

张雅静,刘万臻,卢禹含,等.吉林延边和龙地区华集岭钼矿床成矿时代、成矿流体特征及成矿物质来源.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2154-2170.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240213.

Zhang Yajing, Liu Wanzhen, Lu Yuhan, et al. Mineralization Age, Fluid Properties and Sources of Ore-Forming Materials for Huajiling Molybdenum Deposit in Helong Area of Yanbian, Jilin Province. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(6): 2154-2170. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240213.

吉林延边和龙地区华集岭钼矿床成矿时代、成矿流体特征及成矿物质来源

张雅静¹,刘万臻²,卢禹含³,聂喜涛⁴,张佳楠¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061
2. 吉林省第五地质调查所, 长春 130103
3. 吉林省有色金属地质勘查局研究所, 长春 130012
4. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 长春 130119

摘要:华集岭钼矿床位于华北克拉通北缘东段,是近年来新发现的钼矿床。该矿床中矿体呈NNW向展布,倾向西,倾角为 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$,主要赋存在花岗斑岩及花岗闪长岩中。矿石类型主要有细脉状和浸染状两种,矿石矿物以辉钼矿、磁铁矿和黄铁矿为主,少量赤铁矿和钼华,发育云英岩化、钾化、硅化、绿泥石化和碳酸盐化等围岩蚀变。为了确定成矿时代、成矿流体特征及成矿物质来源,本文对华集岭钼矿床中的辉钼矿进行了Re-Os测年、流体包裹体测温 and H-O-S-Pb同位素分析。结果显示:华集岭钼矿床中辉钼矿Re-Os年龄为 (178.0 ± 1.1) Ma,处于古太平洋板块向欧亚板块俯冲的构造环境。成矿流体由早期的高温、中低盐度、中低密度向晚期的中低温、中低盐度、中等密度演化。石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-2.1\%\sim 2.6\%$, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $-115.8\%\sim -109.7\%$,成矿流体显示岩浆水与大气降水混合的特征;辉钼矿 $\omega(\text{Re})$ 值为 $19.564\times 10^{-6}\sim 23.128\times 10^{-6}$,成矿物质具有壳幔混合的特征;黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 $1.9\%\sim 4.2\%$,均值为 2.7% ,表明硫主要来自幔源;黄铁矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 $17.865\sim 18.279$ 、 $15.546\sim 15.611$ 、 $38.011\sim 38.486$,进一步表明成矿物质具有壳幔混合的特征。

关键词:辉钼矿;Re-Os测年;成矿流体;流体包裹体;同位素;成矿物质;华集岭钼矿床

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240213

中图分类号:P618.2;P611

文献标志码:A

Mineralization Age, Fluid Properties and Sources of Ore-Forming Materials for Huajiling Molybdenum Deposit in Helong Area of Yanbian, Jilin Province

Zhang Yajing¹, Liu Wanzhen², Lu Yuhan³, Nie Xitao⁴, Zhang Jianan¹

收稿日期:2024-05-06

作者简介:张雅静(1985—),女,讲师,博士,主要从事矿物学、岩石学、矿床学等方面的研究,E-mail: yjzhang1985@jlu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2906903);吉林省地勘基金项目([2016]地勘20-15)

Supported by the National Key R&D Program of China (2023YFC2906903) and the Geological Prospecting Fund Project of Jilin Province ([2016] Geological Exploration 20-15)

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
2. The Fifth Geological Survey Institute of Jilin Province, Changchun 130103, China
3. Jilin Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau Research Institute, Changchun 130012, China
4. School of Geomatics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130119, China

Abstract: The Huajiling molybdenite deposit is a newly discovered molybdenum deposit located in the eastern section of the northern margin of the North China craton. It features an ore body oriented in NNW direction, dipping at 45° to 50° , surrounded by wall rocks of granite porphyry and granodiorite. The ore types include fine veinlet ores and disseminated ores, primarily consisting of molybdenite, magnetite and pyrite, with minor amounts of hematite. The alteration of wall rock involves dolomitization, potassium mineralization, silicification, chloritization, and carbonate mineralization. In order to determine the mineralization age, fluid properties and sources of ore-forming materials, this study conducted molybdenite Re - Os dating, fluid inclusion temperature measurements, and H - O - S - Pb isotope analysis on Huajiling deposit. Results indicate that the Re - Os age of Huajiling molybdenum deposit is (178.0 ± 1.1) Ma, formed in a tectonic environment where the ancient Pacific plate subducted beneath the Eurasian plate. The ore-forming fluid evolved from high temperature, low to medium salinity, and low to medium density to low temperature, low to medium salinity, and medium density. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of quartz range from -2.1% to 2.6% , and $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ values range from -115.8% to -109.7% , indicating contributions from both magma water and atmospheric precipitation. The $w(\text{Re})$ values of molybdenite range from 19.564×10^{-6} to 23.128×10^{-6} , exhibiting a crust-mantle mixed source. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ values of pyrite (1.9% - 4.2% , with an average of 2.7%) indicate that the sulfur mainly originates from the mantle. Additionally, the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values of pyrite range from 17.865 - 18.279, 15.546 - 15.611, and 38.011 - 38.486, respectively, further supporting the crust-mantle mixed source hypothesis for ore-forming materials.

Key words: molybdenite; Re - Os dating; ore-forming fluid; fluid inclusions; isotope; ore-forming materials; Huajiling molybdenum deposit

0 引言

吉中地区地处华北克拉通北缘东段与兴蒙造山带东部接壤部位,是我国钼矿的重要成矿区^[1-4]。因其独特的大地构造位置,该地区相继发现了大黑山^[5-9]、季德屯^[10-13]、大石河^[14-16]、福安堡^[17-20]、长安堡^[21-24]、刘生店^[25-26]等大中小型钼矿床。吉林省延边和龙地区位于吉中地区东侧,近年来在和龙地区陆续发现了石马洞^[27]、东风北山^[28]等大中型钼矿床,该区成为寻找钼矿的有利靶区。同时,大批专家、学者对延边和龙地区进行了矿产勘查和科研工作,也进一步推动了区域矿产勘查理论研究的深入开展。

华集岭钼矿床是近年来在和龙地区新发现的钼矿床,位于古洞河深大断裂的北侧,目前正处于勘查阶段,是一处资源潜力较大的钼矿床。目前,华集岭钼矿床成矿时代和成矿流体的演化尚不明确,成矿

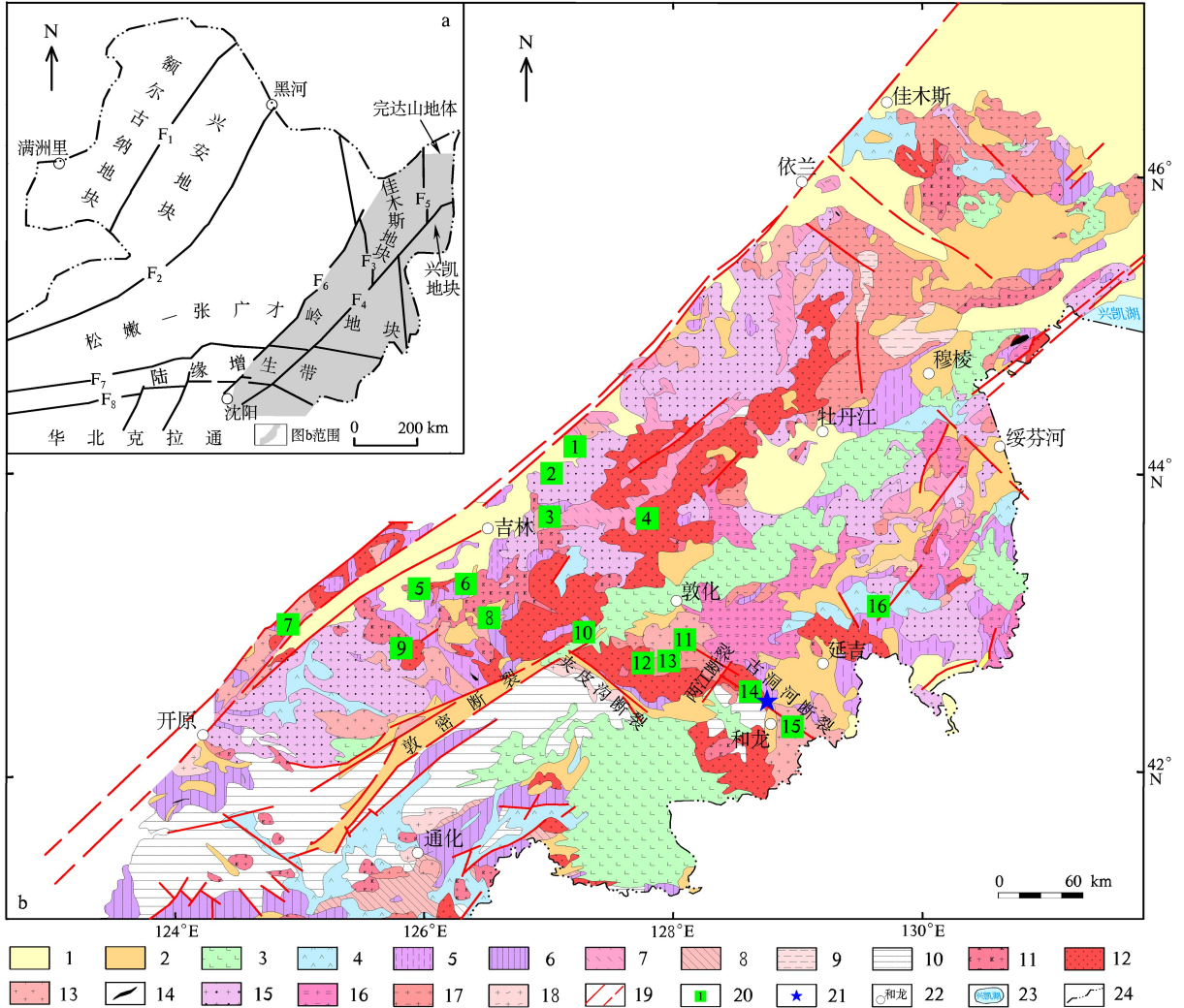
物质来源尚不清楚,这制约了该矿床成矿理论的研究。本文对华集岭钼矿床中辉钼矿开展 Re - Os 同位素定年,对石英中的流体包裹体开展测温实验和 H - O 同位素分析,对矿石中的黄铁矿进行 S - Pb 同位素测试,以揭示成矿时代和构造背景,探讨流体性质及成矿物质来源,为下一步的勘查工作提供理论指导和科学依据。

1 区域地质特征

华集岭钼矿床大地构造位置位于华北克拉通北缘的陆缘增生带内(图 1a)。区域地层由老至新依次出露太古宇、元古宇、古生界、中生界和新生界^[4]。太古宇表壳岩包括鸡南岩组和官地岩组^[29],呈残留体零星出露;元古宇为一套稳定的碳酸盐台地沉积,代表岩性为长仁大理岩;古生界为一套砾岩夹砂岩建造,仅在研究区最东侧少量出露;中生界包括陆源碎屑沉积的河流相-湖泊相和火山碎屑沉积爆发相-

喷溢相,大面积出露覆盖在先存的地层或岩浆岩之上;新生界以船底山组玄武岩为代表,覆盖了大面积的龙岗地块。区域岩浆活动十分频繁,具有多期次、多旋回的特点,其空间展布和形态明显受区域性断裂构造控制^[30-33],岩性以二长花岗岩和花岗闪长岩为主,呈岩基侵入,大面积出露。中—浅成酸性侵入

岩呈岩株出露,岩性以斑状二长花岗岩、花岗斑岩为主;基性—超基性侵入岩呈岩株、岩脉分布,以长仁—樟项岩体为代表。区域构造较为发育,以北西—北东向深大断裂为主,其次发育北北东、近东西向次级构造,形成了区域主要构造格局(图 1b)。



1. 第四系;2. 中、新生界;3. 新生代火山岩;4. 中生代火山岩;5. 古生代片岩;6. 中元古代—古生代沉积岩;7. 中、新元古代片岩;8. 古元古代浅变质岩系;9. 古元古代陆核;10. 太古宙陆核;11. 白垩纪花岗岩;12. 中、晚侏罗世花岗岩;13. 早侏罗世花岗岩;14. 晚三叠世基性岩;15. 三叠纪花岗岩;16. 晚二叠世花岗岩;17. 古生代花岗岩;18. 元古宙花岗岩;19. 断裂及推测断裂;20. 典型铜矿位置及编号;21. 华集岭铜矿床位置;22. 地名;23. 湖泊;24. 国界线。F₁. 塔源—营口断裂带;F₂. 黑河—嫩江断裂带;F₃. 牡丹江断裂带;F₄. 敦密断裂带;F₅. 同江—当斯断裂带;F₆. 依兰—沂蒙断裂带;F₇. 西拉木伦河—长春—延吉断裂带;F₈. 华北克拉通北缘断裂带。铜矿床:1. 长安堡;2. 福安堡;3. 大石河;4. 季德屯;5. 芹菜沟;6. 大黑山;7. 兴文;8. 四方甸子;9. 后倒木;10. 大冰湖沟;11. 三岔;12. 刘生店;13. 新华龙;14. 东风北山;15. 石马洞;16. 夹皮沟。据文献^[27]修编。

图 1 吉黑东部大地构造简图(a)及研究区区域地质图(b)

Fig.1 Simplified tectonic framework in the eastern part of Jilin and Heilongjiang Province (a) and regional geological map of the study area (b)

2 矿床地质特征

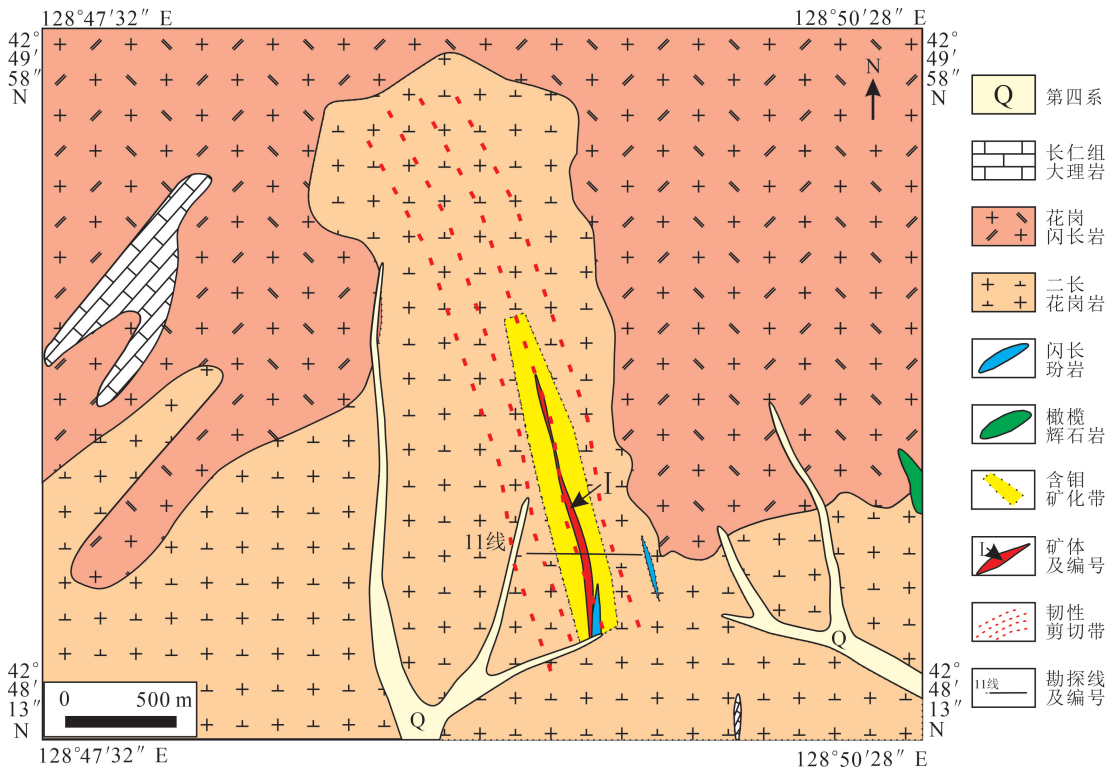
华集岭钼矿床位于吉林省安图县南部,古洞河深大断裂北侧,矿区出露的地层仅见新元古界长仁组大理岩;矿区出露的侵入岩以呈岩基状产出的二长花岗岩和花岗闪长岩为主,早侏罗世花岗斑岩为隐伏岩体,呈岩株状,仅在钻孔中发现,侵入到中三叠世花岗岩中^[34]。闪长玢岩与矿体伴生,脉岩发生明显的矿化现象(图 2),矿区内可见少量北西走向的橄榄辉石岩。花岗岩与大理岩呈侵入接触,接触带附近有明显的同化混染现象。区内至少发育两期构造作用:第一期为北西向断裂,为成矿热液提供运移通道;第二期为成矿后构造,使区内岩石发生中等一强烈的韧性变形,形成弱片麻状构造的岩石。

勘查发现 I 号主矿体 1 条和未编号薄矿体 25 条,矿体总体呈北北西向展布,倾向西,倾角 45°~50°,主要赋存在花岗斑岩及花岗闪长岩中(图 3)。其中, I 号矿体呈脉状,控制长 675 m,厚 3~97 m,控制斜深 20~455 m,Mo 品位以 0.030%~0.070% 为主,0.070%~0.150% 品位次之,最高品位为

0.672%,倾向上品位变化不大,走向上略有差异。矿石手标本上可见石英集合体被定向拉长、局部膨大的现象(图 4a)。

矿石有细脉状和浸染状两种类型(图 4a、b)。围岩蚀变主要有钾化、云英岩化、硅化、绿泥石化和碳酸盐化等(图 4c、d)。地表氧化矿石中可见钼华(图 4b),矿石矿物以辉钼矿、磁铁矿和黄铁矿为主,少量赤铁矿(图 4e、f、g)。脉石矿物有石英、黑云母、微斜长石、绿泥石、方解石和白云母(图 4h、i)等。矿石结构以交代结构为主,也可见半自形粒状结构和他形粒状结构等,矿石构造主要为细脉状和浸染状构造。

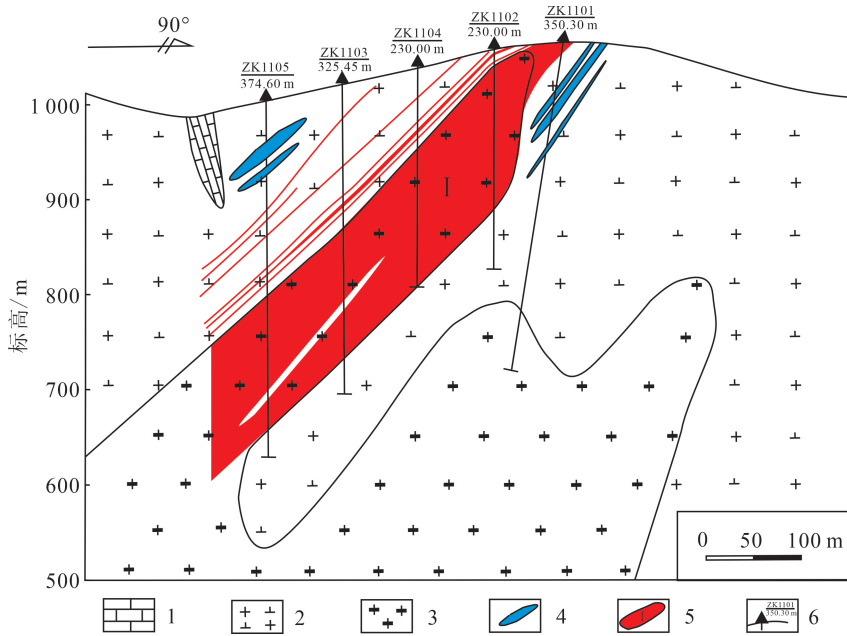
通过野外地质调查和室内综合研究,认为该矿床经历了热液成矿期,并可划分为 4 个阶段:磁铁矿-石英阶段,磁铁矿集合体在石英脉中呈中细粒,磁铁矿的边缘常常可见黑云母和微斜长石;黄铁矿-石英阶段,浸染状分布的黄铁矿在石英脉中呈半自形粒状结构,同时伴生大量的白云母;辉钼矿-石英阶段,该阶段是钼的主要形成阶段;石英-绿泥石-碳酸盐阶段,石英脉中可见少量方解石和绿泥石。



据文献[34]修编。

图 2 华集岭钼矿床地质简图

Fig.2 Generalized geologic map of Huajiling molybdenum deposit



1. 大理岩;2. 花岗闪长岩;3. 花岗斑岩;4. 闪长玢岩;5. 矿体及编号;6. 钻孔编号及孔深。据文献[34]修编。

图 3 华集岭钼矿 11 号勘探线剖面图

Fig.3 Prospecting line profile map of Line 11 for Huajiling molybdenum deposit

3 样品采集及测试方法

用于 Re-Os 测试的 6 件细脉浸染状钼矿石样品采自探槽的不同部位。处理样品时,首先将选取的样本进行破碎处理,在双目镜下挑纯辉钼矿单矿物(纯度 $>98\%$);然后清洗晾干,用玛瑙研钵研磨至 200 目。样品的 Re-Os 同位素测试工作在中国地质科学院国家地质实验测试中心的 Re-Os 同位素实验室完成。实验仪器为 TJA X-series ICP-MS,采用 Cariustube 熔样法,具体操作步骤参照文献[35]。

通过详细的野外地质考察,采集了黄铁矿-石英、辉钼矿-石英、石英-绿泥石-碳酸盐 3 个成矿阶段的样品。首先将不同成矿阶段的样品制成厚 0.5~0.6 mm 的测温片,然后在丙酮中浸泡 3~4 h,之后用清水彻底清洗并晾干备用。本次流体包裹体岩相学观察和显微测温在吉林大学地质流体实验室进行。实验所使用的测温仪器为英国制造的 Linkam THMS-600 型冷热台,其测温范围为 $-180\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

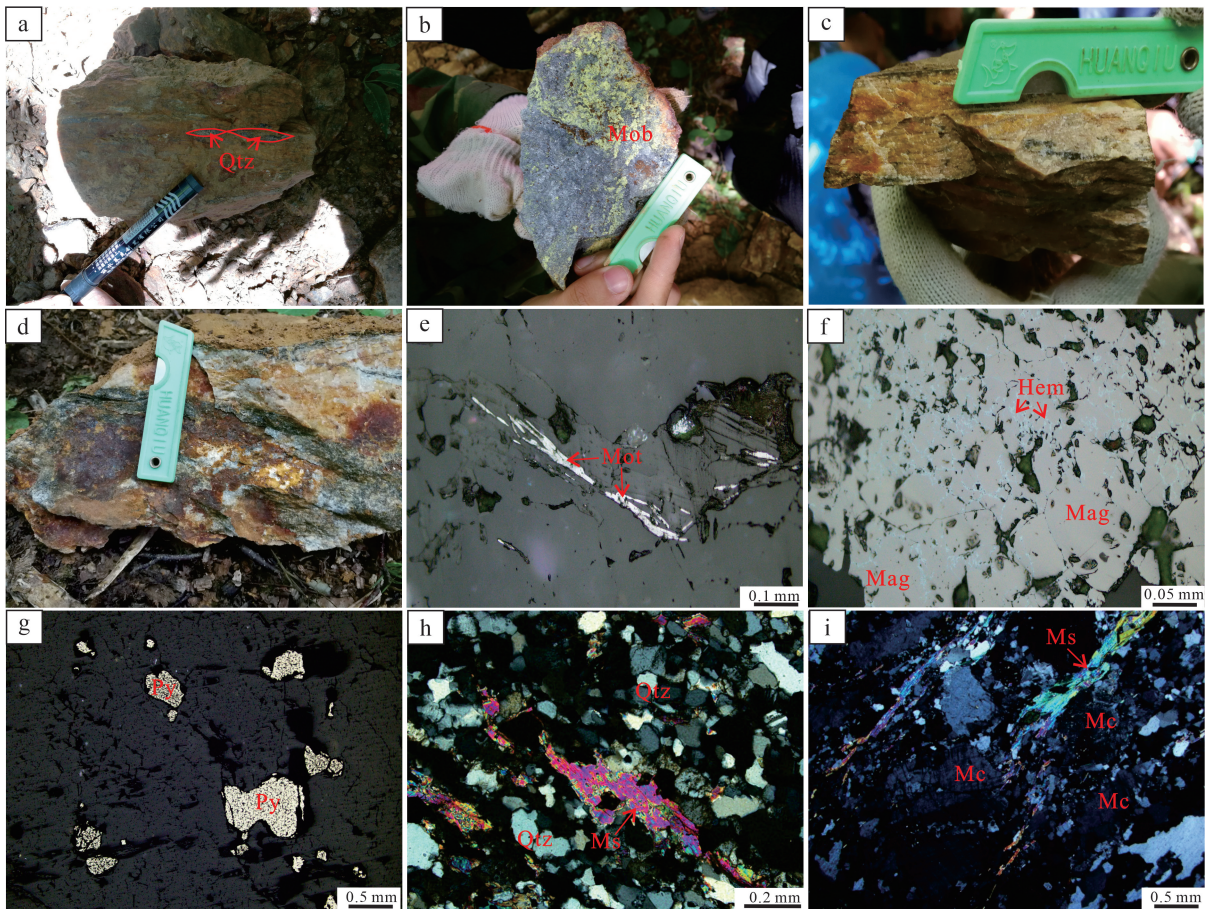
石英、黄铁矿分选在廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司完成。稳定同位素分析在核工业北京地质研究院进行。H-O 测试使用 Finnigan-MAT253

质谱仪, δD 通过爆裂法取水测定,氢同位素测定精度为 $\pm 2\%$ 。S 同位素测试使用 Delta V Plus 气体同位素质谱仪,以 V-CDT 为标准,精度优于 $\pm 0.2\%$ 。Pb 同位素测试使用 IsoProbe-T 质谱仪,对 $1\text{ }\mu\text{g}$ 样品的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测试精度优于 $\pm 0.005\%$ 。

4 测试结果

4.1 辉钼矿 Re-Os 测年结果

6 件辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果列于表 1。由表 1 可知, $w(\text{Re})$ 为 $(19.564\sim 23.128)\times 10^{-6}$,单件辉钼矿样品 Re-Os 同位素模式年龄介于 $(176.1\pm 3.1)\sim (178.7\pm 2.9)\text{ Ma}$ 之间,利用 IsoplotR 将 6 件样品数据拟合后,得到一条相关性较好的直线,获得 Re-Os 等时线年龄为 $(173\pm 15)\text{ Ma}$ (MSWD=0.67)(图 5a)。6 件样品的加权平均年龄为 $(178.0\pm 1.1)\text{ Ma}$ (MSWD=0.41)(图 5b),与等时线年龄在误差范围内一致,表明数据具有可靠性。另外,由等时线测得的 ^{187}Os 初始值为 $(1.1\pm 3.4)\times 10^{-6}$,接近于 0,表明辉钼矿形成时只含微量的 ^{187}Os ,辉钼矿中的 ^{187}Os 主要是由 ^{187}Re 衰变形成,符合 Re-Os 同位素年龄的计算条件,说明该年龄可以代表辉钼矿的结晶年龄。



a. 石英集合体被定向拉长,呈透镜状;b. 矿石氧化后表面可见钼华;c. 钾化蚀变岩;d. 云英岩化蚀变岩;e. 辉钼矿呈束状集合体;f. 半自形的磁铁矿被赤铁矿交代;g. 黄铁矿颗粒;h. 云英岩化蚀变岩中的白云母和石英;i. 钾化(微斜长石)和白云母化蚀变岩。Qtz. 石英;Mob. 钼华;Mot. 辉钼矿;Mag. 磁铁矿;Hem. 赤铁矿;Py. 黄铁矿;Ms. 白云母;Mc. 微斜长石。

图 4 华集岭钼矿矿石和围岩手标本及显微镜下照片

Fig.4 Photos of hand specimens and microscope of ores and surrounding rocks of Huajiling molybdenum deposit

表 1 华集岭钼矿床辉钼矿 Re - Os 同位测试结果

Table 1 Re - Os isotopic test results of Huajiling molybdenite deposit

样品号	$w(^{187}\text{Os})/10^{-9}$		$w(^{187}\text{Re})/10^{-9}$		$w(\text{Re})/10^{-9}$		模式年龄/Ma	
	测量值	2σ	测量值	2σ	测量值	2σ	测量值	2σ
HJL - TC1102 - 1	39.78	0.23	13 356	137	21 250	218	178.5	2.7
HJL - TC1102 - 2	41.25	0.35	14 039	163	22 337	259	176.1	3.1
HJL - TC1102 - 3	43.28	0.27	14 529	175	23 116	279	178.6	3.0
HJL - TC1102 - 4	43.12	0.28	14 536	162	23 128	257	177.8	2.9
HJL - TC1102 - 5	36.67	0.29	12 296	126	19 564	201	178.7	2.9
HJL - TC1102 - 6	42.49	0.33	14 312	117	22 771	187	177.9	2.7

4.2 流体包裹体

4.2.1 流体包裹体岩相学特征

对华集岭钼矿床黄铁矿-石英、辉钼矿-石英、石英-绿泥石-碳酸盐 3 个成矿阶段的石英中流体包裹

体进行了室温下的相态特征和加热过程相变研究。原生流体包裹体分为气液两相(I型)和含 CO_2 三相(II型)包裹体,形态多呈长条状、椭圆状或不规则状,零星分布。其中:气液两相包裹体比较发育,大

小为 6~16 μm (图 6),气液比集中在 10%~40%, 50%。分布在各成矿阶段中;含 CO_2 三相包裹体常温下由气相 CO_2 、液相 CO_2 和液相 H_2O 组成,主要发育在辉钼矿-石英和石英-绿泥石-碳酸盐成矿阶段,大小为 5~15 μm , CO_2 占包裹体体积的 40%~60%,气相 CO_2 占 CO_2 总体积的 30%~40%,个别可达

4.2.2 包裹体显微测温

包裹体显微测温结果见表 2。气液两相包裹体的盐度和密度由经验公式^[36-38]求得,含 CO_2 三相包裹体的盐度利用笼合物熔化温度^[39]计算获得,密度据 CO_2 相部分均一温度^[40]求得。

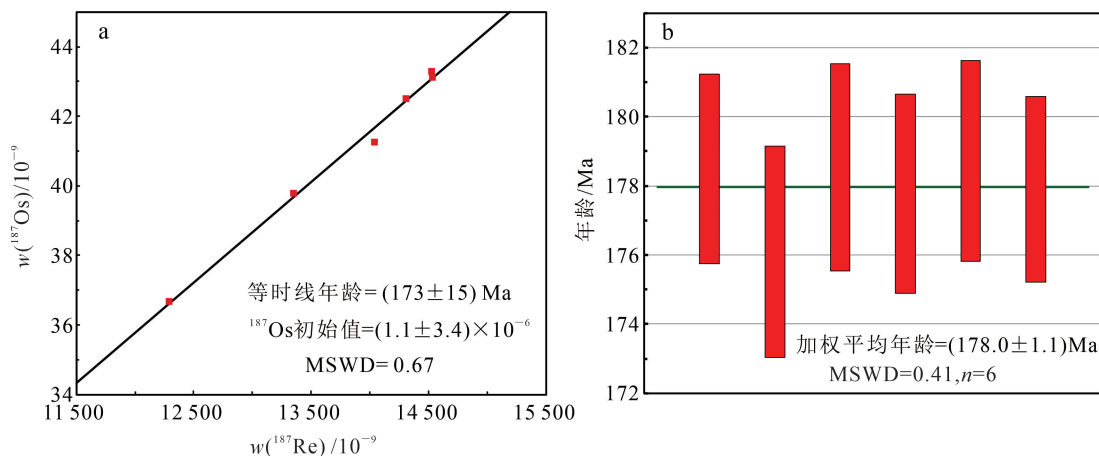
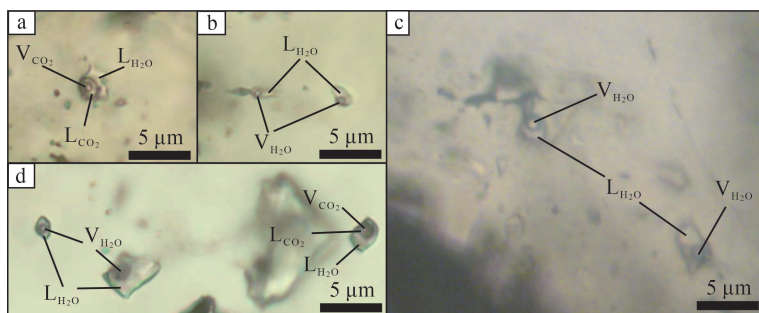


图 5 华集岭钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄(a)及加权平均年龄(b)

Fig.5 Re-Os isochron age (a) and weighted average age (b) of molybdenite in Huajiling molybdenite deposit



a, d. 含 CO_2 三相包裹体; b, c, d. 气液两相包裹体。

图 6 华集岭钼矿床流体包裹体显微照片

Fig.6 Microscopic photos of fluid inclusions of Huajiling molybdenum deposit

表 2 华集岭钼矿床流体包裹体显微测温数据及估算参数

Table 2 Microthermometric data and estimation parameters of fluid inclusions in Huajiling molybdenum deposit

成矿阶段	类型	$T_{\text{mCO}_2}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{i}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{cl}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{hCO}_2}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{ht}}/^\circ\text{C}$	$w(\text{NaCl})/\%$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
黄铁矿-石英	I 型		-9.8~-3.8			301.0~361.4	6.1~13.7	0.68~0.87
	II 型	-59.7~-57.1		3.0~5.9	25.4~31.8	313.7~365.2	7.6~12.0	0.62~0.82
辉钼矿-石英	I 型		-9.8~-3.7			218.7~308.7	6.0~13.8	0.77~0.93
	II 型	-59.3~-57.9		5.4~6.1	24.8~26.8	259.9~308.4	7.3~8.5	0.75~0.83
石英-绿泥石-碳酸盐	I 型		-7.1~-4.5			150.3~219.7	7.2~11.0	0.91~0.98

注: T_{mCO_2} 为固体 CO_2 熔化温度; T_{i} 为冰点温度; T_{cl} 为笼合物熔化温度; T_{hCO_2} 为 CO_2 部分均一温度; T_{ht} 为最终均一温度; $w(\text{NaCl})$ 为盐度; ρ 为密度。包裹体全部均一至液相。

黄铁矿-石英阶段气液两相包裹体(I型)和含CO₂三相包裹体(II型)均有发育,二者紧密共生。其中:I型包裹体冰点温度为-9.8~-3.8℃,计算得到相应盐度为6.1%~13.7%,温度升高均一至液相,最终均一温度介于301.0~361.4℃之间(图7a),计算得到密度为0.68~0.87 g/cm³;II型包裹体笼合物熔化温度为3.0~5.9℃,最终均一温度为313.7~365.2℃(图7a),计算得到相应盐度为7.6%~12.0%(图7b),密度为0.62~0.82 g/cm³。

辉钼矿-石英阶段同样发育气液两相包裹体(I型)和含CO₂三相包裹体包裹体(II型)。其中:I型包裹体冰点温度为-9.8~-3.7℃,温度升高均一至液相,最终均一温度介于218.7~308.7℃之间(图7a),计算得到相应盐度为6.0%~13.8%(图7c),密度为0.77~0.93 g/cm³;II型包裹体笼合物熔化温度为5.4~6.1℃,最终均一温度介于259.9~308.4℃之间,计算得到相应盐度为7.3%~8.5%,

密度为0.75~0.83 g/cm³。

石英-绿泥石-碳酸盐阶段仅见气液两相包裹体(I型),冰点温度为-7.1~-4.5℃,温度升高均一至液相,最终均一温度介于150.3~219.7℃之间(图7a),计算得到相应盐度为7.2%~11.0%(图7d),密度为0.91~0.98 g/cm³。

4.3 石英 H-O 同位素

本文对华集岭钼矿床中黄铁矿-石英阶段和辉钼矿-石英阶段的石英进行了H-O同位素分析(表3、图8)。结果显示:黄铁矿-石英阶段的δ¹⁸O_{H₂O}值为2.2‰和2.3‰,δD_{V-SMOW}值为-112.1‰和-109.7‰;辉钼矿-石英阶段的δ¹⁸O_{H₂O}值为-2.1‰~2.6‰,δD_{V-SMOW}值为-115.8‰~-114.7‰。在H-O同位素图解(图8)中,石英的H-O同位素值均分布于大气降水线与岩浆水之间,显示成矿流体岩浆水与大气降水混合的特征。

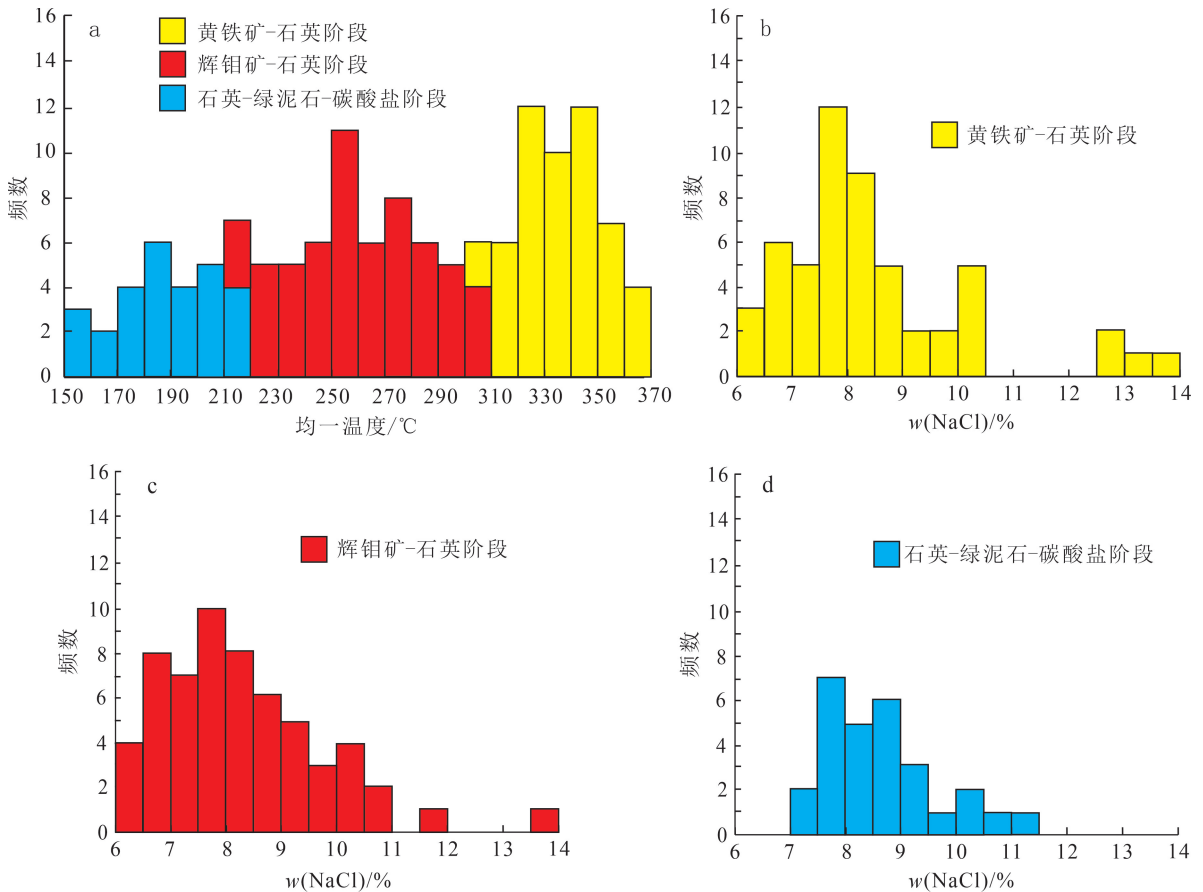


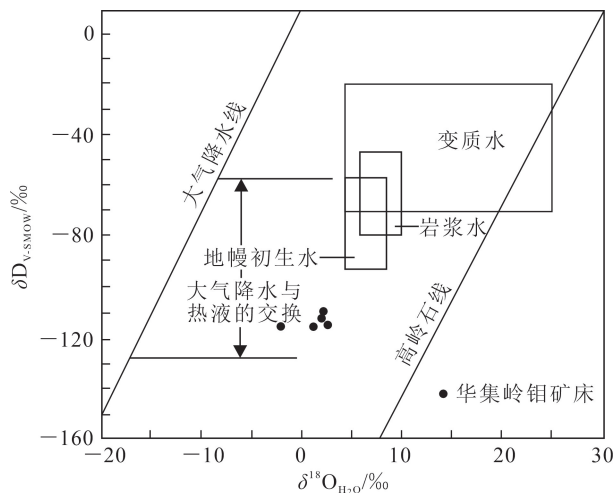
图 7 华集岭钼矿床不同矿化阶段流体包裹体均一温度(a)和盐度(b,c,d)直方图

Fig.7 Histogram of homogenization temperature (a) and salinity (b, c, d) of fluid inclusions in different mineralization stages of Huajiling molybdenum deposit

表 3 华集岭钼矿床中石英氢-氧同位素组成

Table 3 Hydrogen-oxygen isotope composition of quartz from Huajiling molybdenum deposit

样品号	岩性	成矿阶段	计算温度/°C	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$
HJL-1	辉钼矿化石英脉	辉钼矿-石英阶段	285.0	10.0	-114.7	2.6
HJL-2	变形石英脉	辉钼矿-石英阶段	220.0	8.4	-115.5	-2.1
HJL-4	辉钼矿化石英脉	辉钼矿-石英阶段	252.6	9.4	-115.8	0.6
HJL-3	云英岩化蚀变岩	黄铁矿-石英阶段	315.0	8.6	-109.7	2.2
HJL-5	黄铁矿化石英脉	黄铁矿-石英阶段	330.2	8.2	-112.1	2.3



底图据文献[41]。

图 8 华集岭钼矿床中石英 H-O 同位素图解

Fig.8 H-O isotope diagram of Huajiling molybdenum deposit

4.4 黄铁矿 S-Pb 同位素

华集岭钼矿床 9 件黄铁矿样品的 S 同位素测试结果见表 4。黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值 (1.9‰ ~ 4.2‰, 均值为 2.7‰) 在零值附近, 为较小的正值。研究表明, 华集岭钼矿床中矿石的 S 同位素组成具有深源

岩浆硫的特征。

华集岭钼矿床中黄铁矿的铅同位素结果见表 5。其中, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围为 38.011 ~ 38.486, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围为 15.546 ~ 15.611, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化范围为 17.865 ~ 18.279。测试结果显示, 铅具有较均一的同位素组成, 且变化范围较小, 表明该钼矿床的铅来自较稳定的铅源。

表 4 华集岭钼矿床中黄铁矿硫同位素组成

Table 4 Sulfur isotope composition of pyrite in Huajiling molybdenum deposit

样品号	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
HJL-S1	2.6
HJL-S2	2.0
HJL-S3	4.2
HJL-S4	2.0
HJL-S5	2.8
HJL-S6	3.3
HJL-S7	3.0
HJL-S8	2.7
HJL-S9	1.9

表 5 华集岭钼矿床中黄铁矿铅同位素分析结果

Table 5 Lead isotope analysis results of pyrite in Huajiling molybdenum deposit

样品号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
HJL-S1	18.213	15.546	38.086	9.38	35.64	3.68	67.94	14.86	26.90
HJL-S2	17.994	15.602	38.103	9.52	37.47	3.81	73.19	19.71	37.34
HJL-S3	18.279	15.611	38.486	9.50	37.55	3.83	74.34	19.26	39.10
HJL-S4	17.865	15.568	38.011	9.47	37.50	3.83	69.85	17.80	37.19
HJL-S5	18.223	15.581	38.338	9.45	36.96	3.79	71.36	17.32	35.27
HJL-S6	18.146	15.605	38.375	9.50	37.78	3.85	73.61	19.32	40.03

注: Pb 同位素特征参数 ($\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$, $\omega = ^{232}\text{U}/^{204}\text{Pb}$, Th/U, $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$) 值, 利用 Geokit 软件 [42] 计算得到。

5 讨论

5.1 成矿时代及地球动力学背景

在吉林中东部地区有大量钼矿床形成时代的报道,如:大黑山钼矿床成矿年龄为 $(168.7 \pm 3.1) \sim (168.2 \pm 3.2) \text{ Ma}^{[43-44]}$,福安堡钼矿床成矿年龄为 $(166.9 \pm 6.7) \text{ Ma}^{[22]}$,刘生店钼矿床成矿年龄为 $(169.4 \pm 1.0) \sim (168.7 \pm 0.7) \text{ Ma}^{[19,44]}$,季德屯钼矿床成矿年龄为 $(168.4 \pm 2.5) \text{ Ma}^{[45]}$,大石河钼矿床成矿年龄为 $(186.7 \pm 5.0) \sim (186 \pm 3) \text{ Ma}^{[18-19]}$,四方甸子钼矿床成矿年龄为 $(176.4 \pm 4.2) \text{ Ma}^{[45]}$,东风北山钼矿床成矿年龄为 $(194.0 \pm 2.0) \text{ Ma}^{[46]}$,石马洞钼矿成矿年龄为 $(169.3 \pm 1.9) \sim (163.2 \pm 1.0) \text{ Ma}^{[15,32]}$ 。华集岭钼矿床中辉钼矿的 Re-Os 同位素测年结果显示,其平均模式年龄为 $(178.0 \pm 1.1) \text{ Ma}$,表明华集岭钼矿床形成于早侏罗世。通过对该地区多个钼矿床的年代学研究,表明华集岭钼矿的形成并非孤立事件,而是吉林中部—延边地区广泛存在的钼多金属成矿作用的一部分。这一成矿作用主要集中在早—中侏罗世,显示出该时期吉林中部—延边地区成矿作用的集中性。

目前,关于吉林中部—延边地区早—中侏罗世成岩成矿动力学背景已有较多的论述。研究表明,在小兴安岭—张广才岭、延边等地区出露大量的侏罗纪花岗岩,具有相似的物质组成^[47],均显示活动大陆边缘的特征^[1,45,48-52]。结合晚三叠世古亚洲洋的闭合,推测早侏罗世吉林中部—延边地区已经处于古太平洋板块向欧亚板块俯冲的构造环境。同时,研究区内报道的早侏罗世 A 型花岗岩和基性—超基性岩的组合,代表了局部伸展的构造背景^[53-54]。综上所述,研究区内早—中侏罗世时期发生了大规模的钼矿成矿作用,可能与古太平洋板块向欧亚板块下方俯冲所引发的局部伸展作用相关。

5.2 成矿流体性质及演化

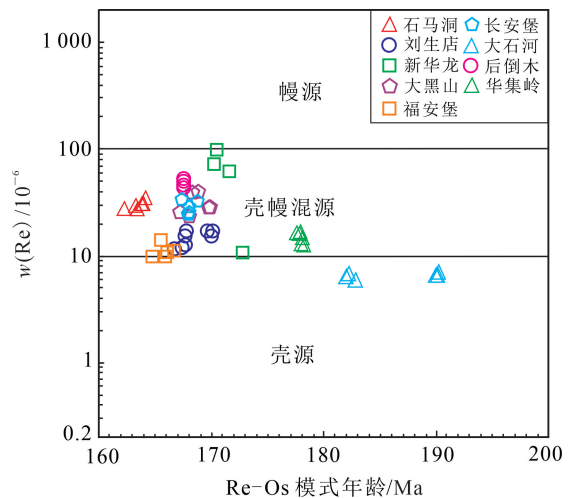
矿床地质特征表明,华集岭钼矿床的形成经历了磁铁矿—石英、黄铁矿—石英、辉钼矿—石英和石英—绿泥石—碳酸盐 4 个成矿阶段。对该矿床 3 个成矿阶段石英中包裹体的观察、测试研究表明,黄铁矿—石英成矿阶段流体性质为高温、中低盐度、中低密度,辉钼矿—石英成矿阶段流体性质为中高温、中低盐度、中低密度,石英—绿泥石—碳酸盐成矿阶段流体性质为中低温、中低盐度、中等密度。

在氢—氧同位素图解(图 8)中,石英的氢—氧同

位素值均分布于大气降水线与岩浆水之间,显示岩浆水与大气降水混合的特征。具有代表性的流体包裹体测温结果显示:在黄铁矿—石英阶段和辉钼矿—石英阶段的包裹体中,可以观察到气液两相包裹体和含 CO₂ 的三相包裹体共生的现象,温度升高,其具有相似的均一温度,表明成矿流体在形成过程中经历了沸腾作用^[55]。沸腾是大规模矿物质沉淀,形成细脉状、浸染状矿体的重要机制。成矿晚期有少量大气降水的加入,降低了流体的温度与盐度,形成中低温、中低盐度的气液两相包裹体。综合特征显示,初始含矿流体在分离迁移过程中,温度和压力下导致流体沸腾。挥发性成分逸出改变了流体的物理化学条件,打破了平衡,促使成矿元素沉淀富集,形成矿床。

5.3 成矿物质来源

辉钼矿 Re-Os 同位素体系不仅可以确定成矿时代,同时可以示踪成矿物质来源。前人^[56-57] 研究认为辉钼矿 $w(\text{Re})$ 值依次为幔源($n \times 10^{-4}$)、壳幔混源($n \times 10^{-5}$)和壳源($n \times 10^{-6}$)。吉林中东部地区早—中侏罗世各钼矿的 $w(\text{Re})$ 值^[2,14,27] (图 9) 表明,成矿物质来源以壳幔混源为主。本文测得华集岭钼矿床中 6 件辉钼矿 $w(\text{Re})$ 值为 $19.564 \times 10^{-6} \sim$



底图据文献^[44];石马洞钼矿床数据来自文献^[27];大石河钼矿床数据来自文献^[14];刘生店、新华龙、大黑山、福安堡、长安堡、后倒木钼矿床数据来自文献^[2]。

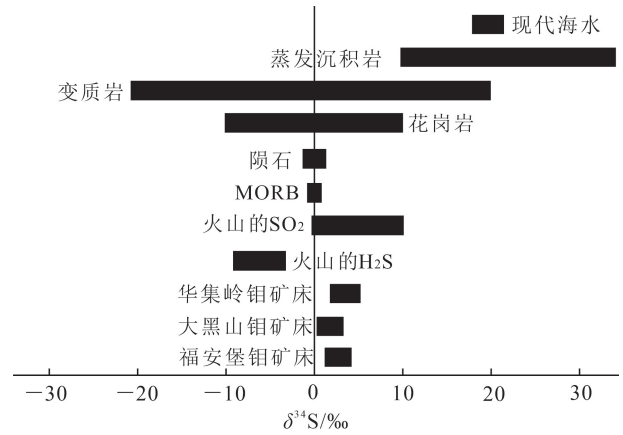
图 9 吉林中东部地区早—中侏罗世钼矿 $w(\text{Re})$ 与 Re-Os 模式年龄关系图

Fig.9 Diagram between $w(\text{Re})$ and Re-Os model age of Early-Middle Jurassic molybdenum deposits in central and eastern Jilin Province

23.128×10^{-6} , 平均值为 22.028×10^{-6} , 显示成矿物质具有壳幔混源的特征(图 9)。

硫化物中的硫同位素组成特征能够有效地追踪和揭示成矿物质的来源。不同来源的硫化物具有不同的 $\delta^{34}\text{S}$ 值^[58-62]。例如, 陨石或幔源的硫同位素比值介于 $-3\text{‰} \sim 3\text{‰}$ 之间, 花岗质岩浆的硫同位素比值范围为 $-5\text{‰} \sim 10\text{‰}$, 大多数变质岩类的硫同位素比值为 $0\text{‰} \sim 20\text{‰}$, 而沉积源还原硫的比值则小于 0‰ 。华集岭钼矿床金属矿物以辉钼矿、磁铁矿和黄铁矿为主, 另发育少量赤铁矿等, 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本可以代表成矿流体总硫同位素组成的特征, 范围为 $1.9\text{‰} \sim 4.2\text{‰}$ (表 4), 均值为 2.7‰ , 与幔源岩浆硫值($-3\text{‰} \sim 3\text{‰}$)接近, 与吉林中东部地区典型矿床硫同位素值^[5, 45, 63]接近(图 10), 表明成矿物质主要来自幔源硫。

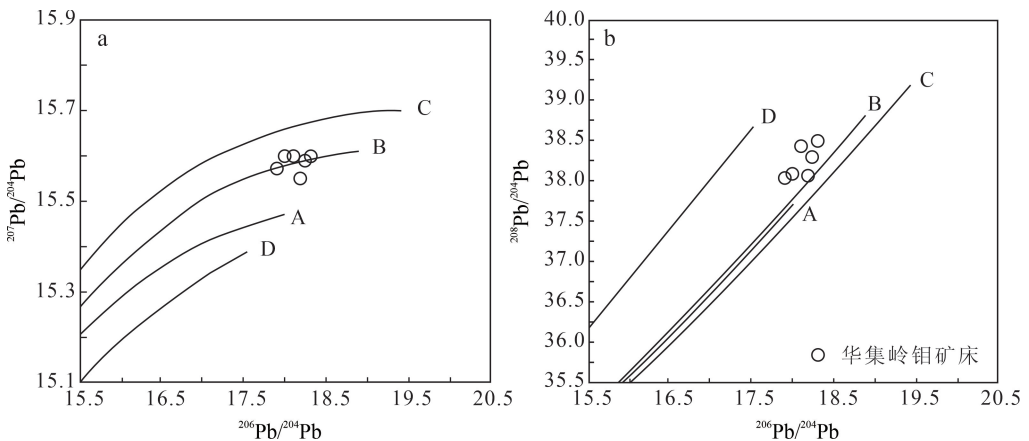
铅属于亲硫元素, 能够直接进入硫化物的晶格结构中^[64]。在金属硫化物中, 铀和钍的质量分数甚微, 同时含有一定量的铅。硫化物结晶后, 其衰变产生的放射性铅质量分数极微, 几乎可以忽略。而铅同位素的组成受环境因素的影响相对较小, 因此, 它能够有效地反映矿床中成矿物质的来源^[65-66]。通过分析矿石内硫化物的铅同位素比值, 并将其与潜在源区的铅同位素组成进行对比, 可以判定矿床形成体系中铅的来源, 这一方法目前在国际上得到了广泛的认可。已有众多学者采用铅同位素技术来示踪成矿物质来源^[66-73]。在华集岭钼矿床中, 黄铁矿的铅同位素组成变化范围较小。具体来说,



大黑山钼矿床数据来自文献^[45, 63]; 福安堡钼矿床数据来自文献^[5]。

图 10 吉林中东部地区典型钼矿床硫同位素分布图
Fig.10 Sulfur isotope distribution map of typical molybdenum deposits in central and eastern Jilin Province

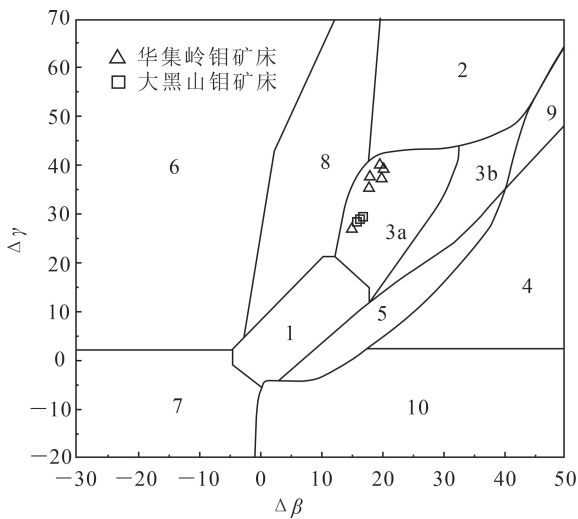
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $17.865 \sim 18.279$ 之间, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $15.546 \sim 15.611$ 之间, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $38.011 \sim 38.486$ 之间。在铅同位素构造模式图(图 11)中, 投影点主要位于造山带附近, 表明其具有混合源的特征^[74-75]。根据黄铁矿铅同位素测试结果, 得到了黄铁矿中铅的相对偏差数值, 具体包括 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ 3 个参数(表 5)。在 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 成因分类图解(图 12)上进行了投图分析。结果显示, 典型矿床大黑山钼矿床和华集岭钼矿床所有点均落于上地壳与地幔混合的岩浆作用成因铅区域之内, 表明其物质来源具有壳幔混源的特点。



A. 地幔; B. 造山带; C. 上地壳; D. 下地壳。底图据文献^[74]。

图 11 华集岭钼矿床中铅同位素构造模式图

Fig.11 Lead isotope structure model of Huajiling molybdenum deposit



1. 地幔铅; 2. 上地壳铅; 3. 上地壳与地幔混合铅(3a. 岩浆作用; 3b. 沉积作用); 4. 化学沉积铅; 5. 海底热水铅; 6. 深变质铅; 7. 深变质下地壳铅; 8. 造山带铅; 9. 古老上地壳铅; 10. 退变质铅。底图据文献[76]; 大黑山钼矿床中黄铁矿数据引自文献[45]。

图12 吉林中东部地区钼矿铅同位素 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 成因分类图
Fig.12 Lead isotope $\Delta\gamma - \Delta\beta$ genetic classification map of molybdenum deposits in central and eastern Jilin Province

综上所述, $w(\text{Re})$ 值和 S、Pb 同位素证据表明华集岭钼矿床成矿物质主要来源于壳幔混源。

6 结论

1) 华集岭钼矿床中辉钼矿 Re - Os 年龄为 $(178.0 \pm 1.1)\text{Ma}$, 表明华集岭钼矿床形成于早侏罗世, 处于古太平洋板块向欧亚板块俯冲的构造环境。

2) 华集岭钼矿床成矿流体性质由高温、中低盐度、中低密度的岩浆流体向中低温、中低盐度、中等密度演化, 晚期有少量大气降水的加入。

3) 华集岭钼矿床 $w(\text{Re})$ 值和 S、Pb 同位素特征显示, 成矿物质的来源主要为壳幔混源。

参考文献 (References):

[1] 孙景贵, 张勇, 邢树文, 等. 兴蒙造山带东缘内生钼矿床的成因类型、成矿年代及成矿动力学背景[J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1317 - 1332.
Sun Jinggui, Zhang Yong, Xing Shuwen, et al. Genetic Types, Ore-Forming Age and Geodynamic Setting of Endogenic Molybdenum Deposits in the Eastern Edge of Xing-Meng Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(4): 1317 - 1332.

[2] Zhang Y, Sun J G, Xing S W, et al. Geochronology

and Metallogenesis of Molybdenite Mo Deposits in East-Central Jilin Province, China: Constraints from Molybdenite Re - Os Isotope Systematics [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 363 - 372.

- [3] 陈衍景, 张成, 李诺, 等. 中国东北钼矿床地质[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1223 - 1268.
Chen Yanjing, Zhang Cheng, Li Nuo, et al. Geology of the Mo Deposits in Northeast China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(5): 1223 - 1268.
- [4] 鞠楠. 吉林中部斑岩型钼矿成矿规律与远景预测[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 1 - 132.
Ju Nan. Metallogenic Regularity and Prospective Prediction of Porphyry Molybdenum Deposits in Central Jilin Province, NE China[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 1 - 132.
- [5] 于晓飞, 侯增谦, 张晗, 等. 吉林永吉县大黑山斑岩型钼矿床成矿流体地球化学特征及成矿机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(6): 1688 - 1699.
Yu Xiaofei, Hou Zengqian, Zhang Han, et al. Characteristics of Ore-Forming Fluids and Metallogenic Mechanism of the Daheishan Porphyry Mo Deposit in Yongji Area, Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(6): 1688 - 1699.
- [6] Ju N, Zhang D, Zhang G B, et al. Geology and Mineralization of the Daheishan Supergiant Porphyry Molybdenum Deposit (1.65 Bt), Jilin, China: A Review[J]. China Geology, 2023, 6(3): 494 - 530.
- [7] Zhou L L, Zeng Q D, Liu J M, et al. Geochronology of Magmatism and Mineralization of the Daheishan Giant Porphyry Molybdenum Deposit, Jilin Province, Northeast China: Constraints on Ore Genesis and Implications for Geodynamic Setting[J]. International Geology Review, 2014, 56(8): 929 - 953.
- [8] Wang C H, Song Q H, Wang D H, et al. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite from the Daheishan Molybdenum Deposit of Jilin Province and Its Geological Significance [J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(3): 269 - 273.
- [9] Han C M, Xiao W J, Windley B F, et al. Re-Os Age of Molybdenite from the Daheishan Mo Deposit in the Eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China[J]. Resource Geology, 2014, 64(4): 379 - 386.
- [10] Wang Z G, Wang K Y, Wan D, et al. Metallogenic Age and Hydrothermal Evolution of the Jidetun Mo Deposit in Central Jilin Province, Northeast China:

- Evidence from Fluid Inclusions, Isotope Systematics, and Geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 89: 731-751.
- [11] 卢志强,李绪俊,秋晨,等.吉林中东部季德屯钼矿床含矿岩体地质、地球化学及年代学研究[J].*矿床地质*, 2016, 35(2): 349-364.
Lu Zhiqiang, Li Xujun, Qiu Chen, et al. *Geology, Geochemistry and Geochronology of Ore-Bearing Intrusions in Jidetun Molybdenum Deposit in Mid-East Jilin Province*[J]. *Geology of Ore Deposits*, 2016, 35(2): 349-364.
- [12] 孟庆丰,于晓飞,郑伟.吉林季德屯钼矿区石英二长岩 SIMS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其成因[J].*地质学报*, 2016, 90(5):917-932.
Meng Qingfeng, Yu Xiaofei, Zheng Wei. *Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Quartz Monzonite from the Jidetun Molybdenum Deposit in Jilin Province*[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(5): 917-932.
- [13] 邵建波,王洪涛,陈殿义,等.吉林省中东部季德屯及石马洞大型钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J].*世界地质*, 2016, 35(3): 717-728.
Shao Jianbo, Wang Hongtao, Chen Dianyi, et al. *Re-Os Isotopic Dating of Molybdenites from Jidetun and Shimadong Large Molybdenum Deposits in Centro-Eastern Jilin and Its Geological Significance*[J]. *Global Geology*, 2016, 35(3): 717-728.
- [14] 鞠楠,任云生,王超,等.吉林敦化大石河钼矿床成因与辉钼矿 Re-Os 同位素测年[J].*世界地质*, 2012, 31(1): 68-76.
Ju Nan, Ren Yunsheng, Wang Chao, et al. *Ore Genesis and Molybdenite Re-Os Dating of Dashihe Molybdenum Deposit in Dunhua, Jilin*[J]. *Global Geology*, 2012, 31(1): 68-76.
- [15] 王辉,任云生,侯鹤楠.延边大石河钼矿床成因及成矿时代[J].*矿物学报*, 2011, 31(增刊1): 96-97.
Wang Hui, Ren Yunsheng, Hou Henan. *Genesis and Ore-Forming Age of Dashihe Molybdenum Deposit in Yanbian*[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(Sup.1): 96-97.
- [16] 刘兴桥,刘俊斌,张俊影.吉林省敦化市大石河钼矿地质特征及找矿方向[J].*吉林地质*, 2009, 28(3): 39-42.
Liu Xingqiao, Liu Junbin, Zhang Junying. *Geological Characteristics and Prospecting Direction of Dashihe Molybdenum Deposit in Dunhua City, Jilin Province*[J]. *Jilin Geology*, 2009, 28(3): 39-42.
- [17] 李立兴,松权衡,王登红,等.吉林福安堡钼矿中辉钼矿铼-钨同位素定年及成矿作用探讨[J].*岩矿测试*, 2009, 28(3): 283-287.
Li Lixing, Song Quanheng, Wang Denghong, et al. *Re-Os Isotope Dating and Molybdenite from the Fu'anpu Molybdenum Deposit of Jilin Province and Discussion on Its Metallogenesis*[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(3): 283-287.
- [18] 于晓飞,侯增谦,钱烨,等.吉林中东部福安堡钼矿床成矿流体、稳定同位素及成矿时代研究[J].*地质与勘探*, 2012, 48(6): 1151-1162.
Yu Xiaofei, Hou Zengqian, Qian Ye, et al. *Ore-Forming Fluids, Stable Isotopes and Metallogenic Epoch of the Fu'anpu Molybdenum Deposit in Mid-East Jilin Province*[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(6): 1151-1162.
- [19] 刘万臻.吉林省福安堡钼矿床地质特征及成因类型研究[D].长春:吉林大学, 2014: 1-65.
Liu Wanzhen. *Study on Geological Features and Genetic Type of Fu'anbao Molybdenum Deposit, Jilin Province*[D]. Changchun: Jilin University, 2014: 1-65.
- [20] 史玥师,李雪莹,史致元.吉林省舒兰市福安堡大型钼矿床勘查过程回顾[J].*吉林地质*, 2015, 34(1): 54-56.
Shi Yueshi, Li Xueying, Shi Zhiyuan. *Review of the Exploration Process of the Fu'anbao Large Molybdenum Deposit in Shulan City, Jilin Province*[J]. *Jilin Geology*, 2015, 34(1): 54-56.
- [21] Zhang J, Yang Y C, Han S J, et al. *Geochronology, Geochemistry, and Lu-Hf Isotopic Compositions of Monzogranite Intrusion from the Chang'anpu Mo Deposit, NE China: Implications for Tectonic Setting and Mineralization*[J]. *Minerals*, 2022, 12(8): 967.
- [22] 松权衡,邢树文,张勇,等.吉林长安堡钼(铜)矿床成矿时代及物质来源:来自辉钼矿 Re-Os 同位素证据[J].*岩矿测试*, 2016, 35(5): 550-557.
Song Quanheng, Xing Shuwen, Zhang Yong, et al. *Origin and Geochronology of Chang'anpu Mo-Cu Deposit in Jilin Province: Constraints from Molybdenite Re-Os Isotope Systematics*[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2016, 35(5): 550-557.
- [23] 张剑,杨言辰,尹成伟.吉林省舒兰市长安堡钼铜矿床地质特征及找矿意义[J].*吉林地质*, 2013, 32(1): 63-66,76.
Zhang Jian, Yang Yanchen, Yin Chengwei. *Geologic Features and Prospecting Significance of the Chang'anpu*

- anpu Mo - Cu Deposit, Shulan Area, Jilin Province [J]. *Jilin Geology*, 2013, 32 (1): 63 - 66, 76.
- [24] Ju N, Ren Y S, Zhang S, et al. The Early Jurassic Chang'anpu Porphyry Cu - Mo Deposit in Northeastern China: Constraints from Zircon U - Pb Geochronology and H - O - S - Pb Stable Isotopes [J]. *Geological Journal*, 2018, 53(6): 2437 - 2448.
- [25] 王辉,任云生,赵华雷,等.吉林安图刘生店铜矿床辉钼矿 Re - Os 同位素定年及其地质意义 [J]. *地球学报*, 2011, 32(6): 707 - 715.
- Wang Hui, Ren Yunsheng, Zhao Hualei, et al. Re - Os Dating of Molybdenite from the Liushengdian Molybdenum Deposit in Antu Area of Jilin Province and Its Geological Significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32 (6): 707 - 715.
- [26] 王景德,陈惠鹏,赵娟.安图县刘生店铜矿床地质特征及找矿标志 [J]. *吉林地质*, 2007, 26(2): 6 - 9.
- Wang Jingde, Chen Huipeng, Zhao Juan. Geologic Features and Ore-Hunting Indicator of the Liushengdian Mo Deposit, Antu County, Jilin Province [J]. *Jilin Geology*, 2007, 26(2): 6 - 9.
- [27] Nie X T, Sun J G, Sun F Y, et al. Zircon U - Pb and Molybdenite Re - Os Dating and Geological Implications of the Shimadong Porphyry Molybdenum Deposit in Eastern Yanbian, NE China [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2020, 57(5): 630 - 646.
- [28] 高岫生,吴卫群,韩寿军.天宝山东风北山铜矿床地质特征及成因探讨 [J]. *吉林地质*, 2010, 29(4): 43 - 53.
- Gao Xiusheng, Wu Weiqun, Han Shoujun. Geological Features and Genesis of Dongfengbeishan Molybdenum Deposit in Tianbaoshan [J]. *Jilin Geology*, 2010, 29 (4): 43 - 53.
- [29] 商青青,任云生,陈聪,等. 延边官地铁矿构造背景与和龙地块太古宙地壳增生:来自岩石地球化学、锆石 U - Pb 年代学及 Hf 同位素证据 [J]. *地球科学*, 2017, 42 (12): 2208 - 2228.
- Shang Qingqing, Ren Yunsheng, Chen Cong, et al. Tectonic Setting of Guandi Iron Deposit and Archean Crustal Growth of Helong Massif in NE China: Evidence from Petrogeochemistry, Zircon U - Pb Geochronology and Hf Isotope [J]. *Earth Science*, 2017, 42 (12): 2208 - 2228.
- [30] 褚小磊. 吉黑东部陆缘中生代斑岩型铜成矿作用研究 [D]. 长春:吉林大学, 2022: 1 - 270.
- Chu Xiaolei. Mesozoic Porphyry Copper Mineralization in the Eastern Continental Margin of Jilin and Heilongjiang Province [D]. Changchun: Jilin University, 2022: 1 - 270.
- [31] 王琳琳. 中国东北小兴安岭及邻区斑岩型矿床成矿作用研究 [D]. 长春:吉林大学, 2018: 1 - 180.
- Wang Linlin. Study on Metallogenesis of Porphyry Deposits in Lesser Xing'an Range and Its Adjacent Areas, NE China [D]. Changchun: Jilin University, 2018: 1 - 180.
- [32] 薛昊日. 吉林省镁铁质-超镁铁质岩特征及成矿作用研究 [D]. 长春:吉林大学, 2020: 1 - 245.
- Xue Haori. Features of the Mafic-Ultramafic Rocks in Jilin Province and Their Metallogenesis [D]. Changchun: Jilin University, 2020: 1 - 245.
- [33] 赵华伟,李德洪,臧兴运,等. 吉中-延边地区燕山期岩浆作用与矿床成矿系列研究 [J]. *地质学报*, 2020, 94 (1): 241 - 254.
- Zhao Huawei, Li Dehong, Zang Xingyun, et al. A Study of Magmatism and Ore Deposit Series of Yanshanian Magmatism in the Central Jilin-Yanbian Area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94 (1): 241 - 254.
- [34] 吉林省地质调查院. 吉林省和龙市华集岭地区铅锌多金属矿普查报告 [R]. 长春:吉林省地质调查院, 2023.
- Jilin Institute of Geological Survey. Geological Prospecting Report of Lead-Zinc Polymetallic Deposit in Huajiling Area, Helong City, Jilin Province [R]. Changchun: Jilin Institute of Geological Survey, 2023.
- [35] 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.
- [36] Bodnar R J. A Method of Calculating Fluid Inclusion Volumes Based on Vapor Bubble Diameters and P - V - T - X Properties of Inclusion Fluids [J]. *Economic Geology*, 1983, 78(3): 535 - 542.
- [37] Bodnar R J. Revised Equation and Table for Determining the Freezing Point Depression of H₂O - NaCl Solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(3): 683 - 684.
- [38] Hall D L. Freezing Point Depression of NaCl - KCl - H₂O Solution [J]. *Economic Geology*, 1988, 83: 197 - 202.

- [39] Bozzo A T, Hsiao-Sheng C, Kass J R, et al. The Properties of the Hydrates of Chlorine and Carbon Dioxide[J]. *Desalination*, 1975, 16(3): 303 - 320.
- [40] Touret J, Bottinga Y. Équations D' état Pour Le CO₂: Application Aux Inclusions Carboniques [J]. *Bull Mineral*, 1979, 102(5/6): 577 - 583.
- [41] Taylor H P. The Application of Oxygen and Hydrogen Isotope Studies to Problems of Hydrothermal Alteration and Ore Deposition [J]. *Economic Geology*, 1974, 69(6): 843 - 883.
- [42] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459 - 464.
Lu Yuanfa. GeoKit: A Geochemical Toolkit for Microsoft Excel [J]. *Geochimica*, 2004, 33 (5): 459 - 464.
- [43] 王成辉, 松权衡, 王登红, 等. 吉林大黑山超大型钼矿辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质意义[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(3): 269 - 273.
Wang Chenghui, Song Quanheng, Wang Denghong, et al. Re - Os Isotopic Dating of Molybdenite from the Daheishan Molybdenum Deposit of Jilin Province and Its Geological Significance [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(3): 269 - 273.
- [44] Zhang Y, Sun J G, Xing S W, et al. Geochronology and Metallogenesis of Porphyry Mo Deposits in East-Central Jilin Province, China: Constraints from Molybdenite Re - Os Isotope Systematics [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 71: 363 - 372.
- [45] 张勇. 吉林省中东部地区侏罗纪钼矿床的地质、地球化学特征与成矿机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1 - 157.
Zhang Yong. Research on Characteristics of Geology, Geochemistry and Metallogenic Mechanism of the Jurassic Molybdenum Deposits in the Mid-East Area of Jilin[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 1 - 157.
- [46] Guo W K, Zeng Q D, Zhang B, et al. Genesis of the Jurassic Dongfengbeishan Porphyry Mo Deposit in Eastern Yanbian, NE China Inferred from Molybdenite Re - Os and Zircon U - Pb Ages, and Whole-Rock Elemental and Zircon Hf Isotopic Compositions[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 165: 256 - 269.
- [47] 张艳斌, 吴福元, 翟明国, 等. 和龙地块的构造属性与华北地台北缘东段边界[J]. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2004, 34(9): 795 - 806.
Zhang Yanbin, Wu Fuyuan, Zhai Mingguo, et al. Tectonic Setting of the Helong Block: Implications for the Northern Boundary of the Eastern North China Craton [J]. *Chinese Science: Series D: Earth Science*, 2004, 34(9): 795 - 806.
- [48] Zhang Y B, Wu F Y, Wilde S A, et al. Zircon U - Pb Ages and Tectonic Implications of 'Early Paleozoic' Granitoids at Yanbian, Jilin Province, Northeast China [J]. *Island Arc*, 2004, 13: 484 - 505.
- [49] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 339 - 353.
Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, et al. Mesozoic Tectonic Regimes and Regional Ore-Forming Background in NE China: Constraints from Spatial and Temporal Variations of Mesozoic Volcanic Rock Associations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 339 - 353.
- [50] 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(5): 549 - 583.
Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, et al. Subduction History of the Paleo-Pacific Slab Beneath Eurasian Continent: Mesozoic-Paleogene Magmatic Records in Northeast Asia [J]. *Science China: Earth Science*, 2018, 48(5): 549 - 583.
- [51] 钱烨, 赵昌吉, 张涛, 等. 吉林中部早侏罗世 A 型花岗岩的地球化学特征及地质意义[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2021, 31(5): 562 - 568, 577.
Qian Ye, Zhao Changji, Zhang Tao, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Early Jurassic A-Type Granite in Central Jilin Province [J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2021, 31 (5): 562 - 568, 577.
- [52] 聂喜涛. 延边和龙地区中生代热液金银、钼和铁铜多金属成矿作用与成矿地质模式研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019: 1 - 241.
Nie Xitao. Research on the Metallogenesis and Geological Model of the Mesozoic Hydrothermal Au - Ag, Mo and Fe - Cu Polymetallic Deposits in Helong of Yanbian Aera, Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2019: 1 - 241.
- [53] Yu J J, Wang Feng, Xu W L, et al. Early Jurassic Mafic Magmatism in the Lesser Xing' an-Zhangguangcai Range, NE China, and Its Tectonic Implications: Constraints from Zircon U - Pb Chronology and Geochemistry [J]. *Lithos*, 2012,

- 142: 256 - 266.
- [54] 叶希青, 孙立影, 徐智涛, 等. 吉林中部靠山地区早侏罗世正长花岗岩锆石 U - Pb 年代学、地球化学特征及其动力学意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(3): 964 - 983.
Ye Xiqing, Sun Liying, Xu Zhitao, et al. Zircon U - Pb Geochronology, Geochemical Characteristics and Geodynamic Significance of the Early Jurassic Syenogranite in the Kaoshan Area of Central Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(3): 964 - 983.
- [55] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1 - 487.
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1 - 487.
- [56] 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: 1815 - 1818.
- [57] 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 等. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其 Re - Os 年龄[J]. 地质学报, 2007, 81(7): 946 - 951.
Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Dong Guangyu, et al. The Geological Characteristics and Re - Os Isotope Age of Molybdenite of the Xiongjiashan Molybdenum Deposit Jiangxi Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(7): 946 - 951.
- [58] 陶利鑫, 甄世民, 白海军, 等. 河北大白阳金矿床黄铁矿微量元素及 S - Pb 同位素地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(5): 1582 - 1598.
Tao Lixin, Zhen Shimin, Bai Haijun, et al. Pyrite Trace Elements Composition and S - Pb Isotope Characters of the Dabayang Gold Deposit, Hebei Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(5): 1582 - 1598.
- [59] Chaussidon M, Albarède F, Sheppard S M F. Sulphur Isotope Variations in the Mantle from Ion Microprobe Analyses of Microsulphide Inclusions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 92(2): 144 - 156.
- [60] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of Sulfur and Carbon [C]//Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York: Wiley, 1979: 509 - 567.
- [61] Rollinson H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. London: Longman Publishing Group, 1993: 1 - 384.
- [62] Seal R R. Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 61(1): 633 - 677.
- [63] 汪志刚. 吉林东部中生代内生金属矿床成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 1 - 219.
Wang Zhigang. Study on Metallogenesis of Mesozoic Endogenous Metal Deposits in the Eastern Part of Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2012: 1 - 219.
- [64] 张宏飞, 高山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1 - 410.
Zhang Hongfei, Gao Shan. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1 - 410.
- [65] 沈渭洲. 稳定同位素地质[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 1 - 425.
Shen Weizhou. Stable Isotope Geology [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987: 1 - 425.
- [66] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3): 73 - 81.
Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, et al. Ore Lead Isotopes as a Tracer for Ore-Forming Mineral Sources: A Review [J]. Geology and Geochemistry, 2002, 30(3): 73 - 81.
- [67] 张乾, 潘家永, 邵树勋. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. 地球化学, 2000, 29(3): 231 - 238.
Zhang Qian, Pan Jiayong, Shao Shuxun. An Interpretation of Ore Lead Sources from Lead Isotopic Compositions of Some Ore Deposits in China [J]. Geochimica, 2000, 29(3): 231 - 238.
- [68] Darling J R, Storey C D, Hawkesworth C J, et al. In situ Pb Isotope Analysis of Fe - Ni - Cu Sulphides by Laser Ablation Multi-Collector ICPMS: New Insights into Ore Formation in the Sudbury Impact Melt Sheet [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 99: 1 - 17.
- [69] 辛未, 孟元库, 许志河, 等. 哀牢山成矿带长安金矿床成因: 地质特征、流体包裹体测温和 H - O - S - Pb 同位素制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(5): 1610 - 1625.
Xin Wei, Meng Yuanku, Xu Zhihe, et al. Genesis of Chang'an Gold Deposit in Ailaoshan Metallogenic Belt: Constraints from Geological Characteristics, Fluid Inclusion Temperature and H - O - S - Pb Isotope [J]. Journal of Jilin University (Earth Science

- Edition), 2022, 52 (5): 1610 - 1625.
- [70] 王硕, 孙丰月, 王冠, 等. 黑龙江省四平山金矿床成矿作用及矿床成因: 来自矿床地质、地球化学、锆石 U - Pb 年代学及 H - O - S 同位素的制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(5): 1626 - 1648.
- Wang Shuo, Sun Fengyue, Wang Guan, et al. Mineralization and Genesis of Sipingshan Gold Deposit, Heilongjiang, China: Evidence from Ore Deposit Geology, Geochemistry, Zircon U - Pb Ages, and H - O - S Isotopes[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (5): 1626 - 1648.
- [71] 何军成, 刘军, 李小伟, 等. 黑龙江省团结沟浅成低温热液金矿床成因: 锆石 U - Pb 定年、元素地球化学和 Hf - S - Pb - He 同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5): 1437 - 1466.
- He Juncheng, Liu Jun, Li Xiaowei, et al. Genesis of Tuanjiogou Epithermal Gold Deposit in Heilongjiang Province: Evidence from Zircon U - Pb Dating, Elemental Geochemistry and Hf - S - Pb - He Isotopes [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53 (5): 1437 - 1466.
- [72] 吴荔, 匡文龙, 张志辉, 等. 江西德兴银山铜铅锌多金属矿床稳定同位素地球化学研究[J]. 黄金, 2024, 45 (2): 68 - 74.
- Wu Li, Kuang Wenlong, Zhang Zhihui, et al. Stable Isotope Geochemistry Study of Yinshan Copper-Lead-Zinc Polymetallic Deposit in Dexing, Jiangxi [J]. Gold, 2024, 45 (2): 68 - 74.
- [73] 梁辉, 韩作振, 王立功, 等. 胶东辽上金矿床的流体包裹体、氢-氧-碳-硫-铅同位素特征及矿床成因[J]. 地质通报, 2022, 41(6): 1053 - 1067.
- Liang Hui, Han Zuozhen, Wang Ligong, et al. The Fluid Inclusions, H - O - C - S - Pb Isotope Characteristics and Genesis of the Liaoshang Gold Deposit in Jiaodong Peninsula[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41 (6): 1053 - 1067.
- [74] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics; The Model [J]. Tectonophysics, 1981, 75(1/2): 135 - 162.
- [75] Stacey J S, Hedlund D C. Lead-Isotopic Compositions of Diverse Igneous Rocks and Ore Deposits from Southwestern New Mexico and Their Implications for Early Proterozoic Crustal Evolution in the Western United States [J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, 94(1): 43 - 57.
- [76] 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟, 等. 地球科学中同位素体系理论与应用: 兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1 - 330.
- Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Tongmo, et al. The Theory and Application of Isotope System in Geoscience: Concurrently on the Evolution of Crust and Mantle in Chinese Mainland[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1 - 330.