

内蒙古翁牛特旗青石洞子斑岩型钼铅锌矿床 成矿时代及矿床成因研究

付丽娟¹, 宁生元¹, 张化鹏¹, 王可勇^{2*}, 苗海兵¹, 张天智¹, 谷建军¹

(1. 内蒙古山金地质矿产勘查有限公司; 2. 吉林大学地球科学学院)

摘要:青石洞子钼铅锌矿床为内蒙古翁牛特旗近期发现的一大型斑岩型矿床, 具有上铅锌矿化、下钼矿化的垂直分带规律。上部铅锌矿体主要产于额里图组安山岩中, 深部钼矿体产于钾长花岗岩-二长花岗岩等杂岩体中。根据矿石矿物组合、结构构造和矿脉穿切关系, 将其成矿作用划分为石英-辉钼矿阶段(I)、石英-黄铁矿阶段(II)、石英-多金属硫化物阶段(III)、石英-方铅矿-闪锌矿阶段(IV)及石英-碳酸盐阶段(V) 5个成矿阶段。各成矿阶段流体包裹体和I、II及IV成矿阶段H-O同位素分析结果表明, 青石洞子钼铅锌矿床的成矿流体早期以岩浆热液为主, 混合少量大气降水; 随着成矿作用进行, 越来越多大气降水不断混入, 至成矿作用晚期逐渐过渡为以大气降水为主的热液。I成矿阶段的辉钼矿Re-Os同位素和III、IV成矿阶段的金属硫化物硫同位素分析结果表明, 成矿物质主要为岩浆来源, 可能有少量的地层加入。矿区地表及钻孔岩芯等不同部位的辉钼矿Re-Os同位素等时线年龄为 $164\text{ Ma}\pm 14\text{ Ma}$, 表明矿床成矿作用发生于中侏罗世, 形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合后的碰撞造山阶段。

关键词:青石洞子; 钼铅锌矿床; 翁牛特旗; 成矿流体; 成矿物质; 成矿时代; 矿床成因

中图分类号: TD11 P618.51

文章编号: 1001-1277(2025)05-0062-08

文献标志码: A

doi: 10.11792/hj20250513

引言

青石洞子钼铅锌矿床位于内蒙古自治区翁牛特旗中西部, 属于少郎河铅锌多金属成矿带, 成矿地质条件优越, 目前已探明一批大中型铅锌银多金属矿床, 如黄花沟、皇姑屯、荷尔勿苏、张家沟和梧桐花等大型银铅锌多金属矿床^[1-3]。2023年5月—2024年10月, 赤峰市庚金矿业有限责任公司在对青石洞子钼铅锌矿区进行勘查时, 在深部(300 m标高以下)发现了钼矿化, 累计探获钼矿石量1亿t、钼金属量13万t, 达大型以上规模。

青石洞子钼铅锌矿床上部为热液脉状铅锌矿化, 下部为斑岩型钼矿化, 是该区域新发现的一种矿化类型, 这2类矿化多独立产出。但是, 随着区域地质勘查的深入开展, 越来越多的勘查实例揭示, 在脉状铅锌银矿床的深部发现了斑岩型钼矿化, 二者可共生产出^[4-5]。前人从不同角度对少郎河铅锌多金属成矿带的多金属矿床开展了研究, 将该成矿带内发现的主要矿床划分为矽卡岩型和热液脉型2类, 认为矿体的产出普遍受地层和构造因素影响, 并与燕山期岩浆活动

密切相关^[6-8]。少郎河铅锌多金属成矿带内该新类型矿床发现时间较短, 缺少对其成矿流体、成矿物质、成矿时代、矿床成因等成矿机制的研究。本文围绕青石洞子钼铅锌矿床主成矿阶段开展流体包裹体、氢氧硫同位素、闪锌矿微量元素分析和辉钼矿Re-Os同位素定年, 在此基础上总结矿床成因及成矿作用机制。

1 区域地质背景

青石洞子钼铅锌矿床位于华北板块北部陆缘增生带(II₂), 翁牛特一敖汉旗古生代活动陆缘(III₂), 广德公—杜家地隆起(III₂¹)。

区域主要出露下石炭统石咀子组(C_{1s})、下二叠统三面井组(P_{1sm})、中二叠统额里图组(P_{2e}), 以及侏罗系—白垩系火山岩地层(见图1)。区域断裂活动强烈, 其中, 规模最大的断裂为近东西向产出的西拉木伦断裂的二级断裂——少郎河断裂, 青石洞子钼铅锌矿床位于该断裂南部, 其次发育北西向、北东向次级断裂。区域岩浆岩发育, 主要出露晚三叠世辉长岩、花岗闪长岩, 中二叠世二长黑云母花岗岩、正长花岗岩、闪长玢岩, 以及早白垩世花岗岩斑岩、流纹斑岩。

收稿日期: 2025-01-08; 修回日期: 2025-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(92062216)

作者简介: 付丽娟(1991—), 女, 工程师, 硕士, 从事矿产普查与勘探工作; E-mail: fulijuan@sd-gold.com

*通信作者: 王可勇(1965—), 男, 教授, 博士, 从事矿产普查与勘探、矿床学方面研究工作; E-mail: Wangky@jlu.edu.cn

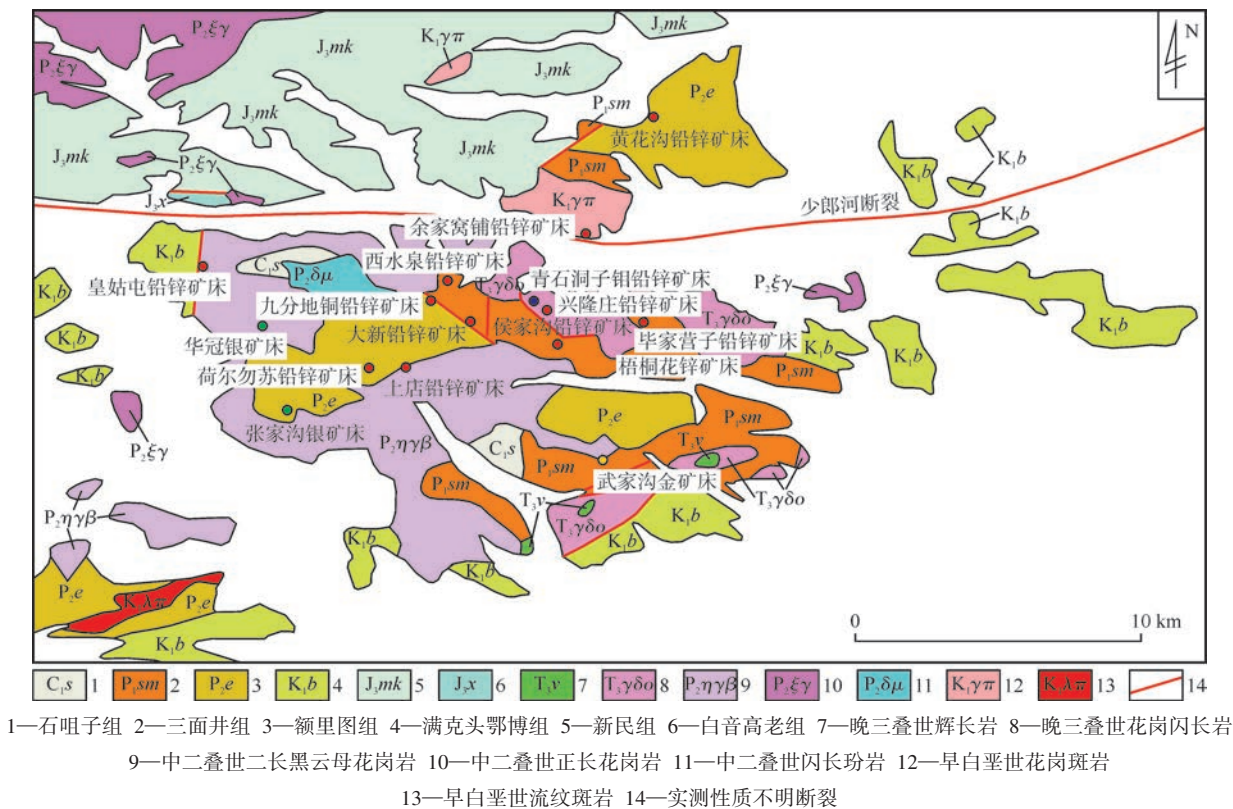


图 1 青石洞子钼铅锌矿床区域地质图(据文献[3]修改)

Fig. 1 Regional geological map of the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

矿区出露地层主要有中二叠统额里图组(P_{2e})、上侏罗统玛尼吐组(J_{3mn})及下白垩统义县组(K_{1y})。其中,额里图组是主要赋矿围岩,由中性火山熔岩及火山碎屑岩组成。前者主要岩性为安山岩,由气孔杏仁状安山岩及其互层组成;后者以角砾安山岩为主,少量中性—酸性角砾熔岩、凝灰角砾岩、凝灰岩夹凝灰砂岩及凝灰砾岩等。该组地层走向北西,倾向北东,倾角 30°~50°。受后期热液活动影响,该组地层岩石局部发生不同程度的绿帘石化、绿泥石化等蚀变,矿脉两侧岩石则发育硅化、绢云母化及碳酸盐化等蚀变。

矿区构造以断裂发育为主要特征,可划分为北东向、北西向 2 组,均表现为压性、压扭性。其中,北东向断裂走向一般为 30°~40°,倾向南东,倾角 50°~70°,沿断面呈舒缓波状变化;北西向断裂走向一般为 290°~310°,倾向北东,倾角多为 50°~65°,断裂内岩石片理化发育,沿断裂形成的破碎带常见热液蚀变及矿化现象,为矿区内主要的控矿构造。

矿区内经历华力西晚期和燕山早期 2 期岩浆活动。地表主要出露华力西晚期斜长花岗岩和燕山早期角砾状闪长玢岩、钾长花岗岩及流纹斑岩。斜长花

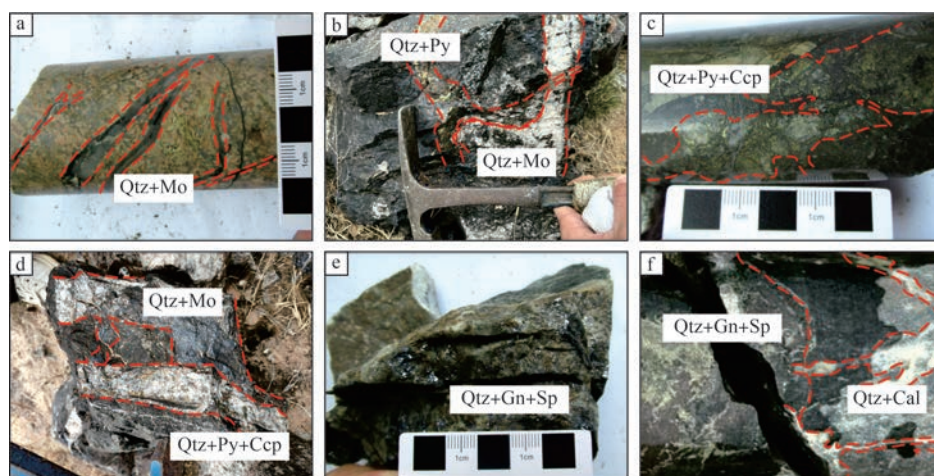
岗岩为中细粒花岗结构,块状构造;角砾状闪长玢岩呈似斑状结构,块状构造;钾长花岗岩呈中细粒花岗结构,块状构造;流纹斑岩多以北西向展布的岩脉形式产出,具斑状结构,流动构造及块状构造。

2.2 矿化特征

矿区矿化类型以斑岩型钼矿化之上叠加热液脉状铅锌银矿化为特征。其中,铅锌矿体多赋存于 300 m 标高以上,产于额里图组安山岩中,呈脉状受北西向压扭性断裂控制,倾向北东,倾角中等偏陡;钼矿体类型为斑岩型,多赋存于 300 m 标高以下,产于隐伏的钾长花岗岩—二长花岗岩等杂岩体中。

矿石中金属矿物主要为方铅矿、闪锌矿、辉钼矿,其次为黄铁矿、黄铜矿等;脉石矿物有钾长石、石英、绿帘石、绿泥石及方解石等。矿石结构主要为自形及他形粒状结构,局部见交代残余结构;矿石呈块状构造、浸染状构造、角砾状构造、条带状构造及脉状构造。

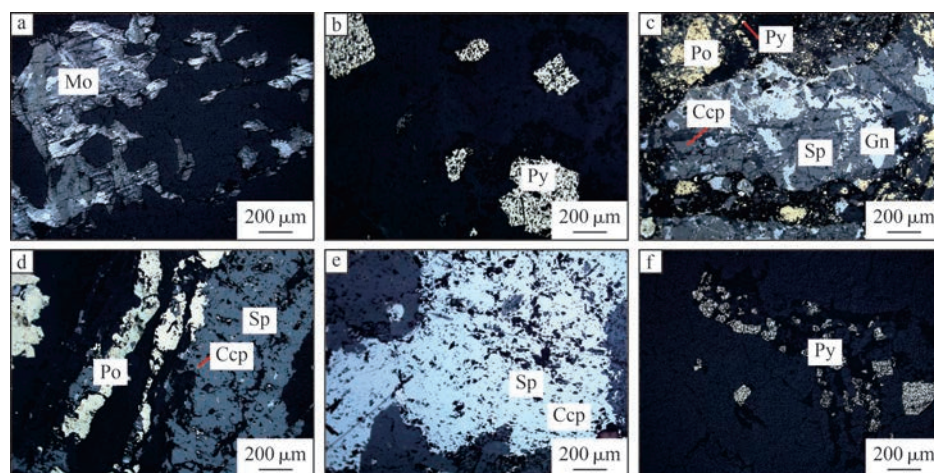
根据矿石矿物组合、结构构造和矿脉穿切关系,将青石洞子钼铅锌矿床成矿作用划分为 5 个成矿阶段(见图 2、图 3),分别为石英—辉钼矿阶段(Ⅰ)、石英—黄铁矿阶段(Ⅱ)、石英—多金属硫化物(黄铁矿—黄铜矿—磁黄铁矿—方铅矿—闪锌矿±辉钼矿)阶段(Ⅲ)、石英—方铅矿—闪锌矿阶段(Ⅳ)及石英—碳酸盐阶段(Ⅴ)。各成矿阶段特征如下。



a—二长花岗岩中的 I 成矿阶段石英-辉钼矿矿脉 b—II 成矿阶段石英-黄铁矿脉穿切 I 成矿阶段石英-辉钼矿矿脉
c—III 成矿阶段石英-黄铁矿-黄铜矿脉 d—III 成矿阶段石英-黄铁矿-黄铜矿脉穿切 I 成矿阶段石英-辉钼矿矿脉
e—IV 成矿阶段石英-方铅矿-闪锌矿脉 f—V 成矿阶段石英-碳酸盐脉穿切 IV 成矿阶段石英-方铅矿-闪锌矿脉
Qtz—石英 Mo—辉钼矿 Py—黄铁矿 Ccp—黄铜矿 Gn—方铅矿 Sp—闪锌矿 Cal—方解石

图2 青石洞子钼铅锌矿床矿石及地表照片

Fig. 2 Photographs of ores and surface from the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit



a—他形辉钼矿 (I 成矿阶段) b—自形—半自形黄铁矿 (II 成矿阶段) c—方铅矿交代闪锌矿,且黄铜矿在闪锌矿中呈乳滴状 (III 成矿阶段)
d—磁黄铁矿交代闪锌矿,且黄铜矿在闪锌矿中呈乳滴状 (III 成矿阶段) e—少量黄铜矿在闪锌矿中呈乳滴状 (IV 成矿阶段)
f—半字形—他形黄铁矿 (V 成矿阶段) Mo—辉钼矿 Py—黄铁矿 Po—磁黄铁矿 Ccp—黄铜矿 Gn—方铅矿 Sp—闪锌矿

图3 青石洞子钼铅锌矿床矿石矿物显微特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of ore minerals in the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit

石英-辉钼矿阶段 (I): 以细脉或细网脉形式产出, 主要矿物为乳白色石英, 石英脉外侧见有钾长石等蚀变矿物, 石英脉内含浸染状半自形辉钼矿, 但多数辉钼矿以薄膜状沿石英裂隙面产出。

石英-黄铁矿阶段 (II): 多以细脉形式产出, 主要矿物为灰色石英, 内含浸染状立方体或半自形黄铁矿集合体, 偶见黄铜矿、辉钼矿等硫化物, 局部地段亦见以石英、黄铜矿为主的细脉。

石英-多金属硫化物阶段 (III): 以细脉形式产出, 主要矿物为黄铁矿、磁黄铁矿, 另有少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等, 脉石矿物以石英为主, 为铅锌主要成矿阶段。

石英-方铅矿-闪锌矿阶段 (IV): 多以细脉形式产出, 金属矿物以自形方铅矿及半自形—他形闪锌矿为主, 脉石矿物主要为石英。

石英-碳酸盐阶段 (V): 多以细网脉形式产出, 穿切上述各阶段矿体, 主要矿物以方解石等碳酸盐矿物为主, 次为石英, 偶见黄铁矿、方铅矿或闪锌矿, 代表成矿作用进入尾声。

矿区矿体两侧围岩均发育不同程度的热液蚀变作用, 主要蚀变类型有钾化、硅化、黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化及碳酸盐化等; 其中, 钾化与钼成矿关系密切, 多发育于石英-辉钼矿矿脉近侧; 其余蚀变与钼铅锌矿化均有关系, 多分布于矿体两侧 1 ~ 5 m。

3 成矿流体及物质来源

3.1 成矿流体来源

3.1.1 流体包裹体岩相学和显微测温

通过对流体包裹体岩相学研究发现,各阶段石英颗粒中主要发育含子矿物三相包裹体(S)、富气相包裹体(LV)及气液两相包裹体(VL)3类原生包裹体,包裹体多呈椭圆形、菱形、四边形及不规则状产出。不同成矿阶段矿石中发育的包裹体类型有所差异,其中,I成矿阶段石英颗粒中发育S型、LV型及VL型3类包裹体,且LV型包裹体发育数量少,S型与VL型或LV型与VL型包裹体多随机成群分布,未见S型、LV型及VL型3类包裹体成群发育或共生发育特征;II成矿阶段石英颗粒中主要发育VL型包裹体,偶见S型包裹体,而LV型包裹体少见;III成矿阶段石

英颗粒中主要发育VL型包裹体,偶见极少量的LV型包裹体;IV成矿阶段的石英颗粒中主要发育VL型包裹体,此外该阶段闪锌矿中亦见大量VL型包裹体,多随机成群产出;V成矿阶段的石英颗粒中主要发育VL型包裹体。

对取自5个成矿阶段矿石石英及闪锌矿中发育的各类型包裹体进行了显微测温研究,结果见表1。在流体包裹体完全均一温度-盐度关系图(见图4)中,自I成矿阶段至V成矿阶段,流体包裹体数据表现出明显的线性排列特征,充分显示了成矿过程中岩浆热液与大气降水不断混合的演化趋势,因此,流体混合及其导致的流体温度、盐度等物化参数的降低变化可能是钼、铅、锌等金属元素沉淀富集成矿的重要机制^[9-10]。

3.1.2 流体包裹体H-O同位素

表1 青石洞子钼铅锌矿床流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric results of fluid inclusions from the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit								
成矿阶段	包裹体类型 (数量)	气泡消失 温度/℃	子矿物融化 温度/℃	冰点温度/℃	完全均一 温度/℃	盐度/%	密度/ (g·cm ⁻³)	均一方式
I	S(31)	123 ~ 272	262 ~ 495		262 ~ 495	39.97 ~ 59.13	0.96 ~ 1.09	子矿物熔化 并均一至液相
	LV(6)			-0.8 ~ -2.1	405 ~ 434	1.39 ~ 3.51	0.41 ~ 0.51	气相
	VL(35)			-2.9 ~ -5.8	241 ~ 366	4.79 ~ 8.94	0.67 ~ 0.86	液相
II	S(3)	327 ~ 352	439 ~ 460		439 ~ 460	51.99 ~ 54.46	0.72 ~ 0.81	子矿物熔化 并均一至液相
	VL(32)			-4.1 ~ -7.2	310 ~ 369	6.58 ~ 10.74	0.69 ~ 0.78	液相
III	LV(7)			-0.9 ~ -2.4	368 ~ 392	1.56 ~ 4.01	0.52 ~ 0.58	气相
	VL(12)			-4.0 ~ -7.0	334 ~ 389	6.44 ~ 10.49	0.68 ~ 0.74	液相
IV	VL(40) ¹⁾			-2.6 ~ -5.8	288 ~ 347	4.32 ~ 8.94	0.69 ~ 0.78	液相
	VL(23) ²⁾			-2.0 ~ -4.1	234 ~ 329	3.37 ~ 6.58	0.73 ~ 0.85	液相
V	VL(39)			-1.5 ~ -3.7	189 ~ 296	2.56 ~ 5.99	0.78 ~ 0.87	液相

注:1)样品为石英;2)样品为闪锌矿;盐度计算公式见文献[11-12]。

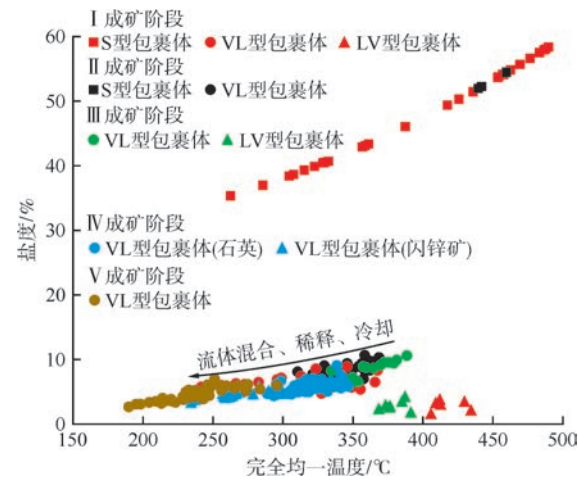


图4 青石洞子钼铅锌矿床流体包裹体完全均一温度-盐度关系图解
Fig. 4 Full homogenization temperature-salinity correlation diagram of fluid inclusions in the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit

为了查明青石洞子钼铅锌矿床成矿流体的来源,对I成矿阶段、II成矿阶段及IV成矿阶段流体包裹体开展了H-O同位素分析。利用石英-水同位素平衡函数和流体包裹体显微测温数据,计算流体包裹体H-O同位素值,结果见表2。

在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}-\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 图解(见图5)中,I成矿阶段样品投点落于岩浆水与大气降水线之间,靠近岩浆水一侧,反映成矿流体可能主要来源于岩浆热液,并有少量大气降水参与;II成矿阶段样品投点与I成矿阶段大体位置相当,反映该阶段成矿流体也主要来自岩浆热液,同时也有少量大气降水参与;IV成矿阶段样品投点位于岩浆水与大气降水线中间位置,明显较I成矿阶段、II成矿阶段样品投点更靠近大气降水,表明成矿流体除岩浆热液来源外,有越来越多的大气

表2 青石洞子钼铅锌矿床流体包裹体H-O同位素分析结果

Table 2 H-O isotope analysis results of fluid inclusions from the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit				
样品编号	矿物	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\text{‰}$
QSDZ-17	石英 I	-114.6	6.5	-0.9
				1.1
QSDZ-25	石英 II	-114.0	5.2	-0.9
				-0.1
QSDZ-28	石英 IV	-120.6	-0.7	-7.4
				-6.6

注:同位素换算公式见文献[13]。

降水参与了成矿作用。

由此表明,青石洞子钼铅锌矿床的成矿流体早期以岩浆水为主,有少量大气降水参与;随着成矿作用进行,越来越多大气降水不断混入,至成矿作用晚期逐渐过渡为以大气降水为主。

3.2 成矿物质来源

青石洞子钼铅锌矿床主要发育黄铜矿、黄铁矿、

表3 青石洞子钼铅锌矿床金属硫化物硫同位素分析结果

Table 3 S isotope analysis results of metal sulfides from the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit					
样品编号	取样位置	成矿阶段	矿物组合	矿物	$\delta^{34}S/\text{‰}$
QSDZ-103-Q1-01PY	地表	Ⅲ	石英-黄铁矿-黄铜矿	黄铁矿	5.24
QSDZ-101-Q1-01CCP	地表	Ⅳ	石英-方铅矿-闪锌矿	黄铜矿	4.28
QSDZ-101-Q1-03	地表	Ⅳ	石英-方铅矿-闪锌矿	闪锌矿	4.84
QSDZ-102-Q1-01	地表	Ⅳ	石英-方铅矿-闪锌矿	闪锌矿	4.79
QSDZ-11-Q1-01	岩芯	Ⅳ	石英-方铅矿-闪锌矿	闪锌矿	3.20
QSDZ-11-Q2-02	岩芯	Ⅳ	石英-方铅矿-闪锌矿	闪锌矿	3.30
QSDZ-24-Q1-01	岩芯	Ⅳ	石英-方铅矿-闪锌矿	闪锌矿	8.77

为3.20 ‰~8.77 ‰,平均值为4.92 ‰,大部分数据分布于典型幔源-岩浆 $\delta^{34}S$ 值(-5 ‰~5 ‰,多数为-3 ‰~3 ‰,并呈塔式分布于零值附近)^[17-20]范围内,少部分略高但趋近该范围,表明硫主要为岩浆源,可能有少量的地层硫加入。

此外,前人研究提出辉钼矿中Re质量分数从壳

表4 青石洞子钼铅锌矿床辉钼矿Re-Os同位素分析结果

Table 4 Re-Os isotope analysis results of molybdenite from the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit									
样品编号	质量/g	$w(\text{Re})/\times 10^{-9}$		$w(^{187}\text{Re})/\times 10^{-9}$		$w(^{187}\text{Os})/\times 10^{-9}$		模式年龄/Ma	
		测量值	1 σ	测量值	1 σ	测量值	1 σ	测量值	1 σ
QSDZ-25	0.017 8	52 035	486	28 732	306	82.85	0.03	172.8	1.8
QSDZ-17	0.011 3	53 165	384	33 416	242	90.10	0.33	161.6	1.3
QSDZ-2	0.024 8	19 778	186	12 431	117	36.22	0.03	174.6	1.6
QSDZ-3	0.030 5	12 395	284	7 790	178	21.59	0.04	166.1	3.8
QSDZ-4	0.027 1	13 842	178	8 700	112	25.16	0.02	173.3	2.2
QSDZ-5	0.011 3	23 917	406	15 032	255	41.72	0.08	166.4	2.8

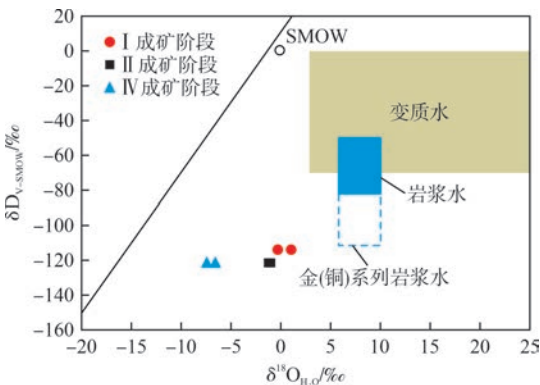


图5 青石洞子钼铅锌矿床流体包裹体 $\delta^{18}O_{H_2O}-\delta D_{V-SMOW}$ 图解
(底图据文献[14-15]修改)

Fig. 5 $\delta^{18}O_{H_2O}-\delta D_{V-SMOW}$ diagram of fluid inclusions in the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit

方铅矿和闪锌矿等硫化物,未见硫酸盐矿物,表明该矿床成矿环境整体以弱还原环境为主,其成矿流体体系中 H_2S 应占优势^[16]。对Ⅲ、Ⅳ成矿阶段矿石样品中的黄铁矿、黄铜矿及闪锌矿3类金属硫化物分别进行了原位硫同位素分析,结果见表3。

由表3可知:青石洞子钼铅锌矿床的硫化物 $\delta^{34}S$ 值

源($n\times 10^{-6}$)、壳幔混源($n\times 10^{-5}$)到幔源($n\times 10^{-4}$)依次递增^[21-23]。青石洞子钼铅锌矿床Ⅰ成矿阶段的辉钼矿样品Re质量分数为 $1.239\ 5\times 10^{-5}\sim 5.316\ 5\times 10^{-5}$,平均值为 $2.918\ 9\times 10^{-5}$ (见表4),具有典型的壳幔混源特征,暗示矿床成矿物质既有岩浆来源,同时可能部分来自围岩地层,这与硫同位素的结果一致。

4 成矿时代

本次工作于青石洞子钼铅锌矿床共采集 6 件辉钼矿样品,分别采自地表及钻孔岩芯等不同部位,其年龄可代表钼成矿年龄,结果见表 4。单个辉钼矿样品 Re-Os 同位素模式年龄为 $(161.6 \pm 1.3) \sim (174.6 \pm 1.6)$ Ma,等时线年龄为 $164 \text{ Ma} \pm 14 \text{ Ma}$ (95 % 置信度, $MSWD=9.5$),加权平均模式年龄为 $168.5 \text{ Ma} \pm 6.5 \text{ Ma}$ (95 % 置信度, $MSWD=10.6$) (见图 6),二者对比发现在误差范围内近于一致,表明数据可靠。

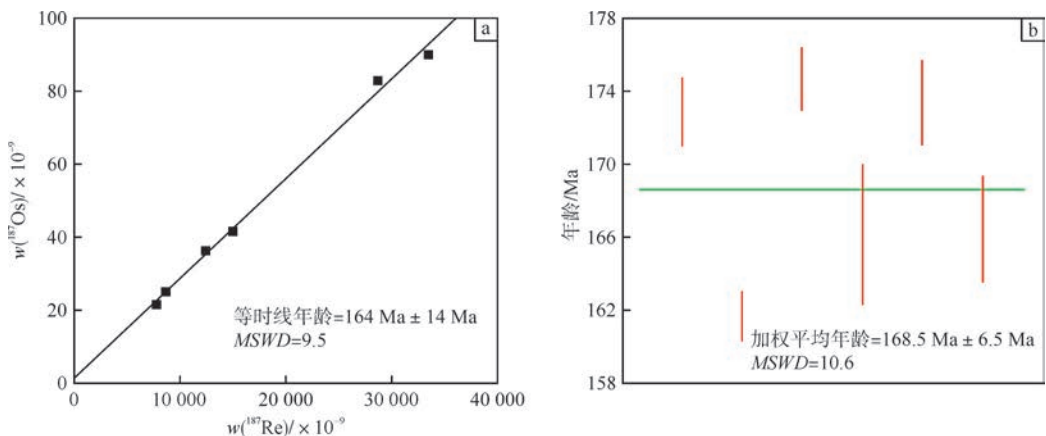


图 6 青石洞子钼铅锌矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄图(a)和加权平均年龄图(b)

Fig. 6 Re-Os isotope isochron age diagram (a) and weighted mean age diagram (b) of molybdenite from the Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit

5 矿床成因

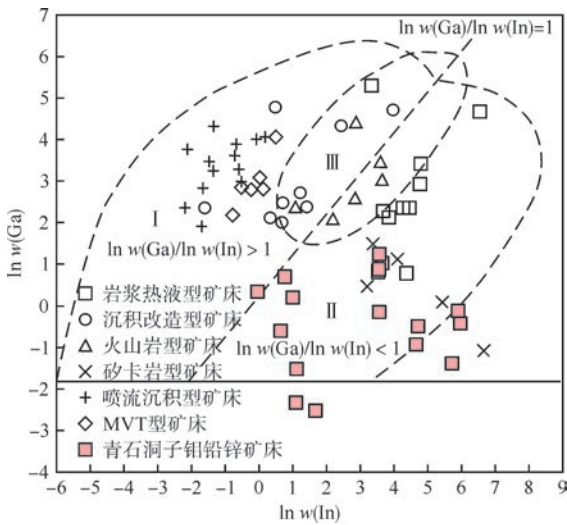
闪锌矿作为矿石中重要的金属矿物,其地球化学特征蕴含着丰富的有关矿床成因及形成物理化学条件等方面的信息^[30-39]。对取自青石洞子钼铅锌矿床Ⅳ成矿阶段 4 件矿石样品中的闪锌矿进行 15 个测点的原位微量元素分析工作,结果显示,在闪锌矿 $\ln w(\text{Ga})-\ln w(\text{In})$ 矿床成因类型判别图解(见图 7)中,样品点大部分落入岩浆热液型矿床范围。

综上所述,青石洞子钼铅锌矿床黄铁矿、黄铜矿及闪锌矿等主要金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $3.20\text{‰} \sim 8.77\text{‰}$,表明成矿物质主要来自深源岩浆活动,部分来自围岩地层;流体包裹体 H-O 同位素揭示,成矿流体早期以岩浆热液为主,少量大气降水混入;随着成矿作用的进行,大气降水越来越多,至成矿作用晚期,成矿流体逐渐过渡为以大气降水为主。闪锌矿微量元素显示,矿床成因具有岩浆热液成因属性,属斑岩型钼-热液脉型铅锌成矿系统产物。

6 结 论

1)青石洞子钼铅锌矿床为翁牛特旗地区近期发现的一大型斑岩型矿床,具有上铅锌矿化、下钼矿化垂直分带规律。铅锌矿体主要产于额里图组安山

辉钼矿 Re-Os 同位素定年结果表明,青石洞子钼铅锌矿床的成矿作用发生于中侏罗世。已有研究表明,自中侏罗世以来,区域主要受蒙古-鄂霍茨克洋发展演化影响,并将其演化过程划分为中-晚侏罗世碰撞造山和早白垩世造山后伸展 2 个阶段^[24]。伴随着中侏罗世蒙古-鄂霍茨克洋逐渐闭合,大兴安岭中南段地区进入陆-陆碰撞造山演化阶段,陆-陆碰撞导致岩石圈地壳加厚、局部坍塌及下地壳的部分熔融,产生大量 I 型及 S 型岩浆及火山活动,岩浆浅部侵位,形成了与岩浆侵入有关的斑岩型钼矿化^[25-29]。



Ⅰ—沉积改造矿床 Ⅱ—岩浆热液型矿床 Ⅲ—火山岩型矿床

图 7 闪锌矿 $\ln w(\text{Ga})-\ln w(\text{In})$ 矿床成因类型判别图解 (底图据文献[35]修改)

Fig. 7 Genetic type discrimination diagram of sphalerite $\ln w(\text{Ga})-\ln w(\text{In})$

岩中,深部钼矿体产于钾长花岗岩-二长花岗岩等杂岩体中。根据矿石矿物组合、结构构造及矿脉穿切关系,将其成矿作用划分为石英-辉钼矿阶段(Ⅰ)、石英-黄铁矿阶段(Ⅱ)、石英-多金属硫化物阶段(Ⅲ)、石英-方铅矿-闪锌矿阶段(Ⅳ)及石英-碳酸盐阶段(Ⅴ)5 个成矿阶段。

2)青石洞子钼铅锌矿床属于斑岩型钼-热液脉型铅锌成矿系统产物。辉钼矿 Re-Os 同位素和金属硫化物硫同位素分析结果表明,成矿物质主要来自深源岩浆活动,部分来自围岩地层;闪锌矿 $\ln w(\text{Ga})-\ln w(\text{In})$ 矿床成因类型判别图解显示,矿床成因具有岩浆热液成因属性;流体包裹体测温及其 H-O 同位素揭示,成矿流体早期以岩浆热液为主,随着成矿作用进行,大气降水越来越多,至成矿作用晚期,成矿流体逐渐过渡为以大气降水为主,流体混合及其导致的流体温度、盐度等物化参数的降低,可能是钼、铅、锌等金属元素沉淀富集成矿的重要机制。

3)青石洞子钼铅锌矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素定年结果($164 \text{ Ma} \pm 14 \text{ Ma}$)表明,成矿作用发生于中侏罗世。伴随着中侏罗世蒙古—鄂霍茨克洋逐渐闭合,大兴安岭中南段地区进入陆-陆碰撞造山演化阶段,陆-陆碰撞导致岩石圈地壳加厚、局部坍塌及下地壳的部分熔融,产生大量 I 型及 S 型岩浆及火山活动,岩浆浅部侵位,形成了与岩浆侵入有关的斑岩型钼矿化。

[参 考 文 献]

- [1] 王春光. 内蒙古少郎河成矿带铅锌多金属矿床成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [2] 郭云鹏, 刘建明, 曾庆栋, 等. 华北克拉通北缘少郎河地区约 2.5 Ga 的二长花岗岩及地质意义[J]. 地质前缘, 2018, 25(4): 11-22.
- [3] 吴垚壘. 内蒙古少郎河成矿带黄花岗铅锌多金属矿床矿物学特征及成因研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [4] 金露英, 秦克章, 李光明, 等. 斑岩钼-热液脉状铅锌银矿成矿系统特征、控制因素及勘查指示[J]. 岩石学报, 2020, 36(12): 3 813-3 839.
- [5] 翟德高, 赵青青, 豆明新, 等. 我国东北部地区大规模低温银成矿特征与机制[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2024, 43(4): 755-766.
- [6] 姜万德, 李顺达, 张森, 等. 内蒙古翁牛特旗铜子铅锌矿构造控矿特征与找矿标志[J]. 世界地质, 2015, 34(4): 971-983.
- [7] 陈井胜, 刘森, 李斌, 等. 内蒙古翁牛特旗晚志留世二长花岗岩年代学及地球化学特征[J]. 地质通报, 2017, 36(8): 1 359-1 368.
- [8] 王春光, 孙国胜, 孙九达, 等. 内蒙古荷尔勿苏铅锌矿区二叠纪侵入岩成因: 锆石 U-Pb 年代学与岩石地球化学制约[J]. 世界地质, 2018, 37(3): 737-746, 760.
- [9] 齐雨宁, 孙国胜, 冯德胜, 等. 内蒙古敖汉旗岱王山金矿床流体包裹体特征及矿床成因[J]. 黄金, 2024, 45(3): 67-71.
- [10] 赵克强, 孙景贵, 程琳, 等. 内蒙古白土营子钼矿床成矿年代学及成矿流体特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(3): 822-839.
- [11] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [12] BODNAR R J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ solution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(3): 683-684.
- [13] CLAYTON R N, O'NEIL J R, MAYEDA T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77: 3 057-3 067.
- [14] TAYLOR H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 1974, 69: 843-883.
- [15] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985.
- [16] 李铁刚. 内蒙古甲乌拉—查干布拉克铅锌银矿田成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [17] HOEFS J. Stable isotope geochemistry[M]. Berlin: Springer Verlag, 1997.
- [18] 郑永飞. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J]. 矿床地质, 2001, 20(1): 57-70, 85.
- [19] 唐卫东, 魏立勇, 高永宝, 等. 北山成矿带老铜沟金多金属矿床 S-Pb-C-O 同位素特征及其对矿床成因的约束[J]. 矿床地质, 2024, 43(5): 1 111-1 126.
- [20] 耿瑞, 李怡欣, 张姍, 等. 黑龙江省老柞山金矿床地质、碳-氢-氧和硫-铅多元同位素特征及矿床成因探讨[J]. 黄金, 2024, 45(10): 25-31.
- [21] 陈雷, 闫臻, 刘凯, 等. 南秦岭冷水沟铜钼金矿床年代学及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(3): 713-727.
- [22] 毛景文, 张作衡, 张招崇, 等. 北祁连山小柳沟钨矿床中辉钼矿 Re-Os 年龄测定及其意义[J]. 地质论评, 1999, 45(4): 412-417.
- [23] 张雅静, 刘万臻, 卢禹含, 等. 吉林延边和龙地区华集集钼矿床成矿时代、成矿流体特征及成矿物质来源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 2 154-2 170.
- [24] 孙清飞. 大兴安岭天山—突泉成矿亚带南段铅锌多金属成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [25] 钟辉, 邵晓勇, 伍月. 内蒙古阿鲁科尔沁旗新民组“豆状”凝灰岩岩石学特征及成因探讨[J]. 地质与资源, 2016, 25(2): 121-124.
- [26] 丁秋红, 王杰, 李晓海, 等. 大兴安岭东南部中侏罗统新民组研究新进展[J]. 地质与资源, 2017, 26(5): 425-438.
- [27] 张超. 大兴安岭南段巴林左旗—扎鲁特旗地区晚中生代岩浆作用及其构造背景[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [28] 张吉衡. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009.
- [29] 马雪俐. 大兴安岭南段东坡铜多金属矿床成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [30] 曾庆文, 戴香麟, 董国臣, 等. 内蒙古浩布高铅锌矿床闪锌矿微量元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 567-582.
- [31] 李士辉, 武广, 李振祥, 等. 大兴安岭南段 1118 高地银多金属矿床闪锌矿微量元素组成: 对矿床成因的制约[J/OL]. 地质前缘, 1-28[2025-01-07]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.12.106>.
- [32] COOK N J, CIOBANU C L, PRING A, et al. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(16): 4 761-4 791.
- [33] FRENZEL M, HIRSCH T, GUTZMER J. Gallium, germanium, indium, and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type—A meta-analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 76: 52-78.
- [34] 赵月华. 云南个旧老厂锡铜多金属矿床地球化学特征及找矿意义[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2022.
- [35] 裴秋明, 张寿庭, 曹华文, 等. 豫西栾川县骆驼山硫锌多金属矿床闪锌矿微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(5): 741-754.
- [36] 孙永刚, 靳皇玉, 王永胜, 等. 大兴安岭北段斑岩型钼(铜)矿床

- 主要硫化物化学成分特征及地质意义——以 770 钼(铜)矿床为例[J]. 黄金, 2024, 45(11): 27-33.
- [37] 晏国龙, 祁小军, 肖淳, 等. 东秦岭钼多金属成矿带夜长坪斑岩-矽卡岩型钼钨矿床磁铁矿成因类型与指示意义[J]. 黄金, 2024, 45(11): 34-44.
- [38] 王卓, 杨文鹏, 符安宗, 等. 多宝山铜钼金成矿带永新金矿床黄铁矿微量元素地球化学特征研究[J]. 黄金, 2024, 45(10): 32-39.
- [39] 于涛, 李雪梅, 于润涛, 等. 大兴安岭北部小柯勒河铜钼矿区二长岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征 [J]. 黄金, 2021, 42(6): 11-19.

Mineralization age and genesis of the Qingshidongzi porphyry-type Mo-Pb-Zn Deposit in Ongniud Banner, Inner Mongolia

Fu Lijuan¹, Ning Shengyuan¹, Zhang Huapeng¹, Wang Keyong², Miao Haibing¹, Zhang Tianzhi¹, Gu Jianjun¹

(1. Inner Mongolia Shandong Gold Geological Minerals Survey Co., Ltd.; 2. College of Earth Sciences, Jilin University)

Abstract: The Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit, recently discovered in Ongniud Banner, Inner Mongolia, is a large porphyry-type deposit characterized by a vertical zonation pattern with upper Pb-Zn mineralization and lower Mo mineralization. The upper Pb-Zn orebodies mainly occur in the Elitu Formation andesite, while the deep Mo orebodies are hosted in a complex of K-feldspar granite and monzogranite. Based on ore mineral assemblages and the crosscutting relationships of textures and veins, 5 mineralization stages are identified: quartz-molybdenite stage (I), quartz-pyrite stage (II), quartz-polymetallic sulfide stage (III), quartz-galena-sphalerite stage (IV), and quartz-carbonate stage (V). Fluid inclusions from each stage, along with H-O isotopic analysis results from stages I, II, and IV, indicate that the early ore-forming fluids in Qingshidongzi Mo-Pb-Zn Deposit were primarily magmatic hydrothermal fluids with minor meteoric water input. As mineralization progressed, meteoric water increasingly mixed in, and by the late stages, the hydrothermal system was dominated by meteoric water. Re-Os isotope dating of molybdenite from stage I and sulfur isotope analyses of metal sulfides from stages III and IV suggest that the ore-forming materials were mainly magmatic in origin, with minor contributions from surrounding strata. Re-Os isochron ages of molybdenite from surface and drill cores yield a mineralization age of $164 \text{ Ma} \pm 14 \text{ Ma}$, indicating that the deposit formed during the Middle Jurassic, in the collisional orogenic stage following the closure of the Mongol-Okhotsk Ocean.

Keywords: Qingshidongzi; Mo-Pb-Zn deposit; Ongniud Banner; ore-forming fluid; ore-forming materials; mineralization age; deposit genesis

(上接第 61 页)

Experimental research of chemical pretreatment-non-cyanide leaching process for a high-sulfur gold concentrate from Gansu

Liu Chuanzhen, Wang Luping, Zang Wenyong, Dou Na, Liu Hui

(Shandong Guohuan Solid Waste Innovation Technology Center Co., Ltd.)

Abstract: The gold leaching rate from direct non-cyanide leaching of a high-sulfur gold concentrate from Gansu is relatively low. To address this issue, a chemical pretreatment-non-cyanide leaching process was adopted. The study focused on the effects of the type and dosage of chemical pretreatment agents, pretreatment time, as well as grinding fineness, slurry pH, liquid-solid ratio, dosage of non-cyanide leaching agent, and leaching time during non-cyanide leaching on the leaching effectiveness. Test results showed that using sulfuric acid as the pretreatment agent at a dosage of 30 kg/t with a pretreatment time of 6 h, and under the conditions of grinding fineness with -0.038 mm accounting for 85 %, leaching slurry pH of 11, liquid-solid ratio of 2 mL/g, non-cyanide leaching agent dosage of 2 kg/t, and leaching time of 48 h, a gold leaching rate of 90.24 % could be achieved. This represents a significant improvement compared with the gold leaching rate of 72.88 % from direct non-cyanide leaching. The research results can provide a reference for the treatment of high-sulfur refractory gold concentrate.

Keywords: high-sulfur gold concentrate; chemical pretreatment; grinding fineness; slurry pH; non-cyanide leaching; gold leaching rate