

西昆仑大红柳滩地区花岗岩类侵位时代与成因*

度明洁^{1,2}, 夏永旗^{1,3}, 李 诺^{1,4,5**}, 加娜提古丽·吾斯曼^{1,2}, 于 杰⁶, 祁冬梅³,
李 婷⁷, 邵宗尧⁷

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所 新疆矿产资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 新疆大学中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830049; 4 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室,
荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 5 新疆矿产资源与数字地质实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;
6 科廷大学, 澳大利亚 珀斯市 6102; 7 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘 要 西昆仑大红柳滩地区花岗岩类分布广泛, 与伟晶岩型锂(铍)矿化时空关系密切。为了约束其地质特征、岩石成因以及对伟晶岩型锂(铍)成矿的作用, 文章对白龙山闪长岩、俘虏沟闪长岩和大红柳滩二云母花岗岩进行了岩石学、矿物学、地球化学和年代学研究。地球化学数据揭示白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩明显富 MgO、CaO 和 TiO₂, 属于准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性岩浆系列, 结合已有全岩 Sr-Nd、锆石 Lu-Hf 等同位素数据, 白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩涉及新生地壳的贡献, 其源区贫黏土, 可能以砂屑岩为主。全岩锆饱和和温度计约束岩浆温度分别为 762~795°C (平均 781°C) 和 769~773°C (平均 771°C)。角闪石温压计约束白龙山闪长岩中角闪石结晶温度为 718~760°C (平均 734°C), 压力介于 125~208 MPa 之间 (平均 151 MPa); 俘虏沟闪长岩中的角闪石结晶温度为 729~776°C (平均 741°C), 压力介于 133~231 MPa 之间 (平均 176 MPa)。白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 (213.67±0.61) Ma (MSWD=1.4, n=39) 和 (211.73±1.02) Ma (MSWD=1.9, n=14)。大红柳滩二云母花岗岩中发育电气石、白云母和石榴子石等富铝矿物, 明显富 SiO₂ 和 K₂O, 贫 MgO、CaO 和 TiO₂, 属于过铝质、高钾钙碱性岩浆系列, 由壳源物质重熔而成, 源区可能是泥质岩。全岩锆饱和和温度计约束其温度为 755~773°C (平均 764°C)。所含锆石往往发育继承核, 其年龄介于 207~2490 Ma 之间。最年轻的岩浆锆石约束岩浆侵位可能发生在 (211.20±1.1) Ma (MSWD=0.34, n=10), 这些岩浆锆石随后被热液增生边包裹, U-Pb 年龄约束岩浆-热液事件发生在 (185.10±0.89) Ma (MSWD=4, n=5), 可能记录了后期伟晶岩侵位所诱发的热液活动。大红柳滩地区同时发育 I 型和 S 型花岗岩, 形成于中温 (734~781°C)、中压 (151~176 MPa) 的条件, 岩浆-热液活动持续时间长达~33 Ma, 为形成超大型规模矿床提供有利条件。

关键词 锆石 U-Pb 年龄; 岩石成因; 花岗岩类; 大红柳滩; 西昆仑

中图分类号: P588.12¹

文献标志码: A

Age and petrogenesis of granitoids in Dahongliutan area, West Kunlun

TUO MingJie^{1,2}, XIA YongQi^{1,3}, LI Nuo^{1,4,5}, JiaNaTiGuLi·WUSIMAN^{1,2}, YU Jie⁶, QI DongMei³,
LI Ting⁷ and TAI ZongYao⁷

(1 Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Laboratory of Continental Dynamics and Metallogenic Prediction of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 4 Key Laboratory of Ecological Security and Sustainable Development of Arid Areas, State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 5 Xinjiang Laboratory of Mineral Resources and Digital Geology, Urumqi

* 本文得到国家自然科学基金项目 (编号: 42122014)、新疆维吾尔自治区重大科技专项 (编号: 2021A03001-2) 和第三次新疆科学考察 (编号: 2022xjkk1301) 联合资助

第一作者简介 度明洁, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 地球探测专业。Email: 1228774931@qq.com

** 通讯作者 李 诺, 女, 1984 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事热液成矿作用研究。Email: linuo@ms.xjb.ac.cn

收稿日期 2023-09-21; 改回日期 2024-01-26。赵海杰编辑。

830011, Xinjiang, China; 6 Curtin University, Perth 6102, Australia; 7 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract

In the West Kunlun orogenic belt, there are well developed Triassic granitoids that may be associated with pegmatite Li(Be) mineralization. In order to constrain its geological characteristics, petrogenesis, and their impact on pegmatitic lithium (beryllium) mineralization. In this paper, petrology, mineralogy, geochemistry and geochronology studies were carried out for the Bailongshan diorite, Fulugou diorite and Dahongliutan two-mica granite from the Dahongliutan district. Geochemical analyses reveal that the Bailongshan diorite and Fulugou diorite are significantly rich in MgO, CaO and TiO₂, and belong to metaluminous-peraluminous, high-K calc-alkaline series. Based on a comprehensive review of available whole-rock Sr-Nd and zircon Lu-Hf data, we propose that the Bailongshan diorite and Fulugou diorite have a source region characterized by low clay content (possibly dominated by sandstone) and potential contributions from juvenile crust. The whole rock Zr saturation temperatures are 762~795°C (averaged at 781°C) for the Bailongshan and 769~773°C (averaged at 771°C) for the Fulugou diorites. Amphibole thermobarometry yields temperatures of 718~760°C (averaged at 734°C) and pressure of 125~208 MPa (averaged at 151 MPa) for the Bailongshan diorite, and 729~776°C (averaged at 741°C) and 133~231 MPa (averaged at 176 MPa) for the Fulugou diorite. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating reveals an emplacement age of (213.67±0.61) Ma (MSWD=1.4, n=39) for the Bailongshan diorite and (211.73±1.02) Ma (MSWD=1.9, n=14) for the Fulugou diorite. In case of the Dahongliutan two-mica granite, there are abundant aluminum-rich minerals such as tourmaline, muscovite and garnet. The two-mica granite has higher SiO₂ and K₂O, but lower MgO, CaO and TiO₂ in comparison to the Bailongshan and Fulugou diorites, and belongs to peraluminous, high K calc-alkaline series. By contrast, the Dahongliutan two-mica granite is mainly sourced from partial melting of pelitic rocks. Its Zr saturation temperature falls into the range of 755~773°C (averaged at 764°C). The zircons hosted by two-mica granite commonly have inherited nuclei, and their U-Pb ages are extremely variable, ranging from 207 Ma to 2490 Ma. The youngest magmatic zircon constrains the emplacement at (211.20±1.1) Ma (MSWD=0.34, n=10). Subsequently, these magmatic zircons were enveloped by hydrothermal overgrowth rims, and the U-Pb age constrains the magmatic-hydrothermal event to have occurred at (185.10±0.89) Ma (MSWD=4, n=5), possibly recording a later hydrothermal event induced by the emplacement of barren pegmatite. The Dahongliutan area concurrently developed I-type and S-type granites, formed under conditions of medium temperature (734~781°C) and pressure (151~176 MPa), with magma-hydrothermal activity lasting ~33 Ma, providing favorable conditions for the formation of super large pegmatite deposits.

Key words: zircon U-Pb age, petrogenesis, granitoids, Dahongliutan, West Kunlun

花岗伟晶岩是锂、铍、铌、钽、铷、铯、锆、钨等战略性金属的重要来源(李建康等, 2023; 赵振华等, 2023)。依据矿化类型, Cerny等(2005)提出将稀有金属伟晶岩被划分为3类:LCT型、NYF型和LCT+NYF混合型。LCT型伟晶岩通常富集Li、Cs、Ta(以及Rb、Be、Sn、B、P、F等)元素, Ta>Nb, Al饱和度高。该类伟晶岩主要形成于晚造山阶段, 多与过铝质S型花岗岩有关, 少量与I型花岗岩有关, 其源区主要为上-中地壳的表壳岩类。NYF型花岗伟晶岩以富集Nb、Y和F(以及Be、REE、Sc、Ti、Zr、Th、U等)元

素, Nb>Ta, 富碱为标志, 主要形成于非造山阶段, 与准铝质到碱性(A型和I型)花岗岩密切相关, 其源区比LCT型深, 深源组分比例也高。LCT+NYF混合型则兼具以上2类伟晶岩的特征。

西昆仑大红柳滩矿集区是中国新近发现的重要锂(铍)成矿集中区, 产出有大红柳滩、509道班西、507、俘虏沟、阿克塔斯等多个超大型-大中型花岗伟晶岩型锂(铍)矿。前人通过对伟晶岩及二云母(二长)花岗岩详细的岩石学、地球化学和年代学等方面的研究, 认为本区稀有金属伟晶岩属LCT型, 强调锂

(铍)矿化与二云母(二长)花岗岩关系密切(乔耿彪等, 2015; 魏小鹏等, 2017; 谭克彬等, 2021)。然而, 除二云母(二长)花岗岩外, 大红柳滩地区还发育同时期的闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩等(魏小鹏等, 2018; 丁坤等, 2020)。这些岩体可独立产出, 亦可与二云母(二长)花岗岩共同组成花岗岩基。本文即以大红柳滩地区出露的花岗岩类, 包括白龙山闪长岩、俘虏沟闪长岩和大红柳滩二云母花岗岩为研究对象, 通过矿物学、岩石学、地球化学和年代学研究, 约束岩石成因和源区性质, 以期提高对西昆仑地区花岗岩类及相关伟晶岩矿化的认识。

1 地质背景

西昆仑造山带地处青藏高原西北缘, 塔里木陆块西南缘, 属中央造山带的最西段, 古亚洲构造域和特提斯构造域的结合部位(Xiao et al., 2005)。该造山带历经早古生代—早中生代期间原特提斯洋和古特提斯洋长期俯冲消减和弧陆碰撞作用, 岩浆活动频繁, 成矿条件优越(Yuan et al., 1999; Wang, 2004; Xiao et al., 2005; Wang et al., 2016)。以奥依塔格-库地缝合带、麻扎-康西瓦缝合带、红山湖-乔尔天山缝合带为界, 可将西昆仑划分为4个构造单元, 自北向南依次是: 北昆仑地体、南昆仑地体、甜水海地体和喀喇昆仑地体(Mattern et al., 2000; 张传林等, 2019)。区内岩浆作用强烈, 沿麻扎-康西瓦缝合带发育一个广阔的岩浆带, 主要由钙碱性花岗岩和蛇绿岩组成(图1)(计文化等, 2004; 肖序常等, 2004; 魏小鹏等, 2017)。

大红柳滩稀有金属成矿带位于甜水海地体, 南北分别被麻扎-康西瓦缝合带和大红柳滩-郭扎错断裂带所局限, 总体呈北西向展布, 长约210 km, 宽20~70 km(图2)(毛景文等, 2019; 唐俊林等, 2022)。区域出露的地层由老到新依次为: 古元古界康西瓦岩群、长城系赛图拉岩群、中元古界甜水海岩群、二叠纪黄羊岭群、三叠系巴颜喀拉山群、新近系泉水沟组以及第四系(图2)。其中, 康西瓦岩群主要由片麻岩、混合岩、斜长角闪岩和片岩组成; 赛图拉岩群主要由灰色斜长黑云石英片岩、斜长浅粒岩、混合片麻岩以及黑云二长变粒岩组成; 甜水海岩群主要岩性为片岩、片麻岩、大理岩和角闪岩; 黄羊岭群由变质含砾细粒长石岩斜砂岩和变质细粒长石岩屑杂砂岩组成; 巴颜喀拉山群是本区伟晶岩型锂(铍)矿主要

赋矿围岩, 岩性主要由变质沉积碎屑岩和碳酸盐岩组成; 第四系由现代雪被和全新世冲洪积层组成(Zhang et al., 2019)。

大红柳滩锂(铍)矿集区位于甜水海地体北部, 区内三叠纪花岗岩多以岩基形式侵入康西瓦岩群和巴颜喀拉岩群, 主要岩石类型包括二云母花岗岩、二长花岗岩、闪长岩等花岗岩类(图2), 因与大红柳滩、509道班西、俘虏沟、阿克塔斯等稀有金属伟晶岩密切的时空关系而备受关注。前人研究多集中于岩石学和成岩年代学, 认为大红柳滩地区花岗岩类侵位年龄均在晚三叠世, 但对不同花岗岩的成因存在争议, 对岩体侵位时的物理化学条件缺少限定。

2 样品特征及测试方法

本次工作在大红柳滩地区系统采集白龙山闪长岩、俘虏沟闪长岩和大红柳滩二云母花岗岩样品用于岩石地球化学、矿物学和年代学研究。其中7件闪长岩样品分别采自509道班西矿区21号探槽旁侧河沟(No. G13~G15、G18, 坐标: N 35°49' 30.59", E 79°15' 41.70")和俘虏沟南(No. HYM9~11, 坐标: N 35°48' 50.28", E 79°05' 3.66")。另6件二云母花岗岩样品采自大红柳滩南矿区(No. DN-24、DN-27、DN-35、DN-37, 坐标: N 35°52' 27", E 79°12' 10.32"; No. DN-45、DN-46, 坐标: N 35°52' 59.7", E 79°12' 24.36")。

采自509道班西的闪长岩侵入至围岩中并被多条无矿的电气石伟晶岩脉穿插(图3a)。该样品与周楷麟等(2021)所述白龙山闪长岩位置接近, 文后皆称之为白龙山闪长岩。岩石主要由斜长石(~40%)、角闪石(~20%)和黑云母(~20%)组成(图3b、c)。斜长石半自形板状, 杂乱分布, 粒度一般为0.5~2.2 mm; 角闪石呈半自形柱状, 杂乱分布, 粒度为0.4~2.2 mm, 可包裹磷灰石、锆石和石英等包体; 黑云母呈棕褐色叶片状, 片径为0.5~2.0 mm。

采自俘虏沟的闪长岩样品手标本呈灰黑色-灰白色(图3d)。岩石的主要组成矿物包括斜长石(~35%)、角闪石(~20%)、黑云母(~20%)(图3e、f)。斜长石呈半自形-自形板状分布, 发育聚片双晶和环带, 粒径0.4~2.2 mm。黑云母呈叶片状分布, 粒径0.2~2.0 mm, 局部见绿泥石化。角闪石呈半自形柱状, 粒径0.2~1 mm, 与黑云母共生, 分布在长石、石英之间, 部分角闪石发生绿泥石化。

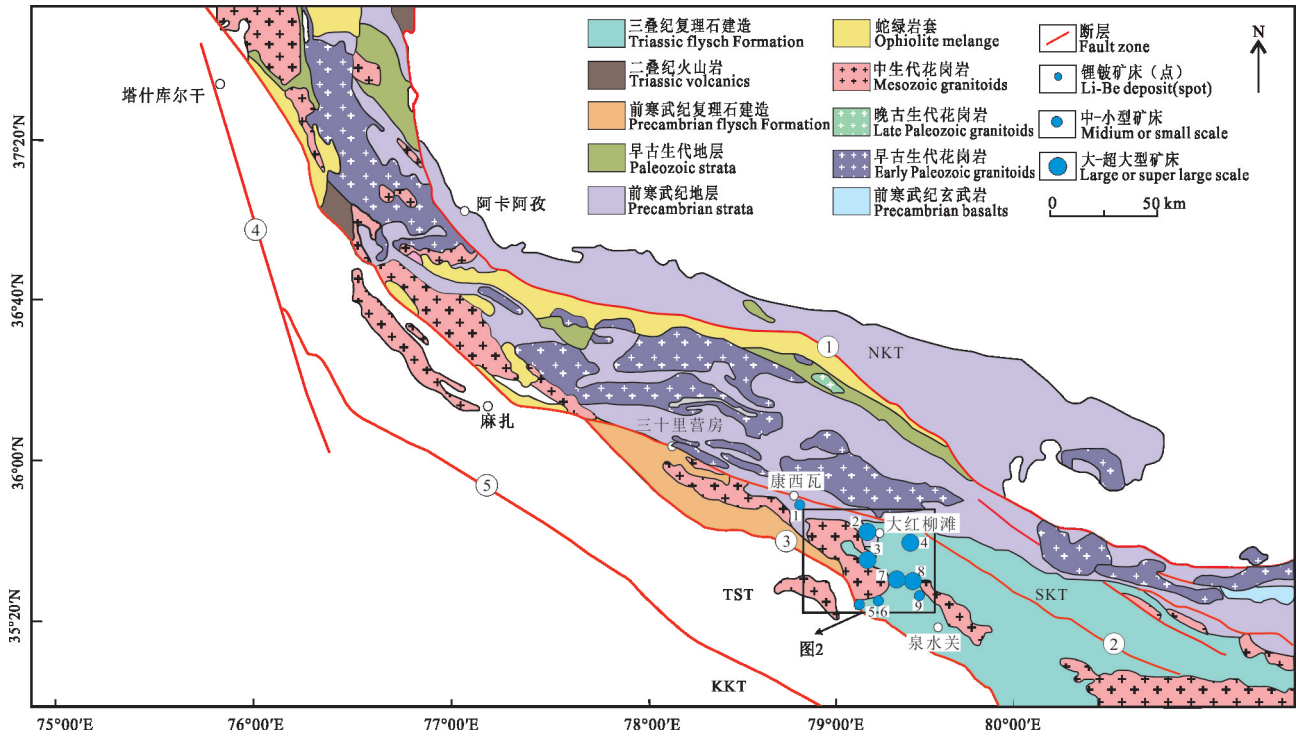


图1 西昆仑造山带地质简图(据 Hu et al., 2016; Wang et al., 2020 修改)

缝合带/区域性断裂:①—奥依塔格-库地缝合带;②—麻扎-康西瓦缝合带;③—大红柳滩-郭扎错断裂;④—喀喇昆仑断裂;⑤—红山湖-乔尔天山缝合带;地体:NKT—北昆仑地体;SKT—南昆仑地体;TST—甜水海地体;KKT—喀喇昆仑地体;矿床/矿点:1—康西瓦;2—阿克塔斯;3—大红柳滩南;4—大红柳滩东;5—俘虏沟1号脉;6—俘虏沟2号脉;7—白龙山;8—509道班西;9—507锂矿

Fig. 1 Geological map of the West Kunlun orogenic belt (modified after Hu et al., 2016; Wang et al., 2020)

Suture zone/regional fault: ①—Oytag-Kudi suture zone; ②—Mazha-Kangxiwa suture zone; ③—Dahongliutan-Guozhacuo fault; ④—Taxkorgan fault; ⑤—Hongshanhu-Qiaortianshan suture zone. Terrane: NKT—North Kunlun terrane; SKT—South Kunlun terrane; TST—Tianshuihai terrane; KKT—Karakorum terrane. Deposits/occurrences: 1—Kangxiwa; 2—Aketasi; 3—Dahongliutan South; 4—Dahongliutan East; 5—Fulugou V-1; 6—Fulugou V-2; 7—Bailongshan; 8—509 Daoban West; 9—507 Li ore

大红柳滩二云母花岗岩被不含矿伟晶岩脉侵入(图3g),二者界限明显(图3h)。二云母花岗岩手标本呈浅灰白色,中细粒花岗岩结构(图3i)。岩石主要由石英(30%~35%)、钾长石(20%~25%)、斜长石(~15%)、白云母(~10%)、黑云母(8%~10%)组成(图3j)。其中,石英呈他形粒状,杂乱分布于斜长石和钾长石之间,粒径0.2~2.6 mm;钾长石和斜长石呈半自形板状,粒径1.5~3.8 mm;黑云母呈叶片状,粒径0.2~0.6 mm,多色性明显;白云母呈片状,粒径0.1~1.2 mm,解理弯曲明显。电气石以铁电气石为主(图3k)。石榴子石自形粒状(图3l),大小一般0.8~1.0 mm,星散状分布。

(1) 全岩主微量元素分析

样品的主量、微量元素分析测试工作在澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素测定采用ME-XRF26F方法,所用仪器为PANalyticalPW2424

型X射线荧光光谱仪(XRF)和SartoriusCP64电子天平,相对偏差与相对误差均小于5%。首先将实验样品煅烧后加入四硼酸锂-偏硼酸锂-硝酸锂助熔物并充分混合,然后置于自动熔炼仪中并保持在1000℃以上熔融。将冷却后熔融物用X荧光光谱仪分析,检测限为0.01%。

超痕量和微量元素的测定采用ME-MS-61r和ME-MS81g方法测定,所用仪器为Agilent5110电感耦合等离子体发射光谱仪和Agilent7900电感耦合等离子体质谱仪。在试样中加入偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂并混合均匀,并在1025℃以上的熔炉中熔化,待溶液冷却后,使用硝酸、盐酸和氢氟酸进行定容,再用等离子体质谱仪分析,检测限随元素不同介于(1~10)×10⁻²之间,相对偏差与相对误差均小于10%。

(2) 锆石LA-ICP-MS U-Pb测年

锆石的分选、制靶和阴极发光(CL)照相在广州

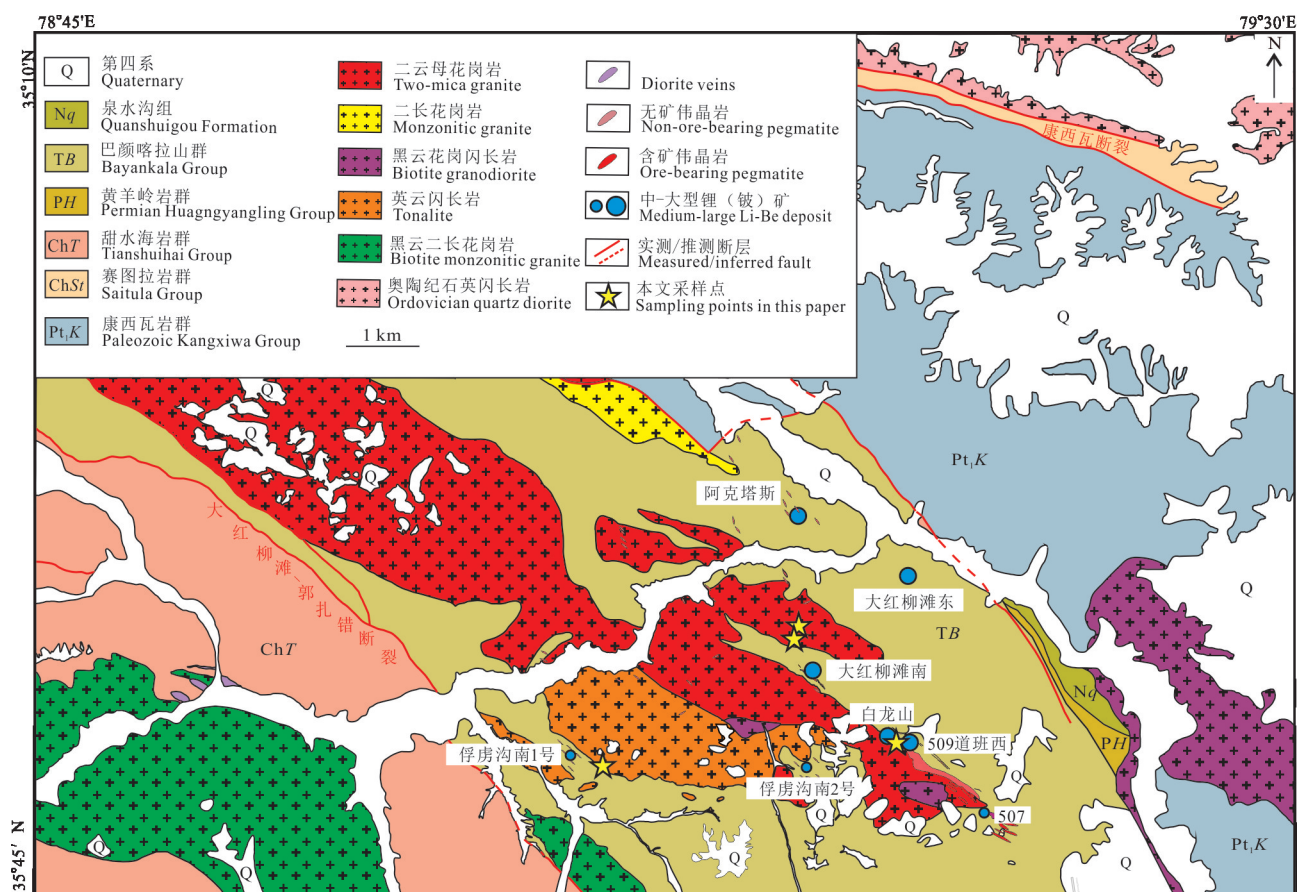


图2 大红柳滩矿集区区域地质图(底图据新疆维吾尔自治区有色地质矿产勘查研究院, 2022 修改)

Fig. 2 Geological map for the Dahongliutan district (modified after Institute of Geology and Mineral Exploration, Nonferrous Geological Exploration Bureau, Xinjiang Uygur Autonomous Region, 2022)

拓岩有限责任公司进行。将样品进行破碎,运用重液法以及磁法进行筛选,在双目镜下挑选出晶型好、色泽度好的锆石颗粒制成环氧树脂靶,并将样品靶抛光至锆石颗粒露出,然后分别在透射光、反射光和阴极发光下进行照相。锆石的阴极发光分析使用 TESCAN MIRA3 场发射扫描电子微探针(FE-SEM)完成,实验条件为加速电压 10 kV,光束电流 15 nA,放大倍率 300~500 倍。

锆石的 LA-ICPMS U-Pb 定年在澳大利亚阿德莱德大学进行,所用仪器为 Agilent ICP-MS 和 RESolution 193 nm 准分子激光剥蚀系统。激光束斑直径为 30 mm,采用氦气(He)作为剥蚀过程中的载气,氩气作为补偿气以调节灵敏度。采用 GJ-1 作为外标对年龄和同位素比值进行数据校正,使用标准锆石 91500 进行监控盲样。利用锆石的 Si 作为内标、NIST610 作为外标进行校正锆石中的 U、Th、Pb 含量。每个数据点分析采集时间为 90 s,

包括 20 s 的气体背景时间采集和 70 s 的样品信号采集。采用 Glitter4 软件计算 U-Th-Pb 同位素比值 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$) 以及微量元素含量 (Esmé van Achterbergh et al., 2001)。锆石的谐和图和加权平均年龄值利用 Isoplot (Vermeesch, 2018) 完成。

(3) 角闪石电子探针分析

角闪石成分的电子探针分析在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,测试仪器为 JXA-8100 电子探针分析仪。实验条件为:加速电压为 15 kV,激发电流为 20 nA,电子束斑直径为 2 μm 。采用的标样主要有:Si(石英)、Al(刚玉)、Na(钠长石)、Cl(石盐)、K(钾长石)、Mg(橄榄石)、Mn 和 Ti(红钒锰矿)、P(磷灰石)、Ca(硅灰石)、F(萤石)。Si、Ti、Al、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K、P、F 和 Cl 峰位的测试时间为 10 s,氧化物背景测试时间为峰位的一半。所有数据校正方式为 ZAF。

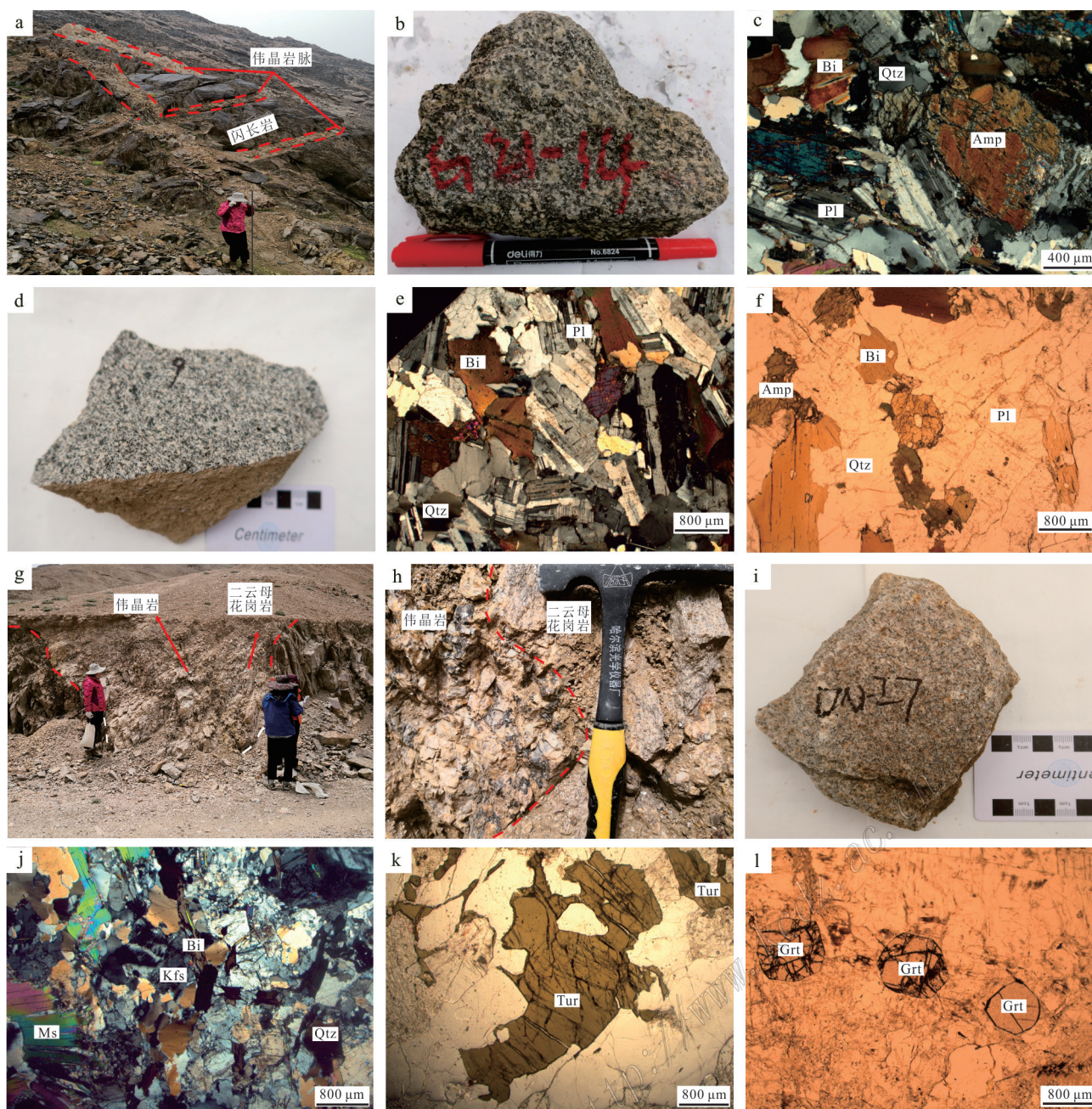


图3 大红柳滩地区用于地球化学和年代学研究的样品及显微照片

a~c. 白龙山闪长岩, 被无矿的电气石伟晶岩脉切穿(a), 主要组成矿物包括斜长石、角闪石和黑云母(b, c); d~f. 俘虏沟闪长岩, 主要组成矿物包括斜长石、角闪石和黑云母; g~l. 大红柳滩二云母花岗岩, 被不含矿伟晶岩脉侵入(g, h), 二云母花岗岩主要由石英、钾长石、斜长石、黑云母、白云母组成(j), 发育少量电气石(k)和石榴石(l)

Amp—角闪石; Bi—黑云母; Grt—石榴子石; Kfs—钾长石; Ms—白云母; Pl—斜长石; Qtz—石英; Tur—电气石

Fig. 3 Samples and micrographs used for geochemical and geochronological study from Dahongliutan area
a~c. Bailongshan diorite, which is cutted by barren tourmaline pegmatite (a), the main minerals include plagioclase, amphibole and biotite (b, c); d~f. Fulugou diorite, with the main minerals including plagioclase, amphibole and biotite; g~l. Dahongliutan two-mica granite cutted by barren pegmatite (g, h), it is mainly composed of quartz, K-feldspar, plagioclase, biotite and muscovite (j), develops by minor tourmaline (k) and garnet (l)

Amp—Amphibole; Bi—Biotite; Grt—Garnet; Kfs—K-feldspar; Ms—Muscovite; Pl—Plagioclase; Qtz—Quartz; Tur—Tourmaline

3 测试结果

3.1 主微量元素

本次研究对大红柳滩地区 13 件花岗岩类样品进行了全岩地球化学分析,结果见表 1。

白龙山闪长岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 最低,为 58.89%~60.30%(平均 59.56%),全碱 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 4.24%~4.96%(平均 4.62%),在 TAS 图解(图 4a)中落于闪长岩区域。俘虏沟闪长岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 居中,介于 60.12%~63.24%(平均 62.08%),全碱 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 5.12%~5.90%(平均 5.46%),落于闪长岩区域。大红柳滩二云母花岗岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 最高,为 73.00%~73.54%(平均 73.21%),全碱 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 8.09%~8.34%(平均 8.24%),落于花岗岩区域。

白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩的 $w(\text{K}_2\text{O})$ 接近,分别为 2.11%~2.87%(平均 2.51%)和 2.34%~3.43%(平均 2.75%),在 $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ 图解(图 4b)中均位于高钾钙碱性系列区域。大红柳滩二云母花岗岩的 $w(\text{K}_2\text{O})$ 则更高,介于 4.69%~5.54%(平均 5.20%),在图 4b 中位于高钾钙碱性-钾玄岩系列范围内。

笔者计算获得白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩的铝饱和度(A/CNK)分别为 0.97~1.14(平均 1.05)和 0.94~0.97(平均 0.96),在 A/CNK-A/NK 图解(图 4c)中,落入准铝质-弱过铝质区域;大红柳滩二云母花岗岩样品的铝饱和度(A/CNK)全部大于 1.1(1.16~1.30,平均 1.23),在图 4c 中落入过铝质花岗岩区域。

由图 5 可见,从白龙山闪长岩→俘虏沟闪长岩,

其 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{SiO}_2)$ 呈显著的负相关关系, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 则与 $w(\text{SiO}_2)$ 呈正相关。考虑到大红柳滩地区花岗岩类缺少金红石, TiO_2 一般赋存在黑云母之中,这意味着岩浆演化过程中可能发生了黑云母的分离结晶(图 5a); Al_2O_3 、 CaO 多赋存在长石之中, Al_2O_3 、 CaO 与 SiO_2 的负相关指示了长石的分离结晶(图 5b、c); Fe_2O_3 、 MgO 多赋存在暗色矿物,尤其是角闪石之中, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{SiO}_2)$ 的负相关反映了角闪石的分离结晶(图 5d、e)。

在球粒陨石标准化的稀土元素配分图(图 6a)中,白龙山闪长岩、俘虏沟闪长岩和大红柳滩二云母花岗岩均表现为富集轻稀土元素、亏损重稀土元素,其稀土元素总量 ΣREE 分别介于 121.86×10^{-6} ~ 159.42×10^{-6} (平均 140.83×10^{-6})、 168.80×10^{-6} ~ 224.60×10^{-6} (平均 198.93×10^{-6}) 和 85.40×10^{-6} ~ 126.34×10^{-6} (平均 107.65×10^{-6}),以二云母花岗岩的稀土元素总量最低;LREE/HREE 比值分别介于 7.47~11.87 (平均 9.38)、8.64~11.13 (平均 10.22) 和 11.37~15.74 (平均 13.74),dEu 分别介于 0.79~0.89 (平均 0.83)、0.56~0.77 (平均 0.64) 和 0.29~0.38 (平均 0.35),以二云母花岗岩的轻、重稀土元素分异和 Eu 元素异常最为明显,表明其源区可能有大量斜长石作为残留相或者经历了明显的长石分离结晶作用(朱弟成等, 2009)。花岗岩中 Ba、Sr 的亏损也可能源自长石矿物的分离结晶作用。

在原始地幔标准化的微量元素图解(图 6b)中,多数样品表现出显著富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素,亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、Ti 等高场强元素的特

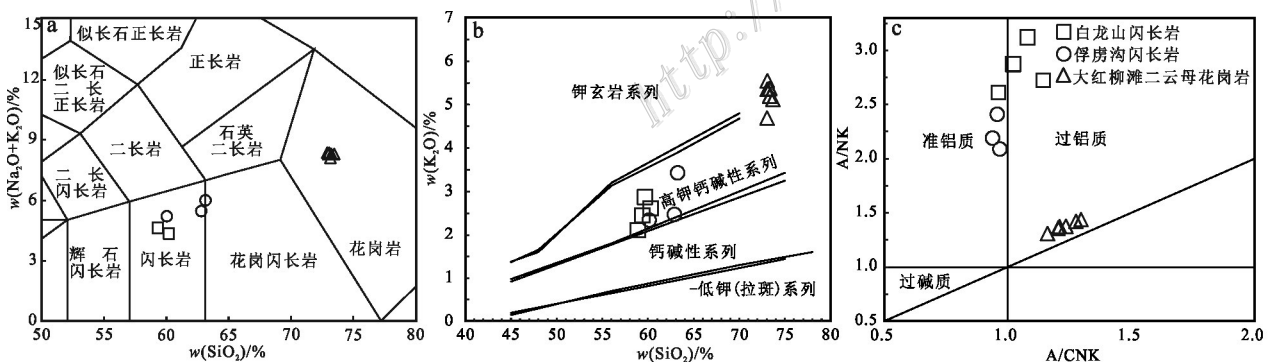


图 4 大红柳滩地区花岗岩类 TAS 图解(a,底图据 Middlemost, 1994)、 $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ 图解(b,底图据 Rickwood, 1989) 和 A/NK-A/CNK 图解(c,底图据 Maniar et al., 1989)

Fig. 4 TAS diagram (a, base map cited from Middlemost, 1994), $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ diagram (b, base map from Rickwood, 1989) and A/NK-A/CNK diagram (c, base map from Maniar et al., 1989) for the Dahongliutan granitoids

表1 大红柳滩地区花岗岩类主量元素(w(B)/%)和微量元素((w(B)/10⁻⁶)分析结果Table1 Major((w(B)/%) and trace((w(B)/10⁻⁶) element compositions of granitoids from the Dahongliutan area

组分	G13	G14	G15	G18	HYM9	HYM10	HYM11	DN24	DN27	DN35	DN37	DN45	DN46
	白龙山闪长岩				俘虏沟闪长岩			大红柳滩二云母花岗岩					
SiO ₂	59.39	58.89	60.3	59.67	62.89	60.12	63.24	73.54	73.11	73.21	73.00	73.33	73.06
TiO ₂	0.78	0.81	0.76	0.77	0.63	0.77	0.66	0.20	0.23	0.18	0.20	0.20	0.20
Al ₂ O ₃	17.25	17.42	17.21	17.81	16.28	17.14	16.26	14.74	14.6	14.68	14.44	14.61	14.92
Fe ₂ O ₃ ^T	7.19	7.53	7.26	7.18	5.72	6.95	5.94	1.41	1.59	1.29	1.62	1.44	1.62
MnO	0.16	0.16	0.15	0.16	0.12	0.15	0.12	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02
MgO	3.23	3.44	3.26	3.26	2.55	2.70	2.51	0.36	0.36	0.27	0.33	0.32	0.25
CaO	5.95	6.25	5.71	4.95	5.44	5.91	4.94	0.78	0.76	0.65	0.76	0.67	0.61
Na ₂ O	2.04	2.66	1.63	2.09	2.89	2.78	2.47	3.19	3.01	2.73	3.62	3.02	2.66
K ₂ O	2.45	2.11	2.61	2.87	2.47	2.34	3.43	5.09	5.33	5.36	4.69	5.19	5.54
P ₂ O ₅	0.18	0.19	0.18	0.18	0.14	0.16	0.14	0.29	0.29	0.32	0.30	0.29	0.30
烧失量	1.53	1.01	1.47	1.44	0.80	0.75	0.62	0.88	0.79	1.11	0.90	0.82	1.23
总和	98.62	99.46	99.07	98.94	99.13	99.71	99.63	99.31	100.1	98.73	98.99	99.11	99.18
A/NK	2.87	2.61	3.12	2.72	2.19	2.41	2.09	1.37	1.36	1.42	1.31	1.38	1.44
A/CNK	1.02	0.97	1.08	1.14	0.94	0.96	0.97	1.21	1.20	1.28	1.16	1.24	1.30
Li	827.0	193.5	997.0	948.0	55.6	49.4	46.8	76.2	81.7	92.8	94.8	53.9	40.1
Be	4.33	1.75	2.10	18.10	2.40	1.65	1.79	3.61	4.88	2.10	2.35	5.52	5.46
Sc	19.2	19.6	18.8	19.0	18.0	17.4	16.4	1.6	1.9	2.5	1.4	2.5	2.2
Cr	50	60	60	50	60	30	50	20	20	20	20	20	10
Rb	219	82	211	246	113	97	130	300	319	311	298	284	295
Sr	326	371	331	306	278	296	269	75	79	45	60	67	65
Y	21.1	19.9	21.2	18.3	24.1	26.1	26.9	7.1	7.4	6.8	7.5	8.6	8.6
Zr	184	178	198	198	181	190	182	99	116	87	111	98	101
Nb	15.4	15.3	15.9	18.7	14.0	13.4	14.6	14.2	15.5	17.6	15.8	16.2	15.6
Hf	4.9	4.6	5.1	5.1	4.7	4.9	4.7	2.8	3.3	2.5	3.2	2.8	2.9
Ta	0.8	0.9	0.9	1.3	1.0	0.9	1.0	1.6	1.5	1.3	1.6	1.8	2.0
Pb	11.3	14.4	10.5	15.4	19.8	17.0	21.9	90.8	68.4	70.1	41.8	28.9	36.9
Th	6.97	8.98	8.63	11.10	18.00	12.50	18.35	13.00	14.45	9.60	15.05	10.75	10.75
U	1.82	2.57	2.42	2.50	1.54	1.56	1.73	3.70	5.25	7.25	9.26	4.92	19.60
La	24.1	26.9	30.9	35.3	43.4	34.9	49.9	22.5	24.4	16.5	24.9	18.4	18.6
Ce	48.3	55.5	62.7	70.1	89.5	72.9	99.3	53.7	58.1	38.2	57.7	42.3	42.1
Pr	5.99	6.52	7.30	7.79	9.62	7.77	10.35	5.79	6.33	4.32	6.40	4.78	4.86
Nd	22.9	24.4	27.1	27.7	35.5	28.7	38.0	21.6	23.2	15.9	23.9	17.6	18.2
Sm	4.88	4.82	5.31	4.97	7.06	5.63	7.21	5.12	5.51	3.89	5.42	4.45	4.44
Eu	1.30	1.32	1.31	1.18	1.21	1.37	1.28	0.56	0.57	0.36	0.46	0.50	0.50
Gd	4.46	4.03	4.49	3.93	5.73	5.11	5.76	3.60	3.89	2.93	3.82	3.61	3.62
Tb	0.67	0.61	0.67	0.57	0.82	0.78	0.86	0.46	0.48	0.39	0.47	0.50	0.49
Dy	3.72	3.52	3.78	3.17	4.64	4.72	5.10	1.81	1.87	1.65	1.93	2.10	2.08
Ho	0.76	0.71	0.76	0.66	0.86	0.93	0.95	0.23	0.25	0.22	0.25	0.28	0.28
Er	2.19	2.01	2.20	1.83	2.36	2.70	2.72	0.53	0.53	0.52	0.56	0.64	0.66
Tm	0.31	0.30	0.31	0.26	0.32	0.38	0.38	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07
Yb	1.97	1.91	2.02	1.69	2.08	2.50	2.37	0.36	0.37	0.40	0.41	0.47	0.47
Lu	0.31	0.30	0.32	0.27	0.32	0.39	0.37	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
ΣREE	121.9	132.9	149.2	159.4	203.4	168.8	224.6	116.4	125.6	85.4	126.3	95.8	96.4
ΣLREE	107.5	119.5	134.6	147.0	186.3	151.3	206.0	109.3	118.1	79.2	118.8	88.0	88.7
ΣHREE	14.39	13.39	14.55	12.38	17.13	17.51	18.51	7.10	7.50	6.23	7.56	7.74	7.73
δEu	0.84	0.89	0.80	0.79	0.56	0.77	0.59	0.38	0.36	0.31	0.29	0.37	0.37
δCe	0.96	1.00	0.99	0.99	1.03	1.04	1.02	1.13	1.12	1.08	1.09	1.08	1.06
Nb/U	8.46	5.95	6.57	7.48	9.09	8.59	8.44	3.84	2.95	2.43	1.71	3.29	0.80
Ta/U	0.44	0.35	0.37	0.52	0.65	0.58	0.58	0.43	0.29	0.18	0.17	0.37	0.10
Nb/Ta	19.25	17.00	17.67	14.38	14.00	14.89	14.60	8.88	10.33	13.54	9.88	9.00	7.80
Sm/Nd	0.21	0.20	0.20	0.18	0.20	0.20	0.19	0.24	0.24	0.24	0.23	0.25	0.24
Rb/Sr	0.67	0.22	0.64	0.8	0.41	0.33	0.48	3.99	4.04	6.94	5.00	4.25	4.57
Zr/Hf	37.55	38.7	38.82	38.82	38.51	38.78	38.72	35.36	35.15	34.80	34.69	35.00	34.83
(La/Yb) _N	8.78	10.1	10.97	14.98	14.97	10.01	15.1	44.83	47.30	29.59	43.56	28.08	28.39
Ba	607	580	617	656	437	565	753	242	244	183	198.5	260	264
M	1.71	1.86	1.6	1.53	1.78	1.82	1.72	1.2	1.2	1.12	1.25	1.16	1.11
T _{Zr} (°C)	775.2	762.1	790	794.8	768.7	770.1	773.4	760.1	772.9	754.5	765.9	761.4	767.7

注: A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)(分子数); A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)(分子数); δEu=Eu_N/(Sm_N+Gd_N)^{0.5}, δCe=Ce_N/(La_N+Pr_N)^{0.5}, N为标准化值(标准化值据文献Sun et al., 1989); 锆饱和温度计算采用T_{Zr}=12900/[2.95+0.85M+ln(496000/Zr_{熔体})]-273.15, 其中M=(Na+K+2Ca)/(Al×Si), 式中均为金属阳离子含量(Miller et al., 2003)。比值单位为1。

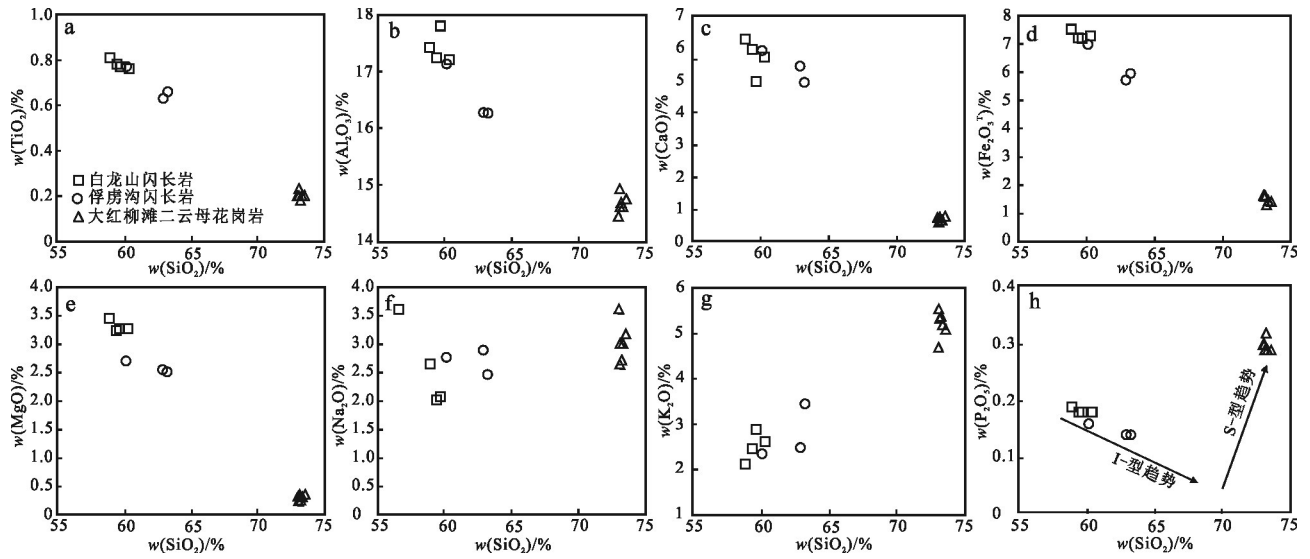


图 5 大红柳滩地区花岗岩类主要元素 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams for the granitoids from the Dahongliutan area

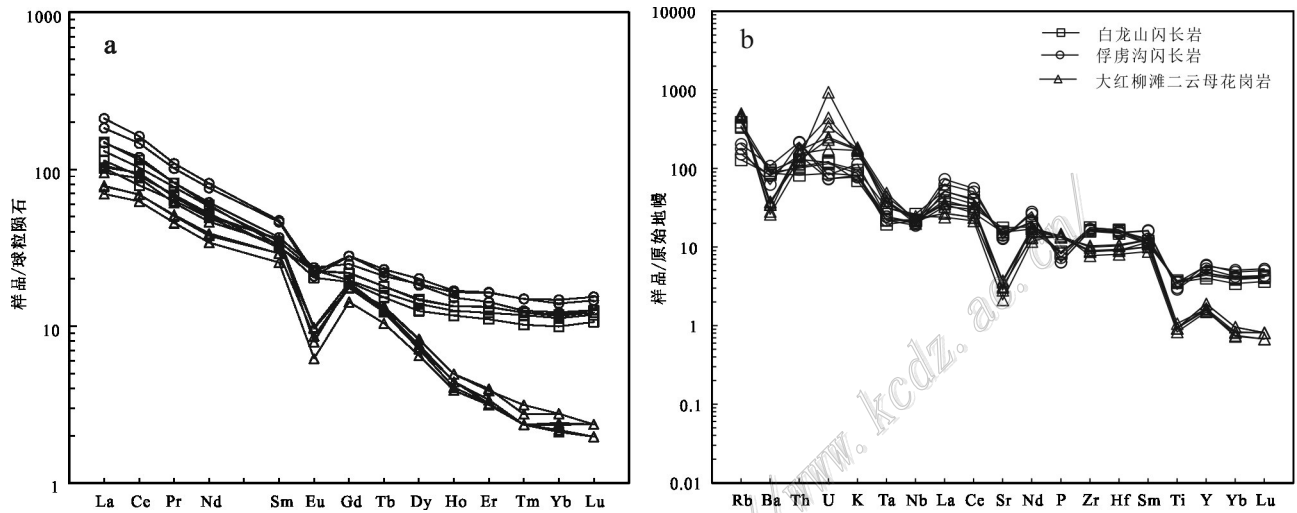


图 6 大红柳滩地区花岗岩类球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化数据引自 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergram (b) for the Dahongliutan granitoids (the data of chondrite and primitive cited from Sun et al., 1989)

征,其中白龙山闪长岩和俘虜沟闪长岩的P元素亏损强烈,大红柳滩二云母花岗岩的U元素异常富集。

稀有元素方面,白龙山闪长岩具有较高的 $w(\text{Li})$ 、 $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Nb})$ 和较低的 $w(\text{Ta})$ 从白龙山闪长岩到俘虜沟闪长岩, $w(\text{Nb})$ 降低, $w(\text{Ta})$ 升高, Nb/Ta 降低,而 $w(\text{Be})$ 基本不变(图7)。上述趋势说明岩浆的结晶分异作用并未造成 $w(\text{Li})$ 、 $w(\text{Be})$ 、 $w(\text{Rb})$ 增加,但对 $w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Ta})$ 等元素意义重大,且铌铁矿先于钽铁

矿结晶。而Rb主要通过替换K、Na和Li等碱金属元素,以类质同象的形式进入锂云母、铯榴石、铯锂云母、钾长石(天河石)、白云母、黑云母和锂辉石等矿物之中(赵振华等, 2020; 吴昌志等, 2021; 谢金玲等, 2023)。本文获得白龙山闪长岩的 $w(\text{Rb})$ 略高于俘虜沟闪长岩,可能是含Rb矿物结晶所致。另外,Rb作为强不相容元素,在地壳中的平均丰度高达 49×10^{-6} ,而在地幔中的丰度只有 0.6×10^{-6} (张卓

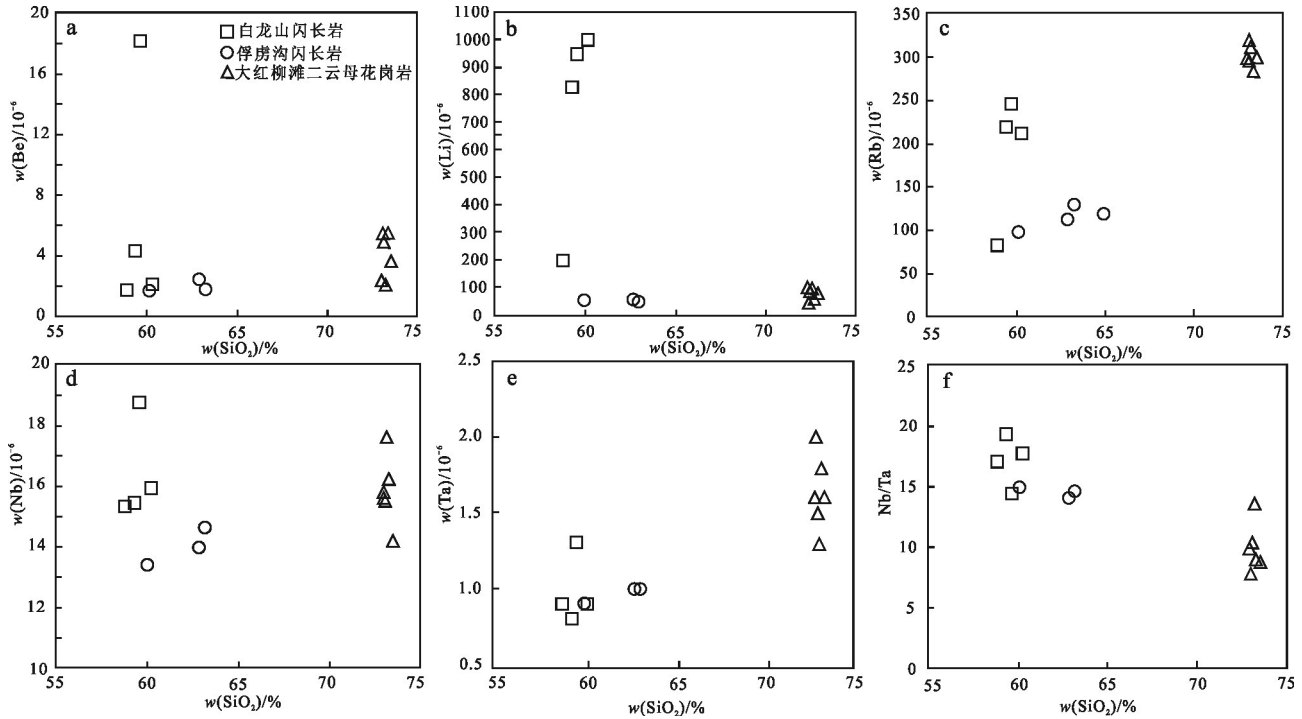


图7 大红柳滩地区花岗岩类 $w(\text{Be})$ 、 $w(\text{Li})$ 、 $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Ta})$ 、 Nb/Ta 随 $w(\text{SiO}_2)$ 变化图解

Fig. 7 Diagrams showing the changes of $w(\text{Be})$, $w(\text{Li})$, $w(\text{Rb})$, $w(\text{Nb})$, $w(\text{Ta})$, Nb/Ta along with $w(\text{SiO}_2)$ in the Dagongliutan granitoids

盈, 2021), 这可能是壳源的二云母花岗岩 $w(\text{Rb})$ 显著增加(图7c)的重要原因。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

本次工作对大红柳滩地区4件花岗岩类样品进行了锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年, 包括闪长岩样品2件(白龙山 G15 和俘虜沟 HYM11)和二云母花岗岩样品2件(DN25 和 DN28), 得到的边部年龄数据见表2, 锆石微量数据见附表1, 二云母花岗岩核部年龄数据见附表2。

白龙山闪长岩样品 G15 和俘虜沟闪长岩样品 HYM11 中的锆石主要为自形晶, 粒径一般在 70~260 μm , 长宽比为 2:1~3:1, 锆石阴极发光(CL)图像显示特征的岩浆韵律环带(图8a)。获得白龙山闪长岩39个位于边部震荡环带处的分析点的 $w(\text{U})$ 为 $(132\sim 588)\times 10^{-6}$, $w(\text{Th})$ 为 $(65\sim 338)\times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.24~0.58 (均大于 0.1), 显示典型岩浆锆石特征(吴元保等, 2004)。计算得到39个点的协和年龄为 $(213.67\pm 0.61)\text{Ma}$ (MSWD=1.4); 加权平均年龄为 $(213.78\pm 0.64)\text{Ma}$ (MSWD=1.08), 二者在误差范围内一致(图9a, b), 可代表白龙山闪长岩的侵位年龄。俘虜沟闪长岩锆石边部的震荡环带处的14个测试点的 $w(\text{U})$ 为 $80\sim 596\times 10^{-6}$, $w(\text{Th})$ 为 $(34\sim 143)\times 10^{-6}$,

Th/U 比值为 0.22~0.51 (均大于 0.1)。计算得到14个测试点的协和年龄为 $(211.73\pm 1.02)\text{Ma}$ (MSWD=1.9), 加权平均年龄为 $(211.90\pm 1.7)\text{Ma}$ (MSWD=2.2), 二者误差范围内一致(图9c, d)。

Breiter 等(2014)提出依据锆石的 Zr/Hf 比值, 可将花岗岩划分为普通花岗岩($\text{Zr}/\text{Hf} > 55$)、中等分异花岗岩($25 < \text{Zr}/\text{Hf} < 55$)和高分异花岗岩($\text{Zr}/\text{Hf} < 25$)3类。获得白龙山闪长岩和俘虜沟闪长岩的锆石 Zr/Hf 比值分别介于 36~49 和 32~45 之间, 均指示中等分异程度。

来自二云母花岗岩的锆石晶型较好, 以柱状为主。锆石粒径变化较大, 介于 60~150 μm , 长宽比主要集中在 2:1~3:1。CL 图像(图8a)显示, 锆石大多具有清晰的核边结构: 边部多发育清晰的振荡环带, 具有岩浆锆石的特征, 核部则结构复杂, 可发育震荡环带、扇形分带或无环带, 且往往边部比核部在 CL 下颜色更暗(图8a)。对119个测试点进行了 U-Pb 定年, 得到的年龄跨度较大, 由 180 Ma 到 2490 Ma (图8a、图9e) (注: 当年龄小于 1000 Ma 时, 使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 反之则使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)。

113个位于核部的测试点给出的 Th/U 比值介于 0.02~1.45, 年龄介于 207~2490 Ma, 以 ~210 Ma 年龄

表2 大红柳滩地区花岗岩类锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the granitoids from Dahongliutan area

分析点号	$w(B)/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%				
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ		
G15-07	98.41	257.11	0.38	0.2425	0.0218	0.0333	0.0008	0.0520	0.0047	220.45	19.82	211.45	4.76	284.86	25.91	96
G15-08	105.36	279.46	0.38	0.2360	0.0207	0.0336	0.0007	0.0503	0.0045	215.17	18.89	213.10	4.65	205.94	18.25	99
G15-09	69.59	179.81	0.39	0.2422	0.0257	0.0333	0.0009	0.0521	0.0056	220.19	23.40	211.11	5.50	288.21	31.10	96
G15-12	118.90	294.97	0.40	0.2467	0.0206	0.0336	0.0007	0.0526	0.0044	223.92	18.70	213.12	4.54	312.72	26.36	95
G15-21	121.14	319.05	0.38	0.2480	0.0200	0.0339	0.0007	0.0527	0.0043	224.94	18.18	215.16	4.46	313.51	25.54	96
G15-32	121.01	299.26	0.40	0.2331	0.0205	0.0335	0.0007	0.0505	0.0043	212.72	18.70	212.36	4.33	216.41	18.43	100
G15-39	150.61	335.19	0.45	0.2345	0.0198	0.0343	0.0007	0.0496	0.0040	213.94	18.06	217.25	4.24	174.24	14.17	102
G15-46	102.9	250.98	0.41	0.2383	0.0226	0.0337	0.0007	0.0512	0.0047	216.99	20.57	213.56	4.70	247.75	22.95	98
G15-48	79.53	203.95	0.39	0.2289	0.0242	0.0340	0.0008	0.0487	0.0051	209.32	22.11	215.37	5.16	133.85	13.94	103
G15-51	125.45	320.94	0.39	0.2380	0.0205	0.0339	0.0007	0.0507	0.0042	216.78	18.64	215.03	4.31	226.53	18.83	99
G15-52	152.30	502.61	0.30	0.2379	0.0171	0.0340	0.0006	0.0506	0.0034	216.74	15.53	215.24	3.64	223.31	15.03	99
G15-55	104.74	230.82	0.45	0.2345	0.0232	0.0334	0.0008	0.0507	0.0049	213.88	21.21	211.63	4.85	227.67	22.15	99
G15-56	174.37	406.49	0.43	0.2370	0.0185	0.0338	0.0006	0.0506	0.0038	215.95	16.90	214.38	3.93	221.39	16.52	99
G15-57	92.31	247.72	0.37	0.2341	0.0225	0.0331	0.0007	0.0510	0.0048	213.57	20.57	210.08	4.69	240.19	22.64	98
G15-60	64.52	131.94	0.49	0.2330	0.0297	0.0341	0.001	0.0493	0.0063	212.63	27.13	216.10	6.26	160.58	20.45	102
G15-66	165.06	359.01	0.46	0.2357	0.0192	0.0335	0.0006	0.0508	0.0040	214.87	17.51	212.68	3.85	228.75	18.04	99
G15-70	130.96	356.86	0.37	0.2482	0.0197	0.0339	0.0006	0.0529	0.0041	225.13	17.91	214.97	3.87	325.06	24.97	95
G15-71	220.55	419.91	0.53	0.2347	0.0178	0.0336	0.0006	0.0505	0.0037	214.03	16.20	213.29	3.57	215.14	15.61	100
G15-75	338.46	588.44	0.58	0.2311	0.0157	0.0337	0.0005	0.0496	0.0032	211.13	14.35	213.95	3.18	175.22	11.21	101
G15-76	102.44	222.12	0.46	0.2319	0.0233	0.0334	0.0007	0.0502	0.0050	211.8	21.25	212.05	4.73	205.05	20.31	100
G15-77	173.80	428.17	0.41	0.2402	0.0181	0.0347	0.0006	0.0501	0.0036	218.6	16.44	219.94	3.65	200.79	14.45	101
G15-84	125.93	342.42	0.37	0.2278	0.0192	0.0336	0.0006	0.0493	0.0040	208.38	17.53	212.78	3.94	159.78	13.05	102
G15-85	144.81	369.73	0.39	0.2342	0.0189	0.0345	0.0006	0.0493	0.0038	213.64	17.22	218.35	3.87	163.29	12.72	102
G15-86	184.73	406.28	0.45	0.2346	0.0182	0.0334	0.0006	0.0510	0.0038	213.97	16.57	211.77	3.65	240.00	17.87	99
G15-90	126.66	277.02	0.46	0.2429	0.0218	0.0336	0.0007	0.0525	0.0046	220.77	19.80	213.05	4.33	307.96	27.04	97
G15-91	130.99	355.76	0.37	0.2303	0.019	0.0331	0.0006	0.0506	0.0040	210.48	17.34	210.07	3.84	219.69	17.54	100
G15-92	167.84	372.44	0.45	0.2373	0.018	0.0336	0.0006	0.0512	0.0039	216.22	16.42	213.27	3.81	250.31	19.22	99
G15-94	98.44	405.05	0.24	0.2343	0.0173	0.0335	0.0006	0.0507	0.0038	213.76	15.82	212.68	3.70	225.73	16.88	99
G15-97	111.43	269.76	0.41	0.2288	0.0204	0.0333	0.0007	0.0498	0.0045	209.18	18.66	211.24	4.34	183.66	16.63	101
G15-98	146.81	337.97	0.43	0.2386	0.019	0.0336	0.0006	0.0514	0.0041	217.23	17.31	213.32	4.00	256.66	20.72	98

白龙山闪长岩(G15), 锆石边部

续表 2
Continued Table 2

分析点号	$w(\text{B})/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%				
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ					
G15-99	114.35	306.35	0.37	0.2384	0.0197	0.0338	0.0007	0.0511	0.0043	217.13	17.99	214.10	4.15	246.04	20.66	99
G15-100	190.14	439.43	0.43	0.2300	0.0165	0.0335	0.0006	0.0497	0.0036	210.22	15.07	212.40	3.56	180.87	13.09	101
G15-101	136.74	336.82	0.41	0.2282	0.0185	0.0339	0.0006	0.0487	0.004	208.68	16.95	214.99	4.01	132.05	10.86	103
G15-108	106.23	273.83	0.39	0.2330	0.0206	0.0334	0.0007	0.0504	0.0045	212.67	18.82	211.73	4.34	211.2	18.96	100
G15-110	310.01	557.75	0.56	0.2375	0.0153	0.0336	0.0005	0.0509	0.0033	216.39	13.92	213.30	3.27	236.36	15.29	99
G15-111	167.14	426.46	0.39	0.2398	0.0171	0.0336	0.0006	0.0514	0.0037	218.22	15.56	213.18	3.61	258.41	18.6	98
G15-114	180.64	353.94	0.51	0.2372	0.0186	0.0341	0.0006	0.0500	0.0040	216.09	16.96	216.40	3.96	195.23	15.51	100
G15-116	160.48	320.98	0.50	0.2358	0.0195	0.034	0.0007	0.0499	0.0042	214.99	17.77	215.40	4.13	191.20	16.01	100
G15-119	150.67	315.75	0.48	0.2340	0.0194	0.0339	0.0007	0.0496	0.0042	213.51	17.74	214.86	4.13	176.67	14.87	101
浮屠沟闪长岩(HYM11), 锆石边部																
HYM11-28	90.74	393.67	0.23	0.2268	0.0173	0.0332	0.0006	0.0495	0.0038	207.55	15.80	210.46	3.75	172.51	13.24	101
HYM11-05	122.85	542.28	0.23	0.2358	0.0154	0.0333	0.0005	0.0509	0.0033	214.94	14.07	211.18	3.31	235.46	15.44	98
HYM11-11	119.27	389.74	0.31	0.2371	0.0178	0.033	0.0006	0.0518	0.0039	216.08	16.24	209.06	3.74	277.51	21.03	97
HYM11-14	113.84	446.57	0.25	0.2511	0.0173	0.0340	0.0006	0.0532	0.0037	227.45	15.71	215.71	3.61	337.6	23.44	95
HYM11-34	60.20	150.78	0.40	0.2379	0.0274	0.0334	0.0009	0.0517	0.0061	216.68	24.93	211.69	5.73	269.73	31.61	98
HYM11-45	109.42	403.64	0.27	0.2254	0.0170	0.0332	0.0006	0.0490	0.0037	206.40	15.54	210.61	3.76	149.03	11.31	102
HYM11-55	128.67	596.22	0.22	0.2410	0.0149	0.0335	0.0005	0.0518	0.0032	219.26	13.56	212.67	3.27	274.39	16.99	97
HYM11-113	128.61	494.68	0.26	0.2380	0.0169	0.034	0.0006	0.0505	0.0036	216.76	15.43	215.58	3.91	219.09	15.78	99
HYM11-47	61.75	135.86	0.45	0.2234	0.0280	0.0335	0.0010	0.0481	0.0061	204.77	25.65	212.66	6.06	103.42	13.19	104
HYM11-50	124.25	381.19	0.33	0.2287	0.0176	0.0328	0.0006	0.0504	0.0039	209.14	16.11	207.86	3.83	210.54	16.37	99
HYM11-79	33.52	79.62	0.42	0.2270	0.039	0.0328	0.0013	0.0499	0.0088	207.72	35.66	208.01	8.26	187.36	32.90	100
HYM11-85	143.37	530.76	0.27	0.2350	0.0162	0.0332	0.0006	0.0510	0.0036	214.29	14.74	210.43	3.69	241.77	16.86	98
HYM11-97	109.86	457.47	0.24	0.2386	0.0176	0.0344	0.0006	0.0501	0.0037	217.27	16.00	218.15	4.06	196.45	14.65	100
HYM11-106	49.67	98.24	0.51	0.2308	0.0355	0.0329	0.0012	0.0507	0.0080	210.88	32.40	208.62	7.51	225.38	35.39	99
二云母花岗岩(DN28和DN25), 锆石边部																
DN28-23	36.30	3830.32	0.01	0.2007	0.007	0.0288	0.0003	0.0505	0.0017	185.73	6.52	182.92	1.60	216.08	7.18	98
DN28-49	92.43	4092.89	0.02	0.2041	0.0067	0.0295	0.0003	0.0498	0.0016	188.63	6.18	187.39	1.65	185.42	6.11	99
DN25-04	507.08	3756.88	0.13	0.2028	0.0093	0.0292	0.0005	0.0499	0.0018	187.49	8.62	185.56	3.11	190.87	7.05	99
DN25-05	235.48	1900.3	0.12	0.2210	0.0107	0.0318	0.0006	0.0500	0.0020	202.70	9.84	202.09	3.76	192.47	7.76	100
DN25-46	38.72	4633.44	0.01	0.1998	0.0087	0.0283	0.0005	0.0509	0.0017	184.95	8.06	179.89	3.11	234.93	7.64	97
DN28-55	769.11	2745.73	0.28	0.2082	0.0075	0.0299	0.0004	0.0501	0.0018	192.01	6.91	189.64	2.55	198.11	7.2	99

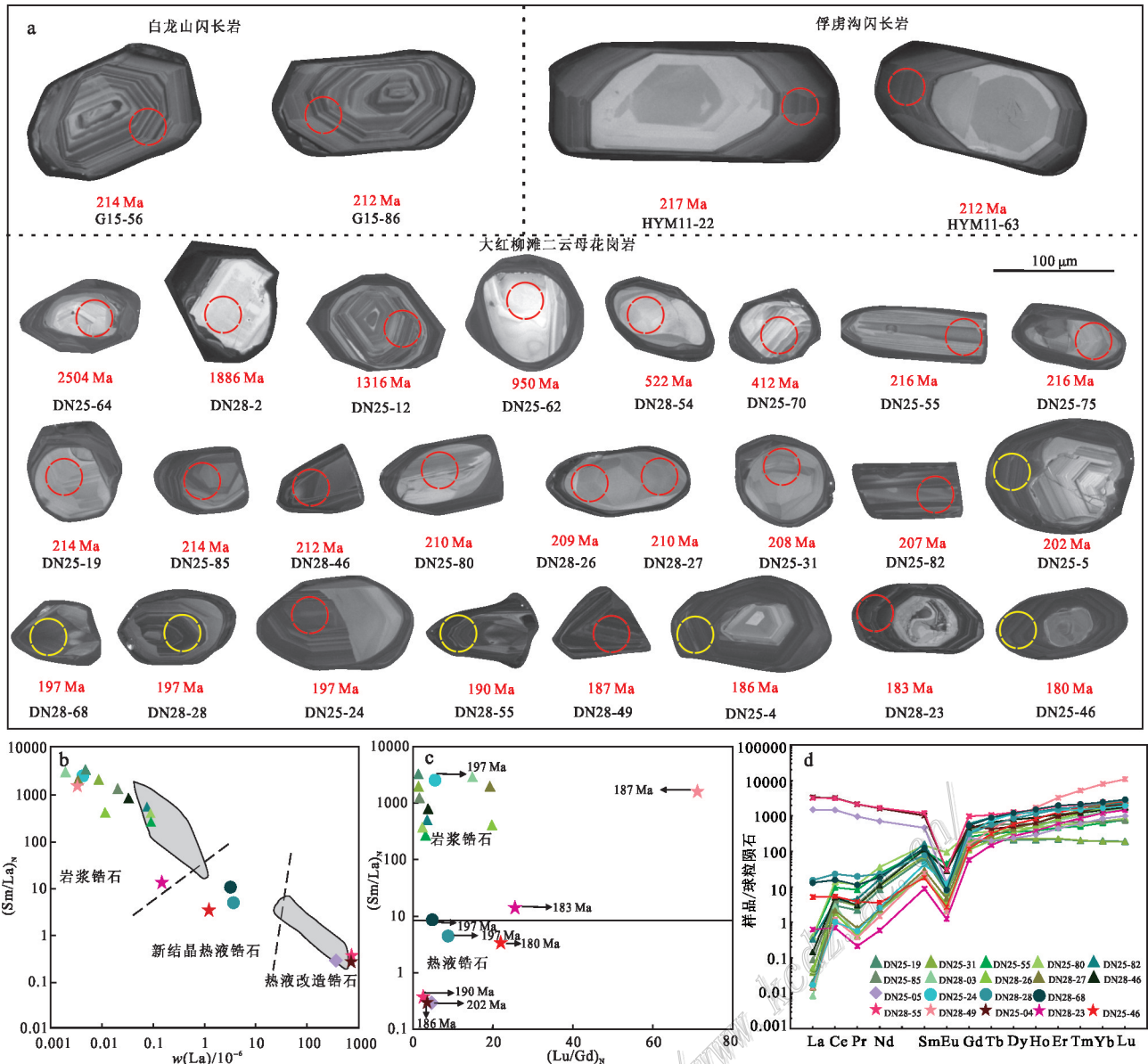


图 8 大红柳滩花岗岩类代表性锆石 CL 特征(a, 黑色数字表示测试点号, 红色数字表示年龄, 黄色圈代表热液锆石)、二云母花岗岩锆石 $(Sm/La)_N-w(La)$ 图解(b, 底图据 Kirkland et al., 2009)、 $(Sm/La)_N-(Lu/Gd)_N$ 图解(c, 底图据 Ferry et al., 2007) 和球粒陨石标准化稀土元素配分图(d, 标准化数据引自 Sun et al., 1989)

Fig. 8 Representative zircon CL images of the Dahongliutan granitoids(a, black numbers are the numbers of spots, red numbers are obtained U-Pb ages, yellow circles represent hydrothermal zircons), $(Sm/La)_N-w(La)$ diagram (b, base map cited from Kirkland et al., 2009), $(Sm/La)_N-(Lu/Gd)_N$ diagram (c, base map cited from Ferry et al., 2007) and chondrite-normalized REE pattern (d, the data of chondrite and primitive mantle cited from Sun et al., 1989) of zircons from the Dahongliutan two-mica granite

为高峰(附表 2, 图 9f)。这些~210 Ma 左右的锆石 Th/U 比值均>0.1, 微量元素和稀土元素配分模式与岩浆锆石一致(图 8b~d)。10 个分析点给出的协和年龄为 $(211.20 \pm 1.1) Ma$ (MSWD=0.34, $n=10$, 附表 2, 图 9g), 与前人获得的大红柳滩二云母花岗岩的侵位时代一致(209.6~217.5 Ma, 表 3), 亦与大红柳滩地

区花岗岩类大规模的岩浆侵入时限一致, 笔者认为可代表岩体的侵位时代, 其余大于该年龄者被认为属继承锆石。这些锆石对应的 Zr/Hf 比值(38~44) 指示中等分异程度。

Hoskin 等(2000)和 Rubatto(2002)的研究表明, 热液锆石的显著特征为稀土元素分配模式比较平

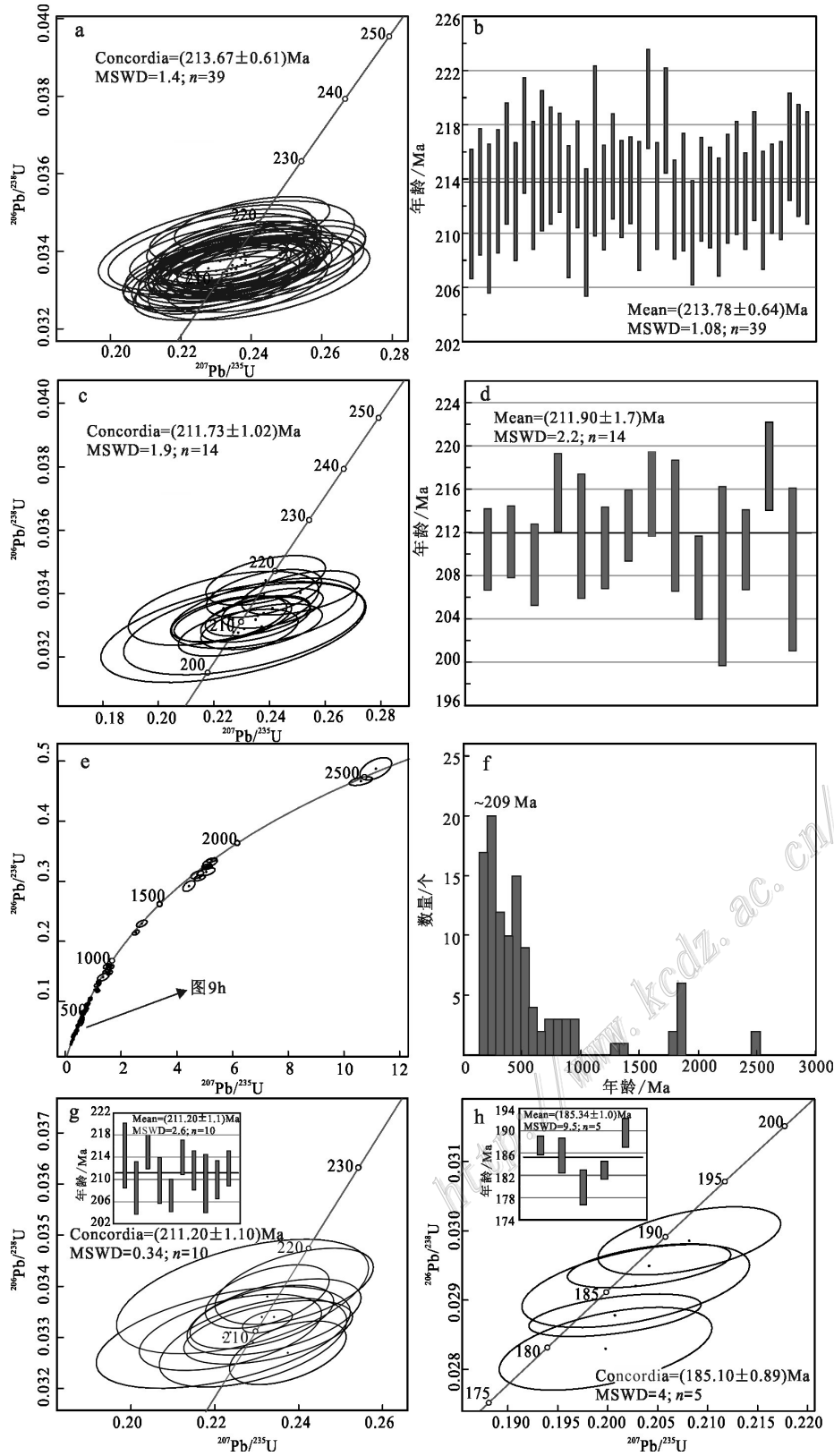


图9 大红柳滩花岗岩类锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果,包括白龙山闪长岩(a,b)、俘虏沟闪长岩(c,d)以及大红柳滩二云母花岗岩(e~h)

Fig. 9 Zircon LA-ICPMS U-Pb ages for the Dahongliutan granitoids, including the Bailongshan diorite (a, b), the Fulugou diorite (c, d), and the Dahongliutan two-mica granite (e-h)

坦,富集 LREE,La 含量较岩浆锆石高, $(\text{Sm}/\text{La})_N$ 比值则明显较低,Ce 正异常较弱甚至没有;而几乎所有岩浆锆石和变质锆石都具有低的 LREE 和强烈的 Ce 正异常, $(\text{Sm}/\text{La})_N$ 比值高。本次研究获得二云母花岗岩核部最年轻的测试点(图 8a 中的 DN25-24、DN28-28、DN28-68 号点)给出的年龄为 197 Ma 左右,其中 DN25-24 测试点的 $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 分别为 2182×10^{-6} 和 48×10^{-6} ,Th/U 比值为 0.02,在锆石成因判别图解中(图 8b~d)落入岩浆锆石区域,其稀土元素配分模式也和典型岩浆锆石类似。其余 2 个点 DN28-28 和 DN28-68 测试点的 $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 分别为 2156×10^{-6} 、 1578×10^{-6} 和 233×10^{-6} 、 209×10^{-6} ,Th/U 比值分别为 0.11 和 0.13。其稀土元素特征介于岩浆锆石和热液锆石之间(图 8b~d),可能形成于岩浆-热液过渡期。与之类似,6 个位于锆石边部的测试点其 $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 、稀土元素组成亦与典型岩浆锆石存在差异。其中 DN28-49 测试点的 $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 分别为 4093×10^{-6} 和 92×10^{-6} ,其 Th/U 极低(0.02),在锆石成因判别图解(图 8b~d)中落于岩浆区域,其稀土元素模式也类似于岩浆锆石。而 DN28-23 和 DN25-46 测试点的 $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 分别为 3830×10^{-6} 、 4633×10^{-6} 和 36×10^{-6} 、 39×10^{-6} ,其 Th/U 比值极低(均为 0.01),显著低于典型岩浆锆石(戚学祥等, 2008)。在锆石成因判别图解(图 8b、c)中分别落于岩浆和热液锆石过渡区域,二者稀土元素配分模式类似于上述岩浆-热液过渡期锆石(DN28-28 和 DN28-68,图 8d),均表现为 $w(\text{La})$ 和 $w(\text{Ce})$ 比岩浆锆石高,且 Ce 正异常不明显,形成于岩浆-热液过渡阶段;而 DN25-04、DN25-05 和 DN28-55 这 3 个点的 Th/U 比值均大于 0.1(分别为 0.13、0.12 和 0.28),其稀土元素

配分模式与典型的热液锆石类似,表现为平坦的稀土元素配分模式,富集 LREE,如 La、Ce、Pr 和 Nd,而 $(\text{Sm}/\text{La})_N$ 、 $(\text{Lu}/\text{Gd})_N$ 比值明显较岩浆锆石更低(图 8b~d),具有热液锆石典型的暗色增生边核幔结构(夏清等, 2021),形成于热液阶段或者岩浆结晶分异晚期。笔者获得 DN25-05 测试点的年龄为 $(202.09 \pm 3.76)\text{Ma}$;其余 5 个点的年龄集中于 185 Ma 左右,给出的协和年龄为 $(185.34 \pm 1.0)\text{Ma}$ (图 9h,表 2),代表了最晚期的岩浆-热液事件的年龄。

3.3 角闪石主量元素分析结果

本次研究对白龙山和俘虏沟的 3 件闪长岩样品(No. G15、HYM9 和 HYM10)进行了角闪石成分的电子探针(图 10),结果见附表 3。

闪长岩中所含角闪石均表现为富 Mg、Ca、K,低 Ti、Na 的特点。获得白龙山(G15)和俘虏沟闪长岩(HYM9 和 HYM10)中角闪石的 $w(\text{MgO})$ 为 8.43%~10.47%, $w(\text{CaO})$ 为 11.37%~12.22%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 0.4%~1.15%, $w(\text{TiO}_2)$ 为 0.43%~1.56%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.72%~1.1%, $w(\text{FeO})$ 为 16.45%~18.72%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 则介于 8.14%~10.98%,在角闪石成因图解(图 11)中落入铁普通角闪石-镁角闪石系列范围。

4 讨论

4.1 岩浆-热液活动时限:来自锆石 U-Pb 年龄的约束

对于大红柳滩地区花岗岩类侵入时代和伟晶岩的矿化时代,前人已做较多工作(表 3)。在成岩年龄方面,前人获得白龙山闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(212.3 \pm 1.6)\text{Ma}$ (王核等, 2021),俘虏沟石英闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(213.7 \pm$

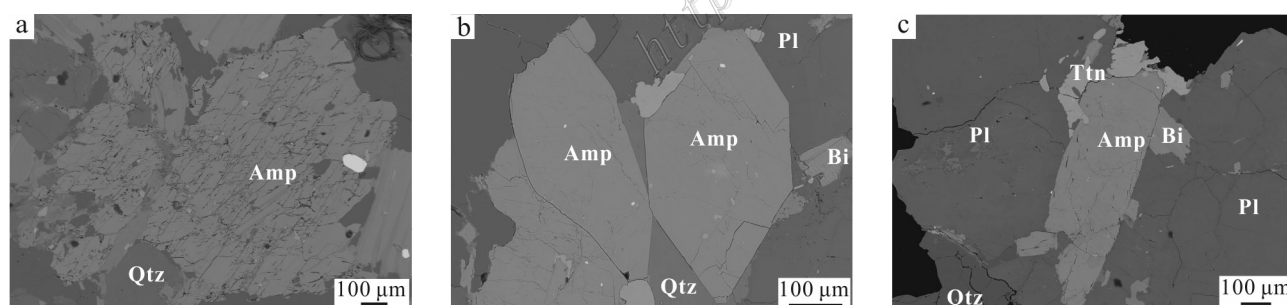


图 10 白龙山和俘虏沟闪长岩中角闪石的背散射特征

Amp—角闪石;Qtz—石英;Bi—黑云母;Pl—斜长石;Ttn—榍石

Fig. 10 BSE characteristics of amphibole from the Bailongshan and Fulugou diorites

Amp—Amphibole; Qtz—Quartz; Bi—Biotite; Pl—Plagioclase; Ttn—Titanite

表3 大红柳滩地区花岗岩类侵位年龄及伟晶岩矿化年龄

Table 3 Emplacement ages of granitoids and mineralization ages of pegmatite Li deposits in the Dahongliutan area

岩体/矿床	岩性	测年方法	测年结果/Ma	资料来源
白龙山	花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	212.3±1.6	王核等, 2021
	闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	213.67±0.61	本文
俘虏沟	石英闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	213.7±2.0	魏小鹏等, 2018
	闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	211.73±1.02	本文
大红柳滩	二云母花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	217.5±2.8	Zhang et al., 2018
	二云母花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	209.6±1.3	魏小鹏等, 2017
	二云母花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	205.90±0.41	Zhou et al., 2022
	二云母花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	211.20±1.10	本文
	二云母花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	185.1±0.89	本文
	二长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	217.4±2.2	乔耿彪等, 2015
	二云母二长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	216.7±0.82	Zhou et al., 2022
	二云母二长花岗岩	SIMS 锆石 U-Pb	216±1.5	唐俊林等, 2022
	白云母二长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	214±0.63	Zhou et al., 2022
	黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	214.7±1.0	Zhou et al., 2022
	黑云母花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	212.71±0.89	Zhou et al., 2022
龙门山锂矿	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	216.8±0.9	唐俊林等, 2022
	细晶花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	209.5±1.2	唐俊林等, 2022
509道班西锂矿	二云母二长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	208.8±1.7	谭克彬等, 2021
	伟晶岩	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar坪年龄	188.07±1.86	王威等, 2022
白龙山锂矿	伟晶岩	LA-ICP-MS 铷钽矿 U-Pb	208.1±1.5	Wang et al., 2021
	伟晶岩	LA-ICP-MS 锡石 U-Pb	211±4.1	周楷麟等, 2021
阿克塔斯锂矿	90-1号脉伟晶岩	LA-ICP-MS 锡石 U-Pb	218±12	Yan et al., 2018
	90-1号脉伟晶岩	LA-ICP-MS 铷钽矿 U-Pb	211.9±2.4	Yan et al., 2018
	花岗伟晶岩	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar坪年龄	144.7±4.3	乔耿彪等, 2020
雪凤岭锂矿	伟晶岩	LA-ICP-MS 锡石 U-Pb	208±15	白洪阳等, 2022
	伟晶岩	LA-ICP-MS 铷钽矿 U-Pb	208.2±2.1	白洪阳等, 2022

2.0)Ma(魏小鹏等, 2018),大红柳滩和509道班西的二云母(二长)花岗岩的锆石U-Pb年龄介于(208.8±1.7)Ma~(217.5±2.8)Ma(乔耿彪等, 2015; 魏小鹏等, 2017; Zhang et al., 2019; 谭克彬等, 2021; 唐俊林等, 2022),龙门山黑云母花岗岩和细晶花岗岩的LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄为(216.8±0.9)Ma和(209.5±1.2)Ma(唐俊林等, 2022)。

成矿年龄方面, Wang等(2021)采用铷钽铁矿U-Pb方法,获得白龙山锂矿的年龄为(208±1.5)Ma,与周楷麟(2021)获得的同一矿床中锡石U-Pb年龄(211±4.1 Ma)在误差范围内一致。闫庆贺等(2017)对阿克塔斯锂矿区90-1号脉中的锡石及铷钽铁矿进行了LA-ICP-MS U-Pb定年,得到的年龄分别为(218±12)Ma和(211.9±2.4)Ma。白洪阳等(2022)获得雪凤岭锂矿床铷钽铁矿和锡石的LA-ICP-MS U-Pb年龄分别为(208.2±2.1)Ma和(208±15)Ma。据此厘定大红柳滩成矿带伟晶岩的稀有金属矿化发生于218~208 Ma之间。

本次研究获得被无矿伟晶岩切穿的白龙山闪长岩(G21)锆石U-Pb年龄为((213.67±0.61)Ma),与前人获得的花岗岩闪长岩年龄((212.3±1.6)Ma)在误差范围内一致,亦与铷钽矿((208±1.5)Ma)和锡石((211±4.1)Ma)U-Pb年龄约束的伟晶岩矿化年龄接近(Wang et al., 2021; 周楷麟, 2021)。鉴于白龙山闪长岩具有较高的全岩 $w(\text{Li})$ (平均 741×10^{-6} ,表1),且其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、Sr同位素初始比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值以及Nd同位素初始比值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i比值)与矿化伟晶岩接近(分别为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7114\sim 0.720$ 和 0.7694 、($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i= $0.7088\sim 0.7094$ 和 0.7265 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5122\sim 0.5123$ 和 $0.5120\sim 0.5121$ 以及($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i= $0.5120\sim 0.5121$ 和 0.5118)(周楷麟, 2021),认为其与伟晶岩矿化之间存在联系。对于俘虏沟闪长岩,其岩浆侵位时代(211.73±1.02)与白龙山闪长岩接近,其地球化学组成也非常相似,笔者认为可能为同一期岩浆事件的结果。而大红柳滩二云母花岗岩被公认为与伟晶岩密

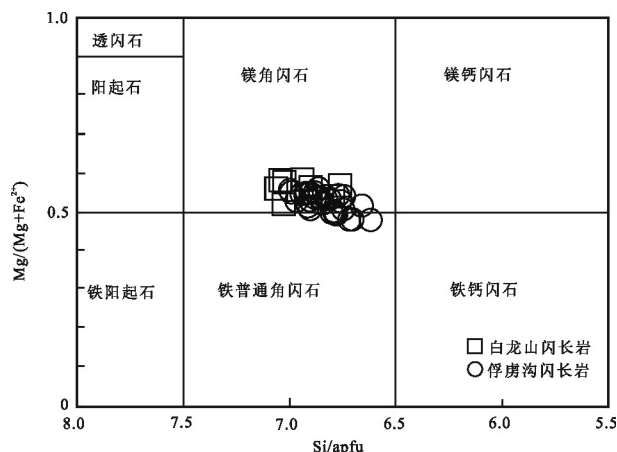


图 11 白龙山和俘虏沟闪长岩中角闪石分类图解(底图据 Leake et al., 1997)

Fig. 11 Classification diagram of amphibole from the Bailongshan and Fulugou diorites (base map cited from Leake et al., 1997)

切相关(魏小鹏, 2018; Yan et al., 2018; 何蕾等, 2023)。

大红柳滩二云母(二长)花岗岩已有年龄集中在 209.6~217.5 Ma 之间(表 3)。本文最新研究揭示, 该岩体所含锆石结构复杂, 往往发育核边结构。由 U-Pb 方法约束的锆石继承核年龄变化于 207~2490 Ma 之间(图 9e、f)。最年轻的岩浆锆石给出的年龄为 (211.20 ± 1.1) Ma(图 9g, MSWD=0.34, $n=10$), 与前人获得的侵位年龄在误差范围内一致, 亦与区域大规模三叠纪岩浆侵位时代一致, 可代表岩浆侵位年龄。但尚有部分锆石颗粒的年龄小于 210 Ma, 且可见 ~210 Ma 的锆石发育增生边(图 8a), 亦说明在 ~210 Ma 之后还有一期岩浆或热液事件。这些增生边的 Th/U 比值、稀土配分特征等与岩浆-热液过渡期锆石和热液锆石特征类似(Watson et al., 1997; Hoskin et al., 2000; Rubatto, 2002; 吴元保等, 2004), 其加权平均年龄为 (185.10 ± 0.89) Ma(图 9h, MSWD=4), 可视为最晚一次的岩浆-热液事件。大红柳滩二云母花岗岩被无矿伟晶岩脉切穿(图 3g、h), 这可能是受后期无矿伟晶岩侵位所致。事实上, 王威等(2022)曾获得 509 道班西伟晶岩中的白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 (188.07 ± 1.86) Ma (MSWD=4.44), 与本文结果接近。

上述年龄结果显示, 大红柳滩矿集区中生代岩浆侵入事件可能始于 218 Ma 左右, 岩浆-热液活动事件至少持续至 185 Ma, 岩浆-热液活动时限长达 33 Ma。

赵振华等(2022)和 Han 等(2022)基于阿尔泰 3 号伟晶岩和花岗岩的精细定年, 提出其岩浆-热液活动持续了 35 Ma; 主成矿期为 220~205 Ma, 并遭受了早侏罗世(~190 Ma)花岗质岩浆侵入所致的叠加成矿。阿尔泰柯鲁姆特 112 号锂-铍-铌-钽矿化伟晶岩内部 6 个结构带的锆石 U-Pb 年龄亦变化于 238.3~188.3 Ma(Lv et al., 2012)。如此长的岩浆-热液活动时限为形成超大型规模矿床提供了有利条件(赵振华等, 2023)。

4.2 花岗岩类形成的温压条件约束

花岗岩质岩浆中的 Zr 在岩浆中的分配系数对温度极其敏感, 而受其他因素影响较小; Watson 等(1983)基于高压高温实验(700~1300°C)获得锆饱和和温度公示为:

$$T_{\text{Zr}} = \frac{12900}{2.95 + 0.85M + \ln\left(\frac{49600}{Zr_{\text{熔体}}}\right)} - 273.15$$

其中 $M = \left[\frac{(Na + K + 2Ca)}{Al \times Si} \right]$, $Zr_{\text{熔体}}$ 为熔体中 Zr 的含量。在未进行 Zr、Hf 校正时, 纯锆石中 $w(\text{Zr})$ 为 496000×10^{-6} , 考虑到锆石在花岗质岩石中为副矿物, 因此可以用全岩中的 $w(\text{Zr})$ 近似代表熔体中 $w(\text{Zr})$ 。

锆石的阴极发光(图 8a)表明, 大红柳滩地区花岗岩类(尤其是二云母花岗岩)所含锆石常发育明显的继承核, 这表明在花岗岩的源区 Zr 是饱和的。因此, 可利用上述公式估算锆饱和温度, 所获结果大致可以代表岩浆源区的初始温度(Miller et al., 2003)。由上述公式计算得出白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩的锆饱和和温度分别介于 762~795°C(平均值 781°C)和 769~773°C(平均值 771°C); 二云母花岗岩的锆饱和和温度介于 755~773°C(平均值 764°C)。考虑到花岗岩岩浆大多以绝热方式上升侵位, 岩浆早期的结晶温度近似代表岩浆形成时的温度(秦江锋等, 2005), 笔者认为由白龙山闪长岩→俘虏沟闪长岩→大红柳滩二云母花岗岩, 岩浆起源温度呈递减趋势(图 12a)。

采用角闪石矿物温压计, 可以对其结晶时的物理化学条件进行有效约束。在此之前, 首先基于岩相学观察及角闪石成因图解(图 12b), 对角闪石的成因类型进行判别并选择其中确属岩浆成因的角闪石, 采用 Ridolfi 等(2010)建立的计算模型, 进行温压条件估算。结果显示, 白龙山闪长岩(G15)中的角闪石结晶温度为 718~760°C(平均值 734°C), 压力介于 125~208 MPa(平均值 151 MPa)。俘虏沟闪长岩(样品号 HYM9、HYM10)中的角闪石结晶温度为

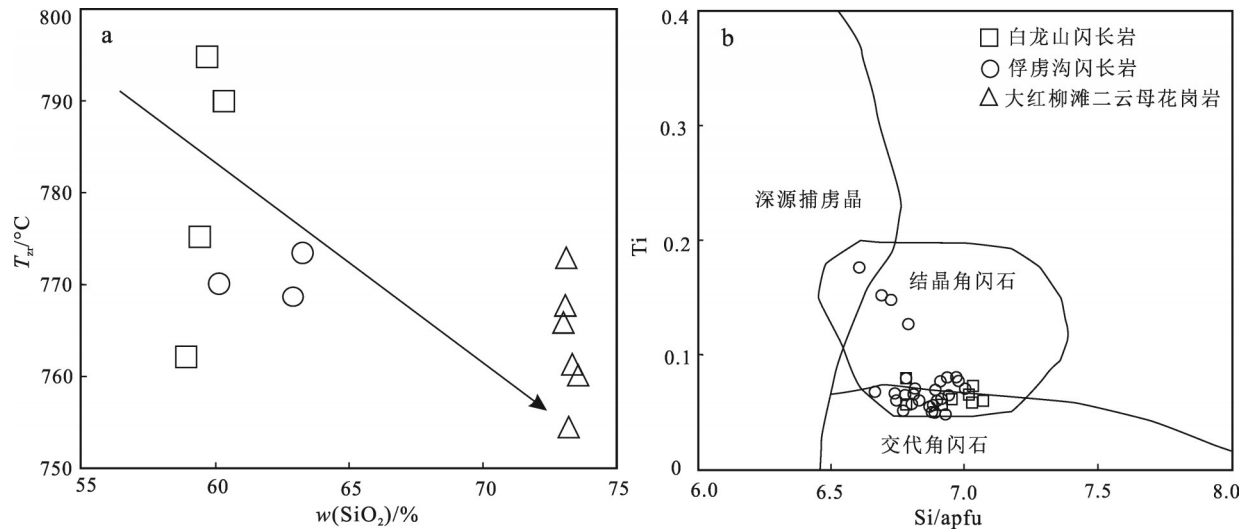


图 12 大红柳滩花岗岩类 $w(\text{SiO}_2)$ - T_z 图解 (a) 和角闪石 Si-Ti 图解 (b, 底图据秦拯纬等, 2018)

Fig. 12 $w(\text{SiO}_2)$ - T_z diagram (a) and amphibole Si-Ti (b, base map cited from Qin et al., 2018) for granitoids from the Dahongliutan area

729~776°C (平均值 741°C), 压力介于 133~231 MPa (平均值 176 MPa)。闪长岩的锆石饱和温度结晶温度高于角闪石计算得出的温度, 可能是由于锆石先于角闪石结晶所致。

Miller 等 (2003) 根据锆饱和温度将花岗岩分为 2 大类: 岩浆结晶温度 >800°C 者称为热花岗岩 (hot granite), 一般形成于拉张或转换拉张环境, 花岗岩规模较大, 温度较高, 含源区残留物较少, 多通过黑云母或角闪石脱水熔融形成, 往往需要外来的热源 (如基性岩浆的侵入); 岩浆结晶温度 <800°C 者称为冷花岗岩 (cold granite), 多形成于地壳减薄环境, 岩浆规模小, 温度低, 含残留物较多, 往往涉及白云母的脱水熔融, 可能需要流体的加入 (王晓东, 2023)。本文获得大红柳滩二云母花岗岩的锆饱和温度低于 800°C, 属 Miller 等 (2003) 所划分的冷花岗岩范畴, 并且锆石中常见继承核 (图 8a), 可视为源区残留物质。此外, 白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩的锆饱和温度也较低, 且与大红柳滩二云母花岗岩温度相当, 指示该花岗岩类均为冷花岗岩, 可能与外来流体加入有关。事实上, 低温闪长岩并非个例, 例如前人获得米斯庙花岗闪长岩中锆石饱和温度为 728~735°C (王晓东, 2023); 竹溪岭地区闪长岩包体和寄主花岗闪长岩的锆石饱和温度分别为 640~793°C 和 769~787°C (孔志岗等, 2023); 西秦岭碌础坝石英闪长岩-花岗闪长岩的全岩锆饱和温度平均为 764°C (任廷仙等, 2021)。

4.3 花岗岩类成因及源区厘定

目前已有花岗岩成因分类多基于岩石的矿物组成、地球化学特征及源区性质, 认为花岗岩可划分为 I 型、S 型、A 型和 M 型, 以 I 型和 S 型最为常见 (Chappell et al., 1992)。岩相学显示白龙山和俘虏沟闪长岩中普遍发育角闪石 (图 3c、e、f); 大红柳滩二云母花岗岩中则发育白云母、石榴子石、电气石等富铝矿物 (图 3j、k、l), 且锆石常见继承核 (图 8a)。地球化学方面, 铝饱和指数 (ASI 值) 明显大于 1 常被作为区分 I 型和 S 型花岗岩的重要参数 (S 型 >1.1; I 型 <1.1) (Chappell, 1999)。本文获得白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩的铝饱和指数 (A/CNK) 在 1 附近, 分别为 0.97~1.14 (平均值 1.05) 和 0.94~0.97 (平均 0.96); 在 A/CNK-A/NK 图解 (图 4c) 中, 上述 2 类闪长岩均落入准铝质-弱过铝质区域。而大红柳滩二云母花岗岩的铝饱和指数 (A/CNK) 明显偏高, 为 1.16~1.30 (平均值 1.23), 在 A/CNK-A/NK 图解 (图 4c) 中落入过铝质区域。花岗质岩浆 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 与 $w(\text{SiO}_2)$ 的相关性也可用于区分 I 型和 S 型花岗岩, 这是由于过铝质岩浆中 P_2O_5 溶解度很高, S 型花岗岩中 P_2O_5 与 SiO_2 正相关或无相关性, 而在准铝-弱过铝质的 I 型花岗岩中二者则具有负相关性 (Chappell, 1999)。由 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 图解 (图 13a) 可见, 白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩的 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 随着 $w(\text{SiO}_2)$ 的增加而降低, 符合 I 型花岗岩的演化趋势; 而大红柳滩二云母花岗岩 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 随着 $w(\text{SiO}_2)$ 的增加而增加, 符合 S 型花岗岩的演化趋势。综上, 认

为白龙山闪长岩和俘虜沟闪长岩属于I型花岗岩,大红柳滩二云母花岗岩属S型花岗岩。

本文获得大红柳滩地区花岗岩类样品轻、重稀土元素分馏明显,球粒陨石标准化稀土元素配分模式表现为轻稀土元素富集的右倾型(图 6a),具有与上地壳相似的稀土元素配分模式。其中白龙山闪长岩的Nb/Ta介于14.38~19.25(平均值17.08),接近地幔值17.50(Hans Wedepohl, 1995);俘虜沟闪长岩的Nb/Ta值较之偏低,为14.00~14.89(平均值14.50);在 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解(图 13b)中,所有白龙山闪长岩样品均落在壳幔混合区域,俘虜沟闪长岩样品落在壳

源区域或与壳幔混合区域的边界。角闪石的成分可辅助判断寄主岩石究竟是壳源还是幔源:幔源角闪石的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 通常大于10%,壳源通常小于10%;幔源角闪石结构式中 $\text{Si}/(\text{Si}+\text{Ti}+\text{Al})\leq 0.765$,而壳源大于0.775(姜常义等, 1984);谢应雯等(1990)提出角闪石的M值($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$)可用来区分花岗岩源区类型: $M>0.7$ 为幔源型, $M<0.5$ 为壳源型, $0.5<M<0.7$ 为壳幔混合型。本文获得白龙山闪长岩和俘虜沟闪长岩中的角闪石 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 分别为8.14%~10.50%(平均值8.95%)和8.37%~10.98%(平均值9.75%), $\text{Si}/(\text{Si}+\text{Ti}+\text{Al})$ 值分别为0.78~0.83(平均值0.81)和0.759~

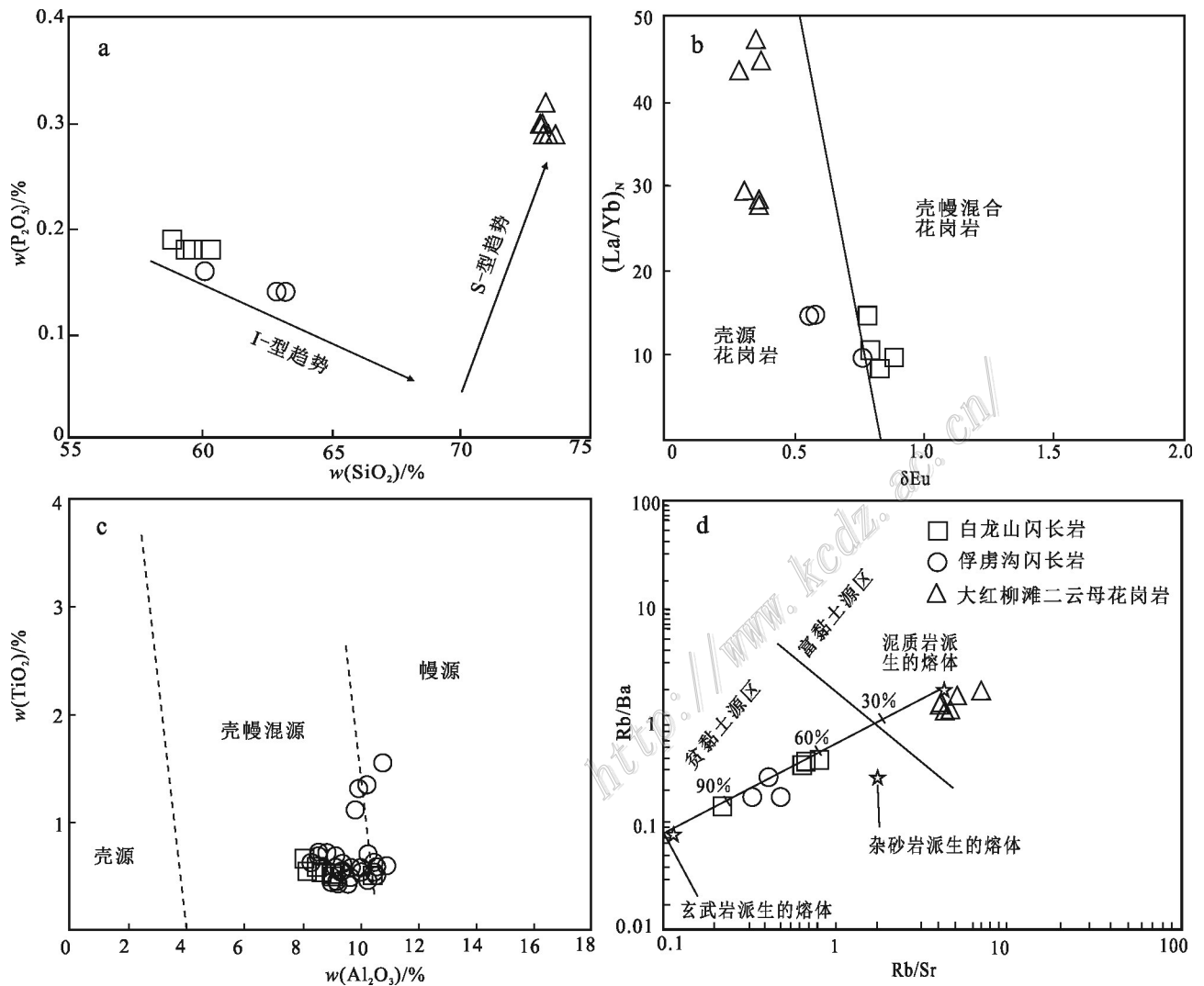


图 13 大红柳滩地区花岗岩类 $w(\text{SiO}_2)-w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 图解(a)、 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解(b,底图据张士贞等, 2014)、角闪石 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)-w(\text{TiO}_2)$ 图解(c,底图据李亚琦等, 2021)以及 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ 图解(d,底图据 Sylvester, 1998)

Fig. 13 $w(\text{SiO}_2)-w(\text{P}_2\text{O}_5)$ diagram (a), $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ diagram (b, base map cited from Zhang et al., 2014), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)-w(\text{TiO}_2)$ diagram of amphibole (c, base map cited from Li et al., 2021) and $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ diagram (d, base map cited from Sylvester, 1998) of the Dahongliutan granitoids

0.820(平均值0.793),均显示壳源的特征;角闪石M值分别介于0.53~0.59和0.48~0.56之间,显示壳幔混源偏壳源的特征。角闪石的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)-w(\text{TiO}_2)$ 图解(图13c)同样显示大部分角闪石样品都落在壳幔混源区域。这亦得到如下同位素证据支持:周楷麟(2021)获得白龙山闪长岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.7088~0.7094,介于地幔初始值(0.704)和大陆地壳平均值(0.719)之间;魏小鹏等(2018)获得俘虏沟石英闪长岩(与本文采样点相近)初始($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值为0.7079~0.7080, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-5.4,亏损地幔模式年龄(t_{DM})为1.28~1.55 Ga,锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-4.6~-2.1。上述特征指示无论是白龙山闪长岩还是俘虏沟闪长岩,其源区皆有幔源贡献,可能源自幔源岩浆底侵(秦江锋,2010)。相比之下,大红柳滩二云母花岗岩的Rb/Sr比值为3.99~6.94,远大于上部陆壳的比值(0.32);Nb/Ta值介于7.80~13.54(平均值9.90),接近地壳值11.00,表明其物源组分可能来自壳源(Yardley,1986);在 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解(图13b)中二云母花岗岩也落在壳源区域。魏小鹏等(2017)获得二云母花岗岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 从-14.01变化到-9.02,指示该类花岗岩具有壳源特征,主要源自地壳物质部分熔融。

由图5可见,从白龙山闪长岩→俘虏沟闪长岩,很可能经历了连续结晶分异作用;而二云母花岗岩未表现类似趋势。在Rb/Sr-Rb/Ba图解(图13d)中,白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩都落入贫黏土源区,大红柳滩二云母花岗岩则落入泥质岩派生的熔体区域。此外,CaO/Na₂O是判断源区成分的重要指标(Sylvester,1989;Patiño et al.,1998):一般泥质岩部分熔融生成的花岗岩其CaO/Na₂O相对较小(<0.3),而砂屑岩生成的花岗岩则相反(>0.3)。如此,白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩的物源可能是砂屑岩(CaO/Na₂O分别介于2.35~3.5和1.88~2.13之间),大红柳滩二云母花岗岩的源区更可能是泥质岩(CaO/Na₂O介于0.21~0.25)。

综合上述,笔者提出大红柳滩地区同时发育I型(白龙山闪长岩、俘虏沟闪长岩)和S型花岗岩(大红柳滩二云母花岗岩),二者均形成于中温、中压环境下。大红柳滩二云母花岗岩源区以泥质岩为主,白龙山闪长岩、俘虏沟闪长岩则可能主要源自砂屑岩部分熔融,并有幔源贡献。

5 结论

(1) 锆石U-Pb定年获得白龙山闪长岩、俘虏沟

闪长岩的侵位时代分别为(213.67±0.61)Ma和(211.73±1.02)Ma;获得大红柳滩二云母花岗岩的侵位时代为(211.20±1.1)Ma,岩浆-热液年龄为(185.1±0.95)Ma。岩浆-热液活动持续时间长达~33 Ma,为形成超大型规模矿床提供有利条件。

(2) 岩锆饱和温度计约束白龙山闪长岩、俘虏沟闪长岩和大红柳滩二云母花岗岩的形成温度分别为762~795℃(平均值781℃)、769~773℃(平均值771℃)和755~773℃(平均值764℃)。角闪石温压计约束白龙山闪长岩和俘虏沟闪长岩的温度和压力分别为718~760℃(平均值734℃)、125~208 MPa(平均值151 MPa)和729~776℃(平均值741℃)、133~231 MPa(平均值176 MPa)。大红柳滩地区花岗岩类形成于中温、中压环境。

(3) 综合岩体地球化学、年代学、角闪石矿物学特征和已有全岩Sr-Nd、锆石Lu-Hf等同位素数据,笔者认为大红柳滩地区同时发育I型(白龙山闪长岩、俘虏沟闪长岩)和S型花岗岩(大红柳滩二云母花岗岩),其中,I型花岗岩源区贫黏土,可能以砂屑岩为主,涉及新生地壳的贡献;S型花岗岩源区富黏土,为泥质岩,由壳源物质重熔而成。

致谢 野外工作得到新疆昆仑蓝钻锂业有限责任公司、新疆有色地勘局的大力支持;三位匿名审稿专家对本文提出的宝贵修改意见,使文章的内容得到很大的提升,在此一并表示感谢!

References

- Bai H Y, Wang H, Yan Q H, Wang S M, Wang Z H, Zhang X Y, Gao H and Qing Y. 2022. Petrogenesis of the black biotite granite in Dahongliutan, western Kunlun: Evidence from zircon U-Pb ages and Li-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 2139-2152(in Chinese with English abstract).
- Breiter K, Lamarao C N and Borges R M K. 2014. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites[J]. *Lithos*, 192-195: 208-225
- Cerny P and Ericit T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *The Canadian Mineralogist*, 43(6): 2005-2026.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*, 83(1-2): 1-26.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535-551.

- Ding K, Liang T, Zhou Y, Feng Y G, Zhang Z, Ding L and Li K. 2020. Petrogenesis of the black biotite granite in Dahongliutan, western Kunlun: Evidence from zircon U-Pb ages and Li-Hf isotopes[J]. *Northwestern Geology*, 53(1): 24-34(in Chinese with English abstract).
- Esmé van Acherbergh, William L G and Johann S. 2001. Metasomatism in mantle xenoliths from the Letlhakane kimberlites: Estimation of element fluxes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(4):397-414.
- Ferry J M and Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429-437.
- Hans Wedepohl K. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217-1232.
- Han J, Zhao Z, Hollings P and Chen H. 2022. A 50 m.y. melting model for the rare metal-rich Koktokay pegmatite in the Chinese Altai: Implications from a newly identified Jurassic granite[J]. *GSA Bulletin*, 135(5-6):1467-1479.
- He L, Gao J G, Wang D H, Liang T, Feng Y G, Huang F, Tan X J and Cen J B. 2023. Genesis relationship investigation of granite and pegmatite in the Dahuangliutantan rare metal deposit, Xinjiang, China[J]. *Mineral Deposits*, 42(4): 693-712(in Chinese with English abstract).
- Hoskin Paul W O and Ireland Trevor R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. *Geology*, 28(7):627-630.
- Hu J, Wang H, Huang C Y, Tong L X, Mu S L and Qiu Z W. 2016. Geological characteristics and age of the Dahongliutan Fe-ore deposit in the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 1-25.
- Jiang C Y and An S Y. 1984. On the chemical composition characteristics of calcic amphiboles in igneous rocks and their petrological significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (3): 1-9(in Chinese with English abstract).
- Ji W H, Han F L, Wang J C and Zhang J L. 2004. Composition, geochemical characteristics, and geological significance of the Suobash ophiolitic melange in the southern Yutian area of the western Kunlun[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1196-1201(in Chinese with English abstract).
- Kirkland C L, Whitehouse M J and Slagstad T. 2009. Fluid-assisted zircon and monazite growth within a shear zone: A case study from Finnmark, Arctic Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(5): 637-657.
- Kong Z G, Mao J W, Liang T, Xu S F, Li Y L, Xu H B and Jin X Y. 2023. Magmatic conditions and geological significance of weakly differentiated I-type granodiorites closely related to the W-Mo mineralization in the Zhuxiling area of southern Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(6): 1619-1648(in Chinese with English abstract).
- Leake B E and Woolley A R. 1997. Nomenclature of amphiboles report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral Names [J]. *The Canadian Mineralogist*, 35(1): 219-246.
- Li J K, Li P, Yan Q G, Wang D H, Ren G L and Ding X. 2023. Sapan-Ganzi-western Kunlun granitic pegmatite type rare metal mineralization zone and its metallogenic regularity[J]. *Science China-Earth Sciences*, 53(8): 1718-1740(in Chinese with English abstract).
- Li X W, Huang X F and Huang D F. 2011. Application review of common barometers in granite[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 415-422(in Chinese with English abstract).
- Li Y Q, Zhang J Q, Wang L X, Liang X, Li Q and Wu W Z. 2021. Genetic mineralogical study of amphibole in Mesozoic amphibole diorite in the Han-Xing region[J]. *Journal of Hebei Geo University*, 44(3): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Lü Z H, Zhang H, Tang Y and Guan S J. 2012. Petrogenesis and magmatic-hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No.112 pegmatite in Altai, northwestern China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopes[J]. *Lithos*, 154: 374-391.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, Song S W, Zhou Q, Gao Y B, Liu X, Fu X F, Cao J, Zeng Z L, Li T G and Fan X Y. 2019. Recent advances in prospecting and research of key metallic mineral resources in China Since the 21st Century[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935-969 (in Chinese with English abstract).
- Mattern F and Schneider W. 2000. Suturing of the Proto- and Paleo-Tethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 637-650.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance[J]. *Geology*, 31(6): 529.
- Middlemost E. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- Patiño Douce A E and Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. *Journal of Petrology*, 39(4):689-710.
- Qi X X, Zeng L S, Meng X G, Xu Z Q and Li T F. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Dala granite in the Tethyan Himalayas and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- Qiao G B, Zhang H D, Wu Y Z, Jin M S, Du W, Zhao X J and Chen D H. 2015. Geological and geochemical characteristics of the Dahongliutantan intrusion in the West Kunlun Mountains and its constraints on petrogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1180-1194(in Chinese with English abstract).
- Qiao G B, Wu Y Z and Liu T. 2020. Age of formation of pegmatite-type rare metal deposits in the Dahongliutan, West Kunlun: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotope ages of muscovite[J]. *Geology of China*, 47(5): 1591-1593(in Chinese with English abstract).
- Qin J F, Lai S C, Li Y F, Bai L and Wang J. 2005. Calculation of zircon saturation temperature and its significance in Yangba intrusion,

- northern margin of Yangzi Plate[J]. *Northwestern Geology*, (3): 1-5(in Chinese with English abstract).
- Qin J F. 2010. Mechanism of Late Triassic granodiorite analogue genesis in the Qinling orogenic belt and deep dynamical background[D]. Supervisor: Lai S C. Xi'an: Northwest University. 266 pp(in Chinese with English abstract).
- Qin Z W, Ma C Q, Fu J M, Lu Y Y, Shi H F and Xiong F H. 2018. Genesis of magnesian-ferrous inclusion in the Xiangga granitic body, East Kunlun: Petrographic and geochemical evidence[J]. *Earth Science*, 43(7): 2420-2437(in Chinese with English abstract).
- Ren T X, Li X W, Wang K, Ge H Y and Guan R. 2021. Geochemical and mineralogical studies on quartz diorite-granodiorite from Luzhuba, West Qinling Mountains, and its geological significance[J]. *Geoscience*, 35(6): 1651-1676(in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247-263.
- Ridolfi F, Renzulli A and Puerini M. 2010. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1): 45-66.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184(1-2): 0-138.
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites[J]. *The Journal of Geology*, 97(3): 261-280.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1-4): 29-44.
- Sun S S and Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42: 313-345.
- Tan K B, Guo Q M and Guo Y M. 2021. U-Pb ages of granites and their tectonic significance from the 509 Daobansi lithium-beryllium polymetallic deposit, Hotan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 44(2): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Tang J L, Ke Q, Xu X W, Kang K, Li H, Tan K B, Dong L H and Liu Y X. 2022. Magmatic evolution and mineralization of the Longmenshan lithium-beryllium pegmatite zone in the Dahongliutan area, West Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(3): 655-675(in Chinese with English abstract).
- Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1479-1493.
- Wang C, Liu L, Korhonen F, Yang W Q, Cao Y T, He S P, Zhu X H and Liang W T. 2016. Origins of Early Mesozoic granitoids and their enclaves from West Kunlun, NW China: Implications for evolving magmatism related to closure of the Paleo-Tethys ocean[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 105(3): 941-964.
- Wang H, Gao H, Zhang X Y, Yan Q H, Xu Y G, Zhou K L, Dong R and Li P. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China[J]. *Lithos*, 360-361: 105449.
- Wang H, Xu Y G, Yan Q H and Zhang X Y. 2021. Progress in the study of pegmatitic lithium deposits in Bailongshan, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3085-3098(in Chinese with English abstract).
- Wang H, Gao H, Wang S M, Yan Q H, Wang Z H, Huang L and Qin Y. 2022. U-Pb chronology, Hf isotopic composition and geologic significance of lithium-beryllium rare-metal pegmatite zircon and niobium-tantalite from Muji area, West Kunlun, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1937-1951(in Chinese with English abstract).
- Wang W, Du X F, Liu W, Li Y, Chen Z L, Ma H D, Qiu L and Xiao F. 2022. Geological characteristics and metallogenic age of the 509 Daobansi lithium-beryllium rare metal mine, West Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1967-1980(in Chinese with English abstract).
- Wang X D. 2023. Chronology, geochemical characteristics and tectonic significance of the granodiorite from Mismiao, Inner Mongolia [D]. Supervisor: Li Y J. Hebei: Hebei University. of Geosciences 44 pp (in Chinese with English abstract).
- Wang Z H. 2004. Tectonic evolution of the western Kunlun orogenic belt, western China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(2): 153-161.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295-304.
- Watson E B, Chemiak D J, Hanchar J M, Harrison T M and Wark D A. 1997. The incorporation of Pb into zircon[J]. *Chemical Geology*, 141(1): 19-31.
- Wei X P, Wang H, Hu J, Mu S L, Qiu Z W, Yan Q H and Li P. 2017. Geochemical and geochronological study of diamictite granite from Dahongliutan, West Kunlun and its geological significance[J]. *Geochimica*, 46(1): 66-80(in Chinese with English abstract).
- Wei X P. 2018. Temporal and spatial distribution, petrogenesis and its tectonic context of Triassic granitoids in the West Kunlun orogenic belt[D]. Supervisor: Wang H. Guang'zhou: University of Chinese Academy of Sciences. 181 pp(in Chinese with English abstract).
- Wei X P, Wang H, Zhang X Y, Dong R, Zhu S B, Xing C H, Li P, Yan Q H and Zhou K L. 2018. Genesis of the Late Triassic high-magnesium diorite in eastern Xikunlun and its geologic significance[J]. *Geochimica*, 47(4): 363-379(in Chinese with English abstract).
- Wu C Z, Jia L, Lei R X, Chen B Y, Feng Z J, Feng Y G, Zhi J and Ba S H. 2021. Main characteristics and research progress of Tianheite granite and related rubidium deposits in the Central Asian orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(9): 2604-2628(in Chinese with English abstract).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Mineralogical study of zircon genesis and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, (16): 1589-1604(in Chinese with English abstract).

- Xia Q, Li Y S, Li X F and Kou Y C. 2021. U-Pb ages, trace elements and Hf isotope characteristics of zircon from mineralized granodiorite veins of the Anfanga gold deposit, West Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(6): 1713-1730(in Chinese with English abstract).
- Xiao X C and Wang J. 2004. Discussion on the lithospheric structure and evolution of the west Kunlun Mountains-Karakorum Mountains and their adjacent areas[J]. *Geological Review*, 50(3): 285-294 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, Jian P, Liu C Z, Yuan C and Sun M. 2005. Accretionary tectonics of the western Kunlun Orogen, China: A Paleozoic-Early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of Southern Eurasia[J]. *Journal of Geology*, 113(6): 687-705.
- Xie J L, Lin B, Qi J, Deng S L, He L and Zhang X X. 2023. Progress of granitic rubidium ore research and the direction of rubidium ore searching on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Gold Science and Technology*, 31(1): 26-36(in Chinese with English abstract).
- Xie Y W and Zhang Y Q. 1990. Phenotypic characterization of hornblende in granitoids from the Hengduan Mountains and its diagenetic significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (1): 35-45(in Chinese with English abstract).
- Yan Q H, Wang H, Qiu Z W, Wei X P and Li P. 2017. Chronology of cassiterite and columbite-tantalite from the Dahongliutan rare-metal pegmatite deposit in West Kunlun and its geological significance[C]. *Chinese Society of Mineral and Rock Geochemistry*. 833-834(in Chinese with English abstract).
- Yan Q H, Qiu Z W, Wang H, Wang M, Wei X P, Li P, Zhang Q R, Li Y C and Liu P Z. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite[J]. *Ore Geology Reviews*, 100: 561-573.
- Yardley B W D. 1986. The continental crust: Its composition and evolution Taylor S R and McClennan S M, Blackwell[J]. *Geological Journal*, 21(1): 85-86.
- Yuan C, Sun M and Li J. 1999. Two granitic plutons in central western Kunlun Belt: Their ages and possible sources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(19): 1807-1810.
- Zhang C L, Ma H D, Zhu B Y, Ye X T, Qiu L, Zhao H X, Liu X Q, Ding T, Wang Q and Hao X S. 2019. Tectonic evolution of the West Kunlun-Karakorum orogenic belt and its metallogenic effects[J]. *Geological Review*, 65(5): 1077-1102(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q C, Liu Y, Wu Z H, Huang H, Li K and Zhou Q. 2019. Late Triassic granites from the northwestern margin of the Tibetan Plateau, the Dahongliutan example: Petrogenesis and tectonic implications for the evolution of the Kangxiwa Palaeo-Tethys[J]. *International Geology Review*, 61(2): 175-194.
- Zhang S Z, Li F Q, Li Y, Liu W and Qin Y D. 2014. Determination of Early Ordovician strong peraluminous granite in the middle part of the Yarlung Tsangpo River bonding zone and its geological significance[J]. *Science China-Earth Sciences*, 44(7): 1388-1402(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Y. 2021. Rubidium isotope geochemistry during chemical weathering of granites[D]. Supervisor: Wei G J and Ma J L. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences). 183p(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Chen H Y and Han J S. 2020. On the independent minerals of rubidium[J]. *Geochimica*, 49(6): 690-693(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Chen H Y and Han J S. 2022. Mineralisation of rare metals in Mesozoic pegmatites from the Altai orogenic belt, Xinjiang[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyanseni*, 61(1): 1-26(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H and Yan S. 2023. Discussion on several issues related to the mineralization of granitic pegmatites[J]. *Geotectonics et Metallogenia*, 47(1): 1-41(in Chinese with English abstract).
- Zhou B, Zhang Z X, Shi Z M, Song H and Yu L S. 2022. Geochemistry, geochronology, and prospecting potential of the Dahongliutan pluton, western Kunlun Orogen: 22[J]. *Applied Sciences*, 12(22): 11591.
- Zhou K L. 2021. Evolutionary characteristics of lithium pegmatites in the Bailongshan, West Kunlun and constraints on the genesis of the deposits [D]. Supervisor: Wang H. Guang'zhou: University of Chinese Academy of Sciences. 176 p(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Mo X X, Wang L Q, Zhao Z D, Niu Y L, Zhou C Y and Yang Y H. 2009. Diagenesis of the Chashum high-divergence type I granite, eastern Gangdisê, Tibet: Zircon U-Pb chronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope constraints[J]. *Science China-Earth Sciences*, 39(7): 833-848(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白洪阳,王核,闫庆贺,王赛蒙,王振宏,张晓宇,高昊,秦艳. 2022. 新疆西昆仑雪风岭锂矿床铌钽铁矿、锡石年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 38(7): 2139-2152.
- 丁坤,梁婷,周义,凤永刚,张泽,丁亮,李侃. 2020. 西昆仑大红柳滩黑云母二长花岗岩岩石成因:来自锆石 U-Pb 年龄及 Li-Hf 同位素的证据[J]. *西北地质*, 53(1): 24-34.
- 何蕾,高景刚,王登红,梁婷,凤永刚,黄凡,谭细娟,岑炬标. 2023. 新疆大红柳滩稀有金属矿田花岗岩与伟晶岩成因关系探讨[J]. *矿床地质*, 42(4):693-712.
- 姜常义,安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. *矿物岩石*, (3): 1-9.
- 计文化,韩芳林,王炬川,张俊量. 2004. 西昆仑于田南部苏巴什蛇绿混杂岩的组成、地球化学特征及地质意义[J]. *地质通报*, 23(12): 1196-1201.
- 孔志岗,毛景文,梁婷,徐生发,李杨林,许红兵,金修. 2023. 皖南竹溪岭与 W-Mo 成矿密切相关的弱分异 I 型花岗闪长岩成岩条件

- 及其地质意义[J]. 岩石学报, 39(6): 1619-1648.
- 李建康, 李鹏, 严清高, 王登红, 任广利, 丁欣. 2023. 松潘-甘孜-西昆仑花岗岩伟晶岩型稀有金属成矿带成矿规律[J]. 中国科学:地球科学, 53(8): 1718-1740.
- 李小伟, 黄雄飞, 黄丹峰. 2011. 花岗岩中常用压力计的应用评述[J]. 高校地质学报, 17(3): 415-422.
- 李亚琦, 张聚全, 王琳萱, 梁贤, 李清, 吴伟哲. 2021. 邯邢地区中生代角闪岩中角闪石的成因矿物学研究[J]. 河北地质大学学报, 44(3): 1-7.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5): 935-969.
- 戚学祥, 曾令森, 孟祥金, 许志琴, 李天福. 2008. 特提斯喜马拉雅打拉花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(7): 1501-1508.
- 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 金谋顺, 杜玮, 赵晓健, 陈登辉. 2015. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约[J]. 地质学报, 89(7): 1180-1194.
- 乔耿彪, 伍跃中, 刘拓. 2020. 西昆仑大红柳滩伟晶岩型稀有金属矿床的形成时代:来自白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄的证据[J]. 中国地质, 47(5): 1591-1593.
- 秦拯纬, 马昌前, 付建明, 卢友月, 史洪峰, 熊富浩. 2018. 东昆仑香加花岗岩体中镁铁质包体成因:岩相学及地球化学证据[J]. 地球科学, 43(7): 2420-2437.
- 秦江锋, 赖昭聪, 李永飞, 白莉, 王娟. 2005. 扬子板块北缘阳坝岩体锆石饱和温度的计算及其意义[J]. 西北地质, 38(3): 1-5.
- 秦江锋. 2010. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景[D]. 导师:赖昭聪. 西安:西北大学. 266页.
- 任廷仙, 李小伟, 王可, 葛涵云, 关瑞. 2021. 西秦岭碌础坝石英闪长岩-花岗岩闪长岩的地球化学、矿物学研究及其地质意义[J]. 现代地质, 35(6): 1651-1676.
- 谭克彬, 郭岐明, 郭勇明. 2021. 新疆和田 509 道班西锂铍多金属矿床花岗岩 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 新疆有色金属, 44(2): 6-10.
- 唐俊林, 柯强, 徐兴旺, 康凯, 李杭, 谭克彬, 董连慧, 刘洋旭. 2022. 西昆仑大红柳滩地区龙门山锂铍伟晶岩区岩浆演化与成矿作用[J]. 岩石学报, 38(3): 655-675.
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 张晓宇. 2021. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 3085-3098.
- 王核, 高昊, 王赛蒙, 闫庆贺, 王振宏, 黄亮, 秦艳. 2022. 新疆西昆仑木吉地区锂铍稀有金属伟晶岩锆石及铋钽铁矿 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 38(7): 1937-1951.
- 王威, 杜晓飞, 刘伟, 李永, 陈正乐, 马华东, 邱林, 肖飞. 2022. 西昆仑 509 道班西锂铍稀有金属矿地质特征与成矿时代探讨[J]. 岩石学报, 38(7): 1967-1980.
- 王晓东. 2023. 内蒙古米斯庙花岗岩闪长岩年代学、地球化学特征及构造意义[D]. 导师:李英杰. 石家庄:河北地质大学. 44页.
- 魏小鹏, 王核, 胡军, 慕生禄, 丘增旺, 闫庆贺, 李沛. 2017. 西昆仑大红柳滩二云母花岗岩地球化学和地质年代学研究及其地质意义[J]. 地球化学, 46(1): 66-80.
- 魏小鹏. 2018. 西昆仑造山带三叠纪花岗岩类时空分布、岩石成因及其构造背景[D]. 导师:王核. 广州:中国科学院大学. 181页.
- 魏小鹏, 王核, 张晓宇, 董瑞, 朱世波, 邢春辉, 李沛, 闫庆贺, 周楷麟. 2018. 西昆仑东部晚三叠世高镁闪长岩的成因及其地质意义[J]. 地球化学, 47(4): 363-379.
- 吴昌志, 贾力, 雷如雄, 陈博洋, 丰志杰, 凤永刚, 智俊, 白世恒. 2021. 中亚造山带天河石花岗岩及相关铀矿床的主要特征与研究进展[J]. 岩石学报, 37(9): 2604-2628.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 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, (16): 1589-1604.
- 夏清, 李永胜, 李雪峰, 寇银川. 2021. 西秦岭安房坝金矿床矿化花岗岩闪长岩脉锆石 U-Pb 年龄、微量元素及 Hf 同位素特征[J]. 岩石学报, 37(6): 1713-1730.
- 肖序常, 王军. 2004. 西昆仑-喀喇昆仑及其邻区岩石圈结构、演化中几个问题的探讨[J]. 地质论评, 50(3): 285-294.
- 谢金玲, 林彬, 祁婧, 邓世林, 何亮, 张晓旭. 2023. 花岗岩型铀矿研究进展及青藏高原铀矿找矿方向[J]. 黄金科学技术, 31(1): 26-36.
- 谢应雯, 张玉泉. 1990. 横断山区花岗岩类中角闪石的标型特征及其成因意义[J]. 矿物学报, (1): 35-45.
- 闫庆贺, 王核, 丘增旺, 魏小鹏, 李沛. 2017. 西昆仑大红柳滩稀有金属伟晶岩矿床锡石及铋钽铁矿年代学及其地质意义[C]. 中国矿物岩石地球化学学会, 833-834.
- 张传林, 马华东, 朱炳玉, 叶现韬, 邱林, 赵海香, 刘晓强, 丁腾, 王倩, 郝晓妹. 2019. 西昆仑-喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应[J]. 地质论评, 65(5): 1077-1102.
- 张士贞, 李奋其, 李勇, 刘伟, 秦雅东. 2014. 雅鲁藏布江结合带中段早奥陶世强过铝质花岗岩的厘定及其地质意义[J]. 中国科学:地球科学, 44(7): 1388-1402.
- 张卓盈. 2021. 花岗岩化学风化过程中的铷同位素地球化学研究[D]. 导师:韦刚健,马金龙. 广州:中国科学院大学. 183页.
- 赵振华, 陈华勇, 韩金生. 2020. 关于铷的独立矿物[J]. 地球化学, 49(6): 690-693.
- 赵振华, 陈华勇, 韩金生. 2022. 新疆阿尔泰造山带中生代伟晶岩的稀有金属成矿作用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 61(1): 1-26.
- 赵振华, 严爽. 2023. 花岗岩伟晶岩成矿有关的几个问题讨论[J]. 大地构造与成矿学, 47(1): 1-41.
- 周楷麟. 2021. 西昆仑白龙山锂矿伟晶岩演化特征及对矿床成因的制约[D]. 导师:王核. 广州:中国科学院大学. 176页.
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 牛耀龄, 周长勇, 杨岳衡. 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. 中国科学:地球科学, 39(7): 833-848.

附表1 锆石微量元素分析结果 ($w(\text{B})/10^{-6}$)
Table 1 Trace elements analyses of zircon ($w(\text{B})/10^{-6}$)

点号	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Zr	Hf	Th	U	Zr/Hf
白龙山闪长岩G15.1边部																						
G15-07	4.46	600.70	2.08	0.002	3.87	0.03	0.53	1.69	0.20	10.42	3.71	48.06	19.04	97.72	21.27	202.33	42.46	431000	10018.35	98.41	257.11	43.02
G15-08	3.51	511.60	2.05	0.001	4.51	0.02	0.39	1.32	0.14	8.81	3.00	41.11	16.15	82.62	17.92	171.89	36.48	431000	10579.86	105.36	279.46	40.74
G15-09	3.52	486.75	1.77	0.001	4.45	0.02	0.34	1.14	0.16	7.32	2.63	37.22	15.24	81.20	18.00	176.64	37.56	431000	10689.54	69.59	179.81	40.32
G15-12	5.85	773.88	3.26	0.002	4.56	0.03	0.67	1.79	0.20	13.19	4.60	61.16	24.84	126.09	27.52	258.92	54.47	431000	9700.91	118.90	294.97	44.43
G15-21	3.02	604.70	2.38	1.073	7.76	0.39	2.30	2.03	0.25	10.69	3.74	49.40	20.03	99.30	21.12	201.72	41.46	431000	11056.31	121.14	319.05	38.98
G15-32	6.08	564.86	2.28	0.001	4.72	0.02	0.67	1.47	0.19	9.63	3.49	45.28	18.86	93.07	19.89	185.63	38.45	431000	10192.11	121.01	299.26	42.29
G15-39	6.74	734.46	2.82	0.001	5.54	0.06	0.99	2.30	0.25	14.10	4.72	61.95	23.59	119.90	25.12	231.36	47.74	431000	9576.93	150.61	335.19	45.00
G15-46	4.57	733.10	2.88	0.046	5.61	0.04	0.87	2.01	0.21	13.12	4.57	59.49	23.74	118.90	25.51	236.89	49.35	431000	10205.24	102.90	250.98	42.23
G15-48	4.66	617.16	2.00	0.002	3.69	0.02	0.59	1.67	0.18	10.91	3.83	50.61	20.16	100.51	21.65	197.41	41.52	431000	10010.31	79.53	203.95	43.06
G15-51	5.93	860.08	2.94	0.517	6.33	0.21	1.59	2.31	0.35	13.47	4.92	64.73	26.98	142.53	31.71	308.31	66.18	431000	8959.48	125.45	320.94	48.11
G15-52	1.90	666.10	2.60	<0.000	5.26	0.02	0.60	1.81	0.15	10.90	4.04	52.85	21.13	109.13	23.90	228.48	48.87	431000	11945.79	152.30	502.61	36.08
G15-55	5.59	601.65	2.19	0.002	6.37	0.03	0.82	1.81	0.22	11.30	4.00	50.52	20.15	96.20	20.47	183.36	37.37	431000	10330.93	104.74	230.82	41.72
G15-56	7.36	1027.77	3.98	0.002	5.94	0.06	1.06	2.98	0.40	16.25	5.77	77.17	32.35	169.74	37.13	359.25	76.54	431000	8683.50	174.37	406.49	49.63
G15-57	4.68	667.83	2.62	0.002	4.52	0.03	0.63	1.58	0.20	11.09	3.84	51.40	21.29	108.96	24.27	233.99	49.32	431000	10240.61	92.31	247.72	42.09
G15-60	8.02	558.35	1.77	0.003	3.98	0.04	0.76	2.00	0.27	12.15	3.97	49.65	18.59	89.43	17.41	155.84	30.71	431000	9812.29	64.52	131.94	43.92
G15-66	4.88	927.54	3.32	0.004	4.74	0.06	1.23	2.73	0.26	16.13	5.87	75.56	30.13	149.15	31.62	295.86	61.29	431000	9680.91	165.06	359.01	44.52
G15-70	4.30	689.40	2.91	0.005	5.82	0.03	0.57	1.88	0.14	11.72	4.09	56.64	22.27	110.58	23.69	226.65	47.41	431000	11257.07	130.96	356.86	38.29
G15-71	5.84	859.16	3.31	0.002	7.00	0.06	0.87	2.41	0.29	14.57	5.22	68.35	27.80	139.81	30.04	284.72	59.16	431000	10021.14	220.55	419.91	43.01
G15-75	3.56	873.30	3.41	0.001	7.70	0.06	1.02	2.85	0.27	15.81	5.59	70.67	27.66	141.51	29.83	271.39	54.75	431000	10276.55	338.46	588.44	41.94
G15-76	5.18	565.50	2.21	0.068	6.15	0.05	0.63	1.55	0.23	10.11	3.72	47.31	18.42	91.49	19.31	180.82	36.66	431000	10288.86	102.44	222.12	41.89
G15-77	3.59	596.93	2.70	0.002	4.38	0.02	0.67	1.56	0.16	9.86	3.51	46.15	19.00	97.50	21.62	209.27	44.13	431000	10875.01	173.80	428.17	39.63
G15-84	4.52	612.06	2.34	0.002	4.02	0.03	0.74	1.82	0.17	10.04	3.57	47.06	19.53	102.34	22.52	215.69	46.85	431000	10433.66	125.93	342.42	41.31
G15-85	3.92	720.65	2.94	0.001	6.30	0.04	0.73	2.16	0.18	12.39	4.51	60.08	23.95	116.86	25.04	236.69	48.64	431000	11424.24	144.81	369.73	37.73
G15-86	6.46	798.93	2.54	0.003	5.39	0.05	0.90	2.51	0.34	13.82	4.84	61.59	25.05	132.60	29.10	276.69	59.55	431000	9111.15	184.73	406.28	47.30
G15-90	6.00	856.65	1.95	0.026	4.19	0.08	1.57	3.07	0.42	16.64	5.61	69.78	27.24	139.11	30.12	281.32	59.84	431000	9004.05	126.66	277.02	47.87
G15-91	6.57	774.18	3.21	0.003	5.00	0.04	0.88	1.87	0.26	12.05	4.36	58.13	24.34	130.01	29.22	289.92	63.00	431000	9644.34	130.99	355.76	44.69
G15-92	3.98	760.07	3.45	0.076	5.83	0.06	0.84	2.05	0.20	14.06	4.97	62.90	24.45	124.56	26.07	240.00	49.06	431000	10243.79	167.84	372.44	42.07
G15-94	5.02	713.58	2.66	0.001	3.24	0.03	0.70	2.02	0.13	12.93	4.52	59.41	23.27	115.85	24.42	227.92	47.25	431000	11576.38	98.44	405.05	37.23
G15-97	5.11	545.30	1.61	0.009	4.17	0.05	0.75	1.81	0.26	9.82	3.39	43.05	17.10	89.13	19.38	188.04	39.54	431000	9320.73	111.43	269.76	46.24
G15-98	19.00	666.70	2.69	0.020	5.01	0.04	0.88	2.00	0.27	11.60	4.10	51.48	21.14	108.92	23.74	227.02	47.57	431000	9672.36	146.81	337.97	44.56
G15-99	7.02	849.00	3.50	0.002	4.79	0.04	0.85	2.35	0.23	14.64	5.25	70.98	28.11	140.86	30.28	286.16	59.43	431000	9555.26	114.35	306.35	45.11

续表 1-1
Continued Table 1-1

点号	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Zr	Hf	Th	U	Zr/Hf
白龙山闪长岩 G15, 边部																						
G15-100	3.78	775.51	3.04	0.002	5.15	0.04	0.86	2.24	0.21	13.45	4.99	63.34	24.86	127.79	27.55	257.52	54.03	431000	10139.91	190.14	439.43	42.51
G15-101	3.44	623.44	2.42	0.001	4.92	0.04	0.76	1.82	0.22	10.56	3.81	51.25	19.83	101.86	22.30	210.95	44.45	431000	10315.64	136.74	336.82	41.78
G15-108	4.06	544.38	2.36	0.001	5.41	0.02	0.41	1.44	0.16	9.81	3.35	45.26	17.64	89.35	18.98	177.60	36.78	431000	10825.63	106.23	273.83	39.81
G15-110	4.61	946.31	3.94	0.001	7.20	0.08	1.43	2.92	0.34	16.64	5.83	75.95	30.45	151.95	32.93	308.41	63.50	431000	9766.46	310.01	557.75	44.13
G15-111	3.79	752.13	3.37	0.003	7.42	0.03	0.72	2.06	0.18	13.74	4.78	62.37	24.45	122.27	25.73	239.36	49.39	431000	11374.93	167.14	426.46	37.89
G15-114	6.18	770.41	2.11	0.002	5.19	0.05	1.34	2.70	0.36	13.47	4.74	61.17	24.41	124.91	27.28	256.95	53.24	431000	8906.20	180.64	353.94	48.39
G15-116	6.95	787.07	3.29	0.063	5.61	0.07	1.01	2.59	0.26	14.97	5.07	67.89	26.07	126.85	26.26	239.89	48.17	431000	9640.42	160.48	320.98	44.71
G15-119	7.94	821.48	2.72	0.158	5.81	0.10	1.31	2.68	0.34	15.69	5.17	67.53	27.13	134.50	28.54	263.90	54.16	431000	9085.30	150.67	315.75	47.44
停虏沟闪长岩 HYM11, 边部																						
HYM11-28	1.62	624.39	1.87	0.288	3.25	0.11	0.75	1.09	0.10	7.48	3.12	44.14	19.21	105.23	24.54	242.95	52.08	431000	12866.59	90.74	393.67	33.50
HYM11-05	2.25	610.06	2.09	0.003	2.79	0.01	0.37	1.08	0.11	7.80	3.18	44.38	18.72	101.44	23.53	235.03	50.16	431000	12982.10	122.85	542.28	33.20
HYM11-11	2.79	632.36	2.32	0.333	5.34	0.10	0.83	1.43	0.14	10.02	3.63	49.31	20.01	104.02	22.63	217.36	44.34	431000	12386.86	119.27	389.74	34.79
HYM11-14	1.64	681.58	1.93	0.127	3.24	0.05	0.55	1.14	0.13	9.11	3.48	49.70	21.08	112.23	25.91	252.64	54.16	431000	12860.43	113.84	446.57	33.51
HYM11-34	5.51	471.23	1.94	<0.000	5.70	0.01	0.34	1.16	0.16	7.58	2.77	38.32	14.74	75.52	15.90	145.23	29.18	431000	11069.89	60.20	150.78	38.93
HYM11-45	1.18	629.89	2.13	0.001	3.70	0.01	0.34	1.08	0.11	8.49	3.24	47.17	19.81	103.01	23.55	228.02	48.75	431000	12804.52	109.42	403.64	33.66
HYM11-55	0.62	642.00	2.30	0.171	3.23	0.02	0.35	1.11	0.11	8.31	3.26	46.18	19.62	107.28	24.61	246.71	53.34	431000	13288.11	128.67	596.22	32.43
HYM11-113	<DL	715.95	2.47	<0.000	3.95	<0.005	0.45	1.32	0.14	10.28	3.87	54.93	23.24	120.65	26.78	256.25	53.97	431000	13043.50	128.61	494.68	33.04
HYM11-47	7.12	509.40	2.03	0.001	5.55	0.02	0.50	1.33	0.16	8.93	3.32	43.00	16.94	80.77	16.67	151.56	30.02	431000	10676.04	61.75	135.86	40.37
HYM11-50	3.24	670.32	2.46	0.001	5.30	0.01	0.39	1.42	0.17	10.84	3.83	53.90	21.87	110.66	23.89	223.55	45.31	431000	12616.01	124.25	381.19	34.16
HYM11-79	<814.1	522.16	1.30	0.004	3.87	0.03	0.59	1.51	0.30	9.59	3.15	43.51	16.77	83.58	17.34	161.71	33.04	431000	9584.44	33.52	79.62	44.97
HYM11-85	<837	656.42	2.38	0.001	4.06	0.02	0.38	1.39	0.14	9.01	3.51	49.60	20.43	108.18	24.16	238.05	49.84	431000	12866.73	143.37	530.76	33.50
HYM11-97	<DL	710.95	2.38	0.001	3.25	0.01	0.39	1.36	0.11	9.72	3.68	52.33	22.35	119.24	27.21	264.49	55.90	431000	13075.29	109.86	457.47	32.96
HYM11-106	<DL	574.36	1.39	0.002	4.87	0.03	0.64	1.65	0.29	11.07	3.79	48.83	18.87	91.11	18.64	170.19	34.39	431000	9500.61	49.67	98.24	45.37
二云母花岗岩 DN25 和 DN28, 边部																						
DN28-23	1.86	722.34	1.74	0.148	0.43	0.02	0.28	1.36	0.07	11.81	5.64	68.44	21.52	98.38	21.82	204.71	37.24	431000	17993.56	36.30	3830.32	23.95
DN28-49	4.54	3285.88	8.96	0.003	0.74	0.04	0.69	3.72	0.11	31.19	15.59	237.85	96.07	538.70	131.78	1350.25	273.68	431000	12903.78	92.43	4092.89	33.40
DN25-04	2.14	1165.34	2.72	789.87	1954.79	202.63	761.24	156.71	1.74	109.83	15.92	127.38	35.62	159.84	33.03	306.13	53.25	431000	16697.27	507.08	3756.88	25.81
DN25-05	1.96	550.48	1.15	354.39	899.42	91.04	332.87	70.52	0.76	49.36	7.47	59.98	16.45	73.12	15.39	141.70	25.43	431000	16773.29	235.48	1900.30	25.70
DN25-46	2.61	1546.27	3.98	1.223	3.24	0.36	1.65	2.79	0.16	23.90	11.75	146.13	46.49	206.47	43.35	379.49	65.46	431000	16427.11	38.72	4633.44	26.24
DN28-55	12.80	2684.93	4.23	758.34	1924.47	203.05	776.40	183.13	1.68	198.50	39.58	320.44	83.66	310.09	52.65	409.29	69.00	431000	12599.09	769.11	2745.73	34.21

续表 1-2
Continued Table 1-2

点号	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Zr	Hf	Th	U	Zr/Hf
二云母花岗岩DN25和DN28核部																						
DN25-24	3.90	2317.01	3.36	0.004	0.63	0.05	1.20	6.68	0.71	65.51	27.79	290.54	72.17	238.73	37.84	283.27	48.88	431000	11317.93	47.51	2182.43	38.08
DN28-28	7.02	2053.85	3.95	3.647	14.03	1.86	10.72	11.77	0.46	63.18	20.91	215.15	64.94	256.21	46.73	387.05	70.15	431000	12311.20	232.78	2155.99	35.01
DN28-68	21.14	2716.85	3.72	3.107	9.49	1.07	8.69	19.01	0.48	110.44	33.43	306.36	86.05	322.54	54.16	412.77	72.79	431000	10308.04	209.14	1577.55	41.81
DN25-58	25.33	1339.41	1.47	61.239	183.84	23.47	110.55	21.79	1.83	38.18	10.37	116.77	42.16	206.33	42.15	391.79	78.76	431000	8926.42	196.36	441.23	48.28
DN25-01	5.40	452.96	1.08	0.009	7.13	0.08	1.24	2.52	0.22	12.71	3.84	43.21	14.34	63.54	12.70	106.87	19.60	431000	10434.27	84.41	363.44	41.31
DN25-02	5.70	985.42	1.16	0.055	12.01	0.06	0.92	2.39	0.64	16.21	5.80	80.06	32.61	165.06	35.98	336.61	71.11	431000	8627.28	13.44	22.62	49.96
DN25-03	6.58	1353.33	0.64	0.008	0.98	0.06	1.43	3.84	0.20	27.00	9.60	121.54	46.02	217.36	44.28	393.60	78.04	431000	9901.57	27.18	96.42	43.53
DN25-06	8.38	1080.57	2.55	0.007	8.96	0.07	1.45	3.25	0.31	19.66	7.09	92.56	35.65	176.50	37.00	335.41	67.76	431000	9278.96	218.02	384.30	46.45
DN25-13	1.60	1683.27	7.34	0.002	93.52	0.06	1.06	1.98	0.32	17.84	7.26	106.25	48.59	268.29	59.34	566.43	116.77	431000	7663.62	338.04	267.67	56.24
DN25-15	2.37	276.86	1.58	0.001	6.86	0.01	0.27	0.63	0.17	4.42	1.66	20.35	8.34	45.98	10.78	116.56	27.31	431000	10348.40	53.85	133.76	41.65
DN25-17	2.74	1731.08	5.28	0.029	21.69	0.06	1.17	3.50	0.62	28.17	10.93	147.85	57.98	294.30	62.43	585.00	122.47	431000	11253.47	77.44	191.92	38.30
DN25-19	18.61	362.12	0.51	0.005	1.81	0.21	3.94	9.81	0.41	35.02	7.38	54.04	11.80	36.80	5.11	33.59	4.81	431000	10814.13	73.34	284.56	39.86
DN25-21	2.24	1737.29	1.66	0.005	5.21	0.12	2.34	5.79	0.57	37.69	12.59	156.47	59.08	285.55	56.87	498.32	97.98	431000	8549.87	145.54	396.20	50.41
DN25-22	4.71	519.36	1.17	0.003	10.93	0.03	0.76	1.78	0.74	9.89	3.20	39.98	16.13	84.22	19.15	187.92	40.61	431000	9170.41	58.34	97.24	47.00
DN25-23	18.89	508.35	2.02	0.003	2.97	0.05	0.92	1.86	0.22	11.31	3.80	45.25	16.78	78.28	15.79	136.99	27.19	431000	9411.37	22.76	62.89	45.80
DN25-25	2.13	726.63	0.93	<0.000	0.26	0.01	0.37	1.90	0.16	18.20	8.17	88.46	22.82	77.97	12.97	104.06	17.65	431000	12163.25	15.13	733.77	35.43
DN25-26	9.72	413.76	0.54	0.004	0.98	0.09	1.88	6.91	0.24	31.75	7.58	57.31	13.01	41.70	6.26	41.26	6.62	431000	10910.17	42.10	342.54	39.50
DN25-27	3.12	662.08	2.92	0.021	9.34	0.10	1.76	3.38	0.56	17.61	5.69	64.22	22.30	100.20	19.04	165.20	31.44	431000	9099.98	79.50	204.26	47.36
DN25-28	2.32	71.08	0.70	0.001	4.02	<0.004	0.13	0.24	0.08	1.25	0.44	5.05	1.92	10.00	2.28	23.01	5.66	431000	10505.23	74.32	377.02	41.03
DN25-29	13.68	292.21	0.60	0.002	1.72	0.12	2.39	7.04	0.22	27.52	5.78	40.15	9.57	30.83	4.78	35.42	5.99	431000	10129.86	70.30	233.26	42.55
DN25-31	22.45	394.53	0.73	0.009	2.59	0.28	4.89	11.40	0.41	40.59	8.13	57.99	12.85	37.87	5.18	32.56	4.73	431000	10105.91	126.54	392.17	42.65
DN25-32	2.78	717.54	2.88	0.010	7.83	0.02	0.42	1.59	0.06	11.17	4.39	57.38	23.06	117.76	24.99	233.77	46.52	431000	11154.50	118.97	657.79	38.64
DN25-33	3.65	248.70	0.80	0.014	0.72	0.01	0.37	1.32	0.14	9.14	3.09	30.32	7.29	22.99	3.29	20.88	3.03	431000	12059.77	12.91	644.65	35.74
DN25-34	7.31	795.52	0.94	0.192	14.31	0.46	4.17	3.54	1.37	12.94	4.28	56.76	23.68	127.81	30.06	309.24	69.76	431000	8370.72	73.48	166.00	51.49
DN25-35	7.00	1919.33	1.98	0.003	2.33	0.04	1.05	3.67	0.07	27.20	10.73	153.99	62.39	312.78	66.13	603.65	118.18	431000	11489.20	118.83	514.79	37.51
DN25-36	1.73	859.46	2.09	0.001	7.19	0.01	0.41	1.13	0.17	10.37	4.23	62.63	26.57	146.59	33.68	336.88	76.37	431000	11480.18	124.98	509.67	37.54
DN25-39	3.88	1202.57	1.21	0.167	51.79	0.18	2.81	6.41	2.82	35.27	10.14	107.91	36.93	169.18	33.11	299.40	59.53	431000	9079.01	199.11	203.93	47.47
DN25-40	11.75	2147.39	0.98	0.018	2.38	0.19	4.07	8.88	0.24	49.56	16.01	199.68	73.68	352.67	69.99	626.28	122.69	431000	9377.60	75.06	169.92	45.96
DN25-41	8.31	745.04	2.19	0.011	20.74	0.10	1.68	2.82	0.44	12.99	4.54	55.58	21.75	116.33	26.03	255.38	55.81	431000	9842.53	120.33	361.21	43.79
DN25-42	7.13	890.31	1.94	1.504	14.66	0.61	3.21	2.77	0.62	13.99	4.98	65.03	27.26	142.45	33.21	325.45	70.68	431000	9427.58	98.93	210.71	45.72
DN25-43	2.39	1316.25	3.32	0.012	11.42	0.17	2.97	5.65	0.27	32.59	10.31	125.89	44.94	208.60	40.21	354.01	69.58	431000	8765.00	120.26	298.55	49.17

续表 1-3
Continued Table 1-3

点号	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Zr	Hf	Th	U	Zr/Hf
DN25-44	4.02	217.94	0.99	<0.000	6.02	<0.005	0.15	0.42	0.20	2.66	1.07	14.53	6.60	36.68	9.26	103.76	25.40	431000	10058.92	60.75	113.14	42.85
DN25-45	4.33	462.85	2.38	0.026	27.33	0.04	0.86	1.77	0.63	8.46	2.71	35.64	13.49	71.52	16.43	171.84	39.09	431000	10018.64	356.88	503.73	43.02
DN25-47	9.52	974.65	0.82	0.012	1.59	0.09	1.80	3.95	0.21	22.16	7.20	89.43	33.01	153.77	30.14	262.93	51.02	431000	8555.50	46.95	101.55	50.38
DN25-49	3.43	428.66	1.14	0.003	1.65	0.00	0.19	0.58	0.52	5.24	2.18	30.19	12.91	71.96	17.19	179.67	42.41	431000	9463.67	6.37	77.22	45.54
DN25-52	4.42	1342.32	4.42	0.018	9.49	0.11	2.12	5.26	0.09	32.60	11.11	132.49	47.02	212.18	39.89	341.98	64.56	431000	9709.48	77.66	366.77	44.39
DN25-53	4.02	992.39	3.16	1.120	25.37	0.42	2.71	3.07	0.58	18.25	6.42	80.32	30.88	155.38	33.02	313.47	64.49	431000	8704.52	267.88	448.29	49.51
DN25-54	7.21	2718.56	3.37	0.064	103.45	0.76	12.22	21.55	9.48	91.65	25.70	264.68	83.88	353.73	64.55	538.68	98.45	431000	8041.11	579.05	398.48	53.60
DN25-55	6.40	705.58	2.72	0.094	5.88	0.78	11.19	15.57	2.58	52.79	11.76	90.01	21.36	77.58	12.96	107.11	19.62	431000	11121.11	218.94	574.96	38.76
DN25-56	5.49	484.29	1.03	0.031	20.10	0.29	3.50	3.83	1.83	14.56	3.99	42.35	15.03	69.31	15.01	151.34	30.76	431000	8092.59	76.42	105.33	53.26
DN25-57	5.43	988.27	7.15	0.093	10.21	0.07	1.14	3.30	0.18	18.90	7.04	89.45	33.92	161.73	31.98	282.17	52.26	431000	11185.63	167.05	520.66	38.53
DN25-62	4.98	524.76	4.53	0.002	6.77	0.02	0.47	1.43	0.02	9.76	3.71	47.29	17.56	85.02	17.13	154.20	29.89	431000	10633.71	26.05	73.58	40.53
DN25-63	4.97	76.44	0.57	0.016	9.41	0.05	0.33	0.38	0.16	1.42	0.41	5.30	2.05	10.86	2.80	32.34	7.83	431000	11231.87	65.43	180.22	38.37
DN25-66	4.29	745.37	0.93	0.012	9.88	0.04	0.80	2.09	0.69	11.77	4.39	57.18	23.98	124.00	27.65	278.40	62.60	431000	9245.54	40.98	62.54	46.62
DN25-67	6.29	312.55	1.46	0.018	7.55	0.01	0.23	0.75	0.08	3.90	1.50	21.33	9.18	52.51	12.20	126.96	27.63	431000	11960.59	97.45	250.34	36.04
DN25-69	8.83	975.06	1.92	0.004	9.59	0.10	1.83	4.48	0.72	24.78	8.04	95.26	32.98	149.37	28.12	241.48	45.06	431000	10075.69	118.27	168.56	42.78
DN25-70	7.11	842.92	1.17	0.004	7.80	0.05	0.96	2.86	0.17	18.08	6.39	77.77	27.99	128.48	24.80	213.46	39.33	431000	9404.74	96.74	213.25	45.83
DN25-71	37.09	773.43	2.38	0.011	20.64	0.06	1.14	2.47	0.62	14.62	4.67	60.49	24.18	126.14	27.99	282.85	62.22	431000	8462.12	87.20	158.00	50.93
DN25-74	3.23	868.19	2.73	2.032	43.37	0.47	4.62	5.73	1.71	23.11	6.23	72.49	25.86	128.65	28.34	286.28	63.09	431000	9847.81	342.42	659.47	43.77
DN25-75	1.16	146.00	0.44	0.001	0.58	<0.004	0.03	0.08	0.06	1.33	0.60	8.14	3.84	22.04	5.42	60.25	15.04	431000	10510.79	16.93	291.78	41.01
DN25-76	6.04	770.77	6.43	0.029	37.99	0.05	0.81	1.94	0.56	12.30	4.48	62.65	23.50	125.69	27.58	274.59	57.12	431000	10519.28	273.70	629.35	40.97
DN25-78	8.41	410.02	1.00	0.005	12.56	0.06	1.11	1.82	0.76	9.29	3.00	35.56	13.19	65.06	14.06	138.53	30.12	431000	8703.63	50.07	142.81	49.52
DN25-79	3.92	1236.41	2.74	0.009	16.82	0.19	3.03	5.82	0.62	29.71	9.14	113.65	42.43	197.42	39.00	347.33	68.92	431000	8125.20	275.18	357.77	53.04
DN25-80	7.96	794.11	5.82	0.094	8.30	1.10	16.77	22.45	5.44	66.16	13.63	110.72	26.44	91.04	15.56	118.88	21.55	431000	10625.24	213.27	378.19	40.56
DN25-82	13.70	2164.49	1.98	0.078	2.33	0.43	7.73	24.99	0.59	123.78	33.51	284.92	72.88	265.80	44.74	343.99	58.78	431000	10205.56	209.55	1326.38	42.23
DN25-85	18.12	1089.30	1.26	0.021	2.46	0.31	5.61	16.65	0.48	83.65	19.91	152.41	34.68	112.48	17.03	119.86	18.76	431000	10453.74	193.57	1173.21	41.23
DN25-89	16.06	1893.82	3.45	0.024	14.45	0.25	3.92	6.55	2.36	35.89	12.00	147.65	57.37	293.89	64.96	635.37	130.37	431000	8938.68	91.85	320.35	48.22
DN28-01	5.91	515.48	2.39	0.002	5.39	0.03	0.55	1.62	0.14	9.18	3.21	43.93	16.90	85.02	18.05	169.01	34.25	431400	11354.10	54.42	135.99	38.00
DN28-03	6.84	861.48	2.22	0.002	1.78	0.04	0.95	3.59	0.12	23.16	7.47	84.72	27.75	126.64	24.96	220.84	42.81	431000	11241.88	81.32	407.30	38.34
DN28-04	6.55	2138.22	3.00	0.104	28.58	0.80	10.43	15.12	4.68	72.58	21.30	227.39	71.99	309.96	57.93	482.05	87.70	431000	7922.79	342.43	493.78	54.40
DN28-05	6.59	618.15	1.18	0.000	6.20	0.03	0.67	1.80	0.24	10.57	4.01	52.89	20.95	104.69	22.68	211.94	44.74	431000	7987.96	22.40	54.73	53.96
DN28-06	6.86	1793.61	3.26	1.364	9.95	0.85	8.22	11.30	1.32	55.60	16.74	189.72	64.33	278.04	50.29	410.95	75.84	431000	8663.92	42.17	95.00	49.75
DN28-07	7.78	816.58	2.46	0.998	14.83	0.34	2.18	2.75	0.16	16.77	6.18	74.91	27.31	128.97	26.18	226.91	43.45	431000	9866.35	164.47	372.19	43.68

续表 1-4
Continued Table 1-4

点号	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Zr	Hf	Th	U	Zr/Hf
DN28-10	5.20	402.42	1.08	0.009	6.12	0.02	0.30	1.11	0.12	6.66	2.46	32.13	12.81	64.49	13.83	129.59	27.23	431000	9937.50	49.93	115.91	43.37
DN28-12	9.15	409.28	2.20	0.003	2.19	0.04	1.04	3.04	0.12	15.97	4.46	43.49	13.41	53.35	9.68	81.00	14.93	431000	11155.25	71.99	207.64	38.64
DN28-13	11.14	2832.25	4.07	0.126	36.86	0.81	13.32	23.80	13.25	96.47	27.05	278.55	89.12	383.01	74.27	671.79	130.36	431000	5510.00	222.90	213.46	78.22
DN28-14	4.46	779.36	5.08	0.160	16.02	0.13	1.68	3.16	0.12	17.68	5.78	71.03	26.38	128.17	25.79	231.97	46.16	431000	9277.30	128.55	293.98	46.46
DN28-15	5.73	435.35	1.91	0.790	5.85	0.31	1.77	2.22	0.12	9.69	3.30	38.77	13.94	69.58	15.38	149.29	28.95	431000	11428.97	83.19	515.05	37.71
DN28-16	4.17	461.39	1.25	3.989	13.72	0.81	3.57	1.73	0.33	7.10	2.44	33.14	13.35	74.80	17.17	175.03	39.31	431000	10090.60	94.24	310.80	42.71
DN28-18	10.82	220.48	0.43	0.003	1.01	0.06	1.34	3.91	0.17	16.82	3.87	31.48	7.08	23.40	3.55	25.18	4.15	431000	11260.47	41.49	337.13	38.28
DN28-21	1.72	400.36	5.63	0.409	4.07	0.12	0.44	0.58	0.11	3.96	1.74	27.73	12.01	68.88	17.19	177.99	37.01	431000	10847.22	58.20	1233.77	39.73
DN28-22	5.56	654.63	2.22	0.017	62.33	0.28	4.06	5.70	1.85	22.31	5.74	63.52	21.60	96.59	19.41	169.35	32.62	431000	8872.56	293.73	216.92	48.58
DN28-24	19.08	1572.71	0.89	0.084	4.17	1.05	16.72	39.39	0.92	164.75	36.34	253.85	53.47	156.71	22.44	153.45	23.35	431000	10160.28	335.06	1737.81	42.42
DN28-25	9.32	1141.54	6.64	0.010	9.33	0.13	2.14	4.88	0.46	27.17	9.22	111.47	40.04	185.02	36.33	311.19	58.05	431000	9277.96	40.09	140.11	46.45
DN28-26	4.25	929.83	1.60	0.012	1.12	0.04	1.04	3.04	0.18	22.53	7.79	86.24	28.06	135.89	29.90	274.63	55.15	431000	10994.35	51.25	373.08	39.20
DN28-27	5.78	1168.46	2.16	0.003	1.32	0.06	1.09	4.47	0.27	28.41	10.21	109.93	35.78	167.89	36.41	344.31	68.20	431000	10758.88	64.63	445.69	40.06
DN28-31	16.24	2968.52	5.58	0.019	18.85	0.06	1.51	5.31	0.42	47.86	18.10	251.47	99.20	472.71	91.34	783.83	148.69	431000	9621.71	241.78	725.64	44.79
DN28-32	5.28	237.71	0.79	0.003	2.07	0.04	0.86	1.65	0.14	7.69	2.21	23.95	7.88	33.61	6.41	55.35	10.32	431000	10763.83	48.86	221.12	40.04
DN28-33	12.57	492.47	0.84	0.002	1.84	0.13	2.30	6.83	0.22	30.60	7.49	63.75	16.50	57.87	9.24	70.80	11.39	431000	11021.35	88.07	305.38	39.11
DN28-34	3.84	406.52	1.69	0.036	12.06	0.04	0.75	1.48	0.45	8.01	2.75	32.32	12.36	61.55	13.99	139.82	30.34	431000	11098.59	220.57	713.39	38.83
DN28-35	13.25	2004.92	1.56	0.109	8.92	0.25	4.37	8.70	2.23	52.92	16.94	197.42	69.17	308.78	58.34	492.09	92.45	431000	8711.72	121.62	152.36	49.47
DN28-37	16.97	2979.44	4.30	0.006	2.15	0.23	4.64	18.45	0.38	113.98	35.33	335.65	92.33	346.12	58.39	440.21	73.35	431000	11169.31	188.56	2146.94	38.59
DN28-39	2.43	222.22	0.93	0.002	3.36	<0.004	0.11	0.29	0.13	2.15	0.84	13.73	6.44	38.39	9.48	98.83	23.11	431000	9924.72	25.92	121.36	43.43
DN28-41	3.32	310.66	1.04	0.002	1.46	0.02	0.61	2.28	0.08	12.72	3.90	37.61	9.66	30.41	4.34	26.82	3.83	431000	13421.17	42.52	221.37	32.11
DN28-43	2.84	879.85	2.69	<0.000	1.63	0.01	0.43	1.94	0.06	14.92	6.19	78.11	27.60	130.19	27.20	244.09	47.09	431000	12239.33	55.26	917.54	35.21
DN28-44	1.67	118.81	0.95	0.002	6.70	<0.004	0.07	0.21	0.10	1.43	0.49	7.06	3.18	18.75	5.21	63.29	17.86	431000	11681.14	58.02	238.39	36.90
DN28-46	10.36	1529.77	1.53	0.034	3.11	0.28	5.07	17.15	1.65	90.68	24.66	199.56	50.68	184.06	30.64	249.06	43.62	431000	9902.47	202.53	1429.97	43.52
DN28-48	7.47	470.43	2.12	0.019	11.39	0.15	2.78	4.25	0.30	15.20	4.18	44.20	14.63	68.78	14.60	136.19	26.03	431000	9714.19	156.48	320.97	44.37
DN28-50	9.55	761.13	2.83	0.029	12.52	0.11	1.89	3.53	1.06	18.66	5.65	67.77	24.75	118.27	24.38	225.74	46.67	431000	8315.39	114.47	216.71	51.83
DN28-51	5.10	1131.32	5.23	0.017	10.47	0.20	3.31	6.04	0.31	29.97	9.54	110.37	38.76	173.65	33.32	283.87	52.69	431000	9677.18	148.02	248.65	44.54
DN28-52	8.04	1318.86	1.27	0.020	9.66	0.05	1.58	4.29	0.88	27.89	9.33	121.18	44.77	214.88	42.34	368.17	70.67	431000	9690.19	99.56	152.90	44.48
DN28-53	4.23	277.30	1.49	0.008	17.46	0.08	1.41	3.35	1.21	12.27	2.92	29.46	9.20	40.23	7.45	67.66	13.20	431000	9180.56	86.88	134.86	46.95
DN28-54	1.60	93.54	0.50	0.003	0.57	<0.004	0.06	0.21	0.11	1.54	0.53	7.13	2.90	13.87	3.22	32.45	7.49	431000	6564.22	19.83	93.25	65.66
DN28-56	22.45	2683.77	2.68	0.108	4.61	0.91	13.82	34.74	1.11	160.12	41.16	341.92	87.77	309.88	51.27	394.96	67.58	431000	9775.45	366.79	1642.27	44.09

续表 1-5
Continued Table 1-5

点号	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Zr	Hf	Th	U	Zr/Hf
DN28-60	3.39	92.52	0.84	0.004	14.48	0.01	0.19	0.38	0.19	2.01	0.53	7.06	2.62	13.18	3.05	29.34	6.72	431000	11440.43	52.45	135.38	37.67
DN28-61	14.51	374.71	0.73	0.042	0.42	0.02	0.51	1.33	0.07	10.92	4.23	42.45	11.28	44.29	8.73	80.49	15.65	431000	12727.56	24.86	420.74	33.86
DN28-62	5.31	697.52	7.17	0.010	6.55	0.02	0.54	1.45	0.37	10.47	4.03	53.54	20.98	109.65	25.30	255.02	59.31	431000	10834.43	51.24	398.01	39.78
DN28-64	42.83	5334.87	316.96	0.056	349.85	0.35	5.51	14.23	1.25	87.57	34.59	453.86	163.82	755.49	148.46	1234.10	202.17	431000	12751.90	452.71	706.07	33.80
DN28-65	67.25	2028.08	2.53	0.102	16.08	0.98	14.72	20.36	2.27	75.62	20.91	222.22	71.42	306.10	56.95	475.45	87.65	431000	9659.98	249.56	471.64	44.62
DN28-66	4.20	1953.23	5.06	3.586	33.19	2.08	14.14	11.58	1.53	45.40	14.56	172.28	63.84	303.48	64.50	586.48	116.01	431000	10491.95	565.54	1225.57	41.08
DN28-67	4.98	677.27	3.44	0.470	12.21	0.13	1.44	2.73	0.42	16.05	5.41	62.61	21.25	100.07	21.47	201.91	40.22	431000	11522.53	103.97	841.78	37.40
DN25-10	4.01	571.19	4.33	0.003	30.67	0.03	0.53	1.30	0.26	8.30	3.04	41.79	17.43	94.44	22.72	234.22	51.20	431000	12280.11	294.79	346.17	35.10
DN25-11	8.66	814.68	1.20	0.001	7.92	0.03	0.75	2.19	0.31	14.50	5.24	69.09	26.57	132.16	26.90	245.81	48.74	431000	10038.08	42.90	86.29	42.94
DN25-16	12.34	2438.76	1.09	0.037	4.29	0.41	6.35	11.83	0.15	60.52	19.83	233.95	82.21	365.69	68.14	558.27	103.68	431000	10682.61	305.47	412.96	40.35
DN25-61	5.38	492.13	0.86	0.009	1.76	0.03	0.52	1.87	0.07	11.02	3.67	47.14	15.39	55.73	8.27	54.34	8.59	431000	11371.72	51.07	278.06	37.90
DN25-64	18.66	870.69	1.63	1.230	53.01	1.48	10.90	7.74	1.24	30.08	7.55	84.72	28.89	135.06	26.21	230.30	46.98	431000	6493.81	250.60	195.85	66.37
DN28-02	7.67	901.02	1.42	0.055	5.73	0.36	5.68	8.04	0.62	32.22	8.63	93.04	31.90	138.68	25.82	220.88	42.90	431000	7943.48	42.35	62.29	54.26
DN28-08	9.85	620.39	1.86	0.004	16.18	0.07	1.22	3.11	0.38	15.72	4.67	56.35	19.63	91.96	18.32	160.76	31.89	431000	10406.02	190.18	395.00	41.42
DN28-17	7.04	1019.95	0.76	0.011	0.92	0.10	2.16	5.56	0.25	33.64	10.75	110.38	33.44	136.34	24.80	202.95	37.69	431000	11062.76	47.18	329.87	38.96
DN28-19	11.32	1559.28	1.58	0.032	10.68	0.53	8.05	13.37	0.23	53.50	15.10	164.00	53.46	229.50	41.89	344.59	62.73	431000	10141.24	381.24	572.16	42.50
DN28-20	8.92	255.82	3.33	0.004	25.03	0.03	0.64	1.01	0.20	4.66	1.52	19.40	7.62	40.00	8.96	87.96	19.00	431000	9833.35	60.49	126.52	43.83
DN28-59	4.94	328.51	1.24	0.001	10.08	0.02	0.34	0.85	0.14	5.63	1.91	25.69	10.07	52.17	11.66	117.77	25.41	431000	10788.63	44.56	65.63	39.95
DN25-12	4.41	1107.78	2.95	80.474	233.26	30.45	135.49	28.44	1.98	40.92	9.16	97.48	35.43	169.77	34.44	313.21	64.75	431000	8763.28	325.57	860.37	49.18

附表 2 大红柳滩地区二云母花岗岩核部锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb analysis results of zircons from the core of the Dahongliutan two-mica granite

分析点号	w(B)/10 ⁻⁶		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%				
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ		
	DN25-24	47.51		2182.43	0.02	0.2128	0.0102	0.0310	0.0007	0.0497	0.0019		195.89	9.36	196.69	4.19
DN28-28	232.78	2155.99	0.11	0.2166	0.0087	0.0310	0.0004	0.0506	0.0020	199.05	8.01	197.03	2.65	220.31	8.57	99
DN28-68	209.14	1577.55	0.13	0.2299	0.0115	0.0310	0.0005	0.0534	0.0023	210.15	10.51	196.62	3.41	344.47	14.55	94
DN25-58	196.36	441.23	0.45	0.7747	0.0434	0.0874	0.0015	0.0641	0.0035	582.44	32.61	540.13	9.46	743.40	40.75	93
DN25-01	84.41	363.44	0.23	0.8094	0.0428	0.0959	0.0017	0.0607	0.0028	602.11	31.81	590.33	10.68	627.93	28.78	98
DN25-02	13.44	22.62	0.59	1.3571	0.1694	0.1403	0.0051	0.0696	0.0087	870.63	108.7	846.16	31.03	916.09	114.8	97
DN25-03	27.18	96.42	0.28	1.6168	0.1041	0.1567	0.0034	0.0743	0.0044	976.75	62.86	938.38	20.2	1047.76	62.49	96
DN25-06	218.02	384.30	0.57	0.2710	0.0201	0.0384	0.0008	0.0509	0.0036	243.49	18.02	242.74	5.16	234.19	16.41	100
DN25-13	338.04	267.67	1.26	0.2824	0.0344	0.0382	0.0012	0.0534	0.0065	252.59	30.74	241.72	7.58	344.62	41.84	96
DN25-15	53.85	133.76	0.40	0.3858	0.0382	0.0518	0.0014	0.0538	0.0052	331.29	32.77	325.59	8.65	361.41	35.14	98
DN25-17	77.44	191.92	0.40	0.8868	0.0554	0.1028	0.0021	0.0624	0.0036	644.67	40.28	630.76	12.92	685.37	39.28	98
DN25-19	73.34	284.56	0.26	0.2266	0.0242	0.0338	0.0009	0.0485	0.0051	207.42	22.16	214.32	5.82	121.82	12.85	97
DN25-21	145.54	396.20	0.37	0.5819	0.0331	0.0750	0.0014	0.0561	0.0028	465.68	26.47	466.21	8.66	457.18	23.12	100
DN25-22	58.34	97.24	0.60	0.6319	0.0581	0.0822	0.0021	0.0556	0.0050	497.30	45.69	509.53	13.02	436.07	39.12	98
DN25-23	22.76	62.89	0.36	0.7861	0.0769	0.0949	0.0027	0.0600	0.0057	588.95	57.64	584.2	16.47	601.9	57.66	99
DN25-25	15.13	733.77	0.02	0.2248	0.0164	0.0331	0.0007	0.0491	0.0034	205.9	15.05	209.78	4.58	153.04	10.45	98
DN25-26	42.10	342.54	0.12	0.2325	0.0190	0.0329	0.0008	0.0511	0.004	212.26	17.32	208.65	4.87	245.57	19.12	98
DN25-27	79.50	204.26	0.39	0.5881	0.0452	0.0722	0.0040	0.0589	0.0039	469.63	36.06	449.34	25.19	562.35	36.8	96
DN25-28	74.32	377.02	0.20	0.6415	0.0363	0.081	0.0016	0.0573	0.0028	503.21	28.48	502.10	9.75	500.75	24.73	100
DN25-29	70.30	233.26	0.30	0.2220	0.0218	0.0324	0.0008	0.0496	0.0048	203.55	20.03	205.28	5.39	175.35	16.85	99
DN25-31	126.54	392.17	0.32	0.2291	0.0180	0.0329	0.0007	0.0504	0.0038	209.46	16.47	208.49	4.74	211.35	15.76	100
DN25-32	118.97	657.79	0.18	0.4916	0.0258	0.0645	0.0012	0.0551	0.0024	406.03	21.27	403.00	7.51	414.26	18.31	99
DN25-33	12.91	644.65	0.02	0.5715	0.0291	0.0705	0.0017	0.0586	0.0025	458.99	23.37	439.00	10.7	551.28	23.36	965
DN25-34	73.48	166.00	0.44	0.2946	0.0302	0.0407	0.0012	0.0523	0.0053	262.21	26.84	256.96	7.63	298.91	30.02	98
DN25-35	118.83	514.79	0.23	0.3094	0.0199	0.0431	0.0009	0.0518	0.0030	273.73	17.63	272.29	5.56	275.65	16.13	99
DN25-36	124.98	509.67	0.25	0.3333	0.0210	0.0470	0.0010	0.0513	0.0029	292.08	18.39	295.83	6.25	251.43	14.28	101
DN25-39	199.11	203.93	0.98	0.2852	0.0311	0.0394	0.0011	0.0522	0.0056	254.74	27.80	249.01	7.19	295.05	31.77	98
DN25-40	75.06	169.92	0.44	0.3391	0.0322	0.046	0.0012	0.0532	0.0049	296.51	28.12	290.06	7.59	335.25	30.97	98
DN25-41	120.33	361.21	0.33	0.6170	0.0360	0.0759	0.0015	0.0586	0.003	487.97	28.49	471.85	9.34	552.14	28.47	97
DN25-42	98.93	210.71	0.47	0.5730	0.0632	0.0675	0.0021	0.0612	0.0067	459.93	50.71	421.37	13.08	645.49	70.50	92
DN25-43	120.26	298.55	0.40	0.2932	0.0236	0.0420	0.0010	0.0503	0.0038	261.07	20.99	265.44	6.16	207.96	15.91	98

续表 2-1
Continued Table 2-1

分析点号	$w(B)/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%				
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$						
				2 σ	2 σ	2 σ	2 σ	2 σ	2 σ	2 σ	2 σ					
DN25-44	60.75	113.14	0.54	0.3589	0.0543	0.0459	0.0018	0.0564	0.0086	311.4	47.07	289.40	11.3	465.32	70.83	93
DN25-45	356.88	503.73	0.71	0.5493	0.0301	0.071	0.0014	0.0558	0.0026	444.53	24.34	441.89	8.48	443.87	20.91	99
DN25-47	46.95	101.55	0.46	0.3484	0.0411	0.0481	0.0015	0.0522	0.0061	303.53	35.84	303.01	9.33	292.15	34.22	100
DN25-49	6.37	77.22	0.08	0.3637	0.0481	0.0487	0.0017	0.0538	0.0071	315.00	41.64	306.40	10.47	362.64	47.92	97
DN25-52	77.66	366.77	0.21	0.4276	0.0280	0.0556	0.0018	0.0554	0.0033	361.48	23.66	348.85	11.44	425.69	25.46	97
DN25-53	267.88	448.29	0.6	0.3288	0.0204	0.0440	0.0007	0.0539	0.0033	288.66	17.90	277.66	4.71	365.27	22.34	96
DN25-54	579.05	398.48	1.45	0.495	0.0273	0.0657	0.0010	0.0544	0.0029	408.28	22.55	410.28	6.43	384.60	20.72	100
DN25-55	218.94	574.96	0.38	0.2389	0.0152	0.034	0.0006	0.0507	0.0032	217.55	13.84	215.64	3.66	226.80	14.23	99
DN25-56	76.42	105.33	0.73	0.2841	0.0546	0.0421	0.0018	0.0489	0.0096	253.93	48.76	265.65	11.5	140.76	27.56	96
DN25-57	167.05	520.66	0.32	0.4980	0.0251	0.064	0.0010	0.0562	0.0027	410.37	20.67	399.83	5.94	461.25	22.43	97
DN25-62	26.05	73.58	0.35	1.4943	0.1049	0.1587	0.0033	0.0682	0.0048	928.08	65.13	949.71	19.65	873.76	61.22	98
DN25-63	65.43	180.22	0.36	0.5889	0.0418	0.0741	0.0018	0.0576	0.0041	470.17	33.35	460.66	10.95	514.33	36.37	98
DN25-66	40.98	62.54	0.66	0.4060	0.0558	0.0508	0.0018	0.0581	0.0081	346.00	47.54	319.20	11.10	530.87	74.37	92
DN25-67	97.45	250.34	0.39	1.168	0.0569	0.1171	0.0018	0.0724	0.0034	785.71	38.28	713.83	10.97	997.24	46.95	91
DN25-69	118.27	168.56	0.70	1.1934	0.0660	0.1331	0.0022	0.0652	0.0035	797.54	44.11	805.50	13.32	779.05	42.17	99
DN25-70	96.74	213.25	0.45	0.4971	0.0352	0.066	0.0012	0.0548	0.0039	409.71	29.02	412.02	7.76	401.82	28.35	99
DN25-71	87.20	158.00	0.55	1.5762	0.0812	0.1589	0.0026	0.0722	0.0036	960.88	49.49	950.80	15.36	989.67	49.58	99
DN25-74	342.42	659.47	0.52	0.2856	0.0161	0.0379	0.0006	0.0549	0.0030	255.08	14.37	239.78	3.81	407.51	22.43	94
DN25-75	16.93	291.78	0.06	0.2381	0.0203	0.034	0.0007	0.0510	0.0044	216.87	18.45	215.65	4.59	240.82	20.57	99
DN25-76	273.70	629.35	0.43	0.6231	0.0277	0.0764	0.0014	0.0595	0.0025	491.8	21.83	474.34	8.88	585.19	24.61	96
DN25-78	50.07	142.81	0.35	0.3215	0.0332	0.0439	0.0011	0.0534	0.0056	283.05	29.23	277.10	7.11	346.17	36.17	98
DN25-79	275.18	357.77	0.77	0.2933	0.0209	0.0420	0.0008	0.0510	0.0036	261.15	18.63	264.98	4.90	241.88	17.17	99
DN25-80	213.27	378.19	0.56	0.2237	0.0175	0.0331	0.0006	0.0494	0.0039	204.96	16.01	209.87	4.12	165.18	12.90	98
DN25-82	209.55	1326.38	0.16	0.2374	0.0112	0.0327	0.0005	0.0532	0.0024	216.28	10.20	207.13	2.92	334.96	15.08	96
DN25-85	193.57	1173.21	0.16	0.2325	0.0119	0.0338	0.0005	0.0502	0.0024	212.25	10.88	214.01	3.11	205.16	9.70	99
DN25-89	91.85	320.35	0.29	0.5457	0.0327	0.0667	0.0013	0.0596	0.0034	442.20	26.49	416.15	8.05	587.25	33.57	94
DN28-01	54.42	135.99	0.40	0.7586	0.0527	0.0901	0.0016	0.0607	0.0043	573.20	39.84	555.96	9.77	629.18	44.14	97
DN28-03	81.32	407.30	0.20	0.2341	0.0167	0.0334	0.0006	0.0506	0.0036	213.56	15.25	211.69	3.51	220.61	15.87	97
DN28-04	342.43	493.78	0.69	0.8200	0.0342	0.0979	0.0010	0.0604	0.0025	608.04	25.36	601.91	6.38	618.51	25.1	99
DN28-05	22.40	54.73	0.41	0.3119	0.0525	0.0452	0.0017	0.0498	0.0086	275.69	46.38	285.03	10.98	184.13	31.63	97
DN28-06	42.17	95.00	0.44	1.4552	0.0895	0.1499	0.0025	0.0701	0.0043	912.04	56.11	900.26	15.10	929.42	57.54	99

续表 2-2
Continued Table 2-2

分析点号	$w(B)/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		
				2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	2σ	
DN28-07	164.47	372.19	0.44	0.5111	0.0330	0.0681	0.0011	0.0542	0.0035	419.19	27.08	424.57	6.66	376.81	24.42	99
DN28-10	49.93	115.91	0.43	0.2736	0.0326	0.0360	0.0010	0.0549	0.0067	245.58	29.26	227.85	6.49	407.37	49.53	93
DN28-12	71.99	207.64	0.35	0.2234	0.0222	0.0328	0.0007	0.0491	0.0049	204.70	20.31	208.16	4.68	153.81	15.49	99
DN28-13	222.9	213.46	1.04	1.1526	0.0936	0.1275	0.0028	0.0653	0.0054	778.49	63.23	773.48	16.79	783.94	64.63	99
DN28-14	128.55	293.98	0.44	0.3333	0.0237	0.0456	0.0008	0.0528	0.0038	292.11	20.78	287.39	4.84	320.04	22.94	98
DN28-15	83.19	515.05	0.16	0.6304	0.0283	0.0803	0.0010	0.0567	0.0025	496.38	22.29	498.05	6.15	479.34	21.09	100
DN28-16	94.24	310.80	0.30	0.5856	0.0325	0.0744	0.0010	0.0569	0.0031	468.07	25.94	462.64	6.31	486.07	26.85	99
DN28-18	41.49	337.13	0.12	0.2250	0.0180	0.0329	0.0006	0.0495	0.0040	206.04	16.46	208.48	3.82	169.73	13.70	99
DN28-21	58.20	1233.77	0.05	0.6086	0.0218	0.0741	0.0007	0.0594	0.002	482.66	17.32	460.96	4.23	580.82	19.84	96
DN28-22	293.73	216.92	1.35	0.6133	0.0384	0.077	0.003	0.0576	0.0036	485.63	30.43	478.33	18.42	513.56	32.31	99
DN28-24	335.06	1737.81	0.19	0.2263	0.0096	0.0324	0.0003	0.0506	0.0021	207.15	8.78	205.56	2.11	220.16	9.06	99
DN28-25	40.09	140.11	0.29	1.5871	0.0813	0.1475	0.0029	0.0779	0.004	965.17	49.46	887.15	17.39	1143.38	58.48	92
DN28-26	51.25	373.08	0.14	0.2220	0.0244	0.033	0.0008	0.0487	0.0054	203.58	22.40	209.29	5.26	134.07	14.99	97
DN28-27	64.63	445.69	0.15	0.2327	0.0162	0.0331	0.0005	0.0509	0.0036	212.44	14.82	209.98	3.42	236.50	16.6	99
DN28-31	241.78	725.64	0.33	1.0672	0.0355	0.1196	0.0011	0.0647	0.0022	737.37	24.56	728.00	6.81	762.29	25.68	99
DN28-32	48.86	221.12	0.22	0.4381	0.0307	0.0555	0.0012	0.0571	0.0041	368.9	25.89	348.24	7.28	496.09	35.67	94
DN28-33	88.07	305.38	0.29	0.2227	0.0184	0.0322	0.0006	0.0501	0.0042	204.19	16.84	204.02	3.93	200.30	16.89	100
DN28-34	220.57	713.39	0.31	0.5024	0.0210	0.0661	0.0007	0.0550	0.0023	413.35	17.27	412.65	4.48	410.89	17.44	100
DN28-35	121.62	152.36	0.80	0.3431	0.0321	0.0478	0.0011	0.0519	0.0050	299.49	28.04	301.26	6.67	278.41	26.68	99=
DN28-37	188.56	2146.94	0.09	0.2197	0.0084	0.032	0.0005	0.0496	0.0019	201.63	7.71	203.09	3.04	175.19	6.78	99
DN28-39	25.92	121.36	0.21	0.7261	0.0597	0.0841	0.0018	0.0624	0.0053	554.28	45.58	520.40	11.16	685.37	57.87	94
DN28-41	42.52	221.37	0.19	0.8936	0.0514	0.1052	0.0016	0.0613	0.0036	648.29	37.29	645.00	9.70	647.78	38.14	99
DN28-43	55.26	917.54	0.06	0.2455	0.0122	0.0353	0.0004	0.0501	0.0025	222.92	11.07	223.69	2.73	200.63	10.14	100
DN28-44	58.02	238.39	0.24	0.5066	0.0342	0.0678	0.0013	0.0538	0.0037	416.14	28.09	422.86	7.99	361.91	24.98	98
DN28-46	202.53	1429.97	0.14	0.2312	0.0138	0.0334	0.0005	0.0498	0.0030	211.19	12.60	212.04	3.15	185.70	11.27	100
DN28-48	156.48	320.97	0.49	0.4644	0.0272	0.0587	0.0023	0.057	0.0034	387.30	22.65	367.41	14.23	491.34	29.38	95
DN28-50	114.47	216.71	0.53	0.5598	0.0360	0.0718	0.0011	0.0561	0.0037	451.39	29.00	446.90	7.14	455.83	29.97	99
DN28-51	148.02	248.65	0.60	1.2163	0.0543	0.1299	0.0018	0.0673	0.0031	808.09	36.05	787.41	11.11	847.32	38.62	97
DN28-52	99.56	152.9	0.65	0.4518	0.0556	0.0606	0.0018	0.0537	0.0068	378.57	46.58	379.07	11.2	355.46	44.82	100
DN28-53	86.88	134.86	0.64	0.6492	0.0480	0.0819	0.0015	0.057	0.0043	507.98	37.54	507.36	9.39	490.11	37.10	100
DN28-54	19.83	93.25	0.21	0.6861	0.0587	0.0843	0.0024	0.0585	0.0051	530.43	45.39	521.65	14.79	546.69	47.97	98

续表 2-3
Continued Table 2-3

分析点号	$w(\text{B})/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		同位素比值		年龄/Ma		谐和度/%						
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ		
DN28-56	366.79	1642.27	0.22	0.2248	0.0093	0.0322	0.0005	0.0501	0.0021	205.86	8.55	204.46	2.96	198.14	8.35	99
DN28-60	52.45	135.38	0.39	0.6780	0.0495	0.0808	0.0017	0.0602	0.0045	525.56	38.36	500.65	10.69	610.89	45.73	95
DN28-61	24.86	420.74	0.06	1.1336	0.0539	0.1195	0.0021	0.0681	0.0027	769.49	36.60	727.72	12.86	869.95	34.20	95
DN28-62	51.24	398.01	0.13	0.6180	0.0344	0.0769	0.0014	0.0577	0.0028	488.62	27.20	477.73	8.82	516.55	25.42	98
DN28-64	452.71	706.07	0.64	0.7907	0.0364	0.0955	0.0016	0.0595	0.0022	591.59	27.26	587.87	9.93	583.90	21.78	99
DN28-65	249.56	471.64	0.53	0.2605	0.0182	0.0377	0.0008	0.0496	0.0032	235.08	16.40	238.55	4.87	177.42	11.59	99
DN28-66	565.54	1225.57	0.46	0.4967	0.0249	0.0647	0.0011	0.0551	0.0023	409.50	20.50	404.05	7.13	417.28	17.61	99
DN28-67	103.97	841.78	0.12	0.4701	0.023	0.0589	0.0011	0.0574	0.0024	391.29	19.18	368.69	6.75	506.75	20.80	94
DN25-10	294.79	346.17	0.85	4.7340	0.1893	0.3108	0.0053	0.1099	0.0032	1773.27	70.92	1744.64	29.84	1796.23	52.31	98
DN25-11	42.90	86.29	0.50	2.7437	0.1551	0.2296	0.0047	0.0862	0.0044	1340.39	75.76	1332.24	27.22	1342.27	67.87	99
DN25-16	305.47	412.96	0.74	5.1934	0.2112	0.3309	0.0055	0.1133	0.0034	1851.53	75.31	1842.91	30.88	1852.02	55.63	100
DN25-61	51.07	278.06	0.18	4.8243	0.1640	0.3059	0.0040	0.1142	0.0035	1789.15	60.84	1720.27	22.66	1866.79	56.73	96
DN25-64	250.6	195.85	1.28	10.6050	0.3423	0.4668	0.0059	0.1648	0.0047	2489.15	80.35	2469.47	31.30	2504.25	71.09	99
DN28-02	42.35	62.29	0.68	5.0550	0.2585	0.3156	0.0056	0.1154	0.0059	1828.58	93.53	1768.36	31.25	1885.72	96.77	97
DN28-08	190.18	395.00	0.48	5.2501	0.1587	0.3353	0.0029	0.1130	0.0032	1860.79	56.25	1864.23	15.89	1847.32	51.63	100
DN28-17	47.18	329.87	0.14	5.0855	0.1579	0.3230	0.0029	0.1138	0.0033	1833.69	56.95	1804.26	16.01	1860.35	53.86	98
DN28-19	381.24	572.16	0.67	5.0750	0.1484	0.3258	0.0026	0.1127	0.0030	1831.94	53.57	1817.75	14.75	1842.02	49.28	99
DN28-20	60.49	126.52	0.48	4.4355	0.1790	0.2920	0.0072	0.1099	0.0041	1719.00	69.37	1651.66	40.99	1796.46	67.1	96
DN28-59	44.56	65.63	0.68	11.1378	0.4669	0.4873	0.0151	0.1640	0.0058	2534.72	106.25	2558.79	79.42	2496.49	88.29	99
DN25-12	325.57	860.37	0.38	2.5286	0.0997	0.2145	0.0035	0.0851	0.0024	1280.30	50.46	1252.97	20.31	1315.99	37.02	98

附表 3 大红柳滩花岗岩类中角闪石的电子探针分析结果(w(B)/%)及特征参数

Table 3 Electron microprobe analyses (w(B)/%) and characteristic parameters of amphiboles from the Dahongliutan granitoids

项目 点号	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9	HYM9
	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	19
SiO ₂	44.44	46.36	46.07	46.65	45.67	46.90	45.84	45.75	46.47	46.77	46.80	47.03	47.17	46.51	46.37	45.58	46.12	45.53	45.53
TiO ₂	0.60	0.49	0.44	0.43	0.46	0.72	0.63	0.51	0.45	0.69	0.72	0.69	0.63	0.55	0.54	0.58	0.54	0.54	0.54
Al ₂ O ₃	10.98	9.72	9.06	9.64	10.34	8.64	10.54	10.61	9.26	9.22	8.91	8.63	8.37	9.46	9.39	10.09	10.11	10.55	10.55
Cr ₂ O ₃	0.05	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.05	/	/	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	/	/
FeO	17.50	17.19	17.00	16.94	17.26	17.03	17.22	17.32	17.13	17.24	17.13	17.09	16.45	17.26	17.12	17.42	17.25	17.61	17.61
MnO	0.65	0.68	0.67	0.67	0.67	0.66	0.67	0.69	0.68	0.72	0.73	0.70	0.74	0.71	0.71	0.64	0.62	0.66	0.66
MgO	9.14	9.78	10.11	9.68	9.71	10.09	9.21	9.19	10.19	9.91	10.03	10.08	10.50	9.62	9.82	9.65	9.64	9.46	9.46
CaO	11.89	12.14	11.95	12.10	12.17	11.88	12.22	12.09	11.80	11.96	11.94	11.94	11.96	12.05	11.86	11.94	12.04	11.90	11.90
Na ₂ O	1.09	0.81	1.00	0.94	0.97	0.96	0.99	0.97	0.96	0.76	1.01	1.01	0.91	0.99	0.96	0.91	0.84	1.00	1.00
K ₂ O	0.98	0.81	0.78	0.75	0.82	0.72	0.96	0.93	0.77	0.81	0.82	0.73	0.73	0.82	0.86	0.91	0.83	0.84	0.84
Cl	0.05	0.05	0.07	0.03	0.06	0.08	0.02	0.05	0.03	0.07	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05
基于 13 个阳离子																			
Si	6.66	6.87	6.89	6.93	6.77	6.97	6.81	6.80	6.88	6.91	6.93	6.98	7.00	6.91	6.90	6.78	6.83	6.74	6.74
Al ^{IV}	1.34	1.13	1.11	1.07	1.23	1.03	1.19	1.20	1.12	1.09	1.07	1.02	1.00	1.09	1.10	1.22	1.17	1.26	1.26
Al ^{VI}	0.61	0.57	0.48	0.61	0.58	0.48	0.66	0.66	0.49	0.51	0.49	0.49	0.47	0.57	0.54	0.55	0.59	0.59	0.59
Ti	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.07	0.06	0.05	0.08	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Fe ³⁺	0.26	0.21	0.26	0.09	0.25	0.19	0.02	0.11	0.36	0.26	0.18	0.16	0.18	0.11	0.22	0.30	0.23	0.33	0.33
Fe ²⁺	1.93	1.92	1.87	2.01	1.89	1.93	2.12	2.04	1.76	1.87	1.94	1.96	1.86	2.03	1.91	1.86	1.90	1.86	1.86
Mn	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
Mg	2.04	2.16	2.25	2.14	2.15	2.24	2.04	2.04	2.25	2.18	2.22	2.23	2.32	2.13	2.18	2.14	2.13	2.09	2.09
Ca	1.91	1.93	1.91	1.93	1.93	1.89	1.95	1.93	1.87	1.89	1.90	1.90	1.90	1.92	1.89	1.90	1.91	1.89	1.89
Na	0.23	0.16	0.20	0.20	0.21	0.17	0.23	0.21	0.15	0.11	0.19	0.19	0.16	0.20	0.17	0.16	0.15	0.18	0.18
K	0.19	0.15	0.15	0.14	0.16	0.14	0.18	0.18	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.16	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16
阳离子总量	15.32	15.24	15.26	15.26	15.30	15.19	15.36	15.30	15.16	15.15	15.24	15.22	15.20	15.28	15.22	15.24	15.22	15.22	15.22
Cl	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
T/C	761.35	732.87	732.13	730.54	745.18	728.76	740.94	743.50	737.09	738.52	736.65	728.95	734.49	732.93	737.94	742.45	734.66	748.03	748.03
P/MPa	231.31	170.50	149.08	166.36	193.17	135.40	199.70	206.92	158.13	158.90	144.83	134.09	132.78	160.27	163.58	187.09	184.17	203.97	203.97

