

· 专题研究 ·

塔里木盆地北缘二叠纪巴立克立克组凝灰岩 年代学、地球化学及构造意义

闵 壮¹, 陈正乐^{1,2}, 潘家永¹, 霍海龙², 韩凤彬², 张文高², 吴 玉³

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘 要: 塔里木盆地北缘广泛分布的二叠纪火山岩, 对于理解天山造山带晚古生代构造演化具有重要研究意义。本文以哈拉峻地区巴立克立克组凝灰岩为研究对象, 开展了地球化学、年代学和 Lu-Hf 同位素研究, 结果显示凝灰岩富硅 ($\text{SiO}_2 = 74.59\% \sim 76.18\%$)、富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.48\% \sim 7.79\%$)、低铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.80\% \sim 14.29\%$), 属于钾玄质过铝质流纹岩类; 具轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损的特征, 具 Eu 弱正异常, 相对富集 Rb、Th 等大离子亲石元素 (LILE), 亏损 P、Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSE), Nb/Ta 值平均为 16.60, Sr/Y 值平均为 2.42, $\text{Mg}^\#$ 值平均为 34.71; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果显示巴立克立克组凝灰岩的结晶年龄为 $280.47 \pm 2.58 \text{ Ma}$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.73 \sim 2.12$, 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 $1318 \sim 1145 \text{ Ma}$ 。结合塔里木盆地北缘早二叠世的构造演化、岩浆活动及沉积分布等信息, 指出巴立克立克组沉积于南天山洋壳向塔里木板块俯冲的板内裂谷盆地中, 具非造山板内岩浆岩特征, 可能为地幔柱作用背景下, 岩石圈地幔底侵导致地壳物质部分熔融的产物, 继承了壳源和幔源的双重源区特征。

关键词: 塔里木盆地北缘; 凝灰岩; 年代学; 地球化学; 构造环境

中图分类号: P597; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)05-0613-16

Geochronology, geochemistry and tectonic significance of the Permian Baliklike Formation tuff in the northern margin of Tarim Basin

MIN Zhuang¹, CHEN Zheng-le^{1,2}, PAN Jia-yong¹, HUO Hai-long², HAN Feng-bin², ZHANG Wen-gao² and
WU Yu³

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: The Permian volcanic rocks widely distributed in the northern margin of the Tarim Basin are of great significance for understanding the late Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan orogenic belt. The research object of this paper is the tuff of the Baliklike Formation in Halajun area, the geochemical, chronological and Lu-Hf isotope studies have been carried out, which show the tuff is rich in silicon ($\text{SiO}_2 = 74.59\% \sim 76.18\%$), high alkali ($7.48\% \sim 7.79\%$), low aluminum ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.80\% \sim 14.29\%$), belonging to calc-alkaline peraluminous rhyolites;

收稿日期: 2022-09-25; 接受日期: 2023-05-23; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172258); 中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目 (NRE2021-01); 中国地质调查局地质调查项目二级项目 (DD20221660-3); 江西省研究生创新专项基金项目 (YC2022-B178)

作者简介: 闵 壮 (1995-), 男, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, E-mail: MinZ@ecut.edu.cn; 通讯作者: 陈正乐 (1967-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 构造地质与矿田构造方向, E-mail: Chenzhengle@263.net。

网络首发时间: 2023-08-10; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20230810.1256.002.html>

enriched in LREE, relatively depleted in HREE, with weakly positive Eu, relatively enriched in large ionic lithophile elements (LILE) such as Rb and Th, and depleted in high field strength elements (HFSE) such as P, Nb, Ta, Ti, the average Nb/Ta ratio is 16.60, the average Sr/Y ratio is 2.42, and the average $Mg^\#$ value is 34.71. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology shows that the crystallization age of the Balikelike Formation tuff is 280.47 ± 2.58 Ma, the $\varepsilon_{Hf}(t)$ value is from -0.73 to 2.12, and the second-stage model age (t_{DM2}) is $1\,318 \sim 1\,145$ Ma. Combined with the early Permian tectonic evolution, magmatic rocks and sedimentary distribution characteristics of the northern margin of Tarim, it is pointed out that the Balikelike Formation was deposited in the intraplate rift basin where the oceanic crust of the South Tianshan subducted to Tarim Basin, with non-orogenic intraplate magma, which is the partial melting of ancient crustal materials under the action of lithospheric mantle and mantle plume, inheriting the dual-source characteristics of crustal and mantle sources.

Key words: northern margin of Tarim Basin; tuff; chronology; geochemistry; tectonic environment

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42172258); Joint Innovation Fund Project of China Uranium Industry Corporation Limited and State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment of East China University of Technology (NRE2021-01); The Second-level Project of Geological Survey Project of China Geological Survey (DD20221660-3); Jiangxi Provincial Graduate Innovation Special Fund Project (YC2022-B178)

作为中亚造山带塔里木板块-哈萨克斯坦板块拼贴系的主体(艾永亮等, 2005), 天山造山带呈近东西向贯穿我国新疆中部地区, 是古生代古亚洲洋构造域多岛洋(海)俯冲消减、碰撞拼贴的产物, 也是我国重要的增生造山带之一(Windley *et al.*, 2007; Rojas-Agramonte *et al.*, 2011; 杨栋栋等, 2011)。塔里木盆地北缘与南天山造山带经历了长期且复杂的盆山耦合和构造转换, 包括古生代洋-陆背景下的盆-山耦合过程以及中生代陆内环境下的盆-山耦合过程(汤良杰等, 2012; 高小芬等, 2014)。塔里木盆地早二叠世大火成岩省主要分布基性火山岩和杂岩体, 酸性侵入体、流纹岩和火山碎屑岩等双峰式岩石组合, 与稀有稀土、多金属、油气等区域成矿关系密切(安秀慧等, 2021)。位于南天山造山带和塔里木盆地北缘柯坪前陆盆地中的哈拉峻地区, 是塔里木盆地北缘二叠纪岩浆岩集中产区之一(肖昱等, 2021), 出露二叠纪凝灰岩、基性-超基性杂岩体、碱性花岗岩体及各类脉体(曹俊等, 2013), 相关研究对于揭示塔里木板块北缘与南天山碰撞带的拼合构造演化过程具有重要意义。

前人将塔里木盆地西北部划分为3个地层分区和6个地层小区, 该区在石炭-二叠纪为一个完整的海进至海退旋回, 其中二叠纪先后经历了碳酸盐台地至陆源碎屑沉积体系(丁跃潮, 1995; 德勒达尔, 1996)。前人认为哈拉峻地区的花岗质岩体及岩脉是与镁铁质岩浆演化晚期的中酸性岩浆混入少量地壳物质有关, 而基性杂岩体则由镁铁质岩浆快速上

升和迅速结晶而形成(曹俊等, 2013), 古岩石圈的再循环是南天山碰撞带显生宙大陆演化的主要机制(He *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2014)。但也有学者认为该区花岗质岩体和普昌杂岩体可能来自塔里木地幔柱作用背景下的新元古代辉长岩源区的部分熔融(Huang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2023)。普昌杂岩体中的斜长石 Ar-Ar 等时线年龄为 267.29 ± 5.62 Ma(周黎霞等, 2010), 矿物学研究表明硅酸盐矿物的结晶导致残余岩浆在晚期阶段形成了不混熔富 Fe-Ti 的熔体并不断富集(邢长明等, 2013)。除此之外, 塔里木盆地广泛分布巨厚的二叠纪火山岩, 有学者在柯坪地层发现8层玄武岩并认为其代表8个独立喷发期(Yu *et al.*, 2011), 前人针对其形成机制主要有两种观点: 一种认为火山岩的形成与塔里木大火成岩省有关(代友旭等, 2017; Cheng *et al.*, 2020), 同期大面积的岩浆岩最可能是地幔柱活动的产物(Zhang *et al.*, 2012a, 2012b); 另一种认为火山岩的形成并未受二叠纪塔里木地幔柱活动的影响(Huang *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2017), 而与区域尺度的后碰撞扩张有关。前人针对该区玄武岩和流纹岩已开展了大量研究工作, 但是关于凝灰岩与塔里木大火成岩省的关系尚不清晰, 而且地幔柱和板块碰撞对凝灰岩的影响方式也不明确。所以, 本文从凝灰岩的角度探讨岩浆源区特征和大地构造背景, 进而揭示塔里木地幔柱上升与岩石圈地幔的相互作用。

研究区位于新疆喀什市北东向约 200 km 的哈

拉峻乡北部,巴立克立克组凝灰岩呈 NE 走向分布于该区中部,出露面积大于 10 km²,本文对巴立克立克组新鲜的凝灰岩进行了岩相学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学和锆石 Lu-Hf 同位素分析,在前人工作基础上对凝灰岩的形成时代、岩石成因和构造背景进行约束,从而探讨塔里木盆地北缘晚古生代构造地球动力学背景,进而揭示塔里木地幔柱活动与南天山洋壳—塔里木板块俯冲碰撞的关系,为区域矿产勘查和科学研究提供参考资料。

1 区域地质与岩石学特征

哈拉峻地区位于南天山碰撞带和塔里木盆地北缘结合带(图1a)。南天山碰撞带形成于石炭纪至二叠纪,由塔里木板块和中天山岛弧块拼贴形成(Gao *et al.*, 1998; 姜常义等, 1999; 高俊等, 2009)。塔里木盆地北缘和南天山碰撞带具有共同的前寒武纪基底,其中塔里木盆地北缘偶见太古宙杂岩以及古元古代兴底塔组和中元古代阿克苏组,下-中古生界海相硅质岩、灰岩和复理石主要出露于南天山碰撞带北部和塔里木盆地北缘中部。两个单元普遍发育上古生界灰岩、砂岩、页岩和少量火山岩(图1b)。值得注意的是,南天山碰撞带北部和中部的二叠纪地层以典型的陆相火山岩(如巴立克立克组)为特征,不整合上覆在强烈褶皱的上石炭统海相碳酸盐岩之上(肖昱等, 2021)。侵入岩出露面积约占南天山碰撞带和塔里木盆地北缘总面积的 5%,以碱性花岗岩类为主。

研究区主要出露地层如下:上泥盆统塔塔埃尔塔格组(*S₁t*)主要为下部红色泥岩和上部杂色砂岩;下石炭统巴什索贡组(*C₁b*)下部为中细粒砂岩夹薄层灰岩,上部为微晶灰岩夹少量钙质砂岩;上石炭统康克林组(*C₂kk*)以碳酸盐岩为主,下部有砂岩、砂砾岩等,含蜓类和牙形石等生物化石;上石炭统喀拉治尔加组(*C₂kl*)为钙质砂岩和石英砂岩夹页岩;上石炭统萨斯克布拉克组(*C₂ss*)为页岩、砂岩和灰岩,与下伏喀拉治尔加组呈整合接触关系;下二叠统巴立克立克组(*P₁bl*)为泥岩、粉砂岩,与灰白色凝灰岩等互层产出,含蜓、腕足、瓣鳃及苔藓虫等,与康克林组呈平行不整合接触;中二叠统卡仑达尔组(*P₂kl*)为砂岩、泥页岩夹硅质岩,其次为泥灰岩和凝灰质砂岩等,与巴立克立克组呈整合接触;下白垩统巴西改组

(*K₁b*)上部为红褐色泥岩夹薄层粉砂岩,下部为砂岩和玄武岩等;古近系苏维依组(*E₃s*)为砖红色砾岩夹紫红色泥岩;新近系阿图什组(*N₂a*)为灰绿色中细粒钙质砂岩和泥岩;第四系(*Q*)广泛出露,主要为冲洪积物。

研究区地层和岩体的分布受构造控制明显,区内分布多条 NE-SW 向断裂,这些断裂是塔里木盆地北部缝合带的组成部分,且被认为是南天山造山带和塔里木盆地北缘的边界(图1b)。东侧有一条近南北走向的普昌左旋走滑断裂(周黎霞等, 2010; 曹俊等, 2013; 邢长明等, 2013)。该区岩浆岩体分布在南天山碰撞带和塔里木北缘结合带的柯坪前陆盆地,通常被认为属于板内岩浆岩类,且具有幔源物质混入(黄河, 2013; 曹俊, 2015),岩性有超基性—基性碱性岩类、中酸性碱性岩类及酸性富碱性岩类,有些已经组成复式杂岩体,表现出一套由基性—酸性的岩石组合,部分岩体被晚期侵入的辉绿岩脉穿插(肖昱等, 2021)。花岗质岩体往往不受构造单元的控制,而是分布于整个板块内部,常呈独立岩株或岩脉状分布。

野外调查资料显示,喀尔果能恰特附近出露的地层倾向为北西,野外可见灰白色凝灰岩与红色砾岩,二者呈断层接触关系(图2a),断层北西侧主要为古近系苏维依组(*E₃s*)紫红色泥岩和砾岩(图2b、2c)和中二叠统卡仑达尔组硅质岩(*P₂kl*),南东侧主要为白垩纪粗面玄武岩。构造剖面图显示出二叠纪地层覆盖在中新生代地层之上,其中巴立克立克组(*P₁bl*)推覆体经过风化蚀残留而构成“飞来峰”现象(图2g),地表可见凝灰岩发生褐铁矿化(图2d)。凝灰岩手标本呈致密块状(图2e),具凝灰结构,假流纹构造,主要由火山尘组成,可见细小的石英和长石晶屑(图2f),副矿物见锆石和铁钛金属矿物等,岩石整体较为新鲜。

2 样品采集与分析方法

本文系统采集了巴立克立克组凝灰岩样品 9 件(YK19224),在河北廊坊地科勘探技术服务有限公司完成岩矿制片、无污染碎样及单矿物分选工作;在北京铂年领航科技有限公司完成锆石制靶、透反射拍照以及阴极发光图像(CL)采集工作。岩石地球化学分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心

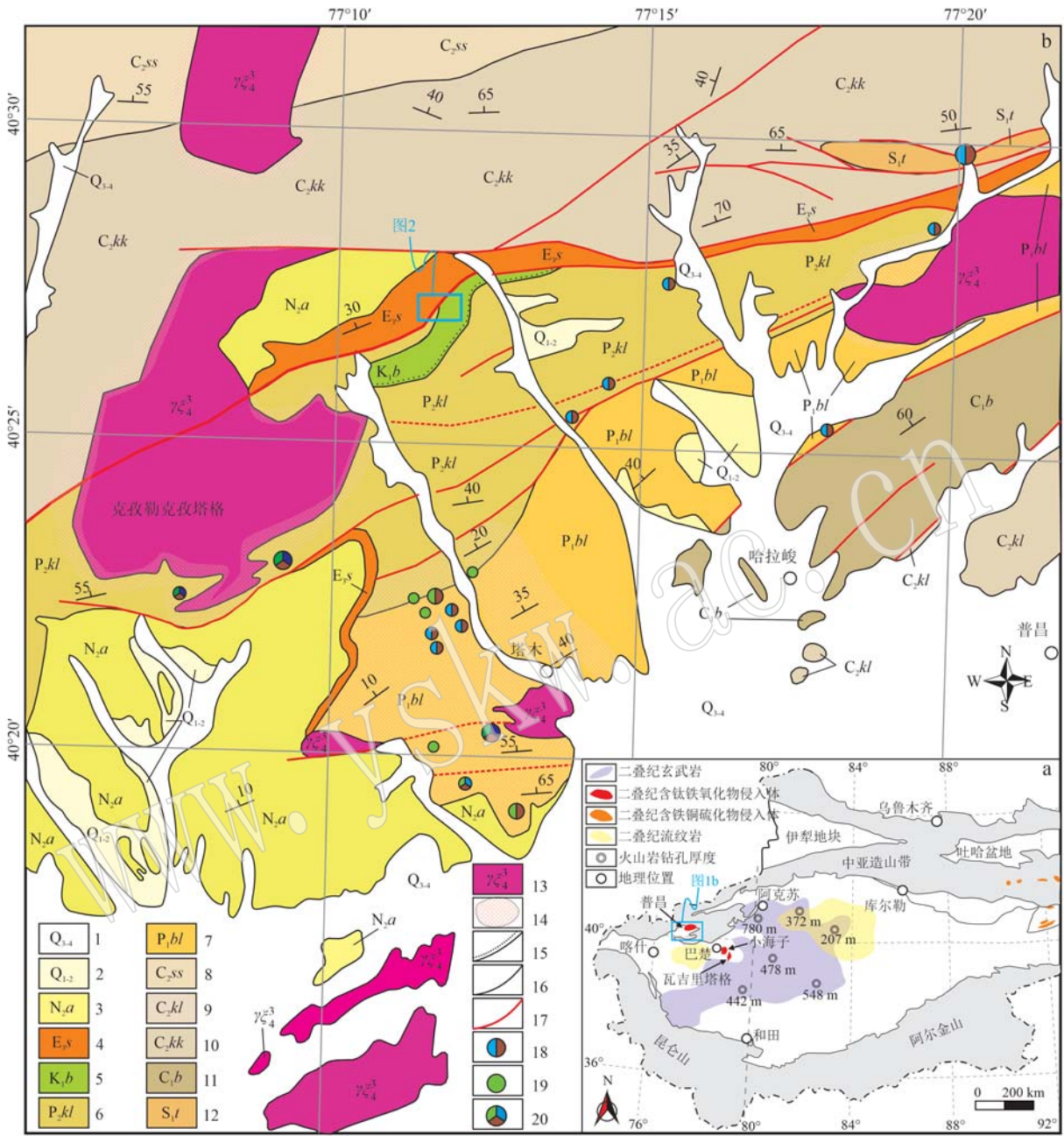


图1 塔里木大火成岩省地质简图[a, 据 Huang 等(2012)修改]和哈拉峻地区地质构造矿产图[b, 据 Cao 等(2019)修改]

Fig. 1 Geological sketch map of Tarim Large Igneous Province(a, modified from Huang *et al.*, 2012) and geological structure mineral map of Halajun area (b, modified from Cao *et al.*, 2019)

1—上更新统-全新统; 2—下更新统-中更新统; 3—上新统阿图什组; 4—渐新统苏维依组; 5—下白垩统巴西改组; 6—中二叠统卡伦达尔组; 7—下二叠统巴拉克立克组; 8—上石炭统萨斯克布拉克组; 9—上石炭统喀拉治尔加组; 10—上石炭统康克林组; 11—下石炭统巴什索贡组; 12—下志留统塔塔艾塔格组; 13—碱性花岗岩; 14—矽卡岩化; 15—不整合接触; 16—地质界限; 17—断层; 18—铅锌矿; 19—铜矿; 20—多金属矿

1—Upper Pleistocene-Holocene; 2—Lower Pleistocene-Middle Pleistocene; 3—Pliocene Atushi Formation; 4—Oligocene Suweiyi Formation; 5—Lower Cretaceous Baxigai Formation; 6—Middle Permian Kalundaer Formation; 7—Lower Permian Balikelike Formation; 8—Upper Carboniferous Sasikebulake Formation; 9—Upper Carboniferous Kalazhierjia Formation; 10—Upper Carboniferous Kangkelin Formation; 11—Lower Carboniferous Bashisuogong Formation; 12—Lower Silurian Tataaiertage Formation; 13—alkaline granite; 14—skarnization; 15—unconformity contact; 16—geological boundary; 17—fault; 18—lead-zinc deposit; 19—copper deposit; 20—polymetallic deposit

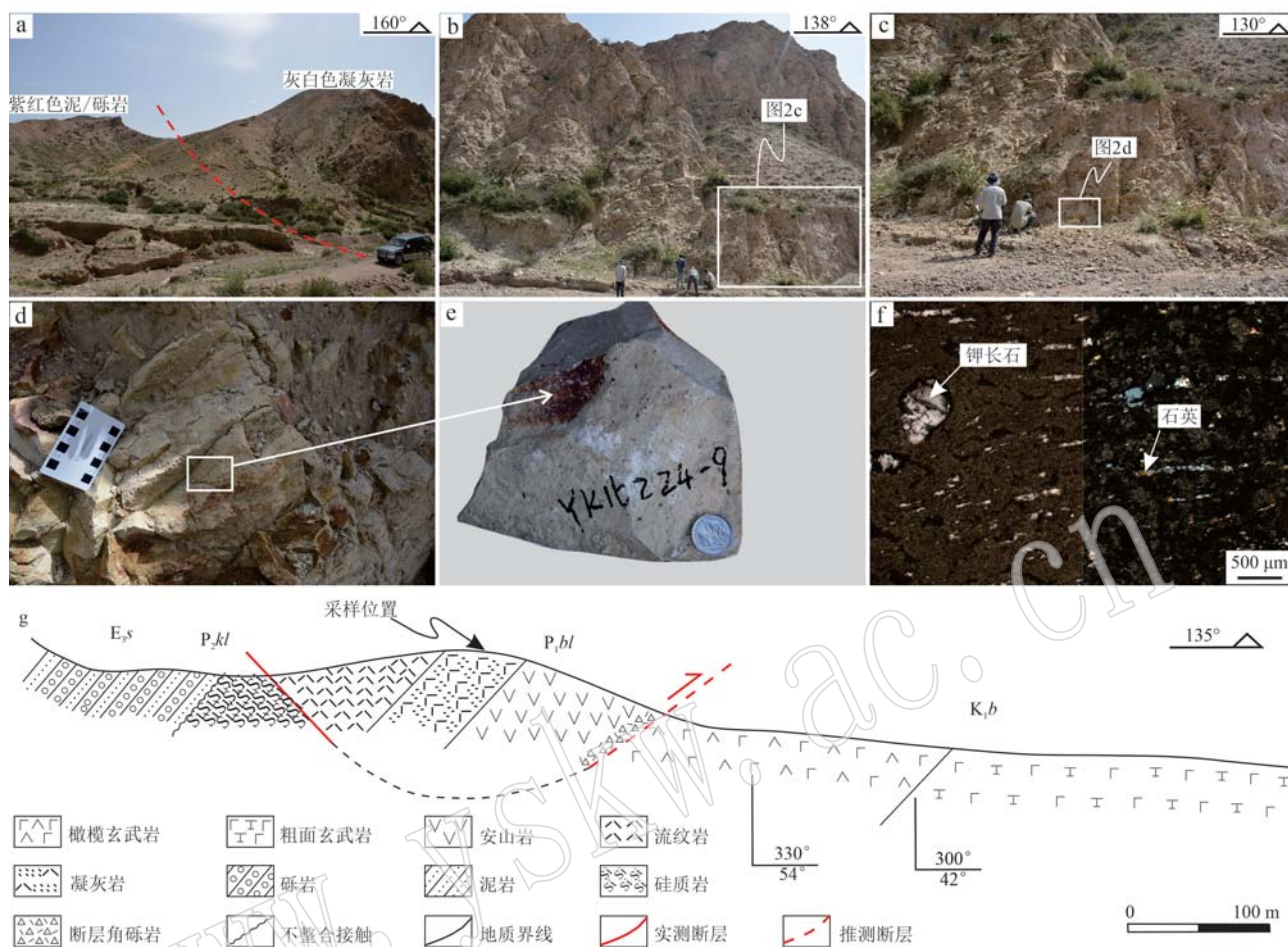


图2 巴立克立克组野外露头及岩相学特征

Fig. 2 Field outcrops and petrographic characteristics of the Balikelike Formation

a—断层接触宏观照片; b—地表露头; c—巴立克立克组火山岩; d—灰白色凝灰岩及采样点; e—手标本照片; f—假流纹构造;
g—地质剖面素描图

a—macro photos of fault contact; b—surface outcrop; c—volcanic rocks of the Balikelike Formation; d—ash-white tuff and sampling points;
e—photos of hand specimens; f—false flow texture; g—sketch map of geological section

完成,其中主量元素分析利用波长色散型X射线荧光光谱仪(PW4400),采用玻璃熔片法进行测定,FeO含量使用湿化学法测定,微量元素采用等离子体质谱仪(PE300D)进行测定,并用等离子光谱和化学法测定进行相互检测,精度优于5%,具体分析方法和数据处理请参考代友旭等(2017)。

锆石 U-Pb 年代学在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。激光剥蚀系统(Coherent GeolasPro 193 nm)束斑直径为 32 μm,能量密度为 8.0 J/cm²。电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700x)采用氦气作为载气。采用标准锆石 91500(Cao *et al.*, 2019)作为外标样进行基体校正,以标准锆石 GJ-1(Jackson *et al.*, 2004)与 Plesovice

(Sláma *et al.*, 2008)作为盲样,以 NIST SRM 610 作为外标,以 Si 为内标样标定锆石中 Pb 元素含量,以 Zr 为内标样标定锆石的微量元素(Liu *et al.*, 2009)。数据处理使用 ICPMSDataCal 12.2 软件完成(Liu *et al.*, 2010),U-Pb 谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算使用 IsoplotR 在线软件(Vermeesch *et al.*, 2018),具体分析方法和数据处理见侯可军等(2009)。

锆石 Hf 同位素在南京聚谱检测科技有限公司完成。激光剥蚀系统(Analyte Excite 193nm)束斑直径为 50 μm,能量密度为 6.0 J/cm²,频率为 8 Hz。电感耦合等离子体质谱仪(Nu Plasma II)采用氦气作为载气。根据 CL 图像和 U-Pb 年龄圈定 Hf 同位

素的测试点,每取 10 次样品锆石数据,交替测试 2 颗标准锆石(包括 GJ-1、91500、Plešovice、Mud Tank、Penglai),以检验锆石 Hf 同位素比值数据质量。 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867\times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ (Sderlund, 2004),球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282 772 和 0.033 2 (Blichert *et al.*, 1998);Hf 同位素单阶段模式年龄(t_{DM})的计算采用现今的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.283 25 和 0.038 4 (Griffin *et al.*, 2000),二阶段

模式年龄(t_{DM2})采用的平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.015,具体分析方法和数据处理可参见徐平等(2004)。

3 分析测试结果

3.1 主量元素特征

巴立克立克组凝灰岩手标本相对新鲜,岩石主量元素含量分析结果见表 1。其中烧失量(LOI)为 1.70%~1.98%,平均为 1.84%; SiO_2 含量为 74.59%~

表 1 哈拉峻地区巴立克立克组凝灰岩的主量元素分析结果

$w_B/\%$

Table 1 The analysis results of major elements of the tuffs from the Balikelike Formation in Halajun area

样品原号	YK224-1	YK224-2	YK224-3	YK224-4	YK224-5	YK224-6	YK224-7	YK224-8	YK224-9
SiO_2	75.66	75.26	74.59	75.20	75.34	74.83	75.44	75.43	76.18
TiO_2	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.19
Al_2O_3	14.10	13.84	14.14	14.24	13.95	14.29	14.03	13.80	13.87
Fe_2O_3	0.10	0.06	0.29	0.25	0.24	0.03	0.14	0.05	0.05
FeO	0.43	0.40	0.25	0.32	0.25	0.43	0.32	0.32	0.34
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.16	0.13	0.15	0.16	0.13	0.12	0.17	0.12	0.13
CaO	0.33	0.35	0.34	0.29	0.34	0.35	0.31	0.35	0.35
Na_2O	1.53	1.53	1.45	1.48	1.52	1.52	1.50	1.58	1.58
K_2O	6.15	6.09	6.09	6.00	6.16	6.14	6.05	6.20	6.21
P_2O_5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
CO_2	0.10	0.10	0.31	0.21	0.21	0.21	0.10	0.12	0.10
H_2O^+	1.62	1.56	1.54	1.60	1.60	1.58	1.68	1.78	1.48
LOI	1.70	1.79	1.98	1.84	1.88	1.88	1.85	1.89	1.71
Total	102.09	101.32	101.33	101.8	101.83	101.59	101.79	101.84	102.21
$\text{Mg}^\#$	34.99	33.50	33.12	33.35	32.11	31.74	39.71	36.63	37.27
δ	1.81	1.80	1.80	1.74	1.82	1.84	1.76	1.87	1.83
ALK	7.68	7.62	7.54	7.48	7.68	7.66	7.55	7.78	7.79
AR	1.22	1.22	1.22	1.22	1.23	1.23	1.22	1.23	1.23
A/CNK	1.76	1.74	1.79	1.83	1.74	1.78	1.78	1.70	1.70

76.18%,平均为 75.33%; Al_2O_3 含量为 13.80%~14.29%,平均为 14.03%; Na_2O 含量为 1.45%~1.58%,平均为 1.52%; K_2O 含量为 6.00%~6.21%,平均为 6.12%;全碱含量(ALK)为 7.48%~7.79%,平均为 7.64%;铝饱和指数(A/CNK)为 1.70~1.83,平均为 1.76;里特曼指数(δ)为 1.74~1.87,平均为 1.81; $\text{Mg}^\#$ 值为 31.74~39.71,平均为 34.71。在火山岩 TAS 图解(图 3a)中,数据点集中投在流纹岩区域;在 A/NK-A/CNK 图解上(图 3b),样品点均落在过铝质区域;在 SiO_2 - K_2O 图解中(图 3c),样品点位于钾玄质系列过渡区域内。凝灰岩具富 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、LOI,贫 CaO、FeO、MgO、 Na_2O 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 的特点,与 A 型花岗岩类似,属钾玄质过铝质流纹岩类。

3.2 稀土和微量元素特征

巴立克立克组凝灰岩微量元素及稀土元素数据见表 2。稀土元素总量为 $128.83\times 10^{-6}\sim 161.39\times 10^{-6}$,平均为 143.34×10^{-6} ;LREE/HREE 值为 2.45~3.12,平均为 2.76,表明样品相对富集 LREE;(La/Yb)_N 为 5.34~8.42,平均为 7.42,属轻稀土元素富集型; δEu 值为 1.01~1.19,平均为 1.09,具 Eu 弱正异常特征,表明样品发生轻微的斜长石分离结晶(赵志根等,1998)(图 4a)。

原始地幔标准化微量元素蛛网图呈右倾型(图 4b),显示富集 Cs、Rb、K 等大离子亲石元素(LILE)及 Th、U 等高场强元素(HFSE),亏损 Nb、Ta、P、Ti,整体反映出有较多的壳源物质加入,指示岩浆源区可能为中元古界地壳物质重熔的产物。其中 Rb/Sr

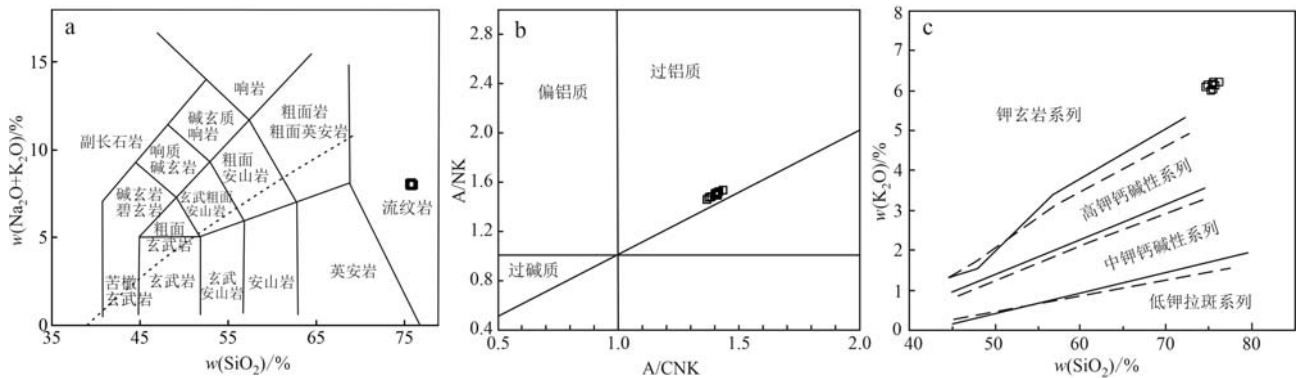


图3 巴立克立克组凝灰岩岩石的 TAS 图解(a, 据 Peccerillo *et al.*, 1976)、A/NK-A/CNK 图解(b, Rickwood *et al.*, 1989) 和 K_2O-SiO_2 图解(c, Feininger *et al.*, 2002)

Fig. 3 TAS diagram(a, Peccerillo *et al.*, 1976), A/NK-A/CNK diagram(b, Rickwood *et al.*, 1989) and K_2O-SiO_2 diagram (c, Feininger *et al.*, 2002) of the Balikelike Formation

表2 哈拉峻地区巴立克立克组凝灰岩的微量元素分析结果

$w_B/10^{-6}$

Table 2 Analysis results of trace elements in the tuffs of the Balikelike Formation in Halajun area

样品原号	YK224-1	YK224-2	YK224-3	YK224-4	YK224-5	YK224-6	YK224-7	YK224-8	YK224-9
Li	7.21	7.06	6.97	7.16	7.35	7.06	7.07	7.46	6.93
Be	2.45	2.47	2.87	2.44	2.66	2.56	2.70	2.81	2.57
Mn	18.90	18.70	15.20	16.90	16.60	16.40	17.80	15.00	13.70
Co	0.29	0.21	0.06	<0.05	<0.05	0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Ni	0.90	0.64	0.23	0.15	0.19	0.43	0.20	0.15	0.14
Cu	1.57	1.23	1.73	1.13	1.10	1.04	1.06	1.13	2.36
Zn	13.90	12.00	12.40	14.10	12.00	12.20	13.60	11.80	10.20
Ga	33.50	31.20	32.20	32.20	31.30	32.90	30.70	31.30	29.90
Rb	245.00	236.00	241.00	237.00	244.00	247.00	242.00	242.00	239.00
Sr	106.00	82.90	74.80	78.30	78.60	81.60	81.10	79.80	77.80
Mo	1.11	1.49	1.34	0.98	1.51	1.35	0.92	1.20	1.32
Cd	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
In	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.07	0.06	<0.05	<0.05
Cs	7.95	7.49	8.57	7.20	7.75	7.97	7.30	7.61	7.49
Ba	926.00	947.00	1023.00	880.00	940.00	942.00	902.00	961.00	954.00
Tl	0.68	0.63	0.44	0.65	0.66	0.67	0.68	0.67	0.65
Pb	16.40	17.30	16.00	16.60	18.90	18.20	16.40	16.90	15.60
Bi	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Th	21.10	20.40	22.30	17.10	19.60	20.40	19.20	19.70	17.90
U	2.14	3.32	2.11	2.94	3.51	3.15	3.65	3.49	3.27
Nb	64.80	59.10	57.00	60.70	58.50	59.20	60.60	56.10	59.90
Ta	3.57	3.56	3.57	3.61	3.61	3.62	3.62	3.50	3.62
Zr	392.00	386.00	395.00	398.00	394.00	405.00	389.00	382.00	383.00
Hf	13.30	13.20	13.30	13.40	13.40	13.40	13.30	13.10	13.10
Ti	1 202.00	1 187.00	1 156.00	1 160.00	1 156.00	1 181.00	1 193.00	1 119.00	1 139.00
W	3.32	2.83	2.13	2.64	3.63	2.99	2.56	3.08	3.08
As	2.48	3.67	2.92	2.44	3.82	3.73	2.33	2.55	3.13
V	1.42	0.92	0.50	0.42	0.34	0.41	0.40	0.25	0.21
La	27.70	25.50	23.00	23.90	26.80	26.00	29.20	28.10	26.60
Ce	59.40	51.10	48.40	49.80	57.70	57.40	63.50	61.20	55.20
Pr	6.63	5.97	5.58	5.79	6.52	6.32	7.22	6.93	6.46
Nd	23.70	21.60	20.20	21.10	23.80	22.40	26.10	25.30	23.80
Sm	5.20	4.67	4.64	4.46	5.20	4.95	5.75	5.51	5.13

续表 2

Continued Table 2

样品原号	YK224-1	YK224-2	YK224-3	YK224-4	YK224-5	YK224-6	YK224-7	YK224-8	YK224-9
Eu	1.88	1.79	1.68	1.63	1.76	1.74	1.93	1.93	1.75
Gd	5.20	4.50	4.73	4.22	5.09	4.81	5.92	5.57	4.96
Tb	0.97	0.83	0.97	0.85	0.97	0.89	1.10	1.06	0.93
Dy	6.40	5.77	6.90	5.79	6.29	5.92	7.36	6.95	5.98
Ho	1.29	1.22	1.50	1.14	1.24	1.20	1.42	1.38	1.18
Er	3.91	3.51	4.50	3.42	3.68	3.45	4.20	4.10	3.47
Tm	0.60	0.52	0.70	0.50	0.53	0.53	0.62	0.60	0.50
Yb	3.71	3.47	4.31	3.19	3.44	3.39	3.80	3.69	3.16
Lu	0.55	0.51	0.62	0.47	0.48	0.48	0.55	0.56	0.46
Sc	2.77	2.56	2.70	2.57	2.60	2.95	2.72	2.71	2.27
Y	35.20	31.70	41.30	30.20	33.40	31.90	37.80	37.00	30.60
δEu	0.36	0.39	0.36	0.38	0.34	0.36	0.33	0.35	0.35
La/Yb	7.47	7.35	5.34	7.49	7.79	7.67	7.68	7.62	8.42
ΣREE	149.91	133.52	130.43	128.83	146.10	142.43	161.39	155.59	141.85
LREE	124.51	110.63	103.50	106.68	121.78	118.81	133.70	128.97	118.94
HREE	2.83	2.54	3.03	2.45	2.72	2.58	3.12	2.99	2.58
LREE/HREE	2.83	2.54	3.03	2.45	2.72	2.58	3.12	2.99	2.58

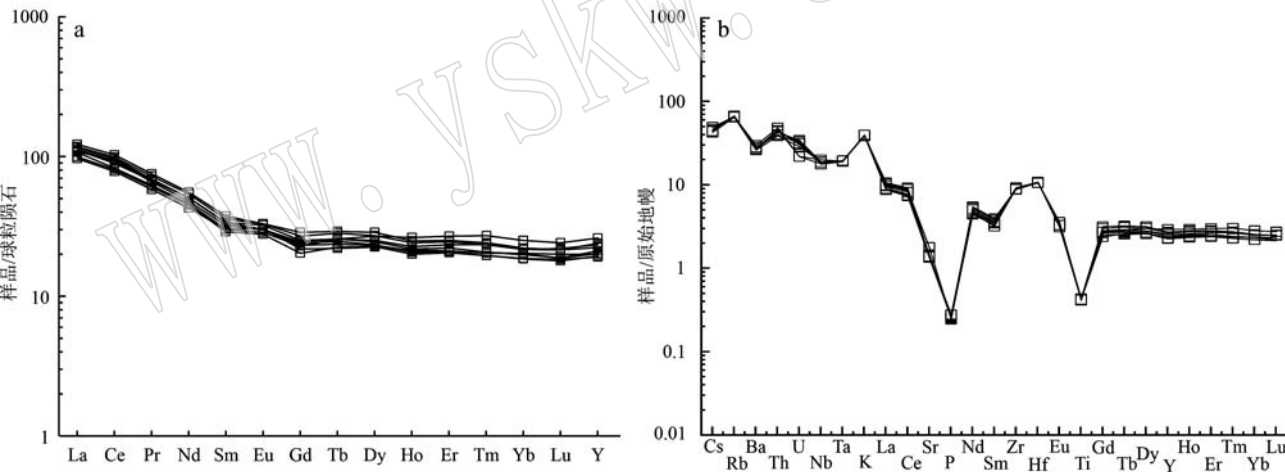


图 4 巴立克立克组凝灰岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a, 球粒陨石数据来自 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 原始地幔数据来自 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 4 The chondrite-normalized rare earth element distribution pattern (a, normalized values of chondrite from Boynton, 1984) and the original mantle-normalized trace elements cobweb diagram (normalized of original mantle values from Sun and Mcdonough, 1989) in the Balikelike Formation

值(介于 2.31 ~ 3.22)和 Rb/Nb 值(介于 3.78 ~ 4.31),同样显示出壳源岩浆的成分特征(图 4b)。

3.3 锆石 U-Pb 年代学特征

巴立克立克组凝灰岩中锆石以半透明-透明为主,呈自形-半自形短柱状,长 60~120 μm,宽 40~85 μm。阴极发光图像显示其具有岩浆振荡环带(图 5a),Th/U 值 0.52~0.88,具有岩浆成因锆石的特征

(Rubatto *et al.*, 2000; 吴元保等,2004)。取谐和度 ≥90%的 10 个测试点,它们的 U 含量变化于 206×10⁻⁶ ~ 450×10⁻⁶ 之间,平均为 259.73×10⁻⁶;Th 含量变化于 128×10⁻⁶ ~ 398×10⁻⁶ 之间,平均为 173.14×10⁻⁶。²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化范围介于 293.8~270.5 Ma 之间,加权平均年龄为 280.47±2.58 Ma (MSWD = 2.6)(图 5b)。

表 3 哈拉峻地区巴立克立克组凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb age analysis of tuffs from the Balikelike Formation in Halajun area

点号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						表面年龄/Ma					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	153	238	0.64	0.055 7	0.00 50	0.342 7	0.031 4	0.044 7	0.000 8	442.6	201	299.2	24	281.7	5
2	135	206	0.65	0.056 4	0.002 9	0.347 9	0.018 5	0.044 9	0.000 8	477.8	119	303.1	14	283.2	5
3	191	261	0.73	0.058 1	0.002 7	0.351 2	0.016 3	0.044 1	0.000 6	531.5	102	305.6	12	278.5	4
4	397	450	0.88	0.059 6	0.002 3	0.379 4	0.013 8	0.046 6	0.000 7	587.1	114	326.6	10	293.8	4
10	133	253	0.53	0.053 1	0.002 3	0.314 9	0.013 9	0.043 3	0.000 6	331.5	98	277.9	11	273.2	4
13	147	231	0.63	0.052 0	0.002 3	0.320 6	0.015 1	0.044 4	0.000 7	287.1	100	282.4	12	280.2	4
15	128	247	0.52	0.050 5	0.002 3	0.296 6	0.013 9	0.042 9	0.000 6	216.7	104	263.7	11	270.5	4
17	129	236	0.55	0.053 6	0.002 6	0.324 6	0.016 2	0.044 5	0.000 8	366.7	109	285.5	12	280.4	5
18	138	219	0.63	0.056 1	0.002 5	0.341 8	0.015 7	0.044 7	0.000 8	453.8	102	298.5	12	281.9	5
19	181	255	0.71	0.050 6	0.002 6	0.302 6	0.015 1	0.043 9	0.000 7	233.4	121	268.5	12	276.9	4

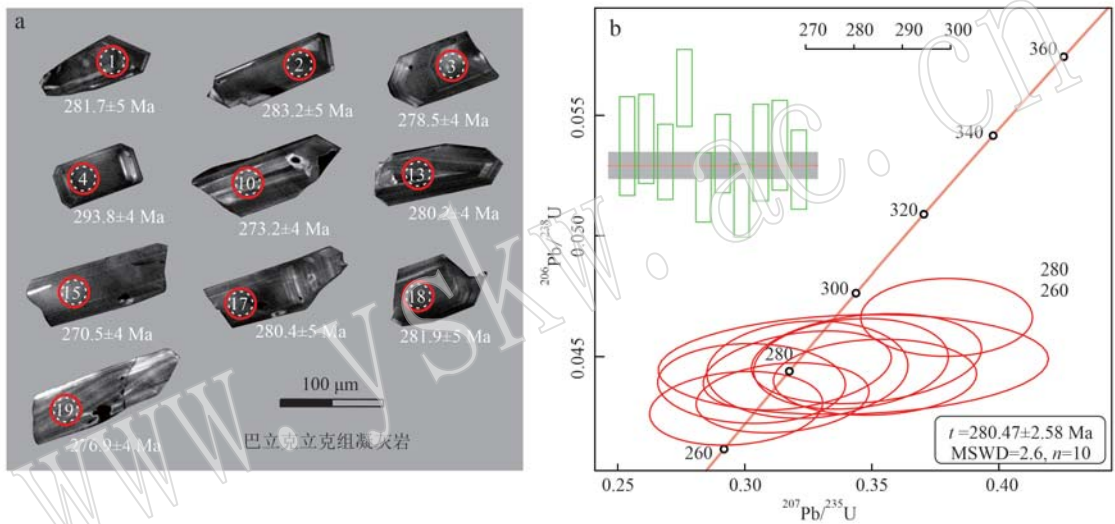


图 5 巴立克立克组凝灰岩的锆石阴极发光图像(a)和 U-Pb 谐和年龄图及加权平均年龄(b)
Fig. 5 Cathodoluminescence photos of zircons and test points (a) and concordance diagram of zircon U-Pb age(b) of tuffs from the Balikelike Formation

3.4 锆石 Hf 同位素 对巴立克立克组凝灰岩中锆石 Hf 同位素进行了测
在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析的基础上, 试,数据分析结果见表4。分析结果表明, 锆石颗粒

表 4 哈拉峻地区巴立克立克组凝灰岩的 LA-MC-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素数据
Table 4 LA-MC-ICP-MS zircon Lu-Hf isotopic data of tuffs from the Balikelike Formation in Halajun area

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$		t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	280.5	0.060 716	0.001 716	0.282 629	0.000 015	0.7	0.5	886	1 226	0.000 073 28
2	280.5	0.070 836	0.001 875	0.282 604	0.000 012	-0.1	0.4	924	1 282	-0.000 014 94
3	280.5	0.039 168	0.000 975	0.282 666	0.000 011	2.0	0.4	823	1 145	0.000 201 70
4	280.5	0.062 839	0.001 682	0.282 608	0.000 012	0.0	0.4	916	1 274	-0.000 002 16
10	280.5	0.071 045	0.001 811	0.282 662	0.000 007	1.9	0.3	840	1 153	0.000 189 00
13	280.5	0.075 163	0.001 742	0.282 642	0.000 010	1.2	0.3	868	1 198	0.000 118 45
15	280.5	0.074 111	0.001 665	0.282 623	0.000 010	0.5	0.4	894	1 240	0.000 051 95
17	280.5	0.050 811	0.001 224	0.282 658	0.000 010	1.7	0.4	837	1 162	0.000 174 43
18	280.5	0.074 115	0.001 696	0.282 616	0.000 010	0.3	0.3	904	1 256	0.000 026 60
19	280.5	0.053 419	0.001 306	0.282 644	0.000 009	1.3	0.3	858	1 193	0.000 125 84

的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于0.002 035(介于0.000 975 ~ 0.001 875之间),平均0.001 569,表明锆石在形成后具有极低的放射性成因 Hf 的积累。锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.039 167 8~0.075 162 56(平均0.032 221 3), $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282 604 ~ 0.282 666(平均0.282 635), $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为-0.1~2.0(平均0.9),根据平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.015)(Jackson *et al.*, 2004)计算得到其单阶段模式年龄(t_{DM1})为924~823 Ma(平均875 Ma),两阶段模式年龄(t_{DM2})为1 282~1 145 Ma(平均1 213 Ma)。

4 讨论

4.1 成岩时代

前人利用碎屑锆石限定柯坪地区夹有玄武岩的二叠纪地层沉积时代不会早于早二叠世晚期,认为可能是中二叠世至晚二叠世早期(李锦轶等, 2017);柯坪盖孜力克乡南部二叠统巴立克立克组中的玄武岩夹层获得锆石 U-Pb 年龄为 287.6 ± 5.5 Ma(代友旭等, 2017);南天山南缘小提坎里克组酸性火山岩锆石 U-Pb 年龄为 289.4 ± 5.5 Ma(罗金海等, 2007);塔中-巴楚地区岩浆岩锆石 U-Pb 年龄,玄武岩年龄 275 ± 13 Ma,凝灰岩年龄 291 ± 10 Ma,辉长岩年龄 274 ± 15 Ma,辉绿岩年龄 272 ± 6 Ma,正长岩年龄 282 ± 3 Ma,英安斑岩年龄 286 ± 4 Ma,岩浆活动属于早二叠世,其中火山岩的形成时间相对早于侵入岩)(陈汉林等, 1997; 徐汉林等, 2006; 曹俊等, 2013)。可见,前人认为火山作用主要发生于早二叠世(李曰俊等, 2000; 姜常义等, 2004; 朱毅秀等, 2005; 徐汉林等, 2006),还有学者结合古生物学证据认为火山作用集中于中二叠世(丁跃潮, 1995)。本文针对哈拉峻地区巴立克立克组凝灰岩开展的锆石 U-Pb 年代学研究结果显示其年龄为 280.47 ± 2.57 Ma,说明该凝灰岩属于早二叠世岩浆活动产物。

4.2 岩石成因及源区特征

关于长英质火山岩的成因,目前有两种观点:一种认为长英质火山岩是幔源基性岩浆经高度结晶分异作用的产物(Grove *et al.*, 1986; Bacon *et al.*, 1988),长英质火山岩具有与同源岩浆岩相似的地球化学组成(Brouxel *et al.*, 1987; Hochstaedter *et al.*, 1990);另一种观点认为长英质火山岩直接来源于地壳的部分熔融,主要与地幔上涌或与幔源基性岩浆

的底侵作用有关,还可能受其他机制所控制(Cox *et al.*, 1972)。哈拉峻地区基性杂岩体和花岗岩脉的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄约为 270 Ma,被认为是早中生代南天山洋壳俯冲交代形成的富集岩石圈地幔参与塔里木地幔柱部分熔融形成的岩浆经过结晶沉淀和机械分选所形成(Zhang *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2019),杂岩体与邻近的金伯利岩及地幔捕虏体具有相近的 Sr-Nd-Hf 同位素组成,表明其很可能来源于汇聚板块俯冲交代影响的岩石圈地幔(Zhang *et al.*, 2011)。曹俊等(2013)认为花岗质岩脉、哈拉峻花岗岩体主要由底侵的镁铁质岩浆分异出的中酸性熔体结晶分异并伴随不同程度的地壳混染形成,约 280 Ma 的大量幔源岩浆底侵是塔里木大火成岩省中 A 型花岗岩形成的必要前提。本文凝灰岩 Nb/Ta 值(平均为 16.60)与哈拉峻花岗岩体(黄河, 2013)、柯坪中基性火山岩基本一致(Huang *et al.*, 2012),相对基性杂岩体 Nb/Ta 值稍高(曹俊, 2015),Sr/Y 值和 $\text{Mg}^\#$ 值低于柯坪中基性火山岩和普昌杂岩体,但相对花岗岩体较高。哈拉峻地区的侵入岩和火山岩的 Sr-Nb 同位素组成的差异(高俊等, 2009; Zou *et al.*, 2015; 程小鑫, 2021)表明它们可能具有不同的源区特征,但它们可能与同一期岩浆活动有关。凝灰岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.282 614~0.282 672之间, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值介于-0.73~2.12之间,在 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 年龄协变图解上落在球粒陨石和上地壳演化线范围内,主体落入了球粒陨石演化线之上(位于亏损地幔和下地壳演化线之间)(图6),二阶段模式年龄(t_{DM2})为1 318~1 145 Ma,具高 SiO_2 、 K_2O 、 Al_2O_3 含量和 $\text{A}/\text{CNK} > 1$ 的特征,推测其可能为岩石圈地幔作用下的地壳部分熔融的产物。

现有资料显示,塔里木盆地基性火山岩的分布面积远大于酸性火山岩(曹俊等, 2013),二者在时间和空间上都有较大重叠,说明它们可能在成因上具有联系,整体上具有双峰式火山岩的分布特征(图1a)。前人研究结果表明,玄武岩源于岩石圈地幔的部分熔融这一观点基本达成共识(姜常义等, 2004; 代友旭等, 2017),本文依据酸性火山岩的时空分布和地球化学等信息,认为是以岩石圈地幔作用下的地壳部分熔融为主,同时与区域分布的玄武岩具有紧密的成因联系。

4.3 构造背景及地质意义

流纹质岩石的微量地球化学组成可以有效地揭示岩石产出的构造背景(Pearce *et al.*, 1979),本文利

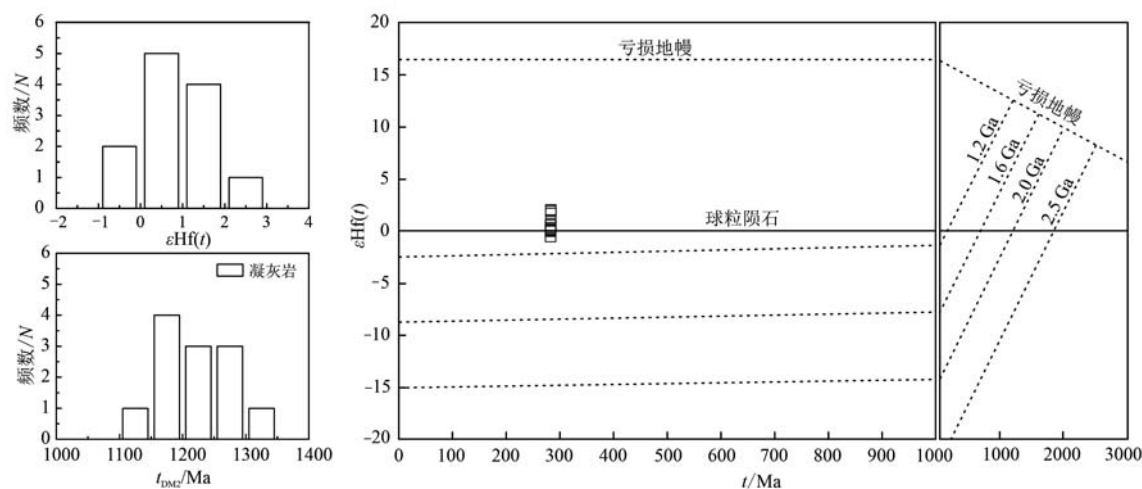
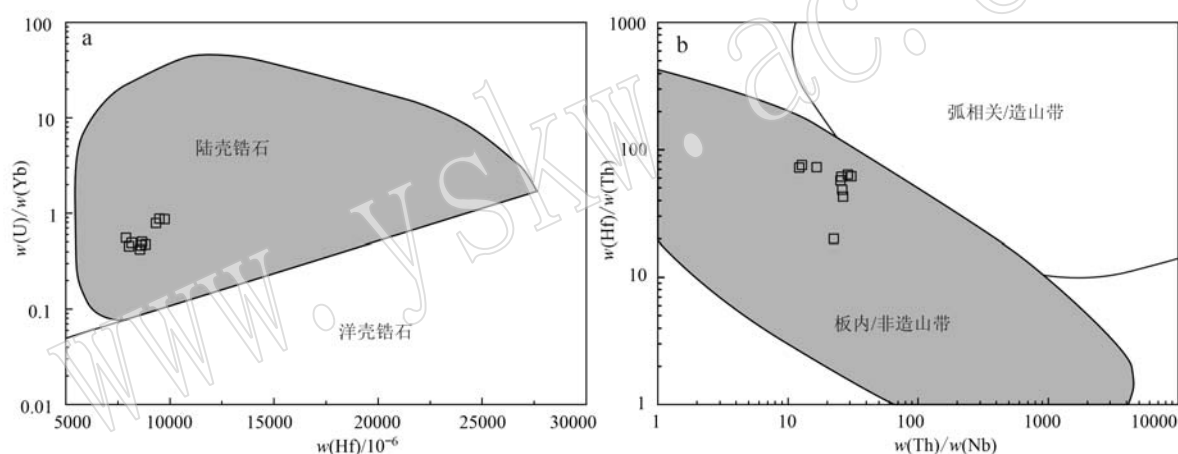


图6 巴立克立克组凝灰岩中锆石 Hf 同位素组成

Fig. 6 Zircon Hf isotopic composition in the tuffs of the Balikelike Formation

图7 巴立克立克组凝灰岩中锆石的 U/Yb-Hf(a) 和 Hf/Th-Th/Nb(b) 构造环境判别图 (Zhang *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012)Fig. 7 U/Yb-Hf(a) and Hf/Th-Th/Nb(b) tectonic discrimination diagrams for zircons of the tuff in the Balikelike Formation (Zhang *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012)

用样品中相对不活动的高场强元素进行了构造环境判别。大量统计大洋中脊、大洋岛弧及岩浆弧环境下锆石的微量元素含量及其比值后发现,利用 U/Yb-Hf 图解能够有效区分来自洋壳和陆壳的锆石 (Grimes *et al.*, 2015)。在锆石的 U/Yb-Hf 构造环境判别图 (图 7a) 中,巴立克立克组凝灰岩样品均投在陆壳范围内。利用锆石的 Th/Nb 值与 Hf/Th 值的相关性将其划分为弧相关/造山带环境和板内/非造山带环境 (Yang *et al.*, 2012),在 Hf/Th-Th/Nb 图解 (图 7b) 中,凝灰岩样品的锆石投在板内/非造山带区域内。

在 Rb-(Y+Nb) 图解中,所有数据点均落入板内

岩浆岩区域 (图 8a); 在 Nb-Y 图解中,样品数据点同样落入板内岩浆岩区域中 (图 8b),说明巴立克立克组凝灰岩具板内岩浆岩特征,形成于早期活动拉张背景下,与碱性玄武岩、基性杂岩体、流纹岩和碱性花岗岩构成双峰式岩石构造组合,与前人报道的与塔里木大火成岩省相关的玄武岩具有相似的构造环境 (罗金海等, 2008)。

南天山洋于新元古代开始沿着中天山那拉提陆缘活动带向北发生俯冲 (Rodinia 超大陆聚合期) (Li *et al.*, 2008),同时在塔里木板块周缘出现了强烈的岩浆活动 (Zhang *et al.*, 2007; Cao *et al.*, 2011; He *et al.*, 2012)。塔里木板块在石炭纪之前处于相对稳定

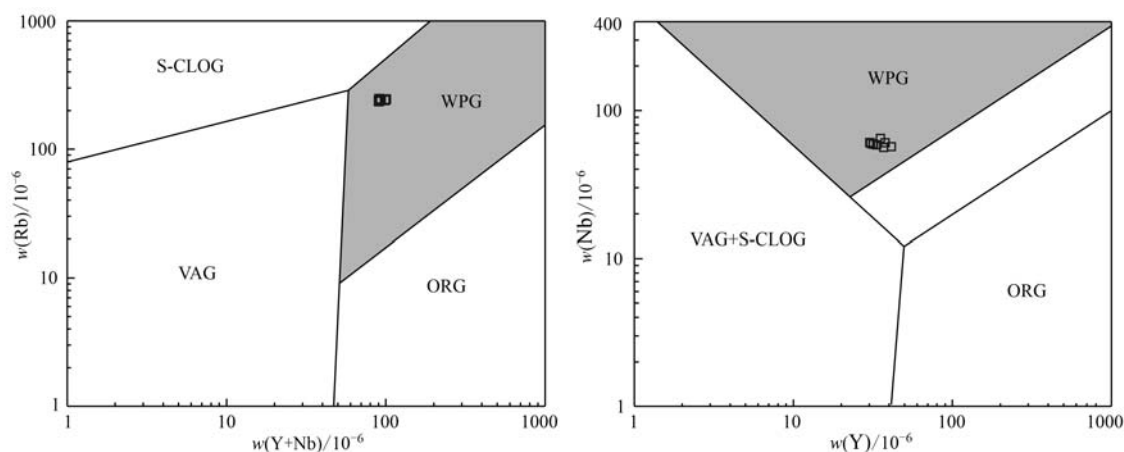


图 8 巴立克立克凝灰岩的 Rb-(Y+Nb)(a) 和 Nb-Y(b) 构造环境判别图解 (Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 8 Rb-(Y+Nb)(a) and Nb-Y(b) discrimination diagrams of tectonic environment of the Balikelike tuff (Pearce *et al.*, 1984)

S-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

S-COLG—syn-collision granite; VAG—volcanic arc granite; WPG—intraplate granite; ORG—mid-ocean ridge granite

的克拉通演化阶段,塔里木盆地北缘和南天山碰撞带于晚石炭世—二叠纪发生碰撞已被大量地质事实所证实 (Yu *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2012),同时地幔柱活动在二叠纪期间导致了早期富集的岩石圈地幔首先发生部分熔融 (Zhang *et al.*, 2010),形成了塔里木二叠纪大火成岩省 (Zhang *et al.*, 2007),巴立克立克组火山岩即是该时期岩浆活动的代表性产物之一。据前文可知塔里木大火成岩省的岩浆活动持续时间大于 10 Ma,早二叠世早期岩浆活动在盆地内部形成大面积溢流玄武岩和火山碎屑岩,早二叠世晚期形成基性—超基性侵入岩、中酸性侵入岩和碱性岩体,分布规模小且零散分散在塔里木盆地北缘。前人研究表明这两个阶段形成的岩浆岩具有不同的地球化学组成和源区属性:早二叠世早期的玄武岩具有 Nb、Ta 负异常和富集的 Nd 同位素组成 (姜常义等, 2004; Li *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2012),可能来自于富集的岩石圈地幔源区;早二叠世晚期一系列侵入岩体主要具有 Nb、Ta 的正异常和亏损 Nd 同位素组成 (Yang *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2009),可能来自于对流地幔源区。前人认为形成塔里木大规模溢流玄武岩需要一个巨大的热源提供足够的热能使得岩石圈部分熔融 (Huang *et al.*, 2012),但热力学模拟结果表明正常的岩石圈地幔不可能发生大规模的熔融喷发出地表 (Nicholas *et al.*, 1992),如果岩石圈地幔被地幔柱的加热交代后可以形成大陆溢流玄武岩 (Gallagher *et al.*, 1992),说明岩石圈—地幔柱的相互作用在塔里木大火成岩省的形成中扮演

了重要的角色。结合巴立克立克组凝灰岩全岩微量元素、锆石年代学、锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及二阶段地壳模式年龄等特征,推断该凝灰岩形成于地幔柱作用下的板内裂谷环境中,主要为岩石圈地幔作用下地壳物质部分熔融的产物,具有壳源和幔源的双重源区特征。

5 结论

(1) 巴立克立克组凝灰岩属于钾玄质过铝质流纹岩类, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 280.47 ± 2.58 Ma, 属于早二叠世岩浆活动的产物。

(2) 凝灰岩具有 A 型花岗岩的特征, 处于板内裂谷盆地环境中, 可能为岩石圈地幔作用下的地壳部分熔融的产物。

(3) 在塔里木地幔柱作用背景下, 形成的凝灰岩具有壳源和幔源的双重源区特征, 壳幔相互作用在塔里木大火成岩省的形成中扮演了重要的角色。

References

- Ai Yongliang, Zhang Lifei, Li Xuping, *et al.* 2005. Geochemical characteristics and tectonic significance of ultra-high pressure eclogite and blueschist in Tianshan Mountains, southwestern Xinjiang [J]. *Advances in Natural Science*, (11): 1346~1356 (in Chinese).
- An X H, Cheng Z G, Zhang Z C, *et al.* 2021. The discovery of Fe-P-REE enriched mineral assemblages in the ignimbrite from Tarim

- large igneous province and its implication[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(4): 717~728.
- Arndt N A and Christensen U. 1992. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: Thermal and geochemical constraints [J]. *Journal of Geophysical Research*, 97: 10 967~10 981.
- Bacon C R and Druitt T H. 1988. Compositional evolution of the zoned calcalkaline magma chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 98(2): 224~256.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1998. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 154(1~2): 243~258.
- Boynnton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements[C]// Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry. Developments in Geochemistry*, 3~114.
- Brouxel M, Lapierre H, Michard A, *et al.* 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: geochemistry of the Copley-Balaklala series, northern California[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 85(4): 386~400.
- Cao Jun. 2015. Mesozoic Mafic-ultramafic Layered Rock Mass and Genesis of Vanadium-bearing Titanomagnetite Deposits in Tarim Large Igneous Province[D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Guangzhou Institute of Geochemistry), 45~53(in Chinese).
- Cao J, Wang X and Tao J. 2019. Petrogenesis of the Piqiang mafic-ultramafic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposit in Tarim Large Igneous Province, NW China[J]. *International Geology Review*, 61(18): 2 249~2 275.
- Cao Jun, Xu Yigang, Xing Changming, *et al.* 2013. Genesis of Early Permian granitoids in Piqiang area, northern margin of Tarim: Implications for the genesis of A-type granites in Tarim Great Igneous Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*. 29(10): 3 336~3 352(in Chinese).
- Cao X, Lü X, Liu S, *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon dating, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications of the Dapingliang Neoproterozoic granites at Kuluketage block, NW China[J]. *Precambrian Research*, 186(1~4): 205~219.
- Chen H L, Yang S F, Dong C W, *et al.* 1997. Determination of the Permian basic rock belt in Tarim Basin and its tectonic significance[J]. *Geochimica*. 26(6): 77~87(in Chinese).
- Chen L L, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2017. Late carboniferous to Early Permian partial melting of the metasedimentary rocks and crustal reworking in the central asian orogenic belt: Evidence from garnet-bearing rhyolites in the Chinese south Tianshan[J]. *Lithos An International Journal of Mineralogy Petrology & Geochemistry*, (1): 1~20.
- Cheng Xiaoxin. 2021. The Permian Magmatic Intrusion Event and Its Tectonic Significance in the Northwestern Margin of Tarim Basin [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 35~50(in Chinese).
- Cheng Z G, Zhang Z C, Wang Z C, *et al.* 2020. Petrogenesis of transitional large igneous province: Insights from bimodal volcanic suite in the Tarim large igneous province [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(5): 1~22.
- Cox K G. 1972. The Karroo Volcanic Cycle[J]. *Journal of the Geological Society*, 128(4): 311~336.
- Dai Y X, Zhang X Y, Yan K, *et al.* 2017. Geochronology, geochemistry and geological significance of Early Permian basalts in Keping area, Xinjiang[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(1): 1~13(in Chinese).
- Deledaer. 1996. Characteristics of Carboniferous-Permian sedimentary system in Western Tarim Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 14(4): 386~393(in Chinese).
- Ding Yuechao. 1995. Division and correlation of Carboniferous-Permian strata in Western Tarim Basin[J]. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 7(1): 11~40(in Chinese).
- Feininger T. 2002. Igneous rocks: A classification and glossary of terms (recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks) [J]. *The Canadian Mineralogist*, 140(3): 367~367.
- Gallagher K and Hawkesworth C. 1992. Dehydration melting and the generation of continental flood basalts[J]. *Nature*, 358(6 381): 57~59.
- Gao J, Qian Q, Long L L, *et al.* 2009. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1 804~1 816(in Chinese).
- Gao Xiaofen, Lin Xiao, Xu Yadong, *et al.* 2014. Evolution of the Paleozoic-Mesozoic sedimentary basin in the South Tianshan Mountains [J]. *Earth Science*, 39(8): 1 119~1 128(in Chinese).
- Gao Y. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 287: 213~231.
- Griffin W L. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Grimes C B, Wooden J L, Cheadle J M, *et al.* 2015. "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 170: 1~46.
- Grove T L and Donnelly-Nolan J M. 1986. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake Volcano, California: Implications for the origin of compositional gaps in calc-alkaline series lavas[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 92(3): 281~302.

- He H, Zhang Z, Kusky T, *et al.* 2012. Geochronology and geochemistry of the Chuanwulu complex in the south Tianshan, western Xinjiang, NW China: Implications for petrogenesis and Phanerozoic continental growth[J]. *Lithos*, (1), 66~85.
- He Z Y, Zhang Z M, Zong K Q, *et al.* 2012. Neoproterozoic granulites from the northeastern margin of the Tarim Craton: Petrology, zircon U-Pb ages and implications for the Rodinia assembly[J]. *Precambrian Research*, 212~213: 21~23.
- Hochstaedter A G, Gill J B and Morris J D. 1990. Volcanism in the Sumisu Rift, II. Subduction and non-subduction related components[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 100: 195~209.
- Huang He. 2013. The Paleozoic Granites in the Southern Tianshan Area of China and Their Regional Geological Evolution[D]. China University of Geosciences (Beijing), 40~50(in Chinese).
- Huang H, Zhang Z, Kusky T, *et al.* 2012. Continental vertical growth in the transitional zone between South Tianshan and Tarim, western Xinjiang, NW China: Insight from the Permian Halajun A1-type granitic magmatism[J]. *Lithos*, 155: 49~66.
- Huang H, Zhang Z, Santosh M, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and metallogenic implications of the Boziguo'er rare metal-bearing peralkaline granitic intrusion in south tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 61:157~174.
- Huang H, Zhang Z, Santosh M, *et al.* 2015. Petrogenesis of the Early Permian volcanic rocks in the Chinese South Tianshan: Implications for crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 228~229: 23~42.
- Hou K J, Li Y H and Tian Y R. 2009. LA-MC-ICP-MS zircon in situ U-Pb dating of microzones[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492 (in Chinese).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1~2): 47~69.
- Jiang Changyi, Mu Yanmei, Bai Kaiyin, *et al.* 1999. Geochronology, petrology, geochemistry and tectonic setting of granitoids in the Southern Tianshan Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 139~149(in Chinese).
- Jiang Changyi, Zhang Pengbo, Lu Dengrong, *et al.* 2004. Petrology, geochemistry, Nd, Sr, Pb isotopic composition and petrogenesis of the Keping basalt[J]. *Geological Review*, 50(5): 492~500(in Chinese).
- Li J Y, Liu J F, Zheng R G, *et al.* 2017. The eruption time of Permian basalt in Keping area, northwestern Tarim Basin: Evidence from detrital zircons[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 39(3): 301~325(in Chinese).
- Li Yuejun, Li Liangchen, Mai Guangrong, *et al.* 2000. A preliminary discussion on the basement of Tarim Basin[C]//The Tectonic Evolution and Supercontinent Cycle of China. Beijing, China, 37~38(in Chinese).
- Li Z, Li Y, Chen H, *et al.* 2012. Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 191~202.
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, *et al.* 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 160(1~2): 179~210.
- 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 [J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Liu Y, Hu Z, Zong K, *et al.* 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535~1 546.
- Luo Jinhai, Che Zicheng, Cao Yuanzhi, *et al.* 2008. Geochemistry, isotopic chronology and tectonic significance of Early Permian acidic volcanic rocks in the southern margin of the Southern Tianshan Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2 281~2 288(in Chinese).
- Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[J]. *Geol. Soc. Special Pub.*, 16(1): 77~94.
- Pearce J and Norry M. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33~47.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 22(4): 247~263.
- Rojas-Agramonte Y, Kröner A, Demoux A, *et al.* 2011. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 19(3): 751~763.
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by Ion Microprobe: Some Examples from the Western Alps[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 373~399.

- Sláma J, Košler C D J, Crowley J L, *et al.* 2008. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249(1~2): 1~35.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tang Liangjie, Qiu Haijun, Yun Lu, *et al.* 2012. Basin-mountain coupling and tectonic transformation of northern margin of Tarim Basin-South Tianshan orogenic belt[J]. *Frontiers in Geoscience*, 19(5): 195~204(in Chinese).
- Ulf Sderlund, Jonathan Patchett P, Jeffrey D Vervoort, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions—Science Direct[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3~4): 311~324.
- Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology [J]. *Geoscience Frontiers*, 9(5): 1 479~1 493.
- Wei X, Xu Y G, Feng Y X, *et al.* 2014. Plume-lithosphere interaction in the generation of the Tarim large igneous province, NW China: Geochronological and geochemical constraints[J]. *American Journal of Science*, 314(1): 314~356.
- Wiedenbeck M, Alle P and Corfu F. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1~23.
- Windley B, Alexeev D, Xiao W, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Zircon genetic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese).
- Xiao Yu, Li Shunting, Ren Jingwu, *et al.* 2021. Study on rare metal ore-bearing properties of alkali-rich granites in Halajun area, Tianshan Mountains, Southwest Xinjiang: A case study of Bashi Suhong pluton [J]. *Mineral Exploration*, 12(7): 1 548~1 555(in Chinese).
- Xing Changming, Wang Yan and Zhang Chuanlin. 2013. Mineral crystallization sequence and genesis of vanadium-titanomagnetite ore in Piqiang stratified rock mass, Tarim Large igneous Province [J]. *Earth Science Frontiers*, (4): 285~298(in Chinese).
- Xu Hanlin, Fang Lehua, Zhang Xin, *et al.* 2006. Characteristics of Early Permian magmas in Tarim Basin and their relationship to hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Geochimica Sinica*, (3): 235~240(in Chinese).
- Xu Ping, Wu Fuyuan, Xie Liewen, *et al.* 2004. Hf isotopes of U-Pb dating standard zircons[J]. *Chinese Science Bulletin*, (14): 1 403~1 410(in Chinese).
- Yang Dongdong, Li Shuangying, Wang Song, *et al.* 2011. Detrital composition of Upper Carboniferous sandstone in northern Tarim basin and its implications for provenance and tectonic attributes[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 645~653(in Chinese with English abstract).
- Yang J, Cawood P A, Du Y, *et al.* 2012. Detrital record of Indosinian mountain building in SW China: Provenance of the Middle Triassic turbidites in the Youjiang Basin[J]. *Tectonophysics*, 574~575: 105~117.
- Yang S F, Li Z, Chen H, *et al.* 2007. Permian bimodal dyke of Tarim Basin, NW China: Geochemical characteristics and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 12(1~2): 113~120.
- Yu X, Yang S F, Chen H L, *et al.* 2011. Permian flood basalts from the Tarim Basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics[J]. *Gondwana Research*, 20(2~3): 485~497.
- Zhang C L, Li X H, Li Z X, *et al.* 2007. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Qurugtagh of northeastern Tarim Block, western China: Geochronology, geochemistry and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 152(3~4): 149~169.
- Zhang C L, Li Z X, Li X H, *et al.* 2010. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275 Ma mantle plume? [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(11): 2 020~2 040.
- Zhang C L, Xu Y G, Li Z X, *et al.* 2010. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? [J]. *Lithos*, 119(3~4): 537~552.
- Zhang D, Zhang Z, Huang H, *et al.* 2018. Petrogenesis and metallogenesis of the Wajilitag and Puchang Fe-Ti oxide-rich intrusive complexes, northwestern Tarim Large Igneous Province[J]. *Lithos*, 304~307: 412~435.
- Zhang D Y and Zhang Z C. 2011. Genesis of Fe-Ti Oxide Ores in Ferrobasaltic Systems: Insights from the Wajilitag and Puchang Intrusive Complexes, Northwestern Tarim Large Igneous Province [J]. *Geophysical Research Letters*, 38(19): 332~333.
- Zhang R, Cheng Z, Zhang Z, *et al.* 2023. Formation of Tarim large igneous province and strengthened lithosphere revealed through machine learning[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(1): 1~17.
- Zhao Zhigen and Gao Liangmin. 1998. Standardization of δEu and δCe Calculation Methods[J]. *Standardized Reporting*, (5): 24~26 (in Chinese).
- Zhou Lixia, Hu Shiling, Wang Ligang, *et al.* 2010. Discussion on the

- age of Piquang gabbro in the northwestern margin of Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 45(4): 1 057~1 065 (in Chinese).
- Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y, *et al.* 2009. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province[J]. Lithos, 113(3~4): 583~594.
- Zou S Y, Li Z L, Song B, *et al.* 2015. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the Wajilitag alkali mafic dikes, and associated diorite and syenitic rocks: Implications for magmatic evolution of the Tarim large igneous province [J]. Lithos, 212~215: 428~442.
- Zhu Yixiu, Jin Zhijun, Lin Changsong, *et al.* 2005. Early Permian magmatic rocks and hydrocarbon accumulation relationship in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, (1): 50~61 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 艾永亮, 张立飞, 李旭平, 等. 2005. 新疆西南天山超高压榴辉岩、蓝片岩地球化学特征及大地构造意义[J]. 自然科学进展, (11): 1 346~1 356.
- 安秀慧, 程志国, 张招崇, 等. 2021. 塔里木大火成岩省熔结凝灰岩中富磷-稀土矿物集合体的识别及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 40(4): 717~728.
- 曹俊. 2015. 塔里木大火成岩省中镁铁-超镁铁质层状岩体及赋含钒钛磁铁矿矿床成因[D]. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 45~53.
- 曹俊, 徐义刚, 邢长明, 等. 2013. 塔里木北缘皮羌地区早二叠纪花岗岩质岩体的成因: 对塔里木大火成岩省 A 型花岗岩成因的启示[J]. 岩石学报, 29(10): 3 336~3 352.
- 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 等. 1997. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的确定及大地构造意义[J]. 地球化学, 26(6): 77~87.
- 程小鑫. 2021. 塔里木盆地西北缘二叠纪岩浆侵入事件厘定及其构造意义[D]. 杭州: 浙江大学, 35~50.
- 代友旭, 张新勇, 阎琨, 等. 2017. 新疆柯坪地区早二叠世玄武岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质科技情报, 36(1): 1~13.
- 德勒达尔. 1996. 塔里木西部石炭—二叠纪沉积体系特征[J]. 新疆地质, 14(4): 386~393.
- 丁跃潮. 1995. 塔里木西部石炭—二叠纪地层划分对比[J]. 新疆石油学院学报, 7(1): 11~40.
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 等. 2009. 西天山的增生造山过程[J]. 地质通报, 28(12): 1 804~1 816.
- 高小芬, 林晓, 徐亚东, 等. 2014. 南天山古生代—中生代沉积盆地演化[J]. 地球科学, 39(8): 1 119~1 128.
- 黄河. 2013. 中国南天山地区古生代花岗岩与区域地质演化[D]. 中国地质大学(北京), 40~50.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 姜常义, 穆艳梅, 白开寅, 等. 1999. 南天山花岗岩类的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境[J]. 岩石学报, 15(2): 139~149.
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登蓉, 等. 2004. 柯坪玄武岩的岩石学、地球化学、Nd、Sr、Pb 同位素组成与岩石成因[J]. 地质论评, 50(5): 492~500.
- 李锦轶, 刘建峰, 郑荣国, 等. 2017. 塔里木盆地西北缘柯坪地区二叠纪玄武岩喷发时限: 来自碎屑锆石的证据[J]. 地球科学与环境学报, 39(3): 301~325.
- 李曰俊, 李良辰, 买光荣, 等. 2000. 关于塔里木盆地基底的初步讨论[C]//中国古陆块构造演化与超大陆旋回专题学术会议(北京), 37~38.
- 罗金海, 车自成, 曹远志, 等. 2008. 南天山南缘早二叠世酸性火山岩的地球化学、同位素年代学及其构造意义[J]. 岩石学报, 24(10): 2 281~2 288.
- 汤良杰, 邱海峻, 云露, 等. 2012. 塔里木盆地北缘—南天山造山带盆-山耦合和构造转换[J]. 地学前缘, 19(5): 195~204.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.
- 肖昱, 李顺庭, 任经武, 等. 2021. 新疆西南天山哈拉峻地区富碱花岗岩稀有金属含矿性研究——以巴什苏洪岩体为例[J]. 矿产勘查, 12(7): 1 548~1 555.
- 邢长明, 王焰, 张传林. 2013. 塔里木大火成岩省皮羌层状岩体的矿物结晶顺序和钒钛磁铁矿矿床成因探讨[J]. 地学前缘, (4): 285~298.
- 徐汉林, 方乐华, 张昕, 等. 2006. 塔里木盆地早二叠世岩浆特征及其对油气成藏关系初探[J]. 地球学报, (3): 235~240.
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. 科学通报, (14): 1 403~1 410.
- 杨栋栋, 李双应, 王松, 等. 2011. 塔里木盆地北缘上石炭统砂岩碎屑组分及其对物源类型和构造属性的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 30(4): 645~653.
- 赵志根, 高良敏. 1998. δEu 、 δCe 计算方法的标准化问题[J]. 标准化报道, (5): 24~26.
- 周黎霞, 胡世玲, 王利刚, 等. 2010. 塔里木盆地西北缘皮羌辉长岩体的时代讨论[J]. 地质科学, 45(4): 1 057~1 065.
- 朱毅秀, 金之钧, 林畅松, 等. 2005. 塔里木盆地塔中地区早二叠世岩岩浆及油气成藏关系[J]. 石油实验地质, (1): 50~61.