

化石稳定碳同位素记录的中国华北第四纪陆地生态系统演变

邓涛^{①②} 董军社^① 王杨^③

(①中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044; ②中国科学院现代古生物学和地层学开放研究实验室, 南京 210008; ③Department of Geological Sciences, Florida State University, Tallahassee, FL32310, USA. E-mail: deng.tao@pa.ivpp.ac.cn)

摘要 分析了来自中国华北地区 11 个第四纪地点共 70 个哺乳动物牙齿釉质样品的碳同位素组成, 结果表明中国华北第四纪陆地生态系统中以 C₃ 植物占优势, 与纬度相当的巴基斯坦以 C₄ 植物占绝对统治地位的情况完全不同. 这一巨大差异是由于青藏高原的隆升引起的, 模拟结果显示高原北侧将发生显著的温度下降, 同时期南侧的温度将上升. 南侧的升温使 C₄ 植物在巴基斯坦取代了 C₃ 植物; 而北侧, 高原上升引起的温度下降抑制了 C₄ 植物的分布, 所以直到现代, 中国华北地区仍然以 C₃ 植物占优势.

关键词 釉质碳同位素 中国华北 陆地生态系统 第四纪

晚中新世以来, 全球的植被发生了从 C₃ 植物向 C₄ 植物的演替. 但 C₄ 植物在世界各地的扩散并不同时, 甚至有人认为 C₄ 植物在 15.3 Ma 以前已出现在东非^[1]. C₄ 植物的扩散有在低纬度出现较早而在高纬度出现较晚的特点^[2]. 对中国西北地区第四纪初期哺乳动物化石釉质和晚新生代红黏土-黄土序列古土壤碳酸盐的稳定碳同位素分析都表明, 这一地区的植被分布具有不同于其他地区的特点^[3-5]. 本研究分析了中国华北地区第四纪哺乳动物牙齿釉质的碳同位素组成, 更准确地阐明了该地区陆地生态系统的特点, 并深入地探讨其形成和演变的机制.

C₄ 植物在晚中新世出现的证据最先从草本植物化石的 Kranz 构造上发现^[6]. 许多研究者通过古土壤和哺乳动物化石牙齿釉质的碳同位素分析都证明自 7 Ma 以来 C₄ 植被在世界各地广泛扩散^[2,7-13]. C₃ 植物的 δ¹³C 值范围为 -23‰~-34‰, 平均值约 -27‰; C₄ 植物的 δ¹³C 值范围为 -9‰~-17‰, 平均值约 -13‰^[14-18]. 土壤中和食草哺乳动物牙齿釉质中的碳酸盐与其碳源相比显著地富集 ¹³C, 其中釉质碳酸盐的富集幅度约 12‰~15‰. 纯 C₃ 食性动物的釉质中 δ¹³C 为 -15‰~-12‰, 平均约 -13‰; 纯 C₄ 食性 δ¹³C 为 -1‰~+2‰, 平均约 +1‰^[7,10,19]. 所以, 可以根据哺乳动物牙齿釉质的碳同位素组成重建 C₃ 和 C₄ 植被在地质历史时期的分布. C₃ 植物包括乔木、大多数灌木和许多冬季的草本植物, 而 C₄ 植物包括大多数夏季的草本植物. C₃ 草类通常限制在比较寒冷的高纬度和高海拔环境中, 也可生长在森林下层, 而

C₄ 草类主要分布于热带和亚热带地区. 用于釉质碳同位素分析的样品都来源于食草的哺乳动物, 所以本文中的 C₃ 和 C₄ 植物主要指草本植物.

1 样品与测试

本文共分析了 70 个来自中国华北地区的哺乳动物牙齿釉质样品(图 1). 所有样品均取自马科、犀科、牛科、鹿科和长鼻目等草原生活的纯粹草食性哺乳动物的颊齿釉质层, 分析方法见文献^[3]. 化石地点包括中国河北阳原小长梁(年龄: 1.67 Ma, 样品: 犀科)、

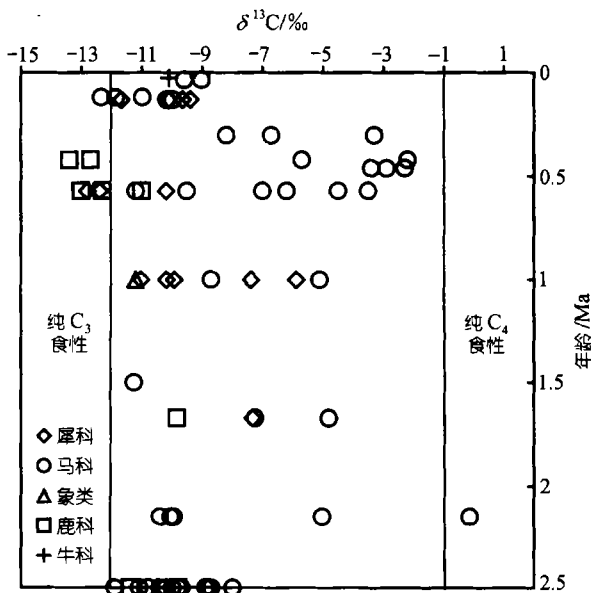


图 1 中国华北地区第四纪哺乳动物牙齿釉质的碳同位素组成

下沙沟(年龄: 1.5 Ma, 样品: 马科)、东谷坨(年龄: 1 Ma, 样品: 马科和犀科)、神泉寺(年龄: 35 ka, 样品: 马科)、中国山西天镇辛窑子(年龄: 2.15 Ma, 样品: 马科)、芮城匭河(年龄: 1 Ma, 样品: 犀科和长鼻目)、阳高许家窑(年龄: 0.13 Ma, 样品: 马科和犀科)、陵川塔水河(年龄: 26 ka, 样品: 牛科), 中国甘肃庆阳巴家嘴(年龄: 2.5 Ma, 样品: 马科、鹿科和牛科)、环县楼房子(年龄: 0.12 Ma, 样品: 马科), 中国北京房山周口店(年龄: 0.57~0.3 Ma, 样品: 马科、犀科和鹿科)(图 2)。

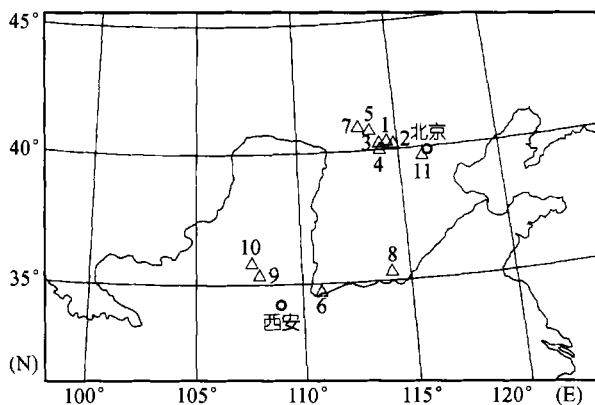


图 2 采样点的地理位置

1. 小长梁; 2. 下沙沟; 3. 东谷坨; 4. 神泉寺; 5. 辛窑子; 6. 匭河;
7. 许家窑; 8. 塔水河; 9. 巴家嘴; 10. 楼房子; 11. 周口店

尽管中国华北地区第四纪哺乳动物牙齿釉质的碳同位素组成存在波动, 但对 70 个样品的分析显示 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 -8.9‰ , 仍然明确地反映出 C_3 植物占优势(约 70%)的特点. 在 2.5 Ma 的早更新世初期, $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 -10‰ , 表明以 C_3 植物占统治地位(约 80%)^[3]. 2.15~1.5 Ma 期间, $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -11.28‰ ~ -0.13‰ 之间波动, 平均值为 -7.6‰ . 尽管 -0.13‰ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近纯粹的 C_4 食性, 但 -7.6‰ 的平均值反映 C_3 植物在早更新世的华北仍然占优势(约 60%). 在 1 Ma 前后, $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围在 -11.21‰ ~ -5.12‰ 之间, 平均值为 -8.7‰ , C_3 植物(约 70%)的优势地位进一步提高. 0.57 ~ 0.3 Ma 期间, $\delta^{13}\text{C}$ 值的波动也很显著, 分布范围在 -13.4‰ ~ -2.2‰ 之间, 但 -7.9‰ 的平均值显示 C_3 植物在中更新世仍然保持约 65% 的优势地位. 在 130 ~ 26 ka 的晚更新世, $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布范围在 -11.86‰ ~ -9.02‰ , 平均值为 -10.4‰ , C_3 植物完全处于统治地位(约 80%), 而且相当稳定.

2 讨论

对巴基斯坦西瓦立克古土壤碳同位素的研究发

现, 在 7.4~7.0 Ma 之间发生了从 C_3 植被向 C_4 植被的显著转变, 这一事件被认为可能与区域性的亚洲季风系统的出现和加强有关^[9]. 由于在非季风区的北美也发现了相似的事件, 其机制被解释为可能是大气 CO_2 浓度已下降到低于 C_3 光合作用的临界水平^[2, 8]. 另一方面, 也有人认为在晚中新世并没有全球性的 C_4 植被扩散, C_3 和 C_4 植被之间的演变与大气组成无关^[1, 20, 21].

本文的分析显示中国华北地区在第四纪时期植被仍然以 C_3 植物为主, 这一结果完全不同于巴基斯坦的情况. 巴基斯坦第四纪马类和象类的釉质 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值约为 0‰ , 显示典型的 C_4 植物群落(约 90%)^[2], C_3 植物仅占约 10%. 这两个地区之间的纬度差别并不大, 巴基斯坦的取样地点在 33°N 附近, 而本文分析的全部样品都来自中国华北地区 $35^\circ\sim 40^\circ\text{N}$ 之间的地点. 中国华北地区的情况反而与在更高纬度($40^\circ\sim 50^\circ\text{N}$)的西欧地区类似^[2]. 中国华北地区和巴基斯坦之间的差异证明区域性的因素对 C_3 , C_4 植被的分布有重要的影响, 青藏高原的隆升是一个重要的因子. 中国甘肃东部灵台晚新生代红黏土和黄土序列的古土壤碳酸盐碳同位素组成也显示自 2 Ma 前 $\delta^{13}\text{C}$ 值的波动已经加强, C_3 植物占统治地位, 达到 80%~60%^[4, 5]. 这个结果与本文从牙齿釉质分析得到的结论一致.

现代 C_3 和 C_4 植物分布的界线位于约 $30^\circ\sim 45^\circ\text{N}$ ^[2]. C_4 植物在北美的 50°N 以南地区占统治地位^[10]. 中国华南 23°N 附近的开阔地带 C_4 植物达 70%^[22], 而 $40^\circ\sim 50^\circ\text{N}$ 之间的中国东北草原地带 C_4 植物比例下降到 40%, C_3 植物则上升到 60%^[23]. 显然, 中国 C_4 和 C_3 植物分布的界线在纬度上至少比北美低 10° , 这与华北整个第四纪时期的情况一致. 在欧亚大陆西端 35°N 附近的地中海地区, C_4 植物比同一纬度的季风区要少得多, 这一差异是由地中海地区典型的冬雨气候引起的, 该地区植物生长季节的气温相当低, 显示温度是影响 C_3 , C_4 植物分布的一个重要因素. 在中国, 现代 C_4 植被从东南到西北方向逐渐减少, 而气候条件在这个方向上从暖湿变为干冷, 显示温度和湿度是影响 C_3 , C_4 植被在中国分布的重要条件^[24].

青藏高原西南侧的巴基斯坦和东北侧的中国华北地区第四纪 C_3 , C_4 植被分布的重大差异是由高原的隆起引起的. 根据模拟, 青藏高原的北侧将发生显著的温度下降, 而同时南侧的温度将上升^[25]. 当青藏高原在晚中新世达到有影响的高度时, 印度季风

在高原南侧形成。高原南侧的升温条件使 C_4 植被在巴基斯坦取代了 C_3 植被, 并居于统治地位^[9]。而在青藏高原的北侧, 尽管东亚季风从 7.2 Ma 前开始了它的初始期, 但由于青藏高原上升引起的温度下降抑制了 C_4 植被在华北地区的分布, 所以第四纪时期这一地区的陆地生态系统中仍然是 C_3 植物占优势。

海陆热能对比的加强以及经向水热输送促进了东亚夏季风的发展^[26]。但是, 青藏高原北侧的温度下降使东亚季风在中国华北地区的发展比青藏高原南侧印度季风的发展要弱得多。在 2.5 Ma 的第四纪初期, 大冰期的到来使 C_3 植物在中国华北地区居于统治地位^[3]。另一方面, 由于青藏高原隆升引起的增温效应, 位于高原西南侧的巴基斯坦并未受到大冰期的影响, 所以在这一地区居于统治地位的是 C_4 植物。更新世冰期和间冰期之间的交替引起 C_3 和 C_4 植物在华北地区分布的变化。然而, 尽管存在波动, 由于青藏高原隆升导致高原北侧的温度下降, C_3 植物依然在中国华北地区占优势。虽然全新世已在冰后期环境中, 但直到现在, 中国华北陆地生态系统中的 C_4 植物还是不到 50%。这就是晚新生代青藏高原隆升对东亚气候和环境所造成的巨大影响。

致谢 本工作受中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-103)、中国科学院院长基金特别支持项目、南京地质古生物研究所现代古生物学和地层学开放研究实验室资助项目(003118)和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077700)资助。

参 考 文 献

- Morgan M E, Kingston J D, Marino B D. Carbon isotope evidence for the emergence of C_4 plants in the Neogene from Pakistan and Kenya. *Nature*, 1994, 367: 162~165
- Cerling T E, Harris J M, MacFadden B J, et al. Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. *Nature*, 1997, 389: 153~158
- 邓涛, 薛祥煦, 董军社. 第四纪初气候转寒事件的化石稳定碳同位素证据. *科学通报*, 1998, 43(17): 1897~1900
- 杨石岭, 丁仲礼, 顾兆炎, 等. 灵台红粘土-黄土剖面晚中新世以来钙结核的碳同位素记录及其古植被指示意义. *科学通报*, 1998, 43(21): 2323~2326
- Ding Z, Yang S. C_3/C_4 vegetation evolution over the last 7.0 Myr in the Chinese Loess Plateau: Evidence from pedogenic carbonate $\delta^{13}C$. *Paleogeogr Paleoclimatol Palaeoecol*, 2000, 160: 291~299
- Thomasson J R, Nelson M R, Zakrzewski R J. A fossil grass (Gramineae: Chloridoideae) from the Miocene with Kranz anatomy. *Science*, 1986, 233: 876~878
- Cerling T E, Quade J, Wang Y, et al. Carbon isotopes in soils and paleosols as ecological and paleoecologic indicators. *Nature*, 1989, 341: 138~139
- Cerling T E, Wang Y, Quade J. Expansion of C_4 ecosystems as an indicator of global ecological change in the Miocene. *Nature*, 1993, 361: 344~345
- Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in northern Pakistan. *Nature*, 1989, 342: 163~166
- Wang Y, Cerling T E, MacFadden B J. Fossil horses and carbon isotopes: new evidence for Cenozoic dietary, habitat, and ecosystem changes in North America. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1994, 107: 269~279
- MacFadden B J, Wang Y, Cerling T E, et al. South America fossil mammals and carbon isotopes: A 25 million-year sequence from the Bolivian Andes. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1994, 107: 257~268
- MacFadden B J, Cerling T E. Mammalian herbivore communities, ancient feeding ecology, and carbon isotopes: A 10 million-year sequence from the Neogene of Florida. *J Vert Paleontol*, 1996, 16: 103~115
- MacFadden B J, Solounias N, Cerling T E. Ancient diets, ecology, and extinction of 5-million-year-old horses from Florida. *Science*, 1999, 283: 824~827
- Bender M M. Variations in the $^{13}C/^{12}C$ ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation. *Phytochemistry*, 1971, 10: 1239~1245
- Winter K, Troughton J H, Card K A. $\delta^{13}C$ values of grass species collected in the northern Sahara Desert. *Oecologia*, 1976, 25: 115~123
- Brown W V. The Kranz syndrome and its subtypes in grass systematics. *Mem Torrey Bot Club*, 1977, 23: 1~97
- Vogel J C, Fuls A, Ellis R P. The geographical distribution of Kranz grasses in South Africa. *S Afr J Sci*, 1978, 74: 209~215
- Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubrick K T. Carbon isotopic discrimination and photosynthesis. *Annu Rev Plant Physiol Mol Biol*, 1989, 40: 503~537
- Lee-Thorp J, van der Merwe N. Carbon isotope analysis of fossil bone apatite. *S Afr J Sc*, 1987, 83: 712~715
- Kingston J D, Marino B, Hill A. Isotopic evidence for Neogene hominid paleoenvironments in the Kenya Rift Valley. *Science*, 1994, 264: 955~959
- Vrba E S, Denton G H, Partridge T E, et al. *Paleoclimate and Evolution with Emphasis on Human Origins*. New Haven: Yale Univ Press, 1995. 178~193
- Ehleringer J R, Lin Z F, Field C B, et al. Leaf carbon isotope ratios of plants from a subtropical monsoon forest. *Oecologia*, 1987, 72: 109~114
- 殷立娟, 王萍. 中国东北草原植物中的 C_3 和 C_4 光合作用途径. *生态学报*, 1997, 17(2): 113~123
- 殷立娟, 李美荣. 中国 C_4 植物的地理分布与生态学研究. I. 中国 C_4 植物及其与气候环境的关系. *生态学报*, 1997, 17(4): 350~363
- Kutzbach J E, Prell W L, Ruddiman F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau. *J Geol*, 1993, 101: 177~190
- 安芷生, 王苏民, 吴锡浩, 等. 中国黄土高原的风积证据: 晚新生代北半球大冰期开始及青藏高原的隆升驱动. *中国科学*, D辑, 1998, 28(6): 483~490

(2001-04-16收稿, 2001-05-15收修改稿)