

梁帅, 刘敬党, 肖荣阁, 等. 内蒙古查干敖包钼矿 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).

内蒙古查干敖包钼矿 Re-Os 同位素年龄 及成矿作用研究

梁 帅¹ 刘敬党^{1,2} 肖荣阁³ 张艳飞² 翟富荣⁴

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁省化工地质勘查院 地勘院, 辽宁 锦州 121000;
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 辽宁省地质勘查院 地勘院, 辽宁 大连 116000)

摘要: 内蒙古查干敖包钼矿是宝音图钼矿区矿床之一, 为狼山北段发现的斑岩白云母石英脉型钼矿, 成矿岩体主要为钾长花岗岩、细晶花岗岩和花岗斑岩, 岩体锆石 U-Pb 平均年龄为(253.5±3.3) Ma。本次研究测得查干敖包辉钼矿的¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os 等时线年龄为(239.2±5.8) Ma, 与成矿岩体时代相差约 13 Ma, 反映钼矿床的形成经历了较长的成岩成矿演化历史。查干敖包钼矿床具有斑岩矿床特点, 矿床产于成矿岩体内接触带, 但是矿化形成于白云母石英脉中, 主要与白云母热液矿物有关, 因此是一种特殊的斑岩型钼矿床。

关键词: 辉钼矿 ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os 年龄; 斑岩白云母石英脉型钼矿; 锆石 U-Pb 年龄; 矿床成因

中图分类号: P597⁺.3; P618.65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)01-0224-11

Re-Os isotopic ages and mineralization of the Qagan Obo molybdenite deposit, Inner Mongolia

LIANG Shuai¹, LIU Jing-dang^{1,2}, XIAO Rong-ge³, ZHANG Yan-fei², ZHAI Fu-rong⁴

(1. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. Liaoning Chemical Geological Exploration College, Jinzhou 121000, Liaoning, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Geological Exploration Institute of Liaoning Academy of Geological Exploration, Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract: The Qagan Obo molybdenum deposit was discovered in the northern part of the Langshan Mountain. It is a porphyry muscovite quartz vein type deposit, and the ore-forming rock bodies are mainly K-feldspar granite, fine-grained granite and granite porphyry, with the zircon U-Pb mean age of (53.5 ± 3.3) Ma. Molybdenite ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os isochron age of the Qagan Obo molybdenum deposit is (239.2 ± 5.8) Ma, with the rock-forming and ore-forming time difference being about 13 Ma, suggesting that the formation of the Qagan Obo molybdenum deposit experienced a long rock-forming and ore-forming evolution history. The Qagan Obo molybdenum deposit has the characteristics of the porphyry deposit, the ore deposit occurs in the inner contact zone with the country rock, but the mineralization took place in muscovite quartz veins, mainly related to hydrothermal mineral muscovite. The deposit is therefore a special kind of porphyry molybdenum deposit.

收稿日期: 2014-07-16; 改回日期: 2014-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40073013)和内蒙古自治区地质矿产勘查开发局勘查项目(NMKD2008-01)联合资助。

作者简介: 梁帅, 男, 1986年生, 博士生, 从事矿床地质研究; E-mail: ls476476@163.com。

Key words: molybdenite ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os age; muscovite quartz vein-type molybdenum deposit; zircon U-Pb age; genesis

About the first author: LIANG Shuai, male, born in 1986, doctor candidate, engages in the study of geology and mineral resources, E-mail: ls476476@163.com.

内蒙古宝音图钼矿区是2008年以来在华北地台北缘中生代岩浆岩带内发现的大型钼、伴生钨铜多金属矿床,大地构造位于华北地台北缘、狼山裂谷西侧的宗乃山—沙拉山构造带内,夹持于阿拉善断裂带和恩格尔乌苏断裂带两条北东向区域性断裂之间(图1)^[1-3]。矿区从北向南由查干楚鲁、查干花、查干敖包和查干德尔斯4个矿段组成(图2)。一些学者对宝音图钼矿的矿床成因、成矿岩体地球化学特征与成岩成矿年代学进行了相关研究,研究表明宝音图钼矿为一斑岩型钼矿,成矿岩体为高硅、富钾和铝过饱和特征的陆壳熔融型花岗岩,成岩年龄平均为253 Ma,成矿年龄平均为243 Ma^[4-10]。

1 矿区地质概况

查干敖包钼矿区位于华北地台北缘西段东西向构造与北东向构造的转折端,区域上南侧为华北

古陆新元古代白云鄂博及渣尔泰山裂谷带,北侧为海西期古陆边缘增生带。矿区属于古陆边缘隆起带,隆起与裂陷形成相间的构造格局,隆起带上出露下元古界深变质岩,裂谷带内分布中元古界浅变质岩,各带内都分布有海西印支期中酸性侵入岩^[1]。

矿区内宝音图群形成于古元古代早期,属华北地台北缘已知的最古老岩石地层单位,并保留了新元古代末期构造-变质事件的记录^[11-13],宝音图群变质岩大面积出露,总厚度大于5176 m^[1]。矿区宝音图背斜隆起核部主要由青灰色片状石英岩、含石榴二云片岩、浅褐色白云母石英片岩组成,矿区东部岩性为二云石英片岩为主夹石英岩、花岗片麻岩、变粒岩及斜长角闪岩。

矿区内褶皱、断裂构造发育,以NE向断裂构造发育为特征,区域地层、岩体均NE向展布,NE向构造带也控制了成矿岩体及矿床矿化的展布方向。

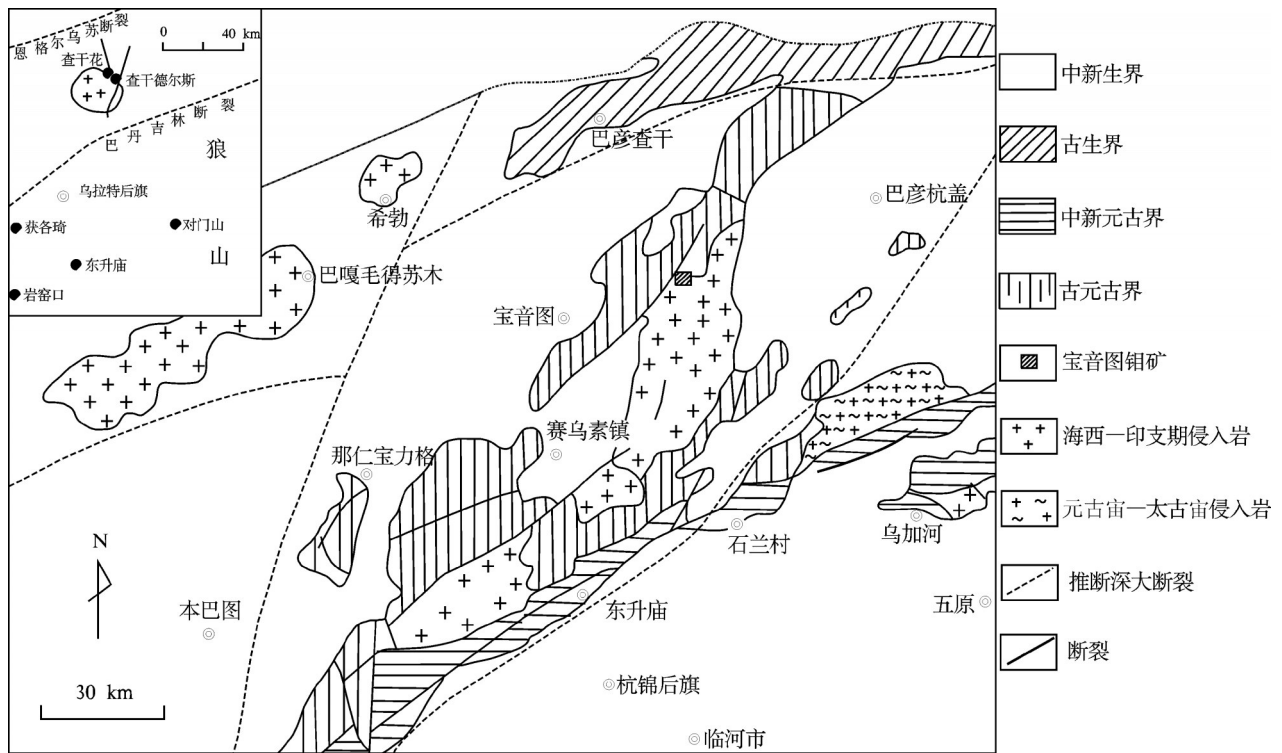


图1 宝音图钼矿区域构造图(据文献[2, 7]改编)

Fig.1 Regional structural map of the Baoyintu molybdenum deposit (modified after references [2, 7])

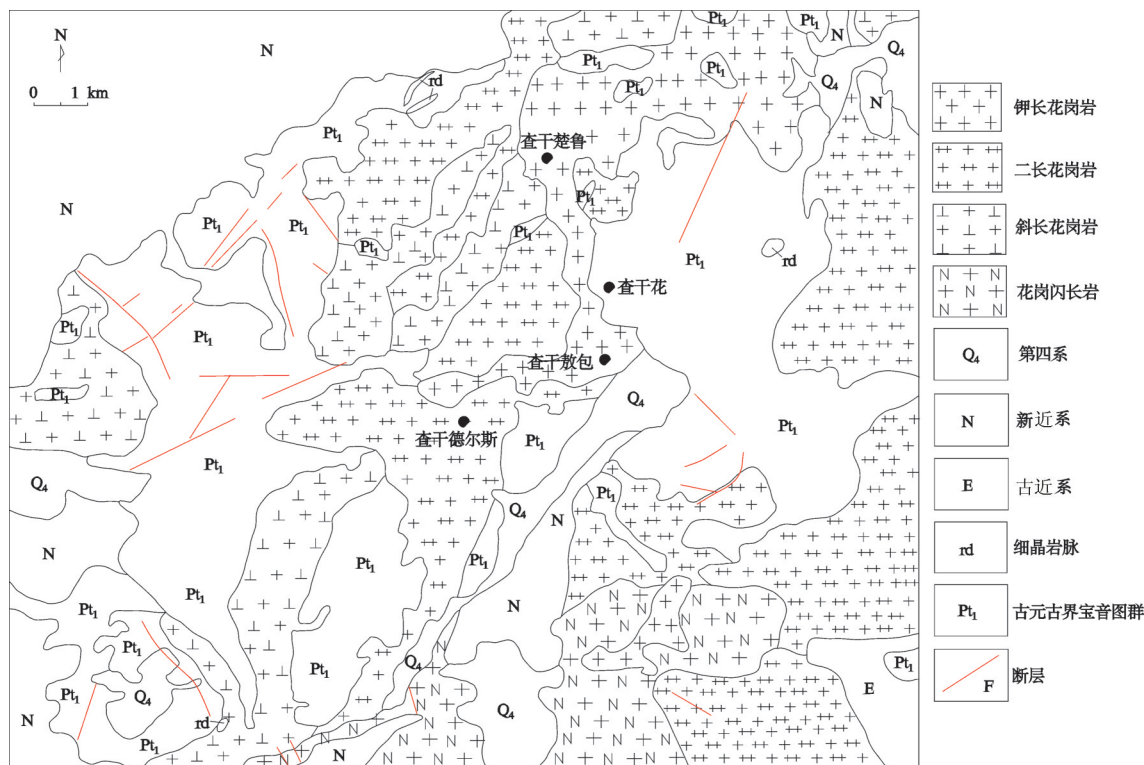


图2 宝音图矿区地质简图

Fig.2 Geological sketch map of the Baoyintu molybdenum deposit

区域内大面积分布印支期斜长花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩及酸性细晶斑岩组成复合岩体,侵入于下元古界宝音图群斜长角闪岩相云母石英片岩、花岗片麻岩、变粒岩夹斜长角闪岩等深变质岩中(图2)。矿区位于复合岩体东部钾长花岗岩及二长花岗岩与变质岩接触带,呈新月形,钾长花岗岩及二长花岗岩中发育的白云母石英脉是主要的矿化体,呈现密集平行细脉带或者大脉带状矿体群。

2 成矿花岗岩

沿宝音图隆起核部侵入于元古界宝音图群变质岩中的花岗岩体,是一个NE-SW向条带状延伸的同源同期不同侵入阶段的复合岩体,区域由西向东依次为斜长花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩和二长花岗岩(图2),无明显界限,呈互相交织关系,其中钾长花岗岩、二长花岗岩岩体与钼成矿关系密切,是主要的含矿岩体,岩体中分布多个细晶花岗岩岩脉、花岗伟晶岩脉和花岗斑岩岩脉。

2.1 岩石学特征

钾长花岗岩: 侵入斜长花岗岩和二长花岗岩

中,呈岩株状产出,为主要含矿母(围)岩;岩石呈浅红褐色、肉红色,中细粒花岗结构,块状构造;主要矿物成分为石英20%~25%,钾长石约60%,斜长石约15%和黑云母约5%;辉钼矿化较好,并伴有不同程度的黄铁矿化、黄铜矿化、绢云母化、高岭土化、绿泥石化和绿帘石化。

二长花岗岩: 多分布于矿区中部及南部,呈面状、脉状和团块状产出,是矿化围岩;岩石呈灰色和黄褐色,中粗粒花岗结构,块状构造;主要矿物成分为石英30%~40%,斜长石30%~35%,钾长石10%~15%,绢云母3%~5%和白云母约3%;见有辉钼矿化,并伴有不同程度的硅化、高岭土化和绢云母化。

细晶花岗岩脉: 肉红色、黄褐色的细粒花岗岩脉,呈岩株状侵入与二长花岗岩和钾长花岗岩中,有钾长细晶岩、二长细晶岩和石英斑岩等,主要矿物为斜长石、钾长石、石英及云母,细粒结构,块状构造。

花岗伟晶岩脉: 主要分布在矿区西部,呈灰白色,伟晶结构,块状构造,矿物成分为石英约20%、钾长石约45%、斜长石约30%和少量的石榴石、电气

石等。

花岗斑岩岩脉:灰褐色,细粒斑状结构,块状构造,矿物成分为石英约20%、长石约65%,见少量白云母。

2.2 岩石化学特征

矿区内成矿花岗岩岩石化学组成均显示铝过饱和, A/CNK 平均为 1.22~1.52; (K₂O+Na₂O) 平均为 6.41%~7.48%, 钾长花岗岩及细晶岩中略高; (K₂O/Na₂O) 平均为 1.1~1.51, 细晶岩最高, 为 1.51; 这些岩石地球化学特征与华北北缘燕山花岗岩带及华南北缘秦岭大别山花岗岩带岩浆岩地球化学特征极其相似^[14-15], 为陆壳岩熔融成因的 S 型花岗岩。

2.3 岩体年龄

刘翼飞等对查干敖包钼矿北部的查干花钼矿成矿花岗岩做过锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测试, 2 个样品所测年龄为 (253.3±2.8) Ma (MSWD=1.17) 和 (253.8±3.7) Ma (MSWD=1.6)^[6], 平均年龄为 (253.5±3.3) Ma, 代表锆石的结晶年龄, 即成矿花岗岩形成于晚二叠世。

3 矿床矿化特征

钼矿床产于钾长花岗岩、二长花岗岩和白云母石英脉中, 矿化白云母石英岩脉呈 NW-NE 疏密相间的交织状, 根据含矿白云母石英脉连续程度及矿化品位, 该矿区划分近 20 条工业矿体矿脉, 长 250~1160 m, 厚 0.6~6 m, Mo 品位为 0.039%~2.438%, 平均为 0.6088%, 矿体受构造裂隙控制, 以充填方式成矿为主, 呈现互相平行的脉状。

矿化白云母石英脉呈密集平行细脉带和大脉型矿体矿脉, 一般在石英大脉之间发育平行的细脉(图 3-a), 石英细脉宽 0.5~7 cm, 石英大脉一般几十厘米, 最宽至几米。细脉单脉延长有限, 但是作为脉体群延伸可以至百米以上, 石英大脉一般延伸都在 200 m 以上。石英脉体产状较陡立, 在 45°~90°, 主矿化石英脉走向方位为 NE-SW 向和 NW-SE 向为主, 晚期石英脉近 EW 向和 SN 向走向, 矿化较弱。

矿脉带构造破碎明显, 一些显示为角砾岩型矿化(图 3-b), 沿石英脉及破碎带两侧局部见浸染状矿化, 沿两侧节理面及裂隙中充填辉钼矿细脉及薄膜状矿化。

矿化石英脉一般呈灰色, 石英脉两侧钾长石化

蚀变(图 3-c), 石英脉边缘及中部含有大量白云母条带(图 3-d), 形成白云母石英脉, 矿化石英脉中几乎都含有白云母, 并且构成本矿床的主要矿石类型, 这是本矿床的重要特征。

矿石金属矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿, 其他金属矿物少见, 共生非金属矿物主要是石英、白云母、绢云母, 并混入大量花岗岩围岩矿物。

镜下鉴定, 鳞片状辉钼矿呈现各种集合体形态或星散状分布于白云母条带中, 在白云母晶间与白云母形成镶嵌共结结构或者在白云母解理缝中形成连晶结构(图 3-e~f)。黄铜矿与辉钼矿共生, 均产于白云母条带中(图 3-g~h)。

4 辉钼矿 Re/Os 同位素测年

4.1 矿石样品

本次研究样品均采自宝音图钼矿查干敖包矿区的钻孔岩心矿石副样, 矿石类型属于白云母石英脉型矿石, 个别样品混入花岗岩碎块, 因此矿石化学成分主要是 SiO₂、Al₂O₃ 和 K₂O, 其他成分含量较低(表 1)。K₂O/Na₂O 均大于 1, 在 1.62~23.54; 明显的铝过饱和, 接近白云母的 Al₂O₃(mol)/K₂O(mol) 比值 3, 个别大于 3 的样品是由于矿石中泥化比较强, Al₂O₃ 构成粘土矿物成分。矿石品位 Mo 为 0.09%~1.16%, Cu 为 0.01%~0.19%; 其中个别样品 Bi 最高达到 0.11%, 达到伴生矿产品位, 可以综合利用。

矿石微量元素中富集 Rb、Ba、Zr, 因此 Rb/Sr、Zr/Y 比值高, Sr/Ba 比值低, 同时与成矿花岗岩明显不同, 矿石中大部分 U 含量高于 Th, 因此 Th/U 小于 1。挥发性元素中富集 F, 含量在 567×10⁻⁶~2644×10⁻⁶。

矿石中稀土含量均较低, 稀土总量一般低于 100×10⁻⁶, 高稀土含量的矿石是由于混入花岗岩碎屑的结果。轻重稀土分异明显, 并显示明显的负钕异常, δEu 为 0.39~0.89。稀土配分曲线平缓的曲线负钕异常明显(图 4-a), 轻重稀土曲线显著右倾的曲线负钕异常较弱(图 4-b), 稀土配分曲线形态与成矿花岗岩类似^[9]。

4.2 Re/Os 同位素测试

首先将野外采集矿石样品, 经过破碎, 镜下分选富矿石中的辉钼矿单矿物, 低品位矿石粉碎至 40~80 目后, 经过仪器分选, 辉钼矿纯度达到 98% 以

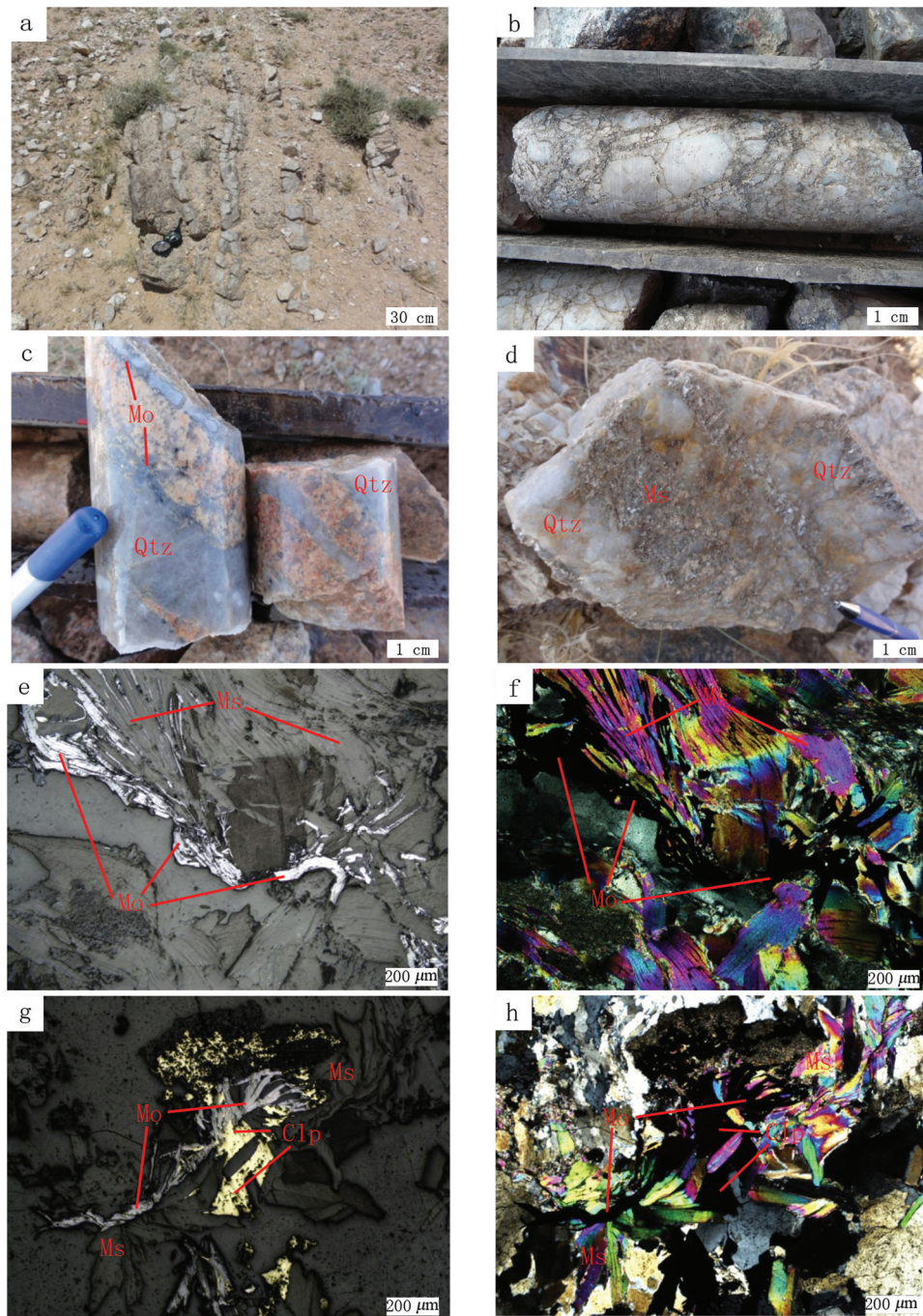


图3 岩石野外和镜下照片

a—地表平行分布的矿化白云母石英脉；b—矿化石英角砾岩脉；c—矿化石英脉边缘辉钼矿；d—含白云母条带矿化石英脉；e、f—灰白色鳞片状辉钼矿呈扇形沿白云母解理缝分布，与白云母形成连晶共生(e为反射光显微照片、f为正交偏光显微照片)；g、h—灰白色鳞片状辉钼矿与铜黄色他形黄铜矿共生，在白云母晶间分布(g为反射光显微照片、h为正交偏光显微照片)；Qtz—石英；Ms—白云母；Mo—辉钼矿；Clp—黄铜矿

Fig.3 Field and microscopic photographs of rocks

a—Surface mineralized muscovite quartz veins in parallel distribution; b—Mineralized quartz breccia veins; c—Molybdenite at the edge of mineralized quartz veins; d—Muscovite-containing stripe mineralized quartz veins; e, f—White scaly molybdenite along the muscovite cleavage seam, exhibiting fanned distribution, and muscovite crystals forming intergrowth (e is reflected light microphotograph, f is crossed nicols microphotograph); g, h—White scaly molybdenum associated with copper yellow anhedral chalcopyrite, distributed in muscovite intergranular space (g is reflected light microphotograph, h is crossed nicols microphotograph); Qtz—Quartz; Ms—Muscovite; Mo—Molybdenite; Clp—Chalcopyrite

表1 同位素矿石样品化学组成
Table 1 isotope chemical composition of the ore sample table

主量元素/%	Mo1	Mo2	Mo3	Mo4	Mo5	Mo6	Mo7	Mo8	Mo9	Mo11	Mo12
SiO ₂	84.71	86.40	87.75	88.20	80.71	85.93	80.93	89.45	80.64	83.69	65.13
TiO ₂	0.11	0.11	0.05	0.05	0.13	0.06	0.09	0.03	0.24	0.18	0.68
Al ₂ O ₃	8.38	6.25	6.27	5.74	8.24	5.97	7.34	5.07	8.60	7.66	17.45
Fe ₂ O ₃	0.21	0.54	0.16	0.11	0.52	0.22	0.40	0.12	0.78	0.42	1.54
FeO	0.44	0.51	0.43	0.43	0.76	0.48	0.76	0.44	1.79	1.24	2.08
MnO	0.05	0.05	0.04	0.02	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06
MgO	0.09	0.20	0.08	0.07	0.30	0.11	0.34	0.05	0.31	0.26	1.15
CaO	1.03	1.40	0.73	0.55	1.51	1.60	3.36	1.11	1.06	0.78	1.29
Na ₂ O	0.62	0.17	0.13	0.06	0.40	0.09	0.18	0.07	1.14	0.89	2.72
K ₂ O	2.22	1.71	1.65	1.45	2.66	1.65	1.38	1.45	2.61	2.43	4.40
P ₂ O ₅	0.10	0.18	0.15	0.11	0.24	0.12	0.16	0.12	0.11	0.10	0.15
Mo	0.16	0.34	0.66	0.95	1.16	1.01	0.46	0.49	0.09	0.21	0.17
Cu	0.01	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.19	0.01	0.05
S	0.08	0.06	0.14	0.34	0.31	0.32	0.23	0.17	0.43	0.12	0.24
LOI	1.82	2.01	1.72	1.78	2.93	2.06	4.06	1.34	2.13	1.78	2.87
TOTAL	100.03	99.94	100.00	99.93	99.97	99.71	99.76	100.01	100.18	99.83	99.96
K ₂ O+Na ₂ O	2.83	1.88	1.78	1.51	3.06	1.74	1.55	1.52	3.75	3.33	7.12
K ₂ O/Na ₂ O	3.58	9.81	12.46	23.54	6.70	17.71	7.78	20.14	2.29	2.73	1.62
Fe ₂ O ₃ /FeO	0.47	1.06	0.37	0.25	0.68	0.47	0.52	0.28	0.43	0.34	0.74
A/CNK	1.58	1.33	1.88	2.14	1.31	1.23	0.93	1.37	1.29	1.39	1.51
A/NK	2.45	2.92	3.13	3.43	2.33	3.08	4.11	3.00	1.83	1.86	1.89
微量元素/10 ⁻⁶	Mo1	Mo2	Mo3	Mo4	Mo5	Mo6	Mo7	Mo8	Mo9	Mo11	Mo12
Li	79.37	36.08	103.05	81.81	50.39	82.13	77.76	91.76	22.60	26.74	127.98
Rb	179.20	159.90	186.80	161.90	229.20	194.60	121.00	153.40	156.60	125.70	425.80
Sr	97.60	81.80	30.90	27.60	117.00	48.50	327.00	28.80	79.00	65.70	101.50
Ba	1447.10	172.30	103.60	237.60	444.10	136.30	232.80	43.70	306.00	246.60	506.10
Zr	38.70	49.80	27.70	30.00	71.00	29.50	45.70	23.20	151.10	94.40	262.40
Hf	1.63	1.58	1.34	1.46	2.10	1.05	1.43	1.07	5.01	3.26	8.78
Th	5.20	5.51	4.05	2.67	8.39	3.18	6.54	2.91	15.90	9.53	30.62
U	26.10	7.12	13.82	7.80	74.46	7.06	9.76	17.38	2.80	1.79	4.35
Y	10.05	8.02	6.73	5.80	8.48	4.36	6.28	5.19	34.99	18.36	44.38
Nb	12.70	14.74	19.14	13.69	14.57	14.51	9.54	13.62	9.35	7.43	49.98
Ta	1.99	1.58	3.13	2.44	1.52	1.20	1.01	1.94	0.62	0.48	2.95
Cr	12.80	25.70	10.00	18.70	11.80	13.70	11.40	13.80	22.70	13.30	52.80
Ni	2.20	2.67	1.66	1.76	2.34	1.81	2.55	1.91	8.67	4.29	16.08
Co	0.75	1.35	0.70	0.77	2.64	0.90	2.48	0.65	7.61	2.75	6.48
V	20.50	25.00	23.80	17.90	24.80	22.30	21.70	19.20	26.50	22.00	124.40
Cs	28.45	18.64	39.62	19.00	31.85	30.29	40.05	16.88	10.01	9.98	55.53
Sc	2.36	2.82	1.87	1.61	2.85	1.85	2.05	1.50	5.99	4.50	18.31
Ga	15.63	16.10	18.47	15.78	18.65	16.44	13.16	13.32	14.28	12.08	55.03
Be	4.32	2.43	4.10	1.94	3.66	2.34	3.06	1.98	2.27	2.69	8.19

续表1

微量元素/%	Mo1	Mo2	Mo3	Mo4	Mo5	Mo6	Mo7	Mo8	Mo9	Mo11	Mo12
Cd	1.04	2.20	4.05	6.68	8.15	6.52	3.05	3.08	8.11	1.39	2.29
Rb/Sr	1.84	1.95	6.05	5.87	1.96	4.01	0.37	5.33	1.98	1.91	4.20
Sr/Ba	0.07	0.47	0.30	0.12	0.26	0.36	1.40	0.66	0.26	0.27	0.20
Th/U	0.20	0.77	0.29	0.34	0.11	0.45	0.67	0.17	5.68	5.32	7.04
V/Cr	1.60	0.97	2.38	0.96	2.10	1.63	1.90	1.39	1.17	1.65	2.36
Zr/Y	3.85	6.21	4.11	5.17	8.37	6.76	7.27	4.47	4.32	5.14	5.91
矿化元素/ 10^{-6}	Mo1	Mo2	Mo3	Mo4	Mo5	Mo6	Mo7	Mo8	Mo9	Mo11	Mo12
Cl	46	51	75	74	91	83	64	64	67	51	67
B	382	21	145	287	30	191	45	97	18	25	12
F	695	851	724	753	1085	753	753	567	615	667	2644
Au/ 10^{-9}	0.67	0.92	1.47	1.44	2.29	1.44	3.03	3.15	1.63	1.04	0.68
Ag/ 10^{-9}	0.22	0.35	0.62	2.67	1.64	1.57	0.85	0.60	3.35	0.16	0.91
As	30.80	9.60	49.00	67.20	12.00	61.60	39.60	19.00	0.20	5.40	0.20
Sb	4.83	0.45	29.72	65.33	1.27	25.02	3.98	18.44	1.19	1.41	0.38
Zn	23.43	36.25	32.57	36.65	130.40	46.55	58.78	29.76	133.28	39.97	108.87
Pb	26.04	14.96	27.73	57.70	62.56	37.54	41.55	31.89	41.71	21.04	24.09
Sn	4.78	11.12	7.10	4.04	6.23	5.16	5.44	4.91	4.90	2.15	24.89
W	3.30	5.34	2.81	3.39	9.25	2.95	3.73	2.14	7.56	11.45	15.20
Bi	10.68	27.43	93.34	516.20	323.32	162.07	44.74	105.60	1102.49	34.04	126.90
稀土元素/ 10^{-6}	Mo1	Mo2	Mo3	Mo4	Mo5	Mo6	Mo7	Mo8	Mo9	Mo11	Mo12
La	7.04	13.20	4.73	2.80	19.01	5.43	13.55	3.65	30.98	24.05	69.96
Ce	13.13	22.89	8.15	4.72	31.64	8.93	22.10	6.51	58.03	44.86	133.24
Pr	1.59	2.67	1.00	0.62	3.59	1.07	2.56	0.81	7.02	5.44	16.06
Nd	5.70	9.56	3.68	2.27	12.73	3.88	9.22	3.00	26.54	20.02	59.67
Sm	1.44	1.84	0.96	0.69	2.37	0.79	1.76	0.83	5.76	4.28	11.74
Eu	0.28	0.28	0.12	0.10	0.48	0.18	0.46	0.11	0.74	0.55	1.50
Gd	1.48	1.57	0.91	0.74	1.91	0.78	1.40	0.78	5.53	3.92	10.04
Tb	0.29	0.27	0.19	0.16	0.29	0.14	0.21	0.15	1.05	0.67	1.63
Dy	1.81	1.55	1.17	1.04	1.58	0.76	1.16	0.94	6.65	3.94	9.35
Ho	0.31	0.28	0.20	0.18	0.28	0.14	0.20	0.16	1.24	0.69	1.64
Er	0.91	0.83	0.57	0.50	0.84	0.39	0.58	0.49	3.76	1.97	4.78
Tm	0.15	0.12	0.09	0.09	0.13	0.05	0.08	0.07	0.56	0.29	0.69
Yb	0.93	0.76	0.61	0.62	0.77	0.37	0.55	0.46	3.53	1.69	4.40
Lu	0.13	0.12	0.09	0.09	0.11	0.05	0.08	0.07	0.51	0.26	0.64
Σ REE	35.18	55.93	22.47	14.58	75.74	22.95	53.91	18.04	151.88	112.62	325.35
LREE/HREE	4.86	9.18	4.85	3.30	11.80	7.55	11.66	4.77	5.66	7.39	8.81
δ Ce	0.95	0.93	0.90	0.86	0.92	0.89	0.90	0.91	0.95	0.94	0.96
δ Eu	0.59	0.50	0.39	0.43	0.69	0.68	0.89	0.42	0.40	0.41	0.42

注: 数据由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分析测试; 铝饱和指数 $A/CNK=Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$; $A/NK=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$, 比值单位为1; 矿化元素: 指矿化剂和矿化金属元素; Σ REE 为不包含Y的稀土元素测试值总和, LREE/HREE、 δ Ce、 δ Eu 为球粒陨石标准化后计算值。

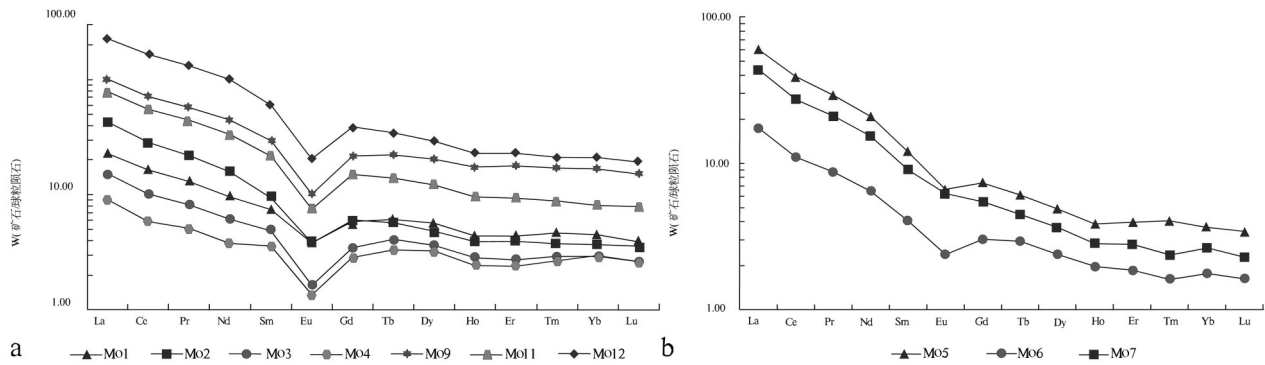


图4 a-钼矿石稀土元素配分模式图,轻重稀土分异弱,负铕异常显著;
b-钼矿石稀土配分曲线图,轻重稀土分异明显,负铕异常较弱

Fig.4 a-Chondrite-normalized REE patterns of molybdenum ores, LREE differentiation is weak, with significant negative Eu anomaly; b- Chondrite-normalized REE patterns of molybdenum ores, obvious LREE differentiation, weak negative Eu anomaly

上。在实验室研磨至粒度<0.05 mm, 经过一系列的化学处理, 对辉钼矿样品进行Re-Os同位素进行分离进入溶液, 然后进行同位素质谱分析^[16-18]。

样品处理及Re-Os同位素测试是由国家地质试验中心实验室完成, 采用美国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-Os含量很低的样品采用美国热电公司(Thermo Fisher Scientific)生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪HR-ICP-MS Element 2进行测量^[19-22]。实验流程用国标JDC(GBW04436)控制, 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、192。用185监测Re。

本文测得8件辉钼矿样品年龄数据(表2), 得到的模式年龄为(237.7±3.4) Ma~(243.9±3.7) Ma, 加权

平均值为(240.3±1.9) Ma(图5-a)。

利用实验室提供的ISOPLOT计算机软件(Ludwig, 1999)计算8个同位素数据拟合等时线, 得到谐和等时线年龄为(239.2±5.8) Ma(n=8, MSWD=2.7)(图5-b), 样品不确定性(MSWD)低、拟合概率高, 与平均模式年龄接近, 因此其等时线谐和年龄可信。

4.3 辉钼矿 Re-Os 年龄分析

本文测得查干敖包矿段的¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os等时线年龄为(239.2±5.8) Ma, MSWD=2.7, 略晚于北部查干花辉钼矿(242.7±3.5) Ma的Re-Os等时线年龄^[2]及南部查干德尔斯辉钼矿(243.0±2.2) Ma的Re-Os等时线年龄^[7]。

从查干敖包钼矿成矿年龄(239.2±5.8) Ma分析, 查干敖包钼矿属于印支晚期花岗岩浆侵入成矿, 但

表2 Re-Os同位素测试结果
Table 2 Re-Os isotope analytical results

样号	样重/g	w(Re)/(μg·g ⁻¹)		w(普Os)/(ng·g ⁻¹)		w(¹⁸⁷ Re)/(μg·g ⁻¹)		w(¹⁸⁷ Os)/(ng·g ⁻¹)		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
Mo5	0.1040	109.0	1.0	0.0381	0.0854	68.51	0.64	279.0	2.4	243.9	3.7
Mo2	0.1001	101.7	1.2	0.1309	0.1811	63.89	0.73	255.9	2.2	239.9	3.9
Mo3	0.1024	115.9	0.9	0.0394	0.2207	72.87	0.56	289.7	2.6	238.1	3.4
Mo4	0.1024	140.2	1.1	0.0398	0.1783	88.09	0.69	353.7	3.1	240.5	3.4
Mo6	0.1077	203.4	2.0	0.0376	0.2105	127.8	1.3	509.6	4.2	238.9	3.7
Mo8	0.1012	75.37	0.57	0.0844	0.1338	47.37	0.36	187.9	1.7	237.7	3.4
Mo10	0.1055	184.5	2.1	0.0368	0.0825	116.0	1.3	465.8	4.1	240.6	3.9
Mo12	0.1065	73.30	0.65	0.1241	0.1716	46.07	0.41	187.0	1.6	243.2	3.6

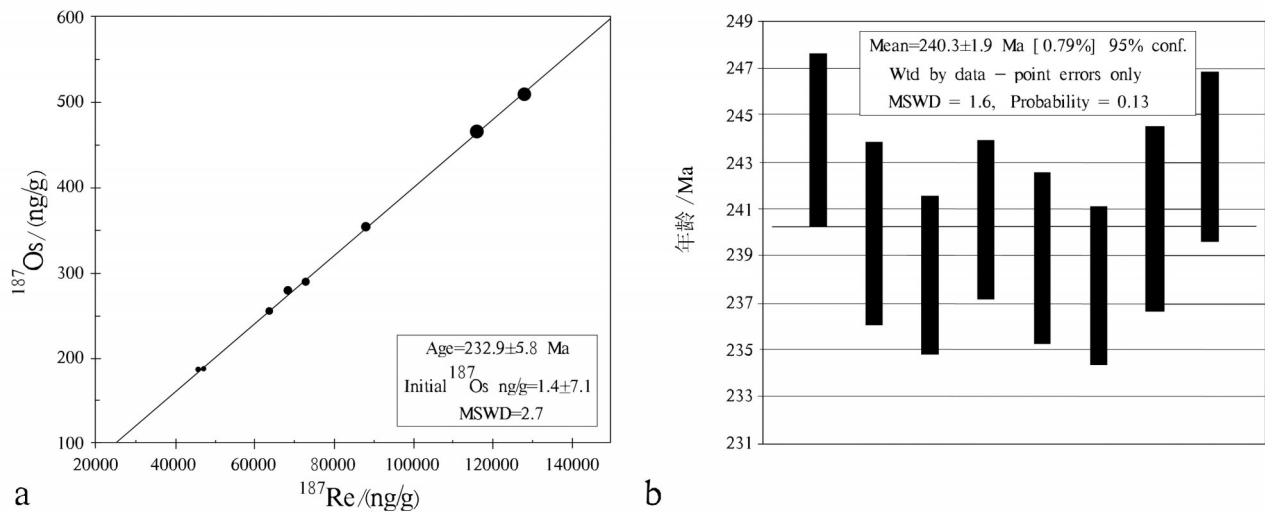


图5 a-模式年龄加权平均值; b-辉钼矿 Re-Os 同位素等时线
Fig.5 a-Weighted average model age; b-Molybdenite Re-Os isochron

是从矿区斜长花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩到细晶花岗岩和花岗斑岩的四个岩浆侵入阶段分析,成矿年龄与区域二长花岗岩体成岩年龄(253.3 ± 2.8) Ma 和(253.8 ± 3.7) Ma 的时间差约 13 Ma^[6],考虑到一些细晶花岗岩、细晶二长花岗岩及花岗斑岩中见有辉钼矿化石英细脉,其成矿可能延续到细晶花岗岩脉形成之后。

因此从成矿年龄分析可以看出,岩浆侵入岩体晚期的钾长花岗岩和细晶岩脉阶段是钼矿成矿阶段,并且成矿年龄由北向南有变新趋势,成矿作用是由北向南扩展。这与矿床控矿构造及成矿花岗岩的结构特征相符,反映查干敖包钼矿床的形成经历了较长的成岩成矿演化历史。

5 成矿作用分析

从区域地质背景及矿化特征分析,查干敖包钼矿成矿与宝音图复式花岗岩体密切相关,复式花岗岩体由斜长花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩、细晶花岗岩和花岗斑岩组成。

花岗岩岩石化学特征显示铝过饱和, Al_2O_3 (mol)/(CaO+Na₂O+K₂O) (mol) 平均为 1.37^[4], 表现为 S 型花岗岩的成分特征, 并且各类花岗岩均为低 Sr、高 Rb、高 Zr、高 U、低 Th、Sr/Ba 低于 1、V/Cr 低于 1.5 等特征^[23], 本文采集同位素样品的 Zr/Y 在 1.17~5.68, 这些特征明显不同于环太平洋岛弧洋壳熔融

形成的埃达克岩特征, 而是陆壳熔融成因花岗岩, 并且与华北北缘燕山花岗岩带及华北南缘秦岭大别山花岗岩带岩浆岩地球化学特征极其相似。

花岗岩岩石化学组成、微量元素及稀土元素均显示不同岩石具有分异作用, 由斜长花岗岩—二长花岗岩—钾长花岗岩—细晶岩—花岗斑岩顺序构成了一个多阶段演化的岩浆活动, 从早期岩浆活动逐渐增强至大规模岩浆上侵, 随后衰减为小规模岩浆侵位, 并伴随着大量成矿流体出溶的成矿岩浆活动, 岩体成分逐渐富钾、铷、锆、铀、稀土, 尤其是晚期钾长花岗岩和细晶岩更富集 Cl、F、B 挥发性矿化剂元素及 Cu、Mo 矿化元素^[23]。查干敖包斑岩钼矿化的发生是这长期岩浆活动周期的结果, 因此晚期岩浆更有利于成矿。

区内成矿岩体锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄平均为(253.5 ± 3.3) Ma, 同时具有明显弧岩浆作用的特点^[23], 反映了深部岩浆源区可能受到了早期俯冲作用的改造, 并在二叠纪期间的碰撞后伸展环境下就位。而本次研究测得查干敖包矿区辉钼矿的 $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ 等时线年龄为(239.2 ± 5.8) Ma, 与花岗岩岩体成岩年龄相差约 13 Ma, 反映查干敖包钼矿床的形成经历了较长的成岩成矿演化历史。

成矿花岗岩岩石化学组分特征及成矿年龄显示区内钾长花岗岩、细晶花岗岩和花岗斑岩提供成矿物质来源, 区域上似斑状斜长花岗岩是分布面积巨大的

岩基,二长花岗岩和钾长花岗岩仅是局部分布的岩体,而细晶花岗岩及花岗斑岩更是分布局限的小岩株,因此岩浆晚期在有限的区域内集中了巨量的有用物质,是有利于形成巨大金属矿床的条件。

查干敖包钼矿床为斑岩型钼矿,矿床产于成矿岩体内接触带,但是矿化形成于白云母石英脉中,主要与白云母热液矿物有关,因此是一种特殊的斑岩钼矿床。

6 结 论

内蒙古查干敖包钼矿成矿岩体主要为钾长花岗岩、细晶花岗岩和花岗斑岩,岩体锆石 U-Pb 平均年龄为(253.5±3.3) Ma; 矿床产于成矿岩体内接触带,但是矿化形成于白云母石英脉中,主要与白云母热液矿物有关,矿体受构造裂隙控制,以充填方式成矿为主,因此是一种特殊的斑岩钼矿床。

本次研究测得查干敖包辉钼矿的 $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ 等时线年龄为(239.2±5.8) Ma, 与成矿岩体时差约 13 Ma, 反映钼矿床的形成经历了较长的成岩成矿演化历史。

钼成矿岩体和矿石的岩石化学组分特征、成岩成矿年龄显示: 区内钾长花岗岩、细晶花岗岩和花岗斑岩提供成矿物质来源, 区域上似斑状斜长花岗岩是分布面积巨大的岩基, 二长花岗岩和钾长花岗岩仅是局部分布的岩体, 而细晶花岗岩及花岗斑岩更是分布局限的小岩株, 因此岩浆晚期在有限的区域内集中了巨量的有用物质, 是有利于形成巨大金属矿床的条件; 不同成矿花岗岩具有分异作用, 钼成矿是岩浆活动周期的结果, 岩浆活动晚期在有利的构造位置有用元素富集成矿。

致谢: 审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 589-609.
Inner Mongolia Geology and Mineral Exploration and Development Bureau. Inner Mongolia Regional Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 589-609(in Chinese).
- [2] 蔡明海, 张志刚, 屈文俊, 等. 内蒙古乌拉特后期查干花钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. 地球学报, 2011, (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, (1): 64-68(in Chinese with English abstract).

- [3] 蔡明海, 彭振安, 屈文俊, 等. 内蒙古乌拉特后期查干德斯钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. 矿床地质, 2011, (3): 377-384.
Cai Minghai, Peng Zhenan, Qu Wenjun, et al. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Chagandeersi molybdenum deposit, western Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2011, (3): 377-384(in Chinese with English abstract).
- [4] 杨帆, 肖荣阁, 李娜, 等. 内蒙古宝音图钼矿床花岗岩稀土元素地球特征及花岗岩成因[J]. 现代地质, 2013, (4): 831-840.
Yang Fan, Xiao Rongge, Li Na, et al. REE geochemical characteristics and genesis of granites in Baoyintu molybdenum deposit, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2013, (4): 831-840(in Chinese with English abstract).
- [5] 屈云燕. 宝音图斑岩钼矿与智利斑岩铜钼矿带成矿岩浆岩地球化学特征对比(硕士论文)[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
Qu Yunyan. Comparison on Geochemical Characteristics of Ore-forming Magmatic Rocks in Baoyintu Porphyry Molybdenum Mine and Chilean Porphyry Copper-Molybdenum Belt (Thesis) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013(in Chinese with English abstract).
- [6] 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 等. 内蒙古查干花钼矿区成矿花岗岩地球化学、年代学及成岩作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 409-420.
Liu Yifei, Nie Fengjun, Jiang Sihong, et al. Ore-forming granite form chaganhua molybdenum deposit, Central Inner Mongolia, China: geochemistry, geochronology and petrogenesis[J]. Acta Petrological Sinica, 2012, 28 (2): 409-420(in Chinese with English abstract).
- [7] 李光耀. 内蒙古乌拉特后旗查干德斯钼矿成矿岩体地球化学特征及成岩作用(硕士论文)[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
Li Guangyao. The Geochemical Characteristics and Diagenesis of Ore-forming Granites from Chagandeersi Molybdenum Deposit, in Western Inner Mongolia (Thesis)[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012(in Chinese with English abstract).
- [8] 颜开. 内蒙古乌拉特后旗查干德斯钼矿床成因及控矿规律研究(硕士论文)[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
Yan Kai. Genesis and Ore-control Regularity of the Molybdenum Ore Deposit in Chagandeersi Molybdenum Deposits in Wulatehouqi, Inner Mongolia (Thesis) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012(in Chinese with English abstract).
- [9] 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 等. 内蒙古查干花钼矿床成矿流体特征及矿床成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, (6): 1794-1805.
Liu Yifei, Nie Fengjun, Jiang Sihong, et al. Ore-forming fluid characteristics and ore genesis of Chaganhua porphyry molybdenum deposit in central Inner Mongolia, China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, (6): 1794-1805(in Chinese with English abstract).

- [10] 张可, 李克庆, 刘翼飞, 等. 内蒙古乌拉特后旗查干花大型钼矿床地质特征[J]. 矿床地质, 2010, (S1): 333-334.
Zhang Ke, Li Keqing, Liu Yifei, et al. The geological features of Chaganhua molybdenum deposits in Wulatehouqi, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2010, (S1): 333-334(in Chinese).
- [11] 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锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. 地质学报, 2013, (02): 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 Geologica Sinica, 2013, (2): 197-207(in Chinese with English abstract).
- [12] 张玉清. 内蒙古白云鄂博北部宝音图岩群变质基性火山岩的年龄、构造背景及地质意义[J]. 地质通报, 2004, (2): 177-183.
Zhang Yuqing. U-Pb single zircon ages of metamorphic basic volcanic rocks of Baoyintu Rock Group in Inner Baoyintu[J]. 2004, (02), 177-183(in Chinese with English abstract).
- [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, (1): 86-90.
XU Bei, Liu Shuwen, Wang Changqiu, et al. Sm-Nd, Rb-Sr geochronology of The northwestern of Baoyintu group in northwestern Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2000, (1), 86-90(in Chinese with English abstract).
- [14] 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, (6): 236-254.
Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, (6): 236-254(in Chinese with English abstract).
- [15] 卢欣祥, 罗照华, 黄凡, 等. 秦岭-大别山地区钼矿类型与矿化组合特征[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 110-127.
Lu Xinxiang, Luo Zhaohua, Huang Fan, et al. Mo deposit types and mineralization assemblage characteristics in Qinling-Dabie Mountain area[J]. Geology in China, 2011, 38(6): 110-127(in Chinese with English abstract).
- [16] 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钼地质年龄[J]. 岩矿测试, 2003, 22(4): 254-257.
Qu Wenjun, Du Andao. Highly precise Re-Os of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion[J]. Rock and Mineral Analysis, 2003, 22 (4): 254-257(in Chinese with English abstract).
- [17] 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 等. 辉钼矿的铼钼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 Hongmiao, 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).
- [18] Smoliar M I, Walker R j w. Re-Os ages of group II A, III A, IV A, and VB iron meteorites[J]. Science, 271: 1099-1102.
- [19] 李永峰, 王春秋, 白凤军, 等. 东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景[J]. 矿产与地质, 2004, (6): 67-74.
Li Yongfeng, Wang Chunqiu, Bai Fengjun, et al. Re-Os isotopic ages of molybdenum deposits in east Qinling and their geodynamic settings[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, (6): 67-74(in Chinese with English abstract).
- [20] 王富春, 陈静, 谢志勇, 等. 东昆仑拉陵灶火钼多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素定年[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1209-1217.
Wang Fuchun, Chen Jing, Xie Zhiyong, et al. Geological features and Re-Os isotopic dating of the Lalingzaohuo molybdenum polymetallic deposit in East Kunlun[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1209-1217(in Chinese with English abstract).
- [21] 黄勇, 唐菊兴, 丁俊, 等. 西藏雄村斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素体系[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 302-311.
Huang Yong, Tang Juxing, Ding Jun, et al. The Re-Os isotope system of the Xiongcu porphyry copper-gold deposit, Tibet[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 302-311(in Chinese with English abstract).
- [22] 代军治, 谢桂青, 王瑞廷, 等. 内蒙古赤峰鸭鸡山钼(铜)矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1614-1621.
Dai Junzhi, Xie Guiqing, Wang Ruiting, et al. Re-Os isotope dating of molybdenite separates from the Yajishan Mo(Cu) deposit, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1614-1621(in Chinese with English abstract).
- [23] 刘翼飞. 内蒙古查干花斑岩钼矿床: 俯冲改造的富集型源区及碰撞后伸展环境对成矿的贡献(博士论文)[D]. 北京: 中国地质科学院, 2013.
Liu Yifei. Metallogenic Study of Chaganhua Porphyry Mo Deposit in Inner Mongolia: Contribution of Subduction-Modified Fertile Magma Source and Post-Collision Extensional Tectonic Setting [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013(in Chinese with English abstract).