

熟制与贮藏对凡纳滨对虾挥发性成分的影响

段秀霞^{1,2}, 施文正^{1,2*}, 汪之和^{1,2}, 王锡昌^{1,2}, 江敏³

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 为研究熟制与贮藏对凡纳滨对虾挥发性成分的影响, 采用电子鼻及固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术分析虾肉的挥发性成分, 并采用相对气味活度值和感官评定法评价虾肉风味的变化。结果显示, 熟制与贮藏对虾肉中的挥发性成分影响显著。凡纳滨对虾生虾、熟虾、熟虾冷却、熟虾冷却过夜及二次熟制虾分别被检出50、68、63、49和41种挥发性成分。二次熟制后, 虾肉中的挥发性成分有所减少, 感官上虾的特征鲜香气也略微减弱; 一次熟制对虾肉的风味影响不大。生虾肉中检测出的挥发性成分如壬醛和癸醛等对风味有显著性影响; 熟虾肉中检测出壬醛、癸醛和十四醛等; 二次熟制的虾肉中检测出对风味影响较大的挥发性成分主要是十八醛、二丁基羟基甲苯等。熟虾经过夜(4℃)放置后, 其中检测出的挥发性成分种类和总量均减少, 但总量差异不显著。研究表明, 熟制可显著增加挥发性风味成分种类和总量, 二次熟制与一次熟制相比, 凡纳滨对虾的关键风味物质种类和含量显著降低; 熟虾冷却后4℃贮藏12 h风味差异不显著。

关键词: 凡纳滨对虾; 熟制; 贮藏; 气相色谱—质谱联用; 挥发性成分; 气味活度值

中图分类号: TS 254.4

文献标志码: A

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)又名“南美白对虾”, 具有肉质鲜美、营养价值高等特点, 是我国重要的虾类养殖对象, 2015年产量为73.15万t^[1-2]。近年来, 针对凡纳滨对虾保鲜方面的研究很多, 如抑制黑变保鲜^[3]、气调保鲜^[4]、可食性涂膜^[5]、防腐保鲜^[6-7]等, 而有关加热温度对凡纳滨对虾虾肉挥发性成分影响的研究较少。

加热熟制是虾类的主要食用方式, 但熟虾隔夜食用、长时间放置后直接食用或再加热, 风味会有一定变化。目前国内外学者^[8-10]一般采用固相顶空微萃取—气相色谱—质谱联用法(HS-SPME-GC-MS)研究食品中的挥发性成分, 并且该方法也是研究水产食品挥发性成分的主要方法。相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)法是目前广泛应用的一种分析食品挥发

性成分的简便方法^[11-12]。本研究在凡纳滨对虾的主要食用方式基础上, 结合电子鼻、SPME-GC-MS、相对活度值法和感官评定方法对熟制与贮藏处理凡纳滨对虾的挥发性成分进行分析, 以期对虾类的安全食用方法提供有价值的参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

鲜活凡纳滨对虾购于上海浦东新区古棕路农贸市场, 平均体质量为(15.5±1.0) g。

1.2 实验仪器与设备

FOX-4000气味指纹分析仪(电子鼻), 法国Alpha M.O.S公司; AUW320电子分析天平, 梅特勒—托利多仪器有限公司; FJ-200高速分散均质

收稿日期: 2017-03-17 修回日期: 2017-05-10

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划(2015BAD17B01); 上海市虾类现代农业产业技术体系建设专项(2014-5); 上海市高校知识服务平台项目(ZF1206)

通信作者: 施文正, E-mail: wzshi@shou.edu.cn

机, 上海标本模型厂; 7890A-5975C GC-MS联用仪, 美国Agilent公司; 手动SPME进样手柄、65 μm 聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)固相微萃取头, 美国Supelco公司; H2050R高速冷冻离心机, 湘仪仪器有限公司。

1.3 实验方法

样品前处理 取鲜活的凡纳滨对虾, 全部活虾分批次进行冰水冷休克, 速冻成单体虾, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏备用。生虾样品: 单体凡纳滨对虾 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 放置1 d后, 流水解冻; 熟虾样品: 生虾样品沸水中保温3 min; 熟虾冷却样品: 生虾样品沸水中保温3 min, 冷却15 min至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 熟虾冷却过夜样品: 熟虾冷却样品 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中放置12 h; 二次熟制虾样品: 熟虾冷却过夜样品沸水中保温3 min。均手工取虾肉。

电子鼻分析 虾肉搅碎后分别与0.18 g/mL NaCl溶液以1:1比例(W/W)混合, 均质后称取2 g匀浆液置于10 mL自动进样瓶中加盖待测, 每组5个平行。

电子鼻参数: 以干燥洁净空气为载气, 流速为150 mL/min; 顶空平衡温度分别为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (生虾、熟虾冷却和熟虾冷却过夜)和 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ (熟虾和二次熟制虾), 顶空平衡时间600 s, 振荡频率500 r/min; 进样体积2500 μL , 注射速率2500 $\mu\text{L/s}$; 数据采集时间120 s, 延滞时间600 s。

挥发性成分测定 SPME条件: 将5组样品虾肉搅碎后分别与0.18 g/mL NaCl溶液以1:1比例(W/W)混合, 均质后称取2 g匀浆液置于20 mL萃取瓶中, 插入已提前老化的萃取头, 分别于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴条件下萃取45 min, 然后进色谱仪解吸5 min, 每组样品3个平行。

GC条件: DB-5MS弹性毛细管柱(60 m $\times$ 0.32 mm, 1 μm), 不分流模式; 程序升温: 柱初温 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持2 min, 以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以 $5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 再以 $8\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升至 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持5 min。载气(He)流量1.0 mL/min。MS条件: 传输线温度 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$, 离子源温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, 四极杆温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电子能量70 eV, 质量扫描范围35~350 m/z。

1.4 相对气味活度值法评价

气味活度值(odoractivity value, OAV)定义为嗅感物质的绝对浓度(C)与相对应的感觉阈值

(T)之比^[11]:

$$OAV = \frac{C}{T} \quad (1)$$

式中, 采用这些化合物的相对百分含量代替其绝对百分含量进行分析。因为所研究样品包含种类较多的挥发性物质, 且本实验只需筛选出所检出化合物中OAV最高(即对样品整体风味贡献最大)的若干种。

相对气味活度值以ROAV评价挥发性成分对样品总体风味的贡献^[14]:

$$ROAV = \frac{C_i \times T_{s \tan}}{C_{s \tan} \times T_i} \times 100 \quad (2)$$

式中, C_i 、 T_i 分别为各挥发性风味成分的相对百分含量(%)及其感觉阈值($\mu\text{g/kg}$); $C_{s \tan}$ 、 $T_{s \tan}$ 分别为对总体风味贡献率最大的成分的相对含量(%)及其感觉阈值($\mu\text{g/kg}$)

其中, $ROAV \geq 1$ 说明该挥发性风味成分为关键风味成分, 对样品总体风味起关键作用; $0.1 \leq ROAV < 1$ 说明该挥发性成分为重要风味成分, 对样品总体风味具有重要作用^[11, 13]。另外, 确定对样品风味起最大贡献组分的 $ROAV_{s \tan}$ 为100, 其他物质的ROAV值按式(2)计算。

1.5 感官评价

由8名熟悉水产品风味的受训人员组成感官评价小组。参考王慧等^[14]和丁浩宸等^[15]感官评价方法, 对5组虾肉的风味以定量描述分析法(QDA)进行感官评价, 具体感官评定标准见表1。统计时去掉1个最高分和1个最低分, 取其平均值对各气味描述的强度进行剖析。

1.6 数据处理

电子鼻数据运用主成分分析法, 获得PCA图; GC-MS数据处理采用Xcalibur软件进行分析; 挥发性成分通过NIST 2008和Wiley 9质谱数据库进行定性分析, 并根据保留时间与相关文献进行比对^[16-17]; 所得数据采用SPSS 21.0软件进行方差分析^[18]; 多重比较采用最小显著差数法(LSD)。

2 结果与分析

2.1 电子鼻实验结果

凡纳滨对虾虾肉挥发性成分电子鼻响应值结果见图1, 传感器P10/1和P40/1的响应值相对较

表 1 凡纳滨对虾感官评分标准

评分指标 scoring index	分值 score				
	1	2	3	4	5
色泽 color	差	较差	一般	较好	好
均一性 homogeneity	差	较差	一般	较好	好
整体气味 whole odor	差	较差	一般	较好	好
虾的特征鲜香气 fresh aroma of shrimp	差	较差	一般	较好	好
腥味 fishy smell	差	较差	一般	较好	好
氨味 ammoniacal smell	差	较差	一般	较好	好
整体滋味 whole taste	差	较差	一般	较好	好
鲜味 umami	差	较差	一般	较好	好
甜味 sweet taste	差	较差	一般	较好	好
苦味 bitter taste	差	较差	一般	较好	好
韧性 tenacity	差	较差	一般	较好	好
粘弹性 viscoelasticity	差	较差	一般	较好	好
喜好性 preference	很不喜欢	不喜欢	一般	喜欢	很喜欢

高, 均超过了0.6, 符合电子鼻响应值的要求。
18根电子鼻金属氧化物传感器对不同条件处理样

品的响应值有所差异, 且各处理组均呈现较好的重复性。其中, LY2/G、LY2/AA、LY2/GH、LY2/gCTL、LY2/gCT这5根传感器的响应值为负值, 其他均为正值, 但它们的绝对值都随加热温度的上升而增加。对于整体传感器的响应值结果而言, 熟虾和二次熟制虾响应值的绝对值相对较大, 生虾响应值的绝对值最小, 且生虾、熟虾冷却及熟虾冷却过夜这3组结果相近。由于传感器响应值和挥发性成分含量成正相关, 说明加热会增加对虾挥发性成分总量; 但不同传感器响应值增加比例不同, 而不同传感器的响应物质也不同, 说明加热对挥发性成分组成有不同影响, 具体挥发性成分的种类和含量需要借助于GC-MS等仪器进行分离鉴定。

以二维散点图显示出的挥发性成分的PCA图中, PC1贡献率为96.160%, PC2贡献率为1.726%, 二者之和为97.886%(图2), 说明主成分反映指标的信息比较完整。PCA分析的判别指数为81, 由此分析, 电子鼻可明显区分不同熟制与贮藏处理的凡纳滨对虾样品。这5组不同样品所在的区域没有互相重叠, 其中生虾、熟虾冷却和熟虾冷却过夜处理的3组样品(35℃)集中分布在PCA图右侧, 熟虾和二次熟制虾2种样品(95℃)集中分布在PCA图左侧, 由于横坐标PC1代表总差异的96.160%, 说明温度对虾肉挥发性成分有明显的影响, 是引起虾肉挥发性成分差异的主要原因。

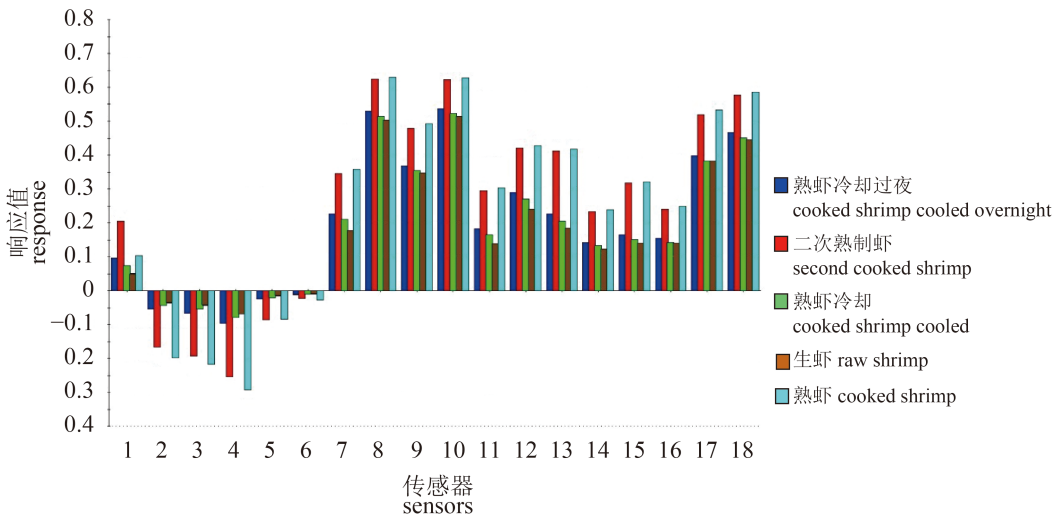


图 1 熟制与贮藏对凡纳滨对虾虾肉挥发性成分影响的响应值

1. LY2/LG, 2. LY2/G, 3. LY2/AA, 4. LY2/GH, 5. LY2/gCTL, 6. LY2/gCT, 7. T30/1, 8. P10/1, 9. P20/2, 10. P40/1, 11. T70/2, 12. PA/2, 13. P30/1, 14. P40/2, 15. P30/2, 16. T40/2, 17. T40/1, 18. TA/2

Fig. 1 Sensor response of E-nose to cooked and stored shrimp meat of *L. vannamei*

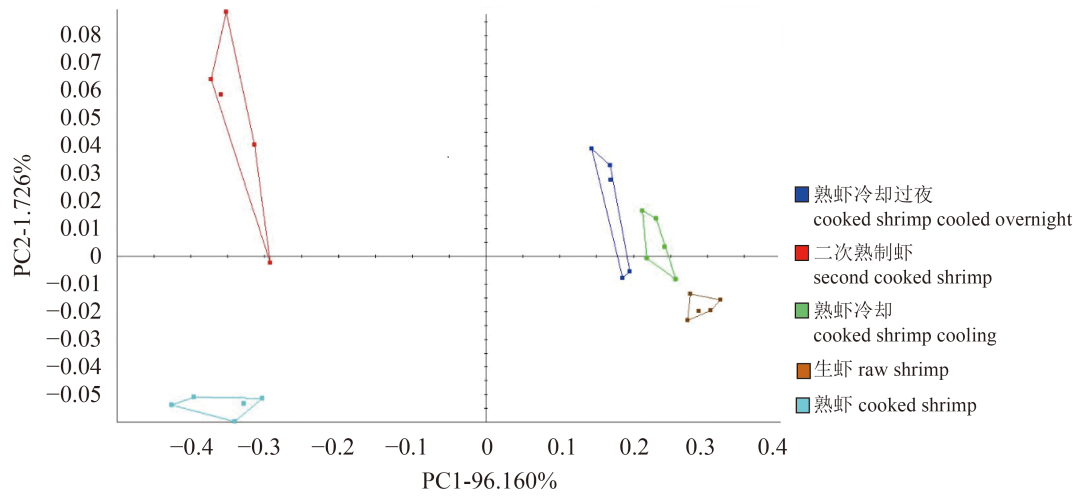


图 2 熟制与贮藏对凡纳滨对虾肉挥发性成分影响的PCA图

Fig. 2 PCA analysis of volatile flavor compounds of cooked and stored shrimp meat of *L. vannamei*

2.2 GC-MS实验结果

5组样品中分别确定出50、63、68、49和41种挥发性成分(表2)。不同处理之间不仅在挥

发性成分种类上有差别, 根据方差分析结果, 大部分挥发性成分含量也差异显著($P<0.05$), 进一步说明熟制与贮藏对凡纳滨对虾的挥发性成分有较大影响, 结果与电子鼻相似。

表 2 熟制与贮藏对凡纳滨对虾肉挥发性成分的影响

Tab. 2 Volatile compounds of cooked and stored shrimp meat of *L. vannamei*

分类 classification	化合物名称 name of compound	阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$) threshold ^[19-22]	相对含量/% relative levels				
			生虾 raw shrimp	熟虾 cooked shrimp	熟虾冷却 cooked shrimp cooled	熟虾冷却过夜 cooked shrimp cooled overnight	二次熟制虾 second cooked shrimp
烷烃类 alkanes	癸烷	—	n.d.	0.01 $\pm$ 0.00	n.d.	n.d.	n.d.
	十二烷	—	1.60 $\pm$ 0.66 ^a	0.03 $\pm$ 0.01 ^{bc}	0.32 $\pm$ 0.20 ^c	0.78 $\pm$ 0.10 ^b	0.14 $\pm$ 0.03 ^c
	十三烷	2140	0.53 $\pm$ 0.01 ^a	0.06 $\pm$ 0.01 ^{bc}	0.28 $\pm$ 0.18 ^b	n.d.	0.62 $\pm$ 0.20 ^a
	3-甲基-十三烷	—	0.36 $\pm$ 0.06 ^b	0.23 $\pm$ 0.01 ^c	0.15 $\pm$ 0.01 ^d	n.d.	0.96 $\pm$ 0.04 ^a
	十四烷	1000	0.31 $\pm$ 0.09 ^b	0.48 $\pm$ 0.14 ^b	0.83 $\pm$ 0.06 ^b	2.69 $\pm$ 1.04 ^a	0.61 $\pm$ 0.19 ^b
	2,6,10-三甲基-十二烷	—	0.21 $\pm$ 0.12 ^b	n.d.	1.62 $\pm$ 0.68 ^a	0.26 $\pm$ 0.04 ^b	n.d.
	十五烷	—	0.82 $\pm$ 0.34 ^b	0.69 $\pm$ 0.21 ^b	0.79 $\pm$ 0.06 ^b	1.01 $\pm$ 0.17 ^b	3.2 $\pm$ 1.55 ^a
	3-甲基-十五烷	—	n.d.	n.d.	n.d.	0.45 $\pm$ 0.01	n.d.
	十六烷	—	0.26 $\pm$ 0.19 ^d	3.14 $\pm$ 0.44 ^a	1.56 $\pm$ 0.09 ^b	1.88 $\pm$ 0.06 ^b	0.80 $\pm$ 0.46 ^c
	十七烷	—	7.33 $\pm$ 4.40 ^a	1.52 $\pm$ 0.11 ^b	1.42 $\pm$ 0.05 ^b	1.79 $\pm$ 0.14 ^b	1.79 $\pm$ 0.05 ^b
	2,6,10-三甲基-十四烷	—	1.50 $\pm$ 0.81 ^a	0.11 $\pm$ 0.02 ^b	0.13 $\pm$ 0.01 ^b	0.25 $\pm$ 0.03 ^b	0.72 $\pm$ 0.67 ^{ab}
	十八烷	—	2.14 $\pm$ 1.41 ^a	2.29 $\pm$ 0.46 ^a	2.24 $\pm$ 0.58 ^a	n.d.	2.93 $\pm$ 0.16 ^a
	6-甲基-十八烷	—	0.31 $\pm$ 0.12 ^c	0.06 $\pm$ 0.03 ^c	0.20 $\pm$ 0.05 ^c	0.98 $\pm$ 0.36 ^b	1.57 $\pm$ 0.25 ^a
	十九烷	—	3.00 $\pm$ 0.80 ^a	1.05 $\pm$ 0.85 ^b	0.81 $\pm$ 0.27 ^b	2.48 $\pm$ 0.14 ^a	2.40 $\pm$ 0.54 ^a
	2,6,10,14-四甲基-十六烷	—	n.d.	n.d.	11.23 $\pm$ 0.02 ^a	6.28 $\pm$ 0.76 ^b	n.d.
	10-甲基-十九烷	—	0.24 $\pm$ 0.15 ^a	n.d.	0.14 $\pm$ 0.04 ^a	n.d.	n.d.

· 续表2 ·

分类 classification	化合物名称 name of compound	阈值/($\mu\text{g/kg}$) threshold ^[19-22]	相对含量/% relative levels				
			生虾 raw shrimp	熟虾 cooked shrimp	熟虾冷却 cooked shrimp cooled	熟虾冷却过夜 cooked shrimp cooled overnight	二次熟制虾 second cooked shrimp
烯烃类 olefins	二十烷	—	1.59±0.48 ^b	3.80±1.23 ^a	3.12±0.17 ^a	n.d.	3.44±0.41 ^a
	1,1'-氧双-癸烷	—	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.63±0.21
	10-甲基-二十烷	—	n.d.	0.18±0.13 ^b	n.d.	0.57±0.36 ^a	n.d.
	二十一烷	—	4.38±1.94 ^a	1.83±0.24 ^b	1.55±0.67 ^{bc}	n.d.	3.07±0.50 ^{ab}
	二十七烷	—	2.28±0.63 ^{ab}	4.12±0.54 ^a	0.95±0.66 ^b	1.66±0.39 ^b	3.90±2.05 ^a
	二十八烷	—	n.d.	1.77±0.43 ^b	n.d.	n.d.	4.02±0.99 ^a
	二十九烷	—	n.d.	1.67±0.31	n.d.	n.d.	n.d.
	小计		26.86	23.03	27.32	21.09	33.54
	柠檬烯	10	1.40±0.48 ^a	n.d.	0.64±0.10 ^b	n.d.	n.d.
	1-甲基-环十二碳烯	—	n.d.	n.d.	5.28±0.28 ^a	n.d.	3.51±0.92 ^b
	柏木烯=雪松烯	—	1.00±0.05 ^a	0.26±0.02 ^c	0.57±0.08 ^b	0.53±0.12 ^b	n.d.
	1-环己基壬烯	—	n.d.	1.64±0.03 ^a	0.99±0.01 ^b	0.10±0.06 ^c	n.d.
	(Z)-7-十六碳烯	—	0.53±0.01 ^a	0.06±0.01 ^b	0.15±0.02 ^b	0.53±0.18 ^a	0.14±0.03 ^b
	(Z)-14-甲基-8-十六碳烯	—	n.d.	0.76±0.02 ^b	n.d.	n.d.	3.22±1.16 ^a
醇类 alcohols	小计		2.93	2.71	7.64	1.16	6.87
	庚醇	—	n.d.	n.d.	0.96±0.2 ^b	2.10±0.79 ^a	n.d.
	辛醇	—	n.d.	n.d.	n.d.	1.59±1.38 ^a	1.01±0.23 ^{ab}
	2-乙基-1-己醇	27 000	n.d.	0.07±0.03 ^b	n.d.	4.39±0.21 ^a	n.d.
	3-壬烯-2-醇	1	n.d.	n.d.	0.92±0.02	n.d.	n.d.
	4-环辛烯-1-甲醇	—	0.14±0.05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	2-己基-1-辛醇	—	n.d.	n.d.	0.29±0.01	n.d.	n.d.
	4-甲基-1-辛烯-3-醇	—	n.d.	n.d.	0.05±0.01	n.d.	n.d.
	异松蒎醇	—	1.06±0.49 ^a	0.02±0.01 ^b	1.39±0.72 ^a	n.d.	n.d.
	(E)-2-癸烯-1-醇	—	4.74±0.93 ^a	n.d.	0.25±0.09 ^b	n.d.	n.d.
	1-癸醇	—	n.d.	n.d.	n.d.	0.67±0.36	n.d.
	2-丙基-1-庚醇	—	0.11±0.11 ^a	n.d.	0.06±0.00 ^{ab}	n.d.	n.d.
	十二烷醇	—	0.41±0.28 ^a	0.16±0.02 ^b	0.21±0.02 ^{ab}	n.d.	n.d.
	十三烷醇	—	n.d.	0.02±0.01	n.d.	n.d.	n.d.
	雪松醇	—	2.01±0.29 ^{ab}	2.35±0.39 ^a	0.80±0.27 ^c	1.52±0.56 ^b	n.d.
	3,7,11-三甲基-十二醇	—	0.47±0.12 ^a	0.49±0.38 ^a	0.23±0.12 ^a	0.28±0.02 ^a	0.45±0.16 ^a
	十五醇	—	n.d.	0.04±0.01 ^{ab}	0.21±0.21 ^{ab}	0.27±0.19 ^a	0.10±0.08 ^{ab}
	十六醇	—	n.d.	0.50±0.11 ^a	0.25±0.07 ^b	n.d.	n.d.
	2-己基-1-癸醇	—	0.51±0.32 ^a	n.d.	0.26±0.01 ^{ab}	n.d.	n.d.
	2-甲基-1-十六烷醇	—	9.15±0.74 ^a	0.66±0.58 ^c	0±0.00	n.d.	2.64±1.02 ^b

· 续表2 ·

分类 classification	化合物名称 name of compound	阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$) threshold ^[19-22]	相对含量/% relative levels				
			生虾 raw shrimp	熟虾 cooked shrimp	熟虾冷却 cooked shrimp cooled	熟虾冷却过夜 cooked shrimp cooled overnight	二次熟制虾 second cooked shrimp
醛类 aldehydes	1-十九醇	—	0.33±0.02 ^a	n.d.	0.14±0.09 ^b	0.28±0.01 ^a	n.d.
	1-二十烷醇	—	1.76±0.72 ^a	n.d.	0.72±0.16 ^b	0.85±0.00 ^b	0.40±0.04 ^{bc}
	2-(十八烷氧基)-乙醇	—	n.d.	1.29±0.06 ^b	n.d.	12.85±2.79 ^a	1.91±0.31 ^b
	1-二十二烷醇	—	n.d.	0.23±0.06 ^b	n.d.	n.d.	1.09±0.14 ^a
	1-二十七烷醇	—	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.50±0.17
	小计		20.69	5.81	6.73	24.78	8.11
	己醛	4.5	n.d.	2.42±0.38 ^a	n.d.	3.12±0.99 ^a	n.d.
	苯乙醛	4	n.d.	0.22±0.17	n.d.	n.d.	n.d.
	壬醛	1	5.42±0.16 ^a	0.26±0.03 ^b	2.48±0.53 ^b	6.94±2.60 ^a	0.79±0.56 ^b
	(E)-2-癸烯醛	0.30	1.41±0.55 ^a	n.d.	1.21±0.04 ^a	n.d.	n.d.
	癸醛	0.10	2.15±0.38 ^a	0.14±0.01 ^d	0.88±0.24 ^c	1.44±0.01 ^b	0.58±0.35 ^{cd}
	2-十二烯醛	—	n.d.	0.08±0.06	n.d.	n.d.	n.d.
	十三醛	—	n.d.	n.d.	n.d.	0.54±0.07	n.d.
	十四醛	—	0.80±0.01 ^{ab}	1.63±1.08 ^a	0.18±0.14 ^b	n.d.	n.d.
	8-十八碳烯醛	—	3.97±0.62 ^a	0.15±0.01 ^c	2.25±0.75 ^b	0.2±0.15 ^c	n.d.
	十八醛	—	n.d.	1.89±0.01 ^{ab}	1.52±0.89 ^{bc}	0.73±0.28 ^{cd}	2.61±0.88 ^a
	小计		13.74	6.80	8.52	12.97	3.99
酮类 ketones	6-甲基-5-庚烯-2-酮	50	0.56±0.51 ^{bc}	2.05±0.81 ^a	1.23±0.26 ^b	n.d.	n.d.
	苯乙酮	65	n.d.	0.06±0.01	n.d.	n.d.	n.d.
	2-亚甲基-环十二烷酮	—	0.65±0.00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	2,2,8,8-四甲基-5-壬酮	—	0.27±0.07	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	6,10,14-三甲基-2-十五烷酮	—	n.d.	2.65±0.65	n.d.	n.d.	n.d.
	小计		1.47	4.76	1.23	n.d.	n.d.
芳香族化合物及其他 aromatic compounds and others	9-十六碳烯酸	—	n.d.	0.35±0.10	n.d.	n.d.	n.d.
	油酸	—	n.d.	0.13±0.02 ^b	n.d.	n.d.	n.d.
	(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸	—	n.d.	0.08±0.01	n.d.	n.d.	1.48±0.77 ^a
	22-二十三碳烯酸	—	n.d.	1.74±0.43	n.d.	n.d.	n.d.
	甲氧基苯基-肟	—	4.29±1.25 ^b	0.48±0.48 ^c	3.80±0.04 ^b	12.83±0.59 ^a	n.d.
	对二甲苯	490	n.d.	0.10±0.02 ^c	1.86±0.69 ^b	5.26±1.87 ^a	3.76±2.51 ^b
	萘	60	2.47±0.92 ^a	0.32±0.02 ^{bc}	1.07±0.24 ^b	0.39±0.03 ^{bc}	n.d.
	1,2,4,5-四甲基-苯	—	0.54±0.38 ^b	0.04±0.01 ^b	2.09±1.20 ^a	0.74±0.25 ^b	0.08±0.02 ^c
	1,2,3,4-四甲基-苯	—	1.09±0.70 ^a	0.08±0.02 ^b	0.28±0.10 ^b	n.d.	0.08±0.04 ^b
	1-亚乙基-1H-茚	—	1.20±0.23 ^{ab}	0.01±0.01 ^c	1.48±0.39 ^a	0.69±0.02 ^b	n.d.
	2-甲基萘	4	n.d.	0.67±0.15	n.d.	n.d.	0.68±0.45 ^b

· 续表2 ·

分类 classification	化合物名称 name of compound	阈值/(μg/kg) threshold ^[19-22]	相对含量/% relative levels				
			生虾 raw shrimp	熟虾 cooked shrimp	熟虾冷却 cooked shrimp cooled	熟虾冷却过夜 cooked shrimp cooled overnight	二次熟制虾 second cooked shrimp
	1-甲基萘	14	5.35±4.12 ^a	0.44±0.31 ^b	0.96±0.25 ^b	0.68±0.04 ^b	n.d.
	五甲基-苯	—	1.59±0.37 ^a	n.d.	1.68±0.68 ^a	1.49±0.66 ^a	n.d.
	1,3-二甲基-萘	—	n.d.	0.25±0.03 ^b	0.32±0.10 ^b	1.96±0.74 ^a	n.d.
	2,7-二甲基-萘	—	n.d.	0.27±0.03 ^c	0.37±0.07 ^b	2.18±0.03 ^a	n.d.
	磷酸三丁酯	—	3.92±2.06 ^c	29.15±1.05 ^a	5.02±0.04 ^c	6.32±0.65 ^c	n.d.
	2,6-二-叔丁基-邻-苯醌	—	n.d.	0.53±0.37 ^a	0.11±0.02 ^b	0.19±0.01 ^b	14.40±5.95 ^b
	4,6-二叔丁基甲酚	—	n.d.	2.55±1.06 ^b	5.99±0.59 ^a	1.36±0.32 ^c	n.d.
	丁基化羟基甲苯	—	3.74±0.47 ^{ab}	0.76±0.14 ^c	1.40±0.25 ^c	1.90±0.34 ^b	n.d.
	异戊酸异丙酯	—	n.d.	0.11±0.03 ^b	n.d.	n.d.	5.06±2.36 ^a
	3,4-二乙基-1,1'-联苯	—	n.d.	0.60±0.07 ^b	0.19±0.07 ^c	1.65±0.11 ^a	0.30±0.00 ^a
	邻苯二甲酸二丁酯	—	n.d.	9.00±0.34 ^a	9.56±0.71 ^a	n.d.	n.d.
	肉豆蔻酸异丙酯	—	2.63±1.02 ^c	6.37±3.95 ^b	10.47±1.14 ^a	1.47±0.20 ^c	8.44±3.67 ^a
	棕榈酸异丙酯	—	4.55±1.28 ^b	n.d.	0.27±0.10 ^c	n.d.	n.d.
	(Z)-9-十八碳烯酸-苯甲酯	—	2.91±1.30 ^a	1.98±0.53 ^{ab}	1.67±0.14 ^{ab}	0.28±0.02 ^b	10.40±0.82 ^a
	异柠檬酸乙酯	—	n.d.	0.97±0.40 ^a	n.d.	0.61±0.28 ^a	3.13±2.57 ^a
	小计		34.29	56.98	48.58	40.00	47.82

注：n.d.表示未检出；—未查到其阈值的相关文献报道；同一行平均数之间不同上标字母表示差异显著($P<0.05$)，下同
Notes: n.d. means the volatile components are undetected; —, the literature that was reported did not find its threshold; values with different letters in the same line means significant difference ($P<0.05$), the same below

熟虾中挥发性成分的有效峰面积最大，其次是二次熟制虾。凡纳滨对虾虾肉在35℃加工条件下的有效峰面积远低于熟虾，而生虾、熟虾冷却和熟虾冷却过夜的峰面积比较接近(图3)，原因是萃取温度升高，虾肉的整体挥发性成分增加。但二次熟制虾肉中的风味物质在加热过程中有所损失，这与电子鼻显示熟虾响应值远高于其他样品处理组的结果相一致。

实验中5组虾肉中检测出的醛酮类物质分别占挥发性物质总相对含量的15.21%、11.56%、9.75%、12.97%和3.99%；醇类物质分别占20.69%、5.81%、6.73%、24.78%、8.11%；烯炔类物质分别占2.93%、2.71%、7.64%、1.16%、6.87%；烷烃类物质分别占26.86%、23.03%、27.32%、21.09%、33.50%；芳香族及其他化合物分别占34.29%、56.98%、48.58%、40.00%、47.82%。结合图3中挥发性成分的有效峰面积进行分析，发现熟虾中检测出的挥发性物质的总含量都是最多的，而二次熟制虾检测出的醇

类、烯炔类和烷烃类物质的相对含量最多。
熟制凡纳滨对虾中检测出一定量的醛酮类

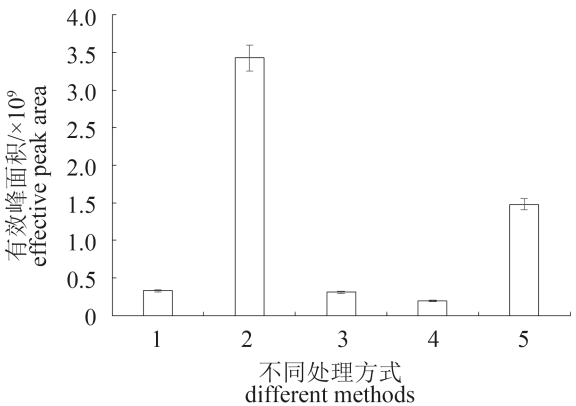


图3 熟制与贮藏对凡纳滨对虾挥发性成分有效峰面积的影响

1. 生虾, 2. 熟虾, 3. 熟虾冷却, 4. 熟虾冷却过夜, 5. 二次熟制虾

Fig. 3 The total areas of volatile components of cooked and stored shrimp meat of *L. vannamei*

1. raw shrimp, 2. cooked shrimp, 3. cooked shrimp cooling, 4. cooked shrimp cooled overnight, 5. second cooked shrimp

物质, 醛类化合物具有气味加和作用^[23], 且阈值较低, 极低浓度时也会对虾肉总体气味存在较大影响。凡纳滨对虾中羰基类化合物相对含量较低(表2), 其中检测出小分子挥发性物质己醛、壬醛和癸醛等, 己醛具有鱼腥味、果味和清香味^[15], 壬醛和癸醛具有绿色植物般的清香^[24]。熟虾肉中检测出苯乙醛, 苯乙醛是一种芳香醛, 具有类似风信子的香气, 稀释后具有水果的甜香气。酮类物质使虾肉具有花香和果香味, 可能是由脂肪氧化或者某些氨基酸分解而得, 其中苯乙酮具有山楂的气味。但杨阳等^[25]研究表明, 凡纳滨对虾只在95 °C下检测出苯甲醛, 呈苦杏仁味; 而本实验检测出的苯乙醛呈蜜香味、芳香味, 推测可能是高温导致多不饱和脂肪酸受热氧化, 降解产生大量不同种类的醛, 它们对虾肉风味的形成有重要作用^[26]。

熟制对虾中还检测出较多醇类物质, 如庚醇、辛醇、2-乙基-1-己醇、3,7,11-三甲基-十二醇等。挥发性醇类物质能产生较为柔和的气味, 与羰基化合物共同对水产品气味有重要贡献^[15]。

对于肉类物质而言, 高温会使肉质发生脂质氧化和蛋白水解, 而脂质氧化是形成醛、酮、醇等挥发性物质的主要途径之一^[27]。

与醛、酮和醇类物质相比, 烷烃类物质赋予虾肉清甜香的风味^[8], 烯烃类中有柠檬烯等, 柠檬烯具有柑橘味; 芳香族类阈值较高, 低浓度时对风味贡献较小, 但从凡纳滨对虾中检测出的相对含量较高, 因此对其风味起有一定的影响。

2.3 熟制对凡纳滨对虾挥发性成分的ROAV分析

经查阅大量相关文献, 得知一些挥发性风味物质的感觉阈值, 结合其相对含量计算ROAV(表3)。一些小分子醛类的阈值较低, 相对含量较高, 计算出的ROAV较大。其中, 癸醛在所有熟制与贮藏处理中的ROAV均最大, 将其设为100, 计算其他挥发性成分相对于癸醛的百分含量。而十三烷、十四烷和2-乙基-1-己醇的阈值较高, 相对含量较低, 所计算出的ROAV很小, 在表3中显示为0.00, 表示其对凡纳滨对虾的风味贡献很小。

表3 凡纳滨对虾挥发性成分的ROAV值比较

Tab. 3 Comparison of ROAV values of volatile components in *L. vannamei*

化合物名称 name of compounds	生虾 raw shrimp	熟虾 cooked shrimp	熟虾冷却 cooked shrimp cooled	熟虾冷却过夜 cooked shrimp cooled overnight	二次熟制虾 second cooked shrimp
十三烷 tridecane	0.00	0.00	0.00	—	0.00
十四烷 tetradecane	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01
柠檬烯 limonene	0.65	—	0.73	—	—
2-乙基-1-己醇 2-ethyl-1-hexanol	—	0.00	—	0.00	—
3-壬烯-2-醇 3-nonen-2-ol	—	—	10.45	—	—
己醛 hexanaldehyde	—	38.41	—	4.81	—
苯乙醛 phenylacetaldehyde	—	3.93	—	—	—
壬醛 nonanal	25.21	18.57	28.18	48.19	13.62
(E)-2-癸烯醛 (E)-2-decenal	21.86	—	45.83	—	—
癸醛 decanal	100	100	100	100	100
6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-methyl-5-hepten-2-one	0.05	2.93	0.28	—	—
苯乙酮 acetophenone	—	0.07	—	—	—
对二甲苯 p-xylene	—	0.01	0.04	0.07	0.13
萘 naphthalene	0.19	0.38	0.2	0.05	—
2-甲基萘 2-methylnaphthalene	—	11.96	—	—	—
1-甲基萘 1-methylnaphthalene	1.78	2.24	0.78	0.34	—

注: —, 未检出; 0.00表示检测到该物质的含量ROAV值小于0.01

Notes: —, the volatile components are undetected; 0.00 indicates that the ROAV value of the substance is less than 0.01

在凡纳滨对虾虾肉中, 挥发性成分中的关键物质是柠檬烯、3-壬烯-2-醇、己醛、苯乙醛、壬醛、(E)-2-癸烯醛、癸醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、苯乙酮、对二甲苯、萘、2-甲基萘、1-甲基萘, 它们对虾肉的风味有一定的修饰作用(表3)。经熟制处理后的虾肉新检出3-壬烯-2-醇、己醛和对二甲苯。熟虾中检出的关键风味物质最多, 但二次熟制虾中的很多关键风味物质未检出, 可

能是由于熟制过程中很多风味物质受热挥发。

2.4 熟制凡纳滨对虾的感官评定

从熟制凡纳滨对虾的色泽、均一性、整体气味、滋味、质构及喜好性等方面进行感官评分。结果显示, 熟制与贮藏凡纳滨对虾的感官评分结果存在显著性差异($P<0.05$)(表4)。生虾的感官评分显著较低, 而熟虾的显著较高。

表 4 熟制与贮藏对凡纳滨对虾感官评定的影响

Tab. 4 Effects of cooking and storage on the sensory evaluation of *L. vannamei*

感官指标 sensory index	生虾 raw shrimp	熟虾 cooked shrimp	熟虾冷却 cooked shrimp cooled	熟虾冷却过夜 cooked shrimp cooled overnight	二次熟制虾 second cooked shrimp
色泽 color	2.00±0.63 ^c	4.00±0.63 ^a	4.33±0.52 ^a	4.17±0.98 ^a	3.50±0.55 ^b
均一性 homogeneity	3.17±0.41 ^a	3.33±0.82 ^a	3.83±0.75 ^a	4.17±0.41 ^a	3.50±0.84 ^a
整体气味 whole odor	1.67±0.52 ^c	3.83±0.75 ^a	2.67±1.03 ^b	3.83±0.41 ^a	3.17±0.41 ^{ab}
虾的特征鲜香气 features fresh aroma of shrimp	1.33±1.21 ^c	3.83±0.75 ^a	2.50±1.05 ^b	3.33±0.52 ^{ab}	3.00±0.89 ^{ab}
腥味 fishy smell	1.67±0.82 ^c	2.83±0.98 ^b	2.83±1.17 ^b	3.33±1.37 ^a	3.33±0.52 ^a
氨味 ammoniacal smell	1.33±0.52 ^b	2.17±1.17 ^a	2.83±1.17 ^a	2.17±1.17 ^a	2.33±1.21 ^a
整体滋味 whole taste	1.50±0.55 ^c	3.00±0.89 ^b	2.50±1.05 ^{bc}	3.83±0.41 ^{ab}	4.50±0.55 ^a
鲜味 umami	1.17±0.98 ^c	2.67±0.82 ^b	2.50±1.05 ^b	3.50±0.55 ^{ab}	3.83±1.17 ^a
甜味 sweet taste	1.67±0.82 ^{bc}	2.00±1.27 ^b	3.67±1.37 ^a	2.50±1.38 ^{ab}	2.00±1.10 ^b
苦味 bitter taste	1.17±0.41 ^a	1.17±0.41 ^a	1.67±1.21 ^a	1.33±0.82 ^a	1.17±0.41 ^a
韧性 tenacity	1.50±0.55 ^c	2.50±1.23 ^b	3.00±1.10 ^b	4.17±0.41 ^a	4.17±0.98 ^a
粘弹性 viscoelasticity	2.00±0.63 ^c	3.50±0.55 ^{ab}	3.00±0.63 ^b	4.17±0.75 ^a	3.83±0.75 ^{ab}
喜好性 preference	1.17±0.41 ^b	3.17±0.98 ^a	3.50±0.84 ^a	3.83±0.75 ^a	3.33±1.51 ^a

凡纳滨对虾由生到熟, 其特征鲜香气、鲜味、甜味等感官评分都显著升高, 这与GC-MS测得的熟虾关键挥发性物质含量高于生虾的结果一致。和二次熟制虾相比, 熟虾中的关键风味物质己醛、苯乙醛和壬醛等含量较高, 二次熟制虾的整体气味和虾的特征鲜香气感官评分较低, 在二次熟制虾中没有检测出己醛和苯乙醛等物质, 这可能是二者风味有差别的主要原因。熟制冷却后一些风味物质会有所损失, 虾的特征鲜香气评分有所降低, 熟虾冷却过夜之后一些整体气味滋味的感官评分有所提升, 同时冷却过夜后虾肉中的己醛、壬醛和癸醛的含量相对升高, 可能是这些醛类成分发挥了作用, 具体原因有待进一步研究。

熟虾的整体气味和虾的特征鲜香气最强,

二次熟制虾的腥味最强(图4-a), 因此, 熟制处理对凡纳滨对虾的风味影响有显著性差异, 这与电子鼻的检测结果相似。生虾与熟虾的整体滋味差异显著, 熟虾与二次熟制虾在滋味和鲜味方面存在显著性差异; 二次熟制虾的滋味和鲜度最强而熟虾冷却的甜味最强(图4-b), 这可能是因为二次熟制能够使虾体内的滋味物质充分呈现, 而甜味物质因二次熟制发生部分溶解。熟虾冷却和熟虾冷却过夜大部分感官指标差异不显著, 说明贮藏12 h对熟虾风味影响较小。

3 结论

本研究对不同熟制和贮藏处理的凡纳滨对虾虾肉的挥发性成分的影响进行了分析。结果表明, 电子鼻可明显区分不同熟制与贮藏处理



图 4 熟制与贮藏凡纳滨对虾气味(a)、滋味(b)组成的雷达图

Fig. 4 Radar maps of odor (a) and taste (b) of cooked and stored shrimp of *L. vannamei*

的凡纳滨对虾虾肉样品。经过HS-SPME-GC-MS检测, 凡纳滨对虾生虾肉、熟虾肉、熟虾冷却虾肉、熟虾冷却过夜虾肉及二次熟制虾肉分别确定出50、68、63、49和41种挥发性成分。熟虾肉与生虾肉相比, 其挥发性成分的种类显著增多; 熟虾肉和熟虾冷却虾肉中挥发性物质种类相近, 而二次熟制虾肉中的种类最少, 这与电子鼻检测结果基本一致; 结合挥发性成分的有效峰面积结果进行分析, 熟虾肉中挥发性成分的有效峰面积最大, 且其种类和含量也是最多的。

综合ROAV和感官评定分析, 熟制对虾肉风味影响显著, 熟虾肉中关键风味成分最多, 含量最高, 二次熟制虾肉中关键风味成分的种类和含量与其他熟制处理的虾肉组相比都有所降低; 生虾第一次熟制时的风味最好, 二次熟制虾特征鲜香气略微减弱; 熟虾冷却在冰箱(4℃)中放置一夜后风味有所损失, 但差异不显著; 二次熟制虾肉的整体滋味和鲜味显著高于其他虾肉, 熟虾冷却虾肉的甜味比较突出。研究结果对虾类的安全食用具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴2016[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
Ministry of Agriculture Fisheries Bureau. Fisheries Statistics Yearbook of China 2016[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016 (in Chinese).
- [2] 张高静, 韩丽萍, 孙剑锋, 等. 南美白对虾营养成分分析与评价[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 254-260.
Zhang G J, Han L P, Sun J F, et al. Analysis and evaluation of nutritive composition in *Penaeus vannamei*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(8): 254-260(in Chinese).
- [3] 陈杭君. 南美白对虾抗黑变保鲜技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
Chen H J. Studies on anti-browning and preservative technologies of prawn (*Penaeus vannamei*)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008 (in Chinese).
- [4] 凌萍华. 冰温、气调包装和保鲜剂在南美白对虾保鲜上的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
Ling P H. Application of super-chilling, modified atmosphere packaging and fresh-keeping agents on preservation of pacific white shrimp[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011 (in Chinese).
- [5] 齐自元, 汪之和, 施文正. 可食性涂膜对南美白对虾微冻冷藏的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 261-264.
Qi Z Y, Wang Z H, Shi W Z. Effect of edible coating on fresh-keeping of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during partially frozen storage[J]. Food Science, 2012, 33(18): 261-264(in Chinese).
- [6] 王凌燕. 南美白对虾腐败微生物分析与防黑变保鲜技术研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2012.
Wang L Y. Microbial Analysis and Anti-blackening and fresh-keeping Technology of *L. Vannamei*[D]. Qingdao: Qingdao University, 2012 (in Chinese).
- [7] 田凤. 冷藏南美白对虾生物防腐保鲜技术的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
Tian F. Study on biological preservation technology of refrigerated *Penaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013 (in Chinese).
- [8] 杨阳, 施文正, 汪之和, 等. 超高压对南美白对虾熟制虾仁风味的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(18): 87-92.

- Yang Y, Shi W Z, Wang Z H, *et al.* Effect of ultra-high pressure on the flavor of cooked white shrimp meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(18): 87-92(in Chinese).
- [9] 蔺佳良, 蔡江佳, 何红萍, 等. 两种海洋甲壳动物挥发性物质的研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(9): 240-249.
- Lin J L, Cai J J, He H P, *et al.* Studies on volatile substances in two species of marine crustacean[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(9): 240-249(in Chinese).
- [10] Silvia S, Luca M C, Sara P, *et al.* Determination of volatile compounds of precooked prawn (*Penaeus vannamei*) and cultured gilthead sea bream (*Sparus aurata*) stored in ice as possible spoilage markers using solid phase micro-extraction and gas chromatography/mass spectrometry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(3): 436-442.
- [11] 顾赛麒, 陶宁萍, 吴娜, 等. 一种基于ROAV值鉴别蟹类关键特征性风味物的方法[J]. 食品工业科技, 2012, 33(13): 410-416.
- Gu S Q, Tao N P, Wu N, *et al.* A new method based on ROAV value to identify the characteristic key volatile compounds of crab flavor[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(13): 410-416(in Chinese).
- [12] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲, 等. 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, *et al.* “ROAV” method: a new method for determining key odor compounds of Rugao Ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370-374(in Chinese).
- [13] 吕梁玉, 官爱艳, 张单阳, 等. 电子束辐照对带鱼鱼糜及其热诱导凝胶挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 77-83.
- Lü L Y, Guan A Y, Zhang D Y, *et al.* Effects of electron beam irradiation on the volatile flavor components of hairtail surimi and its thermally induced gel[J]. Food Science, 2016, 37(18): 77-83(in Chinese).
- [14] 王慧, 施文正, 吴旭干, 等. 不同温度养殖的雌体三疣梭子蟹性腺和蟹肉风味品质比较[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 84-90.
- Wang H, Shi W Z, Wu X G, *et al.* Comparison of flavor quality in gonads and meat of female *Portunus trituberculatus* cultured at different water temperatures [J]. Food Science, 2016, 37(18): 84-90(in Chinese).
- [15] 丁浩宸, 阮东娜, 江银梅, 等. 高值海水鱼糜熟制后挥发性风味的分析及对比[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(8): 163-169.
- Ding H C, Luan D N, Jiang Y M, *et al.* Analysis and comparison of cooked high-value sea fish surimi volatile flavor[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(8): 163-169(in Chinese).
- [16] 陈万超, 杨焱, 李文, 等. 香菇挥发性成分SPME-GC-MS分析及特征指纹图谱的建立[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(10): 1074-1080.
- Chen W C, Yang Y, Li W, *et al.* Analysis of volatile components in lentinula edodes by SPME-GC-MS and establishment of fingerprint[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(10): 1074-1080(in Chinese).
- [17] 牟穰, 毛健, 孟祥勇, 等. 黄酒酿造过程中真菌群落组成及挥发性风味分析[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(3): 303-309.
- Mou R, Mao J, Meng X Y, *et al.* Analysis of fungi diversity and volatile flavor compounds in chinese rice wine fermentation process[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(3): 303-309(in Chinese).
- [18] 王钦德, 杨坚. 食品试验设计与统计分析[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 84.
- Wang Q D, Yang J. Food Test Design and Statistical Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2010: 84 (in Chinese).
- [19] 顾赛麒, 吴娜, 张晶晶, 等. MMSE-GC-O结合OAV法鉴定蒸制崇明地区中华绒螯蟹中关键气味物质[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(3): 877-888.
- Gu S Q, Wu N, Zhang J J, *et al.* Characterization of key odor compounds in steamed Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) farmed in Chongming region by monolithic material sorptive extraction-gas chromatography-olfactometry and odor activity value methods[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(3): 877-888(in Chinese).
- [20] 许刚, 丁浩宸, 张燕平, 等. 南极磷虾头胸部和腹部挥发性风味成分对比[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 146-149.
- Xu G, Ding H C, Zhang Y P, *et al.* Comparison of volatile flavor compounds in the cephalothorax and abdomen of Antarctic krill[J]. Food Science, 2014,

- 35(22): 146-149(in Chinese).
- [21] 丁浩宸, 李栋芳, 张燕平, 等. 南极磷虾肉糜对海水鱼糜制品挥发性风味成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(2): 53-62.
- Ding H C, Li D F, Zhang Y P, *et al.* Effects of Antarctic krill paste on volatile flavor components of marine surimi seafood[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(2): 53-62(in Chinese).
- [22] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 金华火腿主体风味成分及其确定方法[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(2): 173-176.
- Liu D Y, Zhou G H, Xu X L. Study on key odor compounds of Jinhua Ham[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(2): 173-176(in Chinese).
- [23] 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 lipooxygenase activity of grass carp meat[J]. Food Science, 2016, 37(18): 64-70(in Chinese).
- [24] 王怡娟, 娄永江, 陈梨柯. 养殖美国红鱼鱼肉中挥发性成分的研究[J]. 水产科学, 2009, 28(6): 303-307.
- Wang Y J, Lou Y J, Chen L K. The volatile compounds in muscle of cultivated red drum *Sciaenops ocellatus*[J]. Fisheries Science, 2009, 28(6): 303-307(in Chinese).
- [25] 杨阳, 施文正, 汪之和. 加热温度对南美白对虾挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 126-130.
- Yang Y, Shi W Z, Wang Z H. Effects of heating temperature on the volatile compounds of white shrimp[J]. Food Science, 2015, 36(22): 126-130(in Chinese).
- [26] Lu X, Lee J Y, Gong Z, *et al.* HS-SPME GC/MS characterization of volatiles in raw and dry-roasted almonds (*Prunus dulcis*)[J]. Food Chemistry, 2014, 151: 31-39.
- [27] 马海建, 施文正, 宋洁, 等. 超高压处理对草鱼鱼肉风味物质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(8): 204-212.
- Ma H J, Shi W Z, Song J, *et al.* Effects of ultra-high pressure treatment on flavor substances in grass carp[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(8): 204-212(in Chinese).

Effects of cooking and storage on the volatile compounds of *Litopenaeus vannamei*

DUAN Xiuxia^{1,2}, SHI Wenzheng^{1,2*}, WANG Zhihe^{1,2}, WANG Xichang^{1,2}, JIANG Min³

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China;

3. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To investigate the effects of cooking and storage on the volatile compounds of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*), the electronic nose (E-nose) and headspace solid phase micro-extraction gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) were used to analyze the volatile compounds in shrimp meat. The relative odor activity value (ROAV) and sensory evaluation methods were used to evaluate flavor change of shrimp meat. The results of E-nose showed that the effects of cooked and stored treatments were highly remarkable on the volatile compounds of white shrimp. According to GC-MS analysis, 50, 68, 63, 49 and 41 volatile compounds were detected in shrimp meat with raw shrimp, cooked shrimp, cooked shrimp cooled, cooked shrimp after placing at 4 °C overnight, and twice-cooked shrimp, respectively. After twice-cooking, the key flavor substances were slightly weakened and fresh aroma also decreased slightly in the shrimp meat. However, the first cooked had little effect on shrimp flavor. The raw shrimp meat were detected nonanal and decanal, which had a significant impact on flavor. Cooked shrimp were detected nonanal, decanal, tetradecanal and others. The twice-cooked shrimp meat were detected octadecanal, and butylated hydroxytoluene, which had a greater impact on flavor. The detected types and contents of volatile compounds were reduced in the cooked shrimp after storing, but the total difference was not significant. The results showed that the types and contents of volatile compounds of the twice-cooked shrimp could be significantly increased, and the key flavor kinds and contents of *L. vannamei* were also significantly lower than those first cooked shrimp. The flavor difference of cooked shrimp was not significant at 4 °C for 12 h storage.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; cooked; stored; gas chromatography-mass spectrometry; volatile compounds; odor activity value

Corresponding author: SHI Wenzheng. E-mail: wzshi@shou.edu.cn

Funding projects: National Key Technology R & D Program of China (2015BAD17B01); Shanghai Shrimp Modern Agriculture Industry Technical System Construction Project (2014-5); Knowledge Service Platform Project of Shanghai Universities (ZF1206)