吴凯鑫, 吴俊杰, 郭全友, 等. 腌制浓度和干燥时间对轻腌金鲳鱼的品质与细菌多样性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 372−381. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050105
WU Kaixin, WU Junjie, GUO Quanyou, et al. Effects of Different Salt Concentrations and Drying Times on the Quality and Bacterial Diversity of Lightly-salted Golden Pomfret[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 372−381. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050105

· 分析检测 ·

腌制浓度和干燥时间对轻腌金鲳鱼的品质与细菌多样性的影响

吴凯鑫[1,2], 吴俊杰[2], 郭全友[2,*], 林　娜[2], 王积硕[2]
（1.上海海洋大学食品学院, 上海 201306;
2.中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090）

摘　要: 为研究腌制浓度和干燥时间对轻腌金鲳鱼的品质与微生物的影响，本研究以金鲳鱼为对象，分别经 3%、4% 和 5% 盐浓度腌制后冷风干燥 0、18 和 36 h 的轻腌金鲳鱼的生物胺、挥发性风味物质等品质指标以及细菌群落的变化，并对品质指标和细菌组成进行相关性分析。结果表明，硫代巴比妥酸反应物质含量随腌制盐浓度增加而呈上升的趋势。随干燥时间的延长，菌落总数、挥发性盐基氮、硫代巴比妥酸反应物质、腐胺、组胺、尸胺和总胺含量均显著增加（P<0.05），其中干燥 36 h 组鱼肉组胺含量超过最大推荐限值（>50 mg/kg），存在安全风险。指纹图谱表明，醛类、醇类和酮类是轻腌金鲳鱼主要的挥发性有机化合物，且经偏最小二乘判别分析筛选出 14 种差异风味物质可用于轻腌金鲳鱼不同干燥时间的区分。高通量测序结果表明乳球菌属（*Lactococcus*）、假单胞菌属（*Pseudomonas*）和不动杆菌属（*Acinetobacter*）是轻腌金鲳鱼加工过程中主要的菌属。Pearson 相关性分析表明，摩根菌属（*Morganella*）与色胺、腐胺和尸胺均呈显著正相关（P<0.05），假单胞菌属与亚硝酸盐呈显著正相关（P<0.05），不动杆菌属与 3-甲基-3-丁烯-1-醇和 3-戊酮呈极显著正相关（P<0.01）。综上，减少冷风干燥时间可有效提高轻腌金鲳鱼的安全品质。本文为轻腌金鲳鱼产品开发及品质控制提供了理论依据与技术支持。

关键词: 金鲳鱼, 腌制浓度, 干燥时间, 品质, 细菌多样性, 生物胺
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0372−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050105
本文网刊:

Effects of Different Salt Concentrations and Drying Times on the Quality and Bacterial Diversity of Lightly-salted Golden Pomfret

WU Kaixin[1,2], WU Junjie[2], GUO Quanyou[2,*], LIN Na[2], WANG Jishuo[2]
（1.College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2.East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China）

Abstract: To investigate the effects of salt concentrations and drying times on the quality and microbial community of lightly-salted golden pomfret, changes in quality indices (e.g., biogenic amines and volatile flavor compounds) and bacterial communities in samples subjected to salting with 3%, 4%, and 5% salt concentrations followed by cold air drying for 0, 18, and 36 h, respectively, were analyzed, and the correlation between quality indices and bacterial composition was explored. The results showed that the thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) content increased with increasing salt concentration and prolonged drying time, and the total viable count (TVC), total volatile basic nitrogen (TVB-N), TBARS, putrescine, histamine, cadaverine, and total biogenic amines significantly increased (P<0.05). Notably, the histamine content in the 36 h-dried group exceeded the maximum recommended limit (>50 mg/kg), posing a safety risk. Volatile flavor compound analysis revealed that aldehydes, alcohols, and ketones were the primary volatile organic compounds (VOCs) in

收稿日期: 2025−05−14
基金项目: 国家重点研发计划项目（2023YFD2401405）; 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目（2023TD73）。
作者简介: 吴凯鑫（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及贮藏, E-mail: wkxsing@163.com。
*** 通信作者:** 郭全友（1974−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 水产品加工及贮藏, E-mail: dhsguoqy@163.com。

lightly-salted golden pomfret, and 14 differential flavor compounds screened via partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) could be used to effectively distinguish samples with different drying times. High-throughput sequencing indicated that *Lactococcus*, *Pseudomonas*, and *Acinetobacter* were the dominant genera present during processing. Pearson correlation analysis demonstrated that *Morganella* was significantly positively correlated with tryptamine, putrescine, and cadaverine (P<0.05). *Pseudomonas* was significantly positively correlated with nitrite (P<0.05), and *Acinetobacter* was significantly positively correlated with 3-methyl-3-buten-1-ol and 3-pentanone (P<0.01). In conclusion, the safety and quality of lightly-salted golden pomfret could be effectively improved by shortening the cold-air drying time, thereby providing a theoretical basis and technical support for product development and quality control.

Key words: golden pomfret; salt concentration; drying time; quality; bacterial communities; biogenic amines

金鲳鱼，学名卵形鲳鲹（*Trachinotus ovatus*），2023 年我国养殖金鲳鱼产量达 29.2 万吨，是我国重要的海洋经济鱼类[1]。金鲳鱼营养丰富、肉质细嫩且味道鲜美，深受消费者欢迎。金鲳鱼的捕捞具有季节性，因此需采用合适的加工方法（如腌制和干燥）来保存鱼类。轻腌（盐含量≤6%，水分含量≥40%）水产品不但具有良好的适口性，而且符合人们对健康低盐食品的消费需求[2]。目前，腌制水产品多由小作坊通过经验进行腌制加工，缺乏标准化流程，导致产品质量不稳定。Mohdaly 等[3] 对 5 种不同产地的腌鱼进行 pH、挥发性盐基氮（total volatile base nitrogen, TVB-N）和硫代巴比妥酸反应物质（thiobarbituric acid reactive substances, TBARS）以及微生物进行分析，结果表明，不同产地腌鱼的品质存在显著差异，其主要成因可能是产地环境与加工工艺的不同。

腌制过程主要通过食盐抑制腐败菌生长并改善产品特性。与干腌法相比，湿腌法具有腌制时间更短，盐在整个鱼体内分布均匀，对产品质量影响较小的优点[4]，Chen 等[5] 研究了低盐湿腌发酵金鲳鱼在加工过程中品质和挥发性风味物质的变化，发现湿腌促进蛋白质的水解和氧化，加工后的金鲳鱼风味物质含量显著增加。在鱼类加工中，除腌制外，干燥也是调控产品品质的关键环节，干燥工艺可降低鱼肉的水分活度，抑制腐败菌的增殖，使酶失活[6]。邓祎等[7] 研究了不同风干工艺处理的武昌鱼鱼肉品质和风味的变化，发现相较于热风干燥，冷风干燥处理的武昌鱼 TBARS 值较低，脂肪氧化程度较低。在腌制和干燥的加工过程中，由于微生物和酶的作用，发生硝酸盐的还原、蛋白降解和脂质氧化等生化反应，一方面使得大量挥发性有机化合物（volatile organic compounds, VOCs）产生，有利于干腌鱼风味的形成[8]；另一方面导致鱼体亚硝酸盐、生物胺及脂质氧化产物大量累积。目前，轻腌金鲳鱼采用低盐湿腌结合冷风干燥的加工方式研究较少，因此，有必要探究轻腌金鲳鱼湿腌-冷风干燥过程中品质及微生物的变化。

本文以金鲳鱼为研究对象，探究在不同腌制浓度（3%、4%、5%）和干燥时间（0、18、36 h）的交互作用下，鱼肉感官特性、水分、盐含量、pH、菌落总数（total viable count, TVC）、TVB-N、TBARS、亚硝酸盐、生物胺和 VOCs 的动态变化规律，并且通过高通量测序技术，分析轻腌金鲳鱼中微生物菌群变化，探究感官和品质变化与微生物菌群之间的关联，以此解析轻腌金鲳鱼在不同加工阶段中品质和微生物菌群之间关系，为提高轻腌金鲳鱼产品品质和改良加工方式提供科学性的理论与实践依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

冷冻金鲳鱼　购于淘宝烟台虎鲸电子商务有限公司，规格为（350±30）g/条，冷链 2 d 运送到实验室，保存于−18 ℃ 冷库；食盐　上海市杨浦区大润发流通事业股份有限公司；硝酸银标准滴定溶液（0.1 mol/L）、铬酸钾、高氯酸、硼酸、酚酞、氯化钠、甲基蓝、亚甲基红、三氯乙酸、生物胺标准品、硼酸钠、亚铁氰化钾、乙酸锌、亚硝酸钠、对氨基苯磺酸、冰乙酸　国药集团化学试剂有限公司；平板计数琼脂培养基　青岛海博生物技术有限公司；E.Z.N.A.® Soil DNA Kit DNA 抽提试剂盒　美国 Omega 公司。

SW-CJ-1FB 超净台　上海博迅实业有限公司医疗设备厂；MIR-153 高精密度低温培养箱　上海一恒科学仪器有限公司；KDN-103F 自动定氮仪　上海纤检仪器有限公司；HE53/02 水分测定仪　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；Spark 10 mol/L 多功能酶标仪　瑞士 Tenca 公司；Avanti J-301 高性能离心机　美国 Beckman Coulter 公司；FlavourSpecc®气相-色谱离子迁移谱（gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS）联用仪　德国 G.A.S.公司；T100 Thermal Cycler PCR 仪　美国 BIO-RAD 公司；JY600C 电泳仪　北京君意东方电泳设备有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　实验样品制备　经前期市场调研和工艺条件模拟，轻腌金鲳鱼样品制备共分为前处理、腌制和干燥 3 个阶段，冷冻金鲳鱼（n=80）经（9.0±2.0）℃ 流水解冻后，背刨，去鳃去内脏，沥干称重，分别置于 3%、4%、5% 盐水中浸渍，料液比 1∶3（m/m），在（4.0±0.1）℃ 下腌制 12 h。将腌制完成的金鲳鱼于（22.0±0.2）℃ 下分别冷风干燥 0、18、36 h。将轻腌金鲳鱼按照腌制浓度和干燥时间分为 10 组，每组 8 条鱼。分别为 C0D00（金鲳鱼原料）；C3D00、C4D00、C5D00 分别为 3%、4%、5% 盐浓度下腌制 12 h；C3D18、C4D18、C5D18 分别为 3%、4%、5% 盐浓

度下腌制 12 h 后冷风干燥 18 h; C3D36、C4D36、C5D36 分别为 3%、4%、5% 盐浓度下腌制 12 h 后冷风干燥 36 h, 其中水分含量、TVC、pH 和 TVB-N 指标分别在样品干燥 0、18、36 h 结束后立即测定, 剩余样品置于−80 ℃ 冰箱保存直至分析。

1.2.2 感官评价 由八位经过专业培训的感官评定人员组成评定小组, 从气味、组织状态和色泽三个方面对不同加工条件的轻腌金鲳鱼进行感官评价, 感官评价标准参考王睿等[9] 的方法, 具体评价标准如表 1 所示。

1.2.3 品质指标的测定 水分含量测定: 取背肌肉去皮, 搅碎后取(1.00±0.05)g 均匀涂抹于仪器配套的托盘中, 扣紧仪器盖, 在(105.0±0.1)℃ 下测定, 当读数稳定时从显示屏上直接读出样品的水分含量; 盐含量测定: 参照 SC 3011-2001《水产品中盐分的测定》中的直接滴定法测定; pH 测定: 称取 5 g 搅碎的鱼肉加入蒸馏水 45 mL, 摇匀, 静置 30 min 后过滤取滤液, 用 pH 计进行测定; TVC 测定: 参考张曦鹏等[10] 的方法, 并适当修改。在无菌超净台中, 取(10.0±0.1)g 剪碎的鱼肉, 置于 90 mL 无菌生理盐水中, 振摇 30 min, 按照一定的梯度稀释, 取 100 μL 涂布于平板计数琼脂培养基, 置于 30 ℃ 恒温培养箱中培养 72 h 后进行菌落计数; TVB-N 测定: 参照 GB 5009.228-2016《食品中挥发性盐基氮的测定》中的半微量凯氏定氮法测定; TBARS 测定: 参照 GB 5009.181-2016《食品中丙二醛的测定》; 亚硝酸盐含量: 参照 GB 5009.33-2016《食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》; 生物胺含量测定: 参照 GB 5009.28-2016《食品中生物胺的测定》中的高效液相色谱法。

1.2.4 GC-IMS 检测 VOCs 自动进样条件: 称取(1.0±0.2)g 样品置于 20 mL 顶空瓶中, 孵育温度 40 ℃, 孵化转速 500 r/min, 孵育时间 15 min, 采用顶空自动进样的方式, 进样量 500 μL, 进样针温度 65 ℃, 不分流模式进样。GC-IMS 条件: 采用强极性色谱柱 MXT-WAX(30 m×0.53 mm, 1 μm), 柱温 60 ℃, 载气为氮气(≥99.999%), 载气流速程序: 起始流速 2 mL/min, 保持 2 min, 8 min 内升至 10 mL/min, 然后 10 min 内升至 100 mL/min 并保持 10 min, 运行时间 30 min。迁移管温度 45 ℃, 分析时间 30 min, 载气/漂移气为 N_2。

1.2.5 微生物多样性测定 采用 E.Z.N.A.® soil DNA kit 试剂盒进行 DNA 提取, 使用 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')引物扩增细菌 16S rRNA 基因, 在 V3~V4 可变区进行 PCR 扩增。PCR 反应体系为: 5×TransStart FastPfu 缓冲液 4 μL, 2.5 mmol/L dNTPs 2 μL, 上游引物(5 μmol/L)0.8 μL, 下游引物(5 μmol/L)0.8 μL, TransStart FastPfu DNA 聚合酶 0.4 μL, 模板 DNA 10 ng, 补足至 20 μL。扩增程序如下: 95 ℃ 预变性 3 min, 27 个循环(95 ℃ 变性 30 s, 55 ℃ 退火 30 s, 72 ℃ 延伸 30 s), 然后 72 ℃ 稳定延伸 10 min, 最后在 4 ℃ 进行保存[11]。高通量测序由上海美吉生物医药科技有限公司完成。

1.3 数据处理

使用 SPSS 20.0 软件进行差异显著性分析, 所有数据进行方差分析, $P<0.05$ 表示差异显著。使用 GC-IMS 仪器内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对 VOCs 进行定性分析, 运用 Gallery Plot 插件生成指纹图谱。α-多样性分析、主坐标分析(principal co-ordinates analysis, PCoA)、微生物菌落相对丰度分析均在美吉生物平台(https://cloud.majorbio.com)上完成。使用 Pearson 进行相关性分析, 利用软件 Origin 2022 和 GraphPad Prism 9 绘图。

2 结果与分析

2.1 感官评价分析

感官评价作为一种科学客观的评价方法, 可以在一定程度上较为直观地反映鱼肉品质优劣[12]。由图 1 感官评分和实物图可知, C0D00 组鱼体表面透明, 光泽度较佳, 鱼肉组织紧密且均匀, 为大多数人所

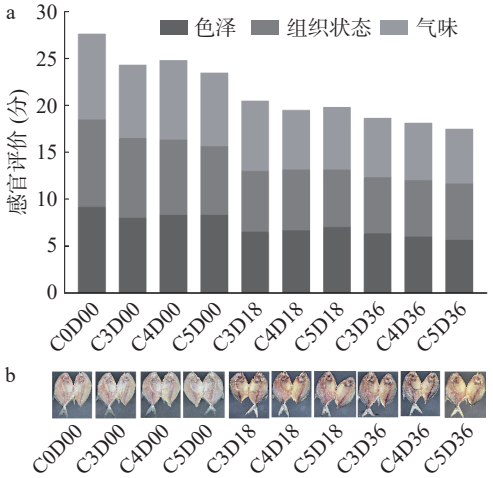


图 1 不同腌制浓度和干燥时间下轻腌金鲳鱼的感官评分(a)和实物图(b)

Fig.1 Sensory scores (a) and physical pictures (b) of lightly-salted golden pomfret under different salt concentrations

表 1 轻腌金鲳鱼的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of lightly-salted golden pomfret

项目	很好(10~8)	较好(7~6)	一般(5~3)	差(2~1)
色泽	鱼体表面透明, 光泽度好	肉色呈现微黄, 透明度一般	肉色呈现黄褐色, 透明度差	肉色呈现暗黄, 不透明
组织状态	组织紧密且均匀, 鱼骨有一定程度的软化, 无霉变	组织较为紧密, 鱼骨存在一定程度的软化, 无霉变	组织均匀性和紧密性一般, 鱼骨软化明显, 出现霉变	组织形态不均匀, 表面干燥, 内部脱水不足, 霉变严重
气味	具有腌腊鱼特有醇香味, 无异味	香味较好, 无腥味	香味较一般, 有腥味	香味较差, 有腐败气味

接受。色泽得分随干燥时间的延长呈降低的趋势，这是因为风干过程加速鱼肉氧化，使轻腌金鲳鱼呈现美拉德反应的黄褐色，干燥 36 h 较干燥 18 h组颜色偏深[9]。气味得分随着鱼肉盐浓度的增加而降低，这可能是因为食盐促进鱼肉的脂质氧化，进而加重不良风味（如腥味）的产生。腌制后（相较于 C0D00 组）组织状态得分降低，且感官评分随干燥时间的延长而呈下降的趋势，这是因为腌制结束后（干燥 0 h 组），由于鱼肉长时间浸泡于盐水中，肉质较 C0D00 组松散；而干燥 36 h 组较 18 h 组质地较硬，组织形态不均匀，鱼肉表面干燥，内部脱水严重，因此，干燥 18 h 组鱼肉感官指标整体优于干燥 36 h 组。

2.2　品质指标分析

2.2.1　水分含量和盐含量　腌制品的加工过程本质上是渗盐脱水的过程。图 2(a)和图 2(b)分别为金鲳鱼加工过程中水分含量和盐含量的变化。干燥时间从 18 h 增至 36 h 的过程中，4% 盐浓度组鱼肉水分含量降低了 4.07%，盐含量增加了 0.78%，而鱼肉色泽、组织状态和气味感官评分均呈下降的趋势，这说明水分含量和盐含量间接影响鱼肉的感官特性。

2.2.2　pH 和 TVC　pH 和 TVC 值分别反映鱼肉腐败变质程度和受微生物污染程度。图 2(c)和图 2(d)分别为金鲳鱼加工过程中 pH 和 TVC 的变化。相同干燥时间下，TVC 值随腌制浓度的增加呈显著降低的趋势（P<0.05），这表明腌制在一定程度上能够抑制微生物的生长，并且盐浓度越高，对细菌抑制作用越强，这与郭雅[13] 的研究结果一致。干燥 36 h 组 pH 显著高于干燥 18 h 组（P<0.05），这是因为鱼肉中蛋白质在微生物作用下被分解产生胺类等碱性物质增多[14]。因此，增加腌制浓度和减少干燥时间能有效抑制微生物的生长，抑制鱼肉腐败变质。

2.2.3　TVB-N 和 TBARS　TVB-N 和 TBARS 含量分别反映鱼肉新鲜度和脂肪氧化程度[15]。图 2(e)和图 2(f)分别为金鲳鱼加工过程中 TVB-N 和 TBARS 的变化。相同干燥时间下，TVB-N 含量随腌制浓度的增加而显著降低（P<0.05），这是因为较高的盐浓度可以抑制鱼肉中内源酶和微生物的生长，减缓蛋白质的分解速度，减缓鱼肉的变质[16]。干燥 36 h 组 TVB-N 值显著（P<0.05）高于干燥 18 h 组，是干燥 18 h 组的 1.52~1.65 倍，这可能是由于长时间的干燥过程，鱼肉中蛋白质分解后产生三甲胺等胺类物质积存，导致 TVB-N 含量增加。TBARS 值随盐浓度增加而呈上升的趋势，这表明食盐促进鱼肉的脂质氧化，这与姜晶丹等[17] 研究结果一致，这是因为氯化钠可作为脂质的促氧化剂，在破坏细胞膜、释放铁离子和抑制抗氧化酶活性方面发挥作用[8]。

2.2.4　亚硝酸盐和生物胺　亚硝酸盐可赋予腌鱼独特的风味和颜色，低浓度的亚硝酸盐具有抗氧化和抑菌特性，可延长鱼肉保质期[18]，而高浓度的亚硝酸盐会与肉中的氨基酸或胺类化合物等反应生成有害物质，对健康构成风险[19]。由表 2 可知，金鲳鱼腌制后，亚硝酸盐含量随着腌制浓度的增加而显著降低（P<0.05），这是由于盐含量的增加抑制了硝酸还原菌的活性，同时对亚硝酸盐还原酶的活性影响极小[20]，张娜等[21] 研究食盐添加量对腌腊鱼安全品质的影响中发现食盐含量越低，亚硝酸盐含量越高，本实验结果与之一致。轻腌金鲳鱼亚硝酸盐含量均小于 2.5 mg/kg，远低于国家限量标准 30.00 mg/kg。

生物胺是鱼肉腐败过程中的产物，过量摄入胺类物质不仅存在较大的中毒风险，还可能诱发过敏反

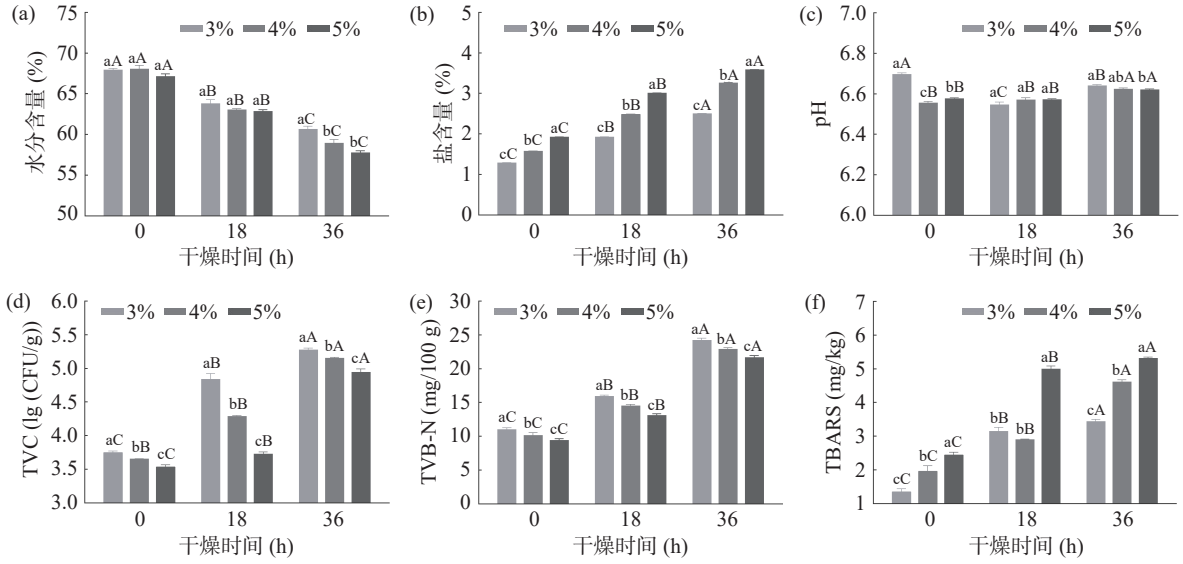


图 2　不同腌制浓度的轻腌金鲳鱼干燥过程中水分含量(a)、盐含量(b)、pH(c)、TVC(d)、TVB-N(e)和 TBARS(f)的变化

Fig.2　Changes in moisture content (a), salt content (b), pH (c), TVC (d), TVB-N (e) and TBARS (f) during the drying process of lightly salted golden pomfret with different salt concentrations

注：不同小写字母表示相同干燥时间，不同腌制浓度下指标差异显著（P<0.05）；不同大写字母表示相同腌制浓度，不同干燥时间下指标差异显著（P<0.05）；表 2 同。

表 2 不同腌制浓度和干燥时间下轻腌金鲳鱼的亚硝酸盐和生物胺含量(mg/kg)

Table 2 Nitrite and biogenic amines content in lightly salted golden pomfret with different salt concentrations and drying times (mg/kg)

指标	C3D00	C4D00	C5D00	C3D18	C4D18	C5D18	C3D36	C4D36	C5D36
亚硝酸盐	2.07±0.04^{aA}	1.44±0.06^{bA}	1.19±0.07^{cB}	1.07±0.11^{bB}	0.88±0.08^{cC}	1.46±0.06^{aA}	1.15±0.08^{aB}	1.05±0.04^{aB}	0.64±0.01^{bC}
色胺	6.43±0.25^{bC}	5.24±0.32^{cC}	9.79±0.65^{aC}	8.73±1.66^{cB}	15.30±0.99^{bA}	19.51±0.89^{aA}	25.98±0.15^{aA}	7.04±0.34^{cB}	14.41±0.16^{bB}
苯乙胺	4.34±0.12^{aC}	3.70±0.76^{aC}	3.20±0.36^{aB}	17.57±0.37^{bA}	28.15±0.62^{aA}	12.21±0.31^{cA}	15.20±2.09^{bB}	17.38±2.47^{aB}	12.19±0.65^{cA}
腐胺	25.31±0.56^{aC}	20.53±1.21^{bC}	18.68±0.91^{cC}	88.65±0.63^{aB}	78.61±0.32^{bB}	69.15±0.53^{cB}	154.41±0.26^{aA}	112.80±0.92^{bA}	93.39±0.08^{cA}
尸胺	9.43±0.32^{aC}	8.71±0.64^{cC}	9.20±0.56^{bC}	31.34±0.21^{aB}	19.67±0.21^{bB}	19.72±0.77^{bB}	50.96±0.31^{aA}	30.22±0.14^{cA}	39.61±1.53^{bA}
组胺	11.33±0.71^{aC}	10.04±1.36^{bC}	9.83±0.39^{cC}	39.46±0.19^{aB}	38.98±0.16^{aB}	30.07±0.03^{bB}	90.31±1.50^{aA}	79.67±0.36^{bA}	60.05±1.58^{cA}
酪胺	21.04±0.66^{aC}	14.87±0.78^{cC}	20.07±0.48^{bC}	35.35±0.13^{aB}	35.15±0.05^{aB}	33.60±1.03^{bB}	52.68±0.15^{aA}	48.91±0.18^{bA}	41.44±0.05^{cA}
亚精胺	9.33±0.63^{bA}	9.85±0.92^{bB}	11.38±0.32^{aA}	7.88±1.21^{bC}	9.59±0.50^{aB}	7.40±0.61^{bB}	8.18±0.03^{cB}	16.22±0.03^{aA}	11.35±0.22^{bA}
精胺	14.99±0.97^{bC}	19.31±0.21^{aB}	18.97±0.24^{aB}	15.30±0.98^{aB}	8.49±0.20^{bC}	9.01±0.23^{bC}	19.12±0.18^{cA}	22.05±0.18^{bA}	27.49±0.15^{aA}
总胺	102.20±4.16^{aC}	92.25±6.20^{bC}	101.12±3.91^{aC}	244.28±5.38^{aB}	233.94±3.05^{bB}	200.67±4.20^{cB}	416.84±4.53^{aA}	314.29±4.62^{bA}	299.93±4.42^{cA}

应危害健康[22]。腐胺、尸胺和组胺是金鲳鱼加工过程的主要胺类物质。腐胺和尸胺通常作为鱼肉新鲜度或微生物变质的指标,干燥 0 h 组鱼肉尸胺和腐胺含量低,鱼肉新鲜度较佳。相同干燥时间下,腐胺和组胺含量均随腌制浓度的增加显著降低(P<0.05),陈玉峰等[23]研究了不同食盐添加量对生物胺的影响,得出了食盐的添加可以抑制金线鱼中腐胺的生成,而 Xie 等[24]也发现减少加盐量会促进腐胺、组胺等生物胺生成,本文研究结果均与之一致。干燥 36 h 鱼肉组胺含量均超过最大推荐限值 50.00 mg/kg[25],存在安全风险。3%、4% 和 5% 盐浓度腌制后干燥 18 h 至 36 h 过程中,总胺含量分别增加了 70.64%、34.35% 和 49.46%,这表明减少干燥时间能有效控制生物胺含量的积累。

2.2.5 挥发性风味物质分析 风味的变化反映品质的动态状况,是衡量品质的关键维度之一。通过 GC-IMS 技术对轻腌金鲳鱼的挥发性风味物质分析进行分析鉴定,由指纹图谱图 3a 可知,将 VOCs 的保留时间与 IMS 数据库进行了比较,共鉴定出 54 种挥发性风味化合物,包括 13 种醇类、13 种醛类、9 种酮类、2 种酯类、3 种萜烯类和其他(14 种,含 9 种未知物)。醛类、醇类和酮类是轻腌金鲳鱼的主要风味物质。

醛类物质因其独特的风味特征和低阈值,是水产食品中重要的风味化合物[26],且醛类物质是脂肪氧化过程中的产物[27]。腌制后庚醛和己醛浓度增加,与 TBARS 变化趋势相同。随着干燥时间的延长,醛类物质浓度呈现增加的趋势,这与王玉等[28]研究咸鲅鱼冷风干燥过程中醛类物质变化趋势不同,这可能与干燥时间和温度影响脂肪氧化相关酶活力有关,而多数醛类物质(如庚醛和己醛)表现为鱼腥味和脂肪味[29],这表明干燥 36 h 较干燥 18 h和 0 h 组鱼腥味和脂肪味较重,导致产品风味品质下降,感官评分降低。

醇类物质通常是由脂质降解和氧化形成[30],是轻腌金鲳鱼加工过程中最丰富的挥发性风味物质。2-甲基丙醇、3-甲基-1-丁醇在原料中均被检测到且保持较高的浓度,两种物质呈果香味。干燥 36 h 组中 1-戊醇浓度高于干燥 18 h 组,是干燥 18 h 组的 5.32~6.25 倍,而 1-戊醇是鱼腥味的重要来源[31],这表明干燥 36 h 组鱼肉鱼腥味较重,而干燥 18 h 组中 C4D18 相较于 C5D18 组其浓度降低了 19.14%,鱼腥味较少。1-戊烯-3-醇、1-戊醇、正丙醇和正丁醇在干燥 36 h 组中均保持较高的浓度,而正丁醇具有刺激性气味,这表明增加干燥时间加重鱼肉的刺激性气味。

干燥组中酮类和萜烯类物质如羟基丙酮、月桂烯等浓度高于未干燥组,对鱼肉风味起到正向作用,赋予鱼肉果味、青草以及花香、香脂气味[32]。三甲胺是鱼腥味的主要来源之一,相同干燥时间下,3% 盐浓度组其浓度高于 4% 和 5% 盐浓度组,这说明三甲胺随着盐度的增加而降低,与之前的研究[8]结果一致。

为进一步揭示不同干燥时间下轻腌金鲳鱼挥发性物质的特征和差异,以 54 种风味物质作为因变量,不同干燥时间作为自变量,如图 3b 所示,PLS-DA 可以实现不同干燥时间下轻腌金鲳鱼的有效区分。本次分析中的自变量拟合指数(R^2_x)为 0.97,因变量拟合指数(R^2_y)为 0.979,模型预测指数(Q^2)为 0.904,R^2 和 Q^2 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受[33]。经过 200 次置换检验,如图 3c 所示,Q^2 回归线与纵轴的相交点小于 0,说明模型不存在过拟合,模型验证有效,认为该结果可用于轻腌金鲳鱼的干燥时间鉴别分析。根据 P<0.05 且 VIP>1 的标准,筛选出 19 种不同干燥时间下轻腌金鲳鱼的差异风味物质,如图 3d 可知分别为正丁醇-M、3-甲基-2-戊酮、月桂烯、羟基丙酮、异丁醛、2-甲基丙醇、3-甲基-1-丁醇-M、3-戊酮、2,4-二甲基庚烷、正丁醇-D、β-蒎烯、3-甲基-3-丁烯-1-醇、三甲胺、己醛-M,未知 5 种。将 14 种已知物质绘制成热图,如图 3e 所示,颜色由蓝到红代表浓度由低到高,干燥 18 h 组相较于干燥 0 h 组中月桂烯、3-甲基-2-戊酮、β-蒎烯、2,4-二甲基庚烷和羟基丙酮浓度较高,赋予鱼肉青草、香脂和鱼腥味,而干燥 36 h 组中 2-甲基丙醇、己醛、三甲胺、3-甲基-1-丁醇和 3-甲基-3-丁烯-1-醇浓度较干燥 18 h 组

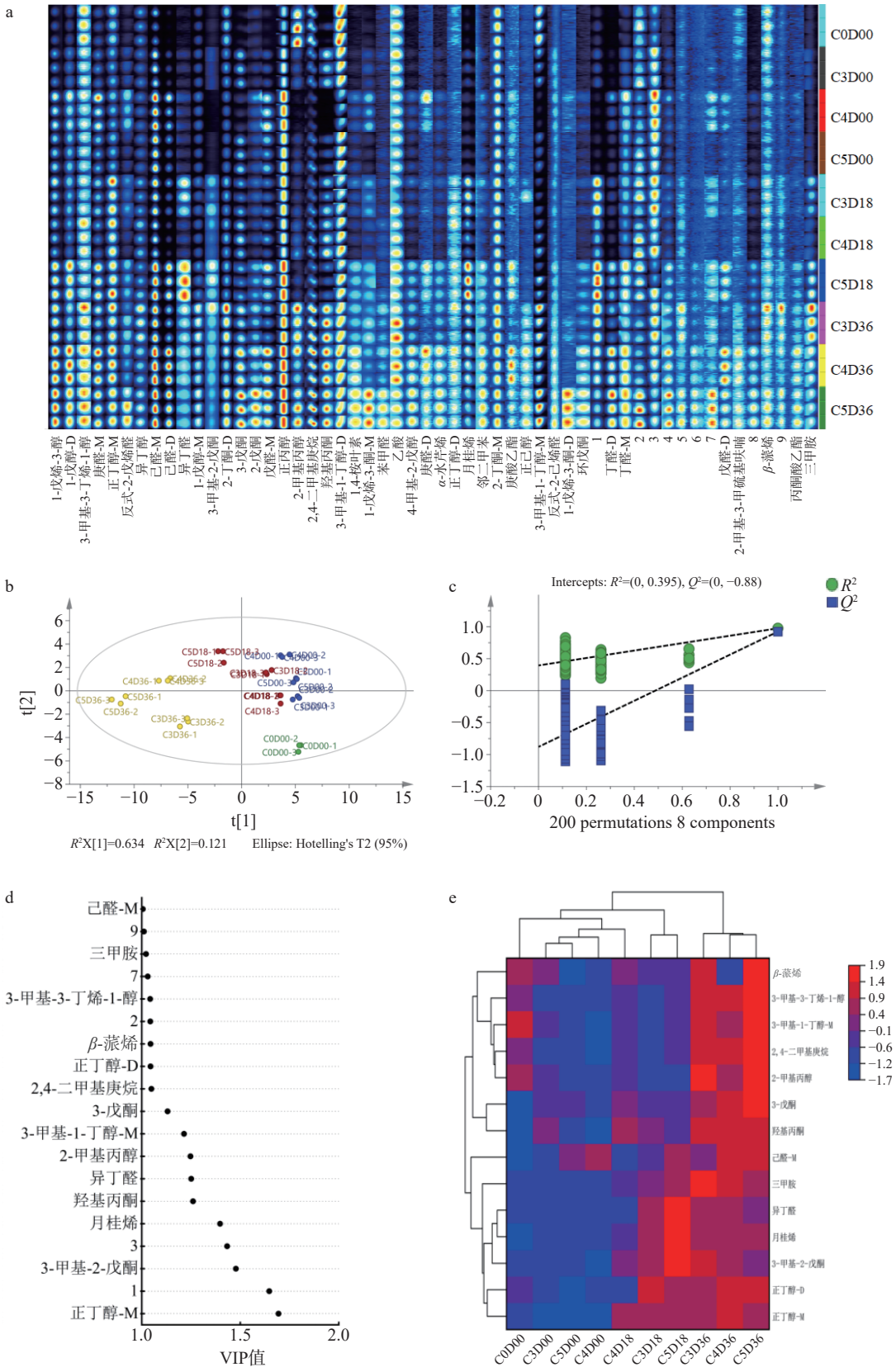


图 3　不同腌制浓度和干燥时间下轻腌金鲳鱼的 VOCs 的指纹图谱(a)、不同干燥时间的轻腌金鲳鱼 PLS-DA 得分图(b)、PLS-DA 模型置换验证图(c)、VIP 值大于 1 的特征风味物质(d)和聚类热图(e)

Fig.3　Fingerprint spectra of VOCs in lightly salted golden pomfret under different salt concentrations and drying times (a), PLS-DA score maps of lightly marinated golden pomfret under different drying times (b), PLS-DA model displacement validation map (c), characteristic flavor compounds with VIP values greater than 1 (d) and clustering heatmap (e)

注: M: 单倍体; D: 二倍体; 1~9: 未知成分。

增加，鱼肉主要以氨味、鱼腥味、脂肪味和刺激性气味等不良气味为主。C3D36 组和 C5D36 组归为一类，两组中异丁醛、己醛、正丁醇和三甲胺浓度高于 C4D18 组，而 C4D18 组 β-蒎烯和羟基丙酮浓度较

高，C4D18 组正向风味物质优于 C3D18 组和 C5D18 组。综上，干燥能赋予轻腌金鲳鱼独特的风味，且减少干燥时间能有效控制不良气味的产生。

2.3　轻腌金鲳鱼细菌多样性分析

2.3.1　细菌的 α-多样性分析　由图 4a 可知，Sobs 指数绘制的稀释曲线趋于平缓，这说明测序结果足以反映所有样品组物种丰富度以及多样性；Venn 图可反映不同样品间 ASV 差异，如图 4b 所示，10 组样品共有的 ASV 数量为 11，未干燥组中 C3D00、C4D00 和 C5D00 组 ASV 数量分别为 92、443 和 115，表明 4% 盐浓度腌制后的轻腌金鲳鱼特有的微生物种类更丰富。α-多样性指数中 Chao1、Ace、Shannon 以及 Simpson 指数反映物种丰富度和

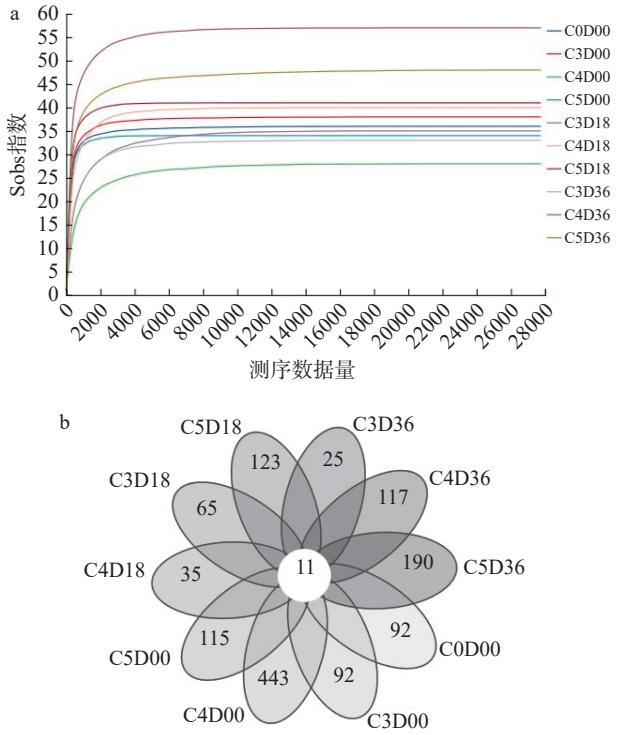


图 4　细菌稀释曲线(a)与 Venn 图(b)

Fig.4　Rarefaction curves of bacterial community (a) and Venn diagram (b)

表 3　不同腌制浓度和干燥时间下轻腌金鲳鱼细菌群落的 α-多样性

Table 3　α-Diversity of bacterial community in lightly salted golden pomfret under different salt concentrations and drying times

样品名称	Chao1指数	Ace指数	Shannon指数	Simpson指数	覆盖率
C0D00	185.00	185.00	2.39	0.33	1.00
C3D00	201.15	201.00	3.26	0.10	>0.99
C4D00	528.95	529.02	1.95	0.52	>0.99
C5D00	217.00	217.00	2.74	0.22	1.00
C3D18	100.04	99.25	1.22	0.60	>0.99
C4D18	174.33	173.71	2.04	0.38	>0.99
C5D18	251.97	252.33	3.30	0.12	>0.99
C3D36	83.62	82.75	1.66	0.39	>0.99
C4D36	258.40	257.44	2.81	0.21	>0.99
C5D36	309.67	307.75	2.98	0.14	>0.99

多样性[34]，Chao1 和 Ace 指数越高，说明物种丰富度越高；Shannon 指数越大，说明菌群多样性越高，而 Simpson 指数越小，说明菌群多样性越高。由表 3 可知，样品的覆盖率均大于 0.99；C4D00 组 Chao1 和 Ace 指数最高，说明 4% 盐浓度腌制后鱼肉细菌群落丰富度最高。C5D18 组相较于 C4D18 组 Shannon 指数较高，而 Simpson 指数较低，说明 4% 相较于 5% 盐浓度腌制后干燥 18 h 的鱼肉中细菌群落分布较均匀且细菌群落多样性较低。

2.3.2　细菌的 β 多样性分析　β 多样性可以反映不同样品微生物群落结构的差异。主坐标分析(principal co-ordinates analysis，PCoA)常被用于评估数据相似性与差异性，距离越近，表明样本菌群组成相似度越高[35]。图 5 所示，PC1 与 PC2 之和达到 75.94%，这能够对菌群的整体特征进行很好地解释。5% 与 3% 盐浓度组距离相较于 4% 与 3% 盐浓度组距离较远，这表明不同腌制浓度导致轻腌金鲳鱼的细菌菌群结构存在差异，腌制浓度越高，差异越显著。

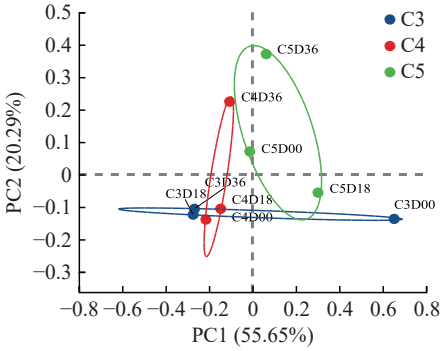


图 5　不同腌制浓度和干燥时间下轻腌金鲳鱼的 PCoA

Fig.5　PCoA of lightly salted golden pomfret under different salt concentrations and drying times

注：C3：C3D00、C3D18、C3D36；C4：C4D00、C4D18、C4D36；C5：C5D00、C5D18、C5D36。

2.3.3　细菌群落组成分析　为了更好地了解轻腌金鲳鱼的细菌群落，进行了门和属水平的分类，共检测出 30 个细菌门，如图 6a 所示，其中厚壁菌门(Firmicutes)、变形菌门(Proteobacteria)、蓝细菌门(Cyanobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)共占细菌菌落总数的 99% 以上，其中厚壁菌门和变形菌门是轻腌金鲳鱼主要的优势菌门。

图 6b 为十组样品相对丰度占比前 15 的细菌属，相对丰度占比前 5 的菌属为乳球菌属(*Lactococcus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、气单胞菌属(*Aeromonas*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*)。随着干燥时间的延长，4%、5% 盐浓度组鱼肉乳球菌属相对丰度逐渐降低，假单胞菌属与之呈现相反的趋势。假单胞菌属在 C3D00 组相对丰度最高(41.50%)，与其他组存在较大差异，这可能是因为该组的盐浓度和 pH 适宜假单胞菌生

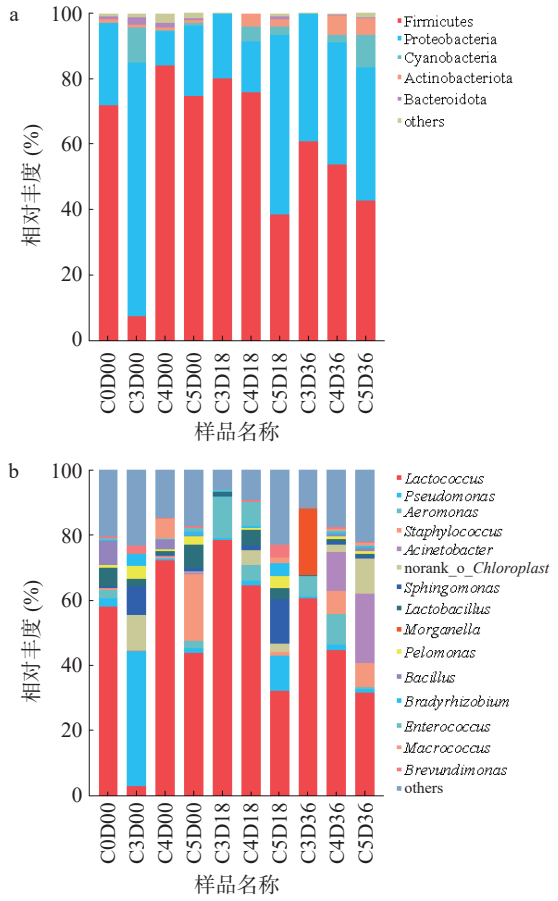


图 6　不同腌制浓度和干燥时间下轻腌金鲳鱼的细菌门(a)和属(b)水平相对丰度

Fig.6　Relative abundance of phylum (a) and genus (b) of lightly salted golden pomfret at different salt concentrations and drying times

长，能高效分解鱼肉营养物质以加速增殖，迅速成为优势菌并抑制其他菌群生长[36]。干燥 18 h 组葡萄球菌属相对丰度低于干燥 0 h 和 36 h 组，且 C4D18 组气单胞菌属相对丰度低于 C3D18 组。不动杆菌属在干燥组中的相对丰度高于未干燥组。乳杆菌属(*Lactobacillus*)在干燥前期相对丰度较高，随干燥时间的延长相对丰度逐渐降低。摩根菌属(*Morganella*)在干燥后期相对丰度较高，其中 C3D36 组相对丰度最高(20.34%)。综上，不同加工阶段的轻腌金鲳鱼菌群组成和丰度存在较大差异。

2.4　细菌群落和感官、品质之间的相关性分析

为进一步探究不同腌制浓度和干燥时间下轻腌金鲳鱼的细菌群落和感官以及品质指标之间的相关性，对相对丰度前 15 的细菌属与感官、水分含量、盐含量、pH、TVC、TVB-N、TBARS、生物胺、亚硝酸盐以及 14 种差异风味物质进行 Pearson 相关性分析。如图 7 所示，亚硝酸盐与假单胞菌属、摩根菌属和芽孢杆菌属均呈显著正相关(P<0.05)，而 Wang 等[20] 也发现干腌鲭鱼加工过程中假单胞菌属与亚硝酸盐呈显著正相关，假单胞菌属可能导致 C3D00 组和 C5D18 组亚硝酸盐含量相较于 C4D18 组较多，

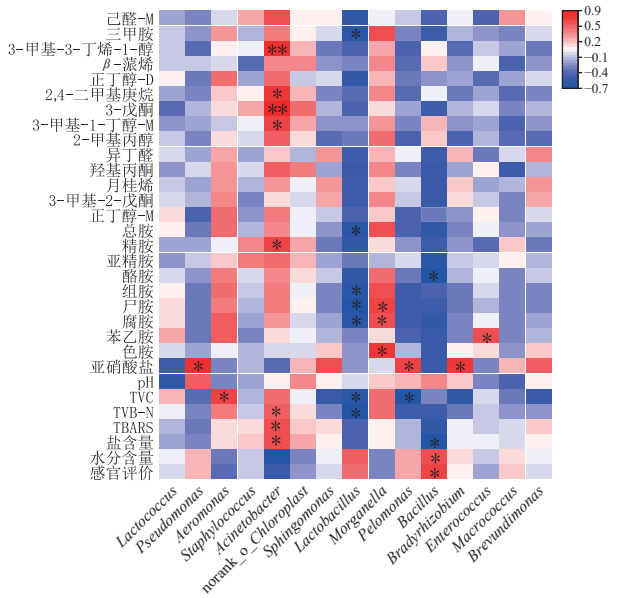


图 7　不同腌制浓度和干燥时间下轻腌金鲳鱼的 Top15 细菌属和感官评价、品质指标的 Pearson 相关性分析

Fig.7　Pearson correlation analysis of the top 15 bacterial genera, sensory evaluation, and quality indicators of lightly salted golden pomfret under different salt concentrations and drying times

注：**表示 P<0.01 水平上极显著相关，*表示 P<0.05 水平上显著相关。

对品质有一定的影响。乳杆菌属与 TVC、TVB-N、三甲胺、腐胺、尸胺和组胺均呈现显著负相关(P<0.05)，而孙海鑫等[37] 研究自然发酵酸鱼中微生物群落多样性与生物胺相关性发现，乳杆菌属与尸胺、腐胺均呈负相关，本文研究结果与之一致，这是由于乳杆菌属可以产生多种抗菌代谢物质，如细菌素，以抑制加工过程中的病原体和腐败微生物的生长[38]，该菌属的存在可能抑制了干燥 18 h 组鱼肉的生物胺含量以及氨味、脂肪酸败等不良风味的产生。葡萄球菌属与己醛呈正相关，该菌属可以产生脂肪水解酶和蛋白水解酶，可以缓慢利用碳水化合物并将其转化为有机酸和芳香族物质[39]。TVC 与气单胞菌属呈显著正相关(P<0.05)，不动杆菌属与 TBARS、TVB-N、2,4-二甲基庚烷、3-甲基-1-丁醇-M 呈显著正相关(P<0.05)，与 3-甲基-3-丁烯-1-醇、3-戊酮均呈极显著正相关(P<0.01)，与三甲胺呈正相关，而气单胞菌属和不动杆菌属是水产制品中导致腐败的主要细菌，两种菌属的存在显著增加了干燥阶段鱼肉的 TVC、TVB-N 和 TBARS 值，增强了鱼肉的刺激性气味和氨味，C4D18 组气单胞菌含量低于 C3D18 组，该菌属的存在可能使 C4D18 组相较 C3D18 组鱼肉的 TVC 值降低。摩根菌属在食品发酵过程中会产生组胺[40]，气单胞菌属会产生大量的腐胺和尸胺[41]。本研究发现，组胺与摩根菌属呈现正相关，腐胺和尸胺与气单胞菌属呈现正相关，两种菌属的存在可能增加了 C3D36 组鱼肉生物胺含量，使得 C3D18 组相较于 C4D18 组鱼肉腐胺和尸胺含量较高。

3 结论

本研究探讨了金鲳鱼在腌制、干燥过程中风味品质和微生物群落的变化。TBARS 值随盐浓度增加而呈上升的趋势。TVB-N、TBARS、TVC、腐胺、组胺、尸胺和总胺含量均随干燥时间的延长显著增加(P<0.05)。亚硝酸盐含量均未超过 30.00 mg/kg。干燥 36 h 组鱼肉组胺含量超过 50.00 mg/kg,存在安全风险。对挥发性风味物质分析表明,醛类、醇类和酮类是轻腌金鲳鱼的主要风味物质。应用偏最小二乘判别分析方法筛选出 14 种差异风味物质可用于轻腌金鲳鱼不同干燥时间的区分。高通量测序表明,乳球菌属、假单胞菌属和不动杆菌属相对丰度较高,是轻腌金鲳鱼加工过程中主要的菌属。假单胞菌属与亚硝酸盐呈显著正相关(P<0.05),摩根菌属与色胺、腐胺和尸胺呈显著正相关(P<0.05),不动杆菌属与 3-甲基-3-丁烯-1-醇、3-戊酮呈极显著正相关(P<0.01)。减少冷风干燥时间,可有效控制腐败菌过度增殖,降低生物胺、亚硝酸盐含量,减少了 TVB-N、TBARS 以及不良风味物质的生成,从而有效提升轻腌金鲳鱼的安全性和品质。本研究为轻腌金鲳鱼工业化生产和品质提升提供了理论基础。

© 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] 涂雨晨, 林海生, 高加龙, 等. 金鲳鱼加工与副产物高值化利用研究现状[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 190−196. [TU Y C, LIN H S, GAO J L, et al. Current status of research on golden pomfret processing andhigh-value utilization of by-products[J]. Food and Machinery, 2024, 40(8): 190−196.]

[2] 郭全友, 单珂, 姜朝军, 等. 源自轻腌大黄鱼的特定腐败菌特性及腐败能力[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 24−32. [GUO Q Y, SHAN K, JIANG C J, et al. Characterization and spoilage potential of specific spoilage organisms isolated from lightly salted large yellow croaker (*Pseudosciaenac rocea*)[J]. Food Science, 2020, 41(1): 24−32.]

[3] MOHDALY A A A, MAHMOUD A A, RAMADAN M F, et al. Biochemical and microbiological characteristics of some Mediterranean salted fish products[J]. Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, 2021, 32(2): 343−355.

[4] SANTOS C, ROSEIRO C, GONÇALVES H, et al. Susceptibility of dry-cured tuna to oxidation and biogenic amines generation related to microbial status and salting/curing technology[J]. Lwt, 2019, 115: 108420.

[5] CHEN Qiuhan, YANG Xuebo, LIU Shouchun, et al. Changes in protein and volatile flavor compounds of low-salt wet-marinated fermented Golden Pomfret during processing[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 140029.

[6] SROY S, AVALLONE S, SERVENT A, et al. Does drying preserve the nutritional quality of small freshwater fish without excessive concentrations of heavy metals?[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100489.

[7] 邓祎, 陈方雪, 杜柳, 等. 不同风干工艺处理的武昌鱼鱼肉品质和风味的变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 263−270. [DENG Y, CHEN F X, DU L, et al. Effects of different air-drying processes on the quality and flavor of Wuchang fish[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 263−270.]

[8] JIANG Caiyan, LIU Yang, JIN Wengang, et al. Effects of curing concentration and drying time on flavor and microorganisms in dry salted Spanish mackerel[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101126.

[9] 王睿, 王琦, 周敏, 等. 茶多酚和 EGCG 对风干金鲳鱼品质相关理化指标的改善效果比较[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 54−63. [WANG R, WANG Q, ZHOU M, et al. Comparison of the effects of tea polyphenols and *Epigallocatechin gallate* on improving physicochemical indexes related to quality of air-dried golden pomfret[J]. Food Science, 2023, 44(2): 54−63.]

[10] 张曦鹏, 蒋中权, 郭全友, 等. 水分含量对轻腌大黄鱼贮藏期间细菌菌相和风味特征的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 210−217. [ZHANG X P, JIANG Z Q, GUO Q Y, et al. Effects of different moisture contents on bacterial flora and flavor characteristics of lightly salted large yellow croaker during storage[J]. Food Science, 2024, 45(8): 210−217.]

[11] 马慧敏, 杨建远, 余诚玮, 等. 草鱼肉在 4 ℃ 冷藏中微生物多样性演变的研究[J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 215−225. [MA H M, YANG J Y, YU C W, et al. Study on the evolution of microbial diversity in grass carp meat during 4 ℃ refrigeration[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 215−225.]

[12] 陶文斌. 低钠盐轻腌对养殖大黄鱼品质及风味影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019. [TAO W B. Study on the effects of low-sodium salt on the quality and flavor of *Larimichthys crocea* during salting[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.]

[13] 郭雅. 不同腌制工艺对风干鳊鱼品质影响研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016. [GUO Y. Effects of different curing technology on quality of air-drying *Parabramis pekinensis*[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2016.]

[14] 张曦鹏, 黄海潮, 郭全友, 等. 轻腌大黄鱼加工过程中的品质变化[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(19): 235−241. [ZHANG X P, HUANG H C, GUO Q Y, et al. Quality changes during the processing of lightly salted large yellow croaker[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 235−241.]

[15] 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. [LIANG Z H, CHEN H Q, LIANG F X, et al. Influence of drying techniques on flavor profile and related physicochemical properties of semi-dried *Trachinotus ovatus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 78−88.]

[16] FAN Hongbing, LUO Yongkang, YIN Xiaofei, et al. Biogenic amine and quality changes in lightly salt- and sugar-salted black carp (*Mylopharyngodon piceus*) fillets stored at 4 ℃[J]. Food Chemistry, 2014, 159: 20−28.

[17] 姜晶丹, 杨明远, 许长华, 等. 湿腌时盐质量浓度对草鱼肌肉组织结构和品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 40−45. [JIANG J D, YANG M Y, XU C H, et al. Effects of salt concentration on texture, microstructure and quality of wet-cured grass carp muscle[J]. Food Science, 2021, 42(8): 40−45.]

[18] FENG Xianchao, LI Chenyi, JIA Xu, et al. Influence of sodium nitrite on protein oxidation and nitrosation of sausages subjected to processing and storage[J]. Meat Science, 2016, 116: 260−267.

[19] SHAKIL M H, TRISHA A T, RAHMAN M, et al. Nitrites in cured meats, health risk issues, alternatives to nitrites: A review[J].

Foods, 2022, 11(21): 3355.
[20] WANG Shanyu, JIAN Chong, ZHAO Ling, et al. Relationship between physicochemical properties, non-volatile substances, and microbial diversity during the processing of dry-cured Spanish mackerel[J]. Food Research International, 2025, 200: 115501.
[21] 张娜, 熊善柏, 赵思明. 工艺条件对腌腊鱼安全性品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(6): 783−787. [ZHANG N, XIONG S B, ZHAO S M. Effects of technological conditions on security qualities of cured fish[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2010, 29(6): 783−787.]
[22] 刘亚楠, 李天舒, 王彦波, 等. 食品生物胺安全控制关联的包装技术研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(15): 150−159. [LIU Y N, LI T S, WANG Y B, et al. Research progress in packaging technologies for safety control of food biogenic amines[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(15): 150−159.]
[23] 陈玉峰, 吴燕燕, 邓建朝, 等. 腌制和干燥工艺对咸金线鱼中生物胺的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(20): 83−91. [CHEN Y F, WU Y Y, DENG J C, et al. Effect of picking and drying process on biogenic amines formation insalted threadfin bream (*Nemipterus hexodon*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(20): 83−91.]
[24] XIE Shuangyu, LI Zhi, SUN Bo, et al. Impact of salt concentration on bacterial diversity and changes in biogenic amines during fermentation of farmhouse soybean paste in Northeast China[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1225−1234.
[25] ABEDINI A, SADIGHARA P, ALIZADEH SANI M, et al. The impact of synthetic and natural additives on biogenic amine production in food products[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103295.
[26] KITAJIMA S, MARUYAMA Y, KURODA M. Volatile short-chain aliphatic aldehydes act as taste modulators through the orally expressed calcium-sensing receptor CaSR[J]. Molecules, 2023, 28(12): 4585.
[27] AL-DALALI S, LI Cong, XU Baocai. Effect of frozen storage on the lipid oxidation, protein oxidation, and flavor profile of marinated raw beef meat[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131881.
[28] 王玉, 赵延宁, 薛勇, 等. 基于电子鼻与 SPME-GC-MS 法分析咸鲅鱼加工过程挥发性风味成分变化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 266−272. [WANG Y, ZHAO Y N, XUE Y, et al. Analysis of volatile flavor compounds changes during salted spanish mackerel processing by electronic nose and SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 266−272.]
[29] CHENG Hao, WANG Jinfeng, XIE Jing. Progress on odor deterioration of aquatic products: Characteristic volatile compounds, analysis methods, and formation mechanisms[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102666.
[30] ZHAO Yue, WANG Yueqi, LI Chunsheng, et al. Novel insight into physicochemical and flavor formation in naturally fermented tilapia sausage based on microbial metabolic network[J]. Food Research International, 2021, 141: 110122.
[31] 陈方雪, 王世哲, 邱文兴, 等. 干腌鱼挥发性风味物质分析方法的建立与优化[J]. 肉类研究, 2023, 37(8): 27−34. [CHEN F X, WANG S Z, QIU W X, et al. Establishment and optimization of analytical method for detection of volatile flavor compounds in dry-cured fish[J]. Meat Research, 2023, 37(8): 27−34.]
[32] 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(9): 206−210. [LIN J J, ZHAO W H, LIU Q Y, et al. Research progress on the effect of lipid hydrolysis and oxidation on the flavor of dry-cured fish[J]. Food Industry, 2021, 42(9): 206−210.]
[33] 邵淑贤, 徐梦婷, 林燕萍, 等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 232−239. [SHAO S X, XU M T, LIN Y P, et al. Differential analysis of aroma components of Huangguanyin oolong tea from different geographical origins using electronic nose and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(4): 232−239.]
[34] 安香玉, 郝建雄, 王成祥, 等. 基于高通量测序技术老面酵头微生物菌群多样性分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 35−41. [AN X Y, HAO J X, WANG C X, et al. Microbial flora diversity analysis of sourdough based on high-throughput sequencing technology[J]. China Brewing, 2024, 43(10): 35−41.]
[35] SUN Dayun, QU Junjie, HUANG Yu, et al. Analysis of microbial community diversity of muscadine grape skins[J]. Food Research International, 2021, 145: 110417.
[36] YANG Xin, LAN Weiqing, SUN Xiaohong. Effect of chlorogenic acid grafted chitosan on microbiological compositions of sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets: Dominant spoilage bacteria, inhibition activity and membrane damage mechanisms[J]. International Journal of Food Microbiology, 2024, 411: 110540.
[37] 孙海鑫, 陈力, 石文琪, 等. 自然发酵酸鱼中微生物群落多样性与理化性质分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(12): 187−195. [SUN H X, CHEN L, SHI W Q, et al. Analysis of microbial community diversity and physicochemical properties of naturally fermented Suanyu[J]. Food Research and Development, 2023, 44(12): 187−195.]
[38] LIU Lu, YANG Jintao, CHEN Hongyan, et al. Characterization of the physicochemical properties, bacterial community and non-volatile profiles of fermented Yu Jiangsuan by *Weissella cibaria* and *Lactobacillus plantarum*[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100951.
[39] LIU Jiayue, MAI Ruijie, LIU Pingru, et al. Flavor formation in dry-cured fish: Regulation by microbial communities and endogenous enzymes[J]. Foods, 2023, 12(16): 3020.
[40] 于红红, 吴明颖, 王庆玲, 等. 百里香精油微胶囊对摩根氏菌和变形杆菌产组胺机制的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 9−16. [YU H H, WU M Y, WANG Q L, et al. Effect of thyme essential oil microcapsules on mechanism of histamine production by *Morganella morganii* and *Proteus bacillus*[J]. Food Science, 2020, 41(19): 9−16.]
[41] WANG Hang, LIU Xiaochang, ZHANG Yuemei, et al. Spoilage potential of three different bacteria isolated from spoiled grass carp (*Ctenopharyngodon* idellus) fillets during storage at 4 ℃[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 81: 10−17.