

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值作为海洋生态系统 食物网示踪剂的研究

——崂山湾水体生物食物网的营养关系*

蔡德陵 孟凡 韩贻兵 高素兰

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

提要 于1992年9月—1994年5月先后对崂山湾海域作了7个航次调查。由实验室培养试验和现场采样分析两种方法得出食物链一个营养级的 ^{13}C 富集度分别为 $(1.6 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ 和 1.7×10^{-3} ,两者几乎一致。由7个季度月的现场采集样品的同位素分析结果表明,从处在食物网底部的浮游植物到最高级的肉食性鱼类之间 $\delta^{13}\text{C}$ 差值平均为 6.9×10^{-3} ,相当于5个营养级;并由各类生物的碳同位素数据分别确定了它们在该食物网中的营养位置,其结果与食性分析方法所得结果基本吻合。同位素示踪方法研究的结果还表明,崂山湾水体生物食物网中碳的来源主要是浮游植物碳。

关键词 碳同位素 食物网 水体生物 营养层次

学科分类号 Q948.885.3

近海生态系统中水体生物食物网的营养结构,其物质和能量的流动过程等都是生态学家十分关注的问题,它不但有重要的理论意义,而且与生物资源的进一步开发密切相关。但是,传统的食性分析法极其繁杂。稳定同位素方法从另一角度为研究营养关系提供了定量指标。这一方法的基本前提是动物与其食物之间具有一种固定的同位素关系(Fry *et al.*, 1984a)。一般而言,海洋动物通常均较其食物要更富集碳的重同位素 ^{13}C ,而且沿着食物链这种 ^{13}C 富集将逐步积累。在世界各地的生态系统中如南印度洋¹⁾,北美斯科舍陆架(Mills *et al.*, 1984)、白令海(McMonnaughey *et al.*, 1979)、澳大利亚托里斯海峡(Fry *et al.*, 1983)、马来西亚马六甲海峡²⁾、墨西哥湾(Fry *et al.*, 1984b)的天然食物网中均存在着这种明显的 ^{13}C 富集作用,所以,有可能通过碳同位素测定对食物网中的营养关系作出客观的判断。本文在对崂山湾海洋植物碳同位素组成已进行了较系统测定的基础上(蔡德陵等, 1999),从实验室培养研究和现场采样测定两个方面用同位素法对该生态系统中水体生物食物网的营养关系作一探讨。

* 国家自然科学基金资助项目, 39170172号。蔡德陵,男,出生于1943年7月,研究员, Fax:0086-0532-2879562

1) Eadie B J, 1972. Ph. D. Dissertation, Texas A & M University, College Station

2) Rodelli M R, 1981. Master's thesis, University of Rhode Island, Providence

收稿日期: 1997-07-04, 收修改稿日期: 1998-05-29

1 材料与amp;方法

1.1 实验室培养研究

在用同位素法对生态系统中食物网营养结构进行研究时,每经过一个营养级碳同位素的富集度是一个重要的参数,由于实际生态系统中生物食性的复杂性,对一个营养级的碳同位素富集度的直接测定有一定的难度。采用实验室培养则可简化一些客观条件。为此,本文选择了黑鲷(*Sparus macrocephalus*)、真鲷(*Pagrosomus major*)、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)等经济鱼种在实验室水族箱中作同位素富集度试验。鱼卵孵化至开口前是消耗鱼卵内的卵黄脂,开口以后喂食小球藻、轮虫等开口饵料,其后过渡至喂食卤虫无节幼体,在鱼生长的不同阶段分别采集样品作同位素分析,并与饵料的同位素组成进行比较,以确定一个营养级的碳同位素富集度。培养一段时间后,将饵料由卤虫幼体和市售虾肉改变为市场购得的蛤蜊肉,继续以蛤蜊肉为饵料培养一段时间,然后取样分析以观察改变饵料对鱼体同位素组成变化的影响。

1.2 现场取样分析

崂山湾位于山东省即墨市东部,鳌山头与女岛之间,湾口向南,属开敞型海湾,面积164km²,湾中水深3—5m。该海域水产资源丰富,鱼、贝、藻类等捕捞业有一定规模,并开发了扇贝、海参、鲍鱼等增养殖品种。于1992年9月—1994年5月先后对该海域作了7个航次的调查。样品采集方法详见蔡德陵等(1999),浮游动物的分析鉴定方法如下:所采集的浮游动物样品在过滤过的海水中清养1—2h后,然后过滤到38#筛绢上,再将其转移至培养皿中,用蒸馏水稀释。在生物显微镜下按优势种挑拣出1—5mg样品,存放于指状管中。指状管中的样品保存于-20℃冰柜中直至进行同位素分析。鱼类等大型生物样品则采集脊椎骨周围肌肉组织用于同位素分析。

1.3 样品的同位素分析

从冰柜中取出样品,放入真空干燥箱中,在真空下使样品完全脱水。而后放置于经600℃预燃烧过的石英舟中称量,加1mol/L盐酸酸化,除去可能存在的无机碳酸盐成分,在50℃烘干后,放入高真空燃烧回路中转化为可供质谱仪测量的纯CO₂气体,详细过程参阅文献(Cai *et al.*, 1988)。同位素分析结果以δ¹³C值形式表示(蔡德陵等,1999)。

2 结果

2.1 一个营养级的碳同位素富集度的测定

2.1.1 实验室培养实验结果 所培养的三种鱼与其饵料之间的碳同位素组成的差值见表1。由表1可知,所培养的三种鱼在鱼卵孵化之后,先喂食轮虫、小球藻等开口饵料,数天后随即改以卤虫无节幼体饵料为主,其后辅以市售的虾肉。经测定卤虫无节幼体与市售虾肉具有完全相同的同位素组成,δ¹³C值均为-16.1×10⁻³。牙鲆在饲养14d和21d后,体长分别达6—7mm和9mm。将整条鱼作为一个标本作同位素测量,体长小的要3—4条鱼合并为一个样

表1 一个营养级的碳同位素富集度(×10⁻³)的实验室测定

Tab.1 The laboratorial determination of carbon isotopic enrichment factor (×10⁻³) per trophic level

试验鱼种	δ ¹³ C _鱼	δ ¹³ C _{饵料}	Δδ ¹³ C
真鲷	-14.3	-16.1	1.8
牙鲆	-14.7	-16.1	1.4
黑鲷	-14.6	-16.1	1.5
黑鲷 ¹⁾	-20.2	-21.8	1.6

1) 改换食性后测得的数据

表1。由表1可知,所培养的三种鱼在鱼卵孵化之后,先喂食轮虫、小球藻等开口饵料,数天后随即改以卤虫无节幼体饵料为主,其后辅以市售的虾肉。经测定卤虫无节幼体与市售虾肉具有完全相同的同位素组成,δ¹³C值均为-16.1×10⁻³。牙鲆在饲养14d和21d后,体长分别达6—7mm和9mm。将整条鱼作为一个标本作同位素测量,体长小的要3—4条鱼合并为一个样

品, $\delta^{13}\text{C}$ 值的平均值为 -14.7×10^{-3} , 与饵料 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的差值(即 ^{13}C 的富集度)为 1.4×10^{-3} , 可视为一个营养级的同位素富集度。与牙鲆相类似, 真鲷在喂养 35d 和 47d 后, $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -14.3×10^{-3} , ^{13}C 的富集度为 1.8×10^{-3} ; 黑鲷在喂养 52d 和 59d 后, $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -14.6×10^{-3} , ^{13}C 的富集度为 1.5×10^{-3} 。

为了进一步试验饵料对动物同位素组成的影响, 在用市售的虾肉喂养黑鲷 80d 后, 将饵料改为同位素组成为 -21.8×10^{-3} 的市售蛤肉, 继续用蛤肉喂养 160d 后, 再测定黑鲷的同位素组成, 发现其 $\delta^{13}\text{C}$ 值已改变为 -20.2×10^{-3} , 与蛤肉同位素组成之间的差值为 1.6×10^{-3} , 与改换食性之前黑鲷与虾肉饵料之间的同位素差值 1.5×10^{-3} 几乎一致。

本文取这 4 个 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值的平均值 $(1.6 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ 作为一个营养级的碳同位素富集度。

2.1.2 由现场采样获得的一个营养级的碳同位素富集度 李少菁(1964)曾用肠含物中饵料成分分析和不同食性与口部附肢构造关系研究了常见浮游桡足类的食性, 认为太平洋哲镖水蚤 (*Calanus pacificus*)¹⁾ 属素食性桡足类, 主要食中、小型硅藻, 一般以 15—30mm 大小的细胞最为常见。它的饵料成分基本上反映了海区中浮游植物的种类组成情况。除硅藻外, 其饵料中还含有少量其它小型浮游生物和大量不可辨认的常呈绿色的碎屑, 因此可以认为浮游植物是中华哲水蚤最主要的饵料。仅当浮游植物贫乏时, 它们才捕食小型动物。所以, 可以认为中华哲水蚤与浮游植物之间基本上相差一个营养级。

由表 2 数据可知, 中华哲水蚤与浮游植物之间不同季节同位素组成差值 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 的平均值约为 1.7×10^{-3} 。

表2 不同季节中华哲水蚤与浮游植物之间的同位素组成的差值 ($\times 10^{-3}$)

Tab.2 The isotopic differences ($\times 10^{-3}$) between *Calanus sinicus* and phytoplankton in various seasons

季节	$\Delta\delta^{13}\text{C}$ 中华哲水蚤	$\delta^{13}\text{C}$ 浮游植物	$\Delta\delta^{13}\text{C}$
春季	-22.7	-24.5	1.8
秋季	-19.7	-21.6	1.9
冬季	-23.9	-25.2	1.3

2.2 崂山湾生态系统水体生物食物网营养关系的同位素测定

对崂山湾不同季节 7 个航次的水体生物样品作了比较系统的碳同位素测量, 其测量结果列于表 3 中。结果显示, 崂山湾水体生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -16.3×10^{-3} — -25.2×10^{-3} 。 $\delta^{13}\text{C}$ 的最大差值可达 8.9×10^{-3} , 这一数值范围与文献 (Mills *et al*, 1984; McConnaughey *et al*, 1979; Fry *et al*, 1983, 1984b) 所报道的海洋生态系统中 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围一致。在崂山湾生态系统浮游食物网中 ^{13}C 最贫化的是浮游植物, 其次是草食性的浮游动物; 而 ^{13}C 最富集的是高级肉食性鱼类, 杂食性或肉食性动物则介于两者之间。

甲壳动物是一种非常重要的浮游动物, 既包括许多终生浮游的种类, 也包括暂时性、阶段性浮游的种类。它们是崂山湾生态系统中次级生产力最重要的组成者之一。在调查中捕获到的甲壳动物最主要的是桡足类, 其次有糠虾类、等足类、端足类、磷虾、短尾类幼体、长尾类幼体和口足类幼体等。总的来说, 甲壳动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的数值范围为 $-17.6 \times$

1) 系本文中中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 的同种异名

表3 崂山湾水体生物食物网的碳同位素组成分布

Tab.3 The distribution of carbon isotopic compositions in the pelagic food web in Laoshan Bay

生物种类	$\delta^{13}\text{C}$ 值 ($\times 10^{-3}$)
浮游植物 Phytoplankton	-19.5--25.2
浮游动物 Zooplankton	-16.3--24.6
甲壳动物 Crustaceans	-17.6--23.9
桡足类 Copepoda	-18.6--23.9
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i> Brodsky	-19.7--23.9
双刺唇角水蚤 <i>Labidocera bipinnata</i> Tanaka	-20.7
左突唇角水蚤 <i>L. similobata</i> Shen et Lee	-18.6
钝筒角水蚤 <i>Pontellopsis yamadae</i> Mori	-20.4
腹斧角水蚤 <i>Pontella securifer</i> Brady	-20.1
宽尾角水蚤 <i>P. latifurca</i> Shen et Zhang	-20.0
墨氏胸刺水蚤 <i>Centropages mcmurrici</i> Willey	-20.9
背针胸刺水蚤 <i>C. dorsispinatus</i> Thompson et Scott	-19.7
钳形歪水蚤 <i>Tortanus forcipatus</i> (Giesbrecht)	-21.9
双毛纺锤水蚤 <i>Acartia bifilosa</i> (Giesbrecht)	-21.4
糠虾类 Mysidacea	-19.4
等足类 Isopoda	-18.5
浮游端足类 Amphipoda	-19.6--20.5
磷虾节胸幼体 Calyptopsis of Euphausiacea	-20.1
瓷蟹蚤状幼体 Zoea of Porcellana	-17.6--21.5
短尾类幼体 Brachyura larva	-20.2--20.5
长尾类幼体 Macrura larva	-19.6--20.0
口足类幼体 Stomatopoda larva	-20.1
毛颚动物 Chaetognatha	-19.7--22.7
强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> Tokioka	-19.7--22.7
脊椎动物 Vertebrata	-16.3--24.6
鳀鱼卵 Eggs of <i>Engraulis japonicus</i> Temminck et Schlegel	-24.6
仔鱼 Fish larvae	-18.7
长绵鲈 <i>Enchelyopus elongatus</i> Kner	-19.9
青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i> (Bleeker)	-19.0
细纹狮子鱼 <i>Liparis tanakae</i> (Gilbert et Burke)	-18.5
石鲈 <i>Kareius bicoloratus</i> (Basilewsky)	-18.4
斑鲈 <i>Clupanodon punctatus</i> (Temminck et Schlegel)	-18.0
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i> Jordan et Starks	-17.9
缝鲈 <i>Azuma emmion</i> Jordan et Snyder	-17.2
黑鲷 <i>Sebastes fuscescens</i> (Houttuyn)	-17.0
鲈鱼 <i>Lateolabrax japonicus</i> (Cuvier et Valenciennes)	-17.0
纹缟蝦虎鱼 <i>Tridentiger trionocephalus</i> (Gill)	-17.0
黄鳍刺蝦虎鱼 <i>Acanthogobius flavimanus</i> (Temminck et Schelegel)	-16.3

10^{-3} — 23.9×10^{-3} , 较本区浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围 -19.5×10^{-3} — 25.2×10^{-3} 要高一个或一个以上营养级。这是因为甲壳动物的食性可以分为草食性、肉食性和杂食性三类。根据食性分析的结果, 中华哲水蚤是比较典型的草食性动物, 而本区其它桡足类则多为肉食性或杂食性的动物, 这与碳同位素的分析结果基本一致。本区其它甲壳动物如糠虾类、等足类、端足类、磷虾类、瓷蟹类幼体、短尾类幼体、长尾类幼体和口足类幼体等其碳同位素组成的分布也处于一个比较窄的范围之中, 大部分在 -18.5×10^{-3} — 20.4×10^{-3} 的数值之间。从同位素组成看, 这些动物的营养层次虽有一定的差别, 但其差别大致上在一个营养阶层之内。

从食性上看毛颚动物是贪婪、凶猛的肉食性动物, 主要捕食小型甲壳动物, 尤其是桡足类、仔、幼鱼和其他毛颚动物等(郑重等, 1984), 反映在碳同位素组成上它在秋冬季节中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围 (-19.7×10^{-3} — 22.7×10^{-3}) 等于或稍高于甲壳动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-19.7×10^{-3} — 23.9×10^{-3})。由于本区夏季未收集到足够分析的毛颚动物样品, 因此作为比较的甲壳动物也相应取了秋冬季的数值范围 (-19.7×10^{-3} — 23.9×10^{-3}), 而不是全年的数值范围 (-17.6×10^{-3} — 23.9×10^{-3})。

从碳同位素组成看, 鱼类是本区营养层次最高的, 但它们可基本上分为三类: 一是低级肉食性鱼类, 如鲢鱼、青鳞鱼、长绵鲷、石鲈、斑鲈、细纹狮子鱼等, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $\leq -18.0 \times 10^{-3}$; 二是中级肉食性鱼类, 如缝鲷、鲈鱼、大泷六线鱼、纹缟蝦虎鱼、黑鲷等, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -17.0×10^{-3} — 18.0×10^{-3} ; 三是高级肉食性鱼类, 如黄鳍刺蝦虎鱼等, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $> -17.0 \times 10^{-3}$ 。

3 讨论

3.1 一个营养级的碳同位素富集度不同测定方法所得结果的比较

对于一个营养级的碳同位素富集度, 本文用实验室培养实验和现场采样分析所获得的结果分别为 1.6×10^{-3} 和 1.7×10^{-3} , 两者十分接近, 在现场采样分析样品中选取了草食性的中华哲水蚤与浮游植物之间的同位素差值, 实验室培养实验中则是肉食性鱼类与其饵料之间的同位素差值, 这两者几乎完全一致, 证明了在食物网中不同营养层次之间一个营养级的 ^{13}C 富集度是基本一致的, 这就说明可以将 1.7×10^{-3} 作为崂山湾生态系统一个营养级的 ^{13}C 富集度。这一结果与文献上所公布的数据是可以比较的。DeNiro 等 (1978) 较早期认为这一富集度为 $(0.8 \pm 1.1) \times 10^{-3}$, 后又认为 1×10^{-3} — 1.5×10^{-3} 是比较合理的。McConnaughey 等 (1979) 在白令海动物区系的一份研究中推导出每一营养阶层有 1.5×10^{-3} 的 ^{13}C 富集作用。Rau 等 (1983) 将这一富集度估计为 0.7×10^{-3} — 1.4×10^{-3} 。Thayer 等 (1983) 发现在墨西哥湾近海总的浮游动物或桡足类对浮游植物有固定的 0.8×10^{-3} — 2.2×10^{-3} 的 ^{13}C 富集作用也是一个旁证。同位素研究表明, 给动物喂食同样的食物在个体之间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差别较小, 为 1×10^{-3} — 2×10^{-3} (Fry *et al*, 1982)。

改变食性对动物同位素组成的变化也由实验鼠的试验得以证明, 且发现一周大小的小鼠的反应比较快而成年鼠的变化较慢 (Mosora *et al*, 1971)。对蟹、虾等也有现场研究的报道 (Schell, 1983)。对黑鲷改换食物的研究表明, 当饵料的同位素组成由 -16.1×10^{-3} 改为 -21.8×10^{-3} 后, 经过 160d 的喂养后, 黑鲷的同位素组成由 -14.6×10^{-3} 变为 -20.2×10^{-3} 。可见饵料变轻 5.7×10^{-3} , 相应地黑鲷也变轻了 5.6×10^{-3} 。两者的变化

几乎完全相等,证明食物的同位素组成是动物同位素组成的一个重要的决定因素。

3.2 崂山湾生态系统浮游食物网中 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布及其对应的营养级

本区生态系统浮游食物网中观测到的最大 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化为 8.9×10^{-3} 。如以浮游植物的全年平均值计算,该生态系统食物网的 ^{13}C 富集度为 6.9×10^{-3} 。以每一营养级碳同位素富集度 1.7×10^{-3} 计,则可知该生态系统从浮游植物至最高级的肉食性鱼类之间应存在有5个营养阶层,这也反映出从处于食物网底部的浮游植物到最高级的肉食性鱼类存在有重要的 ^{13}C 富集作用。如果这一生态系统中碳的来源是以浮游植物为主,那么依据各类生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值以及一个营养级的 ^{13}C 富集度可以估计出它们在食物网中的营养位置,其结果列于表4。需说明的一点是,对于不同种类的生物根据样品采集季节的不同,浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值也应取相应的值。

由表4可知,由同位素推断的生物营养层次位置与食性分析的结果基本上是一致的。邓景耀等(1988)根据胃含物分析结果计算出渤海各种鱼类的营养级:青鳞2.3、绵鲷2.4、鲉鱼2.6、石鲈2.8、六线鱼3.0、鲈鱼3.2、细纹狮子鱼3.2、黑鲟3.4等,均与由碳同位素获得的结果相当吻合。

由碳同位素估算营养层次数据的前提是假设浮游植物是浮游动物的主要碳来源,其结果大多与食性分析的结果相吻合,这反过来证明了这一假设基本上是符合实际情况的,而有少数种属与通常的认识稍有偏离,也可能说明其食物碳尚有其它的来源,如陆源碎屑有机物、海底沉积有机物等。

表4 崂山湾生态系统中各类生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布($\times 10^{-3}$)与相应的营养层次

Tab.4 The $\delta^{13}\text{C}$ distribution ($\times 10^{-3}$) of various kinds of organisms and corresponding trophic level in Laoshan Bay ecosystem

生物种类	$\delta^{13}\text{C}$ 值	营养层次	生物种类	$\delta^{13}\text{C}$ 值	营养层次
浮游植物	-19.5—-25.2	0	低级肉食性鱼	-18.0—-19.9	2.0—3.0
甲壳动物	-17.6—-23.9	1.0—2.0	中级肉食性鱼	-17.0—-17.9	3.1—3.6
毛颚动物	-19.7—-22.7	1.5—2.0	高级肉食性鱼	-16.3	4.0

3.3 与其它海区的比较

由表5可知,这几个生态系统中水体生物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布有一定的类似性,但也存在一定的差别。例如,在崂山湾中浮游植物、甲壳动物等都有较大的变化范围,这主要是因为崂山湾的样品可以反映出季节性变化,有些生态系统则只有一个航次的数据,无法反映出它们的季节性变化;其次地理位置的差别,尤其是纬度等因素也有很大的影响。共同的一点

表5 崂山湾 $\delta^{13}\text{C}$ 分布($\times 10^{-3}$)与其它海区的比较

Tab.5 The comparison of $\delta^{13}\text{C}$ distribution ($\times 10^{-3}$) between Laoshan Bay and the other area

生物种类	崂山湾	斯科舍陆架	托里斯海峡	白令海
		(Mills <i>et al.</i> , 1984)	(Fry <i>et al.</i> , 1983)	(McConnaughey <i>et al.</i> , 1979)
浮游植物	-19.5—-25.2	-25.3 \pm 2.8	-21.8 \pm 0.9	-24.4
甲壳动物	-17.6—-23.9	-20.4—-23.5	-19.6 \pm 1.8	-19.4—-22.1
毛颚动物	-19.7—-22.7	-21.5	—	—
鱼 类	-16.3—-19.9	-18.1	-15.9 \pm 1.4	-18.6

是这些数据都反映出在食物链传递过程中的确存在有明显的碳同位素分馏效应,当然这种效应的影响有时是相当复杂的。

4 结论

4.1 经过实验室培养试验和现场采样分析两种方法测定,崂山湾生态系统食物网一个营养级的碳同位素富集度为 1.7×10^{-3} 。

4.2 在崂山湾水体生物食物网中观测到的 ^{13}C 富集度为 6.9×10^{-3} ,这相当于该食物网中存在有 5 个营养层次。根据碳同位素方法的测定结果表明,该生态系统中浮游动物的碳来源以浮游植物为主。

4.3 与文献上已公布的其它海区数据相比,在生态系统中 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布的许多方面有相似性。由于本文的数据是经过 7 个航次的采样分析的汇总,故较好地反映出水体生物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节性变化规律。

致谢 陈士群、吕奇同志在样品采集和鱼类样品鉴定工作中给予帮助,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 邓景耀,孟田湘,任胜民,1988. 渤海鱼类的食物关系. 海洋水产研究, 9: 151—171
- 李少菁,1964. 厦门几种海洋浮游桡足类的食性与饵料成分的初步研究. 厦门大学学报, 11(3): 93—109
- 郑 重,李少菁,许振祖编著,1984. 海洋浮游生物学. 北京:海洋出版社, 1—93
- 蔡德陵,毛兴华,韩贻兵,1999. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值在海洋生态系统营养关系研究中的应用——海洋植物的同位素组成及其影响因素的初步探讨. 海洋与湖沼, 30(3): 306—314
- Cai D L, Tan F C, Edmond J M, 1988. Sources and transport of particulate organic carbon in the Amazon River and Estuary. Est Coast Shelf Sci, 26(1): 1—14
- DeNiro M J, Epstein S, 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. Geochim Cosmochim Acta, 42: 495—506
- Fry B, Arnold C, 1982. Rapid $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ turnover during growth of brown shrimp (*Penaeus aztecus*). Oecologia, 54: 200—204
- Fry B, Scalan R S, Parker P L, 1983. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in marine food webs of the Torres strait, Queensland, Australian. J Mar Fresh Res, 34: 707—716
- Fry B, Anderson R K, Entzeroth L *et al*, 1984a. ^{13}C enrichment and oceanic food web structure in the northwestern Gulf of Mexico. Contrib Mar Sci, 27: 49—63
- Fry B, Sherr E B, 1984b. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystem. Contrib Mar Sci, 27: 13—47
- McConnaughey T, McRoy C P, 1979. Food-web structure and the fractionation of carbon isotopes in the Bering Sea. Mar Biol, 53: 257—262
- Mills E L, Pittman K, Tan F C, 1984. Food-web structure on the Scotian Shelf, eastern Canada: A study using ^{13}C as a food-chain tracer. ICES Rapp P-V Reun Cons int Explor Mer, 183: 111—118
- Mosora F, Lacroix M, Duchesne J, 1971. Recherches sur les variations du rapport isotope $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, en fonction de la respiration et de la nature des tissus, chez les animaux superieurs. Comp R Acad Sci, Paris, Serie D, 273: 1 423—1 425
- Rau G H, Mears A J, Young D R *et al*, 1983. Animal $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ correlates with trophic level in pelagic food webs. Ecology, 64: 1 314—1 318
- Schell D M, 1983. Carbon-13 and carbon-14 abundances in Alaskan aquatic organisms: delayed production

from peat in Arctic food webs. *Science*, 219:1068—1071

Thayer G W, Govoni J J, Connally D W, 1983. Stable carbon isotope ratios of the planktonic food web in the northern Gulf of Mexico. *Bull Mar Sci*, 33:247—256

STUDIES ON $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ RATIOS AS A TRACER FOR FOOD WEB IN A MARINE ECOSYSTEM —THE TROPHIC RELATIONS IN PELAGIC FOOD WEBS IN LAOSHAN BAY

CAI De-ling, MENG Fan, HAN Yi-bing, GAO Su-lan

(*First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266003*)

Abstract Seven cruise investigations were conducted in Laoshan Bay from September 1992 to May 1994 to study the trophic relations in pelagic food webs in Laoshan Bay ecosystem using a stable isotopic tracer. The ^{13}C enrichment factors per trophic level in the food chain are $(1.6 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ and 1.7×10^{-3} with two methods for laboratorial culture tests and in situ sampling analyses, respectively, showing both are almost identical. The results of isotopic analyses of in situ samples in seven cruises indicate that the mean of $\delta^{13}\text{C}$ value difference between phytoplankton at the bottom of the food webs and carnivorous fishes at the top level is 6.9×10^{-3} , corresponding to 5 trophic levels, and their trophic locations in the food webs are determined for every species based on their $\delta^{13}\text{C}$ values. This result is basically coincident with that by the feeding habit analyses. Compared with the results of isotopic research in other marine ecosystems in the world, the commonness is that the $\delta^{13}\text{C}$ value distributions of various species of organisms reflect the carbon isotopic enrichment existing in food webs and there is some similarity in different ecosystems. The difference is that based on the measurements of seven months seasonally the samples collected from Laoshan Bay also reflect the seasonal variations in $\delta^{13}\text{C}$ value distributions. The results in most references, however, have only data of one cruise; it is difficult to reflect the seasonal variations. Moreover, the differences of geographic positions, especially latitude, also have a large effect on $\delta^{13}\text{C}$ values. The results of the isotopic tracer research show that the predominant source of carbon of pelagic food webs in Laoshan Bay is phytoplankton-derived carbon, while other carbon sources, such as the organic matter derived from terrestrial clastic and the organic matter in the bottom sediments, are secondary sources.

Key words Carbon isotopes Food web Pelagic livings Trophic level

Subject classification number Q948.885.3