

## 特定化合物同位素分析技术在海洋食物网研究中的应用

于 灏<sup>1</sup>, 吴 莹<sup>1</sup>, 张 经<sup>1,2</sup>

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 海洋食物网研究是海洋生态系统研究中的重要部分。特定化合物同位素分析(CSIA)技术是一项研究海洋食物网的新技术,较测定总有机物的稳定同位素技术,为海洋食物网研究提供了更为深入和丰富的信息。通过脂肪酸、氨基酸等分子的稳定同位素特征,可以更细致更准确地了解食物网的营养结构、物质和能量的传递过程。该技术在海洋食物网研究中,特别是在海洋热液系统食物网研究之中表现出广泛的适用性。虽然特定化合物同位素分析技术仍有一些局限性有待改进,但在海洋食物网研究的应用中已经显示出很大的发展潜力。

**关键词:** 生物地球化学; 稳定同位素; 特定化合物同位素分析; 海洋食物网; 综述

**中图分类号:** O657.63; Q148 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-2997(2006)02-122-07

## Application of Compound-specific Isotope Analysis in Marine Food Web Studies

YU Hao<sup>1</sup>, WU Ying<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Estuarial and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;*

*2. Ocean University of China, Qingdao 266003, China)*

**Abstract:** Marine food web plays an important role in marine ecological system. Compound-specific isotope analysis (CSIA) is a new approach in this field. It provides more abundant and precise information in the studies of marine food web compared to stable isotope analysis for bulks and tissues. Stable isotopic characteristics of fatty acid and amino acid can reveal trophic structures, matter and energy flow processes of marine food webs in detail. Compound-specific isotope analysis has displayed its applicability in many fields, particularly in the study of special food web under extreme environment, such as vent system. Although there are some limitations in utilization, the new technique is very promising in future studies.

**Key words:** biogeochemistry; stable isotope; compound-specific isotope analysis; marine food web; review

收稿日期: 2005-08-12; 修回日期: 2005-11-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划: 近海生态系统食物生产的关键过程及其可持续机理(2006CB400601);

教育部新世纪优秀人才支持计划 NCET. 木质素对东海陆架区陆源有机物的埋藏和迁移的示踪(90211009)

作者简介: 于 灏(1978~), 女(汉族), 山东青岛人, 硕士研究生, 海洋化学专业。E-mail: yuhao\_cn@yahoo.com.cn

海洋生态系统是全球变化的物理、化学、生物和社会过程中不可缺少的组成部分,了解海洋生态系统的功能以及它们如何响应全球变化也是有效掌握全球海洋生物资源的基本要求<sup>[1]</sup>。海洋食物网则是维系这些生态系统发展的基础,也是其重要组成部分,因此海洋食物网的研究成为海洋生态系统研究中非常重要的内容<sup>[1]</sup>。

传统的食物网研究方法是食性分析法,即通过测定动物胃中的食物了解动物近期的摄食情况,但这种方法不能提供动物长期的摄食信息以及食性变化情况,存在很大的局限性。生物组织中的碳氮稳定同位素<sup>13</sup>C、<sup>15</sup>N 则可以提供一个较长期的摄食信息及食物网中的物质和能量的传递信息<sup>[2]</sup>。与传统的食性分析方法相比,稳定同位素技术还具有可以客观反映动物的能量来源而无需进行任何校正的优点<sup>[3]</sup>,这为进一步研究食物网的碳来源、能量流动、营养结构等奠定了可靠的基础。从初级生产者到消费者,碳稳定同位素<sup>13</sup>C 的相对丰度变化很小(大约 1‰)或者没有变化,可以用来指示食物的来源;而氮稳定同位素<sup>15</sup>N 通常随着营养等级升高而富集,并且富集量相对恒定,大约每个营养等级富集 3‰~4‰,因此<sup>15</sup>N 可以用来评估有机物的营养等级。将两者与传统的食性分析法相结合,可以得到关于生物营养关系和摄食、栖息地等方面重要的新信息<sup>[2]</sup>。近 20 年来,特定化合物同位素分析技术的发展,将食物网的研究扩展到分子水平上,通过分子水平上的稳定同位素信息,如脂肪酸的 $\delta^{13}\text{C}$ 、氨基酸的 $\delta^{15}\text{N}$ ,揭示食物网中更本质的引起生物组织中同位素分馏的物质和能量传递过程的规律,这对澄清食物网关系中一些模糊的、令人困惑的问题很有帮助。同时特定化合物同位素分析技术将食物网的研究视野拓展到一些新的领域,用于研究一些特殊的食物网,如热液系统食物网。因此,在海洋食物网的研究中,这种技术成为一个新的发展方向。

## 1 稳定同位素技术在海洋食物网研究中的应用

### 1.1 主要应用

在海洋食物网研究中,碳氮稳定同位素的应用主要有动物食性分析,确定驱动食物网的碳来源和能量流动,以及确定食物网中各生物种属所处的营养位置及食物网的营养结构等方面<sup>[3]</sup>。

在确定食物网营养关系和建立能量传递模型方面,研究者已经应用稳定同位素技术对众多海域的食物网进行了研究,确定了这些海域的生物食物网关系,并且通过比较发现了一些规律。例如,不同水体的食物网存在不同特征范围的稳定同位素比值<sup>[4]</sup>;海洋食物网的纬度地带性<sup>[3]</sup>;不同水层的食物网的差异<sup>[1]</sup>等。这些都为探讨气候短期和长期变化对于海洋生态系统及海洋生产力的影响提供了重要的基础信息。

稳定同位素也用于直接研究较长时间尺度的食物网营养结构变化<sup>[5]</sup>,以及外来因素对食物网的影响,如季节变化<sup>[6]</sup>、El Niño 效应<sup>[7]</sup>、污染<sup>[8]</sup>等。这些研究为评估全球变化对海洋生态系统和生产力的影响提供了较直接的证据。

碳氮稳定同位素在食物网中的传递理论同样也适用于示踪史前食物网。通过研究沉积物中碳氮稳定同位素及其变化,与测年技术或者化石记录相结合,就可以了解相应地质年代的食物网情况,并由此推测当时气候的情况,获得气候变化对于食物网、生产力以及生态系统的影响的信息<sup>[9-10]</sup>。

### 1.2 存在的问题

稳定同位素分析技术为海洋食物网的研究提供了更多更可靠的信息,然而,食物网中生物个体或者组织的同位素数据有时候却不能直接解释食物网,还有可能导致一些错误的结论<sup>[11]</sup>。

应用稳定同位素分析法评估不同食物来源的贡献时有这样的重要假设:生物组织的同位素组成等于各个食物来源的碳同位素比值乘以该食物所占百分比的总和。例如,某一草食性动物以 C3 植物和 C4 植物为食,它的组织的碳同位素比值为

$$\delta^{13}\text{C}(\text{组织}) = p\delta^{13}\text{C}(\text{C3 植物}) + (1-p)\delta^{13}\text{C}(\text{C4 植物}),$$

$p$  为 C3 植物在其总食物来源中所占的比例。

但是这个假设存在很多的问题。首先生物对食物中不同成分的吸收具有不同的效率,其次生物组织对食物的同位素组成会有一定的分馏效应,再者生物体的不同组织对食物营养的分配也是不同的<sup>[11]</sup>。因此在评估食物来源时,特别是复杂食物来源时需要非常谨慎。

即使对于同一生物组织,其稳定同位素的分馏也并不是常数,而会根据食物质量和营养压力的情况,以及生长阶段发生变化<sup>[12]</sup>。这些又增

加了评估食物网中营养状况的复杂性。组织所反映的往往并不是整个食物的同位素组成,而是食物中合成此组织的营养成分的同位素组成<sup>[11]</sup>。譬如生物体内蛋白质的同位素组成往往反映食物中蛋白质的同位素组成<sup>[11]</sup>。这样组织中其他营养成分的同位素组成的影响就会使得数据解释变得复杂。

另外,对于一些生物,如细菌、浮游动物、藻类等,它们往往不能直接被测定,而是通过一些替代品,如拖网中的生物残体、溶解态有机物(DOM)、不同粒径的颗粒态有机物(POM)等来确定其稳定同位素指标。这也就限制了同位素分析技术在水生态系统中的应用<sup>[13]</sup>。

同时,在对食物网的更深入的认识方面,也存在着稳定同位素分析技术所不能解决的问题。例如,从生产者到消费者,个体或者组织的 $\delta^{15}\text{N}$ 增大的潜在变化是什么?食物网中的 $\delta^{13}\text{C}$ 的纬度地带性产生的原因是什么?

显而易见以上这些问题的解决需要对生物的同位素特征进行更加深入的研究,也使得分子水平上的同位素特征研究变得必要起来。特定化合物同位素分析技术在一定程度上可以为解决这些问题提供更丰富的信息,为食物网的深入研究提供新的线索和证据。

## 2 特定化合物稳定同位素分析技术在海洋食物网研究中的应用

### 2.1 特定化合物稳定同位素分析技术

分子水平上的稳定同位素测定技术被称为特定化合物稳定同位素分析技术或特定化合物同位素分析(compound-specific isotope analysis, CSIA)。CSIA 技术是一个比较新的技术,直到 1990 年第一台商业生产的测定特定化合物同位素的 GC/C-IRMS 才问世,然后得以推广。

在分子水平上,脂肪酸、碳水化合物、蛋白质、氨基酸等因在生物的新陈代谢过程中的生物合成作用和循环速率不同,而表现出不同的稳定同位素特征<sup>[11]</sup>。生物组织和个体总的稳定同位素特征也就是这些分子的稳定同位素特征的综合表现。因此,化合物的同位素特征可以更具体、更准确地反映食物网中的营养结构,食物网中物质和能量的传递。

K. Schmidt 等在 2004 年研究了磷虾的氨基酸组成和氨基酸单体的氮稳定同位素,发现不

仅磷虾不同的部位的氨基酸组成不同,单体氨基酸的氮稳定同位素也显著不同。可见因为个体的组织具有不同比例和生理机能,通常所采用的用个体来解释营养等级的办法会引起偏差<sup>[14]</sup>。而应用特征氨基酸的 $\delta^{15}\text{N}$ 能为这个问题提供更细致的信息。

一些研究表明异养生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要被其自养的食物来源影响。因为碳水化合物是自养生物碳的重要组成,并且自养生物对于碳水化合物具有选择性吸收的作用,所以碳水化合物的碳同位素组成也就显著影响异养生物和浮游动物的碳同位素组成。因此,对于基于同位素组成上重建食物网关系,碳水化合物的碳同位素组成信息也就特别重要<sup>[15]</sup>。U. Riebesell 等在 2000 年通过研究 POC 的脂肪酸的碳稳定同位素和一种颗石藻的甾醇、脂肪酸、植醇、烯酮的碳稳定同位素揭示了环境温度通过 $\text{CO}_2$ 作用对于 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响<sup>[16]</sup>,从而有助于理解纬度对于食物网 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响。

J. W. McClelland 和 J. P. Montoya (2002) 对海洋浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 的研究表明,随营养等级升高,生物体的 $\delta^{15}\text{N}$ 升高是其体内氨基酸 $\delta^{15}\text{N}$ 变化的平均结果。有的氨基酸,如苯基丙氨酸的 $\delta^{15}\text{N}$ 几乎不变;有的氨基酸,如谷氨酸,从食物到消费者 $\delta^{15}\text{N}$ 升高近 7‰。这揭示了从食物到消费者个体或者组织的 $\delta^{15}\text{N}$ 增大的内在变化。同时,谷氨酸的 $\delta^{15}\text{N}$ 为界定营养等级提供了更宽的范围,而苯基丙氨酸的 $\delta^{15}\text{N}$ 则可以指示食物网的基础氮源<sup>[17]</sup>。同时这些研究结果表明,在分子水平上对生物稳定同位素特征的研究更加深入,为了解和理解食物网中的营养结构,物质和能量的传递提供了更为丰富和细致的信息。

### 2.2 CSIA 技术的原理和应用

CSIA 技术与测定总有机物的稳定同位素技术都是利用相对测量法,测定被分析物气体相对于标准(或者参比)气体的同位素比值,从而得到同位素丰度信息。其定义如下: $\delta X = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$

$R_{\text{sample}}$  是样品的测定同位素比值, $R_{\text{standard}}$  是标准的测定同位素比值<sup>[18]</sup>。

但是,测定总有机物的稳定同位素比值时被分析物气体是由生物个体或者组织整体燃烧而成,而测定特定化合物时被分析的气体是由纯

的分子直接燃烧而成。因此两种技术使用的仪器也不相同。CSIA 技术必须将稳定同位素质谱仪 IRMS 通过燃烧管与 GC 相连,才可以测定很高精度的特定化合物的稳定同位素,这种仪器被称为 GC/C-IRMS 或者 irm-GC/MS<sup>[18]</sup>。

与测定总有机物的稳定同位素技术相比,CSIA 技术的样品的前处理较为复杂,需要将待测样品通过纯化、分离、富集浓缩、衍生化等变为可以通过 GC 分离的分子,然后在燃烧管中变为气态 CO<sub>2</sub> 或者氮氧化物,氮氧化物还需经过还原管还原为 N<sub>2</sub>,最后通过质谱测定同位素比值<sup>[18]</sup>。

自 CSIA 技术问世以来,这项新技术已应用于诸多方面。利用天然丰度的化合物同位素特征值可以鉴定香精、植物油、酒类、药品的品质,进行分子考古学研究,环境检测,地球化学研究等。另外,CSIA 还可以代替放射性示踪剂用于生物化学方面的示踪研究,例如应用很低浓度的 <sup>13</sup>C 示踪剂研究癌细胞中葡萄糖、胆固醇、尿素等的动力学机制,测定蛋白质合成过程等<sup>[18]</sup>。

在我国,CSIA 技术的应用尚处于起步阶段,主要应用于油气地球化学研究<sup>[19]</sup>,沉积物生物源判断<sup>[20]</sup>,古环境重建<sup>[21]</sup>等几个方面。例如,南沙海区 17962 钻孔沉积物中提取的高碳正构烷烃、长链脂肪醇、长链脂肪酸的单体碳同位素变化信息丰富了该地区 3 万年来古气候的变化资料,提供了更高分辨率的记录<sup>[21]</sup>。这些研究成果已经初步显示 CSIA 技术在各个领域应用的巨大潜力。

### 2.3 在海洋食物网研究中的应用

在食物网研究方面,CSIA 技术主要用于土壤食物网研究<sup>[22]</sup>,水体食物网关系研究<sup>[23]</sup>,以及与食物网研究相关联的沉积物物质来源和成岩作用<sup>[13]</sup>、生物生理研究<sup>[24]</sup>等几个方面。可以看出,CSIA 技术在食物网研究中的应用涉及的研究对象、目标化合物都比较广泛,也说明此技术具有良好的适用性。

目前,CSIA 技术在海洋食物网研究中的应用主要涉及如下几个方面:热液系统、POM(悬

浮颗粒有机物)、浮游生物、底栖生物、大型动物等。表 1 是一些 CSIA 技术在海洋有关的系统中的应用。

应用 CSIA 技术对海洋食物网进行系统研究特别表现在海底热液系统研究中。通过 CSIA 对一些极限环境中的生物,如大洋中脊热液系统的虾、贻贝、蠕虫等<sup>[25-28]</sup>,以及墨西哥湾的冷水渗出口的细菌<sup>[13]</sup>的研究,主要在于探询这些生物生长所必需的物质和能量来源。例如,在大西洋中脊热液烟囱区域生活的虾,它们的肌肉组织和体内贮存的类脂的脂肪酸中 16:2、18:2 的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-11\text{‰} \sim -13\text{‰}$ ,这些脂肪酸的  $\delta^{13}\text{C}$  值与所发现的热液细菌化学能合成所固定的碳一致,表明其具有化学能食物来源。而其体内的中性类脂的高度不饱和脂肪酸 20:4 和 22:6 的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-15.8\text{‰} \sim -27.1\text{‰}$ ,与光合作用固定的碳一致,说明这些虾体内贮存的类脂来自早期浮游动物体<sup>[25,27-28]</sup>。而热液烟囱区域贻贝的组织样品中的单不饱和脂肪酸(*n*-8)证实其腮组织含有的这些高含量的单不饱和脂肪酸是与食甲烷的细菌内共生的,两者的脂肪酸的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-24.9\text{‰} \sim -34.9\text{‰}$ ,正是以甲烷为基础的营养范围<sup>[26]</sup>。

CSIA 在这种领域的广泛应用是由于这些极限环境生态系统的生物的特殊性造成的。当这些生物脱离它们生长的特殊生活环境时,其肌体化学组成的变化无法估量,而只有保存于分子中稳定同位素才有可能相对稳定的,有可能提供有关生物生源关系和能量来源的信息。而 CSIA 测定结果与其他相关信息相吻合也证实此方法是适用的。

CSIA 技术也应用于河口、海湾、大洋等传统的海洋生态系统的食物网研究中。例如,发现于两个 Newfoundland 河口的贻贝组织的脂肪酸特定化合物同位素特征表明这些贻贝主要以海洋浮游植物为食,因为两者占优势地位的 16:z0、16:1、20:5 和 20:6 脂肪酸的  $\delta^{13}\text{C}$  值一致<sup>[29]</sup>。

表 1 特定化合物同位素分析技术在海洋食物网研究中的应用

Table 1 Examples of application of compound-specific stable isotope analysis in marine food web

研究区域 Study area	研究对象 Study subject	目标化合物 Compound	同位素 Isotope	测定方法 Analysis method	参考文献 Reference
热液系统	虾, 贻贝	高度不饱和脂肪酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[25, 27, 28]
	贻贝	单不饱和脂肪酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[26]
冷水渗漏口	细菌	磷脂类脂肪酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[13]
海水	POM	高度不饱和脂肪酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[34]
海水	浮游生物	氨基酸	$\delta^{15}\text{N}$	GC/C-IRMS	[17]
淡水、海水体	植物、浮游植物	单糖	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[15]
近岸水体	有孔虫	脂肪酸、氨基酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[35]
河口	贻贝	脂肪酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[29]
海湾、湿地	蓝蟹	氨基酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[12]
海湾	海星	脂肪酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[31]
海湾	鲸	脂肪酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[30]
淡/海水港湾	海豹	高度不饱和脂肪酸	$\delta^{13}\text{C}$	GC/C-IRMS	[32]

CSIA 技术在个体差异的研究中也有比较好的结果。例如 M. Borobia 等 1995 年通过对鲸脂的分析调查了 St. Lawrence 湾的同海域的长须鲸和座头鲸的食物或新陈代谢的差异, 发现化学和同位素的差异与座头鲸比长须鲸的营养等级略低的事实相一致, 这反映了长期的平均食物的差异<sup>[30]</sup>。

从表 1 可以看出, 此技术已经应用于 POM、浮游生物、底栖生物、大型动物。但在传统的海洋食物网研究中, CSIA 技术往往是作为测定总有机物的稳定同位素技术的补充, 或者与其他的科学技术方法相结合, 如与有关脂肪酸的谱图鉴定相结合<sup>[31-32]</sup>。

## 2.4 应用前景

虽然目前 CSIA 技术在海洋食物网研究中更多的是作为测定总有机物的稳定同位素技术的补充, 但其应用价值仍不可低估。首先, 从不同生物类型特定化合物同位素测定结果来看, 一些有价值的化合物组成具有一定的相关性, 这种相关性为建立食物网的营养结构奠定了基础。表 2 列出了各种生物类型的特定化合物同位素测定结果中有价值的化合物组成。从表 2 可以看出,  $\delta^{13}\text{C}$  的测定中, POM、浮游生物和底栖生物都有 16:1 的不饱和脂肪酸的存在, 这大致反映了三种个体的营养等级相关性, 虽然这仍需更多个体的验证。另外, 18:1 的不饱和脂肪酸也存在于每种生物类型中, 这或许也会成为将各

个营养等级的生物类型相联系的生物标志物。

另外, 海洋食物网研究中, CSIA 技术对于  $\delta^{15}\text{N}$  的应用还很少。J. W. McClelland 和 J. P. Montoya (2002) 对海洋浮游生物的  $\delta^{15}\text{N}$  的研究表明氨基酸中的  $\delta^{15}\text{N}$  对于研究海洋食物网是很有帮助的<sup>[17]</sup>。M. S. Fantle 等 1999 年在研究海湾和湿地的蓝蟹中也指出单个氨基酸的氮同位素组成, 特别是谷氨酸和丝氨酸可以阐明其蓝蟹食物网的生态和营养关系, 因为在蟹的新陈代谢循环中这些氨基酸的氮同位素会发生变化<sup>[12]</sup>。某些基本氨基酸是生命体生长所必需的, 氮的循环也就是通过它们进行的, 研究它们的氮同位素对于食物网营养关系和能量传递的解释会很有意义。

然而, 目前 CSIA 技术仍是很新的技术, 还存在着一些局限性。首先特定化合物同位素测定需要特殊的设备——GC/C-IRMS<sup>[33]</sup>, 虽然此设备已经商业化, 但其造价和消耗都非常昂贵。其次, 前处理流程长, 采样后需经过纯化、分离、富集、衍生化等步骤, 并且在前处理和测定的过程中要求操作精细, 防止同位素分馏和质量歧视引起测定结果偏差<sup>[33]</sup>。第三, 数据分析时往往需要较多的经验。目前在这方面的研究还不够多, 在数据处理方面缺乏足够的规律, 认识数据时更多的还需要研究者的经验。最后一点, 也是很关键的一点, 在海洋食物网研究中尚没有发现某种分子标志物的稳定同位素值具有特征的物

源指示作用。虽然 CSIA 技术仍有局限性,但它能够为海洋食物网研究提供更丰富准确的信息,

因此在未来的研究应用中深具发展潜力。

表 2 不同生物类型特定化合物同位素测定结果中有价值的化合物组成

Table 2 Examples of valuable compound compositions in molecular stable isotope analysis of different organisms

研究对象 Subjects	目标化合物有价值的组成 Valuable compound compositions	同位素 Isotope	参考文献 Reference
POM	高度不饱和脂肪酸 $18:1n9/18:1n7,16:1n7/16:0,20:5n3/22:6n3$	$\delta^{13}C$	[34]
浮游生物	脂肪酸 $14:0,16:0,16:1,18:0,18:1$	$\delta^{13}C$	[35]
底栖生物	脂肪酸 $16:0,16:1,20:5$ 和 $20:6$	$\delta^{13}C$	[29]
	脂肪酸 $16:1n7,18:1n7$	$\delta^{13}C$	[31]
大型动物	$18:2n-6, 18:3n-3, 20:4n-6$ 和 $C_{18}$ 高度不饱和脂肪酸	$\delta^{13}C$	[32]

### 参考文献:

- [1] Olson R, Young J, Allain V, et al. OFCCP Workshop on the Application of Stable Isotopes in Pelagic Ecosystems, La Paz, B. C. S., Mexico, 31 May-1 June 2004[J]. Globec international newsletter April 2005. 2005: 42-44.
- [2] Hobson K A, Fisk A, Karnovsky N, et al. A Stable Isotope ( $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{15}N$ ) Model for the North Water Food Web: Implications for Evaluating Trophodynamics and the Flow of Energy and Contaminants[J]. Deep-Sea Research II, 2002, 49:5 131-5 150.
- [3] France R. Stable Nitrogen Isotopes in Fish: Literature Synthesis on the Influence of Ecotonal Coupling[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 41: 737-742.
- [4] 蔡德陵,张淑芳,张 经. 天然存在的碳、氮稳定同位素在生态系统研究中的应用[J]. 质谱学报, 2003, 24 (3): 434-440.
- [5] Satterfield IV F R, Finney B P. Stable Isotope Analysis of Pacific Salmon: Insight into Trophic Status and Oceanographic Conditions over the Last 30 Years[J]. Progress in Oceanography, 2002, 53: 232-245.
- [6] Goering J, Alexander V, Haubenstein N. Seasonal Variability of Stable Carbon and Nitrogen Isotope Ratios of Organisms in a North Pacific Bay [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1990, 30: 239-260.
- [7] Stapp P, Polis G A and Piñero F S. Stable Isotopes Reveal Strong Marine and El Niño Effects on Island Foodwebs[J]. Nature, 1999, 401: 467-469.
- [8] Gaston T F, Suthers I M. Spatial Variation in  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{15}N$  of Liver, Muscle and Bone in a Rocky Reef Planktivorous Fish: the Relative Contribution of Sewage[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 304: 17-33.
- [9] Finney B P, Eaves I G, Sweetman J, et al. Fisheries Productivity in the Northeastern Pacific Ocean over the Past 2,000 Years[J]. Nature, 2002, 416: 729-733.
- [10] Struck U, Altenbach A V, Emeis K C, et al. Changes of the Upwelling Rates of Nitrate Preserved in the  $\delta^{15}N$ -signature of Sediments and Fish Scales from the Diatomaceous Mud Belt of Namibia[J]. Geobios, 2002, 35: 3-11.
- [11] Gannes L Z, O'Brien D M, Drio C M. Stable Isotopes in Animal Ecology: Assumptions, Caveats, a Call for More Laboratory Experiments[J]. Ecology, 1997, 78: 1 271-1 276.
- [12] Fantle M S, Dittel A I, Schwalm S M, et al. A Food Web Analysis of the Juvenile Blue Crab, Callinectes Sapidus, Using Stable Isotopes in Whole Animals and Individual Amino Acids[J]. Oecologia, 1999, 120: 416-426.
- [13] Cifuentes L A, Salata G G. Significance of Carbon Isotope Discrimination between Bulk Carbon and Extracted Phospholipid Fatty Acids in Selected Terrestrial and Marine Environments[J]. Organic Geochemistry, 2001, 32: 613-621.
- [14] Schmidt K, McClelland J W, Mente E, et al. Trophic-level Interpretation Based on  $\delta^{15}N$  Values: Implications of Tissue-Specific Fractionation and Amino Acid Composition[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 266: 43-58.
- [15] van Dongen B E, Schouten S, Damste J S S. Carbon Isotope Variability in Monosaccharides and Lipids of Aquatic Algae and Terrestrial Plants [J]. Marine Ecology Progress Series,

- 2002, 232: 83-92.
- [16] Riebesell U, Revill A T, Holdsworth D G, et al. The Effects of Varying CO<sub>2</sub> Concentration on Lipid Composition and Carbon Isotope Fractionation in *Emiliania Huxleyi*[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64, (24): 4 179-4 192.
- [17] McClelland J W, Montoya J P. Trophic Relationships and the Nitrogen Isotopic Composition of Amino Acids in Plankton[J]. *Ecology*, 2002, 83: 2 173-2 180.
- [18] Meier-Augenstein W. Applied Gas Chromatography Coupled to Isotope Ratio Mass Spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 1999, 842: 351-371.
- [19] 段毅, 张辉, 吴保祥, 等. 柴达木盆地原油单体正构烷烃碳同位素研究[J]. *矿物岩石*, 2003, 23: 91-94.
- [20] 段毅, 宋金明, 张辉. 南沙海区生物单体脂类碳同位素研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33: 889-894.
- [21] 胡建芳, 彭平安, 贾国东, 等. 三万年来南沙海区古环境重建: 生物标志物定量与单体碳同位素研究[J]. *沉积学报*, 2003, 21: 211-218.
- [22] Ruess L, Tiunov A, Haubert D, et al. Carbon Stable Isotope Fractionation and Trophic Transfer of Fatty Acids in Fungal Based Soil Food Chains[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 945-953.
- [23] Siessegger J G, Focken U, Muetzel S, et al. Feeding Level and Individual Metabolic Rate Affect  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  Values in Carp: Implications for Food Web Studies [J]. *Oecologia*, 2004, 138: 175-183.
- [24] Chamberlain P M, Bull I D, Black H I J, et al. Lipid Content and Carbon Assimilation in *Collembola*: Implications for the Use of Compound-Specific Carbon Isotope Analysis in Animal Dietary Studies[J]. *Oecologia*, 2004, 139: 325-335.
- [25] Pond D W, Segonzac M, Bell M V, et al. Lipid and Lipid Carbon Stable Isotope Composition of the Hydrothermal Vent Shrimp *Mirocaris Fortuinata*: Evidence for Nutritional Dependence on Photosynthetically Fixed Carbon[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 157: 221-231.
- [26] Pond D W, Bell M V, Dixon D R, et al. Stable-Carbon-Isotope Composition of Fatty Acids in Hydrothermal Vent Mussels Containing Methatrophic and Thiotrophic Bacterial Endosymbionts[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64: 370-375.
- [27] Pond D W, Dixon D R, Bell M V, et al. Occurrence of 16 : 2(*n*-4) and 18 : 2(*n*-4) Fatty Acids in the Lipids of the Hydrothermal Vent Shrimps *Rimicaris Exoculata* and *Alvinocaris Markensis*: Nutritional and Trophic Implications [J]. *Mar Ecol Prog*, 1997, 156: 167-174.
- [28] Rieley G, Van Dover C L, Hedrick D B, et al. Trophic Ecology of *Rimicaris Exoculata*: a Combined Lipid Abundance/Stable Isotope Approach [J]. *Marine Biology*, 1999, 133: 495-499.
- [29] Murphy D E, Abrajano T A. Carbon Isotope Compositions of Fatty Acids in Mussels from Newfoundland Estuaries[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, 39: 261-272.
- [30] Borobia M, Gearing P L, Simard Y, et al. Blubber Fatty Acids of Finback and Humpback Whales from the Gulf of St. Lawrence[J]. *Mar Biol*, 1995, 122: 341-353.
- [31] McKenzie J D, Black K D, Kelly M S, et al. Comparisons of Fatty Acid and Stable Isotope Ratios in Symbiotic and Non-symbiotic Brittlestars from Oban Bay, Scotland[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 2000, 80: 311-320.
- [32] Smith R J, Hobson K A, Koopman H N, et al. Distinguishing between Populations of Fresh- and Salt- Water Harbour Seals (*Phoca Vitulina*) Using Stable-Isotope Ratios and Fatty Acid Profiles [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1996, 53: 272-279.
- [33] Meier-Augenstein W. Stable Isotope Analysis of Fatty Acids by Gas Chromatography-Isotope Ratio Mass Spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2002, 464: 63-79.
- [34] Tolosa I, Vescovoli I, LeBlond N, et al. Distribution of Pigments and Fatty Acid Biomarkers in Particulate Matter from the Frontal Structure of the Alboran Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 88: 103-125.
- [35] Uhle M E, Macko S A, Spero H J, et al. Sources of Carbon and Nitrogen in Modern Planktonic Foraminifera: the Role of Algal Symbionts as Determined by Bulk and Compound Specific Stable Isotopic Analyses [J]. *Org Geochem*, 1997, 27: 103-113.