DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251125002
引用格式: 秦搏, 朱源, 张海燕, 等. 工厂化养殖条纹锯鲈肌肉营养成分与食用品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 202–210.
QIN B, ZHU Y, ZHANG HY, *et al*. Analysis of nutritional composition and edible quality of the muscle of factory-farmed *Centropristis striata* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 202–210. (in Chinese with English abstract).

工厂化养殖条纹锯鲈肌肉营养成分与食用品质分析

秦 搏[1], 朱 源[1,2], 张海燕[1], 陈昱光[3], 潘明轩[3], 王 鹏[1], 杨光昕[1], 张忭忭[1], 沈晓盛[1*]

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 3. 江苏海洋生物资源创新中心, 南京 226006)

摘 要: 目的 分析工厂化养殖条纹锯鲈(*Centropristis striata*)肌肉营养成分与食用品质。**方法** 采集工厂化养殖的条纹锯鲈样本, 测定并分析了其基本营养成分、氨基酸、脂肪酸、维生素及矿物质含量。**结果** 条纹锯鲈肌肉中水分、蛋白质、脂肪和灰分含量分别为 71.00%、19.30%、8.60%和 1.30%; 共检出 17 种氨基酸, 氨基酸总量为 18.85%, 其中必需氨基酸占比 41.06%, 必需氨基酸指数为 96.20, 表明其为优质蛋白来源; 脂肪酸组成均衡, 多不饱和脂肪酸占比 34.66%, 二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)和二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)含量分别为 4.14%和 2.98%, *n*-6/*n*-3 多不饱和脂肪酸比值为 2.48:1, 动脉粥样硬化指数和血栓形成指数分别为 1.14 和 0.50; 此外, 该鱼种富含维生素 E (497 μg/100 g)和硒(0.720 mg/kg), 矿物质呈现“高钾低钠”特征(钾含量 3901 mg/kg, 钠钾比 0.116), 特别适合“三高”人群膳食需求。**结论** 条纹锯鲈具有均衡的氨基酸组成, 丰富的不饱和脂肪酸、较高的维生素与矿物质含量, 整体营养价值突出, 是极具开发潜力的优质蛋白源。

关键词: 条纹锯鲈; 营养成分; 氨基酸评价; 脂肪酸组成

Analysis of nutritional composition and edible quality of the muscle of factory-farmed *Centropristis striata*

QIN Bo[1], ZHU Yuan[1,2], ZHANG Hai-Yan[1], CHEN Yu-Guang[3], PAN Ming-Xuan[3], WANG Peng[1], YANG Guang-Xin[1], ZHANG Bian-Bian[1], SHEN Xiao-Sheng[1*]

(1. *East China Sea Fisheries Research Institute*, *Chinese Academy of Fishery Sciences*, *Shanghai* 200090, *China*; 2. *College of Food Science and Technology*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*; 3. *Jiangsu Ocean Biological Resources Innovation Center*, *Jiangsu* 226006, *China*)

ABSTRACT: Objective To analyze the nutritional composition and edible quality of the muscle of *Centropristis*

收稿日期: 2025-11-25
基金项目: 江苏省沿海开发集团自主立项项目(24210080)
第一作者: 秦搏(1990—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为海洋生物繁养技术及品质调控。E-mail: 652650570@qq.com
***通信作者:** 沈晓盛(1977—), 男, 研究员, 主要研究方向为水产品安全与质量控制。E-mail: foodsmc98@126.com

striata cultured in factory. **Methods**　A comprehensive analysis of the basic nutrients, amino acids, fatty acids, vitamins and mineral elements was conducted on farmed *Centropristis striata* under industrialized aquaculture conditions. **Results**　The muscle contained 71.0% moisture, 19.3% crude protein, 8.6% crude fat and 1.3% ash. A total of 17 kinds of amino acids were identified, with a total amino acid content of 18.85%. Essential amino acids accounted for 41.06% of the total amino acids, and the essential amino acid index was 96.20, indicating that *Centropristis striata* was a high-quality protein source. The fatty acid profile was well-balanced, with polyunsaturated fatty acids comprising 34.66% of the total fatty acids. The content of docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA) were 4.14% and 2.98%, respectively, and the *n*-6/*n*-3 polyunsaturated fatty acid ratio was 2.48:1. The atherogenic index and thrombogenic index were 1.14 and 0.50, respectively. In addition, *Centropristis striata* was rich in vitamin E (497 μg/100 g) and selenium (0.720 mg/kg). Its mineral profile exhibited a “high potassium, low sodium” characteristic (potassium: 3901 mg/kg; sodium/potassium ratio: 0.116), suggesting that it is particularly suitable for the dietary needs of individuals with hypertension, hyperlipidemia or diabetes. **Conclusion**　*Centropristis striata* possesses a balanced amino acid profile, abundant unsaturated fatty acids and high levels of vitamins and minerals, demonstrating high nutritional value and strong potential as a high-quality protein source.

KEY WORDS: *Centropristis striata*; nutritional components; amino acid evaluation; fatty acid composition

0　引　言

条纹锯鲈(*Centropristis striata*)俗称“翡翠斑”, 是我国引进并已逐步实现规模化养殖的海水鱼种。其分类上隶属于鲈形目(Perciformes)、鲈科(Serranidae)、石斑鱼亚科(Serraninae)、锯鲈属(*Centropristis*), 在市场上也常被称为美洲黑石斑[1]。由于条纹锯鲈具有广温、广盐和抗逆性强的适应特性, 对环境条件的适应范围较宽[2–6], 因而可在我国绝大多数沿海地区开展养殖。这一优良特性使其被视为具备良好养殖前景的品种, 尤其适合推动工厂化、规模化养殖模式的发展。

目前, 条纹锯鲈在我国的养殖整体仍处于发展阶段, 尽管福建[7]、浙江[8]、山东[9]等沿海地区已实现规模化繁育, 育苗成活率可达到 20%以上, 单次苗种产量可达数百万尾级别[10]。但该鱼种的产业化推广仍面临诸多挑战, 尚未形成如大黄鱼般成熟的产业链。一个重要的原因在于, 目前缺乏对其营养成分与食品品质的系统分析, 这限制了该鱼种在商业推广中的定位与价值挖掘。虽然已有部分营养研究, 但其主要目的在于满足开发本土化饲料原料及专用配合饲料的营养需求[11–12], 而针对工厂化养殖条件下商品鱼的食用营养品质的系统研究仍极为匮乏。

因此, 本研究通过系统测定工厂化养殖条纹锯鲈肌肉的基本营养成分、氨基酸组成与营养价值、脂肪酸组成与健康评价、维生素含量、矿物质元素含量及营养质量, 并与常见经济鱼类进行营养比较。对于明确该鱼种的品质优势、扩大养殖规模、提升市场竞争力具有重要意义, 同时也将为今后该品种的规模化、标准化健康养殖提供关键科学依据。

1　材料与方法

1.1　材　料

实验用条纹锯鲈购自中国水产科学研究院东海水产研究所赣榆基地, 由该基地工厂化养殖获得, 平均规格为(700±20) g。采样时间为 2025 年 5 月。养殖期间, 海水温度控制在 21~25 ℃, 养殖用水盐度维持在 18‰左右。投喂饲料为某品牌商品配合饲料, 其粗蛋白质含量为 50%, 粗脂肪含量为 10%。饲料主要原料包括: 进口鱼粉、磷虾粉、小麦面粉、鱼油、磷酸二氢钙、复合维生素及复合矿物质等。

1.2　方　法

1.2.1　基本营养成分组分测定

水分含量测定: GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法 直接干燥法; 蛋白质含量测定: GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法 凯氏定氮法; 脂肪含量测定: GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第一法 索氏抽提法; 灰分含量测定: GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》; 氨基酸测定: GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》; 脂肪酸测定: GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》; 维生素 A、E: GB 5009.82—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》第一法 反相高效液相色谱法; 维生素 D: GB 5009.296—2023《食品安全国家标准 食品中维生素 D 的测定》第三法 液相色谱-串联质谱法; 微量元素测定: GB 5009.268—2016《食品安全国

家标准 食品中多元素的测定》电感耦合等离子体质谱法; 核苷酸测定: GB 1886.171—2016《食品安全国家标准 食品添加剂 5'-呈味核苷酸二钠》。

1.2.2 品质评价

(1)氨基酸评价

根据联合国粮食及农业组织/世界卫生组织(Food and Agriculture Organization/World Health Organization, FAO/WHO)建议的氨基酸评分标准模式和全鸡蛋蛋白质模式分别按式(1)~(3)计算氨基酸评分(amino acids score, AAS)、化学评分(chemicalscore, CS)和必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)[13]。按式(4)~(6)计算氨基酸比值系数(ratio coefficient of amino acid, RC)[14]、氨基酸比值系数评分(score of RC, SRC)[15]、支链氨基酸(branched-chain amino acids, BCAA)[缬氨酸(valine, Val)、亮氨酸(leucine, Leu)、异亮氨酸(isoleucine, Ile)]与芳香族氨基酸(aromatic amino acids, AAA)[苯丙氨酸(phenylalanine, Phe)、酪氨酸(tyrosine, Tyr)]含量的比值 F[16]:

$$\mathrm{AAS}=\frac{A\mathrm{e}}{A\mathrm{s}} \tag{1}$$

$$\mathrm{CS}=\frac{A\mathrm{e}}{A\mathrm{i}} \tag{2}$$

$$\mathrm{EAAI}=\sqrt[n]{\frac{A}{Ae}\times\frac{B}{Be}\times\ldots\times\frac{I}{Ie}}\times 100 \tag{3}$$

$$\mathrm{RC}=\frac{T}{T\mathrm{x}} \tag{4}$$

$$\mathrm{SRC}=100-100\times\frac{\mathrm{RC}_{\text{标准差}}}{\mathrm{RC}_{\text{均值}}} \tag{5}$$

$$F=\frac{A_{\mathrm{val}}+A_{\mathrm{Ile}}+A_{\mathrm{Leu}}}{A_{\mathrm{Phe}}+A_{\mathrm{Tyr}}} \tag{6}$$

式中: Ae 为样品中必需氨基酸含量; As 为世界卫生组织/粮食及农业组织(World Health Organization/Food and Agriculture Organization, WHO/FAO 评分模式中必需氨基酸含量; Ai 为参考蛋白质或理想模式中必需氨基酸含量; n 为所比较的必需氨基酸个数; A~I 为被测样品每克氮中必需氨基酸的含量, mg/g; Ae~Ie 为全鸡蛋蛋白质每克氮中相应必需氨基酸的含量, mg/g; T 为样品中某一必需氨基酸与 WHO/FAO 评分模式中必需氨基酸含量的比值; Tx 为样品中所有必需氨基酸与模式氨基酸含量比值的平均值。A_{val} 为 Val 含量, mg/g; A_{Ile} 为 Ile 含量, mg/g; A_{Leu} 为 Leu 含量, mg/g; A_{Phe} 为 Phe 含量, mg/g; A_{Tyr} 为 Tyr 含量, mg/g。

(2)脂肪酸评价

参考文献[17]计算动脉粥样硬化指数(index of atherogenicity, IA)和血栓形成指数(index of thrombogenicity, IT)用于评估脂肪酸对人体心血管疾病发生的影响, 如式(7)、(8)所示, 用多烯指数(polyene index, PI)来评价多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)的氧化程度[18], 如式(9)所示:

$$\mathrm{IA}=\frac{C_{12:0}+4\times C_{14:0}+C_{16:0}}{\sum\mathrm{MUFA}+\sum\mathrm{PUFA}} \tag{7}$$

$$\mathrm{IT}=\frac{C_{14:0}+C_{16:0}+C_{18:0}}{0.5\times\sum\mathrm{MUFA}+0.5\times\sum n-6\mathrm{PUFA}+3\times\sum n\text{-}3\mathrm{PUFA}+\frac{\sum n-3\mathrm{PUFA}}{\sum n-6\mathrm{PUFA}}} \tag{8}$$

$$\mathrm{PI}=\frac{C_{20:5}+C_{22:6}}{C_{16:0}} \tag{9}$$

式中: MUFA 为单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid)含量; PUFA 为多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid)含量。

(3)元素评价

食物营养价值的评价有很多种方法, 较常采用的是营养质量指数法(index of nutritional quality, INQ)。本次计算过程中各营养素每日参考摄入量参考 2013 版《中国居民膳食营养素参考摄入量》中 18~50 周岁的推荐值[19], 其中能量以男女推荐量的均值计算, 能量参考摄入量为 9835 kJ[20]。具体计算方法如式(10)所示:

$$\mathrm{INQ}=\frac{\text{某营养素含量 / 该营养素参考摄入量}}{\text{食物能量 / 能量参考摄入量}} \tag{10}$$

1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2019 处理试验数据, 进行平均值和标准偏差等描述性指标的统计, 以平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 基本营养成分结果分析

表 1 比较了条纹锯鲹与其他鱼类的基本营养成分, 对照鱼种选择了习性相近且目前规模化养殖较为成功的 3 种经济鱼类: 石斑鱼、大黄鱼与美国红鱼。其中条纹锯鲹蛋白含量为 19.30%, 与美国红鱼(19.10%)相当, 高于石斑鱼(18.20%)和大黄鱼(17.10%), 表明其具备较好的蛋白质供给能力。灰分含量为 1.30%, 高于其他鱼类(石斑鱼 1.00%、大黄鱼 1.03%、美国红鱼 1.28%), 表明其矿物质含量丰富, 在促进骨骼健康或开发功能性食品方面具有潜在优势。此外, 其脂肪含量达 8.6%, 远高于对比鱼种(石斑鱼 2.50%、大黄鱼 1.61%、美国红鱼 0.57%), 这一组成特点使其比能值(7.80 kJ/g)相对较高, 表明条纹锯鲹单位质量可提供较多的代谢能。其 E/P 值较高, 反映出条纹锯鲹的能量供给效率优于其他鱼种, 这对于高能量需求群体的膳食具有积极意义。综上所述, 条纹锯鲹表现出较高的蛋白质和脂肪含量, 能量密度较为突出, 在营养供给效率的方面具有一定优势。

2.2 氨基酸结果分析

2.2.1 氨基酸组成

条纹锯鲹肌肉的氨基酸组成分析结果见表 2。共检出 17 种氨基酸, 包括 7 种必需氨基酸, 氨基酸总量达 18.85%,

表 1　条纹锯鲈与其他鱼类的基本营养成分比较(n=3)

Table 1　Comparative analysis of basic nutritional composition between *Centropristis striata* and other fish species (n=3)

种类	蛋白质/%	灰分/%	水分/%	脂肪/%	无氮浸出物/%	比能值 Q/(kJ/g)	E/P/(kJ/g)
条纹锯鲈	19.30±0.34	1.30±0.56	71.00±0.21	8.60±0.45	0	7.80	40.20
石斑鱼[21]	18.20	1.00	78.20	2.50	0.10	5.11	28.07
大黄鱼[21]	17.10	1.03	79.06	1.61	1.20	4.51	26.36
美国红鱼[21]	19.10	1.28	78.46	0.57	0.59	4.55	23.82

注: 无氮浸出物 = 100%–(水分+灰分+脂肪+蛋白); 无氮浸出物计算为 0%。这表明其肌肉中可检测的碳水化合物(包括糖类、淀粉等)含量极低, 在实验检测精度范围内可忽略不计。比能值 Q 按 Brett 法的蛋白质 22.64 kJ/g, 脂肪 39.51 kJ/g 换算, Q=(蛋白质含量×22.64)+(脂肪含量×39.51), E/P=Q/蛋白质含量。

表明其肌肉蛋白质含量丰富。根据 WHO/FAO 推荐标准, 人体所需的理想蛋白质的∑EAA/∑TAA 应为 40%、∑EAA/∑NEAA 应在 60%以上[22]。而本研究测得条纹锯鲈的∑EAA/∑TAA 为 41.06%, ∑EAA/∑NEAA 约为 69.67%, 表明其氨基酸组成模式符合优质蛋白标准, 营养均衡性良好。其中, 鱼肉蛋白中 Lys(1.89%)和 Leu(1.61%)含量较为突出, 前者有助于钙吸收和免疫调节, 后者在促进肌肉合成与修复方面具有重要作用[23–24], 这说明其能成为优质的蛋白膳食来源, 适宜广泛人群食用。

同时, 表 2 的结果说明该鱼类鱼肉中 umami AA 占比为 6.90%, 占总氨基酸的 36.60%; sweet AA 占比达 6.08%, 占总氨基酸的 32.25%, 这赋予了鱼肉鲜甜味。而且条纹锯鲈的核苷酸含量高达 0.8 mg/g, 其中呈味核苷酸(如 IMP)与 Glu、Asp 等 umami AA 可产生显著的协同增效作用, 使整体鲜味强度增加。此外, 较高的 Arg(1.20%)含量使其具备潜在的心血管保护和抗氧化功能[25–26], 适合健康饮食需求。从烹饪适应性角度看, 高含量的 Glu 和 Asp 使其在热加工过程中易发生美拉德反应, 产生天然增鲜效果, 因而特别适用于烤制、炖汤等烹饪方式[27]。其 salty AA 占比(26.05%)较低, 可在低盐调味下呈现饱满口感, 符合现代低钠饮食趋势。条纹锯鲈的 MAA 含量达 12.67%, 占其总氨基酸(∑TAA)的 67.21%。意味着其三分之二的氨基酸成分都可能具有一定的生理调节和药用潜力。MAA 与呈味氨基酸的高度重叠, 具备潜在健康益处的同时, 也拥有浓郁而愉悦的风味。综上所述, 条纹锯鲈的氨基酸组成不仅满足营养均衡性要求, 同时赋予了其优良的风味特性和潜在的健康价值, 体现出较高的综合品质与开发潜力。

2.2.2　氨基酸营养评价

表 3 为对条纹锯鲈氨基酸营养评价。AAS 和 CS 从不同的角度反映了蛋白质组成和利用之间的关系, 评分越接近 100%, 表明待测样品中必需氨基酸的种类、数量及比例等越接近人体蛋白或标准鸡蛋蛋白, 其营养价值越高[28–29]。条纹锯鲈肌肉中所有必需氨基酸 AAS 值均大于 1.0, 表明该鱼类的蛋白质符合人体需求模式。其中, Lys (AAS=1.80)保持最高值, 高于 FAO/WHO 参考模式(1.0), 说明其可为谷物蛋白

表 2　氨基酸含量及组成(%)

Table 2　Amino acid content and composition (%)

氨基酸组成	含量
Asp#	1.96
Thr*	0.86
Ser	0.68
Glu#	2.95
Gly#	0.87
Ala	1.12
Cys	0.45
Val*	1.00
Met*#	0.64
Ile*	0.94
Leu*#	1.61
Tyr#	0.75
Phe*#	0.80
Lys*#	1.89
His	0.47
Arg#	1.20
Pro	0.66
∑EAA	7.74
∑NEAA	11.11
∑sweet AA	6.08
∑umami AA	6.90
∑salty AA	4.91
∑MAA	12.67
∑TAA	18.85
∑EAA/∑TAA	41.06
∑EAA/∑NEAA	69.67
∑sweet AA/∑TAA	32.25
∑umami AA/∑TAA	36.60
∑salty AA/∑TAA	26.05
∑MAA/∑TAA	67.21

注: *指必需氨基酸(essential amino acidss, EAA), #指药用氨基酸(medicinal amino acid, MAA); ∑UAA 为鲜味氨基酸总量, ∑MAA 为 MAA 总量, ∑EAA 为 EAA 总量, ∑NEAA 为非必需氨基酸总量, ∑TAA 为氨基酸总量。甜味氨基酸(sweet amino acid, sweet AA): Gly、Ala、Ser、Thr、Lys、Pro; 鲜味氨基酸(umami amino acid, umami AA): Asp、Glu、Gly、Ala; 咸味氨基酸(salty amino acid, salty AA): Asp、Glu。天冬氨酸(aspartic acid, Asp), 苏氨酸(threonine, Thr), 丝氨酸(serine, Ser), 谷氨酸(glutamic acid, Glu), 甘氨酸(glycine, Gly), 丙氨酸(alanine, Ala), 胱氨酸(cystine, Cys), 蛋氨酸(methionine, Met), 赖氨酸(lysine, Lys), 组氨酸(histidine, His), 精氨酸(arginine, Arg), 脯氨酸(proline, Pro)。

的理想互补物, 食用该鱼肉能高效补充小麦、大米等主食中 Lys 的不足。Met 和 Cys (AAS=1.60)具优势, 具有支持抗氧化的功能[30]。而根据 CS 分析, Val 是条纹锯鲨的第一限制性氨基酸, 根据蛋白质互补原理, 搭配杏仁等富含 Val 的食物[31], 可优化其蛋白质营养价值。然而, 其他必需氨基酸均表现优异: Leu (CS=0.98)与 Ile (CS=0.92)接近理想水平(1.0), 而 Lys (CS=1.39)更显著超出参考值(1.0)。

表 3 氨基酸营养评价
Table 3 Amino acid nutritional evaluation

EAA	AAS	CS	EAAI	RC	SRC	*F*
Thr	1.11	0.95		0.84		
Val	1.04	0.79		0.79		
Met+Cys	1.60	0.91		1.21		
Ile	1.22	0.92	96.20	0.92	80.92	2.29
Leu	1.18	0.98		0.90		
Phe+Tyr	1.32	0.89		1.00		
Lys	1.80	1.39		1.36		

EAAI 反映了必需氨基酸含量与标准蛋白质相比接近的程度。当 EAAI>95 时, 为优质蛋白源[32]。条纹锯鲨的 EAAI 为 96.20, 表明其必需氨基酸组成与理想蛋白高度接近, 适合作为人体的高效营养源。RC 表示食物中氨基酸含量与参考模式中氨基酸含量的比值。RC<1 表明该必需氨基酸相对不足; 若 RC>1 则表示该 EAA 相对过剩。条纹锯鲨的 RC 接近 1, 表明其在这些氨基酸上的含量相对丰富。根据 RC 判定, 条纹锯鲨的第一限制氨基酸为 Val, 这与 CS 的判定结果一致。SRC 综合评估了食物中各必需氨基酸与模式氨基酸偏离离散度, SRC 越接近 100, 食物的营养价值相对越高[33]。条纹锯鲨的 SRC 为 80.92, 表明其氨基酸平衡情况相对较好。*F* 为 BCAA 与 AAA 之间的比值, 正常情况下人和哺乳动物的 *F* 为 3.0~3.5, 肝脏损伤时会降至 1.0~1.5, 这是由于 BCAA 具有降低胆固醇和保护肝脏的作用。条纹锯鲨的 *F* 为 2.29, 高于人体肝脏损伤时的水平。因此, 肝病患者适量食用条纹锯鲨可能有助于补充 BCAA, 且对肝脏功能具有一定保护作用。

2.3 脂肪酸结果分析

2.3.1 脂肪酸组成

条纹锯鲨肌肉的脂肪酸组成见表 4。共检出 28 种脂肪酸, 包括 11 种 SFA、7 种 MUFA 和 10 种 PUFA 其含量分布为: PUFA (34.66%)>SFA (33.02%)>MUFA (32.22%), 3 者比例接近 1:1:1, 表明其脂肪酸整体构成较为均衡。

在 SFA 中, C16:0 为主要成分, 该脂肪酸构成有助于形成适宜的口感, 并在热加工过程中通过美拉德反应参与风味的形成[34]。现代药理学研究表明, C16:0 具有一定的抗炎、抗氧化及免疫调节功能, 并在肿瘤防治方面显示出潜在价值[35–36]。C18:0 含量为 5.27%, 低于常见陆生动物脂肪中的比例(牛肉中约占 16.49%~17.98%, 羊肉中为 14.68%~53.28%)[37–38], 因此其生理意义值得进一步关注。此外, 其奇数链脂肪酸(odd-chain fatty acid, OCFA)占总脂肪酸的 0.8%, 该值高于一般养殖鱼类的常见水平(<0.3%)[39]。MUFA 中以 C18:1 为主, 含量达 26.0%。油酸被认为是对心血管健康有益的脂肪, 常见于橄榄油、茶油等健康油脂中[40]。反式脂肪酸(trans fatty acid, TFA)

表 4 脂肪酸组成及含量(%)
Table 4 Fatty acid composition and content (%)

脂肪酸名称	脂肪酸	脂肪酸组成
月桂酸	C12:0	0.0621
十三碳酸	C13:0	0.0147
豆蔻酸	C14:0	3.08
十五碳酸	C15:0	0.232
棕榈酸	C16:0	23.0
十七烷酸	C17:0	0.569
硬脂酸	C18:0	5.27
花生酸	C20:0	0.343
二十一碳酸	C21:0	0.0659
山嵛酸	C22:0	0.187
二十四烷酸	C24:0	0.194
SFA	∑SFA	33.02
顺-9-十四碳一烯酸	C14:1	0.0658
棕榈一烯酸	C16:1	4.83
油酸	C18:1	26.0
反-9-十八碳一烯酸	C18:1n9t	0.13
花生一烯酸	C20:1	0.836
芥酸	C22:1	0.126
二十四碳一烯酸	C24:1	0.235
MUFA	∑MUFA	32.22
亚油酸	C18:2	23.2
亚麻酸	C18:3	2.69
γ-亚麻酸	C18:3n6	0.19
花生二烯酸	C20:2	0.517
顺 11,14,17-二十碳三烯酸	C20:3n3	0.108
双高-γ-亚麻酸	C20:3n6	0.139
花生四烯酸	C20:4n6	0.589
EPA	C20:5n3	2.98
二十二碳二烯酸	C22:2	0.105
DHA	C22:6n3	4.14
PUFA	∑PUFA	34.66
n-6 PUFA 总量	∑*n*-6 PUFA	24.64
n-3 PUFA 总量	∑*n*-3 PUFA	9.92

注: 饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)。

(C18:1n9t)的含量较低, 仅占总脂肪酸的 0.13%, 符合膳食脂肪的基本要求。PUFA 组成分析显示, C18:2 含量最高(23.2%)。其中 C18:2 在加热过程中会参与风味物质形成[41]。如此高比例的 C18:2 通常更常见于葵花籽油、玉米油[42], 会使该鱼类的烹饪产物具备独特的风味。更为重要的是, DHA 含量 4.14%, EPA 含量达 2.98%。研究表明, EPA 与 DHA 在预防心脑血管疾病、改善脂质代谢及促进神经系统健康等方面具有重要作用[43–44]。综上所述, 条纹锯鲹的脂肪酸组成兼具营养与健康价值, 并且会给与其独特的风味, 更加有利于食用者形成味觉记忆, 具有较高的商业推广潜力。

2.3.2　脂肪酸营养评价

为综合条纹锯鲹的脂肪品质, 本研究计算了 IA、IT 及 PI。IA 和 IT 越低, 抑制动脉粥样硬化和血栓的活性越高[45]。根据表 4 结果计算, 条纹锯鲹的 IA 为 1.14, IT 仅为 0.50, 表明其脂肪酸组成可能具有一定的抑制血栓形成的潜力。PI 指数越小, 表明 PUFA 降解及氧化程度越小。条纹锯鲹的 PI 为 0.31, 低于其他经济型海水鱼(大黄鱼 0.73、双棘原黄姑鱼 1.09、浅色黄姑鱼 0.64)[18], 表明其 PUFA 的氧化程度较低, 稳定性相对更好。此外, *n*-6 与 *n*-3 PUFA 的比值为 2.48:1(24.64:9.92≈2.48:1)。该比值低于中国营养学会推荐的膳食摄入比例(4~6:1)[46], 更远低于我国居民目前的实际摄入比例(7.6~8:1)[47]。因此, 食用条纹锯鲹有助于我国居民适当调整 *n*-6 和 *n*-3 PUFA 的摄入比例。

2.4　元素结果分析

条纹锯鲹肌肉的矿物质元素含量及营养质量指数见表 5。分析发现, 其矿物元素组成呈现出“高钾、富硒、低钠”的健康特征。常量元素含量依次为: K>Na>Ca>Mg。其中, K 的含量高达 3901 mg/kg, 而钠钾比低至 0.116, 这种极高的钾含量有助于拮抗现代高钠饮食的负面影响, 对维持正常血压和心血管健康具有积极意义[48]。同时, 其 Se 含量达 0.720 mg/kg, 高于富硒食品标准(>0.15 mg/kg), 已达到富硒(0.2~2.0 mg/kg)标准[49]。Se 作为谷胱甘肽过氧化物酶的重要组成部分, 对增强机体的抗氧化防御系统和免疫功能具有重要作用[50–51]。此外, Zn(4.34 mg/kg)与 Fe(4.87 mg/kg)含量也较为丰富。Zn 与 Fe 作为多种关键酶和蛋白质(如血红蛋白)的辅因子[52], 定期食用条纹锯鲹肌肉可为人体补充这两种易缺乏的微量元素。在安全性方面, 尽管检出砷(0.830 mg/kg), 但考虑到其形态可能以低毒有机砷为主, 且含量均未超过国际安全限值, 初步表明其食用风险可能较低。

采用营养质量指数进行进一步评估。当 INQ>1 时, 表示当热量满足时, 该营养素还富余。条纹锯鲹肌肉中所有主要矿物质的 INQ 均远大于 1。其中, K (INQ=19.66)和 Se (INQ=11.50)的含量尤为突出, 可作为膳食补充这两种营养素的功能性来源; Mg、Ca、Mo 的 INQ 均超过 4.38, 亦属优质供给范围。Zn 与 Fe 也表现出良好的营养密度(INQ>2.8)。尽管钠的 INQ 为 2.78, 但其与钾共同形成了极佳的钠钾比(0.116), 符合现代健康膳食理念。综上所述, 条纹锯鲹是一种矿物质营养密度极高的优质资源, 在提供能量的同时能高效提供多种必需矿物质。

表 5　元素含量及组成

Table 5　Element content and composition

元素	结果/(mg/kg)	参考摄入量/(mg/d)	INQ
Na*	451	1500	2.78
Mg*	253	330	5.60
K*	3901	2000	19.66
Ca*	379	800	4.38
Fe#	4.87	16	2.81
Zn#	4.34	10	3.99
Se#	0.720	0.06	11.50
Mo#	0.568	0.1	5.20
Ti#	5.71	/	/
V#	0.0154	/	/
Co#	0.0100	/	/
As#	0.830	/	/
Sr#	0.711	/	/
Ba#	0.0881	/	/
Tl#	0.00125	/	/

注: *表示常量元素; #表示微量元素; /表示无此项。

2.5　维生素结果分析

条纹锯鲹肌肉中脂溶性维生素含量见表 6。检测结果显示, 维生素 E 含量高达 497 μg/100 g, 该值高于多数常见经济鱼类。研究表明, 维生素 E 具有抗氧化、维持生物膜完整性与稳定和维持红细胞完整性的作用。流行病学研究显示, 维生素 E 与神经退行性疾病、老年黄斑变性和癌症等病症的出现密切相关[53–54]。维生素 D 的含量为 0.896 μg/100 g, 约 35.8 IU/100 g。该含量虽低于鲑鱼等富脂鱼类[55], 但仍显著高于畜禽肉类, 表明条纹锯鲹可作为日常膳食中维生素 D 的一个有益补充来源。维生素 A 则有助于维持正常的视觉功能和免疫系统, 并在癌症预防和治疗中能起到正向的作用[56]。综上, 条纹锯鲹含有较为全面的脂溶性维生素, 虽然单项含量不及纯化补充剂, 但其天然复合形态及良好的生物利用度, 因此食用该鱼类有助于日常摄食过程中维生素的补充。

表 6　维生素含量及组成(μg/100 g)

Table 6　Vitamin content and composition (μg/100 g)

种类	含量
维生素 A	8.451
维生素 E	497.000
维生素 D	0.896

3 讨 论

野生与养殖条纹锯鲈的营养价值差异主要源于食物来源与生长环境的不同。吴雷明等[57]研究表明, 相较于投喂颗粒饲料, 使用鲜活饵料饲养的条纹锯鲈有更高不饱和脂肪酸、umami AA, 但营养组成不稳定, 脂肪含量波动大。据此可推测, 野生个体完全依赖海洋天然饵料, 其肌肉中积累的、来源于海洋食物链的长链 PUFA(如 EPA 与 DHA)可能更为丰富, 同时肉质风味物质(如部分呈味氨基酸)的构成也可能更复杂。然而, 野生群体的营养组成同样受季节、海域及个体差异影响, 稳定性较低。

相比之下, 养殖条纹锯鲈的营养品质高度依赖人工饲料配方。若投喂冰鲜杂鱼, 其营养特征可能接近野生鱼, 但该方式存在饲料效率低、病原风险高、易污染水体等问题[58]。研究表明, 使用棉籽浓缩蛋白替代饲料中高达 80%的鱼粉, 对条纹锯鲈的生长性能、饲料利用效率及鱼体组成均无显著负面影响[59]。这种替代策略不仅有助于降低对海洋鱼粉的依赖和成本, 也为通过饲料配方定向优化脂肪酸与氨基酸组成提供了更大空间。当前养殖模式正向更可控、高效的方向发展。例如, 在工业化循环水系统中, 养殖环境稳定、动物应激小, 配合精准营养投喂, 可实现稳定的营养品质输出。相关研究已对该系统的养殖密度(31.97 kg/m^3)、成活率(90.21%)、成本结构与投资回报周期(3.83 年)进行了详细分析[11]。这类高度可控的体系为品质一致性奠定了基础。

产业层面, 条纹锯鲈养殖正朝着品种化、品牌化的高品质方向推进。例如, 江苏省的相关研究机构与企业合作, 正致力于“翡翠斑(条纹锯鲈)种质扩繁与养殖技术研发”, 重点攻关循环水养殖工艺、专用饲料开发和体色调控等技术[60]。这表明产业前沿不再局限于“养得活、长得快”, 更致力于通过全链条技术管控, 培育出口感、外观、营养俱佳, 具有市场辨识度的产品。与此同时, 现代养殖技术凭借精准的营养调控手段, 能够稳定产出蛋白质含量高、品质优良、安全性强的产品, 从而更有效地满足大规模市场的需求。

4 结 论

本研究通过对养殖条纹锯鲈的系统分析表明, 其肌肉具有优异的营养组成特性。蛋白质含量高达 19.3%, 氨基酸组成合理, EAAI 达 96.20, 符合优质蛋白标准。脂肪酸组成均衡, PUFA 占比 34.66%, 其中 DHA 和 EPA 含量丰富, *n*-6/*n*-3 比例为 2.48:1, 对人体心血管健康有益。同时富含维生素 E (497 μg/100 g)和硒(0.720 mg/kg), 矿物质呈现“高钾低钠”的健康特征。因此, 养殖条纹锯鲈是一种营养价值高、风味优良的海水经济鱼类, 其独特的营养成分均有益于人体健康, 符合“健康中国”战略导向, 这说明其具有良好的市场推广前景和深加工潜力。

参考文献

[1] 雷霁霖, 卢继武. 美洲黑石斑鱼的品种优势和养殖前景[J]. 海洋水产研究, 2007(5): 110–115.
LEI JL, LU JW. Varietal advantages and aquaculture prospects of *Centropristis striata* [J]. Marine Fisheries Research, 2007(5): 110–115.

[2] ALAM S, WATANABE O, CARROLL M. Evaluation of salt-incorporated diets on growth, body composition and plasma electrolytes of black sea bass *Centropristis striata* reared in a semi-pilot scale low salinity recirculating aquaculture system [J]. Aquaculture, 2021, 533: 736102.

[3] COTTON C, WALKER L, RECICAR C. Effects of temperature and salinity on growth of juvenile black sea bass, with implications for aquaculture [J]. North American Journal of Aquaculture, 2003, 65(4): 330–338.

[4] CARROLL M, WATANABE O, ALAM S. Growth performance, feed utilization, and resistance to acute crowding of post-metamorphic stage black sea bass *Centropristis striata* reared at high stocking densities in a pilot recirculating nursery [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2023, 55(1): 312–328.

[5] RUSSO D, WATANABE O, KINSEY T, *et al*. Effects of feeding frequency of live prey on larval growth, survival, resistance to hyposalinity stress, Na^+/K^+ ATPase activity, and fatty acid profiles in black sea bass *Centropristis striata* [J]. Aquaculture, 2017, 470: 56–67.

[6] DAWSON R, ALAM S, WATANABE O, *et al.* Evaluation of poultry by-product meal as an alternative to fish meal in the diet of juvenile black sea bass reared in a recirculating aquaculture system [J]. North American Journal of Aquaculture, 2018, 80(1): 74–87.

[7] 谢书秋. 条纹锯鲈海水网箱养殖技术[J]. 渔业信息与战略, 2014, 29(4): 285–288.
XIE SQ. Marine cage culture technology for *Centropristis striata* [J]. Fishery Information & Strategy, 2014, 29(4): 285–288.

[8] 浙江省舟山市水产研究所“美洲黑石斑规模化人工繁育技术研究”顺利通过现场验收[J]. 水产养殖, 2018, 39(7): 23.
The “Research on large-scale artificial breeding technology of *Centropristis striata*” project by Zhoushan fisheries research institute of Zhejiang Province successfully passed on-site acceptance [J]. Journal of Aquaculture, 2018, 39(7): 23.

[9] 张春禄, 陈超, 李炎璐, 等. 盐度对条纹锯鲈(*Centropristis striata*)仔鱼的活力、开口、摄食的影响[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(2): 77–82.
ZHANG CL, CHEN C, LI YL, *et al.* Effects of salinity on activity, initial feeding, and ingestion of *Centropristis striata* larvae [J]. Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(2): 77–82.

[10] 柳敏海, 彭志兰, 李伟业. 条纹锯鲈工业化循环水养殖成本分析[J]. 中国渔业经济, 2020, 38(4): 65–71.
LIU MH, PENG ZL, LI WY. Cost analysis of industrialized recirculating aquaculture system for *Centropristis striata* [J]. Chinese Fisheries Economics, 2020, 38(4): 65–71.

[11] 曹金凤, 阳钢, 马甡, 等. 不同温度条件下条纹锯鲈耗氧率与窒息点的初步研究[J]. 齐鲁渔业, 2010, 27(12): 1–3, 7.
CAO JF, YANG G, MA S, *et al.* A preliminary study on oxygen consumption rate and asphyxiation point of *Centropristis striata* under different temperature conditions [J]. Shandong Fisheries, 2010, 27(12): 1–3, 7.

[12] 林星. 条纹锯鲈幼鱼配合饲料适宜的蛋白质、脂类含量及能蛋比[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2011, 40(4): 401–406.

LIN X. Suitable dietary protein, lipid levels and energy-to-protein ratio for juvenile *Centropristis striata* [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 40(4): 401–406.

[13] PELLETT PL, YOUNG VR. Nutritional evaluation of protein foods [M]. Japan: The United National University Press, 1980.

[14] 徐鑫, 毛红艳, 韩登旭, 等. 新疆不同玉米品种氨基酸营养价值评价[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 244–249.
XU X, MAO HY, HAN DX, *et al.* Evaluation of amino acid nutritional value of different maize varieties in Xinjiang [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(6): 244–249.

[15] 温立香, 袁冬寅, 欧淑琼, 等. 广西三个产区虫茶主要茶特征成分、挥发性成分分析及氨基酸营养评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 329–336.
WEN LX, YUAN DY, OU SQ, *et al.* Analysis of characteristic components, volatile components and amino acid nutritional evaluation of insect tea from three producing areas in Guangxi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 329–336.

[16] 解春芝, 曾海英, 宋杰, 等. 不同种类腐乳游离脂肪酸组成分析及营养评价[J]. 中国酿造, 2018, 37(2): 39–44.
XIE CZ, ZENG HY, SONG J, *et al.* Analysis of free fatty acid composition and nutritional evaluation in different varieties of sufu [J]. China Brewing, 2018, 37(2): 39–44.

[17] 赵亭亭, 陈超, 邵彦翔. 雌雄条纹锯鲈肌肉营养成分的比较与评价[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(3): 151–159.
ZHAO TT, CHEN C, SHAO YX. Comparison and evaluation of muscle nutrient composition in female and male *Centropristis striata* [J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(3): 151–159.

[18] 颜霖, 施建设, 王俊杰, 等. 养殖条件下 3 种石首鱼科鱼类肌肉营养成分的分析与比较[J]. 渔业信息与战略, 2022, 37(4): 277–285.
YAN L, SHI JS, WANG JJ, *et al*. Analysis and comparison of muscle nutrient composition of three Sciaenidae species under culture conditions [J]. Fishery Information & Strategy, 2022, 37(4): 277–285.

[19] 赵丽云, 刘素, 于冬梅, 等. 我国居民膳食营养状况与《中国食物与营养发展纲要(2014—2020 年)》相关目标的比较分析[J]. 中国食物与营养, 2015, 21(8): 5–7
ZHAO LY, LIU S, YU DM, *et al.* Comparative analysis of dietary nutrition status of Chinese residents and the related goals in *The outline for food and nutrition development in China* (2014—2020) [J]. Food and Nutrition in China, 2015, 21(8): 5–7.

[20] 邓宏玉, 刘芳芳, 张秦蕾, 等. 5 种禽肉中矿物质含量测定及营养评价[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(6): 21–24, 103.
DENG HY, LIU FF, ZHANG QL, *et al.* Determination and nutritional evaluation of mineral contents in five kinds of poultry meat [J]. Food Research and Development, 2017, 38(6): 21–24, 103.

[21] 刘世禄, 王波, 张锡烈, 等. 美国红鱼的营养成分与评价[J]. 海洋水产研究, 2002, 23(2): 25–32.
LIU SL, WANG B, ZHANG XL, *et al.* Nutrient composition and evaluation of *Sciaenops ocellatus* [J]. Marine Fisheries Research, 2002, 23(2): 25–32.

[22] WHO/FAO. Energy and protein requirements [Z]. FAO Nutrition Meeting Report Series, 1973: 52−63.

[23] LUO Y, JUNLI L, LEI Z, *et al*. Lysine methylation modifications in tumor immunomodulation and immunotherapy: Regulatory mechanisms and perspectives [J]. Biomarker Research, 2024, 12(1). 10.1186/s40364-024-00621-w

[24] ATHERTON J, KUMAR V, SELBY A, *et al.* Enriching a protein drink with leucine augments muscle protein synthesis after resistance exercise in young and older men [J]. Clinical Nutrition, 2017, 36(3): 888–895.

[25] BENTER F, YOUSIF M, ALSALEH M, *et al.* Angiotensin-(1-7) blockade attenuates captopril- or hydralazine-induced cardiovascular protection in spontaneously hypertensive rats treated with ng-nitro-l-arginine methyl ester [J]. Journal of Cardiovascular Pharmacology, 2011, 57(5): 559–567.

[26] CUI X, XIE Y, MENG−LEI X, *et al.* Sulfur-containing amino acids enhanced antioxidant of yellow mealworm proteins: GPx4 activation through structural modulation evidenced by spectroscopy method [J]. Food Chemistry: 2025, 28: 102562.

[27] TAN Z, AI-NONG Y. Volatiles from the Maillard reaction of *L*-ascorbic acid with *L*-glutamic acid/*L*-aspartic acid at different reaction times and temperatures [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2011, 7(4): 563–571.

[28] 高欣, 石立冬, 任同军, 等. 野生与养殖鱼类营养与品质差异研究进展[J]. 水产学杂志, 2023, 36(1): 108–117.
GAO X, SHI LD, REN TJ, *et al*. Research progress on differences in nutrition and quality between wild and cultured fish [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2023, 36(1): 108–117.

[29] 周静, 刘敦华, 张同刚, 等. 宁夏羊肉中氨基酸含量的测定与分析[J]. 食品科技, 2014, 39(6): 129–133.
ZHOU J, LIU DH, ZHANG TG*, et al.* Determination and analysis of amino acid content in Ningxia mutton [J]. Food Science and Technology, 2014, 39(6): 129–133.

[30] ZHENG L, ZHAO Y, DONG H, *et al.* Structure-activity relationship of antioxidant dipeptides: Dominant role of Tyr, Trp, Cys and Met residues [J]. Journal of Functional Foods, 2016, 21: 485–496.

[31] 吴月亮, 许森, 董胜君, 等. 不同产区苦杏仁营养成分分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 300–305
WU YL, XU M, DONG SJ, *et al*. Analysis of nutritional components in bitter apricot kernels from different producing areas [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(23): 300–305.

[32] 平泽禹, 郑尧, 郭全友, 等.不同规格的南极磷虾营养品质差异研究[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(3): 82–91.
PING ZY, ZHENG Y, GUO QY, *et al.* Study on nutritional quality differences of Antarctic krill with different specifications [J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2022, 58(3): 82–91.

[33] 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价——氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1998(2): 187–190.
ZHU ST, WU K. Protein nutritional value evaluation—Amino acid ratio coefficient method [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1998(2): 187–190.

[34] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J, *et al.* Aroma compounds identified in cooked meat: A review [J]. Food Research International, 2022, 157: 111385.

[35] WANG X, ZHANG C, BAO N. Molecular mechanism of palmitic acid and its derivatives in tumor progression [J]. Frontiers in Oncology, 2023, 13: 1224125.

[36] WANG J, SHEN D, JIANG J, *et al*. Dietary palmitic acid drives a palmitoyltransferase ZDHHC15-YAP feedback loop promoting tumor metastasis [J]. Advanced Science, 2025, 12(6). 10.1002/advs.202409883

[37] 热米拉·阿帕儿, 邢巍婷, 叶小芳, 等. 不同年龄新疆山羊肉品质、脂肪酸和挥发性风味物质比较分析[J]. 草食家畜, 2025(1): 37–46.
REMILA APER, XING WT, YE XF, *et al*. Comparative analysis of meat quality, fatty acids and volatile flavor compounds in Xinjiang goats of different ages [J]. Grass-Feeding Livestock, 2025(1): 37–46.

[38] 于爱缓, 王雨珊, 高会霞, 等. 日粮添加沙葱对牛肉冷藏保鲜品质及脂

肪酸谱的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(12): 278–286.
YU AH, WANG YS, GAO HX, *et al.* Effects of dietary *Allium mongolicum* Regel supplementation on quality and fatty acid profile of beef during refrigerated storage [J]. Food Science, 2025, 46(12): 278–286.

[39] 张志华, 张达娟, 李泽利, 等. 于桥水库 4 种经济鱼类肌肉营养成分分析与评价[J]. 饲料工业, 2024, 45(16): 92–98.
ZHANG ZH, ZHANG DJ, LI ZL, *et al.* Analysis and evaluation of muscle nutrient composition of four economic fish species in Yuqiao Reservoir [J]. Feed Industry, 2024, 45(16): 92–98.

[40] 余顺波, 陈长艳, 张品, 等. 11 种食用植物油的脂肪酸组成及主要营养成分含量[J]. 贵州农业科学, 2022, 50(7): 113–120.
YU SB, CHEN CY, ZHANG P, *et al.* Fatty acid composition and main nutrient contents of 11 kinds of edible vegetable oils [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 113–120.

[41] ZHANG Z, ZANG M, ZHANG K, *et al.* Effects of phospholipids and reheating treatment on volatile compounds in phospholipid-xylose-cysteine reaction systems [J]. Food Research International, 2021, 139: 109918.

[42] 李童, 刘慧蒙, 周慧雨, 等. 蓝莓籽油与 6 种常用植物油营养成分差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(13): 304–310.
LI T, LIU HM, ZHOU HY, *et al.* Analysis of nutritional component differences between blueberry seed oil and six commonly used vegetable oils [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(13): 304–310.

[43] MICHAELOUDES C, CHRISTODOULIDES S, CHRISTODOULOU P, *et al*. Variability in the clinical effects of the omega-3 polyunsaturated fatty acids DHA and EPA in cardiovascular disease—possible causes and future considerations [J]. Nutrients, 2023, 15(22): 19.

[44] SCHACKY CV. Importance of EPA and DHA blood levels in brain structure and function [J]. Nutrients, 2021, 13(4): 1074.

[45] ULBRICHT TLV, SOUTHGATE DAT. Coronary heart disease: Seven dietary factors [J]. The Lancet, 1991, 338(8773): 985–992.

[46] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Chinese Nutrition Society. Chinese dietary reference intakes [M]. Beijing: Science Press, 2014.

[47] 张坚, 孟丽苹, 姜元荣, 等. 中国成人膳食脂肪酸摄入和食物来源状况分析[J]. 营养学报, 2009, 31(5): 424–427.
ZHANG J, MENG LP, JIANG YR, *et al.* Analysis of dietary fatty acid intake and food sources in Chinese adults [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2009, 31(5): 424–427.

[48] IWAHORI T, UESHIMA H, TORII S, *et al.* Diurnal variation of urinary sodium-to-potassium ratio in free-living Japanese individuals [J]. Hypertension Research, 2017, 40(7): 658–664.

[49] 高进, 韩丽娜, 王永波, 等. 多纹钱蝶鱼肌肉主要营养成分分析及评价[J]. 水产科学, 2024, 43(2): 289–296.
GAO J, HAN LN, WANG YB, *et al.* Analysis and evaluation of main nutritional components in the muscle of *Selenotoca multifasciata* [J]. Fisheries Science, 2024, 43(2): 289–296.

[50] LUO L, WANG Y, ZHANG S, *et al.* Preparation and characterization of selenium-rich polysaccharide from *Phellinus igniarius* and its effects on wound healing [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 264: 117982.

[51] CHI X, WEI W, ZHANG W, *et al*. Sodium selenium enhances the antioxidative activities and immune functions of *Apis mellifera* (Hymenoptera: apidae) and increases the selenium content in royal jelly [J]. Environmental Entomology, 2019, 49(1): 169–177.

[52] 董国力. 微量元素铁、锌、碘、硒、氟与人体健康的相关性探究[J]. 中国当代医药, 2013, 20(6): 183–184.
DONG GL. Correlation between trace elements iron, zinc, iodine, selenium, fluorine and human health [J]. China Modern Medicine, 2013, 20(6): 183–184.

[53] 贾宏信, 苏米亚, 陈文亮, 等. 母乳中的维生素 E 与婴幼儿健康研究进展[J]. 中国乳品工业, 2023, 51(4): 35–40.
JIA HX, SU MY, CHEN WL, *et al*. Research progress on vitamin E in breast milk and infant health [J]. China Dairy Industry, 2023, 51(4): 35–40.

[54] 段娟, 张松波. 维生素 E 在慢性病治疗中的研究进展[J]. 临床合理用药杂志, 2021, 14(28): 178–181.
DUAN J, ZHANG SB. Research progress of vitamin E in the treatment of chronic diseases [J]. Journal of Clinical Rational Drug Use, 2021, 14(28): 178–181.

[55] JAKOBSEN J, SMITH C, BYSTED A, *et al.* Vitamin D in wild and farmed atlantic salmon (*Salmo salar*)—What do we know? [J]. Nutrients, 2019, 11(5): 982–982.

[56] CHAKRABORTY U, CHANDRA A. Bitot's spots, dry eyes and night blindness indicate vitamin A deficiency [J]. The Lancet, 2021, 397(10270): e2.

[57] 吴雷明, 陈超, 王鲁, 等. 不同饵料对条纹锯鱼旨幼鱼生长与肌肉营养成分的影响[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(2): 42–50.
WU LM, CHEN C, WANG L, *et al*. Effects of different diets on growth and muscle nutritional composition of juvenile *Centropristis striata* [J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(2): 42–50.

[58] 刘丽杰, 彭凯. 水产配合饲料替代冰鲜杂鱼的研究进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(21): 141–144.
LIU LJ, PENG K. Research progress on replacement of frozen trash fish by formulated feed in aquaculture [J]. Feed Research, 2021, 44(21): 141–144.

[59] 张静雅, 任幸, 李伟业, 等. 利用棉籽浓缩蛋白替代条纹锯鲈饲料鱼粉的潜力[J]. 水产学报, 2020, 44(11): 1873–1882.
ZHANG JY, REN X, LI WY, *et al*. The potential of replacing fish meal with cottonseed concentrate protein in diets for *Centropristis striata* [J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(11): 1873–1882.

[60] 秦搏. 江苏省沿海开发集团总经理周金阳一行到我所赣榆基地调研[EB/OL]. (2025-03-04) [2026-01-15]. http://www.ecsf.ac.cn/info/1018/14188.htm
QIN B. General manager Zhou Jinyang of Jiangsu coastal development group visited our Ganyu base [EB/OL]. (2025-03-04) [2026-01-15]. http://www.ecsf.ac.cn/info/1018/14188.htm

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)