



王松, 袁栋昊, 曹子淇, 等. 中华绒螯蟹对 10 种新型蛋白源粗蛋白及氨基酸表观消化率的比较 [J]. 水产学报, 2026, 50(5): 059616.  
Wang S, Yuan D H, Cao Z Q, *et al.* Comparative study on apparent digestibility coefficients of crude protein and amino acids from ten novel protein sources in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(5): 059616 (in Chinese).

## 中华绒螯蟹对 10 种新型蛋白源粗蛋白及氨基酸表观消化率的比较

王松, 袁栋昊, 曹子淇, 张连杰, 王晓丹, 陈立侨\*, 李二超\*  
(华东师范大学生命科学学院, 上海 200241)

**摘要:** 【目的】为缓解水产饲料中鱼粉资源的短缺, 开发高效的鱼粉替代源, 本研究旨在系统评估中华绒螯蟹对 10 种新型蛋白源 (涵盖酶解、发酵、膨化及水解工艺) 的消化利用特性, 并探究深加工原料中粗蛋白与氨基酸消化率之间的一致性特征。【方法】选取酶解鸡肉粉、酶解羽毛粉、酶解全脂大豆、酶解大豆蛋白、发酵棉籽粕、发酵豆粕、膨化大豆、膨化羽毛粉、水解羽毛粉和水解鱼粉共 10 种新型蛋白原料, 以鱼粉为对照, 三氧化二钇 (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.1%) 为外源指示剂, 采用“70% 基础饲料+30% 待测原料”的套算法, 测定中华绒螯蟹 [初始均重 (125.0 ± 6.1) g] 对原料干物质、粗蛋白、粗脂肪及氨基酸的表观消化率。【结果】原料种类及加工工艺显著影响营养物质的表观消化率。酶解鸡肉粉 (92.80%) 和膨化羽毛粉 (90.77%) 的粗蛋白表观消化率最高, 与鱼粉对照组无显著性差异; 膨化大豆、水解羽毛粉、酶解全脂大豆和水解鱼粉的粗蛋白消化率相对较低 (62.95%~69.22%)。主成分分析及相关性分析揭示, 深加工原料的粗蛋白与氨基酸表观消化率之间存在显著不一致性: 发酵原料可能受非蛋白氮干扰, 其粗蛋白消化率数值被显著高估; 而膨化大豆虽粗蛋白消化率较低, 但其部分氨基酸 (蛋氨酸、组氨酸、赖氨酸、丙氨酸) 的表观消化率仍保持在 90% 以上的高水平。【结论】酶解鸡肉粉和膨化羽毛粉是中华绒螯蟹优质的蛋白源。本研究表明, 针对深加工蛋白源, 建议结合氨基酸表观消化率修正原料营养价值, 以避免配方偏差。

**关键词:** 中华绒螯蟹; 新型蛋白源; 表观消化率; 氨基酸消化率

**中图分类号:** S 963.73

**文献标志码:** A

随着水产养殖业的集约化发展, 鱼粉资源短缺且价格持续攀升已成为制约行业可持续发展的主要限制因素<sup>[1]</sup>。开发利用来源广泛、成本低廉

的新型蛋白源, 一直是水产动物营养学的研究热点<sup>[2]</sup>。然而, 常规植物蛋白源 (如豆粕、棉粕) 和陆生动物副产物往往因抗营养因子含量高、氨基

收稿日期: 2026-02-05 修回日期: 2026-03-05

资助项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2402000); 上海市产业技术体系 (202504); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-48)

第一作者: 王松, 从事水生动物营养与环境健康研究, E-mail: 51251300026@stu.ecnu.edu.cn

通信作者: 陈立侨, 从事水生动物营养与环境健康研究, E-mail: lqchen@bio.ecnu.edu.cn;

李二超, 从事水生动物营养与环境健康研究, E-mail: ecl@bio.ecnu.edu.cn



酸组成不平衡或消化率低等缺陷,限制了其在水产饲料中的高效应用<sup>[3]</sup>。近年来,得益于饲料加工技术的进步,酶解肉粉、发酵粕类、膨化及水解副产物等一批经过深度加工的新型蛋白源逐渐进入市场。这些原料通过酶解预消化、微生物发酵或高温膨化处理,理论上能有效钝化抗营养因子、降解大分子蛋白质,显著改善其营养价值<sup>[4-5]</sup>。但值得注意的是,这些深加工工艺在改善原料理化性质的同时,也改变了营养物质的存在形式(如产生非蛋白氮、发生美拉德反应等)<sup>[6-7]</sup>。这一变化使得传统的以“粗蛋白含量”或单一“粗蛋白消化率”为基准的评价体系,可能无法准确反映其在水产动物体内的营养价值<sup>[8]</sup>。

准确评定原料的表观消化率是构建精准饲料配方的前提。尽管国内外关于主要养殖鱼类[如吉富罗非鱼(GIFT *Oreochromis niloticus*)、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)和墨西哥笛鲷(*Lutjanus campechanus*)]对各类原料消化率的研究已有广泛报道<sup>[9-11]</sup>,但水产动物对营养物质的利用能力具有显著的种间特异性,直接套用鱼类数据设计蟹类饲料往往会导致严重的配方偏差<sup>[12]</sup>。中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)作为一种杂食性甲壳动物,其消化系统缺乏脊椎动物所具有的酸性胃,且肠道相对较短,蛋白质消化主要依赖于胰腺分泌的丝氨酸蛋白酶(如胰蛋白酶)在中性偏碱性的环境中进行<sup>[13-14]</sup>。这种独特的生理特征表明中华绒螯蟹对原料的预处理工艺较为敏感:一方面,适度的加工可能弥补其消化生理局限;另一方面,加工不当产生的难消化物质(如美拉德反应产物)对其利用率的负面影响可能比有胃鱼类更为显著<sup>[15]</sup>。然而,目前针对中华绒螯蟹的消化率数据多集中于大宗常规原料,关于市售新型蛋白源的系统性评价仍十分匮乏,特别是关于“粗蛋白”与“氨基酸”表观消化率之间是否存在规律性的偏差,尚缺乏实验证据支持。

鉴于此,本研究选取了目前饲料市场上具有代表性的10种新型蛋白原料(涵盖酶解、发酵、膨化及水解4类典型工艺),以鱼粉为对照,应用指示剂法结合套算模型,测定中华绒螯蟹对其干物质、粗蛋白、粗脂肪及17种氨基酸的表观消化率。本研究旨在通过系统评估不同原料的消化利用特性,筛选具有替代鱼粉潜力的优质蛋白源,并重点探究深加工原料中粗蛋白与氨基酸消化率之间的一致性及其偏离规律,以期完善中华绒螯

蟹原料营养数据库、构建基于氨基酸表观消化率的精准配方体系提供科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验原料与amp;饲料制作

本研究选取了10种具有代表性的市售新型饲料蛋白原料作为待测对象。根据加工工艺特征,将其分为4类:酶解类(酶解鸡肉粉、酶解羽毛粉、酶解全脂大豆、酶解大豆蛋白)、发酵类(发酵棉籽粕、发酵豆粕)、膨化类(膨化大豆、膨化羽毛粉)及水解类(水解羽毛粉、水解鱼粉)。以鱼粉作为对照原料。所有原料均为市售商业产品,其来源及加工工艺描述见表1。实验前,所有原料均粉碎过60目筛备用。

表1 实验原料的来源及amp;加工工艺

Tab. 1 Sources and descriptions of the test ingredients

编号 code	原料名称 ingredients	加工工艺 processing type	供应商 supplier
FM	鱼粉	未处理	沈阳码头商贸有限公司
EHCM	酶解鸡肉粉	酶解	陕西边界生物科技有限公司
EHFM	酶解羽毛粉	酶解	临朐县华懋饲料有限公司
EHFS	酶解全脂大豆	酶解	江苏富海生物科技有限公司
EHSP	酶解大豆蛋白	酶解	上海源耀农业股份有限公司
FCM	发酵棉籽粕	发酵	鸡泽县天德生物饲料有限公司
FSM	发酵豆粕	发酵	上海源耀农业股份有限公司
ESM	膨化大豆	膨化	大同市佳慧饲料有限公司
EFM	膨化羽毛粉	膨化	临朐县华懋饲料有限公司
HFM	水解羽毛粉	水解	大同市佳慧饲料有限公司
HF	水解鱼粉	水解	陕西边界生物科技有限公司

Notes: FM. fish meal; EHCM. enzymatic hydrolyzed chicken meal; EHFM. enzymatic hydrolyzed feather meal; EHFS. enzymatic hydrolyzed full-fat soybean; EHSP. enzymatic hydrolyzed soy protein; FCM. fermented cottonseed meal; FSM. fermented soybean meal; ESM. extruded soybean meal; EFM. extruded feather meal; HFM. hydrolyzed processed feather meal; HF. hydrolyzed processed fish meal, the same below.

实验饲料配方参照“70%基础饲料+30%待测原料”的套算法设计<sup>[16]</sup>。基础饲料以鱼粉和豆粕为主要蛋白源,玉米淀粉为碳水化合物源,鱼油、大豆卵磷脂和胆固醇为脂肪源,其详细组成见表2。为测定表观消化率,所有饲料中均添加1.0 g/kg(0.1%)的三氧化二钇( $Y_2O_3$ )作为外源惰性指示剂。饲料制作采用逐级扩大法:首先将各种干粉原料按配方比例准确称重并混合均匀,随后加入油源

表 2 实验饲料的组成及营养水平 (干物质)  
Tab. 2 Composition and nutrient levels of experimental diets (dry matter)

原料 ingredient	基础饲料 reference diet	实验饲料 test diet
鱼粉 fish meal	500.0	350.0
豆粕 soybean meal	200.0	140.0
玉米淀粉 corn starch	144.0	100.5
鱼油 fish oil	50.0	35.0
大豆卵磷脂 lecithin	10.0	7.0
胆固醇 cholesterol	5.0	3.5
维生素预混料 vitamin premix <sup>1)</sup>	40.0	28.0
矿物质预混料 mineral premix <sup>2)</sup>	20.0	14.0
羧甲基纤维素钠 CMC-Na	30.0	21.0
氧化钇 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	1.0
待测原料 test ingredients	0.0	300.0

注: 1) 维生素预混料每 100 g 含有盐酸硫胺素 0.15 g, 醋酸视黄醇 0.043 g, 胆钙化醇 0.007 5 g, 核黄素 0.062 5 g, 叶酸 0.025 g, 泛酸钙 0.3 g, 盐酸吡哆醇 0.225 g, 烟酸 0.3 g,  $\alpha$ -生育酚乙酸酯 0.5 g, 抗坏血酸 0.5 g, 甲萘醌 0.05 g, 生物素 0.005 g, 对氨基苯甲酸 0.1 g 以及肌醇 1 g, 使用  $\alpha$ -纤维素补足至 100 g。2) 矿物质预混料每 100 g 含有磷酸二氢钾 21.5 g, 二水氯化铜 0.015 g, 氯化钾 2.8 g, 六水氯化铝 0.024 g, 一水硫酸锰 0.143 g, 六水氯化钴 0.14 g, 磷酸二氢钙 26.5 g, 七水硫酸锌 0.476 g, 七水硫酸镁 10.0 g, 碳酸钙 10.5 g, 柠檬酸铁 1 g, 磷酸二氢钠 10.0 g, 碘化钾 0.023 g 以及乳酸钙 16.50 g, 使用  $\alpha$ -纤维素补足至 100 g。

Notes: 1) the vitamin premix provided essential micronutrients (per 100 g), thiamine hydrochloride 0.15 g, retinol acetate 0.043 g, cholecalciferol 0.007 5 g, riboflavin 0.062 5 g, folic acid 0.025 g, calcium pantothenate 0.3 g, pyridoxine hydrochloride 0.225 g, niacin 0.3 g,  $\alpha$ -tocopherol acetate 0.5 g, ascorbic acid 0.5 g, menadione 0.05 g, biotin 0.005 g, paraaminobenzoic acid 0.1 g and inositol 1 g. The final volume was adjusted to 100 g using  $\alpha$ -cellulose as a carrier. 2) the mineral premix formulation comprised (per 100 g), KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 21.5 g, CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 0.015 g, KCl 2.8 g, AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.024 g, MnSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.143 g, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.14 g, Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 26.5 g, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.476 g, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 10.0 g, CaCO<sub>3</sub> 10.5 g, Fe-citrate 1 g, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 10.0 g, KI 0.023 g, and calcium lactate 16.50 g. The mixture was standardized to 100 g with  $\alpha$ -cellulose.

及约 30% 的去离子水, 充分搅拌至面团状。使用双螺杆挤条机 (F-26 型, 华南理工大学) 将其加工成直径为 2.5 mm 的沉性颗粒饲料。饲料制成后置于 60 °C 烘箱中烘干至水分含量低于 10%, 室温冷却后密封分装, 于 -20 °C 冰箱中保存备用。实验饲料营养成分及氨基酸组成见表 3。

## 1.2 实验动物和饲养管理

本研究经华东师范大学实验动物管理委员会批准 (批准号: f20190101)。实验用中华绒螯蟹 (雄性) 购自上海崇明当地商业养殖基地。实验开始

前, 于室内循环水系统中暂养 1 周, 其间投喂基础饲料, 以使其适应养殖环境及颗粒饲料。暂养结束后, 选取体格健壮、附肢齐全且规格整齐的个体 [初始均重 (125.0 ± 6.1) g], 随机分配至 36 个玻璃养殖缸 (300 L) 中。共设 12 个处理组 (1 个基础饲料组 + 11 个待测原料组), 每组 3 个重复, 每个重复 6 只蟹。为防止中华绒螯蟹争斗及自残影响实验, 各养殖缸内放置瓦片作为隐蔽物。实验期间, 每日于 08:00 和 17:00 各投喂 1 次, 日投喂量约为体重的 3%, 并根据摄食情况及残饵量适时调整, 确保投喂后 1 h 内有少量残饵。养殖用水为曝气自来水, 通过室内循环水系统严格控制水质: 水温 23~26 °C, pH 7.5~8.5, 溶解氧 > 6.0 mg/L, 氨氮 < 0.2 mg/L, 亚硝酸盐 < 0.05 mg/L。光照周期为自然光照 (12L : 12D)。

## 1.3 样品采集

实验进行 1 周后, 待受试蟹完全适应实验饲料并排空肠道原有内容物后, 开始进行粪便收集。为最大程度减少粪便在水中的浸泡溶失, 本研究采用严格限时的“虹吸法”收集。具体操作如下: 每日投喂后 1 h 内, 利用虹吸管彻底清理缸内残饵及排泄物, 并刷洗养殖缸底部以防污染; 随后进行持续观察。待发现有围食膜包裹完整、成形的粪便排出时 (通常在清理后 30~60 min), 立即利用虹吸管吸出, 并用蒸馏水轻轻漂洗以去除表面附着的无机盐及杂质。收集的粪便样品装入冻存管中立即置于 -20 °C 保存, 同一重复的粪便样品合并为一个混合样, 所有处理组同步进行每日收集, 共持续 80 d, 直至收集到足量样品。所有样品经冷冻干燥、粉碎并过 60 目筛后待测。

## 1.4 测定方法

原料、饲料及粪便样品的化学成分分析参照标准方法<sup>[17]</sup>进行。水分含量采用 105 °C 烘干法测定; 粗蛋白含量采用凯氏定氮仪 (Kjeltec 8200, FOSS, 丹麦) 测定; 粗脂肪含量采用索氏抽提法测定; 灰分含量采用 550 °C 马弗炉 (天津玛福尔科技有限公司) 灼烧法测定; 氨基酸含量利用全自动氨基酸分析仪 (L-8900, Hitachi, 日本) 测定。受限于粪便收集样本量及酸碱水解方法的不兼容性, 本研究优先测定了常规的 17 种氨基酸, 未对色氨酸进行独立检测。样品经硝酸与过氧化氢微波消解后, 三氧化二钇 (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 及矿物元素含量使用电感耦合

表 3 实验饲料的常规营养成分及氨基酸组成 (干物质基础)  
**Tab. 3 Proximate composition and amino acid profile of the test diets (dry matter basis)** %

项目 item	FM	EHCM	EHFM	EHFS	EHSP	FCM	FSM	ESM	EFM	HFM	HF
粗蛋白 crude protein	55.43	48.93	51.66	38.53	42.21	42.60	43.99	37.93	48.43	60.07	42.98
粗脂肪 crude lipid	13.63	12.96	13.64	19.32	14.52	12.76	14.33	19.37	12.78	12.66	24.90
灰分 ash	13.61	10.79	11.08	10.92	11.99	12.52	11.86	10.59	12.00	9.96	10.84
天冬氨酸 Asp	5.14	4.34	5.01	1.76	4.43	3.79	3.97	3.42	4.57	5.11	4.12
苏氨酸 Thr	2.24	2.08	1.66	1.28	1.53	1.53	1.59	1.49	1.82	2.07	1.37
丝氨酸 Ser	2.16	1.85	2.16	1.43	1.23	1.64	1.68	1.43	1.92	2.19	1.76
谷氨酸 Glu	8.48	7.00	11.77	7.43	4.95	7.17	6.82	5.65	7.87	9.70	9.78
甘氨酸 Gly	3.12	2.91	2.16	1.17	2.19	2.09	2.02	2.09	2.31	2.82	1.77
丙氨酸 Ala	3.65	3.63	2.27	2.76	3.01	2.36	2.41	2.44	2.78	3.23	1.89
半胱氨酸 Cys	0.44	0.36	0.62	0.48	0.79	0.38	0.36	0.28	0.42	0.43	0.54
缬氨酸 Val	2.70	2.48	2.40	1.66	2.67	1.91	1.94	1.80	2.23	2.59	1.99
蛋氨酸 Met	1.23	1.48	0.29	0.41	1.17	0.63	0.53	0.74	0.57	0.74	0.30
异亮氨酸 Ile	2.56	2.35	1.80	1.23	2.33	1.70	1.95	1.75	2.23	2.35	1.51
亮氨酸 Leu	4.43	4.04	3.34	4.56	3.82	3.03	3.30	2.98	3.78	4.15	2.78
酪氨酸 Tyr	1.71	1.65	1.30	1.08	1.16	1.15	1.24	1.10	1.43	1.47	1.14
苯丙氨酸 Phe	2.58	2.23	3.19	1.77	2.05	2.09	2.03	1.75	2.33	2.87	2.65
赖氨酸 Lys	4.41	4.34	2.87	1.09	3.45	2.96	3.18	3.02	3.65	4.03	2.33
组氨酸 His	1.65	1.64	1.57	1.00	1.13	1.23	1.15	1.10	1.31	1.65	1.28
精氨酸 Arg	3.43	3.03	6.70	1.47	1.71	3.40	2.56	2.25	2.95	4.49	5.60
脯氨酸 Pro	0.39	0.29	0.02	0.54	0.24	0.19	0.20	0.33	0.16	0.13	0.02
总计 total	50.31	45.71	49.13	31.11	37.87	37.23	36.94	33.61	42.34	50.01	40.82

等离子体发射光谱仪 (Optima 8000, PerkinElmer, 美国) 测定。

根据 Cho 等<sup>[16]</sup> 的方法, 计算干物质及各项营养成分的表观消化率 (ADC):

$$\text{ADC}_{\text{diet}} (\%) = 100 \times [1 - (Y_{\text{diet}} \times N_{\text{feces}}) / (Y_{\text{feces}} \times N_{\text{diet}})]$$

$$\text{ADC}_{\text{ingr}} (\%) = \text{ADC}_{\text{test\_diet}} + [(0.7 \times N_{\text{ref}}) / (0.3 \times N_{\text{ingr}})] \times (\text{ADC}_{\text{test\_diet}} - \text{ADC}_{\text{ref\_diet}})$$

式中,  $N$  代表某营养成分含量,  $Y$  代表三氧化二钍含量; 下标 diet、feces、ref、ingr、test\_diet、ref\_diet 分别代表饲料、粪便、基础饲料原料、待测原料、实验饲料及基础饲料。

为评估粗蛋白消化率是否能准确反映氨基酸的利用情况, 本研究定义了消化率偏差指数 (DDI):

$$\text{DDI} = \text{ADC}_{\text{CP}} - \text{ADC}_{\text{Avg\_EAA}}$$

式中,  $\text{ADC}_{\text{CP}}$  为原料的粗蛋白表观消化率 (%);  $\text{ADC}_{\text{Avg\_EAA}}$  为 9 种必需氨基酸 (Thr、Val、Met、Ile、Leu、Phe、Lys、His、Arg) 的平均表观消化率 (%). 差值为正值表示粗蛋白消化率高于氨基

酸利用率, 负值则表示相反。

## 1.5 数据分析

数据以平均值  $\pm$  标准差 (mean  $\pm$  SD) 表示。使用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 分析前进行 Shapiro-Wilk 正态性检验和 Levene 方差齐性检验。组间差异采用 Tukey 氏 HSD 法进行多重比较, 显著性水平设为  $P < 0.05$ 。此外, 采用 R 语言 (4.1.0 版本) 的 FactoMineR 和 factoextra 包对 11 种原料的必需氨基酸消化率数据进行主成分分析 (PCA), 并计算 PC1 主成分得分与 DDI 之间的 Pearson 相关系数。

## 2 结果

### 2.1 实验原料的干物质、粗蛋白及粗脂肪表观消化率

中华绒螯蟹对 11 种实验原料的干物质、粗蛋白及粗脂肪表观消化率 (ADC) 存在显著性差异

( $P < 0.05$ , 表 4)。在干物质方面, 对照组鱼粉的表现消化率为 72.74%。发酵棉籽粕 (90.93%)、水解鱼粉 (89.99%) 和膨化大豆 (88.61%) 的干物质消化率显著高于鱼粉 ( $P < 0.05$ ); 酶解羽毛粉 (84.22%) 和酶解全脂大豆 (81.22%) 亦高于鱼粉, 但无显著性差异 ( $P > 0.05$ ); 膨化羽毛粉 (61.02%) 和水解羽毛粉 (47.33%) 则显著低于鱼粉 ( $P < 0.05$ ), 其中水解羽毛粉的干物质消化率显著低于所有其他原料 ( $P < 0.05$ )。

表 4 中华绒螯蟹对实验原料干物质、粗蛋白和粗脂肪的表观消化率(干物质基础)

Tab. 4 Apparent digestibility coefficients of dry matter, crude protein and crude lipid in test ingredients for *E. sinensis* (dry matter basis) %

原料 ingredients	干物质 dry matter	粗蛋白 crude protein	粗脂肪 crude lipid
鱼粉 FM	72.74 ± 1.83 <sup>cd</sup>	88.46 ± 1.11 <sup>bc</sup>	76.19 ± 2.04 <sup>b</sup>
酶解鸡肉粉 EHCM	72.67 ± 4.19 <sup>cd</sup>	92.80 ± 0.38 <sup>a</sup>	34.97 ± 0.81 <sup>f</sup>
酶解羽毛粉 EHFMM	84.22 ± 1.65 <sup>ab</sup>	84.01 ± 1.63 <sup>d</sup>	53.90 ± 0.69 <sup>c</sup>
酶解全脂大豆 EHFS	81.22 ± 4.39 <sup>abc</sup>	65.11 ± 1.73 <sup>f</sup>	74.19 ± 7.26 <sup>b</sup>
酶解大豆蛋白 EHSP	66.78 ± 5.62 <sup>dc</sup>	86.98 ± 0.33 <sup>cd</sup>	45.86 ± 3.95 <sup>de</sup>
发酵棉籽粕 FCM	90.93 ± 2.39 <sup>a</sup>	83.66 ± 0.83 <sup>d</sup>	41.82 ± 3.08 <sup>ef</sup>
发酵豆粕 FSM	74.14 ± 3.31 <sup>bcd</sup>	85.63 ± 1.99 <sup>cd</sup>	37.26 ± 0.85 <sup>f</sup>
膨化大豆 ESM	88.61 ± 0.06 <sup>a</sup>	62.95 ± 2.39 <sup>f</sup>	78.37 ± 3.88 <sup>ab</sup>
膨化羽毛粉 EFM	61.02 ± 0.27 <sup>e</sup>	90.77 ± 0.64 <sup>ab</sup>	49.29 ± 7.05 <sup>cd</sup>
水解羽毛粉 HFM	47.33 ± 5.99 <sup>f</sup>	65.28 ± 4.43 <sup>f</sup>	50.44 ± 3.62 <sup>cd</sup>
水解鱼粉 HF	89.99 ± 0.06 <sup>a</sup>	69.22 ± 0.28 <sup>e</sup>	85.28 ± 4.87 <sup>a</sup>

注: 同列数据肩标不同小写字母表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

Notes: Values in the same column with different superscripts are significantly different ( $P < 0.05$ ).

在粗蛋白方面, 鱼粉的粗蛋白表观消化率为 88.46%。酶解鸡肉粉 (92.80%) 和膨化羽毛粉 (90.77%) 的粗蛋白消化率与鱼粉无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 表现出与鱼粉相当的消化特性。酶解大豆蛋白 (86.98%)、发酵豆粕 (85.63%)、酶解羽毛粉 (84.01%) 及发酵棉籽粕 (83.66%) 的消化率虽略低于鱼粉, 但差异亦无显著性 ( $P > 0.05$ )。膨化大豆 (62.95%)、水解羽毛粉 (65.28%)、酶解全脂大豆 (65.11%) 和水解鱼粉 (69.22%) 的消化率则显著低于鱼粉 ( $P < 0.05$ )。在粗脂肪方面, 鱼粉的表现消化率为 76.19%。水解鱼粉 (85.28%) 和膨化大豆 (78.37%) 表现出较高的消化率, 与鱼粉组 (76.19%) 无显著性差异; 酶解鸡肉粉的粗脂肪消

化率最低 (34.97%), 显著低于鱼粉 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 实验原料的氨基酸表观消化率

以鱼粉为对照, 各原料的必需氨基酸表观消化率存在显著性差异 ( $P < 0.05$ , 表 5)。对于通常作为第一限制性氨基酸的 Met, 鱼粉的消化率为 97.91%。酶解鸡肉粉 (97.16%) 和酶解全脂大豆 (96.84%) 与鱼粉无显著性差异 ( $P > 0.05$ ); 而水解羽毛粉的蛋氨酸消化率最低 (65.21%), 显著低于鱼粉 ( $P < 0.05$ )。对于 Lys, 鱼粉的消化率为 93.45%, 酶解大豆蛋白 (97.47%) 与鱼粉无显著性差异, 而发酵棉籽粕 (46.45%) 和酶解鸡肉粉 (62.59%) 则显著低于鱼粉 ( $P < 0.05$ )。值得注意的是, 部分原料的氨基酸消化率与其粗蛋白消化率呈现显著的不一致性。以膨化大豆为例, 尽管其粗蛋白消化率显著低于鱼粉 (62.95% vs. 88.46%,  $P < 0.05$ ), 但其 Met (94.35%)、His (95.08%)、Lys (96.78%) 及 Ala (93.69%) 的表观消化率均维持在 90% 以上的高水平。此外, 其 Val (77.67%) 和 Leu (83.09%) 虽低于鱼粉 (Val 83.84%、Leu 86.05%), 但仍显著高于酶解鸡肉粉 (Val 61.68%、Leu 62.30%) 和发酵棉籽粕 (Val 52.91%、Leu 43.23%) ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 必需氨基酸消化模式的主成分分析

对 11 种原料的必需氨基酸消化率进行主成分分析, 结果如表 6 及图 1 所示。前两个主成分累计解释了总方差的 86.4%。PC1 解释了 64.3% 的变异, 主要由 Thr (载荷系数 -0.399)、Leu (-0.390) 和 Val (-0.383) 等氨基酸的负向载荷贡献。第二主成分 (PC2) 解释了 22.1% 的变异, 其中 Arg (0.599) 表现出较高的正向载荷, 而 Met (-0.598) 则表现出较强的负向载荷。在 PCA 得分图上, 原料呈现出明显的聚类特征: 发酵棉籽粕和酶解鸡肉粉位于 PC1 的正半轴 (对应较低的支链氨基酸消化率); 而鱼粉、膨化大豆和酶解大豆蛋白位于 PC1 的负半轴 (对应较高的支链氨基酸消化率)。

## 2.4 粗蛋白与氨基酸消化率的差异评价

根据公式计算的消化率偏差指数结果如表 7 及图 2 所示。不同原料呈现出正向或负向的差异分布。酶解鸡肉粉和发酵棉籽粕表现出最大的正向差异, 差异值分别为 30.36 和 26.97 (即粗蛋白消化率数值远高于氨基酸平均消化率)。膨化大豆表

表 5 中华绒螯蟹对实验原料氨基酸的表现消化率(干物质基础)  
Tab. 5 Apparent digestibility coefficients of amino acids in test ingredients for *E. sinensis* (dry matter basis)

氨基酸 amino acid	FM	EHCM	EHFH	EHFS	EHSP	FCM	FSM	ESM	EFM	HFM	HF
<b>必需氨基酸 EAA</b>											
苏氨酸 Thr	87.44±1.84 <sup>a</sup>	65.31±0.24 <sup>a</sup>	82.91±2.04 <sup>b</sup>	80.92±0.95 <sup>bc</sup>	74.18±1.07 <sup>d</sup>	49.75±0.85 <sup>f</sup>	73.10±0.36 <sup>d</sup>	84.00±1.63 <sup>b</sup>	77.72±5.04 <sup>c</sup>	80.89±1.75 <sup>bc</sup>	74.01±0.36 <sup>d</sup>
缬氨酸 Val	83.84±2.55 <sup>b</sup>	61.68±0.26 <sup>a</sup>	87.91±1.52 <sup>a</sup>	73.46±1.26 <sup>d</sup>	77.30±1.07 <sup>cd</sup>	52.91±0.81 <sup>f</sup>	73.89±0.36 <sup>cd</sup>	77.67±2.03 <sup>c</sup>	75.52±5.77 <sup>cd</sup>	77.97±1.99 <sup>c</sup>	82.56±0.23 <sup>b</sup>
蛋氨酸 Met	97.91±0.66 <sup>a</sup>	97.16±0.09 <sup>a</sup>	78.87±2.81 <sup>d</sup>	96.84±0.45 <sup>a</sup>	95.06±1.65 <sup>a</sup>	85.23±0.45 <sup>e</sup>	93.61±0.35 <sup>ab</sup>	94.35±3.31 <sup>ab</sup>	90.08±5.80 <sup>3</sup>	65.21±3.00 <sup>e</sup>	78.34±0.28 <sup>d</sup>
异亮氨酸 Ile	85.59±2.29 <sup>a</sup>	62.01±0.28 <sup>a</sup>	80.18±2.29 <sup>bc</sup>	68.19±1.35 <sup>f</sup>	80.06±0.95 <sup>bc</sup>	39.73±1.02 <sup>h</sup>	74.88±0.33 <sup>de</sup>	82.72±1.61 <sup>ab</sup>	78.32±5.18 <sup>cd</sup>	77.13±2.11 <sup>cd</sup>	72.71±0.29 <sup>e</sup>
亮氨酸 Leu	86.05±2.18 <sup>b</sup>	62.30±0.26 <sup>a</sup>	80.06±2.30 <sup>cd</sup>	92.92±0.59 <sup>a</sup>	79.85±0.94 <sup>cd</sup>	43.23±0.95 <sup>h</sup>	71.97±0.36 <sup>f</sup>	83.09±1.63 <sup>bc</sup>	78.51±5.02 <sup>de</sup>	84.09±1.35 <sup>b</sup>	75.31±0.31 <sup>e</sup>
苯丙氨酸 Phe	81.03±2.74 <sup>bcd</sup>	50.93±0.33 <sup>b</sup>	88.47±1.52 <sup>a</sup>	80.84±0.90 <sup>bcd</sup>	75.50±1.02 <sup>e</sup>	59.27±0.66 <sup>g</sup>	71.63±0.36 <sup>f</sup>	77.81±1.82 <sup>de</sup>	77.35±5.37 <sup>de</sup>	81.59±1.63 <sup>bc</sup>	81.95±0.24 <sup>b</sup>
赖氨酸 Lys	93.45±1.16 <sup>b</sup>	62.59±0.33 <sup>b</sup>	62.21±4.75 <sup>f</sup>	80.01±0.81 <sup>d</sup>	97.47±0.33 <sup>a</sup>	46.45±0.90 <sup>g</sup>	73.65±0.35 <sup>e</sup>	96.78±0.74 <sup>ab</sup>	83.65±3.90 <sup>3</sup>	86.19±1.68 <sup>c</sup>	71.12±0.29 <sup>e</sup>
组氨酸 His	92.45±1.26 <sup>bc</sup>	55.86±0.36 <sup>b</sup>	75.75±3.59 <sup>e</sup>	97.34±0.40 <sup>a</sup>	97.16±0.31 <sup>a</sup>	62.64±0.61 <sup>g</sup>	70.24±0.38 <sup>f</sup>	95.08±0.85 <sup>ab</sup>	82.30±4.16 <sup>d</sup>	90.79±0.92 <sup>c</sup>	80.23±0.29 <sup>d</sup>
精氨酸 Arg	76.83±3.07 <sup>cd</sup>	44.11±0.38 <sup>b</sup>	94.15±0.97 <sup>a</sup>	63.98±1.40 <sup>f</sup>	50.40±1.84 <sup>g</sup>	70.97±0.45 <sup>e</sup>	65.63±0.42 <sup>f</sup>	71.20±2.18 <sup>e</sup>	73.41±5.65 <sup>de</sup>	77.89±2.04 <sup>c</sup>	85.79±0.26 <sup>b</sup>
<b>非必需氨基酸 NEAA</b>											
天冬氨酸 Asp	86.69±2.04 <sup>a</sup>	50.32±0.36 <sup>f</sup>	80.27±2.55 <sup>bc</sup>	67.18±1.28 <sup>e</sup>	88.37±0.50 <sup>a</sup>	52.10±0.78 <sup>f</sup>	72.35±0.35 <sup>d</sup>	86.47±1.28 <sup>a</sup>	80.53±4.30 <sup>bc</sup>	81.38±1.80 <sup>b</sup>	77.67±0.17 <sup>e</sup>
丝氨酸 Ser	68.54±4.17 <sup>cd</sup>	43.13±0.36 <sup>f</sup>	88.07±1.40 <sup>a</sup>	56.31±1.80 <sup>g</sup>	46.76±1.13 <sup>f</sup>	43.59±0.95 <sup>f</sup>	71.23±0.40 <sup>cd</sup>	56.04±3.29 <sup>e</sup>	67.82±7.27 <sup>d</sup>	79.34±1.89 <sup>b</sup>	73.54±0.47 <sup>e</sup>
谷氨酸 Glu	81.39±2.70 <sup>c</sup>	45.49±0.36 <sup>f</sup>	87.17±1.66 <sup>b</sup>	91.09±0.59 <sup>a</sup>	71.42±1.80 <sup>d</sup>	60.70±0.62 <sup>e</sup>	70.00±0.36 <sup>d</sup>	79.97±1.54 <sup>e</sup>	79.35±4.30 <sup>3</sup>	84.79±1.30 <sup>b</sup>	78.60±0.26 <sup>c</sup>
甘氨酸 Gly	88.36±1.87 <sup>b</sup>	68.58±0.23 <sup>c</sup>	87.07±1.65 <sup>a</sup>	60.13±1.73 <sup>f</sup>	72.05±0.90 <sup>de</sup>	57.62±0.78 <sup>f</sup>	75.38±0.38 <sup>cd</sup>	85.16±1.82 <sup>a</sup>	76.07±5.92 <sup>bc</sup>	79.64±2.04 <sup>b</sup>	79.91±0.19 <sup>b</sup>
丙氨酸 Ala	92.83±1.32 <sup>a</sup>	76.39±0.19 <sup>d</sup>	82.01±2.32 <sup>e</sup>	95.44±0.68 <sup>a</sup>	89.05±1.04 <sup>b</sup>	57.21±0.78 <sup>g</sup>	76.59±0.35 <sup>d</sup>	93.69±1.14 <sup>a</sup>	81.69±4.50 <sup>3</sup>	87.98±1.13 <sup>b</sup>	79.50±0.33 <sup>c</sup>
半胱氨酸 Cys	60.95±5.91 <sup>d</sup>	34.57±0.42 <sup>f</sup>	92.95±0.95 <sup>a</sup>	67.53±1.65 <sup>e</sup>	72.34±1.66 <sup>bc</sup>	59.46±0.73 <sup>d</sup>	75.91±0.36 <sup>d</sup>	41.62±4.43 <sup>e</sup>	67.67±7.79 <sup>e</sup>	75.64±2.18 <sup>b</sup>	90.78±0.17 <sup>a</sup>
酪氨酸 Tyr	86.12±2.06 <sup>a</sup>	63.89±0.26 <sup>c</sup>	79.85±2.30 <sup>bc</sup>	81.38±0.92 <sup>b</sup>	72.84±1.13 <sup>d</sup>	46.30±0.88 <sup>f</sup>	70.95±0.36 <sup>d</sup>	82.00±1.54 <sup>b</sup>	77.58±5.35 <sup>e</sup>	79.01±1.80 <sup>bc</sup>	71.44±0.29 <sup>d</sup>
脯氨酸 Pro	40.48±1.58 <sup>d</sup>	40.01±0.38 <sup>f</sup>	44.28±3.83 <sup>cd</sup>	46.83±9.23 <sup>cd</sup>	53.57±3.83 <sup>bc</sup>	57.98±7.00 <sup>ab</sup>	57.47±1.25 <sup>ab</sup>	44.50±7.72 <sup>cd</sup>	61.24±9.54 <sup>ab</sup>	64.61±2.63 <sup>a</sup>	45.00±0.95 <sup>cd</sup>

注: 同行数据肩标不同小写字母表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。  
Notes: Values in the same row with different superscripts are significantly different ( $P < 0.05$ ).

表 6 基于氨基酸消化率模式主成分分析的前两个主成分载荷

Tab. 6 Loadings of amino acids on the first two principal components from the PCA of amino acid digestibility patterns

氨基酸 amino acid	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2
苏氨酸 Thr	-0.399	-0.05
亮氨酸 Leu	-0.390	-0.127
缬氨酸 Val	-0.383	0.155
异亮氨酸 Ile	-0.382	-0.105
苯丙氨酸 Phe	-0.372	0.263
组氨酸 His	-0.347	-0.171
赖氨酸 Lys	-0.326	-0.362
精氨酸 Arg	-0.174	0.599
蛋氨酸 Met	0.042	-0.598

现出最大的负向差异, 差异值为-21.79(即粗蛋白消化率数值远低于氨基酸平均消化率); 酶解全脂大豆 (-16.50) 和水解羽毛粉 (-14.91) 亦表现为负值。Pearson 相关性分析显示, PC1 得分与 DDI 之间存在极显著的正相关关系 ( $r = 0.796, P = 0.003$ ), 表明 PC1 得分越高的原料, 其粗蛋白消化率相对

于氨基酸消化率的高估程度越大。

### 3 讨论

#### 3.1 不同新型蛋白源的营养物质利用特征

饲料原料的表观消化率是衡量其营养价值及配方适用性的关键指标<sup>[18]</sup>。本研究中, 对照组鱼粉的粗蛋白表观消化率 (88.46%) 与已有报道中不同规格中华绒螯蟹的测定值接近 (均重约 97 g 时为 86.07%<sup>[19]</sup>, 约 64 g 时为 86.49%<sup>[12]</sup>), 表明中华绒螯蟹在不同生长阶段对鱼粉蛋白的消化能力较为稳定, 但新型深加工原料是否存在规格效应有待后续验证。这一对照数据与已有报道的一致性, 表明本实验养殖系统及粪便收集方法具有良好的可靠性, 从而为评估其他 10 种新型蛋白源的表观消化率提供了可信的基准。

原料的预处理工艺是影响其在中华绒螯蟹饲料中利用效率的关键因素。本研究中粗蛋白消化率最高的酶解鸡肉粉和膨化羽毛粉, 其优异表现表明适度的体外酶解或高温膨化处理能有效降解蛋白的大分子结构<sup>[20]</sup>, 显著弥补了中华绒螯蟹因缺乏酸性胃而导致的蛋白质初步消化能力较弱的

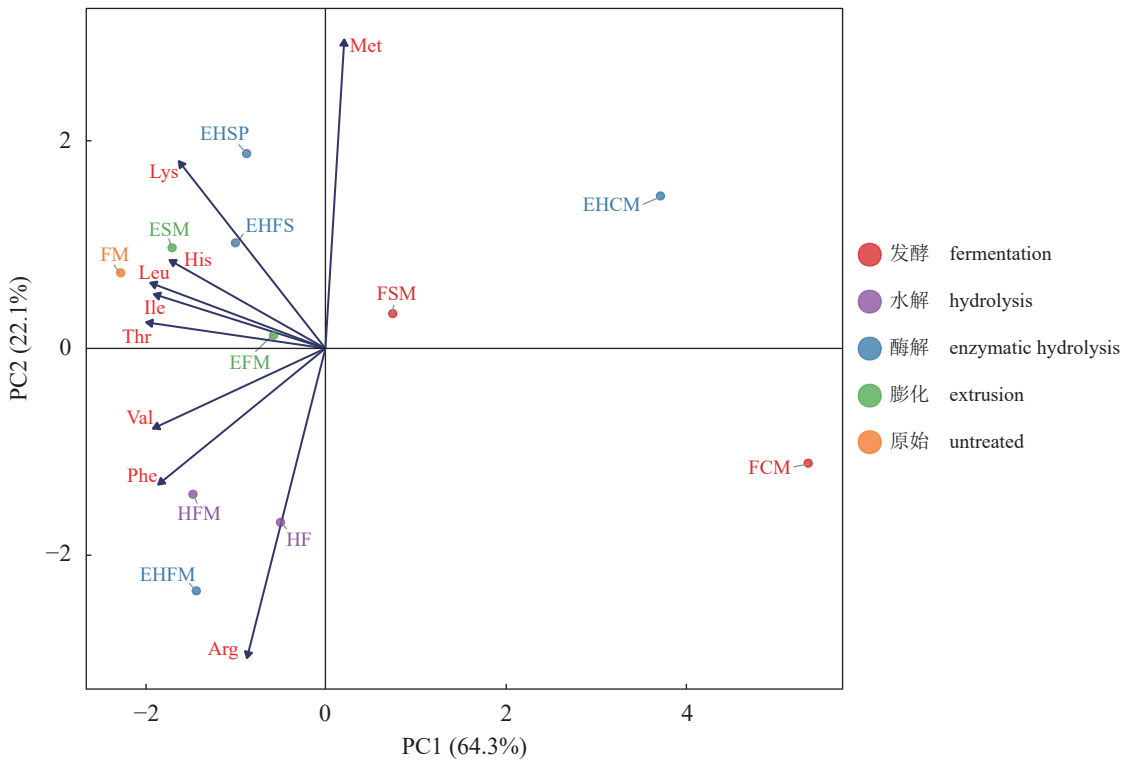


图 1 基于加工工艺的必需氨基酸消化率模式的主成分分析图

Fig. 1 Principal component analysis of essential amino acid digestibility patterns colored by processing technology

表 7 中华绒螯蟹对 11 种蛋白源的主成分得分、加工工艺及消化率指标

Tab. 7 Principal component scores, processing types, and digestibility metrics for eleven protein sources tested in *E. sinensis*

原料 ingredients	PC1	PC2	加工工艺 processing type	粗蛋白消化率/% CPD	必需氨基酸平均消化率/% AEAAD	消化率偏差指数 DDI
EHCM	3.72	-1.47	酶解	92.80	62.44	30.36
FCM	5.37	1.11	发酵	83.66	56.69	26.97
FSM	0.75	-0.34	发酵	85.63	74.29	11.34
EFM	-0.58	-0.13	膨化	90.77	79.65	11.12
EHSP	-0.88	-1.88	酶解	86.98	80.78	6.20
EHFM	-1.43	2.35	酶解	84.01	81.17	2.84
FM	-2.28	-0.73	未加工	88.46	87.18	1.28
HF	-0.50	1.68	水解	69.22	78.00	-8.78
HFM	-1.47	1.41	水解	65.28	80.19	-14.91
EHFS	-1.00	-1.02	酶解	65.11	81.61	-16.50
ESM	-1.70	-0.97	膨化	62.95	84.74	-21.79

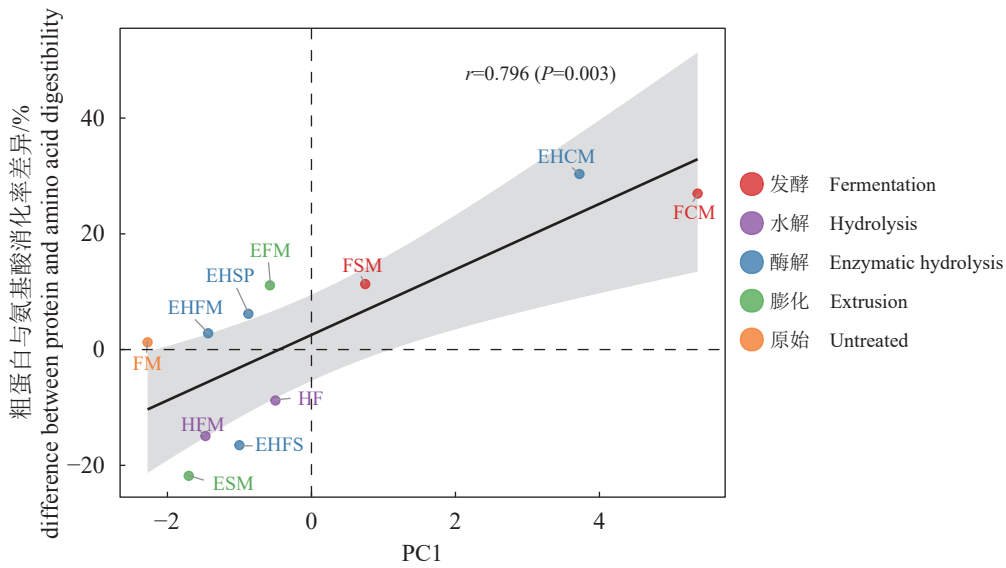


图 2 第一主成分 (PC1) 得分与消化率偏差指数之间的相关性

Fig. 2 Correlation between PC1 scores and digestibility discrepancy index (DDI)

生理局限<sup>[5,21]</sup>。然而，值得特别关注的是，酶解鸡肉粉在展现极佳粗蛋白消化率的同时，其粗脂肪消化率却为所有原料中最低，推测可能与深度酶解工艺改变了原料中脂质的存在状态有关。已有研究表明，动物蛋白的深度酶解可导致游离脂肪酸比例升高<sup>[22-23]</sup>，高比例游离脂肪酸可通过抑制混合胶束形成降低脂质吸收效率<sup>[24]</sup>，同时可能干扰甲壳动物胆汁酸介导的脂质乳化过程<sup>[25-26]</sup>。

此外，发酵类原料呈现出的“粗蛋白消化率高但干物质消化率相对较低”的特征，则揭示了常规

检测指标在评价此类原料时的局限性<sup>[27]</sup>。微生物发酵虽然将部分难消化的大分子碳水化合物转化为有机酸等成分<sup>[28-29]</sup>，但也伴随着非蛋白氮 (NPN) 的大量生成<sup>[30]</sup>。由于常规凯氏定氮法无法区分真蛋白与 NPN，加之发酵原料中灰分的富集效应，往往导致测得的粗蛋白消化率数值高于其实际的有效利用水平<sup>[31]</sup>。综上所述，针对深加工新型原料，仅依赖单一的常规指标往往难以全面满足精准营养的需求，亟需构建结合氨基酸表观消化率数据的多维度评价体系<sup>[32-33]</sup>。

### 3.2 粗蛋白与氨基酸消化率的差异性分析

在传统的水产动物营养评价中, 通常认为原料的粗蛋白表观消化率与其氨基酸消化率呈高度正相关<sup>[34]</sup>。然而, 本研究基于主成分分析及差异度模型的量化评估揭示, 对于新型深加工原料, 这种线性相关关系出现了显著的偏离, 不同工艺原料呈现出两类截然不同的分布模式, 深刻反映了单一粗蛋白指标在预测深加工原料营养价值时的评估偏差风险。

第一类偏离表现为正 DDI 模式 (positive DDI), 即粗蛋白消化率显著高于氨基酸平均消化率, 以发酵原料为典型代表。这种数值上的高估现象, 推测主要源于加工工艺改变了氮元素的存在形式。酶解或发酵处理将大分子蛋白质降解为小肽、游离氨基酸的同时, 也产生了部分 NPN<sup>[35]</sup>。由于常规凯氏定氮法将 NPN 计入粗蛋白总量, 而中华绒螯蟹对部分 NPN 组分的生物转化效率较低, 导致了 CPD 数值的高估<sup>[7,36]</sup>。该结果提示, 若仅依据粗蛋白消化率数据进行配方设计, 极易高估发酵原料的有效蛋白质利用率, 从而导致限制性氨基酸的实际供给不足<sup>[37]</sup>。第二类偏离则表现为负 DDI 模式 (negative DDI), 即粗蛋白消化率较低, 但特定氨基酸利用率依然维持高位, 以膨化大豆最为显著, 这与前人的研究类似<sup>[38]</sup>。尽管总氮消化率较低, 但支链氨基酸的利用率仍维持高位, 这表明不同种类的氨基酸对热加工工艺的敏感性存在显著差异<sup>[39-40]</sup>。上述两种显著的分布模式差异揭示了传统粗蛋白表观消化率在评价深加工原料营养价值时的局限性。具体而言, 单一 CPD 指标易受 NPN 干扰而产生正向偏差, 或因无法体现特定氨基酸 (如支链氨基酸) 的工艺耐受性而产生负向偏差。主成分分析进一步证实了上述指标偏离特征与加工工艺之间的内在关联, 为基于氨基酸消化率修正配方评价体系提供了量化依据。

### 3.3 新型蛋白源在中华绒螯蟹饲料中的应用潜力

综合上述消化率数据, 酶解鸡肉粉在蛋白营养层面具备替代鱼粉的潜力<sup>[41]</sup>, 这与在珍珠龙胆石斑鱼 (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀×*E. lanceolatus* ♂) 上的研究结论类似<sup>[42]</sup>。然而, 该原料表现出的低脂质消化率, 提示深度酶解工艺可能影响了脂质的消化利用。因此, 在以酶解鸡肉粉为主要蛋白源替代鱼粉时, 建议通过补充外源优质脂质或乳化剂以维持饲料的能蛋比平衡, 避免因脂质利

用率受限而影响生长性能。此外, 膨化大豆虽整体消化率偏低, 但其负 DDI 模式揭示了支链氨基酸的利用优势, 因此可作为功能性植物蛋白源, 通过与缺乏该类氨基酸的原料进行科学配伍, 优化饲料的氨基酸模式<sup>[34,43]</sup>。对于发酵类原料, 尽管本研究发现其存在由 NPN 干扰引起的粗蛋白消化率高估现象, 但已有养殖验证实验表明发酵棉籽粕可替代中华绒螯蟹幼蟹饲料中 40% 的豆粕<sup>[44]</sup>, 发酵豆粕亦可替代 10%~15% 的鱼粉<sup>[45]</sup> 而不影响生长性能, 这进一步说明在实际应用中结合养殖效果验证的重要性。

受限干酸水解及常规粪便采集方法, 本研究未能测定新型蛋白源中色氨酸及总能的表观消化率, 在一定程度上限制了原料营养评价数据的完整性。同时, 在分析酶解鸡肉粉低脂质消化率的潜在成因时, 尽管推测该现象可能与深度酶解工艺诱导的游离脂肪酸比例升高有关, 但鉴于评估初期未对各原料的游离脂肪酸组成及酸溶蛋白含量进行针对性定量分析, 上述推论尚需进一步验证。有鉴于此, 后续研究将进一步优化粪便收集与前处理方案, 以满足色氨酸及总能的检测需求, 并在此基础上引入原料精细理化指标 (如脂肪酸图谱与小肽组分) 表征, 旨在深入解析原料加工深度与营养利用偏差的内在关联, 为进一步完善中华绒螯蟹新型蛋白源的营养评价体系提供支撑。

## 4 结论

综上所述, 本研究系统评估了中华绒螯蟹对 10 种新型深加工蛋白源的表观消化特性, 证实适度加工的酶解鸡肉粉与膨化羽毛粉展现出与鱼粉相当的粗蛋白和氨基酸消化利用水平, 具备作为优质水产蛋白源的开发潜力。更为重要的是, 研究明确揭示了在面对不同预处理工艺时, 原料的粗蛋白表观消化率与其氨基酸实际利用率之间存在显著的非线性偏离效应, 深刻反映了单一粗蛋白指标在预测现代深加工原料营养价值时的局限性。因此, 在中华绒螯蟹及类似水产动物的精准饲料开发与配方设计中, 亟需将特定工艺下的氨基酸表观消化率数据纳入核心评价体系, 以有效修正由非蛋白氮富集或特定氨基酸热损耗所引起的营养价值传递偏差。

(作者声明本文无利益冲突)

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Glencross B D, Bachis E, Robb D, *et al.* The evolution of sustainability metrics for the marine ingredient sector: moving towards holistic assessments of aquaculture feed[J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2024, 32(4): 545-561.
- [ 2 ] Katheline H, Jennifer M C, Andrew C, *et al.* The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture diets[J]. *One Earth*, 2019, 1(3): 316-329.
- [ 3 ] Dawood M A O, Koshio S. Application of fermentation strategy in aquafeed for sustainable aquaculture[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(2): 987-1002.
- [ 4 ] 费树站, 刘昊昆, 韩冬, 等. 不同饲料原料对黄颡鱼表观消化率及消化酶活性的影响 [J]. *水生生物学报*, 2020, 44(2): 357-363.
- Fei S Z, Liu H K, Han D, *et al.* Apparent digestibility coefficients of several feed ingredients and their effect on digestive enzyme activities of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(2): 357-363 (in Chinese).
- [ 5 ] 邹峰余, 贾冰玉, 罗智, 等. 发酵棉籽粕对黄颡鱼生长性能、表观消化率和肠道健康的影响 [J]. *水产学报*, 2025, 49(3): 191-204.
- Zou F Y, Jia B Y, Luo Z, *et al.* Effects of fermented cottonseed meal on growth performance, apparent digestibility and intestinal health of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2025, 49(3): 191-204 (in Chinese).
- [ 6 ] Li X Y, Han T, Zheng S X, *et al.* Nutrition and functions of amino acids in aquatic crustaceans[M]//Wu G Y. Amino acids in nutrition and health: amino acids in the nutrition of companion, zoo and farm animals. Cham: Springer, 2021: 169-198.
- [ 7 ] Van Rooijen C, Bosch G, van der Poel A F B, *et al.* The maillard reaction and pet food processing: effects on nutritive value and pet health[J]. *Nutrition Research Reviews*, 2013, 26(2): 130-148.
- [ 8 ] Poojary M M, Lund M N. Chemical stability of proteins in foods: oxidation and the maillard reaction[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2022, 13: 35-58.
- [ 9 ] 李英, 邓君明, 陶琳丽, 等. 吉富罗非鱼对 5 种蛋白源营养物质表观消化率的比较研究 [J]. *饲料工业*, 2017, 38(22): 22-27.
- Li Y, Deng J M, Tao L L, *et al.* Comparative study on apparent digestibility of five feed ingredients for juvenile GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Feed Industry*, 2017, 38(22): 22-27 (in Chinese).
- [10] 时于惠, 祝书杰, 谭北平, 等. 大口黑鲈对六种非粮蛋白源的表现消化率 [J]. *水生生物学报*, 2022, 46(8): 1187-1196.
- Shi Y H, Zhu S J, Tan B P, *et al.* Apparent digestibility of six new non-grain protein ingredients for largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(8): 1187-1196 (in Chinese).
- [11] Hernández C, Hardy R W, Márquez-Martínez D G, *et al.* Evaluation of apparent digestibility coefficients of individual feed ingredients in spotted rose snapper *Lutjanus guttatus* (Steindachner, 1869)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2015, 21(6): 835-842.
- [12] 江星, 陈立桥, 孙盛明, 等. 中华绒螯蟹对 10 种常见饲料蛋白源的表现消化率 [J]. *海洋渔业*, 2013, 35(2): 209-216.
- Jiang X, Chen L Q, Sun S M, *et al.* Apparent digestibility of 10 feed ingredients for Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*[J]. *Marine Fisheries*, 2013, 35(2): 209-216 (in Chinese).
- [13] Zhang Z Y, Jiang H W, Liu Y F, *et al.* Histological observations and gene expression of the digestive system of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2025, 10(3): 411-420.
- [14] Navarrete Del Toro M A, García-Carreño F. The toolbox for protein digestion in decapod crustaceans: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2019, 11(4): 1005-1021.
- [15] 刘翠, 周建成, 刘昊昆, 等. 黄颡鱼对四种动物性蛋白原料在不同制粒工艺下的表现消化率研究 [J]. *水生生物学报*, 2020, 44(6): 1215-1221.
- Liu C, Zhou J C, Liu H K, *et al.* Apparent digestibility of nutrients in four animal protein ingredients with different processing technology for yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(6): 1215-1221 (in Chinese).
- [16] Cho C Y, Slinger S J, Bayley H S. Bioenergetics of salmonid fishes: energy intake, expenditure and productivity[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry*, 1982, 73(1): 25-41.
- [17] AOAC International. Official methods of analysis of AOAC international[M]. Arlington, Va: AOAC International, 1995.
- [18] 李会涛, 麦康森, 艾庆辉, 等. 大黄鱼对几种饲料蛋白原料消化率的研究 [J]. *水生生物学报*, 2007, 31(3): 370-376.
- Li H T, Mai K S, Ai Q H, *et al.* Apparent digestibility of selected protein ingredients for larger yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(3): 370-376 (in Chinese).
- [19] 张璐, 陈立桥, 洪美玲, 等. 中华绒螯蟹对 11 种饲料原料蛋白质和氨基酸的表现消化率 [J]. *水产学报*, 2007, 31(S1): 116-121.
- Zhang L, Chen L Q, Hong M L, *et al.* Apparent digestibility of

- crude protein and amino acids of 11 feed ingredients for *Eriocheir sinensis*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(S1): 116-121 (in Chinese).
- [20] Siddik M A B, Howieson J, Fotedar R, *et al.* Enzymatic fish protein hydrolysates in finfish aquaculture: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(1): 406-430.
- [21] Pennells J, Salini M, Rombenso A, *et al.* The state-of-the-art of aquafeed extrusion: mechanisms, challenges and opportunities [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2025, 17(2): e70002.
- [22] Hussain S M, Bano A A, Ali S, *et al.* Substitution of fishmeal: highlights of potential plant protein sources for aquaculture sustainability[J]. *Heliyon*, 2024, 10(4): e26573.
- [23] Nikoo M, Regenstein J M, Yasemi M. Protein hydrolysates from fishery processing by-products: production, characteristics, food applications, and challenges[J]. *Foods*, 2023, 12(24): 4470.
- [24] Rodriguez-Sanchez R, Tres A, Sala R, *et al.* Effects of dietary free fatty-acid content and saturation degree on lipid-class composition and fatty-acid digestibility along the gastrointestinal tract in broiler starter chickens[J]. *Poultry Science*, 2019, 98(10): 4929-4941.
- [25] Su C, Li J B, Lu Y S, *et al.* Interactive effects of dietary cholesterol and bile acids on the growth, lipid metabolism, immune response and intestinal microbiota of *Litopenaeus vannamei*: sparing effect of bile acids on cholesterol in shrimp diets[J]. *Aquaculture*, 2022, 547: 737412.
- [26] Li L, Liu T Y, Li J R, *et al.* Effectiveness of bile acids as a feed supplement to improve growth performance, feed utilization, lipid metabolism, digestive enzymes, and hepatic antioxidant status in aquaculture animals: a meta-analysis[J]. *Aquaculture Reports*, 2024, 36: 102121.
- [27] Çabuk B, Nosworthy M G, Stone A K, *et al.* Effect of fermentation on the protein digestibility and levels of non-nutritive compounds of pea protein concentrate[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2018, 56(2): 257-264.
- [28] Wang F, Cai Y F, He Y, *et al.* Improvement of feed nutritional value of sprayed corn bran through two-stage solid-state fermentation by non-protein nitrogen utilization microorganisms [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 105(15): 8625-8637.
- [29] Liang Z Q, Wang Z, Shen X J, *et al.* Utilization of synthetic microbial community in solid-state fermentation (SMC-SSF) for converting Chinese distiller grains into protein feed[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2025, 12(1): 104.
- [30] Tran H T Q, Ho T H, Nan F H, *et al.* Assessment of fish protein hydrolysate as a substitute for fish meal in white shrimp diets: impact on growth, immune response, and resistance against *Vibrio parahaemolyticus* infection[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2024, 150: 109597.
- [31] DeVries J W, Greene G W, Payne A, *et al.* Non-protein nitrogen determination: a screening tool for nitrogenous compound adulteration of milk powder[J]. *International Dairy Journal*, 2017, 68: 46-51.
- [32] 明建华, 叶金云, 张易祥, 等. 2 龄青鱼对 7 种饲料原料中营养物质的表观消化率 [J]. *动物营养学报*, 2014, 26(1): 161-169.
- Ming J H, Ye J Y, Zhang Y X, *et al.* Nutrient apparent digestibility in seven feed ingredients for two-year-old black carp (*Mylopharyngodon piceus* Richardson)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(1): 161-169 (in Chinese).
- [33] 姜雪姣, 梁丹妮, 刘文斌, 等. 团头鲂对 8 种非常规饲料原料中营养物质的表观消化率 [J]. *水产学报*, 2011, 35(6): 932-939.
- Jiang X J, Liang D N, Liu W B, *et al.* Apparent digestibility of eight unconventional feed ingredients for *Megalobrama amblycephala*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(6): 932-939 (in Chinese).
- [34] Yang Q H, Tan B P, Dong X H, *et al.* Effect of replacing fish meal with extruded soybean meal on growth, feed utilization and apparent nutrient digestibility of juvenile white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(5): 865-872.
- [35] Xu F, Xing X M, Zhang K, *et al.* Status and prospects of product processing and sustainable utilization of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Heliyon*, 2024, 10(12): e32922.
- [36] 张健, 李磊, 董衍邹, 等. 大黄鱼对 5 种新型非粮蛋白源表观消化率的研究 [J]. *水生生物学报*, 2023, 47(9): 1416-1424.
- Zhang J, Li L, Dong Y Z, *et al.* Apparent digestibility of five new non-grain protein ingredients for large yellow croakers (*Larimichthys crocea*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(9): 1416-1424 (in Chinese).
- [37] Adler S A, Slizyte R, Honkapää K, *et al.* *In vitro* pepsin digestibility and amino acid composition in soluble and residual fractions of hydrolyzed chicken feathers[J]. *Poultry Science*, 2018, 97(9): 3343-3357.
- [38] 刘伟, 文华, 蒋明, 等. 吉富罗非鱼成鱼对 8 种常见植物源饲料原料的表观消化率 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2015, 43(4): 17-25.
- Liu W, Wen H, Jiang M, *et al.* Apparent digestibility coefficients of adult GIFT *Oreochromis niloticus* to ingredients of

- eight common botanical feeds[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(4): 17-25 (in Chinese).
- [39] Risyahadi S T, Sukria H A, Retnani Y, *et al.* Effects of dietary extrusion on the performance and apparent ileal digestion of broilers: a meta-analysis[J]. *Italian Journal of Animal Science*, 2023, 22(1): 291-300.
- [40] Salazar-Villanea S, Astúa-Ureña M, Masís-Montoya A, *et al.* Effect of protease supplementation on apparent ileal crude protein and amino acid digestibility of over-processed soybean meals in broilers[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2022, 13(1): 74.
- [41] 王文娟, 迟淑艳, 谭北平, 等. 凡纳滨对虾对 13 种动物性饲料原料营养物质表观消化率的研究 [J]. *动物营养学报*, 2012, 24(12): 2402-2414.
- Wang W J, Chi S Y, Tan B P, *et al.* Apparent digestibility of nutrients in thirteen animal feed ingredients for white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2012, 24(12): 2402-2414 (in Chinese).
- [42] 宋紫菱, 杨烜懿, 赵旭民, 等. 酶解鸡肉粉替代部分鱼粉对珍珠龙胆石斑鱼生长性能、营养物质表观消化率以及养殖水体水质的影响 [J]. *动物营养学报*, 2021, 33(11): 6349-6365.
- Song Z L, Yang X Y, Zhao X M, *et al.* Effects of partial replacement of fish meal with enzyme-digested poultry by-product meal on growth performance and nutrient apparent digestibility coefficients of hybrid groupers (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀×*E. lanceolatus* ♂) and cultured water quality[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(11): 6349-6365 (in Chinese).
- [43] Castillo S, Gatlin D M. Dietary requirements for leucine, isoleucine and valine (branched-chain amino acids) by juvenile red drum *Sciaenops ocellatus*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, 24(3): 1056-1065.
- [44] 庞栋, 戚常乐, 叶金云. 发酵棉籽粕替代豆粕对中华绒螯蟹幼蟹生长性能、免疫功能、抗氧化能力和肠道健康的影响 [J]. *动物营养学报*, 2023, 35(10): 6638-6649.
- Pang T, Qi C L, Ye J Y. Effects of fermented cottonseed meal replacing soybean meal on growth performance, immune function, antioxidant capacity and intestinal health of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) juveniles[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(10): 6638-6649 (in Chinese).
- [45] Xu C Y, Liu W B, Zhang D D, *et al.* Effects of partial fish meal replacement with two fermented soybean meals on the growth of and protein metabolism in the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 17: 100328.

## Comparative study on apparent digestibility coefficients of crude protein and amino acids from ten novel protein sources in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)

WANG Song, YUAN Donghao, CAO Ziqi, ZHANG Lianjie,  
WANG Xiaodan, CHEN Liqiao\*, LI Erchao\*

(School of Life Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** The global shortage and rising cost of fish meal have driven growing interest in novel protein sources for aquafeed. Advanced processing technologies, including enzymatic hydrolysis, fermentation, extrusion, and hydrolysis, have enabled the production of various deeply processed protein ingredients; however, their digestive utilization in aquatic animals remains insufficiently characterized. As a commercially important crustacean, Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) possesses a digestive physiology that differs fundamentally from that of fish, and the direct application of fish-derived digestibility data to crab feed formulation can lead to substantial errors. However, systematic digestibility data for novel protein sources in this species remain scarce, and whether crude protein apparent digestibility coefficients (ADCs) can reliably predict amino acid availability in highly processed ingredients has not been empirically examined. This study aimed to evaluate the ADCs of ten novel protein ingredients in Chinese mitten crab and to investigate the discrepancy between crude protein and amino acid digestibility across different processing technologies. Ten commercial protein ingredients were tested against fish meal (FM) as the control,

including enzymatically hydrolyzed chicken meal (EHCM), feather meal (EHFM), full-fat soybean (EHFS), and soy protein (EHSP); fermented cottonseed meal (FCM) and soybean meal (FSM); extruded soybean meal (ESM) and feather meal (EFM); hydrolyzed feather meal (HFM) and hydrolyzed processed fish meal (HF). Male crabs [initial body weight ( $125.0 \pm 6.1$ ) g] were assigned to 12 groups (3 replicates, 6 crabs each). Using yttrium oxide ( $Y_2O_3$ , 0.1%) as an inert marker, ADCs of dry matter, crude protein, crude lipid, and 17 amino acids were determined via the 70% basal diet + 30% test ingredient substitution method, with fecal collection conducted over 80 days. Ingredient type and processing technology significantly affected all nutrient ADCs ( $P < 0.05$ ). Crude protein ADCs ranged from 62.95% (ESM) to 92.80% (EHCM). EHCM and EFM (90.77%) were comparable to FM (88.46%) ( $P > 0.05$ ), while ESM, HFM (65.28%), EHFS (65.11%), and HF (69.22%) were significantly lower ( $P < 0.05$ ). Notably, amino acid ADCs did not consistently align with crude protein ADCs. Despite its lowest crude protein ADC, ESM maintained ADCs above 90% for methionine (94.35%), histidine (95.08%), lysine (96.78%), and alanine (93.69%). Principal component analysis of essential amino acid digestibility explained 86.4% of total variance, and PC1 scores were significantly correlated with the digestibility discrepancy index (DDI = crude protein ADC – mean essential amino acid ADC) ( $r = 0.796$ ,  $P = 0.003$ ). EHCM and FCM exhibited the largest positive DDI values (+30.4% and +27.0%), indicating that non-protein nitrogen substantially inflated crude protein ADC relative to actual amino acid utilization. Conversely, ESM showed the largest negative DDI (-21.8%), demonstrating that crude protein ADC underestimated its amino acid utilization potential. In conclusion, EHCM and EFM are high-quality alternative protein sources for Chinese mitten crab with protein digestibility comparable to fish meal. This study reveals that crude protein ADC is an unreliable predictor of amino acid availability in deeply processed ingredients. It is recommended that amino acid-based digestibility data be incorporated into feed formulation systems to correct evaluation biases introduced by processing technologies.

**Key words:** *Eriocheir sinensis*; novel protein sources; apparent digestibility; amino acid digestibility

**Corresponding authors:** LI Erchao. E-mail: [ecli@bio.ecnu.edu.cn](mailto:ecli@bio.ecnu.edu.cn);

CHEN Liqiao. E-mail: [lqchen@bio.ecnu.edu.cn](mailto:lqchen@bio.ecnu.edu.cn)

**Funding projects:** National Key Research and Development Program of China (2023YFD2402000); Agriculture Research System of Shanghai, China (202504); Agriculture Research System of China of MOF and MARA (CARS-48)