



引文格式: 景永康, 张龙, 刘明, 等. 柴北缘西段化石沟英云闪长岩锆石 U-Pb 测年、微量元素特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2026, XX(X): 285–298. DOI: 10.12401/j.nwg.2024097

Citation: JING Yongkang, ZHANG Long, LIU Ming, et al. Zircon U-Pb Dating, Trace Elements Characteristics and Geological Significance of Tonalite in the Huashigou Area, Northwestern Margin of Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2026, XX(X): 285–298. DOI: 10.12401/j.nwg.2024097

柴北缘西段化石沟英云闪长岩锆石 U-Pb 测年、微量元素特征及其地质意义

景永康^{1,2}, 张龙^{1,2,3,*}, 刘明^{1,2}, 王元伟^{1,2}, 陈康^{1,2,4}, 邓楠^{1,2}, 张毅^{1,2,3}, 吴珺玮^{1,2}

(1. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 4. 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 笔者以柴北缘全吉地块西段化石沟地区发育的英云闪长岩为研究对象, 在详尽的野外观察基础上, 对其中的原生锆石开展 LA-ICP-MS 同位素年代学 and 原位微区成分分析, 探讨该区在泥盆纪这一重要构造转换时期的演化历史。化石沟英云闪长岩中原生锆石 CL 图像显示, 锆石晶体多呈长柱状或不规则状自形-半自形晶, 发育清晰的震荡环带; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得加权平均年龄为 (371.1 ± 3.5) Ma, 谐和年龄为 (370.9 ± 1) Ma, Th/U 值为 0.42~0.83; 原位微区成分分析表明其具有明显的 Ce 正异常, 以及强烈的 Eu 负异常, 轻稀土元素普遍亏损而重稀土元素强烈富集; 锆石 Ti 温度计计算得到锆石结晶温度(t_{Zr-Ti})为 628~722 °C, 为典型的岩浆成因锆石。在 Pb-Th 图解中, 测点全部落入 I 型花岗岩锆石区域内, 代表了原始岩浆为壳幔混合型岩浆。综合研究认为, 推测化石沟英云闪长岩形成于碰撞造山后伸展环境下, 代表了地幔物质上涌使地壳物质重熔所导致的岩浆事件。

关键词: 英云闪长岩; 锆石; U-Pb 同位素测年; 柴北缘

中图分类号: P571; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0285-14

Zircon U-Pb Dating, Trace Elements Characteristics and Geological Significance of Tonalite in the Huashigou Area, Northwestern Margin of Qaidam Basin

JING Yongkang^{1,2}, ZHANG Long^{1,2,3,*}, LIU Ming^{1,2}, WANG Yuanwei^{1,2}, CHEN Kang^{1,2,4},
DENG Nan^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2,3}, WU Junwei^{1,2}

(1. Technology Innovation Center for Gold Mine Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2024-11-06; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0342), 中国地质调查局项目(DD20211551), 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目(KC20230011)联合资助。

作者简介: 景永康(1986-), 男, 高级工程师, 从事矿产地质调查评价工作。E-mail: jingyk0112@163.com。

* 通讯作者: 张龙(1988-), 男, 工程师, 从事矿产地质调查评工作价。E-mail: zhanglong242016@163.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Abstract: This study focuses on the tonalite in the Huashigou in the western section of the Quanji massif, northwestern margin of the Qaidam basin. Based on detailed field investigations, LA-ICP-MS in-situ isotopic dating and elemental analyses were carried out on the primary zircons to explore the evolutionary history of this area during the important tectonic transition period of the Devonian. The CL images of zircons in Huashigou tonalite show that zircon crystals are mostly columnar or irregularly shaped, euhedral to subhedral grains with clear oscillatory zonations. Zircon U-Pb dating yields a weighted average age of 371.1 ± 3.5 Ma, a concordant age of 370.9 ± 1 Ma, and a Th/U ratio of 0.42–0.83. LA-ICP-MS in-situ elemental analysis shows obvious Ce positive anomalies, strong Eu negative anomalies, and relative enrichment in light rare earth elements (LREE) compared to heavy rare earth elements (HREE). Zircon Ti thermometer calculation reveals zircon crystallization temperatures (t_{Zr-Ti}) ranging from 628 to 722 °C, indicating a typical magmatic origin. In the Pb-Th diagram, all zircon spots fall within the I-type granite zircon field, representing that the original magma is crust-mantle mixed. Based on the above information, it is inferred that Huashigou tonalite was formed in an extensional environment after the collision, representing a magmatic event caused by mantle upwelling and crustal reworking.

Keywords: tonalite; zircon; zircon U-Pb isotope dating; northwestern margin of Qaidam basin

锆石作为自然界中一种常见的副矿物,广泛分布于沉积岩、岩浆岩和变质岩之中(Andersen, 2005; Gehrels et al., 2011),其具有很好的矿物稳定性、较高的体系封闭温度,以及高 U、Th 值和低普通 Pb 的特点(吴元保等, 2004),使其有能力记录寄主岩石所经历的多期演化历史。因此,锆石 U-Pb 定年被认为是当前同位素年代学中最常用和最有效的方法之一。而随着微区原位测试技术的不断精进,对锆石其他方面的研究和认识也日渐深入。近年来,已有大量学者利用锆石中的微量元素开展研究,在估算岩浆温度(Watson et al., 1983, 2006; Ewing et al., 2013)、识别岩浆演化(El-Bialy et al., 2013)、划分岩石类型(Wang et al., 2012)和判别构造环境(Grimes et al., 2007)等方面取得了大量新认识。李长民(2009)通过对不同成因类型锆石判别标志的系统总结,认为通过锆石阴极发光图像(CL)、背散射图像(BSE)以及微量元素相结合的方法是进行锆石成因鉴定的有效方法。赵志丹等(2018)归纳了青藏高原不同岩石中锆石微量元素的特征与岩浆作用、变质作用等深部过程的规律,为通过锆石微量元素反演和识别岩石成因、构造环境等提供了可靠的依据。

全吉地块(又称欧龙布鲁克地块)位于青藏高原东北缘(郝国杰等, 2004; 陆松年等, 2009; 王欣等, 2024),是塔里木板块、柴达木地块和中-南祁连地块的交汇部位(图 1a)。前人依据陆块的沉积作用、岩浆活动、变质作用以及构造变形等特征,提出全吉地块经历了古元古代古陆核形成、中元古代陆内沉降、中

元古代—新元古代 Rodinia 超大陆汇聚、南华纪—震旦纪 Rodinia 超大陆裂解、早古生代陆块俯冲与折返、晚古生代陆内造山阶段和中新生代高原隆升 7 个演化阶段(郝国杰等, 2004)。其中,泥盆纪是该区由挤压环境转变为拉张环境的重要转换期(郝国杰等, 2004),对这一时期岩浆岩的深入研究,有助于更好的总结区域构造演化历史。前人曾对区内金泉山—化石沟一带的古生代花岗岩开展过相关研究,初步认为该区整体上存在四期古生代岩浆事件(董国强等, 2014)。化石沟铜矿是区内与古生代岩浆事件存在成因联系的一处中型铜矿床,前人围绕矿床地质特征、地球物理特征、地球化学特征等方面开展过一些研究(杨树清, 2009),英云闪长岩侵入体被认为与成矿直接相关。笔者以化石沟英云闪长岩侵入体为研究对象,在详尽的野外调查基础上,开展地质年代学和锆石矿物微区原位成分研究,进一步约束化石沟英云闪长岩岩体的年龄,揭示化石沟英云闪长岩的构造环境,为更好的理解全吉地块古生代构造演化提供新的依据。

1 区域地质背景

研究区大地构造位置属于柴北缘全吉地块西段,北邻北阿尔金俯冲杂岩带,东接祁连地块(胡万龙等, 2016; 图 1a),是西北重要的大地构造单元衔接部位(李卫红等, 2020)。区内出露地层主要为古元古代达肯大坂岩群、泥盆系牦牛沟组、石炭系羊虎沟组第四纪沉积物,其中古元古代达肯大坂岩群的出露面积约

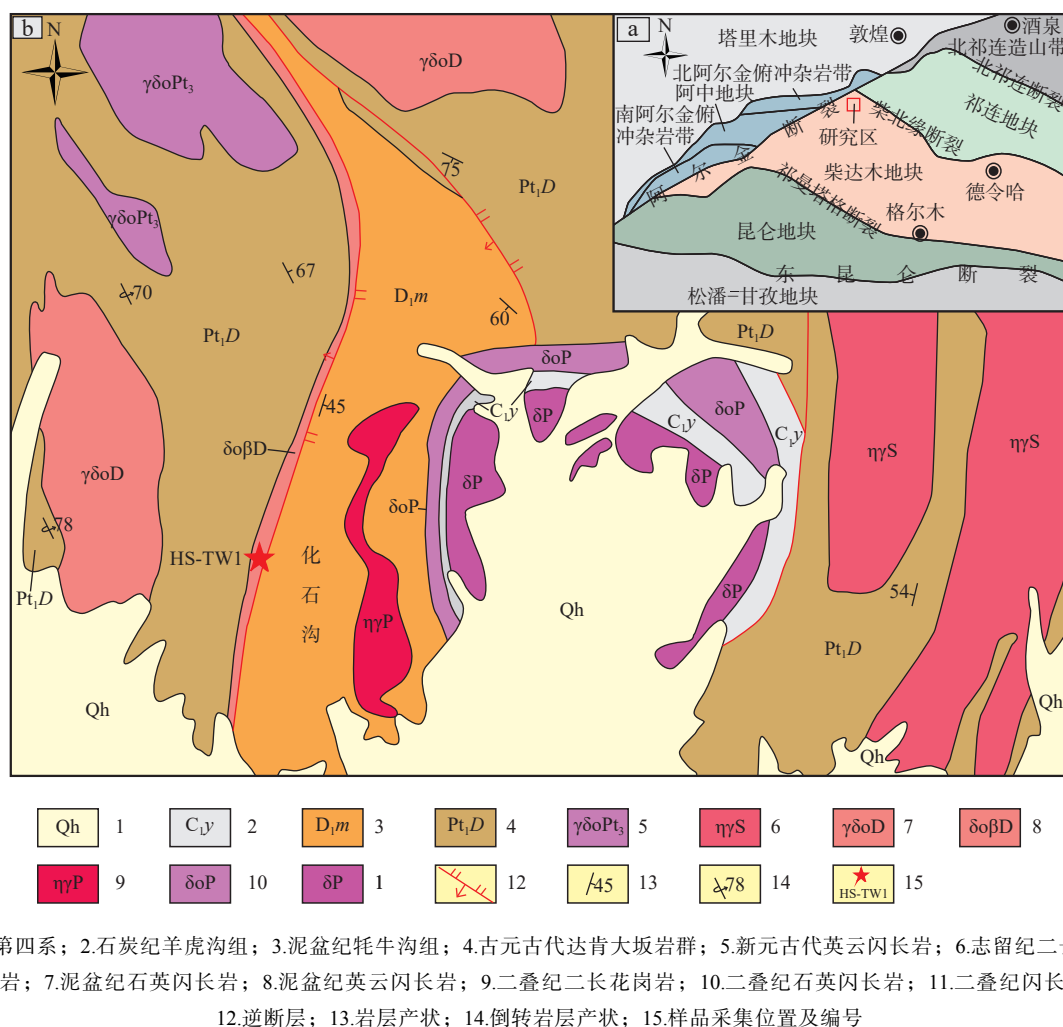


图1 大地构造略图(a)(据刘永顺等, 2009; 许志琴等, 2011 修改)及化石沟一带地质简图(b)

Fig. 1 (a) Geologic map of main tectonic units and (b) geological map of Huashigou area, northwestern margin of Qaidam basin

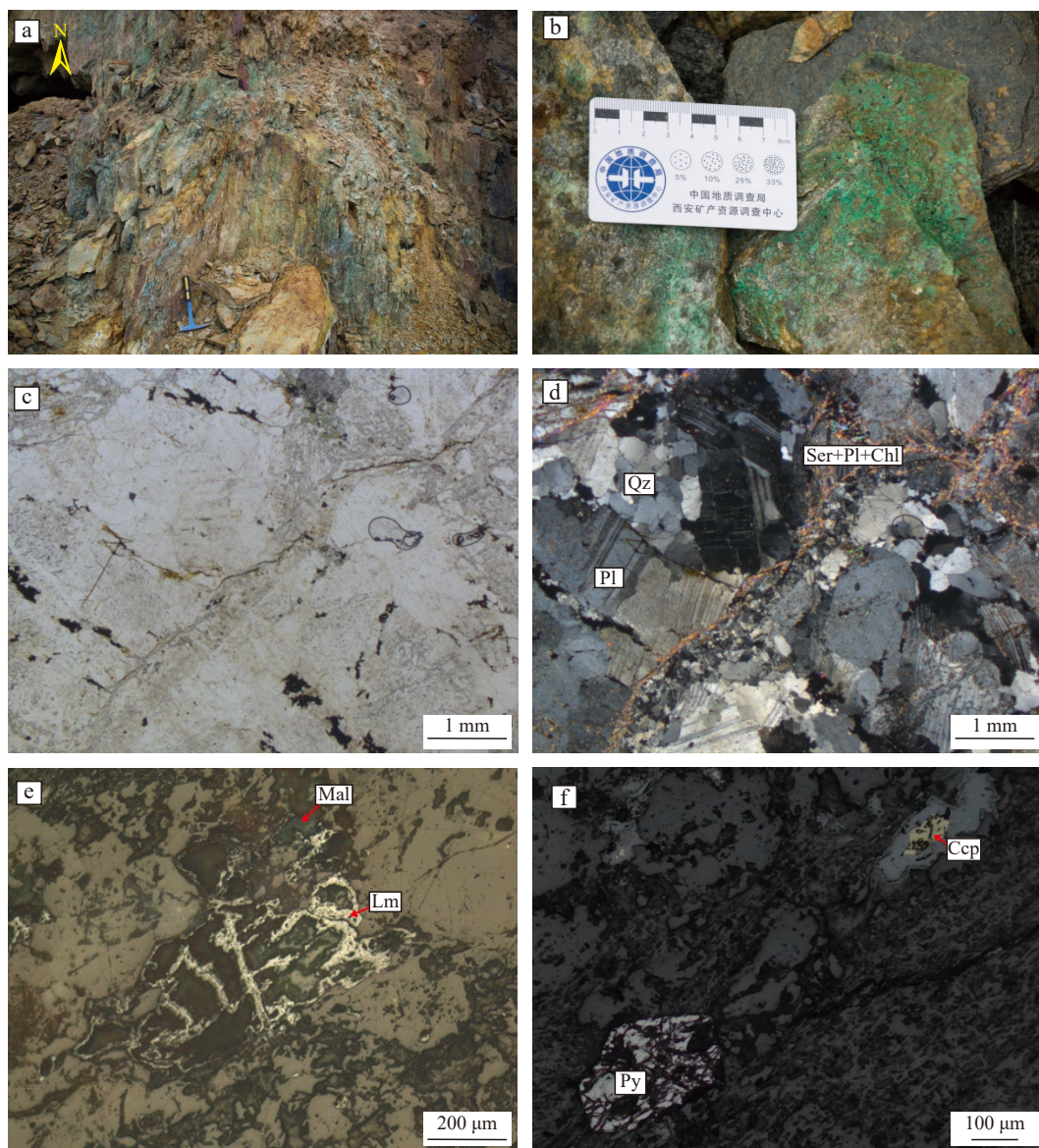
占研究区面积二分之一, 主要为一套由(类)复理石沉积建造和碳酸盐台地沉积建造组成的具角闪岩相变质的中深变质岩系(庄玉军等, 2023)。岩石类型以混合岩、片麻岩、变粒岩、片岩、角闪岩、大理岩为主, 少量变砂岩; 早泥盆纪牦牛山组呈条带状近 SN 向分布于研究区中部, 主要为一套陆相碎屑岩, 由含砾粗砂质板岩、泥质粉砂质板岩、泥质粉砂岩和含碳泥质板岩所组成; 早石炭纪羊虎沟组分布在化石沟环形构造周边, 被闪长岩、石英闪长岩体侵入破坏, 呈残留体存在, 岩性为白云质大理岩和大理岩。第四纪沉积物主要分布在沟谷和山前冲洪积扇, 砾石、砂、黏土及风成黄土覆盖了区内大部分地区。

研究区经历过复杂而强烈的构造活动, 断裂构造发育, 以逆断层为主, 受到阿尔金深大断裂的影响, 区内断裂总体呈 SN 走向, 形态上体现为向 NEE 凸起的弧形, 具有多期活动特点。岩层整体变形则体现为早

期韧性剪切被后期脆性变形叠加的特点, 由于经历较深层次的变形变质, 面理置换十分显著, 原生层面及早期变形行迹均已无法识别; 区内岩浆活动同样强烈, 并具多期活动特点, 部分侵入岩明显受到构造活动的控制, 呈长条状 SN 向弧形展布。岩石类型以中酸性岩为主, 主要为二长花岗岩、石英闪长岩、英云闪长岩和闪长岩, 多呈岩株或岩脉状产出。以华力西期侵入体居多, 晋宁期、加里东期次之(图 2b)。

2 岩石学特征

化石沟英云闪长岩整体受弧形断裂构造的控制, 呈岩枝状, 长条状沿断裂带侵入到达肯大坂岩群和泥盆系牦牛沟组中, 在岩体内部可见有达肯大坂岩群、牦牛沟组捕虏体。岩体北部走向 NWW 向, 南部转为 SEE 向, 南北延伸约 15 km, 倾角多大于 80°, 陡倾产出。



a、b. 化石沟英云闪长岩露头特征；c、d. 英云闪长岩镜下特征(单偏光，正交光)；e、f. 英云闪长岩中金属矿化现象；Qtz. 石英；Pl. 斜长石；Ser. 绢云母；Chl. 绿泥石；Mal. 孔雀石；Lm. 褐铁矿；Ccp. 黄铜矿；Py. 黄铁矿

图2 化石沟英云闪长岩野外及镜下特征

Fig. 2 Field characteristics and Micrographs of tonalite in the Huashigou area

本次研究样品主要采集于化石沟英云闪长岩岩体南部(图 1b), 样品编号 HS-TW1。英云闪长岩整体蚀变较强, 云英岩化、绿泥石化比较发育(图 2a、图 2b)。岩石风化面呈灰绿色, 新鲜面为灰色-浅灰色, 糜棱岩化结构、变余半自形粒状结构(图 2c、图 2d), 块状构造。岩石中斜长石含量约为 40%~43%, 碱性长石含量约为 3%~5%, 石英含量约为 30%~35%, 黑云母含量约为 5%, 绢云母含量为 8%~10%, 绿泥石含量约为 3%, 含极少量磷灰石, 黝帘石, 褐帘石以及含量为 1%~3% 的金属矿物。其中, 斜长石粒径约为 0.25~

3.30 mm, 呈半自形板状, 裂纹发育, 具聚片双晶, 双晶纹多弯曲变形, 碱性长石表面泥化, 石英粒径约为 0.20~0.80 mm, 呈他形粒状, 集合体呈团块状、条带状, 分布于斜长石粒间。显微鳞片状绢云母、鳞片绿泥石、磨细的斜长石、少量细粒半自形晶粒状金属矿物及粉末状铁质充填岩石裂隙呈网脉状。岩石中孔雀石化强烈发育, 孔雀石大多呈纤维状集合体(图 2e), 集合体粒径约为 0.05~0.73 mm, 与其他金属矿物共生, 分布于岩石裂隙中。黄铜矿和黄铁矿(图 2f), 多呈他形-半自形粒状, 稀疏浸染状分布于岩石裂隙中, 多被褐

铁矿交代。

3 测试分析方法

本次工作的锆石挑选和制靶在北京天和信矿业技术开发有限公司完成。具体过程如下, 首先将样品粉碎至 80~100 目, 而后在双目镜下挑选约 200 粒锆石, 后将锆石颗粒用环氧树脂固定制靶, 对其进行表面抛光至暴露锆石内部。随后对锆石进行反射光、透射光、阴极发光(CL)图像的拍摄。通过分析锆石图像, 选出透明度好、晶形好、无明显裂痕的锆石颗粒作为测试对象。

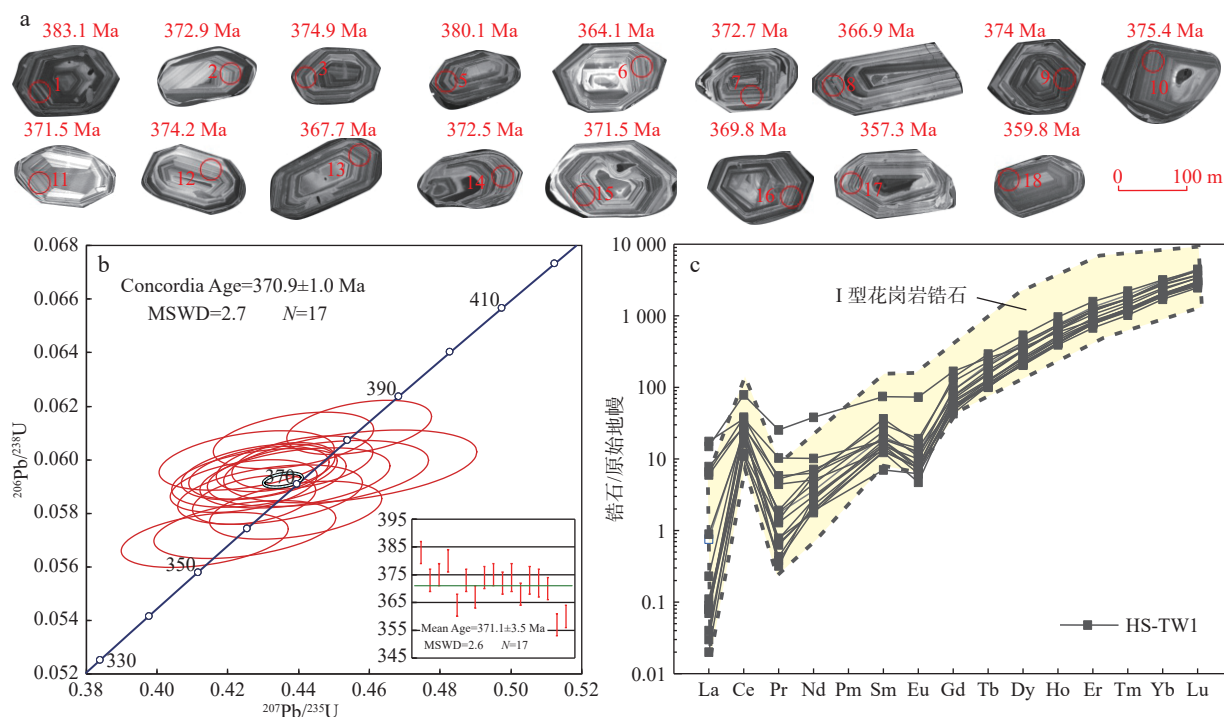
锆石 U-Pb 定年及微量原位成分测定在中国地质调查局西安地质调查中心岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成, 所用激光剥蚀系统为 Coherent GeoLas Pro, ICP-MS 系统为 Agilent 7700x。激光束斑直径选择 36 μm , 测试过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 每个时间分辨分析数据包括约 10 s 的空白信号、40 s 的样品信号和 10 s 的吹扫信号。U-Pb 定年选择 91500 和 GJ-1 作为外标, 普通铅校正依据实测 ^{204}Pb 进行校正 (Andersen, 2002), 微量元素含量

以 NIST610 玻璃作为外标、 ^{29}Si 作内标的方法进行定量计算。对样品数据分析和元素含量计算采用软件 Glitter 完成, U-Th-Pb 同位素比值、年龄计算以及谐和图采用 ISOPLOT 完成。具体的实验参数及分析技术流程见 Li et al. (2023)。

4 测试分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

化石沟英云闪长岩样品的锆石晶形较好, 多为透明-半透明, 呈浑圆状、长柱状或不规则状自形-半自形晶。这些锆石颗粒长度为 150~260 μm , 宽度为 80~110 μm , 长宽比为 1:1~1:2。从锆石 CL 图像中可以观察到少量锆石发育有残留核, 多数锆石内部结构明显, 发育清晰的震荡环带(图 3a)。选择透明度高、晶形较好、无明显裂痕的 18 颗锆石进行测试, 排除 1 个无效测点, 有效测点共 17 个。数据点均分布在谐和线上或其附近, 说明这些锆石颗粒在形成 U-Pb 同位素体系封闭性好, 锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致。定年测试结果显示(表 1, 图 3b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄区间为 357.3~383.1 Ma, 加权平均年龄为 $(371.1 \pm 3.5)\text{Ma}$



球粒陨石成分据 Sun et al. (1989); I 型花岗岩锆石成分区据 Wang et al. (2012)

图3 化石沟英云闪长岩锆石 CL 图像(a)、U-Pb 谐和图、加权平均年龄(b)和锆石球粒陨石标准化 REE 配分曲线图(c)
Fig. 3 (a) CL images of zircons, (b) U-Pb concordia diagram and weighted average age, and (c) chondrite-normalized REE patterns for the zircons from tonalite in the Huashigou area

Tab. 1 The LA-ICP-MS analytical results of U-Pb isotopes for zircons of tonalite in the Huashigou area

测点	(10 ⁻⁶)			同位素年龄					U-Pb年龄 (Ma)											
	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³² Th	1σ						
HS01	10.2	286.7	487.3	1.70	0.0544	0.0017	0.4596	0.0135	0.0612	0.0007	0.0190	0.0003	388.7	66.6	384.0	9.4	383.1	4.1	380.3	6.7
HS02	7.1	215.2	315.6	1.47	0.0525	0.0018	0.4313	0.0145	0.0596	0.0007	0.0180	0.0003	307.6	77.4	364.1	10.3	372.9	4.2	360.0	6.7
HS03	12.3	373.1	445.1	1.19	0.0537	0.0017	0.4435	0.0132	0.0599	0.0007	0.0179	0.0003	357.8	68.0	372.7	9.3	374.9	4.0	358.2	5.7
HS05	7.7	216.5	338.2	1.56	0.0526	0.0018	0.4411	0.0149	0.0607	0.0007	0.0192	0.0004	313.2	77.7	371.0	10.5	380.1	4.3	384.8	7.2
HS06	5.4	192.7	276.0	1.43	0.0551	0.0021	0.4416	0.0161	0.0581	0.0007	0.0149	0.0003	415.5	81.6	371.4	11.3	364.1	4.3	298.6	6.5
HS07	9.1	260.9	398.8	1.53	0.0525	0.0017	0.4312	0.0131	0.0595	0.0007	0.0186	0.0003	307.4	69.9	364.1	9.3	372.7	4.0	371.7	6.3
HS08	12.3	361.8	540.7	1.49	0.0532	0.0015	0.4299	0.0115	0.0585	0.0006	0.0181	0.0003	339.2	62.1	363.1	8.2	366.6	3.7	362.1	5.7
HS09	16.3	472.8	662.4	1.40	0.0529	0.0014	0.4360	0.0110	0.0597	0.0006	0.0183	0.0003	324.4	58.8	367.5	7.8	374.0	3.7	365.9	5.3
HS10	4.6	140.5	314.1	2.24	0.0517	0.0020	0.4278	0.0164	0.0600	0.0007	0.0174	0.0004	272.1	87.9	361.6	11.6	375.4	4.4	348.0	8.5
HS11	6.7	203.1	315.8	1.56	0.0527	0.0021	0.4313	0.0163	0.0593	0.0007	0.0174	0.0004	314.7	85.4	364.1	11.5	371.5	4.4	349.4	7.3
HS12	3.8	108.2	227.9	2.11	0.0554	0.0029	0.4571	0.0236	0.0598	0.0009	0.0184	0.0006	428.9	114.4	382.2	16.4	374.2	5.5	368.3	11.8
HS13	6.3	193.8	314.3	1.62	0.0536	0.0022	0.4344	0.0173	0.0587	0.0007	0.0170	0.0004	355.7	90.0	366.3	12.2	367.7	4.5	340.6	7.7
HS14	5.2	156.3	275.2	1.76	0.0546	0.0026	0.4480	0.0206	0.0595	0.0008	0.0172	0.0005	394.8	102.7	375.9	14.5	372.5	5.0	344.1	9.3
HS15	4.8	139.9	330.6	2.36	0.0539	0.0022	0.4414	0.0177	0.0593	0.0007	0.0175	0.0005	367.4	90.6	371.2	12.5	371.5	4.5	351.2	9.3
HS16	8.6	262.0	495.8	1.89	0.0524	0.0018	0.4270	0.0137	0.0590	0.0007	0.0169	0.0003	303.7	74.2	361.0	9.8	369.8	4.0	338.9	6.7
HS17	8.0	234.9	349.9	1.49	0.0529	0.0020	0.4159	0.0155	0.0570	0.0007	0.0175	0.0004	323.8	85.4	353.1	11.1	357.3	4.1	351.5	7.0
HS18	6.8	207.8	319.1	1.54	0.0539	0.0022	0.4272	0.0169	0.0574	0.0007	0.0168	0.0004	368.6	89.5	361.2	12.1	359.8	4.3	337.6	7.3

($n=17$, $MSWD=2.6$), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄为
(370.9 ± 1)Ma($n=17$, $MSWD=2.7$), 该年龄可能代表了
英云闪长岩的结晶侵位时代, 即晚泥盆世。

4.2 锆石微量元素特征

化石沟英云闪长岩锆石微量元素 LA-ICP-MS 分析数据显示(表 2), 样品锆石中稀土元素含量较高,

表 2 化石沟英云闪长岩锆石微量元素分析测试结果(10^{-6})

Tab. 2 Analytical results of trace elements of zircons in tonalite in the Huashigou area

测点	HS01	HS02	HS03	HS05	HS06	HS07	HS08	HS09	HS10	HS11	HS12	HS13	HS14	HS15	HS16	HS17	HS18
La	0.179	0.025	0.054	4.160	1.855	0.211	1.556	0.022	0.004	0.018	3.550	0.017	1.417	0.009	0.019	0.019	0.008
Ce	14.7	6.7	18.1	22.3	17.0	13.5	23.5	14.2	6.8	7.4	48.1	13.9	17.8	7.1	17.7	14.2	10.2
Pr	0.166	0.041	0.123	0.979	0.551	0.172	0.499	0.072	0.074	0.134	2.417	0.063	0.421	0.036	0.030	0.060	0.181
Nd	1.67	1.056	1.42	4.75	2.96	2.1	3.34	1.26	0.833	2.71	17.82	0.9	2.38	0.881	1.36	0.916	3.06
Sm	3.17	2.12	2.48	2.74	2.86	3.7	2.9	2.76	1.96	5.56	11.35	2.37	1.98	1.074	2.32	1.89	4.64
Eu	0.69	0.43	0.47	0.42	0.73	0.63	0.82	0.47	0.43	0.97	4.24	0.36	0.44	0.36	0.58	0.27	1.11
Gd	18.7	9.7	13.4	10.9	11.2	18.7	15.4	15.6	10.5	28.4	34.4	12.7	10.9	8.8	14.2	11.9	24.8
Tb	7.89	4.22	4.77	4.24	4.56	7.4	5.89	6.46	3.88	10.92	9.66	4.56	3.77	3.96	5.69	3.75	8.5
Dy	102.5	51.8	63.7	59.7	63.9	99.2	84.5	84.2	53.9	135.9	91.9	67.6	55.1	52.3	82.4	57.2	108.7
Ho	42.9	22.2	28.0	25.8	25.9	40.4	37.1	35.7	23.8	54.4	33.4	29.3	23.8	23.4	35.4	23.4	42.2
Er	219.3	112.0	136.5	132.2	134.5	193.8	196.4	173.1	132.3	261.2	141.4	152.8	126.0	129.1	192.4	128.0	206.6
Tm	49.8	26.0	32.1	32.2	31.5	43.8	44.4	39.3	31.0	56.5	31.4	36.0	30.1	30.8	44.1	28.9	44.2
Yb	523.0	289.2	330.7	347.9	348.6	458.3	502.2	412.2	333.1	539.2	332.9	394.0	313.9	337.2	494.8	316.9	470.4
Lu	113.3	62.6	71.1	75.6	74.0	93.0	108.2	85.1	74.2	108.7	69.5	86.2	70.2	76.4	108.0	66.0	94.6
Y	1 418	719	870	854	856	1 228	1 250	1 127	803	1 679	1 087	953	768	802	1 202	793	1 361
Hf	9 154	8 769	10 307	10 130	10 173	9 815	10 383	10 775	10 260	8 727	8 578	10 209	10 550	10 199	11 209	10 897	8 867
Pb	10.2	7.1	12.3	7.7	5.4	9.1	12.3	16.3	4.6	6.7	3.8	6.3	5.2	4.8	8.6	8.0	6.8
Th	286.7	215.2	373.1	216.5	192.7	260.9	361.8	472.8	140.5	203.1	108.2	193.8	156.3	139.9	262.0	234.9	207.8
U	487.3	315.6	445.1	338.2	276.0	398.8	540.7	662.4	314.1	315.8	227.9	314.3	275.2	330.6	495.8	349.9	319.1
Nb	4.0	1.7	2.4	2.8	2.5	1.9	4.5	3.6	1.6	2.9	1.1	2.9	2.8	2.0	4.5	2.1	1.7
Ta	1.28	0.57	0.934	0.935	0.802	0.772	1.434	1.188	0.747	0.843	0.524	1.193	0.976	0.915	1.628	0.916	0.653
Ti	7.7	5.9	3.8	5.3	5.5	4.8	4.5	2.4	2.5	7.3	5.2	4.0	4.2	3.3	4.1	4.0	6.4
Th/U	0.59	0.68	0.84	0.64	0.70	0.65	0.67	0.71	0.45	0.64	0.47	0.62	0.57	0.42	0.53	0.67	0.65
ΣREE	1 097.9	588.3	702.9	723.9	720.2	974.9	1 026.6	870.5	672.9	1 211.9	832.1	800.7	658.0	671.4	998.9	653.3	1 019.3
LREE	19.9	10.0	22.2	34.9	25.3	19.7	31.8	18.3	9.7	15.8	83.2	17.2	24.0	9.1	21.4	17.1	18.1
HREE	1 078.1	578.3	680.6	689.0	694.9	955.2	994.9	852.2	663.2	1 196.1	748.9	783.5	634.0	662.3	977.5	636.2	1 001.2
LREE/HREE	0.018	0.017	0.033	0.051	0.036	0.021	0.032	0.021	0.015	0.013	0.111	0.022	0.038	0.014	0.022	0.027	0.018
$\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^*$	0.275	0.290	0.247	0.233	0.395	0.231	0.376	0.217	0.291	0.236	0.656	0.202	0.287	0.358	0.309	0.177	0.317
$\text{Ce}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}^*$	20.9	51.3	54.7	2.7	4.1	17.4	6.5	88.5	100.9	36.4	4.0	105.4	5.6	97.8	179.7	103.7	65.7
$(\text{Sm}/\text{La})_\text{N}$	27.4	130.8	71.5	1.0	2.4	27.2	2.9	198.9	820.6	468.1	5.0	222.5	2.2	189.1	187.2	154.1	898.4
$(\text{Lu}/\text{Gd})_\text{N}$	49.0	27.1	43.0	56.1	53.3	67.1	56.9	44.8	57.2	31.0	19.8	55.0	44.8	70.0	61.6	37.6	30.8
$t_{\text{Zr-Ti}}(^{\circ}\text{C})$	722.0	698.6	663.1	689.4	691.9	681.5	675.7	628.3	628.9	717.2	688.4	666.5	671.2	652.3	668.3	665.5	705.2
ΔFMQ	4.98	3.93	5.90	5.97	5.51	5.23	6.19	5.87	4.67	3.91	7.23	5.43	5.78	4.48	5.80	5.48	4.55

ΣREE 为 $653.3 \times 10^{-6} \sim 1211.9 \times 10^{-6}$, Y 含量普遍较高, 为 $718.58 \times 10^{-6} \sim 1679.4 \times 10^{-6}$ 。Ti 为 $2.43 \times 10^{-6} \sim 7.71 \times 10^{-6}$, 平均为 4.75×10^{-6} 。LREE 含量为 $9.1 \times 10^{-6} \sim 34.9 \times 10^{-6}$, HREE 含量为 $578.3 \times 10^{-6} \sim 1196.1 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 $0.01 \sim 0.11$, 显示锆石中轻稀土元素强烈亏损, 重稀土元素强烈富集。锆石球粒陨石标准化(Sun et al., 1989)稀土配分曲线(图 3c)也显示为明显的左倾, $\text{Ce}_N/\text{Ce}_N^*$ 为 $2.7 \sim 179.7$, 显示为明显的 Ce 正异常, $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ 为 $0.17 \sim 0.65$, 显示为强烈的 Eu 负异常。

5 讨论

5.1 锆石成因

前人通过分析锆石成因, 将锆石分为岩浆型、热液型和变质型, 这三类锆石在形态结构和微量元素特征上都有一定的差异(闫义等, 2003)。CL 图像是研究锆石内部结构最常用和最有效的方法。岩浆锆石一般为自形-半自形, 粒径为 $20 \sim 250 \mu\text{m}$ (Hoskin et al., 2003), 一般具有特征的岩浆振荡环带; 热液锆石一般自形程度较低, 局部熔蚀状, 发育弱环带或无环带; 变质锆石一般从他形到非常自形, CL 阴极发光图像形态一般显示出微弱的震荡或扇形分区(Zhang et al., 2009; Li et al., 2014; Rubatto, 2017)。此外, 不同成因的锆石, 其具有明显的 Th、U 元素含量差异以及不同的 Th/U 值, 因此, Th/U 值常被人们用来判别锆石的成因, 一般岩浆锆石中 Th、U 含量明显偏高, Th/U 值一般大于 0.4, 而变质锆石中 Th、U 含量相对较低, Th/U 值一般小于 0.1(Rubatto et al., 2000; Möller et al., 2003)。另外, 典型的岩浆型锆石中重稀土元素(HREE)明显富集, 并具有 Ce 正异常和 Eu 负异常(Belousova et al., 2002; 赵一鸣等, 2017); 热液锆石表现为低 Th/U、高 U、高 REE 总量的特征(赵志丹等, 2018); 变质锆石表现为 LREE 含量低, HREE 含量显著低于岩浆锆石, HREE 具有平坦或者上升坡度较缓的标准化分配曲线图(赵志丹等, 2018)。

化石沟英云闪长岩中的锆石多为自形-半自形, 内部结构清晰, 发育明显的震荡环带, 粒径为 $110 \sim 260 \mu\text{m}$, 平均大小约为 $200 \mu\text{m}$; 锆石中 Th、U 的含量均比较高, 其中 Th 含量为 $108.2 \times 10^{-6} \sim 472.7 \times 10^{-6}$, 平均含量为 236.8×10^{-6} , U 含量为 $227.9 \times 10^{-6} \sim 662.4 \times 10^{-6}$, 平均含量为 376.8×10^{-6} , Th/U 值为 $0.42 \sim 0.83$, 平均为 0.61, 均大于 0.4; 且具有明显的 Ce 正异常和 Eu

负异常; 锆石中轻稀土元素强烈亏损, 重稀土元素强烈富集, 这些特征均指示样品中的锆石为典型岩浆锆石。

然而, 仅利用锆石 Th/U 值及 REE 配分特征来判断锆石成因类型时需谨慎, 还应综合锆石其他地球化学指标(赵振华, 2010)。目前, 常用 $\text{Eu}/\text{Eu}^*-\text{REE}$ 图解用来进一步区分岩浆锆石和热液锆石(Hoskin et al., 2003; Li et al., 2018)。本次研究中的锆石样品在 $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*-\text{REE}$ (图 4a)图解中, 均落入到岩浆锆石区域内。此外, 锆石的结晶温度也常被用来区分岩浆型(高于 600°C)和热液型(低于 500°C)(Fu et al., 2009), 锆石微量元素的分配系数遵循 Nernst 定律(Watson et al., 2006), 锆石 Ti 温度计受岩体 $\text{TiO}_2(\alpha_{\text{TiO}_2})$ 和 $\text{SiO}_2(\alpha_{\text{SiO}_2})$ 的活度影响(Watson et al., 2005)。当岩浆中有石英存在时, $\alpha_{\text{SiO}_2}=1$ (Watson et al., 2005), 硅酸盐熔体在典型岩浆结晶温度范围内时, $\alpha_{\text{TiO}_2} \approx 0.6$ (Hayden et al., 2007; Wark et al., 2007), 故文中样品的岩浆中 SiO_2 和 TiO_2 的活度可分别视为 $\alpha_{\text{SiO}_2}=1$ 和 $\alpha_{\text{TiO}_2} \approx 0.6$ 。因此, 根据锆石的 Ti 温度计计算公式(1)可计算获得锆石的结晶温度(Watson et al., 2006; Ferry et al., 2007; Moecher et al., 2014)。

$$T_{\text{Zr-Ti}} = [(4800 \pm 86)/(5.711 \pm 0.072) - \lg(\text{Ti})] - 273.15 \quad (1)$$

锆石 Ti 温度计计算结晶温度($t_{\text{Zr-Ti}}$)与 Th/U 值关系图(图 4b)中可以看出, 化石沟英云闪长岩的样品中锆石 Ti 的含量为 $2.43 \times 10^{-6} \sim 7.71 \times 10^{-6}$, 对应的锆石结晶温度为 $628 \sim 722^\circ\text{C}$, 锆石的结晶温度均大于 600°C , 同样指示了样品锆石可能为岩浆锆石。综上所述, 化石沟英云闪长岩样品中的锆石应为岩浆成因。

5.2 岩石源区构造环境及岩石成因分析

锆石微量元素以及同位素成分是其结晶环境的重要探针, 也是反演岩石成因乃至地球动力学背景的重要手段(Kemp et al., 2010; Reimink et al., 2014), 近年得到广泛的应用(赵志丹等, 2018)。锆石的结晶过程伴随着与之平衡的整个岩浆体系的演化过程, 能够很好地记录岩浆源区性质、岩石类型和成因。对锆石中微量元素 Ti、Hf、Y、Nb、Ta、Th 和 U 以及稀土元素的含量进行分析, 可以较好地解释锆石的岩浆构造环境(Nardi et al., 2013; Li et al., 2014; Wu et al., 2016)。例如, 利用 Hf-U/Yb 和 Y-Th/Yb 图解可以明显区分出锆石是陆壳成因锆石还是洋壳成因锆石, 从而有效判断锆石是从陆壳环境还是洋壳环境中结晶

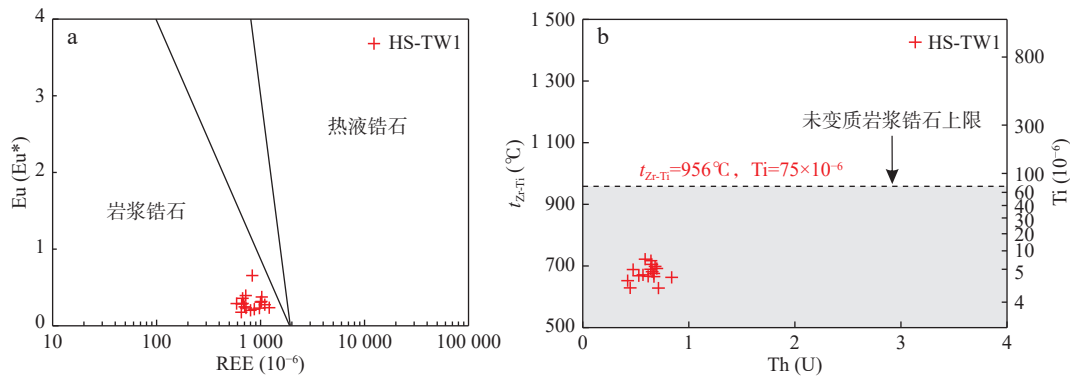


图4 岩浆锆石和热液锆石的 $\text{Eu}(\text{Eu}^*)$ -REE 图解(a)(据 Li et al., 2018)和锆石 Ti 温度计计算结晶温度与 Th(U)值关系图(b)(据 Hoskin et al., 2003; Watson et al., 2006)

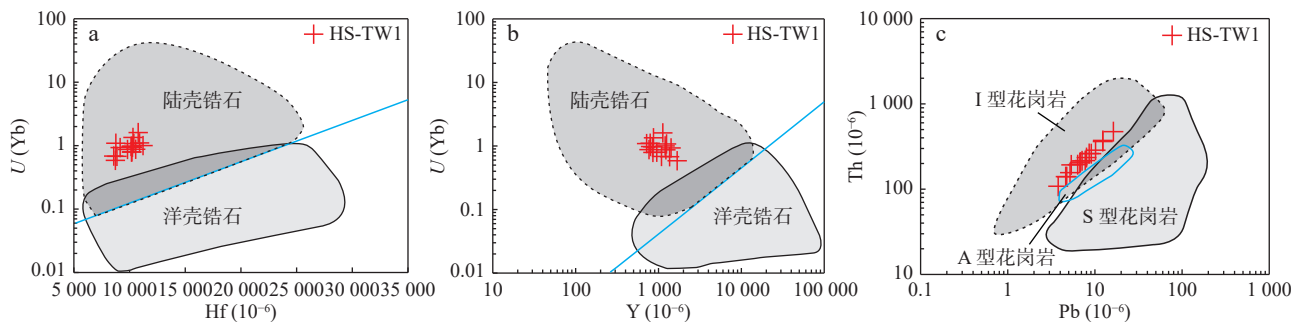
Fig. 4 (a) Diagrams of $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ - REE for discriminating magmatic and hydrothermal zircons and (b) a plot of the calculated crystallization temperatures of zircons using the Ti-thermometer against their Th/U ratios

分异而成(Grimes et al., 2007, 2009)。化石沟英云闪长岩样品中的锆石在 Hf-U/Yb(图 5a)图解和 Y-Th/Yb(图 5b)图解(Grimes et al., 2007)中, 所有测点均落在陆壳成因范围内。

前人研究表明, 早古生代柴达木陆块向全吉地块由南向北完成了俯冲(王惠初等, 2003, 郝国杰等, 2004), 晚古生代板块俯冲结束后, 各地块之间的位置调整等活动引发的岩浆作用, 导致全吉地块在泥盆纪经历了复杂的岩浆活动(胡万龙等, 2016)。柴北缘泥盆纪的花岗岩主要有两期(彭璇等, 2022), 第一期年轻集中在 408~397 Ma, 为经历超高压变质作用的板块折返产生部分熔融形成的花岗质岩浆, 第二期年龄 375~372 Ma, 为超高压变质作用的块体折返后通过拉伸、滑塌、伸展重新调整引起部分熔融形成的岩浆岩(任军虎, 2010)。前人在嗽唠河地区一带获得的石英闪长岩中锆石 U-Pb 年龄为 (372.1 ± 2.6) Ma (吴才来等, 2008); 大柴旦巴嘎柴达木湖地区发现了花岗岩性

质的侵入体, 其锆石 U-Pb 年龄为 (374.5 ± 1.6) Ma(吴才来等, 2007); 大头羊沟一带发现了锆石 U-Pb 年龄为 (372 ± 2.1) Ma(吴才来等, 2007)的花岗岩侵入体; 同时, 在化石沟西侧也发现了 (366 ± 2) Ma 的岩浆侵入事件(董国强等, 2014)。本次获得的锆石 U-Pb 谐和年龄为 (370.9 ± 1) Ma, 表明化石沟英云闪长岩是与区域上泥盆纪第二期岩浆作用同期的岩浆岩。

从研究区晚泥盆世中酸性侵入体化学成分表(表 3)可以看出, SiO_2 的含量为 51.95%~70.86%; 全碱含量为 4.35%~8.48%, 里特曼指数(δ)为 0.87~2.61, AR- SiO_2 碱度率图解(图 6c)中, 所有样品均落入钙碱性系列范围内; Al_2O_3 的含量为 14.30%~17.87%, 高于 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}$ (9.60%~13.53%) 的含量, 均属铝过饱和系列。从微量元素蛛网图(图 6b)可以看出, 所有样品微量元素含量均高于原始地幔, Rb、Ba、Th、K 等大离子亲石元素强烈富集, Nb、P、Ti 等高场强元素相对亏损, 在 Y+Nb-Rb 花岗岩构造环境判别图解(图 6d)中, 所有



a. Hf-U(Yb)图解(据 Grimes et al., 2007); b. Y-U(Yb)图解(据 Grimes et al., 2007); c. Pb-Th 图解(据 Yang et al., 2012)

图5 陆壳锆石和洋壳锆石判别图(a,b)和岩浆类型判别图(c)

Fig. 5 (a, b) Discrimination diagrams of zircons of continental and oceanic crust origins and (c) Discrimination diagrams of zircons from different tectonic background

表 3 晚泥盆世柴北缘花岗岩化学成分分析结果

Tab. 3 The chemical composition analysis results for the late Devonian granites from the northern margin of the Qaidam basin

岩体名称	噶喇河岩体		巴嘎柴达木湖岩体		大头羊沟岩体		化石沟西岩体
岩石名称	石英闪长岩		花岗岩		花岗闪长岩		英云闪长岩
SiO ₂	55.83	51.95	70.86		63.35	64.86	67.46
TiO ₂	0.95	0.96	0.37		0.52	0.61	0.48
Al ₂ O ₃	16.26	17.87	14.32		16.50	14.60	14.30
Fe ₂ O ₃	1.81	1.84	1.39		2.39	2.18	1.75
FeO	4.63	5.53	1.42		2.03	4.20	2.85
MnO	0.12	0.14	0.04		0.08	0.09	0.08
MgO	5.90	5.68	0.65		2.04	4.05	1.69
CaO	7.20	8.70	1.45		4.15	1.78	3.41
Na ₂ O	3.44	3.52	3.40		3.96	2.49	3.52
K ₂ O	1.11	1.31	5.08		2.72	1.86	2.67
P ₂ O ₅	0.20	0.15	0.07		0.23	0.06	0.13
LOI	1.52	1.59	0.84		1.12	2.55	1.18
δ	1.62	2.61	2.58		2.19	0.87	1.57
AR	1.48	1.44	2.52		1.96	1.73	2.07
NK	4.55	4.83	8.48		6.68	4.35	6.19
NCK	11.8	13.5	9.93		10.8	6.13	9.60
La	26.5	16.6	40.1		49.2	29.6	45.5
Ce	52.5	41.8	84.9		98.2	50.3	76.8
Pr	5.84	5.38	9.29		10.8	5.76	8.22
Nd	22.9	23.1	34.2		39.3	20.7	27.9
Sm	4.80	5.35	6.99		6.22	3.45	4.45
Eu	1.20	1.35	1.03		1.54	1.27	1.09
Gd	4.74	5.45	6.39		4.83	3.05	4.15
Tb	0.77	0.91	0.98		0.58	0.48	0.72
Dy	4.58	5.61	5.74		2.80	2.46	3.98
Ho	0.92	1.11	1.09		0.50	0.46	0.78
Er	2.72	3.36	3.40		1.56	1.35	2.33
Tm	0.38	0.47	0.48		0.20	0.21	0.39
Yb	2.45	3.01	3.10		1.30	1.44	2.36
Lu	0.38	0.44	0.50		0.20	0.23	0.39
Y	26.0	31.6	31.8		14.6	12.5	21.8
Ga	18.4	20.1	18.5		19.8	19.2	17.3
Hf	3.90	3.20	6.80		4.00	4.12	4.51
Ta	0.40	0.50	1.06		0.60	0.54	0.97
Rb	34.6	46.5	197		46.8	67.5	98.4
Ba	280	247	675		1 301	273	628
Th	5.62	3.92	23.30		10.40	6.95	14.8
Nb	8.00	6.20	9.33		8.14	6.95	13.0
Sr	399	273	122		1 006	125	199
Zr	163	118	247		151	145	158
Th	5.62	3.92	23.3		10.4	6.95	14.8
U	0.92	0.56	3.07		1.29	0.9	1.68

注：噶喇河石英闪长岩数据源自吴才来等(2008)；巴嘎柴达木湖花岗岩、大头羊沟花岗闪长岩数据源自吴才来等(2007)；化石沟西英云闪长岩数据源自董国强等(2014)；主量元素含量为%；微量和稀土元素含量为10⁻⁶。

样品均落入到火山弧花岗岩范围内。一般情况下, 板块内部的岩石相比弧环境中的岩石更加贫 Nb(Sun et al., 1989), 板内环境形成的锆石相对弧环境下形成的锆石, 具有较高的 Nb/Hf 值(Hawkesworth et al., 2006; Yang et al., 2012)。样品中的锆石的 Nb/Hf 值均比较小, 介于 $0.0001 \sim 0.0004$, 也暗示化石沟英云闪长岩形成于火山弧环境。所有样品稀土元素总量为 $133.25 \times 10^{-6} \sim 231.83 \times 10^{-6}$, 轻稀土总量为 $93.58 \times 10^{-6} \sim 205.26 \times 10^{-6}$, 重稀土总量为 $22.18 \times 10^{-6} \sim 53.48 \times 10^{-6}$, 轻重稀土比值介于 $1.80 \sim 7.73$, 从岩石稀土元素标准化配分曲线(图 6a)可以看出, 总体呈轻稀土富集, 重稀土元素平坦型。除大头羊沟花岗岩样品 δEu 为 1.17,

呈弱正异常, 其余样品均介于 $0.46 \sim 0.83$, 呈负异常。研究表明, 由于地幔岩石氧逸度较低, δCe 往往大于 1, 而在氧逸度较高的地壳环境时, Ce 元素容易与其他元素分离而出现亏损, δCe 则小于 1(董国强等, 2014)。分析结果显示, 晚泥盆世研究区样品 δCe 介于 $0.89 \sim 1.08$, 而在 Pb-Th(图 5c)图解中, 锆石中 Pb 的含量为 $3.79 \times 10^{-6} \sim 10.17 \times 10^{-6}$, Th 的含量为 $108.24 \times 10^{-6} \sim 472.78 \times 10^{-6}$, 样品中锆石测点全部落入 I 型花岗岩锆石区域内, 锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(图 3c)也与 I 型花岗岩锆石(Wang et al., 2012)的配分曲线比较一致, 均指示了原始岩浆为壳幔混合型岩浆。

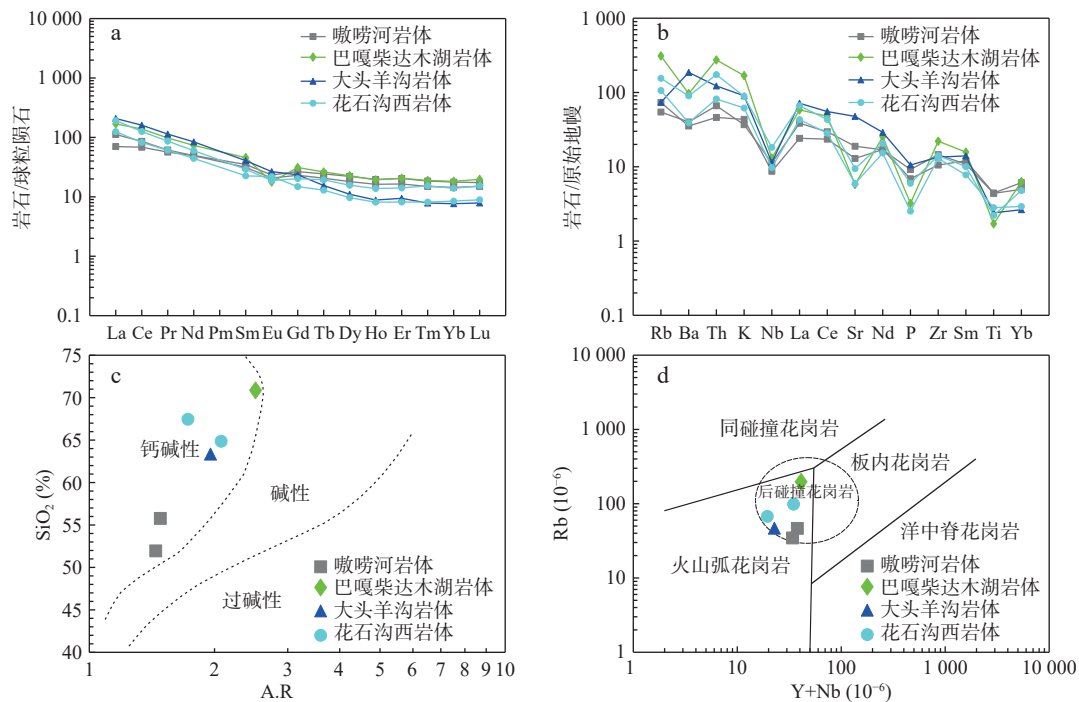


图6 晚泥盆世柴北缘花岗岩球粒陨石标准化 REE 配分曲线图(a; 球粒陨石成分据 Sun et al., 1989)、微量元素蛛网图(b; 原始地幔成分据 Sun et al., 1989)、A.R-SiO₂ 碱度率图解(c; 据 Wright, 1969)、Y+Nb-Rb 构造环境判别图解(d; 据 Pearce et al., 1984)

Fig. 6 (a) Chondrite-normalized REE patterns, (b) Primary mantle-normalized trace element spider diagram, (c) Diagram of A.R-SiO₂, and (d) Diagram of Y+Nb-Rb for the granites of late Devonian from the northern margin of Qaidam basin.

综上所述, 化石沟英云闪长岩样品中的锆石为陆壳熔融成因。锆石微量元素特征进一步印证了化石沟英云闪长岩与区域内该时期大量发育的中酸性岩浆岩具有相似的特征。早古生代柴达木陆块俯冲至全吉地块之下, 全吉地块与柴达木陆块逐渐拼合成一个整体, 泥盆纪处于稳定发展阶段, 整体为拉张状态(郝国杰等, 2004), 在晚泥盆世, 超高压变质带俯冲折

返后, 造山带块体之间均衡调整, 不同块体的岩石部分熔融形成了不同类型的花岗岩(潘美慧等, 2014)。区内泥盆纪为一套粗碎屑岩, 是造山后快速隆起, 风化剥蚀、快速堆积而形成的, 表明晚泥盆世该区碰撞造山已经结束, 处于伸展阶段, 形成了众多的构造裂隙, 古老花岗质地壳由于高温流场的影响, 下部发生部分熔融, 沿构造裂隙侵位而形成英云闪长岩。

6 结论

(1)化石沟英云闪长岩中的锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $(371.1 \pm 3.5) \text{Ma}$, 谐和年龄为 $(370.9 \pm 1) \text{Ma}$, 说明英云闪长岩的结晶侵位时代为晚泥盆世。

(2)化石沟英云闪长岩中锆石 Th/U 值为 0.42~0.83, 具有明显的 Ce 正异常, 以及强烈的 Eu 负异常, 锆石结晶温度 ($t_{\text{Zr-Ti}}$) 为 628~722 °C, 为典型的岩浆锆石。

(3)锆石微量元素特征显示, 化石沟英云闪长岩具有 I 型花岗岩特征, 暗示其原始岩浆为壳幔混合型, 可能形成于碰撞造山后伸展环境, 由古老地壳物质重熔而成。

致谢: 锆石 U-Pb 定年测试得到了中国地质调查局西安地质调查中心靳梦琪同志的帮助。长安大学杨高学教授对本文提出了宝贵的修改意见, 在此表示衷心感谢。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献 (References):

- 董国强, 褚广博, 吴义布, 等. 全吉地块金泉山—化石沟一带古生代花岗质岩体地球化学及其构造意义[J]. 甘肃地质, 2014, 23(1): 19-27.
- DONG Guoqiang, CHU Guangbo, WU Yibu, et al. Geochemistry of paleozoic Jinquanshan-Huashigou granitoids in Quanjia massif and its tectonic significance[J]. Gansu Geology, 2014, 23(1): 19-27.
- 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 等. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化[J]. 地学前缘, 2004, 12(3): 115-122.
- HAO Guojie, LU Songnian, WANG Huichu, et al. The Pre-Devonian tectonic framework in the northern margin of Qaidam basin and geological evolution of Olongbuluck palaeo-block[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 12(3): 115-122.
- 胡万龙, 贾志磊, 王金荣, 等. 南祁连化石沟花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 高校地质学报, 2016, 22(2): 242-253.
- HU Wanlong, JIA Zhilei, WANG Jinrong, et al. Geochronology and Geochemistry Characteristics of the Granites from the Huashigou Area, South Qilian and Their Tectonic Significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(2): 242-253.
- 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 32(3): 161-174.
- LI Changmin. A Review on the Minerageny and Situ Microanalytical Dating Techniques of Zircons[J]. Geological Survey and Research, 2009, 32(3): 161-174.
- 李卫红, 王军, 李小强, 等. 阿尔金东段当金山口中酸性侵入体年代学、地球化学特征及构造意义[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 34-50.
- LI Weihong, WANG Jun, LI Xiaoqiang, et al. Chronology, Geochemical Characteristics of the Intermediate Acid Intrusives in Dangjinshankou, Eastern Altun and Their Tectonic Significance [J]. Northwestern Geology, 2020, 53(4): 34-50.
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件[J]. 地质通报, 2009, 28(10): 1430-1438.
- LIU Yongshun, YU Haifeng, XIN Houtian, et al. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(10): 1430-1438.
- 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 等. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(9): 2195-2208.
- LU Songnian, LI Huaikun, WANG Huichu, et al. Detrital zircon population of Proterozoic meta-sedimentary strata in the Qingling - Qilian-Kunlun Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(9): 2195-2208.
- 潘美慧, 贾志磊, 侯鹏博. 南祁连化石沟铜矿区上石炭统克鲁克组大理岩 C、O 同位素特征[J]. 黄金科学技术, 2014, 22(5): 39-44.
- PAN Meihui, JIA Zhilei, HOU Pengbo. Characteristics of C, O Isotopes in the Upper Carboniferous Keluke Formation in South Qilian Mountains[J]. Gold Science and Technology, 2014, 22(5): 39-44.
- 彭璇, 庄玉军, 辜平阳, 等. 柴北缘小赛什腾山片麻状花岗岩的成因: 来自地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 221-239.
- PENG Xuan, ZHUANG Yujun, GU Pingyang et al. Petrogenesis of the Gneissic Granite in Xiaosaishiteng Mountain, Northern Qaidam: Constraint from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 221-239.
- 任军虎. 柴达木盆地南、北缘南华—泥盆纪构造演化 [D]. 西安: 西北大学, 2010.
- REN Junhu. A study on tectonic evolution during the period of Nanhu to Devonian at the north and south of Qaidam Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 等. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代[J]. 地质通报, 2003, 22(7): 487-493.
- WANG Huichu, LU Songnian, YUAN Guibang, et al. Tectonic set-

- ting and age of the "Tanjianshan Group" on the northern margin of the Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 2003,22(7): 487-493.
- 王欣, 王健, 辜平阳. 全吉地块前寒武纪地层学研究进展[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 192-208.
- WANG Xin, WANG Jian, GU Pingyang. Integrated Precambrian Stratigraphy of the Quanji Massif: A Review[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 192-208.
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1861-1875.
- WU Cailai, GAO Yuanhong, WU Suoping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007,23(8): 1861-1875.
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2008, 38(8): 930-949.
- WU Cailai, GAO Yuanhong, WU Suoping, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating and Geochemistry Characteristics of granites from northwest margin of Qaidam basin[J]. Science in China Press, 2008,38(8): 930-949.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Zircon genesis mineralogical studies and their constraints on U-Pb age interpretation[J]. Chinese Science Bulletin, 2004,49(16): 1589-1604.
- 许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1-22.
- XU Zhiqin, LI Sitian, ZHANG Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 1-22.
- 同义, 林舸, 李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(2): 184-90.
- YAN Yi, LIN Ge, LI Zian. Provenance tracing of sediments by means of synthetic study of shape, composition and chronology of zircon[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003,27(2): 184-90.
- 杨树清. 甘肃省化石沟铜矿床地质特征[J]. 甘肃科技, 2009, 25(17): 47-9+38.
- YANG Shuqing. Geological characteristics of fossil gou copper deposits in Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 2009, 25(17): 47-9+38.
- 赵一鸣, 丰成友, 李大新. 中国矽卡岩矿床找矿新进展和时空分布规律[J]. 矿床地质, 2017, 36(3): 519-543.
- ZHAO Yiming, FENG Chengyou, LI Daxin. New progress in prospecting for skarn deposits and spatial-teporal distribution of skarn deposits in China[J]. Mineral Deposits, 2017, 36(3): 519-543.
- 赵振华. 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[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 267-286.
- ZHAO Zhenhua. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 267-286.
- 赵志丹, 刘栋, 王青, 等. 锆石微量元素及其揭示的深部过程[J]. 地学前缘, 2018, 25(6): 124-135.
- ZHAO Zhidan, LIU Dong, WANG Qing, et al. Zircon trace elements and their use in probing deep processes[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(6): 124-135.
- 庄玉军, 彭璇, 周艳龙, 等. 柴北缘赛什腾山滩间山群晚奥陶世富铌玄武岩成因及其地质意义[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 63-80.
- ZHUANG Yujun, PENG Xuan, ZHOU Yanlong, et al. Genesis and Geological Significance of Late Ordovician Nb-rich Basalts from Tanjianshan Group in Saishitengshan Mountain, Northern Margin of Qaidam Tectonic belt[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 63-80.
- Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- Andersen T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation[J]. Chemical Geology, 2005, 216: 249-270.
- Belousova E, Griffin W L, O'reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143: 602-622.
- El-bialy M Z, Ali K A. Zircon trace element geochemical constraints on the evolution of the Ediacaran (600-614 Ma) post-collisional Dokhan Volcanics and Younger Granites of SE Sinai, NE Arabian-Nubian Shield[J]. Chemical Geology, 2013, 360: 54-73.
- Ewing T A, Hermann J, Rubatto D. The robustness of the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon thermometers during high-temperature metamorphism (Ivrea-Verbano Zone, northern Italy)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2013, 165: 757-779.
- Ferry J, Watson E. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2007, 154: 429-437.
- Fu B, Mernagh T P, Kita N T, et al. Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: a case study from the Gidginbung high-sulphidation Au-Ag-(Cu) deposit, SE Australia[J]. Chemical Geology, 2009, 259: 131-142.
- Gehrels G, Kapp P, Decelles P, et al. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen[J]. Tectonics, 2011, 30.
- Grimes C B, John B E, Cheadle M J, et al. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2009, 158: 757-783.
- Grimes C B, John B E, Kelemen P, et al. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital

- zircon provenance[J]. *Geology*, 2007, 35: 643–646.
- Hawkesworth C, Kemp A. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution[J]. *Chemical Geology*, 2006, 226: 144–162.
- Hayden L A, Watson E B. Rutile saturation in hydrous siliceous melts and its bearing on Ti-thermometry of quartz and zircon [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 258(3): 561–568.
- Hoskin P W, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53: 27–62.
- Kemp A, Wilde S, Hawkesworth C, et al. Hadean crustal evolution revisited: new constraints from Pb–Hf isotope systematics of the Jack Hills zircons[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 296: 45–56.
- Li H, Li J W, Algeo T J, et al. Zircon indicators of fluid sources and ore genesis in a multi-stage hydrothermal system: The Dongping Au deposit in North China[J]. *Lithos*, 2018, 314: 463–478.
- Li H, Watanabe K, Yonezu K. Zircon morphology, geochronology and trace element geochemistry of the granites from the Huangshaping polymetallic deposit, South China: Implications for the magmatic evolution and mineralization processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 60: 14–35.
- Li Y, Song S, Yang X, et al. Age and composition of Neoproterozoic diabase dykes in North Altyn Tagh, northwest China: implications for Rodinia break-up[J]. *International Geology Review*, 2023, 65(7): 1000–1016.
- Moecher D, McDowell S, Samson S, et al. Ti-in-zircon thermometry and crystallization modeling support hot Grenville granite hypothesis[J]. *Geology*, 2014, 42: 267–270.
- Möller A, O'Brien P J, Kennedy A, et al. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: an example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway)[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 220: 65–81.
- Nardi L, Formoso M, Müller I, et al. Zircon/rock partition coefficients of REEs, Y, Th, U, Nb, and Ta in granitic rocks: Uses for provenance and mineral exploration purposes[J]. *Chemical Geology*, 2013, 335: 1–7.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956–983.
- Reimink J R, Chacko T, Stern R A, et al. Earth's earliest evolved crust generated in an Iceland-like setting[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 529–533.
- Rubatto D. Zircon: the metamorphic mineral[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2017, 83: 261–295.
- Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U–Pb zircon dating by ion microprobe: some examples from the Western Alps[J]. *Cathodoluminescence in Geosciences: 2000*, 373–400.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313–345.
- Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 59–66.
- Wark D A, Hildreth W, Spear F S, et al. Pre-eruption recharge of the Bishop magma system[J]. *Geology*, 2007, 35(3): 235–238.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64: 295–304.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest[J]. *Earth. Science*, 2005, 308(5723): 841–844.
- Watson E, Wark D, Thomas J. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151: 413.
- Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. *Geological Magazine*, 1969, 106(4): 370–384.
- Wu T, Xiao L, Ma C. U–Pb geochronology of detrital and inherited zircons in the Yidun arc belt, eastern Tibet Plateau and its tectonic implications[J]. *Journal of Earth Science*, 2016, 27: 461–473.
- Yang J, Cawood P A, Du Y, et al. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian–Triassic volcanogenic sediments in China[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 261: 120–131.
- Zhang X, Xiang H, Zhong Z, et al. U–Pb dating and trace elements composition of hydrothermal zircons from Jianfengling granite, Hainan: Restriction on the age of hydrothermal event and mineralization of Baolun gold deposit[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34: 921–930.