DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20250210002　　http://www.yykxjz.cn/

李雪, 陈张帆, 卢昇, 王崇伟, 李超伟, 陈松林. 性腺发育不同时期雌性红九棘鲈肌肉营养成分的分析与评价. 渔业科学进展, 2026, 47(1): 70–80

LI X, CHEN Z F, LU S, WANG C W, LI C W, CHEN S L. Analysis and evaluation of muscle nutrients in *Cephalopholis sonnerati* at different sexual gland development stages. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(1): 70–80

性腺发育不同时期雌性红九棘鲈肌肉营养成分的分析与评价*

李　雪[1,2]　陈张帆[2,3]　卢　昇[2,3]　王崇伟[2]　李超伟[2]　陈松林[2,3①]

(1. 上海海洋大学水产与生命学院　上海　201306；
2. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室　中国水产科学研究院黄海水产研究所　山东　青岛　266071；
3. 青岛海洋科技中心海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室　山东　青岛　266237)

摘要　为探究雌性红九棘鲈(*Cephalopholis sonnerati*)不同生长阶段肌肉的营养价值和肌肉营养组成变化规律，本研究对红九棘鲈性腺发育不同时期(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ期)肌肉的营养成分进行了分析，并通过计算氨基酸评分(AAS)、化学评分(CS)和必需氨基酸指数(EAAI)等指标评价了其肌肉品质。结果显示，在雌性红九棘鲈性腺Ⅰ~Ⅴ期发育过程中，水分和蛋白含量呈持续上升趋势，脂肪含量Ⅳ期达到最高，随后在Ⅴ期下降。红九棘鲈肌肉中检测出的 16 种氨基酸总量为(18.20±0.26)%~(19.63±0.06)%，在卵巢发育Ⅰ~Ⅴ期过程中呈上升趋势，其中，包含人体所需的 7 种必需氨基酸，4 种主要呈味氨基酸总量为(7.00±0.04)%~(7.55±0.07)%。此外，在肌肉中共检测出 25 种脂肪酸，含量最高的 C16:0 和 C18:1 随红九棘鲈性腺发育呈下降的趋势；而 DHA+EPA 含量呈先下降后上升的趋势。另外，红九棘鲈肌肉中矿物质含量分析结果显示，红九棘鲈肌肉具有丰富的矿物质，检测到 5 种常量元素及 3 种微量元素，且Ⅴ期亲鱼的含硒量高于其他石斑鱼类。本研究揭示了红九棘鲈不同生长阶段肌肉的营养价值和肌肉营养组成变化规律，为红九棘鲈不同发育时期配合饲料的研制和营养价值评价提供了科学依据，并为进一步开展红九棘鲈人工规模化养殖实践奠定了理论基础。

关键词　红九棘鲈；肌肉；营养成分；性腺发育

中图分类号 S965.3　**文献标识码**　A　**文章编号**　2095-9869(2026)01-0070-11

红九棘鲈(*Cephalopholis sonnerati*)又称红瓜子斑，隶属于鲈形目(Perciformes)、鮨科(Serranidae)、九棘鲈属(*Cephalopholis*)，原产于南海深海海域，是石斑鱼的名贵品种之一，具有极高的经济价值和相当广阔的市场前景。红九棘鲈是典型的雌雄同体鱼类，发育阶段为先雌性，雌性性成熟排卵后性逆转为雄性。近年来，由于人工繁育技术取得重要突破，养殖产业蓬勃发展，红九棘鲈成为新兴的石斑鱼养殖品种之一。然

* 山东省重点研发计划(住鲁院士团队支持项目)(2023ZLYS02)、海南省陈松林院士工作站(YSGZZ2023001)、海南省院士创新平台科研项目(YSPTZX202402)、泰山学者攀登计划和中央级公益性科研院所基本科研业务费(2023TD20)和海南省科技专项(ZDYF2022GXJS347)共同资助。李　雪，Email: lx991012lixue@163.com

① 通信作者：陈松林，院士，Email: chensl@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2025-02-10, 收修改稿日期: 2025-03-17

而，目前国内外关于红九棘鲈的研究报道较少，主要集中在其产卵和繁殖模式的研究(Mohan *et al*, 2024)以及端粒到端粒水平的基因组组装(Lu *et al*, 2024)。

海水鱼类因富含多不饱和脂肪酸、优质蛋白、多种矿物质等营养元素，深受广大消费者青睐。研究表明，鱼类肌肉的营养品质受到物种、发育阶段、年龄、性别、饵料等若干内在和外在因素的影响(Zhang *et al*, 2020; Zhang *et al*, 2022; Nichols *et al*, 2023)。目前，在不同种类的石斑鱼肌肉营养比较(赵亭亭等, 2018)、父母本石斑鱼与杂交后代肌肉品质评价(王林娜等, 2023)、饲料中蛋白水平对肌肉品质的影响(赵书燕等, 2017)等方面开展了研究，但石斑鱼肌肉的营养成分随性腺发育的动态变化特征尚未见报道。性腺发育规律研究是进行红九棘鲈人工繁育的基础，了解营养成分可为消费者提供明确的膳食指导。本研究通过对红九棘鲈不同性腺发育阶段肌肉营养成分的分析，对其肌肉品质作出相关评估，探究其不同生长阶段肌肉的营养价值和肌肉营养组成变化规律，可为红九棘鲈不同发育时期配合饲料的研制和营养价值评价提供科学依据，并为进一步开展红九棘鲈人工规模化养殖实践奠定理论基础。

1　材料与方法

1.1　实验鱼采样及生物学指标测定

实验用鱼为不同生长阶段的雌性红九棘鲈，在海南省万宁市林兰水产有限公司(110°26′E，18°43′N)的流水鱼池内饲养，养殖环境条件和饲喂方式均相同。2023 年 3 月，自红九棘鲈 90 日龄起，每 30~60 d 进行样本的随机采集，实验用鱼体态均正常，无伤病。测量鱼体的体长和体重后，解剖鱼体，将性腺取出、称重、计算其性腺发育系数(GSI)=(性腺重量/总体重量)×100%；并取部分性腺样品进行包埋、切片、HE 染色，对性腺发育的组织学进行观察和分期(分别对应性腺发育Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ期)，其中性腺发育Ⅴ期的红九棘鲈选用已驯养 2~3 年的亲鱼。之后，用实验刀剪将待测背部肌肉分离并称重，置于液氮中速冻并保存于−80 ℃待测。样品采用性腺发育相同时期红九棘鲈鱼肉，Ⅰ期随机取 12 条，4 条混合后为 1 份样品；Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ期随机取 3 条，每条鱼为 1 份样品，每个时期均为 3 个平行，每份约 150 g 左右，用于常规营养成分、氨基酸和脂肪酸以及微量元素含量的测定。红九棘鲈的取样日期、体长、体重、性腺重量、性腺发育系数、性腺分期等信息均列于表 1。

表 1　不同性腺发育阶段雌性红九棘鲈的生物学指标测定

Tab.1　Basic information of female *C. sonnerati* at different gonadal development stages

采样时间 Sampling time	月龄 Age/months	体重 Body weight/g	体长 Body length/cm	性腺重量 Gonad weight/g	性腺发育系数 GSI/%	性腺发育状况 Gonad development stage
2023-06-18	3	21.24±3.59	8.64±0.71	0~0.05	0~0.04	Ⅰ
2023-07-18	4	50.77±9.68	12.10±1.47	0.05±0.01	0.10±0.03	Ⅰ
2023-08-16	5	98.04±11.14	16.36±3.27	0.10±0.02	0.11±0.02	Ⅰ
2023-10-24	7	266.96±40.32	20.39±2.13	0.29±0.10	0.11±0.04	Ⅱ
2023-12-14	9	343.95±20.61	22.82±1.85	0.44±0.13	0.13±0.03	Ⅱ
2024-01-23	10	470.64±45.60	25.60±2.88	0.50±0.09	0.11±0.02	Ⅲ
2024-03-16	12	594.70±29.75	28.73±3.21	0.70±0.12	0.12±0.03	Ⅲ
2024-04-16	13	650.06±49.54	30.75±3.45	1.07±0.15	0.12±0.03	Ⅳ
2024-04-20	亲鱼 Parent fish	1 363.16±160.25	36.21±4.06	4.22±0.99	0.31±0.04	Ⅴ

1.2　营养成分测定和评价

1.2.1　*营养成分测定*　将每份红九棘鲈鱼肉置于冻干机中进行低温冻干，研磨后取均质粉末进行检测。鱼肉中水分含量的测定使用电热恒温干燥箱参照 GB 5009.3-2016(直接干燥法)进行；粗灰分含量的测定使用高温炉≥950 ℃高温灼烧参照 GB 5009.4-2016 进行；粗蛋白质含量的测定参照 GB 5009.5-2016(凯氏定氮法)；粗脂肪含量的测定使用全自动脂肪测定仪参照 GB 5009.6-2016(索氏抽提法)进行；氨基酸含量参照 GB 5009.124-2016，使用全自动氨基酸分析仪(日立 L-8900)进行测定；脂肪酸含量参照 GB 5009.168-2016，使用气相色谱仪(Agilent7890A 型)进行测定。矿物元素含量参照 GB 5009.268-2016，使用日本岛津原子吸收分光光度计(AA6800 型)进行测定。

1.2.2　*营养价值评价*　根据联合国粮食及农业组织(FAO)和世界卫生组织(WHO)建议的氨基酸评分模式(Pellet *et al*, 1980)和全鸡蛋蛋白质的氨基酸模式(王光亚, 1991)，按照以下公式分别计算氨基酸评分(AAS)、化学评分(CS)和必需氨基酸指数(EAAI) (Biel *et al*, 2009)，对

性腺发育不同时期红九棘鲈肌肉进行营养评价。

待测蛋白氨基酸含量/(mg/g N)=

$$\frac{\text{肌肉中待测蛋白氨基酸含量}/\%}{\text{肌肉中粗蛋白含量}/\%}\times 6.25\times 1\,000 \quad (1)$$

$$\text{CS}=\frac{\text{待测蛋白氨基酸含量}/(\text{mg}/\text{gN})}{\text{全鸡蛋蛋白质中同种氨基酸的含量}/(\text{mg}/\text{gN})} \quad (2)$$

$$\text{AAS}=\frac{\text{待测蛋白氨基酸含量}/(\text{mg}/\text{gN})}{\text{FAO}/\text{WHO评分标准模式中同种氨基酸含量}/(\text{mg}/\text{gN})} \quad (3)$$

$$\text{EAAI}=\sqrt[n]{\frac{\text{赖氨酸}t}{\text{赖氨酸}s}\times 100\times\frac{\text{亮氨酸}t}{\text{亮氨酸}s}\times 100\times\ldots\ldots\times\frac{\text{缬氨酸}t}{\text{缬氨酸}s}\times 100} \quad (4)$$

式中，n 为红九棘鲈肌肉中测得的必需氨基酸种类数；t 为红九棘鲈肌肉蛋白质的必需氨基酸含量[(mg/g·N)]；s 为全鸡蛋蛋白质的必需氨基酸含量[(mg/g·N)]。

1.3 数据处理

所有的数据分析均为 3 个重复，采用 SPSS 27 对数据进行计算，并进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Turkey 多重比较分析，结果以平均值±标准差(Mean±SD)表示，$P<0.05$ 表示存在显著性差异。

2 结果

2.1 不同性腺发育时期的红九棘鲈生物学指标测定和性成熟系数的变化

根据王崇伟等(未发表数据)对红九棘鲈性腺发育分期，本研究对采集的红九棘鲈性腺进行切片组织学观察，参照石斑鱼卵母细胞时相划分标准(赵会宏等, 2003)进行分期，结果见表 1。红九棘鲈在最初的 3 个月性腺发育较缓慢，从 4 月龄开始，性腺发育速度加快，一直到 13 月龄(性腺Ⅳ期)，性腺发育系数(GSI)值较稳定，处于 0.10~0.12 之间；亲鱼的 GSI 系数显著增加，说明亲鱼的性腺发育成熟度高。

2.2 不同性腺发育时期的红九棘鲈肌肉基本营养成分分析

不同发育时期红九棘鲈肌肉中的基本营养成分分析见表 2。在不同发育阶段，红九棘鲈肌肉的水分、灰分、粗蛋白和粗脂肪含量均发生显著变化。其中，灰分随着性腺发育呈下降趋势，Ⅰ期与Ⅱ期相比显著下降($P<0.05$)，进入性腺Ⅲ期后，红九棘鲈肌肉中的灰分含量相对稳定，亲鱼阶段肌肉的灰分含量略下降，但无显著差异；而粗蛋白在性腺发育Ⅰ~Ⅴ期呈上升趋势，性腺Ⅰ~Ⅳ期增长相对稳定，亲鱼阶段的粗蛋白含量较性腺Ⅰ~Ⅳ期显著提高($P<0.05$)。水分总体呈上升趋势，但在性腺Ⅳ期的肌肉中，水分含量出现一个转折点，显著下降($P<0.05$)；相反，粗脂肪总体呈下降趋势，同样，在性腺Ⅳ期时，粗脂肪含量出现一个显著上升的折点，高于其他性腺发育时期($P<0.05$)，波动较大。

2.3 不同性腺发育时期的红九棘鲈肌肉氨基酸组成与分析

在红九棘鲈的肌肉中共检测出 16 种氨基酸，其中包含 7 种必需氨基酸，2 种半必需氨基酸和 7 种非必需氨基酸(表 3)。在红九棘鲈性腺发育的不同时期，其肌肉中的氨基酸总量(TAA)、必需氨基酸(EAA)、半必需氨基酸(NEAA)、非必需氨基酸(NEAA)和呈味氨基酸(DAA)含量随着性腺发育均呈上升趋势，与不同性腺发育粗蛋白的变化趋势一致，且 TAA 含量在Ⅴ期显著高于其他时期($P<0.05$)。各发育时期的红九棘鲈肌肉氨基酸组成基本一致，呈味氨基酸中谷氨酸(Glu)含量最高，在红九棘鲈性腺发育Ⅰ~Ⅴ期增长相对稳定，Ⅴ期显著上升($P<0.05$)。EAA/TAA 和 EAA/NEAA 的值在性腺发育Ⅰ~Ⅴ期均未有显著性变化，分别为 39.34~40.49 和 75.98~80.33，达到了 FAO/WHO 建议的理想蛋白源标准(EAA/TAA 达 40%

表 2 不同性腺发育阶段红九棘鲈肌肉基本营养成分含量(湿重, n=3)

Tab.2 Comparison of nutritional components in muscles of *C. sonnerati* at different gonad development stages (wet weight, n=3)

性腺发育时期 Gonad development stage	水分 Moisture/%	粗灰分 Ash/%	粗蛋白 Crude protein/%	粗脂肪 Crude fat/%
Ⅰ	70.80 ± 0.20^{d}	2.60 ± 0.00^{a}	19.13 ± 0.15^{d}	5.10 ± 0.10^{b}
Ⅱ	72.87 ± 0.23^{c}	1.47 ± 0.06^{b}	19.47 ± 0.15^{c}	5.10 ± 0.00^{b}
Ⅲ	73.67 ± 0.57^{b}	1.30 ± 0.00^{c}	19.83 ± 0.21^{b}	4.63 ± 0.06^{c}
Ⅳ	69.07 ± 0.15^{e}	1.30 ± 0.10^{c}	19.93 ± 0.21^{b}	9.40 ± 0.10^{a}
Ⅴ	75.10 ± 0.26^{a}	1.20 ± 0.00^{c}	21.27 ± 0.21^{a}	2.33 ± 0.12^{e}

注：同列数据上标不同字母表示有显著差异($P<0.05$)，含有相同字母的为差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: In the same row, values with different letter superscripts are significantly different ($P<0.05$), values with same letter superscripts are no significant difference ($P>0.05$). The same below.

表 3　不同性腺发育阶段红九棘鲈肌肉氨基酸组成与含量

Tab.3　The amino acid components in muscles of *C. sonnerati* at different gonadal development stages

氨基酸类别 Amino acid category	氨基酸种类 Amino acid species	性腺发育阶段 Gonad development stage				
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
必需氨基酸 EAA/%	亮氨酸 Leu	1.46±0.04c	1.57±0.06b	1.58±0.05ab	1.61±0.02ab	1.66±0.03a
	异亮氨酸 Ile	0.81±0.02c	0.87±0.04b	0.88±0.02b	0.89±0.02ab	0.93±0.02a
	蛋氨酸 Met	0.56±0.01b	0.60±0.02a	0.61±0.02a	0.63±0.04a	0.64±0.01a
	苯丙氨酸 Phe	0.82±0.02b	0.87±0.02a	0.89±0.03a	0.87±0.02a	0.87±0.01a
	苏氨酸 Thr	0.88±0.00b	0.93±0.02a	0.93±0.02a	0.93±0.05a	0.97±0.00a
	缬氨酸 Val	0.90±0.03b	0.94±0.05ab	0.94±0.03ab	0.95±0.02ab	0.98±0.01a
	赖氨酸 Lys	1.73±0.03c	1.90±0.04b	1.91±0.04b	1.92±0.03b	1.99±0.02a
半必需氨基酸 HEAA/%	组氨酸 His	0.44±0.01b	0.46±0.01ab	0.46±0.01ab	0.46±0.05ab	0.51±0.01a
	精氨酸 Arg	1.18±0.01cd	1.20±0.02cd	1.23±0.03bc	1.25±0.01b	1.30±0.03a
非必需氨基酸 NEAA/%	谷氨酸 Glu*	2.74±0.05c	2.93±0.10b	2.98±0.06b	2.99±0.06b	3.14±0.06a
	天冬氨酸 Asp*	1.97±0.02b	2.11±0.05a	2.12±0.05a	2.13±0.07a	2.18±0.00a
	丝氨酸 Ser	0.76±0.01a	0.78±0.03a	0.78±0.02a	0.79±0.04a	0.80±0.01a
	甘氨酸 Gly*	1.19±0.01a	1.01±0.41c	1.15±0.04ab	1.10±0.03b	0.96±0.06c
	丙氨酸 Ala*	1.28±0.04ab	1.22±0.06bc	1.28±0.01ab	1.21±0.02c	1.27±0.02abc
	酪氨酸 Tyr	0.66±0.03c	0.71±0.03b	0.73±0.03ab	0.76±0.03a	0.78±0.02a
	脯氨酸 Pro	0.81±0.04bc	0.88±0.03a	0.78±0.04ac	0.85±0.03ab	0.89±0.02a
16 项氨基酸总和 TAA/%		18.20±0.26c	19.00±0.50b	19.27±0.32b	19.28±0.07b	19.63±0.06a
总必需氨基酸 EAA/%		7.16±0.15c	7.68±0.21b	7.75±0.17b	7.77±0.12b	8.04±0.05ab
半必需氨基酸 HEAA/%		1.62±0.01c	1.66±0.03bc	1.69±0.04b	1.71±0.04b	1.81±0.04a
非必需氨基酸 NEAA/%		9.42±0.14c	9.65±0.27ab	9.83±0.10ab	9.83±0.14ab	10.01±0.09a
呈味氨基酸 DAA/%		7.19±0.07bc	7.28±0.18b	7.54±0.07a	7.00±0.04c	7.55±0.07a
EAA/TAA		39.34±0.34b	40.40±0.35a	40.22±0.19a	40.24±0.56a	40.49±0.24a
EAA/NEAA		75.98±0.74b	79.56±1.00a	78.83±0.86a	79.09±2.26a	80.33±0.85a

注：*：呈味氨基酸。

Note: *: Flavor amino acids.

左右，EAA/NEAA 达 60%以上)。由表 4 可知，必需氨基酸中，除缬氨酸、蛋氨酸+胱氨酸较 FAO 评分低，其余氨基酸含量均高于 FAO 评分，其中，在性腺发育Ⅰ~Ⅴ期赖氨酸含量甚至高于鸡蛋蛋白评分，且发现必需氨基酸在性腺发育Ⅲ期时，含量在整个发育时期较高。根据氨基酸评分(AAS)和化学评分(CS)评分规则，红九棘鲈性腺发育不同阶段的肌肉中，蛋氨酸(Met)和胱氨酸(Cys)为第一限制氨基酸，缬氨酸(Val)为第二限制氨基酸。AAS 和 CS 值随红九棘鲈性腺发育在整体上呈单峰型，性腺Ⅰ~Ⅲ期呈上升趋势，在性腺Ⅲ期达到最大值，性腺Ⅳ、Ⅴ期逐渐下降(表 5)。作为食物中蛋白质营养评价的常用指标之一，性腺Ⅰ~Ⅳ期的红九棘鲈肌肉 EAAI 在 82.59~87.60 之间。

2.4　不同性腺发育时期的红九棘鲈肌肉矿物质含量分析

红九棘鲈肌肉具有丰富的矿物质，5 种常量元素磷(P)、镁(Mg)、钾(K)、钠(Na)、钙(Ca)和 3 种微量元素锰(Mn)、锌(Zn)、硒(Se)均在不同发育阶段的红九棘鲈肌肉中被检出(表 6)。此外，微量元素铜(Cu)在性腺Ⅰ期的红九棘鲈肌肉中检出，微量元素铁(Fe)在性腺Ⅰ期和Ⅱ期中检出。在性腺发育不同时期，红九棘鲈肌肉中的各个常量元素变化具有显著差异($P<0.05$)。除 K 外，P、Mg、Na 和 Ca 等常量元素含量在性腺Ⅰ期和性腺Ⅳ期均显著高于其他时期($P<0.05$)，可能由于性腺Ⅰ期的鱼体剔除肌肉较难，肌肉样品中混合着鱼骨，造成各项数值偏高，而 K 的含量在Ⅰ~Ⅴ期增长相对稳定，Ⅴ期显著上升($P<0.05$)。在微量元素中，Zn 和 Se 在性腺发育不同时期均有检出。Zn 的含量较高，在性腺Ⅰ期的红九棘鲈肌肉中含量最高，性腺Ⅳ期次之；Se 的含量在性腺Ⅰ期中较高，随着鱼体发育降低，在性腺Ⅲ期中达到最小值，随后又升高，并在性腺Ⅴ期显著升高($P<0.05$)。

表 4 不同性腺发育阶段红九棘鲈肌肉蛋白(必需氨基酸)与 FAO/WHO 评价标准和鸡蛋蛋白模式比较

Tab.4 Comparison of essential amino acids in muscles of *C. sonnerati* at different gonad development stages to FAO/WHO standard evaluation mode and Whole egg scoring mode

必需氨基酸 Essential amino acid	性腺发育阶段 Gonad development stage					FAO 评分模式 FAO scoring model	鸡蛋蛋白评分模式 Whole egg scoring model
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ		
苏氨酸 Thr	287.51	293.12	298.54	291.65	285.03	250	292
缬氨酸 Val	294.04	296.27	301.75	297.92	287.96	310	410
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	182.96	189.11	195.81	197.57	188.06	220	386
异亮氨酸 Ile	264.64	274.21	282.49	279.10	273.27	250	331
亮氨酸 Leu	477.00	494.83	507.19	504.89	487.78	440	534
苯丙氨酸+酪氨酸 Phe+Tyr	483.53	497.98	520.03	511.16	484.84	380	565
赖氨酸 Lys	565.21	598.84	613.12	602.11	584.74	340	441

表 5 不同性腺发育阶段红九棘鲈氨基酸 AAS 和 CS 评分的比较

Tab.5 Comparison of AAS and CS for amino acids in muscles of *C. sonnerati* at different gonad development stages

必需氨基酸 Essential amino acid	AAS					CS				
	性腺发育阶段 Gonad development stage					性腺发育阶段 Gonad development stage				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
苏氨酸 Thr	1.15	1.17	1.19	1.16	1.14	0.98	1.00	1.02	1.00	0.98
缬氨酸 Val	0.95	0.96	0.97	0.96	0.93	0.72	0.72	0.74	0.73	0.70
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cy	0.83	0.86	0.89	0.90	0.85	0.47	0.49	0.51	0.51	0.49
异亮氨酸 Ile	1.06	1.10	1.13	1.12	1.09	0.80	0.83	0.85	0.84	0.83
亮氨酸 Leu	1.08	1.12	1.15	1.15	1.11	0.89	0.93	0.95	0.95	0.91
苯丙氨酸+酪氨酸 Phe+Tyr	1.27	1.31	1.37	1.35	1.28	0.86	0.88	0.92	0.90	0.86
赖氨酸 Lys	1.66	1.76	1.80	1.77	1.72	1.28	1.36	1.39	1.37	1.33
指数 EAAI						82.59	85.22	87.60	86.62	83.65

表 6 不同性腺发育阶段红九棘鲈雌鱼肌肉矿物质含量

Tab.6 Mineral content in muscles of *C. sonnerati* at different gonad development stages

矿质元素种类 Mineral substance		矿质元素含量/(mg /kg, dry weight) 性腺发育阶段 Gonad development stage				
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
常量元素 Macro elements	磷 P	5 090.00±335.10^{a}	2 406.67±372.20^{c}	1 980.00±96.44^{d}	4 210.00±96.44^{b}	2 163.33±181.40^{cd}
	镁 Mg	418.67±12.90^{a}	308.00±33.51^{c}	306.00±11.36^{c}	360.33±18.58^{b}	317.00±13.45^{c}
	钾 K	3 673.33±166.20^{b}	4 080.00±229.13^{b}	3 960.00±187.30^{b}	3 690.00±0.00^{b}	4 430.00±378.00^{a}
	钠 Na	924.67±47.48^{a}	403.67±21.13^{c}	424.33±20.60^{c}	669.33±43.41^{b}	286.33±22.94^{d}
	钙 Ca	6 276.67±519.30^{a}	624.67±386.47^{c}	389.33±184.78^{c}	4 380.00±268.1^{b}	161.67±56.01^{c}
微量元素 Trace elements	铁 Fe	3.59±0.74^{a}	1.01±1.75^{ab}	0	0	0
	锰 Mn	0.87±0.07^{a}	0	0.11±0.18^{c}	0.62±0.06^{b}	0
	锌 Zn	9.96±0.47^{a}	4.47±0.35^{c}	4.07±0.34^{cd}	6.50±0.22^{b}	3.89±0.14^{cd}
	铜 Cu	0.35±0.30^{a}	0	0	0	0
	硒 Se	0.41±0.04^{b}	0.34±0.04^{c}	0.31±0.02^{c}	0.34±0.04^{c}	0.57±0.02^{a}

2.5 不同性腺发育时期红九棘鲈肌肉脂肪酸含量分析

在性腺Ⅰ~Ⅳ期的红九棘鲈肌肉中共检出 25 种脂肪酸，其中包括 9 种饱和脂肪酸、6 种单不饱和脂肪酸以及 10 种多不饱和脂肪酸(表 7)。不同阶段的红九棘鲈肌肉中脂肪酸含量不同，但不饱和脂肪酸的总量均高于饱和脂肪酸的总量。饱和脂肪酸含量在性腺Ⅰ~Ⅳ期差异不显著，在性腺Ⅴ期中显著下降(P<0.05)。单不饱和脂肪酸的含量在性腺Ⅰ~Ⅳ期逐渐升高，到性腺Ⅳ期显著下降至最低(P<0.05)。多不饱和脂肪酸的含量则相反，在性腺Ⅰ~Ⅳ期逐渐下降，到性腺Ⅴ期显著升高到最高(P<0.05)。

表 7　不同性腺发育阶段红九棘鲈雌鱼肌肉脂肪酸含量

Tab.7　The fatty acid components in muscles of *C. sonnerati* at different gonad development stages

脂肪酸种类 Fatty acid species	性腺发育阶段 Gonad development stage				
	I	II	III	IV	V
饱和脂肪酸 SFA					
C12:0	0.08±0.01[a]	0.11±0.04[a]	0.09±0.00[a]	0.09±0.00[a]	0.09±0.03[a]
C14:0	5.20±0.03[b]	5.14±0.02[b]	5.30±0.21[ab]	5.56±0.02[a]	3.72±0.02[c]
C15:0	0.51±0.00[b]	0.40±0.00[cd]	0.41±0.02[c]	0.38±0.00[d]	0.75±0.01[a]
C16:0	28.97±0.21[a]	28.60±0.36[a]	28.33±0.47[a]	28.90±0.17[a]	26.93±0.15[b]
C17:0	0.57±0.01[b]	0.42±0.00[cd]	0.43±0.02[c]	0.42±0.00[cd]	0.99±0.01[a]
C18:0	8.27±0.06[b]	8.27±0.18[b]	8.42±0.12[b]	8.35±0.08[b]	9.70±0.11[a]
C20:0	0.52±0.00[a]	0.27±0.01[d]	0.29±0.00[c]	0.30±0.01[c]	0.39±0.01[b]
C21:0	0.07±0.00[b]	0	0	0	0.09±0.00[a]
C22:0	0.20±0.01[b]	0.16±0.01[c]	0.17±0.00[c]	0.16±0.01[c]	0.22±0.01[a]
C23:0	0.05±0.00	0	0	0	0.08±0.02
C24:0	0.17±0.02[b]	0.17±0.01[b]	0.15±0.00[bc]	0.14±0.01[c]	0.21±0.01[a]
∑SFA	44.60±0.26[a]	43.57±0.61[a]	43.60±0.78[a]	44.33±0.29[a]	43.20±0.20[b]
单不饱和脂肪酸 MUFA					
C14:1	0.05±0.00[c]	0.06±0.00[bc]	0.06±0.00[bc]	0.07±0.00[ab]	0.06±0.00[abc]
C16:1	7.03±0.03[c]	7.19±0.09[bc]	7.28±0.09[bc]	7.44±0.02[ab]	5.78±0.09[d]
C18:1	0.92±0.07[a]	0.91±0.04[a]	0.92±0.05[a]	0.84±0.04[a]	0.36±0.03[b]
C18:1	20.77±0.15[c]	22.40±0.10[b]	22.43±0.32[b]	23.27±0.12[a]	18.40±0.10[de]
C20:1	1.80±0.02[c]	1.75±0.02[c]	1.89±0.01[b]	1.97±0.02[a]	1.82±0.02[bc]
C22:1	0.32±0.01[ab]	0.34±0.02[ab]	0.37±0.01[a]	0.35±0.03[ab]	0.20±0.06[c]
∑MUFA	30.60±0.10[c]	32.40±0.17[b]	32.73±0.25[b]	33.73±0.15[a]	27.13±0.21[d]
多不饱和脂肪酸 PUFA					
C18:2t	0.86±0.01[c]	1.04±0.03[a]	0.98±0.01[b]	0.97±0.02[b]	0.20±0.02[d]
C18:2	2.35±0.08[c]	3.24±0.09[a]	3.33±0.03[a]	2.95±0.02[b]	1.60±0.08[d]
C18:3 (GLA)	0.12±0.01[a]	0.12±0.00[a]	0.12±0.00[a]	0.12±0.00[a]	0.09±0.01[b]
C18:3 (ALA)	0.95±0.01[c]	1.26±0.02[ab]	1.31±0.03[a]	1.22±0.01[b]	0.54±0.02[d]
C20:2	0.18±0.01[d]	0.23±0.01[bc]	0.24±0.01[b]	0.23±0.00[c]	0.28±0.00[a]
C20:3	0.15±0.01[a]	0.14±0.01[ab]	0.14±0.00[a]	0.13±0.00[bc]	0.15±0.01[a]
C20:4	0.97±0.05[b]	0.75±0.01[c]	0.78±0.02[c]	0.70±0.01[c]	2.34±0.02[a]
C20:5 (EPA)	6.77±0.07[a]	6.72±0.26[a]	6.41±0.39[ab]	5.96±0.19[b]	3.70±0.03[c]
C24:1	0.63±0.01[cd]	0.66±0.01[cd]	0.69±0.08[c]	0.60±0.01[d]	0.86±0.04[ab]
C22:6 (DHA)	11.47±0.06[b]	9.50±0.40[c]	9.32±0.59[c]	8.75±0.21[c]	20.37±0.12[a]
∑PUFA	22.97±0.21[b]	22.00±0.72[b]	21.63±1.01[b]	20.03±0.42[c]	29.07±0.12[a]
∑n-3	16.20±5.11[b]	17.47±0.64[b]	17.03±1.01[b]	15.93±0.42[b]	24.60±0.10[a]
∑n-6	3.78±0.12[c]	4.49±0.09[a]	4.61±0.02[a]	4.12±0.01[b]	4.45±0.12[a]
∑n-9	23.53±0.15[c]	25.17±0.15[b]	25.40±0.26[b]	26.20±0.17[a]	21.27±0.15[d]
EPA+DHA	18.23±0.12[b]	16.22±0.65[c]	15.73±0.97[c]	14.72±0.40[d]	24.07±0.10[a]

在饱和脂肪酸中，C16:0 含量最高，且相比性腺Ⅰ~Ⅳ期，其含量在Ⅴ期亲鱼中达到顶峰；在单不饱和脂肪酸中，C18:1 含量最高，且与其他时期相比，在性腺Ⅳ期中含量最高；在多不饱和脂肪酸中，DHA 和 EPA 的含量较高，但鱼体发育过程中，这 2 种多不饱和脂肪酸含量变化呈现完全不同的趋势。EPA 含量在Ⅰ期中最高，随着发育逐渐降低，在Ⅴ期中含量最低；而 DHA 含量开始在Ⅰ期中较高，随着发育逐渐降低，但Ⅴ期较Ⅳ期显著升高 2.33 倍($P<0.05$)，也较Ⅰ期显著提高 1.78 倍($P<0.05$)。

3 讨论

鱼肉中水分、脂肪、氨基酸、矿物质和脂肪酸等营养成分是评判鱼肉品质的重要指标，且决定鱼肉的口感与风味。水分是构成动物个体体重的最大占比组成，体内水分含量波动趋势在一定程度上可以反映整体代谢水平(滕静等, 2016)。在本研究中，红九棘鲈肌肉中水分含量随发育阶段呈上升趋势，在Ⅴ期时，水分含量达到最高值(75.10±0.26)%，显著高于Ⅰ期(70.80±0.20)% ($P<0.05$)，表明在红九棘鲈性腺发育过程中体内代谢强度不断增强。在性腺Ⅴ期红九棘鲈亲鱼中，粗蛋白含量达到最大值(21.27±0.21) g，且高于大部分鱼类的粗蛋白含量(通常约为 13.90~21.03 g) (王立改等, 2016)，也高于已报道的石斑鱼类(王林娜等, 2018)。脂肪和蛋白作为机体重要能量来源，其含量随着红九棘鲈发育逐渐上升，并为鱼体的快速生长和性腺发育提供营养和能量储备。而性腺Ⅴ期为红九棘鲈性成熟期，且 4 月处于红九棘鲈繁殖季，大部分脂肪用于性腺发育和繁殖，导致肌肉中粗脂肪含量下降。这与中华鲟(*Acipenser sinensis*) (周海, 2018)和圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*) (董纯等, 2022)中的研究结果相似。性腺发育过程中的中华鲟和圆口铜鱼的粗脂肪和粗蛋白含量均逐渐升高，而繁殖季节的圆口铜鱼亲鱼肌肉中脂肪整体呈降低趋势。

肌肉的蛋白质品质取决于肌肉所含的氨基酸种类的含量。在大多数水生动物中，蛋白质被认为是调节性腺成熟和繁殖的关键因素，它有助于促进蛋黄蛋白、肽激素和相关酶的合成(Dabrowski *et al*, 2010; Yuan *et al*, 2011)。不同发育阶段红九棘鲈肌肉所含氨基酸的种类相同，谷氨酸、天冬氨酸、赖氨酸和亮氨酸为占比最高的 4 种氨基酸，这与已报道的鞍带石斑鱼(*Epinehelus lanceolatus*) (王林娜等, 2018)、点带石斑鱼(*Epinephelus maculatus*) (徐大为等, 2008)、七带石斑鱼(*Epinephelus septemfasciatus*) (程波等, 2009)、豹纹鳃棘鲈(*Plectropomus leopardus*)(尤宏争等, 2014)、斑石鲷(*Oplegnathus punctatus*)(王立改等, 2016)、银鲳(*Pampus argenteus*) (黄旭雄等, 2009)和圆口铜鱼(董纯等, 2022)等肌肉中的氨基酸占比相似，表明硬骨鱼类肌肉氨基酸含量在进化过程中的保守性。性腺Ⅰ~Ⅳ期的红九棘鲈肌肉 EAAI 在 82.59~87.60 之间，EAAI 指数在亲鱼性腺Ⅴ期时为 83.65，必需氨基酸指数高于大部分经济鱼类(王林娜等, 2018)，且性腺发育的各个阶段的 EAA/TAA 为(39.34±0.34)%~(40.49±0.24)%，达到 FAO/WHO 理想模式 40%左右；肌肉 EAA/NEEA 为(75.98±0.74)%~(80.33±0.85)%，远高于 FAO/WHO 理想模式的 60%。相比较各个阶段的比值而言，以性腺Ⅴ期的亲鱼营养价值为最高。所含 6 种呈味氨基酸中谷氨酸、天门冬氨酸、甘氨酸和丙氨酸这 4 种的含量在性腺发育过程中呈上升趋势；红九棘鲈亲鱼中的 6 种呈味氨基酸总量为(9.24±0.08)%，高于其他石斑鱼如云纹石斑鱼(*Epinehelus moara*) (5.57%) (王林娜等, 2018)、豹纹鳃棘鲈(7.9%) (尤宏争等，2014)、棕点石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus*) (7.11%) (王际英等, 2015)等，说明红九棘鲈的肉质较为鲜美。红九棘鲈各阶段肌肉中的 AAS 评分均接近或大于 1，CS 评分均超过 0.5，说明红九棘鲈肌肉在性腺发育不同阶段所含必需氨基酸的种类丰富且含量较高。在这两种评分模式下，蛋氨酸(Met)和胱氨酸(Cys)是红九棘鲈肌肉中的第一限制性氨基酸，缬氨酸(Val)为第二限制性氨基酸。因此，在红九棘鲈的养殖过程中，可结合各个时期具体情况，在饲料中适当添加蛋氨酸、胱氨酸和缬氨酸，促进鱼体健康发育和生长。

矿物质为人体必需，但无法由自身产生，需要通过食物摄取获得。红九棘鲈肌肉中可以检测到 5 种常见的常量元素。微量元素中，Zn 和 Se 的含量较高，且在所有性腺发育阶段均能检测到。红九棘鲈肌肉在性腺发育不同阶段中 Zn 的含量在Ⅳ~Ⅴ期下降，可能是向卵巢转移导致降低。红九棘鲈肌肉中 Se 的含量在性腺Ⅴ期最高，且高于云纹石斑鱼(0.397) (王林娜等, 2018)、豹纹鳃棘鲈(0.29) (尤宏争等, 2014)和棕点石斑鱼(0.20) (王际英等, 2015)。Se 对提高人体免疫力、预防心血管疾病和肝病、增加抗氧化活性等方面具有重要作用。红九棘鲈肌肉中含有较丰富的 Se 等微量元素，并含有丰富的 P、Mg、K 等常量元素。

脂肪酸作为生物体内重要的营养成分，对鱼类生长、发育和生殖调控具有重要的生理作用。在红九棘鲈性腺发育Ⅰ~Ⅴ期中，C16:0、C18:0 和 C14:0 为主要饱和脂肪酸种类，其中，C16:0 和 C14:0 的含量随发育阶段呈显著下降趋势，与饱和脂肪酸总量∑SFA 的下降趋势一致，而 C18:0 的含量在性腺Ⅴ期显著增加。该结果与性腺发育不同阶段银鲳中这几类饱和脂肪酸的变化趋势一致(Huang *et al*, 2010)。在红九棘鲈性腺发育过程中，单不饱和脂肪酸总量呈单峰型，在性腺Ⅳ期达到最高值后，在性腺Ⅴ期显著下降，这与野生瓯江凤鲚(*Coilia mystus*) (胡园等, 2021)、银鲳中的报道一致(Huang *et al*, 2010)，说明在红九棘鲈中单不饱和脂肪酸也是优先被分解并为鱼体提供营养和能量的氨基酸种类。其中，C18:1 作为最主要的单不饱和脂肪酸，在红九棘鲈性腺Ⅳ期大量积累，并在性

腺Ⅴ期快速消耗、转移至卵巢，用于卵细胞的成熟和能量代谢。海水鱼类因含有大量多不饱和脂肪酸，其营养价值受到消费者青睐，其中，DHA 和 EPA 被分别称为“脑黄金”和“血管清道夫”，对促进大脑和视力发育、降血脂和调节免疫力有重要作用，是商品化鱼油的重要组成部分，其含量高低可以直接影响鱼类的繁殖性能或繁殖力(Montero *et al*, 2005)。随着红九棘鲈性腺发育，DHA+EPA 含量呈先下降后上升的趋势，推测是鱼体刚开始随着性腺的发育进行消耗，在准备产卵时大量积累到鱼肉中，产卵时转移到卵巢中，以供机体产卵供需。在性腺发育的过程中，DHA 向雌性斑马鱼(*Danio rerio*)发育中的卵巢中迁移(Zhu *et al*, 2019)。美洲沙鱼(*Alos asapidissima*)在卵巢发育过程中，肌肉大量的 EPA、DHA 和 ARA 向卵巢转移(Gao *et al*, 2019)。

4　结论

综上所述，在性腺不同发育阶段雌性红九棘鲈肌肉中营养物质全面且丰富；氨基酸种类齐全且含量较高，其中，呈味氨基酸含量在发育过程中呈上升趋势；不饱和脂肪酸含量丰富，其中，DHA+EPA 含量较高，并在Ⅴ期时达到顶峰；且含有人体所需的多种矿物质元素，Se 的含量在性腺Ⅴ期最高。因此。红九棘鲈是一种极具食用价值和营养保健价值的海水鱼类，尤其是性腺Ⅴ期的亲鱼营养价值为最高。此外，本研究结果为红九棘鲈不同发育时期配合饲料的研制和营养价值评价提供了科学依据，并为进一步开展红九棘鲈人工规模化养殖实践奠定了理论基础。

参　考　文　献

程波, 陈超, 王印庚, 等. 七带石斑鱼肌肉营养成分分析与品质评价. 渔业科学进展, 2009, 30(5): 51–57 [CHENG B, CHEN C, WANG Y G, *et al*. Nutritional components analysis and nutritive value evaluation in *Epinephelus septemfasciatus* muscles. Progress in Fishery Sciences, 2009, 30(5): 51–57]

董纯, 罗安红, 陈小娟, 等. 不同年龄和性腺发育阶段圆口铜鱼营养成分分析. 水生态学杂志, 2022, 43(2): 108–115 [DONG C, LUO A H, CHEN X J, *et al*. Nutrient composition analysis of *Coreius guichenoti* at different ages and gonad development stages. Journal of Hydroecology, 2022, 43(2): 108–115]

胡园, 周朝生, 朱洁, 等. 性腺发育不同阶段野生瓯江凤鲚肌肉营养成分的分析与评价. 水生生物学报, 2021, 45(4): 790–800 [HU Y, ZHOU C S, ZHU J, *et al*. Analysis and evaluation of nutritional composition of wild *Coilia mystus* in Oujiang River at different gonadal development stages. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(4): 790–800]

黄旭雄, 施兆鸿, 李伟微, 等. 银鲳亲鱼不同组织的氨基酸及其随性腺发育的变化. 水产学报, 2009, 33(2): 278–287 [HUANG X X, SHI Z H, LI W W, *et al*. The amino acids in different tissues of silver pomfret (*Pampus argenteus*) broodstock and their change with the gonad development. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(2): 278–287]

滕静, 陶宁萍, 李玉琪. 卵巢发育不同阶段长江刀鲚肉营养成分的分析及评价. 现代食品科技, 2016, 32(9): 267–274 [TENG J, TAO N P, LI Y Q. Analysis and evaluation of nutritional composition of Yangtze River coilia meat at different ovarian development stages. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(9): 267–274]

王光亚. 食物成分表(全国代表值)第Ⅰ版. 北京: 人民卫生出版社, 1991 [WANG G Y. Food composition list (National representative values) 1st edition. Beijing: People's Medical Publishing House, 1991]

王际英, 张德瑞, 马晶晶, 等. 珍珠龙胆石斑鱼肌肉营养成分分析与品质评价. 海洋湖沼通报, 2015, 37(4): 61–69 [WANG J Y, ZHANG D R, MA J J, *et al*. Nutritional components analysis and nutritive value evaluation of ♀ *Epinephelus fuscoguttatus* × ♂ *E. Lanceolatus* muscles. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015, 37(4): 61–69]

王立改, 鲁琼, 詹炜, 等. 斑石鲷肌肉营养成分分析. 食品工业科技, 2016, 37(9): 357–362 [WANG L G, LU Q, ZHAN W, *et al*. Analysis of muscle nutrition composition and the nutrition evaluation of *Oplegnathus punctatus*. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(9): 357–362]

王林娜, 田永胜, 李振通, 等. 棕点石斑鱼、杂交“金虎斑”及珍珠龙胆的肌肉营养成分分析及品质评价. 水产学报, 2023, 47(9): 113–121 [WANG L N, TIAN Y S, LI Z T, *et al*. Analysis and quality evaluation of nutritional components in the muscle of *Epinephelus fuscoguttatus*, *E. fuscoguttatus*♀ × *E. tukula* ♂ and *E. fuscoguttatus*♀×*E. lanceolatus*♂. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(9): 113–121]

王林娜, 田永胜, 唐江, 等. 云纹石斑鱼、鞍带石斑鱼及杂交“云龙斑”肌肉营养成分分析及品质评价. 水产学报, 2018, 42(7): 1085–1093 [WANG L N, TIAN Y S, TANG J, *et al*. Analysis and quality evaluation of nutritional components in the muscle of *Epinehelus moara*, *E. lanceolatus* and hybrid “Yunlong grouper”. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(7): 1085–1093]

徐大为, 邢克智, 张树森, 等. 点带石斑鱼的肌肉营养成分分析. 水利渔业, 2008, 29(3): 54–56 [XU D W, XING K Z, ZHANG S S, *et al*. Analysis of nutritional components in muscle of *Epinephelus maculatus*. Reservoir Fisheries, 2008, 29(3): 54–56]

尤宏争, 孙志景, 张勤, 等. 豹纹鳃棘鲈肌肉营养成分分析与品质评价. 水生生物学报, 2014, 38(6): 1168–1172 [YOU

H Z, SUN Z J, ZHANG Q, *et al*. Nutritional components analysis and nutritive value evaluation in *Plectropomus leopardus* muscles. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(6): 1168–1172]

赵会宏, 刘晓春, 刘付永忠, 等. 斜带石斑鱼雌鱼卵巢发育与血清性类固醇激素的生殖周期变化. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(6): 56–59, 63 [ZHAO H H, LIU X C, LIU F, *et al*. Seasonal cycles of ovarian development and serum sex steroid levels of female grouper *Epinephelus coioides*. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(6): 56–59, 63]

赵书燕, 林黑着, 黄忠, 等. 不同蛋白水平对 2 种规格石斑鱼生长性能、血清生化及肌肉品质的影响. 南方水产科学, 2017, 13(4): 87–96 [ZHAO S Y, LIN H Z, HUANG Z, *et al*. Effect of dietary protein level on growth performance, plasma biochemical indices and flesh quality of grouper (*Epinephelus lanceolatus* × *E. fuscoguttatus*) at two growth stages. South China Fisheries Science, 2017, 13(4): 87–96]

赵亭亭, 张岩, 陈超, 等. 3 种养殖石斑鱼的肌肉营养成分分析与品质评价. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 89–96 [ZHAO T T, ZHANG Y, CHEN C, *et al*. Analysis of nutrient components and evaluation of nutritive quality in flesh of three species of cultured groupers. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(6): 89–96]

周海. 脂肪在中华鲟雌鱼性腺发育过程中的作用及其相关机制研究. 华中农业大学硕士研究生学位论文, 2018 [ZHOU H. Studies on the function and the related mechanism of lipid on gonadal development of female Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*). Master's Thesis of Huazhong Agricultural University, 2018]

BIEL W, BOBKO K, MACIOROWSKI R. Chemical composition and nutritive value of husked and naked oats grain. Journal of Cereal Science, 2009, 49(3): 413–418

DABROWSKI K, ZHANG Y F, KWASEK K, *et al*. Effects of protein-, peptide- and free amino acid-based diets in fish nutrition. Aquaculture Research, 2010, 41(5): 668–683

GAO X Q, FEI F, LIU Z F, *et al*. Lipid content and fatty acid composition in female American shad, *Alosa sapidissima*, at different stages of ovarian development under reared conditions. Aquaculture Research, 2019, 50(2): 439–448

HUANG X X, YIN Y Q, SHI Z H, *et al*. Lipid content and fatty acid composition in wild-caught silver pomfret (*Pampus argenteus*) broodstocks: Effects on gonad development. Aquaculture, 2010, 310(1/2): 192–199

LU S, LIU Y, LI M, *et al*. Gap-free telomere-to-telomere haplotype assembly of the tomato hind (*Cephalopholis sonnerati*). Scientific Data, 2024, 11(1): 1268

MOHAN P J, ANIL M K, GOPALAKRISHNAN A, *et al*. Unraveling the spawning and reproductive patterns of tomato hind grouper, *Cephalopholis sonnerati* (Valenciennes, 1828) from south Kerala waters. Journal of Fish Biology, 2024, 105(1): 186–200

MONTERO D, BASURCO B, NENGAS I, *et al*. Mediterranean fish nutrition. Zaragoza: Ciheam, 2005, 10–11

NICHOLS P D, PETHYBRIDGE H R, ZHANG B W, *et al*. Fatty acid profiles of more than 470 marine species from the Southern Hemisphere. Ecology, 2023, 104(1): e3888

PELLET PL, YOUNG VR. Nutritional evaluation of protein foods. Food and nutrition. Tokyo: United Nations University, 1980, 26–29

YUAN H W, GONG S Y, CHU Z J, *et al*. Effects of low dietary protein level on serum oestradiol, testosterone and sex reversal in rice field eel, *Monopterus albus* (Zuiew). Aquaculture Research, 2011, 42(12): 1752–1763

ZHANG F R, LIU J H, BI Q Z, *et al*. Sex difference in fatty acid composition of six marine teleosts. Journal of Fish Biology, 2022, 101(6): 1606–1610

ZHANG X Y, NING X, HE X X, *et al*. Fatty acid composition analyses of commercially important fish species from the Pearl River estuary, China. PLoS One, 2020, 15(1): e0228276

ZHU Y H, TAN Q S, ZHANG L S, *et al*. The migration of docosahexenoic acid (DHA) to the developing ovary of female zebrafish (*Danio rerio*). Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2019, 233: 97–105

(编辑　冯小花)

Analysis and Evaluation of Muscle Nutrients in *Cephalopholis sonnerati* at Different Sexual Gland Development Stages

LI Xue[1,2], CHEN Zhangfan[2,3], LU Sheng[2,3], WANG Chongwei[2], LI Chaowei[2], CHEN Songlin[2,3]①

(1. *School of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*; 2. *State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao* 266071, *China*; 3. *Laboratory of Marine Fisheries and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao* 266237, *China*)

Abstract The tomato hind, *Cephalopholis sonnerati*, a high-value marine species endemic to the South China Sea, is renowned for its economic importance and market potential. Despite its importance, research on this species has primarily focused on its spawning behavior, reproductive patterns, and genome assembly. This study systematically investigated the gonadal development and muscle nutritional composition of *C. sonnerati* across its gonadal development stages, aiming to elucidate its biological characteristics and nutritional value, thereby supporting its aquaculture development. Histological observations of *C. sonnerati* gonads revealed distinct gonadal development patterns. During the first three months, gonadal development progressed slowly. Four months onward, the development rate increased significantly from 4 to 13 months of age. The gonadal somatic index remained stable during this process but showed a significant increase in broodstock at the mature gonadal stage (stage Ⅴ). Mature gonads exhibited a high degree of development, which supports robust reproductive capability. These findings established a clear timeline for the reproductive maturation of *C. sonnerati* and underscored the importance of tailored aquaculture practices during these critical stages. To further understand the implications of gonadal development on nutritional status, this study analyzed muscle composition across five gonadal development stages (Ⅰ–Ⅴ). Key parameters such as water, protein, and lipid content were evaluated. The results revealed that water and protein content continuously increased from stages Ⅰ to Ⅰ. Lipid content peaked during stage Ⅳ but declined significantly at stage Ⅴ. This pattern indicates heightened metabolic activity during the reproductive phase, when lipids are mobilized to support gonadal development. As primary energy sources, lipids and proteins play a crucial role in sustaining cell growth and reproductive maturation. At stage Ⅴ, *C. sonnerati* achieved its maximum crude protein content (21.27±0.21 g), a value notably higher than that of most other marine fish species (commonly 13.90–21.03 g) and reported groupers. These findings highlight *C. sonnerati* as a premium high-protein marine fish with significant implications for its commercial value. The total amino acid (TAA) content in *C. sonnerati* muscle ranged from (18.20±0.26)% to (19.63±0.06)%, encompassing all seven essential amino acids (EAAs) required for human health. The EAA index of *C. sonnerati* exceeded that of most other economically significant fish species. The ratio of EAAs to TAAs ranged from (39.34±0.34)% to (40.49±0.24)%, closely aligning with the FAO/WHO ideal value of 40%. Similarly, the ratio of EAAs to non-EAAs ranged from (75.98±0.74)% to (80.33±0.85)%, significantly higher than the FAO/WHO recommended standard of 60%. Compared to stages Ⅰ to Ⅳ, nutritional quality peaked in the muscle of stage Ⅴ broodstock. Furthermore, *C. sonnerati* contained six flavor-related amino acids, with their total content ranging from (8.76±0.10)% to (9.24±0.08)%, surpassing levels found in other grouper species. This indicated that *C. sonnerati* not only possessed high nutritional value but also offered superior taste

① Corresponding author: CHEN Songlin, Email: chensl@ysfri.ac.cn

quality. Using amino acid and chemical scores, methionine and cysteine were identified as the first limiting amino acids in *C. sonnerati*, whereas valine was identified as the second limiting amino acid. These findings suggest that the supplementation of aquaculture feed formulations with these amino acids can significantly enhance the growth and reproductive performance of *C. sonnerati*. In addition to amino acids, 25 fatty acids have been identified in the muscle tissues of *C. sonnerati*. Palmitic acid (C16:0) and oleic acid (C18:1) were the most abundant but showed a declining trend during gonadal development, indicating their mobilization and transfer to support oocyte maturation and reproductive energy metabolism. Conversely, docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA) levels peaked during stage Ⅴ, exceeding those reported in most marine fish species. This highlighted their pivotal role in energy supply during reproduction and their potential health benefits for human consumption. Mineral composition analysis revealed that *C. sonnerati* muscle contained five major macro elements: phosphorus, magnesium, potassium, sodium, and calcium. Among the trace elements, zinc and selenium were found in significant quantities across all developmental stages. Selenium content, which was particularly high in stage Ⅴ broodstock, was superior to that in other groupers. Selenium plays a vital role in enhancing immune function, preventing cardiovascular diseases, and improving antioxidant activity. The combination of high levels of selenium and other abundant minerals such as phosphorus and magnesium positioned *C. sonnerati* as an excellent dietary source of essential nutrients. A comprehensive nutritional evaluation of *C. sonnerati* underscored its value as a high-quality marine fish species. Rich in EAAs, fatty acids, and minerals, *C. sonnerati* demonstrated exceptional nutritional and health-promoting properties. Its superior protein content, coupled with the abundance of DHA, EPA, and selenium, makes it particularly suitable for human consumption and a promising candidate for aquaculture promotion. The findings of this study not only emphasize the dietary and economic potential of *C. sonnerati* but also provide critical insights for optimizing aquaculture practices. By understanding nutrient mobilization patterns during gonadal development, aquaculture practitioners can develop stage-specific feeding strategies to enhance growth, reproductive performance, and overall fish quality. Furthermore, the identification of limiting amino acids suggests opportunities to improve feed formulations to support optimal development. In conclusion, *C. sonnerati* is a highly nutritious and economically valuable species with immense potential for sustainable aquaculture. Its rich nutritional profile, superior muscle quality, and protein content make it a promising seafood product. The results of this study serve as a valuable reference for the formulation of efficient aquaculture feeds tailored to the different developmental stages of *C. sonnerati*, contributing to the broader goal of advancing sustainable marine aquaculture.

Key words *Cephalopholis sonnerati*; Muscle; Nutrient composition; Gonadal development