

doi: 10.12029/gc20160525

张锋, 李志丹, 王佳营, 等. 内蒙古乌拉特中旗图古日格金矿辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1771-1779.

Zhang Feng, Li Zhidan, Wang Jiaying, et al. Molybdenite Re-Os dating of the Tugurige gold deposit, Urad Middle Banner, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1771-1779(in Chinese with English abstract).

内蒙古乌拉特中旗图古日格金矿辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其意义

张 锋¹ 李志丹¹ 王佳营¹ 陈军强¹ 文思博¹ 李 超² 邵国钰³ 赵宇川³ 俞初安¹

(1. 天津地质矿产研究所, 天津 300170; 2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 3. 核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010)

摘要:图古日格是内蒙古宝音图地块内的一例具有中型规模的金矿床。含金石英脉呈 NW 向穿插于各类晚古生代岩体与下元古界宝音图群地层中, 矿体走向、倾向延伸相对稳定。金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等, 脉石矿物为石英、方解石等。发育硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化等围岩蚀变。与金共生的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (305.6 ± 4.5) Ma、模式年龄为 (313.5 ± 4.8) Ma, 限定图古日格金矿是晚石炭世构造-岩浆活动的产物。辉钼矿 Re 含量介于 $42.42 \times 10^{-6} \sim 307.7 \times 10^{-6}$, 显示成矿物质可能为壳幔混合来源。

关键词: Re-Os 同位素; 成矿年龄; 图古日格金矿; 乌拉特中旗; 内蒙古

中图分类号: P597; P611; P618.57 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2016) 05-1771-09

Molybdenite Re-Os dating of the Tugurige gold deposit, Urad Middle Banner, Inner Mongolia, and its geological significance

ZHANG Feng¹, LI Zhi-dan¹, WANG Jia-ying¹, CHEN Jun-qiang¹, WEN Si-bo¹, LI Chao²,
SHAO Guo-yu³, ZHAO Yu-chuan³, YU Reng-an¹

(1. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China; 2. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China; 3. No. 208 Geological Party, CNNC, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Tugurige is a middle-sized gold deposit in Buyant Block, Inner Mongolia. The NW-striking gold-bearing quartz veins penetrate the Late Paleozoic rock mass and Lower Proterozoic Buyant Group. The orebody stably extends along the strike and the dip. The metallic minerals mainly include pyrite, chalcopyrite and galena, whereas the gangue minerals are predominately quartz and calcite. The alteration in the wall rocks includes silicification, sericitization and epidotization. The Re-Os dating of molybdenite samples from gold ore yielded a Re-Os isochron age of (305.6 ± 4.5) Ma with an average of (313.5 ± 4.8) Ma. This implies that the Au and Mo mineralization occurred in Late Carboniferous. The Re content of molybdenites in the Tugurige gold deposit is $42.42 \times 10^{-6} \sim 307.7 \times 10^{-6}$, suggesting that the ore-forming material was derived mainly from a mixed source of crust and mantle.

收稿日期: 2015-07-16; 改回日期: 2015-11-13

基金项目: 中国地质调查项目(12120113057300; 12120113057400)及国家自然科学基金项目(41502082)联合资助。

作者简介: 张锋, 男, 1981 年生, 硕士, 工程师, 从事矿产勘查与研究工作; E-mail: cugbzf@163.com。

通讯作者: 李志丹, 男, 1986 年生, 硕士, 工程师, 从事矿产勘查与研究工作; E-mail: cugcug@qq.com。

Key words: Re-Os isotopes; metallogenic ages; Tugurige gold deposit; Urad Middle Banner; Inner Mongolia

About the first author: ZHANG Feng, male born in 1981, master, engages in mineral resources exploration and research; E-mail: cugbzf@163.com.

About the corresponding author: LI Zhi-dan, male, born in 1986, master, engineer, engages in mineral resources exploration and research; E-mail: cugcug@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey program (No. 12120113057300, 12120113057400) and National Natural Science Foundation Project (No. 41502082).

成矿年代学是矿床学研究的重要内容,是分析矿床成因、探讨成矿作用、总结成矿规律的钥匙。辉钼矿 Re-Os 同位素体系具有封闭温度高(约 500℃)^[1]、不易受后期热液、变质和构造事件影响等特点^[2-3],是获得精确成矿年龄的直接手段。另外,由于该体系对成矿过程中地壳物质混入程度高度灵敏^[4],也是示踪成矿物质来源的重要方法。

图古日格金矿位于内蒙古乌拉特中旗海流图镇 310°方向直距 103 km 处,行政区划属巴音杭盖苏木,中心地理坐标:107°34'14"E,42°09'55"N,接近中蒙边界。矿床所属的大地构造位置为宝音图岩浆弧(或称宝音图地块;图 1-A)。宝音图岩浆弧南部马尼图—查干花一带近些年勘查了查干花大型钼矿床、查干德尔斯(Ⅰ)大型钼-铋-钨矿床、查干础鲁中型钨-钼矿床和查干德尔斯(Ⅱ)中型钨矿床等^[5-6],已探明的钼金属量为 40 万 t,铋和钨的储量均在万吨以上^[7]。宝音图地块北部近年来与超基性岩相关的铜镍矿也取得突破,新发现的达布逊镍钴矿达到中型规模,特颇格日图铁镍矿点潜力较大^[8],该地区同时发育图古日格、查干此老、二三八地等金矿床及一系列金矿化点。

图古日格金矿(包括原巴音杭盖金矿)由核工业二〇八大队于 1995 年在图古日格地区发现了 7 号带和 8 号金矿体,同期开展了堆浸实验。1996 年 12 月,中国人民武装警察部队黄金第十一支队提交了《内蒙古自治区巴音杭盖金矿区普查报告》。1996 年 12 月核工业西北地质局二〇八大队提交《乌中旗图古日格金矿区 1007、1008 号矿体储量说明书》。在 1996—2007 年,为进行矿山生产开展了大量地质工作,2007 年 4 月核工业二〇八大队提交了《内蒙古自治区乌拉特中旗图古日格矿区金矿资源储量核实报告》。2010 年 5 月核工业二〇八大队提交了《内蒙古自治区乌拉特中旗图古日格矿区岩金

矿生产详查报告》,探获金金属量 10.6 t,达到中型规模。图古日格金矿发现以来,陈祥等^[9-10]、曹海清等^[11]开展了稀土元素及同位素地球化学研究;王辉^[12]描述了矿床地质特征并探讨了找矿方向。迄今为止,有关该矿床的成岩成矿年代学研究一直欠缺,本文针对图古日格金矿床含金石英脉中共生的辉钼矿进行了 Re-Os 同位素测年,首次获得了图古日格金矿床的高精度成矿年龄。

1 区域地质

宝音图岩浆弧位于索伦蛇绿构造混杂岩带与华北北缘断裂带之间,隆起两侧为中、新生代盆地,隆起与盆地以深大断裂接触(图 1-A)。下元古界宝音图群构成区域结晶基底,分 3 个岩组:石英岩变粒岩组(Pt₁by¹)为浅灰、黄灰色石英岩、变粒岩夹二云石英片岩;石榴片岩组(Pt₁by²)为灰、深灰色石榴二云石英片岩、石榴白云片岩夹片状含石榴白云母石英岩、二云石英片岩及蓝闪片岩透镜体;石英岩大理岩组(Pt₁by³)为浅灰色、灰白色石英岩、大理岩夹灰色石榴石蓝晶石二云片岩及云母石英片岩(图 1)。宝音图群基性火山岩 Sm-Nd 全岩等时线年龄为(2485±128) Ma^[13],宝音图地块变质侵入体和宝音图群石英岩的锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年限定宝音图群形成时代晚于 1426 Ma,碎屑锆石显示华北克拉通物源属性^[14]。白垩系上统(K₂)砖红色泥岩、砂岩、砂砾岩层及新生界陆相沉积构成沉积盖层(图 1-B)。

区内岩浆活动频繁,从超基性岩到酸性岩均有出露。区域内片麻状花岗岩(Pt₁γ),石炭纪片麻状闪长岩(C₁δ)、英云闪长岩(C₂γo)及二长花岗岩(C₂ηγγ)广泛发育,二叠纪似斑状花岗岩少量分布。花岗岩脉、花岗闪长岩脉、石英斑岩脉、石英脉等各类脉岩广泛分布(图 1-B)。

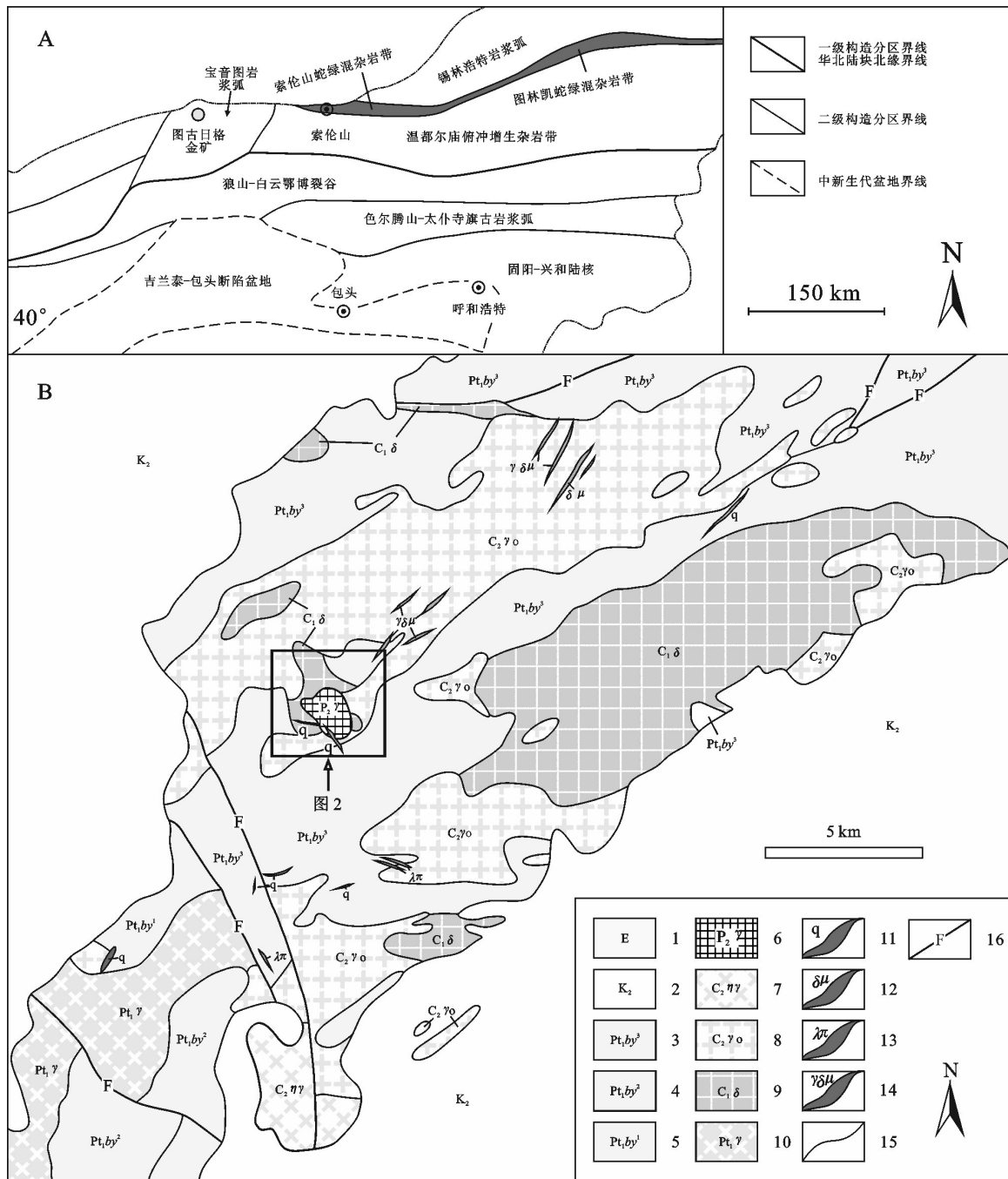


图1 图古日格金矿大地构造位置及区域地质简图(A据[15];B据[16])

1—浅棕色、灰白色砂岩及砂砾岩;2—砖红、棕红色泥岩、砂岩、砂砾岩;3—宝音图群石英岩大理岩组;4—石榴片岩组;5—石英岩变粒岩组;6—黄灰色中细粒似斑状花岗闪长岩;7—灰白色中细粒二长花岗岩;8—灰白色中细粒云英岩化、白云母化英云闪长岩;9—灰、灰绿色片麻状闪长岩;10—片麻状花岗岩;11—石英脉;12—闪长玢岩脉;13—石英斑岩脉;14—花岗闪长玢岩脉;15—地质界线;16—断裂

Fig. 1 The tectonic location (A) and simplified regional geological map (B) of the Tururige gold deposit

1—Light brown-gray sandstone and glutenite; 2—Brick red-brownish red mudstone, sandstone and glutenite; 3—Quartzite-marble Formation of Baoyintu Group; 4—Garnet schist Formation of Baoyintu Group; 5—Quartzite-granulite Formation of Baoyintu Group; 6—Yellow gray medium-fine grained porphyreous granodiorite; 7—Gray medium-fine grained monzonitic granite; 8—Gray medium-fine grained greisenization muscovitization tonalite; 9—Gray-grayish-green gneissic diorite; 10—Gneissic granite; 11—Quartz vein; 12—Dioritic porphyrite vein; 13—Quartz porphyry vein; 14—Granodiorite porphyry vein; 15—Geological boundary; 16—Fault

区域断裂构造十分发育,多为逆断层,主体呈NE向,在区域南部发育NNW和NW向断层(图1-B)。宝音图群变形强烈,以紧密线型褶皱为主,常见倒转褶皱,次一级的紧密小褶皱屡见不鲜,褶皱轴方向以NE向为主,次为NNE和NEE向,局部因受后期构造变动影响,褶皱轴呈“S”型弯曲舒缓延伸。

2 矿床地质

图古日格金矿区地层简单,仅见下元古界宝音图群上岩段(Pt_1by^3),岩性组合为浅灰色、灰白色石英岩、大理岩夹灰色石榴石蓝晶石二云片岩及云母石英片岩(图2)。

矿区岩浆活动频繁,发育有石炭纪闪长岩

($C_1\delta$)、石炭纪透闪石岩($C_1\Sigma$)、石炭纪英云闪长岩($C_2\gamma o$)、二叠纪似斑状花岗闪长岩($P_2\gamma$)(图2)。其中,闪长岩($C_1\delta$)主要由石英、角闪石、斜长石、绿帘石、白(绢)云母、碳酸盐矿物及不透明矿物等组成;透闪石岩($C_1\Sigma$)呈岩盖状侵入蚀变闪长岩中,主要成分为柱状角闪石和普通角闪石;英云闪长岩($C_2\gamma o$)主要由斜长石、石英、白云母组成;似斑状花岗闪长岩($P_2\gamma$)呈岩基状大面积分布,主要成分为长石、石英、黑云母和少量角闪石(图3-A)。

矿区未见大型褶皱及断裂构造,主要发育走向 117° 和 140° 的两组被矿化石英脉充填的小断裂。

矿区石英脉呈北西向穿插于各类岩体与地层中,形成以北西向为主的多条矿体。石英脉宽度在

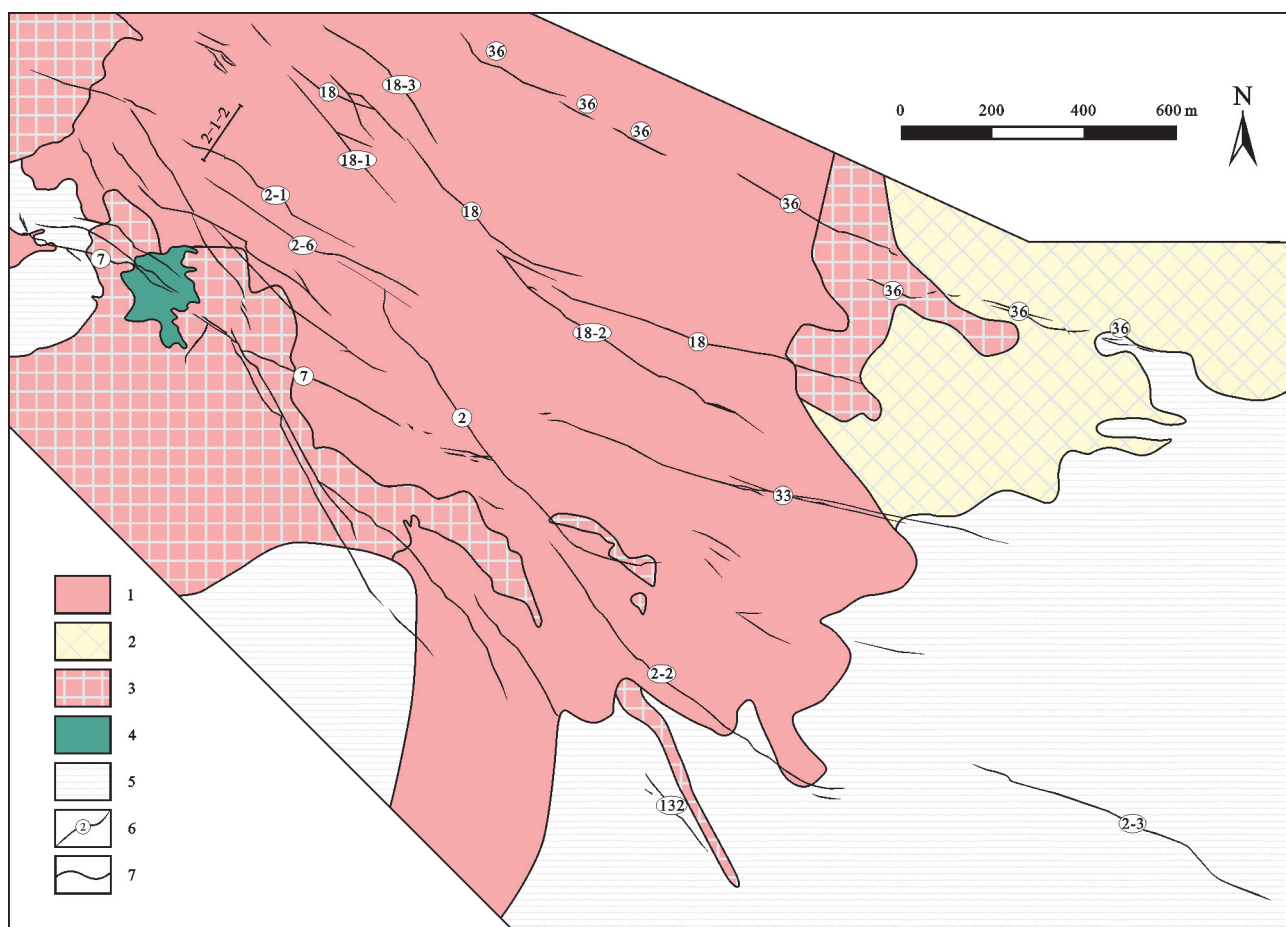


图2图古日格金矿区地质图(据[16]修改)

1—二叠纪似斑状花岗闪长岩;2—石炭纪英云闪长岩;3—石炭纪闪长岩;4—石炭纪透闪石岩;5—下元古界宝音图群上段;
6—金矿体及编号;7—地质界线

Fig. 2 Geological map of the Tugurige gold ore district (modified after reference [16])

1—Permian porphyreous granodiorite; 2—Carboniferous tonalite; 3—Carboniferous diorite; 4—Carboniferous tremolite rock; 5—Upper Formation of Lower Proterozoic Baoyintu Group; 6—Gold orebody and its serial number; 7—Geological boundary

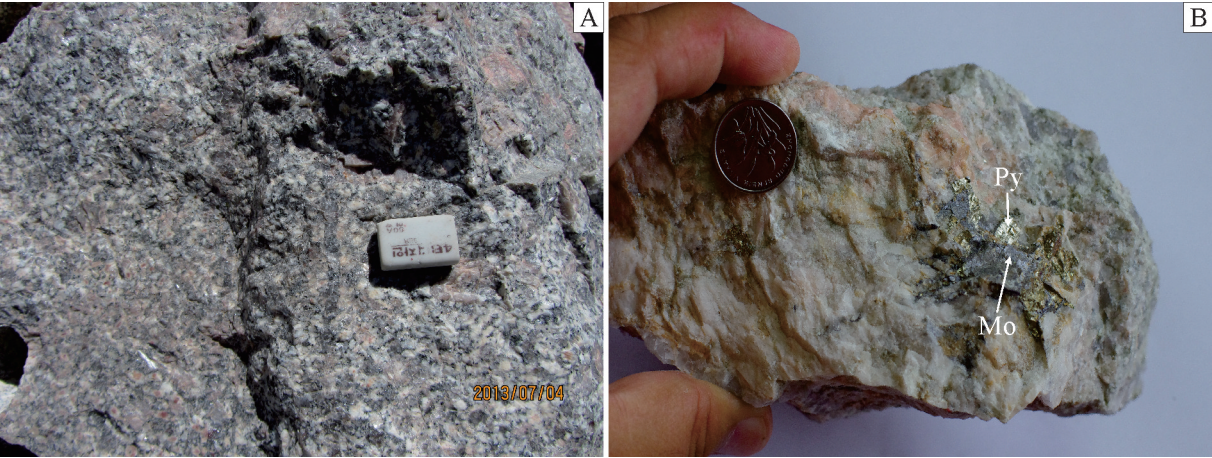


图3 图古日格金矿床似斑状花岗闪长岩(A)及黄铁矿(Py)-辉钼矿(Mo)-石英脉金矿石(B)
Fig. 3 Porphyroblast granodiorite (A) and pyrite-molybdenite-quartz gold ore (B) of the Tugurige gold deposit

0.1~2.3 m,长度从几十米到上千米不等。地表发育69条含金石英脉型矿体,其中较大矿脉有7、2-1、2-3,单脉长600~1600 m,宽0.8~2.0 m。虽然局部有膨胀收缩、分支复合、尖灭再现、尖灭侧现的现象,但主体走向、倾向延伸相对稳定(图4)。

主要金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、自然金,少量辉钼矿(图3-B)。脉石矿物为石英、方解石等。围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化等。

3 样品采集及分析测试

3.1 样品及分析方法

用于Re-Os同位素定年的辉钼矿样品来自图古日格金矿2号主脉2号斜井内采出的石英脉型金矿石,辉钼矿呈细脉状产出于石英脉裂隙中,或呈团块状与石英脉中的黄铁矿共生(图3-B)。样品分选工作在廊坊宇能岩石矿物分选服务有限公司完成,分选时用常规方法将样品粉碎至60~80目,经淘洗和磁选后,在双目镜下分选纯度达99%以上的辉钼矿,最后用玛瑙研钵研磨至200目,用于开展Re-Os同位素组成分析测试。

样品测试工作在国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室完成。测试时采用Carius管封闭溶液分解样品,然后使用美国TJA公司生产的电感耦合等离子体质谱仪TJA X-series ICP-MS测定同位素比值,对于Re:选择质量数185、187,用190监测Os。对于Os:选择质量数为186、187、188、189、190、

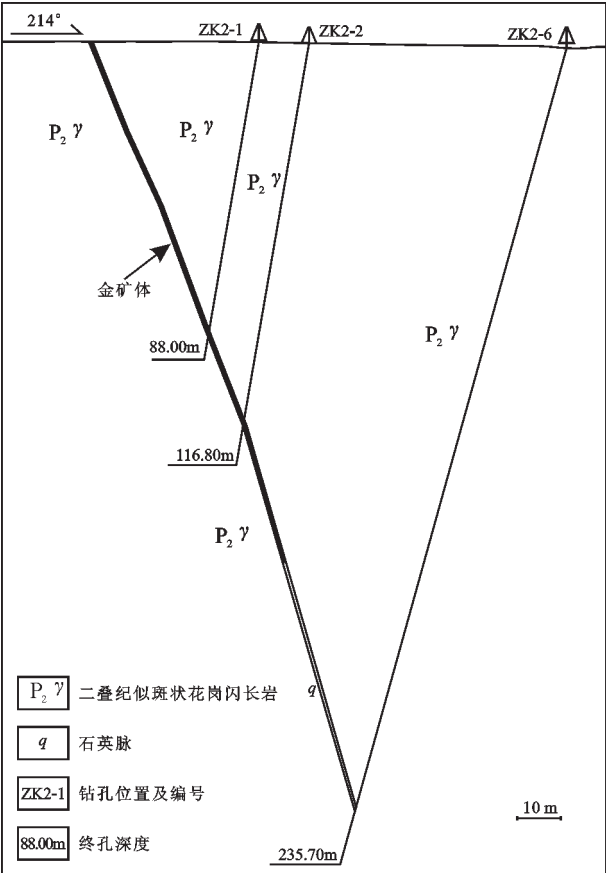


图4 图古日格金矿2-1号矿体2号勘探线剖面图
(据[16]修改)
Fig. 4 Geological section along No. 2 exploration line of No. 2-1 orebody in the Tugurige gold deposit (modified after reference [16])

192,用 ^{185}Re 监测 Re 。TJA X-series ICP-MS测得的 Re 、 Os 、 ^{187}Os 的空白值分别为 $(0.0024\pm 0.0003)\times 10^{-9}$ 、 $(0.00036\pm 0.00005)\times 10^{-9}$ 、 $(0.00002\pm 0.00002)\times 10^{-9}$,远小于所测样品和标样中 Re 、 Os 的含量,不会影响实验结果。普 Os 是根据原子量表和同位素丰度表,通过测量 $^{192}\text{Os}/^{190}\text{Os}$ 比值计算得出^[17-18]。 Re 、 Os 含量的不确定度主要包括:样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差,置信水平95%,由于采用混合稀释剂,模式年龄的不确定度不包括稀释剂和样品的称量误差,但还包括衰变常数的不确定度(1.02%),模式年龄置信水平95%。实验以国家标准物质(GBW04435 (HLP))为表样来监控化学流程和分析数据的可靠性。标样(HLP)的 Re 、 ^{187}Os 及模式年龄与标准值在误差范围内完全一致(表1),因此所测得的辉钼矿数据准确可靠。 Re 和 Os 的分离及质谱测试详细过程参见文献^[19-22]。

3.2 测试结果

图古日格金矿床6件辉钼矿样品的分析测试结果见表2,其中样品14TG-1作为平行样测试了2次。辉钼矿中普通 Os 含量很低,几乎所有的 ^{187}Os 都来自于 ^{187}Re 的 β 衰变,可以通过 ^{187}Re 和 ^{187}Os 的含量来计算模式年龄,模式年龄计算所用公式为: $t=1/\lambda[\ln(1+^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$,其中 ^{187}Re 衰变常数 $\lambda=1.666\times 10^{-11}/\text{a}$ ^[23]。计算结果表明,辉钼矿样品的模式年龄变

化范围相对较窄,为 $(306.5\pm 4.2)\text{ Ma}$ ~ $(318.4\pm 4.4)\text{ Ma}$,加权平均年龄为 $(313.5\pm 4.8)\text{ Ma}$, $(\text{MSWD}=6.3)$ (图5)。利用Isoplot软件对样品进行等时线年龄拟合(图6),所有样品均排列在一条直线上,构成一条相关性很好的 ^{187}Re - ^{187}Os 等时线,获得的等时线年龄为 $(305.6\pm 4.5)\text{ Ma}$, $(\text{MSWD}=6.6)$,两者结果相近,均为晚石炭世。

4 讨 论

4.1 成矿时代

本次工作测得的图古日格金矿中辉钼矿 Re - Os 等时线年龄为 $(305.6\pm 4.5)\text{ Ma}$ 、模式年龄为 $(313.5\pm 4.8)\text{ Ma}$,代表了金成矿作用的年龄,证实图古日格金矿是晚石炭世构造-岩浆活动的产物。矿区容矿似斑状花岗岩的成岩时代可能也并非原先认为的二叠纪,而很可能不晚于晚石炭世。图古日格金矿成矿时代明显老于宝音图隆起区南部查干德尔斯钼矿床(辉钼矿 Re - Os 等时线年龄 $(243.0\pm 2.2)\text{ Ma}$ ^[24])、查干花钼矿床(Re - Os 等时线年龄 $(242.7\pm 3.5)\text{ Ma}$ ^[25])的形成时代,但晚于境外欧玉陶勒盖铜(金)矿的形成时代(辉钼矿 Re - Os 年龄 $373\sim(370\pm 1.2)\text{ Ma}$ ^[26])。与内蒙古中西部金矿床相比,图古日格金矿成矿时代也老于浩尧尔忽洞 $(246\sim 270\text{ Ma})$ ^[27-28]、朱拉扎嘎金矿(石英 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, $(282.3\pm 0.9)\text{ Ma}$ ^[29];成矿期花岗斑岩和成矿后闪长玢岩 SHRIMP

表1 实验标准物质标准值和测定结果

Table 1 Certificated values and analytical data of Re - Os isotope for standard sample

编号	样重/g	$\text{Re}/10^{-6}$		$^{187}\text{Os}/10^{-9}$		模式年龄/Ma	
		数值	2σ	数值	2σ	数值	2σ
GBW04435 (HLP)		283.8 (标准值)	6.2	659.0 (标准值)	14.4	221.4	5.6
141020-23	0.01108	277.3 (测定值)	2.4	642.6 (测定值)	3.7	220.9 (测定值)	3.1

表2 图古日格金矿辉钼矿 Re - Os 同位素数据

Table 2 Re - Os isotopic data of molybdenite from the Tugurige gold deposit

样品名	样重/g	$\text{Re}/10^{-6}$		普 $\text{Os}/10^{-9}$		$^{187}\text{Re}/10^{-6}$		$^{187}\text{Os}/10^{-9}$		模式年龄/Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
14TG-1	0.00128	59.78	0.40	8.561	2.178	37.57	0.25	199.0	1.5	317.1	4.4
14TG-1	0.00507	55.44	0.44	0.6569	0.2122	34.85	0.28	183.6	1.2	315.5	4.5
14TG-2	0.00114	71.89	0.45	0.4146	0.4479	45.19	0.28	232.4	1.7	307.9	4.2
14TG-3	0.00099	307.7	2.1	1.108	0.605	193.4	1.3	990.1	6.5	306.5	4.2
14TG-4	0.00112	81.86	0.53	1.052	0.940	51.45	0.33	273.6	2.0	318.4	4.4
14TG-6	0.00148	42.42	0.34	0.3396	0.9303	26.66	0.21	141.6	1.0	317.9	3.3
14TG-7	0.00510	223.7	1.6	0.3055	0.1594	140.6	1.0	726.3	4.4	309.3	4.2

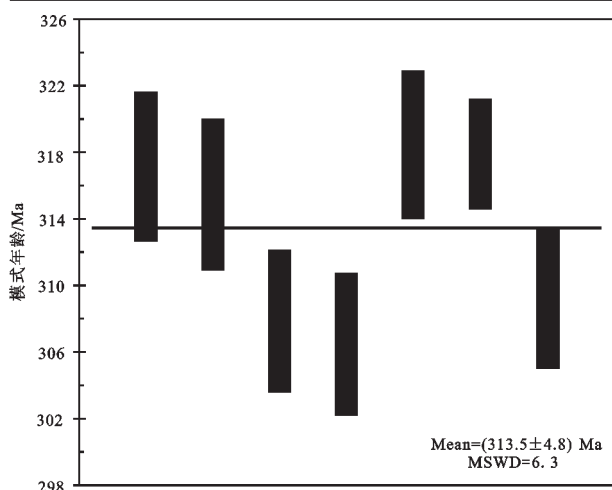


图5 图古日格金矿辉钼矿 Re-Os 年龄加权平均图

Fig.5 Weighted average of Re-Os model age of molybdenites from the Tugurige gold deposit

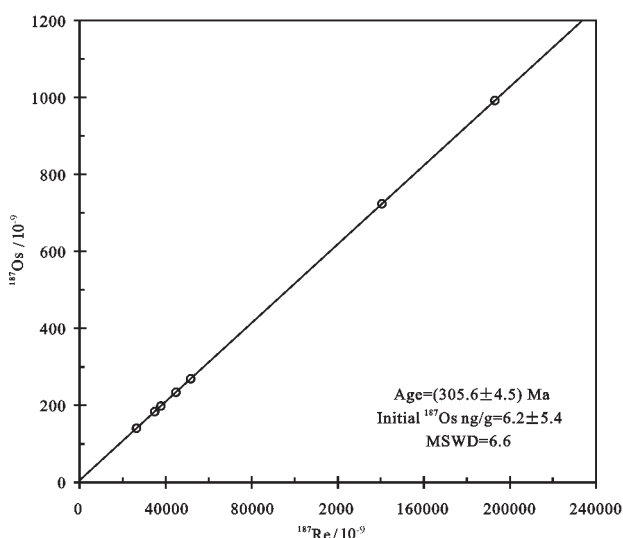


图6 图古日格金矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig.6 Re-Os isochron of molybdenites from the Tugurige gold deposit

锆石 U-Pb 年龄限定成矿时代为 280 Ma^[30]、大青山地区后石花金矿(辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (281.9±1.8) Ma^[31])、四子王旗夏尔楚鲁金矿床(辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (263.8±4.4) Ma^[32])的成矿时代,但比哈达门沟金矿成矿年轻(辉钼矿 Re-Os 等时线为 (386.6±6.1) Ma^[33])。

4.2 成矿物质来源

前人研究表明,Re-Os 同位素体系对硫化物形

成过程中地壳物质的混入程度高度灵敏^[4]。由于 Re 更倾向于在地幔或基性、超基性岩石中富集^[3],因此 Re 含量可作为指示金属矿床成矿物质来源的示踪剂^[4,34]。Mao et al.^[34]综合分析了各种类型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量,发现从地幔来源到壳幔混源再到地壳来源,Re 含量呈数量级下降,从 $n \times 10^{-4} \rightarrow n \times 10^{-5} \rightarrow n \times 10^{-6}$ 。图古日格金矿 5 件辉钼矿样品的 Re 含量介于 $42.42 \times 10^{-6} \sim 81.86 \times 10^{-6}$,2 件样品 Re 含量为 223.7×10^{-6} 和 307.7×10^{-6} ,暗示成矿物质可能为壳幔混合来源,同样陈祥等^[10]、曹海清等^[11]也均认为成矿物质来源为壳幔混源。

5 结 论

(1)图古日格金矿位于宝音图岩浆弧,金矿体主要为含金石英脉,呈 NW 向穿插于似斑状花岗岩及其外围岩体中,主要金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿等,脉石矿物为石英、方解石等。发育硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化等围岩蚀变。

(2)图古日格金矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (305.6±4.5) Ma、模式年龄为 (313.5±4.8) Ma,限定图古日格金矿是晚石炭世构造-岩浆活动的产物。

(3)图古日格金矿辉钼矿样品的 Re 含量介于 $42.42 \times 10^{-6} \sim 307.7 \times 10^{-6}$,显示成矿物质可能为壳幔混合来源。

致谢:感谢审稿专家和责任编辑提出的宝贵修改意见!

参考文献(References):

- [1] Suzuki K, Shimizu H, Masuda A. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 3151-3159.
- [2] Stein H J, Sundblad K, Markey R, et al. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kiviso, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting[J]. *Mineral Deposita*, 1998, 33: 329-345.
- [3] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 2001, 13(6): 479-486.
- [4] Foster J G, Lambert D D, Frick L R, et al. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archean nickel ores from uncontaminated komatiites[J]. *Nature*, 1996, 382(6593): 703-706.

- [5] 刘敬党, 梁帅, 肖荣阁, 等. 内蒙古宝音图钨矿成矿岩体地球化学、年代学及成因研究[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 149–168.
Liu Jingdang, Liang Shuai, Xiao Rongge, et al. Geochemistry, geochronology and petrogenesis of the ore-forming intrusive body in the Baoyintu molybdenum deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 149–168(in Chinese with English abstract).
- [6] 梁帅, 刘敬党, 肖荣阁, 等. 内蒙古查干敖包钨矿 Re–Os 同位素年龄及成矿作用研究[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 224–234.
Liang Shuai, Liu Jingdang, Xiao Rongge, et al. Re–Os isotopic ages and mineralization of the Qagan Obo molybdenite deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 224–234(in Chinese with English abstract).
- [7] 席忠, 张志刚, 贾立炯, 等. 内蒙古马尼图–查干花大型钨–铋–钨矿化区的发现及地质意义[J]. 地球学报, 2010, 31(3): 466–468.
Xi Zhong, Zhang Zhigang, Jia Lijiong, et al. The discovery of the Manitu–Chaganhua large-size Mo–Bi–W mineralized district, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(3): 466–468(in Chinese with English abstract).
- [8] 马娟. 内蒙古特颇格日图超基性岩特征及成矿潜力研究(硕士论文)[D]. 四川: 成都理工大学, 2010:1–54.
Ma Juan. Tepogeritu ultrabasic Rock Bodies Characteristics and Metallogenic Potentiality, Inner Mongolia[D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2010:1–54(in Chinese with English abstract).
- [9] 陈祥, 肖力, 柯真奎, 等. 内蒙古巴音杭盖金矿床稀土元素及同位素研究[J]. 黄金地质, 2000, 6(1): 38–43.
Chen Xiang, Xiao Li, Ke Zhenkui, et al. The study of REE and isotopes in the Bayinhanggai gold deposit, Inner Mongolia[J]. Gold Geology, 2000, 6(1):38–43(in Chinese with English abstract).
- [10] 陈祥, 肖力, 柯真奎, 等. 内蒙古巴音杭盖金矿床稳定同位素研究[J]. 内蒙古地质, 2001, 99(2): 1–6.
Chen Xiang, Xiao Li, Ke Zhenkui, et al. The study of stable isotopes in Bayinhanggai gold deposit in Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Geology, 2001, 99(2): 1–6(in Chinese with English abstract).
- [11] 曹海清, 翁立猛, 夏庆贺, 等. 巴音杭盖金矿成因分析[J]. 矿业工程, 2008, 6(1): 11–13.
Cao Haiqing, Weng Limeng, Xia Qinghe, et al. Analysis of genesis of Bayinhanggai gold ore deposit[J]. Mining Engineering, 2008, 6(1): 11–13(in Chinese with English abstract).
- [12] 王辉. 图古日格金矿基本地质特征及找矿方向[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(增刊): 153–157.
Wang Hui. The geological characteristics and prospecting direction of Tugurige Gold deposit[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2010, 29(supp.): 153–157(in Chinese).
- [13] 徐备, 刘树文, 王长秋, 等. 内蒙古西北部宝音图群 Sm–Nd 和 Rb–Sr 地质年代学研究[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 86–90.
Xu Bei, Liu Shuwen, Wang Changqiu, et al. Sm–Nd, Rb–Sr geochronology of the Baoyintu group in Northwestern Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2000, 46(1): 86–90(in Chinese with English abstract).
- [14] 孙立新, 赵凤清, 王惠初, 等. 内蒙古狼山地区宝音图地块变质基底的锆石 U–Pb 年龄及构造意义[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 197–207.
Sun Lixin, Zhao Fengqing, Wang Huichu, et al. Zircon U–Pb geochronology of metabase rocks from the Baoyintu block in the Langshan area, Inner Mongolia, and its tectonic significance[J]. Acta Geological Sinica, 2013, 87(2): 197–207(in Chinese with English abstract).
- [15] 张玉清, 张明, 贺锋, 等. 内蒙古自治区矿产资源潜力评价成果报告[R]. 内蒙古国土资源厅, 2011.
Zhang Yuqing, Zhang Ming, He Feng et al. Mineral resource potential assessment report of Inner Mongolia[R]. Office of Land and Resources of Inner Mongolia, 2011 (in Chinese).
- [16] 王辉, 邵国钰, 赵宇川, 等. 内蒙古自治区乌拉特中旗图古日格矿区岩金矿生产详查报告[R]. 核工业二〇八大队, 2010.
Wang Hui, Shao Guoyu, Zhao Yuchuan, et al. General exploration report of Tugurige gold deposit, Urad Middle Banner, Inner Mongolia[R]. No. 208 Geologic Party of China National Nuclear Corporation, 2010(in Chinese).
- [17] Bohlke J K, de Laeter J R, De Bièvre P, et al. Isotopic compositions of the elements[J]. J. Phys. Chem. Ref. Data, 2001, 34(1): 57–67.
- [18] Wieser M E. Atomic weights of the elements 2005 (iupac technical report)[J]. Pure Appl. Chem., 2006, 78(11): 2051–2066.
- [19] Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low-blank rhenium–osmium analysis[J]. Anal. Chem., 1995, 67(13):2136–2141.
- [20] 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 等. Carius 管溶样–负离子热表面电离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).
- [21] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, et al. Preparation and certification of Re–Os dating reference materials: molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 2004, 28 (1): 41–52.
- [22] 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): 254–262.
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): 254–262.
- [23] Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re–Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites[J]. Science, 1996, 271: 1099–1102.

- [24] 蔡明海, 张志刚, 屈文俊, 等. 内蒙古乌拉特后旗查干花钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. 地球学报, 2011, 32(1): 64-68.
Cai Minghai, Zhang Zhigang, Qu Wenjun, et al. Geological characteristics and Re-Os dating of the Chaganhua molybdenum deposit in Urad Rear Banner, Western Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(1): 64-68(in Chinese with English abstract).
- [25] 蔡明海, 彭振安, 屈文俊, 等. 内蒙古乌拉特后旗查干德尔斯钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. 矿床地质, 2011, 30(3): 377-384.
Cai Minghai, Peng Zhen'an, Qu Wenjun, et al. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Chagandeersi molybdenum deposit, western Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(3): 377-384(in Chinese with English abstract).
- [26] Kirwin D J, Forster C N, Kavalieris I, et al. The Oyu Tolgoi Copper-Gold deposit, South Gobi, Mongolia[C]//Seltmann R, Gerel O, Kirwin D J (eds.). Geodynamics and Metallogeny of Mongolia with a special emphasis on copper and gold deposit. IAGOD Guidebook Series 11, London, 2005: 155-174.
- [27] 王建平, 刘家军, 江向东, 等. 内蒙古浩尧尔忽洞金矿床黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 测年及其地质意义[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 643-644.
Wang Jianping, Liu Jiajun, Jiang Xiangdong, et al. Biotite ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating and its geological significance of Haoyaoerhudong gold deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(S1): 643-644.
- [28] 曹毅, 聂凤军, 肖伟, 等. 初论内蒙古长山壕金矿床的成矿时限[J]. 岩石学报, 2014, 30(7): 2092-2100.
Cao Yi, Nie Fengjun, Xiao Wei, et al. Metallogenic age of the Changshanhao gold deposit in Inner Mongolia, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(7): 2092-2100(in Chinese with English abstract).
- [29] 李俊建, 骆辉, 周红英, 等. 内蒙古阿拉善地区朱拉扎嘎金矿的成矿时代[J]. 地球化学, 2004, 33(6): 663-669.
Li Junjian, Luo Hui, Zhou Hongying, et al. Metallogenic epoch of Zhulazaga gold deposit in Alxa area, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Geochimica, 2004, 33(6): 663-669(in Chinese with English abstract).
- [30] 李俊建, 翟裕生, 杨永强, 等. 再论内蒙古阿拉善朱拉扎嘎金矿的成矿时代: 来自锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的新证据[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 178-184.
Li Junjian, Zhai Yusheng, Yang Yongqiang, et al. Re-discussion on the metallogenic age of Zhulazaga gold deposit in Alashan Area, Inner Mongolia: Evidence from zircon SHRIMP age[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 178-184(in Chinese with English abstract).
- [31] 王梁, 王根厚, 雷时斌, 等. 内蒙武川后石花金矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2015, 51(3): 422-431.
Wang Liang, Wang Genhou, Lei Shibin, et al. Re-Os dating of molybdenites from the Houshihua gold deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia and its geological significance[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(3): 422-431(in Chinese with English abstract).
- [32] 王佳新, 聂凤军, 张雪旒, 等. 内蒙古夏尔楚鲁金矿床辉钼矿铼-钼同位素年龄及成矿事件[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2386-2393.
Wang Jiaxin, Nie Fengjun, Zhang Xueni, et al. Re-Os dating of molybdenite separated from the Xiaerchulu Au deposit, Inner Mongolia and the Mineralization[J]. Acta Geological Sinica, 2014, 88(12): 2386-2393(in Chinese with English abstract).
- [33] 侯万荣, 聂凤军, 杜安道, 等. 内蒙古包头哈达门沟地区泥盆纪金(钼)矿化事件厘定的同位素证据[J]. 地质论评, 2011, 57(4): 583-590.
Hou Wanrong, Nie Fengjun, Du Andao, et al. Isotopic evidence for determining the Devonian gold and molybdenum mineralization in the Hadamengou Area, Baotou, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2011, 57(4): 583-590(in Chinese with English abstract).
- [34] Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the Northern Qilian mountains and its geological significance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(11/12): 1815-1818.