

食品工业科技

Science and Technology of Food Industry

ISSN 1002-0306, CN 11-1759/TS



《食品工业科技》网络首发论文

题目: 传统日晒与阴干干腌武昌鱼挥发性风味物质的形成及脂肪氧化的变化
作者: 陈方雪, 邱文兴, 谌玲薇, 李冬生, 乔宇, 吴文锦, 熊光权, 汪兰, 丁安子, 李新, 石柳
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070072
收稿日期: 2022-06-24
网络首发日期: 2022-12-07
引用格式: 陈方雪, 邱文兴, 谌玲薇, 李冬生, 乔宇, 吴文锦, 熊光权, 汪兰, 丁安子, 李新, 石柳. 传统日晒与阴干干腌武昌鱼挥发性风味物质的形成及脂肪氧化的变化[J/OL]. 食品工业科技.
<https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070072>



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。

收稿日期: 2022-06-24

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目“淡水鱼保活运输及冷冻预调理风味调控关键技术研发”(2020BBA048); 湖北省农业科技创新中心重大科技研发项目(2020-620-000-002-03)

第一作者简介: 陈方雪(1996—)(ORCID:0000-0002-1587-8719),女,硕士研究生,研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: celiach3n@163.com

*通信作者简介: 乔宇(1981—)(ORCID: 0000-0002-2276-0161),女,副研究员,博士,研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: qiaoyu412@sina.com

传统日晒与阴干干腌武昌鱼挥发性风味物质的形成及脂肪氧化的变化

陈方雪^{1,2}, 邱文兴^{1,2}, 谌玲薇^{1,2}, 李冬生², 乔宇^{1,*}, 吴文锦^{1,*}, 熊光权¹, 汪兰¹,
丁安子¹, 李新¹, 石柳¹

(1.湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北武汉 430064;

2.湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430068)

摘要: 为探究传统干腌鱼的挥发性风味物质,本研究以新鲜武昌鱼为原料,采用日晒、阴干两种传统干制方式对腌制武昌鱼进行加工,并通过测定过氧化值、酸价、茴香胺值、共轭二烯与共轭三烯、羰基价、脂肪酸含量,结合挥发性化合物测定、电子鼻及感官评价来探究传统干腌武昌鱼特征风味物质的形成和风味差异。结果显示:日晒干制的武昌鱼,其过氧化值、酸价、茴香胺值、多烯指数、羰基价均高于阴干和未干制组。日晒武昌鱼的不饱和脂肪酸相对含量要显著低于阴干和未干制的武昌鱼,尤其是油酸(C18:1n9)、亚油酸(C18:2n9)、亚麻酸(C18:3n3)。日晒对武昌鱼整体气味和挥发性风味物质影响较大。日晒武昌鱼挥发性物质有28种,阴干武昌鱼有23种,未干制组为20种。日晒干制武昌鱼具有更强的哈喇味和肉香味,阴干武昌鱼有更显著的鱼腥味和哈喇味。相关性结果表明:武昌鱼的香气物质与脂肪氧化呈显著正相关,与典型的单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸呈显著负相关。脂肪氧化是干腌鱼香气形成的重要途径,日晒促进了脂肪氧化、干腌武昌鱼风味的形成和香气积累。

关键词: 干腌武昌鱼; 日晒; 挥发性风味物质; 香气活性值(OAV); 脂肪氧化

Effects of sunlight on the formation of characteristic aroma compounds and fat oxidation in dry-cured blunt-snout bream

CHEN Fang-xue^{1,2}, QIU Wen-xing^{1,2}, SHEN Ling-wei^{1,2}, LI Dong-sheng², QIAO Yu^{1,*}, WU Wen-jin^{1,*},

XIONG Guang-quan¹, WANG Lan¹, DING An-zi¹, LI Xin¹, SHI Liu¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Products Cold Chain Logistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agro-Products Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

(2. School of Bioengineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In this experiment, blunt-snout bream was used as raw material, and the pickled blunt-snout bream was processed by two traditional drying methods, sun-drying and shade-drying, and by measuring peroxide value, acid

value, anisidine value, polydilute index, carbonyl value, fatty acid content combined with the determination of volatile compounds, electronic nose and sensory evaluation to explore the characteristic flavor compounds of dry-cured fish in different traditional drying methods and overall flavor differences. The results showed that the oxidation value, acid value, anisidine value, polydilute index and carbonyl value of blunt-snout bream dried in sunlight were higher than those in the shade-drying and undried groups. The relative content of unsaturated fatty acids in sun-dried blunt-snout bream was significantly lower than that of shade-dried and undried blunt-snout bream, especially oleic acid (C18:1n9), linoleic acid (C18:2n9), and linolenic acid (C18:3n3) which were significantly lower. Different drying methods have a greater impact on the overall odor and volatile flavor compounds of blunt-snout bream. The main types of volatile substances produced by the two drying methods were 28 and 23, respectively, and 20 in the wet group. Most of the characteristic flavor substances in sun dried fish are aldehydes and alcohols. Sun-dried blunt-snout bream has stronger halal flavor and meat flavor, shade-dried blunt-snout bream has more pronounced fishy smell and rancidity, and undried blunt-snout bream has a strong fishy smell and fragrance. The correlation results showed that the aroma compounds of blunt-snout bream were significantly positively correlated with fat oxidation, and significantly negatively correlated with typical monounsaturated fat plugs and polyunsaturated fatty acids. The aroma substances of blunt-snout bream are formed by the degradation of fatty acid oxidation.

Keywords: Blunt-snout bream; Sunlight; Volatile flavor compounds; Odor activity value(OAV); Fat oxidation

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2022070072

武昌鱼 (*Megalobrama amblycephala*), 学名团头鲂, 俗称鳊鱼等。武昌鱼作为我国所特有的优良淡水鱼类, 是易伯鲁教授在 1955 年确定的新物种。一代伟人毛主席在畅游长江后, 留下了“才饮长沙水, 又食武昌鱼”这样的佳句。让武昌鱼闻名海内外^[1]。干腌鱼制品咸香适宜、风味独特, 是我国传统的水产加工食品之一。我国各个地区都有食用干腌鱼制品的饮食习惯。不同地区的制作工艺不同, 形成了各具地方特色的干腌鱼产品^[2], 武昌鱼常用来制作干腌鱼类产品。日晒是传统常见的干制方法。起初干腌制品的制作是为了使食物得到更好更久的保存, 而其独特的风味受到人们的喜爱和长久的亲睐。

干腌鱼的特殊香气形成机理复杂, 但此前已有大量研究表明这些香气物质来源于脂肪氧化、蛋白质和硫胺素的降解、美拉德反应等^[3]。由于鱼类含有大量的不饱和脂肪酸, 在干制过程中极易发生氧化分解, 生成醛、醇、酮等小分子物质。目前现在工业技术已经可以加快干腌制品的干制和腌制, 但张进杰等^[4]研究表明, 工业化风干干制的鱼肉风味没有传统干制的气味丰富, 传统干腌鱼风味较丰富可能是由于复杂的干制条件与环境, 如日晒、风速、湿度等因素。顾赛麒^[36]的研究表明, 不同干制方式下的干腌鱼脂肪氧化程度和挥发性化合物存在显著差异, 光照组的干腌鱼挥发性风味物质均高于避光组, 冷风与热风干燥的氧化反应类型不同导致主要挥发性化合物也存在差别。Wang^[34]的结果表明, 菜籽油的挥发性化合物在光照后发生变化, 特别是醛挥发性化合物的含量显著增加。Zhang^[35]的研究还表明, 在阳光下酿造的蚕豆酱比在阴凉下酿造的香气更浓郁, 阳光照射有利于挥发性化合物的积累。传统干腌鱼常见的干制方式有日晒干制和阴干, 不同干燥方式造成鱼肉发生的主要反应和反应程度存在着差异, 导致产生的挥发性化合物也存在差异。目前日晒对干腌制品香气和脂肪氧化影响的相关报道较少。

本研究以新鲜腌制后的武昌鱼为原料, 通过两种传统干制方式得到干腌武昌鱼成品, 研究日晒和阴干的传统干腌鱼风味及脂肪氧化的变化, 同时对比有无日晒的传统干腌鱼风味差异, 阐明传统干制武昌鱼的主要风味物质, 为干腌鱼风味加工及调控提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

新鲜武昌鱼，食盐、白糖、白酒购于湖北省武汉市悦联商业悦活里超市。

1.1.2 试剂

正构烷烃外标 (C7-C30) 购自 Sigma-Aldrich Chemical Co. (St. Louis, MO, USA)。实验所用甲醇、盐酸、焦性莫食子酸、石油醚（沸程：30℃~60℃）、氢氧化钠、三氟化硼甲醇溶液、甲醇三氯甲烷、冰乙酸、碘化钾、可溶性淀粉、硫代硫酸钠、乙醚、异丙醇、酚酞、氢氧化钾、茴香胺、冰醋酸、异辛烷、环己烷、苯、2, 4-二硝基苯肼、乙醇、三氯乙酸试剂均为分析纯，购于国药集团化学试剂有限公司。仲辛醇为色谱纯，购于 TCI（上海化成工业发展有限公司）。

1.2 试验仪器与设备

台式高速冷冻离心机 GL-25MS 上海卢湘仪离心机仪器有限公司；可见分光光度计 722N 上海仪电分析仪器有限公司；电子鼻 PEN3 德国 AIRSENSE 电子鼻 北京盈盛恒泰科技有限责任公司；分析天平 GL244-1SCN 德国赛多利斯仪器有限公司；真空包装机 DZD-400/S 江苏腾通包装机械有限公司；电热恒温水浴锅 HH-S2 上海力衡仪器仪表有限公司；冷冻干燥机 LGJ-25C 北京四环科学仪器厂有限公司；气相色谱质谱联用仪 7890A-5975C GC-MS 美国 Agilent Technologies 公司。

1.3 样品处理

1.3.1 原料处理

鲜活武昌鱼（长(34±2) cm，重约 1.6 kg）带水活体运输至实验室宰杀，去鳞，将鱼从背部剖开，除去内脏，用无菌水洗去血、残留的内脏组织和黑膜，然后沥干水进行腌制。

腌制：准确地称取整鱼质量 2%的食盐、1%的糖和 0.5%的白酒（酒精度：42%vol）均匀地涂在鱼的全身。将鱼整齐地平铺在不锈钢盆中，放入 4℃的冰箱中腌制。每 24h 上下翻动一次，总共 2 d。

干制：腌制后，洗去鱼表面的盐份及液体，取其中一批鱼不进行干制作为对照。用不锈钢钩横向刺穿鱼体使其展平悬挂。将日晒处理组的鱼暴露在室外自然环境中并保证有充足的阳光照射，阴干处理组的鱼悬挂至室外自然环境的遮阴处避免日晒。干制时长为每日 8:00-17:00 共计 4 d，其余时间放置于 4℃的冰箱中直至干制结束。干燥时间和气候参数如下：2021 年 3 月 21-24 日四天，连续晴天。气候条件：根据武汉市洪山区气象数据显示，3.21 日 8:00-17:00 平均气温为 12.38℃，风速 3.13 m/s，湿度 45.18%；3.22 日 8:00-17:00 的平均气温为 10.71℃，风速为 1.27 m/s，相对湿度为 63.4%；3.23 日 8:00-17:00 的平均气温为 11.37℃，风速为 2.24 m/s，相对湿度为 59.3%；3.24 日 8:00-17:00 的平均气温为 12.24℃，平均风速为 2.88 m/s，相对湿度为 43.4%。干制 4 天的平均日晒强度为 84282 lux，阴干处日晒强度始终低于 270 lux。干制结束日晒干制武昌鱼的水分含量为 47.6%，阴干武昌鱼水分含量为 52.1%。将所有干腌鱼样品真空包装并储存在-80℃且基于干基样品分析。

1.4 指标测定方法

1.4.1 脂肪的提取及脂含量测定

参考 Folch 等^[5]的方法并稍作修改。准确称取 5.0 g 切碎后鱼肉装入烧杯，加入 40 mL 氯仿-甲醇溶液（V/V，2:1），冰浴匀浆 60 s 后液转至具塞比色管并用氯仿-甲醇溶液定容至 100 mL，静置 1 h 后过滤，去除蛋白和结缔组织，滤液中加入 0.2 倍体积的生理盐水，3500 r/min 离心 15 min，吸出多余上层液体，将下层溶液放置水浴氮吹仪中，氮气吹扫浓缩除去

下层有机溶剂,得到脂质并称取其质量,除去事前称取干燥离心管质量得到其脂肪含量。

1.4.2 过氧化值的测定

测定方法参考 GB5009.227-2016^[6],取 2.4.1 油脂试样进行测定。

1.4.3 酸价的测定

测定方法参考 GB5009.229-2016^[7],取 2.4.1 油样进行测定。

1.4.4 茴香胺值的测定

测定方法参考 GB 24304-2009^[8],取 2.4.1 油样进行测定。

1.4.5 多烯指数的测定

测定方法参考 GB 22500-2008^[37],取 2.4.1 油样进行测定。

1.4.6 羰基价的测定

参考韩瑞阳等^[9]方法,称取 0.05~1.00 g 1.4.1 中油样,置于 10 mL 容量瓶中,加正丁醇溶解试样并稀释至刻度取出 1 mL 放入 15 mL 离心试管中,加入 1 mL 2,4-二硝基苯肼溶液,盖上塞子,摇匀。在 40 °C 水浴中加热 20 min。反应后取出用流水冷却至室温,加入 8 mL 氢氧化钾-正丁醇溶液。涡旋剧烈振荡混匀后,在室温下 3000 r/min 离心 5 min。以 1 cm 比色杯,用试剂空白调节零点,于 420 nm 处测定吸光度。

1.4.7 脂肪酸相对含量的测定

脂肪水解方法方法参考 GB5009.168-2016^[10],脂肪酸甲酯化方法参照王未君和 Kaluzny 等^[11-12]的方法并稍作修改。水解后提取的总脂油样 0.5 g 于 10 mL 离心管中,加入 0.5 mL 0.5 mol/L 氢氧化钠-甲醇溶液,再加入 2.5 mL 正己烷溶液,旋涡混合 5 min,于 5000 r/min 条件下离心 10 min,取上层液体,通过 0.22 μm 有机微孔滤膜过滤,加入 25 μL 十九烷酸甲酯作为内标,正己烷定容至 1 mL,进行气相色谱分析。气相色谱条件:色谱柱: HP-FFAP (60 m, 0.25 mm, 0.25 μm); 升温程序为初温 90 °C,保持 2 min,以 10 °C/min 的速率升温至 180 °C,再以 5 °C/min 的温度升温至 240 °C,保持 10 min;载气为高纯氢气,流量为 1.0 mL/min,进样量 1 μL,分流比 1:30,进样口温度为 230 °C;火焰离子化检测器温度为 240 °C。根据 37 种脂肪酸甲酯混标来确定各脂肪酸的保留时间,以十九烷酸甲酯为内标物质进行定量分析。

1.4.8 电子鼻仪器测定

参考陈方雪^[13]的方法进行测定,取 2.0 g 1.3.1 搅碎的样品,置于 20 mL 电子鼻进样瓶中,密封后于 40 °C 水浴平衡 30 min 进行测定。PEN3 电子鼻测定参数:清洗时间 100 s,测定时间 120 s,气体流量 150 mL/min,每个样品重复 3 次,特征值提取时间点 118-119 s。

1.4.9 挥发性化合物含量测定

参考顾赛麒^[14]的方法并稍做修改。取 2.0 g 1.3.1 搅碎样品于 20 mL 顶空瓶中,放入磁力搅拌器在 40 °C 下平衡 15 min,萃取 40 min。

定性分析:将检测到的挥发物质谱图与 NIST 17 谱库中的标准物质谱图进行对比,同时计算各物质的线性保留指数(linear retention index, LRI)并与文献与网站[15]中的 LRI 值进行对比, LRI 计算公式:

$$RI = 100 \times n + 100 \times \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n}$$

式中: t_n 和 t_{n+1} 分别为碳数为 n 、 $n+1$ 的正构烷烃的保留时间, t 是在 t_n 和 t_{n+1} 之间的某个化合物的保留时间。

定量分析:将 50 μL 质量浓度为 0.8×10^{-6} g/mL 的内标物仲辛醇加入到 2 g 充分绞碎的鱼肉样品中,通过计算待测挥发物与仲辛醇峰面积的比值得到各挥发性化合物的含量。

仪器参数: GC-MS 分析在配至 5975C 质谱仪(安捷伦科技)的 Agilent 7890A 气相色谱仪上进行。在 DB-WAX 色谱柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm, 安捷伦科技公司)上进行分离。载

气氮气的恒定流速为1.0 mL/min。进样器温度为250 ℃，离子源温度为230 ℃。温度程序如下：烘箱温度保持在40 ℃，以2 ℃/min的速度升至100 ℃，然后以5 ℃/min的速度升至180 ℃，最后在8 ℃升至250 ℃/min，保持5分钟。涂层纤维在进样口在250 ℃ 下解吸5分钟。MS扫描在30-400 amu的范围内进行。全扫描模式，不分流。

1.4.10 气味活性值分析

气味活性值（odor activity value, OAV）可用于表征风味化合物贡献大小的物理量，从而反应风味物质对样品整体风味的贡献度，OAV大于1的风味物质被认为具有气味活性是对样品风味有贡献的物质，OAV大于1的组分对风味主体物实际作用；OAV值越大说明该组分对样品总体的风味贡献度越大。OAV计算公式如下：

$$OAV = \frac{C_i}{OT_i}$$

式中：OAV为某个特征香气活性化合物的气味活性值， C_i 为特征香气活性化合物的质量浓度（ng/g）， OT_i 为特征香气化合物在水中的气味阈值。

1.4.11 风味轮廓分析

参考Tan^[34]的方法对干腌武昌鱼进行感官评定。15名感官评价成员都接受了三天的干腌鱼评估培训和实践。选取七个气味描述性词汇用于区分样本分别为鱼腥味、脂肪味、肉味、青草味、土壤味、花果味和金属味。七个描述词汇以下列香气为参考：壬醛、癸醛用于描述“鱼腥味”、反式-2-壬烯醛、辛醛用于描述“脂肪味”、2-辛醛、4-甲基噻唑用于描述“肉味”、己醛、壬醇描述“青草味”、己醇、1-辛烯-3-醇描述“土壤味”、异戊酸、己酸乙酯描述“花果香”特性以及庚醛、2-辛烯-1-醇的用于描述“金属”。评估标准为（0 = 难以察觉，1 = 弱，3 = 显着，5 = 非常强）。将获得的七维风味轮廓绘制在蜘蛛网图中。

1.4.12 统计分析方法

使用 SPASS、Graphpad Prism9 软件进行数据处理及图表绘制，数据以平均值±标准差表示，使用 R studio 4.1.0 (RStudio Inc, USA)进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 传统干腌鱼脂肪氧化的变化

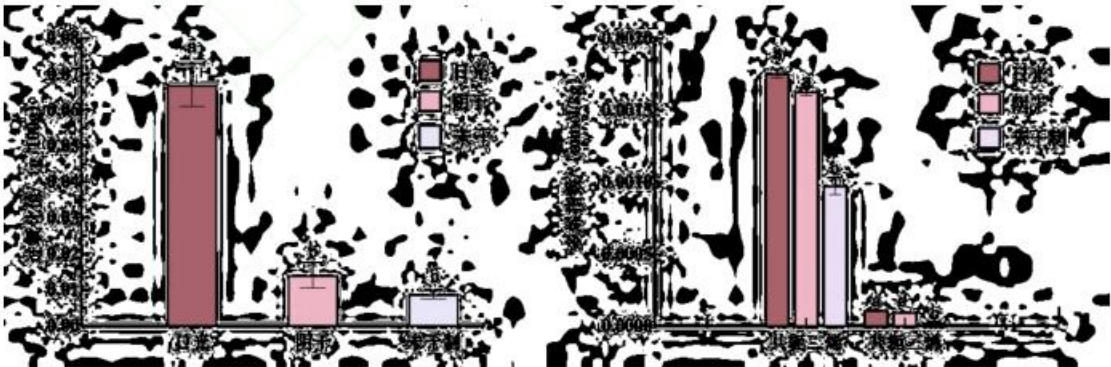


图1 不同传统干腌武昌鱼初级氧化产物的变化

Figure 1 Changes in Primary Oxidation Products of dry-cured blunt-snout bream

实验结果表明两种传统干制方式干制武昌鱼在脂肪氧化程度上有显著性差异，过氧化值（POV, Peroxide Value）主要用于表征样品中的初级氧化产物——氢过氧化物。如图1所示，传统日晒的武昌鱼 POV 值为 0.069 g/100 g 是阴干武昌鱼的 6 倍。共轭烯烃（CD，

Conjugated Diene; CT, Conjugate Triene) 主要是由于多不饱和脂肪酸氧化产生的化合物,同时也表征鱼肉中的初级氧化产物^[17]。传统日晒武昌鱼的共轭二烯含量为 0.00178 mmol/kg 高于传统阴干武昌鱼 0.00161 mmol/kg, 这与测定的过氧化值结果一致, 但共轭三烯含量两种干制方式无明显差异, 日晒干制为 0.000108 mmol/kg 阴干武昌鱼为 0.000099 7mmol/kg。

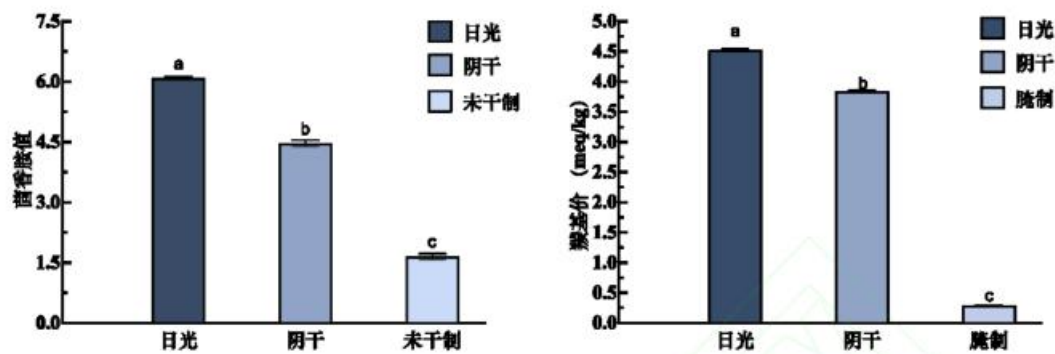


图 2 不同传统干腌武昌鱼次级氧化产物的变化

Figure 2 Changes in Secondary Oxidation Products of dry-cured blunt-snout bream

茴香胺 (p-AnV, p-anisidine value) 值主要由 p-AnV 表征, p-AnV 反映油脂中次级氧化产物醛类总含量 (主要指 a-p-不饱和醛) ^[16], 传统日晒武昌鱼的茴香胺值显著高于阴干武昌鱼的茴香胺值。羰基价 (CV, Carbonyl Value) 是油脂酸败时产生含有醛基和酮基的脂肪酸或甘油酸及聚合物的总量, 用来表征油脂氧化程度。次级氧化指标茴香胺值和羰基价传统日晒均高于传统阴干武昌鱼。这可能是因为日晒促进了脂肪氧化, 加快氧化速率, 氢过氧化物继续反应生成次级氧化产物^[36]。

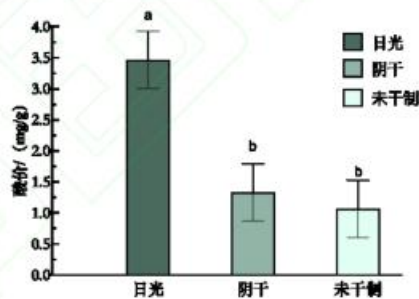


图 3 不同传统干腌武昌鱼酸价的变化

Figure 3 Changes in acid value of dry-cured blunt-snout bream

酸价 (AV, acid value) 主要用于表征脂质样品中的游离脂肪酸的总量 (包括脂质氧化的三级氧化产物——因醛类氧化而获得的游离中短链羧酸和高级脂肪酸甘油酯水解产生的游离长链脂肪酸), 传统日晒武昌鱼 AV 为 3.5 mg/g, 阴干武昌鱼的 AV 为 1.3 mg/g, 脂肪水解程度显著低于传统日晒武昌鱼, 但阴干武昌鱼的酸价与腌制未干制的武昌鱼无显著差异, 这可能是由于光照促进和加深了氧化的发生, 使脂肪酸加速降解, 同时由于游离脂肪酸更易氧化, 使得日晒武昌鱼产生更多的氧化产物^[36]。

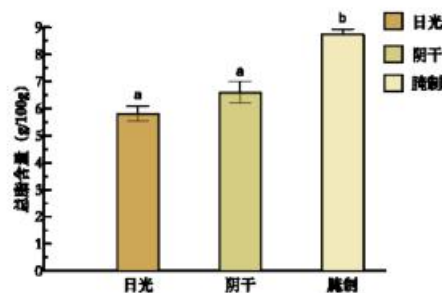


图4 不同传统干腌武昌鱼脂肪含量的变化

Figure 4 Changes in the fat content of dry-cured blunt-snout bream

两种干制方式下的武昌鱼脂肪含量均下降,但日晒干制武昌鱼的脂肪含量显著小于阴干和未干制的武昌鱼。日晒是常用的传统干制方式,日晒也是干制制品脂肪氧化降解的主要途径,且日晒可引发光氧化,其速率是自氧化的上千倍^[18]。这些现象可能是由于日晒加速了脂肪氧化的速率,脂肪降解的脂肪酸作为氧化底物,在自氧化的同时,日晒使光敏剂将激发态氧转变为激发态氧,直接与基态含烯底物的双键结合生成氢过氧化物,再分解或聚合生成醛、酮、酸等化合物或聚物及多聚物。同时部分氢过氧化物也可能分解生成自由基再进入氧化链循环^[19]。不饱和脂肪酸暴露在日晒下便会加其氧化及酸败,所以日晒干制的武昌鱼脂肪氧化程度显著高于阴干武昌鱼的脂肪氧化程度。

2.2 日晒对干制武昌鱼脂肪酸含量的影响

表1 不同传统干腌武昌鱼脂肪酸含量的变化

Table 1 Changes of the fatty acid content of dried blunt-snout bream under sun exposure

脂肪酸类别	脂肪酸	相对含量% (归一化法)		
		日晒	阴干	腌制
SFA	C _{4:0}	0.94±0.07	0.43±0.04	N.D
	C _{12:0}	0.10±0.06	0.01±0.01	0.02±0.01
	C _{14:0}	0.84±0.03	0.86±0.08	0.16±0.03
	C _{15:0}	5.01±1.31	0.14±0.05	0.04±0.01
	C _{16:0}	10.89±1.77	11.57±2.01	N.D
	C _{17:0}	4.25±1.12 ^a	0.18±0.06	0.02±0.01
	C _{18:0}	0.17±0.12	0.19±0.06	N.D
	C _{20:0}	N.D	0.80±0.16	N.D
	C _{21:0}	2.74±0.31	0.13±0.07	N.D
	C _{22:0}	0.73±0.05	1.15±0.05	0.08±0.01
	C _{23:0}	0.63±0.08	0.17±0.02	0.01±0.01
	C _{24:0}	0.73±0.17	0.29±0.03	0.13±0.02
MUFA	C _{14:1}	0.05±0.01	0.04±0.01	0.21±0.13
	C _{15:1}	0.03±0.01	N.D	N.D
	C _{16:1}	1.09±0.02	2.08±0.13	2.33±1.07
	C _{17:1}	0.46±0.08	0.20±0.03	0.50±0.06
	C _{20:1}	0.87±0.11	2.02±1.05	3.18±1.37
	C _{24:1}	0.46±0.02	0.37±0.04	0.53±0.32
	C _{18:1n9t}	0.24±0.07	0.26±0.08	0.26±0.18
	C _{18:1n9c}	35.59±2.03	39.34±2.79	44.54±3.39
	C _{18:2n6c}	14.84±1.72	19.01±2.63	21.37±3.21

PUFA	C _{18:2n6t}	4.73±0.67	1.39±0.07	1.31±0.83
	C _{18:3n6}	3.78±0.21	6.71±1.34	7.21±2.35
	C _{18:3n3}	1.75±0.06	2.51±0.32	3.15±1.77
	C _{20:2}	0.06±0.01	0.56±0.08	1.27±0.84
	C _{20:3n6}	2.37±0.21	0.01±0.01	3.23±2.15
	C _{20:4n6}	2.26±0.09	3.91±0.03	5.16±2.78
	C _{20:3n3}	0.94±0.11	1.53±0.09	N.D
	C _{22:1n9}	N.D	1.68±0.15	1.92±0.32
	C _{22:2}	N.D	0.52±0.02	N.D
	C _{20:5n3}	0.61±0.03	0.87±0.04	1.57±0.77
	C _{22:6n3}	0.73±0.02	1.08±0.36	2.10±1.12
	ΣMUFA	38.79±3.83	44.31±1.78	44.49±2.64
ΣPUFA		32.07±1.11	39.77±1.37	48.29±2.73
ΣSFA		29.14±2.77	15.92±2.01	0.46±0.31

脂肪酸根据其不饱和度可分为：饱和脂肪酸（saturated fatty acids, SFA）、单不饱和脂肪酸（monounsaturated fatty acids, MUFA）和多不饱和脂肪酸（polyunsaturated fatty acids, PUFA）^[20]。在腌制过程中脂肪酸被内源酶水解在干制过程中又作为底物反应降解为醛、酮、酸等小分子物质并生成有香气的挥发性化合物等。MUFA 和 PUFA 是腌腊鱼脂肪酸的重要构成组分，研究表明日晒干制和阴干两种干制方式下武昌鱼的 MUFA 和 PUFA 的含量均有下降，SFA 的含量升高。油酸（C18:1n9c）和亚油酸（C18:2n6c）是腌制武昌鱼重含量最高的 UFA。两种干制方式的武昌鱼样品的 UFA 在含量上均存在显著性差异。传统日晒武昌鱼的 ΣUFA 含量占总脂肪酸的 71%，阴干武昌鱼的 ΣUFA 含量占总脂肪酸含量的 80%。UFA 由 PUFA 和 MUFA 组成，传统日晒武昌鱼的 PUFA 含量显著低于传统阴干武昌鱼，这些现象是因为脂肪氧化大多发生在不饱和脂肪酸上，饱和脂肪酸结构稳定不易发生氧化，不饱和脂肪酸含有双键，其中多不饱和脂肪酸所含双键更多，更易氧化与自由基及激发态氧反应，从而导致脂肪氧化^[21]。在风干武昌鱼中，油酸（C18:1n9c）、亚油酸（C18:2n6c）、（C18:3n6）、亚麻酸（C20:3n3）和花生四烯酸（C20:4n6）是有较大变化的不饱和脂肪酸，其中亚油酸是多数线性醛的前体物质如己醛、庚醛等。2-辛烯醛主要来源于亚油酸，而 2-己烯醛主要来源于亚麻酸。2-庚烯醛可能源自 α-亚麻酸。花生四烯酸是 1-辛烯-3-醇的前体物质，EPA 是 1-戊烯-3-醇的前体物质^[22]。这些脂肪酸降解生成的挥发性化合物对风干武昌鱼的风味提供了很大的贡献。n-3 系 PUFA 因具有预防心脑血管疾病、促进大脑和视神经发育、防癌抗衰老等生理功效，其种类包括：亚麻酸（C20:3n3）、二十二碳六烯酸（DHA，C22:6n3）、二十碳五烯酸（EPA，C20:5n3）等^[23]，在以上两种干制方式武昌鱼中均检出。日晒因素对亚油酸、亚麻酸、DHA 等 PUFA 含量影响显著印证了不饱和程度越高、电子密度越大，在日晒条件下就越容易受到单线态氧的攻击而发生氧化降解。

2.3 传统干腌武昌鱼挥发性风味物质的含量及 OAV 值

表 2 传统干腌武昌鱼风味物质含量及 OAV 值
Table 2 Flavor substance content and OAV value of traditional dried blunt-snout bream

中文名	Compounds	ID	LRI		香气阈值		含量 (ng/g)			OAV		
			计算值	参考值 ^[11]	(ng/g) ^[14]		日晒	阴干	腌制	日晒	阴干	腌制
己醛	Hexanal	MS、LRI	1079.70	1081	4.5	362.67±17.38	42.50±6.93	5.97±2.22		80.59	9.4	1.31
醛	庚醛	Heptanal	MS、LRI	1181.59	1183	2.8	20.53±3.76			7.32		
类	壬醛	Nonanal	MS、LRI	1388.90	1392	1.1	249.6±7.44	25.30±5.36	110.45±13.87	226.91	23	100.4

	癸醛	Decanal	MS、LRI	1459.34	1447	0.1			7.93±0.81			79.3
	正辛醛	Octanal	MS、LRI	1286.34	1287	0.5	38.52±2.24			65.62		
	反-2-辛烯醛	2-Octenal, (E)-	MS、LRI	1346.30	1345	3	54.98±6.92			18.32		
	反-2-己烯醛	2-Hexenal, (E)-	MS、LRI	1211.37	1212	19.2	8.93±4.13			<1		
	顺-2-庚烯醛	(E)-2-heptenal	MS、LRI	1242.37	1243	13.5	2.37±0.17					
	3-甲基丁醛	Butanal, 3-methyl-	MS、LRI	-	906	1.1	114.43±7.03	28.25±2.47		104.02	25.68	
	苯甲醛	Benzaldehyde	MS、LRI	1531.21	1530	41.7	5.94	0.21±0.13	2.09±1.05	<1	<1	<1
	2-戊基呋喃	Furan, 2-pentyl-	MS、LRI	1230.74	1231	5.8	53.12±7.21	6.10±0.48		9.16	1.05	
	乙醇	Ethanol	MS、LRI		930				256.72±10.71			51.344
	正戊醇	1-Pentanol	MS、LRI	1245.73	1247	42	67.16±2.63	20.76±1.93	0.76±0.03	<1	<1	<1
	正己醇	1-Hexanol	MS、LRI	1350.14	1361	5.6	110.15±8.71	48.94±2.54	38.21±2.09	19.67	8.74	6.82
	正辛醇	1-Octanol	MS、LRI	1553.62	1557		9.98±1.11		4.18±1.37	<1	<1	<1
	壬醇	1-Nonanol	MS、LRI			41	10.23±0.21		4.17±0.16	<1	<1	<1
醇	庚醇	1-Heptanol	MS、LRI	1449.36	1457	1.1	9.56±0.34		2.09±0.85	8.69		1.9
类	2,3-丁二醇	2,3-Butanediol, [R-(R*,R*)]-	MS、LRI	1612.34	1607	95.1	87.47±3.38	145.45±9.92		<1	<1	<1
	3-辛醇	3-Octanol	MS、LRI	1391.48	1394	110	2.85±0.84			<1		
	1-烯-3-辛醇	1-Octen-3-ol	MS、LRI	1393.28	1394	1	555.98±21.75	162.51±4.67	33.42±5.26	373.05	108.34	22.28
	1-戊烯-3-醇	1-Penten-3-ol	MS、LRI	1160.55	1163		64.83±3.77	12.44±2.12		<1	<1	
	反-2-辛烯-1-醇	2-Octen-1-ol, (E)-	MS	1627.76	-	20		6.12±1.45				<1
	3-甲基-1-丁醇	1-Butanol, 3-methyl-	MS、LRI	1204.76	1206	1000	97.44±2.21	59.34±7.32				
	2-乙基己醇	2-ethylhexanol	MS、LRI			300			7.46±1.02			<1
	3-辛酮	3-octanone	MS、LRI	1253.72	1251	50.2			1.79±0.66			<1
酮	3-羟基-2-丁酮	2-Butanone, 3-hydroxy-	MS、LRI	1292.39	1286	800	362.49±12.54	326.96±8.29		<1	<1	
类	2-甲基-3-辛酮	Acetoin	MS、LRI	1321.71	1323	850	362.49±3.25		4.77±1.04	<1		<1
	3,5-辛二烯酮	3,5-Octadien-2-one	MS、LRI	1511.36	1517	150	38.80±3.74	813.22±11.86		<1	<1	
	2,3-辛二酮	2,3-octanedione	MS、LRI	1319.91	1323			32.65±0.87	2.09±0.96	<1	<1	<1
	苯乙醇	phenethyl alcohol	MS、LRI					5.60±1.59		<1		
	乙酸	Acetic acid	MS、LRI	1441.33	1442	60	119.97±3.74		7.76±1.19	<1		<1
	己酸乙酯	ethyl caproate	MS、LRI	1232.22	1232	5	18.78	9.77±1.85		6.95	3.60	
其	己酸甲酯	Methyl caproate	MS、LRI	1186.25	1187	70		107.16±2.04	0.73±0.18		1.54	<1
他	辛酸甲酯	Methyl octanoate	MS、LRI	1390.84	1392		20.41±1.21	3.55±1.57	0.89±0.13	<1	<1	<1
	异戊酸	Butanoic acid, 3-methyl-	MS、LRI	1669.40	1671	60	9.73±1.22	32.24±2.70		<1	<1	
	己酸	Hexanoic acid	MS、LRI		1855	3.5/60		16.22±2.34		<1		<1
	柠檬烯	D-Limonene	MS、LRI	1193.7	1198	10	45.71±4.57	24.02±3.32	2.68±0.93	4.57	2.4	<1
	4-甲基噻唑	4-methylthiazole	MS	1277.65	1279		20.23±1.08	6.13±0.77	1.80±0.02	<1	<1	<1

采用气相色谱-质谱法从刚腌制结束的鱼肉块和两种干制方式的腌腊鱼中共检出了 38 种挥发性风味成分,并根据保留指数再次定性,仅有 5 种物质未查阅到对应的参考指数^[15]。其中传统日晒鱼肉 28 种、阴干鱼肉 23 种、腌制结束时的鱼肉 20 种。所有挥发物中 OAV 大于 1 的气味活性物质有 15 种,主要以醛类、醇类和杂环类为主,其中己醛、辛醛、癸醛、壬醛、2-辛烯醛、3-甲基丁醛、1-辛烯-3-醇、乙醇、己醇、庚醇、2-戊基呋喃、乙酸己酯、D-柠檬烯 13 种物质的 OAV 大于 1,可认为其是传统腌腊鱼中主要的气味活性物质。由表 2 可知,日晒干制武昌鱼和阴干武昌鱼的挥发物总含量分别是 2922.98 ng/g 和 1935.44 ng/g, OAV 总和分别是 924.87 和 183.75,挥发物总含量分别是刚腌制结束的 5.9 倍和 4.0 倍,表明传统日晒工艺有利于腌腊鱼整体香气的形成。醛类因其较低的阈值,通常对腌腊鱼整体香气具有这重要贡献。由表 4 可知,按传统工艺日制作的腌腊鱼日晒品中,醛类 OAV 总和为 502.78, 占有挥发性风味成分 OAV 总和的 54.36%, 6 种醛类物质 OAV>1,是对干腌鱼整体风味有贡献的香气物质。此前已有研究表明腌腊鱼中的 C6~C10 饱和醛的风味前提物质时由于油酸、亚油酸、亚麻酸及花生四烯酸等不饱和脂肪酸氧化形成的^[24],其中己醛、庚醛、辛醛、壬醛分别呈现青草味、哈喇味、鱼腥味及油脂味,而烯醛主要源自亚油酸酯和亚麻酸酯的氢过氧化物的降解^[25], 3-甲基丁醛是 Strecker 降解氨基酸生成的具有花香味的物质^[26]。干腌鱼特征性风味被描述为是具有咸香味、脂香味和鱼香味等多种复杂香味融合的味道。上述 3 种饱和醛(壬醛、辛醛、己醛)以及 1 种烯醛(2-壬烯醛)与传统腌腊鱼风味特征相符,可能对其整体香气贡献显著。

醇类主要源自脂肪酸的二级氢过氧化物的分解、脂肪氧化酶作用或由羰基化合物还原生成。又表 2 可知,干制后的鱼肉醇类物质含量增大,并且不饱和醇的种类增多。其中己醇、1-辛烯-3-醇是气味贡献较高的香气物质。己醇是油酸氧化的产物也具有青草味, 1-辛烯-3-醇具有鱼腥味和蘑菇味的特点,有研究表明 1-辛烯-3-醇是花生四烯酸氧化分解的产物。吴燕燕等^[27]在腌红牙鲢中也检测出这两种醇类,并指出 1-辛烯-3-醇是一种具有浓郁蘑菇味的成分,能产生清淡的香气,使腌制加工后的鱼肉更加柔和。

酮类主要由脂肪酸的氧化降解以及醇类物质的氧化生成^[28]。干制结束后,鱼肉中酮类物质的 OAV 总和小于 1,但酮类化合物的含量占比并不低。酮作为脂肪最终氧化降解的底物之一在干制后含量升高,但由于其阈值较高,对干腌鱼的整体风味贡献不大,其气味贡献度远不如醛类和醇类等。然而,有研究指出,酮类对腥味减退具有一定的贡献^[29]。

杂环类、酸类和酯类多数来源于蛋白质和硫胺素的热氧化降解、二羰基化合物的斯特克雷降解和脂肪氧化。其中对干腌鱼整体气味贡献较大的挥发性物质为 2-戊基呋喃和乙酸己酯。其中 2-戊基呋喃有焦糖香味是脂肪氧化的产物^[30],而己酸乙酯具有水果香气和酸味^[38],是对阴干武昌鱼整体风味贡献较大的香气物质。

在传统日晒武昌鱼中,醛类醇类挥发性化合物在总挥发性化合物中占比较高,醛类和醇类含有较低的感官阈值,因此他们赋予了日晒武昌鱼强烈的油脂味、金属味和青草味。而在阴干武昌鱼中,醇类和酯类酸类的含量占比较高,它们赋予了阴干武昌鱼强烈的鱼腥味和酸味,这导致了两种干制武昌鱼整体风味差异较大。

2.4 日晒对干制武昌鱼气味的影响

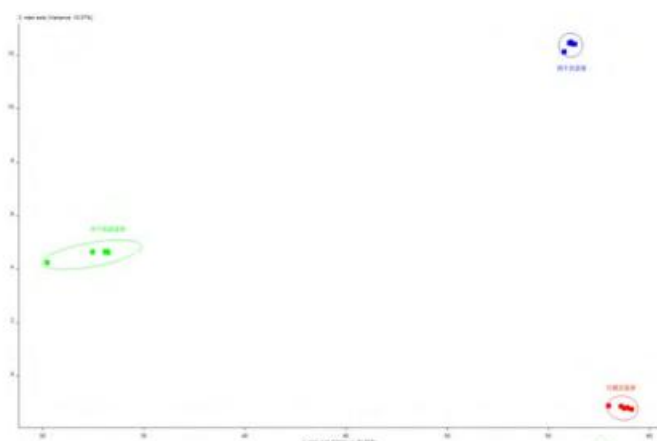


图5 不同传统干腌武昌鱼电子鼻 PCA 图

Figure 5 PCA Diagram of Electronic Nose of blunt-snout bream in Different Drying Methods

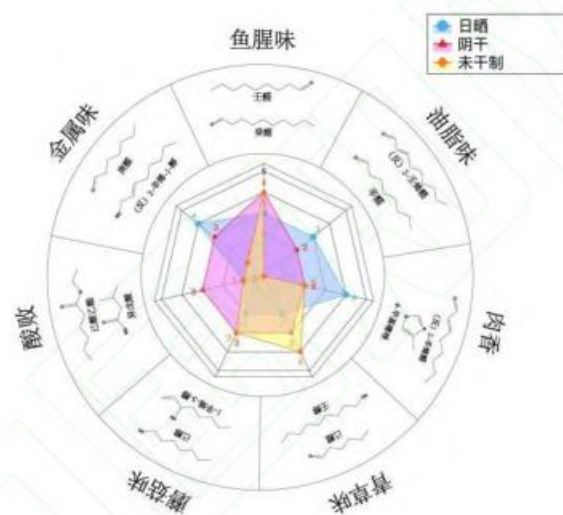


图6 不同传统干腌武昌鱼风味轮廓

Figure 6 Flavor profile of blunt-snout bream in different drying methods

样品均远离原点且具有其独立的气味区域,说明日晒干制、阴干干制的武昌鱼和未干制的武昌鱼总体气味差异显著。由图2电子鼻主成分分析的横纵坐标可以看出,第一主成分和第二主成分的贡献率分别为81.93%、18.07%,累计贡献率达到100%,说明样品整体差异性信息在该主成分平面上有较为充分的展示^[31]。电子鼻PCA结果显示三种鱼肉的整体气味有显著差异。这与GC-MS相似的结果,这三类成分的含量在日晒鱼、阴干鱼、未干制鱼中依次变低。干腌鱼的风味被描述为鱼腥味、油脂味、肉香、青草味、土壤味、酸味、金属味。日晒鱼有强烈的脂肪味,这是因为日晒鱼中含有OAV值较高的辛醛、壬醛和反-2-壬烯醛等油脂香的物质。日晒鱼独有的庚醛赋予了它试剂味、金属味。壬醛、1-辛烯-3-醇和己醛在阴干武昌鱼中是OAV值最高的3个化合物化合物,他们赋予了阴干武昌鱼较强的鱼腥味、青草味和土壤味。干制后的鱼肉有这丰富的风味轮廓相比未干制的鱼肉,未干制的鱼肉几乎没有脂肪的香气。鱼腥味和酸味是未干制鱼肉的主要风味。根据之前GC-MS的结果,日晒干制的鱼肉与阴干的鱼肉有显著差异是因为醛醇酮小分子化合物种类和含量的差异造成的。可能是日晒加速了氧化给日晒干制的鱼肉带来了强烈的油脂香和肉香味。而无日晒的环境可能更适合微生物的生长,有利于分解鱼肉中的蛋白质等物质,使阴干的鱼肉有较明显的鱼腥味

和酸味。而避光干制武昌鱼的鱼腥味、土腥味更强烈，可能是因为避光干制的条件更宜于微生物生长，使微生物分解鱼肉中的氨基酸、脂肪水解的产物形成独特的风味。

2.5 干制武昌鱼的脂肪酸、特征性风味物质及氧化指标的相关性分析

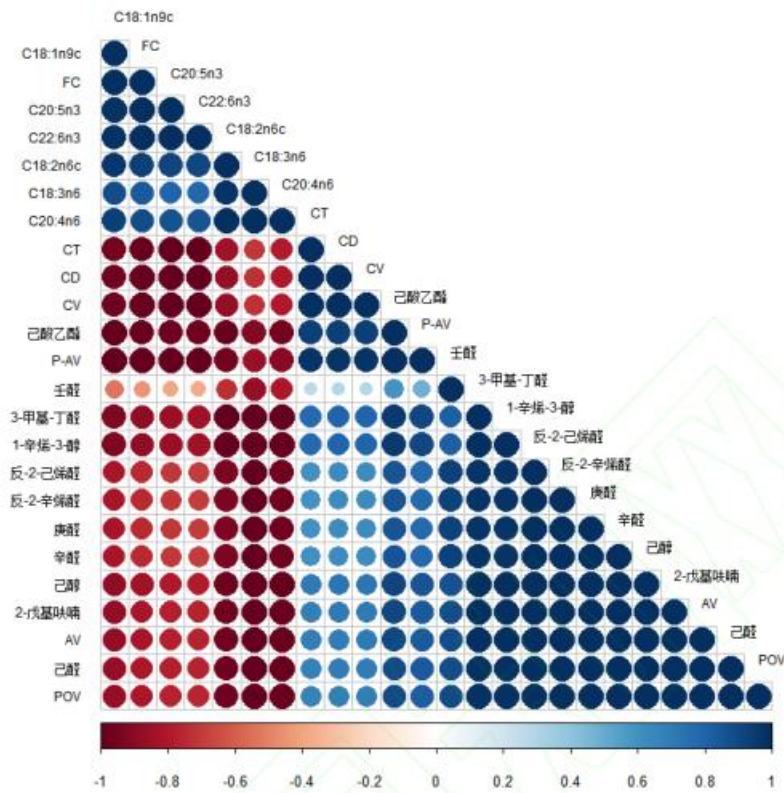


图 7 干腌武昌鱼特的脂肪酸、挥发性风味物质与氧化指标的相关性分析

Figure 7 Correlation analysis of fatty acids, characteristic flavor substances and oxidation indexes of dry-cured blunt-snout bream

从风干武昌鱼的脂肪酸、特征风味物质及脂肪氧化指标的相关性分析可以看出，风干武昌鱼的特征风味物质均与脂肪酸呈负相关，尤其是亚油酸、亚麻酸与花生四烯酸与己醛、庚醛、辛醛、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃、反-2-辛烯醛和呈显著负相关，说明这类不饱和脂肪酸的含量直接影响这类挥发性化合物的生成，这与线性醛、不饱和醇等挥发性化合物是由多数不饱和脂肪酸降解形成的结果一致。同时，这些脂肪酸正是这些醛类的风味前体物质。 p -AV、AV、POV 与挥发性化合物呈正相关，即氧化的程度越深，此类风味物质的含量越高。其中 POV 与 AV 呈显著正相关，这是因为脂肪水解为游离脂肪酸发生氧化生成氧化初级产物氢过氧化物是氧化的初步阶段，部分氢过氧化物会产生新的自由基继续与底物反应再发生氧化反应，还有部分氢过氧化物再降解生成次级氧化产物产生这些挥发性化合物^[32]。

3 结论

两种传统干制方式的武昌鱼在整体气味上有显著差异，日晒干制的武昌鱼有更强的哈喇味和肉香味，阴干武昌鱼有更显著的鱼腥味和花果香，这是由于两种干制方式的特征风味物质辛醛、庚醛、2-辛烯醛、3-甲基-1-丁醛、庚醇具有鱼腥味和油脂味，而 1-辛烯-3-醇、乙酸己酯、D-柠檬烯具有鱼腥味和水果香气。同时，因为日晒加速了脂肪的氧化使得日晒干

制的鱼肉醛、醇类物质的较多且含量高。醛、醇多为低阈值的香气物质,表明了日晒干制的武昌鱼整体气味更加丰富。在香气形成的过程中两种干制方式下,鱼肉的不饱和脂肪酸含量也在降低,多不饱和双键的脂肪酸变化越显著,因光氧化的速率比自氧化快速,所以日晒干制武昌鱼的脂肪酸含量变化比阴干更为显著。日晒加速了氧化赋予了鱼肉更丰富的气味,阴干的武昌鱼的气味更清香。风干武昌鱼的香气物质源于脂肪氧化,与不饱和脂肪酸中亚油酸(C18:2n6)、(C18:3n6)、亚麻酸(C20:3(n-3))和花生四烯酸(C20:4n6)显著相关。现代工业化干制方法可以加速干制时间,但是整体风味不如传统干制干腌鱼风味丰富。本实验为干腌鱼的风味加工与调控提供了一定的参考,但光氧化对干腌产品香气的影响值得进一步探索,因此光的控制和利用对干腌鱼特征香气物质的形成尤为重要。

参考文献:

- [1]叶元土,郭建林,萧培珍,等.养殖武昌鱼体色与鳞片黑色素细胞初步观察[J].饲料工业,2006(22):25-27.Ye Yuantu, Guo Jianlin, Xiao Peizhen, et al. Preliminary observation on body color and scale melanocytes of cultured Wuchang fish[J]. Feed Industry, 2006(22):25-27.
- [2]林剑军,赵文红,刘巧瑜,等.脂质水解氧化对干腌鱼制品风味影响的研究进展[J].食品工业,2021,42(09):206-210.Lin Jianjun, Zhao Wenhong, Liu Qiaoyu, et al. Research progress on the effect of lipid hydrolysis and oxidation on the flavor of dried salted fish products [J]. Food Industry, 2021,42(09):206-210.
- [3]郭雅. 不同腌制工艺对风干鳊鱼品质影响研究[D].南京师范大学,2016.Guo Ya. Study on the effect of different pickling techniques on the quality of air-dried bream[D].Nanjing Normal University,2016.
- [4]张进杰. 中国南方传统腊鱼加工、品质及安全性研究[D].浙江大学,2012.Zhang Jinjie. Research on processing, quality and safety of traditional cured fish in southern China [D]. Zhejiang University, 2012.
- [5]FOLCH J, LEES M, STANL S G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.
- [6]GB 5009.227-2016, 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S].
- [7]GB 5009.229-2016, 食品安全国家标准 食品中酸价的测定[S].
- [8]GB 24304-2009, 食品安全国家标准 动物油脂 茴香胺值的测定[S].
- [9]韩瑞阳,蓝芳,梁宏,等.正丁醇常数法快速测定煎炸油脂中羰基价[J].食品安全质量检测学报,2014,5(11):3501-3508.DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2014.11.026.Han Ruiyang, Lan Fang, Liang Hong, et al. Rapid determination of carbonyl valence in frying oil by n-butanol constant method[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2014,5(11):3501-3508.
- [10]GB 5009.168-2016, 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定[S].
- [11]KALUZNY M A, DUNCAN L A, MERRITT M V, et al. Rapid separation of lipid classes in high yield and purity using bonded phase columns[J]. Journal of Lipid Research, 1985, 26(1): 135-140.DOI:10.1089/jlr.1985.5.651.
- [12]王未君,郑畅,杨博,等.膨爆预处理对三种菜籽油品质及挥发性风味成分的影响[J/OL].中国油料作物学报:1-8[2022-03-11].DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2021122.Wang Weijun, Zheng Chang, Yang Bo, et al. Effects of expansion pretreatment on the quality and volatile flavor components of three kinds of rapeseed oils [J/OL]. Chinese Journal of Oil Crops: 1-8[2022-03-11]. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2021122.
- [13]陈方雪,周明珠,邓祎,等.电子束辐照处理对鲢鱼冷藏期间品质的影响[J].肉类研究,2021,35(06):57-62.Chen Fangxue, Zhou Mingzhu, Deng Yi, et al. Effects of electron beam irradiation on the quality of channel catfish during refrigeration [J]. Meat Research, 2021,35(06):57-62.
- [14]顾赛麒,唐锦品,周绪霞,等.腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成[J].食品科学,2019,40(17):36-44.Gu Saiqi, Tang Jinjing, Zhou Xuxia, et al. Quality change and aroma formation of cured fish during traditional sun drying [J]. Food Science, 2019, 40(17): 36-44.
- [15]The LRI and odor database [DB/OL]. (2004-11-19). <http://www.odour.org.uk/>.

- [16] Wang XY, Xie J, Chen X J . Differences in lipid composition of Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) during storage at 0 °C and 4 °C [J]. Food Research International, 2021, 143:110233.
- [17] Czermer M , Mabel C Tomás, María I Yeannes. Ripening of salted anchovy (*Engraulis anchoita*): development of lipid oxidation, colour and other sensorial characteristics[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2011, 91(4):609-615.
- [18]周胜强.油脂氧化酸败的主要诱因——光氧化[J].四川粮油科技,2003(02):28-30.Zhou Shengqiang.The main cause of oxidative rancidity of fats and oils——photooxidation[J].Sichuan Cereals and Oils Science and Technology,2003(02):28-30.
- [19]顾赛麒,鲍嵘斌,冯媛,等.肉类和水产制品脂质光氧化机制及其影响因素[J].食品与发酵工业,2021,47(24):271-278.DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.027457.Gu Saiqi, Bao Rongbin, Feng Yuan, et al. Mechanism and influencing factors of lipid photooxidation in meat and aquatic products [J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(24): 271-278. DOI: 10.13995/j .cnki.11-1802/ts.027457.
- [20] Guo X , Wang Y , Lu S , et al. Changes in proteolysis, protein oxidation, flavor, color and texture of dry-cured mutton ham during storage[J]. LWT- Food Science and Technology, 2021(8):111860.
- [21]TONGNUANCHAN P, BENJAKUL S, PRODPRAN T. Roles of lipid oxidation and pH on properties and yellow discolouration during storage of film from red tilapia (*Oreochromis niloticus*) muscle protein[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(3): 426-433. DOI:10.1016/j.foodhyd.2010.07.013.
- [22] Zhao D , Hu J , Chen W . Analysis of the relationship between microorganisms and flavor development in dry-cured grass carp by high-throughput sequencing, volatile flavor analysis and metabolomics[J]. Food Chemistry, 368.
- [23]WONG K W. Clinical efficacy of n-3 fatty acid supplementation in patients with asthma[J]. Journal of the American Dietetic Association,2005, 105(1): 98-105. DOI:10.1016/j.jada.2004.10.009.
- [24] Qi Z , Yda B , Sga B , et al. Identification of changes in volatile compounds in dry-cured fish during storage using HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 137.
- [25] Lopez-Pedrouso M , Perez-Santaescolastica C , Franco D , et al. Molecular insight into taste and aroma of sliced dry-cured ham induced by protein degradation undergone high-pressure conditions[J]. Food Research International, 2019, 122(AUG):635-642.
- [26] Moretti V M , Vasconi M , Caprino F , et al. Fatty Acid Profiles and Volatile Compounds Formation During Processing and Ripening of a Traditional Salted Dry Fish Product[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016.
- [27]吴燕燕,游刚,李来好,杨贤庆,邓建朝,陈胜军.低盐乳酸菌法与传统法腌干鱼制品的风味比较[J].水产学报,2014,38(04):600-611.Wu Yanyan, You Gang, Li Laihao, Yang Xianqing, Deng Jianchao, Chen Shengjun.Comparison of flavor of dried fish products cured by low-salt lactic acid bacteria method and traditional method[J].Journal of Fisheries,2014,38(04):600-611.
- [28] Mazhar S , Kilcawley K N , Hill C , et al. A Systems-Wide Analysis of Proteolytic and Lipolytic Pathways Uncovers The Flavor-Forming Potential of The Gram-Positive Bacterium *Macroccoccus caseolyticus* subsp. *caseolyticus*[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11:1533-.
- [29] Flores M . Understanding the implications of current health trends on the aroma of wet and dry cured meat products[J]. Meat Science, 2018, 144:53-61.
- [30] Xu Y , Li L , Regenstein J M , et al. The contribution of autochthonous microflora on free fatty acids release and flavor development in low-salt fermented fish.[J]. Food Chemistry, 2018:S030881461830390X.
- [31]李璇,邓尚贵,张宾,等.基于电子鼻的竹荚鱼肉鲜度及品质的评价[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2012,31(05):384-388.Li Xuan, Deng Shanggui, Zhang Bin, et al. Evaluation of freshness and quality of horse mackerel meat based on electronic nose [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2012,31(05):384-388.
- [32] Love J D , Pearson A M . Lipid oxidation in meat and meat products—A review[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1971, 48(10):547-549.
- [33]Tan Fengling, Wang Peng, Tian Honglei, et al.Characterization of key aroma compounds in flat peach juice based on gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O), odor activity value (OAV), aroma recombination, and omission experiments.[J]Food Chemistry Volume 366, 2021. PP 130604-130604
- [34]Wang, M., Wang, M., Huyan, Z., Li, Q., Hu, K., Li, J., & Yu, X. (2022). Investigation of the effects of lights, temperatures and

packaging materials on the virgin rapeseed oil flavors during storage. *Lwt*, 157. doi:10.1016/j.lwt.2022.113089

[35]Zhao, S., Niu, C., Yang, X., Xu, X., Zheng, F., Liu, C., . . . Li, Q. (2022). Roles of sunlight exposure on chemosensory characteristic of broad bean paste by untargeted profiling of volatile flavors and multivariate statistical analysis. *Food Chem*, 381, 132115. doi:10.1016/j.foodchem.2022.132115

[36]顾赛麒,周洪鑫,郑皓铭,周绪霞,陈园,丁玉庭.干制方式对腌腊草鱼脂肪氧化和挥发性风味成分的影响[J].食品科学,2018,39(21):1-10. Gu Saiqi, Zhou Hongxin, Zheng Haoming, Zhou Xuxia, Chen Yuan, Ding Yuting. Effects of drying methods on fat oxidation and volatile flavor components of pickled grass carp [J]. *Food Science*, 2018, 39(21): 1-10 .

[37]GBT 22500-2008, 食品安全国家标准 动物油脂吸光度的测定[S].

[38]Mantana Buttara, Kanok-Orn Intarapichet, Keith R. Cadwallader. (2014) Characterization of potent odorants in Thai chempedak fruit (*Artocarpus integer* Merr.), an exotic fruit of Southeast Asia, [J] *Food Research International*, Volume 66, 2014, Pages 388-395, ISSN 0963-9969, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.10.004>.