

# 不同养殖地区克氏原螯虾肌肉熟制前后滋味差异

刘焯<sup>1,2</sup>, 邱文兴<sup>1,2</sup>, 胡传锋<sup>1,2</sup>, 杜柳<sup>1,2</sup>, 刘栋银<sup>2</sup>, 向开凯<sup>3</sup>, 汪超<sup>1\*</sup>, 乔宇<sup>2\*</sup>

(1. 湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 湖北武汉 430068)(2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)(3. 武汉设计工程学院食品与生物科技学院, 湖北武汉 430205)

**摘要:** 该研究选取了2个养殖地区(以湖北仙桃和潜江为例)的克氏原螯虾为研究对象, 研究生虾和熟虾肉在滋味上的差异, 对虾肉中呈味核苷酸、有机酸、游离氨基酸和无机离子等含量测定, 并采用味道强度值和味精当量值来评价滋味物质的呈味强度, 同时用电子舌对滋味和气味进行分析。结果表明: 经热处理, 呈味核苷酸中腺苷酸含量最高, 仙桃地区 (AX-1) 和潜江地区 (AX-2) 虾肉中的腺苷酸含量分别为 2.914、2.751 mg/g, 对虾肉的鲜味形成有显著贡献; 甘氨酸和丙氨酸对其甜味形成有显著贡献, 缬氨酸和组氨酸能产生苦味; 而热处理后 AX-1 中甘氨酸和丙氨酸含量分别增长约 50.79% 和 3.79%, AX-2 则分别增长约 67.03% 和 28.82%, 有趣的是 AX-1 中的苦味氨基酸含量也显著增大, 从而影响其整体滋味; 味精当量值呈上升趋势, 无机离子含量、电子舌滋味分析和感官评价与核苷酸、氨基酸等指标结果对应。研究表明: 不同养殖地区克氏原螯虾虾肉的滋味特征存在显著差异, 综合考虑, 热处理后 AX-2 的虾肉整体滋味更佳。

**关键词:** 克氏原螯虾; 热处理; 呈味核苷酸; 游离氨基酸; 滋味成分

文章编号: 1673-9078(2025)03-351-361

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.1399

## Taste Differences between Raw and Steamed *Procambarus clarkii* Meat from Different Aquaculture Areas

LIU Xuan<sup>1,2</sup>, QIU Wenxing<sup>1,2</sup>, HU Chuanfeng<sup>1,2</sup>, DU Liu<sup>1,2</sup>, LIU Dongyin<sup>2</sup>,  
XIANG Kaikai<sup>3</sup>, WANG Chao<sup>1\*</sup>, QIAO Yu<sup>2\*</sup>

(1.School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)  
(2.Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)(3.College of Food & Biology Science and Technology, Wuhan Institute of Design and Sciences, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** *Procambarus clarkii* from two distinct aquaculture areas (Xiantao and Qianjiang in Hubei Province) were examined to clarify flavor differences between raw and steamed *P. clarkii* meat. The contents of flavor-contributing nucleotides, organic acids, free amino acids, and inorganic ions in *P. clarkii* meat were quantitatively determined. The flavor

引文格式: 刘焯,邱文兴,胡传锋,等.不同养殖地区克氏原螯虾肌肉熟制前后滋味差异[J].现代食品科技,2025,41(3):351-361.

LIU Xuan, QIU Wenxing, HU Chuanfeng, et al. Taste differences between raw and steamed *Procambarus clarkii* meat from different aquaculture areas [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 351-361.

收稿日期: 2023-11-22

基金项目: 湖北省科技创新人才计划-科技人才服务企业项目(2023DJC100); 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202221); 潜江市公益性行业科研计划项目(2023GYX030)

作者简介: 刘焯(2000-), 男, 硕士, 研究方向: 水产品加工, E-mail: 2433273869@qq.com

通讯作者: 汪超(1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 312415976@qq.com; 共同通讯作者: 乔宇(1981-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: qiaoyu412@sina.com

intensities of taste substances were assessed with taste activity values and equivalent umami concentrations, and an electronic tongue was employed for taste and odor analyses. Thermal processing revealed adenosine monophosphate (AMP) to be the predominant taste nucleotide, with respective AMP concentrations in *P. clarkii* meat from Xiantao (denoted as AX-1) and that from Qianjiang (denoted as AX-2) of 2.914 and 2.751 mg/g contributing significantly to the umami taste of the meat. Glycine and alanine were identified as primary contributors to sweet taste, and valine and histidine were associated with bitter taste. Notably, thermal processing increased respective glycine and alanine contents in AX-1 by approximately 50.79% and 3.79%. These values were approximately 67.03% and 28.82%, respectively, in AX-2. Interestingly, the concentration of bitter amino acids in AX-1 also rose substantially after thermal processing, thereby influencing the overall taste. The equivalent umami concentrations demonstrated an upward trend. The contents of inorganic ions, the taste analysis via electronic tongue, and the sensory evaluations aligned with the observations about nucleotides and amino acids. The findings of this study indicate that there are pronounced differences in the taste attributes of *P. clarkii* meat sourced from various aquacultural regions. In a comprehensive evaluation, the flavor of thermally processed AX-2 was deemed best.

**Key words:** *Penaeus clarkii*; thermal processing; flavor nucleotide; free amino acid; taste component

小龙虾, 学名克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*), 是一种淡水经济甲壳类动物, 广泛分布于中国长江流域, 因其独特的风味、质地和高营养价值而受到中国消费者的高度赞赏。2022年, 湖北省小龙虾产量 113.8 万 t, 加工产值 398.8 亿元, 加工原料虾 84.5 万 t, 加工成品总量超过 35 万 t<sup>[1]</sup>, 其中潜江地区和仙桃地区小龙虾养殖规模较大, 消费者喜爱度高。

不同养殖环境和熟制都会影响克氏原螯虾的滋味物质<sup>[2,3]</sup>。目前, 许多学者对不同熟制方式的克氏原螯虾滋味或营养品质差异展开了研究。孔金花等<sup>[2]</sup>研究了高温杀菌熟制对小龙虾品质及贮藏的影响, 发现高温熟制处理会显著影响虾肉品质, 且温度越高、时间越长虾肉弹性、硬度越差, 感官评分越低。Liang 等<sup>[4]</sup>介绍了不同热处理对南北美对虾风味的影响, 发现烘烤处理会更加明显增加甜味氨基酸的比例, 虾肉鲜味和丰富度也更高, 同时焙烧与其他热加工相结合有利于提高虾产品的质量。当前, 也有部分学者对不同养殖地区或不同饲料养殖的虾类肌肉中营养组成进行了分析<sup>[5-7]</sup>, 发现不同养殖地区或不同饲料养殖会引起虾类肌肉的营养成分存在较大差异, 尤其表现在脂肪和矿物质含量。水产品进行高温热处理有利于脂肪降解和其他物质转化生成醇类物质, 从而影响其滋味特征。因此许多学者也展开了对小龙虾加工过程中滋味变化的研究, 王子凌等<sup>[8]</sup>在不同卤制加工阶段中添加食盐量探究对虾尾挥发性风味的影响, 张权等<sup>[9]</sup>对调味小龙虾风味特性进行了研究。然而尚未见关于对不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后肌肉中滋味物质成分差异的分析。

因此, 本研究以湖北仙桃和潜江的克氏原螯虾为研究对象, 以虾肉熟制前后的游离氨基酸, 呈味核苷酸, 有机酸, 无机离子 ( $\text{Cl}^-$  和  $\text{PO}_4^{3-}$ ), 味觉活性值 (TAV) 和味精当量值 (EUC) 为指标, 并通过感官评价及电子舌测定其在滋味方面的差异, 以探究不同养殖地区虾肉熟制前后呈味物质的变化, 为消费者选购不同产地的小龙虾提供一定的参考意见。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

分别从湖北仙桃和潜江的水产养殖基地购入克氏原螯虾, 两地克氏原螯虾的养殖条件保持一致, 养殖水温保证在  $25 \pm 1$  °C, 水中溶解氧为  $6.5 \pm 0.5$  mg/L, 每天更换 1/3 体积的水, 喂食其体质量 3% 的商业饲料 (湖北天邦饲料)。选取生长期在 180 d 左右, 长度  $12 \pm 0.5$  cm, 体质量 25 g 的克氏原螯虾, 充氧密封加冰运送至实验室, 保证其存活。

乙酸锌、硝酸银、氢氧化钠 (片状)、无水乙醇、硫酸、硝酸、高氯酸、亚硫酸钠、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾 (分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 酚酞、铬酸钾、钼酸铵、对苯二酚 (分析纯), 上海麦克林生化科技有限公司; 乳酸标准品、酒石酸标准品、苹果酸标准品、琥珀酸标准品、腺苷酸 (Adenosine Monophosphate, AMP) 标准品、肌苷酸 (Inosine Monophosphate, IMP) 标准品、鸟苷酸 (Guanosine Monophosphate, GMP) 标准品、次

黄嘌呤 (Hypoxanthine, Hx) 标准品、次黄嘌呤核苷 (Hypoxanthine Ribonucleoside, HxR) 标准品 (色谱纯), 上海源叶生物科技有限公司。

## 1.2 仪器与设备

SH200N 石墨消解仪, 北京同德创业科技有限公司; UltiMate3000 高效液相色谱仪, 赛默飞世尔科技公司; TS-5000Z 电子舌, 日本 insent; 3K15 冷冻离心机, 曦玛离心机有限公司; OD-15 高速冷冻离心机, 上海优宁维生物科技股份有限公司; SCI-VS 涡旋振荡器, 美国赛洛捷克; PB-10 PH 计, 赛多利斯科学仪器有限公司; GL224-1SCN 电子分析天平, 赛多利斯科学仪器有限公司; XHF-DY 高速均质机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; SHZ-D III 循环水式真空泵, 予华仪器有限责任公司; KS-300VDE/2 双屏液晶超声波清洗器, 昆山洁力美超声仪器有限公司; A360 紫外分光光度计, 翱艺仪器有限公司。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 原料处理方法

对克氏原螯虾进行刷洗, 然后再用冰水将克氏原螯虾冻死, 用量筒接取 1.5 L 纯水于蒸锅中, 分别选取 40 只冻死的虾放在蒸格上, 用 2 000 W 电磁炉加热 20 min 后取出备用。将仙桃地区的生虾记为 AX-1, 蒸制后仙桃地区的虾记为 AX-1-H, 潜江地区的生虾记为 AX-2, 蒸制后潜江地区的虾记为 AX-2-H。

### 1.3.2 感官评价

培训 10 名小组成员按照表 1 对不同养殖地区

克氏原螯虾的外观、气味、滋味、质地进行感官评价, 采用 10 分制, 最后的得分为这四项的加权平均数。

### 1.3.3 味精当量值 (Equivalent Umami Concentrations, EUC)

EUC 值是用来评价核苷酸和氨基酸的协同增效作用, 就相当于多少浓度的味精产生的鲜味强度。计算公式参考崔妍春等<sup>[10]</sup>, 计算公式如下:

$$B = \sum a_p b_p + 1218 \times \sum a_p b_p \times \sum a_q b_q \quad (1)$$

式中:

$B$ ——EUC 的值, g/100 g;

$a_p$ ——Glu 或 Asp 的质量分数, %;

$b_p$ ——Glu 或 Asp 相当于谷氨酸钠的相对鲜味系数 (Glu=1, Asp=0.077);

$a_q$ ——5'-IMP、5'-GMP、5'-AMP 质量分数 /%;

$b_q$ ——5'-IMP、5'-GMP、5'-AMP 相当于谷氨酸钠的相对鲜味系数 (5'-IMP=1、5'-GMP=2.3、5'-AMP=0.18)。

### 1.3.4 呈味核苷酸的测定

提取核苷酸: 称取切碎样品各 2 g, 放入 50 mL 离心管中, 加入体积分数 10% 高氯酸溶液 20 mL, 9 000 r/min 高速均质 30 S, 在 4 °C 8 000 r/min 离心 10 min, 取出上清液, 再加入体积分数 5% 高氯酸溶液 20 mL, 涡旋振荡 1 min, 在 4 °C 8 000 r/min 离心 10 min。重复操作一次, 合并上清液。用氢氧化钠溶液 (10 mol/L 和 1 mol/L) 调节 pH 值至 6.0~6.4, 调节后转移至 100 mL 容量瓶, 用纯水定容后过 0.22 μm 微孔滤膜, 滤液于 4 °C 保存待测。

表 1 感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

| 项目 | 感官评定标准                 |                                 |                            |                              |
|----|------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------|
|    | 9~10 分                 | 7~8 分                           | 5~6 分                      | 3~4 分                        |
| 外观 | 外观完整、虾肉均匀一致、光亮颜色呈鲜红    | 外观较为完整、虾肉较为均匀、颜色较鲜红             | 外观有破损、色泽稍显灰白或焦黄            | 外观破损、色泽呈明显灰白或焦黄色             |
| 气味 | 有清新的虾肉香气, 无腥味、其他异味     | 有虾肉味、无腥臭味或其他异味                  | 虾肉味一般, 有腥味、泥土腥味等异味         | 基本无虾肉香味、腥味明显                 |
| 滋味 | 口感清甜, 有明显鲜味, 脂肪味较厚重    | 口感较清甜, 无明显腥味、有鲜味、脂肪味            | 鲜味不足, 能尝出腥味、鲜味较弱、脂肪味较弱     | 鲜味、脂肪味均不明显                   |
| 质地 | 肉质弹牙, 口感细腻、肌肉纹理清晰、肉质紧实 | 肉质有一定弹性, 口感较为细腻、肌肉纹理较为清晰、肉质较为紧实 | 肉质弹性差, 口感粗糙、肌肉纹理较模糊、肌肉较为粗糙 | 肉质无咀嚼性, 口感干、柴、肌肉纹理模糊不可见、肌肉粗糙 |

参照中华人民共和国水产行业标准 SC/T 3048-2014《鱼类鲜度指标 K 值的测定—高效液相色谱法》的方法提取虾样中的核苷酸并稍作修改,用购买的 AMP、GMP、IMP、Hx、HxR 标准品(纯度 $\geq 99.0\%$ ),制备对应的标准储备液。混合标准工作液:取适量的标准储备液,用流动相配制系列标溶液,使 AMP、GMP、IMP、Hx、HxR 质量浓度为:0.200、0.500、1.00、5.00、15.0、40.0、100  $\mu\text{g/mL}$ 。

色谱条件: AQ-C18 柱(4.6 mm $\times$ 250 mm $\times$ 5  $\mu\text{m}$ ), DAD 检测器;检测波长: 254 nm;柱温: 35  $^{\circ}\text{C}$ ;进样量: 20  $\mu\text{L}$ ;流量: 1.0 mL/min;流动相: 0.02 mol/L 磷酸二氢钾溶液+0.02 mol/L 磷酸氢二钾溶液=1+1 (V/V) 用磷酸调节 pH 至 6.0,最后用蒸馏水定容到 1 000 mL。

试样中 AMP、GMP、IMP、Hx、HxR 含量按公式(2)计算:

$$M_i = \frac{C_i \times V}{M \times F_i} \quad (2)$$

式中:

$M_i$ —试样中 AMP、GMP、IMP、Hx、HxR 含量, mg/100 mg;

$C_i$ —标准工作溶液中 AMP、GMP、IMP、Hx、HxR 的浓度,  $\mu\text{g/mL}$ ;

$V$ —最终定容体积, mL;

$F_i$ —AMP、GMP、IMP、Hx、HxR 的摩尔质量(g/mol)。

表 2 流动相洗脱过程

Table 2 Mobile phase elution procedure

| 时间/min | 流动相 A/% | 流动相 B/% |
|--------|---------|---------|
| 1      | 100     | 0       |
| 14     | 80      | 20      |
| 29     | 60      | 40      |
| 30     | 0       | 100     |
| 37     | 0       | 100     |
| 38     | 100     | 0       |
| 45     | 100     | 0       |

### 1.3.5 氨基酸的测定

参考李发田等<sup>[11]</sup>描述的方法,并稍作修改。称取虾肉样品 1 g 于 10 mL 离心管中,加入 9 mL 盐酸(0.02 mol/L)。超声波处理 20 min 后,离心 5 min (6 000 r/min)。取 0.2 mL 上清液,加入 100  $\mu\text{L}$  衍生液,放入真空干燥箱 40  $^{\circ}\text{C}$  干燥 2 h,干燥后待衍生,衍生 30 min。然后加入 0.9 mL 流动相 B 混匀,过膜待测。使用质量浓度为 20  $\mu\text{g/mL}$  的 17

种氨基酸标准混合物进行外标法定量。仪器条件:检测波长 254 nm;烘箱温度 40  $^{\circ}\text{C}$ ;进样量 10  $\mu\text{L}$ 。衍生液:乙醇:异硫氰酸苯酯:水:三乙胺=7:1:1:1 (V/V/V/V),流动相洗脱条件如表所示。流动相 B: 0.1 mol/L 无水醋酸钠,乙腈(97:3, V/V),用冰醋酸调节 pH 值至 6.5。流动相 A: 乙腈,水(80:20, V/V)。流量为 1 mL/min。

### 1.3.6 等效鲜味值 (Taste Activity Values, TAV)

TAV 值是呈味浓度与其阈值之比,在滋味分析上通常显示出其鲜味的强度。参考刘天天等<sup>[12]</sup>,计算公式如下:

$$D = \frac{C}{T} \quad (3)$$

式中:

$D$ —TAV 值;

$C$ —待测物质的呈味物质浓度, mol/L;

$T$ —该物质的呈味阈值, mol/L。

### 1.3.7 有机酸的测定

参考 GB5009.157-2016《食品安全国家标准 食品中有机酸的测定》并稍作修改。

试样制备:称取 10 g 切碎试样,放入 50 mL 离心管中,加入 20 mL 纯水,于 9 000 r/min 中均质提取,再 12 000 r/min 离心 10 min,取出上层清液于 50 mL 容量瓶中,再加入 20 mL 纯水,涡旋振荡 1 min 后重复提取一次,合并两次提取液并定容至刻度,经 0.22  $\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤,注入高效液相色谱仪分析。色谱条件: AQ-C18 柱(4.6 mm $\times$ 250 mm $\times$ 5  $\mu\text{m}$ ), DAD 检测器;检测波长: 254 nm;柱温: 35  $^{\circ}\text{C}$ ;进样量: 20  $\mu\text{L}$ ;流量: 1.0 mL/min;流动相: 0.02 mol/L 磷酸二氢钾溶液+0.02 mol/L 磷酸氢二钾溶液=1+1 (V/V) 用磷酸调节 pH 至 6.0,最后用蒸馏水定容到 1 000 mL。其中有机酸阈值参考董诗瑜等<sup>[13]</sup>。

### 1.3.8 无机离子的测定

#### 1.3.8.1 氯离子的测定

参考钟明慧等<sup>[14]</sup>描述的方法进行测定,并稍作修改。

#### 1.3.8.2 磷酸根离子的测定

参考 GB5009.87-2016《食品安全国家标准食品中磷的测定》。

### 1.3.9 电子舌的测定

参考 Fan 等<sup>[15]</sup>描述的方法并做修改,小龙虾

在 100 °C 的电磁炉 (2 200 W) 中蒸制 20 min。剥壳切碎后称取试样 50 g 加入 250 mL 纯水, 以 10 000 r/min 均浆 1 min。超声处理 5 min 后, 将样品在冰浴中保存 30 min, 并在 4 °C 下离心取上清液 (8 000 r/min, 15 min) 用保鲜膜包裹, 放入 4 °C 冰箱中静置 6 h 后, 用双圈滤纸过滤后取 50 mL 滤液, 通过电子舌系统 (Astree; Alpha MOS, Toulouse, France) 分析, 选取 120 s 的数据分析。所有测量均一式三份。

#### 1.4 数据处理

实验数据采用 DPS 数据处理系统进行单因素方差分析, 并结合 Duncan 新复极差法对数据进行多重比较, 数据采用平均值 ± 标准差表示。所有实验指标均设三个平行组, 图片和相关性分析使用 Origin 2021, 电子舌主成分分析图使用 Simca 14.1 绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 感官评价分析

熟制处理后克氏原螯虾的感官分析结果如表 3 所示。

相比较而言, 无论是外观、气味、滋味还是质地, AX-2-H 的感官评价均高于 AX-1-H。外观上比较发现, AX-2-H 外观比 AX-1-H 更为完整, 颜色更鲜红, 同时气味上 AX-2-H 的虾味更浓郁, 腥臭味较低。对其滋味水平比较发现, AX-1-H 和 AX-2-H 的感官评价接近, 但 AX-2-H 的虾肉鲜甜味更足, 口感更佳。说明熟制后虾肉均呈现良好的滋味感受, 而 AX-2-H 的整体滋味感受优于 AX-1-H。对虾肉质比较, AX-2-H 的肉质感更细腻和紧实, 弹性大于 AX-1-H。结果分析表明, AX-2-H 的整体感官均优于 AX-1-H。这初步给出了一个比较的结果, 后续将进一步进行比较分析两个不同养殖地区克氏原螯虾滋味上的差异。

表 3 不同养殖地区克氏原螯虾熟制后感官评价

Table 3 Sensory evaluation of *Procambarus clarkii* in different aquaculture areas: steamed samples

| 评价项目   | 外观                       | 气味                       | 滋味                       | 质地                       |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| AX-1-H | 7.15 ± 1.12 <sup>b</sup> | 6.77 ± 1.32 <sup>b</sup> | 7.08 ± 1.33 <sup>b</sup> | 8.08 ± 1.16 <sup>a</sup> |
| AX-2-H | 7.69 ± 1.09 <sup>a</sup> | 7.31 ± 1.38 <sup>a</sup> | 7.31 ± 1.71 <sup>a</sup> | 8.15 ± 1.12 <sup>a</sup> |

注: 表中不同字母表示不同差异性。下表同。

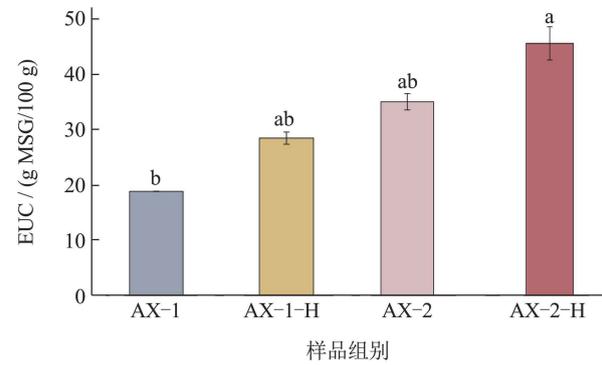


图 1 不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后味精当量变化

Fig.1 Changes of MSG equivalent of *Procambarus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

注: 图中不同字母表示不同差异性。

### 2.2 味精当量值分析

EUC 值 (g MSG/100 g) 是指鲜味氨基酸与核苷酸 (5'-IMP、5'-GMP 和 5'-AMP) 协同作用所产生的鲜味强度等同于多少浓度的味精的鲜味强度<sup>[16]</sup>。

不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后 EUC 变化如图 1 所示, 熟制后虾肉 EUC 值显著上升, 熟制后虾肉的鲜甜味显著增加 ( $P < 0.05$ ), 其中 AX-1-H 的 EUC 值达到 28.379 g MSG/100 g, AX-2-H 的 EUC 值为 45.461 g MSG/100 g, 且所有样品虾肉中 EUC 值都大于 1。说明加热过程中克氏原螯虾肉呈味核苷酸与游离氨基酸协同作用产生大量的鲜味<sup>[17]</sup>, 对虾肉滋味贡献显著, 且 AX-2-H 整体鲜味特征优于 AX-1-H。

### 2.3 克氏原螯虾呈味核苷酸含量

表 4 列出了克氏原螯虾肉中 5 种核苷酸类物质的组成和含量, 核苷酸类物质呈味主要是以 IMP 为代表, 而 IMP 主要是由肌肉中的 ATP 降解形成。有研究表明 IMP 和 GMP 具有强烈的鲜味, 可以增强食品的鲜甜味, AMP 不仅能抑制苦味, 还能与 IMP 产生协同效应并起到增鲜的作用<sup>[18]</sup>, 从而对苦味起到味觉缓冲的作用。将 AX-1 和 AX-2 进行比较发现, 它们的 IMP 和 AMP 的含量均远高于其他核苷酸 ( $P < 0.05$ )。此外对热处理后的小龙虾进行比较发现, 熟制前后虾肉中的呈味核苷酸含量存在明显的差异 ( $P < 0.05$ ), 熟制后虾肉中 AMP 的含量增加, IMP 和 GMP 等含量下降。说明 IMP 和 AMP 对这两地小龙虾生样的鲜味特征贡献程度较

高，这与李学鹏等<sup>[19]</sup>研究结果相一致：高温破坏了 ATP，有利于 AMP 的释放，而 IMP 和 GMP 热稳定性差且易受热分解，因此含量下降。有研究表明在低 IMP 浓度的条件下，AMP 能呈现鲜味，同时使甜味增强<sup>[20]</sup>。

表 4 分析可知，AX-1-H 虾肉中的 AMP 含量较 AX-1 增加了 54.46%，AX-2-H 虾肉中的 AMP 含量较 AX-2 增加了 26.18%。说明熟制处理后克氏原螯虾虾肉的鲜甜感增加。但次黄嘌呤核苷（HxR）和次黄嘌呤（Hx）是虾肉中的异味物质，会产生苦味<sup>[21]</sup>。熟制处理后这些异味物质的含量呈现下降趋势，原因可能是随着蒸制时间的延长，次黄嘌呤与次黄嘌呤核苷分解或高温抑制了自溶酶与微生物酶的活性<sup>[22]</sup>。其含量呈现出 AX-1-H 大于 AX-2-H，因此 AX-1-H 中苦味等一些不好异味会高于 AX-2-H，影响虾肉整体的滋味特征。

总的来说，不同养殖地区克氏原螯虾熟制处理后虾肉中的 AMP 含量较生虾肉均呈现上升趋势，为熟虾肉赋予更加鲜甜的口感。有趣的是，AX-1-H 虾肉中的 Hx 和 HxR 等苦味物质含量大于 AX-2-H，导致虾肉整体滋味特征被这些物质的苦味影响，甚至产生一些异味，从而影响虾肉整体的滋味。这个结果与感官评价表结果相同，均表现出 AX-2-H 整体滋味优于 AX-1-H。

### 2.4 克氏原螯虾游离氨基酸含量

水产品的滋味在一定程度上与游离氨基酸的含量有关，其中主要与天冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、甘氨酸、丝氨酸和脯氨酸有关。游离氨基酸是与鲜味相关的主要滋味物质，不同的游离氨基酸呈现的滋味特征也不同，其中精氨酸虽为苦味氨基酸，但是它可以平衡一定的腥味，同时提高鲜味，对滋味有正向性的贡献<sup>[23]</sup>。

从图 2 游离氨基酸热图可直观发现不同养殖地

区克氏原螯虾熟制前后游离氨基酸含量差异显著。表 5 显示了不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后肌肉中的 17 种游离氨基酸，发现熟制前后小龙虾的游离氨基酸含量存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。AX-1-H 中甜味氨基酸含量较生样下降，AX-2-H 中甜味氨基酸含量较生样上升，AX-1-H 中甜味氨基酸含量降低了 4.36%，AX-2-H 中甜味氨基酸含量增加 47.86%。这可能是由于克氏原螯虾肉在高温条件下，肌原纤维蛋白发生降解生成了大量多肽和游离氨基酸<sup>[24]</sup>，而 AX-1 初始甜味氨基酸含量多，在高温下发生美拉德反应，因此其甜味氨基酸含量未出现增加反而略有降低。AX-1-H 和 AX-2-H 虾肉中苦味氨基酸显著降低 ( $P < 0.05$ )，但 AX-1-H 苦味氨基酸减少量更多，有研究表明呈苦味的氨基酸能够参与风味反应如美拉德反应、strecker 醛降解，生成许多风味物质<sup>[25]</sup>，从而使苦味氨基酸含量降低。但美拉德反应一方面会赋予食品更多风味，另一方面会产生一些具有强烈苦味的产物<sup>[26]</sup>。

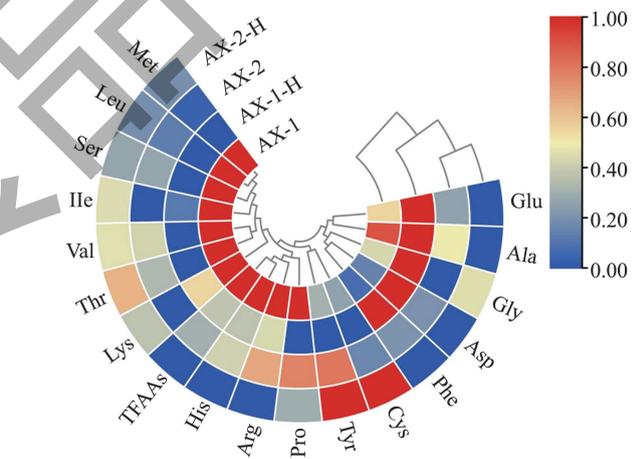


图 2 不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后游离氨基酸聚类热图  
Fig.2 Clustering heat maps of free amino acids of *Procamburus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

表 4 不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后核苷酸及其降解产物含量

Table 4 Contents of nucleotides and their degradation of *Procamburus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

| 呈味核苷酸/(mg/g) | AX-1                         | AX-1-H                       | AX-2                         | AX-2-H                       |
|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| GMP          | 0.12 ± 0.003 9 <sup>a</sup>  | 0.020 ± 0.001 <sup>c</sup>   | 0.078 ± 0.012 <sup>b</sup>   | 0.074 ± 0.001 3 <sup>b</sup> |
| IMP          | 1.03 ± 0.041 <sup>b</sup>    | 0.20 ± 0.027 <sup>c</sup>    | 1.37 ± 0.31 <sup>a</sup>     | 0.022 ± 0.000 4 <sup>c</sup> |
| AMP          | 1.89 ± 0.18 <sup>b</sup>     | 2.91 ± 0.105 <sup>a</sup>    | 2.18 ± 0.53 <sup>b</sup>     | 2.75 ± 0.031 <sup>a</sup>    |
| Hx           | 0.049 ± 0.004 3 <sup>a</sup> | 0.013 ± 0.000 7 <sup>b</sup> | 0.046 ± 0.004 4 <sup>a</sup> | 0.013 ± 0.006 4 <sup>b</sup> |
| HxR          | 0.77 ± 0.16 <sup>a</sup>     | 0.10 ± 0.008 1 <sup>c</sup>  | 0.57 ± 0.034 <sup>b</sup>    | 0.058 ± 0.006 3 <sup>c</sup> |

表5 不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后氨基酸含量 (g/100 g)

Table 5 Contents of free amino acids of *Procambarus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

| 氨基酸  | 滋味特征 | AX-1                         | AX-1-H                       | AX-2                         | AX-2-H                        |
|------|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 天冬氨酸 | 鲜    | 0.024 ± 0.000 6 <sup>c</sup> | 0.127 ± 0.014 <sup>a</sup>   | 0.030 ± 0.001 2 <sup>b</sup> | 0.0059 ± 0.000 3 <sup>d</sup> |
| 谷氨酸  | 鲜    | 0.028 ± 0.000 4 <sup>b</sup> | 0.044 ± 0.002 5 <sup>a</sup> | 0.018 ± 0.000 1 <sup>c</sup> | 0.0088 ± 0.000 1 <sup>d</sup> |
| 甘氨酸  | 甜    | 1.32 ± 0.015 <sup>b</sup>    | 1.99 ± 0.14 <sup>a</sup>     | 0.81 ± 0.000 7 <sup>c</sup>  | 1.35 ± 0.003 6 <sup>b</sup>   |
| 丝氨酸  | 甜    | 0.64 ± 0.004 9 <sup>a</sup>  | 0.32 ± 0.026 <sup>c</sup>    | 0.41 ± 0.000 7 <sup>b</sup>  | 0.41 ± 0.002 5 <sup>b</sup>   |
| 苏氨酸  | 甜    | 0.51 ± 0.004 3 <sup>a</sup>  | 0.13 ± 0.017 <sup>d</sup>    | 0.26 ± 0.000 4 <sup>c</sup>  | 0.38 ± 0.001 1 <sup>b</sup>   |
| 丙氨酸  | 甜    | 1.71 ± 0.018 <sup>a</sup>    | 1.78 ± 0.13 <sup>a</sup>     | 1.46 ± 0.001 1 <sup>b</sup>  | 1.13 ± 0.001 6 <sup>c</sup>   |
| 脯氨酸  | 甜    | 0.41 ± 0.005 1 <sup>a</sup>  | 0.17 ± 0.012 <sup>d</sup>    | 0.35 ± 0.000 1 <sup>b</sup>  | 0.24 ± 0.000 3 <sup>c</sup>   |
| 亮氨酸  | 苦    | 0.35 ± 0.003 6 <sup>a</sup>  | 0.14 ± 0.011 <sup>d</sup>    | 0.16 ± 0.000 9 <sup>c</sup>  | 0.17 ± 0.000 6 <sup>b</sup>   |
| 组氨酸  | 苦    | 1.12 ± 0.011 <sup>a</sup>    | 0.69 ± 0.059 <sup>c</sup>    | 0.73 ± 0.000 5 <sup>b</sup>  | 0.44 ± 0.000 9 <sup>d</sup>   |
| 赖氨酸  | 苦    | 0.31 ± 0.003 4 <sup>a</sup>  | 0.26 ± 0.017 <sup>b</sup>    | 0.19 ± 0.10 <sup>d</sup>     | 0.23 ± 0.001 3 <sup>c</sup>   |
| 精氨酸  | 苦    | 6.85 ± 0.075 <sup>a</sup>    | 5.65 ± 0.42 <sup>c</sup>     | 6.16 ± 0.002 8 <sup>b</sup>  | 4.69 ± 0.037 <sup>d</sup>     |
| 缬氨酸  | 苦    | 0.16 ± 0.001 8 <sup>a</sup>  | 0.081 ± 0.006 4 <sup>c</sup> | 0.11 ± 0.000 5 <sup>b</sup>  | 0.12 ± 0.011 <sup>b</sup>     |
| 酪氨酸  | 苦    | 0.79 ± 0.026 <sup>c</sup>    | 0.62 ± 0.24 <sup>d</sup>     | 1.08 ± 0.000 9 <sup>b</sup>  | 1.19 ± 0.015 <sup>a</sup>     |
| 甲硫氨酸 | 苦    | 0.62 ± 0.007 2 <sup>a</sup>  | 0.31 ± 0.024 <sup>d</sup>    | 0.32 ± 0.000 2 <sup>c</sup>  | 0.37 ± 0.001 2 <sup>b</sup>   |
| 苯丙氨酸 | 苦    | 0.48 ± 0.005 8 <sup>c</sup>  | 0.57 ± 0.031 <sup>a</sup>    | 0.49 ± 0.015 <sup>b</sup>    | 0.48 ± 0.002 1 <sup>d</sup>   |
| 异亮氨酸 | 苦    | 0.18 ± 0.002 2 <sup>a</sup>  | 0.072 ± 0.006 2 <sup>c</sup> | 0.057 ± 0.000 5 <sup>d</sup> | 0.11 ± 0.000 4 <sup>b</sup>   |
| 半胱氨酸 | —    | 0.15 ± 0.008 3 <sup>b</sup>  | 0.13 ± 0.045 <sup>d</sup>    | 0.14 ± 0.007 8 <sup>c</sup>  | 0.20 ± 0.011 <sup>a</sup>     |

因此,不同养殖地区克氏原螯虾氨基酸含量差异明显,经熟制处理后,AX-1-H中的甜味氨基酸含量下降,而AX-2-H的甜味氨基酸含量上升。AX-1-H和AX-2-H的苦味氨基酸含量均下降,且AX-1-H苦味氨基酸含量高于AX-2-H含量。

## 2.5 味道强度分析

熟制处理后克氏原螯虾虾肉中的总氨基酸含量(TFAAs)含量均呈下降趋势,李晓芹等<sup>[27]</sup>提出在烘焙初期会因水分含量的降低和有机物热解等导致氨基酸含量略有上升,烘焙后期含量下降可能是氨基酸参与美拉德反应或在加热中发生分解。如表5所示,比较熟制前后克氏原螯虾滋味物质的TAV值可以发现:AX-1-H和AX-2-H虾肉中的丝氨酸和脯氨酸的TAV值均有减小,赵洪雷等<sup>[28]</sup>发现:随着蒸制的进行,鱼肉中氨基酸含量先上升后下降,因自身的热降解或与还原糖发生美拉德反应而降低,这也解释了氨基酸含量变化不一致的现象。AX-1-H中组、缬氨酸等苦味氨基酸的TAV值显著降低( $P < 0.05$ ),有趣的是,AX-2-H中苦味氨基酸TAV值变化情况不一致,组氨酸TAV值由0.726 9减少到0.443 2,但缬氨酸TAV值却略有增大。有研究发现苦味氨基酸虽然呈苦味,但低含量时能够与一些游

离氨基酸和呈味核苷酸之间产生协同效应,从而增加食品的厚味<sup>[29]</sup>。然而当苦味氨基酸含量远超其阈值时,便会产生强烈的苦涩味,严重影响样品的滋味。

## 2.6 克氏原螯虾有机酸含量

有机酸是水产品中重要的呈味物质,通常都是以盐类的形式存在,可以有效地改善食品的风味。不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后虾肉中有机酸含量如表6所示,由表6可以看出,两种不同养殖地区的克氏螯虾共检测出3种有机酸。琥珀酸和乳酸是虾蟹类水产品中的主要代谢产物,两者对鲜味的特征滋味有一定的贡献作用。有研究表明琥珀酸能与谷氨酸钠(MSG)结合,从而有使鲜味增强的作用<sup>[30]</sup>。

从表6可以看出,熟制后虾肉中乳酸和琥珀酸的含量均下降,AX-1和AX-2分别损失了69.29%、54.34%和38.53%、45.41%。乳酸和琥珀酸高温易分解,且易氧化<sup>[31]</sup>,乳酸和琥珀酸分别损失了56.22%和53.97%。因此虾肉中乳酸和琥珀酸含量的减少可能是因为高温分解或氧化导致。3种有机酸的TAV值均大于1,因此它们对虾肉的滋味有直接作用,能够赋予虾肉一些柔和的酸味,丰富虾肉的整体滋味。

表 5 不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后呈味物质TAV

Table 5 Taste activity values of odorant in meat of *Procambarus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

| TAV      | 阈值 <sup>[13]</sup> /(mg/100 mL) | AX-1                          | AX-1-H                       | AX-2                         | AX-2-H                         |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 天冬氨酸 Asp | 100                             | 0.024 ± 0.000 6 <sup>bc</sup> | 0.13 ± 0.014 <sup>a</sup>    | 0.030 ± 0.001 2 <sup>b</sup> | 0.005 9 ± 0.000 3 <sup>c</sup> |
| 谷氨酸 Glu  | 30                              | 0.028 ± 0.000 4 <sup>b</sup>  | 0.044 ± 0.002 5 <sup>a</sup> | 0.018 ± 0.000 1 <sup>c</sup> | 0.008 8 ± 0.000 1 <sup>d</sup> |
| 丝氨酸 Ser  | 150                             | 0.64 ± 0.004 9 <sup>a</sup>   | 0.32 ± 0.026 <sup>c</sup>    | 0.41 ± 0.000 7 <sup>b</sup>  | 0.41 ± 0.002 5 <sup>b</sup>    |
| 甘氨酸 Gly  | 130                             | 1.32 ± 0.015 <sup>b</sup>     | 1.99 ± 0.14 <sup>a</sup>     | 0.81 ± 0.000 7 <sup>c</sup>  | 1.35 ± 0.003 6 <sup>b</sup>    |
| 苏氨酸 Thr  | 260                             | 0.51 ± 0.004 3 <sup>a</sup>   | 0.13 ± 0.017 <sup>d</sup>    | 0.26 ± 0.000 4 <sup>c</sup>  | 0.38 ± 0.001 1 <sup>b</sup>    |
| 丙氨酸 Ala  | 60                              | 1.71 ± 0.018 <sup>a</sup>     | 1.78 ± 0.13 <sup>a</sup>     | 1.46 ± 0.001 1 <sup>b</sup>  | 1.13 ± 0.001 6 <sup>c</sup>    |
| 精氨酸 Arg  | 20                              | 6.85 ± 0.075 <sup>a</sup>     | 5.65 ± 0.42 <sup>b</sup>     | 6.16 ± 0.002 8 <sup>b</sup>  | 4.69 ± 0.037 <sup>c</sup>      |
| 脯氨酸 Pro  | 300                             | 0.41 ± 0.005 1 <sup>a</sup>   | 0.17 ± 0.012 <sup>d</sup>    | 0.35 ± 0.000 1 <sup>b</sup>  | 0.24 ± 0.000 3 <sup>c</sup>    |
| 缬氨酸 Val  | 40                              | 0.16 ± 0.001 8 <sup>a</sup>   | 0.081 ± 0.006 4 <sup>c</sup> | 0.11 ± 0.000 5 <sup>b</sup>  | 0.12 ± 0.011 <sup>b</sup>      |
| 蛋氨酸 Met  | 30                              | 0.62 ± 0.007 2 <sup>a</sup>   | 0.31 ± 0.024 <sup>c</sup>    | 0.32 ± 0.000 2 <sup>c</sup>  | 0.37 ± 0.001 2 <sup>b</sup>    |
| 赖氨酸 Lys  | 50                              | 0.31 ± 0.003 4 <sup>a</sup>   | 0.26 ± 0.017 <sup>a</sup>    | 0.19 ± 0.10 <sup>a</sup>     | 0.23 ± 0.001 3 <sup>a</sup>    |
| 组氨酸 His  | 20                              | 1.12 ± 0.011 <sup>a</sup>     | 0.69 ± 0.059 <sup>b</sup>    | 0.73 ± 0.000 5 <sup>b</sup>  | 0.44 ± 0.000 9 <sup>c</sup>    |
| 酪氨酸 Tyr  | /                               | 0.79 ± 0.026 <sup>bc</sup>    | 0.62 ± 0.24 <sup>c</sup>     | 1.08 ± 0.000 9 <sup>ab</sup> | 1.19 ± 0.015 <sup>a</sup>      |
| 异亮氨酸 Ile | 90                              | 0.18 ± 0.002 2 <sup>a</sup>   | 0.072 ± 0.006 2 <sup>c</sup> | 0.057 ± 0.000 5 <sup>d</sup> | 0.11 ± 0.000 4 <sup>b</sup>    |
| 亮氨酸 Leu  | 190                             | 0.35 ± 0.003 6 <sup>a</sup>   | 0.14 ± 0.011 <sup>c</sup>    | 0.16 ± 0.000 9 <sup>b</sup>  | 0.18 ± 0.000 6 <sup>b</sup>    |
| 苯丙氨酸 Phe | 90                              | 0.48 ± 0.005 8 <sup>b</sup>   | 0.57 ± 0.031 <sup>a</sup>    | 0.49 ± 0.015 <sup>b</sup>    | 0.48 ± 0.002 1 <sup>b</sup>    |
| AMP      | 50                              | 5.828 1 ± 0.21 <sup>a</sup>   | 3.773 3 ± 0.36 <sup>b</sup>  | 4.360 4 ± 1.065 <sup>b</sup> | 5.502 0 ± 0.063 <sup>a</sup>   |
| GMP      | 12.5                            | 0.163 9 ± 0.011 <sup>c</sup>  | 0.978 2 ± 0.031 <sup>a</sup> | 0.621 8 ± 0.092 <sup>b</sup> | 0.590 4 ± 0.010 <sup>b</sup>   |
| IMP      | 25                              | 0.781 0 ± 0.11 <sup>c</sup>   | 4.118 8 ± 0.16 <sup>b</sup>  | 5.472 9 ± 1.22 <sup>a</sup>  | 0.089 6 ± 0.001 6 <sup>c</sup> |
| 苹果酸      | 50                              | 2.11 ± 0.25 <sup>a</sup>      | 2.07 ± 0.12 <sup>a</sup>     | 2.98 ± 0.11 <sup>a</sup>     | 2.63 ± 0.005 8 <sup>a</sup>    |
| 琥珀酸      | 10.6                            | 97.73 ± 9.56 <sup>a</sup>     | 60.07 ± 3.65 <sup>c</sup>    | 46.33 ± 9.73 <sup>b</sup>    | 67.37 ± 1.30 <sup>d</sup>      |
| 乳酸       | 126                             | 3.42 ± 0.35 <sup>b</sup>      | 1.051 ± 0.35 <sup>a</sup>    | 1.60 ± 0.19 <sup>b</sup>     | 3.51 ± 0.11 <sup>c</sup>       |

表 6 不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后有机酸含量 (mg/100 g)

Table 6 Contents of organic acids in *Procambarus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

| 有机酸种类 | AX-1                          | AX-1-H                      | AX-2                         | AX-2-H                       |
|-------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 苹果酸   | 105.33 ± 12.37 <sup>a</sup>   | 103.29 ± 5.88 <sup>a</sup>  | 131.26 ± 5.44 <sup>a</sup>   | 149.1 ± 0.289 8 <sup>a</sup> |
| 琥珀酸   | 1 035.9 ± 101.31 <sup>a</sup> | 636.79 ± 38.67 <sup>c</sup> | 714.09 ± 103.18 <sup>b</sup> | 491.10 ± 13.81 <sup>d</sup>  |
| 乳酸    | 431.15 ± 43.58 <sup>b</sup>   | 132.37 ± 43.79 <sup>a</sup> | 442.13 ± 24.73 <sup>b</sup>  | 201.87 ± 13.79 <sup>c</sup>  |

### 2.7 克氏原螯虾无机离子含量

水产品中产生咸味的主要无机离子有 Cl<sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>，无机盐的呈味作用主要体现在自身的咸味和使水产品中的风味物质挥发<sup>[32]</sup>。有研究表明 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、Cl<sup>-</sup> 是影响虾肉风味的主要无机离子<sup>[33]</sup>，因此本研究主要对这些离子进行分析。

图 3 显示了不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后虾肉中无机离子的含量。无机离子在呈味机理中主

要起辅助作用，阴离子主要起到改善风味的作用。熟制处理后，AX-2-H 的 Cl<sup>-</sup> 含量高于 AX-1-H，而 Cl<sup>-</sup> 具有抑制酸味，增强鲜味和甜味的作用；磷酸根离子具有降低苦味，增强鲜味和酸味强度的作用<sup>[34]</sup>，AX-1-H 磷酸根离子含量几乎没有改变，AX-2-H 则有所降低。磷酸根离子的缺失会使咸、甜和鲜味有所下降，而这种影响在各种呈味物质协调作用下会减弱。与有机酸含量结合分析可以得出，Cl<sup>-</sup> 降低了虾肉中酸味的强度、增加了鲜甜味，而 AX-1 有机

酸含量高于 AX-2，因此推测 AX-1-H 整体酸味会高于 AX-2-H。

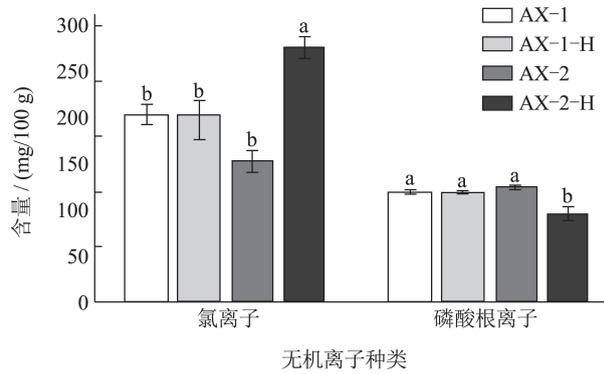


图3 不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后无机离子含量  
Fig.3 Contents of inorganic ions in meat of *Procambarus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

注：图中不同字母表示不同差异性。

### 2.8 电子舌、PCA分析结果

通过电子舌技术对不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后的滋味进行评价。如图4可知，每个样品都显示出独特的输出曲线。这些结果表明，味觉传感器系统可以对不同地区小龙虾的滋味差异进行表征。这可能是由于经过热蒸处理后，虾肉中蛋白质和多肽进行了分解，使鲜味氨基酸和甜味氨基酸得到了积累<sup>[35]</sup>。同时有研究表明热处理后，肉制品在高温条件下发生了一系列复杂的反应（美拉德反应），使肉中香味物质激增<sup>[36]</sup>。如图4所示，熟制前后克氏原螯虾肉的滋味特征差异明显，其中 AX-2-H 鲜味、丰富度优于 AX-1-H，而涩味、苦味等不好的滋味明显低于 AX-1-H。这可以与上述氨基酸结果对应，即高温促使蛋白质热降解生成了大量多肽和游离氨基酸，但由于美拉德反应的存在，使得 AX-1-H 的甜味氨基酸含量下降，而其苦味氨基酸减少量多于 AX-2-H。综上，不同养殖地区克氏原螯虾滋味特征差异明显，特别是熟制后，虾肉的鲜味、丰富度等滋味增加，表现出 AX-2 的整体滋味特征优于 AX-1。

通过 PCA 对从电子舌获得的数据矩阵进行统计分析，如图5所示，传感器阵列进行主成分分析得到的 PC1 和 PC2 的贡献率分别为：58.7% 和 29.8%，很大程度反应了电子舌对不同养殖地区克氏原螯虾风味的相应信息。Duan 等<sup>[37]</sup>对两种鲑鱼进行地理来源鉴定发现，所有样本的 PCA 分布区

域均不重叠，表明电子舌结合主成分分析可以区分不同地理区域的鲑鱼。如图5所示，熟制前的分布区域差异较小，而熟制后分布区域差异明显，说明电子舌结合主成分分析可以分析出不同养殖地区的克氏原螯虾。

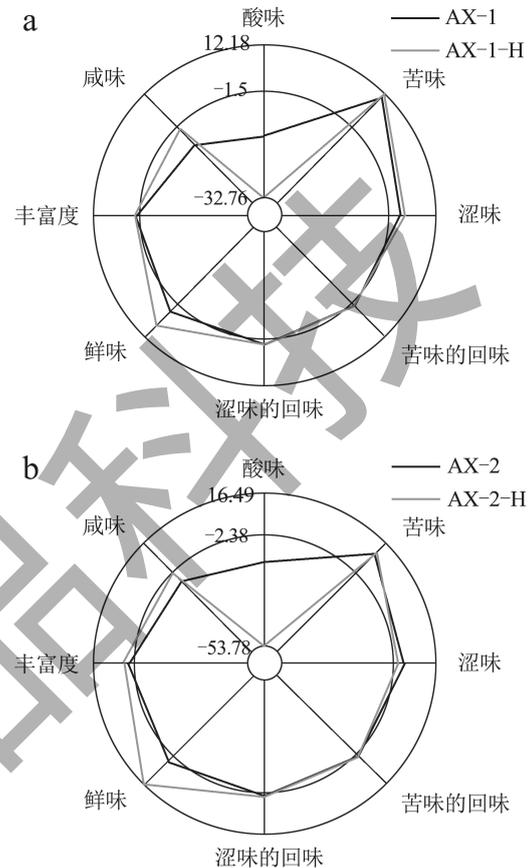


图4 不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后滋味特征差异  
Fig.4 The difference of taste characteristics in meat of *Procambarus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

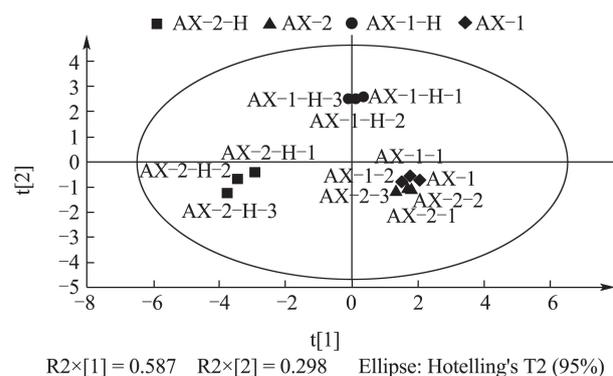


图5 不同养殖地区克氏原螯虾电子舌 PCA 分析图  
Fig.5 PCA analysis of the electronic tongue of *Procambarus clarkii* in different aquaculture areas: raw and steamed samples

### 2.9 相关性分析

为了更好地观察不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后滋味特征的联系性，我们系统地将各理化指标间进行了聚类相关性分析（图6）。研究发现不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后琥珀酸和呈味核苷酸之间成较强正相关性，并且虾肉鲜甜味与AMP、苹果酸之间具有显著的正相关性，特别是苹果酸对EUC值的相关系数为0.8，说明AMP、苹果酸和Cl<sup>-</sup>对虾肉中鲜味的呈现具有显著贡献。有趣的是，虽然有些呈现负相关性，由于一些协调效应的存在，使得这些物质也能对虾肉中的鲜甜味起到一个正向的促进作用。

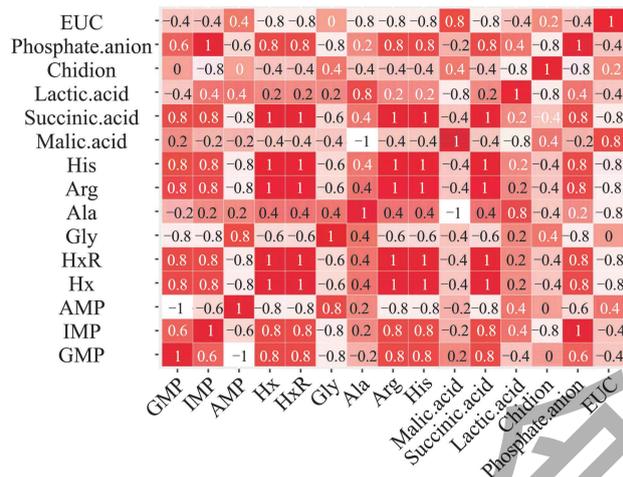


图6 相关性系数分析图

Fig.6 Correlation coefficient analysis

### 3 结论

本研究对不同养殖地区克氏原螯虾熟制前后滋味的差异进行分析。熟制前后小龙虾肉中的一些呈味物质有明显变化，不同养殖地区的克氏原螯虾之间也存在显著差异。对比氨基酸含量可知，熟制后虾肉中甜味氨基酸均含量增加，但不同养殖地区虾肉中苦味氨基酸变化有差异。其中TAV值大于1的呈味氨基酸为甘氨酸、丙氨酸和精氨酸，这些氨基酸对熟制后虾肉特征滋味有重要的贡献。熟制后虾肉中的AMP含量上升，赋予虾肉更鲜甜口感。有趣的是，不同养殖地区虾肉中Hx和HxR等苦味物质含量的差异，这导致虾肉整体滋味特征被影响，甚至产生一些异味。检测出的3种有机酸（苹果酸、琥珀酸和乳酸），它们赋予了虾肉柔和的酸味。EUC值较生虾呈现上升趋势，解释了熟制后虾肉具有强烈鲜味的原因。电子舌的结果与感官评价对应，

均呈现AX-2-H口感和鲜味等滋味高于AX-1-H。

不同养殖地区克氏原螯虾虾肉滋味有明显差异，这种差异主要是由核苷酸（AMP、IMP、GMP、HxR）、甜味和苦味氨基酸（苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸、精氨酸、组氨酸等）、有机酸（苹果酸、琥珀酸）、无机离子（Cl<sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>）的含量差异导致，结合电子舌结果和氨基酸含量的变化推测，高温促使美拉德反应，导致AX-1-H中甜味氨基酸损失，生成苦味物质，同时AX-1-H苦味氨基酸含量高于AX-2-H，使AX-2-H的整体滋味特征优于AX-1-H。但本研究仅关注了不同养殖地区对克氏原螯虾滋味的影响，未探究养殖模式和养殖条件对小龙虾滋味特征的影响，这是后续研究的方向。

### 参考文献

- [1] 全国水产技术推广总站中国水产学会中国水产流通与加工协会.中国小龙虾产业发展报告(2023)[N].中国渔业报,2023-06-19(003).
- [2] 孔金花,温丽敏,诸永志,等.高温熟制杀菌对小龙虾品质及贮藏特性的影响[J].肉类研究,2022,36(3):38-44.
- [3] 郭宏慧,杨方,高沛,等.不同养殖水域中华绒螯蟹滋味差异分析[J].渔业科学进展,2022,43(2):215-227.
- [4] LIANG R, LIN S, CHEN D, et al. Differentiation of *Penaeus vannamei* from different thermal processing methods in physico-chemical, flavor and sensory characteristics [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132092.
- [5] 范武江,苏明,李雪松,等.日本沼虾淀山湖野生群体和养殖群体肌肉营养成分分析[J].水产科技情报,2019, 46(4):181-186.
- [6] 梁正其,旷慧七,秦国兵,等.不同地区养殖的小龙虾的肌肉营养成分分析与评价[J].农业与技术,2021,41(20):117-121.
- [7] 杜雪莉,张凌晶,杨欣怡,等.4种饲料养殖小龙虾营养分析及品质评价[J].食品安全质量检测学报,2022,13(2):576-584.
- [8] 王子凌,张子豪,曾璐瑶,等.不同卤制加工阶段中食盐添加量对小龙虾尾品质及挥发性风味的影响[J].食品科学,2024,45(11):52-60.
- [9] 张权,李金林,胡明明,等.基于电子鼻和溶剂辅助风味蒸发-气相色谱-质谱联用技术分析调味小龙虾挥发性风味特征差异[J].食品与发酵工业,2024,50(8):242-252..
- [10] 崔妍春,张化贤,王爱辉,等.三种贝类蒸煮液主要滋味化合物的分析与比较[J].中国调味品,2022,47(1):1-7.
- [11] 李发田,李岩,李先玉,等.高效液相色谱法检测食品中17种游离氨基酸[J].食品安全质量检测学报,2020,11(14):4841-4848.
- [12] 刘天天,梁中永,范思华,等.北海沙蟹特征滋味成分的分

- 析[J].食品科学,2018,39(14):236-241.
- [13] 董诗瑜,马舒恬,覃静凯,等.小龙虾头营养成分及风味滋味特性分析与评价[J].食品工业科技,2023,44(14):396-405.
- [14] 钟明慧,徐新星,刘康,等.不同蒸制时间下鲟鱼背部肉的风味特征差异分析[J].食品工业科技,2021,42(14):55-60.
- [15] FAN L, XIAO T, XIAN C, et al. Effect of short-term frozen storage on taste of gonads of female *Eriocheir sinensis* and the classification of taste quality combined with sensory evaluation and fuzzy logic model [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132105.
- [16] 赵樑,吴娜,王锡昌,等.不同生长阶段中华绒螯蟹滋味成分差异研究[J].现代食品科技,2016,32(7):261-269.
- [17] 沈思远.热风微波联合干燥南美白对虾工艺优化及品质变化研究[D].上海:上海海洋大学,2021.
- [18] 郭建港.中国对虾“黄海3号”风味品质影响因素的研究[D].上海:上海海洋大学,2022.
- [19] 李学鹏,刘晏玮,谢晓霞,等.热预处理对蓝蛤酶解及酶解液呈味特性的影响[J].食品科学,2020,41(2):133-140.
- [20] 吴文霞,苏长玲,贺芸,等.复合型小龙虾水煮液调味料制备与风味成分分析[J].食品安全质量检测学报,2023,14(11):231-239.
- [21] FUKU S, UEDA Y. Interactions between umami and other flavor characteristics [J]. Trends in Food Science & Technology, 1996, 712: 407-411.
- [22] 邵晨,施文正,曲映红,等.脊尾白虾蒸制过程中品质和滋味的变化[J].水产科学,2023,42(6):1006-1014.
- [23] 洗才凝.渔光一体养殖模式对中华绒螯蟹食用品质的影响[D].上海:上海海洋大学,2022.
- [24] 陆辰燕.BCAT菌株和蛋白酶菌株复配及对发酵香肠风味的作用研究[D].扬州:扬州大学,2021.
- [25] SUN L, ZHANG Z, XIN G, et al. Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 176-187.
- [26] JIA W, GONG A A, ZHANG R, et al. Mechanism of natural antioxidants regulating advanced glycosylation end products of Maillard reaction [J]. Food Chemistry, 2022, 404(Pt A): 134541.
- [27] 李晓芹,方志娟,何新叶,等.咖啡豆烘焙前后16种氨基酸成分变化及营养评价[J].农产品质量与安全,2023,4:26-32.
- [28] 赵洪雷,冯媛,徐永霞,等.海鲈鱼肉蒸制过程中品质及风味特性的变化[J].食品科学,2021,42(20):145-151.
- [29] 宣晓婷,王瑛,尚海涛,等.超高压辅助中华绒螯蟹脱壳及其品质的影响[J].沈阳农业大学学报,2023,54(2):149-156.
- [30] 李婉君.南极磷虾与南美白对虾营养与滋味成分比较[D].上海:上海海洋大学,2015.
- [31] 屈小娟,张良,刘书成,等.高密度CO<sub>2</sub>和热处理对近江牡蛎肉质影响的比较[J].食品工业科技,2013,34(7):117-122.
- [32] 段少奇.凡纳滨对虾真空微波干燥工艺优化及干制过程中风味成分变化规律的研究[D].湛江:广东海洋大学,2021.
- [33] 薛长湖.养殖对虾和天然对虾的风味比较[D].青岛:中国海洋大学,1990.
- [34] 邓捷春,王锡昌,刘源.暗纹东方鲀与红鳍东方鲀滋味成分差异研究[J].食品工业科技,2010,31(3):106-108.
- [35] 穆红,罗瑞明,李亚蕾.热处理对牛骨酶解液美拉德反应产物呈味物质及挥发性成分的影响[J].中国食品学报,2023,23(9):181-191.
- [36] ZHU Z, FANG R, HUANG M, et al. Oxidation combined with Maillard reaction induced free and protein-bound N  $\epsilon$ -carboxymethyllysine and N  $\epsilon$ -carboxyethyllysine formation during braised chicken processing [J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 383-393.
- [37] DUAN Z, DONG S, DONG Y, et al. Geographical origin identification of two salmonid species via flavor compound analysis using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with electronic nose and tongue [J]. Food Research International, 2021, 145: 110385.