

新疆南天山开都河火山岩地球化学特征、锆石 LA-ICP-MS 年代学及其意义

高睿¹, 肖龙¹, 王绘清², 王国灿¹, 罗彦军¹, 刘函¹

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 天津华北地质勘查局, 天津 300170)

摘要: 位于塔里木-卡拉库姆板块与伊犁-哈萨克斯坦板块之间的南天山造山带是最具代表性的造山带之一, 其中发育一条不完整的蛇绿岩带——南天山南缘库勒湖-科克铁克达坂蛇绿岩带, 暗示古缝合线的存在。该蛇绿岩带北面的开都河水电站泥盆纪地层中发育一套中酸性火山岩(包括熔结凝灰岩、含晶屑酸性玻璃质熔岩和安山岩等), 属于碱性-钙碱性系列, A/CNK 值在 0.82~1.31 之间, 该套岩石整体 REE 含量较高, 轻重稀土元素分异显著, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素亏损, 并具有强烈的 Eu 负异常。对熔结凝灰岩中岩浆锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 获得其结晶年龄为 393.1 ± 3.4 Ma, 与中泥盆统(D_2)萨阿尔明组一致。岩石地球化学研究表明, 安山岩可能来自于玄武岩分离结晶, 熔结凝灰岩、含晶屑酸性玻璃质熔岩来自于上地壳部分熔融。推测其形成机制是: 库勒洋盆在中泥盆世向北俯冲消减过程中释放出流体, 导致地幔楔发生部分熔融并形成玄武质岩浆, 部分玄武质岩浆结晶分异形成安山岩, 随着俯冲持续和地壳不断加厚, 玄武质岩浆对上部地壳加热使得其发生部分熔融形成酸性母岩浆, 并最终喷发至地表形成熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩。

关键词: 南天山, 熔结凝灰岩; LA-ICP-MS 锆石年龄, 俯冲消减

中图分类号: P595; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)04-0541-13

Geochemical characteristics and LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of volcanic rocks in Kaidu River, South Tianshan, Xinjiang, and their geological significance

GAO Rui¹, XIAO Long¹, WANG Hui-qing², WANG Guo-can¹, LUO Yan-jun¹ and LIU Han¹

(1. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Tianjin North China Geological Exploration Bureau, Tianjin 300170, China)

Abstract: South Tianshan orogeny is a typical orogenic belt between Tarim-Kalakumu plate and Yili-Kazakhstan plate. Kulehu-Keketiekedaban ophiolitic mélange is exposed in the south margin of the South Tianshan. Kaidu River section is located on the northern margin of Kulehu-Keketiekedaban ophiolite mélange in South Tianshan. In the section, Devonian volcanic rocks composed of ignimbrite, crystal pyroclastic-bearing felsic glassy lava and andesite were discovered. The Devonian volcanic rocks are of alkaline to calc-alkaline series, with A/CNK being 0.82~1.31. The ignimbrite is characterized by high content of REE and strongly enriched and highly-fractionated LREE, with low fractionated HREE and strong negative Eu anomalies. The LA-ICP-MS U-Pb age of zircons from ignimbrite is 393.1 ± 3.4 Ma, suggesting that Saerming Formation belongs to Middle Devonian indeed. The

收稿日期: 2011-03-20; 修订日期: 2012-05-14

基金项目: 中石化海相油气勘探前瞻性项目“中国西北地区构造-岩相古地理研究与编图资助项目(07370502000130)之子项目《塔里木区块构造-岩相古地理研究与编图》

作者简介: 高睿(1985-), 男, 博士研究生, 岩石学、矿物学、矿床学专业, E-mail: jingxingaorui@gmail.com; 通讯作者: 肖龙, 男, 博士, 教授, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

age 393.1 Ma restricts the subduction time of the Kule Ocean basin. Kule Ocean basin started subduction in Middle Devonian (393.1 Ma), which released fluids and resulted in melting of mantle wedge to form basaltic magma. Thus, andesite was formed by fractionation and crystallization of the basaltic magma. When the crust was thickened, the basaltic magma continually ascended upward to cause the melting of the upper crust. Finally, the ignimbrite and crystal pyroclastic-bearing felsic glassy lava were erupted.

Key words: South Tianshan; ignimbrite; LA-ICP-MS; zircon age; subduction

横贯东西连绵3 000多公里的天山(图 1a)被认为是中亚型造山带的重要组成部分,是一条经历了复杂构造演化与地壳增生过程的造山带(Xiao *et al.*, 2004; 高俊等, 2006; 龙灵利等, 2006)。天山造山带根据中天山南缘与北缘缝合线被划分为南天山、中天山与北天山(Allen *et al.*, 1993),位于塔里木-卡拉库姆板块与伊犁-哈萨克斯坦板块之间的南天山造山带是最具代表性的造山带之一。南天山造山带发育有南北两条不同时代的蛇绿混杂岩带(南带沿阿文库-托什罕河-黑英山-库勒湖-欧西达坂分布,北带为长阿吾子-古洛沟-乌瓦门-库米什-铜花山-榆树沟蛇绿混杂岩带)(Gao *et al.*, 1998)和大量古生代花岗岩体。由于南天山古生代的岩浆作用涉及到南天山洋盆俯冲消减和塔里木-中天山碰撞造山等重要地质过程,近年来许多学者对南天山的蛇绿岩和岩浆岩进行了详细的研究(高俊等, 2006; 龙灵利等, 2006; 马中平等, 2006; 朱志新等, 2008, 2009)然而对于分布于南天山晚古生代火山岩的研究却非常少,缺少高质量锆石年代学和岩石地球化学数据。这使得关于南天山洋盆晚古生代的构造演化历史存在争议,尤其对于库勒洋盆(南天山南缘洋盆)俯冲消减是何时开始和持续时间范围如何有比较大的争论(郝杰等, 1993; 汤耀庆等, 1995; 高俊等, 2006; 马中平等, 2006, 2007; 朱志新等, 2008)。

本文以出露于库勒湖蛇绿岩北边的中泥盆统萨阿尔明组中的中酸性火山岩为研究对象,通过野外地质与岩相学研究,结合岩石地球化学、锆石年代学数据,探讨了萨阿尔明组中火山岩的源区特征、构造背景,并结合区域资料探讨了其地质意义。

1 地质背景

南天山介于中天山南缘断裂与塔里木北缘断裂之间,是塔里木板块与哈萨克斯坦板块拼贴汇聚形成的一条碰撞造山带。南天山造山带被后期走滑断

裂分为东西两段(李锦轶等, 2006)。南天山的东段主要为志留纪-泥盆纪地层,震旦纪与早古生代地层零星出露,沉积岩广泛发育,火成岩则极为少量,整体以海相沉积为特点。

本文中的开都河剖面也被称为库勒湖-大山口水电站剖面,构造位置位于南天山南缘蛇绿岩带的东北侧(图 1b),地理上位于新疆和静县西南方向约 60 km 处,剖面起始点与结束点 GPS 坐标分别为 N 41°13'08.5", E 85°43'04.9"和 N 41°14'04.4", E 85°43'49"(WGS84),长度大概为 2.02 km。区内主要出露晚志留-早泥盆世阿尔彼什麦布拉克组(S₃-D_{1a})与中泥盆世萨阿尔明组(D_{2s}),两者分布广泛。阿尔彼什麦布拉克组的岩性为灰黑色、浅褐色、紫红色薄-中厚层状灰岩、生物碎屑灰岩、结晶灰岩夹灰绿色、紫红色片理化砂岩、细砂岩及泥质砂岩,含极其丰富的珊瑚、层孔虫、介形虫与少量牙形石、腕足类、三叶虫化石。萨阿尔明组的岩性为火山碎屑岩、安山岩、玄武岩与灰白色中厚层状白云质灰岩夹碎屑灰岩,含丰富的腕足类、珊瑚、层孔虫化石。它与下伏的阿尔彼什麦布拉克组为整合接触关系(新疆地质矿产局, 1993; 贾承造等, 2004)。根据岩石及化石组合将萨阿尔明组划分为两个亚组:下亚组为喷出岩与火山碎屑岩组合,而上亚组以碳酸盐岩与碎屑岩组合为特点。图 2 是开都河剖面的地层柱状图,剖面共分为 31 层,每层对应的具体岩性组合见图 2。剖面从下至上火山岩含量逐渐减少,暗示火山作用的减弱。该剖面以火山碎屑岩和碎屑它生沉积岩为主,含少量安山岩,并未发现碳酸盐岩,地层属于萨阿尔明组中的下亚组。从剖面的下部到顶部,一共划分出 3 个火山喷发旋回,分别为 1~11 层、16~18 层和 26~31 层。12~15 层、19~25 层属于碎屑岩沉积,根据岩性组合及化石组合判断其形成于前滨-临滨的沉积环境。本文对熔结凝灰岩样品(TR012-7-1)进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,测得其年龄为 393.1 ± 3.4 Ma,对应于中泥盆世,说明萨阿尔明组的确为中泥盆统地层。

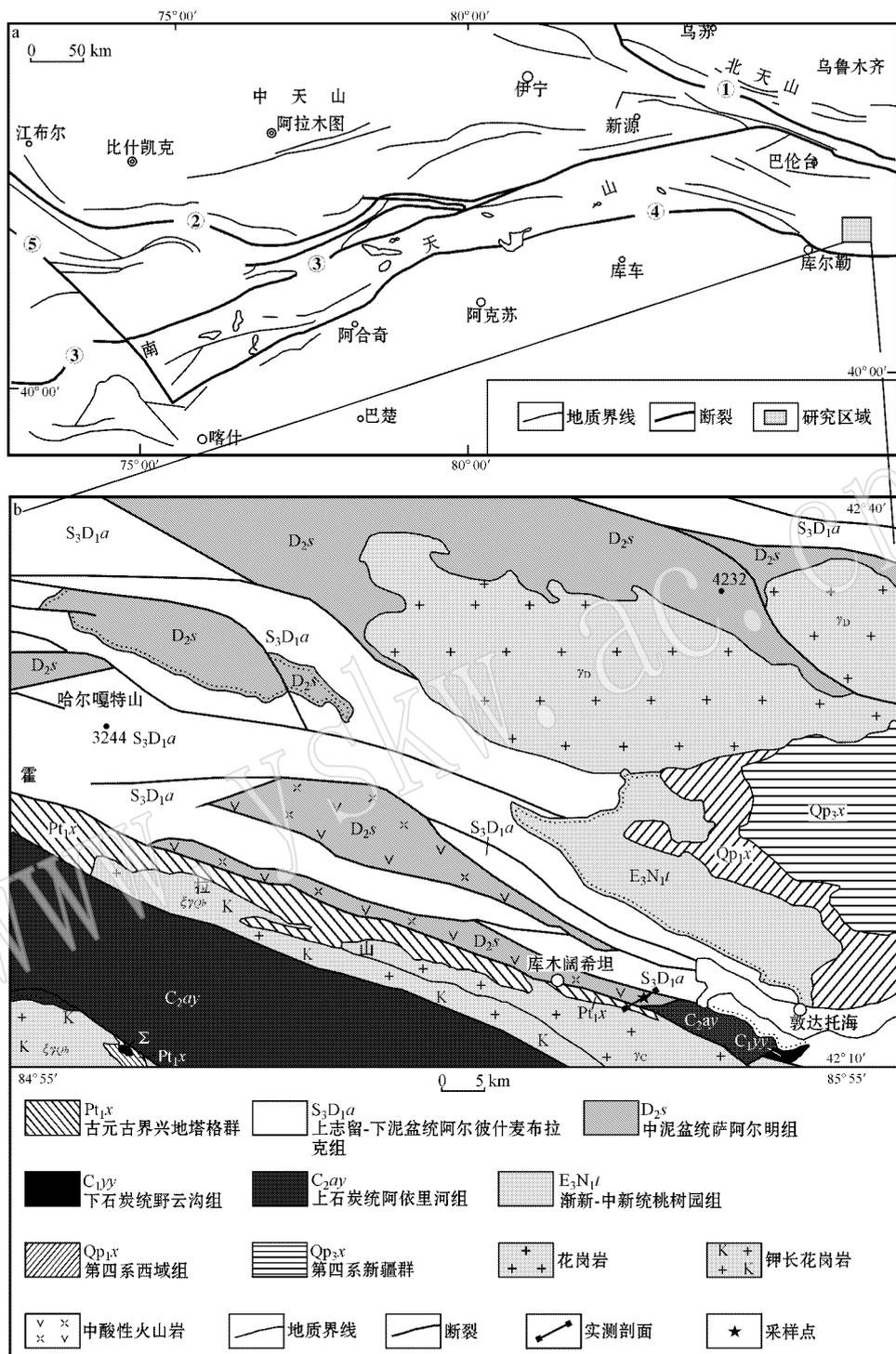
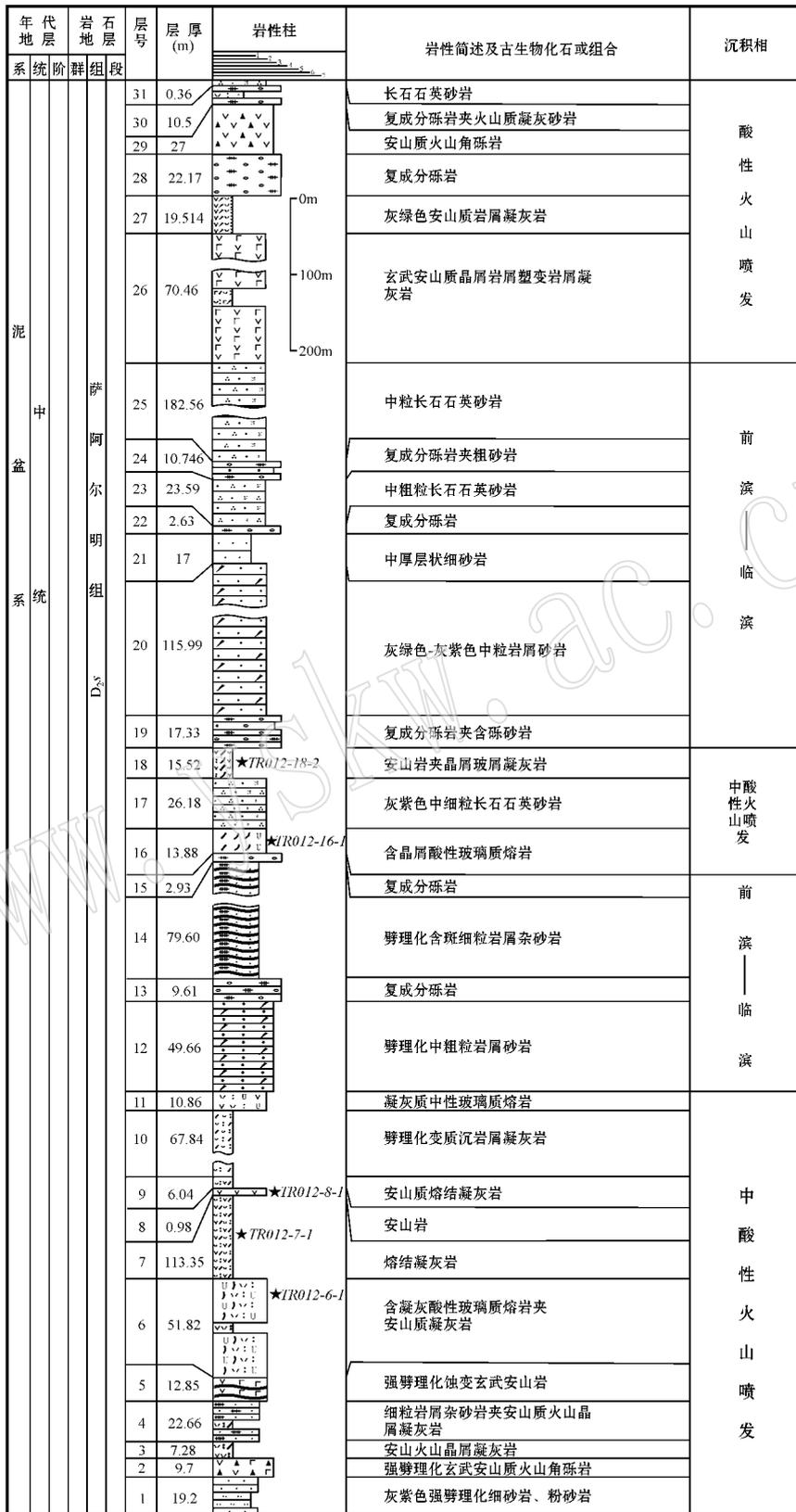


图 1 新疆地区天山区域示意图 (a, 据王超等 2007) 与研究区地质图 (b, 据王洪亮等 2007)

Fig. 1 Geological sketch map of Tianshan orogenic belt in Xinjiang (a, after Wang Chao *et al.*, 2007) and geological map of the study area (b, modified after Wang Hongliang *et al.*, 2007)

- ①—中天山北缘断裂；②—塔拉斯-捷尔斯科伊(尼古拉耶夫线)-阿登布拉克断裂；③—中天山南缘断裂；④—塔里木盆地北缘断裂；⑤—塔拉斯-费尔干纳断裂
- ①—northern marginal suture of Central Tianshan；②—Talas-Dzerskoye (Nikolaev suture)-Fergana fault；③—southern marginal suture of Central Tianshan；④—northern marginal suture of Tarim basin；⑤—Talas-Fergana fault



★ TR012-x-1 代表在第x层采集样品

图 2 开都河泥盆系萨阿组 (D_{2s}) 地层-沉积相综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic-sedimentary facies column of Kaidu River Devonian Saerming Formation (D_{2s})

2 火山岩岩石学特征

剖面中样品 TR012-6-1、TR012-7-1 和 TR012-16-1 分别为硅化含晶屑酸性玻璃质熔岩、熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩。硅化含晶屑酸性玻璃质熔岩(TR012-6-1)(图 3a)具有含晶屑玻璃质结构, 块状构造。岩石主要由晶屑(10%)和玻璃质基质(90%)组成, 晶屑为斜长石, 大小 0.03~1.0 mm 不等, 以 0.2~1.0 mm 为主, 部分呈炸碎棱角状, 聚片双晶常有断裂、错动现象, 斜长石较新鲜, 局部轻微高岭土化。玻璃质已开始重结晶, 重结晶粒度极细

小, 整体多呈霏细状, 间杂有定向排列的丝状绢云母, 推测可能受到强烈的硅化。熔结凝灰岩(TR012-7-1)具有熔结凝灰结构, 似流动构造(图 3b)。主要由晶屑(5%)和塑变玻屑(95%)组成。晶屑大小混杂, 粒度范围约 0.05~1.5 mm, 成分以斜长石为主。斜长石具有不同程度的绢云母化。塑变玻屑形态极不规则, 大体呈定向伸长状, 两端有分叉, 长 0.1~0.6 mm 左右, 部分为鸡骨状, 可能是塑变玻屑-玻屑间的过渡类型; 已重结晶, 呈霏细状, 玻屑整体定向排列构成假流纹构造。塑变玻屑间夹缝处有定向排列的绢云母充填, 可能是火山尘的蚀变产物。含晶屑酸性玻璃质熔岩(TR012-16-1)(图 3c)含凝灰玻璃质

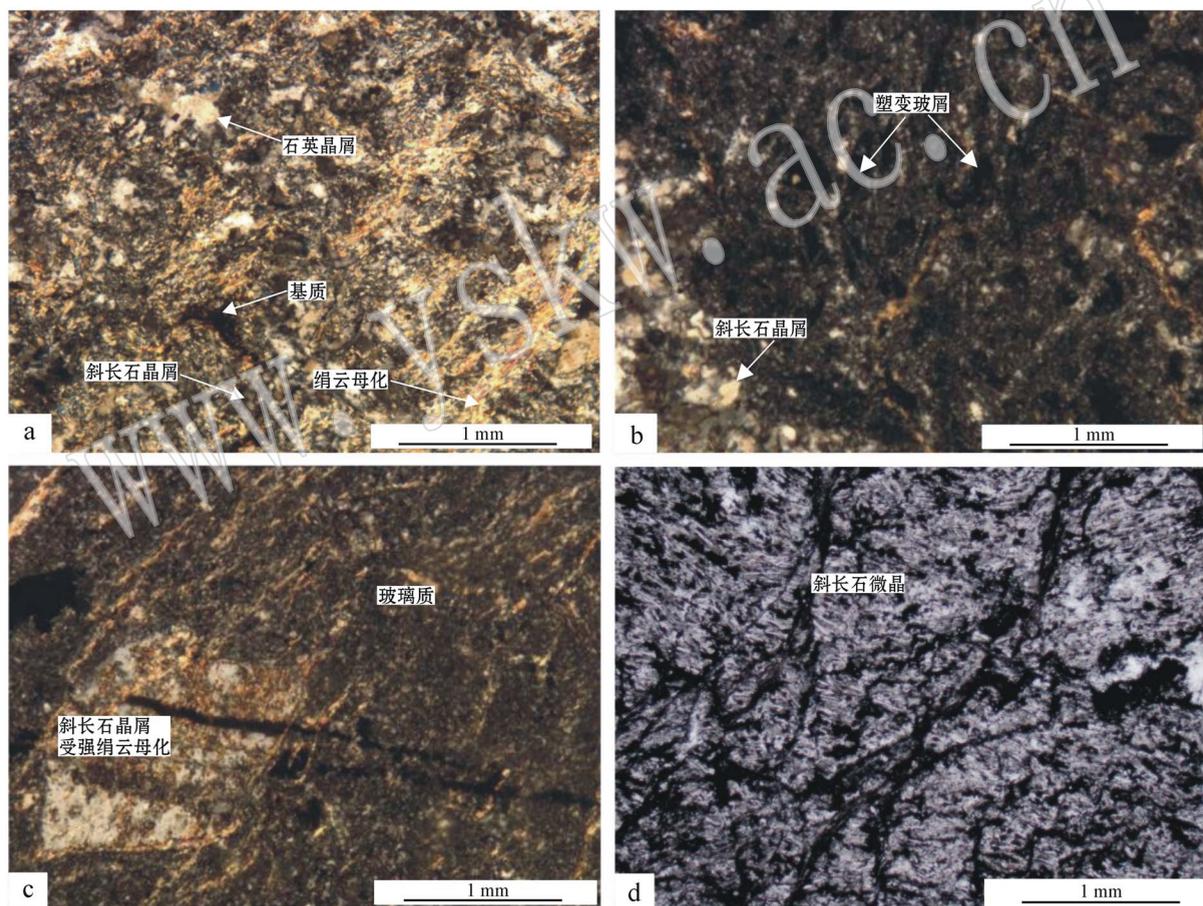


图 3 开都河火山岩在单偏光镜下的显微照片

Fig. 3 Microphotographs of Kaiduhe volcanic rocks (plainlight)

a—TR012-6-1, 含晶屑玻璃质结构, 由晶屑(10%)和玻璃质基质(90%)组成, 玻璃质已重结晶, 多呈霏细状, 间杂有定向排列的绢云母, 受到硅化与绢云母化; b—TR012-7-1, 熔结凝灰结构, 似流动构造, 由晶屑(5%)和塑变玻屑(95%)组成, 晶屑以斜长石为主, 塑变玻屑形态不规则; c—TR012-16-1, 含凝灰玻璃质结构, 块状构造, 由晶屑 10%、岩屑 2% 和玻璃质 88% 构成, 玻璃质无色透明, 已脱玻化呈尘点状和霏细状; d—TR012-8-1, 基质具有交织结构, 由斜长石微晶和不透明铁质微粒构成, 斜长石微晶呈针状, 大多已绢云母化

a—TR012-6-1, crystal pyroclast-bearing glassy texture, consisting of crystal pyroclast (10%) and glassy matrix (90%), glassy materials showing felsitic texture after re-crystallization, with strong silicification and sericitization; b—TR012-7-1, welded tuffaceous texture, flow structure, consisting of feldspar crystal pyroclast (5%) and ductile vitric pyroclast (95%); c—TR012-16-1, tuffaceous glassy texture, massif structure, consisting of crystal pyroclast (10%), detritus pyroclast (2%) and glassy matrix (88%), glassy matrix subjected to recrystallization to form felsitic texture; d—TR012-8-1, matrix composed of needle-like feldspar micro-crystals and opaque iron particulates

结构,块状构造。由晶屑 10%、岩屑 2% 和玻璃质 88% 构成。晶屑全为斜长石,大小 0.2~2.0 mm 不等,部分呈炸碎棱角状,聚片双晶、卡钠复合双晶发育,有不同程度绢云母化。岩屑粒度较细小,以 0.2~0.4 mm 为主,全由不透明铁质构成,偶尔含绢云母化斜长石微晶。玻璃质无色透明,已脱玻化呈点状,正交镜下呈霏细状,整体干涉色很低,为 I 级深灰-黑灰。

安山岩(TR012-8-1、TR012-18-2)为斑状结构,块状构造。斑晶含量很少,约 5%,为斜长石和角闪石。斜长石斑晶呈板状,颗粒长约 2~1 mm,宽约 1~0.5 mm,发育聚片双晶和环带结构。角闪石呈长柱状,大小 0.8 mm×0.2 mm,受到一定熔蚀作用。基质具有交织结构,由斜长石微晶和不透明铁质微粒构成(图 3d),斜长石微晶长板状或针状,大小约 0.1 mm×0.03 mm 左右,绝大多数已绢云母化。

3 分析方法

根据样品的新鲜程度与研究需要,挑选出 12 件样品进行岩石薄片的磨制。对薄片进行镜下鉴定后,选出 5 件样品进行主量元素与微量元素的测试。主量元素在中国科学院广州地球化学研究所元素与同位素地球化学研究室采用 X 射线荧光光谱分析法(XRF)完成,分析误差 < 1%;微量元素分析在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室运用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析,分析精度优于 5%~10%,详细分析方法和流程见文献(Liu *et al.*, 2008a)。挑选熔结凝灰岩(TR012-7-1)进行锆

石 U-Pb 定年测试。锆石分选在河北省地质调查院完成,样品经常规的粉碎、磁选及重力分选,得到纯度较高的锆石,之后在双目显微镜下人工进行挑纯。将挑选出的锆石用环氧树脂固定成圆饼状的靶,并用砂纸进行抛光处理。然后对其进行阴极发光照相,观察锆石内部结构特征,确定发育有韵律环带的岩浆型锆石以备测试。U-Pb 定年在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室用 LA-ICP-MS 测定,详细方法及流程见文献(Liu *et al.*, 2008b)。

4 锆石及 LA-ICP-MS 定年结果

实验测得的锆石 U-Pb 分析数据见表 1,锆石阴极发光图像(CL)与具体分析点见图 4。熔结凝灰岩中的锆石颜色为粉红色到无色,晶形基本完好,自形程度较高。锆石长度大约为 100~200 μm ,长宽比为 2:1~3:1。图 4b 中的锆石显示出清晰的岩浆振荡环带,且并未发现具继承性核的锆石存在。锆石 U 含量为 $154 \times 10^{-6} \sim 467 \times 10^{-6}$,Th 含量为 $102 \times 10^{-6} \sim 515 \times 10^{-6}$,Th/U 比值范围为 0.56~1.58。Th/U > 0.5 表明锆石属于岩浆成因(Hanchar and Miller, 1993; Claesson *et al.*, 2000),所测年龄能够代表火山岩第一旋回喷发年龄。

在谐和曲线图中(图 4a),一共有 17 个数据分析点,所有的点处于谐和曲线上。除了点 TR012-7-1-1 年龄 446 Ma 可能代表上次岩浆事件的年龄外,其余 16 个数据点给出年龄范围为 381~402 Ma。将点 TR012-7-1-1 排除,经过加权平均计算得到的年龄为 $393.1 \pm 3.4 \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=1.19, $n=16$)。

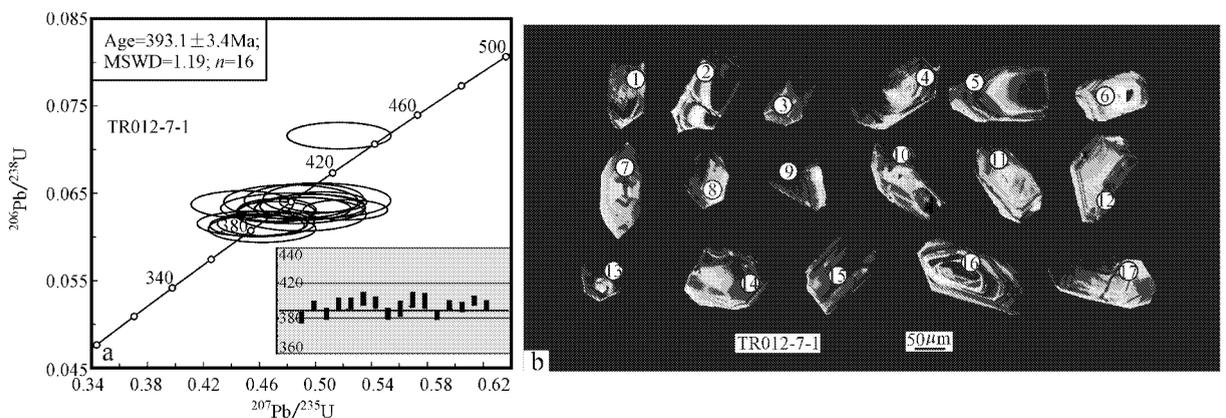


图 4 开都河熔结凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄图(a)和锆石 CL 图像(b)

Fig. 4 U-Pb concordia diagram(a) and CL images(b) of zircons from the ignimbrite of Kaidu River area

表 1 开都河熔结凝灰岩 (TR012-7-1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon analytical data for ignimbrite (TR012-7-1) from Kaidu River section

样号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						年龄 /Ma						
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2σ		
TR012-7-1-1	67	251	321	0.78	0.053	0.0025	0.072	0.0010	0.517	0.0246	329	82	446	6	423	16
TR012-7-1-2	55	282	236	1.19	0.056	0.0030	0.061	0.0010	0.462	0.0254	445	92	381	6	386	18
TR012-7-1-3	111	515	467	1.10	0.055	0.0022	0.063	0.0009	0.473	0.0185	406	62	394	5	393	13
TR012-7-1-4	52	231	295	0.78	0.055	0.0026	0.062	0.0009	0.465	0.0230	396	84	385	6	388	16
TR012-7-1-5	28	110	170	0.65	0.057	0.0042	0.063	0.0012	0.484	0.0342	495	124	396	7	401	23
TR012-7-1-6	53	227	261	0.87	0.057	0.0029	0.063	0.0009	0.498	0.0249	481	85	397	6	410	17
TR012-7-1-7	69	331	311	1.07	0.056	0.0026	0.064	0.0011	0.499	0.0236	457	74	402	7	411	16
TR012-7-1-8	71	343	321	1.07	0.051	0.0027	0.064	0.0010	0.448	0.0241	234	95	398	6	376	17
TR012-7-1-9	42	199	221	0.90	0.054	0.0030	0.062	0.0009	0.455	0.0260	371	102	385	6	381	18
TR012-7-1-10	27	121	154	0.79	0.058	0.0036	0.063	0.0013	0.490	0.0306	547	101	391	8	405	21
TR012-7-1-11	28	118	155	0.76	0.059	0.0043	0.064	0.0013	0.502	0.0346	570	114	401	8	413	23
TR012-7-1-12	25	102	159	0.64	0.056	0.0036	0.064	0.0013	0.483	0.0317	451	110	400	8	400	22
TR012-7-1-13	46	172	304	0.56	0.054	0.0025	0.061	0.0009	0.458	0.0223	379	84	384	5	383	16
TR012-7-1-14	31	134	188	0.72	0.056	0.0027	0.063	0.0009	0.491	0.0227	459	78	395	5	406	15
TR012-7-1-15	62	303	304	1.00	0.054	0.0022	0.063	0.0008	0.472	0.0185	384	67	393	5	392	13
TR012-7-1-16	47	192	242	0.79	0.057	0.0024	0.064	0.0008	0.506	0.0206	501	68	400	5	415	14
TR012-7-1-17	65	359	227	1.58	0.060	0.0023	0.063	0.0008	0.522	0.0199	591	62	395	5	426	13

5 地球化学特征

研究区火山岩样品的主量、微量元素结果见表 2。由于熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩性质类似,故将其作为一组,文中图解均统称为“酸性火山熔岩”进行讨论,安山岩则作为另一组。安山岩 SiO₂ 质量分数为 56.40% ~ 57.29%, MgO 为 1.88% ~ 3.62%, Al₂O₃ 为 14.07% ~ 15.13%, 全碱 (Na₂O + K₂O) 为 6.83% ~ 7.35%, A/CNK = 1.21 ~ 1.31, 里德曼指数 $\sigma = 3.5 \sim 3.8$, 在 TAS 图解 (图 5a) 中落入安山岩区域,属于高钾钙碱性到钾玄岩系列 (图 5b) 熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩 SiO₂ 质量分数为 68.08% ~ 81.06%, MgO 为 0.82% ~ 1.04%, Al₂O₃ 为 8.83% ~ 14.96%, 全碱 (Na₂O + K₂O) 为 4.10% ~ 7.57%, A/CNK = 0.82 ~ 0.96, 里德曼指数 $\sigma = 0.4 \sim 2.3$, 对应于 TAS 图解中流纹岩、

粗面安山岩和英安岩,属于中钾钙碱性至高钾钙碱性系列。样品 TR012-6-1 的 SiO₂ = 81.06%, Al₂O₃ = 8.83% 结合薄片观察到现象,认为其“硅高铝低”是由后期硅化导致。熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩的 A/CNK = 1.21 ~ 1.32, A/NK = 1.31 ~ 1.66, 属于过铝质岩石,安山岩 A/CNK = 0.82 ~ 0.96, A/NK = 1.43 ~ 1.51, 属于准铝质岩石 (图 5c)。

微量元素标准化后的蛛网图见图 6a。安山岩与熔结凝灰岩、含晶屑酸性玻璃质熔岩具有相似的分布曲线,富集大离子亲石元素 Rb、Th、La,亏损 Nb、Ta、Sr、Eu 等元素。由于 Sr 与 Ba 在斜长石中的分配系数很高, Ba 与 Sr 的亏损表明岩浆分离结晶过程之中斜长石经历了强分离结晶作用或是源区残留大量的斜长石。

REE 分配模式图见图 6b。熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩表现出明显的右倾特点,含有很高的稀土元素含量, ΣREE 为 $159.2 \times 10^{-6} \sim 211.4$

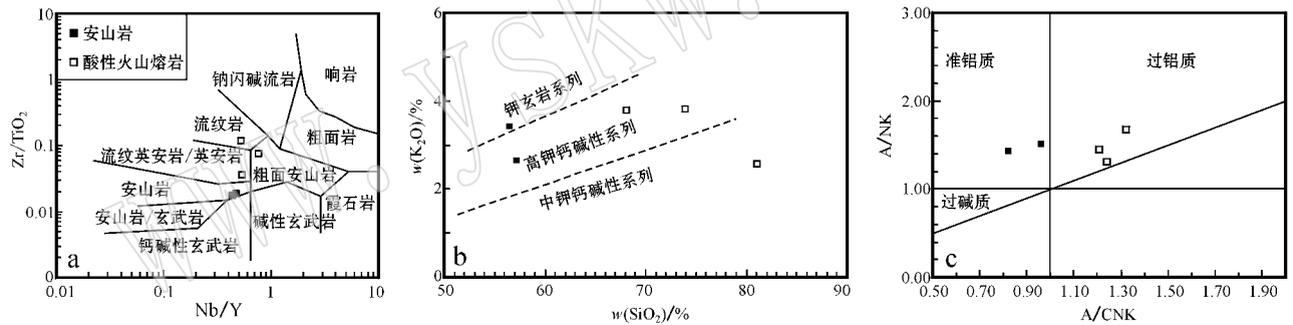


图 5 开都河火山岩 TAS 图解 (a), SiO₂ - K₂O 图解 (b) 和 A/NK - A/CNK 图解 (c)

Fig. 5 TAS diagram (a), K₂O - SiO₂ diagram (b) and A/NK - A/CNK diagram (c) of volcanic rocks in Kaidu River area

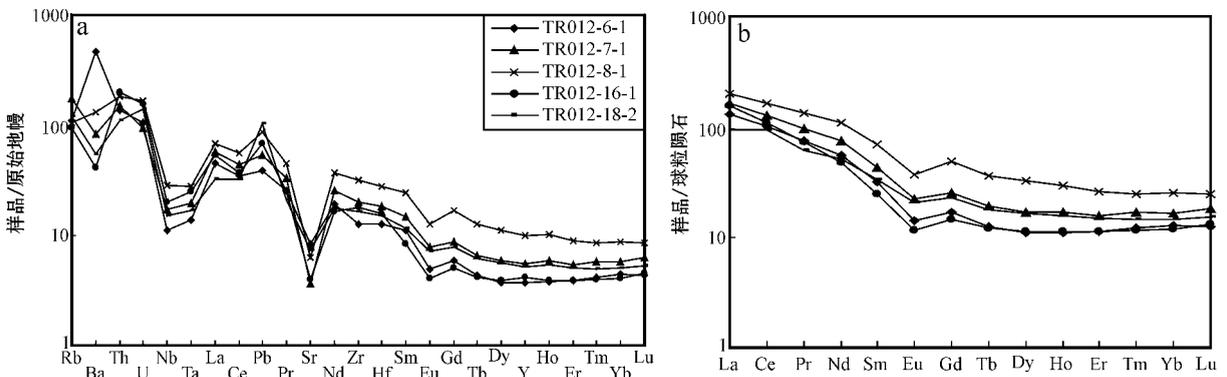


图 6 开都河火山岩稀土元素配分型式图解 (a) 与微量元素配分型式图解 (b) 标准化球粒陨石 REE 含量引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) of volcanic rocks in Kaidu River area

表2 开都河火山岩主量元素($w_B/\%$)与微量元素($w_B/10^{-6}$)数据

Table 2 Major($w_B/\%$) and trace($w_B/10^{-6}$) element data of volcanic rocks in Kaidu River area

样号	TR012-6-1	TR012-7-1	TR012-8-1	TR012-16-1	TR012-18-2
SiO ₂	81.06	68.08	56.40	73.61	57.29
Al ₂ O ₃	8.83	14.96	14.07	13.86	15.13
CaO	0.78	1.12	2.96	0.36	4.28
Fe ₂ O ₃ *	1.36	3.53	7.11	1.33	7.18
K ₂ O	2.55	3.77	3.46	1.96	2.65
MgO	0.82	1.00	3.62	1.04	1.88
MnO	0.01	0.03	0.16	0.03	0.06
Na ₂ O	1.55	3.80	3.37	5.11	4.70
P ₂ O ₅	0.03	0.12	0.78	0.05	0.30
TiO ₂	0.12	0.47	2.11	0.26	1.04
L.O.I	2.49	2.76	5.78	2.00	5.28
Total	99.59	99.66	99.82	99.60	99.79
A/CNK	1.31	1.21	0.96	1.24	0.82
A/NK	1.66	1.45	1.51	1.32	1.43
Mg#	54.67	36.13	50.45	61.06	34.33
σ	0.4	2.3	3.5	1.6	3.8
Sc	6.55	12.40	22.30	3.61	21.50
Cr	6.39	8.27	2.98	4.51	14.70
Ni	2.82	3.22	1.37	11.50	14.40
Rb	69.80	111.00	67.20	59.70	76.90
Sr	177.00	76.40	134.00	84.40	153.00
Zr	140	222	356	200	186
Nb	7.98	12.30	20.10	14.2	10.80
Ba	3 225	574	921	286	383
Hf	3.92	5.68	8.60	4.87	4.67
Ta	0.57	0.80	1.14	1.01	0.68
Pb	2.71	3.80	6.10	4.82	7.24
Th	11.50	12.60	15.30	16.90	9.33
U	2.23	2.00	3.53	3.28	2.91
La	30.60	39.00	47.10	36.40	22.30
Ce	61.40	78.20	98.40	65.90	57.30
Pr	7.02	9.16	12.50	6.84	5.79
Nd	25.70	34.40	50.20	22.10	23.60
Sm	4.88	6.56	10.70	3.73	5.10
Eu	0.83	1.3	2.13	0.67	1.21
Gd	3.48	5.18	9.94	2.99	4.69
Tb	0.47	0.71	1.36	0.45	0.66
Dy	2.75	4.33	8.19	2.83	4.14
Ho	0.62	0.96	1.67	0.64	0.89
Er	1.87	2.61	4.30	1.85	2.43
Tm	0.31	0.43	0.63	0.29	0.37
Yb	2.18	2.82	4.28	1.99	2.47
Lu	0.32	0.47	0.63	0.34	0.39
Y	16.80	25.20	44.70	18.90	23.30
Nb/Y	0.47	0.49	0.45	0.75	0.46
REE	159.2	211.4	296.7	165.9	154.7
LREE	130.4	168.6	221.0	135.6	115.3
HREE	28.8	42.7	75.7	30.3	39.4
Eu/Eu*	0.59	0.66	0.62	0.60	0.74
(La/Yb) _N	9.48	9.37	7.43	12.38	6.11

*表示全铁。

$\times 10^{-6}$, 平均为 178.8×10^{-6} , Σ LREE 与 Σ HREE 含量分别为 $130.4 \times 10^{-6} \sim 168.6 \times 10^{-6}$ 和 $28.8 \times 10^{-6} \sim 42.7 \times 10^{-6}$ 。(La/Yb)_N = 9.37 ~ 12.38 和 LREE/HREE = 3.94 ~ 4.53 表明岩浆的轻重稀土强烈分异, δ Eu 在 0.59 ~ 0.66 之间, 平均为 0.62, 属于中度亏损型。安山岩稀土配分形式类似于酸性火山岩, 呈右倾型分布。 Σ REE 为 $154.7 \times 10^{-6} \sim 296.7 \times 10^{-6}$, 平均为 225.7×10^{-6} , LREE 与 HREE 含量分别为 $115.3 \times 10^{-6} \sim 221 \times 10^{-6}$ 和 $39.4 \times 10^{-6} \sim 75.7 \times 10^{-6}$ (La/Yb)_N = 6.11 ~ 7.43, LREE/HREE = 2.92 ~ 2.93, 表明岩浆的轻重稀土元素分异较酸性火山岩弱。 δ Eu 在 0.62 ~ 0.74 之间, 平均为 0.69, 同样属于中度亏损型。Eu 与 Sr 的负异常表明源区有斜长石残留或是有斜长石从岩浆中分离结晶出去。可见, 虽然存在稀土元素的不一致性, 但是熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩的稀土元素配分形式基本上相似, 呈轻稀土元素富集的右倾形式。

6 讨论

6.1 构造背景

开都河南北两侧均发育玄武岩、安山岩、熔结凝灰岩、火山凝灰岩等, 据估计开都河南侧在中泥盆世经历了 11 个韵律喷发且火山活动的程度由弱至强; 北侧则共能划分出 3 个喷发韵律, 火山岩的含量逐渐增多。开都河南北两侧发育的玄武岩、安山岩、火山碎屑岩、火山熔岩等表明中泥盆世火山作用非常强(新疆地质矿产局, 1993; 刘振涛等, 2008)。额尔宾山从北至南分依次为巴伦台地块、额尔宾山古生代北缘增生楔、额尔宾山弧前增生带与库勒湖-大山水电站岛弧带。开都河火山岩向西与同期的哈尔克山北缘大量酸性火山岩相连接, 代表一条晚志留—早泥盆世的哈尔克山-额尔宾山岛弧带(新疆地质矿产局, 1993; 刘振涛等, 2008)。库勒洋盆在晚志留世—早泥盆世开始向北俯冲, 在额尔宾山开都河形成近东西向展布的库勒湖-大山水电站火山岛弧。中泥盆世时, 库勒洋盆进一步俯冲消减收缩(刘振涛等, 2008; 朱志新等, 2008, 2009)。安山岩亏损 Nb、Ta, 富集大离子亲石元素, 表明其形成环境极为类似岛弧环境, 而熔结凝灰岩经常出现于活动大陆边缘或大陆岛弧的弧后盆地构造环境(Lehti *et al.*, 2006)。在微量元素判别图解中, 开都河剖面的火山岩基本落在岛弧火山岩区内(图 7)。因此, 综合前人

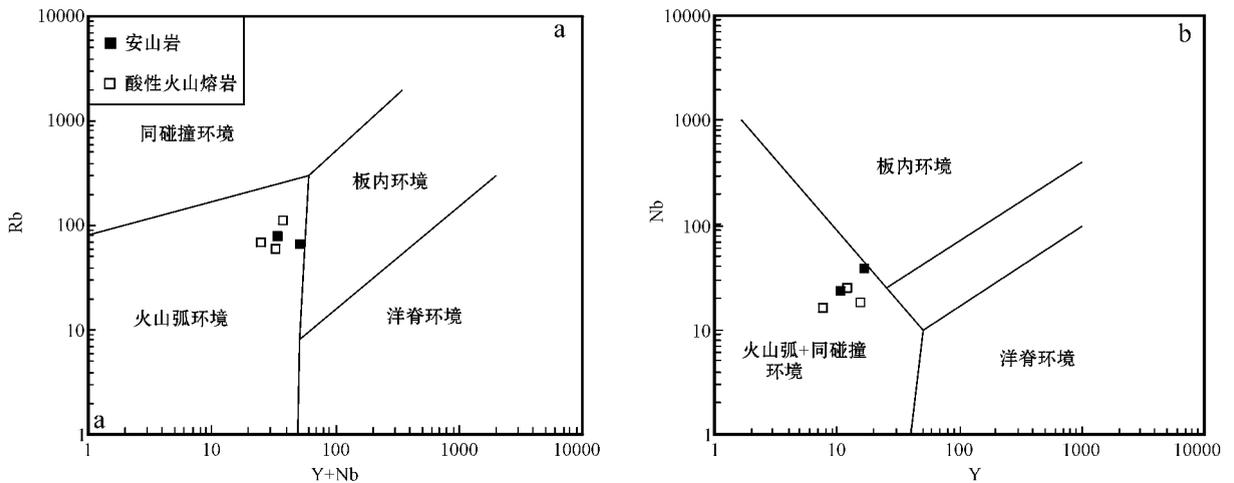


图 7 开都河火山岩构造环境判别图

Fig. 7 Structural discrimination diagrams of Kaidu River volcanic rocks

认识与样品地球化学特征认为开都河火山岩形成于岛弧环境。

6.2 源区特征

玄武质岩浆分离结晶与地壳部分熔融都能形成中酸性岩石,因此需要分析开都河火山岩的演化方式与源区特征,而地球化学特点有助于正确判断其演化历史。开都河水电站安山岩亏损 Nb-Ta,符合岛弧环境下形成的特点,而熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩的 $A/CNK = 1.21 \sim 1.31$,属于过铝质,表明其类似于 S 型花岗岩。刘振涛等(2008)对额尔宾山(库勒湖-开都河地区)火山岩进行了主、微量研究,考虑到其酸性火山岩的地球化学特点与本文中的熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩一致,因此综合数据进行 $La/Sm - La$ 图解(图 8a)判别,发现安山岩、熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩可能并不存在同源的关系,这与蛛网图和稀土配分曲线图中(图 6)安山岩与熔结凝灰岩、含晶屑酸性玻璃质熔岩的分布趋势并不一致表明两类岩石的源区不同的看法相吻合。安山岩由于数据有限,无法明确其具体的演化过程。熔结凝灰岩、含晶屑酸性玻璃质熔岩则与额尔宾山酸性火山岩反映出开都河两侧发育的酸性火山岩来自部分熔融作用,而且其蛛网图和稀土配分曲线图(图 6)类似(刘振涛等,2008),说明熔结凝灰岩、含晶屑酸性玻璃质熔岩则与额尔宾山酸性火山岩来自于同一岩浆源区的部分熔融。

不同源岩发生部分熔融所产生的熔体可以通过化学成分的变化进行示踪。以变质泥岩为主的源区发生部分熔融产生的熔体以高 $Al_2O_3/(MgO +$

$FeO^*)$ 和低 $CaO/(MgO + FeO^*)$ 为特点;来自变质火成岩尤其是镁铁质岩石的熔体以低 $Al_2O_3/(MgO + FeO^*)$ 和高 $CaO/(MgO + FeO^*)$ 为特点;具有中等 $Al_2O_3/(MgO + FeO^*)$ 和 $CaO/(MgO + FeO^*)$ 反映源区为变质杂砂岩(图 8b)(Altherr and Siebel, 2002; Wang *et al.*, 2003)。安山岩 $Al_2O_3/(MgO + FeO^*) = 1.54 \sim 2.17$, $CaO/(MgO + FeO^*) = 0.30 \sim 0.56$, 酸性火山熔岩 $Al_2O_3/(MgO + FeO^*) = 4.24 \sim 6.38$, $CaO/(MgO + FeO^*) = 0.15 \sim 0.3$, 通过图解得到熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩的源区为变质泥岩。大陆地壳的深熔作用与玄武质岩浆的分离结晶作用是形成酸性岩浆的两种方式。地壳增厚往往使大陆地壳部分熔融形成大体积的高硅熔结凝灰岩和酸性玻璃质熔岩(Huppert and Sparks, 1988; Lebtli *et al.*, 2006)。本文熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩的 A/CNK 值介于 $1.21 \sim 1.31$ (平均为 1.25) > 1 , 显示出其铝过饱和的特点,成岩物质来源于地壳。图 8b 进一步揭示变质泥岩为本文熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩的源岩。然而杂砂岩的成分相当于花岗质成分,其部分熔融会形成更酸性的岩浆,因此安山岩不可能通过变质杂砂岩部分熔融得到。安山岩的具体岩浆演化过程依据现有数据无法判断,变玄武岩部分熔融或玄武质岩浆结晶分异都可能形成安山岩。

Watson 和 Harrison(1983)、Miller 等(2003)通过搜集全球 54 个已知花岗岩体及岩体中锆石的地球化学数据,计算出锆石饱和温度(t_{Zr})。岩浆初始温度估算比较困难是因为没有对温度敏感的矿物温

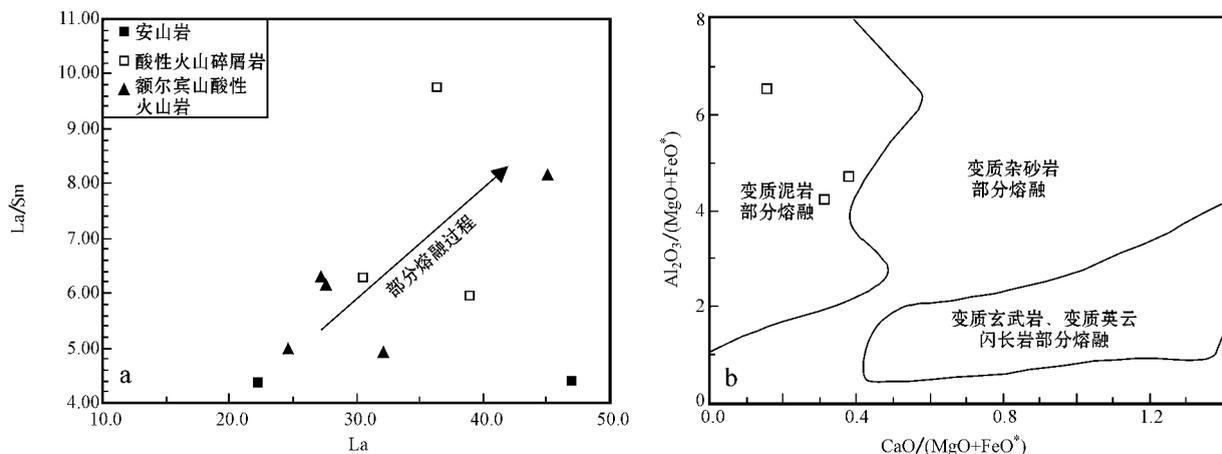


图 8 开都河火山岩 La/Sm - La 图解 (a) 与 $Al_2O_3/(MgO + Fe_2O_3^*) - CaO/(MgO + Fe_2O_3^*)$ 图解 (b)

Fig. 8 La/Sm - La diagram (a) and $Al_2O_3/(MgO + Fe_2O_3^*) - CaO/(MgO + Fe_2O_3^*)$ diagram (b) of volcanic rocks in Kaidu River area

图 a 中的额尔宾山酸性火山岩数据引自刘振涛等 (2008)

the data of felsic rocks in Eerbin Hill region is from Liu Zhentao *et al.* (2008)

度计, 岩浆冷却过程中岩浆与矿物不断达到热平衡。锆石由于在中酸性岩浆中常见, 并且其溶解性与温度之间具有极高的联系, 锆石温度计对估计岩浆温度十分有用 (Miller *et al.*, 2003), $t_{Zr} (^\circ C) = [12900(\ln D_{Zr} + 0.85M + 2.95)] - 273.15$, 其中 $D_{Zr} = 496000/Zr$ 含量, 令 $Si + Al + Fe + Mg + Ca + Na + K + P = 1$, 则 $M = (2Ca + K + Na) / (Si \times Al)$, 计算得到开都河火山岩的锆石饱和温度 $t_{Zr} = 746.2 \sim 890.6^\circ C$, 平均 $821.7^\circ C$ 。实验岩石学表明温度在大于 $800^\circ C$ 时, 地壳的部分熔融作用能够形成花岗闪长质类型的岩浆, 而且岩浆通常处于喷发状态。

6.3 地质意义

南天山构造混杂岩带为一俯冲碰撞带, 是古南天山洋的洋壳在消减过程中不断向洋一侧后退式迁移形成的弧前增生楔叠加伊犁-中天山岛弧与塔里木古陆碰撞造山过程而形成, 仍保存有古南天山洋的洋岛、海山等残留体, 实际上是一条宽大的蛇绿混杂岩带 (Xiao *et al.*, 2004; 李曰俊等, 2010)。

马中平等 (2006, 2007) 识别出库勒湖蛇绿岩套中的基性熔岩形成于弧后环境, 而库勒湖蛇绿岩属于 SSZ 型, 同时考虑到南天山洋盆正经历俯冲消减, 因此认为库勒湖洋盆是南天山洋盆在晚志留—早泥盆世向南俯冲消减时诱发形成的弧后盆地。根据库勒湖蛇绿岩中的 MORB 型玄武岩 $418 \sim 425$ Ma 的年龄, 认为在中晚志留世, 库勒洋盆处于拉张阶段 (龙灵利等, 2006; 马中平等, 2007), 晚志留世—中泥

盆世一直持续向北俯冲消减, 库勒洋盆 (南天山南缘洋盆) 最终于早石炭世关闭并开始碰撞造山, 同碰撞阶段持续到石炭纪末期, 二叠纪进入碰撞后阶段 (蔡东升等, 1995; Shu *et al.*, 1999; 高俊等, 2006; 朱志新等, 2008, 2009)。

Huppert 和 Sparks (1988), Chalot-Prat (1995) 及 Lebtj 等 (2006) 认为高硅熔结凝灰岩的形成是由于地壳加厚导致地壳部分熔融形成。熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩的母岩浆很可能是以长石、石英为主的上地壳近固相线矿物发生部分熔融作用的产物 (单强等, 2007)。库勒洋盆消减时, 洋壳脱水形成富含大离子亲石元素的流体并交代上部的地幔楔, 导致以二辉橄榄岩为主的地幔楔受到交代发生部分熔融, 从而产生玄武质岩浆喷发到地表, 形成钙碱性玄武岩 (开都河北岸火山岩地层下部发育大量玄武岩) (刘振涛等, 2008), 安山岩很可能是其中部分玄武岩结晶分异而形成。随着俯冲进一步加强, 地壳受到挤压逐渐变短、增厚, 类似于地壳碰撞加厚的状态。玄武质岩浆大量聚集到地壳的岩浆房使地壳熔融形成酸性岩浆 (Huppert and Sparks, 1988; 单强等, 2007)。酸性岩浆在浮力与岩浆房中膨胀压力的共同作用下, 沿岩浆房顶部裂隙通道向上运移, 岩浆由于对流与结晶作用会出现气泡化, 之后喷发至地表。这种俯冲加厚状态在中国其它地区有过报道, 例如祁连山造山带东南部地区、新疆北部阿尔泰地区 (单强等, 2007; 张宏飞等, 2007)。俯冲

消减的结果就是形成了库勒湖-大山口水电站岛弧带,并伴生熔结凝灰岩、含晶屑酸性玻璃质熔岩和安山岩。

7 结论

在新疆和静县西南的开都河剖面的古生代泥盆统萨阿尔明组地层中识别出3个火山喷发旋回,对其中熔结凝灰岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,结果为 393.1 ± 3.4 Ma。该年龄进一步佐证了萨阿尔明组的时代为中泥盆世,同时表明库勒洋盆在中泥盆世处于俯冲消减阶段。俯冲过程中,洋壳脱水导致上部地幔楔部分熔融形成玄武质岩浆,而后玄武质岩浆在岩浆房中聚集使得上部地壳发生不同程度的部分熔融形成酸性母岩浆。母岩浆在岩浆房内发生气演化并最终喷发至地表形成熔结凝灰岩和含晶屑酸性玻璃质熔岩。

致谢:衷心感谢匿名评审专家对本文提出的宝贵的修改意见!

References

- Allen M B, Windley B F and Zhang Chi. 1993. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia [J]. *Tectonophysics*, 220(1): 89~115.
- Altherr R and Siebel W. 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 14(4): 397~415.
- Cai Dongsheng, Lu Huaifu, Jia Dong, et al. 1995. Paleozoic plate tectonic evolution of Southern Tianshan [J]. *Geological Review*, 41(5): 432~443 (in Chinese with English abstract).
- Chalot-Prat F. 1995. Genesis of rhyolitic ignimbrites and lavas from distinct sources at a deep crustal level: field, petrographic, chemical and isotopic (Sr, Nd) constraints in the Tazekka volcanic complex (Eastern Morocco) [J]. *Lithos*, 36(1): 29~49.
- Claesson S, Vetrin V, Bayanovab T, et al. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic [J]. *Lithos*, 51(1): 95~108.
- Gao Jun, Li Maosong, Xiao Xuchang, et al. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China [J]. *Tectonophysics*, 287(1): 213~231.
- Gao Jun, Long Lingli, Qian Qing, et al. 2006. South Tianshan: a Late Paleozoic or a Triassic orogen? [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 049~1 061 (in Chinese with English abstract).
- Hanchar J M and Miller C F. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories [J]. *Chemical Geology*, 110(1): 1~13.
- Hao Jie and Liu Xiaohan. 1993. Ophiolite mélange time and tectonic evolution model in South Tianshan area [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 28(1): 93~95 (in Chinese with English abstract).
- Huppert H E and Sparks R S J. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust [J]. *Journal of Petrology*, 29(3): 599~624.
- Jia Chengzao, Wu Shaoyu, Zhang Shibei, et al. 2004. Tarim Basin and Its Surrounding Stratum Research [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Lebit P P, Thouret J, Wörner G, et al. 2006. Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlation [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(3): 251~275.
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, et al. 2006. Crustal tectonic framework of Northern Xinjiang and Adjacent regions and its formation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148~168 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuejun, Zhang Hong'an, Qian Yixiong, et al. 2010. The collision time of south Tianshan orogen, NW China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 45(1): 57~65 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. 2008b. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Liu Yongsheng, Zong Keqing, Kelemen P B, et al. 2008a. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates [J]. *Chemical Geology*, 247(1~2): 133~153.
- Liu Zhentao, Zhu Zhixin, Song Songshan, et al. 2008. The geology and tectonic significance of Devonian volcanic rocks in the south rim of Eerbin mountain, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 26(3): 215~219 (in Chinese with English abstract).
- Long Lingli, Gao Jun, Xiong Xianming, et al. 2006. The geochemical characteristics and the age of the Kule Lake ophiolite in the southern Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 65~73 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongping, Xia Linqi, Xu Xueyi, et al. 2006. Geochemical characteristics of basalts: evidence for the tectonic setting and geological significance of Kulehu ophiolite, South Tianshan Mountains [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(5): 387~400 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongping, Xia Linqi, Xu Xueyi, et al. 2007. Dating for zircons of gabbro from Kulehu ophiolite, southern Tianshan, and its geological implication [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science*

- Edition), 37(1): 107~110 (in Chinese with English abstract).
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. *Geology*, 31(6): 529~532.
- Shan Qiang, Niu Hecai, Yu Xueyuan, *et al.* 2007. Geochemical characteristics, magmatic genesis and tectonic background of the late paleozoic high potassium and high silicon ignimbrite on the southern margin of Altai, north Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1721~1729 (in Chinese with English abstract).
- Shu L S, Charvel J, Guo L, *et al.*, 1999. A large-scale Paleozoic dextral ductile strike-slip zone: the Aqikkudug-Weiya zone along the northern margin of the Central Tianshan belt, Xinjiang, NW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(2): 148~162.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Nonrry M J. *Magmatism in the Oceanic Basin* [C]. *Geology Society, Special Publication*, 42: 313~345.
- Tang Yaoqing, Gao Jun, Zhao Min, *et al.* 1995. The Ophilitic and Blueschists in the Southern Tianshan Orogenic Belt Xinjiang, Northwestern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~133 (in Chinese).
- Wang Chao, Liu Liang, Luo Jinhai, *et al.* 2007. Late Paleozoic post-collisional magmatism in the Southwestern Tianshan orogenic belt, take the Baleigong pluton in the Kokshal region as an example [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1830~1840 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongliang, Xu Xueyi, He Shiping, *et al.* 2007. Geological Map of Tianshan and Adjacent Regions, China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Xiao Wenjiao, Zhang Lianchang, Qin Kezhong, *et al.* 2004. Paleozoic Accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of Central Asia [J]. *American Journal of Science*, 304: 370~395.
- Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. 1993. Regional Geological History of Yunnan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Hongfei, Wang Jing, Xu Wangchun, *et al.* 2007. Derivation of adakitic magma by partial melting of subducted continental crust [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 224~234 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhixin, Li Jinyi, Dong Lianhui, *et al.* 2008. Age determination and geological significance of Devonian granitic intrusions in Seriyakeyilake region, northern margin of Tarim basin, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 971~976 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhixin, Li Jinyi, Dong Lianhui, *et al.* 2009. Tectonic framework and tectonic evolution of the southern Tianshan, Xinjiang, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1863~1870 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡东升, 卢华复, 贾东, 等. 1995. 南天山古生代板块构造演化 [J]. *地质论评*, 41(5): 432~443.
- 单强, 牛贺才, 于学元, 等. 2007. 新疆北部阿尔泰山南缘晚古生代高钾高硅熔结凝灰岩的地球化学、岩浆成因及构造背景 [J]. *岩石学报*, 23(7): 1721~1729.
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 2006. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? [J]. *岩石学报*, 22(5): 1049~1061.
- 郝杰, 刘小汉. 1993. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及大地构造意义 [J]. *地质科学*, 28(1): 93~95.
- 贾承造, 吴绍祖, 张师本, 等. 2004. 塔里木盆地及周边地层研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1~1063.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨 [J]. *地质学报*, 80(1): 148~168.
- 李曰俊, 张洪安, 钱一雄, 等. 2010. 关于南天山碰撞造山时代的讨论 [J]. *地质科学*, 45(1): 57~65.
- 刘振涛, 朱志新, 宋松山, 等. 2008. 新疆额尔宾山南缘泥盆纪火山岩地质特征及构造意义 [J]. *新疆地质*, 26(3): 215~219.
- 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等. 2006. 南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征及其年龄 [J]. *岩石学报*, 22(1): 65~73.
- 马中平, 夏林圻, 徐学义, 等. 2006. 南天山库勒湖蛇绿岩形成环境及构造意义——基性熔岩的地球化学证据 [J]. *岩石矿物学杂志*, 25(5): 387~400.
- 马中平, 夏林圻, 徐学义, 等. 2007. 南天山库勒湖蛇绿岩锆石年龄及其地质意义 [J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 37(1): 107~110.
- 汤耀庆, 高俊, 赵民, 等. 1995. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1~133.
- 王超, 刘良, 罗金海, 等. 2007. 西南天山晚古生代后碰撞岩浆作用: 以阔克萨彦岭地区巴雷公花岗岩为例 [J]. *岩石学报*, 23(8): 1830~1840.
- 王洪亮, 徐学义, 何世平, 等. 2007. 中国天山及邻区 1:1000000 地质图 [M]. 北京: 地质出版社.
- 新疆地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 张宏飞, 王婧, 徐旺春, 等. 2007. 俯冲陆壳部分熔融形成埃达克质岩浆 [J]. *高校地质学报*, 13(2): 224~234.
- 朱志新, 李锦轶, 董连慧, 等. 2008. 新疆塔里木北缘色日牙克依拉克一带泥盆纪花岗岩侵入体的确定及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 24(5): 971~976.
- 朱志新, 李锦轶, 董连慧, 等. 2009. 新疆南天山构造格架和构造演化 [J]. *地质通报*, 28(12): 1863~1870.