

文章编号:1671-5888(2003)03-0270-06

青藏高原北缘山脉隆升时限的同位素证据

陈正乐¹,王小凤¹,冯夏红²,王长秋³,刘 健¹

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所,北京 100081;2. Department of Earth Sciences, Dartmouth College, Hanover, NH 03755;3. 北京大学 地质系,北京 100871)

摘要:青藏高原北缘江孜勒萨依地区新生代地层中自生矿物的 O 和 C 同位素测试结果显示,¹⁸O 和 ¹³C 在渐新世早期和中新世早期都出现急剧的变化。沉积学特征也表明中新世早期新生代沉积物质粒度快速变大,而上新世至早第四纪沉积速率急剧加大。由此推断,青藏高原北缘山脉最早期的隆升开始于渐新世的早期;并在中新世早期出现过山脉的快速隆升;而上新世至第四纪早期山脉的隆升最为强烈。

关键词:青藏高原北缘;山脉隆升;稳定同位素

中图分类号: P542.2;P548.275 **文献标识码:** A

大量的地质事实和数值模拟已经证实,青藏高原的隆升与中国,乃至亚洲新生代的气候变化、亚洲的生态格局的变迁等密不可分^[1~4]。然而迄今为止,高原的隆升时限、阶段性和隆升速率等颇存争议。前人对高原隆升历史的研究主要集中于高原的中部、南部及其边缘^[1,5,6]和高原的东南、东北部等^[7~10],而涉及青藏高原北缘的山脉(包括阿尔金、西昆仑和喀喇昆仑山脉)隆升历史研究寥寥可

数^[11~15]。

在青藏高原北缘地区,前人已先后采用了裂变径迹法^[12,14]、古地磁^[13]和新构造运动特征研究^[11,15]等来推断山脉的隆升过程,但缺乏前陆沉积盆地证据(图 1)。本文主要是利用青藏高原北缘、阿尔金山脉的北西缘江孜勒萨依地区,新生代地层中碳酸盐胶结物的 ¹⁸O、¹³C 变化,结合沉积学特征研究,来探讨青藏高原北缘山脉的隆升历史。

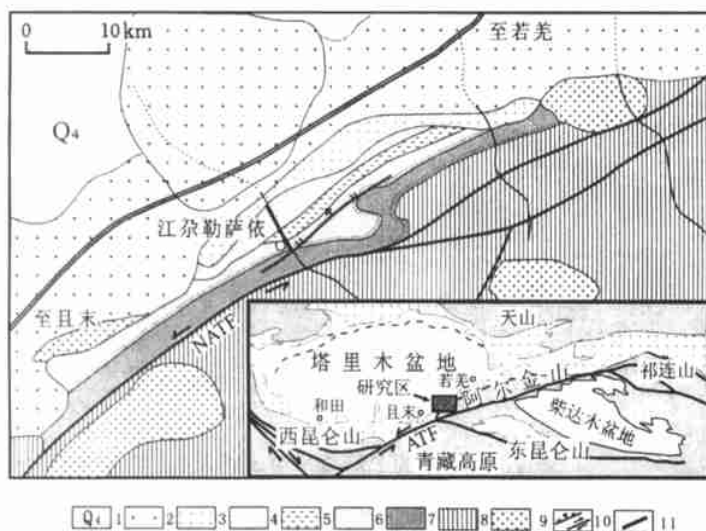


图 1 阿尔金山脉北西山前江孜勒萨依地区地质构造及青藏高原北缘大地构造简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Jiangzhesayi area, and its location in northern Qinghai - Tibetan plateau

1. 第四纪(全新世);2. 早更新世西域组;3. 上新世阿图什组;4. 渐新世 - 中新世乌恰组;5. 古新世 - 始新世库木格列木组;6. 白垩纪克孜勒苏群;7. 侏罗纪叶尔羌组;8. 元古界;9. 花岗岩;10. 正断层和走滑断层;11. 采样剖面位置;ATF. 阿尔金断层;NATF. 阿尔金北缘断层

收稿日期:2002-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40102022);国家重点基础研究项目(2001CB409808,01CB7110013)

作者简介:陈正乐(1967-),男,浙江温州人,研究员,博士,主要从事构造地质研究,E-mail:chenzhengle.263.net.

1 稳定同位素在山脉隆升历史研究中的应用

以同位素组成变化为气候变化的参数,来反演山脉的隆升历史是一种最近才发展、并逐步完善起来的山脉隆升历史研究的方法^[1,16~20]。在原理上,该方法就是利用同位素的高程效应,即通过山脉大气降水中的¹⁸O和D值随着山脉海拔高程的增加而降低。Chamberlain和Boage等发现,在山脉背风面大气降水中D和¹⁸O值大大低于迎风面大气降水中D和¹⁸O值,这种变化往往与山脉的海拔高程密切相关,并可以定量地表示出来^[20,21]。通过全球大量的数据统计分析结果表明,海拔高程每增加100 m,大气降水中¹⁸O_{SMOW}值减少0.21‰^[20]。这一结果与Carizone等根据喜马拉雅山南麓现代河流中的¹⁸O_{SMOW}值与高程变化之间的关系近似一致^{[(0.2‰~0.3‰)/100 m]^[6]。}

¹⁸O值作为地质记录所保存的古气候变化中最有效、最重要的参数,主要与地表温度、降水量和大气降水的历史有关,而在地表条件下新形成的矿物,如含氢的高岭土、蒙脱石,和含氧的碳酸盐胶结物或钙结核等,其O和D同位素组成往往是与地表水平衡的^[18]。因而可以根据地质历史时期内这些新形成矿物的O和D同位素组成来估算当时地表水的同位素组成,进而推断影响大气降水同位素组成变化的山脉海拔高程,来恢复山脉的隆升历史^[18~21]。

目前稳定同位素在山脉隆升历史重建中的应用主要有两个发展方向:一是利用高原或山脉前陆沉积盆地内古土壤中自生矿物(粘土矿物、方解石)中¹⁸O值变化,来推测山脉的隆升历史^[3,18,19,21];二是利用高原或山脉内部沉积盆地内自生矿物或古土壤内¹⁸O值变化,利用推测的大气降水中¹⁸O值随高度变化的相关曲线,计算沉积盆地的古海拔高度,然后对比研究沉积盆地的古海拔与现今的海拔高度,推断山脉或高原的隆升历史^[6,22]。

2 采样点地质背景

阿尔金山、祁连山和西昆仑山构成了青藏高原的北界。研究区就位于青藏高原北缘、阿尔金山脉北西缘的且末江孜勒萨依地区(图1)。该区连续出露了大于3 km厚的侏罗纪至第四纪早期的前陆盆地沉积。它们沿阿尔金山北缘断裂呈北东向展布,其南东侧为北缘断裂所限。断裂的南东侧为早元古界的片岩、片麻岩和大理岩,并发育有加里东期的榴辉岩^[23]。根据新疆地质志的划分^[24],该区的沉积层可分为7段,分别为侏罗纪的叶尔羌群、白垩纪克孜勒苏群、古新世-始新世库木格列木群、渐新世-中新世的乌恰群、上新世的阿图什组、早更新世的西域组和中更新世的乌苏群。地层总体上构成一个宽缓的向斜,江孜勒萨依左行走滑正断层切割了向斜的北西翼,乌苏群不整合覆盖在向斜之上。

在野外我们实测了该向斜的北西翼、江孜勒萨依正断层以北出露的地层,系统采集了200多个沉

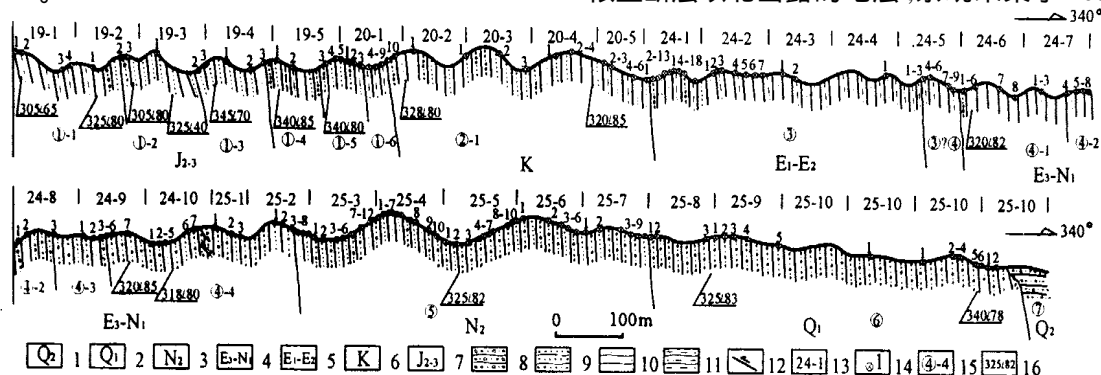


图2 江孜勒萨依地区中、新生代地层实测剖面

Fig. 2 Mesozoic to Cenozoic cross section in the Jianggalesayi area, northern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau

1. 中更新统; 2. 早更新统; 3. 上新统; 4. 渐新统-中新统; 5. 古新统-始新统; 6. 白垩系; 7. 侏罗系; 8. 砾岩; 9. 砂岩、粗砂岩; 10. 粉砂岩; 11. 粉砂质泥岩、泥岩; 12. 断层; 13. 测线编号; 14. 采样位置及编号; 15. 地层分层编号; 16. 地层产状

积学和稳定同位素测试分析样品(图 2)。

3 沉积学特征

在该区,侏罗纪为杂色河湖相含煤建造,岩性为棕色砂岩与棕红色泥岩互层,底部为灰绿色、黄绿色、棕红色泥岩,砂岩及砾岩;白垩系也为河湖相,沉积物质的主体颜色为红色,棕色、棕灰色砂岩夹少量棕色泥岩,底部为灰色砾岩,胶结物质主要为砂、泥质;早第三纪库姆格列木组为河流相粉红色、棕红色砂岩,棕色、灰棕色砾岩夹棕色泥质砂岩、泥岩,其内富含钙质结核;渐新统至中新统乌恰组为山麓河流相灰色、棕灰色砾岩与浅棕色、红棕色泥质砂岩、砂岩,局部夹泥岩;上新统阿图什组为山麓坡积相褐灰色-棕灰色砾岩夹少量浅棕色-红棕色砂岩;早更新统西域组主要为灰色巨厚层粗砾岩夹砂岩透镜体;乌苏组为河流阶地相灰黑色、灰白色砾岩层。总体上,白垩系为红色沉积,第三纪沉积物质的颜色为黄色、棕黄色,胶结物质以碳酸盐为主。第四系色调以土黄色为主,全为砾岩,总体上反映了该区自白垩纪以来处于干旱的氧化环境。

在野外,对沉积层中砾岩层的比例、沉积岩的结构、构造进行详细的观察和测量,结果揭示,总体上砾岩层所占的比例呈逐渐增加的趋势,而在乌恰群的中、下部,岩层中砾岩的比例急剧增大,沉积物的粒度快速变粗,砂岩碎屑中不稳定组分比例明显增加,砂岩中碎屑物质的磨圆度、分选性变差。

假设不同沉积段内沉积速率保持不变,取界限年龄:侏罗纪—白垩纪为 135 Ma,白垩纪—第三纪为 65 Ma,始新世—渐新世为 35 Ma,中新世—上新世为 5 Ma,早更新世—中更新世为 1.8 Ma^[13](西昆仑叶城南剖面,相当于乌苏群和西域组的分界年龄),根据野外实测剖面,计算地层的厚度,若不考虑岩石的压实系数,则该地区白垩纪至今的沉积速率分别为:白垩纪:4.8 m/Ma;早第三纪(古新世—始新世):12 m/Ma;渐新世—中新世:19.7 m/Ma;上新世:180.9 m/Ma;早更新世:651.9 m/Ma。结果显示,上新世至早第四纪该地区的沉积速率急剧加大,盆地处于快速堆积状态。由此推测,此时,阿尔金山脉可能处于快速隆升状态。

4 样品处理、同位素测试分析及结果

通过薄片的镜下鉴定分析,我们选取了满足以下两个条件的样品:(1)胶结物中富含碳酸盐,而碎

屑物质中不含方解石;(2)胶结物中的方解石没有出现次生加大、溶蚀等现象,没有后期改造作用。这样基本上能确保测试结果代表了沉积时地表水的组成特征。

通过电钻取样(胶结物),对样品进行清洗、干燥以去掉盐分,采用酸分解法,加磷酸,抽真空,恒温(25℃)反应约 20 h 后,采集碳酸盐胶结物中的 CO₂,利用质谱仪进行测量,得到 CO₂ 中 O 和 C 的同位素组成。实验所用 CO₂ 的标准样品为标号是 11/20/00 KIS 的碳酸钙样品,测试结果碳同位素采用 PDB 标准,氧同位素以标准平均海洋水(SMOW)为标准。整个样品的测试分析过程是在美国 Dartmouth College 地球科学系同位素地球化学试验室完成的,实验流程和相关的实验原理可参考相关文献[25],[26]。

测试结果如图 3 所示。图中清晰显示,自白垩纪以来 $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 和 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 至少存在 3 次突变:早期在白垩纪和第三纪之间,后两次出现在第三纪期间。早期 ^{18}O 的突变及其 ^{13}C 的波动,与世界范围内的 C 和 O 同位素白垩纪/第三纪的边界事件基本吻合^[25],可能为白垩纪末期灾变事件在陆相地层中的体现。为此,地质学家曾提出了地外事件假设,即用小行星或陨石或彗星撞击地球,从而引起大规模生物灭绝的假设来解释该界线事件^[25]。本文着重讨论新生代地层胶结物中 O 和 C 同位素组成变化规律及其地质意义。

新生代期间, $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 在乌恰群与库木格列木群之间及乌恰群中下部两次发生突变,第一次在渐新世早期, $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 从 23‰ 突然变小至 17‰ 左右;在乌恰群中下部发生的第二次突变, $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 从 21.5‰ 突变为 18‰ 左右,而自第二次突变以后, $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 基本上保持稳定的状态,变化幅度很小,稳定在 17‰~19‰ 之间。 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 基本上与 $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 变化同步,也在乌恰群与库木格列木群之间出现突变, $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 从 -1.5‰ 变化为 -5‰ 左右;在乌恰群的中部, $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 出现强烈的波动,其间 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 曾达到最小值,为 -8.362‰ 强烈波动之后, $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 基本上在 -4‰ 线上来回波动,波动幅度普遍小于 $\pm 1\text{‰}$ 。

由于准确的定年工作还未开展,同上假设不同沉积段内沉积速率保持不变,以 35 Ma 和 5 Ma 分别为乌恰群的开始和结束沉积的年龄,则根据采样点、地层的厚度推断, ^{18}O 的两次突变分别发生在 35 Ma 和 22 Ma 左右; ^{13}C 的早期突变为 35 Ma,乌

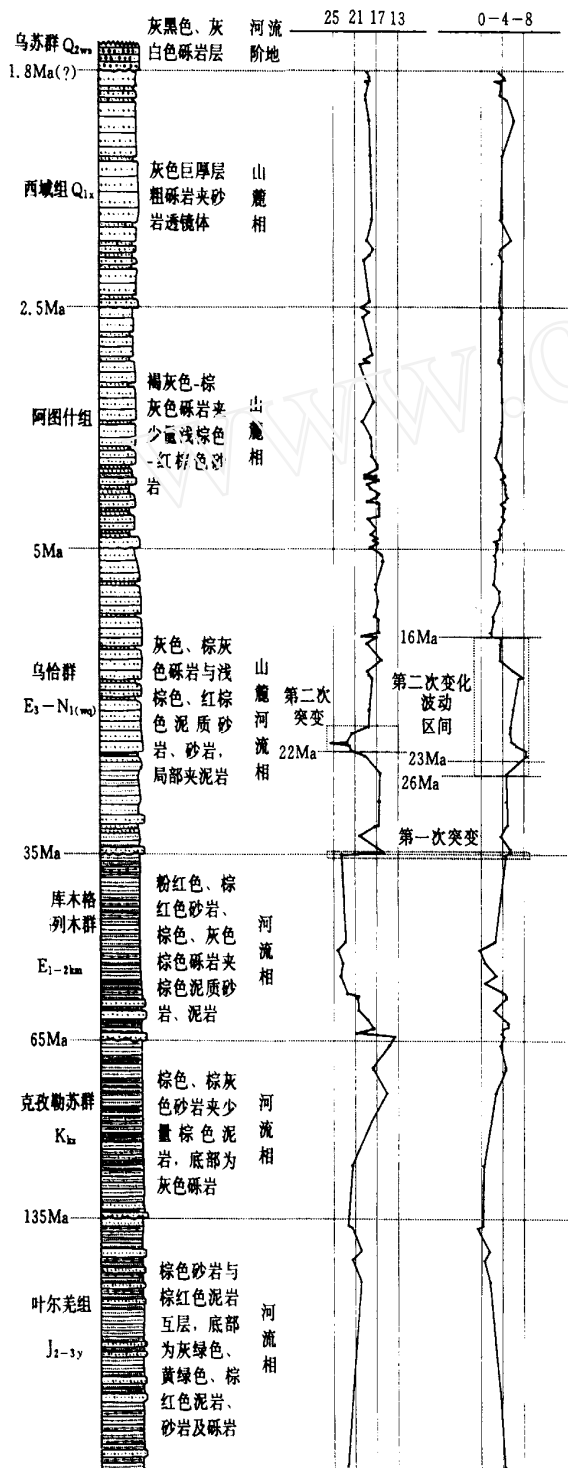


图3 研究区 Mz_3 - Kz 沉积特征及碳酸盐胶结物中 ^{18}O 和 ^{13}C 值测试结果图

Fig.3 Sedimentary characteristic features and analyses results of ^{18}O and ^{13}C in calcite cement from research area between Mz_3 and Kz

恰群沉积期间 ^{13}C 剧烈波动的起止时间为 26 Ma 和 16 Ma, 达到最小值的时间大约为 25 Ma。

5 结论

根据本文的稳定同位素测试结果, 结合盆地沉积演化研究, 笔者推测: 青藏高原北缘山脉最早期的隆升开始于渐新世的早期; 中新世早期, 出现山脉的快速隆升; ^{18}O 、 ^{13}C 自中新世早期之后保持稳定可能与青藏高原的整体抬升有关; 当高原整体隆升到一定高度后, 高原开始起隔挡作用, 推测来自于青藏高原南面的水汽已无法越过青藏高原而影响高原北缘山前盆地, 因而无法影响高原北缘前陆盆地的沉积。

其次, 根据 Chamberlain 的计算公式 (即海拔高程每增加 100 m, 地表水中 $^{18}O_{\text{SEDW}}$ 值减少 0.21 ‰^[20]), 及其中新世早期地层胶结物中方解石的 ^{18}O 的变化值估算 (约 3.5 ‰), 中新世早期山脉的隆升幅度大约为 1 500 m 左右, 远远小于现今青藏高原北缘的高程差 (3 500 ~ 4 000 m), 因而中新世以后高原北缘山脉的隆升更为强烈。沉积速率计算结果也显示, 自上新世开始, 山脉又开始快速隆升, 在第四纪早期达到隆升速率的高峰。

总之, 稳定同位素测试结果和沉积学特征研究, 表明青藏高原北缘山脉至少存在两个阶段的隆升: 渐新世早期至中新世早期, 上新世晚期至早更新世。早期隆升速率、幅度相对较小, 而晚期隆升规模较大。这种推测与 Edward 等^[12]、王军^[14] 及笔者^[27] 等根据磷灰石裂变径迹测试结果所得结论大致吻合, 即青藏高原北缘山脉普遍在渐新世至中新世期间发生快速的剥露 - 隆升构造事件, 而在中新世以后, 山脉的剥露 - 隆升速度显著加快; 而张青松^[11] 等的新构造运动分析、Zheng 等^[13] 的磁性地层学研究和 Wang 等^[15] 的古地磁和孢粉分析结果, 则更多地提供了中新世以后青藏高原北缘山脉快速隆升的佐证。

感谢 Dartmouth College 地球科学系地球化学同位素实验室主任 Page Chamberlain 教授为本项研究提供了实验测试条件, 及 Dartmouth College 地球科学系 Michael Page 博士和汤葵联博士对本次测试分析工作的大力帮助。

参考文献:

- [1] Quadel J, Thure E C, John R B. Development of Asia mon

- soon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in northern Pakistan[J]. *Nature*, 1989, **342**:163-166.
- [2] Molnar P, England P, Joseph M. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan plateau and the Indian monsoon[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, **31**(4):357-396.
- [3] Garzone C, David L D, Quadel J, et al. High times on the Tibetan Plateau: Paleoelevation of The thakhola graben, Nepal[J]. *Geology*, 2000, **28**(4):339-342.
- [4] Edmond J M. Himalayan tectonics, weathering process and the strontium isotope record in marine limestones[J]. *Science*, 1992, **258**:1594-1597.
- [5] Harrison T M, Copeland P, Hall S A, et al. Isotope preservation of Himalayan - Tibetan uplift, denudation and climate histories of two molasses deposits[J]. *Journal of Geology*, 1993, **101**:157-175.
- [6] Garzone C, Quade J, Decelles P, et al. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from delta (super 18) O vs. altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, **183**(1-2):215-229.
- [7] Burchfiel B C, Zhang P Z, Wang Y P, et al. Geology of the Haiyuan fault zone, Ningxia - Hui autonomous region, China, and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Tectonics*, 1991, **10**(6):1091-1110.
- [8] Wang E, Burchfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailaoshan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis[J]. *International Geology Review*, 1997, **39**(3):191-219.
- [9] Fang X M, Li J J, Rob V D V. Rock magnetic and grain size evidence for intensified Asian atmospheric circulation since 800 000 years B. P. related to Tibetan uplift[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, **165**:129-144.
- [10] 施雅风,唐茂仓,马玉珍. 青藏高原的第二期抬升与亚洲季风系的起始时间关系[J]. *中国科学(D 辑)*, 1999, **42**(3):303-312.
- Shi Yafeng, Tang Maocang, Ma Yuzhen. Linkage between the second uplifting of the Qinghai - Xizang (Tibetan) Plateau and the initiation of the Asian monsoon system[J]. *Science in China (Series D)*, 1999, **42**(3):303-312.
- [11] 张青松,李炳元. 喀喇昆仑 - 西昆仑山地区晚新生代隆起过程及自然环境变化初探[J]. *自然资源学报*, 1989, **4**(3):234-240.
- Zhang Qingsong, Li Bingyuan. A preliminary study on the uplifting and environment evolution of the Karakoram and west Kunlun Mountains area since Late Cenozoic Era[J]. *Journal of Natural Resources*, 1989, **4**(3):234-240.
- [12] Edward R S, Trevor A D. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1997, **102**(B3):5043-5063.
- [13] Zheng H B, Powell C, An Z S, et al. Pliocene uplift of the northern Tibetan plateau[J]. *Geology*, 2000, **28**(8):715-718.
- [14] 王军. 西昆仑卡日巴生岩体和苦子干岩体的隆升——来自磷灰石裂变径迹分析的证据[J]. *地质论评*, 1998, **44**(4):435-442.
- Wang Jun. Uplift of the Karibusheng and Kuzigan granite in the west Kunlun mountains - evidence from apatite fission track analysis[J]. *Geological Review*, 1998, **44**(4):435-442.
- [15] Wang J, Wang Y J, Liu Z C, et al. Cenozoic environmental evolution of Qaidam basin and its implications for the uplift of the Tibetan plateau and the drying of central Asia[J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 1999, **152**:37-47.
- [16] Winograd I, Barney J S, Tyler B C, et al. Two-Million-Year record of deuterium depletion in great basin ground waters[J]. *Science*, 1985, **227**:519-521.
- [17] 王富葆,李升峰,申旭辉,等. 吉隆盆地的形成演化、环境变迁与喜马拉雅山隆起[J]. *中国科学(D 辑)*, 1996, **26**(4):329-335.
- Wang Fubao, Li Shengfeng, Shen Xuhui, et al. The formation and evolution of the Jilong Basin, environmental change and the uplift of Himalayan Mountains[J]. *Sciences in China (Series D)*, 1996, **26**(4):329-335.
- [18] Stern L A, Chamberlain C P, Robert C R, et al. Oxygen isotope evidence of climate change from pedogenic clay minerals in the Himalayan molasses[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(4):731-744.
- [19] Chamberlain C P, Page M A, Craw D, et al. Topographic development of the Southern Alps recorded by the isotopic composition of authigenic clay minerals, South Island, New Zealand[J]. *Chemical Geology*, 1999, **155**:279-294.
- [20] Chamberlain C P, Page M A. Reconstructing the paleotopography of mountain belts from the isotopic composition of authigenic minerals[J]. *Geology*, 2000, **28**:115-118.
- [21] Page M A, Sjostrom D J, Furniss G, et al. Isotopic evidence for holocene climate change in the Northern Rockies from a goethite-rich ferricrete chronosequence[J]. *Chemical Geology*, 2000, **166**:327-340.
- [22] David L D, Kyger C L. Oxygen isotope evidence for high altitude snow in the Laramide Rocky Mountains of North America during the Late Cretaceous and Paleogene[J]. *Ge-*

- ology, 2000, **28**(3):243-246.
- [23] 张建新,张泽明,许志琴,等. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄——阿尔金中加里东期山根存在的证据[J]. 科学通报,1999b,**44**(10):1109-1112.
- Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, et al. The age of U-Pb and Sm-Nd for eclogite from the western segment of Altyn Tagh tectonic belt [J]. Chinese Sciences Bulletin, 1999b,**44**(10):1109-1112.
- [24] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1993. 207-265.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 207-265.
- [25] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000. 1-37,162-167,203-205.
- Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. Stable isotopic geochemistry [M]. Beijing: Scientific Publishing House, 2000. 1-37, 162-167, 203-205.
- [26] 魏菊英,王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社,1988. 97-100.
- Wei Juying, Wang Guanyu. Isotopic geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. 97-100.
- [27] 陈正乐,张岳桥,王小凤,等. 新生代阿尔金山脉隆升历史的裂变径迹证据[J]. 地球学报,2001,**22**(5):413-418.
- Chen Zhengle, Zhang Yueqiao, Wang Xiaofeng, et al. Fission track dating of apatite constraints on the Cenozoic uplift of the Altyn Tagh, northern Qinghai - Tibetan Plateau [J]. Acta Geosciencia Sinica, 2001, **22**(5):413-418.

NEW EVIDENCE FROM STABLE ISOTOPE FOR THE UPLIFT OF MOUNTAINS IN NORTHERN EDGE OF THE QINGHAI - TIBETAN PLATEAU

CHEN Zheng-le¹, WANG Xiao-feng¹, FENG Xia-hong², WANG Chang-qiu³, LIU Jian¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Department of Earth Sciences, Dartmouth College, Hanover, NH 03755; 3. Department of Geology, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract: This work presents a study on the uplift history of mountains in the northern Qinghai - Tibetan Plateau based on evidence of stable isotope ratio of oxygen and carbonate in pedogenic calcite from Jiangeleshayi area, northwestern edge of the plateau. Analysis results showed that rapid changes of ¹⁸O and ¹³C in calcite cement occurred both in early Oligocene and early Miocene. The study on sedimentary features indicated that a quick up-coarsening of the sediments size appeared in early Miocene, and sedimentary velocity increased rapidly during Pliocene and early Quaternary. These results suggested that the uplift of mountains in northern edge of the Qinghai - Tibetan Plateau initiated from early Oligocene, and a rapid uplift occurred in early stage of Miocene, while the strongest uplifting occurred from Pliocene to early Quaternary.

Key words: northern Qinghai - Tibetan Plateau; uplift history of mountains; stable isotope