

# 水生动物碳氮稳定同位素富集系数的整合分析

郭 梁 孙翠萍 任伟征 张 剑 唐建军 胡亮亮\* 陈 欣

(浙江大学生命科学学院, 杭州 310058)

**摘 要** 同位素富集系数即动物组织与其食物之间同位素丰度( $\delta$ )的差异值( $\Delta$ ),是稳定性同位素技术应用于生态系统营养关系、食性和食物网研究的重要参数.不同生境条件下和不同物种之间的富集系数通常被认为是相对稳定的,但越来越多的研究发现,富集系数在不同类型动物之间存在明显差异而不是一个恒定值,尽管这一差异范围仍不清楚.本文进行了3种不同权重设置方式的整合分析,综述并比较了4类水生动物(硬骨鱼类、甲壳类、爬行类、软体动物)的碳氮稳定同位素富集系数.在 Web of Science 和 CNKI 数据库上搜索 2014 年底之前发表的论文,获得了 42 篇包含 140 个  $\Delta^{13}\text{C}$  的研究结果和 159 个  $\Delta^{15}\text{N}$  的研究结果.使用 3 种不同的加权方式进行 3 次独立整合分析,3 种加权方式分别是以方差倒数作为权重、以样本量作为权重和相等权重.结果表明,整合分析统计结果十分稳健,不同权重设置的分析结果差异很小.水生动物碳稳定同位素富集系数( $\Delta^{13}\text{C}$ )总体平均值为 1.0‰,其中,硬骨鱼类 1.0‰,甲壳类 1.3‰,爬行类 0.5‰,软体动物 1.5‰;氮稳定同位素富集系数( $\Delta^{15}\text{N}$ )总体平均值为 2.6‰,其中,硬骨鱼类 2.4‰,甲壳类 3.6‰,爬行类 1.0‰,软体动物 2.5‰.统计分析表明,硬骨鱼类、甲壳类、爬行类、软体动物之间的  $\Delta^{13}\text{C}$  没有显著差异,而  $\Delta^{15}\text{N}$  存在显著差异.因此,应用稳定性同位素技术研究水生动物营养关系、食性和食物网中碳富集系数可以选择总体平均值,而氮富集系数则应根据不同水生动物类型选取相应的系数值.

**关键词** 水生动物; 稳定同位素; 富集系数; 整合分析

**Meta-analysis of stable carbon and nitrogen isotopic enrichment factors for aquatic animals.**

GUO Liang, SUN Cui-ping, REN Wei-zheng, ZHANG Jian, TANG Jian-jun, HU Liang-liang\*, CHEN Xin (College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China).

**Abstract:** Isotopic enrichment factor ( $\Delta$ , the difference between the  $\delta$  value of food and a consumer tissue) is an important parameter in using stable isotope analysis (SIA) to reconstruct diets, characterize trophic relationships, elucidate patterns of resource allocation, and construct food webs. Isotopic enrichment factor has been considered as a constancy value across a broad range of animals. However, recent studies showed that the isotopic enrichment factor differed among various types of animals although the magnitude of variation was not clear. Here, we conducted a meta-analysis to synthesize and compare  $\Delta^{13}\text{C}$  and  $\Delta^{15}\text{N}$  among four types of aquatic animals (teleosts, crustaceans, reptiles and molluscs). We searched for papers published before 2014 on Web of Science and CNKI using the key words “stable isotope or isotopic fractionation or fractionation factor or isotopic enrichment or trophic enrichment”. Forty-two publications that contain 140 studies on  $\Delta^{13}\text{C}$  and 159 studies on  $\Delta^{15}\text{N}$  were obtained. We conducted three parallel meta-analyses by using three types of weights (the reciprocal of variance as weights, the sample size as weights, and equal weights). The results showed that no significant difference in  $\Delta^{13}\text{C}$  among different animal types (teleosts 1.0‰, crustaceans 1.3‰, reptiles 0.5‰, and molluscs 1.5‰), while  $\Delta^{15}\text{N}$  values were significantly different (teleosts 2.4‰, crustaceans 3.6‰, reptiles 1.0‰ and molluscs 2.5‰). Our results sugges-

本文由国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB100406)和国家自然科学基金项目(31270485)资助 This work was supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB100406) and the National Natural Science Foundation of China (31270485).

2015-06-02 Received, 2015-12-04 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zjuhull@126.com

ted that the overall mean of  $\Delta^{13}\text{C}$  could be used as a general enrichment factor, but  $\Delta^{15}\text{N}$  should be chosen according to the type of aquatic animals in using SIA to analyze trophic relationships, patterns of resource allocation and food webs.

**Key words:** aquatic animal; stable isotope; enrichment factor; meta-analysis.

自动物的组织与食物之间碳氮稳定同位素丰度( $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$ )的相关性被发现以来<sup>[1-3]</sup>, 稳定同位素分析(stable isotope analysis)越来越多地应用于营养生态学(trophic ecology)的定量研究. 相关的研究包括营养级分析<sup>[4]</sup>、营养关系研究<sup>[5]</sup>、食性分析<sup>[6]</sup>、生态位重叠与资源竞争<sup>[7-8]</sup>和食物网结构研究<sup>[3,9]</sup>等多个方面. 而这些研究中, 70%以上来自水域生态系统<sup>[10]</sup>.

稳定同位素之间在绝大多数化学和生物反应过程中具有相同的性质, 而仅存在由中子数量不同而导致的微小质量差异<sup>[11]</sup>. 正是该差异引发了稳定同位素在动物新陈代谢中的富集效应(enrichment), 即消费者更容易同化食物中的重同位素而代谢排放轻同位素<sup>[2,12]</sup>. 富集效应通常导致  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  随着营养级的增加而增大<sup>[13-14]</sup>. 稳定同位素值在相邻营养级之间(或消费者组织与其食物之间)的差值被称为富集系数(enrichment factor), 用  $\Delta$  表示. 富集系数的测定通常由以下 3 种方式实现: 1) 计算某已知食性的动物与其生境中唯一食物的同位素差值<sup>[9,15]</sup>; 2) 计算野外捕获的动物与其肠道内容物的同位素差值<sup>[9,16]</sup>; 3) 在实验室饲养试验中计算动物与其食物的同位素差值<sup>[17]</sup>.

大量试验数据表明, 在不同条件下不同物种之间测得的富集系数大致处在一个稳定的数值范围内,  $\Delta^{13}\text{C}$  平均值大约在 0~1‰, 而  $\Delta^{15}\text{N}$  平均值大约在 3‰~4‰<sup>[13,14]</sup>. 在实际运用中, 富集系数受到许多条件的限制而很难准确估计, 因此通常被假设为一个恒定值, 可在不同系统和生物之间通用<sup>[18-20]</sup>. 例如 Post<sup>[4]</sup> 总结已发表数据得出  $\Delta^{13}\text{C}$  和  $\Delta^{15}\text{N}$  的常数为 0.4‰和 3.4‰, 尽管这两个富集系数实际上均有较大的变异( $\Delta^{13}\text{C}$  的方差为 1.3‰,  $\Delta^{15}\text{N}$  的方差为 0.98‰), 但被广泛地应用.

然而, 在很多情况下不同生物之间富集系数的差异是不能被简单地忽视的, 富集系数的大小对营养级和食性分析的准确性和客观性有着重要影响<sup>[4,21-23]</sup>. 影响富集系数的因素有很多, 主要与代谢和生理过程有关, 涉及到元素的同化和异化的平衡<sup>[24]</sup>. 影响富集系数的因素研究主要包括动物分类地位、氮素的排泄方式、食物因素、个体发育、营养状

况等多个方面<sup>[21,25-26]</sup>, 但是其影响机理目前仍不清楚. 因此, 在稳定性同位素分析时, 应充分考虑导致富集系数变化的诸多因素和富集系数的变异大小<sup>[13,21]</sup>. 为此有必要根据研究具体对象选择最为合适的富集系数, 从而更准确地分析生物的食物来源和营养级位置等.

整合分析(meta-analysis)是一种对多个独立试验结果进行综合定量分析的统计学方法<sup>[27]</sup>. 整合分析将每个独立研究结果归纳为一个具有权重的效应值(effect size), 并在对效应值进行统计分析的过程中将研究间误差和研究内部误差均考虑在统计模型之中<sup>[28]</sup>, 因此可以得到更具统计学效力的综述结果. 传统的整合分析需要每个独立研究均具备试验组 and 对照组以计算效应值, 但是随着其统计方法学的发展, 现已拓展至可以单个观测值(例如生物多样性、遗传率、呼吸速率等)作为效应值进行分析<sup>[27]</sup>. Vanderklift 等<sup>[21]</sup>曾在 2001 年使用整合分析的方法研究受控试验中氮富集系数的变异来源, 该分析使用传统的 Hedges' d 作为效应值, 收集了大量的研究结果(包括鸟类、哺乳动物和水生生物), 但是较多研究数据因不能完全符合其严格的整合分析条件而未被采用. 在这之后有更多的关于富集系数的独立研究被陆续报道, 为我们开展更全面的整合分析提供了可能.

本文以水生动物为研究对象, 搜索富集系数相关文献, 采用文献中富集系数值作为效应值进行整合分析. 本文对最常见的水生动物研究对象进行分类, 比较不同类型之间富集系数的差异, 以期为水生动物食源分析、营养级位置确定以及食物网结构分析等研究提供一个更为精确的富集系数的参考.

## 1 研究方法

### 1.1 文献检索与数据提取

外文文献的检索使用 Web of Science 数据库(<http://www.webofknowledge.com/wos>). 主题关键词为“stable isotope OR isotopic fractionation OR enrichment factor OR isotopic enrichment OR trophic enrichment”. 检索年限为 2008—2014 年. 精炼研究方向为: Ecology、Marine Freshwater Biology、Oceanography、

Environmental Sciences、Fisheries, 共检索到文献 3666 篇.

检索进一步筛选标准为:1) 文献中需要涉及到 C 或 N 的富集系数;2) 文献中包含以下详细信息: 动物种类、食物类型、试验周期、 $\Delta^{13}\text{C}$  或  $\Delta^{15}\text{N}$ 、样本量、标准差或标准误.

同一篇文献中出现以下情况均视为多个相互独立的研究:1) 测定取食同一食物的多个物种;2) 测

定同一物种取食不同食物;3) 测定同一物种的不同组织部位. 对于以图像形式呈现的结果, 我们使用图像数据化软件 GetData Graph Digitizer version 2.24 获取所需数据.

通过以上方式得到有效文献 20 篇, 结合 Caut 等<sup>[26]</sup>和 Vanderklif 等<sup>[21]</sup>对前人研究的收集整理, 共获得 37 篇文献, 包含  $\Delta^{13}\text{C}$  和  $\Delta^{15}\text{N}$  有效数据共 155 组英文数据、17 组中文数据(表 1).

表 1 整合分析数据来源  
Table 1 Data sources in meta-analysis

| 种名<br>Species                             | 类型<br>Type | 取样组织<br>Sampling tissue                    | 富集系数<br>Enrichment factor                     | 试验周期<br>Duration (d) | 参考文献<br>Reference |
|---|------------|--|---|----------------------|-------------------|
| 湖红点鲑 <i>Salvelinus namaycush</i>          | I          | 未指明 Unspecified                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [18]              |
| 虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>             | I          | 未指明 Unspecified                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [29]              |
| 美洲红点鲑 <i>Salmo fontinalis</i>             | I          | 未指明 Unspecified                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [29]              |
| 幽灵虾 <i>Nihonotrypaea japonica</i>         | II         | 肌肉和全身组织 Muscle and whole body              | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [30]              |
| 哈氏和美虾 <i>N. harmandi</i>                  | II         | 肌肉和全身组织 Muscle and whole body              | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [30]              |
| 四角蛤蜊 <i>Macrta veneriformis</i>           | IV         | 肌肉和全身组织 Muscle and whole body              | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [30]              |
| 菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>      | IV         | 肌肉和全身组织 Muscle and whole body              | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [30]              |
| 绿海龟 <i>Chelonia mydas</i>                 | III        | 血液、皮肤和鳞片 Blood, skin and scute             | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 232                  | [31]              |
| 凡纳滨对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>         | II         | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$                         | 9                    | [32]              |
| 凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>                  | II         | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{15}\text{N}$                         | 21                   | [33]              |
| 大西洋鲑 <i>Salmo salar</i>                   | I          | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [34]              |
| 孔雀花鳉 <i>Poecilia reticulata</i>           | I          | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 64                   | [35]              |
| 蓝蟹 <i>Callinectes sapidus</i>             | II         | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [36]              |
| 长牡蛎 <i>Crassostrea gigas</i>              | IV         | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 90                   | [37]              |
| 凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>                  | II         | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 28                   | [38]              |
| 凡纳滨对虾 <i>L. vannamei</i>                  | II         | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 29                   | [39]              |
| 尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>        | I          | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 56                   | [40]              |
| 鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>                 | I          | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 56                   | [41]              |
| 野翼甲鲶 <i>Pterygoplichthys disjunctivus</i> | I          | 血液和鳍 Blood and fin                         | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 203                  | [42]              |
| 糠虾 <i>Mysis mixta</i>                     | II         | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | –                    | [43]              |
| 湖红点鲑 <i>S. namaycush</i>                  | I          | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 136                  | [44]              |
| <i>Episesarma singaporense</i>            | II         | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 90                   | [45]              |
| <i>E. versicolor</i>                      | II         | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 90                   | [45]              |
| 宽鼻白鲑 <i>Coregonus nasus</i>               | I          | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 146                  | [46]              |
| 鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>               | I          | 肌肉、肝脏和未指明 Muscle, liver and unspecified    | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 540                  | [47]              |
| 日本拟沼螺 <i>Assiminea japonica</i>           | IV         | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 68                   | [48]              |
| 寄生拟沼螺 <i>Angustassiminea castanea</i>     | IV         | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 68                   | [48]              |
| 鳉鱼 <i>Fundulus heteroclitus</i>           | I          | 肝脏 Liver                                   | $\Delta^{15}\text{N}$                         | –                    | [49]              |
| 远海梭子蟹 <i>Portunus pelagicus</i>           | II         | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 56                   | [50]              |
| 虹鳟 <i>O. Mykiss</i>                       | I          | 肌肉、肝脏和全身组织 Muscle, liver and whole body    | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 120                  | [51]              |
| 虹鳟 <i>O. mykiss</i>                       | I          | 肌肉 Muscle                                  | $\Delta^{13}\text{C}$                         | –                    | [52]              |
| 绿海龟 <i>C. mydas</i>                       | III        | 血液 Blood                                   | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 619                  | [53]              |
| 棱皮龟 <i>Dermochelys coriacea</i>           | III        | 血液和皮肤 Blood and skin                       | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 424                  | [54]              |
| 克氏螯虾 <i>Jasus edwardsii</i>               | II         | 血液、肌肉 Bloodandmuscle                       | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 234                  | [55]              |
| 新西兰拟鲈 <i>Parapercis colias</i>            | I          | 全身组织、鳍和未指明 Whole body, fin and unspecified | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 234                  | [55]              |
| 花鲈 <i>Lateolabrax japonicas</i>           | I          | 肌肉、鳍和肝脏 Muscle, fin and liver              | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 100                  | [56]              |
| 狼鲈 <i>Dicentrarchusl abrax</i>            | I          | 肌肉、心脏和肝脏 Muscle, heart and liver           | $\Delta^{15}\text{N}$                         | 730                  | [57]              |
| 大西洋鲑 <i>S. salar</i>                      | I          | 肌肉和肝脏 Muscle and liver                     | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 315                  | [58]              |
| 新糠虾 <i>Neomysis intermedia</i>            | II         | 全身组织 Whole body                            | $\Delta^{15}\text{N}$                         | –                    | [59]              |

续表 1  
Table 1 Continued

| 种名<br>Species                         | 类型<br>Type | 取样组织<br>Sampling tissue        | 富集系数<br>Enrichment factor                     | 试验周期<br>Duration (d) | 参考文献<br>Reference |
|---------------------------------------|------------|--------------------------------|---|----------------------|-------------------|
| 北方蓝鳍金枪鱼 <i>Thunnus thynnus</i>        | I          | 肌肉 Muscle                      | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 90                   | [60]              |
| 北方蓝鳍金枪鱼 <i>T. thynnus</i>             | I          | 肝脏 Liver                       | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | —                    | [61]              |
| 白鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> | I          | 肌肉 Muscle                      | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 150                  | [62]              |
| 草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>    | II         | 肌肉、肝脏和鳃 Muscle, liver and gill | $\Delta^{15}\text{N}$                         | 90                   | [63]              |
| 太平洋牡蛎 <i>C. gigas</i>                 | IV         | 肌肉和全身组织 Muscle and whole body  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 33                   | [64]              |
| 真鲷 <i>Pagrosomus major</i>            | I          | 全身组织 Whole body                | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 160                  | [65]              |
| 牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>      | I          | 全身组织 Whole body                | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 160                  | [65]              |
| 黑棘鲷 <i>Sparus macrocephalus</i>       | I          | 全身组织 Whole body                | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 160                  | [65]              |
| 鲈鱼 <i>L. japonicas</i>                | I          | 肌肉 Muscle                      | $\Delta^{13}\text{C}$                         | 22                   | [66]              |
| 鳀鱼 <i>Engraulis japonicas</i>         | I          | 肌肉 Muscle                      | $\Delta^{15}\text{N}$                         | 180                  | [67]              |
| 赤眼梭 <i>Liza soiuy</i>                 | I          | 肌肉 Muscle                      | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | —                    | [68]              |
| 三疣梭子蟹 <i>P. trituberculatus</i>       | II         | 肌肉 Muscle                      | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | —                    | [68]              |
| 蛄蛄虾 <i>Upogebia</i> sp.               | II         | 肌肉 Muscle                      | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | —                    | [68]              |
| 军曹鱼 <i>Rachycentron canadum</i>       | I          | 肌肉和全身组织 Muscle and whole body  | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 40                   | [69]              |
| 角蝾螺 <i>Turbo cornutus</i>             | IV         | 肌肉 Muscle                      | $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ | 18                   | [70]              |

I：硬骨鱼 Teleosts；II：甲壳类 Crustaceans；III：爬行类 Reptiles；IV：软体类 Molluscs.下同 The same below. —：原文中没有给出数据 No data in the reference.

我们也在 CNKI 数据库 (<http://www.cnki.net>) 对中文文献进行了检索.主题关键词为“同位素”或“富集因子”或“同位素富集”或“营养级富集”或“食谱”,不限定年份.共获得 38 篇文献,但其中绝大多数富集系数均系引用,进一步筛选后仅剩余有效文献 5 篇,包含  $\Delta^{13}\text{C}$  和  $\Delta^{15}\text{N}$  有效数据共 17 组 (表 1).

1.2 统计分析

采用文献研究测得的  $\Delta^{13}\text{C}$ 、 $\Delta^{15}\text{N}$  作为效应值.效应值权重的设定采用 3 种方法<sup>[27]</sup>:1)以文献中  $\Delta^{13}\text{C}$  或  $\Delta^{15}\text{N}$  均值方差 (标准误的平方)的倒数作为权重;2)以文献中  $\Delta^{13}\text{C}$  或  $\Delta^{15}\text{N}$  样本量作为权重;3)相等权重 (即所有效应值的权重均设为 1).在前两种权重定义下,均值方差越小或样本量越大均代表该效应值的测定越准确,对总体平均值的贡献越大,因此其权重也越大.

均值方差估计可通过以下公式计算:

$$V_{\bar{X}_j}=SD_j^2/n_j$$

式中: $\bar{X}_j$  代表第  $j$  个样本的均值 ( $\Delta^{13}\text{C}$  或  $\Delta^{15}\text{N}$ );  $SD_j^2$  代表该样本的方差; $n_j$ 代表该样本的样本量.对标准差缺失的文献,基于所有均值变异系数相同的假设<sup>[27]</sup>,采用以下公式估算:

$$\widetilde{SD}_j=\bar{X}_j\left(\frac{\sum_i^kSD_i}{\sum_i^k\bar{X}_i}\right)$$

式中: $\bar{X}_j$  表示第  $j$  个均值 ( $\Delta^{13}\text{C}$  或  $\Delta^{15}\text{N}$ ); $k$  代表已

知 SD 的总数.对于样本量缺失的文献,赋值为最小样本量 3.

为了进行不同水生动物类型之间的比较,我们将所有效应值归纳为 4 组:硬骨鱼类 (teleosts)、甲壳类 (crustaceans)、爬行类 (reptiles) 和软体动物 (molluscs),采用随机分类模型进行整合分析.分析前进行正态检验和出版偏见检验,剔除异常数据.由于总体数据不能满足正态分布的假设且不同分组之间数据量差异较大,整合分析采用非参数法 (resampling methods),重复取样次数为 4999 次.采用 Bootstrapping 计算 95% 置信区间,并通过校准得到无偏估计 (bias confidence interval).采用 Randomization test ( $\alpha=0.05$ ) 比较所有分组间总差异的显著性,而两两分组之间的差异显著性由置信区间是否重叠判断<sup>[18]</sup>.

统计分析在 Metawin 2.0 中进行.图表绘制采用 Microsoft Excel 2010.

2 结果与分析

2.1 富集系数在不同物种类型和取样组织的分布  
本研究硬骨鱼类是主要研究对象,相关文献 24 篇 (占 55%),其次是甲壳类 12 篇 (占 27%),软体动物 5 篇 (占 11%),爬行类的研究最少,仅 3 篇 (占 7%) (表 1).氮同位素富集系数数据量 (159 个数据) 高于碳同位素 (140 个数据).用于富集系数测定的动物组织的类型多样化,除部分文献未明确提出,可以分为 9 种类型,分别是血液、肌肉、鳍、皮肤、鳞



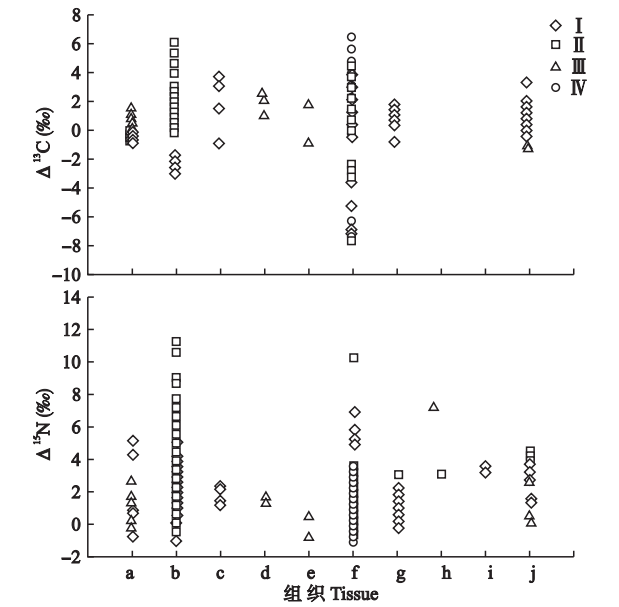


图1 富集系数( $\Delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{15}\text{N}$ )在不同组织类型和水生动物类型的分布

Fig.1 Enrichment factors among different types of tissues and different types of aquatic animals.

I：硬骨鱼 Teleosts；II：甲壳类 Crustaceans；III：爬行类 Reptiles；IV：软体类 Molluscs.下同 The same below. a) 血液 Blood；b) 肌肉 Muscle；c) 鱼鳍 Fin；d) 皮肤 Skin；e) 鳞片 Scute；f) 全身组织 Whole body；g) 肝脏 Liver；h) 鳃 Gill；i) 心脏 Heart；j) 未指明 Unspecified.

片、全身组织、肝脏、鳃和心脏(图1).其中肌肉是最主要的取样对象,分别占了 $\Delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta^{15}\text{N}$ 数据量的34.9%和44.6%.取样组织和动物类型具有一定的相关性.硬骨鱼类的取样组织类型最为丰富,包括了除皮肤、鳞片和鳃以外的所有类型,甲壳类的取样组织包括除了难以取样的组织(心脏、鳍、皮肤、鳞片)以外的所有类型.爬行类的取样组织仅局限在血液、皮肤和鳞片上,而软体动物的类型最单一的,仅包括全身组织和肌肉.

2.2 碳稳定同位素富集系数( $\Delta^{13}\text{C}$ )

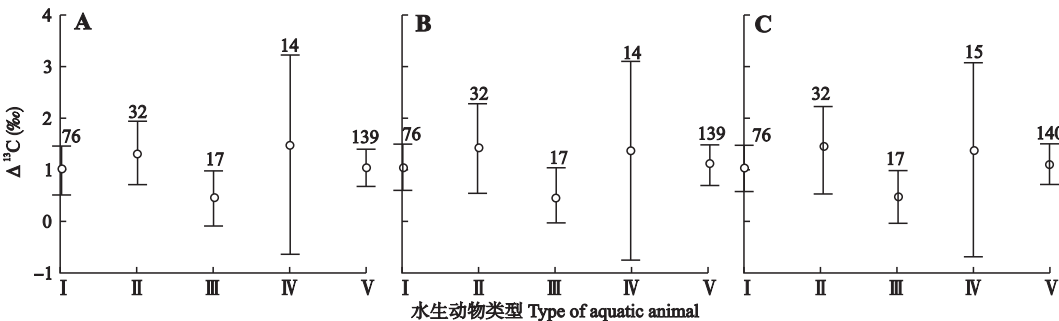


图2 不同水生动物类型的 $\Delta^{13}\text{C}$ (平均值 $\pm$ Bias 置信区间)

Fig.2  $\Delta^{13}\text{C}$  of different types of aquatic animals (mean $\pm$ Bias CI).

A：均值方差倒数为权重 Weighted by the reciprocal of variance；B：样本量为权重 Weighted by sampling size；C：相等权重 Weighted equally. V：所有数据 All data. 上方数字代表组内数据量 The number of  $\Delta^{13}\text{C}$  within each type is above the bar. 下同 The same below.

表2 不同水生动物类型 $\Delta^{13}\text{C}$ 的 Bias 置信区间  
Table 2 Bias confidence intervals of  $\Delta^{13}\text{C}$  among different types of aquatic animals (‰)

| 类型<br>Type | A        | B        | C        |
|------------|----------|----------|----------|
| I          | 0.5~1.4  | 0.6~1.5  | 0.6~1.5  |
| II         | 0.7~1.9  | 0.5~2.3  | 0.5~2.2  |
| III        | -0.1~1.0 | -0.1~1.0 | -0.1~1.0 |
| IV         | -0.7~3.2 | -0.6~3.1 | -0.7~3.1 |
| V          | 0.7~1.4  | 0.7~1.5  | 0.7~1.5  |

A：均值方差倒数为权重 Weighted by the reciprocal of variance；B：样本量为权重 Weighted by sampling size；C：相等权重 Weighted equally. V：所有数据 All data.下同 The same below.

以均值方差倒数作为权重的整合分析结果显示, $\Delta^{13}\text{C}$ 的总体均值为1.1‰(图2A).其中:硬骨鱼类的 $\Delta^{13}\text{C}$ 为1.0‰;甲壳类1.3‰;爬行类0.5‰;软体动物1.5‰.4种类型之间的 $\Delta^{13}\text{C}$ 差异不显著( $P>0.05$ ).

$\Delta^{13}\text{C}$ 以样本量作为权重分析的总体平均值为1.1‰(图2B).其中:硬骨鱼类1.0‰;甲壳类1.4‰;爬行类0.5‰;软体动物1.4‰.4种类型之间的 $\Delta^{13}\text{C}$ 差异不显著( $P>0.05$ ).

相等权重的设置下, $\Delta^{13}\text{C}$ 总体平均值为1.1‰(图2C).其中:硬骨鱼类1.0‰;甲壳类1.4‰;爬行类0.5‰;软体动物1.4‰.与前两种分析结果不同,相等权重的设置下4种类型之间的 $\Delta^{13}\text{C}$ 差异显著( $P<0.05$ ).

从表2可以看出,3种不同权重设置的 $\Delta^{13}\text{C}$ 总体平均值置信区间跨度分别为0.7‰(均值方差倒数作为权重)、0.8‰(样本量作为权重)和0.8‰(相等权重).均值方差倒数作为权重的分析所得置信区间范围最小,上下限也略小于另两种权重设置方式.由于软体动物不同文献报道的数据变异较大,总体平均值的置信区间跨度是4种水生动物类型中最大的.

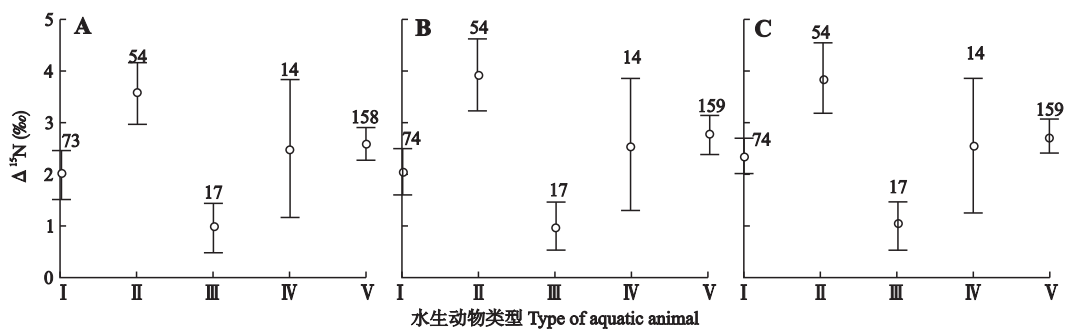


图3 不同水生动物类型的  $\Delta^{15}\text{N}$  (平均值 $\pm$ Bias 置信区间)  
Fig.3  $\Delta^{15}\text{N}$  of different types of aquatic animals (mean $\pm$ Bias CI).

2.3 氮稳定同位素富集系数( $\Delta^{15}\text{N}$ )

以均值方差倒数作为权重的整合分析结果显示,  $\Delta^{15}\text{N}$  的总体均值为 2.6‰ (图 3A). 其中:硬骨鱼类的  $\Delta^{15}\text{N}$  为 2.4‰;甲壳类 3.6‰;爬行类 1.0‰;软体动物 2.5‰.4 种类型之间的  $\Delta^{15}\text{N}$  差异显著 ( $P < 0.05$ ).

以样本量作为权重时,  $\Delta^{15}\text{N}$  总体平均值为 2.7‰ (图 3B). 其中:硬骨鱼类 2.4‰;甲壳类 3.9‰;爬行类 1.0‰;软体动物 2.5‰.4 种类型之间的  $\Delta^{15}\text{N}$  差异显著 ( $P < 0.05$ ).

相等权重的设置下,  $\Delta^{15}\text{N}$  总体平均值为 2.8‰ (图 3C). 其中:硬骨鱼类 2.4‰;甲壳类 3.9‰;爬行类 1.0‰;软体动物 2.6‰.4 种类型之间的  $\Delta^{15}\text{N}$  差异显著 ( $P < 0.05$ ).

在 3 种不同权重设置下,  $\Delta^{15}\text{N}$  的总体平均值置信区间跨度分别为 0.6‰ (均值方差倒数作为权重)、0.7‰ (样本量作为权重) 和 0.7‰ (相等权重) 的置信区间 (表 3). 与  $\Delta^{13}\text{C}$  结果的趋势相同, 均值方差倒数作为权重的分析所得置信区间范围最小, 上下限也略小于另两种权重设置方式, 而在不同类型之间软体动物置信区间范围最大.

根据置信区间是否重叠判断, 甲壳类  $\Delta^{15}\text{N}$  显著大于硬骨鱼类, 而爬行类  $\Delta^{15}\text{N}$  显著小于硬骨鱼类 (图 3).

表 3 不同水生动物类型  $\Delta^{15}\text{N}$  的 Bias 置信区间  
Table 3 Bias confidence intervals of  $\Delta^{15}\text{N}$  among different types of aquatic animals (‰)

| 类型<br>Type | A       | B       | C       |
|------------|---------|---------|---------|
| I          | 2.0~2.7 | 2.0~2.7 | 2.0~2.8 |
| II         | 3.0~4.2 | 3.2~4.6 | 3.2~4.6 |
| III        | 0.5~1.5 | 0.5~1.5 | 0.5~1.5 |
| IV         | 1.2~3.9 | 1.3~3.9 | 1.3~3.9 |
| V          | 2.3~2.9 | 2.4~3.1 | 2.4~3.1 |

3 讨 论

富集系数被广泛运用于生态系统食物链和营养级相关的定量分析,但在实际运用中对不同生态系统和不同生物种类开展针对性的测定受到许多条件限制而难以实现,使用模型估计值或经验值是最省时便捷的途径.据 Caut 等<sup>[26]</sup>统计,60%以上的模型分析使用了来自其他物种和组织的富集系数,在这种情况下,富集系数经验值的精确性和代表性必须受到重视,因为其微小的差异可能会导致分析结果的巨大差异<sup>[29]</sup>.我们通过 3 种不同方式的权重设定得到的总体  $\Delta^{13}\text{C}$  均值为 1.04‰~1.05‰,显著高于 Peterson 等<sup>[11]</sup>综述分析得到的平均值 (0.2‰)、Vander Zanden 等<sup>[18]</sup>综述分析得到的平均值 (0.5‰) 和 Post<sup>[4]</sup>综述分析得到的平均值 (0.4‰),而与 Vander Zanden 等<sup>[18]</sup>综述分析中剔除草食动物后得到的平均值 (0.8‰) 最为接近.3 种不同方式的权重设定得到的总体  $\Delta^{15}\text{N}$  均值为 2.4‰~2.6‰,显著低于通常认为的 3.4‰<sup>[4,12]</sup>和 Peterson 等<sup>[11]</sup>综述的平均值 3.2‰,但是与 Vanderklift 等<sup>[21]</sup>整合分析得到的 2.5‰<sup>[21]</sup>以及 Vander Zanden 等<sup>[18]</sup>综述分析得到的 2.9‰<sup>[18]</sup>没有显著差异.不同综述研究结果存在明显差异,可能与所关注的生物种类和具体数据来源不同有关,表明富集系数在生物之间存在显著差异.本研究涉及大部分水生生物的相关研究,分析结果具有较好的代表性.

目前研究富集系数变异和变异来源的文献仍然很少, Vander Zanden 等<sup>[18]</sup>关于水域生态系统的综述指出,  $\Delta^{13}\text{C}$  和  $\Delta^{15}\text{N}$  在鱼类和无脊椎动物之间没有显著性差异, Caut 等<sup>[26]</sup>综述表明,在哺乳动物、鸟类、鱼类和无脊椎动物之间,  $\Delta^{13}\text{C}$  具有显著性差异但  $\Delta^{15}\text{N}$  没有显著性差异.与 Caut 等<sup>[26]</sup>不同,我们的研究仅针对水生动物,并发现在不同的水生动物类

型之间(硬骨鱼、甲壳类、爬行类和软体动物),  $\Delta^{13}\text{C}$  没有显著性差异 ( $P>0.05$ ), 而  $\Delta^{15}\text{N}$  具有显著性差异 ( $P<0.05$ ). 甲壳类的  $\Delta^{15}\text{N}$  最大, 显著大于硬骨鱼类和爬行类, 而爬行类的  $\Delta^{15}\text{N}$  最小, 显著小于硬骨鱼类和甲壳类. 这 4 种水生生物类型的分类仅是基于进化意义的, 生物之间具体的特征例如生境(例如水域与陆地)、食性(例如食草、食肉与食碎屑)和代谢(例如排氨、排尿素与排尿酸)等对富集系数的影响或许十分复杂, 不同文献的研究结果并不一致<sup>[18,21]</sup>, 而且不同的特征之间很有可能具有交互作用, 因此, 我们认为无法通过简单的整合分析得到令人满意的结果. Vanderklift 等<sup>[21]</sup>整合分析结果指出, 食碎屑动物  $\Delta^{15}\text{N}$  显著低于其他食性动物, 具体体现在软体动物  $\Delta^{15}\text{N}$  显著小于鱼类. 但是我们的分析没有发现软体动物和硬骨鱼类  $\Delta^{15}\text{N}$  的显著性差异.

动物通过富集<sup>14</sup>N 的氮废物平衡体内组织对<sup>15</sup>N 的富集, 因而氮素的排泄方式被认为与<sup>15</sup>N 富集密切相关<sup>[12,30]</sup>. Vanderklift 等<sup>[21]</sup>指出, 排氨型动物 $\Delta^{15}\text{N}$  显著低于排尿素型和排尿酸型动物. 但是在我们的研究中, 排尿酸的爬行类的  $\Delta^{15}\text{N}$  最低, 这可能是由于我们仅仅关注水生爬行动物, 而且相关研究取样部位局限在血液、皮肤和磷片上, 而其他 3 个类型都有包括肌肉的取样部位, 而肌肉的  $\Delta^{15}\text{N}$  一般情况下较其他部位高(图 1). 取样部位的不同可能会导致富集系数的不同<sup>[20-21,25]</sup>, 所以富集系数在具体应用时要注意与经验值的取样部位尽可能保持一致. 从保护野生动物的角度而言, 在活体上对血液、皮肤和磷片的取样分析具有较大优势, 例如研究大型动物海龟(也包括陆地生境的大型哺乳动物和鸟类).

整合分析是一个综合大量研究成果的统计学方法, 因此其适用于研究不同生物的富集系数特征和富集系数的影响因素. 本研究在 Web of Science 和 CNKI 两个重要学术数据库中开展了较为全面的文献搜索, 并且采用了 3 种不同权重自定义方式进行整合分析. 虽然使用均值方差倒数作为权重在统计学意义上是最为合理的方式, 但是我们所收集的研究中均值方差缺失过多(缺失约占总数据量的 2/3), 减弱了该方法的有效性. 因此我们还采用了另外两种权重设置方法, 以此进行权重设定对结果影响的敏感性检验(sensitivity test). 比较 3 种不同权重设置方式结果可见, 权重设置方式对结果影响很小, 统计结果稳健. 分组间比较的结果显示,  $\Delta^{15}\text{N}$  在硬骨鱼类、甲壳类和爬行类之间具有显著差异(甲壳类>硬骨鱼类>爬行类), 因此在具体研究中选择富集系

数时需要考虑不同动物类型对富集系数的影响. 目前, 水生生物的富集系数研究主要集中在硬骨鱼类和甲壳类, 而爬行类和软体动物相关的研究较少, 而且软体动物的不同研究之间异质性很大(导致较大的置信区间范围). 因此, 为了得到更为全面和精确的整合分析结果, 我们仍然需要更多的基础研究提供更多数量和更高质量的研究成果.

## 参考文献

- [1] DeNiro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, **42**: 495-506
- [2] DeNiro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, **45**: 351-351
- [3] Fry B. Stable isotope diagrams of fresh-water food webs. *Ecology*, 1991, **72**: 293-297
- [4] Post DM. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, **83**: 703-718
- [5] Davis AM, Blanchette ML, Pusey BJ, et al. Gut content and stable isotope analyses provide complementary understanding of ontogenetic dietary shifts and trophic relationships among fishes in a tropical river. *Freshwater Biology*, 2012, **57**: 2156-2172
- [6] Samelius G, Alisauskas RT, Hobson KA, et al. Prolonging the arctic pulse: Long-term exploitation of cached eggs by arctic foxes when lemmings are scarce. *Journal of Animal Ecology*, 2007, **76**: 873-880
- [7] Genner MJ, Turner GF, Barker S, et al. Niche segregation among Lake Malawi cichlid fishes? Evidence from stable isotope signatures. *Ecology Letters*, 1999, **2**: 185-190
- [8] Newsome SD, del Rio CM, Bearhop S, et al. A niche for isotopic ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, **5**: 429-436
- [9] Yi X-F (易现峰), Li L-X (李来兴), Zhang X-A (张晓爱), et al. Diet shift of upland buzzards (*Buteo hemilasius*): Evidence from stable carbon isotope ratios. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), 2003, **49**(6): 764-768 (in Chinese)
- [10] Boecklen WJ, Yarnes CT, Cook BA, et al. On the use of stable isotopes in trophic ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2011, **42**: 411-440
- [11] Peterson BJ, Fry B. Stable Isotopes in Ecosystem Studies. *Annual Reviews of Ecology and Systematics*, 1987, **18**: 293-320
- [12] Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of <sup>15</sup>N along food-chains: Further evidence and the relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,

- 1984, **48**: 1135–1140
- [13] del Rio CM, Wolf N, Carleton SA, *et al.* Isotopic ecology ten years after a call for more laboratory experiments. *Biological Reviews*, 2009, **84**: 91–111
- [14] Wada E, Mizutani H, Minagawa M. The use of stable isotopes for food web analysis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1991, **30**: 361–371
- [15] Hobson KA, Welch HE. Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, **84**: 9–18
- [16] Fry B. Food web structure on Georges Bank from stable C, N, and S isotopic compositions. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**: 1182–1190
- [17] Kim SL, Casper DR, Galván-Magaña F, *et al.* Carbon and nitrogen discrimination factors for elasmobranch soft tissues based on a long-term controlled feeding study. *Environmental Biology of Fishes*, 2012, **95**: 37–52
- [18] Vander Zanden MJ, Rasmussen JB. Variation in  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**: 2061–2066
- [19] Guo X-P (郭旭鹏), Li Z-Y (李忠义), Jin X-S (金显仕), *et al.* Feeding habit study of Anchovy (*Engraulis aponicus*) in the central and southern part of the Huanghai Sea with stable isotope techniques. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2007, **29**(2): 98–104 (in Chinese)
- [20] Li Y-K (李云凯), Gong Y (贡艺), Chen X-J (陈新军). Applications of stable isotope analysis in the trophic ecology studies of cephalopods. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(5): 1541–1546 (in Chinese)
- [21] Vanderklift MA, Ponsard S. Sources of variation in consumer-diet  $\delta^{15}\text{N}$  enrichment: A meta-analysis. *Oecologia*, 2003, **136**: 169–182
- [22] Phillips DL, Koch PL. Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models. *Oecologia*, 2002, **130**: 114–125
- [23] Bond AL, Diamond AW. Recent Bayesian stable-isotope mixing models are highly sensitive to variation in enrichment factors. *Ecological Applications*, 2011, **21**: 1017–1023
- [24] Olive PJW, Pinnegar JK, Polunin NVC, *et al.* Isotope trophic-step fractionation: A dynamic equilibrium model. *Journal of Animal Ecology*, 2003, **72**: 608–617
- [25] Ben-David M, Schell DM. Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: A response. *Oecologia*, 2001, **127**: 180–184
- [26] Caut S, Angulo E, Courchamp F. Variation in enrichment factors ( $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ): The effect of diet isotopic values and applications for diet reconstruction. *Journal of Applied Ecology*, 2009, **46**: 443–453
- [27] Koricheva J, Gurevitch J, Mengersen K. Handbook of Meta-Analysis in Ecology and Evolution. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2013
- [28] Gurevitch J, Hedges L. Statistical issues in ecological meta-analyses. *Ecology*, 1999, **80**: 1142–1149
- [29] McCutchan JH, Lewis WM, Kendall C, *et al.* Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos*, 2003, **102**: 378–390
- [30] Yokoyama H, Tamaki A, Harada K, *et al.* Variability of diet-tissue isotopic fractionation in estuarine macrobenthos. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, **296**: 115–128
- [31] Cardona L, Campos P, Levy Y, *et al.* Asynchrony between dietary and nutritional shifts during the ontogeny of green turtles (*Chelonia mydas*) in the Mediterranean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2010, **393**: 83–89
- [32] Gamboa-Delgado J, Le Vay L. Artemia replacement in co-feeding regimes for mysis and postlarval stages of *Litopenaeus vannamei*: Nutritional contribution of inert diets to tissue growth as indicated by natural carbon stable isotopes. *Aquaculture*, 2009, **297**: 128–135
- [33] Gamboa-Delgado J, Le Vay L. Natural stable isotopes as indicators of the relative contribution of soy protein and fish meal to tissue growth in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed compound diets. *Aquaculture*, 2009, **291**: 115–123
- [34] Dempson JB, Power M. Use of stable isotopes to distinguish farmed from wild Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Ecology of Freshwater Fish*, 2004, **13**: 176–184
- [35] Dennis CA, MacNeil MA, Rosati JY, *et al.* Diet enrichment factors are inversely related to  $\Delta^{15}\text{N}$  and  $\Delta^{13}\text{C}$  values of food for fish under controlled conditions. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2010, **24**: 3515–3520
- [36] Dittel AI, Epifanio CE, Schwalm SM, *et al.* Carbon and nitrogen sources for juvenile bluecrabs *Callinectes sapidus* in coastal wetlands. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, **194**: 103–112
- [37] Dubois S, Jean-Louis B, Bertrand B, *et al.* Isotope trophic-step fractionation of suspension-feeding species: Implications for food partitioning in coastal ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **351**: 121–128
- [38] Gamboa-Delgado J, Peña-Rodríguez A, Ricque-Marie D, *et al.* Assessment of nutrient allocation and metabolic turnover rate in pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* co-fed live macroalgae *Ulva clathrata* and inert feed: Dual stable isotope analysis. *Journal of Shellfish Research*, 2011, **30**: 969–978
- [39] Gamboa-Delgado J, Rojas-Casas MG, Nieto-Lopez, MG, *et al.* Simultaneous estimation of the nutritional contribution of fish meal, soy protein isolate and corn



- gluten to the growth of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using dual stable isotope analysis. *Aquaculture*, 2013, **380**: 33–40
- [40] Gaye-Siessegger J, Focken U, Abel H, *et al.* Individual protein balance strongly influences  $\Delta^{15}\text{N}$  and  $\Delta^{13}\text{C}$  values in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Naturwissenschaften*, 2004, **91**: 90–93
- [41] Gaye-Siessegger J, Focken U, Abel H, *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. *Oecologia*, 2004, **138**: 175–183
- [42] German DP, Miles RD. Stable carbon and nitrogen incorporation in blood and fin tissue of the catfish *Pterygoplichthys disjunctivus* (Siluriformes, Loricariidae). *Environmental Biology of Fishes*, 2010, **89**: 117–133
- [43] Gorokhova E, Hansson S. An experimental study on variations in stable carbon and nitrogen isotope fractionation during growth of *Mysis mixta* and *Neomysis integer*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, **56**: 2203–2210
- [44] Harvey CJ, Hanson PC, Essington TE, *et al.* Using bioenergetics models to predict stable isotope ratios in fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, **59**: 115–124
- [45] Herbon CM, Nordhaus I. Experimental determination of stable carbon and nitrogen isotope fractionation between mangrove leaves and crabs. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, **490**: 91–105
- [46] Hesslein RH, Hallard KA, Ramlal P. Replacement of sulfur, carbon, and nitrogen in tissue of growing broad whitefish (*Coregonus nasus*) in response to a change in diet traced by  $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , and  $\delta^{15}\text{N}$ . *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993, **50**: 2071–2076
- [47] Kaifu K, Miyazaki S, Aoyama J, *et al.* Diet of Japanese eels *Anguilla japonica* in the Kojima Bay-Asahi River system, Japan. *Environmental Biology of Fishes*, 2013, **96**: 439–446
- [48] Kurata K, Minami H, Kikuchi E. Stable isotope analysis of food sources for salt marsh snails. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, **223**: 167–177
- [49] Logan J, Haas H, Deegan L, *et al.* Turnover rates of nitrogen stable isotopes in the salt marsh mummichog, *Fundulus heteroclitus*, following a laboratory diet switch. *Ecophysiology*, 2006, **147**: 391–395
- [50] Møller H, Lee SY, Paterson B, *et al.* Cannibalism contributes significantly to the diet of cultured sand crabs, *Portunus pelagicus* (L.): A dual stable isotope study. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, **361**: 75–82
- [51] Pinnegar JK, Polunin NVC. Differential fractionation of  $\Delta^{13}\text{C}$  and  $\Delta^{15}\text{N}$  among fish tissues: Implications for the study of trophic interactions. *Functional Ecology*, 1999, **13**: 225–231
- [52] Rounick JS, Hicks BJ. The stable carbon isotope ratios of fish and their invertebrate prey in four New Zealand rivers. *Freshwater Biology*, 1985, **15**: 207–214
- [53] Seminoff JA, Jones TT, Eguchi T, *et al.* Stable isotope enrichment ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) between soft tissues of the green sea turtle *Chelonia mydas* and its diet. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, **308**: 271–208
- [54] Seminoff JA, Jones TT, Eguchi T, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotope enrichment in soft tissues of the leatherback turtle (*Dermochelys coriacea*): Insights for trophic studies of marine turtles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, **381**: 33–41
- [55] Suring E, Wing SR. Isotopic turnover rate and fractionation in multiple tissues of red rock lobster (*Jasus edwardsii*) and blue cod (*Parapercis colias*): Consequences for ecological studies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, **370**: 56–63
- [56] Suzuki KW, Kasai A, Nakayama K, *et al.* Differential isotopic enrichment and half-life among tissues in Japanese temperate bass (*Lateolabrax japonicus*) juveniles: Implications for analyzing migration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, **62**: 671–678
- [57] Sweeting CJ, Barry J, Barnes C, *et al.* Effects of body size and environment on diet-tissue  $\Delta^{15}\text{N}$  fractionation in fishes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **340**: 1–10
- [58] Trueman CN, McGill RAR, Guyard PH. The effect of growth rate on tissue-diet isotopic spacing in rapidly growing animals: An experimental study with Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2005, **19**: 3239–3247
- [59] Toda H, Wada E. Use of  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  ratios to evaluate the food source of the mysid, *Neomysis intermedia* Czerniawsky, in a eutrophic lake in Japan. *Hydrobiologia*, 1990, **194**: 85–90
- [60] Varela JL, Larranaga A, Medina A. Prey-muscle carbon and nitrogen stable-isotope enrichment factors in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, **406**: 21–28
- [61] Varela JL, Rodriguez-Marin E, Medina A. Estimating diets of pre-spawning Atlantic bluefin tuna from stomach content and stable isotope analyses. *Journal of Sea Research*, 2013, **76**: 187–192
- [62] Xia B, Gao QF, Dong SL, *et al.* Uptake of farming wastes by silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* in polyculture ponds of grass carp *Ctenopharyngodon idella*: Evidence from C and N stable isotopic analysis. *Aquaculture*, 2013, **404**: 8–14
- [63] Xia B, Gao QF, Li HM, *et al.* Turnover and fractionation of nitrogen stable isotope in tissues of grass carp *Ctenopharyngodon idellus*. *Aquaculture Environment Interactions*, 2013, **3**: 177–186
- [64] Yokoyama H, Ishihi Y, Yamamoto S. Diet-tissue isoto-

- pic fractionation of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, **358**: 173–179
- [65] Cai D-L (蔡德陵), Meng F (孟凡), Han Y-B (韩贻兵), *et al.* 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. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖泊), 1999, **30**(6): 671–678 (in Chinese)
- [66] Cai D-L (蔡德陵), Zhang S-F (张淑芳), Tang Q-S (唐启升), *et al.* Stable carbon and nitrogen isotope fractionation in metabolic process of weever (*Lateolabrax japonicus*). *Advances in Marine Science* (海洋科学进展), 2003, **21**(3): 308–317 (in Chinese)
- [67] Cai D-L (蔡德陵), Li H-Y (李红燕), Tang Q-S (唐启升), *et al.* The establishment of the Huang Donghai ecosystem food web continuous nutritional spectrum: The result from stable carbon and nitrogen isotope method. *Science in China* (中国科学), 2005, **35**(2): 123–130 (in Chinese)
- [68] Wan W (万玮), Hu J-Y (胡建英), An L-H (安立会), *et al.* The analysis of nutrition level of Bohai Bay major species in the food web by using stable nitrogen and carbon isotopes. *Journal of Science* (科学通报), 2005, **50**(7): 708–712 (in Chinese)
- [69] Zhou H (周晖), Chen G (陈刚), Shi G (施钢), *et al.* The effects of different diet protein sources on carbon and nitrogen isotope fractionation of juvenile cobia *Rachycentron canadum* L. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), 2014, **33**(5): 35–40 (in Chinese)
- [70] Zhou X-J (周曦杰), Zhang S-Y (章守宇), Wang X (王旭), *et al.* The feeding behaviour and ecological function during summer of one herbivore on seaweed bed in Gouqi Island: The gastropod, *Turbo cornutus* Solander. *Journal of Fisheries of China* (水产学报), 2015, **39**(4): 511–518 (in Chinese)

---

**作者简介** 郭梁,男,1993年生,硕士研究生.主要从事农业生态和利用稳定同位素技术进行生态位分析的研究.  
E-mail: 21407093@zju.edu.cn

**责任编辑** 肖红

---