

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*

刘冬冬 郭召杰** 张志诚 吴朝东

LIU DongDong, GUO ZhaoJie**, ZHANG ZhiCheng and WU ChaoDong

造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2011-07-03 收稿, 2011-11-06 改回.

Liu DD, Guo ZJ, Zhang ZC and Wu CD. 2012. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7):2355–2368

Abstract Latest Paleozoic (former Early Permian) volcanic rocks of Arbasay Formation are represented by typical intermediate-basic, acidic volcanic rocks and pyroclastic rocks, in south margin of Junggar basin, northern to Bayingou ophiolite belt. By means of SHRIMP zircon U-Pb dating, the age of Arbasay volcanic rocks is 307.2 ± 1.3 Ma (MSWD = 1.2), which indicates that Arbasay volcanic rocks were erupted in Late Carboniferous, not Early Permian. The volcanic rocks are characterized by enrichment in LREE and LILE, belonging to calc-alkaline and high-K calc-alkaline series, and have obviously negative anomaly in Nb, Ta. Specially, rhyolites have Ba, Sr, Eu, P and Ti anomalies. Positive $\epsilon_{Nd}(t)$ (+4.21 ~ +7.79) suggests a depleted mantle-related source. The geochemistry characteristics of Arbasay Formation rhyolites are similar to post-collisional A-type granites widely distributed in North Xinjiang (Junggar basin, Yili Block), which implies they should have the same geologic setting. A suit of volcanic sedimentary rocks in Arbasay Formation manifests that deposition in southern margin area of Junggar basin started at Late Carboniferous. With the similarity between Arbasay volcanic rocks, pyroclastic rocks and post-collisional granites in petrology and geochemistry, the proto-type of Late Paleozoic southern Junggar basin should be extensional depression basin.

Key words Southern Junggar basin; Latest Paleozoic volcanic rocks; Zircon SHRIMP U-Pb dating; Geochemistry characteristics; Post-collision; Extensional depression basin

摘要 准噶尔盆地南缘沿巴音沟蛇绿岩带北侧发育一套晚古生代(原下二叠统)阿尔巴萨依组中性、酸性火山岩夹火山碎屑岩。采用锆石 SHRIMP U-Pb 定年方法,对其中流纹岩进行定年,得到年龄为 307.2 ± 1.3 Ma (MSWD = 1.2),表明原定为早二叠世的阿尔巴萨依组火山岩的确切喷发时间为晚石炭世。地球化学分析表明,阿尔巴萨依组火山岩为钙碱性和高钾钙碱性系列,富集轻稀土(LREE),轻重稀土有一定程度的分馏,富集大离子亲石元素(LILE),亏损 Nb、Ta 等高场强元素,流纹岩有 Ba、Sr、P、Eu、Ti 的异常。阿尔巴萨依组火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在 +4.21 ~ +7.79 之间,显示源区富集特征。晚石炭世阿尔巴萨依组火山岩、火山碎屑岩与后碰撞 A 型花岗岩在岩石学、地球化学特征方面相似,表明两者应有相似的构造背景,都为后碰撞伸展环境。阿尔巴萨依组还发育一套火山沉积地层,表明准噶尔南缘沉积作用在晚石炭世已经开始,开始沉积盆地的类型应为伸展断陷盆地。

关键词 准噶尔南缘; 古生代晚期火山岩; 锆石 SHRIMP 定年; 地球化学特征; 后碰撞; 伸展断陷盆地

中图法分类号 P588.14; P597.3

* 本文受国家科技重大专项(2011ZX05009-001)资助。

第一作者简介:刘冬冬,男,1987年生,硕士生,构造地质学专业,E-mail: silencewise@163.com

** 通讯作者:郭召杰,男,1963年生,教授,构造地质学专业,E-mail: zjguo@pku.edu.cn

1 引言

天山造山带是一系列微陆块、岛弧地体及镶嵌于其间不同时期的褶皱带为主的复合造山带,是中亚巨型复合造山带的一部分(肖序常等,1990;何国琦等,1994;李锦轶和肖序常,1999)。造山带夹持于准噶尔地块和塔里木板块之间,是世界上最复杂的造山带之一(Charvet *et al.*,2011;舒良树等,2004)。

天山由北向南分布有三条重要的古生代蛇绿混杂岩带,分别是北天山巴音沟蛇绿岩带、中天山干沟-米什沟蛇绿混杂岩带和南天山库米什-米斯布拉克-红柳河蛇绿混杂岩带,它们的组成结构及其所揭示的大地构造含义一直是国内外研究的热点问题(Charvet *et al.*,2011;肖序常等,1990;何国琦等,1994;高俊等,1995;李锦轶和肖序常,1999;夏林圻等,2002)。关于北天山缝合带的闭合时限,前人的研究较多,总体观点认为是在古生代晚期(Han *et al.*,2009; Charvet *et al.*,2011;夏林圻等,2002)。特别地,位于准噶尔盆地南缘的巴音沟蛇绿岩带,Han *et al.* (2009)限定其闭合时限在 325~316Ma 范围内。

据新疆维吾尔自治区石场幅(K45-II)1:20万区域地质报告(新疆维吾尔自治区地质局,1978^①)(以下简称石场幅)描述,准噶尔盆地南缘的沉积充填开始于古生代晚期,第一套充填层系为下二叠统阿尔巴萨依组,为一套火山岩夹火山碎屑岩地层。天山北缘盆山关系研究还存在重要分歧,主要有两种观点,一种观点认为是前陆盆地(陈书平等,2001;何登发等,2004;贾承造等,2005;宋岩等,2006),另一种观点认为是断陷盆地(方世虎等,2006;韩宝福等,2006;李本亮等,2007)。本文将通过对阿尔巴萨依组沉积充填特征和火山岩年代学、地球化学研究,为天山北缘盆地开始形成的时限,盆地的类型的讨论提供重要依据。

2 区域地质特征

研究区位于准噶尔盆地南缘,巴音沟蛇绿岩带北侧(图1b),周围出露大量花岗岩体,部分花岗岩体切穿了蛇绿岩混杂带(Han *et al.*,2009;徐学义等,2005,2006),表明花岗岩侵入时间在北天山洋闭合之后。Han *et al.* (2009)对这些花岗岩体进行了详细的锆石 SHRIMP U-Pb 定年,得到其年龄在 315~266Ma 范围内,与天山北部准噶尔盆地相对应,属于后碰撞期。

研究区地层单元上属于依连哈比尔尕小区。根据石场幅区域地质报告,依连哈比尔尕地区出露中泥盆统、上石炭统及下二叠统。本文的研究区域集中在头道河子和阿尔巴萨依一带,出露上石炭统和下二叠统,以及新生代地层。长期以来,该地区古生代地层单元的划分,时代归属和名称使用等均不统一,存在争议。总体观点认为(肖序常等,1992;

夏林圻等,2002),该区广泛分布的泥盆-石炭纪地层为一套拉伸作用形成的火山-碎屑岩系,该区地层以火山岩为主,碎屑岩相对较少,且都为浅海相近源沉积。

本文主要研究调查区内的阿尔巴萨依组地层。据石场幅区域地质报告,阿尔巴萨依组为一套火山岩、火山角砾岩夹火山碎屑岩,其时代的确定主要依据上下地层的接触关系,化石资料较少,新疆维吾尔自治区地质矿产局(1995)通过地层对比将其划分为下二叠统。

本文对准噶尔南缘的阿尔巴萨依组地层进行了详细的野外观察,并进行了系统的采样,在流纹岩中挑选锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年,并对该组火山岩样品进行了地球化学和同位素特征分析,准确限定阿尔巴萨依组的形成时限,并探讨这套火山岩的形成机制,进而分析该地区晚古生代区域构造特征。

3 火山岩分布和岩石学特征

3.1 火山岩分布特征

新疆维吾尔自治区地质矿产局(1995)对阿尔巴萨依组的描述是:下部为紫红色凝灰砾岩、砾岩、砂砾岩夹霏细纳长斑岩、酸性火山角砾岩及凝灰岩;上部为灰紫色安山玢岩(向东局部为橄榄玄武玢岩)夹流纹斑岩、霏细斑岩、英安斑岩及凝灰砂岩。

通过野外实地观察,阿尔巴萨依组为中基性、酸性火山岩夹火山碎屑岩沉积。金沟河地区阿尔巴萨依组地层野外实测剖面(图1b中AA')显示:该组地层主要为火山岩和凝灰岩,并含少量砾岩。火山岩主要为玄武岩、安山玄武岩,含部分粗面安山岩(占比例约为5%)、辉石安山岩(占比例约为5%);火山碎屑岩主要为凝灰岩及部分砾岩(砾岩所占比例约为15%),砾岩砾石分选性差,磨圆中等,砾石为火山质成分,粒度小的直径只有0.5cm,大的有50cm,为近源沉积。剖面(图2)岩性描述如下:

——第四系覆盖——

- | | |
|--------------------------|--------|
| 10. 致密安山岩,没有明显晶体颗粒,类似隐晶质 | 278.3m |
| 9. 块状辉绿岩 | 122.3m |
| 8. 灰绿色包裹辉绿质颗粒安山玄武岩 | 153.7m |
| ——露头差—— | |
| 7. 灰绿色安山玄武岩 | 125.2m |
| 6. 灰黑色含气孔、杏仁玄武岩 | 172.6m |
| 5. 灰绿色岩屑晶屑凝灰角砾岩(岩屑晶屑较少) | 182.7m |
| 4. 分选差,磨圆中等砾岩,砾石为火山质 | 45.3m |
| 3. 灰黑色致密块状凝灰岩 | 245.2m |

① 新疆维吾尔自治区地质局. 1978. 中华人民共和国区域地质矿产报告石场幅(K45-II)

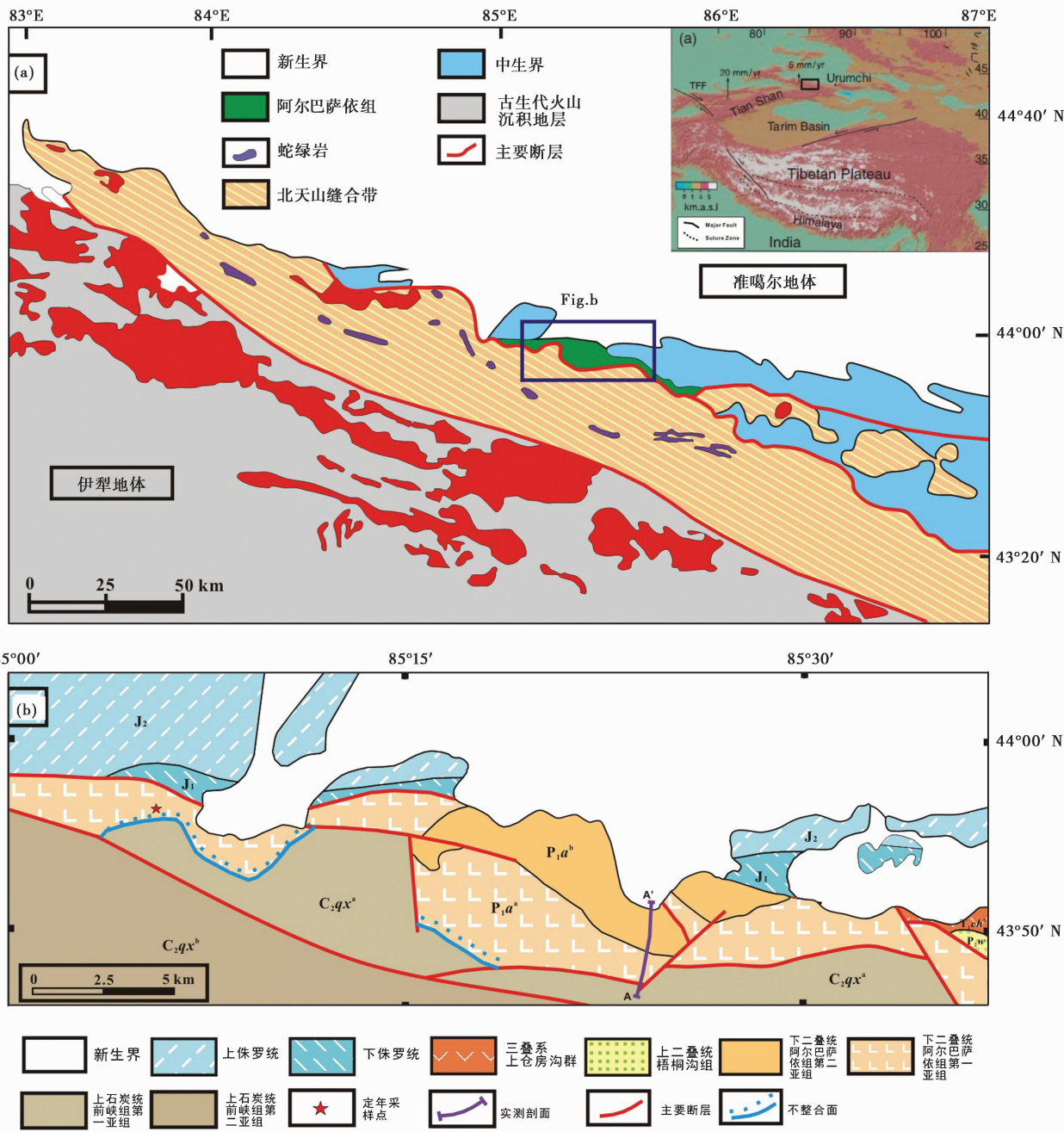


图1 天山北部地质缩略图(a, 据 Han *et al.*, 2009 修改) 和依连哈比尔尕地区地质简图(b, 据新疆维吾尔自治区地质局, 1978 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the North Tianshan (a, after Han *et al.*, 2009) and simplified geological map of Eren Habirga area (b), North Tianshan

- 2. 紫红色火山熔岩 98.3m
 - 1. 暗紫红色(火山)(粗粒)岩屑晶屑凝灰角砾岩 175.7m
- 断层——

上石炭统前峡组(C₂qx)灰黑色含角砾凝灰岩
除了在金沟河地区观察到阿尔巴萨依组地层外, 笔者在图 1b 中小鹿角湾(星号位置), 以及东南部的东大塘地区都

观察到了阿尔巴萨依组地层。在小鹿角湾地区阿尔巴萨依组火山岩以浅色的流纹岩为主, 而在东大塘地区以中基性火山岩和砾岩、少量粗砂岩为主。在小鹿角湾和金沟河地区都采集了典型样品, 磨片进行了镜下观察。

3.2 火山岩的岩石学特征

野外露头观察阿尔巴萨依组主要以火山岩和火山碎屑

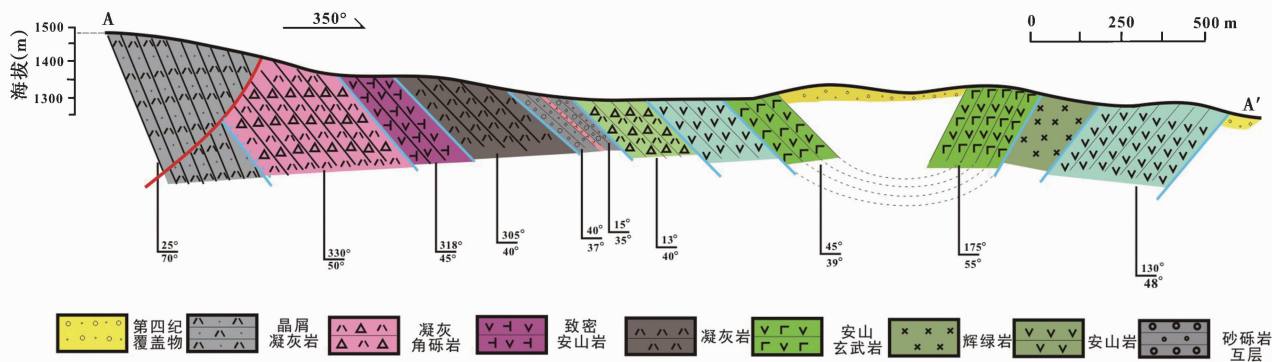


图2 新疆金沟河地区晚古生代地层实测剖面图

Fig. 2 Cross-section of Late Paleozoic strata in Jingouhe area, Xinjiang

岩为主。火山岩蚀变程度低,具有明显的气孔杏仁结构(图3a, b),流纹岩整体为灰白色,具有明显的流纹构造,斑状结构,矿物条带遇斑晶绕过(图3c),在局部地区可以看到火山岩和沉积地层互层(图3d)。镜下特征显示,阿尔巴萨依组粗面安山岩具粗面结构,碱性长石微晶近平行排列,类似交织结构,但定向性相比其要强(图3e),还见部分辉石安山岩,镜下特征显示出明显的斑状结构,斑晶为普通辉石和部分绢云母化的中长石,基质由斜长石和重结晶的玻璃及少量磁铁矿组成,具玻晶交织结构。玄武岩具斑状结构,斑晶含量约为10%左右,主要为斜长石,斑晶呈半自形-自形板状,基质为玻基交织结构,斜长石和碱性长石呈半定向排列,微晶之间有玻璃质或隐晶质充填(图3f)。

4 火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年

4.1 样品和分析方法

为了精确限定阿尔巴萨依组地层的时代,对该组火山岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年。定年样品采自图1b中星号位置,岩石为灰白色流纹岩,具斑状结构,斑晶主要为钾长石和石英。样品的锆石分选在廊坊河北省区域地质调查研究院进行,先用常规方法分选,最后在双目显微镜下挑纯,将锆石和数粒标样 TEMORA 粘在环氧树脂胶上,然后磨至一半,使锆石内部暴露,然后抛光,镀金。测试前在北京大学造山带与地壳演化实验室和北京大学显微镜室拍摄了可见光和阴极发光(CL)照片(图4)。样品的锆石 U-Pb 年龄数据测定工作在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的网络虚拟实验室完成。通过 SHRIMP 远程共享控制系统(SHRIMP Remote Operation System, SROS) 远程控制位于澳大利亚 Curtin 理工大学(Curtin University of Technology)的 SHRIMP II 仪器而获得的。SHRIMP 远程共享控制系统(SROS)由北京离子探针中心,中国计量科学研究院和吉林大学共同研发,可以实现通过 Internet 公共网络,远程控制

SHRIMP II 仪器,远程选取样品待测点和实时远程实验数据输出打印等功能。详细的分析流程和原理参考 Compston *et al.* (1992) 和宋彪等(2002)。用 TEMORA (417Ma) 进行元素间的分馏校正,应用标准锆石 SL13 (572Ma) 标定锆石的 U、Th、Pb 含量,应用实测²⁰⁴Pb校正锆石中的普通铅,标样和样品的分析按照 1 : 3 进行,单个数据点的误差均为 1 σ ,加权平均年龄计算使用 ISOPLLOT 软件,其置信度为 95%。年龄计算过程中使用的衰变常数依据 Steiger and Jager (1977)。

4.2 锆石特征

阿尔巴萨依组的火山岩锆石颗粒自形程度好,发育清晰的岩浆结晶环带(图4)。锆石的 Th/U 比值较集中,介于 0.43 ~ 0.64 之间(表1),Th、U 之间具有较好的正相关性,表明锆石是从成分相对均匀的岩浆中结晶出来的,因此测定的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值可以代表阿尔巴萨依组火山岩中锆石的结晶年龄,即代表火成岩的成岩时代。

4.3 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果

阿尔巴萨依组流纹岩 14 颗锆石的测试数据见表1,可以看出定年的年龄较集中,14 个分析点的年龄值集中在 301 ~ 313Ma 之间,利用 ISOPLLOT 程序进行年龄加权平均值计算及谐和图的绘制,在谐和图(图4)上,所有数据都位于谐和线附近,14 个分析点数据²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 307.2 \pm 1.3Ma (MSWD = 1.2),时代为晚石炭世,表明原定为早二叠世的阿尔巴萨依组火山岩的确切喷发时间为晚石炭世。

5 火山岩地球化学特征

从阿尔巴萨依组火山岩中挑选了 14 个样品进行了主量元素、稀土、微量元素和 Sr、Nd 同位素的地球化学分析。所有样品的主量元素的测定工作在北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室完成,采用 XRF 测定方法,分析误差小

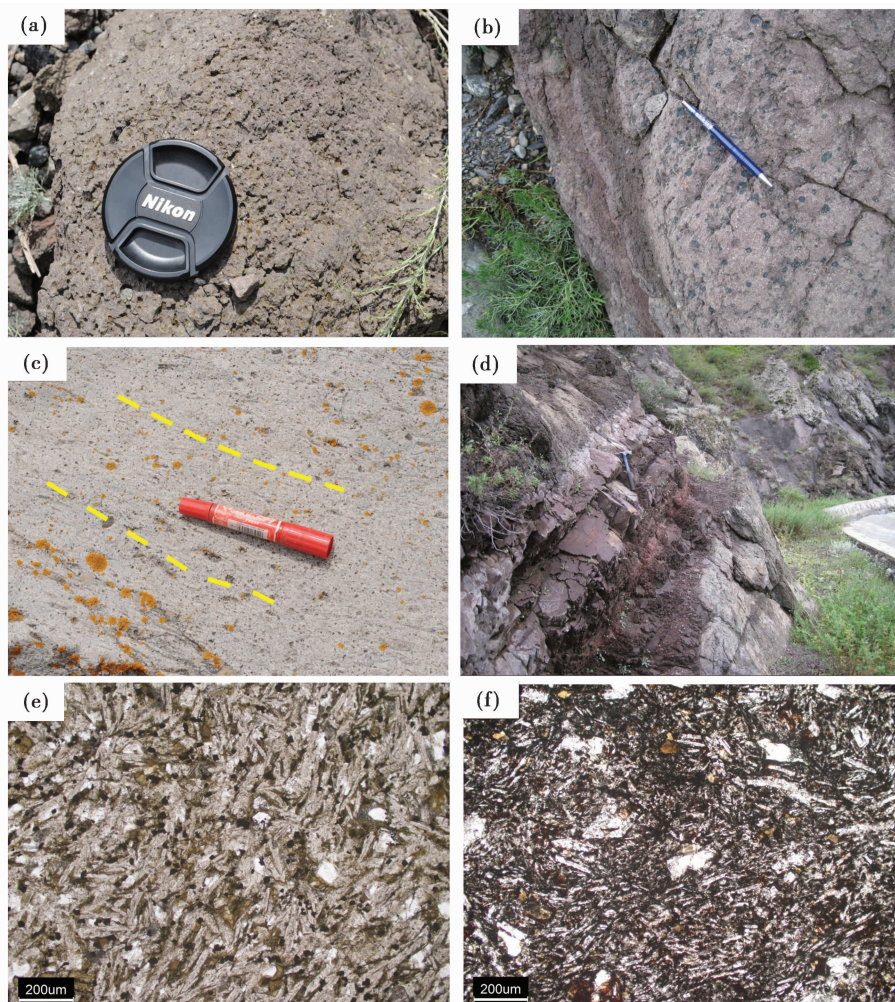


图3 阿尔巴萨依组火山岩野外特征和镜下特征

(a)-安山岩发育气孔结构; (b)-玄武岩发育杏仁结构; (c)-流纹岩具有典型流纹构造; (d)-火山岩和泥页岩互层; (e)-粗面安山岩碱性长石微晶近于平行排列; (f)-玄武岩斑晶主要为斜长石, 基质为玻基交织结构

Fig. 3 Field characteristics and micrographs of volcanic rocks in Arbasay Formation

(a)-pore structure of andesites; (b)-almond structure of basalts; (c)-rhyolite structure; (d)-volcanic rocks interbedded with mud shale; (e)-alkali feldspar microcrystalline of trachyandesite are nearly parallel; (f)-basalts have plagioclase phenocryst, the matrix have glass basis interleaving texture

于3%, 分析数据见表2。微量元素、稀土和 Sr、Nd 同位素测定工作由核工业北京地质研究院分析测试研究所完成, 分析数据见表2、表3。微量元素采用 ICP-MS 方法测定, 分析方法参考刘颖等(1996), 分析误差小于5%, Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素数据采用双稀释法在 VG354 热离子质谱仪上测定, Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素质量分馏分别用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化, 其分析技术和流程参见 Qiao (1988)。

5.1 主量元素

研究区采集的十四个样品指示一个强分散性的主量元素组成(表2), SiO_2 含量从 46.344% 到 76.096% 变化, 表明研究区火山岩酸性、中性、基性都有。实地考察结果显示, 金

沟河附近的阿尔巴萨依组火山岩主要为中性安山岩和基性玄武岩, 而鹿角湾一带的阿尔巴萨依组火山岩主要为流纹岩。样品全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量介于 4.04% 和 9.05% 之间, SiO_2 - K_2O (硅碱) 图(图5) 指示样品属于中钾和高钾钙碱性系列, 结合 SiO_2 - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (TAS) 图解(图5) 可以看出, 样品岩性组合多样, 反应岩浆组合非常复杂, 从玄武岩、安山岩, 到长英质的流纹岩都有, 反应岩浆在形成和运移过程中的分离结晶和大陆地壳混染作用。

主量元素 Harker 图解(图6) 显示, 研究区火山岩样品的 SiO_2 与大多数主量元素具有较好的相关性, 其中 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 $\text{Mg}^\#$ 、 MnO 、 P_2O_5 、 TiO_2 与 SiO_2 呈现较好的负相关, K_2O 与 SiO_2 呈现较好的正相关, 反应同源岩浆的演化特征和岩浆分离结晶演化的趋势。样品 TS09-36 较特殊, 其

表 1 阿尔巴萨依组流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb data of zircons from rhyolite in Arbasay Formation

| 测点号 | U ($\times 10^{-6}$) | Th ($\times 10^{-6}$) | $^{232}\text{Th}/$ ^{238}U | $^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$) | $^{206}\text{Pb}_c$ (%) | $^{207}\text{Pb}^*/$ $^{206}\text{Pb}^*$ | $\pm\%$ | $^{207}\text{Pb}^*/$ ^{235}U | $\pm\%$ | $^{206}\text{Pb}^*/$ ^{238}U | $\pm\%$ | 误差相 关系数 | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma) |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--|---|----------------------------|---|---------|--|---------|--|---------|------------|---|
| TS09-9-1 | 838 | 454 | 0.56 | 35.1 | 0.34 | 0.05253 | 1.1 | 0.3525 | 1.3 | 0.04867 | 0.76 | 0.579 | 305.6 \pm 2.3 |
| TS09-9-2 | 514 | 306 | 0.62 | 21.3 | 0.19 | 0.05368 | 1.4 | 0.357 | 1.6 | 0.04824 | 0.82 | 0.517 | 302.6 \pm 2.4 |
| TS09-9-3 | 1110 | 683 | 0.64 | 46.6 | — | 0.05194 | 0.95 | 0.3493 | 1.2 | 0.04877 | 0.74 | 0.615 | 307.5 \pm 2.2 |
| TS09-9-4 | 746 | 430 | 0.6 | 31.3 | 0.18 | 0.05138 | 1.1 | 0.3456 | 1.4 | 0.04879 | 0.77 | 0.56 | 306.9 \pm 2.3 |
| TS09-9-5 | 346 | 144 | 0.43 | 14.4 | 0.27 | 0.05325 | 1.6 | 0.3546 | 1.8 | 0.0483 | 0.88 | 0.477 | 303.2 \pm 2.6 |
| TS09-9-6 | 533 | 221 | 0.43 | 22 | 0.27 | 0.05403 | 1.3 | 0.3579 | 1.5 | 0.04804 | 0.81 | 0.529 | 301.5 \pm 2.4 |
| TS09-9-7 | 561 | 283 | 0.52 | 23.4 | — | 0.05192 | 1.4 | 0.3476 | 1.6 | 0.04855 | 0.82 | 0.504 | 306.3 \pm 2.5 |
| TS09-9-8 | 639 | 307 | 0.5 | 27 | — | 0.05105 | 1.3 | 0.3453 | 1.5 | 0.04906 | 0.8 | 0.52 | 309.8 \pm 2.4 |
| TS09-9-9 | 339 | 207 | 0.63 | 14.4 | 0.73 | 0.05308 | 1.7 | 0.3613 | 1.9 | 0.04937 | 0.89 | 0.466 | 308.8 \pm 2.8 |
| TS09-9-10 | 460 | 191 | 0.43 | 19.4 | 0.64 | 0.0532 | 2.2 | 0.3594 | 2.3 | 0.04902 | 0.84 | 0.357 | 306.9 \pm 2.6 |
| TS09-9-11 | 716 | 366 | 0.53 | 30.7 | 0.15 | 0.05218 | 1.2 | 0.3586 | 1.4 | 0.04984 | 0.78 | 0.559 | 313.4 \pm 2.4 |
| TS09-9-12 | 622 | 321 | 0.53 | 26.3 | 0.4 | 0.04953 | 1.3 | 0.3345 | 1.6 | 0.04899 | 0.8 | 0.513 | 308.2 \pm 2.4 |
| TS09-9-13 | 506 | 251 | 0.51 | 21.3 | 0.17 | 0.05425 | 1.3 | 0.3661 | 1.6 | 0.04894 | 0.82 | 0.521 | 307.7 \pm 2.5 |
| TS09-9-14 | 677 | 326 | 0.5 | 28.8 | 0.16 | 0.0513 | 2 | 0.3487 | 2.1 | 0.04935 | 0.79 | 0.37 | 310.8 \pm 2.4 |

注:误差为 1σ , Pb^* 和 Pb_c 分别代表放射成因的和普通铅,普通铅用测定的 ^{204}Pb 校正

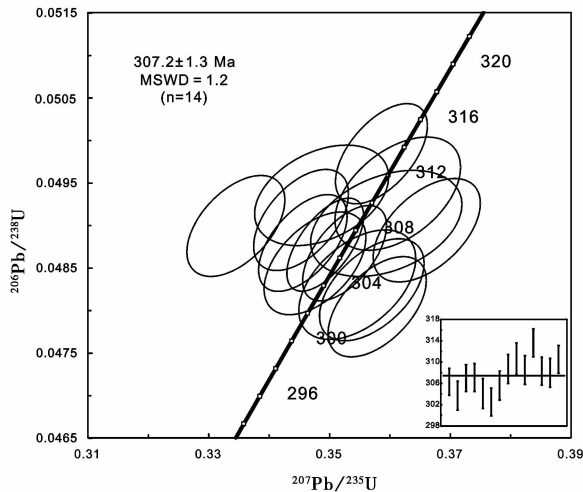
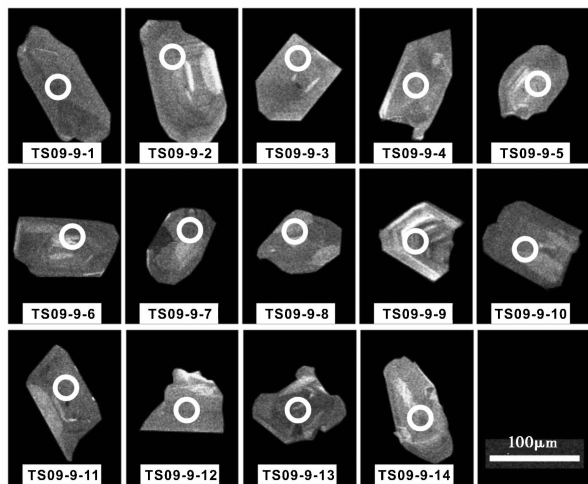


图 4 阿尔巴萨依组流纹岩锆石阴极发光 (CL) 图像和 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 CL images and concordia diagram of SHRIMP U-Pb data of rhyolite in Arbasay Formation

Fe_2O_3^T , TiO_2 含量较其他样品明显偏高,显微镜下观察,样品中含较多的钛铁矿,故而解释了其 Fe_2O_3^T , TiO_2 含量偏高的特征。

5.2 稀土元素

研究区火山岩稀土元素组成测试结果见表 2,球粒陨石标准化图解 (图 7) 显示,除了 TS09-36 之外,样品可分为两类,流纹岩样品 TS09-9-1、TS09-9-5、TS09-9-7、TS09-11-4 作为一类,其他中基性岩样品作为一类。

酸性样品稀土元素总量 ΣREE 介于 215.8×10^{-6} 和 287.3×10^{-6} 之间,平均值为 244.0×10^{-6} , LREE 的值介于 184.5×10^{-6} 和 248.1×10^{-6} 之间,平均值为 209.7×10^{-6} , HREE 介于 30.12×10^{-6} 和 36.91×10^{-6} 之间,平均值为 34.39×10^{-6} 。LREE/HREE 的值在 5.51 ~ 6.73 变化, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值在 4.61 ~ 6.41 变化, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值在 2.87 ~ 3.01 变化, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值在 0.99 ~ 1.47 之间变化 (球粒陨石标准化数值参考 Sun and McDonough, 1989)。

除 TS09-36 之外其他中基性岩样品 ΣREE 介于 $76.03 \times$

表 2 阿尔巴萨依组火山岩主量元素(wt%)、微量元素($\times 10^{-6}$)组成Table 2 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) of volcanic rocks in Arbasay Formation

| 样品号 | TS09-9-1 | TS09-9-5 | TS09-9-7 | TS09-10-1 | TS09-10-2 | TS09-11-4 | TS09-23 | TS09-27 | TS09-28 | TS09-30 | TS09-31-1 | TS09-31-2 | TS09-32-2 | TS09-36 |
|---|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|
| SiO ₂ | 74.72 | 73.29 | 76.10 | 56.22 | 58.33 | 74.27 | 59.53 | 49.56 | 46.34 | 52.93 | 49.73 | 51.68 | 63.58 | 48.06 |
| Al ₂ O ₃ | 13.15 | 13.21 | 12.43 | 17.14 | 15.05 | 14.07 | 15.8 | 17.54 | 17.92 | 15.7 | 16.49 | 17.17 | 13.16 | 15.89 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | 1.27 | 3.53 | 1.32 | 7.02 | 7.25 | 1.28 | 7.84 | 8.97 | 10.92 | 9.77 | 9.86 | 9.57 | 6.11 | 15.76 |
| CaO | 0.1 | 0.62 | 0.35 | 3.4 | 3.28 | 1.25 | 7.26 | 8.02 | 9.04 | 9.34 | 8.91 | 8.64 | 3.09 | 4.88 |
| MgO | 0.4 | 0.24 | 0.03 | 4.26 | 3.41 | 1.08 | 1.88 | 6.23 | 7.12 | 5.03 | 6.1 | 5.47 | 1.76 | 1.95 |
| K ₂ O | 4.86 | 4.16 | 5.07 | 0.96 | 0.96 | 3.96 | 1.55 | 1.08 | 0.48 | 0.74 | 0.7 | 0.89 | 3.04 | 0.63 |
| Na ₂ O | 4.17 | 3.32 | 3.98 | 5.84 | 6.44 | 0.57 | 3.93 | 4.48 | 3.66 | 3.30 | 4.07 | 3.4 | 3.00 | 6.56 |
| MnO | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.16 | 0.19 | 0.03 | 0.17 | 0.15 | 0.12 | 0.12 | 0.14 | 0.15 | 0.07 | 0.15 |
| TiO ₂ | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 1.04 | 1.10 | 0.61 | 0.88 | 1.31 | 1.68 | 1.39 | 1.45 | 1.40 | 0.77 | 3.32 |
| P ₂ O ₅ | 0.00 | 0.01 | 0 | 0.31 | 0.36 | 0.01 | 0.24 | 0.21 | 0.34 | 0.23 | 0.25 | 0.24 | 0.16 | 0.92 |
| Mg [#] | 41 | 13 | 4 | 57 | 51 | 65 | 35 | 61 | 59 | 53 | 58 | 56 | 39 | 22 |
| LOI | 1.22 | 1.49 | 0.6 | 3.51 | 3.48 | 2.82 | 0.82 | 2.33 | 2.28 | 1.34 | 2.18 | 1.29 | 5.19 | 1.78 |
| Total | 99.96 | 99.96 | 99.96 | 99.87 | 99.85 | 99.95 | 99.9 | 99.88 | 99.9 | 99.9 | 99.88 | 99.9 | 99.93 | 99.89 |
| Li | 14.8 | 30.3 | 12.5 | 13.6 | 14 | 24.3 | 12.6 | 18.5 | 14.7 | 12.2 | 13.5 | 9.17 | 30.5 | 17.9 |
| Be | 1.3 | 3.22 | 1.43 | 0.813 | 0.34 | 1.86 | 0.501 | 0.727 | 0.079 | 0.699 | 0.327 | 0.617 | 0.86 | 1.16 |
| Sc | 0.863 | 1.61 | 1.1 | 20 | 20.2 | 0.931 | 25.8 | 30.5 | 30.8 | 30.7 | 30.1 | 30.3 | 17.4 | 27.9 |
| V | 5.8 | 26.5 | 9.19 | 140 | 146 | 11.4 | 162 | 206 | 222 | 190 | 198 | 212 | 103 | 210 |
| Cr | 1.08 | 2.66 | 0.411 | 47.3 | 51.5 | 0.473 | 3.4 | 147 | 66.2 | 148 | 148 | 141 | 48.1 | 2.33 |
| Co | 0.381 | 0.379 | 0.334 | 20.1 | 20.9 | 0.389 | 19.5 | 32.5 | 41 | 30.6 | 33.1 | 33.2 | 10.2 | 31 |
| Ni | 2.11 | 2.36 | 1.9 | 20 | 21.8 | 1.18 | 5.32 | 37.4 | 73.8 | 37.6 | 39.2 | 38.2 | 28 | 15.3 |
| Cu | 4.74 | 7.06 | 4.01 | 27.6 | 33.4 | 6.58 | 38.9 | 38.9 | 44.1 | 54 | 22.5 | 41.5 | 37.8 | 23.7 |
| Zn | 83.9 | 145 | 89.5 | 84.7 | 88.2 | 78.6 | 95.8 | 90.6 | 104 | 84.2 | 99.5 | 90.7 | 91.2 | 101 |
| Ga | 20 | 26.2 | 20.6 | 19.7 | 19.6 | 21.1 | 19.7 | 18.9 | 19.4 | 18.4 | 16.5 | 18.6 | 17.8 | 20.1 |
| Rb | 135 | 134 | 124 | 16.8 | 12.2 | 94.6 | 22.6 | 20.2 | 10.5 | 8.25 | 12.1 | 14.3 | 74.7 | 5.03 |
| Sr | 49.3 | 51.4 | 47.1 | 428 | 541 | 44.9 | 379 | 482 | 432 | 344 | 415 | 338 | 169 | 283 |
| Y | 48.5 | 57.4 | 42.8 | 26.4 | 27.1 | 57 | 22.9 | 26.7 | 28.8 | 26.9 | 27.3 | 27.8 | 25.9 | 94 |
| Nb | 12 | 12.8 | 11.1 | 7.38 | 7.5 | 12.2 | 2.1 | 3.48 | 5.19 | 3.44 | 3.63 | 3.65 | 6.25 | 10.5 |
| Hf | 8.19 | 8.04 | 7.55 | 4.59 | 4.71 | 8.32 | 2.62 | 3.39 | 3.78 | 3.35 | 3.41 | 3.59 | 3.96 | 7.35 |
| Mo | 0.541 | 0.509 | 0.493 | 0.916 | 1.03 | 0.658 | 0.954 | 0.356 | 1.21 | 0.497 | 0.705 | 0.74 | 0.493 | 0.955 |
| Cd | 0.099 | 0.156 | 0.078 | 0.142 | 0.205 | 0.117 | 0.093 | 0.094 | 0.133 | 0.095 | 0.114 | 0.118 | 0.14 | 0.216 |
| In | 0.107 | 0.107 | 0.081 | 0.059 | 0.061 | 0.085 | 0.063 | 0.06 | 0.071 | 0.058 | 0.065 | 0.069 | 0.071 | 0.1 |
| Sb | 0.754 | 0.729 | 0.37 | 0.131 | 0.146 | 0.501 | 0.15 | 0.083 | 0.235 | 0.082 | 0.099 | 0.107 | 0.804 | 0.135 |
| Cs | 1.00 | 1.55 | 0.573 | 0.569 | 0.545 | 1.17 | 0.469 | 0.735 | 0.571 | 0.183 | 0.298 | 0.224 | 8.77 | 0.143 |
| Ba | 49.4 | 25.7 | 53.6 | 678 | 671 | 232 | 414 | 350 | 194 | 247 | 294 | 268 | 290 | 306 |
| Ta | 0.945 | 1 | 0.89 | 0.504 | 0.499 | 0.915 | 0.133 | 0.227 | 0.364 | 0.239 | 0.243 | 0.251 | 0.574 | 0.641 |
| W | 0.853 | 1.15 | 0.736 | 0.376 | 0.372 | 0.909 | 0.306 | 0.195 | 1.01 | 0.243 | 0.317 | 0.199 | 0.677 | 0.273 |
| Re | 0 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | — | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0 | 0.003 | 0.001 |
| Tl | 0.519 | 0.415 | 0.392 | 0.078 | 0.064 | 0.287 | 0.081 | 0.095 | 0.041 | 0.021 | 0.062 | 0.039 | 0.192 | 0.046 |
| Pb | 21.1 | 22.6 | 24 | 9.35 | 14.2 | 18.7 | 6.31 | 4.94 | 6.88 | 4.95 | 5.31 | 4.33 | 12.5 | 7.58 |
| Bi | 0.163 | 0.13 | 0.049 | 0.064 | 0.067 | 0.031 | 0.062 | 0.034 | 0.065 | 0.028 | 0.038 | 0.079 | 0.486 | 0.029 |
| Th | 14.5 | 15 | 14.2 | 3.55 | 3.78 | 14.2 | 2.08 | 1.35 | 1.27 | 1.34 | 1.35 | 1.46 | 4.92 | 1.57 |
| U | 2.98 | 3.36 | 3.13 | 1.24 | 1.26 | 2.9 | 0.649 | 0.973 | 0.479 | 0.644 | 0.588 | 0.725 | 1.48 | 0.693 |
| Zr | 225 | 228 | 233 | 188 | 194 | 232 | 98.1 | 141 | 170 | 134 | 140 | 146 | 145 | 309 |
| La | 39.5 | 44.3 | 44.4 | 20.4 | 20.4 | 54.1 | 10.3 | 10 | 13 | 9.6 | 10.1 | 11 | 17.2 | 40.9 |
| Ce | 83.7 | 89.4 | 89.6 | 41.4 | 43.1 | 109 | 22.1 | 23.5 | 31.8 | 23.4 | 24.1 | 25.9 | 38.1 | 83.4 |
| Pr | 10.6 | 11.8 | 11.9 | 5.51 | 5.81 | 14.7 | 3.2 | 3.55 | 4.64 | 3.49 | 3.55 | 3.8 | 4.98 | 13.9 |
| Nd | 42.2 | 47.7 | 47.1 | 22.8 | 24.7 | 58 | 14.3 | 16.5 | 21.4 | 16.7 | 17.4 | 18.1 | 21.5 | 66.4 |
| Sm | 8.45 | 9.95 | 9.7 | 4.77 | 5.2 | 12.1 | 3.56 | 4.27 | 5.22 | 4.41 | 4.46 | 4.65 | 4.87 | 14.7 |
| Eu | 0.069 | 0.083 | 0.085 | 1.49 | 1.54 | 0.156 | 1.11 | 1.48 | 1.78 | 1.5 | 1.5 | 1.52 | 1.27 | 4.21 |

续表 2
Continued Table 2

| 样品号 | TS09-9-1 | TS09-9-5 | TS09-9-7 | TS09-10-1 | TS09-10-2 | TS09-11-4 | TS09-23 | TS09-27 | TS09-28 | TS09-30 | TS09-31-1 | TS09-31-2 | TS09-32-2 | TS09-36 |
|----------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Gd | 7.33 | 9.11 | 8.27 | 4.68 | 4.96 | 10.8 | 3.57 | 4.15 | 5.09 | 4.53 | 4.47 | 4.75 | 4.44 | 15.4 |
| Tb | 1.33 | 1.79 | 1.43 | 0.871 | 0.905 | 2.01 | 0.688 | 0.832 | 0.978 | 0.859 | 0.855 | 0.909 | 0.801 | 2.69 |
| Dy | 7.71 | 9.75 | 7.64 | 4.65 | 4.98 | 10.6 | 4.08 | 4.6 | 5.12 | 4.83 | 4.81 | 5.24 | 4.65 | 15 |
| Ho | 1.7 | 2.03 | 1.54 | 0.927 | 0.963 | 2.08 | 0.835 | 0.955 | 1.07 | 0.991 | 0.999 | 1.07 | 0.926 | 3.08 |
| Er | 5.29 | 5.91 | 4.5 | 2.63 | 2.78 | 5.82 | 2.38 | 2.7 | 3.07 | 2.81 | 2.83 | 3.02 | 2.76 | 8.85 |
| Tm | 0.921 | 1.01 | 0.815 | 0.418 | 0.437 | 0.971 | 0.392 | 0.445 | 0.487 | 0.448 | 0.452 | 0.495 | 0.47 | 1.36 |
| Yb | 6.14 | 6.37 | 5.16 | 2.73 | 2.69 | 6.05 | 2.55 | 2.64 | 2.99 | 2.63 | 2.77 | 2.97 | 2.8 | 7.97 |
| Lu | 0.885 | 0.935 | 0.768 | 0.405 | 0.425 | 0.907 | 0.388 | 0.405 | 0.447 | 0.413 | 0.433 | 0.448 | 0.449 | 1.3 |
| La/Nb | 4.94 | 4.99 | 4.81 | 4.95 | 4.86 | 4.61 | 4.54 | 4.59 | 4.52 | 4.63 | 4.89 | 4.2 | 2.75 | 3.9 |
| Nb/U | 15.94 | 8.26 | 9.75 | 20.09 | 7.66 | 10.91 | 13.31 | 11.88 | 11.9 | 11.85 | 9.43 | 36.97 | 4.22 | 15.15 |
| Nb/Y | 3.96 | 4.14 | 4.25 | 3.95 | 4.47 | 4.65 | 4.61 | 4.79 | 4.9 | 4.76 | 4.32 | 4.78 | 0.24 | 0.11 |
| (La/Yb) _N | 4.61 | 4.99 | 6.17 | 5.36 | 5.44 | 6.41 | 2.9 | 2.72 | 3.12 | 2.62 | 2.62 | 2.66 | 4.41 | 3.68 |
| (La/Sm) _N | 3.02 | 2.87 | 2.95 | 2.76 | 2.53 | 2.89 | 1.87 | 1.51 | 1.61 | 1.41 | 1.46 | 1.53 | 2.28 | 1.8 |
| (Gd/Yb) _N | 0.99 | 1.18 | 1.33 | 1.42 | 1.53 | 1.48 | 1.16 | 1.3 | 1.41 | 1.42 | 1.33 | 1.32 | 1.31 | 1.6 |
| ∑REE | 215.83 | 240.14 | 232.91 | 113.68 | 118.89 | 287.29 | 69.45 | 76.03 | 97.09 | 76.61 | 78.73 | 83.87 | 105.22 | 279.16 |
| δEu | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.96 | 0.93 | 0.04 | 0.95 | 1.07 | 1.06 | 1.03 | 1.03 | 0.99 | 0.83 | 0.86 |
| δCe | 1.0 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.95 | 0.94 | 0.97 | 1.0 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 1.01 | 0.86 |

注: $Fe_2O_3^T$ 是以 Fe_2O_3 表示的铁总量; $Mg^{\#} = 100 * Mg^{2+} / (Mg^{2+} + 0.9Fe^T)$. $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、 $(Gd/Yb)_N$ 为球粒陨石标准化比值, 标准化数值参考 Sun and McDonough, 1989

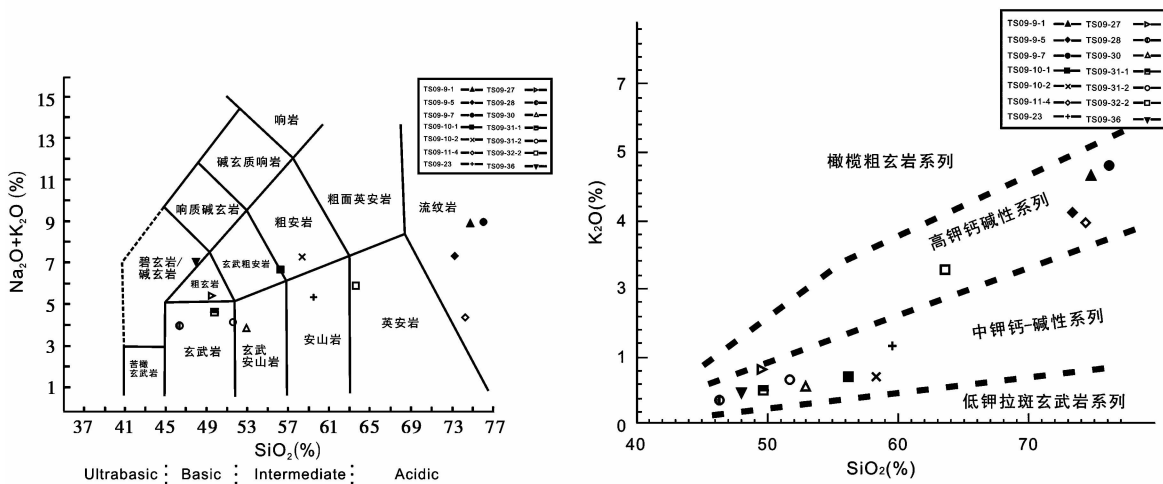


图 5 阿尔巴萨依组火山岩 TAS 图解(岩石类型边界引自 Le Bas *et al.*, 1986) 和 SiO_2 - K_2O 图解(岩石类型边界引自 Rickwood, 1989)

Fig. 5 TAS diagram (boundaries of rock type after Le Bas *et al.*, 1986) and SiO_2 - K_2O diagram (boundaries of rock type after Rickwood, 1989) of Arbasay Formation

10^{-6} 和 118.9×10^{-6} 之间, 平均值为 91.06×10^{-6} 。LREE 的值介于 59.10×10^{-6} 和 100.8×10^{-6} 之间, 平均值为 73.55×10^{-6} , HREE 的值介于 14.88×10^{-6} 和 19.25×10^{-6} 之间, 平均值为 17.52×10^{-6} 。LREE/HREE 的值在 3.88 ~ 5.57 变化, $(La/Yb)_N$ 值在 2.62 ~ 5.43 变化, $(La/Sm)_N$ 值在 1.41 ~ 2.76 变化, $(Gd/Yb)_N$ 值在 1.16 ~ 1.53 之间变化。

流纹岩样品 δEu 值为 0.03 ~ 0.04, 有强的 Eu 负异常, 与

流纹岩中斜长石分离结晶作用有关。而中基性岩样品 δEu 值介于 0.83 ~ 1.07 之间, 接近 1, 几乎没有 Eu 的异常。总体说来, 所有样品都具有轻重稀土分异明显的特征, $(La/Yb)_N$ 值介于 2.62 ~ 6.41 之间。 $(La/Sm)_N$ 值介于 1.41 ~ 3.01, $(Gd/Yb)_N$ 值介于 0.99 ~ 1.53, 表明都具有轻稀土较重稀土要富集的特点。所有样品 δCe 的值变化在 0.94 ~ 1.01 之间, 基本没有 Ce 的负异常。TS09-36 样品稀土含量较其他中基

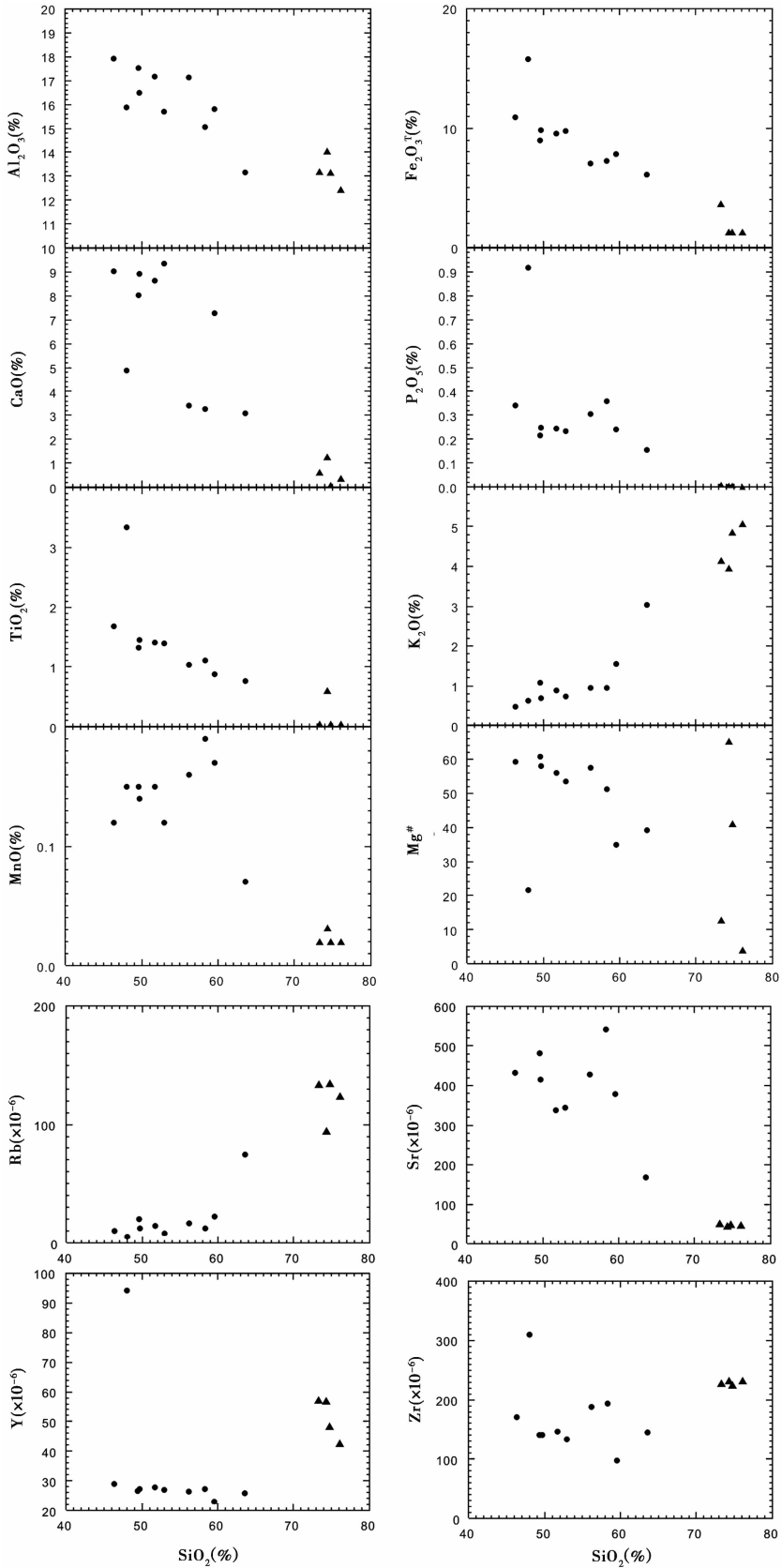


图6 阿尔巴萨依组火山岩主要元素和微量元素哈克图解

Fig. 6 Harker diagrams for major elements and trace elements of Arbasay Formation volcanic rocks

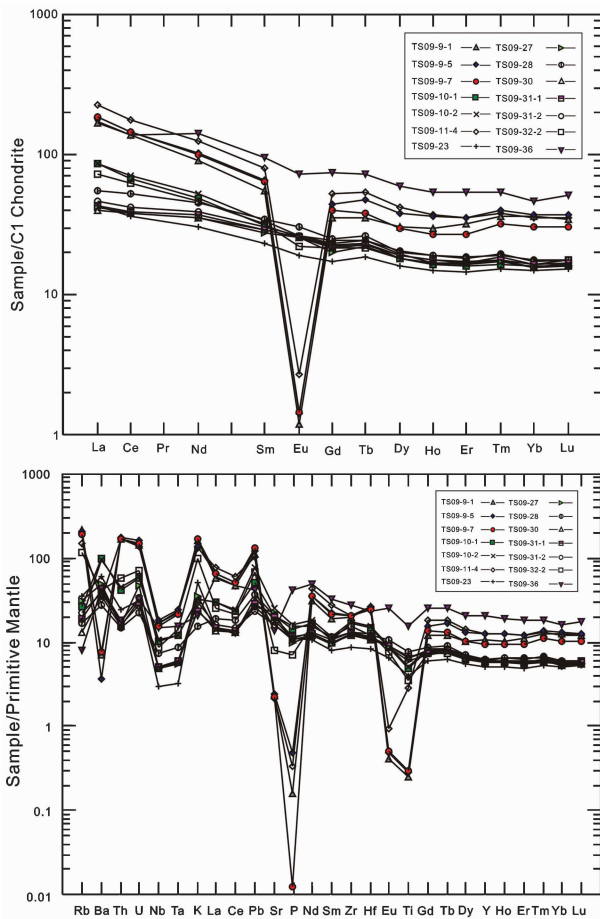


图7 阿尔巴萨依组火山岩微量元素蛛网图和球粒陨石标准化 REE 图解 (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized spider diagram and chondrite-normalized REE patterns for volcanic rocks from Arbasay Formation (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

性岩样品要高,可能与橄榄石分异作用有关,其稀土元素变化趋势与其他中基性岩样品相近。

5.3 微量元素

阿尔巴萨依组火山岩微量元素组成测试结果见表2,微量元素 Harker 图解(图6)显示,Rb 与 SiO_2 显示很明显的正相关的关系,Sr 与 SiO_2 显示负相关,这与斜长石和角闪石的分馏有关,Y 和 Zr 的浓度与 SiO_2 没有显著的相关性,反映含 Y、Zr 矿物如锆石量的不同(多变性)。

原始地幔标准化微量元素蛛网图(图7,原始地幔标准化数值来自 Sun and McDonough, 1989)显示,除 TS09-36 之外,研究区火山岩从微量元素特征上可以分为两类,一类是酸性岩 TS09-9-1、TS09-9-5、TS09-9-7、TS09-11-4, TAS 图解上都投在流纹岩范围内;其他中基性火山岩样品可以归为一类。

样品中酸性岩 Ba、Sr、Eu、P、Ti 有强烈负异常,与新疆北部广泛分布的后碰撞 A 型花岗岩特征一致(Han *et al.*, 2009)。共同的,都有高场强元素(HFSE) Nb、Ta 的负异常,在酸性样品中,除了负异常的 Ba、Sr、Eu、P、Ti 元素之外,主量元素 K 和其他微量元素含量都比中基性样品中高。是由酸性岩和中基性岩分离结晶程度不同导致的。

5.4 同位素特征

样品的同位素测试结果见表3。样品的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.0424 ~ 7.9490, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_m 为 0.703637 ~ 0.735122, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 在 0.698054 ~ 0.704861 范围内; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.1189 ~ 0.1548, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_m 为 0.512728 ~ 0.512942, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 为 0.512458 ~ 0.512642, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +4.21 ~ +7.79。可以看出,阿尔巴萨依组火山岩具有相对低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值和高正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(图8)。

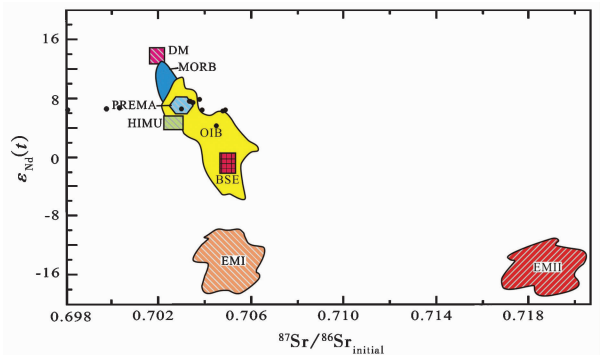


图8 阿尔巴萨依组火山岩 Sr-Nd 初始比值图解(岩石类型边界据 Zindler and Hart, 1986)

Fig. 8 Initial Sr-Nd isotopic diagram for volcanic rocks from Arbasay Formation (boundaries of rock type after Zindler and Hart, 1986)

阿尔巴萨依组火山岩的 Sr-Nd 同位素组成较为集中, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 值 (0.512458 ~ 0.512642) 高, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+4.21 ~ +7.79) 为高正值,指示其可能来源于亏损地幔。

6 讨论

6.1 阿尔巴萨依组火山岩时代

长期以来,阿尔巴萨依组的时代划分存在着较大的分歧。据新疆维吾尔自治区地质矿产局(1995)描述:1970 年新疆区测大队八分队在七角井一带将该套地层划归为下二叠统库莱组,同年,新疆区测大队八分队又将七角井西北的该套地层划归为上石炭统缪林托凯陶山组。新疆区测大队九分队在木垒柯克巴斯他乌一带,将该套地层划为上石炭统缪林托凯陶山组。1972 年,新疆区测大队六分队在以前的基础上补充研究,将该套地层划归为下二叠统阿其克布拉克

表 3 阿尔巴萨依组火山岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotope composition of volcanic rocks in Arbasay Formation

| 样品号 | Rb ($\times 10^{-6}$) | Sr ($\times 10^{-6}$) | $^{87}\text{Rb}/$ ^{86}Sr | $(^{87}\text{Sr}/$ $^{86}\text{Sr})_m$ | 2σ | $(^{87}\text{Sr}/$ $^{86}\text{Sr})_i$ | Sm ($\times 10^{-6}$) | Nd ($\times 10^{-6}$) | $^{147}\text{Sm}/$ ^{144}Nd | $(^{143}\text{Nd}/$ $^{144}\text{Nd})_m$ | 2σ | $(^{143}\text{Nd}/$ $^{144}\text{Nd})_i$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ |
|-----------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---|-----------|---|----------------------------|----------------------------|---|---|-----------|---|---------------------------|
| TS09-9-1 | 133 | 48.9 | 7.9009 | 0.732595 | 10 | 0.698054 | 8.63 | 43.9 | 0.1189 | 0.512807 | 10 | 0.512568 | 6.35 |
| TS09-9-5 | 116 | 45.4 | 7.3593 | 0.735122 | 10 | 0.702949 | 9.33 | 44.6 | 0.1266 | 0.512832 | 10 | 0.512577 | 6.54 |
| TS09-9-7 | 120 | 43.5 | 7.949 | 0.734468 | 9 | 0.699717 | 9.39 | 46.5 | 0.1221 | 0.512819 | 9 | 0.512573 | 6.46 |
| TS09-10-1 | 14.4 | 469 | 0.0888 | 0.705137 | 11 | 0.704749 | 4.84 | 22.5 | 0.1299 | 0.512821 | 11 | 0.51256 | 6.20 |
| TS09-10-2 | 10.7 | 602 | 0.0512 | 0.705085 | 10 | 0.704861 | 4.93 | 23.1 | 0.1291 | 0.512826 | 10 | 0.512566 | 6.32 |
| TS09-11-4 | 89 | 42 | 6.1418 | 0.727126 | 9 | 0.700275 | 11.5 | 55.6 | 0.1248 | 0.512835 | 9 | 0.512584 | 6.67 |
| TS09-23 | 20.9 | 409 | 0.1478 | 0.704513 | 10 | 0.703867 | 3.49 | 14 | 0.1511 | 0.512873 | 10 | 0.512569 | 6.38 |
| TS09-27 | 17.5 | 542 | 0.0932 | 0.703744 | 12 | 0.703337 | 4.17 | 16.4 | 0.1541 | 0.512936 | 12 | 0.512626 | 7.49 |
| TS09-28 | 9.8 | 488 | 0.0583 | 0.703637 | 11 | 0.703382 | 5.07 | 20.9 | 0.1464 | 0.512923 | 11 | 0.512629 | 7.54 |
| TS09-30 | 7.07 | 359 | 0.0569 | 0.703669 | 12 | 0.70342 | 4.07 | 15.9 | 0.1548 | 0.512942 | 12 | 0.512631 | 7.58 |
| TS09-31-1 | 13 | 458 | 0.0823 | 0.703813 | 15 | 0.703453 | 4.48 | 17.6 | 0.1542 | 0.512932 | 15 | 0.512622 | 7.41 |
| TS09-31-2 | 13.2 | 353 | 0.1083 | 0.703878 | 15 | 0.703405 | 4.35 | 17.1 | 0.1535 | 0.512938 | 15 | 0.512629 | 7.55 |
| TS09-32-2 | 55 | 157 | 1.0115 | 0.708925 | 8 | 0.704503 | 4.33 | 19.5 | 0.1341 | 0.512728 | 8 | 0.512458 | 4.21 |
| TS09-36 | 4.35 | 297 | 0.0424 | 0.703954 | 14 | 0.703769 | 14.2 | 64.9 | 0.1325 | 0.512908 | 14 | 0.512642 | 7.79 |

注: $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}, i} - \text{mm}, \text{WK}-1] \times 10^4$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}, m} = 0.512638$; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}, m} = 0.1967$; 下标 m 代表现今测试值, 下标 i 代表初始比值; 火山岩的年龄设为 307Ma

组。1976 年, 新疆区测大队编图分队将托克逊县桃树园东北的该套地层划归为下二叠统阿其克布拉克组。新疆维吾尔自治区地质矿产局(1995)将该套地层统称为阿尔巴萨依组, 停止使用其他组名。其时代的确定主要依据岩性对比, 和上下底层的接触关系, 化石资料较少。

本次研究对阿尔巴萨依组火山岩中流纹岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 结果显示, 原定为早二叠世的阿尔巴萨依组实际年代为晚石炭世, 重新界定了以前混乱的时代划分方案。以前的年龄限定缺乏精确的定年资料, 且缺乏化石证据, 新年龄可靠程度比较高。

6.2 阿尔巴萨依组火山岩的形成环境

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 7), 大离子亲石元素(LILE)相对富集, 高场强元素 Nb、Ta 具有明显的负异常, 具有岛弧火山岩的性质。是否说明阿尔巴萨依组火山岩是岛弧火山岩呢? 岛弧火山岩是岛弧基底岩石部分熔融形成的, 岛弧基底主要由年轻的岛弧拉斑玄武岩组成, 而岛弧拉斑玄武岩就是富集大离子亲石元素(LILE)和亏损高场强元素(HFSE)的, 所以岛弧火山岩就是富集大离子亲石元素(LILE)和亏损高场强元素(HFSE)的。然而需要注意的是, 陆壳与之一样的, 只是富集的程度和 Sr-Nd 同位素比值不同而已, 如果对大陆花岗岩(或流纹岩)投图, 其自然就容易落在岛弧环境, 但这与事实不符(张旗等, 2008)。

而大陆玄武岩的地球化学特征与其源岩和交代作用有关, 如果大陆玄武岩受到大陆地壳或岩石圈的混染作用, 会

给出似消减带信号, 所以如果对大陆玄武岩进行含有 Nb、Ta、Ti 这几个元素的构造判别图解进行投图的话, 也很容易落入岛弧环境区域, 导致将大陆玄武岩误判别成岛弧玄武岩的情况, 与事实相悖。对于那些具有消减带信号的基性熔岩, 可以根据 Zr 含量和 Zr/Y 比值, 或利用 Zr/Y-Zr 图解, 判断它们是否真正是岛弧或活动大陆边缘玄武岩(夏林圻等, 2007)。对阿尔巴萨依组基性岩进行 Zr/Y-Zr 投图(图 9), 除了 TS09-36 之外, 其他基性岩样品都落在板内玄武岩区域。

另外, 阿尔巴萨依组火山岩区域上呈面状展布, 野外观

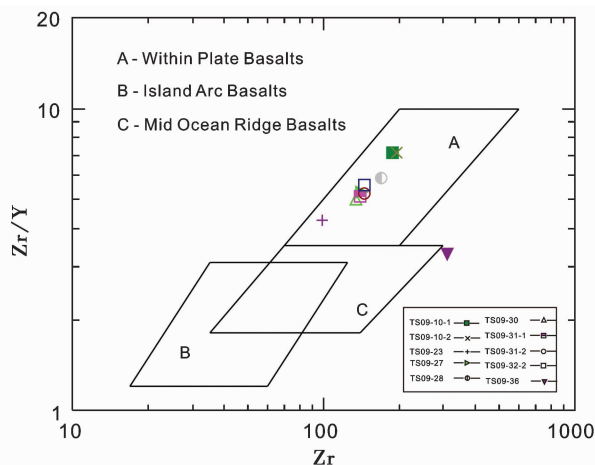


图 9 阿尔巴萨依组基性岩 Zr/Y-Zr 图解(据 Pearce, 1982)

Fig. 9 Zr/Y-Zr diagram for the basic volcanic rocks of Arbasay Formation (boundaries of rock type after Pearce, 1982)

察发现没有明显的构造变形,呈喷溢相覆盖在下伏地层之上,同时阿尔巴萨依组火山岩富碱,LREE 相对于 HREE 富集程度较高,而典型的岛弧火山岩 LREE 相对于 HREE 富集程度较低,种种证据表明,阿尔巴萨依组火山岩是陆相火山岩。同时也说明了至少在 307Ma 之前,北天山洋已经闭合。

6.3 阿尔巴萨依组火山岩的大地构造背景及盆地演化

区域构造研究表明,新疆北部地区晚石炭世-二叠世处于地壳伸张的状态(肖序常等,1992;何国琦等,1994),发育大规模的高 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 低 Sr 的后碰撞 A 型花岗岩(Han *et al.*, 1997, 1999, 2009; Jahn *et al.*, 2000; Chen and Jahn, 2002),并且伴随活跃的火山活动(李锦轶和肖序常,1999;邢秀娟等,2004;朱志新等,2005)。关于准噶尔南缘古生代晚期大地构造背景,近几年的研究较多。Shu *et al.* (2011) 对博格达山以南白杨沟地区研究发现,该地区发育大量滑塌混积岩和双峰火山岩及大规模走滑剪切带,反应伸展大地构造环境,伸展作用开始于 300Ma 左右,并在 300~250Ma 达到峰值。Chen *et al.* (2011) 从岩石学、地球化学年代学、地质年代学方面出发对天山双峰火山岩进行了研究,发现火山岩年龄集中在 295.8 ± 2.8Ma 到 293.3 ± 1.7Ma 范围内,属于高钾钙碱性序列,富集 K + Na、Zr、Ce、Y,亏损 P、Nb、Ta、Ti, Eu 有明显的负异常,反应后碰撞伸展环境。

Han *et al.* (2009) 将北天山和伊犁地体古生代的构造运动划分为三个阶段,分别为俯冲阶段(442~325Ma),同碰撞阶段(325~316Ma)和后碰撞阶段(316~270Ma)。阿尔巴萨依组火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 307.2 ± 1.3Ma,为晚石炭世,时间上与新疆北部广泛分布的后碰撞花岗岩一致。同时,从图 1a 我们也可以观察到,两者在空间上也一致,阿尔巴萨依组地层南边的石炭纪基底和其北邻的准噶尔盆地都发育大量双峰火山岩和后碰撞花岗岩(Han *et al.*, 2009; Shu *et al.*, 2011; 韩宝福等,2006; 杨兴科等,2006)。另外,阿尔巴萨依组流纹岩与后碰撞 A 型花岗岩地球花岗岩特征也相近,都富集大离子亲石元素(LILE),具有 Ba, Sr, P, Eu, Ti, Nb, Ta 的异常,轻稀土富集、重稀土亏损,高正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值。基于以上特征,阿尔巴萨依组流纹岩与后碰撞 A 型花岗岩应是相似的构造背景,只是以喷出岩形式产出。后碰撞花岗岩是碰撞后增厚岩石圈部分发生拆沉,软流圈物质上涌,并发生底侵作用,热力衰减沉降引发伸展垮塌,即碰撞后伸展环境下形成的(Han *et al.*, 1999),所以阿尔巴萨依组火山岩形成时的环境应是一个伸展断陷环境。

阿尔巴萨依组火山岩形成于伸展环境,表明晚石炭世准噶尔南缘处于伸展断陷阶段。前面提到,阿尔巴萨依组还发育一套火山沉积地层,表明准噶尔南缘沉积作用在晚石炭世已经开始,开始沉积盆地的类型应为伸展断陷盆地,而非挤压型前陆盆地。

7 结论

基于对阿尔巴萨依组地层的野外实地观察,火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及地球化学分析,得出以下结论:

(1) 阿尔巴萨依组火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 307.2 ± 1.3Ma,为晚石炭世,而非早二叠世;

(2) 阿尔巴萨依组火山岩主要由中基性-酸性火山岩、火山碎屑岩组成。火山岩为钙碱性和高钾钙碱性系列,富集大离子亲石元素(LILE),亏损 Nb、Ta 等高场强元素,酸性岩有显著的 Ba、Sr、Eu、P、Ti 负异常,轻稀土富集,重稀土亏损,高正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值;

(3) 阿尔巴萨依组火山岩与北天山广泛分布的后碰撞 A 型花岗岩时间空间上一致,地球化学特征相似,两者应有相似的构造环境,表明天山北缘在晚石炭世处于后碰撞伸展断陷阶段,这对天山北缘晚古生代构造演化和油气研究具有重要意义。

致谢 Curtin 理工大学高旻老师在装载样品,仪器调试和仪器监控方面提供了帮助;北京离子探针中心董春艳博士在远程实验协助和数据处理方面提供了帮助;同时,在成文过程中得到了北京大学韩宝福教授的指导;在此一并向他们表示衷心的感谢!

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region (BGMRX). 1995. Lithostratigraphy of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese)
- Charvet J, Shu LS, Laurent-Charvet S, Wang B, Faure M, Cluzel D, Chen Y and Jong K. 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China. *Science China (Earth Sciences)*, 54: 166 - 184
- Chen B and Jahn BM. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of Northwest China and their tectonic implications. *Geology Magazine*, 129: 1 - 13
- Chen SP, Zhang YW, Tang LJ and Bai GP. 2001. Evolution of Junggar Late Carboniferous-Permian foreland basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 75(4): 398 - 408 (in Chinese)
- Chen XJ, Shu LS and Santosh M. 2011. Late Paleozoic post-collisional magmatism in the Eastern Tianshan Belt, Northwest China: New insights from geochemistry, geochronology and petrology of bimodal volcanic rocks. *Lithos*, 1 - 18
- Compston W, Williams IS, Kirschvink JL, Zhang ZC and Ma GG. 1992. Zircon age U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. *Journal of Geological Society, London*, 149: 171 - 184
- Fang SH, Jia CZ, Guo ZJ, Song Y, Xu HM and Liu LJ. 2006. New view on the Permian evolution of the Junggar basin and its implications for tectonic evolution. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 108 - 121 (in Chinese with English abstract)
- Gao J. 1995. The preliminary studies on tectonic environment of formation and geological characters of ophiolites, South Tianshan Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (Suppl.): 85 - 97 (in Chinese with English abstract)

- Han BF, Wang SG and Jahn BM. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138: 135 – 159
- Han BF, Wang XC and He GQ. 1999. Discovery of mantle and lower crust xenoliths from Early Cretaceous volcanic rocks of southwestern Tianshan, Xinjiang. *Chinese Sciences Bulletin*, 44(12): 1119 – 1123
- Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077 – 1086 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Guo ZJ, Zhang ZC, Zhang L, Chen JF and Song B. 2009. Age, geochemistry, and tectonic implications of a Late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *Geological Society of America*, 627 – 640
- He DF, Yin C and Du SK. 2004. Foreland thrust belt tectonic segmentation features, with example of northwestern margin of Junggar basin faults. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 91 – 101 (in Chinese)
- He GQ, Li MS and Liu DQ. 1994. Chinese Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization, Xinjiang. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 662 – 672 (in Chinese)
- Jacques C, Shu LS, Sébastien LC, Wang B, Michel F, Dominique C, Chen Y and Koen DJ. 2010. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China. *Science in China (Earth Science)*, 54(2): 166 – 184
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Trans Royal Soc. Edinburgh: Earth Science*, 91: 181 – 193
- Jia CZ, Song Y, Wei GQ, Zhao MJ, Liu SB and Li BL. 2005. Geological features and petroleum accumulation in the foreland basins in central and western China. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 3 – 13 (in Chinese with English abstract)
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A and Zanertin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745 – 750
- Li BL, Jia CZ, Pang XQ, Guan SW, Yang G, Shi X and Li CX. 2007. The spatial variation of thrust deformation around Qinghai-Tibet Plateau within the foreland basin system. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1200 – 1207 (in Chinese with English abstract)
- Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews of several issues on the crustal structure and tectonic evolution in Xinjiang. *Chinese Journal of Geology*, 34(4): 405 – 419 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochemica*, 25(6): 552 – 556 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS (ed.). *Andesites*. Chichester: Wiley, 525 – 548
- Qiao GS. 1988. Normalization of isotopic dilution analysis. *Science in China (Series A)*, 31: 1263 – 1268
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrological diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247 – 263
- Shu LS, Guo ZJ, Zhu WB, Lu HF and Wang B. 2004. Post-collisional structure and basin evolution of Tianshan. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 393 – 404 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Wang B, Zhu WB, Guo ZJ, Charvet J and Zhang Y. 2011. 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). *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 100(7): 1647 – 1663
- Song B, Zhang YH, Wan YS *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48 (Suppl.): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Song Y, Zhao MJ, Liu SB, Hong F and Qin SF. 2006. Oil and gas accumulation of foreland basins in China. *Geological Review*, 52(1): 85 – 92 (in Chinese with English abstract)
- Steiger RH and Jager E. 1977. Subcommittee on geochronology convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 359 – 362
- Sun SS and McDonough WE. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London (Special Publication), 42: 13 – 345
- Xiao XC, Tang YQ, Li JY, Zhao M, Feng YM and Zhu BQ. 1990. Tectonic evolution of northern Xinjiang, Northwest China. *Geoscience of Xinjiang*, 1: 47 – 68 (in Chinese)
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 171 (in Chinese)
- Xia LY, Zhang GW, Xia ZC, Xu XY, Dong YP and Li XM. 2002. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks. *Geological Bulletin of China*, 21(5): 55 – 62 (in Chinese with English abstract)
- Xia LY, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. *Acta Petrologica et Mineralogica*. 26(1): 77 – 89 (in Chinese with English abstract)
- Xing XJ, Zhou DW, Liu YQ and Hao JR. 2004. Geological characteristics of Early Permian volcanic rocks in Turpan-Hami basins: Discussing on geological setting. *Xinjiang Geology*, 22(1): 50 – 55 (in Chinese)
- Xu XY, Ma ZP, Xia ZC, Xia LQ, Li XM and Wang LS. 2005. Nd, Sr, Pb isotope source tracing of Carboniferous-Permian post-collisional granites in Tianshan. *Northwestern Geology*, 38(2): 1 – 18 (in Chinese)
- Xu XY, Xia LQ, Ma ZP, Wang YB, Xia ZC, Li XM and Wang LS. 2006. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the plagiogranites from Bayingou ophiolite in North Tianshan Mountains and the Petrogenesis of the ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 83 – 94 (in Chinese with English abstract)
- Yang XK, Su CQ, Chen H, Zhang HJ, Yan HQ, Li XF and Liu JQ. 2006. Discovery of the Permian volcanic rocks in the Bingdaban-Houxia, Tianshan Mountains, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 969 – 976 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Pan GQ, Li CD, Jin WJ and Jia XQ. 2008. Problems of granites: Some crucial questions on granite study (5). *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2212 – 2218 (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZX, Li SZ and Li SL. 2005. The characteristics of sedimentary system-continental facies volcano in later Carboniferous Batamayneishan Formation, Zhifang region, East Junggar. *Xinjiang Geology*, 23(1): 14 – 18 (in Chinese)
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493 – 571

附中文参考文献

- 陈书平, 张一伟, 汤良杰, 白国平. 2001. 准噶尔晚石炭世-二叠纪前陆盆地的构造演化. *石油大学学报(自然科学版)*, 75(4): 398 – 408
- 方世虎, 贾承造, 郭召杰, 宋岩, 徐怀民, 刘峻军. 2006. 准噶尔盆地二叠纪盆地属性的再认识及其构造意义. *地学前缘*, 13(3): 108 – 121
- 高俊, 汤耀庆, 赵民. 1995. 新疆南天山蛇绿岩的地质地球化学特征及形成环境初探. *岩石学报*, 11(增刊): 85 – 97

- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长——后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报, 22(5): 1077–1086
- 何登发, 尹成, 杜社宽. 2004. 前陆冲断带构造分段特征——以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例. 地学前缘, 11(3): 91–101
- 何国琦, 李茂松, 刘德权. 1994. 中国新疆古生代地壳演化与成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 662–672
- 贾承造, 宋岩, 魏国齐, 赵孟军, 柳少波, 李本亮. 2005. 中国中西部前陆盆地的地质特征及其油气富集. 地学前缘, 22(2): 3–13
- 李本亮, 贾承造, 庞雄奇, 管树巍, 杨庚, 石昕, 李传新. 2007. 环青藏高原盆山体系内前陆冲断构造变形的空间变化规律. 地质学报, 81(9): 1200–1207
- 李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. 地质科学, 34(4): 405–419
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552–558
- 舒良树, 郭召杰, 朱文斌, 卢华复, 王博. 2004. 天山地区碰撞后构造与盆山演化. 高校地质学报, 10(3): 393–404
- 宋彪, 张玉海, 万渝生等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26–30
- 宋岩, 赵孟军, 柳少波, 洪峰, 秦腾飞. 2006. 中国前陆盆地油气富集规律. 地质论评, 52(1): 85–92
- 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶, 赵民, 冯益民, 朱宝清. 1990. 试论新疆北部大地构造演化. 新疆地质科学, 1: 47–68
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1–171
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 徐学义, 董云鹏, 李向民. 2002. 天山古生代洋盆开启闭合时限的岩石学约束: 来自震旦纪和石炭纪火山岩的证据. 地质通报, 21(5): 55–62
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77–89
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1995. 全国地层多重划分对比研究: 新疆维吾尔自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社
- 邢秀娟, 周鼎武, 柳益群, 郝建荣. 2004. 吐-哈盆地及周缘早二叠世火山岩地球化学特征及大地构造环境探讨. 新疆地质, 22(1): 50–55
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 夏林圻, 李向民, 王立社. 2005. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩的 Nd、Sr、Pb 同位素源区示踪. 西北地质, 38(2): 1–18
- 徐学义, 夏林圻, 马中平, 王彦斌, 夏祖春, 李向民, 王立社. 2006. 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. 岩石学报, 22(1): 83–94
- 杨兴科, 苏春乾, 陈虹, 张鸿剑, 闫海卿, 李新峰, 刘继庆. 2006. 天山冰达坂-后峡一带二叠纪火山岩的发现及其地质意义. 地质通报, 25(8): 969–976
- 张旗, 潘国强, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 2008. 花岗岩研究的误区——关于花岗岩研究的思考之五. 岩石学报, 24(10): 2212–2218
- 朱志新, 李少贞, 李嵩龄. 2005. 东准噶尔纸房地区晚石炭世巴塔玛依内山组陆相火山-沉积体系特征. 新疆地质, 23(1): 14–18