

不同产地中华绒螯蟹鉴定方法及其研究进展

陈 卉^{1,2,3}, 成梦情¹, 董转章¹, 赵 阅¹

(1. 长江大学 生命科学学院/湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北 荆州 434025; 2. 长江大学 麋鹿健康与生境研究中心, 湖北 荆州 434025; 3. 河南省水体污染防治与修复重点实验室, 河南 平顶山 467036)

摘要: 中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*), 俗称河蟹、大闸蟹, 是我国特有名贵水产品。由于不同产区地理环境、养殖模式差异大, 知名品牌中华绒螯蟹往往具有更高的价值, 但同时也导致了近年来假冒原产地大闸蟹的现象越来越严重。目前亟须建立客观、有效的中华绒螯蟹产地判别方法。因此, 越来越多的学者开展了不同产地中华绒螯蟹的鉴定与研究, 常见的判别方法包括形态指标鉴定, 生化指标鉴定, 元素指纹特征鉴定, 稳定同位素技术鉴定, 电子鼻、电子舌鉴定及分子生物学鉴定等。本文中综述了各种鉴定方法的优缺点, 简要介绍了应用上述方法鉴定中华绒螯蟹的研究进展, 并对今后中华绒螯蟹鉴定研究的发展趋势进行了探讨, 可为探索和建立客观、可靠、快速的中华绒螯蟹产地判别方法提供一定的理论参考。

关键词: 中华绒螯蟹; 生物学特征; 产地判别

中图分类号: Q 985.8 文章编号: 1673-1689(2021)03-0011-07 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.03.002

Identification Methods and Research Progress on *Eriocheir sinensis* from Different Habitats

CHEN Hui^{1,2,3}, CHENG Mengqing¹, DONG Zhuanzhang¹, ZHAO Yue¹

(1. College of Life Science/Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. Research Center of Milu Health and Habitat, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 3. Henan Province Laboratory of Water Pollution Control and Rehabilitation, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: *Eriocheir sinensis*, commonly known as river crab and hairy crab, is a unique and precious aquatic product in China. Due to the great difference of geographical environment and breeding mode in various habitats, the well-known brand of *E. sinensis* is of higher value. However, the phenomenon of counterfeiting crabs of fake origin has become more and more serious in recent years. At present, it is urgent to establish an objective and effective method to identify the origin of *E. sinensis*. Therefore, more and more scholars have carried out identifications and studies on *E. sinensis* from different habitats. The identification methods include morphological index identification, biochemical index identification, element fingerprint, stable isotope, electronic nose, electronic tongue, molecular biology and so on. This paper summarized the advantages and disadvantages of various identification methods, and briefly introduced the research progress of

收稿日期: 2020-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700360); 河南省水体污染防治与修复重点实验室开放基金项目(CJSP2018006, CJSP2018014)。

作者简介: 陈 卉(1986—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事湿地生态研究。E-mail: chenhui_17@126.com

identification of *E. sinensis* using the above methods. And the development trend of identification of *E. sinensis* was also discussed. It could provide a theoretical reference for exploring and establishing an objective, effective and rapid detection method to identify the origin of *E. sinensis*.

Keywords: *Eriocheir sinensis*, biological characteristics, origin discrimination

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*), 俗称河蟹、大闸蟹, 是我国特有名贵水产品, 也是重要的淡水养殖种类。中华绒螯蟹的天然群体, 在我国曾广泛分布于辽河、黄河、长江, 以及瓯江、闽江、珠江和南流江等水系。在中华绒螯蟹人工育苗技术取得突破后, 各地迅速发展了中华绒螯蟹的人工养殖。目前, 养殖较集中的区域包括长江流域、黄河流域和辽河流域, 其中长江流域的养殖规模、总产量和成蟹平均规格均占首位^[1-2]。不同产区养殖模式差异大, 不同产地的地理环境不同, 优良环境所产的中华绒螯蟹不仅形成了许多知名品牌, 也被赋予了更高的价值。知名品牌大闸蟹常供不应求, 市场上出现了消费者难以识别的“洗澡蟹”“过水蟹”, 假冒原产地危害日趋严重。同时, 为了获得更好的蟹种, 在养殖和生产过程中也常需要判别蟹种的优劣。因此, 为了探索建立客观、有效的产地判别方法, 越来越多的学者开展了不同产地、不同性别、不同养殖方式、不同等级中华绒螯蟹的鉴定与研究, 研究方法也有了较大的补充和完善。目前, 常见的判别方法包括形态指标鉴定^[3-13], 生化指标鉴定^[14-24], 元素指纹特征鉴

定^[25-31], 稳定同位素技术鉴定^[30,32], 电子鼻^[33-37]、电子舌鉴定^[24,38-39]及分子生物学鉴定^[40-46]等方法。本文中综述了中华绒螯蟹产地判别的常用方法, 并介绍了应用上述方法开展中华绒螯蟹鉴定的优缺点和发展趋势。

1 中华绒螯蟹产地判别方法

为了客观、有效地开展不同产地、不同养殖方式和不同等级中华绒螯蟹的鉴定和研究, 研究者们常采用的研究方法包括形态指标鉴定, 感官评价, 生化指标鉴定, 元素指纹特征鉴定, 稳定同位素技术鉴定, 电子鼻、电子舌鉴定及分子生物学鉴定等(见表1)。其中, 形态鉴定方法操作较为简便、直观、成本低, 已开展的相关研究较多。然而, 由于背甲等形态特征易受到个体发育、环境等影响, 其形态指标体系量化不足、主观性较明显等原因使其判别效果不佳, 而且该方法无法区分同一水系内不同产区的蟹群体。元素指纹特征鉴定方法虽然具有样品量适中、易于规范、判别准确性高等优点, 但元素分析的数据量较大且计算烦琐, 样品处理也较为复杂。

表 1 中华绒螯蟹常见鉴定方法比较

Table 1 Comparison of common identification methods of *Eriocheir sinensis*

鉴定方法	主要鉴定指标	优点	缺点
形态指标鉴定	外部形态指标	简便、直观、低成本	主观性较明显, 无法区分同一水系内不同产区的蟹群体
生化指标鉴定	生物学指数 可食部分比例 营养成分组成	操作简单, 易于规范, 客观, 判别准确性高	指标较多, 样品处理复杂
元素指纹特征鉴定	微量元素	操作简单, 易于规范, 客观, 判别准确性高	数据量较大且计算烦琐, 样品处理较为复杂
稳定同位素技术鉴定	碳稳定同位素比率 氮稳定同位素比率	数据量少, 样品处理较 简单, 稳定性好, 重 复性好, 判别率高	前提是必须建立相应产区的稳定同位素数据 库及判别模型
电子鼻、电子舌鉴定等	含氮类化合物 非氮类化合物 挥发性物质	客观、准确, 重复性好, 可对整体香气和滋味轮 廓进行响应	对环境较敏感, 如检测环境温度和湿度、干扰 性气体等
分子生物学鉴定	微卫星基因座	微卫星标记多态性高, 操作简便, 结果清晰 易读, 可重复性好	必须在已知序列的基础上进行引物设计和扩 增检验

相对于元素指纹特征鉴定,稳定同位素技术对产区判别的稳定性好、可重复性高,但其缺点是必须建立相应产区的稳定同位素数据库及判别模型。

2 中华绒螯蟹产地判别方法的应用

2.1 形态指标鉴定

不同产区中华绒螯蟹的生存环境、养殖模式和遗传特性的不同,是应用形态指标鉴别中华绒螯蟹产地的理论依据^[3,47-48]。许加武等^[3]选用 24 个形态学度量性状,首次将逐步判别法成功用于不同水系中华绒螯蟹的形态判别。之后,许多研究者们通过测定中华绒螯蟹的外部形态差异,采用聚类分析、主成分分析、判别分析等多元分析方法,进一步将不同产区中华绒螯蟹进行归类^[8,10,13]。针对不同地方种群,王武等^[8]选取了 17 个外部形态特征(体长、齿间距、步足长、节长等),开展合浦、绥芬河、长江和辽河 4 个水系内蟹种群的聚类 and 判别分析,可将不同地方种群分开,整体判别率达 74%。何杰等^[10]开展的长江水系野生和养殖中华绒螯蟹扣蟹形态学比较研究也表明,通过形态指标建立的判别方程可有效区分野生和养殖扣蟹,准确率达 95% 以上。此外,卢义等^[12]采用多个形态特征比较长江、黄河和辽河水系的野生扣蟹,也发现雌雄个体间存在多处显著差异,综合判别率达 87.5%,且长江水系和黄河水系的野生扣蟹亲缘关系较近。

然而,杨建等^[49]和杨文斌等^[50]在研究不同产地中华绒螯蟹的形态学特征时,并未发现不同产地的中华绒螯蟹个体间有显著的形态差异。因此,近年来,研究者们进一步在背甲形态学特征基础上进一步建立了地标点法,能将长江水系的太湖、洪泽湖、高宝湖、长荡湖、阳澄湖,以及巴城、兴化“泓膏”养殖水域和长江口崇明自然水域等知名产区产的中华绒螯蟹进行有效区分,判别准确率达 100%^[13]。可见,上述形态指标鉴定方法能区分不同水系、野生和养殖中华绒螯蟹个体,但对同一水系不同产区个体的判别精度尚不理想。形态指标鉴定方法虽然操作较为简便、直观、成本低,但因背甲等形态特征易受到个体发育、环境等影响,形态指标体系量化不足、主观性较明显等原因使得该方法的判别效果不佳。

2.2 生化指标鉴定

中华绒螯蟹的营养丰富,其可食部分的比例和营养含量在很大程度上决定了它的价值,因此研究

者们常通过定量分析中华绒螯蟹的可食部分来开展不同蟹群体判别^[17-18,51-53]。朱清顺和柏如发^[17]通过研究养殖和野生中华绒螯蟹的生物学指数、可食部分比例、营养成分组成等发现养殖雌蟹的性腺指数、性肝指数高于野生蟹,养殖雄蟹的粗蛋白质含量显著高于野生雄蟹;养殖蟹的粗脂肪、氨基酸和无氮浸出物高于野生蟹,但养殖蟹的多不饱和脂肪酸含量低于野生蟹。在研究养殖和野生扣蟹时,何杰等^[10]的研究结果表明长江水系野生扣蟹的肝胰腺指数、总脂含量和常规营养成分均显著高于养殖群体,肝胰腺中多种脂肪酸也存在显著差异。上述研究中野生和养殖蟹群体的生化组成均存在较大差异,结合形态学^[10]、元素分析^[17]等方法,可以建立有效的中华绒螯蟹产地判别方程。

在研究长江、黄河和辽河水系野生扣蟹生化组成时,发现长江雌蟹的肝胰腺指数最高,其肝胰腺的水分、粗蛋白质和总糖含量最低,辽河雌蟹的肝胰腺指数最低,但其肝胰腺的水分和蛋白质含量较高^[12]。辽河蟹肌肉的水分含量最高,长江蟹的甘油三酯含量均显著高于黄河和辽河水系的,此外,黄河蟹游离脂肪酸和胆固醇含量相对较低,但磷脂含量最高^[12]。黄河蟹肝胰腺和躯体肌肉中 18:1n9 和 18:2n6 含量最低,但其 20:5n3 和 22:6n3 含量最高,3 个水系蟹的肝胰腺中脂肪酸差异大于肌肉间的差异。由此可见,可以将野生扣蟹的生化组成差异作为不同水系野生扣蟹鉴别的一个辅助指标^[12]。赵恒亮等^[21]也比较了相同养殖条件下长江、黄河和辽河水系中华绒螯蟹雌蟹的性腺和营养组成特征,结果显示:长江水系雌蟹肌肉和肝胰腺的灰分含量最高;长江水系雌蟹卵巢的 C22:6n3 含量显著高于黄河水系,其卵巢的苯丙氨酸、酪氨酸、色氨酸、天冬氨酸和丝氨酸含量均显著高于辽河水系;黄河水系雌蟹肌肉各种氨基酸含量均最高;长江水系雌蟹卵巢和黄河水系雌蟹肌肉的必需氨基酸最高,且雌蟹卵巢中的必需氨基酸均高于肌肉组织的。

朱献辉等^[21]比较研究了江苏阳澄湖、荷兰某地、上海南汇地区、上海宝山地区、浙江嘉兴地区和苏州太湖中华绒螯蟹可食部分的主要呈味物质,结果显示江苏阳澄湖中华绒螯蟹可食部分的谷氨酸、甘氨酸和肌苷酸含量高于其他地区。谷氨酸和肌苷酸的呈味效果具有相乘作用,使得江苏阳澄湖的中华绒螯蟹更加美味^[21]。采用养殖实验和生化分析方法,

何杰等^[20]比较了长江水系野生和养殖蟹种经池塘养成成蟹的可食率、肥满度、常规生化成分、脂肪酸和氨基酸组成,结果显示成蟹的性腺指数、肝胰腺指数和脂肪酸组成在野生和养殖蟹间存在显著差异。对于不同养殖模式的中华绒螯蟹而言,其脂肪酸种类基本相同,但含量有差异,其中以湖泊放流的中华绒螯蟹品质最优^[18]。

张家奇等^[24]对稻田养殖和池塘养殖的中华绒螯蟹的性腺、肝胰腺指标进行分析讨论,结果表明:在总游离氨基酸方面,肝胰腺含量(X)中 $X_{\text{稻田}} < X_{\text{池塘}}$,肌肉含量(Y)中 $Y_{\text{稻田}} > Y_{\text{池塘}}$,性腺含量(Z)中 $Z_{\text{稻田(雌性)}} > Z_{\text{池塘(雌性)}}$ 、 $Z_{\text{稻田(雄性)}} < Z_{\text{池塘(雄性)}}$ 。同时,稻田蟹的苦味氨基酸远小于池塘蟹,在呈味核苷酸方面,稻田雌、雄蟹肌肉和雌蟹性腺的味精当量高于池塘蟹^[24]。采用生化指标鉴定不同产区大闸蟹操作较为简便,易于规范,试样大小合适,样品量适中,能够较全面的反应蟹的品质,判别准确性高但指标较多,样品处理较烦琐。

2.3 元素指纹特征鉴定

生物体内元素的含量和分布与其生境特征相关,许多学者依此建立了元素指纹分析方法,利用元素种类、含量、组成等信息开展中华绒螯蟹原产地判定^[17,24,28-31,54]。柏如法等^[26]的实验分析结果表明,江苏主要产区八大养殖品牌蟹可食部分矿物质元素主要由Na、P、K、Ca、Mg等9种元素组成。其中,固城湖雌蟹的微量元素含量最高,溧湖雌蟹的微量元素含量最低,而高宝湖雄蟹的微量元素含量最高,太湖雄蟹的微量元素含量最低^[26]。针对养殖和野生中华绒螯蟹个体,通过比较可食组织肌肉、肝脏和性腺微量元素可区分野生和养殖雌蟹群体,但无法区分雄蟹群体,而钙含量可用于区分野生和养殖的雌、雄蟹群体^[17]。此外,我国学者还探索建立了非致死的元素指纹鉴定方法,将中华绒螯蟹的第三步足作为标准化试料,开展了辽宁盘锦地区、江苏洪泽湖、江苏兴化地区、湖北梁子湖^[24]、江苏太湖、石臼湖和固城湖^[50],以及江苏阳澄湖、涌湖、长荡湖和江西军山湖^[49]等产地的中华绒螯蟹判别,元素指纹判别准确率达100%。

在利用中华绒螯蟹的第三步足进行元素指纹特征鉴定时,元素指纹鉴定方法的操作简单,试样大小合适、样品量适中,样品包含软、硬组织,能够综合体现各类组织中元素积累特征,因此该方法具有操作易于规范、客观、快速、判别准确性高等优点,

但元素分析的数据量较大且计算烦琐,样品处理也较为复杂^[30]。

2.4 稳定同位素技术鉴定

稳定同位素技术具有整合、指示、示踪的功能,目前已成功应用于多种特色高值农产品的产地溯源、真伪鉴定,表现出快速、准确、判别性强等优势^[2]。姜涛等^[32]选取第三步足进行 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分析,将江苏、上海等地区的中华绒螯蟹进行有效区分,判别率可达90%~100%。也有学者将元素组成和稳定同位素比值组合,开展中华绒螯蟹多产地判别^[30]。Luo等^[30]测定了取自8个不同地点(当湖、高邮湖、洪泽湖、太湖、阳澄湖;长江口自然生境,东滩;养殖生境,巴城、红高)中华绒螯蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和10种微量元素,当元素组成与稳定同位素比值结合时,原始判别率达到99.4%(交叉验证率为98.2%)。应用稳定同位素进行中华绒螯蟹产区判别具有稳定性好、可重复性高、系统误差小、客观性和判别高等优点,但其缺点是必须建立相应产区的稳定同位素数据库及判别模型。

2.5 电子鼻、电子舌等鉴定

由于不同产地中华绒螯蟹摄食饵料及生境中水体和底泥中的异味物质不同,使得不同产区的中华绒螯蟹风味品质和滋味物质有差异,因此,也可通过检测可食部位香气、滋味等来判别中华绒螯蟹的产地及等级^[33,36-39]。对样品香气、滋味物质的检测主要有感官评价、高效液相色谱、电子鼻、电子舌等手段。顾赛麒^[33]和张晶晶等^[38]通过分析中华绒螯蟹可食部位的香气轮廓和滋味轮廓,检测了来自阳澄湖、松江地区和崇明地区的不同等级养殖蟹。基于单个部位的香气轮廓或滋味轮廓所建模型无法将不同产地蟹群体完全分开,然而基于多个部位的香气轮廓或滋味轮廓建模,获得的样品整体差异信息更丰富,通过偏最小二乘回归法可以建立中华绒螯蟹的等级评定模型^[38]。Wang等^[39]采用吸附萃取-气相色谱-质谱法对不同产地中华绒螯蟹(野生、阳澄地区养殖、崇明地区养殖)的挥发性物质进行提取,将电子鼻、电子舌技术联合检测,可将3个地区中华绒螯蟹的香气和滋味特征进行区分。

何珊等^[34]以江苏阳澄湖和辽宁盘锦地区的中华绒螯蟹为材料,采用电子鼻研究蟹肉挥发性物质,发现辽宁盘锦蟹的醛类和醇类物质较多,而江苏阳澄湖蟹的酯类和酚类物质较多。何珊等^[35]也运用电

子鼻分析不同产地(阳澄湖、辽河和宁海)蟹类,建立了风味指纹模型和特征风味雷达图,其结果表明新鲜阳澄湖蟹的肝胰腺在 W2W 传感器的响应值最高,且新鲜阳澄湖蟹肌肉在 W1S 和 W2S 传感器的响应值始终较高。此外,利用电子舌和人工感官开展蟹肌肉的滋味品质综合分析,也能较好地地区分稻田养殖和池塘养殖的中华绒螯蟹,且雌蟹的区分度高于雄蟹^[24]。

在利用香气、滋味等判别中华绒螯蟹产区的研究中,感官评价容易受到个体因素的影响,高效液相色谱法操作步骤较多、检测周期较长,而电子鼻和电子舌作为新型检测系统,具有客观、准确、重复性好、安全无损、可对整体香气和滋味轮廓进行响应等优点^[33]。

2.6 分子生物学方法鉴定

DNA 微卫星多态性来源于其核心序列重复次数的变化,能揭示动物的遗传特性。目前,DNA 微卫星也已应用于中华绒螯蟹的种群遗传和遗传育种方面^[40]。熊良伟等^[41]以长江水系天然群体为对照,利用微卫星分子标记分析江苏兴化、安徽宣城、辽宁盘锦地区中华绒螯蟹养殖群体遗传分化。结果表明,长江水系天然群体遗传多样性水平高于养殖群体,4 个地区群体处于低等遗传分化水平,江苏兴化地区养殖群体与长江水系天然群体同属一种群,安徽宣城养殖群体与辽宁盘锦养殖群体为另一种群。潘建林等^[56]也采用微卫星 DNA 分型技术对江苏地区 2 个地理种群(本地种与荷兰种)的中华绒螯蟹进行了 2 个微卫星基因座的遗传多态性分析,结果表明 2 个地理种群的微卫星基因座(Esin67 和 Esin87)都有较好的多态性,荷兰种蟹种群的杂合度和多态性信息含量高于本地种蟹种群。

针对长江、黄河和辽河 3 个水系的中华绒螯蟹,刘青^[44]和刘皓等^[43]利用微卫星标记进行了遗传特征分析。研究表明,3 个水系群体具有较高的遗传多样性,而且野生蟹群体的遗传分化与地理距离有一定的相关性,作为育种基础群体进行遗传改良的

潜力较大。李晶晶等^[46]利用 10 个微卫星分子标记分析了中华绒螯蟹 3 个不同水系人工选育群体(“长江 1 号”“光合 1 号”和七里海河蟹)和 1 个海河流域自然群体的遗传多样性和遗传分化水平。表明 4 个中华绒螯蟹群体间的遗传分化水平较低,群体遗传多样性较高。此外,许多研究也表明微卫星标记能较全面地反映各水系中华绒螯蟹的遗传多样性和种群结构信息^[40,42,45,47]。微卫星标记多态性高、操作简便、结果清晰易读、可重复性好,但缺点是必须在已知序列的基础上进行引物设计和扩增检验。

3 展望

近年来,学者们从外部形态、生化组成、种质来源、遗传多样性等方面开展了不同产地、不同养殖方式和不同等级中华绒螯蟹的鉴定和研究。同时,针对传统鉴定方法的不足和差异,许多学者将形态学、生化指标、元素分析等方法结合,进行了较大的补充和完善,建立了有效的野生和养殖蟹群体产地判别方程^[10,17]。此外,新型检测系统电子鼻和电子舌等方法准确和重复性较好,可对中华绒螯蟹的整体香气和滋味轮廓进行响应^[33,38-39]。针对遗传多样性较高的绒螯蟹群体或不同水系中华绒螯蟹,通过微卫星标记能较全面地反映其遗传多样性和种群结构信息,但缺点是必须在已知序列的基础上进行引物设计和扩增检验。

针对不同中华绒螯蟹群体,不同鉴定方法的判别率差异较大,各有其优缺点和适应性。在开展同一水系不同产区的中华绒螯蟹个体研究时,形态指标、微卫星标记等方法的判别效果较差,应考虑与其他鉴定指标如生化指标、元素指纹等结合^[10,17]。稳定同位素技术具有稳定性好、可重复性高、判别率高和前处理简单等优势^[30,32,55]。如果能在揭示中华绒螯蟹稳定同位素组成影响机制的基础上,建立我国主要产区中华绒螯蟹的稳定同位素溯源图谱及判别模型,将能为同一水系不同产区或未知产区蟹群体的判别提供客观、有效、快速的方法。

参考文献:

- [1] 崔江华. 黄河口中中华绒螯蟹养殖技术研究与应用[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- [2] 王武,张文博,边文冀,等. 绒螯蟹三个种群形态判别比较[J]. 水产科技情报,2005,32(2):81-83.
- [3] 许加武,任明荣,李思发. 长江、辽河、瓯江中华绒螯蟹种群的形态判别[J]. 水产学报,1997,21(3):269-274.

- [4] 李晨虹,李思发. 中国大陆沿海六水系绒螯蟹(中华绒螯蟹和日本绒螯蟹)群体亲缘关系:形态判别分析[J]. 水产学报,1999,23(4):337-342.
- [5] 李勇,李思发,王成辉,等. 三水系中华绒螯蟹幼蟹形态判别程序的建立和使用[J]. 水产学报,2001,25(2):120-126.
- [6] 王茜,李晓东,戴伟,等. 不同水系绒螯蟹群体外部形态的判别分析[J]. 水产科学,2006,25(3):125-128.
- [7] 李朝霞,李健,刘萍,等. 中国对虾“黄海1号”选育群体与野生群体的形态特征比较[J]. 中国水产科学,2006,13(3):384-388.
- [8] 王武,徐灿,张文博,等. 四个地方种群绒螯蟹形态差异的比较研究[J]. 中国农学通报,2007(6):648-653.
- [9] 何杰,徐跑,朱健. 南北水系中华绒螯蟹形态差异分析[J]. 海洋湖沼通报,2009,21(3):79-86.
- [10] 何杰,吴旭干,龙晓文,等. 池塘养殖和野生长江水系中华绒螯蟹扣蟹形态学及生化组成的比较研究[J]. 水产学报,2015,39(11):1665-1678.
- [11] 康伟,吴廉,刘金生,等. 图们江水系绒螯蟹的形态差异与遗传混杂[J]. 中国水产科学,2016,23(3):555-564.
- [12] 卢义,吴旭干,何杰,等. 长江、黄河、辽河水系中华绒螯蟹野生扣蟹的形态学及生化组成[J]. 中国水产科学,2016,23(2):382-395.
- [13] 郑朝臣,姜涛,骆仁军,等. 不同产地中华绒螯蟹形态差异的地标点法分析[J]. 水产学报,2017,41(12):1896-1907.
- [14] 韦众,鲍传和. 池塘养殖与湖泊放流中华绒螯蟹的性腺肝脏指数比较[J]. 淡水渔业,1999,29(9):16-17.
- [15] 应森,郭延. 长江蟹和辽中华绒螯蟹性腺及肝脏指数的比较研究[J]. 水利渔业,2001,21(1):10-12.
- [16] 张彤晴,周刚,朱清顺,等. 不同增殖养殖水体中华绒螯蟹一般营养成分比较分析[J]. 水产养殖,2006,27(4):8-10.
- [17] 朱清顺,柏如发. 池塘养殖的中华绒螯蟹与长江野生中华绒螯蟹生物学特性比较[J]. 江苏农业学报,2007(3):218-223.
- [18] 张彤晴,周刚,朱清顺,等. 不同养殖模式中华绒螯蟹脂肪酸比较分析[J]. 淡水渔业,2007,37(1):53-57.
- [19] 滕炜鸣,成永旭,吴旭干,等. 莱茵种群和长江种群子一代中华绒螯蟹性腺发育及相关生物学指数变化的比较[J]. 上海水产大学学报,2008,17(1):65-71.
- [20] 何杰,吴旭干,龙晓文,等. 中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)野生和养殖蟹种对池塘养殖成蟹可食率和营养品质的影响研究[J]. 海洋与湖沼,2016,47(1):140-150.
- [21] 朱献辉,杨玲芝,陈舜胜. 6个地区中华绒螯蟹主要呈味成分比较研究[J]. 食品工业,2017,38(4):274-278.
- [22] 赵恒亮,吴旭干,姜晓东,等. 池塘养殖条件下长江、黄河和辽河种群中华绒螯蟹雌体卵巢发育和营养组成的比较研究[J]. 水产学报,2017,41(1):109-122.
- [23] 龙晓文,吴仁福,麻楠,等. 中华绒螯蟹池塘套养与温室养殖的中华绒螯蟹雄体生物学指数和营养成分比较[J]. 中国水产科学,2017,24(1):100-108.
- [24] 张家奇,张龙,王锡昌. 稻田养殖和池塘养殖对中华绒螯蟹滋味品质的影响[J]. 食品工业科技,2017,38(13):229-236.
- [25] 李庆,蔡友琼,沈晓盛. 中华绒螯蟹中微量元素的分布及评估[J]. 上海水产大学学报,2006,15(2):207-210.
- [26] 柏如法,周刚,李跃华,等. 中华绒螯蟹种质特性研究——江苏主要产区养殖河蟹可食部分矿物质元素特性的比较研究[J]. 水产养殖,2006(5):16-19.
- [27] 赵鉴,苏彦平,刘洪波,等. 不同/相同水系中华绒螯蟹元素“指纹”的产地差异性[J]. 核农学报,2014,28(7):1253-1260.
- [28] JI S, GU S, WANG X, et al. Comparison of olfactometrically detected compounds and aroma properties of four different edible parts of Chinese mitten crab[J]. *Fisheries Science*, 2015, 81(6):1157-1167.
- [29] NEDZAREK A, CZERNIEJEWSKI P, DROST A, et al. The distribution of elements in the body of invasive Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis* H. Milne-Edwards, 1853) from Lake Dabie, Poland [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, 60:1-7.
- [30] LUO R, JIANG T, CHEN X, et al. Determination of geographic origin of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) using integrated stable isotope and multi-element analyses[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274:1-7.
- [31] WANG Q, WU X, LONG X, et al. Nutritional quality of different grades of adult male Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(3):944-955.
- [32] 姜涛,杨健,刘洪波,等. 一种利用稳定同位素比判别中华绒螯蟹产地的方法:中国, CN201710696631.5[P]. 2017-12-15.
- [33] 顾赛麒,王锡昌,张晶晶,等. 电子鼻在中华绒螯蟹产地鉴别及等级评定上的应用[J]. 中国水产科学,2014,21(1):108-117.
- [34] 何珊,蔺佳良,张迪骏,等. 南北中华绒螯蟹挥发性物质的比较研究[J]. 核农学报,2016,30(8):1577-1586.
- [35] 何珊,蔺佳良,张迪骏,等. 基于风味的线性判别和雷达图的中华绒螯蟹溯源[J]. 中国食品学报,2018,18(7):239-246.
- [36] WU N, WANG X, TAO N, et al. Odor profiles of hepatopancreas and gonad of *Eriocheir sinensis* by sensory analysis, electronic

- nose, and GC-MS analysis[J]. *Fisheries Science*, 2016, 82(3):537-547.
- [37] ZHU P, DU J, XU B, et al. Modified unsupervised discriminant projection with an electronic nose for the rapid determination of Chinese mitten crab freshness[J]. *Analytical Methods*, 2017, 9(11):1806-1815.
- [38] 张晶晶, 顾赛麒, 丁玉庭, 等. 电子舌在中华绒螯蟹产地鉴别及等级评定的应用[J]. *食品科学*, 2015, 36(4):141-146.
- [39] WANG S, HE Y, WANG Y, et al. Comparison of flavour qualities of three sourced *Eriocheir sinensis*[J]. *Food Chemistry*, 2016, 200:24-31.
- [40] 毛瑞鑫, 鲁翠云, 刘福军, 等. 中华绒螯蟹部分基因组文库构建和微卫星位点的筛选[J]. *上海海洋大学学报*, 2009, 18(2):2129-2135.
- [41] 熊良伟, 李真, 马克异, 等. 利用微卫星 DNA 分子标记分析中华绒螯蟹养殖群体遗传分化[J]. *农业生物技术学报*, 2012, 20(12):1441-1448.
- [42] GUO E, WU D, TAN F, et al. Characterization of new microsatellites selected from EST resources of Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. *Russian Journal of Genetics*, 2014, 50(11):1238-1241.
- [43] 刘皓, 刘青, 吴旭干, 等. 中华绒螯蟹两种微卫星 DNA 分型方法的应用比较[J]. *生物学杂志*, 2015, 32(1):90-94.
- [44] 刘青, 刘皓, 吴旭干, 等. 长江、黄河和辽河水系中华绒螯蟹生和养殖群体遗传变异的微卫星分析[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(4):958-968.
- [45] LI J, GENG X, CHEN L, et al. Identification and characterization of thirty novel microsatellite DNA markers from the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* expressed sequence tags[J]. *BMC Research Notes*, 2016, 9(1):1-5.
- [46] 李晶晶, 陈丽梅, 耿绪云, 等. 中华绒螯蟹野生群体和不同水系人工选育群体的遗传多样性分析[J]. *渔业科学进展*, 2019, 40(6):105-113.
- [47] 赵沐子, 许志强, 丁淑燕, 等. 长江水系中华绒螯蟹不同来源蟹种周年生长研究[J]. *水产养殖*, 2015, 36(4):1-7.
- [48] 闫龙. 中华绒螯蟹群体的形态学及遗传学研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2015.
- [49] 杨健, 邱楚雯, 苏彦平, 等. 不同水域条件下中华绒螯蟹的形态和元素分布[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(3):187-191.
- [50] 杨文斌, 苏彦平, 刘洪波, 等. 长江水系 3 个湖泊中华绒螯蟹形态及元素“指纹”特征[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(1):84-93.
- [51] 瞿俐俐, 王锡昌, 吴旭干, 等. 影响蟹类营养品质主要因素的研究进展[J]. *食品工业*, 2017, 38(3):217-221.
- [52] 吴旭干, 龙晓文, 刘乃更, 等. 中华绒螯蟹、日本绒螯蟹及其杂交种性腺发育和生化组成的比较[J]. *淡水渔业*, 2015, 45(3):3-8.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 2013.
- [56] 潘建林, 牟大凯, 郝莎, 等. 中华绒螯 *Eriocheir sinensis* 两个地理种群的微卫星 DNA 多态性分析[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2006(5):457-462.
- [57] QIU G, XIONG L, LIU Z, et al. A first generation microsatellite-based linkage map of the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* and its application in quantitative trait loci(QTL) detection[J]. *Aquaculture*, 2016, 451:223-231.