

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2022.02.010

# 基于 HS-SPME-GC-MS 的小龙虾加工水煮液中挥发性风味成分萃取条件优化

Optimization of extraction conditions for volatile flavor compounds  
in crayfish boiled liquid based on HS-SPME-GC-MS

杨祺福<sup>1,2,3,4,5</sup> 徐文思<sup>1,2,3,4,5</sup> 胡思思<sup>1,2,3,4,5</sup> 马嘉晨<sup>1,2,3,4,5</sup> 黄迪<sup>1,2,3,4,5</sup>  
YANG Qi-fu<sup>1,2,3,4,5</sup> XU Wen-si<sup>1,2,3,4,5</sup> HU Si-si<sup>1,2,3,4,5</sup> MA Jia-chen<sup>1,2,3,4,5</sup> HUANG Di<sup>1,2,3,4,5</sup>  
刘丽萍<sup>1,2,3,4,5</sup> 贺江<sup>1,2,3,4,5</sup> 杨品红<sup>1,2,3,4,5</sup> 周顺祥<sup>6</sup>  
LIU Li-ping<sup>1,2,3,4,5</sup> HE Jiang<sup>1,2,3,4,5</sup> YANG Pin-hong<sup>1,2,3,4,5</sup> ZHOU Shun-xiang<sup>6</sup>

(1. 湖南文理学院生命与环境科学学院, 湖南 常德 415000; 2. 水产高效健康生产湖南省协同创新中心, 湖南 常德 415000; 3. 环洞庭湖水产健康养殖及加工湖南省重点实验室, 湖南 常德 415000; 4. 水生动物重要疫病分子免疫技术湖南省重点实验室, 湖南 常德 415000; 5. 常德市农业生物大分子研究中心, 湖南 常德 415000; 6. 顺祥食品有限公司, 湖南 益阳 413200)  
(1. College of Life and Environmental Sciences, Hunan University of Arts and Science, Changde, Hunan 415000, China; 2. Hunan Provincial Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries, Changde, Hunan 415000, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory for Health Aquaculture and Product Processing in Dongting Lake Area, Changde, Hunan 415000, China; 4. Hunan Provincial Key Laboratory for Molecular Immunity Technology of Aquatic Animal Diseases, Changde, Hunan 415000, China; 5. Changde Research Center for Agricultural Biomacromolecule, Changde, Hunan 415000, China; 6. Shunxiang Food Co., Ltd., Yiyang, Hunan 413200, China)

**摘要:**目的:提高小龙虾副产品的产品附加值。方法:以色谱峰个数和峰面积为指标,对平衡时间、氯化钠添加量、萃取时间及萃取温度进行工艺优化,并分析其挥发性风味物质成分。结果:使用 50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头,在平衡时间 0 min、萃取温度 75  $^{\circ}\text{C}$ 、萃取时间 50 min、氯化钠添加量 30% 条件下,小龙虾加工水煮液中可检测出 34 种挥发性风味成分(醇类 5 种,醛类 12 种,烷烃类 5 种,芳香族化合物 5 种,杂环化合物 5 种,

酯类 2 种),总峰面积为  $5.54 \times 10^8$ ,综合得分为 95.47 分,与预测值相比,相对误差为 4.53%。结论:顶空固相微萃取法可萃取出小龙虾加工水煮液中 34 种挥发性风味物质。

**关键词:**顶空固相微萃取;气相色谱—质谱联用;小龙虾;水煮液;挥发性风味物质

**Abstract:** Objective: In order to increase the added value of crayfish by-products. Methods: With chromatographic peaks and peak areas as the inspection indicators, the optimization on equilibrium time, addition of sodium chloride, extraction time and extraction temperature were optimized, and the composition of volatile flavor compounds was analyzed. Results: The optimal extraction conditions were equilibrium time 0 min, extraction temperature 75  $^{\circ}\text{C}$ , extraction time 50 min, addition of sodium chloride 30% with 50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS solid phase microextraction head. Under these conditions, a total of 34 volatile flavor compounds, including 5 alcohols, 12 aldehydes, 5 alkanes, 5 aromatic, 5 heterocyclic compounds and 2 esters, were detected in the crayfish boiled liquid. The total peak area was  $5.54 \times 10^8$ , and the comprehensive score was 95.47. The relative error between

**基金项目:**湖南省教育厅科学研究项目(编号:19C1280, 20C1265);湖南省水产产业技术体系建设项目(编号:湘农发[2019]26号);湖南文理学院大学生创新创业训练计划项目(编号:XDC2021038, XDC2021039);湖南文理学院大学生创新创业研究项目(编号:ZC19078, ZC19079);湖南文理学院博士启动基金(编号:19BSQD05, 19BSQD06);湖南省重点实验室开放课题(编号:2019KJ006, 2019KJ012)

**作者简介:**杨祺福,男,湖南文理学院讲师,博士。

**通信作者:**杨品红(1964—),男,湖南文理学院教授,博士。

E-mail: yph588@163.com

**收稿日期:**2021-07-14

the experimental results and the predicted value was 4.53%. **Conclusion:** The 34 volatile flavor compounds can be extracted from the crayfish boiled liquid by headspace solid phase microextraction.

**Keywords:** headspace solid phase microextraction (HS-SPME); gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); crayfish; boiled liquid; volatile flavor compounds

小龙虾是一种淡水经济虾类,因滋味鲜美广受消费者喜爱。其水煮液是加工过程中的副产物,具有浓郁的小龙虾鲜香味及丰富的营养成分<sup>[1]</sup>,直接排放不仅造成资源浪费,还污染环境。食品风味是衡量食品食用品质的一个重要指标,风味成分种类、含量对食品最终风味的形成起着重要作用,而风味前体物质在加热后发生分解及氧化还原等一系列化学变化,是食品中挥发性风味物质产生的主要途径之一<sup>[2-3]</sup>。食品中风味物质常用的提取方法有顶空固相微萃取法(HS-SPME)、微波辅助萃取法(MAE)和同时蒸馏萃取法(SDE)等<sup>[4]</sup>。HS-SPME多数与气相色谱-质谱技术(GC-MS)联用形成一种快速高效的分析提取技术,具有前处理简单、分析时间短、重复性佳等优点,被广泛应用于食品及农产品检测分析等行业<sup>[5-6]</sup>。该技术检测效果受到多种因素影响,主要有萃取头类型、萃取温度、萃取时间、盐度和平衡时间等<sup>[7]</sup>。研究拟以小龙虾加工水煮液为研究对象,通过单因素结合正交试验优化 HS-SPME-GC-MS 技术检测小龙虾加工水煮液中挥发性风味物质的最佳萃取条件,并分析其挥发性风味物质组成,以期为小龙虾加工水煮液的回收利用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

水煮液:参照文献<sup>[1]</sup>制备;

氯化钠(NaCl):分析纯,湖南汇虹试剂有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

气相色谱-质谱联用仪:7820A GC-5977E MSD 型,美国 Agilent Technologies 公司;

顶空固相微萃取手动进样手柄:SAAB-57330U 型,上海安谱实验科技股份有限公司;

固相微萃取头:SAAB-57328U 型,50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS,上海安谱实验科技股份有限公司;

电子天平:AUX120 型,日本岛津公司;

恒温水浴锅:HH-2 型,上海秋佐科学仪器有限公司;

磁力搅拌器:TALBOYS 7X7 型,美国 Henry Tormenter 公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 固相微萃取头老化 选用 50/30 $\mu\text{m}$ DVB/CAR/

PDMS 固相微萃取头,250  $^{\circ}\text{C}$  的 GC 进样口处老化 20~30 min,直至 GC-MS 测定无干扰峰出现。

#### 1.2.2 顶空固相微萃取 参照文献<sup>[8]</sup>。

1.2.3 GC-MS 分析 参照文献<sup>[9]</sup>,并根据 GC-MS 分析结果中各成分相对保留时间,通过 NIST14.L 质谱库进行检索定性,分析相似指数(SI)  $\geq 80\%$  化合物的检索结果<sup>[10]</sup>。

1.2.4 单因素试验 以挥发性风味物质的峰个数和总峰面积作为指标,分别考察平衡时间(0,5,10,15,20 min)、NaCl 添加量(0%,10%,20%,30%,40%)、萃取时间(20,30,40,50,60 min)和萃取温度(65,70,75,80,85  $^{\circ}\text{C}$ )对小龙虾加工水煮液中挥发性风味物质萃取效果的影响。

1.2.5 正交试验 在单因素试验基础上,以综合评分为标准,设计  $L_9(3^4)$  正交试验表优化 HS-SPME-GC-MS 萃取工艺。

1.2.6 综合评分 参照文献<sup>[10]</sup>,峰个数与总峰面积的权重系数为 0.5,按式(1)计算综合评分。

$$A = \left( \frac{M_i}{M_{\max}} + \frac{N_i}{N_{\max}} \right) \times 0.5 \times 100, \quad (1)$$

式中:

A——综合评分;

$M_i$ ——挥发性风味物质峰个数;

$M_{\max}$ ——挥发性风味物质峰个数最大值;

$N_i$ ——挥发性风味物质总峰面积;

$N_{\max}$ ——挥发性风味物质总峰面积最大值。

### 1.3 数据处理

采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行正交试验设计,所有数据均平行测定 3 次取平均值;采用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计学分析,Tukey 检验, $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

2.1.1 平衡时间 由图 1 可知,当平衡时间  $\leq 20$  min 时,挥发性物质的峰面积无显著变化,但在 15 min 时达最大值;挥发性组分峰个数先略有增加后明显减少,5 min 时峰个数最多。通过综合评分计算,当平衡时间为 5 min 时,挥发性风味物质达到相对平衡状态,有利于萃取头吸附。分子在空气中比在其他介质中扩散快,顶空萃取时很容易达到平衡状态,随着平衡时间的延长,萃取头趋于饱和,会影响其萃取吸附效果,甚至解吸附。故选择 5 min 为最佳平衡时间。

2.1.2 NaCl 添加量 由图 2 可知,随着 NaCl 添加量的增加,挥发性成分的峰面积先显著增大后显著减小,当 NaCl 添加量为 20% 时达最大值;挥发性组分的峰个数先下降后上升再显著减少,当 NaCl 添加量为 20% 时达最高值。适量的盐离子可增加待测组分的离子强度,提高 HS-SPME 分析法的灵敏度,但若 NaCl 添加过量,一些挥

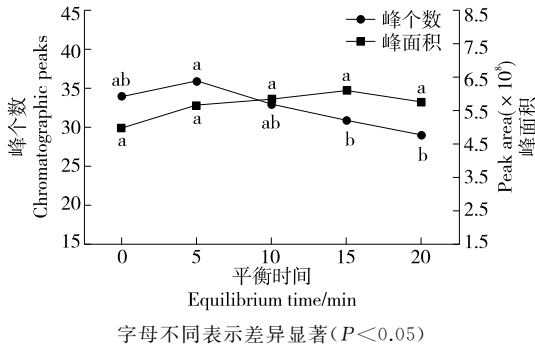


图 1 平衡时间对小龙虾水煮液中挥发性风味成分萃取效果的影响

Figure 1 Effect of equilibrium time on extraction of volatile flavor compounds in crayfish boiled liquid

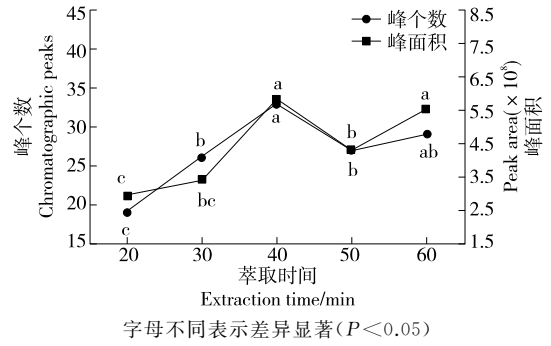


图 3 萃取时间对小龙虾水煮液中挥发性风味成分萃取效果的影响

Figure 3 Effect of extraction time on extraction of volatile flavor compounds in crayfish boiled liquid

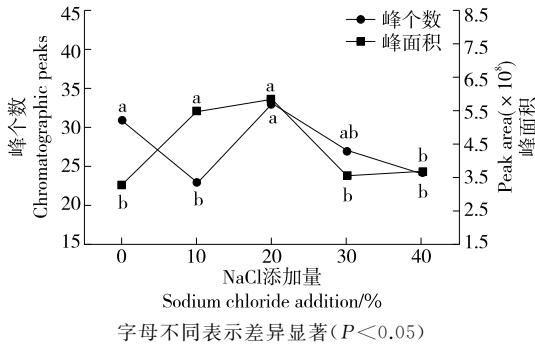


图 2 NaCl 添加量对小龙虾水煮液中挥发性风味成分萃取效果的影响

Figure 2 Effect of sodium chloride addition on extraction of volatile flavor compounds in crayfish boiled liquid

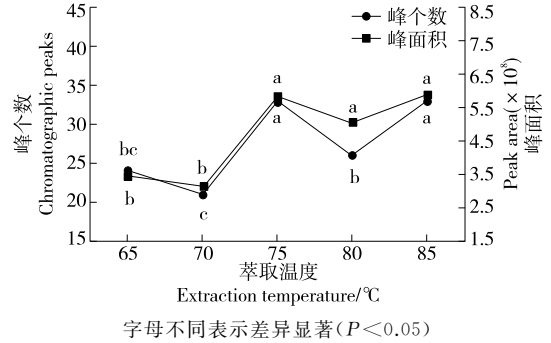


图 4 萃取温度对小龙虾水煮液中挥发性风味成分萃取效果的影响

Figure 4 Effect of extraction temperature on extraction of volatile flavor compounds in crayfish boiled liquid

发性组分的扩散速度可能会因此降低,进而影响基质分子基团之间的相互作用<sup>[9]</sup>。故最佳 NaCl 添加量为 20%。

2.1.3 萃取时间 由图 3 可知,当萃取时间为 20~60 min 时,挥发性成分的峰面积先明显增大后减小,在 40 min 时达最大值;挥发性组分的峰个数先显著增加后略有减少,在 40 min 时达最高值。当萃取时间为 40 min 时,挥发性物质到达平衡状态,萃取头处于饱和。若萃取时间过长,已经被吸附的组分可能出现解吸附现象,反而会降低萃取效果<sup>[11]</sup>。综上,40 min 为最佳萃取时间。

2.1.4 萃取温度 由图 4 可知,当萃取温度为 65~85 °C 时,随着萃取温度的升高,挥发性成分的峰面积先显著增大后无明显变化,在 75 °C 时达最大值;挥发性组分的峰个数先明显增多后显著减少,在 75 °C 时达最高值。当萃取温度为 75 °C 时,一个相对高的温度下,能够加快挥发性组分的运动速率,促进挥发性成分被萃取头富集和吸附,水煮液中绝大部分挥发性物质挥发出来并被吸附,才能达到最佳的萃取效果。萃取温度过高,低沸点组分可能因与高沸点组分的竞争吸附处于劣势而损失,此外,高

温还能使部分挥发性化合物发生变性或裂解<sup>[11]</sup>。综上,75 °C 是一个相对稳定的萃取温度。

2.2 正交试验

结合单因素试验结果,选取平衡时间、NaCl 添加量、萃取时间和萃取温度为试验因素,采用正交试验设计对小龙虾加工水煮液中挥发性风味物质萃取条件进行优化,试验因素水平见表 1,试验设计及结果见表 2,方差显著性分析见表 3。

由表 3 可知,各因素对挥发性风味物质的综合评分影响大小为 A(平衡时间)>D(萃取温度)>C(萃取时

表 1 正交试验因素水平表  
Table 1 Orthogonal design factor level

水平	A 平衡 时间/min	B NaCl 添加量/%	C 萃取 时间/min	D 萃取 温度/°C
1	0	10	30	70
2	5	20	40	75
3	10	30	50	80

表 2  $L_9(3^4)$  正交试验结果

Table 2  $L_9(3^4)$  orthogonal experimental design results

序号	A	B	C	D	峰个数	峰面积 ( $\times 10^8$ )	综合 评分
1	1	1	1	1	28	3.82	72.50
2	1	2	2	2	34	5.28	93.31
3	1	3	3	3	34	5.07	91.56
4	2	1	2	3	28	3.97	73.75
5	2	2	3	1	23	4.28	68.90
6	2	3	1	2	27	3.77	70.61
7	3	1	3	2	30	6.10	94.12
8	3	2	1	3	27	4.26	74.62
9	3	3	2	1	27	4.81	79.15
-----							
$k_1$	85.790	80.123	72.577	73.517			
$k_2$	71.087	78.943	82.070	86.013			
$k_3$	82.630	80.440	84.860	79.977			
R	14.703	1.497	12.283	12.496			

表 3 正交试验方差分析

Table 3 Significant analysis of variance

来源	偏差平方和	自由度	F 值	F 临界值
A	359.422	2	1.699	4.460
B	3.733	2	0.018	4.460
C	248.788	2	1.176	4.460
D	234.340	2	1.108	4.460
-----				
误差	846.280	8		

间) $>$ B(NaCl 添加量)。最佳萃取条件为  $A_1 B_3 C_3 D_2$ , 即平衡时间 0 min、NaCl 添加量 30%、萃取时间 50 min、萃取温度 75  $^{\circ}C$ , 此时综合得分为 95.47, 与预测值相对误差为 4.53%。采用方差分析和显著性检验( $F$  检验)进一步分析<sup>[12]</sup>, 各因素的  $F$  值均未超过临界值  $F_{0.05}$  (4.46), 即在 5% 的置信区间内, 各因素的交互作用无显著影响,  $F$  值检验灵敏度相对较低, 可能是由误差自由度较小导致的。

### 2.3 小龙虾水煮液中挥发性风味物质分析

小龙虾水煮液中挥发性风味物质的总离子流图如图 5 所示, 挥发性风味物质成分及相对含量见表 4。

2.3.1 醛类和芳香族化合物 由表 4 可知, 小龙虾水煮液中共检出 12 种醛类化合物, 其相对含量占总挥发性风味成分的 33.78%, 芳香族化合物 5 种, 占 37.34%。其中苯甲醛和己醛的相对含量最高, 分别达 13.47%, 12.05%, 呈杏仁香、坚果香、水果香以及油脂、青草味<sup>[15-16]</sup>, 是小龙虾加工水煮液中重要的风味贡献物质。其他有风味贡献的醛类及芳香族化合物依次是苯乙醛(8.31%)、庚醛(6.39%)、壬醛(3.31%)、辛醛(1.69%)、癸醛(1.37%)、戊醛(0.71%)、反-2-壬烯醛(0.58%)、2-甲基-2-辛烯醛(0.33%)和( $E$ )-2-癸烯醛(0.24%), 基本呈油脂香和果香, 是小龙虾水煮液中主要的风味成分。水煮液中检出的芳香族化合物的相对含量最高, 近 40%, 主要呈清香、果香和木香, 对丰富小龙虾水煮液的风味起重要作用。

2.3.2 醇类和杂环化合物 水煮液中检出醇类化合物 5 种, 占 10.96%, 其中 5-甲基-2-(1-甲基乙基)-环己醇的相对含量最高(4.79%), 其次是 2-乙基己醇(2.04%), 且呈脂香、玫瑰香味<sup>[15-16]</sup>。对小龙虾水煮液风味贡献的其他醇类成分较少, 而烯、酮、酚类等杂环化合物有 5 种, 占 11.01%。其中, ( $E$ )-6, 10-二甲基-5, 9-十一烷二烯-2-酮也称丙酮香叶酯, 具有清香、果香、木香<sup>[14]</sup>。醇类和杂环化合物对小龙虾水煮液的风味有一定的贡献作用。

2.3.3 烃类和酯类化合物 烃类物质一般无特殊香味, 主要是由脂肪酸烷氧自由基均裂产生, 一般会有所谓的烷烃气味<sup>[18]</sup>。水煮液中共检出烷烃类化合物 5 种, 占 3.34%。其中十二烷的相对含量最高(1.15%), 其次是十三烷(0.83%)。烃类物质是肉类风味组分中杂环化合物的重要中间体, 但其对小龙虾水煮液风味的贡献作用较小。而酯类化合物主要由酸和醇之间发生的酯化反应生成<sup>[19]</sup>。小龙虾水煮液中仅检出 2 种酯类化合物, 即邻苯二甲酸丁基环己酯和乙酸乙酯, 其相对含量为 3.57%。虽然酯类种类和含量较少, 但一些杂环化合物也可以归

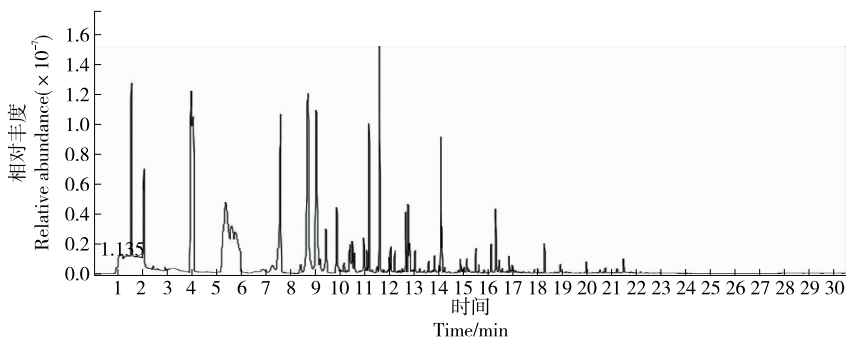


图 5 HS-SPME 萃取小龙虾水煮液挥发性风味物质 GC-MS 总离子流图

Figure 5 GC-MS total ion chromatogram of volatile flavor compounds extracted from crayfish boiled liquid by HS-SPME

表 4 小龙虾水煮液中挥发性风味成分<sup>†</sup>  
Table 4 Volatile flavor components in crayfish boiled liquid

种类	化合物名称	保留时间/min	气味描述 <sup>[13-17]</sup>	相对含量/%
醇类	甲基乙二醇	1.541	/	2.61
	2-乙基己醇	9.811	脂香、玫瑰香味	2.04
	二甲基乙二醇	10.443	/	1.04
	5-甲基-2-(1-甲基乙基)-环己醇	11.545	/	4.79
	顺-2-壬烯-1-醇	12.156	/	0.48
	小计			10.96
醛类	戊醛	3.242	面包香,酒香,果香	0.71
	己醛	5.349	油脂、青草味	12.05
	3-甲基-1-戊醛	5.603	/	4.04
	庚醛	5.700	鱼腥味	6.39
	辛醛	9.384	脂肪香味,果香	1.69
	壬醛	11.118	油脂、青草味	3.31
	2-甲基-2-辛烯醛	11.945	脂肪香味,带猪肉香韵	0.33
	反-2-壬烯醛	11.993	脂肪香味	0.58
	癸醛	12.701	甜香,柑橘香	1.37
	(E)-2-癸烯醛	13.533	脂肪香味,带猪肉香韵	0.24
	2-苯基-2-丁烯醛	13.771	花香、蜜糖、可可和红茶香气	0.42
	2-十一烯醛	14.030	/	2.64
	小计			33.78
	烷烃类	十一烷	11.043	烷烃气味
十二烷		12.609	烷烃气味	1.15
十三烷		14.068	烷烃气味	0.83
十四烷		15.434	烷烃气味	0.49
环十二烷		16.385	烷烃气味	0.30
小计				3.34
芳香族	甲苯	3.955	特殊气味	7.47
	对乙酰氨基酚	7.553	/	7.51
	苯甲醛	8.650	杏仁香、坚果香、水果香	13.47
	苯乙醛	8.990	水果香	8.31
	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛	18.217	/	0.59
小计			37.34	
杂环化合物	环庚三烯	4.036	/	9.46
	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	9.876	/	0.26
	4-甲氧基-2,4,6-环庚三烯-1-酮	10.114	/	0.39
	(E)-6,10-二甲基-5,9-十一烷二烯-2-酮	16.056	清香、果香、木香	0.59
	2,4-二叔丁基苯酚	16.790	烷基酚气味	0.32
小计			11.01	
酯类	乙酸乙酯	2.054	微带果香的酒香	3.30
	邻苯二甲酸丁基环己酯	21.409	芳香气味	0.26
小计			3.57	

<sup>†</sup> /表示未查阅到相关气味。

为酯类,如丙酮香叶酯,其主要提供水果香、花香等气味<sup>[20]</sup>。在小龙虾水煮液整体风味成分中,酯类化合物能起到微妙的作用。

HS-SPME 有利于提取易挥发性化合物,如短链脂肪酸或醇类<sup>[21]</sup>,且出峰快。小龙虾水煮液中挥发性风味物质共检出 34 种,包括醇类 5 种(10.96%)、醛类 12 种(33.78%)、烷烃类 5 种(3.34%)、芳香族化合物 5 种(37.34%)、杂环化合物 5 种(11.01%)、酯类 2 种(3.57%)。而同时蒸馏萃取法(SDE)容易提取挥发性和半挥发性风味成分,出峰相对较慢。采用 SDE-GC-MS 技术从小龙虾水煮液中共检出 73 种挥发性风味物质,包括烷烃类 28 种(47.77%)、酯类 12 种(43.40%)、醛类 9 种(8.94%)、芳香族 6 种(7.31%)、醇类 5 种(7.28%)、酸类 4 种(14.09%)<sup>[1]</sup>。因此,可以认为醛类、芳香族类和酯类为小龙虾水煮液中主要的挥发性风味物质。SDE 法萃取时间较长,但能萃取到更多的挥发性化合物,适合对高沸点、低挥发性物质的分离;HS-SPME 法出峰少,但快速简便、更接近真实挥发风味,适合检测易挥发性的化合物<sup>[22]</sup>。

### 3 结论

通过 HS-SPME-GC-MS 结合正交试验优化小龙虾加工副产物水煮液中挥发性风味物质的萃取条件。结果表明,采用 50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS 萃取头老化后,不需要平衡,最优萃取工艺条件为 NaCl 添加量 30%,萃取时间 40 min、萃取温度 75  $^{\circ}\text{C}$ ,此条件下小龙虾加工水煮液中挥发性风味物质共检出 34 种,其中醛类和芳香族化合物的相对含量较高,其次为醇类和杂环化合物,烷烃类和酯类化合物的相对含量较少。HS-SPME 法萃取小龙虾加工水煮液中挥发性风味成分的方法简便快捷,但在相同检测方法下分析出的挥发性风味成分相对较少,后续可以结合 SDE 法萃取小龙虾加工水煮液中的挥发性风味物质。

#### 参考文献

- [1] 徐文思, 胡诗雨, 邓娟丽, 等. 小龙虾加工水煮液营养成分与风味物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(14): 279-286.  
XU Wen-si, HU Shi-yu, DENG Juan-li, et al. Analysis of nutrient composition and flavor compounds in boiled crayfish liquid[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(14): 279-286.
- [2] 黄业传, 李婷婷, 龚道楷, 等. 高压结合热处理对猪肉风味的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 227-232.  
HUANG Ye-chuan, LI Ting-ting, GONG Dao-kai, et al. Effect of combined thermal and high pressure treatment on flavor of pork[J]. Food Science, 2018, 39(2): 227-232.
- [3] 周慧敏, 张顺亮, 赵冰, 等. 吹扫/捕集-热脱附-气质联用比较分析长白山山黑猪和瘦肉型猪肉的挥发性风味物质[J]. 肉类研究, 2017, 31(3): 45-50.

- ZHOU Hui-min, ZHANG Shun-liang, ZHAO Bing, et al. Comparative analysis of volatile compounds in lean from Changbai mountain black pig and lean-type pig analyzed by purge and trap thermal desorption combined with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Meat Research, 2017, 31(3): 45-50.
- [4] RIU-AUMATELL M, VARGAS L, VICHI S, et al. Characterisation of volatile composition of white salsify (*Tragopogon porrifolius* L.) by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) and simultaneous distillation-extraction (SDE) coupled to GC-MS[J]. Food Chemistry, 2011, 129(2): 557-564.
- [5] 李耀光, 侯鹏娟, 李皓, 等. 基于顶空固相微萃取印蒿挥发性风味成分的 GC-MS 分析[J]. 食品科技, 2016, 41(4): 293-297.  
LI Yao-guang, HOU Peng-juan, LI Hao, et al. Analysis on volatile constituents of *Artemisia palls* W. by SPME-GC-MS [J]. Food Science and Technology, 2016, 41(4): 293-297.
- [6] BHATTACHARJEE P, PANIGRAHI S, LIN D, et al. A comparative qualitative study of the profile of volatile organic compounds associated with *Salmonella* contamination of packaged aged and fresh beef by HS-SPME/GC-MS[J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 48(1): 1-13.
- [7] 张芳, 未志胜, 王鹏, 等. 基于 BP 神经网络和遗传算法的库尔勒香梨挥发性物质萃取条件的优化[J]. 中国农业科学, 2018, 51(23): 4 535-4 547.  
ZHANG Fang, WEI Zhi-sheng, WANG Peng, et al. Using Neural network coupled genetic algorithm to optimize the SPME conditions of volatile compounds in Korla pear[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(23): 4 535-4 547.
- [8] 常宇桐, 罗云敬, 钱承敬, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱质谱法测定馥郁香型白酒中的挥发性香气成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(17): 4 618-4 627.  
CHANG Yu-tong, LUO Yun-jing, QIAN Cheng-jing, et al. Determination of volatile aroma components in Fuyu flavor liquor by headspace-solid phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(17): 4 618-4 627.
- [9] MA R, LIU X H, TIAN H N, et al. Odor-active volatile compounds profile of triploid rainbow trout with different marketable sizes[J]. Aquaculture Reports, 2020(17): 1-7.
- [10] 刘文, 张悦容, 张腾军, 等. 牡蛎体液风味物质的 GC-MS 分析[J]. 核农学报, 2013, 27(1): 81-87.  
LIU Wen, ZHANG Yue-rong, ZHANG Teng-jun, et al. Analysis of the flavor substances in oyster juice by GC-MS[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(1): 81-87.
- [11] 张鹏云, 李蓉, 陈丽斯, 等. 顶空固相微萃取-气质联用法结合自动解卷积技术分析葛根中的挥发性成分[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 220-225.  
ZHANG Peng-yun, LI Rong, CHEN Li-si, et al. Analysis of volatile compounds in *pueraria radix* using headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) combined with automated mass spectral deconvol-

- lution and identification system (AMDIS)[J]. Food Science, 2019, 40(12): 220-225.
- [12] 常春, 白杨, 宋欣怡, 等. 基于正交设计葡萄废弃物基生物活性炭的制备及其吸附性能[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(2): 217-227.
- CHANG Chun, BAI Yang, SONG Xin-yi, et al. Preparation of grape peel based biochar by orthogonal design and its adsorption performance[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(2): 217-227.
- [13] 薛雁, 周芳伊, 黄峰, 等. 毛氏红烧肉特征风味成分分析[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(11): 153-158.
- XUE Yan, ZHOU Fang-yi, HUANG Feng, et al. Analysis of characteristic flavor components of mao's braised meat[J]. Food Research and Development, 2019, 40(11): 153-158.
- [14] 王瑞琦. 红葡萄酒酿造过程中挥发性风味物质的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016: 1-50.
- WANG Rui-qi. Study on volatile flavor compounds in red wine brewing process[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016: 1-50.
- [15] 吴静, 黄卉, 李来好, 等. 鱼制品腥味产生机制及调控措施研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 254-261.
- WU Jing, HUANG Hui, LI Lai-hao, et al. Review on the formation and regulation of the fishy odor in fish products[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 254-261.
- [16] 徐丹萍, 过雯婷, 郑振霄, 等. 干贝的营养评价与关键风味成分分析[J]. 中国食品学报, 2016, 16(12): 218-226.
- XU Dan-ping, GUO Wen-ting, ZHENG Zhen-xiao, et al. Nutritional evaluation and analysis of the volatile flavor component of dried scallop[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(12): 218-226.
- [17] BAEK H H, CADWALLADER K R. Enzymatic hydrolysis of crayfish processing by-products[J]. Journal of Food Science, 2010, 60(5): 929-935.
- [18] 王勇勤, 郭新, 黄笠原, 等. 基于电子鼻和气相色谱-质谱联用技术分析不同贮藏时间羊肉火腿香气成分[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 215-221.
- WANG Yong-qin, GUO Xin, HUANG Li-yuan, et al. Analysis of volatile compounds of mutton ham with different storage times based on electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2019, 40(2): 215-221.
- [19] JIN G, ZHANG J, YU X, et al. Lipolysis and lipid oxidation in bacon during curing and drying-ripening[J]. Food Chemistry, 2010, 123(2): 465-471.
- [20] KHAIRY H L, SAADOON A F, ZZAMAN W, et al. Identification of flavor compounds in rambutan seed fat and its mixture with cocoa butter determined by SPME-GCMS[J]. Journal of King Saud University Science, 2018, 30(3): 316-323.
- [21] 王悦齐, 李春生, 李来好, 等. 基于 GC-MS 联用技术分析传统鱼露发酵过程中挥发性风味成分和脂肪酸组分变化[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 984-995.
- WANG Yue-qi, LI Chun-sheng, LI Lai-hao, et al. Analysis of volatile flavor components and fatty acids in fish sauces during fermentation by GC-MS[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 984-995.
- [22] 陈红霞, 贺稚非, 朱慧敏, 等. 顶空固相微萃取和同时蒸馏萃取用于兔肉挥发性风味成分分析的比较研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(3): 288-291.
- CHEN Hong-xia, HE Zhi-fei, ZHU Hui-min, et al. Comparative application of head space-solid micro-extraction and simultaneous distillation extraction for GC-MS analysis of volatile components in IRA rabbit meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(3): 288-291.
- 
- (上接第 56 页)
- [11] MAMANI LINARES L W, GALLO C, ALOMAR D. Identification of cattle, llama and horse meat by near infrared reflectance or transmittance spectroscopy [J]. Meat Science, 2012, 90(2): 378-385.
- [12] 鞠兴荣, 后其军, 袁建, 等. 基于近红外光谱技术测定稻谷含水量研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(11): 120-124.
- JU Xing-rong, HOU Qi-jun, WU Jian, et al. Determination of moisture content of rice based on the near infrared spectroscopy[J]. Journal of Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(11): 120-124.
- [13] 杨学文. 近红外光谱分析快速测定稻谷常规化学指标[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(5): 65-69.
- YANG Xue-wen. Rapid determination of rice conventional chemical index by near infrared spectroscopy [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(5): 65-69.
- [14] ZHANG F, LIU J, WANG Z. Analysis of oil yield from oil shale minerals based on near-infrared spectroscopy with least squares support vector machines[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2016, 37(10): 1792-1798.
- [15] ZHAN X, ZHU X, SHI X, et al. Determination of hesperidin in tangerine leaf by near-infrared spectroscopy with SPXY algorithm for sample subset partitioning and Monte Carlo cross validation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(4): 964-968.
- [16] 杜尚广. 基于近红外光谱技术快速评价芸苔属种子活力[D]. 南昌: 南昌大学, 2015: 38-39.
- DU Shang-guang. Rapid assessment of seed vigor of Brassica based on near infrared spectroscopy[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015: 38-39.
- [17] CHEN L, YANG Z, HAN L. A review on the use of near-infrared spectroscopy for analyzing feed protein materials [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2013, 48(7): 509-522.
- [18] WEYER L. Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy[M]. [S.l.]: CRC Press, 2007: 57.