

赵一珏, 杨经绥, 刘仕军, 等. 新疆中天山巴仑台闪长岩成因及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1228–1241.

Zhao Yijue, Yang Jingsui, Liu Shijun, et al. The origin of the Baluntai diorite in Central Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1228–1241(in Chinese with English abstract).

新疆中天山巴仑台闪长岩成因及其地质意义

赵一珏¹ 杨经绥² 刘仕军¹ 刘飞² 田亚洲²

(1. 云南地矿国际矿业股份有限公司, 云南 昆明 650051; 2. 大陆构造与动力学国家重点实验室地幔研究中心, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 巴仑台闪长岩反映的大洋俯冲信息为对比乌瓦门蛇绿岩与西侧长阿吾子和东侧库米什蛇绿岩的关系, 探讨南天山洋的洋-陆演化过程具有重要意义。闪长岩具高碱和高铝特征, $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=4.14\%\sim 7.05\%$, Al_2O_3 为 $14.62\%\sim 17.35\%$, 为一套高钾钙碱性系列岩石, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均 10.46, 以富集轻稀土元素和大离子亲石元素(如 K、Rb、Ba、Pb 等)、亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素为特征, 形成于岛弧环境。闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (430.1 ± 1.1) Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-12.7\sim -7.6$, 二阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 1895~2219 Ma, 指示巴仑台闪长岩为早志留世南天山洋北向俯冲, 导致中天山古老结晶基底部分熔融形成。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 巴仑台闪长岩; 乌瓦门蛇绿岩; 中天山南缘缝合带
中图分类号: P 588.12'2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015) 05-1228-14

The origin of the Baluntai diorite in Central Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance

ZHAO Yi-jue¹, YANG Jing-sui², LIU Shi-jun¹, LIU Fei², TIAN Ya-zhou²

(1. Yunnan Geology and Mineral Resources International Mining Industry Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China,
2. CARMA, State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Studies of petrology and geochemistry indicate that the Baluntai diorite is the high-K calc-alkaline diorite. The rocks, which have the data $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=4.14\%\sim 7.05\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.62\%\sim 17.35\%$, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ with an average of 10.46, are characterized by enrichment of large ion lithophile elements (LILE, such as K, Rb, Ba, and Pb) and light REE but depletion of high field strong elements (HFSE, like Nb, Ta, and Ti), and were probably produced in an island arc settings. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the Baluntai diorite was formed at (430.1 ± 1.1) Ma. In-situ zircon Hf analyses show that zircons from Baluntai diorite

收稿日期: 2015-06-15; 改回日期: 2015-06-23

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201011034)资助。

作者简介: 赵一珏, 男, 1988 年生, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: yijue_zhao@163.com。

通讯作者: 杨经绥, 男, 1950 年生, 研究员, 从事岩石学结合大地构造学的研究, 重点研究青藏高原地体边界、中央碰撞造山带的超高压变质岩石及地幔矿物和地幔动力学; E-mail: yangjsui@163.com。

have $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values from -12.7 to -7.6 and t_{DM2} model ages of 1895 Ma to 2219 Ma. Combined with Hf isotope analytical results and regional geological data, it is held that the Baluntai diorite resulted from partial melting of the Tianshan crystalline basement in response to northward subduction of South Tianshan Ocean during the Early Silurian. The isotopic ages of the Baluntai diorite body represent the upper age limit of the Wuwamen ophiolite.

Key words: zircon U–Pb dating; Hf isotope; Baluntai diorite; Wuwamen ophiolite; southern central–Tianshan suture zone

About the first author: ZHAO Yi–jue, male, born in 1988, master candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E–mail: yijue_zhao@163.com.

About the corresponding author: YANG Jing–sui, male, born in 1950, senior researcher and supervisor of doctor candidates, engages in the study of ophiolite of the orogenic zone and ultrahigh–pressure metamorphic rocks; E–mail: yangjsui@163.com.

1 引言

位于中国西北部的天山造山带长约 1500 km, 为乌拉尔—天山造山带在中国境内的延伸, 被认为是分割西伯利亚克拉通和华北克拉通的重要造山带, 记录了欧亚大陆的形成和演化^[1–4]。根据天山造山带中蛇绿岩的分布, 将天山造山带自南向北划分为中天山南缘缝合带、中天山北缘缝合带和北天山北缘缝合带^[1, 5–7]。

中天山南缘缝合带被认为是南天山洋向伊犁—中天山微陆块俯冲闭合的洋壳和上地幔的残余, 沿该缝合带出露的长阿吾子、乌瓦门和库米什等蛇绿岩, 以及相关的中酸性岩体为南天山洋的扩张和消亡提供了很好的证据^[1, 8–13], 然而精确限定南天山洋的洋—陆构造演化历史还存在一些问题, 如长阿吾子蛇绿岩中辉长岩的辉石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 439 Ma, 代表长阿吾子蛇绿岩的形成年龄^[14]; 库米什地区铜花山、榆树沟斜长岩和斜长花岗岩的锆石 U–Pb 年龄分别为 $(435.1 \pm 2.8)\text{Ma}$ 和 $(439.3 \pm 1.8)\text{Ma}$, 代表铜花山—榆树沟蛇绿岩的形成年龄^[15], 该年龄与西段长阿吾子蛇绿岩的年龄一致, 但小于周鼎武等 (2004) 报道的榆树沟蛇绿混杂岩中二辉麻粒岩锆石的核部 SHRIMP U–Pb 年龄 $(452\sim 640\text{Ma})$ ^[16], 也小于乌瓦门蛇绿岩中与洋底扩张有关的玄武岩锆石 U–Pb 年龄 $(460.3 \pm 1.3\text{Ma})$ (牛晓露等, 待发表)。总之, 位于长阿吾子和铜花山—榆树沟蛇绿岩之间的乌瓦门蛇绿岩的时代略早于东西段, 那么在中天山南缘缝合带是否记录南天山洋向伊犁—中天山微陆块俯冲过程中存在中部早、东西段晚的岩浆活动, 是反演南天山洋洋—陆演化的重要证据之一。因此, 寻找巴仑台乌瓦门地区的洋—陆俯冲相关的岩石, 对限定乌瓦门蛇绿岩与长阿吾子和铜花山—

榆树沟蛇绿岩的关系以及南天山洋的构造演化过程具有重要意义。

笔者在乌瓦门蛇绿岩北约 5 km 的老巴仑台镇附近发现的闪长岩体, 采样点地理坐标为 $42^{\circ}38'52.96''\text{N}$, $86^{\circ}16'15.06''\text{E}$ (图 1)。本文开展了闪长岩的岩石学、岩石地球化学、LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素研究, 确定其成因和构造背景, 进而探讨乌瓦门蛇绿岩与中天山南缘缝合带中其它蛇绿岩的关系。

2 区域地质概况和闪长岩特征

巴仑台闪长岩位于伊犁—中天山微陆块的南缘, 其南侧为乌瓦门蛇绿岩, 北侧为古老的结晶基底和古生代的沉积盖层 (图 1)。乌瓦门蛇绿混杂岩出露于和静县北约 40 km, 以构造岩片出露宽度约 2 km, 呈北西西走向, 南北两侧分别以断裂或韧性剪切带与南天山晚古生界和中天山前寒武系接触^[12]。乌瓦门蛇绿岩主要由地幔橄榄岩、辉长岩、辉绿岩脉、玄武岩等组成, 基性岩普遍被石英正长岩脉侵入, 前者发生绿片岩化, 后者无变形。结晶基底主要为元古宙长城系星星峡群, 包括片麻岩、花岗片麻岩、石英岩、石英片岩夹结晶灰岩、白云岩和大理岩等。泥盆系为一套中酸性火山岩和浅变质板岩、白云岩、大理岩。石炭系为一套灰岩、板岩、钙质粉砂岩以及中酸性火山灰凝灰岩、砾岩等。

巴仑台闪长岩体出露面积约 80 km², 位于老巴仑台镇以南 (约 2 km), 岩体呈近东西向展布, 与区域构造线方向一致, 岩体比较新鲜, 呈灰绿色, 细粒结构, 块状构造, 可见暗色矿物略具定向排列于浅色矿物之间呈条带状 (图 2)。岩体内部普遍可见宽 0.2~0.5 m 不等的石英正长岩脉侵入其中, 两者接触关系截然。

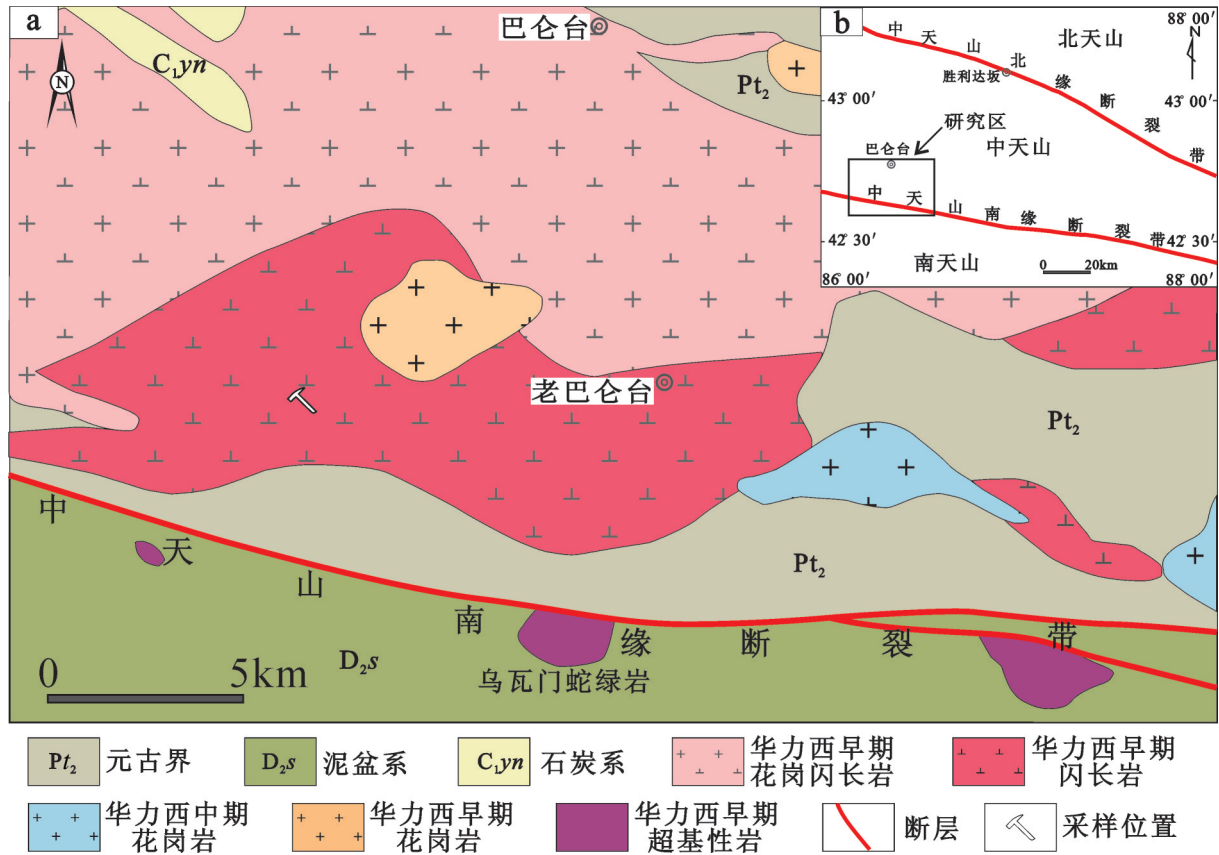


图1 中天山巴仑台地区区域构造简图及采样点地质简图(据①修改)

Fig.1 Simplified geotectonic map and geological map of the sampling site in the Baluntai area, Central Tianshan Mountains

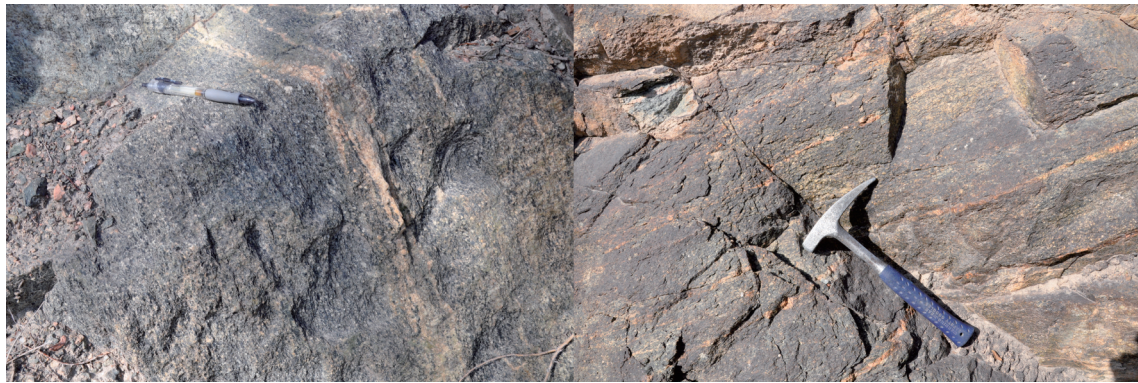


图2 中天山巴仑台闪长岩野外露头
Fig.2 Outcrops of the Baluntai diorite

闪长岩主要成分为斜长石、角闪石、石英和黑云母,含量分别为60%、35%、3%和2%左右。斜长石多呈粒状、板状,发育聚片双晶,部分斜长石表面可见高岭土化,粒径2 mm左右(图3-a)。角闪石为

柱状、粒状,干涉色为绿色到黄绿色,粒径1.5 mm。石英呈粒状嵌于长石和角闪石颗粒之间,粒径0.5 mm。黑云母较少,呈鳞片或者叶片状,分布在其他矿物颗粒间隙当中。在镜下可以清晰地看到岩石

①新疆维吾尔自治区地质局地质科学研究所第五八地质大队.1:20万巴仑台幅地质图,1977.

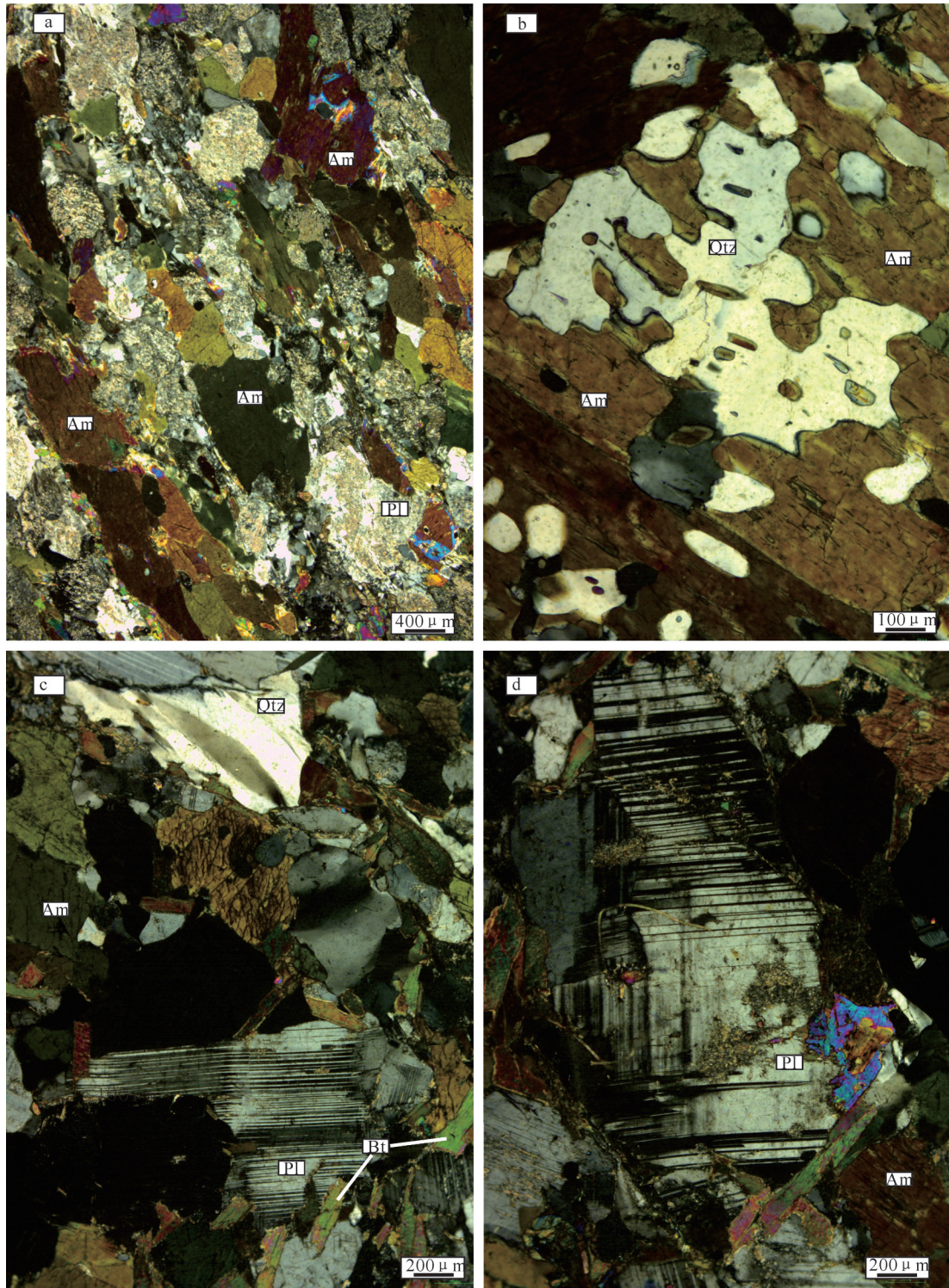


图3 中天山巴仑台闪长岩岩相学照片 (Am—角闪石, Pl—斜长石, Qtz—石英, Bt—黑云母)
 a—角闪石略具定向以及长石高岭土化; b—石英与角闪石呈文象结构共生; c, d—长石机械双晶及石英波状消光

Fig.3 Microphotographs of the Baluntai diorite

(Am—Amphibole, Pl—Plagioclase, Qtz—Quartz, Bt—Biotite)

a—Directional amphiboles and kaolinized plagioclases; b—Graphic texture of quartz and amphiboles; c, d—Wavy extinction of quartz and mechanical twinning in plagioclases

发生了轻微的定向改造(图3-a),由于变形作用,斜长石可见由于发生位错而形成的机械双晶,石英呈波状消光(图3-c、d),部分颗粒粗大的角闪石中有规律地镶嵌他形石英颗粒,构成象形文字状的文象结构(图3-b)。

3 样品及分析方法

选择新鲜的闪长岩样品进行锆石U-Pb定年、Hf同位素和全岩地球化学分析。锆石分选在河北省廊坊市宇恒岩石矿物分选技术服务有限公司完成,将样品粉碎成60目后,经浮选和电磁选方法,在双目镜下挑选锆石颗粒。锆石阴极发光(CL)照相在北京锆年领航科技有限公司电子探针实验室采用扫描电镜完成,加速电压为15 kV。锆石原位U-Pb同位素年龄测定在中国地质调查局天津地质调查中心完成,锆石定年分析所用仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 193激光剥蚀系统。激光剥蚀斑束直径为35 μm ,激光剥蚀样品的深度为20~40 μm 。锆石年龄计算采用国际标准锆石91500作为外标,元素含量采用人工合成硅酸盐玻璃NIST SRM610作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用ICPMSDataCal 4.3程序,并采用软件对测试数据进行普通铅校正^[17],年龄计算及谐和图绘制采用ISOPLOT(3.0版)^[18]软件完成。

锆石原位Hf同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所完成,分析点与锆石U-Pb测试点一致或稍有偏差,但保证在同一颗锆石内。锆石原位Lu-Hf同位素分析仪器为Neptune Plus多吸收ICP-MS和RESOLUTION M-50激光剥蚀系统。激光参数如下:斑束45 μm ,重复率8 Hz,能量80 mJ的He作为载气并加入少量氮气以提高样品信号。样品正常信号分析包括30 s的空白气体收集和30 s的激光剥蚀。积分时间为0.131 s,约有200个周期数据被收集。 ^{173}Yb 和 ^{175}Lu 被用于纠正 ^{176}Yb 和 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的干扰。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 用质量偏差校正指数定律标准化为 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 0.7325。Penglai锆石作为标样用于分析测试中。详细方法见Wu et al.(2006)^[19]。

全岩地球化学分析在国家地质实验测试中心完成,其中主量元素采用X-射线荧光光谱法(XRF)测定(型号:PE300D),并采用等离子光谱和

化学法测定进行互检。微量元素和稀土元素采用等离子质谱法(ICP-MS)测定(型号:PW4400),同时分析2个国家标样(GSR3和GSR5)和3个平行样以保证分析结果的准确度。岩石地球化学全岩分析数据中都含有少量 H_2O 、 CO_2 等,所以,对这些样品的主量元素分析结果在扣除烧失量之后进行归一化,下面的作图和讨论均按照归一化后的“干”成分进行。

4 样品测试分析结果

4.1 锆石特征及分析结果

样品所选锆石数量大于200颗,均呈自形柱状、板状结构,粒径100~200 μm ,长宽比2~3。锆石内部较纯净,基本无裂纹和包裹体。锆石阴极发光图像显示锆石颗粒具清晰的岩浆震荡环带,显示岩浆锆石的特征(图4)。

对巴仑台闪长岩样品锆石进行分析,分析结果见表1,除19.1点给出的Th/U值为0.0628外,其他23个分析点锆石的Th/U值较集中,为0.4120~0.7433,均大于0.4,24个分析点Th/U平均值为0.5392,是岩浆锆石的典型特征^[20]。24个分析点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为(430.1 \pm 1.1)Ma(图5),即早志留世,代表巴仑台闪长岩体的结晶年龄。

4.2 地球化学特征

地球化学分析结果见表2。闪长岩 SiO_2 含量51.84%~59.8%,平均54.20%,为一套中性岩石。 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=4.14\%\sim 7.05\%$,平均5.59%,除了一个异常样品外,其他 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 均小于1,为0.44~0.89,平均0.75,这与典型的铁铜沟闪长岩体^[21]类似。 Al_2O_3 含量较高,为14.62%~17.35%,平均16.45%。在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图(图6)中样品投影在闪长岩区域内, $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图(图6)显示为高钾钙碱系列岩石。根据图解与地球化学主量元素的特征,该岩石为一套高钾钙碱性系列闪长岩。

闪长岩稀土元素含量为 $182.62\times 10^{-6}\sim 258.22\times 10^{-6}$,平均 203.03×10^{-6} ,稀土总量较高,对其进行球粒陨石标准化^[22],稀土配分曲线呈明显的右倾分布,岩石 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均10.46,富集轻稀土,重稀土比较平缓(图7)。轻微的Eu负异常, $\delta\text{Eu}=0.76$,表明岩石经历了斜长石的分离结晶作用^[21,23-24]。

原始地幔标准化后的蛛网图(图8)显示:岩石富集大离子亲石元素(如:K、Rb、Ba等),亏损高场

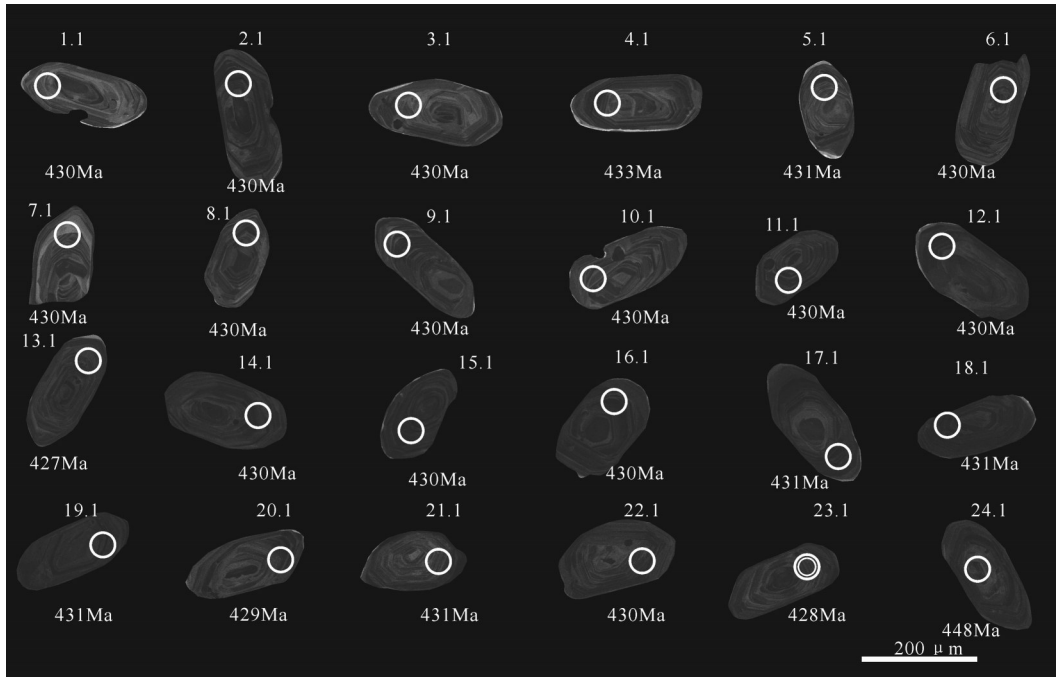


图4 巴仑台闪长岩锆石阴极发光图像及²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄值
Fig.4 CL images of zircons from the Baluntai diorite

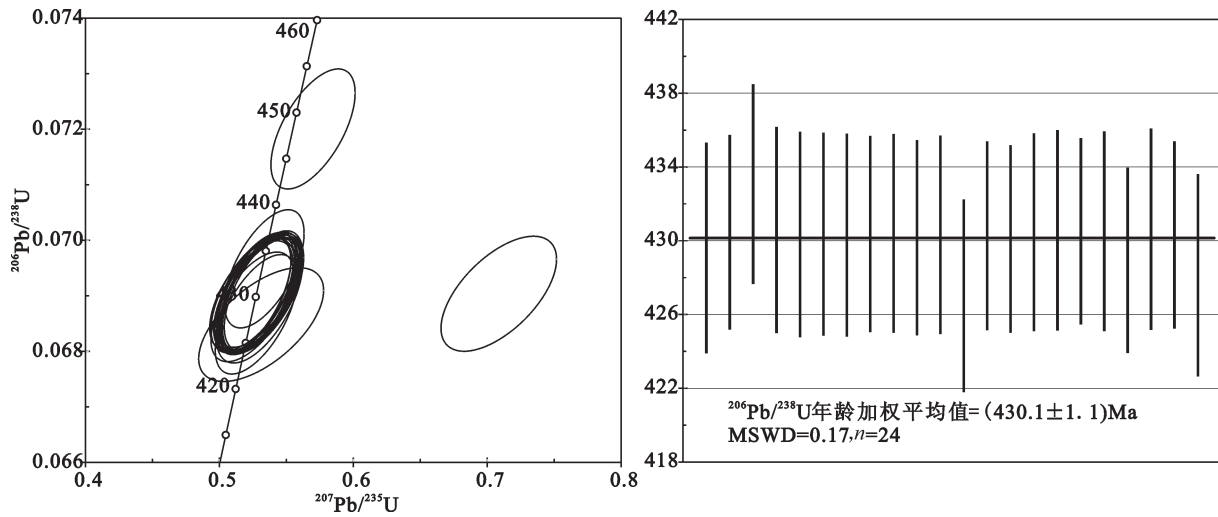


图5 巴仑台闪长岩的LA-ICP-MS U-Pb谐和图和加权平均年龄值
Fig.5 Concordia curves of zircon LA-ICP-MS U-Pb data for the Baluntai diorite

强元素(如:Nb、Ta、Ti、P、HREE等),表现出明显的岛弧特征^[25-26],而Sr元素亏损,可能是岩石后期遭受蚀变或者与残余斜长石有关。

Rb、Y(与Yb相似)和Nb(与Ta相似)是被用来区分花岗岩类型最有效的依据,在Pearce(1984)的构造判别Nb-Y和Ta-Yb图解上,该闪长岩均落

入岛弧岩石系列^[27],指示巴仑台闪长岩体形成于岛弧环境(图9)。

4.3 Hf同位素测试结果

锆石由于其封闭温度较高,抗风化能力强,同时锆石内部Hf含量高,Lu/Hf比值很低,后期由¹⁷⁶Lu衰变产生的¹⁷⁶Hf基本可以忽略不计。所以通过Hf

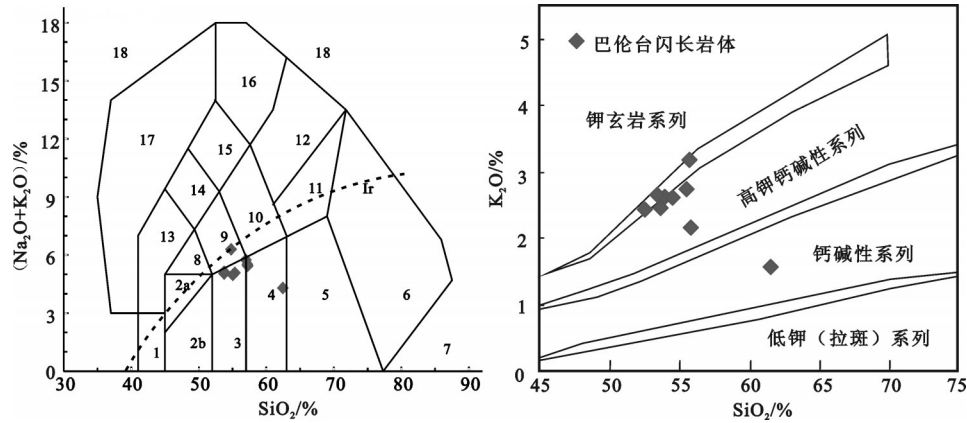


图6 巴仑台闪长岩 SiO₂-(Na₂O+K₂O)图和 SiO₂-K₂O 图

1—橄榄辉长岩; 2a—碱性辉长岩; 2b—亚碱性辉长岩; 3—辉长闪长岩; 4—闪长岩; 5—花岗岩闪长岩; 6—花岗岩; 7—石英岩; 8—二长辉长岩; 9—二长闪长岩; 10—二长岩; 11—石英二长岩; 12—正长岩; 13—副长石辉长岩; 14—副长石二长闪长岩; 15—副长石二长正长岩; 16—副长正长岩; 17—副长深成岩; 18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩; Ir—Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性

Fig. 6 SiO₂-(Na₂O+K₂O) diagram and SiO₂-K₂O diagram for the Baluntai diorite

1—Olivine gabbro; 2—Alkaline gabbro; 3—Gabbro-diorite; 4—Diorite; 5—Granodiorite; 6—Granite; 7—Quartzolite; 8—Monzogabbro; 9—Monzodiorite; 10—Monzonite; 11—Quartz monzonite; 12—Syenite; 13—Feldspathoid gabbro; 14—Feldspathoid monzodiorite; 15—Feldspathoid monzosyenite; 16—Feldspathoid syenite; 17—Foidolite; 18—Tawite/urtite/italite; Ir—Irvine boundary, with the area above the dividing line being alkaline and that below the dividing line being sub-alkaline

表1 巴仑台闪长岩(12YX-5-7)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

Table 1 Data of LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from the Baluntai diorite (12YX-5-7)

测点	含量/10 ⁻⁶		同位素比值						表面年龄/Ma	
	Pb	U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1
1.1	1	452	0.0558	0.0007	0.5301	0.0131	0.0689	0.0005	430	3
2.1	1	913	0.0559	0.0003	0.5324	0.0117	0.0691	0.0004	430	3
3.1	1	402	0.0744	0.0009	0.7087	0.0176	0.069	0.0004	430	3
4.1	1	484	0.0557	0.0005	0.5336	0.0121	0.0695	0.0004	433	3
5.1	1	458	0.0559	0.0005	0.5324	0.0123	0.0691	0.0004	431	3
6.1	1	554	0.0555	0.0004	0.5279	0.0121	0.069	0.0004	430	3
7.1	1	341	0.0558	0.0006	0.5314	0.0129	0.069	0.0004	430	3
8.1	1	658	0.0556	0.0004	0.5293	0.0119	0.069	0.0004	430	3
9.1	1	885	0.0552	0.0003	0.5251	0.0117	0.069	0.0004	430	3
10.1	1	524	0.0557	0.0005	0.5299	0.0123	0.069	0.0004	430	3
11.1	1	791	0.0552	0.0003	0.525	0.0116	0.069	0.0004	430	3
12.1	1	393	0.0552	0.0006	0.5251	0.0128	0.069	0.0004	430	3
13.1	2	310	0.0563	0.0016	0.5313	0.0191	0.0685	0.0004	427	3
14.1	2	632	0.0551	0.0007	0.5245	0.0129	0.069	0.0004	430	3
15.1	1	734	0.0552	0.0005	0.5254	0.0121	0.069	0.0004	430	3
16.1	1	849	0.0556	0.0003	0.5298	0.0117	0.0691	0.0004	430	3
17.1	1	516	0.0553	0.0005	0.527	0.0123	0.0691	0.0004	431	3
18.1	2	752	0.0556	0.0007	0.5293	0.0128	0.0691	0.0004	431	3
19.1	1	542	0.0559	0.0005	0.5319	0.0123	0.0691	0.0004	431	3
20.1	1	419	0.0553	0.0006	0.5246	0.0126	0.0688	0.0004	429	3
21.1	1	347	0.0556	0.0006	0.5293	0.0127	0.0691	0.0004	431	3
22.1	1	607	0.0556	0.0005	0.5296	0.0121	0.069	0.0004	430	3
23.1	1	448	0.0557	0.0006	0.5276	0.0125	0.0687	0.0004	428	3
24.1	1	626	0.0574	0.0004	0.57	0.0128	0.072	0.0004	448	3

表2 巴仑台闪长岩主量元素(%),微量元素和稀土元素(10^{-6})分析结果Table 2 Major (%), trace and rare earth element (10^{-6}) analytical results of the Baluntai diorite

样品号	12YX5-1	12YX5-2	12YX5-3	12YX5-4	12YX5-5	12YX5-8	12YX5-9	12YX5-11	12YX5-12
SiO ₂	52.09	53.37	54.81	59.8	52.71	51.84	54.99	52.93	55.23
Al ₂ O ₃	17.35	16.96	16.2	14.62	17	16.91	16.45	16.26	16.32
CaO	7.48	7.36	6.4	4.67	5.67	7.04	5.45	7.54	4.92
Fe ₂ O ₃	4.87	3.22	4.47	4.64	4.81	5.05	4.24	5.13	4.65
FeO	4.26	5.01	3.48	3.14	3.7	4.29	4.26	3.7	3.99
K ₂ O	2.08	2.23	2.38	1.44	2.98	2.54	2.67	2.89	1.81
MgO	4.98	4.69	4.07	4.32	4.73	5.29	4.45	4.96	4.93
MnO	0.16	0.14	0.15	0.12	0.16	0.17	0.15	0.14	0.14
Na ₂ O	3.2	3.08	3.87	2.7	4.07	2.85	3.13	2.25	4.14
P ₂ O ₅	0.34	0.3	0.3	0.27	0.31	0.33	0.28	0.31	0.3
TiO ₂	1.06	1.01	0.96	0.9	1.03	1.09	0.88	1.01	1.05
LOI	2.33	1.35	2.36	2.48	1.77	1.38	1.97	1.56	2.2
Total	100.2	98.72	99.45	99.1	98.94	98.78	98.92	98.68	99.68
Rb	122	104	60.8	55	85.5	106	74.9	104	58.3
Sr	450	474	384	382	302	459	345	466	285
Ba	956	1348	912	486	1077	1206	1244	1344	489
Th	2.51	2.8	1.59	1.81	2.6	1.32	3.39	1.26	1.94
U	1.64	1.45	0.67	1.02	0.94	0.73	1.25	0.56	0.83
Nb	12.6	11.5	13.3	13	12	12.3	13.3	12.9	9.89
Ta	0.83	0.72	0.7	0.91	0.72	0.71	0.85	0.69	0.56
Zr	240	239	230	226	223	266	172	259	298
Hf	6.33	6.06	6.19	5.6	5.9	6.62	5.18	6.7	7.33
Ti	5995	5669	5561	5107	5631	6549	4912	5606	6098
La	34.4	32.7	40.4	31.1	36	33.4	42.3	35.2	26.4
Ce	68.7	66.2	90.2	62.3	76	66	99.5	83.1	42.5
Pr	10.3	9.58	11.5	8.85	10.3	9.31	13.2	10.6	5.18
Nd	49.3	45	48.2	40	46.7	44.2	58.7	46	21.9
Sm	9.11	8.06	8.99	6.8	8.26	7.83	11.6	9.02	3.13
Eu	2.09	1.86	2.05	1.4	1.92	1.82	2.48	1.91	1.09
Gd	7.96	7.18	7.78	6.02	7.37	6.94	10.3	8.03	2.65
Tb	1.15	1.01	1.13	0.85	1.06	0.98	1.51	1.18	0.36
Dy	6.01	5.42	5.79	4.55	5.78	5.1	8.29	6.17	1.81
Ho	1.16	1.06	1.13	0.91	1.11	1	1.56	1.19	0.35
Er	3.1	2.75	3.09	2.35	2.9	2.72	4.1	3.16	0.96
Tm	0.47	0.4	0.43	0.33	0.41	0.38	0.58	0.44	0.14
Yb	2.92	2.61	2.78	2.18	2.72	2.54	3.58	2.83	0.96
Lu	0.44	0.39	0.43	0.34	0.41	0.4	0.52	0.42	0.16
Y	29.4	26.9	27.7	23.2	26.9	25.4	38.7	29.6	9.14
ΣREE	197.11	184.22	223.90	167.98	200.94	182.62	258.22	209.25	107.59
LREE	173.90	163.40	201.34	150.45	179.18	162.56	227.78	185.83	100.20
HREE	23.21	20.82	22.56	17.53	21.76	20.06	30.44	23.42	7.39
LR/HR	7.49	7.85	8.92	8.58	8.23	8.10	7.48	7.93	13.56
(La/Yb) _N	8.45	8.99	10.42	10.23	9.49	9.43	8.48	8.92	19.73
δ Eu	0.73	0.73	0.73	0.65	0.74	0.74	0.68	0.67	1.13
δ Ce	0.89	0.91	1.01	0.91	0.95	0.90	1.02	1.04	0.84

同位素追踪物质来源和演化历史是现今研究过程中比较常用的方法^[28-30]。

巴仑台闪长岩 Hf 同位素原位分析选取的锆石内部比较均匀,所以可以认为 Hf 同位素和锆石 U-

Pb 年龄是对应的,在计算 Hf 同位素的相关数据时,采用的是同一颗锆石的 U-Pb 年龄。对该样品锆石选取 12 颗进行 Hf 同位素原位分析,结果见表 3。

巴仑台闪长岩体的锆石具有较低的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf

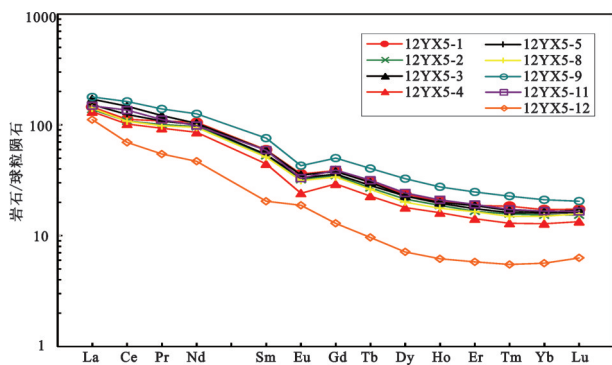


图7 巴仑台闪长岩的稀土元素球粒陨石标准化图解
(据文献[22])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns for the Baluntai diorite (after reference [22])

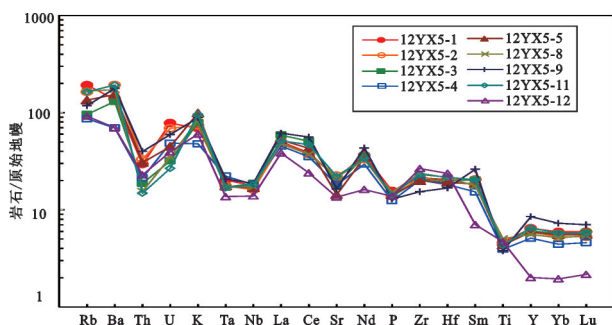


图8 巴仑台闪长岩的微量元素原始地幔蛛网图
(据文献[22])

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace elements patterns for the Baluntai diorite (after reference [22])

比值,变化范围0.000458~0.001320,平均0.000774,表明锆石在形成以后具有很低的放射性Hf积累,所测的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石结晶时岩浆体系的Hf同位素组成^[31]。

巴仑台闪长岩锆石Hf同位素测试结果(表3)表明:锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282152~0.282297,平均0.286227。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-12.7\sim-7.6$,二阶段Hf模式年龄 T_{DM2} 为1895~2219 Ma,相对比较集中,代表闪长岩体为单一来源,同时锆石二阶段模式年龄与锆石年龄差值较大,代表该源区物质在地壳中保存的时间较长。从图10中我们可以看出:巴仑台闪长岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 远离亏损地幔线,是来源于古老的亏损地幔熔融产物经过后期的地质事件产生的岩浆作用。

5 讨论

5.1 巴仑台闪长岩体成因

闪长岩 SiO_2 含量为51.84%~59.8%,平均54.20%, $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=4.14\%\sim 7.05\%$,平均5.59%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值平均为0.75, Al_2O_3 平均含量为16.45%,为一套高钾钙碱性系列闪长岩。岩石富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,指示闪长岩体具有岛弧特征。在Pearce(1984)的构造判别 $(\text{Y}+\text{Nb})-\text{Rb}$ 和 $\text{Yb}-\text{Ta}$ 图解上,闪长岩样品均落入岛弧岩石系列(图9)^[27],与其具有相似微量元素特征的西藏羌塘地体南缘改则嘎布扎花岗闪长岩也与巴仑台闪长岩

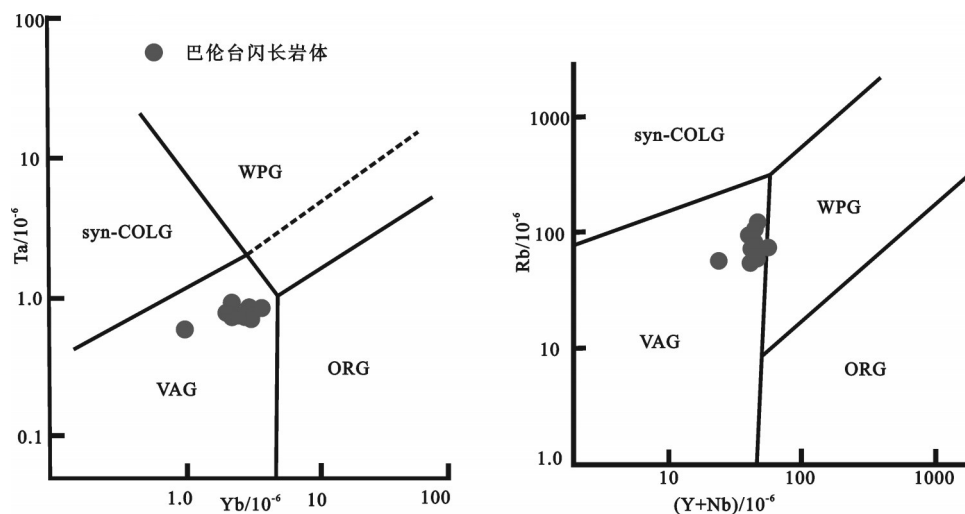


图9 巴仑台闪长岩Ta-Yb、Rb-(Y+Nb)图解

syn-COLG—同碰撞花岗岩;WPG—板内花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;ORG—大洋脊花岗岩

Fig. 9 Diagrams of Ta-Yb and Rb-(Y+Nb) for the Baluntai diorite

syn-COLG—Syn-collisional granite;WPG—Intracontinental granite;VAG—Volcanic arc granite;ORG—Ocean ridge granite

表3 巴仑台闪长岩锆石 Hf 同位素数据
Table 3 Zircon Hf-isotope data of the Baluntai diorite

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}/Ma	$T_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$	f_{LwHf}
12YX5-7-1	430	0.016416	0.000458	0.282275	0.000008	-17.6	-8.2	1359	1936	-0.99
12YX5-7-2	430	0.030579	0.000828	0.282221	0.000008	-19.5	-10.3	1448	2064	-0.98
12YX5-7-3	430	0.013985	0.000382	0.282223	0.000006	-19.2	-9.8	1418	2036	-0.99
12YX5-7-6	430	0.033219	0.000903	0.282297	0.000008	-16.8	-7.6	1344	1895	-0.97
12YX5-7-8	430	0.049174	0.00132	0.282229	0.000008	-19.2	-10.1	1455	2054	-0.96
12YX5-7-10	430	0.031424	0.000853	0.282217	0.000008	-19.6	-10.4	1453	2072	-0.97
12YX5-7-11	430	0.022474	0.000619	0.282226	0.000009	-19.3	-10	1432	2047	-0.98
12YX5-7-12	430	0.023383	0.000633	0.282254	0.000008	-18.3	-9	1394	1985	-0.98
12YX5-7-14	430	0.034143	0.000924	0.282202	0.000008	-20.2	-11	1477	2107	-0.97
12YX5-7-15	430	0.031255	0.000905	0.282152	0.000011	-21.9	-12.7	1546	2219	-0.97
12YX5-7-16	430	0.030622	0.000839	0.282243	0.000009	-18.7	-9.5	1417	2015	-0.97
12YX5-7-17	431	0.020782	0.000622	0.282172	0.000007	-21.2	-11.9	1507	2167	-0.98

具有相似的构造产出背景^[32],说明闪长岩形成于岛弧环境。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值平均 0.286227, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -12.7 \sim -7.6$, 指示具有壳源特征。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与锆石 U-Pb 年龄关系图解(图 8)中, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 远离亏损地幔线, 二阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 1895~2219 Ma, 说明闪长岩浆来源于古老地壳部分熔融的产物。Hu et al.(1998)对闪长岩围岩星星峡群片麻岩和温泉群斜长角闪岩研究表明, 星星峡群片麻岩和一个斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $(1829 \pm 143)\text{Ma}$ 以及温泉群 10 个斜长角闪岩样的 Sm-Nd 参考等时线年龄为 1726 Ma 等^[33], 与本文闪长岩二阶段 Hf 模式年龄近乎一致, 说明巴仑台闪长岩可能是南天山洋北向俯冲导致伊犁—中天山微陆块基底物质部分熔融形成的岩浆产物。

5.2 巴仑台闪长岩地质意义

前人对巴仑台地区出露的花岗质类岩石研究结果表明, 巴仑台地区存在南天山洋向北俯冲的岛弧岩浆产物, 然而对初始俯冲的时限还存在着争论^[1, 34]。杨天南等(2006)^[35]对巴仑台北部地区花岗质糜棱岩进行地球化学及锆石 SHRIMP 定年研究, 得出年龄为 405~416 Ma, 提出早泥盆世南天山洋已经开始向北俯冲于伊犁—中天山微陆块之下并形成火山弧型花岗岩; 而陈义兵等(2012)^[36]认为中天山南缘洋盆在中泥盆世向北俯冲, 证据来自乌瓦门一带的片麻状花岗闪长岩锆石定年结果, 确定该片麻状花岗闪长岩结晶年龄为 389 Ma。而笔者本次

对巴仑台闪长岩进行锆石 U-Pb 测年, 首次得出其结晶年龄为 $(430.1 \pm 1.1)\text{Ma}$, 即早志留世, 可能说明南天山洋的俯冲作用从早志留世就已经开始。值得注意的是, 王守敬等(2010)^[37]对巴仑台地区的钾长花岗岩进行地球化学和锆石 U-Pb 年龄研究, 得出这套具有岛弧性质的花岗岩的年龄为 369 Ma 并认为南天山洋向伊犁—中天山微陆块之下的俯冲至少延续到晚泥盆世。

5.3 巴仑台闪长岩体对乌瓦门蛇绿岩形成时代的限定

沿中天山南缘缝合带分为东段(干沟、榆树沟—铜花山)、中段(乌瓦门和古洛沟)和西段(那拉提山达鲁巴依和长阿吾子)蛇绿岩, 然而前人对该缝合带中蛇绿岩的形成时代还存在着争论。朱志新(2009)对西段蛇绿岩研究中提到新疆地矿局第二区调队 2001 年报道那拉提山达鲁巴依蛇绿岩的辉长岩和玄武岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 590 Ma 和 600 Ma, 是迄今获得的天山造山带中蛇绿岩的最古老年龄^[13, 38]。夏林圻对天山及邻区震旦纪—早寒武世地层进行对比研究, 认为早寒武世为天山古生代洋盆开启时限的下限^[39], 并强调天山山脉前身的古生代洋盆在震旦纪中期就已具有一定的规模^[13, 38, 39]。然而, 郝杰等(1993)^[44]对中天山南缘缝合带西段的长阿吾子蛇绿岩套辉长岩中辉石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄研究, 结果为 439 Ma, 代表蛇绿岩的形成年龄。

中天山南缘缝合带东段蛇绿岩的形成年龄普遍认为形成于440 Ma左右,与西段长阿吾子蛇绿岩类似,如王润三等(1998)对榆树沟麻粒岩相蛇绿岩地体相关岩类进行锆石U-Pb同位素定年,获得440 Ma和364 Ma两个年龄,分别代表榆树沟蛇绿岩套的形成年龄和第一期(角闪岩相或麻粒岩相)变质作用的时代^[40]。榆树沟蛇绿混杂岩中麻粒岩锆石的核部SHRIMP U-Pb年龄为452~640 Ma,代表榆树沟蛇绿岩的形成时代^[16]。杨经绥等提出铜花山—榆树沟蛇绿岩形成构造背景为洋脊型,斜长岩和斜长花岗岩的锆石U-Pb年龄分别为(435.1±2.8)Ma、(439.3±1.8)Ma,代表铜花山—榆树沟蛇绿岩的形成年龄^[15]。

中天山南缘缝合带中段目前还没有蛇绿岩的年龄报道,限制了整个缝合带的对比研究。然而,可以通过对比缝合带北侧与大洋或洋陆俯冲的岩浆事件来探讨中段蛇绿岩的时代。

中段与西段那拉提山北缘断裂以北的灰白色二长花岗岩和那拉提山确鹿特达坂一带的闪长岩和花岗岩进行锆石SHRIMP定年和岩性分析,分别得到年龄为436 Ma、370 Ma和316 Ma,代表其形成于志留纪和泥盆纪与洋岩石圈板块俯冲有关的陆缘^[41]。郝杰等在那拉提花岗岩体中取样,测得黑云母单矿物的⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄为355.1 Ma,推测在晚泥盆—石炭纪期间伊犁—中天山微陆块南缘存在和发育一个岛弧带,它是南天山古大洋向伊犁—中天山微陆块下俯冲的产物^[4]。对哈布腾苏和科布尔特地区岛弧火山岩进行锆石同位素分析研究,得到年龄为420~427 Ma^[42]。对中天山南缘比开地区花岗岩进行地球化学和年代学研究,发现其形成与南天山洋向北俯冲作用有关,年龄为401~479 Ma,峰期岩浆作用时限为401~419 Ma^[43]。穹库什太蓝闪石片岩中获得的多硅白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为(415.37±2.71)Ma,代表俯冲杂岩进入俯冲带发生蓝片岩相变质作用的年龄,变质时间为早古生代末期,反映南天山洋闭合于志留—早泥盆世^[44],进一步的研究表明南天山洋于晚石炭世完成俯冲作用,西南天山进入陆内造山演化阶段^[45]。

杨经绥等(2011)对中天山南缘东段铜花山蛇绿岩体附近的铜花山英安岩和铜花山花岗闪长岩进行锆石SHRIMP年代学研究,得出同位素年龄分别为422 Ma和423 Ma,代表岩体的形成年龄,对其进行岩

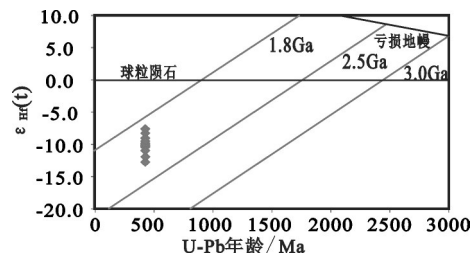


图10 巴尔台岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与锆石U-Pb年龄关系图
Fig.10 Plot of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus U-Pb age of zircon from the Baluntai diorite

石地球化学研究表明,其形成与洋壳俯冲削减有关,是典型的岛弧型岩浆岩^[15,46]。在南天山北缘库米什地区铜花山南部的研究表明:该地区黄尖石山岩体是早古生代早志留世晚期由先存中元古代幔源基性地壳物质熔融的产物,指示是活动大陆边缘俯冲带岛弧演化到正常大陆弧环境的产物,说明早古生代志留纪南天山洋发生俯冲形成强烈的岩浆作用,因此,该岩体的形成标志着南天山洋盆于晚志留世时期已进入俯冲消减的活动大陆边缘演化阶段^[47]。

中天山南缘中段巴尔台镇乌瓦门地区出露的花岗质类岩石研究结果表明,巴尔台地区存在南天山洋向北俯冲的岛弧岩浆产物^[35,36,37](如图11)。而本文得到巴尔台闪长岩锆石U-Pb年龄为(430.1±1.1)Ma,代表了大陆岛弧的岩浆事件,说明乌瓦门南天山洋的俯冲作用应该早于430 Ma。此外,乌瓦门蛇绿混杂岩中有包括来自中天山结晶基底的巴尔台群的片麻岩、斜长角闪岩等构造块体,这些构造块体均呈无根状裹入泥盆纪萨阿尔明组云母石英片岩之中^[48],说明乌瓦门蛇绿岩形成的时代至少在泥盆纪之前,并不是与泥盆系相当或者稍晚,该结论也印证了乌瓦门南天山洋的扩张作用早于早泥盆世,与乌瓦门蛇绿岩中与洋底扩张有关的玄武岩锆石U-Pb年龄(460.3±1.3 Ma)(牛晓露等,待发表)相吻合。总之,乌瓦门蛇绿岩形成时代略早于长阿吾子蛇绿岩、铜花山—榆树沟蛇绿岩和库勒湖蛇绿岩形成的时代。

6 结 论

(1)巴尔台闪长岩体U-Pb年龄(430.1±1.1)Ma,岩体为一套高钾钙碱性系列岛弧闪长岩,为早志留世南天山洋北向俯冲的产物。

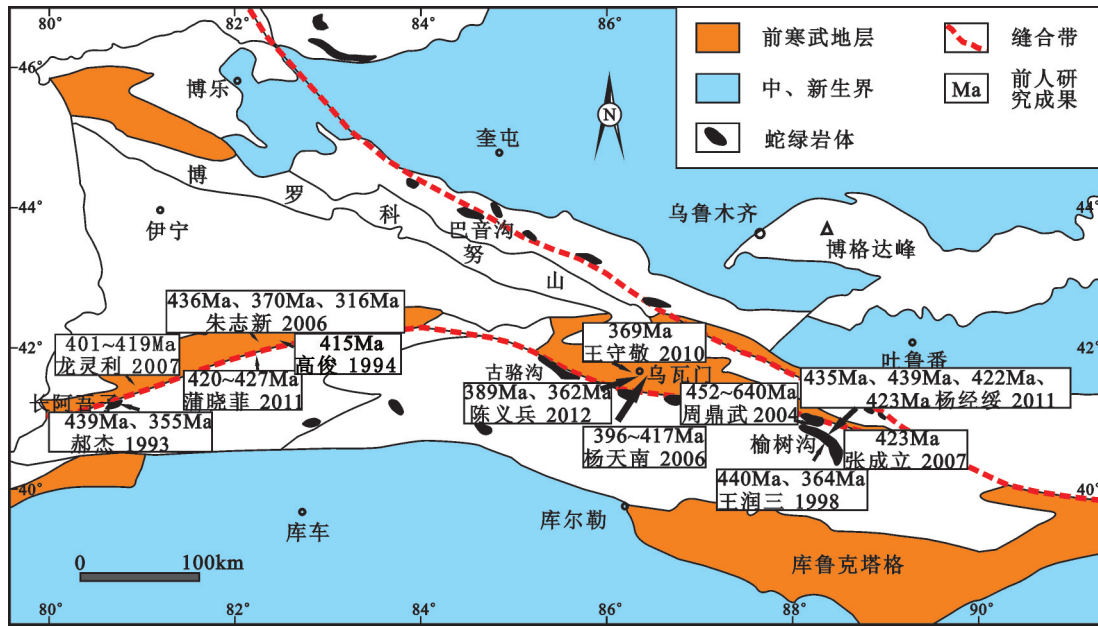


图 11 中天山构造简图及前人研究成果标注

Fig.11 Simplified geotectonic map of the Central Tianshan Mountains and the results of previous studies

(2)巴仑台闪长岩的Hf同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -12.7 \sim -7.6$,二阶段Hf模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 1895~2219 Ma,岩石源区为富集源区,是俯冲板片脱水导致伊犁—中天山微陆块古老地壳部分熔融的产物。

(3)巴仑台地区乌瓦门蛇绿岩形成的时代略早于长阿吾子、铜花山—榆树沟蛇绿岩。

致谢:感谢中国科学院广州地球化学研究所的丁相礼同志在本次Hf同位素有关实验中的无微不至的关怀,同时感谢参加与本项研究相关野外工作的连东洋、王云鹏、冯光英、牛晓露等以及有关领导和司机师傅,使他们的辛勤工作和大力支持才使得本项研究野外工作顺利完成。

参考文献(References):

[1] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京:地质出版社, 1992: 1-169.
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and its Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-169(in Chinese).
[2] Gao J, Li M S, Xiao X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. Tectonophysics, 1998, 287(1/4): 213-231.
[3] Jahn B M, Griffin W L, Windley B. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2): vii-x.
[4] 李锦轶. 中国大陆地壳“镶嵌与叠覆”的结构特征及其演化[J]. 地

质通报, 2004, 23(9/10): 986-1004.
Li Jinyi. Structural characteristics of crustal “mosaicking and superimposition” of the continent of China and its evolution[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9/10): 986-1004(in Chinese with English abstract).
[5] 郭召杰, 马瑞士, 郭令智, 等. 新疆东部三条蛇绿混杂岩带的比较研究[J]. 地质论评, 1993, 39(3): 236-247.
Guo Zhaojie, Ma Ruishi, Guo Lingzhi, et al. A comparative study on three ophiolitic melange belts in eastern Xinjiang[J]. Geological Review, 1993, 39(3): 236-247(in Chinese with English abstract).
[6] 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 中天山北缘干沟蛇绿混杂岩带的地质地球化学[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 49-56.
Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, Zhang Guowei, et al. Geology and geochemistry of the Gangou ophiolitic melange at the northern margin of the Middle Tianshan Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1): 49-56(in Chinese with English abstract).
[7] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山岩浆作用[M]. 北京: 中国大地出版社, 2007: 1-350.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. Magmatism in Tianshan Mountain[M]. Beijing: China Land Press, 2007: 1-350(in Chinese).
[8] Windley B F, Allen M B, Zhao Z, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan range, central Asia[J]. Geology, 1990, 18: 128-131.
[9] 汤耀庆, 高俊, 赵民, 等. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1-133.
Tang Yaoqing, Gao Jun, Zhao Min, et al. The Ophiolite and Blueschists in the Southwestern Tianshan Orogenic Belt, Xinjiang, Northwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 1-133(in Chinese).
[10] 李文渊. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. 中国地质,

- 2015, 42(3): 365–380.
Li Wenyuan. Metallogenic geological characteristics and newly discovered orebodies in Northwest China[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 365–380(in Chinese with English abstract).
- [11] 肖序常, 刘训, 高锐. 新疆南部地壳结构和构造演化[M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 1–270.
Xiao Xuchang, Liu Xun, Gao Rui. The Crustal Structure and Tectonic Evolution of Southern Xinjiang[M]. Beijing: Commercial Press, 2004: 1–270(in Chinese).
- [12] 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境[J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 37–44.
Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, Zhang Guowei, et al. Tectonic setting of the Wuwamen ophiolite at the southern margin of Middle Tianshan Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 37–44(in Chinese with English abstract).
- [13] 朱志新, 李锦轶, 董莲慧, 等. 新疆南天山构造格架及构造演化[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1863–1870.
Zhu Zhixin, Li Jinyi, Dong Lianhui, et al. Tectonic framework and tectonic evolution of the southern Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1863–1870 (in Chinese with English abstract).
- [14] 郝杰, 刘小汉. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及大地构造意义[J]. *地质科学*, 1993, 28(1): 93–95.
Hao Jie, Liu Xiaohan. Ophiolite melange time and tectonic evolutionary model in South Tianshan area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1993, 28(1): 93–95(in Chinese with English abstract).
- [15] 杨经绥, 徐向珍, 李天福, 等. 新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石 U–Pb 同位素定年: 早古生代洋盆的证据[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 77–95.
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Tianfu, et al. U–Pb ages of zircons from ophiolite and related rocks in the Kumishi region at the southern margin of Middle Tianshan, Xinjiang: Evidence of Early Paleozoic oceanic basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 77–95(in Chinese with English abstract).
- [16] 周鼎武, 苏犁, 简平, 等. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及构造意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(14): 1411–1415.
Zhou Dingwu, Su Li, Jian Ping, et al. Zircon U–Pb SHRIMP ages of high–pressure granulite in Yushugou ophiolitic terrane in southern Tianshan and their tectonic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(14): 1411–1415(in Chinese).
- [17] Andersen T. Correction of common Pb in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [18] Ludwig KR. Isoplot/Ex version 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. 1a. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1–56.
- [19] Wu F Y, Yang Y H, Lie W X, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U–Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234(1/2): 105–126.
- [20] Hermann J, Rubatto D, Korsakov A. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141(1): 66–82.
- [21] 徐夕生, 邱检生. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1–346.
Xu Xisheng, Qiu Jiansheng. *Igneous Petrology*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1–346(in Chinese).
- [22] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Journal of the Geological Society*, 1989, 42: 313–345.
- [23] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1–195.
Li Changnian. *Trace Element Petrology of Igneous*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 1–195(in Chinese with English abstract).
- [24] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 411–429.
- [25] Wilson M. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1–466.
- [26] Ionov D A, Hofmann A W. Nb–Ta–Ti–rich mantle amphiboles and micas: Implications for subduction–related metasomatic trace element fractionations[J]. *EPSL*, 1995, 131(3/4): 341–356.
- [27] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956–983.
- [28] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 1999, 399(6733): 252–255.
- [29] 吴福元, 杨进辉, 柳小明, 等. 冀东 3.8Ga 锆石 Hf 同位素特征与华北克拉通早期地壳时代[J]. *科学通报*, 2005, 50(18): 1996–2003.
Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Liu Xiaoming, et al. Hf isotopes of the 3.8 Ga zircons in eastern Hebei Province, China: Implications for early crustal evolution of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(18): 1996–2003(in Chinese).
- [30] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA–MC–ICP–MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2595–2604.
Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation–MC–ICP–MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2595–2604(in Chinese with English abstract).
- [31] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185–220.
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220(in Chinese with English abstract).
- [32] 秦川, 李智武, 朱利东, 等. 西藏羌塘地体南缘改则嘎布扎花岗岩闪长岩侵位时代、成因及其地质意义[J]. *中国地质*, 2015, (1): 105–117.
Qin Chuan, Li Zhiwu, Zhu Lidong, et al. The emplacement epoch, petrogenesis and geological significance of Gabuzha granodiorite at the southern edge of Qiangtang, Tibet[J]. *Geology in China*, 2015, (1): 105–117(in Chinese with English abstract).
- [33] Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng, et al. Constraints on the age of basement and crustal growth in Tianshan Orogen by Nd

- isotopic composition[J]. *Science in China(Series D)*, 1998, 41(6): 648–657 (in Chinese with English).
- [34] 吴文奎, 姜常义, 杨复. 库米什地区古生代地壳演化及成矿规律[M]. 西安: 陕西科学出版社, 1992: 1–150.
Wu Wenkui, Jiang Changyi, Yang Fu. Paleozoic Geological Evolution and Metallogenesis of Kumish Area[M]. Xian: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1992: 1–150(in Chinese).
- [35] 杨天南, 李锦轶, 孙桂华, 等. 中天山早泥盆世陆弧: 来自花岗岩质麻粒岩地球化学及 SHRIMP-U/Pb 定年的证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 41–48.
Yang Tiannan, Li Jinyi, Sun Guihua, et al. Earlier Devonian active continental arc in Central Tianshan: evidence of geochemical analyses and Zircon SHRIMP dating on mylonitized granitic rock[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 41–48(in Chinese with English abstract).
- [36] 陈义兵, 张国伟, 柳小明, 等. 中天山巴仑台地区变形花岗岩类 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义[J]. *地质论评*, 2012, 58(1): 117–125.
Chen Yibing, Zhang Guowei, Liu Xiaoming, et al. Zircons LA-ICP-MS U-Pb dating on the Baluntai deformed granitoids, Central Tianshan Block, Northwest China, and its tectonic implications[J]. *Geological Review*, 2012, 58(1): 117–125(in Chinese with English abstract).
- [37] 王守敬, 王居里. 新疆巴仑台钾长花岗岩的地球化学及年代学[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(1): 105–110.
Wang Shoujing, Wang Juli. The geochemical characteristics and chronology of the K-feldspar granite in Baluntai area, Xinjiang[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2010, 40(1): 105–110(in Chinese with English abstract).
- [38] 杨海波, 高鹏, 李兵, 等. 新疆西天山达鲁巴依蛇绿岩地质特征[J]. *新疆地质*, 2005, 23(2): 123–126.
Yang Haibo, Gao Peng, Li Bing, et al. The geological character of the Sinian Dalubayi ophiolite in the West Tianshan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2005, 23(2): 123–126 (in Chinese with English abstract).
- [39] 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. *地质通报*, 2002, 21(2): 55–62.
Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, et al. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(2): 55–62(in Chinese with English abstract).
- [40] 王润三, 王焰, 李惠民, 等. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地球化学*, 1998, 27(6): 517–522.
Wang Runsan, Wang Yan, Li Huimin, et al. Zircon U-Pb age and its geological significance of high-pressure terrane of granulite facies in Yushugou area, Southern Tianshan Mountain[J]. *Geochimica*, 1998, 27(6): 517–522(in Chinese with English abstract).
- [41] 朱志新, 王克卓, 郑玉洁, 等. 新疆伊利地块南缘志留纪和泥盆纪花岗岩侵入体锆石 SHRIMP 定年及其形成时构造背景的初步探讨[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1193–1200.
Zhu Zhixin, Wang Kezhao, Zheng Yujie, et al. Zircon SHRIMP dating of Silurian and Devonian granitic intrusions in the southern Yili block, Xinjiang and preliminary discussion on their tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1193–1200(in Chinese with English abstract).
- [42] 蒲晓菲, 宋述光, 张立飞, 等. 西南天山超高压变质带中志留纪岛弧火山岩岩片及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1675–1687.
Pu Xiaofei, Song Shuguang, Zhang Lifei, et al. Silurian arc volcanic slices and their tectonic implications in the southwestern Tianshan UHPM belt, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1675–1687(in Chinese with English abstract).
- [43] 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(4): 719–732.
Long Lingli, Gao Jun, Xiong Xianming, et al. Geochemistry and geochronology of granitoids in Bikai region, southern Central-Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(4): 719–732(in Chinese with English abstract).
- [44] 高俊, 肖序常, 汤耀庆, 等. 新疆西南天山蓝片岩的变质作用 pTdt 轨迹及构造演化[J]. *地质论评*, 1994, 40(6): 544–553.
Gao Jun, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, et al. The metamorphic pTdt path of blueschists and tectonic evolution in the Southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 1994, 40(6): 544–553(in Chinese with English abstract).
- [45] 段士刚, 张作衡, 魏梦元, 等. 新疆西天山雾岭铁矿闪长岩地球化学及锆石 U-Pb 年代学[J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 1757–1770.
Duan Shigang, Zhang Zuoheng, Wei Mengyuan, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the diorite associated with the Wuling iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 1757–1770(in Chinese with English abstract).
- [46] 徐向珍, 杨经绥, 郭果林, 等. 新疆天山地区榆树沟-铜花山蛇绿岩特征和构造背景[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 96–120.
Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Guo Guolin, et al. The Yushugou-Tonghuashan ophiolites in Tianshan, Xinjiang, and their tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 96–120 (in Chinese with English abstract).
- [47] 张成立, 周鼎武, 王局里, 等. 南天山库米什南黄尖石山岩体的年代学、地球化学和 Sr、Nd 同位素组成及其成因意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1821–1829.
Zhang Chengli, Zhou Dingwu, Wang Juli, et al. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic composition and genesis implications of Huangjianshishan granite intrusion in Kumishi area of southern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1821–1829(in Chinese with English abstract).
- [48] 李向民, 董云鹏, 徐学义, 等. 中天山南缘乌瓦门地区发现蛇绿混杂岩[J]. *地质通报*, 2002, 21(6): 304–307.
Li Xiangmin, Dong Yunpeng, Xu Xueyi, et al. Discovery of ophiolitic melange in the Wuwamen area on the southern margin of the Central Tianshan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(6): 304–307(in Chinese with English abstract).