

张千, 郭薇, 莫爱杰, 等. 腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾肌肉组分、理化特性、风味物质和滋味的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(3): 136-146. DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.03.016

腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾肌肉组分、理化特性、风味物质和滋味的影响

张千¹, 郭薇¹, 莫爱杰¹, 杨慧君¹, 顾泽茂^{1,2}, 袁勇超^{1,2}

1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070;

2. 华中农业大学双水双绿研究院/长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心/
湖北洪山实验室, 武汉 430070

摘要 为提升克氏原螯虾的肌肉品质、实现优质蛋白供给, 试验选取(13.59±0.25) g 克氏原螯虾 360尾, 随机分为4个处理组, 分别投喂基础饲料(对照 control check, CK)、添加0.5% 枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*, BS)、添加0.5% 腐殖酸钠(sodium humate, HNa)和联合添加0.5% 腐殖酸钠+0.5% 枯草芽孢杆菌(BS+HNa)的饲料, 探究腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾营养组成、质构、挥发性风味物质和滋味的影响。结果显示: 营养组成方面, BS+HNa组虾肉的粗蛋白、粗脂肪和灰分含量均显著高于对照组和BS组。肌肉理化性质方面, BS+HNa组的亮度值 L^* 和红色值 a^* 显著高于其他各组, 黄色值 b^* 显著低于其他各组; 并且该组虾肉的弹性、硬度、回复性、咀嚼性和内聚性均显著高于其他各组。挥发性物质检测方面, 对照组、BS组、HNa组和BS+HNa组试验虾分别鉴定出36、39、34、30种挥发性化合物, 其中BS、HNa、BS+HNa组脂肪香性状相关的物质月桂醛含量均显著高于对照组, 腥味性状相关物质1-辛烯-3醇含量显著低于对照组。肌肉滋味特性传感器检测BS+HNa组肌肉的苦味和咸味响应度最低, 显著低于其他各组; 甜味和鲜味响应度最高, 显著高于对照组。综上, 联合0.5% 腐殖酸钠和0.5% 枯草芽孢杆菌的添加能显著改善克氏原螯虾肌肉的营养组成、肌肉品质效果, 并且联合添加优于单独添加。

关键词 腐殖酸钠; 枯草芽孢杆菌; 克氏原螯虾; 肌肉品质; 营养组成

中图分类号 S966.12 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)03-0136-11

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*), 俗称淡水小龙虾, 原产于北美地区^[1]。2023年养殖产量已达到316.1万t^[2], 是我国重要的经济淡水虾类。随着克氏原螯虾市场需求的不断扩大, 其养殖密度增大、饲料品质不稳定等因素导致克氏原螯虾肉质疏松、肌肉持水力和口感下降^[3-4], 如何保持克氏原螯虾的品质成为学者们关注的问题。芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)是一种革兰氏阳性杆状细菌, 可以产生具有益生菌特性的耐热孢子^[5]。研究表明饲料添加芽孢杆菌能提高肉鸡的pH值和持水力, 改善肉色^[6], 或提高鲤肌肉中蛋白质和氨基酸的含量^[7]。腐殖酸钠是腐殖酸的钠盐, 可以调节养殖动物肠道pH和菌群结

构^[8], 提高养殖动物消化吸收能力^[9], 饲料添加腐殖酸钠可显著提高黄羽肉鸡胸肌pH, 并显著降低滴水损失和剪切力^[10]。

为提高水产养殖效率、保证养殖产量和品质, 研究者开展了诸多关于饲料添加剂的研究, 但多集中于养殖动物机体生长、抗氧化和免疫性能等方面, 对肉质评估较少。本研究从色、香、味、口感和营养组成多方面探讨枯草芽孢杆菌与腐殖酸钠联合添加对幼虾营养与肌肉品质的影响, 旨在提升克氏原螯虾的肌肉品质、实现优质蛋白供给, 进一步丰富饲料添加剂提升肌肉品质应用方面的基础资料。

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 湖北洪山实验室重大项目(2021hszd002); 中央高校自主创新基金项目(2662024SCP008; 2662022SCYJ003); 2023—2025省级小龙虾产业链奖补资金项目

张千, E-mail: 50652087@qq.com

通信作者: 袁勇超, E-mail: yyc@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验设计和饲养管理

试验对象为克氏原螯虾,以市售克氏原螯虾饲料为基础饲料(粗蛋白质水平为30%、粗脂肪水平为6%);在对照组饲料的基础上添加腐殖酸钠(武汉市宇铭生物科技有限公司;纯度99%)和枯草芽孢杆菌(蔚蓝生物科技有限公司;有效活菌数 $\geq 1.0 \times 10^{11}$ CFU/g)。试验用克氏原螯虾由华中农业大学双水双绿科研基地(监利县)提供,养殖试验在湖北省武汉市华中农业大学健康淡水养殖基地温室循环水养殖系统中进行。试验虾暂养于网箱中,2周后选取规格相近、生长状态良好的克氏原螯虾360尾[初始体质量(13.59 ± 0.25) g],随机分为4组:对照组(control check, CK)投喂基础饲料,试验组设为枯草芽孢杆菌添加组(*Bacillus subtilis*, BS)、腐殖酸钠添加组(sodium humate, HNa)和联合添加组(BS+HNa)。BS组在基础饲料中添加0.5%枯草芽孢杆菌,HNa组在基础饲料中添加0.5%腐殖酸钠,BS+HNa组在基础饲料中添加0.5%腐殖酸钠和0.5%枯草芽孢杆菌。试验前先将腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌溶解到适量的水中,均匀喷涂到饲料上,再置于45℃烘箱中烘干至水分含量低于10%,用自封袋密封保存于-20℃冰箱备用。

试验虾分组后转移到装有曝气设备和脱氯自来水的纤维玻璃养殖缸(1.20 m×0.60 m×0.45 m)中,每个缸放置15根PVC管(25 cm×7.5 cm)作为试验虾的栖息场所。试验期间,每天使用曝气自来水换水30%~40%以维持养殖水体的健康状态,养殖水质情况:水温24.1~26.8℃,溶解氧含量5.7~7.6 mg/L,pH值7.2~8.1,总氮0.032~0.071 mg/L。每天08:00和18:00投喂,投喂量为虾体质量的2%~3%,每天记录每缸投喂量,试验虾停止摄食后,使用虹吸法移除养殖缸底部的粪便和残饵,将未摄食完的饲料烘干至恒质量,用于估算饲料消耗量。试验过程中及时捞出死虾并记录,饲养试验进行6周。

1.2 样品采集

养殖试验结束后所有试验虾禁食24 h,用丁香酚麻醉,每组随机挑选12尾虾,分成4份,分别测定常规营养成分、肌肉质构特性、肌肉持水力测定及肌肉色度分析;另外每组随机挑取12尾,分别用于电子

舌、挥发性风味物质分析。

1.3 营养成分分析

采用凯氏定氮法(GB/T6432—1994)测定粗蛋白含量;采用索氏乙醚抽提法(GB/T6433—2006)测定粗脂肪含量;采用马弗炉灼烧法(GB/T6438—1992)测定灰分含量;采用105℃恒温烘干法(GB/T6435—2006)测定水分含量。肌肉持水力的测定方法和计算公式参照文献[11]。

1.4 肌肉质构特性测定

克氏原螯虾3尾,熟制(将清洗后的克氏原螯虾放入沸水中煮7 min后捞出,用冷水冲洗)后取第2~3节腹部肌肉,切成1 cm×1 cm×1 cm的正方体,采用TA-XT Plus质构仪测定室温下克氏原螯虾肌肉各质构指标,探头型号选择P/36R,采用TPA模式对样品进行2次压缩测试,下降速率1.0 mm/s、测定速率1.0 mm/s、回程速率5.0 mm/s、2次压缩时间间隔为5 s、压缩比为50%、触发力设置为49 m·N,每尾虾设6个平行。

1.5 肌肉色度测定

使用CR-400色差仪,经白板校准后,测量熟制后的克氏原螯虾第2~3节腹部肌肉横切面的色度,每组3尾虾,每尾虾取6个平行。得到亮度值(lightness, L^*)、红度值(redness, a^*)和黄度值(yellowness, b^*)3个参数。 $a^* > 0$ 表示样品偏红, $a^* < 0$ 表示样品偏绿, $b^* > 0$ 表示样品偏黄, $b^* < 0$ 表示样品偏蓝。

1.6 挥发性风味物质测定(SPME-GC-MS)

1)GC-MS的测定。称取4 g克氏原螯虾背部肌肉,经食物调理机绞碎后置于20 mL顶空瓶中,加入4 mL氯化钠(0.18 g/mL)溶液并混合均匀。采用顶空固相微萃取(HS-SPME)结合气质联用仪(GC-MS)对克氏原螯虾肌肉中的挥发性风味成分进行检测。将检测到的挥发性风味成分利用NIST谱库进行定性确认,参考文献[12]采用峰面积归一化法计算各成分的相对含量。

2)风味化合物评价。采用相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)法定义 $ROAV \geq 1$ 的挥发性风味成分为克氏原螯虾的关键风味成分,对总体风味起关键的决定作用; $0.1 \leq ROAV < 1$ 的挥发性风味成分为克氏原螯虾的重要风味成分,对总体风味具有重要的修饰作用,计算公式参照文献[13]。

1.7 肌肉滋味测定

采用电子舌测定虾肉的滋味特征,电子舌各传感器性能见表1。参考文献[14]的方法,将虾肉切碎后称取15 g,加入100 mL去离子水,静置30 min,放入高速冷冻机10 000 r/min离心10 min,取上清液,在38℃下超声30 min,最后用砂芯漏斗过滤,收集滤液待测。每组取6尾鲜虾做混样,每个样品取12个平行。

1.8 数据分析

数据均采用SPSS 19软件进行分析,先进行单因素分析(One-way ANOVA)和邓肯检验(Duncan's test) ($P<0.05$),然后采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)评估腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾是否具有交互作用。结果以平均值±标准差(mean±SD)表示。除色度、电子舌数据外,每组数据6个平行。电子舌数据采用设备系统自带的Taste Analysis System Application软件分析,使用Origin 2021软件进行判别因子分析(discriminant factor analysis, DFA)和雷达色谱图制作。

表1 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾的肌肉营养成分(湿质量)

Table 1 Muscle nutritional components (wet weight) of *Procambarus clarkii* under different levels of sodium humate and *Bacillus subtilis* addition

| 组别 Group | 水分 Moisture | 粗蛋白 Crude protein | 粗脂肪 Crude lipid | 灰分 Ash | % |
|---------------|-------------|-------------------|-----------------|-------------|-------|
| CK | 79.18±0.24a | 18.16±0.47c | 1.09±0.03c | 1.47±0.04c | |
| BS | 78.20±0.30b | 18.78±0.11b | 1.22±0.05b | 1.53±0.02b | |
| HNa | 78.54±0.28b | 19.19±0.12b | 1.23±0.11ab | 1.56±0.03ab | |
| BS+HNa | 76.38±0.26c | 20.24±0.17a | 1.32±0.05a | 1.59±0.02a | |
| P值 P-value | HNa | <0.001 | <0.001 | 0.013 | 0.001 |
| | BS | <0.001 | 0.001 | 0.022 | 0.017 |
| | HNa+BS | 0.005 | 0.196 | 0.552 | 0.456 |

注:同列数据无字母或标相同字母表示差异不显著($P>0.05$);不同字母表示差异显著($P<0.05$)。“HNa”表示腐殖酸钠;“BS”表示枯草芽孢杆菌;“HNa+BS”表示腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的相互作用,下表同。Note: Within the same column, values without letters or sharing the same lowercase letter indicate no significant difference ($P>0.05$), while different letters denote significant differences ($P<0.05$). “HNa” represents sodium humate; “BS” represents *Bacillus subtilis*; “HNa + BS” indicates the interaction between sodium humate and *Bacillus subtilis*. The same as below.

2.2 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉理化特性

饲料中添加腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌后克氏原螯虾的肌肉色度测定如表2所示,BS+HNa组的亮度值 L^* 、红度值 a^* 最高,均显著提高于对照组($P<0.05$),与BS组和HNa组无显著差异($P>0.05$);BS+HNa组黄度值 b^* 最低,为 5.61 ± 0.99 ,显著低于其他各组($P<0.05$),且BS组和HNa组的 b^* 值也显著低于对照组($P<0.05$)。双因素方差分析结果显

2 结果与分析

2.1 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉营养成分

如表1所示,BS+HNa组试验虾肌肉的粗蛋白含量最高,为 $(20.24\pm0.17)\%$,显著高于其他各组($P<0.05$),且粗脂肪、灰分含量显著高于对照组和BS组($P<0.05$),但与HNa组无显著性差异($P>0.05$);BS+HNa组肌肉的水分含量最低,显著低于其他各组($P<0.05$)。所有处理组的粗蛋白、粗脂肪和灰分水平都显著高于对照组($P<0.05$)。双因素分析结果显示,单一因素腐殖酸钠对试验虾肌肉的水分和粗蛋白含量影响极显著($P<0.01$),对灰分含量的影响显著($P<0.05$);单一因素枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾肌肉水分的影响极显著($P<0.01$),对粗蛋白含量的影响显著($P<0.05$)。腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的交互作用对试验虾肌肉的水分含量影响显著($P<0.05$)。综上可知联合添加腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌试验虾的营养价值高于对照组。

示,单因素腐殖酸钠或对枯草芽孢杆菌试验虾肌肉的 b^* 值影响极显著($P<0.01$),对试验虾肌肉的 L^* 和 a^* 值影响显著($P<0.05$),并且二者的交互作用对 b^* 值的影响显著($P<0.05$)。

试验虾肌肉质构和持水力特征如表3所示,BS+HNa组试验虾肌肉的硬度、弹性、内聚力、回复性、咀嚼性和持水力均为最高,其中BS+HNa组试验虾肌肉的弹性、内聚力和回复性显著高于其他组($P<0.05$),但HNa组、BS组与对照组均无显著差异

表 2 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉的色度

| Table 2 The color intensity of <i>Procambarus clarkii</i> muscle under different levels of sodium humate and <i>Bacillus subtilis</i> addition | | | | |
|--|------------------------|----------------------|-------------------------|--------|
| 组别 Group | 亮度值 L^* Lightness | 红度值 a^* Radness | 黄度值 b^* Yellowness | |
| CK | 80.64±1.46b | 0.29±0.14b | 10.80±0.85a | |
| BS | 81.28±0.67ab | 0.63±0.35a | 6.39±0.48c | |
| HNa | 81.29±1.25ab | 0.77±0.26a | 8.87±0.58b | |
| BS+HNa | 81.98±0.73a | 0.87±0.58a | 5.61±0.99d | |
| P 值 | HNa | 0.037 | 0.002 | <0.001 |
| P -value | BS | 0.040 | 0.043 | <0.001 |
| | HNa+BS | 0.938 | 0.283 | 0.011 |

($P>0.05$),BS+HNa 组虾肉持水力显著高于对照组 ($P<0.05$),但 HNa 组和 BS 组肌肉持水力与对照组无显著差异($P>0.05$),提示 BS+HNa 组试验虾肌肉口感品质优于单独添加腐殖酸钠或枯草芽孢杆菌组以及对照组。双因素分析结果显示,单因素腐殖酸钠或枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾质构和持水力影响显著($P<0.05$),其中单因素腐殖酸钠对克氏原螯虾肌肉的咀嚼性影响极显著($P<0.01$),单因素枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾肌肉的硬度和咀嚼性影响极显著($P<0.01$),克氏原螯虾肌肉质构受到枯草芽孢杆菌显著影响($P<0.05$);双因素的交互作用对克氏原螯虾肌肉的硬度、内聚性和咀嚼性的影响显著($P<0.05$)。

表 3 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉的质构特性和持水力

Table 3 The texture properties and water-holding capacity of *Procambarus clarkii* muscle at different levels of sodium humate and *Bacillus subtilis* addition

| 组别 Group | 硬度/g Hardness | 弹性 Springiness | 内聚性 Cohesiveness | 回复性 Resilience | 咀嚼性/g Chewiness | 持水力/% Water binding capacity |
|------------|------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
| CK | 833.74±44.63c | 0.70±0.02b | 0.56±0.02b | 0.28±0.01b | 324.89±18.78c | 86.27±2.68b |
| BS | 1 049.50±117.52b | 0.71±0.01b | 0.55±0.03b | 0.28±0.02b | 356.24±13.90c | 89.77±1.51ab |
| HNa | 879.07±57.80c | 0.72±0.01b | 0.56±0.03b | 0.28±0.01b | 406.37±25.15b | 90.08±1.93ab |
| BS+HNa | 1 395.70±86.15a | 0.74±0.01a | 0.65±0.02a | 0.33±0.02a | 548.33±36.62a | 94.27±5.07a |
| P 值 | HNa | 0.003 | 0.009 | 0.002 | 0.020 | <0.001 |
| P -value | BS | <0.001 | 0.011 | 0.004 | 0.024 | <0.001 |
| | HNa+BS | 0.013 | 0.626 | 0.002 | 0.097 | 0.005 |

2.3 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉的挥发性风味物质

如表 4 所示,本试验在克氏原螯虾肌肉中共检测出 54 种挥发性化合物,对照、BS、HNa、BS+HNa 组试验虾分别鉴定出 36、39、34、30 种挥发性化

物,其中醛类 11 种、醇类 5 种、酮类 4 种、酸类 3 种、酯类 6 种、烷烃 14 种、芳香族 8 种和其他化合物 3 种。对照、BS 和 BS+HNa 组克氏原螯虾肌肉挥发性风味化合物含量最高物质均为烃类化合物,其次为醛类。

表 4 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉的挥发性风味物质含量

Table 4 The content of volatile flavor substances in *Procambarus clarkii* muscle under different levels of sodium humate and *Bacillus subtilis* addition

| 挥发性化合物 Volatile compounds | | % | | | |
|---------------------------|--|------|------|------|--------|
| | | CK | BS | HNa | BS+HNa |
| 醛类 Aldehyde | 苯乙醛 Phenylacetaldehyde | — | 1.64 | — | 1.76 |
| | 壬醛 Nonanal | 2.50 | 2.50 | 2.37 | 2.54 |
| | 癸醛 Decanal | 0.70 | 0.29 | 0.67 | — |
| | 十一醛 Undecanal | — | — | 0.49 | — |
| | 2-(2,5-二甲氧基苯基)丙醛 2-(2,5-Dimethoxyphenyl) propionaldehyde | 0.37 | — | — | — |
| | 月桂醛(十二烷醛) Lauraldehyde | — | 0.71 | 0.64 | 0.73 |
| | (Z)-9-十四碳烯醛 (Z)-9-Tetradecenal | 2.42 | 4.67 | 0.80 | — |
| | 顺-11-十六烷烯醛 Cis-11-Hexadecenal | — | — | 0.62 | — |
| | (Z)-7-十六碳烯醛 (Z)-7-Hexadecenal | 3.13 | 6.18 | 2.57 | 8.95 |
| | 棕榈醛 Palmitaldehyde | 3.27 | — | — | — |
| | 十八烷醛 Octadecanal | — | 1.51 | 0.51 | 0.84 |

| 续表 4 Continued Table 4 | | | | | % |
|---------------------------|---|-------|-------|-------|--------|
| 挥发性化合物 Volatile compounds | | CK | BS | HNa | BS+HNa |
| 醇类 Alcohols | 2-乙基-1-己醇 2-Ethyl-1-hexanol | 3.24 | 2.60 | 3.35 | 2.14 |
| | 1-辛烯-3醇 (Z)-1-Octene-3-ol | 4.24 | 3.39 | — | 2.99 |
| | (±)-α-红没药醇 Alpha-bisabolol | — | — | — | 0.40 |
| | 3,7,11,15-3,7,11,15-四甲基-2-十六碳烯-1-醇 | — | — | 1.03 | — |
| | 3,7,11,15-Tetramethyl-2-hexadecen-1-ol | — | — | — | — |
| 酮类 Ketone | 油醇 9-Octadecen-1-ol, (Z)- | — | — | 0.98 | — |
| | 2-(2-辛烯基)-环戊酮 Cyclopentanone, 2-(2-octen-1-yl)- | 0.26 | 0.33 | — | — |
| | β-紫罗酮 Beta-ionone | 0.47 | 0.54 | — | — |
| | 环十五烷酮 Cyclopentadecanone | 0.94 | — | — | — |
| 酸类 Acids | 1-(2,2-二甲基环己基)乙酮 1-(2,2-Dimethylcyclohexanone) | 1.04 | — | 1.27 | 1.26 |
| | 1-氨基-1-环辛烷羧酸 1-Aminocyclooctane-1-carboxylic acid | 1.27 | 1.40 | 2.44 | 0.93 |
| | 3-氧-2-(2'-戊烯基)-环戊烷乙酸 Jasmonic acid | — | — | — | 0.47 |
| | 顺-9-十四碳烯酸 Myristoleic acid | — | — | — | 0.60 |
| 酯类 Esters | 异戊酸甲硫醇酯 S-methyl 3-methylbutanethioate | — | 0.26 | — | — |
| | 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇 1-单异丁酸酯 | 1.13 | 0.68 | — | 0.89 |
| | 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentenediol monoisobutyrate | — | — | — | — |
| | 顺式茉莉酸甲酯 Methyl jasmonate | 1.37 | 1.20 | 1.85 | 2.21 |
| | 棕榈酸异丙酯 Isopropyl palmitate | — | 0.82 | 0.49 | — |
| | 对苯二甲酸二丁酯 Dibutyl terephthalate | 8.04 | 5.38 | 10.70 | 7.43 |
| | 邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate | 1.33 | 1.28 | 2.99 | 2.63 |
| 烷烃类 Alkanes | 3,3-二甲基己烷 3,3-Dimethylhexane | 1.51 | 0.62 | 0.75 | 0.39 |
| | 4,4-二甲基辛烷 4,4-Dimethyloctane | 0.67 | 0.38 | 0.58 | 0.42 |
| | 2,6,10-三甲基十二烷 2,6,10-Trimethyldodecane | 1.18 | 0.32 | 1.85 | — |
| | 十四烷 Tetradecane | 4.68 | 3.73 | 3.54 | 3.87 |
| | 2,6,10-三甲基十四烷 2,6,10-Trimethyltetradecane | 1.86 | 1.30 | 1.64 | 3.18 |
| | 1-(2-甲基丁基)环戊烯 1-(2-Methylbutyl) cyclopentene | — | 0.55 | — | 0.53 |
| | 正十六烷 Hexadecane | 20.06 | 20.96 | 30.05 | 20.08 |
| | 正十八烷 n-Octadecane | 6.39 | 4.40 | 9.25 | 8.86 |
| | 十九烷 Nonadecane | 2.52 | 1.62 | 2.33 | — |
| | 二十烷 Eicosane | 1.62 | 2.87 | 3.04 | 6.46 |
| | 二十一烷 Heneicosane | 0.49 | 1.62 | 1.18 | 3.73 |
| | 新植二烯 Neophytadiene | 2.56 | — | — | — |
| 芳香族 Aromatics | 二十六烷 Hexacosane | — | 2.08 | — | — |
| | 1-亚乙基-1H-茚 1H-Indene, 1-ethylidene- | 0.64 | 1.47 | — | — |
| | 萘 Naphthalene | 0.70 | 0.55 | 0.46 | — |
| | 1,6-二甲基萘 1,6-Dimethylnaphthalene | 0.36 | 1.97 | — | — |
| | 2,7-二甲基萘 2,7-DiMethylnaphthalene | — | 0.95 | — | — |
| | 2,4-二叔丁基苯酚 2,4-Di-tert-butylphenol | 5.64 | 6.98 | 5.09 | 4.34 |
| | 2,6-二叔丁基苯酚 2,6-Di-tert-butylphenol | 3.35 | 2.83 | — | 3.75 |
| 其他类 Others | 2-溴-4,6-二-叔-丁基苯酚 2-Bromo-4,6-di-tert-butylphenol | — | — | 1.17 | — |
| | 4,6-二叔丁基间苯二酚 4,6-Di-tert-butylresorcinol | — | — | 0.48 | — |
| | 2,5-二甲基吡嗪 2,5-Dimethylpyrazine | 4.85 | 5.27 | 0.65 | 3.98 |
| | N,N-二丁基甲酰胺 N,N-Dibutylformamide | 3.69 | 3.25 | 3.78 | 3.21 |
| | 1,2-二溴十二烷 1,2-Dibromododecane | 1.53 | 0.88 | 0.41 | 0.42 |

注：“—”表示未检测出该化合物，下表同。Note: “—” indicates that the compound was not detected. The same as below.

如图 1 所示,挥发性风味化合物种类 BS 组最多,其次为对照组和 HNa 组,BS+HNa 组中挥发性物质种类最少,提示 BS 的处理可能增加烷烃类、脂类和醛类化合物种类;并且 BS+HNa 组挥发性物质种类中酸类物质种类多于其他各组,芳香族和醛类物质少于其他组。如图 2 所示,各组检测到的挥发性物质种类中,烷烃类物质的相对含量最高,对照组、BS 组、HNa 组、BS+HNa 组含量分别为 43.54%、40.45%、54.21%、47.52%。BS 处理使得烷烃类物质减少,醇类和芳香族化合物增加;而 HNa 处理使

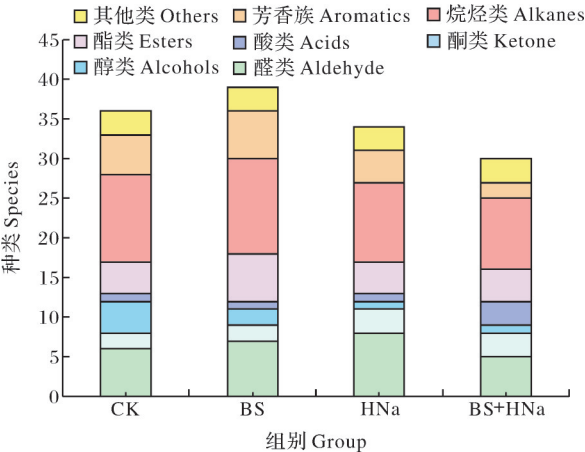


图 1 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉挥发性化合物种类

Fig. 1 The types of volatile compounds in the muscle of *Procambarus clarkii* at different levels of sodium humate and *Bacillus subtilis* addition

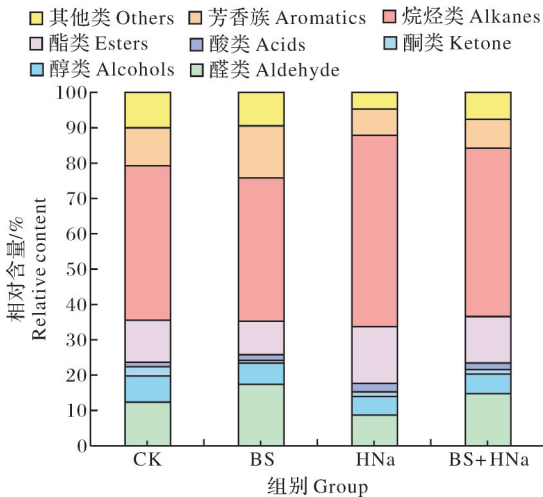


图 2 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉挥发性化合物相对含量

Fig. 2 The relative contents of volatile compounds in the muscle of *Procambarus clarkii* at different levels of sodium humate and *Bacillus subtilis* addition

得烷烃类和脂类增加;联合处理组烷烃类和脂类物质增加,芳香类物质减少,提示联合使用产生拮抗效应。

仅依靠物质的相对含量衡量挥发性物质对风味的贡献不够全面和准确,因此利用计算 ROAV 方法,进一步分析不同挥发性成分对虾肉风味的贡献程度。由表 5 可知,主要挥发性风味物质是贡献度

表 5 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾主要挥发性风味物质的相对气味活度

Table 5 The relative odor activities of the main volatile flavor substances of *Procambarus clarkii* at different addition levels of sodium humate and *Bacillus subtilis*

| 挥发性化合物 Volatile compounds | 觉察阈值/ (μg/kg) Perceived threshold | 气味描述 Odor description | 相对气味活度 Relative odor activity value | | | |
|-----------------------------------|---|---------------------------------------|--|--------|--------|--------|
| | | | CK | BS | HNa | BS+HNa |
| 苯乙醛 Phenylacetaldehyde | 4 | 水果香 Fruity | — | 16.40 | — | 17.16 |
| 壬醛 Nonanal | 1 | 青草味、油脂味、鱼腥味 Grassy, greasy, fishy | 87.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 癸醛 Decanal | 2 | 青草味、肥皂味 Grassy, soapy | 12.25 | 5.80 | 14.07 | — |
| 十一醛 Undecanal | 5 | 水果香、花香 Fruity, floral | — | — | 4.12 | — |
| 月桂醛(十二烷醛) Lauraldehyde | 1.07 | 脂肪香、木质香 Buttery, woody | — | 26.54 | 25.12 | 26.61 |
| 1-辛烯-3-醇 (Z)-1-Octene-3-ol | 1.5 | 土味、蘑菇味、鱼腥味 Earthy, mushroom, fishy | 100.00 | 90.40 | — | 77.74 |
| 十四烷 Tetradecane | 1 000 | 烷烃气味 Alkane-like | 0.16 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 萘 Naphthalene | 60 | 香樟气味 Camphoraceous | 0.41 | 0.37 | 0.32 | — |
| 邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate | 260 | 芳香气味 Aromatic | 0.18 | 0.20 | 0.48 | 0.39 |
| 2,5-二甲基吡嗪 2,5-Dimethylpyrazine | 800 | 坚果香、烘烤香 Nutty, roasty | 0.21 | 0.26 | 0.03 | 0.19 |

注：部分风味描述来自网站 (femaflavor.org/flavor-library)。Note: Some flavor descriptions are from the website (femaflavor.org/flavor-library).

最大的挥发性物质,对照组为 1-辛烯-3 醇,BS 组、HNa 组和 BS+HNa 组主要挥发性风味物质为壬醛,将主要挥发性物质 ROAV 值定为 100,对其他物质进行分析,筛选 ROAV>0.1 的挥发性物质。对照组、BS 组、HNa 组和 BS+HNa 组 虾 肉 样 品 的 ROAV>1 的关键挥发性物质分别有 3 种、5 种、4 种和 4 种。

2.4 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾的肌肉滋味特性

如图 3 所示,判别分析因子 DF1、DF2 的贡献率分别为 98.80%、1.18%,累积贡献率约为 99.98%,两者贡献率之和越接近 1,样品原始信息包含度越大,说明 DFA 结果能够反映各试验组虾肉的整体滋味信息。对照、BS、HNa、BS+HNa 组的滋味轮廓分别分布在第四、三、三、二象限,且各试验组虾肉的置信区间不存在重合,这表明滋味特征存在明显差别。DF1 贡献率>90%,可忽略 DF2 轴,直接通过 DF1 正负轴分析组间差异 BS、HNa、BS+HNa 组的处理使得结果都在 DF1 的负轴,与对照组差异较大,可能是对苦味和咸味的抑制。

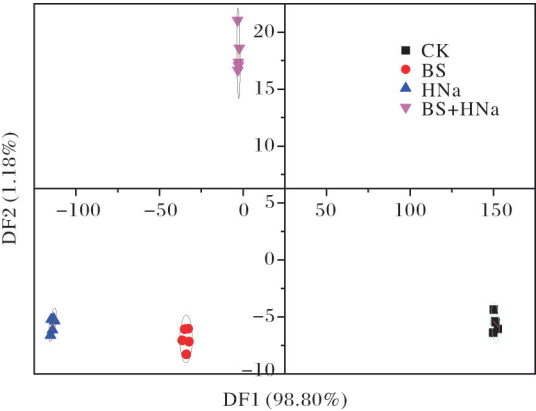


图 3 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉的电子舌 DFA 分析图

Fig. 3 Analysis diagrams of the electronic tongue DFA of *Procambarus clarkii* muscle at different levels of sodium humate and *Bacillus subtilis* addition

电子舌的 7 个传感器中,AHS、CTS、NMS、ANS、SCS 分别对酸味、咸味、鲜味、甜味、苦味敏感,PKS、CPS 为通用传感器,一般用来反映检测样品的复合滋味。如图 4 所示,各试验组克氏原螯虾在 CTS、SCS 传感器上的差异性最大,BS+HNa 组响应强度最低,显著低于其他各组($P<0.05$),提示其苦味和咸味低于其他各组。而 BS+HNa 组 NMS 相应强度最高($2\,247.67\pm8.90$),显著高于 BS 组和对照

组($P<0.05$),HNa 组 ANS 响应度最高,与 BS+HNa 组没有显著差异($P>0.05$),显著高于 BS 组和对照组($P<0.05$),提示 BS+HNa 组试验虾的口感比对照组更加鲜甜。双因素方差分析结果如表 6 所示,腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的交互作用,对试验虾咸苦滋味的减少和鲜甜滋味的提升有极显著影响($P<0.001$)。

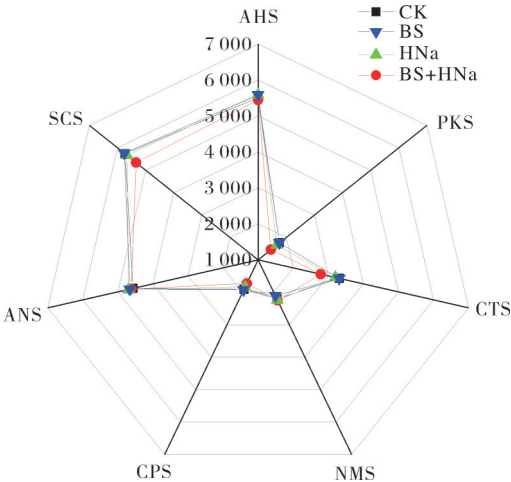


图 4 不同腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌添加水平下克氏原螯虾肌肉的电子舌雷达图

Fig. 4 Electronic tongue radar images of *Procambarus clarkii* muscle at different levels of sodium humate and *Bacillus subtilis* addition

表 6 电子舌对克氏原螯虾肌肉的味觉分析双因素方差分析 P 值

Table 6 Two-factor ANOVA *P*-value of taste analysis of *Procambarus clarkii* muscle by electronic tongue

| 传感器名称 The name of the sensor | HNa | BS | HNa+BS |
|---------------------------------|--------|--------|--------|
| AHS | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| PKS | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| CTS | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| NMS | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| CPS | <0.001 | 0.003 | <0.001 |
| ANS | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| SCS | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

3 讨 论

3.1 腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾肌肉营养组成的影响

水产品的品质由肌肉的营养价值和感官品质决定,营养价值主要通过蛋白质、脂肪和氨基酸等含量

判断,感官品质主要由滋味、风味和质构等组成^[15]。蛋白质含量是评价肌肉品质的重要依据^[16]。本试验中,饲料中添加腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌可以显著提升粗蛋白和粗脂肪的含量,降低水分含量,并且联合腐殖酸钠或枯草芽孢杆菌组粗蛋白水平最高;可能是腐殖酸钠改善了养殖动物的肠道环境^[17],促进枯草芽孢杆菌等益生菌定植^[8],从而提升养殖动物的消化和吸收能力和饲料利用率。上述结果表明腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的添加可以提升克氏原螯虾的营养价值,其他研究与本研究结果一致,饲料中添加枯草芽孢杆菌可以显著提升凡纳滨对虾^[18]、波斯鲟(*Acipenser persicus*)^[19]的体成分中粗蛋白、粗脂肪的比例;但也有研究指出水体中添加腐殖酸对尼罗罗非鱼的全鱼干物质、粗蛋白和灰分含量没有显著影响^[20],推测腐殖酸钠的添加方式影响了试验虾的吸收和利用,腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌如何影响克氏原螯虾肌肉蛋白质沉积的机制仍需要进一步探究。

3.2 腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾肌肉理化特性的影响

色泽是肌肉的重要的理化特性之一^[21],亮度(L^*)、红度(a^*)、黄度(b^*)是评判肌肉色泽的3个指标,其中 L^* 值越高,肌肉亮度越高; a^* 值越高,肉品质越好; b^* 值越高,肉品质越差^[22]。本研究中腐殖酸钠与枯草芽孢杆菌联合添加使试验虾的 L^* 和 a^* 值显著增加, b^* 值显著下降,说明腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌可以显著提升克氏原螯虾的肌肉品质;研究表明肉色 a^* 、 b^* 值的变化与色素物质的含量及状态有关。如血红蛋白和肌红蛋白,可能是腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的抗氧化性^[23]阻止氧合肌红蛋白的进一步氧化和脂肪的过度沉积,保护了肉色^[24];薛俊敬^[25]在肉鸡日粮中添加 3×10^{10} CFU/kg 枯草芽孢杆菌的研究也得到类似的结果。

持水力是肌肉保持自身水分和吸收外来水分的能力,肌肉持水力低,说明水分流失快,可溶性蛋白和风味物质流失快,口感差且不利于加工^[3]。本试验中联合添加腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌可显著提高虾肉持水力,推测腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的抗氧化性保护细胞组织的完整性,从而提升了肌肉组织的持水力;除此之外,腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的交互作用还显著提升了试验虾肌肉的硬度、内聚性和咀嚼性,研究表明应激会导致水生动物肌肉细胞凋亡,使得肌肉持水力和质地下降^[26],并且提升抗氧化酶活

性可以促进胶原蛋白的合成^[27],可能是腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌提升了试验虾机体的抗氧化能力和免疫性能^[23],减少应激从而提升了肌肉理化性质,与Yang等^[28]报道的一致,饲料中添加枯草芽孢杆菌可以提升水生动物肌肉的硬度、咀嚼性和回复性。综上,腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌可以显著改善克氏原螯虾的肌肉理化性质,但具体的机制仍需要深入研究。

3.3 腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾肌肉挥发性风味物质的影响

克氏原螯虾的总体风味主要取决于挥发性风味物质的相对含量和感官阈值,部分物质对总体风味具有显著贡献,为虾肉的主要呈味物质;挥发性风味物质中醛类物质具有果香、花香等香气,且阈值低,对食品风味有重要影响^[29];苯乙醛为凤信子、山楂花香味,在低浓度为果香型^[30],2类物质只在BS、BS+HNa组中检出;月桂醛能够提供脂肪香和木质香,十八烷醛则具有椰子香气,BS、HNa、BS+HNa组虾肉均检测出。壬醛、癸醛是水产动物的重要腥味物质^[31],对照组虾肉检测到腥味物质含量高于BS+HNa组,说明腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的添加可以减弱克氏原螯虾的鱼腥味使其更加鲜美。N,N-二丁基甲酰胺和1,2-二溴十二烷则呈氨味、鱼腥味和刺激性的不良气味^[32],前者广泛存在于水产动物中^[33],这2种物质在BS+HNa组肌肉中含量最低,在对照组最高。以上结果表明腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的添加可以提升克氏原螯虾肌肉的香味,减少土腥味、氨味等不良气味。

3.4 腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾肌肉滋味的影响

对肌肉滋味的评价通常有感官评价和电子舌技术2种方式,电子舌技术代替舌头上的味觉感受器,可以更加客观准确地评价虾肉的滋味物质^[34]。本研究中联合添加腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌可以显著降低电子舌对咸味、苦味的响应度,提高对甜味、鲜味的响应度,说明腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的添加整体上改善了虾肉品味,可能是腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌抑制了脂质氧化和蛋白质氧化,降低苦味和腥味物质的形成。与本研究结果一致,王劲松等^[35]研究中益生菌也可以显著提升鲈鱼肌肉电子舌甜味响应度。综上所述,腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌的联合添加能显著改善克氏原螯虾的营养组成和肌肉品质,且效果优于单独添加,未来的研究可

以进一步探索不同添加水平下腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾生长性能和肌肉品质的长期影响。

参考文献 References

- [1] YUE G H, LI J L, BAI Z Y, et al. Genetic diversity and population structure of the invasive alien red swamp crayfish [J]. Biological invasions, 2010, 12(8): 2697-2706.
- [2] 农业部渔业渔政管理局. 2023 年中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2023. Fisheries Bureau of the Ministry of Agriculture. China fisheries statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2023 (in Chinese).
- [3] 邵俊杰, 徐宇, 李佳佳, 等. 不同规格克氏原螯虾肌肉营养成分和品质特性的比较研究 [J]. 天津农业科学, 2025, 31(1): 52-59. SHAO J J, XU Y, LI J J, et al. Comparative study on muscle nutritional components and quality characteristics of different sizes of *Procambarus clarkii* [J]. Tianjin agricultural sciences, 2025, 31(1): 52-59 (in Chinese with English abstract).
- [4] XU X D, ZHENG X C, ZHOU Q L, et al. The bile acid metabolism of intestinal microorganisms mediates the effect of different protein sources on muscle protein deposition in *Procambarus clarkii* [J/OL]. Microorganisms, 2024, 13(1): 11 [2024-09-30]. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010011>.
- [5] SUBEDI B, SHRESTHA A. A review: application of probiotics in aquaculture [J/OL]. Int J Forest, Anim Fish Res, 2020, 4(5): 1 [2024-09-30]. <https://dx.doi.org/10.22161/ijfof.4.5.1>.
- [6] 姚先赐, 管乐琪, 孙帅, 等. 复合益生菌对白羽肉鸡肌肉品质的影响及作用机理 [J]. 微生物学报, 2024, 64(2): 516-529. YAO X C, GUAN L Q, SUN S, et al. Probiotic mixture improves meat quality of white feather broilers [J]. Acta microbiologica sinica, 2024, 64(2): 516-529 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵怡迪. 复合益生菌改善鲤肠道健康、生长性能及肉品质研究 [D]. 新乡: 河南师范大学, 2021. ZHAO Y D. Study on improving intestinal health, growth performance and meat quality of common carp by compound probiotics [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [8] SWIDSINSKI A, DÖRFFEL Y, LOENING-BAUCKE V, et al. Impact of humic acids on the colonic microbiome in healthy volunteers [J]. World journal of gastroenterology, 2017, 23(5): 885-890.
- [9] ZHANG A R, PIRZADO S A, LIU G H, et al. Dietary supplementation with sodium humate improves egg quality and immune function of laying hens [J]. Journal of applied animal nutrition, 2020, 8(2): 93-99.
- [10] 李贞明, 余苗, 唐延天, 等. 腐殖酸钠对白羽肉鸡营养物质表观消化率、粪便微生物及其代谢产物的影响 [J]. 畜牧兽医学报, 2023, 54(12): 5091-5100. LI Z M, YU M, TANG Y T, et al. Effects of sodium humate on nutrient apparent digestibility, fecal microorganisms and their metabolites in white-feathered broilers [J]. Acta veterinaria et zootechnica sinica, 2023, 54(12): 5091-5100 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李志鹏, 周晓娇, 水珊珊, 等. 低温贮藏中华管鞭虾肌肉品质及组织蛋白酶 H 活性变化 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(22): 306-313. LI Z P, ZHOU X J, SHUI S S, et al. Influence of cold storage on the quality of muscle and the activity of cathepsin H in red shrimp (*Solenocera crassicornis*) [J]. Science and technology of food industry, 2021, 42(22): 306-313 (in Chinese with English abstract).
- [12] 左子珍, 王海波, 柴志欣, 等. 过瘤胃蛋氨酸对牦牛半腱肌肉品质、挥发性风味物质及脂肪酸组成的影响 [J]. 畜牧兽医学报, 2024, 55(3): 1102-1114. ZUO Z Z, WANG H B, CHAI Z X, et al. Effects of rumen-protected methionine on meat quality, volatile flavor compounds and fatty acid composition of yak semitendinosus [J]. Acta veterinaria et zootechnica sinica, 2024, 55(3): 1102-1114 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘钰琪, 陈澄, 陈周, 等. 酵母提取物对鱼糜凝胶品质的影响 [J]. 肉类研究, 2019, 33(5): 1-6. LIU Y Q, CHEN C, CHEN Z, et al. Effects of yeast extract on the gel quality of surimi [J]. Meat research, 2019, 33(5): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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 with English abstract).
- [15] 马睿. 营养与养殖大黄鱼品质之间关系的初步研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. MA R. Preliminary study on the relationship between nutrition and quality of cultured *Pseudosciaena crocea* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [16] 周剑, 赵仲孟, 黄志鹏, 等. 池塘和稻田养殖模式下克氏原螯虾肌肉和肝脏营养成分比较 [J]. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 162-169. ZHOU J, ZHAO Z M, HUANG Z P, et al. Comparison of nutrient components in muscles and hepatopancreas of pond- and paddy field-cultured *Procambarus clarkii* [J]. Progress in fishery sciences, 2021, 42(2): 162-169 (in Chinese with English abstract).
- [17] 葛玲瑞, 向劲, 刘科均, 等. 腐殖酸钠对稻虾养殖环境中水质和浮游生物的短期影响 [J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(4): 440-450. GE L R, XIANG J, LIU K J, et al. Short-term effect of sodium humate on physicochemical properties and plankton community of water in rice shrimp co-culture environment [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(4): 440-450 (in Chinese with English abstract).
- [18] SADAT HOSEINI M N, ADORIAN T J, GHAFARI F H, et al. The effects of dietary probiotic Bacilli (*Bacillus subtilis*

- and *Bacillus licheniformis*) on growth performance, feed efficiency, body composition and immune parameters of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) postlarvae[J]. Aquaculture research, 2018, 49(5): 1926-1933.
- [19] DARAFAH F, SOLTANI M, ALI ABDOLHAY H, et al. Improvement of growth performance, digestive enzymes and body composition of Persian sturgeon (*Acipenser persicus*) following feeding on probiotics: *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis* and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Aquaculture research, 2020, 51(3): 957-964.
- [20] SARKHEIL M, ZAHEDI S, SAFARI O, et al. Effects of humic acid on nutrient removal efficiency of aquatic duckweed (*Lemna minor*) and both growth performance, and hemato-biochemical parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in water recirculating system [J]. International journal of phytoremediation, 2024, 26(4): 481-492.
- [21] TUME R K, SIKES A L, TABRETT S, et al. Effect of background colour on the distribution of astaxanthin in black tiger prawn (*Penaeus monodon*): effective method for improvement of cooked colour [J]. Aquaculture, 2009, 296(1/2): 129-135.
- [22] FLETCHER D L. Poultry meat quality [J]. Worlds Poult Sci J, 2002, 58(2): 131-145.
- [23] 张千, 郭薇, 莫爱杰, 等. 腐殖酸钠和枯草芽孢杆菌对克氏原螯虾生长性能、抗氧化能力和免疫酶活的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(3): 100-108. ZHANG Q, GUO W, MO A J, et al. Effects of sodium humate and *bacillus subtilis* on growth performance, antioxidant capacity and immunoenzyme activity of *Procambarus clarkii* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(3): 100-108 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王永辉, 马俐珍. 肌肉颜色变化的机理及其控制方法初探[J]. 肉类工业, 2006(4): 18-21. WANG Y H, MA L Z. Study on mechanism of color changes of muscle and possible control method [J]. Meat industry, 2006(4): 18-21 (in Chinese with English abstract).
- [25] 薛俊敬. 硒代蛋氨酸与枯草芽孢杆菌对热应激肉鸡肉品质的影响及其机制研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022. XUE J J. Mechanism and effects of selenomethionine and *Bacillus subtilis* on meat quality in broilers under heat stress [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [26] PENG L, ZHANG L Z, XIONG S B, et al. A comprehensive review of the mechanisms on fish stress affecting muscle qualities: nutrition, physical properties, and flavor [J/OL]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2024, 23(3): e13336 [2024-09-30]. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13336>.
- [27] WEI Z H, MA J, PAN X Y, et al. Dietary hydroxyproline improves the growth and muscle quality of large yellow croaker *Larimichthys crocea* [J]. Aquaculture, 2016, 464: 497-504.
- [28] YANG G, CAO H Z, JIANG W H, et al. Dietary supplementation of *Bacillus cereus* probiotics in Pengze crucian carp (*Carassius auratus* var. Pengze): effects on growth performance, fillet quality, serum biochemical parameters and intestinal histology [J]. Aquaculture research, 2019, 50(8): 2207-2217.
- [29] 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. GUO J G. Study on the factors influencing the flavor quality of *Fenneropenaeus chinensis* “Huanghai No. 3” [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [30] 吴燕燕, 陈茜, 石慧, 等. 不同干燥方式对卵形鲳鲹鱼片风味的影响[J]. 水产学报, 2022, 46(7): 1188-1200. WU Y Y, CHEN Q, SHI H, et al. Effects of different drying methods on the flavor of *Trachinotus ovatus* fillets [J]. Journal of fisheries of China, 2022, 46(7): 1188-1200 (in Chinese with English abstract).
- [31] 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, et al. The volatile compounds in muscle of cultivated red drum *Sciaenops ocellatus* [J]. Fisheries science, 2009, 28(6): 303-307 (in Chinese with English abstract).
- [32] MORITA K, KUBOTA K, AISHIMA T. Comparison of aroma characteristics of 16 fish species by sensory evaluation and gas chromatographic analysis [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2003, 83(4): 289-297.
- [33] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: a review [J]. Food chemistry, 1998, 62(4): 415-424.
- [34] 王兴亚, 庞广昌, 李阳. 电子舌与真实味觉评价的差异性研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 213-216. WANG X Y, PANG G C, LI Y. Research progress of difference between electronic tongue and real taste evaluation [J]. Food & machinery, 2016, 32(1): 213-216 (in Chinese with English abstract).
- [35] 王劲松, 张昌桌, 陈燕, 等. 饲喂干酪乳杆菌 K17 对加州鲈鱼肌肉滋味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 46-53. WANG J S, ZHANG C Z, CHEN Y, et al. Impact of supplement of *Lactobacillus casei* K17 on fillet tastes of largemouth bass *Micropterus salmoides* [J]. Science and technology of food industry, 2022, 43(12): 46-53 (in Chinese with English abstract).

Effects of sodium humate and *Bacillus subtilis* supplementation on nutritional components, physicochemical properties, flavor substances and taste of *Procambarus clarkii* muscle

ZHANG Qian¹, GUO Wei¹, MO Aijie¹, YANG Huijun¹, GU Zemao^{1,2}, YUAN Yongchao^{1,2}

1.College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Shuangshui Shuangliu Institute, Huazhong Agricultural University/Engineering Research Center of Ministry of Education for Green Development of Aquatic Biological Industry in Yangtze River Economic Belt/Hubei Engineering Technology Research Center for Breeding and Healthy Aquaculture of Famous Fish/ Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China

Abstract To enhance the muscle quality of *Procambarus clarkii* and provide a high-quality protein supply, 360 *P. clarkii* with an average weight of (13.59 ± 0.25) g were randomly divided into 4 groups. Each group was fed one of the following diets: a basal diet (control check, CK), a basal diet supplemented with 0.5% *Bacillus subtilis* (BS), a basal diet supplemented with 0.5% sodium humate (HNa), and a basal diet supplemented with 0.5% *Bacillus subtilis* and 0.5% sodium humate (BS + HNa), respectively. The effects of sodium humate and *B. subtilis* on the nutritional composition, texture, volatile flavor compounds, and taste of *P. clarkii* were investigated. The results showed that in terms of nutritional composition, the crude protein, crude fat, and ash content of the shrimp meat in the BS + HNa group were significantly higher than those in both the control group and the BS group. Regarding the physical and chemical properties of the muscle, the L^* and a^* values of the BS + HNa group were significantly higher than those of the other groups, while the b^* value was significantly lower. Moreover, the elasticity, hardness, resilience, chewiness, and cohesiveness of the shrimp meat in this group were significantly higher than those of the other groups. In terms of volatile substance detection, 36, 39, 34, and 30 volatile compounds were identified in the control, BS, HNa, and BS + HNa groups, respectively. Among these compounds, the content of lauraldehyde, which is associated with a fatty aroma, was significantly higher in the BS, HNa, and BS + HNa groups compared to the control group. Conversely the content of 1-octen-3-ol, which is related to a fishy odor, was significantly lower in the experimental groups than in the control group. In terms of muscle taste characteristics detected by the sensor, the BS + HNa group exhibited the lowest responses to bitterness and saltiness, which were significantly lower than those of the other groups. Conversely, this group demonstrated the highest responses to sweetness and umami, surpassing those of the control group. In conclusion, the combined addition of 0.5% sodium humate and 0.5% *Bacillus subtilis* can significantly improve the nutritional composition and muscle quality of *P. clarkii*, and this combined approach is superior to the individual additions.

Keywords sodium humate; *Bacillus subtilis*; *Procambarus clarkii*; muscle quality; trophic component

(责任编辑:边书京)