

文章编号: 1673-1689(2011)02-0207-06

L-抗坏血酸脂肪酸酯抗氧化活性

刘建伟, 赵海珍, 吕凤霞*, 别小妹, 张充, 陆兆新, 彭杨

(南京农业大学 食品科技学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 从羟基自由基体系、超氧阴离子自由基体系、二苯苦味肼基自由基体系及还原力测试等方面研究 L-抗坏血酸脂肪酸酯(VC 脂肪酸酯)体外抗氧化活性,并将其添加到猪油和大豆油当中,评价其抗氧化效果。结果表明,在一定的质量浓度范围内,VC 脂肪酸酯对羟基自由基、超氧阴离子自由基、DPPH 自由基均有较好的清除效果,还原能力也较强,并呈一定量效关系,其抗氧化活性与 L-抗坏血酸棕榈酸酯相当。VC 脂肪酸酯在猪油中的添加质量分数为 0.2%,100℃下强制氧化 20 h 时,猪油的过氧化值为 42.8 meq/kg,具有明显的抗氧化活性;在大豆油中添加质量分数 0.2%,强制氧化 14 h 时,大豆油的过氧化值为 11.9 meq/kg,其抗氧化能力大于 TBHQ,与 L-抗坏血酸棕榈酸酯接近,说明 VC 脂肪酸酯是一种有潜力的食品抗氧化剂。

关键词: 猪油; L-抗坏血酸脂肪酸酯; 抗氧化活性

中图分类号: TS 201.2

文献标识码: A

Study on the Antioxidant Activities of L-ascorbyl Fatty Acid Esters

LIU Jian-wei, ZHAO Hai-zhen, LU Feng-xia*, BIE Xiao-mei,

ZHANG Chong, LU Zhao-xin, PENG Yang

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In vitro antioxidant activities of L-ascorbyl fatty acid esters were studied by the items of hydroxyl radical system, superoxide anion free radical system, system of DPPH ·, and reducing power. Its antioxidant effects was further evaluated by adding into the lard and bead oil. The results indicated that L-ascorbyl fatty acid esters within the given concentration range in dose-effect relationship showed good antioxidant activities on both the clearance of hydroxyl radical, superoxide anion free radical and DPPH · and the reducing power. Furthermore, the antioxidant activities of L-ascorbyl fatty acid esters were comparable with that of L-ascorbyl palmitate. When 0.2% (w/w) of L-ascorbyl fatty acid esters were added in the lard for a 20 h forced oxidation at 100℃, the POV of lard was 42.8 meq/kg, which illustrated L-ascorbyl fatty acid esters had significant antioxidant activities. When 0.2% (w/w) of L-ascorbyl fatty acid esters were added in the soybean oil for a 14 h forced oxidation at 100℃, the POV of soybean oil was 11.9 meq/kg. The antioxidant ability of L-ascorbyl fatty acid esters for soybean oil was higher than that of TBHQ, but was close with that of L-ascorbyl palmitate. Thus, L-ascorbyl fatty acid esters were

收稿日期: 2010-07-15

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA100401); 江苏省科技支撑计划项目(BE2008308); 江苏省自然科学基金项目(BK2007160); 南京农业大学 SRT 计划项目(0908A05)。

* 通信作者: 吕凤霞(1963-), 女, 江苏吴江人, 工学博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事酶工程方面的研究。

Email: lufengxia@njau.edu.cn

demonstrated to be potential food antioxidants.

Key words: lard, L-ascorbyl fatty acid esters, antioxidant activities

L-抗坏血酸(以下简称VC)是一种水溶性维生素,由于其具有还原性而被广泛用作抗氧化剂。然而VC的不稳定性、亲水性使其应用受到很大的限制。因此,对VC进行化学修饰可以生成一系列的衍生物,包括高级脂肪酸酯、缩醛或醚类等。这些衍生物既保留着VC的结构部分又引入了亲脂性的长碳链,增强其稳定性和亲脂性从而扩展其应用范围。

L-抗坏血酸脂肪酸酯(L-ascorbyl fatty acid esters, AFAE)是指利用化学或酶催化不同酰基供体和L-抗坏血酸通过酰基化反应得到的VC酯类,包括L-抗坏血酸月桂酸酯(L-ascorbyl laurate)、L-抗坏血酸豆蔻酸酯(L-ascorbyl myristate)、L-抗坏血酸棕榈酸酯(L-ascorbyl palmitate)、L-抗坏血酸油酸酯(L-ascorbyl oleate)以及L-抗坏血酸硬脂酸酯(L-ascorbyl stearate)等。其中L-抗坏血酸棕榈酸酯应用最广泛,是世界卫生组织、食品添加剂联合委员会认可的营养型抗氧化剂^[1],并被美国药典收载^[2]。由于L-抗坏血酸脂肪酸酯既含有亲水性的L-抗坏血酸,又含有亲油性的脂肪酸链,使得其兼具脂溶性抗氧化剂和食品乳化剂的特性,是一种新型的多功能食品添加剂^[3]。目前L-抗坏血酸脂肪酸酯的合成及其抗氧化性能的研究工作已有不少报道^[4-6],但有关脂肪酶催化猪油合成抗坏血酸脂肪酸酯及其抗氧化性能的研究,国内外尚未见报道。而国内的L-抗坏血酸脂肪酸酯无论是合成生产还是应用,均处于开发阶段,因而有着巨大的市场发展潜力。

作者以廉价的猪油和L-抗坏血酸为原料,酶法合成L-抗坏血酸脂肪酸酯,主要对其抗氧化活性进行研究,以评价其抗氧化性能,为新型VC衍生物的开发应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

固定化脂肪酶 Novozyme 435: 购自诺维信(中国)生物技术有限公司; 精制猪油: 购自安徽牧羊油脂有限公司; 二苯苦味肼基自由基(DPPH·): 购自美国 Alfa Aesar 公司; L-抗坏血酸棕榈酸酯(AP): 购自 Sigma Aldrich 公司; VC、邻二氮菲、30% 过氧化氢、FeSO₄、Tris、盐酸、邻苯三酚、FeCl₃、三氯乙

酸、特丁基对苯二酚(TBHQ)等: 均为市售国产分析纯试剂。往复式水浴恒温振荡器: 太仓市实验设备厂; 旋转蒸发仪: 德国 Heidolph 公司; 紫外可见分光光度计 UV-2450: 日本岛津; 7510AS Autosampler 核磁共振仪: 美国 Varian 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 VC 脂肪酸酯的合成 将VC和猪油按摩尔比1:2加入到预先装有20 mL叔戊醇的100 mL具塞锥形瓶中,并加入诺维信公司的Novozyme 435固定化脂肪酶,酶量为质量分数30%VC,50℃下水浴摇床180 r/min振荡反应24 h。反应结束后,参考S Bradoo等人的方法^[7],首先通过过滤的方法除去固定化酶颗粒,将滤液旋转蒸发除去叔戊醇后,在25℃下溶解于极性弱的正己烷中,然后于4℃高速离心20 min得到沉淀。沉淀用乙酸乙酯溶解后,加入乙酸乙酯4倍体积的去离子水,充分混匀,置于分液漏斗中静置分层,取上层液减压真空干燥得到白色固体。按照我国GB 16314-1996中碘量法测得产物纯度达到95%以上,符合要求。

1.2.2 VC 脂肪酸酯对羟自由基清除能力的测定

测定方法采用Fenton反应。参照Xiao-ming Yang等人的方法^[8],并略作改进。先配制0.75 mmol/L邻二氮菲无水乙醇溶液,取该液1 mL,加2 mL的0.2 mmol/L磷酸盐缓冲液(pH 7.4),充分混匀后加入0.75 mmol/L硫酸亚铁溶液(去离子水配制)1 mL,每加一管立即混匀,加入1 mL蒸馏水以补充体积,最后加入0.01% H₂O₂ 1 mL为对照;反应液在37℃保温1 h,于536 nm处测定吸光度。依上法,加入0.75 mmol/L邻二氮菲无水乙醇溶液1 mL,加入2 mL的0.2 mmol/L磷酸盐缓冲液(pH 7.4),充分混匀后,加入0.75 mmol/L硫酸亚铁溶液1 mL,加入1 mL不同浓度的VC脂肪酸酯样品为处理样;最后加入0.01% H₂O₂ 1 mL。空白对照不加0.01% H₂O₂,以蒸馏水补充体积。每个质量浓度样品做3个平行,同时与TBHQ、VC、AP比较清除能力。样品对羟自由基的清除率按下式计算:

$$\text{清除率}(\%) = (A_{536\text{处理}} - A_{536\text{对照}}) / (A_{536\text{空白对照}} - A_{536\text{对照}}) \times 100\%$$

1.2.3 VC 脂肪酸酯对超氧阴离子自由基清除能力的测定 采用邻苯三酚自氧化法测定抗氧化性,

参照何玲玲等人的方法^[9]。取 4.5 mL 50 mmol/L Tris-HCl 缓冲溶液 (pH 8.2), 加 4.2 mL 去离子水, 混匀后 25 °C 水浴保温 20 min, 取出立即加入 25 °C 水浴中预热的 3 mmol/L 邻苯三酚 0.3 mL (以 10 mmol/L HCl 代替邻苯三酚作为空白), 混匀立即倒入比色杯, 于 325 nm 处每隔 30 s 测 A 值一次, 共测 5 min, 计算对照溶液吸光度随时间的变化率 F_0 。依上法, 在加入邻苯三酚前先加入 4.2 mL 不同质量浓度的 VC 脂肪酸酯样品, 混匀后 25 °C 保温 20 min, 取出立即加入 25 °C 水浴中预热的 3 mmol/L 邻苯三酚 0.3 mL, 混匀立即倒入比色杯, 于 325 nm 处每 30 s 测 A 值 1 次, 共测 5 min, 计算溶液吸光度随时间的变化率 F_x 。每个质量浓度样品做 3 个平行, 同时与 TBHQ、VC、AP 比较清除能力。样品对超氧阴离子自由基的清除率按下式计算:

$$\text{清除率}(\%) = (F_0 - F_x) / F_0 \times 100\%$$

1.2.4 VC 脂肪酸酯对 DPPH 自由基清除能力的测定 参照 Xiao-ming Yang 等人的方法^[8], 准确称取 20 mg DPPH ·, 用无水乙醇定容于 250 mL 容量瓶中, 得到浓度为 0.2 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液, 在 0~4 °C 下避光保存。分别吸取不同浓度的 VC 脂肪酸酯样品的乙醇溶液 2 mL, 加入 0.2 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液 2 mL, 摇匀后在室温黑暗处放置 30 min。以无水乙醇调零, 测定 517 nm 处的吸光值 $A_{\text{样品}}$ 。再测定 2 mL DPPH 溶液与 2 mL 乙醇在 517 nm 处的吸光值 A_{DPPH} 。每个浓度样品做 3 个平行, 同时与 TBHQ、VC、AP 比较清除能力。样品对 DPPH · 清除率按下式计算:

$$\text{清除率}(\%) = (A_{\text{DPPH}} - A_{\text{样品}}) / A_{\text{DPPH}} \times 100\%$$

1.2.5 VC 脂肪酸酯的还原能力 采用普鲁士蓝法, 参照 A. Kumaran 等人的方法^[10]。先将样品配成一定质量浓度溶液, 取 0.5 mL VC 脂肪酸酯样品溶液, 加入到 2.5 mL 0.2 mol/L 的磷酸缓冲溶液 (pH 6.6) 和 2.5 mL 1% 的铁氰化钾 ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$) 的离心管中, 混合均匀, 50 °C 水浴 20 min 后快速冷却, 加入 2.5 mL 10% 的三氯乙酸溶液, 2 000 r/min 离心 10 min。取上清液 2.5 mL, 加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 0.1% 的三氯化铁溶液, 混合均匀, 室温下静置反应 10 min, 于 700 nm 处检测吸光值。溶液在 700 nm 处的吸光值越高, 则样品的还原能力越强。每个浓度样品做 3 个平行, 同时与 TBHQ、VC、AP 比较还原力。

1.2.6 VC 脂肪酸酯的抗氧化性能测定 将 VC 脂肪酸酯按油质量分数的 0.2% 分别添加到精制猪油 (猪板油经精炼制得) 和豆油 (一级大豆油, 未添

加任何抗氧化剂) 中, 在 100 °C 下加热搅拌, 待样品充分溶解后, 转入 100 °C 的烘箱中强制氧化, 并每隔 2 h 定期取样, 参照 GB/T 5009.37-2003^[11], 用碘量滴定法测定油样的过氧化值 (POV), 观察其抗氧化值的变化趋势。同时与空白和常用抗氧剂 TBHQ、AP 进行对比实验。

2 结果与讨论

2.1 产物性状及结构鉴定

VC 脂肪酸酯为白色固体粉末, 不溶于水, 但易溶于甲醇、乙醇, 微溶于乙酸乙酯、乙醚, 几乎不溶于正己烷、氯仿、石油醚、甲苯等有机溶剂, 在浓缩或者结晶状态下, 性质非常稳定。将分离纯化后的产品通过 $^1\text{H-NMR}$ (300 MHz, CD_3OD , TMS) 鉴定, 结果见图 1。 δ : 0.9 (-CH₃), 1.29~1.33 (-CH₂-), 1.6 (-CH₂CH₂COO-), 2.01 (-CH₂-CH=CH-CH₂-), 2.3 (-COOCH₂-), 4.03~4.41 (-CH₂CH-), 4.7 (-CHO-), 5.3 (-CH=CH-)。证明所得产物主要由 VC 棕榈酸酯、VC 油酸酯和 VC 硬脂酸酯组成的复合物。产物的 $^1\text{H-NMR}$ 图谱与 Ko Kuwabara^[12] 等人研究的 VC-6-O-油酸酯基本一致。

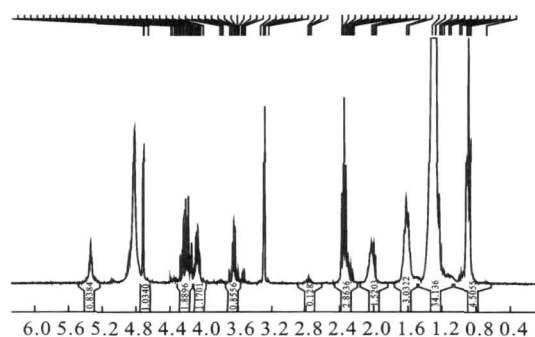


图1 产品的核磁共振图谱

Fig. 1 $^1\text{H-NMR}$ spectra of the product

2.2 VC 脂肪酸酯清除羟自由基能力

通常用 EC_{50} 值来表示清除 50% 自由基时所需抗氧化剂的量, 是衡量抗氧化剂活性的有效指标。采用 Fenton 反应, 对 VC 脂肪酸酯、TBHQ、VC、AP 清除羟自由基能力进行测定, 结果见图 2。

由图 2 可见, 随着各样品液质量浓度的增加, 各样品清除羟基自由基的能力均呈上升趋势, 清除率与质量浓度成量效关系。清除能力大小依次为: $\text{AP} > \text{VC 脂肪酸酯} > \text{TBHQ} > \text{VC}$ 。四者清除 $\text{HO} \cdot$ 自由基的 EC_{50} 值分别为 0.26、0.27、0.33、0.35 mg/mL。本研究 VC 脂肪酸酯的 EC_{50} 值为 0.27 mg/mL, 与吴亚凉^[13] 等人研究相近, 而且清除

HO·的能力大小和趋势也相同。

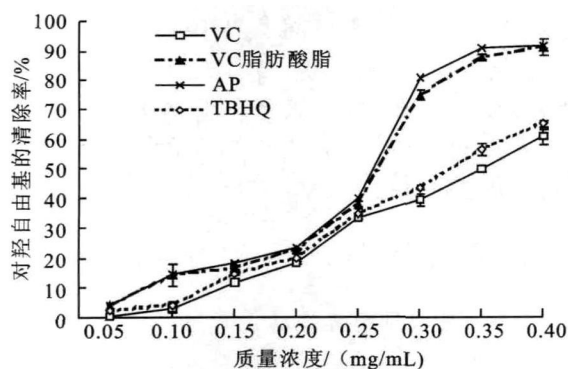


图2 VC脂肪酸酯对HO·的清除率

Fig. 2 Hydroxyl radical scavenging activity of L-ascorbyl fatty acid esters

2.3 VC脂肪酸酯清除超氧阴离子自由基能力

采用邻苯三酚自氧化法,对VC脂肪酸酯、TBHQ、VC、AP清除超氧阴离子自由基能力进行测定,结果见图3。

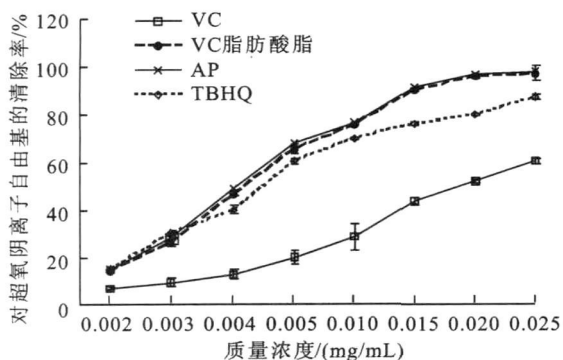


图3 VC脂肪酸酯对O₂⁻·清除率

Fig. 3 Superoxide anion radical scavenging activity of L-ascorbyl fatty acid esters

由图3可见,随着样品液质量浓度的增加,各样品清除超氧阴离子自由基的能力均呈上升趋势,且均表现了量效关系。VC脂肪酸酯、TBHQ、VC和AP清除O₂⁻·的EC₅₀值分别为0.0042、0.0047、0.018、0.004 mg/mL,且清除率随着质量浓度的增大而增大。VC脂肪酸酯清除O₂⁻·能力优于TBHQ、VC,与AP相当。这说明本产品VC脂肪酸酯对O₂⁻·有良好的清除作用。

2.4 VC脂肪酸酯清除DPPH自由基清除能力

按1.2.4的方法,分别进行VC脂肪酸酯、TBHQ、VC、AP清除DPPH自由基清除能力的测定,结果见图4。

由图4可见,各样品对自由基均具有清除DPPH·能力,清除能力大小依次为:TBHQ>VC>AP>VC脂肪酸酯。各样品在一定质量浓度范围

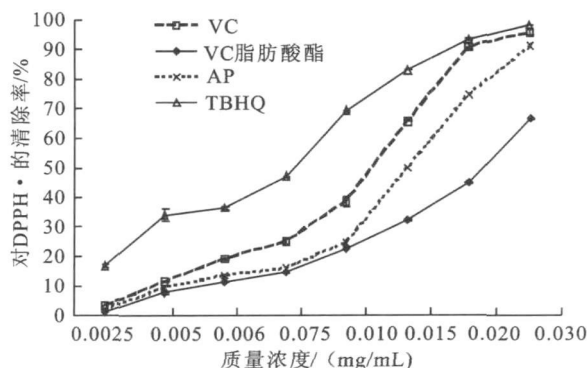


图4 VC脂肪酸酯对DPPH·的清除率

Fig. 4 DPPH· free radical scavenging activity of L-ascorbyl fatty acid esters

内,清除能力与浓度成量效关系。TBHQ和VC在质量浓度0.02 mg/mL以上,对DPPH·清除率可达到90%以上,并趋于稳定,效果明显优于AP和VC脂肪酸酯。VC脂肪酸酯清除DPPH·的EC₅₀值为0.024 mg/mL,这个值比AP清除DPPH·的EC₅₀值0.015 mg/mL高1.6倍,比Hamidah Burham等^[14]人用棕榈油和VC酶法催化合成的VC脂肪酸酯清除DPPH·的EC₅₀值为0.1 mg/mL低,说明本产品清除DPPH·能力更强,但清除DPPH·的能力低于AP,原因可能是受本产品VC脂肪酸酯是一个包括VC棕榈酸酯、VC油酸酯、VC豆蔻酸酯、VC硬脂酸酯的混合性酯的影响。

2.5 VC脂肪酸酯的还原能力

采用普鲁士蓝法,对VC脂肪酸酯、TBHQ、VC、AP还原能力进行测定,结果见图5。

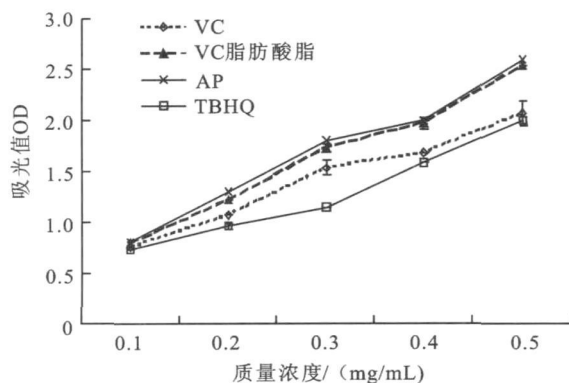


图5 VC脂肪酸酯的还原力

Fig. 5 Reducing ability of L-ascorbyl fatty acid esters

从图5可以看出,在一定质量浓度范围内,随着样品质量浓度的增加,样品的还原力越大;相同质量浓度下,VC脂肪酸酯的还原力明显强于VC和TBHQ,与AP很接近,与巫晓琴等人^[15]研究的相同质量浓度下VC酯的还原力>VC>TBHQ相吻合。

2.6 VC 脂肪酸酯的抗氧化性能测定

不同的抗氧化剂, 加入到猪油中, 测定其抗氧化效果, 结果如图 6。从图 6 可以看出, 在强迫氧化作用下, 添加了抗氧化剂的样品的过氧化值(POV)均比空白对照低, 而且随着强制氧化进行时间的延长, 各样品的 POV 值差别越来越大, 说明各抗氧化剂对猪油的氧化有一定的抑制作用, 这种作用的强弱为 TBHQ > AP > VC 脂肪酸酯。在 100 °C 下强制氧化 20 h 时, VC 脂肪酸酯组、TBHQ 组和 AP 组的 POV 值分别为 42.8、35.7、41.5 meq/kg。

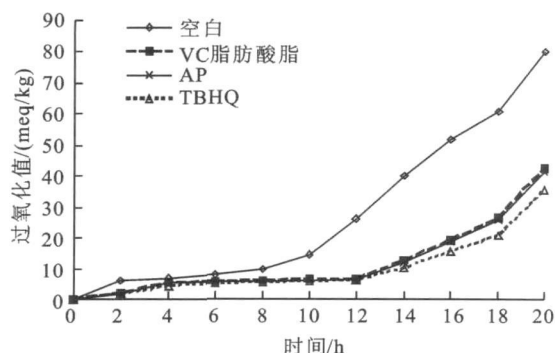


图 6 VC 脂肪酸酯在 100 °C 猪油中的抗氧化值

Fig. 6 Antioxidant capacity of L-ascorbyl Fatty Acid Esters in lard at 100 °C

不同的抗氧化剂, 加入到大豆油中, 测定其抗氧化效果, 结果见图 7。从图 7 中可知, 在大豆油中, VC 脂肪酸酯的抗氧化效果优于 TBHQ, 与 AP 相当。在 100 °C 下强制氧化 14 h 时, VC 脂肪酸酯组、TBHQ 组和 AP 组的 POV 值分别为 11.9、15.0、11.5 meq/kg。

研究结果表明, 将 VC 脂肪酸酯添加到动、植物油中, VC 脂肪酸酯表现出了良好的抗氧化效果, 能有效延长油脂的货架期, 是一种高效的、稳定、营养

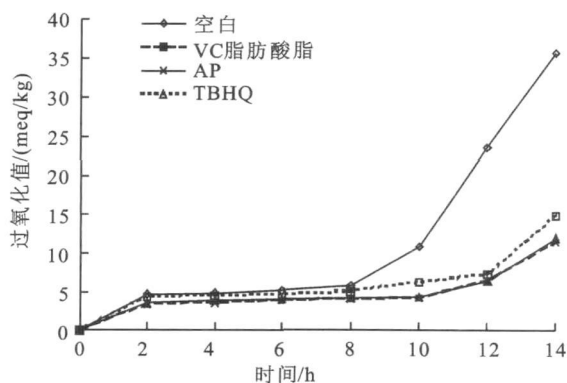


图 7 VC 脂肪酸酯在 100 °C 大豆油中的抗氧化值

Fig. 7 Antioxidant capacity of L-ascorbyl fatty acid esters on bean oil at 100 °C

型的脂溶性食品抗氧化剂。同时也表现出 VC 脂肪酸酯对大豆油的抗氧化作用优于猪油, 这与雷琳等人^[16]研究 L-抗坏血酸棕榈酸酯在动植物油中的抗氧化结果相吻合, 其原因在于动物油与植物油所含的饱和脂肪酸数量不同, 两者被氧化的速度不同。因此, 在动、植物油中添加相同浓度的 VC 脂肪酸酯, 会表现出不同的抗氧化性能。

3 结 语

作者采用脂肪酶将廉价的猪油转化为 VC 脂肪酸酯。纯化后的 VC 脂肪酸酯对羟自由基、超氧阴离子自由基、DPPH 自由基均有较好的清除效果, 并随着浓度增加其清除率不断提高, 还原能力也较强, 并呈一定量效关系, 其抗氧化活性与 AP 相当; VC 脂肪酸酯添加到猪油、大豆油中, 能明显延缓油脂的氧化, 说明 VC 脂肪酸酯是一种有潜力的食品抗氧化剂。

参考文献(References):

- [1] 王红勇, 陶桂全. 抗坏血酸棕榈酸酯对油脂的抗氧化效果观察[J]. 中国畜产与食品, 1997, 4(5): 200-201.
WANG Hong-yong, TAO Gui-quan. Study on antioxidation effect of ascorbyl palmitate for oil[J]. **Chinese Animal Products and Food**, 1997, 4(5): 200-201. (in Chinese)
- [2] 陆豫, 甘利军, 陈葆仁. L-抗坏血酸棕榈酸酯的合成[J]. 精细化工, 1996, 13(3): 17-18.
LU Yu, GAN Li-jun, CHEN Bao-ren. L-ascorbic acid palmitate synthesis[J]. **Fine Chemicals**, 1996, 13(3): 17-18. (in Chinese)
- [3] Qingxun Song, Dongzhi Wei. Study of Vitamin C ester synthesis by immobilized lipase from *Candida* sp. [J]. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, 2002, 18: 261-266.
- [4] Humeau C, Girardin M, Rovel B, et al. Enzymatic synthesis of fatty acid ascorbyl esters[J]. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, 1998, (5): 19-23.
- [5] 汤鲁宏, 张浩. 非水相脂肪酶催化合成 L-抗坏血酸棕榈酸酯的研究[J]. 生物工程学报, 2000, 16(3): 363-367.
TANG Lu Hong, ZHANG Hao. Studies oil lipase catalyzed synthesis of L-ascorbyl palmitate in nonaqueous phase[J].

- Chinese Journal of Biotechnology**, 2000, 16(3): 363–367. (in Chinese)
- [6] 谢文磊, 李魁, 王宏雁. 酯交换法合成 L-抗坏血酸硬脂酸酯及其抗氧化性能[J]. **高校化学工程学报**, 2002, 16(4): 442–445.
- XIE Wen lei, LI Kui, WANG Hong yan. Synthesis of L-ascorbyl stearate by transesterification and its antioxidant effect [J]. **Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities**, 2002, 16(4): 442–445 (in Chinese)
- [7] Bradoo S, Saxena R K, Gupta R. High yields of ascorbyl palmitate by thermostable lipase mediated esterification[J]. **American Oil Chemists' Society**, 1999, 76: 1291–1295.
- [8] Xiaoming Yang, Wei Yu, Zhongping Ou, et al. Antioxidant and immunity activity of water extract and crude polysaccharide from *Ficus carica* L. fruit[J]. **Plant Foods for Human Nutrition**, 2009, 64: 167–173.
- [9] 何玲玲, 王新, 石中亮, 等. 醇提板栗壳色素对羟自由基和超氧阴离子自由基的清除作用[J]. **安徽农业科学**, 2006, 34(10): 2054–2058.
- HE ling ling, WANG xin, SHI zhong liang. Effect of pigment extrated with alcihol from chestnut shell on the scavenging of superoxide anion and hydroxyl radicals. [J]. **Journal of Anhui Agricultural Science**, 2006, 34(10): 2054–2058. (in Chinese)
- [10] Kumaran A, Karunakaran J R. In vitro antioxidant activities of methanol extracts of five *Phyllanthus* species from India [J]. **Food Science and Technology**, 2007, 40(2): 344–352.
- [11] 中华人民共和国卫生部中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.37-2003[S].
- [12] Kuwabara K, Watanabe Y, Adachi S, et al. Synthesis of 6-O-unsaturated acyl L-ascorbates by immobilized lipase in acetone in the presence of molecular sieve [J]. **Biochemical Engineering Journal**, 2003, 16: 18.
- [13] 吴亚凉, 宁正祥. 反丁烯二酸 6-VC 甲酯的合成及抗氧化活性的研究[J]. **食品工业科技**, 2010, 31(1): 311–312.
- WU Ya liang, Ning Zheng xiang. Synthesis of 6-L-ascorbyl trans-β-alkoxycarbonylacrylate and study on its antioxidant property[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2010, 31(1): 311–312. (in Chinese)
- [14] Burham H, Rasheed R A G A, Noorullhamezon M N, et al. Enzymatic synthesis of palmr based ascorbyl esters[J]. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, 2009, (58): 153–157.
- [15] 巫晓琴, 乔薇, 闫素君, 等. L-抗坏血酸 6-对羟基苯甲酸酯的合成及抗氧化活性研究[J]. **中山大学学报: 自然科学版**, 2007, 46(4): 60–67.
- WU Xiao qin, QIAO Wei, YAN Su jun, et al. Synthesis and antioxidant activity evaluation of L-ascorbyl 6-p-Hydroxyl benzoate[J]. **Acta Scintiarum Naturalium Universitatis Sunyaatseni**, 2007, 46(4): 60–67. (in Chinese)
- [16] 雷琳. L-抗坏血酸棕榈酸酯的抗氧化性研究[J]. **中国医药导报**, 2009, 6(17): 13–14.
- LEI Lin. Study on the antioxidation of L-ascorbyl palmitate[J]. **China Medical Herald**, 2009, 6(17): 13–14. (in Chinese)