

北秦岭南台钼多金属矿床成岩成矿年龄及锆石 Hf 同位素组成

柯昌辉¹ 王晓霞¹ 杨 阳² 齐秋菊³ 樊忠平⁴ 高 非⁵ 王修缘⁶

(1.中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037;2.中国地质大学,北京 100083;3.有色金属华东地质勘查局资源调查与评价研究院,南京 210007;4.西北有色地质勘查局 713 总队,陕西商洛 726000;5.陕西有色金属控股集团有限公司,陕西 西安 710075;6.金堆城钼业集团有限公司,陕西 渭南 714000)

摘要:南台钼多金属矿床是北秦岭典型的斑岩-矽卡岩型矿床,矿区内出露的岩浆岩主要有花岗斑岩、石英斑岩脉和爆破角砾岩,花岗斑岩内及接触带发育斑岩型和矽卡岩型钼多金属矿化。锆石 LA-ICPMS 定年测得花岗斑岩的 U-Pb 年龄为 $(151 \pm 1) \text{Ma}$ ($N=12$, $\text{MSWD}=0.32$), 矿区内 6 件辉钼矿的 Re-Os 同位素模式年龄介于 $(146 \pm 2) \sim (151 \pm 2) \text{Ma}$, 其加权平均年龄为 $(148.8 \pm 1.7) \text{Ma}$ ($N=6$, $\text{MSWD}=0.84$)。成岩年龄与成矿年龄在误差范围内基本一致,表明南台钼多金属矿床形成于晚侏罗世,与其以北的华北克拉通南缘的主要斑岩型钼矿床大规模成矿时间一致。该花岗斑岩的锆石 Hf 同位素组成显示: $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始比值介于 0.281 864~0.282 454, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-28.8 \sim -7.9$, 两阶段模式年龄 T_{DM2} 为 2 654~1 506 Ma, 均变化于一个较宽的范围,表明花岗斑岩的源区物质具有多源的特征,其中以壳源组分为主,可能有少量幔源组分的混入,暗示了成矿物质也可能主要来源于地壳,但地幔组分对成矿也有贡献。

关键词:北秦岭;南台钼多金属矿;锆石 U-Pb 年龄;Re-Os 年龄;Hf 同位素

中图分类号: P618.65; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1562-15

秦岭造山带北部和华北地块南缘地区是中国重要的钼多金属和贵金属成矿带之一^[1],其中钼金属储量约占全国总储量的 66%^[2],产出了金堆城、南泥湖、三道庄、上房沟、东沟、夜长坪 6 个超大型钼矿床和黄龙铺、鱼池岭、雷门沟等 10 余处大-中型钼(钨)多金属矿床。

夹持于铁炉子—黑沟—栾川断裂带和商—丹断裂带之间的北秦岭地区,是东秦岭钼矿带的重要组成部分。近年来,随着勘查工作的进一步深入,相继控制了秋树湾、南沟、南台、马河、高沟等多处钼多金属矿床,目前对北秦岭成矿带的研究相对薄弱,仅镇坪秋树湾钼(铜)矿床^[3-6]、栾川南沟钼矿床^[7]和老君山钼矿床^[8]有过详细的工作。蟒岭岩体西侧地区是北秦岭成矿带的重要矿集区之一,分布有南台、马河、西沟、高沟、潘河等几个中小型以钼为主的多金

属矿床,前人对这些钼矿床的研究仅限于矿床地质特征的分析^[9],缺乏可靠的成岩成矿年代学研究资料。

本文选择北秦岭蟒岭岩体西侧南台钼多金属矿床为研究对象,在矿床地质特征研究的基础上,对花岗岩类岩石和辉钼矿矿石样品开展精确的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 和 Re-Os 同位素年代学以及 Hf 同位素研究,为建立北秦岭中生代钼多金属矿床成矿时空格架和与华北陆块南缘钼矿床对比提供重要的年代学信息,同时对北秦岭中生代构造岩浆演化和成岩成矿规律的研究也具有重要的科学意义。

1 区域地质概况

研究区位于北秦岭构造带蟒岭岩体西侧,东秦岭钼矿带南部。北秦岭构造带是秦岭造山带的北段

收稿日期:2012-09-27;改回日期:2012-11-30

基金项目:本文为地质调查项目(1212010012012、1212010811033)和公益性行业专项课题(200911007-09)联合资助成果。

作者简介:柯昌辉,男,1987年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail:kchanghuicags@126.com。

(图 1), 其南北边界分别为商丹断裂和铁炉子—黑沟—栾川断裂, 呈近东西向展布, 自北向南发育 4 条深大断裂: 铁炉子—黑沟—栾川断裂、乔端—瓦穴子断裂、朱阳关—夏馆断裂和商丹断裂。

区域上出露的地层为古元古界秦岭群, 中元古界二郎坪群和中—新元古界宽坪群。秦岭岩群为一套中深变质杂岩系, 主体由片麻岩、角闪岩和大理岩组成, 变质程度主要为角闪岩相, 局部达麻粒岩相^[10,11], 其形成年龄为 2 226~1 987 Ma^[12,13], 经历新元古代(1 000~800 Ma)和早古生代的变质变形^[14,15]; 二郎坪群主要为一套火山—沉积岩系, 化石时代为奥陶纪—志留纪^[16]; 宽坪群主要由一套变质变形达绿片岩相—低角闪岩相的基性火山岩、碎屑岩和碳酸盐岩组成, 形成时代为中—新元古代(986~1 753 Ma)^[15,16]。

区域上主要发育古生代、早中生代和晚中生代三期岩浆活动。晚中生代岩浆活动主要发育于朱阳关—夏馆断裂和铁炉子—黑沟—栾川断裂之间, 分布有 3 个大岩基(牧护关、蟒岭、老君山岩基)和众多中酸性小斑岩体, 钼多金属矿床均与这一期岩浆活动有关。其中蟒岭岩体出露面积达 246 km², 岩体主要由石英闪长岩、似斑状二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩和细粒二长花岗岩组成, 主体岩性为似斑状二长花岗岩,

地球化学上具有富硅、富钾, 具弱的负 Eu 异常的特征, SHRIMP 锆石 U—Pb 年龄为(148.8±1.7)Ma^[18]。

南台钼多金属矿床东距蟒岭岩体 10 km, 是 1971 年陕西省地质局第十三队二分队与地科院物探所、西北地研所在南台—窝沟开展 1:5 000 电法详查、原生晕金属量测量和地质填图时发现的, 后经西北有色地质勘查局七一三总队详细勘查, 已获得 Mo(332+333)金属资源量为 12 425 t, 达中型规模, Mo 平均品位 0.093%^①。

2 矿床地质

2.1 矿区地质特征

2.1.1 矿区地层

矿区(图 2)出露的地层主要为中—新元古界宽坪群, 是一套经历了强烈变形作用, 变质达绿片岩相—低角闪岩相的中低级变质岩系, 其原岩主要由基性火山岩、碎屑岩和碳酸盐岩组成, 具有绿片岩—斜长角闪岩类、云母石英片岩—片麻岩类以及大理岩和石英岩类等三套岩石组合。

2.1.2 矿区构造

矿区构造比较发育, 主要可分为 3 组: 近 EW 向、NE 向和 NNE 向构造, 其中近 EW 向构造形成

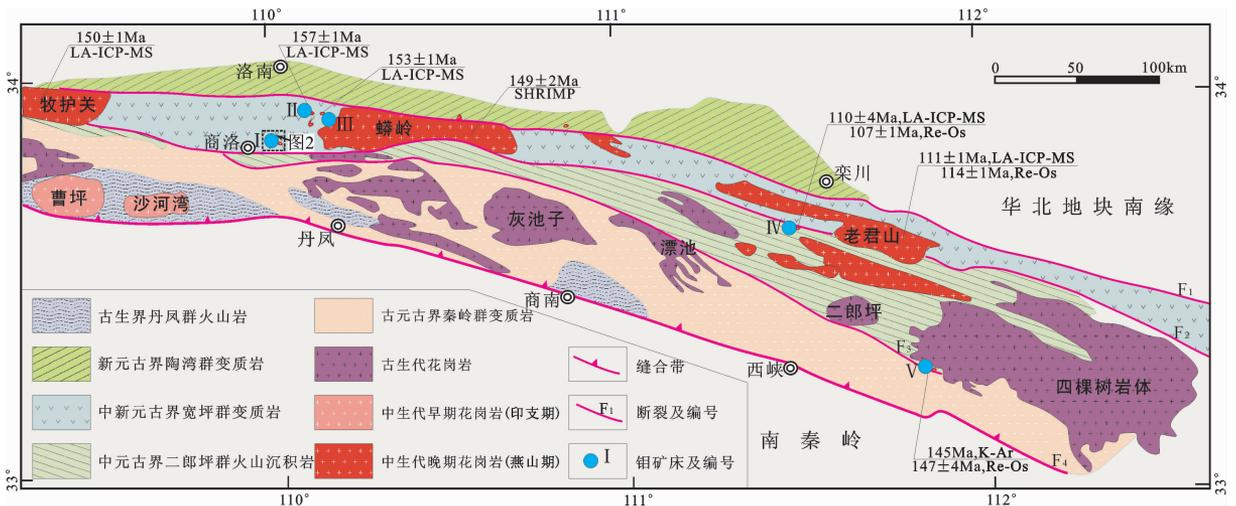


图 1 北秦岭花岗岩类及钼矿床分布^[4,7,8,17-19]

F₁—铁炉子—黑沟—栾川断裂; F₂—乔端—瓦穴子断裂; F₃—朱阳关—夏馆断裂; F₄—商丹断裂; I—南台钼多金属矿床; II—马河钼矿床; III—高沟钼矿床; IV—南沟钼矿床; V—秋树湾钼铜矿床

Fig.1 Geological sketch map showing the distribution of granitoids and molybdenum deposits in the North Qinling Mountains^[4,7,8,17-19]

F₁—Tieluzi—Heigou—Luanchuan fault; F₂—Qiaoduan—Waxuezi fault; F₃—Zhuyangguan—Xiaguan fault; F₄—Shangcheng—Danfeng fault; I—Nantai Mo polymetallic deposit; II—Mahe Mo deposit; III—Gaogou Mo deposit; IV—Nangou Mo deposit; V—Qishuwan Mo, Cu deposit

①樊忠平, 陈小刚, 王卫, 等, 陕西省商洛市商州区南台多金属矿区钼矿详查地质报告, 西北有色地质勘查局 713 总队, 2008.

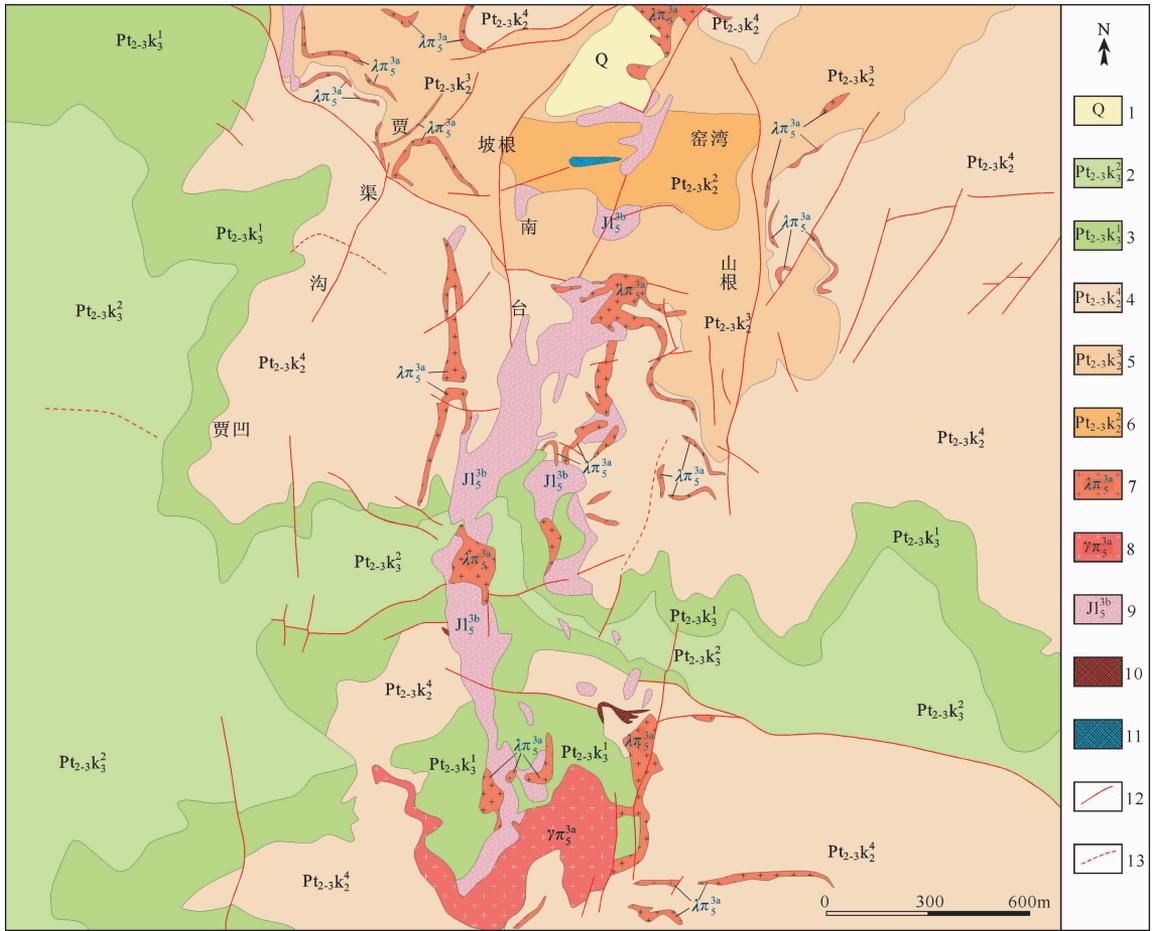


图2 南台钼多金属矿区地质简图

1—第四系;2—石英片岩夹大理岩、硅质岩透镜体,顶部为硅质大理岩;3—绿泥片岩夹大理岩及硅质岩透镜体;4—上段为灰白色厚巨层硅质白云质大理岩、白云母石英片岩、炭质绢云母石英片岩夹绿泥石石英片岩和白云质大理岩透镜体,下段为阳起片岩、绿泥片岩夹炭质绢云母石英片岩及大理岩透镜体;5—上段为含硅质团块及硅质条带白云质大理岩,下段为绿帘钠长阳起片岩、黑云钠长片岩夹炭质绢云母石英片岩、石英片岩;6—白云质大理岩夹硅质岩,硅闪石化普遍;7—石英斑岩;8—花岗岩斑岩;9—爆破角砾岩;10—铜铅锌矿化体;11—钼矿化体;12—实测断层;13—推断断层

Fig.2 Geological sketch map of the Nantai Mo polymetallic deposit

1—Quaternary;2—Quartz-schist intercalated with lenticular marble and silicite, overlaying siliceous marble; 3—Chlorite schist intercalated with lenticular marble and silicite; 4—Upper layer made up of siliceous dolomitic marble, muscovite-quartz schist, carbonaceous sericite quartz schist intercalated with chlorite schist and lenticular dolomitic marble, lower layer made up of actinolite-schist, chlorite schist intercalated with carbonaceous sericite-quartz schist and lenticular marble; 5—Upper layer made up of dolomitic marble intercalated with siliceous nodules, lower layer made up of epidote-albite-actinolite schist, biotite-albite intercalated with carbonaceous silkcloud quartz schist; 6—Dolomitic marble intercalated with siliceous rocks, with common tremolitization; 7—Quartz porphyry; 8—Granite porphyry; 9—Explosion breccia; 10—Copper-lead-zinc mineralized body; 11—Mo mineralized body; 12—Measured fault; 13—Inferred fault

时间早、活动时间长并呈带状发育,为一系列深大断裂和区域性褶皱。区域性褶皱以潘河背斜为主体,其形态和展布经深部钻探证实,为一轴向东西的穹隆式短轴背斜。核部位于潘河河谷,北翼北倾,倾角 $0^{\circ}\sim 17^{\circ}$,南翼南倾,倾角 $0^{\circ}\sim 17^{\circ}$,两翼对称,次一级小型连续宽缓褶皱发育。NNE向构造为印支—燕山期地壳活动的产物,叠加于近EW向构造带之上,在地壳浅

部表现为一系列近等间距分布的NNE向断裂。EW向断裂在燕山运动之前为压性特征,燕山运动早期受到NE向挤压作用而显扭性,并控制一系列中酸性小岩体的展布。矿区深部岩体沿潘河背斜轴部侵入,主要工业矿体围绕岩体周边及背斜两翼分布(图2)。

2.1.3 岩浆活动

矿区浅成侵入-爆发岩浆活动强烈,广泛分布

①白招娣,王金贤,牛翠伊,等.商洛市商州区龙王庙多金属矿区南台矿地形地质图.西北有地质勘查局713总队,2005.

有白岗岩、花岗斑岩、石英斑岩、爆破角砾岩及各种暗色岩脉,其岩石学特征如下^①。

(1) 爆破角砾岩:主要出露于矿区北东窝沟一带及南台地表,呈近南北向长条状分布,角砾岩成分复杂,主要为岩体附近的围岩:如大理岩、硅质岩、绿片岩和石英斑岩、石英正长斑岩、正长斑岩。角砾大小不一,从几毫米到几十厘米,个别达 2 m×5 m,在近角砾岩处还可见到震裂的围岩巨块。角砾杂乱无章,无分选性,不具定向排列。角砾磨圆度差别很大,大多为尖棱状和次棱角状,南段多见次浑圆状—浑圆状石英斑岩角砾和大理岩角砾。胶结物为与角砾成分相同的岩屑、岩粉,以及绿泥石、石英、长石及碳酸盐类矿物。在热液蚀变强烈地段还有透辉石、透闪石、绢云母等,胶结物含量小于 10%。

经工程揭露,该类爆破角砾岩的热液蚀变和矿化在地表与深部的表现差异较大,裸露于地表的角砾岩,仅有轻微的绿泥石化、硅化、碳酸盐化和较弱的浸染状铜、铅、锌多金属矿化。往深部,不仅蚀变逐渐加强,且矿化以钨钼矿化为主。

(2) 石英斑岩脉:地表主要出露于矿区中部北台—杨家一带,其次出露于南段贾渠沟以东。岩石呈灰白色、浅肉红色,块状构造,斑状结构。斑晶由石英(5%~10%)、透长石、正长条纹长石(二者含量 5%~10%)、更钠长石(3%~10%)和黑云母(<1%)组成,矿物粒径 2~5 mm;基质具隐晶结构、微霏细结构、显微花岗结构,矿物粒径 0.005~0.05 mm,由石英(30%~50%)、透长石、显微条纹长石(40%)和更钠长石

(1%~2%)组成。副矿物有钛铁矿、金红石、磷灰石。

(3) 花岗斑岩:呈小规模岩床状顺层产出,主要见于寺沟地段。岩石呈灰白色、浅肉红色,块状构造,具斑状结构,斑晶主要由钾长石、斜长石和石英组成,少量黑云母,长石表面有轻度的次生变化,杂乱分布,基质由钾长石、石英和斜长石组成,粒径一般小于 0.05 mm,呈等轴粒状均匀分布于斑晶矿物周围,发生明显的绢云母化,绢云母呈细小的鳞片状散布,并可见有石英—辉钼矿细脉穿插,副矿物为磷灰石、磁铁矿,偶见萤石。岩石主要化学成分:SiO₂: 73.9%, Al₂O₃: 13.2%, Na₂O: 2.49%, K₂O: 6.87%^[9]。

(4) 白岗岩:为一隐伏的浅成侵入岩体,主要沿潘河背斜轴部侵位于 600 m 标高以下。岩石为白色,微细粒花岗结构,显微文象花岗结构,部分地段为斑状结构。主要矿物有钾长石、更长石、石英,可见黑云母,次生矿物有绢云母、高岭石等,副矿物有锆石、磷灰石、金红石、磁铁矿。

2.2 矿体地质特征

南台矿区为一钼多金属矿床,矿区北自草坪沟南至银厂沟,西起贾渠沟东至党岭沟,在地表约 8 km² 范围内普遍发育钼、钨、铜、铅、锌等金属矿化。矿区南部浅表部主要发育铜、铅、锌等矿化,形成小型矿体,深部形成规模较大但品位较低的钼矿体。目前在花岗斑岩与大理岩接触带中圈定矿体 4 个,编号分别为 I、II、III、IV 号,深部片岩中圈定 V、VI 号矿体,矿体(表 1)主要呈似层状,透镜状产于花岗斑岩和宽坪群地层中,倾向为 SW 或 SE,倾角在 5~

表 1 南台钼多金属矿床矿体产出特征

Table 1 Modes of occurrence of the ore body in the Nantai molybdenum deposit

矿体 编号	赋矿标高/m	赋矿围岩	矿体大小			矿体形态	产状		品位	
			长/m	宽/m	厚/m		倾向	倾向/°	一般品位/%	单样最高/%
I	950~1050	Pt ₂ 、K ₂ ²⁻² 大理岩、花岗斑岩	>600	>260	9.54~41.40	呈似层状,透镜状,较规则,局部地段出现弯曲及分枝复合现象,东段大部分矿体连续性较好	SW	10~20	0.03~0.10	0.228
II	900~1100	Pt ₂ 、K ₂ ²⁻² 大理岩、花岗斑岩	>400	>300	3.20~73.07	矿体形态不规则,呈似层状、透镜状,矿体多处出现弯曲及分枝复合现象	SE	10~21	0.03~0.12	0.69
III	800~950	Pt ₂ 、K ₂ ²⁻² 大理岩、花岗斑岩	>600	>300	2.03~116.86	呈似层状、透镜状,分枝复合现象明显,矿体总体较为连续	SW	15~25	0.03~0.10	0.712
IV	820~960	Pt ₂ 、K ₂ ²⁻² 大理岩、花岗斑岩	>700	>500	5.25~81.23, 均厚 32.32	矿体形态不太规则,呈似层状、透镜状,多处出现分枝复合现象,总体较为连续	SE	5~20	0.03~0.10	0.210
V	700~800	Pt ₂ 、K ₂ ²⁻¹ 绿帘钠长阳起片岩、大理岩条带透镜体	>600	>300	5.90~51.04, 均厚 32.33	呈似层状、透镜状,形态不规则,多出现分枝复合现象,总体连续性较差	SW	5~15	0.03~0.10	0.40
VI	730~850	Pt ₂ 、K ₂ ²⁻¹ 绿帘钠长阳起片岩、少量大理岩条带透镜体	>700	>500	2.30~38.60, 均厚 32.34	各分枝矿体形态较规则,呈似层状、透镜状,分枝复合现象明显,矿体连续性较差	SE	10~25	0.03~0.08	0.198

① 樊忠平,陈小刚,王卫,等,陕西省商洛市商州区南台多金属矿区钼矿详查地质报告,西北有色地质勘查局 713 总队, 2008.

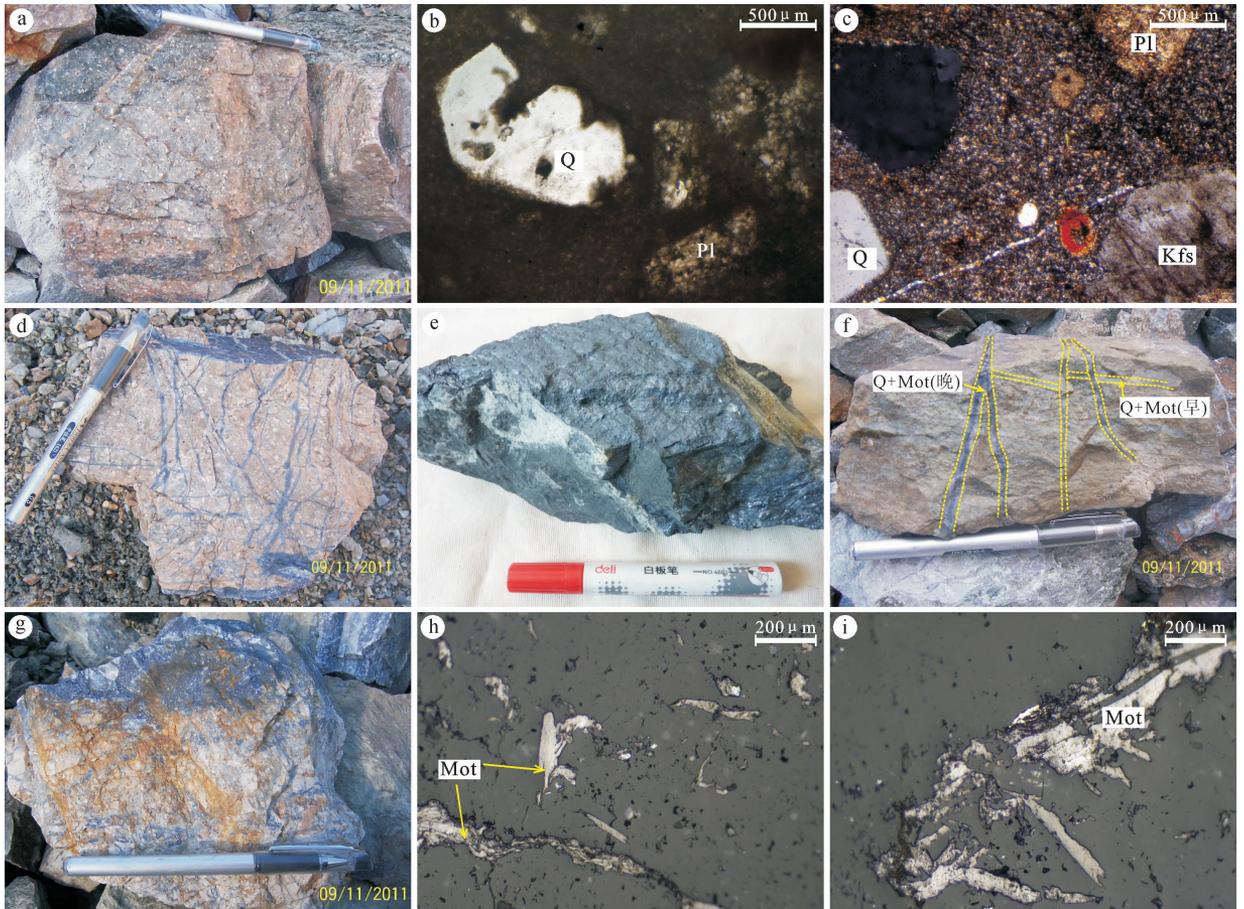


图3 南台钼多金属矿区花岗斑岩及不同类型钼矿石

a—花岗斑岩(PD1030, 998 m 标高); b—花岗斑岩中浑圆状石英斑晶(正交偏光); c—花岗斑岩中钾长石的高岭土化和斜长石的绢云母化(正交偏光); d—网脉状花岗斑岩型矿石(PD1030); e—石英脉型富矿石(PD1030); f—矽卡岩型矿石中晚期的石英-辉钼矿脉穿切早期的石英-辉钼矿脉; g—角砾岩型辉钼矿石; h—辉钼矿呈叶片状产出(正交偏光); i—辉钼矿呈脉状产出; Pl—斜长石; Q—石英; Kfs—钾长石; Mot—辉钼矿

Fig.3 Granitic porphyry and different types of ores in the Nantai Mo polymetallic deposit

a—Granite porphyry (PD1030, 998m); b—Rounded quartz phenocrysts in granite porphyry (+); c—Kaolinization of potassium feldspar and sericitization of plagioclase in granite porphyry(+); d—Stockwork granitic porphyry ore(PD1030); e—Quartz vein type rich ore(PD1030); f—Early quartz-molybdenite veins cut by quartz-molybdenite veins of the late stage in skarn type ore; g—Breccia type Mo ore; h—Molybdenites in foliated form(+); i—Molybdenite in veinlike form; Pl—Plagioclase; Q—Quartz; Kfs—Potassium feldspar; Mot—Molybdenite

20°, 钼品位一般在 0.03%~0.10%, 单样最高在 0.198%~0.712%。

矿石类型主要有花岗斑岩型矿石(图 3-d)、石英脉型矿石(图 3-e)、矽卡岩型矿石(图 3-f)、角砾岩型矿石(图 3-g)四大类。主要金属矿物有辉钼矿、黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、闪锌矿等。脉石矿物主要有石英、透辉石、方解石以及绢(白)云母、闪石类、长石、绿泥石、滑石、蛇纹石、黑云母、磷灰石、锆石、萤石等。

2.3 围岩蚀变

矿区主要围岩类型为中—新元古界宽坪群大理

岩、白云石大理岩和阳起片岩、绿泥片岩,蚀变广泛发育,主要蚀变类型有透闪石化、透辉石化、硅化、碳酸盐化、绿帘石化、叶腊石化、绿泥石化、黑云母化、绢云母化、高岭土化等。

透闪石化、透辉石化和石榴子石化主要见于大理岩、白云石大理岩中,局部地段形成有透辉石矽卡岩、透闪石-透辉石矽卡岩和透辉石-石榴石矽卡岩,蚀变岩石在地表主要分布于潘河背斜核部及其两侧的白云石大理岩中,在深部普遍见于大理岩紧靠爆破角砾岩筒的地段,而且愈北愈强,愈深愈强,自上而下具有透闪石化→镁橄榄石化→透辉石化的

表 2 南台钼多金属矿辉钼矿样品特征

Table 2 Characteristics of molybdenites from the Nantai Mo polymetallic deposit

编号	采样位置	矿石类型	样品特征
ST-06	1 号斜井矿石堆	细脉充填状矿石	辉钼矿呈浸染状产于石英中, 石英脉宽 0.5~1 cm
ST-08	1 号斜井矿石堆	矽卡岩型矿石	辉钼矿-石英细脉穿切矽卡岩层理, 脉宽 0.8 cm 左右
ST-12	1030 平硐 998 标高	石英脉型富矿石	辉钼矿呈薄层状、团块状产于石英脉两侧 (图 3-e)
ST-13	1 号斜井矿石堆	石英脉型矿石	辉钼矿呈薄膜状产于石英脉两侧
ST-14	1 号斜井矿石堆	石英脉型矿石	辉钼矿呈叶片状产于石英脉两侧
ST-15	南台钼多金属矿选矿厂	矽卡岩型矿石	辉钼矿呈薄膜状产于石英脉两侧

分带现象。蚀变伴生 Mo、W、Fe 矿化,且在透辉石、透闪石发育地段,钼钨矿化较强。此外在绿片岩的大理岩夹层中也发育有透闪石化、透辉石化和石榴子石化,形成条带状矽卡岩化岩石。

硅化在矿区也较发育,普遍见于矿区内大理岩和绿片岩中。硅化较强则形成石英岩,硅化早期为灰白色他形石英,中细粒,交代方解石,形成镁橄榄石、透辉石;含磁铁矿,稍晚则为含辉钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿等金属硫化物的细脉,穿切或交代围岩成矿化体或矿体。硅化后期是沿裂隙片理充填的无矿石英脉。

绿帘石化主要见于大理岩中,与钼、钨矿化关系密切,钼矿化常以薄膜状、星点状产出于绿帘石化大理岩地段。

其他蚀变有硅化,滑石化,绢云母化,高岭土化、叶腊石化、绿泥石化,黑云母化和碳酸盐化等,但蚀变微弱,分布局部。

3 样品采集及测试方法

3.1 样品位置与特征

本次用于锆石 U-Pb 定年的花岗斑岩样品采自南台钼多金属矿 1030 平硐 998 标高 (编号 NTG-09, 采样位置: N 33°55'6.9", E 110°03'18.1")。样品 (图 3-a) 比较新鲜,呈肉红色,具块状构造,斑状结构,基质显微花岗结构。斑晶占 10%左右,主要为石英和钾长石,粒径一般在 0.5~1.5 mm,石英多被熔蚀呈浑圆形 (图 3-b),钾长石表面有轻度的次生变化 (图 3-c),杂乱分布,其次有斜长石和绢云母,斜长石表面发生弱的绢云母化 (图 3-c),绢云母呈细小的鳞片状散布;基质主要由钾长石、石英、斜长石以及少量的黑云母组成,粒度一般小于 0.05 mm,副矿物有磁铁矿、榍石和锆石等。

本次研究对南台钼多金属矿 6 件矿石样品中的辉钼矿进行了 Re-Os 同位素年龄测定,具体采样位置和样品手标本特征见图 3 和表 1。辉钼矿-石英脉一般宽 0.5~3 cm,有的可达 5 cm,辉钼矿呈细粒薄膜状分布于脉壁两侧。在显微镜下,辉钼矿一般呈叶片状 (图 3-h) 或细脉状 (图 3-i) 产出,偶见与白钨矿共生,说明二者为同一成矿阶段的产物。

3.2 测试方法

锆石分选在中国地质科学院廊坊物化探研究所完成。将挑选好的无色透明无裂隙不含包裹体的锆石用环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后抛光至锆石露出核部,然后进行锆石的 BSE 照相及 LA-ICPMS 分析。锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室 (GPMR) 利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流 (Ar+He) 中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度^[20]。每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算) 采用软件 ICPMSDataCal 8.3^[21,22] 完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法见文献^[21-23]。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室的 Neptune PLUS 多接收等离子质谱和 Geolas 2005 准分子激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行的,实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用

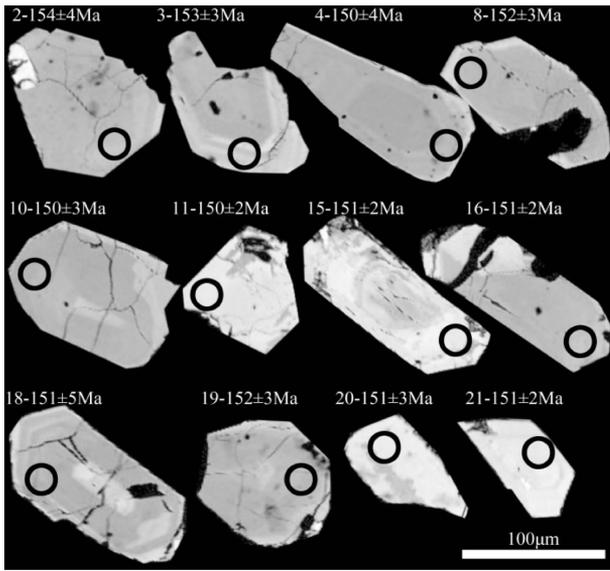


图4 南台钼多金属矿区花岗斑岩锆石背散射图像
Fig.4 Zircons BSE images of granitic porphyry in the Nantai Mo polymetallic deposit

44 μm , 测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质,分析点位于与 U-Pb 定年分析点的附近。分析过程中每 8 h 做一次法拉第杯增益校正 Gain 和电子噪声测量 Baseline。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\ 015\pm 31(2\text{SD}, n=10)$, 与文献^[24-26]报道值在误差范围内完全一致。数据处理采用 ICPMSDataCal8.3。

ST-06、ST-08 的分选在中国地质科学院廊坊物化探研究所完成, 首先将矿石粉碎至 30 目左右, 进行粗分离, 避开石英等与辉钼矿连生的晶体颗粒, 挑选出单矿物辉钼矿, 另外 4 个样品, 辉钼矿主要沿石英脉两侧呈薄层状产出, 相对较好分离, 在野外完成初选; 之后继续粉碎至 60~80 目, 在双目镜下挑选出更纯的辉钼矿晶体, 使纯度达到 99% 以上, 最后置入玛瑙研钵中粉碎至 200 目, 以增加样品的均匀性, 克服失耦现象对准确定年的影响^[27,28]。辉钼矿样品的 Re-Os 同位素分析在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素年代学实验室完成, 采用美国 TJA 公司生产的 TJAX-series ICPMS 测定同位素比值。对于 Re, 选择质量数 185、187, 用 185 监测 Re; 对于 Os, 选择质量数 186、187、188、189、190、192, 用 190 监测 Os。测试方法及处理流程详见文献^[29-32]。

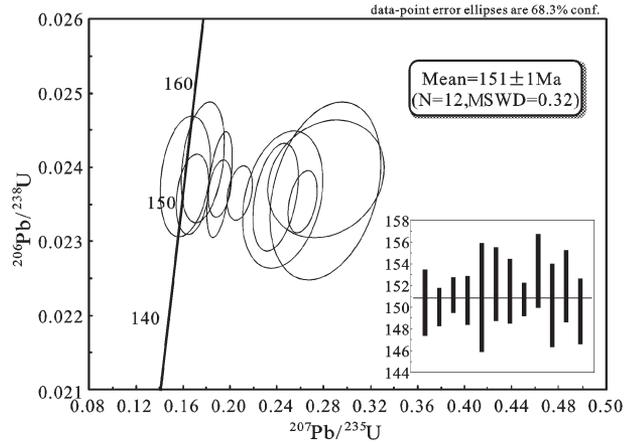


图5 南台钼多金属矿区花岗斑岩锆石 U-Pb 谐和图
Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagram of granitic porphyry in the Nantai Mo polymetallic deposit

4 测试结果

4.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

取自南台钼多金属矿区的花岗斑岩样品 NTG-09 中的锆石呈自形-半自形, 颗粒较大, 大多呈长柱状, 长 60~150 μm , 长宽比为 2:1 到 4:1, 少数为浑圆状, 长宽比为 1.5:1 到 2:1。背散射图像显示, 锆石晶形完好, 裂纹不发育, 部分可见到震荡环带(图4), 具有岩浆锆石的特征。锆石 U 含量为 $275\times 10^{-6}\sim 16\ 395\times 10^{-6}$, Th 含量为 $254\times 10^{-6}\sim 4\ 312\times 10^{-6}$ 。Th/U 比值为 0.25~1.86, 平均值为 0.90, 大于 0.40。以上特征表明这些锆石均为岩浆锆石。

对样品 NTG-09 中 21 颗锆石进行了 21 个点的 U-Pb 年龄分析, 其中 9 粒锆石(1、5、6、7、9、12、13、14、17) 出现不同程度沿不同方向偏离谐和线的情况, 谐和度较低在谐和图和讨论中将不涉及这些点, 剩余 12 个锆石的年龄数据比较集中, 均落在一致线上或者附近(图 5), 得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(151\pm 1)\text{Ma}(2\sigma)$ 。

4.2 锆石 Hf 同位素组成

对南台花岗斑岩(样品 NTG-09)中的锆石进行 U-Pb 定年后又进行了 Hf 同位素组成测定, 在计算过程中, Hf 同位素与锆石 U-Pb 测试点重合且年龄位于谐和线附近的点采用该点的测试年龄值, 未测定 U-Pb 年龄或年龄偏离谐和线较远的点采用样品的加权平均年龄值($t=151\text{Ma}$), 计算结果见表

表 3 南台钼多金属矿区花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of granitic porphyry in the Nantai Mo polymetallic deposit

点号	Pb /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	U /10 ⁻⁶	Th/U	同位素比值			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma, 1 δ)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U (Ma, 1 δ)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma, 1 δ)
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			
NTG-09-2	101	1073	794	1.35	0.0934±0.0060	0.3243±0.0232	0.0241±0.0007	1498±120	285±18	154±4
NTG-09-3	100	1191	764	1.56	0.0529±0.0035	0.1766±0.0121	0.0241±0.0005	324±156	165±10	153±3
NTG-09-4	26	254	275	0.92	0.0791±0.0081	0.2453±0.0225	0.0236±0.0006	1174±199	223±18	150±4
NTG-09-8	142	962	897	1.07	0.0816±0.0078	0.2822±0.0327	0.0239±0.0005	1236±189	252±26	152±3
NTG-09-10	126	1359	732	1.86	0.0753±0.0044	0.2392±0.0127	0.0236±0.0005	1076±118	218±10	150±3
NTG-09-11	614	2875	10343	0.28	0.0797±0.0025	0.2623±0.0084	0.0235±0.0003	1191±62	237±7	150±2
NTG-09-15	738	4312	16395	0.26	0.0573±0.0020	0.1915±0.0065	0.0237±0.0003	502±71	178±6	151±2
NTG-09-16	70	677	855	0.79	0.0514±0.0030	0.1683±0.0093	0.0236±0.0004	257±135	158±8	151±2
NTG-09-18	101	504	1334	0.38	0.0783±0.0068	0.2816±0.0314	0.0237±0.0008	1155±173	252±25	151±5
NTG-09-19	79	849	457	1.86	0.0494±0.0042	0.1620±0.0141	0.0239±0.0005	169±198	152±12	152±3
NTG-09-20	612	3918	15552	0.25	0.0569±0.0018	0.1912±0.0072	0.0238±0.0005	487±69	178±6	151±3
NTG-09-21	780	4146	16193	0.26	0.0625±0.0020	0.2086±0.0070	0.0237±0.0002	694±67	192±6	151±2

表 4 南台钼多金属矿区花岗斑岩的锆石 Hf 同位素分析结果

Table 4 Lu-Hf isotopic data of zircons from granitic porphyry in the Nantai Mo polymetallic deposit

样品号	t/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM1} /Ga	T _{DM2} /Ga	f _{DMHf}
NTG-09-01	151	0.282252	0.002503	0.092683	0.282245	-18.4	-15.3	1469	1916	-0.92
NTG-09-02	150	0.282125	0.001172	0.039098	0.282122	-22.9	-19.6	1594	2154	-0.96
NTG-09-03	151	0.282113	0.002819	0.094546	0.282105	-23.3	-20.2	1685	2186	-0.92
NTG-09-04	151	0.282142	0.001484	0.048120	0.282138	-22.3	-19.2	1584	2125	-0.96
NTG-09-05	152	0.281867	0.001226	0.037887	0.281864	-32.0	-28.8	1956	2654	-0.96
NTG-09-06	158	0.282237	0.002276	0.085943	0.282230	-18.9	-15.9	1482	1944	-0.93
NTG-09-07	154	0.282144	0.003334	0.101459	0.282134	-22.2	-19.2	1663	2130	-0.90
NTG-09-08	151	0.282116	0.002040	0.070040	0.282110	-23.2	-20.1	1645	2177	-0.94
NTG-09-09	150	0.282224	0.004440	0.145865	0.282211	-19.4	-16.5	1594	1980	-0.87
NTG-09-10	156	0.282185	0.003335	0.112280	0.282175	-20.8	-17.8	1603	2051	-0.90
NTG-09-11	153	0.282229	0.000760	0.027664	0.282227	-19.2	-16.0	1434	1952	-0.98
NTG-09-12	159	0.282222	0.003060	0.114177	0.282214	-19.4	-16.4	1535	1976	-0.91
NTG-09-13	155	0.282277	0.003190	0.124292	0.282268	-17.5	-14.5	1460	1871	-0.90
NTG-09-14	157	0.282221	0.002438	0.089570	0.282214	-19.5	-16.4	1512	1976	-0.93
NTG-09-15	154	0.282103	0.002133	0.076768	0.282097	-23.6	-20.6	1667	2202	-0.94
NTG-09-16	156	0.282237	0.003391	0.119827	0.282228	-18.9	-15.9	1528	1949	-0.90
NTG-09-17	155	0.282286	0.003457	0.136654	0.282276	-17.2	-14.2	1458	1855	-0.90
NTG-09-18	157	0.282473	0.006672	0.284213	0.282454	-10.6	-7.9	1295	1506	-0.80
NTG-09-19	154	0.282396	0.004441	0.174448	0.282383	-13.3	-10.4	1331	1646	-0.87
NTG-09-20	154	0.282384	0.004391	0.175088	0.282372	-13.7	-10.9	1347	1668	-0.87

注: ε_{Hf}(t) = { [(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_s - (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_s × (e^{λt} - 1)] / [(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0} - (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0} × (e^{λt} - 1)] - 1 } × 10000; T_{DM1} = 1/λ × ln { 1 + [(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_s - (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}] / [(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_s - (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}] }; T_{DM2} = 1/λ × ln { 1 + [(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{SE} - (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}] / [(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_C - (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}] } + t; s = sample, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0} = 0.282772, (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0} = 0.0332, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.28325, (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.0384^[33,34], t = 锆石结晶年龄, λ = 1.867 × 10⁻¹¹ a⁻¹^[35], (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_C = 0.015。

表 5 南台钼多金属矿及马河钼矿辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 5 Re-Os isotope data of molybdenites from the Nantai Mo polymetallic deposit

矿区	原样名	样重/g	Re/(ng/g)		C 普 Os/(ng/g)		¹⁸⁷ Re/(ng/g)		¹⁸⁷ Os/(ng/g)		模式年龄/Ma	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
南台钼矿区	ST-06	0.02552	4206	32	0.0134	0.0034	2644	20	6.495	0.060	147.3	2.1
	ST-08	0.05008	3664	27	0.0213	0.0122	2303	17	5.611	0.054	146.1	2.1
	ST-12	0.10158	2260	20	0.0058	0.0045	1420	13	3.523	0.031	148.7	2.2
	ST-13	0.10046	2952	23	0.0221	0.0048	1856	14	4.679	0.038	151.2	2.1
	ST-14	0.10018	3771	28	0.0134	0.0076	2370	17	5.953	0.048	150.6	2.0
	ST-15	0.10124	3989	31	0.0196	0.0047	2507	19	6.225	0.056	148.9	2.1
马河钼矿区	ST-01	0.05027	6.556	49	0.0239	0.0090	4.121	30	10.17	0.08	148.0	2.0
	ST-07	0.05056	8.630	65	0.0767	0.1498	5.424	41	13.39	0.13	148.0	2.2

注:①普 Os 是根据 Nier 值得 Os 同位素丰度,通过 ¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 测量比计算得出;②不确定度为 2σ 水平,Re 和 Os 含量的计算误差包括稀释剂标定误差、质谱测量误差及质量分馏校正误差等。模式年龄的计算误差不仅包括稀释剂标定误差、质谱测量误差及质量分馏校正误差等,另外还包括 ¹⁸⁷Re 衰变常数 K 的不确定度(1.02%)。模式年龄 t 按 $t = 1/\lambda \ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})$ 计算,其中 $\lambda (^{187}\text{Re}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1[36]}$ 。

表 6 北秦岭地区钼矿床及岩浆岩同位素年龄

Table 6 Isotope ages of Mo deposits and related magmatites in northern Qinling area

矿床/岩体名称	矿床类型	同源岩浆岩			矿床			资料来源
		岩性	测试方法	年龄/Ma	测定对象	测试方法	年龄/Ma	
南台钼多金属矿床	斑岩-矽卡岩型	花岗斑岩	LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法	151±1	辉钼矿	Re-Os	148.8±1.7	本文
秋树湾钼矿床	斑岩-矽卡岩型	花岗闪长斑岩	黑云母 K-Ar 法	145	辉钼矿	Re-Os	146±2	[4]
老君山钼矿床	斑岩型	黑云母二长花岗岩	LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法	109±1	辉钼矿	Re-Os	114±3	[8]
南沟钼矿床	斑岩型	钾长花岗岩	LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法	109±4	辉钼矿	Re-Os	107±1	[7]
马河钼矿西矿段		二长花岗岩	LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法	157±1				[19],
马河钼矿东矿段		似斑状二长花岗岩	LA-ICPMS 锆石 U-Pb 法	153±1	辉钼矿	Re-Os	148±2	本文

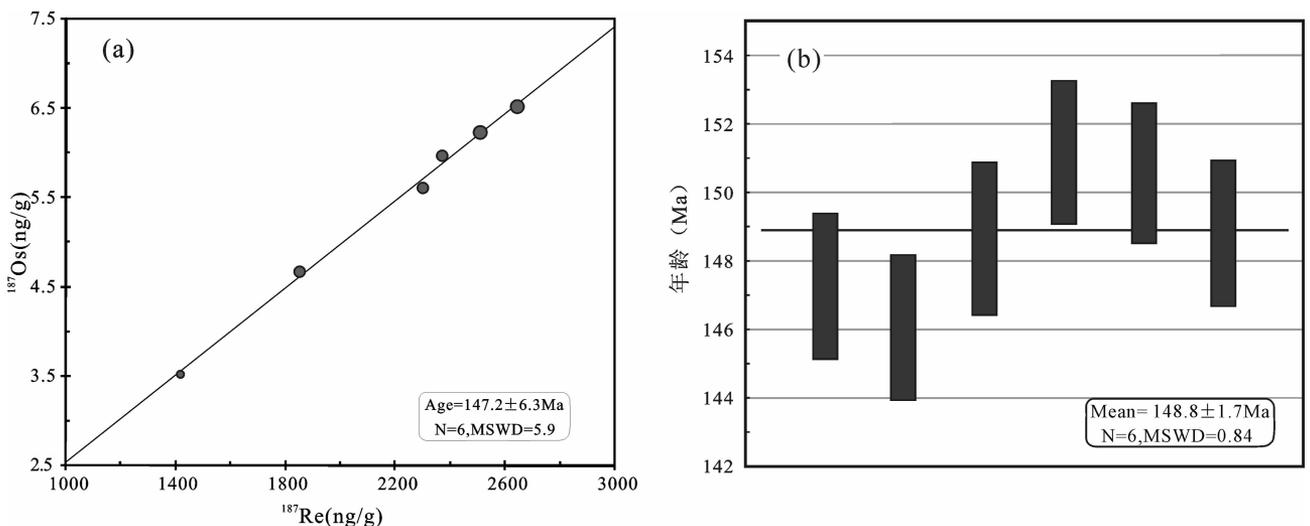


图 6 南台钼多金属矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄(a)和加权平均年龄图(b)

Fig.6 Re-Os isochron age(a)and weighted mean age (b) of molybdenites from the Nantai Mo polymetallic deposit

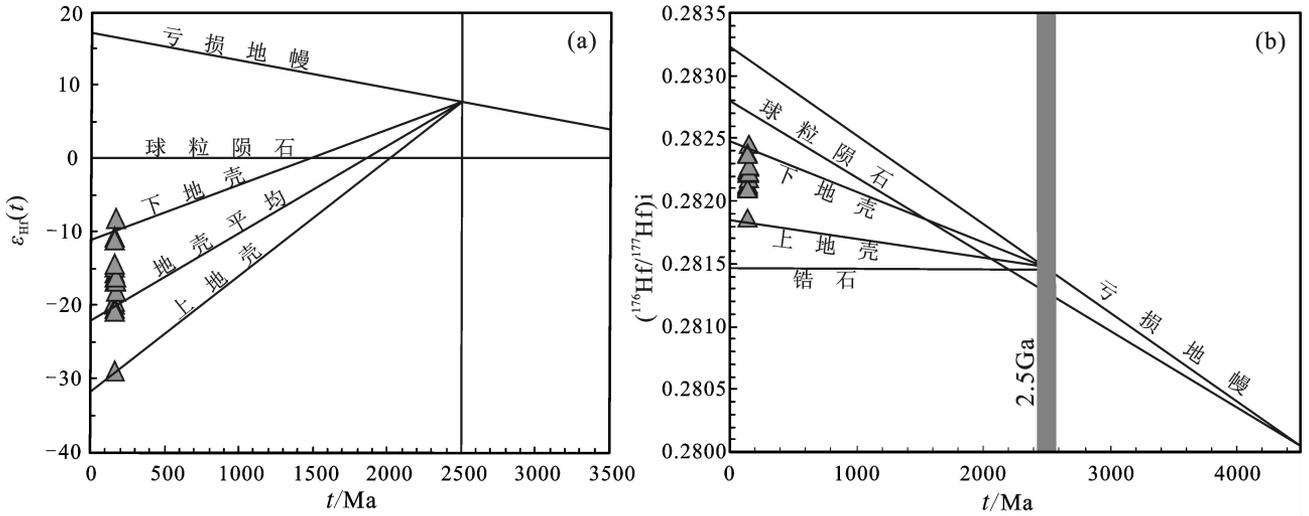


图 7 南台钼多金属矿区花岗斑岩的 Hf 同位素演化

Fig.7 Diagram of $\epsilon_{Hf}(t)$ and $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i-t$ of granitic porphyry in the Nantai Mo polymetallic deposit

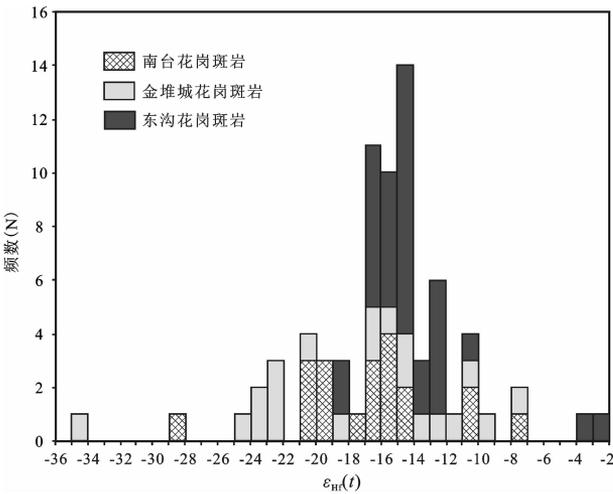


图 8 南台钼多金属矿区花岗斑岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 及其二阶段模式年龄(T_{DM2})和分布直方图^[47,48]

Fig.8 Zircon T_{DM2} and Hf isotopic compositions of granitic porphyry in the Nantai Mo polymetallic deposit

4. 对 NTG-09 中锆石分析了 20 个点, $^{176}Hf/^{177}Hf$ 初始比值介于 0.281 864~0.282 454, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 -28.8~-7.9, 变化范围达 20.9 个 ϵ 单位, 明显高于测试过程中的误差, 因此, 该花岗斑岩很可能具有不均一的锆石 Hf 同位素组成。对应地, 其两阶段 Hf 模式年龄变化也较大, 为 2 654~1 506 Ma。

4.3 辉钼矿 Re-Os 年龄

南台钼矿区 6 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素

测试结果见表 4, 由表 4 可知, 6 件辉钼矿的模式年龄变化范围较小, 分布于 $(146 \pm 2)Ma \sim (151 \pm 2)Ma$, 由于样品 ^{187}Re 变化范围 $(1 420 \sim 2644 \text{ ng/g})$ 不大, 得出的等时线年龄误差较大, 为 $(147.2 \pm 6.3)Ma$ ($N=6$, $MSWD=5.9$) (图 6-a), 6 件辉钼矿的加权平均年龄为 $(148.8 \pm 1.7)Ma$ ($N=6$, $MSWD=0.84$) (图 6-b), 与其等时线年龄在误差范围内基本一致, 可以代表矿床的成矿年龄。马河钼矿区 2 件辉钼矿的模式年龄较为一致, 分别为 $(148.0 \pm 2.0)Ma$ 和 $(148.0 \pm 2.2)Ma$ 。

5 讨论

5.1 成岩成矿年龄及其地质意义

20 世纪 80-90 年代初, 前人在研究秦巴—大别地区重大基础地质问题及主要矿产成矿规律时, 就开始关注南台—银厂沟一带花岗质岩体的形成时代和矿床成因。李靠社^[97]曾对南台矿区内小岩体和爆破角砾岩中的石英斑岩角砾等进行了 K-Ar 法全岩同位素年龄测定, 获得的年龄结果范围比较宽, 为 110~150 Ma。此外, 近几年获得的北台矿区的石英斑岩脉和爆破角砾岩中的石英斑岩角砾的同位素地质年龄为 109.8~114.6 Ma^①。本次获得的南台矿区花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(151 \pm 1)Ma$ 。这些结果表明, 南台钼多金属矿区可能存在两期岩浆活动: 早期为花岗斑岩, 侵入时代为 150 Ma 左右; 晚期主要

① 刘满年, 高选顿. 陕西省商洛市潘河钼矿普查地质报告. 中国人民武装警察部队黄金第五支队, 2007.

为石英斑岩脉,侵入时代在 110Ma 左右。

本次获得的南台钼多金属矿区 6 件辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄介于 $(146\pm 2)\sim(151\pm 2)$ Ma, 其加权平均年龄为 (148.8 ± 1.7) Ma, 略晚于矿区早期的花岗斑岩的形成时代 (151 ± 1) Ma, 由此可见, 花岗斑岩应为主要的成矿斑岩。此外, 马河钼矿区两件辉钼矿的模式年龄为 (148 ± 2) Ma, 与南台钼多金属矿区辉钼矿形成时代接近一致, 略晚于矿区花岗质岩石的形成时代 $(153\sim 157)$ Ma^[19], 上述数据表明, 蟒岭岩体西侧的钼成矿作用主要集中于 148 Ma 左右, 与其以北的华北克拉通南缘的主要斑岩型钼矿床大规模成矿时间一致。

前人研究表明^[38-41], 东秦岭—大别山中生代钼成矿作用主要发生在燕山期和印支期, 主要可划分为 4 个期次: 印支期 $(260\sim 205)$ Ma、晚侏罗世—早白垩世早期 $(148\sim 138)$ Ma, 白垩世中期 $(135\sim 119)$ Ma 和早白垩世晚期 $(116\sim 105)$ Ma。近几年来, 北秦岭地区相继获得了一批钼多金属矿床的成岩成矿年龄(表 5), 结果表明钼成矿同步或略滞后于同源岩浆活动, 成矿年龄集中于 $146\sim 149$ Ma 和 $107\sim 114$ Ma 两个时间段, 分别对应于东秦岭钼矿带的白垩世中期和早白垩世晚期钼成矿作用。

5.2 岩浆源区特征及成矿物质来源

对岩浆岩而言, 锆石的 Hf 同位素分析可以示踪岩浆源区, 为岩石的成因提供证据^[42-44]。锆石因具有较高的 Hf 含量, 但 Lu 的含量又极低, 从而导致其 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 具有极低的比值, 因此, 锆石在形成后没有明显的放射性成因 Hf 的积累, 所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成, 这些特征使锆石成为目前探讨地壳演化和示踪岩石源区的重要工具^[45,46]。

南台花岗斑岩的锆石($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围均较宽, 分别为 $0.281\ 864\sim 0.282\ 454$ 和 $-28.8\sim -7.9$, 在 Hf 同位素演化图解(图 7)中, 其 Hf 同位素组成大部分介于上—下地壳之间, 大部分分布于下地壳演化线附近, 还有少量的介于下地壳演化线和球粒陨石演化线之间, 由此推断南台钼多金属矿区的花岗斑岩的源区物质具有壳幔混合的特征, 以壳源物质为主, 可能有少量的幔源物质贡献。其二阶段 Hf 同位素模式年龄为 $2\ 654\sim 1\ 506$ Ma, 变化于一个较宽的范围, 也暗示了其源岩可能有多重组分。

与金堆城、东沟含矿斑岩的锆石 Hf 同位素组

成对比研究显示(图 8), 它们的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 都有一个比较宽的变化范围, 这也显示了南台含矿斑岩体的源区与金堆城和东沟的含矿斑岩体的源区具有一定的相似性, 它们的源区可能均具有多种组分, 其中包括幔源组分的贡献。

对于东秦岭钼矿床的成矿和成岩物质的来源, 前人开展了大量研究和讨论^[39,49-52], 总体认为成岩成矿物质来源复杂, 从地幔变化到地壳。有的学者根据岩体的锶、氧同位素特征, 认为成矿物质来源于下地壳^[51]。张本仁等^[53]则详细地研究了华北地台南缘的岩石圈组成, 认为 Mo 元素主体上富集于下地壳和上地幔, 结合 Sr-Nd 同位素组成特征, 认为成矿物质主体来源于下地壳, 但混有少量地幔组分。

本文获得的南台钼多金属矿床矿区花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 (151 ± 1) Ma, 矿区内 6 件辉钼矿的 Re-Os 同位素加权平均模式年龄为 (148.8 ± 1.7) Ma, 二者在误差范围内基本一致。锆石 Hf 同位素分析表明, 南台钼多金属矿区的花岗斑岩的源区物质具有多种组分的特征, 以壳源物质为主, 可能有少量的幔源物质贡献, 暗示了成矿物质也主要来源于地壳, 但混有少量地幔组分。李靠社^[37]在研究商州市南台—银厂沟多金属矿床成矿物质来源时, 所做的铅同位素结果显示, 矿石 Pb 同位素具有壳—幔混合的特征, 结合爆破角砾岩中浸染状、细脉状方铅矿脉的方铅矿模式年龄推测成矿物质的源区很可能是被幔源物质所渗透(或污染)的下地壳。

综上所述, 南台钼多金属矿床的成岩和成矿物质主要来源于下地壳, 但有少量地幔组分的贡献。

6 结 论

(1) 南台钼多金属矿区花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 (151 ± 1) Ma, 矿区 6 件辉钼矿 Re-Os 同位素加权平均年龄为 (148.8 ± 1.7) Ma, 二者在误差范围内基本一致, 表明南台钼多金属矿床形成于晚侏罗世, 与其以北的华北克拉通南缘的主要斑岩型钼矿床大规模成矿时间一致。

(2) 南台花岗斑岩的锆石($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为 $0.281\ 864\sim 0.282\ 454$ 和 $-28.8\sim -7.9$, 表明花岗斑岩的源区物质具有多种组分的特征, 以壳源组分为主, 可能有少量幔源组分的混入, 暗示了成矿物质也可能主要来源于下地壳, 但地幔组分对成矿也有贡献。

参考文献 (References):

- [1] 张元厚, 毛景文, 简伟, 等. 东秦岭地区钼矿床研究现状及存在问题 [J]. 世界地质, 2010, 29(2):188-202.
Zhang Yuanhou, Mao Jingwen, Jian Wei, et al. Present status of research on molybdenum deposit in eastern Qinling and the problems remained [J]. Global Geology, 2010, 29 (2):188-202(in Chinese with English abstract).
- [2] Mao J W, Pirajno F, Xiang J F, et al. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt; Characteristics and tectonic settings [J]. Ore Geology Reviews. 2011.
- [3] 伏雄. 河南秋树湾铜(钼)矿床成因探讨 [J]. 矿产与地质, 2003, 17 (3):233-236.
Fu Xiong. Genesis of Qiushuwan copper (molybdenum) deposit of Henan province [J]. Mineral Resources and Geology, 2003, 17(3): 233-236(in Chinese with English abstract).
- [4] 郭保健, 毛景文, 李厚民, 等. 秦岭造山带秋树湾铜钼矿床钼矿 Re-Os 定年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22 (9):2341-2348.
Guo Baojian, Mao Jingwen, Li Houmin, et al. Re-Os dating of the molybdenite from the Qiushuwan Cu-Mo deposit in the east Qinling and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(9): 2341-2348(in Chinese with English abstract).
- [5] 张智慧, 秦明, 方荣, 等. 河南镇平秋树湾矿区铜、钼矿床地质特征及深部找矿潜力分析 [J]. 矿产与地质, 2008, 22(2):107-110.
Zhang Zhihui, Qin Ming, Fang Rong, et al. Geological characteristics of the Qiushuwan Cu, Mo deposit with the analysis of its prospecting potential in deep part, Zhenping of Henan [J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(2):107-110(in Chinese with English abstract).
- [6] 张旭, 戴雪灵, 邓湘伟, 等. 河南秋树湾斑岩体特征及其南山钼矿段外围找矿方向 [J]. 矿产勘查, 2011, 02(2):126-134.
Zhang Xu, Dai Xueling, Deng Xiangwei, et al. The characteristics of Qiushuwan porphyry granite and the prospecting target in the outside of its Nanshan ore section [J]. Mineral Exploration, 2011, 02 (2):126-134(in Chinese with English abstract).
- [7] 杨晓勇, 卢欣祥, 杜小伟, 等. 河南南沟钼矿床地球化学研究兼论东秦岭钼矿床成岩成矿动力学 [J]. 地质学报, 2010, 84(7): 1049-1079.
Yang Xiaoyong, Lu Xinxiang, Du Xiaowei, et al. Ore geochemistry, petrogenesis and metallogenic dynamics of the Nangou molybdenum district in the East Qinling Orogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(7):1049-1079(in Chinese with English abstract).
- [8] 孟芳. 豫西老君山花岗岩体特征及其成矿作用 [D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2010:1-77.
Meng Fang. The Characteristics of the Laojunshan Intrusive and Mineralization, Western Henan Province [D]. Master Degree Thesis, China University of Geosciences (Beijing), 2010:1-77 (in Chinese with English abstract).
- [9] 练翠侠, 欧阳志强, 贺忠春. 陕西省商洛市潘河钼矿地质特征及成因分析 [J]. 矿床地质, 2011, 30(3):448-456.
Lian Cuixia, Ouyang Zhiqiang, He Zhongchun. Geological characteristics and genesis of Panhe molybdenum deposit in Shangluo, Shaanxi Province [J]. Mineral Deposits, 2011, 30(3):448-456(in Chinese with English abstract).
- [10] 游振东, 索书田, 韩郁菁, 等. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析——以东秦岭为例 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 1-326.
You Zhendong, Suo Shutian, Han Yujing, et al., Metamorphic Process and Structural Analysis of the Core of Orogen: Such as East Qinling [M]. Wuhan: Press of China University of Geoscience, 1991:1-326(in Chinese).
- [11] 刘国惠, 张寿广, 游振东. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1993:1-190.
Liu Guohui, Zhang Shouguang, You Zhendong, et al. The Major Metamorphic Rock Groups in the Qinling Orogenic Belt and Their Metamorphic Evolution [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:1-190(in Chinese).
- [12] 张宗清, 刘敦一, 付国民, 等. 北秦岭变质地层同位素年代研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1994:1-191.
Zhang Zongqing, Liu Dunyi, Fu Guomin, et al. Study of Isotope Geochronology of Metamorphic Straigraphy of North Qinling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:1-191(in Chinese).
- [13] 杨力, 陈福坤, 杨一增, 等. 丹凤地区秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄: 北秦岭地体中-新元古代岩浆作用和早古生代变质作用的记录 [J]. 岩石学报, 2010, 26(5):1589-1603.
Yang Li, Chen Fukun, Yang Yizeng, et al. Zircon U-Pb ages of the Qinling Group in Danfeng area: Recording Mesoproterozoic and Neoproterozoic magmatism and Early Paleozoic metamorphism in the North Qinling terrain [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (5):1589-1603(in Chinese with English abstract).
- [14] 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 科学通报, 2004, 49 (18): 1901-1908.
Chen Danling, Liu Liang, Sun Yong, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulite from North Qinling and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (18): 1901-1908(in Chinese with English abstract).
- [15] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001:1-855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001:1-855(in Chinese).
- [16] 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 北秦岭西段宽坪岩群斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS 测年及其地质意义 [J]. 地质学报, 2007, 81 (1): 79-87.
He Shiping, Wang Hongliang, Chen Juanlu, et al. Zircon U-Pb chronology of Kuanping rock group by LA-ICP-MS and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(1):79-

- 87(in Chinese with English abstract).
- [17] 卢欣祥. 秦岭花岗岩大地构造图(附说明书)[M]. 西安:西安地图出版社, 2000.
- Lu Xinxiang. Tectonic Map of Granitoids in the Qinling [M]. Xi'an:Xi'an Map Publishing House, 2000(in Chinese).
- [18] 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6):1573-1593.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Qi Qiuju, et al. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (6):1573-1593 (in Chinese with English abstract).
- [19] 柯昌辉, 王晓霞, 李金宝, 等. 北秦岭马河钨矿区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(1):267-278.
- Ke Changhui, Wang Xiaoxia, Li Jinbao, et al. Chronology and geological significance of the granites from the Mahe Mo deposit in the North Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1):267-278(in Chinese with English abstract).
- [20] Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, et al. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2008, 23:1093-1101.
- [21] Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2):34-43.
- [22] Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2):537-571.
- [23] Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 2010b, 55(15):1535-1546.
- [24] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用 [J]. 岩石学报, 2007, 23(10):2595-2604.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICPMS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(10):2595-2604(in Chinese with English abstract).
- [25] Elhlou S, Belousova E, Griffin WL, et al. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2006, (suppl.):A158.
- [26] Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS [J]. Chemical Geology, 2008, 247: 100-118.
- [27] Stein, H, Scherstén A, Hannah J, et al. Sub-grain scale decoupling of Re and ^{187}Os and assessment of laser ablation ICP-MS spotdating in molybdenite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(19): 3673-3686.
- [28] 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失耦现象 [J]. 矿床地质, 2007, 26(5):572-580.
- Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, et al. Subgrain-size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite [J]. Mineral Deposits, 2007, 26(5):572-580(in Chinese with English abstract).
- [29] 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究 [J]. 地质学报, 1994, 68(4):339-347.
- Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, et al. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites [J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68 (4):339-347 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杜安道, 赵敏敏, 王淑贤, 等. Carius 管溶样-负离子热表面质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄 [J]. 岩矿测试, 2001, 20(4):247-252.
- Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, et al. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius tube sample preparation [J]. Rock and Mineral Analysis, 2001, 20(4):247-252 (in Chinese with English abstract).
- [31] 屈文俊, 杜安道. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄 [J]. 岩矿测试, 2003, 22 (4):254-257, 262.
- Qu Wenjun, Du Andao. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with Carius tube sample digestion [J]. Rock and Mineral Analysis, 2003, 22(4): 254-257, 262(in Chinese with English abstract).
- [32] 李超, 屈文俊, 杜安道. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 ^{187}Os 迁移模式研究 [J]. 矿床地质, 2009, 28(5):707-712.
- Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao. Decoupling of Re and Os and migration model of ^{187}Os in coarse-grained molybdenite [J]. Mineral Deposits, 2009, 28 (5):707-712 (in Chinese with English abstract).
- [33] Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148:243-258.
- [34] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64:133-147.
- [35] Soderlund U, Patchett PJ, Verroot JD, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusion [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219:311-324.
- [36] Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os Ages of Group II A, III A, IV A, and IV B iron meteorites [J]. Science, 1996, 271:1099-1102.
- [37] 李靠社. 商州市南台一银厂沟多金属矿床成矿物质来源初析[J].

- 陕西地质科技情报, 1990(3):46-51.
- Li Kaoshe. Analysis on ore-forming material source of polymetallic ore deposit in Nantai-Yinchanggou area, Shangluo [J]. Geological Science and Technology Information of Shanxi Province, 1990(3): 46-51(in Chinese).
- [38] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景 [J]. 岩石学报, 2005, 21(1):169-188.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1):169-188.
- [39] Mao Jingwen, Xie Guiqing, Bierlein F, et al. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. Geochim. 2008, 72 (18):4607-4626.
- [40] Mao Jingwen, Xie Guiqing, F. Pirajno, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications [J]. Australian Journal of Earth Science. 2010, 57:51-78.
- [41] 黄凡, 王登红, 陆三明, 等. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿辉钼矿 Re-Os 同位素年龄—兼论东秦岭大别山中生代钼成矿作用期次划分 [J]. 矿床地质, 2011, 30(6):1039-1057.
- Huang Fan, Wang Denghong, Lu Sanming, et al. Molybdenite Re-Os isotopic age of Shapinggou Mo deposit in Anhui Province and Mesozoic Mo ore-forming stages in East Qinling-Dabie Mountain region [J]. Mineral Deposits, 2011, 30(6):1039-1057.
- [42] Vervoort J D, Patchett P J, Albarede F, et al. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 181:115-129.
- [43] Griffin W L, Belousova E A, Shee S R. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton:U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons [J]. Precambrian Res., 2004, 131:231-282.
- [44] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 2007, 23(2):185-220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2):185-220(in Chinese with English abstract).
- [45] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Pidgeon RT. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. Nature, 1999, 399:252-255.
- [46] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tongluand Pingtan igneous complexes [J]. Lithos, 2002, 61:237-269.
- [47] 戴宝章, 蒋少涌, 王孝磊, 等. 河南东沟钼矿花岗岩成因: 岩石地球化学, 锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约 [J]. 岩石学报, 2009, 25(11):2889-2901.
- Dai Baozhang, Jiang Shaoyong, Wang Xiaolei, et al. Petrogenesis of the granitic porphyry related to the giant molybdenum deposit in Donggou, Henan province, China: Constraints from petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology and Sr-Nd-Hf isotopes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (11):2889-2901 (in Chinese with English abstract).
- [48] 郭波. 东秦岭金堆城斑岩钼矿床地质地球化学特征与成矿动力学背景 [D]. 西北大学硕士学位论文, 2009.
- Guo Bo. Geology, Geochemistry and Geodynamic Setting of Jinduicheng Porphyry Molybdenum Deposit in East Qinling [D]. Xi'an: Master Degree Thesis, Northwest University: 1-50 (in Chinese with English abstract).
- [49] 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 等. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1988:442-489.
- Hu Shouxi, Lin Qianlong, Chen Longming, et al. The Geology and Metallogeny of the Amalgamation Zone between Ancient North China Plate and South China Plate (Taking Qinling-Tongbai as an Example) [M]. Nanjing: Press of Nanjing University, 1988:442-489(in Chinese).
- [50] 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 等. 中国钼矿床 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1991, 18-128, 403-408.
- Luo Mingjiu, Zhang Fumin, Dong Qiongying, et al. The Molybdenum Deposit in China [M]. Henan: Henan Science and Technology Press, 1991:18-128, 403-408(in Chinese).
- [51] 陈衍景, 李超, 张静, 等. 秦岭钼矿带斑岩体锶氧同位素特征与岩石成因机制和类型 [J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(S1):64-72.
- Chen Yanjing, Li Chao, Zhang Jing, et al. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type [J]. Science in China (Series D), 2000, 30(S1):64-72(in Chinese).
- [52] 刘永春, 付治国, 高飞, 等. 河南栾川南泥湖特大型钼矿床成矿母岩地质特征研究 [J]. 中国钼业, 2006, 30(3):13-17.
- Liu Yongchun, Fu Zhiguo, Gao Fei, et al. Geological character research of ore-forming mother rock of Nannihu oversize molybdenum ore deposit of Luanchuan in Henan [J]. China Molybdenum Industry, 2006, 30(3):13-17(in Chinese).
- [53] 张本仁, 骆庭川, 高山, 等. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994:257-277.
- Zhang Benren, Luo Tingchuan, Gao Shan, et al. Geochemical Study of the Lithosphere, Tectonism and Metallogenesis in the Qinling-Dabashan Region [M]. Wuhan: Press of China University of Geoscience, 1994:257-277(in Chinese).

Rock-forming and ore-forming ages of the Nantai Mo polymetallic deposit in North Qinling Mountains and its zircon Hf isotope composition

KE Chang-hui¹, WANG Xiao-xia¹, YANG Yang²,
QI Qiu-ju³, FAN Zhong-ping⁴, GAO Fei⁵, WANG Xiu-Yuan⁶

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Resource Survey and Assessment, ECE, Nanjing 210007, China; 4. No. 713 Geological Party, Northwest Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals, Shangluo 726000, Shaanxi, China; 5. Shaanxi Non-ferrous Metals Holding Group Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 6. Jinduicheng Molybdenum Group Co., Ltd., Weinan 714000, Shaanxi, China)

Abstract: The Nantai Mo polymetallic deposit is a typical porphyry-skarn deposit in North Qinling Mountains, the magmatic rocks in this deposit include granite-porphyry, quartz porphyry veins and explosion breccia, and there occur porphyry-type and skarn-type Mo polymetallic mineralizations within and around the granite-porphyry body. The granite-porphyry from the Nantai Mo polymetallic deposit is dated at $(151\pm 1)\text{Ma}$ ($N=12$, $\text{NSWD}=0.32$) by using zircon U-Pb LA-ICPMS. Six molybdenites samples from the deposit yield Re-Os isotope model ages ranging from $(146\pm 2)\text{Ma}$ to $(151\pm 2)\text{Ma}$, with an weighted average of $(148.8\pm 1.7)\text{Ma}$ ($N=12$, $\text{NSWD}=0.84$). The granite age and the metallogenic age are consistent with each other within the error limits, suggesting that the Nantai Mo polymetallic deposit was formed in the late Jurassic period, consistent with the formation epoch of the main porphyry-skarn type molybdenum deposits on the southern margin of North China Block. The zircon Hf isotope composition of the granite-porphyry has a large variation, with initial ratios of $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ranging from 0.281 864 to 0.282 454, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ from -28.8 to -7.9, and two-stage model ages from 2654Ma to 1506Ma. These data suggest that granite-porphyry was probably derived from several sources dominated by crustal materials with the addition of small amounts of mantle materials, and the old crust was dominated by the contribution of juvenile components. Therefore, the source of the metallogenic material for the Nantai Mo polymetallic deposit was probably the same as that of the granite.

Key words: North Qinling Mountains; Nantai Mo polymetallic deposit; LA-ICPMS zircon U-Pb age; Re-Os isotope ages; Hf isotope

About the first author: KE Chang-hui, male, born in 1987, master candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit; E-mail: kechanghuicags@126.com.