

Zhang B Q, Chen H F, Hou X, *et al.* Color correlation analysis between live and cooked carapace and hepatopancreas in Chinese mitten crab [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(12): 122507. [张冰清, 陈慧帆, 侯鑫, 等. 活体与煮熟中华绒螯蟹背壳、肝胰腺色泽的相关性分析 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(12): 122507.]

活体与煮熟中华绒螯蟹背壳、肝胰腺色泽的相关性分析

张冰清^{1,2,3} 陈慧帆^{1,2,3} 侯鑫^{1,2,3} 陈晓雯^{1,2,3} 王军^{1,2,3} 王成辉^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学农业农村淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306; 2. 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 3. 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 为探究如何通过活体壳色来指导甲壳类育种和商业性选择, 本研究分析了在活体和煮熟情况下正常性成熟蟹、性早熟蟹、“六月黄”蟹3种食用类型中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)的背壳和肝胰腺组织中的色泽参数和虾青素含量。结果显示: 在活体情况下, 正常性成熟蟹与性早熟蟹、“六月黄”蟹间的背壳、肝胰腺组织的色泽参数 L^* 值存在极显著差异($P<0.01$), 3种类型蟹相互间在背壳、肝胰腺组织的 a^* 和 b^* 值存在极显著差异($P<0.01$); 在煮熟情况下, 3种类型蟹的背壳、肝胰腺组织在 L^* 、 a^* 和 b^* 值上均互相存在极显著差异($P<0.01$)。除性早熟蟹的背壳 a^* 值外, 3种类型蟹的背壳和肝胰腺组织的色泽参数在活体与煮熟情况间均呈极显著或显著正相关($P<0.05$), 表明活体时的色泽指标能较好地反映出煮熟后的色泽特征。此外, 3种类型蟹的活体背壳 L^* 值与煮熟后背壳 a^* 值间均呈极显著负相关($P<0.01$), 表明活体背壳的 L^* 值越小, 煮熟后的背壳颜色更为鲜红。3种类型蟹的背壳虾青素含量测量结果发现, 活体背壳 L^* 值低的蟹, 其煮熟后的背壳更为鲜红, 背壳中的虾青素含量极显著高于 L^* 值高的蟹($P<0.01$)。研究表明: 活体背壳的色泽参数 L^* 值可以作为中华绒螯蟹的壳色品质性状育种和煮熟后鲜红壳色商品蟹的选择依据。

关键词: 背壳; 肝胰腺; 色泽参数; 虾青素; 品质育种; 中华绒螯蟹

中图分类号: S966.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2025)12-122507-09

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0032 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0032



蟹类等甲壳动物的机体色泽会随着不同种类色素蛋白复合物的形成而呈现出多种多样的颜色^[1]。研究发现, 甲壳动物不同组织中的类胡萝卜素种类和含量有所不同。克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)不同部位的虾壳中所含的虾青素含量也有所差异, 其中尾肢壳中的虾青素总量明显高于头胸甲壳、钳壳和足壳等组织^[2]。中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)背壳和肝胰腺组织的总类胡萝卜素含量明显高于其他组织, 且背壳主要以虾青素为主, 肝胰腺主要以 β -胡萝卜素为主^[3]。此外, 类胡萝卜素的种类和含量会随着胚胎的不同发育阶段而变化, 这也导致了甲壳动物胚胎颜色的差异^[4]。

中华绒螯蟹俗称河蟹, 具有肉质细嫩, 味道鲜

美, 营养丰富等特点, 深受广大消费者的喜爱^[5,6]。随着中华绒螯蟹产业的蓬勃发展, 消费者对商品蟹的品质要求越来越高, 除口感和营养等内在品质要求外, 对外观色泽要求也日益提升。富含类胡萝卜素等营养物质的河蟹煮熟后背壳色泽鲜红更激发了消费者的购买欲望, 显示出良好的产业经济价值。当前, 背壳色泽已成为河蟹的重要品质指标之一, 同时也是河蟹育种工作者开始关注的育种目标性状之一。然而, 壳色这一品质性状往往在河蟹煮熟后才能真正体现出来, 难以应用于河蟹活体的育种实践。因而, 如何通过活体的青绿色背壳(生壳)来判断煮熟后(熟壳)的背壳鲜红度, 并用于指导育种实践和高品质商品蟹选择, 是当前中华绒螯蟹

收稿日期: 2025-02-07; 修订日期: 2025-05-08

基金项目: 上海市中华绒螯蟹现代农业产业技术体系建设项目(沪农科产字2024-4号)资助 [Supported by the Shanghai Technology System for Chinese Mitten Crab Industry (2024-4)]

作者简介: 张冰清(1999—), 女, 硕士研究生; 研究方向为水产动物种质资源与种苗工程。E-mail: 2217657912@qq.com

通信作者: 王成辉, 教授; 研究方向为水产动物种质资源与种苗工程。E-mail: wangch@shou.edu.cn

育种和产业发展需要解决的重点问题之一。

21世纪以来,我国中华绒螯蟹育种已取得了重要成绩和进展,选育出多个新品种并在产业上广泛应用。但当前的育种目标性状主要是生长性状,尚未见将色泽作为中华绒螯蟹品质性状育种的报道。因此,本研究通过开展3种可食用类型中华绒螯蟹(正常性成熟蟹、性早熟蟹、“六月黄”蟹)的背壳和肝胰腺组织的色泽参数测定并进行活体与煮熟后色泽参数的关联分析,探究处于不同生长阶段和养殖环境下的中华绒螯蟹背壳色泽的共同特征,试图筛选出活体外在色泽指标来反映煮熟后的壳色特征,以期育种者开展中华绒螯蟹的品质育种和消费者挑选优质商品蟹提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 实验蟹的采集

为了解当前产业上3种食用类型中华绒螯蟹背壳色泽的共同特征,并更好地指导色泽育种开展,取本实验室育种基地的3类实验材料:第1类为一龄的性早熟蟹,共226只;第2类为二龄“六月黄”蟹,共100只;第3类为二龄正常性成熟的成蟹,共132只。

1.2 实验蟹活体背壳(生壳)和煮熟背壳(熟壳)的色泽参数测定

上述实验蟹在充分曝气的自来水中先浸洗5min,然后用牙刷反复刷洗其背壳3次以上去除表面泥沙和污垢后,用纸巾擦干背壳表面水分,立即进行色泽参数测定。

采用三恩时(3nh)手持式色差仪NR60CP和CIE 1976 Lab成像系统测量实验蟹在活体和煮熟后的背壳色泽参数(L^* 、 a^* 和 b^* 值),其中 L^* 代表亮度,其值越大,表示颜色越浅,其值越小,表示颜色越深; a^* 代表红绿色度,正值为红色方向,负值为绿色方向; b^* 代表黄蓝色度,正值为黄色方向,负值为蓝色方向^[7]。

活体背壳(生壳)色泽参数测定:用记号笔在实验蟹背壳上进行编号,选取壳表面3个固定点(图1)进行测定,然后取3点的平均值。

煮熟背壳(熟壳)色泽参数测定:采用水煮法将实验蟹放入开水中煮15min,用纸巾擦干背壳表面的水分,采用与生壳色泽测量一致的方法进行测定。

上述色泽参数测量后,采用自制的暗箱,在光源位置和强度一致的条件下,使用摄像机对所有实验蟹的生壳和对应的熟壳进行拍照记录。

1.3 实验蟹活体肝胰腺(生肝)和煮熟肝胰腺(熟肝)的色泽参数测定

活体肝胰腺(生肝)色泽参数测定:取上述完成

生壳色泽参数测量后的实验蟹,在无菌条件下,迅速解剖取出肝胰腺并放在透明自封袋中。随机选取透明自封袋上的3个点进行测量,然后取3点的平均值。

煮熟肝胰腺(熟肝)色泽参数测定:采用蒸煮法将生肝蒸煮15min后,采用与生肝色泽测量相同的方法进行测定。

同样,采用与背壳拍照相同的方法对生肝和对应的熟肝进行拍照记录。

1.4 虾青素含量测定

分别选取3种类型实验蟹中的生壳 L^* 值最小和最大的各10只样本,采用Agilent公司的SHISEIDO C30柱(4.6 mm×250 mm,包装直径=5 μ m)测定背壳中的虾青素含量。测定方法参考陈慧聪等^[8]和王岁楼等^[9]的方法作适当改动。取去除眼柄和内膜后的背壳,用冷冻干燥机冻干后,再用粉碎机粉碎,最后将碎样用丙酮溶液重复提取至无色后,将提取液过0.45 μ m微孔滤膜后上机检测。

1.5 数据分析

数据以平均值±标准差形式表示,利用IBM SPSS Statistics 25.0进行处理。首先采用K-S检验和Levene法分别对所有数据进行正态性和方差齐性检验。然后,使用ANOVA法分析3种类型实验蟹不同来源和组织的色泽参数差异,用独立样本 t 检验(Independent-sample t -test)分析活体和煮熟实验蟹相关组织间的色泽参数差异,用Pearson法检验不同参数间的相关性,显著性水平为0.05。利用Graphpad prism9.0和OriginPro 2021软件作图。

2 结果

2.1 色泽参数变化规律

通过对正常性成熟蟹、性早熟蟹和“六月黄”蟹在活体和煮熟状态下的背壳色泽测定,发现在活体情况下,正常性成熟蟹与性早熟蟹、“六月黄”蟹



图1 中华绒螯蟹背壳色泽参数的测量位点图

Fig. 1 Measurement site map of carapace color parameters of Chinese mitten crab

在 L^* 值上存在极显著差异($P<0.01$), 3种实验蟹在 a^* 和 b^* 值上相互存在极显著差异($P<0.01$); 在煮熟情况下, 3种实验蟹在 L^* 、 a^* 和 b^* 值上均互相存在极显著差异($P<0.01$)。同样, 3种实验蟹在活体和煮熟情况下的肝胰腺色泽参数差异规律与背壳一致。具体结果如表1所示。

通过对这3种实验蟹所有个体的生壳、生肝及熟壳、熟肝色泽参数作图, 发现它们均具有一致的变动趋势, 表明产业上3种食用类型中华绒螯蟹的色泽参数变化具有表型一致性(图2), 色泽参数可以用于中华绒螯蟹的育种实践。

2.2 中华绒螯蟹活体背壳与煮熟后背壳的色泽参数相关性分析

3种类型实验蟹的活体背壳 L^* 值与煮熟背壳 L^* 值均呈极显著正相关($r=0.359-0.861$, $P<0.01$)。关于活体背壳 a^* 值与煮熟背壳 a^* 值的相关性, 在性早熟蟹内呈极显著负相关($r=-0.212$, $P<0.01$), 而在“六月黄”蟹和正常性成熟蟹内均为无显著相关性($r=-0.062-0.198$, $P>0.05$)。关于活体背壳 b^* 值与煮熟背壳 b^* 值的相关性, 在性早熟蟹和“六月黄”蟹内均呈极显著正相关($r=0.323-0.665$, $P<0.01$), 在正常性成熟蟹内呈显著正相关($r=0.212$, $P<0.05$)。具体如表2所示。

进一步分析发现(表2): 无论是性早熟蟹、“六月黄”还是正常性成熟蟹, 它们的活体背壳 L^* 值与煮熟后背壳 a^* 值之间都具有极显著的负相关关系($P<0.01$), 即: 活体背壳的 L^* 值越小, 其对应的煮熟后背壳的 a^* 值则越大, 意味着熟蟹蟹壳的颜色更为鲜红。

2.3 中华绒螯蟹活体肝胰腺与煮熟后肝胰腺的色泽参数相关性分析

3种类型实验蟹的活体肝胰腺与煮熟肝胰腺的3个色泽参数(L^* 、 a^* 和 b^* 值)均呈极显著正相关($P<0.01$; 表3), 表明通过活体肝胰腺可很好地预测到煮熟后的肝胰腺色泽。

2.4 中华绒螯蟹背壳与肝胰腺的色泽参数相关性分析

性早熟蟹和正常性成熟蟹的生壳 L^* 值与生肝 L^* 值均呈极显著正相关($P<0.01$), 而“六月黄”却是极显著负相关($P<0.01$)。性早熟蟹的生壳 a^* 值与生肝 a^* 值呈极显著正相关($P<0.01$), 而“六月黄”和正常性成熟蟹却无显著相关性($P>0.05$)。3种类型实验蟹的生壳 b^* 值与生肝 b^* 值之间均无显著相关性($P>0.05$; 图3)。

性早熟蟹和正常性成熟蟹的生壳 L^* 值与熟肝 L^* 值间呈极显著正相关($P<0.01$), 而在“六月黄”中

表1 中华绒螯蟹不同来源和组织的色泽参数测定结果

Tab. 1 Color parameters comparisons among the different sources and tissues of Chinese mitten crab

种类Group	性别Sex	组织Tissue	L^*		a^*		b^*	
			活体Live	煮熟Cooked	活体Live	煮熟Cooked	活体Live	煮熟Cooked
性早熟蟹 Precocious crab	雌Female	背壳Carapace	24.06±1.55	43.27±3.61	2.37±0.77	26.06±4.96	4.42±1.93	33.66±4.91
		肝胰腺Hepatopancreas	50.29±3.56	51.81±4.24	30.44±4.86	23.83±6.45	54.63±7.16	52.13±7.04
	雄Male	背壳Carapace	23.67±1.46	43.56±3.03	2.13±0.71	28.95±4.87	3.98±1.72	35.71±3.99
		肝胰腺Hepatopancreas	50.32±3.62	51.55±4.25	25.98±4.47	17.06±4.91	49.20±5.51	45.80±6.02
“六月黄”蟹 June-caught crab	雌和雄 Female and male	背壳Carapace	23.87±1.51 ^b	43.41±3.33 ^b	2.26±0.75 ^b	27.48±5.11 ^b	4.20±1.84 ^c	34.66±4.58 ^b
		肝胰腺Hepatopancreas	50.31±3.58 ^b	51.68±4.24 ^b	28.25±5.17 ^a	20.51±6.66 ^b	51.97±6.94 ^b	49.02±7.27 ^b
	雌Female	背壳Carapace	23.38±1.04	34.97±1.86	-1.86±0.40	16.32±1.83	6.95±1.40	25.79±2.67
		肝胰腺Hepatopancreas	52.49±2.63	47.61±4.30	9.21±1.87	8.07±1.93	41.83±6.00	35.54±4.88
	雄Male	背壳Carapace	24.28±0.93	34.87±2.00	-2.01±0.38	16.52±1.73	5.72±1.06	23.10±2.50
		肝胰腺Hepatopancreas	49.56±2.65	45.54±3.72	9.87±1.83	9.46±1.77	41.06±4.90	38.19±4.53
正常性成熟蟹 Adult crab	雌和雄 Female and male	背壳Carapace	23.88±1.08 ^b	34.91±1.93 ^c	-1.94±0.39 ^c	16.43±1.77 ^c	6.27±1.36 ^b	24.30±2.89 ^c
		肝胰腺Hepatopancreas	50.79±3.01 ^b	46.41±4.09 ^c	9.59±1.87 ^c	8.88±1.96 ^c	41.38±5.37 ^c	37.08±4.84 ^c
	雌Female	背壳Carapace	25.75±2.22	40.69±3.78	3.20±1.29	31.76±4.79	9.26±2.57	36.75±4.01
		肝胰腺Hepatopancreas	55.44±2.83	52.41±4.50	24.99±4.67	28.54±7.38	70.18±9.59	59.58±6.63
	雄Male	背壳Carapace	38.40±3.10	56.89±4.64	2.61±1.11	30.05±4.71	7.22±2.49	36.33±5.82
		肝胰腺Hepatopancreas	75.77±4.50	72.61±4.24	24.82±2.43	22.68±3.81	69.23±7.03	66.50±5.38
	雌和雄 Female and male	背壳Carapace	36.19±5.65 ^a	54.07±7.63 ^a	2.71±1.16 ^a	30.35±4.75 ^a	7.57±2.61 ^a	36.40±5.54 ^a
		肝胰腺Hepatopancreas	72.17±8.87 ^a	69.04±8.84 ^a	24.85±2.93 ^b	23.72±5.13 ^a	69.40±7.51 ^a	65.27±6.19 ^a

注: 同列上标字母不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)

Note: Different superscript letters in the same column indicate significant differences in groups ($P<0.05$)

却无显著相关性($P>0.05$)。性早熟蟹的生壳 a^* 值与熟肝 a^* 值呈显著正相关($P<0.05$), 而在“六月黄”蟹和正常性成熟蟹中均无显著相关性($P>0.05$)。3种类型实验蟹的生壳 b^* 值与熟肝 b^* 值之间均无显著相关性($P>0.05$; 图 4)。

性早熟蟹和正常性成熟蟹的熟壳 L^* 值与熟肝

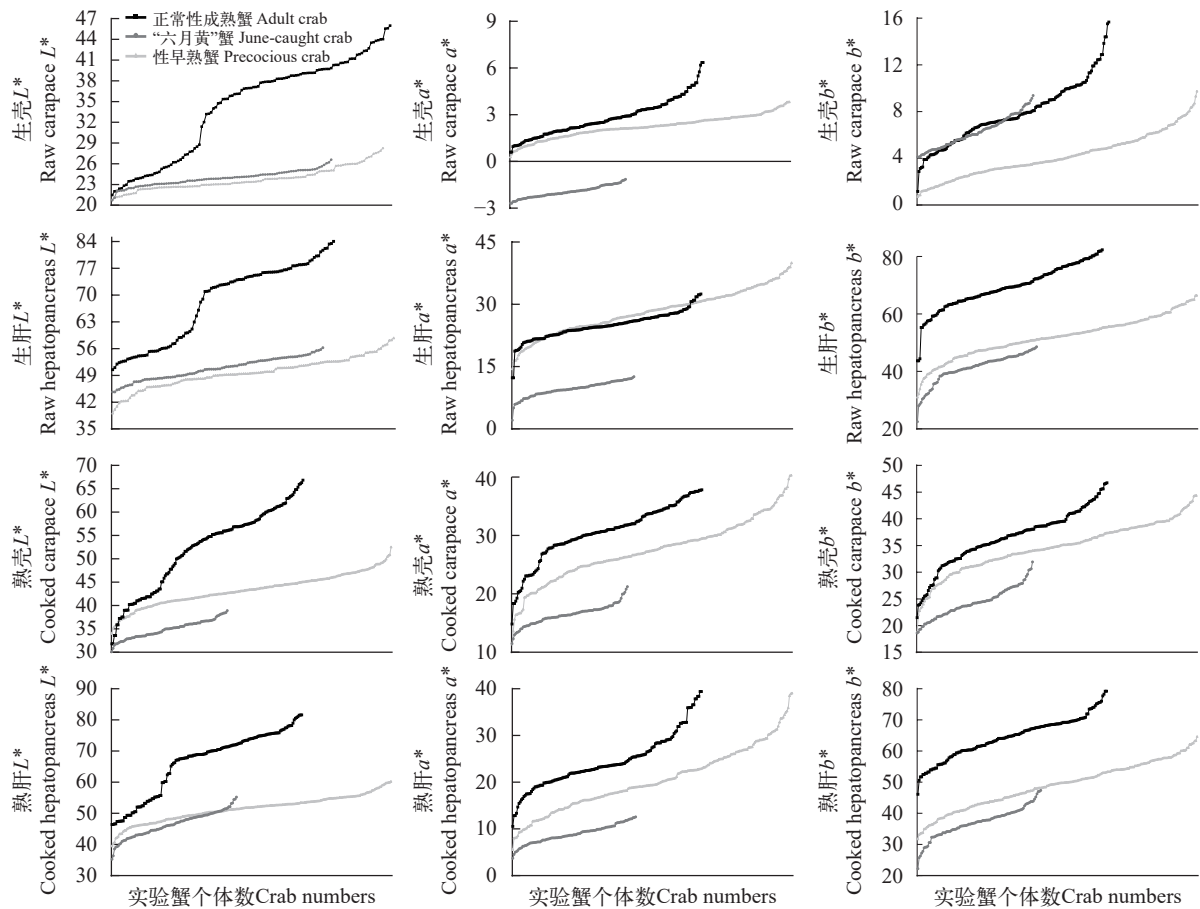


图 2 三种类型中华绒螯蟹在活体和煮熟情况下的背壳和肝胰腺色泽参数变化趋势

Fig. 2 Change trends of color parameters in carapace and hepatopancreas tissues in live and cooked individuals of the three groups of Chinese mitten crab

表 2 三种类型中华绒螯蟹的活体背壳与煮熟后背壳的色泽参数相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients of carapace color parameters between the live and cooked individuals from the three groups of Chinese mitten crab

项目Item	性早熟蟹Precocious crab			“六月黄”蟹June-caught crab			正常性成熟蟹Adult crab		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
L^*	0.455**	0.176**	0.010	0.359**	-0.011	0.317**	0.861**	-0.185*	-0.115
a^*	-0.385**	-0.212**	0.145*	-0.397**	0.198	-0.218*	-0.239**	-0.062	-0.083
b^*	0.097	-0.029	0.323**	-0.059	0.367**	0.665**	0.147	0.031	0.212*

注: *表示显著性水平为 $P<0.05$, **表示显著性水平为 $P<0.01$; 下同
Note: * indicates a significance level of $P<0.05$, and ** indicates a significance level of $P<0.01$; The same applies below

表 3 三种类型中华绒螯蟹的活体肝胰腺与煮熟后肝胰腺的色泽参数相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients of hepatopancreas color parameters between the live and cooked individuals from the three groups of Chinese mitten crab

项目Item	性早熟蟹Precocious crab			“六月黄”蟹June-caught crab			正常性成熟蟹Adult crab		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
L^*	0.721**	0.047	0.556**	0.708**	-0.557**	-0.146	0.889**	-0.238**	-0.045
a^*	-0.011	0.618**	0.465**	-0.603**	0.693**	0.357**	-0.552**	0.386**	0.253**
b^*	0.506**	0.566**	0.796**	-0.202*	0.265**	0.398**	0.469**	-0.112	0.432**

L^* 值呈极显著正相关($P<0.01$),而在“六月黄”蟹中却无显著相关性($P>0.05$)。性早熟蟹的熟壳 a^* 值与熟肝 a^* 值呈极显著负相关($P<0.01$),而在“六月黄”和正常性成熟蟹中却无显著相关性($P>0.05$)。3种

类型实验蟹的熟壳 b^* 值与熟肝 b^* 值之间均无显著相关性($P>0.05$; 图5)。

2.5 虾青素含量分析

3种实验蟹的背壳虾青素含量测量结果发现,

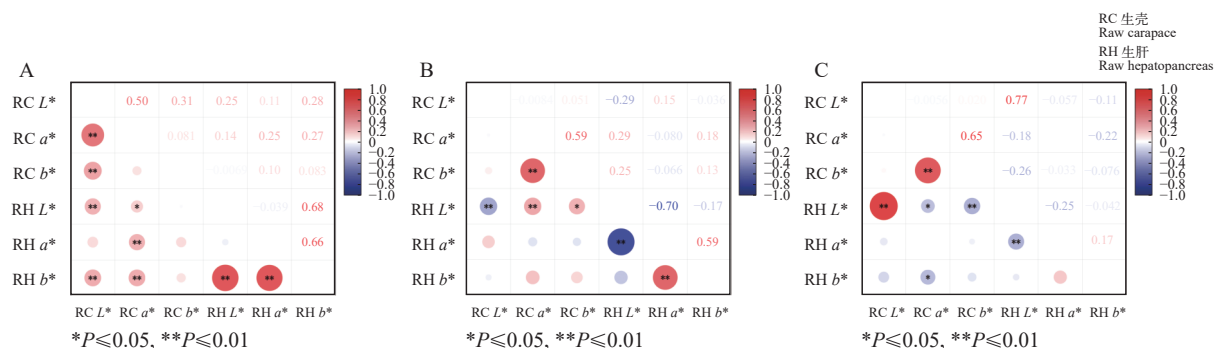


图3 三种类型中华绒螯蟹的壳色与生肝色关系热图

Fig. 3 Heat map of color parameter relationship between the raw carapace and hepatopancreas tissues from the three groups of Chinese mitten crab

A. 性早熟蟹; B. “六月黄”蟹; C. 正常性成熟蟹

A. precocious crab; B. June-caught crab; C. adult crab

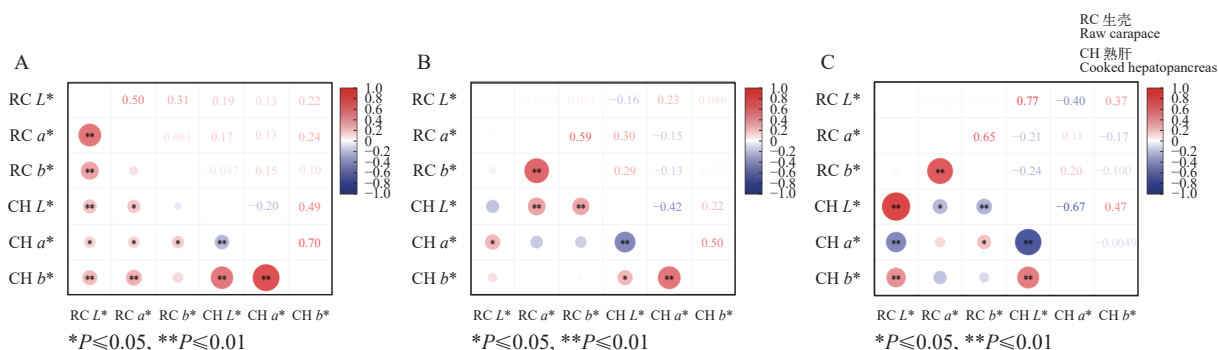


图4 三种类型中华绒螯蟹的壳色与熟肝色关系热图

Fig. 4 Heat map of color parameter relationship between the raw carapace and cooked hepatopancreas tissues from the three groups of Chinese mitten crab

A. 性早熟蟹; B. “六月黄”蟹; C. 正常性成熟蟹

A. precocious crab; B. June-caught crab; C. adult crab

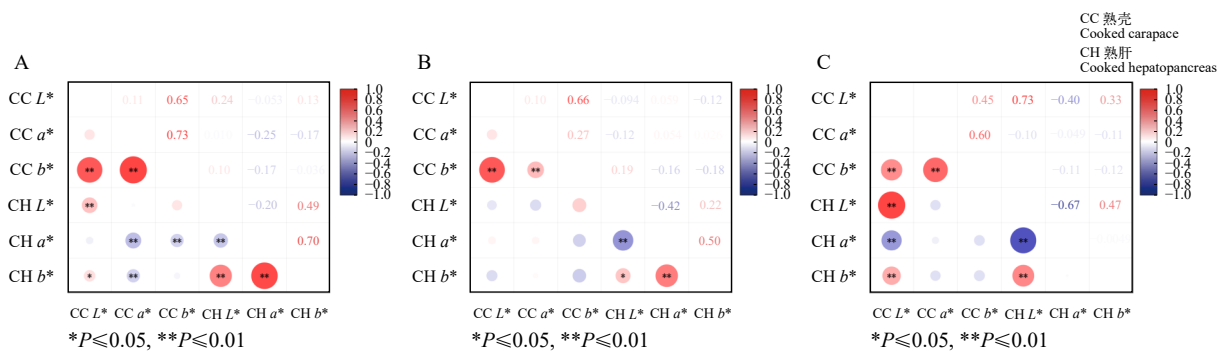


图5 三种类型中华绒螯蟹的熟壳色与熟肝色关系热图

Fig. 5 Heat map of color parameter relationship between the cooked carapace and hepatopancreas tissues from the three groups of Chinese mitten crab

A. 性早熟蟹; B. “六月黄”蟹; C. 正常性成熟蟹

A. precocious crab; B. June-caught crab; C. adult crab

在生壳 L^* 值低的蟹, 其煮熟后的背壳更为鲜红(图 6), 其背壳中的虾青素含量极显著高于 L^* 值高的蟹($P<0.01$; 图 7), 表明活体背壳中的色泽参数 L^* 值可较好地反映出煮熟后的背壳鲜红度和虾青素水平, L^* 值可用于中华绒螯蟹的壳色育种和商品蟹选择。

3 讨论

3.1 不同类型中华绒螯蟹的色泽变化规律

甲壳动物中的某些基因通过调节甲壳内类胡萝卜素含量的变化而引起外壳色泽的改变^[10]。养殖环境的颜色也会影响甲壳动物的色泽, 如水箱颜色显著影响三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)的背甲颜色, 白色养殖池中 L^* 值最高, 红色养殖池中 a^* 值最高, 黄色养殖池中 b^* 值最高^[11]。红壳色和

正常壳色仔蟹在绿光的照射下, 其体色会逐渐加深并趋向黑色^[12]。姜晓东等^[6]研究发现, 在育肥饲料中添加 β -胡萝卜素显著影响了中华绒螯蟹卵巢和肝胰腺组织的色泽。张亚文等^[13]研究发现, 在饲料中添加不同种类的水草粉显著提高了克氏原螯虾头胸甲和卵巢组织的红度(a^*)值和黄度(b^*)值。因此, 甲壳动物的色泽受遗传、环境和饲料等多方面的影响, 尤其与饲料中的类胡萝卜素种类、含量及投喂类胡萝卜素的持续时间有关^[14]。本研究发现, 3 种类型实验蟹活体和煮熟状态下的背壳及肝胰腺的色泽参数均存在极显著差异($P<0.01$), 这可能与它们自身发育阶段、养殖环境及摄食饲料种类不同有关。光、热、酸、氧化剂和还原剂影响类胡萝卜素的稳定性, 其中高温和室外阳光直射会导致

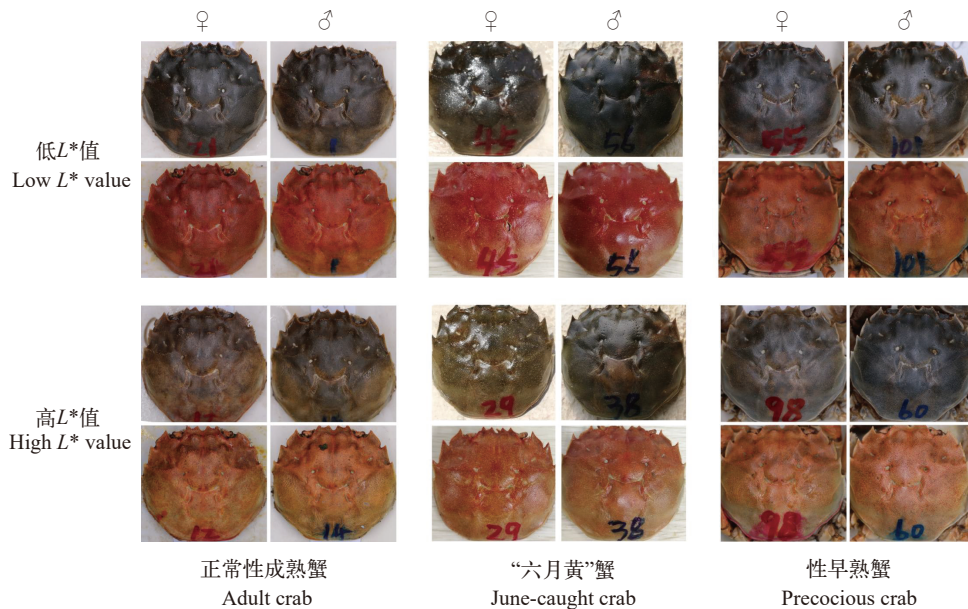


图 6 三种类型中华绒螯蟹代表性个体高低生壳 L^* 值的壳色外观比较

Fig. 6 Color photo observation of raw and cooked carapace from representative individuals of the three groups of Chinese mitten crab with high and low L^* values in raw carapace

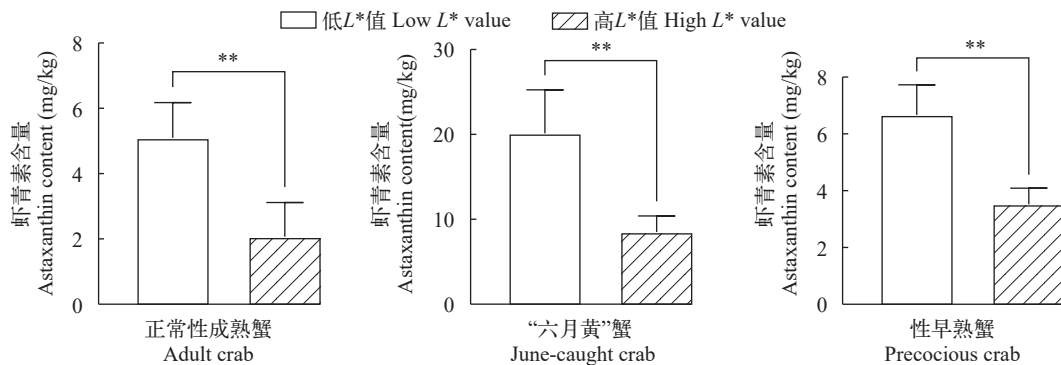


图 7 三种类型中华绒螯蟹高低生壳 L^* 值的虾青素含量比较

Fig. 7 Astaxanthin content comparisons from the three groups of Chinese mitten crab with high and low L^* values in raw carapace

**表示组间存在极显著差异($P<0.01$)

** indicates extremely significant differences between groups ($P<0.01$)

类胡萝卜素在475 nm处的吸收减弱,但在避光条件下无影响^[15]。虾壳虾青素在高温及阳光直射下表现出不稳定性,而在室内自然光或避光条件下,其影响相对较小^[16,17]。在本研究中,3种类型实验蟹在活体和煮熟情况下的背壳和肝胰腺色泽参数变化趋势具有一致性,这可能是因为实验全程维持了统一条件,从而确保了类胡萝卜素的化学性质和稳定性保持一致,虽然煮熟过程中会引起某些生物分子的改变,但色素的基本特性及其表现依然呈现出相同的变化趋势。上述结果也说明,不同生长环境或不同发育阶段的中华绒螯蟹,背壳和肝胰腺色泽参数可能存在一定的差异,但基本的变化趋势具有一致性,外观为青绿色的壳色可以通过测定的色泽参数反映出变化,色泽这一表型性状是可以用于育种实践的。

3.2 中华绒螯蟹活体色泽与煮熟后色泽的关系

Hasan等^[18]研究发现,斑节对虾(*Penaeus monodon*)虾体色泽参数 L^* 和 b^* 值在煮熟前后均存在正相关,并且活体虾体 L^* 值与煮熟虾体 a^* 值之间具有很强的负相关性($r=-0.81$),选择深色未煮熟的虾将导致煮熟后颜色的强度增强。本研究发现,3种类型实验蟹背壳色泽参数 L^* 和 b^* 值在活体与煮熟后均呈显著正相关($P<0.05$),活体背壳 L^* 值与煮熟后背壳 a^* 值之间均呈极显著负相关($P<0.01$),这与Hasan等^[18]的研究结果相符。蟹壳的亮度(L^*)值与总类胡萝卜素呈显著负相关^[19],红度(a^*)值与总类胡萝卜素和虾青素呈正相关^[20]。活体背壳 L^* 值与煮熟背壳 a^* 值之间呈显著负相关的这一规律,不仅揭示了生熟壳色泽之间的内在联系,更为消费者挑选优质商品蟹及育种工作人员开展中华绒螯蟹的品质育种提供了参考和依据。中华绒螯蟹肝胰腺组织类胡萝卜素以 β -胡萝卜素为主^[21]。韩浩等^[22]研究发现,光照、温度、酸碱性、金属离子都会对 β -胡萝卜素产生一定影响,其中光照、温度和金属离子的影响尤为显著。肝胰腺组织(消费上称为蟹黄)是中华绒螯蟹极为重要的可食部位^[5],煮熟后颜色鲜红的肝胰腺更容易受到消费者青睐。本研究发现,3种类型实验蟹肝胰腺色泽参数 L^* 、 a^* 和 b^* 值在活体与煮熟后均呈极显著正相关($P<0.01$),特别是活体肝胰腺 a^* 值与煮熟肝胰腺 a^* 值均呈极显著正相关($P<0.01$),表明活体的肝胰腺越红其煮熟后的肝胰腺也越红,这对养殖者和消费者均具有重要指导意义。

3.3 中华绒螯蟹虾青素含量与色泽的关系

甲壳动物的组织色泽主要受虾青素含量的影响, β -胡萝卜素和玉米黄素在体内也能够转化为虾

青素^[23]。在甲壳动物体内虾青素呈红色, β -胡萝卜素和玉米黄素呈黄色^[19]。研究表明北极红点鲑(*Salvelinus alpinus*)鱼片的色泽参数 a^* 值与类胡萝卜素含量具有显著的相关性^[24]。珠母贝(*Pinctada fucata*)的闭壳肌中,色泽参数 a^* 值与类胡萝卜素含量之间具有极显著的正相关($P<0.01$)^[25]。成蟹蟹壳和卵巢组织的色泽参数 L^* 值与虾青素含量之间均呈显著负相关,蟹壳、肝胰腺和卵巢组织的色泽参数 a^* 值与虾青素含量之间均呈显著正相关^[19]。何志然^[26]研究发现,金色品系三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)中,颜色与亮度(L^*)值存在一定的相互作用,可以通过降低 L^* 值培育出颜色鲜艳的珍珠。本研究发现,3种类型实验蟹低 L^* 值的蟹壳中所含的虾青素含量均极显著高于高 L^* 值的蟹壳($P<0.01$),且低 L^* 值的蟹壳煮熟后颜色更为鲜红。这说明,中华绒螯蟹活体背壳的 L^* 值越小,其对应的煮熟后背壳的 a^* 值则越大,意味着蟹壳所含的虾青素含量越高,煮熟后颜色更为鲜红, L^* 值可用于中华绒螯蟹的壳色育种和商品蟹选择的依据。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Niu J, Wen H, Li C H, et al. Comparison effect of dietary astaxanthin and β -carotene in the presence and absence of cholesterol supplementation on growth performance, antioxidant capacity and gene expression of *Penaeus monodon* under normoxia and hypoxia condition [J]. *Aquaculture*, 2014(422): 8-17.
- [2] Wang C Y, Huang H B, Li J J, et al. Study on the structure and color changes of astaxanthin in different parts of *Procambarus clarkii* shell [J]. *Aquaculture*, 2022, 43(7): 6-12. [王晨宇, 黄鸿兵, 李佳佳, 等. 克氏原螯虾甲壳不同部位中虾青素含量、构成与体色变化研究 [J]. *水产养殖*, 2022, 43(7): 6-12.]
- [3] Xu X Q, Hou X, Zhang X L, et al. Analysis of relative germplasm characteristics of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) with two carapace colors [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024, 39(6): 996-1003. [许雪芹, 侯鑫, 张晓苓, 等. 两种壳色中华绒螯蟹成蟹的相关种质性状分析 [J]. *大连海洋大学学报*, 2024, 39(6): 996-1003.]
- [4] Zadorozhny P A, Borisovets E E, Yakush E V, et al. Change of carotenoid composition in crabs during embryogenesis [J]. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2008, 44(4): 450-461.
- [5] 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.
- [6] Jiang X D, Zhu L X, Cheng Y X, et al. Effect of dietary β -carotene on ovary development, antioxidant capability,

- immunity, and tissue color of adult female Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, **54**(6): 1704-1715. [姜晓东, 朱凌翔, 成永旭, 等. 育肥饲料中添加 β -胡萝卜素对中华绒螯蟹雌体卵巢发育、抗氧化免疫性能和组织色泽的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2023, **54**(6): 1704-1715.]
- [7] He J B, Wang L Z, Qian L L, *et al.* Factors affecting color change of *Porphyra yezoensis* [J]. *Food Research and Development*, 2021, **42**(23): 81-85. [贺钧彬, 王灵昭, 钱亮亮, 等. 条斑紫菜颜色变化的影响因素研究 [J]. 食品研究与开发, 2021, **42**(23): 81-85.]
- [8] Chen H C, Jiao Y L, Wang W L, *et al.* Establishment of a method for carotenoid determination in *Artemia* sp. using UPLC [J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2022, **37**(6): 9-17. [陈慧聪, 焦烨磊, 王伟隆, 等. 基于UPLC对卤虫体内类胡萝卜素检测方法的建立 [J]. 天津科技大学学报, 2022, **37**(6): 9-17.]
- [9] Wang S L, Xie W L. Study on the optimization of extraction method and technological conditions of carotenoid in red pepper [J]. *Farm Products Processing*, 2020(11): 39-41. [王岁楼, 谢雯丽. 红辣椒中类胡萝卜素提取方法及工艺条件优化研究 [J]. 农产品加工, 2020(11): 39-41.]
- [10] Shahidi F, Metusalach, Brown J A. Carotenoid pigments in seafoods and aquaculture [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1998, **38**(1): 1-67.
- [11] Wang J C, Peng K W, Lu H D, *et al.* The effect of tank colour on growth performance, stress response and carapace colour of juvenile swimming crab *Portunus trituberculatus* [J]. *Aquaculture Research*, 2019, **50**(9): 2735-2742.
- [12] Zuo B N, Li X D, Jiang Y S, *et al.* Effects of colorful light on growth performance, feeding and shell color in Chinese mitten crab juvenile *Eriocheir sinensis* with the red shell [J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2018, **8**(3): 26-33. [左炳楠, 李晓东, 姜玉声, 等. 光色对红壳色中华绒螯蟹生长、摄食及体色的影响 [J]. 中国渔业质量与标准, 2018, **8**(3): 26-33.]
- [13] Zhang Y W, Cheng Y X, Li C L, *et al.* Effects of dietary supplementation with different aquatic weed meals on the growth performance, digestive enzyme and antioxidant enzyme activities, and coloration of *Procambarus clarkii* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, **46**(8): 1414-1426. [张亚文, 成永旭, 李晨露, 等. 饲料中添加不同水草粉对克氏原螯虾生长、消化酶、抗氧化酶活性及色泽的影响 [J]. 水产学报, 2022, **46**(8): 1414-1426.]
- [14] Wade N M, Gabaudan J, Glencross B D. A review of carotenoid utilisation and function in crustacean aquaculture [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2017, **9**(2): 141-156.
- [15] Zheng L Y, Xin J Y, Yao T T, *et al.* Study on the Stability of Carotenoid Pigments [C]. Advances in Computer Science Research. December 29-31, 2015. Shenyang, China. Atlantis Press, 2016: 690-694.
- [16] Maoliha A, Tuliwuhan A, Abudoula A. Extraction and stability research of shrimp astaxanthin [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2013, **4**(3): 905-910. [毛丽哈·艾合买提, 吐力吾汗·阿米汗, 阿布都拉·艾尼瓦尔. 虾壳虾青素的提取及其稳定性研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2013, **4**(3): 905-910.]
- [17] Zhang J, Shang J W, He Y, *et al.* Extraction of astaxanthin from *Litopenaeus vannamei* shrimp head and its stability [J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2014, **4**(1): 43-52. [张婧, 商建伟, 贺瑶, 等. 南美白对虾虾头中虾青素的提取工艺及稳定性 [J]. 中国渔业质量与标准, 2014, **4**(1): 43-52.]
- [18] Hasan M M, Raadsma H W, Thomson P C, *et al.* Genetic parameters of color phenotypes of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. *Frontiers in Genetics*, 2022(13): 1002346.
- [19] Li Q Q. Estimates of genetic parameters for colour traits and colour formation mechanism in *Eriocheir sinensis* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 31-34. [李清清. 中华绒螯蟹色泽遗传参数评估及色泽形成机制研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 31-34.]
- [20] Li Q Q, Sun Q F, Liu Q, *et al.* Estimation of genetic parameters for carotenoid traits in Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*, females [J]. *Aquaculture*, 2021(532): 735990.
- [21] Zhang D D, Fan C W, Jiang X D, *et al.* Comparison of edible yield, carotenoid content and nutritional composition between the white carapace strain and green carapace strain of adult *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(9): 122-134. [张冬冬, 范陈伟, 姜晓东, 等. 中华绒螯蟹白壳和绿壳品系成蟹可食率、类胡萝卜素含量和营养组成的比较 [J]. 水产学报, 2023, **47**(9): 122-134.]
- [22] Han H, Li X J, Wang X, *et al.* Optimization of extraction process and stability of β -carotene from pumpkin [J]. *China Condiment*, 2023, **48**(10): 73-77. [韩浩, 李晓娟, 王珣, 等. 南瓜中 β -胡萝卜素提取工艺优化及稳定性研究 [J]. 中国调味品, 2023, **48**(10): 73-77.]
- [23] Matsuno T. Aquatic animal carotenoids [J]. *Fisheries Science*, 2001, **67**(5): 771-783.
- [24] Hatlen B, Jobling M, Bjerkeng B. Relationships between carotenoid concentration and colour of fillets of Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.), fed astaxanthin [J]. *Aquaculture Research*, 1998, **29**(3): 191-202.
- [25] Zhang B, Zhu C B, Meng Z H, *et al.* Carotenoids in pearl oyster *Pinctada fucata*: the tissue distribution and correlation to color parameters [J]. *Pakistan Journal of Zoology*, 2019, **51**(5): 1655-1661.
- [26] He Z R. Breeding progress and genetic parameter estimation of growth and color traits in the first generation of golden strain *Hyriopsis cumingii* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 24-25. [何志然. 三角帆蚌金色品系子一代选育效果及生长和色泽性状遗传参数估计 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 24-25.]

COLOR CORRELATION ANALYSIS BETWEEN LIVE AND COOKED CARAPACE AND HEPATOPANCREAS IN CHINESE MITTEN CRAB

ZHANG Bing-Qing^{1,2,3}, CHEN Hui-Fan^{1,2,3}, HOU Xin^{1,2,3}, CHEN Xiao-Wen^{1,2,3},
WANG Jun^{1,2,3} and WANG Cheng-Hui^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Germplasm Resources Certificated by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Aquatic Sciences, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Aquaculture Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

Abstract: Carapace color is an important quality trait in crustaceans, and display significant breeding importance and economic value in the aquaculture industry. It is urgent to explore how to guide selective breeding and conduct commercial selection by using live carapace color in crustacean industry. This study analyzed the color parameters and astaxanthin content in the carapace and hepatopancreas tissues of three groups of edible live and cooked Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* (adult crab, precocious crab and June-caught crab). The results showed significant intergroup differences in L^* values of the carapace and hepatopancreas tissues among live adult, precocious, and June-caught crabs ($P<0.01$). Additionally, a^* and b^* values in both tissue types also varied significantly among the three groups in the live condition ($P<0.01$). In the cooked condition, significant differences observed in L^* , a^* , and b^* values across all groups ($P<0.01$). These findings indicate that while color parameters of the carapace and hepatopancreas may differ based on growth environment and development stage, consistent underlying trends exist. Exception for a^* value of the carapace in precocious crab, there were significant or highly significant correlations ($P<0.05$) of color parameters between the live and cooked crabs, which indicated color parameters in live crab can respond to its cooked characteristics. Notably, the a^* values of the live hepatopancreas showed a strong positive correlation ($P<0.01$) with those of the cooked hepatopancreas, indicating that darker red hues in live hepatopancreas intensify post-cooking. Furthermore, there were significantly negative correlation between the L^* values in live carapace and the a^* values in cooked carapace ($P<0.01$), indicating that lower L^* value in the live carapace corresponds to more bright-colored red in the cooked carapace. The significant negative correlation not only reveals the intrinsic connection between raw and cooked carapace colors, but also provides a reference for consumers in selecting high-quality crabs and for breeders aiming to improve crab quality. The astaxanthin content in carapace with low L^* values were extremely significantly higher than those with high L^* values in all three crab groups ($P<0.01$), which indicates that the color parameter L^* in the live carapace can effectively reflect the redness of cooked carapace. In summary, this study suggests that carapace L^* values as a valuable quality trait and potential selection index for breeding high-quality, red-shelled Chinese mitten crab, offering essential insights for sustainable aquaculture practices.

Key words: Carapace; Hepatopancreas; Color parameters; Astaxanthin; Quality breeding; *Eriocheir sinensis*