蒋栋磊, 张思迪, 姚轶俊, 等. 纤维素酶辅助乙醇水提法对菜籽油贮藏稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 361−374. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010086
JIANG Donglei, ZHANG Sidi, YAO Yijun, et al. Effect of Cellulase-assisted Ethanol Aqueous Extraction on the Storage Stability of Rapeseed Oils[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 361−374. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010086

· 贮运保鲜 ·

纤维素酶辅助乙醇水提法对菜籽油贮藏稳定性的影响

蒋栋磊, 张思迪, 姚轶俊, 杨冠杰, 王立峰*
（南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏南京 210023）

摘　要: 本研究为探究纤维素酶辅助乙醇水提法（Cellulase-assisted Ethanol Aqueous Extraction Processing，C-EAEP）制备菜籽油的贮藏稳定性，试验设计 C-EAEP 油、热处理后的 C-EAEP 油、传统热压油、三级商品油为研究对象，在加速氧化条件下贮藏 28 d，在贮藏周期内每 7 d 测定四组样品理化指标、维生素 E 含量、脂肪酸组成、挥发性风味物质组成的变化。结果表明：C-EAEP 工艺显著提升了菜籽油的贮藏稳定性。贮藏期间，C-EAEP 油第 28 d 的过氧化值和酸值增幅均低于传统热压油与三级商品油，且维生素 E 总量保留率更高，其中未经热处理的 C-EAEP 油 α-V_E 含量在 28 d 仍维持 40 mg/100 g 以上，显著高于对照组（P<0.05）。此外，C-EAEP 油的不饱和脂肪酸（如油酸、亚麻酸）氧化降解速率更低，经贮藏后不饱和脂肪酸总量稳定在 87.24%~88.65%，高于传统热压油和三级商品油。脂肪酸组成分析显示，C-EAEP 油在贮藏 28 d 后 C18:1 的含量从 28.21% 变化至 28.47%，低于三级商品油和传统热压油，而热处理后的 C-EAEP 油中 C18:1 含量显著提高至 30.39%~30.86%（P<0.05），且芥酸（C22:1）含量降低，健康属性更优；风味物质分析表明，C-EAEP 油因低温工艺抑制了硫苷降解产物中腈类（如 2-丁烯腈）的生成，但热处理后激活酶促反应，促使吡嗪类（如 2,5-二甲基吡嗪）和呋喃类物质（如 2-戊基呋喃）富集，贮藏后期含量分别达 9.23% 和 5.13%，赋予油品更浓郁的烘烤风味。电子鼻分析进一步显示，在贮藏前期，经热处理的 C-EAEP 油对 PA/2 和 P70/2 传感器的响应值高于其他三组菜籽油，在贮藏后期热处理 C-EAEP 油对 PA/2、P70/2 和 T30/1 传感器的响应值显著增加，产生了较丰富的醇类、有机胺类、芳香化合物等物质，风味增强。综上，C-EAEP 工艺通过低温酶解有效保留了油脂天然抗氧化成分，使油脂的氧化稳定性提高，能够延缓酸败，提高贮藏稳定性，在该工艺基础上对 C-EAEP 油经热处理则可增加风味物质。本研究为 C-EAEP 菜籽油的商品化开发提供重要的理论参考，对发展高品质菜籽油，绿色油脂提取工艺的工业化应用具有重要的推动作用。

关键词: 菜籽油, 纤维素酶辅助乙醇水提法, 贮藏稳定性, 热处理, 加速氧化贮藏
中图分类号: TS225.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0361−14
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010086
本文网刊:

Effect of Cellulase-assisted Ethanol Aqueous Extraction on the Storage Stability of Rapeseed Oils

JIANG Donglei, ZHANG Sidi, YAO Yijun, YANG Guanjie, WANG Lifeng*
（Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China）

Abstract: In this study, in order to investigate the storage stability of rapeseed oil prepared by cellulase-assisted ethanol aqueous extraction processing (C-EAEP), the experimental design of C-EAEP oil, heat-treated C-EAEP oil, traditional hot-pressed oil, and tertiary commercial oil were used as research objects. and stored under accelerated oxidative conditions for

收稿日期: 2025−01−09
基金项目: 国家重点研发计划（2023YFF1104605）; 国家自然科学基金（32172297, 32472430）; 江苏高校优势学科建设工程资助项目（PAPD）。
作者简介: 蒋栋磊（1986−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与开发, E-mail: dljiang@nufe.edu.cn。
*** 通信作者:** 王立峰（1977−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮油加工与功能组分开发, E-mail: wanglifeng_8@163.com。

28 d. Changes in the physicochemical indexes, vitamin E contents, fatty acid compositions, and volatile flavour compositions of the four groups of samples were measured every 7 d during the storage cycle. The results showed that the C-EAEP process significantly improved the storage stability of rapeseed oil. During the storage period, the increase in peroxide value and acid value of C-EAEP oil on day 28 was lower than that of conventional hot-pressed oil and tertiary commercial oil, and the retention of total vitamin E was higher, among which the α-V_E content of the unheat-treated C-EAEP oil maintained more than 40 mg/100 g on day 28, which was significantly higher than that of the control group (P<0.05). In addition, the rate of oxidative degradation of unsaturated fatty acids (e.g., oleic acid and linolenic acid) was lower in C-EAEP oil, and the total unsaturated fatty acid content was stable at 87.24%~88.65% after storage, which was higher than that of traditional hot-pressed oil and tertiary commercial oil. Fatty acid composition analysis showed that the content of C18:1 in C-EAEP oil changed from 28.21% to 28.47% after 28 days of storage, which was lower than that of tertiary commercial oils and traditional hot-pressed oils, whereas the content of C18:1 in heat-treated C-EAEP oil was significantly increased to 30.39%~30.86% (P<0.05) and the content of erucic acid (C22:1) was reduced, with better health attributes. Flavour analysis showed that the low temperature process inhibited the production of nitriles (2-butenenitrile) in the thioglycoside degradation products of C-EAEP oil, but the heat treatment activated the enzymatic reaction, which led to the enrichment of pyrazines (2,5-dimethylpyrazine) and furans (2-pentylfuran), with the contents of 9.23% and 5.13% in the late stage of storage, respectively, which conferred a stronger baking flavour of the oil. The oil had a stronger roasted flavour. Electronic nose analysis further showed that in the pre-storage period, the response values of heat-treated C-EAEP oil to the PA/2 and P70/2 sensors were higher than those of the other three groups of rapeseed oils, and in the late storage period the response values of heat-treated C-EAEP oil to the PA/2, P70/2 and T30/1 sensors were significantly increased to produce a richer amount of alcohols, organic amines, aromatic compounds, etc., with enhanced flavour. In conclusion, the C-EAEP process effectively preserved the natural antioxidant components of the oils and fats through low-temperature enzymatic hydrolysis to improve storage stability, and the heat treatment could enhance the organoleptic quality by regulating the formation of flavour substances on this basis. It provides an important theoretical reference for the commercial development of C-EAEP rapeseed oil, and has an important role in promoting the development of high-quality rapeseed oil and the industrial application of green oil extraction process.

Key words: rapeseed oil; cellulase-assisted ethanol aqueous extraction; storage stability; heat treatment; accelerated oxidative storage

近年来，随着人们对食品安全和健康需求的不断提升，油脂的提取与加工技术研究得到了广泛关注。二十一世纪以来，中国油菜产业发展迅猛，2020 年中国油菜籽产量约 1405 万吨，占世界总产量的第二位[1−2]。油菜籽作为我国重要的油料作物之一，其油脂含量高、营养组成丰富，其粗脂肪含量最高能达到 42%，此外还含有 35%~45% 的蛋白质以及纤维素、维生素等其他组分，是植物油脂的重要来源[3−4]。油菜籽的利用渠道广泛，其中最主要的是通过成熟的油菜籽制取菜籽油，其次还包括生产动物饲料、生物柴油以及景观等方面[5]。菜籽油是世界范围内产量第二的食用植物油[6]，随着现代油料制油技术的飞速发展，高质量菜籽油的市场潜力将得以充分体现。

目前菜籽油制备的传统工艺有热压法[7]、溶剂浸出法[8] 和冷榨法[9]。通常存在油脂提取率较低、能源消耗较高以及溶剂残留等问题[10]。并且传统提取工艺对油脂的热处理过程可能导致部分活性物质的损失，同时产生不良风味物质，从而降低了菜籽油的品质与消费者的接受度[11]。因此，开发高效、绿色且兼具品质保护的新型提取技术具有重要意义。水酶法作为一种近年来兴起的绿色提取技术，以其环保、高效以及较低的能耗而受到研究者的青睐，根据提取介质可细分为水代法[12]、水酶法[13] 和乙醇水提法[14] 等。其结合酶促辅助技术，如纤维素酶，可显著提高植物细胞壁的破裂程度，促进植物油脂的释放[15]，目前将纤维素酶同乙醇水提法协同处理制备菜籽油的相关报道较少。因此以油菜籽为原料，采用纤维素酶辅助乙醇水提法（Cellulase-assisted Ethanol Aqueous Extraction Processing, C-EAEP）作为提取方法，能够在有效提高油脂的提取率的同时减少溶剂使用量和能耗[16]，且在较低温度条件下提取，有助于保留油脂中的天然活性成分（如维生素 E、植物甾醇等）[17]，使油脂的氧化稳定性更高，可有效延缓酸败，维持风味，对发展高品质菜籽油具有重要意义。

本研究围绕 C-EAEP 技术提取菜籽油的贮藏稳定性展开，通过选取传统热压油、三级商品油、未经热处理的 C-EAEP 菜籽油以及经热处理的 C-EAEP 菜籽油，系统分析了该技术提取的菜籽油在加速氧化贮藏条件下的理化指标、维生素 E 含量、脂肪酸组成、挥发性风味物质以及电子鼻分析数据的变化，以展示 C-EAEP 菜籽油在贮藏稳定性方面的表现。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

金龙鱼三级商业菜籽油　益海嘉里食品有限公司；氢氧化钠、浓盐酸、碘化钾、无水乙醇、正己烷、冰乙酸、酚酞、乙醚、乙腈、异丙醇、三氯甲烷　分析

纯，国药集团化学试剂有限公司；纤维素酶　南宁庞博生物工程有限公司；37 种脂肪酸甲酯混标、α、γ、δ 维生素 E 标准品　坛墨质检科技股份有限公司。

CP213 SOP 电子天平　赛多利斯科学仪器北京有限公司；FA1004 精密分析天平　常州市幸运电子设备有限公司；6890N 气相色谱仪、GC7890A-5975C 气质联用仪　美国安捷伦科技公司；Heidolph Advantage 旋转蒸发仪　德国 IKA 仪器设备有限公司；AEU45 电热鼓风烘箱　上海精宏实验设备有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　油样制备

1.2.1.1　传统热压油的制备　根据杨晓健等[18] 的方法，称取 500 g 油菜籽，放入烘箱中烘烤后（烘烤温度 130 ℃，烘烤时间 40 min），立即进入榨油机压榨，滤渣进行二次压榨，收集两次压榨油后过滤，得到自制菜籽压榨毛油。而后对毛油进行精炼，取 50 g 毛油于烧杯中，加入磷酸和水，50 ℃ 恒温加热磁力搅拌 20 min，之后 8000 r/min 离心 20 min，收集上层清油得到脱胶油。再取 50 g 脱胶油于烧杯中，向油样中加入碱液，30 ℃ 恒温加热磁力搅拌，随后调整恒温加热磁力搅拌器温度至 50 ℃ 继续脱酸 20 min，反应结束后 8000 r/min 离心 20 min 收集上层清油得到脱酸油，所得即为传统热压油样品。

1.2.1.2　C-EAEP 菜籽油的制备　根据任燕勤[19] 的方法，称取 500 g 油菜籽粉末，在料液比 1∶6（w/v）、提取温度 50 ℃、提取 pH4.8、添加 35%（v/v）乙醇水溶液和 1.5% 纤维素酶的反应条件下恒温水浴 2 h。将 pH 调整至 9.0，温度调整至 75℃，恒温水浴 90 min 后 90 ℃ 灭酶 10 min，室温冷却后 8000 r/min 离心 30 min 倒出上层液，用分液漏斗收集清油和乳状液，对乳状液冷冻破乳后再收集上层清油，收集两次清油并称重。由于 C-EAEP 水提菜籽毛油磷脂和游离脂肪酸含量较低，因此不需要脱胶和脱酸的步骤即可得到三级精炼油，考虑到微量的乙醇残留，将 C-EAEP 菜籽毛油 65 ℃ 旋转蒸发 2 h 去除残留乙醇，所得即为 C-EAEP 菜籽油。

1.2.1.3　热处理 C-EAEP 菜籽油的制备　取 50 g 旋蒸后的 C-EAEP 菜籽油放入预热后的恒温电热套中，将温度调整至 120 ℃ 加热 20 min，加热后静置冷却至室温后过滤，放入 20 mL 玻璃瓶中避光保存。

1.2.2　加速氧化贮藏实验　分别取 500 mL 三级商品油、传统热压油、C-EAEP 菜籽油和热处理的 C-EAEP 菜籽油样品分装于 20 mL 食品级聚乙烯瓶中，然后放入（60±1）℃ 恒温烘箱内分别于第 0、7、14、21、28 d 取出样品分析。

1.2.3　理化指标测定

1.2.3.1　过氧化值的测定　参考 GB/T 5009.227-2016 测定菜籽油中的过氧化值[20]。

1.2.3.2　酸值的测定　参考 GB/T 5009.229-2016 测定菜籽油的酸值[21]。

1.2.3.3　碘值的测定　参考 GB/T 5532-2008 测定菜籽油的碘值[22]。

1.2.3.4　皂化值的测定　参考 GB/T 5534-2008 测定菜籽油的皂化值[23]。

1.2.4　维生素 E 含量测定　参考 GB 5009.82-2016，通过高效液相色谱仪测定菜籽油中维生素 E 的含量[24]。色谱柱：DIONEX C_{18}，检测器为荧光检测器，检测波长：λ_{ex}=280 nm，λ_{em}=340 nm，流动相为乙腈，流速为 1 mL/min，进样量为 5 μL，洗脱时间设置为 40 min。α、γ 和 δ 维生素 E 的标准品溶解于正己烷，用于标准曲线的绘制，具体标曲见表 1。

表 1　各维生素 E 的回归方程、决定系数和线性范围
Table 1　Regression equations, determination coefficients, and linear ranges for various vitamin E compounds

化合物	线性方程	决定系数（R^2）	线性范围（mg/mL）
α-V_E	Y=10198.21X−679.33	0.9992	0.25~10
γ-V_E	Y=9769.39X+456.56	0.9994	0.25~10
δ-V_E	Y=10893.42X−239.67	0.9991	0.25~10

1.2.5　脂肪酸组成测定　通过气质联用仪测定菜籽油的脂肪酸组成。油样预处理参考 GB 5009.168-2016[25]。称取 50 mg 的油样转移至 10 mL 的带塞试管中，加入 1.5 mL 的 1 mol/L 的 KOH-CH_3OH 溶液，60 ℃ 下水浴振荡 40 min，使脂肪酸转化为脂肪酸甲酯，从水浴上迅速取下试管，冷却至室温。然后准确加入 10~25 mL 异辛烷，振摇 2 min 后加入饱和氯化钠水溶液，待其静置分层。吸取上层异辛烷提取溶液约 5~25 mL 试管中，加入约 5 g 无水硫酸钠，振摇 1 min 后静置 5 min 待其分层，吸取上层溶液到进样瓶中待测定。

GC 条件为：色谱柱：SP-2560（100 m×0.25 mm×0.25 μm）；检测器：FID；喷射器和检测器温度：260 ℃；升温程序：初温 150 ℃，持续时间 5 min，然后在 30 min 内以 4 ℃/min 的速率增加至 250 ℃，保持时间 30 min；载气：N_2。

1.2.6　电子鼻分析　使用 Fox3000 传感器进行电子鼻分析阵列指纹分析仪，包含 12 种金属氧化物半导体。各传感器响应敏感特性：LY2/LG 对烷烃类灵敏；LY2/G 对氢气、乙醇灵敏；LY2/AA 对乙醇、丙酮灵敏；LY2/GH 对硫化物灵敏；LY2/gCTL 对醛类灵敏；LY2/gCT 对酯类、萜烯类灵敏；T30/1 对氨、胺类灵敏；P10/1 对可燃气体灵敏；P10/2 对芳香族化合物灵敏；P40/1 对硫化氢、硫醇类灵敏；P70/2 对长链醛酮）灵敏；PA/2 对有机酸灵敏。

根据 Zhang 等[26] 的方法，对不同菜籽油进行电子鼻分析。取 10 mL 菜籽油转移至 50 mL 顶空瓶中，静置 10 min 后，插入电子鼻探头吸取顶端空气，测定挥发性物质。电子鼻参数：样品间隔时间 1 s，

清洗时间 90 s, 归零时间 15 s; 样品准备时间 5 s, 测定时间 150 s, 载气流速 200 mL/min, 进样流量 200 mL/min。样品测定 3 次以上重复, 测定时保持室温。

1.2.7 挥发性风味物质分析 根据 Zhou 等[27] 的方法, 用固相微萃取-气质联用法测定菜籽油中的挥发性风味物质组成。前处理: 取 5 mL 菜籽油样品置于 15m 顶空进样瓶中, 在 70 ℃ 下预热 10 min, 萃取头吸附时间 40 min, 在 250 ℃ 进样口, 解析进样 5 min。

GC 条件: 色谱柱: SH-Rxci-SSil MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm); 柱箱温度: 50 ℃; 升温程序: 初温 160 ℃, 先以 4 ℃/min 升高到 180 ℃, 再以 10 ℃/min 升温达到 240 ℃, 保持时间 10 min; 使用氦气作为载气, 柱压为 48.2 kPa, 柱流量为 0.98 mL/min。

MS 条件: 采用 EI 离子化方式, 离子源温度 220 ℃, 接口温度 30 ℃, 电子能量 90 eV, 溶剂延迟时间 90 s, 发射电流 34.6 μA, 质量扫描范围 50~450 m/z。

用 NIST2.2 谱库对测定结果进行检索, 只报道相似度大于 85% 的物质。峰面积归一化法确定样品中各挥发性风味物质的相对含量[28], 其计算公式如下:

$$X(\%) = \frac{m}{n} \times 100$$

式中: X 为相对含量, %; m 为单组分物质的峰面积; n 为总峰面积。

1.3 数据处理

所有实验均进行 3 次独立重复, 实验数据以平均值±标准差表示。采用 SPSS22.0 软件进行统计分析, 采用 Origin 2018 软件进行作图。差异显著水平采用 Duncan 检验, 设置为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间理化指标变化

在评价植物油脂氧化程度的研究方法上, 通常是从氧化过程中植物油脂物理、化学和感官性质的变化等方面进行研究[29]。图 1 显示了四组菜籽油样品在加速氧化贮藏条件下贮藏 28 d 期间的过氧化值、酸值、碘值、皂化值的变化。从四个理化指标综合分析, 由 C-EAEP 工艺处理的菜籽油在贮藏期间氧化、水解等劣变反应更缓慢, 不饱和成分与甘油三酯结构更稳定, 使其贮藏稳定性显著优于传统热压油和三级商品油, 得出该工艺对菜籽油贮藏理化性质的优化作用。

由图 1(A)可知, 四组菜籽油样品在储藏期间的过氧化值均不断升高, 贮藏初期, 四种菜籽油过氧化值均随时间上升, 反映油脂氧化不断产生氢过氧化物。但总体来看, 热处理后的 C-EAEP 油和未经热处理的 C-EAEP 油比三级商品油和传统热压油的过

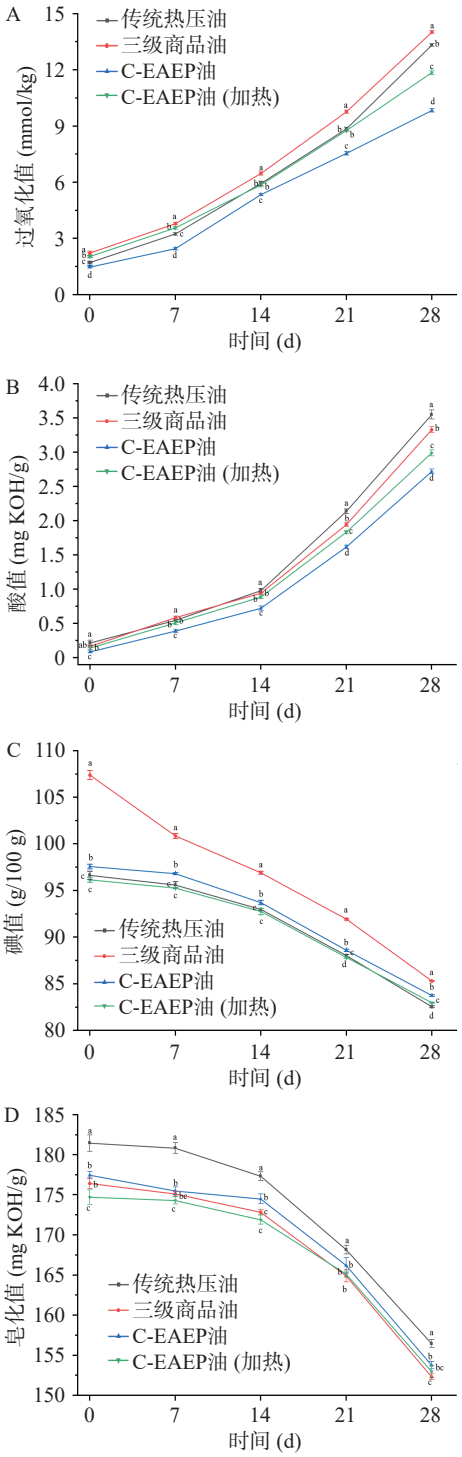


图 1 纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间理化指标

Fig.1 Physicochemical properties of cellulose-assisted ethanol water extraction of rapeseed oil during storage

注: A: 过氧化值; B: 酸值; C: 碘值; D: 皂化值; 图中不同小写字母表示不同工艺间差异显著($P<0.05$), 图 2 同。

氧化值低, 且经 C-EAEP 处理的菜籽油(尤其未加热组)过氧化值增幅显著减小($P<0.05$), 说明该工艺有效延缓氧化, 维持贮藏稳定性。在贮藏的第 14 d, 三级商品油的过氧化值为 6.56 mmol/kg, 超过三级菜籽油国标的 6.0 mmol/kg; 传统热压油、未经热处理的 C-EAEP 油和热处理后 C-EAEP 油的过氧化值分别为 5.98、5.33 和 5.79 mmol/kg, 仍在国家三级菜籽油标准的阈值内。在贮藏的第 21 d, 四组菜籽油的过

氧化值均超过国家标准。在贮藏的第 28 d，传统热压油、三级商品油的过氧化值峰值分别为 13.36、14.01 mmol/kg，远高于 C-EAEP 处理的菜籽油，这也表明其氧化反应剧烈，抗氧化能力弱。

酸值是衡量油脂酸败程度的关键指标，贮藏过程中，油脂因氧化、水解产生游离脂肪酸，酸值越高，表明油脂品质劣变越严重。由图 1(B)可知，随着加速实验时间的延长，四组菜籽油的酸值均呈现先缓慢增长后快速增长的趋势，传统热压油、三级商品油酸值增长较快。但无论是热处理后的 C-EAEP 油还是未经热处理的 C-EAEP 油其酸值显著低于传统热压油和三级商品油(P<0.05)，表明其工艺抑制了游离脂肪酸生成，延缓酸败，贮藏稳定性更优。可能是因为 C-EAEP 油中天然抗氧化物(维生素 E、甾醇等)含量相对较高，因此比传统热压油和三级商品油具有更好的抗氧化效果[30]。贮藏后期油样品质劣变严重，从第 21 d 起，四组菜籽油的酸值均超过国家三级菜籽油标准的 1.0 mg KOH/g。

碘值和皂化值分别反映油脂不饱和键含量和油脂中甘油三酯等成分的变化。由图 1(C)和图 1(D)可知，随着加速实验时间延长，四组菜籽油的碘值和皂化值均呈现先缓慢降低后快速降低的趋势。经 C-EAEP 处理的菜籽油皂化值较其他三种菜籽油变化小，表明其脂肪酸组成相对稳定。三级商品油在贮藏期间碘值和皂化值显著高于其他三组菜籽油(P<0.05)；在贮藏后期，传统热压油、未经热处理的 C-EAEP 油和热处理后 C-EAEP 油碘值和皂化值接近。在加速氧化贮藏的第 28 d，四组菜籽油的皂化值均低于 160 mg KOH/g，品质下降严重，贮藏稳定性降低。

2.2　纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间维生素 E 含量变化

生育酚作为菜籽油的重要活性成分，可以通过改变自由基链的自动氧化过程和延缓不饱和脂肪酸氧化来实现油脂氧化稳定性的提高，从而有效降低异味和酸败的产生[31]。四组菜籽油在贮藏期间维生素 E(V_E)变化如图 2 所示，四组菜籽油在加速氧化贮藏期间维生素 E 总量呈下降趋势，在贮藏第 7~21 d 期间维生素 E 总量下降明显，而在贮藏前期(0~7 d)和贮藏后期(21~28 d)维生素 E 总量下降缓慢。四组菜籽油在加速氧化贮藏期间，三级商品油的 α-V_E 从初始约 32 mg/100 g 降至 28 d 的 25 mg/100 g 以下，V_E 总量从近 95 mg/kg 降至 88 mg/kg 左右，反映出传统高温加工或精炼工艺可能破坏 V_E 结构，且贮藏过程中氧化作用加剧其降解。相较之下，C-EAEP 油及加热处理的 C-EAEP 油的 V_E 保留效果更优，其中 C-EAEP 油的 α-V_E 在 28 d 仍维持在 40 mg/100 g 以上，V_E 总量稳定在 105 mg/kg 以上，显著高于其他 3 组(P<0.05)。尽管加热后的 C-EAEP 油部分 V_E 组分有所下降，但 V_E 总量表现仍显著优于传统热压油(P<0.05)，适度热处理对 V_E 的影响弱于传统高温加工。因此，C-EAEP 工艺的低温酶解机制未对 V_E 结构造成显著破坏，并有效保留其抗氧化成分，使其能够有效延缓贮藏期间 V_E 的降解，维持油脂的抗氧化性能。

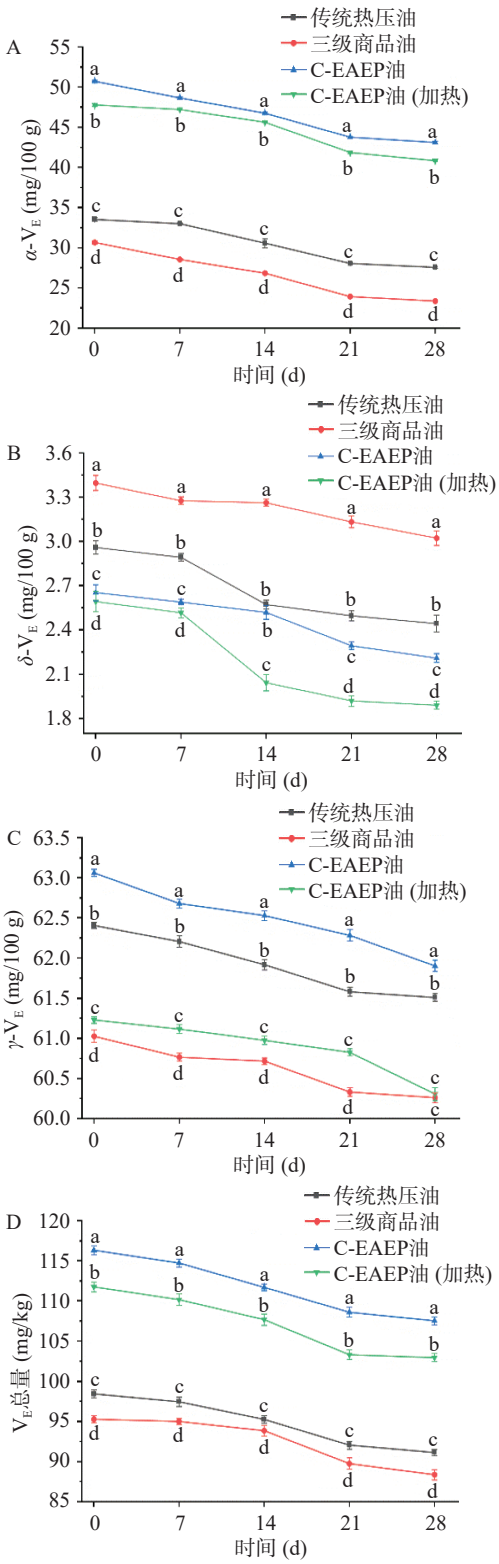


图 2　纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间维生素 E 含量变化

Fig.2　Changes of vitamin E content of cellulose-assisted ethanol water extraction of rapeseed oil during storage

注：A：α-V_E；B：δ-V_E；C：γ-V_E；D：V_E 总量。

2.3 纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间脂肪酸组成

目前，热处理对花生油、菜籽油、大豆油、茶籽油等食用油品质的影响已有文献报道[32]，研究发现植物油脂经加热后，反式脂肪酸含量增加，不饱和脂肪酸含量减少，奇数碳脂肪酸含量升高[33]。由表 2 可知，四组菜籽油在加速氧化储藏期间脂肪酸组成较稳定，无新的短链脂肪酸或长链脂肪酸，不饱和脂肪酸相对含量在贮藏周期结束后减少但变化幅度较小，其中油酸（C18:1）、亚油酸（C18:2）、亚麻酸（C18:3）、花生一烯酸（C20:1）、芥酸（C22:1）等菜籽油特征不饱和脂肪酸含量稳定。

表 2 不同工艺菜籽油贮藏期间的脂肪酸组成（%）

Table 2 Fatty acid composition of rapeseed oil during storage by different processes (%)

脂肪酸组成	贮藏天数(d)	传统热压油	三级商品油	C-EAEP	C-EAEP(热处理)
C14:0	0	0.05±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}	0.06±0.01^{a}	0.05±0.00^{a}
	7	0.05±0.00^{a}	0.04±0.00^{a}	0.06±0.00^{a}	0.05±0.01^{a}
	14	0.05±0.00^{a}	0.04±0.00^{a}	0.06±0.01^{a}	0.05±0.01^{a}
	21	0.04±0.00^{a}	0.05±0.01^{a}	0.06±0.01^{a}	0.05±0.00^{a}
	28	0.05±0.01^{a}	0.05±0.00^{a}	0.05±0.01^{a}	0.05±0.00^{a}
C16:0	0	3.07±0.03^{c}	4.50±0.01^{a}	3.15±0.04^{b}	3.14±0.04^{b}
	7	2.98±0.04^{c}	4.76±0.04^{a}	3.26±0.02^{b}	3.30±0.02^{b}
	14	3.11±0.06^{d}	4.68±0.05^{a}	3.28±0.00^{b}	3.24±0.08^{c}
	21	3.07±0.04^{d}	4.61±0.04^{a}	3.42±0.04^{c}	3.45±0.07^{b}
	28	3.27±0.04^{c}	4.38±0.02^{a}	3.24±0.00^{d}	3.48±0.08^{b}
C18:0	0	1.32±0.04^{c}	1.26±0.08^{d}	1.42±0.03^{b}	1.53±0.03^{a}
	7	1.35±0.04^{b}	1.32±0.05^{c}	1.61±0.05^{a}	1.60±0.04^{a}
	14	1.30±0.02^{d}	1.46±0.06^{c}	1.55±0.06^{b}	1.62±0.06^{a}
	21	1.41±0.01^{b}	1.26±0.08^{d}	1.35±0.02^{c}	1.55±0.02^{a}
	28	1.43±0.02^{c}	1.35±0.05^{d}	1.63±0.02^{b}	1.71±0.10^{a}
C18:1	0	33.42±0.24^{b}	38.24±0.19^{a}	28.21±0.24^{d}	30.39±0.35^{c}
	7	33.29±0.19^{b}	37.95±0.11^{a}	29.02±0.28^{d}	30.86±0.36^{c}
	14	32.98±0.14^{b}	38.15±0.12^{a}	29.21±0.20^{d}	30.74±0.29^{c}
	21	33.08±0.16^{b}	38.22±0.17^{a}	28.75±0.24^{d}	30.69±0.33^{c}
	28	32.73±0.17^{b}	38.73±0.19^{a}	28.47±0.27^{d}	30.52±0.26^{c}
C18:2	0	12.24±0.10^{d}	12.88±0.08^{b}	13.05±0.14^{a}	12.56±0.15^{c}
	7	13.01±0.09^{a}	12.59±0.06^{c}	12.58±0.09^{c}	12.90±0.11^{b}
	14	13.42±0.04^{a}	13.11±0.04^{b}	12.96±0.12^{c}	13.12±0.09^{b}
	21	13.29±0.05^{b}	12.46±0.04^{d}	13.31±0.17^{a}	12.84±0.20^{c}
	28	12.94±0.11^{b}	12.36±0.06^{d}	13.06±0.05^{a}	12.91±0.18^{c}
C18:3	0	8.73±0.06^{c}	8.89±0.13^{b}	8.69±0.21^{d}	9.06±0.23^{a}
	7	8.16±0.04^{d}	8.77±0.08^{b}	8.65±0.17^{c}	8.96±0.17^{a}
	14	8.32±0.03^{d}	8.43±0.05^{c}	8.83±0.08^{a}	8.48±0.15^{b}
	21	8.28±0.04^{d}	8.81±0.06^{a}	8.51±0.20^{c}	8.76±0.18^{b}
	28	8.41±0.04^{c}	8.64±0.13^{b}	8.62±0.16^{b}	8.84±0.20^{a}
C20:0	0	0.59±0.02^{c}	0.69±0.03^{a}	0.67±0.00^{b}	0.67±0.01^{b}
	7	0.63±0.02^{c}	0.71±0.01^{b}	0.72±0.01^{a}	0.62±0.04^{c}
	14	0.72±0.01^{c}	0.80±0.01^{a}	0.59±0.01^{d}	0.75±0.02^{b}
	21	0.70±0.00^{d}	0.72±0.02^{c}	0.77±0.02^{a}	0.75±0.05^{b}
	28	0.68±0.02^{c}	0.81±0.03^{a}	0.81±0.02^{a}	0.72±0.04^{b}
C20:1	0	13.19±0.29^{c}	11.99±0.23^{d}	13.58±0.06^{b}	13.63±0.02^{a}
	7	13.22±0.24^{c}	12.13±0.16^{d}	14.28±0.05^{a}	14.08±0.01^{b}
	14	13.18±0.22^{c}	12.18±0.14^{d}	14.07±0.08^{a}	13.91±0.05^{b}
	21	13.27±0.19^{c}	11.85±0.17^{d}	13.65±0.09^{a}	13.63±0.02^{b}
	28	13.01±0.13^{c}	12.49±0.10^{d}	13.75±0.11^{b}	14.01±0.06^{a}
C20:2	0	0.33±0.01^{a}	0.23±0.01^{b}	0.07±0.02^{c}	0.06±0.00^{c}
	7	0.36±0.00^{a}	0.29±0.00^{b}	0.06±0.01^{d}	0.07±0.01^{c}
	14	0.29±0.01^{b}	0.31±0.01^{a}	0.06±0.00^{c}	0.05±0.01^{c}
	21	0.30±0.01^{b}	0.41±0.02^{a}	0.06±0.00^{c}	0.06±0.01^{c}
	28	0.41±0.02^{a}	0.27±0.01^{b}	0.06±0.01^{c}	0.06±0.00^{c}
C22:0	0	0.32±0.01^{d}	0.39±0.00^{b}	0.34±0.00^{c}	0.44±0.01^{a}
	7	0.28±0.01^{c}	0.41±0.01^{b}	0.26±0.01^{d}	0.52±0.00^{a}
	14	0.42±0.02^{c}	0.44±0.01^{b}	0.23±0.02^{d}	0.56±0.04^{a}
	21	0.40±0.00^{c}	0.51±0.00^{a}	0.29±0.02^{d}	0.47±0.04^{b}
	28	0.32±0.01^{b}	0.33±0.01^{b}	0.32±0.03^{b}	0.39±0.02^{a}

续表 2

脂肪酸组成	贮藏天数(d)	传统热压油	三级商品油	C-EAEP	C-EAEP(热处理)
C22:1	0	19.47±0.04^{c}	15.09±0.03^{d}	24.29±0.22^{a}	21.83±0.01^{b}
	7	19.52±0.10^{c}	16.31±0.07^{d}	23.74±0.22^{a}	20.19±0.01^{b}
	14	20.02±0.13^{c}	15.68±0.09^{d}	23.99±0.25^{a}	20.34±0.02^{b}
	21	19.62±0.13^{c}	15.35±0.10^{d}	23.68±0.22^{a}	21.04±0.01^{b}
	28	19.39±0.09^{c}	15.22±0.04^{d}	23.72±0.24^{a}	21.09±0.01^{b}
C22:2	0	0.21±0.01^{a}	0.18±0.01^{b}	0.02±0.00^{c}	0.01±0.00^{c}
	7	0.24±0.02^{a}	0.12±0.01^{b}	0.01±0.00^{c}	0.01±0.00^{c}
	14	0.15±0.02^{a}	0.14±0.01^{a}	0.01±0.00^{b}	0.02±0.00^{b}
	21	0.09±0.02^{b}	0.14±0.00^{a}	0.04±0.00^{c}	0.02±0.00^{d}
	28	0.07±0.00^{b}	0.13±0.00^{a}	0.04±0.01^{c}	0.02±0.00^{d}
C24:1	0	0.69±0.03^{b}	0.72±0.00^{a}	0.74±0.00^{a}	0.72±0.00^{a}
	7	0.63±0.02^{d}	0.74±0.01^{b}	0.68±0.02^{c}	0.76±0.00^{a}
	14	0.62±0.02^{b}	0.69±0.01^{a}	0.59±0.01^{c}	0.56±0.00^{d}
	21	0.43±0.02^{c}	0.63±0.00^{a}	0.61±0.00^{a}	0.51±0.02^{b}
	28	0.51±0.02^{b}	0.63±0.01^{a}	0.64±0.00^{a}	0.39±0.00^{c}
不饱和脂肪酸	0	87.95±0.23^{c}	88.22±0.29^{b}	88.65±0.17^{a}	87.58±0.35^{d}
	7	87.83±0.21^{b}	88.01±0.17^{a}	88.02±0.33^{a}	87.40±0.26^{c}
	14	87.48±0.13^{c}	88.03±0.18^{b}	88.13±0.21^{a}	87.22±0.21^{d}
	21	87.53±0.22^{b}	87.37±0.27^{c}	87.61±0.14^{a}	87.29±0.19^{d}
	28	87.17±0.18^{a}	87.29±0.19^{a}	87.24±0.28^{a}	87.07±0.32^{a}
饱和脂肪酸	0	12.05±0.11^{b}	11.78±0.14^{c}	11.35±0.13^{d}	12.42±0.09^{a}
	7	12.17±0.14^{b}	11.99±0.06^{c}	11.98±0.04^{c}	12.60±0.10^{a}
	14	12.52±0.08^{b}	11.97±0.11^{b}	11.87±0.06^{c}	12.78±0.13^{a}
	21	12.47±0.10^{c}	12.63±0.05^{b}	12.39±0.08^{d}	12.71±0.04^{a}
	28	12.83±0.07^{b}	12.71±0.03^{c}	12.76±0.04^{b}	12.93±0.12^{a}

注：不同工艺间不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

在贮藏初期(0 d)，C-EAEP 工艺表现出显著的脂肪酸富集特性：其芥酸(C22:1)含量达 24.29%，显著高于传统热压油(19.47%)和三级商品油(15.09%)(P<0.05)，表明酶解作用可有效释放长链不饱和脂肪酸；同时，其总不饱和脂肪酸比例(88.65%)高于其他工艺。相较之下，三级商品油因精炼工艺优化，棕榈酸(C16:0)和油酸(C18:1)含量最高，可能由于精炼选择性去除极性组分。而传统热压油的总不饱和脂肪酸较低，氧化稳定性较弱。

在贮藏中期(7~14 d)，C-EAEP 工艺的优势进一步凸显：14 d 时其亚麻酸(C18:3)含量升至 8.83%，显著高于传统热压油(8.32%)(P<0.05)，且硬脂酸(C18:0)显著高于其他工艺(P<0.05)，反映酶解对于中链饱和脂肪酸的保留作用。然而，C-EAEP 的油酸(C18:1)含量始终低于三级商品油和传统热压油，可能与多不饱和脂肪酸竞争性积累有关。三级商品油在贮藏期间表现出优异的稳定性，总不饱和脂肪酸比例波动最小，且 C18:1 含量始终最高，表明精炼工艺可有效抑制氧化劣变。

在贮藏后期(21~28 d)，C-EAEP 热处理工艺的稳定性优势显现：热处理后 C-EAEP 油的 C16:0 含量升至 3.48%，而未处理组仅升至 3.24%，说明热处理可能加速了部分脂肪酸的分解或重组。经热处理后的 C-EAEP 油，与 C-EAEP 油相比芥酸(C22:1)含量显著降低(P<0.05)，进一步体现热处理在改善油品健康属性中的作用。其硬脂酸(C18:0)含量由 1.53% 升至 1.71%，总不饱和脂肪酸比例仅下降 0.51%(87.58%~87.07%)，下降变化量优于未处理的 C-EAEP(1.41%)的下降速度。传统热压油在长期贮藏中总不饱和脂肪酸比例下降 0.78%(87.95%~87.17%)，证明其较弱的抗氧化能力，需依赖外源添加剂维持品质。

2.4　纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间电子鼻分析

C-EAEP 菜籽油贮藏期间电子鼻雷达图谱如图 3 所示。从图中可以看出，在贮藏第 7 d 和第 14 d，经热处理的 C-EAEP 油对 PA/2 和 P70/2 传感器的响应值高于其他三组菜籽油；在贮藏第 21 d，四组菜籽油对各电子鼻传感器的响应值均呈现出一定的下降趋势，未经热处理的 C-EAEP 油对 LY2/gCTL 和 LY2/gCT 传感器的响应值降低至接近 0，联系 GC-MS 数据得到，可能是由于部分烷烃类物质在这一贮藏阶段消失。在贮藏第 28 d，三级商品油和热处理后的 C-EAEP 菜籽油对 PA/2、P70/2 和 T30/1 传感器的响应值增加，高于其他两组菜籽油。说明三级商品油和热处理后的 C-EAEP 菜籽油在加速氧化贮藏后期产生了较丰富的醇类、有机胺类、芳香化合物等物质，风味增强。

C-EAEP 菜籽油贮藏期间电子鼻 PCA 如图 4 所示。根据 PCA，在贮藏前期，未经热处理的 C-EAEP 菜籽油风味与传统热压油和三级商品油接近；在贮藏第 14 d，未经热处理的 C-EAEP 菜籽油与传统热压

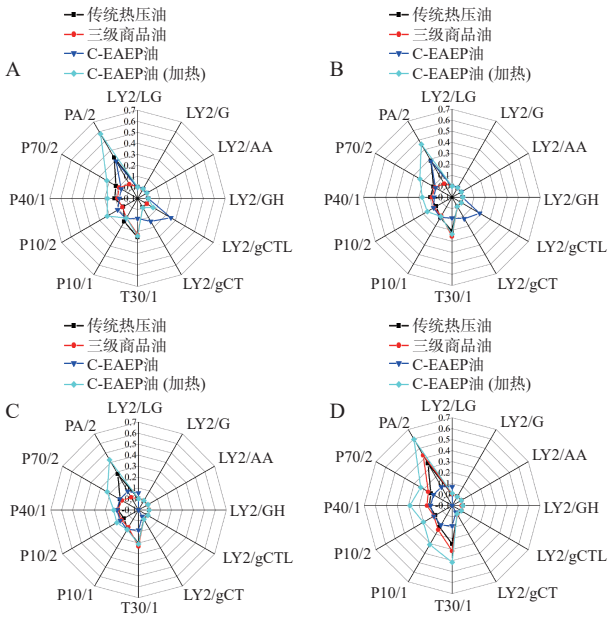


图 3 纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间电子鼻雷达图谱

Fig.3 Radar spectrum of electronic nose during storage of cellulose-assisted ethanol water extraction of rapeseed oil

注: A: 7 d; B: 14 d; C: 21 d; D: 28 d; 图 4 同。

油和三级商品油无重合部分, 风味上出现差异, 而热处理的 C-EAEP 菜籽油风味与三级商品油相近; 在贮藏第 21 d, 三级商品油风味减弱, 与 C-EAEP 菜籽油和传统热压油区别明显; 在贮藏第28 d, 经热处理后的 C-EAEP 菜籽油风味上与三级商品油接近, 在贡献率为 92.4% 的主成分 1 的数值高于热压油和三级商品油, 说明在贮藏后期, 经热处理的 C-EAEP 菜籽油比未经热处理风味增强, 保持了与传统热压油和三级商品油相近的风味。

2.5 纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间挥发性风味物质组成分析

Kraljic 等[34] 考察了不同温度下加热油菜籽原料对菜籽油挥发性风味物质组成的影响, 发现随着温度升高, 菜籽油样品中的硫苷降解产物类、呋喃类和醛类等挥发性风味物质增加。菜籽油贮藏期间挥发性风味物质组成及相对含量如表 3 所示。在整个贮藏过程中共鉴定出 55 种化合物, 其中烷烃类 5 种, 硫苷降解产物类 8 种, 醛类 9 种, 酮类 5 种, 醇类 4 种, 酯类 3 种, 酸类 2 种, 醚类 1 种, 呋喃类 2 种, 烃类 5 种, 吡嗪类化合物 6 种, 烯类 5 种。

硫苷降解产物: 由表 3 可知, 硫苷降解产物在传统热压油中初始含量较高(74.04%), 但随贮藏时间逐渐下降(至 28 d 时为 65.26%), 可能与贮藏期间硫苷进一步水解或挥发损失有关。相比之下, 三级商品油的硫苷降解产物含量较低且变化幅度较小(64.71%~60.86%), 可能因其精炼工艺减少了硫苷前体物质的残留。值得注意的是, 在加速氧化贮藏周期内, 2-丁烯腈始终未在未经热处理的 C-EAEP 菜籽油中被检出, 而在另外三组菜籽油样品中 2-丁烯腈始

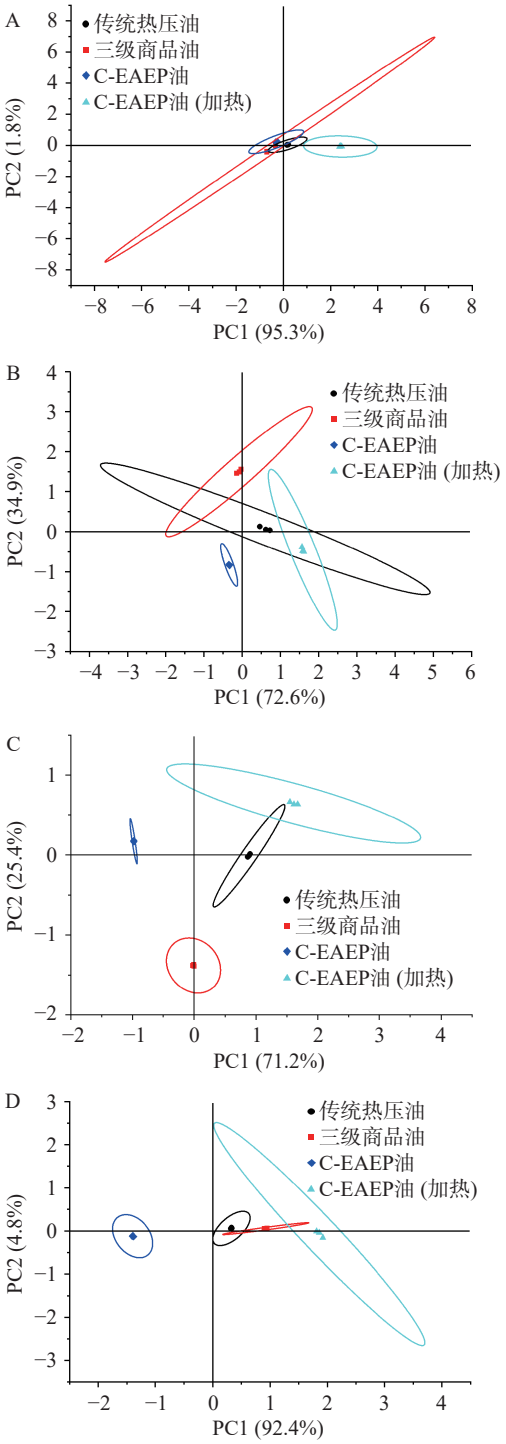


图 4 纤维素酶辅助乙醇水提菜籽油贮藏期间电子鼻 PCA

Fig.4 Electronic nose PCA of cellulose-assisted ethanol water extraction of rapeseed oil during storage

终存在。这是由于传统热压油和三级商品油在高温加工或精炼过程中可能激活黑芥子酶或通过氧化反应促进硫苷分解为腈类(如 2-丁烯腈),而 C-EAEP 冷榨工艺在低温下进行, 抑制了酶活性, 硫苷更倾向于生成异硫氰酸酯(如 3-丁烯基异硫氰酸酯)而非腈类[35]。此外, 未热处理 C-EAEP 油的原料硫苷前体可能因细胞结构破坏较少或种类差异, 限制了腈类的生成。热处理后, C-EAEP 油因温度升高重新激活酶促反应或引发非酶热分解, 促使硫苷转向腈类生成路径, 因此微量 2-丁烯腈被检出。这表明热处理可能

表 3　不同工艺菜籽油贮藏期间挥发性风味物质相对含量(%)

Table 3　Relative content of volatile flavor substances of rapeseed oil during storage by different processes (%)

挥发性风味物质名称	工艺	相对含量				
		0 d	7 d	14 d	21 d	28 d
2-丁烯腈	传统热压油	32.75	29.46	26.82	27.26	27.83
	三级商品油	24.24	25.03	24.94	23.68	23.54
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	0.14	0.25	0.26	0.09	0.15
3-甲基-3-丁烯腈	传统热压油	28.33	27.29	23.38	18.23	20.99
	三级商品油	26.63	24.74	25.93	22.97	23.01
	C-EAEP油	18.23	17.68	18.04	17.43	18.42
	C-EAEP油(热处理)	26.42	25.79	26.25	26.75	25.88
3-丁烯基异硫氰酸酯	传统热压油	3.35	3.12	3.06	1.73	1.68
	三级商品油	1.51	1.24	1.18	1.09	1.15
	C-EAEP油	0.62	0.32	0.34	–	–
	C-EAEP油(热处理)	3.05	2.67	2.41	4.25	5.79
5-己腈	传统热压油	9.71	11.04	6.79	10.19	7.98
	三级商品油	12.04	10.74	9.60	13.05	8.66
	C-EAEP油	8.19	8.24	7.86	8.37	7.06
	C-EAEP油(热处理)	5.74	5.70	6.13	6.39	3.62
苯代丙腈	传统热压油	2.04	1.93	4.07	0.54	1.43
	三级商品油	0.72	1.12	1.08	3.65	3.74
	C-EAEP油	0.26	0.35	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	1.12	1.08	1.35	1.46	0.91
苯乙腈	传统热压油	1.21	2.34	0.95	–	–
	三级商品油	1.08	0.43	0.75	1.58	1.48
	C-EAEP油	–	–	–	0.13	0.24
	C-EAEP油(热处理)	0.43	0.64	0.26	0.43	0.31
环丙乙腈	传统热压油	–	–	1.46	3.69	2.95
	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	–	–	–
环丁腈	传统热压油	–	–	–	–	–
	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	0.04	0.05	0.12	0.06	0.10
	C-EAEP油(热处理)	0.10	0.12	0.05	0.14	0.22
2,4-戊二烯腈	传统热压油	2.07	0.52	2.52	3.19	4.08
	三级商品油	0.03	0.08	0.15	0.38	0.43
	C-EAEP油	3.19	2.79	2.59	3.15	2.67
	C-EAEP油(热处理)	–	0.45	0.76	0.84	0.39
硫苷降解产物类总计	传统热压油	74.04	72.06	63.99	63.11	65.26
	三级商品油	64.71	62.06	63.02	64.93	60.86
	C-EAEP油	30.41	29.11	28.61	29.14	28.49
	C-EAEP油(热处理)	33.71	34.07	35.06	36.10	35.48
糠醛	传统热压油	10.25	8.89	9.53	8.46	9.24
	三级商品油	11.86	11.62	10.69	9.31	10.42
	C-EAEP油	8.46	9.02	8.55	8.43	8.24
	C-EAEP油(热处理)	10.62	9.66	9.70	10.30	10.23
苯甲醛	传统热压油	0.62	0.75	1.02	–	–
	三级商品油	0.31	0.53	0.82	0.13	0.42
	C-EAEP油	–	–	0.21	0.24	0.18
	C-EAEP油(热处理)	0.73	0.81	1.12	1.46	2.82
苯乙醛	传统热压油	0.39	1.05	0.32	0.74	1.20
	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	0.87	0.46	0.75	0.52	0.45

续表 3

挥发性风味物质名称	工艺	相对含量				
		0 d	7 d	14 d	21 d	28 d
壬醛	传统热压油	0.18	3.14	2.03	0.28	0.10
	三级商品油	2.22	1.21	1.54	0.68	0.14
	C-EAEP油	3.28	2.97	2.29	2.35	3.28
	C-EAEP油(热处理)	–	0.39	0.26	0.17	0.29
辛醛	传统热压油	0.36	0.14	0.10	–	–
	三级商品油	1.03	0.42	0.17	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	–	–	–
2-吡咯甲醛	传统热压油	0.48	0.21	0.73	0.06	0.84
	三级商品油	1.07	0.24	0.76	1.31	1.47
	C-EAEP油	–	–	–	–	0.08
	C-EAEP油(热处理)	–	–	–	–	–
3-甲基丁醛	传统热压油	–	–	–	6.21	5.47
	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	28.21	29.04	28.64	27.98	28.34
	C-EAEP油(热处理)	26.13	25.98	26.20	25.52	25.08
2-庚烯醛	传统热压油	0.64	0.04	0.29	–	0.11
	三级商品油	0.24	0.87	1.26	2.06	1.64
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	0.08	0.24	0.12	0.05	0.35
2-噻吩甲醛	传统热压油	0.17	0.15	0.31	0.59	0.62
	三级商品油	0.12	2.39	1.82	2.04	2.47
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	0.39	0.53	0.48	1.02	0.29
醛类总计	传统热压油	12.11	10.69	12.23	19.34	20.26
	三级商品油	13.88	16.86	16.89	17.68	18.56
	C-EAEP油	41.21	41.03	39.69	39.01	40.04
	C-EAEP油(热处理)	38.22	37.37	37.73	37.70	36.69
辛酸乙酯	传统热压油	0.49	0.25	0.83	0.56	1.13
	三级商品油	0.84	0.82	0.76	1.93	1.26
	C-EAEP油	0.56	0.35	0.28	0.46	0.42
	C-EAEP油(热处理)	0.82	1.32	0.90	0.76	0.62
原甲酸三甲酯	传统热压油	–	–	–	1.12	2.27
	三级商品油	0.05	3.25	2.90	2.41	2.75
	C-EAEP油	1.24	1.20	1.43	0.94	1.22
	C-EAEP油(热处理)	3.25	3.84	2.97	3.42	4.02
酯类总计	传统热压油	0.49	0.25	0.83	1.68	3.40
	三级商品油	0.89	4.07	3.70	4.34	4.01
	C-EAEP油	1.80	1.55	1.71	1.40	1.64
	C-EAEP油(热处理)	4.07	5.16	3.87	4.18	4.64
丙酸	传统热压油	–	–	–	–	–
	三级商品油	3.46	3.69	3.04	2.93	2.75
	C-EAEP油	2.19	1.86	2.06	1.48	1.56
	C-EAEP油(热处理)	3.02	2.84	2.94	3.35	3.70
乙酸	传统热压油	2.04	2.23	1.98	2.15	1.90
	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	0.17	0.56	0.11	0.25	0.37
	C-EAEP油(热处理)	2.22	1.94	2.03	1.79	1.85
酸类总计	传统热压油	2.04	2.23	1.98	2.15	1.90
	三级商品油	3.46	3.69	3.04	2.93	2.75
	C-EAEP油	2.36	2.42	2.17	1.83	1.93
	C-EAEP油(热处理)	5.44	3.69	4.97	5.04	5.55
3-羟基-2-丁酮	传统热压油	0.16	1.14	0.20	0.05	0.06

续表 3

挥发性风味物质名称	工艺	相对含量				
		0 d	7 d	14 d	21 d	28 d
3-羟基-2-丁酮	三级商品油	0.13	0.24	0.05	0.11	0.08
	C-EAEP油	–	–	0.05	0.13	0.24
	C-EAEP油(热处理)	0.52	0.24	0.08	0.32	0.26
3-辛烯-2-酮	传统热压油	4.23	2.34	1.96	1.56	2.20
	三级商品油	2.05	1.45	3.01	1.41	2.03
	C-EAEP油	4.28	4.58	4.09	3.62	3.68
	C-EAEP油(热处理)	4.97	4.45	4.01	4.41	3.83
2-庚酮	传统热压油	0.16	0.53	0.16	0.27	0.24
	三级商品油	0.17	0.06	0.12	0.17	0.11
	C-EAEP油	–	0.07	–	0.17	0.14
	C-EAEP油(热处理)	–	0.06	0.12	0.17	–
3-甲基-4-庚酮	传统热压油	–	0.52	0.42	0.93	0.28
	三级商品油	–	–	0.06	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	0.06	0.25	0.38
3,5,5-三甲基-1-己烯	传统热压油	–	–	1.03	1.26	0.85
	三级商品油	–	–	–	–	0.24
	C-EAEP油	3.97	3.68	2.85	3.24	3.07
	C-EAEP油(热处理)	4.95	3.89	4.27	4.16	2.89
酮类总计	传统热压油	5.65	4.53	3.77	4.07	3.63
	三级商品油	2.35	1.75	3.18	1.69	2.22
	C-EAEP油	8.25	8.33	6.99	7.16	6.89
	C-EAEP油(热处理)	10.44	8.64	8.54	9.31	7.36
2-甲基吡嗪	传统热压油	1.65	1.06	1.63	0.94	1.22
	三级商品油	1.78	1.63	1.84	1.42	1.70
	C-EAEP油	6.24	6.31	6.12	5.63	5.95
	C-EAEP油(热处理)	5.49	6.13	5.92	5.42	5.78
2,5-二甲基吡嗪	传统热压油	–	–	–	0.06	0.13
	三级商品油	–	0.08	0.14	0.25	0.34
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	1.25	0.68	1.14	1.25	2.34
2-乙基-5-甲基吡嗪	传统热压油	–	0.04	0.12	0.13	0.12
	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	–	–	0.04
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	传统热压油	0.15	0.21	0.07	0.32	0.08
	三级商品油	0.15	0.22	0.32	0.20	0.06
	C-EAEP油	–	0.08	0.16	0.05	0.35
	C-EAEP油(热处理)	0.78	0.32	0.52	0.60	0.30
2-乙基-3-甲基吡嗪	传统热压油	–	–	–	–	–
	三级商品油	0.25	0.14	0.08	0.09	0.18
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	–	–	–
2-乙基-6-甲基吡嗪	传统热压油	1.02	0.82	1.32	0.72	0.52
	三级商品油	0.42	0.16	0.10	0.20	0.35
	C-EAEP油	–	0.42	0.62	1.09	1.04
	C-EAEP油(热处理)	–	0.16	0.10	0.20	0.35
吡嗪类总计	传统热压油	2.08	2.31	3.14	2.17	2.07
	三级商品油	2.60	2.23	2.48	2.04	2.63
	C-EAEP油	6.24	6.81	6.90	6.77	7.34
	C-EAEP油(热处理)	8.35	7.44	7.77	7.86	9.23
庚烷	传统热压油	3.75	2.87	2.42	1.96	2.34
	三级商品油	0.92	0.24	0.63	0.54	0.80

续表 3

挥发性风味物质名称	工艺	相对含量				
		0 d	7 d	14 d	21 d	28 d
庚烷	C-EAEP油	0.23	0.18	0.07	0.35	0.19
	C-EAEP油(热处理)	0.31	0.24	0.63	0.54	0.80
	传统热压油	1.17	1.39	1.01	1.17	1.22
正己烷	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	–	–	–
	传统热压油	–	–	0.04	0.08	0.14
正辛烷	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	–	0.13	0.32	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	–	–	–
	传统热压油	2.79	1.95	2.47	2.53	2.82
正十二烷	三级商品油	0.32	0.83	0.62	0.49	0.19
	C-EAEP油	0.87	0.82	0.74	0.92	0.63
	C-EAEP油(热处理)	0.23	0.86	0.68	0.46	0.16
	传统热压油	0.14	0.68	0.08	1.02	0.34
1-碘壬烷	三级商品油	–	0.08	–	–	–
	C-EAEP油	0.94	0.28	0.62	0.43	0.73
	C-EAEP油(热处理)	4.24	3.58	3.29	4.04	4.09
	传统热压油	7.85	6.89	6.02	6.76	6.80
烷烃类总计	三级商品油	1.24	1.15	1.25	1.03	0.99
	C-EAEP油	2.49	1.91	1.75	1.97	1.89
	C-EAEP油(热处理)	5.41	5.35	5.63	6.77	6.01
	传统热压油	–	–	–	–	–
2-戊基呋喃	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	–	3.72	4.28
	传统热压油	–	–	–	–	–
2-庚基呋喃	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	0.42	0.79	0.85
	传统热压油	–	–	–	–	–
呋喃类总计	三级商品油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油	–	–	–	–	–
	C-EAEP油(热处理)	–	–	0.42	4.51	5.13

通过激活内源酶或促进硫苷的热降解,导致硫苷衍生物积累。

氧化挥发物:氧化挥发性物质按化学类别分,可分为醛类、酮类、酸类、酯类、烷烃类等。由表 3 可知,传统热压油在贮藏期间,3-甲基丁醛于第 21 d 突然出现(6.21%)并持续至第 28 d(5.47%),而三级商品油中未检出该物质,这可能与传统热压工艺的高温环境及贮藏后期氧化反应的加剧有关,三级商品油的醛类含量增长较缓(13.88%~18.56%),可能得益于精炼过程中抗氧化剂的添加或杂质的去除。3-甲基丁醛通常来源于支链氨基酸(如亮氨酸)的 Strecker 降解或支链脂肪酸(如异丁酸)的氧化,其突然积累反映贮藏中后期脂质氧化[36]。在贮藏期间,三级商品油和热处理 C-EAEP 油的酯类增加,可能与精炼工艺保留酯酶活性或热处理促进脂肪酸与醇类的结合有关。原甲酸三甲酯在热处理 C-EAEP 油中的含量大幅上升(3.25%~4.02%),可能是热处理加速了酯化反应的动力学进程。同时,热处理 C-EAEP 油中酸类含量高于未经热处理的 C-EAEP 油,表明热处理可能通过破坏细胞结构释放更多脂肪酸,或加速氧化酶活性,促进酸类积累。而烷烃类物质(如庚烷、正十二烷)在传统热压油中含量较高且随贮藏下降(7.85%~6.80%),可能因长链烷烃逐渐挥发或氧化分解。热处理 C-EAEP 油的烷烃类增加(5.41%~6.01%),尤其是 1-碘壬烷从 4.24% 升至 4.09%,热处理可能通过脱羧反应释放更多长链烷烃[37]。

吡嗪类物质和呋喃类物质:吡嗪类化合物是典型的美拉德反应产物,与热处理密切相关。传统热压油的吡嗪类含量较低且变化平缓,而热处理 C-EAEP 油的吡嗪类富集(8.35%~9.23%),尤其是 2,5-二甲基吡嗪(1.25%~2.34%)和 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪(0.78%~0.30%)。这一趋势表明,热处理通过促进氨

基酸与还原糖的反应，增强了吡嗪类风味物质的生成，可能赋予油类更浓郁的烘烤或坚果风味[38]。呋喃类是醛类物质在相对短时低温的条件下 Strecker 降解反应的产物，对风味的贡献很大。2-戊基呋喃主要来源于亚油酸或 2-癸二烯醛的氧化，具有豆香和近似面包的特殊香味[39]，呋喃类化合物（如 2-戊基呋喃、2-庚基呋喃）仅在热处理后的 C-EAEP 菜籽油中检测到，并在 28 d 时达 5.13%，进一步证实热处理诱导的脂质氧化和糖类热降解是呋喃生成的主要途径。

3　结论

本研究系统探究了纤维素酶辅助乙醇水提工艺（C-EAEP）对菜籽油贮藏稳定性的影响，并与传统热压油、三级商品油进行对比。在加速氧化贮藏条件下贮藏 28 d，测定加速氧化贮藏条件下菜籽油的理化指标、维生素 E 含量、脂肪酸组成、挥发性风味物质组成，并结合电子鼻分析，综合探究 C-EAEP 菜籽油的贮藏稳定性。研究结果表明，C-EAEP 工艺通过低温酶解有效保留了油脂天然抗氧化成分，油脂的氧化稳定性高，可延缓酸败，维持风味。在整个贮藏期内，C-EAEP 菜籽油在贮藏期间过氧化值与酸值在贮藏 28 d 时增幅较小，表现出显著的抗氧化优势，维生素 E 含量在贮藏期内变化小于 10 mg/kg，油脂营养价值损失小，且在贮藏后期不饱和脂肪酸（如油酸、亚麻酸）仍保持 87% 以上。在贮藏前期，未经热处理的 C-EAEP 菜籽油风味有一定提高；在贮藏后期，未经热处理的 C-EAEP 菜籽油风味减弱，而经热处理的 C-EAEP 菜籽油中吡嗪类和呋喃类物质含量明显增加，赋予油品更丰富的风味特性。电子鼻分析表明，热处理 C-EAEP 油在贮藏后期风味与传统商品油接近，但挥发性氧化产物（如醛类）含量更低，风味稳定性更强。综上所述，C-EAEP 工艺通过低温提取和酶促破壁技术能够减少热敏性成分损失，为绿色制油技术提供了科学依据。有望推动菜籽油加工向绿色化、高值化方向发展，满足消费者对健康油脂的需求。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 黄天柱, 陈渠玲, 吴卫国, 等. 国产菜籽油加工行业现状及发展趋势探讨[J]. 中国油脂, 2020, 45(8): 5−8. [HUANG T Z, CHEN Q L, WU W G, et al. Current situation and development trend of domestic rapeseed oil processing industry[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(8): 5−8.]

[2] 张冉, 曹娟娟, 濮超, 等. 中国油菜籽和菜籽油的生产、进出口及供需分析[J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 8−14,52. [ZHANG R, CAO J J, PU C, et al. Analysis on production, import, export, supply and demand of rapeseed and rapeseed oil in China[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(6): 8−14,52.]

[3] 熊欣洁, 丁彩霞, 史海明, 等. 热榨菜籽油加工过程中三甲胺及其前体物质的分布和变化规律[J]. 中国油脂, 2024, 49(12): 71−77. [XIONG X J, DING C X, SHI H M, et al. Distribution and change rules of trimethylamine and its precursors during hot-pressed rapeseed oil processing[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(12): 71−77.]

[4] NISOV A, VALTONEN A, AISALA H, et al. Effect of peptide formation during rapeseed fermentation on meat analogue structure and sensory properties at different pH conditions[J]. Food Research International, 2024, 180: 114070.

[5] ZIENIUK B, WOŁOSZYNOWSKA M, BIAŁECKA-FLORJAŃCZYK E. Enzymatic synthesis of biodiesel by direct transesterification of rapeseed cake[J]. International Journal of Food Engineering, 2020, 16(3): 20190089.

[6] 于雷, 孙玉萍, 符文志, 等. 进口油菜籽生产菜籽油过程中生育酚和植物甾醇含量的变化[J]. 中国油脂, 2025, 50(6): 23−30. [YU Lei, SUN Yuping, FU Wenzhi, et al. Changes in tocopherol and phytosterol contents during the production of rapeseed oil from imported rapeseed[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(6): 23−30.]

[7] 张翠平, 傅红, 傅彦君, 等. 热压法制备乙基纤维素油凝胶的氧化特性研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 275−280. [ZHANG C P, FU H, FU Y J, et al. Oxidation characteristics of ethylcellulose oleogels prepared by hot pressing technology[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018, 46(2): 275−280.]

[8] 徐开伟, 邹小彤, 刘意, 等. 耦合浮珠-超声辅助溶剂萃取法用于微藻采收及油脂提取[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 267−274. [XU K W, ZHOU X T, LIU Y, et al. Microalgal harvesting and lipid extraction by coupling buoyant-bead and ultrasound-assisted solvent extraction method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(15): 267−274.]

[9] 秦玉川, 刘本同, 薛锦松, 等. 冷榨法与热榨法制取山茶油品质差异研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 97−104. [QIN Y C, LIU B T, XUE J S, et al. Study on quality difference of hot-pressed and cold-pressed camellia oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(5): 97−104.]

[10] YANG J, WEN C T, DUAN Y Q, et al. The composition, extraction, analysis, bioactivities, bioavailability and applications in food system of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 252−260.

[11] 刘旭东, 曾文权, 李力, 等. 油茶籽油生物活性成分、风味物质及脂质组成研究进展[J]. 生物质化学工程, 2024, 58(6): 1−13. [LIU X D, ZEN W Q, LI L, et al. Research progress on the bioactive components, flavor compounds and lipid composition of camellia oleifera seed oil[J]. Biomass Chemical Engineering, 2024, 58(6): 1−13.]

[12] RHEE K C, CATER C M, MATTIL K F. Simultaneous recovery of protein and oil from raw peanuts in an aqueous system[J]. Journal of Food Science, 2010, 37(1): 90−93.

[13] GAO Y H, DING Z S, LIU Y F, et al. Aqueous enzymatic extraction: A green, environmentally friendly and sustainable oil extraction technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 104315.

[14] 李强, 杨瑞金, 张文斌, 等. 乙醇对油茶籽油水相提取的影响[J]. 中国油脂, 2012, 37(3): 6−9. [LI Q, YANG R J, ZHANG W B, et al. Influence of ethanol on aqueous extraction of oil-tea camellia seed oil[J]. China Oils and Fats, 2012, 37(3): 6−9.]

[15] 居秀荣, 李加友, 于建兴, 等. 酶辅助提取植物天然活性物质的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(9): 202−211. [JU X R, LI J Y, YU J X, et al. Advances in enzyme-assisted extraction of

natural active substances from plants[J]. Food Research and Development, 2024, 45(9): 202−211.]
[16] de SOUZA T S P, KAWAGUTI H Y. Cellulases, hemicellulases, and pectinases: Applications in the food and beverage industry[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(8): 1446−1477.
[17] CHEW S C. Cold-pressed rapeseed (*Brassica napus*) oil: Chemistry and functionality[J]. Food Research International, 2020, 131: 108997.
[18] 杨晓健, 王凤霞, 李文飞, 等. 食品级湿法磷酸在植物油脱胶中的应用[J]. 中国油脂, 2020, 45(8): 14−16,21. [YANG X J, WANG F X, LI W F, et al. Application of food grade wet phosphoric acid indegumming of vegetable oil[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(8): 14−16,21.]
[19] 任燕勤. 乙醇水提法提取菜籽油的工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016. [REN Y Q. Research on alcohol-assisted aqueous extraction of rapeseed oil[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]
[20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.227-2016. 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.227-2016. National standard for food safety-Determination of peroxide value in foods[S]. Beiing: Standards Press of China, 2016.]
[21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.229-2016. 食品安全国家标准 食品中酸价的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.229-2016. National standard for food safety-Determination of acid price in foods[S]. Beiing: Standards Press of China, 2016.]
[22] 中华人民共和国国家质量监督检疫检验总局. GB 5532-2008. 中华人民共和国国家标准 动植物油脂 碘值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [General Administration of Quality Supervision, Quarantine and Inspection of the People's Republic of China. GB 5532-2008. National standard of the People's Republic of China-Determination of iodine value of plant and animal fats and oils[S]. Beiing: Standards Press of China, 2008.]
[23] 中华人民共和国国家质量监督检疫检验总局. GB 5534-2008. 中华人民共和国国家标准 动植物油脂 皂化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [General Administration of Quality Supervision, Quarantine and Inspection of the People's Republic of China. GB 5534-2008. National standard of the People's Republic of China-Determination of saponification value of animal and plant fats and oils[S]. Beiing: Standards Press of China, 2008.]
[24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.82-2016. 食品安全国家标准 食品中维生素 E 的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. GB 5009.82-2016. National standard for food safety-Determination of vitamin E in food products[S] Beiing: Standards Press of Chinas, 2016.]
[25] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.168-2016. 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. GB 5009.168-2016. National standard for food safety-Determination of fatty acids in food stuffs[S] Beiing: Standards Press of China, 2016.]
[26] ZHANG W W, FU Q M, JIANG H, et al. Insight into the microwave pretreatment of rapeseeds on the flavor characteristics of rapeseed oils[J]. LWT, 2023, 184: 115045.
[27] ZHOU Q, ZHENG C, WEI F, et al. Flavor precursors identification and thermal degradation mechanisms of glucoerucin in fragrant rapeseed oil[J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137484,.
[28] 邓龙. 菜籽油特征香气成分和营养物质组成的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017. [DENG L. The analysis of volatile compounds and nutrition composition of rapeseed oil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.]
[29] 徐立荣. 食用油贮藏过程自动氧化变化规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. [XU L R. Autoxidative change and its law of edible oils during storage[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.]
[30] CHENG Q, BAO Y Y, LIN Q, et al. The effect of sesamol on endogenous substances and oxidative stability of walnut oil[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1476734.
[31] 黄颖, 郑畅, 周琦, 等. 膨爆预处理对菜籽油营养及抗氧化性能的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(9): 248−256. [HUANG Ying, ZHENG Chang, ZHOU Qi, et al. Effect of steam explosion pretreatment on nutritional and antioxidant properties of rapeseed oil[J]. Food Science, 2025, 46(9): 248−256.]
[32] 叶凤凌, 职士淇, 贾利蓉, 等. 不同温度热处理对 4 种食用油氧化稳定性的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(6): 65−70. [YE F L, ZHI S Q, JIA L R, et al. Effect of heat treatment at different temperatures on the oxidation stability of four edible oils[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(6): 65−70.]
[33] 夏季亮, 陈玎玎, 吴晶. 煎炸菜籽油的脂肪酸组成与品质相关性的研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(11): 51-54. [XIA J L, CHEN D D, WU J. Relationship between the fat acid composition and the quality of rapeseed oil during frying[J] Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(11): 51-54.]
[34] KRALJIĆ K, STJEPANOVIĆ T, OBRANOVIĆ M, et al. Influence of conditioning temperature on the quality, nutritional properties and volatile profile of virgin rapeseed oil[J]. Food Technology and Biotechnology, 2018, 56(4): 562−572.
[35] KRELL M, ROHN S. Bildung und stabilität von glucosinolatabbauprodukten und isothiocyanat-proteinkonjugaten in erhitzten lebensmitteln am beispiel gemüse-angereicherter brote[J]. Lebensmittelchemie, 2023, 77(S2): S2−47-S2-048.
[36] 马勇, 魏从娇, 王雍雍, 等. 发酵香肠中 3-甲基丁醛产生途径的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 324−333. [MA Y, WEI C J, WANG Y Y, et al. Research progress on the production pathway of 3-methylbutanal in fermented sausage[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(9): 324−333.]
[37] MONTEIRO R R C, Da SILVA S S O, CAVALCANTE C L, et al. Biosynthesis of alkanes/alkenes from fatty acids or derivatives (triacylglycerols or fatty aldehydes)[J]. Biotechnology Advances, 2022, 61: 108045.
[38] JIA X, ZHOU Q, WANG J Q, et al. Identification of key aroma-active compounds in sesame oil from microwaved seeds using E-nose and HS-SPME-GC×GC-TOF/MS[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(10): e12786.
[39] WAGNER C, BONTE A, BRÜHL L, et al. Micro-organisms growing on rapeseed during storage affect the profile of volatile compounds of virgin rapeseed oil[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(6): 2147−2155.