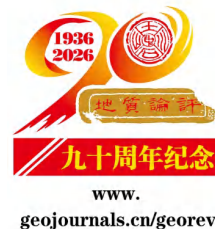


达茂旗沙尔陶勒盖铜钼矿床花岗闪长岩 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征 及其地质意义



李建委¹⁾, 宓奎峰²⁾, 魏正宇¹⁾, 张保涛¹⁾, 胡兆国¹⁾, 梅贞华³⁾, 孙峰⁴⁾

1) 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 济南, 250101;

2) 中国地质科学院, 北京, 100037;

3) 中国冶金地质总局山东局, 济南, 250101; 4) 中国冶金地质总局, 北京, 100031

内容提要:中蒙两国交界地区产出众多铜多金属矿床, 其中位于我国内蒙古达尔罕茂明安联合旗(达茂旗)境内的沙尔陶勒盖铜钼矿自发现以来进行了多次勘查工作, 前人初步查明了矿床地质特征。笔者等研究表明沙陶勒盖矿区孔雀石化花岗闪长岩的锆石 U-Pb 谐和年龄为 293.0 ± 1.0 Ma, 未矿化花岗闪长岩的谐和年龄为 294.1 ± 0.8 Ma, 说明矿区的成岩成矿作用发生在早二叠世。花岗闪长岩中表现出高硅、富铝及高钾的主量元素组合, 相对富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 说明花岗闪长岩具有弧岩浆岩的性质。此外花岗闪长岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 $+4.5 \sim +11.3$ 、 $+7.5 \sim +10.6$, T_{DM2} 分别为 1028~589 Ma、831~631 Ma, 说明成岩岩浆为岛弧岩浆作用的产物。结合区域构造研究, 作者认为满都拉地区早二叠世的花岗岩形成于古亚洲洋向南俯冲背景下。

关键词:沙尔陶勒盖; 达茂旗; 内蒙古; 岩浆来源; 成岩成矿时代; 地球动力学背景; 中亚成矿带

中亚造山带作为全球最大的大陆造山带, 也是显生宙大陆地壳生长最为典型的增生型造山带, 先后经历了微陆块形成、古亚洲洋陆缘增生、滨太平洋大陆边缘俯冲、蒙古—鄂霍次克洋闭合等多个构造阶段(Xiao Wenjiao et al., 2014, 2018)。其中位于中蒙两国交界的内蒙古中部地区地处古亚洲洋陆缘增生演化的主体地区, 经历了古亚洲洋的大洋开裂、俯冲、碰撞、后碰撞和陆内造山作用。这种复杂的地质演化, 造成该地区构造、岩浆等十分强烈, 矿产资源极其丰富。

近年来, 随着地质找矿工作的不断深入, 在蒙古国境内先后发现了察干苏布尔加大型斑岩型铜钼矿床(Tsagaan Suvarga, Cu 1.30 Mt, 品位 0.3%~1.5%; Mo 40 kt, 品位 0.01%~0.1%) (Tungalag et al., 2019)、欧玉陶勒盖超大型斑岩型铜金矿床(Cu 2.25 Mt, 品位 0.48%; Au 328 t, 品位 0.7×10^{-6}) (苗来成等, 2023)。而在我国境内的内蒙古达茂旗(达尔罕—茂明安联合旗)北部也发现了多处矿点及矿

床, 如查干哈达庙 VMS 型铜矿(王超, 2023; 王守光等, 2021)、乌珠新乌苏热液脉型铜铅锌金银矿(华北等, 2020)、沙尔陶勒盖斑岩型铜钼矿(孙峰等, 2023)等(图 1), 显示良好的找矿远景。

沙尔陶勒盖铜钼矿位于达茂旗境内, 归满都拉镇管辖, 满都拉镇之西约 15 km。自 2003 年由山东正元地质资源勘查有限责任公司取得勘查许可证以来, 进行了多次地质勘查工作(孙峰等, 2023), 但关于矿床的形成时代、岩浆来源、地球动力学背景等方面研究较少。笔者等通过对矿区内出露的花岗闪长岩开展锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素研究、主微量元素分析, 以期厘定矿床形成时代、岩浆来源, 判断矿床形成的构造动力学背景, 为区域矿产勘查提供指导。

1 区域地质概况

位于华北板块和西伯利亚板块之间的兴蒙造山带, 地处中亚造山带东段, 是古亚洲洋向华北板块和

注: 本文为中国冶金地质总局地质综合研究项目(编号: 中冶地[2024]CMGBDZYJ003号)、中国冶金地质总局山东局青年基金资助项目(编号: SDYJ-QNKJ202403)的成果。

收稿日期: 2025-04-16; 改回日期: 2025-07-16; 网络首发: 2025-07-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.085

作者简介: 李建委, 男, 1991年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质勘查及找矿研究; Email: ljw0116@126.com。通讯作者: 宓奎峰, 男, 1989年生, 博士, 高级工程师, 主要从事矿床学研究; Email: mikufeng@126.com。

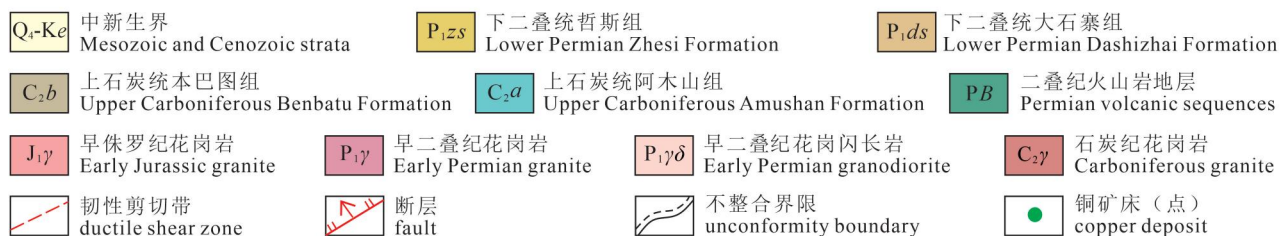
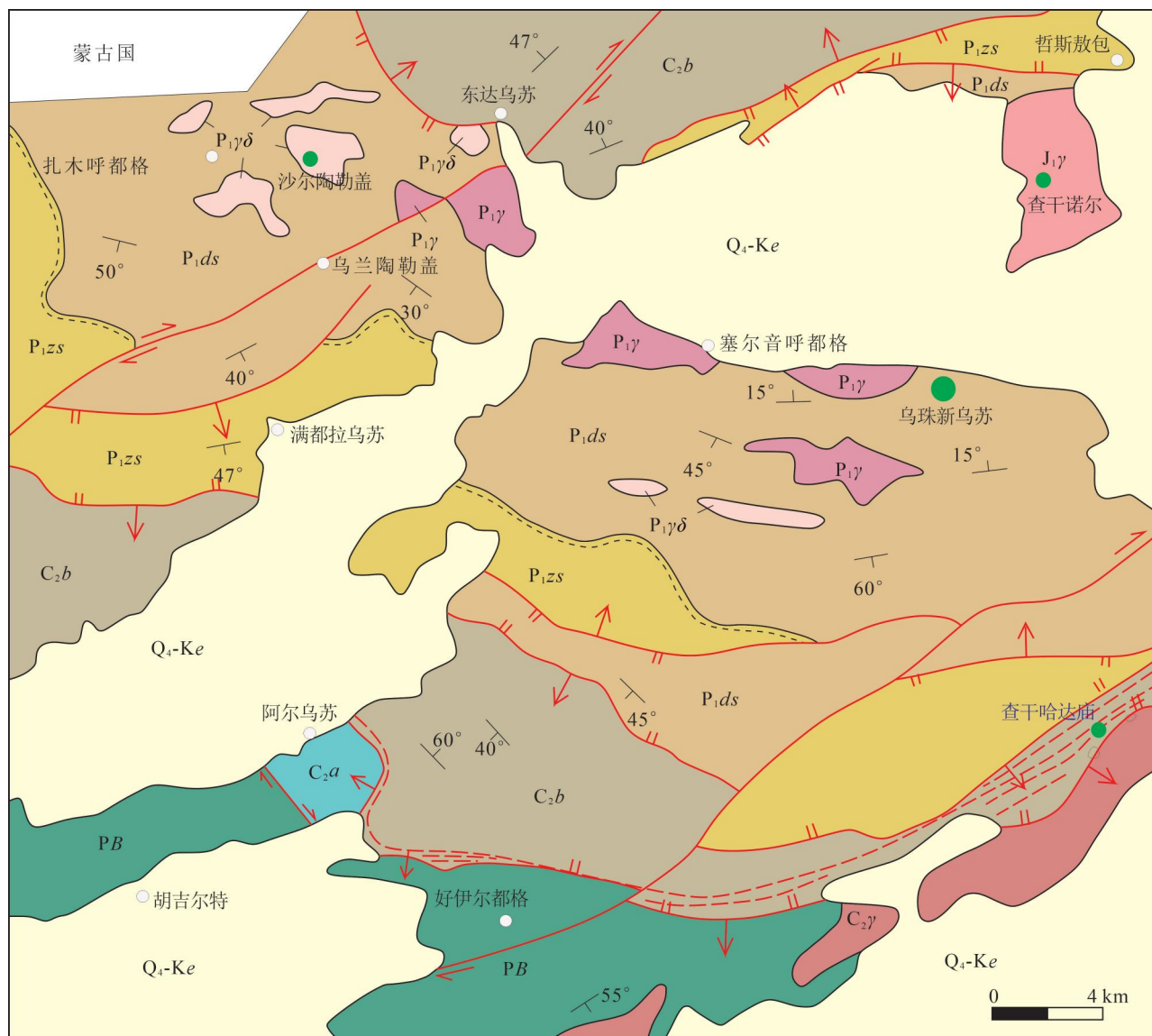


图1 达茂旗满都拉地区地质构造及主要铜矿床分布图,引自(汤超等,2013)

Fig. 1 Geological structures and distribution of major copper deposits in the Mandula area, Darhan Mumingan Banner (modified after Tang Chao et al., 2013&)

西伯利亚板块双向俯冲增生闭合的产物,同时也是中蒙边境成矿带的重要组成部分。Xiao Wenjiao等(2003)将兴蒙造山带由北向南依次划分为乌拉雅斯太活动大陆边缘、贺根山蛇绿岩—弧—增生杂岩带、白音宝力道弧—增生杂岩带、二道井增生杂岩带、温都尔庙俯冲—增生杂岩带、白乃庙弧—岩浆岩

带。又有学者进一步将索伦构造带两侧的岛弧和俯冲增生杂岩带,分别合并为南部造山带与北部造山带(Jian Ping et al., 2008, 2010)。

达茂旗—满都拉地区区域地层属内蒙古草原地层区锡林浩特—磐石地层分区(张晓飞, 2018),区内地层主要为上石炭统本巴图组的砂岩、凝灰质砂

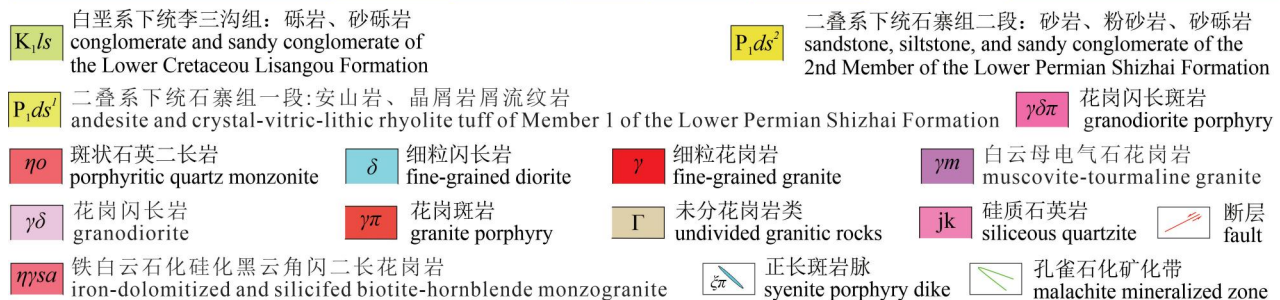
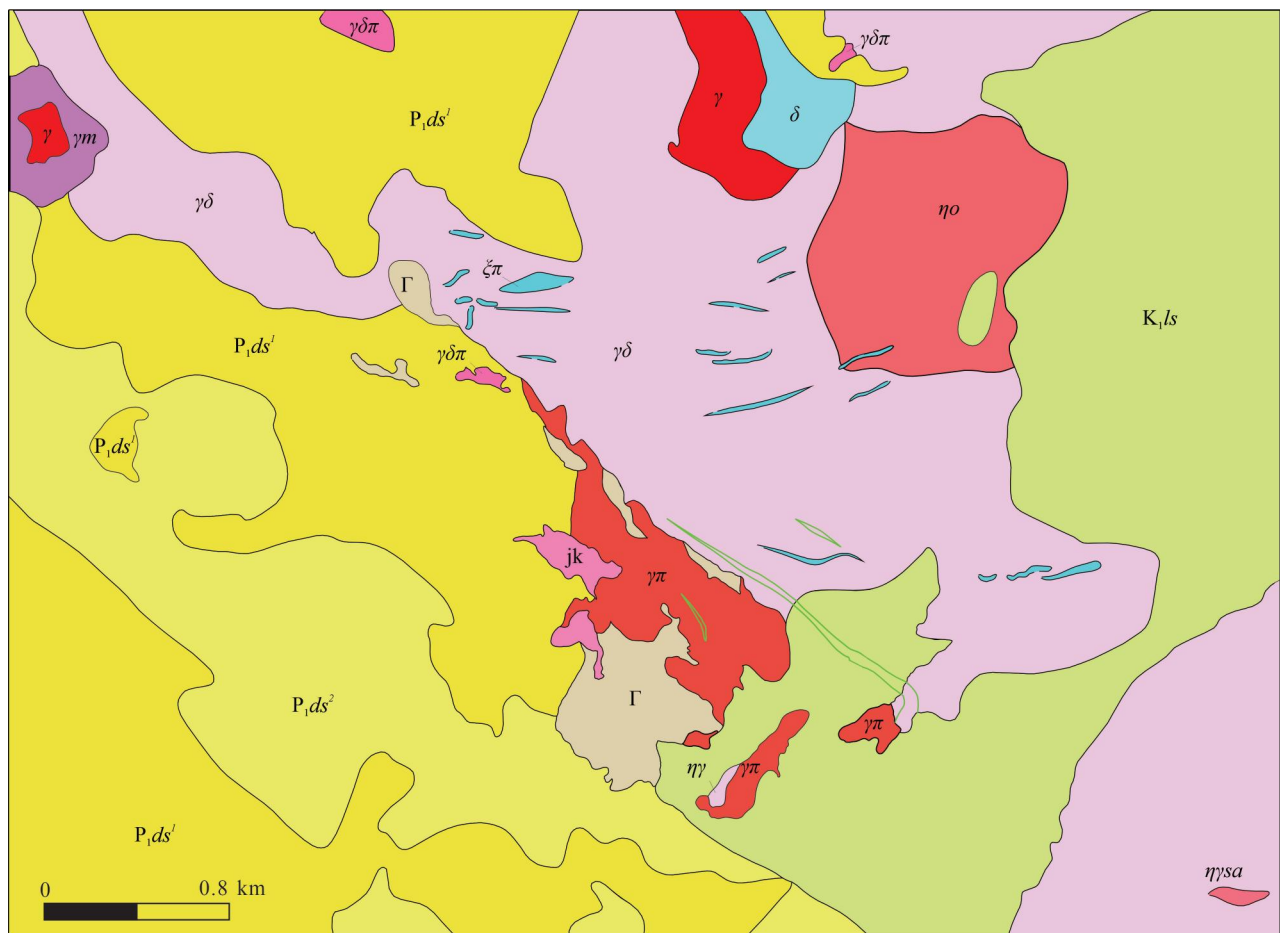


图 2 达茂旗沙尔陶勒盖矿区地质图

Fig. 2 Geological map of the Shiertoalegai mining area, Darhan Mumingan Banner

岩、火山岩及灰岩,下二叠统大石寨组的中酸性火山岩、火山碎屑岩夹灰黑色灰岩,下二叠统哲斯组的长石砂岩、粉砂岩及生物碎屑灰岩,上侏罗统的火山岩及火山碎屑岩,白垩系的砂岩、粉砂岩、砂砾岩及泥岩。

区内断裂和褶皱构造发育,以 NE 向展布为主,并发育有伴生的次生断裂,按走向可分为 NE 向、NW 向、近 EW 向 3 组。

区内岩浆岩较发育,总体呈带状分布,岩石类型主要以中酸性侵入岩为主,另有部分基性—超基性

岩脉出露。

2 矿床地质特征

矿区出露的主要地层为矿区东部白垩系下统李三沟组的砾岩,砾石成分为花岗闪长岩、凝灰岩、灰岩等。粒度大小不等,介于 1~300 mm,呈次圆状,该地层不整合于二叠系下统大石寨组一段凝灰岩、二段安山岩及凝灰岩之上,其中暗色矿物含量变化较大,并有不同程度的绿泥石化、绿帘石化、高岭土化蚀变(图 2)。

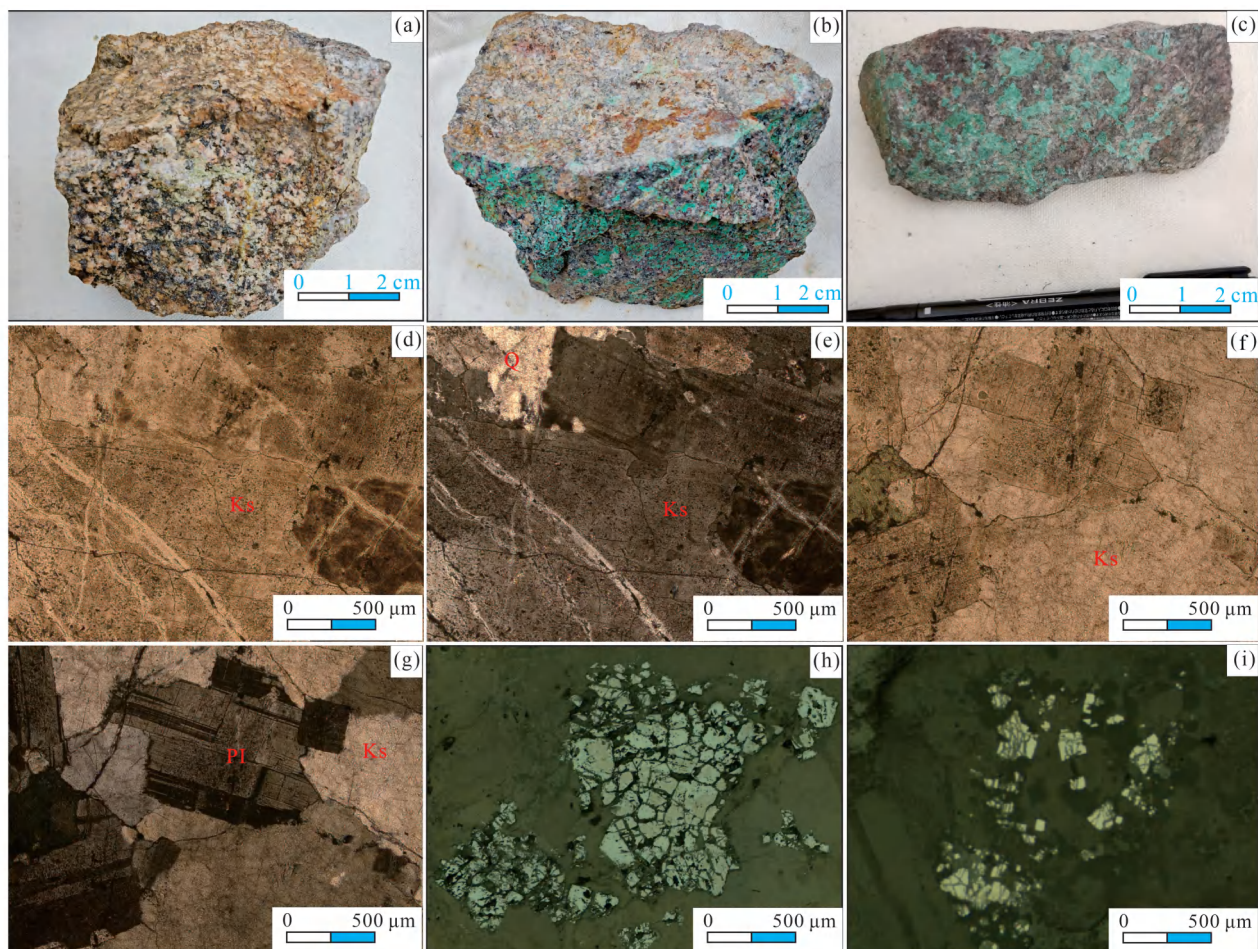


图3 内蒙古达茂旗沙尔陶勒盖矿区手标本和镜下岩石照片：(a) 早二叠世花岗闪长岩；(b)(c) 孔雀石化花岗闪长岩；(d)—(g) 花岗闪长岩镜下照片；(h) 花岗闪长岩中的磁铁矿；(i) 黄铁矿

Fig. 3 Hand specimens and photomicrographs of rocks and minerals from the Shiertoalegai mining area, Darhan Mumingan Banner: (a) Early Permian granodiorite; (b) (c) malachitized granodiorite; (d)—(g) photomicrographs of granodiorite; (h) magnetite in granodiorite; (i) pyrite

构造以节理为主,沿节理面发育有硅化、孔雀石化、绿泥石化、绿帘石化、高岭土化和碳酸盐化等。

岩浆岩主要有早二叠世沙尔陶勒盖岩体的中粒花岗闪长岩,此外发育有花岗斑岩、流纹斑岩、安山玢岩等岩株,以及闪长玢岩、流纹斑岩、花岗斑岩等脉岩。

铜矿化分布在早二叠世花岗闪长岩中,沿岩体内构造破碎带产出。现已发现4条矿化蚀变带,产状倾向NE45~70°、倾角50~70°。①号矿化带延长大于120 m,宽8~20 m,Cu平均品位0.635%,其边界未进行控制。②号矿化带延长达1400 m,宽12~60 m,水平厚度4.00 m,Cu平均品位0.395%。③号矿化带延长大于180 m,宽约20 m,槽探TC5-1揭露铜矿体1条,水平厚度大于3.60 m,Cu品位

1.360%。④号矿化延长大于190 m,带宽约20 m。

矿(化)体主要赋存于黄铁矿化、黄铜矿化花岗闪长岩、黑云角闪二长花岗岩、花岗斑岩中,金属矿物主要有黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿,少量孔雀石、褐铁矿等。脉石矿物主要有石英、角闪石、斜长石、钾长石、石英、角闪石、斜长石、钾长石、黑云母、绢云母、绿泥石及部分碳酸岩矿物(图3)。

围岩蚀变类型主要有硅化、钾化、绢云母化、青盘岩化、高岭土化、碳酸岩化、绿泥石化、绿帘石化等。其中,硅化多以白色石英脉产出,脉宽窄不一,巨大者多呈帽状覆盖在其他岩性之上。

3 实验样品及测试方法

本次研究所用样品主要采自沙尔陶勒盖矿区的

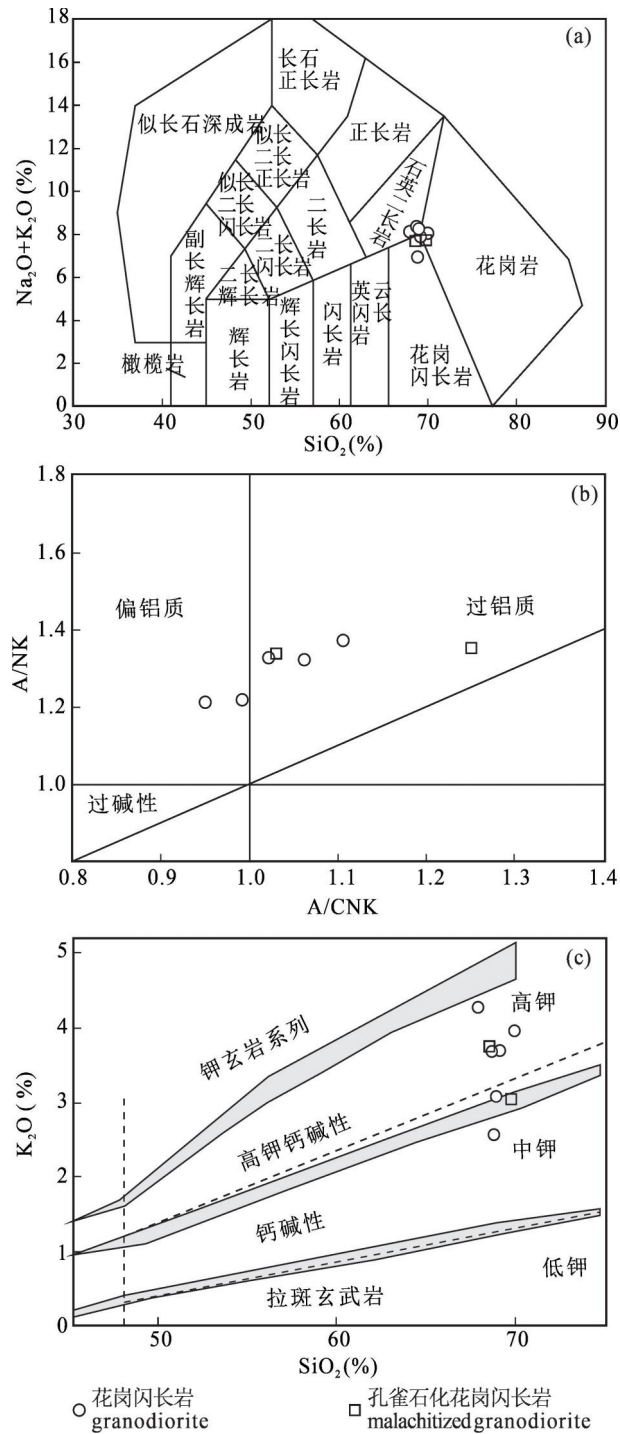


图 4 达茂旗沙尔陶勒盖矿区花岗闪长岩岩石类型和系列划分图解: (a) TAS 图解 (据 Peccerillo and Taylor, 1976); (b) A/CNK—A/NK 图解; (c) K₂O—SiO₂ 图解 (据 Middlemost, 1985)

Fig. 4 Diagrams showing rock types and series classification of granodiorite from the Shiartaolegai mining area, Darhan Mumingan Banner: (a) TAS diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976); (b) A/CNK—A/NK diagram; (c) K₂O—SiO₂ diagram (after Middlemost, 1985)

2 件孔雀石化花岗闪长岩和 6 件蚀变程度较低的花岗闪长岩,测试样品首先经河北省廊坊市拓轩岩矿检测服务有限公司粉碎后,制备全岩粉末样。并选取其中的 24SR5 和 24SR9-2 在机械粉碎后重磁分选,然后在双目镜下挑选锆石颗粒,选出颗粒大、晶形完整、透明度较好的锆石,后在重庆宇劲科技有限公司用环氧树脂制靶、打磨、抛光,并进行透射光、反射光和阴极发光 (CL) 拍摄,以备后续 U-Pb 定年和 Lu—Hf 同位素测试。

3.1 主微量元素组成

主量和微量元素测试工作在北京燕都中实测试技术有限公司完成。全岩主量元素分析采用使用硼酸锂/偏硼酸锂熔融, X 射线—荧光光谱法,测试 13 种构岩元素及烧失量 (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%,其中数据中 Fe₂O₃ 指全铁含量,FeO 单独分析,使用酸消解、重铬酸钾滴定测量;微量元素分析采用硼酸锂熔融、等离子质谱定量,其余样品微量元素分析采用四酸消解,质谱/光谱仪综合分析。

3.2 锆石 U-Pb 定年

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。分析仪器为 GeolasPro 激光剥蚀系统,包括 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。详细实验原理和具体操作流程参考文献 Liu Yongsheng 等 (2010)。试验中所采用的激光束斑和频率分别为 24 μm 和 90 Hz,通过锆石标准样 91500、NIST 610 进行同位素校正,监视测试的重现性和仪器稳定性。激光剥蚀过程中采用氦气作载气,氩气为补偿气用来调节仪器灵敏度,两种气体在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头进行混合, GeolasPro 系统配备有信号平滑装置。每个测试点包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。采用 ICP-MS DataCal 软件对分析数据进行处理 (包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U—Th—Pb 同位素比值和年龄计算) 样品的年龄谱和图和加权平均年龄均采用 Isoplot 4.15 完成。

3.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素工作在在武汉上谱分析科技有限责任公司 Neptune Plus 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 上完成,激光剥蚀光束直径为 32 μm,具体分析测试方法见 (Xu Ping et al., 2004) 和 (Wu Fuyuan et al., 2006),蓬莱锆石用作标样,

监测其测试结果。

4 分析结果

4.1 岩石地球化学特征

矿区花岗闪长岩(含孔雀石化、未矿化)主量、微量和稀土元素分析数据见表1。8件花岗闪长岩样品SiO₂含量为67.90%~70.00%,Al₂O₃含量为13.10%~15.00%,K₂O与Na₂O含量分别为2.56%~4.26%和3.84%~5.17%;在TAS图解中,样品全部落入花岗岩—花岗闪长岩过渡区区域内(图4a);在K₂O—SiO₂图解中,矿区花岗闪长岩为高钾钙碱性系列岩石(图4b)。

矿区花岗闪长岩的稀土总量为35.05×10⁻⁶~70.87×10⁻⁶,稀土总量偏低。在球粒陨石标准化配分图解中(图5a),花岗闪长岩轻重稀土分馏较明显(LREE/HREE=7.44~9.8),暗示源区可能无石榴石或角闪石矿物残留。在微量元素原始地幔标准化蜘蛛图解中(图5b),花岗闪长岩岩均相对富集K、Rb、Th及Pb等大离子亲石元素,相对亏损Ba、U、Ti及P等元素。

4.2 锆石 U-Pb 年龄

笔者等对孔雀石化花岗闪长岩24SR9-2、未矿化花岗闪长岩24SR5进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,分析结果见表2和图6。锆石无色透明,多为规则的长柱状晶形,长宽比分别为2:1~4:1、1.5:1~3.5:1,阴极发光图像(CL)显示清晰均匀的振荡环带。样品中锆石²³²Th、*n*(²³⁸U)含量分别为68.4×10⁻⁶~858.1×10⁻⁶、79.4×10⁻⁶~338.0×10⁻⁶、103.1×10⁻⁶~920.2×10⁻⁶、108.3×10⁻⁶~411.4×10⁻⁶,Th/U值为0.54~1.33、0.64~0.92,与变质成因锆石Th/U值(通常小于0.1)明显不同,属于典型的岩浆成因锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003)。样品24SR9-2共25个测点(表2),删除6个不可用点后,在*n*(²⁰⁶Pb)/*n*(²³⁸U)和*n*(²⁰⁷Pb)/*n*(²³⁵U)谐和图上(图7),19个测点均靠近U-Pb谐和线,*n*(²⁰⁶Pb)/*n*(²³⁸U)谐和年龄为293.00±0.96

表1 达茂旗沙尔陶勒盖矿区花岗闪长岩主量(%)、微量元素(×10⁻⁶)组成

Table 1 Major and trace element compositions of granodiorite from the Shiertaolegai mining area, Darhan Mumingan Banner

样号	24SR5	24SR5-1	24SR5-2	24SR6	24SR6-1	24SR7	24SR5-1	24SR9-2
岩石定名	花岗闪长岩						孔雀石化花岗闪长岩	
SiO ₂	68.90	68.80	68.70	69.10	67.90	70.00	68.50	69.80
TiO ₂	0.38	0.30	0.39	0.37	0.39	0.29	0.38	0.38
Al ₂ O ₃	14.40	13.10	14.10	14.40	15.00	14.60	14.10	14.80
Fe ₂ O ₃	1.34	1.43	1.19	1.79	2.01	1.43	0.91	1.85
FeO	1.51	0.94	1.56	1.03	1.03	0.80	1.51	1.13
MnO	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.04	0.04	0.09
MgO	1.53	1.00	1.47	1.60	1.75	0.96	1.84	1.68
CaO	1.48	4.27	1.76	1.46	1.45	1.80	1.72	0.49
Na ₂ O	5.17	4.37	4.67	4.19	3.84	4.08	3.93	4.68
K ₂ O	3.07	2.56	3.67	3.69	4.26	3.95	3.74	3.03
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.09	0.11	0.12
烧失	1.72	2.89	1.99	1.91	1.87	1.82	2.90	1.70
总和	99.70	99.80	99.70	99.80	99.70	99.80	99.70	99.80
A/NK	1.22	1.31	1.21	1.32	1.37	1.33	1.34	1.35
A/CNK	0.99	0.74	0.95	1.06	1.11	1.02	1.03	1.25
La	12.50	9.79	14.10	11.70	13.40	9.64	6.89	12.90
Ce	26.80	19.90	28.90	24.30	27.30	19.20	13.90	28.50
Pr	3.08	2.76	3.55	2.99	3.14	2.44	1.80	3.29
Nd	12.90	10.50	14.80	11.50	13.10	8.92	6.87	14.00
Sm	2.26	1.73	2.34	1.95	2.24	1.46	1.19	2.25
Eu	0.56	0.42	0.55	0.49	0.56	0.44	0.30	0.53
Gd	1.87	1.51	2.03	1.70	1.98	1.31	1.03	1.88
Tb	0.31	0.24	0.32	0.30	0.33	0.22	0.19	0.30
Dy	1.70	1.27	1.68	1.63	1.85	1.17	1.03	1.53
Ho	0.34	0.24	0.33	0.34	0.37	0.23	0.21	0.31
Er	0.96	0.70	0.92	0.94	1.08	0.67	0.62	0.90
Tm	0.17	0.12	0.16	0.17	0.18	0.12	0.11	0.15
Yb	1.13	0.81	1.05	1.16	1.30	0.81	0.78	0.98
Lu	0.19	0.15	0.18	0.19	0.21	0.15	0.15	0.17
ΣREE	64.80	50.10	70.90	59.40	67.00	46.80	35.10	67.70
LREE	57.60	44.70	63.70	52.40	59.20	41.70	30.60	61.00
HREE	6.67	5.05	6.66	6.42	7.30	4.68	4.12	6.22
$\frac{LREE}{HREE}$	8.63	8.85	9.55	8.17	8.10	8.90	7.44	9.80
δEu	0.27	0.26	0.25	0.27	0.26	0.32	0.28	0.26
Rb	77.50	55.20	85.90	106.00	140.00	114.00	145.00	126.00
Ba	678.00	450.00	716.00	645.00	745.00	532.00	475.00	613.00
Th	5.71	5.25	6.22	6.23	6.66	6.27	4.54	5.28
U	3.78	1.79	2.56	2.38	3.00	1.03	1.10	1.66
Nb	3.72	3.05	3.87	3.68	4.04	3.12	3.28	3.79
Ta	0.29	0.26	0.31	0.27	0.31	0.24	0.25	0.25
Pb	29.80	17.80	20.10	16.30	19.00	13.40	3.38	33.00
Sr	260.00	583.00	243.00	362.00	509.00	349.00	179.00	208.00
Zr	160.00	125.00	126.00	165.00	150.00	99.70	134.00	128.00
Hf	4.17	3.27	3.38	4.25	3.99	2.56	3.74	3.36
Y	9.25	6.88	8.98	9.79	11.40	7.22	6.68	9.23

Ma,加权平均年龄为293.0±1.9 Ma(MSWD=0.105)。样品24SR9-2共25个测点(表2),删除4个

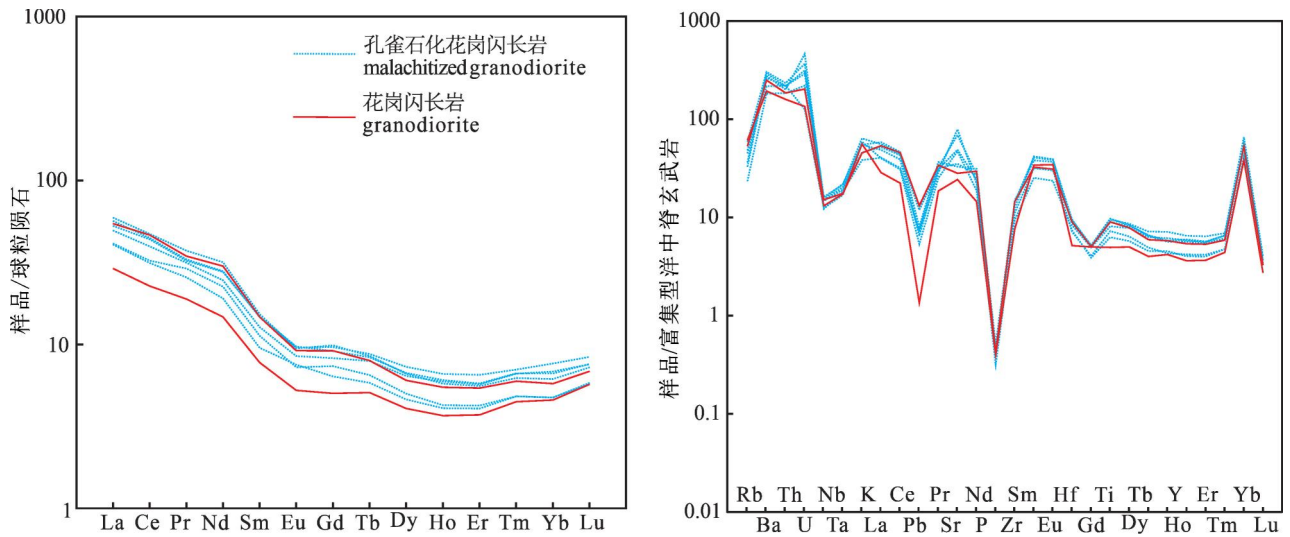


图 5 达茂旗沙尔陶勒盖矿区花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图 (a) 和微量元素原始地幔标准化配分曲线图 (b)。标准化数据引自 (Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of granodiorite from the Shiartaolegai mining area, Darhan Mumingan Banner. Normalization values from Sun and McDonough (1989)

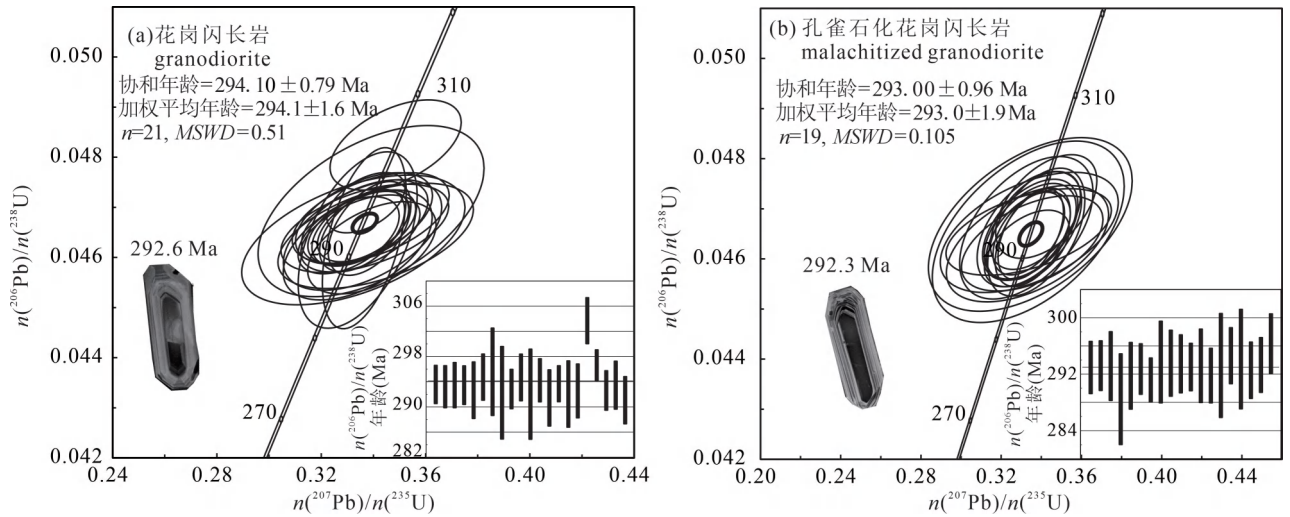


图 6 达茂旗沙尔陶勒盖矿区孔雀石化和未矿化花岗闪长岩锆石年龄谐和图

Fig. 6 Concordia diagrams of zircon ages for malachitized and unmineralized granodiorite from the Shiartaolegai mining area, Darhan Mumingan Banner

不可用点后, 在 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 和 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 谐和图上 (图 6), 21 个测点均靠近 U-Pb 谐和线, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 谐和年龄为 $294.10 \pm 0.79 \text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $294.1 \pm 1.6 \text{ Ma}$ ($MSWD = 0.105$)。

4.3 锆石 Lu—Hf 年龄

笔者等测试 2 件样品的锆石 Lu—Hf 同位素数据分析结果见表 3。Hf 同位素总体成分均一。样品 24SR9-2 锆石中 19 个测点 (表 3) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 $0.282813 \sim 0.2828944$, 平均值为

0.282861 ; $n(^{177}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值处在 $0.000574 \sim 0.001521$, 平均值为 0.001113 ; ($n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$)_i 值处在 $0.282803 \sim 0.282891$ 之间, 平均值为 0.282855 ; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 $7.55 \sim 10.64$, 平均值为 9.38 ; 一阶段模式年龄 $T_{\text{DM1}} = 501 \sim 632 \text{ Ma}$, 平均值为 556 Ma ; 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 631 \sim 831 \text{ Ma}$, 平均值为 713 Ma ; $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值介于 $-0.95 \sim -0.98$, 平均为 -0.97 。样品 24SR5 锆石中 15 个测点 (表 3) 的 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 $0.282731 \sim$

表 2 达茂旗沙尔陶勒盖铜矿床花岗岩长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年数据
Table 2. LA-ICP-MS zircon U - Pb dating data of granodiorite from the Shiertalegai copper deposit, Darhan Mumingan Banner

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Th	U	Pb		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$				
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
24SR5-1-01	157.5	230.0	13.4	0.68	0.3555	0.01367	0.04660	0.00049	301.9	94.4	293.8	10.4	293.6	3.0	99		
24SR5-1-02	241.0	326.0	19.2	0.74	0.3567	0.01078	0.04654	0.00054	305.6	74.1	293.9	8.2	293.2	3.3	99		
24SR5-1-03	79.4	108.2	6.3	0.73	0.3672	0.02125	0.04658	0.00058	322.3	146.3	294.7	16.1	293.5	3.6	99		
24SR5-1-04	141.0	208.0	12.1	0.68	0.3497	0.01226	0.04658	0.00050	287.1	78.7	293.3	9.3	293.5	3.1	99		
24SR5-1-05	106.5	157.6	9.2	0.68	0.3583	0.02004	0.04645	0.00073	316.7	142.6	294.0	15.2	292.7	4.5	99		
24SR5-1-06	110.6	159.7	9.4	0.69	0.3897	0.01986	0.04679	0.00060	298.2	125.9	296.4	15.1	294.8	3.7	99		
24SR5-1-07	138.2	196.8	11.7	0.70	0.3910	0.02860	0.04693	0.00113	324.1	215.7	296.5	21.7	295.6	6.9	99		
24SR5-1-08	338.0	411.4	24.9	0.82	0.3650	0.01062	0.04638	0.00119	298.2	98.1	294.5	8.1	292.3	7.3	99		
24SR5-1-09	178.8	227.2	13.6	0.79	0.3500	0.01508	0.04648	0.00051	301.9	136.1	293.4	11.5	292.9	3.1	99		
24SR5-1-10	194.1	213.7	13.2	0.91	0.3637	0.01734	0.04678	0.00060	298.2	124.1	294.4	13.2	294.7	3.7	99		
24SR5-1-11	106.9	125.7	7.4	0.85	0.3397	0.01507	0.04635	0.00116	372.3	116.7	292.6	11.5	292.1	7.2	99		
24SR5-1-12	118.2	182.2	10.7	0.65	0.3670	0.01600	0.04671	0.00056	322.3	116.7	294.7	12.2	294.3	3.4	99		
24SR5-1-13	152.2	208.6	12.2	0.73	0.3395	0.01885	0.04625	0.00072	316.7	142.6	292.6	14.4	291.5	4.5	99		
24SR5-1-15	175.9	229.6	14.0	0.77	0.3619	0.01164	0.04662	0.00046	272.3	98.1	294.3	8.8	293.7	2.9	99		
24SR5-1-16	143.1	224.4	13.2	0.64	0.3232	0.02826	0.04635	0.00085	253.8	201.8	291.3	21.5	292.1	5.3	99		
24SR5-1-17	164.8	226.1	13.7	0.73	0.34088	0.02476	0.04643	0.00069	301.9	168.5	297.8	18.7	292.6	4.3	98		
24SR5-1-18	119.1	179.4	11.1	0.66	0.34853	0.01659	0.04824	0.00059	333.4	127.8	303.6	12.5	303.7	3.7	99		
24SR5-1-20	278.9	350.5	21.5	0.80	0.33714	0.00989	0.04709	0.00040	253.8	88.0	295.0	7.5	296.7	2.5	99		
24SR5-1-21	183.9	237.0	14.7	0.92	0.33049	0.01282	0.04644	0.00051	242.7	100.9	289.9	9.8	292.7	3.1	99		
24SR5-1-22	183.3	233.8	14.6	0.78	0.33852	0.01050	0.04658	0.00062	231.6	62.0	296.0	8.0	293.5	3.8	99		
24SR5-1-25	220.6	264.3	15.8	0.83	0.33944	0.01626	0.04619	0.00061	344.5	104.6	296.7	12.3	291.1	3.7	98		
24SR9-2-01	184.5	239.6	14.6	0.77	0.35473	0.01077	0.04650	0.00060	301.9	86.1	293.2	8.2	293.0	3.7	99		
24SR9-2-02	68.4	110.3	6.4	0.62	0.33374	0.02723	0.04654	0.00057	387.1	264.8	292.4	20.7	293.2	3.5	99		
24SR9-2-03	92.0	141.3	8.5	0.65	0.33403	0.02930	0.04653	0.00079	253.8	183.3	292.6	22.3	293.2	4.9	99		
24SR9-2-07	68.7	126.5	7.3	0.54	0.32674	0.04051	0.04577	0.00104	235.3	244.4	287.1	31.0	288.5	6.4	99		
24SR9-2-08	77.3	103.1	6.3	0.75	0.33311	0.02668	0.04631	0.00077	298.2	189.8	291.9	20.3	291.8	4.7	99		
24SR9-2-09	99.7	140.5	8.4	0.71	0.33355	0.01382	0.04646	0.00058	276.0	89.8	292.3	10.5	292.8	3.6	99		
24SR9-2-10	101.6	162.8	9.5	0.62	0.33279	0.01398	0.04621	0.00050	301.9	91.7	291.7	10.7	291.2	3.1	99		
24SR9-2-12	87.2	141.3	8.4	0.62	0.33255	0.02194	0.04662	0.00094	276.0	158.3	291.5	16.7	293.7	5.8	99		
24SR9-2-13	449.0	712.3	82.0	0.63	0.33404	0.01717	0.04659	0.00076	283.4	112.9	292.6	13.1	293.6	4.7	99		
24SR9-2-14	598.7	733.3	105.3	0.82	0.33448	0.01572	0.04658	0.00067	300.1	111.1	293.0	12.0	293.5	4.1	99		
24SR9-2-15	564.5	768.1	101.7	0.73	0.33377	0.01176	0.04651	0.00055	298.2	88.0	292.4	9.0	293.0	3.4	99		

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值				同位素年龄 (Ma)				谐和度 (%)		
	Th	U	Pb		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ		测值	1 σ
24SR9-2-16	461.8	584.3	83.9	0.79	0.33749	0.01600	0.04654	0.00084	327.8	114.8	295.3	12.1	293.2	5.2	99
24SR9-2-17	349.0	518.2	66.0	0.67	0.33547	0.02329	0.04631	0.00063	322.3	161.1	293.7	17.7	291.8	3.9	99
24SR9-2-19	262.0	393.0	51.7	0.67	0.33550	0.03158	0.04654	0.00119	298.2	227.8	292.2	24.0	293.3	7.4	99
24SR9-2-21	580.3	709.3	107.0	0.82	0.33704	0.01483	0.04677	0.00064	294.5	103.7	294.9	11.3	294.6	4.0	99
24SR9-2-22	192.7	325.2	41.0	0.59	0.33452	0.03355	0.04669	0.00114	264.9	212.9	293.0	25.5	294.2	7.0	99
24SR9-2-23	515.2	599.1	95.7	0.86	0.33575	0.01237	0.04643	0.00065	361.2	107.4	293.9	9.4	292.6	4.0	99
24SR9-2-24	794.2	599.4	134.1	1.33	0.33447	0.01514	0.04655	0.00063	294.5	107.4	293.0	11.5	293.3	3.9	99
24SR9-2-25	858.1	920.2	149.0	0.93	0.34247	0.01666	0.04705	0.00068	320.4	120.4	299.0	12.6	296.4	4.2	99

0.282913, 平均值为 0.282847; $n(^{177}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 处在 0.000818 ~ 0.002535, 平均值为 0.001451; $(n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf}))_i$ 值处在 0.282715 ~ 0.282910 之间, 平均值为 0.282841; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 4.49 ~ 11.30, 平均值为 8.92; 一阶段模式年龄 $T_{\text{DM1}} = 478 \sim 772 \text{ Ma}$, 平均值为 579 Ma; 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 589 \sim 1028 \text{ Ma}$, 平均值为 744 Ma; $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值介于 -0.92 ~ -0.98, 平均为 -0.96。

5 讨论

5.1 成岩成矿年龄

晚古生代是古亚洲洋俯冲—消减的关键时期, 兴蒙造山带内广泛发育的晚古生代岩浆作用也一直是研究和争论的热点之一, 其岩石组合、成因类型及时空分布等特征可为揭示古亚洲洋俯冲消减过程及兴蒙造山带晚古生代构造演化提供有力的线索 (Jian Ping et al., 2008, Xiao Wenjiao et al., 2003)。兴蒙造山带中西部广泛发育二叠纪侵入岩, 华北板块北缘和二连浩特—东乌珠穆沁旗一线的出露面积相对较大, 中部地区则零星表露, 整体上岩体锆石年龄的峰值主要集中在 265 ~ 285 Ma 其中, 早二叠世时期的侵入岩多以钙碱性、准铝质至弱过铝质为特征 (张晓飞, 2018), 如固阳东部的阿贵沟石英闪长岩 (284 Ma; 赵庆英, 2010)、固阳北部的英云闪长岩 (277 Ma; 张维和简平, 2012)。

笔者等对未矿化花岗闪长岩 24SR5 进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 锆石无色透明, 多为规则的长柱状晶形, 长宽比为 2:1 ~ 4:1, 阴极发光图像 (CL) 显示清晰均匀的振荡环带。样品中锆石 ^{232}Th 、 ^{238}U 含量分别为 $79.4 \times 10^{-6} \sim 338.0 \times 10^{-6}$, $108.3 \times 10^{-6} \sim 411.4 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.64 ~ 0.92, 与变质成因锆石 Th/U 值 (通常小于 0.1) 明显不同, 属于典型的岩浆成因锆石 (Hoskin and Schaltegger, 2003)。样品 24SR9-2 共 25 个测点 (表 2), 删除 6 个不可用点后, 在 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 和 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 谐和图上 (图 7), 19 个测点均靠近 U-Pb 谐和线, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 谐和年龄为 $293.00 \pm 0.96 \text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $293.0 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ($MSWD = 0.105$)。样品 24SR9-2 共 25 个测点 (表 2), 删除 4 个不可用点后, 在 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 和 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 谐和图上 (图 6), 21 个测点均靠近 U-Pb 谐和线, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 谐和年龄为 $294.1 \pm 0.79 \text{ Ma}$, 加权平均年龄为 $294.1 \pm 1.6 \text{ Ma}$ ($MSWD = 0.105$)。综上可见矿化和未矿化的花岗闪长岩年龄相同, 可以代表沙尔陶勒盖岩体的成岩年龄, 也说明其成矿发生在 293 Ma 左右, 矿化类型应为斑岩型。

5.2 岩石成因及源区性质

许多学者对兴蒙造山带与古亚洲演化相关的早二叠世岩浆岩进行过研究, 并对其成因提出了不同的假设。高征西等 (2019) 通过对温都尔庙地区嘎顺地区的早二叠世花岗岩进行了研究, 认为该套岩石形成于岛弧岩浆作用。而在沙尔陶勒盖地区花岗闪长岩中 Al_2O_3 和 Sr 含量分别为 13.05% ~ 15.01% 和 $179 \times 10^{-6} \sim 583 \times 10^{-6}$; 其 Y 和 Yb 含量较低, 含量分别为 $6.68 \times 10^{-6} \sim 11.40 \times 10^{-6}$ 和 $0.78 \times 10^{-6} \sim 1.30 \times 10^{-6}$, 这些岩石含量的特征和其他埃达克岩地球化学特征类型 (Defant

表3 达茂旗沙尔陶勒盖铜矿床花岗岩闪长岩锆石 Lu-Hf 同位素组成
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of granodiorite from the Shiertoalegai copper deposit, Darhan Mumingan Banner

点号	年龄 (Ma)	$\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\frac{n(^{176}\text{Yb})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_i$	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
		测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ					
24SR9-2-01	293	0.28286	0.00002	0.00097	0.00002	0.03474	0.00081	9.4	0.282855	555	714	-0.97
24SR9-2-02	293	0.28286	0.00002	0.00094	0.00001	0.03320	0.00030	9.2	0.28285	561	724	-0.97
24SR9-2-03	293	0.28289	0.00002	0.00106	0.00001	0.03600	0.00026	10.3	0.282881	519	655	-0.97
24SR9-2-07	289	0.28287	0.00002	0.00071	0.00001	0.02372	0.00027	9.5	0.282861	545	703	-0.98
24SR9-2-08	292	0.28290	0.00001	0.00057	0.00001	0.02033	0.00044	10.6	0.282891	501	631	-0.98
24SR9-2-09	293	0.28285	0.00002	0.00114	0.00001	0.04003	0.00046	9.0	0.282844	571	738	-0.97
24SR9-2-10	291	0.28289	0.00001	0.00127	0.00001	0.04395	0.00042	10.4	0.282885	514	647	-0.96
24SR9-2-12	294	0.28286	0.00001	0.00076	0.00000	0.02597	0.00017	9.3	0.282852	557	719	-0.98
24SR9-2-13	294	0.28282	0.00003	0.00087	0.00001	0.02948	0.00025	7.9	0.282812	614	810	-0.97
24SR9-2-14	294	0.28285	0.00001	0.00101	0.00002	0.03505	0.00072	9.0	0.282845	569	736	-0.97
24SR9-2-15	293	0.28288	0.00002	0.00152	0.00003	0.05332	0.00114	10.0	0.282872	534	674	-0.95
24SR9-2-16	293	0.28289	0.00001	0.00143	0.00004	0.05623	0.00173	10.2	0.282879	523	659	-0.96
24SR9-2-17	292	0.28289	0.00002	0.00126	0.00002	0.04558	0.00063	10.1	0.282877	526	665	-0.96
24SR9-2-19	293	0.28282	0.00005	0.00125	0.00008	0.04597	0.00298	7.7	0.282808	624	821	-0.96
24SR9-2-21	295	0.28287	0.00002	0.00123	0.00002	0.04129	0.00045	9.8	0.282865	542	690	-0.96
24SR9-2-22	294	0.28287	0.00003	0.00106	0.00003	0.03664	0.00104	9.6	0.28286	548	701	-0.97
24SR9-2-23	293	0.28281	0.00002	0.00144	0.00003	0.05160	0.00110	7.5	0.282803	632	831	-0.96
24SR9-2-24	293	0.28288	0.00001	0.00115	0.00001	0.04112	0.00058	10.1	0.282876	526	665	-0.97
24SR9-2-25	296	0.28284	0.00003	0.00149	0.00005	0.05114	0.00111	8.5	0.282827	598	774	-0.96
24SR5-1-01	294	0.28287	0.00001	0.00082	0.00001	0.02938	0.00053	9.8	0.282867	536	685	-0.98
24SR5-1-04	294	0.28287	0.00002	0.00107	0.00001	0.03853	0.00027	10.3	0.282882	520	652	-0.95
24SR5-1-05	293	0.28287	0.00002	0.00086	0.00001	0.03058	0.00034	9.7	0.282862	545	696	-0.97
24SR5-1-07	296	0.28273	0.00106	0.00254	0.00017	0.11847	0.01054	9.6	0.282862	544	697	-0.97
24SR5-1-08	292	0.28282	0.00003	0.00213	0.00003	0.06701	0.00073	4.5	0.282715	772	1028	-0.92
24SR5-1-10	295	0.28285	0.00002	0.00142	0.00002	0.05333	0.00085	7.6	0.282806	634	825	-0.94
24SR5-1-12	294	0.28281	0.00004	0.00205	0.00004	0.06354	0.00108	8.9	0.282841	578	744	-0.96
24SR5-1-13	292	0.28292	0.00003	0.00117	0.00001	0.04707	0.00050	7.2	0.282793	652	852	-0.94
24SR5-1-15	294	0.28286	0.00002	0.00143	0.00006	0.05309	0.00196	11.3	0.28291	478	589	-0.96
24SR5-1-17	293	0.28285	0.00003	0.00116	0.00003	0.04104	0.00080	9.3	0.282851	563	722	-0.96
24SR5-1-18	304	0.28284	0.00002	0.00111	0.00001	0.04000	0.00051	8.9	0.282841	576	745	-0.97
24SR5-1-20	297	0.28287	0.00002	0.00111	0.00001	0.04267	0.00059	8.6	0.282827	595	770	-0.97
24SR5-1-22	294	0.28284	0.00003	0.00194	0.00014	0.06992	0.00462	9.6	0.282859	550	703	-0.97
24SR5-1-25	291	0.28281	0.00002	0.00144	0.00005	0.05137	0.00138	8.5	0.282831	597	768	-0.94

注:计算公式如下:

$$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s \cdot (e^{\lambda t} - 1)}{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} \cdot (e^{\lambda t} - 1)} - 1 \right\}; \quad T_{\text{DM1}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}} \right\}$$

$$T_{\text{DM2CC}} = T_{\text{DM1}} - (T_{\text{DM1}} - t) \cdot \frac{f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}}{f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}}; \quad f_{\text{Lu/Hf}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1. \quad \text{其中: } \lambda (^{176}\text{Lu}) = 1.865 \times 10^{-11} / \text{a (Schere et al., 2001)};$$

$$\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s \text{ 和 } \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s \text{ 为样品测量值; } \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} = 0.0332, \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} = 0.282772 \text{ (Blichert-Toft et al., 1997)};$$

$$\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}} = 0.0384, \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}} = 0.28325 \text{ (Griffin et al., 2000)}; \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}} = 0.015; f_{\text{CC}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1;$$

$$f_S = f_{Lu/Hf}; f_{DM} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{CHUR}} - 1; t \text{ 为锆石结晶年龄。}$$

and Drummond, 1990, Martin, 1999)。但与标准的埃达克质岩石相比,沙尔陶勒盖的花岗闪长岩 Sr 含量总体较低,只有个别样品超过 400×10^{-6} , 其应为低 Sr 低 Y 的花岗岩(张旗, 2008, 张旗等, 2024)。

而对兴蒙造山带中的其他早二叠世花岗岩的研究,对其成因则有不同的观点。其中大东沟岩体的碱长花岗岩为 A 型花岗岩,其($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t 的变化范围为 0.70591~0.70874, 具有负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-10.83~-7.86), 二阶段模式年龄 T_{DM}^c 为 1.9~1.7Ga, 具有与华北克拉通北缘下地壳一致的 Sr—Nd 同位素组成, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -19.4~-10.2, 二阶段模式年龄 T_{DM}^c 为 2.5~2.0 Ga, 应为物理和化学性质相似的壳源岩浆混合产物(李龙雪, 2021)。高征西等(2019)等对嘎顺地区花岗闪长岩进行研究,发现其锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 2.7~7.0, 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 介于 861~1129 Ma, 属于洋壳俯冲引起的岛弧岩浆作用的产物。

在岛弧环境下,花岗岩浆通常表现出高硅、富铝及高钾的主量元素组合(AbdelAal et al., 2024)。其微量元素特征尤为典型,普遍显示富集大离子亲石元素(LILE, 如 Rb、Ba、K)及明显亏损高场强元素(HFSE, 如 Nb、Ta、Ti), 形成明显的 Nb—Ta 负异常

(Pearce et al., 1984)。稀土元素配分曲线通常右倾,轻稀土富集(高 La/Yb 值),伴随 Eu 异常,反映斜长石分离结晶或源区残留斜长石的影响(Shinjo et al., 2000)。然而沙尔陶勒盖矿区花岗闪长岩(含孔雀石化、未矿化)显示 SiO₂ 含量为 67.90%~70.00%, Al₂O₃ 含量为 13.10%~15.00%, K₂O 与 Na₂O 含量分别为 2.56%~4.26%和 3.84%~5.17%。相对富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,显示岛弧岩浆作用产物的特征。此外其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 +4.5~+11.3、+7.5~+10.6, 其 Hf 同位素的二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 分别为 1028~589 Ma, 831~631 Ma(表 3, 图 7), 与嘎顺地区花岗闪长岩类似。这些数据都说明这些侵入岩的原始岩浆为岛弧岩浆作用的产物。

5.3 成矿地球动力学背景

前人研究认为中亚造山带的演化以古亚洲洋的打开为标志,约起始于新元古(~1.0 Ga)(Khain et al., 2003), 在古生代,伴随着古亚洲洋持续不断的南北双向俯冲,一系列的微陆块(具有前寒武纪基底),以及岛弧,部分洋壳及大陆边缘增生杂岩体不断碰撞、拼贴在其南、北两侧的克拉通之上,其南侧的克拉通自西向东包括塔里木克拉通、华北克拉通,北侧的克拉通自西向东包括东欧克拉通和西伯利亚

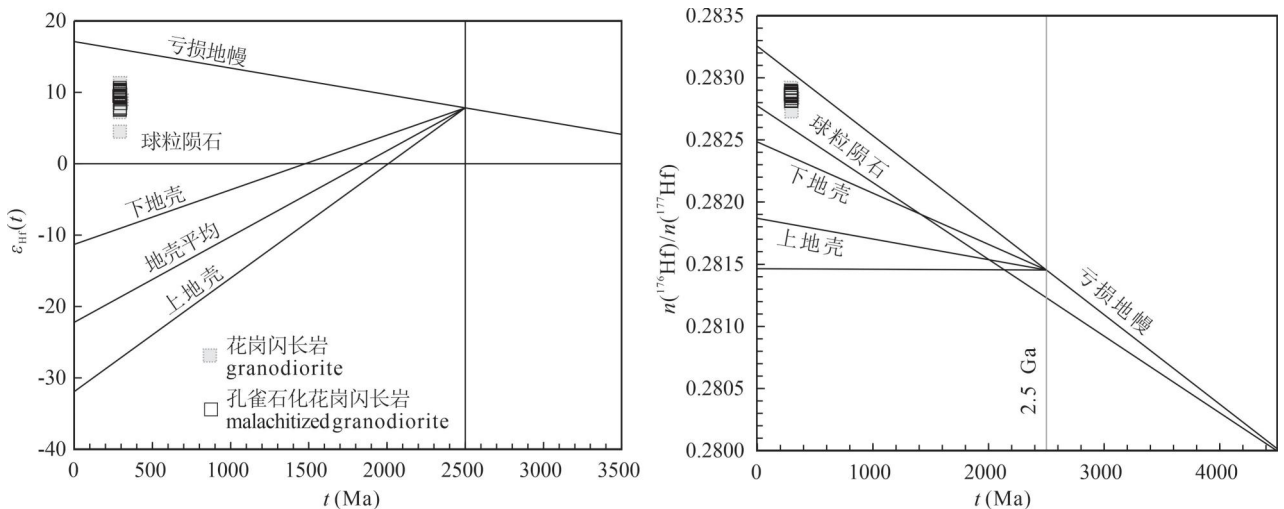


图 7 达茂旗沙尔陶勒盖矿区花岗闪长岩 U-Pb 年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解,底图据(Belousova et al., 2010)

Fig. 7 U-Pb ages and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ plots of granodiorite from the Shiertaolegai

mining area, Darhan Mumingan Banner(base diagram modified from Belousova et al., 2010)

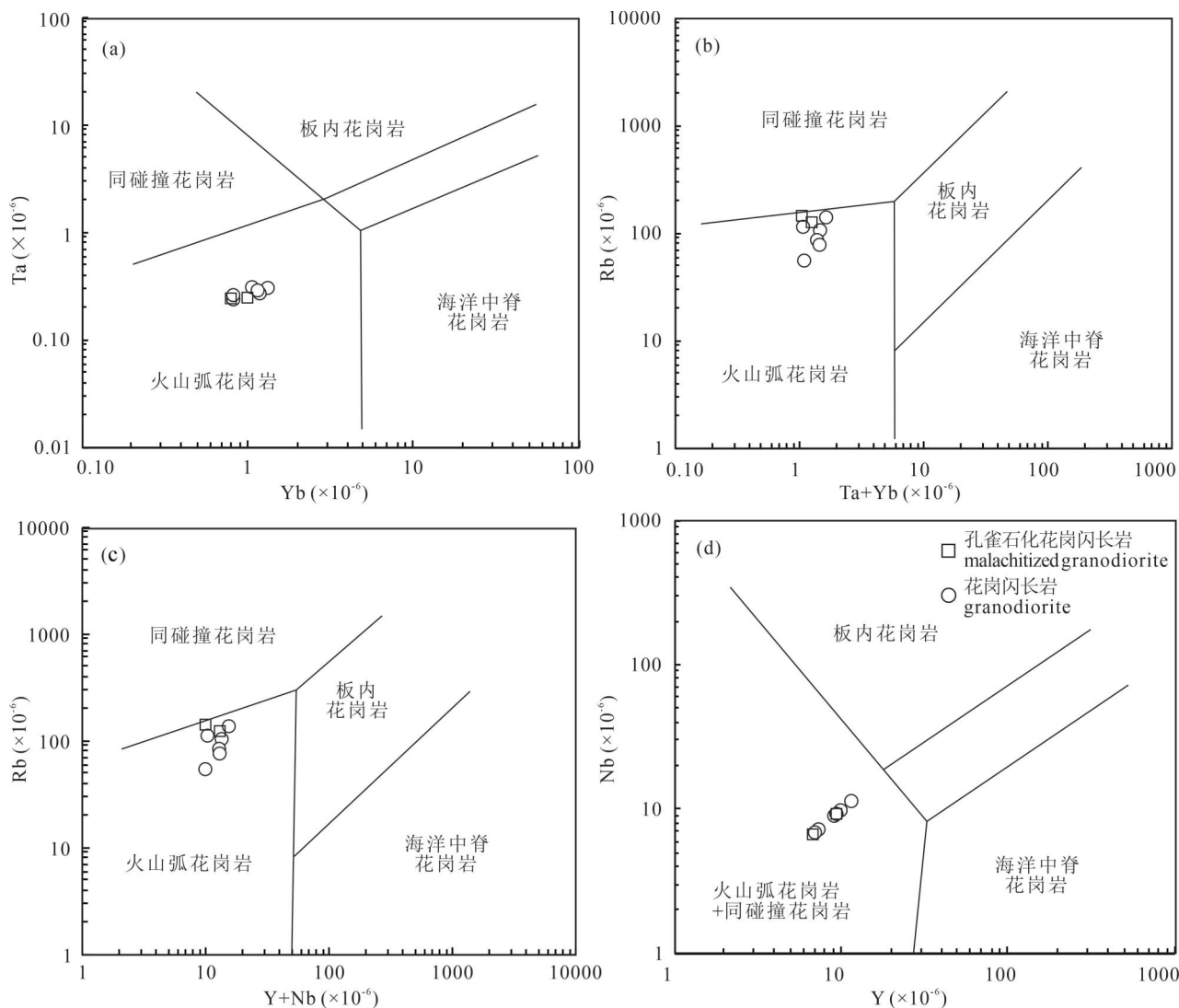


图 8 达茂旗沙尔陶勒盖花岗闪长岩构造环境判别图解: (a) Rb—(Y + Nb)图 (Pearce et al., 1984); (b) Rb—(Ta+Yb)图 (Pearce et al., 1984); (c) Nb—Y 图 (Pearce et al., 1984); (d) Ta—Yb 图 (Pearce et al., 1984)

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams for granodiorite from the Shiartaolegai area, Darhan Mumingan Banner: (a) Rb vs. (Y + Nb) diagram (Pearce et al., 1984); (b) Rb vs. (Ta + Yb) diagram (Pearce et al., 1984); (c) Nb vs. Y diagram (Pearce et al., 1984); (d) Ta vs. Yb diagram (Pearce et al., 1984)

克拉通 (Xiao Wenjiao et al., 2003, 2014, 2018)。

前人对古亚洲洋东段内蒙古中部南蒙古拼合体系中晚石炭世到早二叠世的沉积岩和火山岩 (Zhao Pan et al., 2017) 和早二叠世后碰撞 A 型花岗岩的研究 (Zhang Shuanhong et al., 2016) 表明, 古亚洲洋东段的北向俯冲应该在早二叠世之前 (约 300 Ma) 就已经结束。相比较而言, 前人对古亚洲洋东段华北拼合体系中石炭世到早二叠世弧 (约 340~275 Ma) 相关岩浆岩的研究 (Chen et al., 2017; Zhang Shuanhong et al., 2016) 认为, 古亚洲洋东段的南向俯冲应该至少持续到了早二叠世 (270 Ma)。

在花岗岩构造环境判别图 8d 中, 沙尔陶勒盖矿区的花岗闪长岩成矿岩石样品均落在火山弧花岗岩和碰撞后花岗岩区域。同样在图 8a—c 中, 所有花岗闪长岩均落在火山弧花岗岩。因此, 综合构造背景和岩石类型特点, 作者认为满都拉地区的 ~293 Ma 早二叠世的花岗岩为古亚洲洋向南俯冲背景下形成的具有弧岩浆性质的花岗岩类。

6 结论

(1) 沙尔陶勒盖矿区孔雀石化花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 293.0 ± 0.96 Ma, 未矿化花岗闪长岩

的谐和年龄为 294.1 ± 0.79 Ma, 说明矿区的成岩成矿作用发生在早二叠世。

(2) 花岗闪长岩中表现出高硅、富铝及高钾的主量元素组合, 相对富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 说明花岗闪长岩具有弧岩浆岩的性质。

(3) 满都拉地区早二叠世的花岗岩形成于古亚洲洋向南俯冲背景下。

致谢: 在野外工作期间, 得到了成都理工大学樊文鑫博士和中国地质大学(北京)王智宇的热心帮助; 审稿专家提出的修改意见, 使本文在结构与内容上更加完善; 章雨旭研究员对文稿进行了审阅, 并提出了许多富有建设性的修改建议。在此一并表示诚挚的感谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

高征西, 王继春, 周路路, 赵鑫, 秦江东, 王沛东, 吴艳君, 汪岩, 宝音乌力吉. 2019. 内蒙古温都尔庙地区早二叠世岛弧型花岗闪长岩的发现: 对古亚洲洋闭合的时限约束. 地球科学, 44(10): 3178~3192.

华北, 高雪, 胡兆国, 梅贞华, 张之武, 孟银生, 张保涛, 赵磊. 2020. 兴蒙造山带西段乌珠新乌苏花岗岩岩石成因和构造背景: 地球化学、U-Pb 年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束. 岩石学报, 36(5): 1426~1444.

李龙雪. 2021. 华北克拉通北缘中段二叠纪花岗岩类成因与构造环境. 导师: 莫宣学. 中国地质大学(北京) 博士学位论文: 1~159.

苗来成, 罗晔, Sanchir D, 刘建明, 邹滔, 路增龙, 秦克章, Munkhtsengel B. 2023. 蒙古国铜矿床主要类型、典型矿床、时空分布与构造背景. 岩石学报, 39(11): 3229~3262.

孙峰, 张保涛, 李建委, 刘云, 姬晴川. 2023. 内蒙古达茂旗沙尔陶勒盖地区地质矿产特征及找矿前景. 中国矿业, 32(S1): 85~88+106.

汤超, 陈军强, 商志文, 李志丹, 刘晓雪, 任军平. 2013. 内蒙古达茂旗满都拉地区铜矿地质特征及找矿方向探讨. 地质找矿论丛, 28(2): 210~215.

王超. 2023. 内蒙古达茂旗查干哈达庙铜多金属矿床形成时代与成因机制研究. 导师: 王建平. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1~92.

王守光, 张青, 张成, 曹磊. 2021. 内蒙古查干哈达庙铜矿床硫铅同位素特征及其地质意义. 西部资源, (5): 187~190.

张旗. 2008. 埃达克岩研究的回顾和前瞻. 中国地质, 35(1): 32~39.

张旗, 原杰. 2024. 地球化学研究的危机与机遇. 地质论评, 70(5): 1907~1926.

张维, 简平. 2012. 华北北缘固阳二叠纪闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩套 SHRIMP 年代学. 中国地质, 39(6): 1593~1603.

张晓飞. 2018. 内蒙古中东部晚古生代—早中生代岩浆岩特征及区域构造内涵. 导师: 刘俊来. 中国地质大学(北京) 博士学位论文: 1~177.

赵庆英. 2010. 内蒙古大青山地区晚古生代—早中生代花岗岩成因及其形成构造环境. 导师: 徐学纯. 吉林大学博士学位论文: 1~104.

Abdel-Karim Abdel-Aal M, Hamdy Mohamed M, Surour Adel A. 2024. Geochemistry of island arc assemblage in the Eastern Desert of Egypt and the role of Pan-African magmatism in crustal growth of the Arabian-Nubian shield: a review. Acta Geochimica, 43: 588~622.

Belousova E, Kostitsyn Y, Griffin W, Begg G, O'reilly S, Pearson N. 2010. The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data. Lithos, 119: 457~466.

Blichert-Toft J. 2001. On the Lu - Hf isotope geochemistry of silicate rocks. Geostandards Newsletter, 25: 41~56.

Chen N H C, Zhao G, Jahn B M, Zhou H, Sun M. 2017. Geochemistry and geochronology of the Delinggou Intrusion: Implications for the subduction of the Paleo-Asian Ocean beneath the North China Craton. Gondwana Research, 43: 178~192.

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662~665.

Gao Zhengxi, Wang Jichun, Zhou Lulu, Zhao Xin, Qin Jiangdong, Wang Peidong, Wu Yanjun, Wang Yan, Baoyin Wuliji. 2019&. Discovery of early permian island-arc type granodiorites in Wenduermiao Area, Inner Mongolia: Constraints on timing of closure of Paleo Asian Ocean. Earth Science, 44(10): 3178~3192.

Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Van Acherbergh E, O'Reilly Suzanne Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle; LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 64: 133~147.

Hua Bei, Gao Xue, Hu Zhaoguo, Mei Zhenhua, Zhang Zhiwu, Meng Yinsheng, Zhang Baotao, Zhao Lei. 2020&. Petrogenesis and tectonic setting of the Wuzhuxinwusu Granite, Western Xing-Meng Orogenic Belt: Evidences from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes. Acta Petrologica Sinica, 36(5): 1426~1444.

Hoskin P W, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 27~62.

Jian P, Liu D, Kröner A, Windley B F, Shi Y, Zhang F. 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: implications for continental growth. Lithos, 101: 233~259.

Jian P, Liu D, Kröner A, Windley B F, Shi Y, Zhang W. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc—trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. Lithos, 118: 169~190.

Khain E, Bibikova E, Salmikova E, Kröner A, Gibsher A, Didenko A. 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: new geochronologic data and palaeotectonic reconstructions. Precambrian Research, 122: 329~358.

Liu Y, Gao S, Hu Z, Gao C, Zong K, Wang D. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt—peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of petrology, 51: 537~571.

Li Longxue. 2021&. Origin and Tectonic Setting of Permian Granitoids rocks in the Middle Segment of the North Margin of the North China

- Craton. Dissertation Supervisor: Mo Xuanxue. China University of Geosciences (Beijing) for Master of Doctoral Degree; 1~159.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas; modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411~429.
- Miao Laicheng, Luo Ye, Sanchir D, Liu Jianming, Zou Tao, Lu Zenglong, Qin Kezhang, Munkhtsengel B. 2023#. Types, typical deposits, tempo—spatial distribution and tectonic settings of the copper deposits in Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 39(11): 3229~3262.
- Middlemost E A K. 1985. Magmas and magmatic rocks: an introduction to igneous petrology. New York: Longman; 1~266.
- Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of petrology*, 25: 956~983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to mineralogy and petrology*, 58: 63~81.
- Scherer E, Münker C, Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium—hafnium clock. *Science*, 293: 683~687.
- Shinjo R, Woodhead J D., Hergt J M. 2000. Geochemical variation within the northern Ryukyu Arc: magma source compositions and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 263~282.
- Sun S S, McDonough W S. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Sun Feng, Zhang Baotao, Li Jianwei, Liu Yun, Ji Qingchuan. 2023#. Geological and mineral characteristics and prospecting prospects of the Shaltaulegai Area in Damao Banner, Inner Mongolia. *China Mining Magazine*, 32(S1): 85~88+106.
- Tang Chao, Cheng Junqiang, Shang Zhiwen, Li Zhidan, Liu Xiaoxue, Ren Junping. 2023#. Discussion on geological characters and prospecting direction of copper deposit in Mandula area at Damaoqi, Inner Mongolia. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 28(2): 210~215.
- Tungalag N, Jargalan S, Khashgerel B E, Mijiddorj C, Kavalieris I. 2019. Characteristics of the Late Devonian Tsagaan Suvarga Cu—Mo deposit, Southern Mongolia. *Mineralium Deposita*, 54: 369~380.
- Wang Shouguang, Zhang Qing, Zhang Cheng, Cao Lei. 2021#. Sulfur and lead isotope characteristics and geological significance of the Chaganhadamiao copper deposit in Inner Mongolia. *Western Resources*, (5): 187~190.
- Wang Chao. 2023#. The Ore-forming age and mineralization mechanism of the Chaganhadamiao copper polymetallic deposit in the Darhan Muminggan United Banner, Inner Mongolia. Dissertation Supervisor: Wang Jianping. China University of Geosciences (Beijing) for Master of Professional Degree; 1~92.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234: 105~126.
- Xiao W, Wan B, Windley B F, Ao S, Han C, Feng J. 2014. Geochronologic and geochemical evidence for persistence of south-dipping subduction to late Permian time, Langshan area, Inner Mongolia (China): significance for termination of accretionary orogenesis in the southern Altai. *American Journal of Science*, 314: 679~703.
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, Liu W, Wan B, Zhang J E. 2018. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia. *Earth-Science Reviews*, 186: 94~128.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6).
- Xu P, Wu F Y, Xie L W, Yang Y H. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49: 1642~1648.
- Zhang Wei, Jian Ping. 2012#. SHRIMP dating of the Permian Guyang diorite—quartz diorite—tonalite suite in the northern margin of the North China Craton. *Geology in China*, 39(6): 1593~1603.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu J M, Hu Z C. 2016. Different sources involved in generation of continental arc volcanism: The Carboniferous—Permian volcanic rocks in the northern margin of the North China block. *Lithos*, 240: 382~401.
- Zhang Xiaofei. 2018#. Characteristics and Regional Tectonic Implications of Late Paleozoic—Early Mesozoic Magmatic rocks from the Central and Southern Inner Mongolia. Dissertation Supervisor: Liu Junlai. China University of Geosciences (Beijing) for Doctoral Degree; 1~177.
- Zhao Qinying. 2010#. Origin and Tectonic Setting of Late Paleozoic—Early Mesozoic Granites in Daqingshan District, Inner Mongolia. Dissertation Supervisor: Xu Xuechun. Jilin University for Doctoral Degree; 1~104.
- Zhao P, Xu B, Zhang C H. 2017. A rift system in southeastern Central Asian Orogenic Belt: Constraint from sedimentological, geochronological and geochemical investigations of the Late Carboniferous—Early Permian strata in northern Inner Mongolia (China). *Gondwana Research*, 47: 342~357.
- Zhang Qi. 2008#. Adakite research: retrospect and prospect. *Geology in China*, 35(1): 32~39.
- Zhang Qi, Yuan Jie. 2024#. The crisis and opportunity of geochemical research. *Geological Review*, 70(5): 1907~1926.

U-Pb zircon ages, geochemical characteristics of granodiorites in the Shartolgai copper—molybdenum deposit in Darhan Mumingan Banner, Inner Mongolia

LI Jianwei¹⁾, MI Kuifeng²⁾, WEI Zhengyu¹⁾, ZHANG Baotao¹⁾, HU Zhaoguo¹⁾,
MEI Zhenhua³⁾, SUN Feng⁴⁾

1) Shandong Zhengyuan Geological Exploration Institute, China Metallurgical Geology Bureau, Jinan, 250101;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

3) Shandong Bureau, China Metallurgical Geology Bureau, Jinan, 250101;

4) China Metallurgical Geology Bureau, Beijing, 100031

Objectives: Numerous copper—polymetallic deposits are distributed in the border region between China and Mongolia. The Shiertolgai Cu—Mo deposit, located in Darhan Mumingan United Banner, Inner Mongolia, has undergone multiple exploration campaigns since its discovery, providing preliminary insights into the geological characteristics of the deposit.

Methods: In this paper, based on detailed field geological work, systematic sampling of malachitized and unmineralized granodiorite from the Shiertaolegai mining area was carried out for analyses of major and trace elements, zircon U-Pb dating, and Hf isotopes.

Results: The granodiorites exhibit high Si, Al, and K major element compositions, are relatively enriched in large ion lithophile elements (LILE) such as Rb, Ba, and K, and show depletions in high field strength elements (HFSE) including Nb, Ta, and Ti, indicating typical arc magmatic affinities. In addition, the zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values of the granodiorites range from +4.5 to +11.3 and +7.5 to +10.6, with corresponding two-stage Hf model ages (T_{DM2}) of 1028~589 Ma and 831~631 Ma, respectively, suggesting that the parent magmas were products of island arc magmatism.

Conclusions: Based on regional tectonic studies, the authors propose that the Early Permian granites in the Mandala region were formed in a southward subduction setting of the Paleo-Asian Ocean.

Keywords: Shartolgai; Darhan Mumingan Banner; Inner Mongolia; magma source; magmatic and metallogenic age; geodynamic setting; Central Asian Metallogenic Belt

Acknowledgements: This paper was supported by Geological Integrated Research Project of China Metallurgical Geology Bureau (No. CMGBDZYJ003 [Zhongye-Di-2024]), and Youth Fund Project of Shandong Bureau, China Metallurgical Geology Bureau (No. SDYJ-QNKJ202403)

First author: LI Jianwei, male, born in 1991, master's degree, senior engineer, focus primary research interests on geological exploration and mineral prospecting; Email: ljw0116@126.com

Corresponding author: MI Kuifeng, male, born in 1989, Ph. D., senior engineer; is mainly engaged in ore deposit geology; Email: mikuífeng@126.com

Manuscript received on: 2025-04-16; Accepted on: 2025-07-16; Published online on: 2025-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.085

Edited by: ZHANG Yuxu