

doi:10.3799/dqkx.2012.097

# 中亚巴尔喀什成矿带钼—钨矿床的地质热年代学

陈宣华<sup>1</sup>, 陈正乐<sup>1</sup>, 韩淑琴<sup>1</sup>, 王志宏<sup>1</sup>, 杨屹<sup>2</sup>  
叶宝莹<sup>3</sup>, 李学智<sup>2</sup>, 施炜<sup>1</sup>, 李勇<sup>1</sup>, 陈文<sup>4</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

2. 新疆维吾尔自治区地质矿产开发勘查局第一区调大队, 新疆乌鲁木齐 830011

3. 中国地质大学地质调查研究院, 北京 100083

4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

**摘要:** 巴尔喀什成矿带是世界著名的中亚成矿域斑岩型铜钼成矿带, 产出许多斑岩型铜钼矿床和一些石英脉—云英岩型钨钼矿床。对巴尔喀什成矿带西部的东科翁腊德、阿克沙套、扎涅特3个典型的石英脉—云英岩型钨钼矿床的成矿时代和剥露过程进行了地质热年代学研究。锆石 SHRIMP U-Pb 定年给出东科翁腊德、阿克沙套、扎涅特与成矿作用有关的花岗岩类岩浆作用的年代分别为  $293.6 \pm 2.7$  Ma、 $306 \pm 1$  Ma 和  $304 \pm 4$  Ma, 属海西晚期构造—岩浆活动的产物。花岗岩类  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  测年结果给出了与成矿有关岩体的冷却年龄, 其等时线年龄分别为  $292 \pm 3$  Ma (阿克沙套黑云母)、 $288.8 \pm 3.6$  Ma (阿克沙套钾长石) 和  $278 \pm 5$  Ma (东科翁腊德钾长石)。磷灰石裂变径迹测年给出东科翁腊德、阿克沙套、扎涅特的年龄分别为  $92.1 \pm 5.7$  Ma、 $92.2 \pm 5.0$  Ma 和  $80.3 \pm 4.9$  Ma, 说明这3个矿床的剥露作用主要发生在晚白垩世。花岗岩类岩石 U-Pb、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  和裂变径迹热年代学研究, 揭示了巴尔喀什成矿带 Mo-W 矿床从深成岩浆侵入活动、成矿作用、区域冷却到剥露作用的全过程。

**关键词:** 地质年代学; SHRIMP U-Pb;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ; 裂变径迹; 钼—钨矿床; 巴尔喀什成矿带。

中图分类号: P597

文章编号: 1000—2383(2012)05—0878—15

收稿日期: 2011—11—12

## Geothermochronology of Mo-W Deposits in Balkhash Metallogenic Belt, Kazakhstan, Central Asia

CHEN Xuan-hua<sup>1</sup>, CHEN Zheng-le<sup>1</sup>, HAN Shu-qin<sup>1</sup>, WANG Zhi-hong<sup>1</sup>, YANG Yi<sup>2</sup>,  
YE Bao-ying<sup>3</sup>, Li Xue-zhi<sup>2</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, CHEN Wen<sup>4</sup>

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2. Geological Survey Team No. 1, Xinjiang Bureau of Geological Exploration, Urumqi 830011, China

3. Geological Survey, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract:** The Balkhash metallogenic belt in Kazakhstan, with many porphyritic Cu-Mo deposits and some quartz-vein greisen Mo-W deposits, is a famous porphyritic Cu-Mo metallogenic belt in Central Asian metallogenic domain. Three typical Mo-W deposits such as East Kounrad, Akshatau, and Zhanet, are studied in this paper through the application of geothermochronology. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology yields ages of  $293.6 \pm 2.7$  Ma (alkaline granite),  $306 \pm 1$  Ma (granodiorite), and  $304 \pm 4$  Ma (porphyry monzonite), for East Kounrad, Akshatau, and Zhanet deposits respectively, belonging to the tectonic-magmatism in the Late Hercynian.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology gives the cooling ages at  $292 \pm 3$  Ma for biotite from Akshatau, and  $288.8 \pm 3.6$  Ma and  $278 \pm 5$  Ma for K-feldspars from Akshatau and East Kounrad, respectively. Apatite fission track dating of granitoids gives low temperature cooling ages of  $92.1 \pm 5.7$  Ma,  $92.2 \pm 5.0$  Ma and  $80.3 \pm 4.9$  Ma, for East Kounrad, Akshatau, and Zhanet deposits, respectively, suggesting the uplifting and exhumation of Mo-W deposits together with the granitoids during the Late Cretaceous. The geochronological data and thermal history modeling presented in this paper, together with

**基金项目:** 国家科技支撑计划重点项目暨国家“305”项目(No. 2007BAB25B02)。

**作者简介:** 陈宣华(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事构造地质学和矿产资源科学研究工作。E-mail: xhchen@cags.ac.cn

metallogenic information from previous studies, reveal the entire thermo-history, from the intrusion of plutons and Mo-W metallogenesis in the abyssal system in the Late Carboniferous and the Early Permian, through regional cooling, to the exhumation of the deposits in the Late Cretaceous, in the western part of Balkhash metallogenic belt.

**Key words:** geochronology; SHRIMP U-Pb;  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ; fission track; Mo-W deposit; Balkhash metallogenic belt.

中亚成矿域因其巨量的金属和非金属矿产而闻名于世,成矿作用极其复杂多样(涂光炽,1999;何国琦和朱永峰,2006;朱永峰等,2007;肖文交等,2008;陈宣华等,2009;陈宣华等,2010c;陈宣华等,2011)。巴尔喀什成矿带地处哈萨克斯坦—天山马蹄形构造带的内缘(图1),东西延伸近1000 km,是(环)巴尔喀什—(环)准噶尔—南蒙古斑岩铜(钼)矿带(李明等,2007)的一部分,也是中亚成矿域的核心地区之一(朱永峰等,2007;陈宣华等,2010c)。除了科翁腊德(铜储量>800万t)、阿克斗卡(铜储量 $588\times 10^4$ t)、科克赛、博尔雷等超大型、大型斑岩铜钼矿床和萨亚克大型矽卡岩型铜(钼金)矿床之外(陈宣华等,2010d,2010e),该成矿带西部产出的东科翁腊德(East Kounrad)、阿克沙套(Akshatau)、扎涅特(Zhanet)等云英岩—石英脉型钼钨矿床也具有重要的地位(陈宣华等,2010c;Chen *et al.*, 2010b)。

本文在哈萨克斯坦东科翁腊德、阿克沙套、扎涅特等典型钼钨矿床采集了与成矿作用密切相关的花岗岩类岩石未蚀变的新鲜样品(采样点位置见图2),通过岩样破碎、浮选、电磁选和手工挑拣等方法,挑选出单颗粒锆石、黑云母、钾长石和磷灰石纯净样品,进行了SHRIMP U-Pb、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 及裂变径迹(FT)测年研究,结合辉钼矿Re-Os测年(陈宣华等,2010c),限定了云英岩—石英脉型钼钨成矿作用的年龄,揭示了钼钨矿床从深成岩浆活动、成矿作用、区域冷却至剥露作用全过程的定量化的热演化历史。

## 1 巴尔喀什成矿带钼钨矿床地质特征与样品采集

### 1.1 东科翁腊德钼钨矿床

东科翁腊德大型钼钨矿床位于科翁腊德斑岩型铜矿床的东边约11 km处(图2),是一个地下开采的岩浆期后云英岩—石英脉型钼钨矿床,在二战期间曾发挥过作用,现已废弃。矿床产出在晚古生代陆缘火山—侵入岩带的前缘部位,出露地层为早泥盆世法门阶陆源砂岩粉砂岩组合及少量的酸性凝灰岩夹层、早石炭世沉积—火山岩地层。Mo-W成矿作用

主要出现在石英脉和石英细脉中,也出现在岩钟顶部和石英脉周围的云英岩中(Burmistrov *et al.*, 1990)。矿脉延伸方向为 $275^\circ\sim 285^\circ$ ,延伸长度约8 km,厚度0.30~1.5 m,具有垂向分带特点。该矿床主要矿石矿物为白钨矿、黑钨矿和辉钼矿等,含硅铍石、绿柱石、辉铍矿、黄玉等。矿床储量为20~25万t Mo,品位0.056% Mo(陈宣华等,2010c)。曾有报道东科翁腊德钼钨矿床白云母年龄为302 Ma(Ye. V. Puchkov,转引自陈宣华等,2010c)。本文采集样品xh080910-10(1)为砖红色碱性花岗岩,由钾长石(~45%)、微斜长石(~15%)、石英(~25%)、角闪石(~10%)和黑云母(~5%)等组成。

### 1.2 阿克沙套钼钨矿床

阿克沙套大型钼钨矿床(图2),距离巴尔喀什市约150 km,为浸染状Be-Mo-W石英脉—云英岩型矿床(Yefimov *et al.*, 1990)。该矿床位于晚古生代大陆边缘复理石建造中火山—侵入岩带的后部,是二叠纪阿克沙套成矿省的一部分,受线性和环状断裂构造的控制,不同方向构造带的交切部位是矿床产出的最重要部位(Burmistrov *et al.*, 1990)。矿床产出在侵入于志留系砂岩中的阿克舍套多阶段复合杂岩中的二叠纪淡色花岗岩中,含有辉钼矿、石英和黄玉云英岩矿体,有时含有电气石。矿体形态有独立脉、脉群和网状脉,石英脉含在云英岩岩体中(Bespaev and Miroshnichenko, 2004)。矿床与成矿侵入岩体的顶部密切相关,云英岩岩体群具有根带、中间带和前锋带,主要的矿化作用与中间带相一致;矿脉具有垂向交代分带特征,矿床形成具有多阶段过程(Bespaev and Miroshnichenko, 2004)。主要矿石矿物有黑钨矿、辉钼矿、白钨矿、自然铋、锡石、黄玉、电气石等。矿床资源量为 $2.741\times 10^6$  t(一级储量)0.50%  $\text{WO}_3$ ,  $6.55\times 10^7$  t 0.1%~0.3%  $\text{WO}_3$ ,  $1.75\times 10^7$  t 0.04%~0.07% Mo,  $1.60\times 10^7$  t 0.03%~0.07% Be(陈宣华等,2010c)。本文采集的xh080914-10(1)样品为肉红色碱性花岗岩,由钾长石(~65%)、石英(~25%)、斜长石(~5%)、角闪石(~3%)及少量黑云母等组成;样品xh080914-10(2)为青灰色花岗闪长岩,由斜长石(~45%)、石英(~30%)、角闪石(~20%)、钾长石(~5%)及少量



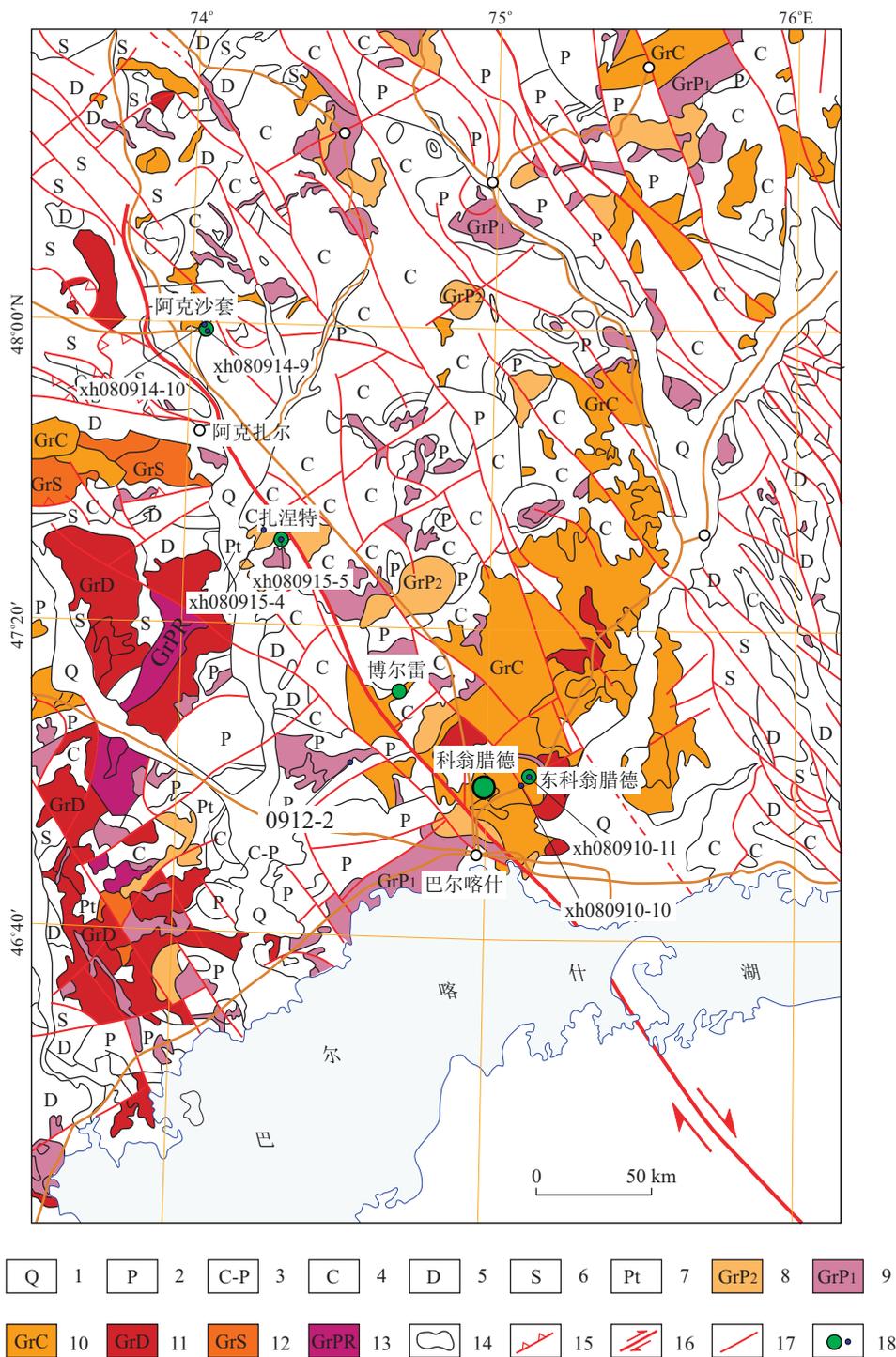


图2 巴尔喀什成矿带西部区域地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the western part of Balkhash metallogenic belt

据陈宣华等(2010c)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.矿床位置(大点)和采样点位置(小点)

黑云母等组成。

### 1.3 扎涅特钼矿床

扎涅特钼矿床为一个中型的石英脉—云英岩型钼矿床(图2)。该矿床位于托克劳背斜西侧,有特殊

的火山机构——短轴向斜,核部充填侵入岩体,直径约14 km。围岩蚀变有钾化(钾长石和黑云母化)、黄铁矿化、云英岩化、绿帘石化等。辉钼矿主要产出在含钼的花岗斑岩、晚期石英脉和裂隙中,呈浸染状和

脉状. 矿体形态、Mo 含量的分布与脉体的形态相一致. 晚期有伟晶岩脉产出. 该矿床主要矿石矿物为辉钼矿、黑钨矿、黄玉和绿柱石等, 具有较高含量的稀土和稀有元素. 在晚期石英脉中辉钼矿与萤石共生(陈宣华等, 2010c). 矿床于 1948 年开始勘探, 具有很好的开采条件, 曾开采过一段时间, 现暂停开采. 本文采集的样品 xh080915-4(1) 为肉红色碱性花岗岩, 由钾长石( $\sim 65\%$ )、斜长石( $\sim 25\%$ )、石英( $\sim 10\%$ )等组成; 样品 xh080915-5(3) 为青灰色二长花岗斑岩, 似斑状, 斑晶为斜长石( $\sim 20\%$ )、钾长石( $\sim 10\%$ ), 基质为中细粒石英( $\sim 45\%$ )、斜长石( $\sim 15\%$ )、钾长石( $\sim 5\%$ )、角闪石( $\sim 5\%$ )及少量黑云母等.

## 2 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

### 2.1 实验条件

手工挑出晶形完好、透明度和色泽度好的锆石, 采用双面胶固定, 将锆石标样(结晶年龄为 417 Ma)与样品排列在指定位置, 用模具注入环氧树脂, 抽真空、烘干, 经树脂固化、打磨、抛光, 制备锆石样品靶. 阴极发光照相采用 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, 通过远程控制位于澳大利亚 Curtin 理工大学的 SHRIMP II 而获得的. SHRIMP 远程共享控制系统由北京离子探针中心、中国计量科学研究所和吉林大学共同研发.

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求得. 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  $^{204}\text{Pb}$  含量进行普通锆校正. 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 锆石样品描述

所测锆石样品来自东科翁腊德钨钼矿床外围的碱性花岗岩、阿克沙套钨钼矿床花岗闪长岩和扎涅特钼矿床二长花岗斑岩, 样品号分别为 xh080910-10(1)、xh080914-10(2) 和 xh080915-5(3). 锆石均为无色透明, 自形粒状、纺锤粒状、短柱状和长柱状, 柱长  $100\sim 300\ \mu\text{m}$ , 极个别达  $400\ \mu\text{m}$  或  $600\ \mu\text{m}$  以上. 锆石一般晶形较完整, 个别锆石较破碎. 锆石内

部结构均匀, 常具有振荡环带韵律或扇状分带结构. 少数锆石核或边部具有多个细小暗色包体. 来自阿克沙套和扎涅特的部分锆石具有浑圆椭球球形态, 或浑圆椭球状核部, 推测为捕获的碎屑锆石. 所测锆石的晶形均较好, 具有明显的岩浆锆石特点(图 3).

### 2.3 分析结果

巴尔喀什成矿带西部钨钼矿床花岗岩类单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 同位素测年数据见表 1. 单个数据点的误差为  $1\sigma$ , 加权平均年龄具  $95\%$  置信度. 年龄数据采用精度较高的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 并进行谐和图解分析(图 4). 各个样品的锆石 SHRIMP U-Pb 测年分析结果分述如下.

样品 xh080910-10(1) 碱性花岗岩: 共分析了 12 粒锆石, 每粒锆石测试 1 个点. 锆石中的 U、Th 含量变化较大, U 为  $(16\sim 223)\times 10^{-6}$ , Th 为  $(14\sim 213)\times 10^{-6}$ ,  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$  比值为  $0.76\sim 1.17$ , 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  $293.6\pm 2.7\ \text{Ma}$  (MSWD=1.6, 图 4a), 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.

样品 xh080914-10(2) 花岗闪长岩共分析了 12 粒锆石, 每粒锆石测试 1 个点. 锆石中的 U、Th 含量变化较大, U 为  $(319\sim 1423)\times 10^{-6}$ , Th 为  $(194\sim 846)\times 10^{-6}$ ,  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$  比值为  $0.48\sim 0.78$ , 绝大部分大于 0.5(只有 1 个为接近 0.5), 具有岩浆锆石的特点. 在去掉  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值偏离较大的 3 个测点(即测点 7.1 为  $310.5\pm 1.0\ \text{Ma}$ , 测点 9.1 为

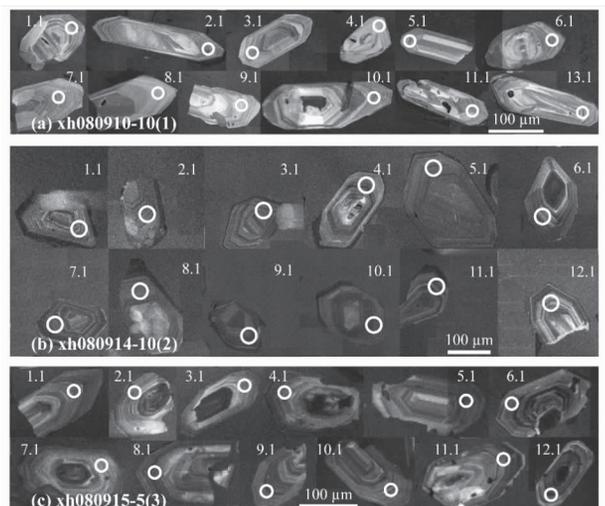


图 3 测年锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images for measured zircons

表1 巴尔喀什成矿带钼钨矿床花岗岩类样品锆石 SHRIMP U-Pb 测年数据  
Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb data for granitoids from Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt

测点	Pb <sub>c</sub> (%)	U(10 <sup>-6</sup> )	Th(10 <sup>-6</sup> )	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb* (10 <sup>-6</sup> )	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb* ± %	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U ± %	<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U ± %	err. corr.	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U (Ma)	±(Ma)	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb (Ma)	±(Ma)			
样品 xh080910-10(1) 碱性花岗岩(东科翁腊德钨钼矿)																
1.1	1.48	118	124	1.08	4.84	0.0464	9.0	0.301	9.2	0.04705	1.5	.163	296.4	4.3	20	220
2.1	1.21	184	158	0.89	7.28	0.0474	7.2	0.297	7.3	0.04555	1.3	.182	287.1	3.7	68	170
3.1	0.75	223	213	0.99	8.78	0.0501	4.6	0.314	4.9	0.04539	1.6	.323	286.2	4.4	201	110
4.1	2.54	20	16	0.82	0.897	0.0539	10	0.370	11	0.0498	3.1	.289	313.6	9.5	366	230
5.1	1.07	97	86	0.92	3.87	0.0514	5.4	0.327	5.6	0.04615	1.6	.292	290.8	4.7	258	120
6.1	0.36	175	129	0.76	7.03	0.0526	5.4	0.338	5.6	0.04666	1.3	.237	294.0	3.8	309	120
7.1	0.35	177	153	0.89	7.17	0.0509	2.6	0.3288	2.9	0.04686	1.3	.444	295.2	3.7	236	60
8.1	3.63	16	14	0.91	0.680	0.047	30	0.313	31	0.0481	3.5	.113	303	10	59	730
9.1	1.56	71	63	0.92	2.85	0.0434	7.8	0.277	8.0	0.04623	1.7	.214	291.3	4.9	-144	190
10.1	0.98	167	147	0.91	6.88	0.0466	6.4	0.305	6.6	0.04747	1.3	.204	299.0	3.9	30	150
11.1	1.42	90	102	1.17	3.74	0.0466	16	0.307	16	0.04784	1.8	.111	301.3	5.2	26	380
13.1	3.20	57	64	1.16	2.30	0.0337	30	0.212	30	0.04572	2.1	.072	288.2	6.0	-818	840
样品 xh080914-10(2) 花岗岩长岩(阿克苏套钨钼矿)																
1.1	0.77	436	246	0.58	18.4	0.0526	3.0	0.353	3.0	0.04861	0.51	.169	306.0	1.5	313	68
2.1	0.00	625	313	0.52	26.2	0.05311	1.2	0.3569	1.3	0.04875	0.46	.355	306.8	1.4	333	27
3.1	0.06	818	504	0.64	34.2	0.05267	1.1	0.3539	1.2	0.04872	0.38	.313	306.7	1.1	315	26
4.1	4.06	1423	846	0.61	61.8	0.0528	6.7	0.353	6.7	0.04850	0.88	.131	305.3	2.6	319	150
5.1	0.25	694	322	0.48	28.8	0.05372	1.6	0.3566	1.6	0.04814	0.47	.290	303.1	1.4	360	35
6.1	0.05	319	194	0.63	13.1	0.05302	1.8	0.3510	1.8	0.04801	0.56	.303	302.3	1.7	330	40
7.1	0.08	999	618	0.64	42.4	0.05185	0.9	0.3529	1.0	0.04935	0.33	.333	310.5	1.0	279	22
8.1	0.14	463	282	0.63	19.3	0.05334	1.5	0.3565	1.6	0.04847	0.59	.370	305.1	1.8	343	34
9.1	—	902	475	0.54	38.5	0.05303	1.3	0.3635	1.3	0.04972	0.35	.258	312.8	1.1	330	29
10.1	0.04	1022	768	0.78	43.5	0.05296	0.9	0.3616	0.9	0.04953	0.37	.394	311.6	1.1	327	20
11.1	0.48	558	280	0.52	23.4	0.0538	3.3	0.361	3.4	0.04868	0.66	.197	306.4	2.0	362	74
12.1	0.10	510	307	0.62	21.5	0.05275	1.1	0.3566	1.1	0.04903	0.40	.358	308.6	1.2	318	24
样品 xh080915-5(3) 二长花岗岩(孔涅特钨矿)																
1.1	0.23	385	316	0.85	16.1	0.0506	2.5	0.338	3.8	0.0485	2.8	.747	305.4	8.5	222	58
2.1	0.33	296	190	0.66	12.5	0.0497	2.6	0.334	3.2	0.04874	1.9	.590	306.8	5.7	182	60
3.1	0.05	270	218	0.83	11.4	0.0530	3.0	0.359	3.6	0.04918	1.9	.536	309.5	5.8	328	68
4.1	0.30	302	303	1.04	12.5	0.0529	3.2	0.349	3.7	0.04784	1.9	.516	301.2	5.6	325	72
5.1	0.42	249	249	1.03	10.5	0.0513	4.0	0.345	4.6	0.0488	2.2	.480	307.3	6.6	255	92
6.1	1.66	653	564	0.89	27.3	0.0502	5.2	0.332	5.5	0.04791	1.9	.345	301.7	5.6	206	120
7.1	0.72	152	138	0.94	6.31	0.0512	6.4	0.339	6.7	0.04801	2.1	.309	302.3	6.1	251	150
8.1	2.36	447	397	0.92	18.9	0.0531	7.0	0.352	7.3	0.04813	1.9	.262	303.0	5.6	331	160
9.1	0.23	424	316	0.77	17.5	0.0521	2.3	0.345	3.0	0.04803	1.9	.622	302.4	5.5	288	53
10.1	0.08	333	398	1.24	14.9	0.0536	3.4	0.384	3.9	0.05197	1.9	.484	326.6	6.0	356	77
11.1	—	418	311	0.77	18.6	0.05431	1.7	0.3883	2.5	0.05186	1.8	.731	325.9	5.9	384	39
12.1	1.56	401	527	1.36	16.5	0.0576	5.4	0.374	6.3	0.0471	3.2	.513	296.7	9.3	514	120

注:误差为1σ; Pb<sub>c</sub>和 Pb\* 分别代表普通铅(<sup>206</sup>Pb<sub>c</sub>)和放射成因铅;使用实测的<sup>207</sup>Pb 含量进行普通铅校正。

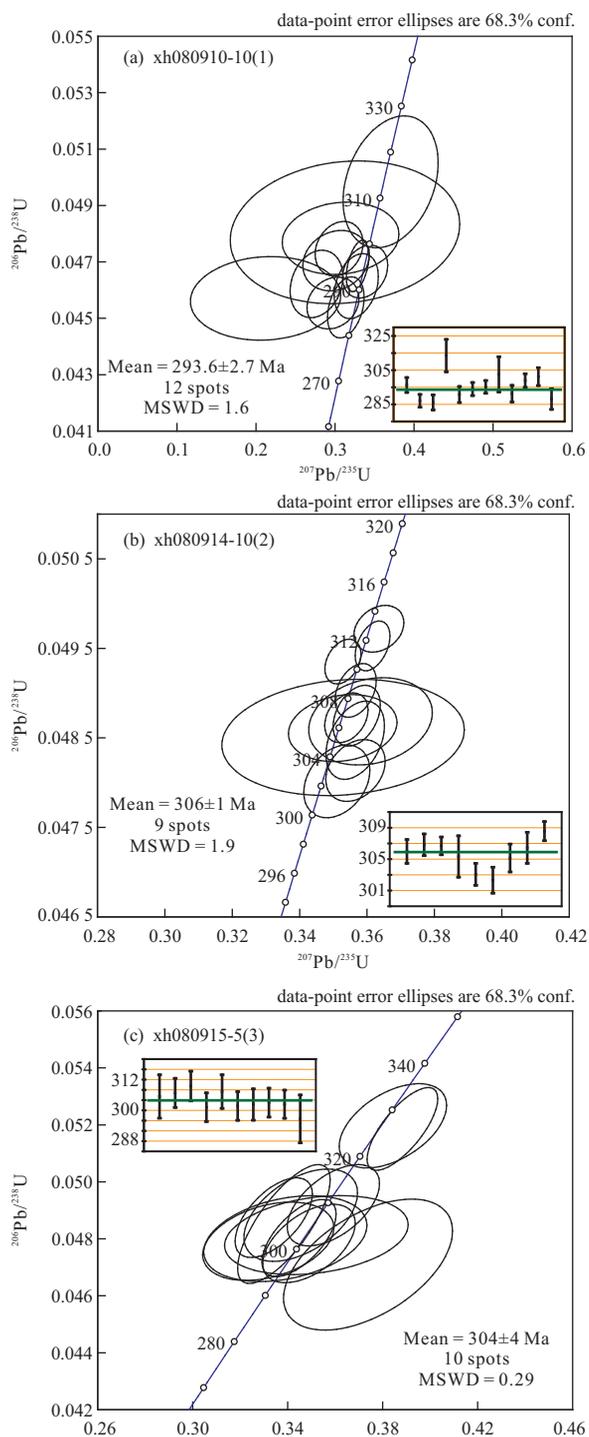


图 4 锆石 U—Pb 谐和图(图中小图为平均年龄分布)

Fig. 4 Zircon  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  concordia diagrams of granitoids from Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt

312.8 ± 1.1 Ma, 测点 10.1 为 311.6 ± 1.1 Ma, 均为继承锆石, 反映了早期世代的锆石结晶年龄之后, 剩余的 9 个测点给出  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权年龄平均值为 306 ± 1 Ma (MSWD = 1.9, 图 4b), 可能代表该花岗岩闪长岩的结晶年龄, 属于晚石炭世(石炭纪宾夕法尼亚

亚亚纪)卡西莫夫期。

样品 xh080915-5(3) 二长花岗斑岩: 共分析了 12 粒锆石, 每粒锆石测试 1 个点。锆石中的 U、Th 含量变化较大, U 为 (152 ~ 653) × 10<sup>-6</sup>, Th 为 (138 ~ 564) × 10<sup>-6</sup>,  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$  比值为 0.66 ~ 1.36, 均大于 0.5, 具有岩浆锆石的特点。在去掉  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值偏离较大的 2 个测点(即测点 10.1 为 326.6 ± 6.0 Ma 和测点 11.1 为 325.4 ± 5.9 Ma, 均为早期世代的继承锆石)之后, 剩余的 10 个测点给出  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权年龄平均值为 304 ± 4 Ma (MSWD = 0.29, 图 4c), 可能代表该二长花岗斑岩的结晶年龄, 属于晚石炭世(石炭纪宾夕法尼亚亚纪)卡西莫夫期。

### 3 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学

#### 3.1 实验条件

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  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 × 10<sup>13</sup> n · cm<sup>-2</sup> · S<sup>-1</sup>。照射总时间为 2 878 min, 积分中子通量为 4.49 × 10<sup>18</sup> n · cm<sup>-2</sup>; 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 ± 1.2 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 °C, 相邻加热阶段的温度差主要在 30 ~ 100 °C 不等, 每个阶段加热 30 min, 净化 30 min。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 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 CaF<sub>2</sub> 来获得, 其值为: ( $^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$ )<sub>Ca</sub> = 0.000 238 9, ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ )<sub>K</sub> = 0.004 782, ( $^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}$ )<sub>Ca</sub> = 0.000 806。 $^{37}\text{Ar}$  经过放射性衰变校正;  $^{40}\text{K}$  衰变常数 λ = 5.543 × 10<sup>-10</sup> · a<sup>-1</sup> (Steiger and Jäger, 1977); 用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线(Ludwig, 2003; 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)。

#### 3.2 分析结果

测年结果列于表 2 中, 阶段加热年龄谱和反等时线见图 5。其中, 东科翁腊德碱性花岗岩样品

表 2 巴尔喀什成矿带钼钨矿床花岗岩类<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄测试数据

Table 2 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating data for granitoids from Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt

阶段	T(°C)	( <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>36</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>38</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	<sup>40</sup> Ar(%)	F	<sup>39</sup> Ar (10 <sup>-14</sup> mol)	<sup>39</sup> Ar (Cum.)(%)	t(Ma)	±1σ(Ma)
xh080910-10(1) 碱性花岗岩 钾长石(东科翁腊德), W=28.25 mg, J=0.004 795											
1	700	46.095 8	0.050 3	0.014 2	0.023 5	67.72	31.217 4	0.72	1.84	251.6	2.4
2	800	37.579 5	0.013 4	0.019 1	0.015 5	89.42	33.605 1	2.53	8.32	269.5	2.5
3	850	36.713 2	0.006 6	0.005 5	0.013 9	94.70	34.768 8	1.62	12.46	278.2	2.6
4	900	37.963 4	0.010 6	0.012 9	0.015 2	91.72	34.820 7	1.52	16.36	278.5	2.6
5	950	39.528 3	0.017 4	0.008 5	0.016 3	87.00	34.388 2	1.48	20.14	275.3	2.6
6	1 000	41.277 9	0.025 3	0.011 3	0.017 9	81.88	33.797 9	1.87	24.92	271.0	2.5
7	1 050	41.108 6	0.025 0	0.004 7	0.017 9	82.03	33.719 6	3.72	34.46	270.4	2.5
8	1 090	41.194 4	0.025 0	0.006 1	0.017 6	82.05	33.798 7	3.31	42.95	271.0	2.5
9	1 130	40.081 2	0.021 4	0.007 2	0.017 1	84.24	33.762 9	4.25	53.82	270.7	2.5
10	1 170	38.486 3	0.015 0	0.003 1	0.015 8	88.47	34.047 7	8.31	75.10	272.8	2.5
11	1 200	37.711 5	0.010 9	0.000 0	0.015 0	91.43	34.478 8	5.15	88.29	276.0	2.6
12	1 250	38.037 6	0.011 8	0.000 0	0.015 3	90.85	34.557 8	1.90	93.14	276.6	2.6
13	1 330	38.707 1	0.014 0	0.000 0	0.015 5	89.29	34.560 8	1.95	98.14	276.6	2.6
14	1 400	38.446 9	0.012 2	0.000 0	0.015 2	90.59	34.829 1	0.73	100.00	278.6	2.7
Total age = 272.9 Ma											
xh080914-10(1) 碱性花岗岩 钾长石(阿克沙套), W=27.11 mg, J=0.005 648											
1	700	33.556 4	0.022 6	0.034 8	0.017 7	80.10	26.877 8	0.71	1.54	255.0	2.5
2	800	32.757 0	0.010 6	0.013 8	0.014 8	90.40	29.613 5	1.87	5.60	279.0	2.6
3	900	31.379 8	0.002 8	0.010 4	0.013 1	97.34	30.540 0	4.32	14.98	287.1	2.7
4	950	31.498 8	0.002 4	0.007 7	0.012 9	97.73	30.783 9	3.15	21.81	289.2	2.7
5	1 000	31.778 7	0.003 1	0.004 5	0.013 2	97.13	30.866 2	3.89	30.25	289.9	2.7
6	1 040	31.999 1	0.003 9	0.000 2	0.013 3	96.35	30.830 7	3.60	38.05	289.6	2.7
7	1 080	32.510 8	0.005 9	0.000 0	0.013 8	94.59	30.751 8	3.48	45.61	288.9	2.7
8	1 130	33.105 6	0.008 4	0.000 9	0.014 3	92.52	30.630 0	5.11	56.70	287.8	2.7
9	1 180	32.916 2	0.007 7	0.001 2	0.014 2	93.07	30.636 4	8.31	74.74	287.9	2.7
10	1 220	32.583 7	0.005 9	0.000 8	0.013 8	94.68	30.849 2	7.31	90.61	289.8	2.7
11	1 280	32.622 3	0.005 8	0.004 9	0.013 9	94.75	30.911 2	3.33	97.83	290.3	2.7
12	1 340	33.138 2	0.006 9	0.000 0	0.014 2	93.82	31.088 7	0.72	99.40	291.8	2.8
13	1 400	33.449 3	0.006 2	0.000 0	0.013 1	94.47	31.598 2	0.28	100.00	296.2	3.2
Total age = 288.0 Ma											
xh080914-10(2) 花岗闪长岩 黑云母(阿克沙套), W=29.76 mg, J=0.005 748											
1	700	29.226 7	0.068 3	0.200 7	0.043 1	30.98	9.054 5	0.38	1.02	91.5	2.7
2	800	40.558 3	0.034 3	0.025 9	0.034 8	74.98	30.412 1	2.83	8.62	290.6	2.7
3	850	31.845 4	0.004 3	0.008 8	0.029 4	96.04	30.585 3	5.22	22.62	292.2	2.7
4	900	31.267 9	0.001 6	0.007 5	0.029 2	98.48	30.793 3	3.27	31.40	294.0	2.7
5	950	31.114 4	0.001 1	0.012 6	0.028 8	98.98	30.797 1	2.83	39.01	294.0	2.7
6	1 000	31.912 7	0.001 5	0.011 7	0.029 0	98.60	31.465 8	3.15	47.48	299.9	2.8
7	1 050	31.318 0	0.001 5	0.016 8	0.028 7	98.56	30.867 3	5.52	62.31	294.6	2.7
8	1 100	31.020 9	0.001 7	0.011 8	0.028 9	98.36	30.513 8	7.74	83.09	291.5	2.7
9	1 140	31.050 1	0.001 6	0.034 2	0.029 2	98.44	30.567 3	5.61	98.15	292.0	2.7
10	1 180	31.045 2	0.001 2	0.669 8	0.030 9	98.99	30.748 7	0.65	99.88	293.6	2.8
11	1 400	33.506 2	0.015 0	2.430 8	0.044 7	87.30	29.307 3	0.04	100.00	281	12
Total age = 291.2 Ma											

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

xh080910-10(1) (锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 293.6±2.7 Ma;本文)钾长石 14 个加热阶段的全熔年龄(Total age)为 272.9 Ma(表 2),坪年龄发育得较好,其 800~1 330 °C 加热阶段坪年龄为 273.8±1.5 Ma(图 5a),<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 正等时线年龄为

278±5 Ma,反等时线年龄为 277.0±4.9 Ma(图 5b)。由反等时线得到的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 初始比值为 261±19,较现代大气氩同位素比值即尼尔值(295.5±5)为小,说明该样品存在放射性成因氩丢失,真实的冷却年龄可能要大于该反等时线年龄。因此,这里采用

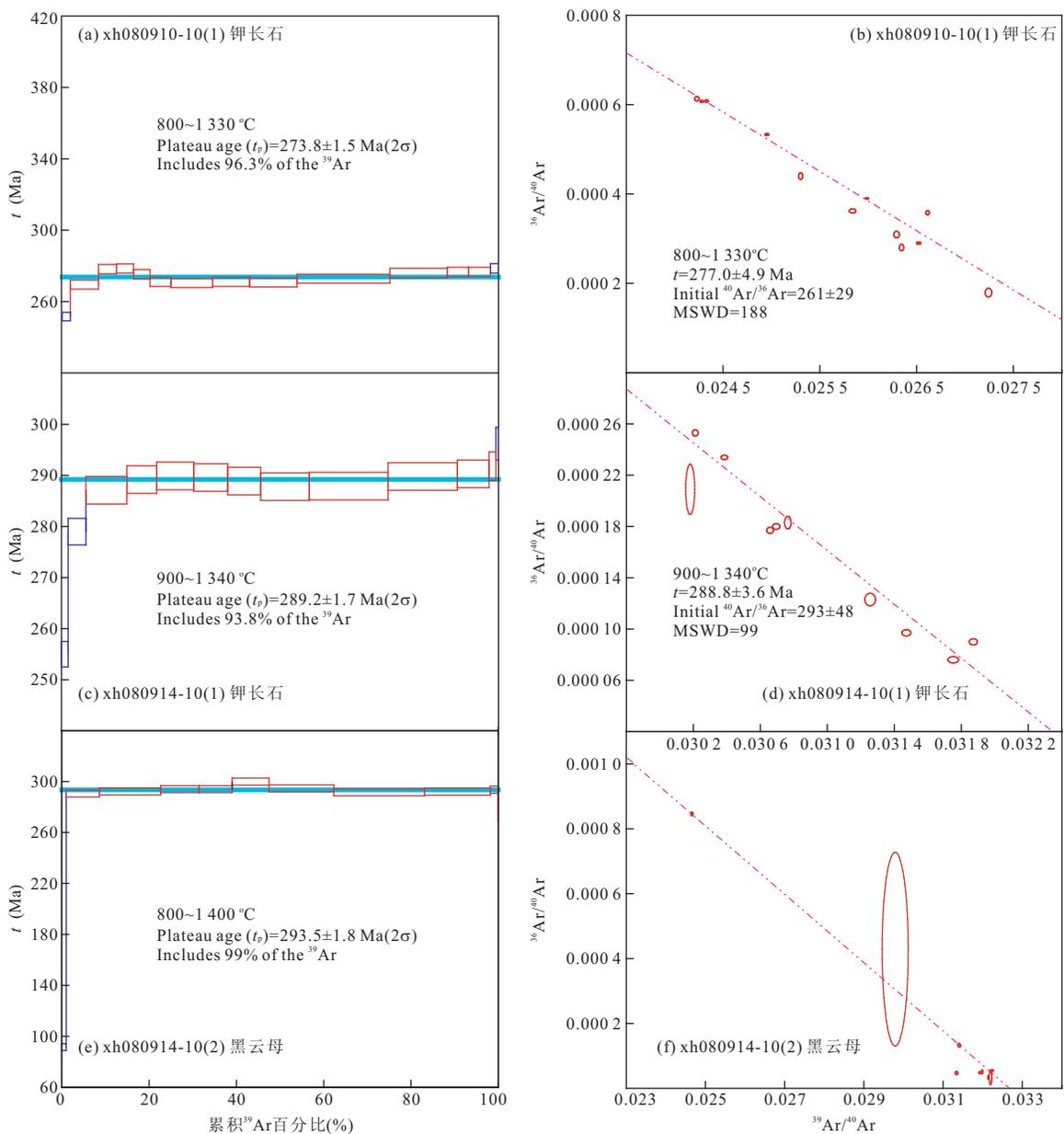


图 5  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  阶段加热年龄谱(a、c、e)和年龄等时线(b、d、f)

Fig. 5  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  release spectra (a, c, and e) for stepwise heating analyses and isochron diagrams (b, d, and f) of minerals from Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt

a、b. xh080910-10(1) 钾长石(东科翁腊德), c、d. xh080914-10(1) 钾长石(阿克沙套), e、f. xh080914-10(2) 黑云母(阿克沙套)

正等时线年龄  $278\pm 5$  Ma 为其冷却年龄,属于二叠纪乌拉尔世晚期. 该钾长石可能在 250 Ma 左右受到后期构造热事件的微弱改造.

阿克沙套碱性花岗岩样品 xh080914-10(1) 钾长石 13 个加热阶段的全熔年龄为 288.0 Ma(表 2), 坪年龄发育较好,其 900~1 340 °C 加热阶段坪年龄为  $289.2\pm 1.7$  Ma(图 5c),  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  正等时线年龄为  $290.2\pm 3.8$  Ma, 反等时线年龄为  $288.8\pm 3.6$  Ma(图 5d). 由反等时线得到的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  初始

比值为  $293\pm 48$ , 与尼尔值( $295.5\pm 5$ ) 基本一致, 说明该样品可能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  $288.8\pm 3.6$  Ma 为其冷却年龄, 属于二叠纪乌拉尔世. 该钾长石可能在 280 Ma 左右和 255 Ma 左右受到后期构造热事件的微弱改造.

阿克沙套花岗闪长岩样品 xh080914-10(2) (锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $306\pm 1$  Ma; 本文) 黑云母 11 个加热阶段的全熔年龄为 291.2 Ma(表 2), 坪年

龄发育较好,其 800~1 400 °C 加热阶段坪年龄为 293.5±1.8 Ma(图 5e),<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 正等时线年龄为 293.1±3.2 Ma,反等时线年龄为 292±3 Ma(图 5f).由反等时线得到的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 初始比值为 290±17,与尼尔值(295.5±5)基本一致,说明该样品可能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 292±3 Ma 为其冷却年龄,属于二叠纪乌拉尔世.该黑云母可能在 90 Ma 左右受到后期构造热事件的极微弱改造.

## 4 磷灰石裂变径迹热年代学

### 4.1 实验条件

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±0.5 Ma).标准玻璃为美国国家标准局 SRM<sub>612</sub>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 HNO<sub>3</sub> 中 20 °C 室温条件下蚀刻 20 s.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 °C 室温、30 min.

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 1 000 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.

### 4.2 FT 测年结果

裂变径迹(AFT)测年结果见表 3.采用 χ<sup>2</sup> 检验以确定单颗粒年龄是否落在泊松分布范围内,以便区分是否属于单一的年龄群组(Galbraith, 1981).所有样品的 χ<sup>2</sup> 概率>5%,即通过 χ<sup>2</sup> 检验,FT 年龄采用合并年龄(即样品所测颗粒总体法年龄,或称“池年龄”).其中,东科翁腊德碱性花岗岩、阿克沙套花岗闪长岩和扎涅特碱性花岗岩分别给出 AFT 年龄为 92.1±5.7 Ma、92.2±5.0 Ma 和 80.3±4.9 Ma,均小于岩浆侵入年龄(分别为 293.6±2.7 Ma、306±1 Ma 和 304±4 Ma;本文).图 6 给出了各个样品的磷灰石单颗粒年龄直方图和放射图.

本次所测样品 AFT 年龄均处在中生代,范围为 92.2±5.0 Ma 至 80.3±4.9 Ma,均处在晚白垩世早中期.所有样品的平均径迹长度(MTL)分布范围为 13.50±0.12 μm 至 13.96±0.11 μm,远小于原始径迹长度(16.3±0.9 μm;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(14.5~15.5 μm;Green *et al.*, 1989).这表明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.采用 AFTSolve 软件(Ketcham *et al.*, 2000)和退火模型(Ketcham *et al.*, 1999)进行的热历史模拟,给出了这些样品的低温热演化曲线(图 7 右上角部分),揭示的热事

表 3 巴尔喀什成矿带钼钨矿床花岗岩类磷灰石裂变径迹测年分析数据

Table 3 Apatite FT dating data for granitoids from Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt

序号	样品编号	岩性	高程(m)	N <sub>c</sub>	ρ <sub>d</sub> (N <sub>d</sub> )(10 <sup>6</sup> cm <sup>-2</sup> )	ρ <sub>s</sub> (N <sub>s</sub> )(10 <sup>5</sup> cm <sup>-2</sup> )	ρ <sub>i</sub> (N <sub>i</sub> )(10 <sup>6</sup> cm <sup>-2</sup> )
1	xh080910-10(1)	碱性花岗岩	402	23	0.968 (2420)	2.995 (578)	0.557 (1075)
2	xh080914-10(2)	花岗闪长岩	762	23	0.901 (2253)	6.199 (936)	1.073 (1620)
3	xh080915-4(1)	碱性花岗岩	579	26	0.882 (2206)	3.319 (624)	0.646 (1215)

序号	样品编号	岩性	U(10 <sup>-6</sup> )	P(χ <sup>2</sup> )%	r	t <sub>FT</sub> (Ma±1σ)	MTL(μm±1σ)(N <sub>i</sub> )	SD(μm)
1	xh080910-10(1)	碱性花岗岩	7.2	90.5	0.856	92.1±5.7	13.50±0.12 (107)	1.26
2	xh080914-10(2)	花岗闪长岩	14.9	76.7	0.756	92.2±5.0	13.85±0.12 (103)	1.20
3	xh080915-4(1)	碱性花岗岩	9.2	95.9	0.802	80.3±4.9	13.96±0.11 (100)	1.15

注: N<sub>c</sub> 为测试的颗粒数; ρ<sub>d</sub> 为标准玻璃的诱发径迹密度; N<sub>d</sub> 为标准玻璃的诱发径迹数; ρ<sub>s</sub> 为自发径迹密度; N<sub>s</sub> 为自发径迹数; ρ<sub>i</sub> 为外探测器诱发径迹密度; N<sub>i</sub> 为外探测器诱发径迹数; U 为磷灰石样品 U 含量; P(χ<sup>2</sup>) 是在自由度为 N<sub>c</sub>-1 时得到的 χ<sup>2</sup> 值的概率; r 为 N<sub>s</sub> 和 N<sub>i</sub> 之间的相关系数; N<sub>i</sub> 为测量的水平围限径迹数; t<sub>FT</sub> 为磷灰石裂变径迹年龄,均为合并年龄; MTL 为围限径迹平均长度; SD 为径迹长度标准偏差.

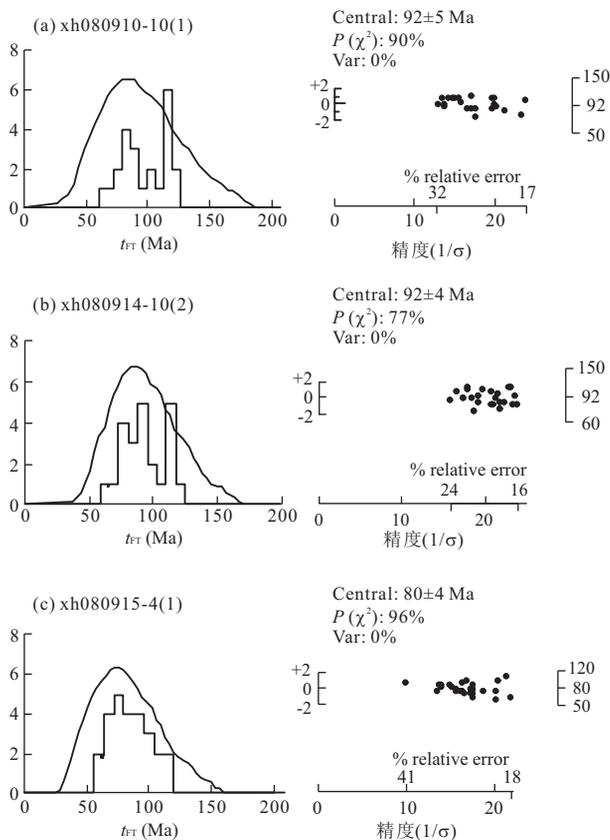


图 6 磷灰石裂变径迹分析结果

Fig. 6 Results of apatite fission track analyses for granitoids from Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt

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

件年龄(模拟年龄范围为 92.9~82.4 Ma)与 AFT 年龄在误差范围内一致。

## 5 讨论

### 5.1 云英岩—石英脉型钼钨成矿作用与岩浆活动的关系及其成矿时代

巴尔喀什成矿带西部的东科翁腊德钼钨矿床、阿克沙套钼钨矿床和扎涅特钼钨矿床, 一般产在花岗岩岩钟的顶部或翼部, 在岩体内、外部具有高浓度的稀有金属综合异常和元素晕, 云英岩—石英脉矿体具有与岩体直接的联系, 说明钼钨成矿作用在成因上与岩体具有密切的关系 (Bespaev and Miroshnichenko, 2004). 钼钨成矿作用主要分为 2 个阶段: 第一阶段为气化—热液阶段, 包括辉钼矿—石英相(440~340 °C)和复杂稀有金属相(480~250 °C);

第二阶段为真正的热液阶段, 包括方铅矿—闪锌矿—石英相(310~150 °C)和方解石—萤石—石英相(180~60 °C) (Yefimov *et al.*, 1990).

前人认为, 东科翁腊德、阿克沙套和扎涅特矿床的成矿时代分别为 285~283 Ma、~285 Ma 和 ~275 Ma (何国琦和朱永峰, 2006). 铼—钨同位素测年得到东科翁腊德、阿克沙套钼钨矿床和扎涅特钼钨矿床的辉钼矿模式年龄(平均值)分别为  $298.0 \pm 4.6$  Ma、 $289.3 \pm 4.2$  Ma 和  $295.0 \pm 4.6$  Ma, 具有比较一致的成矿时代; 3 个矿床铼—钨等时线年龄为  $297.9 (+0.99/-3.4)$  Ma, 可能代表了该地区钼钨成矿作用的起始年龄 (陈宣华等, 2010c). 本文锆石 SHRIMP U-Pb 测年给出东科翁腊德钼钨矿床外围的碱性花岗岩结晶年龄为  $293.6 \pm 2.7$  Ma, 略小于该矿床的辉钼矿铼—钨成矿年龄 ( $298.0 \pm 4.6$  Ma), 说明了碱性花岗岩的侵位发生在钼钨成矿作用的近乎同时或稍后. 而阿克沙套、扎涅特与成矿作用有关的花岗闪长岩、二长花岗斑岩的结晶年龄分别为  $306 \pm 1$  Ma、 $304 \pm 4$  Ma, 均大于辉钼矿铼—钨同位素年龄 (即成矿年龄), 反映了钼钨成矿作用的发生稍晚于花岗闪长岩和二长花岗斑岩的侵位; 它们均晚于该地区博尔雷斑岩铜矿铜钼成矿作用的时期 (辉钼矿铼—钨年龄  $315.8 \pm 6.4$  Ma; 陈宣华等, 2010c). 巴尔喀什成矿带西部斑岩型铜钼—云英岩型钼钨矿床的成矿系列, 可能反映了从板块碰撞 (斑岩铜钼) 到后碰撞 (云英岩钼钨) 的造山作用演化。

东科翁腊德、阿克沙套钼钨矿床和扎涅特钼钨矿床代表了巴尔喀什成矿带最晚期的成矿作用 (何国琦和朱永峰, 2006), 与我国新疆西准噶尔、东准噶尔等地区发育的石英脉—云英岩型钼钨 (锡) 矿带具有大致类似的成矿时代. 例如, 西准噶尔地区次火山岩型杨庄钼矿床的形成时代为早二叠世; 东准噶尔贝尔库都克石英脉—云英岩型锡矿床成矿年龄为  $296.3 \pm 2.6$  Ma (汤好书等, 2006; 白云母 K-Ar 年龄); 东准噶尔萨惹什克锡钨辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为  $307 \pm 11$  Ma (唐红峰等, 2007).

### 5.2 矿床剥露作用的历史

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, 2010a). 从巴尔喀什成矿带钼钨矿床花岗岩类锆石 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 (表 4) 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

表 4 巴尔喀什成矿带钼钨矿床同位素年龄数据

Table 4 Combined geochronologic data from Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt

序号	样品号	采样位置	矿床	岩石名称	测试对象及方法	同位素年龄(Ma)
1	xh080910-11	N47°01'08.5", E075°08'05.9"	东科翁腊 德钨钼矿床	云英岩-石英脉	辉钼矿 Re-Os	298.0±4.6
2					SHRIMP 锆石 U-Pb	293.6±2.7
3	xh080910-10(1)	N46°59'58.6", E075°06'38.7"		碱性花岗岩	钾长石 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	278±5
4					磷灰石 FT	92.1±5.7
5	xh080914-9	N47°58'52.5", E074°03'22.4"	阿克沙套 钨钼矿床	云英岩-石英脉	辉钼矿 Re-Os	289.3±4.2
6	xh080914-10(1)			碱性花岗岩	钾长石 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	288.8±3.6
7		N47°59'41.8", E074°02'35.8"			SHRIMP 锆石 U-Pb	306±1
8	xh080914-10(2)		花岗闪长岩	黑云母 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	292±2	
9				磷灰石 FT	92.2±5.0	
10	xh080915-5(3)	N47°31'16.7", E074°18'55.0"	扎涅特钼矿床	二长花岗岩斑岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	304±4
11	xh080915-5			云英岩-石英脉	辉钼矿 Re-Os	295.0±4.5
12	xh080915-4(1)	N47°32'29.7", E074°15'17.2"		碱性花岗岩	磷灰石 FT	80.3±4.9

注: <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法只给出坪年龄. 辉钼矿 Re-Os 年龄据陈宣华等(2010c), 为模式年龄的平均值.

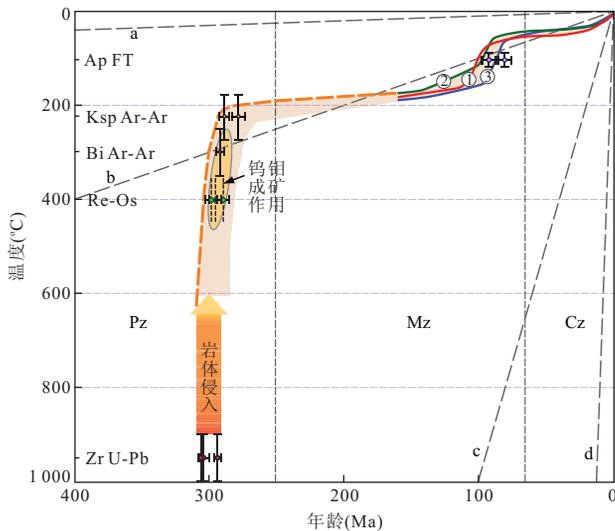


图 7 巴尔喀什成矿带钼钨矿床岩浆-成矿作用和剥露过程的温度-时间图解

Fig. 7 Temperature vs time diagram showing the evolution history of magmatism, metallogenesis and exhumation of Mo-W deposits in Balkhash metallogenic belt 年龄数据主要来自本文, Re-Os 定年数据来自陈宣华等(2010c). 矿物封闭温度据陈宣华等(2010a)和引用的相关文献. a、b、c、d 分别为冷却速率 0.1 °C/Ma、1 °C/Ma、10 °C/Ma 和 100 °C/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 xh080910-10(1)(东科翁腊德); ②为 xh080914-10(2)(阿克沙套); ③为 xh080915-4(1)(扎涅特). 矿物代号: Zr. 锆石; Hb. 角闪石; Bi. 黑云母; Ksp. 钾长石; Ap. 磷灰石

7)来看,该地区钼钨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 2 km 附近),而达到钾长石 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 封闭温度所代表的

深度位置(估计在 5 km 左右). 通常认为,辉钼矿的形成主要发生在 400 °C 左右,属于较高温的成矿阶段,与花岗岩岩体晚期云英岩化的最早期阶段比较吻合. 因此,辉钼矿铼-钨同位素测年得到的钨钼矿床成矿年龄可能比较接近于深成岩浆活动的年龄,而导致巴尔喀什地区发生云英岩-石英脉型钼钨成矿作用的深成岩浆活动的侵位深度可能在 5 km 左右,是巴尔喀什成矿带与斑岩型铜矿化(时代约为 327 Ma 至 316 Ma;陈宣华等,2010c)有关的深成斑岩成矿系统(>2 km)的后续产物. 只有到了晚白垩世(AFT 年龄数据,92.2±5.0 Ma 至 80.3±4.9 Ma),该地区才开始剥露到 2 km(约 60 °C)以浅(图 7). AFT 年龄反映巴尔喀什成矿带西部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(~135 Ma 至 ~67 Ma;李丽等,2008;李玮等,2010)之内.

## 6 结论

通过哈萨克斯坦巴尔喀什成矿带西部东科翁腊德、阿克沙套、扎涅特等钼(钨)矿床与云英岩型钼钨成矿作用有关花岗岩类样品的锆石 SHRIMP U-Pb、<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 和 AFT 测年分析研究,结合前期研究成果(陈宣华等,2010c)的综合分析,得到以下结论:(1)与云英岩型钼钨成矿作用有关的花岗岩类岩浆活动的时代为 306±1 Ma(阿克沙套)和 304±4 Ma(扎涅特);几乎与钼钨成矿作用同时,该地区发生了结晶年龄为 293.6±2.7 Ma 的碱性花岗岩

岩浆活动(东科翁腊德外围)。(2)花岗岩类黑云母、钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学分别给出了矿物冷却年龄,进一步限定了与云英岩型钼钨成矿作用有关的岩体冷却的历史。(3)AFT 测年数据和热历史模拟结果揭示,巴尔喀什成矿带西部的整体抬升—剥露作用发生在晚白垩世(92.2 Ma ~80.3 Ma)。(4)花岗岩类岩石的锆石 U-Pb、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和裂变径迹热年代学研究,揭示了巴尔喀什成矿带西部从深成岩浆活动、云英岩型钼钨成矿作用、区域冷却到剥露作用的全过程。

致谢:参加野外工作的还有杨农、李光明、张进、申萍、薛春纪、吕新彪、张林浩、埃莉诺拉·西姆拉托娃、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 项目办公室和哈萨克斯坦萨特巴耶夫地质科学研究所的大力支持与帮助,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,锆石 SHRIMP 定年得到澳大利亚 Curtin 理工大学高旻和高昊在装载样品、仪器调试和监控方面、北京离子探针中心张维和顾颖强在远程实验协助和数据处理方面的帮助, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年得到国土资源部同位素地质重点实验室的帮助,磷灰石裂变径迹测年得到中国地震局地震动力学国家重点实验室和谷元珠高级工程师的帮助,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

- Bespaev, Kh. A., Miroshnichenko, L. A., 2004. Atlas of mineral deposit models. K. I. Satpaev Institute of Geological Sciences, Almaty, Kazakhstan.
- Burmistrov, A. A., Ivanov, V. N., Frolov, A. A., 1990. Structural and mineralogical types of molybdenum-tungsten deposits of central Kazakhstan. *International Geology Review*, 32 (1): 92—99. doi: 10.1080/00206819009465758
- Chen, G., Zhao, Z. Y., Li, P. L., et al., 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, Y. Q., et al., 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, X. H., Chen, Z. L., Yang, N., 2009. Study on regional mineralizations and ore-field structures: building of mineralizing tectonic systems. *Journal of Geomechanics*, 15 (1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. H., Dang, Y. Q., Yin, A., et al., 2010a. Basin-mountain coupling and tectonic evolution of Qaidam Basin and its adjacent orogenic belts. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, X. H., Qu, W. J., Han, S. Q., et al., 2010b. Re-Os geochronology of Cu and W-Mo deposits in the Balkhash metallogenic belt, Kazakhstan and its geological significance. *Geoscience Frontiers*, 1 (1): 115—124. doi: 10.1016/j.gsf.2010.08.006
- Chen, X. H., Qu, W. J., Han, S. Q., et al., 2010c. 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, X. H., Wang, Z. H., Yang, N., et al., 2010d. Geological characteristics of and metallogenic model for large-scale Sayak copper ore field in Balkhash metallogenic belt, Central Asia. *Journal of Geomechanics*, 16 (2): 189—202 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. H., Yang, N., Chen, Z. L., et al., 2010e. Geological characteristics and metallogenic model of super-large porphyry copper deposit in Aktogai ore field, Kazakhstan. *Journal of Geomechanics*, 16 (4): 326—339 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. H., Yang, N., Ye, B. Y., et al., 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).
- Galbraith, R. F., 1981. On statistical models for fission track counts. *Mathematical Geology*, 13 (6): 471—478. doi: 10.1007/BF01034498
- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., 1981. A natural long-term track annealing experiment for apatite. *Nuclear Tracks*, 5 (1—2): 169—174. doi: 10.1016/0191—278X(81)90039—1
- Green, P. F., Duddy, I. R., Laslett, G. M., et al., 1989. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modeling techniques and extension to geological timescales. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 79 (2): 155—182. doi: 10.1016/0168—9622(89)90018—3
- He, G. Q., Zhu, Y. F., 2006. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions. *Geology in China*, 33 (3): 451—460 (in Chinese with English abstract).
- Hurford, A. J., Green, P. F., 1983. The zeta age calibration of fission-track dating. *Isotope Geoscience*, 1: 285—

317. doi: 10.1016/S0009-2541(83)80026-6
- Ketcham, R. A., Donelick, R. A., Carlson, W. D., 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, 84(9): 1235-1255.
- Ketcham, R. A., Donelick, R. A., Donelick, M. B., 2000. AFTSolve: a program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data. *Geological Materials Research*, 2(1): 1-32.
- Li, L., Chen, Z. L., Qi, W. X., et al., 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, S. H., Hu, Q. W., et al., 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, T. D., Geng, S. F., Fan, B. X., et al., 2008. Geological map of Central Asia and adjacent areas (1:2 500 000). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, W., Hu, J. M., Qu, H. J., 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).
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Geochronology Center, Berkeley, Special Publication No. 4.
- Ren, J. H., Wang, Z. X., Chen, B. W., et al., 1999. Analysis on tectonics of China in global tectonic system—A brief specification on tectonics map of China and its adjacent. Geological Publishing House, Beijing, 1-25 (in Chinese).
- Steiger, R. H., Jäger, E., 1977. Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(3): 359-362. doi: 10.1016/0012-821X(77)90060-7
- Tang, H. F., Qu, W. J., Su, Y. P., et al., 2007. Genetic connection of Sareshike tin deposit with the alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang: constraint from isotopic ages. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1989-1997 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H. S., Chen, Y. J., Liu, Y. L., et al., 2006. Isotope dating of the Be'erkuduke tin deposit in the eastern Junggar area. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(2): 71-73 (in Chinese with English abstract).
- Tu, G. Z., 1999. On the Central Asia metallogenic province. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 397-404 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Shu, L. S., Gao, J., et al., 2008. Continental dynamics of the central Asian orogenic belt and its metallogeny. *Xinjiang Geology*, 26(1): 4-8 (in Chinese with English abstract).
- Yefimov, A. V., Borodayev, Yu. S., Mozgova, N. N., et al., 1990. Bismuth mineralization of the Akchatau molybdenum-tungsten deposit, central Kazakhstan. *International Geology Review*, 32(10): 1017-1027. doi: 10.1080/00206819009465834
- Zhang, Y., Chen, W., Chen, K. L., et al., 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, Y. F., He, G. Q., 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).

## 附中文参考文献

- 陈刚, 赵重远, 李丕龙, 等, 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, 等, 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, 陈正乐, 杨农, 2009. 区域成矿与矿田构造研究——构建成矿构造体系. *地质力学学报*, 15(1): 1-15.
- 陈宣华, 党玉琪, 尹安, 等, 2010a. 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.
- 陈宣华, 屈文俊, 韩淑琴, 等, 2010c. 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, 王志宏, 杨农, 等, 2010d. 中亚巴尔喀什成矿带萨亚克大型铜矿田矿床地质特征与成矿模式. *地质力学学报*, 16(2): 189-202.
- 陈宣华, 杨农, 陈正乐, 等, 2010e. 哈萨克斯坦阿克斗卡超大型斑岩型铜矿田地质特征与成矿模式. *地质力学学报*, 16(4): 326-339.
- 陈宣华, 杨农, 叶宝莹, 等, 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.
- 何国琦, 朱永峰, 2006. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究. *中国地质*, 33(3): 451-460.
- 李丽, 陈正乐, 祁万修, 等, 2008. 准噶尔盆地周缘山脉抬升—

- 剥露过程的 FT 证据. 岩石学报, 24(5): 1011—1020.
- 李明, 周圣华, 胡庆雯, 等, 2007. 中亚成矿域斑岩铜(铅)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, 等, 2008. 亚洲中部及邻区地质图(1: 2 500 000). 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.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等, 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.
- 汤好书, 陈衍景, 刘玉林, 等, 2006. 东准噶尔贝尔库都克锡矿成矿年龄测定. 矿物岩石, 26(2): 71—73.
- 唐红峰, 屈文俊, 苏玉平, 等, 2007. 新疆萨惹什克锡矿与萨北碱性 A 型花岗岩成因关系的年代学制约. 岩石学报, 23(8): 1989—1997.
- 涂光炽, 1999. 初议中亚成矿域. 地质科学, 34(4): 397—404.
- 肖文交, 舒良树, 高俊, 等, 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.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 等, 2006. 成岩混层(I/S) Ar-Ar 年龄谱型及<sup>39</sup>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.