

# 高寒草甸生态系统食物链结构分析—— 来自稳定性碳同位素的证据

易现峰, 张晓爱, 李来兴, 李明财, 赵亮

(中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 稳定性同位素技术应用于生态系统物质流动和食物链营养关系的研究方法, 是基于生物体内天然存在的同位素比值与它们食物密切相关这一原理建立起来的。即将生物体内的稳定性同位素比值(如  $\delta^{13}\text{C}$ )作为一自然标记, 根据物种间该值的相对差异, 追踪生态系统中的主要物质(如碳源)的来源和物质流动。于 2002 年 4~8 月测定了高寒草甸生态系统主要生物群落中物种的稳定性碳同位素比值( $\delta^{13}\text{C}$ ), 依据得到的系统的富集因子( $1.05 \pm 0.45\%$ ), 分析并确定了所测物种间的取食与被取食关系。结果发现, 高寒草甸生态系统由 5 条主要的食物链构成, 其中 1 条为“植物→小型哺乳类→食肉兽/猛禽”的三节点食物链, 2 条为“植物→牲畜和植物→植食性鸟类”的二节点食物链, 2 条分别为“植物→昆虫→雀形目鸟类→猛禽/食肉兽”和“植物→昆虫→两栖类→猛禽/食肉兽”的四节点食物链, 系统食物链的最大长度为 3.53, 与系统的最大节点数相近。表明稳定性碳同位素可以作为分析高寒草甸生态系统食物网和食物链结构以及食物链长度的有效代理(proxy)。

**关键词:** 稳定性碳同位素; 高寒草甸; 食物网; 食物链

中图分类号: Q958.12 文献标识码: A 文章编号: 0254-5853(2004)01-0001-06

## Analysis on Food Web Structure in Alpine Meadow Ecosystem: Evidence from Stable Carbon Isotope Signatures

YI Xian-feng, ZHANG Xiao-ai, LI Lai-xing, LI Ming-cai, ZHAO Liang

(Northwest Institute of Plateau Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

**Abstract:** The stable isotope approach is based on the fact that naturally occurring stable isotope ratios in consumer tissues can be related to those in consumers' diets. Changes in, or fractionation of, stable carbon isotope ratios ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) occur with trophic level and are of the order of 1‰–2‰. Thus, isotope measurement of consumers' tissues can reveal information about their ingested foods in ecosystems that are relatively simple. Determination of stable carbon isotope signatures in the alpine meadow ecosystem demonstrated that the ecosystem was composed of five main food chains, one was three-noded food chain characterized by “plants → small mammals → raptors (or carnivorous mammals)”; two each were two-noded characterized by “plants → vegetarian passerine birds or livestock”; and two each were four-noded and composed of “plants → insects → passerine birds → raptors (or carnivorous mammals)” or “plants → insects → amphibians → raptors (or carnivorous mammals)”, respectively. The maximum length of food chain in the alpine meadow ecosystem was 3.53, which was grossly equal to maximum node number, i.e., 4. In summary, stable carbon isotope ratios can be used as a proxy to analyze food chains and food webs in the alpine meadow ecosystems.

**Key words:** Stable carbon isotope; Alpine meadow; Food web; Food chain

食物网 (food web) 是多种生物及其取食对象的集合, 是由捕食者和被捕食者或取食者与被取食

者构成的复杂的网状结构。所谓捕食者是指至少取食一种生物的物种; 被捕食者是指至少被另一种生

物取食的物种。食物网直接反映生态系统的结构和功能,因此,研究其结构是一个十分重要而复杂的问题,也是生态系统学的一大难题(Zhang et al, 1999)。食物网的真正结构或功能,不易通过直接观察生物觅食、胃容物或粪便分析而决定,而且这只能反映出短暂的营养关系。

由于环境中稳定性同位素组成有差异,以及生物在生理代谢过程中所产生的同位素分馏(fractionation),生物体内的稳定性同位素比值可作为一自然的标记,用来示踪营养物质在生态系中的流动(Peterson et al, 1985; Hobson & Welch, 1992)。在生物学领域中常被应用的稳定性同位素有碳、氮及硫元素等。在生态系统中,生产者的稳定性碳同位素比值( $\delta^{13}\text{C}$ )相对于生态系统中其他消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 的差异,可用于追踪生态系统中的主要物质(碳源)的来源和物质流动。 $\delta^{15}\text{N}$ 则常用于食物网中生物的营养阶层分析, $\delta^{15}\text{N}$ 较高意味着营养阶层的提升,与 $\delta^{13}\text{C}$ 一起来示踪营养物质的流动(Peterson et al, 1985)。在研究生态系统中的食物网及物质流动上,相对于传统的消化道内含物分析,稳定性同位素能提供更迅速、客观的分析。稳定性同位素分析为研究食物网结构提供了一种特别的方式,显示出长期以及短期内生物的食性变化,建立营养流动过程以及生物在食物网及营养层的地位。随着生物觅食习性的不同,稳定性碳、氮同位素比值随其在营养层的位置以特定方式增加,因此可用以分析食物的来源和组成。近年来,稳定性碳、氮同位素技术已广泛被应用于海洋及河口的营养层间营养流动的研究上(Hobson & Welch, 1992; Peterson et al, 1985),并描绘出该生态系统的食物链及营养流动关系。在国内,稳定性碳技术同位素已经被应用于海洋生态系统的结构分析上(Cai et al, 1999, 2001a, b; Guo et al, 2002),并取得了理想的结果。然而,高寒草甸生态系统虽已研究20余年,但还未对食物网进行过专门的研究,因而缺乏定量分析的资料。本文试图以稳定性碳同位素技术分析高寒草甸生态系统简单的食物链结构。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本项研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位实验站进行。该站位于青藏高原东北部,北纬 $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45'$ ,东经 $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}33'$ ,平均海拔

3 200 m。全年平均气温 $-1.7^{\circ}\text{C}$ ,没有明显的四季之分,只有冷暖两季,属高原大陆性气候。站区植物以禾本科、菊科、龙胆科和毛茛科最多,其次为莎草科、蔷薇科和豆科,但莎草科的高草属植物为该地区高寒草甸的优势种群。植被类型主要有高寒灌丛(alpine shrub)、高寒草甸(alpine meadow)和沼泽草甸(swamp meadow)。站区主要动物种群包括小型哺乳类(高原鼠兔、根田鼠、高原鼢鼠等)、雀形目鸟类(小云雀、角百灵、高山岭雀以及朱顶雀等)以及食肉类(香鼬、艾虎和大鸮)等。

### 1.2 生物群落稳定性碳同位素比值( $\delta^{13}\text{C}$ )的测定

于2002年4~8月,选取高寒草甸生态系统主要植物及部分动物样品,鸟类以胸肌作样品,哺乳类以后退肌肉作样品,昆虫及两栖类则取全体。所有样品经恒温干燥箱 $60 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,充分研磨,过100目筛备用。以Finnigan MAT DELTA<sup>PLU</sup>SXL同位素质谱仪和元素分析仪进行测定,二者的操作界面为ConF III。制备条件:氧化炉温度为 $900^{\circ}\text{C}$ ,还原炉温度为 $680^{\circ}\text{C}$ ,柱温为 $40^{\circ}\text{C}$ 。产生的 $\text{CO}_2$ 在真空中经纯化注入比集运量质谱仪(Finnigan Mat, Bremen, Germany)进行测定。以样品同位素组成与标准品之间的偏移来相对测定碳的同位素组成:

$$\delta R_{\text{sample}}(\%) = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1000 \quad (\text{Cerling \& Harris, 1999})$$

其中 $\delta R_{\text{sample}}$ 为被测材料的碳同位素组成; $R_{\text{sample}}$ 为被测样品 $^{13}\text{C}_{\text{sample}}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}$ ,也即样品中 $\text{CO}_2$  45/44的绝对同位素比; $R_{\text{standard}}$ 为 $^{13}\text{C}_{\text{standard}}/^{12}\text{C}_{\text{standard}}$ ,也即标准品中 $\text{CO}_2$  45/44的绝对同位素比。这里的标准品是取自美国South Carolina Pee Dee River河区的一种古生物化石——美洲拟箭石。各物种的碳同位素比值见表1。物种碳同位素比值月间变化不明显,但成体与幼体间差异显著。

### 1.3 碳同位素富集因子的获得

由高原鼠兔、根田鼠、高原鼢鼠、高原兔后腿肌肉和它们的胃容物间以及山生柳和其上专一寄生的一种鳞翅目幼虫的稳定性碳同位素比值差异平均后得到碳同位素富集因子,为 $(1.05 \pm 0.45)\%$ (表2)。

### 1.4 食物链营养关系分析

主要依赖于稳定性碳同位素分析(SCIA),并

辅以胃容物分析 (SCA), 即通过胃容物所获得的部分食物信息, 并比较两种可能存在取食与被取食的生物间的碳同位素差异, 与营养级间的碳同位素富集因子 ( $1.05 \pm 0.45$  ‰) 相比较。依据 DeNiro & Epstein (1978, 1981) 报道的动物与其食物间的碳同位素富集因子为 1‰ ~ 2‰, 我们将所得的富集因子上下各波动 0.45‰, 即若二者差异在 0.60‰ ~ 1.50‰ 范围波动, 则可认定二者之间存在取食与被取食的营养关系; 相反, 若二者差异不在此范围之内或差异较大, 则可认定二者之间不存在 (或存在微弱的) 取食与被取食的营养关系。

### 1.5 食物链长度计算

食物链的长度按下述公式计算:

$$FCL = (\delta^{13}C_{\text{顶级物种}} - \delta^{13}C_{\text{初级生产者}}) / 1.05\text{‰}$$

式中, FCL 指食物链的长度;  $\delta^{13}C_{\text{顶级物种}}$  为顶级物种的稳定性碳同位素比值;  $\delta^{13}C_{\text{初级生产者}}$  为初级生产者的稳定性碳同位素比值; 1.05‰ 是本次实验测定的碳同位素富集因子。

## 2 结果与分析

### 2.1 食物链构成

图 1 所示的是由生物稳定性碳同位素分布特征 (patterns) 所得出的高寒草甸简单的食物网结构, 其中可离解出 5 种具有不同节点 (node) 的食物链, 即:

1. 植物(含种子) → 牲畜和植物 → 植食性鸟

表 1 高寒草甸生态系统生物的碳同位素模式

Table 1 Stable carbon isotope patterns in the alpine meadow ecosystem

物种 Species	取样时间 Sampling time	样本数 No. of samples	$\bar{\delta}^{13}C \pm SD$
藏牦牛 <i>Bos grunniens</i>	2002. 06	2	-25.50 ± 0.03
藏系绵羊 <i>Ovis ammon hodgsoni</i>	2002. 06	2	-24.92 ± 0.10
艾虎 <i>Mustela eversmanni</i>	2002. 07	2	-23.90 ± 0.18
高原兔 <i>Lepus oiostolus</i>	2002. 08	2	-24.67 ± 0.11
高原鼠兔 <i>Ochotona curzoniae</i>	2002. 05	4	-25.07 ± 0.55
	2002. 07	3	-24.77 ± 0.04
高原鼯鼠 <i>Myospalax fontanierii</i>	2002. 04	4	-25.78 ± 0.36
根田鼠 <i>Microtus oeconomus</i>	2002. 05	4	-25.48 ± 0.01
	2002. 07	3	-25.92 ± 0.44
	2002. 07	3*	-25.99 ± 0.14
大鸢 <i>Buteo hemilasius</i>	2002. 04	2	-22.80 ± 0.69
角百灵 <i>Eremophila alpestris</i>	2002. 04	3	-24.18 ± 0.28
	2002. 07	3	-24.48 ± 0.08
	2002. 07	2*	-26.08 ± 0.32
长嘴百灵 <i>Melanocorypha maxima</i>	2002. 04	4	-24.54 ± 0.32
黄嘴朱顶雀 <i>Acanthis flavirostri</i>	2002. 07	2	-26.25 ± 0.13
	2002. 07	2*	-26.69 ± 0.10
小云雀 <i>Alauda gulgula</i>	2002. 05	2	-23.76 ± 0.32
	2002. 07	2*	-26.52 ± 0.07
朱鹀 <i>Anthus roseatus</i>	2002. 07	1	-24.35
	2002. 07	2*	-25.04 ± 0.15
赭红尾鹀 <i>Phoenicurus ochruros</i>	2002. 07	2	-23.83 ± 0.04
	2002. 07	3*	-26.83 ± 0.14
粉红胸鹀 <i>Anthus roseatus</i>	2002. 08	1	-24.16
褐背拟地鸦 <i>Pseudopodoces humilis</i>	2002. 07	5	-24.25 ± 0.28
	2002. 06	2*	-24.60 ± 0.21
黄头鹡鸰 <i>Motacilla citreola</i>	2002. 07	3	-23.46 ± 0.08
	2002. 07	2*	-26.62 ± 0.21
鹁岩鹀 <i>Prunellidae rubeculoides</i>	2002. 04	2	-24.90 ± 0.07
	2002. 07	2*	-25.47 ± 0.13
树麻雀 <i>Passer montanus</i>	2002. 07	3	-24.16 ± 0.07
中国林蛙 <i>Rana temporaria</i>	2002. 07	4	-24.11 ± 0.02
中华大蟾蜍 <i>Bufo bufo</i>	2002. 07	1	-24.22

\* 幼体 (Young)

表 2 高寒草甸生态系统碳同位素的富集因子

Table 2 Stable carbon isotope enrichments in the alpine meadow ecosystem

 $\bar{X} \pm SD$ 

物种 Species	$\delta^{13}C$ (‰)	
	肌肉 (或叶片) Muscle (or Leaf)	胃容物 Stomach contents
根田鼠 <i>Microtus oeconomus</i>	-25.48 ± 0.01	-26.45 ± 0.19
高原兔 <i>Lepus oiostolus</i>	-24.67 ± 0.11	-26.14 ± 0.12
高原鼠兔 <i>Ochotona curzoniae</i>	-24.77 ± 0.04	-26.77 ± 0.14
高原鼯鼠 <i>Myospalax fontanierii</i>	-25.78 ± 0.36	-26.02 ± 0.22
山生柳 <i>Salix oritrepha</i>	-25.82	
专性寄生鳞翅目幼虫 Lepidoptera larva parasite on <i>Salix oritrepha</i>	-25.23 ± 0.05	
平均值 Average	-25.19 ± 0.37	-26.24 ± 0.30
富集效应 Enrichment	1.05 ± 0.45	

### 类两个二节点食物链

这两个链最短, 其中的牲畜主要包括马、藏牦牛及藏系绵羊等, 它们完全生活在人类控制的系统当中, 可认为是没有天敌的物种; 而高寒草甸唯一的植食性鸟类——黄嘴朱顶雀 (*Acanthis flavirostris*) 的栖息环境和繁殖地点主要在山生柳以及鲜卑花的灌丛枝杈间, 很少受到小型食肉兽, 如香鼬 (*Mustela altaica*) 和艾虎 (*Mustela eversmanni*) 的捕食, 因为这二者主要栖息在高寒草甸的鼠类洞穴中, 且主要以小型哺乳类高原鼠兔 (*Ochotona curzoniae*)、甘肃鼠兔 (*Ochotona cansus*) 和高原鼯鼠 (*Myospalax fontanierii*) 等为食。

### 2. 植物 (含种子) → 小型哺乳类 → 食肉兽/猛禽构成三节点食物链

该链中的小型哺乳类主要为高原鼠兔、甘肃鼠兔、根田鼠 (*Microtus oeconomus*)、高原鼯鼠以及数量和密度较低的高原兔 (*Lepus oiostolus*) 和旱獭等, 它们均为食草性动物。该链中的食肉兽主要有艾虎和香鼬等 (赤狐目前已很难发现, 其密度和数量已相当低), 它们主要以高原鼠兔、甘肃鼠兔、高原鼯鼠、根田鼠、高原兔及旱獭为食。此食物链中的顶级消费者中的猛禽主要有大鸮 (*Buteo hemilasius*)、猎隼 (*Falco cherrug*) 和红隼 (*Falco tinnunculus*) 等。

### 3. 植物 (含种子) → 昆虫 → 雀形目鸟类 (杂食性和食虫性) → 猛禽/食肉兽构成的四节点食物链

在该食物链中, 主要的昆虫类群有鞘翅目、双翅目、膜翅目、鳞翅目和半翅目等, 主要的昆虫有草原毛虫、蝶、蝇、蜻、蚊、虻和步甲及其幼虫等, 它们构成了杂食性鸟类 [角百灵 (*Eremophila*

*alpestris*)、小云雀 (*Alauda gulgula*)、鹁岩鹑 (*Prunellidae rubeculoides*)、朱鹀 (*Anthus roseatus*)、树麻雀 (*Passer montanus*)、白腰雪雀 (*Montifringilla taczanowskii*) 和棕颈雪雀 (*Montifringilla ruficollis*) 等] 和食肉性鸟类 [如灰砂燕 (*Hirundo griseopyga*)、赭红尾鹟 (*Phoenicurus ochruros*)、黄头鹡鸰 (*Motacilla citreola*)、褐背拟地鸦 (*Pseudopodoces humilis*)] 主要的食物来源。由稳定性碳同位素比值可以看出, 大鸮主要捕食成体鸟类, 而香鼬和艾虎则主要猎捕幼鸟。

### 4. 植物 (含种子) → 昆虫 → 两栖类 → 猛禽/食肉兽构成的四节点食物链

该链中的昆虫同上所述, 而两栖类主要指中国林蛙 (*Rana temporaria*) 和中华大蟾蜍 (岷山亚种) (*Bufo bufo*), 它们可能会成为猛禽和食肉兽潜在的食物来源。胃容物分析表明, 中国林蛙和中华大蟾蜍胃中含有大量的草原毛虫。

从稳定性碳同位素特征上看, 在上述的 2、3 和 4 食物链中, 作为顶极捕食者的小型食肉类 (香鼬和艾虎), 有时也可能被猛禽 (大鸮和猎隼等) 所捕获。但被捕获的小型食肉类多是行动不便、体弱多病的个体, 而非行动敏捷的个体。在高寒草甸地区, 高空翱翔的大鸮和猎隼很难捕捉到动作灵敏的香鼬和艾虎。

### 2.2 食物链长度

高寒草甸生态系统的食物链的最大长度为 3.53, 与该系统食物链中最大节点数 4 很接近。这二者说明, 稳定性碳同位素可以作为分析高寒草甸生态系统食物网和食物链结构以及食物链长度的有效代理 (proxy)。

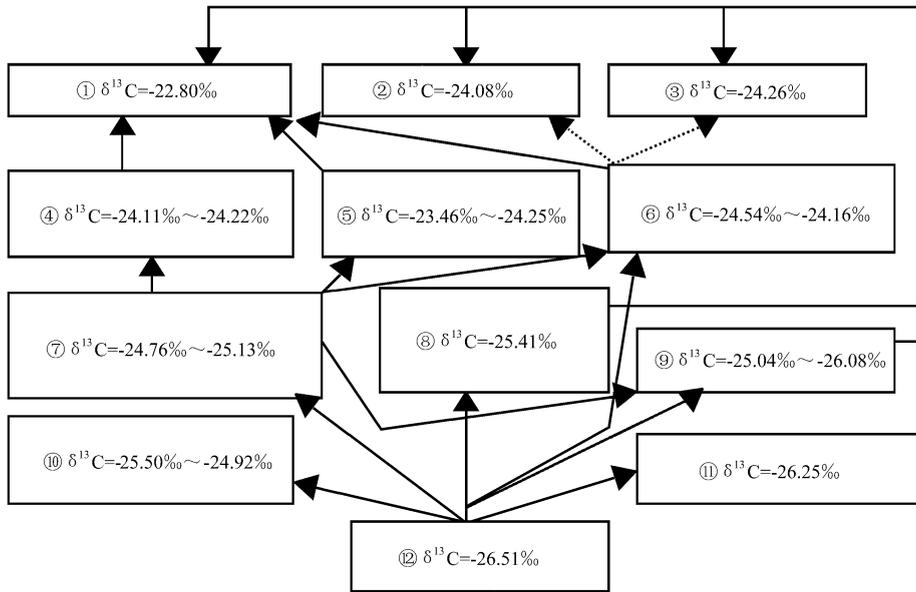


图 1 高寒草甸生态系统简单的食物链营养关系

Fig. 1 Simple food chain trophic relationships among the alpine meadow ecosystem

①大鸮；②艾虎；③香鼬；④两栖类（中国林蛙、中华大蟾蜍）；⑤食虫鸟（褐背拟地鸦、黄头鹡鸰）；⑥杂食鸟类（小云雀、角百灵、鸫岩鹑、赭红尾鹟、长嘴百灵）；⑦食草昆虫（直翅目、半翅目、鳞翅目、膜翅目）；⑧小型哺乳类（高原鼠兔、根田鼠、高原兔、高原鼯鼠）；⑨幼鸟；⑩藏牦牛、藏系绵羊；⑪植食性鸟类（黄嘴朱顶雀）；⑫植物。实线表明二者存在取食关系，而虚线表明二者不存在（或存在很微弱）的取食关系；方框中的数值为稳定性碳同位素比值。

① *Buteo hemilasius* ; ② *Mustela eversmanni* ; ③ *Mustela altaica* ; ④ Amphibians (*Rana temporaria* , *Bufo bufo* ) ; ⑤ Insect-eating birds (*Pseudopodoces humilis* , *Motacilla citreola* ) ; ⑥ Omnivorous birds (*Alauda gulgula* , *Eremophila alpestris* , *Prunellidae rubeculoides* , *Phoenicurus ochruros* , *Melanocorypha maxima* ) ; ⑦ Grass-eating insects (Orthoptera , Hemiptera , Lepidoptera , Hymenoptera ) ; ⑧ Small mammals (*Ochotona curzoniae* , *Microtus oeconomus* , *Lepus oiostolus* , *Myospalax fontanierii* ) ; ⑨ Young birds ; ⑩ *Bos grunniens* , *Ovis ammon hodgsoni* ; ⑪ Passerine birds (*Acanthis flavirostri* ) ; ⑫ Plants . The solid lines mean trophic relationship between two species ; broken lines mean no (or weak) trophic relationship ; values in boxes represent  $\delta^{13}\text{C}$  values of the species .

### 3 讨论

稳定性同位素技术应用于生态系统物质流动和食物链营养关系的研究，是基于生物体内天然存在的同位素比值与它们食物密切相关这一原理建立起来的 (DeNiro & Epstein, 1978, 1981)。稳定性碳同位素比值， $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  (或  $\delta^{13}\text{C}$ ) 在两营养级间的变化常在 1‰ ~ 2‰ 的范围存在 (Hobson & Clark, 1992; Hilderbrand et al, 1996)。这样针对消费者组织中同位素的测定就可以推断它们的食物信息以及在生态系统中的食物链结构。消费者与群落基底物种 (初级生产者) 间  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  的差异早就用来研究物种间的营养关系 (Schoeninger & DeNiro, 1984)。

通过对植物群落、动物群落稳定性碳同位素模式的研究，我们得到了一个高寒草甸生态系统营养级间的碳同位素富集因子：1.05‰；它与 DeNiro & Epstein (1978, 1981) 报道的值相近。于是我们对对其进行一定程度的矫正并将其作为判定取食关系 (或营养关系) 的标准。如果两物种间碳同位素的

差异在 0.60‰ 以下或 1.50‰ 以上，基本上可认为它们之间不存在取食关系。因为对前一种情况而言 (即二者碳同位素比值非常接近)，它们可能已经处在同一个营养级上 (如香鼬和艾虎) (图 1)；对于后一种情况，即二者碳同位素比值存在较大差异，两物种间可能已经出现另外一个营养阶层，也不可能存在取食关系 (如两栖类、香鼬、艾虎和植物群落间已经出现昆虫和小型哺乳类另外一营养阶层) (图 1)。通过该富集因子的判断，再辅以部分动物胃容物的分析结果，可初步得出高寒草甸的食物链营养级关系，这与 Zhang et al (1999) 总结的情况基本类似。然而由此得出的食物链关系中，大鸮与小型哺乳类的微弱的取食关系似乎有悖常理。但对它们稳定性碳同位素分析后，就很容易解释这种现象。大鸮和小型哺乳类间的同位素的富集效应为 2.60‰ 左右，远远超出了我们得到的富集值 1.05‰。也就是说，即使大鸮完全以啮齿类为食，其稳定性碳同位素值也应该在 -24.36‰ 左右。但事实恰恰相反，这说明大鸮的大部分食物的碳同位

素比值应该在  $-23.96\%$  左右, 具有该同位素比值特征的食物资源, 在高寒草甸地区只能是杂食性和食虫性的雀形目鸟类。这种现象可能与大规模化学灭鼠后大鸺的食性改变有关 (Yi et al, 2003)。相反, 对于香鼬和艾虎来说, 它们与小型哺乳类间碳同位素比值的差异在  $1\%$  左右, 小型哺乳类就成为其食物的主要来源, 而非雀形目鸟类。另外, 由同位素富集因子得到的食物链关系中, 赤胸林蚁的碳同位素比值要比小型哺乳类和其他植食性昆虫的高, 说明它属于捕食性昆虫, 应该属于第三营养阶层。经过碳同位素的质量平衡原理计算, 其食物主要来源于对其他昆虫 (卵或尸体) 的捕食, 而非对植物的取食。黄嘴朱顶雀作为高寒草甸地区唯一的植食性鸟类, 其食物主要为鲜卑花的幼嫩种子 (比叶片碳同位素比值低  $1\% \sim 2\%$ ), 其碳同位素比值

最低 (图 1), 因此它不可能成为猛禽和小型食肉兽的主要猎捕对象; 而其栖息和繁殖的特殊生境也避免了它们被猛禽和食肉兽的捕杀。我们还发现, 幼鸟的碳同位素比值甚至比它们的食物还低 (图 1), 这可能与它们对碳同位素较低的代谢能力有关, 因为我们发现幼鸟排泄物的稳定性碳同位素比值较成鸟的高得多。

总之, 利用稳定性碳同位素技术分析高寒草甸生态系统的食物链营养关系是可行的。当然, 在此基础上引入其他稳定性同位素 (氮、硫和锶等) 或辅以动物的胃容物分析, 将使针对生态系统的食物链和食物网的分析更为精确。

致谢: 感谢中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站提供研究场地。

## 参考文献:

- Cai DL, Meng F, Han YB, Gao SL. 1999. 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 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, **30**: 671–678. [蔡德陵, 孟凡, 韩贻兵, 高素兰. 1999.  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  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. 海洋与湖沼, **30**: 671–678.]
- Cai DL, Hong XG, Mao XH, Zhang SF, Han YB, Gao SL. 2001a. Preliminary studies on trophic structure of tidal zone in the Laoshan Bay by using carbon stable isotopes [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, **23**: 41–47. [蔡德陵, 洪旭光, 毛兴华, 张淑芳, 韩贻兵, 高素兰. 2001a. 崂山湾潮间带食物网结构的碳稳定同位素初步研究. 海洋学报, **23**: 41–47.]
- Cai DL, Wang R, Bi HS. 2001b. Trophic relationships in the Bohai ecosystem: Preliminary investigation from  $^{13}\text{C}$  analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, **21**: 1354–1359. [蔡德陵, 王荣, 毕洪生. 2001b. 渤海生态系统的营养关系: 碳同位素研究的初步结果. 生态学报, **21**: 1534–1359.]
- Cerling TE, Harris JM. 1999. Carbon isotope fractionation between diet and bioapatite in ungulate mammals and implications for ecological and paleoecological studies [J]. *Oecologia*, **120**: 347–363.
- DeNiro MJ, Epstein S. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**: 495–506.
- DeNiro MJ, Epstein S. 1981. Influence of diet on the distribution of isotopes in animals [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**: 341–351.
- Guo WD, Yang YP, Wu LX, Wan HK, Hu MH. 2002. Stable carbon isotopes study on trophic relationships of Zhubi reef ecosystem in Nansha Islands [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, **21**: 94–101. [郭卫东, 杨逸萍, 吴林兴, 王汉奎, 胡明辉. 2002. 南沙渚碧礁生态系统营养关系的稳定碳同位素研究. 台湾海峡, **21**: 94–101.]
- Hilderbrand GV, Farley SD, Robbins CT. 1996. Use of stable isotope to determine diets of living and extinct bears [J]. *Can. J. Zool.*, **74**: 2082–2088.
- Hobson KA, Clark RW. 1992. Assessing avian diets using stable isotopes: I. Turnover of  $^{13}\text{C}$  in tissues [J]. *Condor*, **94**: 181–188.
- Hobson KA, Welch HE. 1992. Determination of trophic relationships within a high arctic marine food web using  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  analysis [J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **84**: 9–18.
- Peterson BJ, Howarth RW, Garritt RH. 1985. Multiple stable isotopes used to trace the flow of organic matters in estuarine food webs [J]. *Science*, **227**: 1361–1363.
- Schoeninger MJ, DeNiro MJ. 1984. Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**: 625–639.
- Yi XF, Li LX, Zhang XA, Li MC, Zhao L. 2003. Food habit shift of upland buzzards (*Buteo hemilasius*): Evidence from stable carbon isotope ratios [J]. *Acta Zool. Sin.*, **49**: 52–56. [易现峰, 李来兴, 张晓爱, 李明财, 赵亮. 2003. 大鸺的食性改变: 来自稳定性碳同位素的证据. 动物学报, **49**: 52–56.]
- Zhang XA, Zhao L, Liu ZH. 1999. A preliminary analysis on structure in alpine meadow ecosystem [J]. *Acta Biologica Plateau Sinica*, **14**: 150–156. [张晓爱, 赵亮, 刘泽华. 1999. 高寒草甸生态系统结构的初步分析. 高原生物学集刊, **14**: 150–156.]