

编号: 0258-7106(2011)06-1122-07

内蒙古碾子沟钼矿床 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、 硫同位素组成及其地质意义*

张作伦¹, 刘建明², 曾庆栋²

(1 中铁资源集团中铁资源地质勘查有限公司, 北京 100039; 2 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究
重点实验室, 北京 100029)

摘 要 内蒙古碾子沟钼矿床位于中亚-蒙古巨型造山带东段, 是一中型石英脉型钼矿床, 矿体赋存于燕山期中粗粒黑云母二长花岗岩内的断裂带中, 矿体与岩体空间关系密切。文章对赋矿围岩和主要金属硫化物分别开展了单颗粒 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和硫同位素测试。获得的黑云母二长花岗岩加权平均年龄为 $(152.4 \pm 1.6) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.28$)。8 件辉钼矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $3.50\text{‰} \sim 6.23\text{‰}$, 平均为 4.38‰ 。8 件黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $4.60\text{‰} \sim 8.83\text{‰}$, 平均为 5.62‰ 。结合相关研究成果进一步确定成矿 $(154.3 \pm 3.6 \text{ Ma})$ 与黑云母二长花岗岩密切相关, 成矿物质来源于岩浆, 与黑云母二长花岗岩的形成过程密切相关。

关键词 地球化学; 石英脉型钼矿; SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄; S 同位素; 碾子沟; 内蒙古

中图分类号: P618.65

文献标识码: A

SHRIMP zircon U-Pb dating and sulfur isotope compositions of Nianzigou molybdenum deposit in Inner Mongolia and their geological significance

ZHANG ZuoLun¹, LIU JianMing² and ZENG QingDong²

(1 China Railway Resources Exploration Co. Ltd., Beijing 100039, China; 2 Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract

The Nianzigou ore deposit is a medium-size quartz vein type molybdenum deposit occurring in the Central Asian-Mongolian belt of Inner Mongolia. Its major ore bodies are associated spatially with the Yanshanian medium-coarse grained biotite monzogranite. In order to investigate the relationship between mineralization and diagenesis, the authors applied the SHRIMP dating technique to determining U-Pb ages of zircons from the biotite monzogranite. 13 analyses yielded a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean age of $(152.4 \pm 1.6) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.28$), which suggests that the biotite monzogranite was formed in the Late Jurassic. In addition, this age is quite close to the molybdenite Re-Os isochronic age of $(154.3 \pm 3.6) \text{ Ma}$. Sulfur isotope analyses of molybdenite and pyrite yielded $\delta^{34}\text{S}$ values ranging from 3.50‰ to 6.23‰ , averaging 4.38‰ , and from 4.60‰ to 8.83‰ , averaging 5.62‰ , respectively. The $\delta^{34}\text{S}$ values of the molybdenite and pyrite have characteristics of magma sulfur. Comprehensive studies indicate that the mineralization was in close relation with the diagenesis.

Key words: geochemistry, quartz vein type molybdenum deposit, SHRIMP zircon U-Pb dating, sulfur isotopes, Nianzigou, Inner Mongolia

* 本文得到国家自然科学基金面上项目(40972065)和国家重点基础研究项目(2006CB403507)的资助

第一作者简介 张作伦,男,1981年生,博士,工程师,主要从事矿床成因研究和矿产勘查评价工作。Email: zhangzuolun@163.com

收稿日期 2010-12-30; 改回日期 2011-10-07。秦思婷编辑。

碾子沟钼矿床是西拉沐伦钼矿带中的一个典型石英脉型钼矿床,矿体以石英大脉的形式产于燕山期中粗粒黑云母二长花岗岩内。张作伦等(2009;2010)对该矿床地质特征、辉钼矿 Re-Os 同位素年龄、流体包裹体特征和氢、氧同位素等方面进行了研究,认为成矿流体具有岩浆水与古大气降水混合特征,给出的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(154.3 ± 3.6)Ma,陈志广等(2008)对含矿围岩黑云母二长花岗岩进行了岩石地球化学研究,认为岩浆源具有壳幔源特征,给出的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为(167.1 ± 1.5)Ma。

鉴于围岩 Rb-Sr 年龄与辉钼矿 Re-Os 等时线年龄差别较大,这是否意味着含矿岩体与矿床的形成

无关呢?如果有关那么成矿与成岩关系又如何?本文通过对围岩黑云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄的测定及金属矿物辉钼矿、黄铁矿硫同位素组成对该问题给予讨论。

1 成矿地质背景

碾子沟钼矿床位于内蒙古赤峰市北西部 25 km 处(图 1),产于华北克拉通断裂以北的加里东增生造山带内。增生带地层除少量元古界宝音图群浅变质岩外,主要为下古生界志留系浅变质火山-沉积岩系(片岩、砂板岩、大理岩以及安山岩),上古生界石炭系浅变质沉积岩(砂板岩、大理岩),二叠系火山-沉

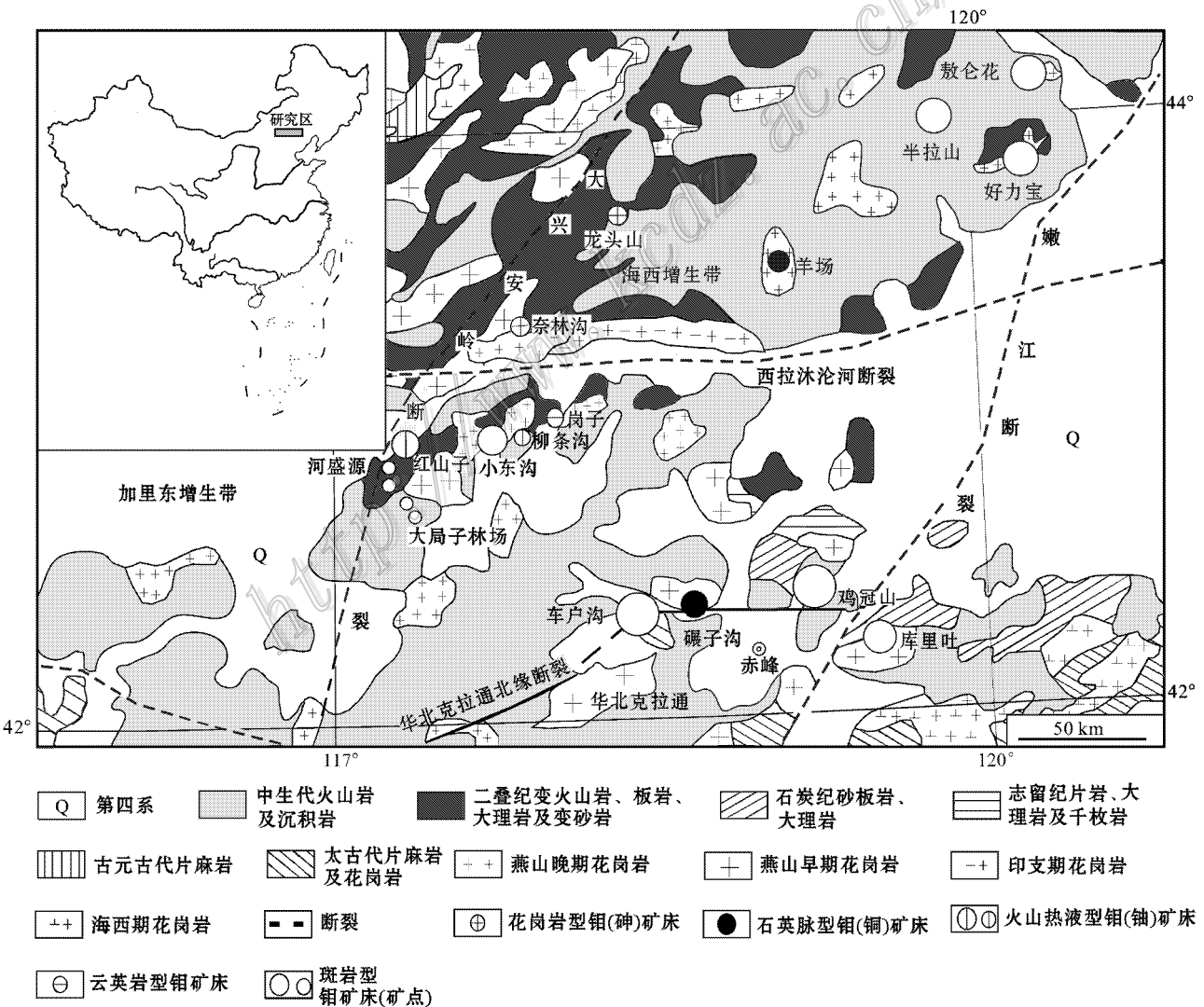


图 1 西拉沐伦钼矿带地质简图(据曾庆栋等 2009 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Xilamulun Mo belt (modified after Zeng et al., 2009)

积岩系(火山碎屑岩、砂岩、板岩、碳酸盐岩),中生界火山岩、次火山岩盖层(芮宗瑶等,1994)。增生带内岩浆活动包括印支期和燕山期,这两期岩浆活动与区内钼成矿作用密切相关。碾子沟钼矿附近的车户沟铜钼矿、库里吐钼矿为印支期成矿(Liu et al., 2009; Zhang et al., 2009),鸡冠山钼矿为燕山期成矿(陈伟军等,2010)。

碾子沟钼矿赋矿燕山期中粗粒黑云母二长花岗岩出露面积约 120 km²,岩体分布面总体受区域 NE 向断裂控制。岩体周围出露有太古界建平群(An_{z1})斜长角闪片麻岩、黑云母角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩;白垩系义县组(K_{1y})中基性火山岩夹火山熔岩、火山角砾岩、集块岩、凝灰岩;第三系玄武岩。

2 矿床地质特征

矿区断裂构造主要有 NNW 向和 NW 向 2 组。断裂构造具有多期活动的特征,早期为压扭性活动,在走向和倾向上形成舒缓波状结构面断层;晚期为张性活动,其间先后充填有闪长玢岩脉和石英脉。

碾子沟钼矿床共发现有 4 条石英脉型矿体(图 2),其中 v1 和 v2 脉是区内最主要的矿脉。v1 号脉

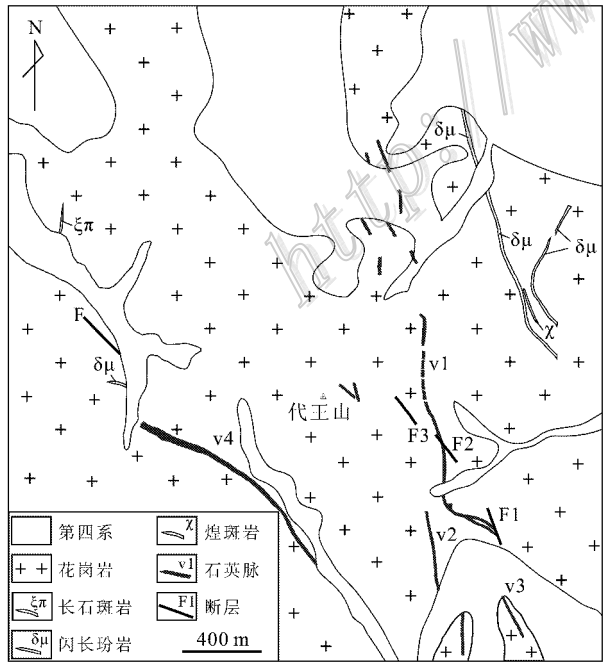


图 2 碾子沟矿区地质图(张作伦等,2009)
Fig. 2 Geological map of the Nianzigou orefield
(after Zhang et al., 2009)

断续延长约 2 500 m,宽 1.37~18.85 m,钼平均品位 0.084%~1.392%。v2 号脉长约 2 000 m,厚度为 0.5~2 m,钼平均品位为 0.141%~0.844%(张作伦等,2009)。矿石中金属矿物主要为辉钼矿和黄铁矿,脉石矿物主要为石英。矿石结构主要为自形-半自形粒状结构、微弯曲长板状结构、揉皱结构。矿石构造主要为浸染状和细脉状构造。成矿阶段可分为石英大脉阶段、辉钼矿-多金属硫化物-石英阶段、玉髓状石英阶段(张作伦等,2010)。

矿区围岩蚀变较强,以线性蚀变为特征,蚀变分带现象不明显,蚀变组合与围岩岩性有关。二长花岗岩主要表现为硅化、钾长石化、绢云母化、高岭土化;闪长玢岩主要表现为硅化、绢云母化、绿泥石化。

3 实验方法

锆石挑选由河北省地勘局廊坊实验室完成。锆石样品定年分析是在北京离子探针中心采用 SHRIMP II 完成,束斑 30 μm,详细分析流程和原理参见有关文献(Compston et al., 1992;宋彪等,2002)。样品靶制作是在北京离子探针中心完成,锆石透射光、反射光、阴极发光(CL)照片拍摄是在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室完成。实验中采用的标准锆石为 SL13(ε(U) 238×10⁻⁶,年龄为 572 Ma)和 TEM(年龄为 417 Ma),前者用于标定 U、Th、Pb 的含量,后者用于校正年龄;采用实测的 ²⁰⁴Pb 进行普通铅校正。实验过程中标准样品 TEM 点与待分析样品点按照 1:3 进行。数据处理采用 SQUID 及 ISOPLLOT 程序完成(Ludwig, 1999; 2001)。

制靶锆石呈无色-淡黄色,透明,金刚光泽,以短柱状、长柱状为主。半自形-自形晶,晶棱清晰,少量为锆石碎块,锆石柱面、锥面发育,粒度一般在 150~250 μm,长宽比为 2:1~1.2:1,锆石多含包裹体,裂纹少见。阴极发光图像显示锆石中振荡环带结构发育,应为典型的岩浆结晶锆石(图 3)。

金属硫化物硫同位素组成是在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室测试完成。样品分析流程可分为 4 个步骤:①将金属硫化物样品与氧化剂五氧化二钒(V₂O₅)按照 1:10 的比例混合均匀,黄铁矿用量 15 mg,辉钼矿用量 25 mg;②将混合样装入石英管内,置于加热炉中,抽真空

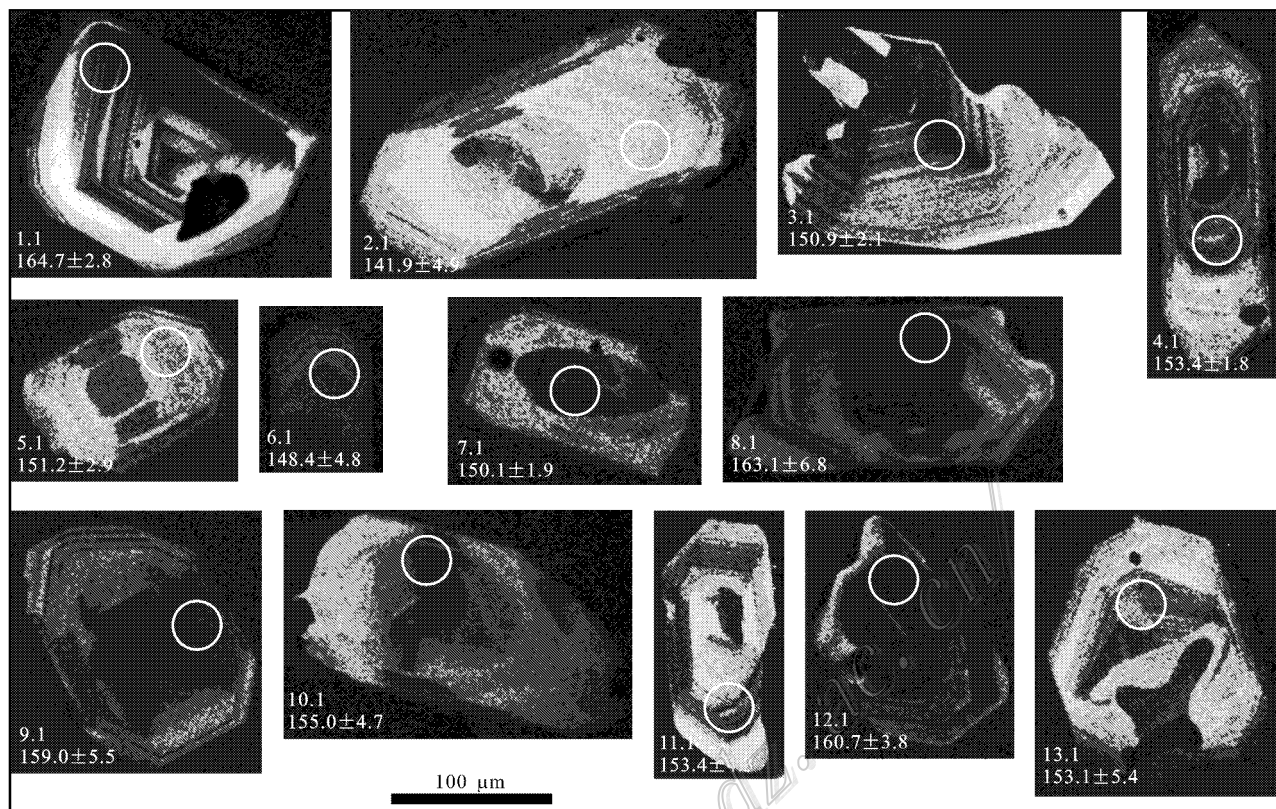


图 3 碾子沟钼矿黑云母二长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 Zircon CL image of biotite monzogranite from the Nianzigou Mo deposit

至 10^{-4} Pa, 升温至 $1\ 000^{\circ}\text{C}$ 、反应 $15\ \text{min}$, 使硫化物中的硫转化为 SO_2 ; ③ 用戊烷冷阱冻住反应后气体中的 H_2O 和 CO_2 将纯净的 SO_2 气体吸入样品管中; ④ 将纯净 SO_2 气体在 Delta-S 质谱仪上进行测试, 所报数据为相对国际标准 CDT 之值。

4 测试结果

碾子沟钼矿黑云母二长花岗岩 13 个点的锆石 U-Pb 分析结果列于表 1, 表中同位素比值误差为 1σ , 加权平均年龄置信度 95%。因年轻锆石 ($<1\ 000\ \text{Ma}$) 中放射性成因 ^{207}Pb 量较少, 分析中容易产生较大的误差, 对年轻锆石均使用其 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄。13 个分析点 Th/U 比为 $0.88 \sim 2.46$ 具有典型岩浆锆石 Th/U 比高的特征 (Wu et al., 2004)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(141.9 \sim 164.7)\ \text{Ma}$, 数据处理时扣除最高值、最低值、不和谐点 (1.1、2.1、12.1 点) 后获得的加权平均年龄为 $(152.4 \pm 1.6)\ \text{Ma}$ (MSWD=0.28) (图 4)。

碾子沟矿区 8 件矿石辉钼矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $3.50\text{‰} \sim 6.23\text{‰}$, 平均值为 4.38‰ ; 8 件黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $4.60\text{‰} \sim 8.83\text{‰}$, 平均值为 5.62‰ (表 2)。碾子沟钼矿床主要金属矿物 (黄铁矿、辉钼矿) $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围集中于 $3.50\text{‰} \sim 6.64\text{‰}$ (除一件黄铁矿样品 8.83‰ 外), 平均 4.74‰ , 极差 3.14‰ , 变化较小 (图 5)。

5 讨论

5.1 定年数据对比分析

碾子沟钼矿床主要金属矿物辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $(154.3 \pm 3.6)\ \text{Ma}$ (张作伦等, 2009) ($153 \pm 5)\ \text{Ma}$ (Zhang et al., 2009), 围岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(167.1 \pm 1.5)\ \text{Ma}$ (陈志广等, 2008), 围岩单颗粒 SHRIMP 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $(152.4 \pm 1.6)\ \text{Ma}$ (MSWD=0.28)。碾子沟钼矿体以石英大脉形式赋存在黑云母二长花岗岩体内的 NW 向断裂构造中, 成矿时代应晚于成岩时代。然而, 上述数

表 1 碾子沟钼矿黑云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测试结果
Table 1 SHRIMP Zircon U-Pb data of biotite monzogranite from the Nianzigou Mo deposit

测试点号	$^{206}\text{Pb}/\%$	$\mu(\text{U})/10^{-6}$	$\mu(\text{Th})/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
1.1	1.84	246	385	1.62	5.53	0.155	11	0.02568	1.5	164.7 $\pm$ 2.8
2.1	6.98	63	99.9	1.64	1.28	—	—	0.02194	4.0	141.9 $\pm$ 4.7
3.1	0.56	174	262	1.55	3.59	0.174	9.6	0.02383	1.2	150.9 $\pm$ 2.1
4.1	1.12	233	342	1.52	4.85	0.157	9.4	0.02400	1.1	153.4 $\pm$ 1.8
5.1	1.61	75	71	0.98	1.56	0.195	13	0.02393	1.8	151.2 $\pm$ 2.9
6.1	0.81	98	119	1.25	2.02	0.230	8.9	0.02364	2.3	148.4 $\pm$ 3.8
7.1	0.40	184	240	1.35	3.78	0.193	5.2	0.02376	1.1	150.1 $\pm$ 1.9
8.1	17.66	47	96.6	2.12	1.22	—	—	0.0249	5.9	163.1 $\pm$ 6.8
9.1	8.40	44	83	1.95	0.997	0.073	78	0.02417	3.2	159.0 $\pm$ 5.5
10.1	2.19	75	140	1.93	1.62	0.197	8.5	0.02453	2.4	155.0 $\pm$ 4.7
11.1	1.51	102	88	0.88	2.15	0.159	14	0.02409	2.7	153.4 $\pm$ 4.3
12.1	0.74	340	810	2.46	7.41	0.167	7.5	0.02515	2.0	160.7 $\pm$ 3.8
13.1	5.98	58	103	1.84	1.26	0.133	61	0.02381	3.9	153.1 $\pm$ 5.4

注：Pb_c 和 Pb* 分别为普通铅和放射性成因铅，误差为 1σ，— 未检出。

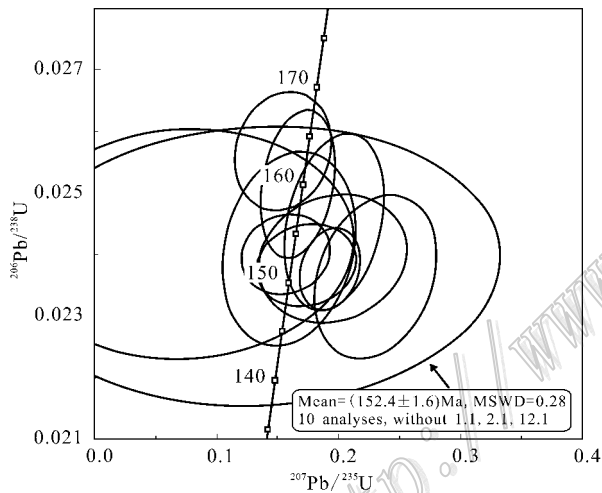


图 4 碾子沟钼矿黑云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 SHRIMP Zircon U-Pb concordia diagram of biotite monzogranite from the Nianzigou Mo deposit

据显示的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄小于全岩 Rb-Sr 年龄，大于锆石 U-Pb 年龄，存在一定的矛盾性。

影响同位素定年结果的因素有仪器误差、样品代表性、同位素封闭温度、衰变常数的准确度等多种因素。锆石 U-Pb 法和全岩 Rb-Sr 等时线法是确定花岗岩形成时代最常用的两种方法，吴俊奇等(2007)对两种定年方法进行了对比研究，统计的 23 个中生代岩体(103~233)Ma 锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄差值变化于 -28.4 Ma~+20.9 Ma，但总体具有变化趋势一致、呈对称正态分布特

表 2 碾子沟钼矿床金属硫化物硫同位素组成
Table 2 Sulfur isotope compositions of metal sulfides from the Nianzigou Mo deposit

编号	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	$\sigma/\text{‰}$	采样位置	矿化类型
N10	黄铁矿	4.96	0.003	二采区一中段	石英脉型矿化
N17	黄铁矿	5.26	0.009	二采区二中段	石英脉型矿化
N46	黄铁矿	4.6	0.007	二采区三中段	石英脉型矿化
N71	黄铁矿	8.83	0.003	一采区一中段	石英脉型矿化
N57	黄铁矿	5.05	0.009	一采区二中段	石英脉型矿化
N69	黄铁矿	6.46	0.009	一采区二中段	石英脉型矿化
N82	黄铁矿	4.78	0.007	一采区三中段	石英脉型矿化
N87	黄铁矿	4.98	0.006	一采区三中段	蚀变岩型矿化
N10	辉钼矿	4.03	0.007	二采区一中段	石英脉型矿化
N57	辉钼矿	4.92	0.004	一采区二中段	石英脉型矿化
N63	辉钼矿	4.61	0.008	一采区二中段	石英脉型矿化
N54	辉钼矿	3.50	0.001	一采区二中段	石英脉型矿化
N59	辉钼矿	3.79	0.008	一采区二中段	石英脉型矿化
N64	辉钼矿	3.88	0.007	一采区二中段	石英脉型矿化
N82	辉钼矿	4.08	0.008	一采区三中段	石英脉型矿化
N87	辉钼矿	6.23	0.008	一采区三中段	蚀变岩型矿化

征，认为两种定年方法成熟、可信。碾子沟钼矿床黑云母二长花岗岩 U-Pb 年龄和 Rb-Sr 年龄差值为 -14.7 Ma，介于 -28.4 Ma~+20.9 Ma 之间。

Re-Os 定年法的精确性目前也受到了一定的质疑，最为直接的表现就是成矿年龄大于成岩年龄，如东沟钼矿床花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为(112±1)Ma，Re-Os 模式年龄为(116.5±1.7)Ma~(115.5±1.7)Ma(叶会寿等，2006)。制约 Re-Os 定年法精确性的一个重要因素是¹⁸⁷Re衰变常数(λ)，无论是现今广泛采用的 λ=1.666×10⁻¹¹/a(Smoliar et al., 1996)，还是 Selby 等(2007)提出的 λ=1.6668×10⁻¹¹

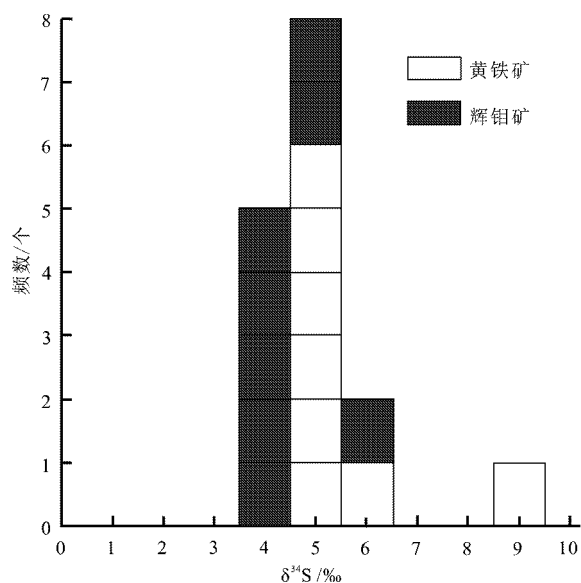


图5 碾子沟钼矿金属硫化物硫同位素直方图

Fig. 5 $\delta^{34}\text{S}$ histogram of metal sulfides from the Nianzigou Mo deposit

/a 都是假设 Re-Os 年龄与球粒陨石 Pb-Pb 年龄或成矿岩体 U-Pb 年龄相等反算而来。述及实验方法源头可以看出,借助 Re-Os 数据讨论成岩、成矿关系时,对应的岩体年龄应与 Re-Os 年龄在误差范围内较为一致。

5.2 成岩作用与成矿作用

碾子沟钼矿床赋存于黑云母二长花岗岩体中,矿体与岩体空间关系密切。本文测得的围岩黑云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $(152.4 \pm 1.6) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.28$),主要矿石矿物辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $(154.3 \pm 3.6) \text{ Ma}$ (张作伦等 2009) ($153 \pm 5) \text{ Ma}$ (Zhang et al., 2009)。成岩、成矿时代在误差范围内一致,表明岩体、矿体为同一成岩、成矿系统演化的产物,均形成于晚侏罗世。

16 件金属硫化物硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体变化范围较窄,集中于 $3.50\text{‰} \sim 6.64\text{‰}$,平均 4.74‰ 。这与西拉沐伦钼矿带小东沟斑岩型钼矿床中的辉钼矿、黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值(平均 4.6‰)较为接近(聂凤军等 2007)。碾子沟钼矿床硫同位素极差较小,具有狭窄的塔式分布特征,这种形态的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布表明成矿硫来自岩浆,可以排除地层硫的混入,且岩浆侵位受控于裂隙充填,而不是靠顶蚀作用。进一步说明碾子沟钼成矿作用与岩浆活动密切相关。

5.3 岩浆作用对内成金属成矿的制约

内生金属成矿作用通常与花岗质岩浆活动有直

接或间接的联系(Richards 2003)。钼矿床除了以独立矿床产出外,还常与黄铜矿伴生形成铜钼矿床,芮宗瑶等(1984)认为,若深源岩浆在成矿中起主导作用,则矿石中铜含量增高,形成以铜为主的矿床;若花岗质基底在成矿中起主要作用,则矿石中钼含量增高,形成以钼为主的矿床。

碾子沟钼矿床为一单钼矿床,围岩黑云母二长花岗岩 Sr-Nd-Pb 同位素数据显示,岩浆源于壳幔过渡带,并与古老地壳具有亲缘性(陈志广等,2008)。辉钼矿的 $\alpha(\text{Re})$ 介于 $12.6 \times 10^{-6} \sim 37.0 \times 10^{-6}$,平均 24.9×10^{-6} ,具有壳幔源特征(张作伦等,2009)。金属矿物辉钼矿、黄铁矿的硫同位素特征偏离幔源岩浆硫 $0 \pm 1\text{‰}$ 范围(Eldridge et al., 1991)。据此可以推断碾子沟钼矿成岩源区以花岗质基底为主导,且成岩源区制约了矿床金属硫化物的形成。

6 结 论

(1) 碾子沟黑云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(152.4 \pm 1.6) \text{ Ma}$,表明岩体侵位于晚侏罗世,且与钼成矿时代一致,属同一成岩、成矿系统演化的产物。

(2) 碾子沟钼矿床辉钼矿、黄铁矿的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体变化范围较窄,集中于 $3.50\text{‰} \sim 6.64\text{‰}$,为岩浆硫特征,说明钼成矿作用与岩浆活动密切相关。

(3) 碾子沟钼矿黑云母二长花岗岩与成矿物质为同源岩浆演化的产物,岩浆源区的不同制约了矿床金属硫化物的形成。

志 谢 感谢赤峰市国土资源局、松山区国土资源局、碾子沟矿业有限责任公司等单位的领导与技术人员在样品采集过程中给予的帮助,感谢审稿专家的宝贵意见。

References

- Chen W J, Liu J M, Liu H T, Sun X G, Zhang R B, Zhang Z L and Qin F. 2010. Geochronology and fluid inclusion study of the Jiguanshan porphyry Mo deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1423-1436(in Chinese with English abstract).
- Chen Z G, Zhang L C, Wu H Y, Wan B and Zeng Q D. 2008. Geochemistry study and tectonic background of A style host granite in Nianzigou molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum metallo-

- genic belt, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 879-889 (in Chinese with English abstract).
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zhang Z C and Ma G G. 1992. Zircon age U-Pb ages for the early Cambrian time-scale[J]. *Journal of Geological Society*, 149: 171-184.
- Eldridge C S, Compston W, Williams I S, Harris J W and Bristow J. 1991. Isotope evidence for the involvement of recycled sediments in diamond formation[J]. *Nature*, 353: 649-665.
- Liu J M, Zhao Y, Sun Y L, Li D P, Liu J, Chen B L, Zhang S H and Sun W D. 2010. Recognition of the latest permian to early triassic Cu-Mo mineralization on the northern margin of the North China block and its geological significance[J]. *Gondwana Research*, 17(1): 125-134.
- Ludwig K R. 1999. Using Isoplot/Ex, Version 2.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[CP]. Berkeley Geochronology Center Special Publication. 1a: 1-47.
- Ludwig K R. 2001. Squid 1.02: A user manual[CP]. Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2: 1-19.
- Nie F J, Zhang W Y, Jiang S H and Liu Y. 2007. Geological features and origin of Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 26(6): 609-620 (in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2003. Tectono-Magmatic Precursors for Porphy Cu (Mo-Au) deposit formation[J]. *Econ. Geol.*, 98: 1515-1533.
- Rui Z Y, Huang C K, Qi G M, Xu J and Zhang H T. 1984. Porphyry copper (molybdenum) deposits of China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-60 (in Chinese).
- Rui Z Y, Shi L D and Fang R H. 1994. Geology and nonferrous metallic deposits in the northern margin of the north China landmass and its adjacent area[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 476p (in Chinese).
- Selby D, Creaser R A, Stein H J, Markey R J and Hannah J L. 2007. Assessment of the ^{187}Re decay constant by cross calibration of Re-Os molybdenite and U-Pb zircon chronometers in magmatic ore systems[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 1999-2013.
- Song B, Zhang Y H and Wan Y S. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48(Supp.) 26-30 (in Chinese with English abstract).
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and IVB iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099-1102.
- Wu J Q, Zhang B T, Lin H F and Chen P R. 2007. Comparison between the zircon U-Pb ages and the whole-rock Rb-Sr ages of granite plutons and its geochemical implication[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 272-281 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569.
- Ye H S, Mao J W, Li Y F, Guo B J, Zhang C Q, Liu J, Yan Q R and Liu G Y. 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078-1088 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, Chen W J, Qin F, Zhang R B, Yu W B, Zhang X H and Zhai M G. 2009. Mineralizing types, geological characteristics and geodynamic background of molybdenum deposits in Xilamulun molybdenum polymetal metallogenic belt on northern margin of North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1225-1238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Wu H Y, Wan B and Chen Z G. 2009. Ages and geodynamic settings of Xilamulun Mo-Cu metallogenic belt in the northern part of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 16: 243-254.
- Zhang Z L, Zeng Q D, Qu W J, Liu J M, Sun X G, Zhang R B, Chen W J and Q F. 2009. The molybdenite Re-Os dating from the Nianzigou Mo deposit, Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 212-218 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z L, Liu J M, Duan X X and Chen W J. 2010. Ore-forming fluid geochemistry of Nianzigou molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum metallogenic belt, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1375-1385 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈伟军, 刘建明, 刘红涛, 孙兴国, 张瑞斌, 张作伦, 覃 锋. 2010. 内蒙古鸡冠山斑岩钼矿床成矿时代和成矿流体研究[J]. *岩石学报*, 26(5): 1423-1436.
- 陈志广, 张连昌, 吴华英, 万 博, 曾庆栋. 2008. 内蒙古西拉沐沦成矿带碾子沟钼矿区 A 型花岗岩地球化学和构造背景[J]. *岩石学报*, 24(4): 879-889.
- 聂凤军, 张万益, 江思宏, 刘 妍. 2007. 内蒙古小东沟斑岩钼矿床地质特征及成因探讨[J]. *矿床地质*, 26(6): 609-620.
- 芮宗瑶, 黄崇珂, 齐国明, 徐 珏, 张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社. 1-60.
- 芮宗瑶, 施林道, 方如恒, 等. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社. 476 页.
- 宋 彪, 张玉海, 万渝生. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 48(增刊): 26-30.
- 吴俊奇, 章邦桐, 凌洪飞, 陈培荣. 2007. 花岗岩锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 等时线年龄对比研究及其地球化学意义[J]. *高校地质学报*, 13(2): 272-281.
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘 珏, 闫全人, 刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 80(7): 1078-1088.
- 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 陈伟军, 覃 锋, 张瑞斌, 于文斌, 张晓晖, 翟明国. 2009. 华北克拉通北缘西拉沐沦钼多金属成矿带钼矿化类型、特征及地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 25(5): 1225-1238.
- 张作伦, 曾庆栋, 屈文俊, 刘建明, 孙兴国, 张瑞斌, 陈伟军, 覃 锋. 2009. 内蒙碾子沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(1): 212-218.
- 张作伦, 刘建明, 段晓侠, 陈伟军. 2010. 内蒙古西拉沐沦成矿带碾子沟钼矿床成矿流体地球化学特征[J]. *岩石学报*, 26(5): 1375-1385.