [65] ZHOU L, SHEN J H, TSE T J, et al. Electrostatic field treatment as a novel and efficient method for refining crude canola oil[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 360: 131905. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131905.
- [66] XU L J, ZHANG Y, ZIVKOVIC V, et al. Deacidification of high-acid rice bran oil by the tandem continuous-flow enzymatic reactors[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133440. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133440.

- [67] LI D M, ZHANG J H, FAIZA M, et al. The enhancement of rice bran oil quality through a novel moderate biorefining process[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112118. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112118.
- [68] TIRITAN M G, TONIAL I B, DALMOLIN I A L, et al. Improving quality of refined canola oil by liquid-liquid extraction on pilot scale apparatus[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(11): e13513. DOI:10.1111/jfpe.13513.
- [69] GUO Q. Antioxidants can be the effective measures to mitigate the TFAs in edible oils[J]. Modern Concepts & Developments in Agronomy, 2022, 11(5): 774. DOI:10.31031/mcda.2022.11.000774.
- [70] 田莹俏, 李甜, 张好, 等. 天然抗氧化剂对玉米油热致异构体的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 149-154. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035985.
- [71] 郭芹, 陈爽, 郑佳丽, 等. *L*-抗坏血酸棕榈酸酯对亚麻酸甘油三酯热致异构反式产物动力学的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(2): 127-135. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.02.016.
- [72] GUO Q, WANG F, HE F, et al. The impact of technical cashew nut shell liquid on thermally-induced *trans* isomers in edible oils[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(3): 1487-1495. DOI:10.1007/s13197-015-2147-y.
- [73] FILIP S, HRIBAR J, VIDRIH R. Influence of natural antioxidants on the formation of *trans*-fatty-acid isomers during heat treatment of sunflower oil[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2011, 113(2): 224-230. DOI:10.1002/ejlt.200900231.
- [74] GUO Q, HA Y M, LI Q P, et al. Impact of additives on thermally-induced *trans* isomers in 9c,12c linoleic acid triacylglycerol[J]. Food Chemistry, 2015, 174: 299-305. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.11.063.
- [75] TARTARO BUJAK I, MIHALJEVIĆ B, FERRERI C, et al. The influence of antioxidants in the thiyl radical induced lipid peroxidation and geometrical isomerization in micelles of linoleic acid[J]. Free Radical Research, 2016, 50(Suppl 1): S18-S23. DOI:10.1080/10715762.2016.1231401.
- [76] 姚怡心, 刘萱, 李志刚, 等. 天然抗氧化剂对亚麻籽甘油二酯油氧化稳定性的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(12): 46-50; 69. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210799.
- [77] MENGELE E A, FERRERI C, CHATGILIALOGLU C, et al. Effects of oxygen and antioxidants on the *cis-trans*-isomerization of unsaturated fatty acids caused by thiyl radicals[J]. Moscow University Chemistry Bulletin, 2010, 65(3): 210-211. DOI:10.3103/S002713141003020X.
- [78] WANG Z Y, HUANG J B, YUN D W, et al. Antioxidant packaging films developed based on chitosan grafted with different catechins: characterization and application in retarding corn oil oxidation[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107970. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.107970.
- [79] GAO H X, YU J, CHEN N, et al. Effects and mechanism of tea polyphenols on the quality of oil during frying process[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(11): 3786-3796. DOI:10.1111/1750-3841.15470.
- [80] LI T, GUO Q, QU Y, et al. Inhibition mechanism of *trans*-resveratrol on thermally induced *trans* fatty acids in peanut oil[J]. Food Chemistry, 2023, 406: 134863. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134863.
- [81] 李甜, 郭芹, 屈阳, 等. 白藜芦醇对花生油热致异构反式脂肪酸的抑制作用[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 34-39. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220826-318.
- [82] LIANG M Z, LI T, QU Y, et al. Mitigation mechanism of resveratrol on thermally induced *trans- α* -linolenic acid of trilinolenin[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 189: 115508. DOI:10.1016/j.lwt.2023.115508.
- [83] GUO Q, LI T, QU Y, et al. Action of phytosterols on thermally induced *trans* fatty acids in peanut oil[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128637. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128637.