

DOI: 10.12264/JFSC2022-0372

基于生物标志物和胃含物分析法的马鞍列岛海域大黄鱼摄食习性研究

杨凡^{1,2}, 刘明智^{1,2}, 蒋日进², 印瑞², 李霞芳^{1,2}, 申家荣^{1,2}, 单晓鸾³, 徐汉祥^{1,2}

1. 浙江海洋大学海洋与渔业研究所, 浙江 舟山 316021;
2. 浙江省海洋水产研究所农业农村部重点渔场渔业资源科学观测实验站; 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室, 浙江 舟山 316021;
3. 山东省乳山市海洋经济发展中心, 山东 乳山 264500

摘要: 大黄鱼(*Larimichthys crocea*)作为我国近海重要的经济鱼类, 曾因不合理的捕捞方式导致资源枯竭, 近年来通过增殖放流等一系列保护措施, 大黄鱼资源有恢复的迹象, 为了解大黄鱼资源变动后摄食情况, 于2021年10—11月, 在马鞍列岛海域采集野生大黄鱼样本328尾, 应用胃含物、碳氮稳定同位素和脂肪酸手段进行食性分析。结果显示, 胃含物饵料生物分为10大类, 包括鱼类(Pisces)、长尾类(Natantia)、短尾类(Brachyura)、口足类(Stomatopoda)、磷虾类(Euphausiacea)等, 以及少量的海藻, 其中口足类中的口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)和小型鱼类为大黄鱼重要的饵料生物。碳氮稳定同位素结果显示 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围是 -19.20‰ ~ -15.17‰ , 平均值为 $-16.70\text{‰}\pm 0.82\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围是 8.86‰ ~ 14.74‰ , 平均值为 $10.76\text{‰}\pm 0.93\text{‰}$ 。稳定同位素分析可得饵料生物类群对大黄鱼的食源贡献率由大到小依次为端足类(Amphipoda)、短尾类、长尾类、口足类、鱼类、磷虾类和糠虾类(Mysidacea)。大黄鱼脂肪酸总计检测出31种, 其中饱和脂肪酸含量为40.45%, 单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸含量分别为39.94%和19.61%。特征脂肪酸分析结果显示, 大黄鱼的初始食源包括细菌类(Bacteria)、硅藻类(Diatom)、甲藻类(Dinoflagellates)、褐藻类(Brown algae)、浮游动物(Zooplankton)和底栖生物(Zoobenthos)等。研究表明大黄鱼摄食具有“广食性”和“捕食性”, 此外, 大黄鱼摄食还存在一定的食性转换, 即糠虾、磷虾等浮游动物常见于小个体内, 而龙头鱼等底层鱼类和口虾蛄、中华管鞭虾等甲壳类常见于大个体内。本研究为深入了解大黄鱼的摄食习性, 合理保护大黄鱼野生资源以及制定大黄鱼管理政策提供了基础资料。

关键词: 大黄鱼; 马鞍列岛; 摄食习性; 胃含物; 稳定同位素; 脂肪酸

中图分类号: S965

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)02-0247-12

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)曾经作为我国近海重要的经济鱼类之一, 在20世纪中叶捕捞产量可达 6.4×10^4 t, 但随着敲罟作业、拦捕进港鱼和捕捞越冬场等不合理的捕捞方式导致大黄鱼资源急剧衰退乃至枯竭^[1], 捕捞产量连年下降, 许多重要的产卵场遭到破坏, 已难以形成渔汛。为了遏制东海区大黄鱼资源衰退, 我国开展大黄鱼增

殖放流, 努力恢复大黄鱼资源, 其中了解大黄鱼的摄食习性、阐明其在海洋生态系统中的营养作用, 对研究其资源量变动以及合理制定野生大黄鱼保护措施具有重大意义。

关于大黄鱼摄食习性, 杨纪明等^[2]在1962年对江浙地区大黄鱼食物组成进行了较为详细的分析, 此后徐佳奕等^[3]分析了2010年官井洋地区的

收稿日期: 2022-11-07; 修订日期: 2022-12-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900904, 2019YFD0901204); 长江口及其邻近海域水生生物资源动态监测项目(HYS-CZ-202312).

作者简介: 杨凡(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: aisuk_yangfan@163.com

通信作者: 蒋日进, 高级工程师, 研究方向为渔业资源与生态. E-mail: jiangridge@163.com

大黄鱼食物组成, 上述报道年代久远, 现如今野生大黄鱼价格较为昂贵, 数量又较为稀少, 因此大黄鱼食性等方面研究鲜有报道。另外上述研究中大黄鱼食性分析手段单一, 不能完全反映大黄鱼的摄食信息。稳定同位素以及脂肪酸等生物标志物分析方法的出现丰富了营养生态学研究手段, 能够更好地反映鱼类摄食情况。碳氮稳定同位素通常稳定富集在生物体内, 利用生物体与饵料生物体内的同位素比值可以较为完整地反映消费者的食物来源及组成比例^[4]。不同生物对脂肪酸合成及改造能力有一定的差异, 更重要的是, 特定的脂肪酸只能通过特定的代谢过程产出, 而摄入性的外源脂肪酸通常保守性地存在于生物体的组织内^[5], 因此, 脂肪酸也可以用来指示消费者潜在食物来源并划分生物间营养关系。利用稳定同位素与脂肪酸方法反映蝶水母(*Ocyropsis crystalina*)^[6]、鲷(*Engraulis japonicus*)^[7]等海洋生物食性

方面已经取得了良好的进展。

近些年来通过大规模的增殖放流, 东海区大黄鱼资源略有恢复迹象, 但是对于其资源变动后摄食习性情况的了解较少, 为此本研究以 2021 年 10—11 月马鞍列岛渔业资源调查所采集的大黄鱼为样本, 利用胃含物、碳氮稳定同位素以及脂肪酸方法综合分析大黄鱼食物来源及组成, 探究大黄鱼资源变动后的摄食情况, 为合理保护大黄鱼野生资源等相关研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2021 年 10、11 月在马鞍列岛附近海域采集大黄鱼样品, 采集方式为渔业资源调查和渔民渔获物(图 1)。同步采集可能的饵料生物, 如小型鱼、虾蟹、磷虾糠虾等, 样品的采集、分析与处理均按照《海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查》进行^[8]。

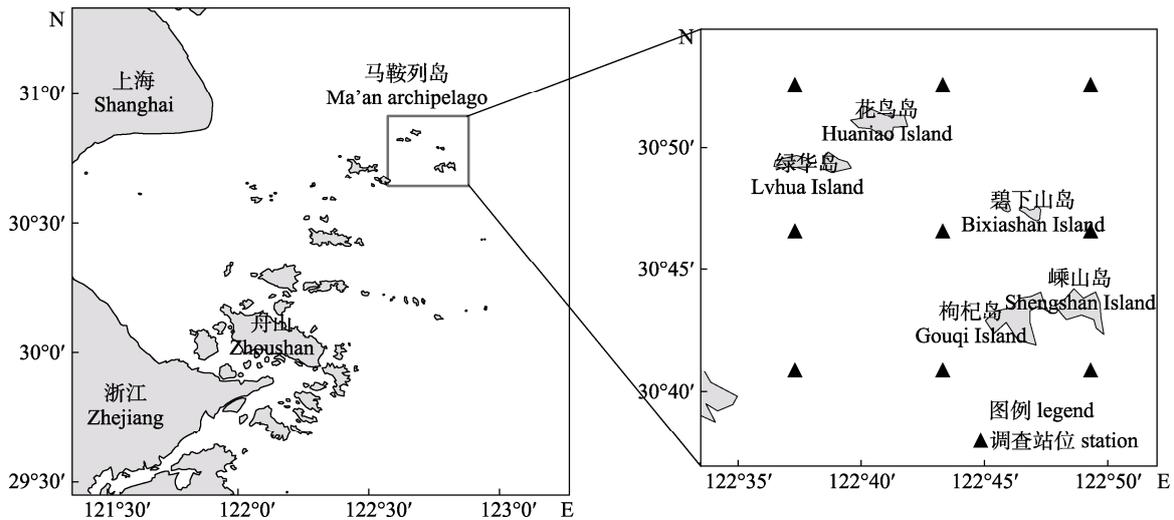


图 1 马鞍列岛调查站位

Fig. 1 Sampling stations in Ma'an archipelago

1.2 胃含物分析

样品冷冻保存带回实验室分析, 测量大黄鱼的体长(mm)、体重(g)等生物学信息。共采集到 328 尾(ind)大黄鱼, 空胃率 58.7%。样品体长范围为 89~311 mm, 平均体长为 171 mm, 体长主要集中于 140~180mm, 占总数的 71.34%; 体重范围为 25.30~404.35 g, 平均体重为 84.96 g。在 Nikon SMZ-2000 解剖显微镜下把饵料生物鉴定到最小

分类单元并计数, 使用 Mettler Toledo PL403 电子天平称重(精密度 0.0001 g), 称重前将水分尽可能吸干。

通过重量百分比(W%)、数量百分比(N%)、出现频率(F%)以及相对重要性指数百分比(IRI%)分析饵料组成^[9], 计算公式如下:

$$W\% = \frac{\text{某饵料生物的重量}}{\text{胃含物总重量}} \times 100\%$$

$$N\% = \frac{\text{某饵料生物的个数}}{\text{胃含物饵料生物总个数}} \times 100\%$$

$$F\% = \frac{\text{含有某饵料生物的实胃数}}{\text{非空胃数}} \times 100\%$$

$$IRI = (N\% + W\%) \times F\% \times 10^4$$

$$IRI\% = IRI \times \frac{100\%}{\sum_{i=1}^n IRI_i}$$

1.3 稳定同位素分析

鱼类取背部肌肉, 虾类取腹部肌肉, 蟹类取螯足肌肉, 磷虾类、糠虾类等小型甲壳动物去除杂质后, 用 10% HCL 酸化处理以消除碳酸盐的影响^[10]。用锡纸包裹样品, 置于 Alpha 1~2 L Dplus 冷冻干燥机中干燥 24 h, 并充分研磨, 其中一部分大黄鱼样品用作脂肪酸分析。所有样品通过 DELTA V Advantage 同位素质谱仪(Isotope Ratio Mass Spectrometer)来测定稳定碳、氮同位素比值。IRI 计算公式为:

$$\delta X = \left[\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] \times 10^3$$

式中, $\delta X = \delta^{13}\text{C}$ 或 $\delta^{15}\text{N}$, $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ 或 ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$; $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定精度 $\leq \pm 0.1\%$, $\delta^{15}\text{N}$ 值的测定精度 $\leq \pm 0.2\%$; R_{sample} 为所测样品的同位素比值; R_{standard} 为标准物质的同位素比值。

1.4 脂肪酸分析

脂肪酸分析按照 GB 5009.168-2016 国家标准^[11], 将研磨后的大黄鱼肌肉样品每份取 1~2 g 置于离心管内, 加入 20 mL 氯仿和 10 mL 甲醇, 在碱性条件下皂化和甲酯化, 生成脂肪酸甲酯, 再加入 6 mL 的 0.9% 氯化钠水溶液摇匀、静置分层、取上清液后, 经毛细管柱气相色谱分析, 采用峰面积归一化法测定脂肪酸组成及其百分比含量。

1.5 数据处理

根据大黄鱼胃含物结果, 把主要饵料分为鱼类、长尾类、短尾类、口足类、磷虾类、糠虾类和端足类(相对重要性指数占比大于 0.5%)。基于大黄鱼和饵料类群的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 使用 R 语言 4.1.3 版本中的“SIAR”模型计算饵料类群对大黄鱼的食源贡献率, 其中模型中 $\delta^{13}\text{C}$ 富集因子为 $(1.0 \pm 0.4)\%$ ^[12], 取各饵料类群不同物种的富集因

子平均值作为 $\delta^{15}\text{N}$ 富集因子, 计算方法参考 Hussey 等^[13]。采用 Spearman 相关分析法检验同位素、特征脂肪酸与体长的关系。数据处理使用 Microsoft Excel2019 和 SPSS24 软件, 站位图的绘制使用 ArcGIS10.2 软件, 其余绘图使用 Origin 2022 软件。

2 结果与分析

2.1 大黄鱼的胃含物组成

对胃含物的分析结果表明, 大黄鱼的摄食较为广泛, 饵料生物包括鱼类、长尾类、短尾类、口足类、磷虾类等 10 大类饵料生物(表 1)。已查明的饵料生物种类为 31 种(包括不可鉴定到种的饵料生物), 其中可以鉴定到种的有 21 种, 主要包括 7 种长尾类和 8 种鱼类。

根据饵料生物的相对重要性指数百分比, 大黄鱼主食口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)、龙头鱼(*Harpadon nehereus*)、细条天竺鲷(*Apogonichthys lineatus*)、发光鲷(*Acropoma japonicum*)、中国毛虾(*Acetes chinensis*)、七星底灯鱼(*Benthosema pterotum*)、中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*), IRI% 分别为 22.44%、13.41%、4.69%、3.71%、1.72%、1.34% 和 1.25%, 其余种类所占比例较小, 均小于 1%。若根据饵料的重量百分比, 龙头鱼占比最高, 达 21.5%, 其次为发光鲷、中华管鞭虾、口虾蛄和细条天竺鲷。按个数百分比, 口虾蛄仍是最重要的饵料生物, 其次为龙头鱼和细条天竺鲷, 其余饵料生物所占比例低于 4%。根据出现频率, 大黄鱼重要的饵料种类依次为口虾蛄、龙头鱼、细条天竺鲷、中国毛虾、七星底灯鱼、发光鲷、太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*)和大眼幼体(*Megalopa*), 其余所占比例小于 5%。此外, 不同体长的大黄鱼, 其胃内饵料生物的出现频率也有所不同, 如体长小于 140 mm 的大黄鱼, 胃内磷虾、糠虾、钩虾、鳃等浮游动物或小型中上层鱼类更多, 而体长大于 200 mm 的大黄鱼胃内更多出现龙头鱼、口虾蛄、中华管鞭虾等底层鱼类或甲壳类。

由此可知, 口虾蛄、龙头鱼及其他小型鱼类为大黄鱼的重要饵料生物, 其次为长尾类和磷虾

表 1 大黄鱼的食物组成
Tab. 1 Diet compositions of *Larimichthys crocea*

饵料种类 prey item	质量百分比 W%	个数百分比 N%	出现频率 F%	相对重要性指数百分比 IRI%
双壳类 Lamellibranchia	0.62	1.62	3.75	0.37
扇贝幼体 Pectinidae sp. larva	0.62	1.62	3.75	0.37
桡足类 Copepoda	0.02	0.54	1.25	0.03
水蚤 <i>Daphnia</i> sp.	0.02	0.54	1.25	0.03
端足类 Amphipoda	0.29	3.24	7.50	0.59
麦杆虫 <i>Caprella</i> sp.	0.18	1.62	3.75	0.30
钩虾 <i>Gammarus</i> sp.	0.11	1.62	3.75	0.29
糠虾类 Mysidacea	0.06	9.83	16.65	7.05
中华节糠虾 <i>Siriella sinensis</i>	+	0.1	0.4	+
不可辨认糠虾 unidentified Mysidacea	0.06	9.73	16.25	7.05
磷虾类 Euphausiacea	0.18	12.43	18.75	5.62
太平洋磷虾 <i>Euphausia pacifica</i>	0.04	3.24	5.00	0.73
中华假磷虾 <i>Pseudeuphausia sinica</i>	0.02	0.54	1.25	0.03
不可辨认磷虾 unidentified Euphausiacea	0.12	8.65	12.50	4.86
长尾类 Natantia	34.80	21.07	41.25	21.93
中华管鞭虾 <i>Solenocera crassicornis</i>	10.20	1.08	2.50	1.25
日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i>	2.21	0.54	1.25	0.15
东海红虾 <i>Plesionika izumiae</i>	3.27	1.08	2.50	0.48
葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	3.61	1.08	2.50	0.52
刀额仿对虾 <i>Parapenaeopsis cultriostris</i>	3.69	0.54	1.25	0.23
细巧仿对虾 <i>Parapenaeopsis tenella</i>	2.77	1.62	3.75	0.73
中国毛虾 <i>Acetes chinensis</i>	1.93	3.24	7.50	1.72
不可辨认虾 unidentified Decapoda	7.12	11.89	20.00	16.85
口足类 Stomatopoda	8.37	11.89	25.00	22.44
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	8.37	11.89	25.00	22.44
短尾类 Brachyura	5.12	11.89	23.75	11.17
大眼幼体 megalopa	0.17	2.16	5.00	0.52
泥足隆背蟹 <i>Carcinoplax vestitus</i>	0.48	0.54	1.25	0.06
不可辨认蟹 unidentified crabs	4.47	9.19	17.50	10.59
鱼类 Pisces	50.53	26.48	51.25	30.74
短吻红舌鲷 <i>Cynoglossus joyneri</i>	2.73	0.54	1.25	0.18
龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i>	21.50	5.41	11.25	13.41
细条天竺鲷 <i>Apogonichthys lineatus</i>	6.26	4.32	10.00	4.69
紫斑舌鲷 <i>Cynoglossus purpureomaculatus</i>	0.90	0.54	1.25	0.08
赤鼻棱鲷 <i>Thryssa kammalensis</i>	1.70	0.54	1.25	0.12
七星底灯鱼 <i>Benthosema pterotum</i>	1.60	3.24	6.25	1.34
发光鲷 <i>Acropoma japonicum</i>	10.68	2.70	6.25	3.71
鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	0.94	0.54	1.25	0.08
不可辨认鱼类 unidentified Pisces	4.22	8.65	12.50	7.13
不可辨认海藻 unidentified Macroalgae	0.01	1.08	1.25	0.06

注: +代表所占比例<0.01.

Note: + indicates the ratio is smaller than 0.01.

糠虾等浮游甲壳类。其余双壳类、端足类和桡足类为偶然性饵料。按饵料的生态习性, 根据其重

量百分比, 可将大黄鱼的饵料生物划分为 3 种生态类群, 即游泳生物(鱼类)、浮游生物(中国毛虾、磷虾类等小型甲壳类)和底栖生物(除中国毛虾以外的长尾类、短尾类、口足类), 它们所占的重量百分比分别为 50.53%、3.1%和 46.36%。

2.2 稳定同位素分析

2.2.1 大黄鱼及其饵料生物的稳定同位素比值

大黄鱼肌肉的碳、氮稳定同位素结果如表 2 所示。大黄鱼的碳、氮同位素范围均比较广泛, 其中 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -19.20‰ ~ -15.17‰ , 最大差值为 4.03‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 8.86‰ ~ 14.74‰ , 最大差值为 5.88‰ 。大黄鱼的碳、氮稳定同位素平均值分别为 $(-16.70\pm 0.82)\text{‰}$ 和 $(10.76\pm 0.93)\text{‰}$ 。随着体长

的增加, 大黄鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈下降趋势, $\delta^{15}\text{N}$ 值呈上升趋势(图 2)。Spearman 相关性检验结果显示, 大黄鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与体长无显著相关性, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 值与体长呈极显著正相关关系($P<0.01$)。

大黄鱼 7 类饵料生物类群的碳、氮稳定同位素结果如表 2 所示。饵料生物类群的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -22.06‰ ~ -15.57‰ , 最大差值为 6.49‰ , 平均值为 $(-18.33\pm 1.89)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 2.88‰ ~ 13.03‰ , 最大差值为 11.15‰ , 平均值为 $(8.23\pm 2.79)\text{‰}$ 。其中, 糠虾类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 平均值仅为 $(-21.74\pm 0.33)\text{‰}$; 短尾类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 平均值仅为 $(-16.55\pm 0.71)\text{‰}$; 端足类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低, 平均值仅为 $(3.07\pm 0.21)\text{‰}$; 口足类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高, 平均值为 $(9.89\pm 1.10)\text{‰}$ 。

表 2 大黄鱼及其主要饵料生物类群的碳、氮稳定同位素比值
Tab. 2 The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ value of *Larimichthys crocea* and its main prey groups

种类 category	样品量 number	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$	
		平均值±标准差 mean±SD	范围 range	平均值±标准差 mean±SD	范围 range
大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	35	-16.70 ± 0.82	$-19.20\sim -15.17$	10.76 ± 0.93	$8.86\sim 14.74$
鱼类 Pisces	14	-18.51 ± 1.83	$-21.03\sim -16.00$	9.71 ± 2.45	$4.48\sim 13.03$
长尾类 Natantia	10	-17.11 ± 1.52	$-19.44\sim -15.57$	9.04 ± 1.31	$6.62\sim 10.38$
短尾类 Brachyura	6	-16.55 ± 0.71	$-17.36\sim -16.06$	8.93 ± 1.88	$7.81\sim 11.11$
口足类 Stomatopod	5	-17.76 ± 0.08	$-17.82\sim -17.68$	9.89 ± 1.10	$9.33\sim 11.26$
磷虾类 Euphausia	4	-19.98 ± 0.13	$-20.14\sim -19.84$	6.27 ± 0.74	$5.51\sim 7.30$
糠虾类 Mysidacea	4	-21.74 ± 0.33	$-22.06\sim -21.40$	3.91 ± 0.41	$3.53\sim 4.35$
端足类 Amphipoda	4	-18.30 ± 0.97	$-19.14\sim -17.24$	3.07 ± 0.21	$2.88\sim 3.29$

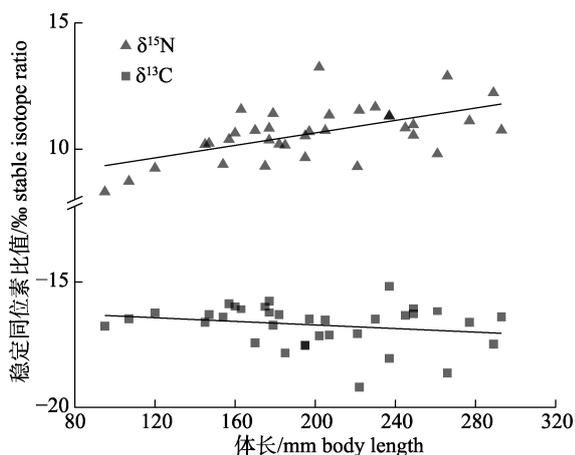


图 2 碳、氮稳定同位素随体长的变化
Fig. 2 Changes of stable isotopes of carbon and nitrogen with body length

2.2.2 食源贡献率

根据大黄鱼及其饵料生物类群的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 使用 SIAR 模型计算各饵料的食源贡献率。分析结果显示, 大黄鱼摄食的主要饵料类群为端足类, 其贡献率平均值为 33.27% , 范围为 11.01% ~ 49.88% , 其次为短尾类和长尾类, 贡献率平均值分别为 26.93% 和 16.68% 。饵料生物贡献率变化范围最大的为短尾类, 范围在 0% ~ 57.64% 之间。长尾类、口足类、鱼类、磷虾类和糠虾类的贡献率范围分别为 0% ~ 56.89% 、 0% ~ 40.19% 、 0% ~ 37.29% 、 0% ~ 29.16% 和 0% ~ 19.28% (图 3)。

2.3 脂肪酸分析

2.3.1 大黄鱼的脂肪酸组成分析

大黄鱼肌肉中共检测出 31 种脂肪酸, 其中饱和脂肪酸(saturated

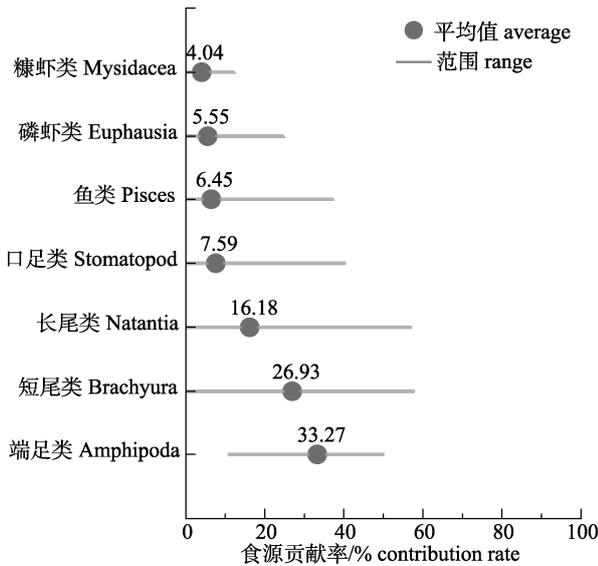


图 3 饵料生物类群对大黄鱼的食物贡献率
Fig. 3 Contribution rate of the major prey groups to *Larimichthys crocea*

fatty acid, SFA)包含 11 种(C12 : 0、C13 : 0、C14 : 0、C15 : 0、C16 : 0、C17 : 0、C18 : 0、C20 : 0、C21 : 0、C22 : 0 和 C23 : 0), 占总脂肪酸含量的 40.45%; 不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acids, UFA)包含 8 种单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFA)(C14 : 1、C16 : 1、C17 : 1、C18 : 1n9t、C18 : 1n9c、C20 : 1n9、C22 : 1n9 和 C24 : 1n9)和 12 种多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)(C18 : 2n6t、C18 : 2n6c、C18 : 3n6、C18 : 3n3、C20 : 2、C20 : 3n6、C20 : 3n3、C20 : 4n6、C22 : 2、C20 : 5n3、C22 : 5n3 和 C22 : 6n3), 分别占总脂肪酸含量的 39.94% 和 19.61%。如图 4 所示, 脂肪酸含量>1%的共有 11 种, 包括 4 种饱和脂肪酸, 2 种单不饱和脂肪酸和 5 种多不饱和脂肪酸; 不饱和脂肪酸含量显著大于饱和脂肪酸; SFA 中含量最高的脂肪酸为 C16 : 0 (27.6%); MUFA 和 PUFA 中含量最高的脂肪酸分别为 C18 : 1n9c (24.64%)和 C22 : 5n3 (8.94%)。

2.3.2 指示食性的特征脂肪酸 特征脂肪酸可以指示生物的食性, 结合已有研究, 整理如表 3 所示。根据大黄鱼的脂肪酸组成, 可知大黄鱼肌肉中主要有 12 种特征脂肪酸, 包括 C14 : 0、C16 : 0、C18 : 1n9c、C20 : 5n3 和 C22 : 6n3 等。其中 C16 : 0、C18 : 1n9c 和 C22 : 6n3 等几种主要的

特征脂肪酸含量较高, 基于特征脂肪酸指示大黄鱼的初始食源包括细菌、硅藻、甲藻、褐藻、浮游动物和底栖生物等。

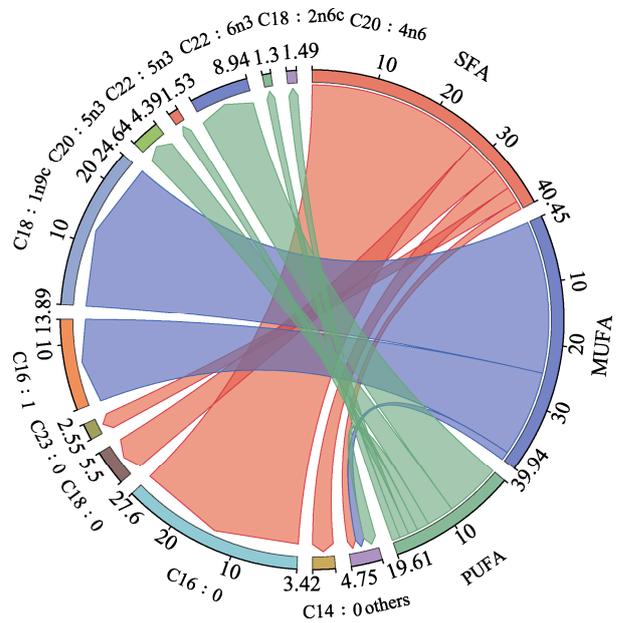


图 4 大黄鱼的脂肪酸组成
Fig. 4 Fatty acid compositions of *Larimichthys crocea*

表 3 大黄鱼肌肉特征脂肪酸及其来源

Tab. 3 Signature fatty acids in muscle of *Larimichthys crocea* and their sources

脂肪酸 fatty acid	含量/% content	食物源 food sources	参考文献 reference
C14 : 0	3.52	硅藻 diatom	[14]
C16 : 0	29.6	硅藻 diatom	[14]
C20 : 5n3	4.39	硅藻 diatom	[14]
C22 : 6n3	8.94	甲藻 dinoflagellates	[15]
C15 : 0+	1.17	细菌 bacteria	[16]
C17 : 0	1.88	细菌 bacteria	[16]
C18 : 1n9c	24.64	褐藻 brown algae	[17]
		浮游动物 zooplankton	
C18 : 2n6+	1.88	陆源植物 terrestrial plant	[18]
C18 : 3n3	1.88	海草 seagrass	[18]
		大型藻类 macroalgae	
C20 : 4n6	1.49	底栖生物 zoobenthos	[19]

表 4 显示了大黄鱼的特征脂肪酸含量与体长的相关性。由表 4 可知, 大黄鱼肌肉组织中有 4 种特征脂肪酸含量与体长之间存在着显著的线性关系, 分别为 C14 : 0、C16 : 0、C22 : 6n3 和 C18 : 2n6+C18 : 3n3。其中 C14 : 0 和 C16 : 0 随着体长的增加而降低, C22 : 6n3 和 C18 : 2n6+

C18 : 3n3 随体长的增加而增加。

表4 大黄鱼体长与特定脂肪酸含量之间的关系
Tab. 4 The relationship between body length and percentage of specific fatty acids in *Larimichthys crocea*

脂肪酸 fatty acid	判定参数 parameter of determination	
	R^2	P
C14 : 0	0.232	0.013*
C16 : 0	0.634	0.002**
C20 : 5n3	0.023	0.817
C22 : 6n3	0.521	0.001**
C15 : 0+C17 : 0	0.141	0.782
C18 : 1n9c	0.043	0.911
C18 : 2n6+C18 : 3n3	0.597	0.007**
C20 : 4n6	0.241	0.342

注: R^2 为回归方程拟合优度的度量; *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$).

Note: R^2 means coefficient of determination; * means significant correlations ($P<0.05$); ** means very significant correlations ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 大黄鱼胃含物组成

通过对大黄鱼胃含物的鉴定分析(表1), 认为大黄鱼摄食具有“广食性”和“捕食性”的特点。本研究共记录到大黄鱼食物组成包含10大类31种, 食物种类繁多、门类复杂, 可见其食性的“广食性”。“广食性”的一个重要原因是其摄食器官形态, 鱼类在长期进化过程中, 形成了一系列适合自身摄食的形态学特征。大黄鱼吻钝尖, 口端位, 口裂大而斜, 这些特点有利于大黄鱼捕食游泳生物; 下颌稍突出, 牙齿细小尖锐, 上颌齿多行^[20], 便于撕咬体表较硬的生物如甲壳类等。通过进一步与前人的研究^[2]对比后发现, 本研究中大黄鱼的食物组成种类出现下降的趋势。胃含物中并未发现石首鱼科中的大黄鱼、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、皮氏叫姑鱼(*Johnius belangerii*)等, 鳀科中的黄鳀(*Setipinna taty*)、刀鲚(*Coilia nasus*)、凤鲚(*Coilia mystus*)等种类也未能发现, 推测其原因主要是饵料生物大量减少。历史上东海区渔业资源种类繁多, 是许多重要经济鱼类的栖息地。随着人类的过度捕捞、水域环境恶化以及栖息地生境破碎化, 表现出渔业资源产量下降, 经济鱼

类出现小型化与低龄化, 生物多样性降低^[21]。这直接导致大黄鱼饵料生物减少, 食物资源匮乏, 大黄鱼捕食压力增大, 这对原本就衰退的大黄鱼野生资源更是雪上加霜。在海洋生态系统中, 饵料生物扮演重要角色, 它通过食物链推动能量流动和物质循环^[22], 在上行效应作用下为高营养级生物提供能量, 某种程度上会影响高营养级生物的数量^[23], 因此饵料生物的减少也是大黄鱼野生资源难以恢复的原因之一。

捕食性体现在其饵料生物主要以游泳生物和底栖生物为主, 这两大类的重量百分比分别为50.53%和46.36%。其中游泳生物以底层或近底层鱼类居多, 如相对重要性指数占比较大的种类: 龙头鱼(13.41%)、细条天竺鲷(4.69%)和发光鲷(3.71%)。而底栖生物主要以长尾类(20.21%)、短尾类(11.17%)和口虾蛄(22.44%)为主, 其中长尾类包括中华管鞭虾、东海红虾(*Plesionika izumiae*)等, 短尾类主要为大眼幼体和蟹类。此外胃含物内还见到如鳀等中上层鱼类, 也偶见浮游动物类, 如端足类和糠虾类。在胃含物分析过程中, 发现龙头鱼等底层鱼类和口虾蛄、中华管鞭虾等底层甲壳类常见于大个体内(如体长>200 mm、160~180 mm), 而糠虾、磷虾等浮游动物以及鳀等小型中上层鱼类常见于小个体内(如体长<140 mm)。可见随着个体生长发育, 大黄鱼由起初的稚鱼到幼鱼再到成鱼, 食性有明显的转换, 其栖息水层也由中上层逐渐过渡到底层水域, 这也与杨纪明等^[2]和郑严等^[24]的结论相符。这种摄食特性有益于保障不同生活史阶段食物的质与量, 更利于该物种满足不同生长发育阶段的营养所需, 这也符合“最佳摄食理论”^[25]。

综合胃含物分析及前人研究成果, 大黄鱼在资源变动后饵料生物种类减少, 多以底栖性生物为食。此外, 随着个体发育, 摄食饵料生物从中上层水域转变到中下层水域, 摄食环境与种类均发生变化。

3.2 大黄鱼及其饵料的碳氮稳定同位素特征

消费者组织内稳定同位素的积累是其生长、摄食等一系列复杂过程综合作用的结果, 其中摄食为消费者提供大量的外源同位素, 更是 $\delta^{13}\text{C}$ 和

$\delta^{15}\text{N}$ 的主要决定因素^[26]。通常, 碳稳定同位素比值范围越大, 表明消费者食源多样性水平越高^[27]。本研究大黄鱼饵料生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度范围达到 6.49‰, 食源多样化, 说明大黄鱼是一种“广食性”鱼类, 这也进一步验证了胃含物结果。关于饵料生物的稳定同位素, 除短尾类外, 其余饵料生物的碳同位素值均小于大黄鱼, 说明该海域可能存在以大黄鱼为主要消费者的食物链。碳通过食物链逐级传递, 碳稳定同位素通过食物链富集而逐渐升高。短尾类主要以蟹类为主, 这类生物营底栖生活, 底栖类生物具有较强的碳同位素富集能力^[28], 因此短尾类碳同位素值稍大于大黄鱼。

$\delta^{15}\text{N}$ 通常在不同营养级之间的富集度为 3.4‰, 可以用来指示消费者在食物链中的营养生态位^[7]。氮稳定同位素在有机体内蛋白质合成时被有限地排出体外, 因此消费者体内的氮稳定同位素值要高于食源^[29]。氮稳定同位素随着大黄鱼体长增加而升高, 说明大黄鱼在不同生长阶段摄食的饵料生物营养级升高, 食性发生转换, 这也与胃含物分析结果保持一致。此外, $\delta^{15}\text{N}$ 值与体长(叉长)的线性关系在一些顶级捕食者如长鳍鲭鲨中有所体现^[30], 这也说明海洋生态系统中高营养级的消费者在不同发育阶段食谱不同, 存在一定的食性转换。

根据饵料生物稳定同位素计算得出, 大黄鱼饵料生物类群按贡献率排序依次为端足类(33.27%)、短尾类(26.93%)和长尾类(16.18%), 胃含物结果中占比较大的鱼类和口足类贡献率则较低, 分别为 6.45%和 7.59%。两者结果有一定差距, 一方面是因为两者反映的摄食时间段不同, 胃含物分析反映的是大黄鱼“瞬时”的摄食结果, 受外界因素影响较大, 而同位素分析可以反映较长时间段摄食的结果^[7]; 另一方面是因为胃含物分析难以定量分析易消化的饵料生物, 得到的结果多为不易消化和容易鉴定的饵料, 并且大黄鱼对不同饵料生物的同化率不同也会导致两者分析结果产生差异^[31]。结合胃含物组成可知, 端足类生物主要是麦杆虫和钩虾。本次样品采集于马鞍列岛海域, 该海域存在大量的人工贻贝养殖区, 养殖区内浮筏海藻是这两类端足生物良好的栖息地。

其原因一方面大黄鱼可能因为饵料不足, 选择摄食这两种端足类生物; 另一方面在胃含物分析实验过程中, 发现端足类多包含于一胃囊状组织中, 因此推测这类食源为大黄鱼的间接性饵料, 这也是端足类饵料生物贡献率较高的主要原因。短尾类饵料生物主要以蟹类为主, 大多数蟹类与成体大黄鱼共栖于中下层水域, 二者在空间生态位难免存在一定重叠, 这就给大黄鱼捕食蟹类创造了有利条件。另外舟山海域蟹类资源种类繁多, 群体数量较大^[32], 加之浙江省对蟹类的大量增殖放流, 为海洋高营养级生物提供了重要的饵料来源。长尾类主要为中华管鞭虾、日本鼓虾、东海红虾等该海域常见种, 这类饵料生物种类多, 数量大^[33], 是“捕食性”鱼类良好的摄食选择。糠虾类、磷虾类、鱼类和口足类的平均贡献率均小于 10%。糠虾类与磷虾类多为幼鱼期饵料^[24], 本研究样本幼鱼期个体较少, 因此可能导致这两类饵料生物贡献率低, 同样, 受样本个体大小所限, 鱼类和口足类饵料贡献率较低。

综合稳定同位素分析, 大黄鱼随着体长增加, 摄食的饵料生物营养级升高, 表现出食性转换, 这与胃含物结果相符。根据饵料生物稳定同位素贡献率可知, 大黄鱼主要摄食端足类、短尾类和长尾类等, 食物组成受到海域内优势种的影响。

3.3 大黄鱼脂肪酸组成

脂肪酸可以为海洋生物的生长发育和繁殖等行为提供能量^[34], 由于其普遍存在性也被用于指示食源。某些脂肪酸只存在于特定的生物中且来源单一, 如 $\text{C}_{20}:1\text{n}-9$ 、 $\text{C}_{22}:1\text{n}-11$ 存在于哲水蚤属^[35], 因此这类脂肪酸可以用于指示特定的饵料生物来源。通常, 初级生产者如浮游植物等对脂肪酸的合成和改造能力较强, 随着营养级增加, 这种能力逐渐减弱。另外, 脂肪酸还具有转化速率快这一特性, 可以记录较长时间的营养变化情况^[14]。正是基于脂肪酸这些特性, 可以用来指示大黄鱼食源。根据脂肪酸分析结果, $\text{C}_{16}:0$ 的总含量达 29.6%, 其作为一种普遍存在且能够被有机体自身合成的一类脂肪酸, 在一些海洋生物如脊尾白虾、小黄鱼体^[36]内占比较高, 因此很难根据这一指标反映食性信息, 然而一些学者认为

C16:0 结合 C14:0、C20:5n3 可以更好地指示硅藻类食源^[14], 结合 C22:6n3 类脂肪酸可以表征甲藻类食源^[15]。综合分析植食性指示脂肪酸, 甲藻类和硅藻类也是大黄鱼的食物来源。由于浮游动物与小型底栖虾类大多摄食浮游植物, 根据最优化觅食理论^[25], 大黄鱼随着体长增长, 摄食由浮游动物为主转为虾蟹与鱼类为主, 因此 C14:0 和 C16:0 会随体长增加而降低。调查海域内浮游植物群落结构主要由甲藻类和硅藻类组成, 其生物量较为丰富^[37], 也为该海域的消费者提供了良好的饵料基础。C18:1n9c 含量仅次于 C16:0, 为 24.64%, 这类脂肪酸在海洋生态系统中被认为是褐藻、浮游动物和肉食性的表征^[17], 也被认定为底栖生态系统中的食物标志^[17], 因此可以推断底栖性鱼类、短尾类等是大黄鱼的重要饵料生物, 这一结果得到胃含物及稳定同位素结论的支持。C15:0+C17:0、C20:4n6、C18:2n6+C18:3n3 含量较低, 分别为 1.17%、1.49% 和 1.88%, 含量均大于 1%, 也可以用作食物标志物的研究^[38]。C15:0+C17:0 用于指示海洋内的浮游细菌, 这些细菌可能来源于悬浮颗粒物或碎屑有机物, 但在本研究中含量较低, 因此推测大黄鱼对浮游细菌的摄食量较小。C20:4n6 可以用来指示底栖食性, 马鞍列岛海域底栖动物种类主要以甲壳类和软体动物为主^[39], 而 C20:4n6 可以通过甲壳类或软体类自身合成^[40], 结合稳定同位素食源贡献率综合分析, 可以判断大黄鱼摄食以口虾蛄为主的底栖动物。C18:2n6+C18:3n3 多用于指示陆源植物, 本次采样海域离岸距离近, 加之紧邻杭州湾, 陆源植物碎屑随水体的注入可能给大黄鱼带来了丰富的饵料。

综合分析脂肪酸组成, 大黄鱼主食底栖类生物, 如鱼类和甲壳类, 选择摄食甲藻类、硅藻类等浮游植物和大型海藻如褐藻类, 也会摄食部分以细菌为主的悬浮颗粒物以及陆源输入的植物。

4 结论

本研究结合多种手段探究了资源变动后野生大黄鱼的摄食习性, 由胃含物分析结果可知大黄鱼具有“广食性”和“捕食性”的特点, 食物来源较为广泛; 基于碳、氮稳定同位素计算饵料生物对

大黄鱼的营养贡献率, 端足类和底栖虾蟹对大黄鱼的贡献率较高, 这与马鞍列岛广泛分布的筏式养殖区有关, 因此大黄鱼摄食习性与栖息环境关系紧密; 通过分析特征脂肪酸可知大黄鱼主要摄食底栖类生物, 如鱼类和甲壳类, 也会摄食少量甲藻类、硅藻类等浮游植物和大型海藻如褐藻类等, 以及部分以细菌为主的悬浮颗粒物和陆源输入的植物。本研究对更好地保护野生大黄鱼提供了食性基础资料, 但还存在不足之处, 如胃含物分析时鉴定种类不完整, 另外采样时间集中于秋季, 且数量有限, 样品体长分布不均匀, 多集中于 140~180 mm, 其余体长的大黄鱼分析较少, 未能根据时间尺度与体长组划分研究大黄鱼食性转换, 因此在后续研究中需要从时间或空间尺度上综合考虑大黄鱼栖息地、环境因子等方面, 更全面地分析野生大黄鱼的摄食生态。

参考文献:

- [1] Yu C G, Yan X J, Jiang Q L, et al. Cause analysis of resources change and reconstruction strategy of *Larimichthys crocea* Daiqu group in the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(4): 616-625. [俞存根, 严小军, 蒋巧丽, 等. 东海岱衢族大黄鱼资源变动的的原因探析及重建策略[J]. 水产学报, 2022, 46(4): 616-625.]
- [2] Yang J M, Zheng Y. Feeding habit and seasonal variation of the food contents of the large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* (Richardson), off chekiang and kiangsu[J]. Studia Marina Sinica, 1962(2): 14-28. [杨纪明, 郑严. 浙江、江苏近海大黄鱼 *Pseudosciaena crocea* (Richardson) 的食性及摄食的季节变化[J]. 海洋科学集刊, 1962(2): 14-28.]
- [3] Xu J Y, Chen J J, Tian F G, et al. Summer diet composition and feeding ecology of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) in Guanjiang Yang[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(1): 94-104. [徐佳奕, 陈佳杰, 田丰歌, 等. 官井洋大黄鱼夏季食物组成和摄食习性[J]. 中国水产科学, 2012, 19(1): 94-104.]
- [4] Zhang J, Wang Y X, Feng H M, et al. Analysis of feeding habits of cultured jellyfish (*Rhopilema esculentum*) in Tongzhou Bay based on fatty acid and stable carbon and nitrogen isotopic analysis[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(1): 25-31. [张健, 王佚兮, 冯慧敏, 等. 基于脂肪酸标记法和稳定同位素技术的通州湾养殖水域海蜇食性分析[J]. 南方水产科学, 2021, 17(1): 25-31.]
- [5] Dalsgaard J, St John M, Kattner G, et al. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment[J]. Advances in

- Marine Biology, 2003, 46: 225-340.
- [6] Jin X, Li C L, Liu M T. The diet of the common medusa species in the East China Sea revealed by fatty acid and stable carbon and nitrogen isotopic analysis[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(3): 486-493. [金鑫, 李超伦, 刘梦坛. 基于脂肪酸标记法和碳氮稳定同位素比值法的东海水母常见种的食性分析[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(3): 486-493.]
- [7] Wang J, Jiang R J, Hu C L, et al. Feeding ecology of *Engraulis japonicus* based on stomach contents and stable isotope[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2035-2044. [王静, 蒋日进, 胡翠林, 等. 基于胃含物分析和稳定同位素技术研究鳀的摄食生态[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2035-2044.]
- [8] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763. 6-2007 Specifications for Oceanographic Survey-Part 6: Marine Biological Survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2008. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T12763. 6-2007 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [9] Cortés E. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: Application to elasmobranch fishes[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(3): 726-738.
- [10] Xu J, Wang Y Y, Wang K, et al. Protocols for sample collection, pretreatment and preservation of aquatic organisms in stable isotope ecology[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(5): 989-997. [徐军, 王玉玉, 王康, 等. 水域生态学中生物稳定同位素样品采集、处理与保存[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(5): 989-997.]
- [11] National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National Food Safety Standards Determination of Fat in Foods: GB5009.124-2016[S]. Beijing: Standards Press Of China, 2017: 1-24. [中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中脂肪酸的测定: GB5009.124-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-24.]
- [12] Zhao Y S, Shan X J, Yang T, et al. Contributions of carbon sources to food webs adjacent to the Miaodao archipelago and their implications for carbon sink fisheries[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 132-141. [赵永松, 单秀娟, 杨涛, 等. 庙岛群岛毗邻海域秋冬季底栖食物网潜在碳来源贡献及对碳汇渔业的思考[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 132-141.]
- [13] Hussey N E, MacNeil M A, McMeans B C, et al. Rescaling the trophic structure of marine food webs[J]. *Ecology Letters*, 2014, 17(2): 239-250.
- [14] Jin X. Preliminary study on the planktonic food web in the Yellow Sea and East China Sea—Based on fatty acid labeling method and stable isotope ratio method of carbon and nitrogen[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011. [金鑫. 黄东海浮游食物网的初步研究——基于脂肪酸标记法和碳氮稳定同位素比值法[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.]
- [15] Dalsgaard J, St John M, Kattner G, et al. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment[J]. *Advances in Marine Biology*, 2003, 46: 225-340.
- [16] Rajendran N, Suwa Y, Urushigawa Y. Distribution of phospholipid ester-linked fatty acid biomarkers for bacteria in the sediment of Ise Bay, Japan[J]. *Marine Chemistry*, 1993, 42(1): 39-56.
- [17] Johns R B, Nichols P D, Perry G J. Fatty acid composition of ten marine algae from Australian waters[J]. *Phytochemistry*, 1979, 18(5): 799-802.
- [18] Napolitano G E, Pollero R J, Gayoso A M, et al. Fatty acids as trophic markers of phytoplankton blooms in the Bahía Blanca Estuary (Buenos Aires, Argentina) and in Trinity Bay (Newfoundland, Canada)[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 1997, 25(8): 739-755.
- [19] Stowasser G, Pond D W, Collins M A. Using fatty acid analysis to elucidate the feeding habits of Southern Ocean mesopelagic fish[J]. *Marine Biology*, 2009, 156(11): 2289-2302.
- [20] Zhao S L, Xu H X, Zhong J S. Zhejiang Marine Ichthyology[M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 2016. [赵盛龙, 徐汉祥, 钟俊生. 浙江海洋鱼类志[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2016.]
- [21] Ni H E, Lu J H. Present utilization situation of main fishery resources in Zhoushan fishing ground[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4): 569-572. [倪海儿, 陆杰华. 舟山渔场主要渔业资源利用现状[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4): 569-572.]
- [22] Solé R V, Montoya J M. Complexity and fragility in ecological networks[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2001, 268(1480): 2039-2045.
- [23] Chen J Y, Wang K, Guo Y L, et al. Food web structure of the Bao'an Lake based on stable carbon and nitrogen isotopes analysis[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(5): 699-706. [陈俊伊, 王康, 郭钰伦, 等. 基于稳定同位素技术的保安湖食物网结构特征研究[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(5): 699-706.]

- [24] Zheng Y, Yang J M. Feeding habits of larvae, juveniles and juveniles of *Pseudosciaena crocea* in Zhejiang offshore[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1965(4): 355-372. [郑严, 杨纪明. 浙江近海大黄鱼仔、稚、幼鱼的食性[J]. 海洋与湖沼, 1965(4): 355-372.]
- [25] Zhu M G, Yang G, Zhang T, et al. Feeding habits of *Acanthogobius ommaturus* in the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(4): 914-923. [朱美贵, 杨刚, 张涛, 等. 长江口斑尾刺虾虎鱼的摄食习性[J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 914-923.]
- [26] MacNeil M A, Skomal G B, Fisk A T. Stable isotopes from multiple tissues reveal diet switching in sharks[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 302: 199-206.
- [27] Yang F, Yin R, Fan J T, et al. Preliminary study on the food web and potential carbon sources of main consumers in Zhongjieshan Islands sea area in Zhoushan, Zhejiang[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(1): 25-37. [杨凡, 印瑞, 范江涛, 等. 中街山列岛海域食物网结构初步研究及主要消费者潜在碳源分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(1): 25-37.]
- [28] Gao C X, Dai X J, Tian S Q, et al. Trophic structure of major fishery organisms in the offshore waters of southern Zhejiang: Insights from stable isotope analysis[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(4): 438-453. [高春霞, 戴小杰, 田思泉, 等. 基于稳定同位素技术的浙江南部近海主要渔业生物营养级[J]. 中国水产科学, 2020, 27(4): 438-453.]
- [29] Ge F. *Modern Ecology*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2008. [戈峰. 现代生态学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [30] Chen Z A, Wu F, Dai X J, et al. Trophic niche partitioning of four pelagic shark species in the tropical Atlantic based on multi-tissue stable isotopes ratios[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2014-2020. [陈子昂, 吴峰, 戴小杰, 等. 基于多组织稳定同位素比值的热带大西洋4种鲨鱼营养生态位分化[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2014-2020.]
- [31] Xu W, Yang R, Chen G, et al. Feeding ecology of *Decapterus maruadsi* in the southern coastal area of Zhejiang based on stomach contents and stable isotope analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(11): 3097-3104. [徐雯, 杨蕊, 陈淦, 等. 基于胃含物和碳、氮稳定同位素研究浙江南部近海蓝圆鲹的摄食生态[J]. 应用生态学报, 2022, 33(11): 3097-3104.]
- [32] Niu W Z, Han L, Yu C G, et al. Crab community structure and its relationship with environmental factors in the eastern sea area of Zhoushan Islands[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(2): 29-38. [牛威震, 韩磊, 俞存根, 等. 舟山群岛东侧海域蟹类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 海洋学报, 2022, 44(2): 29-38.]
- [33] Lu Z H, Xue L J, Zhang L, et al. Assessment of shrimp stock biomass in continental shelf waters of the East China Sea[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(5): 855-862. [卢占晖, 薛利建, 张龙, 等. 东海大陆架虾类资源量评估[J]. 水生生物学报, 2013, 37(5): 855-862.]
- [34] Tocher D R. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2003, 11(2): 107-184.
- [35] Kohlbach D, Graeve M, Lange B A, et al. The importance of ice algae-produced carbon in the central Arctic Ocean ecosystem: Food web relationships revealed by lipid and stable isotope analyses[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(6): 2027-2044.
- [36] Wang T, Gao C X, Wang S Q, et al. Characteristics of fatty acid composition and dietary indication of small yellow croaker in the offshore waters of southern Zhejiang[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(6): 992-1001. [王腾, 高春霞, 王少琴, 等. 浙江南部近海小黄鱼肌肉脂肪酸组成及食源指示分析[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(6): 992-1001.]
- [37] Jin J L, Cai L P, Yu J T. Relationship between eutrophication and phytoplankton in the coastal waters of Zhoushan in summer during 2016—2017[J]. *Ocean Development and Management*, 2020, 37(1): 51-55. [金敬林, 蔡丽萍, 余健涛. 2016—2017年夏季舟山近岸海域富营养化程度与浮游植物多样性[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(1): 51-55.]
- [38] Pollierer M M, Dyckmans J, Scheu S, et al. Carbon flux through fungi and bacteria into the forest soil animal food web as indicated by compound-specific ^{13}C fatty acid analysis[J]. *Functional Ecology*, 2012, 26(4): 978-990.
- [39] Yan R X, Feng M, Wang X B, et al. Temporal and spatial distribution of dominant macrozoobenthos species in the sea area off northern Zhejiang Province[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(5): 1162-1174. [严润玄, 冯明, 王晓波, 等. 浙江北部海域大型底栖动物优势种的时空分布[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(5): 1162-1174.]
- [40] Kelly J R, Scheibling R E, Iverson S J. Fatty acids tracers for native and invasive macroalgae in an experimental food web[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 391: 53-63.

Study on the Feeding ecology of *Larimichthys crocea* in the Ma'an archipelago based on biomarker and stomach content analysis

YANG Fan^{1,2}, LIU Mingzhi^{1,2}, JIANG Rijin², YIN Rui², LI Xiafang^{1,2}, SHEN Jiarong^{1,2}, SHAN Xiaoluan³, XU Hanxiang^{1,2}

1. Marine and Fisheries Research Institute, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China;
2. Zhejiang Marine Fisheries Research Institute; Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources for Key Fishing Grounds, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China; Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fishery Resources of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China;
3. Rushan Marine Economic Development Center, Rushan 264500, China

Abstract: *Larimichthys crocea* is an important economic fish to China's coastal waters. Once, resources were exhausted owing to unreasonable fishing methods such as knocking operations, catching the incoming fish, and rounding up overwintering fish groups. In recent years, through a series of protection measures such as enhancement and release, the resources of *L. crocea* have shown signs of recovery. In order to understand the feeding habits of *L. crocea* after the changes and provide basic information for rational protection of wild resources of *L. crocea*, 328 rare wild *L. crocea* samples were collected from Ma'an archipelago from October to November in 2021. After basic biological determination, the food composition was explored by stomach contents analysis. Based on the stable isotope values of carbon and nitrogen of *L. crocea* and prey groups, the nutritional contributions of prey groups to *L. crocea* were calculated, and the fatty acid content in muscle of *L. crocea* was detected to analyze the feeding characteristics indicated by signature fatty acids. The results showed that there were 10 categories of prey groups, including Pisces, Natantia, Brachyura, Stomatopoda, Euphausiacea, etc. According to the index of relative importance, the most important prey species of *L. crocea* were *Oratosquilla oratoria* (22.44%), *Harpadon nehereus* (13.41%), *Apogonichthys lineatus* (4.69%), and *Acropoma japonicum* (3.71%). Results of the stable isotope analysis showed that $\delta^{13}\text{C}$ of *L. crocea* ranged from -19.20‰ to -15.17‰ , with an average of $(-16.70\text{‰}\pm 0.82\text{‰})$, and the $\delta^{15}\text{N}$ of *L. crocea* ranged from 8.86‰ to 14.74‰ , with an average of $(10.76\text{‰}\pm 0.93\text{‰})$. Spearman's correlation test showed that there was no significant correlation between $\delta^{13}\text{C}$ value and body length of *L. crocea*, while the $\delta^{15}\text{N}$ value was positively correlated with body length ($P < 0.01$). The average contribution rates of prey groups to *L. crocea* in descending order were Amphipoda (33.27%), Brachytail (26.93%), Natantia (16.68%), Stomatopods (7.59%), Pisces (6.45%), Euphausiacea (5.55%), and Mysidacea (4.04%). A total of 31 kinds of fatty acids were detected in *L. crocea*, among which the content of saturated fatty acids was 40.45%, and contents of monounsaturated fatty acids and polyunsaturated fatty acids were 39.94% and 19.61%, respectively. According to the signature fatty acid results, the initial food sources of *L. crocea* include Bacteria, Diatom, Dinoflagellates, Brown algae, Zooplankton, and Zoobenthos. This study explored the feeding habits of wild *L. crocea* after resource change by a combination of various methods. According to the results of stomach contents analysis, *L. crocea* has the characteristics of "mixed feeding" and "predatory" fish, and the food source is relatively wide. According to the stable isotope results for carbon and nitrogen, the contribution rate of Amphipoda, benthic shrimps, and crabs to *L. crocea* was higher, which was related to the suspended farming area widely distributed in Ma'an archipelago; thus the feeding habits of *L. crocea* were closely related to the habitat and environment. Based on the analysis of signature fatty acids, it can be seen that *L. crocea* also ingested terrestrial inputs, algae, bacteria, and phytoplankton. This study provides the basic data of feeding habits of wild *L. crocea*. In order to better protect the resources of *L. crocea*, the feeding ecology of wild *L. crocea* will be more comprehensively analyzed by considering the habitat and environmental factors of *L. crocea* at the temporal and spatial scales in subsequent studies.

Key words: *Larimichthys crocea*; Ma'an archipelago; feeding habit; stomach content; stable isotope; fatty acid

Corresponding author: JIANG Rijin. E-mail: jiangridge@163.com