

文章编号: 1674-5566(2024)01-0202-09

DOI: 10.12024/jsou.20230304132

基于稳定同位素的江苏近海金乌贼摄食生态分析

周敏华¹, 张 虎², 刘必林^{1,3,4,5}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 江苏省海洋水产研究所, 江苏 南通 226007; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306)

摘 要: 为进一步掌握江苏近海金乌贼(*Sepia esculenta*)种群生活史特征, 根据在江苏沿海港口所采集的样本, 利用碳氮稳定同位素分析法对金乌贼的摄食生态及营养生态位进行研究。结果表明, 金乌贼雌、雄群体间 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均不存在显著性差异; 金乌贼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与胴长之间相关性不显著, $\delta^{15}\text{N}$ 值与胴长之间存在显著相关性; 雌性金乌贼营养生态位宽度($\text{SEAc}=0.57\%e^2$)与雄性($\text{SEAc}=0.63\%e^2$)无明显差异, 雌性略大于雄性, 且两者高度重叠(0.62)。同位素聚类分析显示, 可将金乌贼个体分为75~114 mm、115~184 mm和185~204 mm等3个胴长组; 185~204 mm胴长组营养生态位宽度最大($\text{SEAc}=1.77\%e^2$), 75~114 mm胴长组营养生态位宽度最小($\text{SEAc}=0.39\%e^2$); 仅75~114 mm和115~184 mm胴长组间生态位重叠率为中度重叠(0.34), 其余胴长组间生态位重叠率低。分析认为, 金乌贼 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化主要受同位素基线值和金乌贼洄游模式影响, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化主要受金乌贼摄食作用影响; 雌性和雄性金乌贼群体之间食物资源和栖息地利用高度相似; 不同发育阶段的金乌贼在营养生态位上具有明显差异。

关键词: 金乌贼; 江苏近海; 稳定同位素; 营养生态位

中图分类号: S 931.1 **文献标志码:** A

金乌贼(*Sepia esculenta*)隶属于头足纲(Cephalopoda)乌贼目(Sepioidea)乌贼科(Sepiidae)乌贼属(*Sepia*), 生长发育迅速, 为一年生种类^[1-2]。主要分布于我国东海、黄海中部及北部、渤海等海域, 是我国近海重要的经济头足类^[3]。自20世纪80年代起, 由于受到过度捕捞、水环境污染、气候灾害等影响, 我国近海金乌贼资源濒临衰退, 渔获量大幅下降^[4-5]。系统掌握近海金乌贼的摄食生态对于其资源养护、管理及合理开发利用具有重要意义^[6-7]。

摄食生态学的研究内容主要包括摄食习性、食物组成以及营养生态位等方面, 是渔业生物学研究的重点内容。稳定同位素技术(Stable isotope analysis, SIA)近年来被广泛应用于头足类摄食生态研究。其原理是生物圈中的轻、重同位

素在生物体内新陈代谢过程中具有复杂的分馏机制^[8], 因此生物组织中的稳定同位素信息可作为示踪剂指示物质能量在海洋生态系统中的流动^[9-10]。其中 $\delta^{13}\text{C}$ 可用于分析食物来源和栖息环境的变化^[11]; $\delta^{15}\text{N}$ 能够随个体生长和食物网传递作用在各营养级不断富集, 从而反映捕食者的营养级水平^[12-13]; 通过 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值量化评估生物的营养生态位能够探究重叠或分离的群体间关系^[14-15]。

目前对于金乌贼的研究主要集中在人工繁育^[16]、增殖放流^[5]和环境因子胁迫^[17]等领域, 而有关摄食生态的研究较少。本研究利用碳氮稳定同位素分析法对江苏近海金乌贼营养生态位进行研究, 探究江苏近海金乌贼不同胴长组间摄食差异及生态位变动机制, 为进一步掌握江苏近

收稿日期: 2023-03-30 修回日期: 2023-05-28

基金项目: 2022年度江苏省农业生态保护与资源利用专项-渔业生态与资源监测(2022-SJ-061-01); 2021年度江苏省农业生态保护与资源利用专项-渔业生态与资源监测(2021-SJ-110-02)

作者简介: 周敏华(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋生物学。E-mail: zhouminhua65@qq.com

通信作者: 张 虎, E-mail: ahu80@163.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

海金乌贼种群生活史特征提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料来源

实验用金乌贼样品共 142 尾,由在江苏南通、盐城、连云港、吕泗渔场和海州湾沿海港口随机采样捕获,采样范围为 119°E~122°E,31°N~36°N (图 1),采样时间为 2021 年 9—11 月。所有样本通过冷链运回实验室。

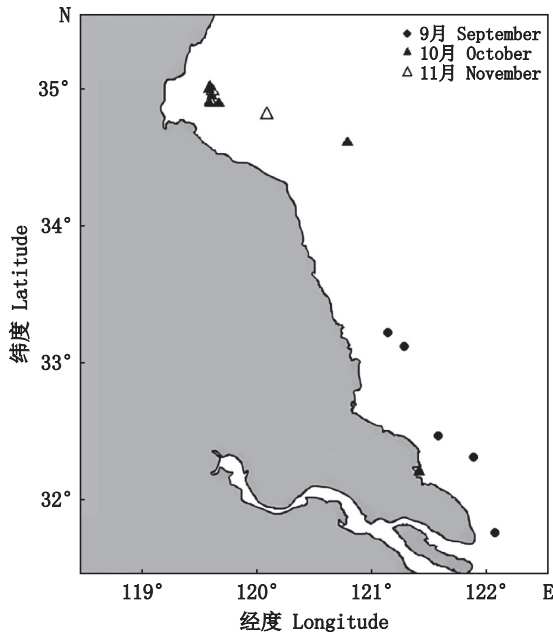


图 1 江苏近海沿岸海域调查站点图

Fig. 1 Sampling stations of survey along coast of Jiangsu Province

1.2 研究方法

1.2.1 生物学测定

将采集的金乌贼样本在实验室解冻后进行基础生物学测定。用皮尺和电子秤分别对个体的胴长(Mantle length)和体质量(Body mass)进行测量,其中胴长精确至 1 mm,体质量精确至 1 g,并以 10 mm 的胴长间隔对样本进行分组。区分样本性别后,对个体性腺成熟度和摄食等级进行鉴定。剪取胴体前端处肌肉约 2 cm×2 cm 并去除表皮,置于 5 mL 离心管中冷冻保存(-20 °C)。

1.2.2 稳定同位素分析

使用超纯水清洗肌肉组织并放入冷冻干燥机(Christ Alpha 1-4)中于-55 °C 干燥至少 24 h。干燥后使用高通量组织研磨器(Scientz-48)将肌肉样品研磨成粉末。称取 1~1.5 mg 粉末并用锡

纸包被后送入稳定同位素分析质谱仪(ISOPRIME 100)和元素分析仪(Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany)中进行稳定同位素测定。测定结果以 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的形式表示,其计算公式如下:

$$\delta X = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

其中: X 为 ^{13}C 或 ^{15}N ; R_{sample} 为样品 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)的值; R_{standard} 为标准物质 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)的值。 $\delta^{13}\text{C}$ 值采用 PDB(美国卡罗莱纳州白垩系 Pee Dee 组地层中美洲拟箭石)为标准物质, $\delta^{15}\text{N}$ 值采用大气氮为标准物质;为保证稳定同位素分析质谱仪测定精度并减少实验结果误差,每放入 20 个待测肌肉样品则插入 3 个标准物质($\delta^{13}\text{C} = -26.98\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N} = 5.96\text{‰}$)以校准碳、氮稳定同位素(分析精度为 0.06‰)。稳定同位素测定在上海海洋大学渔业资源可持续开发教育部重点实验室稳定同位素分析室内进行。

1.3 数据处理

(1)利用 t 检验对不同性别金乌贼 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行显著性分析;利用非参数估计的局部加权回归散点平滑法(Locally weighted regression scatterplot smoother, LOESS)拟合金乌贼肌肉稳定同位素值与胴长间的关系,其中平滑系数(Span)设置为 0.8。

(2)利用 R 语言 SIBER 软件包中的贝叶斯标准椭圆绘制不同性别金乌贼营养生态位图,并计算营养生态位宽度(SEAc)和重叠率。根据 LANGTON^[18]提出的重叠率标准,0~0.29 表示重叠率低,0.30~0.60 表示重叠率中等,大于 0.60 则表示重叠率高。

(3)基于 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值对不同胴长金乌贼进行聚类分析并绘制营养生态位图;计算不同胴长组金乌贼营养生态位宽度(SEAc)和重叠率。所有统计分析均在 SPSS 27.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 肌肉稳定同位素值

本研究共采集 142 尾金乌贼样本,其中雄性 77 尾,雌性 65 尾。雄性金乌贼胴长范围为 83~201 mm (131.84 mm±24.53 mm), $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为-19.17‰~-16.96‰(-18.00‰±0.51‰); $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 9.81‰~12.11‰(10.95‰±0.57‰)。雌性金乌贼胴长范围为 75~196 mm(136.92 mm±24.31 mm),

$\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-19.03\text{‰} \sim -16.88\text{‰}$ ($-18.12\text{‰} \pm 0.59\text{‰}$)。雌、雄间 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值均不存在显著性差异 ($P=0.17>0.05$; $P=0.31>0.05$), 见表1。

表1 金乌贼肌肉样本信息
Tab. 1 Muscle sampling information of *S. esculenta*

性别 Sex	数目 Number/尾	胴长 Mantle length/mm		$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$		$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	
		平均值±标准差 Mean±SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	范围 Range
雄性 Male	77	131.84±24.53	83~201	-18.00±0.51	-19.17~-16.96	10.95±0.57	9.81~12.11
雌性 Female	65	136.92±24.31	75~196	-18.12±0.50	-19.03~-16.88	10.83±0.59	9.80~13.05

2.2 稳定同位素值与胴长关系

在稳定同位素值与胴长的变化关系中, $\delta^{13}\text{C}$ 值与金乌贼胴长不存在显著相关性 ($P>0.05$), $\delta^{15}\text{N}$ 值与胴长之间存在显著相关性 ($P<0.05$)。LOESS 曲线分析显示, 随着胴长的增大 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现一定的

波动, 在胴长 75~124 mm 范围内无显著变化, 在 125~164 mm 范围内逐渐减小, 在 >164 mm 时呈上升趋势; $\delta^{15}\text{N}$ 值随着胴长增大显著升高, 在 75~124 mm 范围内迅速增加, 在 125~164 mm 范围内变化趋势平缓, 在胴长 >164 mm 时迅速升高(图2)。

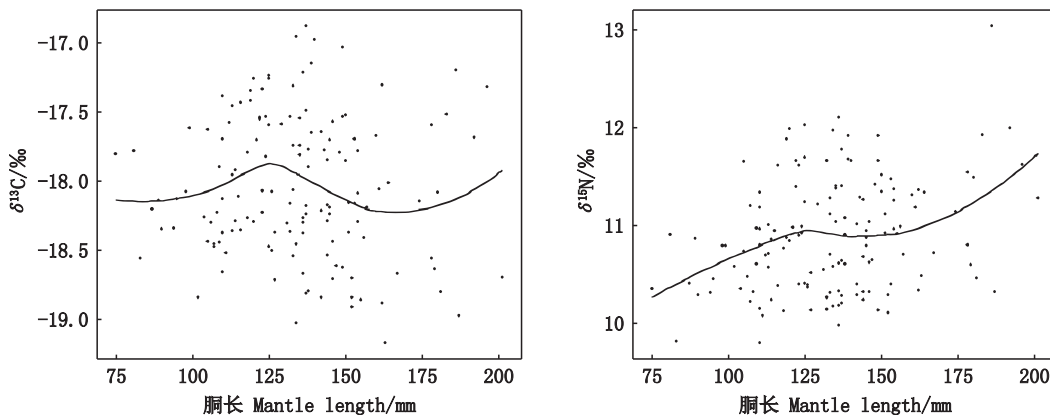


图2 金乌贼各胴长组 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值以及与胴长关系的平滑拟合

Fig. 2 Relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values with each mantle length group and smooth fitting with mantle length of *S. esculenta*

2.3 营养生态位雌雄差异

基于金乌贼肌肉 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值绘制的贝叶斯标准椭圆显示(图3), 雄性金乌贼营养生态位宽度 ($\text{SEAc}=0.57\text{‰}^2$) 与雌性 ($\text{SEAc}=0.63\text{‰}^2$) 无明显差异, 且两者营养生态位高度重叠(0.71)。

2.4 不同胴长组营养生态位对比

基于 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值对不同胴长金乌贼进行聚类分析。结果表明, 聚类后金乌贼样本共分为3个不同胴长组: 75~114 mm、115~184 mm 和 185~204 mm (图4)。营养生态位图显示(图5), 185~204 mm 胴长组营养生态位宽度最大 ($\text{SEAc}=1.77\text{‰}^2$), 其次是 115~184 mm 胴长组 ($\text{SEAc}=0.54\text{‰}^2$), 75~114 mm 胴长组营养生态位宽度最小 ($\text{SEAc}=0.39\text{‰}^2$) (表2); 75~114 mm 和 115~184 mm 胴长组间营养生态位重叠率为 0.34, 属中度重叠; 115~184 mm 和

185~204 mm 胴长组间仅有少量营养生态位重叠, 重叠率为 0.09; 75~114 mm 和 185~204 mm 胴长组间没有营养生态位重叠(表3)。

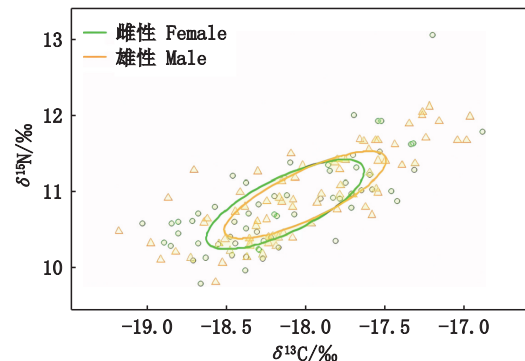


图3 雌、雄金乌贼生态位标准贝叶斯椭圆图
Fig. 3 Trophic niche eclipse area of male and female of *S. esculenta*

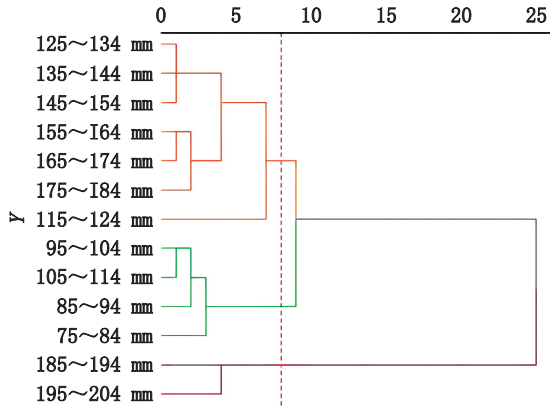


图4 不同胴长金乌贼稳定同位素聚类分析结果
Fig. 4 Results of *S. esculenta* isotope clustering analysis of different mantle length

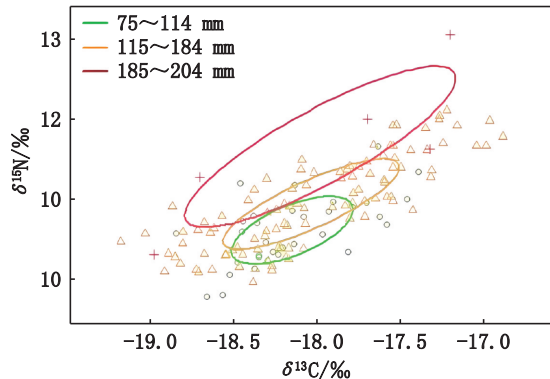


图5 不同胴长组金乌贼营养生态位
Fig. 5 Trophic niche of *S. esculenta* in different mantle length groups

表2 金乌贼不同胴长组营养生态位指标
Tab. 2 Metrics of *S. esculenta* in different mantle length groups

指标 Metrics	组别 Group		
	75~114 mm	115~184 mm	185~204 mm
TA/‰ ²	1.51	2.20	1.58
SEA/‰ ²	0.38	0.53	1.33
SEAc/‰ ²	0.39	0.54	1.77

表3 不同胴长组金乌贼营养生态位宽度(SEAc,‰²)和重叠率
Tab. 3 Trophic SEAc(‰²) and overlap of *S. esculenta* in different mantle length groups

组别 Group	75~114 mm	115~184 mm	185~204 mm
75~114 mm	0.39‰ ²	-	-
115~184 mm	0.34	0.54‰ ²	-
185~204 mm	0	0.09	1.77‰ ²

注:表中“-”处表示此处数据省略。
Notes: The “-” in the table indicates that the data here are omitted.

3 讨论

3.1 稳定同位素值与胴长关系

在海洋生态系统中,生物体内的碳、氮稳定同位素值会受到栖息地同位素基线值和摄食习性的影响^[19]。¹³C在食物网中富集程度低(<1‰),且由于沿海食物网中相对丰富的初级生产力和营养物质流动,^{δ13}C值随着离岸距离的增加呈下降趋势^[20-21]。因此^{δ13}C的变化趋势主要指示头足类的栖息地变动及洄游模式^[22-23]。¹⁵N在海洋食物网中富集程度高(3‰~4‰),因此可用于指示生物的营养位置^[24]。高营养层级的海洋生物通常具有较高的^{δ15}N值^[25]。通过对金乌贼肌肉中的碳、氮稳定同位素信息进行分析,能够了解金乌贼个体生活史中食性及栖息地环境的变化机制。

在金乌贼稳定同位素值与胴长变化关系的研究中,LOESS分析显示,随着胴长的增大^{δ13}C值呈波动起伏,在75~124 mm范围内无显著变化。根据WANG等^[26]和NATSUKARI等^[27]的研究,金乌贼胴长为11~70 mm时为仔稚鱼期,71~120 mm时为未成熟亚成鱼期,胴长>120 mm时为成鱼期。因此本研究中金乌贼胴长75~124 mm范围内^{δ13}C值变化不大,表明仔稚鱼和亚成鱼群体仅在产卵场附近活动,具有相对稳定的食物来源和栖息环境。当金乌贼胴长增大至125~164 mm时^{δ13}C值缓慢下降,这可能主要与成鱼期金乌贼的洄游习性相关。李嘉泳^[28]将金乌贼的生活史分为4个时期,即幼体在越冬场内的生长发育期(12—3月)、成体由越冬场向产卵场的洄游期(4—5月)、成体在沿岸产卵场的结群期(5—7月)及子代幼体自产卵场向越冬场的洄游期(8—11月)。本研究所采用样本的采集时间为9—11月,但由于机体不同组织间的同位素分馏和转化率具有显著差异,同位素信息通常需要几周甚至数月的时间才能在的肌肉组织中反映出来^[29-30],因此本研究认为胴长大小为125~164 mm的样本的^{δ13}C值可能反映了成鱼个体在越冬期时所处栖息地的稳定同位素特征值。WANG等^[26]对其他水域金乌贼的研究中也发现了类似的研究结果。随着个体的生长发育,金乌贼成鱼为满足生殖需求,由越冬场向沿岸产卵场洄游,并在沿岸初级生产力较高的水域集群繁殖。因此当胴长>164 mm时,^{δ13}C值随胴长增大呈缓慢上升趋势。

这种变化机制也在鱼类^[31]和其他头足类^[32]的研究中发现。

此外, LOESS曲线拟合显示 $\delta^{15}\text{N}$ 值随着金乌贼胴长增大而显著升高,且在75~124 mm范围内迅速增加,表明未成熟个体随着体型不断增大,捕食能力提高,其食性结构发生了相应转变,更高营养层级的食物在其中所占据的比例不断增加,以满足自身生长发育和储存能量的需求。WANG等^[26]在分析青岛近海金乌贼稳定同位素时同样发现 $\delta^{15}\text{N}$ 值随着金乌贼胴长的增加而增加,金乌贼的营养水平随着个体发育不断升高。在胴长大小为125~164 mm时, $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化趋于平缓,可能是由于此时成鱼已具备较强的捕食能力,能够精确捕获偏好的食物,有相对稳定的摄食习性。当胴长>164 mm时, $\delta^{15}\text{N}$ 值随金乌贼胴长增大而快速升高,表明此时体型较大的成鱼具有更强的游泳能力和捕食能力,能够摄食更高营养层级的物种,主要的摄食对象从浮游动物和小型甲壳类向鱼类、虾蛄、毛虾等转变^[4]。

3.2 雌、雄群体营养生态位差异

根据生物体内 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值所绘制的营养生态位能够反映生物利用食物资源及栖息地环境的能力强弱,生态位重叠度反映不同物种或不同群体间的营养相似度及竞争关系。本研究中雌、雄金乌贼个体生态位范围无显著差异且高度重叠,表明雌性和雄性群体对食物和栖息地资源的利用高度相似,具有相同的洄游模式,并存在种内竞争。贡艺^[33]研究发现,茎柔鱼雌、雄个体间 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著性差异, $\delta^{15}\text{N}$ 值均值差小于1个营养级,这表明雌、雄个体栖息于相同的环境且食性结构相似。本研究中雌性金乌贼营养生态位宽度($\text{SEAc}=0.63\%o^2$)略大于雄性($\text{SEAc}=0.57\%o^2$),可能是由于雌性个体对食物和能量的需求较高以满足其生殖需求。类似的现象在其他头足类的研究中也观察到^[34]。

3.3 不同发育阶段营养生态位变化

通过稳定同位素技术量化评估生物的营养生态位,不仅可表征不同群体间的相互作用关系,而且能直观反映个体不同发育阶段食物来源和营养水平的相似度及变化模式^[35-36]。本研究基于稳定同位素特征对不同胴长金乌贼进行聚类分析,并将其聚类为3个不同胴长组(75~114 mm、115~184 mm和185~204 mm)。根据聚类结果所

绘制的营养生态位图显示,金乌贼的营养生态位宽度随着个体发育而不断增大。ROSAS-LUIS等^[37]研究发现阿根廷滑柔鱼和巴塔哥尼亚枪乌贼的营养生态位宽度均随着个体生长发育至不同阶段而显著增加。WANG等^[26]也发现了类似的研究结果。金乌贼仔稚鱼-亚成鱼时期体型较小,游泳和捕食能力较弱,仅在沿岸产卵场附近生活,主要以浮游动物和小型甲壳类为食,因此75~114 mm营养生态位宽度较小。而随着体型和角质颚的不断生长,从亚成鱼期过渡至成鱼期的金乌贼具有更强的游泳能力和摄食能力,食性逐渐发生转变,并开始向越冬场所洄游,食物来源范围增大。因此与75~114 mm胴长组相比,115~184 mm的营养生态位宽度较大,且二者存在中等重叠。这一现象在其他头足类的研究中也发现^[38-40]。185~204 mm胴长组的金乌贼相较于其他2个胴长组具有更大的营养生态位宽度,且营养生态位重叠率很小。表明体型较大的成鱼个体能够更灵活地利用栖息地环境,高营养层级的猎物在其食物组成中占比更大。此外,75~114 mm胴长组与185~204 mm之间无营养生态位重叠,表明仔稚鱼与体型较大的成鱼在游泳能力和摄食习性上具有显著差异,二者具有不同的食性结构。FANG等^[38]研究认为,未成熟群体和成熟群体在稳定同位素特征和营养生态位上的显著性差异可能反映了该物种为减少资源竞争并提高生存概率而采取的一种自适应策略。因此,本研究认为金乌贼不同发育期在营养生态位上的分化是个体发育、摄食习性转变及生存策略选择的共同作用结果。

4 结论与展望

(1)金乌贼 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化主要受同位素基线值和金乌贼洄游模式影响。而 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化主要受金乌贼摄食影响。

(2)雌性和雄性金乌贼的营养生态位高度重叠,雌性群体营养生态位宽度略大于雄性。反映了雌性和雄性金乌贼群体之间食物资源和栖息地利用的高度相似,雌性群体具有更高的食物和能量需求。

(3)不同发育阶段的金乌贼在营养生态位上具有明显差异。仔稚鱼-亚成鱼期的金乌贼体型较小,游泳和捕食能力较弱,营养生态位宽度较

小。随着胴长增大,逐渐过渡至成鱼期的金乌贼具有更强的捕食能力和游泳能力,营养生态位宽度较大,高营养水平的猎物在其食物组成中占比增大。

(4)其他头足类的相关研究表明,肌肉脱脂处理前、后的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值具有显著差异,脂质会影响食性研究和营养级计算的精确度^[41-42]。因此,今后分析金乌贼肌肉碳、氮稳定同位素时应首先对样本进行脱脂处理,以提高研究结果的准确性。

感谢袁健美,贲成恺,肖悦悦,祝超文,胡海生,祖凯伟在实验样本采集和实验数据分析等方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] 韦柳枝. 山东日照近海金乌贼生物学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
WEI L Z. Biology of *Sepia esculenta* in the coastal waters of Rizhao[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [2] 刘必林, 顾心雨, 王冰妍, 等. 角质颚色素沉积可视化及其在头足类判别分类中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(4): 785-793.
LIU B L, GU X Y, WANG B Y, et al. Visualization of cephalopod beak pigmentation and its application to the classification of cephalopods [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(4): 785-793.
- [3] 方舟, 俞骏, 杨光明媚, 等. 东海外海金乌贼角质颚与内壳微结构特征及轮纹判读[J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(2): 42-52.
FANG Z, YU J, YANG G M M, et al. Microstructure of beak and cuttlebone and determination of growth increments for *Sepia esculentas* off coast of East China Sea [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2022, 42(2): 46-52.
- [4] 郝振林, 张秀梅, 张沛东. 金乌贼的生物学特性及增殖技术[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 601-606.
HAO Z L, ZHANG X M, ZHANG P D. Biological characteristics and multiplication techniques of *Sepia esculenta* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4): 601-606.
- [5] 李战军, 李伟亚, 王四杰, 等. 山东省金乌贼增殖放流现状与资源养护对策[J]. 水产学杂志, 2019, 32(6): 64-68.
LI Z J, LI W Y, WANG S J, et al. The enhancement & releasing status and maintenance countermeasure of golden cuttlefish (*Sepia esculenta*) in Coastal Shandong Province [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2019, 32(6): 64-68.
- [6] 陈新军. 世界头足类资源开发现状及我国远洋鱿钓渔业发展对策[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 321-330.
CHEN X J. Development status of world cephalopod fisheries and suggestions for squid jigging fishery in China [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 321-330.
- [7] 陈新军, 刘金立, 林东明, 等. 渔业资源学研究发展现状及趋势[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(5): 1168-1179.
CHEN X J, LIU J L, LIN D M, et al. Review of development and trend in fisheries resource science [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(5): 1168-1179.
- [8] 李云凯, 贡艺, 陈新军. 稳定同位素技术在头足类摄食生态学研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1541-1546.
LI Y K, GONG Y, CHEN X J. Applications of stable isotope analysis in the trophic ecology studies of cephalopods [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(5): 1541-1546.
- [9] POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions [J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [10] ROUNICK J S, WINTERBOURN M J. Stable carbon isotopes and carbon flow in ecosystems: measuring ^{13}C to ^{12}C ratios can help trace carbon pathways [J]. BioScience, 1986, 36(3): 171-177.
- [11] 刘必林, 桓梦瑶, 许巍, 等. 鱼类眼睛晶体信息分析与应用研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(2): 287-294.
LIU B L, HUAN M Y, XU W, et al. Review of the information analysis and its application in fish eye lens [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(2): 287-294.
- [12] 李建华, 李云凯, 陈新军, 等. 头足类硬组织的稳定同位素研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(1): 154-160.
LI J H, LI Y K, CHEN X J, et al. Review on stable isotope in hard tissues of cephalopods [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(1): 154-160.
- [13] 林静远, 刘必林, 桓梦瑶, 等. 我国几种常见头足类角质颚碳氮稳定同位素分析[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 394-401.
LIN J Y, LIU B L, HUAN M Y, et al. Carbon and nitrogen stable isotopes analysis of the common cephalopods beaks in the offshore of China [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 394-401.
- [14] SARDENNE F, BODIN N, CHASSOT E, et al. Trophic niches of sympatric tropical tuna in the Western Indian Ocean inferred by stable isotopes and neutral fatty acids [J]. Progress in Oceanography, 2016, 146: 75-88.
- [15] CUCHEROUSET J, VILLÉGER S. Quantifying the multiple facets of isotopic diversity: New metrics for stable isotope ecology [J]. Ecological Indicators, 2015, 56: 152-160.

- [16] 陈令明, 孙成峰, 季本安, 等. 金乌贼室内养殖技术[J]. 科学养鱼, 2022(8): 62-63.
CHEN L M, SUN C F, JI B A, et al. Indoor breeding technology of *Sepia esculenta* [J]. Scientific Fish Farming, 2022(8): 62-63.
- [17] 王兴强, 沈晔, 崔春辉, 等. 低盐胁迫对金乌贼存活、免疫酶活性和基因表达的影响[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2020, 29(2): 6-14.
WANG X Q, SHEN Y, CUI C H, et al. Effects of low salinity stress on the survival, immune enzyme activity and gene expression of *Sepia esculenta* [J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition), 2020, 29(2): 6-14.
- [18] LANGTON R. Diet overlap between atlantic cod, *Gadus morhua*, silver hake, *Merluccius bilinearis*, and fifteen other northwest atlantic finfish [J]. Fishery Bulletin, 1982, 80(4): 745-759.
- [19] 王芮, 陆化杰, 陈静, 等. 基于内壳稳定同位素信息的东海太平洋褶柔鱼摄食与洄游研究[J/OL]. 水产学报, 2023: 1-11. [2023-06-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20230220.1715.010.html>.
WANG R, LU H J, CHEN J, et al. Feeding and migration of *Todarodes pacificus* in the East China Sea based on the stable isotopic information of gladius [J/OL]. Journal of Fisheries of China, 2023: 1-11. [2023-06-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20230220.1715.010.html>.
- [20] RUIZ-COOLEY R I, VILLA E C, GOULD W R. Ontogenetic variation of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ recorded in the gladius of the jumbo squid *Dosidicus gigas*: geographic differences [J]. Marine Ecology Progress, 2010, 399: 187-198.
- [21] 陈静, 陆化杰, 王芮, 等. 基于碳氮稳定同位素的西北印度洋鳶乌贼摄食习性研究[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(5): 1250-1257.
CHEN J, LU H J, WANG R, et al. Feeding ecology of *Sthenoteuthis oualaniensis* based on carbon and nitrogen stable isotope analysis in the northwest indian ocean [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, 53(5): 1250-1257.
- [22] ROOKER J R, DAVID WELLS R J, ADDIS P, et al. Natural geochemical markers reveal environmental history and population connectivity of common cuttlefish in the Atlantic Ocean and Mediterranean Sea [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2020, 17(168): 20200309.
- [23] 马金, 田思泉, 陈新军. 水生动物洄游分布研究方法综述[J]. 水产学报, 2019, 43(7): 1678-1690.
MA J, TIAN S Q, CHEN X J. Review of the research methods for migration and distribution of aquatic animals [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(7): 1678-1690.
- [24] 贡艺, 汪惠琼, 李云凯, 等. 茎柔鱼氨基酸氮稳定同位素特征及营养位置估算[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 402-408.
GONG Y, WANG H Q, LI Y K, et al. Amino acid nitrogen isotopic composition and trophic position estimation of jumbo squid *Dosidicus gigas* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 402-408.
- [25] KEELING R F, KÖRTZINGER A, GRUBER N. Ocean deoxygenation in a warming world [J]. Annual Review of Marine Science, 2010, 2: 199-299.
- [26] WANG L L, LIU Y, ZHANG X M. Stable isotope analysis revealed ontogenetic changes in trophic ecology and migration patterns of *Sepia esculenta* in the Northern Coastal Waters of China [J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 818088.
- [27] NATSUKARI Y, TASHIRO M. Neritic squid resources and cuttlefish resources in Japan [J]. Marine Behaviour and Physiology, 1991, 18(3): 149-226.
- [28] 李嘉泳. 金乌贼 *Sepia esculenta* Hoyle 在黄渤海的结群生殖和洄游[J]. 山东海洋学院学报, 1963, 5(2): 69-108.
LI J Y. On the breeding and migration of the golden cuttlefish, *Sepia esculenta* Hoyle, living in yellow sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 1963, 5(2): 69-108.
- [29] ARGÜELLES J, LORRAIN A, CHEREL Y, et al. Tracking habitat and resource use for the jumbo squid *Dosidicus gigas*: a stable isotope analysis in the Northern Humboldt Current System [J]. Marine Biology, 2012, 159(9): 2105-2116.
- [30] CHEREL Y, FONTAINE C, JACKSON G D, et al. Tissue, ontogenic and sex-related differences in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of the oceanic squid *Todarodes filippovae* (Cephalopoda: Ommastrephidae) [J]. Marine Biology, 2009, 156(4): 699-708.
- [31] WU Z X, ZHANG X M, DROMARD C R, et al. Partitioning of food resources among three sympatric scorpionfish (Scorpaeniformes) in coastal waters of the northern Yellow Sea [J]. Hydrobiologia, 2019, 826(1): 331-351.
- [32] LIU B L, JIN Y, CHEN X J, et al. High individual variability in beak stable isotopes of jumbo squid off Peruvian exclusive economic zone (EEZ) waters in the analysis of migratory and foraging ecology [J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(1): 232-238.
- [33] 贡艺. 基于生物化学示踪物的东太平洋茎柔鱼摄食生态学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
GONG Y. Feeding ecology of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) in the eastern Pacific Ocean inferred by biochemical tracers [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [34] 操亮亮, 刘必林, 李建华. 基于稳定同位素技术的东南

- 太平洋公海茎柔鱼摄食生态分析[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(1): 120-128.
- CAO L L, LIU B L, LI J H. Analysis of feeding ecology of jumbo squid *Dosidicus gigas* in the high seas of southeast Pacific Ocean based on stable isotope technology [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(1): 120-128.
- [35] SEMMENS B X, WARD E J, MOORE J W, et al. Quantifying inter- and intra-population niche variability using hierarchical bayesian stable isotope mixing models [J]. PLoS One, 2009, 4(7): e6187.
- [36] BEARHOP S, ADAMS C E, WALDRON S, et al. Determining trophic niche width: a novel approach using stable isotope analysis [J]. Journal of Animal Ecology, 2004, 73(5): 1007-1012.
- [37] ROSAS-LUIS R, NAVARRO J, MARTÍNEZ-BAENA F, et al. Differences in the trophic niche along the gladius of the squids *Illex argentinus* and *Doryteuthis gahi* based on their isotopic values [J]. Regional Studies in Marine Science, 2017, 11: 17-22.
- [38] FANG S, HAN P W, SHI S W J, et al. Ontogenetic variation of trophic habitat for sympatric benthic octopods in East China Sea derived from isotopic analysis on beaks [J]. Fisheries Research, 2021, 238: 105902.
- [39] 张嘉琦, 刘必林. 基于碳氮稳定同位素技术的西北太平洋富山武装乌贼和相似钩腕乌贼的生态位变化研究 [J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(3): 515-523.
- ZHANG J Q, LIU B L. Comparative analysis of feeding ecology of two small cephalopods in the Northwest Pacific Ocean [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2023, 38(3): 515-523.
- [40] CARLISLE A B, GOLDMAN K J, LITVIN S Y, et al. Stable isotope analysis of vertebrae reveals ontogenetic changes in habitat in an endothermic pelagic shark [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2015, 282(1799): 20141446.
- [41] 刘娜, 刘必林. 脂类去除对赤道外海茎柔鱼软组织稳定同位素的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(1): 155-160.
- LIU N, LIU B L. Influence of lipid removal on stable isotope analysis of soft tissues of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off equatorial waters [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(1): 155-160.
- [42] 张宇美. 基于碳氮稳定同位素的南海鳶乌贼摄食生态与营养级研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014.
- ZHANG Y M. Feeding habits and trophic level of purpleback flying squid, *Sthenoethis oualaniensis* based on carbon and nitrogen stable isotope analysis in the South China Sea [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2014.

Feeding ecology of *Sepia esculenta* in Jiangsu coastal waters based on stable isotopes analysis

ZHOU Minhua¹, ZHANG Hu², LIU Bilin^{1,3,4,5}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Jiangsu Marine Fisheries Research Institute, Nantong 226007, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to further understand the characteristics of the life history of the *Sepia esculenta* population in the coastal waters of Jiangsu, the feeding ecology and nutritional niche of the *Sepia esculenta* were studied by using the carbon and nitrogen stable isotope analysis method based on the samples collected in the coastal ports of Jiangsu. The results showed that there was no significant difference in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values between male and female populations of *Sepia esculenta*; There was a significant correlation between them; the nutritional niche width of male *Sepia esculenta* ($\text{SEAc}=0.57\%o^2$) was not significantly different from that of females ($\text{SEAc}=0.63\%o^2$), and females were slightly larger than males, and both are highly overlapping (0.62). Isotopic cluster analysis showed that *Sepia esculenta* individuals could be divided into three mantle length groups of 75–114 mm, 115–184 mm and 185–204 mm; The niche width of the 114 mm mantle length group was the smallest ($\text{SEAc}=0.39\%o^2$); only the niche overlap rate between the 75–114 mm and 115–184 mm mantle length groups was moderate (0.34), and the niche overlap rate among the other mantle length groups was low. According to the analysis, the change of $\delta^{13}\text{C}$ value of *Sepia esculenta* was mainly affected by the isotope baseline value and the migration pattern of *Sepia esculenta*, while the change of $\delta^{15}\text{N}$ value was mainly affected by the feeding effect of *Sepia esculenta*; the height of food resources and habitat utilization between female and male golden squid groups were highly similar; *Sepia esculenta* at different developmental stages had obvious differences in nutritional niche.

Key words: *Sepia esculenta*; coastal waters of Jiangsu; stable isotope; nutritional niche