

阿尔金北缘 EW 向山脉新生代隆升剥露的 裂变径迹证据

孙 岳^{1, 2)}, 陈正乐^{1)*}, 陈柏林¹⁾, 韩凤彬¹⁾, 周永贵¹⁾, 郝瑞祥¹⁾, 李松彬¹⁾

1)中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 本文主要利用磷灰石裂变径迹测年技术探讨了阿尔金北缘 EW 向山脉隆升的时空差异特征。22 个岩体分别采自阿尔金北缘 EW 向山体中的卓尔布拉克、大平沟和喀腊大湾地区。裂变径迹测试结果显示, 样品的径迹年龄介于(62.6 ± 3.5)~(28.3 ± 1.7) Ma, 平均径迹长度均介于(13.25 ± 0.15)~(14.29 ± 0.1) μm 之间。进一步根据裂变径迹长度和温度数据, 开展了磷灰石温度-时间的反演模拟。结果表明, 阿尔金北缘山体的隆升呈现一定的规律: 在南北方向上, 南部率先隆升并向北部扩展, 东西方向上, 山脉中段大平沟样品径迹年龄较其他样品年龄大且时间局限在古新世和始新世, 呈现中间向两侧隆升趋势。所有样品热史模拟曲线形态相对一致, 径迹长度分布呈单峰式, 表明阿尔金北缘地区可能仅仅新生代经历了古新世—渐新世(65—28 Ma)的快速隆升-剥露事件, 中新世及后期的构造隆升-剥露事件在本区不发育。对比分析阿尔金地区的隆升剥露热事件可知, 阿尔金山脉新生代的隆升-剥露整体性和差异性共存: 古近纪阿尔金山脉隆升具有普遍性和区域性, 而中新世至今的隆升和剥露仅仅存在于 NEE 走向阿尔金主断裂带旁侧的山体和 NE 向的山体, 推测中新世以来阿尔金主断裂带的快速走滑并没有影响阿尔金北缘 EW 向山体的隆升和剥露。

关键词: 裂变径迹; 隆升与剥露过程; 新生代; 阿尔金北缘

中图分类号: P597; P546 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.01.09

Cenozoic Uplift and Denudation of the EW-trending Range of Northern Altun Mountains: Evidence from Apatite Fission Track Data

SUN Yue^{1, 2)}, CHEN Zheng-le^{1)*}, CHEN Bai-lin¹⁾, HAN Feng-bin¹⁾,
ZHOU Yong-gui¹⁾, HAO Rui-xiang¹⁾, LI Song-bin¹⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

2) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083

Abstract: This paper mainly presents analytical results of apatite fission-track ages to constrain the uplifting characteristics of EW-trending range of Northern Altun Mountains. 22 rock mass samples were collected from Zhuoerbulake, Dapinggou, and Kaladawan in EW-trending mountain range of Northern Altun Mountains. Fission-track ages for these samples range from (62.6 ± 3.5) to (28.3 ± 1.7) Ma with mean track lengths varying from (13.25 ± 0.15) to (14.29 ± 0.1) μm . According to track lengths and measured age data, the authors carried out the inversion simulation on temperature and age of apatite. The results show a specific regularity of the uplifting of Northern Altun Mountains. In the SN direction, the fission-track ages display a uplifting trend from south to

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41072071)、中国地质调查局地质大调查项目(编号: 1212011220936)和国土资源部公益性行业科研专项(编号: 2011311191-02)联合资助。

收稿日期: 2013-08-09; 改回日期: 2013-12-03。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 孙岳, 男, 1986 年生。博士研究生。主要从事构造地质学专业研究。通讯地址: 100081, 北京市海淀区民族大学南路 11 号。
E-mail: sy0136@163.com。

*通讯作者: 陈正乐, 男, 1967 年生。研究员, 博士生导师。主要从事构造地质与矿田构造研究。E-mail: chenzhengle@263.net。

north. In the EW direction, the ages of Dapinggou area in the middle mountains were older than those of other areas and confined to Paleocene and Eocene, and imply an uplifting trend from the middle outwards. The similar thermal history simulation lines of all samples and the single peak of track lengths are considered to have been caused by rapid uplifting during the Paleocene-Eocene (63~28 Ma) and steadiness during the Miocene and later periods in the Northern Altun Mountains. A comparative study of the uplifting and exhumation of the whole Altun area shows that the mountains uplifting and denudation of this region had both global and unique features in Cenozoic: the uplifting of the Altun Mountains had universality and regional features in Paleogene, but uplifting and exhumation existed in NEE-trending and NE-trending mountain ranges in Miocene and subsequent period. It is held that the rapid strike-slip Altun fault has had no influence on uplifting and denudation of EW-trending mountain ranges in Northern Altun Mountains since Miocene.

Key words: fission track; uplift and denudation process; Cenozoic; North Altun

阿尔金山脉位于青藏高原北部，介于塔里木盆地与柴达木盆地之间，总体上呈北东向带状展布。根据山体走向，可以将阿尔金山脉分为：沿 NEE 走向的阿尔金主断裂带两侧山体(图 1 中的 I)、NE 向山体(图 1 中的 II)和阿尔金北缘 EW 向的山体(图 1 中的 III)。由于其特殊的大地构造位置、阿尔金断裂带的巨大走滑位移量及其对青藏高原新生代构造变形的制约，许多学者已经从构造、岩石和地质年代学等方面研究了阿尔金山脉的构造演化历史和成矿规律，尤其是对阿尔金主断裂的走滑过程与青藏高原新生代变形之间的关系研究取得了卓有成效的研究进展(张建新等, 2001; Chen et al., 2002; 刘永江等, 2007; Wu et al., 2012)。也有较多的研究涉及了阿尔金山脉新生代的隆升-剥露过程及其与阿尔金断裂走滑作用之间的关系，认为阿尔金山脉存在多期次的隆升和剥露作用，而且山脉的隆升与青藏高原的隆升及其阿尔金断裂带的走滑作用关系密切(Sobel et al., 1997; Wang, 1997; Yue et al., 2004; 陈正乐等, 2005)，但是前人对阿尔金山脉的隆升和剥露研究主要集中在阿尔金主断裂旁侧 NEE 走向的阿尔金山体和 NE 走向的阿尔金山脉(图 1 中 I 和 II 部分)(Jolivet et al., 1999, 2001; 万景林等, 2001; 葛肖虹等, 2002; 陈正乐等, 2001, 2002, 2006a; Yuan et al., 2006; Wang et al., 2006)，对阿尔金北缘 EW 向的红柳沟—拉配泉山体(图 1 中 III 部分)隆升剥蚀的研究则相对较少(陈正乐等, 2006a)，因而缺乏了对阿尔金山脉隆升和剥露的整体性和差异性的认知，制约了对阿尔金主断裂带走滑过程的复原分析。

裂变径迹定年技术是 20 世纪 60 年代兴起的一种同位素年代学方法(Jing et al., 1993; 陈文寄等, 1999; 付明希, 2003)，特别适用于缺乏有效沉积记录地区的低温构造演化分析(朱文斌等, 2007)。目前，裂变径迹定年技术已广泛应用于含油盆地的热史模拟、造山带的隆升与剥露、盆山耦合关系、沉积盆地分析、成矿热液及断裂活动时限等方面的研究(Wang et al., 2003; 袁万明等, 2004; 陈正乐等,

2006b, 2008; 向树元等, 2007; 柳振江等, 2010)。本文主要利用裂变径迹技术，研究阿尔金北缘 EW 向的红柳沟—拉配泉山体新生代隆升剥露历史，并系统对比已发表的年代数据，探讨阿尔金山脉新生代的整体隆升剥露特征。

阿尔金北缘 EW 向红柳沟—拉配泉山体位于塔里木地块结晶基底的南界，总体上呈近 EW 向延伸(图 1 中的 III)，是阿尔金 NEE 向构造带与北祁连构造带西段的交汇复合部位(陈柏林等, 2009; 郝瑞祥等, 2013)，海拔 2200~3600 m。在该山体内，从太古界至新生界均有发育。太古界主要出露于北部地区，为一套高角闪岩相(局部麻粒岩相)变质岩。元古界主要为变质岩、碳酸盐岩及中基性-中酸性火山岩。古生界仅局部出露石炭系和二叠系灰岩、炭质泥岩；新生界为砾岩、砂岩沉积物。研究区岩浆活动强烈，类型多样，有元古宙、加里东期和海西期花岗岩和以加里东为主的基性超基性岩体(陈正乐等, 2006a)，早古生代花岗岩规模最大。

为了确定阿尔金北缘 EW 向山体的差异隆升及其阶段性特征，野外对山体中段的卓尔布拉克、大平沟和喀腊大湾地区大致呈 SN 方向上进行了系统的采样，具体采样位置见图 2。共采集 22 个新鲜露头样品，岩性主要为花岗闪长岩、闪长岩和花岗岩，均为加里东期侵入岩。单个样品重量大于 2 kg，空间坐标位置由便携式 GPS 结合 1:10 万地形图确定。

1 实验方法

本次样品的裂变径迹测年实验在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室进行，由谷元珠高级工程师完成全部样品的测试工作。所有样品经过粉碎，矿物分离和挑选后，采用外探测器法(Gleadow et al., 1981)对样品进行裂变径迹分析，有关实验条件为：磷灰石蚀刻条件为 5.5% HNO₃，室温 20℃，20s；外探测器采用低铀含量白云母，蚀刻条件为 40% HF，室温 20℃，40 min；Zeta 标定(Hurford et al., 1983)选用国际标准样，标准玻璃为

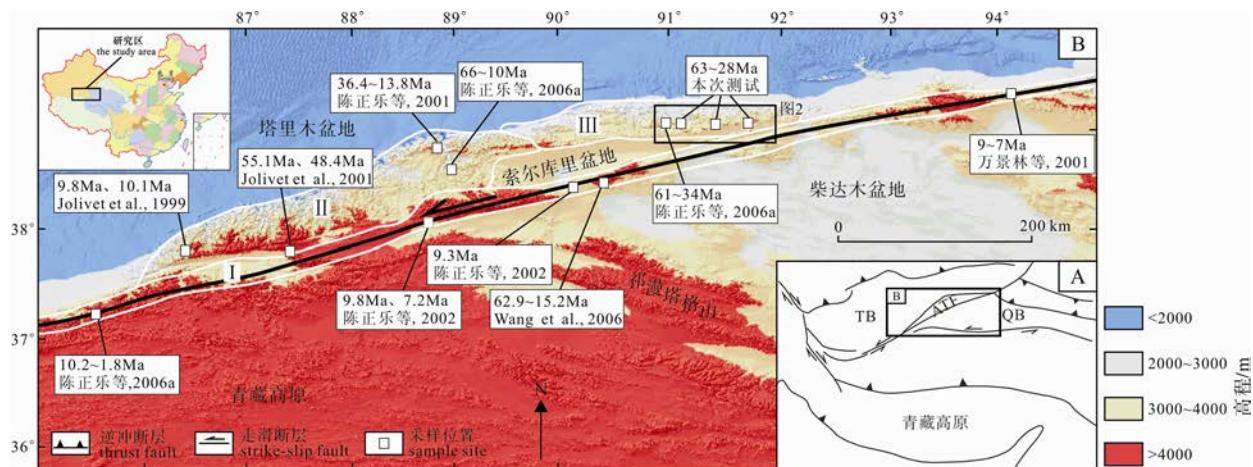


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the study area

A-研究区大地构造简图; B-阿尔金山脉分区及裂变径迹采样位置和年龄图;

I - 阿尔金主断裂旁侧山体; II - NE 向山体; III - EW 向山体; ATF - 阿尔金断裂带; TB - 塔里木盆地; QB - 柴达木盆地
A-Tectonic sketch map of the study area; B-Subarea of Altun Mountains and location of fission track sample and fission track age;
I-mountains around Altun fault; II-NE-trending mountains; III-EW-trending mountains; ATF-Altun fault;
TB-Tarim Basin; QB-Qaidam Basin

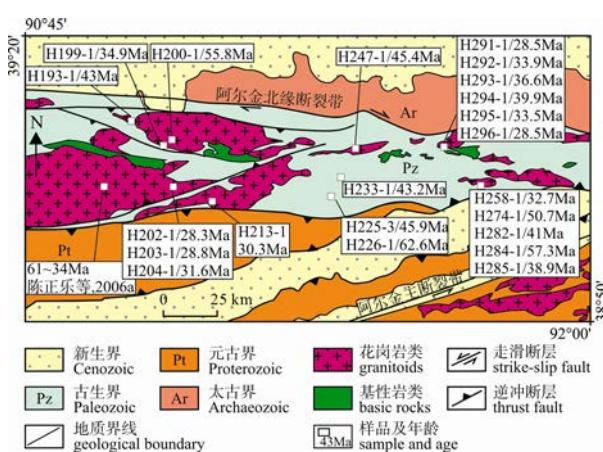


图 2 研究区样品采集位置及年龄图

Fig. 2 Locations and ages of the samples in the study area

美国国家标准局 CN-5 铀标准玻璃; 样品送至中国原子能科学研究院 492 反应堆进行辐照; 径迹统计用 OLYMPUS 偏光显微镜, 在放大 1000 倍浸油条件下完成。磷灰石裂变径迹的封闭温度采用 $(110 \pm 10)^\circ\text{C}$, 退火带温度为 $60 \sim 120^\circ\text{C}$ (康铁笙等, 1991), 年龄误差 $\pm 1\sigma$ 。

2 实验结果

2.1 数据分析

本次 22 个测试样品分别采自卓尔布拉克的北沟、西沟和南沟, 大平沟北段和南段, 喀腊大湾北段和中南段。年龄测试过程中, 全部样品的磷灰石单颗粒测量数目均大于 20, 径迹长度的测量数目均大于 50 条, 部分超过 100 条, 满足后面热史模拟的要求。所有测试样品 $P(x^2) > 5\%$, 即通过 x^2 检测, 服从泊松分布(朱文斌等, 2007), 并且年龄直方图呈单

峰, 单颗粒年龄不分散, 说明各样品的单颗粒年龄属于同一年龄组分, 因此本文所用的径迹年龄均为池年龄。测试结果表明, 研究区样品径迹年龄介于 $(62.6 \pm 3.5) \sim (28.3 \pm 1.7) \text{ Ma}$, 远远小于岩体形成年龄, 说明所有样品均经历完全退火和部分退火, 记录的是后期的构造隆升-剥露时间。径迹长度介于 $13.25 \sim 14.29 \mu\text{m}$ 之间, 标准差介于 $0.99 \sim 1.32 \mu\text{m}$ 之间, 具有典型的无扰动基岩型特征(Gleadow et al., 1986; 康铁笙等, 1991), 裂变径迹长度分布的标准差 S 和平均径迹长度的关系见图 3。

卓尔布拉克位于研究区西侧, 共采集的 7 个样品。样品 H202-1、H203-1 和 H204-1 为一组, 采自卓尔布拉克西沟, 岩性均为花岗闪长岩, 测试年龄和径迹长度基本一致, 分别为 $\sim 29 \text{ Ma}$ 和 $\sim 14.20 \mu\text{m}$ 。7 个样品的裂变径迹年龄位于 $55.8 \sim 28.3 \text{ Ma}$, 径迹年龄在 30 Ma 左右较集中, 揭示了卓尔布拉克地区在古新世末—渐新世发生快速隆升。

大平沟位于研究区中部, 其中 3 个样品采自大平沟南段, 岩性为闪长岩, 径迹年龄位于 $62.6 \sim 43.2 \text{ Ma}$; 1 个样品(编号 H247-1)采自北段, 岩性为花岗岩, 径迹年龄为 45.4 Ma , 表明大平沟地区快速隆升作用发生于古新世—始新世中期。

喀腊大湾位于研究区东部, 共采集 11 个样品, 岩性均为花岗岩。5 个样品采自喀腊大湾中南段, 径迹年龄介于 $57.3 \sim 32.7 \text{ Ma}$; 6 个样品采自北段, 径迹年龄介于 $39.9 \sim 28.5 \text{ Ma}$ 。表明喀腊大湾地区快速隆升主要发生在始新世—渐新世。

从采样位置上分析, 样品径迹年龄和样品高程基本呈正相关(图 4), 南侧海拔相对较高, 径迹年龄

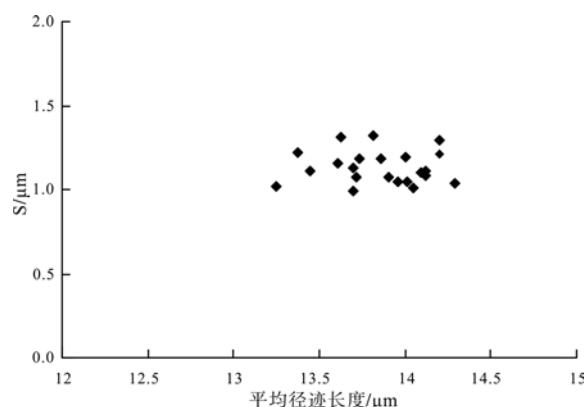


图 3 阿尔金北缘地区样品磷灰石裂变径迹长度分布的标准差 S 和平均径迹长度的关系

Fig. 3 Relationship between standard deviation of track length and mean track length of apatites from northern Altun

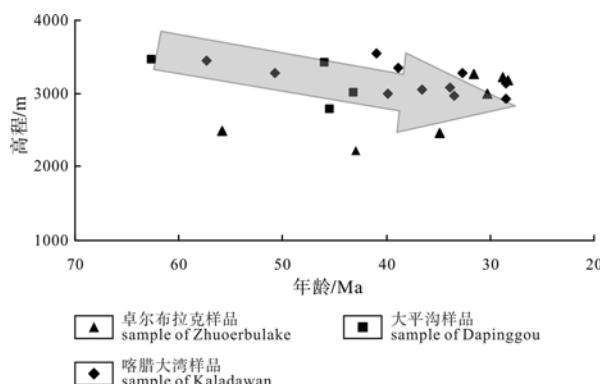


图 4 阿尔金北缘地区样品高程和径迹年龄关系
Fig. 4 Relationship between altitude and track age of samples in northern Altun

较大,说明海拔高低不同的样品先后进入退火带的事实。大平沟样品 H226-1 处在南侧且海拔较高, 测试的径迹年龄最大, 喀腊大湾北段海拔较低, 其样品的径迹年龄较小。

2.2 热史模拟

裂变径迹的长度的差异记录了不同样品经历的时间-温度信息, 因此, 利用径迹长度和年龄可以模拟出样品所经历的热历史。阿尔金北缘地区样品的热演化史模拟是基于地质资料和磷灰石裂变径迹数据的分析, 热史模拟软件为 AFTSovle, 采用 Ketcham 等(1999)多组分退火模型和 Monte Carlo 方法, Dpar 初始值为 1.5, 初始径迹长度为 $16.3 \mu\text{m}$, 模拟次数设置为 10000 次。多次模拟得出可接受热史模拟区间、好的模拟区间和最佳模拟曲线。

卓尔布拉克和大平沟样品模拟结果见图 5, 喀腊大湾样品模拟见图 6。从图中可以看出, 除样品 H204-1 和 H293-1 “K-S 检验” 值为 0.43 和 0.34 外, 其他样品均不小于 0.5, “年龄 GOF” 值均大于 0.5, 说明所有样品模拟结果可以接受且可信度高。“K-S 检验” 代表径迹长度模拟值和实测值的吻合程度,

“年龄 GOF” 代表径迹年龄模拟值和实测值的吻合程度。若“K-S 检验” 和“年龄 GOF” 都大于 5% 时, 表明模拟结果可以接受, 当它们值超过 50% 时, 模拟结果较好(朱文斌等, 2007), 镜质体反射率是与古地温有关的参数, 当它大于 0.64 时, 表明模拟结果较好。

根据研究区样品模拟的温度-时间曲线可知, 卓尔布拉克、大平沟和喀腊大湾的样品均呈现类似的热历史, 表明所有样品在新生代期间经历了快速隆升剥蚀和缓慢剥蚀过程。卓尔布拉克地区, 样品 H200-1 开始快速隆升相对较早, 发生在古新世($\sim 63 \text{ Ma}$), 其余样品模拟曲线均表现快速隆升发生在始新世—渐新世($45\sim 28 \text{ Ma}$); 大平沟地区, 样品 H226-1 开始隆升在古新世($\sim 65 \text{ Ma}$), 其余样品隆升均在始新世($50\sim 43 \text{ Ma}$); 喀腊大湾地区, 北段 6 个样品为一组具有基本一致的热史模拟曲线, 快速隆升发生在渐新世($40\sim 28 \text{ Ma}$), 中南段样品 H284-1 和 H274-1 位置相近, 快速隆升发生在古新世(65 Ma 、 58 Ma), 其余 3 个样品快速隆升发生在始新世—渐新世($44\sim 32 \text{ Ma}$)。

样品 H226-1 采自大平沟南段卡拉塔格南部, H284-1 采自喀腊大湾中南段, 这两个样品均位于研究区南部, 热史模拟年龄分别为 63 Ma 和 58 Ma , 最先发生快速隆升; 其余样品模拟年龄主要集中在 $50\sim 28 \text{ Ma}$ 。 28 Ma 至今所有样品温度均降到磷灰石部分退火带以外, 且后期未发生增温过程, 模拟曲线表明山体没有再次的隆升事件。根据研究区样品径迹年龄和热史模拟曲线, 阿尔金北缘山体隆升主要发生在古近纪。

陈正乐等(2006a)利用裂变径迹定年技术测得红柳沟—拉配泉山脉内岩性为钾长花岗岩的阿北冰沟岩体(卓尔布拉克)年龄位于 $61\sim 34 \text{ Ma}$ 之间, 径迹长度为 $12.1\sim 12.3 \mu\text{m}$ (无扰动基岩型), 通过对数据的分析得出该岩体的隆升剥露作用发生于古新世—渐新世早期。本文在此基础上对这些样品进一步开展了温度-时间的热历史反演模拟, 从模拟图(图 7)中可以看出除样品 D541 隆升发生在中生代晚期($\sim 75 \text{ Ma}$)外, 其他样品均发生在新生代($65\sim 40 \text{ Ma}$)。所有热史模拟曲线和本次模拟具有相似性, 说明样品中磷灰石经历热事件是类似的。

3 讨论与结论

3.1 北缘山体隆升

根据样品所处位置、径迹年龄和温度-时间最佳拟合曲线(图 8), 系统对比阿尔金北缘卓尔布拉克、大平沟、喀腊大湾地区的磷灰石裂变径迹年代学数

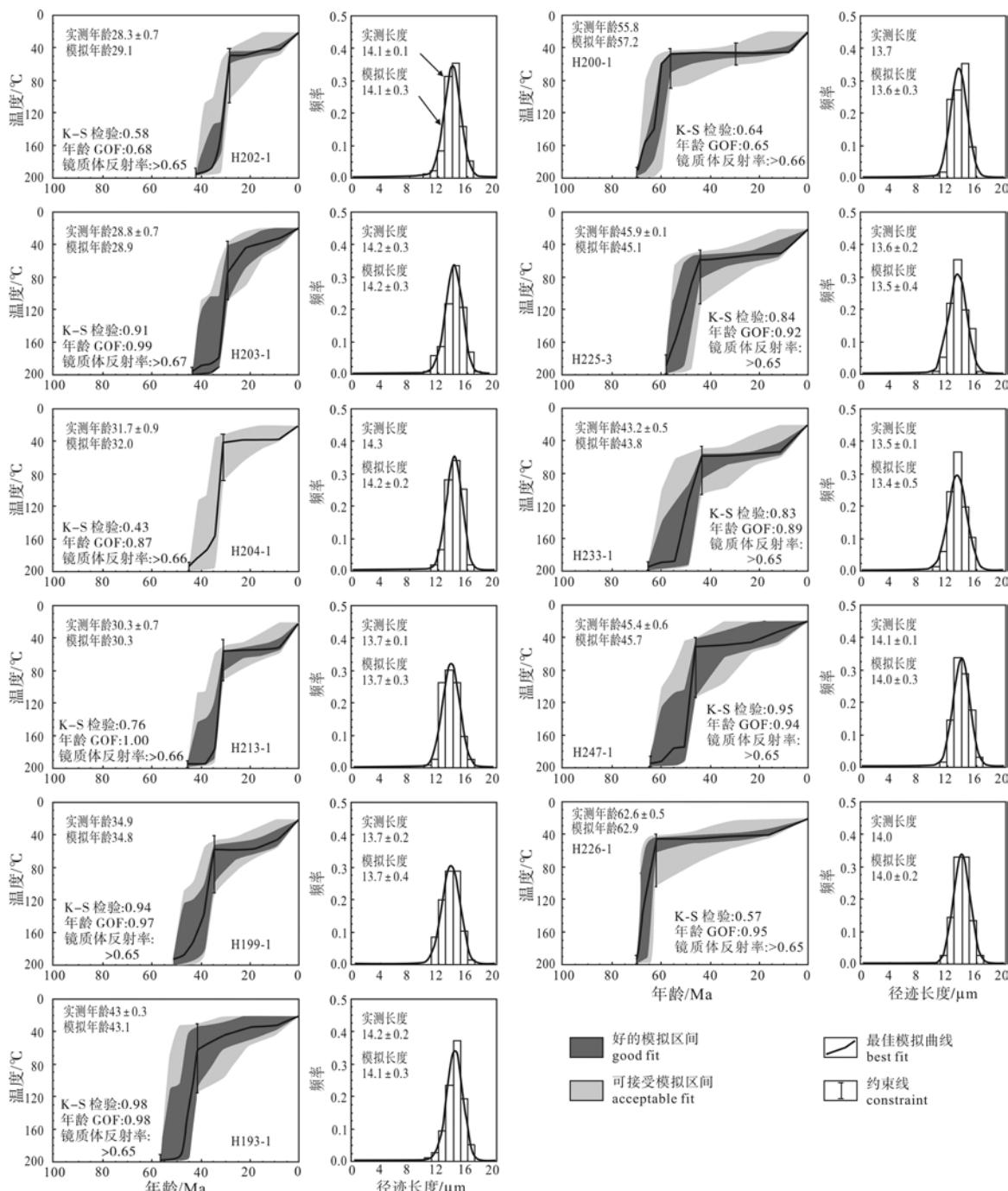


图 5 卓尔布拉克(左侧)、大平沟样品(右)热模拟图

Fig. 5 Modeled thermal history for samples from Zhuerbulaake(left) and Dapinggou(right) area

据, 揭示了新生代阿尔金北缘山体隆升具有明显的时空差异性。

时间上, 阿尔金北缘地区至少经历了 1 期的快速隆升和后期的缓慢剥蚀过程。快速隆升发生在古新世—渐新世(65—28 Ma), 可以分古新世早期(65—57 Ma)和中新世中期—渐新世中期(48—28 Ma)两个相对集中的隆升时限。样品从封闭温度快速冷却至 50℃ 左右, 假设封闭温度 110℃, 地温梯度是 30℃/km, 即样品从地下 3 km 抬升至近地表大约 1 km 深度, 隆升视速率约 0.50 mm/a(快速隆升期限

设为 4 Ma); 在渐新世之后(28 Ma 至今)所有样品模拟曲线相对平稳, 样品温度从 50℃ 左右降到地表 20℃, 隆升视速率约为 0.036 mm/a, 表明阿尔金北缘地区此时活动微弱, 以缓慢剥蚀为主。

空间上, 阿尔金北缘山脉呈现非整体隆升特征, 研究区南侧样品的实测径迹年龄相对大于北侧的径迹年龄, 揭示山脉隆升由南到北的趋势, 这与印度板块由南向北俯冲碰撞亚欧板块事件也是一致的; 大平沟地区样品实测径迹年龄相对早于两侧卓尔布拉克和喀腊大湾地区径迹年龄, 说明在古新世—渐

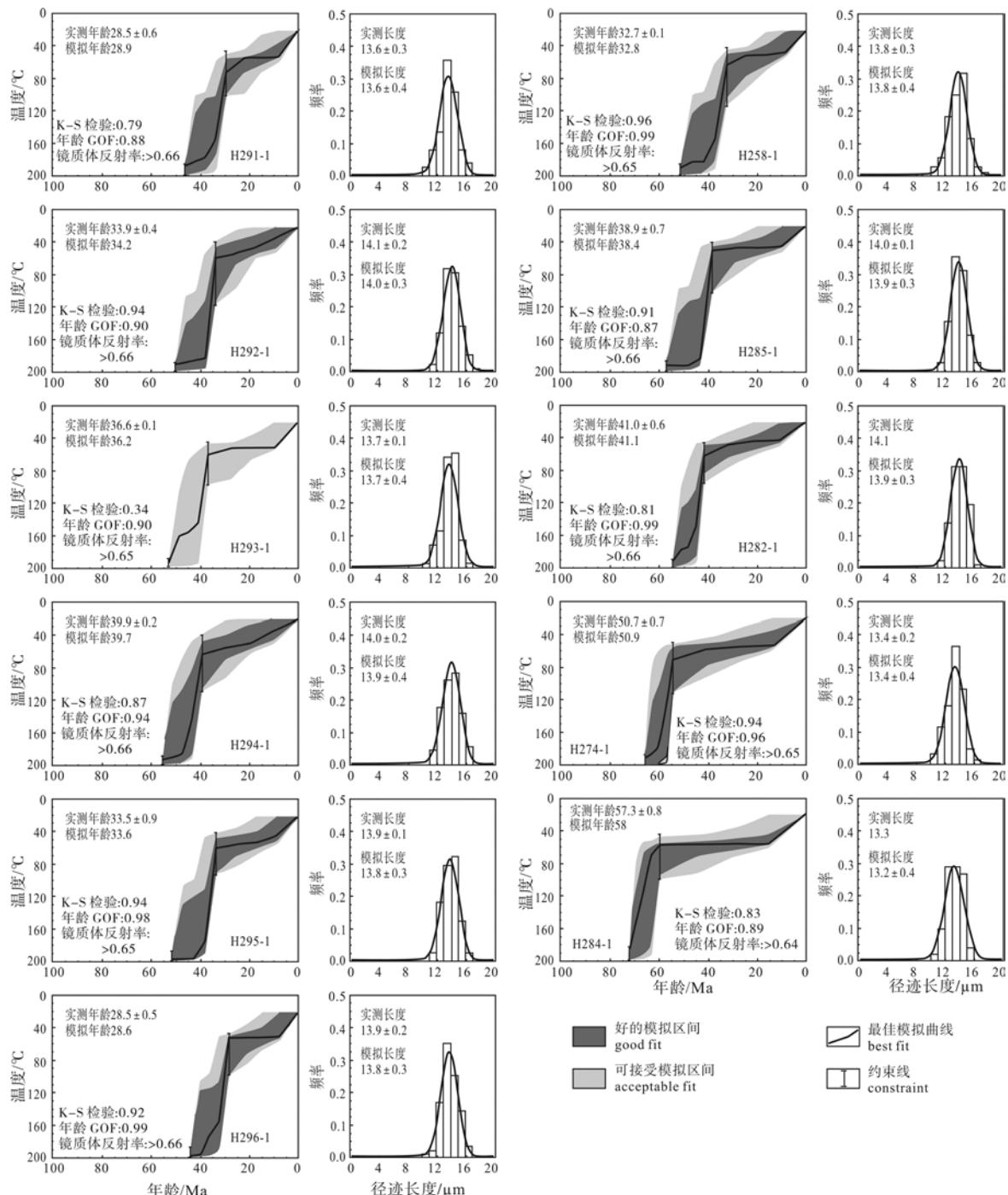


图 6 喀腊大湾样品热模拟图(左侧为北段样品, 右侧为中南段样品)

Fig. 6 Modeled thermal history for samples from Kaladawan area
(left-samples from northern segment; right-samples from central-south segment)

新世阿尔金北缘的隆升在东西方向上也不作为一个整体, 显示自中间向两侧隆升趋势。可见, 阿尔金北缘山体的隆升在时间上和空间上都具有一定的规律。

3.2 阿尔金新生代构造热事件

对于阿尔金山体的隆升剥露及断裂的走滑运动, 很多学者都做了研究, 如图 1。Jolivet 等分别于 1999 年和 2001 年利用磷灰石裂变径迹得出阿尔金中段和昆仑地区在新生代 30 Ma 以前有一次隆升。

陈正乐等(2001)对阿尔金若羌—茫崖地区作磷灰石裂变径迹测试, 得到 36.4~13.8 Ma 的年龄, 推测阿尔金山脉隆升始于渐新世延续到中新世, 且非均匀隆升。陈正乐等(2006a)测得阿尔金北缘红柳沟—拉配泉山脉内冰沟岩体的径迹(卓尔布拉克)年龄位于 61~34 Ma 之间, 认为该岩体的隆升剥露作用发生于古新世—渐新世早期。Wang 等(2006)测得阿尔金断裂中段阿卡腾龙山地区磷灰石径迹年龄为 62.9~15.2 Ma, 多数年龄集中在~18 Ma。本文的磷

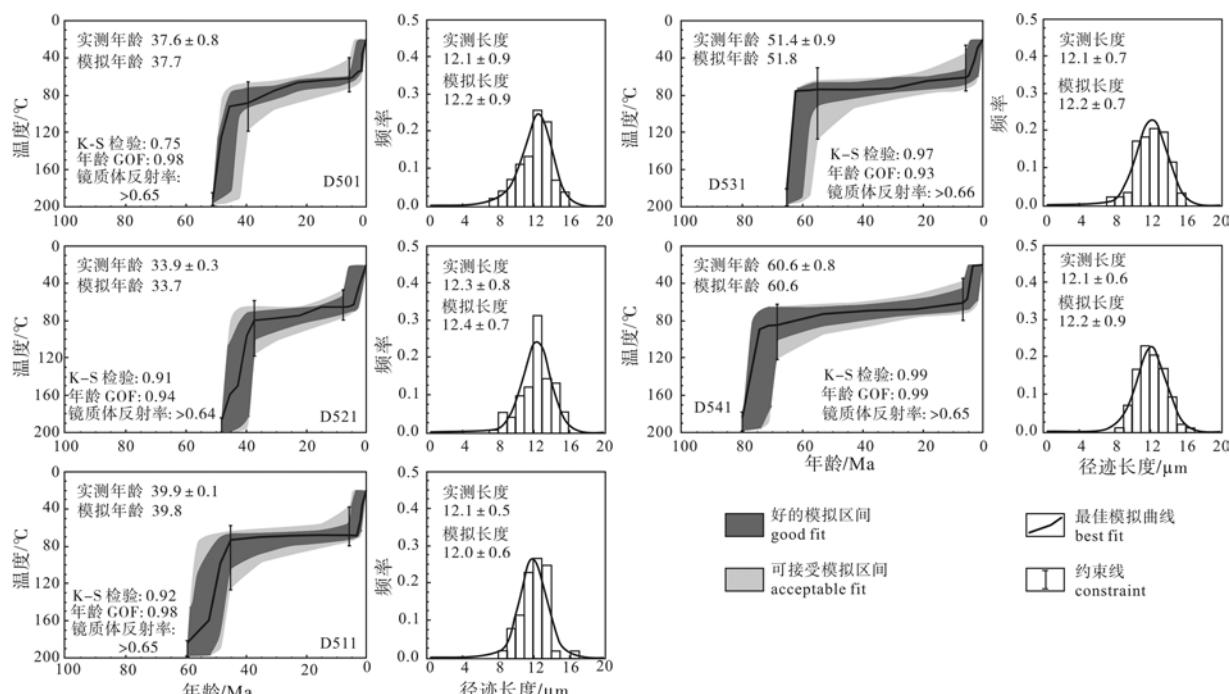
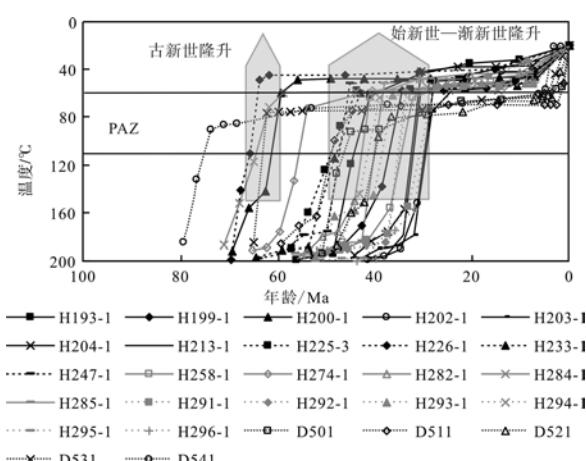


图 7 冰沟岩体样品热模拟图(源数据据陈正乐, 未发表)

Fig. 7 Modeled thermal history for samples from Binggou rock mass(original data after CHEN Zheng-le, unpublished)

图 8 阿尔金北缘样品温度-时间模拟最佳曲线图
(PAZ 表示部分退火带)Fig. 8 The best-fit line of the temperature-time modeling for samples from the northern Altun
(PAZ means partial annealing zone)

灰石径迹年龄和热史模拟结果同样反映出阿尔金北缘山体在 65~28 Ma 的隆升剥露时间。大量的研究表明整个阿尔金地区在古近纪的快速隆升事件具有普遍性和区域性, 包括阿尔金断裂及旁侧山脉、NE 向山脉和阿尔金北缘 EW 向山脉, 这与青藏高原及周边构造事件发生的时限具有一定的关系, 其隆升原因应为印度板块向亚欧板块俯冲碰撞导致地壳缩短增厚及青藏高原的隆升有关。

新近纪期间, 阿尔金主断裂北部阿克塞—当金山口一带及阿尔金主断裂带中段附近岩体在 8 Ma 左右经历了一次抬升剥露或快速走滑变形的构造热

事件作用(万景林等, 2001; 王瑜等, 2002; 陈正乐等, 2002)。索尔库里、阿克塞、苏北三个同走滑沉积盆地记录了阿尔金渐新世到中新世构造变形事件(Ritts et al., 2004), 阿尔金主断裂北部铁江沟组磨拉石也记录了 13.7~9 Ma 之间山体的快速隆升(Sun et al., 2005)。阿尔金中段和昆仑地区在 9—5 Ma 期间发生隆升剥露(Jolivet et al., 1999, 2001)。这些研究成果表明在中新世(特别是 8 Ma 左右)阿尔金 NE 向山脉发生快速隆升, 且阿尔金主断裂有大规模走滑运动, 但本次阿尔金北缘样品裂变径迹的测试年龄和热史模拟并没有显示~8 Ma 山体的快速隆升, 说明在渐新世阿尔金北缘 EW 向的山体已经隆升到现今的高度, 后期不再有隆升事件, 也反应出阿尔金主断裂带在 8 Ma 左行走滑造成的山体“正花状”挤压抬升并没有影响到阿尔金北缘 EW 向的山脉。野外观察也未发现阿尔金北缘断裂的明显活动迹象, 间接支持了上述的推测。因此, 在渐新世后期的构造事件主要体现在阿尔金主断裂和 NE 向山脉上, 阿尔金北缘 EW 向的山体无隆升事件。

3.3 结论

- 1) 阿尔金北缘山脉在新生代的隆升具有明显的时空差异性, 时间上表现为前期的快速隆升剥露(古新世—渐新世), 可分为 65—57 Ma 和 48—28 Ma 这两个相对快速的隆升时间, 此时山体已隆升到现今的高度, 之后以平稳剥蚀为主。空间上表现为从南向北和自中间向两侧的隆升趋势, 山体隆升主要与印度板块向亚欧板块俯冲碰撞有关。

2)古近纪山体的隆升剥露在阿尔金地区具有普遍性和区域性,但新近纪的构造事件仅仅表现在阿尔金主断裂旁侧和NE向山体上,阿尔金北缘EW向的山脉处于平静期,总体上与青藏高原及周边地区地质事件具有一定的耦合性。

参考文献:

- 陈柏林,蒋荣宝,李丽,陈正乐,祁万修,刘荣,崔玲玲,王世新. 2009. 阿尔金山东段喀腊大湾地区铁矿带的发现及其意义[J]. 地球学报, 30(2): 143-154.
- 陈文寄,计凤桔,王非. 1999. 年轻地质体系的年代测定(续)——新方法、新进展[M]. 北京: 地震出版社.
- 陈正乐,宫红良,李丽,王小凤,陈柏林,陈宣华. 2006a. 阿尔金山脉新生代隆升-剥露过程[J]. 地学前缘, 13(4): 91-102.
- 陈正乐,李丽,刘健,宫红良,蒋荣宝,李胜祥,郑恩玖,韩效忠,李细根,王成,王国荣,王果,鲁克改. 2008. 西天山隆升-剥露过程初步研究[J]. 岩石学报, 24(4): 625-636.
- 陈正乐,刘健,孙知明,王小凤,裴军令,宫红良. 2005. 阿尔金山脉新生代剥露历史——前陆盆地沉积记录[J]. 地质通报, 24(4): 302-308.
- 陈正乐,万景林,刘健,李胜祥,郑恩玖,韩效忠,李细根,宫红良. 2006b. 西天山山脉多期次隆升-剥露的裂变径迹证据[J]. 地球学报, 27(2): 97-106.
- 陈正乐,万景林,王小凤,陈宣华,潘锦华. 2002. 阿尔金断裂带8 Ma左右的快速走滑及其地质意义[J]. 地球学报, 23(4): 295-300.
- 陈正乐,张岳桥,王小凤,陈宣华. 2001. 新生代阿尔金山脉隆升历史的裂变径迹证据[J]. 地球学报, 22(5): 413-418.
- 付明希. 2003. 磷灰石裂变径迹退火动力学模型研究进展综述[J]. 地球物理学进展, 18(4): 650-655.
- 葛肖虹,刘永江,任收麦. 2002. 青藏高原隆升动力学与阿尔金断裂[J]. 中国地质, 29(4): 346-350.
- 郝瑞祥,陈柏林,陈正乐,王永,李松彬,韩凤彬,周永贵. 2013. 新疆阿尔金山喀腊大湾地区玄武岩的地球化学特征及地质意义[J]. 地球学报, 34(3): 307-317.
- 康铁笙,王世成. 1991. 地质热历史研究的裂变径迹法[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘永江,NEUBAUER F,葛肖虹,GENSER J,袁四化,李伟民,龚庆林,陈元忠. 2007. 阿尔金断裂带年代学和阿尔金山隆升[J]. 地质科学, 42(1): 134-146.
- 柳振江,王建平,郑德文,刘家军,刘俊,付超. 2010. 胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据[J]. 岩石学报, 26(12): 3597-3611.
- 万景林,王瑜,李齐,王非,王二七. 2001. 阿尔金山北段晚新生代山体抬升的裂变径迹证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 222-224.
- 王瑜,万景林,李齐,王非,王二七. 2002. 阿尔金山北段阿克塞——当金山口一带新生代山体抬升和剥蚀的裂变径迹证据[J]. 地质学报, 76(2): 191-198.
- 向树元,马新民,泽仁扎西,巴桑次仁. 2007. 嘉黎断裂带两侧晚新生代差异隆升的磷灰石裂变径迹纪录[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 32(5): 615-121.
- 袁万明,董金泉,汤云晖,保增宽. 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.
- 张建新,许志琴,杨经绥,张泽明,崔军文. 2001. 阿尔金西段榴辉岩岩石学、地球化学和同位素年代学及其构造意义[J]. 地质学报, 75(2): 186-197.
- 朱文斌,张志勇,舒良树,万景林,卢华夏,王胜利,杨伟,苏金宝. 2007. 塔里木北缘前寒武基底隆升剥露史: 来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. 岩石学报, 23(7): 1671-1682.
- References:**
- CHEN Bai-lin, JIANG Rong-bao, LI Li, CHEN Zheng-le, QI Wang-xiu, LIU Rong, CUI Ling-ling, WANG Shi-xin. 2009. Discovery of iron ore zones in the Kaladawan area within the eastern part of the Altun mountains and its significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(2): 143-154(in Chinese with English abstract).
- CHEN Wen-ji, JI Feng-ju, WANG Fei. 1999. Dating the new geological system (continue): new method and progress[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- CHEN Y, GILDER S, HALIM N, COGNE J P, COURTILLOT V. 2002. New paleomagnetic constraints on central Asian kinematics: Displacement along the Altyn Tagh fault and rotation of the Qaidam Basin[J]. Tectonics, 21(5): 1042-1060.
- CHEN Zheng-le, GONG Hong-liang, LI Li, WANG Xiao-feng, CHEN Bai-Lin, CHEN Xuan-hua. 2006a. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh mountains[J]. Earth Science Frontiers, 13(4): 91-102 (in Chinese with English abstract).
- CHEN Zheng-le, LI Li, LIU Jian, GONG Hong-liang, JANG Rong-bao, LI Sheng-xiang, ZHENG En-jiu, HAN Xiao-zhong, LI Xi-gen, WANG Cheng, WANG Guo-rong, WANG Guo, LU Ke-gai. 2008. Preliminary study on the uplifting-exhumation process of the western Tianshan range,northwestern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(4): 625-636(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zheng-le, LIU Jian, SUN Zhi-ming, WANG Xiao-feng, PEI Jun-ling, GONG Hong-liang. 2005. Cenozoic erosional history of the Altyn Tagh Mountains inferred from the sedimentary record of the foreland basin[J]. Regional Geology of China, 24(4): 302-308(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zheng-le, WAN Jing-lin, CHEN Xuan-hua, PAN Jing-hua. 2002. Rapid Strike-slip of the Altyn Tagh Fault at 8 Ma and Its Geological Implications[J]. Acta Geoscientia Sinica, 23(4): 295-300(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zheng-le, WAN Jing-lin, LIU Jian, LI Sheng-xiang, ZHEN En-jiu, HAN Xiao-zhong, LI Xi-geng, GONG Hong-liang. 2006b. Multi-stage uplift and exhumation of the west Tianshan Mountain: Evidence from the apatite fission-track dating[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(2): 97-106(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zheng-le, ZHANG Yue-qiao, WANG Xiao-feng, CHEN Xuan-hua. 2001. Fission Track Dating of Apatite Constrains on the Cenozoic Uplift of the Altyn Tagh Mountain[J]. Acta Geoscientia Sinica, 22(5): 413-418(in Chinese with English abstract).
- FU Ming-xi. 2003. Review on the model of the apatite fission track annealing kinetics[J]. Progress in Geophysics, 18(4): 650-655(in Chinese with English abstract).
- GE Xiao-hong, LIU Yong-jiang, REN Shou-mai. 2002. Uplift dynamics of the Qinghai-Tibet Plateau and Altun fault[J]. Chinese Geology, 29(4): 346-350(in Chinese with English abstract).

- GLEADOW A J W, DUDDY I R, GREEN P F, LOVERING J F. 1986. Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 94(4): 405-415.
- GLEADOW A J W, DUDDY I R. 1981. A natural long-term track annealing experiment for apatite[J]. Nuclear Tracks, 5(1-2): 169-174.
- HAO Rui-xiang, CHEN Bai-lin, CHEN Zheng-le, WANG Yong, LI Song-bin, HAN Feng-bin, ZHOU Yong-gui. 2013. Geochemical characteristics of basalts from Kaladawan in east Altun Mountains of Xinjiang and their implications[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(3): 307-317(in Chinese with English abstract).
- HURFORD A J, GREEN P F. 1983. The zeta age calibration of fission-track dating[J]. Chemical Geology, 41:285-317.
- JING G R, WANG S C, KANG T S. 1993. Thermal history significance of apatite fission track length distributions and ages[J]. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 22(1-4): 783-784.
- JOLIVET M, BRUNEL M, SEWARD D, XU Z, YANG J, ROGER F, TAPPONNIER P, MALAVIEILLE J, ARNAUD N, WU C. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan Plateau: Fission-track constraints[J]. Tectonophysics, 343: 111-134.
- JOLIVET M, ROGER F, ARNAUD N, BRUNEL M, TAPPONNIER P, SEWARD D. 1999. Exhumation history of the Altun Shan with evidence for the timing of the subduction of the Tarim block beneath the Altyn Tagh system, North Tibet[J]. Earth and Planetary Science, 329: 749-755.
- KANG Tie-sheng, WANG Shi-cheng. 1991. Geological thermal fission track method of historical research[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- KETCHAM R A, DONELICK R A, CARLSON W D. 1999. Variability of apatite fission track annealing Kinetics : Extrapolation to geological time scales[J]. American Mineralogist, 84: 1235-1255.
- LIU Yong-jiang, NEUBAUER F, GE Xiao-hong, GENSER J, YUAN Si-hua, LI Wei-min, GONG Qing-lin, CHEN Yuan-zhong. 2007. Geochronology of the Altun Fault zone and rising of the Altun mountains[J]. Chinese Journal of Geology, 42(1): 134-146(in Chinese with English abstract).
- LIU Zheng-jiang, WANG Jian-ping, ZHENG De-wen, LIU Jia-jun, LIU Jun, FU Chao. 2010. Exploration prospect and post-ore denudation in the northwestern Jiaodong Gold Province, China: Evidence from apatite fission track thermochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(12): 3597-3611(in Chinese with English abstract).
- RITTS B D, YUE Y J, GRAHAM S A. 2004. Oligocene-Miocene Tectonics and Sedimentation along the Altyn Tagh Fault, Northern Tibetan Plateau: Analysis of the Xorkol, Subei, and Aksay Basins[J]. The Journal of Geology, 112: 207-229.
- SOBEL E R, DUMITRU T A. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India-Asia collision[J]. Journal of Geophysical Research, 102(B3): 5043-5063.
- SUN J M, ZHU R X, AN Z S. 2005. Tectonic uplift in the northern Tibetan Plateau since 13.7 Ma ago inferred from molasse deposits along the Altyn Tagh Fault[J]. Earth and Planetary Science Letters, 235: 641-653.
- WAN Jing-lin, WANG Yu, LI Qi, WANG Fei, WANG Er-qi. 2001. FT Evidence of Northern Altyn Uplift in Late-Cenozoic[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 20(4): 222-224(in Chinese with English abstract).
- WANG E, WAN J L, LIU J Q. 2003. Late Cenozoic geological evolution of the foreland basin bordering the West Kunlun range in Pulu area: Constraints on timing of uplift of northern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 108(B8): 2401-2413.
- WANG E, XU F Y, ZHOU X J, WAN J L, BURCHFIELD B C. 2006. Eastward migration of the Qaidam basin and its implications for Cenozoic evolution of the Altyn Tagh fault and associated river systems[J]. GSA Bulletin, 118(3-4): 349-365.
- WANG E. 1997. Displacement and timing along the northern strand of the Altyn Tagh fault zone, Northern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 150:55-64.
- WANG Yu, WAN Jing-lin, LI Qi, WANG Fei, WANG Er-qi. 2002. Fission-track Evidence for the Cenozoic Uplift and Erosion of the Northern Segment of the Altyn Tagh Fault Zone at the Aksay-Dangjin Pass[J]. Acta Geologica Sinica, 76(2): 191-198(in Chinese with English abstract).
- WU L, XIAO A C, WANG L Q, MAO L G, WANG L, DONG Y P, XU B. 2012. EW-trending uplifts along the southern side of the central segment of the Altyn Tagh Fault, NW China: Insight into the rising mechanism of the Altyn Mountain during the Cenozoic[J]. Science China: Earth Sciences, 55(6): 926-939.
- XIANG Shu-yuan, MA Xin-min, ZEREN Zha-xi, BASANG Ci-ren. 2007. Record of Apatite Fission Track of the Differential Uplift in Both Sides of Jiali Fault Belt since Late Cenozoic[J]. Journal of China University of Geosciences (Earth Science), 32(5): 615-621(in Chinese with English abstract).
- YUAN W M, DONG J Q, TANG Yun-hui, BAO Zeng-kuan. 2004. Thermal history of the tereketi batholith in Altay mountains, northern Xinjiang: evidence from apatite fission track analysis[J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(2): 199-204(in Chinese with English abstract).
- YUAN W M, DONG J Q, WANG S C, ANDREW C. 2006. Apatite fission track evidence for Neogene uplift in the eastern Kunlun Mountains, northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 27: 847-856.
- YUE Y J, RITTS B D, GRAHAM S A, WOODEN J L, GEHRELS G E, ZHANG Z C. 2004. Slowing extrusion tectonics: lowered estimate of post-Early Miocene slip rate for the Altyn Tagh fault[J]. Earth and Planetary Science Letters, 217(1-2): 111-122.
- ZHANG Jian-xin, XU Zhi-qin, YANG Jing-sui, ZHANG Ze-ming, CUI Jun-wei. 2001. Petrology, Geochemistry and Geochronology of Eclogites from the Western Segment of the Altun Tectonic Belt, Northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 75(2): 186-197(in Chinese with English abstract).
- ZHU Wen-bin, ZHANG Zhi-yong, SHU Liang-shu, WANG Jing-lin, LU Hua-fu, WANG Sheng-li, YANG Wei, SU Jin-bao. 2007. Uplift and exhumation history of the Precambrian basement, Northern Tarim: Evidence from apatite fission track data[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(7): 1671-1682(in Chinese with English abstract).