1000-0569/2021/037(08)-2547-61 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报 doi:10.18654/1000-0569/2021.08.18

新疆西准噶尔苏云河斑岩型钼矿的剥露和保存条件：来自裂变径迹和(U-Th)/He热年代学的约束*

王雅美[1,2] 尹继元[2**] 袁超[3] 肖文交[4,5] 陈文[2] 蔡克大[1] 杨雪叶[1,2] 陶再礼[1,2]

WANG YaMei[1,2], YIN JiYuan[2**], YUAN Chao[3], XIAO WenJiao[4,5], CHEN Wen[2], CAI KeDa[1], YANG XueYe[1,2] and TAO ZaiLi[1,2]

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083
2. 中国地质科学院地质研究所,自然资源部深地动力学重点实验室,北京 100037
3. 中国科学院广州地球化学研究所,同位素地球化学国家重点实验室,广州 510640
4. 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆矿产资源研究中心,乌鲁木齐 830011
5. 中国科学院地质与地球物理研究所,岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029

1. *School of Earth Science and Resources*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*
2. *MNR Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics*, *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*
3. *State Key Laboratory of Isotope Geochemistry*, *Guangzhou Institute of Geochemistry*, *Chinese Academy of Sciences*, *Guangzhou* 510640, *China*
4. *Xinjiang Research Center for Mineral Resources*, *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *China*
5. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution*, *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*

2021-02-20 收稿, 2021-05-30 改回.

Wang YM, Yin JY, Yuan C, Xiao WJ, Chen W, Cai KD, Yang XY and Tao ZL. 2021. Exhumation and preservation conditions of Suyunhe porphyry molybdenum deposit in the West Junggar, Xinjiang (NW China): Constraints from the fission track and (U-Th)/He thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 2547 – 2561, doi: 10.18654/1000-0569/2021.08.18

Abstract Porphyry deposit is a kind of epithermal deposit, which is mostly formed in the convergent plate boundary. However, ancient porphyry deposit was often destroyed and disappeared due to later tectonic or exhumation. Therefore, it is vital to reveal the exhumation and uplift process after mineralization for further understanding the preservation conditions and regional prospecting prospects of the deposits. Suyunhe porphyry molybdenum deposit in the west part of the West Junggar, Xinjiang was formed in Late Carboniferous. It is a well-preserved porphyry deposit, which provides a natural laboratory for us to study the preservation conditions of ancient porphyry metallogenic system. In this paper, we present new zircon and apatite fission track (ZFT and AFT) and zircon (U-Th)/He (ZHe) data for the Suyunhe porphyry molybdenum deposit. Combined with thermal modeling inversion, we suggest that the hydrothermal alteration process of the Suyunhe porphyry molybdenum deposit lasted at least 55Myr. It underwent a thick burial (5.2 ~ 8.1km) sediments from Early Permian to Middle Triassic. The deposit experienced a rapid exhumation stage from Middle Triassic to Early Cretaceous (240 ~ 120Ma). The exhumation rate was 49.0 ~ 56.7m/Myr, and the corresponding denudation amount was 7.4 ~ 9.2km. After the Cretaceous (120Ma), it entered a slow exhumation stage with an exhumation rate of 6.7 ~ 21.7m/Myr and exhumation amount of 0.8 ~ 2.6km. Among them, the Middle Triassic to Early Cretaceous rapid exhumation was not the product of far-field effects (e.g., the collision between Qiangtang and Kunlun-Qaidam or the collision between Qiangtang and Lhasa), but related to the activation of strike slip faults in the region. Therefore, early thick burial and later dry climate and slow exhumation provided key conditions for the preservation of the Carboniferous Suyunhe porphyry molybdenum deposit.

Key words Low temperature thermochronology; Porphyry molybdenum deposit; Uplift history; Preservation conditions; West

---

* 本文受国家重点研发计划项目(2019YFA0708601、2017YFC0601206)、中国地质调查项目(DD20190001、DD20190004)、国家自然科学基金项目(41888101、41873060、41830216)、自然资源部深地动力学重点实验室开放课题基金(No. J1901-5)和IGCP 662联合资助.

第一作者简介: 王雅美,女,1998年生,博士生,构造地质学专业,E-mail: Wangym_cugb@163.com

** **通讯作者:** 尹继元,男,1983年生,研究员,博士生导师,地球化学专业,E-mail: yinjiyuan1983@163.com

Junggar metallogenic belt

摘 要 斑岩型矿床多形成于汇聚型板块边界。由于其较浅的就位深度,大部分古老的斑岩型矿床很容易受到后期的剥蚀而消失殆尽。研究斑岩型矿床成矿后的埋藏和去顶过程对于深入理解矿床的保存条件和区域找矿前景至关重要。新疆西准噶尔西部的苏云河斑岩型钼矿床形成于晚石炭世,是一处保存良好的斑岩型矿床,为我们研究前中生代斑岩成矿系统的保存条件提供了天然的实验室。本文首次针对该矿床开展了锆石和磷灰石裂变径迹与锆石(U-Th)/He 低温热年代学分析,结合热历史反演模拟以及前人的年代学数据显示,苏云河斑岩钼矿的蚀变过程至少持续了 55Myr。在早二叠世到中三叠世,矿区接受 5.2~8.1km 厚的沉积物覆盖。中三叠世至早白垩世(240~120Ma),矿床经历了快速剥露作用,剥露速率为 49.0~56.7m/Myr,去顶量为 7.4~9.2km。早白垩世(120Ma)至今为缓慢剥露阶段,剥露速率为 6.7~21.7m/Myr,去顶量为 0.8~2.6km。中三叠世至早白垩世的快速冷却事件可能并不是特定构造事件(比如:南部羌塘和昆仑-柴达木碰撞或者羌塘和拉萨碰撞)远程效应的产物,而与区域内走滑断层的活化密切相关。而矿床早期沉积的巨厚盖层以及早白垩世以来干旱气候和缓慢剥露,为石炭-二叠纪斑岩型钼矿得以保存提供了条件。

关键词 低温热年代学;斑岩型钼矿;剥露历史;保存条件;西准噶尔成矿带

中图法分类号 P597.3; P618.65

斑岩型钼矿床是全球 Mo 金属最主要的来源之一(Hart, 2007; Sillitoe, 2010),通常形成于俯冲带上方的岩浆弧中或俯冲后碰撞带中(Richards, 2009; Wilkinson, 2013)。已有研究表明,成矿岩体通常就位于 3~5km 深度(Sillitoe, 2010; 陈华勇和吴超, 2020),矿床平均厚度为 2km(Aliyari *et al.*, 2020)。世界范围内保存完好的斑岩型矿床大多形成于中-新生代(Singer *et al.*, 2008),而多数古生代及其以前的斑岩型矿床常常受到长期的剥蚀而消失殆尽(Kesler and Wilkinson, 2006; Wilkinson and Kesler, 2007)。然而,还是有少量古老的斑岩型矿床得以保存下来(如内蒙古泥盆纪奥尤陶勒盖铜金矿床,新疆天山晚古生代的土屋-延东斑岩铜矿床和西准噶尔晚古生代苏云河斑岩型钼矿床等),这些矿床的储量巨大,具备一定的经济价值。前中生代斑岩型矿床经过长期的构造演化而保存良好,必定存在特殊的保存条件,研究古老斑岩型矿床成矿后的剥露和去顶过程是理解其保存条件的关键。

近二十年来,低温热年代学(裂变径迹和(U-Th)/He 定年)分析技术已经逐步发展成熟,并被广泛应用到矿床地质领域(McInnes *et al.*, 2005; 袁万明, 2016; Yin *et al.*, 2019)。磷灰石(AFT)和锆石(ZFT)裂变径迹和锆石(U-Th)/He(ZHe)方法能有效提取矿床成矿期后的不同时间和温度区间内的热演化信息(Reiners *et al.*, 2004; McInnes *et al.*, 2005; Enkelmann and Garver, 2016)。传统的锆石 U-Pb 同位素体系具有较高的封闭温度,主要记录火成岩的侵位时代,含钾矿物的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 测年(如:角闪石、黑云母和钾长石 $^{40}Ar/^{39}Ar$)主要记录热液蚀变和成矿时代,结合含矿岩体或围岩中锆石和磷灰石等矿物的(U-Th)/He 和裂变径迹测年,可以获取金属矿床矿化、蚀变以及后期剥露过程完整的时间-温度信息。

本文以新疆西准噶尔晚古生代的苏云河斑岩型钼矿为例,通过该矿床的锆石(U-Th)/He 以及锆石和磷灰石裂变径迹热年代学的研究,结合前人已发表的辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb 年龄来约束该矿床形成和热液演化过程,旨在揭示矿床埋藏与剥露过程,探讨其特殊的矿床保存条件。

1 区域地质背景与矿床地质特征

1.1 区域地质背景

西准噶尔地区位于中国新疆维吾尔自治区境内,处于准噶尔盆地、天山和阿尔泰山、哈萨克斯坦地体所包围的一个三角形区域(图 1),是巴尔喀什-西准噶尔成矿带的重要组成部分(朱永峰, 2014; Shen *et al.*, 2015; 申萍等, 2015)。以 NEE 向谢米斯台断裂为界,西准噶尔划分为北部和南部(Xu *et al.*, 2012)。西准噶尔北部的谢米斯台和萨吾尔两条断裂控制着该地区岩浆岩的分布(Chen *et al.*, 2010)。

西准噶尔南部 NE 向的大断裂(如达拉布特断裂、安齐断裂、玛伊勒断裂和巴尔鲁克断裂等)十分发育(图 1b),表现为多组、多期次的时空分布特征,对区内地层、岩浆岩、构造形态及成矿等起着重要的控制作用。区域内广泛分布泥盆-石炭系地层,其中巴尔鲁克山位于西准噶尔西南部,主要出露中泥盆统巴尔鲁克组、上泥盆统铁列克组、下石炭统姜巴斯套组等地层。西准噶尔地区晚古生代花岗岩广泛分布,这些花岗岩的形成时代主要集中在早石炭世(ca. 340~320Ma)和晚石炭世至早二叠世(ca. 310~290Ma)(韩宝福等, 2006; Geng *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; 尹继元等, 2013)。

晚古生代以来,西准噶尔地区主要经历了俯冲增生、洋盆关闭、走滑和逆冲推覆等多个阶段(Allen *et al.*, 1995)。达拉布特断裂在二叠纪经历了左旋走滑,使克拉玛依西岩体偏移了 100km(Allen *et al.*, 1995; Choulet *et al.*, 2012)。古地磁资料显示,西准噶尔相对于西伯利亚在早二叠世经历了逆时针旋转,而 NW 向的北天山断裂则发育右旋走滑(Wang *et al.*, 2007; Choulet *et al.*, 2011)。准噶尔盆地地震剖面显示,西准噶尔在二叠纪被推覆到准噶尔盆地基底岩石之上(Li *et al.*, 2017)。中亚造山带西段多数近直立的韧性剪切

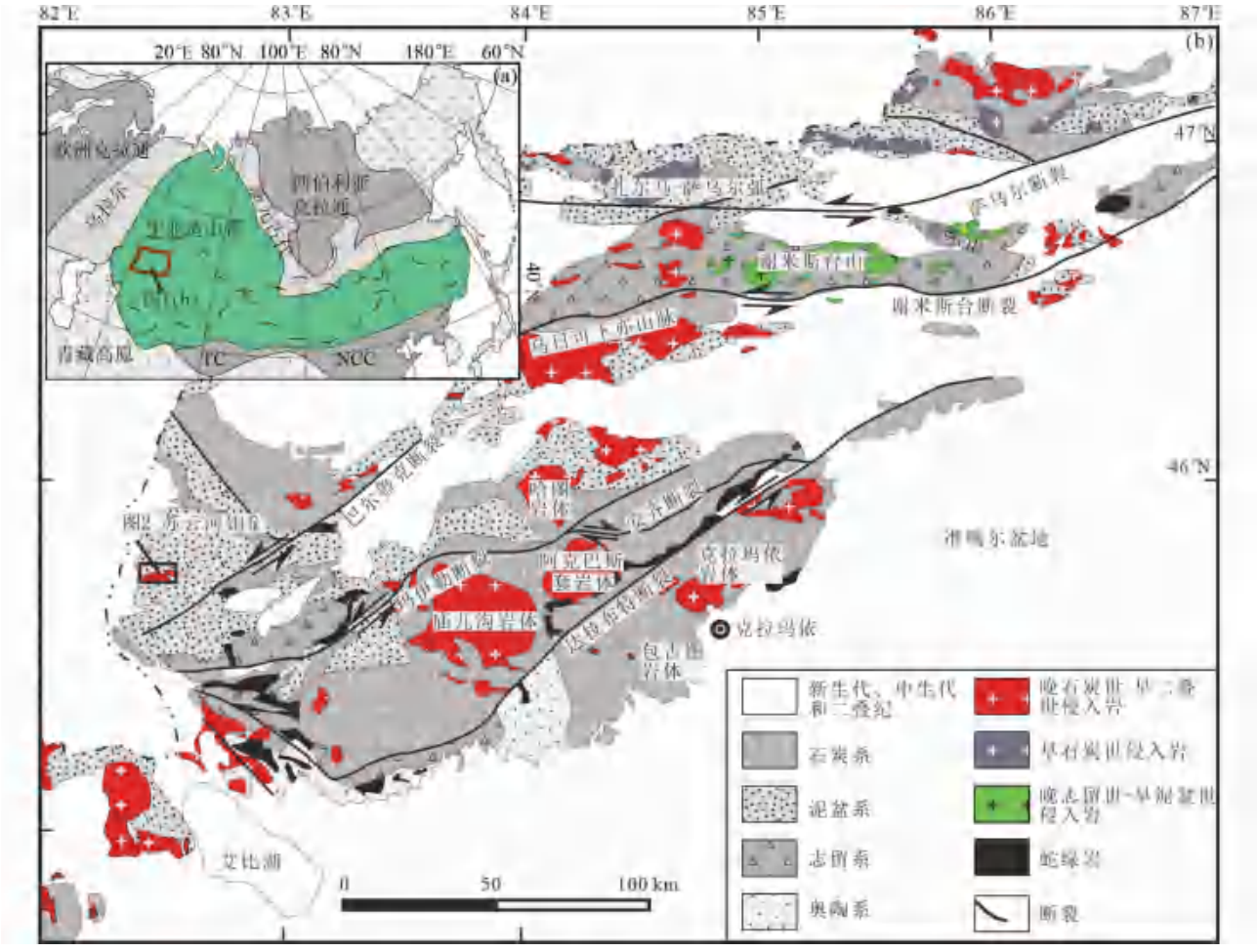

图 1 中亚造山带构造简图(a，据 Jahn *et al.*，2000 修改)和西准噶尔地区地质简图(b，据 Yin *et al.*，2017 修改)

TC-塔里木克拉通；NCC-华北克拉通

Fig. 1 Simplified tectonic divisions of the Central Asian Orogenic Belt (a, modified after Jahn *et al.*, 2000) and simplified geological map of the West Junggar (b, modified after Yin *et al.*, 2017)

TC-Tarim Craton; NCC-North China Craton

带的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄在 290～245Ma 之间，如额尔齐斯断裂在二叠纪(290～265Ma)发生了地壳尺度的逆冲(Briggs *et al.*，2007)，北天山剪切带北部在 245Ma 之前发生了区域性的右旋走滑事件(Charvet *et al.*，2007)。这些断层活动表明新疆北部在二叠至三叠纪期间发生了广泛变形。这种变形在整个中亚地区主要表现为走滑作用，并伴随着收缩变形或伸展变形(Gillespie *et al.*，2017，2020)。而构造地质学、古地磁学、地震等地质资料也显示，西准噶尔在中生代发生构造活化(Choulet *et al.*，2013)，主要表现为区内大型断裂均发生了右旋走滑作用(余养里，2016)。有学者认为蒙古-鄂霍兹克海的闭合和欧亚板块南缘的地块间碰撞的远程效应波及中亚西部，包括准噶尔地区(Hendrix *et al.*，1992；Sobel and Arnaud，1999；Jolivet *et al.*，2001；Gong *et al.*，2021)，使西准噶尔地区在中生代构造活动非常活跃，并引发该地区整体抬升和夷平作用(Dumitru *et al.*，2001；李玮等，2007；李丽等，2008；Li *et al.*，2014)。

1.2 矿床地质特征

苏云河斑岩型钼矿位于巴尔鲁克断裂北侧(图 1、图 2)，矿区主要出露地层为中泥盆统巴尔鲁克组，由凝灰岩和安山质凝灰岩等组成(钟世华等，2015)。NE 向断裂构造在矿区内十分发育，控制着含矿带的分布，矿化主要发生在长英质岩石及其围岩中(图 2)。矿区内共出露三个花岗斑岩体，分别为Ⅰ号、Ⅱ号和Ⅲ号岩体，其中Ⅱ号岩体出露面积最大。三个岩体均呈岩株状侵入到中泥盆统地层中。矿化主要发生在斑岩体及其接触的围岩中，矿体呈水平-缓倾的巨厚层状或似层状，主要赋存在中泥盆统巴尔鲁克组火山沉积岩中，部分赋存于花岗斑岩及花岗闪长斑岩体中(图 2)。矿体与围岩无明显界限，呈渐变接触关系，目前已探明的钼储量为 57 万 t。

矿石矿物包括辉钼矿、白钨矿、黄铁矿和黄铜矿，以及少

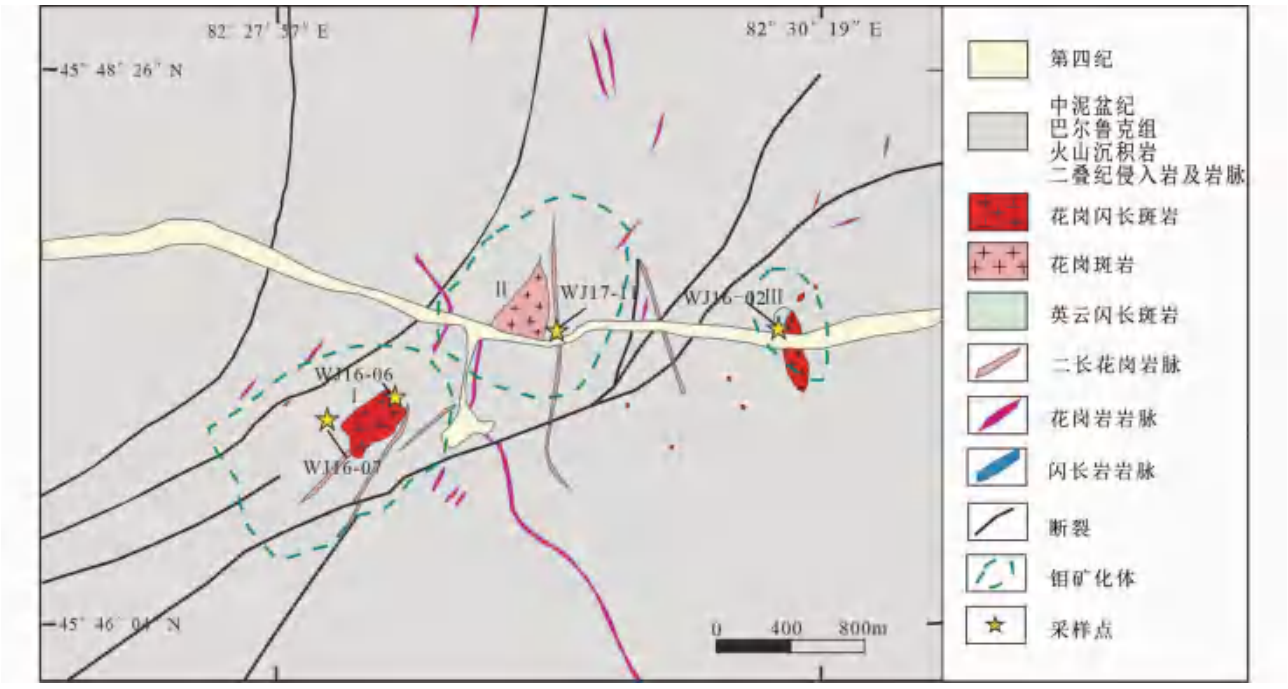

图2 苏云河斑岩型钼矿矿区地质图(据 Shen *et al.*, 2017 修改)

Fig. 2 Geological map of Suyunhe porphyry molybdenum deposit (modified after Shen *et al.*, 2017)

量的辉铜矿、斑铜矿、钛铁矿和磁黄铁矿。脉石矿物以石英、钾长石、斜长石和黑云母为主。钼矿化主要出现在石英脉和细脉中(Shen *et al.*, 2017)。钼矿化相关的围岩蚀变包括钾质、绿泥石-白云母和千枚岩蚀变。在热液活动的初始阶段,钾质蚀变广泛发育,后被绿泥石-白云母蚀变和火山碎屑围岩中的千枚岩蚀变叠加。绿泥石-白云母蚀变具有绿泥石+白云母+伊利石+石英+钛石的矿物组合,以黑云母部分至完全转变为绿泥石、斜长石转变为细粒白云母和伊利石为代表。千枚岩蚀变具有白云母+伊利石+石英+黄铁矿的矿物组合,广泛存在于火山碎屑围岩中(Shen *et al.*, 2017)。钟世华等(2015)将苏云河钼矿成矿过程划分为3个阶段。早期流体以岩浆水为主,发育石英-钾长石脉、石英-钾长石-(黄铁矿)-辉钼矿脉、钾长石脉和无矿石英脉;中期流体以岩浆水和大气水的混合水为主,主要发育石英-辉钼矿-黄铁矿脉、石英-辉钼矿脉和石英-黄铁矿脉和无矿石英脉;晚期流体的混合水中,大气水的比例增加,为中低温、低盐度流体,主要发育石英-碳酸盐脉、石英-黄铁矿脉和无矿石英脉。中期为主要成矿阶段,而晚期脉体中几乎没有矿化。

杨猛等(2015)和 Shen *et al.* (2017)通过测定花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄限定了侵入岩的活动年限为294~309Ma。Shen *et al.* (2013)和钟世华等(2015)报道苏云河钼矿中辉钼矿的 Re-Os 加权年龄分别为301±4Ma和295±2Ma,表明矿化发生于晚石炭世-早二叠世。对含矿斑岩及围岩中的流体包裹体进行成矿条件分析显示,主要成矿阶段流体均一温度为240~443℃,压力77.3~81.3MPa,对应成矿深度为1.9~4.8km(杨志强等,2012;钟世华等,2015)。

2 样品与测试方法

2.1 样品描述

本次研究采集了4件花岗质岩石样品开展低温热年代学研究,采样位置见图2,分别为石英闪长玢岩(WJ16-02)、微细粒斑状二长花岗岩(WJ16-06)、二长闪长玢岩(WJ16-07)和二长花岗岩(WJ17-11)。所有样品均为斑状或似斑状结构,斑晶含量为35%~45%,斑晶矿物主要为斜长石(20%~30%)、钾长石(少量)、石英(约10%)、角闪石(5%~10%)和黑云母(少量)。基质主要由斜长石组成(20%~50%),含少量钾长石、角闪石、石英、黑云母。样品中的黑云母等暗色矿物普遍被白云母及绿泥石交代呈假象(图3)。4件样品均有不同程度矿化,其中样品 WJ16-07 较为明显,含有大量立方体晶形的黄铁矿、辉钼矿颗粒,部分白云母被碳酸盐岩矿物交代,有轻微绿泥石化。样品 WJ16-06 和 WJ17-11 中穿插有大量石英细脉,绿泥石化蚀变较强。样品的基本情况见表1。

2.2 样品测试方法

2.2.1 锆石和磷灰石裂变径迹测年

裂变径迹分析是在美国亚利桑那大学地球科学系完成,锆石和磷灰石颗粒通过外探测器方法进行测年。磷灰石颗粒被安装在环氧树脂、氧化铝和金刚石中抛光,然后在20±

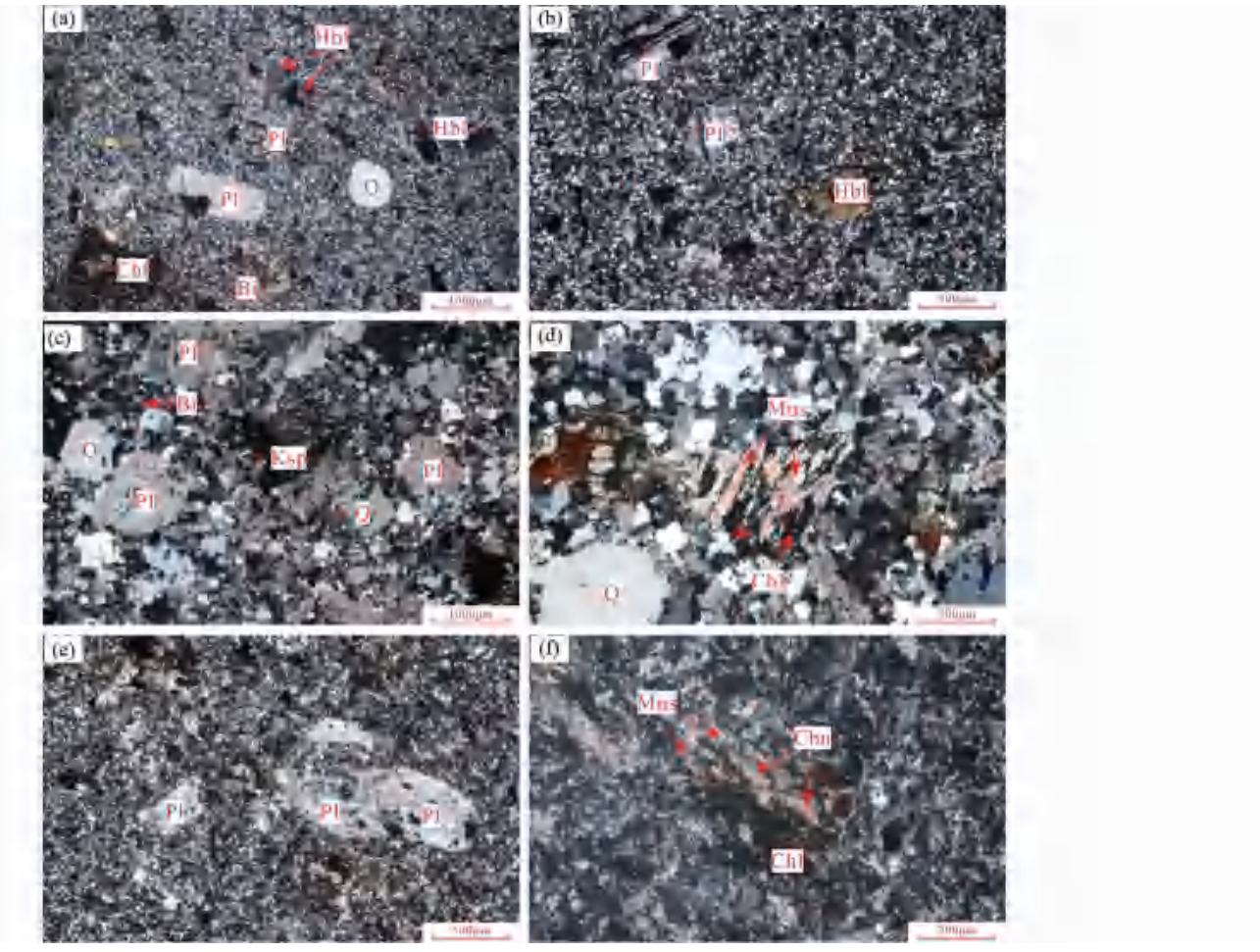

图 3　苏云河地区花岗质岩石的正交偏光镜下照片

(a、b)石英闪长玢岩(WJ16-02)；(c、d)二长花岗岩(WJ16-06)；(e、f)二长闪长玢岩(WJ16-07). Ksp-钾长石；Pl-斜长石；Bi-黑云母；Chl-绿泥石；Hbl-角闪石；Mus-白云母；Cbn-碳酸盐

Fig. 3　Microscopic photos of granitic rocks in the Suyunhe area (under CPL)

(a, b) quartz diorite porphyrite (WJ16-02); (c, d) monzodiorite porphyrite (WJ16-06); (e, f) monzogranite (WJ16-07). Ksp-K-feldspar; Pl-plagioclase; Bi-biotite; Chl-chlorite; Hbl-hornblende; Mus-muscovite; Cbn-carbonate

表 1　苏云河钼矿样品位置和热年代学分析方法汇总

Table 1　Summary of sample localities and thermochronological analysis in the Suyunhe Mo deposit

样品号	位置	GPS	岩性	海拔(m)	测试方法
WJ16-02	靠近苏云河Ⅲ号岩体	45°47′19″N、82°30′00″E	石英闪长玢岩	1275	AFT
WJ16-06	苏云河钼矿Ⅰ号岩体	45°47′00″N、82°28′15″E	微细粒斑状二长花岗岩	1327	AFT、ZHe
WJ16-07	靠近苏云河Ⅰ号岩体	45°47′05″N、82°28′00″E	二长闪长玢岩	1325	AFT
WJ17-11	靠近苏云河Ⅱ号岩体	45°47′18″N、82°28′59″E	二长花岗岩	1175	AFT、ZFT

1℃下用 5.5M 的 HNO_3 蚀刻 20 ± 0.5 秒，显示出自发裂变径迹。锆石颗粒固定在全氟烷氧基树脂上，使用金刚石进行抛光，而后在锆坩埚 220℃条件下使用 KOH-NaOH 共晶熔体蚀刻 3 ~ 36 小时(Gleadow *et al.*, 1986)。最佳刻蚀时间取决于样品的年龄和辐射损伤，需要通过重复刻蚀和每隔 3 ~ 6 小时观察监测。在美国俄勒冈州立大学 Triga 反应堆进行照射，中子通量使用欧洲标准物质和测量研究所(IRMM)的铀玻璃 IRMM 540R 进行监测。照射后通过用 48% HF 刻蚀 20 分钟揭示出诱发径迹。最后利用奥林巴斯 BX61 显微镜和 Kinetek 自动分级系统计算自发和诱发的裂变径迹密度。裂变径迹的长度和 Dpar 值使用 FTStage 软件进行校准，裂变径迹年龄采用 Hurford and Green (1983)推荐的 Zeta 校准方法 IUGS 计算，以获得 ± 1σ 误差的中心年龄。根据 Hurford (1990)的建议，通过反复校准包括 Durango、Fish Canyon 磷灰

石和 Fish Canyon 锆石在内的大量国际公认的年龄标准,获得了磷灰石和锆石 IRMM 540R 和 IRMM541 Zeta 校准因子分别为 351.9 ± 3.8 和 116.0 ± 1.3。详细分析流程依据 Thomson and Ring (2006)的标准。

2.2.2 锆石(U-Th)/He 测年

锆石(U-Th)/He 测年在美国科罗拉多大学波尔得分校热年代学研究和仪器实验室完成。锆石颗粒首先在显微镜下进行挑选,主要观察锆石颗粒的尺寸,形状和包裹体等情况。由于 α 粒子的射出效应的存在,需要对实测年龄进行校正。将挑选好的锆石颗粒进行拍照,并在镜下测量锆石颗粒的长、宽和高及锥体的长度,根据测量结果计算 α 校正系数。完成测量后锆石颗粒装入铌囊中。用四极质谱仪来测定 $^4He/^3He$ 值,^4He 含量用同位素稀释法测定。完成 ^4He 含量分析后,锆石颗粒需要经历多次消解。第一次消解时样品中加入 200μL 含 ^{235}U-^{230}Th-^{145}Nd 稀释剂的 HF 酸。将小瓶加盖,堆放在 125mL 的聚四氟乙烯瓶中,然后放置在高压釜(Parr)中,在 220℃下消解 72 小时。消解过的溶液在 90℃的热盘上蒸干后,加入 200μL 7∶1 HNO_3∶HF 的混合液,然后加盖,在 90℃的热盘消减 4 个小时。矿物溶解后用 1 ~ 3mL 的双去离子水稀释,使用 Agilent 7900 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICP-M_S)进行 U、Th 和 Sm 含量分析。详细的分析流程请参考 Johnson *et al.* (2017)。

3 测试结果

3.1 裂变径迹测年结果

3.1.1 磷灰石裂变径迹测年结果

本文采集的 4 件样品均进行了磷灰石裂变径迹分析。在每个样品中挑选出 20 个质量良好的磷灰石颗粒进行测试,测试结果如表 2 和图 4 所示。4 件样品的平均裂变径迹长度为 13.4 ~ 14.0μm,均显示为较窄的单峰分布(图 4),暗示样品快速通过部分退火带(Gleadow *et al.*, 1986; 吕红华等, 2013)。所有样品均通过卡方检验($P(\chi^2)$ > 5%,表 2),显示了单一的单颗粒年龄,即样品的年龄可以反映其经历的构造热事件。样品的中心年龄分别为 190 ± 13.8Ma(样品 WJ16-02)、126 ± 7.3Ma(样品 WJ16-06)、186 ± 13.9Ma(样品 WJ16-07)和 146 ± 6.1Ma(样品 WJ17-11)。4 件样品的平均 Dpar 值在 2.02 ~ 2.45μm 之间,大于标准矿物磷灰石的蚀刻半径(Donlick *et al.*, 1999, 2005),表明其较高的耐退火率。

3.1.2 锆石裂变径迹测年结果

样品 WJ17-11 进行了锆石裂变径迹分析。在样品中挑选 14 个质量良好的锆石颗粒进行测试,所有单颗粒年龄分布在 193 ~ 317Ma 之间,且通过卡方检验($P(\chi^2)$ > 5%),说明单颗粒年龄聚合性较好。中心年龄采用 IUGS 推荐的 Zeta 校准方法计算(Hurford and Green, 1983),本次实验锆石的 Zeta 值为 116.0 ± 1.3,其中心年龄为 247 ± 15.8Ma(表 2)。

表 2 苏云河钼矿的锆石和磷灰石裂变径迹结果

Table 2 Zircon and apatite fission track results from Suyunhe Mo deposit

样品号	矿物	矿物颗粒数量	径迹密度($\times 10^6 \cdot cm^{-2}$)			年龄离散率	中心年龄 ± 1σ (Ma)	磷灰石平均裂变径迹长度 (μm ± 1 s. e.) (no. of tracks)	标准差 (μm)
			ρ_s(Ns)	ρ_i(Ni)	ρ_d(Nd)	$P(\chi2)$			
WJ16-02	磷灰石	20	0.8154 (370)	1.012(459)	1.362(4358)	<0.01% (>99.9%)	190.3 ± 13.8	13.79 ± 0.14(54)	1.02
WJ16-06	磷灰石	20	0.9046(506)	1.684(942)	1.347(4311)	<0.01%(99.20%)	126.1 ± 7.3	13.44 ± 0.14(64)	1.09
WJ16-07	磷灰石	20	0.8306(345)	1.033 (429)	1.332(4263)	<0.01% (>99.9%)	185.8 ± 13.9	13.51 ± 0.20(30)	1.09
WJ17-11	磷灰石	20	4.994(1256)	7.069 (1778)	1.187(3799)	0.01%(94.10%)	145.9 ± 6.1	13.40 ± 0.14(100)	1.36
	锆石	14	28.01(2492)	3.406 (303)	0.5272 (3374)	<0.01%(99.60%)	246.7 ± 15.8	–	–

注:ρ_s、ρ_i 和 ρ_d 分别为自发径迹密度、诱发径迹密度和标准径迹密度,Ns、Ni 和 Nd 分别为自发径迹数、诱发径迹数和标准径迹数;$P(\chi2)$ 为所有检验单颗粒年龄正态分布的置信度量值

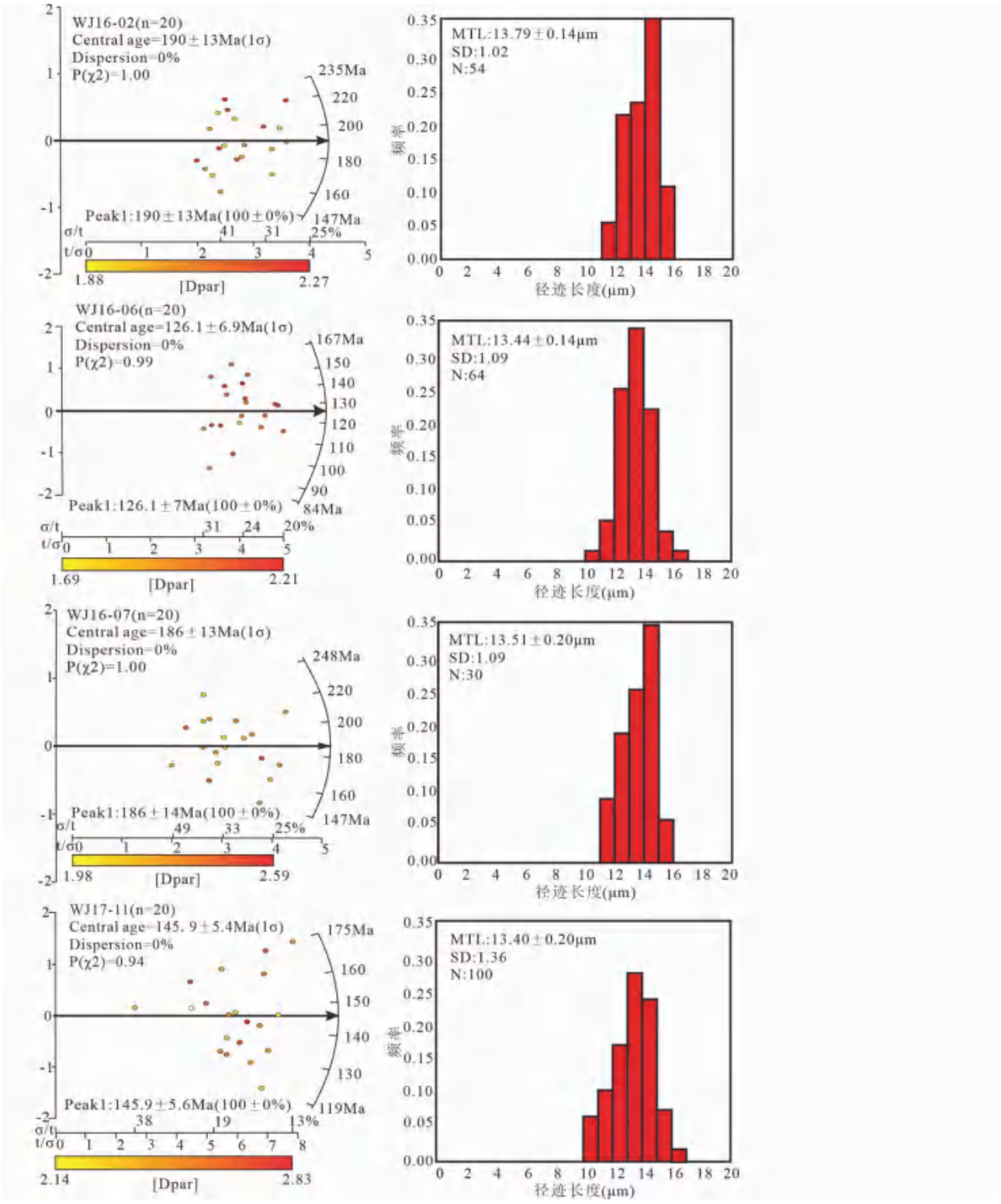

图 4　苏云河斑岩钼矿区磷灰石裂变径迹年龄雷达图(左)和径迹长度分布图(右)

Fig. 4　Radial plots (left) and track length distribution (right) of apatite fission track of the Suyunhe Mo deposit

3.2　锆石(U-Th)/He 测年结果

样品 WJ16-06 的锆石(U-Th)/He 分析结果见表 3。4 个锆石颗粒的(U-Th)/He 年龄分别为 209 ± 1Ma、208 ± 2Ma、238 ± 2Ma、239 ± 2Ma(表 3)，其加权平均年龄为 224 ± 1Ma。该样品的单颗粒 ZHe 年龄或者加权年龄都明显比其锆石 U-

表 3 苏云河钼矿的锆石(U-Th)/He 结果

Table 3 Zircon (U-Th)/He results from the Suyunhe Mo deposit

测点号	矿物	Th/U	未校正年龄(Ma)	1σ	Ft	±(%)	校正年龄(Ma)	不确定度(Ma)	校正不确定度(Ma)
WJ1606-z1	锆石	0.421	142.45	1.34	0.678	7.0	208.80	14.62	1.34
WJ1606-z2		0.410	157.21	2.14	0.751	7.0	208.44	14.59	2.14
WJ1606-z3		0.601	176.58	1.70	0.736	7.0	238.46	16.69	1.70
WJ1606-z4		0.479	166.76	2.32	0.694	7.0	238.55	16.70	2.32

表 4 基于年龄-封闭温度法、矿物对法和热史模拟法估算苏云河斑岩型钼矿不同时期的剥露速率

Table 4 Denudation rate of different periods from the Suyunhe porphyry Mo deposit based on age-closure temperature, mineral pairs and thermal modeling method

样品号	年龄-封闭温度法						矿物对法				热史模拟法			
	ZHe		AFT		ZFT		ZHe/AFT		ZFT/AFT		快速冷却阶段		缓慢冷却阶段	
	年龄(Ma)	速率(m/Myr)	年龄(Ma)	速率(m/Myr)	年龄(Ma)	速率(m/Myr)	时间(Ma)	速率(m/Myr)	时间(Ma)	速率(m/Myr)	时间(Ma)	速率(m/Myr)	时间(Ma)	速率(m/Myr)
WJ16-02			190.3	13.7							240~120	56.7	120~0	6.7
WJ16-06	208.8	30.7	126.1	20.6			82.7	45.9			240~120	49.0	120~0	21.7
WJ16-07			185.8	14.0							240~120	53.3	120~0	10.0
WJ17-11			145.9	17.8	246.7	35.7			100.8	61.5	240~120	56.7	120~0	16.7

注:年龄-封闭温度法确定的剥露速率为样品年龄至今的平均剥露速率;矿物对法确定了由 AFT 与 ZFT、ZHe 年龄限定的时间内的剥露速率;热史模拟法中用到的各阶段时间温度数据基于图 7 所示模拟结果

Pb 年龄更年轻,表明这些数据是可靠的,能反映岩体就位以来的冷却过程。

3.3 HeFTy 软件模拟

本文使用 HeFTy 软件对样品进行热历史模拟,以便更好地了解样品所经历的时间-温度信息。输入数据包括磷灰石裂变径迹的单颗粒年龄、长度、蚀刻半径以及 C 轴投影夹角等。扩散动力学模型引自 Ketcham *et al.* (2007)的多元动力学模型,动力学参数用 Dpar 值,初始径迹长度为 16.3μm (Donelick *et al.*, 1999)。长度拟合最优方程选用 Kolmogorov-Smirnov Test,计算方法选择 Monte Carlo(Ketcham *et al.*, 2009)。起始点限制条件为温度 280~320℃,年龄 260~280Ma(图 5),温度的限制必须高于 ZFT 封闭温度,年龄的限制范围是 ZFT 和锆石 U-Pb 的年龄之间。同时假定模拟终点的地表温度为 20±3℃。其中模拟结果分为良好热历史曲线(GOF>0.5)和较好热历史曲线(GOF>0.05)。每件样品的模拟直到良好路径达到 100 条时才会停止,模拟结果见图 5。其中,最佳拟合路径和加权平均路径分别用黑色和蓝色曲线标注。本研究热史模拟年龄的 GOF 值均大于 0.9,径迹长度 GOF 值大于 0.6,说明本次热模拟结果可信。AFT、ZFT、ZHe 的封闭温度区间分别为 60~110℃、210~270℃、160~200℃(Gleadow *et al.*, 1986; Green, 1989; Corrigan, 1991)。由于裂变径迹在高于封闭温度时退火作用几乎在瞬时发生,而低于封闭温度时退火速率极低(Gleadow *et al.*, 1986),因此,退火模型仅在封闭温度(PAZ)范围内有效,不应过度解释 PAZ 以外获得的冷却曲线。本文的热历史模拟结果显示苏云河斑岩钼矿经历了一期快速冷却,即中三叠世至早白垩世(240~120Ma)。

3.4 剥露速率计算

本文使用矿物对法、年龄-封闭温度法和热史模拟法计算苏云河钼矿的剥露速率(丁汝鑫等, 2007; 常远和周祖翼, 2010; 吕红华等, 2013)。矿物对法是指对同一样品采用不同方法进行测年,而后根据封闭温度差和年龄差的比来计算剥露速率。年龄-封闭温度法为已知样品年龄和封闭温度,假定区域的地温梯度和当今地表温度来计算剥露速率。而热史模拟法是根据模拟曲线及冷却区间的划分来计算剥露速率。因此,热史模拟法较之其他两种方法,更能体现每个阶段的剥露速率和揭顶量的差异。由于 AFT、ZHe 和 ZFT 的封闭温度分别为 60~110℃、160~200℃和 210~270℃(Hurford and Green, 1983; Ketcham *et al.*, 1999; Reiners *et al.*, 2004; Enkelmann and Garver, 2016),计算时,AFT、ZHe 与 ZFT 的封闭温度分别取 85℃、180℃和 240℃,计算结果见表 4。根据热史模拟法的计算结果,苏云河钼矿在中二叠世-早白垩世(240~120Ma)的剥露速率为 49.0~56.7m/Myr,在早白垩世至今(120~0Ma)的剥露速率为 6.7~21.7m/Myr。

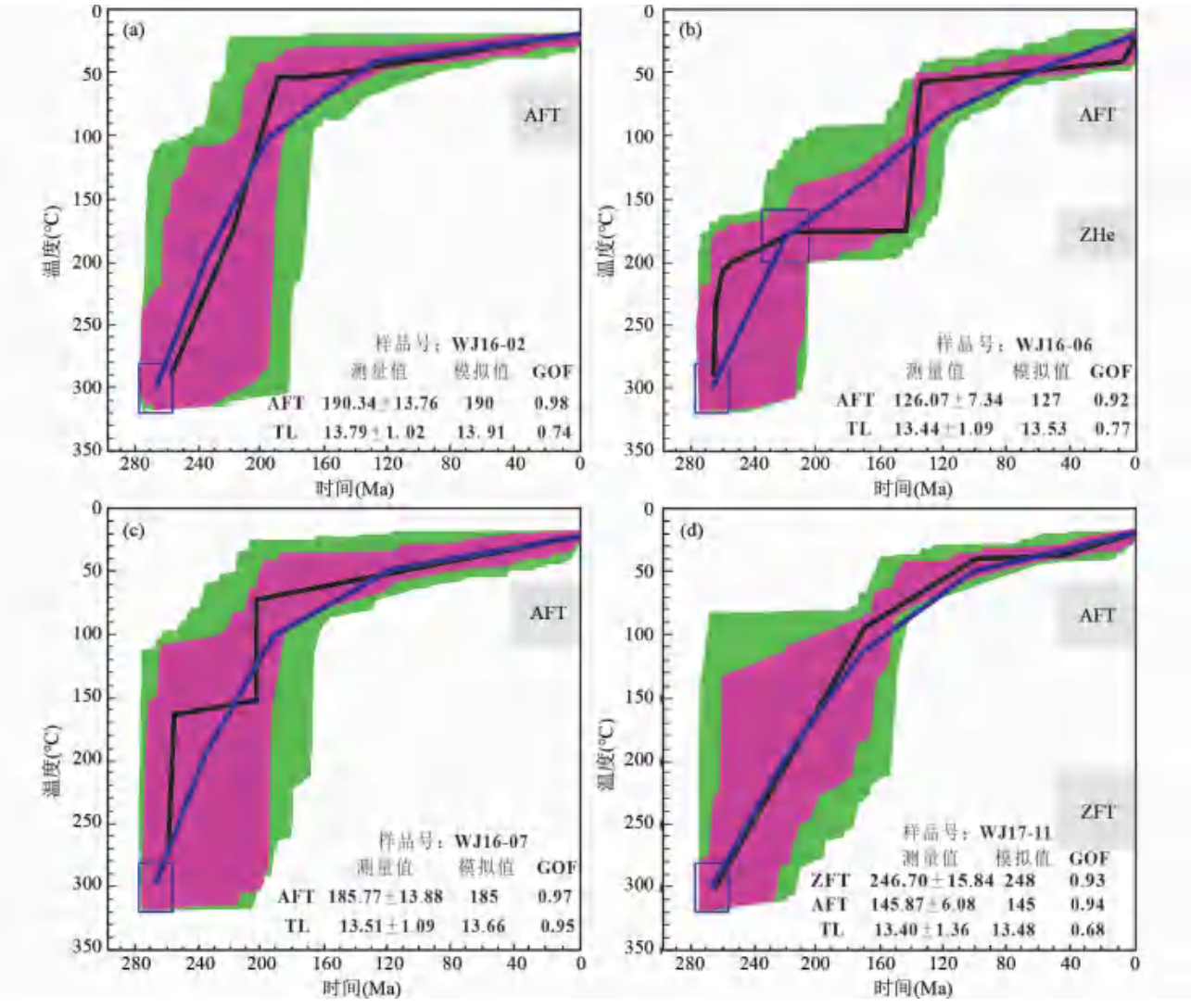

图 5 苏云河钼矿花岗质岩石样品的热历史模拟结果

紫色区域代表拟合良好；绿色区域代表拟合可接受；蓝色线代表加权平均路径；黑色线代表最佳拟合曲线；方框代表模拟初始值限制；4 个样品均输入 AFT 年龄作为初始条件；GOF 代表拟合良好值；TL 代表径迹长度．封闭温度范围为：AFT：60～110℃，ZHe：160～200℃，ZFT：210～270℃

Fig. 5 Results of HeFTy thermal history modeling of selected granitic samples from the Suyunhe porphyry Mo deposit

4 讨论

4.1 苏云河斑岩型钼矿的岩浆-热液演化过程

斑岩型矿床主要形成于汇聚板片边缘，是复杂岩浆和热液过程的产物，其就位古深度通常小于 6km（Wilkinson and Kesler, 2007; Richards, 2009; Sillitoe, 2010; Cooke *et al.*, 2014）。准确掌握岩浆-热液-冷却过程是探索斑岩矿床形成、演化和保存机制的基础（McInnes *et al.*, 2005; Wilkinson and Kesler, 2009）。传统锆石 U-Pb 同位素体系具有较高的封闭温度，主要记录火成岩的侵位时代（Cherniak and Watson, 2001），辉钼矿 Re-Os 年龄，锆石裂变径迹和（U-Th）/He 年龄主要记录成矿和热液活动时代（Green, 1989; Suzuki *et al.*, 1996）。杨猛等（2015）报道了苏云河钼矿区 I# 含矿花岗岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 309±4Ma。而 Shen *et al.*（2017）得到苏云河花岗岩和花岗闪长岩的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 298～294Ma。这些锆石 U-Pb 年龄结果表明，苏云河钼矿区侵入岩岩浆活动时限为晚石炭-早二叠世。Shen *et al.*（2013）和钟世华等（2015）报道苏云河钼矿中辉钼矿的 Re-Os 加权年龄分别为 301±4Ma 和 295±2Ma，表明矿化发生于晚石炭世晚期到早二叠世。苏云河钼矿区花岗岩的侵位时限与成矿年龄在误差范围内一致，表明这些花岗岩可能与钼矿化密切相关。另外，苏云河矿床绿泥石化蚀变广泛发育。三种类型的绿泥石化蚀变被识别出来，分别为绿泥石化蚀变Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ型。Ⅰ型绿泥石赋存于深部

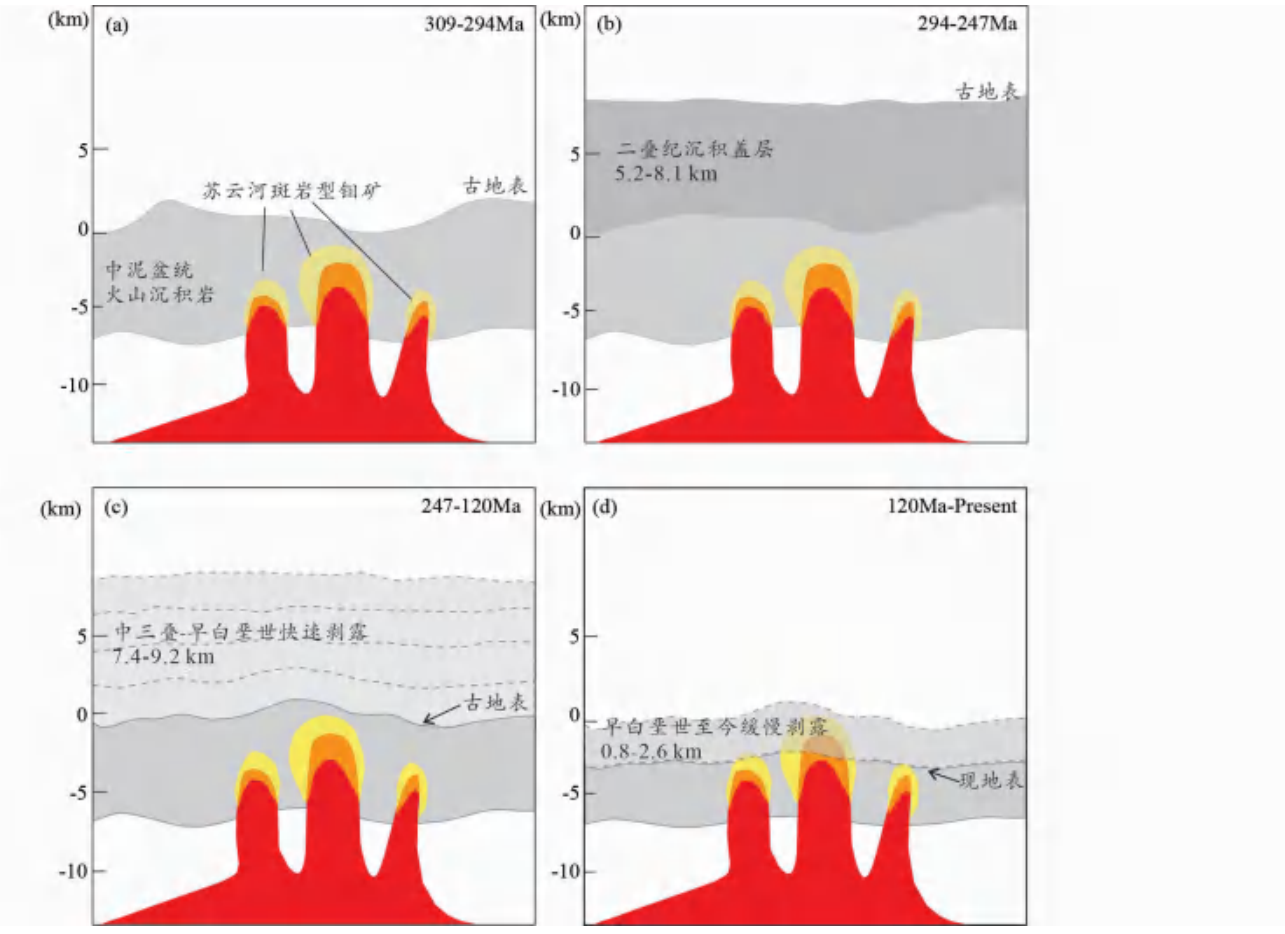

图 6 苏云河斑岩型钼矿侵位、埋藏和剥露模型图

纵坐标是以 294Ma 时古地表海拔为 0km 设置的参考系.(a)花岗岩质岩浆侵入到中泥盆统地层中,岩浆作用和成矿作用几乎同时形成;(b)矿床在早二叠世-中三叠世之间接受了较厚的沉积;(c)中三叠世-早白垩世期间经历了快速的快速剥露过程;(d)早白垩世以后经历缓慢剥露过程

Fig. 6 Schematic diagrams of emplacement, burial and exhumation of the Suyunhe porphyry Mo deposit

花岗岩中,以原生黑云母或角闪石的置换为特征。除绿泥石蚀变外,绢云母蚀变常被观察到,并取代花岗岩中的斜长石或长石;Ⅱ型绿泥石主要赋存于含矿石英脉或细脉中,Ⅱ型绿泥石与辉钼矿有密切的关系,因此它们的化学成分可以用来测定钼矿化的物理化学条件;Ⅲ型绿泥石也伴有绢云母。但它们赋存于浅层火山沉积序列中,并形成蚀变边,与贫瘠的石英脉或细脉接壤(钟世华等, 2015; Cao *et al.*, 2020)。类型Ⅱ的绿泥石化蚀变是相对高的温度(319~353℃),与所测量的流体包裹体温度一致(钟世华等, 2015; Cao *et al.*, 2020)。而类型Ⅰ和Ⅲ绿泥石化蚀变的温度较低(247~319℃)。锆石裂变径迹的封闭温度刚好可以控制晚期绿泥石化蚀变的上限,这表明该矿床的低温蚀变不晚于 240Ma。因此,苏云河斑岩型矿床可能经历了长期的(>55Myr)蚀变过程。

4.2 苏云河斑岩型钼矿的矿床保存和剥露史

通常,岩浆从岩浆房上侵到浅部地壳过程中,由于岩浆与围岩巨大的温度差,导致岩浆与围岩之间快速的热传导过程而快速降温,其冷却速率可达 1000℃/Myr,甚至更高(McInnes *et al.*, 2005; Harris *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014)。苏云河花岗岩和花岗闪长岩从锆石 U-Pb(298~294Ma)到 ZFT(247±16Ma)封闭温度的平均冷却速率仅为 10.1~19.7℃/Myr,比典型的斑岩型矿床小两个数量级。这可能有以下三种原因:(1)花岗岩就位较深,围岩温度大于 ZFT 部分保留区,导致 ZFT 系统长时间没有计时;(2)花岗岩的 ZFT 年龄被成矿后岩浆热液事件所重置;(3)成矿后接受了较厚的埋藏,矿体被埋藏至较深的位置,埋藏温度高于 ZFT 的部分保留区,重置了 ZFT 年龄。根据邵洁涟计算成矿压力和深度的经验公式(杨志强等, 2012),获得苏云河斑岩钼矿成矿深度为 1.9~4.8km(钟世华等, 2015)。假定地表温度为 20℃,地温梯度为 25℃/km。苏云河斑岩钼矿最大侵位深度对应的围岩温度为 140℃左右。花岗岩的形成温度明显高于围岩温度。因此,这些花岗岩只是浅部就位,第一种可能排除。苏云河地区已报道的最年轻的锆石 U-Pb 年

龄为 293.7 ±2.3Ma(Shen *et al.*, 2017)，在早二叠世之后没有岩浆活动的证据，而且也没有受到后期流体交代的迹象，第二种可能也排除。西准噶尔在晚石炭至早二叠世主要为伸展背景(Geng *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2010; 尹继元等, 2013)，十分有利于接受沉积。由于断裂构造作用，西准噶尔在 ~285 ~260Ma 经历了普遍剥蚀过程(Gillespie *et al.*, 2020)，这可能为矿区之上的盖层提供了物源。此外，位于准噶尔盆地西南端的石炭纪碎屑岩样品的热历史模拟也显示，它们经历了二叠纪至中三叠世的埋藏过程，该样品至少被加热至 ~120℃，导致其 AFT 年龄重置(Glorie *et al.*, 2019)。因此我们认为，苏云河钼矿可能也经历了一期快速埋藏过程，其温度超过 ZFT 的部分保留区，导致其年龄重置。

以地温梯度 25℃/km 和 ZFT 封闭温度 210 ~270℃计算(Hurford and Green, 1983; Brandon *et al.*, 1998)，若要重置 ZFT 年龄，样品的温度至少到达 270℃，对应最大的埋藏深度为 10km(图 6a, b)。根据 WJ16-06 和 WJ17-11 两组样品的矿物对计算结果，苏云河钼矿 208 ~126Ma 的冷却速率为 1.1℃/Myr，247 ~146Ma 的冷却速率为 1.5℃/Myr，明显低于晚石炭-中三叠世期间的冷却速率，说明中三叠世以来矿体和围岩的温度已经基本平衡。因此，厚埋藏应该发生于中三叠世之前。斑岩的侵位古深度为 1.9 ~4.8km，需要在晚石炭至中三叠世期间覆盖约 5.2 ~8.1km 的盖层。

自中三叠世开始，矿床进入快速冷却阶段。对准噶尔盆地西北缘的物源研究表明，在这一阶段西准噶尔为盆地提供了大量的碎屑沉积(蔚远江等, 2020)。热史模拟结果和沉积学证据均表明，矿床在三叠纪至早白垩世发生了快速冷却。根据热史模拟法的计算结果，苏云河钼矿中三叠世-早白垩世(240 ~120Ma)的剥露速率为 49.0 ~56.7m/Myr，揭顶量为 7.4 ~9.2km(图 6c)。

早白垩世之后，矿床进入缓慢冷却阶段，苏云河钼矿所受剥蚀作用明显减缓。根据热史模拟法的计算结果，其平均剥露速率为 6.7 ~21.7m/Myr，较之中三叠世-早白垩世已经明显减缓。在缓慢冷却阶段，该地区的揭顶量为 0.8 ~2.6km。此外，准噶尔盆地的沉积学相关研究表明，白垩纪末期以来，准噶尔盆地受全球气候变冷和青藏高原隆升共同影响，干旱化程度不断加强(王熠哲等, 2019)，这种干旱性气候在中生代晚期及新生代一定程度上限制了西准噶尔的剥蚀作用(Pullen *et al.*, 2020)。这些证据表明苏云河钼矿在晚白垩世之后经历了缓慢剥露过程，直至裸露至地表(图 6d)。

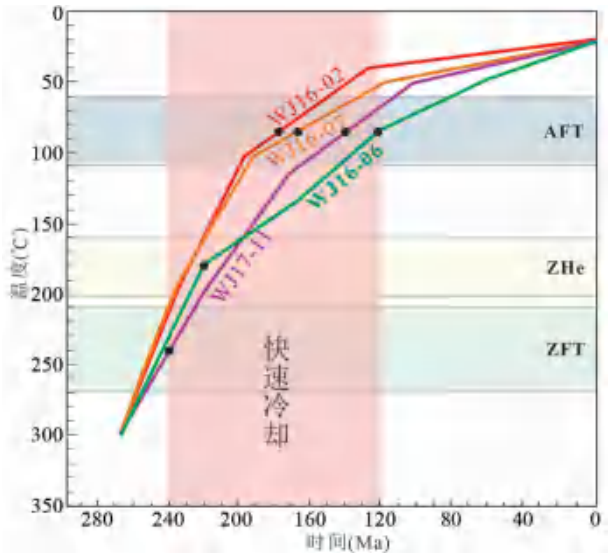

图 7 苏云河钼矿综合的热史模拟汇编

黑色圆点表示样品处于封闭温度区间中间时的年龄

Fig. 7 Interpreted thermal history of the Suyunhe Mo deposit derived from the modeling

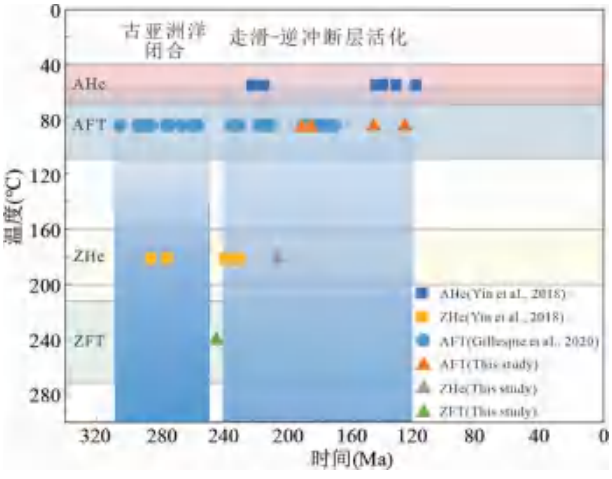

图 8 西准噶尔不同类型低温年代学年龄统计图

图中数据来自本研究、Yin *et al.* (2018)和 Gillespie *et al.* (2020). 与图中标示出的冷却区间相关的主要构造事件有：古亚洲洋的闭合(310 ~250Ma)(Gillespie *et al.*, 2020; Glorie *et al.*, 2019)；区域内走滑-逆冲断层活化(240 ~120Ma)

Fig. 8 Low temperature geochronological data summary of different dating systems in the West Junggar

4.3 西准噶尔中生代快速冷却事件

目前，一些学者认为西准噶尔地区中生代经历快速冷却过程(Yin *et al.*, 2018)，也有学者认为是缓慢冷却过程(Gillespie *et al.*, 2020)。本文获得的 ZFT、ZHe 和 AFT 年龄结果表明西准噶尔地区经历了漫长的中生代冷却过程(247 ~126Ma)。热模拟也显示该地区经历了一期连续的冷却和剥露过程(图 7)。样品 WJ16-06 和 WJ17-11 使用矿物对法计算结果表明，其在 224 ~126Ma 和 246 ~145Ma 期间的冷却速率分别为 1.1℃/Myr 和 1.5℃/Myr，指示了相对快速的冷却。这些结果与准噶尔盆地在中生代接受了巨厚的沉积一致。比如：准噶尔盆地西北缘的红山嘴地区在三叠纪持续拗陷并发生沉积补偿，湖盆内充填巨厚的三叠-白垩系沉积(高阳等, 2016)。这些中生代沉积岩物源来自于西北地区，由

厚层的砾岩和沉积角砾岩组成,岩石成分成熟度差、碎屑颗粒分选差,均支持这一期的快速剥露(Hendrix *et al.*, 1992)。另外,前期在西准噶尔包古图地区也获得相似的中生代的ZHe和AHe热年代学数据(Yin *et al.*, 2018)。这表明这一时期的快速冷却不仅仅局限于苏云河地区,而是整个西准噶尔地区。前人的研究显示,西准噶尔地区中生代经历多期次的快速冷却事件,可能与区域南部的远程效应有关(如:羌塘和昆仑-柴达木碰撞或者羌塘和拉萨碰撞)(Hendrix *et al.*, 1992; Dumitru *et al.*, 2001)。然而,西准噶尔在二叠-三叠纪呈现由NW向SE的逆冲、旋转的区域构造(何登发等, 2018),这些构造活动并非受到由南向北的挤压应力而形成的。本文的研究结果表明,单一的构造事件的远程效应很难解释如此漫长的冷却过程。相比而言,区域内走滑-逆冲断层的活动可能更好地解释这期冷却过程。

首先,本文在苏云河地区获得的磷灰石裂变径迹数据(190~126Ma)和西准噶尔南部地区获得的磷灰石(U-Th)/He数据(237~120Ma)都比较分散(Yin *et al.*, 2018)。Gillespie *et al.* (2020)在西准噶尔地区也获得比较分散的磷灰石裂变径迹结果(307~177Ma)(图8)。而热模拟结果也显示西准噶尔地区经历漫长的中生代快速冷却过程(图5、图7)。其次,西准噶尔地区在晚古生代末期到中生代由广泛发育走滑断层转换为走滑逆冲断层(Allen *et al.*, 1995; Allen and Vincent, 1997; Laurent-Charvet *et al.*, 2003; Choulet *et al.*, 2012),并发育多组逆冲推覆体,由西向东依次为塔尔巴哈台-萨吾尔推覆体、巴尔鲁克-谢米斯台推覆体、加依尔推覆体,呈前展式活动,红车断裂带、克百断裂带和乌夏断裂带处于冲断前锋部位,同时伴有地块旋转(何登发等, 2018)。第三,准噶尔盆地西北缘在三叠纪发生了强烈挤压变形,侏罗-白垩纪虽然构造作用有所减弱,但地层内部存在多期局部不整合,说明局部的断层活动仍然活跃(隋风贵, 2015; 胡小文等, 2020)。最后,Yang *et al.* (2012)通过地震剖面分析显示,准噶尔盆地南隆起的断裂活动时限一直持续到白垩纪。西准噶尔东南缘断裂带在三叠纪-侏罗纪发育右旋走滑活动(余养里, 2016)。综上所述,西准噶尔地区在中生代断裂活动频繁,在时间上很难与某个特定的构造事件或者远程效应相关。因此,我们认为西准噶尔地区中生代的快速冷却过程可能与区内发生的走滑-逆冲作用有关。

5 结论

对苏云河钼矿花岗质岩石进行了低温热年代学分析,包括ZFT、AFT和ZHe测年。综合其它地质背景资料和年龄数据,得出以下结论:

(1)苏云河矿床经历了超过55Myr的中-低温蚀变过程。

(2)苏云河斑岩型钼矿在晚石炭-早三叠世期间接受大约5.2~8.1km的盖层埋藏。而后经历了中生代快速冷却过程,揭顶量约为7.4~9.2km,在晚白垩世之后进入缓慢冷却阶段,揭顶量为0.8~2.6km。矿床的保存很大程度上受到后期的埋藏和抬升速率的控制。

(3)西准噶尔地区中生代的快速冷却可能是由区内大型断层活化引起的。

致谢 韩春明研究员与刘丽萍博士与作者就斑岩成矿与保存机制进行了讨论;三位匿名审稿人详细审阅了全文,并提出很多宝贵的意见和建议;在此一并衷心的表示感谢!

谨以此文致敬李继亮先生!李继亮先生在多个领域的开创性研究,引领和推进了我国沉积学和造山带大地构造学的研究发展。他严谨的科研态度、崇高的学术思想令我辈深深折服,感谢先生在中国地质学科作出的杰出贡献!

References

Aliyari F, Afzal P, Harati H and Hou ZQ. 2020. Geology, mineralogy, ore fluid characteristics, and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the Kahang Cu-(Mo) porphyry deposit, Urumieh-Dokhtar magmatic arc, Central Iran. Ore Geology Reviews, 116: 103238

Allen MB, Şengör AMC and Natal'in BA. 1995. Junggar, Turfan and Alakol basins as Late Permian to Early Triassic extensional structures in a sinistral shear zone in the Altaid orogenic collage, Central Asia. Journal of the Geological Society, 152(2): 327-338

Allen MB and Vincent SJ. 1997. Fault reactivation in the Junggar region, Northwest China: The role of basement structures during Mesozoic-Cenozoic compression. Journal of the Geological Society, 154(1): 151-155

Brandon MT, Roden-Tice MK and Garver JI. 1998. Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, Northwest Washington State. GSA Bulletin, 110(8): 985-1009

Briggs SM, Yin A, Manning CE, Chen ZL, Wang XF and Grove M. 2007. Late Paleozoic tectonic history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System. GSA Bulletin, 119(7-8): 944-960

Cao MJ, Hollings P, Evans NJ, Cooke DR, McInnes BIA, Zhao KD, Qin KZ, Li DF and Sweet G. 2020. In situ elemental and Sr isotope characteristics of magmatic to hydrothermal minerals from the black mountain porphyry deposit, Baguio District, Philippines. Economic Geology, 115(4): 927-944

Chang Y and Zhou ZY. 2010. Basic methods to inverse exhumation rates using low-temperature thermochronological data. Science and Technology Review, 28(21): 86-94 (in Chinese with English abstract)

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

Chen HY and Wu C. 2020. Metallogenesis and major challenges of porphyry copper systems above subduction zones. Scientia Sinica (Terrae), 50(7): 865-886 (in Chinese)

Chen JF, Han BF, Ji JQ, Zhang L, Xu Z, He GQ and Wang T. 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China. Lithos, 115(1-4): 137-152

Cherniak DJ and Watson EB. 2001. Pb diffusion in zircon. Chemical Geology, 172(1-2): 5-24

Choulet F, Chen Y, Wang B, Faure M, Cluzel D, Charvet J, Lin W and Xu B. 2011. Late Paleozoic paleogeographic reconstruction of western Central Asia based upon paleomagnetic data and its

geodynamic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 42(5): 867 – 884

Choulet F, Faure M, Cluzel D, Chen Y, Lin W, Wang B and Jahn BM. 2012. Architecture and evolution of accretionary orogens in the Altaids collage: The Early Paleozoic West Junggar (NW China). American Journal of Science, 312(10): 1098 – 1145

Choulet F, Chen Y, Cogné JP, Rabillard A, Wang B, Lin W, Faure M and Cluzel D. 2013. First Triassic palaeomagnetic constraints from Junggar (NW China) and their implications for the Mesozoic tectonics in Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 78: 371 – 394

Cooke DR, Hollings P, Wilkinson JJ and Tosdal RM. 2014. Geochemistry of porphyry deposits. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). Treatise on Geochemistry. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier, 357 – 381

Corrigan J. 1991. Inversion of apatite fission track data for thermal history information. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 96 (B6): 10347 – 10360

Ding RX, Zhou ZY and Wang W. 2007. Modeling exhumation rates of orogenic belts with low-temperature thermochronological data. Advances in Earth Science, 22(5): 447 – 455 (in Chinese with English abstract)

Donelick RA, Ketcham RA and Carlson WD. 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: Ⅱ. Crystallographic orientation effects. American Mineralogist, 84(9): 1224 – 1234

Donelick RA, O'Sullivan PB and Ketcham RA. 2005. Apatite fission track analysis, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 58(1): 49 – 94

Dumitru TA, Zhou D, Chang EZ, Graham SA, Hendrix MS, Sobel ER and Carroll AR. 2001. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution of Central Asia: From continental assembly to intracontinental deformation. Boulder, Colorado: Geological Society of America Memoir, 194: 71 – 99

Enkelmann E and Garver JI. 2016. Low-temperature thermochronology applied to ancient settings. Journal of Geodynamics, 93: 17 – 30

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 Y, Yu XH, Huang DJ, Wang J, Liu WF and Zhao YW. 2016. Depositional characteristics of braided-river delta in Karamay Formation of Hongshanzui area, Junggar Basin. Journal of Northeast Petroleum University, 40(4): 35 – 44, 105 (in Chinese with English abstract)

Geng HY, Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Xian WS, Zhao GC, Zhang LF, Wong K and Wu FY. 2009. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? Chemical Geology, 266(3 – 4): 364 – 389

Gillespie J, Glorie S, Xiao WJ, Zhang ZY, Collins AS, Evans N, McInnes B and De Grave J. 2017. Mesozoic reactivation of the Beishan, southern Central Asian Orogenic Belt: Insights from low-temperature thermochronology. Gondwana Research, 43: 107 – 122

Gillespie J, Glorie S, Jepson G, Xiao WJ and Collins AS. 2020. Late Paleozoic exhumation of the West Junggar Mountains, NW China. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125 (1): e2019JB018013

Gleadow AJW, Duddy IR, Green PF and Lovering JF. 1986. Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 94(4): 405 – 415

Glorie S, Otasevic A, Gillespie J, Jepson G, Daniăík M, Zhimulev FI, Gurevich D, Zhang Z, Song D and Xiao W. 2019. Thermo-tectonic history of the Junggar Alatau within the Central Asian Orogenic Belt (SE Kazakhstan, NW China): Insights from integrated apatite U/Pb, fission track and (U-Th)/He thermochronology. Geoscience Frontiers, 10(6): 2153 – 2166

Gong L, Kohn BP, Zhang ZY, Xiao B, Wu L and Chen HY. 2021. Exhumation and preservation of Paleozoic porphyry Cu deposits: Insights from the Yandong deposit, Southern Central Asian orogenic belt. Economic Geology, 116(3): 607 – 628

Green PF. 1989. Thermal and tectonic history of the East Midlands shelf (onshore UK) and surrounding regions assessed by apatite fission track analysis. Journal of the Geological Society, 146(5): 755 – 773

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part Ⅰ): Timing of post-collisional plutonism. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1077 – 1086 (in Chinese with English abstract)

Harris AC, Dunlap WJ, Reiners PW, Allen CM, Cooke DR, White NC, Campbell IH and Golding SD. 2008. Multimillion year thermal history of a porphyry copper deposit: Application of U-Pb, $^{40}Ar/^{39}Ar$ and (U-Th)/He chronometers, Bajo de la Alumbrera copper-gold deposit, Argentina. Mineralium Deposita, 43(3): 295 – 314

Hart CJ. 2007. Reduced intrusion-related gold systems. In: Goodfellow WD (ed.). Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5: 95 – 112

He DF, Wu ST, Zhao L, Zheng ML, Li D and Lu Y. 2018. Tectono-depositional setting and its evolution during Permian to Triassic around Mahu Sag, Junggar Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 39 (1): 35 – 47 (in Chinese with English abstract)

Hendrix MS, Graham SA, Carroll AR, Sobel ER, McKnight CL, 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. GSA Bulletin, 104(1): 53 – 79

Hu XW, Yang XY, Ren YS, Wu ZJ, Du GF and Huang TT. 2020. Sedimentary environment and tectonic evolution of Junggar Basin: Constrains on the mineralization of sandstone-type uranium deposits. Geotectonica et Metallogenia, 44(4): 725 – 741 (in Chinese with English abstract)

Hurford AJ and Green PF. 1983. The zeta age calibration of fission-track dating. Chemical Geology, 41: 285 – 317

Hurford AJ. 1990. Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Subcommission on Geochronology. Chemical Geology, 80(2): 171 – 178

Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 91(1 – 2): 181 – 193

Johnson JE, Flowers RM, Baird GB and Mahan KH. 2017. "Inverted" zircon and apatite (U-Th)/He dates from the Front Range, Colorado: High-damage zircon as a low-temperature (< 50℃) thermochronometer. Earth and Planetary Science Letters, 466: 80 – 90

Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Roger F, Tapponnier P, Malavieille J, Arnaud N and Wu C. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan Plateau: Fission track constraints. Tectonophysics, 343(1 – 2): 111 – 134

Kesler SE and Wilkinson BH. 2006. The role of exhumation in the temporal distribution of ore deposits. Economic Geology, 101(5): 919 – 922

Ketcham RA, Donelick RA and Carlson WD. 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales. American Mineralogist, 84(9): 1235 – 1255

Ketcham RA, Carter A, Donelick RA, Barbarand J and Hurford AJ. 2007. Improved modeling of fission-track annealing in apatite. American Mineralogist, 92(5 – 6): 799 – 810

Ketcham RA, Donelick RA, Balestrieri ML and Zattin M. 2009. Reproducibility of apatite fission-track length data and thermal history reconstruction. Earth and Planetary Science Letters, 284(3 – 4):

504 – 515

Laurent-Charvet S, Charvet J, Monié P and Shu L. 2003. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern central Asia (NW China): New structural and geochronological data. Tectonics, 22(2): 1009

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 JY, Chen XH, Wang ZH, Chen W, Li C and Huang PH. 2017. Late Palaeozoic mineralization and tectonic evolution of the West Junggar metallogenic belt, Central Asia: Constraints from Re-Os and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology. International Geology Review, 59(9): 1131 – 1153

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 W, Hu JM, Li DP, Liu JX, Sun YP and Liang JW. 2007. Analysis of the Late Paleozoic and Mesozoic paleocurrents and it's constructional significance of the northern Bogdashan, Xinjiang. Acta Sedimentologica Sinica, 25(2): 283 – 292 (in Chinese with English abstract)

Lü HH, Chang Y, Wang W and Zhou ZY. 2013. Rapid exhumation of the Tianshan Mountains since the Early Miocene: Evidence from combined apatite fission track and (U-Th)/He thermochronology. Science China (Earth Sciences), 56(12): 2116 – 2125

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

Pullen A, Banaszynski M, Kapp P, Thomson SN and Cai FL. 2020. A mid-Cretaceous change from fast to slow exhumation of the western Chinese Altai mountains: A climate driven exhumation signal? Journal of Asian Earth Sciences, 197: 104387

Reiners PW, Spell TL, Nicolescu S and Zanetti KA. 2004. Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(8): 1857 – 1887

Richards JP. 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. Geology, 37(3): 247 – 250

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

Shen P, Hattori K, Pan HD, Jackson S and Seitmuratova E. 2015. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: Zircon trace-element data from porphyry Cu deposits in the Central Asian orogenic belt. Economic Geology, 110(7): 1861 – 1878

Shen P, Zhou TF, Yuan F, Pan HD, Wang JL and Seitmuratova E. 2015. Main deposit types, mineral systems, and metallogenic belt connections in the Circum-Balkhash-West Junggar metallogenic province. Acta Petrologica Sinica, 31(2): 285 – 303 (in Chinese with English abstract)

Shen P, Pan HD, Cao C, Zhong SH and Li CH. 2017. The formation of the Suyunhe large porphyry Mo deposit in the West Junggar terrain, NW China: Zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic results. Ore Geology Reviews, 81: 808 – 828

Sillitoe RH. 2010. Porphyry copper systems. Economic Geology, 105(1): 3 – 41

Singer DA, Berger VI and Moring BC. 2008. Porphyry copper deposits of the world: Database and grade and tonnage models. U.S. Geological Survey, Open-File Report: 2008 – 1155

Sobel ER and Arnaud N. 1999. A possible Middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. Tectonics, 18(1): 64 – 74

Sui FG. 2015. Tectonic evolution and its relationship with hydrocarbon accumulation in the northwestern margin of Junggar basin. Acta Geologica Sinica, 89(4): 779 – 793 (in Chinese with English abstract)

Suzuki K, Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the ReOs system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(16): 3151 – 3159

Thomson SN and Ring U. 2006. Thermochronologic evaluation of postcollision extension in the Anatolide orogen, western Turkey. Tectonics, 25(3): TC3005

Wang B, Chen Y, Zhan S, Shu L, Faure M, Cluzel D, Charvet J and Laurent-Charvet S. 2007. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan belt. Earth and Planetary Science Letters, 263(3 – 4): 288 – 308

Wang YZ, Wu CD, Ma J, Fang YN, Xu Z and Zhou YX. 2019. Strata color rhythm of the Cretaceous-Neogene and evolution of palaeoenvironment and palaeoclimate in Junggar Basin. Journal of Palaeogeography, 21(3): 451 – 468 (in Chinese with English abstract)

Wei YJ, Hu SY and He DF. 2020. Skeleton components of Permian-Lower Jurassic clastic rocks in NW margin of Junggar basin: Tracing to provenance and tectonic settings evolution. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1347 – 1366 (in Chinese with English abstract)

Wilkinson BH and Kesler SE. 2007. Tectonism and exhumation in convergent margin orogens: Insights from ore deposits. The Journal of Geology, 115(6): 611 – 627

Wilkinson BH and Kesler SE. 2009. Quantitative identification of metallogenic epochs and provinces: Application to Phanerozoic porphyry copper deposits. Economic Geology, 104(5): 607 – 622

Wilkinson JJ. 2013. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs. Nature Geoscience, 6(11): 917 – 925

Xu Z, Han BF, Ren R, Zhou YZ, Zhang L, Chen JF, Su L, Li XH and Liu DY. 2012. Ultramafic-mafic mélange, island arc and post-collisional intrusions in the Mayile Mountain, West Junggar, China: Implications for Paleozoic intra-oceanic subduction-accretion process. Lithos, 132 – 133: 141 – 161

Yang M, Wang JL, Wang JQ and Liu C. 2015. Late Carboniferous intra-oceanic subduction and mineralization in western Junggar: Evidence from the petrology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Ⅰ# ore-bearing granite body in Suyunhe molybdenite orefield, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 31(2): 523 – 533 (in Chinese with English abstract)

Yang XF, He DF, Wang QC, Tang Y, Tao HF and Li D. 2012. Provenance and tectonic setting of the Carboniferous sedimentary rocks of the East Junggar Basin, China: Evidence from geochemistry and U-Pb zircon geochronology. Gondwana Research, 22(2): 567 – 584

Yang ZQ, Wu BY, Zheng SS, Chen PE and An JL. 2012. Analysis of metallogenic conditions of East Gobi porphyry molybdenum deposit. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 27(3): 308 – 314 (in Chinese with English abstract)

Yin JY, Yuan C, Sun M, Long XP, Zhao GC, Wong KP, Geng HY and Cai KD. 2010. Late Carboniferous high-Mg dioritic dikes in Western Junggar, NW China: Geochemical features, petrogenesis and tectonic implications. Gondwana Research, 17(1): 145 – 152

Yin JY, Chen W, Yuan C, Zhang YY, Long XP, Yu S, Zhang Y, Li J and Sun JB. 2013. Ages and tectonic implication of Late Paleozoic plutons in the West Junggar, North Xinjiang: Evidence from LA-ICPMS zircon geochronology. Geochemistry, 42(5): 414 – 429 (in Chinese with English abstract)

Yin JY, Chen W, Xiao WJ, Yuan C, Windley BF, Yu S and Cai KD. 2017. Late Silurian-early Devonian adakitic granodiorite, A-type and I-type granites in NW Junggar, NW China: Partial melting of mafic lower crust and implications for slab roll-back. Gondwana Research, 43: 55 – 73

Yin JY, Chen W, Xiao WJ, Long XP, Tao N, Liu LP, Yuan C and Sun

M. 2018. Tracking the multiple-stage exhumation history and magmatic-hydrothermal events of the West Junggar region, NW China: Evidence from $^{40}Ar/^{39}Ar$ and (U-Th)/He thermochronology. Journal of Asian Earth Sciences, 159: 130 – 141

Yin JY, Chen W, Thomson SN, Sun M, Wang YN, Xiao WJ, Yuan C, Sun JB and Long XP. 2019. Fission track thermochronology of the Tuwu-Yandong porphyry Cu deposits, NW China: Constraints on preservation and exhumation. Ore Geology Reviews, 113: 103104

Yu YL. 2016. Mesozoic strike-slip structures and tectonic evolution of Hong-Che fault zone in the northwestern margin of Junggar basin, Xinjiang, China. Ph. D. Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English summary)

Yuan WM. 2016. Thermochronological method of revealing conservation and changes of mineral deposits. Acta Petrologica Sinica, 32(8): 2571 – 2578 (in Chinese with English abstract)

Zhong SH, Shen P, Pan HD, Zheng GP, Yan YH and Li J. 2015. The ore-forming fluid and geochronology of the Suyunhe Mo deposit, West Junggar, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 31(2): 449 – 464 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF. 2014. Geological evolution and division of giant metallogenic belts in core part of Central Asian Metallogenic Region. Mineral Deposits, 33(03): 471 – 485 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

常远，周祖翼. 2010. 利用低温热年代学数据计算剥露速率的基本方法. 科技导报，28(21)：86 – 94

陈华勇，吴超. 2020. 俯冲带斑岩铜矿系统成矿机理与主要挑战. 中国科学(地球科学)，50(7)：865 – 886

丁汝鑫，周祖翼，王玮. 2007. 利用低温热年代学数据计算造山带剥露速率. 地球科学进展，22(5)：447 – 455

高阳，于兴河，黄丁杰，王进，刘文峰，赵延伟. 2016. 准噶尔盆地红山嘴地区克拉玛依组辫状河三角洲沉积特征. 东北石油大学学报，40(4)：35 – 44，105

韩宝福，季建清，宋彪，陈立辉，张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(Ⅰ)——后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报，22(5)：1077 – 1086

何登发，吴松涛，赵龙，郑孟林，李涤，路玉. 2018. 环玛湖凹陷二叠-三叠系沉积构造背景及其演化. 新疆石油地质，39(1)：35 – 47

胡小文，杨晓勇，任伊苏，吴兆剑，杜高峰，黄婷婷. 2020. 准噶尔盆地沉积环境-构造演化对砂岩型铀矿成矿的控制作用. 大地构造与成矿学，44(4)：725 – 741

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

李玮，胡健民，黎敦朋，刘金侠，孙宜朴，梁积伟. 2007. 新疆博格达山北缘晚古生代-中生代古水流样式转折及其构造意义. 沉积学报，25(2)：283 – 292

吕红华，常远，王玮，周祖翼. 2013. 天山中新世早期快速剥露：磷灰石裂变径迹与(U-Th)/He 低温热年代学证据. 中国科学(地球科学)，43(12)：1964 – 1974

申萍，周涛发，袁峰，潘鸿迪，王居里，Seitmuratova E. 2015. 环巴尔喀什-西准噶尔成矿省矿床类型、成矿系统和跨境成矿带对接. 岩石学报，31(2)：285 – 303

隋风贵. 2015. 准噶尔盆地西北缘构造演化及其与油气成藏的关系. 地质学报，89(4)：779 – 793

王熠哲，吴朝东，马健，房亚男，许酌，周彦希. 2019. 准噶尔盆地白垩纪-新近纪地层颜色韵律与古环境和古气候演化. 古地理学报，21(3)：451 – 468

蔚远江，胡素云，何登发. 2020. 准噶尔盆地西北缘二叠系-下侏罗统碎屑岩骨架组分及其物源与构造背景演化示踪. 地质学报，94(5)：1347 – 1366

杨猛，王居里，王建其，刘存. 2015. 新疆西准噶尔地区晚石炭世洋内俯冲与成矿：来自苏云河钼矿区Ⅰ#含矿花岗岩体的证据. 岩石学报，31(2)：523 – 533

杨志强，吴邦友，郑松森，陈培伟，安金亮. 2012. 新疆东戈壁斑岩型钼矿床成矿流体包裹体温度-压力研究. 地质找矿论丛，27(3)：308 – 314

尹继元，陈文，袁超，张运迎，龙晓平，喻顺，张彦，李洁，孙敬博. 2013. 新疆西准噶尔晚古生代侵入岩的年龄和构造意义：来自锆石 LA-ICPMS 定年的证据. 地球化学，42(5)：414 – 429

余养里. 2016. 准噶尔盆地西北缘红车断裂带中生代走滑构造及其构造演化. 博士学位论文. 杭州：浙江大学

袁万明. 2016. 矿床保存变化研究的热年代学技术方法. 岩石学报，32(8)：2571 – 2578

钟世华，申萍，潘鸿迪，郑国平，鄢瑜宏，李晶. 2015. 新疆西准噶尔苏云河钼矿床成矿流体和成矿时代. 岩石学报，31(2)：449 – 464

朱永峰. 2014. 中亚成矿域核心区地质演化和巨型成矿带划分. 矿床地质，33(3)：471 – 485