

https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.099



大兴安岭南段道伦达坝黑云母花岗岩成岩时代、锆石微量元素、Lu-Hf 同位素特征及地质意义

李岩^{1,3}, 许立权^{1*}, 李廷栋², 肖庆辉², 郭灵俊¹,
程杨³, 范玉须⁴, 庞进力¹, 袁伟明¹, 罗鹏跃¹

1. 内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010020
2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
3. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300
4. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039

摘要: 道伦达坝铜多金属矿床位于大兴安岭成矿带南段, 对道伦达坝矿床黑云母花岗岩开展了锆石 U-Pb 测年、锆石微量元素和 Lu-Hf 同位素研究。锆石 U-Pb LA-ICP-MS 测年结果显示黑云母花岗岩形成时代为 $282.2 \pm 4.5 \sim 287.0 \pm 3.7$ Ma。锆石 Lu-Hf 同位素研究结果显示黑云母花岗岩锆石均具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (平均值分别为 0.282 770 和 0.282 769) 和低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (平均值分别为 0.002 224 和 0.001 984) 同位素组成, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 3.05~8.58 之间和 2.31~7.36, 二阶段模式年龄分别为 730.22~1 083.46 Ma 和 812.42~1 134.56 Ma, 暗示其来源为年轻的新生地壳, 可能遭受了古老地壳的混染。锆石微量元素研究显示, 黑云母花岗岩的锆石具有低的 Nb 含量 ($< 2 \times 10^{-6}$) 和强烈的 Eu 异常, 符合 S 型花岗岩特征。锆石的 Ti 饱和温度平均值为 770 °C 和 785 °C, 指示其源区经历了水近饱和情况下的部分熔融, 暗示其可能形成于俯冲环境下。

关键词: 道伦达坝 Cu 多金属矿; 早二叠世; 锆石 U-Pb 定年; 锆石微量元素; Lu-Hf 同位素; 兴蒙造山带; 地球化学。

中图分类号: P581; P611

文章编号: 1000-2383(2020)07-2585-13

收稿日期: 2020-04-29

Geochronology, Zircon Trace Element and Lu-Hf Isotope Characteristics of the Biotite Granite and Their Geological Significance from Daolundaba Cu Polymetallic Deposit, Southern Great Hinggan Ling, China

Li Yan^{1,3}, Xu Liquan^{1*}, Li Tingdong², Xiao Qinghui², Guo Lingjun¹,
Cheng Yang³, Fan Yuxu⁴, Pang Jinli¹, Yuan Weiming¹, Luo Pengyue¹

1. Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-Prospecting, Hohhot 010020, China
2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
3. Institute of Mineral Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China
4. General Prospecting Institute China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China

Abstract: Daolundaba Cu polymetallic deposit is located in southern segment of Great Hinggan Ling metallogenic belt. In this study,

基金项目: 内蒙古自治区地质矿产勘查基金项目 (No. 2017-YS01).

作者简介: 李岩 (1988—), 男, 工程师, 从事岩石学和矿床学研究. ORCID: 0000-0001-7392-0535. E-mail: liyan@cmgb.cn

* 通讯作者: 许立权, E-mail: xuliqun2005@163.com

引用格式: 李岩, 许立权, 李廷栋, 等, 2020. 大兴安岭南段道伦达坝黑云母花岗岩成岩时代、锆石微量元素、Lu-Hf 同位素特征及地质意义. 地球科学, 45(7): 2585-2597.

we carried out chronological studies of LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, zircon trace element and Lu-Hf isotope for the biotite granites in Daolundaba deposit. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results suggested that the formation age of the biotite granites range from $282.2 \pm 4.5 - 287.0 \pm 3.7$ Ma. Lu-Hf isotope analysis of the biotite granite showed that the biotite granites had high isotopic compositions of $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (mean values of 0.282 770 and 0.282 769) and low isotopic compositions of $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (mean values of 0.002 224 and 0.001 984), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from 3.05–8.58 and 2.31–7.36, with older two-stage ages (730.22–1 083.46 Ma and 812.42–1 134.56 Ma). Zircon trace element results suggest eda S-type granites characteristic with al ow Nb ($<2 \times 10^{-6}$) values and large negative Euanomalies. The forming mean temperatures of the biotite granite calculated by zircon Tithermometer are 770 °C and 785 °C, indicated that its magmas is like lytorelate to a subducted environment, and the source region probably experienced partial melting with water nearly saturation. The Daolundaba copper polymetallic deposit was formed in the Late Permian subduction environment.

Key words: Daolundaba Cu polymetallic deposit; Late Paleozoic; zircon U-Pb dating; zircon trace element; Lu-Hf isotope; Xingmeng orogenic belt; geochemistry.

0 引言

大兴安岭中南段位于古亚洲洋古生代俯冲消减增生带内,是我国北方重要的银、铅、锌、铜、锡、钼多金属矿集区(张天福等, 2019). 区内已发现的代表性矿床有大井锡铜多金属矿、维拉斯托银铅锌锡多金属矿,拜仁达坝银铅锌多金属矿、黄岗梁铁锡矿,道伦达坝铜多金属矿、浩布高锌铁矿,毛登锡多金属矿等(翟德高等, 2012; 刘瑞麟等, 2018). 一些研究者认为这些矿床大多形成于晚侏罗世—早白垩世(周振华等, 2010; 段明等, 2016; 刘瑞麟等, 2018), 成矿作用是蒙古—鄂霍茨克洋碰撞造山作用与古太平洋板块俯冲作用远程效应联合作用的结果(刘瑞麟等, 2018), 另一种观点则认为古生代亦是兴蒙造山带的一个重要的成矿阶段, 形成了一套岛弧或活动大陆边缘环境下的斑岩—矽卡岩—热液脉型铜钼金多金属矿床(江思宏等, 2011; 周振华等, 2014).

道伦达坝铜钨锡多金属矿床南距内蒙古西乌珠穆沁旗道伦达坝苏木约 3 km, 矿床的钨锡金属总储量达到大型, 铜为中型规模, 铜、钨品位较富, Cu 平均品位 1%~5% 左右, WO_3 平均为 0.1%~1.0% 左右, 局部达到 5%, 是研究区内典型的铜钨锡银多金属矿床(王万军等, 2005), 对于该矿床的形成时代及成岩、成矿背景仍然存在争议, 严重制约了区域成矿规律的研究. 道伦达坝矿床的矿床地质特征、成矿流体和成矿物质来源等方面的证据显示, 该矿床为中—高温热液脉状矿床, 成矿作用与区内早二叠世黑云母花岗岩关系密切(潘小菲等, 2009; 徐佳佳等, 2009; 周振华等, 2014). 王万军等(2005)和段明等(2016)认为其为华北板块与西伯利亚板块碰撞造山后岩石圈伸展背景下的产物, 周

振华等(2014)开展了矿床地质、岩石学、锆石年代学、地球化学和锆石 Hf、全岩 Pb 同位素研究, 认为其形成于早二叠世西伯利亚板块南缘俯冲增生背景之下. 陈公正等(2018)测得矿区 16 号矿体锡石 U-Pb 年龄为 135 Ma, 认为矿区黑云母花岗岩仅为赋矿岩体, 成矿作用与矿区外围燕山期张家营子岩体关系密切.

众所周知, 岩浆热液矿床成矿岩体往往因后期热液作用而发生蚀变, 易对全岩地球化学成分造成影响. 近年来研究表明, 锆石在遭受变质作用后仍可保留原来的年龄和地球化学成分信息(赵振华, 2010). 本文对矿区黑云母花岗岩与成矿的关系进行了重新讨论, 并对矿区黑云母花岗岩锆石开展了微量元素及 Lu-Hf 同位素研究, 为研究成岩、成矿地质背景, 总结大兴安岭地区成矿规律提供新的证据.

1 地质概况

道伦达坝铜多金属矿大地构造位置位于锡林浩特中间地块北部边缘地带, 华北板块北缘与西伯利亚板块南缘的接触过渡带晚古生代岛弧增生杂岩带内(图 1a). 从元古宙到中生代经历了多期次的构造—岩浆活动(邵济安等, 1998). 矿区出露的地层主要有下元古界宝音图群(Pt_1by)黑云母斜长片麻岩、变粒岩和下二叠统寿山沟组粉砂质板岩、粉砂质泥岩及粉砂岩(原林西组), 以及少量下白垩统白音高老组酸性火山碎屑岩(陈公正等, 2018)(图 1b). 矿区侵入岩主要为黑云母花岗岩, 受区域构造控制, 多呈 50° 左右延伸, 侵入到砂板岩中, 呈岩基状产出, 在接触带处有云英岩化、角岩化等围岩蚀变. 此外, 还发育多种脉岩, 主要包括花岗细晶岩岩脉、细粒花岗岩岩脉及石英脉等. 矿区位于米生庙—阿

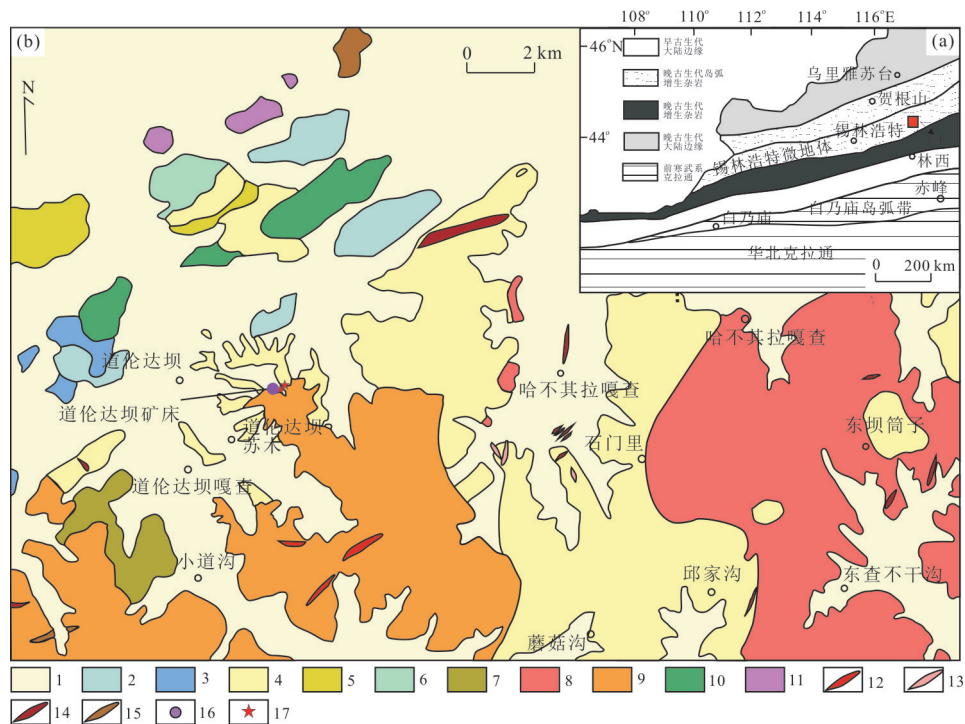


图1 (a)大地构造位置图;(b)矿区地质简图

Fig.1 (a)Sketch map showing tectonic position;(b)schematic geological map

1. 第四系;2. 下白垩统白音高老组;3. 上侏罗统玛尼吐组;4. 下二叠统寿山沟组;5. 上石炭统阿木山组;6. 上石炭统本巴图组;7. 古元古界音图群;8. 燕山期花岗岩类;9. 华力西期花岗岩;10. 华力西期辉长岩;11. 华力西期石英闪长岩;12. 石英斑岩脉;13. 石英脉;14. 花岗细晶岩脉;15. 闪长玢岩脉;16. 道伦达坝矿床;17. 采样点;a. 据 Xiao *et al.*(2003),周振华等(2014);b. 据陈公正等(2018)修改

拉腾郭勒复背斜北东段南东翼的第三挤压破碎带内,褶皱及断裂发育,其中汗白音乌拉背斜及北东向断裂是矿区内主要的控矿和容矿构造,直接控制矿区矿体的形态和分布(图2).

道伦达坝铜多金属矿床矿体总体沿北东向展布,少数呈北北东向、北北西向和近东西向延展,产状中等倾斜或陡倾斜,多赋存于黑云母花岗岩体与地层的接触带或岩体内部,受断裂构造控制作用明显,矿体膨胀收缩、分枝复合及尖灭再现等现象常见.可划分为铜矿体、钨矿体、锡矿体等异体共生矿,铜钨矿体、铜锡矿体、钨锡矿体等同体共生矿(潘小菲等,2009).各矿体的矿石物质成分复杂,但组成基本相同,其中金属矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、毒砂、闪锌矿、黑钨矿、自然铜、自然银、赤铁矿银金矿、胶状黄铁矿、次生褐铁矿、孔雀石、蓝铜矿等;脉石矿物主要有石英、萤石、钾长石、绢云母、方解石、绿泥石化等.矿石结构主要为交代熔蚀和半自行粒状、包含结构.构造主要为脉状、网脉状、交错脉状、团斑状、条带状、浸染状、团块状、薄膜状及胶状构造.寿山沟组的砂板岩是矿体的直接围岩,近矿围岩蚀变现象可见硅化、黄铁绢云岩化、

碳酸盐化、绿泥石化、高岭土化、钾长石化、云英岩化、萤石化、电气石化,其中硅化、云英岩化、萤石化与矿体关系最为密切(潘小菲等,2009;周振华等,2014).根据野观察、手标本及镜下鉴定,成矿过程可分为气成—高温热液阶段、高温热液阶段、中温热液阶段和低温热液阶段.气成—高温热液阶段广泛发育硅化、钾化、电气石化等,矿石矿物主要由白钨矿、黑钨矿、锡石和毒砂等.高温热液阶段发育黄铁绢英岩化、绿泥石化和萤石化,矿石矿物主要包括白钨矿、黑钨矿、锡石、毒砂、磁黄铁矿和黄铜矿.中温热液阶段是铜矿化的主要阶段,主要蚀变类型包括硅化、萤石化、绿泥石化、绢云母化和碳酸盐化,矿石矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、菱铁矿和胶状黄铁矿等.低温热液阶段为成矿后热液活动,表现为方解石脉、萤石脉切穿早期矿脉或矿石(徐佳佳等,2009;周振华等,2010,2014).

2 样品特征与测试分析方法

2.1 样品特征

样品 DLDB18-001 采自道伦达坝矿区矿石堆,

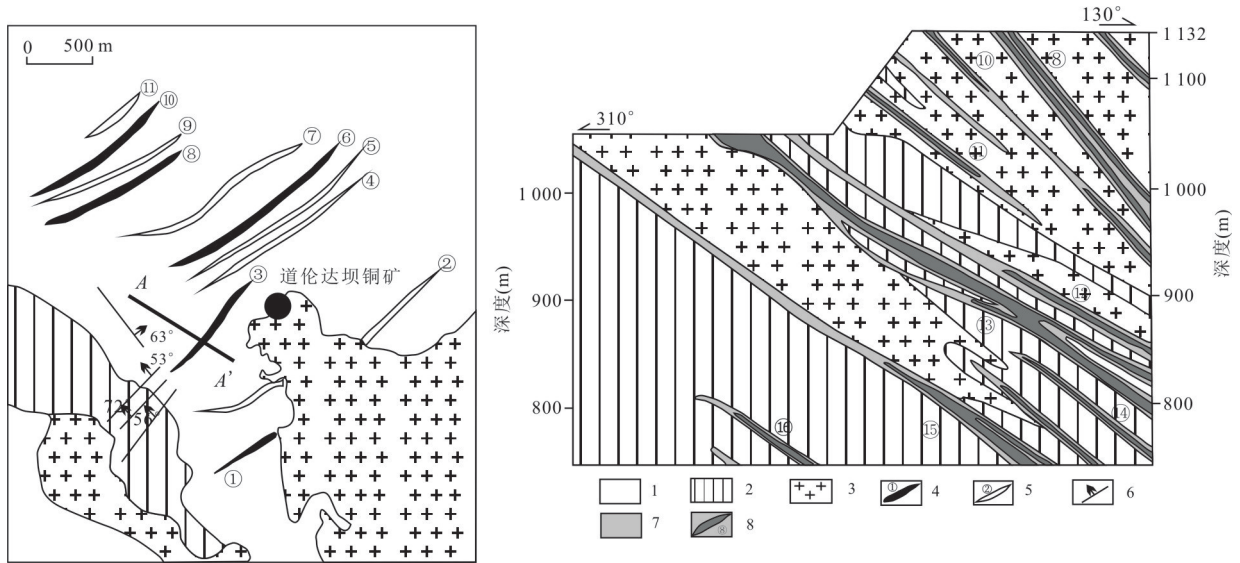


图2 道伦达坝矿区构造示意图和A-A'矿体剖面图

Fig.2 Sketch of structure in Daolundaba deposit and orebody's section along A-A' line

1. 第四系; 2. 二叠系寿山沟组; 3. 黑云母花岗岩; 4. 背斜及编号; 5. 向斜及编号; 6. 断裂及产状; 7. 蚀变带; 8. 矿体及编号; 据潘小菲等(2009)修改

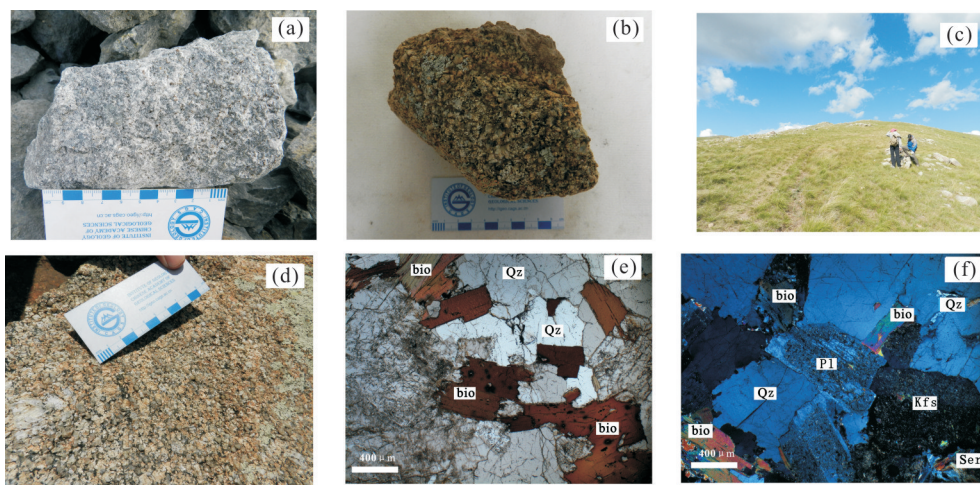


图3 道伦达坝花岗岩手标本(a, b)、野外露头(c, d)及镜下显微(e. 单偏光; f. 正交偏光)照片

Fig.3 Photograph of specimens(a, b), field outcrop(c, d) and microphotograph (e. polarized; f. orthogonal polarization) from Daolundaba biotite granite

Qz. 石英; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Bio. 黑云母; Ser. 绢云母

为井下与成矿关系密切花岗岩, 表面呈灰白色, 有微弱蚀变. 样品 DLDB18-010 粗粒黑云母花岗岩采自矿区外围(采样坐标: E 117°58'40", N 44°15'50"), 样品因风化表面呈浅黄色. 两件样品总体呈中粗粒粒状结构, 块状构造(图 3a, 3b), 主要组成矿物包括石英、钾长石、斜长石和黑云母(图 3c, 3d), 其中钾长石和斜长石存在泥化及绢云母化(图 2d), 此外还可见少量锆石和石榴子石等副矿物. 石英为不规则他粒状, 粒径为 3~5 mm, 含量约为 30%. 钾长石为半自形板状, 主要为微斜长石, 常具格子状双晶, 粒

度约为 3~5 mm, 含量约为 28%, 斜长石为半自形板状, 粒度为 3~5 mm, 含量约为 32%. 黑云母多呈自形一半自行鳞片状、粒度约为 0.5~2.0 mm, 含量约为 10%.

2.2 样品的测试分析方法

锆石单矿物挑选在首钢地质勘查院地质研究所完成. 将样品人工破碎后, 按照常规重力和磁选的方法初步分离出锆石, 在双目镜下进一步挑选提存. 锆石制靶及阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司完成.

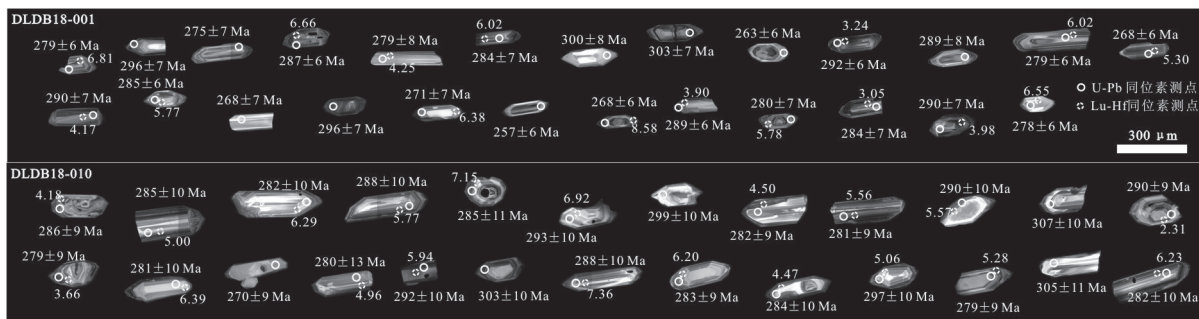


图4 道伦达坝黑云母花岗岩锆石 CL 图像

Fig.4 CL images of zircons from Daolundaba biotite granite

锆石 U-Pb 同位素及微量元素分析在中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)上完成, 锆石测年分析所用的仪器为四极杆等离子体质谱仪, 仪器型号为 PerkinElmer Elan DRC II. 样品的熔蚀进样系统为 193 波长的 ArF 准分子激光剥蚀系统. 剥蚀载气为惰性气体 He, 采用单点剥蚀, 束斑直径为 32 μm , 激发频率为 10 Hz, 激光束能量为 10 J/cm^2 , 剥蚀时间为 90 s, 背景时间为 19 s. 使用 LaDating@Zrn 软件进行数据处理, 使用 ComPbCorr 进行普通 Pb 校正, 使用 Isoplot3.23 软件绘制协和图. 以标准锆石 91500 作为标样, 分析结果为 1 061.9~1 065.0 Ma, 与推荐年龄(1 064 Ma)在误差范围内一致. 锆石微量元素使用同一套仪器测试完成. 以高纯度 He 气作为载气, 流速为 0.3 L/min, 频率为 10 Hz, 激光束能量为 11 J/cm^2 , 剥蚀直径为 32 μm , BF 功率为 1 350 W, 雾化器流速为 0.7 L/min. 使用 NIST610 作为外标, 以 Si 作为内标校正激光能量的漂移. 分析结果采用 LaTEcale 软件进行处理, 详细测试分析方法参见文献(Gao *et al.*, 2002).

锆石 Lu-Hf 同位素分析在北京铅年领航科技有限公司完成, 检测仪器为激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪, 激光进样系统为澳大利亚 ASI (美国应用光谱)公司的 Resolution SE 193nm 准分子激光剥蚀系统, 分析系统为美国 Thermofisher 公司的 NEPTUNE plus(多接收等离子体质谱仪). 在已进行过 U-Pb 同位素分析的锆石上选择不同的位置, 利用 Resolution SE 193 nm 系统对锆石进行剥蚀, 斑束直径为 38 μm , 能量密度为 7~8 J/cm^2 , 频率为 10 Hz, 激光剥蚀物质以高纯 He 为载气送入 Neptune Plus(MC-ICPMS), 接收器配置与溶液进样方式相同. 获得标准锆石 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 993 \pm 37 (2SD, $n=14$), 与推荐值(0.282 015 \pm 19)在误差范围内一致(Elhrou *et al.*, 2006).

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 同位素

黑云母花岗岩锆石呈典型的长柱状晶型, 结晶较好. 锆石阴极发光照片可见清晰的岩浆锆石振荡环带(图 4), 选择其中不具有明显的核-幔结构, 亦无后期变质壳的锆石用于测试, 其锆石 U-Pb 年龄可代表岩浆冷却结晶年龄. 对两个样品分别选取 25 颗锆石进行 U-Pb 同位素测试, 测试结果见附表 1. 其中样品 DLDB18-001 获得的 25 个数据中 24 个协和度较好(图 5a), 样品 DLDB18-010 获得的 25 个数据协和度均较好(图 5b), 锆石 U 和 Th 含量变化不大(Th 为 31.8~166.9, U 为 121.8~788.0), Th/U 比为 0.07~0.79, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 282.2 \pm 4.5 Ma 和 287.0 \pm 3.7 Ma, 表明其为晚古生代早二叠世岩浆活动的产物.

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

Lu-Hf 同位素分析结果见附表 2, Hf 同位素总体成分均一, 样品 DLDB18-001 锆石 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值介于 0.282 694~0.282 850 之间, 平均值为 0.282 758, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 3.05~8.58 之间, 平均值为 5.32, 一阶段模式年龄为 $t_{\text{DM}}=575.52\sim 781.42$ Ma, 二阶段模式年龄为 $t_{\text{DM}}^{\text{C}}=730.22\sim 1\ 083.46$ Ma. 样品 DLDB18-010 锆石 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 值介于 0.282 670~0.282 812 之间, 平均值为 0.282 758, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 2.31~7.36 之间, 平均值为 5.44, 一阶段模式年龄为 $t_{\text{DM}}=635.25\sim 809.35$ Ma, 二阶段模式年龄为 $t_{\text{DM}}^{\text{C}}=812.42\sim 1\ 134.56$ Ma.

3.3 锆石微量元素

两件黑云母花岗岩样品锆石微量元素测试结果见附表 3, 样品 DLDB18-001 的锆石稀土总量为 $\Sigma\text{REE}=587\times 10^{-6}\sim 3\ 015\times 10^{-6}$, 平均为 1 483 $\times 10^{-6}$. Eu/Eu* 值为 0.01~0.13, 平均为 0.04, δEu 值为

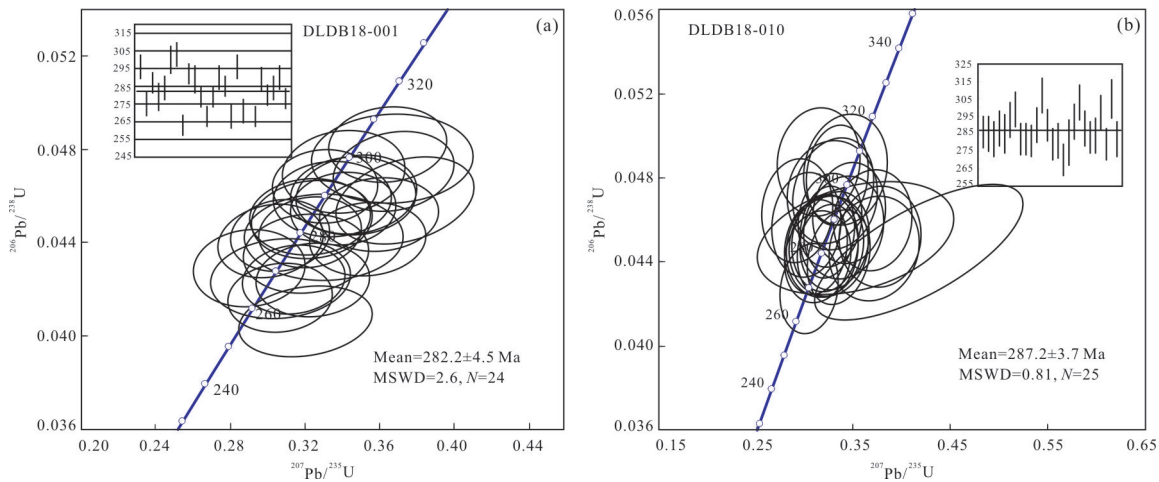
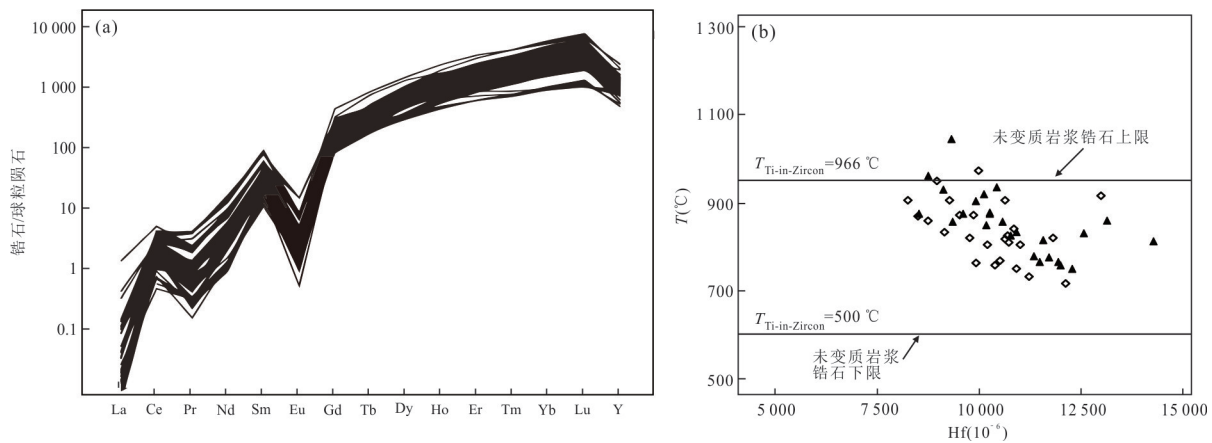


图5 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄协和图

Fig.5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams

图6 锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图与 Hf- $T_{\text{Ti-in-zircon}}$ 关系图Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and plots of zircons Hf- $T_{\text{Ti-in-zircon}}$ of zircons(b)a. 标准化数值据 Sun *et al.* (1989); b. 底图据周敦日格勒等 (2017)

0.01~0.10, 平均为 0.03. Ce/Ce^* 值为 2.39~34.1, 平均值为 11.7, δCe 值为 1.53~14.39, 平均为 4.67. 样品 DLDB18-010 的锆石稀土总量为 $\Sigma\text{REE} = 831 \times 10^{-6} \sim 2854 \times 10^{-6}$, 平均为 1627×10^{-6} . Eu/Eu^* 值为 0.01~0.1, 平均为 0.04, δEu 值为 0.01~0.08, 平均为 0.03. Ce/Ce^* 为 2.80~28.53, 平均为 11.01, δCe 值为 1.68~8.84, 平均为 4.08. 总体来说, 道伦达坝黑云母花岗岩锆石微量元素具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常, 球粒陨石标准化配分曲线呈重稀土富集, 轻稀土亏损的左倾谱型(图 6a).

4 讨论

4.1 成岩时代

锆石的振荡环带通常被视作判别其是否为岩

浆锆石的标志之一. 然而, 完全从流体或流体饱和的熔体中结晶的热液锆石也可具有类似岩浆锆石的振荡环带(Dubińska *et al.*, 2004). 本文选择两个黑云母花岗岩样品中振荡环带清晰、无后期变质壳的锆石进行测试(图 3), 在 Hf- $T_{\text{Ti-in-zircon}}$ 关系图基本落入未变质区域(图 6), 可能为岩浆锆石或热液锆石. 锆石中的 Th/U 值常被用作判断其成因, 岩浆锆石的 Th/U 值通常大于 0.1, 变质成因和热液锆石 Th/U 则小于 0.1. 本文两个样品锆石 Th/U 值基本大于或接近 0.1, 符合典型岩浆锆石成因特征. 然而, 赵振华(2010)研究发现, 判断锆石成因单纯依靠 Th/U 值是不可靠的, 应与其他化学指标综合使用. 近年来研究发现, 岩浆锆石的稀土元素含量从 La 到 Lu 呈急剧增加趋势, 强烈富集重稀土, 稀土元素球粒陨石标准化曲线呈陡左倾, Ce 呈明显正异

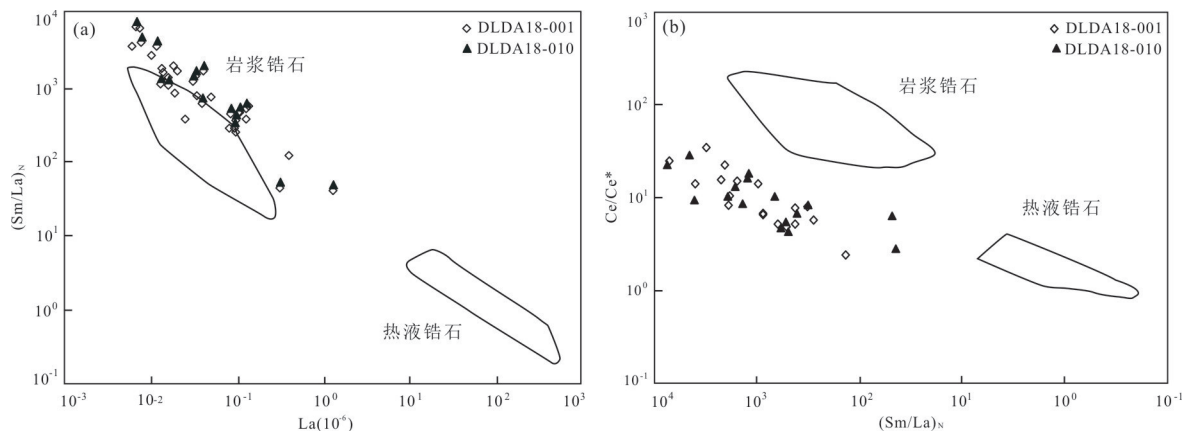


图7 锆石La-(Sm/La)_N(a)和(Sm/La)_N-Ce/Ce*关系图(b)(底图引自Hoskin *et al.*, 2005)

Fig.7 Plots of zircon La-(Sm/La)_N(a) and (Sm/La)_N-Ce/Ce* (b) (modified from Hoskin *et al.*, 2005)

常, Eu呈明显负异常. 热液锆石稀土元素总含量明显更高, 尤其表现为轻稀土含量明显增加, 稀土元素球粒陨石标准化曲线相对平缓, Ce正异常不明显(赵振华, 2010). 道伦达坝黑云母花岗岩锆石稀土总量与岩浆锆石稀土总量相似(平均值分别为 1.483×10^{-6} 和 1.627×10^{-6}), 稀土元素球粒陨石标准化曲线为陡左倾模式, 具有明显的Ce正异常(Ce/Ce*平均值分别为11.7和11.01), 和Eu负异常(Eu/Eu*平均值分别为0.04和0.04). 在La-(Sm/La)_N(图7a)和(Sm/La)_N-Ce/Ce*图解中(图7b), 样品锆石均落入或接近岩浆锆石区域, 偏离热液锆石区域. 综上, 本文所研究的锆石为岩浆同期结晶的岩浆锆石, 其年龄可代表岩浆侵位或结晶时间.

锆石U-Pb定年结果显示(附表1), 矿区内黑云母花岗岩样品(DLDB18-001)协和度较好的24个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 282.2 ± 4.5 Ma, 矿区外圈内黑云母花岗岩样品(DLDB18-010)协和度较好的25个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 287.0 ± 3.7 Ma, 与前人研究在误差范围内一致(周振华等, 2014; 段明等, 2016). 表明道伦达坝矿床黑云母花岗岩为晚古生代早二叠世岩浆活动的产物.

4.2 岩浆结晶温度

对锆石中微量元素Ti含量的有效测定并通过计算可以对岩浆结晶温度进行很好地约束(赵振华, 2010). 本文采用Ferry and Watson(2007)的锆石Ti温度计算公式计算成岩温度, 公式如下:

$$\lg(\times 10^{-6}, \text{Ti-in-zircon}) = (5.711 \pm 0.072) - (4.800 \pm 86)/T(\text{K}) - \lg a_{\text{SiO}_2} + \lg a_{\text{TiO}_2}, \quad (1)$$

由于本文研究花岗岩体系中中存在石英, 因此 $a_{\text{SiO}_2} \approx 1$, 在典型岩浆温度范围内, 硅酸盐熔体中

$a_{\text{TiO}_2} \approx 0.6$ (Watson and Harrison, 2005; 赵振华, 2010), 计算结果见(附表3). 样品DLDB18-001的锆石Ti温度 T_{Ti} 的范围为662~892 °C, 平均值为770 °C, 样品DLDB18-010的锆石Ti温度 T_{Ti} 的范围为694~951 °C, 平均值为785 °C.

Chappell and Williams(2004)研究发现, 澳大利亚拉克兰地区花岗岩可划分为高温和低温两种类型. 前者早期锆含量较低, 未达到饱和状态, 锆含量表现出随温度增加而增加, 随着岩浆结晶作用继续进行, 锆含量达到饱和而含量降低, 计算的温度代表了岩浆的最低温度; 后者含有较多的残留锆石, 可以推测岩浆开始结晶时锆就已经达到了饱和状态, 锆含量随结晶过程而降低, 计算的温度反映了岩浆最高温度(Chappell and Williams, 2004). Miller *et al.*(2003)依据锆饱和温度的高低将花岗岩分为“冷”(平均为766 °C)和“热”(平均为840 °C)两类, 认为“冷”的花岗岩含源区残留物较多, 岩浆的形成主要与流体加入有关, “热”的花岗岩含源区残留物较少, 其形成可能主要与外来热的加入有关(Miller *et al.*, 2003). 本次测试锆石样品阴极发光图中可见一些具有继承锆石特征的锆石, 加之, 已有的研究表明道伦达坝黑云母花岗岩含有继承锆石, 这说明岩浆初始处于锆饱和状态, 计算出的锆石Ti温度反映了岩体形成的上限温度(Miller *et al.*, 2003; 段明等, 2016). 因此, 本文研究的黑云母花岗岩应为低温花岗岩, 其源区可能在流体加入情况下, 经历了水近饱和条件下的熔融过程.

4.3 岩石成因及岩浆源区

岩石地球化学研究表明, 黑云母花岗岩岩相学和岩石地球化学特征类似于白云鄂博地区印支期S

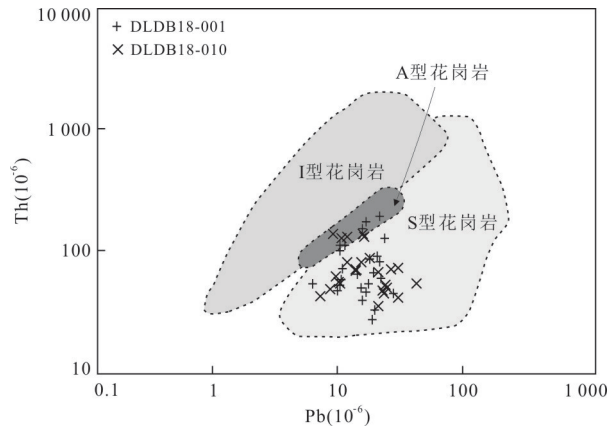


图 8 锆石 Th-Pb 关系

Fig.8 Plots of zircon Th-Pb

底图引自 Wang *et al.* (2012)

型花岗岩(陶继雄等, 2003), SiO_2 含量与澳大利亚 Lachlan 造山带的 S 型花岗岩 SiO_2 (平均值为 69.05%) 含量相近, 富 Al_2O_3 、 K_2O , 过铝质, CIPW 标准矿物刚玉 (Cor) 含量均大于 1%, 副矿物中多见白云母, 符合典型 S 型花岗岩组成特征. 全岩的锶同位素和铅同位素均显示了该岩体具有壳源特征 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.708 34) (王万军等, 2005; 周振华等, 2014).

Wang *et al.* (2012) 通过对比青藏高原南部典型 I 型、S 型以及东北缘典型 A 型花岗岩类锆石微量元素成分发现 S 型花岗岩锆石具有相对高 Th/Pb 值 (0.4~21.0) 和低的 Nb 值 ($1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$), 相比 I 型花岗岩具有更明显的 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.03 \sim 0.30$, 大多小于 0.2), 本文两件样品锆石均具有低的 Nb 含量 (小于 2×10^{-6}) 和强烈的 Eu 异常 (Eu/Eu^* 值均小于 0.2, 平均值为 0.04), 符合 S 型花岗岩特征. 在 Th-Pb 图解中本文两件样品的锆石均落入 S 型花岗岩范围内 (图 8), 这一结果与前人研究结果一致 (周振华等, 2014).

道伦达坝黑云母花岗岩锆石具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (平均值分别为 0.282 770 和 0.282 769) 和低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (平均值分别为 0.002 224 和 0.001 984) 同位素组成, 暗示锆石在形成之后仅具有很少的放射性成因 Hf 积累, 所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素组成可以代表其结晶时体系的 Hf 同位素组成 (Amelin *et al.*, 2000; 吴福元等, 2007a, 2007b). $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 3.05~8.58 之间和 2.31~7.36, 在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解中全部落入兴蒙造山带东段范围内 (图 8a), 位于球粒陨石和亏损地幔演化线之间 (图

8b), 在 Grimes *et al.* (2007) 提出的 U-Yb (图 9a)、U/Yb-Y (图 9b)、U/Yb-Hf (图 9c) 图解中, 锆石均落入陆壳源区区域, 暗示其来源于新生下地壳的部分熔融. 锆石的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值介于 $-0.97 \sim -0.88$ (平均值为 -0.93) 和 $-0.99 \sim -0.91$ (平均值为 -0.94), 明显小于硅铝质地壳 (-0.72) 和镁铁质地壳 (-0.34) (图 10), 因此二阶段模式年龄更能反应其源区物质从亏损地幔被抽取的时间, 或者在地壳的平均存留时间 (周振华等, 2011). 道伦达坝黑云母花岗岩锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄为 730.22~1 083.46 Ma 和 812.42~1 134.56 Ma, 表明岩浆侵位过程中可能遭受了古老地壳的混染.

4.4 与成矿的关系

道伦达坝矿床黑云母花岗岩属前进场岩体北段, 主要为黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩等. 岩体可分为边缘相、过渡相及中心相, 中心相位于岩体中心部位, 出露面积小; 边缘相广泛发育各类脉岩, 岩体及围岩中均发育热液蚀变, 表明岩体剥蚀程度低. 矿体主要分布于岩体内接触带或定位与岩体内部, 受构造控制明显, 近矿岩体普遍发育典型的高温 (云英岩化、电气石化等) 和中温 (绿泥石、高岭土等) 热液蚀变. 岩体钨、锡元素含量显著偏高, 与东乌珠穆沁旗沙麦钨矿的花岗岩体及江西大余洪水寨钨矿区花岗岩相比, 钨、锡、钼等元素含量也较高, 有利于形成类似于云英岩化型钨和铜的强烈矿化. 流体包裹体研究显示, 黑云母花岗岩与成矿各阶段从流体包裹体组分到均一温度均具有很好地继承性和连续演化特征, 显示了浆控高温热液矿床成矿流体性质及演化的普遍规律, 因此认为成矿初始流体源于黑云母花岗岩 (徐佳佳等, 2009). Feng *et al.* (2017) 测得道伦达坝矿床 5 件黄铜矿和 5 件磁黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄分别为 282.7 ± 1.7 Ma 和 283.0 ± 2.6 Ma, 这一结果与黑云母花岗岩年龄在误差范围内一致. 以上证据均表明黑云母花岗岩与道伦达坝矿床具有成因上的联系. 此外, 陈公正等 (2018) 测得矿区 16 号矿体锡石 U-Pb 年龄为 135 Ma 左右, 推测矿区外围张家营子岩体 (135 Ma) 为该矿床的成矿岩体. 然而, 高温热液矿床一般产于岩体附近, 从作者给出的采样点坐标来看, 该岩体距离矿床较远 (采样点: 北纬 $44^\circ 14' 27''$, 东经 $115^\circ 06' 23''$; 道伦达坝矿床中心: 北纬 $44^\circ 14' 42''$, 东经 $117^\circ 58' 36''$), 其是否为成矿岩体尚需要进一步加以确定. 众多研究表明, 大兴安岭南段中

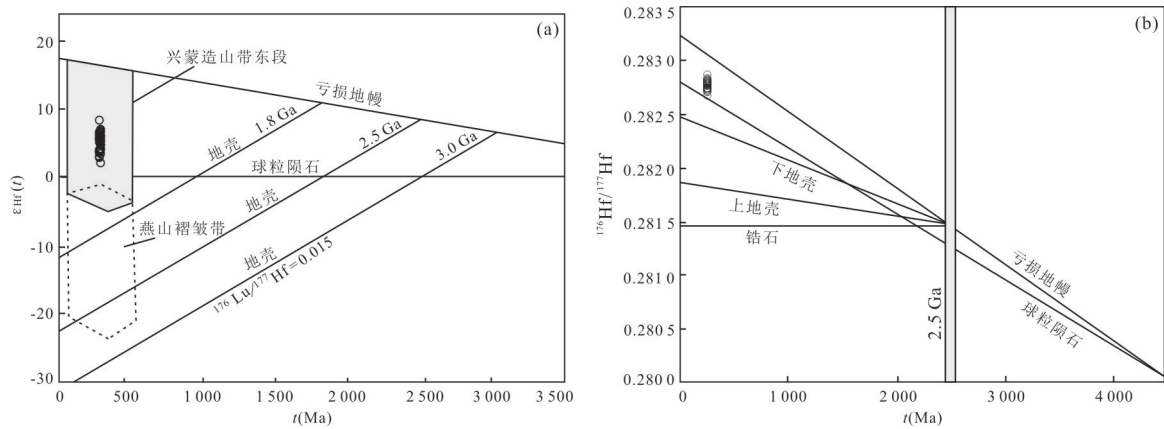


图 9 锆石 Hf 同位素特征图(底图引自 Vervoort *et al.*, 1996; 周振华等, 2014)

Fig 9 Hf isotopic composition of zircon(modified from Vervoort *et al.*, 1996; Zhou *et al.*, 2014)

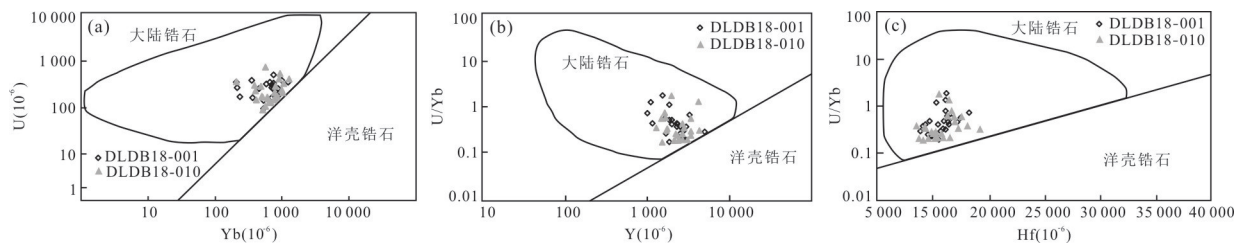


图 10 锆石 U-Yb(a)、U/Yb-Y(b)、U/Yb-Hf(c)关系图(底图引自 Grimes *et al.*, 2007)

Fig.10 Plots of zircon U-Yb(a)、U/Yb-Y(b)、U/Yb-Hf(c)(modified from Grimes *et al.*, 2007)

生代存在锡成矿高峰,道伦达坝共圈定铜矿体、钨矿体、锡矿体、铜钨矿体、铜锡矿体、钨锡矿体等共 130 多个矿体,因此,该年龄仅能证明在道伦达坝存在中生代锡成矿作用,但并不能以此否定晚古生代的成矿作用。

4.5 成岩、成矿背景及意义

一些学者认为古亚洲洋在早古生代已经闭合,从晚石炭世一早二叠世起,内蒙中部处于陆内伸展的环境下,在中二叠世开始发生裂解,形成了若干近东西向分布的海盆,并因持续的伸展发育为有限洋盆,在早中生代之后受华北板块和扬子板块碰撞及陆内造山作用的远程影响最终闭合(徐备等, 2014)。另一种观点认为,古亚洲洋俯冲一直持续到晚古生代(刘建峰等, 2016),甚至持续到中生代(Xiao *et al.*, 2003)。程杨等(2019)在迪彦庙地区识别出了一套洋内弧火成岩组合,其中 MORE-Like 玄武岩锆石 U-Pb 年龄为 286 ± 6.1 Ma,认为在早二叠世古亚洲洋在该地区仍然处于俯冲阶段(程杨等, 2019)。李尚启等(2017)对内蒙古中部温都尔庙地区变基性火山岩开展了地球化学和年代学研究,获得锆石 U-Pb 年龄为 254.8 ± 6.2 Ma,结合岩石地球化学及区域地质特征认为,温都尔庙地区在晚二

叠世时古亚洲洋尚未闭合(李尚启等, 2017)。Gao *et al.*(2016)和范玉须等(2019)在西乌旗地区发现了晚二叠世(255~254 Ma)高铯低钇花岗岩和高镁安山岩(253~251 Ma),共同构成了俯冲板片断离背景下火成岩组合,表明晚二叠世该地区仍然存在俯冲作用。索伦山蛇绿岩中硅质岩中早二叠世放射虫动物群最新研究成果同样表明早二叠世古亚洲洋仍未闭合(李钢柱等, 2017)。此外,内蒙东部不同区域、不同时代沉积物碎屑组分对比研究也证明了古亚洲洋沿西拉木伦缝合带自西向东呈“剪刀”式闭合,最终闭合时间持续到晚二叠一早三叠世(赵英利等, 2016)。内蒙古自治区地质矿产勘查基金(2017-YS01)运用李廷栋院士洋板块地质思想,对西拉木伦地区开展了系统的工作,将发育于该区域的原林西组粉砂质板岩、粉砂质泥岩及粉砂岩,归为下二叠统寿山沟组,为一套复理石或冲积扇建造。以上最新研究成果表明,古亚洲洋在早二叠世尚未完全闭合,在迪彦庙地区仍然存在俯冲作用及海相沉积地层。道伦达坝黑云母花岗岩为形成于早二叠世俯冲环境弧花岗岩(周振华等, 2014),为新元古代新生下地壳(可能为锡林浩特杂岩)在俯冲流体加入的情况下发生部分熔融的产物,岩浆源区

岩石可能在早期经历了地表过程(吴福元等, 2007a), 因此表现出 S 型花岗岩相似的地球化学特征.

古亚洲洋为包含众多小洋盆和微陆块的多岛洋盆系统(邵济安等, 2018), 大兴安岭地区位于古亚洲洋古生代构造演化域, 处于洋—陆转换构造体制之下, 经历了强烈的俯冲和增生造山作用, 区内燕山期岩浆活动强烈, 广泛发育同期的 Ag、Pb、Zn、Cu、W、Sn、Mo 等金属矿产, 然而古生代与古亚洲洋俯冲、消减有关的矿床却较少(江思宏等, 2011; 周振华等, 2014). 其原因是该地区古生代本身成矿作用较弱, 还是由于燕山期强烈的岩浆活动使早期形成的矿床被破坏, 或被后期成矿作用叠加改造?

众所周知, 矿床的形成和定位受许多局部地质因素的制约, 但成矿初始驱动机制来源于地壳深部, 成矿物质的运移和再富集是在洋—陆转化的过程中实现的. 大洋俯冲带(洋/洋俯冲和洋/陆俯冲)是大洋板片的俯冲消亡地和大陆的诞生地, 同时也是重要的矿产资源聚集地(肖庆辉等, 2016; 潘桂棠等, 2019). 造山带蕴藏着众多大型、超大型金属矿床, 全球 2/3 的铜矿和 1/3 的金矿都与俯冲增生造山作用和碰撞造山作用有关, 典型的实例有滨太平洋成矿域和我国西藏冈底斯成矿带(李廷栋等, 2019). 兴蒙造山带位于中亚造山带东段, 地处西伯利亚板块与华北克拉通之间, 经历了古亚洲洋从形成到消亡的完整演化过程. 目前有报道的与其构造演化有关的成矿作用始于 500 Ma, 断续演化到 210 Ma(江思宏等, 2018). 代表性的矿床有多宝山斑岩型铜钼矿(506 Ma)、白乃庙斑岩型铜钼金矿床(440 Ma)、准苏吉花斑岩型钼矿(298 Ma)、奥尤特砂卡岩型铜锌矿(286 Ma)、毕力赫金矿(272 Ma)、车户沟斑岩型钼矿、白音诺尔砂卡岩型铅锌矿等(江思宏等, 2018). 由此可见, 兴蒙造山带内古生代内成矿作用并非个例. 道伦达坝铜多金属矿床为与 S 型花岗岩有关的中—高温热液脉型矿床(徐佳佳等, 2009; 段明等, 2016), 岩石地球化学研究表明, 岩石富 Al_2O_3 、 K_2O , 属过铝质, 亏损 Nb、Ta、Sr、Ti 等元素, 富集轻稀土、亏损重稀土且具有明显的 Eu 负异常, 符合壳源成因的火山弧花岗岩成分特征, 微量元素构造判别图中落入火山弧花岗岩和及其与同碰撞花岗岩边界范围内. 结合锆石微量元素及同位素特征, 说明该岩体形成于晚古生代早二叠世俯冲环境之下, 为本区晚古生代古亚洲洋俯冲背景下的

成矿作用增加了新的证据. 加之, 随着研究的深入, 在一些中生代矿床中也发现了古生代成矿作用被叠加的证据(如黄岗梁、敖包特)(要梅娟等, 2016; 陈公正等, 2018). 综上, 可以推测, 随着古生代古亚洲洋的俯冲消减及增生造山作用过程, 在兴蒙造山带可能存在着强烈成矿作用, 形成了一批斑岩型、砂卡岩型及热液脉型矿床(江思宏等, 2011; 周振华等, 2014), 这些矿床有的被保存了下来, 有的经历了中生代成矿作用的叠加而被“掩盖”, 需要更加详细的解剖加以识别.

5 结论

(1) 道伦达坝黑云母花岗岩锆石 U-Pb 定年结果为 282.2 ± 4.5 Ma 和 287.0 ± 3.7 Ma, 表明其形成于早二叠世.

(2) 锆石微量元素显示其具有 S 型花岗岩的特征. 锆石 Ti 饱和温度为 $662 \sim 892$ °C (平均值为 770 °C) 和 $694 \sim 951$ °C (平均值为 785 °C), 暗示其可能形成于俯冲环境下, 源区经历了水近饱和情况下的部分熔融.

(3) 锆石 Lu-Hf 同位素结果显示 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $3.05 \sim 8.58$ 和 $2.31 \sim 7.36$, 且为陆壳锆石, 暗示道伦达坝黑云母花岗岩源自新生下地壳的部分熔融; 二阶段模式年龄较老 ($30.22 \sim 1083.46$ Ma 和 $812.42 \sim 1134.56$ Ma), 说明岩浆侵位过程中可能遭受古老地壳的混染.

致谢: 野外工作得到道伦达坝矿床生成技术部王耀明的帮助, 两位匿名审稿人对文章提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢.

附表数据参见本刊官网 (www.earth-science.net).

References

- Amelin, Y., Lee, D.C., Halliday, A.N., 2000. Early-Middle Archaean Crustal Evolution Deduced from Lu-Hf and U-Pb Isotopic Studies of Single Zircon Grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4205–4225. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00493-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00493-2)
- Chappell, B. W., White, A. J. R., Williams, I. S., et al., 2004. Low- and High-Temperature Granites. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 95(1–2): 125–140. <https://doi.org/10.1017/S0263593300000973>
- Chen, G.Z., Wu, G., Li, T.G., et al., 2018. LA-ICP-MS Zircon and Cassiterite U-Pb Ages of Daolundaba Copper-Tungstent Deposit in Inner Mongolia and Their Geo-

- logical Significance. *Mineral Deposits*, 37(2): 225—245 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y., Xiao, Q.H., Li, T.D., et al., 2019. Magmatism and Tectonic Background of Early Permian Intra-Oceanic Arc in Diyanmiao Subduction Accretion Complex Belt in Eastern Margin of Central Asian Orogenic Belt. *Earth Science*, 44(10): 3454—3468 (in Chinese with English abstract).
- Duan, M., Zeng, W., Feng, X.X., et al., 2016. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages and Geological Features of Daolundaba Granite in Xilinhaote Area, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 35(7): 1207—1216 (in Chinese with English abstract).
- Dubińska, E., Bylina, P., Kozłowski, A., et al., 2004. U-Pb Dating of Serpentinization: Hydrothermal Zircon from a Metasomatic Rodingite Shell (Sudetic Ophiolite, SW Poland). *Chemical Geology*, 203(3/4): 183—203. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.10.005>
- Elhlou, S., Belousova, E., Griffin, W. L., et al., 2006. Trace Element and Isotopic Composition of GJ-Red Zircon Standard by Laser Ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1383>
- Fan, Y.X., Li, T.D., Xiao, Q.H., et al., 2019. Zircon U-Pb Ages, Geochemical Characteristics of Late Permian Granite in West Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and Tectonic Significance. *Geological Review*, 65(01): 248—266 (in Chinese with English abstract).
- Feng, J. R., Zhou, Z. H., Che, H. W., 2017. Permian Copper - Polymetallic Mineralization in the Southern Great Xing'an Range, Northeast China: The Daolundaba Copper - Polymetallic Deposit Example. *International Geology Review*, 59(13): 1709—1722.
- Ferry, J. M., Watson, E. B., 2007. New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429—437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
- Gao, S., Liu, X. M., Yuan, H. L., et al., 2002. Determination of Forty Two Major and Trace Elements in USGS and NIST SRM Glasses by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 26(2): 181—196. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2002.tb00886.x>
- Gao, X. F., Guo, F., Xiao, P. X., et al., 2016. Geochemical and Sr-Nd-Pb Isotopic Evidence for Ancient Lower Continental Crust beneath the Xi Ujimqin Area of NE China. *Lithos*, 252—253: 173—184.
- Grimes, C. B., John, B. E., Kelemen, P. B., et al., 2007. Trace Element Chemistry of Zircons from Oceanic Crust: A Method for Distinguishing Detrital Zircon Provenance. *Geology*, 35(7): 643. <https://doi.org/10.1130/g23603a.1>
- Hoskin, P. W. O., 2005. Trace-Element Composition of Hydrothermal Zircon and the Alteration of Hadean Zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637—648. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006>
- Jiang, S.H., Nei, F.J., Bai, D.M., et al., 2011. Geochronology Evidence for Indosinian Mineralization in Baiyinnuoer Pb-Zn Deposit of Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 30(5): 787—798 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S.H., Zhang, L.L., Liu, Y.F., et al., 2018. Metallogeny of Xing-Meng Orogenic Belt and Some Related Problems. *Mineral Deposits*, 37(4): 671—711 (in Chinese with English abstract).
- Li, G.Z., Wang, Y.J., Li, C.Y., et al., 2017. Discovery of Early Permian Radiolarian Fauna in the Solon Obo Ophiolite Belt, Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 62(5): 400—406. <https://doi.org/10.1360/N972016-00703>
- Li, T.D., Xiao, Q.H., Pan, G.T., et al., 2019. A Consideration about the Development of Ocean Plate Geology. *Earth Science*, 44(5): 1441—1451 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Q., Chen, Y.J., Han, R.D., et al., 2017. Chronology and Geochemistry of Meta-Basic Volcanics of Baiyinnuoer Region in Wenduermiao Area, Inner Mongolia. *Global Geology*, 36(2): 428—440 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.F., Li, J.Y., Sun, L.X., et al., 2016. Zircon U-Pb Dating of the Jiujiangzi Ophiolite in Bairin Left Banner, Inner Mongolia: Constraints on the Formation and Evolution of the Xar Moron River Suture Zone. *Geology in China*, 43(6): 1947—1962 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R.L., Wu, G., Li, T.G., et al., 2018. LA-ICP-MS Cassiterite and Zircon U-Pb Ages of the Weilasituo Tin-Polymetallic Deposit in the Southern Great Xing'an Range and Their Geological Significance. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 183—201 (in Chinese with English abstract).
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31(6): 529. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0529:hacgio>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0529:hacgio>2.0.co;2)
- Pan, G.T., Xiao, Q.H., Zhang, K.X., et al., 2019. Recognition of the Oceanic Subduction-Accretion Zones from the Orogenic Belt in Continents and Its Important Scientific Significance. *Earth Science*, 44(5): 1544—1561 (in Chinese with English abstract).

- Pan, X.F., Wang, S., Hou, Z.Q., et al., 2009. Geology and Metallogenesis of Daolundaba Copper Polymetallic Deposits, Inner Mongolia. *Mineralogica*, 33(3): 402–410 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J.A., Tian, W., Tang, K., D., et al., 2018. Preliminary Discussion on the Role of Microcontinental Blocks in the Evolution of the Central Asian orogenic belt: Taking the Xilinhaote Microcontinental Block as an Example. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J.A., Zhang, L.Q., Mou, B.L., 1998. The Mesozoic Tectono-Thermal Evolution in the Middle and South of Daxing 'Anling. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, (3): 193–200 (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. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tao, J.X., Hu, F.X., Chen, Z.Y., 2003. Characteristics and Tectonic Environment of S-Type Granite Belt in the Northern Margin of the North China Block. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (2): 112–118. (in Chinese with English abstract)
- Vervoort, J.D., Patchett, P.J., Gehrels, G.E., et al., 1996. Constraints on Early Earth Differentiation from Hafnium and Neodymium Isotopes. *Nature*, 379(6566): 624–627. <https://doi.org/10.1038/379624a0>
- Wang, W.J., Sun, Z.J., Hu, X.Z., 2005. Geological Characters and Tectonic Setting of Qianjinchang Granite in Inner Mongolia. *Geology and Prospecting*, 41(2): 35–40 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhu, D.C., Zhao, Z.D., et al., 2012. Magmatic Zircons from I-, S- and A-Type Granitoids in Tibet: Trace Element Characteristics and Their Application to Detrital Zircon Provenance Study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.07.027>
- Watson, E.B., Harrison, H.T., 2005. Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841–844. <https://10.1126/science.1110873>
- Wu, F.Y., Li, X.H., Yang, J.H., et al., 2007a. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007b. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Q.H., Li, T.D., Pan, G.T., et al., 2016. Petrologic Ideas for Identification of Ocean-Continent Transition: Recognition of Intra-Oceanic Arc and Initial Subduction. *Geology in China*, 43(3): 721–737 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W.J., Brian, W., Jie, F.H., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6). <https://doi.org/10.1029/2002tc001484>
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q.Z., et al., 2014. Preliminary Study on the Pre-Mesozoic tectonic Unit Division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841–1857 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J.J., Lai, Y., Cu, D., et al., 2009. Characteristics and Evolution of Ore-Forming Fluids of the Daolundaba Copper-Poly-Metal Deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2957–2972 (in Chinese with English abstract).
- Yao, M.J., Cao, Y., Lui, J.J., et al., 2016. Isotope Age of Re-Os in Molybdenite and Genetic Implication of Huanggangliang Fe-Sn Deposit in Inner Mongolia. *Mineral Exploration*, 7(3): 399–403 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, D.G., Lui, J.J., Yang, Y.Q., et al., 2012. Petrogenetic and Metallogenic Ages and Tectonic Setting of the Huanggangliang Fe-Sn Deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 513–523 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T.F., Guo, S., Xin, H.T., et al., 2019. Petrogenesis and Magmatic Evolution of Highly Fractionated Granite and Their Constraints on Sn- (Li-Rb-Nb-Ta) Mineralization in the Weilasituo Deposit, Inner Mongolia, Southern Great Xing'an Range, China. *Earth Science*, 44(1): 248–267 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.L., Li, W.M., Wen, Q.B., et al., 2016. Late Paleozoic Tectonic Framework of Eastern Inner Mongolia: Evidence from the Detrital Zircon U-Pb Ages of the Mid-Late Permian to Early Triassic sandstones. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 807–2822 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.H., 2010. Trace Element Geochemistry of Accessory Minerals and its Applications in Petrogenesis and Metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 267–286 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, A.R.G.L., Dai, J.G., Li, Y.L., et al., 2017. Zircon Trace Element Geochemical Characteristics of Late Silurian - Early Jurassic Granitoids from Eastern Kunlun Range and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 33(1): 173–190.
- Zhou, Z.H., Lv, L.S., Feng, J.R., et al., 2010. Molybdenite

- Re-Os Ages of Huanggang Skarn Sn-Fe Deposit and their Geological Significance, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 667—679 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.H., Lv, L.S., Yang, Y.J., et al., 2010. Petrogenesis of the Early Cretaceous A-Type Granite in the Huanggang Sn-Fe Deposit, Inner Mongolia: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3521—3537 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.H., Ouyang, H.G., Wu, X.L., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry Study of the Biotite Granite from the Daolundaba Cu-W Polymetallic Deposit in the Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 79—94 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈公正, 武广, 李铁刚, 等, 2018. 内蒙古道伦达坝铜钨锡矿床 LA-ICP-MS 锆石和锡石 U-Pb 年龄及其地质意义. *矿床地质*, 37(2): 30—50.
- 程杨, 肖庆辉, 李廷栋, 等, 2019. 中亚造山带东缘迪彦庙俯冲增生杂岩带早二叠世洋内弧岩浆作用及构造背景. *地球科学*, 44(10): 3454—3468.
- 段明, 曾威, 冯晓曦, 等, 2016. 内蒙古锡林浩特地区道伦达坝矿区花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质通报*, (7): 1207—1216.
- 范玉须, 李廷栋, 肖庆辉, 等, 2019. 内蒙古西乌珠穆沁旗晚二叠世花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. *地质论评*, 65(1): 248—266.
- 江思宏, 聂凤军, 白大明, 等, 2011. 内蒙古白音诺尔铅锌矿床印支期成矿的年代学证据. *矿床地质*, 30(5): 787—798.
- 江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 等, 2018. 兴蒙造山带成矿规律及若干科学问题. *矿床地质*, 37(4): 671—711.
- 李钢柱, 王玉净, 李成元, 等, 2017. 内蒙古索伦山蛇绿岩带早二叠世放射虫动物群的发现及其地质意义. *科学通报*, (5): 60—66.
- 李尚启, 陈跃军, 韩仁道, 等, 2017. 内蒙古温都尔庙地区白音诺尔一带变质基性火山岩年代学和地球化学研究. *世界地质*, 36(2): 428—440.
- 李廷栋, 肖庆辉, 潘桂棠, 等, 2019. 关于发展洋板块地质学的思考. *地球科学*, 44(5): 1441—1451.
- 刘建峰, 李锦轶, 孙立新, 等, 2016. 内蒙古巴林左旗九井子蛇绿岩锆石 U-Pb 定年: 对西拉木伦河缝合带形成演化的约束. *中国地质*, 43(6): 1947—1962.
- 刘瑞麟, 武广, 李铁刚, 等, 2018. 大兴安岭南段维拉斯托锡多金属矿床 LA-ICP-MS 锡石和锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地学前缘*, 25(5): 183—201.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 等, 2019. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义. *地球科学*, 44(5): 1545—1561.
- 潘小菲, 王硕, 侯增谦, 等, 2009. 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床特征研究. *大地构造与成矿学*, 33(03): 402—410.
- 邵济安, 田伟, 唐克东, 等, 2018. 初论微陆块在中亚造山带演化中的作用: 以锡林浩特微陆块为例. *地学前缘*, 25(4): 1—10.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 1998. 大兴安岭中南段中生代的构造热演化. *中国科学(D辑:地球科学)*, (3): 2—9.
- 陶继雄, 胡凤翔, 陈志勇, 2003. 华北陆块北缘印支期 S 型花岗岩带特征及其构造环境. *岩石矿物学杂志*, (2): 112—118.
- 王万军, 孙振家, 胡祥昭, 2005. 内蒙古前进场花岗岩体的地质特征及其构造环境. *地质与勘探*, 41(2): 35—40.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 3—24.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185—220.
- 肖庆辉, 李廷栋, 潘桂棠, 等, 2016. 识别洋陆转换的岩石学思路——洋内弧与初始俯冲的识别. *中国地质*, 43(3): 721—737.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等, 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探. *岩石学报*, 30(7): 1841—1857.
- 徐佳佳, 赖勇, 崔栋, 等, 2009. 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床成矿流体特征及其演化. *岩石学报*, (11): 2957—2972.
- 要梅娟, 曹焯, 刘家军, 等, 2016. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其成因意义. *矿产勘查*, 7(3): 399—403.
- 翟德高, 刘家军, 杨永强, 等, 2012. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床成岩、成矿时代与构造背景. *岩石矿物学杂志*, 31(4): 513—523.
- 张天福, 郭硕, 辛后田, 等, 2019. 大兴安岭南段维拉斯托高分异花岗岩体的成因与演化及其对 Sn-(Li-Rb-Nb-Ta) 多金属成矿作用的制约. *地球科学*, 44(1): 248—267.
- 赵英利, 李伟民, 温泉波, 等, 2016. 内蒙东部晚古生代构造格局: 来自中、晚二叠—早三叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据. *岩石学报*, 32(9): 2807—2822.
- 赵振华, 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用. *地学前缘*, (1): 269—288.
- 周敖日格勒, 戴紧根, 李亚林, 等, 2017. 东昆仑山脉晚志留世—早侏罗世花岗岩类岩石中锆石微量元素地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, (1): 173—189.
- 周振华, 吕林素, 冯佳睿, 等, 2010. 内蒙古黄岗夕卡岩型锡铁矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 26(3): 667—679.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 等, 2010. 内蒙古黄岗锡铁矿区早白垩世 A 型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约. *岩石学报*, 26(12): 3521—3537.
- 周振华, 欧阳荷根, 武新丽, 等, 2014. 内蒙古道伦达坝铜钨多金属矿黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义. *岩石学报*, 30(1): 79—94.