

中国北方两种现代草地动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与植被类型的关系初探

李玉梅¹, 刘东生¹, 韩家懋¹, 洪业汤², 朱咏煊², 董丽敏², 彭建华²

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002

摘要: 在简单了解研究区的植被、气候状况的基础上, 分析了内蒙古锡林郭勒和青海海北两种典型草地食草动物牙齿的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 测定了采样点表土有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。锡林郭勒的表土有机质碳同位素组成略分散, 且与植被和微环境密切相关。海北的表层土壤有机质碳同位素组成比较集中。两地的碳同位素组成都偏轻, 是植被中 C4 植物含量少的反映。两地放牧动物的珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别比当地植物偏重 12.9‰ 和 13.5‰, 或 14.1‰ 和 14.7‰。火灾等高温过程对动物牙齿的碳同位素组成可能没有显著影响。

关键词: $\delta^{13}\text{C}$; C4 植物; 古环境; 锡林郭勒; 高寒草甸

中图分类号: P52 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2003)02-0104-04

骨骼和牙齿的碳同位素组成提供了动物食谱的信息。牙齿上的珐琅质——牙釉无孔隙、结晶度高^[1], 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值在石化和成岩作用中不会发生改变^[2,3], 现代牙釉与化石的无机碳含量没有明显差别^[4], 因此, 珐琅质是研究动物食谱的首选指标。

据前人研究结果^[1-11], 食草动物牙齿珐琅质羟基磷灰石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可反映植被中 C3 和 C4 植物的比例关系, 后者与古生态环境密切相关。古动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的研究理所当然地受到重视。

20 世纪 80 年代初, Ericson 等^[5] 率先开展了埃塞俄比亚古哺乳动物牙齿磷灰石碳同位素组成的研究, 藉此恢复了上新世动物的食谱。90 年代, Quade 和 Cerling 等^[6-11] 对动物牙齿进行了较为深入系统的研究, 编制了判定动物食谱的图表, 考察了晚中新世以来全球范围内的 C4 植物发展历史, 提出了新生代环境演变的新认识, 引起了国际上的普遍关注。

最早采用 Cerling 等^[12] 的方法研究黄土高原食草动物牙齿珐琅质羟基磷灰石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的是邓涛等^[13,14]。他们测定了来自早更新世早期庆阳巴家嘴动物群的 18 个样品的碳同位素组成, 指出该动物群的生活环境是 2.5 Ma B.P. 气候转寒事件在庆阳这一气候敏感带的产物^[13,14]。此后, 邓涛等^[15] 又发现华北第四纪陆地生态系统以 C3 植物占优势, 与相近纬度的巴基斯坦以 C4 植物占绝对统治地位的情况迥然不同。他们认为, 这一巨大差异是由青藏高原的隆升所致^[15]。

国际上通过测定动物牙齿化石 $\delta^{13}\text{C}$ 值来探讨全球古环境变化的工作已经取得了很多成果, 中国大陆的相关研究亦已起步。但用以确定动物牙齿 $\delta^{13}\text{C}$ 值与食谱相关性的资料中缺乏中国大陆的数据, 使这一判别方法应用于我国的可靠性欠佳; 来自中国大陆实验室的数据更少。为进一步明确中国大陆食草动物牙齿 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其生活环境的关联性, 本次研究在简单了解研究区的植被、气候状况的基础上, 分析了内蒙古锡林郭勒和青海海北两种典型草地食草动物牙齿的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 测定了采样点表土有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 以期初步判断动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与当地植被中 C3、C4 植物比例的关系。

1 研究区概况

为获得具代表性的中国北方草原和草甸的资料, 选择了内蒙古典型草原生态系统和青海高寒草甸生态系统为研究对象。

典型草原选定为内蒙古草原锡林郭勒盟的锡林河流域。样品采集于中国科学院内蒙古草原生态系统定位站的样地及周边地区^[16]。该区海拔 1000~1300 m, 属高平原地形^[16]。典型草原又叫真草原或干草原, 是温带内陆半干旱气候条件下形成的草地类型, 植被主要为真旱生与广旱生多年生丛生禾草, 在某些条件下可由灌木与小半灌木组成。区内年气温为 0.57℃, 年均降水量 350.43 mm, 日照 2617.54 h, 土壤为栗钙土^[16]。锡林河流域共有种子植物 629

收稿日期: 2002-10-13 收到, 2003-03-25 改回

基金项目: 国家自然科学基金(4989170)、中国科学院知识创新工程基金(KZCK-103)、环境地球化学国家重点实验室基金联合资助项目

第一作者简介: 李玉梅(1974—), 女, 博士后, 第四纪地质学与地球化学专业. E-mail: liymey@163.com.

种, 分属 74 科, 291 属, 其中包括 21 种 C4 植物, 分属于 15 科^[17]。高寒草甸选定为青海门源, 研究集中于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站工作区内。区内海拔 3200~ 3300 m, 年均气温- 1.7℃, 年均降水量 614.8 mm。植被类型主要为高寒灌丛和高寒草甸, 结构简单, 51 种植物中有 7 种为 C4 植物, 42 种为 C3 植物, 2 种为中间类型^[18]。

总体上, 两地植被中均以 C3 植物为主要类型。

2 样品采集与分析

表层土壤样品分别采自锡林郭勒草原的大针茅草原和羊草草甸; 青海海北高寒草甸生态系统的金露梅灌丛、矮蒿草草甸和小蒿草草甸。此外, 还采集了锡林郭勒的河漫滩、沙地等非典型地点的样品。表土样品所属的微环境类型共有 9 种(表 1)。两地的动物牙齿样品未作详细分区, 实验中选用的动物牙齿全部为两地的臼齿或前臼齿。此外, 还采集了两地不同日期的 5 个大气样品作为参考。

表 1 表层土壤样品统计表

Table 1 Statistics of topsoil samples

样品号	采样地点	海拔/m	采样时间	微环境
M ₀₁	锡林郭勒	1180	2000/08	沙地, 植被稀疏
M ₁₁	锡林郭勒	1200	2000/08	开阔地, 羊草草甸
M ₂₁	锡林郭勒	1200	2000/08	开阔地, 大针茅草原
M ₃₁	锡林郭勒	1200	2000/08	开阔地
M ₄₁	锡林郭勒	1180	2000/08	河漫滩
M ₅₁	锡林郭勒	1190	2000/08	一级阶地
Q ₁₁	青海海北	3300	2000/07	阴坡, 金露梅灌丛
Q ₂₁	青海海北	3250	2000/07	滩地, 矮蒿草草甸
Q ₃₁	青海海北	3280	2000/07	阳坡, 小蒿草草甸

有机质碳稳定同位素分析在中国科学院地球化学研究所进行。将土壤样品置于 1 Mol/L HCl 中, 中速振荡 4 h 后, 放置 24 h, 以蒸馏水洗至中性并离心。干后用安瓿法制取 CO₂, 冷却法纯化, 以 MAT-252 质谱仪测定。实验误差小于 ±0.2‰。

动物牙齿的碳同位素分析也在同一实验室完成。以超声波清洗样品后, 将不残留牙本质、牙骨质和齿表白垚的纯净珐琅质层剥下, 在 0.1 M HAC 中浸泡 16 h, 用蒸馏水淋洗。干后研磨至 200 目, 与 10% H₂O₂ 反应 16 h, 反复淋洗并离心, 再与 0.1 M HAC 反应 16 h。用蒸馏水淋洗多次并离心干燥后, 置于 70℃ 的纯 H₃PO₄ 中 6 h, 纯化释放的气体。最后, 用金属银丝除去可能存在的污染物 SO₂^[19], 以 MAT-252 质谱仪测定。实验误差小于 ±0.5‰。

大气 CO₂ 的碳同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。用冷却法纯化大气中的 CO₂, MAT-251 质谱仪测定。误差小于 ±0.2‰。

3 结果与讨论

(1) 分析结果: 测试结果见图 1 和表 2。

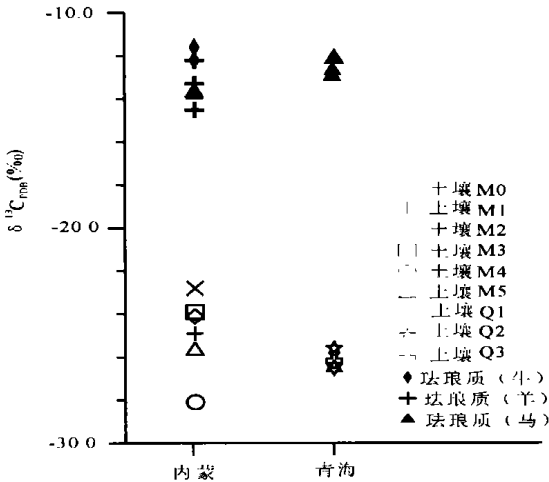


图 1 内蒙古和青海表土及动物牙齿碳同位素组成
Fig. 1 δ¹³C values of topsoil and enamel in Innermongolia and Qinghai

锡林郭勒的两个大气样品 δ¹³Cco₂ 平均值为 -7.7‰ 海北的 3 个大气样品 δ¹³Cco₂ 平均值为 -10.2‰。锡林郭勒动物牙齿的碳同位素组成, 最大值为- 11.6‰, 最小值为- 14.5‰。海北动物标本相对较少, 3 个个体的 δ¹³C 值分别为- 12.2‰, - 12.7‰和- 12.8‰ 非常接近。这与表土有机质的情况类似。两地 δ¹³C 平均值依次- 13.0‰和- 12.6‰。

(2) 讨论: 由图 1 可知, 锡林郭勒表土有机质碳同位素组成略分散, 且与植被和环境密切相关。河漫滩与沙地的差异甚为突出。前者湿度大, 植被密集, 水草丰富; 后者则非常干旱, 植被稀疏, C4 植物相对较多。总体上, 锡林郭勒表土有机质碳同位素组成较轻, 这与当地植被以 C3 植物为主有关。

表 2 现代动物牙齿碳同位素测试结果

Table 2 δ¹³C values of modern enamel

编号	δ ¹³ C _{PDB} (‰)	采样地	备注
N1	- 11.6	锡林郭勒	牛
N1 450	- 10.8	锡林郭勒	牛; 加热至 450℃
N1 800	- 11.3	锡林郭勒	牛; 加热至 800℃
N2	- 12.2	锡林郭勒	牛
S1	- 13.3	锡林郭勒	羊
S2	- 14.5	锡林郭勒	羊
S3	- 12.2	锡林郭勒	羊
M1	- 13.8	锡林郭勒	蒙古马
MY	- 13.6	锡林郭勒	蒙古马
Q1P3	- 12.2	海 北	浩门马
Q2P1	- 12.8	海 北	浩门马
Q2M1	- 12.7	海 北	浩门马

海北表层土壤有机质碳同位素组成比较集中, 偏轻, 与前人的结论一致^[20]。这与当地植被构成简单、碳同位素组成偏轻^[21]、C4 植物少的情况相一致。

锡林郭勒动物牙齿的碳同位素组成因物种的不同而略有差别: 羊轻于马, 牛最重。可能意味着动物对食物的选择也是影响珐琅质同位素组成的因素之一。不过从实测数据看, 上述几个物种的差异并不是很大。

统计结果表明, 植食动物牙齿珐琅质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常比其食物重 $14\text{‰} \sim 15\text{‰}$ ^[22]。在纯 C3 植物区, 生活在密闭树冠下的动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小 (为 -20‰); 湿润环境中 (开阔树冠下) 的动物牙齿 $\delta^{13}\text{C}$ 值次之, 为 $-13\text{‰} \sim -10\text{‰}$; 干旱环境中则较重, 为 $-9\text{‰} \sim -8\text{‰}$ 。纯 C4 植物区, 植食动物牙齿 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围较窄, 为 $2\text{‰} \sim 4\text{‰}$ ^[19], 或 $-4.5\text{‰} \sim +1.3\text{‰}$ ^[23]。由于密闭树冠下 C4 植物不可能繁茂, 故混合食谱只能是湿润区的 C3 植物或干旱区的 C3 植物与纯 C4 植物。据此, Cerling 等^[24] 给出了动物牙齿珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值与食物类型的关系图, 可由珐琅质的碳同位素组成判断食谱中 C3、C4 植物的百分比。

在中国大陆, 土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值往往较当地植被偏重, 而西方的偏重值是 1‰ 左右^[25, 26], 中国西北地区的则是 2.2‰ ^[21]。因此, 土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以被用来计算地表植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。若不考虑各种微环境在整个牧区的权重, 依不同的参数, 锡林郭勒和海北的地表植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值可能分别为 -25.9‰ 和 -26.1‰ , 或 -27.1‰ 和 -27.3‰ 。

若以本次测试的平均值 -13.0‰ 和 -12.6‰ 来代表锡林郭勒和海北两地放牧动物的珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 则两地动物牙齿的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别较植物偏重 12.9‰ 和 13.5‰ , 或者 14.1‰ 和 14.7‰ 。这两组差值 (尤其是根据中国西北的资料算出的一组) 与上文提到的 Cerling 等^[19] 的研究结果非常吻合。总之, 就本次研究所涉及的对象而言, Cerling 等^[22] 的统计结果还是适用于中国大陆的。

锡林郭勒大气 CO_2 的碳同位素组成接近全球平均值 -8.0‰ ^[27], 而青海大气 CO_2 则明显较全球平均值富集轻同位素, 这与罗健等^[20] 的结果一致。这种偏轻的 CO_2 物源可能通过控制植被的 $\delta^{13}\text{C}$ 值来影响土壤有机质和动物牙齿珐琅质的碳同位素组成。由于本次所采集的大气样品数量很少, 故在此不作过多讨论。

此外, 考虑到在古环境研究中收集到的动物化石可能经历过火灾等高温过程, 试将采自锡林郭勒的动物牙齿 N1 的两个平行样品分别置于 450℃ 和 800℃ 马弗炉中加热 1h , 然后依上文的方法进行测定。实验结果 (表 2) 表明, 高温过程对动物牙齿的

碳同位素组成可能没有显著影响。

4 结 论

锡林郭勒的表土有机质碳同位素组成略呈分散状, 且与植被和微环境密切相关。海北的同类数据则比较集中。两地的碳同位素组成都偏轻, 是植被中 C4 植物含量少的反映。两地放牧动物的珐琅质 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别较当地植物偏重 12.9‰ 和 13.5‰ , 或者 14.1‰ 和 14.7‰ 。这与前人^[21] 的研究结果非常吻合。火灾等高温过程对动物牙齿的碳同位素组成可能没有显著影响。

大气、植被、土壤和动物食谱之间的定量关系有望今后的工作中能得到补充和完善。

致谢 感谢中国科学院内蒙古草原生态系统定位站和海北高寒草甸生态系统定位站、中国科学院地球化学研究所在样品采集和分析过程中给予的大力支持。

参考文献 (References):

- [1] Trautz O R. Crystalline organization of dental mineral [A]. Miles A E D *et al.* Structural and chemical organization of teeth [M]. London: Academic Press, 1967. 165–200.
- [2] 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 [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 107: 269–279.
- [3] Wang Y, Cerling T E. A model of fossil tooth and bone diagenesis: implication for paleodiet reconstruction from stable isotopes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 107: 281–289.
- [4] Morgan M E, Kingston J D, Marino B D. Carbon isotopic evidence for the emergence of C4 plants in the Neogene from Pakistan and Kenya [J]. *Nature*, 1994, 367: 162–165.
- [5] Ericson J E, Sullivan C H, Boaz N T. Diets of Pliocene mammals from the Omo, Ethiopia, deduced from carbon isotope ratios in tooth apatite [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1981, 36: 69–73.
- [6] MacFadden B J, Solounias N, Cerling T E. Ancient diets, ecology, and extinction of 5-million-year-old horses from Florida [J]. *Nature*, 1999, 283: 824–827.
- [7] MacFadden B J, Cerling T E. Fossil horses, carbon isotopes and global change [J]. *Trends Ecol. Evol.*, 1994, 9: 481–486.
- [8] MacFadden B J, Cerling T E, Prado J. Cenozoic terrestrial ecosystem evolution in Argentina: evidence from carbon isotopes of fossil mammal teeth [J]. *Palaeos.*, 1996, 11: 319–327.
- [9] MacFadden B J, Wang Y, Cerling T E, Anaya F. South American fossil mammals and carbon isotopes: a 25 million-year sequence from the Bolivian Andes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 107: 257–268.
- [10] Quade J, Cerling T E, Barry J C, Morgan M E, Pilbeam D R, Chivas A R, Lee-Thorp J A, van der Merwe N J. A 16-Ma record of paleodiet using carbon and oxygen isotopes in fossil teeth from Pakistan [J]. *Chemical Geology*, 1992, 94: 183–192.

- [11] Quade J, Solounias N, Cerling T E. Stable isotopic evidence from peat soil carbonates and fossil teeth in Greece for forest or woodland over the past 11 Ma[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 108: 41– 53.
- [12] Cerling T E, Harris J M, MacFadden B J, Ehleringer J R, Leakey M G, Eisenmann V, Quade J. Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary[J]. *Nature*, 1997, 389: 153– 158.
- [13] 邓涛, 薛祥煦. 中国的真马化石及其生活环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1999. 113– 114.
Deng Tao, Xue Xiangxu. Chinese fossil horses of *Equus* and their environment[M]. Beijing: China Ocean Press, 1999. 113– 114. (in Chinese)
- [14] Deng Tao, Xue Xiangxu. The evidence of fossil carbon isotopes of the climatic event at Quaternary beginning[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(5): 477– 480.
- [15] 邓涛, 董军社, 王杨. 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[J]. *科学通报*, 2001, 47(1): 76– 82.
Deng Tao, Dong Junshe, Wang Yang. Variation of terrestrial ecosystem recorded by stable carbon isotopes of fossils in northern China during the Quaternary[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2002, 47(1): 76– 82.
- [16] 陈佐忠, 汪诗平, 等. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1– 103.
Chen Zuozhong, Wang Shiping, *et al.* Steppe system of China[M]. Beijing: Press, 2000. 1– 103. (in Chinese)
- [17] 宋炳煜. 内蒙古典型草原中的 C4 植物[J]. *植物杂志*, 1993, 20(4): 8– 9.
Song Bingyu. C4 plant of Steppe, Inner Mongolia. *Journal of plants* [J]. 1993, 20(4): 8– 9. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨福国. 高寒草甸生态系统中的初级生产[A]. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集[C]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1989. 11– 15.
Yang Futun. The primary producers in the alpine meadow ecosystem [A]. Northwest plateau institute of Biology, CAS *et al.* The proceedings of the international symposium of alpine meadow ecosystem[C]. Lanzhou: People's Press of Gansu, 1989. 11– 15. (in Chinese)
- [19] Cerling T E, Harris J M, MacFadden B J. Carbon isotopes, diets of north American equids, and the evolution of north American C4 grasslands[A]. Griffiths ed. *Stable isotopes*[M]. Oxford: BIOS Scientific Publishers Ltd., 1998. 363– 380
- [20] 罗健. 青藏高原大气 CO₂、植物、现代沉积物碳同位素组成研究[D]. 兰州: 中国科学院兰州地质研究所, 1998. 1– 63
Luo Jian. The preliminary research about the stable Carbon isotope composition of atmospheric CO₂, plants, and modern sediment of Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1998. 1– 63. (in Chinese)
- [21] 王国安. 中国北方草本植物及有机质碳同位素组成[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2001. 16– 132
Wang Guo'an. $\delta^{13}\text{C}$ composition in herbaceous plants and surface soil organic matter in North China[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, C A S, 2001. 16– 132. (in Chinese)
- [22] Cerling T E, Ehleringer J R, Harris J M. Carbon dioxide starvation, the development of C4 ecosystems, and mammalian evolution[Z]. *Royal Society of London Philosophical Transactions. ser. B.*, 1998, 353: 159– 171.
- [23] Sponheimer M, Lee-Thorp J A. Isotopic evidence for the diet of an early hominid, *Australopithecus africanus*[J]. *Science*, 1999, 283: 368– 370.
- [24] Cerling T E. Paleorecords of C4 plant and ecosystems[A]. Sage R F, Monson R K, *eds.* C4 plant biology[M]. San Diego: Academic Press, 1999. 445– 472.
- [25] Stout J D, Rafter T A, Throughton J H. The possible significance of isotopic ratios in paleoecology[A]. Suggate R P, Cresswell M M *eds.* Quaternary Studies[M]. Wellington: Royal Society of New Zealand, 1975. 279– 286.
- [26] Dzurec R S, Boutton T W, Caldwell M M, Smith B N. Carbon isotope ratios of soil organic matter and their use in assessing community composition changes in Curlew Valley, Utah[J]. *Oecologia*, 1985, 66: 17– 24.
- [27] Jain A K, Khesgi H S, Wuebbles D J. A globally aggregated reconstruction of cycles of carbon and its isotopes[J]. *Tellus.*, 1996, 48B(4): 583– 600.

The Relationship Between Vegetation and $\delta^{13}\text{C}$ Value of Tooth Enamel in Two Kinds of Meadows, Northern China

LI Yu-mei¹, LIU Dong-sheng¹, HAN Jia-mao¹, HONG Ye-tang², ZHU Yong-xuan², Dong Li-min², Peng Jian-hua²

1. *Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China*; 2. *Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China*

Abstract: The $\delta^{13}\text{C}$ value of fossil enamel is used for studying the paleovegetation all of the world, but the relationship between the $\delta^{13}\text{C}$ values of enamel and vegetations in China is undetermined. In this research, the $\delta^{13}\text{C}$ values of the tooth enamel of mammals in Xilinguole and Haibei have been analyzed, and the $\delta^{13}\text{C}$ values of organic matters in topsoil have also been determined, in order to illustrate the relationship between the $\delta^{13}\text{C}$ values of enamel and vegetations in Northern China. We find that the $\delta^{13}\text{C}$ values of organic matters in topsoil in Xilinguole and Haibei are all light. This reflects that the C4 biomass is few in the vegetations. The $\delta^{13}\text{C}$ values of the tooth enamel of mammals in Xilinguole and Haibei are 12.9‰ and 13.5‰, or 14.1‰ and 14.7‰ heavier than their diets, respectively. The results in China and other countries are essentially identical. This indicates that it would be reliable to use it to study the paleovegetation in China. At the same time, the high temperature course such as fire probably does not have the notable influence on the $\delta^{13}\text{C}$ values of enamel.

Key words: $\delta^{13}\text{C}$; C4 biomass; paleovegetation; Xilinguole; meadow