

# 新疆东天山红云滩地区构造-热演化探讨:来自 Ar-Ar 和 (U-Th)/He 热年代学的约束\*

孙敬博<sup>1</sup> 孙腾飞<sup>2</sup> 陈文<sup>1\*\*</sup> 喻顺<sup>1</sup> 尹继元<sup>1</sup> 李超<sup>3</sup> 张彦<sup>1</sup> 刘新宇<sup>1</sup>

SUN JingBo<sup>1</sup>, SUN TengFei<sup>2</sup>, CHEN Wen<sup>1\*\*</sup>, YU Shun<sup>1</sup>, YIN JiYuan<sup>1</sup>, LI Chao<sup>3</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup> and LIU XinYu<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室,大陆构造与动力学国家重点实验室,北京 100037

2. 长安大学地球科学与资源学院,西安 710054

3. 国家地质实验测试中心,北京 100037

1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Laboratory of Isotope Thermochronology, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China

2015-05-21 收稿, 2015-09-08 改回.

Sun JB, Sun TF, Chen W, Yu S, Yin JY, Li C, Zhang Y and Liu XY. 2015. Thermo-tectonic evolution history of Hongyuntan area, eastern Tianshan, Xinjiang: Constrained from Ar-Ar and (U-Th)/He dating. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (12): 3732 – 3742

**Abstract** Hongyuntan rock mass is located in the West Jueluotage area, eastern Tianshan Mountain, Xingjiang, NW China. Research on the thermal evolution history of this rock mass can provide important evidence for constraining the thermal history of the whole eastern Tianshan Mountain. This study reports new biotite Ar/Ar age, zircon and apatite (U-Th)/He ages of a same granodiorite sample from Hongyuntan rock mass, which, in conjunction with pre-existing zircon U-Pb age and inverse modeling simulations, constrain the thermal-tectonic history of Hongyuntan area. Biotite Ar-Ar dating yields a plateau age of  $316.9 \pm 1.8$  Ma. Zircon and apatite (U-Th)/He dating yield weighted mean ages of  $213.7 \pm 9.6$  Ma and  $65.5 \pm 1.3$  Ma, respectively. Three fast cooling stages can be deduced by thermochronology data and inverse model simulation: Late Carboniferous epoch-Early Permian epoch (ca. 330 ~ 296 Ma), Late Triassic epoch (222 ~ 220 Ma) and Late Cretaceous epoch (91 ~ 77 Ma). It is indicated that the first fast cooling stage was caused by conductive cooling after emplacement and uplift cooling company with Tianshan orogeny. Late Triassic and Late Cretaceous epoch fast cooling were related to the uplift of eastern Tianshan, which were caused by far-field effects of Qiangtang-Eurasia collision and Kohistan-Dras-Lhasa collision, respectively. Low-temperature thermochronology results indicate that Aqishan-Yamansu area, where Hongyuntan rock mass located in, was stable during Cenozoic. This is a significant different with the Cenozoic tectonic evolution of the western Tianshan.

**Key words** Thermal evolution history; Hongyuntan intrusive rocks; Ar-Ar dating; (U-Th)/He dating; Eastern Tianshan

**摘要** 红云滩岩体位于东天山觉罗塔格西部,对其进行热演化历史研究对于揭示觉罗塔格地区乃至整个东天山地区的构造-热演化历史具有重要意义。本文对红云滩岩体进行黑云母 Ar-Ar、锆石 (U-Th)/He 和磷灰石 (U-Th)/He 测年,并结合前人的锆石 U-Pb 测年结果,精细刻画该岩体自形成以后经历的热演化过程,并据此识别出东天山红云滩地区发生过多期快速抬升冷却事件。黑云母阶段升温 Ar-Ar 法同位素定年得到的坪年龄为  $316.9 \pm 1.8$  Ma,单颗粒锆石和磷灰石 (U-Th)/He 同位素定年得到的平均年龄分别为  $213.7 \pm 9.6$  Ma 和  $65.5 \pm 1.3$  Ma。热年代学数据及模拟结果表明东天山红云滩地区自晚古生代以来经历了 3 个快速冷却阶段,分别为:晚石炭世至早二叠世 (ca. 330 ~ 296 Ma)、晚三叠世 (222 ~ 220 Ma)、晚白垩世 (91 ~

\* 本文受国家自然科学基金项目(41473053、41403046)、地质矿产调查评价项目(12120113015600)、国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201511064-2)和中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(J1525)联合资助。

第一作者简介:孙敬博,男,1987年生,硕士,地球化学专业,E-mail: jingbo95003@126.com

\*\* 通讯作者:陈文,男,1962年生,研究员,博士生导师,从事同位素地质年代学研究,E-mail: chenwenf@vip.sina.com

77Ma)。其中,晚石炭世至早二叠世的快速冷却作用是岩体侵位后与围岩热传导冷却及伴随天山造山隆升冷却综合作用的结果,晚三叠世和晚白垩世的两期快速冷却事件分别与羌塘-欧亚板块、Kohistan-Dras 岛弧-拉萨地块碰撞的远程效应造成的东天山地区隆升作用有关。新生代以来,红云滩岩体所在的阿奇山-雅满苏地区构造活动相对较弱,未发生较为明显的隆升作用,与天山西段新生代的构造活动有着明显的差异。

**关键词** 热演化历史;红云滩岩体;Ar-Ar 测年;(U-Th)/He 测年;东天山

**中图分类号** P597.3

天山山脉位于中国西部和中亚地区,总体上近东西向延伸,绵延 2500 多千米。与昆仑山-阿尔泰山和准噶尔盆地、塔里木盆地构成了“三山夹两盆”的构造地貌格局。天山造山带初始形成是由古生代的俯冲和碰撞作用导致(Allen *et al.*, 1993; Charvet *et al.*, 2007, 2011; Xiao *et al.*, 2009; 马瑞士等, 1997),并在此之后经历了多次构造活动最终形成现今天山的构造形态(Bullen *et al.*, 2001; Hendrix *et al.*, 1994; Li *et al.*, 2014; 舒良树等, 2004)。

前人对天山山脉天山造山带基本格架形成后的隆升剥蚀历史研究,已做过大量工作,积累了丰富的研究成果。舒良树等(2004)通过盆山演化特点认为天山二叠纪发生过强烈隆升作用,在三叠纪遭受夷平作用,受印亚陆陆碰撞的影响,于新近纪以来发生逆冲推覆。根据不整合面的发育情况,有研究者认为天山在中生代经历了晚侏罗世-早白垩世的隆升作用和三叠纪-晚侏罗世、晚白垩世的夷平作用阶段(马瑞士等, 1993; 张良臣和吴乃元, 1985)。近年来,随着热年代学理论和技术的发展,有关天山地区隆升剥蚀历史的研究越来越多,主要涉及到的技术手段包括 Ar-Ar 测年、裂变径迹和 (U-Th)/He 测年等。热年代学的研究主要取得以下几方面的认识:中生代天山隆升作用发生于晚三叠世(De Grave *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014; 陈正乐等, 2006, 2008; 李锦轶等, 2000; 李向东等, 1998)和晚侏罗世-白垩纪(De Grave *et al.*, 2012; Dumitru *et al.*, 2001; Glorie *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014; 陈正乐等, 2008; 郭召杰等, 2006; 朱文斌等, 2004, 2007);新生代天山隆升剥蚀历史受关注程度更高,但仍然存在争议,其初始隆升时间存在以下几种观点:始新世(Yu *et al.*, 2014; 杜治利等, 2007),渐新世(Dumitru *et al.*, 2001; Hendrix *et al.*, 1994; Sobel and Dumitru, 1997; Yin *et al.*, 1998; 陈正乐等, 2006; 郭召杰等, 2006)和中新世(Bullen *et al.*, 2001; 沈传波等, 2006; 王彦斌等, 2001; 朱文斌等, 2006, 2007)。以上研究主要集中在天山中、西段和天山北段,争议的存在与研究区范围之广不无关系,但具体到东天山地区,相对较小的范围内也依然存在不一致的认识,高洪雷等(2014)、郭召杰等(2002)和刘红旭等(2014)认为东天山新生代以来处于稳定状态,其构造面貌基本继承了中生代的特征;袁万明等(2007)则认为东天山于 20Ma 以来发生了快速冷却作用。另外,前人所采用的热年代学手段以裂变径迹为主,用中高温至低温系统的热演化历史研究相对较少,同时也缺乏更低温度的限定。本文采用包括锆石和磷灰石(U-Th)/He、黑云母 Ar-Ar 等多种同位素测年体系对东天山觉罗塔格地区开展系统的隆升剥蚀历史研究,对于天山

局部地区和整个天山完整热演化历史及动力学机制探讨具有一定的指示意义。

## 1 地质背景

研究区阿奇山-雅满苏地区位于东天山觉罗塔格南缘,是东天山构造演化的重要单元,主要出露石炭系中酸性火山岩和侵入岩(图 1)。该地区构造背景目前还存在不同的认识,主要观点包括古生代时期形成的岛弧(Xiao *et al.*, 2004; 罗桂昌等, 1999; 苏春乾等, 2009; 吴昌志等, 2006)、早石炭世裂谷(秦克章等, 2002; 王京彬等, 2006; 肖序常等, 1992)等观点。其北部为康古尔塔格韧性剪切带,南部通过阿齐克库都克大断裂与中天山地块相隔。

阿奇山-雅满苏火山岩带内出露地层主要为下石炭统阿奇山组火山岩、雅满苏组火山碎屑岩、陆源碎屑和碳酸盐岩,上石炭统土古土布拉克组钙质砾岩、凝灰砂岩、安山质凝灰角砾岩和安山质沉凝灰岩(苏春乾等, 2009)。带内侵入岩极为发育,主要为华力西中-晚期花岗岩,自西向东依次出露有红云滩岩体、阿奇山岩体、百灵山岩体、雅满苏岩体等。本文所研究的红云滩岩体位于阿奇山-雅满苏地区西侧,吴昌志等(2006)已进行过构造背景的限定,认为其成因为洋壳俯冲所导致的下地壳物质部分熔融、岩浆分离结晶和上地壳同化混染作用的产物。

## 2 样品采集与测试分析

### 2.1 样品采集和岩石学特征

本研究样品采自东天山觉罗塔格地区红云滩岩体,采样位置位于红云滩铁矿东北方向约 3km,该地区地形呈舒缓波状,表面岩石发生破碎,所采集样品(样品号 TS1074)岩性为花岗闪长岩。红云滩岩体侵入于下石炭统雅满苏组海相火山-沉积岩系中,岩体近地表被风化部分为淡红褐色,较深部未被风化部分呈灰白色。

花岗闪长岩为灰色块状,花岗结构(图 2a, b)。主要成分为斜长石(20% ~ 50%)、钾长石(15% ~ 30%)、石英(30%左右)和黑云母(3%)。斜长石主呈半自形板状,0.4 ~ 1.2mm,不均匀绢云母化、黝帘石化,局部可见环带构造,少量与钾长石接触处见交代蠕虫结构,可见聚片双晶;钾长石呈半自形板状-他形粒状,0.5 ~ 2mm,具高岭土化,局部粒内嵌布少量半自形板状斜长石和他形粒状石英;石英他形粒

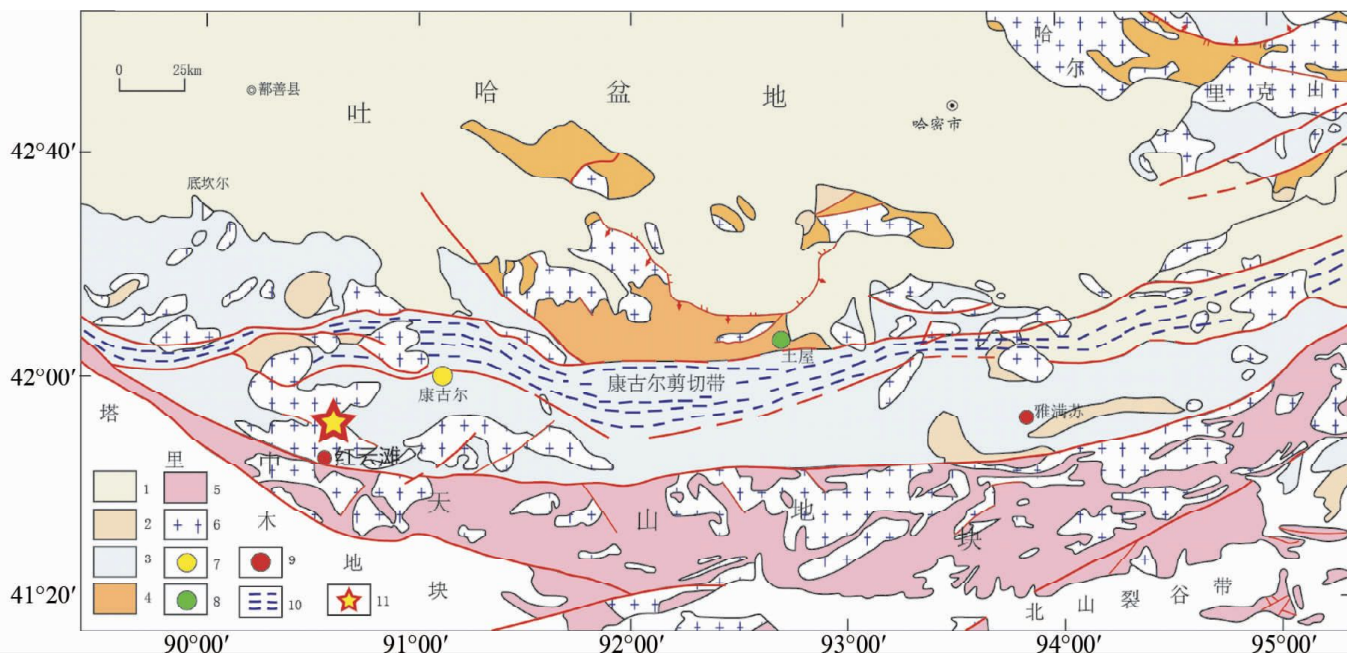


图1 东天山构造格架地质简图(据王京彬等, 2006 修改)

1-中生代沉积盖层;2-二叠纪陆相火山-沉积岩系;3-石炭纪火山-沉积岩系;4-奥陶-泥盆纪火山-沉积岩系;5-变质岩;6-花岗岩类;7-金矿床;8-铜矿床;9-铁矿床;10-剪切带;11-采样位置

Fig. 1 Tectonic framework and geological sketch map of eastern Tianshan (modified after Wang *et al.*, 2006)

1-Meso-Cenozoic sedimentary cover; 2-Permian continental volcanic-sedimentary rocks; 3-Carboniferous volcanic-sedimentary rocks; 4-Ordovician-Devonian volcanic-sedimentary rocks; 5-metamorphic rocks; 6-granitoids; 7-Au deposit; 8-Cu deposit; 9-Fe deposit; 10-shear zone; 11-sampling location

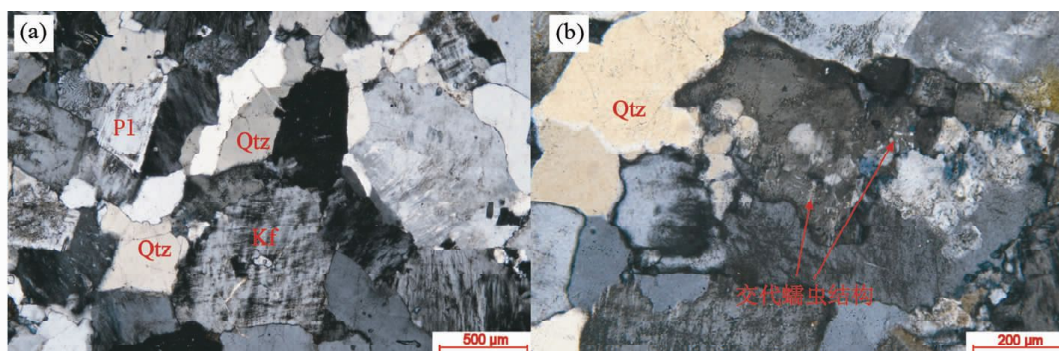


图2 红云滩岩体花岗闪长岩显微照片

Pl-斜长石;Kf-钾长石;Qtz-石英

Fig. 2 Microphotographs of the Hongyuntan granodiorite

Pl-plagioclase; Kf-K-feldspar; Qtz-quartz

状, 0.2 ~ 1.5mm, 单晶或集合体填隙状分布于长石粒间, 局部粒内波状消光; 黑云母呈鳞片状、叶片状, 片径 0.2 ~ 1.2mm, 似堆状分布, 多绿泥石化, 呈假象, 局部残留处多色性较明显;  $Ng'$  = 棕褐色,  $Np'$  = 浅黄色; 见不透明矿物呈半自形粒状, 大小 0.05 ~ 0.2mm, 零星分布。副矿物为磷灰石、褐帘石和不透明矿物。

## 2.2 样品分析

用于测试的黑云母、锆石和磷灰石均来自花岗闪长岩, 单矿物由岩石直接粉碎并进行过筛、磁选和重液分选得到。

黑云母 Ar-Ar 同位素定年分析在中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室完成。进行 Ar-Ar 分析的黑

云母单矿物(纯度 > 99%)用超声波清洗。清洗后的样品被封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射。照射工作是在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行的, 使用 H4 孔道, 中子流密度约为  $2.60 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ S}^{-1}$ 。照射总时间为 1440min, 积分中子通量为  $2.25 \times 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; 同期接受中子照射的还有用做监控样的标准样: ZBH-25 黑云母标样, 其标准年龄为  $132.7 \pm 1.2 \text{ Ma}$ , K 含量为 7.6%。样品的阶段升温加热使用石墨炉, 每阶段加热 10min, 净化 30min。质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行的, 每个峰值均采集 20 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过

表 1 红云滩花岗闪长岩黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 阶段升温加热分析数据Table 1 The results of <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar stepwise heating dating of biotite for Hongyuntan granodiorite

T(°C)	$\left(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{36}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{37}\text{Ar}_o}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	$\left(\frac{^{38}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}\right)_m$	F	<sup>39</sup> Ar (10 <sup>-14</sup> mol)	<sup>39</sup> Ar(累积) (%)	年龄 (Ma)	±1σ (Ma)
TS1074 黑云母, Step = 14, W = 32.54mg, J = 0.004514									
700	68.0473	0.2084	0.2299	0.0559	6.4841	0.22	1.44	52.0	3.2
760	39.6361	0.0326	0.1003	0.0209	30.0134	0.91	7.34	229.2	2.2
820	44.7475	0.0093	0.0223	0.0148	42.0045	1.80	18.98	313.2	2.9
860	43.5324	0.0047	0.0122	0.0140	42.1406	1.68	29.84	314.1	2.9
900	43.2271	0.0030	0.0099	0.0136	42.3503	1.42	39.00	315.6	2.9
940	43.7325	0.0025	0.0179	0.0134	42.9779	1.02	45.59	319.9	3.0
990	44.2412	0.0062	0.0238	0.0135	42.3993	0.87	51.20	315.9	3.1
1040	44.6717	0.0061	0.0558	0.0139	42.8802	1.04	57.90	319.2	3.0
1090	43.9172	0.0037	0.0609	0.0130	42.8162	1.50	67.56	318.8	2.9
1140	43.2378	0.0013	0.0839	0.0129	42.8543	3.03	87.18	319.0	2.9
1180	42.7522	0.0011	0.3652	0.0126	42.4541	1.43	96.39	316.3	2.9
1240	43.3260	0.0024	0.5454	0.0149	42.6649	0.47	99.44	317.7	2.9
1320	51.9405	0.0323	0.2036	0.0154	42.4157	0.07	99.91	316.0	5.6
1400	147.3068	0.3475	0.3958	0.1317	44.6668	0.01	100.00	331	57
$t_T = 307.9\text{Ma}$ ; $t_P = 316.9 \pm 1.8\text{Ma}$ ; $t_i = 317.3 \pm 3.8\text{Ma}$ , MSWD = 0.51									

注:表中下标 m 代表质谱测定的同位素比值;F = <sup>40</sup>Ar\* / <sup>39</sup>Ar 指放射性成因<sup>40</sup>Ar 和<sup>39</sup>Ar 比值;<sup>37</sup>Ar<sub>o</sub> 为经过放射性衰变校正的<sup>37</sup>Ar;Step 为 Ar-Ar 阶段升温的阶段数;W 为样品质量;t<sub>T</sub> 为总气体年龄;t<sub>P</sub> 为坪年龄;t<sub>i</sub> 为等时线年龄. Ar-Ar 同位素定年分析在中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室完成

分析照射过的 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 CaF<sub>2</sub> 来获得,其值为:(<sup>36</sup>Ar/<sup>37</sup>Ar<sub>o</sub>)<sub>Ca</sub> = 0.0002389, (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar)<sub>K</sub> = 0.004782, (<sup>39</sup>Ar/<sup>37</sup>Ar<sub>o</sub>)<sub>Ca</sub> = 0.000806.<sup>37</sup>Ar 经过放射性衰变校正;<sup>40</sup>K 衰变常数 λ = 5.543 × 10<sup>-10</sup> y<sup>-1</sup>;用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线(Ludwig, 2001)。坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见有关文章(陈文等, 2011, 2006; 张彦等, 2006)。

磷灰石(U-Th)/He 测年在中国地质科学院地质研究所同位素热年代学实验室完成,锆石(U-Th)/He 测年在科廷大学 JDLCMS 实验室(John De Laeter Center for Isotope Research)完成。从岩石样品中分选出的锆石和磷灰石单矿物放在双目体式镜下进行进一步挑选,选择晶形较好的晶体,并尽量排除含包裹体的颗粒;晶体尺寸在镜下通过刻度尺测量,并根据测量结果计算 α 校正系数(F<sub>T</sub>; Farley *et al.*, 1996)。晶体测量后拍摄镜下照片并装入铈囊(锆石)和铂囊(磷灰石)中。样品的氦气通过二极管激光器加热提取,用四极杆质谱测定<sup>4</sup>He/<sup>3</sup>He 值,样品中的<sup>4</sup>He 含量最终通过同位素稀释法测定而来。样品<sup>4</sup>He 的测量不确定度小于 1%。样品<sup>4</sup>He 含量分析之后,将其进行化学溶解并通过电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析 U、Th 含量。铂囊中的磷灰石样品加入 25μL 含 50% HNO<sub>3</sub> 的稀释剂,稀释剂中<sup>235</sup>U 为 15 × 10<sup>-9</sup>,<sup>230</sup>Th 为 5 × 10<sup>-9</sup>;标准溶液中加入等体积同种稀释剂并加入 25μL 含 25 × 10<sup>-9</sup> 的 U 和 25 × 10<sup>-9</sup> 的 Th 标准试剂。磷灰石样品加入试剂后静置 12h 左右使磷灰石充分溶解。锆石的化学溶解需要在高压密封溶样器(Parr)中经历多次消解。第一次消解时样品中加入 25μL 含 15 × 10<sup>-9</sup> 的<sup>235</sup>U 和

15 × 10<sup>-9</sup> 的<sup>230</sup>Th 的稀释剂和 350μL HF;标准溶液中加入等体积同种稀释剂并加入 25μL 含 77 × 10<sup>-9</sup> U 和 77 × 10<sup>-9</sup> Th 的标准试剂;消解在 240°C 条件下持续 40h。消解过的溶液蒸干后加入 300μL HCl 进行第二次消解处理,在 200°C 的条件下持续 24h。磷灰石和锆石样品的 U、Th 元素质谱分析所用仪器均为电感耦合等离子质谱(ICP-MS),U 和 Th 同位素比值分析不确定度小于 2%(Evans *et al.*, 2005)。

### 3 分析结果与模拟

#### 3.1 Ar-Ar 年龄

样品的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素测年分析结果列于表 1,相应的坪年龄和反等时线年龄分别见图 3 和图 4。

计算得到样品总气体年龄为 307.9Ma。从图 3 中可以看出,820 ~ 1400°C 总共 12 个温度阶段组成了一个很好的年龄谱,坪年龄( $t_P$ ) = 316.9 ± 1.8Ma,对应了 92.7% 的<sup>39</sup>Ar 释放量。相应的<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar-<sup>36</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 反等时线年龄( $t_i$ ) = 317.1 ± 3.9Ma,<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 初始比值 = 238 ± 79 (MSWD = 39) (图 4)。坪年龄和反等时线年龄在误差范围内完全一致。316.9 ± 1.8Ma 的 Ar-Ar 坪年龄代表了黑云母冷却降温至 Ar-Ar 同位素体系封闭温度时的年龄。

#### 3.2 (U-Th)/He 年龄

锆石和磷灰石单颗粒的(U-Th)/He 同位素测年分析结果列于表 2。锆石显微照片见图 5a,晶体自形-半自形结构,



表2 红云滩花岗闪长岩锆石和磷灰石(U-Th)/He 同位素年龄

Table 2 Zircon and apatite (U-Th)/He ages for Hongyuntan granodiorite

测点号	U ( $\times 10^{-6}$ )	1 $\sigma$	Th ( $\times 10^{-6}$ )	1 $\sigma$	Th/U	He (ncc)	He 误差 (%)	未校正年龄 (Ma)	F <sub>T</sub>	校正年龄 (Ma)	1 $\sigma$
锆石											
TS1074-1	854	26	857	39	1.0	26.2	2.5	146.9	0.67	220.1	10.3
TS1074-2	966	30	585	27	0.61	41.3	2.5	149.3	0.71	210.2	8.9
TS1074-3	2073	65	1614	74	0.78	54.5	2.5	144.7	0.66	219.6	10.5
TS1074-4	826	26	545	25	0.66	59.6	2.5	155.3	0.76	204.8	8.7
磷灰石											
TS1074-1	2.13	0.09	41.3	1.70	20.0	0.02	2.70	31.0	0.44	70.6	1.4
TS1074-2	2.78	0.11	23.3	1.00	8.7	0.02	2.69	28.0	0.46	60.3	1.2
TS1074-3	50.6	2.10	334	14.0	6.8	2.80	2.50	268.4	0.48	564.9	10.5

注: F<sub>T</sub> 代表  $\alpha$  校正系数; 校正年龄 = 未校正年龄/F<sub>T</sub>

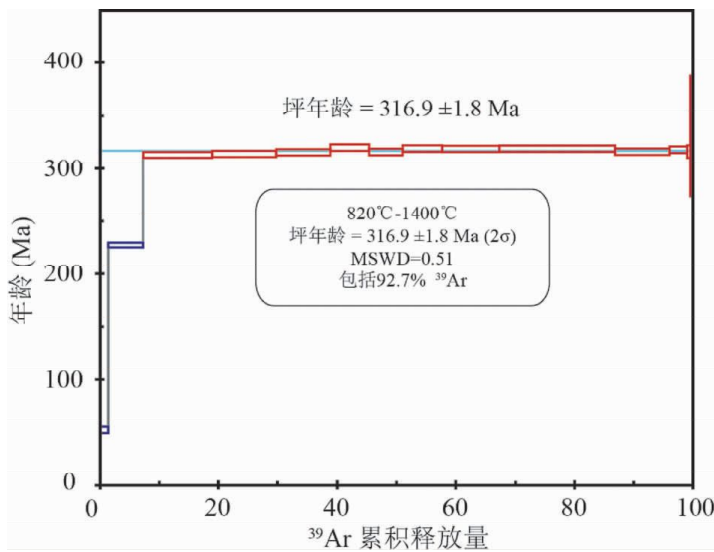


图3 红云滩花岗闪长岩黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 阶段升温年龄谱图

Fig. 3 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar age spectrum of biotite from Hongyuntan granodiorite

粒度均在 60 $\mu$ m 以上, 未见包裹体和裂缝, 局部有蠕虫状蚀痕。4 颗锆石的 (U-Th)/He 年龄在 204.8  $\pm$  8.7Ma 到 220.1  $\pm$  10.3Ma 之间, 并在误差范围内完全一致, 平均年龄为 213.7  $\pm$  9.6Ma。4 个锆石颗粒并未出现由于辐射损伤或存在包裹体、裂隙等因素导致的年龄分散现象, 说明样品质量较好, 所记录的热演化信息准确性较高。磷灰石显微照片见图 5b, 晶体自形-半自形结构, 但整体粒度较小, TS1074-1 和 TS1074-2 透明度较好, TS1074-3 透明度稍差。3 颗磷灰石 (U-Th)/He 年龄分别为 70.6  $\pm$  1.4Ma、60.3  $\pm$  1.2Ma、564.9  $\pm$  10.5Ma。数据显示, TS1074-3 颗粒的 (U-Th)/He 年龄明显偏老, 颗粒尺寸与另外 2 颗基本一致, 但 He 含量高出两个数量级。该颗粒晶体为六方柱形态, 并呈现一定程度的磨蚀, 说明该颗粒是磷灰石, 可排除疑似锆石造成的混淆。He 含量异常高的原因可能是单矿物颗粒内部存在富含 U、Th 元素的包裹体, 这些包裹体通常为锆石或独居石等晶体, 在地

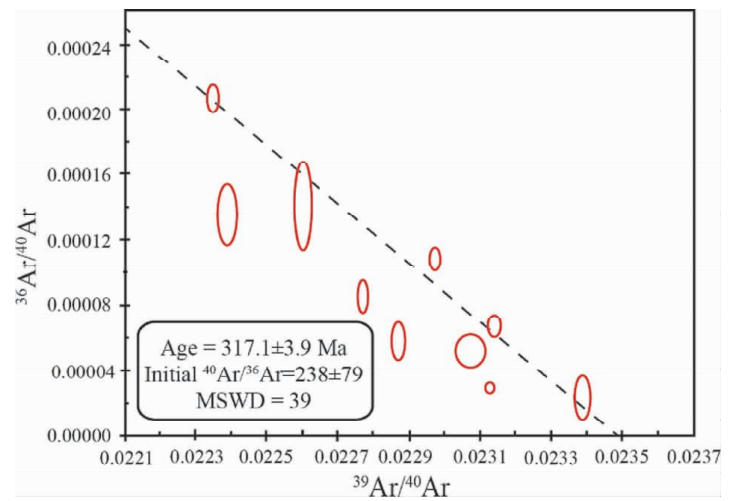


图4 红云滩花岗闪长岩黑云母<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar-<sup>36</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 反等时线图

Fig. 4 <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar-<sup>36</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar inverse isochron of biotite from Hongyuntan granodiorite

质演化过程中释放了大量的 He, 并在加热取气过程中释放出来, 但在磷灰石样品溶解过程中这些晶体无法溶于硝酸, U、Th 元素不能进入到溶液中, 从而导致子体元素偏高, 使磷灰石 (U-Th)/He 年龄偏老。磷灰石样品 TS1074-1 和 TS1074-2 二者年龄较为接近, 取其平均年龄 65.5  $\pm$  1.3Ma 进行计算和模拟。

### 3.3 模拟

(U-Th)/He 同位素定年体系中, 当体系达到封闭温度以后, <sup>4</sup>He 由 U 和 Th 经过  $\alpha$  衰变而不断积累, 产生的 <sup>4</sup>He 保存在矿物中, 部分由于扩散而少量丢失, 有研究表明 <sup>4</sup>He 的扩散受辐射损伤影响较大 (Flowers, 2009; Shuster *et al.*, 2006); 当岩石在 He 半保留区间内 (30 ~ 70 $^{\circ}$ C) 停留较长时间 (> 10<sup>7</sup>y) 时, 晶体尺寸对 He 年龄将会产生最显著的影响 (Reiners and Farley, 2001); 由于 <sup>4</sup>He 在形成时所具有的初始动能导致其在矿物内部需要运移约 20 $\mu$ m 才能停止, 从而导

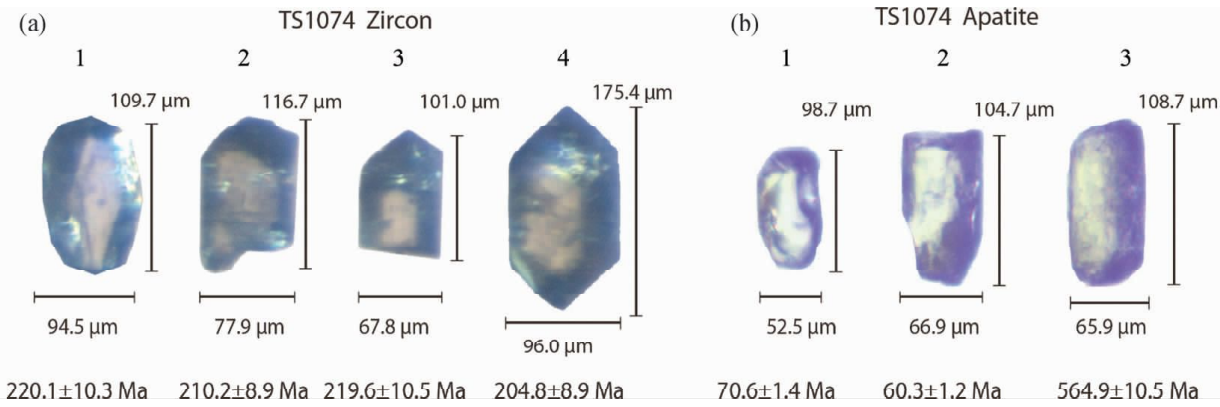


图5 红云滩花岗闪长岩锆石(a)和磷灰石(b)显微照片

Fig. 5 Microscopy images of zircon (a) and apatite (b) from Hongyuntan granodiorite

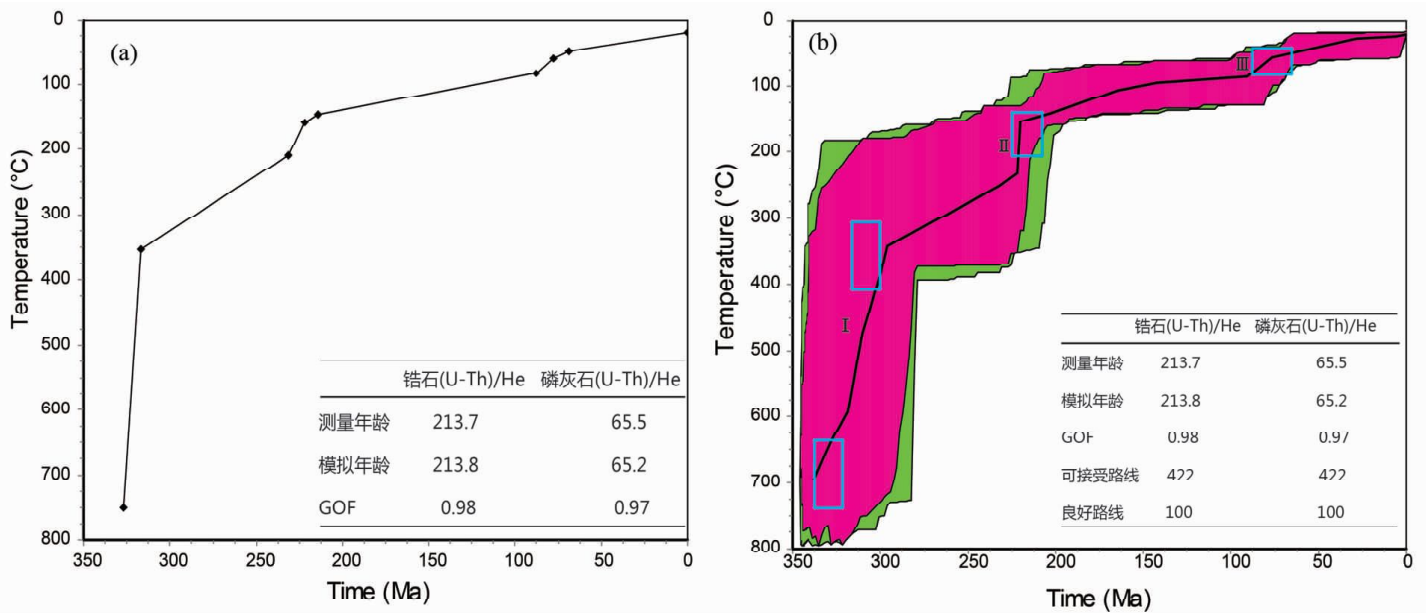


图6 红云滩岩体热历史正演(a)与反演(b)模拟结果

Fig. 6 Forward modeling results (a) and inverse modeling results (b) for thermal history of Hongyuntan intrusive rocks

致在晶体边缘生成的 $^4\text{He}$ 部分发生出射而丢失;另外,U、Th分带不均匀的情况下,若核部的U、Th元素浓度较边部偏高,进行正常 $\alpha$ 射出校正(Ft校正)会得到偏老的年龄(Fitzgerald *et al.*, 2006; Tagami *et al.*, 2003)。正因为(U-Th)/He测年体系受以上因素的影响,样品在同样初始的条件下如果经历不同的热演化过程,将得到不同的(U-Th)/He年龄结果。因此,样品的(U-Th)/He年龄代表的不仅仅是年龄值,还包含了样品所经历的时间-温度历史信息。揭示样品所经历的时间-温度历史,需要借助热年代学的反演技术,即根据已测定样品的年龄、颗粒有效半径等信息,假定样品初始的条件,结合蒙特卡罗等方法进行模拟。

本文采用HeFTy软件(Ketcham, 2005)对样品经历的时间-温度历史进行反演模拟。磷灰石采用Flowers *et al.* (2009)的辐射损伤积累和退火模型(RDAAM),锆石选择Reiners *et al.* (2004)的热扩散模型。反演条件以锆石U-Pb年龄(吴昌志等, 2006)和黑云母Ar-Ar年龄进行高-中温阶段演化时间限定,以锆石和磷灰石(U-Th)/He年龄进行低温

阶段演化时间限定。温度区间以各自体系的封闭温度区间为基础:锆石U-Pb选择 $750 \pm 50^\circ\text{C}$ ,黑云母Ar-Ar选择 $350 \pm 50^\circ\text{C}$ (Grove and Harrison, 1996; Harrison *et al.*, 1985; McDougall and Harrison, 1999),锆石(U-Th)/He选择 $170 \sim 196^\circ\text{C}$ (Reiners *et al.*, 2002, 2004, 2005),磷灰石(U-Th)/He选择 $70^\circ\text{C}$ (Farley, 2000; Wolf *et al.*, 1996)。为尽量减少限定区间对模拟造成人为干扰,所选取的限定区间均较宽,其中高温区间选择 $800 \sim 650^\circ\text{C}$ 、 $345 \sim 320\text{Ma}$ ;中温阶段选择 $400 \sim 260^\circ\text{C}$ 、 $320 \sim 280\text{Ma}$ ;低温阶段 $220 \sim 110^\circ\text{C}$ 、 $250 \sim 180\text{Ma}$ 和 $100 \sim 30^\circ\text{C}$ 、 $100 \sim 50\text{Ma}$ 。随机模拟100条较好的路径,选择其中“最优”的一条路径作为岩体热演化的时间-温度曲线。模拟结果见图6,图中绿色区域为可接受的热史曲线集(拟合度 $> 5\%$ ),红色的为较好的热史曲线集(拟合度 $> 50\%$ ),黑色粗线为最佳拟合曲线,浅蓝色矩形框从左下至右上分别为锆石U-Pb、黑云母Ar-Ar、锆石(U-Th)/He和磷灰石(U-Th)/He的年龄及其封闭温度范围。样品的年龄拟合度(GOF)大于0.95。

模拟结果显示红云滩岩体自岩浆固结以来经历了三期快速冷却阶段(图中罗马数字所示):I)岩体固结之后经历快速冷却,穿越黑云母 Ar-Ar 同位素体系所代表的年龄和封闭温度区间,该阶段从大约 330Ma 开始持续到 296Ma,温度从 700℃ 降至 340℃。冷却速率约为 10℃/Myr;II)晚三叠世快速冷却阶段,时间从 222Ma 持续到 220Ma,温度从 230℃ 降至 155℃。冷却速率约为 37℃/Myr,反映了一次极快速冷却事件;III)晚白垩世冷却阶段时间从 91Ma 到 77Ma,温度从 87℃ 降至 54℃,冷却速率约为 2.3℃/Myr。

## 4 讨论

本文得到的热年代学数据及其模拟结果显示东天山阿奇山-雅满苏地区存在晚石炭世-早二叠世、晚三叠世、晚白垩世三期快速冷却事件。该结果与前人的测试结果及地质事实均具有很好的一致性。

红云滩岩体位于东天山觉罗塔格南缘,形成于晚古生代觉罗塔格俯冲洋壳之上的火山弧环境,由锆石 U-Pb 限定其侵位时间为  $328.5 \pm 9.3$  Ma(吴昌志等, 2006)。岩体侵位时温度通常会高于围岩的温度,通过与围岩的热平衡作用而迅速冷却,此过程持续时间因岩体岩性、规模、侵入深度等条件不同而有差异,并尤以花岗岩体积规模影响较大(章邦桐等, 2013)。岩石学研究表明呈中粗粒全品质结构、具均匀块状构造等地质特征的花岗岩,其形成(侵位)时的埋深约为 6.5 ~ 13km(Hyndman, 1985),花岗岩在该深度位置处于传热效应明显的热传导层范围内,岩浆热量将主要通过围岩的热传导散失(章邦桐等, 2013)。假设红云滩岩体所在地区地温梯度为造山带正常水平 30℃/km(朱文斌等, 2007),地表温度选择 10℃(Hendrix *et al.*, 1994; Sobel and Dumitru, 1997),黑云母 Ar-Ar 体系封闭温度 350℃ 所代表的地下深度约为 11km,处于传导冷却的深度范围内,并且有研究表明,侵入体冷却至与围岩温度一致所需时间短可至 0.3Myr 以内(Fu *et al.*, 2010; Garwin, 2002; McInnes *et al.*, 2005)长可达十几个百万年(Dalrymple *et al.*, 1999; Hattori and Keith, 2001),推测黑云母 Ar-Ar 年龄代表了红云滩岩体自侵位后通过热传导冷却降温至  $350 \pm 50$ ℃ 时的时间。已有研究表明,天山造山带的形成发生在晚石炭世-早二叠世(Allen *et al.*, 1993; Charvet *et al.*, 2007, 2011; Dumitru *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 1998, 2011; Wang *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2009),红云滩岩体形成于洋壳俯冲阶段(吴昌志等, 2006),侵位之后伴随晚石炭世-早二叠世天山的造山作用持续发生隆升。本文反演模拟结果(阶段 I)显示,红云滩岩体自侵位之后的冷却作用持续到 296Ma,同样说明岩体在通过传导冷却至黑云母封闭温度之后,继续伴随天山的造山作用发生了隆升冷却。

根据锆石(U-Th)/He 年龄和反演模拟结果显示,红云滩岩体晚三叠世期间经历过一次极快速冷却阶段(阶段 II)。

有研究表明,天山中生代变形作用与不同陆块碰撞增生到亚洲板块南部边缘有关,其中包括晚三叠世(230 ~ 220Ma)羌塘地块的增生作用(Hendrix *et al.*, 1992)。近几年已发表的热演化数据揭示出在天山多个地区存在该期快速隆升剥蚀作用,包括西天山和准噶尔等地区(De Grave *et al.*, 2012; Dumitru *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2014; 陈正乐等, 2006, 2008),另外在天山东部地区发现存在三叠纪-侏罗纪的岩浆活动(Zhang *et al.*, 2005; 顾连兴等, 2006; 李华芹等, 2005)和断裂活动以及构造热事件等(李锦轶等, 2000; 李向东等, 1998),显示天山山脉在后碰撞地壳演化阶段经历了晚三叠世的一期重要构造热事件。本文锆石(U-Th)/He 实测年龄和模拟结果表明研究区所在的东天山阿奇山-雅满苏地区也存在晚三叠世快速隆升冷却事件,证明由羌塘-欧亚板块碰撞远程效应造成的该期快速隆升事件在天山地区广泛存在。

第 III 阶段的快速隆升作用发生于晚白垩世。刘红旭等(2014)和高洪雷等(2014)在阿奇山-雅满苏岛弧带内的阿奇山地区和东部雅满苏地区获得的不同岩性样品的磷灰石裂变径迹年龄在 82 ~ 51Ma 之间,与本文的数据结果完全一致,均表明该时期内存在一期快速隆升作用。朱文斌等(2004, 2007)通过裂变径迹测年证实东天山吐哈盆地和塔里木北缘前寒武基底在晚白垩世发生过构造抬升。邵磊等(1999)根据吐鲁番-哈密盆地白垩纪砂岩成熟度指数较低的特点证明吐哈盆地及周边地区在中生代晚期受燕山及喜山运动的影响构造活动性加强。除了天山东部地区之外,在西天山和准噶尔等地区,前人通过(U-Th)/He、裂变径迹等热年代学手段和沉积学特征研究发现白垩世的快速隆升冷却事件的存在(De Grave *et al.*, 2012; Dumitru *et al.*, 2001; Glorie *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014; 陈正乐等, 2006; 郭召杰等, 2005; 王彦斌等, 2001)。除了热年代学研究之外,此次隆升剥露事件对应的构造变形和角度不整合发现于天山及其周边不同地区,如塔里木盆地东部的车尔臣断裂在白垩纪再次活动(卢华复等, 2006),伊犁盆地南缘达拉低等地的钻孔资料显示上白垩统与下伏的中、下侏罗统之间为角度不整合接触(陈正乐等, 2008),张国伟等(1999)发现伊犁盆地白垩系沉积存在缺失,认为可能是由整个天山山脉在燕山运动末期强烈隆升所造成的。综合来看,晚白垩世的快速冷却事件在塔里木北缘、西天山、准噶尔盆地、东天山等地区均有记录。通过本文的磷灰石(U-Th)/He 年龄及其模拟结果说明,晚白垩世的快速冷却阶段在东天山阿奇山-雅满苏地区也有很明显的体现,表明该地区在此时期发生过快速隆升作用。吐哈盆地上白垩统与上覆地层为角度不整合,塔里木盆地白垩纪晚期发生整体抬升,Hendrix *et al.* (1992)认为该期构造抬升-剥露可能是由于科希斯坦-德拉斯(Kohistan-Dras)岛弧与拉萨地块碰撞的远程效应所致,我们推测本次碰撞的远程效应对吐哈盆地和塔里木盆地之间的阿奇山-雅满苏地区晚白垩世的隆升作用也产生了显著的影响。

关于天山山脉新生代的构造运动已有丰富的研究成果, Hendrix *et al.* (1994) 在塔里木盆地-准噶尔盆地地区采用磷灰石裂变径迹研究发现天山新生代的隆升作用发生在 24Ma 左右; Dumitru *et al.* (2001) 对准噶尔-库车剖面的研究发现天山在 25Ma 左右发生挤压-隆升作用; 近年来, 对此次隆升作用有了较为集中的报道(陈正乐等, 2006, 2008; 郭召杰等, 2006), Yu *et al.* (2014) 在库车盆地采用磷灰石 (U-Th)/He 测年研究还发现了 10Ma 和 6Ma 的隆升作用。以上研究主要集中在天山的西段, 所反映的新生代构造运动并不能代表整个天山山脉的新生代构造运动特点。本文所研究的红云滩地区位于天山东段, 岩体的热年代学数据和反演模拟结果并未显示 24Ma 左右隆升事件的存在。研究区在新生代以前已经位于地下 2km 以浅的深度位置, 自晚白垩世以后在此深度基础上以 0.7°C/Myr 速度缓慢冷却, 同时伴随平均速率为 0.026mm/y 的缓慢剥蚀作用。高洪雷等(2014)、郭召杰等(2002)和刘红旭等(2014)在红云滩岩体所在的阿奇山-雅满苏地区开展的裂变径迹热年代学研究认为东天山新生代以来处于稳定状态, 其构造面貌基本继承了中生代的特征, 本文以更低封闭温度的测年方法在该地区同样未发现更晚期的快速冷却作用, 表明阿奇山-雅满苏地区在新生代期间总体保持稳定, 未受到明显的构造挤压-抬升作用影响。同时也说明天山东段和西段在新生代期间的构造活动有着明显差异。

## 5 结论

(1) 东天山红云滩地区自晚古生代以来经历了 3 期快速冷却, 分别发生于: 晚石炭世至早二叠世 (ca. 330 ~ 296Ma)、晚三叠世 (222 ~ 220Ma)、晚白垩世 (91 ~ 77Ma)。其中第一期快速冷却除了岩体侵位后与围岩发生热传导冷却之外, 还伴随天山的造山作用发生了隆升冷却。

(2) 新生代以来, 红云滩岩体所在的阿奇山-雅满苏地区构造活动相对较弱, 未发生较为明显的隆升作用, 与天山西段新生代的构造活动有着明显的差异。

**致谢** 感谢澳大利亚 Curtin 大学 JdI.CMS 中心 Noreen Evans, Brent I. A. McInnes, Brad McDonald 和 Celia Mayers 在 (U-Th)/He 测年技术上的指导帮助; 诚挚感谢中国科学院地质与地球物理研究所王非研究员及吴林、单竞男、张炜斌等人在 U、Th 元素质谱分析测试方面提供的帮助。

## References

Allen MB, Windley BF and Zhang C. 1993. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia. *Tectonophysics*, 220(1-4): 89-115  
 Bullen ME, Burbank DW, Garver JI and Abdrakhmatov KY. 2001. Late Cenozoic tectonic evolution of the northwestern Tien Shan: New age

estimates for the initiation of mountain building. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1544-1559  
 Charvet J, Shu LS and Laurent-Charvet S. 2007. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): Welding of the Tarim and Junggar plates. *Episodes*, 30(3): 162-186  
 Charvet J, Shu LS, Laurent-Charvet S, Wang B, Faure M, Cluzel D, Chen Y and De Jong K. 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China. *Science China (Earth Sciences)*, 54(2): 166-184  
 Chen W, Zhang Y, Zhang YQ, Jin GS and Wang QL. 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan Plateau: Evidence from Ar-Ar thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867-872 (in Chinese with English abstract)  
 Chen W, Wan YS, Li HQ, Zhang ZQ, Dai TM, Shi EZ and Sun JB. 2011. Isotope geochronology: Technique and application. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1917-1947 (in Chinese with English abstract)  
 Chen ZL, Wan JL, Liu J, Li SX, Zheng EJ, Han XZ, Li XG and Gong HL. 2006. Multi-stage uplift and exhumation of the West Tianshan Mountain: Evidence from the apatite fission-track dating. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(2): 97-106 (in Chinese with English abstract)  
 Chen ZL, Li L, Liu J, Gong HL, Jiang RB, Li SX, Zheng EJ, Han XZ, Li XG, Wang C, Wang GR, Wang G and Lu KG. 2008. Preliminary study on the uplifting-exhumation process of the western Tianshan range, northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 625-636 (in Chinese with English abstract)  
 Dalrymple GB, Grove M, Lovera OM, Harrison TM, Hulen JB and Lanphere MA. 1999. Age and thermal history of the Geysers plutonic complex (felsite unit), Geysers geothermal field, California: A  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and U-Pb study. *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 285-298  
 De Grave J, Glorie S, Ryabinin A, Zhimulev F, Buslov MM, Izmer A, Elburg M, Vanhaecke F and Van den Haute P. 2012. Late Palaeozoic and Meso-Cenozoic tectonic evolution of the southern Kyrgyz Tien Shan: Constraints from multi-method thermochronology in the Trans-Alai, Turkestan-Alai segment and the southeastern Ferghana Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 44: 149-168  
 Du ZL, Wang QC and Zhou XH. 2007. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Kuqu-South Tianshan Basin-Mountain system from the evidence of apatite fission track analysis. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 399-408 (in Chinese with English abstract)  
 Dumitru TA, Zhou D, Chang EZ, Graham SA, Hendrix MS, Sobel ER and Carroll AR. 2001. Uplift, exhumation, and deformation in the Chinese Tien Shan. *Geological Society of America Memoirs*, 194: 71-99  
 Evans NJ, Wilson NSF, Cline JS, McInnes BIA and Byrne J. 2005. Fluorite (U-Th)/He thermochronology: Constraints on the low temperature history of Yucca Mountain, Nevada. *Applied Geochemistry*, 20(6): 1099-1105  
 Farley KA, Wolf RA and Silver LT. 1996. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4223-4229  
 Farley KA. 2000. Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *Journal of Geophysical Research*, 105(B2): 2903-2914  
 Fitzgerald PG, Baldwin SL, Webb LE, and O'Sullivan PB. 2006. Interpretation of (U-Th)/He single grain ages from slowly cooled crustal terranes: A case study from the Transantarctic Mountains of southern Victoria Land. *Chemical Geology*, 225(1-2): 91-120  
 Flowers RM. 2009. Exploiting radiation damage control on apatite (U-Th)/He dates in cratonic regions. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(1-2): 148-155  
 Fu FQ, McInnes BIA, Evans NJ and Davies PJ. 2010. Numerical modeling of magmatic-hydrothermal systems constrained by U-Th-Pb-He time-temperature histories. *Journal of Geochemical Exploration*, 106(1-3): 90-109  
 Gao HL, Liu HX, He JG, Tian MM and Che YF. 2014. Mesozoic-



- Cenozoic uplift-exhumation history of East Tianshan: Evidence from apatite fission track. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 249–260 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ and He GQ. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287(1–4): 213–231
- Gao J, Klemd R, Qian Q, Zhang X, Li JL, Jiang T and Yang YQ. 2011. The collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen. *Tectonophysics*, 499(1–4): 118–131
- Garwin S. 2002. The geologic setting of intrusion-related hydrothermal systems near the Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa, Indonesia. In: Goldfarb RJ and Nielsen R (eds.). *Integrated Methods for Discovery*. Special Publication-Society of Economic Geologists, 9: 333–366
- Glorie S, De Grave J, Buslov MM, Elburg MA, Stockli DF, Gerdes A and Van den Haute P. 2010. Multi-method chronometric constraints on the evolution of the Northern Kyrgyz Tien Shan granitoids (Central Asian Orogenic Belt): From emplacement to exhumation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 38(3–4): 131–146
- Grove M and Harrison TM. 1996.  $^{40}\text{Ar}$  (super\*) diffusion in Fe-rich biotite. *American Mineralogist*, 81(7–8): 940–951
- Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Wang YX, Tang JH, Wang CS, Xi AH and Zheng YC. 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1103–1120 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZJ, Zhang ZC, Liao GH and Fang SH. 2002. Uplifting process of Eastern Tianshan Mountains: Evidence from fission-track age and its tectonic significance. *Xinjiang Geology*, 20(4): 331–334 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZJ, Wu CD, Zhang ZC, Wang MN and Fang SH. 2005. Mesozoic-Cenozoic relationships between Tianshan Mountain and Peripheral Basins: Evidences from sedimentology and exhumation of Jurassic in Houxia Area, Urumchi. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 558–567 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZJ, Zhang ZC, Wu CD, Fang SH and Zhang R. 2006. The Mesozoic and Cenozoic exhumation history of Tianshan and comparative studies to the Junggar and Altai Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 1–15 (in Chinese with English abstract)
- Harrison TM, Duncan I and McDougall I. 1985. Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in biotite: Temperature, pressure and compositional effects. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(11): 2461–2468
- Hattori KH and Keith JD. 2001. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: Evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA. *Mineralium Deposita*, 36(8): 799–806
- Hendrix MS, Graham SA, Carroll AR, Sobel ER, McKnight CI, Schulein BJ and Wang ZX. 1992. Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tian Shan: Evidence from Mesozoic strata of the North Tarim, South Junggar, and Turpan basins, Northwest China. *Geological Society of America Bulletin*, 104(1): 53–79
- Hendrix MS, Dumitru TA and Graham SA. 1994. Late Oligocene-Early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: An early effect of the India-Asia collision. *Geology*, 22(6): 487–490
- Hyndman DW. 1985. *Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks*. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: McGraw-Hill, 125–142
- Ketchum RA. 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 275–314
- Li GM, Cao MJ, Qin KZ, Evans NJ, McInnes BIA and Liu YS. 2014. Thermal-tectonic history of the Baogutu porphyry Cu deposit, West Junggar as constrained from zircon U-Pb, biotite Ar/Ar and zircon/apatite (U-Th)/He dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 741–758
- Li HQ, Wu H, Chen FW, Deng G, Yang HM, Yang ZF, Mei YP and Guo J. 2005. Isotopic chronological evidence for Yanshanian diagenetic mineralization in Baishan Rhenium-Molybdenum Mine, E. Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 249–255 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Xiao XC, Chen W, Zhang SH and Li WD. 2000. Late Carboniferous to Late Triassic thermal evolution of the crust of Northern Xinjiang, NW China:  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating to Huangcaopo Group in the Kaokesai' ergai Mountain of East Junggar. *Acta Geologica Sinica*, 74(4): 303–312 (in Chinese with English abstract)
- Li XD, Wang QM and Wang KZ. 1998. New Information of post-collisional evolution of the Tianshan Mountains: Evidence from dynamic metamorphic rocks from the middle sector of Awulale Range. *Geological Review*, 44(4): 443–448 (in Chinese with English abstract)
- Liu HX, Yan DP, He JG, Chen F, Gao HL, Suo SX, Wang X, Zhang X, Cao QY, Wang YW and Zhao J. 2014. Apatite fission track evidence for the Mesozoic-Cenozoic tectonic uplift of Aqishan-Yamansu area, East Tianshan: With discussion of tectonic activity and geological disposal of radioactive waste. *Geological Journal of China Universities*, 20(1): 81–92 (in Chinese with English abstract)
- Lu HF, Wang SL, Luo JC, Shu LS, Sang H, Zhu WB, Li YF and Jin YA. 2006. Fault systems and their tectonic evolution in the Eastern Tarim basin. *Oil & Gas Geology*, 27(8): 433–441 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KL. 2001. Using Isoplot/EX, v2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1a
- Luo GC, Yang XK and Cheng HB. 1999. Establish of Lower Carboniferous Aqishan Formation in Jueluotage zone of Xinjiang. *Journal of Xi'an Engineering University*, 21 (Suppl.): 39–44 (in Chinese with English abstract)
- Ma RS, Wang CY and Ye SF. 1993. *Tectonic Framework and Crust Evolution of Eastern Tianshan*. Nanjing: Nanjing University Press, 1–225 (in Chinese)
- Ma RS, Shu LS and Sun JQ. 1997. *Tectonic Evolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountain*. Beijing: Geological Publishing House, 11–202 (in Chinese)
- McDougall I and Harrison TM. 1999. *Geochronology and Thermochronology by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Method*. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: Oxford University Press, 1–269
- McInnes BIA, Evans NJ, Fu FQ and Garwin S. 2005. Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 467–498
- Qin KZ, Fang TH, Wang SL, Zhu BQ, Feng YM, Yu HF and Xiu QY. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in Eastern Tianshan Mountains, NW-China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 302–308 (in Chinese with English abstract)
- Reiners PW and Farley KA. 2001. Influence of crystal size on apatite (U-Th)/He thermochronology: An example from the Bighorn Mountains, Wyoming. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(3–4): 413–420
- Reiners PW, Farley KA and Hickey HJ. 2002. He diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of zircon: Initial results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte. *Tectonophysics*, 349(1–4): 297–308
- Reiners PW, Spell TL, Nicolescu S and Zanetti KA. 2004. Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(8): 1857–1887
- Reiners PW. 2005. Zircon (U-Th)/He thermochronometry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 151–179
- Shao L, Li WH and Yuan MS. 1999. Characteristic of sandstone and its tectonic implications of the Turpan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 95–99 (in Chinese with English abstract)
- Shen CB, Mei LF, Liu L, Tang JG and Zhou F. 2006. Evidence from apatite and zircon fission track analysis for Mesozoic-Cenozoic uplift

- thermal history of Bogeda Mountain of Xinjiang, Northwest China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(3): 87–92 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Guo ZJ, Zhu WB, Lu HF and Wang B. 2004. Post-collision tectonism and basin-range evolution in the Tianshan belt. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 393–404 (in Chinese with English abstract)
- Shuster DL, Flowers RM and Farley KA. 2006. The influence of natural radiation damage on helium diffusion kinetics in apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3–4): 148–161
- Sobel ER and Dumitru TA. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India-Asia collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3): 5043–5063
- Su CQ, Jiang CY, Xia MZ, Wei W and Pan R. 2009. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb age of volcanic rocks of Aqishan Formation in the eastern area of North Tianshan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 901–915 (in Chinese with English abstract)
- Tagami T, Farley KA and Stockli DF. 2003. (U-Th)/He geochronology of single zircon grains of known Tertiary eruption age. *Earth and Planetary Science Letters*, 207(1–4): 57–67
- Wang B, Shu LS, Faure M, Jahn BM, Cluzel D, Charvet J, Chung SL and Meffre S. 2011. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan; Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélangé (NW China). *Tectonophysics*, 497(1–4): 85–104
- Wang JB, Wang YW and He ZJ. 2006. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China. *Geology in China*, 33(3): 461–469 (in Chinese with English abstract)
- Wang YB, Wang Y, Liu X, Fu DR, Wang J and Wang SC. 2001. Apatite fission-track records of Mesozoic and Cenozoic episodic reactivation of the Tianshan and West Kunlun Mountains. *Regional Geology of China*, 20(1): 94–99 (in Chinese with English abstract)
- Wolf RA, Farley KA and Silver LT. 1996. Helium diffusion and low-temperature thermochronometry of apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4231–4240
- Wu CZ, Zhang ZZ, Zaw K, Della-Pasque F, Tang JH, Zheng YC, Wang CS and San JZ. 2006. Geochronology, geochemistry and tectonic significances of the Hongyuntan granitoids in the Qoltag area, Eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1121–1134 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370–395
- Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HI, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to Mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189–1217
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. *Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions*. Beijing: Geological Publishing House, 5–8 (in Chinese)
- Yin A, Nie S, Craig P, Harrison TM, Ryerson FJ, Qian XL and Yang G. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 17(1): 1–27
- Yu S, Chen W, Evans NJ, McInnes BIA, Yin JY, Sun JB, Li J and Zhang B. 2014. Cenozoic uplift, exhumation and deformation in the North Kuqa Depression, China as constrained by (U-Th)/He thermochronometry. *Tectonophysics*, 630: 166–182
- Yuan WM, Bao ZK, Dong JQ, Guo ZJ and Deng J. 2007. Zircon and apatite fission track analyses on mineralization ages and tectonic activities of Tuwu-Yandong porphyry copper deposit in Northern Xinjiang, China. *Science in China (Series D)*, 50(12): 1787–1795
- Zhang BT, Ling HF and Wu JQ. 2013. New thinking, method and calculated examples of high temperature thermochronology of granite plutons. *Geological Journal of China Universities*, 19(3): 385–402 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Li SZ, Liu JX, Teng ZH, Jin HL, Li W, Huang XX and Wu YH. 1999. Structural feature and evolution of Yili Basin, Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 203–214 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC and Wu NY. 1985. The geotectonic and its evolution of Tianshan. *Xinjiang Geology*, 3(3): 1–14 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Y, Chen W, Chen KL and Liu XY. 2006. Study on the Ar-Ar Age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of <sup>39</sup>Ar recoil loss: Examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province. *Geological Review*, 52(4): 556–561 (in Chinese with English abstract)
- Zhu WB, Wan JL, Shu LS, Sun Y and Wang F. 2004. Evidence from apatite fission track analysis for Mesozoic-Cenozoic thermal history of Turpan Basin. *Progress in Natural Science*, 14(10): 1194–1198 (in Chinese)
- Zhu WB, Shu LS, Wan JL, Sun Y, Wang F and Zhao ZY. 2006. Fission-track evidence for the exhumation history of Bogda-Harlik Mountains, Xinjiang since the Cretaceous. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 16–22 (in Chinese with English abstract)
- Zhu WB, Zhang ZY, Shu LS, Wan JL, Lu HF, Wang SL, Yang W and Su JB. 2007. Uplift and exhumation history of the Precambrian basement, northern Tarim: Evidence from apatite fission track data. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1671–1682 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZZ, Gu LX, Wu CZ, Li WQ, Xi AH and Wang S. 2005. Zircon SHRIMP dating for the Weiya pluton, eastern Tianshan: Its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 481–490

#### 附中文参考文献

- 陈文, 张彦, 张岳桥, 金贵善, 王清利. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据. *岩石学报*, 22(4): 867–872
- 陈文, 万渝生, 李华芹, 张宗清, 戴撞谟, 施泽恩, 孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用. *地质学报*, 85(11): 1917–1947
- 陈正乐, 万景林, 刘健, 李胜祥, 郑恩玖, 韩效忠, 李细根, 宫红良. 2006. 西天山山脉多期次隆升-剥露的裂变径迹证据. *地球学报*, 27(2): 97–106
- 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. *岩石学报*, 24(4): 625–636
- 杜治利, 王清晨, 周学慧. 2007. 中新世库车-南天山盆地系统隆升历史的裂变径迹证据. *岩石矿物学杂志*, 26(5): 399–408
- 高洪雷, 刘红旭, 何建国, 田明明, 车永飞. 2014. 东天山地区中-新生代隆升-剥露过程: 来自磷灰石裂变径迹的证据. *地学前缘*, 21(1): 249–260
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 王银喜, 唐俊华, 汪传胜, 郗爱华, 郑远川. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. *岩石学报*, 22(5): 1103–1120
- 郭召杰, 张志诚, 廖国辉, 方世虎. 2002. 天山东段隆升过程的裂变径迹年龄证据及构造意义. *新疆地质*, 20(4): 331–334
- 郭召杰, 吴朝东, 张志诚, 王美娜, 方世虎. 2005. 乌鲁木齐后峡地区侏罗系沉积特征、剥露过程及中新生代盆地关系讨论. *高校地质学报*, 11(4): 558–567

- 郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 方世虎, 张锐. 2006. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. 地质学报, 80(1): 1-15
- 李华芹, 吴华, 陈富文, 邓刚, 杨红梅, 杨再峰, 梅玉萍, 郭敬. 2005. 东天山白山铼钼矿区燕山期成岩成矿作用同位素年代学证据. 地质学报, 79(2): 249-255
- 李锦轶, 肖序常, 陈文, 张思红, 李卫东. 2000. 新疆北部晚石炭世至晚三叠世地壳热演化——东准噶尔考克塞尔盖山荒草坡群的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 定年. 地质学报, 74(4): 303-312
- 李向东, 王庆明, 王克卓. 1998. 天山后碰撞阶段构造演化的新信息——来自阿吾拉勒山中段动力变质岩的证据. 地质论评, 44(4): 443-448
- 刘红旭, 颜丹平, 何建国, 陈峰, 高洪雷, 所世鑫, 王勋, 张晓, 曹清艳, 王永文, 赵建. 2014. 阿齐山-雅满苏地区中-新生代构造隆升裂变径迹证据: 兼论构造活动对核废选址场的意义. 高校地质学报, 20(1): 81-92
- 卢华复, 王胜利, 罗俊成, 舒良树, 桑洪, 朱文斌, 李毓丰, 金英爱. 2006. 塔里木盆地东部断裂系统及其构造演化. 石油与天然气地质, 27(4): 433-441
- 罗桂昌, 杨兴科, 程宏宾. 1999. 新疆觉罗塔格地区下石炭统阿奇山组的确立. 地球科学与环境学报, 21(增): 39-44
- 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 1993. 东天山构造格架及地壳演化. 南京: 南京大学出版社, 1-225
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 11-202
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究. 新疆地质, 20(4): 302-308
- 邵磊, 李文厚, 袁明生. 1999. 吐鲁番-哈密盆地的砂岩特点及构造意义. 沉积学报, 17(1): 95-99
- 沈传波, 梅廉夫, 刘麟, 汤济广, 周锋. 2006. 新疆博格达山中新生代隆升-热历史的裂变径迹记录. 海洋地质与第四纪地质, 26(3): 87-92
- 舒良树, 郭召杰, 朱文斌, 卢华复, 王博. 2004. 天山地区碰撞后构造与盆山演化. 高校地质学报, 10(3): 393-404
- 苏春乾, 姜常义, 夏明哲, 魏巍, 潘荣. 2009. 北天山东段阿奇山组火山岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄. 岩石学报, 25(4): 901-915
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪. 中国地质, 33(3): 461-469
- 王彦斌, 王永, 刘训, 傅德荣, 王军, 王世成. 2001. 天山、西昆仑山中、新生代幕式活动的磷灰石裂变径迹记录. 中国区域地质, 20(1): 94-99
- 吴昌志, 张遵忠, Zaw K, Della-Pasque F, 唐俊华, 郑远川, 汪传胜, 三金柱. 2006. 东天山觉罗塔格红云滩花岗岩年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 22(5): 1121-1134
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 5-8
- 袁万明, 保增宽, 董金泉, 郭召杰, 邓军. 2007. 新疆土屋-延东斑岩铜矿区成矿时代与构造活动的裂变径迹分析. 中国科学(D辑), 37(10): 1330-1337
- 章邦桐, 凌洪飞, 吴俊奇. 2013. 花岗岩体高温热年代学研究的新思路、方法及计算实例. 高校地质学报, 19(3): 385-402
- 张国伟, 李三忠, 刘俊霞, 滕志宏, 金海龙, 李伟, 黄先雄, 吴亚红. 1999. 新疆伊犁盆地的构造特征与形成演化. 地学前缘, 6(4): 203-214
- 张良臣, 吴乃元. 1985. 天山地质构造及演化史. 新疆地质, 3(3): 1-14
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层(I/S) Ar-Ar 年龄谱型及 $^{39}\text{Ar}$ 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例. 地质论评, 52(4): 556-561
- 朱文斌, 万景林, 舒良树, 孙岩, 王锋. 2004. 吐鲁番-哈密盆地中新生代热历史: 磷灰石裂变径迹证据. 自然科学进展, 14(10): 1194-1198
- 朱文斌, 舒良树, 万景林, 孙岩, 王锋, 赵忠岩. 2006. 新疆博格达-哈尔里克山白垩纪以来剥露历史的裂变径迹证据. 地质学报, 80(1): 16-22
- 朱文斌, 张志勇, 舒良树, 万景林, 卢华复, 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. 岩石学报, 23(7): 1671-1682