

DOI: 10.12264/JFSC2025-0055

寒地养殖三种配组中华绒螯蟹雄体品质及有毒重金属含量比较

苏俊杰^{1,2}, 王世会^{1,3*}, 赵志刚^{1,3}, 罗亮^{1,3}, 张瑞^{1,3}, 郭坤^{1,3}, 张淑琪^{1,2}

1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江省冷水性鱼类种质资源及增养殖重点开放实验室, 黑龙江 哈尔滨 150070;
2. 大连海洋大学食品科学与工程学院, 辽宁 大连 116023;
3. 中国水产科学研究院盐碱水域渔业工程技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150070

摘要: 为筛选适宜在寒地养殖的中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)种质并评价其品质特征, 本研究对辽河自交(LL)、长江自交(YY)、辽河♀×长江♂杂交(LY)三种配组中华绒螯蟹扣蟹进行为期 5 个月的养殖, 获得成体雄蟹并比较了可食率、肥满度、色泽、常规营养成分、脂肪酸组成、游离氨基酸组成、矿物质元素组成以及有毒重金属元素含量。结果表明, LY 的出肉率(muscle yield, MY)和总可食率(total edible yield, TEY)显著高于其余两组($P<0.05$); 三组雄蟹肥满度无显著差异($P>0.05$); YY 和 LY 头胸甲红度值、肝胰腺亮度值均显著高于 LL ($P<0.05$), LY 肝胰腺黄度值显著高于其余两组($P<0.05$); LL 肝胰腺指数 HSI 和性腺指数 GSI 较高; 肝胰腺和肌肉中的总脂含量高于其余两组, YY 肝胰腺和性腺系统中的灰分含量显著高于其余两组($P<0.05$), LY 性腺系统和肌肉的粗蛋白含量显著高于其余两组($P<0.05$); LY 肝胰腺中 Σ PUFA、 Σ EFA、n-3/n-6 PUFA 和 DHA/EPA 高于其余两组; LY 性腺系统中脯氨酸 Pro 含量、肌肉中丙氨酸 Ala 和脯氨酸 Pro 含量显著高于其余两组($P<0.05$); LY 性腺系统和肌肉的总苦味氨基酸 Σ TBV 相对较少; LY 性腺系统和肌肉的总矿物质元素 Σ TME 显著高于其余两组($P<0.05$), LY 的铁 Fe 和锌 Zn 含量显著高于其余两组($P<0.05$); LL、YY 和 LY 中有毒重金属含量远低于食品中污染物限量国家标准。综上所述, LY 在出肉率、总可食率、头胸甲红度值、肝胰腺黄度值、性腺系统和肌肉的粗蛋白含量、肝胰腺中 Σ PUFA、 Σ EFA、n-3/n-6 PUFA 和 DHA/EPA、肌肉中丙氨酸 Ala 和脯氨酸 Pro 含量、性腺系统和肌肉的总矿物质元素 Σ TME、可食组织中铁和锌含量物等指标上占据优势, 表现出更高的食用和营养价值。

关键词: 中华绒螯蟹; 寒地; 营养品质; 有毒重金属

中图分类号: S966

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2025)08–1093–17

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)又名河蟹, 以其鲜美的肉质和丰富的营养成分而受到消费者的喜爱, 河蟹在中国饮食文化中有着悠久的历史, 与其他水产品相比, 其碳水化合物、蛋白质和多不饱和脂肪酸等含量更为丰富, 是秋季传统的美食, 具有很高的经济价值^[1]。20 世纪 70 年代, 随着河蟹人工繁育技术的突破^[2], 河蟹养殖在各地迅速发展, 养殖区域主要分布在江苏、湖北、安

徽和辽宁等省份, 养殖模式有池塘养殖、稻蟹综合种养、湖泊生态围网养殖等^[3]。河蟹产业快速发展得益于良种、良法等多方因素共同作用, 其中优良品种的持续研发及推广应用是推动我国河蟹产业快速发展的重要因素之一。截至 2025 年初, 农业农村部已批准 8 个国审河蟹新品种^[4–6]。近些年, 随着河蟹养殖产业规模扩大, 以我国东北地区为代表的寒地河蟹产业迅速发展。黑龙江省是

收稿日期: 2025-03-14; 修订日期: 2025-03-25.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2401003); 黑龙江省种业创新发展基金项目; 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD59).

作者简介: 苏俊杰(1999–), 男, 硕士研究生, 从事河蟹养殖与品质评价. E-mail: sjj1142533889@163.com

通信作者: 王世会, 副研究员, 从事河蟹遗传育种、健康养殖与品质评价. E-mail: wangshihui@hrfri.ac.cn

寒地^[7]的典型代表之一,境内河流、湖泊众多,水面资源丰富,为发展水产养殖提供了良好的条件。全省年平均水资源量 810 亿 m³,水面总面积 3037 km²^[8]。近些年来,黑龙江省深入贯彻落实绿色健康水产养殖“五大行动”,积极推动水产养殖业高效发展,促进水产养殖增产增收^[9]。

随着人民生活水平的提高,选择优质安全的水产品已成为大众消费的重要方向。因此,评估水产品的品质和安全十分必要。合理的营养摄入是维持身体健康的重要基础,充足的营养能够提高身体抵抗疾病的能力,降低感染和慢性病的风险^[10]。食品安全直接关系到消费者的健康和生命安全,食物中存在的重金属及其他病菌微生物污染导致食源性疾病,甚至危及生命^[11]。由于河蟹是甲壳类底栖生物,易富集环境中的污染物,尤其是有毒重金属污染。有毒重金属元素在进入人体后,因其半衰期长,对人体是慢性但永久性的伤害,其在人体内不断积累,最终达到蓄积毒性阈值,将对人体造成不可逆转的损害^[12]。目前关于河蟹营养品质和有毒重金属元素的报道相对较多。丁昊翔等^[13]比较了浙江湖州、江苏阳澄湖、上海崇明等六个产地“六月黄”河蟹的营养品质,表明六产地“六月黄”河蟹可食率和常规生化组成相似,但色泽和脂肪酸含量存在显著性差异;钱晓莉等^[14]评估了池塘养殖、湖泊养殖及野生河蟹的矿物质组成及风险,证实三种来源河蟹可食组织中矿物质含量存在一定差异;Guo 等^[15]探究了不同肝胰腺红度的河蟹营养品质,发现肝胰腺红度值越高,河蟹的营养品质越高;Zhang 等^[16]研究了稻田养殖雄性河蟹的营养成分和生长发育情况,表明雄性河蟹肝胰腺和性腺中脂肪、蛋白质等营养物质含量较低;Przemyslaw 等^[17]研究了河蟹可食部分的含量及营养成分,认为河蟹是一种富含优质脂肪酸的水产品。在河蟹有毒重金属元素研究方面,Yang 等^[18]在探讨微塑料对河蟹幼蟹体内铅的联合作用时发现,多金属蛋白酶和铅联合暴露显著增加了河蟹体内铅的积累量;Zhang 等^[19]采用风险评估方法评价了江苏受污染区域内河蟹体内化学物质和重金属元素对人体暴露的影响,认为少量食用受污染区域养成的河蟹潜在

致癌风险较低;Bai 等^[20]评估了食用不同水系野生河蟹健康风险,证实食用野生河蟹不会对人体健康造成影响;Tang 等^[21]评估了池塘养殖和稻蟹共作两种养殖模式对河蟹体内微量元素(Ag、Al、As、Ba、Cd 等)积累和食用安全性风险,认为两种模式养殖的河蟹没有或有很低的健康风险。

目前对河蟹品质和有毒重金属元素的研究大多集中在长江流域。寒地具有生物生长周期短、夏季日照时间长、昼夜温差较大等养殖环境的特殊性,团队前期已经筛选了适宜寒地养殖河蟹种质^[22],但对其品质特征和有毒重金属积累情况并不清楚,因此十分有必要对寒地环境下不同水系河蟹的品质和有毒重金属积累情况进行比较。为此,本研究评估了在寒地池塘养殖模式下不同水系河蟹自交及杂交子一代成体雄蟹的可食率、色泽、常规营养成分、脂肪酸、游离氨基酸、矿物质元素和有毒重金属元素含量,旨在为筛选适宜寒地养殖的高品质河蟹种质提供基础依据,同时也为评估寒地养殖河蟹品质及有毒重金属含量提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验用蟹及样品采集

实验用蟹来自黑龙江省绥化市肇东市河蟹养殖试验基地(45.65°N, 125.77°E)。采集不同水系河蟹样本包括辽河自交 LL,长江自交 YY 和辽河♀×长江♂杂交 LY 三种组合的子一代成体雄蟹,其中不包含长江♀×辽河♂杂交组合的子代。寒地养殖河蟹的重要问题是由于生长期短,成蟹养成规格小,严重影响寒地河蟹产业发展。因此需要通过筛选大规格亲本繁育后代,并通过累代遗传,从而达到提升寒地养殖河蟹规格的目标。团队前期在长江水系河蟹收集的亲本规格为 150 g/只以上,而在辽河水系河蟹收集的亲本规格为 125 g/只以上,这导致长江♀和辽河♂无法在自然环境中交配繁育,因此笔者未收集到此种组合的雄蟹。2023 年 9 月 25 日开始随机采样,每种组合成体雄蟹各采集 20 只,体重及形态学参数如表 1 所示,送至中国水产科学研究院黑龙江水产研究所黑龙江省冷水性鱼类种质资源及增养殖重点开放实验室进行实验。

表 1 本研究使用的成年雄性中华绒螯蟹体重和形态学参数

Tab. 1 Body weight and morphological parameters of adult male *Eriocheir sinensis* used in this study

项目 item	LL	YY	LY
体重/g body weight	122.21±3.07	117.75±2.51	123.15±3.62
头胸甲长/mm carapace length	57.05±0.48	56.38±0.39	57.19±0.60
头胸甲宽/mm carapace width	63.04±0.55	62.51±0.48	62.92±0.65

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹。
Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*.

1.2 可食率测定

本研究中实验用河蟹经黑龙江水产研究所实验动物福利与伦理委员会审查和批准(申请编号: 20230910-001)。活体解剖, 用镊子夹取每只蟹全部肝胰腺及性腺组织并分别精确称重, 用于计算肝胰腺指数(hepatosomatic index, HSI, %)和性腺指数(gonadosomatic index, GSI, %)。随后将头胸甲样品、肝胰腺样品、性腺样品及剩余河蟹组织置于-20 ℃冰箱保存备用。刮取肌肉时, 先将-20 ℃保存的剩余河蟹组织室温解冻, 随后剪开附肢及腹部骨骼, 用镊子精确刮取附着在骨骼上的肌肉, 用于计算出肉率(muscle yield, MY, %), 总可食率(total edible yield, TEY, %)为 HSI、GSI 和 MY 三者之和。根据体重与头胸甲长, 计算饱满度(condition factor, CF)。

肝胰腺指数 HSI (%)=100%×肝胰腺重/体重;

性腺指数 GSI (%)=100%×性腺重/体重;

出肉率 MY (%)=100%×肌肉重/体重;

总可食率 TEY (%)=性腺指数 GSI+肝胰腺指数 HSI+出肉率 MY;

饱满度 CF (g/cm³)=体重/头胸甲长³。

1.3 色泽及常规营养成分测定

参照 Long 等^[23]的色泽测定方法, 用色差仪(CR-400, 日本柯尼卡美能达公司生产, 日本)测定头胸甲和肝胰腺干样色泽, L^* 代表亮度值, a^* 代表红度值, b^* 代表黄度值。采用真空冷冻干燥机(FD-1A-50, 北京博医康仪器有限公司, 中国)测定可食组织(肝胰腺、性腺系统和肌肉)的水分含量; 采用杜马斯燃烧定氮法测定粗蛋白, 仪器为

杜马斯全自动定氮仪(rapid N exceed Elementar, 德国艾力蒙塔公司, 德国); 采用 FOLCH 氯仿-甲醇溶解法测定总脂, 仪器为真空干燥箱(DZF-6050, 上海一恒科学仪器有限公司, 中国); 采用 550 ℃高温灼烧法测定灰分, 仪器为马弗炉(SX2-4-10, 上海一恒科学仪器有限公司, 中国)。通过水分数据, 将粗蛋白、总脂和灰分干重数据换算为湿重数据。

1.4 脂肪酸测定

参照 Wang 等^[24]的实验方法, 根据 GB 5009.168-2016^[25]中归一化法测定脂肪酸组成及百分比含量。吸取 8 mL 含 2%氢氧化钠的甲醇溶液, 注入脂肪酸提取物中, 连接好回流冷凝装置[水浴温度为(80±1) ℃], 在水浴中回流直到油滴完全消失。之后在冷凝器上端加入 7 mL 15%的三氟化硼甲醇溶液, 继续在水浴中回流 2 min, 最后用少量纯净水冲洗冷凝管。停止加热后将烧瓶从水浴中取出并迅速冷却至室温。加入 10~30 mL 正庚烷并振荡 2 min, 再加入适量饱和氯化钠水溶液, 静置分层。吸取 5 mL 左右上层正庚烷提取液并注入 25 mL 试管中, 加入 3~5 g 无水硫酸钠, 振荡 1 min, 静置分层后吸取上层溶液至进样瓶中以备测定。用 Agilent 7890B-5977A 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, 7890B-5977A, 安捷伦科技公司, 美国)进行脂肪酸分析, 毛细管柱采用 Omegawax320 型号(30.0 m × 0.32 mm, 美国)。

脂肪酸品质采用低胆固醇血症指数/高胆固醇血症比率(h/H)、动脉粥样硬化指数(AI)和血栓形成指数(TI)来评价^[26], 计算公式如下:

$$h/H = \frac{\sum(C18:1n9, C18:1n7, C18:2n6, C18:3n6, C18:3n3, C20:3n6, C20:4n6, C20:5n3, C22:4n6, C22:5n3, C22:6n3)}{\sum(C14:0, C16:0)}$$

$$AI = \frac{(C12:0 + 4 \times C14:0 + C16:0)}{(\sum n-6 \text{ PUFA} + \sum n-3 \text{ PUFA} + \sum \text{MUFA})}$$

$$TI = \frac{(C14:0 + C16:0 + C18:0)}{(0.5 \times \sum \text{MUFA} + 0.5 \times \sum n-6 \text{ PUFA} + 3.0 \times \sum n-3 \text{ PUFA} + n-3:n-6 \text{ PUFA})}$$

1.5 游离氨基酸测定

游离氨基酸测定参照 Chen 等^[27]实验方法。称取 0.1 g 左右干燥样品, 加入 15 mL 5% 三氯乙酸溶液, 匀浆 1 min 左右, 在冷却浴中超声处理 5 min 后静置 2 h, 在 4 °C、10000 r/min 条件下离心 15 min, 静置分层, 吸取约 5 mL 上清液, 加入适量 3 mol/L 氢氧化钠溶液使 pH 调节至 2.0, 用蒸馏水将溶液稀释至 25 mL, 充分混匀。最后将溶液通过 0.45 μm 滤膜过滤, 待测。用氨基酸自动分析仪(L-8800, 日立仪器有限公司, 日本)进行测定, 呈味强度值(TAV)为游离氨基酸含量与阈值之间的比值^[28]。

1.6 元素测定

元素按照 GB 5009.268-2016^[29]中电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定。称取干燥样品约 0.25 g (精确到 0.001 g), 置于微波消解仪内管底部, 加入 5 mL 硝酸、2 mL 双氧水和 1 mL 蒸馏水后封盖, 并设置空白对照组。将装有混合溶液的消解管置于微波消解仪(MARS, 美国 CEM 公司, 美国)中混匀消解 1 h 左右。之后将消解管冷却至室温, 缓慢拧开盖子并取下, 将混合溶液倒至 50 mL 离心管中, 加入 0.5 mL 内标液(100 μg/L)和适量纯净水定容至 50 mL, 混匀后静置待测。元素测定采用电感耦合等离子体质谱仪(7500, 安捷伦科技公司, 美国)。

1.7 数据分析

所有数据均采用平均值±标准误($\bar{x} \pm SE$)表示。采用 EXCEL 软件处理实验数据, SPSS 26.0 软件(IBM 公司, 美国)统计分析, Levene 法进行方差齐性检验, 当不满足齐性方差时对百分比数据进行反正弦或平方根处理。采用 ANOVA 进行方差分析, Duncan 氏法进行多重比较, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 总可食率和肥满度比较

表 2 显示长江自交组后代 YY 的肝胰腺指数

HSI 和性腺指数 GSI 显著低于辽河自交组后代 LL 和辽河♀×长江♂杂交组后代 LY($P < 0.05$), LY 的出肉率 MY 和总可食率 TEY 显著高于 LL 和 YY($P < 0.05$), 而肥满度 CF 则无显著性差异($P > 0.05$)。

表 2 辽河与长江水系中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的可食组织比例和肥满度比较

Tab. 2 Comparison of edible ratio and condition factor of inbred and hybrid adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze River system

n=20; $\bar{x} \pm SE$			
项目 item	LL	YY	LY
肝胰腺指数/% HSI	6.95±0.20 ^a	5.00±0.23 ^b	6.65±0.18 ^a
性腺指数/% GSI	1.91±0.08 ^a	1.57±0.08 ^b	2.05±0.06 ^a
出肉率/% MY	26.96±0.61 ^b	26.31±0.55 ^b	28.71±0.50 ^a
总可食率/% TEY	35.26±0.68 ^b	32.88±0.73 ^c	37.46±0.58 ^a
肥满度/(g/cm ³) CF	0.66±0.01	0.66±0.01	0.66±0.01

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹。同行数据上标不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*. Values in the same row with different superscripts are significantly different among groups($P < 0.05$).

2.2 色泽比较

解剖采样过程中发现 YY 肝胰腺湿样色泽全部为黄黑色, LL 约 10% 为黄黑色, 而 LY 则均为橙黄色, 无黄黑色个体。表 3 为成年雄性中华绒螯蟹头胸甲和肝胰腺干样色泽。三组雄蟹头胸甲 L^* 和 b^* 均无显著性差异($P > 0.05$), LL 的 a^* 显著低于 YY 和 LY($P < 0.05$); 三组肝胰腺中 LL 的 L^* 显著低于 YY 和 LY($P < 0.05$), a^* 无显著性差异($P > 0.05$), LY 的 b^* 显著高于 LL 和 YY($P < 0.05$)。从外观上(图 1)看, YY 和 LY 头胸甲干样的红度较高, LL 和 LY 的肝胰腺干样红度和黄度较高, YY 的肝胰腺干样红度较低。

2.3 常规营养成分比较

表 4 为成年雄性中华绒螯蟹可食组织常规营养成分比较。YY 肝胰腺中的水分和灰分显著高于 LL 和 LY($P < 0.05$), LL 的总脂显著高于 YY 和

表 3 辽河与长江水系中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的头胸甲和肝胰腺干样色泽

Tab. 3 The carapace and hepatopancreas coloration of inbred and hybrid adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze River system

$n=20; \bar{x} \pm SE$

项目 item	色泽参数 color paramant	LL	YY	LY
头胸甲 carapace	亮度 L^*	68.13±0.52	68.11±0.49	68.02±0.40
	红度 a^*	15.63±0.51 ^b	17.40±0.48 ^a	17.19±0.35 ^a
	黄度 b^*	41.37±0.71	40.77±0.85	42.03±0.84
肝胰腺 hepatopancreas	亮度 L^*	50.41±2.29 ^b	63.57±0.30 ^a	58.85±1.44 ^a
	红度 a^*	11.16±1.98	6.90±0.87	9.84±0.67
	黄度 b^*	29.34±2.96 ^{ab}	22.66±2.44 ^b	34.91±2.44 ^a

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹. 同行数据上标中含有不同字母表示差异显著($P<0.05$).

Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*. Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

LY($P<0.05$), 粗蛋白则无显著性差异($P>0.05$); YY 性腺系统中水分和灰分显著高于 LL 和 YY($P<0.05$), LY 的粗蛋白显著高于 LL 和 YY($P<0.05$), LL 和 YY 的总脂显著高于 LY($P<0.05$); YY

肌肉组织中水分更高, LY 粗蛋白更高, LL 总脂更高, 灰分无显著性差异($P>0.05$).

2.4 脂肪酸组成及含量比较

表 5 为成年雄性中华绒螯蟹可食组织中主要脂肪酸组成比较。YY 肝胰腺的 Σ SFA、 Σ MUFA、AI 和 TI 显著高于其余两组($P<0.05$), 而 ARA、EPA、DHA、 Σ PUFA、 Σ EFA、 Σ HUFA、 Σ n-3 PUFA、 Σ n-6 PUFA、n-3/n-6 PUFA、 Σ DHA+EPA、DHA/EPA 和 h/H 则显著低于其余两组($P<0.05$); LL 性腺系统中 ARA、 Σ n-6 PUFA 显著高于其余两组($P<0.05$), 而 DHA、 Σ n-3 PUFA、n-3/n-6 PUFA 和 DHA/EPA 则显著低于其余两组($P<0.05$); LL 肌肉组织中 ARA 和 Σ n-6 PUFA 显著高于其余两组($P<0.05$), YY 的 DHA 和 DHA/EPA 显著高于其余两组($P<0.05$), 而 Σ EFA 则显著低于其余两组($P<0.05$)。肝胰腺中, YY 的 h/H 显著低于其余两组($P<0.05$), 而 AI 和 TI 显著高于其余两组($P<0.05$), 说明低胆固醇血症的风险增加, 动脉粥样硬化和形成血栓的风险增加, 总体来说, 肝胰腺中显著性差异项明显比性腺系统和肌肉中的多, 这可能与 YY 肝胰腺色泽呈现黄黑色有关。



图 1 辽河与长江水系成年雄性中华绒螯蟹头胸甲和肝胰腺干样色泽外观

LL: 辽河自交中华绒螯蟹; YY: 长江自交中华绒螯蟹; LY: 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹.

Fig. 1 The coloration of carapace and hepatopancreas of adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze River system

LL: Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY: Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY: Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*.

2.5 游离氨基酸组成及含量比较

表 6 为成年雄性中华绒螯蟹可食组织中游离氨基酸组成及含量比较。YY 肝胰腺中半胱氨酸 Cys 和脯氨酸 Pro 含量显著低于其余两组($P<0.05$), LY 的必需氨基酸百分比 PETFAA 显著低于其余两组($P<0.05$); LY 性腺系统中脯氨酸 Pro 含量显著高于其余两组($P<0.05$), YY 的酪氨酸 Tyr 含量

显著高于其余两组($P<0.05$); LY 肌肉中丙氨酸 Ala、脯氨酸 Pro 显著高于其余两组($P<0.05$), LL 的甘氨酸 Gly、酪氨酸 Tyr 显著高于其余两组($P<0.05$)。三种可食组织中, 肌肉的游离氨基酸含量最高(1467.00~1668.81 mg/100 g), 其次是肝胰腺(588.00~995.99 mg/100 g), 最少的是性腺系统(422.33~474.77 mg/100 g)。呈鲜味氨基酸主要为

表 4 辽河与长江水系中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的可食组织常规营养成分比较(湿重)

Tab. 4 The edible tissue proximate composition of inbred and hybrid adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze river system (wet weight)

n=3; $\bar{x} \pm SE$; %			
项目 item	LL	YY	LY
肝胰腺 hepatopancreas			
水分 moisture	59.16±1.49 ^b	74.91±1.89 ^a	60.78±1.11 ^b
粗蛋白 crude protein	9.38±0.40	10.69±0.90	10.00±0.54
总脂 total lipid	31.38±0.19 ^a	11.01±0.63 ^c	25.66±0.48 ^b
灰分 ash	0.77±0.08 ^b	1.42±0.09 ^a	1.09±0.06 ^{ab}
性腺系统 gonadal system			
水分 moisture	75.09±0.36 ^b	76.17±0.35 ^a	74.31±0.25 ^b
粗蛋白 crude protein	16.91±0.01 ^b	16.26±0.00 ^c	17.53±0.07 ^a
总脂 total lipid	0.96±0.01 ^a	0.91±0.02 ^a	0.71±0.03 ^b
灰分 ash	1.94±0.01 ^b	2.78±0.04 ^a	2.22±0.11 ^b
肌肉 muscle			
水分 moisture	81.49±0.45 ^b	82.86±0.54 ^a	80.34±0.37 ^b
粗蛋白 crude protein	16.24±0.23 ^b	14.59±0.06 ^c	16.75±0.06 ^a
总脂 total lipid	1.10±0.01 ^a	0.86±0.03 ^c	0.96±0.00 ^b
灰分 ash	1.34±0.01	1.38±0.06	1.56±0.06

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹。同行数据上标中含有不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*. Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

谷氨酸 Glu, 呈甜味氨基酸主要为丙氨酸 Ala 和精氨酸 Arg, 呈苦味氨基酸主要为组氨酸 His。部分氨基酸有甜味和苦味两种呈味特征, 如脯氨酸 Pro、精氨酸 Arg、赖氨酸 Lys、缬氨酸 Val 和甲硫氨酸 Met。LL 肌肉中总鲜味氨基酸含量比其余两组雄蟹略高, 同时 LL 肝胰腺和肌肉中总苦味

氨基酸含量略高, LY 肝胰腺和肌肉中总甜味氨基酸含量较高(表 7)。

2.6 矿物质元素组成及评价比较

成年雄性中华绒螯蟹可食组织中矿物质元素组成及含量如表 8 所示。LL 肝胰腺中钠 Na 含量显著低于其余两组($P<0.05$), YY 的总矿物质元素 Σ TME 含量显著高于其余两组($P<0.05$), LY 的铁 Fe 和锌 Zn 含量显著高于其余两组($P<0.05$), 其他元素含量无显著性差异($P>0.05$); LY 性腺系统中钠 Na、钙 Ca、铁 Fe、铜 Cu 元素含量显著高于其余两组($P<0.05$), LL 的锰 Mn 元素含量显著高于其余两组($P<0.05$), LY 的总矿物质元素 Σ TME 含量显著高于其余两组($P<0.05$), 其余元素含量无显著性差异($P>0.05$); LY 肌肉组织中的钠 Na、钾 K、锌 Zn、铜 Cu、总矿物质元素 Σ TME 含量显著高于其余两组($P<0.05$), LL 的硒 Se 含量显著高于其余两组($P<0.05$), 钙 Ca、铁 Fe 元素含量则显著低于其余两组($P<0.05$), YY 的锰 Mn 元素含量显著高于其余两组($P<0.05$), 其他元素含量无显著性差异($P>0.05$)。

表 9 为 19~50 岁成年人群每 100 g 河蟹可食组织中参考摄入量(DRI)。LY 肝胰腺中铁 Fe 和硒 Se 百分比含量超过推荐摄入量(RDA), 剩余元素均未超过适宜摄入量(AI)和可耐受最高摄入量(UL); 性腺系统和肌肉组织无元素超过推荐摄入量 RDA, 适宜摄入量 AI 和可耐受最高摄入量 UL。LY 可食组织中铁 Fe 相较其余两组 DRI 明显更高, 其性腺系统和肌肉中铜 Cu、钠 Na 和钙 Ca 中的 DRI 高于其余两组。

表 5 辽河与长江水系中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的可食组织中主要脂肪酸组成比较(百分比含量)

Tab. 5 The edible tissue major fatty acid composition of inbred and hybrid adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze River system (percent of total fatty acids)

脂肪酸 fatty acid	肝胰腺 hepatopancreas			性腺系统 gonadal system			肌肉 muscle		
	LL	YY	LY	LL	YY	LY	LL	YY	LY
C14:0	0.66±0.01 ^a	0.56±0.01 ^b	0.55±0.02 ^b	0.39±0.02	0.53±0.18	0.34±0.00	0.29±0.05	0.23±0.02	0.25±0.01
C15:0	0.52±0.01 ^b	0.65±0.01 ^a	0.48±0.03 ^b	ND	0.26±0.03 ^a	0.23±0.01 ^a	0.29±0.03	0.24±0.02	0.27±0.00

(待续 to be continued)

(续表 5 Tab. 5 continued)

脂肪酸 fatty acid	肝胰腺 hepatopancreas			性腺系统 gonadal system			肌肉 muscle		
	LL	YY	LY	LL	YY	LY	LL	YY	LY
C16:0	16.59±0.20 ^b	23.72±0.64 ^a	16.53±0.17 ^b	9.23±0.68	10.20±0.68	9.84±0.01	13.14±0.24 ^{ab}	12.68±0.16 ^b	13.43±0.13 ^a
C17:0	0.44±0.01 ^b	0.77±0.01 ^a	0.35±0.01 ^c	0.76±0.01 ^{ab}	0.78±0.02 ^a	0.68±0.03 ^b	1.00±0.01 ^a	0.83±0.01 ^b	0.84±0.05 ^b
C18:0	2.66±0.05 ^b	4.94±0.11 ^a	2.53±0.04 ^b	8.63±0.40	9.10±0.31	9.15±0.38	9.63±0.22	9.58±0.08	9.76±0.12
C20:0	0.46±0.00 ^b	0.67±0.02 ^a	0.37±0.01 ^c	0.68±0.02	0.33±0.06	0.43±0.15	0.70±0.07	1.35±0.43	0.76±0.12
Σ SFA	22.12±0.27 ^b	32.78±0.50 ^a	21.57±0.28 ^b	20.61±0.00	21.59±0.53	21.00±0.68	25.18±0.21	25.12±0.29	25.41±0.24
C15:1n5	0.19±0.01 ^a	0.23±0.03 ^a	0.12±0.00 ^b	1.46±0.09 ^a	1.21±0.06 ^{ab}	0.99±0.03 ^b	1.72±0.02 ^a	1.21±0.08 ^b	1.06±0.06 ^b
C16:1n7	6.79±0.21 ^a	3.29±0.08 ^b	5.75±0.37 ^a	2.04±0.44	1.48±0.29	1.99±0.11	1.72±0.21	1.05±0.14	1.53±0.21
C17:1n7	0.59±0.02 ^a	0.58±0.01 ^{ab}	0.52±0.02 ^b	0.49±0.21	0.27±0.02	0.29±0.03	0.32±0.02 ^a	0.25±0.01 ^b	0.32±0.00 ^a
C18:1n9	34.94±0.35 ^b	52.45±0.07 ^a	35.88±0.37 ^b	23.28±1.31	25.25±0.07	25.54±0.13	24.70±0.36	26.35±0.42	26.30±0.56
C20:1n9	0.57±0.01 ^b	1.11±0.05 ^a	0.66±0.03 ^b	0.97±0.03 ^c	1.34±0.00 ^a	1.15±0.04 ^b	0.70±0.04	0.82±0.06	0.80±0.03
C22:1n9	0.20±0.04 ^b	0.89±0.01 ^a	0.13±0.01 ^b	ND	0.44±0.04 ^a	0.30±0.11 ^a	0.13±0.07	0.25±0.14	0.13±0.07
Σ MUFA	43.41±0.52 ^b	58.53±0.10 ^a	43.17±0.18 ^b	31.39±1.16	32.61±0.24	32.67±0.17	29.28±0.65	29.95±0.50	30.13±0.92
C18:2n6	26.29±0.48 ^a	6.55±0.24 ^b	27.66±0.39 ^a	13.50±0.93	13.56±0.03	14.75±0.21	14.93±0.11 ^{ab}	14.22±0.13 ^b	16.00±0.69 ^a
C18:3n3	3.82±0.06 ^a	0.28±0.03 ^b	4.18±0.14 ^a	1.86±0.12	1.72±0.07	2.00±0.11	2.43±0.13 ^a	1.75±0.03 ^b	2.64±0.21 ^a
C20:2n6	1.33±0.05 ^a	0.70±0.06 ^c	1.05±0.04 ^b	4.20±0.12	3.98±0.25	3.84±0.10	2.50±0.07 ^a	2.52±0.08 ^a	2.00±0.08 ^b
C20:3n6	0.22±0.04	0.19±0.01	0.13±0.01	ND	0.32±0.01 ^a	0.18±0.03 ^b	0.16±0.01	0.19±0.01	0.10±0.05
C20:4n6 (ARA)	1.05±0.04 ^a	0.22±0.02 ^c	0.58±0.03 ^b	15.21±0.64 ^a	12.58±0.54 ^b	11.35±0.24 ^b	8.06±0.16 ^a	6.95±0.32 ^b	5.70±0.25 ^c
C20:3n3	0.33±0.01 ^a	ND	0.37±0.02 ^a	0.74±0.04	0.68±0.05	0.78±0.00	0.50±0.03	0.45±0.01	0.53±0.04
C20:5n3 (EPA)	0.96±0.05 ^a	0.23±0.02 ^c	0.70±0.04 ^b	9.65±0.63	9.04±0.04	9.77±0.01	13.18±0.44	12.46±0.10	12.48±0.73
C22:6n3 (DHA)	0.24±0.05 ^b	ND	0.38±0.02 ^a	2.23±0.14 ^b	3.94±0.07 ^a	3.77±0.04 ^a	3.80±0.15 ^c	6.38±0.13 ^a	5.01±0.50 ^b
Σ PUFA	34.23±0.68 ^a	8.16±0.43 ^b	35.05±0.45 ^a	47.38±0.52	45.80±0.75	46.42±0.45	45.55±0.84	44.93±0.38	44.45±0.00
Σ SFA:									
Σ MUFA:	1.00:1.96:1.55	1.00:1.79:0.25	1.00:2.00:1.63	1.00:1.52:2.30	1.00:1.51:2.12	1.00:1.56:2.21	1.00:1.16:1.81	1.00:1.19:1.79	1.00:1.19:1.75
Σ PUFA									
Σ EFA	30.11±0.51 ^a	6.83±0.27 ^b	31.84±0.48 ^a	15.35±1.04	15.28±0.04	16.75±0.32	17.36±0.08 ^{ab}	15.97±0.13 ^b	18.64±0.90 ^a
Σ HUFA	6.61±0.23 ^a	0.91±0.06 ^b	6.34±0.17 ^a	29.68±1.33	28.26±0.48	27.84±0.34	28.12±0.67	28.19±0.45	26.46±1.30
Σ n-3 PUFA	5.34±0.16 ^a	0.51±0.04 ^b	5.63±0.16 ^a	14.47±0.69 ^b	15.37±0.06 ^{ab}	16.32±0.07 ^a	19.90±0.52	21.04±0.20	20.66±1.07
Σ n-6 PUFA	28.89±0.56 ^a	7.65±0.31 ^b	29.42±0.34 ^a	32.91±0.16 ^a	30.43±0.81 ^b	30.10±0.37 ^b	25.65±0.32 ^a	23.89±0.27 ^b	23.79±0.38 ^b
n-3/n-6 PUFA	0.18±0.00 ^a	0.07±0.00 ^b	0.19±0.00 ^a	0.44±0.02 ^b	0.51±0.02 ^{ab}	0.54±0.00 ^a	0.78±0.01	0.88±0.01	0.87±0.06
Σ DHA+EPA	1.19±0.10 ^a	0.15±0.08 ^b	1.08±0.03 ^a	11.88±0.77	12.97±0.03	13.54±0.04	16.98±0.59	18.84±0.23	17.49±1.22
DHA/EPA	0.25±0.04 ^b	ND	0.55±0.07 ^a	0.23±0.00 ^c	0.44±0.01 ^a	0.39±0.01 ^b	0.29±0.00 ^c	0.51±0.01 ^a	0.40±0.02 ^b
<i>h/H</i>	3.91±0.06 ^a	2.47±0.07 ^b	4.07±0.07 ^a	6.86±0.38	6.24±0.53	6.62±0.08	5.01±0.14	5.29±0.08	4.99±0.05
AI	0.25±0.00 ^b	0.39±0.01 ^a	0.24±0.00 ^b	0.14±0.00	0.16±0.02	0.14±0.00	0.19±0.01	0.18±0.00	0.19±0.00
TI	0.38±0.01 ^b	0.84±0.02 ^a	0.37±0.01 ^b	0.24±0.01	0.25±0.01	0.24±0.01	0.26±0.00	0.25±0.00	0.26±0.01

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹; ND 代表低于检出限; ΣSFA, 总饱和脂肪酸; ΣMUFA, 总单不饱和脂肪酸; ΣPUFA, 总多不饱和脂肪酸; ΣEFA, 总必需脂肪酸; ΣHUFA, 总高不饱和脂肪酸; Σn-3 PUFA, 总ω-3多不饱和脂肪酸; Σn-6 PUFA, 总ω-6多不饱和脂肪酸。h/H, 低胆固醇血症/高胆固醇血症比率; AI, 动脉粥样硬化指数; TI, 血栓形成指数。同行数据上标中含有不同字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe ♀×Yangtze ♂ hybrid *Eriocheir sinensis*; ND represents below the detection limit value; ΣSFA, total saturated fatty acids; ΣMUFA, total monounsaturated fatty acids; ΣPUFA, total polyunsaturated fatty acids; ΣEFA, total essential fatty acids; ΣHUFA, total highly unsaturated fatty acids; Σn-3 PUFA, total ω-3 polyunsaturated fatty acids; Σn-6 PUFA, total ω-6 polyunsaturated fatty acids. *h/H*, hypocholesterolaemic/hypercholesterolaemic ratio; AI, index of atherogenicity; TI, index of thrombogenicity. Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 6 辽河与长江水系中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的可食组织中游离氨基酸组成及含量比较(湿重)

Tab. 6 The free amino acid composition and content in the edible tissue of inbred and hybrid adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze River system (wet weight)

游离氨基酸 free amino acid	肝胰腺 hepatopancreas			性腺系统 gonadal system			肌肉 muscle		
	LL	YY	LY	LL	YY	LY	LL	YY	LY
天冬氨酸 Asp	41.99±3.55	21.79±6.41	34.95±3.66	47.12±6.61	49.09±9.96	40.77±7.73	9.68±0.60	8.05±0.91	7.28±0.22
精氨酸 Arg	199.98±25.89	123.12±10.54	199.57±46.42	53.65±3.64	57.04±1.05	49.07±2.12	429.24±21.89	395.85±16.99	444.90±32.93
丙氨酸 Ala	111.21±4.68	71.38±1.35	156.17±46.72	84.18±3.16	89.20±0.39	82.53±8.15	306.63±12.54 ^{ab}	283.38±10.23 ^b	357.51±15.01 ^a
半胱氨酸 Cys	2.92±0.26 ^a	1.48±0.16 ^b	2.55±0.37 ^{ab}	0.91±0.17	0.09±0.04	0.88±0.33	0.82±0.13	0.87±0.10	0.77±0.10
谷氨酸 Glu	77.59±9.48	48.95±6.15	82.53±7.72	74.74±3.97	79.60±7.53	69.19±11.78	64.13±4.06	59.88±3.63	55.31±5.86
甘氨酸 Gly	57.92±2.46	38.27±1.58	68.44±17.28	30.97±0.98	31.81±0.03	31.20±1.44	378.54±4.62 ^a	348.17±1.60 ^b	358.04±2.19 ^b
组氨酸 His	20.78±1.75	13.12±1.15	19.64±3.39	7.63±0.27	7.93±0.51	6.89±1.30	24.19±2.18	21.88±1.92	21.85±1.35
脯氨酸 Pro	56.83±2.19 ^a	2.98±0.05 ^b	62.41±6.01 ^a	51.62±1.37 ^b	59.97±2.54 ^{ab}	67.34±1.74 ^a	165.49±1.98 ^b	164.32±2.06 ^b	256.64±0.32 ^a
丝氨酸 Ser	5.42±0.89	2.85±0.37	4.43±0.86	1.11±0.02	1.07±0.00	0.96±0.06	3.36±0.14	2.52±0.20	3.18±0.23
酪氨酸 Tyr	50.69±4.77	33.28±3.47	45.40±9.79	3.06±0.91 ^b	19.26±2.08 ^a	10.75±2.14 ^{ab}	31.57±3.85 ^a	29.06±2.93 ^{ab}	17.24±2.14 ^b
异亮氨酸 Ile▲	32.32±3.97	20.98±1.48	26.22±7.32	8.49±0.25	8.72±0.37	7.92±2.33	12.77±1.98	11.30±1.77	9.28±1.81
亮氨酸 Leu▲	73.03±8.93	46.87±6.33	62.15±14.45	11.85±0.10	12.40±0.32	9.13±2.68	20.08±2.98	18.35±2.60	18.10±3.13
赖氨酸 Lys▲	90.76±6.68	58.62±4.75	87.75±23.72	16.77±0.33	16.93±0.46	13.90±3.95	41.20±4.90	37.64±5.38	34.61±4.84
甲硫氨酸 Met▲	20.56±0.86	13.37±0.52	19.24±3.84	6.72±0.99	6.82±0.53	3.65±1.05	27.43±2.69	24.65±2.45	17.10±4.53
苯丙氨酸 Phe▲	53.36±4.94	32.04±3.26	42.29±10.57	12.01±0.35	12.18±0.44	8.60±1.67	16.49±1.36	14.26±1.10	13.31±2.46
苏氨酸 Thr▲	46.19±3.31	29.36±2.16	43.36±8.92	10.61±0.83	11.71±0.37	10.86±1.23	23.60±2.73	21.55±2.07	29.84±4.27
缬氨酸 Val▲	45.84±4.45	29.55±3.30	38.88±11.25	10.43±0.69	10.93±0.32	8.68±1.89	28.54±3.57	25.26±3.54	23.87±5.13
总必需氨基酸ΣEFAA	362.06±33.13	230.78±21.81	319.89±80.08	76.89±3.05	79.70±0.52	62.74±14.81	170.12±20.20	153.01±18.91	146.09±26.16
总游离氨基酸ΣFAA	987.40±88.85	588.00±50.23	995.99±214.99	431.88±0.58	474.77±17.28	422.33±51.60	1583.77±62.95	1467.00±51.96	1668.81±16.29
必需氨基酸百分比 PETFAA	36.66±0.06 ^a	39.22±0.36 ^a	31.87±1.16 ^b	17.80±0.68	16.81±0.72	14.65±1.72	10.71±0.85	10.40±0.92	8.74±1.48

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹; ▲为必需氨基酸. 同行数据上标中含有不同字母表示差异显著($P<0.05$).

Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*; ▲, essential amino acid. Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 7 辽河与长江水系中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的可食组织中游离氨基酸的阈值和呈味强度值(TAV)比较

Tab. 7 The free amino acid threshold and taste activity value (TAV) in edible tissue of inbred and hybrid adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze River system

游离氨基酸 free amino acid	肝胰腺 hepatopancreas			性腺系统 gonadal system			肌肉 muscle			阈值/ (mg/100 mL) threshold	呈味特征 flavor characteristic
	LL	YY	LY	LL	YY	LY	LL	YY	LY		
天冬氨酸 Asp	0.42	0.22	0.35	0.47	0.49	0.41	0.10	0.08	0.07	100	鲜(+) umami (+)
谷氨酸 Glu	2.59	1.63	2.75	2.49	2.65	2.31	2.14	2.00	1.84	30	鲜(+) umami (+)
总鲜味氨基酸 ΣTUV	3.01	1.85	3.10	2.96	3.14	2.71	2.23	2.08	1.92		
丙氨酸 Ala	1.85	1.19	2.60	1.40	1.49	1.38	5.11	4.72	5.96	60	甜(+) sweetness (+)
甘氨酸 Gly	0.45	0.29	0.53	0.24	0.24	0.24	2.91	2.68	2.75	130	甜(+) sweetness (+)
丝氨酸 Ser	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	150	甜(+) sweetness (+)
苏氨酸 Thr	0.18	0.11	0.17	0.04	0.05	0.04	0.09	0.08	0.11	260	甜(+) sweetness (+)
脯氨酸 Pro	0.19	0.01	0.21	0.17	0.20	0.22	0.55	0.55	0.86	300	甜/苦(+) sweetness/bitterness (+)

(待续 to be continued)

(续表 7 Tab. 7 continued)

游离氨基酸 free amino acid	肝胰腺 hepatopancreas			性腺系统 gonadal system			肌肉 muscle			阈值/ (mg/100 mL) threshold	呈味特征 flavor characteristic
	LL	YY	LY	LL	YY	LY	LL	YY	LY		
精氨酸 Arg	4.00	2.46	3.99	1.07	1.14	0.98	8.58	7.92	8.90	50	甜/苦(+) sweetness/bitterness (+)
总甜味氨基酸 ΣTSV	6.70	4.09	7.53	2.93	3.12	2.87	17.27	15.97	18.60		
赖氨酸 Lys	1.82	1.17	1.75	0.34	0.34	0.28	0.82	0.75	0.69	50	甜/苦(-) sweetness/bitterness (-)
缬氨酸 Val	1.15	0.74	0.97	0.26	0.27	0.22	0.71	0.63	0.60	40	甜/苦(-) sweetness/bitterness (-)
甲硫氨酸 Met	0.69	0.45	0.64	0.22	0.23	0.12	0.91	0.82	0.57	30	苦/甜/硫(-) bitterness/sweetness/sulphur (-)
组氨酸 His	1.04	0.66	0.98	0.38	0.40	0.34	1.21	1.09	1.09	20	苦(-) bitterness (-)
异亮氨酸 Ile	0.36	0.23	0.29	0.09	0.10	0.09	0.14	0.13	0.10	90	苦(-) bitterness (-)
亮氨酸 Leu	0.38	0.25	0.33	0.06	0.07	0.05	0.11	0.10	0.10	190	苦(-) bitterness (-)
苯丙氨酸 Phe	0.59	0.36	0.47	0.13	0.14	0.10	0.18	0.16	0.15	90	苦(-) bitterness (-)
总苦味氨基酸 ΣTBV	6.02	3.85	5.44	1.49	1.53	1.19	4.09	3.68	3.30		

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹; “+”表示味道愉悦; “-”表示味道不好; ΣTUV, 总鲜味氨基酸; ΣTSV, 总甜味氨基酸; ΣTBV, 总苦味氨基酸。
Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*; + means pleasant taste; - means unpleasant taste. ΣTUV, total umami values; ΣTSV, total sweetness values; ΣTBV, total bitterness values.

2.7 有毒重金属元素含量比较

表 10 显示肝胰腺中铅 Pb 和汞 Hg 有毒重金属含量低于检出限, YY 的镉 Cd 元素含量显著低于其余两组($P<0.05$), LL 的铬 Cr 元素含量显著高于其余两组($P<0.05$); 性腺系统中, 三组样品的铅 Pb、汞 Hg 和镉 Cd 元素含量均低于检出限, 铬 Cr 元素含量均低于食物中污染物限量, 且无显著性差异($P>0.05$); 肌肉中, 铅 Pb、汞 Hg 和镉 Cd 元素含量低于检出限, 铬 Cr 元素含量均低于食物中污染物限量, 且无显著性差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 总可食率和肥满度比较

肝胰腺、性腺和肌肉是河蟹的三大可食组织, 三者占体重百分比之和为总可食率^[30], 因此河蟹的出肉率 MY、肝胰腺指数 HSI 和性腺指数 GSI 成为评价其可食品质的主要指标^[1]。值得注意的是, YY 雄蟹在寒地养殖期间全部个体均出现肝胰腺色泽偏黑的症状, 可能是由于对环境的不适应导致肝胰腺出现病变或感染, 从而影响肝胰腺的色泽。研究表明, 长江自交 YY 的 GSI 显著低于辽河自交 LL 和辽河♀×长江♂杂交 LY($P<0.05$), 说明长江水系河蟹在寒地养殖其性腺发育较慢。

上文提到 YY 的肝胰腺色泽为黄黑色, 可能发生了病变, 而肝胰腺是河蟹重要的代谢和消化器官^[31], 肝胰腺病变可能通过营养供给中断、激素失调、毒素积累等多途径影响性腺发育, 导致 YY 的性腺发育缓慢。而 LL 和 LY 的 HSI 和 GSI 无显著性差异($P>0.05$), 同时三种组合河蟹 CF 无显著性差异($P>0.05$), 均与以往报道相似^[32-33]。LY 的 MY 和 TEY 显著高于 LL 和 YY($P<0.05$), 说明 LY 对寒地养殖表现出更强的适应性, 可食品质更优。

3.2 色泽比较

色泽不仅决定着食物的市场价格, 还密切影响顾客的消费欲望^[34], 对评价河蟹感官品质至关重要。通常使用亮度值 L^* 、红度值 a^* 和黄度值 b^* 评价河蟹色泽品质, 头胸甲及肝胰腺组织红度值大小密切影响河蟹的感官评价^[35], 本研究表明, YY 和 LY 的头胸甲 a^* 均显著高于 LL($P<0.05$), LY 肝胰腺的 b^* 显著高于其余两组($P<0.05$), LY 的头胸甲和肝胰腺外观均表现出较高的红度和黄度, 这说明 LY 的头胸甲和肝胰腺色泽品质更加优异。头胸甲和肝胰腺中类胡萝卜素的组成和含量密切影响着河蟹对应组织的色泽^[36], 同时类胡萝卜素具有抗氧化和免疫功能, 能够明显提高水产动物的生长性能、繁殖性能、抗疾病能力和成活率^[37],

表 8 辽河与长江水系中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的可食组织中矿物质元素组成及含量比较(湿重)
Tab. 8 The mineral element composition and content in the edible tissue of inbred and hybrid adult male
Eriocheir sinensis in the Liaohe and Yangtze River system (wet weight)

元素 element	肝胰腺 hepatopancreas			性腺系统 gonadal system			肌肉 muscle		
	LL	YY	LY	LL	YY	LY	LL	YY	LY
钠 Na	2755.73±67.73 ^b	4023.90±317.20 ^a	3882.38±308.97 ^a	7937.72±17.54 ^c	8736.71±55.86 ^b	10609.15±1.97 ^a	3693.33±39.85 ^b	4600.72±233.64 ^a	5318.25±328.78 ^a
钾 K	1989.72±223.63	2346.71±174.74	2072.17±198.32	2190.94±67.16	2392.72±78.66	2145.34±24.18	2379.29±57.10 ^{ab}	2305.15±68.25 ^b	2783.75±192.91 ^a
钙 Ca	829.63±96.07	1129.29±173.84	999.04±71.63	2015.83±33.93 ^b	1860.14±1.14 ^b	2195.17±40.46 ^a	1276.79±15.21 ^b	1555.52±37.94 ^a	1631.23±115.93 ^a
镁 Mg	159.81±11.52	246.67±36.80	191.62±32.72	365.62±18.24	364.07±10.94	351.42±14.06	335.50±4.75	357.64±9.06	386.77±36.97
铁 Fe	128.08±12.71 ^b	77.82±13.48 ^b	231.03±20.22 ^a	9.53±0.00 ^b	10.06±0.03 ^b	12.91±0.58 ^a	13.08±1.41 ^b	17.16±1.08 ^a	18.28±0.77 ^a
锌 Zn	16.14±0.55 ^{ab}	14.60±1.01 ^b	18.90±1.06 ^a	9.59±0.13	9.76±0.31	9.39±0.08	38.68±0.26 ^b	39.09±0.32 ^b	43.14±1.13 ^a
铜 Cu	5.82±0.66	7.46±0.81	6.80±0.60	6.50±0.04 ^b	6.86±0.37 ^b	8.76±0.03 ^a	7.83±0.40 ^b	8.28±0.58 ^b	11.19±0.47 ^a
锰 Mn	2.29±0.29	4.81±1.00	3.11±0.69	3.48±0.05 ^a	2.90±0.14 ^b	2.81±0.07 ^b	0.56±0.06 ^b	0.89±0.06 ^a	0.52±0.04 ^b
硒 Se	0.68±0.06	0.63±0.03	0.67±0.02	0.43±0.01	0.38±0.01	0.37±0.02	0.31±0.01 ^a	0.25±0.00 ^b	0.29±0.02 ^{ab}
总矿物质元素 Σ TME	5887.90±310.36 ^b	7851.88±685.25 ^a	7045.72±516.03 ^{ab}	12539.64±137.00 ^c	13383.60±35.75 ^b	15335.32±48.02 ^a	7745.37±34.53 ^b	8884.71±232.92 ^{ab}	10193.43±667.62 ^a

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹. 同行数据上标中含有不同字母表示差异显著 ($P<0.05$).
Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*. Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 9 辽河与长江水中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的可食组织中矿物质元素品质评价(%膳食营养素参考摄入量)
Tab. 9 The edible tissue mineral element nutritional quality assessment of inbred and hybrid adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze River system (% DRI)
n=3; $\bar{x} \pm SE$

元素 element	膳食营养素参考 摄入量 mg/d DRI	肝胰腺 hepatopancreas			性腺系统 gonadal system			肌肉 muscle		
		LL	YY	LY	LL	YY	LY	LL	YY	LY
推荐摄入量 RDA										
镁 Mg	335-255	4.77-6.27	7.36-9.67	5.72-7.51	10.91-14.34	10.87-14.28	10.49-13.78	10.01-13.16	10.68-14.03	11.55-15.17
铁 Fe	18-8	71.15-160.10	43.23-97.27	128.35-288.79	5.29-11.91	5.59-12.57	7.17-16.14	7.27-16.35	9.54-21.46	10.16-22.85
铜 Cu	0.9	64.63	82.93	75.53	72.20	76.21	97.34	86.97	91.96	124.38
锌 Zn	11-8	14.67-20.17	13.27-18.25	17.18-23.62	8.72-11.99	8.88-12.20	8.53-11.73	35.16-48.35	35.54-48.87	39.21-53.92
硒 Se	0.055	124.36	114.76	121.09	77.73	69.30	67.18	55.84	44.65	53.59
适宜摄入量 AI										
钠 Na	1500	18.37	26.83	25.88	52.92	58.24	70.73	24.62	30.67	35.45
钾 K	4700	4.23	4.99	4.41	4.66	5.09	4.56	5.06	4.90	5.92
钙 Ca	1200	6.91	9.41	8.33	16.80	15.50	18.29	10.64	12.96	13.59
锰 Mn	2.3-1.8	9.94-12.70	20.93-26.74	13.53-17.28	15.14-19.34	12.59-16.09	12.22-15.62	2.44-3.12	3.88-4.96	2.25-2.88
可耐受最高摄入量 UL										
钠 Na	2300	11.98	17.50	16.88	34.51	37.99	46.13	16.06	20.00	23.12
钙 Ca	2500	3.32	4.52	4.00	8.06	7.44	8.78	5.11	6.22	6.52
镁 Mg	350	4.57	7.05	5.47	10.45	10.40	10.04	9.59	10.22	11.05
铁 Fe	45	28.46	17.29	51.34	2.12	2.24	2.87	2.91	3.81	4.06
铜 Cu	10	5.82	7.46	6.80	6.50	6.86	8.76	7.83	8.28	11.19
锌 Zn	40	4.03	3.65	4.72	2.40	2.44	2.35	9.67	9.77	10.78
锰 Mn	11	2.08	4.38	2.83	3.17	2.63	2.56	0.51	0.81	0.47
硒 Se	0.4	17.10	15.78	16.65	10.69	9.53	9.24	7.68	6.14	7.37

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹.
Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe♀×Yangtze♂ hybrid *Eriocheir sinensis*.

表 10 辽河与长江水系中华绒螯蟹自交与杂交成年雄性后代的可食组织中有毒重金属元素比较 (湿重)
Tab. 10 The edible tissue heavy metal element comparison of inbred and hybrid adult male *Eriocheir sinensis* in the Liaohe and Yangtze River system (wet weight)

n=3; $\bar{x} \pm SE$; mg/kg

重金属元素 heavy metal element	肝胰腺 hepatopancreas			性腺系统 gonadal system			肌肉 muscle			食品中污染 物限量 GB 2762-2022 toxic heavy metal limit in food
	LL	YY	LY	LL	YY	LY	LL	YY	LY	
铅 Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5
汞 Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5
镉 Cd	0.18±0.03 ^a	0.01±0.00 ^b	0.17±0.01 ^a	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5
铬 Cr	0.27±0.07 ^a	0.05±0.00 ^b	0.07±0.02 ^b	0.09±0.01	0.03±0.01	0.03±0.00	0.06±0.01	0.04±0.02	0.08±0.02	2.0

注: LL, 辽河自交中华绒螯蟹; YY, 长江自交中华绒螯蟹; LY, 辽河♀×长江♂杂交中华绒螯蟹; ND 代表低于检出限。同行数据上标中含有不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: LL, Liaohe inbred *Eriocheir sinensis*; YY, Yangtze inbred *Eriocheir sinensis*; LY, Liaohe ♀×Yangtze ♂ hybrid *Eriocheir sinensis*; ND represents below the detection limit value. Values in the same row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

LY 的头胸甲和肝胰腺中总类胡萝卜素含量要高于其余两组,说明 LY 具有更好的类胡萝卜素营养价值。

3.3 常规营养成分比较

河蟹可食组织中富含多种营养成分,对人体健康有多方面益处,是评价河蟹品质的重要指标之一^[17],本研究表明,三组雄蟹的可食组织中常规营养成分含量与王世会等^[38]的实验结果相比,除 YY 肝胰腺的总脂含量较低外,其余基本一致。YY 的水分含量显著高于其余两组($P<0.05$),且其肝胰腺中总脂含量显著低于其余两组($P<0.05$),可能是 YY 肝胰腺功能较弱或出现病变,影响肝胰腺正常功能,导致水分和脂肪代谢异常,也与上文提到其肝胰腺黄黑色相对应。LY 性腺系统和肌肉的粗蛋白含量显著高于其余两组($P<0.05$),说明 LY 具有更高的蛋白质营养价值;LL 在肝胰腺和肌肉中的总脂含量显著高于其余两组($P<0.05$),说明 LL 有较高的脂肪营养价值;YY 在肝胰腺和性腺系统中的灰分含量显著高于其余两组($P<0.05$),说明 YY 的矿物质营养价值更高。可食组织中水分占比最大,肝胰腺中总脂营养丰富,性腺系统和肌肉中蛋白质营养丰富,与已往报道一致^[1,38]。

3.4 脂肪酸组成及含量比较

脂肪酸组成和含量是反映河蟹营养价值的重要参数之一^[39],特别是必需脂肪酸和多不饱和脂肪酸的含量^[40]。有研究表明 DHA 和 EPA 对心血

管、眼睛和脑部健康具有重要作用,对于孕妇健康和婴儿发育至关重要^[41-42]。本研究表明,三组雄蟹 LL、YY 和 LY 的肝胰腺中 Σ PUFA 含量($34.23\pm0.68\%$)、($8.16\pm0.43\%$)和($35.05\pm0.45\%$)与 Chen 等^[27]、Zhang 等^[31]、肖昌伦等^[43]实验结果相比,YY 的 Σ PUFA 含量过低,这可能与其肝胰腺病变有关,导致脂肪酸含量异常,其余两组河蟹数据与已往报道相似。三组雄蟹可食组织中 EPA 和 DHA 的占比与肖昌伦等^[43]的实验结果相比,EPA 占比与已往报道相似,DHA 占比较低。肝胰腺组织中,YY 的 Σ SFA 含量显著高于其余两组,可能是 YY 脂肪酸代谢出现问题,导致饱和和脂肪酸无法有效分解或转化,从而在肝胰腺中积累。C18:0、C18:1n9 的含量与口味和品质有关,C18:0 的含量越高河蟹口味越差^[44],C18:1n9 在营养学方面被称为“安全脂肪酸”,能够有效降低胆固醇。本研究发现,YY 在三个可食组织中的总 C18:0 和 C18:1n9 含量明显更高,一方面,这可能会对其口感造成不好的影响,另一方面,在降低胆固醇方面其更具优势。 Σ n-3 PUFA、 Σ n-6 PUFA 和 n-3/n-6 PUFA 是反映脂肪酸质量的重要指标^[27],n-3/n-6 PUFA 中 Σ n-3 PUFA 占比越高营养价值就越高^[45]。本研究表明 LY 的 Σ n-3 PUFA 含量高于其余两组,且 n-3/n-6 PUFA 比值在三个可食组织中均大于其余两组,由此可以看出 LY 的营养价值和风味更佳。值得一提的是,相较于肝胰腺和

性腺系统, 肌肉中的 Σ n-3 PUFA 和 n-3/n-6 PUFA 明显更高。从这方面来说, 肌肉中的营养价值相对较高, 这也与之前的报道相一致^[1]。

3.5 游离氨基酸组成及含量比较

河蟹可食组织中的蛋白质由氨基酸组成, 游离氨基酸的含量与河蟹的风味品质密切相关^[46]。实验结果表明, 三种配组雄蟹肝胰腺中主要游离氨基酸为精氨酸 Arg、丙氨酸 Ala、谷氨酸 Glu、亮氨酸 Leu 和赖氨酸 Lys, 性腺系统中主要为丙氨酸 Ala、谷氨酸 Glu、精氨酸 Arg 和脯氨酸 Pro, 肌肉中主要为精氨酸 Arg、丙氨酸 Ala、甘氨酸 Gly 和脯氨酸 Pro, 这与已往报道是一致的^[40,46-47], 不过在含量上存在些许差异。LL 肝胰腺和肌肉中的 Σ EFAA 高于其余两组, LY 肝胰腺和肌肉中的 Σ FAA 明显高于其余两组, 说明 LL 和 LY 在氨基酸含量上占据优势。肝胰腺中含量较高的是精氨酸 Arg、丙氨酸 Ala, 性腺系统中含量较高的是丙氨酸 Ala、谷氨酸 Glu 和脯氨酸 Pro, 肌肉中含量较高的是精氨酸 Arg、丙氨酸 Ala、甘氨酸 Gly 和脯氨酸 Pro, 此结果与 Wang 等实验结果^[38]一致。赖氨酸 Lys、缬氨酸 Val 和组氨酸 His 为主要呈苦味氨基酸, 对河蟹风味品质有负面影响, 在性腺系统和肌肉中 LY 的 Σ TBV 相对较少, 这说明其风味受负面影响较少。 Σ TUV 与 Σ TSV 与河蟹风味品质呈正相关, 谷氨酸 Glu 为主要呈鲜味氨基酸, 使河蟹口感更加鲜美; 丙氨酸 Ala 和精氨酸 Arg 为主要呈甜味氨基酸, 能提升河蟹食用口感。LY 肝胰腺的 Σ TUV 含量更高, YY 性腺系统的 Σ TUV 含量更高, LL 肌肉的 Σ TUV 含量更高, 三种配组河蟹在 Σ TUV 含量比较中各具优势, LY 肝胰腺和肌肉中的 Σ TSV 与其余两组相比更高, 综合来看 LY 的风味品质更佳。

3.6 矿物质元素组成及评价比较

矿物质元素是人体必需的营养成分之一, 它们在维持健康、促进生理功能方面发挥着重要作用^[48]。矿物质是人体必需的元素, 人体无法自身产生、合成的, 每天矿物质的摄取量也是基本确定的, 因此河蟹可食组织中矿物质元素的组成和含量对评价河蟹营养品质有重要作用^[49]。钠 Na、

钾 K、钙 Ca、镁 Mg 是构成有机体的必备元素, 也是人体所需的常量元素。Na 维持体内液体平衡, 支持神经和肌肉功能; K 支持正常的心脏功能和肌肉收缩; Ca 构成和维持骨头与牙齿的强度, 参与神经传导、肌肉收缩和血液凝固; Mg 帮助维持肌肉和神经的正常功能, 对预防心血管疾病具有重要的作用^[50]。三组雄蟹可食组织中常量元素含量与钱晓莉等^[14]、王世会等^[38]和赵磊等^[51]实验结果相似。微量元素主要包括铁 Fe、锌 Zn、铜 Cu、锰 Mn 和硒 Se 等, Fe 参与能量代谢, 对免疫系统至关重要; Zn 促进儿童生长, 维持味觉和嗅觉; Cu 能防止贫血、骨质疏松、神经系统异常; Mn 维持骨骼健康, 参与人体代谢调节; Se 维持甲状腺正常功能, 参与免疫调节, 具有抗癌作用。三组雄蟹可食组织中微量元素含量与钱晓莉等^[14]、王世会等^[38]和赵磊等^[51]实验结果无明显差异。同时应注意, 微量元素需适量, 过量会引起中毒。YY 在肝胰腺和性腺系统中的 K 含量高于其余两组, 对人体的肌肉和心脏功能更有益。LY 在性腺系统和肌肉中 Na 含量高于其余两组, 更有利于促进人体代谢等功能。同时, LY 可食组织中的 Fe 含量高于其余两组, 对预防缺铁性贫血有更好的效果。

3.7 有毒重金属元素比较

有毒重金属元素如铅 Pb、汞 Hg、镉 Cd、铬 Cr 等对人类健康和生态系统造成了多种危害, Pb 和 Hg 可导致神经系统损伤, 尤其对儿童的影响更为显著; Cd 会导致肾脏功能损害, 长期接触可能导致肾病, Cr 会增加机体患癌症的风险, 因此有毒重金属元素检测和比较对评价河蟹食用的安全性以及保障消费者生命健康尤为重要^[52]。本研究表明, Pb、Hg 在三种可食组织中均未达到检出限, Cd 仅在肝胰腺中检测到, 但均低于食品中污染物限量(0.5 mg/kg), Cr 在三种可食组织中均检测到, 但均低于食品中污染物限量(2.0 mg/kg), 除 LL 肝胰腺中 Cr 含量稍高外, 其余数据与江苏苏州阳澄湖河蟹的 Cr 含量^[14]无明显差异, 说明寒地养殖河蟹食用安全性较高。

本研究分析了寒地养殖的三种配组河蟹(辽河自交 LL、长江自交 YY、辽河♀×长江♂杂交

LY)的可食率、肥满度、色泽、常规营养成分、脂肪酸组成、游离氨基酸组成、矿物质元素组成以及有毒重金属元素,结果表明 LL 的肝胰腺和肌肉总脂含量较高,脂肪营养价值更高;YY 的矿物质营养价值更高,但 YY 在寒地养殖中性腺发育较慢,且肝胰腺可能出现病变或感染;LY 在寒地养殖中表现出更强的适应性,可食品质更优。头胸甲和肝胰腺色泽品质更优异,具有更高的红度和黄度,且总类胡萝卜素含量更高,营养价值更佳。性腺系统和肌肉粗蛋白含量较高,脂肪酸营养价值更高,且风味品质更佳。矿物质元素方面,LY 的 Na、Cu、Ca、Fe 和 Zn 含量较高,对人体更有益。三种河蟹的有毒重金属元素含量均低于食品中污染物限量,食用安全性较高。总体来看,与 LL 和 YY 比较而言,LY 在寒地养殖中表现出更强的适应性,可食品质、色泽、营养成分和矿物质元素含量更优,且有毒重金属元素含量在安全范围内,是寒地非常重要的潜在养殖对象,同时也是人体更加优质的食品来源。

参考文献:

- [1] Zhao H L, Wu X G, Long X W, et al. Nutritional composition of cultured adult male *Eriocheir sinensis* from Yangtze River, Yellow River and Liaohe River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(5): 1117-1129. [赵恒亮, 吴旭干, 龙晓文, 等. 长江、黄河和辽河种群中华绒螯蟹雄体成蟹可食组织营养组成的比较[J]. 中国水产科学, 2016, 23(5): 1117-1129.]
- [2] Zhao N G. Experiments on the artificial propagation of the woolly-handed crab (*Eriocheir sinensis* h.milne—Edwards) in artificial sea water[J]. Journal of Fisheries of China, 1980, 4(1): 95-104. [赵乃刚. 用配制海水进行中华绒螯蟹人工繁殖的试验[J]. 水产学报, 1980, 4(1): 95-104.]
- [3] Fishery Administration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook-2024[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 34. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2024[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 34.]
- [4] Wang J, Xu P, Zhou G, et al. Genetic improvement and breeding practices for Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2018, 49(2): 292-301.
- [5] National Fisheries Technology Extension Center. 2023 Guidelines for new aquatic varieties[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023. [全国水产技术推广总站. 2023 水产新品种推广指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.]
- [6] National Fisheries Technology Extension Center. In 2024, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs announced the promotion of 23 new aquatic products[J]. China Fisheries, 2024(11): 10-15. [全国水产技术推广总站. 2024 年农业农村部公告推广 23 个水产新品种[J]. 中国水产, 2024(11): 10-15.]
- [7] Wang S H, Su J J, Zhang S Q, et al. Nutritional quality and heavy metal safety risk assessment of Chinese mitten crab(*Eriocheir sinensis*) and crayfish (*Procambarus clarkii*) cultivated in cold ponds[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2025, 40(3): 396-405. [王世会, 苏俊杰, 张淑琪, 等. 寒地池塘养殖中华绒螯蟹与克氏原螯虾营养品质及有毒重金属风险评估[J]. 大连海洋大学学报, 2025, 40(3): 396-405.]
- [8] Chu J D, Su X L, Wu H J, et al. Analysis of terrestrial water storage and its component changes in China from 2002 to 2021[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 170-178. [褚江东, 粟晓玲, 吴海江, 等. 2002—2021 年中国陆地水储量及其组分变化分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 170-178.]
- [9] Zhang Y L. The north cold area aquatic product technology promotion strategy[J]. Northern Chinese Fisheries, 2021, 40(2): 16-18. [张曰亮. 北方高寒地区水产技术推广策略[J]. 黑龙江水产, 2021, 40(2): 16-18.]
- [10] Ji B P, Wang Z. Impact of dietary nutrition on human athletic performance[J]. Food Research and Development, 2024, 45(16): 220-224. [纪本平, 王哲. 膳食营养对人体竞技能力的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(16): 220-224.]
- [11] Gong Q W, Li X M. Construction and measurement of agricultural green development index: 2005-2018[J]. Reform, 2020(1): 133-145. [巩前文, 李学敏. 农业绿色发展指数构建与测度: 2005—2018 年[J]. 改革, 2020(1): 133-145.]
- [12] Bo L J, Wang D J, Zhang G, et al. Heavy metal speciation in sediments and the associated ecological risks in rural rivers in southern Jiangsu Province, China[J]. Soil and Sediment Contamination: an International Journal, 2015, 24(1): 90-102.
- [13] Ding H X, Tang M J, Jiang X D, et al. Comparative study of the nutritional quality of outseason crab at lunar June (*Eriocheir sinensis*) from major Chinese production areas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(7): 1052-1063. [丁昊翔, 唐美君, 姜晓东, 等. 中国主要产地“六月黄”中华绒螯蟹的营养品质比较[J]. 中国水产科学, 2022,

- 29(7): 1052-1063.]
- [14] Qian X L, Chen A Q, Wang L, et al. Mineral element composition and risk assessment in edible part of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* from three sources[J]. Fisheries Science, 2025, 44(1): 14-25. [钱晓莉, 陈阿琴, 王磊, 等. 3 种来源中华绒螯蟹矿物质组成及风险评估[J]. 水产科学, 2025, 44(1): 14-25.]
- [15] Guo H H, Zhang J G, Wu Y D, et al. Comparison of body characteristics, carotenoid composition, and nutritional quality of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) with different hepatopancreas redness[J]. Foods, 2024, 13(7): 993.
- [16] Zhang B Y, Wang W J, Zhu R, et al. Comparative study on growth performance and edible portion nutritional composition of male *Eriocheir sinensis* at different growth stages in rice-crab culture systems[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 130: 106156.
- [17] Czerniejewski P, Bienkiewicz G, Tokarczyk G. Nutritional quality and fatty acids composition of invasive Chinese mitten crab from Odra Estuary (Baltic basin)[J]. Foods, 2023, 12(16): 3088.
- [18] Yang Z G, Zhu L L, Liu J N, et al. Polystyrene microplastics increase Pb bioaccumulation and health damage in the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*[J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154586.
- [19] Zhang H, Zhang H R, Zhao L, et al. Ecosystem impact and dietary exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) and heavy metals in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) and their farming areas in Jiangsu, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 227: 112936.
- [20] Bai S Y, Wang S H, Qin D L, et al. Elemental analysis of wild *Eriocheir sinensis*: Determining the geographic origin and human health risk assessment[J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2023, 15(4): 133-142.
- [21] Tang S Z, Song D, Bai S Y, et al. Trace elements accumulation and health risk assessment of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) from monoculture and rice-crab co-culture mode[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 123: 105640.
- [22] Su J J, Wang S H, Zhao Z G, et al. Research on the screening of new strains of Chinese mitten crab reared in carbonate alkalinity water in cold regions[J]. Marine Fisheries, 2025, in press. [苏俊杰, 王世会, 赵志刚, 等. 寒地盐碱水养殖中华绒螯蟹新种质筛选研究[J]. 海洋渔业, 2025, 接收.]
- [23] Long X W, Wu X G, Zhao L, et al. Effects of dietary supplementation with *Haematococcus pluvialis* cell powder on coloration, ovarian development and antioxidation capacity of adult female Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. Aquaculture, 2017, 473: 545-553.
- [24] Wang S H, Luo L, Zhang R, et al. Biochemical composition and quality of wild-caught adult mitten crabs from three river basins[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 110: 104574.
- [25] National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.168-2016 National Food Safety Standard-Determination of Fatty Acids in Food[S]. Standards Press of China: Beijing, China, 2016: 10-11. [中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.168-2016 食品安全国家标准-食品中脂肪酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 10-11.]
- [26] Śmietana N, Panicz R, Sobczak M, et al. Spiny-cheek crayfish, *Faxonius limosus* (rafinesque, 1817), as an alternative food source[J]. Animals, 2021, 11(1): 59.
- [27] Chen D W, Zhang M, Shrestha S. Compositional characteristics and nutritional quality of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food Chemistry, 2007, 103(4): 1343-1349.
- [28] Rotzoll N, Dunkel A, Hofmann T. Quantitative studies, taste reconstitution, and omission experiments on the key taste compounds in morel mushrooms (*Morchella deliciosa* Fr.)(J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(7): 2705-2711.
- [29] National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.268-2016. National food safety standard-Determination of multi elements in food[S]. Standards Press of China: Beijing, China, 2016: 1-5. [中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.268-2016 食品安全国家标准-食品中多元素的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-5.]
- [30] Wu H R, Ge M T, Zhou X H, et al. Nutritional qualities of normal and precocious adult male Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*)[J]. Aquaculture Research, 2019, 50(8): 2267-2275.
- [31] Zhang L, Tao N P, Wu X G, et al. Metabolomics of the hepatopancreas in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) [J]. Food Research International, 2022, 152: 110914.
- [32] Wang S H, Cheng Y X, Shi L Y, et al. A comparative study of edible yield and quality in adult Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) in different periods of autumn[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(10): 1196-1209. [王世会, 成永旭, 石连玉, 等. 秋季不同时期上市中华绒螯蟹可食率和品质比较[J]. 中国水产科学, 2020, 27(10): 1196-1209.]
- [33] Wang S H, Wang Y Z, Wu X G, et al. Gonadal development

- and biochemical composition of Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) from four sources[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(3): 1066-1080.
- [34] Sijtsema S, Linnemann A, van Gaasbeek T, et al. Variables influencing food perception reviewed for consumer-oriented product development[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2002, 42(6): 565-581.
- [35] Chien Y H, Jeng S C. Pigmentation of kuruma prawn, *Penaeus japonicus* Bate, by various pigment sources and levels and feeding regimes[J]. Aquaculture, 1992, 102(4): 333-346.
- [36] Han T, Li X Y, Wang J T, et al. Effects of dietary astaxanthin (AX) supplementation on pigmentation, antioxidant capacity and nutritional value of swimming crab, *Portunus trituberculatus*[J]. Aquaculture, 2018, 490: 169-177.
- [37] Brown A C, Leonard H M, McGraw K J, et al. Maternal effects of carotenoid supplementation in an ornamented cichlid fish[J]. Functional Ecology, 2014, 28(3): 612-620.
- [38] Wang S H, Luo L, Zhang R, et al. Comparison of edible yield, color, and quality of adult male Chinese mitten crabs(*Eriocheir sinensis*) between two and three years of age[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(8): 1119-1133. [王世会, 罗亮, 张瑞, 等. 北方寒区 2 龄和 3 龄雄性中华绒螯蟹成蟹可食率、色泽及品质比较[J]. 中国水产科学, 2022, 29(8): 1119-1133.]
- [39] Wu X G, Cheng Y X, Sui L Y, et al. Biochemical composition of pond-reared and lake-stocked Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* (H. Milne-Edwards) broodstock[J]. Aquaculture Research, 2007, 38(14): 1459-1467.
- [40] Shao L C, Wang C, He J, et al. Hepatopancreas and gonad quality of Chinese mitten crabs fattened with natural and formulated diets[J]. Journal of Food Quality, 2013, 36(3): 217-227.
- [41] Rubio-Rodríguez N, Beltrán S, Jaime I, et al. Production of omega-3 polyunsaturated fatty acid concentrates: A review [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(1): 1-12.
- [42] Shahidi F, Ambigaipalan P. Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2018, 9: 345-381.
- [43] Xiao C L, Sun Y F, Lu Z Z, et al. Comparison of nutritional quality between two fattening methods and lake-cultured *Eriocheir sinensis*[J]. Journal of Fisheries of China, 2025, 49(1): 193-208. [肖昌伦, 孙云飞, 鹿珍珍, 等. 两种育肥方式与湖泊养殖中华绒螯蟹营养品质的比较[J]. 水产学报, 2025, 49(1): 193-208.]
- [44] Kimata M, Ishibashi T, Kamada T. Studies on relationship between sensory evaluation and chemical composition in various breeds of pork[J]. Nihon Yoton Gakkaishi, 2001, 38(2): 45-51.
- [45] FAO/WHO. Fats and oils in human nutrition: Report of a joint FAO/WHO expert consultation[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1994.
- [46] Wang Y Z, Li J H, Wang S H, et al. Composition and nutritional qualities of edible tissues of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) from Ya Lake over different months[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 105: 104199.
- [47] Wang S, He Y, Wang Y Y, et al. Comparison of flavour qualities of three sourced *Eriocheir sinensis*[J]. Food Chemistry, 2016, 200: 24-31.
- [48] Dato-Cajegas C R S, Yakupitiyage A. The need for dietary mineral supplementation for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, cultured in a semi-intensive system[J]. Aquaculture, 1996, 144(1-3): 227-237.
- [49] Gökoğlu N, Yerlikaya P. Determinaton of proximate composition and mineral contents of blue crab (*Callinectes sapidus*) and swim crab (*Portunus pelagicus*) caught off the Gulf of Antalya[J]. Food Chemistry, 2003, 80(4): 495-498.
- [50] Cui L L, Lu S X, Gao H T, et al. Analysis and evaluation of muscle nutritional components of five principal trains of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in China[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2021, 34(6): 1-10. [崔丽莉, 鲁绍雄, 高海涛, 等. 5 个养殖虹鳟品种肌肉的营养成分分析与评价[J]. 水产学杂志, 2021, 34(6): 1-10.]
- [51] Zhao L, Wu X G, Long X W, et al. Comparative study on major mineral contents among three mitten crab populations: *Eriocheir sinensis*, *E. japonica* and their hybrids[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(22): 109-113, 118. [赵磊, 吴旭干, 龙晓文, 等. 中华绒螯蟹、日本绒螯蟹及其杂交种成体主要矿物质元素含量比较[J]. 广东农业科学, 2014, 41(22): 109-113, 118.]
- [52] Fu L, Lu X B, Niu K, et al. Bioaccumulation and human health implications of essential and toxic metals in freshwater products of Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 673: 768-776.

Comparison of the quality and toxic heavy metal content of male Chinese mitten crab from three crossbred cultured in cold regions

SU Junjie^{1,2}, WANG Shihui^{1,3*}, ZHAO Zhigang^{1,3}, LUO Liang^{1,3}, ZHANG Rui^{1,3}, GUO Kun^{1,3}, ZHANG Shuqi^{1,2}

1. Key Open Laboratory of Cold Water Fish Germplasm Resources and Breeding of Heilongjiang Province, Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China;
2. College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;
3. Engineering Technology Research Center of Saline-alkaline Water Fisheries, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China

Abstract: To screen suitable germplasm of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) for cold region aquaculture and evaluate their quality characteristics, this study conducted a 5-month cultivation experiment on three crossbred juvenile crab groups [Liaohe inbred (LL), Yangtze inbred (YY), and Liaohe ♀ × Yangtze ♂ hybrid (LY)]. Adult male crabs were collected to compare the edible yield, condition factor, coloration, proximate composition, fatty acid profiles, free amino acid compositions, mineral element contents, and toxic heavy metal elements. The results demonstrated that LY exhibited significantly higher meat yield (MY) and total edible yield (TEY) compared to the other groups ($P < 0.05$). The condition factor (CF) of the males did not significantly differ among these three groups ($P > 0.05$). YY and LY showed significantly higher carapace redness (a^*) and hepatopancreas lightness (L^*) than LL ($P < 0.05$), while LY displayed significantly higher hepatopancreas yellowness (b^*) ($P < 0.05$). LY contained significantly higher crude protein content in both the gonadal system and muscle tissues ($P < 0.05$). The hepatopancreas of LY contained higher Σ PUFA, Σ EFA, n-3/n-6 PUFA, and DHA/EPA values compared with those of the other two groups. The gonadal system of LY showed significantly higher proline (Pro) content ($P < 0.05$), while the muscle contained significantly higher alanine (Ala) and Pro ($P < 0.05$). LY demonstrated relatively lower total bitter-taste amino acids (Σ TBV) in both tissues. LY exhibited significantly higher total mineral elements (Σ TME) in gonads and muscle ($P < 0.05$), with notably elevated iron (Fe) and zinc (Zn) concentrations ($P < 0.05$). All groups showed toxic heavy metal contents far below the national food safety limits. Although LL demonstrated a higher hepatosomatic index (HSI) and gonadosomatic index (GSI), superior total lipid content, and Σ EFAA in hepatopancreas and muscle and YY showed a significantly higher ash content in the hepatopancreas and gonads ($P < 0.05$), LY exhibited predominant advantages in most evaluation metrics, e.g., higher MY, TEY, carapace a^* , hepatopancreas L^* , contents of crude protein in the gonadal system and muscle, contents of Σ PUFA, Σ EFA, n-3/n-6 PUFA, and DHA/EPA in the hepatopancreas, content of Pro in the gonadal system, contents of Ala and Pro in the muscle, Σ TME in the gonadal system and muscle, and contents of Fe and Zn in the edible tissues. The hybrid LY displayed superior edibility and nutritional value, demonstrating optimal comprehensive characteristics for cold-region aquaculture.

Key words: *Eriocheir sinensis*; cold region; nutritional quality; heavy metal

Corresponding author: WANG Shihui. E-mail: wangshihui@hrfri.ac.cn