

新疆阿克陶县乌孜别里地区流纹岩的 形成时代及成因分析

李 沛^{1,2}, 王 核^{1*}, 普 强³, 丘增旺^{1,2},
闫庆贺^{1,2}, 董 瑞^{1,2}, 张晓宇^{1,2}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河北省地矿局第五地质大队, 河北 唐山 063000)

摘 要: 西昆仑乌孜别里山口南侧一带火山岩地层的时代归属一直存有争议。该套地层虽普遍发育以流纹岩为主的火山岩系, 但尚未有人对其开展系统的年代学与地球化学研究。本次研究对该套地层中的流纹岩进行元素地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素的研究。流纹岩激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)锆石 U-Pb 年龄为(521.0±2.8) Ma, 表明其形成于早寒武世。流纹岩具有高硅富碱的特点, 为过铝质、高钾钙碱性系列, 岩石明显富集大离子亲石元素(Rb、K)、轻稀土元素和不相容元素 U, 相对亏损重稀土元素、高场强元素(P、Ti), 具有中等 Eu 负异常, 流纹岩具有高分异 S 型花岗岩的特征。锆石 Hf 同位素初始比值 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在-0.9~4.1 之间, 主要为正值, 两阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}2}$)介于 1533~1229 Ma 之间, 显示乌孜别里地区流纹岩为中元古代新生地壳物质重熔形成的岩浆, 经较高分异演化而成。结合前人研究成果, 推断研究区流纹岩形成于原特提斯洋俯冲背景下岩浆弧构造环境。

关键词: 早寒武世; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 地球化学; 流纹岩; 木吉金矿

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2021)06-0562-17
DOI: 10.19700/j.0379-1726.2021.06.003

Geochronology, geochemistry and genesis of the rhyolite in the Wuzibieli area, Akto County, Xinjiang

LI Pei^{1,2}, WANG He^{1*}, PU Qiang³, QIU Zeng-wang^{1,2}, YAN Qing-he^{1,2},
DONG Rui^{1,2} and ZHANG Xiao-yu^{1,2}

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. The Fifth Geology Company of Hebei Geology and Mineral Bureau, Tangshan 063000, China

Abstract: Rhyolite dominated volcanic rocks widely outcrop in the Wuzibieli area, Akto county, in the West Kunlun orogenic belt. However, to date, no systematic chronological and geochemical studies have been performed, which hinders our understanding of their genesis and tectonic environment. In this study, we report the geochemistry, zircon U-Pb dating, and Hf isotopes of rhyolites in this area. LA-ICP-MS Zircon dating yielded a concordant $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ age of (521.0±2.8) Ma, indicating that the rhyolite erupted during the Early Cambrian. Geochemically, the rhyolites are peraluminous and show a high-K calc-alkaline signature. They are enriched in LILEs (such as Rb and K), LREE, and more mobile incompatible elements (U), but relatively depleted in HFES (such as P and Ti). They also show medium negative Eu anomalies and share most features with highly differentiated S-type granites.

收稿日期(Received): 2020-01-03; 改回日期(Revised): 2020-03-21; 接受日期(Accepted): 2020-04-02

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发专项(2019B00011); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2018A03004); 国家自然科学基金(91962215, 41972088); 国家重点研发计划(2019YFC06005201); 第二次青藏科考项目(2019QZKK0802-01); 国家十二五科技支撑项目(2015BAB05B03); 中国科学院广州地球化学研究所 135 项目(135TP201601)

作者简介: 李沛(1986-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业。E-mail: 522685551@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): WANG He, E-mail: wanghe@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290986

The Zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values are nearly positive ($-0.9\sim 4.1$), and the two-stage model age ($t_{\text{DM}2}$) ranges from 1229 to 1553 Ma, indicating that the rhyolite in the Wuzibeli area was likely generated by partial melting of Mesoproterozoic new crust. Integrating with previous study, it is inferred that the rhyolite was formed in the continental volcanic arc related to the subduction of the Proto-Tethys Ocean.

Key words: Early Cambrian; zircon U-Pb dating; Hf isotope; geochemistry; rhyolites; the Muji gold deposit

0 引 言

西昆仑阿克陶县乌孜别里山口南侧一带火山岩地层的时代归属一直存有争议。新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局区域地质测量大队^[1]将其划归于中上石炭统奈扎塔什群;新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队^[2]将其时代划归于奥陶-志留系;新疆区域地质志^[3]将其划归志留系;河南省地质调查院^[4]将其划分至下石炭-上二叠统哈拉米兰河群;陕西省地质调查院^[5]将其重新厘定至恰提尔群,时代划归石炭-二叠纪;新疆维吾尔自治区地质矿产局通过“新疆木吉破碎蚀变岩型金矿成矿规律及资源量定量预测工作”^[6]将其划归至上石炭统奈扎塔什群;西安地质矿产研究所^[7]将其划分至下石炭-上二叠统恰提尔群。但值得注意的是,因为工作区环境的严苛性,尚没有确凿的年代数据来佐证。关于地层时代归属的划分,主要依据是区域上岩石性质的类比。本次研究拟对采集于乌孜别里地区火山岩地层中流纹岩的地球化学数据进行分析,精确测定其所在地层的时代,同时对其成因及构造环境作初步探讨。

1 地质背景

乌孜别里山口南侧一带火山岩距新疆阿克陶县木吉乡约 70 km,位于木吉金矿区内南部,与塔吉克斯坦相邻。大地构造位置位于印度板块与欧亚板块碰撞带的前缘区附近,是古亚洲洋和特提斯构造域的结合部位,具有演化历史漫长,构造复杂的特点^[8-10]。经历了古生代和中生代的多期造山运动,以及新生代的印度板块向欧亚板块碰撞引起的远程构造效应,该地区产生强烈的地壳缩短和隆升,形成了如今向北突出的弧形造山带——帕米尔构造结,见图 1a。帕米尔构造结东部被右旋走滑喀喇昆仑断裂(KKF)切断,北部以主帕米尔逆断层带(MPT)为界与阿莱盆地相邻^[11-12],根据帕米尔地区蛇绿岩带的

分布特点,结合区域地质构造演化规律,前人提出以 Akbaytal-Tanymas 缝合带和 Rushan-Pshart 缝合带为界,将其划分为北帕米尔、中帕米尔和南帕米尔^[13-15]。河北省第五地质大队^[16]将研究区大地构造分区划归于塔什库尔干-甜水海地块,与中帕米尔相接^[17]。塔什库尔干-甜水海地块和西昆仑地体以麻扎-康西瓦缝合带为界。一般认为麻扎-康西瓦缝合带经慕斯塔格峰西侧的江托克铁热克达坂^[18],延伸到塔吉克斯坦,再出现在我国的乌孜别里山口^[3]。部分学者认为麻扎-康西瓦缝合带往北与木扎灵-空贝利断裂相连,通过乌孜别里山口延到国外^[19]。

该区构造极为发育,其中乌孜别里山口-博多布拉克断裂(F_6) (图 1b)为调查区内主要的边界断裂,总体走向 NWW-近 EW 向,波状弯曲,向西在乌孜别里山口南侧一带延出国外,向东在恰普吐孜敦别力山口南一带延出国外。断层主断面较难辨认,但其主体位于一系列山脊的鞍部,局部见陡坎、陡壁,主断面向北倾,倾向 $8^\circ\sim 20^\circ$,倾角在 70° 以上,具有多期活动的特点。在断裂带及北侧有一系列大致平行断裂的石英脉形成,石英脉具碎裂和蚀变现象,发育有硅化、褐铁矿化、孔雀石化和蓝铜矿化为主,石英脉中含明金,研究区内最具代表性的例子就是阔克吉勒嘎金矿床。木吉金矿区是目前西昆仑发现的规模最大的金矿富集区。阔克吉勒嘎金矿床则是木吉金矿区内最大的岩金矿床。该矿床已发现的 21 处金矿体均产于蚀变破碎带中。

研究区地层露头较差,岩石风化、片理化比较严重。主要出露地层为:下寒武统(C_1)、下志留统温泉沟群(S_{1w})、上白垩统铁龙滩群(K_2t)以及第四系(Q)。

下寒武统(C_1):调查区该套地层争议颇多,时代归属混乱且证据严重不足,河北省第五地质大队^[16]最终将其定为下石炭~上二叠统恰提尔群($C_1\sim P_2q$),与陕西省地质调查院报告^[5]一致。但根据本人最新的研究发现,其时代归属应为早寒武世,具体划分为哪个群组,尚待讨论。该套地层主要分布在克则勒治业克沟~乌孜别里山口南侧,北以乌孜别里-博多布拉克断裂(F_6)为界,与下志留统温泉沟群(S_{1w})

呈断层接触,向东、向南和向西延出国境,整体呈 NWW 向带状展布。该套地层由南至北可划分为两个岩性段。第一岩性段岩石组合主要以海相火山岩为主,其中多见流纹岩,偶见英安岩、安山岩、玄武安山岩和玄武岩夹层。局部岩石有一定程度的变质,变质矿物以绢云母、绿泥石为主。第二岩性段主要岩性为大理岩、片理化结晶灰岩和硅化灰岩等,见有少量的二云母石英千枚岩,岩性组合较为简单,主要为一套碳酸盐夹碎屑岩组合。下志留统温泉沟群(S_{1w})在研究区内分布最广,整体呈近 EW 向带状展布,为一套低绿片岩相的浅变质岩和碳酸盐岩互层。基岩露头差,风化严重,具有强变形弱变质的特点,面理、片理化发育,整体产状数据绝大多数集中在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\angle 40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内。

上白垩统铁龙滩群(K_2t)在区内分布范围有限,主要出露于克则勒治业克沟-乌孜别里山口的北侧,琼巴额什沟北侧的玉衣提克特一带有部分出露,均呈近 EW 向带状展布。由于受后期构造改造影响及风化剥蚀,多数地段呈“斑秃”状零散的孤包不整合

于下志留统温泉沟群之上,厚度及规模较小。该群岩性以灰岩、石英岩和凝灰岩为主,自下而上具有由细到粗的粒序特征。

研究区内的第四系(Q)冲洪积物主要分布于海拔相对较低的宽阔河谷中,多以砾石、砂和砂土等为主,砾石以棱角-次棱角状为主,夹杂大量泥沙质。

2 岩相学特征

本次研究选取的 5 件流纹岩样品采集地点为 $38^{\circ}35'02''N$ 、 $73^{\circ}54'35''E$,见图 1b。样品整体较为新鲜,野外露头呈浅肉红色,具斑状结构,块状构造、流纹构造(图 2a、图 2b)。岩石由斑晶、基质组成。斑晶主要由钾长石(5%~15%)、石英(5%~10%)构成。钾长石半自形-自形,板状为主,发育卡斯巴双晶,0.2~3.0 mm,零散定向分布;石英呈半自形粒状,粒径 0.1~1.0 mm,可见波状消光(图 2d)。基质由长英质及少量蚀变矿物构成。长英质部分具隐晶-微晶结构,部分具球粒结构,两部分各自呈条纹状相间流状

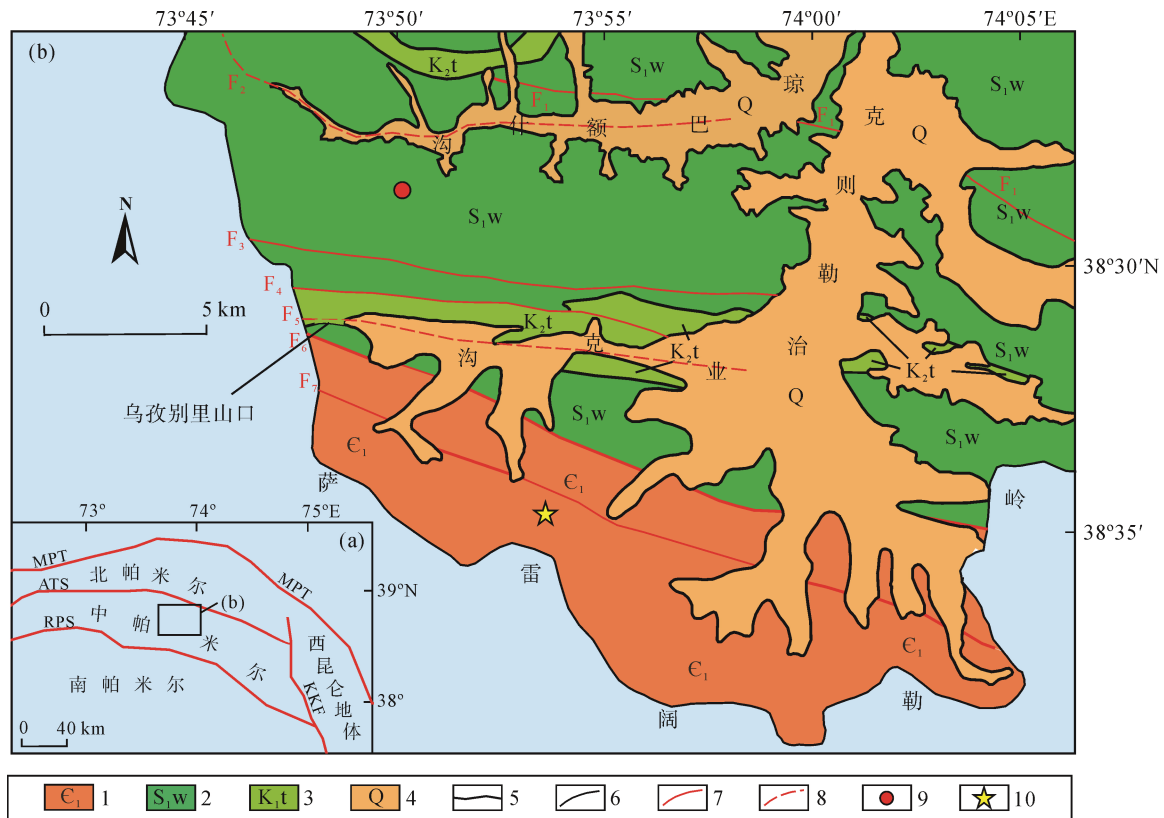


图 1 研究区地质背景图

Fig.1 Map showing regional geological background of the study area

(a) 西昆仑-帕米尔大地构造略图;(b) 木吉金矿区地层分布图。1-下寒武统;2-下志留统温泉沟群;3-上白垩统铁龙滩群;4-第四系;5-萨雷阔勒岭;6-地层界线;7-实测断层;8-推测断层;9-阔克吉勒嘎岩金矿;10-采样位置;ATS-Akбайtal-Tanymas 缝合带;KKF-喀喇昆仑断裂;MPT-主帕米尔逆冲断层;RPS-Rushan-Pshart 缝合带。

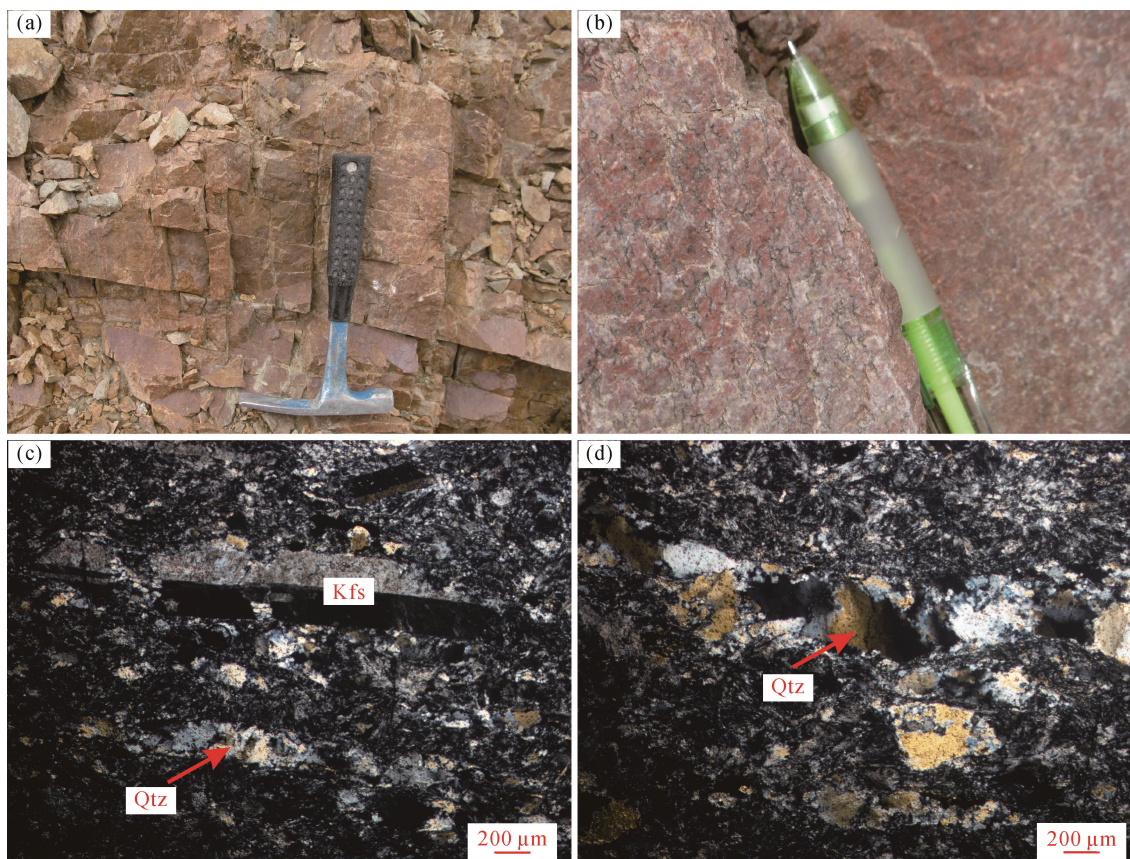


图 2 研究区流纹岩的野外及镜下显微照片

Fig.2 Microphotographs of rhyolites in the study area
Kfs-钾长石; Qtz-石英。

分布构成流纹构造,具轻微高岭土化。蚀变矿物为绢云母,显微鳞片状,直径小于 0.05 mm,集合体呈线纹状、条纹状等零散定向分布。

3 分析测试方法

样品的破碎和锆石分选由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。样品制靶和锆石阴极发光(CL)图像由重庆宇劲科技有限公司完成。锆石 U-Pb 年龄测定在中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室完成。Hf 同位素及全岩主元素、微量元素分析测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析测试方法

样品破碎后制成约 80 目(0.177 mm)粉末,用清水淘洗,得到的重砂部分,再经过电磁选分离出锆石,在双目镜下挑选出晶形完整、无裂隙和透明度好的锆石,粘于环氧树脂表面,固化后打磨抛光至

露出一个光洁平面,然后进行透反射和阴极发光(CL)照像,结合这些图像选择适宜的点位进行测试。锆石的原位 U-Pb 定年和微量元素分析利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)完成。仪器采用美国 Resonetics 公司生产的 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)联机。实验采用标准锆石 TEMORA^[20]作为测年外标,激光剥蚀直径为 30 μm,频率为 8 Hz,具体实验分析方法详见涂湘林等^[21]。数据处理使用软件 ICPMSDataCal 10.1^[22]。锆石谐和年龄图绘制和年龄计算采用软件 Isoplot3.0^[23]。

3.2 岩石主元素、微量元素分析测试方法

将样品无污染粉碎至 200 目(0.075 mm)用于地球化学分析测试。主元素使用 Rigaku ZSX100e 型 XRF 进行分析,精度优于 5%,微量元素使用 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRC-e 型 ICP-MS 进行分析,分析精度优于 5%,具体分析方法和过程参照梁细荣等^[24]和李献华等^[25]。

3.3 锆石 Hf 同位素分析测试方法

锆石 Hf 同位素原位分析, 使用仪器为美国 resonetic 公司生产的 Neptune Plus 型多接收等离子质谱仪(MC-ICP-MS), 激光剥蚀系统为 RESOLUTION M-50, 详细激光剥蚀参数如下: 分析时激光剥蚀直径为 45 μm , 频率为 8 Hz, 激光输出能量为 80 mJ/cm^2 , 采用 He 和少量 N_2 作为气体介质。测试过程采用蓬莱锆石作为标样^[26], 数据标准化根据 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$, 质量歧视校正用指数法则进行, Yb 和 Lu 的干扰校正取 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02655$ ^[27]和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5887$, 而 Yb 分馏校正则根据 $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}=1.35272$ 用指数法则进行^[28]。 ϵ_{Hf} 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数^[29] $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 Hf 模式年龄计算中采用的球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.282772^[30] 和 0.28325^[31], 二阶段模式年龄计算中采用平均地壳 $f_{\text{cc}}=-0.55$ ^[31]。

4 测试结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

本次研究对木吉金矿区西南部火山岩系的流纹岩样品进行了锆石 U-Pb 定年分析, 结果见表 1。

流纹岩样品中锆石晶型较好, 多呈短柱状, 晶体长度一般为 60~100 μm , 长宽比集中于 1.5 : 1~2 : 1 之间。阴极发光图像(图 3a)显示, 大部分锆石晶型较完整, 具有清晰的岩浆韵律环带, 显示岩浆成因特征^[32]。流纹岩中锆石的 U、Th 含量分别为 200~455 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和 85.4~346 $\mu\text{g}/\text{g}$, 也显示出岩浆锆石的特点^[33-34]。

本次研究共选择了 25 个点进行测试, 其中第 23 号点由于 Pb 丢失导致测试数据异常故已删去, 其余测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 (513.5 \pm 7.15)~(528.8 \pm 8.75) Ma 之间, 加权平均年龄为 (521.0 \pm 2.8) Ma, MSWD=0.24, 见图 3b。

表 1 乌孜别里地区流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the rhyolite sample from the Wuzhibieli area

测点	含量($\mu\text{g}/\text{g}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)				协和度 (%)
	Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
1	32.4	152	286	0.53	0.05588	0.00209	0.02576	0.08423	0.00124	0.37240	509.9	15.83	521.3	7.36	97
2	40.8	245	352	0.70	0.05610	0.00181	0.02156	0.08469	0.00115	0.41153	511.2	13.24	524.0	6.83	97
3	35.1	184	312	0.59	0.05265	0.00171	0.02140	0.08412	0.00121	0.41279	486.2	13.46	520.7	7.19	93
4	32.3	130	294	0.44	0.05794	0.00178	0.02155	0.08456	0.00111	0.41375	525.7	13.04	523.3	6.61	99
5	40.1	193	356	0.54	0.05637	0.00177	0.02113	0.08439	0.00118	0.43396	513.4	12.94	522.3	6.99	98
6	50.0	285	428	0.67	0.05730	0.00180	0.02243	0.08513	0.00137	0.48436	524.0	13.59	526.7	8.13	99
7	24.9	113	220	0.51	0.05761	0.00205	0.02533	0.08502	0.00129	0.40636	526.2	15.32	526.0	7.66	99
8	43.6	291	371	0.78	0.05765	0.00165	0.02058	0.08405	0.00107	0.41462	522.2	12.50	520.2	6.34	99
9	22.6	85.4	200	0.43	0.05749	0.00181	0.02370	0.08548	0.00147	0.49480	527.2	14.32	528.8	8.75	99
10	31.6	133	276	0.48	0.05751	0.00188	0.02428	0.08455	0.00115	0.37897	524.3	14.71	523.2	6.84	99
11	37.3	226	320	0.71	0.05876	0.00259	0.03297	0.08400	0.00121	0.29551	525.5	19.95	520.0	7.18	98
12	37.6	202	330	0.61	0.05729	0.00317	0.03934	0.08430	0.00129	0.25586	512.0	24.13	521.8	7.69	98
13	29.2	174	261	0.67	0.06037	0.00405	0.05155	0.08291	0.00120	0.19409	533.1	30.97	513.5	7.15	96
14	38.3	208	337	0.62	0.05456	0.00408	0.05183	0.08405	0.00138	0.19780	493.5	32.38	520.2	8.19	94
15	38.8	216	341	0.63	0.05728	0.00499	0.06384	0.08422	0.00120	0.14789	516.6	38.99	521.3	7.13	99
16	40.9	232	358	0.65	0.05363	0.00507	0.06405	0.08434	0.00122	0.13987	489.2	40.19	522.0	7.26	93
17	43.0	276	375	0.73	0.05702	0.00459	0.05860	0.08403	0.00117	0.15750	515.9	35.81	520.1	6.96	99
18	53.0	330	455	0.72	0.05632	0.00368	0.04721	0.08460	0.00115	0.18997	513.4	28.92	523.5	6.85	98
19	36.9	224	322	0.69	0.05618	0.00304	0.03858	0.08424	0.00112	0.22677	511.9	23.66	521.4	6.68	98
20	40.6	222	352	0.63	0.05630	0.00252	0.03084	0.08460	0.00129	0.32603	512.8	18.90	523.5	7.70	97
21	53.1	337	445	0.76	0.05738	0.00183	0.02199	0.08405	0.00106	0.38555	523.9	13.33	520.2	6.28	99
22	53.7	346	454	0.76	0.05822	0.00194	0.02318	0.08329	0.00104	0.36525	526.8	14.01	515.8	6.17	97
23	52.0	294	436	0.67	0.05804	0.00208	0.02341	0.08377	0.00104	0.36068	526.0	14.16	518.6	6.20	98
24	54.0	331	447	0.74	0.05771	0.00204	0.02323	0.08311	0.00109	0.37919	522.0	14.11	514.7	6.48	98

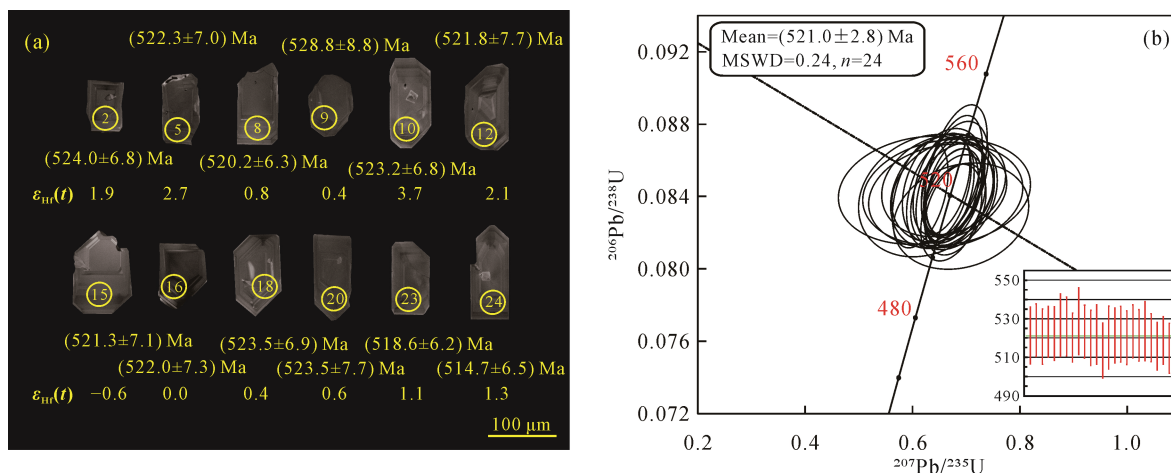


图 3 乌孜别里地区流纹岩中代表性锆石的阴极发光图像(CL)、分析点位、年龄及 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(a, 实线圆圈和虚线圆圈分别代表锆石 U-Pb、Hf 同位素分析点位置)和锆石 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig.3 CL images of zircons in the rhyolite from the Wuzibeli area, with analytical numbers, U-Pb ages, and $\epsilon_{Hf}(t)$ values (a), and the zircon U-Pb concordia diagram (b)

4.2 岩石地球化学特征

4.2.1 主元素特征

木吉金矿区 5 个流纹岩样品的地球化学分析结果见表 2。流纹岩的 SiO_2 含量在 71.3%~79.3% 之间, 平均含量为 74.5%; Na_2O 含量主要介于 0.07%~0.81% 之间, K_2O 含量为 5.9%~10.6%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值大于 2.49, 具有明显的富钾低钠特征; 5 件样品的里特曼指数介于 0.99~4.11 之间, 平均值为 2.77, 总体显示钙碱性, L3B-6-2 和 L3G-7 两件样品的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 虽然都大于 10%, 但并非碱性流纹岩(图 4), 镜下也未看到有碱性暗色矿物的存在; Al_2O_3 含量在 9.18%~13.4% 之间, 平均含量为 11.7%, 铝饱和指数(A/CNK)为 0.99~1.33; CaO 含量在 0.17%~2.04% 之间, 平均含量为 0.81%, Fe_2O_3 含量为 1.06%~2.34%, 平均含量为 1.74%; MgO 含量为 0.13%~1.51%, 平均含量为 0.52%, 与流纹岩 Mg、Fe 和 Ca 组分较低规律一致, 低 TiO_2 (0.12%~0.46%)。此外, 岩石还表现出低 P_2O_5 (0.00%~0.06%)、 MnO (0.06%~0.09%) 的特征。在火山岩 TAS 分类命名图解(图 5a)中, 5 件样品均落在流纹岩范围内; 在 A/NK-A/CNK 图解中(图 5b), 样品点主要落在过铝质范围内, 总体表现为过铝质特征。

4.2.2 微量元素特征

木吉金矿区西南部流纹岩 5 件样品稀土元素总量 $\sum\text{REE}$ 主要介于 53.8~106 $\mu\text{g}/\text{g}$ 之间, 轻稀土元素($\sum\text{LREE}$)介于 43.2~81.8 $\mu\text{g}/\text{g}$ 之间, 重稀土元素($\sum\text{HREE}$)介于 10.6~27.6 $\mu\text{g}/\text{g}$ 之间, $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$

比值介于 3.42~4.53 之间, 显示轻稀土元素相对于重稀土元素有一定程度的富集; 分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 2.37~3.20 之间, 轻、重稀土分馏作用比较明显, 中等负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.35\sim0.64$)。原始地幔标准化微量元素蛛网图(见图 6b)显示, 岩石富集大离子亲石元素(Rb、K)、轻稀土元素和不相容元素 U, 相对亏损重稀土元素、高场强元素(P、Ti)。

4.3 锆石 Hf 同位素特征

流纹岩锆石原位 Hf 同位素分析结果见表 3, Hf 同位素演化图解如图 7 所示。样品锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.001375818~0.00313943, 平均值为 0.001895949, 所有锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值都小于 0.004, 表明锆石在形成后基本上没有放射性成因 Hf 的积累, 所测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值能代表其形成时体系的 Hf 同位素组成^[39]。分析结果显示, 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.282446~0.282571, 平均值为 0.282502。锆石 Hf 同位素初始比值 $\epsilon_{Hf}(t)$ 变化范围在 -0.9~4.1 之间, 主要为正值; 单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})介于 970~1175 Ma 之间; 两阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})介于 1533~1229 Ma 之间。

5 讨论

5.1 成岩年龄

关于木吉金矿区南部火山岩地层时代归属问题, 争论由来已久。由于研究区所处地理位置的特殊性(这其中既包括高海拔的环境因素, 也包括我国与

表 2 乌孜别里地区流纹岩主量元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果Table 2 Major (%) and trace element concentrations ($\mu\text{g/g}$) of rhyolites from the Wuzhibieli area

样号	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	L.O.I	Total	A/CNK	A/NK	K ₂ O+Na ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O	I _b	Sc	Ti	V
L3B-2-1	10.7	2.04	1.06	7.92	0.98	0.09	0.81	0.05	72.9	0.41	2.76	99.7	0.99	1.22	8.73	9.78	85.8	5.07	2471	11.4
L3B-2-2	12.7	0.20	1.30	6.68	0.16	0.08	2.68	0.06	75.2	0.46	0.14	99.6	1.33	1.36	9.36	2.49	89.3	4.66	2615	13.9
L3B-6-1	9.18	1.10	2.30	5.94	0.18	0.06	0.07	0.00	79.3	0.12	1.39	99.7	1.29	1.53	6.01	84.9	91.8	3.31	530	1.70
L3B-6-2	13.4	0.54	2.34	10.6	0.13	0.05	0.15	0.02	71.3	0.24	0.76	99.6	1.19	1.25	10.8	70.9	88.4	4.64	1331	6.01
L3G-7	12.5	0.17	2.07	10.0	0.16	0.07	0.35	0.00	73.9	0.17	0.31	99.6	1.18	1.20	10.4	28.6	89.5	1.91	541	2.40
样号	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm
L3B-2-1	35.6	737	1.85	2.87	6.39	60.8	7.88	1.23	141	85.2	36.3	276	11.5	0.57	3320	14.0	33.7	4.68	21.5	6.56
L3B-2-2	96.0	613	1.72	2.70	12.8	13.9	11.1	0.99	108	34.6	22.5	303	12.7	0.74	493	10.2	23.5	3.00	11.4	2.35
L3B-6-1	35.2	434	2.57	1.65	2.45	18.3	11.6	1.70	145	26.3	16.2	201	10.3	0.62	415	11.6	26.6	3.29	11.9	2.39
L3B-6-2	33.5	338	0.78	1.30	2.49	11.0	16.1	2.45	208	28.9	27.4	296	12.7	0.51	590	78.0	164	19.4	71.6	13.1
L3G-7	85.7	506	0.73	1.87	3.24	10.8	10.7	0.98	188	21.0	14.3	263	10.5	0.69	628	9.72	19.8	2.31	8.93	2.03
样号	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	ΣREE	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	Rb/Sr	Th/U	La _N /Y _{BN}	δEu
L3B-2-1	1.41	6.90	1.24	6.91	1.33	3.47	0.50	3.13	0.48	7.33	0.87	13.9	13.4	3.98	106	3.42	1.65	3.38	3.20	0.64
L3B-2-2	0.43	2.68	0.55	3.72	0.86	2.79	0.46	3.09	0.51	8.11	0.97	5.37	14.6	3.58	65.6	3.47	3.10	4.09	2.37	0.52
L3B-6-1	0.28	2.21	0.41	2.88	0.69	2.34	0.41	2.97	0.47	6.60	0.88	1.65	14.1	1.74	68.5	4.53	5.53	8.10	2.80	0.36
L3B-6-2	1.34	9.86	1.14	5.90	1.22	3.80	0.63	4.34	0.68	9.10	1.08	2.58	21.4	3.79	375	12.6	7.19	5.65	12.9	0.35
L3G-7	0.43	2.03	0.35	2.31	0.55	1.88	0.34	2.64	0.48	9.01	0.89	2.63	16.1	4.55	53.8	4.08	8.95	3.55	2.64	0.63

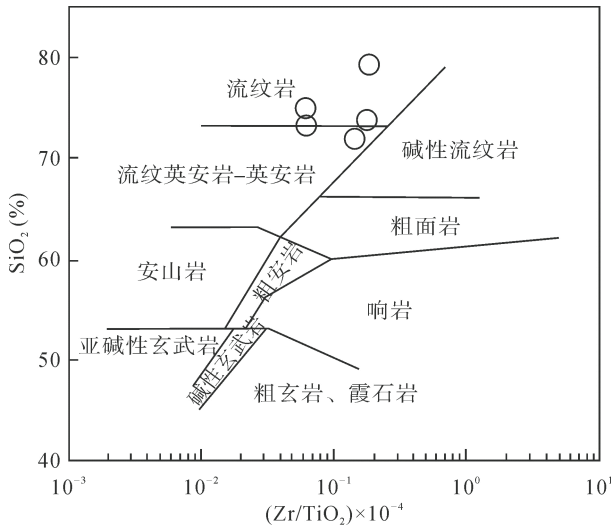


图 4 乌孜别里地区流纹岩 SiO₂-Zr/TiO₂ 图解 (底图据 Winchester *et al.* [35])

Fig.4 SiO₂-Zr/TiO₂ diagram (after Winchester *et al.* [35]) of rhyolites from the Wuzhibieli area

邻国边界问题的限制因素), 该区域一直未有科研工作者进行系统性的科学考察研究, 最终导致地层时代归属的划分依靠的仅仅是区域上岩石性质的对比。本次研究获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄对该区域地层时代提供了重要约束, 表明其形成于早寒武世。

5.2 岩石成因类型

目前, 花岗岩成因分类主要根据其源区和地球化学成分的不同分为 S 型、I 型、M 型和 A 型 4 种基本类型^[40-41]。自然界中真正由地幔岩浆衍生的 M 型花岗岩极少, 主要成因类型为 I 型、S 型和 A 型。判断和区分 I 型、S 型和 A 型花岗岩的重要矿物学标志是角闪石、堇青石和碱性暗色矿物^[42-43], 但由

于研究区流纹岩缺乏以上标志性矿物, 因此难以从矿物学上划分成因类型。本次研究主要从地球化学特征方面来区别。

研究区流纹岩富硅、富钾和贫磷的特点, 虽显示出 A 型花岗岩的特征, 但 $10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值 ($10^4 \times \text{Ga}/\text{Al}=1.39\sim 2.39$) 小于 2.6, 偏低的 Zr、Nb、Ce 和 Y 含量 ($\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}=254\sim 499 \mu\text{g}/\text{g}$)、TiO₂ 含量和锆石结晶温度 (809~848 °C)^[44], 又不同于典型的 A 型花岗岩^[43,45,46]。前述元素地球化学特征显示, 本次所研究的流纹岩具有过铝质特征, Eu 中等负异常, δEu 平均值为 0.5, Na 含量较低等特征明显不同于 I 型花岗岩。岩石样品具有高 Si, 富碱, 低 CaO、TiO₂ 和 P₂O₅ 的特征, 表明岩浆可能经历了一定程度的分异演化; 中等负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.35\sim 0.64$) 和 Sr 的亏损, 暗示岩浆在演化的过程中发生了斜长石的分离结晶作用或源区有斜长石的残留; 分异指数 $I_D > 85.8$ (范围在 85.8~91.8 之间, 均值为 89.0), 表明岩浆在离开源区的过程中经历了较高分异程度的结晶分异作用。在 $\text{Fe}_2\text{O}_3^T/\text{MgO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 和 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 的判别图解中 (图 8), 分析样品基本落入分异的长英质花岗岩及 A 型花岗岩区域内。通常情况下, A 型花岗岩都没有显示强烈分异的证据, 而高分异的长英质 I&S 型花岗岩又可以具有与典型 A 型花岗岩部分一致的某些主元素和微量元素值^[47], 据此判断其为高分异的花岗岩。Rb/Sr 比值可以有效反映源区物质的性质, Rb/Sr > 0.9 为 S 型花岗岩, Rb/Sr < 0.9 为 I 型花岗岩^[48], 5 件样品的 Rb/Sr 比值介于 1.65~8.95 之间, 均大于 0.9, 显示出 S 型花岗岩的特征。在 SiO₂-Zr 和 ACF 图解中 (图 9), 样品几乎

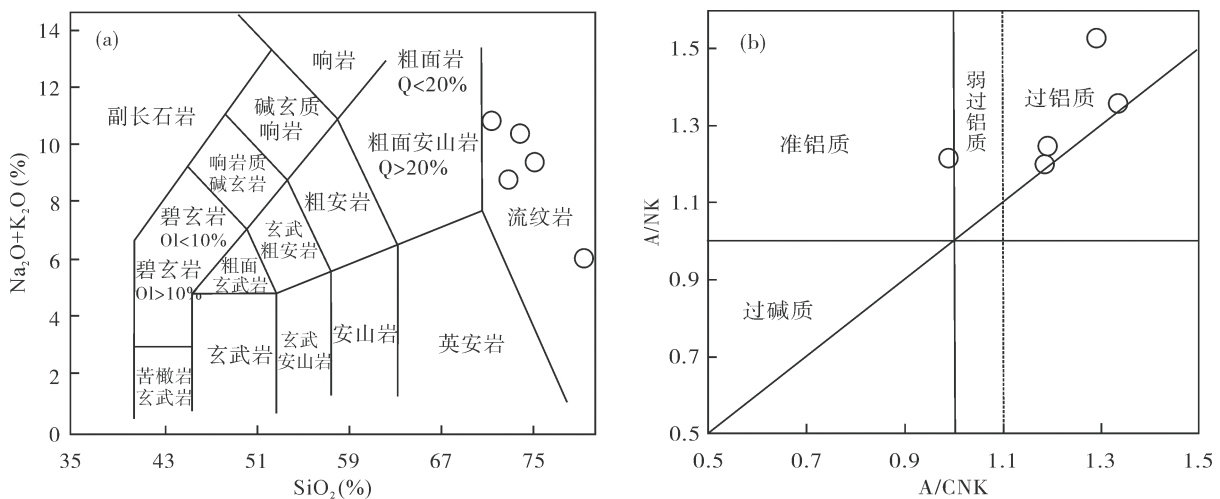


图 5 乌孜别里地区流纹岩 TAS 分类图(a, TAS 底图据 Le Bas *et al.* [36])和 A/CNK-A/NK 图(b, 底图据 Maniar *et al.* [37])

Fig.5 TAS diagram (after Le Bas *et al.* [36]) and A/CNK-A/NK diagram (after Maniar *et al.* [37]) of rhyolites from the Wuzhibieli area
Q-石英; Ol-橄榄石。

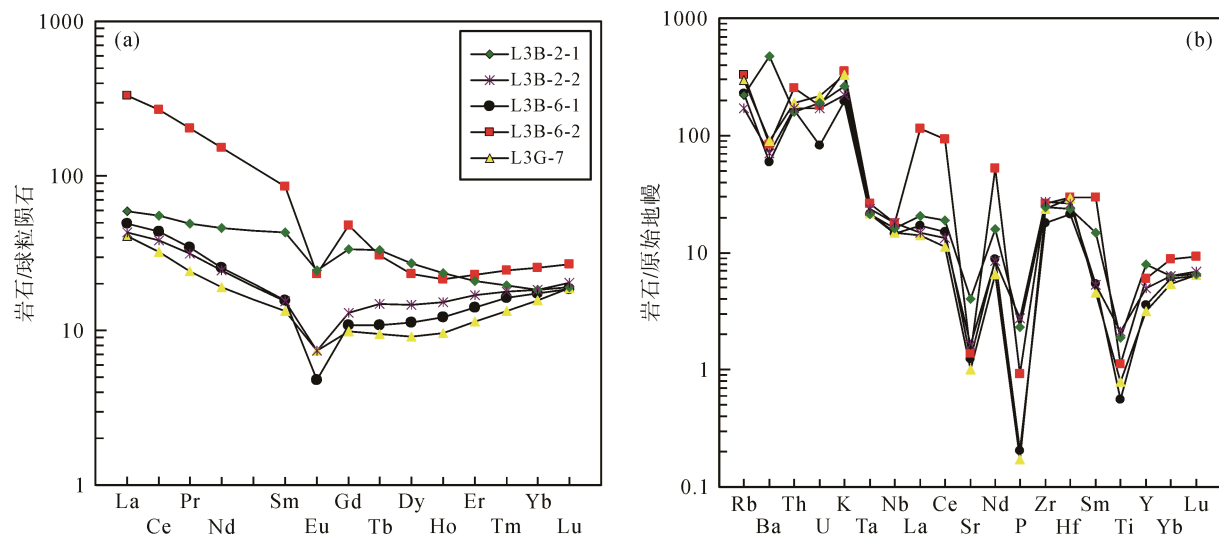


图6 球粒陨石标准化稀土元素分布模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun *et al.*^[38])

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of rhyolites from the Wuzibeli area (normalizing values from Sun *et al.*^[38])

表3 乌孜别里地区流纹岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Hf isotopic compositions of zircons of rhyolites from the Wuzibeli area

测点	年龄(Ma)	1 σ	协和度(%)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{(\text{Lu}/\text{Hf})}$
1	521.3	7.36	97	0.053947338	0.001507018	0.282522	0.000010	-8.85	2.1	1048.1	1348.3	-1.0
2	524.0	6.83	97	0.07998493	0.002167403	0.282520	0.000010	-8.91	1.9	1069.5	1365.0	-0.9
3	520.7	7.19	93	0.060249615	0.001706267	0.282525	0.000012	-8.74	2.1	1049.4	1346.2	-0.9
4	523.3	6.61	99	0.048031488	0.001375818	0.282448	0.000011	-11.44	-0.4	1148.4	1508.2	-1.0
5	522.3	6.99	98	0.057311274	0.001514597	0.282539	0.000010	-8.26	2.7	1024.4	1310.4	-1.0
6	526.7	8.13	99	0.147523047	0.00313943	0.282505	0.000012	-9.43	1.1	1120.5	1417.8	-0.9
7	526.0	7.66	99	0.044504385	0.001258939	0.282571	0.000011	-7.10	4.1	970.9	1229.2	-1.0
8	520.2	6.34	99	0.058205804	0.001595201	0.282482	0.000010	-10.24	0.7	1106.6	1438.6	-1.0
9	528.8	8.75	99	0.053470323	0.001707123	0.282470	0.000012	-10.69	0.4	1128.3	1464.9	-0.9
10	523.2	6.84	99	0.058238136	0.001574469	0.282566	0.000013	-7.27	3.7	986.3	1248.8	-1.0
11	520.0	7.18	98	0.060958051	0.001670615	0.282562	0.000011	-7.44	3.4	995.7	1263.5	-0.9
12	521.8	7.69	98	0.054767567	0.001583497	0.282523	0.000011	-8.81	2.1	1048.8	1347.4	-1.0
13	513.5	7.15	96	0.058914114	0.001714005	0.282500	0.000010	-9.61	1.1	1084.9	1405.5	-0.9
14	520.2	8.19	94	0.06232443	0.001818335	0.282486	0.000013	-10.12	0.7	1108.4	1435.8	-0.9
15	521.3	7.13	99	0.07359718	0.002276138	0.282452	0.000012	-11.33	-0.6	1172.2	1521.9	-0.9
16	522.0	7.26	93	0.073638386	0.002295671	0.282470	0.000013	-10.67	0.0	1145.5	1480.0	-0.9
17	520.1	6.96	99	0.052344929	0.001445995	0.282499	0.000011	-9.67	1.3	1079.4	1399.5	-1.0
18	523.5	6.85	98	0.068774838	0.00191397	0.282476	0.000011	-10.47	0.4	1125.8	1458.6	-0.9
19	521.4	6.68	98	0.051461282	0.001513973	0.282509	0.000011	-9.31	1.6	1067.0	1377.7	-1.0
20	523.5	7.70	97	0.063962524	0.001927127	0.282481	0.000013	-10.30	0.6	1119.0	1447.7	-0.9
21	520.2	6.28	99	0.100056094	0.002816883	0.282474	0.000011	-10.55	-0.1	1157.2	1484.8	-0.9
22	515.8	6.17	97	0.071672408	0.002132873	0.282446	0.000012	-11.52	-0.9	1175.2	1533.6	-0.9
23	518.6	6.20	98	0.082884982	0.002306405	0.282503	0.000011	-9.52	1.1	1098.8	1409.8	-0.9
24	514.7	6.48	98	0.090602478	0.002541018	0.282513	0.000010	-9.14	1.3	1090.2	1393.0	-0.9

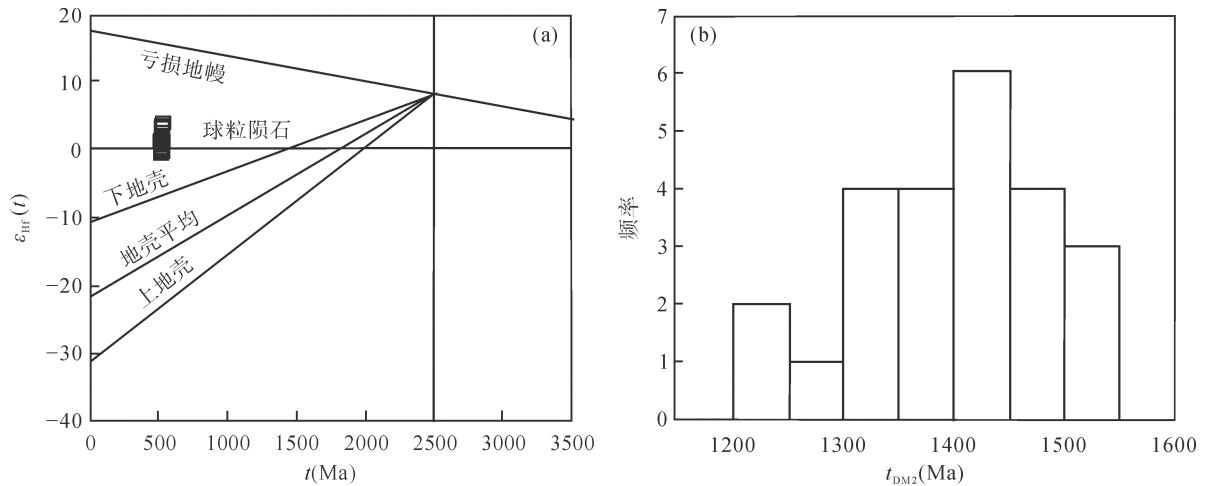


图 7 乌孜别里地区流纹岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(a)和 t_{DM2} 频率分布直方图(b)

Fig.7 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age plot (a) and t_{DM2} histogram (b) for the Wuzibeli area

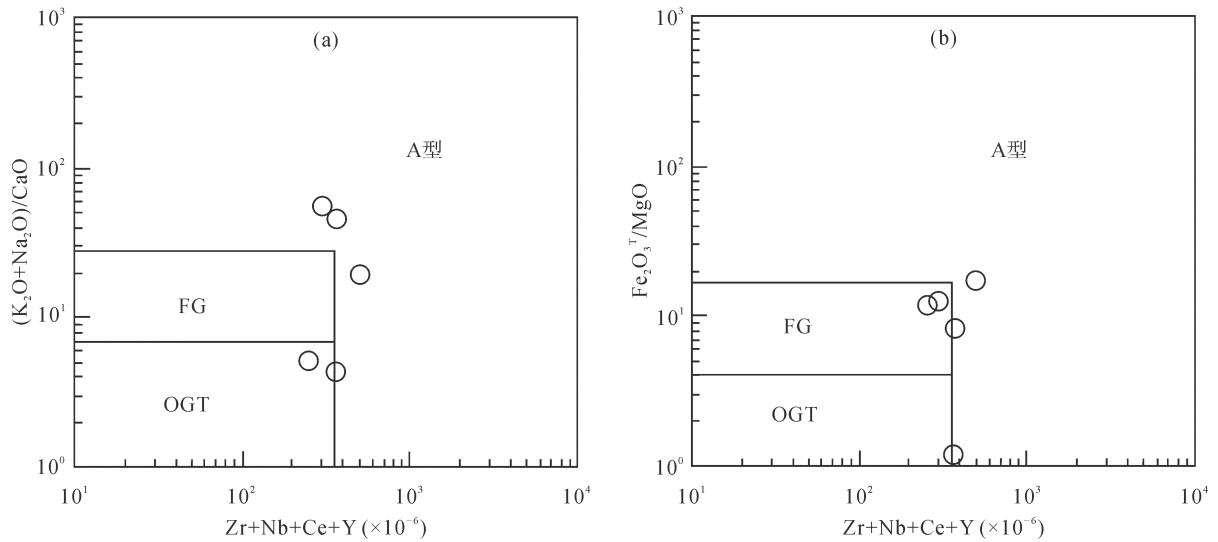


图 8 乌孜别里地区流纹岩地球化学分类图解(底图据 Whalen *et al.*^[45])

Fig.8 The geochemical classification diagrams of rhyolites from the Wuzibeli area (after Whalen *et al.*^[45])

FG-分异的长英质花岗岩; OGT-未分异的 M 型、I 型和 S 型花岗岩。

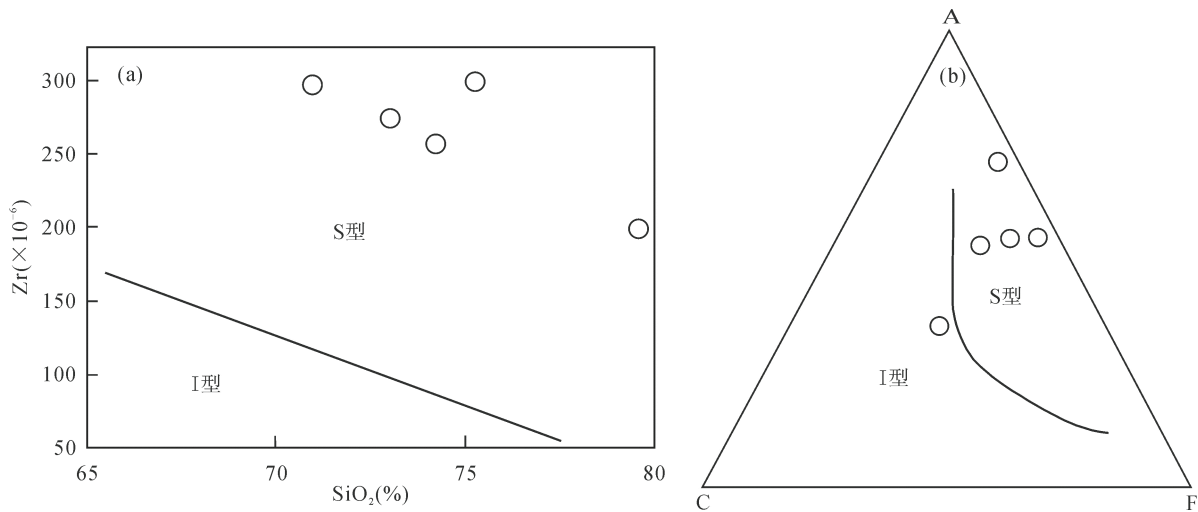


图 9 乌孜别里地区流纹岩 $\text{SiO}_2\text{-Zr}$ 图解(a, 底图据 Whalen *et al.*^[45])和 ACF 图解(b, 底图据 Chappell *et al.*^[49])

Fig.9 SiO_2 vs. Zr (after Whalen *et al.*^[45]) and ACF (after Chappell *et al.*^[49]) diagrams of rhyolites from the Wuzibeli area

A- $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$; C-CaO; F- $\text{FeO}+\text{MgO}+\text{MnO}$ 。

全部落入 S 型花岗岩区域内。综上所述, 本次研究认为研究区流纹岩应为高分异 S 型花岗岩。

5.3 岩浆源区演化

研究区流纹岩样品轻、重稀土元素分异较弱 ($(La/Yb)_N$ 主要介于 2.37~3.20 之间), 重稀土平坦, 指示岩浆源区部分熔融残留相主要矿物组成是角闪石而非石榴石; Eu、Sr 和 Ba 负异常指示斜长石在岩浆源区稳定, 或者岩浆演化过程中有斜长石的结晶分异^[50]; 无明显的 Nb-Ta 负异常, 指示源区部分熔融残留中无金红石。这些特征均表明该流纹岩是经历较高分化的演化形成。流纹岩的物质来源比较复杂, 主要有 3 种认识: ①地壳物质受幔源岩浆底侵发生部分熔融形成^[51-53]; ②幔源玄武质岩浆经分离结晶作用形成^[44,54,55]; ③壳幔岩浆混合形成^[56-58]。

通常情况下, 流纹岩并不能由幔源岩浆直接分异形成, 幔源玄武质岩浆结晶分异一般形成的是安山质岩石^[59]。锆石因具有极低的 Lu/Hf 比值及其稳定性而成为目前探讨岩浆起源与演化、示踪岩石源区及壳幔相互作用的重要工具^[30,60,61]。研究区流纹岩的锆石 Hf 同位素组成变化范围较小, 显示其在组成上的较均一性, 反映了岩石形成时的物源特征, 可以排除地幔物质的混入。通常锆石 Hf 同位素模式年龄代表原岩物质从亏损地幔分异的时代, 锆石 $\varepsilon Hf(t) > 0$ 指示其来源于新生地壳的熔融^[60,62], 而 $\varepsilon Hf(t) < 0$ 则表明其来源于古老地壳的再循环^[60]。本次研究测得流纹岩的 $\varepsilon Hf(t) = -0.9 \sim 4.1$, 主要为正值, 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 介于 1533~1229 Ma 之间(图 7b)。在 $\varepsilon Hf(t)$ 和年龄图解中(图 7a), 数据点主要落于球粒陨石 Hf 同位素演化线上, 代表其原岩来自新生地壳的重熔, 从其二阶段模式年龄可知, 可推测该区在 1.23~1.53 Ga 期间有新生地壳的增长。

该流纹岩的 Nb/Ta 比值(11.7~13.3), 均值为 12.3, 与大陆地壳中的(Nb/Ta \approx 11)^[63-64]非常接近, 且明显低于幔源岩浆的 Nb/Ta 比值(17.5 \pm 2.0)^[65-66], 说明流纹岩源区受地壳组分的影响比较大。Th/Ce 比值(0.13~0.81, 均值为 0.5)和 Th/U 比值(3.38~8.10, 均值为 4.95)与大陆地壳(Th/Ce \geq 0.2^[67]; Th/U=6^[68])非常接近, 说明该组流纹岩可能是壳源物质部分熔融的产物。流纹岩中 Rb/Sr 比值为 1.65~8.95(平均为 5.29)、Rb/Nb 比值为 8.49~17.9(平均为 13.8), 均高于全球上地壳的平均值(0.32 和 4.5)^[69], 表明其岩浆源区主要为壳源岩浆。在 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ 图解上(图 10),

样品均落在壳源型花岗岩范围内, 证明该流纹岩为壳源物质熔融的产物。

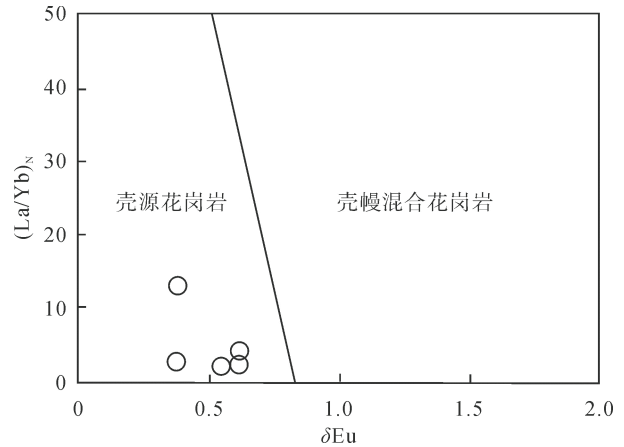


图 10 乌孜别里地区流纹岩 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ 图解
(底图据文献^[70])

Fig. 10 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ (after reference [70]) diagram of rhyolites from the Wuzhibieli area

综上所述, 本次研究认为乌孜别里地区流纹岩为中元古代新生地壳重熔形成的岩浆, 经较高分化的演化而成。

5.4 成岩构造环境

近年来, 塔什库尔干-水海地块地质调查研究表明, 区域上发育一系列的寒武纪岩浆作用记录, 如大量的花岗岩类、基性岩墙和双峰式火山岩等^[71-82], 揭示了西昆仑造山带在早古生代的构造演化背景主要有以下 4 种模式: 原特提斯洋俯冲背景岛弧环境^[71-74]、原特提斯洋俯冲背景下岩浆弧构造环境^[75-76]、伸展构造背景下陆内裂谷环境^[72,73,77-79]以及被动陆缘构造环境^[83-86]。

一般 S 型花岗岩被认为是在同碰撞或者后碰撞构造背景下形成的, 研究区流纹岩在(Y+Nb)-Rb 图解(图 11b)上虽都落入后碰撞构造区域, 但在 Rb/30-Hf-3Ta 图解(图 11a)中则显示出火山弧的特征。前人研究表明, 在火山弧环境下, 由于地壳的加厚能够产生 S 型花岗岩: 沉积岩通常在洋壳低角度俯冲的过程中能够被深埋, 然后由于洋壳俯冲向高角度转换, 俯冲带之上出现伸展的环境, 沉积岩部分熔融产生 S 型花岗岩浆^[87]。研究区流纹岩富集轻稀土, 亏损高场强元素, 在稀土元素和微量元素图解方面显示出较为典型的岛弧花岗岩特征, 在 $w(Y)-w(Zr)$ 图解中(图 12a), 样品均落在弧岩浆岩区域, 暗示其与火山弧花岗岩具有亲缘性。另有研究表明, 活动

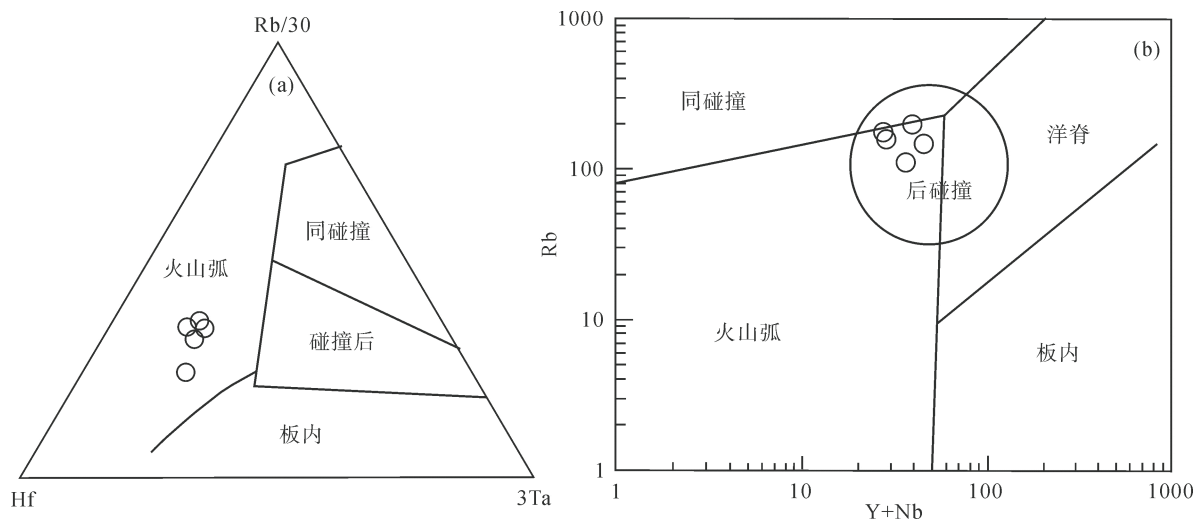


图 11 乌孜别里地区流纹岩 Rb/30-Hf-3Ta 图解(a, 底图据 Harris *et al.*^[89])和(Y+Nb)-Rb 图解(b, 底图据 Pearce^[90])
Fig.11 Rb/30-Hf-3Ta (after Harris *et al.*^[89]) and (Y + Nb) vs. Rb (after Pearce^[90]) diagrams of rhyolites from the Wuzibieli area

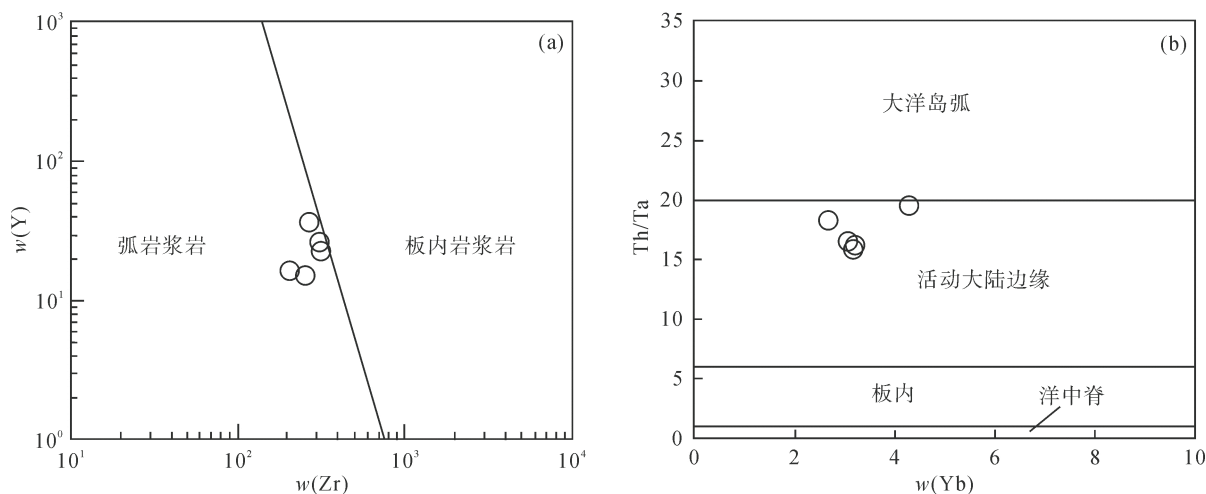


图 12 乌孜别里地区流纹岩 w(Y)-w(Zr)图解(a)和 Th/Ta-w(Yb)图解(b)(底图据 Gorton *et al.*^[91])
Fig.12 w(Y)-w(Zr) and Th/Ta-w(Yb) (after Gorton *et al.*^[91]) diagrams of rhyolites from the Wuzibieli area

大陆边缘的岩浆岩 Th/Ta 比值较高(16~20)^[88], 而该流纹岩 Th/Ta 比值为 15.1~19.8, 在 Th/Ta-w(Yb)图解中(图 12b), 样品均落在活动大陆边缘区域。综上所述, 推断研究区流纹岩在早寒武世的形成背景为原特提斯洋俯冲背景下岩浆弧构造环境。

6 结 论

(1) 乌孜别里地区流纹岩成岩年龄为(521.0±2.8) Ma, 表明它形成于早寒武世, 而非晚石炭-早二叠时期的产物。

(2) 乌孜别里地区流纹岩具有高硅富碱特点, 属于过铝质高钾钙碱性系列。岩石明显富集大离子亲石元素(Rb、K)、轻稀土元素和不相容元素 U, 相对亏损重稀土元素、高场强元素(P、Ti), 具有中等

Eu 负异常, 属于高分异 S 型花岗岩。

(3) 乌孜别里地区流纹岩由中元古代新生地壳重熔形成的岩浆经较高分化的分异演化而成。

(4) 结合前人研究, 推断研究区流纹岩形成于原特提斯洋俯冲背景下岩浆弧构造环境。

本文撰写过程中, 中国科学院广州地球化学研究所的包志伟研究员、河海大学的张传林教授给予了热忱的帮助并提出了宝贵的修改意见, 在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 新疆地矿局区域地质测量大队二分队. 1:100 万西昆仑地区木吉-塔什库尔干一带地质、矿产调查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地矿局区域地质测量大队, 1967.

The Second Unit of Regional Geological Survey Company of

- Xinjiang Geology and Mineral Bureau. Geological and Mineral Investigation Reports in the areas of Muji-Tashikuergan of West Kunlun (Scale 1 : 1000000) [R]. Urumqi: Regional Geological Survey Company of Xinjiang Geology and Mineral Bureau, 1967 (in Chinese).
- [2] 汪玉珍. 1 : 50 万新疆南疆西部地质图、矿产图说明书[R]. 乌鲁木齐: 新疆地矿局第二地质大队, 1985.
Wang Yu-Zhen. Description of Geological Maps and Mineral Maps of Western South Xinjiang (Scale 1 : 500000) [R]. Urumqi: The Second Geology Company of Xinjiang Geology and Mineral Bureau, 1985 (in Chinese).
- [3] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-780.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang. The Regional Geology of Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-780 (in Chinese).
- [4] 卢书炜, 杜凤军, 任建德. 中华人民共和国区域地质调查报告(艾提开尔丁萨依、英吉沙县幅, 1 : 250000)[R]. 北京: 中国地质大学出版社, 2005: 1-287.
Lu Shu-wei, Du Feng-jun, Ren Jian-de. The Regional Geology of Aitikaierdingsayi and Yingjisha (Scale 1: 250000) of The People's Republic of China [R]. Beijing: China University of Geosciences Press. 2005: 1-287 (in Chinese).
- [5] 陕西省地质调查院. 木吉西南一带 1 : 5 万区域矿产地质调查报告[R]. 西安: 陕西省地质调查院, 2009.
Shaanxi Institute of Geological Survey. The Regional Geology of Southwest of Muji (Scale 1 : 50000) [R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Geological Survey. 2009 (in Chinese).
- [6] 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局. 新疆木吉破碎蚀变岩型金矿成矿规律及资源量定量预测工作[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 2010.
Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development. Metallogenic Regularity and Quantitative Prediction of Resources of the Fractured Altered Gold Deposits in Muji, Xinjiang[R]. Urumqi: Xinjiang Bureau of Geo-exploration and Mineral Development. 2010 (in Chinese).
- [7] 闫明江, 张广辉, 徐卫东. 青藏高原北部空白区基础地质综合研究[J]. 西北地质, 2005: 110.
Yan Ming-jiang, Zhang Guang-hui, Xu Wei-dong. A comprehensive study of basic geology in the northern blank area of the Qinghai Tibet Plateau[J]. Northwestern Geol, 2005: 110 (in Chinese).
- [8] 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 高延林, 许志琴. 青藏高原的构造演化[J]. 中国地质科学院院报, 1990, 20(1): 123-125.
Xiao Xu-chang, Li Ting-dong, Li Guang-cen, Gao Yan-lin, Xu Zhi-qin. Tectonic evolution of the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau[R]. Bull Chinese Geol Sci, 1990, 20(1): 123-125 (in Chinese).
- [9] 董连慧, 屈迅, 朱志新, 张良臣. 新疆大地构造演化与成矿[J]. 新疆地质, 2010, 28(4): 351-357.
Dong Lian-hui, Qu Xun, Zhu Zhi-xin, Zhang Liang-chen. Tectonic evolution and metallogenesis of Xinjiang, China[J]. Xinjiang Geol, 2010, 28(4): 351-357 (in Chinese with English abstract).
- [10] Zhang X J, Zhang L C, Xiang P, Wan B, Pirajno F. Zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Shuichang Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: Constrains on the ore-forming age and tectonic setting[J]. Gondw Res, 2011, 20(1): 137-148.
- [11] Strecker M R, Frisch W, Hamburger M W, Ratschbacher L, Semiletkin S, Zamoruyev A, Sturchio N. Quaternary deformation in the Eastern Pamirs, Tadzhikistan and Kyrgyzstan[J]. Tectonics, 1995, 14(5): 1061-1079.
- [12] 陈汉林, 陈沈强, 林秀斌. 帕米尔弧形构造带新生代构造演化研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 890-902.
Chen Han-lin, Chen Shen-qiang, Lin Xiu-bin. A review of the Cenozoic evolution of Pamir Syntax[J]. Adv Earth Sci, 2014, 29(8): 890-902 (in Chinese with English abstract).
- [13] Burtman V S. Cenozoic crustal shortening between the Pamir and Tianshan and a reconstruction of the Pamir-Tianshan transition zone for the Cretaceous and Paleogene[J]. Tectonophysics, 2000, 319(2): 69-92.
- [14] Robinson A C, Yin A, Manning C E, Harrison T M, Zhang S H, Wang X F. Tectonic evolution of the northeastern Pamir: Constraints from the northern portion of the Cenozoic Kongur Shan extensional system, western China[J]. Geol Soc Am Bull, 2004, 116(7): 953.
- [15] Robinson A C, Yin A, Manning C E, Harrison T M, Zhang S H, Wang X F. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: Implications for strain-accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan-Tibetan orogeny[J]. Geol Soc Am Bull, 2007, 119(7/8): 882-896.
- [16] 河北省地质矿产勘查开发局第五地质大队. 新疆阿克陶县乌孜别里地区矿产地质调查[R]. 唐山: 河北省地质矿产勘查开发局第五地质大队, 2015.
Tangshan: The Fifth Geology Company of Hebei Bureau of Geo-exploration and Mineral Development. Geological and Mineral Survey of Wuzibieli Area in Akto County, Xinjiang [R]. Tangshan: The Fifth Geology Company of Hebei Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, 2015 (in Chinese).
- [17] Ducea M N, Lutkov V, Minaev V T, Hacker B, Ratschbacher L, Luffi P, Schwab M, Gehrels G E, McWilliams M, Vervoort J, Metcalf J. Building the Pamirs: The view from the underside[J]. Geology, 2003, 31(10): 849-852.
- [18] 王世炎. 区域地质调查成果报告(叶城县幅、塔什库尔干县幅, 1 : 250000) [R]. 郑州: 河南省地质调查院, 2004.
Wang Shi-yan. The Regional Geology of Yecheng and Tashikuergan (Scale 1 : 250000) [R]. Zhengzhou: Henan Provincial Geological Survey Institute. 2004 (in Chinese).
- [19] 李荣社, 计文化, 杨永成. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 1993, 1-400.
Li Rong-she, Ji Wen-hua, Yang Yong-cheng. Geology of Kunlun Mountain and its adjacent areas[M]. Beijing Geological Publishing House, 1993, 1-400 (in Chinese).
- [20] Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chem Geol, 2003, 200(1/2): 155-170.
- [21] 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应

- 用[J]. 地球化学, 2011, 40(1): 83–98.
- Tu Xiang-lin, Zhang Hong, Deng Wen-feng, Ling Ming-xing, Liang Hua-ying, Liu Ying, Sun Wei-dong. Application of RESOLUTION in-situ laser ablation ICP-MS in trace element analyses[J]. *Geochimica*, 2011, 40(1): 83–98 (in Chinese with English abstract).
- [22] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [23] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot/Ex Version 3.00: A Geochronology Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1–70.
- [24] 梁细荣, 李献华, 刘颖, 李寄岫. 激光熔蚀微探针-电感耦合等离子体质谱法——一种快速测定岩石样品中多个元素的新方法[J]. *分析测试学报*, 2000, 19(1): 33–36.
- Liang Xi-rong, Li Xian-hua, Liu Ying, Lee Chee-yu. Laser ablation microprobe: Inductively coupled plasma mass spectrometry: A new method for rapid determination of multiple elements in rock samples[J]. *J Instr Anal*, 2000, 19(1): 33–36 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比[J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 289–294.
- Li Xian-hua, Liu Ying, Tu Xiang-lin, Hu Guang-qian, Zeng Wen. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks using ICP-AES and ICP-MS: A comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution[J]. *Geochimica*, 2002, 31(3): 289–294 (in Chinese with English abstract).
- [26] Li X H, Long W G, Li Q L, Liu Y, Zheng Y F, Yang Y H, Chamberlain K R, Wan D F, Guo C H, Wang X C, Tao H. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age[J]. *Geost Geoanal Res*, 2010, 34(2): 117–134.
- [27] Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C, Bayon G, Burton K. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections[J]. *J Anal Atom Spectr*, 2002, 17(12): 1567–1574.
- [28] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chem Geol*, 2006, 234(1/2): 105–126.
- [29] Scherer E, Munker C, Mezger K. Calibration of the lutetium-hafnium clock[J]. *Science*, 2001, 293(5530): 683–687.
- [30] Blichert T J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle crust system[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148(1/2): 243–258.
- [31] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61(3/4): 237–269.
- [32] Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the Western Alps[J]. *Cathodolum Geosci*, 2000: 373–400.
- [33] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N I. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143(5): 602–622.
- [34] 吴元保, 郑永飞. 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*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Sci Bull*, 2004, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- [35] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chem Geol*, 1977, 20: 325–343.
- [36] Le Bas M J, Maitre R W L, Streckeisen A, Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *J Petrol*, 1986, 27(3): 745–750.
- [37] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101(5): 635–643.
- [38] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geol Soc London Spec Pub*, 1989, 42: 313–345.
- [39] 王汾连, 赵太平, 陈伟, 王焰. 峨眉山大火成岩省赋 Nb-Ta-Zr 矿化正长岩脉的形成时代和锆石 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2013, 29(10): 3519–3532.
- Wang Fen-lian, Zhao Tai-ping, Chen Wei, Wang Yan. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf Isotopic compositions of the Nb-Ta-Zr bearing syenitic diakes in the Emeishan large igneous province[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2013, 29(10): 3519–3532 (in Chinese with English abstract).
- [40] Chappell B W. Aluminum saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535–551.
- [41] Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97(1/2): 1–29.
- [42] Miller C F. Are strongly peraluminous magmas derived from politic sedimentary source? [J] *J Geol*, 1985, 93(6): 673–689.
- [43] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- Wu Fu-yuan, Li Xian-hua, Yang Jin-hui, Zheng Yong-fei. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- [44] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1983, 64(2): 295–304.
- [45] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95(4): 407–419.
- [46] Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1982, 80(2): 189–200.
- [47] Whalen J B. Geochemical characteristics, discrimination marks and petrogenesis of A-type granites[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95(4): 407–419.

- [48] 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 陈繁荣. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. 岩石学报, 1993, 9(1): 44–54.
Wang De-zi, Liu Chang-shi, Shen Wei-zhou, Chen Fan-rong. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type clastoporphyritic lava[J]. Acta Petrol Sinica, 1993, 9(1): 44–54 (in Chinese with English abstract).
- [49] Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Earth Environ Sci Trans Royal Soc Edinb, 1992, 83(1/2): 1–26.
- [50] Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. Chem Geol, 2005, 218(3/4): 339–359.
- [51] 王德滋, 周金城, 邱检生, 张海进. 东南沿海早白垩世火山活动中的岩浆混合及壳幔作用证据[J]. 南京大学学报(地球科学), 1994, 6(4): 317–325.
Wang De-zi, Zhou Jin-cheng, Qiu Jian-sheng, Zhang Hai-jin. Evidence of magma mixing and crust mantle action in Early Cretaceous volcanism in the southeast coast of China[J]. J Nanjing Univ Geosci, 1994, 6(4): 317–325 (in Chinese with English abstract).
- [52] 于津海, 王德滋, 耿建华. 一个古元古代 A 型流纹岩[J]. 地球化学, 1998, 27(6): 549–558.
Yu Jin-hai, Wang De-zi, Geng Jian-hua. A Palaeoproterozoic A-type rhyolite[J]. Geochimica, 1998, 27(6): 549–558 (in Chinese with English abstract).
- [53] 李伍平. 辽西义县晚白垩世大兴庄组流纹岩的地球化学特征及其成因[J]. 地球科学, 2011, 36(3): 429–439.
Li Wu-ping. Geochemistry characteristics of the Late Cretaceous adakitic rhyolites of Daxingzhuang Formation and its genesis in Yixian Area, western Liaoning Province[J]. Geoscience, 2011, 36(3): 429–439 (in Chinese with English abstract).
- [54] McCulloch M T, Kyser T K, Woodhead J D, Kinsley L. Pb-Sr-Nd-O isotopic constraints on the origin of rhyolites from the Taupo Volcanic Zone of New Zealand: Evidence for assimilation followed by fractionation from basalt[J]. Contrib Mineral Petrol, 1994, 115(3): 303–12.
- [55] Shinjo R, Kato Y. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin[J]. Lithos, 2000, 54(3/4): 117–137.
- [56] Hildreth W, Halliday A N, Christiansen R L. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone plateau volcanic field[J]. J Petrol, 1991, 32(1): 63–138.
- [57] Briand B, Bouchardon J L, Capiez P, Piboule M. Felsic (A-type)-basic (plume-induced) Early Palaeozoic bimodal magmatism in the Maures massif (southeastern France)[J]. Geol Mag, 2002, 139(3): 291–311.
- [58] 丁烁, 黄慧, 牛耀龄, 赵志丹, 喻学惠, 莫宣学. 东昆仑高 Nb-Ta 流纹岩的年代学、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3603–3614.
Ding Shuo, Huang Hui, Niu Yao-ling, Zhao Zhi-dan, Yu Xue-hui, Mo Xuan-xue. Geochemistry, geochronology and petrogenesis of East Kunlun high Nb-Ta rhyolites[J]. Acta Petrol Sinica, 2011, 27(12): 3603–3614 (in Chinese with English abstract).
- [59] Hirose K. Melting experiments on lherzolite KLB-1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melts[J]. Geology, 1997, 25(1): 42–44.
- [60] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 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 Fu-yuan, Li Xian-hua, Zheng Yong-fei, Gao Shan. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- [61] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, Pidgeon R T. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. Nature, 1999, 399(6733): 252–255.
- [62] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Ackerbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. The Hf isotope compositing of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kinberlites[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2000, 64(1): 133–147.
- [63] Taylor S P, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific, 1985.
- [64] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. Chem Geol, 1995, 120(3/4): 347–359.
- [65] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth Planet Sci Lett, 1988, 90: 297–314.
- [66] Dostal J, Chatterjee A K. Contrasting behavior of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada) [J]. Chem Geol, 2000, 163(1/4): 207–218.
- [67] Kerrich R, Polat A, Wyman D, Hollings P. Trace element systematics of Mg-, to Fe- tholeiitic basalt suits of the Superior Province: Implications for Archean mantle reservoirs and greenstone belt genesis[J]. Lithos, 1999, 46(1): 163–187.
- [68] Rudnick R L, Gao S. The Composition of the Continental Crust[M]. Oxford: Elsevier, 2003: 1–64.
- [69] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. London: Blackwell, 1985: 57–72.
- [70] 陈佑纬, 毕献武, 胡瑞忠, 戚华文. 贵东复式岩体印支期产铀和非产铀花岗岩地球化学特征对比研究[J]. 矿物岩石, 2009, 29(3): 106–114.
Chen you-wei, Bi Xian-wu, Hu Rui-zhong, Qi Hua-wen. Comparison of geochemical characteristic of uranium- and non-uranium-bearing Indosinian granites in Guidong composite pluton[J]. Mineral Petrol, 2009, 29(3): 106–114 (in Chinese with English abstract).
- [71] 陕西省地质调查院. 新疆 1: 5 万 J43E017015 等 4 幅区域地质调查报告[R]. 西安: 陕西省地质调查院, 2011.
Shaanxi Institute of Geological Survey. The Regional Geology of 4 maps(J43E017015) of Xinjiang (Scale 1: 50000) [R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Geological Survey, 2011 (in Chinese).

- [72] 陕西省地质调查院. 新疆 1:5 万 J43E016014 等 4 幅区域地质调查报告[R]. 西安: 陕西省地质调查院, 2012.
Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey. The Regional Geology of 4 maps(J43E016014) of Xinjiang (Scale 1:50000) [R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Geological Survey, 2012 (in Chinese).
- [73] 陕西省地质调查院. 新疆 1:5 万 J43E014012 等 7 幅区域地质调查报告[R]. 西安: 陕西省地质调查院, 2014.
Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey. The Regional Geology of 7 maps(J43E014012) of Xinjiang (Scale 1:50000) [R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Geological Survey, 2014 (in Chinese).
- [74] 朱杰, 李秋根, 王宗起, 汤好书, 陈旭, 肖兵. 西昆仑甜水海地体早寒武世花岗岩浆作用及其构造意义[J]. 西北地质, 2016, 49(4): 1-18.
Zhu Jie, Li Qiu-gen, Wang Zong-qi, Tang Hao-shu, Chen Xu, Xiao Bing. Magmatism and tectonic implications of Early Cambrian granitoid plutons in Tianshuihai terrane of the western Kunlun orogenic belt, Northwest China[J]. Northwest Geol, 2016, 49(4): 1-18 (in Chinese with English abstract).
- [75] 匡爱兵, 王云, 刘兵, 张银洲. 新疆叶城县麻扎-塔什库尔干县塔吐鲁沟一带 1:5 万区域地质矿产调查报告[R]. 成都: 四川省核工业地质调查院, 2014.
Kuang Ai-bing, Wang Yun, Liu Bing, Zhang Yin-zhou. The Regional Geology of Yecheng and Tashikuergan of Xinjiang (Scale 1:50000) [R]. Chengdu: Sichuan Institute of Nuclear Geology, 2014 (in Chinese).
- [76] 张辉善, 何世平, 计文化, 王超, 史俊波, 康孔跃, 张杰, 祝大伟, 汤宏伟, 李承栋, 葱德华. 甜水海地块晚寒武世花岗岩对原特提斯洋演化的启示: 来自锆石年代学和地球化学的证据[J]. 地质学报, 2016, 90(10): 2582-2602.
Zhang Hui-shan, He Shi-ping, Ji Wen-hua, Wang Chao, Shi Jun-bo, Kang Kong-yue, Zhang Jie, Zhu Da-wei, Tang Hong-wei, Li Cheng-dong, Xi De-hua. Implications of Late Cambrian granite in Tianshuihai massif for the evolution of proto-tethy ocean: Evidences from zircon geochronology and geochemistry[J]. Acta Geol Sinica, 2016, 90(10): 2582-2602 (in Chinese with English abstract).
- [77] 高晓峰, 校培喜, 康磊, 朱海平, 过磊, 奚仁刚, 董增产. 新疆塔什库尔干塔阿西一带火山岩成因及地质意义[J]. 地球科学, 2013, 38(6): 1169-1182.
Gao Xiao-feng, Xiao Pei-xi, Kang Lei, Zhu Hai-ping, Guo Lei, Xi Ren-gang, Dong Zeng-chan. Origin of the volcanic rocks from the Ta'axi Region, Taxkorgan Xinjiang and its geological significance[J]. Earth Sci, 2013, 38(6): 1169-1182 (in Chinese with English abstract).
- [78] 林尚康, 汤好书, 任涛. 西昆仑赞坎铁矿区英安斑岩地球化学特征及 U-Pb 年代学研究[J]. 河南科学, 2015, 33(6): 986-992.
Lin Shang-kang, Tang Hao-shu, Ren Tao. Study on geochemistry and Zircon U-Pb ages of dacite porphyry from the Zankan iron deposit West Kunlun area[J]. Henan Sci, 2015, 33(6): 986-992 (in Chinese with English abstract).
- [79] 乔耿彪, 王萍, 伍跃中, 郝延海, 赵晓健, 陈登辉, 吕鹏瑞, 杜玮. 西昆仑塔什库尔干陆块赞坎铁矿层形成时代及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 616-629.
Qiao Geng-biao, Wang Ping, Wu Yue-zhong, Hao Yan-hai, Zhao Xiao-jian, Chen Deng-hui, Lü Peng-rui, Du Wei. Formation age of ore-bearing strata of the Zankan iron deposit in Taxkorgan landmass of Western Kunlun Mountains and its geological significance[J]. Geol China, 2015, 42(3): 616-629 (in Chinese with English abstract).
- [80] 燕长海, 陈曹军, 曹新志, 张旺生, 陈俊魁, 李山坡, 刘品德. 新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2012, 31(4): 549-557.
Yan Chang-Hai, Chen Cao-jun, Cao Xin-zhi, Zhang Wang-sheng, Chen Jun-kui, Li Shan-po, Liu Pin-de. The discovery of the “Pamir-type” iron deposits on Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance[J]. Geol Bull China, 2012, 31(4): 549-557 (in Chinese with English abstract).
- [81] Hu J, Wang H, Huang C Y, Tong L X, Mu S L, Qiu Z W. Geological characteristics and age of the Dahongliutan Fe-ore deposit in the Western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China[J]. J Asian Earth Sci, 2016, 116: 1-25.
- [82] 胡军, 王核, 慕生禄, 王敏, 侯学文. 西昆仑甜水海地块南屏雪山早古生代花岗岩地球化学、Hf 同位素特征及其壳幔岩浆作用[J]. 地质学报, 2017, 91(6): 1192-1207.
Hu Jun, Wang He, Mu Sheng-lu, Wang Min, Hou Xue-wen. Geochemistry and Hf isotopic compositions of Early Paleozoic granites in Nanpingxueshan from the Tianshuihai terrane, West Kunlun: Crust-mantle magmatism[J]. Acta Geol Sinica, 2017, 91(6): 1192-1207 (in Chinese with English abstract).
- [83] 杨克明. 论西昆仑大陆边缘构造演化及塔里木西南盆地类型[J]. 地质论评, 1994, 40(1): 9-18.
Yang Ke-ming. The formation and evolution of the western Kunlun continental margin[J]. Geol Rev, 1994, 40(1): 9-18 (in Chinese with English abstract).
- [84] 计文化. 西昆仑-喀喇昆仑晚古生代-早中生代构造格局[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005: 1-143.
Ji Wen-hua. The late Paleozoic-early Mesozoic tectonic frame in the western Kunlun-Karakorum area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005, 1-143 (in Chinese with English abstract).
- [85] 计文化, 陈守建, 李荣社, 王训练. 青藏高原及邻区古生代构造-岩相古地理综合研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014: 1-381.
Ji Wen-hua, Chen Shou-jian, Li Rong-she, Wang Xun-lian. The comprehensive study of Paleozoic tectonics and in the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (Wuhan), 2014: 1-381 (in Chinese with English abstract).
- [86] 柳坤峰, 王永和, 姜高磊, 张思敏, 张克信. 西昆仑新元古代-

- 中生代沉积盆地演化[J]. 地球科学, 2014, 39(8): 987-999.
- Liu Kun-feng, Wang Yong-he, Jiang Gao-lei, Zhang Si-min, Zhang Ke-xin. Evolution of Neoproterozoic-Mesozoic Sedimentary Basins of West Kunlun Area[J]. Earth Sci, 2014, 39(8): 987-999 (in Chinese with English abstract).
- [87] Collins W J, Richards S W. Geodynamic significance of S-type granites in circum-Pacific orogens[J]. Geology, 2008, 36(7): 559-562.
- [88] Ma X X, Xu Z Q, Chen X J, Meert J G, He Z Y, Liang F H, Meng Y K, Ma S W. The origin and tectonic significance of the volcanic rocks of the Yeba Formation in the Gangdese magmatic belt, South Tibet[J]. J Earth Sci, 2017, 28(2): 265-282.
- [89] Harris N B W, Marzouki F M H, Ali S. The Jabel Sayd complex, Arabian Shield: Geochemical constraints on the origin peralkaline and related granites[J]. J Geol Soc Lond, 1986, 143: 287-295.
- [90] Pearce J A. Sources and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 1996, 19(4): 120-125.
- [91] Gorton M P, Schandl E S. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks[J]. Can Mineral, 2000, 38(5): 1065-1073.