

# 尼罗罗非鱼制作传统上海熏鱼过程中的风味变化

薛永霞<sup>1,2</sup>, 卫赛超<sup>1</sup>, 张菊<sup>1</sup>, 陈舜胜<sup>1,2\*</sup>

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 国家淡水水产品加工技术研发中心, 上海 201306)

**摘要:** 为探究上海熏鱼制作过程中不同加工阶段风味物质的变化, 本研究以尼罗罗非鱼肉为对象, 通过高效液相色谱法、氨基酸自动分析法和固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术对上海熏鱼4个加工阶段(生鲜罗非鱼、一次浸渍、一次浸渍后油爆和上海熏鱼成品)的风味物质进行分析和鉴定。结果显示, 各阶段IMP含量呈逐渐上升趋势, 是主要的鲜味核苷酸。游离氨基酸总量和呈味氨基酸含量也逐渐升高, 并呈显著性差异, 其中天冬氨酸和谷氨酸对上海熏鱼风味影响最大。生鲜罗非鱼、一次浸渍、一次浸渍后油爆和上海熏鱼成品中挥发性物质依次为50、84、78和82种, 主要由醛类、酮类、醇类和烃类构成。因此, 浸渍和油爆是上海熏鱼风味形成的主要原因, 使得罗非鱼鱼体的腥味得以有效改善。

**关键词:** 尼罗罗非鱼; 核苷酸; 游离氨基酸; 挥发性成分; 风味; 加工

**中图分类号:** TS 254.4

**文献标志码:** A

罗非鱼俗称非洲鲫鱼, 富含蛋白质和多种脂肪酸, 营养价值高、肉质细嫩、无肌间刺、易于加工, 享有“白三文鱼”的美称<sup>[1-2]</sup>。联合国粮食及农业组织(FAO)的统计数据表明, 已经有120多个国家和地区养殖罗非鱼。近年来, 我国罗非鱼每年的产量以4.82%的速率递增<sup>[3]</sup>。然而, 我国罗非鱼产业过分依赖国际市场, 国内市场容量小、产品单一, 初级产品占绝大部分, 深加工产品甚少, 加工技术落后, 罗非鱼出口、内销均受到挑战<sup>[4]</sup>。此外, 罗非鱼固有的腥味令消费者难以接受, 故急需开发适合国内市场需求罗非鱼加工产品。上海熏鱼是一道色香味俱全的特色传统沪菜, 一般以草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)为加工原料, 外脆里嫩、滋味鲜美, 深受江南地区人民喜爱, 但草鱼肌间刺较多, 影响食用。上海熏鱼风味形成于不同加工阶段, 但不同加工阶段对风味成分的影响尚不明确。

为探究罗非鱼在制作传统上海熏鱼过程中风味物质的变化, 本实验选取尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*), 采用高效液相色谱法(HPLC)、氨基酸自动分析法和固相微萃取—气相色谱—质谱法(SPME-GC-MS)对不同加工阶段罗非鱼肉中的核苷酸、游离氨基酸和挥发性物质进行鉴定与分析, 确定其在不同加工阶段的风味成分及关键风味物质, 为罗非鱼的深加工提供理论基础。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验材料

尼罗罗非鱼, 约600 g/尾, 购自上海浦东新区古棕路农工商超市。经充氧运回, 急杀(重击头部致死), 去除鱼鳞、鱼鳍、内脏等, 洗净后切段(1.5 cm左右)。

核苷酸及其关联物标准品: 三磷酸腺苷(ade-

收稿日期: 2018-10-11 修回日期: 2019-03-22

资助项目: 国家自然科学基金(31471685); “上海市高校知识服务平台”项目(ZF1206); “基于风味前体形成机制的特色风味稳定性调控方法研究”项目(2017YFD0400105-02)

通信作者: 陈舜胜, E-mail: sschen@shou.edu.cn

nosine triphosphate, ATP)、二磷酸腺苷(adenosine diphosphate, ADP)、肌苷酸(inosine monophosphate, IMP)、次黄嘌呤(hypoxanthine, Hx), 美国Sigma公司; 一磷酸腺苷(adenosine monophosphate, AMP)、次黄嘌呤核苷(inosine, HxR), 日本TCI公司; 色谱级磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、甲醇, 分析级高氯酸(perchloric acid, PCA)、氢氧化钾、三氯乙酸(Trichloroacetic acid, TCA)、氢氧化钠、氯化钠, 国药集团化学试剂有限公司; 17种色谱级氨基酸混标, 中国计量科学研究院化学计量与分析科学研究所; 色谱级2,4,6-三甲基吡啶, 美国Sigma公司。

## 1.2 加工工艺

传统上海熏鱼加工分为三个阶段: 第一次浸渍(30 min)→油爆(180 °C, 5 min)→第二次浸渍(1 min)。其中, 第一次浸渍: 料酒(20%)、食用盐(1.5%)、葱(2%)、姜(1%)、蒜(1%)、胡椒粉(1%)和生抽酱油(5%)浸渍30 min。油爆: 油爆温度180 °C, 油爆时间5 min。第二次浸渍: 葵花籽油(5%)、五香粉(0.1%)、白砂糖(3%)、生抽酱油(10%)、水(60%)熬制10 min后浸渍1 min。

本实验主要研究罗非鱼在传统上海熏鱼加工过程中的4个阶段: 生鲜罗非鱼( $a_0$ )、一次浸渍罗非鱼( $a_1$ )、一次浸渍后油爆罗非鱼( $b_1$ )和一次浸渍后油爆, 再二次浸渍罗非鱼( $c_1$ , 上海熏鱼成品)。为了进一步研究油爆这一工艺对鱼肉风味物质的影响, 将生鲜罗非鱼直接油爆(生鲜油爆罗非鱼,  $b_0$ )作为对照组。制备样品前均沥干料液或油。

## 1.3 仪器与设备

高效液相色谱仪, W2690/5美国Waters公司; 氨基酸自动分析仪L-8800, 日本Hitachi公司; 涂层厚度65  $\mu\text{m}$ 聚二甲基硅氧烷/二乙烯苯(polydimethylsiloxane/divinylbenzene, PDMS/DVB)固相微萃取头, 美国Supelco公司; 6890 GC-5975 MS气相色谱—质谱联用仪, 美国Agilent公司; AUW320电子分析天平, 日本岛津公司; H2050R高速冷冻离心机, 长沙湘仪有限公司; DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器, 巩义市予华仪器有限责任公司; HY-81电热炸锅, 佛山市南海泊菲机电设备有限公司; ZQ02CJ2不粘锅, 浙江爱仕达电器股份有限公司; 九阳JYC-21HEC05电磁炉, 九阳股份有限公司; 海尔DW-25W300低温

冰箱, 上海圣科仪器设备有限公司。

## 1.4 实验方法

**核苷酸类化合物分析** 参考Yokoyama等<sup>[5]</sup>的测定方法。分别称取5.00 g样品于50 mL离心管中, 加入质量分数为10%的PCA 10 mL, 匀浆后冷冻离心(10 000 r/min, 15 min, 4 °C), 取离心后上清液, 用5 mL 5%的PCA洗涤沉淀, 再次离心; 重复以上操作2次, 合并上清液, 用10 mol/L和1 mol/L的KOH溶液调节pH值为6.50, 静置30 min, 取上清液定容至50 mL, 摇匀, 过0.22  $\mu\text{m}$ 滤膜后待测。整个处理过程均在0~4 °C下操作。

**高效液相色谱条件:** ODS-SPC<sub>18</sub>色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5  $\mu\text{m}$ ), 保护柱柱芯(4 mm×10 mm, 5  $\mu\text{m}$ ); 流动相A, 0.05 mol/L磷酸二氢钾和磷酸氢二钾(体积比1:1)溶液, 用磷酸调节pH值为6.50; 流动相B, 甲醇溶液, 等梯度洗脱; 流速1 mL/min; 柱温28 °C; 检测波长254 nm; 进样量10  $\mu\text{L}$ 。

**游离氨基酸分析** 参考陈剑岚等<sup>[6]</sup>的分析方法。分别称取2.00 g样品, 加入15 mL质量分数为15%的TCA溶液, 匀浆后静置2 h, 冷冻离心(10 000 r/min, 15 min, 4 °C), 取上清液5 mL, 用3 mol/L的NaOH溶液调pH值至2.0, 定容至10 mL, 摇匀, 过0.22  $\mu\text{m}$ 滤膜后待测。

**氨基酸自动分析仪条件** 色谱柱(4.6 mm×150 mm, 7  $\mu\text{m}$ ); 分离树脂, 阳离子交换树脂; 柱温度57 °C; 检测波长570 nm(脯氨酸为440 nm); 缓冲溶液(1通道)流速0.40 mL/min; 反应液茚三酮试剂; 反应液(2通道)流速0.35 mL/min; 进样量20  $\mu\text{L}$ 。

**气相色谱—质谱分析** 准确称取搅碎后的鱼肉2.50 g, 然后加入2.50 mL 0.18 g/mL NaCl溶液, 匀浆后迅速置于20 mL顶空瓶中加盖待测。顶空固相微萃取条件: 采用65  $\mu\text{m}$  PDMS/DVB固相微萃取头, 萃取温度45 °C, 萃取时间40 min。

**色谱条件程序升温**<sup>[7]</sup>: 柱初温40 °C, 保持2 min, 以4 °C/min升至160 °C, 然后以10 °C/min升至250 °C, 保持5 min; 不分流模式进样; 载气(He)流量1.0 mL/min; 进样口温度250 °C; 解吸温度250 °C; 解吸时间5 min。质谱条件: 传输线温度280 °C; 四极杆温度150 °C; 离子源温度230 °C; 电子能量70 eV; 质量扫描范围 $m/z$  35~350。

## 1.5 数据处理

核苷酸类化合物和游离氨基酸数据分析用SPSS 17.0对数据进行方差分析, 同时采用

Duncan氏法进行显著性分析。

**GC-MS数据分析** 挥发性成分采用NIST 02和Wiley质谱数据库进行匹配定性,且当正反匹配度均大于800(最大值为1 000)的化合物才予以报道<sup>[7-8]</sup>。在样品中加入3 μL原始浓度为1 000 mg/g的内标物2,4,6-三甲基吡啶(TMP),通过挥发物与TMP峰面积之比计算其绝对浓度(假设各挥发物的绝对校正因子为1.0)<sup>[9]</sup>:

$$\text{浓度 (ng/g)} = \frac{\text{峰面积比 (挥发物/TMP)} \times m \text{ (TMP)}}{2.5 \text{ g}} \times 10^3 \quad (1)$$

式中,  $m$ 为TMP的质量(μg)。

**确定关键风味化合物<sup>[10]</sup>** 采用相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)法,定义对样品总体风味贡献最大的组分ROAV<sub>stan</sub>=100,对其他挥发性成分按以下公式计算:

$$\text{ROAV}_i \approx \frac{C_{ri}}{C_{rstan}} \times \frac{T_{stan}}{T_i} \times 100 \quad (2)$$

式中,  $C_{ri}$ 和 $T_i$ 分别为各挥发性物质的含量和相应的感觉阈值;  $C_{rstan}$ 和 $T_{stan}$ 分别为样品总体风味贡献最大组分的含量和相应的感觉阈值。所有组分 $0 \leq \text{ROAV} \leq 100$ , ROAV值越大表明该组分对样品总体风味贡献程度越大,  $\text{ROAV} \geq 1$ 的组分被认为对样品总体风味贡献显著,是该样品的关键风味化合物。

## 2 结果

### 2.1 尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中的核苷酸变化

不同加工工艺对尼罗罗非鱼肉中核苷酸类的含量有较明显影响,各样品中AMP含量较低,

但研究表明,AMP与IMP、谷氨酸和天冬氨酸有协同增鲜的作用<sup>[11]</sup>。IMP在 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 和 $c_1$ 中的含量分别为247.05、300.28、344.27、308.35和279.14 mg/100 g,  $a_0$ 中含量最低,  $b_0$ 中含量最高,  $a_0$ 的TAV=9.88,其他样品的TAV均显著性提高(表1),表明浸渍和油爆均有助于提高IMP含量,对呈味效果有重要贡献。

### 2.2 尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中的游离氨基酸变化

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 和 $c_1$ 中游离氨基酸分别为327.07、402.81、379.23、495.35和349.93 mg/100 g,呈味氨基酸占比依次为70.40%、74.84%、70.51%、74.13%和73.35%,整体呈显著性上升趋势(表2);  $a_1$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 和 $c_1$ 中呈味氨基酸比 $a_0$ 分别提高6.31%、0.16%、5.30%和4.20%;浸渍和油爆过程中天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸和甘氨酸的TAV均显著高于 $a_0$ (表3);各样品中天冬氨酸和谷氨酸TAV>1,  $c_1$ 中均达到最大值1.94和10.04,表明浸渍和油爆可显著提高鱼肉鲜味。

### 2.3 尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中的挥发性物质变化

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 和 $c_1$ 中挥发性物质分别为50、84、65、78和82种(表4),整体呈显著性上升趋势,主要由醛类、酮类、醇类、烃类,以及少量醚类、含硫化合物、含氮化合物、芳香族、酸类、酯类和其他化合物构成。由式(2)计算可知3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、己醛、庚醛、苯乙醛、壬醛、癸醛、(E, E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、蒎烯、右旋柠檬烯、石竹烯、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2-甲基丁酸甲酯和2-正戊基呋喃对 $c_1$ 风味贡献显著(表5)。鱼肉的挥发性风味成分主要由醛类、醇类、烃类、

表1 尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中的核苷酸含量

Tab. 1 Contents of nucleotides of *O. niloticus* during the processing of Shanghai smoked fish mg/100 g

加工阶段 processing stages	肌苷酸 IMP	味道强度值 TAV	三磷酸腺苷 ATP	二磷酸腺苷 ADP	一磷酸腺苷 AMP	味道强度值 TAV	次黄嘌呤 Hx	次黄嘌呤核苷 HxR
$a_0$	247.05±12.32 <sup>a</sup>	9.88	18.36±1.84 <sup>e</sup>	8.38±0.68 <sup>ab</sup>	9.59±0.54 <sup>b</sup>	0.19	4.42±0.49 <sup>a</sup>	16.57±0.71 <sup>b</sup>
$a_1$	300.28±5.66 <sup>bc</sup>	12.01	15.48±0.94 <sup>b</sup>	9.40±0.42 <sup>bc</sup>	6.71±0.70 <sup>a</sup>	0.13	3.38±0.17 <sup>a</sup>	8.36±0.48 <sup>a</sup>
$b_0$	344.27±11.64 <sup>d</sup>	13.77	9.86±1.27 <sup>a</sup>	10.17±0.47 <sup>c</sup>	13.80±0.71 <sup>d</sup>	0.28	3.37±0.04 <sup>a</sup>	16.21±0.83 <sup>b</sup>
$b_1$	308.35±6.86 <sup>c</sup>	12.33	8.25±1.03 <sup>a</sup>	9.39±0.11 <sup>bc</sup>	11.61±0.09 <sup>c</sup>	0.23	3.75±0.11 <sup>a</sup>	24.04±0.68 <sup>c</sup>
$c_1$	279.14±7.78 <sup>b</sup>	11.17	6.29±2.52 <sup>a</sup>	7.51±0.26 <sup>a</sup>	9.56±0.27 <sup>b</sup>	0.19	8.98±1.20 <sup>b</sup>	7.79±0.50 <sup>a</sup>

注:同行肩标不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),下同。味道强度值(TAV)>1,呈味效果显著<sup>[12]</sup>;TAV<1,呈味效果不显著<sup>[13]</sup>  
Notes: in the same row, values with different small letter superscripts mean significant differences ( $P<0.05$ ), the same below. Taste activity value (TAV) > 1, taste effect is significant<sup>[12]</sup>; TAV < 1, taste effect is not significant<sup>[13]</sup>

表 2 尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中的游离氨基酸含量  
 Tab. 2 Contents of free amino acids of *O. niloticus* during the processing of Shanghai smoked fish mg/100 g

氨基酸 amino acids	呈味情况 flavor characteristics	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>	阈值 <sup>[11]</sup> (mg/100 mL) taste threshold
天冬氨酸 Asp <sup>★</sup>	鲜/酸(+)	3.26±0.07 <sup>a</sup>	3.54±0.01 <sup>b</sup>	3.34±0.03 <sup>a</sup>	4.02±0.02 <sup>c</sup>	5.81±0.07 <sup>d</sup>	3
苏氨酸 Thr <sup>▲</sup>	甜(+)	20.87±1.04 <sup>c</sup>	16.34±0.04 <sup>a</sup>	22.42±0.22 <sup>d</sup>	17.97±0.41 <sup>b</sup>	15.34±0.11 <sup>a</sup>	260
丝氨酸 Ser <sup>★</sup>	甜(+)	2.83±0.13 <sup>a</sup>	4.00±0.09 <sup>b</sup>	2.99±0.08 <sup>a</sup>	5.22±0.07 <sup>c</sup>	6.52±0.11 <sup>d</sup>	150
谷氨酸 Glu <sup>★</sup>	鲜/酸(+)	6.55±0.08 <sup>a</sup>	29.53±0.77 <sup>b</sup>	7.62±0.21 <sup>a</sup>	40.60±1.14 <sup>c</sup>	50.18±1.75 <sup>d</sup>	5
甘氨酸 Gly <sup>★</sup>	甜(+)	123.44±0.58 <sup>a</sup>	209.12±1.36 <sup>d</sup>	142.45±0.83 <sup>b</sup>	248.26±2.18 <sup>c</sup>	149.82±1.89 <sup>c</sup>	130
丙氨酸 Ala <sup>★</sup>	甜(+)	34.63±0.21 <sup>d</sup>	27.53±0.32 <sup>b</sup>	39.86±0.03 <sup>c</sup>	32.36±0.21 <sup>c</sup>	24.26±0.12 <sup>a</sup>	60
半胱氨酸 Cys	苦/甜/硫(-)	0.95±0.01 <sup>b</sup>	0.89±0.00 <sup>a</sup>	1.96±0.00 <sup>d</sup>	2.04±0.00 <sup>c</sup>	1.68±0.00 <sup>c</sup>	ND
缬氨酸 Val <sup>▲</sup>	甜/苦(-)	3.54±0.09 <sup>a</sup>	4.09±0.11 <sup>b</sup>	4.34±0.04 <sup>b</sup>	5.89±0.14 <sup>d</sup>	5.52±0.13 <sup>c</sup>	40
甲硫氨酸 Met <sup>▲</sup>	苦/甜/硫(-)	0.29±0.01 <sup>a</sup>	0.32±0.01 <sup>a</sup>	0.44±0.02 <sup>b</sup>	0.58±0.03 <sup>c</sup>	0.76±0.02 <sup>d</sup>	30
异亮氨酸 Ile <sup>▲</sup>	苦(-)	1.54±0.05 <sup>a</sup>	2.10±0.02 <sup>c</sup>	1.90±0.04 <sup>b</sup>	2.96±0.07 <sup>d</sup>	3.58±0.09 <sup>c</sup>	90
亮氨酸 Leu <sup>▲</sup>	苦(-)	3.21±0.14 <sup>a</sup>	3.96±0.07 <sup>b</sup>	3.93±0.01 <sup>b</sup>	5.43±0.08 <sup>c</sup>	6.03±0.07 <sup>d</sup>	190
酪氨酸 Tyr	苦(-)	1.14±0.04 <sup>a</sup>	1.04±0.00 <sup>a</sup>	1.26±0.04 <sup>b</sup>	1.36±0.07 <sup>b</sup>	1.34±0.04 <sup>b</sup>	ND
苯丙氨酸 Phe <sup>▲</sup>	苦(-)	1.15±0.07 <sup>a</sup>	1.16±0.02 <sup>a</sup>	1.07±0.01 <sup>a</sup>	1.80±0.01 <sup>b</sup>	3.55±0.08 <sup>c</sup>	90
赖氨酸 Lys <sup>▲</sup>	甜/苦(-)	23.54±0.44 <sup>a</sup>	39.78±0.85 <sup>c</sup>	28.69±0.46 <sup>b</sup>	51.53±1.18 <sup>d</sup>	28.35±0.48 <sup>b</sup>	50
组氨酸 His	苦(-)	35.90±0.65 <sup>d</sup>	26.55±1.04 <sup>b</sup>	40.22±0.59 <sup>c</sup>	31.01±0.73 <sup>c</sup>	21.65±0.49 <sup>a</sup>	20
精氨酸 Arg	甜/苦(+)	4.69±0.25 <sup>a</sup>	5.11±0.20 <sup>ab</sup>	5.60±0.13 <sup>b</sup>	7.59±0.14 <sup>c</sup>	5.44±0.28 <sup>b</sup>	50
脯氨酸 Pro <sup>★</sup>	甜/苦(+)	59.54±1.39 <sup>d</sup>	27.75±0.85 <sup>b</sup>	71.14±1.41 <sup>e</sup>	36.74±0.46 <sup>c</sup>	20.09±0.51 <sup>a</sup>	300
总量 total		327.07±3.92 <sup>a</sup>	402.81±2.87 <sup>d</sup>	379.23±1.28 <sup>c</sup>	495.35±6.30 <sup>e</sup>	349.93±4.98 <sup>b</sup>	
呈味氨基酸百分比/% percentage of taste amino acids		70.40	74.84	70.51	74.13	73.35	

注: ★为呈味氨基酸, ▲为必需氨基酸; “+”表示味道愉悦, “-”表示味道不好, “ND”表示阈值未查到

Notes: ★. taste amino acid, ▲. essential amino acid, +. pleasant taste; -. unpleasant taste, ND. taste threshold not detected

表 3 尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中呈味氨基酸的味道强度值

Tab. 3 Taste activity value of flavor amino acids of *O. niloticus* during the processing of Shanghai smoked fish

加工阶段 processing stages	天冬氨酸 Asp	丝氨酸 Ser	谷氨酸 Glu	甘氨酸 Gly	丙氨酸 Ala	脯氨酸 Pro
a <sub>0</sub>	1.09	0.02	1.31	0.95	0.58	0.20
a <sub>1</sub>	1.18	0.03	5.91	1.61	0.46	0.09
b <sub>0</sub>	1.11	0.02	1.52	1.10	0.66	0.24
b <sub>1</sub>	1.34	0.03	8.12	1.91	0.54	0.12
c <sub>1</sub>	1.94	0.04	10.04	1.15	0.40	0.07

吡嗪类和呋喃类物质组成, 对鱼肉风味形成具有重要贡献。

### 3 讨论

#### 3.1 核苷酸和游离氨基酸

浸渍和油爆后, IMP含量显著性提高, 主要

原因: ①鱼体死后, ATP在多种酶的参与下依次降解为ADP、AMP、IMP、HxR和Hx<sup>[14]</sup>; ②ATP耐热性较差<sup>[15]</sup>, 高温油爆过程中促进ATP降解, 使IMP快速积累, 邱霞琴等<sup>[16]</sup>也发现加热草鱼15 min后仅ATP含量显著下降, IMP含量显著增加; ③IMP在中性条件下稳定性较好, 一次浸渍过程中料酒改变了鱼肉的pH<sup>[17]</sup>, 促进IMP进一步降解; ④少

表 4 尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中的挥发性物质含量  
 Tab. 4 Contents of volatile components of *O. niloticus* during the processing of Shanghai smoked fish ng/g

挥发性物质 volatile components	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>
<b>醛类 aldehydes</b>					
3-甲基丁醛 3-methylbutyraldehyde	—	—	5.58±0.10	19.84±1.11	11.74±0.75
2-甲基丁醛 2-methylbutyraldehyde	—	—	8.36±0.41	42.69±2.28	21.42±0.58
己醛 hexanal	223.56±6.96	20.37±0.86	138.80±3.84	47.44±0.74	39.98±1.50
(Z)-4-庚烯醛 (Z)-4-heptenal	0.53±0.02	—	—	—	—
庚醛 heptanal	17.79±2.06	—	26.87±1.93	12.21±0.03	10.37±0.39
苯甲醛 benzaldehyde	8.63±0.82	—	15.90±0.17	21.24±0.16	19.92±0.70
(E, E)-2,4-庚二烯醛 (E, E)-2,4-heptadienal	2.27±0.63	—	—	—	—
苯乙醛 benzeneacetaldehyde	—	30.49±1.88	11.36±0.55	36.73±1.39	30.02±0.58
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-octenal	7.73±0.32	—	—	—	—
壬醛 nonanal	60.38±4.30	28.31±3.47	49.98±2.47	39.66±0.89	26.85±0.52
癸醛 decanal	7.44±0.42	8.35±0.22	7.13±0.36	8.90±0.30	7.98±0.28
(E, E)-2,4-壬二烯醛 (E, E)-2,4-nonadienal	0.96±0.08	—	—	—	—
(Z)-柠檬醛 (Z)-citral	—	30.29±2.08	—	—	—
对甲氧基苯甲醛 anisicaldehyde	—	—	—	—	19.37±0.32
(E)-2-癸烯醛 (E)-2-decenal	—	—	—	—	7.46±0.29
(E)-肉桂醛 (E)-cinnamaldehyde	—	—	—	—	38.28±1.86
柠檬醛 citral	—	38.27±3.55	—	7.86±0.46	2.70±0.02
(E, E)-2,4-癸二烯醛 (E, E)-2,4-decadienal	3.86±0.41	2.06±0.02	4.91±0.08	2.29±0.07	1.70±0.01
十五醛 pentadecanal	—	2.62±0.01	—	—	—
十四醛 tetradecanal	—	—	0.78±0.02	—	—
合计 total	333.15	160.76	269.67	238.86	237.79
<b>酮类 ketones</b>					
2-庚酮 2-heptanone	7.00±0.17	—	10.10±0.28	15.12±0.22	10.09±0.41
6-甲基-2-庚酮 6-methyl-2-heptanone	0.79±0.04	—	—	—	—
3-乙基环戊酮 3-ethylcyclopentanone	—	—	—	6.17±0.02	—
3-辛酮 3-octanone	3.95±0.26	—	—	—	—
6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-methyl-5-hepten-2-one	—	8.14±0.51	—	35.47±1.03	25.02±0.72
苯乙酮 acetophenone	—	0.82±0.02	—	—	—
2-壬酮 2-nonanone	3.91±0.02	—	4.71±0.38	—	—
3-壬烯-2-酮 3-nonen-2-one	—	—	—	—	2.32±0.02
樟脑 camphor	—	11.85±0.74	—	—	—
2-癸酮 2-decanone	2.54±0.22	—	3.50±0.19	—	—
d-马鞭草烯酮 d-verbenone	—	3.56±0.19	—	—	—
2-十一烷酮 2-undecanone	—	5.05±0.47	—	—	—



· 续表4 ·

挥发性物质 volatile components	$a_0$	$a_1$	$b_0$	$b_1$	$c_1$
6,10,14-三甲基-2-十五烷酮 6,10,14-trimethyl-2-pentadecanone	—	0.51±0.02	—	—	—
合计 total	18.19	29.93	18.31	56.76	37.43
<b>醇类 alcohols</b>					
1-戊烯-3-醇 1-penten-3-ol	3.26±0.07	—	—	—	—
3-甲基-1-丁醇 3-methyl-1-butanol	—	10.25±0.31	—	—	2.74±0.12
2-甲基-1-丁醇 2-methyl-1-butanol	—	7.81±1.01	—	—	—
戊醇 pentanol	10.49±0.47	2.51±0.17	8.03±0.26	7.54±0.46	6.19±0.07
己醇 hexanol	33.45±2.97	37.36±2.84	8.13±0.20	—	1.66±0.01
庚醇 heptanol	5.96±0.48	3.48±0.34	4.58±0.21	4.71±0.24	—
1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	55.75±4.23	28.46±0.57	32.27±1.86	39.70±2.87	32.24±0.31
桉叶油醇 eucalyptol	—	72.41±4.58	—	36.95±0.44	33.90±2.43
2-乙基己醇 2-ethylhexanol	7.92±0.42	—	—	—	—
4-乙基环己醇 4-ethylcyclohexanol	—	—	10.78±0.77	—	—
(Z)-1-甲基-4-(1-甲基乙基)-2-环己烯-1-醇 (Z)-1-methyl-4-(1-methylethyl)-2-cyclohexen-1-ol	—	1.11±0.10	—	—	—
(Z)-2-辛烯-1-醇 (Z)-2-octen-1-ol	8.48±0.31	—	—	—	6.10±0.18
环辛醇 cyclooctanol	—	6.66±0.41	—	—	—
1-辛炔-3-醇 1-octyn-3-ol	—	12.70±0.18	—	—	—
辛醇 octanol	—	—	—	—	11.03±0.30
2-己基-1-辛醇 2-hexyl-1-octanol	—	—	—	4.70±0.31	—
苯乙醇 phenylethyl alcohol	—	14.24±0.89	—	—	—
4-萜烯醇 terpinen-4-ol	—	17.88±1.36	—	—	—
冰片 borneol	—	31.04±1.91	—	—	—
1,7,7-三甲基二环[2.2.1]庚-2-醇 1,7,7-trimethylbicyclo[2.2.1]heptan-2-ol	—	—	—	7.12±0.40	—
2-(4-甲基苯基)丙-2-醇 2-(4-methylphenyl)propan-2-ol	—	4.78±0.25	—	—	—
香茅醇 citronellol	—	10.91±0.60	—	—	—
香叶醇 geraniol	—	24.34±0.80	—	—	—
合计 total	125.31	285.94	63.79	100.72	93.86
<b>烃类 alkanes</b>					
蒎烯 pinene	—	13.61±2.07	1.58±0.02	15.61±0.29	11.52±0.41
莰烯 camphene	—	18.91±0.24	—	18.16±1.13	16.41±0.35
$\beta$ -蒎烯 $\beta$ -pinene	—	13.69±0.47	—	—	—
5-乙基-2,2,3-三甲基庚烷 5-ethyl-2,2,3-trimethylheptane	—	—	8.65±0.53	—	—
3-萜烯 3-carene	—	55.34±2.15	—	91.98±2.04	79.22±2.07
2-萜烯 2-carene	—	2.25±0.19	—	—	—
右旋柠檬烯 D-limonene	4.83±0.30	163.83±3.27	80.05±2.31	264.15±4.36	260.79±4.55

·续表4·

挥发性物质 volatile components	$a_0$	$a_1$	$b_0$	$b_1$	$c_1$
罗勒烯 $\beta$ -ocimene	—	1.73±0.07	—	—	—
萜品烯 $\gamma$ -terpinene	—	3.92±0.25	—	—	—
4-甲基十三烷 4-methyltridecane	—	—	—	2.58±0.01	—
十一烷 undecane	60.77±5.31	127.32±3.84	3.90±0.33	6.75±0.38	71.67±4.26
5-甲基十一烷 5-methylundecane	—	—	4.23±0.63	—	—
2,6,10,14-四甲基十七烷 2,6,10,14-tetramethylheptadecane	—	—	—	6.76±0.15	—
左旋樟脑 L-camphor	—	—	—	4.52±0.20	4.82±0.15
3-甲基十一烷 3-methylundecane	—	—	4.45±0.11	—	—
十二烷 dodecane	4.96±0.23	8.08±0.50	14.20±1.28	15.08±0.76	—
癸烷 decane	—	—	9.18±0.06	—	—
2,6,10-三甲基十二烷 2,6,10-trimethyldodecane	—	—	0.80±0.01	6.23±0.16	—
二十烷 eicosane	—	—	2.84±0.22	1.67±0.06	—
3,5,24-三甲基四十烷 3,5,24-trimethyltetracontane	—	—	5.50±0.20	8.27±0.25	1.15±0.02
6-甲基十五烷 6-methylpentadecane	—	—	—	4.51±0.30	—
十九烷 nonadecane	—	—	3.36±0.33	5.98±0.19	9.70±0.03
10-甲基十九烷 10-methylnonadecane	—	—	—	1.79±0.03	—
2,6,11-三甲基十二烷 2,6,11-trimethyldodecane	—	—	6.35±0.65	6.03±0.22	—
十三烷 tridecane	3.65±0.22	6.96±1.35	11.49±0.34	8.96±0.21	4.98±0.05
6,9-二甲基十四烷 6,9-dimethyltetradecane	—	—	1.65±0.02	—	—
2,3,5,8-四甲基癸烷 2,3,5,8-tetramethyldecane	—	—	4.02±0.20	—	—
二十八烷 octacosane	—	—	—	12.82±0.41	—
(3R-反式)-4-乙烯基-4-甲基-3-(1-甲基乙基)-1-(1-甲基乙基)环己烯 (3R-trans)-4-ethenyl-4-methyl-3-(1-methylethenyl)-1-(1-methylethyl)-cyclohexene	—	18.98±0.16	—	—	12.14±0.60
2,6-二甲基十七烷 2,6-dimethylheptadecane	—	—	—	8.83±0.12	—
二十六烷 hexacosane	—	—	10.15±0.32	13.66±0.53	—
二十一烷 heneicosane	—	—	5.81±0.10	—	—
二十七烷 heptacosane	—	—	—	6.82±0.03	—
2,6,10-三甲基十五烷 2,6,10-trimethylpentadecane	—	—	7.32±7.32	—	—
2-甲基-8-丙基十二烷 2-methyl-8-propyldodecane	—	—	13.69±0.81	—	—
$\alpha$ -胡椒烯 $\alpha$ -copaene	—	37.49±0.21	—	22.61±0.84	38.26±1.52
2,6,6-三甲基癸烷 2,6,6-trimethyldecane	—	—	3.25±0.28	—	—
3-甲基十三烷 3-methyltridecane	—	—	5.41±0.28	—	—
2,5-二甲基十四烷 2,5-dimethyltetradecane	—	—	—	1.92±0.01	—
[1S-(1 $\alpha$ , 2 $\beta$ , 4 $\beta$ )]-1-乙基-1-甲基-2,4-双(1-甲基乙基)环己烷 [1S-(1 $\alpha$ , 2 $\beta$ , 4 $\beta$ )]-1-ethenyl-1-methyl-2,4-bis(1-methylethenyl)-cyclohexane	—	8.31±0.43	—	—	—

· 续表4 ·

挥发性物质 volatile components	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>
十四烷 tetradecane	3.05±0.23	3.80±0.32	11.66±0.89	19.78±1.04	3.83±0.12
2,6,10-三甲基十四烷 2,6,10-trimethyltetradecane	—	—	—	8.12±0.43	—
十八烷 octadecane	—	—	5.55±0.18	2.70±0.07	—
2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯基)双环[3.1.1]庚-2-烯 2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)-bicyclo[3.1.1] hept-2-ene	—	3.21±0.17	—	—	—
石竹烯 caryophyllene	—	225.08±6.02	—	106.24±3.40	71.38±2.46
(Z)-β-金合欢烯 (Z)-β-farnesene	—	2.01±0.14	—	—	—
环十二烷 cyclododecane	6.47±0.33	—	—	—	—
γ-衣兰油烯 γ-murolene	—	4.89±0.25	—	—	1.18±0.03
γ-长叶蒎烯 γ-longipinene	—	7.37±0.45	—	—	—
[S-(R*, S*)]-5-(1,5-二甲基-4-己烯基)-2-甲基-1,3- 环己二烯	—	160.53±7.06	—	36.42±1.65	17.33±0.22
[S-(R*, S*)]-5-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-2-methyl-1, 3-cyclohexadiene	—	—	—	—	—
十五烷 pentadecane	1.74±0.10	—	10.53±0.27	13.24±0.46	1.11±0.05
β-甜没药烯 β-bisabolene	—	42.52±3.52	—	7.70±0.53	4.25±0.11
[S-(R*, S*)]-3-(1,5-二甲基-4-己烯基)-6-亚甲基环己烯 [S-(R*, S*)]-3-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-6- methylencyclohexene	—	51.80±1.36	—	7.94±0.38	—
α-葑烯 α-cadinene	—	—	—	—	7.90±0.05
十六烷 hexadecane	1.11±0.02	—	3.05±0.28	5.26±0.14	—
十七烷 heptadecane	2.81±0.09	3.33±0.19	4.31±0.07	8.50±0.52	1.72±0.04
二十四烷 tetracosane	—	—	4.96±0.28	—	—
合计 total	89.39	984.96	247.94	749.92	622.82
<b>含硫类 S-containing</b>					
二甲醚 methoxymethane	—	33.22±0.57	—	47.68±1.85	91.63±0.08
二甲基硫醚 dimethyl sulfide	2.70±0.09	—	—	—	—
硫化丙烯 methyl-thiirane	—	—	—	7.86±0.36	10.58±0.33
1-(甲硫基)-1-丙炔 1-(methylthio)-1-propyne	1.94±0.14	—	—	—	—
甲基烯丙基硫醚 allylmethyl-sulfide	—	49.01±3.01	—	—	—
甲基丙基硫醚 1-(methylthio)-propane	—	6.79±0.42	—	—	—
(Z)-1-(甲硫基)-1-丙烯 (Z)-1-(methylthio)-1-propene	—	11.61±0.04	—	—	—
二烯丙基硫醚 diallyl sulfide	—	17.99±0.67	—	—	—
2,4-二甲基噻吩 2,4-dimethylthiophene	—	4.22±0.24	—	—	—
4-烯丙基苯甲醚 4-allylanisole	—	—	—	—	54.53±1.97
二叔十二烷基二硫化物 di-tert-dodecylsulfide	—	—	5.71±0.06	—	—
合计 total	4.64	122.84	5.71	55.54	156.74
<b>含氮类 N-containing</b>					
三甲胺 trimethylamine	16.87±0.32	5.04±0.11	12.18±0.07	1.33±0.03	0.49±0.01



·续表4·

挥发性物质 volatile components	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>
N-甲基吡咯 1-methyl-1H-pyrrole	—	—	3.96±0.19	5.86±0.27	6.55±0.23
2,5-二甲基吡嗪 2,5-dimethylpyrazine	—	—	10.44±0.41	40.92±1.40	31.41±1.93
2,6-二甲基吡嗪 2,6-dimethylpyrazine	—	—	—	20.83±1.47	12.74±0.82
1-甲基-2-乙烯基-1H-咪唑 1-methyl-2-vinyl-1H-imidazole	—	—	—	—	8.77±0.40
2,3-二甲基吡嗪 2,3-dimethylpyrazine	—	—	2.11±0.08	16.96±1.05	8.88±0.27
2-乙基-6-甲基吡嗪 2-ethyl-6-methylpyrazine	—	—	—	21.28±1.39	16.35±0.69
2-乙基-5-甲基吡嗪 2-ethyl-5-methylpyrazine	—	—	—	43.82±1.73	25.88±0.50
2-乙酰基吡咯 1-(1H-pyrrol-2-yl)-ethanone	—	—	—	—	5.20±0.08
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine	—	—	—	62.73±2.37	44.51±2.19
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪 2-ethyl-3,5-dimethylpyrazine	—	—	—	60.30±0.22	35.46±0.92
2,3-二甲基-5-乙基吡嗪 2,3-dimethyl-5-ethylpyrazine	—	—	15.14±0.30	—	4.81±0.18
2,5-二乙基吡嗪 2,5-diethylpyrazine	—	—	—	—	8.18±0.12
2,5-二甲基-3-(2-甲基丙基)-吡嗪 2,5-dimethyl-3-(2-methylpropyl)-pyrazine	—	—	—	—	2.30±0.10
合计 total	16.87	5.04	43.83	274.03	211.53
<b>芳香族 aromatics</b>					
甲苯 toluene	2.42±0.16	2.02±0.04	1.86±0.03	0.89±0.01	0.30±0.00
对二甲苯 p-xylene	—	—	1.68±0.03	—	1.18±0.01
苯乙烯 styrene	—	—	—	1.99±0.04	1.54±0.05
甲氧基-苯基肟 methoxy-phenyl-oxime	4.24±0.03	2.63±0.03	3.55±0.03	1.02±0.02	0.32±0.00
4-异丙基甲苯 p-cymene	—	—	—	11.49±0.68	—
2,3-二氢-4-甲基-1H-茚 2,3-dihydro-4-methyl-1H-indene	—	—	—	—	4.61±0.04
1,2,4,5-四甲苯 1,2,4,5-tetramethylbenzene	—	—	—	—	9.63±0.51
2,4,6-三甲基-1,3-苯二胺 2,4,6-Trimethyl-1,3-phenylenediamine	—	—	—	—	5.33±0.24
萘 naphthalene	3.85±0.31	4.79±0.33	4.39±0.29	7.12±0.19	44.76±1.28
1-乙基-2,4,5-三甲基苯 1-ethyl-2,4,5-trimethylbenzene	—	—	—	—	6.36±0.06
2,3-二氢-4,7-二甲基-1H-茚 2,3-dihydro-4,7-dimethyl-1H-indene	—	—	—	—	3.17±0.21
五甲基苯 pentamethylbenzene	—	—	—	—	5.49±0.22
茴香脑 anethole	3.18±0.01	11.52±0.68	—	—	53.10±1.94
1-甲基萘 1-methylnaphthalene	—	3.83±0.08	—	—	—
2-甲基萘 2-methylnaphthalene	3.14±0.34	4.04±0.00	—	—	1.19±0.03
丁香酚 eugenol	—	11.75±0.71	—	—	—
1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基苯 1-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-4-methylbenzene	—	34.97±1.82	—	8.62±0.15	4.24±0.17
(1 $\alpha$ , 4 $\alpha$ $\beta$ , 8 $\alpha$ )-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢-7-甲基- 4-亚甲基-1-(1-甲基乙基)-萘 (1 $\alpha$ , 4 $\alpha$ $\beta$ , 8 $\alpha$ )-1,2,3,4,4a,5,6,8a-octahydro-7-methyl- 4-methylene-1-(1-methylethyl)-naphthalene	—	11.90±1.28	—	—	—
2,6-二叔丁基对甲酚 butylated hydroxytoluene	8.15±0.35	15.16±0.68	40.74±3.45	48.68±3.25	9.88±0.28

· 续表4 ·

挥发性物质 volatile components	$a_0$	$a_1$	$b_0$	$b_1$	$c_1$
2,6-双(1,1-二甲基乙基)-4-(1-氧代丙基)苯酚 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-(1-oxopropyl)phenol	0.85±0.04	2.24±0.03	0.57±0.05	0.82±0.02	0.78±0.04
2,2-双对羟苯基丙烷4,4'-(1-methylethylidene)bis-phenol	—	1.34±0.15	—	—	—
合计 total	25.83	106.19	52.79	80.63	151.88
<b>酸类 acids</b>					
羟基乙酸 hydroxyacetic acid	—	—	1.34±0.03	—	—
十四酸 tetradecanoic acid	1.22±0.09	0.54±0.03	—	—	0.98±0.03
十六酸 n-hexadecanoic acid	3.29±0.16	3.62±0.15	2.34±0.10	1.48±0.02	8.92±0.54
合计 total	4.51	4.16	3.68	1.48	9.90
<b>酯类 esters</b>					
氨基甲酸甲酯 methyl carbamate	—	4.57±0.41	—	—	—
丁酸甲酯 methyl butyrate	5.95±0.32	—	5.73±0.27	6.02±0.22	5.59±0.07
2-甲基丁酸甲酯 methyl 2-methylbutyrate	3.28±0.20	1.53±0.01	3.34±0.28	3.21±0.07	3.20±0.15
乙酸异戊酯 isopentyl acetate	—	—	1.22±0.02	0.92±0.02	1.22±0.14
己酸甲酯 methyl caproate	2.78±0.30	2.41±0.13	—	—	—
苯甲酸甲酯 benzoic acid methyl ester	—	5.28±0.36	—	—	—
苯甲酸乙酯 benzoic acid ethyl ester	—	10.90±0.21	—	—	—
壬酸甲酯 nonanoic acid methyl ester	1.37±0.12	—	—	—	—
2-甲基-1-(1,1-二甲基乙基)-2-甲基-1,3-丙二酰酯 methyl-1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanedicarboxylate	—	7.81±0.51	—	—	—
十四酸甲酯 methyl tetradecanoate	0.61±0.04	—	—	—	—
邻苯二甲酸二异丁酯 diisobutylphthalate	—	7.15±0.45	—	—	—
十六酸甲酯 hexadecanoic acid methyl ester	0.99±0.06	1.22±0.03	—	—	—
合计 total	14.98	36.30	10.29	10.15	10.01
<b>其他 others</b>					
2-乙基-2-甲基环氧乙烷 2-ethyl-2-methyloxirane	—	—	—	6.14±0.13	—
1,2-环氧-2-甲基丁烷 1,2-methyl-2-ethyloxirane	—	—	2.02±0.01	—	—
2,2-二甲氧基丁烷 2,2-dimethoxybutane	—	—	—	1.35±0.05	—
2-正戊基呋喃 2-pentylfuran	25.36±2.28	31.36±0.36	48.22±2.41	51.43±1.73	71.29±1.81
合计 total	25.36	31.36	50.24	58.92	71.29

注：“—”表示未检出

Notes: —, not detected

量呈味核苷酸作为增鲜剂添加到酱油中<sup>[18]</sup>, 因此,  $a_0$ 中IMP含量最低,  $b_0$ 中IMP含量 $>b_1>a_1>c_1$ 。研究表明IMP具有强烈的鲜味<sup>[19]</sup>, 各样品的TAV $>1$ , 故IMP是制作上海熏鱼过程中主要的鲜味核苷酸。

不同加工工艺游离氨基酸总量和呈味氨基酸的含量均显著高于 $a_0$ (表3), 主要原因: ①料酒中的乙醇破坏了蛋白质结构, 调味料如糖、

盐、葱姜汁等在乙醇的引导下也顺利地进入到原料内部, 促进氨基酸溶出<sup>[17]</sup>; ②生抽酱油中游离氨基酸(天冬氨酸、谷氨酸等)进入鱼肉内部<sup>[20]</sup>; ③鱼体自身组织蛋白的分解作用 and 高温油爆蛋白质氧化降解作用<sup>[20]</sup>。组氨酸本身呈苦味<sup>[11]</sup>,  $c_1$ 中的含量比 $a_0$ 降低了39.69%, 主要原因是鱼肉中存在醛类化合物, 而组氨酸可与还原性化合

表5 尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中挥发性物质的相对气味活度值

Tab. 5 Relative odor activity value of volatile components of *O. niloticus* during the processing of Shanghai smoked fish

挥发性物质 volatile components	阈值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) sensory threshold	$a_0$	$a_1$	$b_0$	$b_1$	$c_1$
3-甲基丁醛 3-methylbutyraldehyde	1.1	—	—	7.11	20.27	13.37
2-甲基丁醛 2-methylbutyraldehyde	1	—	—	11.73	47.97	26.84
己醛 hexanal	5	60.10	4.88	38.93	10.66	10.02
(Z)-4-庚烯醛 (Z)-4-heptenal	0.8	0.89	—	—	—	—
庚醛 heptanal	2.8	8.54	—	13.46	4.90	4.64
苯甲醛 benzaldehyde	41.7	0.28	—	0.53	0.57	0.60
(E, E)-2,4-庚二烯醛 (E, E)-2,4-heptadienal	15.4	0.20	—	—	—	—
苯乙醛 benzeneacetaldehyde	4	—	9.13	3.98	10.32	9.40
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-octenal	3	3.46	—	—	—	—
壬醛 nonanal	1	81.16	33.90	70.10	44.56	33.65
癸醛 decanal	0.1	100	100	100	100	100
(E, E)-2,4-壬二烯醛 (E, E)-2,4-nonadienal	0.09	14.34	—	—	—	—
(Z)-柠檬醛 (Z)-citral	30	—	1.21	—	—	—
对甲氧基苯甲醛 anisaldehyde	200	—	—	—	—	0.12
(E)-2-癸烯醛 (E)-2-decenal	0.3	—	—	—	—	31.16
柠檬醛 citral	32	—	1.43	—	0.28	0.11
(E, E)-2,4-癸二烯醛 (E, E)-2,4-decadienal	0.07	74.12	35.24	98.38	36.76	30.43
十四醛 tetradecanal	5	—	—	0.22	—	—
2-庚酮 2-heptanone	141	0.07	—	0.10	0.12	0.09
3-辛酮 3-octanone	28	0.19	—	—	—	—
6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-methyl-5-hepten-2-one	50	—	0.19	—	0.80	0.63
苯乙酮 acetophenone	65	—	0.02	—	—	—
2-壬酮 2-nonanone	200	0.03	—	0.03	—	—
2-癸酮 2-decanone	7.94	0.43	—	0.62	—	—
2-十一烷酮 2-undecanone	7	—	0.86	—	—	—
1-戊烯-3-醇 1-penten-3-ol	400	0.01	—	—	—	—
3-甲基-1-丁醇 3-methyl-1-butanol	250	—	0.05	—	—	0.01
戊醇 pentanol	4 000	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
己醇 hexanol	2 500	0.02	0.02	<0.01	—	<0.01
庚醇 heptanol	3	2.67	1.39	2.14	1.76	—
1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	1.5	49.96	22.72	30.17	29.74	26.93
2-乙基己醇 2-ethylhexanol	270 000	<0.01	—	—	—	—
辛醇 octanol	110	—	—	—	—	0.13
(Z)-2-辛烯-1-醇 (Z)-2-octen-1-ol	40	—	0.25	—	—	0.19
苯乙醇 phenylethyl alcohol	750	—	0.02	—	—	—

· 续表5 ·

挥发性物质 volatile components	阈值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) sensory threshold	$a_0$	$a_1$	$b_0$	$b_1$	$c_1$
香茅醇 citronellol	50	—	0.26	—	—	—
香叶醇 geraniol	40	—	0.73	—	—	—
蒎烯 pinene	6	—	2.72	0.37	2.92	2.41
$\beta$ -蒎烯 $\beta$ -pinene	140	—	0.12	—	—	—
右旋柠檬烯 D-limonene	10	0.65	19.62	11.23	29.68	32.68
十一烷 undecane	1 170	0.07	0.13	<0.01	0.01	0.08
十二烷 dodecane	2 040	<0.01	<0.01	0.01	0.01	—
十三烷 tridecane	2 140	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01
十四烷 tetradecane	100	0.04	0.05	0.16	0.22	0.05
石竹烯 caryophyllene	64	—	3.94	—	1.87	1.40
二甲基硫醚 dimethyl sulfide	1	3.63	—	—	—	—
二烯丙基硫醚 diallyl sulfide	32.5	—	0.66	—	—	—
三甲胺 trimethylamine	2.4	9.45	2.51	7.11	0.62	0.26
N-甲基吡咯 1-methyl-1H-pyrrole	49 600	—	—	<0.01	<0.01	<0.01
2,5-二甲基吡嗪 2,5-dimethylpyrazine	800	—	—	0.02	0.06	0.05
2,6-二甲基吡嗪 2,6-dimethylpyrazine	200	—	—	—	0.12	0.08
2,3-二甲基吡嗪 2,3-dimethylpyrazine	2 500	—	—	<0.01	0.01	<0.01
2-乙基-5-甲基吡嗪 2-ethyl-5-methylpyrazine	100	—	—	—	0.49	0.32
2-乙酰基吡咯 1-(1H-pyrrol-2-yl)-ethanone	170 000	—	—	—	—	<0.01
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine	1	—	—	—	70.48	55.78
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪 2-ethyl-3,5-dimethylpyrazine	1	—	—	—	67.75	44.44
甲苯 toluene	1 550	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
对二甲苯 p-xylene	450.23	—	—	0.01	—	<0.01
苯乙烯 styrene	730	—	—	—	<0.01	<0.01
萘 naphthalene	60	0.09	0.10	0.10	0.13	0.93
2-甲基萘 2-methylnaphthalene	4	1.06	1.21	—	—	0.37
丁香酚 eugenol	820	—	0.02	—	—	—
十四酸 tetradecanoic acid	10 000	<0.01	<0.01	—	—	<0.01
十六酸 n-hexadecanoic acid	10 000	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
丁酸甲酯 methyl butyrate	60	0.13	—	0.13	0.11	0.12
2-甲基丁酸甲酯 methyl 2-methylbutyrate	0.25	17.63	7.33	18.74	14.43	16.04
乙酸异戊酯 isopentyl acetate	2	—	—	0.86	0.52	0.76
己酸甲酯 methyl caproate	70	0.05	0.04	—	—	—
苯甲酸乙酯 benzoic acid ethyl ester	60	—	0.22	—	—	—
2-正戊基呋喃 2-pentylfuran	5.8	5.88	6.48	11.66	9.96	15.40

注：“—”表示无法计算出ROAV

Notes: —, not calculated ROAV

物发生强烈的美拉德反应<sup>[21]</sup>。故浸渍和油爆有助于提高游离氨基酸和呈味氨基酸含量,从而显著增加鱼肉鲜味,浸渍对鱼肉风味的贡献更为显著。

### 3.2 醛类和酮类

$a_0$ 中醛类含量显著高于 $a_1$ ,主要原因是鱼肉自身或一次浸渍液中的醛类、氨基酸或糖被还原,以及脂肪酸酶促氧化为醇类<sup>[22]</sup>。油爆后醛酮类含量显著高于 $a_1$ ,主要原因是羰基化合物(醛、酮)是由鱼肉的脂肪酸氧化生成,高温可加速脂肪酸氧化降解<sup>[23-24]</sup>。 $c_1$ 中醛酮类含量显著低于 $b_1$ 样品,主要原因:①二次浸渍这一过程中,醛类和氨基酸(如组氨酸)发生了强烈的美拉德反应,二酮类是美拉德反应的初级阶段产物,进一步生成吡嗪类物质<sup>[21]</sup>;②羰基(醛、酮)类化合物具有亲水基团,少量醛、酮类物质在二次浸渍过程中溶出到浸渍液中。

己醛、庚醛、(E)-2-辛烯醛、壬醛、(E, E)-2,4-癸二烯醛是鱼类典型的腥味物质<sup>[8-9, 25-26]</sup>,己醛、庚醛和壬醛在浓度适宜时分别呈青草、果子和草香气味,浓度较高时呈酸败味、鱼腥味或脂肪味,阈值分别为4.5、2.8和1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[8-9, 26]</sup>,各阶段均显著低于 $a_0$ ,表明浸渍和油爆可有效改善腥味等不愉快的风味,各样品ROAV>1,表明对鱼肉风味具有重要贡献。(E)-2-辛烯醛和(E, E)-2,4-癸二烯醛分别呈脂肪味<sup>[8]</sup>和鸡油味<sup>[26]</sup>,前者仅在 $a_0$ 中检出,后者各阶段均显著低于 $a_0$ , $c_1$ 中含量最低,二者对风味具有重要贡献,主要原因是香辛料的掩蔽作用掩盖了那些不受欢迎的异味,或香辛料的有机成分与腥味物质成分发生了某些化学反应<sup>[27]</sup>,Özyurt等<sup>[28]</sup>发现(E, E)-2,4-癸二烯醛在油炸样品中被大量检出,这与本研究一致。苯乙醛呈浓郁的玉簪花香气, $a_0$ 中未检出,其他阶段均被检出,癸醛呈甜香和柑桔香气<sup>[29]</sup>,各样品中均被检出,二者对 $c_1$ 的风味有重要贡献。苯甲醛呈坚果香和杏仁香味<sup>[30]</sup>,油爆后含量显著增加,加热是其产生的重要条件<sup>[30]</sup>。3-甲基丁醛和2-甲基丁醛呈果香味,在油爆后被检出,对鱼肉的风味形成有一定贡献。各样品中醛类的种类较多,含量较高,对鱼肉整体风味形成具有重要贡献,酮类则相反,油爆是脂肪氧化降解的重要条件,加工后的罗非鱼肉腥味得以改善,特征风味得以丰富。

### 3.3 醇类和烃类

一次浸渍样品中醇类的含量最高,生鲜鱼肉醇类含量次之,其他阶段醇类的含量均显著性降低,主要原因:①醇类主要来源于醛类物质、氨基酸和糖的还原以及脂肪酸酶促氧化等<sup>[22]</sup>,如 $a_1$ 中己醇高达37.36  $\text{ng}/\text{g}$ ;②高温油爆促进醇类氧化为醛、酮类物质,因此油爆后的3个样品中醇类含量较低;③ $a_0$ 中1-辛烯-3-醇含量最高,为55.75  $\text{ng}/\text{g}$ ,呈蘑菇和泥土的气味,导致鱼肉具有较重的泥土味<sup>[31]</sup>,浸渍和油爆后,其在样品中的含量均显著降低, $c_1$ 中含量最低,表明泥土味得以有效改善。浸渍和油爆样品中烃类的含量均显著性高于 $a_0$ , $a_1$ 中烃类含量最高,尤其是萜类含量显著性提高,表明调味辅料和油爆是烃类的重要来源。研究表明:①蒎烯、蒎烯、 $\beta$ -甜没药烯、姜烯和冰片是生姜精油的主要成分<sup>[32-33]</sup>,3-萜烯、 $\alpha$ -胡椒烯和石竹烯是胡椒的主要成分<sup>[34]</sup>,这与本研究结果一致;②烷烃主要来自脂肪酸烷氧自由基的均裂<sup>[7]</sup>,油爆促进了脂肪酸的烷氧化,因此浸渍和油爆后烃类含量显著增加。蒎烯呈清香和松木香气,蒎烯、姜烯和冰片呈松木香和樟脑香, $\beta$ -甜没药烯呈木香, $\beta$ -蒎烯呈松脂香气<sup>[35]</sup>,3-萜烯呈辛辣味, $\alpha$ -胡椒烯呈辛辣味,石竹烯呈木香和丁香香气<sup>[34]</sup>,均对鱼肉风味具有一定贡献。右旋柠檬烯呈似鲜花的清淡香气,可进一步氧化生成醛酮醇类化合物,是风味化合物潜在的前体物质<sup>[35]</sup>,浸渍和油爆后其含量显著高于生鲜鱼肉,对鱼肉风味有重要贡献。油爆后样品检出大量支链烷烃如2,6,6-三甲基癸烷、2,6,10-三甲基十二烷、2,6,10-三甲基十四烷、2,6,10-三甲基十五烷、2,6,10,14-四甲基十七烷和3,5,24-三甲基四十烷等,Yu等<sup>[36]</sup>发现克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)废弃物中检测到的2,6,10,14-四甲基十五烷有清甜香味,故推测本研究中检出的支链烷烃对鱼肉风味有一定贡献。饱和醇类感觉阈值很高,对鱼肉风味贡献很小,而不饱和醇类的阈值相对较低,对样品总体风味形成具有一定贡献<sup>[7]</sup>。调味辅料和油爆是烃类形成的重要来源,对风味形成有一定贡献。

### 3.4 醚类、含硫和含氮化合物

醚类和含硫化合物主要在 $a_1$ 、 $b_1$ 和 $c_1$ 中检出,表明其主要来自调味辅料。二甲基硫醚是水体中微生物或藻类的降解产生的,呈难闻的臭味,

仅在生鲜样品中检出。研究表明, 硫化丙烯、甲基烯丙基硫醚和二烯丙基硫醚等含硫化合物是大蒜和洋葱等原材料重要的香味物质, 分别呈大蒜味、洋葱味和辣根味, 是烹调时去腥、脱臭和调味的重要调味品<sup>[37]</sup>, 这与本研究结果一致。 $a_1$ 、 $b_1$ 和 $c_1$ 中均检出二甲醚, 呈轻微醚香气味, 4-烯丙基苯甲醚呈大茴香类香气, 是五香粉的主要成分之一<sup>[38]</sup>, 二者对风味有一定贡献。油爆后样品中检出的含氮化合物主要是吡嗪和吡咯, 上海熏鱼中含氮物质种类最多, 高达14种, 表明美拉德反应需要在一定加热条件下发生, 二次浸渍中添加生抽酱油和白砂糖也发生了美拉德反应, 有相似研究表明, 吡嗪类是美拉德反应的产物, 常在加热过程中产生, 呈浓烈的坚果和烘烤香气<sup>[9]</sup>。三甲胺呈鱼腥味和氨味, 含量呈显著下降趋势,  $c_1$ 中含量最低, 表明传统上海熏鱼这一加工工艺可有效改善罗非鱼腥味。本研究检出的3-乙基-2,5-二甲基吡嗪和2-乙基-3,5-二甲基吡嗪对上海熏鱼的风味贡献显著, 丰富了鱼肉的风味成分。

### 3.5 芳香族及其他化合物

芳香族会使鱼肉呈不愉快的风味<sup>[9, 39]</sup>, 浸渍和油爆后各样品芳香族含量均显著下降, 表明鱼体令人不悦的风味得以改善。本研究检出的甲苯、对二甲苯、甲氧基—苯基肟、1,2,3,4-四甲苯、萘和2-甲基萘是从受污染的环境中富集到鱼体内, 表明鱼类的生长环境会影响到其风味<sup>[9, 39-40]</sup>。 $a_1$ 中检出的茴香脑呈甜味和茴香香气, 是胡椒粉和五香粉的主要成分<sup>[39, 41]</sup>, 对上海熏鱼风味贡献显著。酸类和酯类化合物的种类相对较少, 阈值较高, 含量也较低, 故对风味形成贡献很小。2-甲基丁酸甲酯呈苹果和朗姆酒香味, 阈值仅为0.25  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 对鱼肉风味贡献显著。2-正戊基呋喃阈值为5.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 呈果蔬香味<sup>[42]</sup>, 浸渍和油爆后呈显著上升趋势, 可作为肉类脂质氧化的指示物<sup>[42]</sup>, 对鱼肉风味贡献显著。

## 4 结论

尼罗罗非鱼制作上海熏鱼过程中IMP、游离氨基酸、呈味氨基酸和挥发性物质含量均显著性增加, IMP、天冬氨酸和谷氨酸分别为制作上海熏鱼过程中主要的鲜味核苷酸和氨基酸, 对上海熏鱼呈味有显著贡献。3-甲基丁醛、2-甲基

丁醛、己醛、庚醛、苯乙醛、壬醛、癸醛、(E, E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、蒎烯、右旋柠檬烯、石竹烯、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2-甲基丁酸甲酯和2-正戊基呋喃是上海熏鱼成品风味活性成分, 对上海熏鱼风味形成具有重要贡献。浸渍是改善腥味和形成风味的重要条件, 不同辅料对风味均有重要贡献。油爆加速了脂肪氧化降解, 为美拉德反应提供了必要条件, 赋予鱼肉特征风味, 浸渍和油爆对上海熏鱼风味形成具有协同增鲜的作用。

### 参考文献:

- [1] 巩育军, 郭先霞, 李瑞伟, 等. 罗非鱼营养成分研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2009(11): 50-52.  
Gong Y J, Guo X X, Li R W, *et al.* Advancement of nutrient components of tilapias[J]. *Food and Nutrition in China*, 2009(11): 50-52(in Chinese).
- [2] 赵永强, 杨贤庆, 李来好, 等. EGCG对尼罗罗非鱼肌原纤维蛋白降解的抑制作用[J]. *水产学报*, 2018, 42(8): 1307-1314.  
Zhao Y Q, Yang X Q, Li L H, *et al.* Inhibition of EGCG on myofibrillar protein degradation of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(8): 1307-1314(in Chinese).
- [3] 农业部渔业渔政管理局. 渔业统计年鉴(2004—2016年)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004-2016.  
Fisheries Bureau of the Ministry of Agriculture. China fishery statistical yearbook (2004-2016)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004-2016(in Chinese).
- [4] 赵志霞, 吴燕燕, 李来好, 等. 我国罗非鱼加工研究现状[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(9): 363-367, 373.  
Zhao Z X, Wu Y Y, Li L H, *et al.* Current research situation of tilapia processing in China[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(9): 363-367, 373(in Chinese).
- [5] Yokoyama Y, Sakaguchi M, Kawai F, *et al.* Changes in concentration of ATP-related compounds in various tissues of oyster during ice storage[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1992, 58(11): 2125-2136.
- [6] 陈剑岚, 邵琳雅, 施文正, 等. 不同宰杀方式对草鱼肉呈味水溶性成分的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(17): 27-31.  
Chen J L, Shao L Y, Shi W Z, *et al.* Effect of different slaughter methods on water-soluble flavor components



- in grass carp meat[J]. *Food Science*, 2016, 37(17): 27-31(in Chinese).
- [7] 康翠翠, 施文正, 刁玉段, 等. 加热温度对花鲈鱼肉挥发性成分的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(18): 60-66.
- Kang C C, Shi W Z, Diao Y D, *et al.* Effect of heating temperature on the volatile compounds of *Lateolabrax maculatus* meat analyzed by electronic nose and GC-MS[J]. *Food Science*, 2017, 38(18): 60-66(in Chinese).
- [8] 刁玉段, 张晶晶, 史珊珊, 等. 致死方式对草鱼肉挥发性成分和脂肪氧合酶活性的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(18): 64-70.
- Diao Y D, Zhang J J, Shi S S, *et al.* Effect of different slaughter methods on volatile compounds and lipoxygenase activity of grass carp meat[J]. *Food Science*, 2016, 37(18): 64-70(in Chinese).
- [9] 吴容, 陶宁萍, 刘源, 等. 同时蒸馏萃取-气质联用分析养殖暗纹东方鲀肉中的挥发性成分[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(9): 132-140.
- Wu R, Tao N P, Liu Y, *et al.* Analysis of volatile compounds in meat of cultivated puffer fish (*Takifugu obscurus*) by simultaneous distillation and extraction (SDE) combined with GC-MS[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2012, 38(9): 132-140(in Chinese).
- [10] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. *食品科学*, 2008, 29(7): 370-374.
- Liu D Y, Zhou G H, Xu X L. “ROAV” method: a new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. *Food Science*, 2008, 29(7): 370-374(in Chinese).
- [11] 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.
- Fang L, Shi W Z, Diao Y D, *et al.* Effect of freezing methods on the taste components in different parts of grass carp meat[J]. *Food Science*, 2018, 39(12): 199-204(in Chinese).
- [12] Chen D W, Zhang M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(3): 1200-1205.
- [13] 张苏平, 邱伟强, 卢祺, 等. 全自动氨基酸分析仪法测定4种贝类肌肉中谷胱甘肽和游离氨基酸含量[J]. *食品科学*, 2017, 38(4): 170-176.
- Zhang S P, Qiu W Q, Lu Q, *et al.* Determination of glutathione and free amino acids in muscles of four shellfish species by automatic amino acid analyzer[J]. *Food Science*, 2017, 38(4): 170-176(in Chinese).
- [14] 陈剑岚, 陈舜胜, 施文正, 等. 大小草鱼肉呈味水溶性成分的比较[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(1): 213-217.
- Chen J L, Chen S S, Shi W Z, *et al.* Study of water-soluble flavor components in fish meat of different size of grass carp[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(1): 213-217(in Chinese).
- [15] 崔桂友. 呈味核苷酸及其在食品调味中的应用[J]. *中国调味品*, 2001(10): 25-29, 32.
- Cui G Y. Flavor nucleotides and their usage in food[J]. *Chinese Condiment*, 2001(10): 25-29, 32(in Chinese).
- [16] 邱霞琴, 岳都盛. HPLC法分析加热对草鱼红肉中滋味物质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(2): 90-93.
- Qiu X Q, Yue D S. Study on the effects of heating on the flavor substances in the red meat of grass carp by HPLC[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(2): 90-93(in Chinese).
- [17] 王妍. 料酒的调味增香机理[J]. *中国调味品*, 2005(7): 32-34.
- Wang Y. The mechanism of cooking wine enhance the flavor of food[J]. *China Condiment*, 2005(7): 32-34(in Chinese).
- [18] 杜琨, 张亚宁, 方多. 呈味核苷酸及其在食品中的应用[J]. *中国酿造*, 2005(10): 50-52.
- Du K, Zhang Y N, Fang D. Flavor nucleotides and their application in food[J]. *China Brewing*, 2005(10): 50-52(in Chinese).
- [19] Qiu W Q, Chen S S, Xie J, *et al.* Analysis of 10 nucleotides and related compounds in *Litopenaeus vannamei* during chilled storage by HPLC-DAD[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 67: 187-193.
- [20] 周芳伊, 张泓, 黄峰, 等. 肉制品风味物质研究与分析进展[J]. *肉类研究*, 2015, 29(7): 34-37.
- Zhou F Y, Zhang H, Huang F, *et al.* Advances in research and analysis of flavor compounds in meat products[J]. *Meat Research*, 2015, 29(7): 34-37(in Chinese).
- [21] Cordoba J J, Antequera T, Garcia C, *et al.* Evolution of free amino acids and amines during ripening of Iberian cured ham[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1994, 42(10): 2296-2301.
- [22] Selli S, Cayhan G G. Analysis of volatile compounds of wild gilthead sea bream (*Sparus aurata*) by simultaneous distillation-extraction (SDE) and GC-MS[J]. *Microchemical Journal*, 2009, 93(2): 232-235.

- [23] Shahidi F, Botta J R. Seafoods: chemistry, processing technology and quality[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1994.
- [24] Min D B, Lee H O. Chemistry of lipid oxidation[M]// Teranishi R, Wick E L, Hornstein I. Flavor chemistry. Boston, MA: Springer, 1999: 175-187.
- [25] 王霞, 黄健, 侯云丹, 等. 电子鼻结合气相色谱-质谱联用技术分析黄鳍金枪鱼肉的挥发性成分[J]. 食品科学, 2012, 33(12): 268-272.
- Wang X, Huang J, Hou Y D, *et al.* Analysis of volatile components in yellowfin tuna by electronic nose and GC-MS[J]. Food Science, 2012, 33(12): 268-272(in Chinese).
- [26] 吴燕燕, 王悦齐, 李来好, 等. 基于电子鼻与HS-SPME-GC-MS技术分析不同处理方式腌干带鱼挥发性风味成分[J]. 水产学报, 2016, 40(12): 1931-1940.
- Wu Y Y, Wang Y Q, Li L H, *et al.* Analysis of volatile components in various cured hairtail by electronic nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(12): 1931-1940(in Chinese).
- [27] 伍瑞祥, 吴涛. 淡水鱼土腥物质及脱腥技术研究进展[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(10): 253-256.
- Wu R X, Wu T. Advances in research on groundy components and deodorization techniques in freshwater fish[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2011, 8(10): 253-256(in Chinese).
- [28] Özyurt G, Kafkas E, Etyemez M. Effect of the type of frying oil on volatile compounds of goatfish (*Upeneus pori*) during cold storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(12): 2598-2602.
- [29] 田迪英, 焦慧, 陶威, 等. 5种海鱼挥发性风味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(10): 155-159.
- Tian D Y, Jiao H, Tao W, *et al.* Analysis of volatile flavor components of five kinds of marine fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(10): 155-159(in Chinese).
- [30] Chen D W, Zhang M. Analysis of volatile compounds in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2006, 14(3): 297-303.
- [31] Josephson D B, Lindsay R C, Stuiber D A. Identification of compounds characterizing the aroma of fresh whitefish (*Coregonus clupeaformis*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(2): 326-330.
- [32] Ge L H, Xu Y S, Xia W S. The function of endogenous cathepsin in quality deterioration of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets stored in chilling conditions[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(3): 797-803.
- [33] Bartley J P, Jacobs A L. Effects of drying on flavour compounds in Australian-grown ginger (*Zingiber officinale*)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(2): 209-215.
- [34] 李祖光, 高云芳, 刘文涵. 黑胡椒风味成分的研究[J]. 食品科学, 2003, 24(10): 128-131.
- Li Z G, Gao Y F, Liu W H. Study on aroma compounds of the black pepper *Nigrum L.*[J]. Food Science, 2003, 24(10): 128-131(in Chinese).
- [35] Buttery R G, Turnbaugh J G, Ling L C. Contribution of volatiles to rice aroma[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1988, 36(5): 1006-1009.
- [36] Yu X Z, Yang C, Du S K, *et al.* A new method for determining free fatty acid content in edible oils by using electrical conductivity[J]. Food Analytical Methods, 2012, 5(6): 1453-1458.
- [37] Guilhon G M S P, da Silva E S, da Silva S L, *et al.* Volatile and non-volatile compounds and antimicrobial activity of *Mansoa difficilis* (Cham.) Bureau & K. Schum: (Bignoniaceae)[J]. Quimica Nova, 2012, 35(11): 2249-2253.
- [38] 杨荣华, 张国农. 香辛料的香气成分及其在食品中的利用[J]. 中国调味品, 2000(10): 26-28.
- Yang R H, Zhang G N. The component of aroma in spice and its application at food[J]. Chinese Condiment, 2000(10): 26-28(in Chinese).
- [39] 王璐, 王锡昌, 刘源. 草鱼不同部位气味研究[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 158-164.
- Wang L, Wang X C, Liu Y. Comparative analysis of odor and volatile composition of different parts of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) carcass[J]. Food Science, 2010, 31(6): 158-164(in Chinese).
- [40] 崔方超, 李婷婷, 杨兵, 等. 电子鼻结合GC-MS分析草鱼脱腥前后风味变化[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 126-130.
- Cui F C, Li T T, Yang B, *et al.* Flavor compounds of fresh and deodorized grass carps as determined by electronic nose combined with GC-MS[J]. Food Science,

- 2014, 35(20): 126-130(in Chinese).
- [41] 孙宝国. 食用调香术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 25-32.
- Sun B G. Flavoring[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 25-32(in Chinese).
- [42] 张娜. 中华绒螯蟹风味物质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- Zhang N. Study on flavor compounds of Chinese mitten crab[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008(in Chinese).

## Changes of flavor components of *Oreochromis niloticus* during the processing of traditional Shanghai smoked fish

XUE Yongxia<sup>1,2</sup>, WEI Saichao<sup>1</sup>, ZHANG Ju<sup>1</sup>, CHEN Shunsheng<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National R & D Branch Center for Freshwater Aquatic Products Processing Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** To investigate the changes of flavor components of *Oreochromis niloticus* during the processing of Shanghai smoked fish, high performance liquid chromatography (HPLC), amino acid auto-analyzer and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were employed to analyze and identify the flavor components of Shanghai smoked fish in four processing stages (fresh *O. niloticus*, the first pickling, the first pickling followed by frying and Shanghai smoked fish products). The results showed that IMP, as main umami nucleotide, its contents of later stages were significantly higher than that of the earlier stages. Moreover, the contents of free amino acids and taste amino acids had the same trend as the IMP, among them, aspartic acid and glutamic acid had the greatest influence on the flavor of Shanghai smoked fish. In addition, 50, 84, 78 and 82 volatile components were detected in fresh *O. niloticus*, first pickling, first pickling followed by frying and Shanghai smoked fish products respectively, which were mainly composed of aldehydes, ketones, alcohols and hydrocarbons. Therefore, its fishy smell of *O. niloticus* was greatly improved by pickling and frying as they were the main cause of its flavor formation.

**Key words:** *Oreochromis niloticus*; nucleotides; free amino acids; volatile compounds; flavor; processing

**Corresponding author:** CHEN Shunsheng. E-mail: sschen@shou.edu.cn

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (31471685); Knowledge Service Platform Project of Shanghai Universities (ZF1206); Research Project on the Control Method of Characteristic Flavor Stability Based on the Formation Mechanism of Flavor Precursors (2017YFD0400105-02)