

doi: 10.12097/gbc.2023.08.013

大兴安岭南段内蒙古小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成矿背景

刘永强¹, 吕志成^{2,3*}, 王虎¹, 程海明¹

LIU Yongqiang¹, LYU Zhicheng^{2,3*}, WANG Hu¹, CHENG Haiming¹

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100083;

3. 自然资源部矿产勘查技术指导中心, 北京 100083

1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

3. Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China

摘要:【研究目的】大兴安岭南段新发现的小大川铅锌铜矿赋存于黑云母二长花岗岩体中,在空间上受到燕山晚期侵入岩的影响。其成岩成矿时代、岩石成因及成矿地质背景等尚不清楚,对其研究可以为区域内铅锌成矿规律提供新的依据。

【研究方法】采集大兴安岭南段小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩岩样品,进行岩相学、锆石 U-Pb 测年,岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素分析。【研究结果】研究表明,小大川黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 135.9 ± 0.8 Ma 和 134.9 ± 0.8 Ma,表明铅锌矿化发生在早白垩世。岩石地球化学特征显示,黑云母二长花岗岩富 SiO_2 (71.29%~72.92%)、 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ (7.17%~7.89%)、 Al_2O_3 (13.35%~14.48%),贫 MgO (0.61%~0.64%)、 CaO (1.24%~1.73%),富集 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 元素,亏损 Ba、K、Sr、P、Ti 元素且稀土元素配分型式呈“海鸥型”分布, δEu 值为 0.35~0.47,负 Eu 异常明显,属于高钾钙碱性、过铝质 A_2 型花岗岩。Sr-Nd 同位素特征显示 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.70545~0.70548, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -1.7~-0.3, Nd 同位素的二阶段模式年龄为 957~1071 Ma。【结论】结合年代学特征及地球化学特征,认为岩石成因属新生地壳和幔源物质混合同时受到上地壳混染。小大川黑云母二长花岗岩形成于蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后的伸展环境,该环境同时还导致了区域内成岩成矿作用的发生。

关键词: 大兴安岭南段;小大川铅锌铜矿床;黑云母二长花岗岩;锆石 U-Pb 定年;Sr-Nd 同位素;伸展环境

创新点: 首次对小大川铅锌铜矿床开展锆石 U-Pb 定年、全岩地球化学及 Sr-Nd 同位素分析研究,确定了成岩成矿时间及成矿地质背景。

中图分类号: P618.2; P588.12⁺1 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)02/03-0404-20

Liu Y Q, Lyu Z C, Wang H, Cheng H M. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of biotite monzonitic granite and mineralization background in Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit of Inner Mongolia, the southern Great Khingan Range. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(2/3): 404-423

Abstract: [Objective] The newly discovered Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit in the southern section of the Greater Khingan Range occurs in the biotite monzonitic granite body and is spatially affected by the late Yanshanian intrusive rocks. The age of diagenesis and mineralization, petrogenesis and metallogenic geological background are still unclear. The study can provide a new basis for the metallogenic regularity of lead and zinc in the area. [Methods] Samples of biotite monzogranite from the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit in the southern section of the Greater Khingan Range were collected for petrographic study, zircon U-Pb dating, whole rock geochemical analysis, and Sr-Nd isotopic investigations. [Results] Research shows that the zircon U-Pb ages of the biotite monzonitic

收稿日期: 2023-08-11; 修订日期: 2023-12-23

资助项目: 国家自然科学基金项目《关键金属元素超强富集成矿动力学》(批准号: 92162323)

作者简介: 刘永强 (1995-), 男, 在读硕士生, 地质工程专业。E-mail: lygdgzyx2023@163.com

* 通信作者: 吕志成 (1966-), 男, 研究员, 从事地球化学方面的研究。E-mail: zhichenglv@163.com

granite are 135.9 ± 0.8 Ma and 134.9 ± 0.8 Ma, indicating that the Pb-Zn mineralization occurred in the Early Cretaceous. The rock geochemical characteristics show that the biotite monzonitic granite is rich in SiO_2 (71.29%~72.92%), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (7.17%~7.89%), Al_2O_3 (13.35%~14.48%), poor in MgO (0.61%~0.64%) and CaO (1.24%~1.73%), enriched in Nb, Ta, Zr, Hf and Th elements, depleted in Ba, K, Sr, P and Ti elements, and the rare earth distribution pattern is “seagull” type. The δEu value is 0.35~0.47, and the negative Eu anomaly is obvious. It belongs to high-potassium calc-alkaline and peraluminous A_2 -type granite. The Sr-Nd isotope characteristics show that the $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ value is 0.70545~0.70548, the $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value is $-1.7 \sim -0.3$, and the two-stage model age of Nd isotope is 1071~957 Ma. **[Conclusions]** Combined with the chronological and geochemical characteristics, it is considered that the diagenetic material is a mixture of new crust and mantle-derived material and is contaminated by the upper crust. The Xiaodachuan biotite monzonitic granite was formed in an extensional environment after the closure of the Mongolia-Okhotsk Ocean, which also led to the occurrence of diagenesis and mineralization in the region.

Key words: Southern Great Xing'an Range; Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit; biotite monzonitic granite; zircon U-Pb dating; Sr-Nd isotope; extensional environment

Highlights: This study is the first to conduct zircon U-Pb dating, whole-rock geochemistry, and Sr-Nd isotope analysis on the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit. It determined the timing of lithification and mineralization as well as the metallogenic geological background.

大兴安岭南段位于中亚造山带的东部, 地处贺根山断裂以南、西拉木伦缝合带以北、嫩江断裂以西的地区, 是中国北方重要的多金属成矿带之一。自古生代以来, 该地区受到古亚洲洋构造域、中—新生代蒙古-鄂霍茨克洋构造域, 以及古太平洋构造域的联合影响, 复杂的构造演化和多期强烈的岩浆作用与铜-铅-锌-银-铁-钼-锡-锂多金属成矿密切相关(Zhai et al., 2014; Ouyang et al., 2015; Pei et al., 2017), 其中铅锌的储量为 12.57 Mt, 铜的储量为 0.88 Mt(Mi et al., 2021)。大兴安岭南段发现多处铅锌矿床, 包括双尖子山热液脉型铅-锌-银矿床(Zhai et al., 2020)、拜仁达坝热液脉型铅-锌-银矿床(Liu et al., 2017)、边家大院斑岩-热液脉型锡-银-铅-锌-铜多金属矿床(Zhai et al., 2017)、白音查干热液脉型锡-铅-锌-银矿床(姚磊等, 2017)、姚儿吐热液脉型铅-锌-银矿床(Mi et al., 2021)等, 铅锌成矿极具潜力。

前人对大兴安岭南段地区单个铅锌矿床的成矿时代, 与成矿有关花岗岩的成岩时间、成岩过程、成矿流体及同位素特征进行了大量的研究。然而, 对铅锌矿床的类型和年龄, 以及与燕山期侵入体关系的研究较少。小大川铅锌铜矿床是大兴安岭南段黄岗梁-甘珠尔庙成矿带南东侧近年来新发现的热液脉型矿床, 资源储量铅为 2.28×10^4 t、锌为 2.16×10^4 t、铜为 1.43×10^4 t, 平均品位 Pb 为 3.29%、Zn 为 3.11%、Cu 为 0.72%, 前人主要对其基础地质特征进行了初步研究(王河等, 2019), 其花岗岩形成时代、岩石成因、源区性质及成岩环境尚不清楚。本文通

过锆石 U-Pb 年龄研究确定了黑云母二长花岗岩的成岩年龄, 利用全岩元素地球化学及 Sr-Nd 同位素确定了小大川铅锌铜矿床花岗岩的成岩过程。最后, 以这些数据为依据, 通过总结区域内铅锌矿床的成矿年龄、成矿物质来源及多金属矿床与铅锌矿床之间的关系, 为研究区铅锌成矿规律的研究提供了新的依据。

1 区域地质背景

大兴安岭南段位于中亚造山带东部的兴蒙造山带, 从松辽地块南部延伸至兴安地块北部(图 1-c)。研究区出露的地层主要包括: 前寒武纪黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、花岗片麻岩、黑云变粒岩及少量片岩基底, 奥陶系浅变质碎屑岩夹火山岩, 志留系板岩、砂岩及大理岩, 石炭系砂岩、灰岩, 二叠系板岩、变质细砂岩、大理岩及凝灰岩, 侏罗系砂岩、泥岩及火山碎屑岩, 白垩系在研究区大面积出露, 以砂岩、泥岩和火山碎屑岩为主。其中二叠系火山沉积建造是研究区多金属矿床的主要赋矿围岩(赵一鸣等, 1994; Wang et al., 2001)。区域内的断裂构造发育较多, NE 向的断裂为研究区的主体构造, 控制区域内晚中生代岩浆岩和矿床的分布(盛继福等, 1999)。区域内岩浆活动频繁, 以中生代侵入岩分布最广, 花岗岩岩石类型多为 I 型和 A 型。形成时代可分为早—中三叠世、早—中侏罗世和晚侏罗世—早白垩世 3 个阶段, 岩性主要为花岗闪长岩、二长花岗岩、碱性花岗岩、正长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩等

岩脉($\gamma\pi$), 闪长玢岩脉($\delta\mu$)及花岗岩脉(γ)(图 2)。黑云母二长花岗岩为含矿岩体, 呈浅肉红色—灰白色, 中粗粒结构, 块状构造(图 3-a), 由钾长石(约 30%)、石英(约 29%)、斜长石(约 25%)、黑云母(约 15%)及极少数的暗色矿物(约 1%)组成(图 3-c~e)。在岩体与矿体的接触位置, 发育有细晶花岗岩, 颜色为浅肉红色, 细粒结构, 块状构造(图 4-c), 主要矿物为石英(约 40%)、钾长石(约 35%)、斜长石(约 10%)及少量黑云母(约 5%)(图 3-b, f)。

矿区内断裂构造较为发育, 包括 4 条 NE—NNE 走向的断裂(图 2)。黑云母二长花岗岩的产出受控于 NE—NNE 向压扭性构造, 该组构造裂隙为 NE 向主断裂派生的次级断裂。岩浆岩沿 NE—NNE 向构造裂隙侵入充填, 形成走向 $10^\circ\sim 35^\circ$, 倾向 $100^\circ\sim 125^\circ$, 倾角 $65^\circ\sim 84^\circ$ 的岩体, 该次级断裂为本矿区的主要控矿构造。矿区内未发现后期构造对矿体的破坏作用。

目前, 矿区内共发现的 5 条具有工业价值的铅锌铜矿体均呈脉状分布。I、II、III 号铜矿体走向为 $18^\circ\sim 23^\circ$, 倾向为 $108^\circ\sim 113^\circ$, 矿体长度为 326~550 m, 矿体大部分由铜硫化物组成(图 4-a)。IV、VI 号铅锌矿体走向为 48° , 倾向为 $65^\circ\sim 75^\circ$, 矿体长度分别为 260 m 和 400 m, 矿体大部分由铅锌硫化物组成

(图 4-b)。铅锌铜矿体在岩体中多呈脉状、浸染状和网状出现, 铜矿体主要矿石矿物为黄铜矿和黄铁矿, 铅锌矿体矿石矿物主要有方铅矿、闪锌矿, 以及少量的黄铜矿、黄铁矿, 脉石矿物主要有石英、绿泥石、绢云母、方解石、萤石。矿石结构主要有自形晶粒状结构、半自形—他形晶粒结构、包含结构、共边结构、固溶体分离结构、交代残余结构、港湾状结构、压碎结构等。矿石构造主要有块状构造、花斑状构造、浸染状构造、脉状构造、晶洞构造等。小大川铅锌铜矿床中的热液蚀变作用较多, 主要的蚀变类型有硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化。

3 采样分析方法

本次实验样品取自 IV 号、VI 号铅锌矿体的围岩, 且均为未发生蚀变的黑云母二长花岗岩, 极具代表性, 具体采样位置见图 2。对采集的 5 块花岗岩样品进行了全岩地球化学分析, 3 块花岗岩样品进行了 Sr-Nd 同位素分析。从样品 XBC-7 和 XBC-9 中分离出锆石颗粒, 进行锆石 U-Pb 年代学研究。

3.1 全岩主量、微量和稀土元素分析

将黑云母二长花岗岩样品进行清洗并粉碎至 200 目后, 进行岩石的主量和微量元素分析测试。主

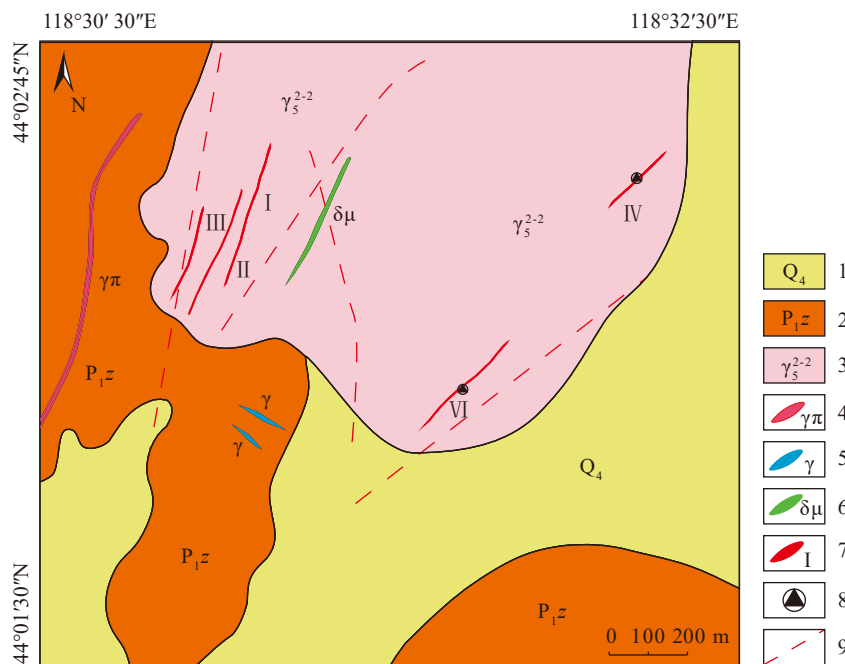


图 2 小大川铅锌铜矿床地质简图(据赤峰盛源地质勘查有限公司, 2018)

Fig. 2 Geological sketch map of the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

1—第四系; 2—下二叠统哲斯组; 3—燕山期黑云母二长花岗岩; 4—花岗斑岩脉; 5—花岗岩脉; 6—闪长玢岩脉; 7—矿体位置及编号; 8—采样位置; 9—断裂

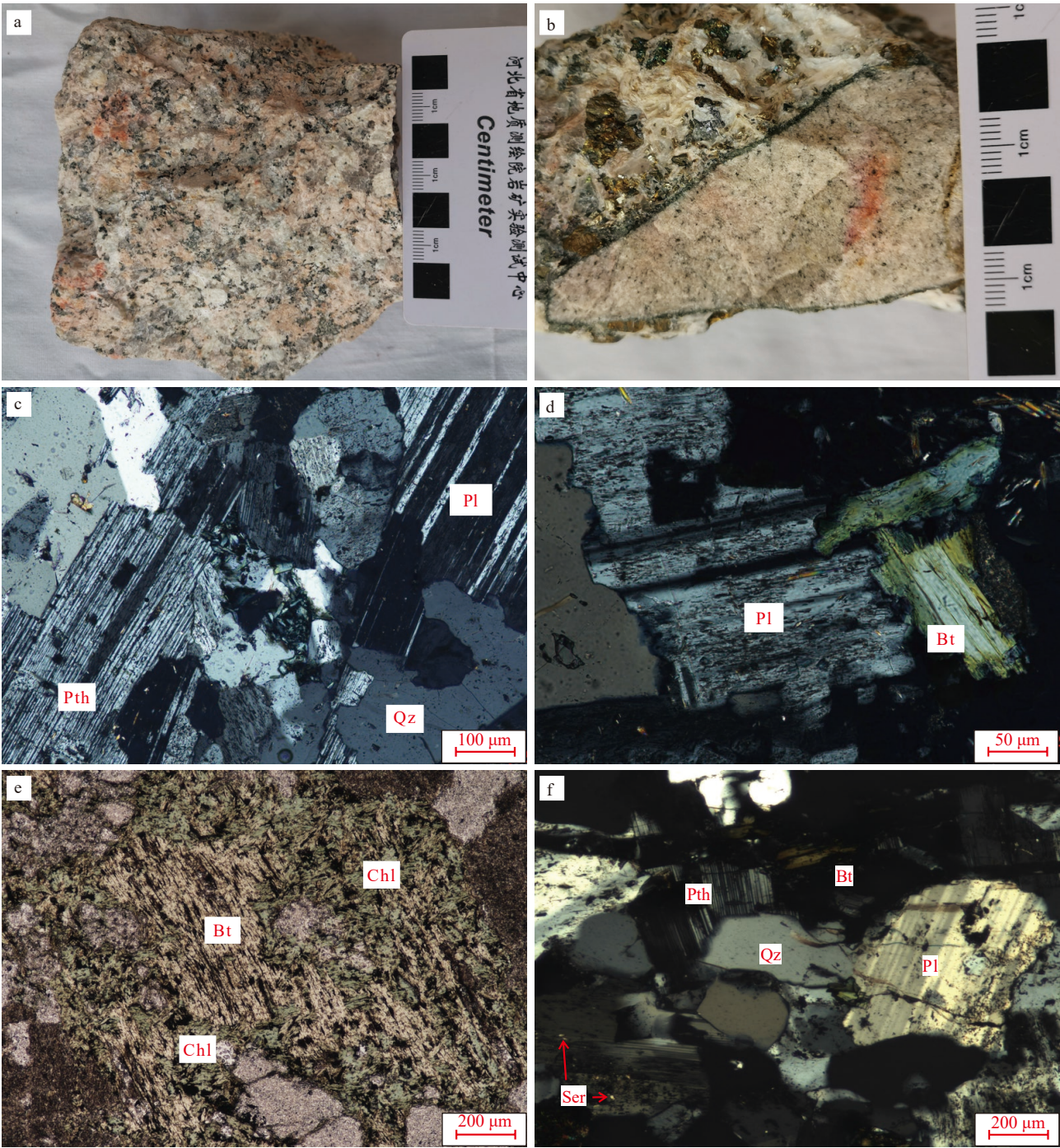


图3 花岗岩手标本及镜下照片

Fig. 3 Granite hand specimens and microscopic photographs

a—黑云母二长花岗岩手标本; b—细晶花岗岩手标本; c, e—黑云母二长花岗岩显微照片(正交偏光); f—细晶花岗岩显微照片(正交偏光)。Pth—条纹长石; Chl—绿泥石; Bt—黑云母; Qz—石英; Ser—绢云母

量和微量元素测试工作在澳实分析检测(广州)有限公司矿物实验室完成。全岩主量元素分析采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融, X 射线-荧光光谱法, 测试构岩元素及烧失量(LOI), 检测元素含量后换算成氧化物,

实验室使用 QC 样控制每个元素的数据质量, 氧化物的检测限为 0.1%~100%。微量元素分析采用硼酸锂熔融、等离子质谱定量分析、质谱/光谱仪综合分析。

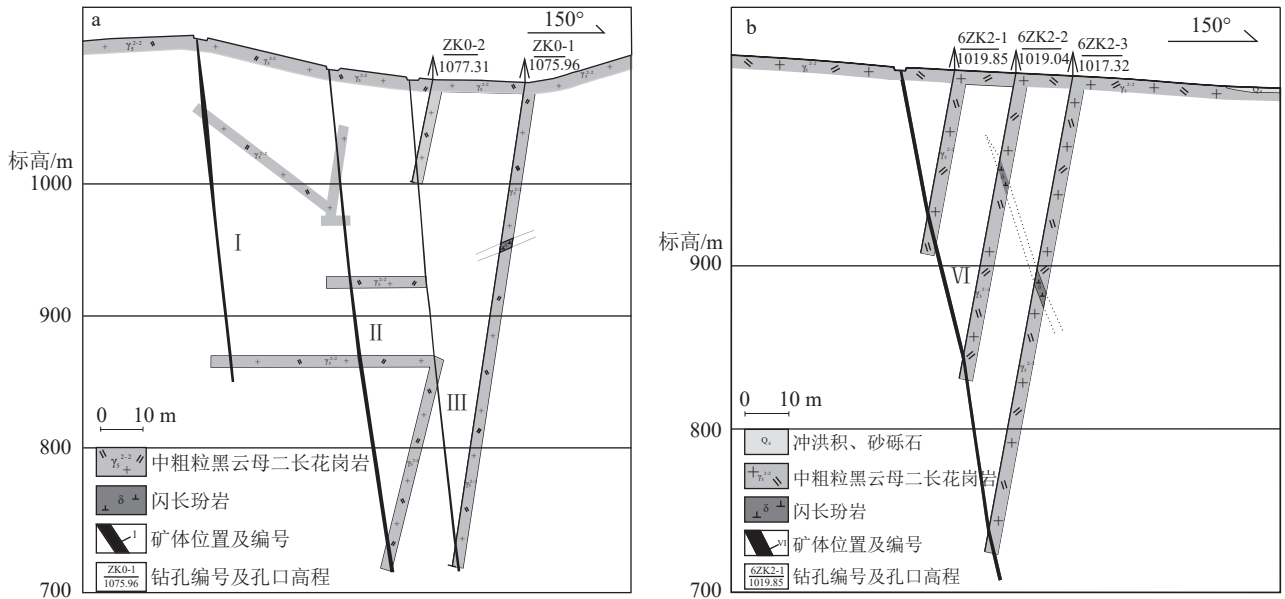


图 4 小大川矿区 I、II、III 号铜矿体的 0 号勘查线(a)和 VI 号铅锌矿体的 3 号勘查线(b)剖面图
(据赤峰盛源地质勘查有限公司, 2018)

Fig. 4 Profile of survey line 0 for Cu ore bodies No. 1, No. 2 and No. 3 (a) and survey line 3 for Pb-Zn ore body No. 6 (b) in the Xiaodachuan deposit

3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

在重庆宇劭科技有限公司使用传统的重液和重磁技术对样品 XBC-7 和 XBC-9 进行锆石的分离工作, 然后在透射光和反射光下检测分离的锆石并通过阴极发光(CL)成像技术对锆石颗粒的外部 and 内部结构进行观察。锆石的定年工作使用武汉上谱分析科技有限责任公司 GeolasPro 激光剥蚀系统和 Agilent7700e 型 ICP-MS 完成。通过锆石标准样 91500 进行元素和同位素分馏校正, 锆石微量元素含量校正的内标和外标分别为 ^{29}Si 和 NIST610。具体的操作流程和仪器参数见 Liu et al. (2010)。采用 ICPMSDataCal 软件对分析数据进行处理。样品的 U-Pb 谐和图和年龄加权平均值计算均采用 Isoplot 4.15 完成 (Ludwig, 2003)。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

全岩 Sr-Nd 同位素分析和测试工作在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成, 分析测试流程详见 Li (2006)。其中, Sr-Nd 同位素采用 HF+HNO₃ 混合酸溶解并用阳离子交换技术进行分离, 在 NeptunePlus 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 上进行测试。Sr、Nd 同位素质量分馏分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 、 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行标准化校正。Nd 同位素二阶段模

式年龄计算采用球粒陨石 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 值 (分别为 0.512638 和 0.1967; Jacobsen and Wasserburg, 1984) 及亏损地幔参考值 (分别为 0.21365 和 0.513151; Goldstein and Jacobsen, 1988)。

4 分析结果

4.1 全岩主量、微量和稀土元素

小大川黑云母二长花岗岩的全岩主量、微量和稀土元素组成见表 1。黑云母二长花岗岩中 SiO₂、Al₂O₃、K₂O、Na₂O、MgO、CaO 和 Fe₂O₃ 的含量分别为 71.29%~72.92%、13.35%~14.48%、3.36%~4.01%、3.81%~3.98%、0.61%~0.64%、1.24%~1.73% 和 0.44%~0.76%。在 TAS 和 SiO₂-K₂O 图解 (图 5) 中将其归类为高钾钙碱性花岗岩。小大川黑云母二长花岗岩的 A/NK (Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)) 和 A/CNK (Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)) 值分别为 1.28~1.35 和 1.04~1.06, 均大于 1, 在 A/CNK-A/NK 图解 (图 6) 中, 将其归类为准铝质—过铝质类。

黑云母二长花岗岩轻稀土元素富集且具有中等程度的负 Eu 异常 (图 7-a), LREE/HREE 和 δEu 值分别为 6.28~8.55 和 0.35~0.47。本次实验还说明了轻、重稀土元素的中度分馏特征, 其 (La/Yb)_N 值为 5.66~8.27。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示

表 1 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩主量、微量和稀土元素含量

Table 1 Major, trace and rare earth elements content of biotite monzogranite in the Xiaodachuan Pb–Zn–Cu deposit

元素	XBC 5-1	XBC 5-2	XBC-6	XBC-7	XBC-8	元素	XBC 5-1	XBC 5-2	XBC-6	XBC-7	XBC-8
SiO ₂	71.36	71.29	72.92	72.34	71.33	Zn	62	61	120	261	301
Al ₂ O ₃	14.48	14.40	13.35	13.57	13.73	Li	30.2	29.5	31.1	32.1	36.4
CaO	1.73	1.72	1.50	1.25	1.24	V	24	27	26	29	29
Fe ₂ O ₃	0.73	0.76	0.60	0.54	0.44	Ni	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
K ₂ O	4.01	4.00	3.36	3.73	3.83	Y	23.9	23.9	23.6	25.6	22.4
MgO	0.61	0.63	0.64	0.62	0.61	Co	3.2	3.0	3.0	3.1	3.1
MnO	0.05	0.05	0.08	0.09	0.10	Ga	22.1	21.4	20.2	19.75	20.8
Na ₂ O	3.88	3.86	3.81	3.94	3.98	Sc	5.4	5.2	4.9	4.7	5.4
P ₂ O ₅	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	Be	3.48	3.41	3.59	3.00	2.85
TiO ₂	0.29	0.29	0.29	0.31	0.30	Rb/Sr	0.55	0.56	0.48	0.72	0.70
FeO	1.60	1.58	1.73	1.82	1.99	Rb/Ba	0.28	0.28	0.33	0.33	0.35
烧失量	1.25	1.36	1.41	1.77	1.63	La	21.7	21.2	24.8	33.2	24.6
Na ₂ O+K ₂ O	7.89	7.86	7.17	7.67	7.81	Ce	47.2	47.4	53.7	70.5	52.5
Na ₂ O/K ₂ O	0.97	0.97	1.13	1.06	1.04	Pr	5.56	5.59	6.33	7.79	5.94
Mg [#]	32.49	33.12	33.47	32.42	31.31	Nd	21.1	21.3	22.5	29.2	22.5
σ	2.20	2.18	1.72	2.01	2.15	Sm	4.82	4.88	5.02	6.08	4.93
DI	85.07	85.04	85.57	86.71	86.29	Eu	0.67	0.72	0.60	0.65	0.67
A/NK	1.35	1.35	1.35	1.29	1.28	Gd	4.70	4.34	4.51	5.05	4.35
A/CNK	1.04	1.04	1.06	1.06	1.06	Tb	0.75	0.75	0.70	0.82	0.70
Sr	291	288	291	243	241	Dy	4.23	4.23	4.04	4.66	3.83
Rb	160	160	140	175	168	Ho	0.82	0.85	0.84	0.89	0.80
Ba	573	565	426	524	483	Er	2.42	2.42	2.32	2.49	2.26
Th	11.15	10.98	12.85	12.85	11.63	Tm	0.37	0.36	0.36	0.39	0.35
U	4.29	4.22	4.63	5.29	2.34	Yb	2.43	2.39	2.31	2.55	2.23
Cr	3.00	2.00	3.00	2.00	3.00	Lu	0.37	0.37	0.35	0.39	0.34
Ta	0.75	0.74	0.71	0.72	0.60	ΣLREE	101.1	101.1	113.0	147.4	111.1
Nb	9.80	9.70	9.30	9.50	9.30	ΣHREE	16.09	15.71	15.43	17.24	14.86
Zr	174	168	193	187	174	(La/Sm) _N	2.83	2.73	3.11	3.43	3.14
Hf	5.0	4.9	5.8	5.3	5.0	(Gd/Yb) _N	1.56	1.47	1.58	1.60	1.57
Cu	6.3	5.9	76.0	47.4	122.5	(La/Yb) _N	6.02	5.98	7.23	8.78	7.44
Pb	20	19.8	96	155	276	δEu	0.43	0.47	0.38	0.35	0.43

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

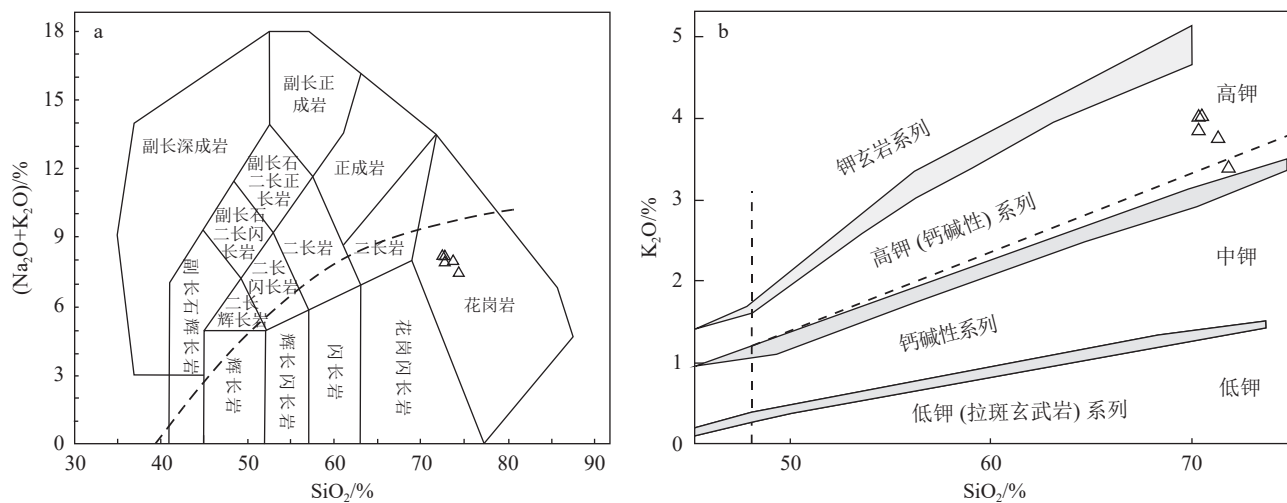
(图 7-b), 其富集 Rb、Th、Nd、La、Hf 等元素, 亏损 Ba、Sr、P、Zr 等元素。

4.2 锆石 U–Pb 年龄

小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩样品 XBC-7、XBC-9 的锆石阴极发光(CL)图像如图 8 所示。在透射光和反射光下, 锆石颗粒多呈无色、棱柱状、自形的特征, 锆石颗粒粒径为 60~200 μm, 长宽比为

1 : 1~5 : 1。锆石的 CL 图像显示, 大部分锆石内部结构清晰, 具有明显的核—边结构, 锆石呈自形—半自形且边部发育明显的振荡环带, 无继承锆石核的存在。

黑云母二长花岗岩的锆石 U–Pb 测试结果见表 2, 并在图 9-a, c 中显示。样品 XBC-7 的 26 个锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 132.1~139.6 Ma 之间, 年龄加权平均值为 135.9±0.8 Ma(MSWD=0.85)(图 9-b)。样

图 5 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩 TAS 图解(a)和 SiO_2 - K_2O 判别图解(b)

(a 图据 Middlemost, 1994; b 图据 Peccerillo and Taylor, 1976)

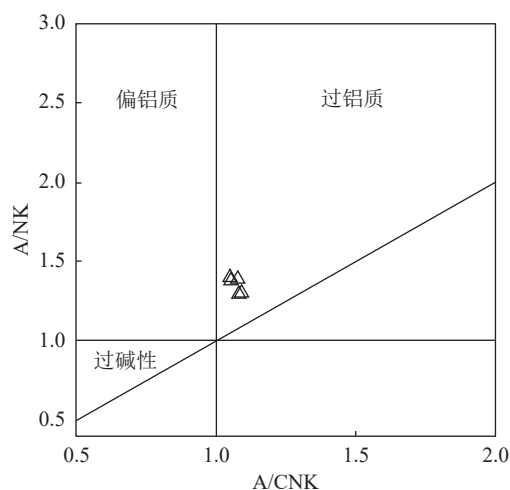
Fig. 5 Illustration of TAS (a) and SiO_2 - K_2O discrimination (b) for the biotite monzogranite of the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

图 6 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩 A/CNK-A/NK 图解(据 Middlemost, 1985)

Fig. 6 A/CNK-A/NK diagram for the biotite monzogranite of the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

品 XBC-9 的 24 个锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 132.7~137.4 Ma 之间, 年龄加权平均值为 134.9 ± 0.8 Ma (MSWD=0.4)(图 9-c)。

4.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

小大川黑云母二长花岗岩的全岩 Sr-Nd 同位素分析结果列于表 3。以本次锆石 U-Pb 定年测得的黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄(135.9 ± 0.8 Ma)为基础进行校正后, 得到了 3 个黑云母二长花岗岩样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.70545 \sim 0.70548$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-1.7 \sim -0.3$, $T_{2\text{DM}}(\text{Nd})$ 年龄为 1071~957 Ma。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

前人研究表明, 大兴安岭南段铅锌矿床的形成与晚中生代岩浆的侵入关系密切(毛景文等, 2013)。本文通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 首次测得 2 件小大川铅锌铜矿床黑云母二长花岗岩样品的年龄分别为 135.9 ± 0.8 Ma 和 134.9 ± 0.8 Ma, 均为早白垩世。这一年龄范围与邻区双尖子山热液脉型铅-锌-银矿床花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(135.2 ± 1.4 Ma; Zhai et al., 2020)、小井子热液脉型铜-铅-锌-银矿床黑云母二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(136.2 ± 1.1 Ma; Mi et al., 2022)、白音诺尔矽卡岩型铅-锌-银矿床长石斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(136 ± 2 Ma; Jiang et al., 2017)、白音额勒布热液脉型铅-锌-银矿床花岗闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(141.6 ± 1.6 Ma; 宋开瑞, 2019), 以及边家大院斑岩-热液脉型锡-银-铅-锌-铜矿花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄($140.8 \pm 0.9 \sim 140.2 \pm 0.6$ Ma; Ruan et al., 2015; Zhai et al., 2017)在误差范围内大致相同, 表明大兴安岭南段与铅锌成矿密切相关的花岗质岩石主要形成于早白垩世。

在小大川铅锌铜矿区, 黑云母二长花岗岩侵入哲斯组形成了铅锌铜矿化, 铅-锌-铜矿体呈脉状赋存在黑云母二长花岗岩体中, 且未受到构造活动的影

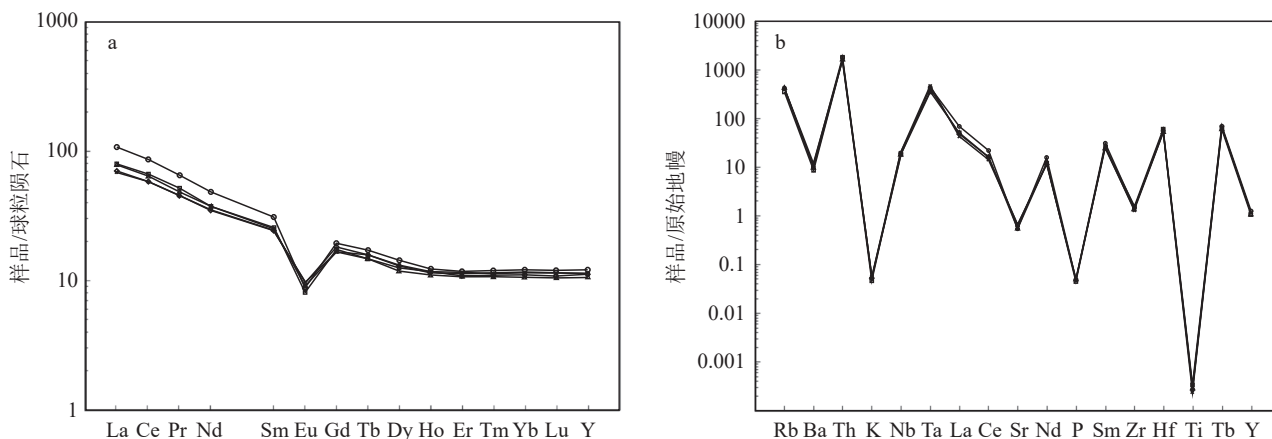


图 7 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(标准化数据分别据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized rare earth element partition curves (a) and primitive mantle normalized trace element spiderweb plots (b) of biotite monzogranite from the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

响,矿体在空间上与黑云母二长花岗岩密切相关,表明黑云母二长花岗岩的年龄为铅-锌-铜矿化年龄的上限。另外,黑云母二长花岗岩锆石的 CL 成像显示,锆石呈自形一半自形且边部发育明显的振荡环带,且 Th/U 值(0.28~0.59)较高,表明其为岩浆成因(Koschek, 1993; Zhang et al., 2020),因此其年龄可以代表岩浆岩结晶年龄。本次得到了小大川铅锌铜矿床早白垩世黑云母二长花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄分别为 135.9 ± 0.8 Ma 和 134.9 ± 0.8 Ma,代表了岩浆岩的结晶年龄,表明矿化可能发生在约 135 Ma,与邻区内其他铅-锌-铜多金属矿床的岩浆活动及铅-锌-铜的矿化年龄一致(表 4)。

5.2 岩石类型划分

显生宙,中国东北地区发生了大量岩浆岩的侵入,其中 A 型和 I 型花岗质岩体广泛分布(Wu et al., 2003)。许多铅锌铜多金属矿床的形成都与 A 型花岗岩有关,包括边家大院热液脉型铜-铅-锌-银矿床中的花岗斑岩(顾玉超等, 2017)、黄冈梁砂卡岩型锡-铁矿床中的钾长花岗岩和花岗斑岩(Zhou et al., 2012),以及喀什吐云英岩型钼矿床中的花岗岩(Zhai et al., 2014; Liu et al., 2018; Wang et al., 2018)等。

小大川黑云母二长花岗岩的矿物成分主要为石英、钾长石、斜长石、黑云母及少量的副矿物,具有较高的 SiO_2 含量(71.29%~72.92%)、 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量(7.17%~7.89%)、 $\text{TFeO}/(\text{MgO}+\text{TFeO})$ 值(0.78~0.8)、 $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 值(2.75~2.88)、 TFeO/MgO 值(3.54~3.91)及较低的 MgO (平均值 0.62%)、

CaO (平均值 1.49%)、 TiO_2 (平均值 0.30%)、 P_2O_5 (平均值 0.09%),富集 Nb、Ta、Zr、Hf、Th 等高场强元素(HFSE),明显亏损 Ba、Sr、P、Ti 元素,稀土元素特征显示其轻稀土元素富集($(\text{La}/\text{Yb})_N=5.66\sim 8.27$)且有较明显的负 Eu 异常(δEu 值为 0.35~0.47),以上描述与 I 型和 S 型花岗岩的特征相异,符合 A 型花岗岩的特征(Pearce et al., 1984; Whalen et al., 1987; Eby, 1992; Frost et al., 2001; Bonin, 2007)。另外,Whalen et al.(1987)以 $10000*\text{Ga}/\text{Al}>2.6$ 作为划分 A 型花岗岩的标准,本次研究的所有黑云母二长花岗岩样品的 $10000*\text{Ga}/\text{Al}$ 值介于 2.75~2.88 之间,均大于 2.6,符合 A 型花岗岩的判定标准。在 $10000*\text{Ga}/\text{Al}-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 、 $10000*\text{Ga}/\text{Al}-\text{TFeO}/\text{MgO}$ 判别图解(图 10-a, b)中,黑云母二长花岗岩所有样品投点都落入 A 型花岗岩区域。Eby (1992)将 A 型花岗岩分为 A_1 和 A_2 亚型,不同亚型的 A 型花岗岩代表不同的起源和构造环境, A_1 亚型代表非造山的大陆裂谷或板内环境, A_2 亚型代表花岗岩形成于造山后的伸展环境(顾玉超等, 2017),在 $\text{Y}/\text{Nb}-\text{Rb}/\text{Nb}$ 和 $\text{Y}/\text{Nb}-\text{Sc}/\text{Nb}$ 图解(图 10-c, d)中所有样品投点落在 A_2 型区域,因此,将小大川矿区花岗岩归为 A_2 型高钾钙碱性过铝质花岗岩。

5.3 源区性质与岩石成因

虽然大兴安岭南段许多与成矿有关的花岗岩均为 A 型花岗岩,但是对于 A 型花岗岩的成因并没有统一的结论。前人对 A 型花岗岩的研究得出的成因模型可以归纳为以下几点:①岩浆混合模式:地壳熔

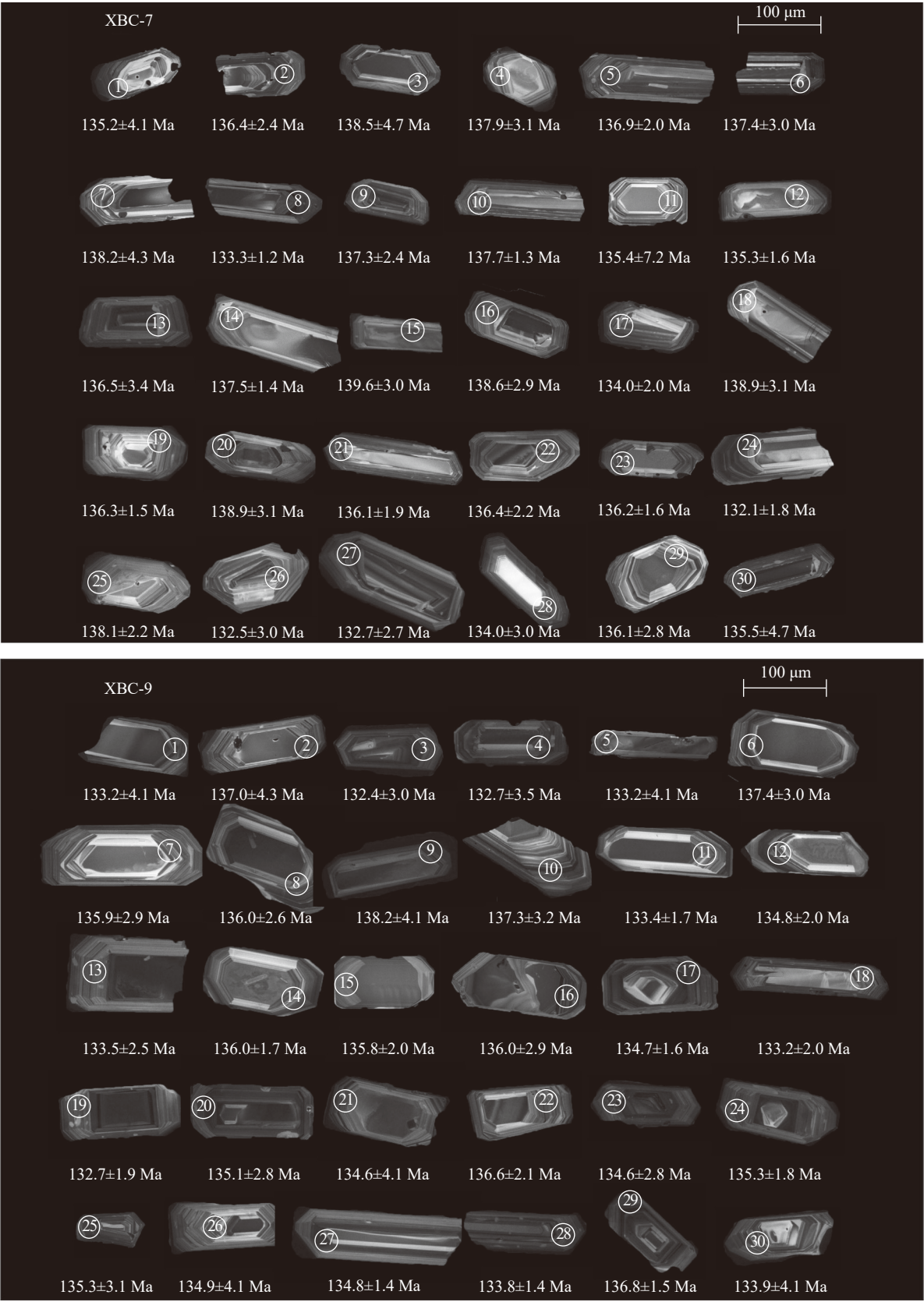


图 8 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩锆石阴极发光图像(CL)及测试位置

Fig. 8 Zircon CL images and test position of biotite monzonitic granite in the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

表 2 小大川铅锌铜矿床黑云母二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 数据

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb geochronological data for the biotite monzogranite from the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

测点号	Pb/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
XBC-7-02	82	678	2009	0.34	0.04913	0.00295	0.1458	0.0083	0.02138	0.00037	138.2	7.4	136.4	2.4
XBC-7-03	68	720	1153	0.62	0.04856	0.00532	0.1459	0.0170	0.02172	0.00075	138.3	15.1	138.5	4.7
XBC-7-04	28	268	658	0.41	0.04924	0.00354	0.1451	0.0095	0.02162	0.00049	137.6	8.4	137.9	3.1
XBC-7-05	84	836	1752	0.48	0.04899	0.00279	0.1453	0.0081	0.02146	0.00032	137.8	7.2	136.9	2.0
XBC-7-07	74	723	1125	0.64	0.04504	0.01004	0.1466	0.0317	0.02167	0.00068	138.9	28.1	138.2	4.3
XBC-7-08	89	897	1930	0.46	0.04864	0.00183	0.1403	0.0052	0.02090	0.00019	133.3	4.6	133.3	1.2
XBC-7-09	73	629	1665	0.38	0.04875	0.00345	0.1445	0.0102	0.02153	0.00038	137.1	9.1	137.3	2.4
XBC-7-10	81	830	1666	0.50	0.04867	0.00199	0.1453	0.0059	0.02160	0.00021	137.8	5.3	137.7	1.3
XBC-7-11	35	361	707	0.51	0.04869	0.00769	0.1385	0.0176	0.02122	0.00113	131.7	15.7	135.4	7.2
XBC-7-12	52	459	1211	0.38	0.04897	0.00220	0.1429	0.0062	0.02121	0.00025	135.6	5.5	135.3	1.6
XBC-7-13	65	669	1216	0.55	0.05105	0.00668	0.1438	0.0144	0.02140	0.00054	136.4	12.8	136.5	3.4
XBC-7-14	56	525	1214	0.43	0.04840	0.00200	0.1452	0.0064	0.02156	0.00022	137.6	5.6	137.5	1.4
XBC-7-15	28	246	484	0.51	0.04905	0.00341	0.1473	0.0100	0.02189	0.00047	139.5	8.9	139.6	3.0
XBC-7-17	51	522	1240	0.42	0.04937	0.00300	0.1418	0.0081	0.02101	0.00032	134.6	7.2	134.0	2.0
XBC-7-18	42	473	742	0.64	0.04899	0.00446	0.1460	0.0131	0.02178	0.00049	138.3	11.6	138.9	3.1
XBC-7-19	80	831	1614	0.52	0.04903	0.00198	0.1435	0.0055	0.02137	0.00024	136.2	4.9	136.3	1.5
XBC-7-21	58	534	1400	0.38	0.04858	0.00246	0.1435	0.0073	0.02134	0.00030	136.1	6.5	136.1	1.9
XBC-7-22	48	469	1009	0.46	0.04904	0.00270	0.1443	0.0075	0.02139	0.00036	136.9	6.6	136.4	2.2
XBC-7-23	96	1024	1738	0.59	0.04831	0.00246	0.1428	0.0069	0.02136	0.00026	135.6	6.2	136.2	1.6
XBC-7-24	98	1062	2034	0.52	0.04870	0.00293	0.1395	0.0080	0.02071	0.00029	132.6	7.1	132.1	1.8
XBC-7-25	28	229	743	0.31	0.04778	0.00645	0.1469	0.0210	0.02165	0.00035	139.2	18.6	138.1	2.2
XBC-7-26	57	568	1142	0.50	0.04732	0.00312	0.1391	0.0095	0.02077	0.00047	132.2	8.4	132.5	3.0
XBC-7-27	59	579	1253	0.46	0.04712	0.00297	0.1400	0.0089	0.02080	0.00043	133.1	7.9	132.7	2.7
XBC-7-28	38	387	741	0.52	0.04705	0.00418	0.1424	0.0120	0.02100	0.00047	135.2	10.7	134.0	3.0
XBC-7-29	59	594	1024	0.58	0.04710	0.00306	0.1436	0.0087	0.02134	0.00045	136.2	7.7	136.1	2.8
XBC-7-30	62	489	938	0.52	0.04574	0.00571	0.1443	0.0181	0.02124	0.00075	136.9	16.0	135.5	4.7
XBC-9-01	28	251	611	0.41	0.04675	0.00503	0.1401	0.0135	0.02087	0.00064	133.1	12.1	133.2	4.1
XBC-9-02	30	276	819	0.34	0.04731	0.00598	0.1450	0.0202	0.02148	0.00068	137.5	17.9	137.0	4.3
XBC-9-03	60	514	1681	0.31	0.04924	0.00508	0.1393	0.0111	0.02075	0.00047	132.4	9.9	132.4	3.0
XBC-9-05	25	206	735	0.28	0.04717	0.00706	0.1435	0.0227	0.02154	0.00048	136.2	20.2	137.4	3.0
XBC-9-06	58	583	1236	0.47	0.04858	0.00360	0.1434	0.0102	0.02130	0.00045	136.1	9.0	135.9	2.9
XBC-9-07	32	303	641	0.47	0.04977	0.00390	0.1437	0.0101	0.02132	0.00041	136.3	9.0	136.0	2.6
XBC-9-10	54	516	1402	0.37	0.04980	0.00506	0.1409	0.0128	0.02091	0.00027	133.8	11.4	133.4	1.7
XBC-9-11	38	343	906	0.38	0.04837	0.00263	0.1418	0.0088	0.02113	0.00031	134.7	7.8	134.8	2.0
XBC-9-12	40	410	831	0.49	0.04941	0.00403	0.1405	0.0105	0.02092	0.00039	133.5	9.3	133.5	2.5
XBC-9-13	54	450	1262	0.36	0.04985	0.00274	0.1444	0.0072	0.02133	0.00027	136.9	6.4	136.0	1.7
XBC-9-14	45	471	983	0.48	0.04838	0.00337	0.1427	0.0101	0.02128	0.00032	135.4	9.0	135.8	2.0
XBC-9-15	18	147	408	0.36	0.04977	0.00432	0.1431	0.0119	0.02132	0.00045	135.8	10.6	136.0	2.9
XBC-9-16	84	896	1531	0.59	0.04869	0.00205	0.1415	0.0058	0.02112	0.00025	134.3	5.2	134.7	1.6
XBC-9-17	48	423	1151	0.37	0.04935	0.00322	0.1406	0.0086	0.02088	0.00031	133.5	7.6	133.2	2.0
XBC-9-18	50	466	1166	0.40	0.04869	0.00286	0.1390	0.0076	0.02080	0.00030	132.2	6.8	132.7	1.9
XBC-9-19	91	855	2383	0.36	0.04946	0.00412	0.1429	0.0112	0.02118	0.00044	135.6	9.9	135.1	2.8
XBC-9-21	46	411	1059	0.39	0.04828	0.00355	0.1437	0.0108	0.02142	0.00034	136.4	9.6	136.6	2.1
XBC-9-22	65	593	1252	0.47	0.04895	0.00864	0.1418	0.0232	0.02110	0.00045	134.6	20.6	134.6	2.8
XBC-9-23	73	643	1807	0.36	0.04910	0.00322	0.1429	0.0087	0.02121	0.00029	135.6	7.7	135.3	1.8
XBC-9-24	60	550	1366	0.40	0.04892	0.00330	0.1431	0.0099	0.02121	0.00049	135.8	8.8	135.3	3.1
XBC-9-26	56	536	1117	0.48	0.04871	0.00180	0.1420	0.0052	0.02114	0.00023	134.8	4.6	134.8	1.4
XBC-9-27	57	513	1574	0.33	0.04888	0.00196	0.1407	0.0054	0.02098	0.00022	133.7	4.8	133.8	1.4
XBC-9-28	83	841	1728	0.49	0.04860	0.00167	0.1442	0.0051	0.02145	0.00023	136.8	4.5	136.8	1.5
XBC-9-30	44	431	918	0.47	0.04841	0.00462	0.1400	0.0129	0.02099	0.00064	133.0	11.5	133.9	4.1

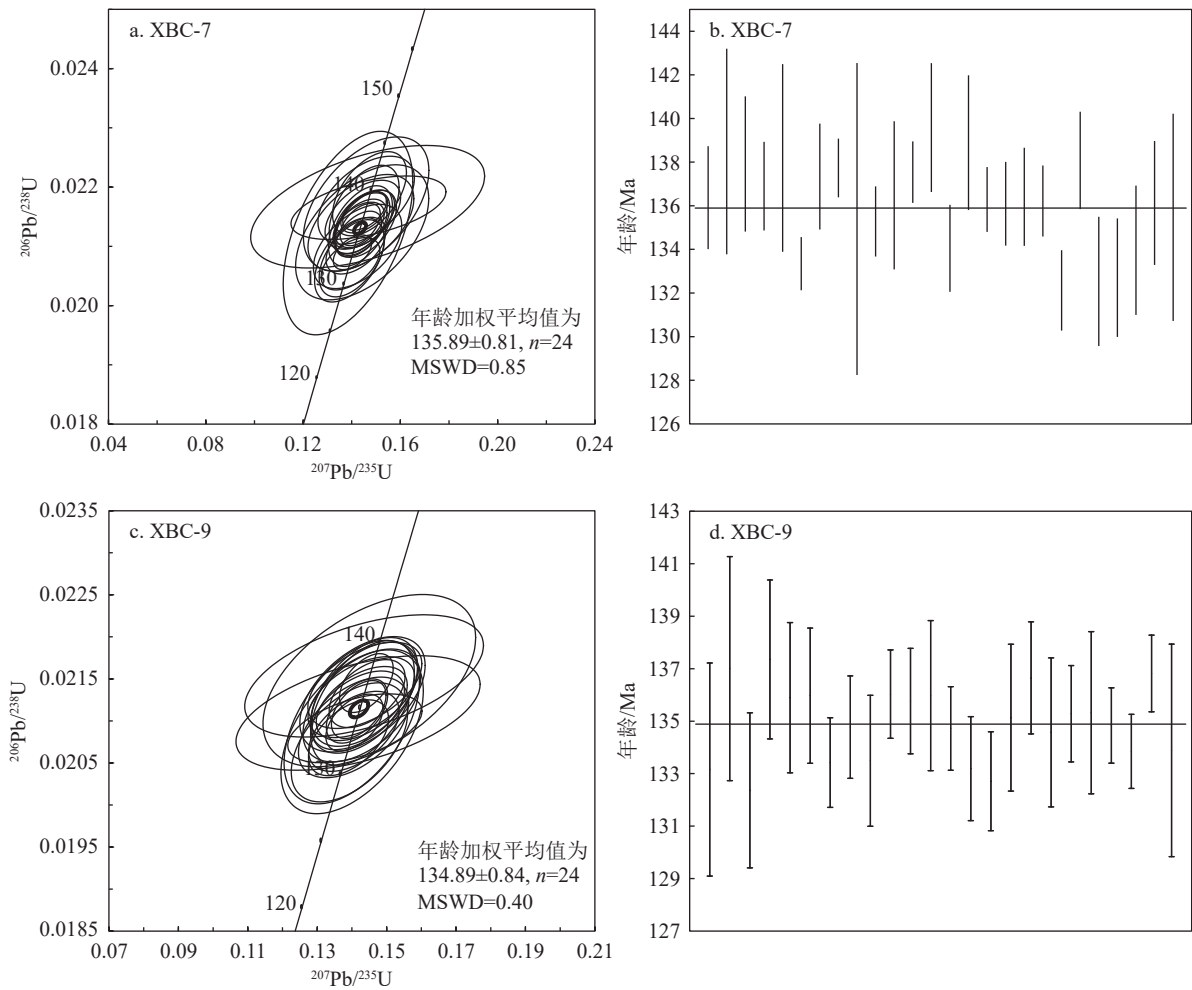


图 9 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩样品 XBC-7、XBC-9 锆石 U-Pb 年龄谐和图(a, c)和年龄谱图(b, d)

Fig. 9 The XBC-7, XBC-9 zircon U-Pb age concordia diagrams (a, c) and age weighted average diagrams (b, d)

表 3 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd isotope analysis results of whole rock of biotite monzogranite from the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

样号	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$I_{\text{Sr}}(t)$	Sm/ 10^{-6}	Nd/ 10^{-6}
XBC-6	140	291	1.39311	0.708139	0.000022	0.70545	5.02	22.5
XBC-7	175	243	2.08536	0.709484	0.000022	0.70546	6.08	29.2
XBC-8	168	241	2.01856	0.709374	0.000021	0.70548	4.93	22.5
样号	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$I_{\text{Nd}}(t)$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	T_{DM}/Ma	$T_{2\text{DM}}/\text{Ma}$
XBC-6	0.13489	0.512494	0.000013	0.512374	-1.7	-0.31	1271	1071
XBC-7	0.12589	0.512558	0.000009	0.512446	-0.3	-0.36	1030	957
XBC-8	0.13247	0.512518	0.000008	0.512400	-1.2	-0.33	1188	1030

体与地幔起源的镁铁质岩浆混合(Wickham et al., 1996; Yang et al., 2007); ②结晶分异模式: 幔源碱性玄武岩发生高度结晶分异(Shellnutt and Jahn, 2010); ③残余抽离模式: 下地壳部分熔融的花岗质残留物的低程度部分熔融(Collins et al., 1982; Whalen et al.,

1987); ④部分熔融模式: 地壳岩石的部分熔融形成(King et al., 1997)。这些模型主要说明地幔和地壳的混合对岩石成因起到的作用(Wu et al., 2002)。小大川黑云母二长花岗岩样品具有高 SiO_2 (平均值为 71.85%) 和较低的 MgO (平均值为 0.62%) 含量, 表明

表 4 小大川铅锌铜矿及邻区典型矿床成岩成矿年龄

Table 4 Ages of diagenesis and mineralization of typical deposits in Xiaodachuan Pb–Zn–Cu deposit and its adjacent areas

矿床名称	矿床类型	矿种	围岩锆石 U–Pb年龄	矿化年龄	参考文献
双尖子山	热液脉型	铅–锌–银	花岗斑岩 135.2±1.4 Ma	135.0±0.6 Ma Re–Os年龄	Zhai et al., 2020 王祥东, 2017
白音诺尔	矽卡岩型	铅–锌–银	长石斑岩 136±2 Ma	138.8±0.9 Ma Re–Os年龄	Jiang et al., 2017
小井子	热液脉型	铜–铅–锌–银	黑云母二长花岗岩 136.2±1.1 Ma	早白垩世	Mi et al., 2022
姚儿吐	热液脉型	铅–锌–银	二长花岗岩 137.1±0.4 Ma	早白垩世	Mi et al., 2021
白音额勒布	热液脉型	银–铅–锌	花岗斑岩 141.6±1.6 Ma	144.1±2.1 Ma	宋开瑞, 2019
边家大院	斑岩–热液脉型	锡–银–铅–锌–铜	花岗斑岩 140.8±0.9 Ma 140.2±0.6 Ma	140.0±1.7 Ma Re–Os年龄	Ruan et al., 2015 Zhai et al., 2017
小大川	热液脉型	铜–铅–锌	黑云母二长花岗岩 135.9±0.8 Ma	早白垩世	本文

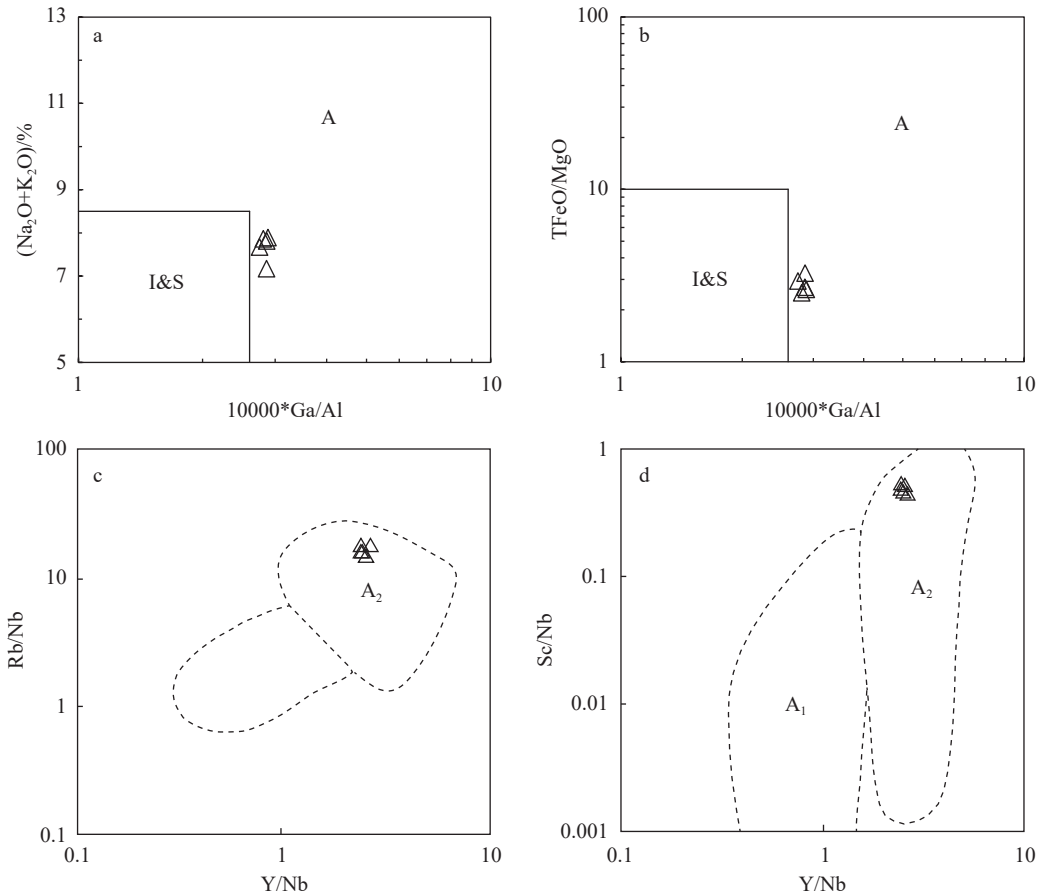


图 10 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩类型判别图解(底图据 Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; Eby, 1992)

Fig. 10 Illustration of the type discrimination of the biotite monzogranite in the Xiaodachuan Pb–Zn–Cu deposit

a—10000*Ga/Al–(Na₂O+K₂O) 图解; b—10000*–TFeO/MgO 图解; c—Y/Nb–Rb/Nb 图解; d—Y/Nb–Sc/Nb 图解。

A—A 型花岗岩区域; I&S—I 型和 S 型花岗岩区域

成岩物质不只来源于地幔(Bonin, 2008)。地幔可能在花岗岩形成过程中提供了一定的热量。

分离结晶在 A 型花岗岩的成分变化过程中起着重要的作用(Mi et al., 2019)。La-La/Sm 图解(图 11-a)说明, 岩浆演化过程中分离结晶作用是主要的控制因素。例如, 微量元素 Ba、Sr、Eu、P 的亏损表明斜长石、钾长石和磷灰石的分离结晶(Wu et al., 2002; 任文恺等, 2020)。另外, 小大川黑云母二长花岗岩的 $Mg^\#$ 、Th/U 值、Nb/Ta 值及 Zr/Hf 值是判断岩浆成因的重要指标, 其 $Mg^\#$ 值为 31.31~33.47(地壳 $Mg^\# < 40$; Rapp et al., 1999), Th/U 值为 2.43~4.97(下地壳的 Th/U 值为 6.0), Nb/Ta 值为 13.07~15.50(地壳比值 11~12; Rudnick et al., 2003); Zr/Hf 值为 33.28~35.28(地壳比值 33; Taylor and McLennan, 1985), 说明黑云母二长花岗岩成因为壳幔混源。

镁铁质幔源岩浆和硅质地壳熔体的混合被认为是中国东北 A 型和 I 型花岗岩的来源(Griffin et al., 2002)。小大川黑云母二长花岗岩的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-1.7~-0.3)明显比区域内地幔物质提供了重要的物质来源的白音查干铅锌矿 A 型花岗岩的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(+3.6~+3.8)偏低(姚磊等, 2017), 而与由新生地壳部分熔融和幔源组分混合形成的海拉沟深成岩体的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-0.36~0.35)相近, 体现出弱亏损地幔的特征(Mi et al., 2022)。 $\varepsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解(图 12-a)显示, 本次实验样品及邻区典型同类型矿床成矿岩体的数据点均落在靠近地幔演化线右侧, 且叠合在中国东北显生宙花岗岩区, 其二端元混合

模拟计算显示(图 12-b), 投点均落在玄武岩和下地壳的演化线上, 说明岩浆源区为 60%~70% 玄武岩和 30%~40% 的下地壳物质混合而成。另外, $(La/Yb)_N - Nb/La$ 图(图 11-b)显示, 岩浆源区受到了俯冲板块或下地壳的交代作用; 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩 Nd 的两阶段模式年龄(T_{2DM})集中分布于 1071~957 Ma 之间, 故推断小大川黑云母二长花岗岩源区为中元古代亏损幔源物质和古老地壳部分熔融形成的新生下地壳(60%~70% 新生玄武岩和 30%~40% 古老下地壳)。岩石成因为新生下地壳发生部分熔融且经历了分离结晶作用, 岩浆上升过程中遭受了部分上地壳的混染。

5.4 成矿地质背景

显生宙以来, 中国东北地区许多伸展盆地、火山作用和侵入作用, 以及一些铅锌铜矿床的形成受到了古亚洲洋构造域, 中—新生代蒙古-鄂霍茨克洋构造域及古太平洋构造域的共同影响, 大量的构造运动使大兴安岭南段中生代中晚期侵入岩形成于板块内部的伸展环境, 同时发生了大规模的岩浆作用和成矿作用(Zhang et al., 2019; Goldfarb et al., 2021)。据前人研究, 古亚洲洋在二叠纪—三叠纪初已经发生了闭合(任纪舜等, 1992; 刘建明等, 2004; Chen et al., 2007), 而本文小大川黑云母二长花岗岩的成岩时代为早白垩世, 因此该岩体不可能是古亚洲洋闭合后伸展作用的产物。对于古太平洋沿西向向东部亚欧板块俯冲的影响, 前人研究表明, 其主要影响着朝鲜半岛—松辽盆地东部地区, 并且在晚白垩世又

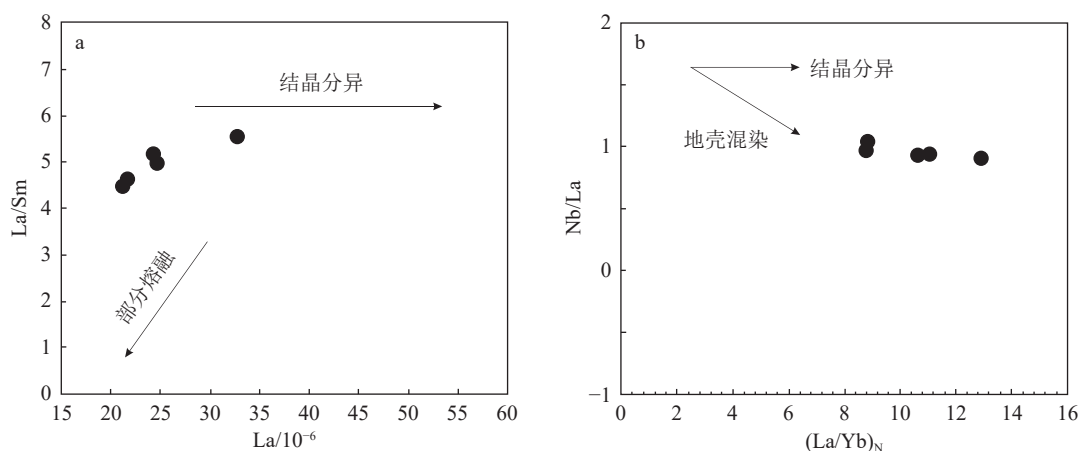


图 11 小大川铅锌铜矿床黑云母二长花岗岩 La-La/Sm 图解(a)和 $(La/Yb)_N - Nb/La$ 图解(b)(底图据 Allegre and Minster, 1978)

Fig. 11 La-La/Sm diagram (a) and $(La/Yb)_N - Nb/La$ diagram (b) for the biotite monzogranite of the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

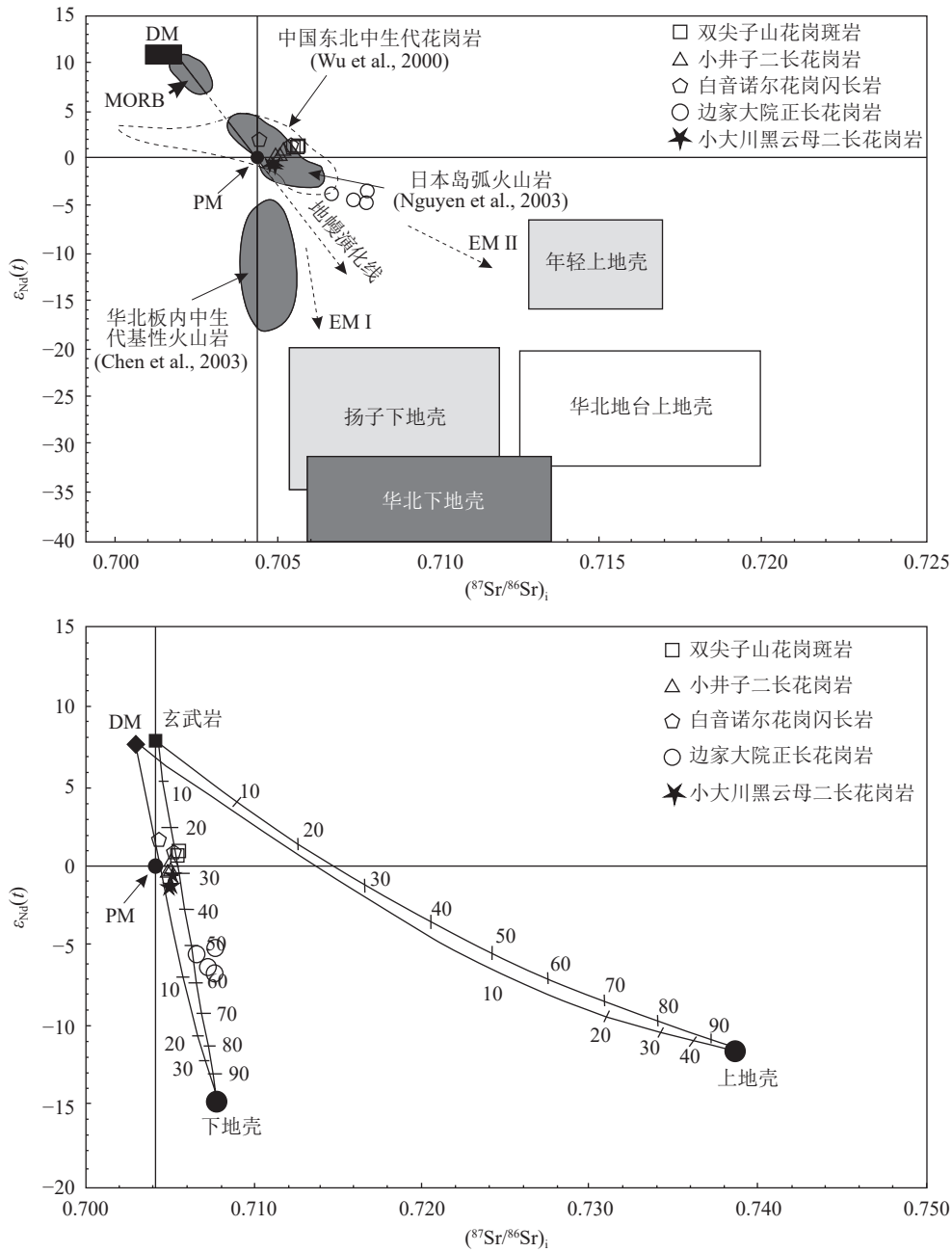


图 12 小大川铅锌铜矿床黑云母二长花岗岩和邻区典型矿床与成矿有关岩浆岩 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ 图解(a)和源区与熔体混染的混合计算图(b)(底图据 Jahn et al., 1999, 2004; Wu et al., 2000)

Fig. 12 Illustration of $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ of the biotite monzogranite of the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit and typical deposits in the neighboring area that are related to metallogenic magmatism (a) and mixing calculations for source and melt contaminations (b)

DM—亏损地幔; MORB—大洋中脊玄武岩; EM I—富集地幔 I; EM II—富集地幔 II; PM—原始地幔

发生了向东的迁移(Wang et al., 2015),而本次研究的小大川铅锌矿床位于松辽盆地以西,且其所在的黄岗梁-甘珠尔庙成矿带与古太平洋的俯冲方向呈较大的交角,说明古太平洋构造域对小大川铅锌铜矿

区黑云母二长花岗岩的影响较小,小大川铅锌铜矿床成岩成矿作用主要受到蒙古-鄂霍茨克洋构造域的影响。

研究表明,蒙古-鄂霍茨克洋沿东南方向向额尔

古纳-兴安地块的俯冲可能始于二叠纪早—中期(Mi et al., 2020), 于中晚侏罗世闭合(Zorin, 1999), 并在 267~225 Ma 和 215~165 Ma 形成了 2 个不连续的岩浆作用阶段(Mi et al., 2017; 2020)。受到蒙古-鄂霍茨克洋由北西向南东方向俯冲闭合的影响(Metelkin et al., 2010), 使大兴安岭南段所处板块受到的构造力为张性力, 其构造运动使板块内部压力减小, 因此推断该区域早白垩世的伸展环境与蒙古-鄂霍茨克洋造山期后的闭合作用有关(顾玉超等, 2017)。小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩形成于早白垩世(135 Ma), 在时间上与蒙古-鄂霍茨克洋闭合的造山期后相对应, 在 SiO_2 - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 构造环境判别图解(图 13-a)中均投点于造山后区域, 在 $(\text{Y}+\text{Nb})$ - Rb 图解(图 13-b)中均投点于后碰撞花岗岩区域且投点位于构造三分区交点附近, 说明其构造环境为造山后拉张环境, 与邻区边家大院锡-银-铅-锌-铜矿床花岗斑岩(蒋昊原等, 2020)和双尖子山铅-锌-银矿床正长斑岩(赵家齐等, 2022)的形成环境相同, 结合其花岗岩类型为 A_2 型和前人对大兴安岭南段侵入岩形成环境的综合认识, 判定小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩的形成环境为早白垩世受到蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后的伸展环境。

对于大兴安岭南段铅锌矿的形成, 来自热液型铅锌矿床的硫同位素特征显示矿石硫主要来自于岩浆热液(图 14-b), 铅同位素显示成矿物质来源皆为

壳幔混源(图 14-a), 这与大兴安岭南段中生代侵入岩具有相同的物质来源。幔源和新生壳源的岩浆混合影响了成矿物质由深到浅的迁移和富集, 花岗质岩浆的侵入伴随着富含铅、锌、铜热液流体的迁移, 这些流体沿着构造裂隙上升侵入到周围地层中, 受到围岩和大气降水的影响, 促进了铅锌矿的形成。

6 结 论

(1) 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 135.9 ± 0.8 Ma 和 134.9 ± 0.8 Ma, 矿体呈脉状赋存在花岗岩体中, 且未受到构造活动的影响, 成岩成矿年龄均为早白垩世。

(2) 小大川黑云母二长花岗岩源区为幔源物质和古老地壳部分熔融形成的新生下地壳(60%~70% 新生玄武石和 30%~40% 古老下地壳)。岩石成因为新生下地壳发生部分熔融且经历了分离结晶作用, 岩浆上升过程中遭受了部分上地壳的混染。花岗岩形成于蒙古-鄂霍茨克洋“剪刀式”闭合造山后的伸展环境。

(3) 蒙古-鄂霍茨克洋闭合造山后伸展环境导致了晚侏罗世—早白垩世大规模的岩浆作用和铅锌矿的形成。

致谢: 野外工作得到中国地质调查局发展研究中心杜泽忠博士、林成贵博士, 成都理工大学樊文

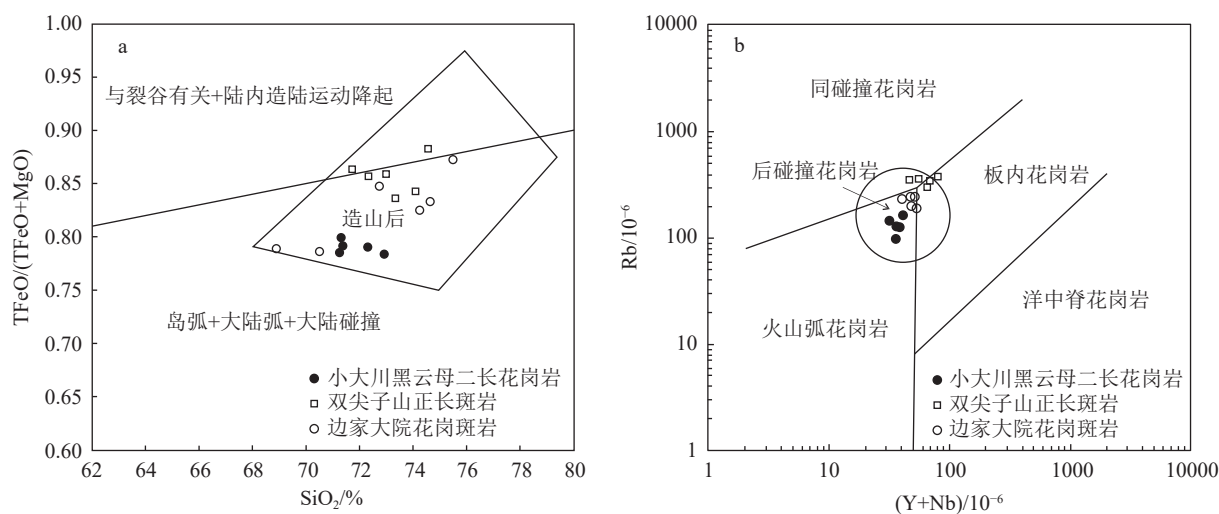


图 13 小大川铅锌铜矿黑云母二长花岗岩 SiO_2 - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (a)和 $(\text{Y}+\text{Nb})$ - Rb (b)构造环境判别图解

(底图据 Pearce et al., 1984; Maniar and Piccoli et al., 1989)

Fig. 13 SiO_2 - $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ (a) and $(\text{Y}+\text{Nb})$ - Rb (b) tectonic setting discrimination diagrams of the biotite monzogranite in the Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit

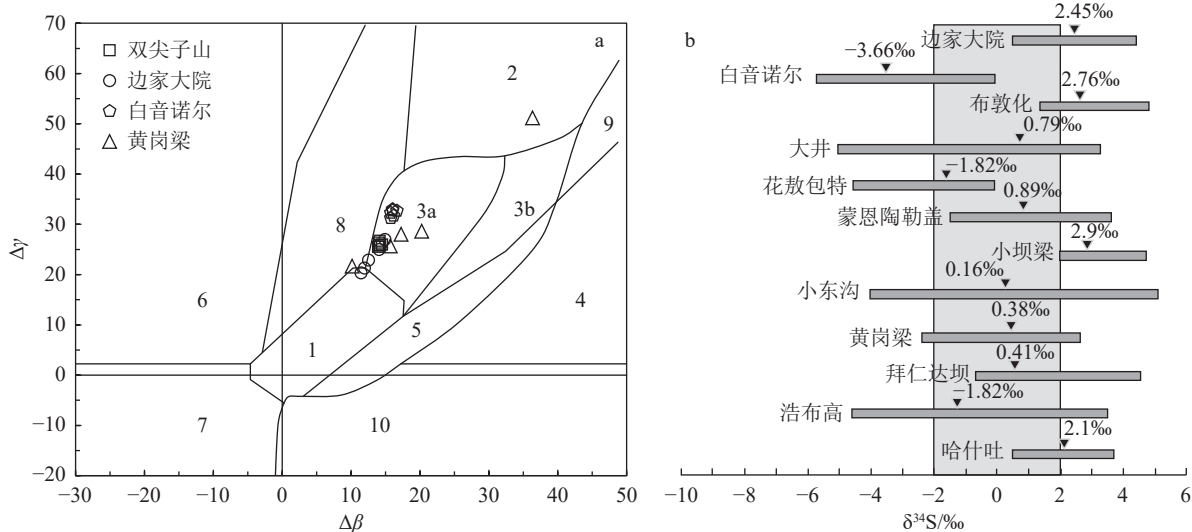


图 14 小大川铅锌铜矿邻区典型矿床矿石的铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 分类图解(a)和硫同位素组成图解(b)

(a 图据朱炳泉, 1998; b 图据 Zhai et al., 2014)

Fig. 14 Lead isotope $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ classification diagram(a) and sulfur isotope composition diagram(b) of typical ore deposits in Xiaodachuan Pb-Zn-Cu deposit adjacent area

1—地幔源铅; 2—上地壳源铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲铅 (3a—岩浆作用, 3b—沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

鑫博士的指导和帮助, 成文过程中得到中国地质调查局发展研究中心李永胜高级工程师及中国地质科学院宓奎峰博士的指导, 在此一并感谢, 并感谢审稿专家的意见和建议。

References

- Allegre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1-25.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 97(1/2): 1-29.
- Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, et al. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 139-169.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189-200.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids; petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology (Boulder)*, 20(7): 641-644.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J. 2001. A Geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033-2048.
- Goldfarb R J, Mao J W, Qiu K F, et al. 2021. The great Yanshanian metallogenic event of eastern Asia: Consequences from one hundred million years of plate margin geodynamics[J]. *Gondwana Research*, 100: 223-250.
- Goldstein S J, Jacobsen S B. 1988. Rare earth elements in river waters[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 89(1): 35-47.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3/4): 237-269.
- Gu Y C, Chen R Y, Jia B, et al. 2017. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the syenogranite from the Bianjiadayuan Pb-Zn-Ag deposit of Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. *Geology in China*, 44(1): 101-117 (in Chinese with English abstract).
- Jacobsen S B, Wasserburg G J. 1984. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, II[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 67(2): 137-150.
- Jahn B M, Capdevila R, Liu D Y, et al. 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 629-653.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. *Chemical Geology*, 157(1-2): 119-146.
- Jiang H Y, Zhao Z D, Zhu X Y, et al. 2020. Characteristics and metallogenic significance of granite porphyry and pyroxene diorite in the Bianjiadayuan Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 47(2): 450-471 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Chen C L, Bagas L, et al. 2017. Two mineralization events in

- the Baiyinnuoer Zn-Pb deposit in Inner Mongolia, China: Evidence from field observations, S-Pb isotopic compositions and U-Pb zircon ages[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 339–367.
- King P L, White A J R, Chappell B W, et al. 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391.
- Koschek, G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon[J]. *Microsc*, 171(3): 223–232.
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3/4): 207–224.
- Liu J M, Zhang R, Zhang Q Z. 2004. The regional metallogeny of da hinggan ling, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 11(1): 269–277 (in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Zhou T F, Zhang D Y, et al. 2018. S isotopic geochemistry, zircon and cassiterite U-Pb geochronology of the Haobugao Sn polymetallic deposit, southern Great Xing'an Range, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 93: 168–180.
- Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, et al. 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 43: 123–148.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4.
- Lv Z C, Duan G Z, Liu C Q, et al. 2000. Types of Silver Deposits, Metallogenic Series, and Metallogenic Geochemical Characteristics in the Greater Khingan Mountains Region[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 305–309 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Mao J W, Zhou Z H, Wu G, et al. 2013. Metallogenic regularity and minerogenetic series of ore deposits in Inner Mongolia and adjacent areas[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 715–729 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F, Sun S S, Ringwood A E, et al. 1992. Potassium, rubidium, and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001–1012.
- Metelkin D V, Vernikovskiy V A, Kazansky A Y. 2010. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence[J]. *Gondwana Research*, 18(2/3): 400–419.
- Mi K F, Lu Z C, Li C F, et al. 2017. Origin of the Badaguan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, northeast China: Constraints from geology, isotope geochemistry and geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 81(1): 154–172.
- Mi K F, Lu Z C, Liu Q, et al. 2021. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of granites in the Yaoertu deposit: Implications for Pb-Zn-Ag mineralization in the southern Great Xing'an Range, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 220: 106666.
- Mi K F, Lu Z C, Yan T J, et al. 2020. Zircon geochronological and geochemical study of the Baogaigou Tin deposits, southern Great Xing'an Range, Northeast China: Implications for the timing of mineralization and ore genesis[J]. *Geological Journal*, 55(7): 5062–5081.
- Mi K F, Lü Z C, Zhao S J, et al. 2021. Petrogenesis and metallogenic implications of the Late Jurassic Dagayin pluton, southern Great Xing'an Range, northeast China: Integrated geochronological, petrological, and geochemical constraints[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, (220): 106666.
- Mi, K F, Lü Z C, Yan, T J, et al. 2022. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopic constraints on the relationship between Mo and Pb-Zn mineralization in the Haisugou pluton in the southern Great Xing'an Range, northeast China[J]. *Ore Geology Reviews*, 144: 104838.
- Middlemost E A, Magmas K, Rocks M. 1985. An introduction to igneous petrology[J]. *Magma and magmatic Rocks*, Longmans.
- Middlemost E A. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3/4): 215–224.
- Ouyang H G, Mao J W, Zhou Z H. 2015. Late Mesozoic metallogeny and intracontinental magmatism, southern Great Xing'an Range, northeastern China[J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1153–1172.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Pei Q M, Zhang S T, Santosh M, et al. 2017. Geochronology, geochemistry, fluid inclusion and C, O and Hf isotope compositions of the Shuitou fluorite deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 83: 174–190.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356.
- Ren W K, Wang S Y, Chen L B, et al. 2020. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology, geochemistry and geological significance of granodiorites in Lancai Area, Tongren, Qinghai[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 50(4): 1059–1074 (in Chinese with English abstract).
- Ruan B X, Lv X B, Yang W, et al. 2015. Geology geochemistry and fluid inclusions of the Bianjiadayuan Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia, NE China: Implications for tectonic setting and metallogeny (Article)[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 121–137.
- Rudnick R L, Gao S, Holland H D, et al. 2003. Composition of the continental crust[J]. *The Crust*, 3: 1–64.
- Shellnutt J S, Jahn B M. 2010. Formation of the Late Permian Panzhihua plutonic-hypabyssal-volcanic igneous complex: Implications for the

- genesis of Fe-Ti oxide deposits and A-type granites of SW China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(3/4): 509–519.
- Sheng J F, Fu X Z, et al. 1999. Metallogenic Environment and geological characteristics of copper-polymetallic deposits in the central section of the Greater Khingan Mountains[M]. Beijing: Seismological Press: 1–216 (in Chinese with English abstract).
- Song K R. 2019. The Metallogenic Relationship between fluorite deposits and silver-polymetallic deposits and its prospecting significance in the Linxi Area of Inner Mongolia[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Taylor S. R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Blackwell Scientific Pub.: 1–312.
- Wang F X, Bagas L, Jiang S H, et al. 2017. Geological, geochemical, and geochronological characteristics of Weilasituo Sn-polymetal deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 1206–1229.
- Wang H, Li F, Zhang G H. 2019. Genesis and prospecting indicators of the Xiaodachuan lead-zinc-copper polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. *Inner Mongolia Science Technology and Economy*, (6): 66 (in Chinese with English abstract).
- Wang J B, Wang Y W, Wang L J, et al. 2001. Tin-polymetallic mineralization in the southern part of the Da Hinggan Mountains, China[J]. *Resource Geology*, 51(4): 283–291.
- Wang X D, Xu D M, Lv X B, et al. 2018. Origin of the Haobugao skarn Fe-Zn polymetallic deposit, Southern Great Xing'an Range, NE China: geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Pb isotopic constraints[J]. *Ore Geology Reviews*, 94: 58–72.
- Wang X D. 2017. Diagenesis and Metallogenesis of the Silver-Lead-Zinc Polymetallic Deposit in the Lindong Area, Inner Mongolia[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Guo L, Zhang L, et al. 2015. Timing and evolution of Jurassic-Cretaceous granitoid magmatisms in the Mongol-Okhotsk Belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic Settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97(1): 365–392.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wickham S M, Alberts A D, Zanzvilovich A N, et al. 1996. A stable isotope study of anorogenic magmatism in East Central Asia[J]. *Journal of Petrology*, 37(5): 1063–1095.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic[J]. *Lithos*, 64(3/4): 191–204.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S W, et al. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophysics*, (1/2): 89–113.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187(1/2): 143–173.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. 2007. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89(1/2): 89–106.
- Yao L, Lv Z C, Ye T Z, et al. 2017. Zircon U-Pb age, geochemical and Nd-Hf isotopic characteristics of quartz porphyry in the Baiyinchagan Sn polymetallic deposit, Inner Mongolia, southern Great Xing'an Range, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3183–3199 (in Chinese with English abstract).
- Zhai D G, Liu J J, Wang J P, et al. 2014. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology, and whole-rock geochemistry of the Hashitu molybdenum deposit and host granitoids, Inner Mongolia, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(1): 144–160.
- Zhai D G, Liu J J, Zhang A L, et al. 2017. U-Pb, Re-Os, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of porphyry Sn-Cu-Mo and polymetallic (Ag-Pb-Zn-Cu) vein mineralization at Bianjiadayuan, Inner Mongolia, NE China: Implications for discrete mineralization events[J]. *Economic Geology*, (8): 2041–2059.
- Zhai D G, Williams-Jones A E, Liu J J, et al. 2020. The genesis of the giant Shuangjianzishan epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, northeastern China[J]. *Economic Geology*, 115(1): 101–128.
- Zhang L L, Jiang S H, Bagas L, et al. 2019. Element behaviour during interaction of magma and fluid: A case study of Chamuhan Granite, implications on the genesis of W-Mo mineralisation[J]. *Lithos*, 342: 31–44.
- Zhang W, Lentz D R, Thorne K G, et al. 2020. Late Silurian-Early Devonian slab break-off beneath the Canadian Appalachians: Insights from the Nashwaak Granite, west-central New Brunswick, Canada[J]. *Lithos*, 358: 105393.
- Zhao G L, Yang G L, Fu J Y. 1989. Mesozoic volcanic rocks in the central and southern parts of the Greater Khingan Mountains[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press: 1–252 (in Chinese).
- Zhao J Q, Zhou Z H, Ouyang H G, et al. 2022. Zircon U-Pb age and geochemistry of quartz syenite porphyry in Shuangjianzishan Ag-Pb-Zn(Sn) deposit, Inner Mongolia, and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 41(2): 324–344 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Wang D W, Zhang D Q, et al. 1994. Geological conditions for copper-polymetallic metallogenesis and prospecting models in the southeastern part of Inner Mongolia[M]. Beijing: Seismological Press: 1–234 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Mao J W, Lyckberg P. 2012. Geochronology and isotopic geochemistry of the A-type granites from the Huanggang Sn-Fe deposit, southern Great Hinggan Range, NE China: Implication for their origin and tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 48: 272–286.
- Zhu B Q. 1998. Study on chemical heterogeneities of mantle crustal systems and geochemical boundaries of blocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 5(1): 72–82 (in Chinese with English abstract).
- Zorin Y A. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-

Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 306(1): 33–56.

附中文参考文献

- 赤峰盛源地质勘查有限公司. 2018. 内蒙古自治区巴林右旗小大川矿区铅锌铜矿详查报告[R].
- 顾玉超, 陈仁义, 贾斌, 等. 2017. 内蒙古边家大院铅锌银矿床深部正长花岗岩年代学与形成环境研究[J]. *中国地质*, 44(1): 101–117.
- 蒋昊原, 赵志丹, 祝新友, 等. 2020. 内蒙古边家大院铅锌银矿床花岗岩斑岩及辉石闪长岩特征及对成矿的指示[J]. *中国地质*, 47(2): 450–471.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. *地学前缘*, 11(1): 269–277.
- 吕志成, 段国正, 刘丛强, 等. 2000. 大兴安岭地区银矿床类型、成矿系列及成矿地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 305–309.
- 毛景文, 周振华, 武广, 等. 2013. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列[J]. *矿床地质*, 32(4): 715–729.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 1992. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社: 90–103.
- 任文恺, 王生云, 陈礼标, 等. 2020. 青海同仁兰采地区花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 50(4): 1059–1074.
- 盛继福, 傅先政, 等. 1999. 大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M]. 北京: 地震出版社: 1–216.
- 宋开瑞. 2019. 内蒙古林西地区萤石矿与银多金属矿成矿关系及找矿意义[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文.
- 王河, 李峰, 张国辉. 2019. 内蒙古小大川铅锌铜多金属矿床成因与找矿标志[J]. *内蒙古科技与经济*, (6): 66.
- 王祥东. 2017. 内蒙古林东地区银铅锌多金属矿床成岩成矿作用[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文.
- 姚磊, 吕志成, 叶天竺, 等. 2017. 大兴安岭南段内蒙古白音查干 Sn 多金属矿床石英斑岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Nd-Hf 同位素特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 33(10): 3183–3199.
- 赵国龙, 杨桂林, 傅嘉有. 1989. 大兴安岭中南部中生代火山岩[M]. 北京: 北京科学技术出版社: 1–252.
- 赵家齐, 周振华, 欧阳荷根, 等. 2022. 内蒙古双尖子山银铅锌(锡)矿床石英正长斑岩 U-Pb 年龄地球化学及其地质意义[J]. *矿床地质*, 41(2): 324–344.
- 赵一鸣, 王大畏, 张德全, 等. 1994. 内蒙古东南部铜多金属成矿地质条件及找矿模式[M]. 北京: 地震出版社: 1–234.
- 朱炳泉. 1998. 壳幔化学不均一性与块体地球化学边界研究[J]. *地学前缘*, 5(1): 72–82.