6 种淡、海水鱼糜制品的滋味特征及其指纹图谱的建立

安玥琦[1,2,3]，阮秋凤[1]，张学振[3]，熊善柏[1,2,3,*]
（1.华中农业大学食品科学技术学院，湖北 武汉 430070；2.国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心（武汉），湖北 武汉 430070；3.长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心，湖北 武汉 430070）

摘 要：为明确不同品种鱼糜制品的滋味差异物并建立鱼糜制品的滋味指纹图谱，以3 种海水鱼糜（带鱼、铜盆鱼、金线鱼）和3 种淡水鱼糜（鲢鱼、草鱼、青鱼）为原料制备鱼糜制品，采用电子舌、高效液相色谱、气相色谱等技术，测定各鱼糜制品中滋味物质的含量，并结合微阵列显著性分析、聚类热图分析等手段，建立鱼糜制品的滋味指纹图谱。结果表明，6 种鱼糜制品的滋味特征有显著差异。带鱼鱼糜制品中具有鲜味的谷氨酸和天冬氨酸含量较高，分别为2.37 mg/100 g和1.32 mg/100 g；金线鱼糜制品中二者含量则最低；草鱼鱼糜制品中含有较高的脯氨酸（甜味）和组氨酸（苦味）。海水鱼糜制品中多不饱和脂肪酸占比约是淡水鱼糜制品的2 倍。在淡水鱼糜制品中，白鲢鱼糜制品中多不饱和脂肪酸含量相对较高。与淡水鱼糜制品相比，海水鱼糜制品普遍具有较高含量的甜菜碱、肌苷酸和鸟苷酸，以及较低含量的次黄嘌呤。通过微阵列显著性分析，在6 种鱼糜制品中共筛选出46 种差异物质，并依据该差异物质进行聚类热图分析，构建鱼糜制品的滋味指纹图谱，可直观反映淡、海水鱼糜制品滋味差异及主要差异物质。

关键词：淡水鱼；海水鱼；鱼糜制品；滋味轮廓；滋味指纹图谱

Taste Characteristics and Fingerprinting of Surimi Products Made from Three Species of Freshwater Fish and Three Species of Marine Fish

AN Yueqi[1,2,3], RUAN Qiufeng[1], ZHANG Xuezhen[3], XIONG Shanbai[1,2,3,*]
(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. National R&D Branch Center for Conventional Fresh Water Fish Processing (Wuhan), Wuhan 430070, China;
3. China Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China)

Abstract: To clarify the taste differences between surimi products from different fish species and establish a taste fingerprint of surimi products, three species of marine fish (hairtail, red sea snapper, and golden thread) and three species of freshwater fish (silver carp, grass carp, and black carp) were used to produce surimi gels. The taste profiles of the gels were analyzed by an electronic tongue, high performance liquid chromatography and gas chromatography, and a taste fingerprint of surimi was established by significance analysis of microarray (SAM), cluster analysis, and heatmap analysis. The results showed that the taste characteristics of the six surimi products were significantly different. Hairtail surimi contained high levels of glutamate (2.37 mg/100 g) and aspartic acid (1.32 mg/100 g). Golden thread surimi showed the lowest contents of glutamate and aspartic acid. In addition, grass carp surimi contained relatively high contents of proline (tasting sweet) and histidine (tasting bitter). The proportion of polyunsaturated fatty acids in marine surimi was about twice as high as that in freshwater surimi. Among the freshwater surimi products, the proportion of polyunsaturated fatty acids was relatively higher in silver carp surimi. Compared with freshwater surimi, marine fish surimi had a higher content of betaine, inosine 5′-monophosphate (IMP) and guanosine 5′-monophosphate (GMP), and a lower content of hyperxanthine (Hx). Through SAM, a total of 46

收稿日期：2022-07-28
基金项目：国家自然科学基金面上项目（32072250）；国家现代农业产业技术体系建设专项（CARS-45）
第一作者简介：安玥琦（1991—）（ORCID: 0000-0003-4997-5506），女，博士，研究方向为水产品风味品质调控。
E-mail: anyueqi@mail.hzau.edu.cn
*通信作者简介：熊善柏（1963—）（ORCID: 0000-0001-8863-0362），男，教授，硕士，研究方向为水产品加工与贮藏。
E-mail: xiongsb@mail.hzau.edu.cn

differential substances were selected between the six surimi products, and the taste fingerprint constructed based on these differential substances by heatmap analysis could directly reflect the taste differences and major differential substances between freshwater and marine fish surimi.

Keywords: freshwater fish; marine fish; surimi products; taste profile; taste fingerprint

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220728-316

中图分类号：TS254.4 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2023）10-0231-09

引文格式：

安玥琦, 阮秋凤, 张学振, 等. 6 种淡、海水鱼糜制品的滋味特征及其指纹图谱的建立[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 231-239. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220728-316. http://www.spkx.net.cn

AN Yueqi, RUAN Qiufeng, ZHANG Xuezhen, et al. Taste characteristics and fingerprinting of surimi products made from three species of freshwater fish and three species of marine fish[J]. Food Science, 2023, 44(10): 231-239. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220728-316. http://www.spkx.net.cn

水产品中的滋味物质包括游离氨基酸、核苷酸及其相关化合物、有机碱、有机酸、呈味肽、糖类、无机盐和矿物质等[1-2]。此外，短链脂肪酸也具有酸味，长链脂肪酸虽然本身没有味道，但可增加水产品肉质的适口感和香郁感、改善其呈味特性[3]。鱼糜制品是起源于我国的传统水产加工品，因其独特口感和鲜美滋味而广受国内外消费者青睐。2021年，我国鱼糜制品总产量达134.98万 t[4]。然而近年来我国可用于鱼糜制品生产加工的海水鱼资源日益匮乏，白鲢、草鱼等大宗淡水鱼已成为鱼糜制品的重要原料。不同类型（淡水鱼、海水鱼）鱼糜制品的滋味特征有明显不同，相同类型、不同品种的鱼糜制品滋味特征亦存在差异，但不同类型/品种间鱼糜制品的滋味差异物质组成尚不明确，因此亟需建立鱼糜制品的滋味指纹图谱以对其滋味品质进行区分与鉴别。

风味指纹图谱（包括气味和滋味）是基于样品的风味品质区别其来源、属性、品种等的有效途径。该图谱是指将组成复杂多样的风味物质经前处理后，采用色谱、光谱或其他仪器分析手段并结合化学计量学方法，得到的能够标示其化学特征的指纹图谱。目前，风味指纹图谱已用于果蔬[5]、料酒[6]、咖啡[7]、油脂[8]、中草药[9]、肉类[10-11]和水产品[12-13]的产地区分、品种鉴别、品质评价等。然而不同类型、不同品种的鱼糜制品的滋味指纹图谱尚未被建立。基于此，本研究以带鱼（*Trichiurus lepturus*）、铜盆鱼（*Pagrosomus major*）及金线鱼（*Nemipterus virgatus*）3 种海水鱼糜和鲢鱼（*Hypophthalmichthys molitrix*）、草鱼（*Ctenopharyngodon Idella*）及青鱼（*Mylopharyngodon piceus*）3 种淡水鱼糜为原料制备鱼糜制品，采用电子舌、高效液相色谱、气相色谱等技术，测定各鱼糜制品中游离氨基酸、核苷酸及其关联物、脂肪酸、甜菜碱等滋味物质的含量，并结合微阵列显著性分析、聚类热图分析等手段，建立鱼糜制品的滋味指纹图谱，以期为鱼糜制品的风味品质调控与基于滋味特征的品种鉴别提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷冻海水鱼糜（带鱼鱼糜、铜盆鱼糜、金线鱼糜），由福建安井食品股份有限公司提供。冷冻海水鱼糜，漂洗次数为3 次，添加抗冻剂为4%白砂糖、0.2%复合磷酸盐（三聚磷酸盐∶焦磷酸盐=1∶1）。带鱼鱼糜、铜盆鱼糜、金线鱼糜的产地分别为浙江舟山、福建泉州、印度尼西亚。

冷冻淡水鱼糜（白鲢鱼糜、草鱼鱼糜、青鱼鱼糜）为实验室自行制备样品。新鲜白鲢（质量为1.4～2.5 kg/尾）、新鲜草鱼（质量为1.8～2.1 kg/尾）、新鲜青鱼（质量为2.3～3.9 kg/尾），均来源于武汉市东西湖淡水鱼养殖场。

37 种脂肪酸甲酯混标（色谱纯） 美国Sigma-Aldrich公司；三磷酸腺苷（adenosine-5′-triphosphate，ATP）、二磷酸腺苷（adenosine-5′-diphosphate，ADP）、一磷酸腺苷（adenosine-5′-monophosphate，AMP）、次黄嘌呤（hyperxanthine，Hx）、次黄嘌呤核苷（hypoxanthine ribonucleoside，HxR）、鸟苷酸（guanosine monophosphate，GMP）、肌苷酸（inosine monophosphate，IMP）和甜菜碱标准品（色谱纯）上海源叶生物科技有限公司；AccQ·Tag Ultra氨基酸分析包 美国Waters公司；甲醇和氯仿（均为色谱纯），氯化钠、山梨醇、三聚磷酸盐、焦磷酸盐（均为分析纯）国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

Y-QSJ1型食品料理机 广东奥帝尔电子科技有限公司；AVANTI J-26型高速冷冻离心机 美国Beckman公司；ASTREE型滋味分析仪 法国Alpha M.O.S公司； 2D型超高效液相色谱仪 美国Waters公司；

Trace1310 ISQ型气相色谱-质谱（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS）仪　美国Thermo公司；UV-2600型紫外-可见分光光度计　尤尼柯仪器有限公司。

1.3　方法

1.3.1　鱼糜制品的制备

冷冻淡水鱼糜的制备方法：新鲜淡水鱼（白鲢、草鱼、青鱼）经去头、去鳞、去内脏等前处理后，冰水洗净剖片，用采肉机采肉（2 次），然后在10 ℃左右用鱼肉质量的5 倍清水漂洗鱼糜3 次，每次漂洗时间15 min，离心（2 500 r/min，10 min）脱水，添加抗冻剂（蔗糖4%，山梨醇4%，复合磷酸盐0.2%（三聚磷酸盐-焦磷酸盐，1∶1））混合斩拌，采用复合薄膜真空包装，快速冻结后于－18 ℃冻藏备用。冷冻淡水鱼糜与冷冻海水鱼糜的冻藏时间均为6 个月。

将冷冻鱼糜轻微解冻切块后，称取500 g冷冻鱼糜置于食品料理机中，加冰调整其水分质量分数至78%，使用食品料理机斩拌1 min，再加入质量分数2.5%氯化钠继续斩拌1 min。将斩拌好的鱼浆真空排气后灌入直径22 mm的肠衣并封口。于40 ℃水浴加热1 h后，迅速转入90 ℃水浴加热30 min，之后使用流水冷却并置于4 ℃过夜备用[14]。

1.3.2　滋味轮廓分析

参考Luo Xiaoying等[14]所述方法并作修改，将鱼糜制品切成约5 mm×5 mm×5 mm块状并准确称取15.00 g，加入蒸馏水100 mL，均质（7 500 r/min，30 s）后离心（4 ℃，10 000 r/min，10 min），取上清液用双圈定性滤纸过滤，并收集滤液使用ASTREE型滋味分析仪（电子舌）分析样品的滋味轮廓。仪器参数：样品延迟时间0 s，获取时间120 s，搅拌速率60 r/min。

1.3.3　总脂肪酸组成和含量的测定

脂肪提取采用氯仿-甲醇直接提取法[15]。脂肪的皂化和脂肪酸甲酯化方法如下：在脂肪提取物中加入2 mL 2 g/100 mL氢氧化钠甲醇溶液，85 ℃水浴30 min后加入3 mL 14 g/100 mL三氟化硼-甲醇溶液继续水浴30 min。降至室温后在离心管中加入1 mL正己烷，振荡萃取2 min，然后静置1 h。取上层清液100 μL，用正己烷定容到1 mL，过0.45 μm滤膜后使用GC-MS进行测定。

GC-MS检测条件[16]：TG-5MS色谱柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；升温程序：80 ℃保持1 min，以10 ℃/min升温至200 ℃，然后以5 ℃/min升温至250 ℃，最后以2 ℃/min升到270 ℃，保持3 min。进样口温度290 ℃；载气流速1.2 mL/min；不分流。离子源温度280 ℃，传输线温度280 ℃，溶剂延迟时间5.00 min，质量扫描范围30～400 u。

试样中脂肪酸含量的计算依据外标法所测得的脂肪酸甲酯含量进行换算，公式如下：

$$W=\frac{C\times V\times n}{m}\times k$$

式中：W为试样中各脂肪酸的含量/（mg/kg）；C为试样测定液中脂肪酸甲酯质量浓度/（mg/L）；V为定容体积/mL；k为各脂肪酸甲酯转化为脂肪酸的换算系数；n为稀释倍数；m为试样的称样质量/g。

1.3.4　游离氨基酸和核苷酸类化合物的测定

参考Luo Xiaoying等[14]的方法进行测定。

1.3.5　甜菜碱含量的测定

参考陈德慰等[17]的方法，准确称取5.00 g鱼糜制品加入20 mL蒸馏水混合匀浆（8 000 r/min，2 min）后于100 ℃水浴中加热20 min，冷却过滤后离心（10 000 r/min，4 ℃，20 min）收集上清液，置于4 ℃冰箱贮存。取上清液1 mL，稀释至5 mL，经冰浴冷却15 min后，用浓盐酸调节pH值到1后加入雷氏盐溶液5 mL，充分振摇后在4 ℃冰箱静置4 h。静置4 h后离心（10 000 r/min，30 min），沉淀用5 mL 99%乙醚洗涤，弃上清液，待乙醚自然挥发后加5 mL 70%丙酮溶液将甜菜碱雷氏盐结晶溶解，于波长525 nm处测定吸光度，用70%丙酮作为参比溶液。标准曲线使用质量浓度梯度（0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/mL和0.6 mg/mL）甜菜碱标准溶液在与样品相同的条件下测定。

1.3.6　鱼糜制品滋味指纹图谱的建立

1.3.6.1　鱼糜制品中滋味物质含量的标准化处理

以带鱼鱼糜制品中滋味物质的含量为参考样本进行概率商归一化处理（probabilistic quotient normalization，PQN）[18]，并对数值以lg进行对数转换[19]。最后，通过基于变量离散度计算的缩放因子调整每个变量特征。计算方式是以均值为中心，除以每个变量的标准差[20]。

1.3.6.2　鱼糜制品中差异滋味物质的筛选

采用微阵列显著性分析（significance analysis of microarray，SAM），依据标准化后各鱼糜制品中的滋味物质值，筛选6 种鱼糜制品中的差异滋味物质[21]。SAM分析时，需选择合适的Delta值，并尽量减小误判率（false discovery rate，FDR）。本研究以FDR小于0.05为依据选择差异滋味物质[22]。

1.3.6.3　鱼糜制品滋味指纹图谱的建立

对筛选出的差异滋味物质进行聚类热图分析，实现鱼糜制品的滋味差异程度可视化，并衡量不同类型、不同品种鱼糜制品滋味特征的相似性与差异性[23]，构建鱼糜制品的滋味指纹图谱。

1.3.6.4　鱼糜制品的滋味差异评价

基于所筛选出的差异滋味物质的含量，采用主成分分析（principal component analysis，PCA）对鱼糜制品的滋味差异进行评价，并验证所建立的鱼糜制品滋味指纹图谱的准确性[24]。

1.4 数据处理

实验重复3 次，除电子舌测定6 个平行外，其他指标均测定3 个平行。滋味轮廓分析依据电子舌7 个传感器的响应值，使用SPSS 22软件进行线性判别分析（linear discriminant analysis，LDA）。数据采用SPSS 22软件进行方差分析，$P<0.05$，差异显著，应用Origin 9.0软件作图，使用MetaboAnalyst 5.0网络在线软件进行滋味指纹图谱的构建。结果用$\bar{x}\pm s$表示。

2 结果与分析

2.1 鱼糜制品的滋味轮廓

图1a显示了基于电子舌探头响应值的6 种鱼糜制品滋味特征的LDA结果。LD1和LD2的累积贡献率达95.7%，说明LDA结果能够反映6 种鱼糜的整体滋味信息。淡水鱼糜制品的滋味轮廓分布在第3、4象限，海水鱼糜制品的滋味轮廓分布在第2象限。此外，6 组样品的置信区间均无重叠，说明6 种鱼糜制品的滋味轮廓均有显著差异。由图1b可知，6 种鱼糜制品中，草鱼、青鱼和带鱼的鱼糜制品的甜味、咸味和鲜味较高，白鲢鱼糜制品的苦味、酸味和咸味最弱。

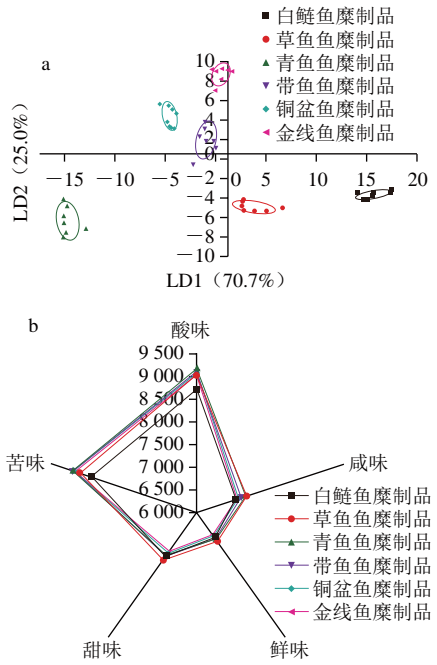


图1 基于电子舌探头响应值的鱼糜制品滋味特征的LDA（a）和雷达图（b）

Fig. 1 Linear discriminant analysis of taste characteristics of surimi products based on the response values E-tongue (a) and radar chart of surimi products (b)

2.2 鱼糜制品中游离氨基酸的组成和含量

游离氨基酸的组成和含量显著影响鱼糜制品的呈味特性[14]。如表1所示，整体而言，带鱼鱼糜制品中游离氨基酸含量最高，尤其是其中鲜味和苦味氨基酸总量显著高于其他5 种鱼糜制品（$P<0.05$）；草鱼鱼糜制品和青鱼鱼糜制品的总游离氨基酸含量次之；白鲢鱼糜制品中游离氨基酸的含量最低，尤其是苦味氨基酸含量显著低于其他5 种鱼糜制品（$P<0.05$）；金线鱼糜制品的鲜味和甜味氨基酸含量显著低于其他5 种鱼糜制品（$P<0.05$）。

具有鲜味的Asp和Glu在带鱼鱼糜制品含量最高，而在金线鱼糜制品中含量最低。在3 种淡水鱼糜制品中，Asp和Glu的含量较为平均，分别为0.47～0.65 mg/100 g和0.28～0.37 mg/100 g。对于甜味氨基酸，Ser和Ala在带鱼鱼糜制品和铜盆鱼鱼糜制品中含量较高，均显著高于淡水鱼糜制品（$P<0.05$）；青鱼鱼糜制品含有较高的Gly；而草鱼鱼糜制品则含有较高的Pro。此外，白鲢鱼糜制品和金线鱼糜制品中苦味氨基酸的含量较低。3 种淡水鱼糜制品中，具有苦味的His含量均显著高于3 种海水鱼糜制品（$P<0.05$）。

表1 鱼糜制品中游离氨基酸的含量

Table 1 Contents of free amino acids in surimi products

mg/100 g

氨基酸	滋味[25]	白鲢鱼糜制品	草鱼鱼糜制品	青鱼鱼糜制品	带鱼鱼糜制品	铜盆鱼糜制品	金线鱼糜制品
天冬氨酸Asp	鲜	0.28 ± 0.00^{b}	0.37 ± 0.13^{b}	0.30 ± 0.03^{b}	1.32 ± 0.02^{a}	0.33 ± 0.01^{b}	0.13 ± 0.00^{c}
谷氨酸Glu	鲜	0.53 ± 0.01^{d}	0.65 ± 0.05^{c}	0.47 ± 0.04^{d}	2.37 ± 0.01^{a}	1.15 ± 0.02^{b}	0.32 ± 0.01^{e}
丝氨酸Ser	甜	0.34 ± 0.01^{d}	0.55 ± 0.03^{c}	0.69 ± 0.02^{b}	1.68 ± 0.00^{a}	1.68 ± 0.04^{a}	0.28 ± 0.00^{d}
甘氨酸Gly	甜	0.62 ± 0.01^{d}	1.20 ± 0.12^{c}	1.94 ± 0.03^{a}	1.38 ± 0.00^{b}	1.25 ± 0.05^{bc}	0.41 ± 0.00^{e}
苏氨酸Thr	甜	0.74 ± 0.03^{b}	0.96 ± 0.20^{a}	0.72 ± 0.06^{b}	1.13 ± 0.01^{a}	0.56 ± 0.05^{b}	0.74 ± 0.02^{b}
丙氨酸Ala	甜	0.74 ± 0.04^{c}	1.47 ± 0.22^{cd}	1.66 ± 0.07^{c}	3.06 ± 0.02^{a}	2.14 ± 0.10^{b}	1.29 ± 0.06^{d}
脯氨酸Pro	甜	0.82 ± 0.06^{b}	3.51 ± 0.72^{a}	0.55 ± 0.04^{b}	0.82 ± 0.00^{b}	0.63 ± 0.04^{b}	0.42 ± 0.00^{b}
缬氨酸Val	苦	0.43 ± 0.01^{d}	0.85 ± 0.18^{b}	0.54 ± 0.08^{cd}	1.81 ± 0.06^{a}	0.71 ± 0.02^{bc}	0.49 ± 0.01^{d}
赖氨酸Arg	苦	1.34 ± 0.15^{d}	4.14 ± 0.08^{a}	2.17 ± 0.03^{c}	4.35 ± 0.23^{a}	2.77 ± 0.07^{b}	1.16 ± 0.01^{d}
精氨酸Lys	苦	0.79 ± 0.05^{c}	2.91 ± 0.05^{b}	1.16 ± 0.06^{c}	3.68 ± 0.02^{a}	1.02 ± 0.04^{d}	1.02 ± 0.02^{d}
蛋氨酸Met	苦	0.20 ± 0.03^{d}	0.33 ± 0.10^{bc}	0.24 ± 0.01^{bcd}	1.22 ± 0.04^{a}	0.35 ± 0.02^{b}	0.22 ± 0.00^{cd}
组氨酸His	苦	2.25 ± 0.06^{c}	10.03 ± 0.36^{a}	5.67 ± 0.19^{b}	0.77 ± 0.00^{e}	1.27 ± 0.06^{d}	0.10 ± 0.02^{f}
酪氨酸Tyr	苦	0.45 ± 0.15^{c}	1.05 ± 0.37^{de}	3.08 ± 0.65^{c}	6.66 ± 0.42^{a}	4.74 ± 0.22^{b}	1.62 ± 0.06^{d}
异亮氨酸Ile	苦	0.13 ± 0.05^{e}	0.32 ± 0.01^{d}	2.32 ± 0.01^{a}	2.02 ± 0.04^{b}	0.47 ± 0.00^{c}	0.38 ± 0.01^{d}
亮氨酸Leu	苦	0.27 ± 0.04^{c}	0.50 ± 0.06^{c}	0.12 ± 0.01^{c}	0.41 ± 0.08^{c}	1.95 ± 0.45^{b}	3.39 ± 0.08^{a}
苯丙氨酸Phe	苦	4.10 ± 0.11^{d}	3.57 ± 0.39^{d}	9.70 ± 0.22^{b}	12.71 ± 0.31^{a}	8.41 ± 0.19^{c}	8.14 ± 0.04^{c}
总鲜味氨基酸		0.81 ± 0.02^{d}	1.02 ± 0.15^{c}	0.77 ± 0.05^{d}	3.69 ± 0.03^{a}	1.48 ± 0.02^{b}	0.45 ± 0.01^{e}
总甜味氨基酸		3.26 ± 0.11^{c}	7.69 ± 0.14^{b}	5.56 ± 0.15^{d}	8.07 ± 0.08^{a}	6.26 ± 0.11^{c}	3.14 ± 0.09^{e}
总苦味氨基酸		9.96 ± 0.25^{e}	23.70 ± 0.63^{b}	21.92 ± 0.84^{c}	33.63 ± 0.89^{a}	21.69 ± 0.21^{c}	16.52 ± 0.54^{d}
总游离氨基酸		14.03 ± 0.38^{e}	32.41 ± 0.43^{b}	28.25 ± 0.82^{c}	45.39 ± 0.95^{a}	29.43 ± 0.76^{c}	20.11 ± 0.44^{d}

注：同行不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。下表同。

2.3 鱼糜制品中核苷酸类化合物和甜菜碱含量

鱼肉中的ATP会在酶的作用下降解形成ADP、AMP及IMP，其中AMP和IMP具有鲜味，但AMP会继续降解为IMP，在鱼肉内富集较少，故IMP是鱼肉鲜味的主要贡献成分之一[26]。在鱼糜制品的热加工过程中，IMP会受热降解形成HxR和Hx，Hx积累多过会导致水产品产生苦味[27]。另外，由次黄苷酸代谢生成的GMP，具有特殊的香菇鲜味，也是鱼肉中的呈味核苷酸[28]。如表2所示，鱼糜制品中未检测到ATP和ADP。6 种鱼糜制品中GMP含量无显著差异（$P>0.05$）；铜盆鱼糜制品中AMP含量

最高；带鱼鱼糜制品中IMP含量最高；草鱼鱼糜制品则含有较高的HxR和Hx。整体而言，海水鱼糜制品中含有较多的具有鲜味的IMP，而淡水鱼糜制品中含有较多的具有苦味的Hx。

甜菜碱是一种生物碱，可以赋予水产品甜味、鲜味，同时增强厚味[29]。由表2可知，3 种淡水鱼糜制品的甜菜碱含量无显著性差异（$P>0.05$），海水鱼糜制品的甜菜碱含量显著高于淡水鱼糜制品（$P<0.05$）。在海水鱼糜制品中，带鱼和铜盆鱼糜制品的甜菜碱含量显著高于金线鱼糜制品（$P<0.05$）。

表 2　鱼糜制品中核苷酸类化合物和甜菜碱的含量

Table 2　Contents of nucleotides, related substances and betaine in surimi products

mg/100 g

滋味物质	白鲢鱼糜制品	草鱼鱼糜制品	青鱼鱼糜制品	带鱼鱼糜制品	铜盆鱼糜制品	金线鱼糜制品
ATP	ND	ND	ND	ND	ND	ND
ADP	ND	ND	ND	ND	ND	ND
AMP	1.81 ± 0.18^{b}	0.50 ± 0.11^{c}	0.39 ± 0.21^{c}	0.87 ± 0.15^{c}	2.55 ± 0.66^{a}	0.52 ± 0.21^{c}
IMP	14.12 ± 0.32^{b}	13.41 ± 0.31^{b}	13.63 ± 0.88^{b}	17.31 ± 2.96^{a}	15.04 ± 0.99^{ab}	14.52 ± 1.11^{b}
GMP	11.10 ± 0.17^{a}	8.81 ± 1.12^{a}	10.21 ± 1.51^{a}	13.52 ± 5.56^{a}	10.84 ± 3.28^{a}	12.91 ± 2.25^{a}
HxR	38.20 ± 1.44^{ab}	39.68 ± 2.46^{a}	38.48 ± 2.66^{ab}	34.81 ± 1.24^{b}	36.61 ± 2.24^{ab}	37.41 ± 1.77^{ab}
Hx	24.74 ± 1.02^{b}	27.05 ± 0.42^{a}	26.70 ± 1.08^{a}	22.00 ± 1.87^{c}	23.30 ± 0.27^{bc}	23.04 ± 0.33^{bc}
甜菜碱	20.34 ± 2.12^{c}	21.00 ± 1.56^{c}	23.41 ± 1.09^{c}	43.44 ± 4.25^{a}	45.64 ± 5.31^{a}	40.09 ± 9.18^{b}

注：ND.未检出。下表同。

2.4　鱼糜制品的总脂肪酸组成和含量

长链脂肪酸虽然不具有呈味特性，但水产品中的脂肪含量与其嫩爽或醇厚的口感密切相关[3]。因此，本研究测定了鱼糜制品中的总脂肪酸组成与含量并将其归于滋味物质，以综合反映鱼糜制品的滋味品质特性。如表3所示，在6 种鱼糜制品共检测出25 种脂肪酸，包括11 种饱和脂肪酸，7 种单不饱和脂肪酸和7 种多不饱和脂肪酸。整体而言，淡水鱼糜制品的饱和脂肪酸占比和单不饱和脂肪酸占比显著高于海水鱼糜制品（$P<0.05$），而海水鱼糜制品中多不饱和脂肪酸占比显著高于淡水鱼糜制品（$P<0.05$）。白鲢鱼糜制品和青鱼鱼糜制品分别具有最高的饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸含量，而铜盆鱼糜制品中多不饱和脂肪酸的含量最高。

通常认为，水产品中多不饱和脂肪酸除了具有较高的营养特性外，也是水产品气味特征形成的主要前体物质。例如，亚油酸、亚麻酸、二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸可经氧化形成某些羰基类、醇类等水产品中的关键气味物质，如己醛、(*Z*)-4-庚烯醛、(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛和(*E*,*Z*,*Z*)-2,4,7-癸三烯醛等[30]。淡水鱼糜制品中亚油酸和*α*-亚麻酸的含量均显著高于海水鱼糜制品（$P<0.05$），其中亚油酸在青鱼鱼糜制品中含量最高，*α*-亚麻酸在白鲢鱼糜制品中含量最高。而海水鱼糜制品则含有较高的二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸，其中二十碳五烯酸含量在铜盆鱼糜制品中含量最高，二十二碳六烯酸在海水鱼糜制品中的含量均显著高于淡水鱼糜制品（$P<0.05$）。

表 3　鱼糜制品中脂肪酸组成和含量

Table 3　Fatty acid composition and contents in surimi products

mg/100 g

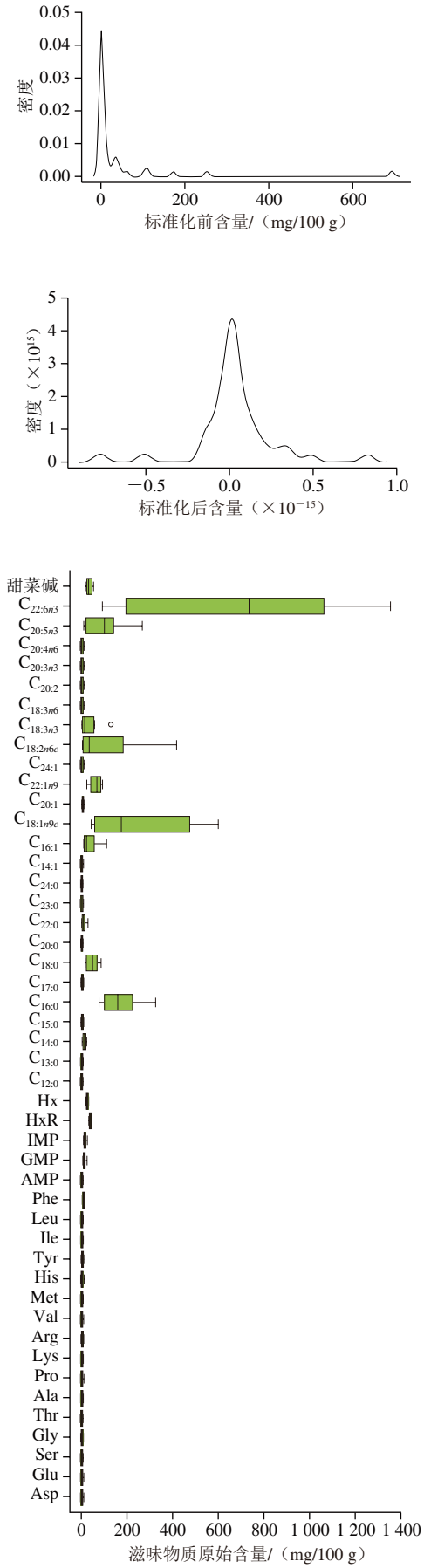
脂肪酸	白鲢鱼糜制品	草鱼鱼糜制品	青鱼鱼糜制品	带鱼鱼糜制品	铜盆鱼糜制品	金线鱼糜制品
月桂酸（$C_{12:0}$）	0.46 ± 0.00^{a}	0.10 ± 0.00^{d}	0.25 ± 0.00^{c}	0.21 ± 0.00^{c}	0.52 ± 0.00^{a}	0.38 ± 0.00^{b}
十三碳酸（$C_{13:0}$）	0.28 ± 0.00^{a}	ND	0.09 ± 0.00^{c}	0.11 ± 0.00^{c}	0.19 ± 0.00^{b}	0.19 ± 0.00^{b}
肉豆蔻酸（$C_{14:0}$）	18.84 ± 0.00^{b}	2.42 ± 0.01^{f}	8.85 ± 0.04^{d}	8.55 ± 0.19^{e}	20.39 ± 0.06^{a}	10.96 ± 0.02^{c}
十五碳酸（$C_{15:0}$）	3.32 ± 0.00^{b}	0.58 ± 0.01^{f}	1.73 ± 0.01^{d}	1.35 ± 0.01^{e}	3.49 ± 0.01^{a}	3.10 ± 0.01^{c}
棕榈酸（$C_{16:0}$）	321.96 ± 2.57^{a}	100.04 ± 0.11^{e}	221.58 ± 0.58^{b}	77.36 ± 0.25^{f}	187.64 ± 1.17^{c}	125.88 ± 0.37^{d}
十七碳酸（$C_{17:0}$）	4.83 ± 0.00^{c}	0.78 ± 0.00^{f}	2.02 ± 0.00^{e}	2.08 ± 0.01^{d}	7.23 ± 0.01^{a}	6.75 ± 0.02^{b}
硬脂酸（$C_{18:0}$）	66.13 ± 0.04^{b}	16.64 ± 0.08^{f}	48.68 ± 0.16^{c}	20.23 ± 0.02^{e}	85.10 ± 0.04^{a}	45.34 ± 0.06^{d}
二十碳酸（$C_{20:0}$）	2.73 ± 0.03^{b}	1.64 ± 0.01^{d}	3.62 ± 0.01^{a}	0.78 ± 0.00^{f}	1.94 ± 0.00^{c}	1.36 ± 0.00^{e}
二十二碳酸（$C_{22:0}$）	12.95 ± 1.15^{b}	9.49 ± 0.16^{c}	25.81 ± 2.13^{a}	1.54 ± 0.18^{e}	5.29 ± 0.83^{d}	3.23 ± 0.04^{de}
二十三碳酸（$C_{23:0}$）	0.31 ± 0.01^{c}	0.10 ± 0.00^{f}	0.29 ± 0.00^{d}	0.13 ± 0.00^{e}	0.49 ± 0.01^{b}	0.52 ± 0.00^{a}
二十四碳酸（$C_{24:0}$）	0.59 ± 0.01^{c}	0.44 ± 0.00^{f}	0.99 ± 0.01^{c}	0.86 ± 0.01^{d}	1.63 ± 0.00^{a}	1.29 ± 0.00^{b}
肉豆蔻油酸（$C_{14:1}$）	1.92 ± 0.01^{a}	0.11 ± 0.00^{f}	0.53 ± 0.00^{b}	0.20 ± 0.00^{e}	0.44 ± 0.00^{c}	0.27 ± 0.01^{d}
棕榈油酸（$C_{16:1}$）	106.99 ± 0.13^{a}	10.00 ± 0.04^{f}	55.24 ± 0.00^{b}	11.05 ± 0.04^{e}	26.75 ± 0.10^{c}	17.06 ± 0.14^{d}
油酸（$C_{18:1n9c}$）	471.54 ± 0.11^{b}	223.51 ± 0.01^{c}	597.32 ± 0.30^{a}	41.63 ± 0.04^{f}	121.92 ± 0.11^{d}	55.52 ± 0.00^{e}
二十碳一烯酸（$C_{20:1}$）	8.64 ± 0.01^{b}	7.63 ± 0.03^{c}	10.17 ± 0.01^{a}	1.15 ± 0.01^{f}	4.02 ± 0.01^{d}	2.85 ± 0.00^{e}
二十碳二烯酸（$C_{20:2}$）	2.69 ± 0.00^{c}	3.87 ± 0.01^{b}	8.85 ± 0.00^{a}	0.64 ± 0.00^{f}	2.09 ± 0.01^{d}	1.63 ± 0.01^{e}
芥酸（$C_{22:1n9}$）	69.22 ± 0.12^{c}	90.18 ± 0.36^{a}	82.29 ± 0.20^{b}	23.24 ± 0.08^{f}	63.04 ± 0.04^{d}	39.94 ± 0.12^{e}
二十四碳一烯酸（$C_{24:1}$）	0.64 ± 0.00^{f}	0.94 ± 0.02^{d}	0.89 ± 0.01^{e}	1.34 ± 0.02^{c}	2.07 ± 0.01^{a}	1.39 ± 0.01^{b}
亚油酸（$C_{18:2n6c}$）	60.38 ± 0.21^{c}	181.34 ± 0.29^{b}	414.63 ± 0.40^{a}	3.43 ± 0.01^{f}	5.31 ± 0.02^{d}	4.53 ± 0.00^{e}
α-亚麻酸（$C_{18:3n3}$）	127.63 ± 0.05^{a}	24.21 ± 0.01^{c}	52.34 ± 0.12^{b}	2.21 ± 0.03^{f}	4.73 ± 0.01^{d}	3.35 ± 0.01^{e}
γ-亚麻酸（$C_{18:3n6}$）	2.72 ± 0.02^{b}	1.63 ± 0.01^{d}	3.64 ± 0.02^{a}	0.77 ± 0.01^{f}	1.93 ± 0.01^{c}	1.40 ± 0.01^{e}
二十碳三烯酸（$C_{20:3n3}$）	5.44 ± 0.01^{a}	0.78 ± 0.01^{e}	1.60 ± 0.03^{b}	0.49 ± 0.01^{f}	1.37 ± 0.01^{c}	1.05 ± 0.01^{d}
花生四烯酸（$C_{20:4n6}$）	0.38 ± 0.01^{c}	4.10 ± 0.02^{a}	1.66 ± 0.01^{b}	0.22 ± 0.00^{f}	0.79 ± 0.00^{e}	0.59 ± 0.01^{d}
二十碳五烯酸（$C_{20:5n3}$）	138.76 ± 0.03^{b}	8.23 ± 0.17^{f}	18.11 ± 0.08^{e}	101.60 ± 0.21^{c}	265.29 ± 0.59^{a}	97.10 ± 0.09^{d}
二十二碳六烯酸（$C_{22:6n3}$）	439.73 ± 1.03^{d}	90.62 ± 1.03^{f}	193.53 ± 1.17^{e}	$1\,059.46\pm2.31^{b}$	$1\,350.34\pm1.27^{a}$	$1\,023.53\pm0.33^{c}$
总饱和脂肪酸	432.39 ± 3.64^{a}	132.22 ± 0.23^{d}	313.88 ± 1.65^{b}	113.18 ± 0.16^{e}	313.89 ± 2.07^{b}	198.98 ± 0.40^{c}
总单不饱和脂肪酸	658.94 ± 0.16^{b}	332.36 ± 0.46^{c}	746.44 ± 0.11^{a}	78.60 ± 0.19^{f}	218.23 ± 0.23^{d}	117.02 ± 0.25^{e}
总多不饱和脂肪酸	777.71 ± 0.77^{d}	314.76 ± 0.88^{f}	694.35 ± 0.73^{e}	$1\,168.80\pm2.50^{b}$	$1\,631.83\pm1.87^{a}$	$1\,133.16\pm0.22^{c}$
总脂肪酸	$1\,869.03\pm4.57^{b}$	779.33 ± 0.65^{f}	$1\,754.66\pm2.49^{c}$	$1\,360.57\pm2.15^{e}$	$2\,163.95\pm0.02^{a}$	$1\,449.16\pm0.43^{d}$
饱和脂肪酸占比*	23.13 ± 0.14^{a}	16.97 ± 0.01^{c}	17.89 ± 0.07^{b}	8.32 ± 0.03^{f}	14.51 ± 0.10^{d}	13.73 ± 0.02^{e}
单不饱和脂肪酸占比*	35.26 ± 0.08^{b}	42.65 ± 0.09^{a}	42.54 ± 0.05^{a}	5.78 ± 0.02^{e}	10.08 ± 0.01^{c}	8.08 ± 0.02^{d}
多不饱和脂肪酸占比*	41.61 ± 0.06^{d}	40.39 ± 0.08^{e}	39.57 ± 0.01^{f}	85.91 ± 0.05^{a}	75.41 ± 0.09^{c}	78.19 ± 0.04^{b}

注：*.单位为%。

2.5　鱼糜制品滋味指纹图谱的建立

在上述研究基础上，对鱼糜制品中的滋味物质含量进行包括样本归一化、数据转换和数据缩放等步骤的数据标准化处理，使后续数据分析更加稳定和准确[18]。数据标准化结果如图2所示。经标准化后，反映鱼糜制品中各滋味物质含量的数值范围均在－2～2之间，更有利于指纹图谱的呈现。进一步地，控制FDR小于0.05，取Delta值为5.1，采用SAM法从6 种鱼糜制品滋味成分中筛选出具有显著差异的滋味物质。在6 种鱼糜制品中，共筛选出46 种差异滋味物质，结果如表4所示。

将筛选出的46 种差异滋味物质进行聚类分析并构建鱼糜制品的滋味指纹图谱（图3）。从图3可以看出，不同类型、不同品种的鱼糜制品之间的滋味特征存在差异的同时，亦具有相似性。淡水鱼糜制品中，草鱼鱼糜制品和青鱼鱼糜制品的滋味特征最为相近，而白鲢鱼糜制品的滋味特征则与铜盆鱼糜制品的滋味特征较为相近。从该滋味指纹图谱可以直观看出各鱼糜制品的滋味特征，例如，青鱼鱼糜制品中含有较高的Pro、HxR、Hx、$C_{22:1n9}$、$C_{20:4n6}$和较少的饱和脂肪酸（C_{12}～C_{18}）；带鱼鱼糜制品中含有较多的游离氨基酸（Asp、Glu、Lys、Arg、Val、Met、Ile、Phe、Ser、Tyr等）；而白鲢鱼糜制品则含有较多的不饱和脂肪酸（$C_{20:3n3}$、$C_{14:1}$、$C_{16:1}$等）和较少的游离氨基酸与核苷酸。



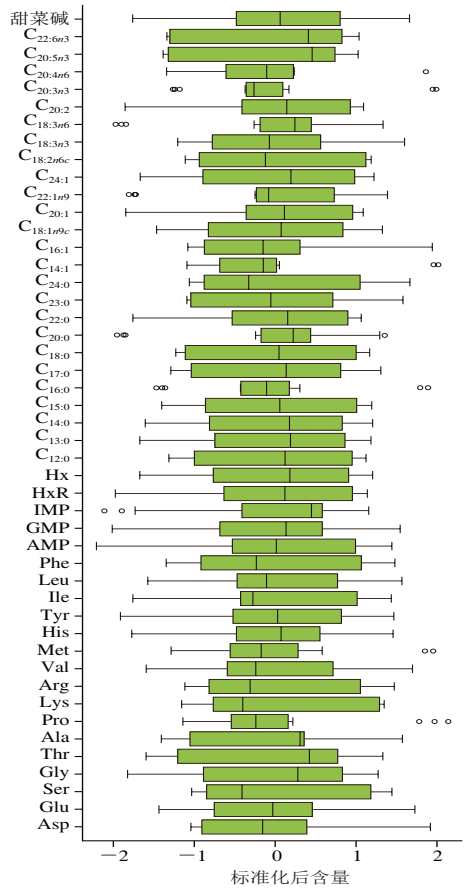


图 2　鱼糜制品滋味物质标准化前后的核密度图和箱线图

Fig. 2　Kernel density plots and boxplots before and after standardization of taste compounds in surimi products

表 4　鱼糜制品中的差异滋味化合物

Table 4　Differential taste substances in surimi products

序号	差异滋味物质	Delta值	标准偏差	FDR
1	$C_{18:2n6c}$	1 155.7	0.000 267 18	0
2	$C_{18:3n3}$	1 101.5	0.000 411 66	0
3	$C_{20:5n3}$	1 027.0	0.000 635 05	0
4	$C_{22:6n3}$	947.61	0.000 911 54	0
5	$C_{20:4n6}$	905.38	0.001 078 3	0
6	$C_{18:1n9c}$	898.56	0.001 106 8	0
7	$C_{13:0}$	896.20	0.001 116 7	0
8	$C_{17:0}$	850.27	0.001 320 9	0
9	His	846.87	0.001 336 9	0
10	$C_{14:1}$	814.74	0.001 494 6	0
11	$C_{16:1}$	798.72	0.001 578 0	0
12	$C_{20:1}$	785.35	0.001 650 1	0
13	$C_{20:3n3}$	757.38	0.001 809 3	0
14	$C_{14:0}$	751.43	0.001 844 7	0
15	$C_{20:2}$	736.48	0.001 936 1	0
16	$C_{15:0}$	706.19	0.002 133 2	0
17	$C_{12:0}$	637.25	0.002 651 3	0
18	$C_{18:0}$	611.00	0.002 879 2	0
19	$C_{23:0}$	604.27	0.002 940 9	0
20	Ser	582.83	0.003 146 6	0
21	Lys	529.38	0.003 731 6	0
22	$C_{22:1n9}$	508.39	0.003 994 7	0
23	$C_{16:0}$	496.99	0.004 147 0	0
24	Glu	481.31	0.004 368 1	0
25	$C_{24:0}$	455.84	0.004 759 6	0
26	$C_{20:0}$	452.51	0.004 813 9	0
27	$C_{24:1}$	447.12	0.004 903 8	0

续表4

序号	差异滋味物质	Delta值	标准偏差	FDR
28	$C_{18:3n6}$	427.03	0.005 258 2	0
29	Arg	390.30	0.006 000 3	0
30	$C_{22:0}$	384.42	0.006 132 0	0
31	Pro	355.69	0.006 838 6	0
32	Leu	325.70	0.007 708 2	0
33	Gly	208.81	0.013 454	0
34	Ile	208.78	0.013 457	0
35	Phe	200.41	0.014 122	0
36	Ala	159.59	0.018 354	0
37	Val	129.99	0.023 057	0
38	Asp	123.18	0.024 450	0
39	Met	120.50	0.025 042	0
40	HxR	96.077	0.031 917	0
41	Thr	95.366	0.032 169	0
42	Hx	85.394	0.036 126	0
43	Tyr	83.160	0.037 139	0
44	甜菜碱	42.938	0.072 460	0
45	IMP	42.810	0.072 672	0
46	AMP	20.906	0.143 49	0.000 212 77

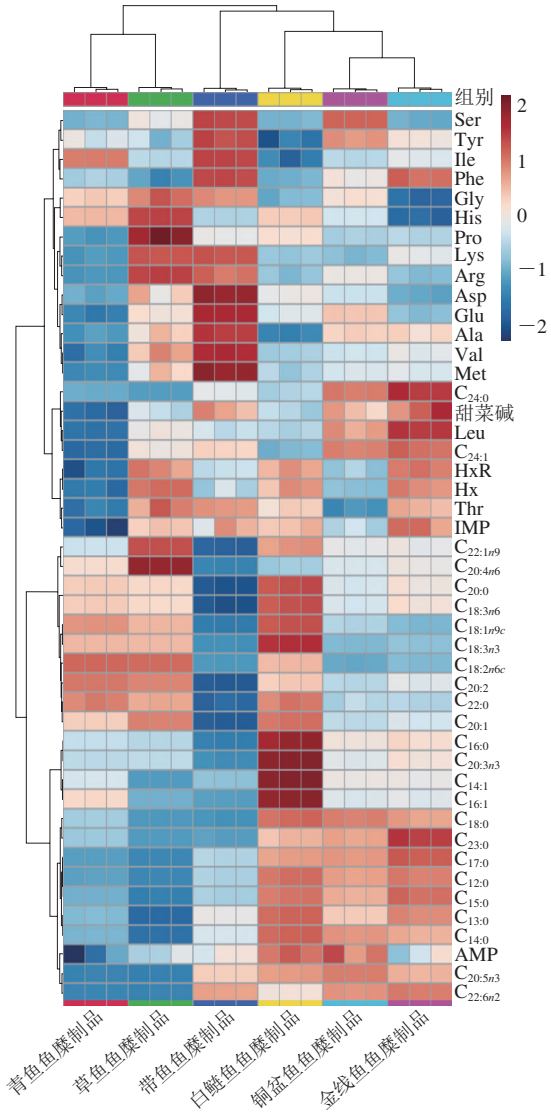


图 3　鱼糜制品的滋味指纹图谱

Fig. 3　Taste fingerprint of surimi products

2.6　鱼糜制品滋味指纹图谱的差异评价

主成分分析（principal component analysis，PCA）是基于多指标进行样本区分的最常用方法。基于鱼糜制品中各滋味物质含量的6 种鱼糜制品进行PCA，结果如图4所示。PC1和PC2的累计贡献率达69.55%，6 种鱼糜制品均各自分布在相应区域，表明PCA可以从整体上反映6 种鱼糜制品之间滋味特征差异。PCA结果与聚类热图分析建立的鱼糜制品滋味指纹图谱（图3）的结果较为一致，即金线鱼糜制品与铜盆鱼糜制品的PCA滋味特征相近，均分布在第2象限；青鱼鱼糜制品与草鱼鱼糜制品的滋味特征较为相近，均分布在第4象限；而白鲢鱼糜制品于带鱼鱼糜制品分别分布在第1和第3象限。此外，图4也显示了鱼糜制品与滋味物质含量之间的相关性，例如，金线鱼糜制品和铜盆鱼糜制品中含有较多的$C_{20:5n3}$、Leu和$C_{24:0}$等；带鱼鱼糜制品含有较多的游离氨基酸；草鱼鱼糜制品和青鱼鱼糜制品则含有较多的Hx、HxR、Pro和$C_{18:2n6c}$等；白鲢鱼糜制品则含有较多$C_{14:1}$、$C_{16:1}$和$C_{20:3n3}$。上述趋势也均在鱼糜制品滋味指纹图谱（图3）中得以体现，说明本研究所建立的鱼糜制品的滋味指纹图谱真实可靠。

与PCA结果相比，本研究所构建的鱼糜制品的滋味指纹图谱的优势在于：1）利用通过SAM筛选出的主要差异物建立指纹图谱，而不是使用全部滋味成分构建图谱，使图谱更加简洁明了；2）通过对滋味物质含量的归一化处理，更直观地反映出其相对含量，避免了极高或极低值对图谱的影响；3）可视化地显示了各组样品间的滋味差异性，并直观地反映了各组样品间的主要差异滋味物质。

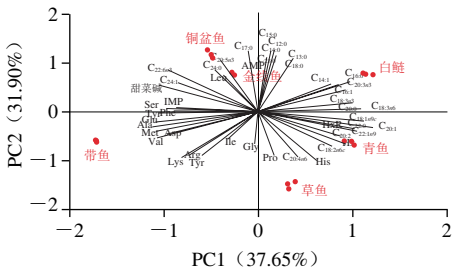


图 4　基于鱼糜制品中滋味物质含量的PCA双标图

Fig. 4　PCA biplot of contents of taste substances in surimi products

3　讨　论

水产品的滋味不同于肉制品，具有独特的鲜甜滋味，这都是水产品富含的鲜甜的滋味物质带来的结果[1]。与草鱼、鳙鱼、带鱼等[31-33]鱼肉相比，经漂洗处理后的鱼糜中游离氨基酸、核苷酸及其降解产物和甜菜碱等主要滋味物质含量显著降低，经热加工制成鱼糜制品后其滋味特征会进一步发生显著变化[34-35]。本研究较为全面地评

价了鱼糜制品中的滋味物质组成，并发现不同类型、不同品种的鱼糜制品的滋味特性存在显著差异。

已有研究通过电子舌对淡水鱼糜（草、鲢、鳙鱼糜）和海水鱼糜（带、鳕鱼糜）的滋味特征进行区分，但未能鉴别3 种淡水鱼糜的滋味差异[36]。翁丽萍等[37]利用电子舌区分了养殖和野生大黄鱼的滋味品质。然而，由于电子舌并不能准确反映滋味物质的种类与含量，其滋味差异评价效果有限。本研究结合微阵列显著性分析、聚类热图分析等手段，建立了鱼糜制品的滋味指纹图谱，可直观反映样品间的差异性和主要差异物质。

4 结 论

3 种海水鱼糜制品（带鱼、铜盆鱼、金线鱼）和3 种淡水鱼糜制品（鲢鱼、草鱼、青鱼）的滋味特征有显著差异。与淡水鱼糜制品相比，海水鱼糜制品中多不饱和脂肪酸的含量约为淡水鱼糜制品的2 倍，且含有较高的甜菜碱、IMP和GMP，以及较低的Hx。而6 种鱼糜制品中氨基酸含量的差异主要与品种有关，带鱼鱼糜制品中具有鲜味的谷氨酸和天冬氨酸含量较高；金线鱼糜制品中二者含量则最低；草鱼鱼糜制品中含有较高的脯氨酸（甜味）和组氨酸（苦味）。依据鱼糜制品中滋味物质的含量，结合微阵列显著性分析、聚类热图分析等手段，建立6 种鱼糜制品的滋味指纹图谱，反映了样品间滋味的差异性和主要差异物质，对鱼糜制品的风味调控与基于滋味特征的品种鉴别提供了理论依据。

参考文献：

[1] 章超桦, 薛长湖. 水产食品学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2018: 112-121.

[2] 施文正, 方林, 吴旭干, 等. 我国沿海主要海域雌性三疣梭子蟹呈味成分含量的比较[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 127-133. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201716020.

[3] KORIYAMA T, KOHATA T, WATANABE K, et al. The effects of oils on the taste of tuna extract: research on the effects of fish oil on the taste-II[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 2000, 66(5): 876-881.

[4] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2022中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022: 89.

[5] TRIVITTAYASIL V, TSUTA M, IMAMURA Y, et al. Fluorescence fingerprint as an instrumental assessment of the sensory quality of tomato juices[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(4): 1167-1174. DOI:10.1002/jsfa.7199.

[6] 李茜云, 郭明, 董颖娜, 等. 典型品牌料酒风味物质的气相色谱/质谱指纹图谱构建及主成分分析和聚类分析[J]. 分析科学学报, 2019, 35(2): 175-181. DOI:CNKI:SUN:FXKX.0.2019-02-008.

[7] HUANG L F, WU M J, ZHONG K J, et al. Fingerprint developing of coffee flavor by gas chromatography-mass spectrometry and combined chemometrics methods[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 588(2): 216-223. DOI:10.1016/j.aca.2007.02.013.

[8] TRES A, RUIZ-SAMABLAS C, VAN DER VEER G, et al. Geographical provenance of palm oil by fatty acid and volatile compound fingerprinting techniques[J]. Food Chemistry, 2013, 137(1-4): 142-150. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.09.094.

[9] FU Z H, LI S J, HU H H, et al. Taste comparison of unprocessed and processed siegesbeckiae herba based on electronic tongue[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2017, 48(4): 673-680.

[10] 詹萍, 田洪磊, 李卫国, 等. 羊肉特征风味指纹图谱的构建[J]. 现代食品科技, 2013, 29(10): 2522-2527. DOI:CNKI:SUN:GZSP.0.2013-10-038.

[11] ZHANG J Y, YANG Z Y, YANG Y Y, et al. Development of a flavor fingerprint by GC-MS with chemometric method for volatile compounds of yak and yellow cattle bone soup[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(4): 943-954. DOI:10.1007/s12161-016-0657-5.

[12] 袁树昆, 李若云, 吴祖芳, 等. 不同盐度条件下鱼露发酵前期挥发性风味物质的指纹图谱[J]. 水产学报, 2017, 41(6): 896-906. DOI:10.11964/jfc.20161210666.

[13] HUANG X H, ZHENG X, CHEN Z H, et al. Fresh and grilled eel volatile fingerprinting by E-nose, GC-O, GC-MS and GC × GC-QTOF combined with purge and trap and solvent-assisted flavor evaporation[J]. Food Research International, 2019, 115: 32-43. DOI:10.1016/j.foodres.2018.07.056.

[14] LUO X Y, XIAO S T, RUAN Q F, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131260. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131260.

[15] FOLCH J, LEES M, STANLEY G H S. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.

[16] 卞智慧, 于瑞莲, 魏思敏, 等. 蝉花, 蛹虫草和冬虫夏草药材中脂肪酸含量的比较研究[J]. 中国药房, 2017, 28(30): 4252-4256.

[17] 陈德慰, 苏键, 颜栋美, 等. 广西北部湾常见水产品中甜菜碱含量测定及呈味效果评价[J]. 现代食品科技, 2011, 27(4): 468-472. DOI:10.3969/j.issn.1673-9078.2011.04.025.

[18] DIETERLE F, ROSS A, SCHLOTTERBECK G, et al. Probabilistic quotient normalization as robust method to account for dilution of complex biological mixtures. Application in ^{1}H NMR metabonomics[J]. Analytical Chemistry, 2006, 78(13): 4281-4290. DOI:10.1021/ac051632c.

[19] DURBIN B P, HARDIN J S, HAWKINS D M, et al. A variance-stabilizing transformation for gene-expression microarray data[J]. Bioinformatics, 2002, 18(Suppl 1): S105-S110. DOI:10.1093/bioinformatics/18.suppl_1.S105.

[20] BERG R A V D, HOEFSLOOT H C, WESTERHUIS J A, et al. Centering, scaling, and transformations: improving the biological information content of metabolomics data[J]. BMC Genomics, 2006, 7: 142. DOI:10.1186/1471-2164-7-142.

[21] ALLISON D B, CUI X, PAGE G P, et al. Microarray data analysis: from disarray to consolidation and consensus[J]. Nature Reviews Genetics, 2006, 7: 55-65. DOI:10.1038/nrg1749.

[22] KERR M K. Design considerations for efficient and effective microarray studies[J]. Biometrics, 2003, 59(4): 822-828.

[23] DATTA S, DATTA S. Comparisons and validation of statistical clustering techniques for microarray gene expression data[J]. Bioinformatics, 2003, 19(4): 459-466.

[24] 邹妍, 鄢海燕. 基于PCA及PLS-DA算法分析决明子炒制前后化学成分的变化[J]. 中国医院药学杂志, 2018, 38: 2027-2030.

[25] WANG Z H, XU Z, SUN L M, et al. Dynamics of microbial communities, texture and flavor in Suan Zuo Yu during

fermentation[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127364. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127364.

[26] 苏欣, 黄春红, 曹菊花. 淡水鱼鱼肉风味物质及其影响因素研究进展[J]. 肉类研究, 2018, 32(8): 78-82. DOI:CNKI:SUN:RLYJ.0.2018-08-020.

[27] PONGSETKUL J, BENJAKUL S, VONGKAMJAN K, et al. Changes in volatile compounds, ATP-related compounds and antioxidative properties of, kapi, produced from, acetes vulgaris, during processing and fermentation[J]. Food Bioscience, 2017, 19: 49-56. DOI:10.1016/j.fbio.2017.06.002.

[28] 郭全友, 张秀洁, 姜朝军. 大黄鱼成鱼养殖阶段滋味物质分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35(4): 228-235. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.4.030.

[29] 方林, 施文正, 刁玉段, 等. 冻结方式对不同部位草鱼呈味物质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(12): 199-204. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201812031.

[30] AN Y Q, QIAN Y P, MAGANA A, et al. Comparative characterization of aroma compounds in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), Pacific whiting (*Merluccius productus*), and Alaska Pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi by aroma extract dilution analysis, odor activity value, and aroma recombination studies[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(38): 10403-10413. DOI:10.1021/acs.jafc.9b07621.

[31] 高琴, 安玥琦, 陈周, 等. 短时微流水处理对池塘养殖鳙鱼肌肉滋味品质的影响[J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1057-1066. DOI:10.7541/2021.2021.002.

[32] 陈周, 胡杨, 安玥琦, 等. 短时间微流水处理对池塘养殖草鱼鱼肉品质的提升作用[J]. 水产学报, 2020, 44(7): 1198-1210. DOI:10.11964/jfc.20191012021.

[33] 揭珍, 徐大伦, 杨文鸽. 新鲜带鱼营养成分及风味物质的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(11): 1201-1205. DOI:CNKI:SUN:WXQG.0.2016-11-015.

[34] 方兵, 汪之和, 施文正. 漂洗次数对鳊鱼鱼糜风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(1): 11-16. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.01.003.

[35] 翟营营, 黄晶晶, 张慧敏, 等. 酵母抽提物主要滋味成分分析及其对鱼糜制品风味的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 105-113.

[36] 吴浩, 刘源, 顾赛麒, 等. 电子鼻、电子舌分析和感官评价在鱼糜种类区分中的应用[J]. 食品工业科技, 2013, 34(18): 80-82. DOI:CNKI:SUN:SPKJ.0.2013-18-026.

[37] 翁丽萍, 戴志远, 赵芸, 等. 养殖大黄鱼和野生大黄鱼特征滋味物质的分析与比较[J]. 中国食品学报, 2015, 15(4): 254-261. DOI:CNKI:SUN:ZGSP.0.2015-04-056.