

柴达木盆地北缘小赛什腾山二叠纪花岗岩的发现及其构造意义

高万里^{1,2)}, 王宗秀^{1,2)}, 李磊磊¹⁾, 崔明明¹⁾, 钱涛^{1,2)}, 胡俊杰¹⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

2) 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京, 100081

内容提要:赛什腾山位于柴达木地块北缘构造带(柴北缘构造带)与阿尔金走滑断裂带斜交部位,属于柴北缘残山带的一部分,带内零星出露的花岗岩体一直被认为形成于早古生代,属于早古生代洋陆碰撞期的花岗岩。我们对小赛什腾山两个花岗岩体重新进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素和微量元素分析,结果表明,两个岩体三个花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄分别为 $260 \pm 3\text{Ma}$, $268 \pm 8\text{Ma}$ 和 $263 \pm 8\text{Ma}$,表明其形成于中二叠世,而非原先认为的早古生代。所有锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布在 $0.28294 \sim 0.28320$ 之间,并具有极高的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($11 \sim 20$),其平均二阶段 Hf 模式年龄为 350Ma ,稍高于其 U-Pb 年龄,反应其源区可能为具有亏损地幔特征的新生镁铁质物质。结合区域地质特征和已有研究成果的分析认为,宗务隆小洋盆向西可能延伸至小赛什腾山地区,中二叠世俯冲的洋壳发生部分熔融形成了具有极高的正 ϵ_{Hf} 值的花岗岩。该发现表明柴北缘地区存在二叠纪时期的洋壳俯冲,为深入理解柴北缘晚古生代—中生代的构造演化提供了新的佐证。

关键词:青藏高原;柴达木盆地;中二叠世;花岗岩;锆石 U-Pb 年代学

柴北缘构造带位于青藏高原东北缘(图 1),北以青海南山断裂为界与祁连造山带相隔,南以柴达木盆地北缘断裂为界与柴达木地块毗邻,呈北西向展布,东西两端分别被哇洪山-温泉断裂和阿尔金断裂所截(图 1)。自北而南依次划分为宗务隆构造带、欧龙布鲁克微陆块和柴北缘早古生代俯冲带 3 个构造单元(Song Shuguang et al., 2014; Lu Songnian et al., 2002)。宗务隆构造带主要由宗务隆山群、土尔根大坂群、郡子河群、印支期花岗岩以及岛弧火山岩等组成(Guo Anlin et al., 2009);欧龙布鲁克微陆块主要由达肯大坂岩群、德令哈杂岩、万洞沟群和南华纪—震旦纪全吉群等共同构成(Chen Nengsong et al., 2007, 2009; Song Shuguang et al., 2010; Lu Songnian et al., 2002, 2016; Wang Huichu et al., 2005);柴北缘早古生代俯冲带内岩石出露较为齐全,从元古代至晚古生代均有出露,包括达肯大坂岩群、沙柳河岩群、滩间山群以及牦牛山组等(图 2)。带内还零星出露了一些

花岗岩体,为理解柴北缘地区地壳演化提供了良好的载体。Wu Cailai et al. (2001, 2004, 2007, 2008, 2014)曾对其展开过系统的研究工作,总体上看,该地区出露的花岗岩主要以古生代花岗岩为主(Chen Shiyue et al., 2016; Xin Chunlin et al., 2016),分别对应这一时期的洋壳俯冲、陆壳俯冲和板块的折返等阶段(Cheng Feng et al., 2017; Zhang Guibin et al., 2013; Wu Cailai et al., 2008)。区域内晚古生代—中生代花岗岩出露较少,除了赛什腾山三岔沟岩体(Wu Cailai et al., 2008),多数集中在柴北缘东段宗务隆构造带附近(Cheng Feng et al., 2017; Guo Anlin et al., 2009; Peng Yuan et al., 2016; Wu Cailai et al., 2016)。关于该时期花岗岩形成的构造背景还存在较大的争议,有学者认为,柴北缘西段二叠纪花岗岩形成在加里东造山后的陆内俯冲环境下(Wu Cailai et al., 2008),另有学者认为,宗务隆一带出露的二叠纪—三叠纪花岗岩具有弧花岗岩的特征,从而提出宗务隆地区可能存在海

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(DD20189614、DD02160173)联合资助成果。

收稿日期:2018-04-16;改回日期:2018-10-11;网络发表日期:2019-03-01;责任编辑:黄敏。

作者简介:高万里,男,1985年生。助理研究员,主要从事区域构造和岩石大地构造方面研究。Email: gwanli851202@163.com。

引用本文:高万里,王宗秀,李磊磊,崔明明,钱涛,胡俊杰. 2019. 柴达木盆地北缘小赛什腾山二叠纪花岗岩的发现及其构造意义. 地质学报, 93(4):816~829, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019101.

Gao Wanli, Wang Zongxiu, Li Leilei, Cui Mingming, Qian Tao, Hu Junjie. 2019. Discovery of the permian granite in saishiteng mountain of the northern qaidam basin and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 93(4):816~829.

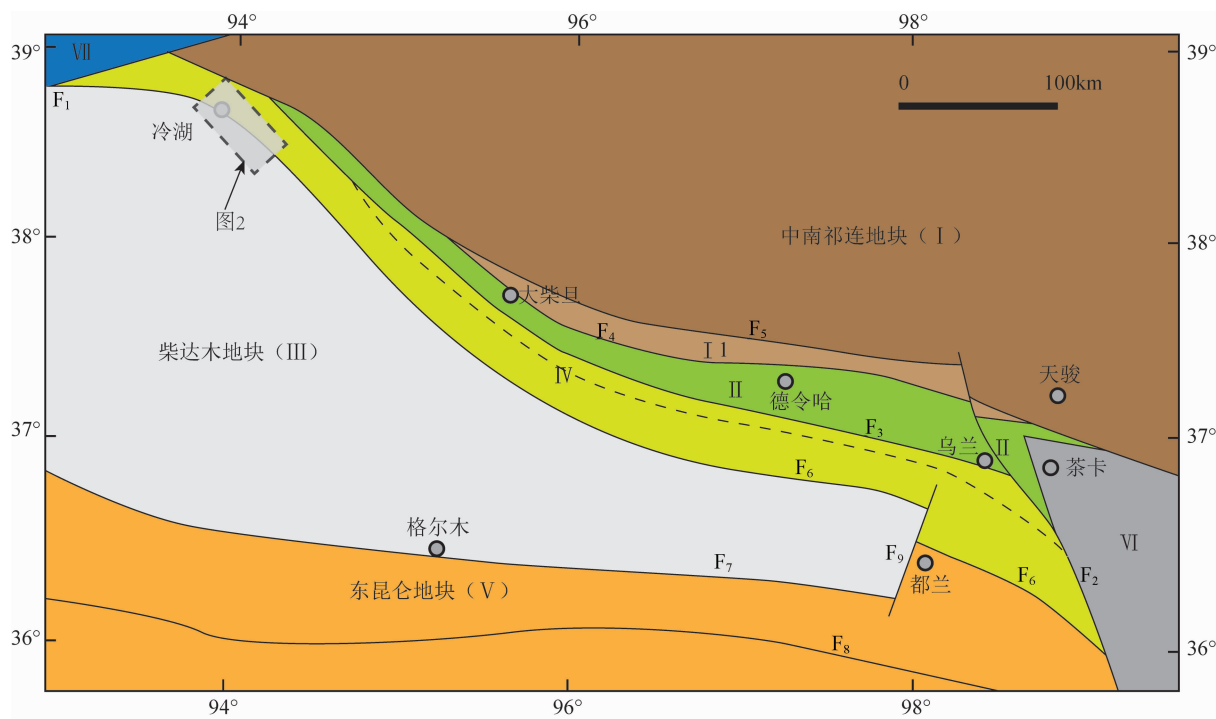


图 1 柴达木盆地北缘大地构造格架

Fig. 1 The tectonic framework of North Qaidam Basin

构造单元: I—中南祁连地块; I₁—宗务隆山构造带; II—欧龙布鲁克微陆块; III—柴达木地块; IV—柴北缘早古生代缝合带; V—东昆仑地块; VI—共和盆地; VII—阿尔金地块。主要断裂: F₁—阿尔金断裂; F₂—哇洪山—温泉断裂; F₃—柴北缘(乌兰—鱼卡)断裂; F₄—宗务隆山南缘断裂; F₅—宗务隆—青海湖南缘断裂; F₆—柴北缘南缘断裂; F₇—东昆北断裂; F₈—东昆中断裂; F₉—牦牛山—香日德断裂

Tectonic unit: I—the south Qilian Block; I₁—the Zongwulong tectonic zone; II—the Olongbuluke micro-Block; III—the Qaidam Block; IV—the Early Paleozoic suture zone of North Qaidam Block; V—the East Kunlun Block; VI—the Gonghe Basin; VII—the Altyn Block. Major fault: F₁—the Altyn fault; F₂—the Wenquan fault; F₃—the north-Qaidam fault; F₄—the south Zongwulong fault; F₅—the Zongwulong-Qinghai lake fault; F₆—the south North-Qaidam fault; F₇—the north East-Kunlun fault; F₈—the middle East-Kunlun fault; F₉—the Maoniushan-Xiangride fault

西—印支期造山带(Guo Anlin et al., 2009),还有学者提出,西秦岭地块与柴达木地块的斜向碰撞是该地区三叠纪花岗岩形成的主要原因(Peng Yuan et al., 2016),上述这些争议无疑制约了对区域晚古生代的构造演化的认识。近年来,陆续有学者在柴北缘西段发现了二叠纪花岗岩(Dong Zengchan et al., 2015; Hu Wanlong et al., 2016; Jia Zhilei et al., 2017; Qiu Shidong et al., 2015),为探讨柴北缘地区晚古生代的构造演化提供了新的视角。本次研究在柴北缘西段小赛什腾山地区发现了二叠纪花岗岩,对其年代学展开详细工作,结合区域二叠纪花岗岩的研究成果,探讨该期花岗岩形成的构造背景,这一工作对于了解柴北缘晚古生代的构造格局与演化具有重要的科学意义。

1 区域地质背景及样品描述

柴北缘地区的前寒武系是一套中—高级变质岩

系,主要由斜长角闪岩、云母片岩、片麻岩等组成。早古生代地层发育奥陶系滩涧山群(Gao Xiaofeng et al., 2011; Wang Huichu et al., 2003),主要为岛弧火山岩及砂页岩夹灰岩,发育低绿片岩相变质,属大陆边缘海相活动型沉积;晚古生代地层包括泥盆统和石炭系,是一套陆相粗碎屑岩、火山岩及海陆交互的碎屑岩沉积。此外,还有少量的中生代地层出露,主要是侏罗系和白亚系的含煤沉积岩系。前人的研究认为,该区以鱼卡—乌兰断裂为界,可分为地质特征明显不同的两个地质单元(Hao Guojie et al., 2004)。北部单元主要是指乌兰—德令哈—欧龙布鲁克—全吉山—达肯大坂山一带,称为欧龙布鲁克微陆块,主要由德令哈杂岩和新厘定的达肯大坂群及其不整合其上的新元古代全吉群和具有稳定大陆边缘沉积特征的寒武系—奥陶系组成;南部单元分布于都兰以北的沙柳河—野马滩—铅石山—锡铁山—绿梁山—鱼卡—赛什腾山一带,主要是早古生

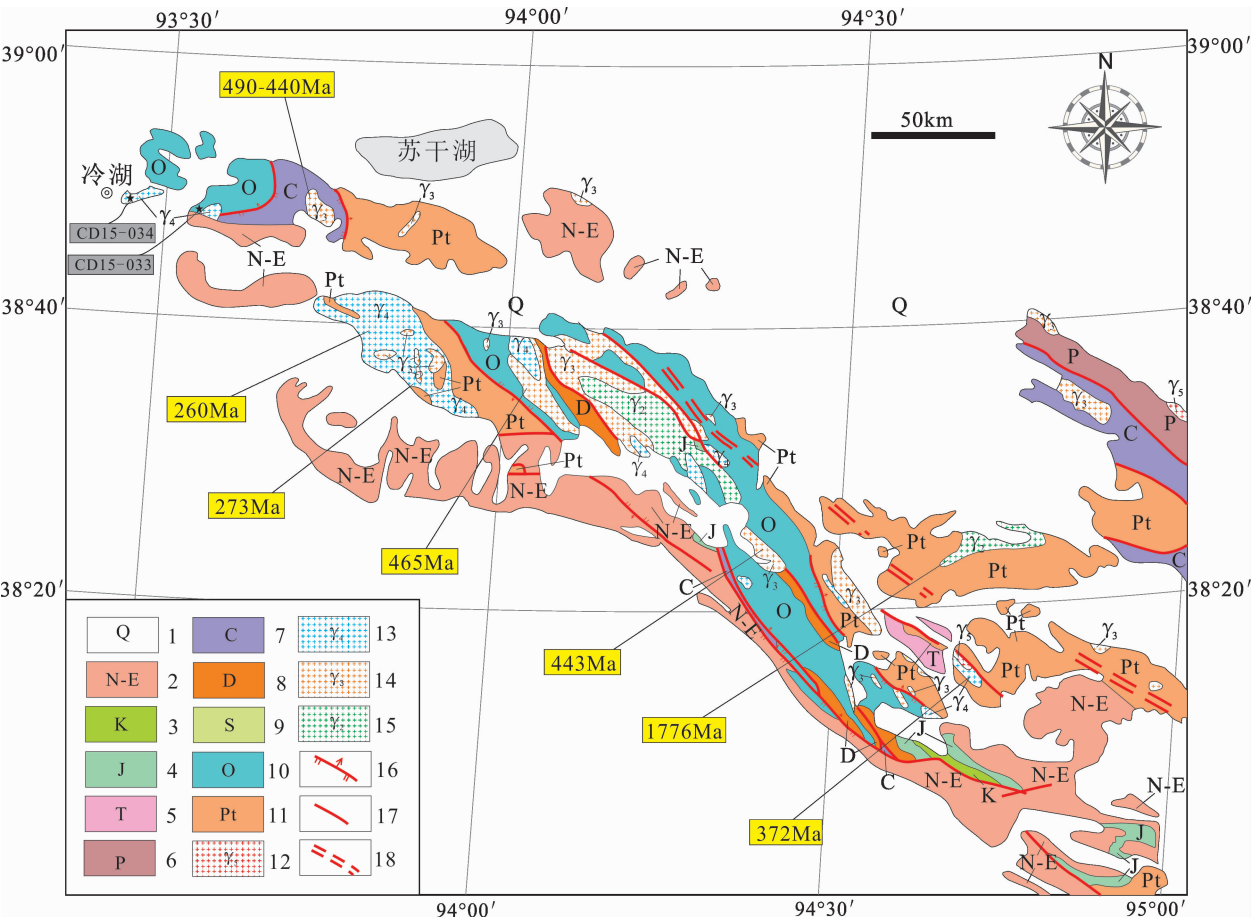


图 2 赛什腾山地区地质图

Fig. 2 The geological map of Saishiteng Mountain

1—第四纪;2—古近—新近纪;3—白垩纪;4—侏罗纪;5—三叠纪;6—二叠纪;7—石炭纪;8—泥盆纪;9—志留纪;10—奥陶纪;11—元古代;
12—中生代花岗岩;13—晚古生代花岗岩;14—早古生代花岗岩;15—元古代花岗岩;16—逆冲断裂;17—性质不明断裂;18—韧性剪切带
1—Quaternay;2—Paleogene-Neogene;3—Cretaceous;4—Jurassic;5—Triassic;6—Permian;7—Carboniferous;8—Devonian;10—Ordovician;
11—Proterozoic;12—Mesozoic granite;13—Late-Paleozoic granite;14—Early-Paleozoic granite;15—Proterozoic granite;16—thrust fault;
17—unknown fault;18—ductile shear zone

代俯冲碰撞杂岩带(Wang Huichu et al. , 2005),由含榴辉岩的花岗质片麻岩和具有弧火山岩特征的下古生界滩间山群所组成,泥盆纪磨拉石不整合其上。区域内的赛什腾山、团鱼山、三岔沟和噶喇河等岩体主要分布于该地质单元内,这些花岗岩体整体上呈北西向斜列式分布,与构造线方向一致。

小赛什腾山位于柴达木盆地西北角冷湖镇北部地区,其西部为阿尔金山、东部紧挨赛什腾山,呈近东西向展布(图 2)。小赛什腾山可分为 3 个基本地质单元;西部出露奥陶系滩涧山群,主要发育暗紫色玄武岩、灰绿色安山岩及安山质火山角砾岩,属于早古生代火山岛弧一部分,上部夹石英长石砂岩及砂质板岩;中部主要出露石炭系怀头他拉组,岩性为白色大理岩、灰岩、灰白色石英硬砂岩、夹板岩;东部主要出露元古界片岩、片麻岩;各岩组之间均为断层接

触,组内断裂发育,且发育多个花岗岩侵入体,Chen Shiyue et al. (2016)对中部出露的糜棱岩化花岗岩开展了年代学测试,结果表明小赛什腾山地区存在 470~480Ma、440~450Ma 和 390~400Ma 三期古生代花岗岩浆侵入旋回。本次研究选取的花岗岩体位于小赛什腾山西部的两个岩体,靠近冷湖镇(图 2),共采集了 3 件锆石 U-Pb 测试样品,编号分别为样品 CD15-033-1、样品 CD15-034-1、样品 CD15-034-2。

样品 CD15-033-1 取自滩涧山群内部的一个花岗岩岩脉,岩性为糜棱岩化花岗岩(图 3a),具有典型的糜棱结构,长石、石英均定向展布。镜下观察发现,岩石主要由残斑、基质组成,残斑占 70%,主要为长石及其集合体。残斑呈似条痕状、透镜状定向分布,粒度大小不等,局部见蠕虫结构。基质主要由

石英及新生变质矿物组成,石英($\geq 25\%$)具明显动态重结晶,呈压扁拉长状,绕晶流状分布;新生矿物 $1\% \sim 5\%$,为绢云母、绿泥石,鳞片状,绕晶流状分布。

样品 CD15-034-1、样品 CD15-034-2 取自同一个岩体,其中样品 CD15-034-1 为英云闪长岩,样品 CD15-034-2 为钾长花岗岩,野外可见到钾长花岗岩侵入到早期的英云闪长岩体中(图 3b)。显微镜下观察发现(图 3c),英云闪长岩(CD15-034-1)主要由角闪石、长石、黑云母和石英等组成,其中角闪石含量 20% ,斜长石 40% ,石英 25% ,黑云母 5% ,其余的为副矿物榍石、锆石等。斜长石多呈现板条状,有时呈聚斑产出,普遍发育聚片双晶,角闪石多呈半自形—自形晶,较新鲜。钾长花岗岩(CD15-034-2)岩石由斜长石(15%)、钾长石(55%)、石英(25%)、黑云母(2%)组成(图 3d)。斜长石呈半自形板状,杂乱分布,粒度一般 $2 \sim 5\text{mm}$,少部分 $5 \sim 8\text{mm}$,少数 $0.2 \sim 2\text{mm}$,高岭土化、绢云母化明显。钾长石呈近

半自形板状,杂乱分布,粒度一般 $2 \sim 5\text{mm}$,少部分 $5 \sim 7\text{mm}$,少数 $0.2 \sim 2\text{mm}$,轻高岭土化,交代斜长石,内含斜长石包体。石英呈他形粒状,似填隙状分布于长石粒间,有的与长石呈似文象状交生,粒度一般 $2 \sim 5\text{mm}$,部分 $0.1 \sim 2\text{mm}$,粒内轻波状消光。黑云母呈叶片状,棕黄色,零散分布,粒度 $0.1 \sim 1.3\text{mm}$ 。

2 测试方法

对三个花岗岩样品进行锆石 U-Pb 年代学分析,锆石按常规方法分选,最后在双目镜下挑纯,将分选锆石用双面胶粘在载玻片上,罩上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中,待树脂充分固化后,将样品靶从载玻片上剥离,并对其进行打磨和抛光,然后对靶上的样品进行反射光和透射光照相以及阴极发光(CL)照相。3 个花岗岩样品的 CL 图像分析均在中国地质科学院国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。锆石的 Th、U、Pb 同位素分析在国土资源部成矿作

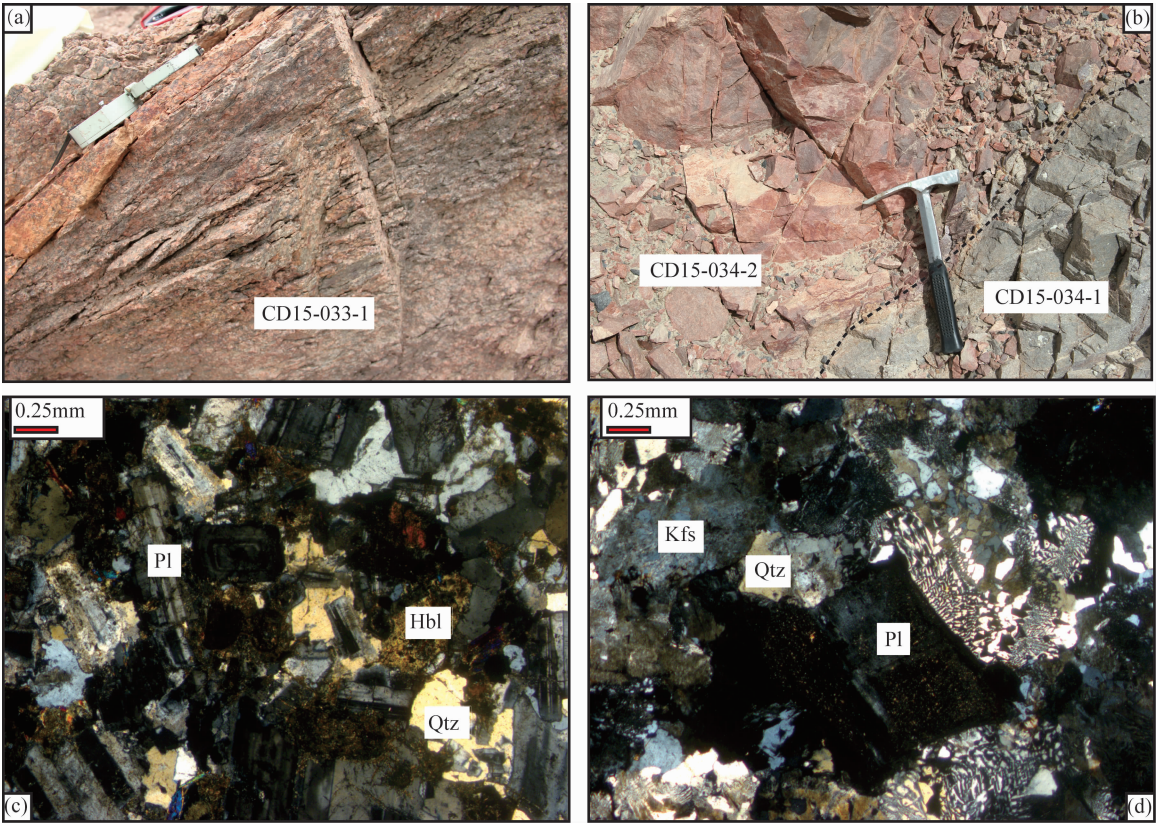


图 3 野外及显微镜下照片

Fig. 3 Field pictures and photomicrographs of the granites

(a)—糜棱花岗岩(CD15-033-1);(b)—石英闪长岩(CD15-034-1)和钾长花岗岩(CD15-034-2);(c)—石英闪长岩正交偏光镜下照片(CD15-034-1);
(d)—钾长花岗岩正交偏光镜下照片(CD15-034-2);Pl—斜长石;Hbl—角闪石;Qtz—石英;Kfs—钾长石
(a)—mylonite granite (CD15-033-1);(b)—quartz diorite (CD15-034-1) and K-feldspar granite (CD15-034-2);
(c)—photomicrographs (+) of quartz diorite (CD15-034-1);(d)— photomicrographs (+) of K-feldspar granite (CD15-034-2)

用与资源评价重点实验室采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)完成。采用的仪器、相关参数及测试流程参见文献(Hou Kejun et al., 2009)。锆石 U-Pb 定年工作所用的 MC-ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司最新一代 Neptune Plus 型多接收等离子体质谱仪。采用的激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro 193nm。激光剥蚀以氦气作为剥蚀物质的载气,激光剥蚀束斑直径 $32\mu\text{m}$,激光能量密度为 $10\text{J}/\text{cm}^2$,频率为 8Hz。锆石中的 U、Pb 在 8000°C 以上的高温等离子体中发生离子化,利用动态变焦扩大色散可以同时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素,从而进行锆石微区 U-Pb 同位素原位同时测定。每个分析点的气体背景采集时间为 4s,信号采集时间为 23s。数据分析前用国际上通用的锆石标样 91500 作为参考物质进行仪器的最佳化,使仪器达到最大的灵敏度、最小的氧化物产率($\text{ThO}+/\text{Th}+<2\%$)和最低的背景值。选用 GJ-1 作为辅助标样对数据的准确性进行验证。ICP-MS 数据采集选用一个质量峰采集一点的跳峰方式。每测定 5~10 个样品点,测定一组标样(一个标样 91500 点 和一个 GJ-1 点)。采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICPMSDataCal 程序(Liu Yongsheng et al., 2008)和 LudwigKR 的 Isoplot 程序(Ludwig, 2001)进行数据处理;年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏。

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接受等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行,Hf 同位素分析点在 U-Pb 分析点上进行。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径 $55\mu\text{m}$,测定时采用国际标样 CJ1 作为参考物质。相关仪器运行条件及详细分析流程见 Hou Kejun(2007)。分析过程中锆石标样 CJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282015\pm 28(2\text{SD}, n=10)$,与文献报道值在误差范围内完全一致。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

糜棱岩化花岗岩(CD15-033-1)中的锆石多为长柱状晶体,长宽比为 1:1 至 2:1,颗粒大小约为 $80\sim 180\mu\text{m}$,锆石的 Th/U 介于 $0.98\sim 4.02$ 之间,CL 图像显示锆石发育典型的振荡环带结构,显示其为岩浆成因(图 4)。对该岩石样品的 40 颗锆石

进行 U-Pb 同位素分析,测试结果见表 1 和图 4。在年龄谐和曲线上,36 个测点全部落在谐和曲线或者临近谐和曲线,具有较好的群落性, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄比较一致,介于 $251\sim 285\text{Ma}$ 之间,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $260\pm 3\text{Ma}$ (MSWD=1.4),可能代表了该期岩浆活动岩体最后的结晶年龄。

英云闪长岩(CD15-034-1)中的锆石为长柱状晶体,长宽比为 1:1 至 2:1,颗粒大小约为 $80\sim 100\mu\text{m}$,锆石的 Th/U 介于 $1.26\sim 2.30$ 之间,属于岩浆(图 4)。对该岩石样品的 20 颗锆石边部进行了 U-Pb 同位素分析,测试结果见表 1 和图 4。所有锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄比较一致,介于 $251\sim 280\text{Ma}$ 之间,其中谐和曲线上 11 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $269\pm 6\text{Ma}$ (MSWD=2.2),代表岩体的结晶年龄。

钾长花岗岩(CD15-034-2)中的锆石为长柱状晶体,长宽比为 1:1 至 2:1,颗粒大小约为 $80\sim 100\mu\text{m}$,发育振荡环带结构,部分锆石发育核边构造(图 4),锆石的 Th/U 介于 $1.0\sim 2.5$ 之间,属于岩浆成因。对该岩石样品的 20 颗锆石边部进行了 U-Pb 同位素分析,测试结果见表 1 和图 4。测点 11 的锆石 U-Pb 年龄为 $352\pm 9\text{Ma}$,为捕虏锆石。其余锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄比较一致,介于 $241\sim 282\text{Ma}$ 之间,谐和曲线上 11 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $263\pm 5\text{Ma}$ (MSWD=1.3),代表岩体最后的结晶年龄。

3.2 锆石 Hf 同位素

本次工作对已进行锆石 U-Pb 测年的小赛什腾山糜棱岩化花岗岩样品 24 颗锆石(CD15-033-1)和英云闪长岩样品 15 颗锆石(CD15-034-1)进行了 Lu-Hf 同位素分析(表 2)。所测样品的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $11.7\sim 20.8$,有四个测点的 T_{DMC} 值明显小于锆石 U-Pb 年龄,原因尚不清楚。剩余锆石的 T_{DMC} 模式年龄集中在 $286\sim 541\text{Ma}$ 之间,略高于岩石的 U-Pb 年龄,个别锆石的形成年龄与其两阶段模式年龄(254Ma 、 290Ma 、 294Ma)基本一致(图 5)。

4 讨论

4.1 花岗岩的侵位时代

前人曾对柴北缘地区的花岗岩做过大量研究,总体上岩浆活动以古生代为主,Wu Cailai et al. (2008)对区内的岩浆侵入事件做过总结,依据花岗岩的锆石年代学数据,将柴北缘古生代的岩浆事件分为五个期次,分别是:早中奥陶世($460\sim 475\text{Ma}$)、

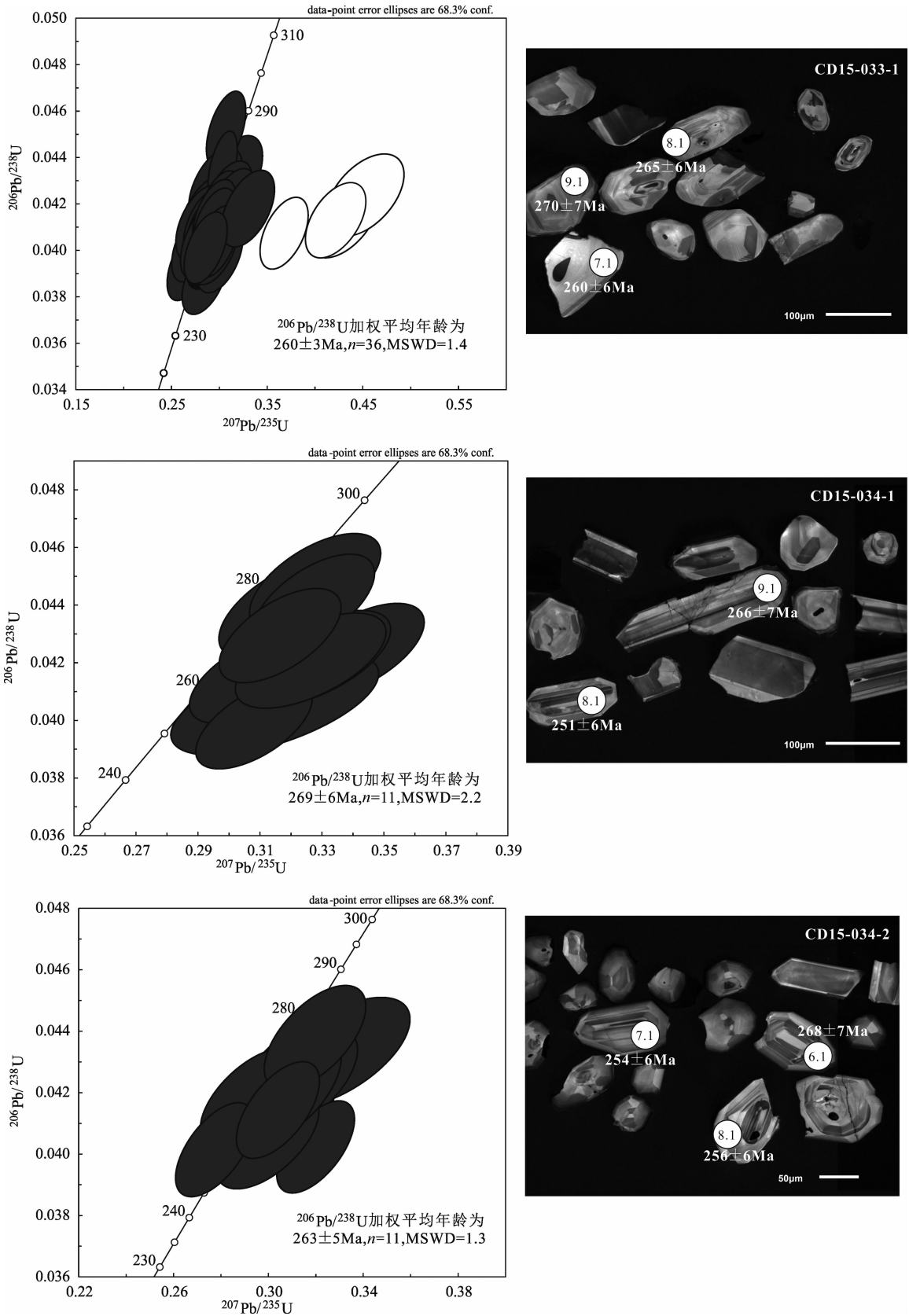


图 4 小赛什腾山花岗岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of granites from Saishiteng Mountain

表 1 小赛什腾山花岗岩锆石 U-Pb 年龄

Table 1 Zircon U-Pb age of granites from Saishiteng mountain

点号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$	1ρ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1ρ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1ρ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$	1ρ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1ρ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1ρ
CD15-033-1 糜棱化花岗岩															
1. 1	333.00	327.54	0.98	0.05166	0.00145	0.28401	0.00843	0.03990	0.00093	270	63	254	7	252	6
2. 1	21.28	44.74	2.10	0.05392	0.00327	0.30756	0.01857	0.04140	0.00108	368	131	272	14	261	7
3. 1	22.89	65.18	2.85	0.05290	0.00336	0.31522	0.01988	0.04320	0.00115	324	137	278	15	273	7
4. 1	177.18	225.04	1.27	0.05317	0.00166	0.29708	0.00967	0.04050	0.00095	336	69	264	8	256	6
5. 1	78.62	113.05	1.44	0.05249	0.00205	0.29329	0.01168	0.04050	0.00098	307	87	261	9	256	6
6. 1	25.90	75.26	2.91	0.04929	0.00215	0.30722	0.01356	0.04520	0.00110	162	99	272	11	285	7
7. 1	37.80	80.27	2.12	0.04961	0.00256	0.28129	0.01459	0.04110	0.00103	177	116	252	12	260	6
8. 1	48.43	194.50	4.02	0.05092	0.00175	0.29421	0.01043	0.04190	0.00099	237	77	262	8	265	6
9. 1	39.44	61.07	1.55	0.05026	0.00316	0.29628	0.01854	0.04280	0.00112	207	139	264	15	270	7
10. 1	16.77	39.15	2.33	0.05066	0.00371	0.29068	0.02114	0.04160	0.00114	226	161	259	17	263	7
11. 1	35.36	64.08	1.81	0.04915	0.00256	0.26668	0.01395	0.03940	0.00099	155	118	240	11	249	6
12. 1	29.85	58.39	1.96	0.05170	0.00317	0.29237	0.01791	0.04100	0.00107	272	135	260	14	259	7
13. 1	70.28	140.79	2.00	0.05203	0.00191	0.29168	0.01099	0.04070	0.00097	287	82	260	9	257	6
14. 1	116.57	221.66	1.90	0.05051	0.00161	0.30358	0.01011	0.04360	0.00103	219	72	269	8	275	6
15. 1	78.36	113.60	1.45	0.05061	0.00217	0.28290	0.01233	0.04050	0.00099	223	96	253	10	256	6
16. 1	43.79	66.79	1.53	0.04927	0.00270	0.27313	0.01501	0.04020	0.00102	161	123	245	12	254	6
17. 1	31.38	80.08	2.55	0.05086	0.00264	0.28991	0.01508	0.04130	0.00105	234	115	259	12	261	6
18. 1	18.18	38.09	2.10	0.07530	0.00435	0.42978	0.02458	0.04140	0.00112	1077	112	363	17	261	7
19. 1	27.00	54.73	2.03	0.04944	0.00303	0.28072	0.01717	0.04120	0.00108	169	137	251	14	260	7
20. 1	42.60	73.15	1.72	0.05309	0.00293	0.30901	0.01707	0.04220	0.00109	333	120	273	13	267	7
21. 1	41.07	72.53	1.77	0.05351	0.00312	0.30438	0.01774	0.04130	0.00108	350	126	270	14	261	7
22. 1	51.17	105.75	2.07	0.05327	0.00290	0.28478	0.01552	0.03880	0.00100	340	118	254	12	245	6
23. 1	18.60	84.29	4.53	0.05218	0.00298	0.29438	0.01678	0.04090	0.00106	293	125	262	13	259	7
24. 1	34.09	76.10	2.23	0.05196	0.00251	0.29983	0.01457	0.04190	0.00105	284	107	266	11	264	6
25. 1	34.39	65.19	1.90	0.05051	0.00276	0.28622	0.01566	0.04110	0.00104	219	122	256	12	260	6
26. 1	45.47	85.48	1.88	0.05062	0.00238	0.28483	0.01356	0.04080	0.00101	224	105	255	11	258	6
27. 1	55.48	144.00	2.60	0.05371	0.00236	0.30840	0.01375	0.04160	0.00103	359	96	273	11	263	6
28. 1	46.08	75.28	1.63	0.05417	0.00293	0.31294	0.01697	0.04190	0.00108	378	117	277	13	265	7
29. 1	40.02	60.89	1.52	0.05272	0.00291	0.28992	0.01603	0.03990	0.00102	317	121	259	13	252	6
30. 1	57.82	86.76	1.50	0.05045	0.00247	0.28051	0.01385	0.04030	0.00100	216	110	251	11	255	6
31. 1	17.66	37.17	2.10	0.07741	0.00466	0.45240	0.02698	0.04240	0.00117	1132	116	379	19	268	7
32. 1	30.36	75.77	2.50	0.05155	0.00261	0.29489	0.01501	0.04150	0.00104	266	112	262	12	262	6
33. 1	40.05	90.43	2.26	0.05489	0.00287	0.30069	0.01578	0.03970	0.00102	408	113	267	12	251	6
34. 1	20.29	70.05	3.45	0.05202	0.00265	0.29491	0.01510	0.04110	0.00104	286	112	262	12	260	6
35. 1	25.94	69.22	2.67	0.06548	0.00292	0.36790	0.01658	0.04080	0.00102	790	91	318	12	258	6
36. 1	31.75	80.92	2.55	0.05330	0.00299	0.29478	0.01653	0.04010	0.00104	342	121	262	13	254	6
37. 1	32.12	70.60	2.20	0.05329	0.00270	0.29682	0.01515	0.04040	0.00102	341	111	264	12	255	6
38. 1	30.27	54.63	1.80	0.05725	0.00319	0.33004	0.01836	0.04180	0.00109	501	119	290	14	264	7
39. 1	31.43	77.09	2.45	0.07405	0.00366	0.42184	0.02085	0.04130	0.00107	1043	97	357	15	261	7
40. 1	49.08	71.09	1.45	0.05168	0.00267	0.28588	0.01488	0.04010	0.00102	271	114	255	12	254	6
CD15-0034-1 花岗闪长岩															
1. 1	54.68	95.16	1.74	0.05243	0.00215	0.31691	0.01337	0.04390	0.00111	304	91	280	10	277	7
2. 1	74.34	117.40	1.58	0.05836	0.00237	0.34137	0.01424	0.04240	0.00108	544	86	298	11	268	7
3. 1	166.25	337.71	2.03	0.07702	0.00205	0.47055	0.01369	0.04430	0.00108	1122	52	392	9	280	7
4. 1	39.59	68.73	1.74	0.05627	0.00399	0.31470	0.02215	0.04060	0.00117	462	151	278	17	256	7
5. 1	72.68	98.93	1.36	0.05406	0.00252	0.30943	0.01470	0.04150	0.00107	373	101	274	11	262	7
6. 1	77.65	113.93	1.47	0.05306	0.00199	0.32653	0.01274	0.04460	0.00111	331	83	287	10	282	7
7. 1	53.37	100.43	1.88	0.05309	0.00220	0.32771	0.01398	0.04480	0.00113	332	91	288	11	282	7
8. 1	334.11	767.43	2.30	0.05552	0.00134	0.30351	0.00824	0.03970	0.00095	433	53	269	6	251	6
9. 1	65.88	106.33	1.61	0.05654	0.00261	0.32872	0.01545	0.04220	0.00109	473	100	289	12	266	7
10. 1	111.39	151.73	1.36	0.11209	0.00305	0.72049	0.02120	0.04660	0.00115	1834	48	551	13	294	7

续表 1

点号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$	1ρ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1ρ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1ρ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$	1ρ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1ρ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1ρ
11.1	133.51	167.93	1.26	0.05608	0.00218	0.30798	0.01241	0.03980	0.00100	455	84	273	10	252	6
12.1	98.83	127.52	1.29	0.09275	0.00279	0.54512	0.01746	0.04260	0.00106	1483	56	442	11	269	7
13.1	100.03	144.68	1.45	0.05381	0.00206	0.32725	0.01297	0.04410	0.00110	363	84	288	10	278	7
14.1	33.60	60.18	1.79	0.05624	0.00273	0.32630	0.01606	0.04210	0.00109	461	105	287	12	266	7
15.1	71.97	123.55	1.72	0.08629	0.00268	0.50612	0.01664	0.04250	0.00106	1345	59	416	11	269	7
16.1	42.22	72.14	1.71	0.06591	0.00268	0.37289	0.01556	0.04100	0.00105	803	83	322	12	259	6
17.1	35.78	64.38	1.80	0.06754	0.00279	0.39807	0.01686	0.04280	0.00110	854	84	340	12	270	7
18.1	62.82	98.55	1.57	0.05343	0.00212	0.31642	0.01298	0.04300	0.00108	347	87	279	10	271	7
19.1	76.67	98.86	1.29	0.05651	0.00288	0.35568	0.01832	0.04570	0.00120	472	110	309	14	288	7
20.1	122.36	158.98	1.30	0.05693	0.00235	0.31110	0.01322	0.03960	0.00101	488	89	275	10	251	6
CD15-034-2 钾长花岗岩															
1.1	42.31	77.74	1.84	0.05384	0.00254	0.30603	0.01472	0.04120	0.00106	364	103	271	11	260	7
2.1	67.88	189.46	2.79	0.05702	0.00203	0.29883	0.01112	0.03800	0.00095	492	77	266	9	241	6
3.1	32.43	58.95	1.82	0.05516	0.00334	0.32942	0.01996	0.04330	0.00118	418	130	289	15	273	7
4.1	57.59	101.07	1.75	0.05216	0.00206	0.30602	0.01250	0.04260	0.00107	293	87	271	10	269	7
5.1	118.15	150.31	1.27	0.05730	0.00261	0.30521	0.01416	0.03860	0.00100	503	98	271	11	244	6
6.1	116.79	147.23	1.26	0.05399	0.00241	0.31569	0.01442	0.04240	0.00109	371	97	279	11	268	7
7.1	73.78	182.79	2.48	0.05764	0.00183	0.31983	0.01082	0.04020	0.00099	516	69	282	8	254	6
8.1	51.93	84.80	1.63	0.05371	0.00251	0.29957	0.01428	0.04050	0.00104	359	102	266	11	256	6
9.1	64.77	109.32	1.69	0.05365	0.00203	0.31202	0.01228	0.04220	0.00106	356	83	276	10	266	7
10.1	219.31	221.31	1.01	0.06114	0.00194	0.32942	0.01115	0.03910	0.00097	644	67	289	9	247	6
11.1	84.69	137.35	1.62	0.30592	0.00734	2.36521	0.06288	0.05610	0.00140	3500	37	1232	19	352	9
12.1	117.41	105.16	0.90	0.06462	0.00302	0.33481	0.01589	0.03760	0.00099	762	96	293	12	238	6
13.1	38.07	70.08	1.84	0.05082	0.00246	0.29305	0.01444	0.04180	0.00108	233	108	261	11	264	7
14.1	175.67	439.92	2.50	0.05190	0.00130	0.33445	0.00940	0.04670	0.00113	281	56	293	7	294	7
15.1	74.98	79.89	1.07	0.05801	0.00288	0.32446	0.01632	0.04060	0.00107	530	106	285	13	256	7
16.1	85.19	127.22	1.49	0.05009	0.00189	0.27727	0.01092	0.04020	0.00101	199	85	249	9	254	6
17.1	47.85	84.86	1.77	0.05291	0.00228	0.31958	0.01415	0.04380	0.00112	325	95	282	11	276	7
18.1	147.33	243.32	1.65	0.06106	0.00177	0.36714	0.01156	0.04360	0.00107	641	61	318	9	275	7
19.1	105.71	143.69	1.36	0.05318	0.00193	0.30391	0.01157	0.04140	0.00104	337	80	269	9	262	6
20.1	159.97	207.72	1.30	0.05447	0.00182	0.33547	0.01187	0.04470	0.00111	391	72	294	9	282	7

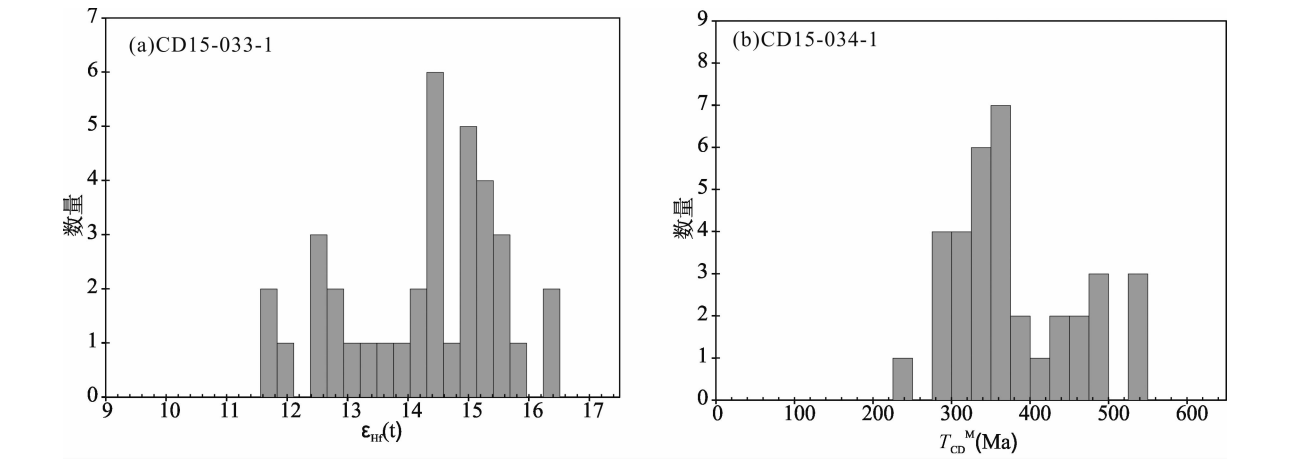


图 5 小赛什腾山花岗岩的锆石 Hf 同位素组成
Fig. 5 Zircon Hf isotopic composition of the Saishiteng granites

晚奥陶世 (440~450 Ma)、晚志留世—早泥盆世 (395~410 Ma)、晚泥盆世 (370~385 Ma) 和二叠纪 (260~275 Ma)。相比早古生代和晚古生代早期的岩浆活动,二叠纪岩浆活动强度明显偏弱,仅在三岔沟(Wu Cailai et al., 2008)和乌兰地区(Wu Cailai et al., 2016)发现了二叠纪花岗岩。近年来,有学

表 2 小赛什腾山花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic comments of granites from Saishiteng mountain

样品	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf (corr)	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf (corr)	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf (corr)	2σ	年龄 (Ma)	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (t)	T _{DM} (Ma)	T _{DM} ^C (Ma)	f _s
CD15. 033. 1. 1	0. 0911	0. 0002	0. 0033	0. 0000	0. 283214	0. 000033	260	0. 28320	20. 8	54	48	−0. 90
CD15. 033. 1. 2	0. 0113	0. 0001	0. 0004	0. 0000	0. 283100	0. 000018	260	0. 28310	17. 3	210	179	−0. 99
CD15. 033. 1. 3	0. 0461	0. 0007	0. 0016	0. 0000	0. 283056	0. 000028	260	0. 28305	15. 5	282	294	−0. 95
CD15. 033. 1. 4	0. 0435	0. 0001	0. 0014	0. 0000	0. 283077	0. 000023	260	0. 28307	16. 3	250	245	−0. 96
CD15. 033. 1. 5	0. 0161	0. 0003	0. 0005	0. 0000	0. 282992	0. 000019	260	0. 28299	13. 4	363	427	−0. 98
CD15. 033. 1. 6	0. 0238	0. 0002	0. 0008	0. 0000	0. 283025	0. 000022	260	0. 28302	14. 5	320	356	−0. 98
CD15. 033. 1. 7	0. 0221	0. 0003	0. 0007	0. 0000	0. 282985	0. 000022	260	0. 28298	13. 1	375	446	−0. 98
CD15. 033. 1. 8	0. 0222	0. 0003	0. 0008	0. 0000	0. 283019	0. 000021	260	0. 28302	14. 3	328	369	−0. 98
CD15. 033. 1. 9	0. 0380	0. 0002	0. 0011	0. 0000	0. 283108	0. 000025	260	0. 28310	17. 4	203	169	−0. 97
CD15. 033. 1. 10	0. 0265	0. 0002	0. 0008	0. 0000	0. 283010	0. 000022	260	0. 28301	14. 0	340	389	−0. 98
CD15. 033. 1. 11	0. 0168	0. 0004	0. 0005	0. 0000	0. 282964	0. 000017	260	0. 28296	12. 4	403	491	−0. 98
CD15. 033. 1. 12	0. 0163	0. 0001	0. 0005	0. 0000	0. 283053	0. 000022	260	0. 28305	15. 6	278	290	−0. 98
CD15. 033. 1. 13	0. 0378	0. 0002	0. 0012	0. 0000	0. 283045	0. 000021	260	0. 28304	15. 2	294	314	−0. 96
CD15. 033. 1. 14	0. 0135	0. 0002	0. 0005	0. 0000	0. 283051	0. 000022	260	0. 28305	15. 5	281	294	−0. 98
CD15. 033. 1. 15	0. 0423	0. 0002	0. 0012	0. 0000	0. 283020	0. 000024	260	0. 28301	14. 3	330	372	−0. 96
CD15. 033. 1. 16	0. 0218	0. 0001	0. 0006	0. 0000	0. 282967	0. 000022	260	0. 28296	12. 5	400	486	−0. 98
CD15. 033. 1. 17	0. 0184	0. 0002	0. 0005	0. 0000	0. 283022	0. 000023	260	0. 28302	14. 5	321	359	−0. 98
CD15. 033. 1. 18	0. 0344	0. 0005	0. 0010	0. 0000	0. 283049	0. 000025	260	0. 28304	15. 3	287	303	−0. 97
CD15. 033. 1. 19	0. 0191	0. 0001	0. 0006	0. 0000	0. 283023	0. 000024	260	0. 28302	14. 5	321	359	−0. 98
CD15. 033. 1. 20	0. 0291	0. 0004	0. 0008	0. 0000	0. 283034	0. 000021	260	0. 28303	14. 9	307	335	−0. 97
CD15. 033. 1. 21	0. 0401	0. 0003	0. 0011	0. 0000	0. 283039	0. 000023	260	0. 28303	15. 0	302	327	−0. 97
CD15. 033. 1. 22	0. 0196	0. 0003	0. 0006	0. 0000	0. 282972	0. 000023	260	0. 28297	12. 7	393	475	−0. 98
CD15. 033. 1. 23	0. 0294	0. 0002	0. 0010	0. 0000	0. 283077	0. 000029	260	0. 28307	16. 3	247	240	−0. 97
CD15. 033. 1. 24	0. 0188	0. 0001	0. 0005	0. 0000	0. 283046	0. 000021	260	0. 28304	15. 3	288	305	−0. 98
CD15. 034. 1. 1	0. 0241	0. 0005	0. 0009	0. 0000	0. 283028	0. 000036	268	0. 28302	14. 8	316	344	−0. 97
CD15. 034. 1. 2	0. 0307	0. 0001	0. 0009	0. 0000	0. 283022	0. 000018	268	0. 28302	14. 6	325	360	−0. 97
CD15. 034. 1. 3	0. 0440	0. 0025	0. 0015	0. 0001	0. 283037	0. 000105	268	0. 28303	15. 0	309	332	−0. 95
CD15. 034. 1. 4	0. 0192	0. 0001	0. 0006	0. 0000	0. 282973	0. 000024	268	0. 28297	12. 9	391	466	−0. 98
CD15. 034. 1. 5	0. 0254	0. 0005	0. 0009	0. 0000	0. 282943	0. 000030	268	0. 28294	11. 8	437	539	−0. 97
CD15. 034. 1. 6	0. 0223	0. 0002	0. 0007	0. 0000	0. 283031	0. 000023	268	0. 28303	14. 9	311	337	−0. 98
CD15. 034. 1. 7	0. 0245	0. 0001	0. 0008	0. 0000	0. 283013	0. 000022	268	0. 28301	14. 3	336	377	−0. 98
CD15. 034. 1. 8	0. 0429	0. 0013	0. 0015	0. 0000	0. 282945	0. 000036	268	0. 28294	11. 7	441	541	−0. 95
CD15. 034. 1. 9	0. 0210	0. 0006	0. 0007	0. 0000	0. 282948	0. 000024	268	0. 28294	12. 0	427	525	−0. 98
CD15. 034. 1. 10	0. 0358	0. 0007	0. 0013	0. 0000	0. 282967	0. 000027	268	0. 28296	12. 6	406	487	−0. 96
CD15. 034. 1. 11	0. 0437	0. 0003	0. 0015	0. 0000	0. 283047	0. 000026	268	0. 28304	15. 4	294	309	−0. 95
CD15. 034. 1. 12	0. 0289	0. 0002	0. 0009	0. 0000	0. 283016	0. 000025	268	0. 28301	14. 4	333	373	−0. 97
CD15. 034. 1. 13	0. 0328	0. 0002	0. 0010	0. 0000	0. 282996	0. 000023	268	0. 28299	13. 6	363	420	−0. 97
CD15. 034. 1. 14	0. 0256	0. 0002	0. 0008	0. 0000	0. 283032	0. 000023	268	0. 28303	14. 9	310	336	−0. 98
CD15. 034. 1. 15	0. 0342	0. 0005	0. 0010	0. 0000	0. 283055	0. 000019	268	0. 28305	15. 7	279	286	−0. 97

者相继在冷湖盐场(Dong Zengchan et al. , 2014), 南祁连化石沟(Jia Zhilei et al. , 2017)等地发现了二叠纪花岗岩,证明区域内的岩浆活动并非均为早古生代侵入。本次研究所获得的 3 个花岗岩的锆石 U-Pb 年龄集中分布在 268~260Ma 之间,属于海西晚期侵入,小赛什腾山花岗岩与区域二叠纪花岗岩发现,进一步指示柴北缘在海西晚期存在一期显著的岩浆活动。另外,有学者对赛什腾山地区的原属奥陶纪滩涧山群的火山岩进行了最新的锆石 U-Pb 年代学研究(Xu Xuming et al. , 2017),结果显示,

该套火山岩形成于晚二叠世(256. 9±0. 7Ma),这更加表明柴北缘西部地区二叠纪的火山—岩浆活动远比以往认识的更强烈,其岩石成因对认识区域构造演化具有重要意义。

4. 2 源区讨论

Hf 同位素的示踪研究已经广泛地应用于一些重要地球化学储库(如亏损地幔、球粒陨石和地壳等)的源区判别(Wu Fuyuan et al. , 2007)。对岩浆岩锆石 Hf 同位素的研究表明,具有低的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 以及 ε_{Hf}(t)值的岩石往往指示其源区为地壳或是经

过地壳的混染;而具有较高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 以及正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的岩石直接来自地幔或由幔源物质分异的新生壳源物质,比如现代大洋玄武岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 高达+23(Corfu et al., 1993; Kinny, 2003)。对于花岗岩,锆石 Hf 同位素地壳模式年龄(T_{DMC})代表岩浆源岩蚀源区地壳物质从亏损地幔库脱离的平均年龄。

本文对小赛什腾山岩体锆石的 Hf 同位素研究结果表明其具有极高的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(11.7~20.8),样品锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 以及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值投点几乎都位于亏损地幔演化线上,反映其为亏损地幔物质来源特征(图 6)。这一特征指示,小赛什腾山岩体源岩可能为新生的玄武质下地壳物质部分熔融的产物。对两个样品锆石的模式年龄计算显示,绝大部分年龄分布在 286~541Ma 之间,其平均值为 350Ma(图 5),这个年龄略高于 U-Pb 年龄(260Ma 以及 268Ma)。已有的研究成果表明,柴北缘地区在古生代期间不存在新生地壳的增长,因此,其极高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的特征最有可能源于亏损地幔物质直接分异的产物。区域上冷湖盐场北山 O 型埃达克岩的发现表明(Qiu Shidong et al. 2015),柴北缘地区在二叠纪期间可能存在俯冲板片的熔融,因此,本文发现的具有极高的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗岩可能也是俯冲板片(MORB)熔融形成的。

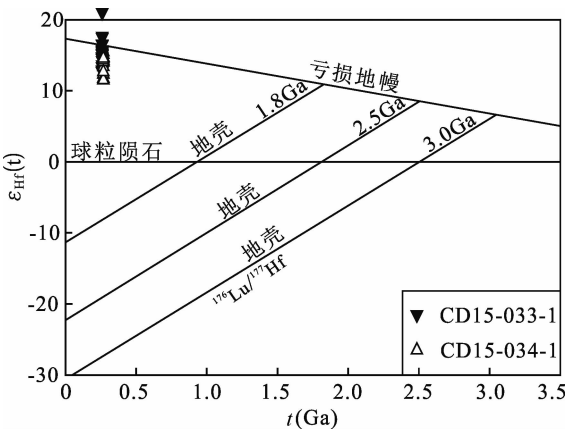


图 6 小赛什腾山花岗岩的锆石 Hf 同位素特征
Fig. 6 Zircon Hf isotopic features of Saishiteng granites

4.3 花岗岩形成的大地构造背景

柴北缘地区是继秦岭一大别之后,又一个被确定的超高压变质带(Yang Jingsui et al., 2001, 2009; Xu Zhiqin et al., 2003),与区域超高压变质带相伴生的早古生代的花岗质岩浆活动比较频繁,研究程度也最深,基本确定了早奥陶纪至晚泥盆纪花岗岩形成的大地构造背景与区域构造演化的关系

(Wu Cailai et al., 2008)。相比之下,二叠纪—三叠纪花岗岩仅有零星的报道,对其大地构造背景指示意义方面的研究也较为薄弱。传统上一直认为,柴北缘地区在加里东期发生了陆—陆碰撞造山事件,晚泥盆纪牦牛山组不整合在前泥盆纪地层之上,标志着造山运动的结束,之后一直以升降运动为主,没有发生大的构造运动,仅有的比较强烈的构造活动发生在欧龙布鲁克地块与南祁连地块之间的宗务隆构造带上(Zhang Xueting et al., 2007)。关于该构造带性质,早期的研究认为,宗务隆构造带属于裂陷槽(裂谷)性质(Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, 1991);之后又有学者提出,宗务隆构造带是在原特提斯洋闭合之后,伴随着古特提斯洋的拉开,形成在欧龙布鲁克地块与南祁连地块之间的小洋盆(Zhang Zhiyong et al., 2004),初始裂陷可能形成于早—中泥盆世,洋盆形成于晚石炭世(Wang Yizhi et al., 2001),中二叠世—中三叠世洋壳向南俯冲。Guo Anlin et al. (2009)通过对宗务隆构造带内构造变形与花岗岩的分析认为,宗务隆构造带二叠纪—三叠纪的花岗岩可能形成在俯冲—碰撞的背景下,代表了印支期比较强烈的造山运动。Wu Cailai et al(2008)最早研究了柴北缘三岔沟地区的二叠纪花岗岩,近年来又通过对乌兰地区二叠纪—早三叠世花岗岩的研究指出,宗务隆洋壳向南俯冲于欧龙布鲁克陆块下,南祁连地块与欧龙布鲁克地块沿宗务隆构造带的碰撞缝合引发了这一时期的岩浆活动(Wu Cailai et al., 2016; Wu Di et al., 2017)。宗务隆构造带存在代表洋壳的蛇绿岩组合(Wang Yizhi et al., 2001),且存在碰撞引发的岩浆活动(Guo Anlin et al., 2009),是否存在洋壳的俯冲作用一直没有直接的证据。最近,有学者在冷湖附近的南祁连化石沟地区发现了中二叠世埃达克性质的花岗岩,但被认为形成在造山挤压向后造山伸展的构造体制转变阶段(Hu Wanlong et al., 2016; Jia Zhilei et al., 2017); Qiu Shidong et al(2015)在冷湖盐场北山发现了二叠纪 O 型埃达克质花岗岩,认为其是俯冲板片直接熔融的产物,为柴北缘地区二叠纪存在洋壳俯冲提供了直接的证据。本次研究发现的二叠纪花岗岩在形成年龄与锆石 Hf 同位素特征上与盐场北山花岗岩相似,意味着它们可能与区域上的 O 型埃达克岩具有同样的形成背景。

小赛什腾山中二叠纪花岗岩锆石具有极高的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,其二阶段 Hf 模式年龄集中在 541~

286Ma 之间,平均为 350Ma,表明该花岗岩形成与新生镁质物质的部分熔融有关。区域上经过早古生代洋壳俯冲—碰撞之后,晚古生代时期,整个柴北缘地壳处于持续的伸展拉张状态下,在其北侧拉张作用最显著的吐尔根大坂—宗务隆一带可能拉张出了有限洋盆(Guo Anlin et al., 2007),形成玄武岩组成的大洋洋壳(含 MORB 上覆的远洋沉积物),中二叠世时期有限洋盆开始发生向南的俯冲,俯冲的洋片(MORB)直接部分熔融形成了具有极高正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值特征的花岗岩。区域上中二叠世埃达克岩的发现也进一步证实二叠纪期间可能存在洋壳的俯冲(Dong Zengchan et al., 2015; Hu Wanlong et al., 2016; Jia Zhilei et al., 2017; Qiu Shidong et al., 2015)。这一发现为宗务隆洋壳俯冲提供了有利的证据,同时也表明宗务隆残留小洋盆向西延伸到小赛什腾山北部地区,于中二叠世前就开始发生了向南的俯冲作用。

5 结论

小赛什腾山花岗岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学分析表明,该花岗岩形成在中二叠世 260~268Ma,证实区域不仅有加里东期岩浆活动,还存在显著的晚海西期岩浆活动。花岗岩锆石具有极高的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,暗示该花岗岩源于亏损地幔物质的部分熔融,结合区域背景分析,认为小赛什腾山中二叠世花岗岩的形成可能与北部宗务隆小洋盆俯冲板片的部分熔融有关。

致谢:野外工作中得到了青海石油勘探开发研究院周苏平高级工程师的帮助,中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士,王倩工程师以及中国地质科学院高莉博士、刘艳娇硕士生帮助进行了锆石 LA-ICPMS 的实验与分析,与西北大学孙娇鹏博士进行了有益的探讨,在此一并致谢。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, 1991. Regional Geology of the Qinghai Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Chen Nengsong, Gong Songlin, Sun Min, Li Xiaoyan, Xia Xiaoping, Wang Qinyan, Wu Fuyuan, Xu Ping. 2009. Precambrian evolution of the Quanji Block, northeastern margin of Tibet: Insights from zircon U-Pb and Lu-Hf isotope compositions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3~4): 367~376.
- Chen Nengsong, Wang Qinyan, Chen Qiang, Li Xiaoyan. 2007. Components and metamorphism of the basements of the Qaidam and Oulongbuluke micro-continental blocks, and a tentative interpretation of paleocontinental evolution in NW-Central China. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 043~055 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shiyue, Zhang yue, Sun Jiaopeng, Peng Yuan, Ma Shuai, Shao Pengcheng, Liu Jin. 2016. LA-ICP-MS U-Pb Dating for Paleozoic Granite from Xiaosaishiteng Mountain and Its Geological Significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 36(1):119~124(in Chinese with English abstract).
- Chen Xuanhua, Gehrels G, Yin An, Zhou Qi, Huang Penghui. 2015. Geochemical and Nd-Sr-Pb-O isotopic constrains on Permo-Triassic magmatism in eastern Qaidam Basin, northern Qinghai-Tibetan plateau: Implications for the evolution of the Paleo-Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114(SI4): 674~692.
- Cheng Feng, Jolivet M, Hallot E, Zhang Daowei, Zhang Changhao, Guo Zhaojie. 2017. Tectono-magmatic rejuvenation of the Qaidam craton, northern Tibet. *Gondwana Research*, 49: 248~263.
- Corfu F, Stott G M. 1993. Age and Petrogenesis of Two Late Archean Magmatic Suites, Northwestern Superior Province, Canada: Zircon U-Pb and Lu-Hf Isotopic Relations. *Journal of Petrology*, 34(4): 817~838.
- Dong Zengchan, Gu Pingyang, Jiao He, Zha Xianfeng, Chen Ruiming, Zhang Haidi. 2014. Geochemistry and chronology of Yanchangbeishan gabbro in Lenghu area at the west segment of the north margin of Qaidam. *Chinese Journal of Geology*, 49(4): 1132~1149(in Chinese with English abstract).
- Dong Zengchan, Yang Cheng, Gu Pingyang, Wang Hong, Zha Xianfeng, Chen Ruiming, Zhang Haidi. 2015. Geochronology and Geochemistry of Yanchangbeishan Biotite Adamellite of Lenghu Area in Qinghai and Their Geological Significance. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 39(1):167~178 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xiaofeng, Jiao Peixi, Jia Qunzi. 2011. Redetermination of the Tanjianshan Group: Geochronological and Geochemical Evidence of Basalts from the Margin of the Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 85(9):1452~1463(in Chinese with English abstract).
- Guo Anlin, Zhang Guowei, Sun Yangui, Cheng Shunyou, Qiang Juan. 2007. Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of late-Paleozoic mafic volcanic rocks in the surrounding areas of the Gonghe basin, Qinghai province and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 747~754 (in Chinese with English abstract).
- Guo Anlin, Zhang Guowei, Qiang Juan, Sun Yangui, Li Guang, Yao Anping. 2009. Indosinian Zongwulong orogenic belt on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Hao Guojie, Lu Songnian, Wang Huichu, Xin Houtian, Li Huaikun. 2004. The Pre-Devonian tectonic framework in the northern margin of Qaidam basin and geological evolution of Olongbuluck palaeo-block. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 11(3): 115~122 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zhou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuru., Xie Guiqing. 2007. Laser ablation-MCICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrol. Sin* 23(10), 2595~2604 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablationmultion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits* 28(4), 481~492 (in Chinese with English abstract).
- Hu Wanlong, JIA Zhilei, Wang Jinrong, Hou Kexuan, Wang Shuhua. 2016. Geochronology and Geochemistry Characteristics of the Granites from the Huashigou Area, South Qilian and Their Tectonic Significance. *Geological Journal of China Universities*, 22(2): 242~253(in Chinese with English abstract).
- Jia Zhilei, Chen Wanfeng, Sha Xin, Wang Jinrong. 2017. Discovery of Middle Permian Adakitic Rocks in South Qilian Area, Gansu and implications for Tectonics and Cu (Au) Mineralization.

- Geotectonica et Metallogenia, 41(1): 222~234 (in Chinese with English abstract).
- Kinny P D. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53(1): 327~341.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Gunther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Hailong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Lu Songnian, Hao Guojie, Xiang Zhenqun. 2016. Precambrian major geological events. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 140~155 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaikun, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zheng Jiankang. 2002. Redefinition of the "Dakendaban Group" on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 19~23 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. User's manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): a geochronological toolkit for Microsoft excel. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 1a, 55.
- Peng Yuan, Ma Yinsheng, Liu Chenglin, Li Zongxing, Sun Jiaopeng, Shao Pengcheng. 2016. Geological characteristics and tectonic significance of the Indosinian granodiorites from the Zongwulong tectonic belt in North Qaidam. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 206~221 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Shidong, Gu Pingyang, Pang Xinyu, Dong Zengchan, Zha Xianfeng, ZhaFangyong, Chen Ruiming, Zhuang Yujun. 2015. Zircon MC-LA-ICP-MS U-Pb dating. *Geochemistry and Geological Significance of Gneissic Quartz Diorite in Northern Lenghu, Qinghai*. *Geological Review*, 61(4): 948~960 (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, Zhang Cong, Zhang Lifei. 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Earth-Science Reviews*, 129: 59~84.
- Song Shuguang, Su Li, Li Xianhua, Zhang Guibin, Niu Yaoling, Zhang Lifei. 2010. Tracing the 850-Ma continental flood basalts from a piece of subducted continental crust in the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Precambrian Research*, 183(4): 805~816.
- Song Shuguang, Yang Jingsui. 2001. Sanidine+Quartz inclusion in Dulan Eclogites Evidence for UHP Metamorphism on the North Margin of the Qaidam Basin, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 180~185 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Lu Songnian, Mo Xuanxue, Li Huaikun, Xin Houtian. 2005. An Early Paleozoic collision orogen on the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China. *Geological Bulletin of China*, 24(7): 603~612 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Lu Songnian, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zhang Baohua, Wang Qinghai, Tian Qi. 2003. Tectonic setting and age of the "Tanjianshan Group" on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 22(7): 487~493 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yizhi, BaiYongshan. 2001. Geological characteristics of Tianjunnanshan ophiolite in Qinghai and its forming environment. *Geology of Qinghai*, 1: 29~35 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Joseph L. Wooden, Trevor Ireland, Li Haibing, Shi Rendeng, Men Fanchong, Chen Songyong, Harold Persing, Anders Meibom. 2004. Granitic Magmatism on the Early Paleozoic UHP Belt of Northern Qaidam, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 78(05): 658~674 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Li Zhaoli, Lei Min, Qin Haipeng, Li Mingze, Liu Chunhua, Ronald B. Frost, Paul T. Robinson, Joseph L. Wooden. 2014. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from Dulan and the chronological framework of the North Qaidam UHP belt, NW China. *Science China: Earth Sciences*, 44(10): 2142~2165 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Suoping, Chen Qilong, Joseph L. Wooden, Frank K. Mazadab, Chris Mattinson. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1861~1875 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Wu Suoping, Chen Qilong, Joseph L. Wooden, Frank K. Mazadab, Chris Mattinson. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemistry of granites from the west section in the north margin of Qaidam basin, NW China. *Science China: Earth Sciences*, 38(8): 930~949 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Lei Min, Wu Di, Li Tianxiao. 2016. Zircon SHRIMP Dating and Genesis of Granites in Wulan Area of Northern Qaidam. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(4): 493~516 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Ireland T, Wooden J, Li Haibing, Wan Yusheng and Shi Rendeng. 2001. Zircon SHRIMP ages of Aolaoshan granite from the south margin of Qilianshan and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 215~221 (in Chinese with English abstract).
- Wu Di, Wu Cailai, Lei Min, Li Tianxiao. 2017. Geochemical characteristics and genesis of the granites from Wulan Area, North Qaidam. *Geological Review*, 63(3): 597~615 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Xin Cunlin, Xie Qinghao, Dong Gai, Liao Jiandong. 2016. Geochemical Characteristics of Early Paleozoic Granites in the Saishiteng Mountain, Qinghai Province and Their Significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(5): 908~916 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xuming, Liu Guang, Liang Guoqing. 2017. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of the Volcanic Rocks in the Area of Saishiteng Mountain. *Xinjiang Geology*, 35(3): 250~254 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Wu Cailai, Li Haibing, Zhang Jianxin, Qi Xuexiang, Song Shuguang, Wan Yuesheng, Chen Wen, Qiu Haijun. 2003. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Qaidam Ultra-Pressure. *Acta Petrologica Sinica*, 77(2): 163~172 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, Wu Cailai, Shi Rendeng, Zhang Jianxin, Li Haibing, Wan Yusheng, Liu Yan, Qiu Haijun, Liu Fulai, Maruyama Shigenori. 2001. Discovery of Coesite in the North Qaidam Early Paleozoic Ultrahigh-high Pressure (UHP-HP) Metamorphic Belt, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 75(2): 175~179 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Liu Fulai, Wu Cailai. 2009. Tectonic setting of main high-and ultrahigh-pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1529~1560 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guibin, Zhang Lifei, Christy A G. 2013. From oceanic subduction to continental collision: An overview of HP-UHP metamorphic rocks in the North Qaidam UHP belt, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 98~111.
- Zhang Zhiyong, Yin Hongfu, Wang Bingzhang, Zhang Kexin. 2004. Presence and Evidence of Kuhai-Saishitang Branching Ocean in Copulae between Kunlun-Qinling Mountains. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 691~696 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈能松,王勤燕,陈强,李晓彦. 2007. 柴达木和欧龙布鲁克陆块基

- 底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探. 地学前缘, 14(1): 43~55.
- 陈世悦, 张跃, 孙娇鹏, 彭渊, 马帅, 邵鹏程, 刘金. 2016. 小赛什腾山古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年及地质意义. 矿物学报, 36(1): 119~124.
- 董增产, 辜平阳, 陈锐明, 查显峰, 张海迪. 2015. 柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 130~144.
- 董增产, 辜平阳, 焦和, 查显峰, 陈锐明, 张海迪. 2014. 柴北缘西端冷湖盐场北山辉长岩地球化学及年代学研究. 地质科学, 49(4): 1132~1149.
- 高晓峰, 校培喜, 贾群子. 2011. 滩间山群的重新厘定——来自柴达木盆地周缘玄武岩年代学和地球化学证据. 地质学报, 85(9): 1452~1463.
- 郭安林, 张国伟, 强娟, 孙延贵, 李广, 姚安平. 2009. 青藏高原东北缘印支期宗务隆造山带. 岩石学报, 25(1): 1~12.
- 郭安林, 张国伟, 孙延贵, 程顺有, 强娟. 2007. 青海省共和盆地周缘晚古生代镁铁质火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学及其地质意义. 岩石学报, 23(4): 747~754.
- 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 辛后田, 李怀坤. 2004. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化. 地学前缘, 11(3): 115~122.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595~2604.
- 胡万龙, 贾志磊, 王金荣, 侯克选, 王淑华. 2016. 南祁连化石沟花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 高校地质学报, 22(2): 242~253.
- 贾志磊, 陈万峰, 沙鑫, 王金荣. 2017. 甘肃省南祁连化石沟地区发现中二叠世埃达克质岩: 大地构造及成矿意义. 大地构造与成矿学, 41(1): 222~234.
- 陆松年, 郝国杰, 相振群. 2016. 前寒武纪重大地质事件. 地学前缘, 23(6): 140~155.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 袁桂邦, 辛后田, 郑健康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定. 地质通报, 21(1): 19~23.
- 彭渊, 马寅生, 刘成林, 李宗星, 孙娇鹏, 邵鹏程. 2016. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗岩闪长岩地质特征及其构造意义. 地学前缘, 23(2): 206~221.
- 青海省地质矿产局. 1991. 中华人民共和国地质矿产部地质专报·一, 区域地质·第 24 号, 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 邱士东, 辜平阳, 庞新愉, 董增产, 查显峰, 查方勇, 陈锐明, 庄玉军. 2015. 青海冷湖北片麻状石英闪长岩的 MC-LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义. 地质论评, 61(4): 948~960.
- 宋述光, 杨经绥. 2001. 柴达木盆地北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体: 超高压变质作用的证据. 地质学报, 75(2): 180~185.
- 王惠初, 陆松年, 莫宣学, 李怀坤, 辛后田. 2005. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统. 地质通报, 24(7): 603~612.
- 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 辛后田, 张宝华, 王青海, 田琪. 2003. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代. 地质通报, 22(7): 487~493.
- 王毅智, 拜永山, 陆海莲. 2001. 青海天峻南山蛇绿岩的地质特征及其形成环境. 青海地质, 1: 29~35.
- 吴才来, 郜源红, 李兆丽, 雷敏, 秦海鹏, 李名则, 刘春花, Ronald B. Frost, Paul T. Robinson, Joseph L. Wooden. 2014. 都兰花岗岩锆石 SHRIMP 定年及柴北缘超高压带花岗岩年代学格架. 中国科学: 地球科学, 44(10): 2142~2165.
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 陈其龙, Joseph L. Wooden, Frank K. Mazadab, Chris Mattinson. 2007. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 23(8): 1861~1875.
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 陈其龙, Joseph L. Wooden, Frank K. Mazadab, Chris Mattinson. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学特征. 中国科学(D 辑: 地球科学), 38(8): 930~949.
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 李天啸. 2016. 柴北缘乌兰地区花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其成因. 地球学报, 37(4): 493~516.
- 吴才来, 杨经绥, J. L. Wooden, 史仁灯, 陈松永, A. Meibom, C. Mattinson. 2004. 柴达木北缘都兰野马滩花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 科学通报, 49(16): 1667~1672.
- 吴才来, 杨经绥, Trevori Reland, Joe Wooden, 李海兵, 万渝生, 史仁灯. 2001. 祁连南缘峨眉山花岗岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义. 岩石学报, 17(2): 215~221.
- 吴才来, 杨经绥, 许志琴, Joseph L. Wooden, Trevor Ireland, 李海兵, 史仁灯, 孟繁聪, 陈松永, Harold Persing, Anders Meibom. 2004. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗岩岩浆作用. 地质学报, 78(5): 658~674.
- 吴迪, 吴才来, 雷敏, 李天啸. 2017. 柴达木北缘乌兰地区花岗岩岩石地球化学特征及成因. 地质论评, 63(3): 597~615.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 辛存林, 谢庆豪, 董凯, 廖建栋. 2016. 青海赛什腾山早古生代花岗岩地球化学特征及意义. 矿物岩石地球化学通报, 35(5): 908~916.
- 徐旭明, 刘广, 梁国庆. 2017. 青海赛什腾山一带火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征. 新疆地质, 35(3): 250~254.
- 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 李海兵, 张建新, 戚学祥, 宋述光, 万渝生, 陈文, 邱海峻. 2003. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制. 地质学报, 77(2): 163~176.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 李海兵, 万渝生, 刘焰, 邱海峻, 刘福来, Maruyama Shigenori. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英. 地质学报, 75(2): 175~179.
- 张智勇, 殷鸿福, 王秉璋, 王瑾, 张克信. 2004. 昆秦接合部海西期苦海—赛什塘分支洋的存在及其证据. 地球科学——中国地质大学学报, 29(6): 691~696.

Discovery of the permian granite in saishiteng mountain of the northern qaidam basin and its tectonic significance

GAO Wanli^{* 1,2)}, WANG Zongxiu^{1,2)}, LI Leilei¹⁾, CUI Mingming¹⁾, QIAN Tao^{1,2)}, HU Junjie¹⁾

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 100081;*

2) *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing, 100081*

** Corresponding author: gwanli851202@163.com*

Abstract

The Saishiteng Mountain, located in the convergent part of North Qaidam tectonic belt and Altyn Tagh fault zone, belongs to one part of the North Qaidam tectonic belts. Granitic pluton outcropping in this area has long been regarded to form in early Mesozoic and should be the granitic rock resulting from the early Mesozoic ocean-continent collision. This study investigated the two granitic plutons in Saishiteng Mountain using LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, Lu-Hf isotopic and trace element analysis. The results show that three granite samples from the two plutons have zircon U-Pb ages of $260\pm3\text{Ma}$, $268\pm8\text{Ma}$ and $263\pm8\text{Ma}$, respectively, indicating that they formed in the Middle Permian, but not previously suggested early Mesozoic. $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ values of all zircons range from 0.28294 to 0.28320, with extremely high positive ϵ_{Hf} value of 11 to 20, and average two-stage model age of 350 Ma, higher than U-Pb age, suggesting that source region might be characterized by new-born mafic material with feature of depleted mantle. Combined with regional geological characteristics and existing research results, this study concludes that the Middle Permian granite with high positive ϵ_{Hf} values might form from partial melting of Middle Permian subduction of oceanic crust due to the extension of the Zongwulong oceanic basin westward to Saishiteng Mountain area. The discovery indicates that oceanic plate subduction occurred in the Permian, which provides new evidence for understanding the Late Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution in the northern Qaidam Basin.

Key words: Tibetan Plateau; Qaidam Basin; Middle Permian; granites; zircon U-Pb geochronology