

文章编号: 1674 - 5566(2014)01 - 0154 - 07

头足类硬组织的稳定同位素研究进展

李建华^{1,2,3,4}, 李云凯^{1,2,3,4}, 陈新军^{1,2,3,4}, 方舟¹, 刘必林^{1,2,3,4}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 远洋渔业协同创新中心, 上海 201306)

摘 要: 头足类作为一种重要的海洋无脊椎动物, 在世界海洋生态系统中扮演着非常重要的角色。而目前对其捕食活动和摄食情况的研究不多。稳定同位素作为新型应用技术, 被广泛应用于生态系统的研究中。头足类作为捕食者, 其体内有大量的碳(C)、氮(N)、氧(O)等稳定同位素, 且其硬组织是稳定同位素积累的优良载体, 因此通过稳定同位素示踪的方法, 分析硬组织各部位稳定同位素含量及其分布, 可为了解头足类在海洋生态系统中所处的地位提供手段和方法。根据国内外研究现状, 重点分析了耳石、角质额和内壳等硬组织稳定同位素在头足类摄食生态中的应用, 并进行了总结和归纳, 同时对今后的研究提出了建议。

研究亮点: 目前国内对稳定同位素在各方面的研究都有所涉及, 而在头足类中却鲜有报道。本文重点分析了耳石、角质额和内壳等硬组织稳定同位素在头足类摄食生态中的应用, 并对其研究进展进行了总结和归纳, 对今后发展趋势进行了展望。

关键词: 头足类; 稳定同位素; 摄食生态; 海洋生态系统

中图分类号: S 932.8

文献标志码: A

头足类被联合国粮农组织确定为人类未来重要的蛋白质来源, 资源蕴藏量大, 在世界海洋捕捞业中的地位越来越重要。头足类位居海洋营养级金字塔的中层, 具有承上启下的作用, 在世界海洋生态系统中扮演着非常重要的角色^[1]。头足类属于掠食性凶猛动物, 对捕食对象几乎没有选择性, 鱼类、甲壳类、软体动物、多毛类、毛颚类等, 均在捕食的范围之内, 并且具有明显的种间和种内自相残食现象^[2]。目前, 人们仅对几种经济头足类的摄食生态有一定了解, 主要为近岸种类, 而大多数大洋性种类由于其洄游分布范围广、栖息水层深等特点, 使得我们对其知之甚少。头足类不仅是人类消费的主要水产品之一, 而且还是许多大型海洋生物的食物, 因此透彻了解头足类的摄食生态学显得至关重要。

稳定同位素技术 (stable isotope techniques,

SIT) 是自原子核的质子和中子被发现后逐渐兴起的新型应用技术^[3]。1913 年汤姆逊 (THOMSON) 和阿斯顿 (ASTON) 首次发现稳定同位素。稳定同位素具有稳定和分布广泛的特点, 同时具有示踪 (tracers)、整合 (integration) 和指示 (indicators) 等多项功能。而稳定同位素技术具有检测快速、结果准确等特点, 现已经广泛应用于地质^[4]、医疗^[5]、物理学^[6]、考古^[7]、农业^[8]等多方面的研究中。以稳定同位素作为示踪剂研究生态系统中生物要素的循环及其与环境的关系, 利用稳定同位素技术的时空整合能力研究不同时间和空间尺度生态过程与机制, 以及利用稳定同位素技术的指示功能揭示生态系统功能的变化规律, 已成为了解生态系统功能动态变化的重要研究手段之一^[9]。

1952 年利用¹⁴C 标记测定初级生产力的方法

收稿日期: 2013-02-02 修回日期: 2013-08-21

基金项目: 国家自然科学基金 (NSFC41276156); 国家高技术研究发展计划 (2012AA092303); 上海市科技创新行动计划 (12231203900)

作者简介: 李建华 (1987—), 女, 助理工程师, 研究方向为渔业资源学。E-mail: M100301441@stmail.shou.edu.cn

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

开始推广并被应用于海洋调查中^[10],以稳定同位素¹³C 作为示踪技术研究食物链网和能量流,了解食物链网的营养结构,揭示生态系中营养物质的循环与能量转换规律^[10],逐渐受到国内外学者的重视。国内外诸多学者采用稳定同位素技术对海洋植物^[11]、海洋鱼类^[12]以及海洋哺乳动物^[13]进行了研究,从而对其在生态系统中的地位有了更深的了解。头足类的稳定同位素研究始于2000年,最早由日本学者 TAKAI 等对全世界7个地区10种头足类的地理差异进行了稳定同位素分析^[14],之后稳定同位素技术在头足类中得到了广泛的应用。为此,本文在介绍稳定同位素应用方法及意义的基础上,总结与回顾各国学者在头足类稳定同位素领域的研究进展,并对其今后的研究方向进行展望,为稳定同位素技术在头足类摄食生态等领域的应用提供参考。

1 稳定同位素在摄食生态中的作用和意义

由于稳定同位素(stable isotope)的原子核稳定,因此其化学性质也相对比较稳定。常用的稳定同位素包括碳同位素(¹³C)、氢同位素(²H)、氮同位素(¹⁵N)和氧同位素(¹⁸O)等。由于生物体主要由碳(C)、氮(N)、氧(O)3种元素组成,因此对其稳定同位素的分析具有一定的相关性,可以应用于自然界的各个领域^[3]。

稳定同位素技术在生态系统尤其是海洋生态系统中的研究在国内外起步均较晚,直到20世纪60年代后期相关工作才逐渐增多,主要体现在海洋生态系统结构与功能、食物链和生物生产力等方面。目前稳定同位素技术在生态系统中的应用研究主要包括:(1)研究生态系统的碳源及能量来源;(2)生态系统各物种所处的营养位置;(3)生态系统稳定性变化的研究。其中碳源及能量来源还可分为:(1)动物的食性分析;(2)生态系统的碳源;(3)系统中的能量流动。

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 还可用于追踪有机体内碳水化合物、蛋白质等有机物的含量^[15]。由于高级消费者相对于低级消费者有更高的¹⁵N含量(平均高于2.5‰~3.4‰)^[16-17],因此 $\delta^{15}\text{N}$ 的含量常常被用来指示该物种在生态系统中的营养位置(trophic position)^[18]。而 $\delta^{13}\text{C}$ 在食物链中的含量较低,因此常被用来表示营养关系中的初始来

源^[19]。在海洋生态系统中, $\delta^{13}\text{C}$ 主要可以表示浮游生物分布所处纬度的高低,同时可以指示所摄入的食物是来自远洋还是近岸,是营浮游生活还是底栖生活^[20]。

2 稳定同位素的研究方法

目前对各物种稳定同位素的研究主要基于质谱仪的分析方法。由于样品中不止一种物质存在,所以在分析之前,必须要进行样品的预处理。对 $\delta^{13}\text{C}$ 而言,就是要经历将样品中的碳组分转化成二氧化碳的预处理过程,即将样品转化成可供质谱仪测量的纯净气体的过程。样品中有机碳稳定同位素的测定主要包括样品的采集与保存、干燥、粉碎、气化、纯化过程等预处理步骤。为了减少结果的干扰,一般需对样品进行去脂和去无机碳处理。而 $\delta^{15}\text{N}$ 也是采用相同的方法进行处理。

对经过处理的备用样品,用锡纸包好,放入质谱仪中进行分析。然后测得稳定同位素碳(¹³C/¹²C)和氮(¹⁵N/¹⁴N)相对丰度之比。碳氮同位素比值以国际通用的 δ 值表示,定义为:

$$\delta x = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \quad (1)$$

式中: δx 为¹³C或¹⁵N; R_{sample} 为所测得的同位素比值。碳稳定同位素的标准 R_{standard} 采用PDB值(pee dee belemnite);氮同位素的标准 R_{standard} 采用大气氮^[21]。为了保持实验结果的稳定性和仪器的准确性,每测试5个样品后,插入测量一个工作标准样品,个别样品则进行2~3次复测。碳氮稳定同位素比值精度为 $\pm 0.02 \times 10^{-3}$,碳氮百分含量精密密度分别为0.71%和0.31%^[21]。

3 稳定同位素在头足类中的应用

目前稳定同位素技术已应用于许多海洋生物的研究中,如分析其在海洋生态系统中的地位等。对于食物链中段的头足类,其地位和硬骨鱼类相当^[22],也逐渐成为众多学者的研究对象,基于稳定同位素的分析可很好地反映出它在生态系统中的地位。硬组织是记录头足类整个生活史的重要载体,对硬组织进行稳定同位素研究有利于了解头足类的摄食、洄游等行为。头足类的硬组织主要有角质颚、耳石和内壳。

3.1 角质颚的稳定同位素在头足类中的应用

角质颚是头足类的主要摄食器官,由上下两部分组成,具有稳定的形态特征、良好的信息储存以及耐腐蚀等特点,这样的结构能够使其不被捕食者消化,具有很好的指示作用。

CHEREL 和 HOBSON^[23]对印度洋南部凯尔盖朗群岛的抹香鲸胃含物中头足类的角质颚进行了分析,认为角质颚中 $\delta^{13}\text{C}$ 含量较为丰富, $\delta^{15}\text{N}$ 含量则相对较少; $\delta^{15}\text{N}$ 含量和角质颚的大小呈正相关,角质颚不同部位的 $\delta^{15}\text{N}$ 含量也有所不同,这可反映出头足类角质颚生长的规律;同时首次利用角质颚的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值研究了头足类的营养结构,认为其头足类营养级位于甲壳类和鱼类之间,且根据角质颚 $\delta^{13}\text{C}$ 的含量分析,认为取样的头足类来自 3 个不同的生长海域。

COOLEY 等^[24]对茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*) 角质颚中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 进行稳定同位素分析,并且结合胃含物对其摄食习性与生态进行了研究。研究发现,较大个体的茎柔鱼有着相对较高的营养位置,但胃含物分析法和稳定同位素分析法所得的结果有所不同。分析还发现,肌肉中稳定同位素的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 含量分别比角质颚中高 1‰ 和 4‰。研究也证实了,角质颚是一种可以替代肌肉作为稳定同位素分析的可靠材料。随后,COOLEY 和 MARKAIDA^[25]推导出肌肉和角质颚中稳定同位素含量和胴长的关系以及其相互的关系式。

HOBSON 和 CHEREL^[26]对人工养殖情况下乌贼 (*Sepia officinalis*) 的角质颚进行了分析与研究,其目的是期望能够重新构建头足类和其捕食者的摄食生态关系。在养殖的前 1-2 个月和 2 个月之后的时间里,根据乌贼生长的特性,分别喂食不同的虾类,结果发现在乌贼的软组织(如口球、腕、胴体)中, $\delta^{15}\text{N}$ 的含量高出虾类 3.3‰,而 $\delta^{13}\text{C}$ 的含量差别不大;作为硬组织的角质颚,其 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的含量均不丰富,根据角质颚的生长特征,可将喙部稳定同位素含量视为新生个体的摄食情况,其它部分含量视为成年个体的摄食情况。此外,HOBSON 和 CHEREL^[26]对法国海岸采集的 4 种不同头足类与养殖的乌贼进行比较,也发现了类似的情况。因此认为,角质颚作为较易获取和不易腐烂的稳定性极好的硬组织,其稳定同位素的含量对重新构建头足类的摄食

生态是一种非常有用的工具。

CHEREL 等^[27]还利用角质颚稳定同位素,分析了 19 种深海头足类(包括大型章鱼类和鱿鱼类)的营养级水平及其结构。研究认为,稳定同位素可以判断头足类所在的营养位置,而不是简单的营养级。这 19 种头足类中 $\delta^{13}\text{C}$ 含量变化幅度为 1.7‰,这也意味着其栖息地位于相对接近或者类似的环境中;而 $\delta^{15}\text{N}$ 的含量变化为 4.6‰,相当于 1.5 个营养级。研究还发现,大型鱿鱼(如大王乌贼)个体很大,但并不是高营养级种类,这也说明其营养级水平与个体大小无关。

3.2 耳石的稳定同位素在头足类中的应用

耳石是位于平衡囊内起平衡作用的一对硬组织,它是头足类加速度感应器的一部分,包含大量生物学和生态学信息,被形象地称作生命记录仪。许多学者通过耳石微结构中的轮纹结构读取其年龄^[28-30]。从化学结构来分析,耳石主要由无机矿物质和有机物组成,其中无机矿物质含量占整个耳石的 95% 以上,主要是碳酸钙盐结晶形成的文石,无方解石、球霏石等晶相,有机物含量占整个耳石 4%~5%^[31-33]。

研究发现,耳石中的 $\delta^{18}\text{O}$ 可以通过碳化的 ^{18}O 在海水中的含量来推断其形成的温度情况^[34-35]。LANDMAN 等^[34]假设球霏石是均匀分布在耳石的平衡囊中,且根据 BIGG 和 ROHLING^[35]研究结果假设水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -0.2‰,对圣保罗巨乌贼 (*Architeuthis sanctipauli*) 3 个样本栖息环境的水温进行了推断,依据软体动物中球霏石和水中 ^{18}O 之间的关系式^[36],推断出圣保罗巨乌贼生活于水温为 10.5~12.9℃、水深在 125~250 m 的环境中,有时栖息水深可达到 1 000 m,但也是短暂的^[37-40]。因此我们可以利用耳石的稳定同位素来反映头足类具体的生活水层的环境。

3.3 内壳的稳定同位素在头足类中的应用

头足类内壳具有支持身体的功能,其中乌贼类的石灰质内壳还能够提供浮力^[41]。它们不仅是重要的分类依据,而且是研究头足类生物学、生态学的理想材料。

LANDMAN 等^[42]对鸚鵡螺属以下种类的隔膜所含的 $\delta^{18}\text{O}$ 进行了测定,并对中胚胎期到胚后期的不同含量作了分析,结果发现,在不同的温度条件下,可通过测定鸚鵡螺的隔膜中 $\delta^{18}\text{O}$ 含量

来鉴别差异,通常鹦鹉螺在温度为 22 ~ 24 °C,水深为 100 ~ 200 m 处进行胚胎发育,而胚后发育 $\delta^{18}\text{O}$ 的含量越来越大,这也和其往更深更冷水层移动有很大的关系。BETTENCOURT 和 GUERRA^[43]通过对乌贼内壳的稳定同位素来预测了其生态信息。研究认为,幼体和成体 $\delta^{13}\text{C}$ 的不同,可能与非生物因素或食物有关;不同地理区域 $\delta^{18}\text{O}$ 的差异可能与水温密切相关。LUKENEDER 等^[44]通过对内壳 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析,探讨了旋壳乌贼年龄与生活水层的关系。分析认为,随着内壳中 $\delta^{18}\text{O}$ 含量增加,旋壳乌贼生活水层转向温度较低的深层水域;而 $\delta^{13}\text{C}$ 含量的变化则与性成熟、繁殖活动开始以及食物转变有关。LORRAIN 等^[45]对在秘鲁外海所采集的 5 尾大型个体茎柔鱼营养级进行了研究,结果表明,在个体间的摄食策略并不随着个体大小的变化而有所变化,总的来说,内壳的 $\delta^{13}\text{C}$ 含量是表明茎柔鱼生活史(一般为 8 ~ 9 个月)中一次或几次的洄游情况,而 $\delta^{15}\text{N}$ 的含量则有很大的波动,其中一尾个体表现出 4.6% 的下降(超过了一个营养级),这也说明在那一时刻该个体从高营养级到低营养级的变化过程。茎柔鱼在生活史中具有很高的可塑性,并且具有很大的潜力来适应环境变化。通过对样本分析得出 3 个结论:(1)茎柔鱼洄游行为非常频繁;(2)它们并没有一个特定的摄食策略;(3)它们的营养级并不会随着年龄的增长而发生系统的变化。因此,内壳是一种非常有价值的研究材料,是对传统胃含物研究和其它组织稳定同位素研究的重要补充。

4 展望与分析

综上所述,稳定同位素技术已逐渐在头足类生态摄食研究中得到应用。前人研究表明,通过对头足类的角质颚、耳石和内壳等硬组织稳定同位素的初步研究,可很好的揭示其营养关系及其在海洋生态系统中所处的地位。头足类处于食物链的中间环节,具有承上启下的作用,弄清楚它的摄食生态特征不仅是对该物种本身新陈代谢过程的了解,同时对整个海洋生态系统能量流动规律的掌握都有着极为重要的意义。对于头足类体内生态信息的解读^[46-48],基于硬组织的稳定同位素技术为我们提供了一种行之有效的方法。但是,对于种类繁多的头足类,其所处的

生态地位仍然有待考证,特别是头足类各类硬组织所包含信息的解读以及与其它海洋生物之间的摄食关系,仍然需要进行深入的研究。

头足类种类繁多,个体大小从不足 1 cm 到 20 m(总长),最大个体超过 500 kg;其洄游分布范围广,几乎生活在所有三大洋海域;栖息水域从表层至深海,最大深度超过 5 000 m;其多数为短生命周期种类,生命不超过 1 年,是典型的生态机会主义者,其资源补充量极易受到海洋环境因子的影响^[49-50]。因此,头足类在海洋生态系统中所扮演的角色是极其复杂的。根据目前世界头足类硬组织稳定同位素的研究现状,拟提出今后研究方向:(1)角质颚、耳石和内壳等硬组织具有较为稳定的生态信息,但是各个组织的稳定同位素含量与不同种类、不同部位、不同发育阶段等有关,因此,今后需要针对不同类别(如底层的乌贼类、大洋性柔鱼类、章鱼类,以及深海的大王乌贼类等)来选择合适的硬组织,作为分析稳定同位素的标准材料,以此建立起头足类硬组织稳定同位素的技术规范和标准;(2)需要加强与胃含物分析的结合,一方面根据胃中残留的食物进行种类鉴别,另一方面需要结合其它手段对摄食种类进行鉴定与分析,从而更为准确地把握头足类的摄食生态习性;(3)在海上采集样本,需要对角质颚等硬组织进行保存,如何选择合适的保存条件,且不影响角质颚稳定同位素的分析,有必要对其保存条件进行系统研究,为保存标准和规范的制定打下基础;(4)需要结合多种研究方法,更好地对头足类的摄食生态进行研究,例如结合生物标记化合物对头足类的消化组织进行分析;结合对头足类体内重金属含量的分析等,以便更好地对头足类摄食生态、种群、洄游等进行深入的研究。

本研究得到农业部大洋渔业资源环境科学观测实验站 (Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture, P. R. China) 的资助,特此致谢。

参考文献:

- [1] CLARKE M R. The role of cephalopods in the world's oceans [J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society B-Biological Sciences*, 1996, 351: 977 - 1112.

- [2] 王尧耕, 陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业 [M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 58 - 751.
- [3] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 3 - 165.
- [4] CHARLES C, COUDRAY C, RAMBEAU M, et al. Stable isotopes in studies of intestinal absorption, exchangeable pools and mineral status: The example of magnesium [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 19(1): 97 - 103.
- [5] KOLETZKO B, DEMMELMAIR H, HARTL W, et al. The use of stable isotope techniques for nutritional and metabolic research in paediatrics [J]. *Early Human Development*, 1998, 53(1): S77 - S97.
- [6] NORDT L C, HALLMARK C T, WILDING L P, et al. Quantifying pedogenic carbonate accumulations using stable carbon isotopes [J]. *Geoderma*, 1998, 82(3): 115 - 136.
- [7] NIEBUHR B, JOACHIMSKI M M. Stable isotope and trace element geochemistry of Upper Cretaceous carbonates and belemnite rostra (Middle Campanian, north Germany) [J]. *Geobios*, 2002, 35(1): 51 - 64.
- [8] ZHANG C Z, ZHANG J B, ZHAO B Z, et al. Stable isotope studies of crop carbon and water relations: a review [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(5): 578 - 590.
- [9] 林光辉. 稳定同位素生态学: 先进技术推动的生态学新分支 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 119 - 122.
- [10] 高全贺, 高孟春, 彭艳超, 等. 稳定碳同位素在海洋生态学上的应用 [J]. *中国新技术新产品*, 2010(4): 14.
- [11] GILLES L, PATRICK D, SYLVIE G. Applications of C and N stable isotopes to ecological and environmental studies in seagrass ecosystems [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49(11): 887 - 891.
- [12] WAN R J, WU Y, HUANG L, et al. Fatty acids and stable isotopes of a marine ecosystem: Study on the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) food web in the Yellow Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(11): 1047 - 1057.
- [13] JEREMY K, MARC O, PIERRE R, et al. The use of stable isotope analyses from skin biopsy samples to assess trophic relationships of sympatric delphinids off Moorea (*French Polynesia*) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, 395(1/2): 48 - 54.
- [14] TAKAI N, ONAKA S, IKEDA Y, et al. Geographical variations in carbon and nitrogen stable isotope ratios in squid [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2000, 80(4): 675 - 684.
- [15] KELLY J F. Stable isotopes of carbon and nitrogen in the study of avian and mammalian trophic ecology [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2000, 78(1): 1 - 27.
- [16] MINAGAWA M, WADA E. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(5): 1135 - 1140.
- [17] VANDERKLIFT A, PONSARD S. Sources of variation in consumer-diet $\delta^{15}\text{N}$ enrichments: a meta-analysis [J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 169 - 182.
- [18] HOBSON K A, WELCH H E. Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 84(1): 9 - 18.
- [19] HOBSON K A, PIATT J F, PITOCHELLI J. Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1994, 63(4): 786 - 798.
- [20] CHEREL Y, HOBSON K A, WEIMERSKIRCH H. Using stable-isotope analysis of feathers to distinguish moulting and breeding origins of seabirds [J]. *Oecologia*, 2000, 122(2): 155 - 162.
- [21] 郭旭鹏, 李忠义, 金显仕, 等. 采用碳氮稳定同位素技术对黄海中南部鳀鱼食性的研究 [J]. *海洋学报*, 2007(2): 100 - 104.
- [22] GEORGE D J, RON K, O' DOR. Squid-the new ecosystem indicators [R]. The role of squid in open ocean ecosystems, 16 - 17 November, 2006, Hawaii, USA: 78 - 80.
- [23] CHEREL Y, HOBSON K A. Stable isotopes, beaks and predators: a new tool to study the trophic ecology of cephalopods, including giant and colossal squids [J]. *Proceeding Research Society of Biology*, 2005, 272(1572): 1601 - 1607.
- [24] RUIZ-COOLEY R I, MARKAIDA U, GENDRON D, et al. Stable isotopes in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) beaks to estimate its trophic position: comparison between stomach contents and stable isotopes [J]. *Journal of the Marine Biological*

- Association of the United Kingdom, 2006, 86(2): 437 – 445.
- [25] RUIZ-COOLEY R I, MARKAIDA U. Use of stable isotopes to examine foraging ecology of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) [R]. The role of squid in open ocean ecosystems, 16 – 17 November 2006, Hawaii, USA: 62 – 63.
- [26] HOBSON K A, CHEREL Y. Isotopic reconstruction of marine food webs using cephalopod beaks new insight from captive raised *Sepia officinalis* [J]. Canadian Journal of Zoology, 2006, 84(5): 766 – 770.
- [27] CHEREL Y, RIDOUX V, SPITZ J, et al. Stable isotopes document the trophic structure of a deep-sea cephalopod assemblage including giant octopus and giant squid [J]. Biology Letters, 2009, 5(3): 364–367.
- [28] JACKSON G D. The use of statolith microstructures to analyze life-history events in the small tropical cephalopod *Idiosepius pygmaeus* [J]. Fishery Bulletin, 1989, 87(2): 265 – 273.
- [29] GAULDIE R W, WEST I F, FÖRCH E C. Statocyst, statolith and age estimation of the giant squid, *Architeuthis kirki* [J]. The Veliger, 1994, 37(1): 93 – 109.
- [30] MEJÍA-REBOLLO A, QUIÑÓNEZ-VELÁZQUEZ C, SALINAS-ZAVALA C, et al. Age growth and maturity of jumbo squid (*Dosidicus gigas* D'Orbigny, 1835) off the western coast of the Baja California peninsula [C]. CalCOFI Report, 2008, 49: 256 – 262.
- [31] DILLY P N. The structure of some cephalopod statoliths [J]. Cell and Tissue Research, 1976, 175(2): 147 – 163.
- [32] RADTKE R L. Chemical and structural characteristic of statoliths from the short-finned squid *Illex illecebrosus* [J]. Marine Biology, 1983, 76(1): 47 – 54.
- [33] BETTENCOURT V, GUERRA A. Growth increments and biomineralization process in cephalopod statoliths [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2000, 248(2): 191 – 205.
- [34] LANDMAN N H, COCHRAN J K, CERRATO R, et al. Habitat and age of the giant squid (*Architeuthis sanctipauli*) inferred from isotopic analyses [J]. Marine Biology, 2004, 144(4): 685 – 691.
- [35] BIGG G R, ROHLING E J. An oxygen isotope data set for marine waters [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105(C4): 8527 – 8535.
- [36] GROSSMAN E L, KU T L. Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects [J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 1986, 59: 59 – 74.
- [37] KALISH J M. ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in fish otoliths: metabolic and kinetic effects [J]. Marine ecology progress series. Oldendorf, 1991, 75(2): 191 – 203.
- [38] THORROLD S R, CAMPANA S E, JONES C M, et al. Factors determining $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ fractionation in aragonitic otoliths of marine fish [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997, 61(14): 2909 – 2919.
- [39] TANAKA N, MONAGHAN M C, RYE D M. Contribution of metabolic carbon to mollusc and barnacle shell carbonate [J]. Nature, 1986, 320: 520 – 523.
- [40] BROECKER W S, PENG T H. Tracers in the sea [M]. Eldigio Press. Lamont Doherty Geological Observatory, Palisades, 1982.
- [41] 董正之. 世界大洋经济头足类生物学 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991: 1 – 279.
- [42] LANDMAN N H, COCHRAN J K, RYE D M, et al. Early life history of Nautilus: evidence from isotopic analyses of aquarium-reared specimens [J]. Paleobiology, 1994, 20(1): 40 – 51.
- [43] BETTENCOURT V, GUERRA A. Carbon and oxygen isotope composition of the cuttlebone of *Sepia officinalis*: A tool for predicting ecological information [J]. Marine Biology letters, 1999(133): 651 – 657.
- [44] LUKENEDER A, HARZHAUSER M, MBLLEGGER S, et al. Stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) in Spirula spirula shells from three major oceans indicate developmental changes paralleling depth distributions [J]. Marine Biology Letters, 2008, 154(1): 175 – 182.
- [45] LORRAIN A, ARGÜELLES J, ALEGRE A, et al. Sequential isotopic signature along gladius highlights contrasted individual foraging strategies of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) [J]. PLoS ONE, 2011, 6(7): e22194.
- [46] 刘必林, 陈新军, 马金, 等. 头足类耳石微化学研究进展 [J]. 水产学报, 2010, 34(2): 315 – 321.
- [47] 马金, 陈新军, 刘必林. 环境对头足类耳石微结构的影响研究进展 [J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(5): 616 – 622.

- [48] 刘必林,陈新军. 头足类角质颚的研究进展[J]. 水产学报, 2009,33(1):157-165.
- [49] 曹杰,陈新军,刘必林,等. 鱿鱼类资源量变化与海洋环境关系的研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2010,19(2):232-239.
- [50] 陈新军,曹杰,田思泉,等. 鱿鱼类资源评估与管理研究现状[J]. 上海海洋大学学报,2009,18(4):459-466.

Review on stable isotope in hard issues of cephalopods

LI Jian-hua^{1,2,3,4}, LI Yun-kai^{1,2,3,4}, CHEN Xin-jun^{1,2,3,4}, FANG Zhou¹, LIU Bi-lin^{1,2,3,4}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai 201306, China)

Abstract: Cephalopods play the key roles in marine ecosystem as important invertebrate in the ocean. However, little information about its predation and dietary status has been known so far. As a novel applied technology, stable isotope has multiple utility functions with quick inspection and accurate result, so this method is applied in many researches including marine ecosystem. A large proportion of carbon, nitrogen and oxygen are accumulated in the body of cephalopods, which are both predators and food of top predators. The hard structures are the good carrier of the elements for stable isotope. Therefore by means of stable isotope tracing, the content and distribution of stable isotope in every section of hard issue is analyzed to understand the trophic level of cephalopods among the marine organism. In this paper we will give a brief introduction of the application of stable isotope in hard issues of cephalopods (such as statoliths, beaks and inner shell), give a comprehensive understanding of trophic ecology on cephalopods and have a looking in the future.

Key words: cephalopods; stable isotope; trophic ecology; marine ecosystem