

# 新疆昭苏县北高铝玄武岩时代、岩石学和地球化学特征

——西天山早石炭世汇聚板块构造的标志

李智佩<sup>1,2</sup>, 白建科<sup>1,2</sup>, 茹艳娇<sup>3</sup>, 李婷<sup>1,2</sup>, 李晓英<sup>1,2</sup>

LI Zhipei<sup>1,2</sup>, BAI Jianke<sup>1,2</sup>, RU Yanjiao<sup>3</sup>, LI Ting<sup>1,2</sup>, LI Xiaoying<sup>1,2</sup>

1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质调查局造山带地质研究中心/西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

3. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068

1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Centre for Orogenic Belt Geology, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Geophysical and Geochemical Exploration Corporation, Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals in Northwest China, Xi'an 710068, Shaanxi, China

**摘要:**西天山乌孙山南坡赛克散萨依一带出露的早石炭世杜内阶大哈拉军山组火山岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $355.1 \pm 4.0$  Ma。火山岩岩石类型主要为玄武岩和少量钠质粗面玄武岩(夏威夷岩),  $\text{SiO}_2$  含量为 45.04%~49.84%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 2.36%~4.63%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.35%~2.31%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值为 2.00~8.69, 表明均属钠质火山岩;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量集中在 16.01%~17.15% 之间, 以偏碱性的高铝质玄武岩为主, 有少量碱性玄武岩。火山岩稀土元素总量为  $94.71 \times 10^{-6} \sim 127.2 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 2.41~4.07,  $\delta\text{Eu}$  值为 0.99~1.15, 具有轻、重稀土元素分馏明显的右倾式配分型式。大离子亲石元素较洋脊玄武岩富集, 存在明显的 Th-U 槽和 Nb-Ta 槽。高场强元素多数与洋脊玄武岩接近,  $\text{TiO}_2$  的亏损不显著,  $\text{K}_2\text{O}$  明显富集。玄武岩的演化具有典型的拉斑质玄武岩经分离结晶作用形成的铁富集演化趋势, 且以辉石和斜长石为主要的分离结晶矿物, 橄榄石的分离结晶作用不明显。高铝质玄武岩的确定, 是早石炭世伊犁地区中天山板块汇聚构造环境的标志, 与现今高铝质火山岩产出构造环境对比认为, 这些火山岩形成于大陆边缘岛弧, 其构造位置可能为俯冲带上的第二火山链; 火山岩浆则可能由俯冲带上流体交代的富集地幔部分熔融形成。

**关键词:**大哈拉军山组; 高铝玄武岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学; 构造环境; 西天山

**中图分类号:** P588.14<sup>+</sup>5; P591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)06-0864-16

**Li Z P, Bai J K, Ru Y J, Li T, Li X Y. Age and petro-geochemistry of High-aluminum basalts from northern Zhaosu County of Xinjiang: The sign to convergent margins of Early Carboniferous plate in West Tianshan. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(6): 864-879**

**Abstract:** Basalts and sodic trachybasalts are the main rocks outcropped in the south of Wusunshan in western Tianshan Mountains. LA-ICP-MS analysis on the Early Carboniferous volcanic rocks of Dahalajunshan Group yields an U-Pb age of  $355.1 \pm 4.0$  Ma. These volcanic rocks are characterized by  $\text{SiO}_2$  45.04%~49.84%,  $\text{Na}_2\text{O}$  2.36%~4.63%, and  $\text{K}_2\text{O}$  0.35%~2.31%, high ratios of  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (2.00~8.69) and high contents of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (16.01%~17.15%), suggesting that they are sodic and high alumina basalts with small amount of alkaline basalts. The total rare earth contents,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  and  $\delta\text{Eu}$  of volcanic rocks range from  $94.71 \times 10^{-6}$  to  $127.2 \times 10^{-6}$ ,

收稿日期: 2020-02-26; 修订日期: 2020-04-17

资助项目: 中国地质调查局项目《天山-兴蒙成矿带火山岩浆作用对成矿制约的综合研究》(编号: 1212010050503)、《西北地区重要成矿带基础地质综合研究》(编号: 1212010610319)、《国家地质大数据汇聚与管理》(编号: DD20190415)、《国家地质大数据汇聚与管理(中国地质调查局西安地质调查中心)》(编号: DD20190387)

作者简介: 李智佩(1962-), 男, 研究员, 从事岩石学、区域地质研究。E-mail: 476056388@qq.com

from 2.41 to 4.07 and from 0.99 to 1.1 respectively. The REE patterns are characterized by enriched LREE and relatively depleted HREE, with weak positive Eu anomaly, which is in accordance with high sodic plagioclase contents in rocks. Enriched large-ion-lithophile elements (LILE), such as Ba and K, depleted high-field-strength elements (HFSE), such as Nb-Ta, Th-U and Ti, and the magmatic evolution trend suggest that these rocks belong to typical island arc tholeiitic series, which have experienced pyroxene and feldspar fractionation. The determination of high alumina basalts is the sign to convergent margin of early Carboniferous plate in West Tianshan. Therefore, it is considered that these basaltic rocks were formed at continental arc setting and could be in the second volcanic chain. And then, the basaltic magma might be formed by partial melting of enriched metasomatic mantle upon subduction zone.

**Key words:** Dahalajunshan Group; high alumina basalts; LA-ICP-MS zircon U-Pb ages; geochemistry; tectonic environment; western Tianshan Mountains

中亚造山带是全球显生宙地壳生长最重要的地区之一<sup>[1-3]</sup>,其生长机制存在侧向和垂向之争,而且分别得到蛇绿岩、岛弧岩浆岩<sup>[4-14]</sup>和花岗岩浆作用<sup>[2-3,15-19]</sup>的支持。其中,在中国西天山地区分布最广泛的晚泥盆世—早石炭世大哈拉军山组火山岩,构成了该时期地壳侧向增生的重要组成部分。然而,对于大哈拉军山组火山岩形成的构造环境存在激烈争论,主要观点有:①大陆裂谷环境<sup>[1-3,20-24]</sup>,后碰撞裂谷环境<sup>[25-26]</sup>或造山后伸展盆地<sup>[27]</sup>;②活动大陆边缘和岛弧环境<sup>[19,27-39]</sup>;③具有元古宙陆壳基底

的活动大陆边缘弧后拉张环境<sup>[40]</sup>;④大陆减薄拉张环境<sup>[10]</sup>。本文通过对昭苏县以北的乌孙山南坡大哈拉军山组火山岩的同位素年代学、岩石学和地球化学特征进行研究,探讨火山岩的时代、岩石成因及其形成的构造环境,为西天山区域构造演化研究提供证据。

### 1 区域地质背景

研究区位于哈萨克斯坦板块<sup>[41-42]</sup>东南段(图 1),其南北两侧分别为博罗科努活动陆缘、那拉

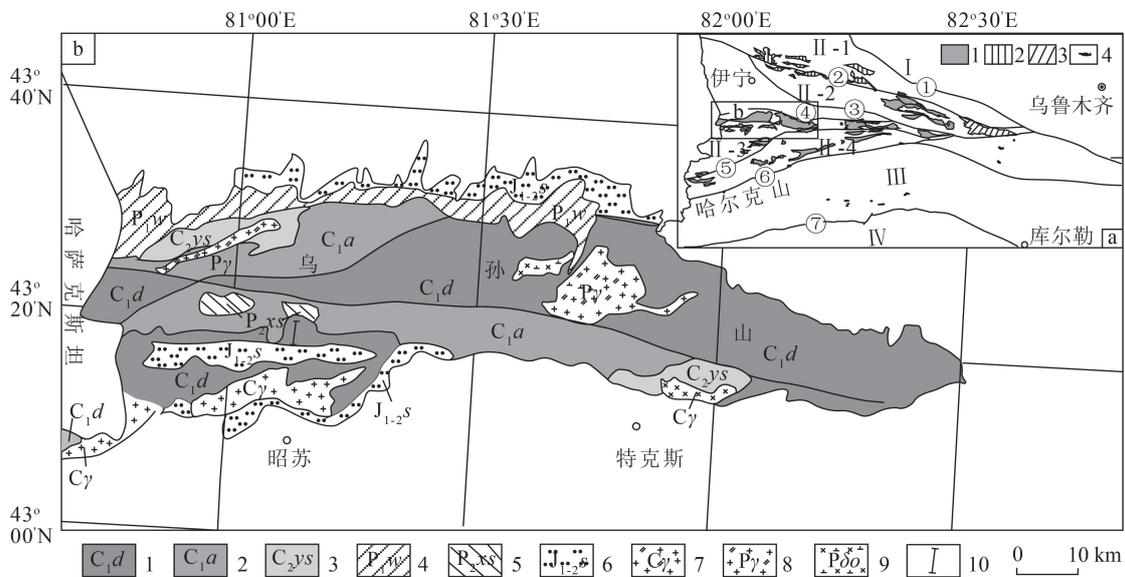


图 1 乌孙山一带地质简图(据参考文献[43]修改)

Fig. 1 Simplified geologic map of the Wusunshan district

图 a: 1—早石炭世早期火山岩; 2—早石炭世晚期火山岩; 3—晚石炭世火山岩; 4—蛇绿岩; ①—中天山北缘缝合带; ②—博罗科努山南坡断裂带; ③—阿吾拉勒南缘断裂; ④—乌孙山北部断裂; ⑤—那拉提北部断裂; ⑥—中天山南缘缝合带; ⑦—塔里木北缘断裂带; I—准噶尔盆地和北天山; II—中天山造山带; II-1—博罗科努构造-火山岩带; II-2—阿吾拉勒山构造-火山岩带; II-3—乌孙山-塔斯巴山构造-火山岩带; II-4—那拉提山构造-火山岩带; III—古生代南天山增生楔和塔里木北缘被动陆缘; IV—塔里木板块;

图 b: 1—下石炭统大哈拉军山组; 2—下石炭统阿克苏克组; 3—上石炭统伊什基里克组; 4—下二叠统乌郎组; 5—上二叠统晓山萨依组; 6—下-中侏罗统水西沟群; 7—石炭纪花岗岩; 8—二叠纪花岗岩; 9—二叠纪石英闪长岩; 10—剖面位置

提活动陆缘、南天山古生代增生楔和塔里木北缘古生代被动陆缘,以及塔里木板块(图1-a)。在博罗科努陆缘活动带,分布早古生代寒武纪—石炭纪蛇绿岩<sup>[8, 44-48]</sup>;在南天山也分布一系列蛇绿岩<sup>[48-50]</sup>,它们是古生代天山洋的残片。目前,天山洋的形成被认为始于新元古代晚期的Rodinia大陆裂解,到寒武纪天山洋处于伸展阶段,奥陶纪—早石炭世为沟—弧—盆演化阶段。有关南天山洋的闭合时代,存在石炭纪之前<sup>[22-24, 51]</sup>和早石炭世末期<sup>[5, 33-34, 52-55]</sup>之争。对于中天山北缘晚古生代蛇绿岩代表的洋盆性质的认识,存在弧后盆地<sup>[56]</sup>、有限洋盆<sup>[57]</sup>和准噶尔早古生代洋盆向南俯冲诱发岩石圈拉伸而形成的小洋盆环境<sup>[4]</sup>,以及红海型裂谷<sup>[22, 46-47]</sup>等观点;对于该洋盆的关闭时间也存在早石炭世末期<sup>[52, 55]</sup>和晚二叠世之争<sup>[7]</sup>。

## 2 火山岩岩相学

区域上,西天山地区大哈拉军山组可以分为4个相对独立的构造—火山岩带(图1-a),由以安山岩为主的火山—沉积岩系<sup>[12, 29-32, 35-36, 58-63]</sup>组成。研究区位于乌孙山西段的察布查尔山脉南坡,主要岩石组合有碱性橄榄玄武岩、拉斑玄武岩等<sup>[40]</sup>。昭苏县赛克散萨依剖面上,大哈拉军山组火山岩以灰黑色为主,部分为紫红色。在剖面上,块状玄武岩厚度略大于气孔状和杏仁状玄武岩(图2)。

显微镜下,玄武岩可分为无斑玄武岩和含斑玄武岩。无斑玄武岩主要由斜长石(50%~65%)、单

斜辉石(20%~30%)、磁铁矿(5%~10%)组成,部分含有橄榄石(5%~10%)。斜长石分布杂乱,其格架之间充填单斜辉石或橄榄石小晶体,构成间粒结构或填间结构(图3-a)。斜长石呈自形长板条状,粒度一般介于0.25 mm×0.05 mm~1 mm×0.15 mm之间,长宽比为4:1~7:1,发育聚片双晶、卡钠复合双晶,部分绿帘石化和钠黝帘石化。斜长石还可见嵌晶含长结构,自形程度明显高于辉石。辉石常呈半自形粒状,粒度多小于0.2 mm,大小不一。橄榄石呈半自形粒状,粒度小,有蛇纹石化蚀变和铁质析出。无斑玄武岩中气孔较多,含量达10%~20%,呈不规则状,且可见数个气孔相通。

含斑晶的玄武岩具有斑状结构,基质具有间粒结构或玻基结构。斑晶总含量为10%~20%,由斜长石(10%)、辉石(5%)和橄榄石(3%~5%)组成。斜长石呈自形长条状,粒度为1 mm×0.2 mm~2 mm×0.5 mm,略呈定向排列。基质由斜长石(60%)、辉石(25%~30%)、磁铁矿(5%~10%)等组成。个别岩石基质为玻璃质,含较少的(小于2%)针状斜长石,构成玻基结构(图3-b)。

## 3 分析方法

野外采集地球化学样品时,避开风化面和杏仁体。在室内通过显微镜观察,选择蚀变较弱的样品10件,在玛瑙研钵中研磨至200目以下。主量元素采用XRF分析,分析误差优于5%;微量和稀土元素运用ICP-MS方法分析,检测限优于 $5 \times 10^{-9}$ ,相

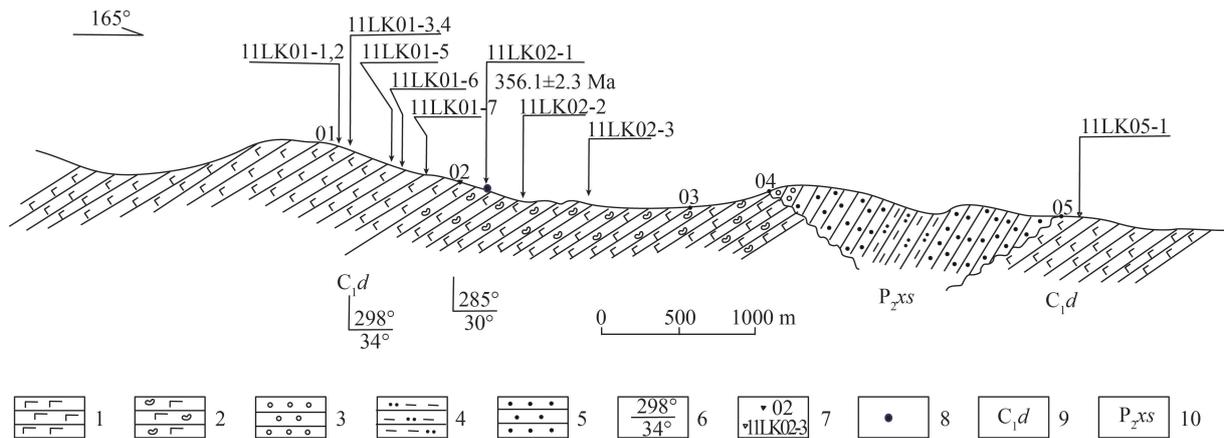


图2 昭苏县赛克散萨依大哈拉军山组火山岩剖面

Fig. 2 Section of Dahalajunshan Group from Saikesayi river of Zhaosu County

1—玄武岩;2—杏仁状玄武岩;3—砾岩;4—砂岩;5—沙质泥岩;6—产状;7—地质点、地球化学样品点及其编号;  
8—铅石同位素采样点;9—下石炭统大哈拉军山组;10—上二叠统晓山萨依组

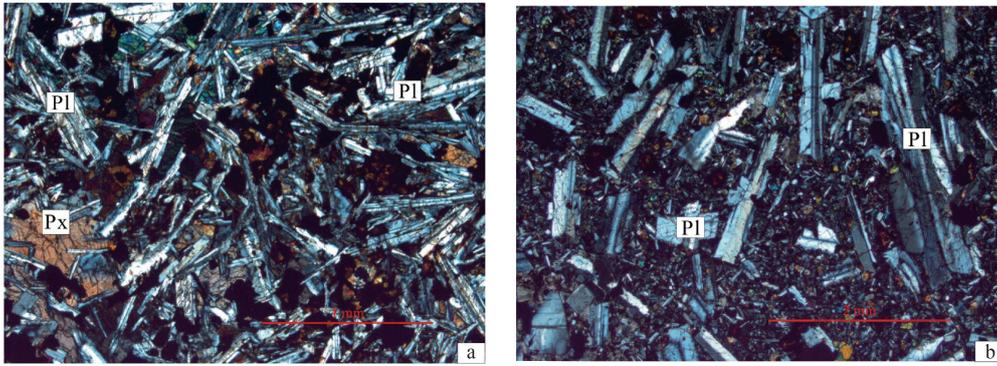


图 3 昭苏县赛克散萨依大哈拉军山组火山岩显微照片

Fig. 3 Microphotographs of typical basalts outcropped in the section of Dahalajunshan Group from Saikesayi river of Zhaosu County

a—无斑玄武岩,呈间粒结构,由斜长石、单斜辉石组成,见橄榄石假象(正交偏光);b—斑状玄武岩,呈斑状结构,斜长石斑晶略显定向排列,基质由隐晶质和微晶长石组成(正交偏光)。Pl—斜长石;Px—辉石

对标准偏差优于 5%。上述地球化学测试均在西安地质调查中心测试中心完成。

锆石同位素年龄样品的分离在廊坊区域地质实验室完成。玄武岩样品 11LK02-1 采自剖面第三层(图 2),GPS 坐标为北纬 43°18.070′、东经 81°07.721′。将野外采集的新鲜样品 20 kg,粉碎至 80 目以上,按常规方法分选,之后挑选晶形完好、无包裹体、透明度好、粒度大的锆石颗粒准备测试。

同位素年龄测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。将待测样品置于环氧树脂中,待固结后抛磨至粒径的约二分之一,使锆石内部充分暴露,在 FEI 公司生产的场发射环境扫描电子显微 Quanta400 E-FC 上进行锆石阴极发光(CL)照像,分析电压为 15 kV,电流为 19 nA。LA-ICP-MS U-Pb 同位素测定所用仪器为 Agilent 型 ICP-MS,与之配套的激光剥蚀系统是德国 Lamda Physik 公司生产的 Geolas 200M 深紫外 DUV 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统。激光斑束直径为 30 μm,激光剥蚀深度为 20~40 μm。详细的测试过程、分析步骤和数据处理方法见 Liu 等<sup>[64]</sup>。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石同位素年龄

编号为 11LK02-1 的玄武岩样品中,大多数锆石晶体的粒径小于 100 μm,呈淡黄色透明体,为半自形-自形柱状,长宽比为 1:1~2:1,锆石核部 CL 强度不均一,所有锆石都发育明显的振荡环带(图 4),具有典型岩浆锆石的特征。本次研究认为,

火山岩的锆石长宽比较小,主要应该与火山岩浆的性质,即高铝玄武质岩浆及在岩浆房中的分离结晶作用有关。位于锆石中心部位(15 号)和边部(16 号)2 个测点的表面年龄非常接近(图 4),表明两者是岩浆演化过程中几乎同期结晶的锆石。由表 1 可知,锆石的 Th 含量为  $39 \times 10^{-6} \sim 378 \times 10^{-6}$ ,U 含量为  $69 \times 10^{-6} \sim 427 \times 10^{-6}$ ,Th/U 值为 0.48~0.88。绝大多数测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄大于 350 Ma,变化范围为 344~368 Ma(表 1)。数据点均落在 U-Pb 谐和线右侧及其附近,在置信度 95% 时的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $355.1 \pm 4.0$  Ma (MSWD=0.25)(图 5),解释为玄武岩的结晶年龄,为早石炭世杜内期。

### 4.2 主量元素

主量元素分析结果(表 2)表明,玄武岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 45.04%~49.52%, $\text{TiO}_2$  含量为 1.22%~1.89%, $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 16.01%~17.15%,仅 1 个样品  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 15.27%(表 2)。 $\text{MgO}$  含量为 5.70%~8.94%, $\text{Mg}^\#$  值( $\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ )为 0.46~0.63,表明岩石经历了不同程度的分离结晶作用。 $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 2.36%~4.00%, $\text{K}_2\text{O}$  为 0.35%~1.22%, $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  值为 3.25~8.69,显示均属钠质火山岩;全碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )含量为 2.72%~5.18%,平均值为 3.78%。由 TAS 图(略)可知,昭苏赛克散萨依剖面火山岩岩石类型主要为玄武岩,含少量钠质粗面玄武岩。岩石的里特曼指数集中在 3.82~8.66 之间,仅 1 个玄武岩样品为 2.61(表 2),表明以碱性玄武岩系列为主,仅 1 个样品落入亚碱性系列。据

表 1 昭苏赛克散萨依剖面玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素年龄分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb analyses of zircon from basalt in Saikesayi section

测点编号	元素含量/ $10^{-6}$		同位素比值										年龄/Ma						
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	11LK02-1-03	378	427	0.88	0.0572	0.0015	0.4455	0.0106	0.0564	0.0004	0.0180	0.0002	501	56	374	7	354	3	360
11LK02-1-04	243	318	0.76	0.0580	0.0015	0.4540	0.0108	0.0568	0.0005	0.0185	0.0002	530	56	380	8	356	3	371	4
11LK02-1-05	193	298	0.65	0.0566	0.0021	0.4491	0.0160	0.0575	0.0006	0.0192	0.0004	477	81	377	11	360	4	384	7
11LK02-1-06	169	268	0.63	0.0560	0.0014	0.4346	0.0104	0.0563	0.0004	0.0176	0.0002	450	56	366	7	353	3	353	5
11LK02-1-07	243	368	0.66	0.0564	0.0014	0.4384	0.0097	0.0564	0.0004	0.0177	0.0002	466	53	369	7	354	3	354	4
11LK02-1-08	236	362	0.65	0.0560	0.0013	0.4262	0.0093	0.0552	0.0004	0.0178	0.0002	452	52	360	7	346	3	357	4
11LK02-1-09	158	282	0.56	0.0562	0.0012	0.4428	0.0088	0.0572	0.0004	0.0175	0.0002	458	48	372	6	358	2	350	4
11LK02-1-10	126	216	0.59	0.0551	0.0018	0.4169	0.0130	0.0549	0.0005	0.0170	0.0003	417	72	354	9	344	3	341	6
11LK02-1-13	181	274	0.66	0.0563	0.0013	0.4488	0.0096	0.0579	0.0004	0.0177	0.0002	462	51	376	7	363	3	354	4
11LK02-1-14	339	637	0.53	0.0555	0.0012	0.4292	0.0081	0.0561	0.0004	0.0185	0.0002	431	46	363	6	352	2	371	4
11LK02-1-15	99.1	200	0.49	0.0564	0.0020	0.4509	0.0150	0.0580	0.0006	0.0184	0.0004	466	76	378	10	364	4	370	8
11LK02-1-16	169	253	0.67	0.0544	0.0013	0.4354	0.0093	0.0581	0.0004	0.0174	0.0002	387	51	367	7	364	3	349	4
11LK02-1-17	132	213	0.62	0.0609	0.0018	0.4787	0.0136	0.0570	0.0005	0.0182	0.0003	635	64	397	9	358	3	365	6
11LK02-1-18	108	208	0.52	0.0556	0.0019	0.4349	0.0140	0.0567	0.0006	0.0174	0.0003	437	74	367	10	356	3	348	7
11LK02-1-19	129	222	0.58	0.0568	0.0015	0.4380	0.0106	0.0560	0.0004	0.0167	0.0002	482	57	369	8	351	3	334	5
11LK02-1-21	135	243	0.55	0.0641	0.0017	0.4994	0.0126	0.0565	0.0005	0.0196	0.0003	746	56	411	9	354	3	392	6
11LK02-1-22	190	382	0.50	0.0586	0.0015	0.4543	0.0108	0.0562	0.0004	0.0179	0.0003	552	55	380	8	353	3	358	5
11LK02-1-24	122	200	0.61	0.0630	0.0019	0.4960	0.0140	0.0570	0.0005	0.0188	0.0003	710	63	409	10	358	3	376	6
11LK02-1-25	100	208	0.48	0.0564	0.0018	0.4433	0.0135	0.0570	0.0005	0.0181	0.0003	466	70	373	10	358	3	363	7
11LK02-1-26	39.1	69.9	0.56	0.0581	0.0023	0.4680	0.0181	0.0584	0.0006	0.0191	0.0004	533	86	390	12	366	4	382	8
11LK02-1-27	166	257	0.65	0.0599	0.0013	0.4847	0.0096	0.0587	0.0004	0.0191	0.0002	598	47	401	7	368	3	383	4
11LK02-1-29	108	222	0.49	0.0601	0.0014	0.4716	0.0101	0.0569	0.0004	0.0191	0.0002	608	50	392	7	357	3	382	5
11LK02-1-30	146	285	0.51	0.0576	0.0013	0.4491	0.0092	0.0566	0.0004	0.0179	0.0002	514	49	377	6	355	3	358	5
11LK02-1-31	99.1	196	0.51	0.0562	0.0015	0.4336	0.0108	0.0560	0.0005	0.0178	0.0003	458	58	366	8	351	3	357	5
11LK02-1-32	198	380	0.52	0.0556	0.0011	0.4382	0.0076	0.0571	0.0004	0.0171	0.0002	437	43	369	5	358	3	343	4

钱青等<sup>[38]</sup>报道,该地区存在少量玄武安山岩和铁钛玄武岩,前者为拉斑岩浆系列,后者为碱性岩浆系列。

然而,火山岩的 CIPW 岩石化学计算结果表明,这些样品多数不含橄榄石和霞石标准矿物,只有粗面玄武岩(11LK01-5)和玄武岩(11LK02-1)的橄榄石标准矿物含量分别为 8.97% 和 7.00%,前者含有的霞石标准矿物仅为 0.12% (表 2);绝大多数样品含有紫苏辉石标准矿物(3.95%~24.07%)和透辉石标准矿物(3.50%~11.66%)。这些数据均显

示亚碱性系列火山岩的特征。根据标准矿物和前述岩相学鉴定结果,所有玄武岩样品均以斜长石、单斜辉石和少量橄榄石为矿物组合。结合 Nb/Y-SiO<sub>2</sub>、Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>、Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解(图 6-a~c)和 AFM 图解(图 6-d),样品具有明显的铁富集趋势,表明该地区玄武岩以拉斑玄武岩系列为主。此外,由于大多数火山岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量大于 16%,可以认为研究区大哈拉军山组火山岩是以高铝质拉斑玄武岩为主、少数样品具有碱性系列火山岩特征的岩浆岩组合。

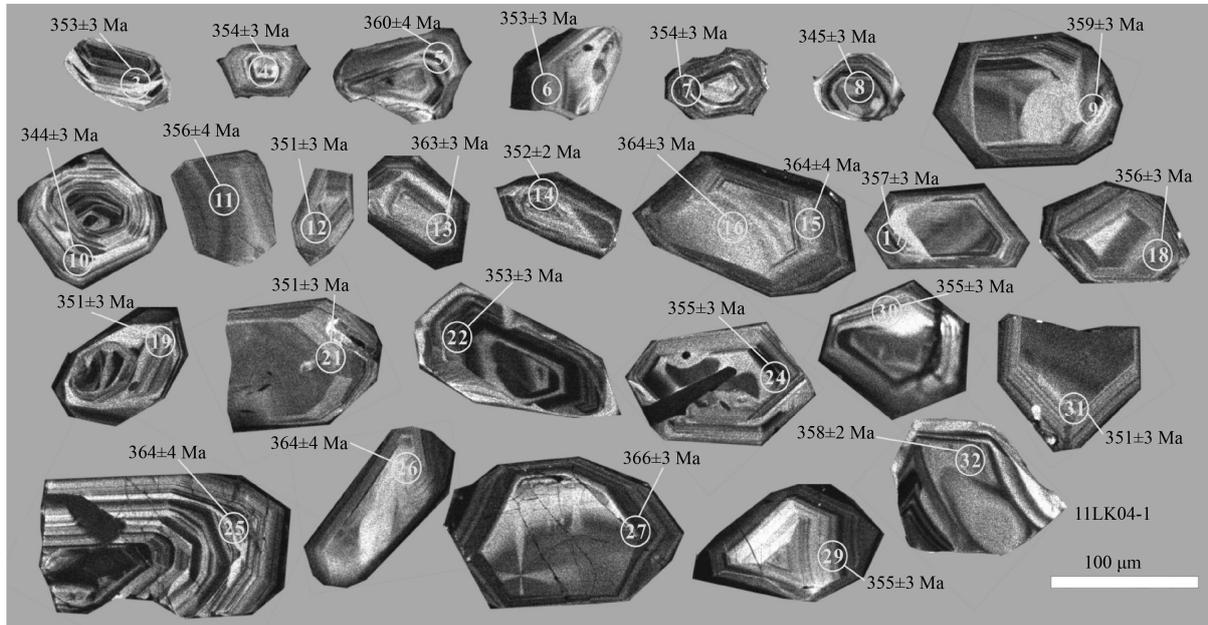


图 4 赛克散萨依剖面玄武岩(11LK02-1)锆石阴极发光(CL)图像(图中数值为<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表面年龄)

Fig. 4 Zircon CL images of basalt(11LK02-1) from Saikesayi section

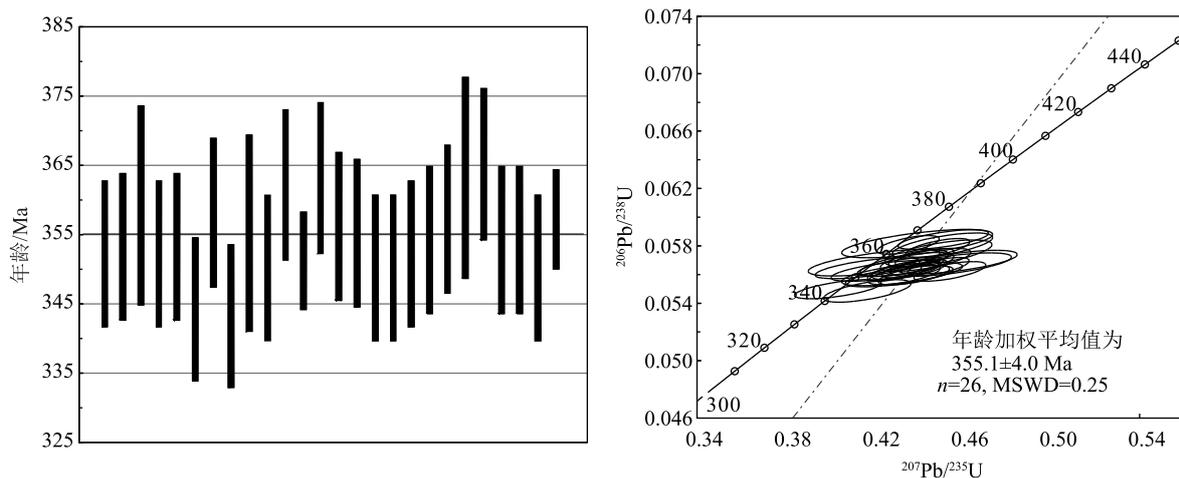


图 5 赛克散萨依剖面玄武岩(11LK02-1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb histogram of weighted average ages and concordia diagram for zircon from basalt of Saikesayi section

表2 赛克散萨依剖面火山岩主量、微量和稀土元素化学组成及CIPW标准矿物含量

Table 2 Major, trace and rare earth element contents and CIPW norm of volcanic rocks from Saikesayi section

元素	粗面玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	粗面玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
	11LK01-1	11LK01-2	11LK01-3	11LK01-4	11LK01-5	11LK01-6	11LK01-7	11LK02-1	11LK02-3
SiO <sub>2</sub>	49.52	45.06	45.14	45.04	46.1	45.96	45.46	45.93	45.84
TiO <sub>2</sub>	1.22	1.83	1.85	1.89	1.61	1.75	1.50	1.57	1.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.32	16.58	17.15	16.76	15.27	17.00	16.41	16.01	16.74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.25	11.02	10.73	9.03	10.64	9.87	9.22	8.75	5.28
FeO	3.02	2.13	2.62	3.98	1.17	2.3	1.97	2.37	4.72
MnO	0.16	0.15	0.13	0.19	0.18	0.14	0.16	0.16	0.18
MgO	7.71	6.28	5.7	6.3	6.91	5.97	7.54	7.06	8.94
CaO	6.05	9.23	9.27	9.01	7.42	9.57	9.62	7.28	8.25
Na <sub>2</sub> O	3.93	2.81	3.04	2.77	3.96	3.1	2.67	4.00	2.36
K <sub>2</sub> O	1.06	0.35	0.35	0.35	1.22	0.6	0.44	0.65	0.36
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.34	0.39	0.39	0.4	0.4	0.43	0.37	0.38	0.29
烧失量	4.39	4.1	3.59	4.29	5.09	3.26	4.56	5.8	5.6
总计	99.97	99.93	99.96	100.01	99.97	99.95	99.92	99.96	99.97
Alk	4.99	3.16	3.39	3.12	5.18	3.7	3.11	4.65	2.72
Mg <sup>#</sup>	0.62	0.48	0.46	0.48	0.54	0.49	0.57	0.55	0.63
Pb	3.5	2.75	2.5	2.63	0.68	4.85	2.24	3.44	1.32
Zn	79.4	94.8	101	95.8	95.5	86.7	84.9	84.4	78.8
Cr	170	52.4	49.1	48.7	122	151	166	164	175
Ni	113	96.1	102	93.6	105	114	130	132	131
Co	37	46	46.9	45.5	42.4	40.8	42.4	43.3	43.7
Li	16.9	8.17	8.62	11.6	28	21.5	29.2	48.9	41.2
Rb	20.4	4.07	4.37	3.44	25.2	10.1	6.95	17.2	3.83
Cs	0.36	0.12	0.14	0.24	0.28	0.14	0.093	0.27	0.26
Mo	0.63	0.69	0.68	0.61	0.97	0.84	0.62	0.75	0.31
Sr	615	388	415	434	910	497	441	1090	320
Ba	256	126	149	135	297	254	130	194	116
V	153	230	244	237	118	239	199	212	224
Sc	22.8	25.4	27.7	24.4	28.1	32.3	26.4	27.1	28.3
Nb	4.99	4.46	4.79	4.38	4.26	4.73	4.20	4.64	3.11
Ta	0.43	0.42	0.44	0.41	0.39	0.38	0.33	0.35	0.26
Zr	129	143	150	144	120	127	115	128	103
Hf	2.68	3.03	3.18	3.05	2.53	2.75	2.29	2.71	2.29
Ga	16.8	17.2	19.9	17.6	14.9	17.5	17.6	15.8	17
U	0.35	0.19	0.18	0.16	0.11	0.17	0.13	0.13	0.2
Th	1.45	0.82	0.55	0.48	0.39	0.45	0.61	0.58	0.54
La	13.4	10.3	11	10.4	8.68	11.2	10.4	11	8.41
Ce	31	28.1	29.1	27.8	24.8	28.8	25.8	28.2	21
Pr	4.45	4.34	4.38	4.27	3.66	4.42	3.79	4.09	3.13
Nd	19.3	20.5	22	21	18.1	21	18.6	20.2	15.3
Sm	4.61	5.36	5.66	5.73	4.96	5.57	4.42	4.99	4.32
Eu	1.51	1.84	1.98	1.9	1.63	1.89	1.7	1.68	1.55
Gd	4.58	5.44	5.72	5.65	4.83	5.53	4.5	4.83	4.28

续表 2

元素	粗面玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	粗面玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
	11LK01-1	11LK01-2	11LK01-3	11LK01-4	11LK01-5	11LK01-6	11LK01-7	11LK02-1	11LK02-3
Tb	0.74	0.87	0.91	0.87	0.76	0.82	0.67	0.81	0.67
Dy	4.53	5.67	5.72	5.72	4.87	5.43	4.65	5.12	4.74
Ho	0.99	1.14	1.26	1.13	1.04	1.18	0.95	1.12	0.96
Er	2.54	3.23	3.28	3.18	2.81	3.12	2.52	2.95	2.51
Tm	0.37	0.48	0.52	0.47	0.43	0.43	0.39	0.42	0.37
Yb	2.22	2.86	3.08	2.88	2.4	2.71	2.32	2.6	2.32
Lu	0.37	0.44	0.5	0.47	0.38	0.37	0.36	0.39	0.35
Y	24.5	29.4	32.1	29.8	26.5	28.6	25.1	27.2	24.8
∑REE	115.1	120.0	127.2	121.3	105.9	121.1	106.2	115.6	94.7
(La/Yb) <sub>N</sub>	4.07	2.43	2.41	2.43	2.44	2.79	3.02	2.85	2.44
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.83	1.21	1.22	1.14	1.10	1.26	1.48	1.39	1.22
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.66	1.53	1.50	1.58	1.62	1.65	1.57	1.50	1.49
δEu	0.99	1.03	1.05	1.01	1.01	1.03	1.16	1.03	1.09
Q	0.00	1.86	1.28	2.16	0.00	0.39	0.35	0.00	0.52
An	24.82	32.93	33.28	33.66	21.35	31.71	32.98	25.25	36.01
Ab	34.75	24.78	26.66	24.46	35.05	27.1	23.66	35.9	21.14
Or	6.56	2.16	2.15	2.16	7.61	3.67	2.73	4.08	2.26
Ne	0	0	0	0	0.12	0	0	0	0
Di	3.50	9.71	9.40	8.25	11.66	11.51	11.51	8.36	4.38
Hy	18.21	11.89	10.44	12.64	0	10.11	14.44	4.87	24.07
Ol	0.23	0	0	0	8.97	0	0	7.00	0
Il	2.43	3.63	3.65	3.75	0	3.44	2.99	3.17	2.84
Mt	7.03	2.14	3.63	8.32	4.59	2.89	2.64	3.83	8.11
he	1.69	10.03	8.63	3.7	8.05	8.22	7.85	6.65	0
Ap	0.78	0.89	0.88	0.91	0.92	0.97	0.85	0.88	0.67
sum	100.00	100.02	100.00	100.01	98.32	100.01	100.00	99.99	100.00

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为  $10^{-6}$

#### 4.3 稀土和微量元素

火山岩稀土元素总量  $\sum \text{REE}$  (包括 Y) 较低且变化范围较小, 为  $94.7 \times 10^{-6} \sim 127.2 \times 10^{-6}$  (表 2)。稀土元素的  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  值、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  值和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  值依次分别集中在  $2.44 \sim 4.07$ 、 $1.22 \sim 1.83$  和  $1.49 \sim 1.66$  之间。这些数据表明, 研究区玄武岩均具有轻稀土元素富集型配分型式, 轻、重稀土元素内部分馏弱, 而轻、重稀土元素之间分馏明显的特征; 在球粒陨石标准化配分模式图上, 配分曲线较平坦、呈微弱的右倾型 (图 7-a)。此外, 大多数玄武岩有弱正 Eu 异常,  $\delta\text{Eu}$  值为  $0.99 \sim 1.06$ , 个别为  $1.09 \sim 1.16$  (表 2), 显示正 Eu 异常较明显, 与显微镜下观察到的长石矿物含量高吻合。

微量元素方面 (表 2), 火山岩的 Nb 含量很低,

集中分布在  $3.11 \times 10^{-6} \sim 4.99 \times 10^{-6}$ ; Ta 含量为  $0.26 \times 10^{-6} \sim 0.44 \times 10^{-6}$ , 平均含量为  $0.38 \times 10^{-6}$ ; Zr、Hf 含量分别为  $103 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$  和  $2.29 \times 10^{-6} \sim 3.18 \times 10^{-6}$ 。在 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解 (图 6-c) 中, 几乎所有样品点落入亚碱性系列玄武岩, 也与前述结论一致。

微量元素 MORB (洋中脊玄武岩) 标准化蛛网图 (图 7-b) 上, 大离子亲石元素 (LILE) 均较 MORB 富集, 但是存在明显的 Th-U 槽和 Nb、Ta 槽。高场强元素 (HFSE) 多数与 MORB 接近, TiO<sub>2</sub> 亏损不显著 (图 7-b)。上述特征中, Th-U 槽、Nb-Ta 槽、TiO<sub>2</sub> 的亏损, 以及 K<sub>2</sub>O 的明显富集 (图 7-b) 等, 均是研究区火山岩的形成与消减作用有关的重要特征。

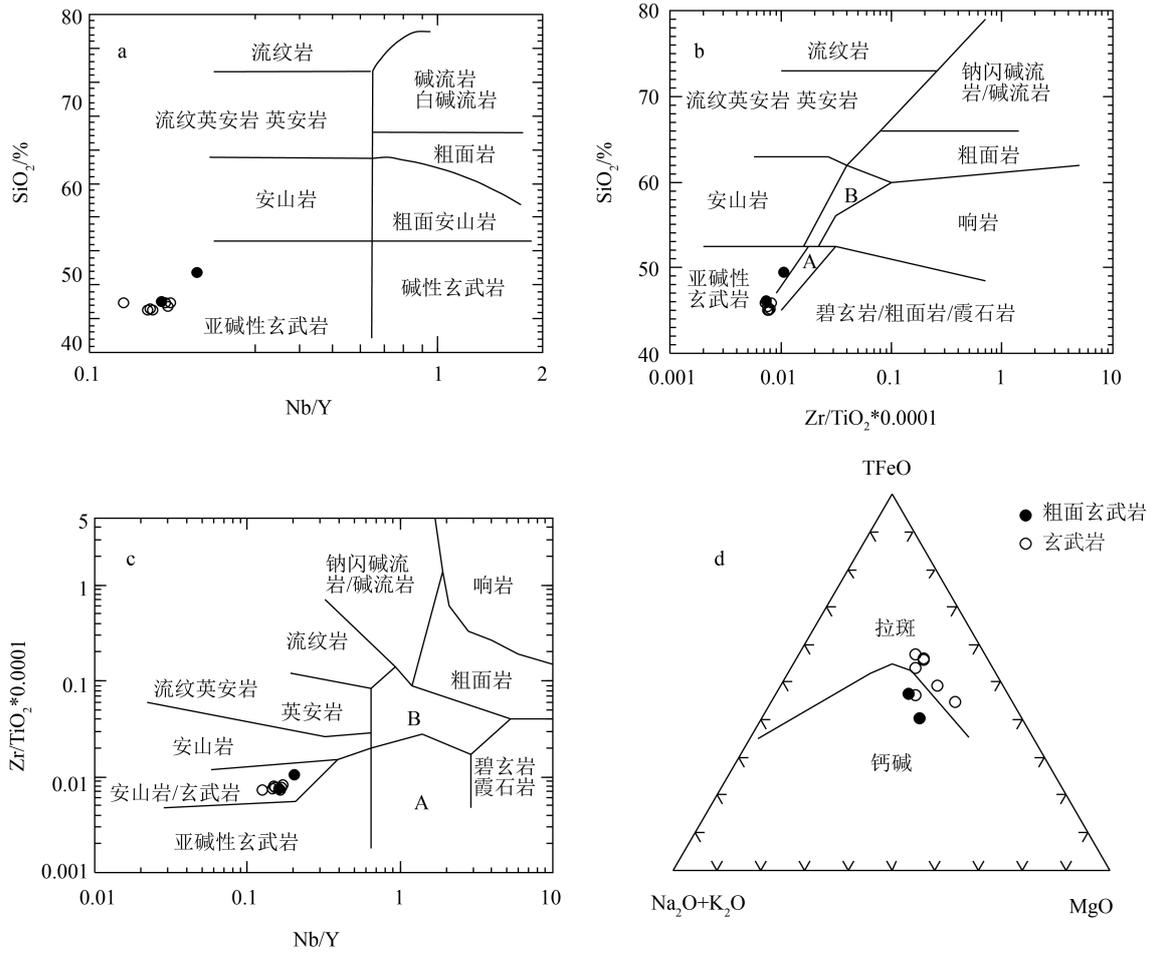


图6 赛克散萨依剖面火山岩岩石化学图解(a~c 据参考文献[65];d 据参考文献[66])

Fig. 6 Geochemical diagrams for volcanic rocks from Saikesayi section

a—Nb/Y—SiO<sub>2</sub> 图解;b—Zr/TiO<sub>2</sub> \* 0.0001—SiO<sub>2</sub> 图解;c—Nb/Y—Zr/TiO<sub>2</sub> \* 0.0001 图解;d—AFM 图解。A—碱性玄武岩;B—粗面安山岩

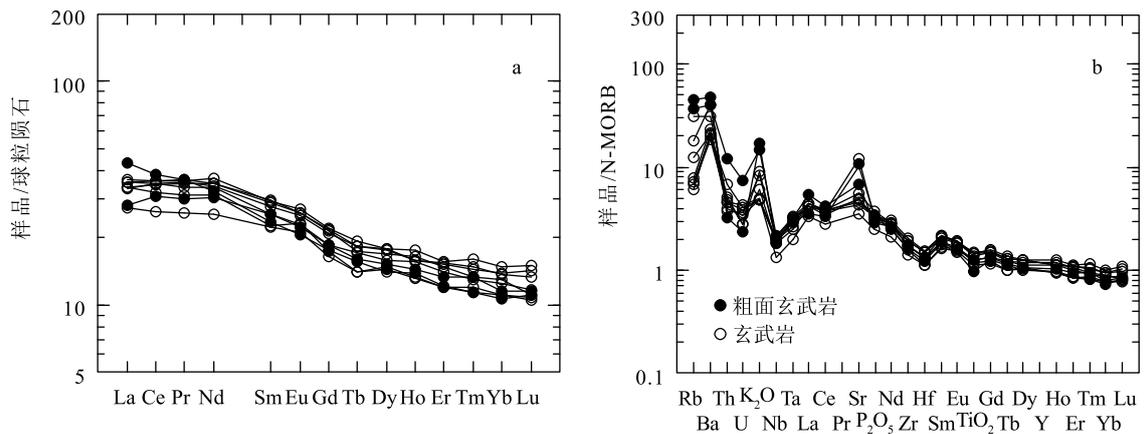


图7 赛克散萨依剖面火山岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

(稀土元素标准化数据据参考文献[67];N-MORB 据参考文献[68])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and N-MORB-normalized spidergrams(b) for basalts from Saikesayi section

## 5 讨 论

### 5.1 关于高铝玄武岩

高铝玄武岩(HAB)最早由 Tilley<sup>[69]</sup> 提出并定义,代表一种  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量高(16%~18%)且不含斑晶的熔岩,产于美国加利福尼亚州的 Medicine Lake 地区。在仔细研究高铝玄武岩的岩相学和化学特征后,Kuno<sup>[70]</sup> 指出,日本岛弧存在许多高铝玄武岩,提出高铝玄武岩代表一种原始岩浆系列,且高铝玄武岩既有碱性系列又有钙碱系列的种属。大多数后来被划分为 HAB 的岛弧熔岩都含有高达 30%~60%的斑晶,通常以斜长石为主<sup>[71]</sup>;同时,高铝玄武岩是岛弧火山岩浆作用中最常见且非常重要的火山岩<sup>[70]</sup>。如前所述,昭苏赛克散萨依剖面的火山岩, $\text{SiO}_2$  含量为 45.04%~49.52%, $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 16.01%~17.15%,符合高铝玄武岩定义<sup>[69-70]</sup>,大部分样品也符合  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量大于 16.5%的标准<sup>[72]</sup>,这与钱青等<sup>[40]</sup> 对同一地区玄武岩的化学分析结果一致。虽然多数样品的里特曼指数大于 3.82(表 2),但实质上均为亚碱性拉斑系列(图 6)。大多数样品的  $\text{MgO}$  含量集中在 5.70%~6.91%之间,少数样品大于 7%(7.06%~8.94%),即属高镁玄武岩<sup>[73]</sup>。这些特点与俄罗斯堪察加半岛 Klyuchevskoy 火山<sup>[74]</sup> 中的许多岩石特征相近。

早期实验岩石学研究认为,石英拉斑玄武岩、高铝玄武岩和碱性玄武岩 3 种类型岩浆可以在类似于日本岛弧中、不同深度上的岩浆熔离或分离结晶作用形成,其深度依次为小于 15 km、15~35 km 和 35~60 km<sup>[75]</sup>。之后,有关高铝玄武岩成因的争论主要集中在究竟是俯冲洋壳和相关沉积物部分熔融的原始岩浆<sup>[70, 76-78]</sup>,还是高镁玄武岩母岩浆分离结晶的产物<sup>[74, 78-80]</sup>。

火山岩 Harker 图解(图略)中,赛克散萨依剖面玄武岩的  $\text{SiO}_2$  与  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFeO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  等具有一定的线性关系,表明这些玄武岩之间可能具有岩浆分离结晶作用; $\text{Mg}^\#$ 变化范围为 0.48~0.63,表明其结晶分离作用为较弱-中等程度。随着  $\text{SiO}_2$  的增加, $\text{TiO}_2$ 、 $\text{TFeO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$  等均减少,表明可能存在辉石及斜长石的分离结晶作用;而  $\text{MgO}$  的增加可能是因为橄榄石的分离结晶作用不明显。 $\text{CaO}$  与  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  的相关性较好,表明存在单斜辉石的分离结晶<sup>[81-82]</sup>,这与岩石中存在

单斜辉石斑晶一致。火山岩的稀土元素配分型式不存在明显的负 Eu 异常,反而多数样品还有正 Eu 异常(表 2;图 7),可能说明斜长石的分离结晶作用弱或者其分离结晶作用被单斜辉石的分离结晶作用补偿,且使 Eu 产生了弱的富集。在火山岩  $\text{TFeO}/\text{MgO}-\text{TiO}_2$ <sup>[83]</sup>(图略)和 AFM 图解中,火山岩具有拉斑玄武岩的演化趋势和铁富集。此外,少量非高铝玄武岩( $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量小于 16%)及铁钛玄武岩<sup>[40]</sup> 的出现,表明区内玄武质岩浆的演化具有向铁富集分异的趋势演化,是拉斑质玄武岩浆系列的重要特征。

### 5.2 火山岩形成的构造环境

20 世纪 70 年代末期,新疆区域地质调查队在特克斯以南的科克苏河一带建立了大哈拉军山组:“杜内阶由一套火山熔岩、火山碎屑岩夹正常沉积碎屑岩组成,在大哈拉军山出露完整,且上下限清楚”<sup>[84]</sup>,沉积环境为海陆交互相。剖面上,火山岩主要由辉石安山岩、粗面安山岩和流纹岩组成。在随后开展的伊犁地区地层清理时,将出露于伊犁地区多数化石依据不充分的火山-沉积岩系均归于大哈拉军山组<sup>[85]</sup>。在造成大哈拉军山组广泛使用的同时,开启了西天山地区大哈拉军山组火山岩形成的时代、岩石组合和构造环境争论<sup>[1-3, 22-40]</sup>。

大量区域地质调查与综合研究成果表明,目前被归于大哈拉军山组的地层,是一个地质年代跨度较大的岩石地层单位,晚泥盆世—晚石炭世均有,其同位素年龄范围为 386.4~312.8 Ma<sup>[12, 29-37, 58-62, 85-89]</sup>,阿吾拉勒松湖铁矿和式可布台铁矿的同位素年龄可达 305.5±1 Ma 和 300.9±1 Ma<sup>[90]</sup>。同时,伊犁地区不同地段大哈拉军山组火山岩不仅在时代上相差很大,而且在岩石组合与岩石系列上也有较大差异,总体上是以安山岩为主的玄武安山岩—安山岩—英安岩—流纹岩组合,以钙碱系列和高钾钙碱系列为主,少量拉斑系列<sup>[29, 31, 35-37, 63, 86-87, 91-95]</sup>。但在昭苏县北部乌孙山南坡,大哈拉军山组火山岩是以碱性橄榄玄武岩为主、有少量拉斑玄武岩的岩石组合<sup>[40]</sup>。由此可见,正是由于大哈拉军山组火山岩在时代、岩石组合、序列、岩浆系列等方面均存在较大差异,才造成对其形成的构造环境乃至对整个天山地区地质构造演化的认识迥然不同。

如上所述,赛克散萨依地区大哈拉军山组火山岩是以拉斑系列为主的火山岩岩石组合。为了区

分不同类型或不同构造环境的拉斑玄武岩,20世纪60—80年代,许多岩石学家进行了深入研究并提出了许多卓有成效的判别图解<sup>[95-98]</sup>。如上所述,在稀土和微量元素的含量及其球粒陨石或 MORB 标准化图(图7)中,研究区拉斑玄武岩与大洋橄榄拉斑玄武岩不同;在图8-b~c中,研究区拉斑玄武岩均落在岛弧拉斑玄武岩或岛弧玄武岩范围内。从图8-d可以判断,研究区玄武岩的形成环境为大陆边缘岛弧。

许多研究者认为,南天山洋是古亚洲洋的主洋盆,它的关闭代表了整个古亚洲洋的关闭时限。然而,对于该洋盆闭合时间的认识存在巨大差异,有石炭纪之前<sup>[22, 24, 48]</sup>、早石炭世末期<sup>[5, 33, 49-51]</sup>等认识。南天山地区蛇绿岩的形成年龄集中在440~397 Ma<sup>[47, 99-102]</sup>,为志留纪—早泥盆世。与蛇绿岩伴生

的深海硅质岩中,境外南天山分布最广的为含泥盆纪放射虫的硅质岩,其次为早石炭世早期的硅质岩<sup>[103]</sup>。境内南天山发现的放射虫化石时代为晚泥盆世法门期—早石炭世维究期,表明早石炭世代表南天山洋盆关闭的年龄下限<sup>[104]</sup>。变质岩方面,南天山榴辉岩—蓝片岩同位素年龄研究表明,350~345 Ma 相当于同碰撞时间,323~312 Ma 相当于后碰撞时间<sup>[5, 105]</sup>。位于伊犁地块南部、代表帖尔斯克洋(Terskey)的早古生代蛇绿岩缝合带很可能沿尼古拉耶夫线即那拉提北缘断裂延伸,并在早奥陶世<sup>[106]</sup>或晚奥陶世<sup>[103, 107-110]</sup>闭合,使伊犁地块南侧的昭苏—伊塞克岛弧<sup>[111]</sup>碰撞相接,该区陆缘型火山作用一直持续到晚石炭世<sup>[112]</sup>。但在该带北侧,中亚地区的伊塞克湖以北存在向南略微突出的奥陶纪—石炭纪的扎来伊尔—奈曼碰撞带<sup>[111]</sup>,很可能延伸到

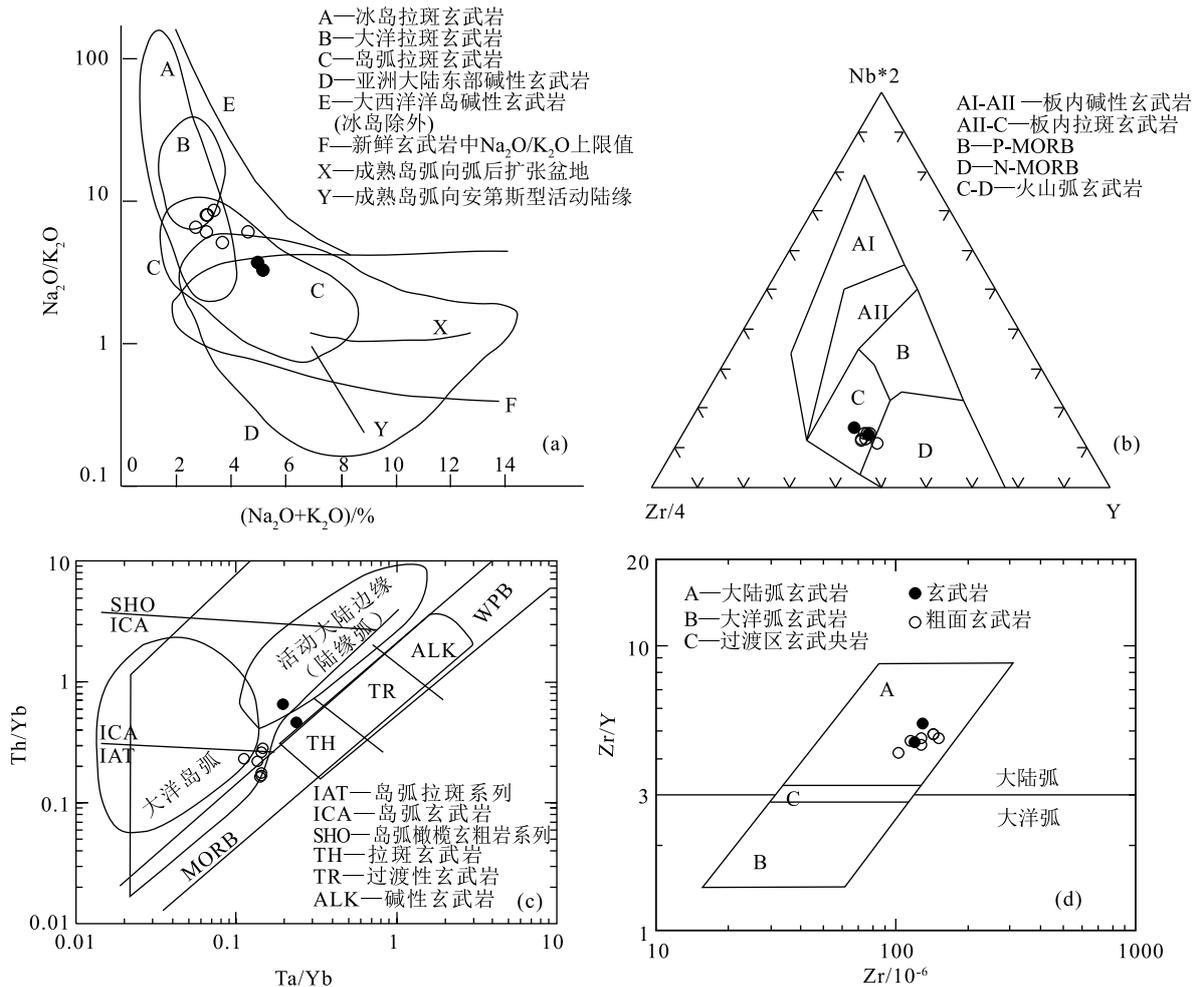


图8 赛克散萨依剖面火山岩构造环境判别图(底图据参考文献[95-98])

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams of volcanic rocks from Saikesayi section

MORB—洋中脊玄武岩;WPB—板内玄武岩

中国境内并与昭苏盆地以北的乌孙山-塔斯巴山石炭纪火山沉积岩系相接。昭苏县赛克散萨依剖面位于该带的东延部分,早石炭世,其南部为奥陶纪完成碰撞的那拉提-伊塞克湖陆缘岛弧<sup>[29]</sup>,其北为伊犁地块-乌孙山北坡早石炭世岛弧火山岩<sup>[36]</sup>。位于那拉提-伊塞克湖陆缘岛弧的科克苏河剖面上,大哈拉军山组的同位素年龄为  $358.9 \pm 2.3 \text{ Ma}$ <sup>[86, 92]</sup>。侵入岩方面,485~366 Ma 形成的是成熟岛弧的高钾钙碱系列岩石组合,352~320 Ma 的石炭纪岩体,岩石类型主要为花岗闪长岩-二长花岗岩-正长花岗岩,其物质来源有古老地壳、新生地壳及亏损地幔和古老地壳混合源区,表明后者具有地幔物质的加入<sup>[113]</sup>。Gao 等<sup>[114]</sup>指出,南天山地区 460~330 Ma 的侵入岩浆活动,与南天山大洋板块向北俯冲作用有关。综上所述,南天山洋很可能在早石炭世晚期关闭,但不排除在局部地区晚泥盆世开始板块碰撞。

中天山北缘—北天山地区被认为是古亚洲洋的次要洋盆,其关闭时限也存在奥陶纪末<sup>[8, 115]</sup>、石炭纪<sup>[44-45]</sup>、晚二叠世<sup>[7]</sup>等观点。从中天山北缘—北天山地区的蛇绿岩分布看,主要存在 2 个蛇绿混杂岩带,分别为位于冰大坂—干沟—米什沟一带的奥陶纪蛇绿岩<sup>[8, 115]</sup>和位于沙泉子—石河子以南的早泥盆世—早石炭世蛇绿混杂岩带(本文称为奎屯河—巴音沟蛇绿混杂岩带)。冰大坂—干沟—米什沟蛇绿岩的时代为奥陶纪<sup>[8, 115]</sup>。奎屯河—巴音沟蛇绿混杂岩中,蛇绿岩的形成年龄为  $385.7 \sim 324.8 \text{ Ma}$ <sup>[46-47, 116-117]</sup>,为早泥盆世—早石炭世末。从现有资料分析,该蛇绿混杂岩带与新疆北部其他地区的蛇绿混杂岩明显不同的是,蛇绿岩的形成年龄与混杂基质接近,其他地区的混杂基质远比蛇绿岩的形成时代年轻。因此,对奎屯河—巴音沟蛇绿混杂岩带蛇绿岩和混杂岩的形成机制和就位机制需要重新认识。需要说明的是,蛇绿混杂岩带中的泥盆纪—石炭纪地层为一套海相火山-沉积岩系,其沉积相、岩石组合、变形变质作用等,可能表明在泥盆纪—石炭纪早期,中天山北缘依然为具有活动大陆边缘的性质,北天山洋有向南俯冲的可能性。

上述区域地质综合研究表明,在石炭纪早期,即西天山地区“大哈拉军山组”火山岩形成时期,中天山南北缘可能同时存在俯冲作用。西天山伊犁地块在这种机制作用之下,在博罗科努和那拉提南、北 2 个造山带,自中晚泥盆世开始,一方面形成

了与俯冲作用有关的火山-沉积岩系;另一方面,由于双向俯冲作用的存在,可能导致伊犁地块产生局部的拉张作用。位于那拉提造山带的北侧、伊犁地块内的乌孙山西段,如前所述,为拉斑玄武岩系列为主的火山岩,多数具有高铝玄武岩特征,既是早石炭世南天山洋向北俯冲形成的岛弧火山岩的反映,也是该地区存在着伸展作用的岩石地球化学显示。微量元素(表 2)方面,赛克散萨依剖面火山岩的 Nb、Ta 含量与 Sunda 岛弧 Nb、Ta 含量(分别为  $3.1 \times 10^{-6} \sim 4.1 \times 10^{-6}$  和  $0.3 \times 10^{-6}$ )<sup>[118-119]</sup>相近,而 Zr、Hf 含量接近于 Andes 弧,后者分别为  $152 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$  和  $2.35 \times 10^{-6} \sim 3.74 \times 10^{-6}$ <sup>[120]</sup>,说明研究区火山岩形成的构造环境处于过渡环境。此外,Zr/Nb 值为 17.2~33.1,处于典型岛弧火山岩 Zr/Nb 值(10~60)范围<sup>[121]</sup>;结合图 8-a 可知,火山岩总体上为岛弧拉斑玄武岩且具有向弧后盆地的演化趋势,但是可能不是弧后盆地火山岩。

### 5.3 岩浆源区

大多数成熟岛弧都存在第一火山链和第二火山链。第一火山链的岩浆多数是由消减板片之上含水地幔被板片俯冲引起的对流向下拖曳至约 120 km 处被加热,发生脱水并熔融形成。第二火山链则多是由金云母和辉石的脱水反应形成发生在约 200 km 深度的部分熔融,大多数为高铝玄武岩<sup>[122]</sup>。伊犁地块南缘在早古生代—早石炭世,火山岩和侵入岩具有成熟岛弧的岩石组合。研究区玄武岩为高铝质拉斑玄武岩系列,形成环境为大陆边缘岛弧。在火山岩的 Nb/Yb-Th/Yb 和 Nb/Yb-Zr/Yb 图解(图 9)中,火山岩的岩浆源区为富集地幔,应该是消减板块之上位于第二火山链的地幔橄榄岩。

## 6 结 论

(1)西天山地区乌孙山南坡赛克散萨依一带玄武质火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $355.1 \pm 4.0 \text{ Ma}$ ,属早石炭世杜内阶,与区域上那拉提山北坡大哈拉军山组时代相同。

(2)赛克散萨依剖面火山岩属偏碱性高铝质拉斑玄武岩为主的岩石组合,具有轻重稀土元素均富集、轻重稀土元素分馏明显的右倾式配分型式,弱正 Eu 异常表明玄武岩中钠质斜长石含量较多。大离子亲石元素较 MORB 富集,且存在明显的 Th-U 槽和 Nb-Ta 槽。高场强元素多数与 MORB 接近,

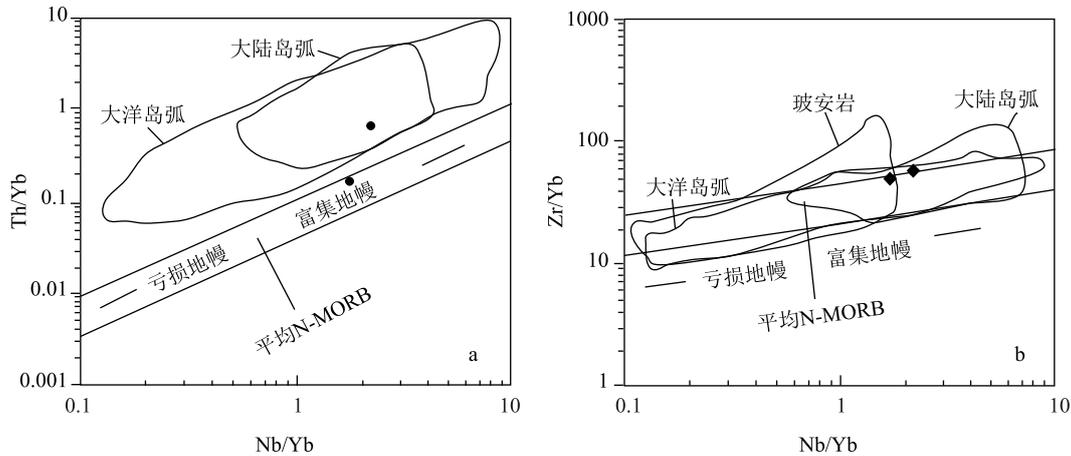


图9 赛克散萨依大哈拉军山组火山岩构造环境判别图<sup>[123]</sup>

Fig. 9 Discrimination diagrams for tectonic settings of volcanic rocks from Saikesayi section

N-MORB—正常洋中脊玄武岩

TiO<sub>2</sub> 亏损不显著, K<sub>2</sub>O 明显富集等是火山岩形成于与消减作用有关的主要证据。玄武岩岩浆的形成主要由俯冲带上流体交代作用形成的富集地幔部分熔融形成, 并经历了以辉石和斜长石为主的分离结晶作用, 橄榄石的分离结晶作用不明显, 造成火山岩具有典型拉斑玄武岩的铁富集演化趋势。

(3) 赛克散萨依剖面高铝玄武岩的确定, 是西天山地区早石炭世板块汇聚的标志。结合西天山区域地质综合分析认为, 西天山地区早石炭世火山岩的形成环境为具有大陆边缘特征的岛弧, 构造上可能位于俯冲带上的第二火山链。

**致谢:** 在成文过程中得到西北大学地质学系张成立教授、第五春荣教授和中国地质调查局发展研究中心李仰春教授级高工的指导和帮助, 在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] Sengör A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [2] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive Granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. *Episodes*, 2000, 23: 82-92.
- [3] Jahn B M, Griffin W L, Wingley B F. Continental growth in the Phanerozoic: evidence from Central Asia [J]. *Tectonophysics (special issue)*, 2020, 328: 1-227.
- [4] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-11, 90-103.
- [5] Gao J, Klemd R. Formation of HP LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints [J]. *Lithos*, 2003, 66: 1-22.
- [6] Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia [J]. *American Journal of Science*, 2004, 304: 370-395.
- [7] Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 102-117.
- [8] 董云鹏, 张国伟, 周鼎武, 等. 中天山北缘冰达坂蛇绿混杂岩的厘定及其构造意义 [J]. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(6): 552-560.
- [9] 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 37-44.
- [10] 陈丹玲, 刘良, 车自成, 等. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 378-384.
- [11] Heinhorst J, Lehmann B, Ermolov P, et al. Paleozoic crustal growth and metallogeny of Central Asia: evidence from magmatic-hydrothermal ore systems of Central Kazakhstan [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328: 69-87.
- [12] 张芳荣, 程春华, 余泉, 等. 西天山乌孙山一带大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年 [J]. *新疆地质*, 2009, 27(3): 231-235.
- [13] Shen P, Shen Y C, Li X H, et al. Northwestern Junggar Basin, Xiemisitai Mountains, China: A geochemical and geochronological approach [J]. *Lithos*, 2012, 140/141: 103-118.
- [14] Chen J F, Han B F, Jia J Q, et al. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China [J]. *Lithos*, 2010, 115: 137-152.
- [15] Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle magma source for the Ulungur River A-type granites from north Xinjiang, China:

- Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implication for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 1994, 138: 135-159.
- [16] Zhou T F, Yuan F, Fan Y, et al. Granites in the Saur region of the west Junggar, Xinjiang Province, China: geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance [J]. *Lithos*, 2008, 106: 191-206.
- [17] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Syn- and post-collisional granitoids in the Central Tianshan orogen: geochemistry, geochronology and implications for tectonic evolution [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 568-581.
- [18] Neubauer F, Liu X M, Hauzenberger C. Syn- and post-collisional granitoids in the Central Tianshan orogen: geochemistry, geochronology and implications for tectonic evolution [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 568-581.
- [19] Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic magmatic rocks in the Lamasu-Dabate area, northwestern Tianshan (west China): Evidence for a tectonic transition from arc to post-collisional setting [J]. *Lithos*, 2010, 119: 393-411.
- [20] 车自成, 刘洪福, 刘良, 等. 中天山造山带的形成与演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-135.
- [21] 车自成, 刘良, 刘洪福, 等. 论伊犁裂谷 [J]. *岩石学报*, 1996, 12(3): 478-490.
- [22] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱 [J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10): 903-910.
- [23] 夏林圻, 李向民, 夏祖春, 等. 天山石炭纪—二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱 [J]. *西北地质*, 2006, 39(1): 1-49.
- [24] Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, et al. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(3-4): 419-433.
- [25] 白建科, 李智佩, 徐学义, 等. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 85-96.
- [26] 白建科, 李智佩, 徐学义, 等. 西天山早石炭世构造环境: 大哈拉军山组底部沉积地层学证据 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 459-470.
- [27] 高山林, 李云新. 西天山尼勒克水泥厂大哈拉军山组形成时代与构造背景 [J]. *新疆地质*, 2017, 33(4): 440-448.
- [28] 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1995, 14(4): 289-300.
- [29] 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究 [J]. *科学通报*, 2005, 50: 2004-2014.
- [30] 王博, 舒良树, Cluzel D, 等. 新疆伊犁北部石炭纪火山岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 498-508.
- [31] 安芳, 朱永峰. 西北天山吐拉苏盆地火山岩 SHRIMP 年代学和微量元素地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(12): 2741-2748.
- [32] 龙灵利, 高俊, 钱青, 等. 西天山伊犁地区石炭纪火山岩地球化学特征及构造环境 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 699-710.
- [33] 李永军, 李注苍, 佟丽莉, 等. 论天山古洋盆关闭的地质时限——来自伊犁地块石炭系的新证据 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 2905-2912.
- [34] 李永军, 吴乐, 李书领, 等. 伊宁地块石炭纪火山岩及其对构造演化的约束 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(1): 1-15.
- [35] 李继磊, 钱青, 高俊, 等. 西天山昭苏东南部阿登套地区大哈拉军山组火山岩及花岗岩侵入体的地球化学特征、时代和构造环境 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 2913-2924.
- [36] 茹艳娇, 徐学义, 李智佩, 等. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造环境 [J]. *地质通报*, 2012, 31(1): 50-62.
- [37] 李大鹏, 杜杨松, 庞振山, 等. 西天山阿吾拉勒石炭纪火山岩年代学和地球化学研究 [J]. *地球学报*, 2013, 34(2): 176-192.
- [38] 李鸿, 西天山尼勒克一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造意义 [J]. *新疆地质*, 2017, 35(2): 145-150.
- [39] 周翔, 余心起, 王宗秀, 等. 西天山大哈拉军山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *地质通报*, 2015, 34(5): 845-860.
- [40] 钱青, 高俊, 熊贤明, 等. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的地球化学特征、成因及形成环境 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1307-1323.
- [41] 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 等. 亚洲大地构造图 (1: 8 000 000) [M]. 北京: 地图出版社, 1982.
- [42] 李春昱, 王荃. 中国北部边陲及邻区的古板块构造与欧亚大陆的形成 [C] // 蔡文俊 (主编). 中国北方板块构造文集, 第 1 集 [M]. 北京: 地质出版社, 1983: 3-16.
- [43] 王洪亮, 徐学义, 何世平, 等. 天山及邻区地质图 (1: 1 000 000) [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [44] Kwon S T, Tilton G R, Coleman, R G, et al. Isotopic studies bearing on the tectonics of the west Junggar region, Xinjiang, China [J]. *Tectonics*, 1989, 8(4): 719-727.
- [45] Xiao X C, Tang Y Q, Wang J, et al. Tectonic evolution of the Northern Xinjiang, N. W. China: an introduction to the tectonics of the southern part of the Paleo-Asian Ocean [C] // Coleman, R G. Reconstruction of the Paleo-Asian Ocean. Proceeding of the 29th International Geological Congress, Part B. VSP, Utrecht, 1994: 6-25.
- [46] 徐学义, 夏林圻, 马中平, 等. 天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 83-94.
- [47] 徐学义, 夏林圻, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世: 来自辉长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的证据 [J]. *地质学报*, 2006, 50(8): 1168-1176.
- [48] 李智佩, 吴亮, 颜玲丽. 中国西北地区蛇绿岩时空分布与构造演化 [J]. *地质通报*, 2020, 39(6): 783-817.
- [49] 汤耀庆, 高俊, 赵民. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [50] 杨经绥, 徐向珍, 李天福, 等. 新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石 U-Pb 同位素定年: 早古生代洋盆的证据 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 77-95.
- [51] 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据 [J]. *地质通报*, 2002, 21(2): 55-62.
- [52] Gao J, Li M S, Xiao X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the

- Tianshan Orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 1998, 287: 213-231.
- [53] Gao J, Zhang L F, Liu S W. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age record of formation and uplift of the blueschists and eclogites in the western Tianshan Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 1047-1051.
- [54] 姜常义, 穆艳梅, 白开寅, 等. 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*, 1999, 15(2): 298-305.
- [55] 赵振华, 王强, 熊小林, 等. 新疆北部的两类埃达克岩[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1249-1265.
- [56] 王作勋, 邹继易, 吕喜朝, 等. 天山多旋回构造演化及成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 129-133.
- [57] 高长林, 黄泽光, 叶德燎, 等. 中国早古生代三大古海洋及其对盆地的控制[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(5): 439-448.
- [58] 李智佩, 白建科, 茹艳娇, 等. 西天山地区早石炭世火山岩形成时代、地层清理及其地质意义[C] // 第四届全国地层会议论文摘要, 2013: 599.
- [59] 朱永峰, 周晶, 宋彪, 等. 新疆“大哈拉军山组”火山岩形成时代问题及其解题方案[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 487-497.
- [60] 翟伟, 孙晓明, 高俊, 等. 新疆阿希金矿床赋矿围岩—大哈拉军山组火山岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1399-1404.
- [61] 李永军, 李注苍, 周继兵, 等. 西天山阿吾拉勒一带石炭系岩石地层单位厘定[J]. *岩石学报*, 2009, 25(6): 1332-1340.
- [62] 汪帮耀, 姜常义. 西天山查岗诺尔铁矿区石炭纪火山岩地球化学特征及岩石成因[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(6): 18-27.
- [63] 沈立军, 王怀洪, 李大鹏, 等. 新疆西天山智博铁矿床地球化学及同位素特征[J]. *地质通报*, 2020, 39(5): 698-711.
- [64] Liu X, Gao S, Diwu C, et al. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 mu m spot size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52: 1257-1264.
- [65] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [66] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Can. Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523-548.
- [67] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements [C] // Henderson P. Rare earth element geochemistry, 1984: 63-114.
- [68] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [M]. Geological Society of London, Special Publication, 1989, 42: 313-334.
- [69] Tilley C E. Some aspects of magmatic evolution[J]. *Quarterly Journal of Geological Society*, 1950, 106: 37-50.
- [70] Kuno H. High-alumina basalt [J]. *Journal of Petrology*, 1960, 1: 121-145.
- [71] Ewart A E. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: With special reference to the andesitic-basaltic compositional range [C] // Thorpe R. S. Andesites: Orogenic andesites and related rocks. New York, John Wiley & Sons, 1982: 25-95.
- [72] 王德滋, 周新民. 火山岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [73] Perfit M R, Gust D A, Bence A E, et al. Chemical Characteristics of Island-Arc Basalts: Implications for Mantle Sources [J]. *Chemical Geology*, 1980, 30: 227-256.
- [74] Ozerov A Y. The evolution of high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, based on microprobe analyses of mineral inclusions [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, 95: 65-79.
- [75] Green T H, Green D H, Ringwood A E. The origin of high-alumina basalts and their relationships to quartz tholeiites and alkali basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1967, 2: 41-51.
- [76] Marsh B D, Carmichael I S E. Benioff zone magmatism[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79: 1196-1206.
- [77] Brophy J G, Marsh B D. On the origin of high-alumina arc basalt and the mechanics of melt extraction [J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27: 763-789.
- [78] Crawford A J, Falloon T J, Eggins S. The Origin of island arc high-alumina basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97: 417-430.
- [79] Kay S M, Kay, R W. Aleutian tholeiitic and calc-alkaline magma series 1: The mafic phenocrysts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1985, 90: 276-290.
- [80] Kadik A A, Rozenhauer M, Lukanin O A. Experimental study of pressure influence on the crystallization of Kamchatka magnesian and aluminous basalts[J]. *Geochemistry*, 1989, 12: 1748-1762.
- [81] Albarède F, Luais B, Futon G, et al. The Geochemical regimes of Piton de la Fournaise volcano (Reunion) during the last 530 000 years[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(2): 171-201.
- [82] Geist D, Naumann T, Larson P. Evolution of Galapagos magmas: mantle and crustal fractionation without assimilation [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(5): 953-971.
- [83] Miyashiro A. The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19: 218-224.
- [84] 新疆维吾尔自治区区域地质表编写组. 西北地区区域地质表[M]. 北京: 地质出版社, 1981: 177-208.
- [85] 朱永峰, 安芳, 薛云兴, 等. 西南天山特克斯科桑溶洞火山岩的锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2255-2263.
- [86] 李婷, 徐学义, 李智佩, 等. 西天山科克苏河大哈拉军山组火山岩形成年代和岩石地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(12): 1929-1938.
- [87] 冯金星, 石品福, 汪帮耀, 等. 西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-132.
- [88] 高山林, 李云新. 西天山尼勒克水泥厂大哈拉军山组形成时代与构造背景[J]. *新疆地质*, 2017, 33(4): 440-448.
- [89] 韩琼, 弓小平, 马华东, 等. 西天山阿吾拉勒成矿带大哈拉军山组火山岩时空分布规律及其地质意义[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 570-586.
- [90] 孙林华, 彭头平, 王岳军. 新疆特克斯东南大哈拉军山组玄武安山岩地球化学特征: 岩石成因和构造背景探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(3): 372-379.
- [91] 郭璇, 朱永峰. 新疆新源县城南石炭纪火山岩岩石学和元素地球化学研究[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(1): 62-73.
- [92] 茹艳娇, 李智佩, 白建科, 等. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组火

- 山岩岩石组合与喷发序列研究进展[J].西北地质,2018,51(4): 33-42.
- [93] 李注苍,李永军,李景宏,等.西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析[J].新疆地质,2006,24(2): 120-124.
- [94] 孙吉明,马中平,徐学义,等.西天山伊宁县北琼阿希河谷火山岩地球化学特征及构造背景探讨[J].岩石矿物学杂志,2012,31(3): 335-347.
- [95] 从柏林.岩石化学研究及其意义[C]//叶大年,从柏林.岩矿实验室工作方法手册.北京:地质出版社,1981: 293-322.
- [96] Miyashiro. Classification, characteristics, and origin of ophiolites [J]. The Journal of Geology, 1975, 83(2): 249-281.
- [97] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 1986, 56: 207-218.
- [98] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [C] // Hawkesworth C J, Norry M J. Nantwich, Continental Basalts and Mantle Xenoliths. UK: Shiva, 1983: 230-249.
- [99] 王润三,王居里,周鼎武,等.南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究[J].地质科学,1999,34(2): 166-176.
- [100] 郝杰,刘小汉.南天山蛇绿混杂岩形成时代及大地构造意义[J].地质科学,1993,28(1): 93-95.
- [101] 龙灵利,高俊,熊贤明,等.南天山库勒湖蛇绿岩地球化学特征及其年龄[J].岩石学报,2006,22(1): 65-73.
- [102] 马中平,夏林圻,徐学义,等.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,2006,25(5): 387-400.
- [103] 何国琦,李茂松.中亚蛇绿岩带研究进展及区域构造连接[J].新疆地质,2000,18(3): 193-202.
- [104] 舒良树,王博,朱文斌.南天山蛇绿混杂岩中放射虫化石的时代及其构造意义[J].地质学报,2007,81(9): 1161-1168.
- [105] Klemd R, Bröcker M, Hacker B R, et al. New age constraints on the metamorphic evolution of the high-pressure/low-temperature belt in the western Tianshan Mountains, NW China [J]. The Journal of Geology, 2005, 113: 157-168.
- [106] Kröner A, Alexeiev D V, Hegner E, et al. Zircon and muscovite ages, geochemistry, and Nd-Hf isotopes for the Aktyuz metamorphic terrane: evidence for an Early Ordovician collisional belt in the northern Tianshan of Kyrgyzstan [J]. Gondwana Research, 2012, 21(4): 901-927.
- [107] Lomize M G, Demina L I, Zarshchikov A A. The Kyrgyz-Terskei Paleocainic Basin, Tien Shan [J]. Geotectonics, 1997, 31: 463-482.
- [108] 何国琦,李茂松,韩宝福.中国西南天山及邻区大地构造研究[J].新疆地质,2001,19(1): 7-11.
- [109] Bazhenov M L, Collins A Q, Degtyarev K E, et al. Paleozoic northward drift of the North Tien Shan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism [J]. Tectonophysics, 2003, 366: 113-141.
- [110] Qian Q, Gao J, Klemd R, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China [J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98: 551-569.
- [111] 李锦轶,王克卓,李亚萍,等.天山山脉地貌特征:地壳组成与地质演化[J].地质通报,2006,25(8): 895-909.
- [112] Mao J W, Konondelko D, Seltam R, et al. Postcollisional age of the Kumtor Gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan [J]. Economic Geology, 2004, 99: 1771-1780.
- [113] 徐学义,王洪亮,马国林,等.西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石 Hf 同位素研究[J].岩石矿物学杂志,2010,29(6): 691-706.
- [114] Gao J, Long L, Klemd R, et al. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: geochemical and age constraints of granitoid rocks. International [J]. Journal of Earth Sciences, 2009, 98: 1221-1238.
- [115] 董云鹏,周鼎武,张国伟,等.中天山北缘干沟蛇绿混杂岩带的地质地球化学[J].岩石学报,2006,22(1): 49-56.
- [116] 李超,肖文交,韩春明,等.新疆北天山奎屯河蛇绿岩斜长花岗岩锆石 SIMS U-Pb 年龄及其构造意义[J].地质科学,2013,43(3): 815-826.
- [117] 苏会平,司国辉,张超.新疆北天山巴音沟南侧发育早泥盆纪蛇绿岩及其构造意义[J].陕西地质,2014,32(1): 33-38.
- [118] Wheller G E, Varne R, Foden J D, et al. Geochemistry of Quaternary volcanism in the Sunda-banda arc, Indonesia, and three-component genesis of island-arc basalt magmas [J]. Journal of Volcaology and Geothermal Research, 1987, 32: 137-160.
- [119] Gertisser R, Keller J. Trace element and Sr, Nd, Pb and O isotope variations in medium-k and high-k volcanic rocks from Merapi Volcano, Central Java, Indonesia: evidence for the involvement of subducted sediments in Sunda Arc magma genesis [J]. Journal of Petrology, 2003, 44(3): 457-489.
- [120] Patricia Sruoga, Eduardo J, Llambias et al. Volcanological and geochemical evolution of the Diamante Caldera-Maipo volcano complex in the southern Andes of Argentina (34° 10' S) [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2005, 19: 399-414.
- [121] Davidson J P. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism. Subduction Top to Bottom [J]. Geophysical Monograph series, DC, 1996(96): 251-262.
- [122] Tatsumi Y, Eggins S. Subduction zone magmatism [M]. Blackwell Science, 1995: 1-211.
- [123] Pearce J A. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. Annual Review of Earth Planet Sciences, 1995, 23: 251-285.
- ①新疆区域地质调查大队.昭苏幅1/20万区域地质调查报告.1978.