

中亚巴尔喀什成矿带晚古生代最晚期岩浆侵入事件及其热演化历史*

杨屹¹ 陈宣华² 陈正乐³ 韩淑琴³ SEITMURATOVA Eleonora⁴ 王志宏² 施炜³ 叶宝莹⁵
 YANG Yi¹, CHEN XuanHua², CHEN ZhengLe³, HAN ShuQin³, SEITMURATOVA Eleonora⁴, WANG ZhiHong², SHI Wei³ and YE BaoYing⁵

1. 新疆地质调查院, 乌鲁木齐 830000
2. 中国地质科学院, 北京 100037
3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
4. Laboratory of Geological Formations, K. Satpaev Institute of Geological Sciences, Almaty 050010
5. 中国地质大学, 北京 100083

1. Xinjiang Geological Survey, Urumqi 830000, China
2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
4. Laboratory of Geological Formations, K. Satpaev Institute of Geological Sciences, Almaty 050010, Kazakhstan
5. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2014-04-30 收稿, 2014-07-12 改回.

Yang Y, Chen XH, Chen ZL, Han SQ, Seitmuratova E, Wang ZH, Shi W and Ye BY. 2015. The latest granitic intrusive magmatism and thermal evolution in the Late Paleozoic Balkhash Metallogenic Belt (Kazakhstan), Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2):304–314

Abstract The Balkhash Metallogenic Belt (Kazakhstan) in the Central Asia, with the occurrence of many well-known large and super-large porphyritic Cu-Mo deposits, large skarn Cu deposits, and large rare metal deposits, is one of the multi-core areas of the Central Asian metallogenic domain controlled by boundary strike-slip fault system. Zircon SHRIMP U-Pb, Ar-Ar thermochronology, and apatite fission track dating and thermal history modeling, provide a multidisciplinary approach to constrain the whole course thermo-history of the latest Late Paleozoic intrusive granitic magmatism in the western part of the Balkhash Metallogenic Belt. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granitic pluton north to the Borly Cu deposit, reveals intrusive granitic magmatism at 289.7 ± 2.3 Ma in the Early Permian, which was previously considered as of an age in the Triassic. The latest Late Paleozoic granitic pluton has a similar age with the W-Mo metallogenesis at ~ 289 Ma for the Akshatau deposit. Based on geochronological results from previous and this study, we reconstruct the whole course thermal history, from intrusion, through regional cooling, to the Late Mesozoic exhumation at 92.4 ± 5.9 Ma, for the granitic pluton.

Key words Late Paleozoic; Intrusive magmatism; Exhumation; Thermal geochronology; Balkhash metallogenic belt; Central Asia

摘要 哈萨克斯坦巴尔喀什成矿带是中亚成矿域重要的晚古生代斑岩铜钼和云英岩-石英脉型钨钼成矿带, 是受走滑断裂边界控制的中亚多核成矿系统的核心之一。本文根据锆石 SHRIMP U-Pb 定年、⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代学、磷灰石裂变径迹定年和热历史模拟, 厘定了巴尔喀什成矿带西部地区晚古生代最晚期深成岩浆侵入事件。研究表明, 原来被认为是属于三叠纪的后碰撞花岗岩类侵入岩体, 给出锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 289.7 ± 2.3 Ma, 为早二叠世。结合前人研究, 本文探讨了巴尔喀什成矿带西部从深成岩浆侵入、钨钼成矿作用、区域冷却到剥露作用热历史的全过程。晚古生代最晚期花岗岩类侵入体具有与钨

* 本文受国家科技支撑计划重点项目暨国家 305 项目(2007BAB25B02)、深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)和中国地质调查局地质调查项目(1212011120184)联合资助。

第一作者简介: 杨屹, 男, 1968 年生, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作, E-mail: yy2004002@163.com

钼矿床相同的晚中生代剥露作用年龄($92.4 \pm 5.9\text{Ma}$)。

关键词 晚古生代; 岩浆侵入事件; 剥露作用; 热年代学; 巴尔喀什成矿带; 中亚

中图法分类号 P585.121; P597.3

哈萨克斯坦巴尔喀什成矿带(图1)是中亚造山带(也被称为“中亚成矿域”)的核心地区之一(朱永峰等, 2007, 2014; 陈宣华等, 2010a, 2011), 晚古生代经历了从晚石炭世板块俯冲机制到早二叠世后碰撞机制的转换(刘刚等, 2012)。Yakubchuk(2004)认为, 中亚造山带(也被称为Altaid)是古特提斯洋的一个残余, 它的形成完全是克拉通内部的拼贴作用, 其构造演化与成矿作用主要受几个地幔柱事件的强烈影响。

巴尔喀什成矿带区域地壳演化与金属成矿作用具有以下主要特征: 1) 古生代地壳生长和演化具有多阶段性(朱永峰等, 2007, 2014), 陆壳增生显著(肖文交等, 2008; 刘刚等, 2012); 2) 壳幔相互作用强烈(肖文交等, 2008), 多旋回物质活化-再活化作用显著(朱永峰等, 2007); 3) 成矿环境和成矿作用演化具有长期性、周期性(朱永峰等, 2007)和继承性, 成矿物质具有同源性; 4) 成矿环境和成矿类型的多样性(肖文交等, 2008); 5) 成矿时代相对集中在几个时期, 主要在晚石炭世-早二叠世(Shen *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014; 朱永峰等, 2014); 6) 陆内改造复杂(肖文交等, 2008), 造就了成

矿作用的多次改造与叠加。以上这些特征导致了成矿带内成矿物质的多次迁移、聚集与成矿, 形成了大量世界级的大型超大型矿床, 如科翁腊德、阿克斗卡、科克赛、博尔雷等大型超大型斑岩铜矿床, 萨亚克大型矽卡岩型铜矿床, 以及东科翁腊德、阿克沙套、扎涅特等云英岩-石英脉型钨钼矿床等(陈宣华等, 2012a; Chen *et al.*, 2014)。

本文在哈萨克斯坦巴尔喀什成矿带博尔雷斑岩铜矿床北侧采取了有关花岗岩类样品, 进行了锆石 SHRIMP 定年、黑云母和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年、磷灰石裂变径迹测年, 揭示了该地区晚古生代最晚期的花岗岩类岩浆侵入事件及其热演化历史, 将原本认为是属于三叠纪的花岗岩类侵入体重新厘定为二叠纪侵入岩体, 从而为巴尔喀什成矿带与我国新疆西准噶尔成矿带的对比研究提供了新的依据。

1 巴尔喀什成矿带地质概况

巴尔喀什成矿带(图1、图2)位于中亚哈萨克斯坦巴尔

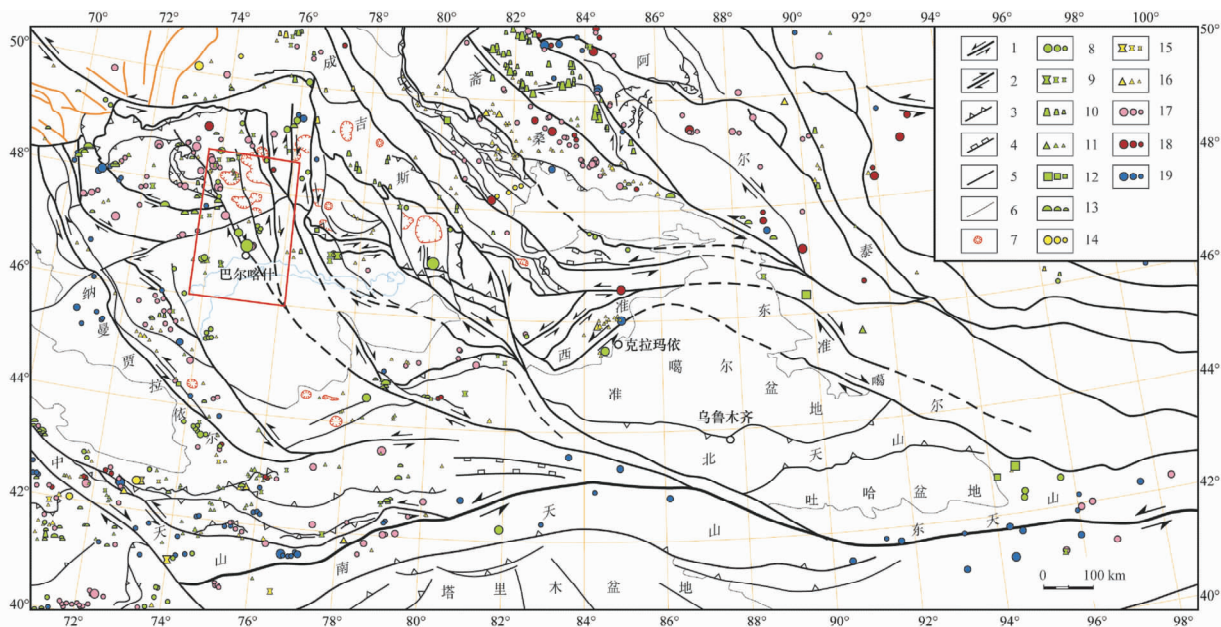


图1 中亚成矿域巴尔喀什-准噶尔成矿带断裂构造体系与矿床分布简图(据 Chen *et al.*, 2014 修改)

断裂构造体系修改自任纪舜等(1999)和李廷栋等(2008)。斑岩型铜钼矿床分布修改自李明等(2007)和其它资料。图中四边形框给出本文研究范围。1-左行走滑断裂; 2-右行走滑断裂; 3-逆冲断层; 4-正断层; 5-断层; 6-盆地边界; 7-火山机构(破火山口); 8-斑岩铜矿(符号大小分别代表大、中、小型矿床, 下同); 9-矽卡岩型铜矿; 10-黄铁矿型矿床(铜、金); 11-热液型铜矿; 12-铜镍硫化物矿床; 13-火山岩型铜矿; 14-斑岩型金矿; 15-矽卡岩型金矿; 16-热液型金矿; 17-稀有金属矿床(W、Mo、Sn、Bi等); 18-稀有金属矿床(Ta、Nb、Li、Be、TR等); 19-铁矿床

Fig.1 Structural geological sketch map of the Balkhash, the West Junggar, the East Junggar, and the East Tianshan metallogenic belts and their adjacent areas in the Central Asian metallogenic domain, showing distribution of mineral deposits (after Chen *et al.*, 2014)

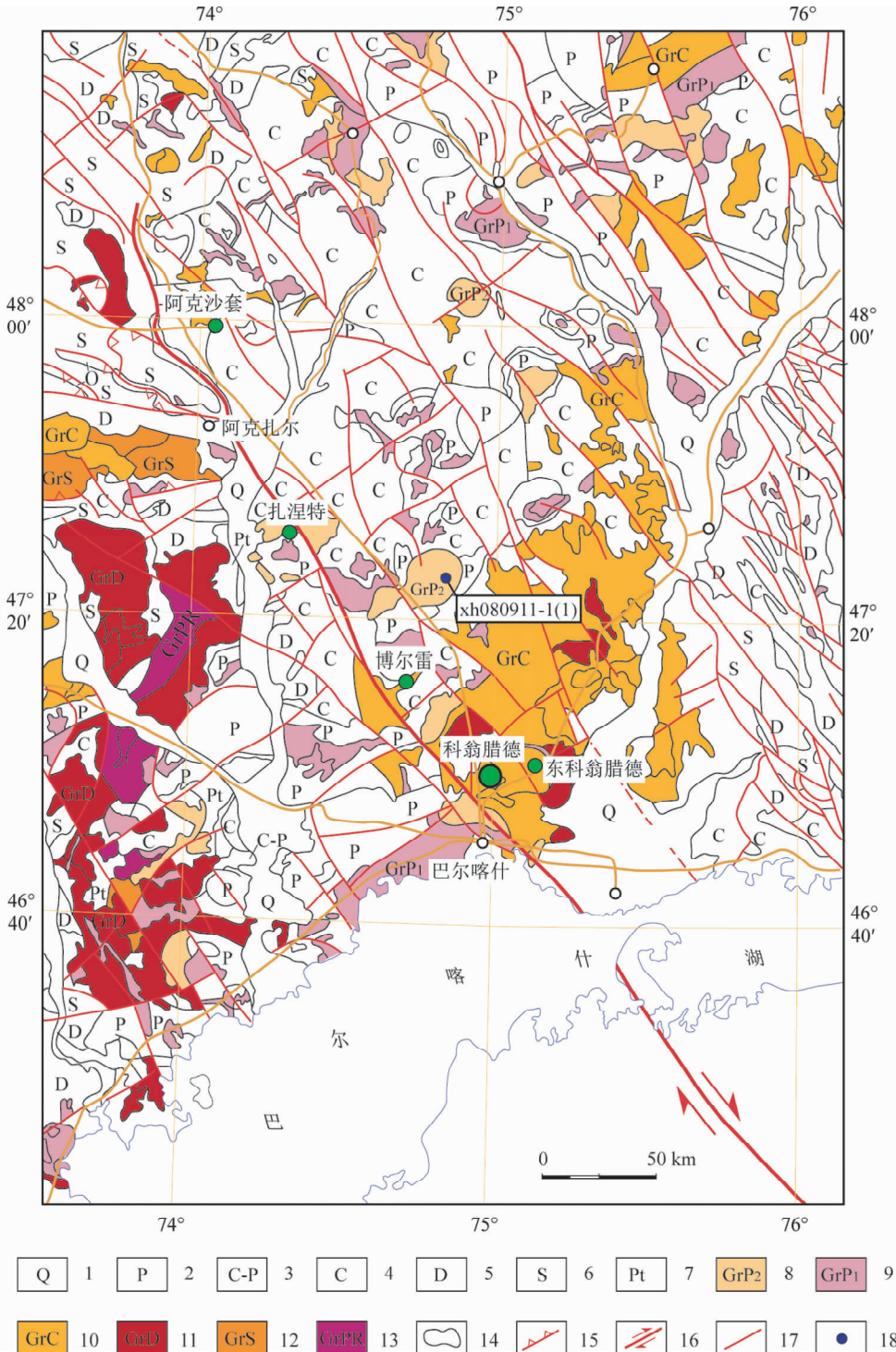


图2 巴尔喀什成矿带西部区域地质简图(据陈宣华等,2010a 修改)

1-第四系;2-二叠系;3-石炭-二叠系(未分);4-石炭系;5-泥盆系;6-志留系;7-前寒武系;8-三叠纪花岗岩类;9-二叠纪花岗岩类;10-石炭纪花岗岩类;11-泥盆纪花岗岩类;12-奥陶纪花岗岩类;13-前寒武纪花岗岩类;14-巴尔喀什湖区;15-逆冲断裂;16-右行走滑断裂;17-断裂;18-采样点位置

Fig.2 Geological sketch map of the western part of Balkhash metallogenic belt (after Chen *et al.*, 2010a)

喀什湖北侧的巴尔喀什、萨亚克和阿克斗卡地区,是中亚造山带哈萨克斯坦-天山马蹄形构造带的内缘,为一晚古生代(海西期)褶皱区,大地构造位置属准噶尔北缘古生代活动陆

缘的滨巴尔喀什泥盆-石炭纪残余洋盆(何国琦等,2004),是中亚成矿域多核成矿系统的核心部分(朱永峰等,2007, 2014;陈宣华等,2010a)。

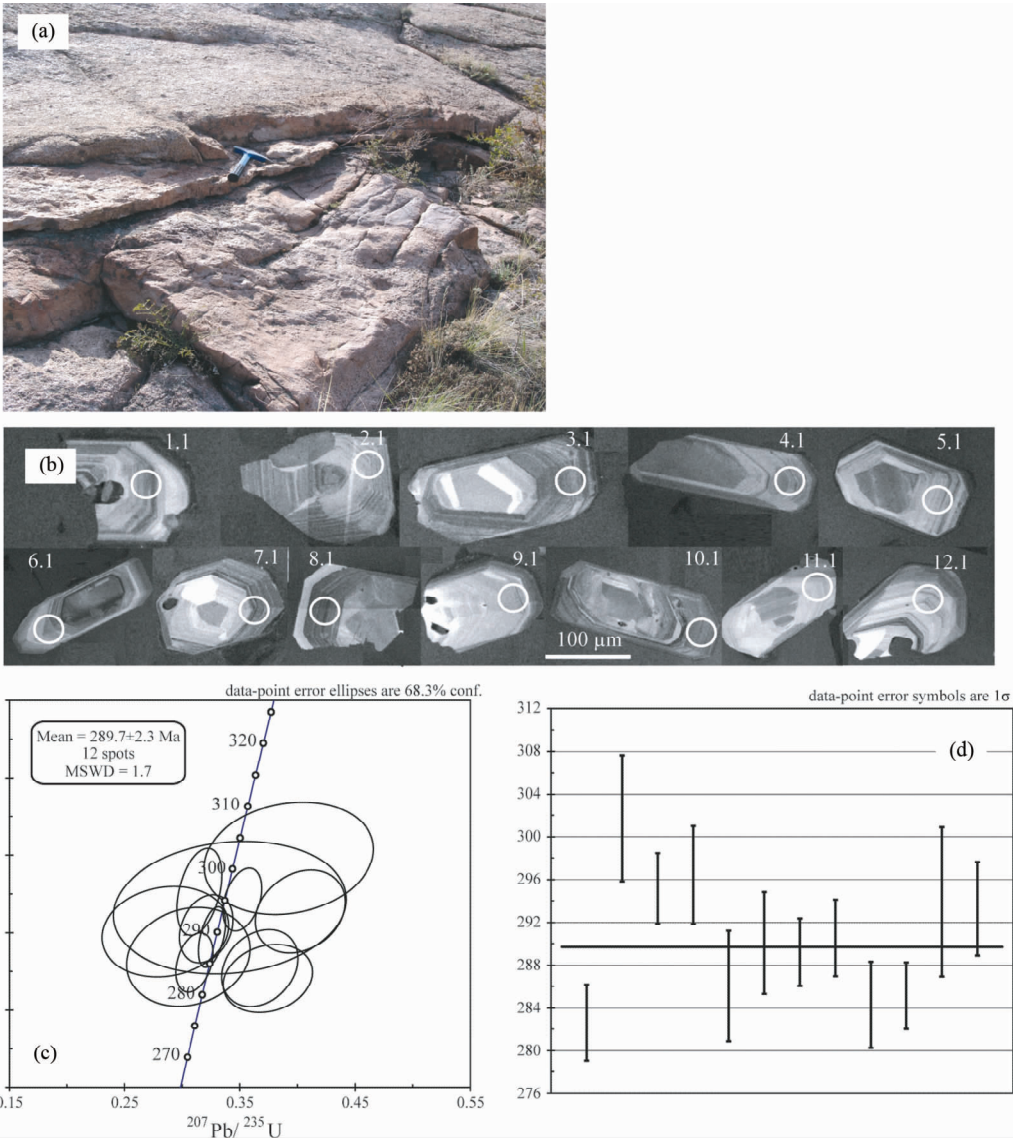


图3 岩石样品与锆石测年分析结果

(a) 野外露头照片；(b) 测年锆石 CL 图像；(c) 锆石 U-Pb 谐和图；(d) 锆石平均年龄分布

Fig.3 Rock sample and zircon SHRIMP U-Pb dating results

成矿带区域地壳演化主要可以划分为两个阶段：1) 中元古代至古生代晚期古洋盆的演化与关闭阶段(李锦轶等, 2006), 包括罗地尼亚超大陆形成(Pt_2), 罗地尼亚超大陆裂解与古亚洲洋形成(Pt_3), 古亚洲洋发展(Pz_1), 古亚洲洋最后消亡、关闭和欧亚大陆形成(D-P); 2) 二叠纪以来的陆内演化阶段, 主要受陆内断裂构造体系的控制, 在二叠纪至侏罗纪期间受古太平洋和古特提斯洋演化的影响, 新生代期间受印度板块与欧亚板块碰撞的影响(李锦轶等, 2006)。晚石炭世至早二叠世, 巴尔喀什成矿带东延的新疆北部地区进入后碰撞伸展至大陆裂谷演化阶段(高睿等, 2013; 徐学义等, 2014)。

巴尔喀什成矿带前寒武纪和古生代地层出露于相对稳定地块(莫因特地块)和缝合带中, 地层出露齐全, 有文德纪-

寒武纪石英砂岩、灰岩和含磷地层, 奥陶纪灰岩、粉砂岩、砂岩和砾岩建造, 在缝合带内有蛇绿岩及蛇绿混杂岩建造。志留纪地层为一套陆相碎屑岩系, 其厚度巨大, 达 5000 ~ 6000m。泥盆系分布很广泛, 下泥盆统主要为海相陆源沉积, 局部含安山玢岩建造, 下中泥盆统为海相火山沉积岩建造, 期后火山活动强烈, 广泛出现安山岩-英安岩-流纹岩建造。早石炭世在滨巴尔喀什地区广泛分布有碳酸盐-陆源碎屑岩建造和陆相流纹岩-英安岩建造, 其上为晚石炭世陆源碎屑岩及磨拉石建造。

成矿带具有多期构造-岩浆侵入活动, 其中以海西期最为强烈, 侵入岩分布十分广泛, 主要为中酸性侵入岩, 早石炭世花岗岩分布在北巴尔喀什复背斜的边缘, 中石炭世-晚石炭世是岩浆活动的鼎盛期, 大面积分布的花岗闪长岩-花岗

岩建造以及中浅成侵入的中酸性斑岩,构成最具潜力的成矿建造。在托克劳盆地的托帕尔杂岩体,科翁腊德超大型斑岩铜矿床就产于其中最晚期的花岗闪长斑岩中。晚古生代构造-岩浆活动造就了巴尔喀什成矿带,使之成为哈萨克斯坦最主要的斑岩型铜矿化集中区(申萍和沈远超, 2010; 李光明等, 2008; 陈宣华等, 2012a; Shen *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014; 朱永峰等, 2014),同时也是世界上三大斑岩型铜矿带最重要的铜矿区之一。

2 样品采集与分析方法

2.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年

本文在哈萨克斯坦巴尔喀什成矿带西部博尔雷斑岩铜矿床的北边采取了有关碱性花岗岩岩样品(xh080911-1(1));采样点位置见图2,野外照片见图3a)。通过岩样破碎、浮选、电磁选等方法挑选出单颗粒锆石,然后在双目镜下挑纯,手工挑出晶形完好、透明度和色泽度好的锆石。锆石样品靶制备与阴极发光照相:将选出的锆石样品颗粒,固定在双面胶上,将锆石标样(结晶年龄为417Ma)与样品排列在指定位置,随后用模具注入环氧树脂,抽真空,烘干,使树脂固化后对其进行打磨、抛光(至锆石粒径的大约二分之一),使靶表面光滑、锆石内部充分暴露。锆石阴极发光照相采用北京离子探针中心阴极发光实验室GATAN公司Chroma阴极发光(CL)探头。

锆石 U-Pb 年龄数据是在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的网络虚拟实验室,通过 SHRIMP 远程共享控制系统(SHRIMP Remote Operation System, SROS)远程控制位于澳大利亚 Curtin 理工大学(School of Physical Sciences, Curtin University of Technology)的 SHRIMP II(高分辨二次离子探针质谱仪)仪器而获得的。SHRIMP II 具有高灵敏度和高分辨率的特点。SHRIMP 远程共享控制系统(SROS)由北京离子探针中心、中国计量科学研究院和吉林大学共同研发,可以实现通过 Internet 公共网络,远程控制 SHRIMP II 仪器,远程选取样品待测点和实时远程实验数据输出打印等功能。

测试流程为每分析一次标样接着做3个(有时为2个)锆石测点。一个年龄数据用5组扫描结果的平均值得。锆石 U-Pb 年龄计算采用 ISOPLOT(3.00 版)程序(Ludwig, 2003)进行。根据实测的²⁰⁴Pb 含量进行普通铅校正。为了避开晶体表层可能存在的微裂纹造成铅的淋滤丢失,分析点选在锆石颗粒中较暗部位(U 含量通常较高),以期尽可能得到准确的测年数据。

2.2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代学

⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年在国土资源部同位素地质重点实验室完成。选纯的矿物(纯度>99%)用超声波清洗,然后封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射。照射工作在中国原子能

科学研究院“游泳池堆”中进行,使用 B4 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 2878min,积分中子通量为 $4.49 \times 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$;同期接受中子照射的监控标准样 ZBH-25 黑云母标样,标准年龄 $132.7 \pm 1.2 \text{ Ma}$, K 含量 7.6%。

样品阶段升温加热使用石墨炉,初始温度为 700℃,相邻加热阶段的温度差主要在 40℃ 至 100℃ 不等,每个阶段加热 30min,净化 30min。质谱分析在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行,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分析照射过的 K₂SO₄ 和 CaF₂ 来获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_o)_{\text{Ca}} = 0.0002389$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_o)_{\text{Ca}} = 0.000806$ 。³⁷Ar 经过放射性衰变校正;⁴⁰K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (Steiger and Jäger, 1977);用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线(Ludwig, 2001; v2.49)。坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见陈文等(2006)和张彦等(2006)。

2.3 磷灰石裂变径迹热年代学

裂变径迹(FT)测年分析在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成。采用外探测器法(Gleadow and Duddy, 1981)标准测试流程及 Zeta(ζ)校正法(Hurford and Green, 1983)计算得到样品的磷灰石裂变径迹(AFT)年龄。年龄标准样为杜兰哥(Durango)磷灰石(31.4 ± 0.5Ma)。标准玻璃为美国国家标准局 SRM₆₁₂ 铀标准玻璃,在照射过程中用作放射性剂量计测量中子通量。磷灰石自发裂变径迹在 5.5N HNO₃ 中 20℃ 室温条件下蚀刻 20s。照射过程中盖在磷灰石颗粒样品和标准玻璃放射性剂量计之上的低铀白云母外探测器诱发裂变径迹蚀刻条件为 40% HF, 20℃ 室温, 30min。

磷灰石样品在中国原子能科学研究院 492 反应堆进行辐照。磷灰石裂变径迹统计和径迹长度测量用 OLYMPUS 偏光显微镜,在放大 1000 倍浸油及反射光源条件下完成围限径迹长度的测量。计算 AFT 年龄采用的权重平均 Zeta(ζ) 值为 356.6 ± 10 。

3 分析结果

3.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年

样品 xh080911-1(1) 锆石为自形粒状和短柱状,无色透明,CL 图像(图 3b)显示锆石晶形比较完整,呈短柱状,柱长为 100 ~ 300 μm,个别可长达 350 μm 以上,锆石内部结构均匀,振荡环带韵律结构和扇状分带结构非常明显,个别比较破碎,少数锆石核部或边部有细小的 1 个或多个暗色包体。所测锆石晶形均较好,具有明显的岩浆锆石特点。

表 1 样品锆石 SHRIMP 测年数据

Table 1 Zircon U-Pb dating of sample

测点号	Pb _c (%)	U (×10 ⁻⁶)	Th (×10 ⁻⁶)	Th/U	²⁰⁶ Pb* (×10 ⁻⁶)	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±%	err. corr.	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	± (Ma)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma)	± (Ma)
1.1	2.35	247	169	0.71	9.75	0.0606	6.7	0.374	6.8	0.04483	1.3	.188	282.7	3.6	624	140
2.1	0.05	54	45	0.86	2.24	0.0594	12	0.393	12	0.04792	2.0	.162	301.7	5.9	583	260
3.1	0.07	342	239	0.72	13.8	0.0545	2.9	0.352	3.2	0.04685	1.1	.360	295.2	3.3	393	66
4.1	0.59	160	148	0.95	6.53	0.0485	3.8	0.315	4.1	0.04706	1.6	.384	296.4	4.6	126	89
5.1	1.26	60	62	1.06	2.38	0.0488	11	0.305	12	0.04538	1.8	.159	286.1	5.2	139	270
6.1	1.59	92	71	0.80	3.68	0.0450	13	0.285	13	0.04603	1.7	.132	290.1	4.8	-57	310
7.1	0.05	370	315	0.88	14.6	0.0515	2.1	0.3260	2.4	0.04588	1.1	.471	289.2	3.2	264	48
8.1	0.38	212	133	0.65	8.42	0.0505	4.6	0.321	4.8	0.04610	1.3	.261	290.6	3.6	217	110
9.1	-	155	117	0.78	5.96	0.0591	5.8	0.367	5.9	0.04509	1.5	.244	284.3	4.0	571	130
10.1	0.54	379	308	0.84	14.8	0.0498	3.3	0.311	3.4	0.04523	1.1	.325	285.2	3.1	186	76
11.1	0.19	48	44	0.95	1.94	0.053	19	0.341	20	0.0466	2.4	.124	293.9	7.0	332	440
12.1	-	104	90	0.90	4.10	0.0627	6.2	0.402	6.4	0.04654	1.5	.237	293.2	4.4	699	130

注：误差为 1σ; Pb_c 和 Pb* 分别代表普通铅 (²⁰⁶Pb_c) 和放射成因铅; 使用实测的 ²⁰⁴Pb 含量进行普通铅校正

表 2 黑云母和钾长石 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 法年龄测试数据

Table 2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of biotite and K-feldspar

阶段	T(°C)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	⁴⁰ Ar (%)	F	³⁹ Ar (×10 ⁻¹⁴ mol)	³⁹ Ar(Cum.)(%)	Age (Ma)	±1 (Ma)
XH080911-1(1) 黑云母, W = 28.61mg, J = 0.005126											
1	700	190.0602	0.5567	0.0329	0.1322	13.44	25.5426	0.14	0.43	222.0	5.1
2	800	55.9751	0.0658	0.0036	0.0315	65.25	36.5226	1.71	5.84	309.6	2.9
3	850	38.5516	0.0086	0.0015	0.0196	93.41	36.0110	4.79	21.03	305.6	2.8
4	890	36.6177	0.0030	0.0023	0.0183	97.56	35.7257	3.57	32.35	303.4	2.8
5	930	36.1989	0.0020	0.0190	0.0181	98.36	35.6072	2.95	41.69	302.4	2.8
6	980	36.5669	0.0028	0.0046	0.0182	97.72	35.7343	2.86	50.75	303.4	2.8
7	1030	37.4029	0.0060	0.0090	0.0191	95.27	35.6355	2.04	57.21	302.7	2.8
8	1080	37.5433	0.0065	0.0137	0.0190	94.88	35.6197	1.90	63.24	302.5	2.8
9	1140	37.2983	0.0057	0.0073	0.0190	95.47	35.6080	4.71	78.15	302.4	2.8
10	1180	36.7235	0.0037	0.0101	0.0186	97.03	35.6325	4.96	93.85	302.6	2.8
11	1230	36.3353	0.0026	0.0097	0.0181	97.90	35.5714	1.80	99.57	302.2	2.8
12	1300	37.3012	0.0091	0.0048	0.0178	92.81	34.6185	0.06	99.76	294.7	6.1
13	1400	37.8366	0.0169	0.2935	0.0289	86.82	32.8593	0.07	100.00	280.8	5.9
Total age = 303.1Ma											
XH080911-1(1) 钾长石, W = 26.35mg, J = 0.004795											
1	800	37.3971	0.0099	0.0118	0.0146	92.16	34.4641	3.08	9.96	275.9	2.6
2	860	36.7282	0.0044	0.0098	0.0135	96.44	35.4205	2.59	18.36	283.0	2.6
3	920	37.5303	0.0067	0.0083	0.0141	94.74	35.5575	2.56	26.63	284.0	2.6
4	980	39.3821	0.0131	0.0132	0.0153	90.18	35.5149	2.69	35.35	283.7	2.6
5	1040	42.1469	0.0231	0.0064	0.0171	83.76	35.3000	3.00	45.05	282.1	2.6
6	1090	44.2029	0.0306	0.0145	0.0189	79.56	35.1699	3.04	54.89	281.1	2.6
7	1130	45.7846	0.0359	0.0169	0.0199	76.84	35.1837	2.96	64.49	281.2	2.6
8	1160	45.4373	0.0342	0.0136	0.0198	77.74	35.3211	4.26	78.27	282.3	2.6
9	1190	44.8351	0.0319	0.0098	0.0193	78.98	35.4132	3.72	90.31	282.9	2.6
10	1240	44.7683	0.0318	0.0000	0.0191	79.01	35.3721	1.94	96.61	282.6	2.6
11	1300	46.1282	0.0351	0.0263	0.0204	77.50	35.7486	0.52	98.28	285.4	2.8
12	1400	46.1782	0.0343	0.0238	0.0200	78.06	36.0496	0.53	100.00	287.6	2.9
Total age = 282.0Ma											

注：表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值; F = ⁴⁰Ar*/³⁹Ar, 为放射成因 ⁴⁰Ar 与 ³⁹Ar 的比值

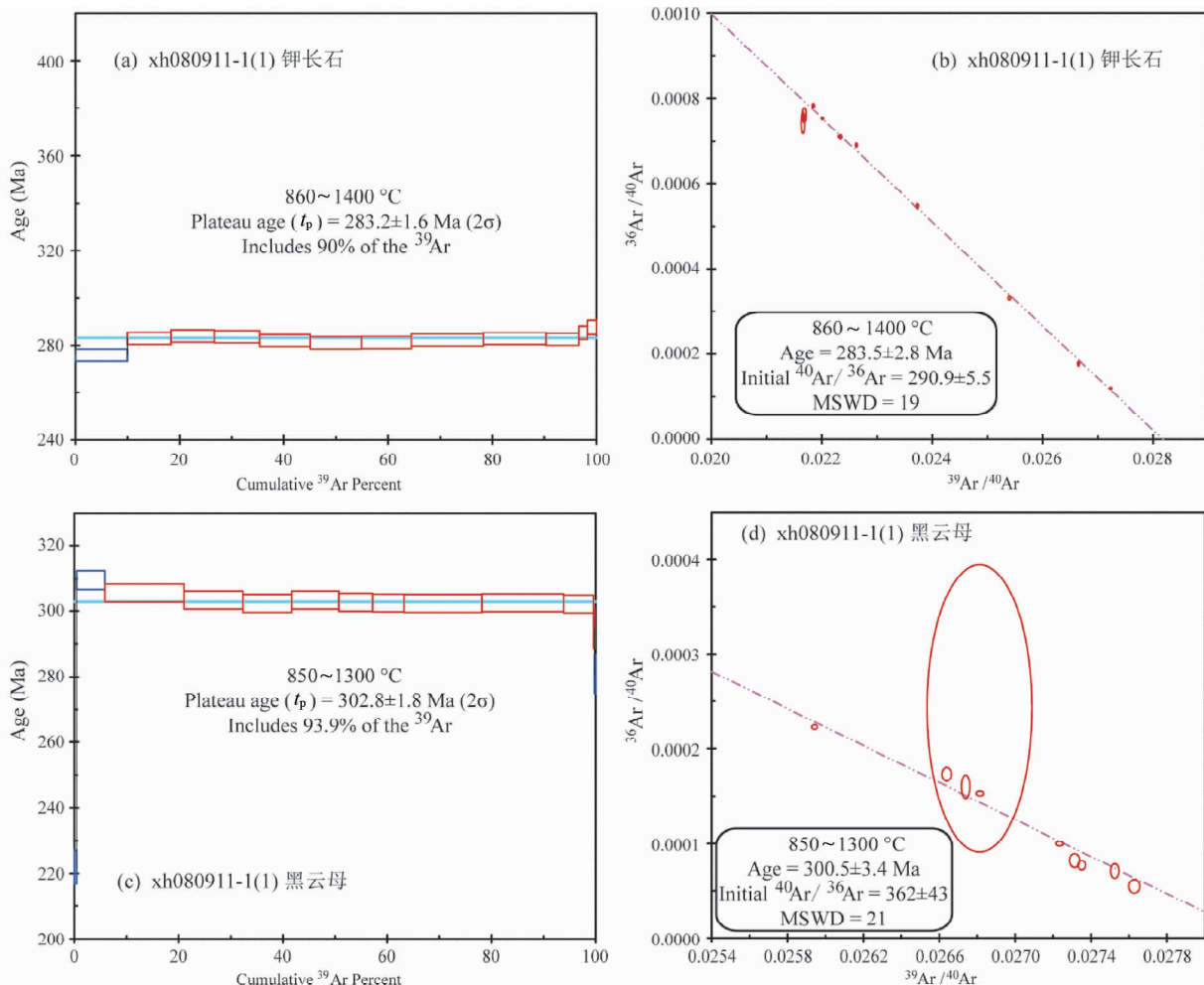


图4 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热年龄谱 (a, c) 和年龄反等时线 (b, d)
(a, b) 钾长石; (c, d) 黑云母

Fig. 4 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar release spectra (a, c) for stepwise heating analyses and isochron diagrams (b, d)

测年结果见表1。共分析了12粒锆石,每粒锆石测试1个点。锆石中的U、Th含量变化较小,U为 $48 \times 10^{-6} \sim 379 \times 10^{-6}$,Th为 $44 \times 10^{-6} \sim 315 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.65~1.06,均大于0.5,具有岩浆锆石的特点。所有12个测点给出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄平均值为 $289.7 \pm 2.3\text{Ma}$ (MSWD = 1.7;图3c),可能代表该碱性花岗岩的结晶年龄,属于早二叠世(二叠纪乌拉尔世)萨克马尔期。

3.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学

博尔雷东北碱性花岗岩样品 Xh080911-1(1) 钾长石和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温测年结果见表2。

Xh080911-1(1) 钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (图4a, b) 12个加热阶段的全熔年龄 (Total age) 为282.0Ma, 坪年龄发育较好, 其860~1400°C加热阶段坪年龄为 $283.2 \pm 1.6\text{Ma}$ (包括释出 $^{39}\text{Ar}_k$ 的90%)。该样品等时线年龄的线性关系较好, 给出 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 正等时线年龄为 $283.8 \pm 3.4\text{Ma}$, 反等时线年龄为

$283.5 \pm 2.8\text{Ma}$ 。由反等时线得到的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 290.9 ± 5.5 , 略小于现代大气氩同位素比值(298.56 ± 0.31 ; Lee *et al.*, 2006), 说明该样品基本上不存在放射性成因氩过剩或氩丢失, 因此, 这里采用反等时线年龄 $283.5 \pm 2.8\text{Ma}$ 为其冷却年龄, 属于早二叠世。

Xh080911-1(1) 黑云母 (图4c, d) 13个加热阶段的全熔年龄 (Total age) 为303.1Ma, 坪年龄发育较好, 其850~1300°C加热阶段坪年龄为 $302.8 \pm 1.8\text{Ma}$ (包括释出 $^{39}\text{Ar}_k$ 的93.9%)。该样品等时线年龄的线性关系较好, 给出 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 正等时线年龄为 $300.6 \pm 3.5\text{Ma}$, 反等时线年龄为 $300.5 \pm 3.4\text{Ma}$ 。由反等时线得到的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为 362 ± 43 , 大于现代大气氩同位素比值(298.56 ± 0.31 ; Lee *et al.*, 2006), 说明该样品存在放射性成因氩过剩, 真实的冷却年龄要小于该反等时线年龄, 因此, 这里仍然采用反等时线年龄 $300.5 \pm 3.4\text{Ma}$ 为其冷却年龄, 属于晚石炭世。该黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄略大于同样品锆石结晶年龄 ($289.7 \pm 2.3\text{Ma}$), 不能很好地反映所在岩体的冷却过程。

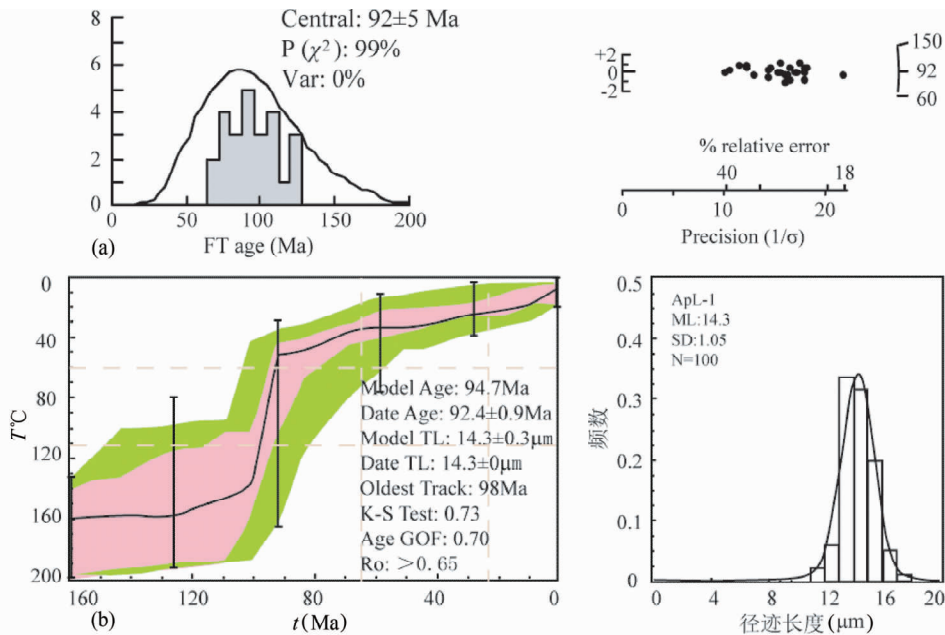


图5 巴尔喀什成矿带磷灰石裂变径迹分析(a)和热历史模拟结果(b)

(a)数据图说明:左为单颗粒年龄直方图,曲线为拟合中心年龄趋势;右为放射图,其左侧坐标为误差范围,右侧坐标为年龄,横坐标上为相对误差下为精度,图中圆点为所测试颗粒,直观标明中心年龄、 $P(\chi^2)$ 检验值、相对误差和测试颗粒数;(b)采用 AFTSolve (Ketcham *et al.*, 2000)得到的热历史模拟结果

Fig. 5 Apatite fission-track (AFT) age histograms (left of a), radial plots (right of a), AFT thermal history model (left of b), and track length distribution (right of b)

3.3 磷灰石裂变径迹热年代学

XH080911-1(1)磷灰石裂变径迹(AFT)测年结果如下:测试的颗粒数(N_c)为25,标准玻璃的诱发径迹密度(ρ_d)为 $0.949 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$,标准玻璃的诱发径迹数(N_d)为2373,自发径迹密度(ρ_s)为 $2.877 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$,自发径迹数(N_s)为538,外探测器诱发径迹密度(ρ_i)为 $0.523 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$,外探测器诱发径迹数(N_i)为978,磷灰石样品U含量为 6.9×10^{-6} ,自由度为 N_c-1 时得到的 χ^2 值的概率 $P(\chi^2)$ 为92.4%, N_s 和 N_i 之间的相关系数(r)为0.876,测量的水平围限径迹数(N_j)为100。

测试结果表明,磷灰石裂变径迹年龄(FT AGE)为 $92.4 \pm 5.9 \text{ Ma}$ ($\pm 1\sigma$),明显小于岩浆侵入年龄($289.7 \pm 2.3 \text{ Ma}$; 本文),处在晚白垩世早期。磷灰石围限径迹平均长度(MTL)为 $14.30 \pm 0.11 \mu\text{m}$ ($\pm 1\sigma$),径迹长度标准偏差(SD)为 $1.05 \mu\text{m}$ 。该径迹平均长度小于原始径迹长度($16.3 \pm 0.9 \mu\text{m}$; 陈刚等, 2005),也小于快速冷却至地表温度的裂变径迹平均长度($14.5 \sim 15.5 \mu\text{m}$; Green *et al.*, 1989),表明这些样品均经历了完全退火作用,然后又被缓慢抬升到部分退火带之上并最终成为地表露头。

图5给出了该样品磷灰石单颗粒年龄直方图和放射图(a)和热历史模拟结果(b)。

4 讨论

地质热年代学研究的矿物封闭温度是认识地质体(包括矿床)形成与剥露作用的热演化历史的重要依据(陈宣华等, 2010b; Chen *et al.*, 2014)。前人认为,巴尔喀什成矿带内存在三叠纪花岗岩类岩浆活动,为该地区(特别是巴尔喀什岩基)的最年轻花岗岩类侵入体。本次研究所进行的锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果,显示该地区最年轻的花岗岩类侵入体的年龄为 $289.7 \pm 2.3 \text{ Ma}$,属于早二叠世萨克马尔期。原来被认为是早三叠世侵入的岩体,也给出了早二叠世的年龄。与之类似,在巴尔喀什成矿带东延的我国境内西准噶尔成矿带,也出现一些早二叠世花岗岩类岩基,如夏尔莆岩体(即克拉玛依岩体)给出早二叠世年龄($297.6 \pm 2.5 \text{ Ma}$; 李永军等, 2013),大致属于同一时期。

从巴尔喀什成矿带西部云英岩-石英脉型钨钼矿床花岗岩类和晚古生代最晚期花岗岩类侵入岩体的锆石 U-Pb 年龄、黑云母和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄、磷灰石 FT 年龄和模拟热历史,以及它们各自的封闭温度所构成的演化曲线(图6)来看,该地区钨-钼成矿作用的深度可能要远远超过磷灰石 FT 部分退火带的深度(其上界面在2km附近),而达到钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 封闭温度所代表的深度位置(估计在5km左右; 陈宣华等, 2012a, b)。

巴尔喀什成矿带西部晚古生代最晚期花岗岩类岩浆侵

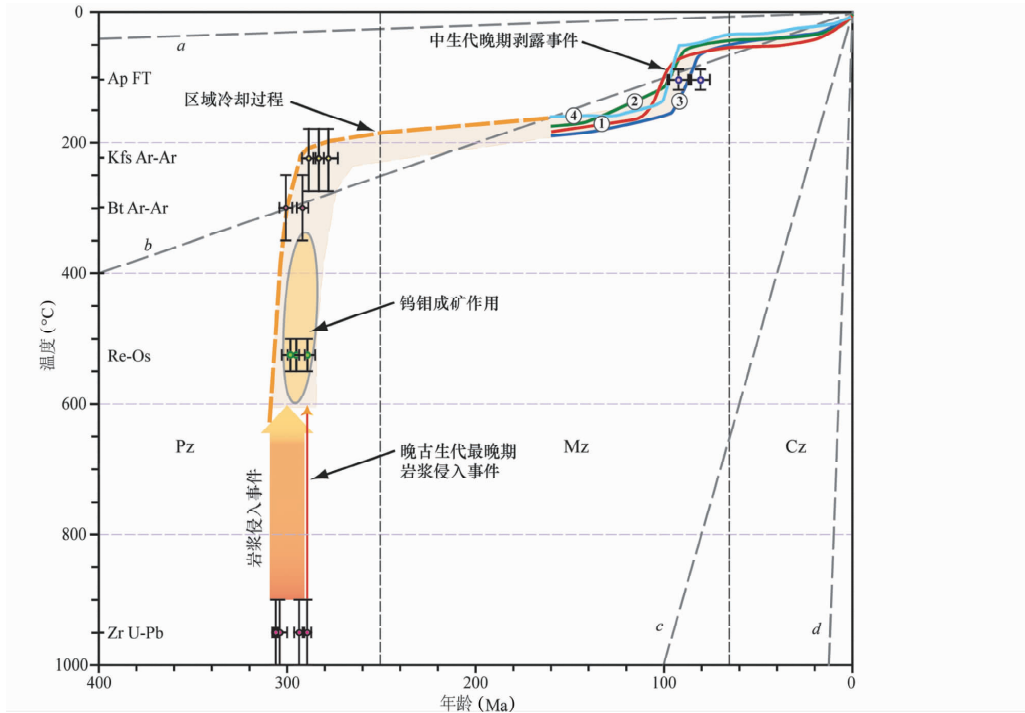


图6 巴尔喀什成矿带晚古生代最晚期侵入岩体岩浆作用和剥露过程的温度-时间图解

图中同时给出钨钼矿床的岩浆-成矿作用和剥露过程(修改自陈宣华等,2012b). 矿物封闭温度据陈宣华等(2010b)和引用的相关文献. a-d分别为冷却速率 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 、 $1^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 、 $10^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 和 $100^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 线. 粗虚线及其阴影部分为推测冷却曲线. 磷灰石裂变径迹模拟曲线:①为东科翁腊德;②为阿克苏套;③为扎涅特;④为本文数据. 矿物代号:Zr-锆石;Bt-黑云母;Kfs-钾长石;Ap-磷灰石

Fig. 6 Temperature vs. time diagram showing the evolution history of the latest pluton in Late Paleozoic and its exhumation in the western part of the Balkhash metallogenic belt

入岩体的磷灰石 FT 年龄($92.4 \pm 5.9\text{Ma}$), 与该地区钨-钼矿床花岗岩类的磷灰石 FT 年龄($92.2 \pm 5.0\text{Ma}$ 至 $80.3 \pm 4.9\text{Ma}$; 陈宣华等, 2012b) 极为一致, 代表了该岩体与钨-钼矿床共同的剥露年龄, 同时也是区域地壳的整体剥露年龄. 这说明, 只有到了晚白垩世, 该地区才开始剥露到 2km (约 60°C) 以浅(图6). 磷灰石 FT 年龄反映巴尔喀什成矿带的整体隆升事件处在我国新疆准噶尔盆地周缘构造抬升-剥露作用的时限($\sim 135\text{Ma}$ 至 $\sim 67\text{Ma}$; 李丽等, 2008; 李玮等, 2010)之内, 说明了巴尔喀什成矿带与我国新疆西准噶尔成矿带在晚中生代剥露历史上具有一致性. 由于受中生代右行走滑断裂活动和局部的差异抬升作用的影响, 造成了不同地质体之间磷灰石裂变径迹年龄之间的微小差异. 磷灰石裂变径迹测年结果表明, 巴尔喀什地区并没有受新生代印度-欧亚板块陆-陆碰撞事件的影响, 也没有受新生代天山造山带构造变形作用的影响.

5 结论

通过巴尔喀什成矿带西部晚古生代最晚期花岗岩类侵入岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学、磷灰石裂变径迹定年和热历史模拟, 结合前人研究数据, 得到结

论如下:

(1) 巴尔喀什成矿带西部地区原来被认为是属于三叠纪的后碰撞花岗岩类侵入岩体, 给出锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $289.7 \pm 2.3\text{Ma}$ (早二叠世), 代表了该地区晚古生代最晚期深成岩浆侵入事件的年龄, 与该地区最晚期云英岩-石英脉型钨钼成矿作用的年龄相当.

(2) 区域深成岩浆侵入、钨钼成矿作用、中温冷却到低温剥露作用热历史全过程的构建, 揭示了晚古生代最晚期花岗岩类侵入体具有与钨钼矿床类似的热演化历史, 反映了区域热演化的整体性与一致性. 其中, 晚古生代最晚期花岗岩类侵入体具有与钨钼矿床相同的中生代晚白垩世剥露作用年龄($92.4 \pm 5.9\text{Ma}$), 反映了巴尔喀什成矿带晚白垩世整体抬升与剥露历史.

致谢 一起参加野外地质调查与采样的还有杨农、李光明、张进、申萍、薛春纪、吕新彪、张林浩、西尔班·佳克巴娃等; 研究工作得到新疆维吾尔自治区国家 305 项目办公室、哈萨克斯坦萨特巴耶夫地质科学研究所和课题组聂风军、白大明和江思宏研究员的大力支持与帮助; 资料收集得到新疆自然资源与生态环境研究中心王煜高级工程师的帮助; 两位审稿专家提出了建设性的修改意见; 作者谨表衷心感谢.

References

- Chen G, Zhao ZY, Li PL, Ren ZL, Chen JP and Tan MY. 2005. Fission track evidence for the tectonic thermal history of the Hefei basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(6): 1366 – 1374 (in Chinese with English abstract)
- 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 XH, Qu WJ, Han SQ, Seitmuratova E, Shi W, Yang N, Chen ZL, Ye BY, Zeng FG, Du AD, Jiang RB and Wang ZH. 2010a. Re-Os dating of molybdenites from the Cu-Mo-W deposits in the Balkhash metallogenic belt, Kazakhstan and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1333 – 1348 (in Chinese with English abstract)
- Chen XH, Dang YQ, Yin A, Wang LQ, Jiang WM, Jiang RB, Zhou SP, Liu MD, Ye BY, Zhang M, Ma LX and Li L. 2010b. Basin-mountain Coupling and Tectonic Evolution of Qaidam Basin and Its Adjacent Orogenic Belts. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 365 (in Chinese)
- Chen XH, Yang N, Ye BY, Wang ZH and Chen ZL. 2011. Tectonic system and its control on metallogenesis in western Junggar as part of the Central Asia multi-core metallogenic system. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3): 325 – 338 (in Chinese with English abstract)
- Chen XH, Wang ZH, Chen ZL, Han SQ, Seitmuratova E, Yang Y, Ye BY, Shi W, Li Y and Chen W. 2012a. Geochronological constraints on skarn copper metallogenesis of the large-scale Sayak ore field, Kazakhstan, Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 1981 – 1994 (in Chinese with English abstract)
- Chen XH, Chen ZL, Han SQ, Wang ZH, Yang Y, Ye BY, Li XZ, Shi W, Li Y and Chen W. 2012b. Geothermochronology of Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt, Kazakhstan, Central Asia. *Earth Science*, 37(5): 878 – 892 (in Chinese with English abstract)
- Chen XH, Seitmuratova E, Wang ZH, Chen ZL, Han SQ, Li Y, Yang Y, Ye BY and Shi W. 2014. SHRIMP U-Pb and Ar-Ar geochronology of major porphyry and skarn Cu deposits in the Balkhash metallogenic belt, Central Asia, and geological implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 723 – 740
- Gao R, Xiao L, Wang GC, He XX, Yang G and Yan SW. 2013. Paleozoic magmatism and tectonic setting in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3413 – 3434 (in Chinese with English abstract)
- Gleadow AJW and Duddy IR. 1981. A natural long-term track annealing experiment for apatite. *Nuclear Tracks*, 5(1–2): 169 – 174
- Green PF, Duddy IR, Laslett GM, Hegarty KA, Gleadow AJW and Lovering JF. 1989. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 79(2): 155 – 182
- He GQ, Cheng SD, Xu X, Li JY and Hao J. 2004. Tectonic Map of Xinjiang and Adjacent Areas, China (1 : 2500000). Beijing: Geological Publishing House, 1 – 65 (in Chinese with English abstract)
- Hurford AJ and Green PF. 1983. The zeta age calibration of fission-track dating. *Chemical Geology*, 41: 285 – 317
- Ketcham RA, Donelick RA and Donelick MB. 2000. AFTSolve: A program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data. *American Mineralogist*, 88(5–6): 929
- Lee JY, Marti K, Severinghaus JP, Kawamura K, Yoo HS, Lee JB and Kim JS. 2006. A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(17): 4507 – 4512
- Li GM, Qin KZ and Li JX. 2008. Geological features and tectonic setting of porphyry copper deposits rounding the Balkhash region, Central Kazakhstan, Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2679 – 2700 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, He GQ, Xu X, Li HQ, Sun GH, Yang TN, Gao LM and Zhu ZX. 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148 – 168 (in Chinese with English abstract)
- Li L, Chen ZL, Qi WX, Wang SX, Chen XH, Wu YP, Gong HL, Wei XC, Yang Y and Li XZ. 2008. Apatite fission track evidence for uplifting-exhumation processes of mountains surrounding the Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1011 – 1020 (in Chinese with English abstract)
- Li M, Zhou SH, Hu QW and Tian PR. 2007. Knowledge of porphyry Cu (Mo) ore belts in the Central Asian metallogenic domain and their establishment. *Geology in China*, 34(5): 870 – 877 (in Chinese with English abstract)
- Li TD, Ujkenov BS, Kim BC, Tomurtogoo O and Petrov OV. 2008. Geological Map of Central Asia and Adjacent Areas (1 : 2500000). Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Li W, Hu JM and Qu HJ. 2010. Fission track analysis of Junggar basin peripheral orogen and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(2): 171 – 182 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Li GY, Kang L, He XG, Zhang HW and Wang JN. 2013. Evidence of zircon U-Pb geochronology for magma mixing of Xiaerpu granite in West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3023 – 3030 (in Chinese with English abstract)
- Liu G, Chen XH, Dong SW, Chen ZL, Han SQ, Yang Y, Ye BY and Shi W. 2012. Late Paleozoic crustal growth and tectonic evolution in Balkhash metallogenic belt (Kazakhstan), Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 1995 – 2008 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Geochronology Center, Berkeley, Special Publication No. 4
- Ren JX, Wang ZX, Chen BW, Jiang CF, Niu BG, Li JY, Xie GL, He ZJ and Liu ZG. 1999. Analysis on Tectonics of China in Global Tectonic System; A Brief Specification on Tectonics Map of China and Its Adjacent Areas. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 25 (in Chinese)
- Shen P and Shen YC. 2010. A comparative study on ore-forming conditions and their models of the porphyry copper deposits in western Junggar, China and Circum-Balkhash, Kazakhstan. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2299 – 2316 (in Chinese with English abstract)
- Shen P, Pan HD, Xiao WJ, Chen XH, Eleonorad S and Shen YC. 2013. Two geodynamic-metallogenic events in the Balkhash (Kazakhstan) and the West Junggar (China): Carboniferous porphyry Cu and Permian greisen W-Mo mineralization. *International Geology Review*, 55(13): 1660 – 1687
- Steiger RH and Jäger E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(3): 359 – 362
- Xiao WJ, Shu LS, Gao J, Xiong XL, Wang JB, Guo ZJ, Li JY and Sun M. 2008. Continental dynamics of the Central Asian Orogenic Belt and its metallogeny. *Xinjiang Geology*, 26(1): 4 – 8 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Li RS, Chen JL, Ma ZP, Li ZP, Wang HL, Bai JK and Tang Z. 2014. New constrains on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1521 – 1534 (in Chinese with English abstract)
- Yakubchuk A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: A revised model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 761 – 779
- 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 ³⁹Ar 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 YF, He GQ and An F. 2007. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain. Geological Bulletin of China, 26(9): 1167–1177 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Xu X, Luo ZH, Shen P, Ma HD, Chen XH, An F and Wei SN. 2014. Geological Evolution and Ore-Formation in the Core Part of Central Asian Metallogenic Region. Beijing: Geological Publishing House, 1–202 (in Chinese)

附中文参考文献

陈刚, 赵重远, 李丕龙, 任战利, 陈建平, 谭明友. 2005. 合肥盆地构造热演化的裂变径迹证据. 地球物理学报, 48(6): 1366–1374

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

陈宣华, 屈文俊, 韩淑琴, Seitmuratova E, 施炜, 杨农, 陈正乐, 叶宝莹, 曾法刚, 杜安道, 蒋荣宝, 王志宏. 2010a. 巴尔喀什成矿带 Cu-Mo-W 矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测定及其地质意义. 地质学报, 84(9): 1333–1348

陈宣华, 党玉琪, 尹安, 汪立群, 蒋武明, 蒋荣宝, 周苏平, 刘明德, 叶宝莹, 张敏, 马立协, 李丽. 2010b. 柴达木盆地及其周缘山系盆山耦合与构造演化. 北京: 地质出版社, 1–365

陈宣华, 杨农, 叶宝莹, 王志宏, 陈正乐. 2011. 中亚成矿域多核成矿系统西准噶尔成矿带构造体系特征及其对成矿作用的控制. 大地构造与成矿学, 35(3): 325–338

陈宣华, 王志宏, 陈正乐, 韩淑琴, Seitmuratova E, 杨屹, 叶宝莹, 施炜, 李勇, 陈文. 2012a. 中亚萨亚克大型铜矿田砂卡岩型铜成矿作用的年代学制约. 岩石学报, 28(7): 1981–1994

陈宣华, 陈正乐, 韩淑琴, 王志宏, 杨屹, 叶宝莹, 李学智, 施炜, 李勇, 陈文. 2012b. 中亚巴尔喀什成矿带钼-钨矿床的地质热年代学. 地球科学, 37(5): 878–892

高睿, 肖龙, 王国灿, 贺新星, 杨刚, 鄯圣武. 2013. 西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景. 岩石学报, 29(10): 3413–3434

何国琦, 成守德, 徐新, 李锦轶, 郝杰. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2500000;附说明书). 北京: 地质出版社, 1–65

李光明, 秦克章, 李金祥. 2008. 哈萨克斯坦环巴尔喀什斑岩铜矿床地质与成矿背景研究. 岩石学报, 24(12): 2679–2700

李锦轶, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 高立明, 朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. 地质学报, 80(1): 148–168

李丽, 陈正乐, 祁万修, 王世新, 陈宣华, 吴益平, 宫红良, 魏新昌, 杨屹, 李学智. 2008. 准噶尔盆地周缘山脉抬升-剥露过程的 FT 证据. 岩石学报, 24(5): 1011–1020

李明, 周圣华, 胡庆雯, 田培仁. 2007. 中亚成矿域斑岩铜(钼)矿带的认识与建立. 中国地质, 34(5): 870–877

李廷栋, 耿树方, 范本贤, 丁孝忠, 剧远景. 2008. 亚洲中部及邻区地质图(1:2500000). 北京: 地质出版社

李玮, 胡健民, 渠洪杰. 2010. 准噶尔盆地周缘造山带裂变径迹研究及其地质意义. 地质学报, 84(2): 171–182

李永军, 李甘雨, 康磊, 何小刚, 张洪伟, 王军年. 2013. 西准噶尔夏尔甫岩体岩浆混合的锆石 U-Pb 年代学证据. 岩石学报, 29(9): 2009–2014

刘刚, 陈宣华, 董树文, 陈正乐, 韩淑琴, 杨屹, 叶宝莹, 施炜. 2012. 巴尔喀什成矿带晚古生代地壳增生与构造演化. 岩石学报, 28(7): 1995–2008

任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦轶, 谢广连, 和政军, 刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社, 1–25

申萍, 沈远超. 2010. 西准噶尔与环巴尔喀什斑岩型铜矿床成矿条件及成矿模式对比研究. 岩石学报, 26(8): 2299–2316

肖文交, 舒良树, 高俊, 熊小林, 王京彬, 郭召杰, 李锦轶, 孙敏. 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用. 新疆地质, 26(1): 4–8

徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 马中平, 李智佩, 王洪亮, 白建科, 唐卓. 2014. 新疆北部古生代构造演化的几点认识. 岩石学报, 30(6): 1521–1534

张彦, 陈文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层(L/S)Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar 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

朱永峰, 何国琦, 安芳. 2007. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律. 地质通报, 26(9): 1167–1177

朱永峰, 徐新, 罗照华, 申萍, 马华东, 陈宣华, 安芳, 魏少妮. 2014. 中亚成矿域核心区地质演化与成矿作用. 北京: 地质出版社, 1–202