

高压静电场协同抗氧化剂抑制大豆油氧化

袁媛¹, 季婉¹, 张岩², 庄红^{1,*}

(1. 吉林大学食品科学与工程学院, 吉林 长春 130062; 2. 吉林大学物理学院, 吉林 长春 130062)

摘要: 高压静电场作为物理加工技术, 近年来在食品领域有一定应用, 但在油脂加工方面的应用鲜有报道。本研究以大豆油为原料, 通过探究过氧化值、酸价、羰基价、茴香胺值及典型脂肪酸相对含量的变化, 考察高压静电场对大豆油油脂氧化的影响。研究表明当高压静电场场强为150 kV/m时, 对大豆油油脂氧化的抑制效果最好。在该场强下, 协同考察了茶多酚、植酸、特丁基对苯二酚这3种抗氧化剂对大豆油氧化的抑制效果。结果表明: 150 kV/m高压静电场结合茶多酚的方式增强了茶多酚的抗氧化效果, 可以有效抑制大豆油的氧化, 其对过氧化值、酸价、羰基价及茴香胺值的抑制率分别达到34.4%、67.6%、66.0%及55.0%。高压静电场结合茶多酚的处理方式, 为抑制大豆油油脂氧化提供了全新的研究思路。

关键词: 高压静电场; 大豆油氧化; 抑制; 抗氧化剂; 茶多酚

Synergistic Suppression of High Voltage Electrostatic Field and Antioxidants on Soybean Oil Oxidation

YUAN Yuan¹, JI Wan¹, ZHANG Yan², ZHUANG Hong^{1,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China;

2. College of Physics, Jilin University, Changchun 130062, China)

Abstract: High voltage electrostatic field, a physical processing technology, has been used in the food industry in recent years. However, there is little research on its impact on oil processing. In this study, we treated soybean oil with high voltage electrostatic field to explore its effect on the oxidation of soybean oil by evaluating the changes in peroxide value (POV), acid value (AV), carbonyl value (CV), anisidine value (AnV) and the relative contents of typical fatty acids. The results showed that the best suppression on the oxidation of soybean oil was observed when the field strength was 150 kV/m. At this electric field intensity, the inhibitory effects of three antioxidants: tea polyphenols, phytic acid and tert-butylhydroquinone on the oxidation of soybean oil were investigated. It turned out that 150 kV/m high voltage electrostatic field could result in the oxidation of soybean oil suppression. The percentage inhibition of POV, AV, CV and AnV by tea polyphenols was enhanced to 34.4%, 67.6%, 66.0% and 55.0%, respectively, thereby effectively alleviating the oxidation of soybean oil. Our conclusion may provide a novel direction for the suppression of soybean oil oxidation.

Keywords: high voltage electrostatic field; soybean oil oxidation; suppression; antioxidant; tea polyphenols

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201813013

中图分类号: TS221

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 13-0081-06

引文格式:

袁媛, 季婉, 张岩, 等. 高压静电场协同抗氧化剂抑制大豆油氧化[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 81-86. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201813013. <http://www.spkx.net.cn>

YUAN Yuan, JI Wan, ZHANG Yan, et al. Synergistic suppression of high voltage electrostatic field and antioxidants on soybean oil oxidation[J]. Food Science, 2018, 39(13): 81-86. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201813013. <http://www.spkx.net.cn>

油脂是人类生命活动中必不可少的物质, 然而油脂在贮藏期间容易发生氧化反应, 导致其食用品质下降,

甚至危害人类健康^[1-2]。目前油脂常用的保鲜方法有低温贮藏、气调保鲜、添加抗氧化剂等^[3-5], 这些方法起到一

收稿日期: 2018-01-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31772092); 吉林省科技厅国际合作项目 (20180414073GH);

吉林省教育厅项目 (JKH20180168KJ)

第一作者简介: 袁媛 (1978—), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品加工危害物形成及控制技术。E-mail: yuan_yuan@jlu.edu.cn

*通信作者简介: 庄红 (1974—), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品科学。E-mail: zhuanghong@jlu.edu.cn

定抗氧化效果的同时,在实际应用中也有不足之处,例如:全程低温冷链难以实现,气调设施难以全面推广,人工合成油脂抗氧化剂存在潜在安全隐患等。因此,研究与开发新型的抗氧化保鲜处理方法已成为油脂行业亟需解决的问题^[6]。

高压静电场是一种人工综合效应场,220 V电压经处理后输出稳定的直流高电压,在两块平行的电极板间形成高压匀强静电场,通过控制台调节电压改变电场强度^[7]。目前,高压静电技术在食品领域的应用研究主要包括:食品保鲜^[8-9]、酶的钝化^[10]、食品杀菌^[11]等;但高压静电场抑制油脂氧化等方面的研究鲜有报道^[12]。

本研究以大豆油为原料,利用高压静电场与常用抗氧化剂的协同作用,以期探索出大豆油抗氧化的新方法,为延长其保质期、保障其品质及安全提供一定的基础依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆油(精炼一级) 嘉里粮油(营口)有限公司。

茶多酚(生物试剂,纯度 $\geq 98\%$)、植酸(生物试剂,纯度 $\geq 70\%$)、特丁基对苯二酚(*tert*-butylhydroquinone, TBHQ)(生物试剂,纯度 $\geq 98\%$) 上海源叶生物有限公司;2,4-二硝基苯胍国药集团化学试剂有限公司;茴香胺 美国Sigma公司;异辛烷(色谱纯)、硫代硫酸钠、三氯乙酸等(均为分析纯) 北京化工厂。

1.2 仪器与设备

NDYDJC-20kVA油浸式交流串级试验变压器及控制台 武汉南星电力科技有限公司;ED 53洁净烘箱(精密) 德国宾德公司;MX-S涡旋振荡器美国赛洛捷克公司;AG204电子天平 美国梅特勒-托利多公司;HHS-11-8电热恒温水浴锅 上海博迅实业有限公司医疗设备厂;UV-7504C紫外-可见分光光度计 上海精科实业有限公司;QP2010气相色谱质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用仪 岛津国际贸易上海有限公司;Rxi-5ms色谱柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μ m) 美国瑞斯泰克公司。

1.3 方法

1.3.1 预氧化油脂样品的制备

将10 mL大豆油装入培养皿中,高压静电场分别设置场强0(对照)、50、150、250、350、400 kV/m,每组处理时间均为30 min,每组设置3个平行。处理后的油脂样品放入150 $^{\circ}$ C烘箱中,4 h后取出置于室温条件下贮存。预氧化油脂样品重复处理3次。

1.3.2 油脂结合抗氧化剂样品的处理

参考GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》^[13],大豆油中分别添加0.2 g/kg抗氧化剂(茶多酚、植酸、TBHQ),混匀后分装入培养皿,高压静电场分别设置场强0、150 kV/m,每组处理时间均为30 min,每组设置3个平行。之后放入100 $^{\circ}$ C烘箱中,8 h后取出置于室温条件下贮存。以上操作重复3次。以不添加任何抗氧化剂、不经过电场处理的油脂样品作为对照组。

1.3.3 油脂氧化评价指标的测定

过氧化值、酸价、羰基价、茴香胺值,分别参考GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》^[14]、GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》^[15]、GB 5009.230—2016《食品安全国家标准 食品中羰基价的测定》^[16]、GB/T 24304—2009《动植物油脂 茴香胺值的测定》^[17]方法进行测定。

1.3.4 油脂脂肪酸相对含量的测定

1.3.4.1 脂肪酸甲酯的制备

参考GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》^[18]和文献[19-20]的处理方法将样品中的脂肪酸甲酯化。称取0.06 g样品于10 mL具塞试管中,每个试管加入4 mL异辛烷、0.2 mL 2 mol/L氢氧化钾-甲醇溶液,塞紧试管塞,剧烈振摇2 min,至试管内混合溶液澄清,加1 g一水合硫酸氢钠,剧烈振摇1 min,静置40 min。取上清液待测。

1.3.4.2 GC-MS检测

GC条件:进样口温度为250 $^{\circ}$ C,分流比1:40,高纯氦气(99.999%)的流速为2 mL/min;色谱柱升温按照如下程序:160 $^{\circ}$ C保持50 min,然后以2 $^{\circ}$ C/min的速率均匀升至220 $^{\circ}$ C,并保持10 min。

MS条件:离子源温度200 $^{\circ}$ C,电子能量70 eV;接口温度为220 $^{\circ}$ C;采集扫描Scan,质量扫描范围40~390 u。

1.4 数据统计分析

各项指标均为3组平行的平均值,应用Excel 2010软件计算标准偏差并作图,应用SPSS 19.0软件中多重比较法进行差异显著性分析,以 $P<0.05$ 表示差异显著。

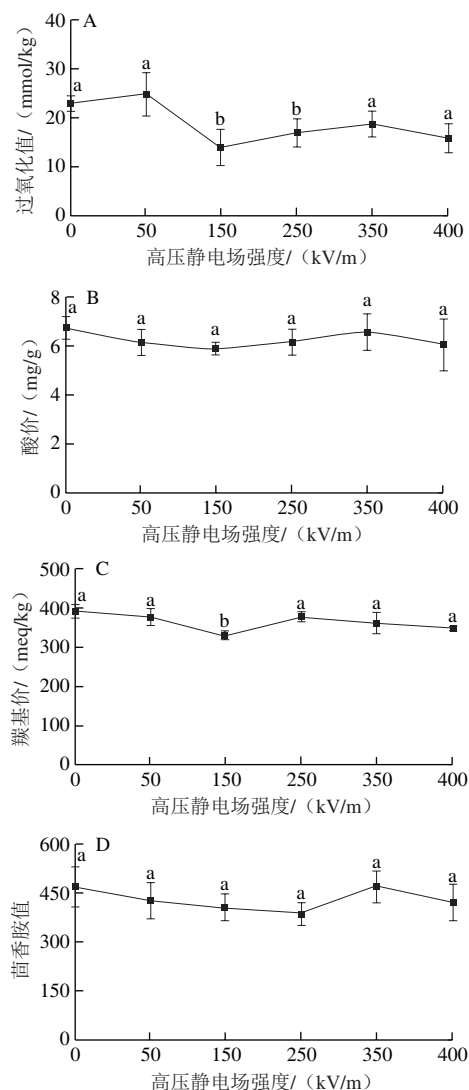
2 结果与分析

2.1 高压静电场单独处理对大豆油油脂氧化的影响

2.1.1 氧化相关理化指标

在本研究过程中,首先通过油脂氧化典型指标评价高压静电场单独处理对大豆油油脂氧化的影响(图1)。所选择的各评价指标(过氧化值、酸价、羰基价及茴香胺值)均随高压静电场强度的增强呈现先减小后增大的趋势。总体来说,过氧化值、酸价和羰基价在

场强为150 kV/m时最小, 茴香胺值在250 kV/m时最小, 其中, 150 kV/m实验组的过氧化值和羰基价与对照组之间差异显著 ($P<0.05$)。考虑到场强为150 kV/m时, 过氧化值与对照组差异显著, 而且场强越大, 电压越高, 操作难度和不安全系数越大, 故选择150 kV/m作为后续实验的静电场条件。



A. 过氧化值; B. 酸价; C. 羰基价; D. 茴香胺值。
小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。

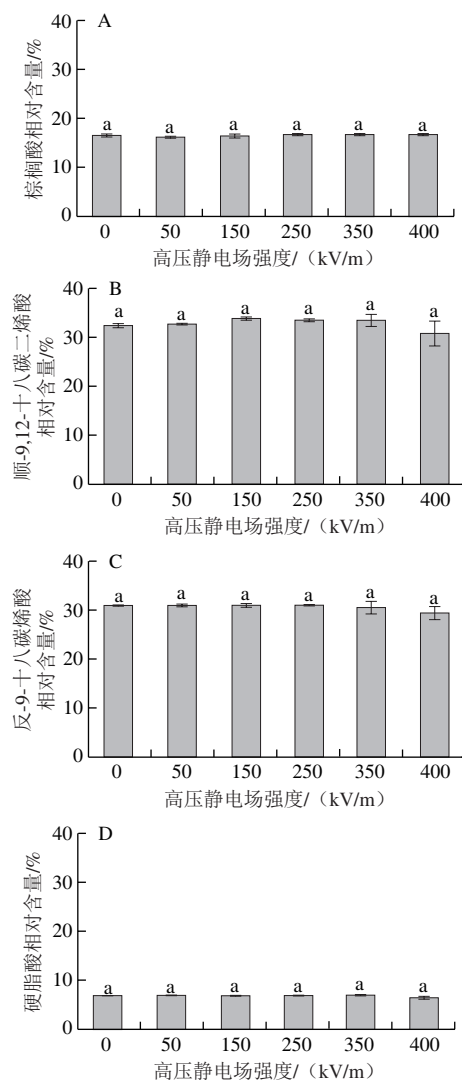
图1 不同场强的高压静电场对大豆油氧化相关理化指标的影响

Fig. 1 Effects of different high voltage electrostatic fields on indicators of soybean oil oxidation

2.1.2 脂肪酸相对含量

脂肪酸是油脂的重要组成成分, 决定油脂的固有属性。目前脂肪酸组成多用来表征油脂的理化特征、营养价值^[21-22]。油脂在氧化过程中, 顺式和反式脂肪酸的比例及生物活性物质的含量也会发生改变^[23]。本研究选取了大豆油中4种典型脂肪酸, 即棕榈酸、顺-9,12-十八碳二烯酸、反-9-十八碳烯酸、硬脂酸, 考察高压静电场对脂

肪酸相对含量的影响 (图2)。综合看来, 高压静电场对大豆油氧化过程中脂肪酸相对含量的影响并不大, 各处理组与对照组间差异不显著 ($P>0.05$)。



A. 棕榈酸相对含量; B. 顺-9,12-十八碳二烯酸相对含量;
C. 反-9-十八碳烯酸相对含量; D. 硬脂酸相对含量。图7同。

图2 不同场强的高压静电场对大豆油典型脂肪酸相对含量的影响

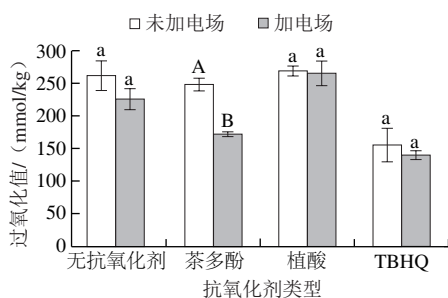
Fig. 2 Effects of different high voltage electrostatic fields on the relative contents of typical fatty acids in soybean oil

2.2 高压静电场协同抗氧化剂对大豆油油脂抗氧化的影响

2.2.1 过氧化值

由图3可知, 对照组的过氧化值为262 mmol/kg, 单独加电场的样品过氧化值为225 mmol/kg, 与对照组相比下降了14.1%; 加茶多酚不加电场的样品的过氧化值为249 mmol/kg, 结合电场后的过氧化值下降为172 mmol/kg, 两组差异极显著 ($P<0.01$); 加植酸不加电场的样品的过氧化值为269 mmol/kg, 结合电场后的过氧化值为265 mmol/kg, 两组之间无明显变化; 加TBHQ不加电场的样品的过氧化值为155 mmol/kg, 结合电场后的过氧化

值为139 mmol/kg, 后者比前者下降10.3%, 两者差异不显著 ($P>0.05$)。由此可以看出, 茶多酚结合静电场对大豆油的氧化抑制作用显著增强, TBHQ本身对大豆油的氧化有更为明显的抑制作用, 但是与静电场相结合, 增效作用不大, 植酸对其没有抑制作用。与对照组相比, 茶多酚结合150 kV/m高压静电场处理对大豆油氧化过氧化值的有效降低率为34.4%。



同一抗氧化剂添加组, 小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$); 大写字母不同表示差异极显著 ($P<0.01$)。下同。

图3 150 kV/m高压静电场结合不同抗氧化剂对大豆油过氧化值的影响
Fig. 3 Effects of different antioxidants on peroxide value in soybean oil under 150 kV/m high voltage electrostatic field

2.2.2 酸价

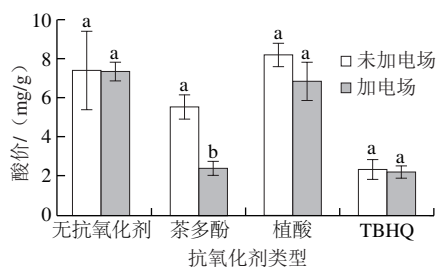


图4 150 kV/m高压静电场结合不同抗氧化剂对大豆油酸价的影响
Fig. 4 Effects of different antioxidants on acid value in soybean oil under 150 kV/m high voltage electrostatic field

如图4所示, 对照组的酸价为7.4 mg/g, 加电场的样品酸价为7.3 mg/g; 加茶多酚不加电场的样品的酸价为5.5 mg/g, 结合电场后的酸价为2.4 mg/g, 两者差异显著 ($P<0.05$); 加植酸不加电场的样品的酸价为8.2 mg/g, 结合电场后的酸价为6.8 mg/g, 后者比前者下降了17.1%, 两组之间差异不显著 ($P>0.05$); 加TBHQ不加电场的样品的酸价为2.3 mg/g, 结合电场后的样品的酸价为2.2 mg/g, 两组之间无明显变化。说明茶多酚与150 kV/m高压静电场结合的增效作用较好, 与对照组相比, 对大豆油氧化酸价的有效降低率为67.6%。

2.2.3 羰基价

图5显示了高压静电场结合不同抗氧化剂对大豆油羰基价的影响, 对照组的羰基价为488 meq/kg, 只加电场的样品羰基价为423 meq/kg, 比对照组下降了13.3%;

加茶多酚不加电场样品的羰基价为309 meq/kg, 结合电场后的羰基价下降为166 meq/kg, 两组之间差异极显著 ($P<0.01$); 加植酸不加电场的样品的羰基价为426 meq/kg, 结合电场后的样品的羰基价为402 meq/kg, 与对照组相比差异不显著 ($P>0.05$); 加TBHQ不加电场的样品的羰基价为161 meq/kg, 结合电场后的羰基价为120 meq/kg, 后者比前者下降25.5%, 两组之间差异不显著 ($P>0.05$)。由此可见, 抗氧化剂结合静电场对抑制羰基价升高的增效作用中, 茶多酚最明显, 其次是TBHQ, 最后是植酸。与对照组相比, 茶多酚结合150 kV/m高压静电场处理对大豆油氧化羰基价的有效降低率为66.0%。

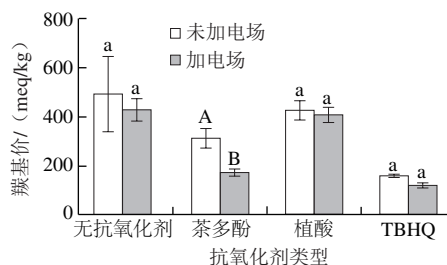


图5 150 kV/m高压静电场结合不同抗氧化剂对大豆油羰基价的影响
Fig. 5 Effects of different antioxidants on carbonyl value in soybean oil under 150 kV/m high voltage electrostatic field

2.2.4 茴香胺值

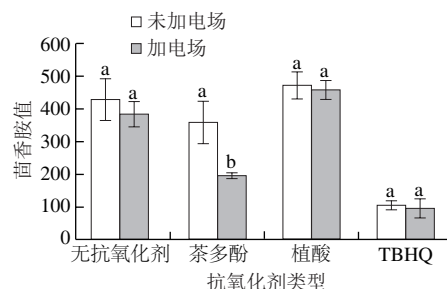


图6 150 kV/m高压静电场结合不同抗氧化剂对大豆油茴香胺值的影响
Fig. 6 Effects of different antioxidants on anisamine value in soybean oil under 150 kV/m high voltage electrostatic field

如图6所示, 对照组的茴香胺值为429.8, 加电场的样品的茴香胺值为383.0, 比对照组下降了10.9%; 加茶多酚不加电场的样品茴香胺值为361.5, 结合电场后的茴香胺值为193.4, 两组之间差异显著 ($P<0.05$); 加植酸不加电场的样品茴香胺值为469.3, 结合电场后的茴香胺值为453.9, 两组甚至均高于对照组; 加TBHQ不加电场的样品茴香胺值为105.8, 结合电场后的茴香胺值为91.0, 后者比前者下降了14.0%, 但差异不显著 ($P>0.05$)。因此, 茶多酚与静电场的增效作用明显, TBHQ与静电场的增效作用不明显, 植酸对大豆油的氧化没有抑制作用。与对照组相比, 茶多酚结合150 kV/m高压静电场处理对大豆油氧化茴香胺值的有效降低率为55.0%。

2.2.5 脂肪酸相对含量

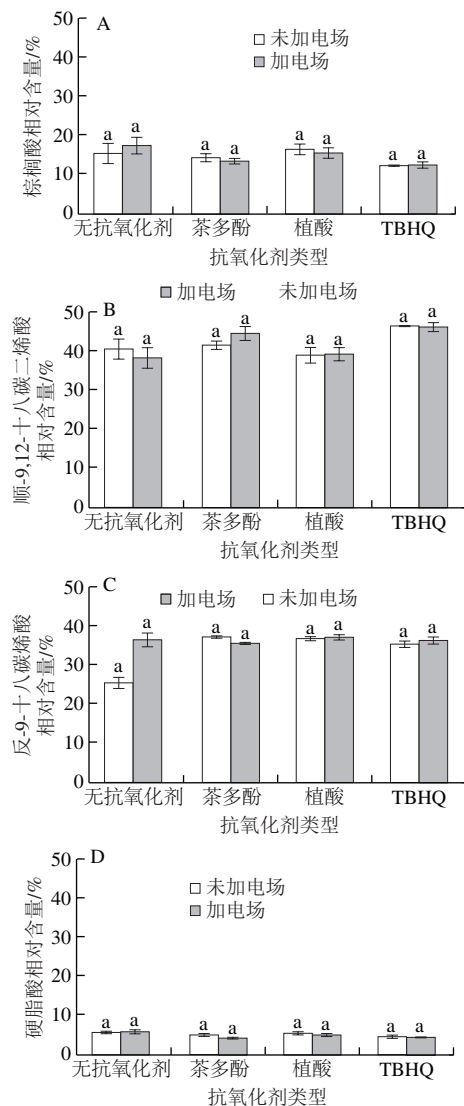


图7 150 kV/m高压静电场结合不同抗氧化剂对大豆油典型脂肪酸相对含量的影响

Fig. 7 Effects of different antioxidants on the relative content of typical fatty acids in soybean oil under 150 kV/m high voltage electrostatic field

由图7可知,加入3种抗氧化剂并未显著增强高压静电场对大豆油各类脂肪酸相对含量的影响,各加电场的实验组与未加电场的对照组之间差异不显著($P>0.05$),与静电场单独处理大豆油的实验结果一致。

3 讨论

本实验前期研究中发现150 kV/m高压静电场对大豆油氧化有一定的抑制作用,但是4个油脂氧化评价指标中,对酸价和茴香胺值的抑制率不是十分明显,因此将高压静电场与抗氧化剂相结合,以期达到更好的抗氧化效果;另一方面,期望借助物理手段,增强抗氧化剂自

身的性能,最大程度减少其添加量,开发出更安全、高效的抗氧化剂。

油脂的自动氧化是自由基的连锁反应。大豆油氧化过程中产生的自由基活性很强,极度不稳定,容易夺取电子^[24-25]使其进一步氧化。用高压静电场处理大豆油,给予其电子,使自由基稳定下来,从而抑制了大豆油的氧化,宏观表现在过氧化值、酸价、羰基价、茴香胺值均有所下降。

植酸作为食品的抗氧化剂,能使许多可促进氧化作用的金属离子被螯合而失去活性,同时释放出氢离子,破坏分解油脂在自动氧化过程中产生的过氧化物,阻止其继续形成醛、酮等有害物^[26]。但是也有研究称植酸作为一种抗氧化增效剂,与抗氧化剂复配使用,效果较好。另外,本实验中植酸的纯度为70%,抗氧化效果可能与纯度有关,因此可能导致植酸未起到抗氧化作用。

茶多酚与TBHQ的抗氧化能力的原理是一致的。两者都是还原剂,提供 H^+ 与自由基结合,终止自由基连锁反应^[27-29],从而抑制大豆油的氧化。然而,茶多酚是一类天然存在的多羟基酚类化合物的混合物^[30],TBHQ是人工合成的二酚类化合物,高压静电场对二者抗氧化性的影响不同,可能由于茶多酚复杂的组成,也可能与羟基的数量、位置等有关。高压静电场与茶多酚的协同作用机理还有待进一步研究。

高压静电场结合抗氧化剂对大豆油脂的脂肪酸种类及相对含量无明显影响。在煎炸过程中,油脂不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的转化、氧化及顺、反异构化反应,需要外界提供能量;因此,脂肪酸的变化与加热温度、时间密切相关,正常加工过程中其种类、比例变化不大^[31-35],本研究中大豆油脂的所有处理都基于相同的预氧化温度和时间,在此阶段提供的能量相同,说明高压静电场提供的能量不足以改变脂肪酸的结构。

4 结论

本研究采用高压静电场与抗氧化剂相结合的方式处理大豆油,通过检测其常规理化指标和相对脂肪酸含量,分析对大豆油的抗氧化效果。结果表明,150 kV/m高压静电场结合茶多酚可以显著提高茶多酚的抗氧化能力,有效抑制大豆油的氧化,为开发油脂抗氧化的新方法提供一定的理论参考。

参考文献:

- [1] 周丽凤. 油脂氧化与抗氧化技术[J]. 粮食与食品工业, 2008, 15(5): 24-26. DOI:10.3969/j.issn.1672-5026.2008.05.008.
- [2] 杨剑婷, 郝利平. 关于引起核桃中油脂哈败因素的研究初探[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2001, 21(3): 271-273. DOI:10.3969/j.issn.1671-8151.2001.03.021.

- [3] 陶菲, 郇海燕, 陈杭君, 等. 不同包装对山核桃脂肪氧化的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 303-305. DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2008.09.061.
- [4] 云少君, 戴玥, 延莎. β -胡萝卜素和植酸对胡麻油抗氧化活性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 277-280. DOI:10.3969/j.issn.1671-8151.2015.03.011.
- [5] 曾娟, 李会娜. 樟树叶多酚对油脂的抗氧化活性研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(8): 949-951; 968. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2012.08.022.
- [6] 李志刚, 张薇薇, 王愈, 等. 不同场强高压电场处理对油脂抗氧化性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(10): 745-750. DOI:10.3969/j.issn.1671-8151.2016.10.011.
- [7] 王丽平, 李苑, 余海霞, 等. 高压电场对生鲜食品保鲜机理研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(3): 278-283. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201703044.
- [8] 丹阳, 李里特, 张刚. 短时高压静电场处理对黄瓜采后生理的影响[J]. 食品科学, 2005, 26(10): 240-242. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2005.10.058.
- [9] WANG J, LI L T, YE Q, et al. Effect of high voltage electrostatic fields on post-harvest quality of strawberry fruit[J]. Agricultural Sciences in China, 2005, 4(4): 294-298.
- [10] CASTRO I, MACEDO B, TEIXEIRA J A, et al. the effect of electric field on important food-processing enzymes: comparison of inactivation kinetics under conventional and ohmic heating[J]. Journal of Food Science, 2010, 69(9): C696-C701. DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.tb09918.x.
- [11] 叶春苗. 高压静电场保鲜技术原理及应用现状研究[J]. 农业科技与装备, 2016(8): 58-59. DOI:10.16313/j.cnki.nykjyzb.2016.08.022.
- [12] 张薇薇. 高压电场和抗氧化剂处理对油脂抗氧化作用效果研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013: 7-10.
- [13] 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, 2016: 7; 85; 110.
- [14] 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, 2016: 1-4.
- [15] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中酸价的测定: GB 5009.229—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-4.
- [16] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中羰基价的测定: GB 5009.230—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 动植物油脂 茴香胺值的测定: GB/T 24304—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-4.
- [18] 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, 2016: 1-4.
- [19] KANDHRO A, SHERAZI S T H, MAHESAR S A, et al. GC-MS quantification of fatty acid profile including *trans* FA in the locally manufactured margarines of Pakistan[J]. Food Chemistry, 2008, 109(1): 207-211. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.12.029.
- [20] HUANG Z L, WANG B W, CRENSHAW A A. A simple method for the analysis of *trans* fatty acid with GC-MS and ATTM-Silar-90 capillary column[J]. Food Chemistry, 2006, 98(4): 593-598. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.05.013.
- [21] 丁俭, 齐宝坤, 王立敏, 等. 5 种不同植物油脂氧化程度与脂肪酸比例变化的相关性研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(8): 84-91. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2017.08.014.
- [22] 姬彦羽, 赵宏亮, 魏静, 等. 热加工过程中棕榈油理化特性、脂肪酸与自由基的变化研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5): 66-70; 76. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.05.004.
- [23] ANDRIKOPOULOS N K, DEDOUSSIS G V, FALIREA A, et al. Deterioration of natural antioxidant species of vegetable edible oils during the domestic deep-frying and pan-frying of potatoes[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2002, 53(4): 351-363. DOI:10.1080/09637480220138098.
- [24] 堀口昇. 负离子的神奇疗效[M]. 上海: 上海中医药大学出版社, 2009: 1-20.
- [25] ZHAO W, YANG R, LIANG Q, et al. Electrochemical reaction and oxidation of lecithin under pulsed electric fields (PEF) processing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(49): 12204-12209. DOI:10.1021/jf304236h.
- [26] 吴澎, 田纪春, 王凤成. 谷物中植酸及其应用的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(3): 137-143.
- [27] 李海波. 茶多酚的应用与研究[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(2): 12-15. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2004.02.004.
- [28] 张素娟, 李家林, 崔炳群, 等. 油脂抗氧化剂TBHQ的合成及应用研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2012, 2(3): 184-189. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2012.03.031.
- [29] OHKATSU Y, KAJIYAMA T, ARAI Y. Antioxidant activities of tocopherols[J]. Polymer Degradation & Stability, 2001, 72(2): 303-311. DOI:10.1016/S0141-3910(01)00022-2.
- [30] 姜红波, 赵卫星, 温普红. 天然抗氧化剂: 茶多酚的应用[J]. 应用化工, 2010, 39(10): 1578-1581. DOI:10.3969/j.issn.1671-3206.2010.10.039.
- [31] 张铁英, 姜元荣, 陈雅琼. 煎炸油在煎炸过程中脂肪酸组成的变化[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 132-136.
- [32] 杨滢, 陈奕, 张志芳, 等. 油炸过程中3种植物油脂脂肪酸组分含量及品质的变化[J]. 食品科学, 2012, 33(23): 36-41.
- [33] 邓龙, 邓泽元, 胡蒋宁, 等. 油茶籽油加工过程中理化性质和营养品质的变化[J]. 食品科学, 2015, 36(23): 111-115. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201523021.
- [34] STUCHLÍK M, ZÁK S. Vegetable lipids as components of functional foods[J]. Biomedical Papers of the Medical Faculty of the University Palacky, Olomouc, Czechoslovakia, 2002, 146(2): 3-10.
- [35] ALIREZA S, TAN C P, HAMED M, et al. Effect of frying process on fatty acid composition and iodine value of selected vegetable oils and their blends[J]. International Food Research Journal, 2010, 17: 295-302.