DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260127003
引用格式: 李佳瑶, 谢超, 张梓祺, 等. 不同吸附剂对乙酯型鱼油挥发性物质的影响规律探究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 311–320.
Li Jiayao, Xie Chao, Zhang Ziqi, et al. Study on the influence law of different adsorbents on volatile substances in ethyl ester-type fish oil [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 311–320. (in Chinese with English abstract).

不同吸附剂对乙酯型鱼油挥发性物质的影响规律探究

李佳瑶[1], 谢　超[1*], 张梓祺[1], 王宇暇[2], 马可欣[2], 黄彦淳[2], 郑　炜[3]

(1. 浙江海洋大学食品与药学学院, 舟山　316022; 2. 浙江海洋大学比萨海洋研究生学院, 舟山　316022; 3. 浙江普罗德食品科技有限公司, 舟山　316104)

摘　要: 目的　探究乙酯型鱼油在添加不同吸附剂后挥发性物质种类以及差异性。**方法**　利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对碳管复合吸附剂进行表征测定; 通过测定乙酯型鱼油酸价、过氧化值和茴香胺值评估乙酯型鱼油的品质; 气相色谱-离子迁移光谱法(gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS)以及多元统计分析筛选经不同吸附剂处理后乙酯型鱼油中关键挥发性物质。**结果**　经 SEM 得出碳纳米管与活性炭复合结构稳定; 碳管复合吸附剂处理后乙酯型鱼油品质符合 GB 5009.229—2025《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》、GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》、GB/T 24304—2024《动植物油脂 茴香胺值的测定》; 经 GC-IMS 共检测出 53 种挥发性物质, 包括醛类 11 种, 醇类 10 种, 酮类 8 种, 酯类 7 种, 烯烃类 6 种, 其他类 11 种。GC-IMS 结合正交偏最小二乘判别分析及变量重要性投影分析最终筛选出 14 种关键性挥发性物质, 分别为(*E*,*E*)-2,4-壬二烯醛、N-亚硝基二甲胺、2-丁酮(*D*)、(*Z*)-3-己烯醇、乙二醇(*D*)、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*D*)、十碳醛、1-丁醇、3-甲基-1-丁醇、乙二醇(*M*)、丙酸乙酯(*M*)、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*M*)、3-戊烯-2-酮(*M*)、苊烯。**结论**　本研究明确了新型碳管复合吸附剂对乙酯型鱼油风味物质的调控规律, 并对乙酯型鱼油精炼工艺优化提供科学指导及新型吸附材料开发提供理论支撑与实践依据。

关键词: 乙酯型鱼油; 挥发性物质; 多元统计分析; 气相色谱-离子迁移光谱法; 碳管复合吸附剂
中图分类号: TS225.2　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)13–0311–10

Study on the influence law of different adsorbents on volatile compounds in ethyl ester-type fish oil

LI Jia-Yao[1], XIE Chao[1*], ZHANG Zi-Qi[1], WANG Yu-Xia[2], MA Ke-Xin[2], HUANG Yan-Chun[2], ZHENG Wei[3]

(1. *College of Food and Pharmacy*, *Zhejiang Ocean University*, *Zhoushan* 316022, *China*; 2. *Pisa Marine Graduate School*, *Zhejiang Ocean University*, *Zhoushan* 316022, *China* 3. *Zhejiang Protel Food Technology Co*., *Ltd*., *Zhoushan* 316104, *China*)

收稿日期: 2026-01-27
基金项目: 浙海经厅项目(2026HYB09004)
第一作者: 李佳瑶(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 15149980703@163.com
***通信作者:** 谢超(1975—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为水产品质量与安全、水产品加工与综合利用。E-mail: xc750205@163.com

ABSTRACT: Objective To investigate the types and differences of volatile compounds in ethyl ester-type fish oil after the addition of different adsorbents. **Methods** The carbon tube composite adsorbent was characterized using a scanning electron microscope (SEM). The quality of ethyl ester-type fish oil was evaluated by determining its acid value, peroxide value and p-anisidine value. Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) combined with multivariate statistical analysis was applied to screen the key volatile compounds in ethyl ester-type fish oil treated with different adsorbents. **Results** SEM analysis confirmed the stability of the carbon nanotube-activated carbon composite structure; after treatment with the carbon tube composite adsorbent, the quality of ethyl ester-type fish oil complied with GB 5009. 229—2025 *National food safety standard-Determination of acid value in foods*, GB 5009.227—2023 *National food safety standard-Determination of peroxide value in foods*, GB/T 24304—2024 *Animal and vegetable fats and oils-Determination of anisidine value*; GC-IMS analysis detected a total of 53 kinds of volatile compounds, including 11 kinds of aldehydes, 10 kinds of alcohols, 8 kinds of ketones, 7 kinds of esters, 6 kinds of alkenes and 11 kinds of other compounds. Combined with orthogonal partial least squares discriminant analysis and variable importance in projection, GC-IMS screening finally identified 14 kinds of key volatile substances, namely (*E*,*E*)-2,4-nonadienal, N-nitrosodimethylamine, 2-butanone (*D*), (*Z*)-3-hexenol, ethanediol (*D*), (*E*,*E*)-2,4-heptadienal (*D*), decanal, 1-butanol, 3-methyl-1-butanol, ethanediol (*M*), ethyl propionate (*M*), (*E*,*E*)-2,4-heptadienal (*M*), 3-penten-2-one (*M*) and camphene. **Conclusion** This study clarifies the regulatory rules by which a novel new type carbon tube composite adsorbent the flavor compounds in ethyl ester-type fish oil, providing scientific guidance for optimizing the refining process of ethyl ester-type fish oil, as well as theoretical support and practical evidence for the development of new adsorbent materials.

KEY WORDS: ethyl ester-type fish oil; volatile compounds; multivariate statistical analysis; gas chromatography-ion mobility spectrometry; carbon tube composite adsorbent

0 引 言

鱼油是 ω-3 多不饱和脂肪酸(omega-3 polyunsaturated fatty acids, ω-3PUFA)的重要来源, 其中主要成分二十碳五烯酸(eicosape ntaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosa hexaenoic acid, DHA)[1]具有多种功效, 如预防心血管疾病[2]、抗炎[3]、调节血脂[4]、抗衰老[5]等。因此鱼油被广泛应用在功能性食品、医药剂以及膳食营养补充剂的开发[6]。DHA 和 EPA 是人体中的关键营养素, 但人体自身合成效率较低, 需要通过食物摄入满足需求[7]。目前, DHA 和 EPA 的推荐摄入量为 0.25 g/d[8]。随着市场需求的日益增长, 在“健康中国”的战略引导下, 鱼油相关产品的研究与开发备受关注[9]。

鱼油生产工艺主要包括提取、精炼和富集纯化 3 个环节[10], 其中精炼步骤主要为脱胶、脱酸、脱色和脱臭[11]。然而鱼油中的多不饱和脂肪酸含有多个双键, 在精炼过程中容易产生不良异味[12]。此外, 在生产的过程中还易产生污染物如 3-氯丙醇酯(3-monochloro-1,2 propanediolester, 3-MCPDE)[13]和缩水甘油酯(glycidyl ester, GEs)[14], 严重影响鱼油的品质。为解决上述问题, 生产中常添加吸附剂[15], 如活性炭(activated carbon, AC)、活性白土等[16]。但它们对 3-MCPDE、GEs 以及部分氧化挥发性物质脱除效率较差[17]。目前鱼油广阔的市场前景, 加大了对复合吸附剂的研究与开发, 如生物碳-白土复合吸附剂对鱼油中 3-氯丙醇的吸附率高达 55.32%[18]。因此碳管复合吸附剂通过碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)[19]与 AC 进行复合构建[20], 将其应用在精炼过程中可有效脱除这两种成分, 能显著改善鱼油的风味。当前研究主要集中对鱼油污染物的脱除效率的影响, 但对吸附过程中对鱼油气味的影响关注相对较少。

气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)是一种可以快速对挥发性物质进行分离与检测的技术, 具有容易操作、灵敏度高、精度高等优势[21]。通过 GC-IMS 构建的图谱, 可直观看出挥发性物质的差异[22], 结合多元统计分析可以通过图谱快速筛选出待测样品的特征性物质[23]。

鉴于此, 本研究旨在通过将碳管复合吸附剂应用在鱼油精炼的过程中, 利用 GC-IMS 以及多元统计分析, 探究不同吸附处理条件下乙酯型鱼油中挥发性物质的差异, 精准解析吸附剂对鱼油关键风味物质(如醛类、酮类、醇类等)的影响规律, 从而助力于生产更安全、风味更佳的高品质鱼油产品。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

乙酯型鱼油(浙江普罗德食品科技有限公司)。

多壁 CNTs(纯度大于 95%)、AC 粉(50~200 μm)、2,2’-二氨基二苯二硫、N-羟基硫代琥珀酰亚胺、盐酸多巴胺(纯

度 98%)、浓硫酸、三乙醇胺、二环己基碳二亚胺、间苯二酚、甲醛、冰醋酸、硫代硫酸钠、碘化钾、三氯甲烷、异辛烷、p-茴香胺、无水硫酸钠、酚酞、氢氧化钠(NaOH)溶液(分析纯)、去离子水(国药集团化学试剂有限公司); 正构酮: 2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮[分析纯, 阿拉丁试剂(上海)有限公司]; 99.999%氮气(济南德洋特种气体有限公司)。

1.2　仪器与设备

MXT-WAX 毛细管色谱柱(30 m×0.53 mm,1.0 μm)(美国 Restek 公司); FlavourSpec®气相离子迁移谱(德国 G.A.S. 公司); CTC-PAL 3 静态顶空自动进样装置(瑞士 CTC Analytics AG 公司); GS0101 数控超声清洗仪(深圳冠博科技实业有限公司); 78-1 磁力加热搅拌器(金坛区西城新瑞仪器厂); PX125DZH 电子天平[精度 0.01 mg, 奥豪斯仪器(上海)有限公司]; 721 可见分光光度计(青岛精诚仪器仪表有限公司); Nova NanoSEM 230 场发射扫描电子显微镜(美国 FEI 公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　碳管复合吸附剂的制备

(1)三乙醇胺修饰的 CNTs 制备

将 CNTs 置于酸性处理液中进行超声处理, 获得酸改性 CNTs, 随后将其放入三乙醇胺的水溶液中进行酯化反应, 反应温度为 70 ℃, 时间为 1.5 h, 过滤后获得三乙醇胺修饰的 CNTs。

(2)多官能团 AC 制备

将粒径为 200 μm 的 AC 粉末进行羧基活化后置于去离子水中, 依次添加二环己基碳二亚胺和 N-羟基硫代琥珀酰亚胺对羧基化的 AC 进行活化, 将 2,2-二氨基二苯二硫与活化的 AC 混合反应, 形成多官能团 AC; 将多巴胺以及多官能团 AC 分散于水中, 进行超声处理, 形成多巴胺修饰 AC。

(3)碳管复合吸附剂制备

将三乙醇胺修饰的 CNTs、多巴胺修饰 AC 按重量比以 1:1 的比例加入水中, 然后加入间苯二酚以及甲醛, 升温反应, 得到碳管复合吸附剂(CNT/AC)。

1.3.2　碳管复合吸附剂精炼乙酯型鱼油的工艺方法

称取一定量的乙酯型鱼油样品, 置于三口烧瓶中, 进行脱胶处理, 后加入 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液, 与鱼油的体积比为 1:5, 在常温下充分搅拌并反应 30 min, 进行脱酸, 使鱼油中的游离脂肪酸与 NaOH 发生皂化反应, 得到碱化鱼油液。向碱化鱼油液中按 2.0 g/L 的比例加入碳管复合吸附剂, 搅拌均匀形成精炼体。将三口烧瓶置于油浴锅中, 在减压的条件下缓慢升温至 120~140 ℃, 持续搅拌 60 min, 使碳管复合吸附剂充分与乙酯型鱼油发生吸附作用进行脱色、脱臭处理。反应结束后, 对精炼体进行抽滤操作, 分离出碳管复合吸附剂, 最终得到精炼鱼油液。

1.3.3　扫描电子显微镜分析碳管复合吸附剂

取少量制成的干燥 CNT/AC, 置于在样品台上, 用导电胶带固定, 确认后, 经喷金处理, 在 8 kV 加速电压下, 观察其复合结构。

1.3.4　乙酯型鱼油理化性质检测

参照 GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》、GB 5009.229—2025《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》、GB/T 24304—2024《动植物油脂茴香胺值的测定》进行检测。

1.3.5　不同吸附剂处理条件下乙酯型鱼油的 GC-IMS 检测

参照 Capitain 等[24]方法, 稍作修改, 具体如下。

(1)样品前处理

准确量取待测样品 1 g 置于 20 mL 顶空瓶中, 充分混匀后, 40 ℃孵育 15 min 后进样, 每个样品测定 3 组平行。

(2)顶空进样条件

孵化温度: 40 ℃; 孵化时间: 15 min; 进样体积: 500 μL; 不分流进样; 孵化转速: 500 r/min; 进样针温度: 85 ℃。

(3)色谱柱类型

MXT-WAX 色谱柱(30 m×0.53 mm, 1.0 μm); 色谱柱温度: 60 ℃; 载气: 高纯氮气(纯度≥99.999%); 程序升压: 初始流量 2.00 mL/min 保持 2 min, 在 10 min 内线性增至 10.00 mL/min, 在 13 min 内线性增至 100.00 mL/min, 保持 5 min。色谱运行时间: 30 min; 进样口温度: 80 ℃。具体气相色谱条件如表 1 所示。

表 1　GC 条件
Table 1　Conditions of GC

时间/min	E_1[漂移气流速/(mL/min)]	E_2[载气流速/(mL/min)]	数据采集
0	150	2	记录
2	150	2	-
12	150	10	-
25	150	100	-
30	150	100	停止

注: -代表无额外操作、仅维持当前气流参数稳定运行。

(4)离子迁移谱条件

电离源: 氚源(^{3}H); 迁移管长度: 53 mm; 电场强度: 500 V/cm; 迁移管温度: 45 ℃; 漂移气: 高纯氮气(纯度大于等于 99.999%); 流速: 150 mL/min; 正离子模式。

1.3.6　感官评定

感官方法参照 SC/T 3503—2022《多烯鱼油制品》, 选定 12 名品评员对样品进行评价。每项指标的评分范围从最低分 1 分到最高分 10 分, 具体评分标准参照表 2。

表 2 感官评分表
Table 2 Table of sensory evaluation

项目名称	评分标准	得分
色泽(10 分)	浅黄色或橙黄色	6~10
	黄色或橙红色	3~5
	红棕色或深黄色	0~2
气味(10 分)	具有鱼油正常气味，无酸败味	6~10
	较淡酸败味	3~5
	明显酸败味	0~2
状态(10 分)	透明油状液体	6~10
	微有浑浊	3~5
	浑浊明显	0~2
杂质(10 分)	无正常视力可见外来杂质	6~10
	有少量杂质	3~5
	有明显杂质	0~2
滋味(10 分)	稍有鱼腥味	6~10
	有明显鱼腥味	3~5
	较浓鱼腥味	0~2

1.4 数据处理

所有实验均作 3 次平行。采用 GC-IMS 仪器配套的 VOCal (0.4.03)分析软件处理 IMS 数据，用 VOCal (0.4.03)软件内置的 GC 保留指数(NIST 2020)数据库和 IMS 迁移时间数据库检索和比对，对目标物进行定性分析。利用 VOCal (0.4.03)数据处理软件中的 Reporter、Gallery Plot 等插件分别生成挥发性成分的三维谱图、二维谱图、差异谱图、指纹图谱。采用 SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis，OPLS-DA)绘图、置换检验以及变量重要性投影(variable importance in projection，VIP)分析。采用 Microsoft Office 2016 专业版 Excel 2019 绘制雷达图。

2 结果与分析

2.1 SEM 分析

图 1 为碳管复合吸附剂放大 10000、20000 倍的 SEM 图，由图 1 可清晰的看出 AC 与 CNTs 复合的结构。碳管复合吸附剂为异味物质提供了大量吸附位点与高效的扩散通道，是其实现优异吸附效果的微观结构。

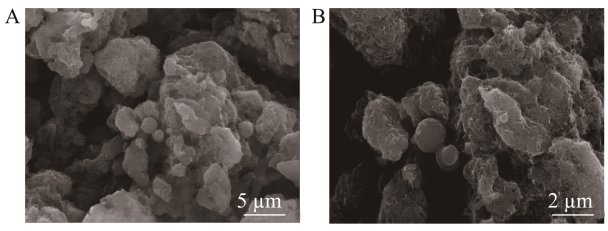


图 1 碳管复合结构 SEM 的 10000 (A)、20000 (B)倍图
Fig.1 SEM images of carbon tube composite structure at magnifications of 10000 (A) and 20000 (B) times

2.2 理化性质分析

所有理化指标均设置 3 组平行测定，结果如表 3 理化性质结果偏差小、重复性好，其中酸价、过氧化值以及茴香胺值均符合 GB 5009.229—2025、GB 5009.227—2023、GB/T 24304—2024 要求，表明碳管复合剂在精炼过程中稳定可控且能够保证产品食用安全。

表 3 3 组碳管复合吸附剂理化指标
Table 3 Physicochemical indexes of 3 groups of carbon tube composite adsorbents

理化指标	JHYY-1	JHYY-2	JHYY-3
酸价/(mg KOH/g)	0.6453	0.6580	0.6167
过氧化值/(meq/kg)	1.43	1.36	1.34
茴香胺值	16.272	15.348	15.943

2.3 不同吸附剂处理乙酯型鱼油的 GC-IMS 挥发性成分谱图比较分析

GC-IMS 可通过迁移率不同，有效地分离和鉴定挥发性物质[25]。通过三维谱图系统对比 CK 组(原样)、BTXH 组(白土吸附后)、JHYY 组(碳管复合吸附后)3 组乙酯型鱼油，由图 2 可知 3 组样品在挥发性成分的组成具有相似性，但在信号强度上呈现出明显差异性特征。这表明经过吸附剂处理后主要影响挥发性物质的含量。

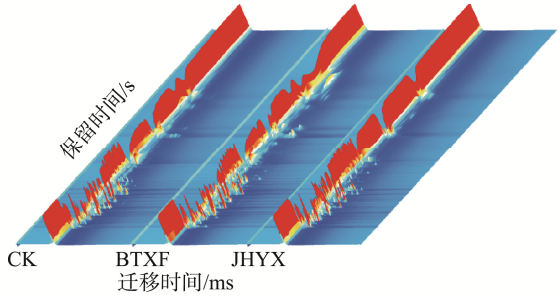


图 2 3 组乙酯型鱼油样品的 GC-IMS 挥发性成分三维谱图
Fig.2 Three-dimensional GC-IMS spectra of volatile components in 3 groups of ethyl ester-type fish oil samples

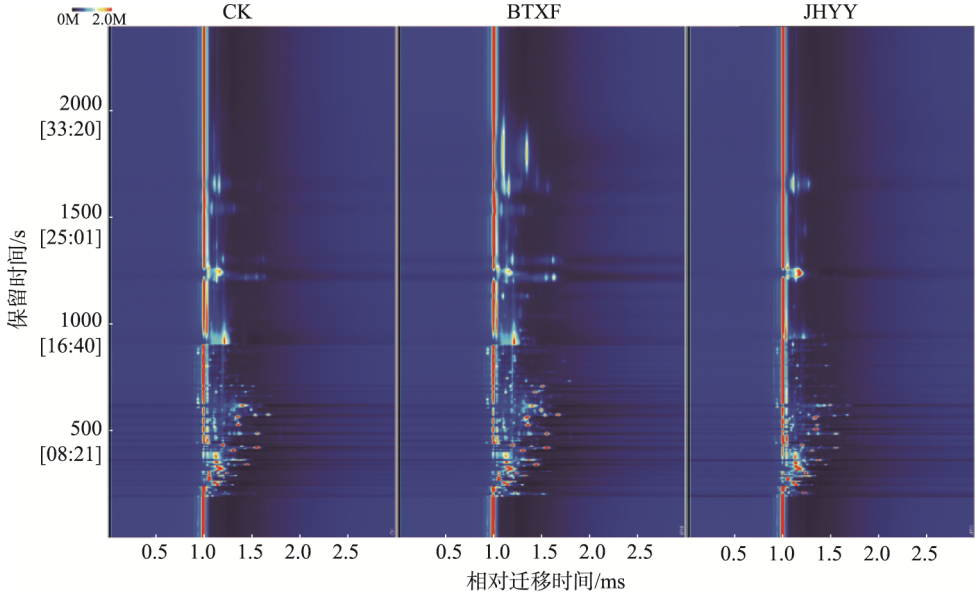
在三维图谱(图 2)的基础上，将二维图谱(图 3)和差异图谱(图 4)相结合，综合的分析方法可更加全面的观测到不同吸附剂处理乙酯型鱼油中挥发性物质的特性与差异。

图 3 中，横坐标 1.0 处红色竖线是反应离子峰(reactive ion peak，RIP 峰)，两侧的每个点代表一种挥发性物质，颜色代表物质峰强度，从蓝色到红色，颜色越深表示峰的强度越大[26]。乙酯型鱼油多数挥发性物质信号保留时间小于 1000 s，相对迁移时间在 1~2 ms 范围内，其中 JHYY 组蓝色面积相对较多，峰强度以及挥发性物质明显弱于前两组。结果表明，碳管吸附剂处理后的乙酯型鱼油中挥发性物质出现减少现象。

图 4 以 CK 组作为参照，得到 3 组样品的差异对比图。由图 5 可知，CK 组与 BTXF 组对比，发现 BTXF 组多数挥发性物质浓度远高于 CK 组，说明经过白土吸附后的乙酯型鱼油部分挥发性物质出现升高；BTXF 组与 JHYY 组对比，发现在中上部区域部分物质 JHYY 组没有，因此该区域可作为区分两组的核心差异的重点；JHYY 组与 CK 组对比，发现 JHYY 中多数挥发性物质浓度相较于 CK 组较低，因此清晰的看出经不同吸附剂处理后的乙酯型鱼油挥发性物质浓度存在显著性差异。

2.4　不同吸附剂处理乙酯型鱼油的 GC-IMS 挥发性成分谱图的定性分析

通过对样本进行 GC-IMS 检测，最终在乙酯型鱼油中共检出 53 类挥发性物质，其中醛类 11 种，醇类 10 种，酮类 8 种，酯类 7 种，烯烃类 6 种，其他类 11 种，挥发性组分明细如表 4 所示。这些挥发性物质构成了鱼油独特的香气，其中占主要地位的有醛类、醇类以及酮类，其中醛类物质的产生，主要是由于脂质氧化所导致的与其他物质相结合产生或在加热条件下醛类通过碳氢化合物转化，断链



注：M 表示信号幅值，图 4 同。

图 3　3 组乙酯型鱼油样品的 GC-IMS 挥发性成分二维谱图

Fig.3　2D GC-IMS spectra of volatile components in 3 groups of ethyl ester-type fish oil samples

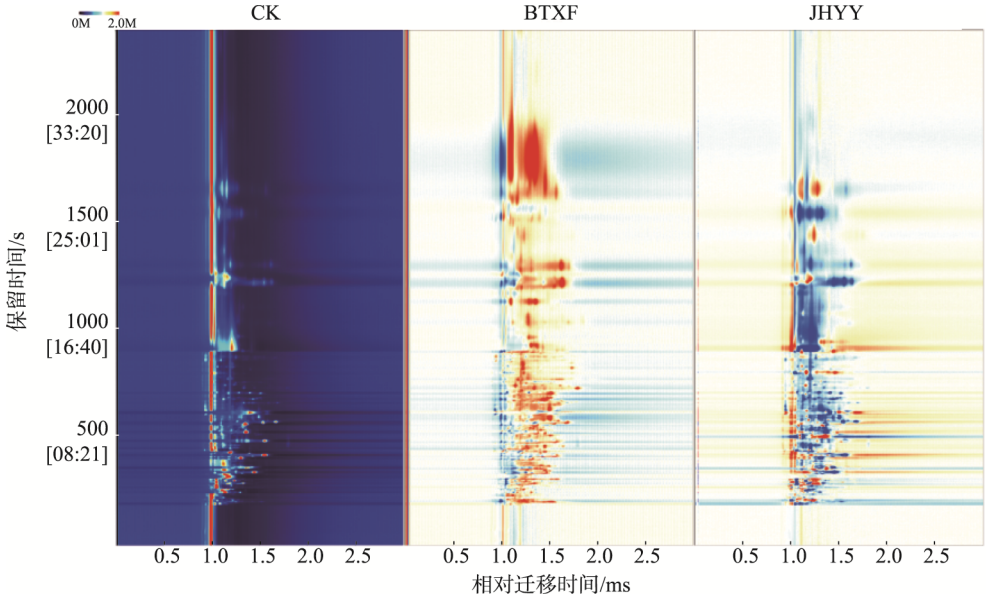


图 4　3 组乙酯型鱼油样品的 GC-IMS 挥发性成分差异谱图

Fig.4　GC-IMS difference spectra of volatile components in 3 groups of ethyl ester-type fish oil samples

而成。该类物质是鱼油氧化酸败的主要原因。如(*E*,*E*)-2,4-壬二烯醛是亚油酸经加热氧化生成 13-氢过氧化物，经烷氧自由基 *β*-裂解最终生成; (*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*D*/*M*)、*α*-亚麻酸经加热氧化生成 13-氢过氧化物，烷氧自由基 β-裂解生成，它们属于低分子不饱和醛，对乙酯型鱼油产生油脂味或鱼腥味等。由图 5 可知，将乙酯型鱼油经过不同吸附剂处理过后，JHYY 组的含量占比 28%，相较于其他两组，这一现象可能是碳管复合吸附剂在加热环境下与鱼油中的不饱和脂肪酸发生反应或对醛酮醇类物质吸附的顺序性，尽管吸附剂对醛类亦存在一定的物理吸附，但催化生成效应可能占据主导，导致醛类物质含量增加。由于醛类具有较低的气味阈值，因此对鱼油气味有很大影响。

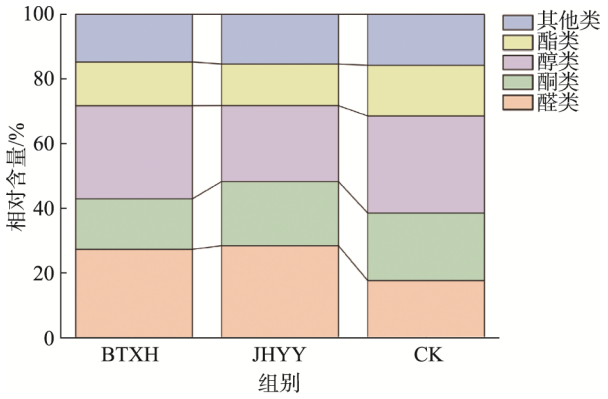


图 5 挥发性物质相对含量图

Fig.5 Relative contents of volatile compounds

表 4 不同吸附处理条件下乙酯型鱼油中挥发性物质

Table 4 Volatile compounds in ethyl ester-type fish oil under different adsorption treatments

类别	中文名称	CAS 号	分子式	MW	RI	Rt/s	Dt/a.u.	气味描述
醛	庚醛(*D*)	C111717	$C_7H_{14}O$	114.2	1200.2	661.729	1.34643	油脂味、清香、醛香
	庚醛(*M*)	C111717	$C_7H_{14}O$	114.2	1200.4	662.045	1.70166	油脂味、清香、醛香
	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*D*)	C4313035	$C_7H_{10}O$	110.2	1494.3	1248.751	1.18243	油脂味、鱼腥味、青草香
	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*M*)	C4313035	$C_7H_{10}O$	110.2	1485.4	1224.566	1.64351	油脂味、鱼腥味、青草香
	苯甲醛丙二醇缩醛	C2568254	$C_{10}H_{12}O_2$	164.2	1256.7	744.822	1.14705	花香味、木质味
	2-己烯醛(*D*)	C505577	$C_6H_{10}O$	98.1	1217.0	685.368	1.18464	甜味的、青草味
	2-己烯醛(*M*)	C505577	$C_6H_{10}O$	98.1	1217.3	685.831	1.51530	甜味的、青草味
	(*E*)-2-戊烯醛	C1576870	C_5H_8O	84.1	1103.7	483.041	1.37318	辛辣的、苹果味、绿色的
	3-甲基丁醛	C590863	$C_5H_{10}O$	86.1	903.0	287.285	1.19943	醚味的、青草味
	十碳醛	C112312	$C_{10}H_{20}O$	156.3	1483.8	1220.370	1.55083	醛味的、柑橘味
	(*E*,*E*)-2,4-壬二烯醛	C5910872	$C_9H_{14}O$	138.2	1664.6	1813.373	1.35503	绿色的
醇	(*Z*)-3-己烯醇	C928961	$C_6H_{12}O$	100.2	1363.8	938.196	1.22542	新鲜的、青草的
	乙二醇(*D*)	C107211	$C_2H_6O_2$	62.1	1623.5	1657.303	1.11461	-
	乙二醇(*M*)	C107211	$C_2H_6O_2$	62.1	1627.6	1672.122	1.16535	-
	苯甲醛丙二醇缩醛	C2568254	$C_{10}H_{12}O_2$	164.2	1256.7	744.822	1.14705	苦味的、甜味的
	2-乙氧基乙醇	C110805	$C_4H_{10}O_2$	90.1	1247.9	731.142	1.33971	-
	3-甲基-1-丁醇	C123513	$C_5H_{12}O$	88.1	1165.5	594.766	1.50073	-
	1-丁醇	C71363	$C_4H_{10}O$	74.1	1128.6	525.307	1.36881	发酵的气味
	2-戊醇	C6032297	$C_5H_{12}O$	88.1	1133.9	534.776	1.21383	温和的、青草味
	2-甲基-1-戊醇	C105306	$C_6H_{14}O$	102.2	833.3	245.868	1.30220	-
	4-甲基-2-戊醇(*D*)	C108112	$C_6H_{14}O$	102.2	1154.1	572.308	1.27674	辛辣的、酒精味
酮	环己酮(*D*)	C108941	$C_6H_{10}O$	98.1	1293.0	803.521	1.16061	薄荷味
	环己酮(*M*)	C108941	$C_6H_{10}O$	98.1	1292.6	802.841	1.45901	薄荷味
	3-戊烯-2-酮(*D*)	C625332	C_5H_8O	84.1	1140.9	547.504	1.06740	鱼腥味的、果味的
	3-戊烯-2-酮(*M*)	C625332	C_5H_8O	84.1	1144.8	554.717	1.34345	鱼腥味的、果味的
	2-戊酮(*D*)	C107879	$C_5H_{10}O$	86.1	989.0	348.013	1.12191	甜味、果味的
	2-丁酮(*D*)	C78933	C_4H_8O	72.1	910.4	292.045	1.05962	樟脑味、果味的
	2-丁酮(*M*)	C78933	C_4H_8O	72.1	919.1	297.758	1.25035	樟脑味、果味的
	2-戊酮(*M*)	C107879	$C_5H_{10}O$	86.1	999.9	357.050	1.37554	木香的、果味的

表 4(续)

类别	中文名称	CAS 号	分子式	MW	RI	Rt/s	Dt/a.u.	气味描述
酯	(*Z*)-3-己烯基甲酸酯	C33467731	$C_7H_{12}O_2$	128.2	1275.5	774.597	1.17436	绿色的、新鲜的
	2-辛炔酸甲酯	C111126	$C_9H_{14}O_2$	154.2	1233.6	709.570	1.40391	甜香的、绿色的
	戊酸甲酯	C624248	$C_6H_{12}O_2$	116.2	1102.8	481.606	1.57295	果味的
	丙酸乙酯(*D*)	C105373	$C_5H_{10}O_2$	102.1	952.9	321.085	1.14758	朗姆酒味、果味的
	丙酸乙酯(*M*)	C105373	$C_5H_{10}O_2$	102.1	975.6	337.747	1.45220	朗姆酒味、果味的
	乙酸乙酯	C141786	$C_4H_8O_2$	88.1	904.5	288.237	1.33739	果味的、醚味的
	丁酸丙酯	C105668	$C_7H_{14}O_2$	130.2	1104.3	484.037	1.26976	酸败的、果味的
烯烃	松油烯(*D*)	C586629	$C_{10}H_{16}$	136.2	1306.2	827.056	1.22465	草药的
	松油烯(*M*)	C586629	$C_{10}H_{16}$	136.2	1305.0	824.930	1.73767	草药的
	1-十二烯	C112414	$C_{12}H_{24}$	168.3	1211.9	678.062	1.43388	-
	3-蒈烯	C13466789	$C_{10}H_{16}$	136.2	1153.5	571.265	1.68070	柑橘味、松木香
	α-蒎烯	C80568	$C_{10}H_{16}$	136.2	1007.7	365.221	1.21603	-
	茨烯	C79925	$C_{10}H_{16}$	136.2	1065.1	430.890	1.21054	草本味
其他	吡咯烷(*D*)	C123751	C_4H_9N	71.1	1021.3	379.740	1.05131	氨的
	吡咯烷(*M*)	C123751	C_4H_9N	71.1	1036.2	396.411	1.27301	氨的
	环己烷	C110827	C_6H_{12}	84.2	720.4	191.121	1.04017	-
	1,4-二氯苯	C106467	$C_6H_4Cl_2$	147.0	1429.6	1083.824	1.12122	-
	1,4-二氯苯	C106467	$C_6H_4Cl_2$	147.0	1451.4	1136.755	1.10709	-
	环己胺	C108918	$C_6H_{13}N$	99.2	1231.8	706.895	1.18504	-
	N-亚硝基二甲胺	C62759	$C_2H_6N_2O$	74.1	751.7	204.926	1.22721	-
	2,5-二甲基吡嗪	C123320	$C_6H_8N_2$	108.1	1323.5	859.017	1.1018	坚果味的、可可味
	吡嗪	C290379	$C_4H_4N_2$	80.1	1223.9	695.392	1.04267	甜香味
	烯丙基硫化物	C592881	$C_6H_{10}S$	114.2	1211.2	677.173	1.12579	硫的
	2-丁基呋喃	C4466244	$C_8H_{12}O$	124.2	1159.1	582.116	1.18375	辛辣的

注: 风味描述来源: https://www.femaflavor.org/flavor-library, MW 为分子量(molecular weight), RI 为保留指数(retention index), Dt 为相对迁移时间(relative migration time), -表示未查询到气味描述。

醇类物质的产生主要由于脂肪的氧化降解, 氨基酸代谢等; 如 3-甲基-1-丁醇为亮氨酸降解生成的醇类物质, 具有果香、薄荷气味; (*Z*)-3-己烯醇是 *α*-亚麻酸经热氧化生成 13-氢过氧化物后, 在在酶促反应中发生 *β*-裂解产生, (*Z*)-3-己烯醛, 再经氢转移还原形成, 具有新鲜的、青草味。由图 5 可知, 将乙酯型鱼油经过不同吸附剂处理过后, 发现 JHYY 组相比 BTXH 组醇类相对含量下降的多。出现这一现象主要是由于醇类可作氢键给体和受体于碳管复合吸附剂结合; 在加热条件下发生反应将醇类转化为醛类物质, 导致醇类物质的相对含量下降, 由于腥味醇类的减少, 鱼油的整体风味品质得到改善。

酮类物质的产生主要来自氨基酸降解、不饱和脂肪酸的热氧化降解和革兰氏菌的氧化作用, 其化学性质较为稳定, 通常具有刺激性气味、花香等。如 2-丁酮(*D*)是鱼油中多不饱和脂肪酸热氧化的特征降解产物, 具有樟脑味、果味的气味特征; 3-戊烯-2-酮(*M*)鱼油热氧化过程中生成的特征性不饱和酮, 其生成主要源于氧化裂解而成, 具有鱼腥味。由图 5 可知, 将乙酯型鱼油经过不同吸附剂处理过后, 得出 JHYY 组酮类的相对含量为 20%, 产生这一现象的原因可能是碳管复合吸附剂对醇类吸附效果较好, 抑制酮类的吸附, 使得酮类的相对含量无显著下降情况, 从而对乙酯型鱼油的风味产生影响。

2.5　不同吸附剂处理乙酯型鱼油的 GC-IMS 挥发性成分指纹图谱分析

通过对比经不同吸附剂处理后乙酯型鱼油各阶段的指纹图谱, 可以直观看出样品中挥发性物质含量的变化。

GC-IMS 指纹图谱如图 6 所示 A 区 3 组样品中挥发性物质及其浓度无明显变化, 主要包括丙酸乙酯, (*E*)-2-戊烯醛; 其中丙酸乙酯贡献水果香气, (*E*)-2-戊烯醛贡献青草味。B 区 3 组样品对比得出, 该区在 JHYY 组中挥发性物质及其浓度有所增加, 主要包括 3-戊烯-2-酮、*α*-蒎烯、丁酸丙酯、2-丁基呋喃、2-戊醇、2-丁酮、环己酮等挥发性物质; C 区 3 组样品对比得出, 该区在 BTXF 组中挥发性物质及其浓度有所增加, 主要包括萜品油烯、2-己烯醛、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛等挥发性物质。

经指纹图谱综合分析发现, BTXF 组经白土吸附处理后加重鱼油中的鱼腥味和油腻味, 并引入大量新的挥发性物质从而导致鱼油的整体风味变复杂如松油烯、1-十二烯、2-己烯醛(*M*)等; JHYY 组用碳管复合吸附剂处理后降低腥臭

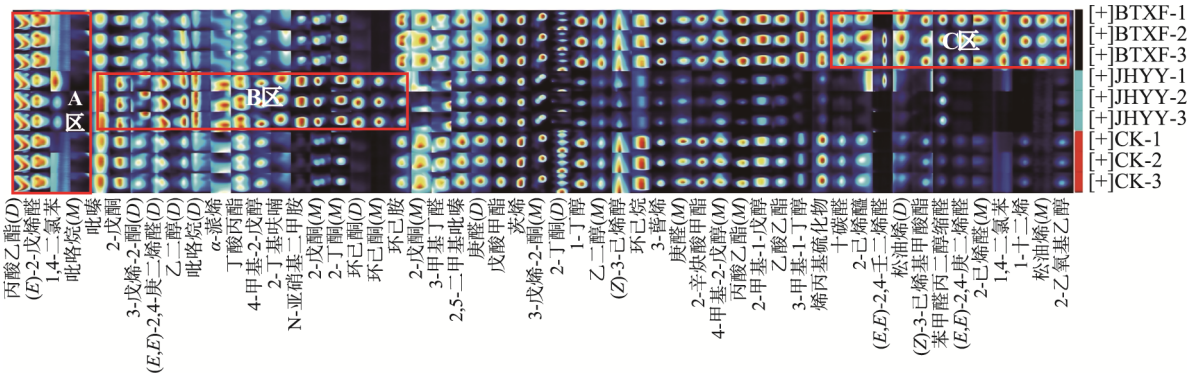


图 6 3 组乙酯型鱼油样品的 GC-IMS 挥发性成分指纹图谱(n=3)

Fig.6 GC-IMS fingerprint profiles of volatile components in 3 groups of ethyl ester-type fish oil samples (n=3)

挥发性物质的产生，最终总体挥发性物质呈现减少且浓度降低的趋势，其对气味的影响较为温和且浓度较低并未出现 BTXF 组复杂的味道。

通过在乙酯型鱼油中加入碳管复合吸附剂对挥发性物质的数量以及浓度有较大的影响。碳复合材料由 CNTs 与 AC 复配而成，由于 CNTs 孔径较小，使得鱼油主体部分无法进入，但对鱼油产生腥臭、哈喇味物质疏水性小分子可以被有效吸附，从而保证乙酯型鱼油的营养和成分不受影响并且从源头减少不良气味；碳管复合材料中含有羰基与碳碳双键的分子之间有较强的相互作用力，通过其表面大量吸附位点对异味进行吸附处理，最终实现对鱼油风味的改善。

2.6 不同吸附剂处理乙酯型型鱼油的多元统计分析

OPLS-DA 是一种应用于数据降维和模式识别的统计技术，其基于偏最小二乘回归原理，能够有效处理多维数据集，实现数据集的分类、识别、可视化及未来趋势的预测[27]。通过 GC-IMS 数据构建 OPLS-DA 模型，其中 R^2Y=0.998；Q^2=0.993，其结果接近 1.0，说明该模型具有良好的解释性和预测性。由图 7 可知 3 组乙酯型鱼油样本中，同一组平行样本呈现紧密状态，表明同组样品中挥发性物质组成高度相似，但总体分布分散且处于不同的象限。上述结果表明，经不同吸附剂处理后的样本的挥发性物质组成上存在明显差异。

置换检验可以更好的对模型进行进一步的验证处理，只有在置换检验中成功的模型才可用作数据的可视化，以及后期变量投影重要性因子的计算[28]。对所构建的 OPLS-DA 模型经过 200 次置换检验后，由图 8 可知 R^2=0.332，Q^2=–0.847，R^2 均高于 Q^2 且 Q^2 与 Y 轴相交于负半轴，说明表明该模型未出现过拟合[29]，实现对不同吸附剂处理后乙酯型鱼油的快速区分。

VIP 常用于 OPLS-DA 模型关键变量的分析，可以准确描述出每个变量对模型的总体贡献[30]，VIP 越大，说明贡献率越大[31]。如图 9 所示 VIP>1 的挥发性物质在图中用红色突出显示，根据 P<0.5 且 VIP>1 的标准通过筛选得出有显著贡献的 14 种物质，其中(*E*,*E*)-2,4-壬二烯醛的 VIP 值最高，是区分不同吸附剂处理后乙酯型鱼油中的关键性物质；(*Z*)-3-己烯醇、乙二醇(*D*)、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*D*)、2-丁酮(*D*)、乙二醇(*M*)、丙酸乙酯(*M*)、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*M*)、1-丁醇、N-亚硝基二甲胺、十碳醛、3-甲基-1-丁醇、3-戊烯-2-酮(*M*)、苯烯是区分差异性的核心物质，这些物质多数为乙酯型鱼油氧化的产物，可以有效区分鱼油间的差异性。结果表明: GC-IMS 结合 VIP 可以准确地判断出经不同吸附剂处理后的鱼油之间挥发性物质的差异性变化，为乙酯型鱼油的品质评价提供科学依据。

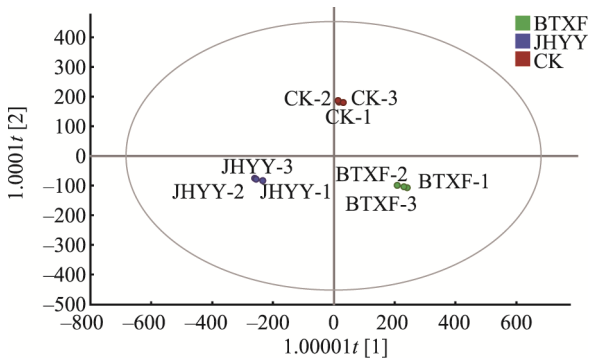


图 7 3 组乙酯型鱼油样品的 OPLS-DA 得分图

Fig.7 OPLS-DA score plot of 3 groups of ethyl ester-type fish oil samples

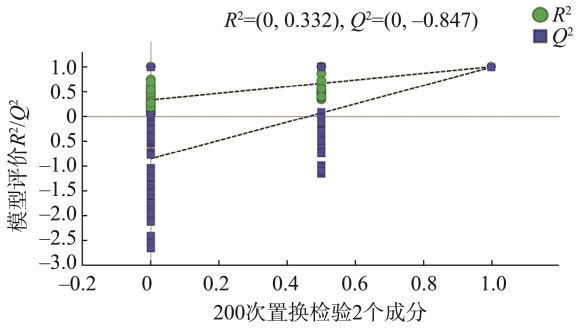


图 8 3 组乙酯型鱼油样品的 OPLS-DA 置信检验结果

Fig.8 OPLS-DA permutation test results of 3 groups of ethyl ester-type fish oil samples

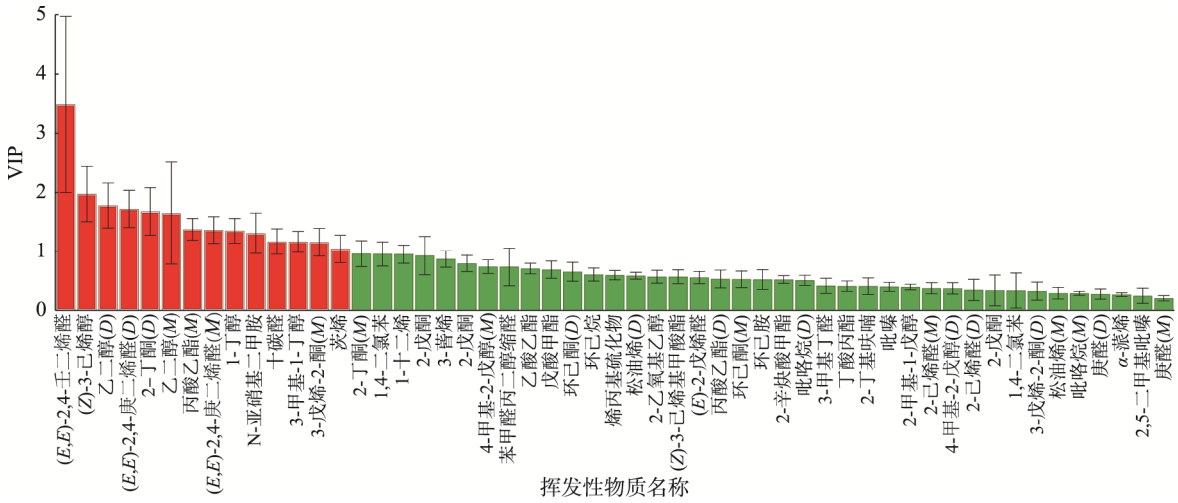


图 9　3 组乙酯型鱼油样品 OPLS-DA 分析的 VIP

Fig.9　VIP of the OPLS-DA analysis for 3 groups of ethyl ester-type fish oil samples

2.7　不同吸附剂处理后乙酯型鱼油感官评价分析

如图 10 所示，评定小组得出 JHYY 组在色泽、滋味、杂质、状态以及气味上均高于其他两组，其原因为碳管复合吸附剂处理后的乙酯型鱼油能有效去除异味物质，使得鱼油呈现透明均匀的状态，可以显著降低鱼腥味，使得乙酯型鱼油的感官品质得到明显改善。

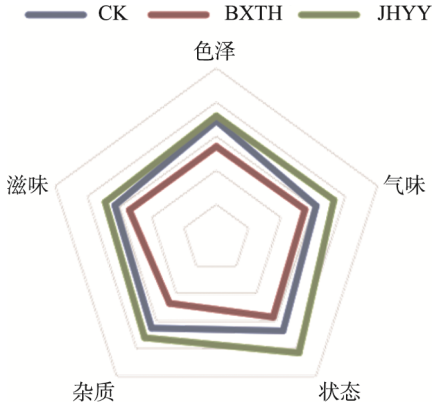


图 10　乙酯型鱼油感官指标定量描述分析雷达图

Fig.10　Radar chart for the quantitative description of sensory index of ethyl ester-type fish oil

3　讨论与结论

本研究通过对乙酯型鱼油设置不添加吸附剂、添加活性白土以及碳管复合吸附剂进行精炼处理，利用 GC-IMS 技术全面分析经吸附剂处理后对乙酯型鱼油中整体风味的影响。通过 GC-IMS 共检测出 53 种挥发性物质，并结合 VIP>1 共鉴定出 14 种关键挥发性物质，分别为(*E*,*E*)-2,4-壬二烯醛、(*Z*)-3-己烯醇、乙二醇(*D*)、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*D*)、2-丁酮(*D*)、乙二醇(*M*)、丙酸乙酯(*M*)、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛(*M*)、1-丁醇、N-亚硝基二甲胺、十碳醛、3-甲基-1-丁醇、3-戊烯-2-酮(*M*)、苯烯，它们是对乙酯型鱼油风味影响最大的挥发性物质，其中 N-亚硝基二甲胺主要来源于鱼体自身降解以及在生产加工带入的亚硝化试剂在高温下发生反应，促进生成，对人体具有潜在危害性，因此在加工过程中应注意该问题。综上，经过 GC-IMS 和多元统计分析得到，经 3 组乙酯型鱼油样本中挥发性物质存在明显差异，该研究不仅揭示了新型吸附剂对鱼油风味物质的调控规律，也为乙酯型鱼油精炼工艺的品质评价提供了新的技术参考。碳管复合吸附剂在实验室条件下展示出优异的吸附性能，具备工业化的理论基础，但工业化应用需要进一步验证，后续应聚焦在规模化、安全、稳定的条件下，来推动新型吸附材料在鱼油精炼领域的应用。

参考文献

[1] 郑佳楠, 刘琳, 张友胜, 等. 三种不同 EPA/DHA 组成鱼油乳液的体外消化特性比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 118–127.
Zheng Jianan, Liu Lin, Zhang Yousheng, et al. Comparison of *in vitro* digestibility of fish oil emuls-ions with different EPA/DHA compositions [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(7): 118–127.

[2] Chen Jiali, Jayachandran M, Bai Weibin, et al. A critical review on the health benefits of fish consumption and its bioactive constituents [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130874.

[3] Ghorbanzade T, Jafari S M, Akhavan S, et al. Nano-encapsulation of fish oil in nano-liposomes and its application in fortification of yogurt [J]. Food Chemistry, 2017, 216: 146–152.

[4] Yao Jianxin, Zhang Yu, Jiao Jingjing. Rewiring marine *n*-3 polyunsaturated fatty acids as circadian rhythm regulators for manipulating glycolipid metabolism: emerging insights into molecular mechanism and potential targets [J]. Current Opinion in Food Science, 2024, 60: 101228.

[5] Xia Juan, Yang Longgen, Huang Chengyi, et al. Omega-3 polyunsaturated fatty acid eicosapentaenoic acid or docosahexaenoic acid improved ageing-associated cognitive decline by regulating glial polarization [J]. Mar Drugs, 2023, 21(7): 398.

[6] Das P, Dutta A, Panchali T, et al. Advances in therapeutic applications of fish oil: a review [J]. Measurement: Food, 2024, 13: 100142.
[7] 曾德金. 营养健康产业呈现六大发展趋势[N]. 经济参考报, 2024-03-06 (7).
Zeng Dejin. Nutrition and health industry shows six major development trends [N]. Economic Reference News, 2024-03-06 (7).
[8] Huang Guoxin, Li Ning, Wu Xufang, et al. Nutrition, production, and processing of virgin omega-3 polyunsaturated fatty acids in dairy: an integrative review [J]. Heliyon, 2024, 10(22): e39810.
[9] 康景轩. 研发生产富含 Omega-3 脂肪酸食品是改善民众营养健康状况的重要饮食策略[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(3): 41–45, 18–19.
Kang Jingxuan. Development and production of omega-3 fatty acids-enriched foods is an important dietary strategy to improve people's nutritional and health status [J]. Journal of the Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(3): 41–45, 18–19.
[10] 谭春明, 冯诗茹, 聂诗, 等. 鱼类副产物中鱼油的绿色提取、改性及其功能研究进展[J]. 南方水产科学, 2025, 21(6): 168–182.
Tan Chunming, Feng Shiru, Nie Shi, et al. Research progress of green extraction, modification and functional study of fish oil from fishery by-products [J]. South China Fisheries Science, 2025, 21(6): 168–182.
[11] Bonilla-Méndez J R, Hoyos-concha J L. Methods of extraction refining and concentration of fish oil as a source of omega-3 fatty acids [J]. Revista Corpoica-Cienciay Tecnología Agropecuaria, 2018, 19(3): 645–668.
[12] Zhu Yujie, Zheng Xinhong, Zeng Qiaoling, et al. The inhibitory effect of large yellow croaker roe phospholipid as a potential antioxidant on fish oil oxidation stability [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103291.
[13] 李加辛. 玉米油脱臭条件下 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯形成规律的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021: 1-3.
Li Jiaxin. Study on the formation rules of 3-monochloro-1,2-propanediol esters and glycidyl esters under corn oil deodorization conditions [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021: 1-3.
[14] Goh K M, Wong Yuhua, Tan Chinping, et al. A summary of 2-,3-MCPD esters and glycidyl ester occurrence during frying and baking processes [J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 460–469.
[15] 马路凯, 廖梓瑜, 张倩玮, 等. 水产油脂的加工及营养、安全研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(11): 9–15.
Ma Lukai, Liao Ziyu, Zhang Qianwei, et al. Processing, nutrition, and safety of aquatic oils: a research progress review [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(11): 9–15.
[16] Li Ying, Zhuan Xiaoci, Wu Xinrui, et al. Sustainablevalorization of *Litseacubeba* (*Lour*.) pers. residueas thenewlauric oil source using alternative green extraction and refining methods [J]. Foods, 2022, 11(14): 2047.
[17] 李诗莹, 谈乐乐, 刘静, 等. 改性活性炭对甲基橙的吸附试验探究[J]. 武汉工程大学学报, 2025, 47(6): 607–613.
Li Shiying, Tan Lele, Liu Jing, et al. Experimental investigation on the adsorption of methyl orange by modified activated carbon [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2025, 47(6): 607–613.
[18] 张芳, 宋诗军, 董芮娟, 等. 生物炭-白土吸附剂对鱼油中 3-氯丙醇酯的吸附性能研究[J]. 核农学报, 2023, 37(1): 118–127.
Zhang Fang, Song Shijun, Dong Ruijuan, et al. Study on the adsorption performance of biochar-bentonite adsorbent for 3-chloropropanol esters in fish oil [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(1): 118–127.
[19] 张亚昕. 碳基吸附剂对食用油中多环芳烃的脱除研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 8-9.
Zhang Yaxin. Study on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in edible oils by carbon-based adsorbents [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 8-9.
[20] Venkatappagari S, Mutra R R. Experimental study on the mechanical behavior of flat-joggle-flat joints bonded with GNP/CNT modified adhesives [J]. Polymer Composites, 2026, 47(1): 697–709.
[21] Hopfgartner G. Current developments in ion mobility spectrometry [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2019, 411(24): 6227.
[22] Wang Zhaoling, Mi Si, Wang Xianghong, et al. Characterization and discrimination of fermented sweet melon juice by different microbial strains via GC-IMS-based volatile profiling and chemometrics [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(4): 1241−1247.
[23] 吴鸣, 吴浚滢, 范琦琦, 等. 食品风味物质的合成机理及检测方法的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 329–336.
Wu Ming, Wu Junying, Fan Qiqi, et al. Research progress on synthesis mechanism and detection methods of food flavor substances [J]. Food Science, 2024, 45(16): 329–336.
[24] Capitain C, Weller P. Non-targeted screening approaches for profiling of volatile organic compounds based on gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS) and machine learning [J]. Molecules, 2021, 26(18): 5457.
[25] Chen Jiahui, Tao Lina, Zhang Ting, et al. Effect of four types of thermal processing methods on the aroma profiles of acidity regulator-treated tilapia muscles using E-nose, HS-SPME-GC-MS, and HS-GC-IMS [J]. LWT, 2021, 147: 111585.
[26] 朱晴云, 程伟, 刘耕典, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱法解析不同质量等级金裕皖馥香白酒的挥发性组分差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 307–316.
Zhu Qingyun, Cheng Wei, Liu Gengdian, et al. Analysis of the differences of volatile components in Jinyuwan Fuxiang Baijiu of different quality grades based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 307–316.
[27] Huang X, Zhao L, Pang S, et al. Effects of varieties, cultivation methods, and origins of *Citrus sinensis*, Hongjiang on volatile organic compounds: HS-SPME-GC/MS analysis coupled with OPLS-DA [J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1725.
[28] 郭琳琳, 徐美丽, 张馨月, 等. 基于电子鼻和气相色谱-离子迁移谱分析河北地区不同品牌桃香醋挥发性化合物差异[J]. 现代食品科技, 2026, 42(2): 278–292.
Guo Linlin, Xu meili, Zhang Xinyue, et al. Analysis of volatile compound differences in peach vinegars from different brands in Hebei region based on electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 278–292.
[29] Rong Yuting, Xie Jialing, Yuan Haibo, et al. Characterization of volatile metabolites in Puerh teas with different storage years by combining GC-E-Nose, GC-MS, and GC-IMS [J]. Food Chemistry X, 2023, 18: 100693.
[30] 袁丽萍, 钟比真, 胡明明, 等. GC-IMS 结合化学计量法分析黑鱼内脏粗鱼油精制过程中挥发性物质变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 273–281.
Yuan Liping, Zhong Bizhen, Hu Mingming, et al. Changes in volatile components during the refining process of crude fish oil from snakehead fish viscera by using GC-IMS and chemometric analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 273–281.
[31] 金文刚, 刘俊霞, 孙海燕, 等. 基于 GC-IMS 结合化学计量学鉴别大鲵油掺伪不同比例花生油挥发性有机物特征[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 368–376.
Jin Wengang, Liu Junxia, Sun Haiyan, et al. Characterization of volatile organic compounds of giant salamander (*Andrias davidianus*) oil adulterated with different amount of peanut oil by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics [J]. Food Science, 2023, 44(10): 368–376.

(责任编辑: 曹岱琳 安香玉)