

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.598>



内蒙古北山造山带花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及地质意义

李 敏,任邦方,滕学建,张 永,段霄龙,牛文超,段连峰

中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170

摘要:砾石滩地区位于内蒙古额济纳旗西部,晚古生代花岗岩出露广泛,是研究北山造山带晚古生代地质演化的关键地区。锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年结果显示,该地区的花岗岩形成于晚石炭世,其中英云闪长岩年龄为 310.8 ± 1.4 Ma,花岗闪长岩年龄为 310.3 ± 1.4 Ma 和 306.0 ± 1.2 Ma,二长花岗岩年龄为 308.7 ± 1.4 Ma。岩石学及化学成分显示其为准铝质—弱过铝质、中钾钙碱性系列岩石;稀土配分曲线呈现轻稀土元素相对富集的右倾分布特征,弱负铕异常(δEu 为 $0.7 \sim 0.9$);岩石富集大离子亲石元素 Rb、K 等,具有负的 Nb、Ta 和 Ti 异常;英云闪长岩、花岗闪长岩具有不均一的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($3.8 \sim 14.8$)、($7.3 \sim 14.0$),二阶段 Hf 同位素模式年龄 t_{DM}^{c} 分别为 $378 \sim 1083$ Ma、 $433 \sim 868$ Ma。北山造山带北部晚石炭世英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩的形成与壳幔混合有关,产生于大洋岩石圈俯冲过程中,形成于陆缘弧环境,该过程诱发了地幔对流,因而产生了幔源岩浆底侵,并将元古宙基底岩石熔融,壳幔混合之后形成晚石炭世大规模花岗岩类。

关键词:北山造山带;晚石炭世;构造环境;锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄;锆石 Hf 同位素;地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2018)12-4586-20

收稿日期: 2017-12-06

Geochemical Characteristics, Zircon U-Pb Age and Hf Isotope and Geological Significance of Granitoid in Beishan Orogenic Belt

Li Min, Ren Bangfang, Teng Xuejian, Zhang Yong, Duan Xiaolong, Niu Wenchao, Duan Lianfeng

Tianjin Center of Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: Lishitan area is located in west of Ejin County of Inner Mongolia, where Late Paleozoic granitoid is exposed in a wide range. And it's a key area to the geology evolution research of Beishan orogenic belt in Late Paleozoic. The zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results show that the granitoid in this area was formed in the Late Carboniferous, the tonalite was formed at 310.8 ± 1.4 Ma, the granodiorite was formed at 310.3 ± 1.4 Ma, 306.0 ± 1.2 Ma respectively, and the monzonitic granite was formed at 308.7 ± 1.4 Ma. The petrology and lithochemistry demonstrate that the tonalite, granodiorite and monzonitic granite belong to quasi-aluminous to weakly peraluminous rocks and middle-K calc-alcaline series. The tonalite, granodiorite and monzonitic granite are enriched in LREE and part of large iron lithophile elements, including Rb, K et al., relatively depleted in HREE, Nb, Ta and Ti with weakly negative europium anomaly (δEu is $0.7 \sim 0.9$). The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of tonalite and granodiorite are variable, ranging from 3.8 to 14.8 and 7.3 to 14.0 respectively. And the two stage Hf isotope model ages (t_{DM}^{c}) range from 378 to 1083 Ma and from 433 to 868 Ma respectively. The formation of tonalite, granodiorite and monzonitic granite is related with crust-mantle mixing, which were formed in the active epicontinent arc environment in the process of the ocean lithosphere subduction in Northern Beishan orogenic belt in Late Carboniferous. Mantle convection was caused by the process, thus led to mantle-derived magma invasion, which melted the Proterozoic basement rocks, and massive granitoids formed after

基金项目:中国地质调查局项目(Nos.12120114064601,121201006000172601)。

作者简介:李敏(1986—),男,工程师,主要研究方向为岩石地球化学和构造地质学。ORCID: 0000-0002-0651-1122. E-mail: limin_2447@qq.com

引用格式:李敏,任邦方,滕学建,等,2018.内蒙古北山造山带花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及地质意义.地球科学,43(12):4586—4605.

crust-mantle mixing in Late Carboniferous.

Key words: Beishan orogenic belt; Late Carboniferous; tectonic setting; LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb age; zircon Hf isotope; geochemistry.

0 引言

北山造山带(图 1a)位于甘、新、蒙交界,地处中亚造山带的南缘,为华北—塔里木板块、哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块的交汇部位(Zuo *et al.*, 1991; 王玉往和姜福芝, 1997; 龚全胜等, 2002; Dodson *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2009, 2010; Zhao *et al.*, 2012, 2015; Zhang *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2015),是天山—兴蒙造山带的关键枢纽地带(龚全胜等, 2002; 侯青叶等, 2012). 北山造山带经历了多期次、多阶段的板块裂解—俯冲—碰撞—拼合的复杂地质演化过程,具多旋回复合造山的特点(龚全胜等, 2002; Xiao *et al.*, 2010),由前寒武纪基底的微陆块(Su *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2015; Yuan *et al.*, 2015; Zong *et al.*, 2017)、早古生代公婆泉岩浆弧和古亚洲洋俯冲—增生过程中产生的增生杂岩组成(Zheng *et al.*, 2014a). 其中,晚古生代岩浆活动十分强烈,并构成了巨型的白山—乌珠尔嘎顺晚古生代构造岩浆岩带.

前人对北山造山带的地质演化进行了研究,但对于花岗岩的形成时代、地质背景还存在异议. 贾元

琴等(2016)在风雷山地区获得白山组流纹岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 318.5 ± 1.2 Ma, 并认为其构造背景为陆缘弧; 卢进才等(2013)获得红石山地区晚古生代火山岩锆石 U-Pb 年龄为 296.8 ± 3.5 Ma 和 314.9 ± 3.3 Ma; 牛亚卓等(2014)测得甜水井、碎石山地区的火山岩锆石 U-Pb 年龄为 296.8 ± 3.5 Ma 和 311.1 ± 3.2 Ma, 形成于大陆边缘浅海演化至裂谷盆地. 齐瑞荣等(2006)认为北山大石山岩体为 A₂ 型花岗岩, 获得的 Rb-Sr 等时线年龄为 273.0 Ma, 并认为北山地区在海西晚期进入造山后拉张裂解环境.

为确定北山造山带晚古生代花岗岩形成时代、岩石成因、岩浆源区性质及其构造背景,笔者基于 1:5 万哈珠等 4 幅区域地质调查工作,借助当前高精度分析测试手段,对其开展了岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素示踪研究.

1 区域地质背景和岩体地质特征

内蒙古北山地区大地构造单元划分大致以红柳

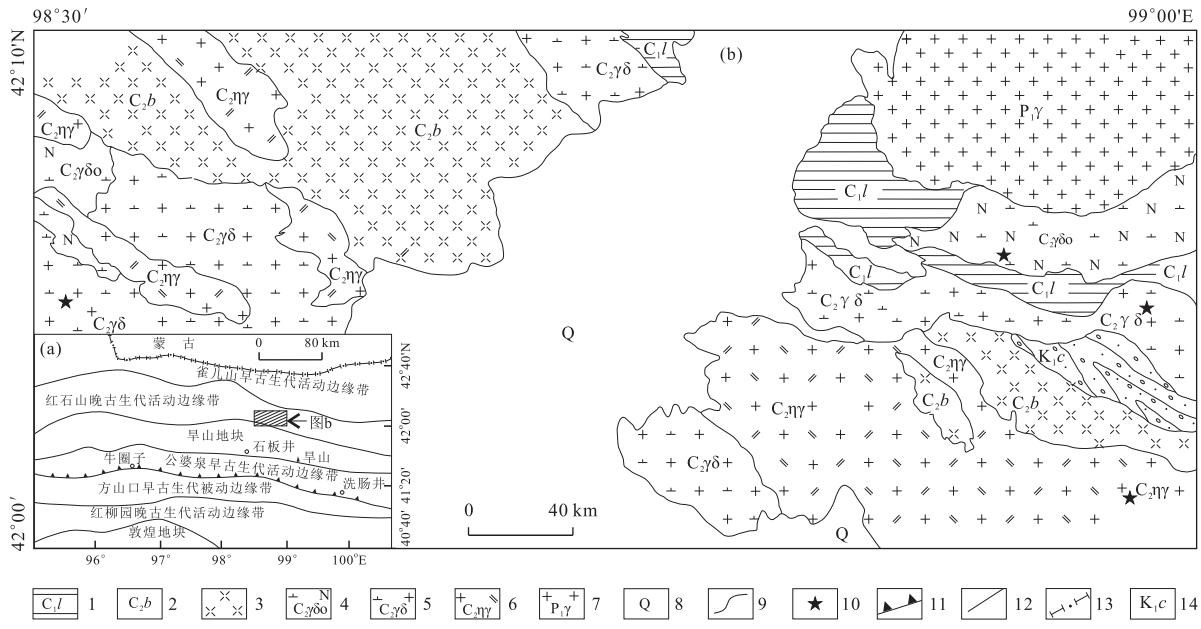


图 1 额济纳旗砾石滩地区地质简图

Fig.1 Geological sketch map of Lishitan area in Ejina county

1.下石炭统绿条山组;2.下石炭统白山组;3.流纹岩;4.晚石炭世英云闪长岩;5.晚石炭世花岗闪长岩;6.晚石炭世二长花岗岩;7.二叠纪花岗岩;
8.第四系;9.地质界线;10.采样位置;11.缝合带;12.构造分区界线;13.国界;14.上白垩统赤金堡组

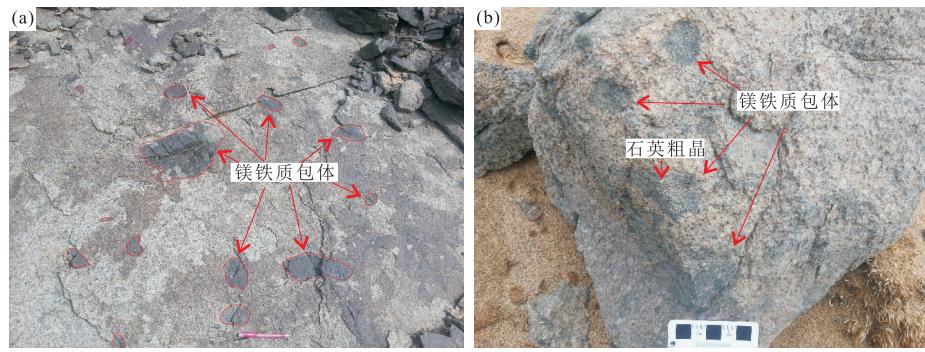


图 2 镁铁质包体
Fig.2 Mafic inclusions

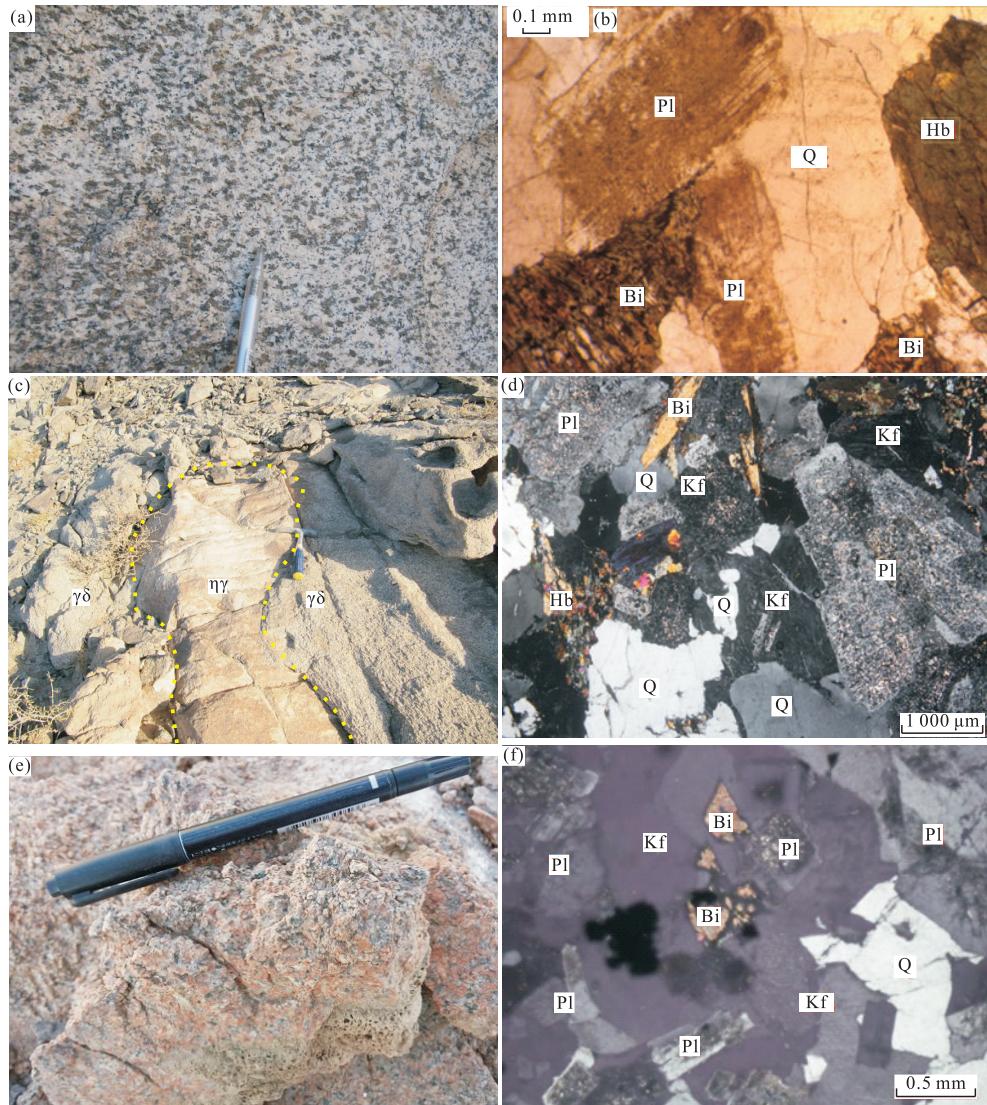


图 3 研究区花岗岩类野外与显微照片

Fig.3 Field photos and photomicrographs of granitoids in the study area

a.英云闪长岩;b.英云闪长岩偏光显微照片;c.二长花岗岩侵入花岗闪长岩;d.花岗闪长岩偏光显微照片;e.二长花岗岩;f.二长花岗岩偏光显微照片

河—牛圈子—洗肠井缝合带和红石山—百合山—蓬勃山为界,划分出南侧的塔里木板块、中间的马鬃山

微陆块(明水—旱山地块)(Ao *et al.*, 2011; 杨合群等, 2012; 郑荣国等, 2012; Tian *et al.*, 2014). 次一级

构造单元由北往南依次为:雀儿山—狐狸山早古生代活动边缘带,红石山—黑鹰山晚古生代活动边缘带,星星峡—明水—旱山地块,公婆泉—东七一山早古生代活动边缘带(图 1a).其中,南侧的敦煌微板块由早前寒武基底岩系敦煌岩群、中上元古界盖层以及古生界地层和侵入岩组成(戴霜等,2003;Guo et al.,2014;Song et al.,2013);马鬃山微陆块则发育了古元古代北山岩群变质地层,其南缘被公婆泉—东七一山早古生代岩浆弧叠加改造,在早古生代晚期与南侧的敦煌地块完成了拼贴(左国朝和何国琦,1990;于福生等,2000;Ao et al.,2010;郑荣国等,2012).雀儿山—狐狸山早古生代活动边缘带主要由下古生界地层和侵入岩组成,红石山—黑鹰山晚古生代活动边缘带主要由石炭系地层和晚古生代花岗岩组成.

砾石滩地区(图 1b)位于内蒙古额济纳旗西部,红石山—百合山—蓬勃山断裂带南侧(图 1b).区内地层分布较少,主要为北山岩群(Pt_1B)、下石炭统绿条山组(C_1l)、上石炭统白山组(C_1b)、上白垩统赤金堡组(K_1c).研究区南侧发育少量北山岩群(Pt_1B)大理岩、石英变粒岩等;下石炭统绿条山组(C_1l)被晚古生代花岗岩侵入,发育角岩化岩屑长石砂岩、黑云长英质角岩、黑云长英质接触板岩;上石炭统白山组(C_2b)发育大套流纹岩、安山岩和玄武岩,与晚石炭世花岗岩同期形成,安山岩和玄武岩位于研究区北侧;上白垩统赤金堡组(K_1c)主要为含砾粗砂岩、砾岩、中砂岩等,不整合覆盖于晚古生代花岗岩之上.

研究区晚古生代花岗岩主要为晚石炭世花岗岩、早二叠世花岗岩.晚石炭世花岗岩主要为英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩,3 种岩石类型共同构成杂岩体,呈岩基产出.杂岩体内发育大量暗色微粒包体(图 2),大多数包体与寄主岩的界线是截然的,少部分呈过渡关系,有时还可见到冷凝边现象,包体中有时可见较粗大的石英(有时是斜长石)捕捞晶(图 2b).

英云闪长岩出露面积较小,分布在晚石炭世杂岩体的边部,侵入绿条山组,被晚石炭世二长花岗岩、花岗闪长岩和二叠纪花岗岩侵入.岩石呈浅灰色,中细粒粒状结构(图 3a),块状构造,主要成分为斜长石(Pl)、钾长石(Kf)、石英(Q)、角闪石(Hb)、黑云母(Bi),副矿物为磁铁矿、锆石等.其中,斜长石牌号 $An=32$,有轻微绢云母化、绿帘石化,含量约为 50%~55%;石英含量约为 25%~30%;钾长石主要为微斜

长石、正长石,含量约为 5%~6%;角闪石含量约为 10%~15%,黑云母含量为 5%~6%(图 3b).

花岗闪长岩呈岩基产出,北西—南东向面状展布,主要出露于砾石滩地区西侧,侵入灰白色中细粒英云闪长岩体和绿条山组、白山组地层中,岩体边部靠近绿条山组边部相变为中细粒斑状角闪花岗闪长岩,被中细粒二长花岗岩侵入(图 3c).岩石由斜长石(45%~50%)、石英(25%)、钾长石(15%)、黑云母(12%)、少量角闪石(3%)组成(图 3d).

二长花岗岩多分布在杂岩体的中部,侵入于花岗闪长岩和二长花岗岩以及白山组之中,被二叠纪花岗岩侵入.岩石呈砖红色—肉红色,中细粒不等粒结构,块状构造(图 3e),主要矿物由斜长石(42%)、钾长石(31%)、石英(22%)及少量黑云母(<5%)组成(图 3f),副矿物为磁铁矿、磷灰石、锆石等.

2 样品分析方法

锆石挑选工作在河北省区域地质调查院完成,本文共选取 4 件样品进行同位素年代学测试.样品经过常规粉碎淘洗、磁选和重液分离后,借助双目镜挑选纯度在 99% 以上的锆石.然后在北京锆年领航科技有限公司完成锆石的制靶和透射光、反射光、阴极发光照相.本文 4 件样品(02TW1、06TW27、16TW10、14TW20)的测年工作在天津地质矿产研究所实验室完成(表 1),测试仪器为激光剥蚀多接收等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS),由 NEWAVE 193nmFX 激光器和 Thermo Fisher 公司的 NEPTUNE 质谱仪组成(耿建珍等,2011).采用准确的锆石微区原位 U-Th-Pb 同位素定年测试,分析中采用的激光束斑直径为 $35 \mu\text{m}$,剥蚀物质的载气为氦气,分析流程见 Yuan et al.(2004).采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al.,2010) 处理最终测试数据,最后采用 ISOPLOT3.0 程序(Ludwig,2003) 绘制 U-Pb 年龄谐和图和计算加权平均年龄.

本文共采集 12 件样品(英云闪长岩 3 件、花岗闪长岩 7 件、二长花岗岩 2 件)进行主、微量元素分析,分析结果见表 2,主量元素和微量元素分析测试在天津地质矿产研究所实验室完成.流程如下:新鲜岩石样品去除风化表皮,粉碎至 200 目的粉末状.用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试主量元素,FeO 含量的测定使用氢氟酸—硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法,分析精度优于 2%,使用 ICP-MS 测试微量元素含量,分析精度优于 5%.

锆石 Hf 同位素的测定采用 NEPTUNE(MC-ICPMS)系统,是在 U-Pb 定年分析的锆石的同一位置或附近进行的,使用的激光器和质谱仪与前述锆石 U-Pb 测试一致。分析条件、仪器型号及流程见耿建珍等(2011)。在分析过程中, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值是根据锆石测点的 U-Pb 年龄计算的,本文采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004), 球粒陨石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.033 6, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 785(Bouvier *et al.*, 2008)。依据现今亏损地幔 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.038 4, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.283 250(Griffin *et al.*, 2000) 计算亏损地幔模式年龄(t_{DM})。计算锆石 Hf 同位素的地壳模式年龄(t_{DM^c})时,采用 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.015 (Griffin *et al.*, 2002)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

通过透射光、反射光和阴极发光图像对样品 02TW1、06TW27、16TW10、14TW20 分别选取无裂纹发育、无包裹体发育、晶形、阴极发光特征典型的锆石进行了 LA-MC-ICP-MS U-Pb 分析,分析结果见表 1。

4 件样品锆石表面光滑,自形程度较好,呈长柱状,部分为短柱状、粒状,长轴为 150~250 μm ,长宽比约为 1:1~4:1。锆石阴极发光(CL)图像中(图 4),显示出岩浆型锆石的振荡韵律环带结构,锆石 Th/U 比值分别为 0.34~0.64、0.53~1.05、0.44~0.92、0.63~1.38,高于变质成因锆石(一般小于 0.1),为典型的岩浆锆石(Koschek, 1993; Williams *et al.*, 1996; 吴元保和郑永飞, 2004)。

样品 02TW1(英云闪长岩)(图 5a)有 25 个锆石测点,各测值的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 非常均一($303 \pm 4 \text{ Ma} \sim 314 \pm 4 \text{ Ma}$),25 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在置信度为 95% 时的加权平均年龄为 $310.8 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ($\text{MSDW}=0.47$)。

样品 06TW27(测区西部花岗闪长岩)的 24 个锆石测点中的 21 个测点位于谐和线上,第 14、20、23 个测点偏离谐和线较远,3 个测点均位于锆石振荡环带上,但 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 偏低,可能是由于 Pb 丢失造成。其余 21 个分析点年龄分布较为集中($307 \pm 3 \text{ Ma} \sim 314 \pm 3 \text{ Ma}$)(图 5b),21 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在置信度为 95% 时的加权平均年龄为 $310.3 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.34$)。

样品 16TW10(测区东部花岗闪长岩)(图 5c)有 24 个锆石测点,各测值的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 非常均一($304 \pm 3 \text{ Ma} \sim 309 \pm 3 \text{ Ma}$),24 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在置信度为 95% 时的加权平均年龄为 $306.0 \pm 1.2 \text{ Ma}$ ($\text{MSDW}=0.18$)。

样品 14TW20(二长花岗岩)(图 5d)有 24 个锆石测点,各测值均位于谐和线上,为 2 组谐和年龄,第 1 组有 21 个测点,各测值的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比较均一($306 \pm 3 \text{ Ma} \sim 314 \pm 3 \text{ Ma}$),21 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在置信度为 95% 时的加权平均年龄为 $308.7 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ($\text{MSDW}=0.53$)。第 2 组有 3 个测点,3 粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在置信度为 95% 时的加权平均年龄为 $342.6 \pm 4.1 \text{ Ma}$ ($\text{MSDW}=0.60$),3 粒锆石的核部与边部振荡环带较为截然,可能是岩浆侵位时捕获的早石炭世围岩的锆石。

综上,4 个测年样品所测得的岩体形成时代分别为 $310.8 \pm 1.4 \text{ Ma}$ 、 $310.3 \pm 1.4 \text{ Ma}$ 、 $306.0 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 和 $308.7 \pm 1.4 \text{ Ma}$,表明砾石滩地区花岗岩的侵位时代为晚石炭世。

3.2 地球化学

主、微量元素分析结果见表 2。英云闪长岩—花岗闪长岩中 SiO_2 含量相对偏低(60.1%~68.6%),二长花岗岩表现为高 SiO_2 (69.8%~73.1%);英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量中等,为 5.2%~7.1%;里特曼指数 δ 均小于 3.3,为钙碱性岩石,在岩石系列 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6a)中显示其属于中钾钙碱性系列,A/CNK 值均小于 1.1(图 6b),显示准铝质至弱过铝质特征;除样品 TW.1,其他样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 均小于 1,为 0.26~0.98,样品 TW.1 的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.02; MgO 含量较低(0.5~3.0), FeO_{T} 含量较低(2.2~6.2)。

英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩的固结指数 SI 分别为 22.5~23.6、10.4~20.6、5.1~8.4,表明岩浆经历了相对较高的分异演化,且分异程度逐渐升高。

在稀土元素配分曲线图(图 7a)上,英云闪长岩—东部花岗闪长岩—二长花岗岩—西部花岗闪长岩呈轻稀土元素富集的右倾型曲线特征,稀土总量 ΣREE 分别为 $54.9 \times 10^{-6} \sim 61.6 \times 10^{-6}$ 、 $114.2 \times 10^{-6} \sim 134.6 \times 10^{-6}$ 、 $100.6 \times 10^{-6} \sim 105.2 \times 10^{-6}$ 、 $141.9 \times 10^{-6} \sim 155.1 \times 10^{-6}$,含量有逐渐升高的趋势。 $\text{LREE}/\text{HREE}=5.2 \sim 9.3$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{N}}=3.9 \sim 7.7$,重稀土相对亏损; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=2.2 \sim 5.2$, $(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}}=1.0 \sim 1.8$, LREE 内部分馏程度中等,HREE 内部

表 1 砾石滩地区花岗岩 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of granitoids in Lishitan area

样品号	含量(10^{-6})	同位素比值						表面年龄(Ma)										
		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	
02TW1																		
1	4	76	0.049 6	0.000 6	0.357 3	0.024 9	0.052 2	0.003 7	0.012 8	0.000 3	0.396 0	0.000 9	312	4	310	22	296	161
2	4	77	0.049 3	0.000 7	0.362 5	0.045 7	0.053 3	0.006 8	0.012 2	0.000 5	0.531 5	0.001 1	310	4	314	40	343	287
3	5	98	0.048 8	0.000 6	0.353 1	0.015 9	0.052 5	0.002 4	0.013 0	0.000 3	0.386 1	0.000 5	307	4	307	14	307	103
4	4	86	0.049 7	0.000 5	0.359 4	0.020 1	0.052 4	0.002 9	0.014 1	0.000 3	0.378 8	0.000 6	313	3	312	17	303	126
5	6	117	0.049 8	0.000 5	0.360 3	0.016 2	0.052 5	0.002 3	0.013 3	0.000 2	0.400 5	0.000 3	313	3	312	14	308	101
6	5	108	0.049 5	0.000 5	0.356 3	0.015 6	0.052 2	0.002 3	0.013 8	0.000 2	0.360 8	0.000 6	312	3	309	14	293	99
7	6	114	0.049 6	0.000 5	0.359 8	0.019 9	0.052 6	0.002 9	0.012 3	0.000 2	0.435 7	0.001 3	312	3	312	17	311	125
8	6	127	0.049 3	0.000 5	0.362 1	0.014 9	0.053 3	0.002 1	0.012 4	0.000 2	0.396 4	0.000 8	310	3	314	13	341	90
9	4	77	0.049 4	0.000 6	0.362 8	0.028 7	0.053 3	0.004 3	0.010 7	0.000 4	0.369 4	0.000 6	311	4	314	25	343	181
10	6	127	0.049 5	0.000 5	0.362 2	0.013 8	0.053 1	0.002 0	0.013 8	0.000 2	0.445 4	0.001 5	311	3	314	12	331	86
11	4	92	0.048 0	0.000 6	0.348 3	0.023 3	0.052 6	0.003 5	0.015 3	0.000 4	0.341 2	0.001 3	303	4	303	20	310	154
12	6	121	0.049 2	0.000 5	0.361 3	0.018 0	0.053 3	0.002 6	0.014 7	0.000 4	0.354 3	0.000 9	309	3	313	16	341	109
13	4	82	0.049 2	0.000 6	0.364 1	0.025 0	0.053 7	0.003 9	0.014 1	0.000 3	0.455 5	0.000 7	309	4	315	22	358	163
14	6	115	0.049 6	0.000 6	0.364 3	0.021 9	0.053 3	0.003 4	0.014 3	0.000 2	0.636 3	0.004 2	312	4	315	19	341	145
15	4	84	0.049 9	0.000 6	0.360 3	0.021 6	0.052 3	0.003 2	0.013 9	0.000 3	0.395 1	0.000 6	314	4	312	19	300	139
16	6	117	0.049 4	0.000 5	0.362 5	0.017 8	0.053 2	0.002 7	0.014 6	0.000 2	0.446 1	0.000 9	311	3	314	15	336	114
17	5	101	0.049 8	0.000 5	0.361 4	0.022 9	0.052 6	0.003 3	0.015 7	0.000 3	0.514 7	0.003 0	314	3	313	20	311	144
18	4	71	0.049 0	0.000 6	0.360 2	0.041 3	0.053 3	0.006 4	0.015 5	0.000 7	0.385 8	0.000 8	309	4	312	36	340	270
19	4	73	0.049 2	0.000 6	0.357 8	0.026 6	0.052 7	0.004 5	0.014 9	0.000 4	0.482 5	0.001 2	310	4	311	23	318	194
20	5	97	0.049 4	0.000 5	0.360 5	0.024 3	0.053 0	0.003 6	0.007 3	0.000 4	0.461 0	0.000 4	311	3	313	21	327	153
21	6	115	0.049 6	0.000 5	0.361 0	0.015 4	0.052 8	0.002 3	0.014 3	0.000 2	0.510 3	0.000 4	312	3	313	13	321	100
22	7	132	0.049 6	0.000 6	0.362 7	0.013 3	0.053 0	0.001 9	0.015 3	0.000 2	0.593 8	0.003 2	312	4	314	12	328	83
23	7	132	0.049 6	0.000 6	0.360 2	0.013 2	0.052 7	0.001 9	0.014 6	0.000 2	0.489 7	0.001 9	312	4	312	11	315	81
24	20	372	0.049 6	0.000 6	0.362 1	0.007 0	0.053 0	0.000 9	0.015 3	0.000 1	0.577 6	0.004 0	312	4	314	6	328	39
25	9	167	0.048 9	0.000 5	0.358 0	0.012 7	0.053 1	0.001 9	0.014 8	0.000 2	0.504 6	0.002 2	308	3	311	11	334	79

续表 1

样品号	含量(10^{-6})	同位素比值										表面年龄(Ma)						
		^{206}Pb	^{206}U	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
06TW27																		
1	12	213	0.049 9	0.000 5	0.363 4	0.008 3	0.052 8	0.001 1	0.014 8	0.000 1	0.768 6	0.004 8	314	3	315	7	322	48
2	8	153	0.049 9	0.000 5	0.363 9	0.011 2	0.052 9	0.001 7	0.013 7	0.000 1	0.825 3	0.003 0	314	3	315	10	323	72
3	6	108	0.049 5	0.000 6	0.358 8	0.018 6	0.052 5	0.002 7	0.013 3	0.000 2	1.050 4	0.005 7	312	4	311	16	309	117
4	8	145	0.049 4	0.000 5	0.358 7	0.012 8	0.052 6	0.001 8	0.013 5	0.000 1	0.934 0	0.003 4	311	3	311	11	312	79
5	10	189	0.049 7	0.000 5	0.359 7	0.008 2	0.052 5	0.001 1	0.013 6	0.000 1	0.853 3	0.005 5	312	3	312	7	308	49
6	9	159	0.049 6	0.000 5	0.355 4	0.016 4	0.052 5	0.002 4	0.013 6	0.000 1	0.881 1	0.003 3	312	3	312	14	309	106
7	9	167	0.049 4	0.000 5	0.358 4	0.008 5	0.052 6	0.001 2	0.013 8	0.000 1	0.970 4	0.001 7	311	3	311	7	312	52
8	8	145	0.049 3	0.000 5	0.356 8	0.018 1	0.052 5	0.002 7	0.013 9	0.000 2	1.031 4	0.004 3	310	3	310	16	308	116
9	12	206	0.049 4	0.000 5	0.359 7	0.007 7	0.052 9	0.001 1	0.016 5	0.000 1	0.790 6	0.001 2	311	3	312	7	323	46
10	12	210	0.049 0	0.000 5	0.353 8	0.010 7	0.052 4	0.001 5	0.018 3	0.000 2	0.835 4	0.004 1	308	3	308	9	301	64
11	16	268	0.049 3	0.000 5	0.356 8	0.006 4	0.052 5	0.000 9	0.018 8	0.000 1	0.797 3	0.002 1	310	3	310	6	308	37
12	8	138	0.049 5	0.000 6	0.358 8	0.011 9	0.052 6	0.001 7	0.020 3	0.000 3	0.525 2	0.001 3	311	4	311	10	313	73
13	15	253	0.049 1	0.000 5	0.355 4	0.008 5	0.052 5	0.001 2	0.020 7	0.000 1	0.798 3	0.000 4	309	3	309	7	307	52
14	18	313	0.046 3	0.000 5	0.455 1	0.008 1	0.071 3	0.001 2	0.024 4	0.000 1	0.722 6	0.002 2	292	3	381	7	966	33
15	12	197	0.048 9	0.000 5	0.354 7	0.017 9	0.052 6	0.002 6	0.022 9	0.000 5	0.804 5	0.002 2	308	3	308	16	311	111
16	7	115	0.049 4	0.000 5	0.358 3	0.011 2	0.052 6	0.001 6	0.025 6	0.000 2	0.669 7	0.001 1	311	3	311	10	312	70
17	12	179	0.049 1	0.000 5	0.355 4	0.010 6	0.052 5	0.001 5	0.025 8	0.000 3	0.871 6	0.000 8	309	3	309	9	308	64
18	15	251	0.049 4	0.000 5	0.358 7	0.007 8	0.052 6	0.001 1	0.021 6	0.000 1	0.698 9	0.001 8	311	3	311	7	312	47
19	11	180	0.049 2	0.000 5	0.356 8	0.009 6	0.052 7	0.001 4	0.019 6	0.000 1	0.855 0	0.000 9	309	3	310	8	314	60
20	17	371	0.037 2	0.000 4	0.419 0	0.006 6	0.081 7	0.001 2	0.021 4	0.000 1	0.603 7	0.002 5	235	2	355	6	1239	29
21	9	166	0.049 4	0.000 6	0.360 3	0.013 2	0.052 9	0.001 9	0.019 5	0.000 3	0.716 3	0.008 5	311	4	312	11	326	82
22	12	206	0.048 8	0.000 5	0.352 4	0.006 9	0.052 3	0.001 0	0.017 2	0.000 1	0.842 3	0.001 9	307	3	307	6	299	42
23	8	154	0.039 2	0.000 5	0.629 0	0.016 6	0.116 3	0.002 8	0.023 2	0.000 2	0.714 0	0.001 3	248	3	495	13	1900	44
24	17	310	0.048 7	0.000 5	0.352 9	0.007 3	0.052 5	0.001 0	0.016 2	0.000 1	0.822 3	0.004 4	307	3	307	6	308	45

续表 1

样品号	含量(10^{-6})	同位素比值										表面年龄(Ma)								
		^{16}Tw	^{10}Pb	$^{\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
1	10	196	0.0486	0.0005	0.3537	0.0072	0.0528	0.0010	0.0158	0.0001	0.5961	0.0029	306	3	308	6	320	6	320	44
2	13	237	0.0483	0.0005	0.3490	0.0077	0.0524	0.0011	0.0159	0.0001	0.6740	0.0026	304	3	304	7	304	7	304	49
3	10	203	0.0486	0.0005	0.3536	0.0089	0.0527	0.0013	0.0153	0.0001	0.5265	0.0009	306	3	307	8	317	8	317	55
4	12	230	0.0482	0.0005	0.3509	0.0067	0.0528	0.0010	0.0153	0.0000	0.7149	0.0007	304	3	305	6	319	6	319	41
5	12	213	0.0485	0.0005	0.3533	0.0073	0.0528	0.0010	0.0156	0.0001	0.7531	0.0015	305	3	307	6	322	6	322	45
6	10	198	0.0485	0.0005	0.3515	0.0071	0.0526	0.0010	0.0157	0.0001	0.6371	0.0007	305	3	306	6	310	6	310	44
7	16	312	0.0486	0.0005	0.3510	0.0058	0.0523	0.0008	0.0160	0.0001	0.4764	0.0018	306	3	306	5	301	5	301	34
8	9	182	0.0486	0.0005	0.3520	0.0088	0.0525	0.0012	0.0158	0.0001	0.5325	0.0019	306	3	306	8	309	8	309	54
9	12	234	0.0484	0.0005	0.3518	0.0063	0.0527	0.0009	0.0159	0.0001	0.6486	0.0027	305	3	306	6	316	6	316	39
10	9	181	0.0486	0.0005	0.3509	0.0085	0.0524	0.0012	0.0160	0.0001	0.4732	0.0029	306	3	305	7	303	7	303	53
11	4	80	0.0487	0.0005	0.3540	0.0150	0.0527	0.0002	0.0163	0.0002	0.4797	0.0014	307	3	308	13	316	13	316	96
12	8	156	0.0487	0.0005	0.3533	0.0099	0.0527	0.0014	0.0160	0.0001	0.5577	0.0027	306	3	307	9	315	9	315	62
13	16	311	0.0489	0.0005	0.3544	0.0061	0.0526	0.0009	0.0154	0.0001	0.5583	0.0026	308	3	308	5	311	5	311	37
14	10	192	0.0488	0.0005	0.3535	0.0079	0.0525	0.0011	0.0150	0.0001	0.4863	0.0010	307	3	307	7	307	7	307	49
15	9	186	0.0487	0.0005	0.3512	0.0086	0.0523	0.0012	0.0145	0.0001	0.5127	0.0022	306	3	306	7	300	7	300	52
16	9	186	0.0487	0.0005	0.3540	0.0075	0.0527	0.0011	0.0132	0.0001	0.4397	0.0022	307	3	308	6	316	6	316	46
17	13	257	0.0485	0.0005	0.3521	0.0061	0.0526	0.0008	0.0131	0.0001	0.5077	0.0028	306	3	306	5	312	5	312	36
18	15	295	0.0488	0.0005	0.3538	0.0057	0.0526	0.0008	0.0134	0.0001	0.4795	0.0021	307	3	308	5	310	5	310	34
19	13	252	0.0482	0.0005	0.3534	0.0060	0.0532	0.0009	0.0123	0.0000	0.5215	0.0014	304	3	307	5	336	5	336	36
20	14	272	0.0491	0.0005	0.3560	0.0058	0.0526	0.0008	0.0129	0.0000	0.5448	0.0014	309	3	309	5	311	5	311	34
21	15	272	0.0488	0.0005	0.3526	0.0074	0.0524	0.0010	0.0131	0.0000	0.8665	0.0011	307	3	307	6	303	6	303	45
22	22	396	0.0486	0.0005	0.3524	0.0051	0.0526	0.0007	0.0125	0.0000	0.9200	0.0021	306	3	307	4	313	4	313	30
23	12	234	0.0488	0.0005	0.3545	0.0062	0.0527	0.0008	0.0132	0.0000	0.6252	0.0005	307	3	308	5	316	5	316	36
24	13	242	0.0486	0.0005	0.3526	0.0059	0.0526	0.0008	0.0135	0.0000	0.7459	0.0021	306	3	307	5	311	5	311	36

续表1

样品号	含量(10^{-6})	同位素比值										表面年龄(Ma)						
		14TW20	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
1	4	73	0.0496	0.0006	0.3603	0.0218	0.0527	0.0031	0.0151	0.0003	0.7429	0.0048	312	4	312	19	317	135
2	14	223	0.0545	0.0006	0.4920	0.0101	0.0535	0.0013	0.0159	0.0001	0.9304	0.0051	342	4	343	9	349	53
3	9	139	0.0550	0.0006	0.4955	0.0121	0.0534	0.0015	0.0168	0.0001	0.7922	0.0024	345	3	346	10	347	65
4	6	99	0.0495	0.0005	0.3582	0.0181	0.0525	0.0026	0.0142	0.0001	0.9888	0.0032	311	3	311	16	307	114
5	12	174	0.0541	0.0006	0.3982	0.0104	0.0534	0.0014	0.0166	0.0001	1.3788	0.0128	340	4	340	9	344	59
6	8	134	0.0491	0.0009	0.3578	0.0143	0.0529	0.0021	0.0140	0.0002	0.9244	0.0050	309	6	311	12	323	91
7	29	493	0.0492	0.0005	0.3581	0.0053	0.0528	0.0007	0.0134	0.0001	1.1148	0.0014	310	3	311	5	319	31
8	10	178	0.0489	0.0005	0.3577	0.0107	0.0531	0.0016	0.0128	0.0001	1.0436	0.0047	308	3	310	9	331	66
9	9	152	0.0495	0.0006	0.3593	0.0171	0.0526	0.0025	0.0142	0.0001	1.0305	0.0018	312	4	312	15	311	110
10	10	189	0.0489	0.0005	0.3545	0.0081	0.0526	0.0012	0.0130	0.0001	0.8957	0.0040	307	3	308	7	313	51
11	15	273	0.0487	0.0005	0.3529	0.0075	0.0526	0.0011	0.0132	0.0001	1.0595	0.0023	306	3	307	7	312	46
12	13	238	0.0488	0.0005	0.3572	0.0071	0.0531	0.0010	0.0140	0.0000	0.9247	0.0018	307	3	310	6	333	44
13	12	211	0.0499	0.0005	0.3584	0.0076	0.0521	0.0010	0.0149	0.0001	0.8807	0.0035	314	3	311	7	291	45
14	15	260	0.0491	0.0005	0.3588	0.0066	0.0530	0.0009	0.0142	0.0001	0.9250	0.0057	309	3	311	6	331	39
15	6	114	0.0492	0.0005	0.3589	0.0161	0.0529	0.0023	0.0159	0.0002	0.6339	0.0033	310	3	311	14	324	98
16	16	284	0.0489	0.0005	0.3565	0.0068	0.0529	0.0010	0.0144	0.0000	0.8231	0.0010	308	3	310	6	323	41
17	10	192	0.0486	0.0005	0.3549	0.0085	0.0530	0.0013	0.0158	0.0001	0.6965	0.0013	306	3	308	7	328	54
18	20	348	0.0490	0.0005	0.3557	0.0055	0.0526	0.0007	0.0147	0.0000	0.9293	0.0009	308	3	309	5	313	32
19	16	284	0.0487	0.0005	0.3514	0.0060	0.0524	0.0008	0.0146	0.0001	0.9587	0.0068	306	3	306	5	301	36
20	16	283	0.0486	0.0005	0.3515	0.0066	0.0525	0.0009	0.0147	0.0000	0.9007	0.0033	306	3	306	6	308	40
21	16	280	0.0486	0.0005	0.3388	0.0136	0.0577	0.0020	0.0138	0.0001	1.1108	0.0071	306	3	332	12	519	77
22	11	194	0.0493	0.0005	0.3574	0.0067	0.0526	0.0009	0.0155	0.0001	0.8529	0.0096	310	3	310	6	311	40
23	11	202	0.0493	0.0005	0.3573	0.0150	0.0526	0.0020	0.0161	0.0003	0.6824	0.0101	310	3	310	13	312	86
24	14	240	0.0496	0.0005	0.3389	0.0068	0.0525	0.0009	0.0152	0.0001	0.9836	0.0094	312	3	311	6	307	41

注:测试单位为天津地质矿产研究所实验室。



图 4 砾石滩地区花岗岩类部分锆石阴极发光图像及年龄
Fig.4 CL image and dating of zircons for granitoids in Lishitan area
黄圈为 U-Pb 测点, 蓝圈为 Hf 同位素测点

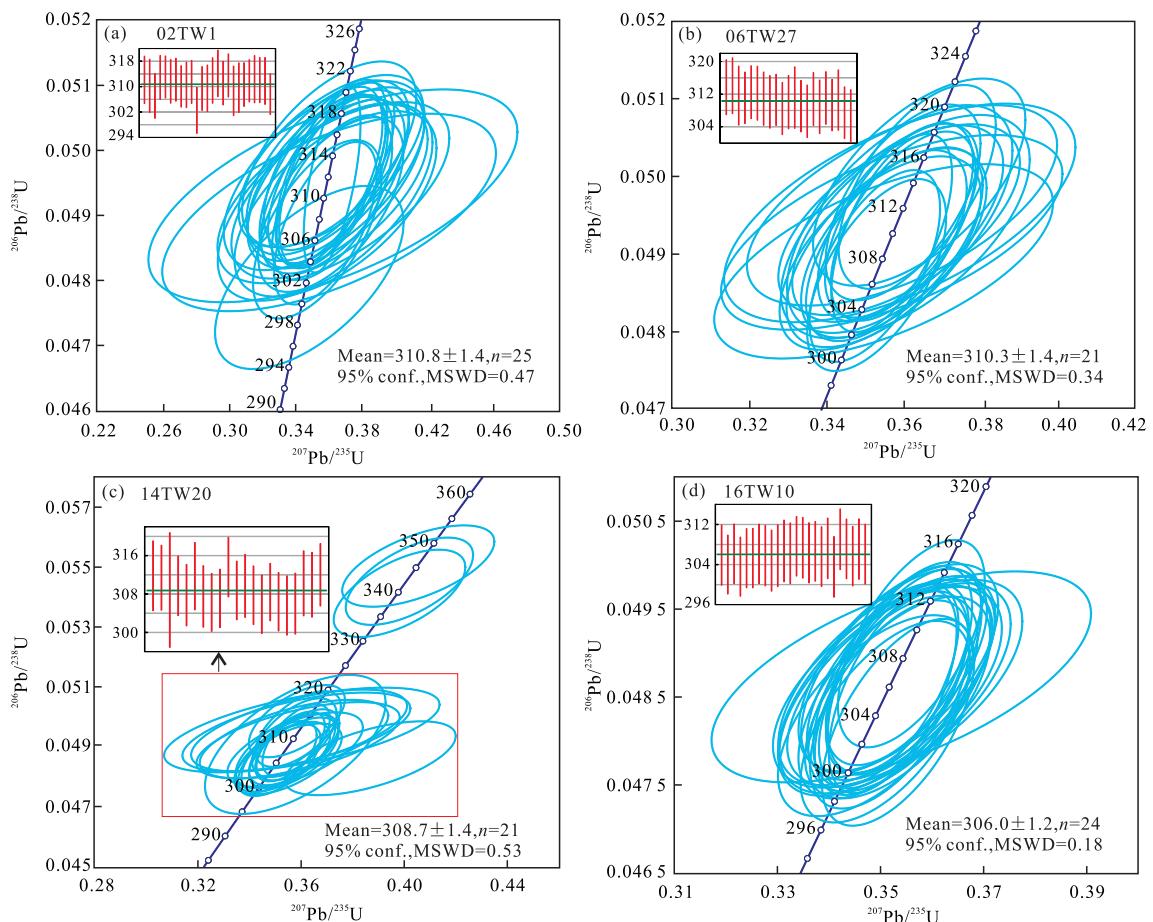
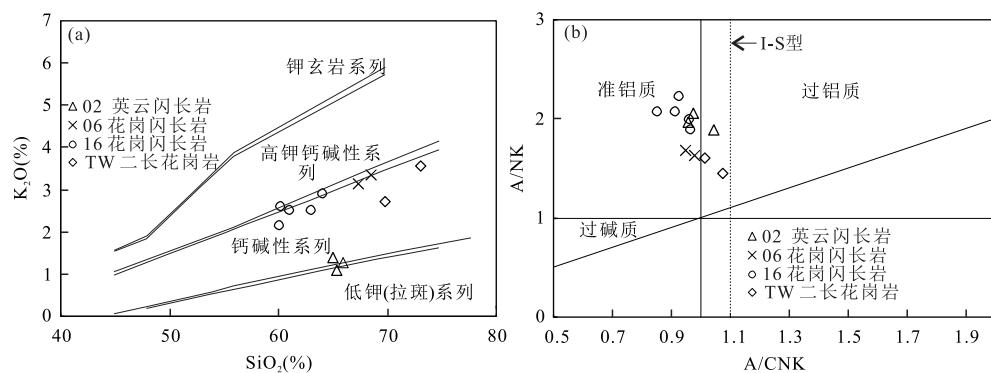


图 5 砾石滩地区花岗岩类 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig.5 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of granitoids in Lishitan area

表 2 砾石滩地区花岗岩类主量元素(%)、微量元素(10^{-6})分析结果Table 2 Major (%) and trace element (10^{-6}) compositions of granitoids in Lishitan area

样号	英云闪长岩			花岗闪长岩 1			花岗闪长岩 2			二长花岗岩		
	02.1	02.2	02.3	06.1	06.2	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	TW.1	TW.2
SiO ₂	65.97	65.08	65.40	68.57	67.37	64.04	63.04	61.04	60.14	60.21	73.06	69.83
Al ₂ O ₃	16.56	17.20	16.56	15.11	15.04	15.39	15.57	16.09	16.33	16.23	13.92	14.27
Fe ₂ O ₃	1.04	1.02	1.12	2.02	2.57	2.65	3.29	3.28	3.26	2.86	1.85	1.83
FeO	2.00	2.20	2.03	1.40	1.53	2.55	2.46	3.01	3.25	3.48	0.52	1.22
CaO	4.91	4.07	4.92	3.39	3.78	4.28	4.61	5.45	5.66	6.16	1.83	2.84
MgO	2.50	2.85	2.58	1.18	1.43	2.36	2.49	2.93	3.04	2.96	0.51	0.86
K ₂ O	1.27	1.40	1.10	3.35	3.14	2.91	2.50	2.50	2.15	2.58	3.57	2.73
Na ₂ O	4.28	4.62	4.18	3.43	3.39	3.03	3.12	3.07	3.05	3.08	3.51	3.63
TiO ₂	0.36	0.38	0.40	0.48	0.56	0.56	0.61	0.62	0.70	0.56	0.27	0.41
P ₂ O ₅	0.098	0.100	0.095	0.120	0.140	0.130	0.140	0.140	0.140	0.140	0.060	0.100
MnO	0.058	0.058	0.054	0.079	0.090	0.100	0.110	0.110	0.120	0.120	0.050	0.080
FeOT	2.94	3.12	3.04	3.22	3.84	4.94	5.42	5.96	6.18	6.05	2.19	2.87
Fe ₂ O _{3T}	3.26	3.47	3.38	3.58	4.27	5.48	6.02	6.63	6.87	6.73	2.43	3.19
Mg [#]	64.10	65.72	64.04	43.47	43.83	50.07	49.06	50.75	50.76	50.63	32.86	38.61
AR	1.70	1.79	1.65	2.16	2.06	1.87	1.77	1.70	1.62	1.68	2.63	2.18
A/CNK	0.95	1.04	0.97	0.98	0.95	0.97	0.96	0.91	0.93	0.85	1.07	1.01
SI	22.54	23.57	23.43	10.37	11.86	17.48	17.97	19.81	20.61	19.79	5.12	8.37
FL	53.06	59.66	51.76	66.67	63.34	58.12	54.94	50.54	47.88	47.88	79.46	69.13
MF	54.87	53.05	54.97	74.35	74.14	68.78	69.78	68.22	68.17	68.17	82.29	78.01
δ	1.34	1.64	1.24	1.80	1.75	1.68	1.58	1.72	1.58	1.86	1.67	1.51
K ₂ O+Na ₂ O	5.55	6.02	5.28	6.78	6.53	5.94	5.62	5.57	5.20	5.66	7.08	6.36
K ₂ O/Na ₂ O	0.30	0.30	0.26	0.98	0.93	0.96	0.80	0.81	0.70	0.84	1.02	0.75
灼失量	0.72	0.76	1.33	0.71	0.80	1.73	1.80	1.42	1.80	1.22	0.90	2.17
Cr	45.60	50.30	42.70	3.63	3.83	10.10	11.40	15.70	12.00	17.80	2.94	2.54
Ni	45.60	52.50	45.00	2.36	2.58	8.70	9.25	11.30	12.10	12.20	1.59	1.38
Co	11.00	12.40	10.90	5.95	7.09	13.00	14.40	17.40	18.60	17.40	1.87	3.71
Rb	50.00	57.50	43.40	105.00	95.80	78.80	66.10	79.60	62.20	80.70	145.00	92.00
Cs	3.36	3.37	2.66	4.61	4.18	4.02	2.93	4.39	4.15	5.83	1.83	1.74
Sr	296	356	315	215	219	256	276	287	278	357	149	230
Ba	114	127	118	582	519	384	322	328	298	415	589	525
V	52.70	55.10	53.40	62.50	74.90	110.00	123.00	140.00	158.00	144.00	19.30	35.60
Sc	10.20	9.53	9.14	8.54	8.98	15.50	15.40	18.10	18.10	21.20	6.99	7.41
Nb	3.26	2.83	3.21	7.50	8.27	6.62	7.03	5.88	7.33	5.80	7.80	6.83
Ta	0.26	0.26	0.28	0.63	0.68	0.58	0.59	0.65	0.81	0.52	0.77	0.57
Zr	113.0	104.0	109.0	198.0	215.0	132.0	121.0	65.2	99.2	140.0	104.0	154.0
Hf	2.78	2.90	2.98	5.83	6.15	4.31	3.97	2.77	4.00	5.13	3.58	4.59
Ga	15.00	14.70	14.50	16.00	16.20	16.00	16.70	17.10	17.80	17.00	13.20	14.40
U	0.46	0.51	0.47	2.18	2.30	1.63	1.87	2.14	3.23	1.87	1.17	1.78
Th	3.88	3.61	4.23	13.00	11.80	11.50	10.70	12.60	14.30	9.53	11.50	7.49
La	9.75	9.29	8.90	23.40	26.10	21.20	18.90	20.70	16.10	17.80	20.70	19.00
Ce	17.10	17.30	15.40	47.70	51.70	42.30	39.20	41.60	37.90	41.20	37.50	36.30
Pr	2.46	2.42	2.31	5.98	6.37	5.15	4.76	5.32	5.30	5.72	4.22	4.26
Nd	9.73	9.67	8.84	22.60	24.20	19.30	18.30	21.20	21.60	23.40	14.70	15.80
Sm	2.25	2.30	1.90	4.42	4.77	3.66	3.67	4.53	4.74	4.98	2.57	2.97
Eu	0.58	0.59	0.55	1.06	1.08	0.86	0.85	1.08	1.10	1.19	0.58	0.77
Gd	2.30	2.25	2.02	4.01	4.44	3.29	3.30	4.35	4.31	4.69	2.29	2.67
Tb	0.36	0.36	0.31	0.63	0.70	0.52	0.51	0.68	0.72	0.76	0.35	0.44
Dy	1.97	2.08	1.78	3.85	4.24	3.14	3.15	4.06	4.41	4.66	2.01	2.61
Ho	0.38	0.40	0.34	0.82	0.92	0.65	0.65	0.83	0.94	0.98	0.42	0.52
Er	1.08	1.11	0.95	2.36	2.62	1.84	1.86	2.43	2.65	2.81	1.34	1.67
Tm	0.16	0.17	0.15	0.36	0.41	0.28	0.29	0.37	0.41	0.44	0.22	0.27
Yb	1.07	1.11	0.97	2.47	2.76	1.89	1.92	2.47	2.82	2.94	1.70	2.03
Lu	0.16	0.18	0.15	0.40	0.44	0.30	0.30	0.38	0.44	0.46	0.29	0.34
Y	12.20	12.10	10.30	21.80	24.30	16.40	16.50	18.60	21.00	22.60	11.70	15.50
δEu	0.77	0.78	0.85	0.76	0.71	0.74	0.73	0.73	0.73	0.74	0.72	0.82
ΣREE	61.55	61.33	54.87	141.86	155.05	120.78	114.16	128.60	124.44	134.63	100.59	105.15
LREE/HREE	5.60	5.43	5.68	7.06	6.91	7.76	7.15	6.06	5.19	5.32	9.31	7.50
(La/Lu) _N	6.53	5.53	6.36	6.27	6.36	7.57	6.75	5.84	3.92	4.15	7.65	5.99
(La/Sm) _N	2.80	2.61	3.02	3.42	3.53	3.74	3.32	2.95	2.19	2.31	5.20	4.13
(Gd/Lu) _N	1.78	1.55	1.66	1.24	1.25	1.36	1.36	1.41	1.21	1.26	0.98	0.97

注:测试工作由天津地质矿产研究所完成,常量元素采用 XRF 测试,其中 FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法,微量元素采用 ICP-MS 测试。

图 6 砥石滩地区花岗岩类 K_2O - SiO_2 图解(a)和 A/CNK - A/NK 图解(b)Fig.6 Diagrams of K_2O versus SiO_2 (a) and A/CNK - A/NK (b) of granitoids in Lishitan area

b. 据 Peccerillo and Taylor(1976)

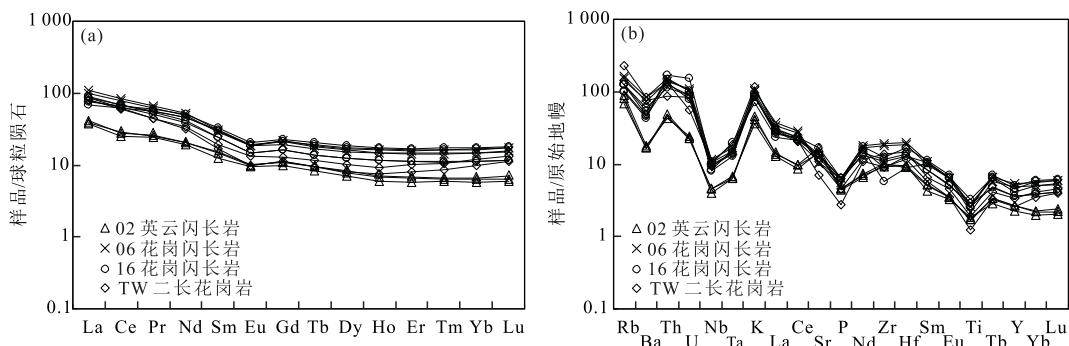


图 7 砥石滩地区花岗岩类稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of granitoids in Lishitan area

球粒陨石标准化值、原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989)

分馏程度偏低; δEu (0.7~0.9), 平均值为 0.8, 弱亏损。由表 2 可知, 英云闪长岩—西部花岗闪长岩—东部花岗闪长岩—二长花岗岩 Rb 的含量分别为 43.4×10^{-6} ~ 57.5×10^{-6} 、 95.8×10^{-6} ~ 105.0×10^{-6} 、 62.2×10^{-6} ~ 80.7×10^{-6} 、 92.0×10^{-6} ~ 145.0×10^{-6} , 其中英云闪长岩接近大陆地壳 Rb 平均含量 49×10^{-6} ; Ba 含量分别为 114×10^{-6} ~ 127×10^{-6} 、 519×10^{-6} ~ 582×10^{-6} 、 298×10^{-6} ~ 415×10^{-6} 、 525×10^{-6} ~ 589×10^{-6} , 英云闪长岩、西部花岗闪长岩低于大陆地壳 Ba 平均含量 456×10^{-6} ; Sr 含量分别为 296×10^{-6} ~ 356×10^{-6} 、 215×10^{-6} ~ 219×10^{-6} 、 256×10^{-6} ~ 357×10^{-6} 、 149×10^{-6} ~ 230×10^{-6} , 其中英云闪长岩接近大陆地壳 Sr 平均含量 320×10^{-6} (张德会和赵仑山, 2013)。微量元素蛛网图(图 7b)显示出曲线相似的特征, 表明微量元素具有共同的地球化学行为和共同的源区性质; 岩石富集大离子亲石元素(LILE)Rb、K 等, 弱亏损 Ba、Sr、Eu, 相对亏损高场强元素(HFSE)Ta、

Nb、P 和 Ti。

3.3 锆石 Hf 同位素

本文对英云闪长岩样品 02TW1 的测年锆石 16 个测点和花岗闪长岩样品 7218 的锆石 16 个测点进行了 Hf 同位素分析, 数据见表 3, 英云闪长岩样品 11、12、13 测点的二阶段模式年龄 t_{DM}^C 分别为 163 Ma、101 Ma、-101 Ma, 小于英云闪长岩成岩年龄, 可能是试验误差所致, 所以, 将这 3 个测点的数值剔除。样品 02TW1、7218 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值均较高, 分别为 0.282 691~0.283 002、0.282 791~0.282 986; 初始 Hf 同位素组成 $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ 值分别为 -2.9~8.1、0.7~7.6, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 3.8~14.8、7.3~14.0, 二阶段 Hf 同位素模式年龄 t_{DM}^C 分别为 378~1 083 Ma、433~868 Ma, 主要集中于 444~1 083 Ma, 为新元古代至奥陶纪。Hf 同位素数据显示, 晚石炭世英云闪长岩、花岗闪长岩以正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为特征, 具有相对年轻的锆石二阶段模式年龄。

表 3 英云闪长岩(02TW1)、花岗闪长岩(7218)锆石 Hf 同位素数据

Table 3 Zircon Hf isotopic data of the tonalite (02TW1) and granodiorite (7218)

点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM} (Ma)	t_{DM}^{c} (Ma)
02TW1.1	312	0.032 3	0.000 7	0.282 866	0.000 028	0.282 862	3.3	10.0	542	685
02TW1.2	307	0.036 8	0.000 8	0.282 964	0.000 033	0.282 960	6.8	13.4	406	466
02TW1.3	313	0.047 8	0.001 0	0.282 804	0.000 034	0.282 798	1.1	7.8	636	831
02TW1.4	313	0.034 2	0.000 8	0.282 893	0.000 028	0.282 888	4.3	11.0	506	624
02TW1.5	310	0.039 0	0.000 9	0.282 803	0.000 031	0.282 797	1.1	7.7	635	833
02TW1.6	311	0.032 6	0.000 8	0.282 691	0.000 030	0.282 687	-2.9	3.8	790	1 083
02TW1.7	311	0.041 0	0.000 9	0.282 732	0.000 035	0.282 726	-1.4	5.2	736	993
02TW1.8	303	0.033 6	0.000 8	0.282 727	0.000 031	0.282 723	-1.6	4.9	740	1 007
02TW1.9	309	0.054 9	0.001 4	0.282 950	0.000 034	0.282 942	6.3	12.8	433	506
02TW1.10	314	0.025 4	0.000 7	0.282 776	0.000 032	0.282 772	0.1	6.9	669	888
02TW1.11	312	0.055 3	0.001 7	0.283 100	0.000 028	0.283 091	11.6	18.1	218	163
02TW1.12	309	0.020 1	0.000 5	0.283 121	0.000 033	0.283 119	12.4	19.1	181	101
02TW1.13	311	0.027 4	0.000 9	0.283 211	0.000 036	0.283 206	15.5	22.2	56	-101
02TW1.14	310	0.035 3	0.000 9	0.282 956	0.000 027	0.282 950	6.5	13.1	419	485
02TW1.15	311	0.020 1	0.000 6	0.282 972	0.000 023	0.282 968	7.1	13.8	393	444
02TW1.16	312	0.029 1	0.000 8	0.283 002	0.000 025	0.282 997	8.1	14.8	353	378
7218.1	318	0.035 4	0.001 0	0.282 837	0.000 020	0.282 831	2.3	9.1	589	753
7218.2	316	0.097 8	0.002 4	0.282 986	0.000 032	0.282 972	7.6	14.0	392	433
7218.3	317	0.086 9	0.002 3	0.282 879	0.000 026	0.282 865	3.8	10.3	548	675
7218.4	318	0.051 5	0.001 6	0.282 918	0.000 027	0.282 909	5.2	11.8	481	575
7218.5	318	0.084 9	0.002 6	0.282 824	0.000 025	0.282 808	1.8	8.3	634	803
7218.6	319	0.048 4	0.001 9	0.282 848	0.000 026	0.282 837	2.7	9.3	586	737
7218.7	318	0.064 7	0.002 0	0.282 824	0.000 023	0.282 812	1.8	8.4	623	794
7218.8	319	0.039 4	0.001 2	0.282 841	0.000 022	0.282 834	2.4	9.2	586	745
7218.9	319	0.055 4	0.001 8	0.282 890	0.000 023	0.282 880	4.2	10.8	523	640
7218.10	317	0.055 4	0.001 9	0.282 791	0.000 024	0.282 780	0.7	7.3	669	868
7218.11	318	0.073 6	0.002 1	0.282 830	0.000 025	0.282 818	2.1	8.6	616	782
7218.12	321	0.040 1	0.001 3	0.282 856	0.000 020	0.282 848	3.0	9.8	566	711
7218.13	320	0.045 7	0.001 2	0.282 865	0.000 022	0.282 858	3.3	10.1	552	689
7218.14	318	0.052 5	0.001 6	0.282 840	0.000 020	0.282 831	2.4	9.1	593	753
7218.15	317	0.049 3	0.001 4	0.282 933	0.000 025	0.282 924	5.7	12.4	458	541
7218.16	319	0.062 8	0.001 8	0.282 858	0.000 028	0.282 848	3.1	9.7	569	713

注: 测试单位为天津地质矿产研究所实验室。

4 讨论

4.1 构造环境

从区域构造背景看,研究区位于红石山—百合山—蓬勃山蛇绿混杂岩带南侧。在一些同位素年龄和化石的基础上,红石山洋被普遍认为是早石炭世形成(龚全胜等,2002;魏志军等,2004;黄增保和金霞,2006;王国强等,2014;Xiao et al., 2014),俯冲阶段为早石炭世中晚期至晚石炭世末期,蛇绿岩两侧的石炭系钙碱性火山岩具有活动陆缘弧的岩石学和地球化学特征(魏志军等,2004;何世平等,2005;黄增保和金霞,2006;王国强等,2014),蛇绿岩构造侵位的时间为二叠纪之后(魏志军等,2004),红石山洋闭合时间为早二叠世(Ao et al., 2010; Zheng et al., 2014b)。另外,研究区晚石炭世的花岗岩类局部发育糜棱岩化现

象,研究区的韧性剪切带为 NWW-SEE 向,糜棱面理产状约为 $215^\circ \angle 70^\circ$,石英等矿物拉伸线理与水平方向小角度斜交,显示右行斜冲走滑性质,区域上为中天山—北山北缘右行走滑韧性剪切带的一部分,与中天山南缘—星星峡右行韧性走滑剪切带性质一致(蔡志慧等,2012)。走滑型韧性剪切带常与地体之间的斜向汇聚和碰撞有成因联系(许志琴等,1996),说明研究区晚石炭世花岗岩后期叠加的韧性变形具有碰撞成因。区域上伸展环境下的碱性镁铁质长英质岩浆作用的侵位年龄为 280~240 Ma(Pirajno, 2010; Song et al., 2011),可能与壳幔拆离、岩石圈拉薄体制关系密切(龚全胜等,2002)。综上,本文晚石炭世英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩可能为碰撞前俯冲阶段的弧岩浆岩。

研究区晚石炭世岩石组合为:英云闪长岩、花岗

闪长岩、二长花岗岩、流纹岩、流纹质凝灰岩、玄武岩、安山岩。上述花岗岩类岩石中均含角闪石、黑云母等富水矿物，表明岩浆含水，显示与洋壳俯冲作用有关的弧火成岩组合特征（肖庆辉等，2009）。砾石滩英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩，岩体整体变形不明显，但岩体边部岩石的薄片中可见黑云母、角闪石等矿物变形，表明岩体就位时经历了中等程度挤压过程。岩体内钾含量中等，铝饱和指数 A/CNK 均小于 1.1，大部分样品小于 1，为中钾钙碱性准铝质系列岩石。英云闪长岩具有和洋中脊玄武岩及球粒陨石接近的 Zr/Hf 比值（35.9~40.7）（37±2，Pfänder *et al.*, 2007），英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩具有负的 Nb、Ta 和 Ti 异常，低的 Nb/Ta 比值（9.0~12.5），岩石的 Rb、Y、Nb、Th、Ta、Zr 和 Yb 丰度及其比值特征和弧岩浆岩相似（刘金龙等，2016；王树庆等，2016）。

在 Pearce *et al.* (1984) ($Y+Nb$)—Rb 花岗岩构造环境判别图上（图 8a），英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩位于火山弧花岗岩区；在 Batchelor and Bowden (1985) 的 R_1-R_2 判别图解上，英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩位于板块碰撞前消减地区花岗岩区。

晚石炭世英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩形成于俯冲阶段的挤压环境。此外，英云闪长岩中富水矿物——角闪石含量较多，高达 15%，花岗闪长岩次之，二长花岗岩几乎不含角闪石；普遍认为要将一定规模的含水岩浆保持在一个相对封闭而稳定的条件下冷凝结晶，只有在挤压的区域构造背景下才能实现，同时应具有丰富的流体来源，即岩浆活动可能是处于俯冲的条件下，而不是拉张的裂谷环境。

研究区范围内，由北东往南西，英云闪长岩→东部花岗闪长岩→西部花岗闪长岩， K_2O 、ΣREE 有逐渐增加的趋势，表明大陆地壳组分参与岩浆活动的程度逐渐增大；且花岗岩体的南侧为下元古界北山岩群（Pt₁B）（马鬃山微陆块）。岩石学和地球化学研究结果表明，砾石滩地区钙碱性花岗岩的分异程度较低，铕亏损不明显，富集 Rb、K，亏损 Sr、Ba、Nb、Ta、P、Ti，具有弧岩浆岩特征；样品的 Nb/U 值（2.27~7.09）和 Nb/La 值（0.28~0.46）明显低于大陆壳，可能是源区受到俯冲流体的交代导致；考虑到岩体内发育下元古界北山岩群和新元古代片麻状花岗闪长岩捕掳体，结合上述证据，笔者认为英云闪长岩形成于洋壳俯冲期的陆缘弧靠洋一侧的环境，花岗闪长岩、二长花岗岩位于陆缘弧靠陆一侧。

4.2 岩浆源区性质

砾石滩晚石炭世花岗岩类具活动大陆边缘弧岩浆岩性质。弧岩浆岩一般可通过以下几个过程形成：(1) 俯冲板片的部分熔融 (Defant and Drummond, 1990)；(2) 被交代地幔楔的部分熔融 (Rogers and Hawkesworth, 1989)；(3) 基性下地壳的部分熔融 (Atherton and Petford, 1993)；(4) 岩浆混合作用 (Barbarin, 1999)。英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩样品中 Sr 含量较低 (149×10^{-6} ~ 357×10^{-6})，较低的 $(La/Yb)_N$ 值和较高的 Yb_N 值及 Y 含量，与典型的埃达克岩明显不同（张旗等，2001），因此，可排除俯冲板片部分熔融产出本区花岗岩类的可能性；本区英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩均呈岩基产出，岩体周围共生的同期基性岩石相对较少，所以直接由地幔部分熔融形成本区大面积花岗岩类的可能性较小；基性下地壳岩石脱水部

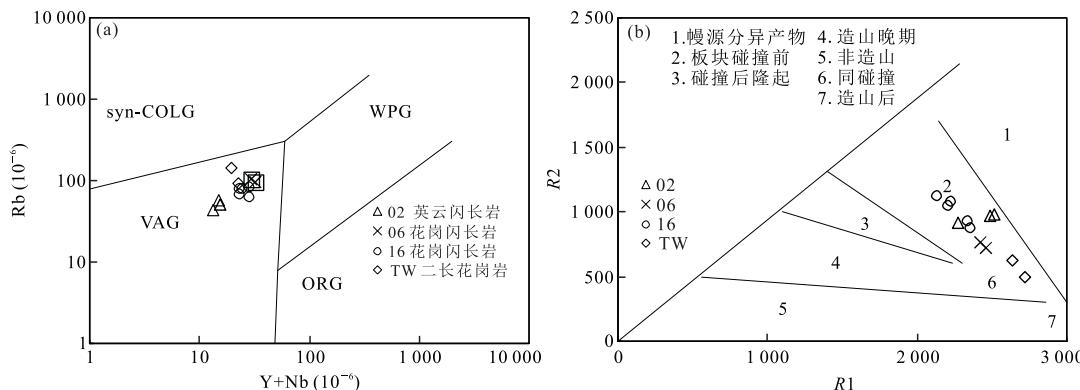


图 8 砾石滩地区花岗岩类构造判别图解

Fig.8 Tectonic discrimination diagrams of granitoids in Lishitan area

a. ($Y+Nb$)—Rb 判别图，据 Pearce *et al.* (1984)；ORG. 大洋脊花岗岩；WPG. 板内花岗岩；VAG. 火山弧花岗岩；syn-COLG. 同碰撞花岗岩；b. R_1-R_2 判别图，据 Batchelor and Bowden (1985)， $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$, $R_2=6Ca+2Mg+Al$

分熔融可以形成铁镁质熔体,且具有低 SiO_2 ,高 Al_2O_3 ,弱或无 Eu 负异常等特征,这与本区英云闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩样品不符。研究区晚石炭世花岗岩体内部发育大量暗色微粒包体(图 2),大多数包体与寄主岩的界线是截然的,少数组呈过渡关系,有时还可见到冷凝边现象,包体中有时可见较粗大的石英(有时是斜长石)捕捞晶(图 2b),包体中出现的不平衡结构和矿物组合说明酸性岩浆结晶过程中有基性岩浆的加入。这些特点都暗示本区曾发生了壳幔岩浆混合作用。

由于锆石稳定性较强,同时具有较高的 Hf 质量分数和极低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值,并且其形成后基本没有放射性成因 Hf 的积累,使得锆石 Hf 同位素研究成为目前示踪岩浆源区的重要手段之一(Amelin *et al.*, 1999; Söderlund *et al.*, 2004; 吴福元等, 2007)。本文英云闪长岩、花岗闪长岩样品中 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大,分别为 3.8~14.8、7.3~14.0,均位于亏损地幔演化线与 1.8 Ga 平均地壳演化线之间(图 9)。一般认为具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗质岩石来自亏损地幔或从亏损地幔中新增生的年轻地壳物质的部分熔融(Belousova *et al.*, 2005)。二阶段 Hf 同位素模式年龄 t_{DM}^{C} 分别为 378~1 083 Ma、433~868 Ma,大于岩浆结晶年龄,反映它们的岩浆可能起源于新元古代地壳的部分熔融,但本文英云闪长岩具有较高 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且样品中锆石 Hf 同位素组成显示出明显的不均一性(变化范围达 11),由于锆石 Hf 同位素比值不会随部分熔融或分离结晶而变化,因此其不均一性很可能指示了一个开放体系,与前寒武纪地壳重熔过程中幔源物质的加入有关(Kemp *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2009; Ravikant *et al.*, 2011; 王冠等, 2014)。英云闪长岩、花岗闪长岩样品中较高的 $\text{Mg}^{\#}$ 值(44~66),同样显示出可能有幔源组分的加入。研究区内,晚石炭世早期的英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩内大都含有丰富的镁铁质微粒包体,与花岗岩几乎同年龄的镁铁质火成岩广泛出露:红石山—百合山—蓬勃山断裂带南侧哈珠东山一带发育大面积上石炭统白山组海相玄武岩,说明在晚石炭世有大量的地幔物质以岩浆的形式进入地壳。此外,江思宏和聂凤军(2006)对北山地区红石山—黑鹰山地体海西晚期花岗岩类的 Nd 同位素分析表明,北山地区大量发育具有正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的花岗岩,花岗岩类的地幔组分所占比例为 0%~86.47%。因此,地幔物质的加入很有可能导致本区英云闪长岩、花岗闪长岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 Hf 同位素

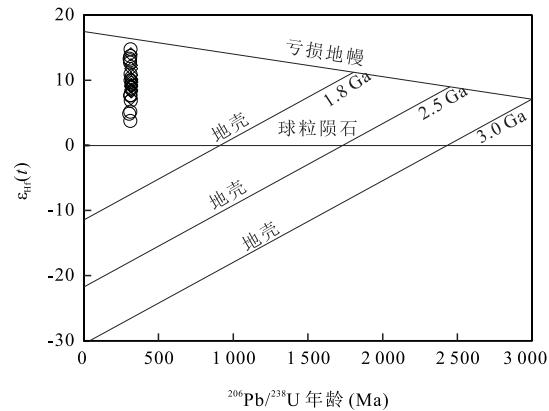


图 9 砾石滩地区英云闪长岩、花岗闪长岩的锆石 Hf 同位素时间演化图解

Fig.9 Zircon Hf isotope time evolution diagram of the tonalite and granodiorite in Lishitan area

模式年龄的不均一,且 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为较高的正值。如果岩石源区有地幔物质的加入,则 Hf 同位素模式年龄仅仅反映一种平均的混合年龄(Murphy and Nance, 2002; 吴福元等, 2007)。在研究区采样点的南侧发育大量下元古界北山岩群(Pt_1B),在研究区的深部也有可能分布,其次,研究区西部发现新元古代中期花岗闪长岩,呈捕捞体出露于晚石炭世花岗闪长岩之中,而英云闪长岩、花岗闪长岩的二阶段 Hf 同位素模式年龄 t_{DM}^{C} 分别为 378~1 083 Ma、433~868 Ma,为新元古代至泥盆纪,结合源区幔源组分的加入,可能是本区下元古界北山岩群及新元古代的花岗岩类组成的基底岩石重熔形成研究区晚石炭世花岗岩类。综合上述主量元素、微量元素及锆石 Hf 同位素讨论认为,砾石滩晚石炭世英云闪长岩岩浆可能为古元古界北山岩群及新元古代的花岗岩类组成的基底岩石部分熔融形成的岩浆与地幔岩浆的混合物,地幔物质比例较大,由此说明砾石滩地区晚石炭世花岗岩的形成与地幔物质注入地壳并与其反应关系密切,但 2 种岩浆的混合比例有待于进一步研究。

研究表明,在俯冲—碰撞的动力学背景下容易发生幔源岩浆对下地壳的底侵作用(金振民和高山, 1996)。通过上述证据,笔者认为北山造山带北部砾石滩地区晚石炭世英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩的形成与壳幔混合有关,产生于大洋岩石圈俯冲过程中,该过程诱发了地幔对流,因而产生了幔源岩浆底侵,并将元古代基底岩石熔融,壳幔混合之后形成晚石炭世大规模花岗岩类。

5 结论

(1) 北山造山带北部砾石滩地区的英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩的成岩年龄分别为 310.8 ± 1.4 Ma、 310.3 ± 1.4 Ma 和 306.0 ± 1.2 Ma、 308.7 ± 1.4 Ma, 形成于洋壳俯冲期的陆缘弧环境。

(2) 英云闪长岩、花岗闪长岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 $3.8 \sim 14.8$ 、 $7.3 \sim 14.0$, 二阶段 Hf 同位素模式年龄 t_{DM}^{c} 分别为 $378 \sim 1083$ Ma、 $433 \sim 868$ Ma, 为新元古代至泥盆纪 Hf 同位素数据显示, 晚石炭世英云闪长岩、花岗闪长岩以正的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为特征, 二阶段 Hf 同位素模式年龄 t_{DM}^{c} 大于岩浆结晶年龄。

(3) 北山造山带北部晚石炭世英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩的形成与壳幔混合有关, 产生于大洋岩石圈俯冲过程中, 该过程诱发了地幔对流, 因而产生了幔源岩浆底侵, 并将元古宙基底岩石熔融, 壳幔混合之后形成晚石炭世大规模花岗岩类。

致谢: 本文在写作过程中得到了中国地质调查局天津地质调查中心辛后田教授级高工的建议和指导, 审稿老师对本文提出了宝贵的意见, 耿建珍和张健高级工程师在锆石 U-Pb 年龄测试和锆石 Hf 同位素的测定过程中给予了热情的帮助, 在此表示衷心的感谢!

References

- Amelin, Y., Lee, D.C., Halliday, A.N., et al., 1999. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrital Zircons. *Nature*, 399 (6733): 252–255. <https://doi.org/10.1038/20426>
- Ao, S.J., Xiao, W.J., Han, C.M., et al., 2010. Geochronology and Geochemistry of Early Permian Mafic-Ultramafic Complexes in the Beishan Area, Xinjiang, NW China: Implications for Late Paleozoic Tectonic Evolution of the Southern Altaids. *Gondwana Research*, 18 (2–3): 466–478. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.01.004>
- Ao, S.J., Xiao, W.J., Han, C.M., et al., 2011. Cambrian to Early Silurian Ophiolite and Accretionary Processes in the Beishan Collage, NW China: Implications for the Architecture of the Southern Altaids. *Geological Magazine*, 149 (4): 606–625. <https://doi.org/10.1017/S0016756811000884>
- Atherton, M.P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362 (6416): 144–146. <https://doi.org/10.1038/362144a0>
- Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46 (3): 605–626. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00085-1)
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48 (1–4): 43–55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., 2005. Zircon Crystal Morphology, Trace Element Signatures and Hf Isotope Composition as a Tool for Petrogenetic Modelling: Examples from Eastern Australian Granitoids. *Journal of Petrology*, 47 (2): 329–353. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi077>
- Bouvier, A., Vervoort, J.D., Patchett, P.J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273 (1–2): 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Cai, Z.H., Xu, Z.Q., He, B.Z., et al., 2012. Age and Tectonic Evolution of Ductile Shear Zones in the Eastern Tianshan-Beishan Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (6): 1875–1895 (in Chinese with English abstract).
- Dai, S., Fang, X.M., Zhang, X., et al., 2003. Island Arc North of the Tarim-SK Plate: The Geology and Geochemistry of Gongpoquan Group. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 39 (4): 80–87 (in Chinese with English abstract).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347 (6294): 662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Dodson, J., Li, X.Q., Ji, M., et al., 2009. Early Bronze in Two Holocene Archaeological Sites in Gansu, NW China. *Quaternary Research*, 72 (3): 309–314. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.07.004>
- Geng, J.Z., Li, H.K., Zhang, J., et al., 2011. Zircon Hf Isotope Analysis by Means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30 (10): 1508–1513 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Q.S., Liu, M.Q., Li, H.L., et al., 2002. The Type and Basic Characteristics of Beishan Orogenic Belt, Gansu. *Northwestern Geology*, 35 (3): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites.

- Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147.
[https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Guo, Q.Q., Xiao, W.J., Hou, Q.L., et al., 2014. Construction of Late Devonian Dundunshan Arc in the Beishan Orogen and Its Implication for Tectonics of Southern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 184–187: 361–378. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.11.007>
- He, S.P., Zhou, H.W., Ren, B.C., et al., 2005. Crustal Evolution of Palaeozoic in Beishan Area, Gansu and Inner Mongolia, China. *Northwestern Geology*, 38(3): 6–15 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Q. Y., Wang, Z., Liu, J. B., et al., 2012. Geochemistry Characteristics and SHRIMP Dating of Yueyashan Ophiolite in Beishan Orogen. *Geoscience*, 26(5): 1008–1018 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z. B., Jin, X., 2006. Tectonic Environment of Basic Volcanic Rocks in the Hongshishan Ophiolite Mélange Zone, Beishan Mountains, Gansu. *Geology in China*, 33(5): 1030–1037 (in Chinese with English abstract).
- Jia, Y.Q., Zhao, Z.X., Xu, H., et al., 2016. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Tectonic Setting of Rhyolites from Baishan Formation in Fengleishan Area of the Beishan Orogenic Belt. *Geology in China*, 43(1): 91–98 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S.H., Nie, F.J., 2006. Nd-Isotope Constrains on Origin of Granitoids in Beishan Mountain Area. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 826–842 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.M., Gao, S., 1996. Underplating and Its Geodynamical Significances for the Evolution of Crust-Mantle Boundary. *Geological Science and Technology Information*, 15(2): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Foster, G.L., et al., 2007. Magmatic and Crustal Differentiation History of Granitic Rocks from Hf-O Isotopes in Zircon. *Science*, 315(5814): 980–983. <https://doi.org/10.1126/science.1136154>
- Koschek, G., 1993. Origin and Significance of the SEM Cathodoluminescence from Zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223–232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1993.tb03379.x>
- Liu, J.L., Sun, F. Y., Wang, Y. D., et al., 2016. Tectonic Setting of Hadahushu Mafic Intrusion in Urad Zhongqi Area, Inner Mongolia: Implications for Early Subduction History of Paleo-Asian Ocean Plate. *Earth Science*, 41(12): 2019–2030 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.141>
- Liu, Q., Zhao, G.C., Sun, M., et al., 2015. Ages and Tectonic Implications of Neoproterozoic Ortho- and Paragneisses in the Beishan Orogenic Belt, China. *Precambrian Research*, 266: 551–578. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.022>
- Liu, X.C., Chen, B.L., Jahn, B.M., et al., 2010. Early Paleozoic (ca. 465 Ma) Eclogites from Beishan (NW China) and Their Bearing on the Tectonic Evolution of the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(4): 715–731. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.10.017>
- Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2009. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Lu, J.C., Niu, Y.Z., Wei, X.Y., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Late Paleozoic Volcanic Rocks from the Hongshishan Area of the Beishan Orogenic Belt and Its Tectonic Significances. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2685–2694 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K.R., 2003. Isoplot 3.0—A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Murphy, J.B., Nance, R.D., 2002. Sm-Nd Isotopic Systematics as Tectonic Tracers: An Example from West Avalonia in the Canadian Appalachians. *Earth-Science Reviews*, 59(1–4): 77–100. [https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(02\)00070-3](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(02)00070-3)
- Niu, Y.Z., Lu, J.C., Wei, J.S., et al., 2014. Chronology of the Lütiaoshan Formation in the Beishan Area and Its Tectonic Significances. *Geological Review*, 60(3): 567–576 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Rare Earth Elements in East Carpathian Volcanic Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 32(2): 121–126. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(76\)90050-9](https://doi.org/10.1016/0012-821x(76)90050-9)
- Pirajno, F., 2010. Intracontinental Strike-Slip Faults, Associated Magmatism, Mineral Systems and Mantle Dynam-

- ics: Examples from NW China and Altay-Sayan (Siberia). *Journal of Geodynamics*, 50(3–4): 325–346. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.01.018>
- Pfänder, J. A., Münker, C., Stracke, A., et al., 2007. Nb/Ta and Zr/Hf in Ocean Island Basalts—Implications for Crust-Mantle Differentiation and the Fate of Niobium. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1–2): 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.11.027>
- Qi, R.R., Huang, Z.B., Jin, X., 2006. Geochemical Characteristics and Tectonic Implications of the Dashishan A-Type Granitic Intrusion in Beishan Area, Gansu Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2): 90–96 (in Chinese with English abstract).
- Ravikant, V., Wu, F.Y., Ji, W.Q., 2011. U-Pb Age and Hf Isotopic Constraints of Detrital Zircons from the Himalayan Foreland Subbasin on the Tertiary Palaeogeography of the Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 304(3–4): 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.009>
- Rogers, G., Hawkesworth, C.J., 1989. A Geochemical Traverse across the North Chilean Andes: Evidence for Crust Generation from the Mantle Wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 91(3–4): 271–285. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(89\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0012-821x(89)90003-4)
- Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D., et al., 2004. The ^{176}Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00012-3)
- Song, D.F., Xiao, W.J., Han, C.M., et al., 2013. Progressive Accretionary Tectonics of the Beishan Orogenic Collage, Southern Altaiids: Insights from Zircon U-Pb and Hf Isotopic Data of High-Grade Complexes. *Precambrian Research*, 227(1): 368–388.
- Song, X.Y., Xie, W., Deng, Y.F., et al., 2011. Slab Break-off and the Formation of Permian Mafic-Ultramafic Intrusions in Southern Margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China. *Lithos*, 127(1–2): 128–143. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.08.011>
- Su, B.X., Qin, K.Z., Sun, H., et al., 2012. Subduction-Induced Mantle Heterogeneity beneath Eastern Tianshan and Beishan: Insights from Nd-Sr-Hf-O Isotopic Mapping of Late Paleozoic Mafic-Ultramafic Complexes. *Lithos*, 134–135: 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.12.011>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tian, Z.H., Xiao, W.J., Windley, B.F., et al., 2014. Structure, Age, and Tectonic Development of the Huoshishan-Niujuanzhi Ophiolitic Mélange, Beishan, Southernmost Altaiids. *Gondwana Research*, 25(2): 820–841. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.006>
- Wang, G., Sun, F.Y., Li, B.L., 2014. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Diorite in Xiarihamu Ore District from East Kunlun and Its Geological Significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 876–891 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.201403113>
- Wang, G.Q., Li, X.M., Xu, X.Y., et al., 2014. Zircon U-Pb Chronological Study of the Hongshishan Ophiolite in the Beishan Area and Their Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1685–1694 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.Q., Xin, H.T., Hu, X.J., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Paleozoic Wulanaobaotu Intrusive Rocks, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(4): 555–569 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.W., Jiang, F.Z., 1997. Features and Distribution of Volcanic Rock Associations of Various Ages in the Beishan Area, Gansu. *Regional Geology of China*, 16(3): 298–304 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Z.J., Huang, Z.B., Jin, X., et al., 2004. Geological Characteristics of Ophiolite Migmatitic Complex of Hongshishan Region, Gansu. *Northwestern Geology*, 37(1): 13–18 (in Chinese with English abstract).
- Williams, I.S., Buick, I.S., Cartwright, I., 1996. An Extended Episode of Early Mesoproterozoic Metamorphic Fluid Flow in the Reynolds Range, Central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(1): 29–47. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1996.00029.x>
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genetic Mineralogy of Zircons and Its Constraints to the Age of U-Pb Geochronology. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Xiao, Q.H., Deng, J.F., Qiu, R.Z., et al., 2009. A Preliminary Study of the Relationship between Granitoids and the Growth of Continental Crust: A Case Study of the Formation of Key Orogen Granitoids in China. *Geology in China*, 36(3): 594–622 (in Chinese with English abstract).

- Xiao, W.J., Han, C.M., Liu, W., et al., 2014. How Many Sutures in the Southern Central Asian Orogenic Belt: Insights from East Xinjiang-West Gansu (NW China)?. *Geoscience Frontiers*, 5(4): 525—536. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.04.002>
- Xiao, W.J., Mao, Q.G., Windley, B.F., et al., 2010. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Processes of the Beishan Orogenic Collage. *American Journal of Science*, 310(10): 1553—1594. <https://doi.org/10.2475/10.2010.12>
- Xu, X.W., Li, X.H., Jiang, N., et al., 2015. Basement Nature and Origin of the Junggar Terrane: New Zircon U-Pb-Hf Isotope Evidence from Paleozoic Rocks and Their Enclaves. *Gondwana Research*, 28(1): 288—310. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.03.011>
- Xu, Z.Q., Zhang, J.X., Xu, H.F., 1996. Ductile Shear Zones in the Main Continental Mountain Chains of China and Their Dynamics. Geological Publishing House, Beijing, 1—294 (in Chinese).
- Yang, H.Q., Zhao, G.B., Li, Y., et al., 2012. The Relationship between Paleozoic Tectonic Setting and Mineralization in Xinjiang-Gansu-Inner Mongolia Juncture Area. *Geological Bulletin of China*, 31(2): 413—421 (in Chinese with English abstract).
- Yu, F.S., Wang, C.Y., Qi, J.F., et al., 2000. The Clarification and Tectonic Implication of the Early Silurian Ophiolite Mélange in Hongliuhe Area. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 20(4): 60—66 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Gao, S., Liu, X.M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.2004.tb00755.x>
- Yuan, Y., Zong, K.Q., He, Z.Y., et al., 2015. Geochemical and Geochronological Evidence for a Former Early Neoproterozoic Microcontinent in the South Beishan Orogenic Belt, Southernmost Central Asian Orogenic Belt. *Precambrian Research*, 266: 409—424. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.034>
- Zhang, D.H., Zhao, L.S., 2013. *Geochemistry*. Geological Publishing House, Beijing, 70 (in Chinise).
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2001. The Characteristics and Tectonic-Metallogenic Significances of the Adakites in Yanshan Period from Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Pease, V., Wu, T.R., et al., 2012. Discovery of an Adakite-Like Pluton near Dongqiyishan (Beishan, NW China)—Its Age and Tectonic Significance. *Lithos*, 142—143: 148—160. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.021>
- Zhao, J., Wang, W.L., Dong, L.H., et al., 2012. Application of Geochemical Anomaly Identification Methods in Mapping of Intermediate and Felsic Igneous Rocks in Eastern Tianshan, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 81—89. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.006>
- Zhao, Z.Y., Zhang, Z.C., Santosh, M., et al., 2015. Early Paleozoic Magmatic Record from the Northern Margin of the Tarim Craton: Further Insights on the Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 28(1): 328—347. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.04.007>
- Zheng, R.G., Wu, T.R., Zhang, W., et al., 2012. Geochemical Characteristic and Tectonic Settings of the Yueyashan-Xichangjing Ophiolite in Beishan Area. *Acta Geologica Sinica*, 86(6): 961—971 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R.G., Wu, T.R., Zhang, W., et al., 2014a. Geochronology and Geochemistry of Late Paleozoic Magmatic Rocks in the Yinwaxia Area, Beishan: Implications for Rift Magmatism in the Southern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91: 39—55. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.04.022>
- Zheng, R.G., Wu, T.R., Zhang, W., et al., 2014b. Late Paleozoic Subduction System in the Northern Margin of the Alxa Block, Altaiads: Geochronological and Geochemical Evidences from Ophiolites. *Gondwana Research*, 25(2): 842—858. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.011>
- Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Pan, G.T., et al., 2009. Early Cretaceous Subduction-Related Adakite-Like Rocks of the Gangdese Belt, Southern Tibet: Products of Slab Melting and Subsequent Melt-Peridotite Interaction?. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 298—309. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2008.05.003>
- Zong, K.Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32—48. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.010>
- Zuo, G.C., He, G.Q., 1990. Series on Tectonics of North Plate, China: Plate Tectonics and Metallogenesis Regularities in Beishan Region. Peking University Press, Beijing, 1—226 (in Chinese).
- Zuo, G.C., Zhang, S.L., He, G.Q., et al., 1991. Plate Tectonic

Characteristics during the Early Paleozoic in Beishan near the Sino-Mongolian Border Region, China. *Tectonophysics*, 188 (3—4): 385—392. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90466-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90466-6)

附中文参考文献

- 蔡志慧,许志琴,何碧竹,等,2012.东天山—北山造山带中大型韧性剪切带属性及形成演化时限与过程.岩石学报,28(6):1875—1895.
- 戴霜,方小敏,张翔,等,2003.塔里木—中朝板块北缘的志留纪岛弧公婆泉群火山岩地质地球化学及构造意义.兰州大学学报,39(4):80—87.
- 耿建珍,李怀坤,张健,等,2011.锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定.地质通报,30(10):1508—1513.
- 龚全胜,刘明强,李海林,等,2002.甘肃北山造山带类型及基本特征.西北地质,35(3):28—34.
- 何世平,周会武,任秉琛,等,2005.甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化.西北地质,38(3):6—15.
- 侯青叶,王忠,刘金宝,等,2012.北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及 SHRIMP 定年.现代地质,26(5):1008—1018.
- 黄增保,金霞,2006.甘肃北山红石山蛇绿混杂岩带中基性火山岩构造环境分析.中国地质,33(5):1030—1037.
- 贾元琴,赵志雄,许海,等,2016.北山风雷山地区白山组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及构造环境.中国地质,43(1):91—98.
- 江思宏,聂凤军,2006.北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约.地质学报,80(6):826—842.
- 金振民,高山,1996.底侵作用(underplating)及其壳—幔演化动力学意义.地质科技情报,15(2):1—7.
- 刘金龙,孙丰月,王英德,等,2016.内蒙古乌拉特中旗哈达呼舒基性岩体形成的构造背景与古亚洲洋的早期俯冲历史.地球科学,41(12):2019—2030.
- 卢进才,牛亚卓,魏仙样,等,2013.北山红石山地区晚古生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义.岩石学报,29(8):2685—2694.
- 牛亚卓,卢进才,魏建设,等,2014.甘蒙北山地区下石炭统绿条山组时代修正及其构造意义.地质论评,60(3):567—576.
- 齐瑞荣,黄增保,金霞,2006.甘肃北山大石山 A 型花岗岩体的地球化学特征及构造意义.岩石矿物学杂志,25(2):90—96.
- 王冠,孙丰月,李碧乐,等,2014.东昆仑夏日哈木矿区闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),44(3):876—891.
- 王国强,李向民,徐学义,等,2014.甘肃北山红石山蛇绿岩锆石 U-Pb 年代学研究及构造意义.岩石学报,30(6):1685—1694.
- 王树庆,辛后田,胡晓佳,等,2016.内蒙古乌兰敖包图早古生代侵入岩年代学、地球化学特征及地质意义.地球科学,41(4):555—569.
- 王玉往,姜福芝,1997.北山地区各时代火山岩组合特征及分布.中国区域地质,16(3):298—304.
- 魏志军,黄增保,金霞,等,2004.甘肃红石山地区蛇绿混杂岩地质特征.西北地质,37(1):13—18.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185—220.
- 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.科学通报,49(16):1589—1604.
- 肖庆辉,邓晋福,邱瑞照,等,2009.花岗岩类与大陆地壳生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例.中国地质,36(3):594—622.
- 许志琴,张建新,徐慧芬,1996.中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学.北京:地质出版社,1—294.
- 杨合群,赵国斌,李英,等,2012.新疆—甘肃—内蒙古衔接区古生代构造背景与成矿的关系.地质通报,31(2):413—421.
- 于福生,王春英,漆家福,等,2000.甘新交界红柳河地区早志留世蛇绿混杂岩的厘定及大地构造意义.矿物岩石,20(4):60—66.
- 张德会,赵仑山,2013.地球化学.北京:地质出版社,70.
- 张旗,王焰,钱青,等,2001.中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义.岩石学报,17(2):236—244.
- 郑荣国,吴泰然,张文,等,2012.北山地区月牙山—洗肠井蛇绿岩的地球化学特征及形成环境.地质学报,86(6):961—971.
- 左国朝,何国琦,1990.中国北方板块构造丛书——北山板块构造及成矿规律.北京:北京出版社,1—226.