

不同干燥方式下鮰鱼片的干燥特性及风味变化

周明珠^{1,2}, 熊光权¹, 乔宇¹, 廖李¹, 汪兰¹, 吴文锦¹, 李新¹, 石柳¹, 丁安子¹, 黎彩³

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 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 430064) (3. 武汉梁子湖水产品加工有限公司, 湖北武汉 430200)

摘要: 本文以鮰鱼为原料, 研究了不同干燥方式对鮰鱼干燥特性的影响, 并利用气相离子迁移色谱 (Gas Chromatography Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS)、电子鼻、电子舌以及氨基酸自动分析仪等技术, 对不同干燥方式对鮰鱼片风味进行了分析。结果表明, 真空冷冻干燥的鮰鱼片收缩率最小, 为 5.44%, 显著低于其他三种干燥方式 ($p < 0.05$), 且其复水速率最快, 用时最短; 热风干燥的鮰鱼片硬度最大, 达 1929.70 g, 与其他三种干燥方式之间有显著性的差异 ($p < 0.05$); 真空干燥使得鮰鱼片的 L* 值为最小, a* 值和 b* 值最大, 使鮰鱼片呈现焦糖色, 而真空冷冻干燥的 L* 值最高, a* 值和 b* 值最低, 使鮰鱼片呈现白色; 热风干燥和微波干燥的鮰鱼片气味比较相似, 热风干燥和真空干燥处理的鮰鱼片的滋味比较相似, 而真空冷冻干燥气味和滋味都区别于其他三种干燥方式; 热风干燥和真空冷冻干燥的甜味氨基酸含量分别比苦味氨基酸含量高 51.97 mg/g 和 67.66 mg/g; 微波干燥和真空干燥的苦味氨基酸含量分别比甜味氨基酸含量高 3.56 mg/g 和 6.11 mg/g。因此, 真空冷冻干燥对鮰鱼片的干燥特性影响最小, 且风味有区别于其他三种干燥方式。

关键词: 鮰鱼; 干燥特性; 气味; 滋味

文章编号: 1673-9078(2021)04-242-251

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.4.0905

Drying Characteristics and Flavor Changes of Catfish Fillets under

Different Drying Methods

ZHOU Ming-zhu^{1,2}, XIONG Guang-quan¹, QIAO Yu¹, LIAO Li¹, WANG Lan¹, WU Wen-jin¹, LI Xin¹, SHI Liu¹, DING An-zi¹, LI Cai³

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China) (2. School of Bioengineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan 430064, China) (3. Wuhan Liangzihu Aquatic Product Processing Co. Ltd., Wuhan 430200, China)

Abstract: In this paper, the effects of different drying methods on the drying characteristics of catfish were studied. Gas chromatography ion mobility spectrometry (GC-IMS), electronic nose, electronic tongue and amino acid analyzer were used to analyze the flavor of different drying methods. The results showed that the shrinkage rate of vacuum freeze-drying was 5.44%, which was significantly lower than the other three drying methods ($p < 0.05$), and its rehydration rate was the fastest and the time was the shortest; the hardness of hot-air drying was the highest, reaching 1929.70 g. Compared with the other three drying methods, there was a significant difference ($p < 0.05$); the L* value was the minimum, a* value and b* value were the largest in the vacuum drying, which made the catfish slice appear caramel color, while the vacuum freeze-drying had the highest L* value, the lowest a* value and b* value, which made it white; the hot-air drying and microwave drying had similar odor, and the hot-air drying and vacuum drying had similar odor. The sweet amino acid content of hot air drying and vacuum freeze-drying were 51.97 mg/g and 67.66 mg/g, respectively, higher than those of bitter amino acids; the contents of bitter amino acids in

引文格式:

周明珠,熊光权,乔宇,等.不同干燥方式下鮰鱼片的干燥特性及风味变化[J].现代食品科技,2021,37(4):242-251

ZHOU Ming-zhu, XIONG Guang-quan, QIAO Yu, et al. Drying characteristics and flavor changes of catfish fillets under different drying methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(4): 242-251

收稿日期: 2020-09-27

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金资助项目 (CARS-46); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0400601)

作者简介: 周明珠 (1996-) 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏

通讯作者: 乔宇 (1981-) 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏

microwave drying and vacuum drying were 3.56 mg/g and 6.11 mg/g, respectively, higher than those of sweet ones. Therefore, the vacuum freeze-drying had the least effect on the drying characteristics of channel fish fillets, and the flavor was different from the other three drying methods.

Key words: crayfish; drying characteristics; smell; taste

斑点叉尾鮰 (*Ictalurus punctatus*) 起源于美洲, 属于鲶形目鮰科鱼类, 在国内广泛养殖^[1], 斑点叉尾鮰水分含量很高, 很容易受到微生物的污染导致其腐败变质, 失去其食用价值; 但因鱼肉肉质鲜美, 蛋白质含量较高, 因此受到消费者的广大欢迎^[2]; 那么水分含量过高是现在急需解决的问题。而干燥是有效解决问题的重要环节, 它可通过降低样品中的水分含量, 延长货架期^[3]; 也能赋予其独特风味, 包括肌肉蛋白质水解产生的游离氨基酸、小分子多肽等和脂肪氧化分解和游离氨基酸进一步降解产生的醛、酮类等挥发性物质^[4]。

在水产品干燥方面, 一般使用真空冷冻干燥法、微波干燥法等^[5]。近年来, 国内外研究人员在干燥方面做了大量的研究实验, 采用的干燥方法主要有热风干燥、真空冷冻干燥、真空微波干燥以及联合干燥等^[6-8]。

真空冷冻干燥的成品收缩率小, 物料空隙均匀, 复水性好, 营养成分不会被破坏, 能最大限度地保持产品的色、香、味、型。到目前为止, 真空冷冻干燥是干燥效果最好的方法之一, 但是, 它设备投资大, 能耗高, 成本较高。张玉斌等^[9]发现使用真空冷冻干燥技术干燥浓缩牦牛骨汤, 可以最大限度的保留物料原有色、香、味、型。但存在干燥能耗较高、产品附加值增加等缺点。近年来微波干燥在果蔬领域应用较多, 因其干燥方式是由内部偶极分子高频往复运动产生热能, 传热速率快, 效率高, 缩短了干燥时间, 且可控性好, 操作方便等; 而传统干燥方式与微波干燥有明显不同, 传统干燥是通过热传导来干燥样品。目前微波干燥在水产品方面的应用研还比较少。段振华^[10,11]等发现微波干燥的较低微波功率有助于保持鳙鱼和罗非鱼鱼片的优良品质。热风干燥的优点为所用设备及操作过程较为简单, 缺点为能耗大且耗时, 并且容易使鱼肉过度氧化^[12], 在干燥过程中, 鱼肉容易被破坏、发生脂肪氧化、美拉德褐变等反应, 造成鱼干收缩率较大、复水率、复原率低下, 硬度增加, 弹性减小。真空干燥的环境为低温低压, 可以较好的保持食品的品质^[13]。近年来真空干燥在果蔬领域应用较多, 而在水产品领域的应用还较少。李真等^[14]采用真空干燥技术使得熏马肉干的感官品质得到了显著性的提高。Pankyamma 等^[15]发现真空干燥处理可使得鱿鱼

丝的褐变程度显著低于热风干燥, 且蛋白纤维降解程度更低, 与热风干燥相比具有节能省时的优点。

此实验以鮰鱼片为研究对象, 通过不同的干燥方式对鮰鱼片的干燥特性 (包括收缩率、硬度、色泽以及复水率等) 和风味 (包括气味、挥发性风味物质、滋味以及游离氨基酸等) 进行比较分析, 为鮰鱼干燥工艺提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

原料为新鲜鮰鱼, 约重 1.5~2.0 kg/条, 购于武汉市武商超市 (农科院店)。

氯化钠、三氯乙酸、氢氧化钠, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

TGL-24MC 台式高速冷冻离心机, 长沙平凡仪器仪表有限公司; PEN3 电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; 7890A-5975C GC-MS, 美国 Agilent Technologies 公司; KQ5200DE 超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; LGJ-25C 冷冻干燥机, 北京四环科学仪器厂有限公司; L-8900 型氨基酸自动分析仪, 日本日立公司; FlavourSpec® 食品风味分析与质量控制系统 (配 Laboratory Analytical Viewer(LAV)分析软件及 Library Search 定性软件的 GC-IMS 系统), 德国 G.A.S 公司; G70F20CN2L-B8H (B0) 微波炉, 佛山市顺德区格兰仕微波炉电器有限公司; PCE-3000 真空干燥箱, 上海索谱仪器有限公司; Ta-XT 2i/50 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; CR-400 色差仪, KonicaMinolta (柯尼卡美能达); ASTREEII 电子舌, 法国 Alpha M.O.S 公司。

1.3 方法

1.3.1 鮰鱼片的制备

新鲜鮰鱼去鳞、去鳃、去内脏后, 置于装有碎冰的塑料袋中, 30 min 内运回实验室, 在 4 °C 下去头、去皮、清洗、切分为 2.5 cm×2 cm×0.7 cm 的鱼片, 在 4 °C 冰箱中放置 4 h 使内部水分分布均匀, 然后进行干燥处理: ①微波干燥: 取鮰鱼片放入功率为 210 W 的

微波炉中干燥 32 min, 使其水分质量分数为 10%~12%; ②热风干燥: 取鲷鱼片放入 70 °C 的热风干燥箱中干燥 5.5 h, 使其水分质量分数为 10%~12%; ③真空干燥: 取鲷鱼片放入真空度为 0.09 MPa, 温度为 70 °C 的真空干燥箱中干燥 5 h, 使其水分质量分数为 10%~12%; ④真空冷冻干燥: 取鲷鱼片在 -18 °C 的冰箱中预冻 24 h 后放入冷冻干燥机中冻干 36 h, 使其水分质量分数为 10%~12%。

1.3.2 收缩率

准确记录新鲜鲷鱼片的体积 (V_1), 将新鲜鱼片进行不同干燥处理后, 准确记录干燥后的鲷鱼片体积 (V_2), 计算其收缩率 (R_s)。

$$R_s / \% = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100\%$$

1.3.3 硬度

采用 Ta.XT 2i/50 质构分析仪、探头型号为 P/2 的圆柱型平底探头来测定样品的硬度。测定条件: 测前速度、测试速度、测后速度分别为 5.00 mm/s、1.00 mm/s、5.00 mm/s, 距离为 3.00 mm, 触发力 5.0 g。所有测试均有 5 个平行样, 取平均值。

1.3.4 色度

采用色差仪, 重复测量待测鲷鱼片的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 连续 5 次平行; L^* 为明暗值, a^* 为红或绿值, b^* 为黄或蓝值。

1.3.5 复水率

准确称取干燥鲷鱼片的质量 m_1 , 然后将其置于 45 °C 的恒温水浴锅中进行复水, 复水后取出, 用滤纸片吸干表面水分后称取复水后的鲷鱼片质量 m_2 ; 每间隔 5 min 取出一次, 记录数据, 直至达到恒重。每个实验组三个平行。

$$R_f / \% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\%$$

1.3.6 电子鼻测定

准确称取样品各 0.2 g, 加入 2 mL 0.18 g/mL NaCl, 置于 50 mL 进样瓶中。为保证结果可靠性, 每个样品分别制备 3 个平行。

采用 PEN3 型便携式电子鼻对干燥鲷鱼片进行检测。样品前处理: 顶空平衡温度 35 °C, 时间 30 min。电子鼻测定条件: 注射针温度 50 °C, 进气量 150 mL/min, 测定时间 120 s, 清洗时间 100 s, 特征值提取时间点设定为 118~120 s, 对同一时间段内的信息进行主成分分析 (PCA) 处理。

1.3.7 气相色谱-离子迁移色谱 (GC-IMS)

准确称取样品各 1.0 g, 加入 5 mL 水和 1.0 g 氯化钠, 置于 20 mL 顶空瓶中。为保证结果可靠性, 每个

样品分别制备 3 个平行样。

自动顶空进样条件: 孵育温度 60 °C; 孵育时间 30 min; 进样体积 200 μ L。

GC-IMS 条件: FS-SE-54-CB-1 15m ID: 0.53 mm; 进样针温度 85 °C, 色谱柱温度 60 °C; 载气/漂移气为 N_2 ; 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, 10 min 内升至 100 mL/min, 10 min 内升至 150 mL/min, 运行时间为 30 min。IMS 条件温度 45 °C, 漂移气流速 150 mL/min。

分析: 仪器配套的分析软件包括 LAV (Laboratory Analytical Viewer) 和三款插件 (Reporter 插件、Gallery Plot 插件、Dynamic PCA 插件) 以及 GC \times IMS Library Search (应用软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库可对物质进行定性分析), 可以分别从不同角度进行样品分析。

1.3.8 电子舌

准确称取鲷鱼片 5 g, 加入 120 mL 纯净水, 均质后静置 30 min, 过滤后取 80 mL 澄清液备用。采用 AstreeII 电子舌检测装置, 在室温下进行测量。测定前确保传感器处于稳定状态。每测量一次进行一次传感器清洗, 每个样品重复测试 4 次。

1.3.9 游离氨基酸

根据付娜^[16]的方法处理干燥鲷鱼片并稍作修改, 即每个处理组的样品各取 0.2 g, 分别加入 5% 三氯乙酸 15 mL, 匀浆后在 4 °C 下静置 2 h, 取上清液 10 mL 用冷冻离心机离心 (9000 r/min, 15 min), 离心结束后取上清液 5 mL 用 NaOH 调 pH 至 2.0, 去离子水定容至 10 mL, 用 0.22 μ m 的水相滤膜过滤, 最后用氨基酸自动分析仪检测, 每个处理组做 3 次平行实验。

1.3.10 数据处理

实验数据使用 Excel 进行处理, 采用 DPS 进行差异显著性分析和相关性分析, 用 Origin 2017 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式鲷鱼片收缩率、硬度、色度的变化

如表 1 所示, 不同干燥方式处理的鲷鱼片, 其收缩率、硬度、以及 L^* 、 a^* 、 b^* 值都有显著性的影响 ($p < 0.05$); 从表中可看出真空冷冻干燥的鲷鱼片收缩率为 5.44%, 显著低于其他三种干燥方式 ($p < 0.05$); 说明真空冷冻干燥能够尽可能地保持鲷鱼片原有形态, 这与刘书成^[6]等的研究结果一致, 可能是由于真

空冷冻干燥虽然能保持样品基本结构特征,但在干燥时,水分升华,在重力作用下细胞结构无法维持原状,导致样品轻微程度的收缩^[16,17]。硬度是肉干类食品品质特征评价的重要指标,热风干燥的鲷鱼片硬度最大,达 1929.70 g,与其他三种干燥方式之间有显著性的差异 ($p<0.05$),这可能是由于热风干燥过程中,水分迁移的速率较慢,使得样品表面形成了硬壳,导致细胞结构被破坏,硬度增加^[17]。鲷鱼片的色泽是非常重要的品质指标,可以用来评定干燥方式对鲷鱼片外观的

影响。其中真空干燥使得鲷鱼片的 L^* 值为 57.25,显著低于其他三种干燥方式, a^* 值和 b^* 值分别为 5.19 和 22.00,显著高于其他三种干燥方式,说明真空干燥使鲷鱼呈现焦糖色,这可能是由于发生了美拉德反应和脂肪氧化,吴满刚等^[18]研究表明美拉德褐变也是干燥后肉类色泽变化的主要原因。而真空冷冻干燥的 L^* 值最高, a^* 值和 b^* 值最低,分别为 86.97、0.57 和 10.09,可能是因为真空冷冻干燥的温度低,可能未发生美拉德褐变和脂肪氧化,因此表现出良好的色泽。

表 1 不同干燥方式的鲷鱼片收缩率、硬度、色泽的变化

Table 1 Changes in shrinkage, hardness and color of catfish fillets with different drying methods

处理组	收缩率/%	硬度/g	L^*	a^*	b^*
微波干燥	68.87±1.67 ^b	648.54±11.68 ^b	65.31±0.90 ^b	2.08±0.10 ^b	21.95±0.54 ^a
热风干燥	78.63±13.38 ^{ab}	1929.70±389.05 ^a	62.53±0.24 ^c	1.76±0.39 ^b	18.55±0.41 ^b
真空干燥	86.14±2.38 ^a	571.63±91.82 ^b	57.25±0.85 ^d	5.19±0.54 ^a	22.00±0.17 ^a
真空冷冻干燥	5.44±0.62 ^c	644.15±95.45 ^b	86.97±0.67 ^a	0.57±0.06 ^c	10.09±0.26 ^c

注: 同一指标的不同小写字母代表样品内存在显著差异 ($p<0.05$)。

2.2 不同干燥方式鲷鱼片复水率的变化

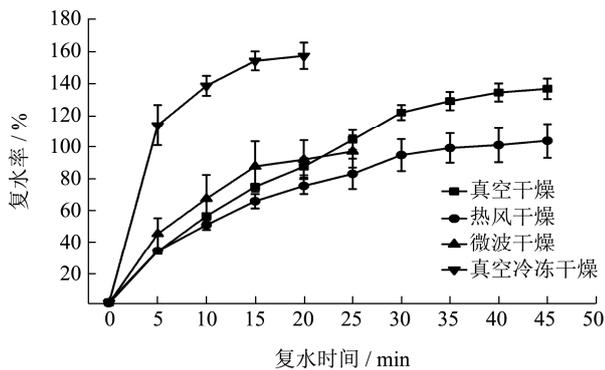


图 1 不同干燥方式鲷鱼片复水率的变化

Fig.1 Changes in the rehydration rate of catfish fillets with different drying methods

不同干燥方式的鲷鱼片复水率的变化趋势如图 1 所示,从图中可看出,干燥方法对鲷鱼片的复水率有显著的影响 ($p<0.05$);其中真空冷冻干燥的鲷鱼片复水时达到恒重,仅需 20 min,用时最短,且复水速率最快,而真空干燥和热风干燥需 45 min,才能达到恒重,且热风干燥的复水速率最慢;样品经干燥处理后细胞和结构的破坏程度决定了其复水性能^[19];干燥处理后,若是样品的细胞结构遭到破坏、组织结构变得塌陷,则此干燥方式干燥的鲷鱼片复水性能就较差^[20]。而真空冷冻干燥的鲷鱼片在干燥过程中水分是以冰晶态升华汽化,升华后会形成小孔构成疏松结构,但纤维结构保持的比较完整^[21],为复水时水分的渗入提供了良好的条件,因此真空冷冻干燥复水速度快,复水率高。而热风干燥和真空干燥的鲷鱼片,收缩率

较大,这两种处理使得鲷鱼片的组织结构比较紧密,复水时使得水分较难渗入,因此此干燥方式的复水速度和复水率都较低。

2.3 不同干燥方式鲷鱼片气味的变化

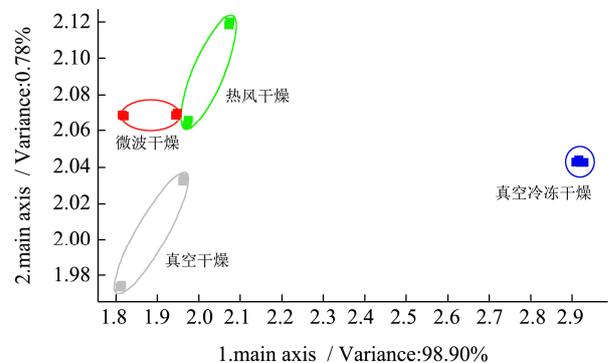


图 2 不同干燥方式鲷鱼片气味的变化

Fig.2 Changes in the odor of catfish fillets in different drying methods

不同干燥方式鲷鱼片的主成分分析 (PCA) 结果如图 2 所示,第一主成分 (PC1) 的贡献率为 98.90%,第二主成分 (PC2) 的贡献率为 0.78%,累计贡献率达到 99.68%,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。由图 2 可以看出,不同干燥方式处理的鲷鱼片气味有较为明显的差别,其中真空冷冻干燥与其他三种干燥方式的气味分布距离较远,说明真空冷冻干燥处理的鲷鱼片气味区别于其他三种干燥方式,可能是因为其干燥温度较低,可能未发生美拉德反应和脂肪氧化,所以表现出气味有差别。微波干燥和热风干燥的鲷鱼片气味分布比较接近,说明

这两种干燥方式干燥的鲷鱼片气味无明显差别。微波干燥是通过造成分子间剧烈的内摩擦,从而使物体发热,从而使水分挥发^[22];热风干燥是通过鼓入热风,进而使空气流动速度加快使得水分蒸发^[23];这两种干燥过程中都因温度较高可能会发生美拉德反应和脂肪氧化^[24],所以气味较接近,但区别于其他干燥方式。

2.4 GC-IMS

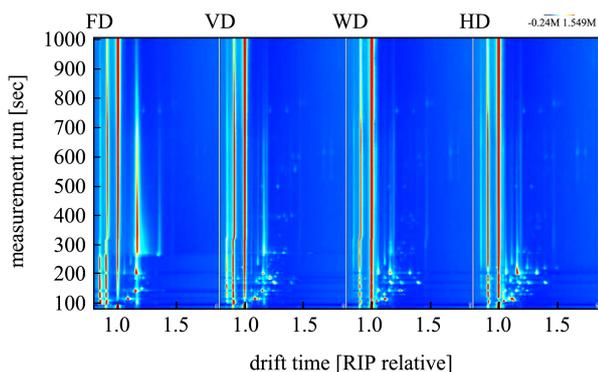


图3 干燥鲷鱼片的气相离子迁移谱图

Fig.3 Gas phase ion mobility spectrum of dried catfish fillet

注: FD: 真空冷冻干燥; VD: 真空干燥; WD: 微波干燥; HD: 热风干燥。

如图3所示,横坐标1.0处的竖线为反应离子峰(经归一化处理)。横坐标为迁移时间,纵坐标为保留时间。反应离子峰峰两侧的每一个点各代表一种挥发性物质,且颜色越深表示浓度越大;其中白色表示浓度较低,紫色表示浓度较高。从上面的对比图,图3中可以看出四种不同干燥处理方式的鲷鱼片的气相离

子迁移谱明显不同,冷冻干燥处理的鲷鱼片的挥发性有机物种类较少,浓度较高,热风干燥处理的鲷鱼片的挥发性有机物种类较多。

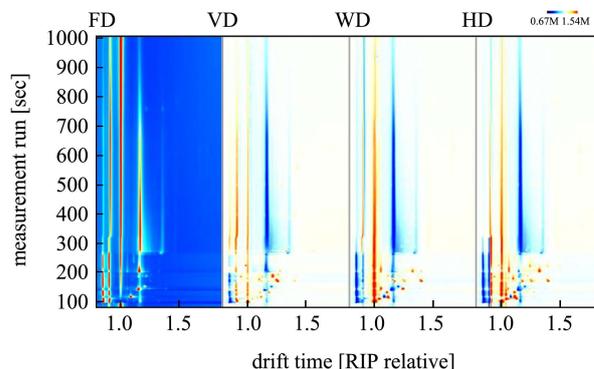


图4 干燥鲷鱼片的气相离子迁移谱图 Difference 图

Fig.4 Difference diagram of gas phase ion mobility spectra of dried catfish fillets

注: FD: 真空冷冻干燥; VD: 真空干燥; WD: 微波干燥; HD: 热风干燥。

为了更加方便观察样品间的差异,如图4所示:采用差异对比模式,选取真空冷冻干燥的样品谱图为参比,其他样品的谱图扣减参比。白色代表两种样品的挥发性物质一致,而紫色代表该物质的浓度高于参比,蓝色代表该物质的浓度低于参比。通过差异对比图4可以明显观察出与图3的结论一致,即冷冻干燥处理的鲷鱼片的挥发性有机物种类较少,浓度较高,热风干燥处理的鲷鱼片的挥发性有机物种类较多。为了明确对比不同干燥鲷鱼片中的具体的差异物质,下面选取所有峰进行指纹图谱对比。

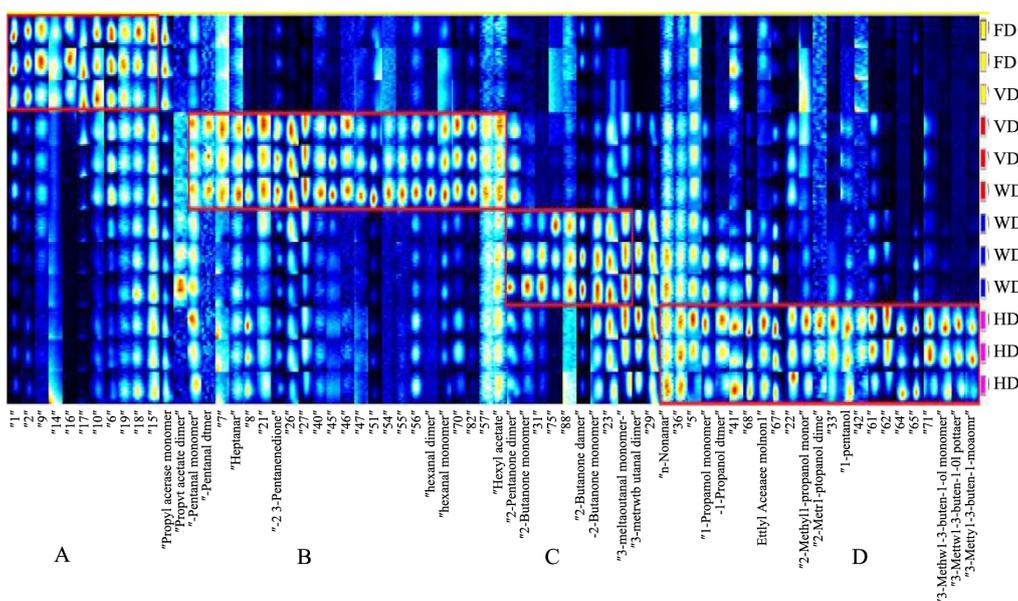


图5 气相离子迁移谱图中选取的挥发性有机物的 Gallery Plot 图

Fig.5 Gallery plot of selected volatile organic compounds in the gas-phase ion migration spectrum

注: FD: 真空冷冻干燥; VD: 真空干燥; WD: 微波干燥; HD: 热风干燥。

表2 不同干燥方式的鲶鱼片气相离子迁移谱图定性结果

Table 2 Qualitative results of gas phase ion mobility spectra of catfish fillets with different drying methods

序号	化合物	CAS#	分子式	分子量	保留指数	保留时间/s	离子迁移时间/ms	注释
1	2-丁酮	C78933	C ₄ H ₈ O	72.1	598.3	144.247	1.0559	单体
2	2-丁酮	C78933	C ₄ H ₈ O	72.1	597.7	143.987	1.2507	二聚体
3	乙酸乙酯	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	611.2	149.453	1.0956	
4	戊醛	C110623	C ₅ H ₁₀ O	86.1	696.7	190.413	1.1866	单体
5	戊醛	C110623	C ₅ H ₁₀ O	86.1	696.5	190.258	1.4217	二聚体
6	乙酸丙酯	C109604	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	712.1	201.541	1.1625	单体
7	乙酸丙酯	C109604	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	711.9	201.387	1.4803	二聚体
8	3-甲基丁醛	C590863	C ₅ H ₁₀ O	86.1	654.7	168.391	1.1722	单体
9	3-甲基丁醛	C590863	C ₅ H ₁₀ O	86.1	653.3	167.724	1.408	二聚体
10	2,3-戊二酮	C600146	C ₅ H ₈ O ₂	100.1	690.5	186.069	1.2202	
11	2-戊酮	C107879	C ₅ H ₁₀ O	86.1	689.4	185.307	1.1257	单体
12	2-戊酮	C107879	C ₅ H ₁₀ O	86.1	688.6	184.813	1.3737	二聚体
13	异丁醇	C78831	C ₄ H ₁₀ O	74.1	625.9	155.591	1.1689	单体
14	异丁醇	C78831	C ₄ H ₁₀ O	74.1	625.1	155.238	1.3575	二聚体
15	壬醛	C124196	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1104.7	782.488	1.4765	
16	1-戊醇	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	764.3	244.38	1.2485	
17	庚醛	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	902.5	400.621	1.3345	
18	己醛	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	793.7	271.933	1.2556	单体
19	己醛	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	793.5	271.708	1.561	二聚体
20	乙酸己酯	C142927	C ₈ H ₁₆ O ₂	144.2	1013.4	603.349	1.4089	
21	丙醇	C71238	C ₃ H ₈ O	60.1	562.4	130.733	1.1084	单体
22	丙醇	C71238	C ₃ H ₈ O	60.1	561.1	130.268	1.2514	二聚体
23	3-甲基-3-丁烯-1-醇	C763326	C ₅ H ₁₀ O	86.1	735.4	219.651	1.2426	单体
24	3-甲基-3-丁烯-1-醇	C763326	C ₅ H ₁₀ O	86.1	734.9	219.191	1.2735	二聚体
25	3-甲基-3-丁烯-1-醇	C763326	C ₅ H ₁₀ O	86.1	734.3	218.731	1.4908	聚合物

如图5所示,图中每一行代表一个样品中选取的全部信号峰,图中每一列代表同一挥发性有机物在不同样品中的信号峰;从图中可以看出每种样品的完整挥发性有机物信息以及样品之间挥发性有机物的差异。不同干燥方式处理的鲶鱼片共定性出25种挥发性物质,如表2所示。

如图5,观察四种不同干燥方式处理鲶鱼片的挥发性有机物指纹图谱可以发现:四种不同干燥处理方式鲶鱼片的挥发性有机物种类差异明显,且不同干燥方式处理鲶鱼片的特征挥发性有机物不同,其中真空冷冻干燥处理的鲶鱼片挥发性有机物种类较少,浓度较高,图中A区域的风味物质在真空冷冻干燥中的浓度远远大于其他样品中的,可作为真空冷冻干燥的鲶鱼片的特征物质;真空干燥处理鲶鱼片的挥发性有机物主要为醛类和少量的酮类和酯类,如图中B区域,包括:戊醛、庚醛、2,3-戊二酮、己醛和乙酸己酯等;醛类物质主要由多不饱和脂肪酸的氧化产生的,且阈

值较低,对鱼肉总体气味特征有重要影响^[25-28]。其中,己醛主要是来自于亚油酸的氧化。微波干燥处理鲶鱼片的挥发性有机物主要为图中C区域,包括:2-戊酮和2-丁酮等;酮类由高温条件下的脂肪氧化产生,这些化合物赋予鱼肉甜香味、焦糖香味、清香和果香。热风干燥处理鲶鱼片的挥发性有机物主要为醇类和酯类,见图中D区域,包括:壬醛、丙醇、乙酸乙酯、2-甲基-1-丙醇、戊醇和3-甲基-3-丁烯-1-醇等;醇类来源于脂肪的氧化降解,酯类往往具有水果香味,被认为是脂质代谢生成的羧酸和醇的酯化作用的产物^[29]。Drumm^[30]等已经证实了壬醛是油酸氧化的产物;图中微波干燥和热风干燥的挥发性有机物的种类相同的较多,但比例存在明显差异;这与电子鼻的结果一致。

由图6可知,第一主成分(PC1)的贡献率为44%,第二主成分(PC2)的贡献率为32%,2种主成分累计贡献率达到76%,数据降维后所得综合变量在二维空间即可表达原有变量的大部分信息。通过二维空间

的数据分布差异可以直观地观察到组间和组内样品间的差异性, 组内各样品相对集中于一定范围内, 并与其他各组数据的成簇区域有明显的间距, 这说明同一干燥处理的样品重复性较好, 不同干燥方式处理的样品特异性较明显^[31]。

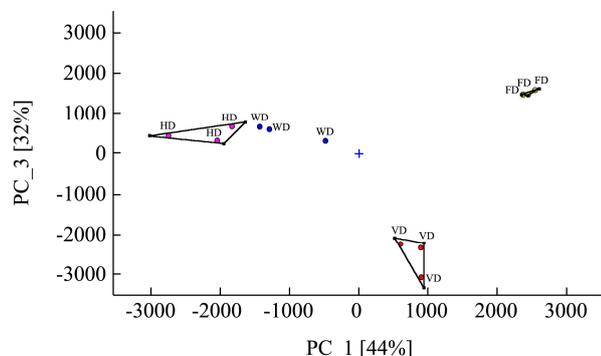


图6 干燥鮰鱼片的PCA图

Fig.6 PCA picture of dried catfish fillets

注: FD: 真空冷冻干燥; VD: 真空干燥; WD: 微波干燥; HD: 热风干燥。

PCA图与 Gallery Plot图结论相同。PCA图显示不同样品的差异, 样品相近则代表差异小, 相隔远则代表组分差异明显。如图6中所示可以通过PCA观察四种不同干燥方式鮰鱼片的风味物质明显不同, 微波干燥和热风干燥的比较相似。这与电子鼻和指纹图谱的结果一致。

2.5 不同干燥方式鮰鱼片滋味的变化

不同干燥方式鮰鱼片滋味的主成分分析(PCA)结果如图7所示, PCA可以用于区分不同样品间的差异^[32,33], 识别指数DI值越大表示区分度越大; 如图7所示, 识别指数DI值为99%, 大于90%, 且不同样品

之间无重叠, 区分明显。这表明利用电子舌能区分样品滋味的差异, 不同干燥处理对鮰鱼片滋味具有不同的影响。

此外, 第一主成分(PC1)的贡献率为93.79%, 第二主成分(PC2)的贡献率为4.77%, 2种主成分累计贡献率达到98.56%, 说明可以反映出干燥鮰鱼片滋味的主要信息。由图7可以看出, 不同干燥方式处理的鮰鱼片滋味有较为明显的差别, 其中真空冷冻干燥处理的鮰鱼片滋味区别于其他三种干燥方式, 可能是因为真空冷冻干燥因干燥温度较低, 与其他三种干燥方式温度上有差异, 导致此处理可能未发生美拉德反应和脂肪氧化, 所以产生滋味差异。热风干燥和真空干燥处理的鮰鱼片的滋味分布都处在图中的第三象限, 说明这两种处理使得鮰鱼片滋味比较相似。

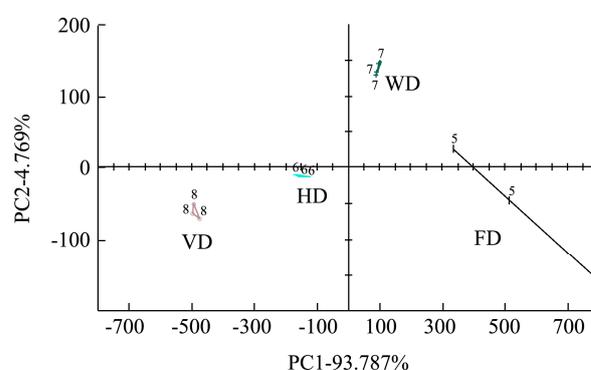


图7 干燥鮰鱼片滋味的主成分分析

Fig.7 Principal component analysis of the taste of dried catfish fillet

注: FD: 真空冷冻干燥; VD: 真空干燥; WD: 微波干燥; HD: 热风干燥。

2.6 游离氨基酸

表3 不同干燥方式的鮰鱼片游离氨基酸含量的变化

Table 3 Changes in free amino acid content of catfish fillets with different drying methods

氨基酸种类 ^[34]	游离氨基酸含量/(mg/g)			
	微波干燥	热风干燥	真空干燥	真空冷冻干燥
天冬氨酸 (Asp)	0.86±0.75	0.81±0.14	0.67±0.21	1.58±0.06
谷氨酸 (Glu)	12.82±0.20	18.20±0.12	22.13±0.09	20.91±0.10
鲜味氨基酸总量	13.68	19.01	22.80	22.49
丙氨酸 (Ala)	12.47±1.01	24.19±0.03	5.96±1.46	26.80±0.03
甘氨酸 (Gly)	23.31±0.04	41.78±0.11	12.78±0.25	44.48±0.06
丝氨酸 (Ser)	4.71±3.58	7.33±0.41	3.85±0.37	21.02±0.34
苏氨酸 (Thr)	11.83±0.00	26.27±0.14	14.25±0.38	34.95±0.27
甜味氨基酸总量	52.32	99.57	36.84	127.25
精氨酸 (Arg)	6.19±0.90	10.55±0.77	4.73±0.07	15.90±0.14
组氨酸 (His)	16.19±0.60	13.38±0.16	9.47±0.20	18.71±0.34

转下页

接上页

异亮氨酸 (Ile)	0.00±0.40	0.45±0.10	1.69±0.10	0.00±0.21
亮氨酸 (Leu)	2.99±0.15	4.08±0.05	3.27±0.50	4.61±1.17
甲硫氨酸 (Met)	7.78±0.09	8.42±0.16	7.89±0.00	8.45±0.00
苯丙氨酸 (Phe)	22.73±0.36	10.72±0.11	15.90±0.24	11.84±0.06
缬氨酸 (Val)	0.00±0.33	0.00±0.06	0.00±0.06	0.08±0.24
苦味氨基酸总量	55.88	47.60	42.95	59.59
赖氨酸 (Lys)	12.33±0.87	14.53±0.11	12.31±0.01	7.93±0.08
酪氨酸 (Tyr)	5.2±1.05	7.36±0.27	5.43±0.10	8.30±0.12
半胱氨酸 (Cys)	21.82±0.13	14.56±0.50	15.74±0.12	34.47±0.03
无味氨基酸总量	39.35	36.45	33.48	50.70

注: a: 呈味氨基酸; b: 必需氨基酸; “+”代表呈味强度, +越多呈味强度越大; “ND”代表未检测出。

Yang 等^[35]将游离氨基酸分为 4 组, 即甜味氨基酸: Ala、Gly、Ser、Thr; 鲜味氨基酸: Asp 和 Glu; 苦味氨基酸: Arg、His、Ile、Leu、Met、Phe、Val; 无味氨基酸: Lys、Tyr、Cys。

由表 3 可知, 从干燥鲶鱼片中共检测出 16 种游离氨基酸, 不同干燥方式对样品中游离氨基酸的影响不同, 其中真空冷冻干燥甜味氨基酸、苦味氨基酸和无味氨基酸的含量均显著高于其他干燥方式 ($p<0.05$), 分别为 127.25 mg/g、59.59 mg/g 和 50.70 mg/g; 而真空干燥的鲜味氨基酸含量为 22.80 mg/g, 显著高于其他干燥方式 ($p<0.05$)。由表可知, 热风干燥和真空冷冻干燥的甜味氨基酸含量分别为 99.57 mg/g 和 127.25 mg/g, 苦味氨基酸含量分别为 47.60 mg/g 和 59.59 mg/g, 可看出热风干燥和真空冷冻干燥的甜味氨基酸含量分别比苦味氨基酸含量高 51.97 mg/g 和 67.66 mg/g; 而微波干燥和真空干燥的甜味氨基酸含量分别为 52.32 mg/g 和 36.84 mg/g, 苦味氨基酸含量分别为 55.88 mg/g 和 42.95 mg/g, 微波干燥和真空干燥的苦味氨基酸含量分别比甜味氨基酸含量高 3.56 mg/g 和 6.11 mg/g。

3 结论

综上所述, 不同干燥方式的鲶鱼片都有其各自的特征。真空冷冻干燥的鲶鱼片收缩率最小, 为 5.44%, 且其复水速率最快, 用时最短; 热风干燥的鲶鱼片硬度最大, 达 1929.70 g, 与其他三种干燥方式之间有显著性的差异 ($p<0.05$); 真空干燥使得鲶鱼片呈现焦糖色, 而真空冷冻干燥使鲶鱼片呈现白色; 真空冷冻干燥对鲶鱼片的干燥特性影响最小。电子鼻分析得知热风干燥和微波干燥的气味比较相似; GC-IMS 分析得冷冻干燥处理的鱼干挥发性有机物种类较少, 浓度较高; 电子舌分析得热风干燥和真空干燥处理的鲶鱼片的滋味比较相似, 而真空冷冻干燥气味和滋味都区别

于其他三种干燥方式; 热风干燥和真空冷冻干燥的甜味氨基酸含量分别比苦味氨基酸含量高 51.97 mg/g 和 67.66 mg/g; 微波干燥和真空干燥的苦味氨基酸含量分别比甜味氨基酸含量高 3.56 mg/g 和 6.11 mg/g。

参考文献

- [1] 陆剑锋, 林琳, 叶应旺, 等. 斑点叉尾鲶在不同保藏温度下的鲜度变化[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(5): 187-190
LU Jian-feng, LIN Lin, YE Ying-wang, et al. Freshness changes of channel catfish at different storage temperatures [J]. Food Research and Development, 2012, 33(5): 187-190
- [2] 封功能, 张雪梅, 刘汉文, 等. 斑点叉尾鲶含肉率及肌肉营养成分分析[J]. 江西农业学报, 2007, 19(7): 79-80
FENG Gong-neng, ZHANG Xue-mei, LIU Han-wen, et al. Analysis of meat content and muscle nutritional components of channel catfish [J]. Jiangxi Journal of Agriculture, 2007, 19(7): 79-80
- [3] 王强. 酱鸭与香辛料风味物质及其在加工过程中的变化 [D]. 南昌: 南昌大学, 2011
WANG Qiang. Flavor compounds of sauced duck and spices and their changes during processing [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011
- [4] 陈小雷, 胡王, 鲍俊杰, 等. 不同干燥方式对封鳊鱼品质的影响[J]. 水产科学, 2019, 38(1): 98-103
CHEN Xiao-lei, HU Wang, BAO Jun-jie, et al. The effect of different drying methods on the quality of sealed bream [J]. Fishery Sciences, 2019, 38(1): 98-103
- [5] Wang J, Xi Y S. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(4): 505-511
- [6] 刘书成, 张常松, 吉宏武, 等. 不同干燥方法对罗非鱼片品质和微观结构的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 221-227
LIU Shu-cheng, ZHANG Chang-song, JI Hong-wu, et al.

- Effects of different drying methods on the quality and microstructure of tilapia fillets [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 221-227
- [7] KHALLOUFI S, Almeida-rivera C, Bongers P. Supercritical-CO₂ drying of foodstuffs in packed beds: Experimental validation of a mathematical model and sensitive analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(1): 141-150
- [8] 黄艳,黄建立,郑宝东. 银耳微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 362-367
HUANG Yan, HUANG Jian-li, ZHENG Bao-dong. Microwave vacuum drying characteristics and kinetic model of white fungus [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 362-367
- [9] 张玉斌,余群力,聂志刚,等. 浓缩牦牛骨汤真空冷冻干燥工艺实验研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(1): 259-263, 362
ZHANG Yu-bin, YU Qun-li, NIE Zhi-gang, et al. Experimental study on vacuum freeze drying process of concentrated yak bone soup [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(1): 259-263, 362
- [10] 段振华,丁晓阳,汪菊兰,等. 罗非鱼片的热风微波复合干燥动力学[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(12): 37-40
DUAN Zhen-hua, DING Xiao-yang, WANG Ju-lan, et al. Hot-air microwave compound drying kinetics of tilapia fillets [J]. Food Research and Development, 2009, 30(12): 37-40
- [11] 段振华,张敏,汤坚. 鳙鱼的热风干燥规律研究[J]. 水产科学, 2004, 23(3): 29-32
DUAN Zhen-hua, ZHANG Min, TANG Jian. Study on the hot-air drying law of bighead carp [J]. Fisheries Science, 2004, 23(3): 29-32
- [12] 段振华,尚军,徐松. 罗非鱼的热风干燥特性及其主要成分含量变化研究[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 479-482
DUAN Zhen-hua, SHANG Jun, XU Song. Hot-air drying characteristics of tilapia and changes in the content of main components [J]. Food Science, 2006, 27(12): 479-482
- [13] 张增帅,张宝善,罗喻红,等. 食品微波真空干燥研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 393-397
ZHANG Zeng-shuai, ZHANG Bao-shan, LUO Yu-hong, et al. Research progress in microwave vacuum drying of food [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(23): 393-397
- [14] 李真,刘雅娜,苏里阳,等. 干燥工艺对熏马肉干品质的影响[J]. 肉类研究, 2016, 30(2): 10-14
LI Zhen, LIU Ya-na, SU Li-yang, et al. The effect of drying process on the quality of smoked horse meat [J]. Meat Research, 2016, 30(2): 10-14
- [15] Pankyamma V, Mokam S Y, Debbarma J, et al. Effects of microwave vacuum drying and conventional drying methods on the physicochemical and microstructural properties of squid shreds [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(13): 5778-5783
- [16] 付娜,王锡昌. 电子舌分析和感官评价在游离氨基酸对中华绒螯蟹整体滋味贡献评价中的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(20): 91-96
FU Na, WANG Xi-chang. Electronic tongue analysis and sensory evaluation in the evaluation of the contribution of free amino acids to the overall taste of Chinese mitten crab [J]. Food Industry Science and Technology, 2014, 35(20): 91-96
- [17] Miraeia S H, Sturm B, Nasirahmadi A. Effects of hot-air and hybrid hot air-microwave drying on drying kinetics and textural quality of nectarine slices [J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 54: 915-927
- [18] 吴满刚,王俊山,段立昆,等. 不同干燥处理方法对鸡肉丁的干燥效果[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 235-241
WU Man-gang, WANG Jun-shan, DUAN Li-kun, et al. The drying effect of different drying methods on chicken cubes [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(7): 235-241
- [19] Okos M R, Narishman G, Singh R K, et al. Food dehydration. In: Handbook of Food Engineering [M]. York: Marcel Dekker, Inc, 1992: 437-562
- [20] 宋洪波,毛志怀. 干燥方法对植物产品物理特性影响的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 117-121
SONG Hong-bo, MAO Zhi-huai. Research progress on the effects of drying methods on the physical properties of plant products [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 117-121
- [21] 华泽钊. 冷冻干燥新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006
HUA Ze-zhao. New Technology of Freeze-drying [M]. Beijing: Science Press, 2006
- [22] 李里特. 微波在食品加工中应用的原理和特点[J]. 食品工业科技, 1991, 6: 3-7
LI Li-te. The principle and characteristics of microwave application in food processing [J]. Food Industry Science and Technology, 1991, 6: 3-7
- [23] 李阳. 果蔬热风真空组合干燥实验研究及装置设计[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017
LI Yang. Experimental research and device design of hot-air vacuum combined drying of fruits and vegetables [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017

- [24] 刘建彬,康乐,刘梦娅,等.鸡肉肽在美拉德反应中对生成肉味化合物的贡献研究[J].现代食品科技,2015,31(4):301-310
LIU Jian-bin, KANG Le, LIU Meng-ya, et al. Study on the contribution of chicken peptides to meaty compounds in Maillard reaction [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(4): 301-310
- [25] 徐永霞,刘滢,姜程程,等.电子鼻结合气质联用法分析大菱鲆冷藏过程中挥发性成分变化[J].食品与发酵工业,2014,40(1):193-197
XU Yong-xia, LIU Ying, JIANG Cheng-cheng, et al. Electronic nose combined with GC/MS to analyze the changes of volatile components in turbot during cold storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(1): 193-197
- [26] XIE Jian-chun, SUN Bao-guo, ZHENG Fu-ping, et al. Volatile flavor constituents in roasted pork of mini-pig [J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 506-514
- [27] Shahidi F, Botta J R. Seafoods: Chemistry, Processing Technology and Quality [M]. Boston: Springer, 1994
- [28] Min D B, Lee H O. Flavor chemistry [J]. Boston: Springer, 1999, 1(1): 175-189
- [29] Farmer L J, Mcconnell J M, Graham W D. Flavor and Lipid Chemistry of Seafoods [M]. Washington DC: American Chemical Society, 1997: 95-109
- [30] Drumm T D, Spanier A M. Changes in the content of lipid autoxidation and sulfur-containing compounds in cooked beef during storage [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 1991, 39(2): 336-343
- [31] 王辉,田寒友,李文采,等.基于顶空气相色谱-离子迁移谱技术的冷冻猪肉贮藏时间快速判别方法[J].食品科学,2019,40(2):269-274
WANG Hui, TIAN Han-you, LI Wen-cai, et al. A fast identification method of frozen pork storage time based on headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry technology [J]. Food Science, 2019, 40(2): 269-274
- [32] Loutfi A, Coradeschi S, Mani G K, et al. Electronic noses for food quality: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144: 103-111
- [33] 李靖,王成涛,刘国荣,等.电子鼻快速检测煎炸油品质[J].食品科学,2013,34(8):236-239
LI Jing, WANG Cheng-tao, LIU Guo-rong, et al. Electronic nose for rapid detection of frying oil quality [J]. Food Science, 2013, 34(8): 236-239
- [34] 魏云云,宫雪,辛广,等.基于化学分析与电子舌研究干燥方式对点柄粘盖牛肝菌鲜味的影响[J].食品科学,2018,39(18):192-198
WEI Yun-yun, GONG Xue, XIN Guang, et al. Based on chemical analysis and electronic tongue to study the effect of drying methods on the umami taste of *Boletus edulis* [J]. Food Science, 2018, 39(18): 192-198
- [35] Yang J H. Non-volatile taste components of several commercial mushrooms [J]. Food Chemistry, 2001, 73(4): 461-466

(上接第 32 页)

- [27] 陈绪龙,赵国巍,廖正根,等.当归超微粉体和普通粉体的粉体学性质比较[J].中国实验方剂学杂志,2010,16(18):1-5
CHEN Xu-long, ZHAO Guo-wei, LIAO Zheng-gen, et al. Comparative study on properties of *Angelica* in ultrafine powder and common powder [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2010, 16(18): 1-5
- [28] White, James, Robert, et al. Statistical methods for detecting differentially abundant features in clinical metagenomic samples [J]. Plos Computational Biology, 2009, 5(4): e1000352
- [29] Zagato E, Pozzi C, Betocchi A, et al. Endogenous murine microbiota member *Faecalibaculum rodentium* and its human homologue protect from intestinal tumour growth [J]. Nature Microbiology, 2020, 5(2): 511-524