

高寒草甸消费者种群稳定碳、氮同位素组成的海拔分异^{*}

宋大伟¹ 李明财^{2,3,4**} 李来兴³ 易现峰⁵ 张晓爱³

(¹ 吉林师范大学, 吉林四平 136000; ² 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; ³ 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; ⁴ 中国科学院研究生院, 北京 100039; ⁵ 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003)

摘要 通过测定青藏高原东部高寒区不同海拔主要植物和消费者种群(雀形目鸟类和小型哺乳类)的稳定碳、氮同位素比值,研究了高寒草甸消费者种群同位素组成特征及其影响因素。结果表明:植物平均稳定碳同位素随海拔升高表现出明显的增加趋势;消费者种群稳定碳、氮同位素随海拔的升高有明显的富集效应。雀形目鸟类种群稳定碳、氮同位素随海拔的升高均呈明显增加趋势;小型哺乳类稳定碳同位素随海拔上升不明显,而稳定氮同位素具有明显的增大趋势。消费者种群稳定碳、氮同位素沿海拔梯度的富集效应,一方面与植物稳定同位素在海拔梯度上的富集密切相关;另一方面与海拔和纬度变化所引起一系列环境因子的变化在一定程度上影响到动物的稳定同位素分布模式。另外,在高寒草甸地区,与雀形目鸟类相比,小型哺乳类在动物稳定同位素组成的代谢过程中更容易受到环境改变的影响。

关键词 高寒草甸; 稳定碳、氮同位素; 消费者种群

中图分类号 Q958.12 **文献标识码** A **文章编号** 1000 - 4890(2007)01 - 0040 - 06

Altitudinal differentiation of stable carbon and nitrogen isotopes composition of main consumers on alpine meadow of east Qinhai-Tibet Plateau SONG Da-wei¹, LI Ming-cai^{2,3,4}, LI Lai-xing³, YI Xian-feng⁵, ZHANG Xiao-ai³ (¹ Jilin Normal University, Siping 136000, Jilin, China; ² Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ³ Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; ⁴ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; ⁵ College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 40 - 45.

Abstract: By measuring the ¹³C / ¹⁵N ratios of main plants and their consumers (passerine birds and small mammals) on different altitudes alpine meadow of east Qinhai-Tibet Plateau, this paper studied the characteristics of the consumers' stable carbon and nitrogen isotopes composition and their relationships with the plants' stable isotopes composition and environmental factors. The results showed that the average ¹³C value of plants increased with increasing altitude, and the stable C and N isotopes composition of the consumers also increased significantly from low to high altitude. Both ¹³C and ¹⁵N of passerine birds had obvious increase with increasing altitude, while the ¹³C value of small mammals did not change with altitude, but their ¹⁵N had a significant increase from low to high altitude. It was suggested that the variation of plants' stable carbon and nitrogen isotopes composition might be the important factor determining the altitudinal differentiation of the consumers' stable isotopes composition, and the variation of environmental factors due to the changes of altitude and latitude could partially contribute to the stable carbon and nitrogen isotopes composition of the consumers. Compared with passerine birds, small mammals in their metabolic processes of stable carbon and nitrogen isotopes were more sensitive to the changes of the environment.

Key words: alpine meadow; stable carbon and nitrogen isotopes; consumers

* 国家自然科学基金资助项目(30270217)。

** 通讯作者 E-mail: Linc@ipc.ac.cn

收稿日期: 2006-04-12 接受日期: 2006-10-31

1 引言

生态系统内稳定同位素的分馏和富集程度最初可归结到植物种群同位素模式的变化。植物的稳定碳、氮同位素常常受到各种环境因素的影响 (Guillemette & Stephen, 2001; 王国安和周力平, 2002; 冯虎元等, 2003; 李明财等, 2005; 郑兴波等, 2005), 温度在这个过程中是关键因素 (Guillemette & Stephen, 2001; 王国安和周力平, 2002; 李明财等, 2005)。温度常常影响到 C₃ 和 C₄ 植物的分布 (Ehleringer *et al*, 1987; 殷立娟和祝玲, 1990; Li *et al*, 2006), 从而影响到系统基底层同位素分布模式, 进而影响消费者机体同位素的分布。目前, 海拔变化对植物种群稳定碳同位素的影响已有大量研究 (Kömer *et al*, 1988; 李相博等, 1999; Guillemette & Stephen, 2001), 而对于消费者种群同位素模式沿海拔梯度变化规律的研究较少 (Chamberlain *et al*, 1997; Graves *et al*, 2002)。消费者与群落基底物种 (初级生产者) 稳定碳、氮同位素比值的差异已被用来研究物种间的营养关系 (Schoeninger & DeNiro, 1984; 易现峰和张晓爱, 2005), 因为消费者的同位素分布模式受生产者比如陆地植物的稳定同位素组成影响。另外, 环境条件的改变也可以影响到动物对稳定同位素的代谢过程。国内对于消费者种群随海拔的同位素分馏模式还未见报道。本文将对 3 个不同海拔地区的植被、主要消费者种群 (雀形目鸟类和小型哺乳类) 稳定碳、氮同位素进行测定, 初步研究其同位素组成在海拔梯度上的分布模式以及探讨这种分布模式的影响因素, 为将来研究青藏高原动物迁徙路线及生存起源问题提供科学依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究区概况

试验分别选在青藏高原东部青海省境内不同海

拔的门源县、河南县和玛多县境内进行。3 个研究地点的气候均属高原大陆性气候, 光照时间长, 日照强烈。分为冷暖两季, 冷季漫长寒冷, 多大风, 暖季短促凉润, 11 月至翌年 4 月为冷季, 5—10 月是暖季, 7—8 月是全年平均气温最高的时段。植被在门源县及河南县主要以高寒矮蒿草或小蒿草草甸所覆盖, 玛多县主要为高寒草甸或半荒漠所占据。各研究区的气候资料及植被类型见表 1。研究区内小型哺乳类主要包括高原鼠兔 (*Ochotona curzoniae*)、根田鼠 (*Microtus oeconomus*)、高原鼯鼠 (*Myospalax bailey*)、青海田鼠 (*Lasiopodomys fuscus*)、高原兔 (*Lepus oiostolus*)。雀形目鸟类主要包括白腰雪雀 (*Onychosternus taczanowskii*)、棕颈雪雀 (*Pyrgilauda nrficolis*)、角百灵 (*Eremophila alpestris*)、小云雀 (*Aldaula gulgula*)、赭红尾鹀 (*Phoenicurus ochuross*)、褐背拟地鸦 (*Pseudopodoces humilis*)、高山岭雀 (*Leucosticte brandti*)、树麻雀 (*Passer montanus*)、鹁岩鹑 (*Punella nubiculoides*)、长嘴百灵 (*Melanocorypha maxima*)、黄嘴朱顶雀 (*Acanthis flavirostris*), 在不同海拔分布类群有所不同 (表 2)。

2.2 样品采集与稳定碳、氮同位素测定

2003 年夏季草盛期 (7—8 月) 在每个研究区内收集 1.0 × 10⁴ m² 范围内的植物叶片 (尽量收集到其中所有物种)。在门源县总共收集 25 科 70 属 99 种植物叶片, 河南县共收集 23 科 50 属 72 种植物, 而玛多县共收集 20 科 38 属 62 种植物。同时收集研究区内的主要初级消费者种群。鸟类以胸肌作为样品, 小型哺乳类以后腿肌肉作为样品, 以尽量排除脂肪组织对稳定同位素组成的影响。待测样品在恒温 70 °C 下烘 48 h 至恒质量, 充分研磨之后过 200 筛, 装到密封袋子备用。采用 Finnigan MAT DELTA^{plus} XL 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。制备条件: 氧化炉

表 1 研究区气候资料与植物类型

Tab 1 Climate and vegetation types of study areas

地点	海拔 (m)	植被类型	北纬	东经	年均温度 (°C)	年降水量 (mm)	年蒸发量 (mm)	年光照时数 (h)
门源县	3150	高寒草甸	37°26'	101°29'	-0.1	512.0	1106.6	2460.6
河南县	3560	高寒草甸	34°50'	101°36'	-0.6	554.9	1235.3	2459.3
玛多县	4210	高寒草甸半荒漠	34°55'	98°13'	-3.8	321.6	1322.5	2838.3

表 2 3 个海拔地区主要植物种群和消费者的稳定碳、氮同位素分布模式 (‰)

Tab 2 Distribution patterns of stable carbon and nitrogen isotope ratios of plants and main consumers living at the three areas with different altitudes

物种	门源县		河南县		玛多县	
	^{13}C	^{15}N	^{13}C	^{15}N	^{13}C	^{15}N
植物	-27.23 ±0.9	-	-27.04 ±0.94	-	-26.53 ±0.73	-
高原鼠兔	-24.95 ±0.25	3.21 ±0.18	-24.69 ±0.10	3.25 ±0.46	-24.48 ±1.08	6.54 ±0.53
根田鼠	-25.74 ±0.34	2.85 ±0.42	-	-	-	-
高原鼯鼠	-25.78 ±0.36	5.27 ±1.20	-	-	-	-
青海田鼠	-	-	-	-	-25.41 ±0.01	8.86 ±0.06
高原兔	-24.67	2.51	-	-	-	-
白腰雪雀	-	-	-23.88 ±0.22	6.90 ±0.36	-23.41 ±0.45	7.50 ±2.73
棕颈雪雀	-	-	-23.83 ±0.30	4.79 ±0.67	-22.06 ±0.64	9.12 ±0.56
角百灵	-24.18 ±0.28	7.35 ±0.37	-23.63 ±0.14	5.99 ±0.67	-23.30 ±0.14	11.92 ±2.98
小云雀	-23.97	7.06	-23.76 ±0.32	6.00 ±0.56	-18.92 ±0.22	9.99 ±0.63
赭红尾鹀	-23.94 ±0.14	6.67 ±0.02	-23.41 ±0.14	7.22 ±0.01	-23.43 ±0.19	11.41 ±0.04
褐背拟地鸦	-24.29 ±0.33	7.58 ±1.27	-23.63 ±0.34	8.74 ±2.41	-	-
高山岭雀	-24.08 ±0.30	7.77 ±1.09	-	-	-	-
树麻雀	-24.18 ±0.06	7.77 ±0.53	-	-	-	-
鸫岩鹀	-24.90 ±0.07	8.44 ±0.81	-	-	-	-
长嘴百灵	-24.54 ±0.32	6.01 ±0.12	-	-	-	-
黄嘴朱顶雀	-24.25 ±0.17	7.90 ±0.84	-	-	-	-

温度 900 ℃, 还原炉温度 680 ℃, 柱温 40 ℃。产生的 CO_2 和 N_2 在真空中经纯化后注入比集运量 602E 质谱仪 (Finnegan MAT, Bremen, Germany) 进行测定。测定结果以稳定碳同位素 (^{13}C) 和稳定氮同位素 (^{15}N) 表示:

$$^{13}\text{C} = \left[\left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}} \right)_{\text{样品}} / \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}} \right)_{\text{标准}} - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

$$^{15}\text{N} = \left[\left(\frac{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}}{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}} \right)_{\text{样品}} / \left(\frac{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}}{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}} \right)_{\text{标准}} - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

式中: $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{样品}} / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{标准}}$ 分别是样品和标准品 (PDB) 的碳同位素比率; $(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{样品}} / (^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{标准}}$ 分别是样品和标准品 (大气中的氮气) 的氮同位素比率。整个分析过程 (包括样品处理和分析) 的精度为 0.2‰。

2.3 数据分析

采用 SPSS 10.0 进行统计分析, 数据以 Mean ± SD 表示。不同海拔地区稳定性同位素的差异显著性以独立样本 t 检验, $P < 0.05$ 为显著水平, 所有统计分析结果均为双尾。

3 结果与分析

3.1 植物种群稳定同位素组成的海拔分异

植物种群的平均稳定碳同位素组成随海拔的升高具有明显的增加趋势 (图 1), 由门源县的

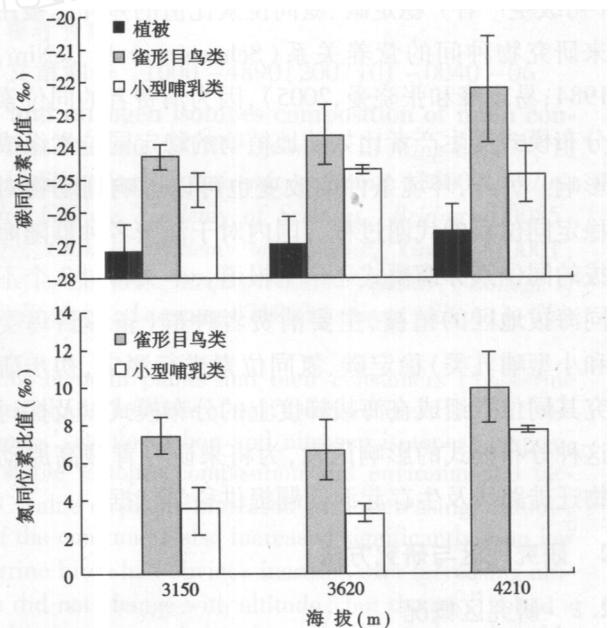


图 1 不同海拔植物、雀形目鸟类及小型哺乳类稳定碳、氮同位素比值

Fig 1 Stable carbon and nitrogen isotope ratios of plants, passerine birds and small mammals at different altitudes

(-27.23 ±0.9)‰ 增加为玛多县的 (-26.53 ±0.73)‰ (表 2), 植物种群稳定碳同位素富集效应为 $0.66\text{‰} \cdot \text{km}^{-1}$, 且在不同海拔之间的差异达到了极显著水平 ($P < 0.001$)。植物的稳定碳同位素组成随海拔升高与环境条件的改变有关, 如温度、降水、

CO₂ 浓度的影响 (Polley *et al* , 1995; Rice & Giles, 1996; Edwards *et al* , 2000; 于大炮等, 2003)。随着海拔的升高, 温度、降水、CO₂ 浓度降低, 而蒸发量升高, 这都会导致植物叶片气孔导度下降或气孔关闭, 植物叶片内部的 CO₂ 浓度下降, 光合作用过程中叶片对 ¹³C 的分馏降低, 从而光合作用产物稳定碳同位素组成增加 (Stewart *et al* , 1995; Guillemette & Stephen, 2001)。植物稳定氮同位素主要受到土壤中各种氮素源 (硝酸盐和铵盐等) 同位素组成的影响 (Shearer & Kohl, 1989)。对部分具有固氮功能的植物来说, 其氮同位素组成还受大气中氮气同位素组成的影响 (Virginia *et al* , 1989)。研究表明, 固氮植物与非固氮植物相比, ¹⁵N 低 2% 左右 (Schoeninger & DeNiro, 1984; Lajtha & Marshall, 1994)。

3.2 雀形目鸟类及小型哺乳类稳定同位素组成的海拔分异

雀形目鸟类的稳定碳、氮同位素比值总体上随海拔升高呈增大趋势 (图 1, 表 2), 而且 3 地之间的差异均达到显著水平 ($P < 0.01$) (表 3), 稳定碳、氮同位素随海拔表现出与植物种群类似的变化模式 (图 1)。鸟类平均稳定碳同位素比值从门源县的 -24.26‰ 上升到玛多县的 -22.22‰, 富集效应为 $2.27‰ \cdot km^{-1}$, 而氮同位素从门源县的 7.39‰ 上升到玛多县的 10.00‰, 富集效应为 $2.48‰ \cdot km^{-1}$ (图 1), 而且不同鸟类均呈现相同的变化模式 (表 2)。3 个试验地点的角百灵、小云雀和赭红尾鹀, 稳定碳、氮同位素比值均随海拔的升高而增大 (表 2), 说明在青藏高原海拔升高导致了雀形目鸟类稳定碳、氮同位素的富集。

小型哺乳类的稳定碳、氮同位素组成随海拔的变化显示不同分布模式 (图 1, 表 2)。稳定碳同位素随海拔升高的富集程度较弱, 只有河南县与门源县之间达到显著性水平 ($P < 0.01$) (表 3), 从门源县的 -25.28‰ 上升到河南县的 -24.69‰, 而到玛多县又下降到 -24.85‰, 富集效应为 $0.41‰ \cdot km^{-1}$ (表 2)。而稳定氮同位素从低海拔到高海拔呈明显的富集效应, 河南县与玛多县、门源县与玛多县均达到显著性水平 ($P < 0.01$) (表 3), 从门源县的 3.46‰ 增加至玛多县的 7.70‰, 富集效应为 $4.02‰ \cdot km^{-1}$ (表 2), 尽管河南县较门源县呈现略微的降低。高原鼠兔的稳定碳同位素比值在门源县、河南县及玛多县分别为 -24.95‰、-24.69‰ 和 -24.48‰, 而稳定氮同位素比值分别为 3.21‰、

表 3 不同海拔地区主要植物种群和消费者的稳定碳、氮同位素差异显著性分析

Tab 3 Significant analyses on differences between stable carbon and nitrogen isotope ratios of plants and main consumers living in the areas with different altitudes

	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>P</i>
稳定性碳同位素			
雀形目鸟类			
河南县 - 门源县	4.773	44.22	0
河南县 - 玛多县	-3.687	38	0.001
门源县 - 玛多县	-5.864	48	0
小型哺乳类			
河南县 - 门源县	3.361	14.71	0.004
河南县 - 玛多县	0.225	6	0.829
门源县 - 玛多县	-1.105	17	0.285
植物			
河南县 - 门源县	-2.740	59.216	0
河南县 - 玛多县	-1.416	75.328	0
门源县 - 玛多县	-3.833	59.188	0
稳定性氮同位素			
雀形目鸟类			
河南县 - 门源县	-3.259	34.857	0.003
河南县 - 玛多县	-5.308	34	0
门源县 - 玛多县	-4.776	47	0
小型哺乳类			
河南县 - 门源县	0.978	2.901	0.402
河南县 - 玛多县	-5.999	5.826	0.001
门源县 - 玛多县	-8.979	11	0

3.25‰ 和 6.54‰ (表 2), 说明稳定碳、氮同位素比值随海拔升高而增加, 而本研究中小型哺乳类稳定碳同位素比值随海拔较弱的富集程度可能是由于不同海拔地区不同物种分布而产生的种间差异造成的。总体上, 消费者种群稳定性同位素在 3 个海拔梯度上有明显的富集效应, 随海拔的升高而增加, 且表现出与植物种群类似的变化模式。

3.3 雀形目鸟类及小型哺乳类稳定同位素组成海拔分异的影响因素

由于消费者稳定碳同位素组成表现出与植物同位素组成类似的海拔富集模式, 即随着海拔的升高而增加 (表 2), 说明动物的碳同位素富集主要来源于对植物碳同位素的同化。因此可认为, 温度、气压及降水的变化引起的植物碳同位素组成在不同海拔的差异影响动物稳定碳同位素富集; 另一方面, 随着海拔的升高, 稳定碳同位素在不同海拔梯度以及不同类型消费者之间的富集效应不是等同的, 不是完全按照植物的富集效应逐渐富集的, 动物的同位素代谢过程和分馏模式直接受到环境条件的影响。但雀形目鸟类和小型哺乳类的稳定碳同位素随海拔变化所呈现出的 2 种相反的富集模式, 即与植物种群

的富集效应相比,雀形目鸟类随海拔升高富集效应增大,而小型哺乳类减小,这可能与动物的食性及代谢过程有关。本研究中的小型哺乳类都是植食性的,以植物的叶片或根部为食,而雀形目鸟类除了黄嘴朱顶雀为植食性,褐背拟地鸦是肉食性,其它均为杂食性鸟类,这就使得鸟类成为二级或者更高级消费者,所处的营养级要高于小型哺乳类,一方面使得鸟类的同位素比值要高于小型哺乳类;另一方面,处于更高营养级的鸟类同位素富集效应要大于小型哺乳类。另外,鸟类与小型哺乳类的不同代谢过程可能也会对同位素分馏产生影响。

由于受到样本数的限制,本文没有测定植物种群的氮同位素组成。但根据 3 个地区小型哺乳类的氮同位素模式来看,门源县与河南省土壤与植物的氮同位素组成差异不大,而玛多县土壤和植物的氮同位素组成明显高于前两地(表 2)。这可从各消费者的氮同位素组成看出,同时可以解释为什么玛多县消费者的氮同位素组成与门源县及河南省之间存在明显差异,而门源县和河南省消费者之间稳定氮同位素的富集不明显。虽然系统基底层植物的氮同位素很少受到温度、水分和气压的影响,但不同海拔可引起土壤氮同位素的富集,门源县和河南省雀形目鸟类之间稳定氮同位素的明显富集就说明这一点。玛多县消费者的氮同位素组成明显居高,一方面可能与植物及土壤高氮同位素组成有关;另一方面可能是高海拔引起的环境变化对动物代谢影响造成的。动物的同位素富集来源于植物对土壤或大气氮素的固定(Schoeninger *et al*, 1998),动物在消化、吸收和排泄植物氮素营养过程中,实现了氮同位素的富集。在这个过程中,动物对植物蛋白质(氨基酸)的降解(转氨基和脱氨基作用)、吸收利用(脂肪酸、糖和蛋白质的合成)以及尿酸和尿素排泄起到了关键的作用(Vander *et al*, 1975)。可以认为,由海拔引起的温度效应,是不同海拔梯度间各消费者氮同位素组成差异的间接原因。水分胁迫常常会引起动物稳定氮同位素比值的上升(Ambrose & DeNiro, 1986; Sealey *et al*, 1987; Comie *et al*, 1994),Heaton(1987)也发现干旱地区动物的 ^{15}N 值较高,所以稳定氮同位素组成差异与在海拔梯度上形成降水量减少和蒸发量增大有关。

4 小 结

消费者种群稳定碳、氮同位素组成随海拔升高

而升高的现象,是由不同海拔地区植物(含土壤)的同位素组成所决定的,同时由海拔引起的一系列环境因素的变化起到了关键作用。随海拔梯度改变的温度效应和水分胁迫效应,可能影响到了动物消化系统对同位素的代谢过程和分馏机制,从而影响到动物稳定同位素分布模式。本研究对消费者群落稳定碳、氮同位素随海拔的分布模式做了分析,植物只分析了碳同位素,而且研究中由于不同海拔分布的物种存在差别,采用同种物种进行了研究。结果表明,消费者种群稳定碳、氮同位素组成随海拔上升而增高的现象,表现出与植物之间的响应关系。

参考文献

- 冯虎元, 安黎哲, 陈 拓. 2003. 马先蒿属植物稳定碳同位素组成与环境因子之间的关系. *冰川冻土*, 25(1): 88 - 93.
- 李明财, 易现峰, 李来兴, 等. 2005. 青藏高原东部典型高山植物叶片 ^{13}C 的季节变化. *西北植物学报*, 25(1): 77 - 81.
- 李相博, 陈践发, 张平中. 1999. 青藏高原(东北部)现代植物碳同位素组成特征及其气候信息. *沉积学报*, 17(2): 325 - 329.
- 王国安, 周力平. 2002. 中国北方 C_3 植物碳同位素组成与年均温度关系. *中国地质*, 29(1): 55 - 57.
- 易现峰, 张晓爱. 2005. 稳定性同位素技术在生态学上的应用. *生态学杂志*, 24(3): 306 - 314.
- 殷立娟, 祝 玲. 1990. 东北草原 C_3 和 C_4 牧草及其生态分布的初步研究. *应用生态学报*, 1(3): 237 - 242.
- 于大炮, 周 莉, 代力民, 等. 2003. 树木年轮分析在全球变化研究中的应用. *生态学杂志*, 22(6): 91 - 96.
- 郑兴波, 张 岩, 顾广虹. 2005. 碳同位素技术在森林生态系统碳循环研究中的应用. *生态学杂志*, 24(11): 1334 - 1338.
- Ambrose SH, DeNiro MJ. 1986. The isotope ecology of East African mammals. *Oecologia*, 69: 395 - 406.
- Chamberlain CP, Blum JD, Holmes RT, *et al*. 1997. The use of isotope tracers for identifying populations of migratory birds. *Oecologia*, 109: 132 - 241.
- Comie AB, Schwartz HP, Gray J. 1994. Determination of the hydrogen isotopic composition of bone collagen and correction for hydrogen exchange. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 365 - 375.
- Edwards TWD, Graf W, Trimbom P, *et al*. 2000. ^{13}C response surface resolves humidity and temperature signals in trees. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 161 - 167.
- Ehleringer JR, Lin ZF, Field CB. 1987. Leaf carbon isotope ratios of plants from a subtropical monsoon forest. *Oecologia*, 72: 109 - 114.

- Kömer C, Fapuhar GD, Roksapdie Z 1988 A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude *Oecologia*, **74**: 622 - 632
- Graves GR, Romanek CS, Navarro AR 2002 Stable isotope signature of philopatry and dispersal in a migratory songbird *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **99**: 8096 - 8100
- Guillemette MENOT, Stephen BURNS 2001. Carbon isotopes in Ombrogenic peat bog plants as climatic indicators: Calibration from an altitudinal transect in Switzerland *Organic Geochemistry*, **32**: 233 - 245.
- Heaton THE 1987. The $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios of plants in South Africa and Namibia: Relationship to climate and coastal/saline environments *Oecologia*, **74**: 236 - 246
- Lajtha K, Marshall JD. 1994. Sources of variation in the stable isotopic composition of plants// Lajtha K, Michener RH, eds *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* London: Blackwell Scientific Publications: 1 - 21.
- Li M, Liu HY, Yi X, et al 2006 Characterization of photosynthetic pathway of plant species growing in the eastern Tibetan plateau using stable carbon isotope compositions *Photosynthetica*, **44**: 102 - 108
- Polley HW, Johnson HB, Mayeux HS 1995 Nitrogen and water requirements of C_3 plants grown at glacial to present carbon dioxide concentrations *Functional Ecology*, **9**: 86 - 96
- Rice SK, Giles L. 1996 The influence of water content and leaf anatomy on carbon isotope discrimination and photosynthesis in Sphagnum. *Plant, Cell and Environment*, **19**: 118 - 124.
- Schoeninger MJ, DeNiro MJ. 1984 Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**: 625 - 639.
- Schoeninger MJ, Iwaniec UT, Nash LT 1998 Ecological attributes recorded in stable isotope ratios of arboreal primate hair *Oecologia*, **113**: 222 - 230.
- Sealey JC, van der Merwe NJ, Lee Thop JA, et al 1987. Nitrogen isotopic ecology in southern Africa: Implications for environmental and dietary tracing *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**: 2707 - 2717.
- Shearer G, Kohl DH 1989. Estimates of N_2 fixation in ecosystems: The need for and basis of the ^{15}N natural abundance method// Rundel PW, Ehleringer JR, Nagy KA, eds *Ecological Research* New York: Springer-Verlag: 342 - 374.
- Stewart GR, Turnbull MH, Schmidt S, et al 1995. ^{13}C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: A biological integrator of water availability. *Australian Journal of Plant Physiology*, **22**: 51 - 55.
- Vander AJ, Sherman JN, Luciano DS 1975. *Human Physiology: The Mechanisms of Body Function* New York: McGraw-Hill
- Virginia RA, Jarrell WM, Rundel PW, et al 1989. The use of variation in the natural abundance of ^{15}N to assess symbiotic nitrogen fixation by woody plants// Rundel PW, Ehleringer JR, Nagy KA, eds *Stable Isotopes in Ecological Research*. New York: Springer-Verlag: 345 - 394.

作者简介 宋大伟,女,1966年生,副教授。主要从事生物工程研究。E-mail: Sdw1158@163.com

责任编辑 刘丽娟
