

东天山东戈壁钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及印支期成矿事件^{*}

吴艳爽¹ 项楠¹ 汤好书² 周可法^{1**} 杨永飞³

WU YanShuang¹, XIANG Nan¹, TANG HaoShu², ZHOU KeFa^{1**} and YANG YongFei³

1. 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

2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

3. 北京大学 造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871

1. Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

3. Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China

2012-09-25 收稿, 2012-11-20 改回.

Wu YS, Xiang N, Tang HS, Zhou KF and Yang YF. 2013. Molybdenite Re-Os isotope age of the Donggebi Mo deposit and the Indosinian metallogenic event in eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 121–130

Abstract The Donggebi giant Mo deposit is located in the Qoltag metallogenic belt, eastern Tianshan, Xinjiang. Eight molybdenite samples from the deposit yield Re-Os isotope ages ranging from 228.7 ± 2.7 Ma to 241.7 ± 0.9 Ma, with an isochron age of 231.9 ± 6.5 Ma (95% confidence, MSWD = 0.71), and a weighted mean age of 238.5 ± 3.7 Ma (95% confidence, MSWD = 5.8). The lowest molybdenite Re-Os age (228.7 ± 2.7 Ma) agrees well with the age (227.6 ± 1.3 Ma) of the parental porphyritic granite at the deposit, indicating that the magmatism and Mo-mineralization occurred in Triassic. The Re contents in seven molybdenite samples range from 26.51×10^{-6} to 91.34×10^{-6} , suggesting that the ore-forming metals were mainly sourced from an immature continental crust which was likely formed in Paleozoic subduction-related accretion. Compiling of the available isotope ages obtained from the mineral systems in eastern Tianshan area shows that the Indosinian mineralization was significant in the eastern Tianshan orogenic belt. The Indosinian mineralization occurred in continental collision regime.

Key words Molybdenite Re-Os isotope age; Donggebi Mo deposit; Indosinian mineralization; Continental collision; Eastern Tianshan

摘 要 东戈壁超大型钼矿床位于新疆境内的东天山觉罗塔格成矿带。8 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素年龄介于 228.7 ± 2.7 Ma ~ 241.7 ± 0.9 Ma, 等时线年龄为 231.9 ± 6.5 Ma (95% 置信度, MSWD = 0.71), 加权平均年龄为 238.5 ± 3.7 Ma (95% 置信度, MSWD = 5.8)。其中, 最小的辉钼矿 Re-Os 年龄与矿区内斑状花岗岩年龄 (227.6 ± 1.3 Ma) 一致, 表明成岩和成矿作用发生在三叠纪。7 件辉钼矿样品 Re 含量为 26.51×10^{-6} ~ 91.34×10^{-6} , 指示成矿物质主要来自古生代增生作用形成的不成熟大陆壳。已有成矿年龄显示了印支期成矿事件在东天山地区非常显著, 发生于大陆碰撞造山体制。

关键词 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄; 东戈壁钼矿; 印支成矿作用; 大陆碰撞作用; 东天山

中图法分类号 P597.3; P618.65

中亚造山带是全球最大的增生造山带与大陆成矿域(陈衍景, 2000; 李锦轶等, 2006; 王京彬和徐新, 2006; 肖文交等, 2008; 陈衍景等, 2009), 它经历了多期次的洋盆形成、俯冲消减和闭合等过程, 并在二叠纪末-三叠纪初彻底闭合

* 本文受国家自然科学基金项目(U1139301、U1129302)资助。

第一作者简介: 吴艳爽, 女, 1987 年生, 硕士, 助研, 矿床学专业, E-mail: wuyuan0530@163.com

** 通讯作者: 周可法, 男, 研究员, 数字地质与成矿预测专业, E-mail: zhoukf@ms.xjb.ac.cn

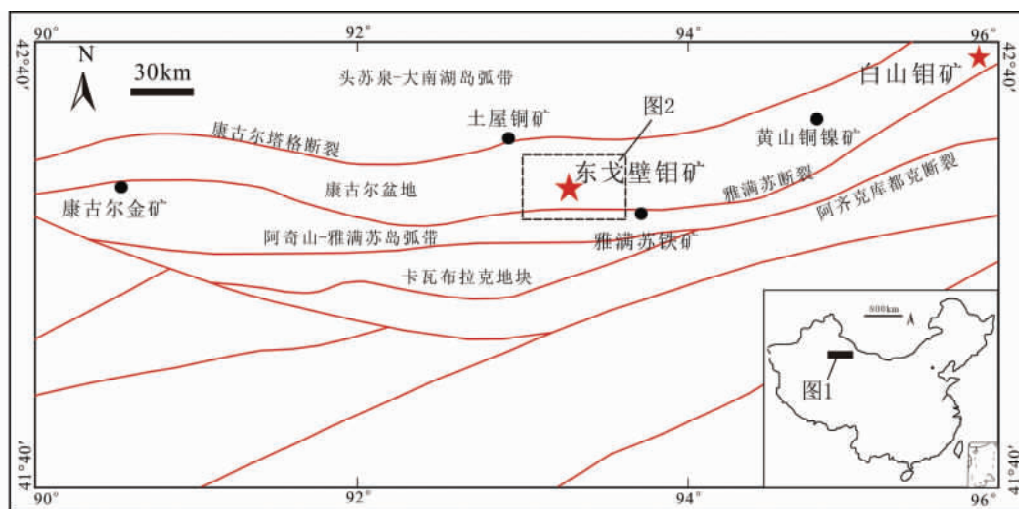


图1 东天山区域构造略图(据河南第二地质勘查院, 2010)

Fig. 1 Tectonic framework of eastern Tianshan, showing the location of the Donggebi Mo deposit

(Sengör and Natal'in, 1996; Bazhenov *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2003, 2004, 2009; Chen *et al.*, 2007, 2012)。按照现代成矿理论,在洋壳俯冲和大陆碰撞可分别形成古生代和中生代的岩浆热液(斑岩型、矽卡岩型)、变质热液型(造山型)和浅成热液等多类成矿系统(陈衍景和富士谷, 1992; 陈衍景等, 2007, 2008, 2012; 李诺等, 2007a; Pirajno, 2009)。东天山成矿带位于中亚成矿域的南缘,是我国的重要成矿省之一(陈衍景等, 1995; Xiao *et al.*, 2004; 王登红等, 2006),包括了多个成矿带或矿田,如大南湖-头苏泉成矿带、康古尔-黄山成矿带、雅满苏成矿带和中天山成矿带等。

东戈壁钼矿床位于新疆哈密市境内,经河南地勘院详细的地质勘查工作,已探明钼资源储量 50 万吨,平均品位 0.115%,是一个具有超大型规模的隐伏斑岩型钼矿床(河南省地质矿产勘查开发局第二地质勘查院(后文简称河南第二地质勘查院), 2010^①)。该矿床与白山超大型斑岩钼矿毗邻,均产于东天山的觉罗塔格多金属成矿带上,显示了该成矿带寻找斑岩钼矿的潜力(图1)。为确定成矿时代,杨志强等(2011)对矿区花岗岩类进行了同位素年代学研究,获得花岗斑岩脉和斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 292.2 ± 2.8 Ma 和 227.6 ± 1.3 Ma。显示成矿作用发生在二叠纪或三叠纪两种可能性,仍无法确定该矿床形成于古生代还是中生代。

鉴于上述,为研究矿床成因,总结成矿规律,指导今后找矿工作,我们对东戈壁钼矿床进行了辉钼矿 Re-Os 年龄测定,确证其形成于三叠纪,并探讨了东天山地区的印支期成矿事件。

1 地质背景

东戈壁钼矿床位于阿奇克库都克深大断裂带以北的觉

罗塔格晚古生代岛弧增生带内(杨兴科等, 1996)。早石炭世之后,觉罗塔格地区强烈褶皱隆起,形成以阿奇山-雅满苏为中心的复背斜,发育多期次中酸性侵入岩。该区二叠纪地层褶皱变形,伴有中酸性岩体侵入和断裂构造产生(王新昆等, 2009)。觉罗塔格岛弧增生带的多期次构造-岩浆事件形成了多时代、多类型的成矿系统,包括与基性-超基性杂岩带有关的土墩-黄山-镜儿泉铜镍成矿带,与浅侵位中酸性岩浆活动有关的土屋-延东斑岩铜(金)矿带和白山-东戈壁斑岩钼矿带,深侵位花岗岩浆活动有关的小白石头-沙东钨锡成矿带,与陆相火山-次火山作用有关的石英滩-马庄山-南金山浅成低温热液型金矿带,与海相火山-沉积作用有关的红云滩-库姆塔格-雅满苏等铁-铜-金矿床,与大型剪切带或走滑断裂作用有关的康古尔塔格金矿带等(图1)。

2 矿床地质特征

矿区地层为下石炭统干墩组。干墩组为一套厚度巨大的陆源碎屑-碳酸盐沉积建造,下部为黄褐色变质砂岩、石英细砂岩及深灰色薄层灰岩;中部为灰绿色粗砂岩、紫红色千枚岩及细碧岩夹含铁碧玉岩;上部为灰绿色、黄褐色中粗粒砂岩夹含铁碧玉岩及细碧岩。区内断裂主要有北东向、近东西向及北西向,以近东西向和北东向断裂规模最大。褶皱主要为东戈壁复向斜,该复向斜由 4 个次级背斜和 4 个次级向斜组成,其两翼岩层产状均较陡,倾角一般在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 左右。随后,晚古生代-早中生代构造-岩浆作用强烈,中酸性-酸性岩浆岩发育,破坏了褶皱、断裂的完整性(图2)。

岩浆岩以酸性侵入岩为主,呈长条带状或等轴状岩株产

① 河南省地质矿产勘查开发局第二地质勘查院. 2010. 新疆哈密市东戈壁钼矿勘探报告

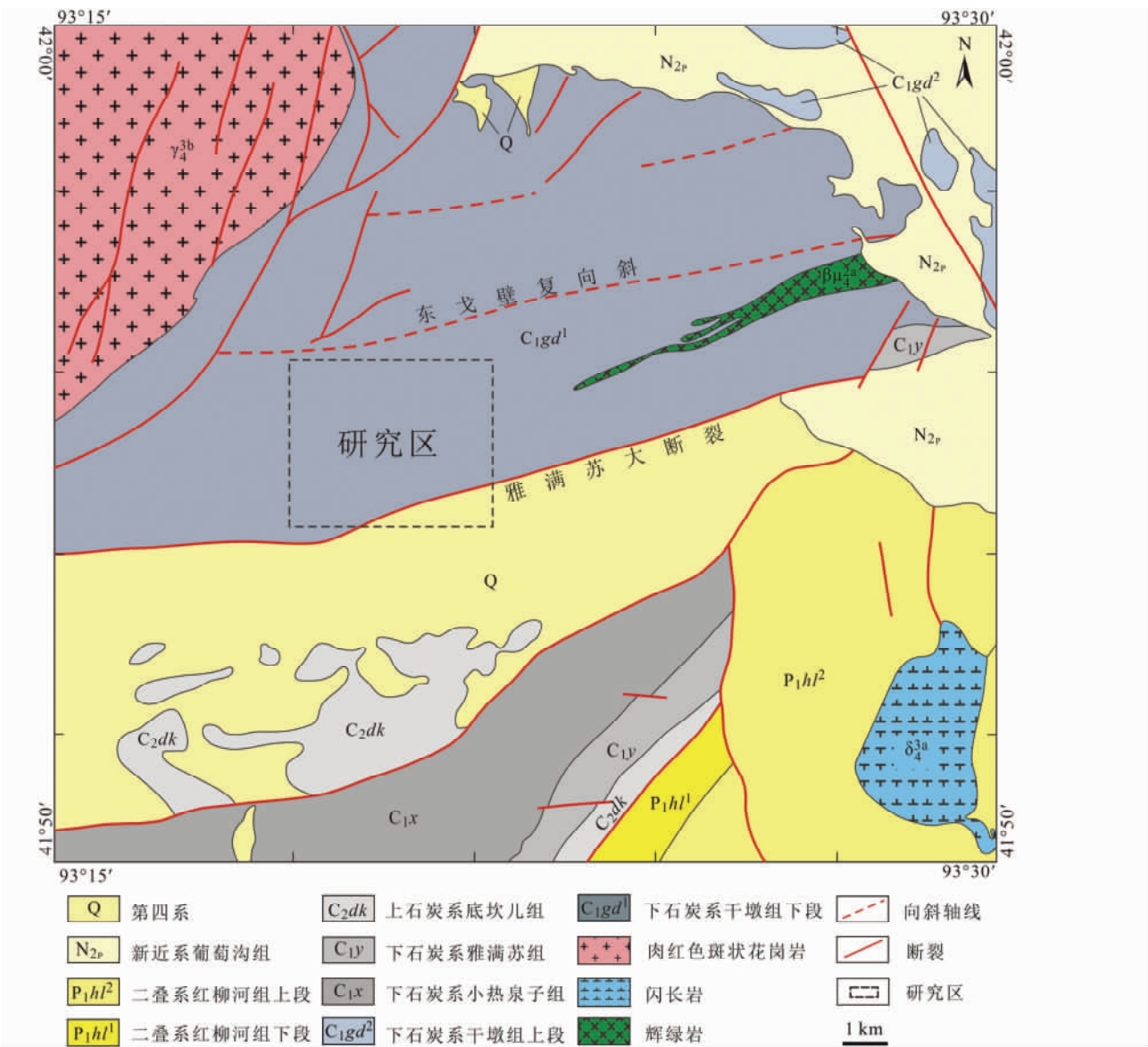


图2 东戈壁钼矿矿床地质图(据河南第二地质勘查院, 2010)
Fig.2 Geological map of the Donggebi Mo deposit

出,主要为斑状花岗岩、花岗斑岩脉、细粒花岗岩脉,均为隐伏岩体,其与围岩的接触处多具中细粒结构或细粒冷凝边结构。各侵入体的矿物成分基本相同,具有斑状或似斑状结构,斑晶以石英、钾长石、斜长石为主,基质主要由微细粒斜长石、钾长石、石英和黑云母,并含绢云母、绿泥石、磷灰石、黄铁矿和白钨矿等副矿物或蚀变矿物,不同岩体的斑晶含量、主要矿物所占比例、矿物粒度具有一定差别。杨志强等(2011)获得斑状花岗岩和细粒花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 227.6 ± 1.3 Ma,花岗斑岩脉年龄为 292.2 ± 2.8 Ma。因此,花岗岩与斑状花岗岩、细粒花岗岩不是同期形成的。

东戈壁钼矿矿体赋存于隐伏斑状花岗岩东西两侧的外接触带,将矿区分为东西两个矿段,两矿段内的矿体均受同一个斑状花岗岩体控制。其中,东矿带 I 号矿体为矿床的主矿

体,赋矿围岩主要为石炭系干墩组浅变质的砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩等一套碎屑岩(图3)。矿体平面形态为形状不规则的近圆形,剖面形态为近似层状-透镜状,总体产状平缓,由中心向周边缓慢倾斜,倾角 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$,局部矿体倾角变陡,倾角 30° 左右。

矿石类型以石英网脉型为主。钼矿物主要为辉钼矿(图4),多呈薄膜状、浸染状赋存于围岩表面或石英脉与围岩接触面上,或是呈自形-半自形粒状、叶片状、团块状、鳞片状赋存于石英细脉中。其它金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、白钨矿、黑钨矿等;脉石矿物主要为石英、绢云母、黑云母、钾长石、斜长石、白云母、方解石等。矿石结构包括鳞片-叶片状结构、他形粒状结构、半自形粒状结构、自形粒状结构、共边结构、交代结构、乳浊状结构、碎裂

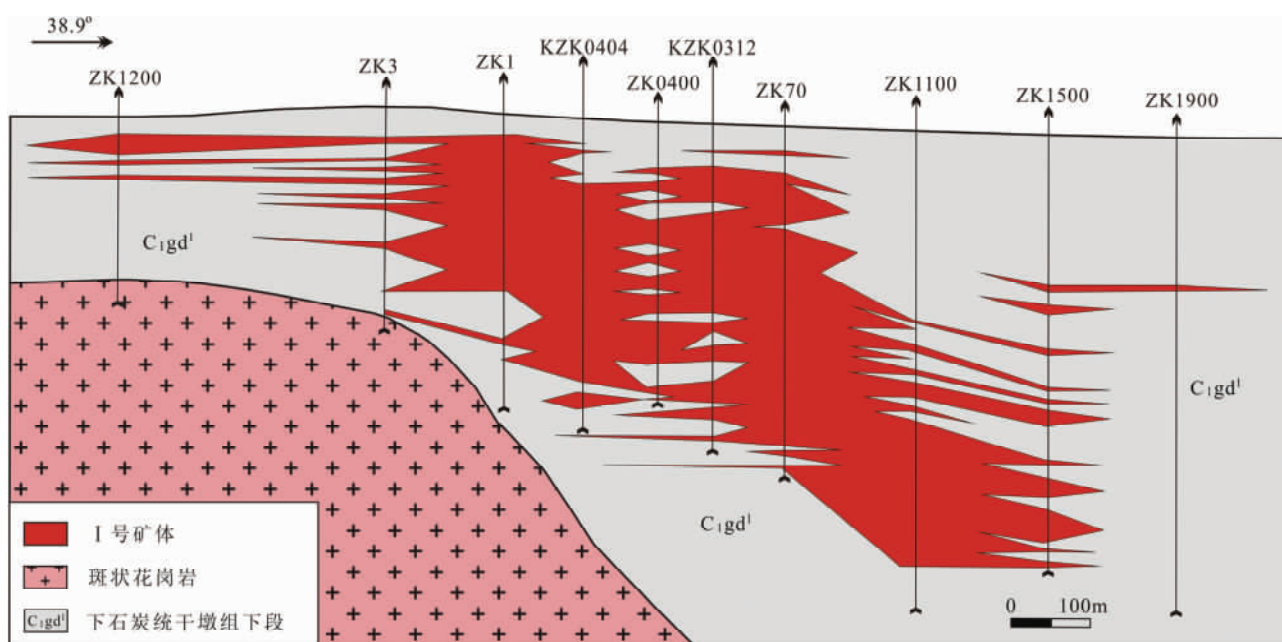


图3 东戈壁钼矿床 I 号勘探剖面图(据河南第二地质勘查院, 2010)

Fig.3 No. I exploration profiles of the Donggebi Mo deposit

结构等。矿石构造包括细脉浸染状、脉状、条带状、颗粒状-斑块状、放射状、角砾状等构造。

围岩蚀变主要有钾化、硅化、黄铁矿化、电气石化、碳酸盐化、萤石化、绢云母化(白云母化),黑云母化等。其中,硅化、钾长石化与钼矿化关系密切。围岩蚀变显示空间分带性,从岩体至围岩依次是钾硅酸盐化带→绢英岩化带→青磐岩化带。时间上也显示明显的变化,由钾硅酸盐化演变为绢英岩化。

3 样品采集和分析方法

8 件辉钼矿样品均采自钻孔岩芯,采样位置和样品特征见图 4 和表 1。样品经粉碎、分离、粗选和精选,获得了纯度 >99% 的辉钼矿。

辉钼矿样品溶解,Re、Os 纯化分离,ICP-MS 分析等,均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。实验仪器为 ELAN DRC-e ICP-MS,仪器灵敏度大于 40000cps/ppb(1ppb = ng/g15In),相对标准偏差(RSD%)小于 3%。HCl 和 HNO₃ 通过亚沸蒸馏提纯,实验用水为 Millipore 18MΩ·cm,同位素稀释剂¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 分别稀释至 10 × 10⁻⁹和 0.1 × 10⁻⁹备用。阴离子交换树脂采用 AG1-X8 (200~400 目),实验用卡洛斯管约 230mm 长,内部容积大约 120mL,实验前用 60% 的王水加热煮 5h,蒸馏水清洗干后加热到 560℃ 约 8h 退火。

本次实验使用改进的卡洛斯管溶样新方法。首先用 HNO₃ 在 120mL 卡洛斯管中分解硫化物,反应产生的气体极少部分挥发的 Os 用 10mol/L 的 HCl 在冰水浴中吸收,待反

表 1 东戈壁钼矿样品特征表

Table 1 Characteristics of the samples from Donggebi Mo deposit

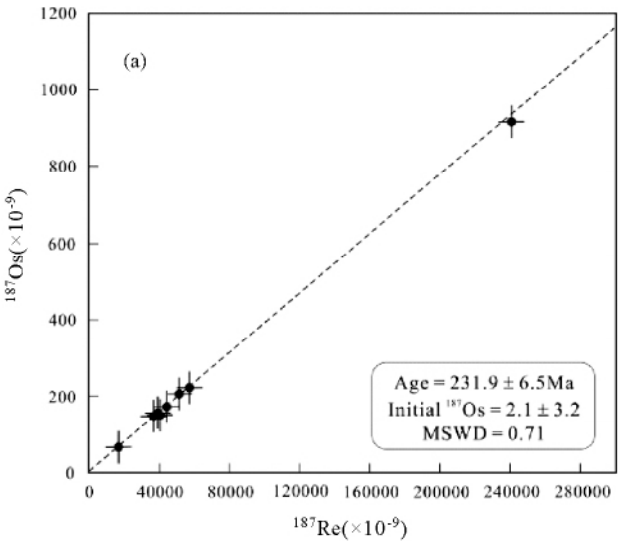
序号	样品号	样深(m)	样品特征
1	ZK02-37	227	辉钼矿呈薄膜状产于石英与围岩接触面
2	ZK02-40	247	辉钼矿呈薄膜状产于石英与围岩接触面
3	ZK02-50	300	辉钼矿呈团块状集合体产于石英脉中
4	ZK02-51	309	辉钼矿呈片状产于石英与围岩接触面
5	ZK03-32	238	辉钼矿呈片状产于石英脉中
6	ZK03-53	450	辉钼矿团块状集合体产于围岩表面
7	ZK03-75	204	辉钼矿呈团块状集合体产于石英脉中
8	ZK03-01	124	辉钼矿呈片状浸染于石英脉中

应完成后,将吸收 Os 的 HCl 再转移回卡洛斯管中,然后加入稀释剂和 HNO₃ 并封闭卡洛斯管。由于硫化物与 HNO₃ 反应产生的气体已预先除去,此方法可以增加取样量至 3~5g,并且基本没有爆炸的危险,使得 Re-Os 同位素的测定更为可靠(Qi et al., 2010)。铼-钨化学分离和质谱测定方法参见(杜安道等, 1994; Qi et al., 2010),具体实验步骤如下:将样品标准称量与卡洛斯管中,缓慢加入 HNO₃ 分解硫化物,产生的气体和少部分 Os 用 2.5mL 10mol/L HCl 在冰水浴中吸收,由于反应过程中产生大量的热量,在反应过程中持续通入净化的空气,以避免冷却时导致吸收 Os 的 HCl 回流。待反应完全,将吸收 Os 的 HCl 转移至卡洛斯管中,并用 4mol HCl 分两次清洗卡洛斯管。加入适量的¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 稀释剂,加入 15mL HNO₃,密封卡洛斯管,放入不锈钢套中于 200℃ 加热 15h。将之取出并置冰箱冷冻室冷却 2h。打开卡洛斯管,将进气的特氟龙管移至管底部,在沸腾的水浴中加热蒸馏,同



图4 东戈壁钼矿床矿石类型及辉钼矿特征
(a) -石英脉中的辉钼矿; (b) -围岩表面的薄膜状辉钼矿; (c) -浸染状辉钼矿; (d) -含辉钼矿的钾长石-石英脉; (e) -叶片状辉钼矿; (f) -鳞片状辉钼矿
Fig.4 Ore types and occurrence of molybdenite at Donggebi
(a) -molybdenite aggregates in quartz vein; (b) -molybdenite film coating wallrock; (c) -disseminated molybdenite; (d) -molybdenite-bearing K-feldspar-quartz vein; (e) -molybdenite flakes in quartz vein; (f) -epidosome molybdenite

时缓慢加入 5mL H₂O₂ 使 Os 蒸馏完全,Os 用净化空气带出,



并用 1.5mL H₂O 在冰水浴中吸收,该吸收液用于 Os 的 ICP-MS 测定。将蒸馏 Os 剩下的溶液转移至 125mL 特氟龙烧杯中,蒸干后加入 3mL HCl 再蒸干,残渣用 25mL 2mol/L HCl 溶解,用阴阳离子交换树脂分离 Re,该溶液用于 Re 的 ICP-MS 测定。

Re 和 Os 全流程空白值分别为 0.006×10^{-9} 和 0.002×10^{-9} 。实验结果由辉钼矿标样 JDC 监控,标样测定年龄数据与推荐值基本一致,指示分析结果稳定可靠。8 件辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果列于表 2。

4 讨论

4.1 东戈壁钼矿床的成矿年龄

采用¹⁸⁷Re 衰变常数 λ 值 = $1.666 \times 10^{-11} / a$ (Smoliar *et al.*, 1996),求得单个辉钼矿样品 Re-Os 同位素年龄介于 $228.7 \pm 2.6 Ma$ 和 $241.7 \pm 0.9 Ma$ 之间。利用 ISOPLOT 软件 (Model 3; Ludwig, 1999) 将 8 件数据回归成一条直线,求得 Re-Os 等时线年龄为 $231.9 \pm 6.5 Ma$ (95% 置信度,MSWD = 0.71; 图 5a); 8 个单样品年龄的加权平均值为 $238.5 \pm 3.7 Ma$ (95% 置信度,MSWD = 5.8; 图 5b),二者在误差范围内一致,显示了数据的可靠性。此外,求得¹⁸⁷Os 初始值为 $0.002 \pm 0.003 \times 10^{-6}$,接近于 0,表明辉钼矿形成时几乎不含¹⁸⁷Os,辉钼矿中的¹⁸⁷Os 系由¹⁸⁷Re 衰变形成,说明所获得单样品年龄能较好地反映辉钼矿的结晶时间,符合 Re-Os 同位素体系年龄的计算条件。因此, $231.9 \pm 6.5 Ma$ 的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄代表了东戈壁钼矿床的形成时间。

考虑到辉钼矿 Re-Os 体系对后期热液作用的抵抗能力和对古老事件的记忆性 (Suzuki *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2011, 2012),本文倾向使用最小的单样品辉钼矿 Re-Os 年龄 ($228.7 \pm$

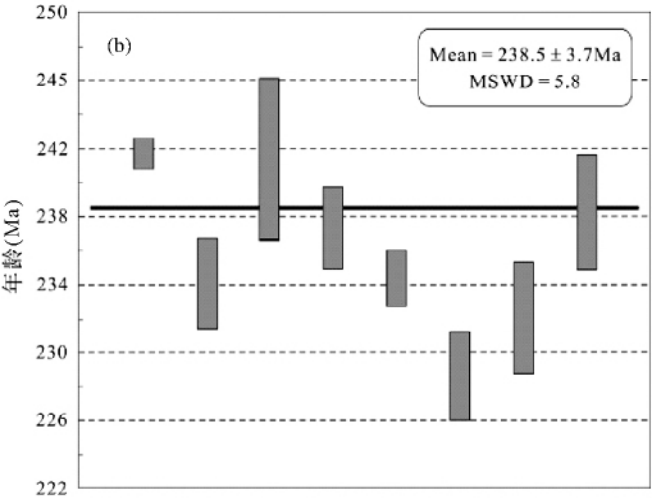


图5 东戈壁钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄图 (a) 和加权平均年龄图 (b)

Fig.5 Molybdenite Re-Os isochron (a) and weighted mean age (b) of the Donggebi Mo deposit

表2 东戈壁钼矿辉钼矿 ReOs 同位素测年数据

Table 2 Re-Os isotopic data for molybdenite from the Donggebi Mo deposit

样品号	Re ($\times 10^{-9}$)		^{187}Re ($\times 10^{-9}$)		^{187}Os ($\times 10^{-9}$)		年龄(Ma)	
	测定值	1 σ	测定值	1 σ	测定值	1 σ	测定值	1 σ
ZK02-37	58997.80	1138.47	36932.62	712.68	148.45	0.5319	241.7	0.9
ZK02-40	91342.25	1087.44	57180.25	1131.46	222.63	2.5118	234.1	2.6
ZK02-50	81941.85	1454.27	51295.60	910.37	205.95	4.0443	241.4	4.7
ZK02-51	62906.76	1170.68	39379.63	732.85	155.46	1.5672	237.3	2.4
ZK03-32	70597.94	2427.10	44194.31	1519.36	172.32	1.1994	234.4	1.2
ZK03-53	384771.25	6047.44	240866.8	3785.7	915.97	10.608	228.7	2.6
ZK03-75	63591.58	1449.35	39808.33	907.29	153.64	2.1619	232.0	3.3
ZK03-01	26517.64	227.13	16600.04	142.18	65.80	0.9321	238.3	3.4

注: 模式年龄 t 按 $t = 1 / (\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re}))$ 计算, 其中 $(\lambda^{187}\text{Re}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Smoliar *et al.*, 1996)

2.6Ma) 作为成矿年龄。此年龄与矿区中部隐伏斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄($227.6 \pm 1.3 \text{ Ma}$; 黄超勇等, 2011; 杨志强等, 2011) 完全一致, 证实斑状花岗岩和钼矿化属于同一事件, 发生在印支期, 是大陆碰撞体制(含后碰撞)的产物(陈衍景等, 2012)。

4.2 Re 含量与成矿物质来源

辉钼矿中 Re 含量作用于成矿物质来源示踪, Mo-Cu 矿床中辉钼矿 Re 含量多数为 $10 \times 10^{-6} \sim 29 \times 10^{-6}$, 明显低于 Cu-Mo 或 W-Mo 矿床中 Re 的含量; 从幔源经壳幔混源到壳源, 辉钼矿 Re 含量从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 递降(胡受奚等, 1988; Mao *et al.*, 1999; Stein *et al.*, 2001; Berzina *et al.*, 2005; 李诺等, 2007a, b; 陈衍景等, 2012)。

东戈壁钼矿 8 件辉钼矿样品中 7 件 Re 含量为 $26.51 \times 10^{-6} \sim 91.34 \times 10^{-6}$, 显示成矿物质以不成熟陆壳为主, 或者, 成熟陆壳与部分地幔物质混合。一件样品的 Re 含量高达 384.77×10^{-6} , 显示该样存在较多幔源物质参与。重要的是, 该样品恰恰来自蚀变的干墩组, 而干墩组被认为是岛弧火山岩建造, 表明辉钼矿 Re 含量记录了干墩组的物源信息, 同时指示干墩组为东戈壁钼成矿系统提供了成矿物质。综合上述信息, 我们认为成矿斑岩和成矿物质初始来源于古生代新生地壳物质的部分熔融作用。

杨志强等(2011)和马雁飞等(2012)对矿区隐伏斑状花岗岩岩石化学成份进行了分析研究, 得出岩体 SiO_2 含量 $> 70\%$, 平均 74.42% , 花岗岩体富硅; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.71 > 1$, K_2O 含量 4.76% , 显示了高钾富碱特点; 斑状花岗岩的稀土元素特征 ΣREE 为 $117 \times 10^{-6} \sim 151 \times 10^{-6}$, 平均 132×10^{-6} ; LREE/HREE 为 $1.9 \sim 2.9$, 平均 2.2 , 表现为轻稀土富集; δEu 为 $0.21 \sim 0.427$, 平均 0.289 , 为强负铕异常, 显示了壳源花岗岩的特点, 属陆壳重熔的碰撞型花岗岩(Chen *et al.*, 2000), 此与辉钼矿 Re 含量的示踪结果基本一致。

4.3 东天山印支期岩浆-成矿事件

前人对东天山地区的成矿年代学进行了诸多研究, 表明

该区成矿作用主要发生在晚石炭世-早二叠世(陈衍景等, 1995; 毛景文等, 2002; 李华芹等, 1998, 2006; 韩春明等, 2002; 陈富文等, 2005; Zhang *et al.*, 2005), 而中生代成矿作用研究的较少。陈富文等(1999)、Zhang *et al.* (2005) 和李华芹等(2006) 提出: 三叠纪有强烈的岩浆活动, 并伴随有多种金属矿床的形成。近年来的研究获得: 金窝子和金窝子 210 金矿石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 $228 \pm 22 \text{ Ma}$ 和 $230 \text{ Ma} \pm 6 \text{ Ma}$ (陈富文等, 1999); 鄯善采石场钾长花岗岩 TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 $230 \pm 2.3 \text{ Ma}$ (李文明等, 2002); 尾亚钒钛磁铁矿环状花岗岩单颗粒锆石 U-Pb 和谐年龄为 219.4 Ma , 天湖二长花岗岩体全岩 Rb-Sr 等时线年龄和单颗粒锆石 U-Pb 和谐年龄分别为 $220 \pm 26 \text{ Ma}$ 和 $209.7 \pm 7.1 \text{ Ma}$, 小白石头泉夕卡岩型钨矿黑云二长花岗岩全岩的 Rb-Sr 等时线年龄 $244 \pm 5 \text{ Ma}$ (李华芹和陈富文, 2004); Li *et al.* (2005) 又测得小白石头泉白钨矿石英脉 Rb-Sr 等时线年龄为 $248 \pm 7 \text{ Ma}$, 双峰山和石英滩石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄分别为 $226 \pm 21 \text{ Ma}$ 和 $237 \pm 9 \text{ Ma}$; 李嵩岭等(2002) 获得尾亚环形山超单元二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 240.6 Ma ; 尾亚细粒花岗岩、辉长岩、石英闪长岩和石英正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 $237 \pm 8 \text{ Ma}$, $236 \pm 6 \text{ Ma}$, $233 \pm 8 \text{ Ma}$ 和 $246 \pm 6 \text{ Ma}$ (Zhang *et al.*, 2005); 星星峡黑云母花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 236 Ma (Wang *et al.*, 2010); 土墩钾长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 246 Ma (周涛发等, 2010); Zhang *et al.* (2005) 和李华芹等(2006) 获得白山钼矿辉钼矿及其共生的黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄分别为 $224.8 \sim 225 \text{ Ma}$ 和 $229 \pm 2 \text{ Ma}$, 其黑云母斜长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 239 Ma 和南部斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 为 $235 \sim 245 \text{ Ma}$ (李华芹等, 2006)。可以看出, 东天山地区印支期成矿作用强烈, 找矿潜力较大。本文对东戈壁超大型钼矿床形成时间的确定, 进一步说明东天山印支期成矿作用值得重视。

天山地区发育大量古生代和中生代的多种类型、多种金属的成矿系统, 但迄今尚未发现三叠纪以前的单钼矿床或钼多金属矿床, 与中亚造山带东段钼成矿演化特点一致, 表明

钼矿床是地壳演化到一定程度的产物(陈衍景等, 2012; 陈衍景, 2013)。

在中亚造山带东段、华北克拉通边缘、中央造山带以及华南地区, 均识别出重要的印支期构造事件和成矿作用(陈衍景等, 2009, 2012)。例如, 秦岭造山带中温泉、黄龙铺、大湖、纸房等钼矿床的成矿时间被确定为三叠纪(李诺等, 2007b; 邓小华等, 2009; 陈衍景, 2010; Li *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2011); 在中亚造山带东段, 单钼矿床和钼多金属矿床始现于三叠纪(陈衍景等, 2012)。在阿勒泰地区, 除大量伟晶岩稀有金属矿床形成于三叠纪外, 一批造山型金铜铅锌矿床以及部分铁矿床被证实形成于三叠纪(Wan *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012; Zheng *et al.*, 2012; 郑义等, 2013)。此外, 甘肃北山地区在三叠纪也形成了一定规模的钨钼金铅锌矿床(如: 红尖兵山钨矿床, 江思宏和聂凤军, 2006; 小狐狸山钼矿床, 张雨莲等, 2012; 南金山金矿, 江思宏等, 2006; 拾金坡金矿, 周济元等, 2000; 新井铅锌矿, 殷先明, 2008)。

以上表明, 我国众多构造单元普遍发生了印支期成矿事件。

5 结论

(1) 东戈壁钼矿床的 8 件辉钼矿样品 Re-Os 年龄介于 $228.7 \pm 2.7 \text{ Ma} \sim 241.7 \pm 0.9 \text{ Ma}$, 等时线年龄为 $231.9 \pm 6.5 \text{ Ma}$ (95% 置信度, MSWD = 0.71), 加权平均年龄为 $238.5 \pm 3.7 \text{ Ma}$ (95% 置信度, MSWD = 5.8), 确证东戈壁钼矿形成于三叠纪。

(2) 东戈壁钼矿 8 件辉钼矿样品中 7 件 Re 含量介于 $26.51 \times 10^{-6} \sim 91.34 \times 10^{-6}$, 指示成矿物质主要来自壳源, 成矿岩体斑状花岗岩的同位素年龄 ($227.6 \pm 1.3 \text{ Ma}$) 和地球化学特征也显示壳源性质, 指示成岩成矿作用发生于大陆碰撞造山体制。

(3) 东天山地区存在重要的印支期成矿事件, 三叠纪开始出现单钼矿床。

致谢 本研究在陈衍景教授和肖文交研究员的指导下完成; 韩春明研究员、朱志敏博士等指导了野外工作; 中科院矿床地球化学国家重点实验室尹一凡老师和漆亮研究员指导和帮助完成了样品分析; 成文过程中与邓小华、张志欣和刘艳宾等博士进行了讨论; 两位评审专家提出了宝贵的修改意见; 特此致谢!

References

Bazhenov ML, Collins AQ, Degtyarev KE, Lavashova NM, Nikolaichuk AV, Pavlov VE and VanderVoo R. 2003. Paleozoic northward drift of the North Tianshan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism. *Tectonophysics*, 366: 113 – 141

Berzina AN, Sotnikova VI, Economou-Eliopoulos M and Eliopoulos DG. 2005. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia. *Ore Geology Reviews*, 26(1–2): 91 – 113

Chen FW, Li HQ, Cai H and Liu GQ. 1999. The origin of the Jinwozi gold deposit in eastern Xinjiang: Evidence from isotope geochronology. *Geological Review*, 45(3): 247 – 254 (in Chinese with English abstract)

Chen FW, Li HQ, Chen YC, Wang DH, Wang JL, Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of mineralization in the Tuwu-Yandong porphyry copper mine, East Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 256 – 261 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan. Beijing: Seismological Press, 1 – 234 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Fu SG, Wu DH, Wu XD and Jing J. 1995. The coupling of the gold mineralization with the collisional orogenesis and the distribution of gold deposits, northern Xinjiang. *Gold Geology*, 1(3): 8 – 16 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ. 2000. Progress in the study of Central Asia-type Orogenesis-metallogenesis in Northwest China. *Geological Journal of China Universities*, 6(1): 17 – 22 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z and Wang HH. 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl. 1): 82 – 94

Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 139 – 169

Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085 – 2108 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Xiao WJ and Zhang JJ. 2008. Ore-system as a geodynamic probe. *Geology in China*, 35(6): 1059 – 1073 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Zhai MG and Jiang SY. 2009. Significant achievement and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695 – 2726 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China. *Geology in China*, 37(4): 854 – 865 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Pirajno F, Wu G, Qi JP and Xiong XL. 2012. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 889 – 917

Chen YJ, Zhang C, Li N, Yang YF and Deng K. 2012. Geology of the Mo deposits in Northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1223 – 1268 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ. 2013. The development of continental collision metallogeny and its application. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 1 – 17 (in Chinese with English abstract)

Deng XH, Yao MJ, Li J and Sun YL. 2009. Molybdenite Re-Os isotope age of the Zhaiwa Mo deposit and implications for Xiongerian mineralization in eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2739 – 2746 (in Chinese with English abstract)

Du AD, He HL, Yin WN, Zou XJ, Sun YL, Kong DZ, Chen SZ and Qu WJ. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339 – 346 (in Chinese with English abstract)

Han CM, Mao JW, Yang JM, Wang ZL and Cui B. 2002. Types of Late Palaeozoic endogenous metal deposits and related geodynamical evolution in the East Tianshan. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 222 – 234 (in Chinese with English abstract)

Hu SX *et al.* 1988. *Geology and Mineralization in the Collisional Belts between the Northern and Southern China Blocks*. Nanjing: Nanjing University Press, 1 – 558 (in Chinese).

- Huang CY, Lang YF, Dong LJ and He HL. 2011. Geological characteristics and genesis research of the Donggebi porphyry molybdenum deposit in eastern Tianshan. *China Molybdenum Industry*, 35(3): 8–17 (in Chinese)
- Jiang SH and Nie FJ. 2006. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of Hongjianbingshan tungsten deposit in Beishan Mountain, Gansu Province, China. *Mineral Deposits*, 25(1): 89–94 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SH, Nie FJ, Chen WS and Jin GC. 2006. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology and fluid inclusion features of the Nanjinshan gold deposit, Beishan Mt., Gansu Province. *Geological Review*, 52(2): 266–275 (in Chinese with English abstract)
- Li HQ, Xie CF and Chang HL. 1998. Study on Metallogenetic Chronology of Nonferrous and Precious Metallic Ore Deposits in North Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 1–263 (in Chinese)
- Li HQ and Chen FW. 2004. Isotope Geochronology of Regional Mineralization in Xinjiang, NW China. Beijing: Geological Publishing House, 1–391 (in Chinese)
- Li HQ, Wu H, Chen FW, Deng G, Yang HM, Yang ZF, Mei YP and Guo J. 2005. New chronological evidence for Indosinian diagenetic mineralization in eastern Xinjiang, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 264–275 (in Chinese with English abstract)
- Li HQ, Chen FW, Li JY, Qu WJ, Wang DH, Wu H, Deng G and Mei YP. 2006. Age of mineralization and host rock in the Bainshan rhennim-molybdenum district, East Tianshan, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 926–922 (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 N, Chen YJ, Zhang H, Zhao TP, Deng XH, Wang Y and Ni ZY. 2007a. Molybdenum deposits in East Qinling. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 186–198 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Sun YL, Li J and Li WB. 2007b. Molybdenite Re-Os isochron age of the Wunugetu Shan porphyry Cu/Mo deposit Inner Mongolia and its implication for metallogenic geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2881–2288 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Chen YJ, Fletcher R and Zeng QT. 2011. Triassic mineralization with Cretaceous overprint in the Dahu Au-Mo deposit, Xiaoqinling gold province: Constraints from SHRIMP monazite U-Th-Pb geochronology. *Gondwana Research*, 20(2–3): 543–552
- Li N, Chen YJ, Pirajno F, Ni ZY and Sun YL. 2012. Timing of the Yuchiling giant porphyry Mo system and implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, doi: 10.1007/s00126-012-0441-4
- Li SL, Li WQ, Feng XC and Dong FR. 2002. Age of formation of Weiya composite stocks in eastern Tianshan Mountains. *Xinjiang Geology*, 20(4): 357–359 (in Chinese with English abstract)
- Li WM, Ren BC, Yan XK, Li YZ and Chen Q. 2002. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significance in eastern Tianshan region. *Northwestern Geology*, 25(4): 24–41 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig K. 1999. Isplot/Ex Version 2.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Geochronology Center, Berkeley, Special Publication 1a
- Ma YF, Tu LQ, Shi SR and Yin JF. 2012. Characteristics and origin of the Donggebi molybdenum deposit porphyry in Xinjiang. *Geological Survey and Research*, 35(1): 29–33 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Du AD. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11–12): 1815–1818
- Mao JW, Yang JW, Han CM and Wang ZL. 2002. Metallogenic systems of polymetallic copper and gold deposits and related metallogenic geodynamic model in eastern Tianshan, Xinjiang. *Earth Science*, 27(4): 413–424 (in Chinese with English abstract)
- Pirajno F. 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Berlin: Springer, 1–1250
- Qi L, Zhou MF, Gao JF and Zhao Z. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(4): 585–589
- Sengör AMC and Natal' in BA. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of synthesis. In: Yin A and Harrison TM (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 486–640
- Smoliar ML, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of group IA, IIA, IVA and IVB iron meteorites. *Science*, 271(5252): 1099–1102
- Stein HJ, Markey RJ, Morgan JW, Hannah JL and Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works. *Terra Nova*, 13(6): 479–486
- 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 Re-Os system for molybdenum and the cooling history of molybdenum ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(16): 3151–3159
- Wan B, Xiao WJ, Zhang LC and Han CM. 2012. Iron mineralization associated with a major strike-slip shear zone: Radiometric and oxygen isotope evidence from the Mengku deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 44: 136–147
- Wang DH, Li CJ, Chen ZH, Chen SP, Xiao KY, Li HQ and Liang T. 2006. Metallogenic characteristics and direction in mineral search in the East Tianshan, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 910–915 (in Chinese with English abstract)
- Wang JB and Xu X. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23–31 (in Chinese with English abstract)
- Wang XK, Peng WL, Hu KL, Zhu ZX, Zhao TY and Wang HX. 2009. Determination of Lower Carboniferous calc-alkali granite in middle uplift of East Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 27(3): 212–216 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Sun GH and Li JY. 2010. U-Pb (SHRIMP) and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the evolution of the Xingxingxia shear zone, NW China: A Triassic segment of the Altyn Tagh fault system. *Geological Society of America*, 122(3–4): 487–505
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1069–1089
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370–395
- Xiao WJ, 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)
- Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to Mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Science*, 98(6): 1189–1217
- Yang XK, Tao HX, Luo GC and Ji JS. 1996. Basic features of plate tectonic in east Tianshan of China. *Xinjiang Geology*, 14(3): 221–227 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZQ, Wu BY, Zheng SS, An JL and Chang YQ. 2011. Geological and geochemical characteristics of ore-forming granite porphyry in East Gobi porphyry molybdenum deposit in Xinjiang. *Geology and Mineral Resources of South China*, 27(3): 208–214 (in Chinese with English abstract)
- Yin XM. 2008. Re-study on metallogenesis of Indo-Chinese and Yanshan Epoch granite and exploration in Beishan area of Gansu Province.

- Gansu Geology, 17(3): 1-5, 35 (in Chinese with English abstract)
- Zhang L, Zheng Y and Chen YJ. 2012. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb-Zn systems. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 69-79
- Zhang LC, Xiao WJ, Qin KZ, Qu WJ and Du AD. 2005. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance. *Mineralium Deposita*, 39(8): 960-969
- Zhang YL, Xu RK, Shan L, Jia QZ, Song ZB, Chen XY, Zhang XF, Chen B, Li YZ and Quan SC. 2012. Rock-forming and ore-forming ages of the Xiaohulishan molybdenum deposit in Beishan area, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 31(2-3): 469-475 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZZ, Gu LX, Wu CZ, Li WQ, Xi AH and Wang S. 2005. Zircon SHRIMP dating for the Weiya pluton, eastern Tianshan: Its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 481-490
- Zheng Y, Zhang L, Chen YJ, Qin YJ and Liu CF. 2012. Geology, fluid inclusion geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Wulasigou Cu deposit, and their implications for ore genesis, Altay, Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*, 49: 128-140
- Zheng Y, Zhang L and Guo ZL. 2013. The zircon LA-ICP-MS U-Pb and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Xinjiang: Implications for ore genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 191-204 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JY, Cui BF, Xiao HL and Chen SZ. 2000. The rift evolution and Au ore-forming regular in east part of Beishan, Gansu and Xinjiang. *Volcanology & Mineral Resources*, 21(1): 7-17 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Yuan F, Zhang DY, Fan Y, Liu S, Peng MX and Zhang JD. 2010. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 478-502 (in Chinese with English abstract)
- Zhu LM, Zhang GW, Chen YJ, Ding ZJ, Guo B, Wang F and Lee B. 2011. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Wenquan Mo-Bearing granitoids in West Qinling, China: Constraints on the geodynamic setting for the newly discovered Wenquan Mo deposit. *Ore Geology Review*, 39(1-2): 46-62
- 附中文参考文献**
- 陈富文, 李华芹, 蔡红, 刘姝群. 1999. 新疆东部金窝子金矿成因讨论: 同位素地质年代学证据. *地质论评*, 45(3): 247-254
- 陈富文, 李华芹, 陈毓川, 王登红, 王金良, 刘德权, 唐延玲, 周汝洪. 2005. 东天山土屋-延东斑岩铜矿田成岩时代精确测定及其意义. *地质学报*, 79(2): 256-261
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 1-234
- 陈衍景, 富士谷, 吴德华, 吴锡丹, 靖军. 1995. 新疆北部金矿化与碰撞造山作用的耦合及金等矿床的分布规律. *黄金地质*, 1(3): 8-16
- 陈衍景. 2000. 中国西北地区中亚型造山-成矿作用的研究意义和进展. *高校地质学报*, 6(1): 17-22
- 陈衍景, 倪培, 范洪瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征. 2007. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085-2108
- 陈衍景, 肖文交, 张进江. 2008. 成矿系统: 地球动力学的有效探针. *中国地质*, 35(6): 1059-1073
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. *岩石学报*, 25(11): 2695-2726
- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用. *中国地质*, 37(4): 854-865
- 陈衍景, 张成, 李诺, 杨永飞, 邓轲. 2012. 中国东北钼矿床地质. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(5): 1223-1268
- 陈衍景. 2013. 大陆碰撞成矿理论的创建及应用. *岩石学报*, 29(1): 1-17
- 邓小华, 姚明军, 李晶, 孙亚莉. 2009. 东秦岭寨凹钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及熊耳期成矿事件. *岩石学报*, 25(11): 2739-2746
- 杜安道, 何红廖, 殷万宁, 邹晓秋, 孙亚莉, 孔德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究. *地质学报*, 68(4): 339-346
- 韩春明, 毛景文, 杨建民, 王志良, 崔彬. 2002. 东天山晚古生代内生金属矿床类型和成矿作用的动力学演化规律. *地质学报*, 76(2): 222-234
- 胡受奚等. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿. 南京: 南京大学出版社, 1-588
- 黄超勇, 郎岩峰, 董理践, 付治国. 2011. 东天山东戈壁特大型钼矿床地质特征及成因研究. *中国钼业*, 35(3): 8-17
- 江思宏, 聂凤军. 2006. 甘肃北山红尖兵山钨矿床的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学研究. *矿床地质*, 25(1): 89-94
- 江思宏, 聂凤军, 陈伟十, 靳光成. 2006. 北山地区南金山金矿的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学及其流体包裹体特征. *地质论评*, 52(2): 266-275
- 李华芹, 谢才富, 常海亮. 1998. 新疆北部主要有色贵金属矿床成矿期同位素年代学研究. 北京: 地质出版社, 1-263
- 李华芹, 陈富文. 2004. 中国新疆区域成矿作用年代学. 北京: 地质出版社, 1-391
- 李华芹, 陈福文, 李锦轶, 屈文俊, 王登红, 吴华, 邓刚, 梅玉萍. 2006. 再论东天山白山钼钨矿区成岩成矿时代. *地质通报*, 25(8): 916-922
- 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
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 赵太平, 邓小华, 王运, 倪智勇. 2007a. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景. *地学前缘*, 14(5): 186-198
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 李文博. 2007b. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿铼-钨等时线年龄及其成矿地球动力学背景. *岩石学报*, 23(11): 2881-2288
- 李高岭, 李文铅, 冯新昌, 董富荣. 2002. 东天山尾亚复式岩株形成时代讨论. *新疆地质*, 20(4): 357-359
- 李文明, 任秉琛, 杨兴科, 李有柱, 陈强. 2002. 东天山中酸性侵入岩浆作用及其地球动力学意义. *西北地质*, 25(4): 24-41
- 马雁飞, 涂良权, 师书冉, 殷剑锋. 2012. 新疆东戈壁钼矿床斑岩体特征及成因分析. *地质调查与研究*, 35(1): 29-33
- 毛景文, 杨建民, 韩春明, 王志良. 2002. 东天山铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型. *地球科学*, 27(4): 413-424
- 王登红, 李纯杰, 陈郑辉, 陈世平, 肖克炎, 李华芹, 梁婷. 2006. 东天山成矿规律与找矿方向的初步研究. *矿床地质*, 25(8): 910-915

- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报, 80(1): 23–31
- 王新昆, 彭慰兰, 胡克亮, 朱志新, 赵同阳, 王华新. 2009. 新疆东天山中部隆起区早石炭世钙碱性花岗岩的确定. 新疆地质, 27(3): 212–216
- 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
- 杨兴科, 陶洪祥, 罗桂昌, 姬金生. 1996. 东天山板块构造基本特征. 新疆地质, 14(3): 221–227
- 杨志强, 吴邦友, 郑松森, 安金亮, 常勇强. 2011. 新疆东戈壁斑岩型钼矿之斑岩体特征. 华南地质与矿产, 27(3): 208–214
- 殷先明. 2008. 甘肃北山印支燕山期花岗岩成矿作用与找矿工作再研究. 甘肃地质, 17(3): 1–5, 35
- 张雨莲, 徐荣科, 陕亮, 贾群子, 宋忠宝, 陈向阳, 张晓飞, 陈博, 栗亚芝, 全守村. 2012. 内蒙古北山地区小狐狸山钼矿辉钼矿年龄和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 31(2–3): 469–475
- 郑义, 张莉, 郭正林. 2013. 新疆铁木尔特铅锌铜矿床锆石 U-Pb 和黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及其矿床成因意义. 岩石学报, 29(1): 191–204
- 周济元, 崔炳芳, 肖惠良, 陈世忠. 2000. 甘新北山东段裂谷演化及金矿成矿规律. 火山地质与矿产, 21(1): 7–17
- 周涛发, 袁锋, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及成矿作用研究. 岩石学报, 26(2): 478–502