吴东源, 林海生, 陆大鹏, 等. 基于电子鼻、GC-IMS 和 GC-MS 分析干燥方式对墨西哥湾扇贝挥发性成分的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 357−367. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070209

WU Dongyuan, LIN Haisheng, LU Dapeng, et al. Effect of Drying Method on Volatile Compounds of *Argopecten irradians concentricus* Based on Electronic Nose, GC-IMS and GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 357−367. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070209

· 分析检测 ·

基于电子鼻、GC-IMS 和 GC-MS 分析干燥方式对墨西哥湾扇贝挥发性成分的影响

吴东源[1], 林海生[1,2,*], 陆大鹏[3], 曹文红[1,2], 谭明堂[1,2], 陈忠琴[1,2], 郑惠娜[1,2]

（1.广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524088;
2.广东省水产品加工与安全重点实验室/国家贝类加工技术研发分中心（湛江）/南海生物资源开发与利用协同创新中心, 广东湛江 524088;
3.湛江市食品药品检验所, 广东湛江 524088）

摘　要: 为探究不同干燥方式对墨西哥湾扇贝（*Argopecten irradians concentricus*）挥发性成分的影响。本研究以鲜贝柱（fresh scallops，FS）作为对照，采用自然干燥（natrual drying，ND）、热风（hot air dring，HAD）、真空（vacuum drying，VD）三种干燥方式加工贝柱，利用电子鼻（electronic nose，E-nose）、气相离子迁移谱（gas chromatography-ion mobility spectrometry，GC-IMS）以及气相色谱-质谱联用（gas chromatographymass spectrometry，GC-MS）多维度解析了干燥方式对扇贝柱挥发性有机化合物（volatile organic components，VOCs）的影响。结果表明，电子鼻能够有效地区分不同干燥方式扇贝柱的气味特征，其中 ND 组与 HAD 组具有部分相似的气味特征。GC-IMS 指纹图谱显示 ND 组的特征 VOCs 包括 1-辛烯-3 醇、2-甲基-吡啶、2,6-二甲基-吡啶、4-甲基噻唑和二甲基三硫，HAD 和 VD 的特征 VOCs 以酮类为主，包括 5-甲基-3 庚酮、2-甲基-3（二氢）-呋喃酮、4-羟基-4-甲基-2-戊酮；二维谱图显示干燥增加了扇贝挥发性化合物的种类和含量，其中 ND>HAD>VD。GC-MS 结果显示，不同干燥方式对扇贝 VOCs 组成及含量具有显著影响，其中 ND、HAD 和 VD 分别检出 32、26 和 16 种 VOCs，醛类化合物的相对含量由干燥前的 13.79% 分别上升至 18.39%、24.45%、19.37%，醇类化合物的含量由干燥前的 33.91% 分别降低至 21.30%、19.09% 和 13.84%。基于 ROAV 理论鉴别出了 10 种关键的香气成分，以醛类和酮类为主，共有的 VOCs 为癸醛、苯甲醛，赋予了扇贝花果香、坚果香，ND、VD 组的特征香味为柑橘香和花香，而 HAD 组的特征香气为花果香和木香。本研究揭示了不同干燥方式下扇贝 VOCs 的组成及香气特征，可为干贝加工过程中风味的调控及香气的提升提供理论依据。

关键词: 扇贝, 电子鼻, 气相离子迁移谱（GC-IMS）, 气相色谱-质谱联用（GC-MS）, 干燥方式, 挥发性成分

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0357−11　　本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070209

Effect of Drying Method on Volatile Compounds of *Argopecten irradians concentricus* Based on Electronic Nose, GC-IMS and GC-MS

WU Dongyuan[1], LIN Haisheng[1,2,*], LU Dapeng[3], CAO Wenhong[1,2], TAN Mingtang[1,2], CHEN Zhongqin[1,2], ZHENG Huina[1,2]

（1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
2.Guangdong Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety/National Research and Development Branch

收稿日期: 2025−07−17

基金项目: 国家科技部国家重点研发计划子课题（2024YFD2401903）; 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目（CARS-49）; 广东省现代农业产业技术体系贝藻创新团队（2024CXTD23）; 海南省重点研发计划项目（ZDYF2024GXJS316）。

作者简介: 吴东源（1998−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 水产食品质量与安全, E-mail: 386534356@qq.com。

*** 通信作者:** 林海生（1985−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品精细加工及高值化利用, E-mail: haishenglin@163.com。

Center for Shellfish Processing (Zhanjiang)/South China Sea Biological Resources Development and Utilization Collaborative Innovation Center, Zhanjiang 524088, China;
3.Zhanjiang Institute for Food and Drug Control, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: To investigate the impact of drying methods on the volatile profile of *Argopecten irradians concentricus*, fresh scallops (FS) was compared with samples processed by natural drying (ND), hot-air drying (HAD) and vacuum drying (VD). Odor characteristics and volatile organic compounds (VOCs) were comprehensively analysed by electronic nose (E-nose), gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that E-nose clearly discriminated the odour patterns of the differently dried scallops, with ND and HAD showing partial overlap. GC-IMS fingerprints revealed that ND was characterized by 1-octen-3-ol, 2-methylpyridine, 2,6-dimethylpyridine, 4-methylthiazole, and dimethyl trisulfide, whereas HAD and VD were dominated by ketones such as 5-methyl-3-heptanone, 2-methyl-3(2H)-furanone and 4-hydroxy-4-methyl-2-pentanone. Two-dimensional maps indicated that drying increased both the number and abundance of volatiles (ND>HAD>VD). GC-MS analysis demonstrated that the drying method markedly influenced the VOC profiles of scallops, with 32, 26, and 16 compounds detected in the ND, HAD, and VD groups, respectively. Aldehydes rose from 13.79% in fresh scallops to 18.39%, 24.45%, and 19.37%, whereas alcohols declined from 33.91% to 21.30%, 19.09%, and 13.84%. ROAV analysis further pinpointed ten key aroma-active compounds, mainly aldehydes and ketones, with decanal and benzaldehyde shared across all treatments, contributing floral, fruity, and nutty notes. ND and VD were typified by citrus and floral-like aromas, while HAD was characterized by floral-fruity and woody notes. This study elucidates the composition and aroma characteristics of VOCs in scallops under different drying methods and provides a theoretical foundation for flavor regulation and aroma enhancement in dried scallop processing.

Key words: scallops; E-nose; gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); gas chromatographymass spectrometry (GC-MS); dryging methods; volatile components

墨西哥湾扇贝(*Argopecten irradians concentricus*)作为海湾扇贝的南部亚种,是我国东南沿海地区重要的经济养殖贝类。根据 2024 年中国渔业统计年鉴显示,2023 年福建、广东、广西及海南四省的养殖总产量达 1.29×10^5 吨[1],且呈现逐年增长趋势。墨西哥湾扇贝食用价值高,具有营养丰富,低脂肪、高蛋白的特点,且富含多种矿物质元素和多不饱和脂肪酸,是优质的蛋白质来源。王昊[2] 测定了 4 种扇贝闭壳肌中脂肪酸和矿物质元素组成,结果显示海湾扇贝 PUFA 的含量为 51.95%±3.90%,同时富含了 K、Mg 等在内的 7 种矿物质元素。李伟青等[3] 测定了海湾扇贝柱的基本营养成分,结果显示粗蛋白含量为 12.7%(湿基),粗脂肪含量 2.21%(湿基),其粗蛋白含量显著高于翡翠贻贝、河蚬以及栉孔扇贝,脂肪含量也显著低于另外 3 种贝类。墨西哥湾扇贝的闭壳肌(贝柱)是其主要食用部位,其加工方式主要有鲜销、冷冻、干制品等。其中干贝(又称瑶柱),是利用其闭壳肌经盐水煲煮、干燥后制成的干制品,因其鲜美滋味、高营养价值以及低脂高蛋白的特性,深受消费者青睐,在市场中占据重要地位。

目前,贝类干燥技术主要包括自然干燥(natrual drying, ND)、热风干燥(hot air dring, HAD)和真空干燥(vacuum drying, VD)等[4]。自然干燥应用范围广,成本较低,但受到天气和环境因素的限制;热风干燥效率高,但高温可能导致蛋白质变性、脂质氧化及美拉德反应加剧;而真空干燥避免了与氧气接触,通常能更好地保持物料原有的外观和营养价值[5],不同干燥方式的贝类在感官、营养保留、色泽以及风味特征存在显著差异。香气是决定干贝品质好坏的关键因素,香气的形成涉及美拉德反应、蛋白质降解及微生物代谢等复杂过程[6−8],主要的挥发性气味物质包括醇、醛、酮、酯类等。目前,基于气相离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)和气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联合电子鼻等智能感官技术已成为气味分析的重要手段[9],其具有高效、稳定等优点,并可实现风味的数字化表征[10]。研究表明不同的干燥方式对气味的形成具有显著影响。梁钻好等[11] 探究了 5 种干燥方法对半干金鲳鱼风味的影响,结果表明日光联合变温热泵干燥的方法更能促进风味物质的形成,综合得分最佳。孟维博等[12] 研究发现热风微波联合干燥法能够显著提升牡蛎干的风味品质,相较于单一干燥方式,该联合干燥法在促进牡蛎干香气物质生成和改善整体风味方面更具优势,为水产品干燥加工中风味优化提供了有益参考。

目前,针对扇贝原料的研究多集中于干燥方式对其理化特性、感官品质及流变学特性的影响。例如刘静[13] 曾探究热泵干燥对扇贝力学特性和品质变化影响的机制。孙丽雯[14] 探究了两种干燥方式(冷风、自然晾干)条件下栉孔扇贝的品质和流变学变化。李欣怡等[15] 曾探究了干燥方式对海湾扇贝色泽、氨基酸以及多糖抗氧化活性的影响,但未对其具体风味成分进行解析。关于干燥方式对扇贝关键挥发性成分影响的研究鲜有涉及,基于此,本研究以墨西哥

湾扇贝为研究对象，以鲜贝柱为对照，采用自然干燥、热风干燥和真空干燥三种方式处理墨西哥湾扇贝，借助电子鼻、GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 多维技术深入探究干燥方式对其关键挥发性成分的影响，旨在为干贝加工中风味的精准调控提供理论支持。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

墨西哥湾扇贝贝柱　鲜贝柱购置于湛江市遂溪县港门镇，置于泡沫箱中加冰运输于 2 h 内运回实验室，置于−20 ℃ 冰箱中备用。

VOS-210C 型真空干燥箱　上海爱朗仪器有限公司；DHG-9030A 型电热鼓风干燥箱　上海一恒仪器；TQ850NX 型三重四级杆气相色谱质谱联用仪、50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取针　日本岛津公司；PEN3 型电子鼻　德国 Airsense 公司；Flavour-Spec 型气相离子迁移谱　德国 G.A.S 公司；MTX-5(15 m×0.53 mm)色谱柱　美国 RESTEK 公司；DF-101S 数显加热磁力搅拌水浴锅　科瑞仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品前处理　扇贝柱解冻至室温后，用蒸馏水洗净，去除表面残留的内脏和杂质后，挑选品相良好、无破碎且大小相近的贝柱 1000 g，平均分为 4 组，分别作为鲜贝对照组（Fresh scallops, FS）和 3 种干燥方式的原料。

1.2.2　干贝的制备工艺　将挑选后的贝柱置于配制好的 5% 的食用盐水中（料液比为 1∶5）漂烫 2 min 后立即捞出，置于厨房纸上沥干水分备用，然后按照以下方式进行干燥。

自然干燥（natrual drying, ND）：将贝柱均匀地置于竹筛中，选择晴朗的夏季，9:00~18:00 期间，干燥通风且平整的在有持续阳光的地方，进行晾晒。每隔 1 h 利用温湿度计记录变化，平均温度 45±5 ℃，夜晚无阳光时放入密封袋并置于密闭容器中，重复此步骤直至水分含量到达 20%。

热风干燥（hot air dring, HAD）：将原料单层均匀平铺于烤盘中，置于鼓风干燥箱，温度为 50±2 ℃，风速为 5 m/s 直至水分含量到达 20%。

真空干燥（vacuum drying, VD）：将原料单层均匀平铺于烤盘中，置于真空干燥箱，温度 50±2 ℃，真空度保持在 0.08 MPa，直至水分含量到达 20%。

1.2.3　挥发性成分的检测

1.2.3.1　电子鼻分析　参考周莹等[16] 的方法，并稍作修改。准确称取 3.00 g 样品于 50 mL 离心管中，保鲜膜密封 2 层，于室温下平衡 30 min 后，使用 PEN3 电子鼻对样品进行气味检测。测定条件设定为进样流速 400 mL/min，传感器自清洗时间 90 s，采集时间 90 s，选取信号稳定的 58~60 s 信号区间作为采集时间，每组样品做 3 次平行测定。电子鼻各传感器对应的敏感特征如表 1 所示。

表 1　PEN3 型电子鼻传感器对应的敏感物质及特征气体

Table 1　Sensitive substances and characteristic gases for the PEN3 electronic nose sensor

序号	传感器名称	敏感特点	特征气体
1	W1C	芳烃类化合物	甲苯
2	W5S	氮氧化物	二氧化氮
3	W3C	芳香物质及氨类	苯
4	W6S	氢化物	氢气
5	W5C	短链烷烃类	乙烷、丙烷
6	W1S	烷类	甲烷
7	W1W	氮氧化物、有机硫化物	硫化氢
8	W2S	醇类、醛酮	一氧化碳
9	W2W	有机硫化物、芳烃类	硫化氢
10	W3S	长链烷烃类	癸烷

1.2.3.2　GC-IMS 分析　参考王治军等[17] 的方法，并稍作修改。称取 2 g 样品于 20 mL 顶空萃取瓶中，65 ℃ 下于震荡孵化器中以 500 r/min 孵育 15 min，通过 1 mL 气密加热注射器将 0.5 mL 顶空样品以不分流模式注入自动进样器中，进样温度：80 ℃。

GC 条件：MTX-5（15 m×0.53 mm）型色谱柱，柱温：60 ℃；载气为 N2（纯度≥99.999%）；载气流速程序为初始流速 2 mL/min 保持 2 min，随后在 20 min 线性增加至 100 mL/min，保持 5 min，在 30 min 时达到最终流速 150 mL/min。

IMS 条件：漂移管温度为 45 ℃，在 150 mL/min 的恒定流速下运行。根据各挥发性化合物的保留指数（retention index, RI），将 RI 和保留时间通过仪器自带数据库 NIST-14II06-10204 内化合物信息对比，对挥发性化合物进行定性分析。每组样品进行三次平行测试。

1.2.3.3　GC-MS 分析样品制备　样品于搅拌机中磨开，切成细碎，取 5 g 装入 50 mL 顶空萃取瓶中，经老化后的萃取头插入顶空瓶中在 65 ℃ 条件下萃取 40 min，萃取完成后在进样口解析 5 min。

1.2.3.4　GC-MS 分析条件　GC 条件：TR-35MS（30 m×0.25 mm, 0.25 μm）型毛细管柱；进样口温度 250 ℃；升温程序：初始温度为 50 ℃，随后以 4、5、5 ℃/min 分别升温至 100、200和 230 ℃，并在终温处保持 2、2 和 5 min；以高纯度氦气作为载气，流速为 1 mL/min，采用不分流的方式进样。

MS 条件：电子轰击离子源；电子能量 70 eV；离子源温度 230 ℃；传输线温度 250 ℃；检测器温度为 280 ℃；质量扫描范围 m/z 33~450。

1.2.3.5　定性定量分析　所有样品进行三次平行的测定，去除烷氧硅类等杂峰后取测得各样品物质总数最多的单次数据进行分析。将色谱图中的每个峰与系统图谱库（FFNSC3 和 NIST17）中已知化合物的质谱数据进行比对，保留相似度大于 80 的化合物。被测组分的相对含量利用面积归一化法进行计算，计算公式为：

挥发性成分的相对含量(%) = $\frac{\text{单个挥发性成分的峰面积}}{\text{挥发性成分的总面积}} \times 100$

1.2.4　相对气味活度值的计算　基于相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)理论分析关键风味化合物, ROAV 值的计算公式如下:

$$ROAV(\%) = \frac{C_A}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_A} \times 100$$

式中: C_A 为各挥发性组分的相对含量, %; C_{max} 为样品中香气贡献最大的组分含量, %; T_A 为各挥发性组分的气味阈值, μg/kg; T_{max} 为对样品中香气贡献最大的组分的气味阈值, μg/kg。

1.3　数据处理

利用 WinMuster 软件对电子鼻数据进行处理分析, Vocal_0.4.03 软件以及 NIST-14II06-10204 数据库对 GC-IMS 挥发性化合物进行定性分析, 建立指纹图谱与二维差异谱图。采用 Office Excel 2020 对 GC-MS 各样品挥发性物质组成进行筛选分析及 ROAV 的计算。采用 Origin 2020 绘制不同干燥样品中电子鼻雷达响应图, PCA 主成分分析图, 挥发性物质组成及相对含量的堆积图。

2　结果与分析

2.1　电子鼻分析

如图 1A 所示, 干燥处理前后扇贝的气味轮廓相似, 其中传感器 W1W、W5S 的响应值最大, 表明硫化物和氮氧化物是主要气味特征, 该结果与 WANG 等[18] 的研究结论一致。雷达图显示 ND 组的传感器 W1W 和 W5S 的响应值最高, HAD 和 VD 组次之, 这可能是由于扇贝柱持续长时间暴露在阳光下, 因持续氧化和蛋白质降解等原因积累了更多的无机硫化物和氮氧化物[19], 硫化物通常阈值较低, 主要来源于含硫氨基酸如半胱氨酸的热降解, 对风味的形成具有较大的贡献[20], 而氮氧化物的生成与持续的氧化有关, VD 处于真空缺氧的条件下可能是造成其 W5S 响应值低于 ND、HAD 的主要原因[21]。为了进一步区分不同干燥方式扇贝柱气味特征的差异, 对电子鼻结果进行 PCA 分析, 如图 1B 显示, 第一主成分(PC1)贡献率达 79.0%, 第二主成分(PC2)为 13.9%, 累计贡献率 92.9%, 表明电子鼻结果能够基本涵盖样品中挥发性成分的主要信息。样品在 PCA 空间呈离散分布, 分别位于不同象限且相距较远, 结果表明电子鼻结果能够对干燥前后扇贝柱气味特征进行有效的区分[22], 其中 ND、HAD 在二维空间的图像部分重叠, 证明具有相近的挥发性气味特征。

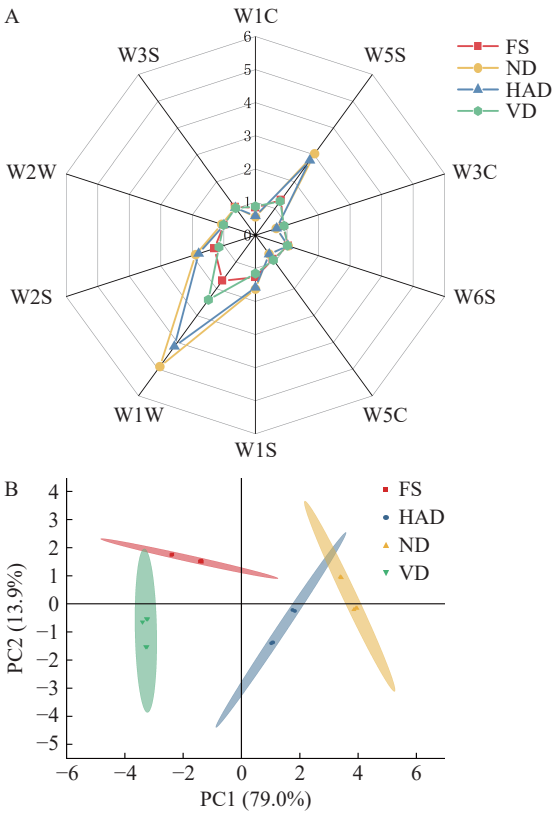


图 1　不同干燥方式扇贝柱电子鼻雷达响应图(A)及 PCA 分析(B)

Fig.1　Radar response map (A) and PCA (B) analysis of the electronic nose of scallop columns with different drying methods

2.2　GC-IMS 分析

2.2.1　指纹图谱分析　采用 GC-IMS 技术分析不同干燥方式对扇贝柱挥发性有机化合物(VOCs)的影响, 结果如表 2 所示, 共检测出 60 种 VOCs, 其中包括醇类 9 种、其他 18 种、醛类 3 种、酸类 3 种、酮类 9 种以及酯类 18 种。参照化合物谱库信息进行定性分析, 建立了图 2 所示的指纹图谱, 指纹图谱能够清晰地展示各处理组之间 VOCs 的差异, 图中每个亮点代表一种化合物, 其颜色深度与物质相对含量呈正相关, 颜色越红代表含量越高[23]。根据化合物含量变化特征, 将指纹图谱划分为三个区域: A 区域为干燥前后共有的化合物, 其中包括 2-乙酰基吡咯、丁酸乙酯、1,3-丁二醇、四氢噻吩酮、反式-2-戊烯醛等酯、醇、酮、醛以及其他化合物在内的 21 种物质; B 区和 C 区分别代表干燥前后的差异物质。B 区域显示, ND 组含量明显增加的化合物包括 1-辛烯-3-醇、2-甲基吡啶、2,6-二甲基吡啶、4-甲基噻唑和二甲基三硫等。其中, 1-辛烯-3-醇又称蘑菇醇可赋予蘑菇香气[24]; 吡啶类物质作为氨基酸与还原糖反应的氧化产物, 能产生面包和饼干特有的香气[25]; 噻唑类物质通过美拉德反应或 Strecker 降解形成, 主要呈现坚果和肉香风味[26]; 二甲基三硫则具有洋葱和大蒜特征气味。这些特征性气味物质的协同作用增强了 ND 组的整体香气特征。与崔明仙等[27] 的研究对比发现, ND 组新增了吡啶、噻唑和硫化物等化合物。这表明在特定条件下, 干燥处理比加热更能促进香气物质的形成。HAD 与 VD 的特征化合物主要以酮类物质为主, 包括 5-甲基-3-庚酮、2-甲基-3(二氢)-呋喃酮、4-羟基-4-甲基-2-戊酮等, 酮类化合物主要来源于脂肪酸的氧化降解, 其中 5-甲基-3-庚酮属于脂

表 2　不同干燥方式扇贝柱风味化合物 GC-IMS 分析

Table 2　GC-IMS analysis of flavor compounds in scallop adductors under different drying methods

化合物名称	分类	CAS号	RI	RT(s)	气味描述
庚醇	醇	111-70-6	967.3	441.81	–
2-丁氧基乙醇	醇	111-76-2	902.7	279.68	–
1-己醇	醇	111-27-3	876.5	236.27	–
2-己烯醇	醇	2305-21-7	861.7	216.03	–
1,3-丁二醇	醇	107-88-0	772.1	126.49	–
1-辛烯-3-醇	醇	3391-86-4	984.2	497.89	泥土、蘑菇
苯甲醇	醇	100-51-6	1040.8	613.38	茉莉花香、杏仁香
反式-2-己烯-1-醇	醇	928-95-0	868.7	225.29	–
2-呋喃甲醇	醇	98-00-0	856.2	208.99	–
丙基苯	其他	103-65-1	964.7	433.56	–
邻甲酚	其他	95-48-7	1046.3	622.69	–
乙苯	其他	100-41-4	862.9	217.63	–
二乙二醇二甲醚	其他	111-96-6	965.2	435.12	–
苯乙烯	其他	100-42-5	902.2	278.74	–
2-乙酰基吡咯	其他	1072-83-9	1077.5	678.55	核桃、烤面包
2-乙酰基-1-吡咯啉	其他	85213-22-5	923.5	323.99	爆米花
二乙基二硫	其他	110-81-6	919.9	315.90	–
2,6-二甲基吡啶	其他	108-48-5	897.3	269.18	坚果、烘焙香
2-甲基吡嗪	其他	109-08-0	838.0	187.24	坚果、烘焙香
2-甲基吡啶	其他	109-06-8	836.4	185.38	坚果、烘焙香
4-甲基噻唑	其他	693-95-8	828.1	176.38	坚果香
2,5-二甲基吡嗪	其他	123-32-0	919.4	314.80	炒花生、巧克力
2-丁基呋喃	其他	4466-24-4	886.9	251.48	水果、葡萄酒
2,4-二甲基噻唑	其他	541-58-2	877.7	237.10	咖啡、坚果香
N-亚硝基甲乙胺	其他	10595-95-6	829.7	178.08	氨味、鱼腥味
二甲基三硫	其他	3658-80-8	967.5	442.25	大葱、洋葱
2,3-二甲基吡嗪	其他	5910-89-4	927.4	333.03	烤香、坚果、可可香
5-甲基呋喃醛	醛	620-02-0	953.9	401.73	坚果、焦糖、朗姆酒
2-甲基-2-戊烯醛	醛	623-36-9	836.7	185.74	果香、青草、脂肪
反式-2-戊烯醛	醛	1576-87-0	752.9	113.72	柑橘香
丁酸	酸	107-92-6	812.8	160.73	–
戊酸	酸	109-52-4	884.6	248.12	–
巴豆酸	酸	107-93-7	849.7	200.90	–
四氢噻吩酮	酮	1003-04-9	967.1	440.99	蔬菜、奶油
3-甲基-2-环戊烯-1-酮	酮	2758-18-1	961.3	423.23	焦糖香、坚果香
5-甲基-3-庚酮	酮	541-85-5	947.6	384.28	果香、脂香
3-庚烯-2-酮	酮	1119-44-4	929.8	338.74	草莓、菠萝
4-羟基-4-甲基-2-戊酮	酮	123-42-2	820.3	168.25	椰香、奶油香
3-庚酮	酮	106-35-4	882.4	244.82	苹果香、草本香
2-甲基-3(二氢)-呋喃酮	酮	3188-00-9	815.5	163.44	肉汤、洋葱
环戊酮	酮	120-92-3	795.6	144.92	青果、绿叶
2-环己烯-1-酮	酮	930-68-7	924.7	326.85	果蔬、草本
丙位戊内酯	酯	108-29-2	975.9	469.49	果香、奶香
丙酸异戊酯	酯	105-68-0	975.7	468.71	杏子、菠萝
2-糠酸甲酯	酯	611-13-2	975.7	468.76	焦香
己酸甲酯	酯	106-70-7	924.8	327.16	菠萝、香蕉
gamma-丁内酯	酯	96-48-0	925.0	327.43	椰子、奶香
甲酸己酯	酯	629-33-4	911.4	297.58	甜香、果香
硫代乙酸丙酯	酯	2307-10-0	876.5	236.21	大葱、蒜味
丙酸异丁酯	酯	540-42-1	862.5	217.03	梨、苹果
丁酸异丙酯	酯	638-11-9	849.8	201.08	菠萝、香蕉
丁酸乙酯	酯	105-54-4	812.0	159.10	菠萝、香蕉
甲酸异戊酯	酯	110-45-2	785.1	135.97	菠萝、香蕉

续表 2

化合物名称	分类	CAS号	RI	RT(s)	气味描述
丁酸丙酯	酯	105-66-8	889.3	255.21	菠萝、香蕉
乙酸异戊酯	酯	123-92-2	868.6	225.21	菠萝、香蕉
戊酸甲酯	酯	624-24-8	831.0	179.47	菠萝、香蕉
异硫氰酸异丙酯	酯	2253-73-8	835.9	184.88	辛辣、刺鼻
甲酸正戊酯	酯	638-49-3	827.0	175.14	菠萝、香蕉
甲酸-3-甲基丁酯	酯	110-45-2	790.3	140.31	梨、苹果
3-甲基丁酸甲酯	酯	556-24-1	764.3	121.16	苹果、菠萝

注: 气味描述来源于香气查询网站http://www.flavornet.org/index.html; “–”表示未查到。

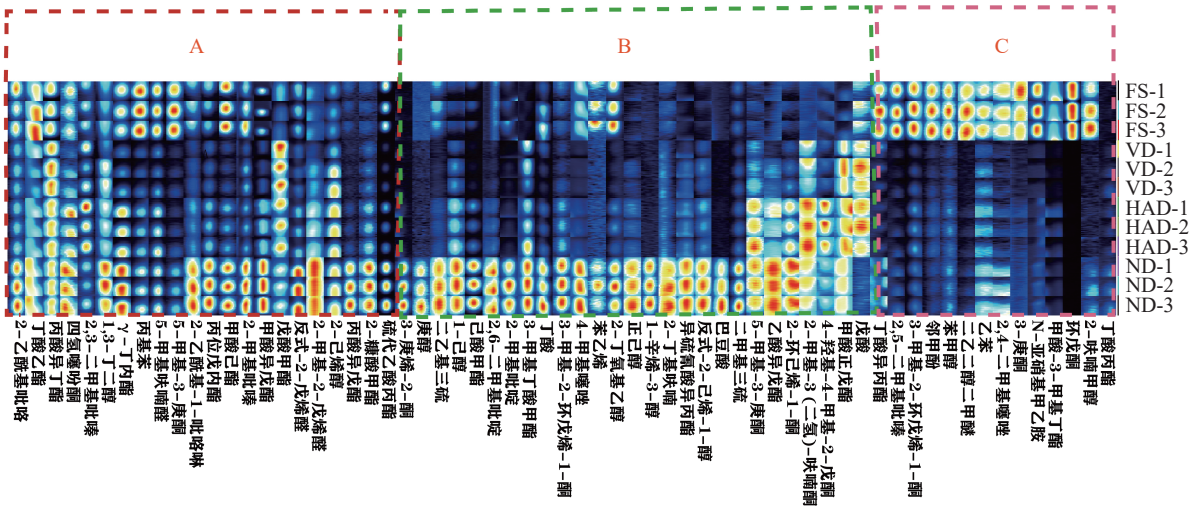


图 2　不同干燥方式扇贝柱 GC-IMS 指纹图谱

Fig.2　GC-IMS Fingerprints of scallop columns with different drying methods

肪族酮类具有类似烤香、花生和土豆气味, 而 2-甲基-3(二氢)-呋喃酮则具有面包、坚果气味[28]。C 区域为 FS 组的特征 VOCs, 包括 2,5-二甲基吡嗪、邻甲酚、苯甲醇、3-庚酮、环戊酮、3-甲基-2-环戊烯-1-酮、丁酸丙酯等, 其中 N-亚硝基甲乙胺具有类似鱼腥和氨味的刺激性气味[29], FS 组呈现高信号强度, 而经干燥后其强度明显降低, 这表明干燥能降低扇贝的不良气味, 提升其风味。

2.2.2　二维谱图分析　GC-IMS 根据化合物的保留以及迁移时间实现对化合物的快速定性, 为了进一步量化 VOCs 的变化趋势, 以 FS 谱图为对照进行背景扣除后得到不同干燥方式下扇贝的二维差异图谱。如图 3 所示, 其中横纵坐标分别代表 VOCs 的迁移时间与保留时间, 而垂直红线则表示反应离子强度峰(RIP), 离子峰两侧的点分别表示不同的 VOCs, 不同大小和颜色深浅的点表示化合物含量的高低, 反映了离子流信号的强弱, 点的面积越大和红色越深则表示化合物的含量越高, 由图可知 4 组样品 VOCs 均存在于迁移时间为 0.5~1 ms 和保留时间 100~500 s 的范围内。当化合物含量与对照相同时呈白色, 高于或低于对照时分别显示红色或蓝色[30]。如图 3 所示, 干燥处理后点的数量明显增多, 颜色变深, 这表明干燥处理增加了挥发性化合物的种类与含量, 其影响程度依次为 ND>HAD>VD, 该结果与电子鼻分析结论一致。

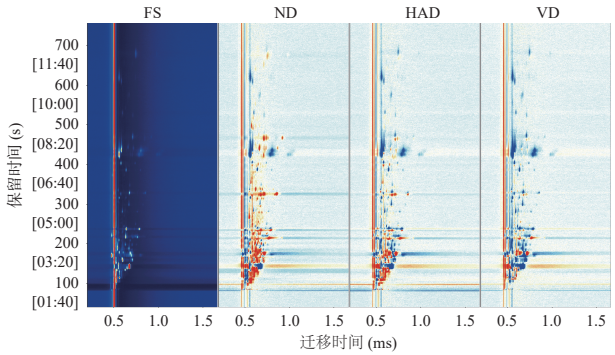


图 3　不同干燥方式扇贝柱 GC-IMS 差异图谱

Fig.3　Differences in GC-IMS spectra of scallop columns with different drying methods

2.3　GC-MS 分析

2.3.1　定性定量分析　GC-MS 结果表明不同干燥方式对扇贝 VOCs 组成具有显著影响, 从 4 组样品共鉴定出 53 种 VOCs, 其中包含醇类 6 种、醛类 7 种、酸类 5 种、酮类 7 种、烃类 15 种、酯类 6 种以及其他化合物 7 种, 如图 4 所示, ND、HAD、VD 分别检出 32、26、16 种 VOCs。利用面积归一化法计算其相对含量结果如表 3 所示。醛类化合物的相对含量由干燥前的 13.79% 分别上升至 18.39%、24.45% 和 19.37%, 其中 HAD 组醛类含量最高, 为 24.45%。醛类化合物主要是由脂肪酸氧化降解形成的, 气味阈值

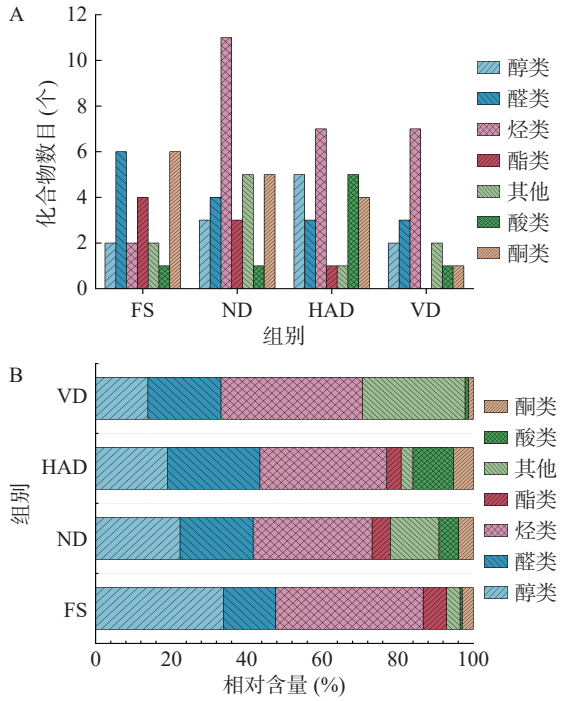


图 4　不同干燥方式扇贝柱 GC-MS 化合物种类分布(A)和相对含量(B)

Fig.4　Distribution of compound species (A) and content (B) of scallop column GC-MS with different drying methods

较低同时带有强烈的烘焙香和花果香味[31]，能够提升干制品的整体香气。除了通过氧化的途径，醛类还可通过美拉德反应产生，PENG 等[32] 研究了不同的烘烤温度，保温时间和水分含量对花生油挥发性成分影响，结果表明随着温度的升高和保温时间的延长，美拉德反应加剧，提升了醛酮类和呋喃类化合物的含量。癸醛和苯甲醛在 4 组样品中均有检出，与对照组相比，扇贝柱中苯甲醛的含量经干燥处理后有不同程度的提升，癸醛带有强烈的柑橘香、脂肪香，由脂肪氧化产生，广泛存在于热加工和油炸食品中[33]，而苯甲醛能赋予食品独特的杏仁、坚果香[34]。

醇类来源于醛酮类物质的还原以及脂质氧化，在 4 组样品中共检出 6 种醇类物质，醇类化合物的含量由干燥前的 33.92% 分别降低至 21.30%、19.09% 和 13.84%(ND、HAD、VD)。VD 组中的含量最低，这可能与 VD 处于真空缺氧的环境有关，减缓了脂类的氧化从而减少了醇类物质的生成，孟令帅等[35] 研究不同干燥方式对红托竹荪复水特性及其品质的影响，结果表明三种干燥方式均造成醇类的损失，其中真空干燥的醇类含量最低，本文研究结果与之类似。1-辛烯-3-醇在 4 组样品中均被检出，其又被称为蘑菇醇，主要呈现蘑菇香，但通常被认为是水产品

表 3　不同干燥方式扇贝挥发性物质组成及相对含量

Table 3　Composition and relative content of volatile substances in scallops with different drying methods

分类	化合物名称	保留时间 (min)	CAS号	相对含量%				气味描述
				FS	ND	HAD	VD	
醇	1-辛烯-3-醇	20.21	3391-86-4	32.70	18.40	15.29	13.16	蘑菇香、泥土香
	1-癸烯-3-醇	27.88	51100-54-0	1.22	1.61	0.61	ND	蘑菇香
	(Z)-2-辛烯-1-醇	24.70	26001-58-1	ND	1.29	ND	ND	–
	2-丁基-1-辛醇	17.48	3913-02-8	ND	ND	0.55	0.68	–
	1-壬醇	26.05	143-8-8	ND	ND	0.92	ND	玫瑰香、油脂香
	1-戊醇	14.42	71-41-0	ND	ND	1.72	ND	面包香、果香
醛	辛醛	15.56	124-13-0	1.60	6.63	3.31	ND	甜橙、蜂蜜香
	壬醛	18.67	124-19-6	5.76	ND	11.16	9.26	脂肪、花香
	2-辛烯醛	19.45	2363-89-5	0.27	ND	ND	ND	肉香、脂肪香
	癸醛	21.54	112-31-2	2.15	3.67	3.70	3.50	蜡香、柑橘香
	苯甲醛	21.81	100-52-7	3.70	4.71	6.28	6.61	杏仁、坚果香
	月桂醛	26.80	112-54-9	0.31	ND	ND	ND	腊香、皂香
	庚醛	12.39	111-71-7	ND	3.38	ND	ND	甜杏、坚果香
酸	壬酸	37.70	112-5-0	0.59	ND	0.23	ND	–
	乙酸	19.71	64-19-7	ND	4.98	0.42	0.89	醋味
	癸酸	35.78	334-48-5	ND	ND	1.07	ND	–
	肉豆蔻酸	41.01	544-63-8	ND	ND	3.88	ND	–
	苯甲酸	46.74	65-85-0	ND	ND	5.14	ND	–
酮	3-辛酮	14.39	106-68-3	0.70	ND	ND	ND	土霉味，蘑菇香
	1-辛烯-3-酮	15.76	4312-99-6	0.86	ND	ND	ND	土壤、蘑菇香
	甲基庚烯酮	16.79	110-93-0	0.18	0.98	1.25	1.28	柑橘、柠檬香
	2-壬酮	18.38	821-55-6	0.14	1.66	2.39	ND	脂香、奶油香
	2-十一酮	24.04	112-12-9	0.46	ND	0.66	ND	蜡香、果香、脂肪香
	香叶基丙酮	30.47	3796-70-1	0.57	0.35	0.94	ND	花香、果香、木香
	2-乙基环戊酮	27.14	4971-18-0	ND	0.69	ND	ND	草本香

续表 3

分类	化合物名称	保留时间（min）	CAS号	相对含量%				气味描述
				FS	ND	HAD	VD	
烃	二甲硫基甲烷	15.24	1618-26-4	0.46	ND	ND	ND	葱蒜、鲜芥菜味
	戊基环丙烷	23.47	2511-91-3	ND	0.42	ND	ND	−
	2,3,3-三甲基-辛烷	10.75	62016-30-2	ND	1.07	2.03	ND	−
	2-溴十二烷	19.96	13187-99-0	ND	1.26	1.62	3.13	−
	十七烷	24.51	629-78-7	ND	1.54	ND	ND	−
	2-甲基-6-丙基-十二烷	12.10	55045-8-4	ND	3.58	ND	ND	−
	十二烷	11.52	112-40-3	ND	4.04	8.51	15.05	−
	十五烷	17.21	629-62-9	ND	4.70	2.68	ND	−
	十四烷	19.19	629-59-4	ND	2.45	1.82	3.35	−
	3-甲基十一烷	12.10	1002-43-3	ND	ND	2.61	4.95	−
	2,6,11-三甲基-十二烷	21.95	629-62-9	ND	ND	−	1.86	−
	3,5,5-三甲基-2-己烯	13.15	112-40-3	38.57	8.66	14.3	7.44	−
	1-十二烯	17.47	112-41-4	ND	0.91	ND	ND	−
	1-十五烯	23.02	13360-61-7	ND	1.32	ND	ND	−
	(Z, Z)-3,5-辛二烯	5.33	7348-80-3	ND	ND	ND	1.69	−
酯	己二酸二异丙酯	30.95	6938-94-9	0.54	ND	ND	ND	−
	戊二醇二异丁酸酯	31.29	6846-50-0	0.62	ND	ND	ND	−
	邻苯二甲酸二异丁酯	36.25	84-69-5	1.30	ND	ND	ND	−
	邻苯二甲酸二丁酯	40.84	84-74-2	3.77	0.90	3.79	ND	−
	2-甲基-3-氧代丁酸甲酯	26.43	17094-21-2	ND	1.61	ND	ND	−
	己酸乙烯基酯	26.82	3050-69-9	ND	2.09	ND	ND	−
其他	苯酚	34.48	108-95-2	0.40	ND	0.19	ND	刺鼻、辛辣味
	2,4-二叔丁基苯酚	39.79	96-76-4	3.14	2.59	2.94	17.56	木香、樟脑味
	2,6-二叔丁基对甲酚	32.35	128-37-0	ND	0.74	ND	ND	−
	对叔戊基苯酚	41.20	80-46-6	ND	1.35	ND	9.60	酚味、皮革味
	2-乙酰基噻唑	24.92	24295-3-2	ND	1.51	ND	ND	烤肉、坚果香
	2,6-二甲基吡嗪	16.47	108-50-9	ND	3.04	ND	ND	烘烤香、可可香
	2,5-二甲基-3-乙基-吡嗪	19.90	13360-65-1	ND	3.73	ND	ND	烤面包、坚果香

注“ND”表示该化合物未检出，化合物气味描述参考查询网站http://www.flavornet.org/index.html.；“−”表示未查到。

中腥味的来源之一[36]，经干燥后其相对含量明显降低，说明干燥在一定程度上能够减少水产品的不良气味，提升其整体的品质，与前文中 GC-IMS 中的研究结论一致。

酮类物质是水产品风味的主要贡献者之一，其阈值较低，对挥发性气味的贡献较大，主要来源于脂肪酸的氧化分解以及氨基酸的转化[37]。2-壬酮作为中长链饱和酮类，带有明显的脂香和奶油香，仅在 ND、HAD 组中检出。甲基庚烯酮经干燥后相对含量具有不同程度的上升，由干燥前的 0.18% 分别提升至 0.98%、1.25% 和 1.28%，其具有清新的柑橘香、柠檬香，通常含量较低，但可作为微量风味物质参与风味的调节[38]。

在其他类物质中 2-乙酰基噻唑、2,6-二甲基吡嗪、2,5-二甲基-3-乙基-吡嗪仅在 ND 组中检出，其中噻唑类物质的形成与含硫氨基酸及羰基化合物的反应密切相关，如美拉德反应和 Strecker 降解，带有肉香和烤香[39]。而吡嗪通常由氨基酸与羰基化合物的缩合、氨基酸热解等形成，具有独特坚果香和烘烤香，二者均为干贝热加工过程中产生的重要风味物质，进一步验证了扇贝柱长期暴露在阳光下，持续氧化的过程中，可能发生了复杂的美拉德和氨基酸降解等反应，导致 ND 组产生独特的风味[40]。

2.4 基于 ROAV 理论鉴别关键性风味物质

挥发性化合物对样品香气的贡献大小除了与其在样品中的含量大小有关，其气味阈值也是决定其风味贡献程度的重要因素[41]。为了进一步探讨 GC-MS 检测结果中各挥发性组分对整体香气的贡献程度，基于 ROAV 理论对干燥扇贝柱中关键性气味物质进行了评估，结果如表 4 所示。相对气味活度值（ROAV）理论用于评估挥发性组分对样品整体香气的贡献程度，ROAV 值越大，对样品的整体香气贡献越大[42]。通常来说 0.1≤ROAV<1 被定义为对整体风味具有修饰作用，而 ROAV 值大于 1 的组分被认为对样品整体风味具有重要贡献[43]。

4 组样品中 1-辛烯-3-醇对扇贝柱气味贡献最大，定义其 $ROAV_{max}$ 为 100，根据已知气味阈值共鉴别出 10 种关键的 VOCs，癸醛和苯甲醛在鲜样及

表 4　不同干燥方式扇贝柱挥发性风味物质 ROAV

Table 4　Volatile flavor substances in scallop columns of different drying methods ROAV

名称	气味阈值(μg/kg)	气味描述	ROAV			
			FS	ND	HAD	VD
庚醛	3	甜杏、坚果香	–	6.12	–	–
辛醛	0.7	甜橙、蜂蜜香	7.00	51.47	30.88	–
癸醛	0.1	蜡香、柑橘香、花香	65.81	199.44	241.99	265.96
苯甲醛	3	杏仁、坚果香	3.77	8.53	13.69	16.74
壬醛	1	柑橘、脂肪、花香	17.62	–	72.99	70.36
1-辛烯-3-酮	0.005	土壤、金属、蘑菇	523.27	–	–	–
香叶基丙酮	0.01	花香、果香、木香	–	190.20	614.78	–
2-壬酮	5	果香、甜香	0.09	1.80	3.13	–
二甲硫基甲烷	0.003	葱蒜、鲜芥菜味	468.94	–	–	–
1-辛烯-3-醇	1	蘑菇味、泥土味	100.00	100.00	100.00	100.00

注：“–”表示未检出，化合物气味描述及阈值大小参考气味查询网站http://www.flavornet.org/index.html。

3 种干燥样品中均被检出，且其 ROAV 远大于 1，在 VD 组中 ROAV 值最大，由此说明二者作为干贝共有关键 VOCs，赋予了 ND、HAD 和 VD 不同程度的花果和坚果香气。根据 ROAV 值大小顺序，在 ND 组中癸醛>香叶基丙酮>辛醛>苯甲醛>庚醛>2-壬酮，共 6 种，因此癸醛呈现的柑橘香、花香是 ND 的主要香气特征；在 HAD 组中，香叶基丙酮>癸醛>壬醛>辛醛>苯甲醛>2-壬酮，共 6 种，因此香叶基丙酮呈现的花果香和木香是 HAD 组的主要香气特征；VD 组中，癸醛>壬醛>苯甲醛，共 3 种，因此 VD 呈现的主要香气特征与 ND 组一致，表现为柑橘香和花香。而 FS 组共有 7 种，以 1-辛烯-3-酮的 ROAV 值(523.27)为最大值。1-辛烯-3-酮的气味阈值较低，带有泥土、金属和蘑菇味，是 FS 组的特征 VOCs。综上，干燥前后扇贝的共同气味特征是花果香和坚果香，其中以 VD 组的气味最强烈，ND、VD 组的特征香味为柑橘香和花香，而 HAD 组的特征香气为花果香和木香。

3　结论

本研究利用电子鼻、GC-IMS、HS-SPME-GC-MS 等技术探究了 3 种干燥方式对墨西哥湾扇贝挥发性物质组成及关键香气成分的影响。结果表明，不同干燥方式对墨西哥湾扇贝的挥发性成分与香气特征具有显著影响，电子鼻能够有效地区分 3 种干燥方式的气味特征，其中 ND 与 HAD 具有部分相近的气味特征。GC-IMS 结果表明 ND 产生更多的 VOCs，如 1-辛烯-3-醇、2-甲基吡啶、2,6-二甲-吡啶、4-甲基噻唑和二甲基三硫等，形成了蘑菇、烘焙和洋葱等特征香气；HAD 和 VD 则以酮类为主，呈现烤香和坚果香。GC-MS 分析显示，干燥增加了醛类含量并降低了醇类含量。基于 ROAV 理论鉴定出癸醛和苯甲醛等 10 种关键香气物质，ND 和 VD 突出柑橘香与花香，而 HAD 则表现为花果香和木香。本研究为干贝风味调控与品质提升提供了理论依据。

© 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] 农业农村部渔业渔政管理局. 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2024[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. Fishery statistical yearbook of China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024.]

[2] 王昊. 岩扇贝与深海扇贝营养成分分析及与三种养殖扇贝的比较[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016. [WANG H. Composition of nutritional composition for Rock Scallop (*Crassadoma gigantea*) and Sea Scallop (*Placopecten magellanicus*) and cultured scallops of three species[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2016.]

[3] 李伟青, 王颉, 孙剑锋, 等. 海湾扇贝营养成分分析及评价[J]. 营养学报, 2011, 33(6): 630−632. [LI W Q, WANG X, SUN J F, et al. The nutrients analysis and evaluation of *Argopectens irradias*[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2011, 33(6): 630−632.]

[4] 赵依凡, 迟海. 干燥技术及其在水产品加工中的应用研究进展[J]. 现代农业科技, 2024(24): 132−136. [ZHAO Y F, CHI H, et al. Research progress on drying technology and its application in aquatic product processing[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(24): 132−136.]

[5] 梁加越, 赵广华, 臧佳辰. 贝类水产品干燥技术研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(11): 257−260. [LIANG J Y, ZHAO G H, ZANG J C. Research progress in drying technology of shellfish aquatic products[J]. Food Industries, 2022, 43(11): 257−260.]

[6] 马晓翠, 王彩蝶, 祖丽比娜·艾尼瓦尔, 等. 巨大芽孢杆菌发酵棉籽粕降解游离棉酚的条件优化及其对代谢物的影响[J]. 中国饲料, 2025(7): 158−166. [MA X C, WANG C D, ZULIBINA ANWR, et al. Optimization of conditions for degradation of free gossypol in cotton meal fermented by *Bacillus megaterium* and its effect on cotton meal metabolites[J]. China Feed, 2025(7): 158−166.]

[7] HUANG Yingyu, LI Haoyu, YU Xinxin, et al. Foodomics-based chemical profiling and signature compound characterization of air-fried potato chips: The effect of thermal processing and fish oil treatment on advancing safety, nutrition, and flavor attributes[J]. Food Bioscience, 2025, 66: 106211.

[8] 李金海, 马怡煊, 裴慧洁, 等. 抗氧化乳酸菌和葡萄球菌接种发酵对广式香肠品质的影响[J/OL]. 食品科学, 1−17[2025-03-31]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20250331.1058.016.html. [LI J H, MA Y X, PEI H J, et al. Effects of co-fermentation

with lactic acid bacteria and staphylococcus with antioxidant activity on the quality of cantonese sausages[J/OL]. Food Science, 1−17[2025-03-31]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20250331.1058.016.html.]

[9] WANG Junyi, WANG Jing, QIAO Lina, et al. From traditional to intelligent, a review of application and progress of sensory analysis in alcoholic beverage industry[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101542.

[10] 安子阳, 黄文, 王益, 等. 智能感官技术在特色农产品品质评价中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(20): 140−148. [AN Z Y, HUANG W, WANG Y, et al. Research progress of intelligent sensory technology in quality evaluation of characteristic agricultural products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(20): 140−148.]

[11] 梁钻好, 陈海强, 梁凤雪, 等. 不同干燥方法对半干金鲳鱼风味及其相关理化指标的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1−13[2025-07-09]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020176. [LIANG Z H, CHEN H Q, LIANG F X, et al. Influence of drying techniques on flavor profile and related physicochemical properties of semi-dried *Trachinotus ovatus*[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−13[2025-07-09]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020176.]

[12] 孟维博, 刘燕, 伍国杰, 等. 不同干燥方法对牡蛎干品质及气味的影响[J]. 食品科技, 2015(6): 174−179. [MENG W B, LIU Y, WU G J, et al. Effect of different drying methods on quality and odour of dried oysters[J]. Food Science and Technology, 2015(6): 174−179.]

[13] 刘静. 基于力学特性介导微观结构演变的扇贝柱热泵干燥品质变化机制[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023. [LIU J. Mechanism of quality changes of scallop adductors during heat pump drying based on microstructure evolution induced by mechanical properties[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.]

[14] 孙丽雯. 栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)干制工艺及流变学特性探讨[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. [SUN L W, Study on the drying processing of zhikong scallop (*Chlamys farreri*) and its rheological characteristic[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.]

[15] 李欣怡, 孙莉, 李智博. 干燥方式对扇贝柱色泽氨基酸组成和多糖抗氧化活性的影响[J]. 农产品加工, 2022(6): 22−25,29. [LI X Y, SUN L, LI Z B, et al. Effects of drying methods on color, amino acid composition and antioxidant activity of polysaccharides in scallop columns[J]. Farm Products Processing, 2022(6): 22−25,29.]

[16] 周莹, 吉宏武, 张泽伟, 等. 虾青素对热风干制凡纳滨对虾香气特性的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(1): 95−102. [ZHOU Y, JI H W, ZHANG Z W, et al. Effect of astaxanthin on aroma characteristics of hot-air-dried *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(1): 95−102.]

[17] 王治军, 杨要芳, 李汉琪, 等. 不同干制工艺对牡蛎干特征气味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 289−298. [WANG Z J, YANG Y F, LI H Q, et al. Effect of different drying processes on characteristic odor of dried oysters[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 289−298.]

[18] WANG Yueyao, TIAN Guifang, MAO Kemin, et al. Effects of four cooking methods on flavor and sensory characteristics of scallop muscle[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1022156.

[19] 吴世宇, 任晓旭, 林心萍, 等. 微生物与谷氨酰胺酶耦合发酵对高盐稀态酱油生物胺和风味特性的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1−11[2025-07-09]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043139. [WU S Y, REN X X, LIN X P, et al. Impact of glutaminase-coupled fermentation with microorganism on biogenic amines and flavor characteristics in high-salt diluted soy sauce[J/OL]. Food and Fermentation Industries,1−11[2025-07-09]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043139.]

[20] GUAN Sihui, YANG Fei, YAO Jinxiao, et al. Dynamic changes in volatile organic compounds of cherry tomato fruits during storage at different temperatures using HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2025, 218: 116790.

[21] 王亚东, 徐昕鋆, 王颖, 等. 箭型固相微萃取-气相色谱-质谱法结合智能电子感官技术分析红纹奶酪的风味品质[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 152−160. [WANG Y D, XU X Y, WANG Y, et al. Analysis of flavor quality of red cheese by solid phase microextraction arrow-gas chromatography-mass spectrometry combined with intelligent electronic sensory techniques[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 152−160.]

[22] 李瑞丽, 赵俊俊, 戴水平, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和电子鼻技术分析烘焙温度对菊苣根提取物挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 311−321. [LI R L, ZHAO J J, DAI S P, et al. Effect of roasting temperature on volatile components of chicory root extract analyzed by hs-spme-gc-ms and electronic nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 311−321.]

[23] CHEN Xiaoying, SHI Jiazhou, YAN Yonggang, et al. Detection of volatile organic compounds in Far farae *Flos* using HS-GC-IMS across different flower colors[J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102227.

[24] XIAO Zuobing, LIU Longxue, NIU Yunwei, et al. Mushroom alcohol(1-octen-3-ol)and other 7 aroma compounds selected from Chinese dry-cured hams can enhance saltiness perception[J]. Meat Science, 2024, 208: 109398.

[25] 涂超逸, 邹思瑾, 袁方. 美拉德反应中间体对代糖面包风味和色泽品质改善效果评价[J/OL]. 食品科学, 1−13[2025-03-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20250310.1622.012.html. [TU C Y, ZOU S J, YUAN F, et al. Effects of maillard reaction intermediates on improving the flavor and color quality of sugar-substituted breads[J/OL]. Food Science, 1−13[2025-03-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20250310.1622.012.html.]

[26] 殷运菊, 郭秋平, 方正锋, 等. 氨基酸的呈味机制及其对肉品风味的影响研究进展[J/OL]. 中国畜牧杂志, 1−16[2025-03-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2083.S.20250313.0921.002.html. [YING Y J, GUO Q P, FANG Z F, et al. Research progress on amino acid flavor mechanism and its impact on meat flavor[J/OL] Chinese Journal of Animal Science, 1−16[2025-03-24]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2083.S.20250313.0921.002.html.]

[27] 崔明仙, 李妍, 付晴晴, 等. 三种扇贝挥发性风味物质指纹图谱分析[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(3): 743−758. [CUI M X, LI Y, FU Q Q, et al. Fingerpring analysis of volatitle flavor compounds in three scallops of *Argopecten Irradlans, Chlamys Farreri* and *Patinopecten Yessoensis*[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2022, 53(3): 743−758.]

[28] 牛逍瞳, 马燕, 张健, 等. 超高压杀菌对低脂核桃酱品质的影响及其货架期预测[J/OL]. 食品工业科技, 1−23[2025-09-12]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025050033. [NIU X T, MA Y, ZHANG J, et al. Effect of ultra-high pressure sterilization on the quality of low-fat walnut sauce and its shelf life prediction[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−23[2025-09-12]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025050033.]

[29] 张钦华, 洪婉馨, 胡知文, 等. 藻类腥味智能检测与脱腥策略

的研究进展[J/OL]. 食品研究与开发，1−14[2025-04-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1231.TS.20250218.1121.002.html.［ZHANG Q H, HONG W X, HU Z W, et al. Advances in intelligent detection and deodorization strategies for fishy odor in algae[J/OL]. Food Research and Development, 1−14[2025-04-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1231.TS.20250218.1121.002.html.］

［30］ 栗紫慧, 曲映红, 施文正, 等. 利用顶空-气相色谱-离子迁移谱结合电子鼻分析黑鱼蒸制过程中挥发性风味物质的变化[J]. 食品与发酵工业，2025, 51(1): 322−329.［LI Z H, QU Y H, SHI W Z, et al. Evaluation of aroma characteristics in snakehead fish (*Channa argus*) during steaming using an HS-GC-IMS and E-nose[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 322−329.］

［31］ ZHOU Zheng, WANG Bo, WANG Liang, et al. Unraveling the lipid photooxidation reactions in salmon oil under different light wavelength conditions via omics approaches[J]. Food Chemistry, 2025, 488: 144867.

［32］ PENG Zekang, ZHANG Yue, XU Chao, et al. Effect of novel radio frequency roasting on color appearance, volatile compounds, fatty acid composition, and storage stability of peanut oil[J]. Food Chemistry, 2025, 485: 144534.

［33］ YU Ligang, PANG Ying, SHEN Guang, et al. Identification and selection of volatile compounds derived from lipid oxidation as indicators for quality deterioration of frozen white meat and red meat using HS-SPME-GC–MS combined with OPLS-DA[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141112.

［34］ NIU Jialiang, LIU Ruiqi, LI Weiwei, et al. Characterize and explore the dynamic changes in the volatility profiles of sauce-flavor Baijiu during different rounds by GC-IMS, GC–MS and GC×GC–MS combined with machine learning[J]. Food Research International, 2025, 213: 116568.

［35］ 孟令帅, 聂玉, 雷燕, 等. 不同干燥方式对红托竹荪复水特性及其品质的影响[J]. 食品科技，2024, 49(10): 68−77.［MENG L S, NIE Y, LEI Y, et al. Effects of different drying methods on rehydration characteristics and quality of *Dictyophora rubrovolvata*[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(10): 68−77.］

［36］ 范霖澳, 陈婷茹, 陈继承, 等. 嫩芽海带在冻干汤块加工过程中挥发性风味物质变化[J/OL]. 食品工业科技，1−25[2025-07-09]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020023.［FAN L A, CHEN T R, CHEN J C, et al. Changes in volatile flavor compounds of tender kelp during the processing of freeze-dried soup cubes[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−25[2025-07-09]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025020023.］

［37］ GUO Cheng, ZHANG Dongmei, DONG Huilong, et al. Exploration of flavor profile and stability of pork skull soup under different high pressure boiling times[J]. Lwt, 2025, 225: 117908.

［38］ DAI Yixin, SUN Shuang, YANG Fan, et al. Revealing volatile odor compounds in watermelon juice to enhance fructose sweetness perception: Sensory evaluation and molecular docking techniques[J]. Foods, 2025, 14(6): 1034.

［39］ 陈艳琳, 王修俊, 包欢欢, 等. 低盐咸蛋黄在加工过程中风味物质的变化分析[J/OL]. 中国食品学报，1−9[2025-07-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.ts.20250610.1536.012.html.［CHEN Y L, WANG X J, BAO H H, et al. Analysis of changes of flavor compounds in low-salt salted egg yolk during processing[J/OL]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 1−9[2025-07-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4528.ts.20250610.1536.012.html.］

［40］ 康新玥, 郭莹, 秦立芹, 等. 不同地区酱香型高温大曲制曲过程理化指标及挥发性风味化合物分析[J]. 中国酿造，2025, 44(6): 116−122.［KANG X Y, GUO Y, QIN L Q, et al. Analysis of physiochemical indicators and volatile flavor compounds in the process of sauce-flavor high-temperature Daqu in different regions[J]. China Brewing, 2025, 44(6): 116−122.］

［41］ ZHANG Wei, DONG Xiaoyuan, CHEN Mei, et al. Flavor composition analysis of light-aroma liquor of yellow crane tower based on GC×GC-TOFMS[J]. Food Analytical Methods, 2025, 18(7): 1371−1383.

［42］ YANG Yuxia, CHEN Jing, ZHENG Fengjin, et al. Assessment of characteristic flavor and taste quality of sugarcane wine fermented with different cultivars of sugarcane[J]. Fermentation, 2024, 10(12): 628.

［43］ ZHOU Lei, ZHENG Wei, SUI Yong, et al. Characterization of volatile organic compounds in selenium-enriched brown rice tea of different colors using E-nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Lwt, 2025, 224: 117830.