

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.212>



# 东天山早中生代侵入体地球化学特征及其构造意义

高志武<sup>1</sup>, 吕昶良<sup>2</sup>, 邓明国<sup>3</sup>, 管申进<sup>3\*</sup>, 杨富强<sup>2</sup>

1. 遵义师范学院工学院, 贵州遵义 563006

2. 广西壮族自治区地球物理勘察院, 广西柳州 545005

3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093

**摘要:** 东天山百灵山西辉长岩、似斑状花岗岩近年来才被发现, 为了解其成因及相关大地构造背景, 对其进行地质学、地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Sr-Nd 同位素分析. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, 百灵山西辉长岩、似斑状花岗岩分别形成于 236 Ma 和 228 Ma. 辉长岩具有较低的  $\text{SiO}_2$  (43.50%~46.03%) 含量, 较高的  $\text{CaO}$  (11.40%~13.24%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  (9.62%~11.84%) 和  $\text{MgO}$  (6.02%~10.58%;  $\text{Mg}^{\#}=53\sim69$ ) 含量以及  $\text{Ce/Pb}$ 、 $\text{Ti/Zr}$ 、 $\text{Ti/Y}$  及  $\text{Ba/Th}$  比值, 且富集 LREE、LILE, 表明其形成于受板片脱水流体交代地幔楔的部分熔融. 似斑状花岗岩表现出 I 型花岗岩的特征, 且具有较高的  $\text{SiO}_2$  (71.14%~72.71%), 强富集 LREE [ $(\text{La/Yb})_{\text{N}}=12.61\sim28.45$ ] 和 LILE (例如 Rb, K 和 Pb), 表明其形成于下地壳的部分熔融. 而较高的  $\text{Mg}^{\#}$  (39~41) 值、 $\text{Ti/Y}$  (154.40~306.18) 比值, 显示其源区有地幔物质的加入. 结合前人研究成果, 可知东天山地区在 240 Ma 以后已经进入陆内演化阶段, 百灵山西辉长岩及似斑状花岗岩均形成于陆内环境.

**关键词:** 东天山; 早中生代; 百灵山西辉长岩; 似斑状花岗岩; 地球化学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2021)07-2287-12

收稿日期: 2020-07-19

## Geochemical Features and Tectonic Setting of the Mesozoic Intrusions in Eastern Tianshan

Gao Zhiwu<sup>1</sup>, Lü Changliang<sup>2</sup>, Deng Mingguo<sup>3</sup>, Guan Shenjin<sup>3\*</sup>, Yang Fuqiang<sup>2</sup>

1. College of Engineering, Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China

2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Geophysical Survey Institute, Liuzhou 545005, China

3. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

**Abstract:** The Early Mesozoic magmatism of the eastern Tianshan was just reported recently, the source and tectonic setting of which are poorly understood. Formed during the Early Mesozoic, the Bailingshanxi gabbro and porphyritic granite were recently discovered. In this study, new geochemistry, zircon U-Pb dating and whole-rock Sr-Nd isotope data are provided for these intrusions. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results reveal that the gabbro and porphyritic granite emplaced at ca. 236 Ma and 228 Ma, respectively. The Bailingshanxi gabbro has low  $\text{SiO}_2$  (43.50%–46.03%) content, and high  $\text{CaO}$  (11.40%–13.24%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  (9.62%–11.84%) and  $\text{MgO}$  (6.02%–10.58%;  $\text{Mg}^{\#}=53\sim69$ ) contents. Meanwhile, it is characterized by high  $\text{Ce/Pb}$ ,  $\text{Ti/Zr}$ ,  $\text{Ti/Y}$  and  $\text{Ba/Th}$  ratios, and rich in LREE and LILE (e.g., Ba and Sr), indicating the Bailingshanxi gabbro was originated from the partial melting of the metasomated mantle wedge. Showing high  $\text{SiO}_2$  (71.14%–72.71%), LREE [ $(\text{La/Yb})_{\text{N}}=12.61\sim28.45$ ] and LILE (e.g., Rb, K and Pb), the Bailingshanxi porphyritic granite was likely derived from the partial melting of the lower crust. Additionally, it has high  $\text{Mg}^{\#}$  (39–41) value and  $\text{Ti/Y}$  (154.40–306.18) ratios, implying mantle component played an important

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos. 41363001; 41762009); 遵义师范学院博士基金项目 (No. 遵师 BS[2019]44 号).

**作者简介:** 高志武 (1972–), 男, 博士, 主要从事矿床勘查、矿山数字化等方面研究. ORCID: 0000-0002-4884-7273. E-mail: zhihiwugao@163.com

**\* 通讯作者:** 管申进, ORCID: 0000-0001-5522-9919. E-mail: guanssj@163.com

**引用格式:** 高志武, 吕昶良, 邓明国, 等, 2021. 东天山早中生代侵入体地球化学特征及其构造意义. 地球科学, 46(7): 2287–2298.

role in the formation of the porphyritic granite. Integrating with previous studies, the Eastern Tianshan is probably under inter-plate environment after 240 Ma, and the Bailingshanxi gabbro and porphyritic granite were formed during this stage.

**Key words:** eastern Tianshan; early mesozoic; Bailingshanxi gabbro; porphyritic granite; geochemistry.

## 0 引言

中亚造山带是全球最大的显生宙增生造山带和大陆成矿域,在其大陆地壳增生和改造过程中,伴随着多期次、多类型的成矿作用(图 1; Allen *et al.*, 1993). 东天山地区位于中亚造山带的南缘,其在古生代经历了一个完整的俯冲、碰撞和碰撞后伸展过程,伴随着大量的酸性—超基性岩浆活动,并形成一系列的大中型矿床,成为了我国重要的 Cu-Fe-Pb-Zn-Au-Mo-Ni-W-Ag-Co 多金属成矿省(Xiao *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2012). 长期以来,人们一直认为东天山地区岩浆—热液矿床主要形成于古生代(Chen *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2018a). 对该区的研究,也主要集中于东天山地区古生代的大地构造背景(Xiao *et al.*, 2004; 王京彬等, 2006)、岩浆岩地球化学特征(Wang *et al.*, 2018a)、矿床成因及矿床地质特征(Han *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2018b, 2019)等方面. 然而,随着研究的深入以及测试技术的迅速发展,人们在东天山地区发现了一些的早中生代岩体,如东戈壁岩体、白山岩体及尾亚岩体等. 这些岩体的形成年龄多集中在 240~220 Ma(Li *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2017),且与东天山地区的 Mo-V-Ti 等矿床关系密切,暗示早中生代可能也是东天山地区重要的构造—岩浆—成矿事件. 然而,目前为止,对东天山地区早中生代岩体的报道和研究依然非常有限,这严重阻碍了对东天山地区早中生代构造—岩浆—成矿事件的进一步理解(周涛发等, 2010). 因此,有必要加大对东天山地区早中生代岩浆作用的研究,探讨岩浆起源及形成过程,确定东天山地区早中生代的大地构造背景.

本研究选取东天山百灵山西岩体为研究对象,通过研究其岩石主微量元素特征、锆石 U-Pb 年代学以及 Sr-Nd 同位素特征,对岩浆岩的特征及来源进行限定,并探讨东天山地区早中生代的大地构造背景.

## 1 地质背景

东天山地区位于吐哈盆地以南,塔里木盆地以

北,呈东西向带状展布,长约 560 km,宽约 110 km(图 1a; Chen *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2013). 区内产出多条区域性深大断裂,如大草滩断裂、康古尔断裂、雅满苏断裂及阿奇克库都克断裂等,其均沿近东西向展布. 以这些断裂带为界,由北向南可分为以下几个构造单元:博格达—哈尔里克岛弧带、大南湖—头苏泉岛弧带、康古尔韧性剪切带、阿齐山—雅满苏带及中天山地块(陈寿波等, 2018; 黄宝强等, 2018). 其中,博格达—哈尔里克岛弧主要由奥陶—石炭纪火山岩、碎屑沉积岩、中—酸性侵入岩、以及部分基性—超基性杂岩组成. 大南湖—头苏泉岛弧带位于康古尔断裂以北,主要出露泥盆系及石炭系钙碱性火山岩、火山碎屑岩、火山沉积岩等,侏罗系碎屑沉积岩等. 带内发育 NW、NE 向断层,控制着带内岩浆岩及矿产的分布. 侵入岩以石炭纪中—酸性岩为主,与带内 Cu 矿化密切相关,并发育少量二叠纪基性、超基性岩体(陈寿波等, 2018). 康古尔韧性剪切带分布在康古尔断裂以南、雅满苏断裂以北(图 1a),近东西向展布,是与东天山地区的成矿作用密切相关的大型剪切变形带. 带内主要分布有带内主要出露泥盆系大南湖组、下石炭统干敦组、二叠系野马泉组陆相沉积碎屑岩以及第四系冲积层(涂其军等, 2014). 受韧性剪切作用的影响,带内岩石普遍经历过明显的变形变质作用,构造片岩、紧闭褶皱、劈理、拉伸线理等发育. 此外,该带广泛分布着石炭纪中酸性侵入岩及二叠纪基性—超基性岩体,其与该带中的 Au、Mo 及 Cu-Ni 成矿作用密切相关. 阿齐山—雅满苏带主要由上石炭统雅满苏组双峰式火山岩,土古土布拉克组第一岩性段浅海相火山沉积岩、第二岩性段安山质火山碎屑岩,以及下石炭统阿奇山组火山碎屑岩为主,夹有沉积岩夹层;石炭纪地层之上为二叠系火山岩、火山沉积岩、碎屑岩等(周涛发等, 2010; Zhao *et al.*, 2019). 石炭纪中—酸性岩体,侵入火山岩地层中,并形成大量的 Fe-Cu 矿化;此外,带内局部出露有二叠纪基性—超基性侵入岩(Zhao *et al.*, 2019). 中天山地块位于阿奇克库都克断裂以南(图 1a),区内出露的地层主要为前寒武纪基底,其成分较为复杂,主要为一套经受变质的火山—沉积岩,由长城

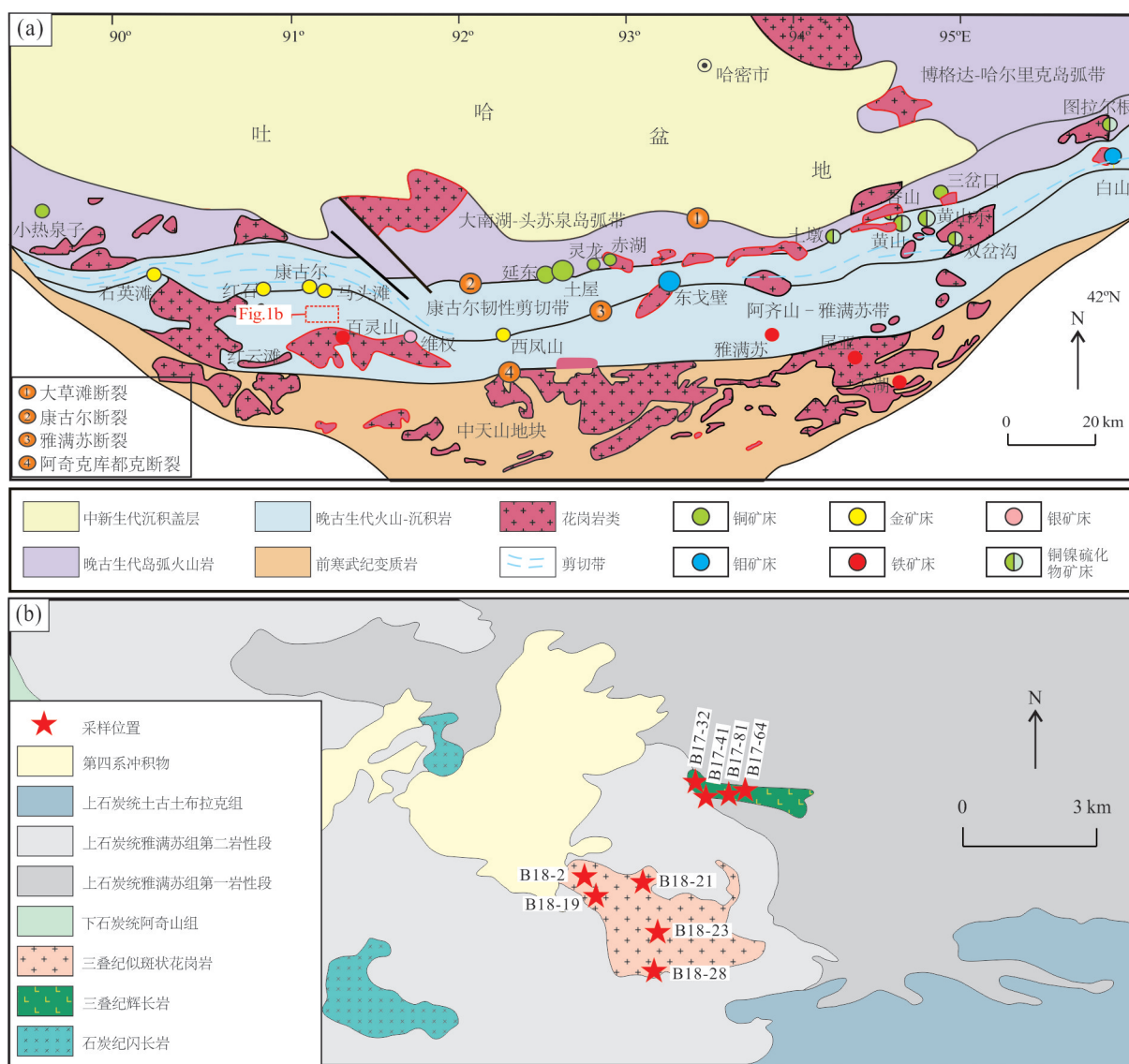


图 1 (a)东天山地质特征及重要矿床分布;(b)百灵山西地区地质简图

Fig. 1 (a) Simplified tectonic map of the eastern Tianshan belt; (b) geologic map of the Bailingshanxi area

a. 据王京彬等(2006), Deng *et al.* (2017)修改; b. 据新疆地质调查院 1:5 万地质图

系星星峡群、蓟县系卡瓦布拉克群及青白口系天湖群组成,岩石普遍经历了绿片岩相变质.区内岩浆岩分布广泛,出露有元古代到早中生代的岩体(王京彬等, 2006).

百灵山西岩体位于阿奇山—雅满苏岛弧带内,北邻雅满苏断裂,距离东南部百灵山岩体约 6 km,出露岩性主要为似斑状花岗岩、辉长岩,其西侧分布有少量石炭纪闪长岩(新疆地质调查院 1:5 万地质图).这些岩体主要侵入雅满苏组地层中,岩体附近地层局部发生矽卡岩化、大理岩化等蚀变.

本研究中样品 B18-2 的采样坐标为:  $91^{\circ}17'40''\text{E}$ ,  $41^{\circ}53'54''\text{N}$ ,所采岩体为辉长岩以及似斑状花岗岩.辉长岩呈灰绿色,具有辉长结构、块状构造

(图 2a, 图 2b),主要由辉石(35%~40%)、斜长石(40%~50%)、橄榄石(5%~10%)及少量的磁铁矿(<5%)等矿物组成.其中,辉石主要呈半自形、他形粒状,粒径 0.2~1.5 cm,灰绿色;橄榄石主要呈半自形粒状,粒径通常在 0.5 cm 以下;斜长石呈斑片状,长约 0.5~2.0 cm,多呈自形结构,局部有弱的蚀变,形成绢云母等矿物;磁铁矿等粒径多小于 0.5 cm,呈他形粒状分布在斜长石、辉石颗粒之间.似斑状花岗岩具有似斑状结构、块状构造,灰白色,主要由~30%的石英、~25%的斜长石、~35%的钾长石以及 5%~10%的黑云母组成(图 2c,图 2d),并有少量的锆石、磁铁矿、磷灰石及角闪石,其总量约占 5%~10%.其中,钾长石呈半自形、自形粒状结构,



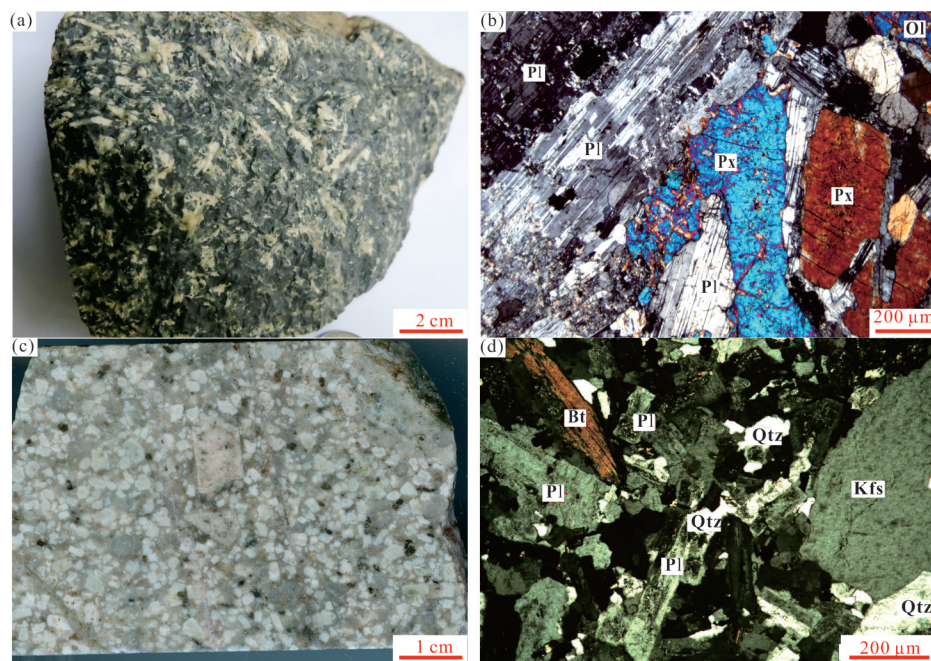


图2 (a)百灵山西辉长岩手标本及(b)镜下照片;(c)百灵山西似斑状花岗岩手标本及(d)镜下照片

Fig. 2 Photographs (a, c) and photomicrographs (b, d) of the Bailingshanxi gabbro (a, b) and porphyritic granite (c, d)

Ol. 橄榄石; Pl. 斜长石; Px. 辉石; Qtz. 石英; Kfs. 钾长石; Bt. 黑云母

粒径 0.2~1.2 cm, 矿物表面局部发生弱的粘土化蚀变; 斜长石呈他形、半自形粒状, 粒径多小于 0.5 cm, 表面较脏, 局部发生弱的粘土化蚀变; 石英呈他形粒状, 粒径多小于 0.5 cm; 黑云母多呈棕色片状, 节理发育, 自形, 长约 0.2~0.5 cm.

## 2 分析方法

本研究用于岩石主微量、Sr-Nd 及锆石 U-Pb 同位素分析的辉长岩和似斑状花岗岩样品, 均为新鲜、无明显蚀变的岩石, 从而保证实验数据真实可靠.

### 2.1 锆石 U-Pb 定年

分别选取百灵山西辉长岩及似斑状花岗岩样品, 进行锆石 U-Pb 定年工作, 样品挑选工作是在河北廊坊市区域地质调查研究所完成. 岩石样品首先经过破碎、浮选及磁选分离后, 在双目镜下对锆石进行挑选. 选取无明显裂隙、晶型好的锆石, 固定在环氧树脂靶上, 打磨、抛光锆石靶表明, 使得锆石露出. 对锆石进行透射光、反射光及阴极发光 (CL) 图像分析, 选取环带清晰、无裂隙、无包裹体的锆石进行 U-Pb 同位素测试. 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年是在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 由 GeoLas 2005 激光器、Agilent

7500a 型电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 共同完成. 激光剥蚀束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ , 能量密度为 5 J/ $\text{cm}^2$ , 剥蚀频率为 5 Hz (Zong *et al.*, 2010). 实验过程中用 He、Ar 为载体, 锆石 91500 被用作标样, 每分析 5 个测试点后分析 2 个标样, 具体过程详见 Zong *et al.* (2010). 测试结果用软件 ICPMSDataCal 10.8 软件来进行处理, 并用 Isoplot 4.0 软件得到样品的谐和图解及加权平均年龄.

### 2.2 全岩主、微量分析

本文分别选取 4 个百灵山西辉长岩样品和 5 个似斑状花岗岩样品进行主微量分析. 其中全岩主元素分析是在广州澳实分析测试有限公司完成, 所用仪器为 Rikagu RIX 2100 型 X 荧光光谱仪 (XRF) 完成, 其分析精度优于 1%, 详细测试过程见 Zhou *et al.* (2014). 微量元素分析在中国核工业北京地质研究所分析测试研究中心完成, 所有仪器为的 Element I 型 (德国 Finnigan MAT 公司生产) 电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 完成, 分析精度优于 3%.

### 2.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

本文分别选取 4 个百灵山西辉长岩样品和 5 个似斑状花岗岩样品进行全岩 Sr-Nd 同位素分析. 测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素国家重点实验室完成, Sr、Nd 同位素分析是用 Neptune Plus 多接受电感耦合等离子质谱仪上完成, 详细步

骤见 Zhang *et al.* (2015). Sr 和 Nd 同位素比值分别有用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.119\ 4$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\ 9$  来校正. 在分析过程中, 分别以 NBS-987 和 JNdi-1 对样品的 Sr 和 Nd 进行标定.

### 3 实验结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

本次对百灵山西辉长岩(WY17-32)和似斑状花岗岩(BS18-2)的锆石 U-Pb 测试结果如附表 1 和图 3 所示. 辉长岩锆石较小, 一般为  $50\sim 100\ \mu\text{m}$ , 长宽比为  $1:1\sim 1:2$ , 在 CL 图像上具有清晰的振荡环带(图 3a); 部分锆石具有核边结构, 但核部较小, 无法对其进行 LA-ICP-MS 分析. 锆石中 Th 的含量为  $(21\sim 665)\times 10^{-6}$ , U 的含量为  $(60\sim 740)\times 10^{-6}$ , Th/U 比值为  $0.32\sim 0.93$ , 其中大部分  $>0.4$ , 表明其为岩浆锆石(Belousova *et al.*, 2002). 17 颗锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $243\sim 230\ \text{Ma}$ , 加权平均年龄为  $236.2\pm 2.8\ \text{Ma}$  (MSWD=0.37), 代表辉长岩形成年龄(图 3c, 图 3d). 似斑状花岗岩中, 锆石均呈无色透明的长柱状颗粒, 大小为  $100\sim 300\ \mu\text{m}$ , 长:宽约为  $2:1\sim 4:1$ , CL 图像中振荡环带清晰(图 3b). 锆石中 Th 的含量为  $(212\sim 975)\times 10^{-6}$ , U 的含量为  $(310\sim 762)\times 10^{-6}$ , Th/U 比值为  $0.33\sim 2.05$ , 表明所测锆石均为岩浆锆石, 其年龄可以代表岩体形成的年龄. LA-ICP-MS 测试结果表明, 似斑状花岗岩的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的年龄为  $233\sim 222\ \text{Ma}$ , 加权平均年龄为  $227.6\pm 2.1\ \text{Ma}$  (MSWD=1.3)(图 3e, 图 3f).

#### 3.2 全岩主微量元素

百灵山西辉长岩全岩地球化学分析结果显示: 其具有较低的  $\text{SiO}_2$  ( $43.50\%\sim 46.03\%$ )、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ( $2.51\%\sim 3.65\%$ ) 含量, 较高的  $\text{CaO}$  ( $11.40\%\sim 13.24\%$ )、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  ( $9.62\%\sim 11.84\%$ )、 $\text{MgO}$  ( $6.02\%\sim 10.58\%$ ) 和  $\text{TiO}_2$  ( $1.58\%\sim 2.36\%$ ) 含量,  $\text{Mg}^\#$  值为  $53\sim 69$ . 似斑状花岗岩具有较高的  $\text{SiO}_2$  ( $71.14\%\sim 72.71\%$ )、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  ( $7.53\%\sim 8.24\%$ ) 含量, 较低的  $\text{CaO}$  ( $1.41\%\sim 1.70\%$ )、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  ( $1.78\%\sim 2.08\%$ )、 $\text{MgO}$  ( $0.57\%\sim 0.72\%$ ) 和  $\text{TiO}_2$  ( $0.26\%\sim 0.30\%$ ) 含量,  $\text{Mg}^\#$  值为  $39\sim 41$  (附表 2). 在  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$  图解中, 辉长岩主要落入辉长岩区域, 而似斑状花岗岩主要落入花岗岩区域内(图 4); 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解中, 辉长岩样品具有中钾—高钾钙碱性系列特征, 而似斑状花岗岩则具有高钾钙碱性系列特征(图 5a). 在 A/NK-A/CNK 图解中, 百灵山西似斑状

花岗岩表现出来偏铝质的特征(图 5b).

百灵山西辉长岩稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $(118.17\sim 188.16)\times 10^{-6}$ , 平均值为  $144.30\times 10^{-6}$ . 在稀土元素球粒陨石标准化配分图中, 辉长岩样品显示轻稀土(LREE)富集、重稀土(HREE)亏损的现象,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值为  $5.80\sim 10.04$ , 平均值为  $7.43$ , Eu 显示弱的负异常到正异常( $0.92\sim 1.47$ )(图 6a). 似斑状花岗岩稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $(68.53\sim 90.51)\times 10^{-6}$ , 平均值为  $80.04\times 10^{-6}$ . 在稀土元素球粒陨石标准化图解中, 似斑状花岗岩显示强富集 LREE、亏损 HREE,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值为  $12.61\sim 28.45$ , 平均值为  $21.66$ , 显示负的 Eu 异常( $0.71\sim 0.90$ )(图 6c). 在微量元素原始地幔标准化蜘蛛网图中, 辉长岩富集 Ba、La 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素(图 6b); 似斑状花岗岩富集 Rb、Ba、U、La、Pb 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素(图 6d).

#### 3.3 全岩 Sr-Nd 同位素

全岩 Sr-Nd 同位素的结果如附表 3 和图 7 所示, 百灵山西辉长岩、似斑状花岗岩的  $I_{\text{Sr}}$  值分别为  $0.705\ 566\sim 0.706\ 287$  和  $0.703\ 943\sim 0.706\ 224$ . 辉长岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $2.97\sim 5.17$ , 单阶段模式年龄为  $951\sim 879\ \text{Ma}$ ; 似斑状花岗岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $1.88\sim 3.98$ , 单阶段模式年龄为  $788\sim 664\ \text{Ma}$ , 两阶段模式年龄为  $1\ 004\sim 760\ \text{Ma}$ .

## 4 讨论

#### 4.1 岩石成因

测试结果表明, 百灵山西辉长岩具有较低的  $\text{SiO}_2$  ( $43.50\%\sim 46.03\%$ ) 含量, 较高的  $\text{CaO}$  ( $11.40\%\sim 13.24\%$ )、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  ( $9.62\%\sim 11.84\%$ ) 和  $\text{MgO}$  ( $6.02\%\sim 10.58\%$ ) 含量, 且具有高的  $\text{Mg}^\#$  值 ( $53\sim 69$ ), 明显不同于下地壳镁铁质岩石部分熔融所形成的岩浆岩( $\text{Mg}^\#$  值通常小于  $40$ ; Atherton and Petford, 1993), 显示地源岩浆特征. 地壳混染和结晶分异是讨论基性岩成岩过程的重要内容. Lassiter and DePaolo(1997)指出, 仅发生分离结晶作用的岩浆, 其  $\text{La}/\text{Sm}$  比值通常小于  $5$ , 且基本无变化; 如在上升过程中发生了地壳混染, 则  $\text{La}/\text{Sm}$  比值会迅速增高, 通常大于  $5$ . 此外, 在地球演化的过程中 Ce 元素的相容性比 Pb 元素强, 因此地幔中具有较高的 Ce/Pb 比值 ( $25\pm 5$ ; Hofmann, 1997), 而地壳中具有较低的 Ce/Pb 比值 (多为  $4\sim 15$ ; Hofmann,

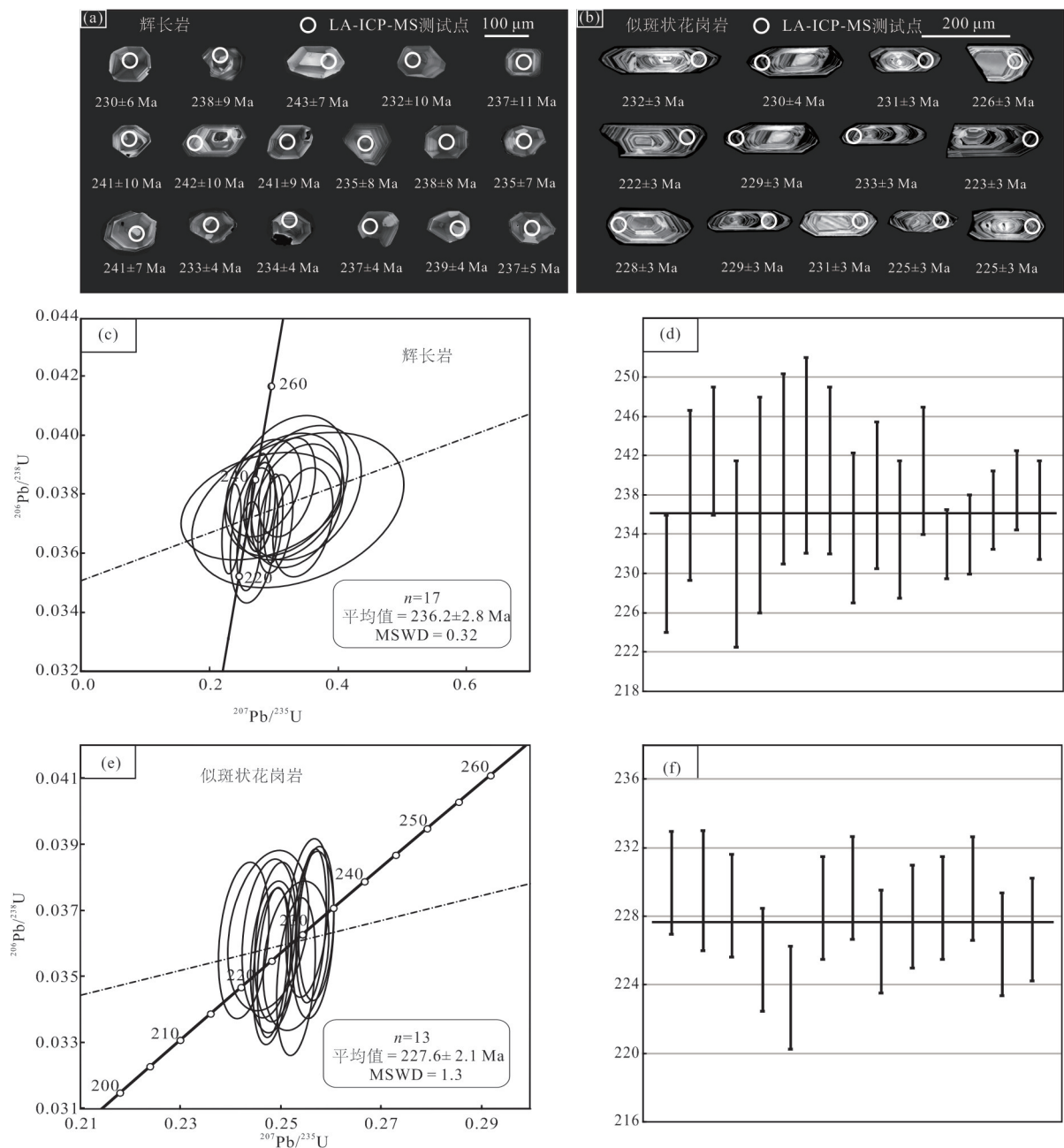


图 3 (a)百灵山西辉长岩锆石 CL 图像;(b)百灵山西似斑状花岗岩锆石 CL 图像;(c,d)百灵山西辉长岩及(e,f)似斑状花岗岩 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄

Fig. 3 The CL images of zircon grains from the Bailingshanxi gabbro (a) and porphyritic granite (b); U-Pb concordia and weighted average diagrams of the zircons from (c,d) Bailingshanxi gabbro and (e,f) porphyritic granite

1997). 百灵山西辉长岩样品具有较高的 Ce/Pb (25.03~56.06)、Ti/Zr (66.86~117.23) 和 Ti/Y (292.50~591.30) 比值, 较低的 La/Sm 比值 (2.46~4.04), 表明其来自于幔源 (Ti/Zr>30, Ti/Y>200; Wedepohl, 1995), 在上升过程中地壳同化混染现象不明显. 较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值, 较低的  $I_{\text{Sr}}$  值, 也表明没有明显地壳物质的加入. 曾有学者指出岩浆中单斜辉石的结晶会明显消耗 Mg 的含量, 百灵山西岩体中

较高的 MgO (6.02%~10.58%) 含量, 表明岩浆中单斜辉石的结晶不明显; 岩浆中无明显  $\text{Eu}^*$  异常 (0.92~1.47), 表明岩浆演化过程中斜长石结晶不明显; 较高的  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  (9.62%~11.84%) 表明岩浆中磁铁矿等未发生明显的结晶. 因此, 可认为百灵山岩体未发生明显的结晶分异现象.

已有研究表明, 典型的 Nb、Ta、Ti 亏损是岛弧环境岩浆岩的重要特征 (Wang *et al.*, 2016). 在主





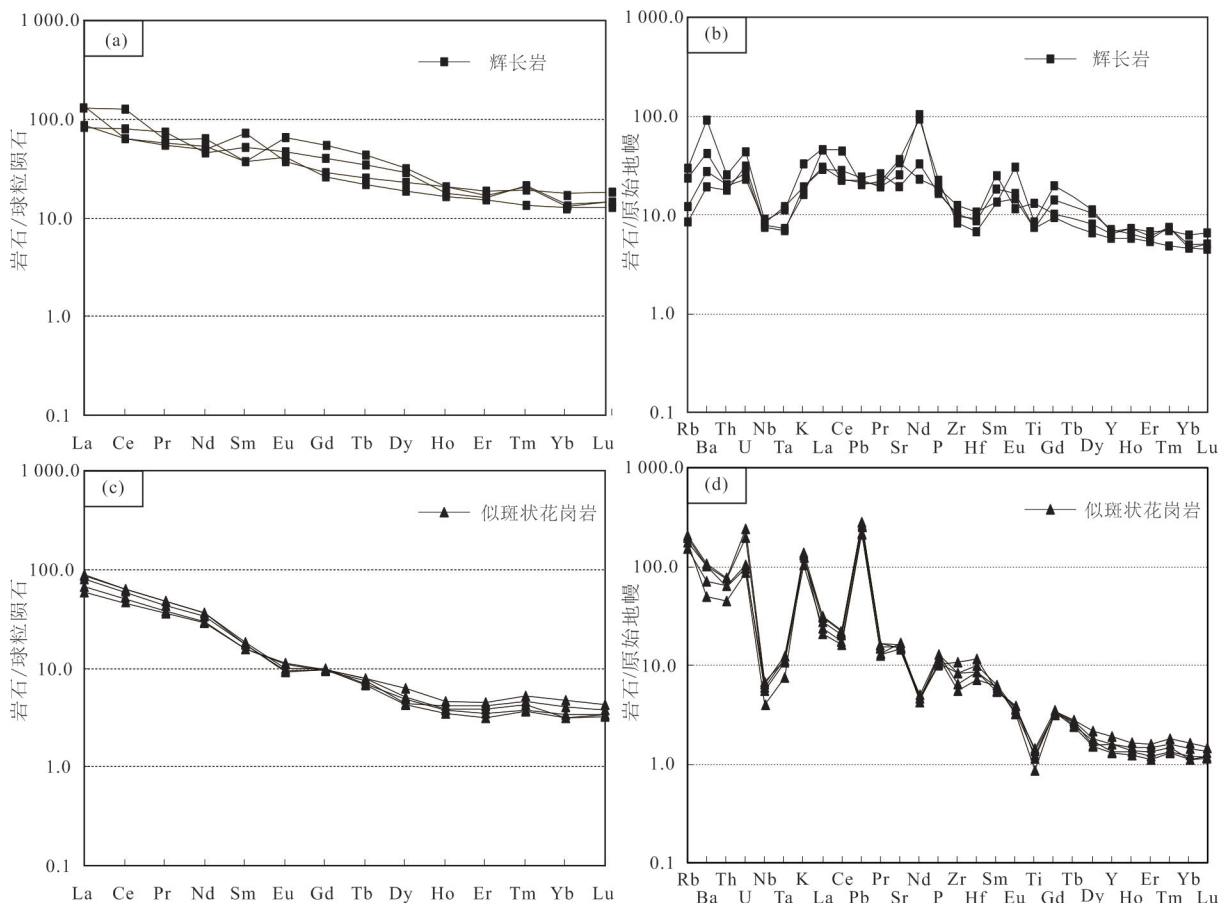


图6 百灵山西辉长岩、似斑状花岗岩球粒陨石标准化REE模式图和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig.6 Chondrite-normalized REE and primitive-mantle-normalized trace element diagrams for the Bailingshanxi gabbro and porphyritic granite

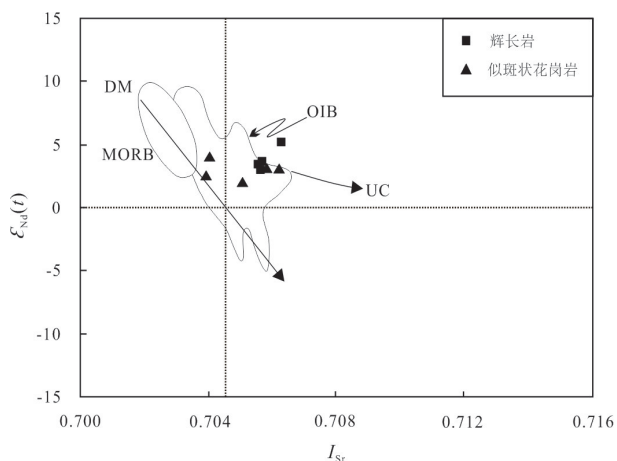


图7 百灵山西辉长岩、似斑状花岗岩  $I_{Sr}$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ 图解

Fig. 7  $I_{Sr}$ - $\epsilon_{Nd}(t)$  diagrams for the Bailingshanxi

DM. 亏损地幔; MORB. 洋中脊玄武岩; OIB. 大洋岛弧玄武岩; UC. 上地壳; OIB、MORB区域来自于 Wang *et al.*, (2018a)

时,  $Mg^\#$  会升高, 因此,  $Mg^\#$  值大于 40 被认为是指示幔源物质加入的一个标志 (Richards and Kerrich, 2007). 似斑状花岗岩样品具有较高的  $Mg^\#$  值 (39~

41), 指示源区有幔源物质的加入. 而较高的 Ti/Y 比值 (154.40~306.18), 同样暗示了幔源物质的加入. 与百灵山西辉长岩相似, 这些幔源物质同样受到了俯冲物质交代, 保留了岛弧岩浆的特征, 从而使得百灵山西似斑状花岗岩具有岛弧岩浆特征的 Sr-Nd 同位素组成, 并在 Th/Yb-Nb/Yb 图解中, 样品落入俯冲带富集区 (图 8a). 在稀土配分图解中, 似斑状花岗岩具有弱的 Eu 负异常, 表明岩浆演化过程中经历了斜长石的结晶分异过程. 而岩浆中缺少捕获锆石, 且具有正的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值、较低的  $I_{Sr}$  值, 表明岩浆在上升过程中并没有明显受到上地壳的混染.

综上所述, 百灵山西辉长岩来自于受俯冲流体交代的地幔楔的部分熔融而形成; 而似斑状花岗岩主要来自于下地壳的部分熔融, 并有地幔楔部分熔融岩浆的加入.

#### 4.2 早中生代大地构造背景

在整个古生代, 东天山地区经历了康古尔洋的俯冲、碰撞及碰撞后伸展过程. 其中, 大南湖—头苏泉岛弧带与阿齐山—雅满苏带的碰撞, 可能发生在



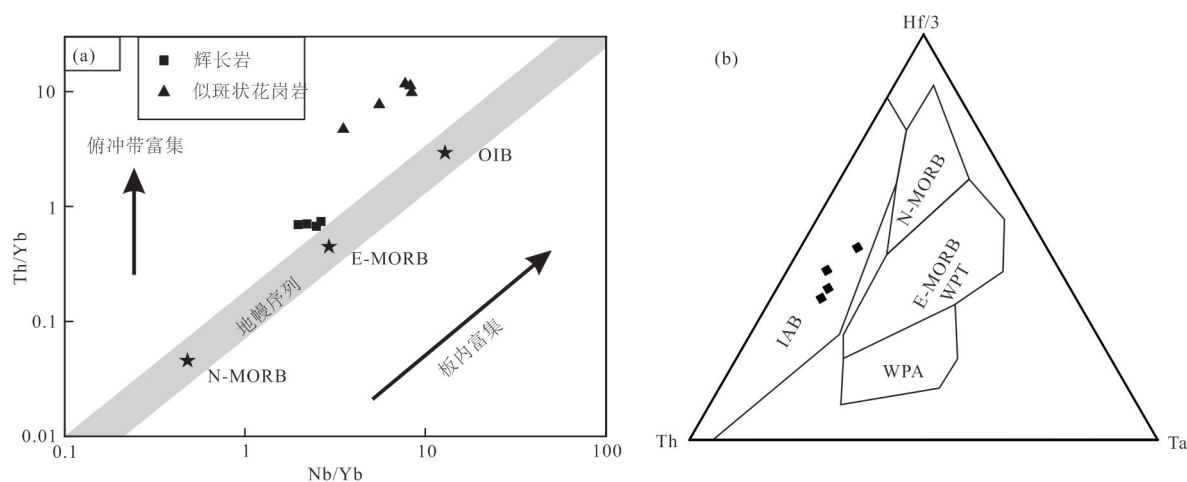


图8 (a)百灵山西辉长岩及似斑状花岗岩的Zr/Nb-Zr及(b)百灵山西辉长岩的Hf-3×Ta-Rb/30图解

Fig. 8 (a) Zr/Nb vs. Zr diagram for Bailingshanxi gabbro and porphyritic granite and (b) Hf-3×Ta-Rb/30 diagram for Bailingshanxi gabbro

IAB. 岛弧玄武岩; WPA. 板内拉斑玄武岩; WPT. 碱性板内玄武岩; N-MORB. 正常型洋中脊玄武岩; E-MORB. 富集型洋中脊玄武岩; OIB. 大洋岛弧玄武岩

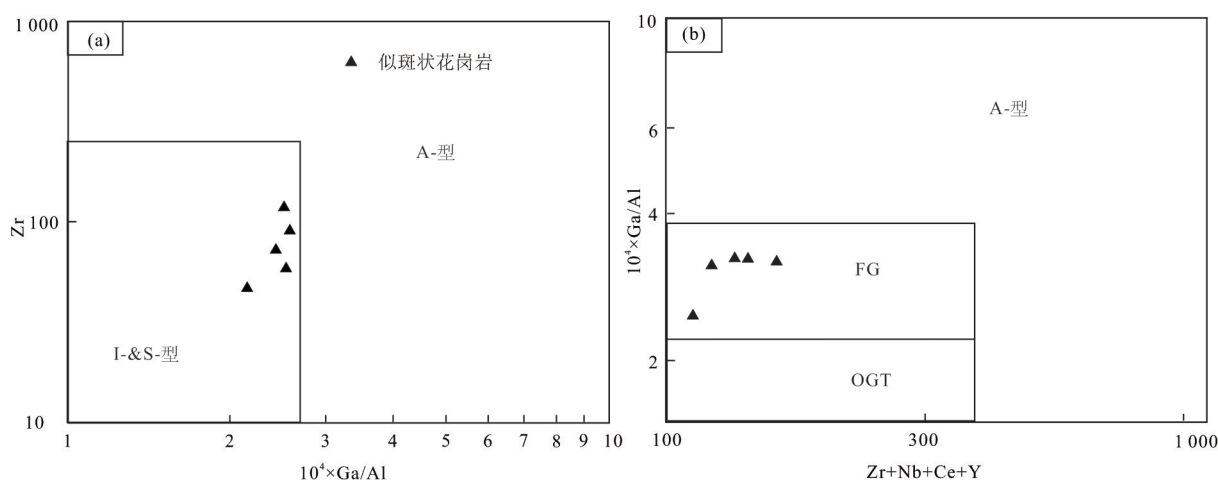


图9 白山似斑状花岗岩Zr-10 000×Ga/Al及10 000×Ga/(Al-Zr+Nb+Ce+Y)相关图解

Fig. 9 Zr vs. 10 000×Ga/Al and 10 000×Ga/(Al-Zr+Nb+Ce+Y) diagrams for Baishan porphyritic granite

FG. 分异的I,S型花岗岩; OGT. 未分异I,S型花岗岩; Zr与Zr+Nb+Ce+Y数量级为 $10^{-6}$

~300 Ma,这是因为:(1)东天山地区已发现的最年轻的红石山蛇绿岩年龄为~310 Ma(Zhang *et al.*, 2005, 2008);(2)在~300 Ma的时候,东天山地区形成了多个造山型Au矿,学者们认为其形成于同碰撞阶段(Xiao *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2010);(3)学者们在博格达地区发现了双峰式岩浆岩,其形成于~295 Ma(陈希杰和舒良树, 2010). 在此之后,东天山地区进入了碰撞后伸展阶段,产出了大量的Cu-Ni硫化物矿床,如黄山、黄山东、土墩、图拉尔根等,其年龄主要集中在290~270 Ma(Han *et al.*, 2010; Qin *et al.*, 2011),主要形成于碰撞后伸展环境(Qin

*et al.*, 2011). 赤龙峰—黑尖山正长岩、双岔沟花岗闪长岩等均形成于252 Ma左右,产于后碰撞伸展环境下(周涛发等, 2010; Zhao *et al.*, 2019). 而产于250 Ma以后的岩体,如东戈壁似斑状花岗岩( $236.0 \pm 2.2$  Ma; Wu *et al.*, 2017)、小白石头黑云母花岗岩(242~240 Ma; Deng *et al.*, 2017)等,具有板内岩浆岩的特征(Deng *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017). 这表明东天山地区碰撞后伸展阶段可能结束于250~240 Ma,在此之后东天山地区进入板内阶段(图10).

百灵山西辉长岩形成于( $236.2 \pm 2.8$ ) Ma

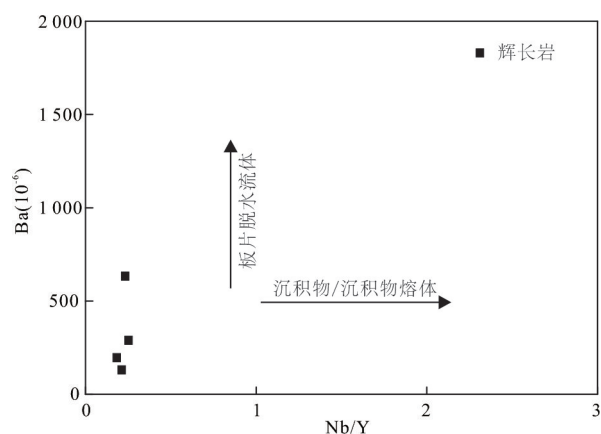


图 10 百灵山西辉长岩 Ba-Nb/Y 相关图解

Fig. 10 Ba vs. Nb/Y diagram for Bailingshanxi gabbro

(MSWD=0.37), 明显晚于 250~240 Ma, 暗示其形成于板内环境。在 Hf/3-Th-Ta 图解中, 虽然辉长岩样品落入岛弧玄武岩区域 (图 8b), 但前人研究已经表明, 在碰撞造山过程结束后, 由被交代地幔楔部分熔融所形成的岩浆岩同样具有岛弧玄武岩特征 (Wang *et al.*, 2018a)。因此, 百灵山西辉长岩具有岛弧岩浆特征可能是源区被俯冲物质交代的结果。百灵山西似斑状花岗岩形成于  $227.6 \pm 2.1$  Ma (MSWD=1.3), 具有明显的高钾钙碱性特征; 而研究表明, 碰撞后伸展环境下形成的高钾钙碱性花岗岩, 通常产于大洋闭合后 30~50 Ma 内 (Li *et al.*, 2018), 这从侧面表明了百灵山西似斑状花岗岩与碰撞后伸展环境无关, 而是形成于陆内环境。

早古生代时期, 东天山地区及周边区域并不存在大型洋-陆相互作用, 而该时期的岩浆作用却广泛分布于东天山地区、羌塘地区 (高曦等, 2019)、西昆仑地区 (乔耿彪等, 2015) 及塔里木南缘 (郭坤一等, 2003)。而羌塘南部古特提斯洋早古生代的俯冲作用, 则可能是形成东天山地区-羌塘地区早中生代构造-岩浆-成矿作用的驱动力。因此, 可以认为百灵山西辉长岩、似斑状花岗岩均是受古特提斯洋俯冲的远程作用的影响, 由受俯冲流体交代的地幔楔、下地壳发生部分熔融形成; 其中, 辉长岩是由地幔楔部分熔融所形成的岩浆直接侵入上地壳所形成, 而似斑状花岗岩则由地幔楔部分熔融所形成的基性岩浆与下地壳部分熔融所形成的酸性岩浆混合而形成。

## 5 结论

(1) 百灵山西辉长岩形成于  $236.2 \pm 2.8$  Ma, 是

由受俯冲板片脱水流体交代的地幔楔地幔部分熔融而形成; 而百灵山西似斑状花岗岩形成于  $227.6 \pm 2.1$  Ma, 是由受俯冲物质交代的下地壳的部分熔融而形成, 在此过程中有地幔物质的加入。

(2) 在 250~240 Ma 时, 东天山地区碰撞后伸展阶段已结束, 此后东天山地区处于板内环境, 百灵山西辉长岩及似斑状花岗岩均在此背景形成。

致谢: 本次研究在野外取样期间得到了新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队的帮助; 样品测试期间得到了中国地质大学 (武汉) 胡兆初教授、中科院广州地球化学研究所张兆峰研究员的帮助; 审稿专家也给论文提出了宝贵的意见; 在此一并表示衷心感谢!

附表见本刊官网: [www.earth-science.net](http://www.earth-science.net)。

## References

- Allen, M. B., Windley, B. F., Zhang, C., 1993. Palaeozoic Collisional Tectonics and Magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia. *Tectonophysics*, 220(1/2/3/4): 89–115. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90225-9)
- 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>
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Chen, S.B., Huang, B.Q., Li, C., et al., 2018. Alteration and Mineralization Ages of the Yuhai Cu Deposit in Eastern Tianshan, Xinjiang and the Application of Short Wavelength Infra-Red (SWIR) in Exploration. *Earth Science*, 43(9): 2911–2928 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X.J., Shu, L.S., 2010. Features of the Post-Collisional Tectono-Magmatism and Geochronological Evidence in the Karlik Mt., Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3057–3064 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Pirajno, F., Wu, G., et al., 2012. Epithermal Deposits in North Xinjiang, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 889–917. <https://doi.org/10.1007/s00531-011-0689-4>
- Deng, X. H., Chen, Y. J., Santosh, M., et al., 2017. U-Pb Zircon, Re-Os Molybdenite Geochronology and Rb-Sr Geochemistry from the Xiaobaishitou W (-Mo) Deposit: Implications for Triassic Tectonic Setting in Eastern Tianshan, NW China. *Ore Geology Reviews*, 80(3): 332–

351. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.013>
- Guo, K.Y., Zhang, C.L., Zhao, Y., et al., 2003. Ar-Ar Dating of Lamproite along South Margin of the Tarim Platform and Its Geologic Significance. *Chinese Journal of Geology*, 38(4): 532—534 (in Chinese with English abstract).
- Gao, X., Li, J.C., Yuan, G.L., et al., 2019. Middle-Late Triassic Magmatic Records for the Accretionary Processes of South Qiangtang Accretionary Terrane: The Mafic Dykes in Mayigangri - Jiaomuri Area, North Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 35(3): 760—774 (in Chinese with English abstract).
- Han, C.M., Xiao, W.J., Zhao, G.C., et al., 2010. In-Situ U-Pb, Hf and Re-Os Isotopic Analyses of the Xiangshan Ni-Cu-Co Deposit in Eastern Tianshan (Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: Constraints on the Timing and Genesis of the Mineralization. *Lithos*, 120(3/4): 547—562. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.019>
- Hofmann, A.W., 1997. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism. *Nature*, 385(6613): 219—229. <https://doi.org/10.1038/385219a0>
- Huang, B.Q., Chen, S.B., Li, C., et al., 2018. Geochemical Features and Geological Significance of Yuhaxi Plutons in Eastern Tianshan, Xinjiang. *Earth Science*, 43(9): 37—59 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X.W., Qi, L., Gao, J.F., et al., 2013. First Reliable Re-Os Ages of Pyrite and Stable Isotope Compositions of Fe(-Cu) Deposits in the Hami Region, Eastern Tianshan Orogenic Belt, NW China. *Resource Geology*, 63(2): 166—187. <https://doi.org/10.1111/rge.12003>
- Lassiter, J.C., DePaolo, D.J., 1997. Plumes/Lithosphere Interaction in the Generation of Continental and Oceanic Flood Basalts: Chemical and Isotope Constraints. *American Geophysical Union*, 100: 335—355. <https://doi.org/10.1029/GM100p0335>.
- Li, S., Wang, T., Wilde, S.A., et al., 2012. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Implications of Triassic Granitoids from Beishan, NW China. *Lithos*, 134—135: 123—145. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.12.005>
- Li, S., Wilde, S.A., Wang, T., 2018. Early Permian Post-Collisional High - K Granitoids from Liuyuan Area in Southern Beishan Orogen, NW China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Lithos*, 179(Parts 1—2): 99—119. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.08.002>
- Liu, B., Wang, X.Q., 2016. SIMS U-Pb Dating and Hf Isotope of Zircons from the Deep Granite Porphyry in Baishan Mo Deposit, Eastern Tianshan, Northwest China, and Their Geological Significance. *Earth Science Frontiers*, 23: 291—300 (in Chinese with English abstract).
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3/4): 223—253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Plank, T., Langmuir, C.H., 1998. The Chemical Composition of Subducting Sediment and Its Consequences for the Crust and Mantle. *Chemical Geology*, 145(3/4): 325—394. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2)
- Qin, K.Z., Su, B.X., Sakyi, P.A., et al., 2011. SIMS Zircon U-Pb Geochronology and Sr-Nd Isotopes of Ni-Cu-Bearing Mafic - Ultramafic Intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in Correlation with Flood Basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a Ca. 280 Ma Mantle Plume. *American Journal of Science*, 311(3): 237—260. <https://doi.org/10.2475/03.2011.03>
- Qiao, G.B., Zhang, H.D., Wu, Y.Z., et al., 2015. Petrogenesis of the Dahongliutan Monzogranite in Western Kunlun: Constraints from SHRIMP zircon U - Pb Geochronology and Geochemical Characteristics. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1180—1194 (in Chinese with English abstract).
- Richards, J.P., Kerrich, R., 2007. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogensis. *Economic Geology*, 102(4): 537—576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Tu, Q.J., Wang, Y.S., Dong, L.H., 2014. Re-Os Dating of Molybdenite from the Baishan Molybdenum Deposit in the Eastern Tianshan Area of Xinjiang and Its Geological Significance. *Xinjiang Geology*, 32: 322—327 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, United States, 1—328.
- Wang, J.B., Wang, Y.W., He, Z.J., 2006. Ore Deposits as a Guide to the Tectonic Evolution in the East Tianshan Mountains, NW China. *Chinese Geology*, 33: 461—469 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.F., Chen, H.Y., Han, J.S., et al., 2018a. Paleozoic Tectonic Evolution of the Dananhu-Tousuquan Island Arc Belt, Eastern Tianshan: Constraints from the Magmatism of the Yuhai Porphyry Cu Deposit, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153(1): 282—306. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.05.022>
- Wang, Y.F., Chen, H.Y., Xiao, B., et al., 2018b. Overprinting Mineralization in the Paleozoic Yandong Porphyry Copper Deposit, Eastern Tianshan, NW China: Evidence from Geology, Fluid Inclusions and Geochronology. *Ore Geology Reviews*, 100(5): 148—167. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.013>



- Wang, Y. F., Chen, H. Y., Baker, M. J., et al., 2019. Multiple Mineralization Events of the Paleozoic Tuwu Porphyry Copper Deposit, Eastern Tianshan: Evidence from Geology, Fluid Inclusions, Sulfur Isotopes, and Geochronology. *Mineralium Deposita*, 54(7): 1053–1076. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0859-4>
- Wang, Y. H., Xue, C. J., Liu, J. J., et al., 2016. Geological, Geochronological, Geochemical, and Sr-Nd-O-Hf Isotopic Constraints on Origins of Intrusions Associated with the Baishan Porphyry Mo Deposit in Eastern Tianshan, NW China. *Mineralium Deposita*, 51(7): 953–969. <https://doi.org/10.1007/s00126-016-0646-z>
- Wedepohl, K.H., 1995. The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Wu, Y. S., Zhou, K. F., Li, N., et al., 2017. Zircon U-Pb Dating and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes of the Ore-Associated Porphyry at the Giant Donggebi Mo Deposit, Eastern Tianshan, NW China. *Ore Geology Reviews*, 81(3): 794–807. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.007>
- Xiao, W. J., Zhang, L.C., Qin, K.Z., et al., 2004. Paleozoic Accretionary and Collisional Tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the Continental Growth of Central Asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370–395. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.4.370>
- Zhang, L. C., Qin, K. Z., Xiao, W. J., 2008. Multiple Mineralization Events in the Eastern Tianshan District, NW China: Isotopic Geochronology and Geological Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2/3/4): 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.10.011>
- Zhang, W. F., Chen, H. Y., Han, J. S., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of Igneous Rocks in the Bailingshan Area: Implications for the Tectonic Setting of Late Paleozoic Magmatism and Iron Skarn Mineralization in the Eastern Tianshan, NW China. *Gondwana Research*, 38: 40–59. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.011>
- Zhang, Z. Z., Gu, L. X., Wu, C. Z., et al., 2005. Zircon SHRIMP Dating for the Weiya Pluton, Eastern Tianshan: Its Geological Implications. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 79(4): 481–490. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2005.tb00914.x>
- Zhao, L. D., Chen, H. Y., Hollings, P., et al., 2019. Late Paleozoic Magmatism and Metallogenesis in the Aqishan-Yamansu Belt, Eastern Tianshan: Constraints from the Bailingshan Intrusive Complex. *Gondwana Research*, 65: 68–85. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.08.004>
- Zhou, L. G., Xia, Q. X., Zheng, Y. F., et al., 2014. Polyphase Growth of Garnet in Eclogite from the Hong'an Orogen: Constraints from Garnet Zoning and Phase Equilibrium. *Lithos*, 206–207: 79–99. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.06.020>
- Zhou, T.F., Yuan, F., Zhang, D.Y., et al., 2010. Geochronology, Tectonic Setting and Mineralization of Granitoids in Jueluotage Area, Eastern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 478–502 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Liu, Y. S., Gao, C. G., et al., 2010. In Situ U-Pb Dating and Trace Element Analysis of Zircons in Thin Sections of Eclogite: Refining Constraints on the Ultra High-Pressure Metamorphism of the Sulu Terrane, China. *Chemical Geology*, 269(3/4): 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.021>

#### 附中文参考文献

- 陈寿波, 黄宝强, 李琛, 等, 2018. 新疆东天山玉海铜矿蚀变、矿化年龄的厘定及 SWIR 勘查应用研究. *地球科学*, 43(9): 2911–2928.
- 陈希杰, 舒良树, 2010. 新疆哈尔里克山后碰撞期构造岩浆活动特征及年代学证据. *岩石学报*, 26(10): 3057–3064.
- 郭坤一, 张传林, 赵宇, 等, 2003. 塔里木南缘煌斑岩的时代及其地质意义. *地质科学*, 38(4): 532–534.
- 高曦, 李静超, 袁国礼, 等, 2019. 南羌塘增生过程中的中—晚三叠世岩浆记录: 藏北玛依岗日—角木日地区基性岩墙. *岩石学报*, 35(3): 760–774.
- 黄宝强, 陈寿波, 李琛, 等, 2018. 新疆东天山玉海西岩体地球化学特征及其地质意义. *地球科学*, 43(9): 37–59.
- 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 等, 2015. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约. *地质学报*, 89(7): 1180–1194.
- 涂其军, 王杨双, 董连慧, 2014. 新疆东天山白山钨矿辉钼矿 Re-Os 测年及地质意义. *新疆地质*, 32: 322–327.
- 王京彬, 王玉往, 何志军, 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪. *中国地质*, 33: 461–469.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 等, 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究. *岩石学报*, 26(2): 478–502.