



引文格式: 陈建, 王欣, 孟元库, 等. 北天山巴音沟石炭纪安山岩岩石成因及构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 91–112. DOI: 10.12401/j.nwg.2024006

Citation: CHEN Jian, WANG Xin, MENG Yuanku, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Carboniferous Andesites from Bayingou in the North Tianshan Belt, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 91–112. DOI: 10.12401/j.nwg.2024006

北天山巴音沟石炭纪安山岩岩石成因及构造意义

陈建^{1,2,3}, 王欣^{1,2,3,*}, 孟元库⁴, 熊发挥⁵, 孟凡雪⁴

(1. 山东省第八地质矿产勘查院, 山东日照 276800; 2. 日照地质地理信息大数据研究院, 山东日照 276800; 3. 山东省地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室, 山东日照 276800; 4. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590; 5. 地幔研究中心, 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 北天山增生杂岩带是北天山洋最终闭合的产物, 对其中分布的晚古生代火山岩开展详细的地质学、年代学和地球化学研究对恢复古亚洲洋的构造演化历史具有重要的科学意义。笔者选取北天山增生杂岩带巴音沟石炭纪安山岩为研究对象, 在详细的野外地质调查基础之上、对其开展系统的岩石学、矿物学、地质年代学以及全岩主微量地球化学综合分析。研究发现: ①北天山巴音沟中的这套安山岩具有较低的全岩 MgO 含量 ($< 3\%$), 明显区别于典型的高镁安山岩 ($MgO > 6\%$), 但其具有较高的 $Mg^\#$ 值 (> 45), 结合其微量元素特征, 表明安山岩形成于与板块俯冲相关的汇聚板块边缘, 其中幔源物质参与了安山岩的形成和演化。②LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $(324.1 \pm 1.1) Ma$ ($MSWD=1.5$), 代表了巴音沟安山岩的形成时代为早石炭世晚期的霍夫期。文中的北天山石炭纪安山岩是基性下地壳部分熔融形成的长英质熔体和幔源熔体混合的产物。结合区域地质资料, 进一步限定了北天山洋在早石炭世晚期可能仍然没有闭合。

关键词: 北天山; 石炭纪; 火山岩; 岩石学; 构造环境

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0091-22

Petrogenesis and Tectonic Implications of the Carboniferous Andesites from Bayingou in the North Tianshan Belt, Xinjiang

CHEN Jian^{1,2,3}, WANG Xin^{1,2,3,*}, MENG Yuanku⁴, XIONG Fahui⁵, MENG Fanxue⁴

(1. Number 8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276800, Shandong, China; 2. Rizhao Big Data Research Institute of Geology and Geographic Information, Rizhao 276800, Shandong, China; 3. Key Laboratory of Nonferrous Metal Ore Exploration and Resource Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276800, Shandong, China; 4. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 5. CARMA (Center for Advanced Research on Mantle), Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Late Paleozoic volcanic rocks in the North Tianshan complex belt are the products of closure of

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-11-29; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 山东省高等学校青创科技支持计划(2019KJH004)资助。

作者简介: 陈建(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事基础地质调查和研究。E-mail: 47259697@qq.com。

* 通讯作者: 王欣(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事矿床地质的勘查和研究。E-mail: 395387752@qq.com。

the North Tianshan Ocean, which are important for understanding the Paleozoic evolution history of the Paleo-Asian Ocean. In this study, we present new petrological, mineralogical, geochronological and geochemical data on the Carboniferous Bayingou andesites in the North Tianshan belt, and discuss their petrogenesis and tectonic implications of the andesites. The results show that: ① the andesites belong to the calc-alkaline series that formed in a convergent continental margin setting related to the plate subduction in this study, whereas these andesites have low MgO ($< 3\%$) contents that are different from typical high-Mg andesites ($> 6\%$), whereas the andesites have high $Mg^\#$ values (> 45), indicating mantle materials participating in the formation of the andesites. ② *In-situ* LA-ICP-MS zircon U-Pb dating on the andesites of the Bayingou Formation yielded an weighted average age of (324.1 ± 1.1) Ma (MSWD=1.5), representing the emplacement age of the andesites. The Carboniferous andesites were a mixing product of the felsic and mantle-derived melts, and the felsic melts were derived from partial melting of the mafic lower crust in the North Tianshan orogenic belt. Integrated with the previous studies and geological data, this study holds that the Bayingou Carboniferous andesites were generated in a subduction zone or arc-related environment, which further indicates that the North Tianshan Ocean was still not closed in the late Early Carboniferous.

Keywords: North Tianshan belt; carboniferous; volcanic rocks; petrology; tectonic setting

在大地构造上, 中亚造山带(CAOB)位于东欧克拉通, 南接塔里木-华北克拉通, 北邻欧洲与西伯利亚克拉通, 是现今全球分布规模最大的显生宙增生型造山带(Windley et al., 2007; 王盟等, 2023), 是研究古亚洲洋俯冲、闭合和显生宙大陆地壳生长的经典地区(Xiao et al., 2013, 2015)。天山造山带位于中亚造山带的南缘, 西起乌兹别克斯坦, 向东经哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、中国, 一直延伸至蒙古国西南部, 记录了古生代时期古亚洲洋的一系列俯冲增生及弧陆碰撞等造山作用事件, 形成了包括微陆块、增生楔、海山和岛弧体系的复合型造山单元(肖序常等, 1990; 何国琦等, 1994; 李锦轶等, 1999; 肖文交等, 2006; Xiao et al., 2013, 2015)。根据地形条件、岩浆岩分布、地质单元组成和演化历史上的差异, 天山造山带一般以托克逊-库米什公路为界, 进一步可以分为东天山和西天山, 其中西天山进一步又可细分为北天山、中天山和南天山(Gao et al., 1998; 白云来等, 2004)。

西天山造山带发育有大量的晚古生代岩浆岩, 构成了若干条总体平行于缝合带的岩浆岩带, 一般认为这些岩浆岩记录了古亚洲洋各个分支洋盆的俯冲、闭合以及碰撞等关键信息(王作勋等, 1990; Long et al., 2011), 是研究古亚洲洋形成与演化最为理想的地质素材。总体来讲, 西天山晚古生代岩浆岩主要包括与蛇绿岩形成有关的石炭纪基性熔岩、基性侵入岩和斜长花岗岩(徐学义等, 2006); 与板块俯冲有关的活动大陆边缘环境下的石炭纪钙碱性花岗岩和中基性的火山岩以及相应的侵入岩等(姜常义等, 1995; 车自成

等, 1996; 夏林圻等, 2003; 王博等, 2006; 黄惠明等, 2021); 与同碰撞有关的偏铝、过铝质花岗岩等(韩宝福等, 2004; 杨天南等, 2006; 张招崇等, 2009; Long et al., 2011); 以及与后碰撞阶段有关的流纹岩、花岗岩和双峰式火山岩等(韩宝福等, 2006; 杨兴科等, 2006; Han et al., 2010; Shu et al., 2011; 刘冬冬等, 2012)。与其他类型岩石相比, 位于缝合带的混杂岩对于解析洋盆的形成与演化具有重要的科学意义。由南向北, 西天山造山带包括 3 条重要的古生代混杂岩带, 它们分别是南天山库米什-米斯布拉克-东天山红柳河混杂岩带、中天山干沟-米什沟混杂岩带以及北天山巴音沟混杂岩带。这些混杂岩带的组成、结构及其所揭示的大地构造意义始终是国内外地学研究的热点前沿问题(邬继易等, 1989; 肖序常等, 1990; 王作勋等, 1990; 肖序常等, 1992; 高俊等, 1993; 何国琦等, 1994; 汤耀庆等, 1995; 高长林等, 1995; 高俊等, 1995; 李锦轶等, 1999; Gao et al., 2001; 李向民等, 2002; 夏林圻等, 2002; 舒良树等, 2004; 肖文交等, 2006; 徐学义等, 2006; Charvet et al., 2011)。

北天山晚古生代混杂岩带位于北天山伊连哈比尔尕晚古生代构造岩浆带内, 从艾比湖, 经巴音沟向东延伸至后峡一带(王作勋等, 1990; 肖序常等, 1992), 其中巴音沟混杂岩带是北天山混杂岩带的典型代表, 是研究北天山洋的形成、闭合以及大地构造环境的绝佳选择, 多年来, 有学者对其物质组成、结构、古生物、岩石学和年代学等方面相继开展了一些研究(邬继易等, 1989; 王作勋等, 1990; 肖序常等, 1992; 何国琦等,

1994; 高长林等, 1995; 徐学义等, 2006; 刘冬冬等, 2012)。然而, 前人的工作主要集中在基性岩, 而对巴音沟混杂岩带中的中性岩研究较为薄弱, 且对其岩石、矿物、地球化学的综合性研究也较为匮乏。与基性混杂岩相比, 钙碱性的安山岩通常代表了地壳的平均组成, 其成因、构造环境和后期演化更为复杂, 有可能代表了地壳最为原始的化学组成, 或与地幔平衡的原始岩浆等。另外, 安山岩主要形成于活动大陆板块边缘地区, 是汇聚板块边缘最具典型的岩石代表(郑永飞, 2022), 为了解俯冲带相关的岩浆形成过程以及大陆地壳形成演化和壳幔相互作用提供了重要的信息。因此, 对其成因和形成时代的限定有助于更全面的理解研究区古亚洲洋俯冲和闭合的过程。

此外, 北天山洋闭合的时间仍然存在着激烈的争议, 部分学者认为北天山地区的碰撞造山作用于早石炭世末期已经结束, 区内出露的石炭纪—二叠纪火山岩应该与地幔柱得活动有关(Xia et al., 2004; Xia et al., 2020)。例如, 李永军等(2010)根据岩石组合、构造接触关系、变形特征和古生物等方面的证据, 认为北天山古生代洋盆的闭合时间为早石炭世晚期。Han 等(2010)对缝合带中的钉合岩体开展了详细的研究, 认为钉合岩体的形成时代(316 Ma)限定了北天山洋闭合的上限时间。然而, 一些学者提出直到早石炭世时北天山洋仍然没有闭合, 北天山地区石炭纪火山岩是形成于汇聚板块边界的弧火山作用的产物(Yu et al., 2016; An et al., 2017)。例如, Li 等(2015)认为早二叠世时北天山洋依然可能存在, 基于对增生杂岩中形成的岛弧型岩浆岩的系统性研究; Li 等(2015)进一步指出, 俯冲带的回撤同样可以在增生杂岩中形成岛弧型的岩浆岩。因此, 对代表性样品开展系统的年代学和地球化学研究有望成为解决上述问题的关键, 对约束北天山洋盆的俯冲、闭合过程具有重要的科学意义。

鉴于上述, 本次研究选择北天山巴音沟中的中性火山岩-安山岩作为研究对象, 通过对其开展进行详细的野外地质调查、高精度的锆石 U-Pb 测年、全岩主微量元素和电子探针 EPMA 等综合分析, 探讨安山岩形成的精确时代、岩石成因以及区域构造意义, 为北天山洋的演化提供新的地质学证据。

1 区域地质特征和研究背景

在大地构造上, 西天山造山带夹持于准噶尔地块

和塔里木地块之间(图 1a), 以大型区域断裂为界, 可以进一步划分为 4 个构造单元, 分别为北天山增生杂岩带、伊犁地块、中天山地块和南天山增生杂岩带(郭继易等, 1989; 肖文交等, 2006; Li et al., 2015)。其中, 位于西天山造山带北缘的北天山增生杂岩带, 长约 300 km, 宽约为 30 km, 整体走向呈 NWW 至 SEE 向展布, 向北推覆到准噶尔盆地的中新生代沉积地层之上(Han et al., 2010)。北天山增生杂岩带主要由代表大洋岩石圈残片的蛇绿岩和一套晚古生代泥盆纪至石炭纪的海相复理石沉积岩系组成(王盟等, 2022)。综上所述, 巴音沟混杂岩带位于北天山增生杂岩带的腹地, 是研究北天山增生杂岩带构造演化最为理想的代表, 其中研究区位于巴音沟混杂岩带的北缘(图 1a、图 1b)。

巴音沟混杂岩分布于巴音沟、沙大王以及奎屯河一带(图 1b)。出露地层主要有石炭纪的沙大王组、巴音沟组以及由超镁铁质-镁铁质的岩石和部分硅质岩、角砾岩等组成的混杂岩。据新疆维吾尔自治区乌苏幅(L-45-31)1: 20 万区域地质图描述, 巴音沟组主要分布在巴音沟、屯河、四棵树河等地, 在巴音沟一带出露比较完整, 故命名为巴音沟组。巴音沟组由灰绿色、浅灰绿色、灰色块状、厚层状凝灰岩、晶屑-岩屑凝灰岩和一套基性-中性火山熔岩及火山碎屑岩组成。文中将巴音沟组中的中基性熔岩归属于巴音沟混杂岩带的组成部分, 认为其是古天山洋盆俯冲和演化的产物。前人对其开展了部分研究, 认为该区广泛分布的泥盆纪—石炭纪地层为一套拉张环境形成的火山-碎屑熔岩系, 以火山岩为主, 碎屑岩相对较少(肖序常等, 1992; 夏林圻等, 2002)。在巴音沟地区, 由于后期构造作用的强烈改造, 混杂岩中的超镁铁质-镁铁质岩石呈无根块状、岩片或透镜状分布于火山岩、沉积岩之中, 与薄层状硅质岩互层产出(肖序常等, 1990, 1992; 高长林等, 1995)。另有对本工作区相邻的伊宁县北 30 km 的阿希火山岩研究表明: 安山岩与同期浅水相陆源沉积岩层伴生, 反映了火山岩浆作用的不连续性, 具有多次喷发的特征。此外, 与之伴生的大量华力西中期的弧型花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩的地质与地球化学研究结果表明该火山岩形成于俯冲带之上的活动大陆边缘环境(王博等, 2006)。伊犁北缘的巴音沟-莫托沙拉沟岩带中的地幔橄榄岩、辉长岩和洋壳沉积物等构造残片沿伊犁陆块的北缘边界延伸逾 250 km, 出现在伊犁块体的北缘, 与伊犁岛弧火

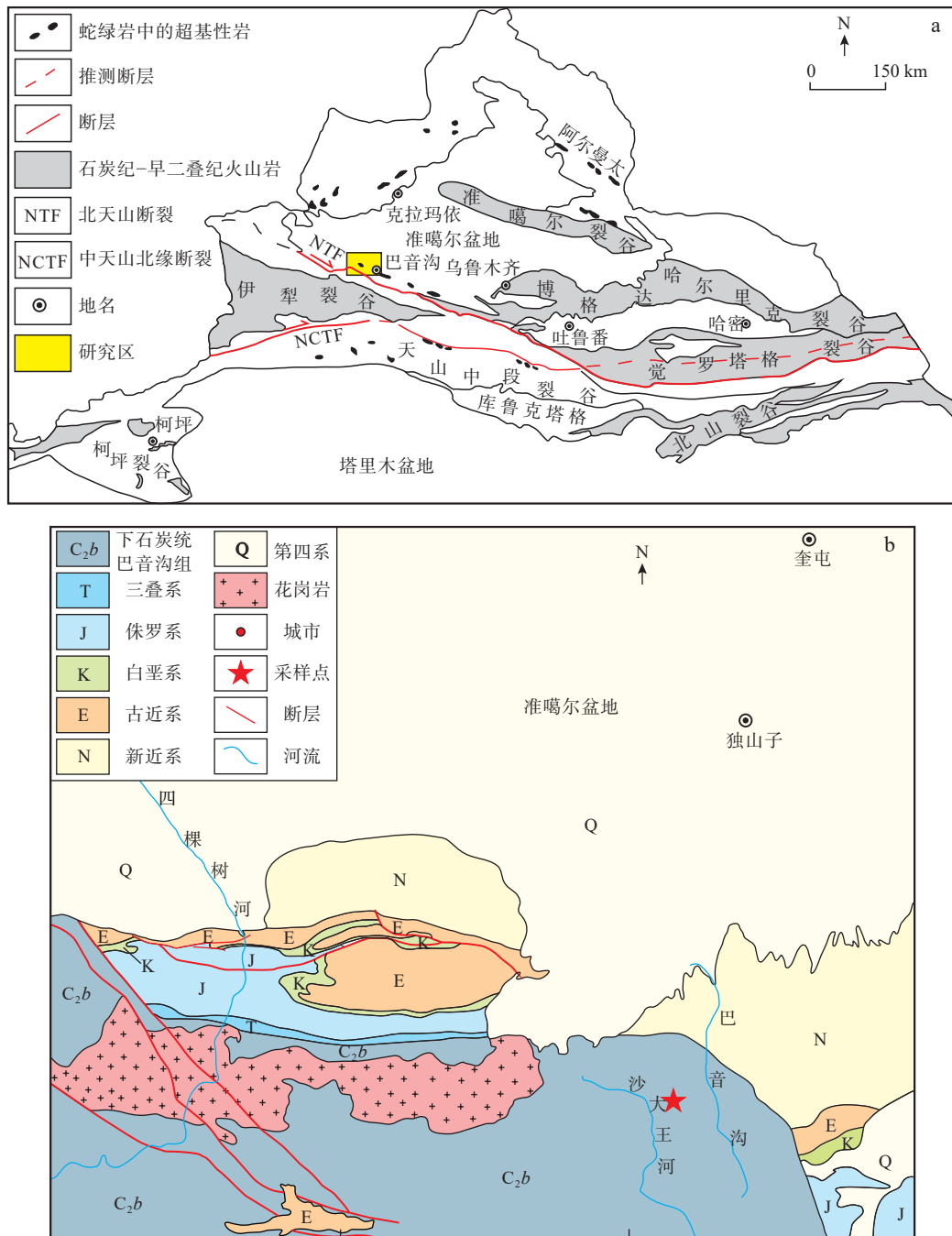


图1 新疆北部地区石炭纪火山岩分布简图(a)(据夏林圻等, 2002, 2004; 李源等, 2011; 熊发挥等, 2011)和北天山巴音沟地区地质简图(b)

Fig. 1 (a) Geological simplified map of the Carboniferous volcanic rocks in the North Tianshan belt, Xinjiang Province and (b) geological simplified map in Bayingou area of the North Tianshan belt

山岩有很好的空间配置关系(夏林圻等, 2004; 王博等, 2006), 显示了在构造上的亲缘性。

2 岩石学特征

野外调查显示, 出露于巴音沟的安山岩以构造透

镜体的形式产出, 野外出露良好, 样品整体较为新鲜, 无明显的构造变形和后期强烈的风化蚀变(图 2a、图 2b)。野外调查显示, 巴音沟安山岩为典型的块状结构, 部分安山岩具有枕状构造的特征(图 2b), 在空间展布上, 灰绿色的安山岩与蛇纹石化的地幔橄榄岩为典型的岩浆侵位接触关系, 且岩块内可见地幔橄榄

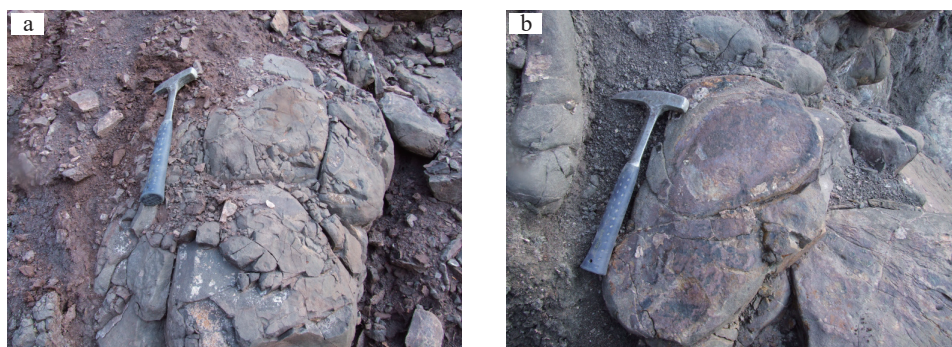


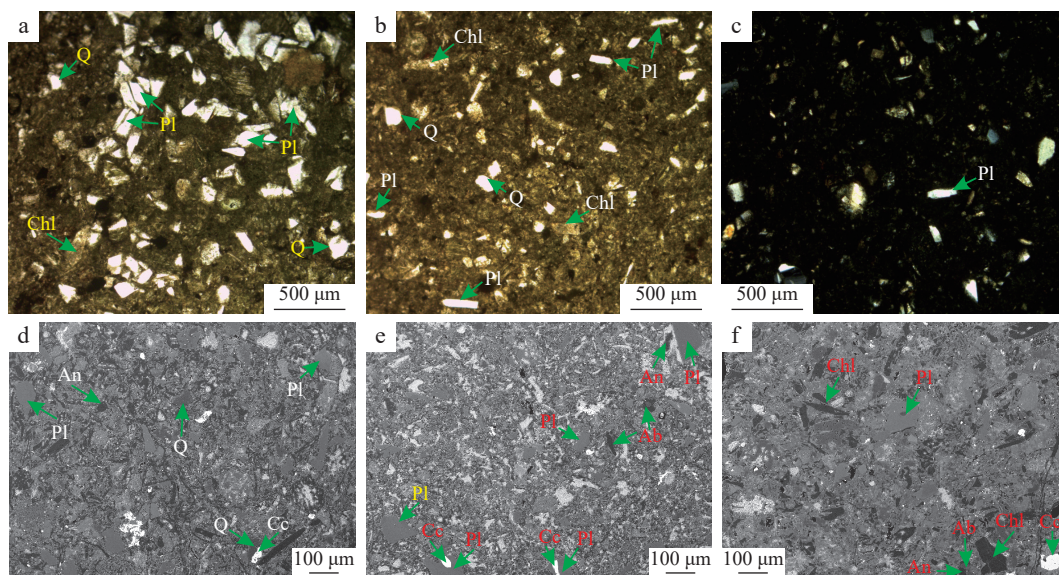
图2 北天山巴音沟安山岩野外分布照片

Fig. 2 Field exposures of the Bayingou andesite rocks in the North Tianshan belt

岩的岩块。安山岩的出露面积 $\sim 1\,000\text{ m}^2$, 具体采样为坐标为 $N(44^\circ 05' 8.14'')$, $E(84^\circ 47' 38'')$, 采样高程(H)为 $1\,799\text{ m}$ 。

在夯实的野外调查基础之上, 对本次研究的岩石样品进行详细的镜下岩相学观测, 并结合电子探针和岩石化学分析结果, 采自巴音沟的火山岩为典型的安山岩。岩石为典型的斑状结构, 斑晶以自形-半自形的

斜长石为主, 基质主要为斜长石微晶和部分镁铁质矿物(角闪石和黑云母), 可见杏仁构造(杏仁体为方解石)。镜下薄片显示, 安山岩的主要矿物组成为斜长石、钠长石、角闪石、石英等(图3), 其中部分较大颗粒的长石在后期已经发生黝帘石化和绢云母化, 角闪石发生绿泥石化, 岩石矿物组合见表1, 绿泥石可能为辉石、角闪石等蚀变的产物。



An. 钙长石; Chl. 绿泥石; Cc. 方解石; Pl. 斜长石; Q. 石英

图3 巴音沟组中酸性火山岩显微照片(a~c)和电子背散射图像(d~f)

Fig. 3 (a~c) Petrographic and (d~f) BSE pictures of the mid-acid volcanic rocks from the Bayingou Formation

3 分析方法

3.1 矿物化学成分

本次的矿物电子探针 EPMA 成分分析在中国地质科学院地质研究所自然资源部大陆动力学重点实验室完成, 使用的仪器型号为日本电子公司的 JEOL

JXA-8800R(型号为 Inca Energy 型电子探针), 探针束流 20 nA , 实验测试的加速电压稳定在 15.0 kV , 电子束斑半径为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.2 全岩地球化学分析

本次测试的安山岩全岩主微量化学成分分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。全岩主量元素成分分析使用熔片 X 射线荧光光谱法(XRF)

表 1 北天山巴音沟安山岩电子探针(EPMA)分析结果(%)

Tab. 1 Electronic probe microanalyses (EPMA) results of the andesite from the Bayingou in the North Tianshan belt(%)

测点号	矿物名称	SiO ₂	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	FeO	TiO ₂	NiO	Total
2	斜长石	56.915	5.41	0.016	0.149	0.015	27.137	0.027	9.748	0.5	0.047	0.02	99.984
13		60.359	7.042	0.001	0.284		24.648	0.015	6.77	0.309	0.017		99.445
17		63.423	8.101	0.001	0.472		22.686		4.638	0.244	0.002	0.017	99.584
23		58.159	6.047	0.016	0.132	0.047	26.454		8.683	0.493	0.024		100.055
24		56.751	5.489	0.028	0.172	0.018	27.013	0.041	10.027	0.348	0.005		99.892
26		59.989	6.461	0.009	0.272		25.173	0.036	7.326	0.34	0.029	0.022	99.657
40		62.344	7.375	0.001	0.151	0.002	23.767	0.003	5.852	0.142	0.014	0.017	99.668
46		61.304	6.977		0.427	0.015	23.88	0.023	6.641	0.361	0.007		99.635
47		60.685	6.872	0.043	0.295		24.567	0.015	6.659	0.32		0.011	99.467
55		59.994	7.326	0.019	0.955	0.034	23.977	0.003	5.153	0.404	0.042	0.035	97.942
61		60.494	7.136	0.028	1.243	0.052	24.689	0.007	4.968	0.42	0.031	0.03	99.098
65		59.829	7.335	0.009	0.234	0.012	24.754		6.746	0.321	0.036	0.011	99.287
66		58.474	7.152		0.225		25.07	0.012	6.254	0.34	0.009		97.536
76		60.631	7.286	0.018	0.295	0.023	24.165	0.023	6.316	0.324	0.002		99.083
77		57.5	5.238	0.012	0.815	0.049	26.319		8.352	0.533	0.014		98.832
19	钠长石	67.771	10.623	0.053	0.137	0.381	18.761	0.016	0.076	1.146	0.048		99.012
20		68.142	10.075	0.071	0.165	0.391	19.071	0.021	0.043	1.169		0.016	99.164
35		69.394	11.223		0.061	0.019	18.736	0.016	0.02	0.139			99.608
60		69.1	11.565		0.117	0.016	19.12	0.017	0.051	0.193		0.007	100.186
62		68.806	11.525		0.02	0.006	19.131	0.001	0.156	0.062	0.015		99.722
64		67.953	11.335	0.021	0.221	0.029	19.475		0.12	0.125	0.012		99.291
75		68.963	11.078	0.015	0.045	0.007	19.073	0.042	0.06	0.058			99.341
3	绿泥石	30.442	0.069	0.251	0.028	12.129	14.459	0.64	0.502	29.314	0.038		87.872
16		30.737	0.078	0.413	0.029	12.365	14.243	0.577	0.413	28.525		0.051	87.431
31		62.715	8.213	0.048	0.017		18.643	0.036	0.113	0.104			89.889
32		60.968	7.539	0.025	0.037		19.073		0.061	0.154	0.005		87.862
42		32.093	0.86	0.08	0.048	10.929	15.544	0.662	0.368	28.306	0.047		88.937
43		30.764	0.032	0.138	0.018	11.628	14.215	0.682	0.457	30.105	0.015		88.054
45		30.226	0.003	0.144	0.018	13.302	14.571	0.651	0.45	28.593	0.056	0.049	88.063
48		29.927	0.025	0.23	0.009	13.847	15.114	0.532	0.348	27.425			87.457
49		30.151	0.014	0.171	0.018	13.485	15.023	0.501	0.43	27.875	0.025	0.024	87.717
54		30.632	0.07	0.389	0.015	13.683	14.923	0.429	0.487	26.853	0.007		87.488
70		30.14	0.031	0.145	0.058	12.597	14.394	0.598	0.288	30.028	0.001		88.28
72		30.632	0.075	0.035	0.144	12.825	14.994	0.45	0.454	29.716	0.021	0.012	89.358
5	石英	98.789	0.037	0.061	0.138	0.121	0.577	0.028	0.033	0.44			100.224
8		99.054	0.137	0.024	0.04	0.001	0.658	0.019	0.058	0.068			100.059
10		98.93	0.074	0.048	0.076	0.025	0.571	0.02	0.011	0.181	0.002		99.938
28		98.645	0.188	0.023	0.071	0.029	0.803	0.01	0.044	0.348			100.161
29		98.374	0.042		0.09	0.009	0.714	0.01	0.103	0.102	0.128	0.012	99.584
51		98.634	0.136	0.058	0.138	0.009	0.749	0.008	0.059	0.109	0.046	0.039	99.985
53		99.027	0.003	0.001		0.007	0.01		0.013	0.031	0.02	0.034	99.146
58		99.417		0.028	0.019	0.005	0.023		0.006	0.125	0.025		99.648
67		98.585	0.085	0.015	0.096		0.352	0.028	0.031	0.015	0.045		99.252
71		99.796	0.007	0.013	0.029	0.005	0.022	0.006	0.007	0.027	0.047	0.008	99.967

续表 1

测点号	矿物名称	SiO ₂	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	FeO	TiO ₂	NiO	Total
7	方解石	2.067	0.405	0.644	0.176	0.605	1.033	1.289	47.545	1.18	0.03		54.974
25			0.057		0.022	0.039	0.022	0.105	53.871	0.492	0.008		54.616
27			0.06	0.027		0.042	0.004	0.109	53.79	0.441		0.001	54.474
34				0.017	0.011	0.163		0.143	54.128	0.552			55.014
39			0.056		0.011	0.163	0.014	0.176	50.362	0.625			51.407
44			0.06	0.015	0.005	0.111	0.006	0.164	54.08	1.005	0.037		55.483
52				0.068	0.005	0.068	0.018	0.955	54.038	0.172	0.021	0.05	55.395
57		0.622	0.018	0.045	0.002	0.26	0.08	1.451	52.228	0.451			55.157
63		4.242	0.035	0.012	0.01	1.414	0.201	0.572	48.864	1.118	0.062	0.018	56.548
4	沸石	60.83	7.585	0.034	0.084	0.119	19.712	0.002	0.172	0.58	0.011		89.129
6		60.674	10.162	0.026	0.028		20.377			0.205			91.472
9		62.423	8.772	0.045	0.055	0.004	19.111	0.006	0.232	0.16			90.808
11		60.543	8.485	0.022	0.003	0.016	19.13		0.056	0.183			88.438
15		55.393	12.474	0.016	0.01	0.017	21.925	0.003		0.073		0.013	89.924
18		61.957	7.973	0.029	0.05	0.054	18.774	0.009	0.172	0.413	0.022	0.007	89.46
21		58.749	5.846	0.05	1.413	0.753	20.822	0.056	0.667	1.594	0.309		90.259
36		60.719	9.445	0.018	0.049		19.801	0.017	0.107	0.139	0.028		90.323
37		57.103	11.794	0.009	0.017		21.753		0.024	0.125	0.021	0.005	90.851
59		58.065	10.85	0.023		0.008	21		0.014	0.163		0.002	90.125
68		59.588	9.734	0.01	0.056	0.075	20.065		0.142	0.254	0.173	0.05	90.147
69		58.883	10.254		0.042	0.032	20.875	0.06	0.03	0.224	0.021		90.421
74		58.608	10.42		0.047	0.047	20.652	0.029	0.068	0.245			90.116

完成,并用等离子光谱和化学法对测试结果进行互相检验。全岩微量元素中的部分元素,主要包括 Sr、Nb、V、Ni、Cr、Zr、Hf、Th、Ba、U 等采用熔片 XRF 和酸溶等离子质谱 ICP-MS 法测定,其中轻重稀土元素采用 ICP-MS 法完成测定。实验过程中,同时完成 GSR3 和 GSR5 两个国家标准样品以及是哪个平行样品进行数据质量的监控。在分析精度方面,全岩主量元素优于 5%,微量元素优于 10%。

3.3 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年

本次研究中安山岩的锆石分选工作在河北省地质矿产与开发局廊坊区域地质调查队实验室完成。岩石样品经常规物理粉碎、重力浮选、人工重砂和电磁分选等方法,筛选出纯度较高的锆石颗粒。随后,在双目镜下再次进行矿物的晶形和形态的观察,确保最终挑选的锆石纯度大于 99%,并且无裂缝,晶形整体上较为完整。3 个样品分选的锆石数量均在 300 粒以上,其中随机挑选 100~150 锆石粒,用环氧树脂进行制靶,随后用不同型号的砂纸和磨料将锆石靶表面抛光到锆石颗粒厚度的二分之一左右,具体的制靶流程及注意事项见相关文献(宋彪等, 2002)。下一步工

作是将抛光好的锆石进行内部结构和构造的分析,完成反射光和透射光照相。锆石的阴极发光 CL 图像的采集在中国地质科学院北京离子探针中心完成。CL 阴极发光主要查明锆石的内部结构、成因,为选择适当的测点位置进行测年提供依据参考。在对锆石详细的矿物学和 CL 图像分析的基础上,本次的锆石的原位 U-Pb 同位素年龄分析在自然资源部中国地质调查局天津地质调查中心测试分析中心完成。本次锆石定年所采用的仪器型号为 Finnigan Neptune 型 LA-ICP-MS 以及与之配套的激光 New wave UP 193 剥蚀系统。激光剥蚀束斑的直径为 35 μm,激光剥蚀样品的深度约为 20~30 μm,频率为 8~10Hz。本次实验中,采用国际标准锆石 91500 作为外标进行数据质量的检测,锆石的元素含量分析采用人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标进行监控,²⁹Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用软件 ICPMSDataCal 10.0 程序完成,具体的数据处理流程见 Liu 等(2008)。最后,对测试的数据进行普通铅校正(Andersen, 2002),年龄计算及谐和图绘制采用植入 Excel 中的 ISO-PLOT 程序完成(Ludwig, 2003)。

4 分析结果

4.1 矿物学分析结果

矿物电子探针分析结果见表 1。分析结果表明：安山岩中的长石为斜长石与钠长石，斜长石 An 的牌号主要集中在 30~50，为中长石；沸石为方沸石，呈长条状，无晶形，填充于气孔中，指示富水环境；方解石呈脉状和粒状分布。

4.2 主量元素分析结果

安山岩全岩主量元素分析结果见表 2。文中所有样品的主量元素化学成分作图和讨论均是扣除挥发分(LOI)后归一化的结果。本次分析样品的 SiO₂ 含量为 57.15%~65.94%，除 1 个样品外，其余岩石 SiO₂ 含量均小于 65%，属于中性岩类。在火山岩硅碱图岩性分类中(图 4a)，除两个样品落在英安岩区域外，其余

9 个样品点均分布在安山岩区域，与野外观察和电子探针分析结果相符。镜下薄片分析显示，部分样品石英脉发育，可能导致其全岩 SiO₂ 含量升高，投点位于英安岩区域。所有样品均位于 Irvine 线以下(碱性和亚碱性分界线)，属于亚碱性系列。此外，所测试的样品具有较大的 Al₂O₃ 含量变化，变化范围介于 12.57%~16.15%，平均为 15.15%，显示出高 Al 的地球化学特征；Fe₂O₃^T 含量为 4.74%~9.60%，平均为 6.24%；MgO 含量较低(<3%，平均为 2.20%)。同时，样品的 TiO₂、CaO 和 P₂O₅ 含量较低，平均值分别为 0.89%、3.69% 和 0.17%。全碱(K₂O+Na₂O)含量为 5.22%~6.46%，且 Na₂O 大于 K₂O，K₂O/Na₂O 值在 0.17~0.76，平均值为 0.40，具有钠质的地球化学特征；里特曼指数 σ 为 1.51~2.29(平均 1.98<3.3)，属于钙碱性系列。在 SiO₂ vs. K₂O 判别图解中(图 4b)，多数样品显示出中钾钙碱性系列的地球化学特征，一个样品落入高钾

表 2 北天山巴音沟安山岩主量元素地球化学分析结果(%)

Tab. 2 Major (%) elemental compositions of the andesite from the Bayingou in the North Tianshan belt

样品号	924-1	924-2	924-4	924-9	925-2	925-5	925-7	926-1	926-6	926-7	926-9
SiO ₂	62.80	62.84	63.68	65.94	62.69	62.29	61.08	58.18	58.22	60.34	57.15
TiO ₂	0.65	0.86	0.78	0.74	0.71	0.99	0.64	0.98	0.97	0.96	1.52
Al ₂ O ₃	15.18	15.12	14.83	14.86	16.05	14.9	12.57	15.63	15.82	16.15	15.51
Fe ₂ O ₃ ^T	2.54	4.35	2.95	2.49	2.15	1.9	2.44	5.37	5.31	3.33	6.83
FeO ^T	2.29	3.92	2.66	2.24	1.94	1.71	2.20	4.83	4.78	3.00	6.15
FeO	2.46	1.65	2.48	2.6	3.25	2.89	2.3	2.82	2.96	2.82	2.77
MnO	0.10	0.11	0.1	0.1	0.1	0.11	0.14	0.15	0.15	0.13	0.22
MgO	1.72	1.82	1.91	1.83	2.32	1.92	1.92	2.84	2.83	2.28	2.79
CaO	3.05	2.85	3.47	2.67	2.53	3.94	6.48	3.65	3.53	4.64	3.78
Na ₂ O	5.02	3.56	4.17	3.9	5.26	5.38	3.64	3.84	4.17	4.53	4.47
K ₂ O	1.44	2.7	1.66	2.5	1.07	0.93	1.58	2.01	1.73	1.26	1.05
P ₂ O ₅	0.15	0.17	0.15	0.14	0.11	0.21	0.12	0.17	0.18	0.21	0.28
LOI	4.35	3.28	3.57	2.26	3.35	3.61	6.21	4.25	3.67	3.13	2.70
Total	99.46	99.31	99.75	100.03	99.59	98.86	99.12	99.89	99.54	99.78	99.07
CaO/(FeO ^T +MgO)	0.73	0.51	0.73	0.62	0.53	0.98	1.47	0.47	0.46	0.84	0.44
Al ₂ O ₃ /(FeO ^T +MgO)	0.46	0.28	0.39	0.46	0.54	0.57	0.39	0.23	0.24	0.37	0.18
Mg [#]	57.53	45.56	56.53	59.52	68.34	66.90	61.15	51.45	51.60	57.80	44.97
Na ₂ O+K ₂ O	6.46	6.26	5.83	6.4	6.33	6.31	5.22	5.85	5.9	5.79	5.52
K ₂ O/Na ₂ O	0.29	0.76	0.40	0.64	0.20	0.17	0.43	0.52	0.41	0.28	0.23
FeO ^T /MgO	1.33	2.15	1.39	1.22	0.83	0.89	1.14	1.70	1.69	1.31	2.20
里特曼指数σ	2.11	1.98	1.64	1.79	2.03	2.06	1.51	2.25	2.29	1.93	2.15

注：LOI为烧失量；Fe₂O₃^T为全铁含量。

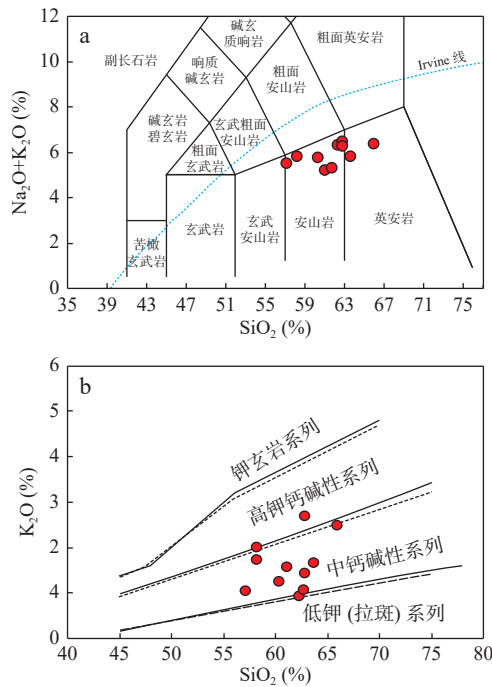


图4 安山岩 TAS 图解(a) (Le et al., 2002) (碱性与亚碱性系列分界线来自 Irvine et al., 1971); 安山岩的 SiO_2 vs. K_2O 图解 (Morrison, 1980) (b)

Fig. 4 (a) TAS diagram for the andesite; (b) SiO_2 vs. K_2O diagram for the andesites

钙碱性系列区域。

在哈克图解中 (图 5a~图 5g), 样品 SiO_2 与 MgO 、 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Fe_2O_3^T 等氧化物之间没有明显的线性关系, 表明岩浆在结晶过程中没有经历明显的矿物分离结晶过程。

4.3 微量元素分析结果

微量元素分析结果见表 3。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛网模式图上 (图 6a), 所测的样品均明显富集大离子亲石元素, 如 Rb、Ba、K 和 Pb 等, 亏损高场强元素 Nb、Ti 和 P, 具有与大陆地壳或俯冲带环境的弧岩浆岩相似的地球化学特征 (Gill, 1981; Kelemen, 1995)。另外, 样品具有弱的 Zr-Hf 正异常 ($\text{Zr}/\text{Hf}=28.04\sim31.85$) (图 6a) 和低的 Sr/Y 值 ($6.58\sim17.67$), 显示出正常的弧岩浆岩地球化学特征 (非埃达克岩)。

所有样品显示相似的稀土配分模式, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上 (图 6b), 测试的样品具有轻稀土 (LREE) 富集的右倾型分布特征, LREE 的值介于 $49.85\times10^{-6}\sim89.86\times10^{-6}$, 平均值为 72.94×10^{-6} ; 重稀土 (HREE) 的值介于 $16.86\times10^{-6}\sim23.56\times10^{-6}$, 平均值为 19.57×10^{-6} 。LREE/HREE 值在 2.68~4.65 之间变化,

(La/Yb)_N 值介于 1.74~3.71, 显示出轻稀土略富集的特征。稀土总量 $\sum\text{REE}$ 为 $66.71\times10^{-6}\sim109.37\times10^{-6}$, 低于地壳平均组成。样品 Eu/Eu* 值为 0.81~0.95, 存在弱的 Eu 负异常 (图 6a), 表明岩浆源区可能经历了少量斜长石分离结晶作用 (Hugh, 1993)。

4.4 安山岩锆石 U-Pb 年代学分析结果

选取安山岩中的 33 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析 (表 4), 安山岩中的锆石多为无色透明, 大部分为自形-半自形, 呈短柱状-长柱状, 颗粒长×宽为 $100\sim200\mu\text{m}\times50\sim90\mu\text{m}$, 长宽比为 1:1 到 3:1。锆石阴极发光图像 (CL) 显示锆石发育较窄的震荡环带 (图 7), 表明锆石结晶时的岩浆温度较低, 微量元素的扩散速度较慢。结合锆石晶形以及无继承性锆石的发现, 表明所有锆石均具有岩浆成因锆石的特征 (Rubatto et al., 2000)。锆石 Th/U 值为 0.06~0.69, 除一颗锆石为 0.06 外, 其余颗粒 Th/U 值均 >0.30 , 平均值为 0.39, 进一步表明其为岩浆成因。获得的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中于 320~330 Ma 之间, 加权平均年龄为 (324.1 ± 1.1) Ma (MSWD=1.5) (图 8)。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 同位素年龄谐和图上, 数据点基本位于谐和曲线上 (图 8), 表明锆石在形成后没有明显的 Pb 丢失。因此, 该年龄代表巴音沟安山岩的形成时代, 属于早石炭世晚期霍夫期。

5 讨论

野外调查表明, 所测的样品基本新鲜无蚀变, 且主量元素分析表明所有样品的烧失量 LOI 较低, 介于 2.26%~6.21%, 平均值为 3.67%, 烧失量 LOI 和 U、Pb、Rb 等元素之间没有明显的线性相关关系。因此, 本次研究所采集的安山岩整体上较为新鲜, 蚀变作用对元素含量的变化影响较小 (Ashwal et al., 2006)。

5.1 岩石成因

安山岩的研究虽然已经超过半个多世纪, 但安山岩的岩石成因仍然存在着巨大的争议 (Wang et al., 2023)。安山岩成因和构造环境较为复杂, 目前成因仍存在较大的争议, 主要包括玄武质岩浆的分离结晶; 俯冲洋壳及其沉积物的直接熔融; 基性岩浆和酸性岩浆混合 (Streck et al., 2007); 基性地壳的部分熔融以及含水地幔的部分熔融等 (Wood et al., 2009)。文中巴音沟安山岩整体具有相对低的 MgO ($<3\%$)、Ni ($8.56\times10^{-6}\sim17.1\times10^{-6}$)、Cr ($27.5\times10^{-6}\sim83.5\times10^{-6}$) 和 V

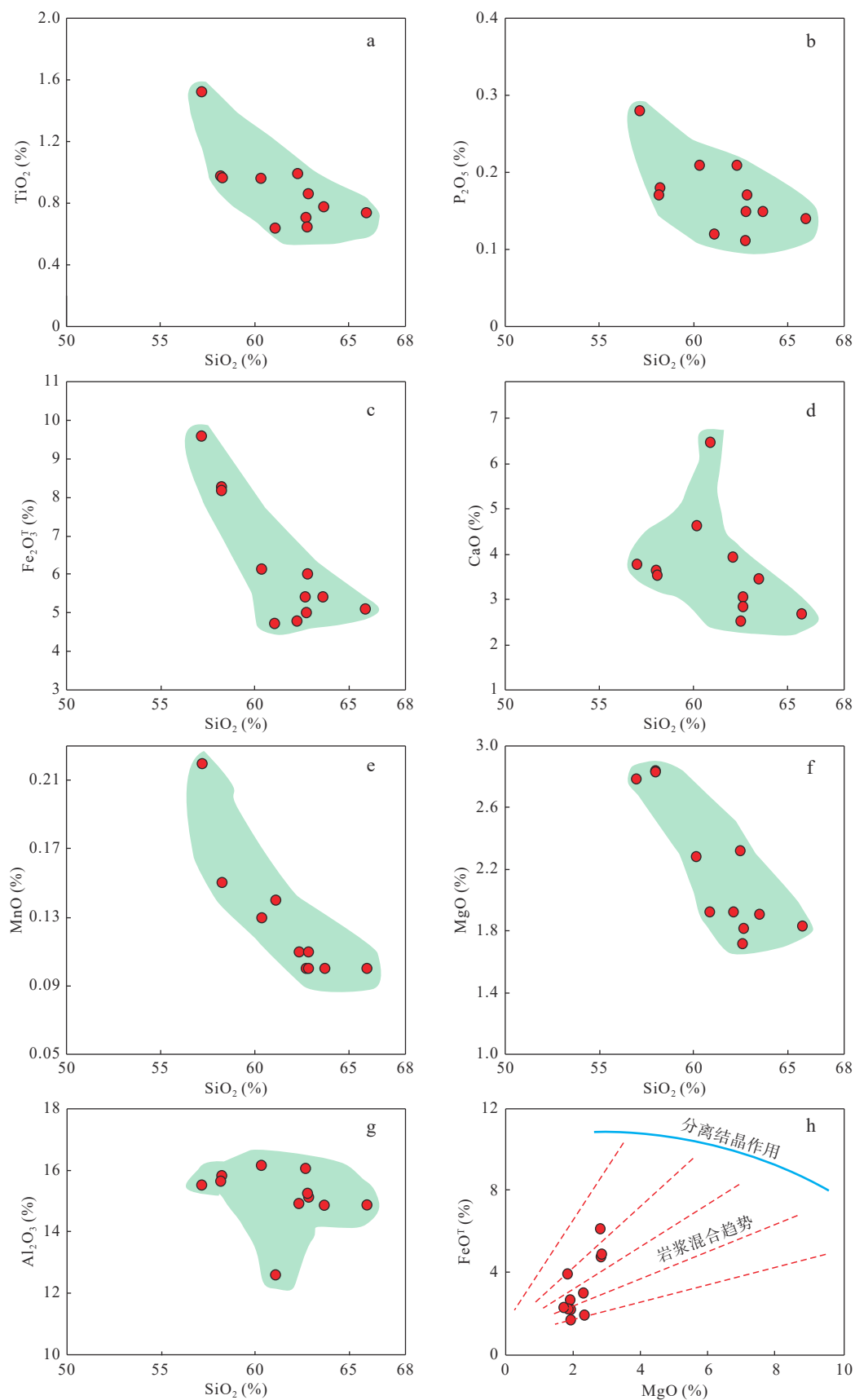


图5 北天山巴音沟安山岩全岩主元素哈克图解

Fig. 5 Harker diagrams of the whole-rock major elements for the andesite in the North Tianshan belt

表3 北天山巴音沟安山岩全岩微量元素地球化学分析结果(10^{-6})Tab. 3 Whole-rock trace ($\times 10^{-6}$) elemental compositions of the andesite from the Bayingou in the North Tianshan belt

样品号	924-1	924-2	924-4	924-9	925-2	925-5	925-7	926-1	926-6	926-7	926-9
La	15.5	17.3	17.6	15.4	13.7	9.84	14.7	11.2	11.2	7.92	8.63
Ce	37.4	38.10	39.10	34.80	31.90	24.70	34.00	27.30	27.80	19.50	21.60
Pr	4.97	4.90	5.06	4.56	4.35	3.66	4.47	3.81	3.83	2.86	3.27
Nd	21.5	21.4	21.4	19.2	18.9	17.8	19.1	17.9	18.3	13.9	16.40
Sm	5.52	5.29	5.32	4.84	5.02	5.46	4.82	5.03	5.04	4.06	5.14
Eu	1.46	1.48	1.38	1.23	1.43	1.64	1.29	1.37	1.55	1.61	1.62
Gd	5.48	5.42	5.15	4.50	4.85	6.06	4.88	5.14	5.21	4.49	5.26
Tb	0.89	0.86	0.82	0.75	0.78	0.99	0.78	0.85	0.84	0.74	0.86
Dy	5.73	5.33	5.1	4.58	5.03	6.36	4.92	5.15	5.4	4.64	5.42
Ho	1.21	1.13	1.1	0.99	1.11	1.35	1	1.08	1.1	0.97	1.11
Er	3.42	3.24	3.18	2.71	3.09	3.85	2.96	2.93	3.23	2.72	3.08
Tm	0.52	0.47	0.45	0.41	0.48	0.55	0.42	0.44	0.47	0.38	0.47
Yb	3.59	3.36	3.2	2.86	3.35	3.82	2.99	3.03	3.26	2.53	3.14
Lu	0.54	0.5	0.51	0.42	0.53	0.58	0.42	0.44	0.48	0.39	0.44
Sr	198	222	199	180	199	366	416	280	302	424	400
Rb	23.4	52.7	28.5	44.2	28.2	16	38.1	51	30.8	15.1	15.5
Ba	302	722	285	650	451	1 177	635	387	804	1 022	1 000
Th	3.65	2.94	3.36	3.03	3.05	1.07	2.73	2.16	1.92	0.75	0.92
Nb	4.7	3.72	4.26	4.28	3.46	1.84	3.21	3.01	2.66	1.51	2.09
Zr	180	129	140	138	139	92.9	115	124	108	67.3	72.6
Hf	5.65	4.44	4.55	4.53	4.76	3.36	3.67	4.07	3.79	2.4	2.54
Zr/Hf	31.85	29.05	30.76	30.46	29.20	27.65	31.33	30.47	28.50	28.04	28.58
Y	30.1	28.4	28.2	23.9	27.8	32.8	26.8	27.3	27.4	24	26.8
V	75.5	109	102	95.4	80.9	68.1	75.2	141	137	120	181
Cr	83.5	67.5	75.2	43.9	36.4	48.3	70.3	31.9	31.7	27.5	50.1
Ni	14.3	13.5	11.3	9.54	9.65	15.3	8.56	12.6	11	15.2	17.1
U	1.32	1.01	1.21	0.9	1.02	0.64	0.82	0.78	0.73	0.46	0.51
Pb	11.7	8.16	8.58	8.53	10	6.84	8.28	6.58	7.18	4.6	3.93
Sr/Y	6.58	7.82	7.06	7.53	7.16	11.16	15.52	10.26	11.02	17.67	14.93
La/Yb	4.32	5.15	5.50	5.38	4.09	2.58	4.92	3.70	3.44	3.13	2.75
La/Nb	3.30	4.65	4.13	3.60	3.96	5.35	4.58	3.72	4.21	5.25	4.13
(La/Yb) _N	2.91	3.47	3.71	3.63	2.76	1.74	3.31	2.49	2.32	2.11	1.85
Th/Yb	1.02	0.88	1.05	1.06	0.91	0.28	0.91	0.71	0.59	0.30	0.29
Nb/Yb	1.31	1.11	1.33	1.50	1.03	0.48	1.07	0.99	0.82	0.60	0.67
ΣREE	107.7	108.8	109.4	97.3	94.5	86.7	96.8	85.7	87.7	66.7	76.4
Eu/Eu*	0.81	0.85	0.81	0.81	0.89	0.87	0.81	0.82	0.92	1.15	0.95
Ce/Ce*	1.03	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.02	1.01	1.03	0.99	0.98

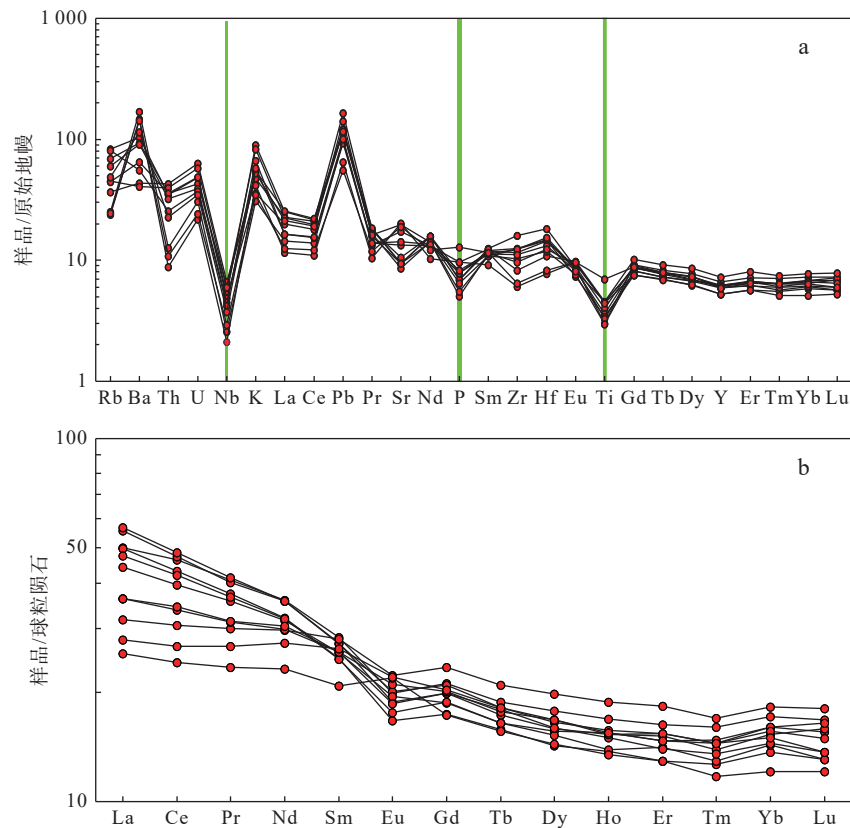


图6 北天山巴音沟安山岩微量元素原始地幔标准化蜘蛛网图(a)(标准化值据 Sun et al., 1989)和稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(b)(标准化值据 Boynton., 1984)

Fig. 6 (a) Primitive mantle normalized trace element patterns of the andesite from the Bayingou formation in the North Tianshan belt and (b) Chondrite-normalized REE distribution pattern of the andesite from the Bayingou formation in the North Tianshan belt

含量($68.1 \times 10^{-6} \sim 181 \times 10^{-6}$),与含水地幔直接熔融产生的高MgO、Cr、Ni特征不一致。如果来自于地幔源区,后期必须经历较高分离结晶作用,但在La vs. La/Yb图解中(图9a),所有样品均显示出部分熔融趋势,分离结晶作用不明显。此外,如果样品经历明显的分离结晶作用,研究区需要有伴生的同源的基性岩浆作用,并且它们之间往往存在着紧密的演化关系。然而,野外调查显示,在空间上,除了少量的超镁铁质岩石外,缺乏基性岩浆结晶分异的典型岩石组合,即缺乏时空上密切联系的玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩组合。因此,笔者研究的安山岩样品可能不是交代地幔的部分熔融以及幔源岩浆结晶分异的产物。俯冲洋壳及其沉积物的直接熔融也是产生安山岩的一个重要途径。通常,俯冲洋壳的部分熔融形成的安山岩通常显示出轻稀土分馏强烈并特别亏损重稀土,具有埃达克岩的地球化学,这与文中的安山岩中的地球化学特征明显不一致(表3,图6a、图6b),暗示了研究区的安山岩不是起源于俯冲洋壳及其沉积物直接的

熔融。另外,安山岩样品具有明显的Pb($3.93 \times 10^{-6} \sim 11.7 \times 10^{-6}$)正异常和高的Th($0.75 \times 10^{-6} \sim 3.65 \times 10^{-6}$)、U($0.46 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-6}$)含量,显示出典型陆壳地球化学特征,明显高于平均上地幔值(Rudnick et al., 2003)。此外,样品的La/Nb值为3.30~5.35,也远高于地幔的数值(1.0),接近于地壳平均值(2.2)(Rudnick et al., 2003),进一步表明文中研究的安山岩有来自于壳源物质的贡献。但值得注意的是,本次研究的安山岩样品具有高的 $Mg^\#$ 值(>45),类似于高 $Mg^\#$ 安山岩的部分地球化学特征(Kelemen, 1995)。实验岩石学表明,基性地壳部分熔融产生的长英质熔体的 $Mg^\#$ 值通常 <45 (Rapp et al., 1995),高 $Mg^\#$ 值暗示了幔源物质的贡献。此外,样品总的稀土含量低于地壳平均组成,也表明安山岩形成过程中有地幔物质加入。在图9b中,所有样品位于地壳熔体和地幔熔体的AFC曲线上,进一步暗示了地幔物质在安山岩成岩过程中的作用。结合安山岩成因模型,笔者研究的安山岩可能是壳幔混合的结果,在MgO vs. FeO^T 图解中(图5h),所有样

表4 北天山巴音沟安山岩锆石 LA-ICP-MS 测年结果
Tab. 4 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircons from the andesite from the Bayingou Formation in the North Tianshan belt

测点号	含量($\times 10^{-6}$)		同位素比值										年龄 (Ma)										
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	err%	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	err%	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	err%	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	err%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ			
1	2.46	48.65	0.0509	0.0005	1.01	0.4910	0.0484	9.86	0.0699	0.0072	10.35	0.0102	0.0006	5.89	0.3900	0.0010	0.26	320.2	3.2	405.6	40.0	926.1	212.5
2	5.89	114.73	0.0520	0.0004	0.71	0.3818	0.0171	4.48	0.0532	0.0024	4.49	0.0115	0.0004	3.11	0.3851	0.0018	0.46	326.8	2.3	328.4	14.7	339.3	101.7
3	3.43	68.20	0.0510	0.0004	0.87	0.4336	0.0380	8.77	0.0617	0.0059	9.49	0.0123	0.0008	6.15	0.3211	0.0009	0.28	320.5	2.8	365.7	32.1	663.4	203.4
4	3.96	76.61	0.0511	0.0004	0.82	0.4148	0.0265	6.40	0.0588	0.0037	6.36	0.0102	0.0003	2.69	0.5403	0.0020	0.37	321.5	2.6	352.4	22.5	560.7	138.6
5	3.38	66.77	0.0520	0.0005	0.90	0.3837	0.0330	8.61	0.0535	0.0047	8.77	0.0102	0.0005	5.03	0.3676	0.0008	0.20	326.6	2.9	329.8	28.4	352.2	198.1
6	2.69	51.63	0.0511	0.0005	0.96	0.3895	0.0542	13.92	0.0553	0.0081	14.58	0.0160	0.0009	5.36	0.3836	0.0017	0.45	321.2	3.1	334.0	46.5	424.5	325.3
7	3.90	76.00	0.0516	0.0004	0.75	0.3816	0.0332	8.70	0.0537	0.0048	8.92	0.0142	0.0006	3.97	0.3441	0.0011	0.33	324.1	2.4	328.3	28.5	358.1	201.4
8	5.83	111.22	0.0520	0.0003	0.65	0.3888	0.0241	6.20	0.0542	0.0034	6.19	0.0140	0.0004	3.07	0.4061	0.0015	0.38	326.8	2.1	333.5	20.7	380.1	139.2
9	3.34	62.51	0.0524	0.0005	0.86	0.3803	0.0491	12.91	0.0527	0.0070	13.38	0.0153	0.0007	4.32	0.4272	0.0011	0.25	329.0	2.8	327.3	42.3	315.1	304.3
10	11.55	223.71	0.0510	0.0003	0.58	0.3702	0.0110	2.98	0.0526	0.0016	2.96	0.0115	0.0003	2.42	0.5087	0.0010	0.21	320.8	1.9	319.8	9.5	312.6	67.3
11	5.42	103.17	0.0518	0.0004	0.68	0.3794	0.0229	6.03	0.0531	0.0032	6.02	0.0120	0.0003	2.76	0.4993	0.0059	1.19	325.7	2.2	326.6	19.7	332.7	136.4
12	2.91	57.39	0.0509	0.0004	0.86	0.3815	0.0352	9.22	0.0543	0.0051	9.35	0.0110	0.0005	4.22	0.4392	0.0009	0.21	320.2	2.8	328.1	30.3	384.4	210.1
13	2.68	51.16	0.0508	0.0004	0.85	0.4204	0.0443	10.54	0.0600	0.0065	10.81	0.0172	0.0006	3.71	0.3792	0.0006	0.16	319.7	2.7	356.3	37.6	602.7	233.9
14	4.39	86.08	0.0513	0.0004	0.75	0.4469	0.0252	5.64	0.0632	0.0035	5.50	0.0119	0.0004	3.72	0.3669	0.0040	1.10	322.2	2.4	375.1	21.2	716.3	116.8
15	3.76	72.06	0.0520	0.0004	0.84	0.3779	0.0492	13.02	0.0527	0.0072	13.61	0.0125	0.0006	5.08	0.4344	0.0026	0.60	326.9	2.8	325.5	42.4	315.4	309.5
16	3.53	67.76	0.0524	0.0004	0.80	0.3759	0.0327	8.70	0.0521	0.0047	8.97	0.0124	0.0006	4.48	0.4036	0.0014	0.34	329.0	2.6	324.0	28.2	288.0	205.0
17	7.24	143.78	0.0514	0.0003	0.60	0.3859	0.0132	3.41	0.0544	0.0018	3.37	0.0129	0.0004	3.20	0.3014	0.0010	0.32	323.4	1.9	331.4	11.3	387.9	75.7
18	3.41	66.79	0.0509	0.0004	0.81	0.4694	0.0326	6.95	0.0669	0.0046	6.89	0.0140	0.0006	4.29	0.3302	0.0010	0.29	320.0	2.6	390.8	27.2	834.1	143.5
19	3.09	62.22	0.0519	0.0004	0.81	0.3807	0.0514	13.49	0.0533	0.0075	14.10	0.0440	0.0022	4.91	0.0628	0.0003	0.56	325.9	2.6	327.6	44.2	339.6	319.3
20	7.71	150.00	0.0513	0.0003	0.62	0.3793	0.0136	3.59	0.0537	0.0019	3.51	0.0155	0.0004	2.59	0.3429	0.0019	0.54	322.2	2.0	326.5	11.7	357.3	79.2
21	9.60	185.82	0.0518	0.0003	0.60	0.3872	0.0123	3.17	0.0542	0.0017	3.11	0.0170	0.0004	2.61	0.2968	0.0010	0.33	325.6	1.9	332.3	10.5	379.8	69.9
22	5.06	99.43	0.0508	0.0003	0.68	0.3780	0.0275	7.27	0.0539	0.0039	7.26	0.0180	0.0006	3.31	0.2832	0.0021	0.75	319.7	2.2	325.5	23.7	367.6	163.6
23	3.38	67.54	0.0517	0.0004	0.76	0.4205	0.0279	6.63	0.0590	0.0039	6.57	0.0090	0.0004	4.13	0.3271	0.0007	0.21	325.1	2.5	356.4	23.6	565.5	143.1
24	4.69	88.59	0.0519	0.0004	0.73	0.3863	0.0346	8.96	0.0540	0.0049	9.03	0.0210	0.0008	3.65	0.3040	0.0007	0.23	326.3	2.4	331.7	29.7	369.4	203.4
25	8.48	164.62	0.0515	0.0003	0.60	0.3781	0.0132	3.49	0.0533	0.0018	3.43	0.0160	0.0004	2.69	0.3283	0.0010	0.31	323.4	1.9	325.6	11.4	341.1	77.6
26	3.25	60.72	0.0525	0.0005	0.87	0.3877	0.0443	11.44	0.0536	0.0063	11.70	0.0150	0.0006	3.69	0.4349	0.0014	0.32	329.7	2.9	332.7	38.0	353.5	264.3
27	2.78	53.94	0.0523	0.0007	1.27	0.3883	0.0692	17.83	0.0539	0.0318	59.02	0.0130	0.0014	10.51	0.3458	0.0015	0.42	328.5	4.2	333.1	59.4	365.3	1330.4
28	2.68	52.49	0.0512	0.0005	0.89	0.3960	0.0377	9.52	0.0561	0.0056	9.92	0.0130	0.0005	4.09	0.3775	0.0027	0.73	321.6	2.9	338.7	32.2	457.8	219.9
29	9.74	176.04	0.0519	0.0003	0.57	0.3961	0.0104	2.64	0.0553	0.0014	2.60	0.0130	0.0003	2.08	0.6929	0.0019	0.28	326.4	1.9	338.8	8.9	424.6	57.9
30	2.99	56.37	0.0509	0.0004	0.83	0.4416	0.0487	11.04	0.0629	0.0072	11.44	0.0200	0.0009	4.52	0.3515	0.0016	0.45	320.3	2.6	371.4	41.0	704.0	243.4
31	19.42	353.67	0.0516	0.0003	0.57	0.3778	0.0061	1.62	0.0531	0.0008	1.57	0.0150	0.0003	1.85	0.5965	0.0011	0.18	324.6	1.9	325.4	5.3	331.4	35.7
32	2.91	54.48	0.0525	0.0004	0.78	0.3802	0.0369	9.70	0.0526	0.0053	10.11	0.0143	0.0005	3.39	0.4416	0.0007	0.16	329.6	2.6	327.2	31.7	310.1	230.2
33	3.05	57.83	0.0512	0.0005	0.91	0.3748	0.0401	10.71	0.0531	0.0060	11.25	0.0155	0.0006	3.99	0.4440	0.0008	0.18	321.8	2.9	323.2	34.6	333.5	255.1

注：表中所列误差均为1 σ 误差。



图7 北天山巴音沟安山岩中锆石阴极发光 CL 图像

Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images of the andesite from the Bayingou in the North Tianshan belt

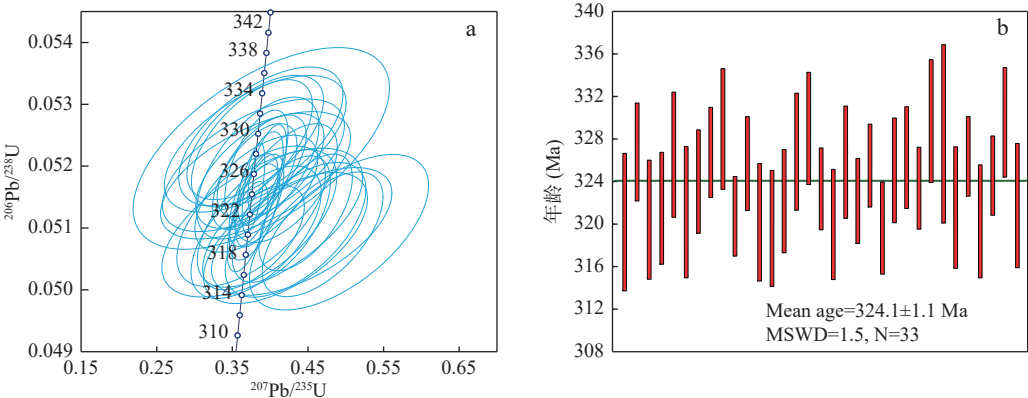


图8 北天山巴音沟安山岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和图(a)和加权年龄图(b)

Fig. 8 (a) Concordia diagram and (b) weighted average age diagram of zircon LA-ICP-MS U-Pb data for the andesite from the Bayingou in the North Tianshan belt

品均落入岩浆混合的趋势线上,也进一步支持这一推论,表明安山岩是岩浆混合的产物。此外,哈克图解

中的非线性关系也可能是岩浆混合作用的结果。在主量元素判别图解中(图 9c),安山岩样品具有低的

$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ 值(摩尔比值),落在变玄武岩或变英云闪长岩的区域附近,表明安山岩可能源自基性下

地壳的部分熔融,这与样品具有弱的 Eu 异常或无 Eu 异常特征相吻合。

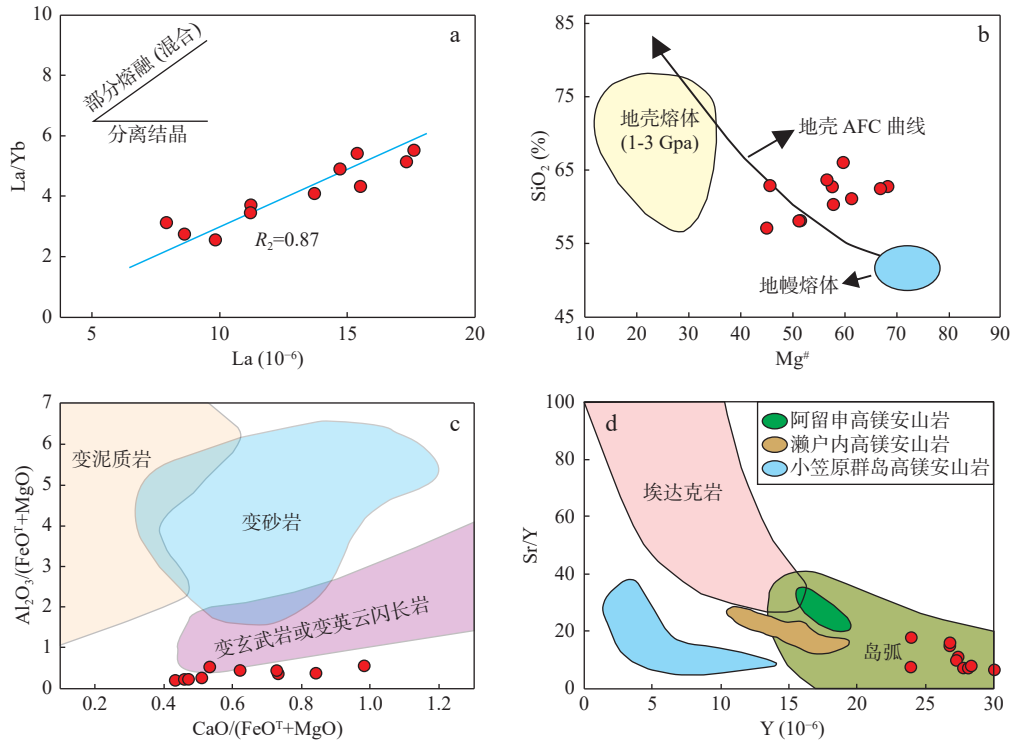


图9 北天山巴音沟安山岩岩石地球化学图解 La vs. La/Yb 图解(a)(矿物分离结晶模拟据 Ersoy et al., 2010)、 $\text{Mg}^{\#}$ vs. SiO_2 图解(b)(地壳 AFC 曲线据 Stern et al., 1996)、主量元素成分判别图解(c)(底部据 Altherr et al., 2000 修)、Y vs. Sr/Y 图解(d)(据 Tatsumi, 2006)

Fig. 9 (a) Petro-geochemical diagrams of the andesite in Bayingou of the North Tianshan belt La vs. La/Yb diagram, (b) $\text{Mg}^{\#}$ vs. SiO_2 diagram, (c) Major element compositional diagram and (d) Y vs. Sr/Y diagram

实验岩石学证明,在压力约为 0.8GPa 时,基性下地壳发生部分熔融时,残留相为角闪石+斜长石±斜方辉石,但是无石榴子石;当压力升高到 1.6GPa 时,主要矿物残留相为石榴子石+单斜辉石±角闪石±斜长石±斜方辉石。本次研究的安山岩样品均落入岛弧安山岩区域(图 9d),而非加厚地壳的埃达克岩区域,和阿留申、濑户内以及小笠原岛弧的高 Mg 安山岩明显不同,表明北天山巴音沟安山岩岩浆源区深度不大,这与研究的安山岩样品没有明显的 HREE 亏损相一致。结合研究区地质背景,笔者研究的安山岩可能形成于俯冲的弧环境即汇聚板块边缘,交代的地幔楔物质发生部分熔融产生的基性岩浆底侵于基性下地壳并使其发生熔融,产生的熔体与地幔岩浆混合是巴音沟安山岩的可能的成岩模式。

5.2 构造环境

长期以来,巴音沟中基性火山熔岩形成的构造环

境划分存在着较大的分歧。部分学者这些中基性火山岩主要形成于伸展背景的弧后盆地(王作勋等, 1990; 高长林等, 1995),但舒良树等(2001)认为这些中基性火山岩熔岩很可能形成与弧前盆地环境。肖序常等(1992)认为这些中基性火山岩和北天山晚古生代洋盆的形成有关,是洋盆演化后期的残留物,并且进一步指出北天山洋盆的打开和准噶尔古生代洋盆向北的俯冲导致岩石圈的拉伸有关。另外,还有部分学者得出,巴音沟混杂岩主要形成于碰撞造山的后期,形成于典型的伸展环境,是裂谷拉伸向大洋裂谷转换时的产物,记录了红海型洋盆早期的演化历史记录(夏林圻等, 2002, 2003; 徐学义等, 2006)。

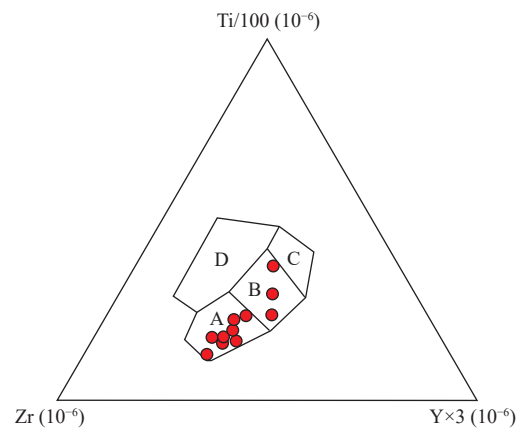
前已述及,笔者研究的巴音沟混杂岩中的安山岩与全球典型岛弧安山岩(Condie, 1981; 张保民等, 1992)具有非常相似的地球化学特征,仅显示 Al_2O_3 、CaO、Eu 稍低,高场强元素 Hf 稍高的特征。在三角图解

Ti/100-Zr-Y $\times 3$ 图解(图 10)中,样品落入岛弧拉斑和 MORB 及岛弧钙碱性区域,进一步支持这些安山岩可能形成于俯冲的岛弧环境或洋中脊环境。但笔者研究的样品为典型的中性岩,不是洋中脊玄武岩。此外,样品稀土和微量元素组成也与洋中脊玄武岩典型的左倾稀土配分模式和亏损不相容元素不相符,因此,文中研究的安山岩非古生代洋盆残留,而很有可能形成于典型的弧环境。参考近十年来对大陆边缘和大陆内部钙碱性火山岩的研究发现,研究区内安山岩不具备“伸展型钙碱性火山岩”的典型特征(Mccarron et al., 1998; 李伍平等, 1999),也表明该安山岩可能形成于俯冲带环境。此外,文中的安山岩样品具有低的 TiO₂、K₂O+Na₂O 和 P₂O₅ 含量,以及低的 Fe₂O₃^T%/MgO%(<2.0)和 K₂O/Na₂O 值(<0.8),显示出弧火山岩的地球化学特征(李伍平等, 1999)。

在俯冲带环境中,弧岩浆岩的源区物质主要来自于以下 4 个方面:①地幔楔中富水橄榄岩的部分熔融。②俯冲带中的熔/流体交代岩。③俯冲板片部分熔融形成的熔体。④大陆地壳物质的同化混染(李伍平等, 1999; 李源等, 2011)。在岩浆作用过程中,部分高场强元素,如 Zr、Hf、Nb 等元素在蚀变和变质作用过程中具有良好的稳定性,是判别岩石成因和岩浆源区的良好示踪剂(Hugh, 1993; Macdonald et al., 2000)。故选用 Hf、Th、Nb 等元素的相关图解来判别岩石的形成环境。在与板块俯冲有关的火山岩的 Th/Yb vs. Nb/Yb 图解(图 11a)中,所有样品都落在大陆岛弧火山岩和大洋岛弧火山岩的重叠区域,显示出巴音沟安山岩很有可能形成于汇聚板块的边缘环境,而非裂谷

环境;在 La/Yb-Th/Yb 判别图解中(图 11b)中,所有样品也均落入岛弧环境中,具有俯冲带岩浆岩的地球化学特征(Kelemen et al., 1990)。

综合本研究和前人在本研究区附近开展的基性岩与酸性岩的工作,火山岩自 SE 向 NW 显示由基性-中性-酸性的演化规律,反映形成于岛弧或活动大陆边缘钙碱性火山系列的演化规律(宋红伟等, 2019; 李继磊, 2021)。此外,在野外所见的安山岩与其他岩石,经镜下鉴定有一部分为岩屑凝灰岩、凝灰质粉砂岩和岩屑砂岩。凝灰质粉砂岩代表较深水沉积,而岩屑砂岩代表了浅水沉积的环境,这一点在地质报告及前人的研究中也得到了证实(王博等, 2006; 刘冬冬等, 2012)。这些火山岩岩浆具有不连续喷发的特点,同



A. 岛弧拉斑玄武岩区; B. MORB、岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩区; C. 钙碱性玄武岩区; D. 板内玄武岩

图 10 安山岩 Ti/100-Zr-Y $\times 3$ 图解(Pearce et al., 1973)

Fig. 10 Ti/100-Zr-Y $\times 3$ diagram of the andesite

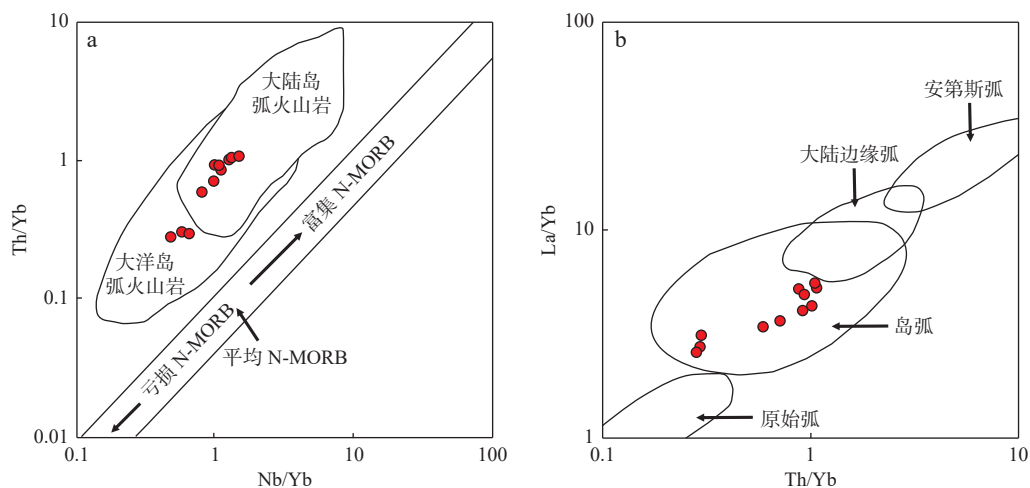


图 11 安山岩 Th/Yb-Nb/Yb 图解(a)(据韩作振等, 2018)和安山岩 La/Yb-Th/Yb 图解(b)(Pearce et al., 1981)

Fig. 11 (a) Th/Yb versus Nb/Yb for the andesite and (b) La/Yb vs. Th/Yb diagram for the andesite

样可以说明此火山岩形成于俯冲带之上的弧火山环境中。

笔者研究的安山岩样品呈钙碱性, 富集大离子亲石元素, 相比较重稀土而言, 轻稀土则相对富集, 具有右倾的配分模式, 且亏损 Nb、Ti、P 等高场强元素, 也显示出弧岩浆岩的地球化学特征, 是俯冲作用过程中, 俯冲板片脱水, 含水流体相携带 LREE 和大离子亲石元素等流体活动性元素进入上覆地幔楔, 而高场强元素保留在残余板片中(宋彪等, 2002), 说明岩浆源区受到俯冲带流体的交代或者其母岩浆源区是俯冲流体交代地幔楔部分熔融的产物。较高的 Ba/La 值(表 3)说明俯冲带流体对弧岩浆源区的影响较为显著。随后, 地幔楔部分熔融形成的母岩浆使其上覆的基性下地壳发生熔融, 中-基性岩浆混合形成岛弧特征的安山质岩浆。巴音沟的安山岩与邻区阿尔巴萨组火山岩和阿希火山岩的稀土、微量元素地球化学特征十分相似, 表明其可能形成于相似的构造背景, 即形成于俯冲带之上的岛弧构造环境。

5.3 火山岩时代

北天山带的主体由泥盆系凝灰质砂岩、凝灰岩、板岩、千枚岩、灰岩和中基性火山岩, 下石炭统凝灰质粉砂岩, 以及上石炭统碎屑岩和火山碎屑岩组成, 上述岩石组合被认为是增生杂岩的组成部分(Condie, 1989; Wang et al., 2016)。其与伊犁地块和中天山地块以北天山缝合带为界(图 1a), 这条缝合带由北天山断裂带、高压变质作用形成的蓝闪石-多硅白云母片岩、以及混杂岩残片构成(Condie, 1989; Xiao et al., 2013; Wang et al., 2016)。长期以来, 对巴音沟组蛇绿岩时限的界定是通过基性的辉长岩、辉绿岩与酸性的斜长花岗岩的锆石 U-Pb 测年与放射虫硅质岩中放射虫及牙形石微体化石定年确定的, 如蛇绿混杂岩中斜长花岗岩和辉长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $(324.8 \pm 7.1) \text{ Ma}$ 和 $(344.0 \pm 3.4) \text{ Ma}$ (徐学义等, 2006; Li et al., 2015)。因而, 笔者对巴音沟组中性安山岩岩石地球化学和年代学的研究, 在岩石共生组合方面填补了对于中性岩年代学的空白, 也有助于确定不同岩性岩石之间的共生组合关系, 并进一步确定火山岩的形成环境。

本次研究对巴音沟火山岩中安山岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 结果显示, 该安山岩的年龄为 $(324.1 \pm 1.1) \text{ Ma}$, 从锆石形态、锆石内部结构及锆石的 U-Pb 同位素等方面来分析, 安山岩的锆石并非在喷发过程中捕获的锆石, 也并非经历后期变质的变质锆石,

代表着安山岩形成的年龄, 这一年龄代表着大洋板块向大陆板块之下俯冲并经部分熔融所形成的安山岩岩浆在喷发就位过程的时限。

巴音沟混杂岩周围出露大量的花岗岩体, 部分花岗岩体切穿了混杂带(徐学义等, 2006; Han et al., 2010), 表明花岗岩侵入时间在北天山洋闭合之后。洋壳硅质岩中所含的晚泥盆世—早石炭世的放射虫化石(肖序常等, 1992)以及斜长花岗岩中锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄 $(325 \pm 7) \text{ Ma}$ (徐学义等, 2006), 共同界定了洋盆消减的时限。Han 等(2010)对上述花岗岩进行了详细的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年, 得到其年龄在 $315 \sim 266 \text{ Ma}$ 范围内, 与天山北部准噶尔盆地对应, 属于后碰撞时期; 依据斜长花岗岩的研究, 得到准噶尔南缘的巴音沟混杂岩带的形成时限为 $325 \sim 316 \text{ Ma}$ 。此外, 本组安山岩与本区斜长花岗岩以及邻区同带的阿尔巴萨组火山岩、前峡组火山岩和四棵树花岗闪长岩对比发现, 基性-中性-酸性火山岩均属于钙碱性火山岩, 且形成年代也较为相近。巴音沟斜长花岗岩 $(324.8 \pm 7.1) \text{ Ma}$ (徐学义等, 2006), 阿尔巴萨组流纹岩 $(307.2 \pm 1.3) \text{ Ma}$ (刘冬冬等, 2012), 四棵树花岗闪长岩 $(315.9 \pm 2.5) \text{ Ma}$ (Han et al., 2010)。岩石共生组合与地球化学方面均符合岛弧-活动大陆边缘带的特点, 表明北天山地区在早石炭世晚期—晚石炭世早期发生俯冲, 北天山洋在该时期尚未闭合。

6 结论

(1) 巴音沟安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的加权平均年龄为 $(324.1 \pm 1.1) \text{ Ma}$ (MSWD=1.5), 代表了古亚洲洋开始俯冲后安山岩形成的时代, 即早石炭世晚期。

(2) 巴音沟安山岩是幔源岩浆和壳源岩浆混合的产物, 其中幔源岩浆与俯冲流体交代上覆地幔楔的部分熔融有关, 壳源岩浆是基性下地壳的部分熔融。

(3) 对比西天山及邻区石炭纪火山岩岩石学和地球化学表明, 西天山石炭纪火山岩中的安山岩形成于俯冲带之上的大陆边缘环境, 是北天山洋向伊犁-中天山板块俯冲的产物。

参考文献(References):

白云来, 陈启林, 汤中立, 等. 塔里木板块东北边缘弧后裂谷系

- 统基性、超基性岩特征[J]. 中国地质, 2004, 31(3): 254-262.
- BAI Yunlai, CHEN Qilin, TANG Zhongli, et al. The characteristics of basic-ultrabasic rocks in the back-arc rift system on the north-eastern margin of the Tarim plate[J]. *Geology in China*, 2004, 31(3): 254-262.
- 车自成, 刘良, 刘洪海, 等. 论伊利裂谷[J]. 岩石学报, 1996, 12(3): 478-490.
- CHE Zicheng, LIU Liang, LIU Honghai, et al. Review on the ancient Yili rift, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(3): 478-490.
- 高俊, 汤耀庆, 赵民. 新疆南天山蛇绿岩的地质地球化学特征及形成环境初探[J]. *岩石学报*, 1995, 11: 85-97.
- GAO Jun, TANG Yaoqing, ZHAO Min. The geochemistry and tectonic setting of the ophiolites in southern Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11: 85-97.
- 高俊, 肖序常, 汤耀庆. 天山库米什蓝片岩的发现及其大地构造意义[J]. 中国区域地质, 1993, 4: 344-347.
- GAO Jun, XIAO Xuchang, TANG Yaoqing. The discovery of Kumishi Blueschist and its tectonic significance form South Tianshan Mountains[J]. *Chinese Regional Geology*, 1993, 4: 344-347.
- 高长林, 崔可锐, 钱一雄, 等. 天山微板块构造与塔北盆地[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1-132.
- GAO Changlin, CUI Kerui, QIAN Yixiong, et al. Microplate tectonics from the Tianshan Mountains and northern Tarim basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995, 1-132.
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 等. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. 新疆地质, 2004, 22(1): 4-11.
- HAN Baofu, HE Guoqi, WU Tairan, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical features of Early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: Implications for tectonic evolution[J]. *Xinjiang Geology*, 2004, 22(1): 4-11.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)-后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1077-1086.
- HAN Baofu, JI Jianqing, SONG Biao, et al. Late Paleozoic vertical of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1077-1086.
- 韩作振, 闫俊磊, 刘辉, 等. 吉林永吉地区南楼山组火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 10-19.
- HAN Zuozhen, YAN Junlei, LIU Hui, et al. Zircon U-Pb chronological and geochemical characteristics of volcanic rocks from the Nanloushan Formation in Yongji Area, Jilin Province[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2018, 37(1): 10-19.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权. 中国新疆古生代地壳演化与成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994, 662-672.
- HE Guoqi, LI Maosong, LIU Dequan. Chinese Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization Xinjiang [M]. Urumqi: Xinjiang Peoples Publishing House, 1994, 662-672.
- 黄惠明, 李鹏飞, 胡万万, 等. 西天山伊利地块早古生代拼贴: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(4): 786-804.
- HUANG Huiming, LI Pengfei, HU Wanwan, et al. Early Paleozoic Amalgamation of the Yili Block (Chinese West Tianshan): Insight from Detrital Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(4): 786-804.
- 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 从岛弧向裂谷的变迁-来自阿吾拉勒山地区火山岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(4): 289-300.
- JIANG Changyi, WU Wenkui, ZHANG Xueren, et al. The change from island arc to rift valley: evidence from volcanic rocks of Awulale area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 1995, 14(4): 289-300.
- 李继磊. 俯冲带变质脱水作用与流体性质[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 23-29.
- LI Jilei. Metamorphic dehydrations and fluid nature in subduction zones[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 40(5): 23-29.
- 李锦轶, 肖序常. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[J]. 地质科学, 1999, 34(4): 405-419.
- LI Jinyi, XIAO Xuchang. Brief reviews of several issues on the crustal structure and tectonic evolution in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1999, 34(4): 405-419.
- 李伍平, 路凤香. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展. 地质科技情报[J], 1999, 18(2): 58-61
- LI Wuping, LU Fengxiang. New progress of the study of geologic setting for Calc-alkaline volcanic rocks [J]. *Geological Science and Technology*, 1999, 18(2): 58-61.
- 李向民, 董云鹏, 徐学义, 等. 中天山南缘乌瓦门地区发现蛇绿混杂岩[J]. 地质通报, 2002, 21(6): 304-307.
- LI Xiangmin, DONG Yunpeng, XU Xueyi, et al. The discovery of ophiolitic melange in Wuwamen area from southern margin of central Tianshan mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(6): 304-307.
- 李永军, 李注苍, 佟丽莉, 等. 论天山古洋盆关闭的地质时限—

- 来自伊宁地块石炭系的新证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 2905–2912.
- LI Yongjun, LI Zhucang, TONG Lili, et al. Revisit the constraints on the closure of the Tianshan ancient oceanic basin: New evidence from Yining block of the Carboniferous[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 2905–2912.
- 李源, 杨经绥, 张健, 等. 新疆东天山石炭纪火山岩及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 193–209.
- LI Yuan, YANG Jingsui, ZHANG Jian, et al. Tectonic significance of the Carboniferous volcanic rocks in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 193–209.
- 刘冬冬, 郭召杰, 张志诚, 等. 准噶尔南缘古生代晚期盆山关系: 阿尔巴萨依组火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩石地球化学限定[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2355–2368.
- LIU Dongdong, GUO Zhaojie, ZHANG Zhicheng, et al. The late Paleozoic tectonic relationship between the Tian Shan orogenic belt and Junggar basin: Constraints from zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemistry characteristics of volcanic rocks in Arbasay Formation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2355–2368.
- 舒良树, 郭召杰, 朱文斌, 等. 天山地区碰撞后构造与盆山演化[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 393–404.
- SHU Liangshu, GUO Zhaojie, ZHU Wenbin, et al. Post-collisional structure and basin evolution of Tianshan[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(3): 393–404.
- 舒良树, 卢华复, 印栋浩, 等. 新疆北部古代大陆增生构造[J]. 新疆地质, 2001, 19(1): 59–63.
- SHU Liangshu, LU Huaifu, YIN Donghao, et al. Late Paleozoic continental accretionary tectonics in northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2001, 19(1): 59–63.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26–30.
- SONG Biao, ZHANG Yuhai, WAN Yusheng, et al. Mount making and procedure of the SHRIMP Dating[J]. *Geological Review*, 2002, 48(sup.): 26–30.
- 宋红伟, 赵民, 刘坤朋, 等. 内蒙古牙尔盖地区哈布楚浑迪隆起晚石炭世花岗岩类演示化学特征及其构造环境[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 9–20.
- SONG Hongwei, ZHAO Min, LIU Kunpeng, et al. The petrochemical characteristics and tectonic environment of Late Carboniferous granitoids of the Habchuhudi' uplift in Yalgai area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 38(5): 9–20.
- 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, 1–215.
- TANG Yaoqing, GAO Jun, ZHAO Min. The ophiolites and blueschists from southwestern Tianshan mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995, 1–215.
- 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.
- WANG Bo, SHU Liangshu, CLUZEL D, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous volcanic rocks in the northern part of the Ili Block, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 498–508.
- 王盟, 裴先治, 张进江, 等. 伊犁地块北缘早石炭世阿拉斯坦闪长岩成因及其对北天山洋俯冲过程的启示[J]. 地质通报, 2023, 42(5): 771–787.
- WANG Meng, PEI Xianzhi, ZHANG Jinjiang, et al. Petrogenesis of the Early Carboniferous Alasitan diorites from the northern margin of Yili Block and implication for subduction process of the North Tianshan Ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(5): 771–787.
- 王盟, 裴先治, 陈有炘, 等. 北天山西段晚石炭世—早二叠世花岗岩成因及其构造意义[J]. 地质学报, 2022, 96(2): 482–499.
- WANG Meng, PEI Xianzhi, CHEN Youxin, et al. Petrogenesis and tectonic implication of Late Carboniferous to Early Permian granites from the western Chinese North Tianshan belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2): 482–499.
- 王作勋, 邬继易, 吕喜朝, 等. 天山多旋回构造及成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990, 1–217.
- WANG Zuoxun, WU Jiye, LV Xichao, et al. Polycyclic tectonic evolution and metallogeny of the Tianshan Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1990, 1–217.
- 邬继易, 刘成德. 新疆北天山巴音沟蛇绿岩的地质特征[J]. 岩石学报, 1989, 5(2): 76–88.
- WU Jiye, LIU Chengde. Geological features of Bayingou ophiolitic suite of North Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1989, 5(2): 76–88.
- 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.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi, et al. Carboniferous Tianshan igneous mega-province and mantle plume[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9-10): 903–910.
- 夏林圻, 徐学义, 夏祖春, 等. 天山石炭纪碰撞后裂谷火山作用[J]. 地质学报, 2003, 77(3): 338–360.
- XIA Linqi, XU Xueyi, XIA Zuchun, et al. Carboniferous post-collisional rift volcanism of the Tianshan Mountains, Northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 338–360.
- 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(5): 55–62.
- XIA Linqi, ZHANG Guowei, XIA Zuchun, et al. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(5): 55–62.
- 肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1062–1076.
- XIAO Wenjiao, HAN Chunming, YUAN Chao, et al. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of Northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleo-Asian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1062–1076.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992, 1–169
- XIAO Xuchang, TANG Yaoqing, FENG Yimin, et al. Tectonic evolution of northern Xinjiang and its adjacent regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992, 1–169.
- 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶, 等. 试论新疆北部大地构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1990, 47–68
- XIAO Xuchang, TANG Yaoqing, LI Jinyi, et al. Tectonic evolution of northern Xinjiang, Northwest China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990, 47–68.
- 熊发挥, 杨经绥, 贾毅, 等. 新疆博格达白杨沟的枕状熔岩: 岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 838–854.
- XIONG Fahui, YANG Jingsui, JIA Yi, et al. The pillow lava of Baiyanggou in Bogda, Xinjiang: geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics[J]. *Geology in China*, 2011, 38(4): 838–854.
- 徐学义, 夏林圻, 马中平, 等. 北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.
- XU Xueyi, XIA Linqi, MA Zhongpin, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the plagiogranites from Byingou ophiolite in North Tianshan Mountains and the petrogenesis of the ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 83–94.
- 杨天南, 王小平. 新疆库米什早泥盆世侵入岩时代, 地球化学及大地构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(5): 401–411.
- YANG Tiannan, WANG Xiaoping. Geochronology, petrochemistry and tectonic implications of Early Devonian plutons in Kumux area, Xinjiang[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 25(5): 401–411.
- 杨兴科, 苏春乾, 陈红, 等. 天山冰达坂-后峡一带二叠纪火山岩的发现[J]. *地质通报*, 2006, 25(8): 969–976
- YANG Xingke, SU Chunqian, CHEN Hong, et al. Discovery of the Permian volcanic rocks in the Bingdaban-Houxia, Tianshan Mountains, and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(8): 969–976.
- 张保民, 沈上越, 刘祥品, 等. 云南德钦阿登各火山岩的特征及其构造环境[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 1992, 17(4): 437–445.
- ZHANG Baomin, SHEN Shangyue, LIU Xiangpin, et al. The characteristics and tectonic environment on the origin of Adengge volcanic rocks in Deqin, Yunnan Province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1992, 17(4): 437–445.
- 张招崇, 董书云, 黄河, 等. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学: 岩石成因和构造背景[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1827–1839.
- ZHANG Zhaochong, DONG Shuyun, HUANG He, et al. Geology and geochemistry of the Permian intermediate-acid intrusion in the southwestern Tianshan, Xinjiang, China: Implications for petrogenesis and tectonics[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1827–1839.
- 郑永飞. 汇聚板块边缘地球系统科学[M]. 北京: 科学出版社, 2022, 1–194
- ZHENG Yongfei. Earth system science of convergent plate margins [M]. Beijing: Science Press, 2022, 1–194.
- Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 2000, 50: 51–73.
- An F, Zhu Y F, Wei S N, et al. The zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the basement nature and Paleozoic evolution in northern margin of Yili block, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2017, 43: 41–54.
- Andersen T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1–2): 59–79.
- Ashwal L, Torsvik T, Horvath P, et al. A mantle-derived origin for Mauritian trachytes[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 57(9): 1645–1675.
- Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. In: Henderson P (Ed.). *Rare Earth Elements Geochemistry* [M]. Elsevier, Amsterdam, 1984: 63–114.
- Charvet J, Shu L S, Laurent-charvet S, et al. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2011, 54: 166–184.
- Condie K C. Archean Greenstone Belts [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981: 1–425.
- Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the

- Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 1989, 23: 1–18.
- Ersoy Y, Helvacl. FC-AFC-FCA and mixing modeler: A Microsoft Excel spreadsheet program for modeling geochemical differentiation of magma by crystal fractionation, crustal assimilation and mixing[J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(3): 383–390.
- Gao J, Li M S, Xiao X C, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northern China[J]. *Tectonophysics*, 1998, 287: 213–231.
- 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*, 2001, 45: 1047–1051.
- Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics [M]. Berlin: Springer, 1981: 1–390.
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, et al. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122: 627–640.
- Hugh R R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. England: Longman Scientific & Technical, New York: Wiley & Sons, 1993: 1–384.
- Irvine T N, Baragar V R. A guide to the chemical classification of the Common volcanic rock[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523–548.
- Kelemen P B. Genesis of high Mg# andesites and the continental crust[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, 120(1): 1–19.
- Kelemen PB, Johnson KTM, Kinzler RJ, et al. High-field-strength element depletions in arc basalts due to mantle-magma interaction[J]. *Nature*, 1990, 345(6275): 521–524.
- Le M R W, Streckeisen A, Zanwttin, et al. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences Sub commission on the Systematics of Igneous Rocks [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 1–236.
- Li C, Xiao W J, Han C M, et al. Late Devonian-early Permian accretionary orogenesis along the North Tianshan in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *International Geology Review*, 2015, 57: 1023–1050.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257: 34–43.
- Long L L, Gao J, Kelemd R, et al. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2011, 126: 321–340.
- Ludwig K R. Isoplot / Ex version 2.49. A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 2003.
- Macdonald R, Hawkesworth C J, Health E. The Lesser Antilles volcanic chain: A study in arc magmatism[J]. *Earth Science Reviews*, 2000, 49: 1–76.
- Mccarron J J, Smellie J L. Tectonic implications of fore-arc magmatism and generation of high-magnesian andesites: Alexander Island, Antarctica[J]. *Journal of the Geological Society London*, 1998, 155: 269–280.
- Morrison G W. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 1980, 13: 97–108.
- Pearce J A, Alabaster T, Shelton A W, et al. The Oman Ophiolite as a Cretaceous Arc-Basin Complex: Evidence and Implications[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1981, 300: 299–317.
- Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290–300.
- Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of meta-basalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 891–931.
- Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM microprobe: Some examples from the western Alps [J]. *Cathodoluminescence in Geosciences*, 2000, 373–400.
- Rudnick R, Gao S. Composition of the continental crust. In: Rudnick R. The crust, treatise on geochemistry [M]. Amsterdam, Elsevier, 2003: 1–64.
- Shu L S, Wang B, Zhu W B, et al. Timing of initiation of extension in the Tianshan, based on structural, geochemical and geochronological analyses of bimodal volcanism and olistostrome in the Bogda Shan (NW China)[J]. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 2011, 100(7): 1647–1663.
- Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral volcanic zone[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 123(3): 263–281.
- Streck M J, Leeman W P, And Chesley J. High-magnesian andesite from Mount Shasta: a product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt[J]. *Geology*, 2007, 35(4): 351–354.
- Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and pro-

- cesses [C]. In: Saunders Ad and Norry MJ (eds.). Magmatism in Ocean Basins. London: Geological Society Publication, 1989, 42: 313–345.
- Tatsumi Y. High-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, SW Japan: Analogy to Archean magmatism and continental crust formation? [J]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 2006, 34: 467–499.
- Wang C M, Bagas L, Lu Y J, et al. Terrane boundary and spatio-temporal distribution of ore deposits in the Sanjiang Tethyan Orogen: Insights from zircon Hf-isotopic mapping [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 156: 39–65.
- Wang S J, Brown M. Making Andesite Through Shallow Hybridization of Magmas Derived from Variably Enriched Lithospheric Mantle [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2023, 128: e2023JB026402.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164: 31–47.
- Wood B J, Turner S P. Origin of primitive high-Mg andesite: constraints from natural examples and experiments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 283(1–4): 59–66.
- Xia L Q, Li X M. Revisiting the tectonic setting of the Carboniferous volcanic rocks in the Chinese Tianshan and its neighboring areas [J]. *Gondwana Research*, 2020, 84: 1–19.
- 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 American Bulletin*, 2004, 116: 419–433.
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1316–1341.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Orogens, Sutures, and Terminal Accretion [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43(1): 477–507.
- Yu X Q, Wang Z X, Zhou X, et al. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of volcanic rocks from the Dahalajunshan Formation: implications for Late Devonian-Middle Carboniferous tectonic evolution of the Chinese western Tianshan [J]. *International Journal of Earth Science*, 2016, 105: 1637–1661.