



食品与发酵工业

Food and Fermentation Industries

ISSN 0253-990X, CN 11-1802/TS

《食品与发酵工业》网络首发论文

题目：不同干制工艺对牡蛎干特征气味的影响
作者：王治军，杨要芳，李汉琪，陈忠琴，高加龙，郑惠娜，林海生，秦小明，曹文红
DOI：10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036597
收稿日期：2023-06-27
网络首发日期：2023-09-13
引用格式：王治军，杨要芳，李汉琪，陈忠琴，高加龙，郑惠娜，林海生，秦小明，曹文红. 不同干制工艺对牡蛎干特征气味的影响[J/OL]. 食品与发酵工业. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036597>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

不同干制工艺对牡蛎干特征气味的影响

王治军¹, 杨要芳¹, 李汉琪¹, 陈忠琴^{1,2}, 高加龙^{1,2}, 郑惠娜^{1,2}, 林海生^{1,2}, 秦小明^{1,2}, 曹文红^{1,2}✉

1 (广东海洋大学 食品科技学院, 国家贝类加工技术研发分中心(湛江), 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东省海洋生物制品工程实验室, 广东 湛江, 524088)

2 (海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 大连工业大学, 辽宁 大连, 116034)

*通信作者 曹文红, 教授为通信作者, E-mail: cchunlin@163.com

摘要 为探究不同干制工艺对牡蛎干特征气味的影响及其形成机制, 该研究以焯水牡蛎为对照(CK), 研究了真空冷冻干制(vacuum freeze drying, VFD)、热风干制(hot air drying, HAD)、真空干制(vacuum drying, VD)、自然晒干(solar drying, SD) 4种干制工艺对牡蛎干脂肪酸组成和挥发性物质的影响。结果表明, 牡蛎干干制加工后脂肪酸含量显著减少($P < 0.05$), VFD、VD、SD、HAD组总脂肪酸含量分别减少19.45%、49.27%、27.69%、46.63%, 其中饱和脂肪酸减少21.39%~45.17%, 不饱和脂肪酸减少20.66%~52.21%。电子鼻结果显示5组样品的香气特征明显不同, 高温干制(HAD、VD)显著增加了氮氧化合物的浓度。采用气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)从5组样品中鉴别出71种挥发性化合物, 主成分分析和指纹图谱表明5组样品的挥发性物质存在显著差异, 通过偏最小二乘回归模型(partial least squares regression model, PLS-DA)和变量投影重要度(variable importance for the projection, VIP)筛选了31种差异性挥发性化合物, 包括庚醛、丁醛、2-甲基-2-戊烯醛、2-庚酮、1-戊烯-3-酮、2-丁酮、1-辛烯-3-醇等, Pearson相关性分析表明, 游离脂肪酸中的C15:0、C16:1、C16:0、C18:3、C18:4、C20:0、C20:1、C20:2与牡蛎干中的多种特征挥发性化合物的形成密切相关。

关键词 干制工艺; 脂肪酸; 气味; 牡蛎干; 化学计量学

DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036597

Effect of different drying processes on characteristic odor of dried oysters

WANG Zhijun¹, YANG Yaofang¹, LI Hanqi¹, CHEN Zhongqin^{1,2}, GAO Jialong^{1,2}, ZHENG Huina^{1,2}, LIN Haisheng^{1,2}, QIN Xiaoming^{1,2}, CAO Wenhong^{1,2}✉

(1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, National Research and Development Branch Center for Shellfish Processing (Zhanjiang), Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Zhanjiang 524088, China; 2.Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract To investigate the effects of different drying methods on the characteristic volatile flavors of dried oysters and their formation mechanisms, this study investigated the effects of vacuum freeze drying (VFD), hot air drying (HAD), vacuum drying (VD), and natural sun drying (SD) on the fatty acid composition and volatile compounds of dried oysters and service blanched oyster as a control (CK). Results showed that the fatty acid content of oysters was decreased after dry processing ($P < 0.05$), and the total fatty acid content was decreased by 19.45%, 49.27%, 27.69%, and 46.63% in the VFD, VD, SD, and HAD groups, respectively. Among them, saturated fatty acids were reduced by 21.39% to 45.17% and unsaturated fatty acids by 20.66% to 52.21%. The electronic nose results showed that the aroma characteristics of 5 groups of oysters were significantly different, and the high-temperature dry processing (HAD and VD) increased the concentration of nitrogen oxides

收稿日期: 2023-06-27

基金项目: 湛江市科技计划项目(2022A05038); 国家贝类产业技术体系(CARS-49)

作者简介: 王治军, 硕士研究生

网络首发时间: 2023-09-13 17:17:34 网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1802.TS.20230912.1635.003>

($P < 0.05$). 71 kinds of volatile compounds were identified from 5 groups of oysters via gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), and the principal component and fingerprinting analysis showed that volatile compounds of 5 groups of oysters were different significantly, and volatile compounds were identified by partial least squares regression model (PLS-DA) and variable importance projection (VIP) to screen 31 kinds of volatile compounds, including heptanal, butanal, 2-methyl-2-pentenal, 2-heptanone, 1-penten-3-one, 2-butanone, 1-octen-3-ol, etc. Various characteristic volatile compounds in dried oysters were closely related to the free fatty acids ($C_{15:0}$, $C_{16:1}$, $C_{16:0}$, $C_{18:3}$, $C_{18:4}$, $C_{20:0}$, $C_{20:1}$, and $C_{20:2}$) using Pearson correlation analysis.

Key words drying technologies; fatty acids; odor; dried oysters; chemometric analysis

牡蛎是世界上养殖规模最大的海洋贝类, 根据《中国渔业统计年鉴》^[1], 2021 年中国牡蛎养殖产量达 581.91×10^4 吨, 约占世界牡蛎养殖产量的 86%^[2-3]。牡蛎营养丰富、味道鲜美, 深受全球消费者的青睐^[4-5]。但是牡蛎的高水分含量和丰富的营养成分导致其在生产、运输、销售过程中极易因微生物、温度等外部环境的影响而变质, 从而失去食用价值。因此, 在中国和亚洲其他国家, 人们通过干制加工来延长牡蛎的保质期。干制加工不但可以延长保质期, 减少运输成本和因销售不合时宜造成的损失, 还生产出具有特殊风味的牡蛎干制产品。在中国市场, 牡蛎干以其独特的口感和风味普遍受到消费者的认可, 是广东人逢年过节餐桌上不可或缺的菜肴。

传统的牡蛎干制工艺主要以自然晒干 (solar drying, SD) 为主, 但该方法存在产品质量低、干制效率慢、条件不受控制等缺点, 近年来为了提高干制效率和产品质量开发了热风干制 (hot air drying, HAD)、真空冷冻干制 (vacuum freeze drying, VFD)、真空干制 (vacuum drying, VD)^[6-8]。但不同干制工艺因干制条件 (温度、 O_2 、干制时间) 的不同, 对脂肪氧化、蛋白质降解、氨基酸代谢等生理生化反应有不同程度的影响, 从而产生不同的气味物质^[6, 7, 9-10]。香气在决定干制产品的质量和消费者接受度方面起着重要作用^[11]。

脂质作为挥发性物质的重要前体物, 其在干制过程中的氧化降解是水产干制品特征香气形成的主要途径, 不饱和脂肪酸是发生热降解的主要脂肪酸^[11-12], 在干制过程中不饱和脂肪酸从脂质中释放出来进一步氧化成醛、酮、醇等挥发性物质, 该类物质通常阈值较低, 对产品的气味品质有显著影响^[13]。ZHENG 等^[11]研究发现磷脂能促进虾干中吡嗪类、醛类等芳香族化合物的形成。WANG 等^[14]在金鲳鱼中鉴定出 95 种挥发性化合物, 其中 54.74% 的化合物与脂质氧化相关, 特征香气成分戊醛、己醛、1-辛烯-3-醇等与油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸的水平呈正相关。KE 等^[15]发现干腌鱼的特征挥发性风味物质 1-辛烯-3-醇、正己醛、庚醛、辛醛、2, 4-癸二烯醛、1-辛烯-3-酮等主要由脂肪酸氧化产生。综上所述, 脂质在干制过程中的氧化降解对水产干制品特征气味的形成有重要作用。

基于此, 本文以香港牡蛎 (*Crassostrea hongkongensis*) 为对象, 研究 SD、VFD、VD、HAD 四种干制工艺对牡蛎干气味和脂肪酸组成的影响, 并结合多元化分析明确脂肪酸与特征气味变化的相互关系, 为牡蛎干制产品的标准化生产提供技术支撑和水产干制品的风味调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

VOS-210C 型真空干燥器, 上海爱朗仪器有限公司; LGJ-12 型真空冷冻干燥机, 北京松源华兴科技发展有限公司; GZX-9140MBE 型电热鼓风干燥箱, 上海博迅医疗生物仪器有限公司; PEN3 型电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; Inert Cap®Pure-WAX 石英毛细柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μ m)、TQ8050NX 型气相色谱-质谱联用仪, 日本岛津公司。

37 种脂肪酸混合标准品, 美国 Sigma 公司; 三氯甲烷 (分析纯)、甲醇 (色谱纯)、正己烷 (色谱纯), 国药集团化学试剂有限公司; 十九烷酸标准品, 上海源叶生物科技有限公司; 14%BF₃-CH₃OH 溶液, 美国 Supelco 公司, 氯化钠、氢氧化钠、硫酸钠均为分析纯。

1.2 样品处理

牡蛎购自湛江霞山海鲜批发市场, 将新鲜牡蛎储存在装有冰块的泡沫盒中, 并在 1 h 内运往实验

室。去壳(用蚝刀撬开上壳,切断闭壳肌,取出牡蛎肉),选择大小均匀、质量为 $25\text{ g} \pm 2\text{ g}$ 的牡蛎肉,清洁,在 5%NaCl 溶液(1:5, w/v)中漂烫 1 min[水分含量 = $(76 \pm 0.5)\%$],漂烫的牡蛎用以下 4 种工艺进行干制,直至水分含量为 $(20 \pm 2)\%$ 。HAD:样品平铺于 $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的鼓风干燥箱中,风速为 1 m/s,干制 660 min。VD:样品平铺于 $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的真空干燥箱中,真空度为 0.08 MPa,干制 720 min。VFD:样品在 -80°C 预冷冻 6 h 后,置于真空冷冻干燥室,冷阱温度 -50°C ,真空度 10 Pa,干制 960 min。SD:样品平铺于竹编中,置于阳光下,温度 $(33 \pm 3)^\circ\text{C}$,晒制 28 h。

1.3 实验方法

1.3.1 电子鼻分析

参考周莹等^[16]的方法并稍作修改,称取 2.00 g 样品于 20 mL 顶空进样瓶中,立即用顶空瓶盖密封,于室温下平衡 30 min 后,使用 PEN3 电子鼻对样品进行检测。测定条件为:进样流速 300 mL/min,传感器自清洗时间 120 s,采集时间 120 s,选取信号稳定的 55~59 s 为信号采集时间,每组样品做 3 次平行重复测定。

1.3.2 脂肪酸分析

称取 5 g 干样或 10 g 鲜样,加入 100 mL V(氯仿):V(甲醇)=2:1,于 4°C 冰箱中避光静置提取 24 h,过滤,向滤液中加 30 mL MgCl_2 溶液(0.03 mol/L),混匀后静置 4 h,收集下层氯仿层于 30°C 旋转蒸发仪中浓缩,待溶剂完全蒸发后,加入 5 mL 氢氧化钠-甲醇溶液(0.5 mol/L),再加入 100 μL 10 mg/mL 十九烷酸作为内标,于 100°C 油浴中冷凝回流 10 min,加入 3 mL 14% $\text{BF}_3\text{-CH}_3\text{OH}$ 溶液反应 3 min,再加入 2 mL 正己烷溶液,回流萃取 2 min,冷却至室温后,加入 10 mL 饱和氯化钠溶液,混匀后静置,待分层后,收集上层并加入少量的无水硫酸钠脱去残余水分,用 0.22 μm 有机相滤膜过滤后进行 GC-MS 分析。

GC-MS 条件:GC 条件:色谱柱:Pure-WAX 石英毛细柱($30\text{ m} \times 0.25\text{ mm}$, $0.25\text{ }\mu\text{m}$),载气流速 1.0 mL/min,分流比 50:1,进样口温度: 250°C ,进样量:1 μL 。升温程序:起始柱温: 80°C ,保持 3 min,以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升至 160°C ,保持 5 min,然后以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升至 250°C ,保持 5 min。MS 条件:EI 离子源,电子能量 70 eV,接口温度 250°C ,离子源温度 230°C ,m/z 扫描范围 33~550。

1.3.3 GC-IMS 分析

称取 2 g(干基计)样品于 20 mL 顶空瓶中,在 60°C 下以 500 r/min 孵育 10 min,通过 1 mL 气密加热注射器将 500 μL 顶空样品以不分流模式注入自动进样器中,进样温度: 80°C 。色谱柱:MTX-5($15\text{ m} \times 0.53\text{ mm}$,美国 RESTEK 公司),柱温: 60°C ,载气/漂移气为氮气(纯度 $\geq 99.999\%$)。载气流速程序:0~2 min 为 2 mL/min,2~25 min 线性增加至 100 mL/min,并保持至 30 min。IMS 在温度 45°C 和流速 150 mL/min 条件下运行。在相同条件下以 C4-C9 正酮类化合物为外标,计算各挥发性化合物的保留指数(retention index, RI),将 RI 和漂移时间与 IMS 数据库的信息进行对比,结合参考文献对挥发性化合物定性。

1.4 数据分析

使用 IBM SPSS Statistics 26 (SPSS Corp, Chicago, USA) 软件进行显著性分析($P < 0.05$),使用 Microsoft Excel 2019 软件计算平均值和标准偏差,数值以平均值 $\pm$ 标准差形式表示, SIMCA 14.1 用于偏最小二乘法判别分析(partial minimum quads-discriminant analysis, PLS-DA), Origin 2021 用于绘图。

2 结果与分析

2.1 脂肪酸分析

表 1 为不同干制工艺下牡蛎干的脂肪酸组成分析,由表可知,牡蛎中不饱和脂肪酸含量显著高于饱和脂肪酸含量($P < 0.05$),其中,棕榈酸($\text{C}_{16:0}$)、油酸($\text{C}_{18:1}$)、DHA($\text{C}_{22:6}$)分别是含量最高

的饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸,该结果与 Wang 等^[5]在太平洋牡蛎中的研究结果一致。牡蛎经干制加工后脂肪酸含量显著减少 ($P<0.05$), VFD、VD、SD、HAD 组总脂肪酸含量较 CK 组分别减少 19.45%、49.27%、27.69%、46.63%,其中饱和脂肪酸减少 21.39%~45.17%,不饱和脂肪酸减少 20.66%~52.21%。脂肪酸作为气味物质的重要前体物,在干制加工过程中被氧化降解成醛、酮、醇等小分子挥发性物质^[14,17], Li 等^[18]研究发现己醛、癸醛、苯甲醛、(Z)-2-庚烯醛、(E)-2-辛烯醛、2-戊基呋喃、(E,E)-2,4-癸二烯醛等挥发性化合物是 $C_{18:1}$ 、 $C_{18:2}$ 、 $C_{18:3}$ 的降解产物。此外,干制工艺对牡蛎干的脂肪酸组成有显著影响, VFD 组脂肪酸含量显著高于高温干制组 (HAD、VD),表明高温促进了脂质的氧化降解,该结果与 WANG 等^[19]的研究结果一致。

表1不同干制工艺下牡蛎干的脂肪酸组成分析 单位: mg/100 g, 干基计
Table 1 Fatty acid composition of dried oysters under different drying technologies

脂肪酸	CK	VFD	VD	SD	HAD
$C_{12:0}$	2.30±0.13 ^a	ND	1.50±0.01 ^c	2.00±0.02 ^b	1.50±0.05 ^c
$C_{13:0}$	2.60±0.16 ^a	0.40±0.07 ^d	1.40±0.12 ^c	1.90±0.05 ^b	1.70±0.06 ^b
$C_{14:0}$	0.50±0.05 ^c	32.10±0.16 ^a	0.60±0.19 ^c	0.80±0.06 ^{bc}	0.90±0.03 ^b
$C_{14:1}$	3.20±0.83 ^a	0.80±0.28 ^c	1.60±0.47 ^b	2.80±0.46 ^a	0.90±0.43 ^{bc}
$C_{15:0}$	85.80±5.25 ^a	73.30±2.64 ^b	51.20±4.20 ^c	76.00±2.77 ^b	57.00±3.06 ^c
$C_{16:0}$	1 366.60±65.01 ^a	1 155.70±31.56 ^b	748.20±16.14 ^d	979.00±31.65 ^c	687.90±20.54 ^c
$C_{16:1}$	446.20±19.39 ^a	250.30±15.83 ^b	92.80±8.85 ^d	238.00±3.08 ^b	162.30±2.01 ^c
$C_{17:1}$	33.60±1.95 ^a	8.00±0.68 ^b	5.50±0.25 ^c	29.70±1.27 ^a	7.80±0.64 ^b
$C_{18:0}$	506.60±34.74 ^a	445.60±19.87 ^b	313.00±14.70 ^{cd}	286.60±17.27 ^d	325.50±18.86 ^c
$C_{18:1}$	1 078.00±60.82 ^a	976.70±10.05 ^a	524.80±15.48 ^d	885.5±31.24 ^b	680.30±16.97 ^c
$C_{18:3}$	255.50±6.38 ^a	235.00±4.59 ^b	79.70±4.68 ^d	210.60±1.14 ^c	27.40±1.15 ^c
$C_{18:4}$	274.40±9.44 ^a	156.60±21.73 ^b	86.20±1.34 ^d	168.70±1.87 ^b	114.40±5.84 ^c
$C_{20:0}$	171.20±6.98 ^a	14.40±4.48 ^d	123.00±4.06 ^c	189.40±6.41 ^a	146.30±3.14 ^b
$C_{20:1}$	605.60±15.18 ^a	556.80±7.25 ^b	459.40±12.00 ^c	414.5±28.27 ^d	429.3±1.20 ^d
$C_{20:3}$	67.20±4.51 ^a	44.41±12.92 ^c	22.80±0.74 ^d	56.22±3.01 ^b	40.62±3.18 ^c
$C_{20:4 n-6}$	9.70±2.90 ^a	5.73±0.98 ^b	2.80±0.42 ^d	ND	4.10±0.16 ^c
$C_{20:4 n-3}$	1.20±0.13 ^b	53.13±19.72 ^a	ND	ND	1.30±0.13 ^b
$C_{20:5(EPA)}$	238.52±3.86 ^a	175.90±0.18 ^d	88.21±6.33 ^c	103.20±10.40 ^b	95.30±2.56 ^c
$C_{22:0}$	132.20±3.00 ^a	60.80±3.99 ^b	25.61±3.16 ^{cd}	31.70±5.87 ^c	22.50±3.32 ^d
$C_{22:2}$	74.91±7.95 ^a	45.80±1.47 ^b	42.30±9.23 ^b	78.20±6.86 ^a	77.70±1.99 ^a
$C_{22:6(DHA)}$	769.60±28.58 ^a	642.30±6.49 ^b	437.00±19.22 ^d	574.2±17.96 ^c	402.7±13.28 ^d
单不饱和脂肪酸	2 166.60±98.17 ^a	1 792.60±34.09 ^b	1 084.10±37.05 ^c	1 570.50±64.32 ^c	1 280.60±21.25 ^d
多不饱和脂肪酸	1 691.03±63.75 ^a	1 358.87±68.08 ^c	759.01±41.96 ^d	1 291.12±41.18 ^b	763.52±28.29 ^d
饱和脂肪酸	2 267.80±115.32 ^a	1 782.30±62.77 ^b	1 264.51±42.58 ^d	1 567.40±64.10 ^c	1 243.30±49.06 ^d
总脂肪酸	6 125.43±277.24 ^a	4 933.77±164.94 ^b	3 107.62±121.59 ^c	4 329.02±169.60 ^b	3 287.42±98.60 ^c

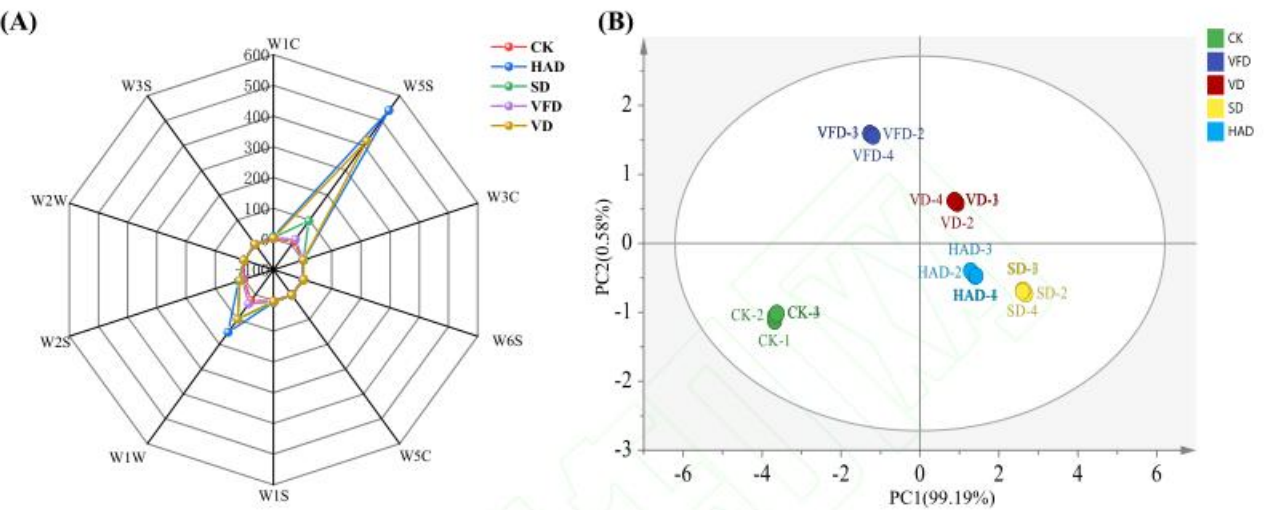
注: ND: 未检出; 同行不同小写字母表示样品间具有显著性差异 ($P<0.05$)。

2.2 电子鼻分析

如图 1-A 所示,不同干制工艺下牡蛎干的雷达指纹轮廓相似,所有样品在 W5S 传感器的响应值最高,其次是 W1W 传感器,其余传感器的检测值较小,表明焯水牡蛎和牡蛎干的特征气味物质主要为氮化合物和含硫化合物,该结果与前人研究结果一致^[5, 20],据报道太平洋牡蛎中醛类物质含量很高,且该类物质阈值较低,因此对牡蛎的气味特征影响较大。此外,不同样品的电子鼻响应值存在显著差异 ($P<0.05$),干制组 (HAD、VD、SD、VFD) 的信号值显著高于 CK 组,其中 HAD 组与 CK 组差异最大, VFD 组与 CK 组差异最小。信号值的高低与样品中挥发性物质的浓度相关,牡蛎中不饱和脂肪酸含量丰富^[5,21],在干制过程中脂肪酸被氧化降解成醛、酮、醇、酸等化合物,但不同于

制工艺因干制条件不同，对脂质的氧化降解有不同程度的影响，导致不同干制工艺下牡蛎干的挥发性物质存在差异^[6]。ZHU 等^[22]研究了不同干制方式对河豚鱼片风味的影响，结果表明 HAD 比其他干制方式产生更多的挥发性物质，提升了鱼片产品的香气属性。

为了进一步区分不同牡蛎干香气特征的差异，对电子鼻数据进行 PCA 分析。结果如图 1-B 所示，PC1 贡献率为 99.19%，PC2 贡献率为 0.58%，累积贡献率为 99.77%，基本涵盖样本的所有信息，该结果能够准确反映原始样本的特征。5 组样品分布于 4 个不同象限内且样品之间距离较远，表明不同干制工艺对牡蛎干的挥发性成分有显著影响。



A-电子鼻响应值；B-主成分分析

图 1 不同干制工艺下牡蛎干的电子鼻响应值和主成分分析
Fig. 1 E-nose response values and principal component analysis of dried oysters under different drying technologies

2.3 挥发性物质分析

2.3.1 GC-IMS 谱图分析

采用 GC-IMS 对样品中的挥发性物质进行了分析，为了方便比较不同样品的异同，采用了差异对比模式得到了不同干制工艺下牡蛎干挥发性物质的 GC-IMS 二维差异对比图谱（图 2），即选取 CK 组的谱图作为参照，其他样品的谱图扣减参照，如果二者挥发性物质一致，则扣减后的背景为白色，而红色点代表该物质的含量高于参照样品，蓝色点表示低于参照样品^[23]。由图可知，不同样品的挥发性成分的特征谱图存在显著差异，谱图变化较大的是在保留时间 100~300 s（绿色圈内），与 CK 相比，干制组（VFD、VD、SD、HAD）气味物质特征峰的数量和特征峰信号强度均显著增加，此外，干制工艺对牡蛎干的挥发性成分有显著影响，热干制组（VD、SD、HAD）谱图中红色点显著高于冷干制组（VFD），且 VD、SD、HAD 组的谱图也存在差异（绿色圈内），表明干制加工的温度是影响产品气味的关键因素^[7]，高温干制促进了脂质的氧化降解，增加了干制品中挥发性物质的浓度从而提升了感官属性的丰富度，对于干制产品风味品质的提升有积极作用，该结果与电子鼻、脂肪酸的测定结果一致。

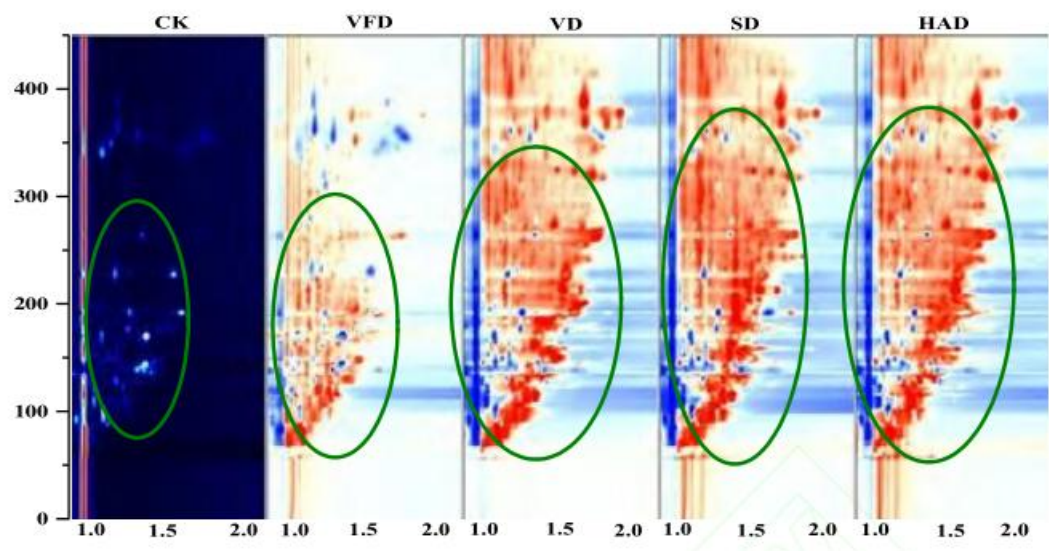


图 2 不同干制工艺下牡蛎干挥发性物质的 GC-IMS (二维) 谱图
Fig.2 GC-IMS (two-dimensional) spectra of dried oyster volatiles under different drying technologies

2.3.2 挥发性物质的定性定量分析

GC-IMS 主要是以正酮 C4-C9 为外标, 通过计算各挥发性物质的 RI 并与仪器的 IMS 数据库和 NIST 数据库匹配, 再结合保留时间和迁移时间实现对挥发性物质的定性分析^[23]。由表 2 可知, 在 5 组样品中共鉴别出 71 种单体或二聚体挥发性物质, 其中醇类 16 种、呋喃类 7 种、醚类 2 种、醛类 24 种、酸类 3 种、酮类 10 种、酯类 5 种、其他化合物 4 种。

表2 不同干制工艺下牡蛎干挥发性物质的相对含量和光谱参数
Table 2 Relative content and spectral parameters of dried oyster volatiles under different drying technologies

中文名称	英文名称	DT	RI	RT	相对含量/%				
					CK	VFD	VD	SD	HAD
顺-3-壬烯醇	(Z)-3-nonen-1-ol	1.053 56	1 159.9	655.20	3.09±0.01 a	0.22±0.0 3 ^d	0.68±0.05 ^c	0.61±0.05 ^c	0.82±0.04 ^b
1-辛烯-3-醇 (D)	Oct-1-en-3-ol-M	1.371 85	985.8	358.85	2.56±0.04 a	2.16±0.0 1 ^b	1.16±0.04 ^c d	1.12±0.04 ^d	1.35±0.06 ^c
3-呋喃甲醇	3-Furanmethanol	1.157 58	977	349.57	3.49±0.04 a	2.81±0.0 4 ^b	1.21±0.02 ^c	1.15±0.02 ^d	1.26±0.03 ^c
1-戊醇 (D)	Pentan-1-ol-M	1.108 11	764.7	197.73	2.21±0.16 a	1.56±0.0 6 ^b	0.14±0.01 ^c	0.14±0.02 ^c	0.11±0.02 ^d
丙醇	1-Propanol	1.253 83	549.2	125.48	0.74±0.06 b	0.63±0.0 2 ^c	0.96±0.02 ^a	0.40±0.02 ^d	0.66±0.02 ^c
3-辛醇	3-Octanol	1.263 79	1 007.5	384.91	0.90±0.07 d	2.17±0.0 9 ^a	1.44±0.05 ^c	1.51±0.05 ^c	1.89±0.08 ^b
正丁醇	1-Butanol	1.406 4	663.7	155.83	0.13±0.02 d	0.72±0.0 3 ^c	0.95±0.07 ^b	0.99±0.01 ^b	1.18±0.02 ^a
糠醇 (M)	2-Furanmethanol-M	1.378 06	837.9	237.24	0.08±0.01 d	0.17±0.0 3 ^c	0.30±0.02 ^b	1.95±0.02 ^a	0.30±0.02 ^b
糠醇 (D)	2-Furanmethanol-N	1.361 97	866.4	254.63	0.05±0.01 c	0.06±0.0 1 ^b	0.05±0.01 ^c	0.84±0.01 ^a	0.05±0.01 ^c
1-辛烯-3-醇 (M)	Oct-1-en-3-ol-D	1.364 17	984.5	357.45	0.84±0.03 a	0.44±0.0 1 ^d	0.49±0.02 ^c	0.50±0.01 ^c	0.62±0.04 ^b
5-甲基-2-呋喃甲醇	5-Methyl-2-furanmethanol	1.593 74	961.1	333.38	0.04±0.01 c	0.04±0.0 2 ^c	0.50±0.02 ^b	0.51±0.01 ^b	0.56±0.01 ^a
1-戊醇 (M)	Pentan-1-ol-D	1.560 47	762.5	196.64	0.66±0.09 a	0.62±0.0 1 ^a	0.14±0.01 ^d	0.18±0.01 ^b	0.15±0.01 ^c
芳樟醇	Linalool	1.515 57	1 099	529.85	0.17±0.01 d	1.17±0.0 2 ^a	0.69±0.01 ^c	1.04±0.01 ^b	1.00±0.03 ^b
二氢月桂烯醇	Dihydromyrcenol	1.224 31	1 074.6	486.57	0.25±0.02 c	1.44±0.0 4 ^b	1.06±0.02 ^d	1.62±0.04 ^a	1.24±0.02 ^c
正己醇	n-Hexanol	1.231 02	871.5	257.88	0.26±0.02 c	0.48±0.0 2 ^b	0.49±0.02 ^b	0.23±0.01 ^c	0.65±0.04 ^a
3-甲基-3-丁烯-1-醇	3-Methyl-3-buten-1-ol	1.326 37	727	179.87	0.03±0.01 d	0.02±0.0 1 ^d	0.19±0.01 ^c	0.29±0.01 ^b	0.65±0.02 ^a

2,5-二甲基呋喃 (D)	2,5-Dimethylfuran-D	1.505 56	704.7	170.07	9.35±0.16 a	5.61±0.0 1 ^b	3.97±0.10 ^c	3.46±0.02 ^d	3.35±0.05 ^d
四氢呋喃 (M)	Tetrahydrofuran-M	1.352 72	628.4	145.76	2.44±0.11 a	1.28±0.0 2 ^b	0.24±0.02 ^c	0.23±0.01 ^d	0.32±0.03 ^c
四氢呋喃 (D)	Tetrahydrofuran-D	1.063 35	631.9	146.71	1.24±0.06 c	6.50±0.0 8 ^a	2.75±0.07 ^d	3.40±0.21 ^b	2.94±0.16 ^c
2-乙酰基呋喃 (M)	2-Acetylfuran-M	1.224 58	915.2	290.70	0.13±0.01 d	0.11±0.0 1 ^d	1.89±0.14 ^b	1.19±0.08 ^c	2.56±0.05 ^a
2,5-二甲基呋喃 (M)	2,5-Dimethylfuran-M	1.120 01	695.9	166.34	0.11±0.01 d	0.28±0.0 1 ^b	0.19±0.01 ^c	0.26±0.01 ^b	0.46±0.02 ^a
2-乙酰基呋喃 (D)	2-Acetylfuran-D	1.039 36	911.8	291.70	0.52±0.02 c	0.49±0.0 2 ^{cd}	1.00±0.02 ^b	0.47±0.01 ^d	1.22±0.04 ^a
2-正戊基呋喃	2-Pentyl furan	1.447 74	994.3	368.04	0.09±0.00 c	0.08±0.0 1 ^c	0.27±0.01 ^b	0.44±0.01 ^a	0.46±0.01 ^a
乙二醇二甲醚	1,2-Dimethoxyethane	1.247 74	654.5	153.11	0.75±0.05 d	1.57±0.0 3 ^c	1.82±0.02 ^b	1.84±0.04 ^b	2.07±0.01 ^a
二丙基二硫醚	Dipropyl disulfide	1.299 44	1 109	548.70	0.29±0.01 d	0.64±0.0 3 ^c	0.75±0.02 ^b	0.61±0.05 ^c	1.45±0.05 ^a
4-甲基噻唑	4-Methylthiazole	1.477 74	816.4	224.91	0.05±0.01 d	0.15±0.0 3 ^c	0.25±0.02 ^b	2.52±0.01 ^a	0.20±0.05 ^b
二甲胺	dimethylamine	1.361 97	423.8	98.98	1.20±0.05 d	8.59±0.1 a	3.92±0.06 ^b	3.92±0.15 ^b	2.95±0.11 ^c
2-乙烷基-3,5-二甲基 吡嗪	2-Ethyl-3,5- dimethylpyrazine	1.736 21	1 074.6	486.57	0.1±0.00 ^d	0.22±0.0 2 ^c	0.52±0.06 ^b	1.33±0.07 ^a	0.77±0.07 ^b
(E,E)-2,4-庚二烯醛 (M)	(E, E)-2,4-heptadienal- M	1.198 33	1 013.8	393.47	1.86±0.03 a	0.73±0.0 8 ^c	1.54±0.07 ^b	1.58±0.06 ^a b	1.72±0.08 ^a
庚醛 (D)	Heptanal-M	1.334 18	901.9	279.41	2.07±0.10 b	2.73±0.0 6 ^a	0.50±0.03 ^d	0.69±0.03 ^c	0.48±0.04 ^d
2-己烯醛 (D)	2-Hexenal-D	1.517 05	853.2	246.41	3.38±0.05 a	2.00±0.0 3 ^b	0.62±0.04 ^c	0.40±0.01 ^d	0.62±0.05 ^c
2-己烯醛 (M)	2-Hexenal-M	1.507 05	849.7	244.33	4.51±0.04 b	2.36±0.1 0 ^c	5.08±0.32 ^a	5.37±0.11 ^a	5.18±0.10 ^a
己醛	Hexanal	1.263 76	792.8	212.17	2.56±0.06 a	1.41±0.0 2 ^b	0.09±0.01 ^c	0.08±0.01 ^c	0.13±0.01 ^c
反式-2-戊烯醛 (D)	(E)-2-pentenal-D	1.355 37	752	191.55	8.83±0.15 a	3.54±0.1 8 ^d	7.87±0.07 ^c	7.81±0.05 ^c	8.24±0.08 ^b
异戊醛	3-Methylbutanal	1.196 71	647.7	151.16	3.13±0.07 a	1.99±0.0 4 ^d	2.67±0.10 ^b	2.31±0.17 ^c	2.56±0.10 ^b c
反式-2-戊烯醛 (M)	(E)-2-pentenal-M	1.104 88	751.1	191.08	2.61±0.09 a	2.04±0.0 5 ^b	0.19±0.01 ^c	0.19±0.01 ^c	0.14±0.01 ^d
反-2-辛烯醛 (D)	(E)-2-octenal-D	1.332 79	1 062.3	466.07	0.21±0.01 d	0.16±0.0 4 ^d	1.92±0.14 ^b	0.98±0.13 ^c	3.16±0.19 ^a
反-2-辛烯醛 (M)	(E)-2-octenal-M	1.232 17	1 061.6	463.64	1.39±0.01 d	0.60±0.0 1 ^c	2.37±0.05 ^b	1.72±0.06 ^c	2.99±0.01 ^a
(E,E)-2,4-庚二烯醛 (D)	(E, E)-2,4-heptadienal-D	1.617 73	1 016.8	397.65	0.51±0.06 b	0.18±0.0 3 ^c	5.09±0.21 ^a	4.95±0.22 ^a	5.31±0.16 ^a
正辛醛	Octanal	1.824 00	1 007	384.32	0.12±0.01 c	0.46±0.0 3 ^d	1.93±0.08 ^b	1.29±0.04 ^c	2.91±0.09 ^a
2,4-庚二烯醛	2,4-Heptadienal	1.626 11	1 000.7	375.93	0.15±0.01 b	0.08±0.0 1 ^c	2.01±0.13 ^a	1.92±0.15 ^a	2.07±0.14 ^a
(E)-2-庚烯醛 (M)	(E)-hept-2-enal-M	1.253 08	957.6	329.87	0.12±0.01 d	0.09±0.0 1 ^c	1.87±0.11 ^b	1.22±0.13 ^c	2.38±0.08 ^a
庚醛 (M)	Heptanal-D	1.695 86	901.8	279.30	0.63±0.07 c	1.95±0.1 0 ^c	4.03±0.05 ^a	1.83±0.02 ^d	2.84±0.08 ^b
3-甲基-2-丁烯醛 (D)	3-Methyl-2-butenal-D	1.356 12	786.5	208.87	0.11±0.01 d	0.50±0.0 7 ^c	0.96±0.01 ^b	1.93±0.08 ^a	0.59±0.04 ^c
3-甲基-2-丁烯醛 (M)	3-Methyl-2-butenal-M	1.357 89	779	204.99	0.21±0.01 c	0.32±0.0 3 ^b	0.30±0.02 ^b	0.77±0.12 ^a	0.83±0.11 ^a
丁醛 (D)	Butanal-D	1.291 48	596.8	137.30	0.20±0.01 e	2.09±0.0 2 ^c	3.17±0.09 ^b	3.40±0.11 ^a	0.90±0.01 ^d
5-甲基呋喃醛	5-Methylfurfural	1.466 06	962.6	334.89	0.04±0.00 c	0.05±0.0 1 ^c	0.32±0.02 ^b	0.50±0.01 ^a	0.34±0.01 ^b
苯甲醛	Benzaldehyde	1.148 85	962.6	334.89	0.35±0.01 d	0.44±0.0 1 ^c	0.56±0.01 ^b	0.66±0.01 ^a	0.62±0.03 ^a
(E)-2-庚烯醛 (D)	(E)-hept-2-enal-D	1.669 76	957.8	330.098	0.46±0.02 ab	0.24±0.0 1 ^d	0.50±0.02 ^a	0.35±0.01 ^c	0.45±0.02 ^b
(Z)-4-庚烯醛	(Z)-4-heptenal	1.147 92	900.3	278.08	0.44±0.01 b	0.73±0.0 3 ^a	0.18±0.01 ^d	0.28±0.01 ^c	0.17±0.01 ^d
2-甲基-2-戊烯醛	2-Methyl-2-pentenal	1.158 71	834.2	235.07	0.08±0.00 c	0.13±0.0 1 ^c	0.16±0.01 ^b	0.10±0.00 ^d	0.25±0.02 ^a
丁醛 (M)	Butanal-M	1.289 76	596.8	135.30	0.12±0.01 d	0.15±0.0 1 ^c	0.71±0.11 ^b	0.87±0.03 ^b	1.87±0.30 ^a
异戊酸	3-Methylbutyric acid	1.494 57	827.5	231.18	0.20±0.01 c	0.47±0.0 2 ^d	5.14±0.31 ^b	4.65±0.15 ^c	7.40±0.08 ^a
2-甲基戊酸	2-Methylpentanoic acid	1.262	1 031.6	418.74	0.21±0.01	0.22±0.0	0.38±0.01 ^b	0.29±0.02 ^c	0.50±0.02 ^a

		39			d	1 ^d			
丙酸	Propanoic acid	1.111 43	702.8	169.25	0.58±0.05 a	0.36±0.0 3 ^b	0.04±0.01 ^d	0.07±0.01 ^c	0.05±0.00 ^d
3-辛酮	3-Octanone	1.305 88	992.8	366.44	1.04±0.08 a	0.21±0.0 1 ^b	0.21±0.01 ^b	0.21±0.01 ^b	0.12±0.01 ^c
1-戊烯-3-酮	1-Penten-3-one	1.308 45	687.5	162.98	2.27±0.07 b	1.11±0.0 7 ^d	2.18±0.07 ^b	2.40±0.02 ^a	1.99±0.03 ^c
丙酮	Acetone	1.114 81	544.3	124.31	9.83±0.18 a	6.95±0.0 5 ^b	2.52±0.03 ^d	2.46±0.06 ^d	3.85±0.09 ^c
2-丁酮 (D)	2-Butanone-D	1.245 84	586.4	134.62	3.94±0.22 a	3.29±0.1 0 ^b	0.23±0.01 ^d	0.17±0.01 ^c	0.30±0.01 ^c
2-丁酮 (M)	2-Butanone-M	1.063 35	579.7	132.92	1.13±0.14 d	3.65±0.1 3 ^a	2.89±0.08 ^c	3.37±0.04 ^b	1.24±0.04 ^d
3-羟基-2-丁酮	3-hydroxybutan-2-one	1.327 88	716.7	175.27	0.48±0.10 c	0.56±0.0 2 ^b	0.47±0.02 ^c	3.44±0.12 ^a	0.47±0.11 ^c
1-辛烯-3-酮	1-Octen-3-one	1.673 58	980.9	353.655	0.13±0.01 b	0.03±0.0 0 ^c	0.29±0.01 ^a	0.29±0.02 ^a	0.32±0.02 ^a
3-庚烯-2-酮	3-Hepten-2-one	1.230 45	932.5	306.093	0.02±0.00 d	0.06±0.0 1 ^c	0.18±0.02 ^b	0.20±0.01 ^b	0.35±0.01 ^a
2-庚酮	2-Heptanone	1.261 71	890.7	270.419	0.16±0.01 c	0.30±0.0 1 ^a	0.22±0.02 ^b	0.13±0.01 ^d	0.24±0.02 ^b
2-甲基四氢呋喃-3-酮	Dihydro-2-methyl- 3(2H)-furanone	1.434 21	814.6	223.952	0.05±0.00 d	0.28±0.0 1 ^b	0.18±0.01 ^c	0.94±0.03 ^a	0.32±0.10 ^b
2-乙基-6-甲基吡嗪	2-Ethyl-6- methylpyrazine	1.201 74	997.5	371.773	1.83±0.11 a	0.19±0.0 2 ^d	0.44±0.02 ^c	0.68±0.02 ^b	0.69±0.03 ^b
丁酸乙酯	Ethyl butyrate	1.559 53	791.1	211.282	4.69±0.12 b	6.05±0.1 9 ^a	5.01±0.22 ^b	0.54±0.09 ^d	2.05±0.22 ^c
丙酸乙酯 (D)	Ethyl propanoate-D	1.453 28	710.1	172.399	1.02±0.04 b	1.17±0.0 3 ^a	0.13±0.01 ^d	0.06±0.00 ^c	0.18±0.01 ^c
丙酸乙酯 (M)	Ethyl propanoate-M	1.150 52	707.6	171.314	0.41±0.03 c	1.78±0.0 5 ^a	0.69±0.06 ^b	0.19±0.01 ^d	0.38±0.02 ^c
乙酸乙酯	Acetic acid ethyl ester	1.340 06	610.3	140.848	0.07±0.01 c	1.58±0.0 1 ^c	3.92±0.05 ^a	3.42±0.21 ^b	0.27±0.03 ^d
3-羟基丁酸乙酯	Ethyl 3- hydroxybutanoate	1.173 21	943.2	316.044	0.06±0.01 d	0.26±0.0 2 ^c	0.39±0.02 ^b	0.59±0.02 ^a	0.38±0.02 ^b

注: D: 二聚体; M: 单体; RI: 保留指数; RT 保留时间/s; DT: 迁移时间/ms; 同行不同小写字母表示样品间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

为进一步分析不同干制工艺对牡蛎干挥发性物质的影响,采用归一化对图谱中各种有机化合物进行了半定量分析,得到了样品中各挥发性化合物的相对含量(表2、图3)。由图3可知,5组样品中鉴别出的挥发性物质的总相对含量在93.72%~99.07%之间,能够代表原始样本的大部分信息,其中醛、醇、酮、呋喃类化合物含量较高,与电子鼻的测定结果一致。醛类是牡蛎干中的主要挥发性物质,相对含量为24.97%~46.72%,与CK组相比,VFD组醛类含量显著减少,HAD、SD、VD组醛类含量均显著增加,醛类主要来源于脂质的氧化降解反应,且该类物质通常阈值较低,呈现强烈的脂香、青香、果香^[7, 24],因此,醛类物质的浓度是导致不同干制工艺下牡蛎干香气特征存在差异的重要因素。醇类物质的相对含量为10.44%~15.50%,醇类物质一般来源于脂质的氧化以及醛、酮类物质的还原^[25-26],其阈值通常较高,对产品的气味影响不大,但一些不饱和醇(例如,1-辛烯-3-醇)的阈值较低,且被认为是水产品腥味的来源^[27],与CK相比,干制加工减少了牡蛎干中1-辛烯-3-醇的含量,对牡蛎干风味品质的提升有积极作用。酮类物质主要由不饱和脂肪酸的热氧化以及氨基酸的降解产生,属于不稳定的中间体,会被进一步氧化或还原成相应的醇^[12],该物质通产赋予产品独特的香气和果味,是干制产品特征气味的重要组成部分。呋喃类化合物主要来源于美拉德反应^[11],5组样品中的相对含量在9.45%~14.35%,其中2-乙酰基呋喃阈值较低且具有强烈肉香味,被认为是干制产品中的关键气味化合物^[28],HAD组2-乙酰基呋喃的含量显著高于其他组。

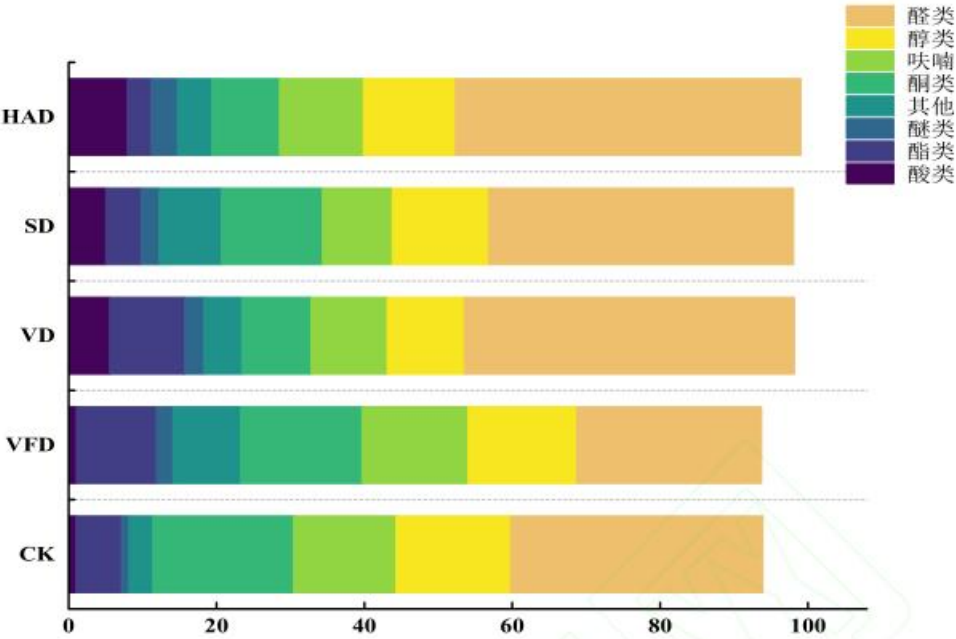


图 3 不同干制方式下牡蛎干中各类挥发性物质的相对含量 (%)
Fig.3 Total relative contents of various classes of volatile substances in dried oysters under different drying technologies (%)

2.3.3 指纹图谱分析

为了进一步区分不同干制工艺下牡蛎干的香气特征，构建了 5 组样品的指纹图谱，结果如图 4 所示，图中每一行为一个样品，每个样品重复 3 次，每一列为一种挥发性物质，图中颜色越深代表该物质含量越高，指纹图谱可分为 A、B、C、D 四个区域，A 区域为焯水牡蛎的特征香气物质，包括 1-辛烯-3-醇、3-呋喃甲醇、1-戊醇、反式-2-戊烯醛、1-戊醇、2-丁酮、丙酸乙酯、丙酸、3-辛酮等，具有蘑菇、泥土、青草、柑橘等类别的风味^[5]。B 区域为牡蛎经热干制（VD、SD、HAD）加工后显著增加的挥发性化合物，以阈值较低的醛、酮类物质为主，包括反式-2-戊烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、2-己烯醛、异戊醛、苯甲醛、(E)-2-庚烯醛、2-甲基-2-戊烯醛、庚醛、1-辛烯-3-酮、2-庚酮、1-戊烯-3-酮、2-丁酮等，赋予牡蛎干花香、脂香、果香、青香等风味特征，C 区域为热干制组（VD、SD、HAD）牡蛎干共有的挥发性化合物，包括 2,4-庚二烯醛、2-正戊基呋喃、2-乙酰基呋喃、正辛醛、芳樟醇、3-庚烯-2-酮、正丁醇、2,5-二甲基呋喃、5-甲基-2-呋喃甲醇等，其中呋喃化合物为牡蛎干贡献了强烈的烤肉香属性，该类化合物尤其在 HAD 组表现出更高的浓度。D 区域是 SD 组显著高于其他组的物质，包括糠醇、4-甲基噻唑、3-羟基-2-丁酮、乙酸乙酯、3-羟基丁酸乙酯、3-庚烯-2-酮、二氢月桂烯醇、2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪、2-甲基四氢呋喃-3-酮等。

试后(图 6-C) Q^2 回归线与纵轴的交点小于零, 且 R^2 与 Q^2 的交点 (0.9948, 0.9796) 大于 0.5, 模型没有过度拟合, 表明该模型预测能力可靠。在 PLS-DA 模型中, 变量投影重要度 (variable importance for the projection, VIP) 是评价变量贡献度的指标, 一般认为 $VIP > 1$ 的变量能反映统计模型中的差异特征^[29], 在 5 组样品中共筛选出 31 种 $VIP > 1$ 的挥发性物质, 结果如图 6-B 所示, 这些物质可以作为区分不同样品的标志物。

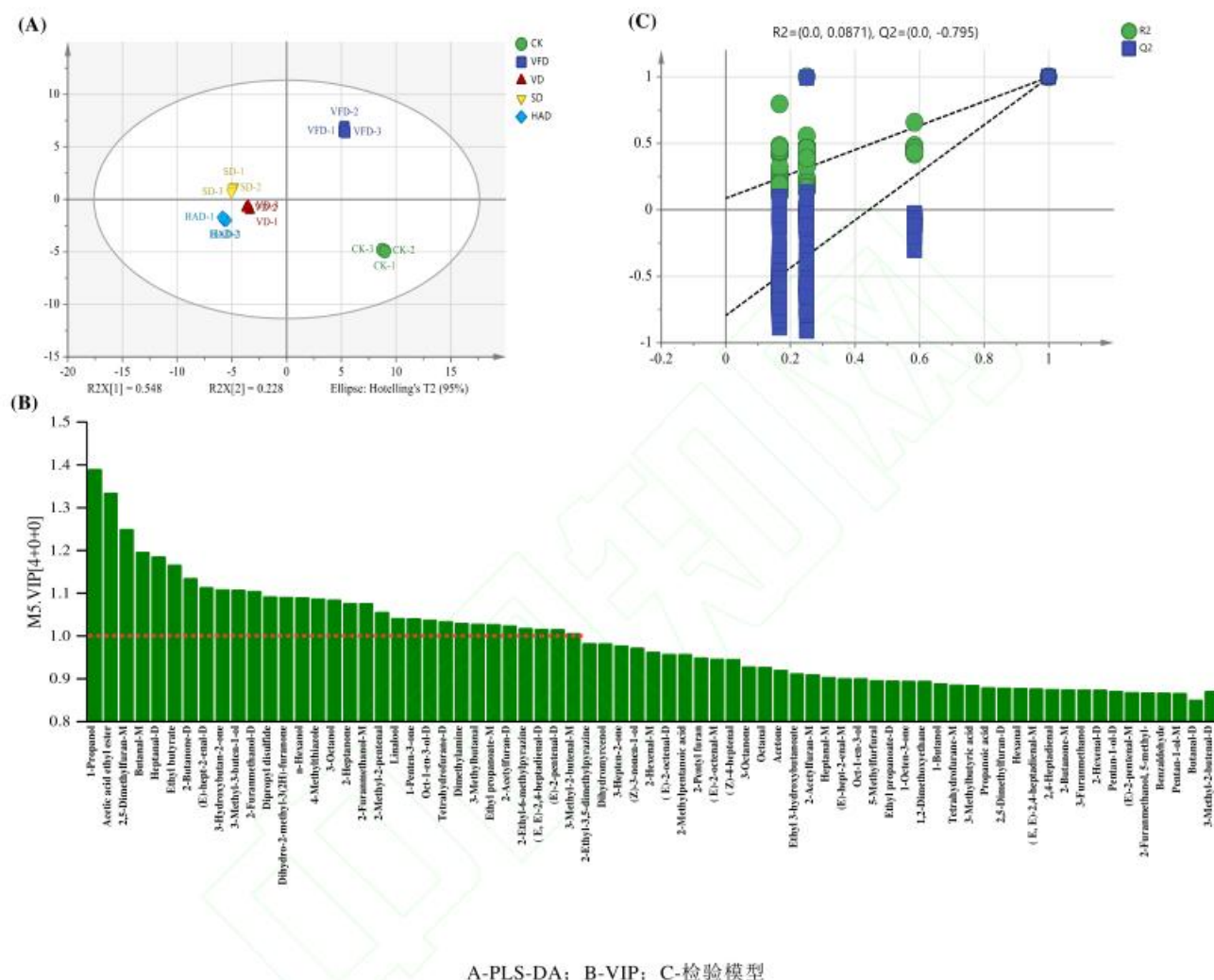


图 6 不同干制工艺下牡蛎干挥发性物质的 PLS-DA、VIP、检验模型
Fig.6 PLS-DA, VIP, and test model of dried oyster volatiles under different drying technologies

2.4.3 相关性分析

为了研究脂肪酸与挥发性风味物质之间的关系, 对游离脂肪酸与 $VIP > 1$ 的挥发性化合物进行了 Pearson 相关性分析, 结果如图 7 所示, 红色方块代表呈正相关, 蓝色方块代表呈负相关, 颜色越深代表相关系数的绝对值越大, 星号代表呈极相关性 ($P < 0.05$), 由图可知, 游离脂肪酸中的 $C_{15:0}$ 、 $C_{16:1}$ 、 $C_{16:0}$ 、 $C_{18:3}$ 、 $C_{18:4}$ 、 $C_{20:0}$ 、 $C_{20:1}$ 、 $C_{20:2}$ 与牡蛎干中的特征挥发性物质庚醛、丁醛、2-甲基-2-戊烯醛、2-庚酮、1-戊烯-3-酮、2-丁酮、1-辛烯-3-醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛等呈显著负相关性 ($P < 0.05$), 该结果与前人的研究结果类似, WANG 等^[14]研究结果表明脂肪酸中的 $C_{17:0}$ 、 $C_{16:0}$ 、 $C_{18:0}$ 、 $C_{18:1}$ 、 $C_{18:3}$ 、 $C_{20:0}$ 与金鲳发酵过程中挥发性化合物的形成呈显著相关性, ZHENG 等^[11]研究发现不饱和度较高的脂肪酸对虾干整体香气的影响较大, $C_{16:0}$ 、 $C_{18:0}$ 、 $C_{18:1}$ 、 $C_{18:2}$ 可促进虾干香气物质的形成。由此可进一步说明牡蛎干制过程中的脂质降解与挥发性气味的形成密切相关, 可为牡蛎干挥发性

气味形成机制研究提供理论依据。

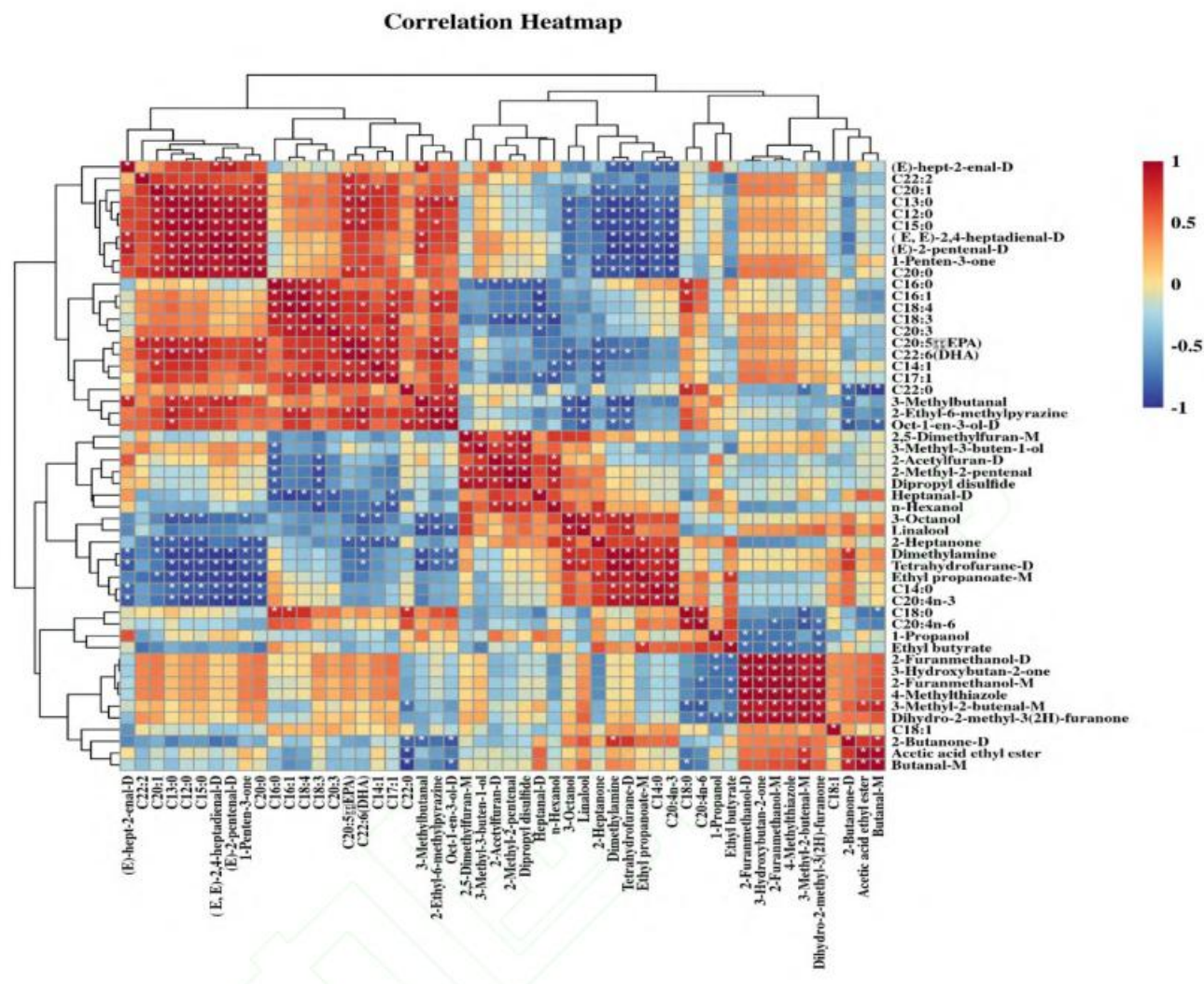


图7 相关性分析
Fig.7 Correlation analysis

3 结论

不同干制工艺对牡蛎干的气味和脂肪酸组成有显著影响,牡蛎经干制加工后脂肪酸含量显著降低,其中 VD 组脂肪酸损失最严重,其次是 HAD,而 VFD 更有利于保留脂肪酸。通过 GC-IMS 鉴别了 71 种挥发性化合物,醛、醇、酮、呋喃类化合物是牡蛎干的主要挥发性物质,多元化分析结果表明,不同干制工艺对牡蛎干气味有显著影响,热干制(VD、SD、HAD)显著增加了挥发性物质的浓度,电子鼻能有效区分不同样品的气味。此外,筛选了 31 种差异性挥发性化合物,包括庚醛、丁醛、2-甲基-2-戊烯醛、2-庚酮、1-戊烯-3-酮、2-丁酮、1-辛烯-3-醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛等,牡蛎干特征气味的形成与游离脂肪酸中 C_{15:0}、C_{16:1}、C_{16:0}、C_{18:3}、C_{18:4}、C_{20:0}、C_{20:1}、C_{20:2} 等的氧化降解密切相关。

参考文献

- [1] 农业农村部. 2022 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China Fishery Statistical Yearbook 2022 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
- [2] GAO J X, ZHANG Y Y, HUANG X H, et al. Comparison of amino acid, 5'-nucleotide and lipid metabolism of oysters (*Crassostrea gigas*

- Thunberg) captured in different seasons [J]. Food Research International, 2021, 147: 110560.
- [3] PENG D M, ZHANG S C, ZHANG H Z, et al. The oyster fishery in China: Trend, concerns and solutions [J]. Marine Policy, 2021, 129: 104524.
- [4] LIU C S, GU Z F, LIN X X, et al. Effects of high hydrostatic pressure (HHP) and storage temperature on bacterial counts, color change, fatty acids and non-volatile taste active compounds of oysters (*Crassostrea ariakensis*) [J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131247.
- [5] WANG Q, SUN C, CHEN L P, et al. Evaluation of microalgae diets on flavor characteristics of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) during fattening [J]. Food Chemistry, 2022, 391: 133191.
- [6] LI Y, JIANG S, ZHU Y, et al. Effect of different drying methods on the taste and volatile compounds, sensory characteristics of *Takifugu obscurus* [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 223-232.
- [7] QIU D, DUAN R B, WANG Y Q, et al. Effects of different drying temperatures on the profile and sources of flavor in semi-dried golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. Food Chemistry, 2023, 401: 134112.
- [8] YIN M Y, MATSUOKA R, YANAGISAWA T, et al. Effect of different drying methods on free amino acid and flavor nucleotides of scallop (*Patinopecten yessoensis*) adductor muscle [J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133620.
- [9] YU M G, LI T, SONG H L. Characterization of key aroma-active compounds in four commercial oyster sauce by SGC/GC × GC-O-MS, AEDA, and OAV [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104368.
- [10] ZHANG N L, WANG W L, LI B, et al. Non-volatile taste active compounds and umami evaluation in two aquacultured pufferfish (*Takifugu obscurus* and *Takifugu rubripes*) [J]. Food Bioscience, 2019, 32: 100468.
- [11] ZHENG X S, JI H W, ZHANG D, et al. The identification of three phospholipid species roles on the aroma formation of hot-air-dried shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by gas chromatography-ion mobility spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Research International, 2022, 162: 112191.
- [12] CHEN C, FAN X K, HU Y Y, et al. Effect of different salt substitutions on the decomposition of lipids and volatile flavor compounds in restructured duck ham [J]. LWT, 2023, 176: 114541.
- [13] CHEN Z Q, ZHU Y H, CAO W H, et al. Novel insight into the role of processing stages in nutritional components changes and characteristic flavors formation of noble scallop *Chlamys nobilis adductors* [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132049.
- [14] WANG Y Q, WANG H F, WU Y Y, et al. Insights into lipid oxidation and free fatty acid profiles to the development of volatile organic compounds in traditional fermented golden pomfret based on multivariate analysis [J]. LWT, 2022, 171: 114112.
- [15] KE Z G, BAI Y, BAI Y W, et al. Cold plasma treated air improves the characteristic flavor of Dry-cured black carp through facilitating lipid oxidation [J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131932.
- [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] 刘琳琳, 秦小明, 刘亚, 等. 香港牡蛎挥发性成分及其加热处理变化 [J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(5): 41-49.
- LIU L L, QIN X M, LIU Y, et al. Volatile components of HongKong oyster and their changes by heat treatment [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2018, 38(5): 41-49.
- [18] LI P L, ZHAO W, LIU Y Y, et al. Precursors of volatile organics in foxtail millet (*Setaria italica*) porridge: The relationship between volatile compounds and five fatty acids upon cooking [J]. Journal of Cereal Science, 2021, 100: 103253.
- [19] FU X J, LIN Q L, XU S Y, et al. Effect of drying methods and antioxidants on the flavor and lipid oxidation of silver carp slices [J]. LWT, 2015, 61(1): 251-257.
- [20] CHEN L P, ZHANG H W, SHI H H, et al. The flavor profile changes of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) in response to salinity during depuration [J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100485.
- [21] LIU C S, JI W Z, JIANG H Z, et al. Comparison of biochemical composition and non-volatile taste active compounds in raw, high hydrostatic pressure-treated and steamed oysters *Crassostrea hongkongensis* [J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128632.
- [22] ZHU Y, CHEN X T, PAN N, et al. The effects of five different drying methods on the quality of semi-dried *Takifugu obscurus* fillets [J]. LWT, 2022, 161: 113340.
- [23] 徐永霞, 白旭婷, 冯媛, 等. 基于 GC-IMS 和化学计量学分析海鲈鱼肉蒸制过程中风味物质的变化 [J]. 食品科学, 2021, 42(22): 270-275.
- XU Y X, BAI X T, FENG Y, et al. Changes of flavor compounds in sea bass during steaming process as analyzed by gas chromatography-ion mobility spectroscopy and chemometrics [J]. Food Science, 2021, 42(22): 270-275.
- [24] JIANG H, ZHANG M T, YE J J, et al. HS-SPME-GC-MS and OAV analyses of characteristic volatile flavour compounds in salt-baked drumstick [J]. LWT, 2022, 170: 114041.
- [25] 刘常园, 方东路, 汤静, 等. 基于电子鼻和 GC-IMS 分析复热对香菇汤挥发性风味物质的影响 [J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(4): 46-53.
- LIU C Y, FANG D L, TANG J, et al. Based on electronic nose and GC-IMS to study effect of reheating on volatile flavor substances of lentinus edodes soups [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(4): 46-53.
- [26] 姚文生, 蔡堂喧, 刘登勇, 等. 不同材料熏制鸡腿肉挥发性物质 GC-IMS 指纹图谱分析 [J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(6): 37-45.
- YAO W S, CAI Y X, LIU D Y, et al. Volatile compounds analysis in chicken thigh smoked with different materials by GC-IMS fingerprint [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(6): 37-45.
- [27] WANG Z J, LI H Q, CAO W H, et al. Effect of drying process on the formation of the characteristic flavor of oyster (*crassostrea hongkongensis*) [J]. Foods, 2023, 12(11): 2136.
- [28] ZHANG D, JI H W, LIU S C, et al. Similarity of aroma attributes in hot-air-dried shrimp (*Penaeus vannamei*) and its different parts using sensory analysis and GC-MS [J]. Food Research International, 2020, 137: 109517.
- [29] SUN W Z, JI H W, ZHANG D, et al. Evaluation of aroma characteristics of dried shrimp (*Litopenaeus vannamei*) prepared by five different procedures [J]. Foods, 2022, 11(21): 3532.