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]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 78−88. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020176

LIANG Zuanhao, CHEN Haiqiang, LIANG Fengxue, et al. Effects of Drying Techniques on Flavor Profile and Related Physicochemical Properties of Semi-dried *Trachinotus ovatus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 78−88. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020176

· 研究与探讨 ·

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

梁钻好[1,3], 陈海强[1,3], 梁凤雪[1,3], 余　铭[2,3,*]

（1.阳江职业技术学院, 广东 阳江 529566;
2.广东海洋大学食品科学与工程学院, 广东 阳江 529500;
3.广东省食品低温加工工程技术研究中心, 广东 阳江 529566）

摘　要: 为探究光照和温度对半干金鲳鱼风味及其相关理化指标的影响，并确定适宜的干燥方法，本研究采用日晒、60 ℃ 热风干燥、20 ℃ 热泵干燥、日光+20 ℃ 热泵干燥和日光+变温热泵干燥 5 种方式干制半干金鲳鱼，测定样品总挥发性盐基氮（TVB-N）和丙二醛含量，利用顶空固相微萃取-气质联用技术（HS-SPME-GC-MS）定性挥发性成分，同时基于气味活性值（OAV）筛选特征风味化合物，并采用聚类热图对样品风味进行归类，最后根据主成分分析（PCA）综合得分确定最佳干燥方式。结果表明，日晒和热风组具有较高的 TVB-N 和丙二醛含量，气味丰富但含有刺鼻的不良气味；相比日晒和热风组，3 组热泵干燥的 TVB-N 和丙二醛含量分别下降 13% 以上和 55% 以上，风味相对较弱，其中对风味有重要贡献的醇、醛和酮类化合物总相对含量为日光+变温热泵>日光+20 ℃ 热泵>20 ℃ 热泵。聚类热图显示，相比热风干燥，3 组热泵干燥半干金鲳鱼的风味更接近日晒组。PCA 综合得分以日光+变温热泵干燥组最高。综上所述，低温有利于保持半干金鲳鱼品质，减少不良气味的产生，增加光照和适当的高温则能促进风味物质的形成；5 种干燥方式中，半干金鲳鱼风味及其相关理化指标综合最佳的是日光+变温热泵干燥组。

关键词: 半干金鲳鱼, 日光低温热泵干燥, 挥发性成分, 主成分分析, 聚类分析

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0078−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020176

本文网刊:

Effects of Drying Techniques on Flavor Profile and Related Physicochemical Properties of Semi-dried *Trachinotus ovatus*

LIANG Zuanhao[1,3], CHEN Haiqiang[1,3], LIANG Fengxue[1,3], YU Ming[2,3,*]

（1.Yangjiang Polytechnic, Yangjiang 529566, China;
2.School of Food Science and Engineering, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529566, China;
3.Engineering Technology Research Center of Low Temperature Food Pocessing of Guangdong Provice, Yangjiang 529500, China）

Abstract: The aim of this study was to evaluate the effects of sunlight exposure and drying temperature on the flavor profile and related physicochemical properties of semi-dried *Trachinotus ovatus*, with a view to providing insights into optimal drying technique. Five drying treatments were applied: sunlight drying, hot-air drying at 60 ℃, heat pump drying at 20 ℃, combined sunlight/heat pump drying at 20 ℃, and sunlight/heat pump drying with variable-temperature. The sample

收稿日期: 2025−02−24

基金项目: 广东省教育厅普通高校重点领域专项（2021ZDZX4081）; 广东省教育厅普通高校重点科研平台（2021GCZX017）; 广东省“百千万工程”项目（KTP20240469）。

作者简介: 梁钻好（1989−）, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 食品低温加工, E-mail: jaly1031@163.com。

*** 通信作者:** 余铭（1973−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品保藏新技术, E-mail: yuemin1973@126.com。

analysis included content assessment of total volatile basic nitrogen (TVB-N) and malondialdehyde (MDA), identification of volatile compounds through headspace solid-phase microextraction GC-MS, screening of characteristic flavor compounds based on OAV value, and categorization of flavor profile via clustering heatmap. Finaly, the optimal drying technique was identified by principal component analysis (PCA). Results showed that the sunlight drying and hot-air drying groups exhibited elevated levels of TVB-N and MDA, characterised by a rich bouquet but also containing pungent and undesirable odours. In contrast, compared with the sunlight drying and hot-air drying groups, the three groups treated with heat pump drying showed more than 13% and 55% decrease on TVB-N and MDA respectively, and relatively weak flavors. Meanwhile, the total relative contents for key flavor contributors of alcohols, aldehydes and ketones were as follows: Sunlight/heat pump drying with variable-temperature>combined sunlight/heat pump drying at 20 ℃>heat pump drying at 20 ℃. Furthermore, the cluster heatmap demonstrated that, in comparison with hot air drying, the flavor of semi-dried *Trachinotus ovatus* dried by the three groups of heat pumps was more analogous to that of sun-drying. The highest PCA score was obtained in the group of sunlight/heat pump drying with variable-temperature. In summary, this finding suggests that low temperatures are conducive to preserving the quality of semi-dried *Trachinotus ovatus*, and reducing the production of unpleasant odors. Besides, the appropriate levels of heat and light can promote the formation of flavor substances. Among the five sample groups, the semi-dried *Trachinotus ovatus* with the best comprehensive flavor and related physicochemical properties was the group of sunlight/heat pump drying with variable-temperature.

Key words: semi-dried *Trachinotus ovatus*; combined sunlight/heat pump drying; volatile components; principal component analysis; clustering analysis

金鲳鱼，学名卵形鲳鲹，为鲈形目鲹科鲳鲹属。据中国水产科学研究院统计，2023 年全国金鲳鱼的年产量为 29.23 万吨，成为我国第一大海水鱼养殖品种。金鲳鱼更是华南地区海洋牧场的重要养殖品种之一[1]；广东湛江就是其全国最大的养殖基地，养殖量占全国 40%，被誉为“中国金鲳鱼之都”；广东阳江也是仅次于湛江的国内第二大金鲳鱼主产区。金鲳鱼无肌间刺、肉质鲜嫩、富有弹性、口感滑嫩饱满，但它的脂肪含量较高，不适宜全干。半干金鲳鱼（水分含量 40%~70%），既延长了鱼肉保鲜期，也保留了水产品的鲜甜味，其口感独特，为华南地区特色水产制品。

水产品干燥方式包括传统的人工晒制、高温机械烘干（热风干燥）和一些新型的低温干燥方式，如热泵干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、远红外干燥等。传统日晒的鱼干风味独特，市场接受度高；高温机械烘干干燥速度快，虽可有效避免人工晒制的缺陷，但干燥过程也容易发生蛋白质热变性、脂质氧化、美拉德反应等影响干制品品质和外观（硬化）的不良反应[2]，且太阳光氧化降解产生的风味物质有别于热反应降解[3]。高脂类水产更适宜采用低温干燥以减少脂肪氧化，延长货架期。低温干燥方式中，以低能耗的低温热泵干燥技术最具推广前景，由于干燥温度低，表面水分的蒸发速度与内部向表面迁移速度比较接近，避免了水产品中不饱和脂肪酸的氧化和表面发黄，减少了蛋白质受热变性、物料变形、变色和呈味类物质的损失；但也正因为干燥温度太低，产品色泽较淡，风味物质难以形成[4]，感官欠佳，市场接受度较低。本团队研发的日光低温集成干燥设备[5]，是在热泵干燥的基础上进行升级改造，实际为日光-热泵的组合干燥装备，生产的产品既保留大众喜好的日晒风味，又能更好地保持水产品营养、延缓氧化、增强贮藏性。但实际上，阳光与热能复合作用下的水产品风味变化非常复杂。相较于阴干处理，光照更能促进干腌武昌鱼脂肪氧化、风味形成和香气积累[6]，有效提高腌腊草鱼风味物质的气味活性值[7]。但目前关于阳光与温度双变量对水产品风味影响的研究较为匮乏。基于此，本研究采用不同干燥方法干制半干金鲳鱼，深入探究太阳光和温度对半干金鲳鱼风味及其相关理化指标（TVB-N、丙二醛含量）的影响，旨在为水产品新型组合干燥方式提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

金鲳鱼、食盐、味精　购于阳江市木赍市场；2,4,6-三甲基吡啶（纯度 99%）　上海麦克林生化科技有限公司；氯化钠、硼酸、乙醇、氧化镁、盐酸、无水碳酸钠、溴甲酚绿、甲基红、亚甲基蓝、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、乙二胺四乙酸二钠　分析纯，天津市福晨化学试剂厂。

日光低温集成干燥设备　实验室研发见图 1，阳



图 1　日光低温集成干燥设备

Fig.1　Sunlight low-temperature integrated drying equipment

江市江湾冷气机电有限公司制造; DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱　成都圣欣科学仪器有限公司; 萃取头(50/30 μm DVB/CAR/PDMS)　美国 Supelo 公司; GCMS-QP2010 UItra 气质联用仪、DB-Wax 色谱柱　日本(岛津)有限公司; ATN-300 自动凯氏定氮仪　上海洪纪仪器设备有限公司; SP-752 紫外可见分光光度计　上海光谱仪器有限公司; SY204 分析天平　上海佑科仪器仪表有限公司; HH·S21-4 恒温水浴锅　上海悦丰仪器仪表有限公司; BC/BD-320HEK 冰柜　青岛海尔特种电冰柜有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　金鲳鱼的腌制与干燥处理　挑选质量(500±50)g 的鲜活金鲳鱼, 去鱼鳞、鱼鳃和内脏, 切成连块状, 用清水冲洗干净鱼体至无血丝。配制腌制液: 8% 食盐水中加入 0.5% 味精。腌制处理: 鱼肉重量和腌制液体积比为 1∶2, 再按鱼肉重量加入 20% 碎冰, 确保鱼肉完全浸泡于腌制液中, 腌制时间 1 h。腌制结束后把鱼肉捞起沥干备用。

腌制后的金鲳鱼按 5 种干燥方式进行干燥处理, 干燥时间通过鱼肉最终水分含量降到 50%±5% 来确定, 干燥结束后样品真空包装至−18 ℃ 冻藏。5 种干燥方式及工艺参数: A: 日晒 3 d; B: 60 ℃ 热风干燥 6 h; C: 20 ℃ 热泵干燥 21 h; D: 日光+20 ℃ 热泵干燥 16 h; E: 日光+变温热泵干燥 16 h, 温度变化设置: 20 ℃ 2 h, 40 ℃ 0.5 h, 20 ℃ 2 h, 40 ℃ 0.5 h, 20 ℃ 11 h。C、D、E 组均采用本团队研发并授权专利[5] 的日光低温集成干燥设备进行干燥, 其中 C 组在室内避光运行, D、E 组露天运行。

1.2.2　理化指标的测定　TVB-N 含量参照 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的半微量滴定法进行测定; 丙二醛含量参照 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》中的分光光度法进行测定。

1.2.3　挥发性化合物的测定　参照梁钻好等[8] 的方法稍作修改。取鱼肉研磨成鱼糜后待测。于顶空瓶中准确称取 5.00 g 鱼肉样品, 并加入 20 mL 饱和氯化钠溶液和 10 μL 0.05 mL/L 2,4,6-三甲基吡啶溶液后迅速密闭顶空瓶, 80 ℃ 平衡 10 min 后将已老化的萃取头插入顶空瓶中富集萃取 30 min, 在 240 ℃ 脱附 3 min 进样。

色谱条件: DB-Wax 极性毛细管柱(30 m×250 μm×0.25 μm), 载气为氦气, 流速 1 mL/min; 恒压模式, 压力 112 kPa; 色谱柱起始柱温为 50 ℃, 首先以 4 ℃/min 升到 100 ℃, 然后以 3 ℃/min 升到 150 ℃, 最后以 10 ℃/min 升到 230 ℃。进样量 10 μL, 不分流。进样口温度 240 ℃, 检测器温度 280 ℃。

质谱条件: EI 离子源温度 230 ℃, 能量 70 eV, 扫描范围 35~500 m/z。数据由 Xcalibur 软件系统处理, 未知化合物经计算机检索 NIST 谱库(107 k compounds)相匹配, 正反匹配度>80 的鉴定结果才予以报道。

化合物含量和内标物质含量计算公式分别如公式(1)和公式(2)所示:

$$\text{化合物浓度}(\mu g/100\ g)=\frac{\text{化合物峰面积}}{\text{内标物峰面积}}\times\text{内标物质量浓度} \quad \text{式(1)}$$

$$\text{内标物质量浓度}(\mu g/100\ g)=\frac{\rho\times v\times c}{m} \quad \text{式(2)}$$

式中: ρ, 内标物密度, 视为 1 g/mL; v, 内标物体积, mL; c, 内标物浓度, mL/L; m, 鱼肉质量, g。

1.2.4　特征风味化合物的鉴别　查阅相关文献获得挥发性化合物的嗅觉阈值, OAV 值大于 1 的确定为特征风味化合物, 计算如公式(3)所示:

$$OAV=\frac{\text{化合物浓度}}{\text{该化合物的嗅觉阈值}} \quad \text{式(3)}$$

1.3　数据处理

试验数据采用 WPS Office Execl 6.14.0 进行绘图, GraphPad Prism 9 进行方差分析和主成分分析, TBtools-II 进行聚类热图分析, 采用 SPSS 23 软件中的单因素 ANOVA 检验中的 Duncan's post-hoc 检测对数据间的差异显著性进行评价(P<0.05)。

2　结果与分析

2.1　干燥方式对半干金鲳鱼 TVB-N 及丙二醛含量的影响

TVB-N 含量反映蛋白质的变性程度, 丙二醛含量反映脂肪氧化程度, 二者含量越高代表蛋白质变性、脂肪氧化程度越严重[9−10]。如图 2、图 3 所示, 干燥方式对半干金鲳鱼的 TVB-N 及丙二醛含量有显著影响(P<0.05)。TVB-N 含量高低排序为: 日晒>60 ℃ 热风>日光+变温热泵>日光+20 ℃ 热泵>20 ℃ 热泵, 两者之间均有显著差异。在丙二醛含量上, 日晒组也是位居第一, 高达 2.76 mg/kg, 其含量分别为 20 ℃ 热泵、日光+20 ℃ 热泵和日光+变温热泵这

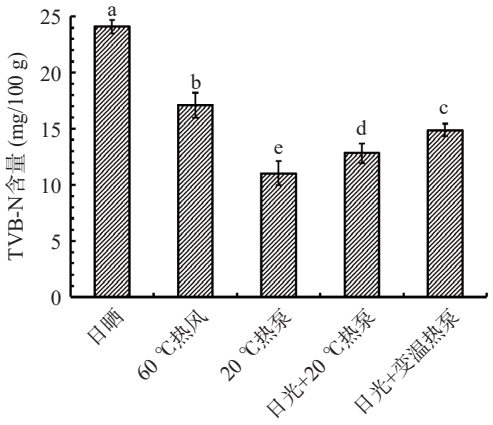


图 2　干燥方式对半干金鲳鱼 TVB-N 含量的影响

Fig.2　Effect of drying methods on TVB-N contents of semi-dried *Trachinotus ovatus*

注: 不同字母代表有显著差异(P<0.05), 图 3 同。

3 组热泵干燥的 19.83 倍、8.41 倍和 9.87 倍；热风组次之，其含量也分别达到 3 组热泵干燥的 5.27 倍、2.24 倍和 2.63 倍。3 组热泵干燥中，以 20 ℃ 热泵组的 TVB-N 和丙二醛含量最低，即 20 ℃ 低温热泵干燥有利于延缓半干金鲳鱼的蛋白质变性。

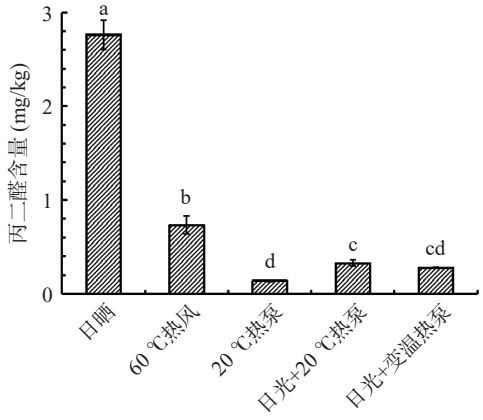


图 3　干燥方式对半干金鲳鱼丙二醛含量的影响

Fig.3　Effect of drying methods on malondialdehyde contents of semi-dried *Trachinotus ovatus*

鱼肉蛋白质在细菌蛋白酶与内源性蛋白酶的共同作用下逐步降解成肽类和氨基酸，再经脱氨酶和脱羧酶作用生成大量的挥发性氨和生物胺类[11]。日晒过程鱼肉中微生物含量显著增加[11]，温暖阳光下也适合内源性蛋白酶作用，表现为 TVB-N 含量最高。高温同样会加速蛋白质、游离氨基酸和核苷酸的降解，使蛋白质发生热变性[9]。3 组热泵干燥的干燥温度较低，低温下微生物繁殖速率减慢，各种生化反应速率受到抑制[9]，表现为 3 组热泵干燥的半干金鲳鱼 TVB-N 含量较低。且根据光和温度变化，表现为 20 ℃ 热泵组的 TVB-N 含量最低，增加光照和提高温度后，即日光+变温热泵干燥组，其 TVB-N 含量显著增加。这表明低温避光干燥有利于降低蛋白质变性程度。

温度高于 35 ℃ 时，鱼脂肪氧化加速，因此 60 ℃ 热风干燥的半干金鲳鱼脂肪氧化的产物丙二醛含量显著高于 3 组热泵干燥的；然而光照亦可加速脂肪氧化[7,12]，故温度同样控制在 20 ℃，日光+热泵组的丙二醛含量略高于单独热泵组，日晒组的金鲳鱼长时间受太阳光尤其是强烈的紫外线直接照射，丙二醛含量甚至高于热风组。这与顾赛麒等[7] 研究发现光照组腌腊鱼脂质氧化指标均高于避光组这一结果一致。

2.2　半干金鲳鱼挥发性成分分析

2.2.1　半干金鲳鱼挥发性成分总体分析　采用顶空固相微萃取-气质联用技术（HS-SPME-GC-MS）测定半干金鲳鱼的挥发性成分，结果见表 1。5 组半干金鲳鱼分别被检测出 77、65、70、65 和 61 种挥发性成分，共同化合物 29 种。其中以 1-辛烯-3-醇、己醛和壬醛含量相对较高，这 3 种化合物的总相对含量约占总挥发性物质的 1/3，可能是半干金鲳鱼重要的挥发性成分。1-辛烯-3-醇主要源于氧化酶对不饱和脂肪酸的氧化分解作用[13]，具有鱼肉香、脂肪气味、草和蘑菇的气味[14]，阈值低；己醛和壬醛的风味前体物质是源于油酸、亚油酸、亚麻酸及花生四烯酸等不饱和脂肪酸的氧化[15]，具有青葱味[14]，也是低阈值化合物。现有研究表明，1-辛烯-3-醇、己醛和壬醛是腌腊红牙鱼[16]、干腌武昌鱼[6]、腌腊草鱼[7,17] 等多种腌腊鱼制

表 1　半干金鲳鱼主要挥发性成分

Table 1　Main volatile components of stinky semi-dried *Trachinotus ovatus*

化合物	日晒		60 ℃热风		20 ℃热泵		日光+20 ℃热泵		日光+热泵变温	
	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）
醇类	71.911	30.170	48.553	26.244	37.743	17.992	36.312	20.614	28.669	16.743
2,3-丁二醇	–	–	0.589	0.318	1.364	0.650	1.157	0.657	0.288	0.168
1-戊烯-3-醇	–	–	1.163	0.628	1.041	0.496	1.023	0.581	1.597	0.933
β-松油醇	–	–	3.370	1.821	–	–	3.745	2.126	–	–
戊醇	2.114	0.887	3.545	1.916	2.059	0.982	3.308	1.878	2.494	1.457
2-丁基-1-辛醇	10.315	4.328	–	–	–	–	–	–	–	–
己醇	2.042	0.857	1.588	0.858	2.976	1.419	1.598	0.907	1.694	0.989
反-2-壬烯-1-醇	6.741	2.828	–	–	–	–	–	–	–	–
十一醇	1.383	0.580	–	–	–	–	–	–	–	–
1-辛烯-3-醇	9.620	4.036	17.159	9.275	12.896	6.147	11.698	6.641	7.229	4.222
庚醇	2.914	1.223	3.115	1.684	2.880	1.373	2.204	1.251	2.275	1.328
2-己基-1-辛醇	20.932	8.782	–	–	–	–	–	–	–	–
十八醇	0.813	0.341	–	–	–	–	–	–	–	–
4-乙基环己醇	0.463	0.194	–	–	–	–	–	–	–	–
己基癸醇	0.522	0.219	–	–	–	–	–	–	–	–
辛醇	2.871	1.205	1.771	0.957	1.884	0.898	1.260	0.715	1.404	0.820
反-2-辛烯-1-醇	2.333	0.979	5.238	2.831	2.705	1.290	2.429	1.379	2.098	1.225
壬烯-4-醇	1.565	0.657	1.801	0.973	0.773	0.369	0.874	0.496	–	–

续表 1

化合物	日晒		60 ℃热风		20 ℃热泵		日光+20 ℃热泵		日光+热泵变温	
	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）
十三醇	–	–	–	–	–	–	–	–	0.406	0.237
壬醇	1.422	0.597	0.684	0.370	0.901	0.429	1.050	0.596	0.829	0.484
3-环己烯-1-乙醇	2.522	1.058	3.164	1.710	2.164	1.032	2.536	1.439	2.175	1.270
十四醇	–	–	0.313	0.169	0.686	0.327	–	–	–	–
3,7,11-三甲基十二醇	0.590	0.247	–	–	–	–	–	–	–	–
四氢薰衣草醇	0.334	0.140	–	–	0.501	0.239	0.294	0.167	0.266	0.155
2-乙基-1-己醇	0.246	0.103	1.987	1.074	0.534	0.255	1.241	0.705	1.797	1.049
2-癸炔-1-醇	–	–	–	–	0.384	0.183	0.211	0.120	0.341	0.199
9-十二炔-1-醇	–	–	1.463	0.791	1.030	0.491	0.794	0.451	1.195	0.698
十二醇	–	–	–	–	0.969	0.462	–	–	0.534	0.312
β-苯氧乙醇	–	–	–	–	–	–	0.682	0.387	–	–
百秋李醇	0.123	0.051	–	–	0.274	0.131	–	–	0.146	0.085
合金欢醇	1.696	0.711	1.391	0.752	1.184	0.565	–	–	1.469	0.858
十六醇	0.349	0.146	0.214	0.115	0.537	0.256	0.211	0.120	0.433	0.253
醛类	87.679	36.786	76.888	41.560	74.619	35.571	66.734	37.885	76.684	44.785
戊醛	1.301	0.546	1.913	1.034	–	–	1.298	0.737	1.003	0.586
己醛	27.351	11.475	43.800	23.675	32.163	15.332	30.123	17.101	32.644	19.065
庚醛	7.129	2.991	1.541	0.833	2.960	1.411	1.768	1.004	2.718	1.587
2,4-壬二烯醛	–	–	0.468	0.253	0.584	0.278	0.562	0.319	–	–
反-4-庚烯醛	1.136	0.476	–	–	–	–	–	–	–	–
辛醛	0.804	0.337	3.226	1.744	4.211	2.007	3.767	2.138	4.518	2.639
反-2-庚烯醛	4.121	1.729	–	–	–	–	–	–	–	–
壬醛	29.790	12.499	8.771	4.741	16.637	7.931	17.968	10.201	15.540	9.076
5-乙基环戊-1-烯甲醛	–	–	–	–	–	–	–	–	0.402	0.235
反-2-辛烯醛	–	–	3.307	1.788	–	–	–	–	–	–
十一醛	3.822	1.604	–	–	–	–	–	–	–	–
癸醛	3.589	1.506	4.925	2.662	9.815	4.679	4.115	2.336	12.376	7.228
苯甲醛	2.986	1.253	5.774	3.121	4.869	2.321	4.800	2.725	4.736	2.766
反-2-壬烯醛	1.160	0.486	0.787	0.425	1.232	0.587	0.951	0.540	1.030	0.602
反,顺-2,6-壬二烯醛	0.333	0.140	0.452	0.244	0.471	0.224	0.428	0.243	0.300	0.175
十四醛	1.744	0.732	–	–	0.515	0.246	0.385	0.219	0.668	0.390
反-2-癸烯醛	0.933	0.391	–	–	–	–	–	–	–	–
十二醛	0.491	0.206	–	–	–	–	–	–	–	–
反-2,4-癸二烯醛	–	–	0.379	0.205	0.422	0.201	0.163	0.093	0.158	0.093
2,4-癸二烯醛	0.449	0.188	0.854	0.462	0.518	0.247	0.343	0.195	0.297	0.174
十五醛	0.540	0.227	0.210	0.113	0.223	0.106	0.062	0.035	0.292	0.170
十六醛	–	–	0.481	0.260	–	–	–	–	–	–
酮类	19.053	7.994	21.746	11.754	21.849	10.416	17.092	9.703	15.866	9.266
2-丁酮	–	–	–	–	–	–	3.039	1.725	–	–
3-羟基-2-丁酮	0.619	0.260	–	–	–	–	–	–	–	–
2,3-辛二酮	2.250	0.944	–	–	2.296	1.094	–	–	–	–
2-甲基-3-辛酮	–	–	15.604	8.434	11.634	5.546	9.427	5.352	6.956	4.063
甲基庚烯酮	4.201	1.763	1.933	1.045	4.363	2.080	1.923	1.092	3.142	1.835
3-辛烯-2-酮	–	–	0.657	0.355	–	–	–	–	–	–
3,5-辛二烯-2-酮	5.049	2.118	1.846	0.998	–	–	–	–	–	–
2-十一酮	–	–	0.175	0.095	0.532	0.254	0.641	0.364	0.445	0.260
香叶基丙酮	6.933	2.909	1.531	0.827	2.824	1.346	2.062	1.170	5.323	3.109
3,5-二壬烯-2-酮	–	–	–	–	0.201	0.096	–	–	–	–
酯类	2.695	1.131	0.493	0.266	1.996	0.951	0.711	0.404	2.252	1.315
丙氨酸乙酯	0.290	0.122	–	–	–	–	–	–	–	–
己酸乙烯基酯	0.887	0.372	–	–	–	–	–	–	–	–
丁酸丁酯	0.432	0.181	–	–	–	–	–	–	0.363	0.212

续表 1

化合物	日晒		60 ℃热风		20 ℃热泵		日光+20 ℃热泵		日光+热泵变温	
	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）
水杨酸辛酯	1.086	0.456	0.493	0.266	1.996	0.951	0.711	0.404	1.889	1.103
芳香类	6.847	2.873	5.459	2.951	21.158	10.086	6.081	3.452	5.073	2.963
2-戊基呋喃	0.994	0.417	0.874	0.473	0.573	0.273	0.588	0.334	–	–
甲苯	0.467	0.196	0.507	0.274	0.407	0.194	3.415	1.939	–	–
对二甲苯	–	–	0.884	0.478	–	–	–	–	–	–
1,2,3-三甲苯	–	–	–	–	1.513	0.721	–	–	0.431	0.252
对乙基甲苯	–	–	–	–	0.701	0.334	–	–	–	–
1,3,5-三甲苯	0.685	0.287	0.152	0.082	1.367	0.652	–	–	–	–
1,2,4-三甲苯	1.346	0.565	–	–	0.874	0.417	–	–	–	–
邻乙基甲苯	–	–	0.407	0.220	1.710	0.815	0.635	0.360	0.625	0.365
4-异丙基甲苯	0.706	0.296	–	–	–	–	–	–	–	–
4-乙基邻二甲苯	–	–	0.124	0.067	0.774	0.369	0.099	0.056	–	–
3-乙基邻二甲苯	–	–	0.135	0.073	1.643	0.783	–	–	–	–
2-乙基对二甲苯	–	–	0.348	0.188	1.296	0.618	0.304	0.173	0.465	0.272
1,2,4,5-四甲苯	1.940	0.814	0.726	0.393	5.656	2.696	0.259	0.147	2.491	1.455
5-乙基-3,5-二甲苯	–	–	1.301	0.703	2.728	1.301	–	–	1.060	0.619
3,4-二甲基异丙苯	–	–	–	–	1.503	0.716	–	–	–	–
五甲苯	0.710	0.298	–	–	–	–	–	–	–	–
苯酚	–	–	–	–	0.413	0.197	0.782	0.444	–	–
含氮类	1.196	0.502	1.894	1.024	0.000	0.000	7.325	4.158	1.647	0.962
三甲胺	1.045	0.439	–	–	–	–	–	–	–	–
2-甲基-2,4-戊二胺	–	–	1.727	0.934	–	–	6.884	3.908	1.647	0.962
吲哚	0.151	0.063	0.166	0.090	–	–	0.441	0.250	–	–
烯炔类	10.972	4.603	8.589	4.642	7.372	3.514	7.630	4.332	5.762	3.365
十二烯	2.314	0.971	–	–	–	–	–	–	–	–
7-甲基-4-癸烯	1.574	0.660	–	–	–	–	–	–	–	–
1-丁基环戊烯	–	–	0.383	0.207	–	–	–	–	–	–
3,5,5-三甲基-2-己烯	4.388	1.841	5.478	2.961	3.198	1.525	5.483	3.113	4.255	2.485
十七烯	–	–	1.283	0.694	1.616	0.770	0.815	0.463	0.857	0.501
1-石竹烯	–	–	0.657	0.355	1.304	0.622	–	–	–	–
十五烯	–	–	–	–	–	–	0.420	0.239	–	–
α-蒎烯	–	–	–	–	0.655	0.312	0.497	0.282	–	–
菖蒲烯	–	–	–	–	0.273	0.130	–	–	0.172	0.101
5,7-十二碳二烯	1.148	0.482	–	–	–	–	–	–	–	–
8-甲基-1-十一烯	–	–	0.310	0.168	0.325	0.155	0.128	0.073	0.181	0.106
3-十二炔	1.133	0.475	–	–	–	–	–	–	–	–
1,11-十二烷二炔	0.415	0.174	0.478	0.258	–	–	0.287	0.163	0.297	0.173
烷烃类	37.997	15.942	21.385	11.559	45.035	21.469	33.670	19.114	35.273	20.600
癸烷	2.847	1.195	–	–	–	–	1.264	0.717	–	–
3,3,5-三甲基庚烷	3.191	1.339	–	–	0.894	0.426	–	–	0.811	0.474
5-(2-甲基丙基)壬烷	2.480	1.041	–	–	–	–	1.566	0.889	0.630	0.368
2-甲基-6-丙基十二烷	1.252	0.525	–	–	–	–	–	–	–	–
5-甲基十一烷	0.639	0.268	–	–	–	–	–	–	–	–
3,8-二甲基癸烷	0.991	0.416	–	–	–	–	–	–	–	–
十二烷	4.923	2.065	–	–	0.990	0.472	–	–	2.099	1.226
3-甲基-5-丙基壬烷	–	–	1.302	0.704	2.942	1.403	–	–	–	–
十三烷	0.469	0.197	3.756	2.030	4.711	2.246	3.225	1.831	3.470	2.027
3.5-二甲基十二烷	1.426	0.598	–	–	–	–	–	–	–	–
十七烷	3.033	1.272	2.819	1.524	7.248	3.455	5.539	3.145	5.049	2.949
十四烷	–	–	2.524	1.364	5.436	2.591	4.596	2.609	3.976	2.322
十五烷	2.020	0.847	1.618	0.875	2.842	1.355	2.109	1.197	2.173	1.269
十六烷	–	–	6.028	3.258	11.988	5.715	8.503	4.827	8.095	4.727

续表 1

化合物	日晒		60 ℃热风		20 ℃热泵		日光+20 ℃热泵		日光+热泵变温	
	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）	浓度（μg/100 g）	相对含量（%）
9-甲基十七烷	–	–	–	–	0.442	0.211	–	–	0.203	0.119
2,6,10-三甲基十二烷	–	–	–	–	2.144	1.022	1.230	0.698	1.601	0.935
2-甲基十二烷	1.780	0.747	–	–	–	–	0.117	0.067	–	–
2,3-二甲基十二烷	–	–	–	–	–	–	0.433	0.246	–	–
2,6,10,14-四甲基十五烷	8.833	3.706	2.948	1.593	5.398	2.573	5.086	2.887	7.165	4.185
十九烷	4.114	1.726	–	–	–	–	–	–	–	–
5-丙基十三烷	–	–	0.391	0.212	–	–	–	–	–	–
酸类	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.539	0.267	0.00	0.00
2-乙基丁酸	–	–	–	–	–	–	0.593	0.337	–	–

注: –表示未检测出, 表2同。

品的特征风味化合物。对比 5 组样品中 1-辛烯-3-醇、己醛和壬醛含量可知, 60 ℃ 热风组的 1-辛烯-3-醇和己醛含量最高, 而 3 组光照(日晒、日光+20 ℃热泵、日光+变温热泵)的壬醛含量相对偏高。因此可推测脂肪酸的热氧化降解有利于形成 1-辛烯-3-醇和己醛, 而这可能又与美拉德反应促进形成这类化合物有关[18]; 壬醛的合成则更偏向于光氧化降解。顾赛麒等[19] 在光敏剂高铁肌红蛋白介导腌腊草鱼脂质光氧化反应实验得出壬醛含量与脂肪酸的光氧化反应呈正相关。陈方雪等[6] 研究也发现日晒的干腌武昌鱼中壬醛含量显著高于阴干的。

2.2.2 不同干燥方式对半干金鲳鱼主要挥发性成分的影响 如图 4 所示, 在半干金鲳鱼挥发性化合物大类方面, 5 组样品共检测出 9 大类 122 种挥发性成分, 以醇类、醛类、酮类和烷烃类化合物为主, 其次是烯炔类, 还有少量的芳香类、酯类和含氮类化合物。20 ℃ 热泵组未被检测出含氮类化合物, 只有日光+20 ℃ 热泵组被检测出 1 种酸类化合物(2-乙基丁酸), 其他 4 组未被检测出酸类化合物。

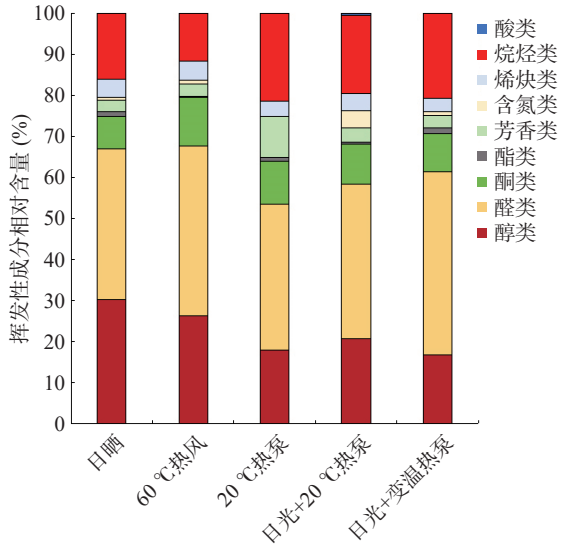


图 4 半干金鲳鱼各类别挥发性成分的相对含量及种类数量

Fig.4 Relative content and species quantity of various types of volatile components in semi-dried *Trachinotus ovatus*

日晒组的挥发性成分种类最多, 以醇类和醛类含量最高、种类最多(图 4)。从挥发性成分类别分析, 醇类主要源于不饱和脂肪酸的降解[19−20], 醛类主要源自脂肪酸自氧化(线性醛)和氨基酸降解(支醛和芳香醛)[21−23], 二者阈值低, 对气味有极大贡献作用。此外, 不饱和烯醇和烯醛被认为对腌腊鱼的干香、青香、脂香贡献显著[19]。这些表明, 日晒半干金鲳鱼气味更丰富。除了 1-辛烯-3-醇、己醛和壬醛外, 日晒组的 2-丁基-1-辛醇、2-己基-1-辛醇、反-2-壬烯-1-醇、反-2-庚烯醛和庚醛含量也较高, 其中 2-丁基-1-辛醇、2-己基-1-辛醇、反-2-壬烯-1-醇、反-2-庚烯醛只在日晒组中被检测出, 是日晒组区别于其他干燥方式的重要挥发性成分。现有研究也发现类似现象, 反-2-壬烯-1-醇和反-2-庚烯醛只在日晒组的腌草鱼[7] 和腌武昌鱼中[6] 被检测出。

酮类主要由脂肪酸的氧化降解以及醇类物质的氧化生成[24]。酮类化合物在各组半干金鲳鱼中占比也较高, 但大部分阈值也较高, 对半干金鲳鱼整体风味贡献度不如醇类和醛类, 但对成品风味具有一定的修饰作用[25]。

5 组样品中被检测出 3 种含氮类化合物, 其中具有腐败特征臭味的三甲胺阈值较高, 对半干金鲳鱼风味有重要影响, 是鱼腥气味的重要来源。三甲胺只在日晒组中被检测出, 与半干金鲳鱼长时间暴露在外被微生物污染有关[11], 也从侧面反映日晒半干金鲳鱼不耐贮藏, 与 2.1 日晒组 TVB-N 含量较高相一致。20 ℃ 热泵组未被检测出含氮化合物, 说明低温有利于减少不良气味的产生。

3 组热泵干燥均被检测出约 10 种烷烃类化合物, 相对含量约占总挥发性成分的 20%, 远高于日晒组(15.9%)和热风组(11.6%)。烷烃类化合物阈值较高, 对半干金鲳鱼风味几乎无贡献, 表明 3 组热泵干燥的风味显著相对较弱。这与 20 ℃ 热泵干燥温度太低, 延缓了脂质和蛋白质氧化降解或阻碍了美拉德反应等从而抑制了部分风味前体物质的形成密切相

关。虽然如此，但 3 组热泵干燥中对风味有重要贡献的醇类、醛类和酮类化合物总相对含量为日光+变温热泵（70.8%）>日光+20 ℃ 热泵（68.2%）>20 ℃ 热泵（64.0%），即相同干燥温度下，增加光照和适当的高温，有利于加速脂质和蛋白质氧化降解（与 2.1 的理化指标变化规律一致），从而促进风味前体物质的形成。

2.3　半干金鲳鱼特征风味化合物分析

如表 2 所示，通过 OAV 值大于 1 确定半干金鲳鱼的特征风味化合物有 21 种，共有特征风味化合物 10 种，包括 4 种醇类（己醇、1-辛烯-3-醇、庚醇、反-2-辛烯-1-醇）和 6 种醛类（己醛、庚醛、壬醛、癸醛、反-2-壬烯醛、反,顺-2,6-壬二烯醛）。

醇类特征风味物质中，以 1-辛烯-3-醇的 OAV 值最高，在 5 组半干金鲳鱼中占 4 种醇类特征风味化合物贡献度的 85% 以上，表明 1-辛烯-3-醇对半干金鲳鱼香气贡献较大。醇类香气差异也较大，己醇具有青草味，1-辛烯-3-醇具有蘑菇味、庚醇具有坚果味[14]，这 3 种醇类物质也被顾赛麒等[11] 确定为腌腊草鱼的重要气味活性物质。反-2-辛烯-1-醇则有脂香和奶油香[7]，香气各异的醇类赋予半干金鲳鱼丰富细腻的风味。

C5~C10 的饱和醛主要来自油酸、亚油酸、亚麻酸和花生四烯酸等的氧化降解，不饱和烯醛主要来自亚油酸酯和亚麻酸酯氢过氧化物的降解[11,19]。根据气味描述（表 2），上述 4 种饱和醛和 2 种烯醛赋予了半干金鲳鱼典型的鱼香、青香和脂香风味，顾赛麒等[11] 的研究也得出类似的结果。其中癸醛、壬醛、反-2-壬烯醛、己醛的 OAV 值均超 50，这 4 种醛类特征风味化合物在 5 组半干金鲳鱼中分别占 10 种共有特征风味化合物总贡献度的 88.96%、84.75%、92.23%、88.55% 和 95.77%，在 10 种共有特征风味化合物中对半干金鲳鱼风味贡献度较大。

十一醛具有脂肪、黄油和蜡香，对半干金鲳鱼风味有正向贡献作用，而含有汽油和辛辣气味的 4-异丙基甲苯以及具有腐败氨臭味的三甲胺（OAV 值 104.55）对风味起反向贡献作用[14,26]。5 组半干金鲳鱼中，仅日晒组被检出十一醛、4-异丙基甲苯和三甲胺，且 OAV>1，可推测这 3 种风味化合物是日晒半干金鲳鱼区别于其它干燥方式的重要特征风味化合物。此外，反-2-辛烯醛只在热风组被检测出，并且具有较高的 OAV 值（11.024），可能与高温有利于熟肉中的热反应和不饱和脂肪酸的降解有关，其尖刺的脂肪气味[26] 可能是热风干燥半干金鲳鱼哈喇味的重要来源。

根据特征风味化合物的 OAV 值进行聚类热图分析，结果如图 5 所示，可把 5 组半干金鲳鱼样品分成 3 大类。热风组和日晒组各为一类，3 组热泵干燥的风味较为接近，可归为一类。5 组样品中，同一特征化合物在某组样品中的贡献度越大（OAV 值越大），颜色越红，反之颜色越蓝。对比其他组，热风组的特征风味化合物贡献度要么最大，要么最小，呈明显的两极分化，表现为风味较尖锐。日晒组的特征风味化合物贡献度也有明显的分化，且大部分特征风味

表 2　半干金鲳的特征风味化合物（OAV>1）

Table 2　Characteristic flavor compounds of semi-dried *Trachinotus ovatus* (OAV>1)

序号	化合物	气味描述	阈值（μg/100 g）	OAV值				
				日晒	60 ℃热风	20 ℃热泵	日光+20 ℃热泵	日光+变温热泵
1	己醇	绿色青草味，脂肪气味，叶菜味[14]	0.57[14]	3.583	2.786	5.221	2.803	2.972
2	1-辛烯-3-醇	鱼肉香，脂肪气味，草和蘑菇的气味[14]	0.15[14]	64.136	114.396	85.971	77.987	48.196
3	庚醇	新鲜的绿色气味，坚果味[14]	0.55[14]	5.298	5.664	5.237	4.007	4.136
4	反-2-辛烯-1-醇	绿色柑橘、蔬菜、奶油、脂肪和蜡香[7]	2.00[7]	1.166	2.619	1.353	1.214	1.049
5	戊醛	辛辣味，杏仁味，橡胶味[27]	0.9[27]	1.446	2.126	–	1.442	1.115
6	己醛	鱼味，青葱味，未成熟的青涩水果味[14]	0.5[14]	54.702	87.599	64.326	60.246	65.288
7	庚醛	鱼干味，甜杏、坚果香气[14,26]	0.29[14]	24.582	5.315	10.205	6.097	9.372
8	4-庚烯醛	饼干味，奶油味，脂肪味[14]	0.42[14]	2.704	53.770	–	–	–
9	辛醛	橙皮味，脂肪味，甜杏子味[26]	0.06[14]	13.394	–	70.175	62.778	75.305
10	壬醛	青葱味、牛脂味、薰衣草味[14]	0.11[14]	270.823	79.738	151.246	163.348	141.274
11	反-2-辛烯醛	尖刺的脂肪、肉香、青香气[26]	0.30[7]	–	11.024	–	–	–
12	十一醛	蜡、脂肪、黄油、花香、柑桔的气味[26]	0.5[27]	7.644	–	–	–	–
13	癸醛	青香、蜡香、柑橘香、花香[26–27]	0.01[27]	358.933	492.499	981.453	411.525	1237.625
14	苯甲醛	苦杏仁、樱桃及坚果香[26]	4.17[27]	0.716<1	1.385	1.168	1.151	1.136
15	反-2-壬烯醛	脂肪、青香、蜡香、蔬菜香[26]	0.008[7]	144.946	98.332	154.047	118.895	128.796
16	反,顺-2,6-壬二烯醛	甜香、青香，并带有蔬菜香韵[26]	0.08[14]	4.161	5.653	5.883	5.350	3.754
17	2,3-辛二酮	甜的奶油香[26]	1.2[27]	1.875	–	1.913	–	–
18	2-十一酮	脂肪香，果香，酮香，乳酪、奶油的味道[26]	0.55[14]	–	0.319<1	0.967<1	1.165	0.810<1
19	2-戊基呋喃	青豆气味，面包香，麦芽香的气息[14,26]	0.59[14]	1.684	1.482	0.971<1	0.997<1	–
20	4-异丙基甲苯	油脂味，辛辣味，汽油味、柠檬香[14]	0.5[14]	1.412	–	–	–	–
21	三甲胺	腐败鱼肉味、氨臭味	0.01[14]	104.550	–	–	–	–

化合物贡献度大小与热风组相反，即日晒组的风味明显区别于热风组，这表明光氧化降解反应产生的风味物质是有别于热反应降解产生的。日光+20 ℃ 热泵组和日光+变温热泵组的特征风味化合物贡献度最为接近，大部分为中偏低贡献度，表明两组半干金鲳鱼风味较柔和。相比热风组，3 组热泵干燥的半干金鲳鱼风味特征更接近日晒组。

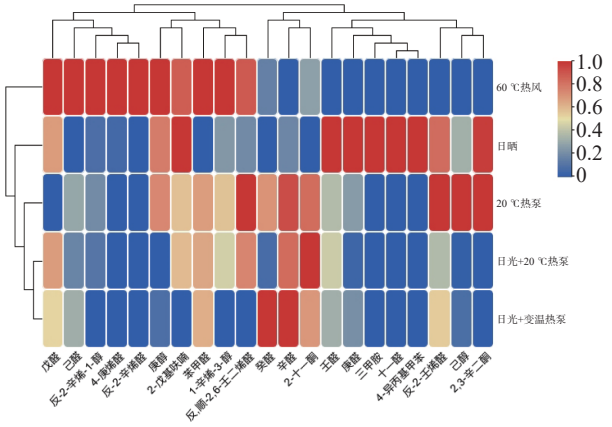


图 5 基于特征风味化合物的半干金鲳鱼聚类热图

Fig.5 Cluster heatmap of semi-dried *Trachinotus ovatus* based on characteristic flavor compounds

2.4 半干金鲳鱼风味及其相关理化指标的关联分析

结合特征风味化合物和风味相关理化指标(TVB-N 和丙二醛含量)对 5 组半干金鲳鱼进行 PCA 分析，提取出 3 个主成分，累计方差贡献率达 97.14%(表 3)，表明 3 个主成分可以解释原始数据的绝大部分信息。以不同主成分的方差贡献率为权重，根据提取的 3 个主成分得分与相应权重乘积的累加和计算得到 5 组半干金鲳鱼特征风味化合物、TVB-N 和丙二醛的综合得分和排序结果见表 4。综合得分越高，说明该组样品的风味及相关理化指标综合指标越好[28]。综合得分由高到低依次排序为：日光+变温热泵、日光+20 ℃ 热泵、20 ℃ 热泵、60 ℃ 热风、日晒。

酶促反应、热降解反应、美拉德反应等导致的脂肪氧化与水解、蛋白质降解与氧化，是食品形成风味物质的重要途径。高温和光照均有利于加速脂解和蛋白水解，释放风味前体物质，从而促进半干金鲳鱼风味的形成。同时，脂解和蛋白水解也是鱼肉品质劣变的两个重要生化过程[29]，表现为 TVB-N、丙二醛含量增加，贮藏性降低。过度的脂解和蛋白水解所释放的挥发性氨和生物胺类(如三甲胺、吲哚等)同样会给半干金鲳鱼带来刺鼻的不良气味。如何找到平衡点以获得品质风味兼优的半干金鲳鱼产品，是目前行业亟待解决的关键问题。日光+变温热泵组利用低温热泵干燥技术抑制脂解和蛋白水解，获得 TVB-N 和丙二醛含量较低的半干金鲳鱼；结合日光和短时高温加工适当促进脂解和蛋白水解[30]，提升产品风味，从而获得风味及其相关理化指标综合最佳的半干金鲳鱼。

表 3 半干金鲳鱼特征风味化合物及其相关理化指标的主成分载荷矩阵

Table 3 Principal component load matrix of characteristic flavor compounds and related physicochemical properties of semi-dried *Trachinotus ovatus*

指标	成分		
	PC1	PC2	PC3
己醇	−0.224	0.370	−0.890
1-辛烯-3-醇	0.538	−0.665	−0.472
庚醇	−0.121	−0.720	−0.619
反-2-辛烯-1-醇	0.552	−0.806	−0.185
戊醛	0.116	−0.761	0.625
己醛	0.749	−0.589	−0.064
庚醛	−0.983	−0.112	−0.060
4-庚烯醛	0.499	−0.848	−0.029
辛醛	0.191	0.981	0.009
壬醛	−0.974	0.119	0.031
反-2-辛烯醛	0.541	−0.822	−0.031
十一醛	−0.947	−0.320	0.038
癸醛	0.278	0.681	−0.041
苯甲醛	0.989	−0.098	−0.088
反-2-壬烯醛	−0.643	0.572	−0.494
反,顺-2,6-壬二烯醛	0.541	−0.207	−0.694
2,3-辛二酮	−0.693	0.083	−0.712
2-十一酮	0.544	0.755	−0.044
2-戊基呋喃	−0.350	−0.771	−0.375
4-异丙基甲苯	−0.947	−0.320	0.038
三甲胺	−0.947	−0.320	0.038
TVB-N	−0.730	−0.604	0.274
丙二醛	−0.862	−0.498	0.091
特征值	10.350	7.993	3.305
方差贡献率(%)	45.020	34.750	14.370
累计方差贡献率(%)	45.020	79.770	94.140

表 4 半干金鲳鱼的因子得分及综合得分

Table 4 Principal component scores and comprehensive scores of semi-dried *Trachinotus ovatus*

干燥方式	F1	F2	F3	综合得分	排名
日晒	−5.449	−1.619	0.125	−3.184	5
60 ℃热风	3.114	−4.159	−0.100	−0.061	4
20 ℃热泵	0.502	2.099	−2.929	0.568	3
日光+20 ℃热泵	1.137	1.178	1.006	1.132	2
日光+变温热泵	0.695	2.502	1.898	1.545	1

3 结论

本研究表明，光照和温度对半干金鲳鱼风味及其相关指标有重要影响。日晒和热风干燥半干金鲳鱼的 TVB-N 和丙二醛含量显著高于 3 组热泵干燥的(P<0.05)，日晒组样品具有独特的 2-丁基-1-辛醇、2-己基-1-辛醇、反-2-壬烯-1-醇和反-2-庚烯醛，气味更丰富，但也含有不良风味组分(4-异丙基甲苯和三甲胺)。3 组热泵干燥能有效抑制 TVB-N 和丙二醛含量的增加，但其样品中对气味几乎无贡献的烷烃类化合物占比远高于日晒组和热风组，导致其风味相对较弱；进一步深入分析，3 组热泵干燥中对风味有重

要贡献的醇类、醛类和酮类化合物总相对含量为日光+变温热泵（70.8%）>日光+20 ℃ 热泵（68.2%）>20 ℃ 热泵（64.0%）。这表明低温有利于保持半干金鲳鱼品质，增加光照和适当的高温有利于促进风味物质的形成，基于特征风味化合物的聚类热图分析结果表明，3 组热泵干燥的半干金鲳鱼风味特征比热风组更接近日晒组。结合特征风味化合物、TVB-N 和丙二醛的 PCA 分析表明，日光+变温热泵干燥能获得风味和品质较佳的半干金鲳鱼。

© 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］ 袁可怡, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 不同烹饪方式对金鲳鱼片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 81−90. ［YUAN K Y, ZHAO T T, JIAO W J, et al. Effects of different cooking methods on the quality of golden pomfret fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 81−90.］

［2］ 梁凤雪, 梁钻好, 周伟光, 等. 热风-热泵联合干燥对虾工艺优化[J]. 现代食品, 2020(15): 95−100. ［LIANG F X, LIANG Z H, ZHOU W G, et al. Optimization of drying prawn with the combination of hot air and heat pump[J]. Modern Food, 2020(15): 95−100.］

［3］ 余静, 张佳敏, 王卫, 等. 干燥工艺对腌腊鱼品质特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(12): 95−102. ［YU J, ZHANG J M, WANG W, et al. Effect of drying process on quality characteristics of salted fish[J]. Food Research and Development, 2019, 40(12): 95−102.］

［4］ 赵卉双, 焦顺山, 张振涛, 等. 不同干燥技术及其对水产品品质影响的研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(9): 260−264. ［ZHAO H S, JIAO S S, ZHAGN Z T, et al. Research progress on drying technologyand its effect on quality of aquatic products[J]. The Food Industry, 2020, 41(9): 260−264.］

［5］ 陈海强, 梁钻好, 余铭, 等. 一种复合日晒的低温智控脱水设备: 中国, 202223597722.9[P]. 2022-12-28. ［CHEN H Q, LIANG Z H, YU M, et al. A low-temperature intelligent dehydration equipment with composite sun exposure: China, 202223597722.9[P]. 2022-12-28.］

［6］ 陈方雪, 邱文兴, 谌玲薇, 等. 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]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 36−45. ［CHEN F X, QIU W X, SHEN L W, et al. Formation of volatile flavor compounds and changes in fat oxidation in blunt-snout bream by traditional sun-drying and shade-drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 36−45.］

［7］ 顾赛麒, 周洪鑫, 郑皓铭, 等. 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 S Q, ZHOU H X, ZHENG H M, et al. Effects of different drying methods on lipid oxidation and volatile flavor components of cured grass carp[J]. Food Science, 2018, 39(21): 1−10.］

［8］ 梁钻好, 黄宁, 马晓飞, 等. 混合乳酸菌发酵对臭鳜鱼风味特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(8): 226−233. ［LIANG Z H, HUANG N, MA X F, et al. Effect of mixed lactic acid bacteria fermentation on flavor characteristics of stinky mandarin fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(8): 226−233.］

［9］ 梁钻好, 陈海强, 梁凤雪, 等. 基于水分迁移分析热风-热泵联合干燥对虾肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 134−141. ［LIANG Z H, CHEN H Q, LIANG F X, et al. Effect of hot air and heat pump combined drying on prawn meat quality based on water migration analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(22): 134−141.］

［10］ 徐毓谦, 谢菲菲, 张德权, 等. 电场辅助冰温和超冰温贮藏对生鲜牛肉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(5): 321−332. ［XU Y Q, XIE F F, ZHANG D Q, et al. Effects of electric field assisted controlled freezing point storage and supercooling storage on the quality of fresh beef[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(5): 321−332.］

［11］ 顾赛麒, 唐锦晶, 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 S Q, TANG J J, ZHOU X X, et al. Quality change and aroma formation in cured fish during traditional sun drying processing[J]. Food Science, 2019, 40(17): 36−44.］

［12］ 高海, 蔡欢欢, 朱志伟. 光照和温度对草鱼和三文鱼鱼肉贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 244−249. ［GAO H, CAI H H, ZHU Z W. Comparative study of effects of light exposure and storage temperature on the quality of grass carp fillets and salmon fillets[J]. Food Science, 2017, 38(15): 244−249.］

［13］ SUN Y W, ZHANG Y, SONG H L. Variation of aroma components during frozen storage of cooked beef balls by SPME and SAFE coupled with GC-O-MS[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(1): e15036.

［14］ GIRI A, OSAKO K, OKAMOTO A, et al. Olfactometric characterization of aroma active compounds in fermented fish paste in comparison with fish sauce, fermented soy paste and sauce products[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 1027−1040.

［15］ ZHANG Q, DING Y C, GU S Q, et al. Identification of changes in volatile compounds in dry-cured fish during storage using HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2020, 137: 107339.

［16］ 吴燕燕, 游刚, 李来好, 等. 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(4): 600−611. ［WU Y Y, YOU G, LI L H, et al. Comparison of flavor components between low-salt lactic acid fermented fish and traditional salted fish[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(4): 600−611.］

［17］ ZHAO D D, HU J, CHEN W X. Analysis of the relationship between microorganisms and flavour development in dry-cured grass carp by high-throughput sequencing, volatile flavour analysis and metabolomics[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130889.

［18］ BABIČ K, STROJNIKL, ĆIRIĆ A, et al. Optimization and validation of an HS-SPME/GC-MS method for determining volatile organic compounds in dry-cured ham[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1342417.

［19］ 顾赛麒, 王涣淇, 冯媛, 等. 高铁肌红蛋白对腌腊鱼脂质氧化与挥发性风味的影响[J]. 水产学报, 2023, 47(4): 182−193. ［GU S Q, WANG H Q, FENG Y, et al. Effects of metmyoglobin on lipid oxidation and volatile flavor of cured fish[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(4): 182−193.］

［20］ 解万翠, 卢宽, 于靖, 等. 水产品香气研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 11−21. ［XIE W C, LU K, YU J, et al. Research progress on aroma of aquatic products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(1): 11−21.］

［21］ SIRTORI F, DIMAURO C, BOZZI R, et al. Evolution of volatile compounds and physical, chemical and sensory characteristics of Toscano PDO ham from fresh to dry-cured product[J]. Euro-

pean Food Research and Technology, 2020, 246(3): 409−424.
[22] QIN J Y, WANG Z H, WANG X C, et al. Effects of microwave time on quality of grass carp fillets processed through microwave combined with hot-air drying[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4159−4171.
[23] 米鑫鑫, 郑茜, 唐密, 等. 过热蒸汽技术对烤鱼“外酥里嫩”品质特性和风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(16): 61−71. [MI X X, ZHENG X, TANG M, et al. Impact of superheated steam technology on ‘crispy outside and tender inside’ quality characteristics and flavor of roasted fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(16): 61−71.]
[24] 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 *Macrococcus caseolyticus* subsp. caseolyticus[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1533.
[25] 刘昌华. 鲈鱼风干成熟工艺及其脂质分解氧化和风味品质特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [LIU C H. Study on drying-reping process of perchs lipolysis and lipid oxidation and fleavour character during processing[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]
[26] 孙宝国, 刘玉平. 食用香料手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004. [SUN B G, LIU Y P. Edible flavor manual[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004.]
[27] GU S Q, WANG X C, TAO L P, et al. Characterization of volatile compounds in different edible parts of steamed Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food Research International, 2013, 54: 81−92.
[28] 王雪, 潘兆平, 陈嘉序, 等. 湖南省 16 种柑橘陈皮加工适宜性分析[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 355−370. [WANG X, PAN Z P, CHEN J X, et al. Suitability analysis of 16 citrus varieties for processing *Pericarpium citri* Reticulatae in Hunan Province[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(10): 355−370.]
[29] PAN C, ZHANG X F, CHEN S J, et al. Analysis of quality-related proteins in golden pompano (*Trachinotus ovatus*) fillets with modified atmosphere packaging under superchilling storage[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(4): 2253−2265.
[30] LIU H, HUANG J L, HU Q K, et al. Dual-fiber solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry for the analysis of volatile compounds in traditional Chinese dry-cured ham[J]. Journal of Chromatography B, 2020, 1140: 121994.