

电场对储藏大豆原油氧化稳定性的影响

邹真, 王成龙, 尹丽卿, 庞林江, 路兴花*
(浙江农林大学食品与健康学院 杭州 311300)

摘要 为研究电场处理对储藏大豆原油氧化稳定性的影响。以电场强度和处理时间为单因素, 分析其对油脂过氧化值 (POV) 的影响, 确定最佳电场处理条件。采用 GC-MS 法和 HPLC 法测定电场处理对油脂甾醇、角鲨烯和生育酚含量的影响, 并评价电场处理后油脂体外抗氧化能力。结果表明, 电场处理的电场强度为 3 000 V/m, 电场处理时间为 3 h。电场处理对油脂内源性抗氧化成分甾醇、角鲨烯和生育酚的保护效果显著, 经电场处理的油脂甾醇相对损失抑制率达 23.08%, 角鲨烯相对损失抑制率达 19.99%, 对生育酚个体具有不同的损失抑制程度, 保护程度由强至弱为 δ -生育酚 > β -生育酚 > α -生育酚 > γ -生育酚, 其中电场对大豆原油中 δ -生育酚的损失抑制率影响明显。电场处理减缓了油脂 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除活性和 FRAP 铁离子还原能力的下降速率, 保护了油脂的抗氧化能力。电场可抑制油脂的氧化速度, 减缓氧化程度, 并对油脂内在抗氧化成分损失有抑制作用, 在一定程度上保护了油脂的抗氧化能力, 具有较好的抗氧化效果。

关键词 电场; 大豆原油; 天然抗氧化成分; 抗氧化能力

文章编号 1009-7848(2024)10-0346-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.10.032

大豆油是全国高产量、高消费、高营养的优良食用油之一, 其含有丰富的亚油酸、 ω -9 单不饱和脂肪酸^[1-2]等不饱和脂肪酸及磷脂、维生素 E 等多种营养成分, 具有降血压, 预防癌症和心血管疾病^[3-4], 调节大脑发育生长以及延缓衰老^[5]等功能特性。为保证大豆食用油正常的加工供应, 维持油脂品质与营养特性, 大豆原油的储备至关重要。

电场技术作为一种节能、高效、高品质的食品保藏方法, 被广泛用于各种食品的保鲜中。电场技术在碰柑^[6]、香菇^[7]、猪肉^[8]、罗非鱼^[9]等食品贮藏保鲜的应用已有报道。近年来, 电场技术应用于油脂领域的研究报道也越来越多, 例如: 探究高压直流电场对食用油氧化劣变的抑制效果^[10]。将电场技术结合抗氧化剂, 研究两者对抑制油脂氧化的协同作用等^[11]。Ariza 等^[12]研究了电场对鳄梨油和初榨橄榄油特性的影响, 在不添加抗氧化剂的情况下, 电场技术可作为最小的修饰保存原油的一种方法。Zeng 等^[13]研究了脉冲电场 (PEF) 处理抑制花生油氧化反应速度, 可延长油品货架期。季婉^[14]研究了在电场与抗氧化剂协同作用下对大豆油氧化的抑制效果。Tuberos 等^[15]和 Ambika 等^[16]分别采用

DPPH 和 ABTS 法对食用油和精油进行抗氧化评价, 表明其具有抗氧化活性。这些研究主要集中在对成品油的研究, 对未精炼原油以及抗氧化效应的研究较少。为方便储藏及对后续油脂加工品质的保障, 我国目前储备以原油为主。延长食用油原油的储藏周期, 对保障国家的战略需求和粮油市场的供应至关重要。

电场技术在果蔬、农作物等产品方面具有广泛应用, 而对于食用原油储藏的抗氧化应用鲜有研究报道。为进一步探究电场对原油的氧化抑制效果, 本试验以大豆原油为研究对象, 在加速氧化储藏过程中, 对电场处理条件下的大豆原油进行生育酚、甾醇、DPPH、ABTS⁺ 自由基清除力等指标的测定, 分析电场对油脂抗氧化成分、抗氧化能力的影响以及油脂的抗氧化效果, 为拓宽电场技术在油脂储藏方面的应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆原油由浙江省粮食局直属粮油储备库提供, 未添加抗氧化剂。三氯甲烷、氢氧化钾、异丙醇、乙醚、乙酸乙酯、水溶性生育酚、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐、二苯代苦味肼基、过硫酸钾、2,4,6-三吡啶基三嗪、氯化铁等均为分析纯级。甲醇、1,4-二氧六环、正己烷均为

收稿日期: 2023-10-23

基金项目: 浙江省科技厅重点研发计划项目(2020C02018)

第一作者: 邹真, 女, 硕士生

通信作者: 路兴花 E-mail: xhlu@zafu.edu.cn

色谱纯级。(α,β,γ,δ)生育酚、胆甾烷醇,均为分析标准品。

1.2 仪器与设备

QP-2010 气相色谱质谱联用仪,日本岛津公司;Agilent 1100 液相色谱仪,美国 Agilent 公司;JA5003B 电子分析天平,上海精科天美科学仪器有限公司;Sigma 3K15 离心机,德国希格玛仪器有限公司;Synergy H1 多功能酶标仪,美国伯腾仪器有限公司;HWS-250FT 智能恒温箱,宁波普朗特仪器有限公司;KQ5200B 超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;T6-新悦可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;YL15-9053A 电热恒温鼓风干燥箱,上海龙跃仪器设备有限公司;RJ-5 工频电场场强仪,建德市梅城高频电磁仪器厂。

1.3 方法

1.3.1 电场强度、处理时间单因素实验 油样避光置于 50 ℃,电场组(EF)强度设置为 500,1 000,2 000,3 000 V/m,处理 3 h/d,连续处理 24 d,同时设无电场处理为对照(CK),筛选最佳电场强度处理。继续电场处理时间试验(EF),时间为 1,2,3,4,5 h/d,连续处理 24 d,同时设 CK 组(0 h/d)。每隔 4 d 取样,测定指标,处理重复 3 次,取平均值。

1.3.2 过氧化值测定 参考《食品中过氧化值的测定》(GB 5009.227-2016)。

氧化抑制率(%) = (对照组 POV - 处理组 POV) / 对照组 POV × 100 (1)

1.3.3 甾醇和角鲨烯的测定 前处理参考翟孟婷等^[7]的方法。GC-FID 色谱条件:载气高纯氮气(99.999%),恒流模式,流速 1 mL/min,分流比 15:1。进样口温度 250 ℃,进样量 1 μL。升温程序:柱温 230 ℃,以 2 ℃/min 升到 250 ℃,保持 75 min。质谱条件:离子源为 EI 源,离子源温度 230 ℃,电离电压 70 eV,接口温度 250 ℃。全扫描模式,扫描速度 1 666 u/s;溶剂切除时间为 3 min;扫描离子范围为 50~500 u。

1.3.4 生育酚的测定 参考《食品中维生素 A、D、E 的测定》(GB 5009.82-2016),稍作改变。

损失率 = 损失量 / 初始量 (2)

相对损失抑制率(%) = (对照组损失率 - 处理组损失率) / 对照组损失率 (3)

1.3.5 油脂抗氧化能力的测定

1.3.5.1 抗氧化评价测试样品制备 参考李志晓^[8]的方法,稍作修改。

1.3.5.2 DPPH 自由基清除能力的测定 参照王小清^[9]的方法并略加修改。使用酶标仪测定,样品的 DPPH 自由基清除能力用 Trolox 当量来表示,其单位为 μmol TE/100 g 油。下同。

1.3.5.3 ABTS⁺自由基清除活性的测定 参照李圆圆^[20]的方法,并略加修改,用全自动酶标仪测定大豆油对 ABTS⁺自由基的清除能力。

1.3.5.4 FRAP 还原力的测定 参照温宝莉^[21]的方法,并略加改动,采用紫外分光光度计进行测定。

下降率(%) = 下降值 / 初始值 (4)

下降抑制率(%) = (CK 组下降率 - EF 组下降率) / CK 组下降率 (5)

1.4 数据统计与分析

用 Excel 2016 对数据进行分析,所得结果用 $\bar{x} \pm s$ (n=3) 表示。使用 SPSS 26.0 进行方差分析,统计学显著水平以 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同场强和处理时间下对油脂过氧化值的影响

2.1.1 电场强度和处理时间对大豆原油过氧化值的影响 由图 1 可知,各处理大豆原油的过氧化值(POV)随着储藏时间的延长均呈大幅上升趋势,CK 组 POV 上升最快。除 EF 组 500 V/m 有微弱的促氧化效果外,电场处理油脂 POV 始终低于 CK 组,且强度越大 POV 越低,氧化抑制效果越好。3 000 V/m 效果最明显,从第 4 天开始与 CK 组相比差异显著($P < 0.05$);EF 组氧化抑制效果随储藏时间延长呈增强趋势,氧化抑制率逐渐增加,且随着处理场强增加显著提高,储藏至 24 d 时,EF 组氧化抑制率从高到低分别为 13.71%,9.96%,6.80%,1.16%。因此,3 000 V/m 的电场强度在氧化初期阶段可较好抑制氢过氧化物的生成,减缓氧化速率。

采用场强 3 000 V/m 每天对油脂处理不同时间的结果可知(图 2),所有处理油脂 POV 均随储藏时间的延长呈上升趋势,CK 组和 1 h 处理组增速最快,3 h 处理组的 POV 增加最为缓慢,储藏期间不同程度低于其它处理。储藏至 24 d,3 h EF 组

油脂 POV 显著比 CK 降低了 13.71%。其它电场处理时间的 POV 及其增幅均大于 3 h EF 组。因此, 3 h 处理组可较好抑制大豆原油 POV 增加, 减缓油脂氧化酸败速度。

上述研究结果表明, 在 3 000 V/m 电场强度

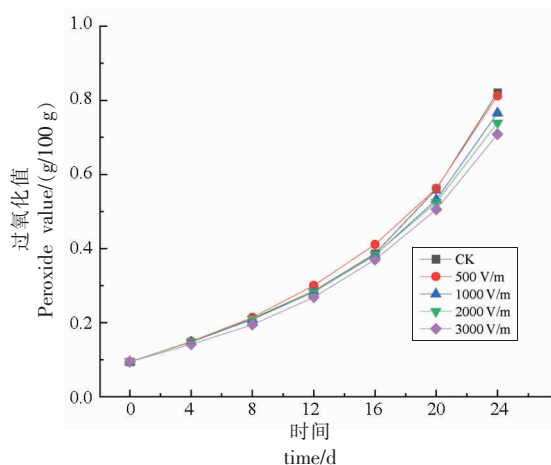


图 1 电场强度对大豆原油过氧化值的影响

Fig.1 Effect of electric field intensity on peroxide value of soybean crude oil

下, 处理 3 h, 对大豆原油 POV 具有显著抑制作用, 这可能是由于电场影响了自由基链式反应, 有效降低了自由基的活性, 减少自由基之间的碰撞, 降低氧化速率, 从而减缓自动氧化进程, 产生较少的过氧化物, 宏观上表现为 POV 有所降低^[22-23]。

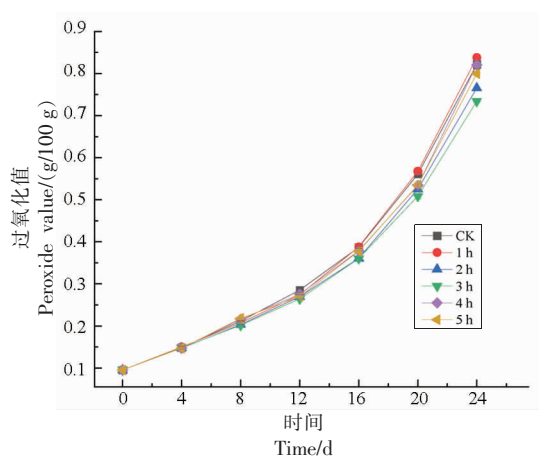


图 2 电场处理时间对大豆原油过氧化值的影响

Fig.2 Effect of electric field treatment time on peroxide value of soybean crude oil

2.2 电场处理对大豆原油天然抗氧化成分的影响

2.2.1 电场处理对大豆原油甾醇和角鲨烯的影响

植物甾醇是自然界广泛存在的一类天然活性物质。在各种油料种子中甾醇含量较高^[24]。与文献^[25]报道一致, 最常见的 β -谷甾醇、豆甾醇、菜油甾醇在大豆原油中含量较高。由图 3 可知, 大豆原油储藏过程中植物甾醇含量不断降低, 甾醇总量初始值为 $(3\ 115.0 \pm 39.31)$ mg/kg, 24 d 加速氧化储藏后, 大豆原油 CK 组甾醇含量降至 $(2\ 591.4 \pm 32.78)$ mg/kg, 损失率达到 16.81%, 而 EF 组的大豆原油甾醇含量损失率仅为 12.93%。EF 组显著减少了 120.8 mg/kg 甾醇的损失, 相对损失抑制率达到 23.08%。可见, 电场处理有效抑制了大豆原油中甾醇物质的降解。

经 24 d 的加速氧化储藏后, CK 组大豆原油中含有的菜油甾醇、豆甾醇和 β -谷甾醇含量分别降低了 129.5, 142.0, 252.1 mg/kg, 而 EF 组大豆原油仅分别降低了 91.5, 119.8, 191.6 mg/kg, 相对损失抑制率分别为 10.41%, 15.68%, 24.01%。大豆原

油甾醇储藏期间降幅明显, 经电场处理后的甾醇降解程度有所减缓。同时, 电场处理对大豆原油中不同种类甾醇的降解抑制效果不一, 保护作用由强至弱表现为: β -谷甾醇>豆甾醇>菜油甾醇。电场处理对植物甾醇的损失抑制效果可能由于植物甾醇的分子质量大, 参与氧化反应存在空间位阻效应, 电场处理使得空间位阻效应进一步增大, 更难被氧化。

角鲨烯又名三十碳六烯是一种高不饱和烃, 氧化稳定性好, 在油脂中有轻微的抗氧化作用^[26]。在大豆原油储藏期间角鲨烯同甾醇类似, 亦呈不断下降的趋势(图 4), 24 d 后, CK 组和 EF 组油脂的角鲨烯含量分别为 (171.6 ± 1.05) mg/kg 和 (184.8 ± 4.23) mg/kg, 损失率分别为 27.95% 和 22.36%, 相对损失抑制率达到 19.99%。故电场处理具有抑制大豆原油角鲨烯损失的保护效果。

2.2.2 电场处理对大豆原油生育酚的影响 油脂中生育酚是一种重要的天然抗氧化剂, 大豆原油中含有 4 种生育酚, 含量最高的是 γ -生育酚, δ -生育酚次之, β -生育酚含量最少^[27]。检测结果表

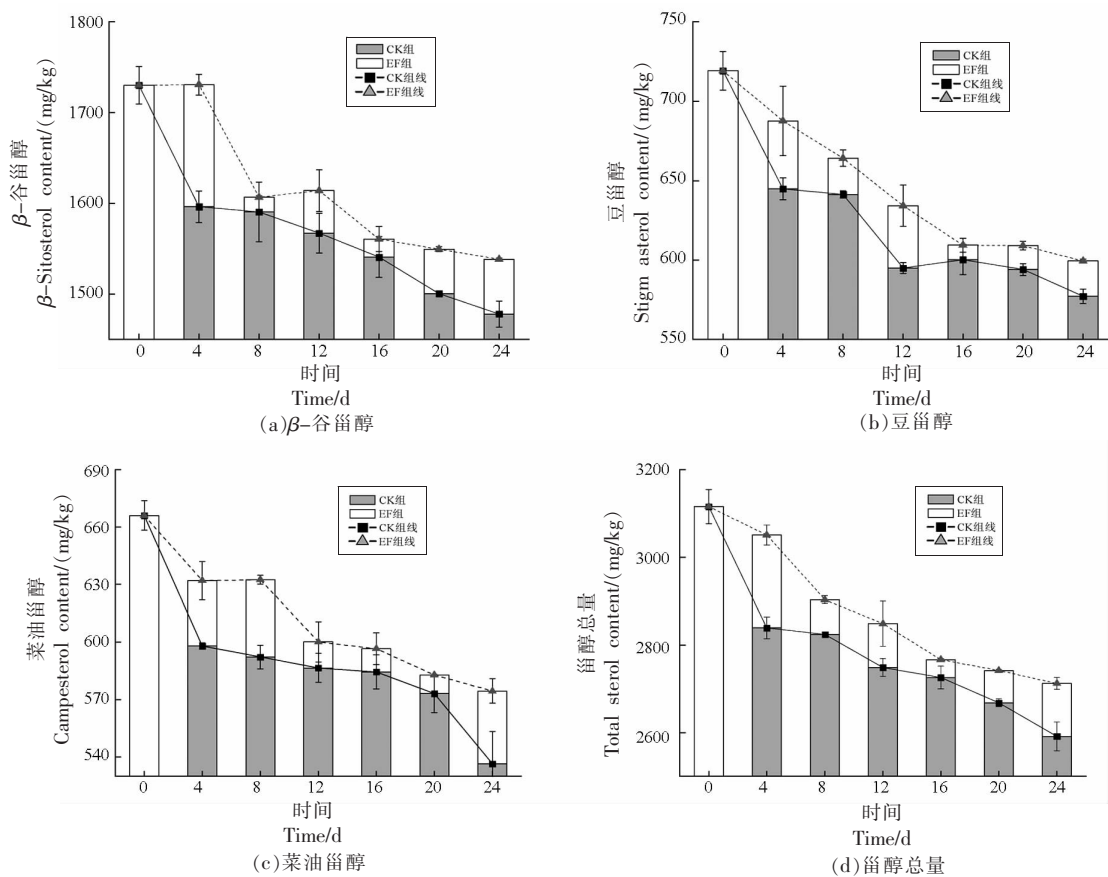


图 3 电场处理对大豆原油中甾醇含量的影响

Fig.3 Effect of electric field treatment on sterol content in soybean crude oil

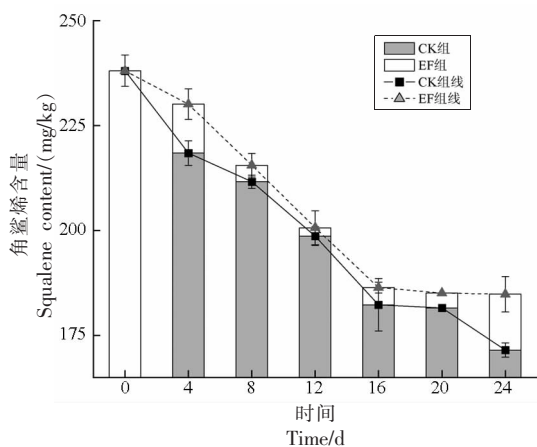


图 4 电场处理对大豆原油中角鲨烯含量的影响

Fig.4 Effect of electric field treatment on squalene content in soybean crude oil

明, 大豆原油中总生育酚含量为 (850.2 ± 8.16) mg/kg, α -生育酚、 β -生育酚、 γ -生育酚和 δ -生育酚含量分别为 (89.51 ± 1.44) , (19.57 ± 0.31) , $(560.8 \pm$

$4.71)$ mg/kg 和 (180.4 ± 1.70) mg/kg。储藏期间, 大豆原油 4 种生育酚含量均有不同程度的减少, 而电场处理显著抑制了油脂中生育酚含量的降低 ($P < 0.05$)。

根据图 5 可知, 大豆原油 CK 组中各种生育酚含量与 EF 组下降趋势一致, 经电场处理后的大豆原油的生育酚含量损失程度较小, 尤其是 α -生育酚和 β -生育酚, 电场处理可以更好的降低 α -生育酚和 β -生育酚的损失。大豆原油 CK 组的生育酚总量为 (735.9 ± 0.78) mg/kg, 在储藏期间 α -生育酚、 β -生育酚、 γ -生育酚、 δ -生育酚含量的损失率分别为 33.71%, 17.21%, 12.09%, 13.45%。然而, 储藏期间内在电场处理作用下的大豆原油生育酚总量为 (746.0 ± 2.50) mg/kg, α -生育酚、 β -生育酚、 γ -生育酚、 δ -生育酚含量损失率分别为 30.67%, 14.41%, 11.40%, 5.54%, 相对损失抑制率分别为 9.03%, 16.28%, 5.72%, 22.89%。电场处理对生育

酚个体的保护作用大小为 δ -生育酚 $>$ β -生育酚 $>$ α -生育酚 $>$ γ -生育酚,其中电场对大豆原油中 δ -生育酚的损失抑制率作用相对明显。综上所述,电场作用保护了大豆原油中4种生育酚含量的损

失,对大豆原油中的微量抗氧化成分具有一定保护作用,这与Ozkan等^[28]的分析结果相类似。微量抗氧化成分在更大程度上的保留,使油脂保持更好的抗氧化能力。

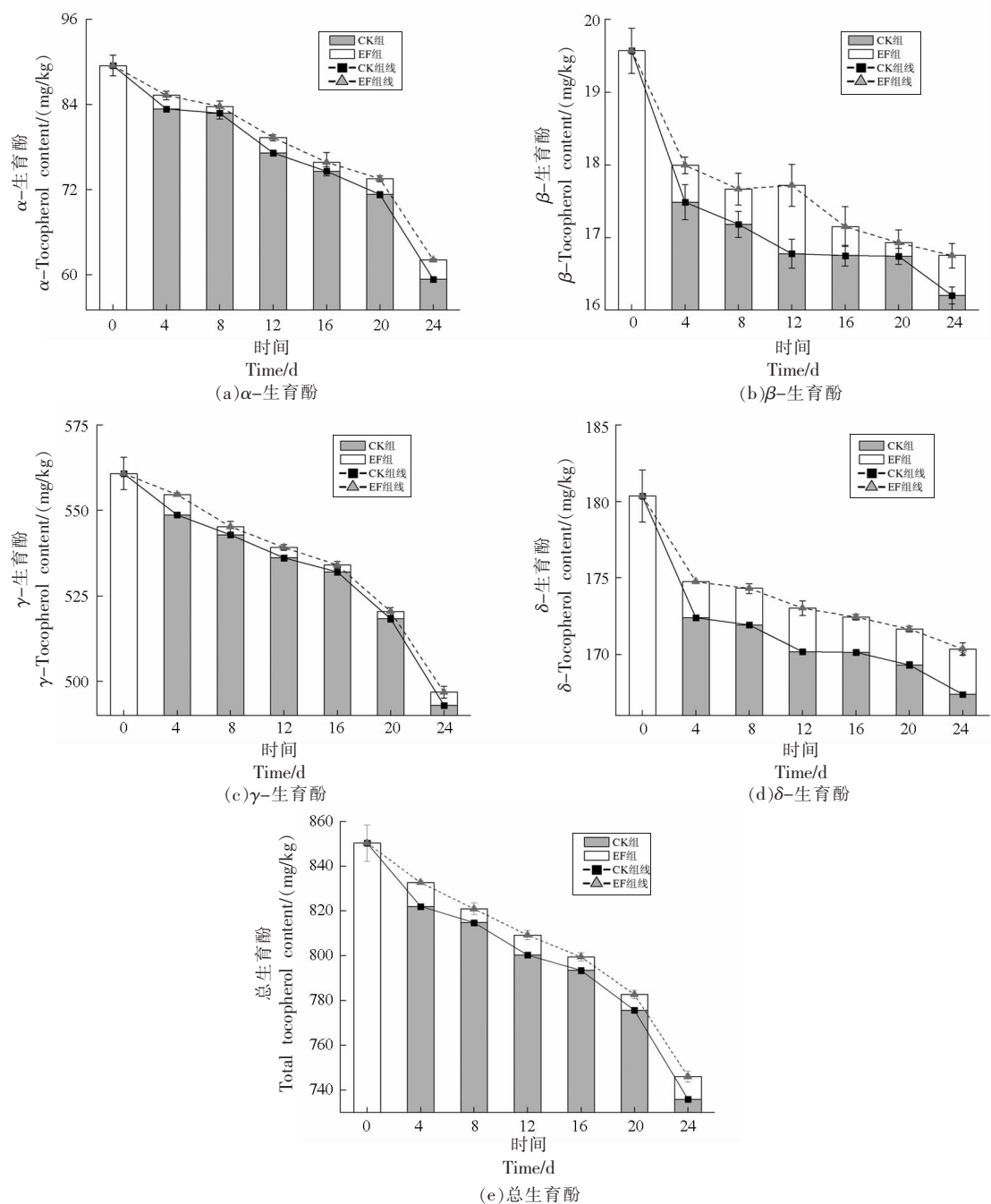


图5 电场处理对大豆原油中生育酚含量的影响

Fig.5 Effect of electric field treatment on tocopherol content in soybean crude oil

2.3 电场对大豆原油抗氧化活性的影响

2.3.1 电场处理对大豆原油 DPPH 自由基清除活

性的影响 氧化储藏期间的 DPPH 自由基清除能力以 Trolox 当量表示, Trolox 当量越大表明油脂清

除自由基效果越好,抗氧化能力也越强。图 6 是大豆原油在 24 d 加速氧化期间的 DPPH 自由基清除抗氧化活性结果。大豆原油 CK 组和 EF 组的初始抗氧化能力高达 $(59.67\pm 1.05)\mu\text{mol TE}/100\text{g}$ 油,随储藏时间延长,大豆原油的 DPPH 清除能力均明显下降,而 EF 组的大豆原油 DPPH 清除能力始终均高于 CK 组。经 24 d 加速氧化后,大豆原油 CK 组 DPPH 清除能力的下降率为 15.81%;EF 组的 DPPH 清除能力的下降率为 11.83%,较 CK 组抑制了 25.12%清除能力的降低。储藏过程中 CK 组与 EF 组的 DPPH 自由基清除能力差异显著($P<0.05$)。结果表明,电场处理对 DPPH 自由基清除能力具有较好的保护效果,可能由于电荷作用促使一些断键能低的化学基团中 C-H 键分解出氢原子,从而以 DPPH-H 的形式中和 DPPH 自由基^[29]。

2.3.2 电场处理对大豆原油 ABTS⁺自由基清除活性的影响 ABTS⁺甲醇体系评价 CK 组和 EF 组大豆原油在 24 d 储藏期间的抗氧化活性如图 7 所示。大豆原油初始的 ABTS⁺自由基清除能力为 $(86.64\pm 1.16)\mu\text{mol TE}/100\text{g}$ 油,CK 组大豆原油在储藏期间的下降率为 85.26%;EF 组的下降率为 78.29%,电场减缓了 6.97%的抗氧化活性下降。与 DPPH 自由基清除能力的测定结果相比,大豆原油对 ABTS⁺自由基清除能力下降速度更明显。

在储藏前 12 d 内,EF 组的 ABTS⁺自由基清除能力始终保持在 $75\mu\text{mol TE}/100\text{g}$ 油以上,而 CK 组在第 8 天开始 ABTS⁺自由基清除能力已降至 $70\mu\text{mol TE}/100\text{g}$ 油以下。第 12 天时,EF 组 ABTS⁺自由基清除能力相较于 CK 组下降抑制率达到最高,为 10.78%。在储藏前期,电场很好的保护了大豆原油对 ABTS⁺自由基的清除能力,自 12 d 后下降趋势明显,而 EF 组的清除率仍高于 CK 组。

2.3.3 电场处理对大豆原油 FRAP 还原能力的影响 在 24 d 加速储藏过程中,CK 组和 EF 组大豆原油的 FRAP 还原能力的变化情况如图 8 所示。大豆原油初始 FRAP 还原能力为 $(311.2\pm 4.05)\mu\text{mol TE}/100\text{g}$ 油,CK 组和 EF 组 FRAP 还原能力的变化趋势非常相似,分别下降了 (73.57 ± 2.05) 、 $(70.76\pm 2.12)\mu\text{mol TE}/100\text{g}$ 油,下降率分别达到 23.65%和 22.74%。经 SPSS 分析,电场处理对大豆原油的 FRAP 还原能力的影响不显著($P>0.05$),其保护效

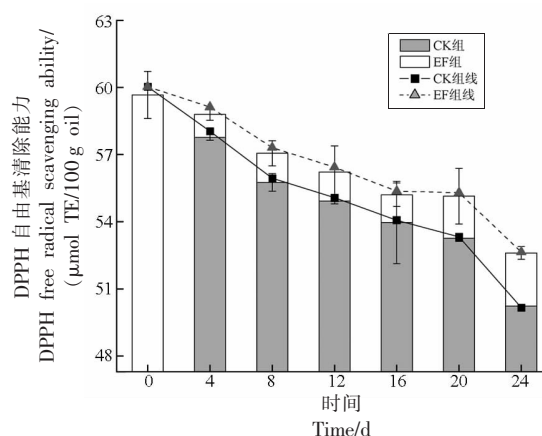


图 6 电场处理对油脂 DPPH 自由基清除活性的影响

Fig.6 Effect of electric field treatment on DPPH radical scavenging activity of oil

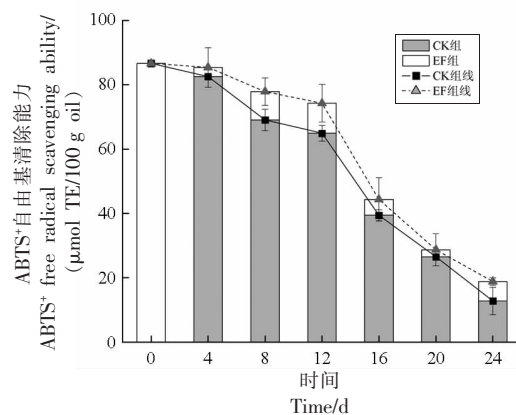


图 7 电场处理对油脂 ABTS⁺自由基清除活性的影响

Fig.7 Effect of electric field treatment on ABTS⁺ free radical scavenging activity of oil

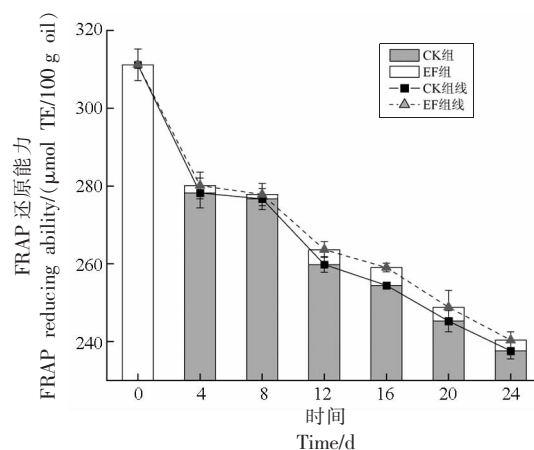


图 8 电场处理对油脂铁离子还原能力 FRAP 的影响

Fig.8 Effect of electric field treatment on FRAP reducing ability of oil

果无 DPPH、ABTS⁺自由基清除能力佳,表明电场处理对油脂 FRAP 还原能力的影响较小。

抗氧化能力是评估油脂抗氧化效果的指标之一,试验发现经电场处理后,可更好的保护大豆原油清除 ABTS⁺自由基能力、DPPH 自由基清除能力和铁离子还原能力,与 Faisal^[30]、张映瞳等^[31]和张茜等^[32]研究电场对抗氧化能力的影响结果一致。抗氧化能力的大小和微量抗氧化物质含量存在一定的相关性^[33],关于电场作用油脂改善其抗氧化活性的机理还需要进一步探究。

3 结论

电场技术处理大豆原油有氧化抑制效果,在 3 000 V/m 强度电场处理 3 h 效果最好,其氧化抑制率达到 13.71%。对油脂内源性抗氧化成分结果表明,储藏期间,电场处理后大豆原油的甾醇、角鲨烯、生育酚含量的相对损失抑制率为 23.08%, 19.99%, 8.85%, 均有不同程度的保护作用,减少营养成分流失,有益于油脂的抗氧化效果。对油脂的抗氧化活性测定结果表明,电场处理大豆原油 DPPH、ABTS⁺抗氧化能力的保护效果显著。因此,电场技术可抑制油脂氧化程度,并减少油脂内在抗氧化成分的损失,有利于保护油脂的抗氧化能力。

参 考 文 献

- [1] 卢银洁,郝利平,郭雨萱.大豆油和黑豆油主要脂肪酸含量及变化研究[J].食品研究与开发,2016,37(7):136-138.
LU Y J, HAO L P, GUO Y X. Research on the contents and changes of the main fatty acids in soybean oil and black soybean oil[J]. Food Research and Development, 2016, 37(7): 136-138.
- [2] 徐云,周玉婷,熊婷,等.常见植物油以及调和油研究进展[J].粮油与饲料科技,2021(5):8-12.
XU Y, ZHOU Y T, XIONG T, et al. Research progress on common vegetable oils and blending oils[J]. Grain Oil and Feed Technology, 2021(5): 8-12.
- [3] MENAA F, MENAA A, MENAA B, et al. Trans-fatty acids, dangerous bonds for health? A background review paper of their use, consumption, health implications and regulation in France[J]. Eur J Nutr, 2013, 52: 1289-1302.
- [4] MADSEN L, PEDERSEN L M, LIASET B, et al. cAMP-dependent signaling regulates the adipogenic effect of n-6 polyunsaturated fatty acids[J]. Journal of Biological Chemistry, 2008, 283(11): 7196-205.
- [5] 韩勛.大豆油份相关性状与脂质代谢物的多维遗传网络研究[D].武汉:华中农业大学,2020.
HAN X. Multi-dimension genetic networks for acyl-lipid metabolites and seed oil-related traits in soybean[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [6] 吴珏,谢文华,徐淑婷,等.高压静电场处理对椪柑采收后贮藏性的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2020,46(1):64-73,82.
WU J, XIE W H, XU S T, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on the storability of postharvest ponkan fruit[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2020, 46(1): 64-73, 82.
- [7] 王宗伟,李文香,肖秧,等.高压静电场处理对香菇采收后保鲜效果的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2019,36(2):131-135.
WANG Z W, LI W X, XIAO Y, et al. Effect of high voltage electrostatic preservation on postharvest preservation of *Lentinus edodes*[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2019, 36(2): 131-135.
- [8] KO W C, YANG S Y, CHANG C K, et al. Effects of adjustable parallel high voltage electrostatic field on the freshness of tilapia (*Oreochromis niloticus*) during refrigeration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 151-157.
- [9] JIA G, HE X, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field on the freezing behavior and quality of pork tenderloin[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 204: 18-26.
- [10] 唐以德,唐雪蓉.电场抑制食用油脂氧化劣变新技术的研究[J].郑州粮食学院学报,1994(3):31-35.
TANG Y D, TANG X R. Research on a new technology for electric field inhibition of oxidation and deterioration of edible oils and fats[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 1994(3): 31-35.
- [11] 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].晋中:山西农业大学,2013.
ZHANG W W. Research on the antioxidant effect of

- high-voltage electric field and antioxidant an oil[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2013.
- [12] ARIZA -ORTEGA J A, DEL SOCORRO CRUZ -CANSINO N, RAMÍREZ-MORENO E, et al. Effect of electric field on the characteristics of crude avocado oil and virgin olive[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(7): 2166-2170.
- [13] ZENG X, HAN Z, ZI Z. Effects of pulsed electric field treatments on quality of peanut oil[J]. Food Control, 2010, 21(5): 611-614.
- [14] 季婉. 高压电场对美拉德反应和油脂氧化的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
JI W. Effect of high voltage electric field on the Maillard reaction and oil oxidation[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [15] TUBEROSO C I G, KOWALCZYK A, SARRITZU E, et al. Determination of antioxidant compounds and antioxidant activity in commercial oilseeds for food use[J]. Food Chemistry, 2007, 103(4): 1494-1501.
- [16] AMBIKA S, SUDIPTA J, ASIT R, et al. Chemical constituent analysis and antioxidant activity of leaf essential oil of *Curcuma xanthorrhiza*[J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2021, 24(4): 736-744.
- [17] 翟孟婷, 谢亮, 林泽峰, 等. 食用植物油中甾醇总含量测定方法的优化[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(9): 256-261.
ZHAI M T, XIE L, LIN Z F, et al. Optimization of determination method for total sterol content in edible vegetable oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(9): 256-261.
- [18] 李志晓. 加工过程对油茶籽油微量营养成分和抗氧化性能的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
LI Z X. Impact on trace nutrients and antioxidant activity of camellia seed oil in processing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [19] 王小清. 核桃杏仁调和油贮藏稳定性及氧化规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WANG X Q. Study on storage stability and oxidation patterns of walnut oil and almond oil blends[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [20] 李园园. 月见草油精炼过程对其营养成分和抗氧化性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LI Y Y. Effect of refining process of evening primrose oil on its nutritional composition and antioxidant performance [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [21] 温宝莉. 紫苏籽油精炼过程对其品质影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WEN B L. Study on the influence of perilla seed oil refining process on its quality [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [22] ZHAO W, YANG R, LIANG Q, et al. Electrochemical reaction and oxidation of lecithin under pulsed electric fields (PEF) processing[J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(49): 12204-12209.
- [23] 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.
YUAN Y, JI W, ZHANG Y, et al. Synergistic suppression of high voltage electrostatic field and antioxidants on soybean oil oxidation[J]. Food Science, 2018, 39(13): 81-86.
- [24] 唐瑞丽. 大豆油储藏稳定性与预测研究 [D]. 南京: 南京财经大学, 2016.
TANG R L. Study on storage stability and prediction of soybean oil [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2016.
- [25] NORMEN L, JOHNSON M, ANDERSSON H, et al. Plant sterols in vegetables and fruits commonly consumed in Sweden[J]. European Journal of Nutrition, 1999, 38(2): 84-89.
- [26] CUI N, ZHAO T, HAN Z, et al. Characterisation of oil oxidation, fatty acid, carotenoid, squalene and tocopherol components of hazelnut oils obtained from three varieties undergoing oxidation[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(6): 3456-3466.
- [27] 丁云连, 申瑶, 李璟, 等. 大豆油中维生素 E 组分及含量的研究[J]. 现代食品, 2019(14): 151-154, 157.
DING Y L, SHEN Y, LI J, et al. Study on the composition and content of vitamin e in soybean oil [J]. Modern Food, 2019(14): 151-154, 157.
- [28] OZKAN G, STÜBLER A, AGANOVIC K, et al. Retention of polyphenols and vitamin C in cranberry bush purée (*Viburnum opulus*) by means of non-thermal treatments[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 129918.
- [29] WU S Q, LI R, JIANG Z T, et al. Evaluation of antioxidant active ingredients of spikenard essential oil by ultra-fast gas chromatography electronic nose

- and radical scavenging mechanism[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 151: 112489.
- [30] FAISAL MANZOOR M, AHMED Z, AHMAD N, et al. Probing the combined impact of pulsed electric field and ultra-sonication on the quality of spinach juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(5): e15475.
- [31] 张映瞳, 张元元, 赵欢欢, 等. 中强度脉冲电场对娃娃菜活性物质含量及抗氧化能力的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(19): 183-193.
- ZHANG Y T, ZHANG Y Y, ZHAO H H, et al. Effect of moderate intensity pulsed electric field on the contents of bioactive compounds and antioxidant capacity of baby cabbage (*Brassica pekinensis* L. var. *gemmifera* Zenk.)[J]. *Food Science*, 2021, 42(19): 183-193.
- [32] 张茜, 郑雅莹, 李妍, 等. 高压静电场预处理对花生芽活性物质及抗氧化能力的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 190-195.
- ZHANG Q, ZHEGN Y Y, LI Y, et al. Effect of high-voltage electrostatic field on bioactive components and antioxidant activity of peanut sprouts[J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 190-195.
- [33] 黄健花, 宋志华, 刘慧敏, 等. 植物油的不同组分DPPH自由基清除能力及其与微量有益成分含量的相关性[J]. *中国油脂*, 2017, 42(2): 67-70.
- HUANG J H, SONG Z H, LIU H M, et al. DPPH free radical scavenging activities of different components in vegetable oils and correlation with their minor components[J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(2): 67-70.

Effect of Electric Field Treatment on Oxidation Stability of Soybean Crude Oil in Storage

Zou Zhen, Wang Chenglong, Yin Liqing, Pang Linjiang, Lu Xinghua
(School of Food and Health, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300)

Abstract To study the effect of electric field treatment on oxidation stability of soybean crude oil. Based on the influence of single factor about electric field intensity or treatment time on lipid peroxide value (POV), the optimal conditions of electric field treatment were determined. The content changes of sterol, squalene and tocopherol under the optimal electric field condition were determined by GC-MS and HPLC. The antioxidant capacity of oils with the electric field treatment was evaluated *in vitro*. The optimal electric field intensity was 3 000 V/m and the electric field treatment time was 3 h. The relative loss inhibition rate of sterol, squalene and tocopherol were 23.08% and 19.99%, respectively. The loss inhibition rate of sterol and squalene were different for tocopherol. The protection order was δ -tocopherol > β -tocopherol > α -tocopherol > γ -tocopherol, and the electric field had a relatively obvious effect on the inhibition rate of δ -tocopherol loss in soybean crude oil. Electric field treatment slowed down the decrease rate of DPPH and ABTS⁺ free radical scavenging activity and FRAP reducing ability of oils, and protected the antioxidant capacity of oils. Electric field can inhibit the oxidation rate and the degree of oxidation of oils, and has an inhibitory effect on the loss of antioxidant components in oils, which protects the antioxidant capacity of oils and has a good antioxidant effect.

Keywords electric field; soybean crude oil; natural antioxidant ingredients; antioxidant capacity