

# 阿尔泰山南缘白垩纪以来的剥露历史和古地形恢复

刘海涛,袁万明,田朋飞,薛斌,宋高,赵文菊

(中国地质大学 科学研究院, 北京 100083)

**摘要:**应用裂变径迹技术研究阿尔泰山南缘中生代以来的隆升剥露历史,并对古地形进行恢复。对所获得的11个磷灰石样品的裂变径迹年龄分析表明,裂变径迹年龄变化分布于99.1~43.7 Ma之间。该地区晚白垩世以来平均视剥露速率为 $0.050 \text{ mm/a}$ 。热史模拟结果表明,阿尔泰山南缘自白垩纪以来经历了多期冷却剥露历史:早白垩世至晚白垩世晚期(约120~75 Ma),剥露速率为 $0.044 \text{ mm/a}$ ;晚白垩世晚期至始新世(约75~50 Ma),剥露速率为 $0.070 \text{ mm/a}$ ;中新世以来(约20~15 Ma~现今),剥露速率为 $0.081 \text{ mm/a}$ 。对研究区进行古地形恢复显示,自白垩纪(120 Ma)至今,平均剥露幅度达约5 km,古地形海拔降低约0.8 km。阿尔泰山南缘白垩纪以来古地形海拔仅在17.5~50 Ma期间保持基本稳定,其他阶段均有降低的趋势。早白垩世的构造抬升与蒙古-鄂霍茨克海最后阶段的闭合以及西伯利亚板块和中朝-蒙古板块的最终收敛和碰撞有关,晚白垩世晚期至始新世的构造活动则是受拉萨地块、Kohistan-Dras岛弧增生的远距离影响,中新世以来快速隆升可能与印度板块与欧亚板块碰撞的远程效应有关。

**关键词:**古地形恢复;隆升剥蚀;白垩纪-新生代;磷灰石裂变径迹;阿尔泰山南缘

**中图分类号:** P512.2; P542

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2012)03-0412-13

## Denudation and exposure history and paleotopographic reconstruction of the southern margin of the Altay Mountains since Cretaceous

LIU Hai-tao, YUAN Wan-ming, TIAN Peng-fei, XUE Bin, SONG Gao and ZHAO Wen-ju

(Science Research Institute, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Altay is an important part of the Central Asian Orogenic Belt, and also the largest accretion orogen in the world. At present, scholars both in China and abroad are focusing their Altay studies on the evolution of various stages of orogenic movements as well as geochemical and geochronological time constraints on the orogenic activities. In contrast, the study of the Mesozoic-Cenozoic cooling history is relatively insufficient. To carry out the researches on the cooling as well as denudation and exposure history of the post-orogenic stage of the Altay orogenic belt is of great importance in the in-depth understanding of the formation of a large mountain range after the evolutionary stage. Researches on the post-orogenic uplift of the cooling as well as denudation and exposure history about Altay orogen are of great significance in that it make researchers obtain in-depth understanding of the formation of a large mountain range after the evolutionary stage. With the improvement of the fission track analysis technology, fission-track thermochronology represented by apatite has become the effective means for revealing the denudation and exposure age and speed of orogenic activity as well as the evolution of tectonic, topographic and thermal history. Low-temperature chronology records rock movement information of the upper

收稿日期: 2011-10-08; 修订日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872141, 40872068, 41172088) 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB421006)

作者简介: 刘海涛(1985-), 男, 硕士研究生, 矿物岩石矿床专业, E-mail: ht101305130@126.com; 通讯作者: 袁万明(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为岩石、构造与成矿以及裂变径迹热年代学, E-mail: Yuanwm@cugb.edu.cn

crust within a few kilometers and on a million-year scale, and thus offers a good choice for the quantitative recovery of ancient orogenic terrain. This paper discusses uplifting-denudation and exposure history and paleotopographic reconstruction of this region based on fission track technology. AFT data from 11 samples show that the AFTA range from 99.2 Ma to 43.7 Ma. The average denudation and exposure rate has been 0.050 mm/ma since Late Cretaceous. Thermal history modeling results show that there have been multi-phase cooling and denudation and exposure evolutions since the Cretaceous period in the south margin of the Altay Mountains. From Early Cretaceous to Late Cretaceous (about 120~50 Ma), the denudation and exposure rate was 0.044 mm/a, and from Late Cretaceous to Eocene (about 75~70~50 Ma), the denudation and exposure rate was 0.070 mm/a. Since the Miocene (about 20~15 Ma~Present), the denudation and exposure rate has been 0.081 mm/a (the denudation and exposure rate was obtained from three methods, i.e., the age-closure temperature method, the cooling curve simulation and the age-elevation method). Early Cretaceous tectonic uplift of the Altay Mountains was contemporaneous with the final closure of the Mongol-Okhotsk Ocean, and the convergence and eventual collision of the Siberian and North China (Sino-Korean)/Mongolian continents. Tectonic activities from Late Cretaceous to Eocene were affected by long-distance effects of Lhasa block and Kohistan-Dras arc accretion. Rapid uplift since the Miocene may be related to distant effects of India-Eurasia convergence. Low-temperature thermochronology can be used to conduct paleotopographic reconstruction, and the specific process is shown as follows: First, the cooling history of rock samples is remodeled. Then, the amount of stratigraphic erosion is estimated through temperature gradient. Finally, such affecting factors as balance role, climate and tectonics are considered. Paleotopographic reconstruction of the study area shows that the average denudation and exposure highness from Cretaceous up till now is about 5 km, while paleoelevation has been decreased by about 0.8 km. Cretaceous-Cenozoic paleoelevation of the south range of Altay Mountains has tended to decrease except for a stable period of 50~17.5 Ma.

**Key words:** paleotopographic reconstruction; uplift and denudation; Cretaceous-Cenozoic; apatite fission track; southern margin of Altay Mountains

阿尔泰山是中亚造山带的重要组成部分,是世界上最大的增生造山带。目前,国内外学者对阿尔泰山的研究多集中于造山期各阶段的演化(Buslov *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2008a, 2008b)以及对各造山时期进行厘定的地球化学及同位素年代学(Sun *et al.*, 2008; 刘国仁等, 2008; 杨富全等, 2008; 柴凤梅等, 2008)。相对而言,对中生代—新生代冷却历史的研究则相对较少(袁万明等, 2004a, 2004b; Yuan *et al.*, 2006, 2009; Buslov *et al.*, 2008; 林秀斌等, 2010)。开展阿尔泰山造山带造山期后冷却历史和隆升剥露研究,对于深入理解这一大型山脉形成以后的演化历史有重要意义。

碰撞造山作用通常可以形成持续数百万年以上的地形。造山期后山脉地形的演化及其对侵蚀(气候)、构造作用的响应近年来已成为造山带研究的热点之一。20世纪90年代以来,随着裂变径迹分析技术的日益完善,以磷灰石为代表的裂变径迹热年代学已经成为揭示造山带剥露时代和速度、构造地

形演变以及热史演化的有效手段。古地形恢复通常是指利用物质平衡法再造地形古高度(Hay *et al.*, 1989)。所谓的物质平衡是在给定的时间间隔内,作用在研究区表面的构造、侵蚀和沉积过程所造成沉积物的侵蚀总量与沉积总量之间的物质守恒。对于造山带而言,物质平衡实际就是造山过程中通过逆冲和地壳短缩作用在山脉中形成的物质积累与通过侵蚀作用从山脉中造成的物质流失之间的物质守恒(Metivier and Gaudemer, 1997)。

利用物质平衡法再造古地形的关键之一,在于重点时间段内侵蚀量的确定。低温年代学因其可以记录地壳上部几公里内、距今几十至上百个百万年内的温度历史,进而可给出相应剥蚀厚度等特征,成为研究浅部剥露的重要方法,因此低温热年代学已成为中新生代以来古地形再造研究的重要手段(Gleadow and Brown, 2000; Gleadow *et al.*, 2002; Kohn *et al.*, 2002, 2005; Gunnell and Fleitout, 2000; Braun, 2005)。本文以阿尔泰山南缘地区的

花岗岩为研究对象,对不同高程上的 11 个磷灰石样品进行裂变径迹分析,取得了研究地区中生代剥露特征的低温年代学新证据,对研究区进行了古地形恢复。

1 地质背景

阿尔泰山脉位于西伯利亚板块南缘(图 1),属于西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块的结合带,走向 NW,是加里东-海西期增生于西伯利亚板块南

缘的陆缘增生造山带,由不同时期块体拼接而成(李锦轶, 1999; Xiao *et al.*, 2004; Yakubchuk, 2004)。哈萨克斯坦-准噶尔板块在早古生代沿额尔齐斯深大断裂带开始俯冲,导致由北东向南西逐渐发展和加强的陆缘岩浆活动和褶皱造山作用发生。

阿尔泰山南缘为泥盆纪火山岩,中部为变质核杂岩带,北部边缘为逆冲推覆带。从海西期末至新生代,总体上处于隆升和向南推覆。阿尔泰山南缘的额尔齐斯构造带北为西伯利亚板块,南为哈萨克斯坦-准噶尔板块(陈毓川等,2003)。

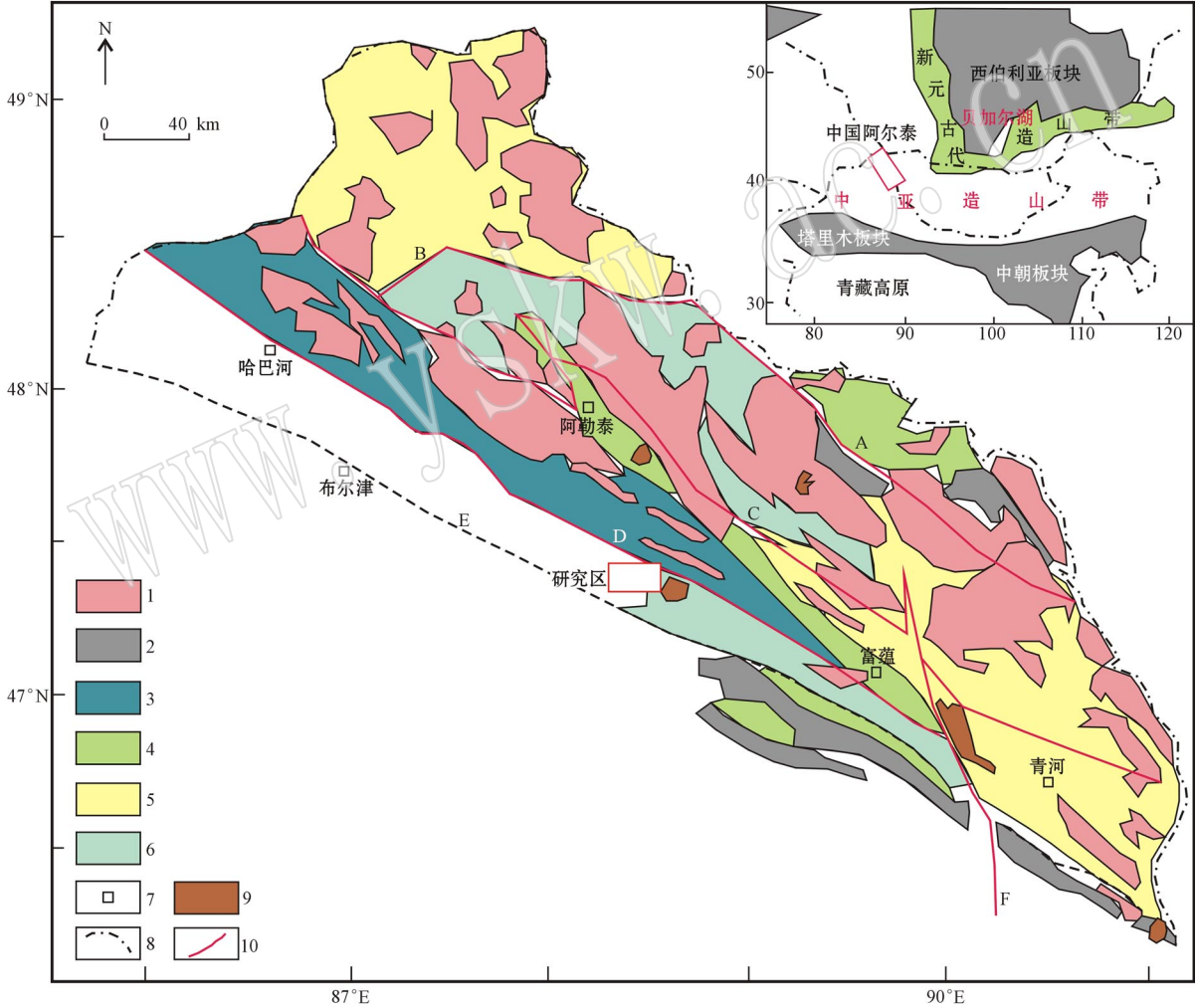


图 1 阿尔泰地区地质简图(改自 Cai Keda *et al.*, 2010)

Fig. 1 Simplified geological map of Altay area(modified after Cai Keda *et al.*, 2010)

- 1—花岗岩; 2—石炭系火山岩; 3—泥盆系碎屑岩; 4—泥盆系火山岩; 5—奥陶系碎屑岩; 6—片岩和片麻岩; 7—城市; 8—国界线;  
9—中生代花岗岩; 10—断层; A~F 为阿尔泰山南缘 6 条主要断层  
1—granitoid; 2—Carboniferous volcanic rocks; 3—Devonian clastic rocks; 4—Devonian volcanic rocks; 5—Ordovician clastic rocks;  
6—schist and gneiss; 7—city; 8—national boundaries; 9—Mesozoic granite; 10—fault; A~F, major faults in Altay

2 样品及实验方法

此次实验样品采集于阿尔泰沙尔布拉克地区。沙尔布拉克一带位于额尔齐斯构造带的北侧，区域上属于西伯利亚古板块阿尔泰陆缘活动带中段即阿尔泰褶皱带克兰复向斜中段的阿勒泰向斜。出露地

层主要有：中古元古界克木齐群、中上志留统库鲁木提群、下泥盆统康布铁堡组、中泥盆统阿勒泰组、上石炭统喀喇额尔齐斯组。区内泥盆纪、石炭纪、二叠纪侵入岩广泛分布，岩石类型较为复杂，从基性至酸性岩均有分布，以酸性岩为主，中酸性岩次之，基性岩较少(高福平等,2010)(图 2)。

样品均取自新鲜露头，采用大约等间距的采样

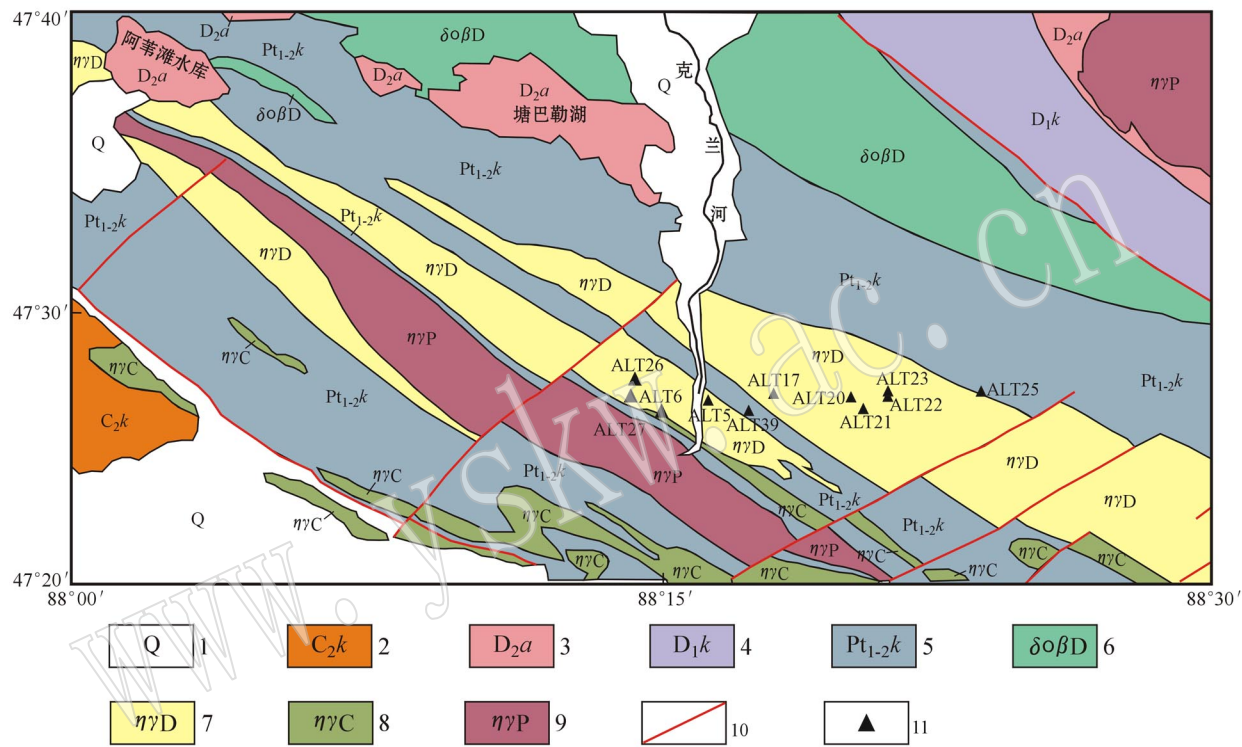


图 2 研究区地质简图与样点分布(改自高福平等, 2010)  
Fig. 2 Simplified geological map of the study area and distribution of sampling sites(modified after Gao Fuping et al., 2010)

- 1—第四系；2—上石炭统喀喇额尔齐斯组；3—上泥盆统阿勒泰组；4—下泥盆统康布铁堡组；5—中古元古界克木齐群；6—泥盆纪英云闪长岩；7—泥盆纪花岗岩质片麻岩；8—石炭纪二长花岗岩；9—二叠纪二长花岗岩；10—断层；11—样品采集位置及编号  
1—Quaternary; 2—Upper Carboniferous Kara-Ertix Formation; 3—Upper Devonian Altay Formation; 4—Lower Devonian Kangbutiebu Formation; 5—Middle-Paleoproterozoic Xemirxek Group; 6—Devonian tonalite; 7—Devonian granitic gneiss; 8—Carboniferous monzogranite; 9—Permian monzogranite; 10—fault; 11—sampling location and its serial number

方式，野外用便携式 GPS 记录采样点的高度及经纬度。样品的岩性多为花岗岩质岩石。单个样品均大于 5 kg。具体采样地点见图 2。  
将采集的岩石样品粉碎，使粉碎后的粒径与岩石中矿物粒度相适应，经传统方法粗选后，利用电磁选、重液选等手段，进行磷灰石单矿物提纯。将磷灰石颗粒置于玻璃片上，用环氧树脂滴固，然后进行研

磨和抛光，使得矿物内表面露出。在 25℃ 下用 7% HNO<sub>3</sub> 蚀刻 30 s 揭示自发径迹，将低铀白云母外探测器与矿物一并入反应堆辐照，之后在 25℃ 下 40% HF 蚀刻 20 s 揭示诱发径迹，中子注量利用 CN5 铀玻璃标定。矿物的裂变径迹是用高精度光学显微镜在高倍镜下测量，裂变径迹的正确识别至关重要。选择平行 c 轴的柱面测出自发径迹和诱发径迹密



度,水平封闭径迹长度(Gleadow *et al.*, 1986)依据 Green(1986)建议的程序测定。根据 IUGS 推荐的  $\xi$  常数法和标准裂变径迹年龄方程(Hurford and Green, 1982)计算年龄值。

3 实验结果与分析

本次测试的阿尔泰山南缘磷灰石裂变径迹样品

共 11 个(表 1)。测试结果显示,除样品 ALT-6 可测试颗粒较少,其他样品均达到年龄统计要求,裂变径迹年龄变化于  $49 \pm 5.2 \sim 80.8 \pm 4.8$  Ma。依据 Green (1981)的技术计算误差,  $\chi^2$  值用于评价所测单颗粒属于同一年龄组的概率(Galbraith, 1981)。  $\chi^2 < 5\%$  是单颗粒年龄不均匀分布的证据。如果发现年龄分散,则基于泊松变异的常规分析(Green, 1981)无效,而代之以“中心年龄”,中心年龄实质上是权重平均年龄。

表 1 磷灰石裂变径迹分析结果  
Table 1 Analytical results of apatite fission track

| 原样号    | 高程/m  | 颗粒数/n | $\rho_s/10^5 \cdot \text{cm}^{-2}$<br>(Ns) | $\rho_i/10^5 \cdot \text{cm}^{-2}$<br>(Ni) | $\rho_d/10^5 \cdot \text{cm}^{-2}$<br>(Nd) | P/%   | 中心年龄/Ma<br>( $\pm 1\sigma$ ) | L/ $\mu\text{m}$<br>(N) |
|--------|-------|-------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------|------------------------------|-------------------------|
| ALT-5  | 821   | 27    | 6.567(854)                                 | 17.662(2 297)                              | 9.5(6 817)                                 | 0.01  | 67.6 $\pm$ 5.7               | 12.7 $\pm$ 2(106)       |
| ALT-6  | 781   | 4     | 4.865(154)                                 | 17.787(563)                                | 9.411( 6817)                               | 36.37 | 49 $\pm$ 5.2                 | 13.6 $\pm$ 2.0(67)      |
| ALT-17 | 988   | 25    | 6.69(1 237)                                | 22.763(4 209)                              | 11.585(6 817)                              | 5.1   | 65.7 $\pm$ 4.3               | 12.6 $\pm$ 2(102)       |
| ALT-20 | 1 548 | 25    | 7.544(2 364)                               | 22.229(6 966)                              | 12.255 (6 817)                             | 5.24  | 80.8 $\pm$ 4.8               | 12.7 $\pm$ 2(122)       |
| ALT-21 | 1 361 | 23    | 4.077(878)                                 | 18.396(3 962)                              | 12.422(6 817)                              | 0.46  | 52.4 $\pm$ 3.9               | 13.1 $\pm$ 1.6(90)      |
| ALT-22 | 1 202 | 25    | 5.405(1 204)                               | 21.76(4 847)                               | 12.589(6 817)                              | 0.13  | 59.8 $\pm$ 4.2               | 12.3 $\pm$ 1.9(125)     |
| ALT-23 | 1 118 | 27    | 5.867(1 443)                               | 18.26(4 491)                               | 12.589(6 817)                              | 0.57  | 78.6 $\pm$ 5.2               | 12.4 $\pm$ 2.1(136)     |
| ALT-25 | 999   | 28    | 3.974(836)                                 | 13.871(2 981)                              | 12.589(6 817)                              | 14.37 | 69.6 $\pm$ 4.8               | 12.8 $\pm$ 2.0(100)     |
| ALT-26 | 889   | 29    | 2.975(315)                                 | 12.67(1 342)                               | 12.589(6 817)                              | 83.01 | 57.3 $\pm$ 4.6               | 12.0 $\pm$ 1.9(96)      |
| ALT-27 | 916   | 28    | 4.435(402)                                 | 16.308(1 478)                              | 12.422(6 817)                              | 31.57 | 65.0 $\pm$ 5.4               | 12.3 $\pm$ 1.9(104)     |
| ALT-39 | 950   | 13    | 0.683(98)                                  | 1.888(271)                                 | 10.08(6 817)                               | 90.76 | 70.6 $\pm$ 9.1               | 12.0 $\pm$ 2.5(63)      |

$\rho_s$ 、 $\rho_i$  和  $\rho_d$  分别为自发径迹密度、诱发径迹密度和标准径迹密度; Ns、Ni 和 Nd 分别为自发径迹数、诱发径迹数和标准径迹数; P 为  $\chi^2$  检验值; L 为裂变径迹平均长度; N 为径迹长度数。

7 个样品(ALT-6, 17, 20, 25, 26, 27, 39)  $\chi^2$  检验值大于 5%,同时单颗粒年龄直方图呈现较为典型的单峰式分布(图 3),径迹长度分布直方图(图 4)均呈单峰状,符合受单一热事件控制的特点,具有确切的地质热事件意义。另外 4 个样品(ALT-5, 21, 22,23)  $\chi^2$  检验值小于 5%,单颗粒年龄及长度配分形态以混合型为主,部分样品结果显示出非典型的双峰式特征,反映出这些样品具有较为复杂的热演化历史。使用耶鲁大学的 Mark Brandon 教授开发的 BINOMFIT 软件对样品的裂变径迹年龄进行分解,结果显示  $\chi^2$  检验值小于 5% 的年龄均可分解为最年轻组分和较老组分两组年龄(图 5)。

样品的裂变径迹平均长度在  $12.0 \pm 1.9 \sim 13.6 \pm 2.0 \mu\text{m}$ ,虽然平均径迹长度变化不大,但是,长度值相对较小,每个样的长度标准差较大,反映样品在磷灰石裂变径迹退火带滞留时间较长。

综合两类裂变径迹年龄数据(表 1、图 5)并以直方图形式表示(图 6),则较为清晰地显示具有 3 个年龄组: 99.1 Ma、81.4~65.0 Ma、57.3~43.7 Ma,中

值分别为约 100、75 和 50 Ma。裂变径迹年龄的分组说明阿尔泰山南缘不是连续的整体的冷却剥露,采自不同部位样品的裂变径迹年龄,恰好是区内构造隆升剥蚀作用的体现。对  $\chi^2$  检验值大于 5%、具有确切地质意义的裂变径迹年龄做高程-年龄图,结果(图 7)显示样点总体具有明显的正相关性,即高程越高的样品年龄越大,这与阿尔泰山自白垩纪以来整体遭受剥蚀的特征相符。

4 岩体冷却与剥露历史

4.1 地质热演化历史

基于 Ketcham 等(1999)的退火模型,并应用蒙特卡罗(Monte Carlo)逼近法进行了模拟。根据获得的裂变径迹参数和样品所处的地质背景与条件,确定反演模拟的初始条件。模拟温度从高于裂变径迹退火带的  $\sim 130^\circ\text{C}$  到现今地表温度,模拟时间从白垩纪 120 Ma 到现今,模拟结果见图 8。每个样品均获得了最佳的热历史路径(图中实线),虚线区代表反

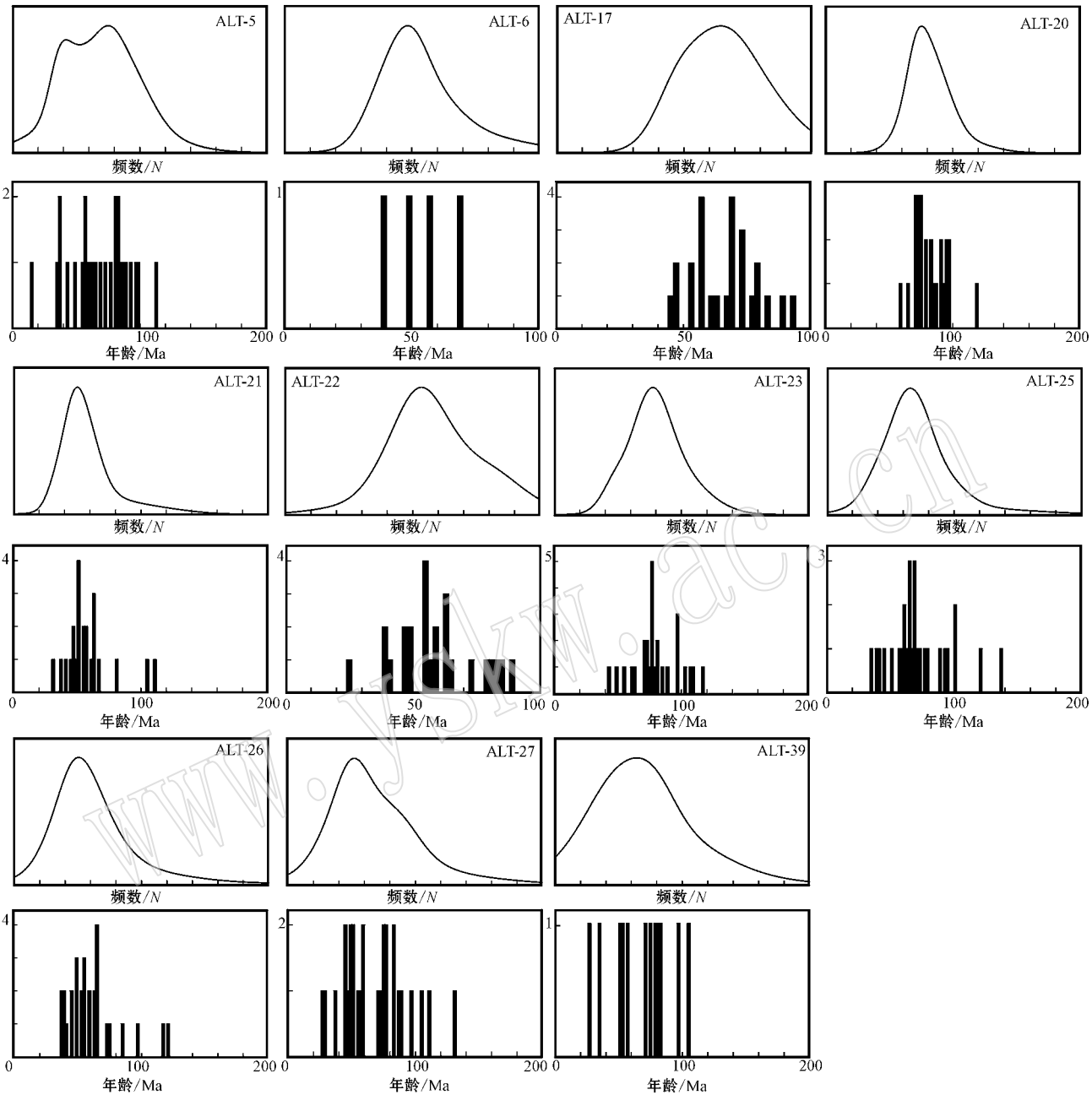


图 3 磷灰石样品裂变径迹单颗粒年龄直方图(下图)及其频率曲线(上图)

Fig. 3 Histograms of apatite single grain ages for each sample (lower) and their frequency curves (upper)

演模拟的较好拟合区,点线区代表可接受区。每个图左上角标出样品代号、实测径迹长度和模拟径迹长度、实测 Pooled 年龄和模拟 Pooled 年龄(由于研究样品  $\chi^2$  值较高,均属于同组年龄,所以,其 Pooled 年龄与 Central 年龄相同),以及 K-S 检验和 GOF 年龄拟合参数。当 K-S 值和 GOF 值均大于 0.5 时,一般认为模拟结果较好。

本次工作获得热历史模拟较好的样品有 5 个

(ALT-5, 17, 21, 26, 39),总体上属于四阶段演化模式(图 8):① 约 120~75~70 Ma,温度较高,处于磷灰石裂变径迹退火带底部温度,主体高于 100℃;② 从 75~70~50 Ma,快速冷却,温度由 120~100℃ 降至 65~60℃;③ 50~20~15 Ma,缓慢冷却,温度由 65~60℃ 降至 60~55℃;④ 从约 20~15 Ma~现今,快速冷却,温度由 60~55℃ 降为现在的地表温度(平均 15℃)。

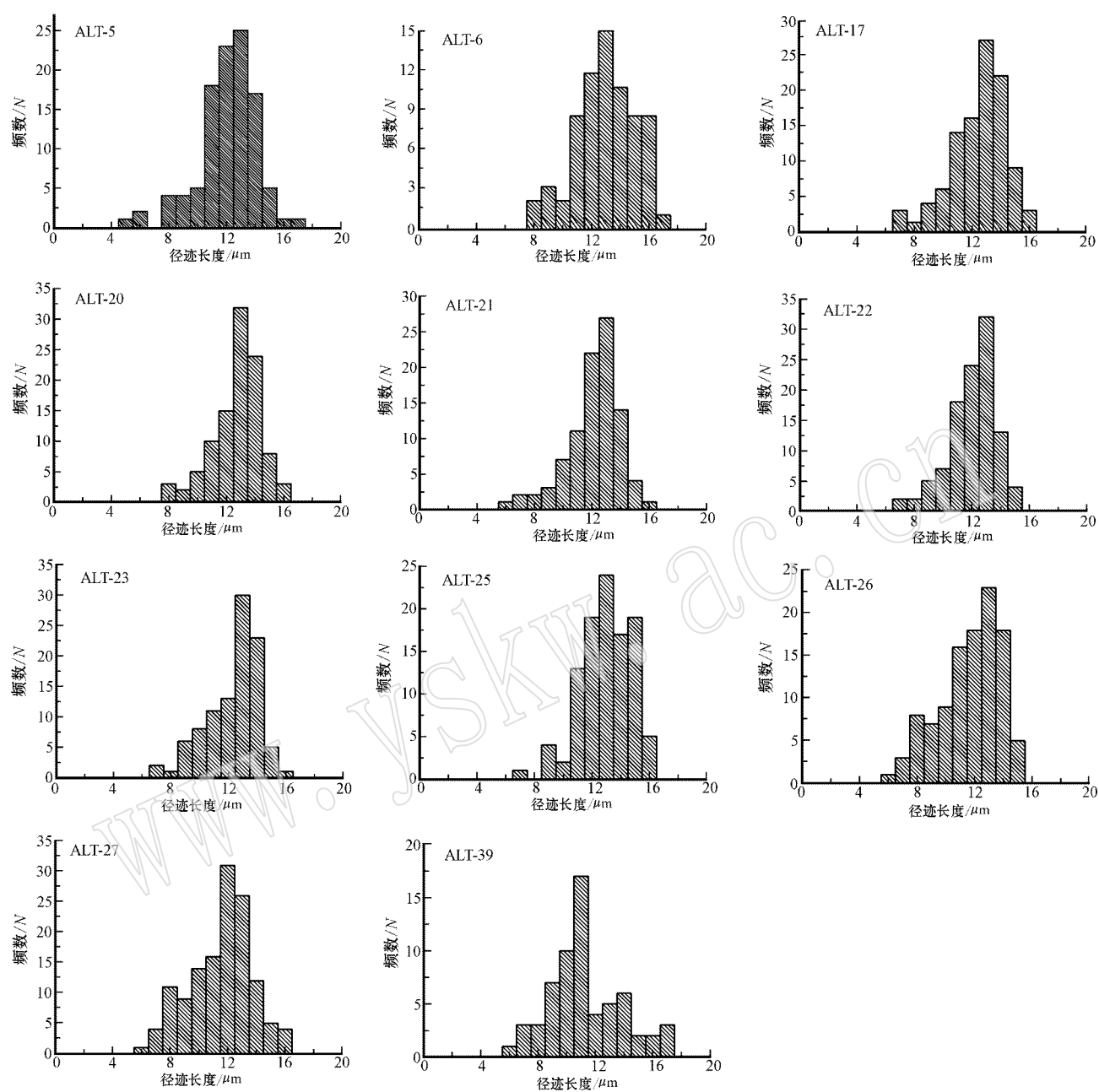


图 4 裂变径迹长度分布直方图

Fig. 4 Histograms of track length distribution

另外,样品 ALT-39 的热历史演化模式比较特殊,在约 120~75 Ma 时快速降温,由 120~100℃ 降至 50℃;70~20 Ma 期间存在一个升温的过程,温度由 50℃ 升高到约 80℃;此后迅速降低至地表温度。据样品所处位置分析,此处热历史演化模式发生较大改变可能是由于样品距离断层较远,故早期的退火事件对其影响较小。因此,其早期的冷却历史可代表区域整体的早期冷却历史。

4.2 剥露历史及速率

利用低温热年代学数据计算岩体剥露速率,主要是根据封闭温度与样品年龄关系、样品所经历的时间-温度曲线、样品的热年龄和矿物内衰变或裂变产物保存规律特征的对应关系,反演样品的冷却历史,然后结合区域地温场的信息定量恢复岩石的剥露过程,具体方法包括年龄-封闭温度法、冷却曲线模拟法以及矿物对法。另外,年龄-高程法独立于地

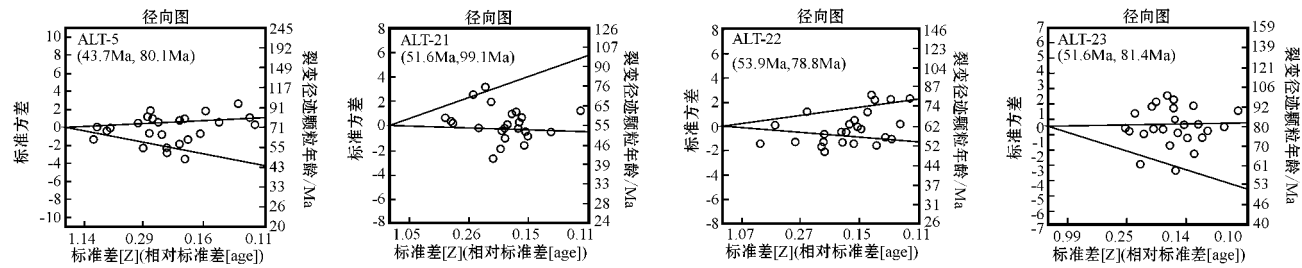


图 5  $\chi^2$  检验值小于 5% 的裂变径迹年龄分组图

Fig. 5 Radial plot for AFT age grouping ( $\chi^2 < 5\%$ )

图左上角分别为样品号、最年轻组分年龄和较老组分年龄

The numerals at the left corner are the sample number, the youngest component age and the older components age, respectively

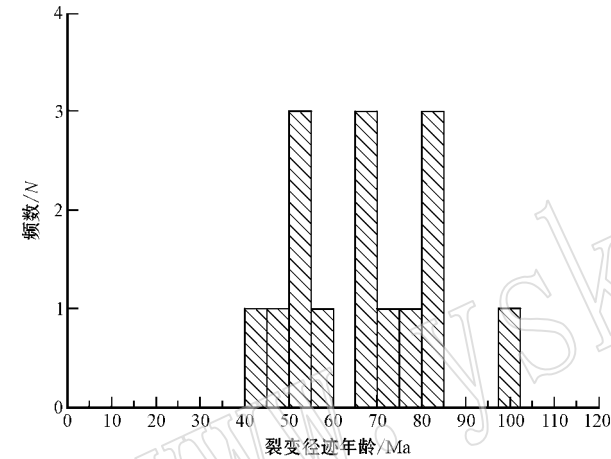


图 6 磷灰石裂变径迹年龄分布直方图

Fig. 6 Histogram of AFT age for each sample

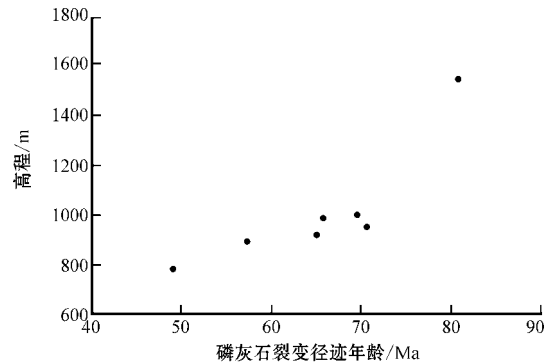


图 7 裂变径迹年龄-高程图

Fig. 7 Chart of AFT age and sample elevation

温场参数,通过一系列采集于近似垂直的地形剖面内样品高程和热年龄的线性关系,约束剥露速率。当然,各种方法既有各自的应用优势和限制,也可以联合起来共同实现剥露速率的定量研究(丁汝鑫等,

2007)。

4.2.1 年龄-封闭温度法

年龄-封闭温度法可以为直观评价区域的平均剥露状态提供数据支持。

选取冷却经历相对简单的 6 个样品 (ALT-6, 17, 20, 25, 26, 27),其所测得的热年龄值即为样品通过封闭温度至今的时间。取封闭温度为 110℃,地表温度为 15℃,取造山带平均地温梯度 30℃/km。按下式计算剥露速率:剥露速率×年龄值=(封闭温度-地表温度)/地温梯度。计算结果显示,各个样品的平均剥露速率相差不大,6 个样品相应的平均剥露速率分别为 0.065、0.049、0.039、0.045、0.055 和 0.049 mm/a,平均为 0.05 mm/a。

4.2.2 冷却曲线模拟法

以造山带平均地温梯度 30℃/km 计算,根据磷灰石裂变径迹对热历史模拟结果,可以计算不同时期的隆升速率和隆升程度。由于第 2 阶段和第 4 阶段具有的温差和时间差分别为 47.5℃、22.5 Ma 和 42.5℃、17.5 Ma,则两个阶段的隆升速率和隆升幅度分别为第 2 阶段 0.070 mm/a 和 1.58 km,第 4 阶段 0.081 mm/a 和 1.42 km。第 3 阶段的温差和时间差分别为 5℃和 32.5 Ma,隆升速率很小,只有 0.005 mm/a。由于没有其他矿物约束第 1 阶段上限,故不能较精确计算其隆升速率。若将第 1 阶段大约确定为 120 Ma,由平均剥露速率 0.05 mm/a 可知,第 1 阶段剥露速率约为 0.060 mm/a。此外,由样品 ALT-39 的热历史演化的第 1 阶段可知约 120~75 Ma 期间温差和时间差分别为 60℃和 45 Ma,剥露速率为 0.044 mm/a。

4.2.3 年龄-高程法

年龄-高程法被广泛应用于造山带研究中。在



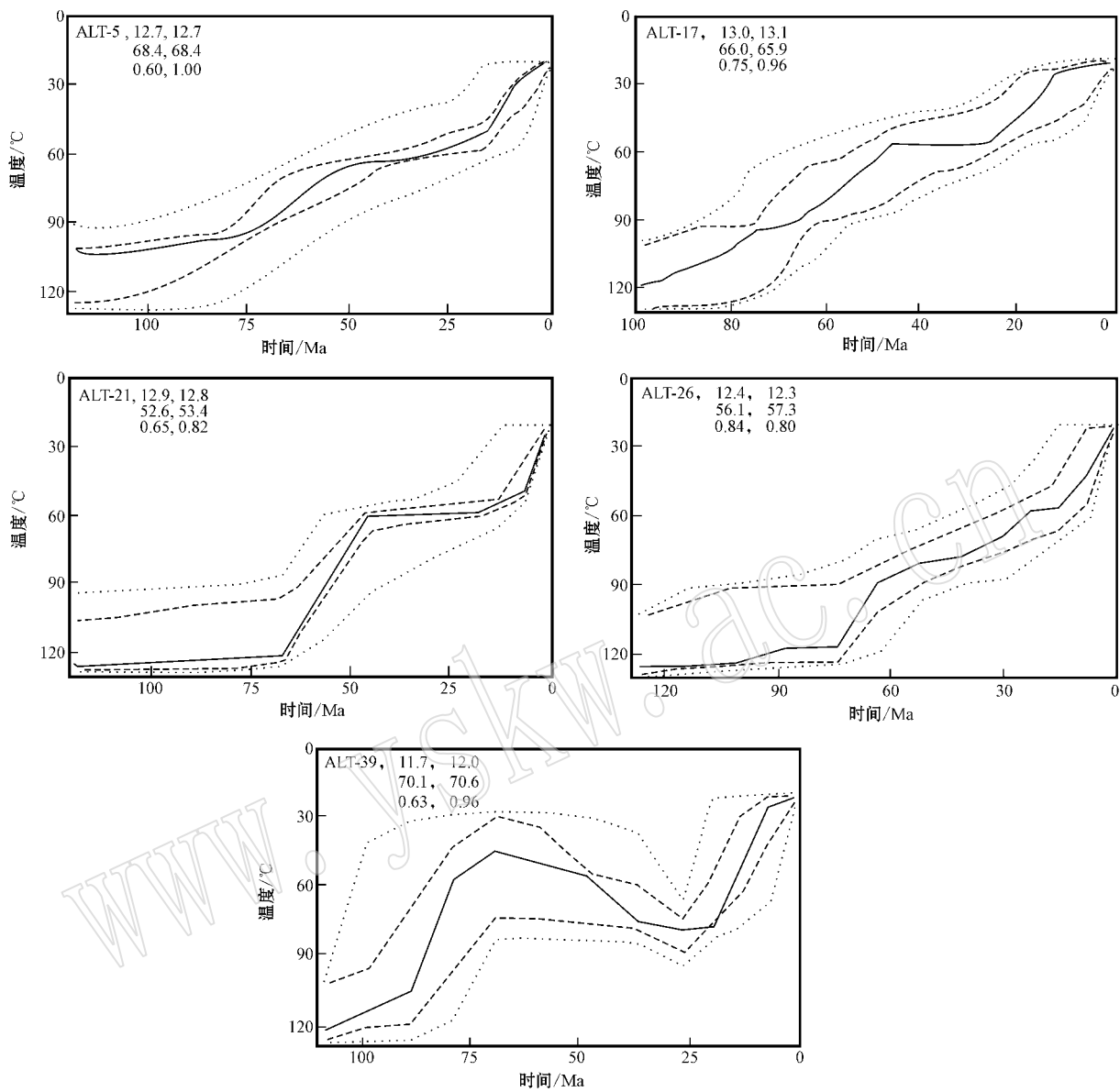


图 8 阿尔泰山南缘地质热演化历史模拟结果

Fig. 8 Thermal histories based on AFT inverse modeling in the south margin of the Altay Mountains

本次取样水平距离不超过 6 km 范围内、高差约 0.8 km 的地形剖面内,不同高程上的 7 个样品分析结果显示 第 2 阶段的平均剥露速率为 0.01 mm/a,明显小于其他方法计算所得结果 第 1 阶段为 0.05 mm/a,所计算出的剥露速率与冷却曲线模拟法所得结果基本一致。第 2 阶段不一致的原因可能是该方法忽视了现今地表高程与古地表高程的差异,另外,本区高差较小,也可能导致误差较大。

综上所述,阿尔泰山南缘自白垩纪以来经历了多期冷却剥露:约 120~75 Ma,剥露速率为 0.044 mm/a;75~70~50 Ma,剥露速率为 0.070 mm/a;50

~20~15 Ma,剥露速率很慢,为 0.005 mm/a;20~15 Ma~现今,剥露速率为 0.081 mm/a。

## 5 古地形恢复

低温年代学可以重塑岩石样品所经历冷却历史,根据地温梯度,估算相应的地层剥蚀量,最后再考虑均衡作用、气候、构造等影响因素,恢复古地形,这便是通过低温年代学进行古地形恢复的具体过程 (Gleadow and Brown, 2000)。

阿尔泰山南缘的剥露速率以及变化阶段已经在

第 4 节计算获得,若取各阶段变化的中间值,计算各阶段的剥蚀厚度,结果显示,0~17.5 Ma、17.5~50 Ma、50~72.5 Ma、72.5~120 Ma 阶段的剥蚀厚度分别为1 417 m、163 m、1 575 m、2 090 m,总计达到 5 245 m。

剥蚀区地形高度的演化不仅受控于剥蚀作用,还受到地壳均衡等因素影响,故古地形恢复应将上一步计算所得剥蚀厚度加到现今地形上,然后做均衡校正。一般的均衡校正模式采用艾里均衡模式(Hay *et al.*, 1989) :假设在上地幔处,存在一个水平方向的地壳均衡面,均衡面上承受的压力不变。对于剥蚀区而言,剥蚀前后均衡面上所承受的压力相等(图 9), $H_{iso}$  表示剥蚀前后地壳均衡面,则古高度的均衡校正公式为:

$$D_{ij}\rho_{ij} + D_s\rho_s + D_c\rho_c = D_s\rho_s + D_c\rho_c + [D_{ij} - (H_j - H_i)]\rho_m$$

其中, $D_{ij}$  为 j 至 i 阶段的剥蚀厚度, $D_s$  为其他沉积厚度, $D_c$  为地壳厚度, $H_j$  为 j 时的古地形高度, $H_i$  为 i 时的地形高度, $\rho_{ij}$  为 j 至 i 阶段的剥蚀量的密度, $\rho_s$  为其他沉积的密度, $\rho_c$  为地壳密度, $\rho_m$  为地幔密度。

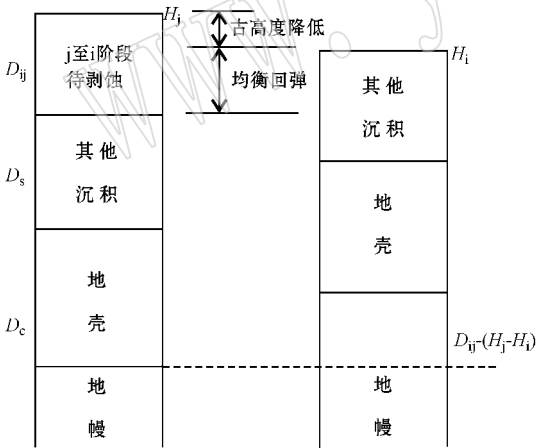


图 9 剥蚀区地壳均衡作用示意图(改自丁汝鑫, 2006)

Fig. 9 Schematic diagram of isostasy in erosion area (after Ding Ruxin, 2006)

上式进一步整理简化可得均衡校正公式为:

$$H_j = D_{ij}(\rho_m - \rho_{ij})/\rho_m + H_i$$

高度降低 $\Delta H$ 和均衡回弹 $H_{iso}$ 分别为:

$$\Delta H = H_j - H_i = D_{ij}(\rho_m - \rho_{ij})/\rho_m$$

$$\text{和 } H_{iso} = D_{ij} - \Delta H$$

在阿尔泰山南缘研究中,取地壳密度为 2 700

$\text{kg/m}^3$ ,地幔密度为 3 300  $\text{kg/m}^3$ 。根据前面所计算出的剥露量,采用上述公式计算古地形高度变化量,结果显示 17.5、50、72.5 和 120 Ma 时古地形高度变化量分别达到 258、287、574 和 954 m,同时期均衡回弹量分别达到 1 159、1 293、2 581 和 4 291 m。

此外,如以  $SL_i$  表示抬升开始至今的海面变化量(假设海面上升为正值),则古地形高度为  $H_j - SL_i$ 。

取地质历史时期 17.5、50、72.5 和 120 Ma 时海平面高度分别为 50、80、100 和 150 m (Hallam, 1992),则 17.5、50、72.5 和 120 Ma 时古地形海拔相对于现今地形海拔的变化量分别为 208、207、474 和 804 m。

从剥露量、古地形海拔变化量计算结果可见,120 Ma 至今,平均剥露幅度达约 5 km,而古地形海拔降低约 0.8 km。阿尔泰山南缘白垩纪以来古地形海拔只在 17.5~50 Ma 期间大约保持不变,其他阶段均有降低的趋势。

## 6 磷灰石裂变径迹对区域构造事件的约束

阿尔泰山南缘自白垩纪以来经历了多期冷却剥露,第 1 次发生在白垩纪(约 120~75 Ma),第 2 次发生在晚白垩世晚期至始新世(75~70~50 Ma),第 3 次发生在中新世以来(20~15 Ma~现今)。

早白垩世的构造抬升在阿尔泰山与邻区皆有报道,准噶尔盆地上、下白垩统之间的不整合是此期构造变形的具体表现。Yuan 等(2006)在阿尔泰山地区获得了早白垩世(134~100 Ma)构造隆升的磷灰石裂变径迹年龄数据。Johan 等(2002)通过对俄罗斯境内阿尔泰山北 Teletskoye 湖地区的研究确定了白垩纪约 125~100 Ma 有一个快速冷却降温的阶段。Graham 等(2001)指出阿尔泰山地区中生代构造的重新活动与同时期的蒙古-鄂霍茨克海最后阶段的闭合有关。晚侏罗世至早白垩世,西伯利亚板块和中朝-蒙古板块的最终收敛和碰撞引起了造山带的发展(Xu *et al.*, 1997; Zorin, 1999)。碰撞带从鄂霍茨克海,通过蒙古向西延伸,直至贝加尔裂谷带的西南部。碰撞带最早在早中侏罗世(170~180 Ma 前)从西部开始碰撞(Zorin, 1999),持续的碰撞及相关的挤压构造一直持续到早白垩世,最后在东部结束(110~140 Ma 前)(Van de Beek *et al.*, 1996;

Zorin, 1999)。碰撞所导致的变形不仅仅局限在碰撞带本身,而且通过迁移影响了内陆和蒙古阿尔泰地区(Dobretsov *et al.*, 1996),直至贝加尔湖地区(Van de Beek *et al.*, 1996),甚至达到了西伯利亚克拉通边缘(Zorin, 1999)。本次实验结果显示,阿尔泰地区也经历了造山运动远场的影响。这些效应所引起的阿尔泰造山带的再造山和变形,导致了一次重要的中生代冷却剥蚀。

本次实验所显示的晚白垩世至新生代早期的冷却隆升事件(75~70~50 Ma)在阿尔泰其他地区也有报道。袁万明等(2004a, 2004b)在铁热克提岩体的磷灰石裂变径迹测试结果及热史模拟中揭示了这次冷却事件。中亚地区在中新生代发生了不同陆块碰撞增生到欧亚板块南部边缘的运动,它们是晚三叠世(230~200 Ma)羌塘地块的增生作用、晚侏罗世(140~125 Ma)拉萨地块的增生作用、晚白垩世(80~70 Ma)Kohistan-Dras 岛弧的增生作用以及 55 Ma 以来印度板块与欧亚大陆的碰撞作用(Vincent and Allen, 1999)。阿尔泰山白垩纪晚期的冷却剥露事件,可能反映了拉萨地块、Kohistan-Dras 岛弧的增生作用对阿尔泰地区的远距离影响。

中新世阿尔泰地区快速隆升,同样在本区和邻区都有广泛的记录。如袁万明等(2007)在土屋-延东铜矿的裂变径迹测试结果及热史模拟同样揭示了 20 Ma 之后的快速隆升冷却事件。新近纪(约 25 Ma)以来,准噶尔盆地东南缘经历了一次抬升-剥露作用(李丽等, 2008)。本次的快速隆升可能与印度板块与欧亚板块碰撞的远程效应有关。本次研究同样确认了中新世以来(20~15 Ma ~ 现今)的这次快速冷却隆升事件。

## 7 结论

阿尔泰山南缘样品的裂变径迹年龄变化于 99.1~43.7 Ma 之间,较为清晰地显示 3 个年龄组:99.1 Ma、81.4~65.0 Ma 和 57.3~43.7 Ma,中值分别为约 100、75 和 50 Ma。年龄的分组说明阿尔泰山南缘不是连续的整体的冷却剥露,采自不同部位样品的裂变径迹年龄是区内构造隆升剥蚀作用的体现。

研究区白垩纪以来经历了多期冷却剥露:早白垩世至晚白垩世晚期(约 120~75 Ma),剥露速率为  $0.044 \text{ mm/a}$ ;晚白垩世晚期至始新世(75~70~50 Ma),剥露速率为  $0.070 \text{ mm/a}$ ;中新世以来(20~15

Ma~现今),剥露速率为  $0.081 \text{ mm/a}$ 。

研究区自白垩纪(120 Ma)至今,平均剥露幅度达约 5 km,而古地形海拔降低约 0.8 km。阿尔泰山南缘白垩世以来古地形海拔只在 17.5~50 Ma 期间大约保持不变,其他阶段均有降低的趋势。

阿尔泰山南缘早白垩世的构造抬升与蒙古-鄂霍茨克海最后阶段的闭合以及西伯利亚板块和中朝-蒙古板块的最终收敛和碰撞有关。晚白垩世至新生代早期的冷却隆升事件源于拉萨地块、Kohistan-Dras 岛弧增生的远距离影响;中新世阿尔泰地区快速隆升,可能与印度板块与欧亚板块碰撞的远程效应有关。

## References

- Braun J. 2005. Quantitative Constraints on the Rate of Landform Evolution Derived from Low-Temperature [A]. Reiners P W and Ehlers T A. Low-Temperature Thermochronology: Techniques, Interpretations, and Applications [C]. Mineralogical Society of America, Geochemical Society, 351~374.
- Buslov M M, Fujiwara Y, Iwata K, *et al.* 2004. Late Paleozoic-Early Mesozoic Geodynamics of Central Asia [J]. *Gondwana Research*, 7 (3): 791~808.
- Buslov M M, Kokh D A and De Grave J. 2008. Mesozoic-Cenozoic tectonics and geodynamics of Altai, Tien Shan, and Northern Kazakhstan, from apatite fission-track data [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 49: 648~654.
- Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, *et al.* 2010. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the northwest Chinese Altai: Implications for petrogenesis and tectonic evolution [J]. *Gondwana Research*, 18: 638~652.
- Chai Fengmei, Mao Jingwen, Dong Lianhui, *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating for meta-rhyolites of the Kangbutiebao Formation at the Abagong iron deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 (11): 1592~1601 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan and Wang Jingbin. 2003. Proceedings of Geology and Mineral Resources, Altai Mountains in Xinjiang, China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Ding Ruxin. 2006. Exhumation and Paleotopography Reconstruction in Dabie Orogen since Late Cretaceous [D]. Ph. D. Thesis of Tongji University (in Chinese).
- Ding Ruxin, Zhou Zuyi and Wang Wei. 2007. Modeling exhumation rates of Orogenic Belts with Low-temperature thermochronological data [J]. *Advances In Earth Science*, 22(5): 447~456 (in Chinese with English abstract).
- Dobretsov N L, Buslov M M, Delvaux D, *et al.* 1996. Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of

- lithospheric plate interaction and mantle plumes[J]. *International Geology Review* 38, 430~466.
- Galbraith R F. 1981. On statistical models for fission track counts[J]. *Mathematical Geology*, 13 : 471~488.
- Gao Fuping, Zhou Gang, Lei Yongxiao, *et al.* 2010. Early Permian granite age and geochemical characteristics in Shaerbulake of Xinjiang Altay area and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(9) : 1 281~1 293(in Chinese with English abstract).
- Gleadow A J W and Brown R W. 2000. Fission track thermochronology, and the long-term denudational response to tectonics [A]. Summerfield M J. *Geomorphology and Global Tectonics*[C]. Chichester : John Wiley and Sons, 57~75.
- Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, *et al.* 1986. Confined fission track lengths in apatite : A diagnostic tool for thermal history analysis [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 94 : 405~415.
- Gleadow A J W, Kohn B P, Brown R W, *et al.* 2002. Fission track thermotectonic imaging of the Australian continent [J]. *Tectonophysics*, 349 : 5~21.
- Graham S A, Hendrix M S, Johnson C L, *et al.* 2001. Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in southeast Mongolia[J]. *Geological Society of America Bulletin* 113 : 1 560~1 579.
- Green P F. 1981. A new look at statistics in fission track dating [J]. *Nuclear Tracks*, 5 : 77~86.
- Green P F. 1986. On the thermo-tectonic evolution of northern England : evidence from fission track analysis[J]. *Geology*, 5 : 493~506.
- Gunnell Y and Fleitout L. 2000. Morphotectonic evolution of the Western Ghats, India [A]. Summerfield M. *Geomorphology and Global Tectonics*[C]. Chichester : John Wiley and Sons, 321~338.
- Hallam. 1992. *Phanerozoic Sea-Level Changes* [M]. New York : Columbia University Press.
- Hay W W, Shaw C A and Wold C N. 1989. Mass-balanced paleogeographic reconstructions[J]. *Geologische Rundschau*, 78 : 207~242.
- Hurford A J and Green P F. 1982. A users' guide to fission-track dating calibration[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59 : 343~354.
- Johan De Grave, Peter Van den haute. 2002. Denudation and cooling of the Lake Teletskoye Region in the Altai Mountains (South Siberia) as revealed by apatite fission-track thermochronology [J]. *Tectonophysics*, 349 : 145~159.
- Ketcham R A, Donelick R A and Carlson W D. 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics III : Extrapolation to geological time scales[J]. *American Mineralogist*, 84 : 1 235~1 255.
- Kohn B P, Gleadow A J W, Brown R W, *et al.* 2002. Shaping the Australian crust over the last 300 million years : Insights from fission track thermotectonic and denudation studies of key terranes [J]. *Aust. J. Earth Sci.*, 49 : 697~717.
- Kohn B P, Gleadow A J W, Brown R W, *et al.* 2005. Visualizing thermotectonic and denudation histories using apatite fission track thermochronology[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58 : 567~588.
- Li Li, Chen Zhengle, Qi Wanxiu, *et al.* 2008. Apatite fission track evidence for uplifting-exhumation processes of mountains surrounding the Junggar basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (5) : 1 011~1 020(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi and Xiao Xuchang. 1999. Brief Reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China [J]. *Scientia Geologica sinica*, 34(4) : 405~419(in Chinese with English abstract).
- Lin Xiubin, Chen Hanlin, Yang Shufeng, *et al.* 2010. Exhumation of the Fuyun basic granulite in Altaid Orogenic Belt : Constraints from fission-track thermochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2) : 413~420(in Chinese with English abstract).
- Liu Guoren, Qin Jihua, Zhao Zhonghe, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb ages of zircon in the gneiss of Erqisi tectonic belt in Altay, Xinjiang, and their geological significances [J]. *Geoscience*, 22(2) : 190~196 (in Chinese with English abstract).
- Metivier F and Gaudemer Y. 1997. Mass transfer between eastern Tian Shan and adjacent basins (central Asia) : constraints on regional tectonics and topography [J]. *Geophysical Journal International*, 128 : 1~17.
- Sun M, Yuan C, Xiao W J, *et al.* 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai : Progressive accretionary history in the Early to Middle Palaeozoic [J]. *Chemical Geology*, 247 : 352~383.
- Van der Beek P, Delvaux D, Andriessen P A M, *et al.* 1996. Early Cretaceous denudation related to convergent tectonics in the Baikal region, SE Siberia [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 153 : 515~523.
- Vincent S J and Allen M B. 1999. Evolution of the Minle and Chaoshui Basins, China : implications for Mesozoic strike-slip basin formation in Central Asia [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 111 : 725~742.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, *et al.* 2008b. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China : Implications for the tectonic evolution of central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32 : 102~117.
- Xiao W J, Pirajno F and Seltmann R. 2008a. Geodynamics and metallogeny of the Altaid orogen [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32 : 77~81.
- Xiao W J, Windley B F, Badareg C, *et al.* 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids : Implications for the growth of Central Asia [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 161 : 339~343.
- Xu X, Harbert W, Dril S, *et al.* 1997. New paleomagnetic data from the Mongol-Okhotsk collision zone, Chita region, southcentral Russia : implications for Paleozoic paleogeography of the Mongol-Okhotsk Ocean [J]. *Tectonophysics*, 269 : 113~129.
- Yakubchuk A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage : a revised model [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23 : 761~779.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Yuan Shenghao, *et al.* 2008. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altay, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4) : 485~499(in Chinese with English ab-

stract).

Yuan Wanming, Andy Carter, Dong Jinquan, *et al.* 2006. Mesozoic-Tertiary exhumation history of the Altai Mountains, northern Xinjiang, China: New constraints from apatite fission track data [J]. *Tectonophysics*, 412: 183~193.

Yuan Wanming, Bao Zengkuan, Dong Jinquan, *et al.* 2007. Fission track thermochronology application to mineralization ages of hydrothermal deposits in Kelang Basin, Northern Xingjiang, China [J]. *World Sci-Tech R&D*, 29(2): 8~14 (in Chinese with English abstract).

Yuan Wanming, Dong Jinquan and Bao Zengkuan. 2004. Fission track evidences for tectonic activity In Altai Mountains, Xinjiang, north-western China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 461~468 (in Chinese with English abstract).

Yuan Wanming, Dong Jinquan, Tang Yunhui, *et al.* 2004. Thermal history of the Tierenketi Batholith in Altai Mountains, Northern Xingjiang: Evidence from apatite fission track analysis [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(2): 199~204 (in Chinese with English abstract).

Yuan Wanming, Zheng Qiugen, Bao Zengkuan, *et al.* 2009. Zircon fission track thermochronology constraints on mineralization epochs in Altai Mountains, northern Xinjiang, China [J]. *Radiation Measurements*, 44: 950~954.

Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia [J]. *Tectonophysics*, 306: 33~56.

## 附中文参考文献

柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 等. 2005. 新疆阿尔泰山南缘阿巴宫铁矿区

康布铁堡组变质火山岩年龄及其地质意义 [J]. *地质学报*, 82(11): 1592~1601.

陈毓川, 王京滨. 2003. 中国新疆阿尔泰山地质与矿产论文集 [M]. 北京: 地质出版社.

丁汝鑫. 2006. 大别造山带晚白垩世以来的剥露作用及古地形再造 [D]. 同济大学博士论文.

丁汝鑫, 周祖翼, 王 伟. 2007. 利用低温年代学数据计算造山带剥露速率 [J]. *地球科学进展* [J], 22(5): 447~456.

高福平, 周 刚, 雷永孝, 等. 2010. 新疆阿尔泰山南缘沙尔布拉克一带早二叠世花岗岩的年龄、地球化学特征及地质意义 [J]. *地质通报*, 29(9): 1281~1293.

林秀斌, 陈汉林, 杨树锋, 等. 2010. 阿尔泰山带富蕴基性麻粒岩折返过程: 来自裂变径迹热年代学的限定 [J]. *岩石学报*, 26(02): 413~420.

李 丽, 陈正乐, 祁万修, 等. 2008. 准噶尔盆地周缘山脉抬升-剥露过程的 FT 证据 [J]. *岩石学报*, 24(05): 1011~1020.

李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述 [J]. *地质科学*, 34(4): 405~419.

刘国仁, 秦纪华, 赵忠合, 等. 2008. 新疆阿尔泰额尔齐斯构造带片麻岩的锆石 U-Pb SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. *现代地质*, 22(2): 190~196.

杨富全, 毛景文, 闫升好, 等. 2008. 新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义 [J]. *地质学报*, 82(4): 485~499.

袁万明, 保增宽, 董金泉, 等. 2007. 新疆阿尔泰克朗盆地热液成矿时代的裂变径迹分析 [J]. *世界科技研究与发展*, 29(2): 8~14.

袁万明, 董金泉, 保增宽. 2004. 新疆阿尔泰山带构造活动的磷灰石裂变径迹证据 [J]. *地学前缘*, 11(4): 461~468.

袁万明, 董金泉, 汤云晖, 等. 2004. 新疆阿尔泰铁热克提岩体热历史的磷灰石裂变径迹法研究 [J]. *地球学报*, 25(2): 199~204.