

西天山乌孙山地区大哈拉军山组火山岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄及其构造环境

茹艳娇^{1,2}, 徐学义¹, 李智佩¹, 陈隽璐¹, 白建科¹, 李 婷¹

RU Yan-jiao^{1,2}, XU Xue-yi¹, LI Zhi-pei¹, CHEN Jun-lu¹, BAI Jian-ke¹, LI Ting¹

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054

1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要: 西天山乌孙山地区大哈拉军山组由玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩及相应的火山碎屑岩组成, 安山岩和流纹岩分布最广。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 火山活动喷发的安山岩与安山质晶屑凝灰熔岩分别形成于 $353.9\text{Ma} \pm 6.5\text{Ma}$ 和 $356.3\text{Ma} \pm 4.4\text{Ma}$, 属于早石炭世早期。通过区域对比, 西天山大哈拉军山组的火山岩浆作用显示从伊犁中天山板块南北缘向伊犁盆地内部逐渐变年轻的特点, 且火山岩喷发时代差别不大(约 40Ma)。岩石地球化学研究表明, 火山岩属钙碱性系列, 富集轻稀土元素, 相对亏损重稀土元素。中性火山岩富集大离子亲石元素(如 Cs、Rb、Th、U), 而相对亏损高场强元素, 具有明显的 Nb、Ta、Ti 负异常, 显示出岛弧火山岩的特征; 酸性火山岩相对富集 Rb、Th、U、Ta 等元素, 具有明显的 Ba、Sr、P、Eu、Ti 等元素的负异常。综合伊犁-中天山板块南缘的构造演化特征, 认为大哈拉军山组形成于活动大陆边缘环境, 产在板块俯冲-碰撞的最后阶段。
关键词: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 构造环境; 大哈拉军山组; 西天山

中图分类号: P597^{+.3}

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2012)01-0050-13

Ru Y J, Xu X Y, Li Z P, Chen J L, Bai J K, Li T. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and tectonic background of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks in Wusunshan area, West Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(1): 50-62

Abstract: Volcanic rocks in the Dahalajunshan Formation of Wusunshan area in West Tianshan Mountains are composed of basalt, andesite, dacite, rhyolite and relevant volcanoclastic rocks, with andesite and rhyolite being dominant. The LA-ICP-MS zircon dating results show that andesite and andesitic tuff lava in the Dahalajunshan Formation from Wusunshan area yield concordant $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of $353.9 \pm 6.5\text{Ma}$ and $356.3 \pm 4.4\text{Ma}$, implying that they were erupted at the early stage of Early Carboniferous. Regional correlation shows that the volcanic magmatism gradually became younger from the north and the south edge of Yili-Central Tianshan plate to Yili basin, and the eruption time span is small (about 40Ma). Therefore, the age of Dahalajunshan Formation at the south edge of Yili block should be confined between 363Ma and 326Ma, namely Late Devonian to Early Carboniferous and mainly in Early Carboniferous Tournaisian period-Viséan period. The geochemical characteristics show that the volcanic rocks belong to the calc-alkaline series, enriched in LREE and depleted in HREE relatively. The primitive mantle-normalized trace element patterns show that intermediate volcanic rocks are slightly enriched in large-ion-lithophile elements (LILE) such as Cs, Rb, Th and U and relatively depleted in HFSE and have obvious negative Nb, Ta, Ti anomalies, and that acid rocks are characterized by Rb, Th, U, Ta enrichment and Ba, Sr, P,

收稿日期: 2011-07-28; 修订日期: 2011-10-12

资助项目: 国家自然科学基金项目《西天山西南缘那拉提段古生代花岗岩成因对天山洋陆转换的制约》(批准号: 40872061) 和中国地质调查局项目《天山-兴蒙成矿带火山岩浆作用对成矿制约的综合研究》(编号: 1212010050503)、《西北地区重要成矿带基础地质综合研究》(编号: 1212010610319)、《天山成矿带基础地质综合研究》(编号: 1212010010200)

作者简介: 茹艳娇(1986-), 女, 在读硕士, 矿物、岩石、矿床学专业。E-mail: lanzixing160@163.com

通讯作者: 徐学义(1966-), 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: xuxueyi1030@163.com

Eu, Ti depletion. In combination with the south edge of Central Tianshan tectonic evolution, the characteristics of volcanic rocks in Dahalajunshan Formation suggest that they were probably formed in an active continental margin environment.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; tectonic background; Dahalajunshan Formation; West Tianshan Mountains

西天山地区广泛分布的大哈拉军山组由玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗面安山岩、英安岩、流纹岩及基性—中酸性火山碎屑岩组成,主要出露于伊犁地块的南北缘及伊犁盆地内部。前人对大哈拉军山组火山岩进行了较多的研究,在大哈拉军山组火山岩的形成时代和构造环境方面获得诸多进展。刘友梅等^[1]采用全岩⁴⁰Ar—³⁹Ar等时线法获得的特克斯林场大哈拉军山组火山岩年龄为326Ma;翟伟等^[2]采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得阿希金矿富矿围岩大哈拉军山组石英安山岩年龄为363Ma;朱永峰等^[3-4]用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得新源南玄武岩年龄为355Ma,巩留—特克斯公路玄武安山岩形成年龄为361Ma,乌孙山科桑溶洞英安岩和流纹岩分别形成于368Ma和356Ma;张芳荣等^[5]用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测定乌孙山西段熔结凝灰岩和英安岩的年龄分别为353Ma和344Ma。因此,大哈拉军山组的形成时代为晚泥盆世到早石炭世。依据大哈拉军山组不同地区的形成时代,结合其物质组成的差异,部分学者建议对西天山地区大哈拉军山组火山岩进行解体,并提出了相对完整的解体方案^[3,6]。有关大哈拉军山组火山岩形成的构造环境目前也存在多种认识,一是形成于大陆板内裂谷环境,认为是造山后大陆裂谷拉伸阶段的产物^[7-9];二是形成于岛弧或大陆边缘弧环境,认为是南天山洋盆向伊犁—中天山板块之下俯冲形成的岛弧火山岩^[10-11];三是形成于活动大陆边缘弧后拉张环境,不同于大陆裂谷环境,也不同于典型的火山弧环境^[12]。构造环境认识分歧的核心是大哈拉军山组火山岩的形成是否与天山古生代洋盆活动有关,是形成于挤压体制下还是伸展体制下。造成这些认识分歧的根本原因是对大哈拉军山组火山岩系的组成、结构、喷发幕次及其地球化学特征缺少系统的精细研究,以及对中天山南缘蛇绿构造混杂岩带为代表的南天山洋盆最终闭合时限的不同认识。因此,针对以上问题,深入开展大哈拉军山组的形成时代和构造环境研究,对于认识天山乃至中亚地区古生代构造演化的过程具有重要的科学意义。本文拟以

形成时代相对集中、火山岩出露较好的乌孙山地区为研究对象,进行火山喷发地层序列、岩石学、锆石年代学与地球化学研究,并与西天山其它地区大哈拉军山组火山岩的研究资料进行对比,以期更为深入地探讨大哈拉军山组火山岩的形成时代与构造环境。

1 地质背景

西天山是伊犁地块、塔里木板块和准噶尔板块交汇的地区。伊犁地块夹持于中天山南缘断裂与北缘断裂之间,呈楔形向东尖灭(图1),在其南北两侧均发育古生代造山带^[13]。伊犁地块出露的最古老地层是北部的温泉岩群与南部的木扎尔特岩群。温泉岩群分布于别珍套山北部阿克萨依一带,呈西窄东宽的断块产出,为一套由高级片麻岩类与变质表壳岩类组成的中深变质岩系^[14];木扎尔特岩群集中分布于那拉提—红柳河缝合带内木扎尔特河流域,呈NEE向断续带状展布或零星出露,主体为一套达到角闪岩相变质的层状岩系^[15]。早古生代地层在伊犁地块南部大部分缺失,仅存在志留系巴音布鲁克组火山岩;而在伊犁地块北部连续沉积了寒武系、奥陶系和志留系,其中志留系为一套浅海相陆棚碎屑岩与碳酸盐岩建造,与上覆下石炭统大哈拉军山组呈断层接触。晚古生代地层在伊犁地块内均有出露,尤其是大哈拉军山组上覆地层阿克沙克组为一套正常浅海相碳酸盐岩与陆源碎屑岩建造,与大哈拉军山组呈角度不整合接触。其中晚古生代最具特征的是石炭纪火山活动强烈发育,形成了巨厚的火山—沉积岩系,且石炭纪火山作用由西向东强度逐渐减弱,在最东端巴伦台地区发育海陆交互的磨拉石建造^[10]。

西天山区域内,最具重要意义的石炭纪火山—沉积岩系,即大哈拉军山组,其物质组成和喷发形式在不同地区有一定的变化规律。在特克斯—昭苏一带,大哈拉军山组主要由流纹岩、粗面安山岩、辉石安山岩夹不同成分的火山碎屑岩组成,以角度不整合(或呈断裂接触关系)覆于上志留统阿克牙子组之上^①。在新源县南部的那拉提山北坡,大哈拉军山

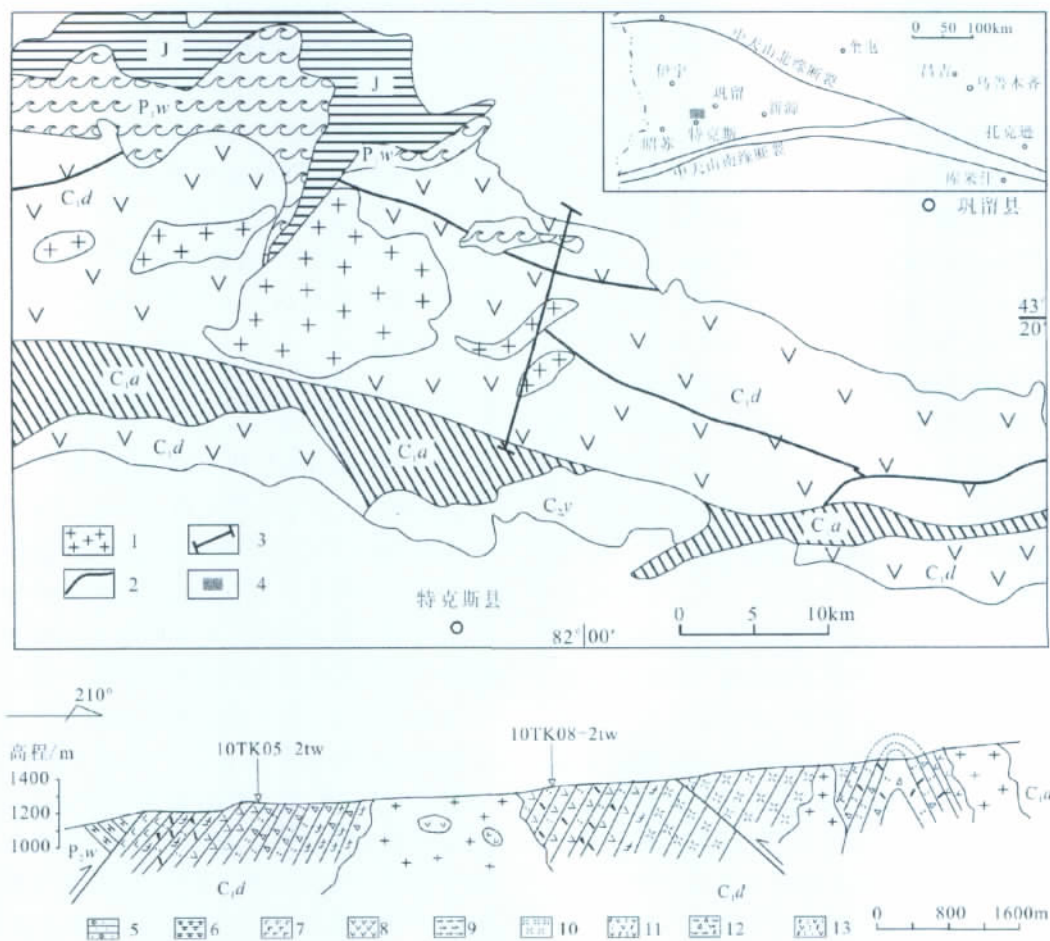


图1 西天山乌孙山地区地质-构造简图(修改自参考文献①)和实测剖面

Fig. 1 Geological and tectonic map of Wusunshan area in West Tianshan Mountains and volcanic rock section

J—侏罗系;Pw—乌郎组;C_{2v}—伊什基里克组;C_{1a}—阿克沙克组;C_{1d}—大哈拉军山组;

1—花岗岩;2—断层;3—剖面位置及同位素采样点;4—研究区;5—砂砾岩;6—粗面岩;7—玄武岩;8—安山岩;

9—英安岩;10—流纹岩;11—安山质晶屑凝灰熔岩;12—英安质含角砾熔岩;13—安山质晶屑凝灰岩

组主要由安山岩、流纹岩、火山碎屑岩及少量的正常沉积岩组成,以角度不整合(或呈断裂)覆盖在震旦系特克斯群变质岩上。在西天山东段巴仑台—莫托萨拉地区,早石炭世的沉积为马鞍桥组的磨拉石建造(缺失火山岩),以角度不整合覆盖在元古宙巴仑台群变质岩上^[16]。此外,伊犁地块南缘那拉提地区和北缘博罗科努地区侵入岩浆活动强烈,其中大量出露的石炭纪侵入岩表现出岛弧钙碱性系列岩石的特征^[17-18]。

研究区位于西天山乌孙山一带,在大地构造上位于伊犁地块南部,中天山南缘断裂以北(图1)。区内出露的地层主要是石炭纪火山—沉积岩系,其次为晚二叠世乌郎组双峰式火山岩系,后有侏罗系等

山间河湖相建造覆盖于其上。石炭系自下而上依次为下石炭统大哈拉军山组火山岩—阿克沙克组碎屑岩与碳酸盐岩和上石炭统伊什基里克组双峰式火山岩—东图津河组碎屑岩—科古琴山组粗碎屑岩,各组之间均以角度不整合接触^[19]。此外,早石炭世晚期库勒萨依斑岩侵入于大哈拉军山组,早二叠世其那尔萨依花岗岩和晚二叠世辉长岩侵入于石炭系之中。区内早石炭世大哈拉军山组火山岩出露最为广泛,受区域断裂的控制,大致呈近东西向带状展布,岩层北倾,基本上没有变质、无变形或弱变形,局部发育宽缓的小褶皱。阿克沙克组呈角度不整合覆盖于大哈拉军山组之上(部分地段为断层接触),其中含有大量种类丰富的腕足、珊瑚等化石,其时代属早

石炭世维宪期^②。

2 火山岩岩石类型及喷发韵律

2.1 火山喷发韵律

本次研究对乌孙山地区伊宁—特克斯一带大哈拉军山组火山岩进行了地质剖面测量,火山岩系厚度大于 4000m。根据剖面图和柱状图(图 1、图 2)总结火山岩岩石类型及变化特征为:下部为安山质、流纹质熔岩和相应的火山碎屑岩;中部为英安质、安山质熔岩和火山碎屑岩;上部为玄武质火山岩。总体上以安山岩和流纹岩分布最多。火山岩地层中没有出现明显的喷发间断(正常沉积岩),但可以根据火山岩岩相从下到上的变化识别出火山喷发基本韵律。第一韵律:溢流相夹爆发相,安山岩中夹少量安山质晶屑凝灰岩;第二韵律:酸性喷溢相,流纹岩夹少量英安岩;第三韵律:中酸性溢流相夹爆发相,下部从安山质晶屑凝灰熔岩开始,上部为英安质含角砾熔岩,自下而上火山活动逐渐加强;第四韵律:爆发相夹溢流相,下部厚层火山角砾岩、角砾凝灰岩,中部安山岩,上部英安质晶屑凝灰岩;第五韵律:溢流相,由厚层玄武岩组成。这种多韵律的喷发表现了火山活动逐渐加强、规模逐渐变大的特征。

2.2 岩相学特征

乌孙山地区伊宁—特克斯一带的火山岩剖面中,火山岩岩石类型主体由玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩及相应的火山碎屑岩组成,以安山岩和流纹岩分布为主。各类岩石的岩相学特征如下。

玄武岩:灰黑色,斑状结构,块状构造。斑晶主要为基性斜长石(20%~25%)。有的样品中可见橄榄石(5%~10%);有的可见辉石斑晶(15%),其中单斜辉石 10%、斜方辉石 5%。基质由斜长石(20%~30%)、辉石(10%)与隐晶质(20%)组成,呈间粒结构和间粒-间隐结构(图 3-B),前者表现为斜长石微粒间充填许多辉石微晶,后者则为斜长石微晶间充填黑色隐晶质。基质被后期热液交代,常见绿泥石化、碳酸盐化。

玄武安山岩(样品 TK08-5、08-7)和安山岩(05-2、08-6):灰黑色,均为斑状结构。斑晶主要为斜长石(20%~30%),也可见辉石(2%~3%)、石英(2%~5%)斑晶。基质多具玻基交织结构,由斜长石微晶(15%~20%)与隐晶质(40%~60%)组成。

流纹岩(样品 10TK 09-1、09-2、10-1):肉红

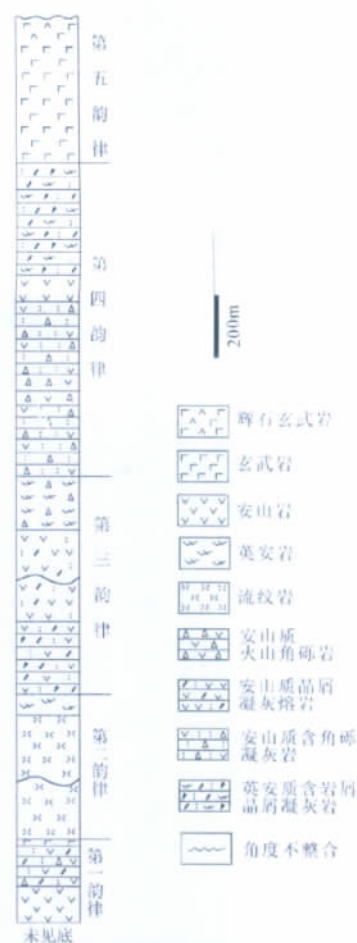


图 2 大哈拉军山组火山岩柱状图
Fig. 2 Columns of volcanic rocks
in Dahalajunshan Formation

色,斑状结构,流纹构造,多见长英质微晶与斑晶呈明显的条带状成分分层(图 3-A)。斑晶为石英(10%~20%)、长石(10%~15%)及少量的黑云母(<5%)。其中斜长石约占 5%,碱性长石占 5%~10%。基质为长英质,含量 65%~80%,呈微晶结构或霏细结构,有时局部呈球粒结构。

锆石 U-Pb 测年的样品 10TK05-2 采自剖面下部(图 1),GPS 地理坐标 43°25.857'N、81°54.118'E。岩性为灰红色安山岩(图 3-C),斑状结构。斑晶含量 25%~30%,其中石英 10%、斜长石 15%~20%。斜长石发育聚片双晶和卡钠复合双晶,部分发生绿帘石化、高岭土化。基质含量 65%~70%,由斜长石微晶(35%)、磁铁矿(3%~5%)和玻璃质(30%)组成,呈间隐结构,细长条状的斜长石微晶间充填着许多玻璃质,局部还有较少的磁铁矿颗粒。

锆石 U-Pb 测年样品 10TK08-2 采自火山岩剖面的中部(图 1),GPS 地理坐标 $43^{\circ}24.234'N$ 、 $81^{\circ}53.169'E$ 。岩性为安山质晶屑凝灰熔岩(图 3-D),暗朱红色,凝灰质结构,熔岩胶结。斜长石晶屑呈自形—它形,宽板状、刀状、棱角状,以后者居多,大小为 $(0.3 \times 0.2) \sim (2 \times 0.7)mm$,含量 30%~40%,多发生钠黝帘石化,有时边部被熔蚀,略显定向性;辉石晶屑含量为 10%~15%,多发生绿泥石化。其余被安山质熔岩胶结,基质呈玻基交织结构,总含量 55%~60%,其中含有许多次生石英小颗粒(含量 10%~15%)。

3 测试分析方法

(1)地球化学测试方法:本次研究在仔细观察薄片的基础上,选择了 7 件较新鲜的岩石样品进行了化学分析。分析在中国地质调查局西安地质调查中心完成。氧化物以 X 荧光光谱仪 3080E 测试;稀土元素和微量元素 Cu、Pb、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni 用等离子质谱仪测试;微量元素 Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、Zr、Ga 用 X 荧光光谱仪 2100 测试。

(2)锆石年代学测试分析方法:样品的破碎和锆石挑选由河北省廊坊市国家重点实验室完成。锆石 CL 图像和 LA-ICP-MS 定年分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石阴极发光图像在

FEI 公司的场发射环境扫描电子显微 Quanta400 E-FC 上完成,分析电压 15kV,电流 19nA。锆石 U-Pb 原位定年分析所用仪器为 Agilent 型 ICP-MS 及与之配套的激光剥蚀系统(德国 Lamda Physik 公司生产的 Geolas 200M 深紫外 DUV 193nmArF 准分子激光剥蚀系统)。激光斑束直径是 $30\mu m$,激光剥蚀样品的深度为 $20 \sim 40\mu m$ 。详细的测试过程、分析步骤和数据处理方法见参考文献[20]。

4 火山岩锆石 U-Pb 年龄

阴极发光图像研究表明,锆石具有明显的震荡环带或扇形分带,表明所有锆石都是从岩浆中结晶出来的。个别锆石具有明显的核,锆石核部或者代表早期岩浆房中的结晶产物,或者代表早期岩浆锆石的残余。为了测定火山岩的形成年龄,主要测定了锆石边部的年龄。测试过程中尽量选择阴极发光生长环带明显、无包裹体、无裂纹的锆石晶体(图 4)。

编号为 10TK05-2 的锆石样品,双目镜下颜色呈淡红色透明体,为自形—半自形短柱状晶体,部分晶体两端可见双锥。柱状锆石晶体长 $50 \sim 150\mu m$,宽度一般在 $50 \sim 80\mu m$ 之间,长宽比多在 1:1~2:1 之间。阴极发光图像(图 4)显示,锆石发育 CL 强度差异明显的震荡环带或具有较宽的条带状结构,为典型岩

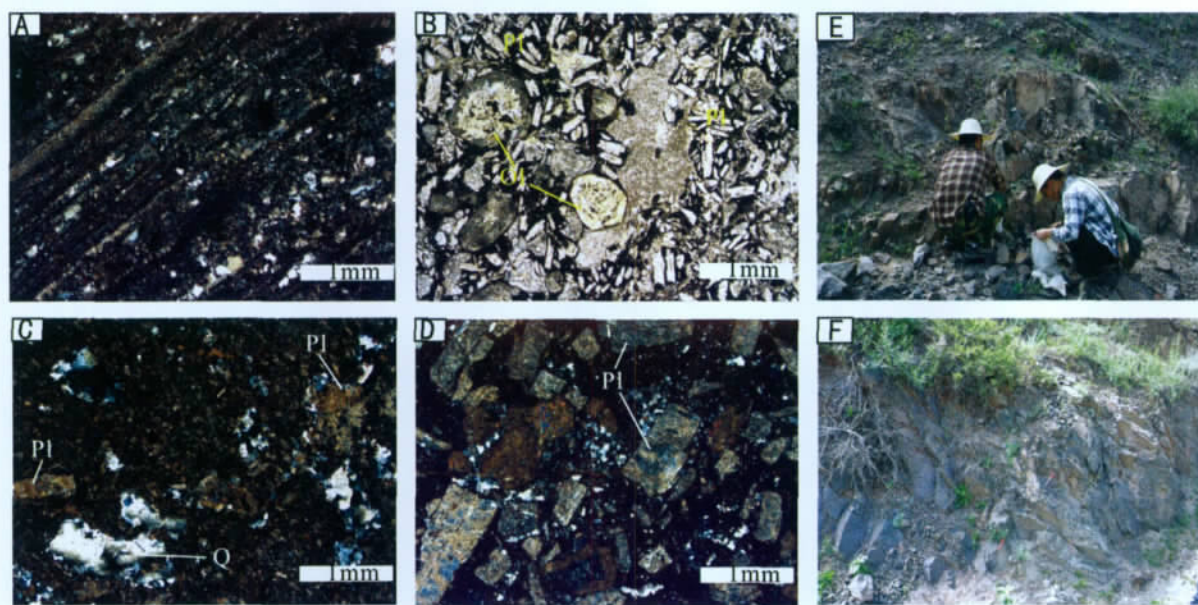


图 3 大哈拉军山组火山岩显微照片(A~D)和野外照片(E,F)

Fig. 3 Microphotographs of volcanic rocks of Dahalajunshan Formation

A—流纹岩中的流纹构造;B—玄武岩;C—安山岩基质呈间隐结构(E—样品 10TK05-2 野外采样点);
D—安山质晶屑凝灰熔岩(F—样品 10TK08-2 野外采样点);Pl—斜长石;Q—石英;Ol—橄榄石

浆锆石的特征。依据锆石阴极发光内部结构的差异,可将锆石分为 2 类:一类锆石从中心至边部发育较好的韵律环带,环带间宽度小,属岩浆高温环境下结晶的锆石,如 7、11~13、15、18、24、27 号锆石;另一类锆石 CL 强度不均一,不显环带,但具有条带或扇形分带,如 16、22、28、29、31、32 号锆石。锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1。锆石 Th 含量较高,为 $(186.89\sim 701.55)\times 10^{-6}$,U 含量也较高,为 $(327.04\sim 778.58)\times 10^{-6}$,7 号测点的 Th、U 含量甚至达到 1269.67×10^{-6} 、 1560.70×10^{-6} ,但所有测点的 Th/U 比值均在 0.56~1.16 之间,明显高于变质成因的锆石(通常小于 0.1),而与岩浆成因的锆石一致(>0.4)^[21]。14 个测点显示的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围比较小,介于 338.7~364.6Ma 之间,这些年龄测定值均落在 U-Pb 谐和线上或靠近谐和线分布于很小的区域内,置信度 95% 时 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $353.9\text{Ma}\pm 6.5\text{Ma}$ (MSWD=0.33)(图 5),应该解释为安山岩的结晶年龄,表明乌孙山地区大哈拉军山组火山岩形成于早石炭世早期。

编号为 10TK08-2 的安山质晶屑凝灰熔岩样品中的锆石呈淡黄色或无色透明体。按照锆石晶体形态和 CL 显示的内部结构差异(图 4),可将锆石分为 2 种类型。一类锆石自形程度好,呈柱状晶体,其长度在 80~200 μm 之间,宽度在 50 μm 左右,长宽比为 1:1~3:1,锆石不显环带结构,但可见扇形分带,如 1、2、5、6 号锆石;另一类锆石颗粒较小,呈粒状,粒径 50~80 μm ,发育较好的韵律环带,如 10、11、13~15、18、20、24~26、29、35 号锆石。所有锆石的 Th 含量为 $(83.72\sim 342.79)\times 10^{-6}$,U 含量也较高,为 $(134.38\sim 611.02)\times 10^{-6}$,Th/U 比值总体在 0.55~1.24 区间内变化,属典型的岩浆结晶锆石。17 个测点显示的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围在 346.6~373.8Ma 之间,且都落在 U-Pb 谐和线上或附近较小的区域内,置信度 95% 时的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $356.3\text{Ma}\pm 4.4\text{Ma}$ (MSWD=0.45)(图 5),代表了安山质晶屑凝灰熔岩的形成年龄。

5 火山岩地球化学特征

5.1 主量元素

主量元素测试结果如表 2 所示。所有火山岩样品的 LOI 介于 0.26~3.85 之间,表明岩石样品没有经过强烈的蚀变。安山岩、玄武安山岩的 SiO_2

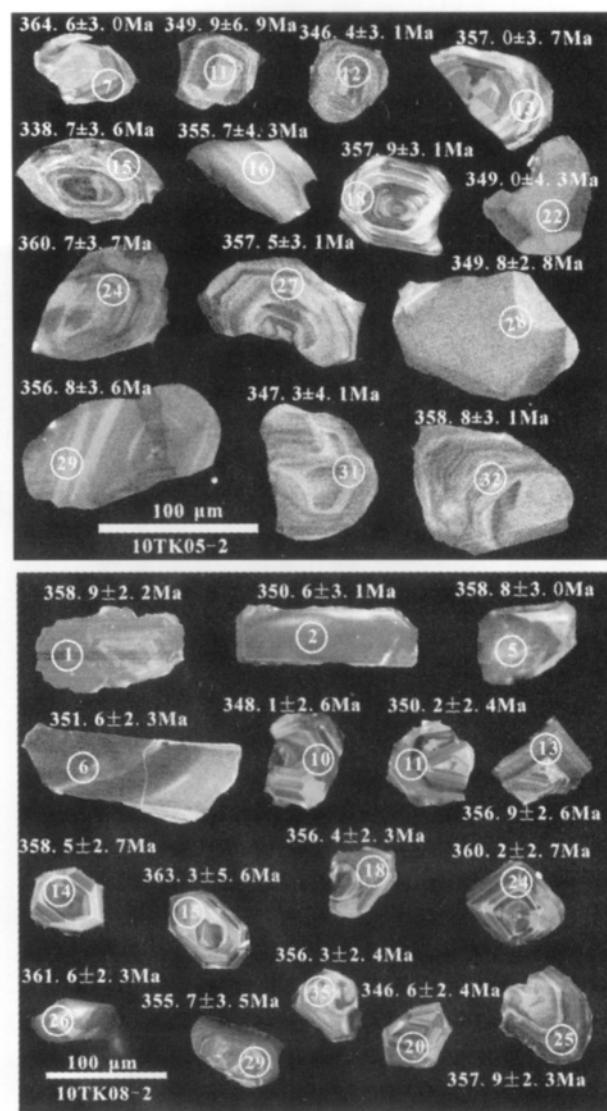
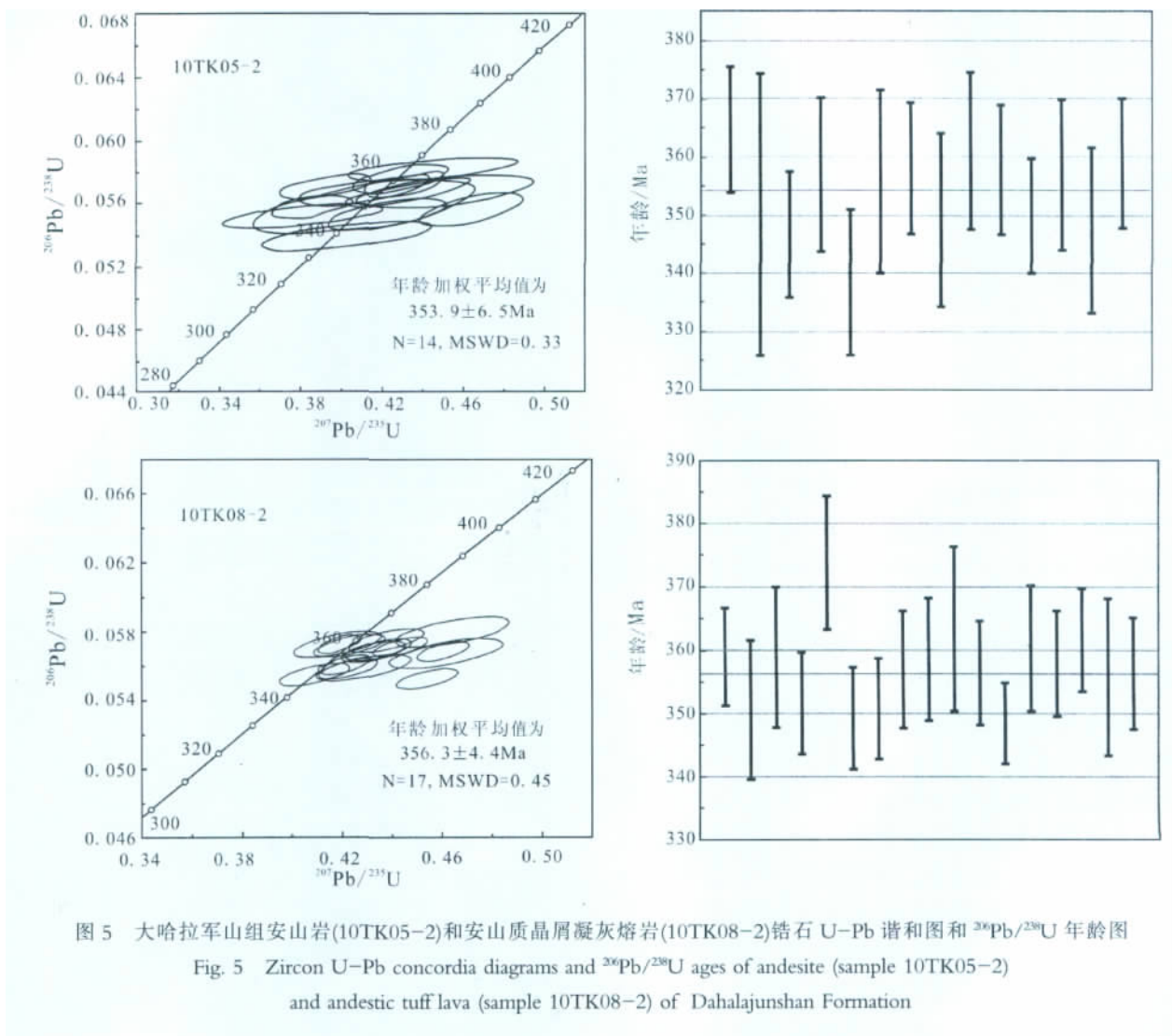


图 4 大哈拉军山组安山岩(10TK05-2)和安山质晶屑凝灰熔岩(10TK08-2)锆石阴极发光图像和分析点

Fig. 4 CL images of zircons from andesite (sample 10TK05-2) and andestic tuff lava (sample 10TK08-2) of Dahalajunshan Formation and locations of the analytical points

圆圈内数字为 U-Pb 分析点号,其它数字为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄

含量在 54.18%~61.53% 之间, TiO_2 含量在 0.82%~1.36% 之间, Al_2O_3 含量变化小, 介于 15.03%~18.3% 之间, MgO 含量变化大, 在 2.19%~7.14% 之间, $\text{Mg}^\#$ 值为 0.41~0.61 ($\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$), Na_2O 含量介于 2.21%~4.66% 之间, K_2O 含量为 1.92%~3.52%; 流纹岩的 SiO_2 含量比较高, 在 75.34%~78.92% 之间, TiO_2 含量在 0.06%~0.23% 之间, Al_2O_3 含量变化小, 介于



11.45%~13.26%之间, MgO 含量变化小, 在 0.06%~0.15%之间, Na_2O 含量介于 3.52%~3.76%之间, K_2O 含量为 3.88%~4.85%。在 SiO_2 -Nb/Y 图解(图 6-a)上, 所有火山岩样品显示为中性-酸性的岩石系列, 由玄武安山岩、安山岩与流纹岩组成, 其 Nb/Y 比值为 0.29~0.70(<0.8), 属亚碱性系列。在 SiO_2 -TFeO/ MgO 图(图 6-b)中, 安山质熔岩样品点落入了拉斑系列和钙碱性系列分界线附近, 由于流纹岩已无法用 SiO_2 -TFeO/ MgO 图解判断其岩浆系列^[2], 利用 AR 碱度率计算 ($\text{AR} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) 值, 其 $\text{AR} = 4.24 \sim 4.81$, 属于钙碱性系列。

5.2 微量元素与稀土元素

样品的微量元素与稀土元素测试结果见表 2。

安山岩、玄武安山岩的稀土元素总量 (ΣREE) 为 $93.4 \times 10^{-6} \sim 182.88 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.89 \sim 6.99$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.37 \sim 3.29$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.35 \sim 1.84$; 流纹岩样品的稀土元素总量整体高于安山岩, 其 ΣREE 为 $124.385 \times 10^{-6} \sim 255.17 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.85 \sim 6.60$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.78 \sim 2.73$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.04 \sim 1.66$ 。从稀土元素球粒陨石配分模式图(图 7-A)上也可以看出, 所有配分曲线为右倾的轻稀土元素相对富集而重稀土元素相对平坦型, 轻稀土元素内部和重稀土元素内部的分馏程度都比较弱。中性岩 Eu 负异常 ($\delta \text{Eu} = 0.78 \sim 0.83$) 不明显, 酸性岩 δEu 值较低, 介于 0.04~0.23 之间, 显示出明显的 Eu 负异常, 表明流纹质岩浆喷发前发生过斜长石的分离结晶作用或源区有斜长石残留。

在微量元素原始地幔标准化图解(图 7-B)上,

表 1 乌孙山地区大哈拉军山组火山岩 U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 1 Analytical results of U-Th-Pb isotopes
from the Dahalajunshan Formation volcanic rocks in Wusunshan aera

测点	Th ²³² /10 ⁻⁶	U ²³⁸ /10 ⁻⁶	Th/U	同位素比值 ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	同位素比值 ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	同位素年龄 /Ma ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	同位素年龄 /Ma ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
10TK05-2											
7	1269.67	1560.70	0.81	0.44490	0.02761	0.05819	0.00049	373.7	19.4	364.6	3.0
11	369.94	529.02	0.70	0.41117	0.03590	0.05578	0.00113	349.7	25.8	349.9	6.9
12	324.01	560.11	0.58	0.38039	0.02568	0.05521	0.00052	327.3	18.9	346.4	3.2
13	186.83	327.04	0.57	0.42068	0.02801	0.05693	0.00061	356.5	20.0	357.0	3.7
15	355.65	546.27	0.65	0.40269	0.02769	0.05395	0.00059	343.6	20.0	338.7	3.6
16	295.39	394.65	0.75	0.44828	0.03060	0.05674	0.00072	376.1	21.5	355.8	4.4
18	494.56	676.35	0.73	0.39254	0.01539	0.05709	0.00052	336.2	11.2	357.9	3.2
22	320.72	494.54	0.65	0.46338	0.01683	0.05563	0.00071	386.6	11.7	349.0	4.3
24	299.82	334.61	0.90	0.42830	0.01568	0.05756	0.00061	362.0	11.2	360.7	3.7
27	292.78	471.34	0.62	0.44127	0.01388	0.05702	0.00052	371.2	9.8	357.5	3.2
28	701.55	603.97	1.16	0.38562	0.01317	0.05577	0.00046	331.2	9.7	349.8	2.8
29	212.24	354.38	0.6	0.50130	0.02209	0.05692	0.00059	412.6	14.9	356.9	3.6
31	246.24	388.89	0.63	0.42191	0.01901	0.05535	0.00068	357.4	13.6	347.3	4.1
32	438.68	778.58	0.56	0.43203	0.01339	0.05725	0.00052	364.6	9.5	358.9	3.2
10TK08-2											
1	335.95	611.02	0.55	0.41845	0.00535	0.05725	0.00036	354.9	3.8	358.9	2.2
2	342.79	276.45	1.24	0.42857	0.01242	0.05589	0.00051	362.2	8.8	350.6	3.1
5	142.14	134.38	1.06	0.41812	0.01153	0.05724	0.00050	354.7	8.3	358.8	3.1
6	313.32	288.03	1.09	0.42103	0.00670	0.05605	0.00038	356.8	4.8	351.6	2.3
8	216.14	199.14	1.09	0.47958	0.01012	0.05969	0.00046	397.8	6.9	373.8	2.8
10	145.98	176.66	0.83	0.40889	0.00922	0.05548	0.00043	348.1	6.6	348.1	2.6
11	178.88	227.11	0.79	0.42223	0.00771	0.05582	0.0004	357.6	5.5	350.2	2.4
13	228.69	219.06	1.04	0.43412	0.00886	0.05693	0.00042	366.1	6.3	356.9	2.6
14	113.36	148.33	0.76	0.42289	0.00937	0.05718	0.00044	358.1	6.7	358.5	2.7
15	165.91	223.19	0.74	0.46392	0.01506	0.05798	0.00058	387.0	10.5	363.3	3.6
18	193.27	251.19	0.77	0.46027	0.00690	0.05684	0.00038	384.4	4.8	356.4	2.3
20	133.01	165	0.81	0.45394	0.00814	0.05524	0.00039	380.0	5.7	346.6	2.4
24	83.72	128.93	0.65	0.43761	0.00996	0.05747	0.00045	368.6	7.0	360.2	2.8
25	213.55	328.6	0.65	0.44314	0.00716	0.05710	0.00038	372.5	5.0	357.9	2.3
26	177.57	259.46	0.68	0.58012	0.00756	0.05769	0.00037	464.5	4.9	361.6	2.3
29	102.78	155.21	0.66	0.46150	0.01499	0.05672	0.00057	385.3	10.4	355.7	3.5
35	207.87	246.46	0.84	0.43250	0.00839	0.05682	0.00041	365.0	6.0	356.3	2.5

安山岩与流纹岩的分配模式明显不同。玄武安山岩、安山岩样品曲线基本相似,呈右倾型,大离子亲石元素相对富集(如 Cs、Rb、Th、U),而高场强元素相对亏损,具有 Nb、Ta、Ti 三种元素的负异常,这一特征与洋壳俯冲-消减作用有关。相比之下,流纹岩样品曲线变化比较大,明显不同于中基性岩石,表现出明

显的 Ba、Sr、P、Eu、Ti 等元素的负异常,而相对富集 Cs、Rb、Th、U 等元素。

6 讨 论

6.1 年代学格架

西天山大哈拉军山组火山-沉积岩系主要出露

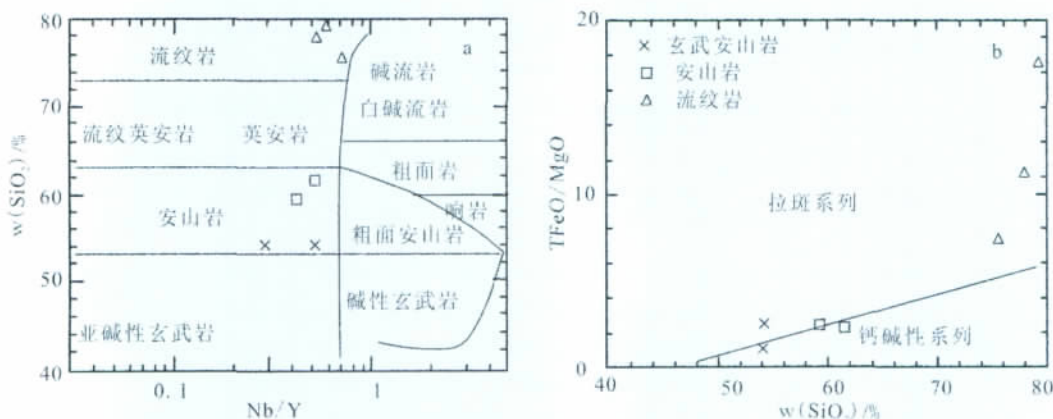
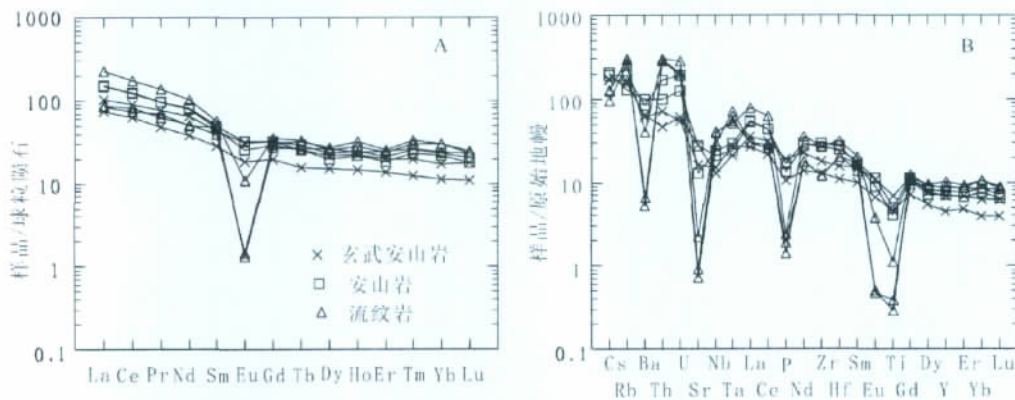
图6 SiO_2 -Nb/Y 图解(a)和 TFeO/MgO - SiO_2 图解(b)Fig. 6 Diagrams of SiO_2 versus Nb/Y (a) and TFeO/MgO versus SiO_2 (b)

图7 大哈拉军山组火山岩稀土元素配分模式(A)和微量元素标准化蛛网图(B)

(标准化数据引自参考文献[23])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (A) and primitive mantle normalized trace element patterns of Dahalajunshan Formation volcanic rocks (B)

于伊犁地块南北缘和盆地中部的阿吾拉勒地区,其建组剖面位于特克斯县城南科克苏河流域的大哈拉军山,为一套紫红色—灰绿色中酸性熔岩、火山碎屑岩夹少量正常沉积岩。根据剖面中细砂岩所含层孔虫、卢木 *Calamites* sp. 及其与上下地层的接触关系确定为下石炭统^①。自建组以来,前人对大哈拉军山组火山岩的形成时代作了一系列研究。有学者认为,特克斯达坂和阿希金矿周缘大哈拉军山组火山岩形成于晚泥盆世^[10],并且应该解体。然而近来报道的乌孙山西段大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 353Ma 和 344Ma^[5]。本文测定乌孙山东段安山岩与安山质晶屑凝灰熔岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 354Ma、356Ma,并且火山岩地球化学特征与区域基

本相同,确定乌孙山地区大哈拉军山组火山岩主体形成于早石炭世早期,有少量可能形成于晚泥盆世晚期,是同一构造环境下的产物。

综合分析西天山地区大哈拉军山组火山岩的形成年龄(表3)可以发现,出露于伊犁地块北缘的火山岩形成年龄介于 386~345Ma 之间,说明北缘火山岩浆作用相对较早;伊犁盆地内部火山岩形成年龄在 342~337Ma 之间,属早石炭世中期;出露于伊犁地块南部及南缘的火山岩形成年龄在 368~326Ma 之间,表明火山喷发从晚泥盆世开始,主体在早石炭世。因此,西天山大哈拉军山组火山岩浆喷发特点是:伊犁地块南北缘火山喷发时代较早,而伊犁盆地内部相对较晚,即火山作用从伊犁地块南北缘向伊犁盆地内部逐渐变年轻,且火山岩主体喷发时代差

表 2 乌孙山地区大哈拉军山组火山岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Analytical results of major and trace elements and REE of Dahalajunshan Formation volcanic rocks from Wusunshan area

样品 岩性	10TK08-7 玄武安山岩	10TK08-5 玄武安山岩	10TK08-6 安山岩	10TK05-2 安山岩	10TK09-1 流纹岩	10TK09-2 流纹岩	10TK10-1 流纹岩
SiO ₂	54.18	54.26	59.28	61.53	75.34	78.92	77.76
TiO ₂	0.94	1.36	1.00	0.82	0.23	0.06	0.08
Al ₂ O ₃	15.03	16.79	18.30	16.03	13.26	11.45	12.02
Fe ₂ O ₃	2.29	4.26	2.60	1.64	0.73	0.65	0.81
FeO	6.05	4.83	3.26	2.83	0.46	0.47	0.62
MnO	0.29	0.33	0.19	0.09	0.03	0.06	0.05
MgO	7.14	3.30	2.19	1.80	0.15	0.06	0.12
CaO	5.11	5.87	3.81	2.80	0.23	0.16	0.22
Na ₂ O	2.21	3.64	4.37	4.66	3.76	3.52	3.69
K ₂ O	2.49	1.92	2.32	3.52	4.85	4.09	3.88
P ₂ O ₅	0.22	0.39	0.34	0.27	0.05	0.03	0.04
LOI	3.85	2.80	2.05	3.70	0.58	0.26	0.57
Totle	99.80	99.75	99.71	99.69	99.67	99.73	99.86
Pb	53.1	12.2	24.7	15.6	12.3	26.3	31.5
Zn	182.0	133.0	96.6	67.5	18.1	21.7	26.0
Cr	389.00	13.20	8.14	4.76	5.42	3.83	6.03
Ni	105.00	11.70	3.36	2.41	2.83	2.75	2.94
Co	23.10	14.40	8.74	6.59	1.23	0.90	0.71
Li	40.2.00	19.20	27.50	29.9	1.93	2.09	1.80
Rb	101.0	90.1	76.9	115.0	163.0	187.0	181.0
Cs	3.57	3.68	4.23	4.06	2.07	2.73	2.79
Mo	0.08	0.85	0.68	0.45	1.24	1.04	0.47
Sr	326.0	559.0	542.0	255.0	45.5	19.1	15.2
Ba	393.0	430.0	655.0	547.0	281.0	36.3	45.0
V	169.00	250.00	96.30	69.40	4.47	0.04	3.48
Sc	25.80	24.80	14.60	10.30	4.42	2.45	3.02
Nb	10.0	8.6	13.8	15.7	27.7	26.8	19.8
Ta	1.02	0.77	0.90	1.10	1.96	2.12	2.71
Zr	133	186	274	304	296	129	131
Hf	3.11	4.48	7.00	7.74	9.01	5.89	5.97
Ga	16.9	20.6	19.8	19.1	18.3	16.6	17.6
U	1.11	1.24	2.57	3.92	6.05	3.97	4.35
Th	5.63	3.66	7.84	13.20	24.70	23.10	24.40
Y	19.4	29.9	33.1	30.3	39.4	45.9	38.1
La	16.9	23.4	34.3	34.9	52.8	20.4	20.1
Ce	36.9	52.7	72.9	72.0	108.0	49.1	44.8
Pr	4.26	6.78	8.65	8.47	12.60	5.81	6.32
Nd	17.1	28.1	36.3	34.3	46.5	23.1	22.8
Sm	4.05	6.17	6.99	6.63	8.48	5.81	7.05
Eu	1.010	1.700	1.740	1.380	0.610	0.081	0.075
Gd	3.85	6.14	6.13	5.64	7.06	6.28	5.43
Tb	0.55	0.90	1.02	0.89	1.19	1.15	0.95
Dy	3.61	5.18	5.52	4.70	6.26	6.69	6.52
Ho	0.78	1.17	1.31	1.16	1.54	1.75	1.31
Er	2.09	3.03	3.30	2.90	3.90	4.13	3.92
Tm	0.30	0.47	0.61	0.55	0.74	0.83	0.66
Yb	1.74	2.70	3.63	3.39	4.87	4.87	3.87
Lu	0.26	0.42	0.48	0.43	0.62	0.58	0.58
ΣREE	93.40	138.86	182.88	177.34	255.17	130.58	124.38
(La/Yb) _N	6.60	5.89	6.42	6.99	7.37	2.85	3.53
(La/Sm) _N	2.61	2.37	3.06	3.29	3.89	2.19	1.78
(Gd/Yb) _N	1.79	1.84	1.37	1.35	1.17	1.04	1.14
δEu	0.77	0.83	0.79	0.67	0.23	0.04	0.04

注:氧化物含量的单位为%,稀土和微量元素含量为 10⁻⁶

别不大(约 40Ma)。

6.2 构造环境探讨

大哈拉军山组火山岩在西天山广泛分布,是天山造山带构造演化的重要单元,尤其与中天山南缘蛇绿混杂岩带为代表的南天山洋演化的关系更为密切。研究表明,哈尔克山北的长阿吾子蛇绿岩、古洛沟蛇绿岩、巴仑台南侧的乌瓦门蛇绿岩和库米什南侧的榆树沟-铜花山-硫磺山蛇绿混杂岩为中天山南缘蛇绿混杂岩带^[28-29],该带中长阿吾子蛇绿岩的辉石⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄为 439Ma^[30],榆树沟蛇绿岩斜长花岗岩和斜长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 439Ma、435Ma^[31],代表了中天山南缘蛇绿岩的形成年龄,记录了南天山洋盆的存在。关于该洋盆的俯冲-消减时代,众多学者对蛇绿混杂岩带中榴辉岩的蓝闪石、多硅白云母进行了⁴⁰Ar-³⁹Ar 测年和高温麻粒岩锆石 U-Pb 测年^[32-34,28],认为榴辉岩的峰期变质年龄为 415~345Ma,表明南天山洋盆在晚志留世已经开始俯冲消减并遭受高压变质作用,一直持续到早石炭世。中天山南缘晚志留世巴音布鲁克组岛弧火山岩和普遍发育的晚志留世—早泥盆世陆弧型侵入岩均被认为是南天山洋盆向北俯冲消减的产物^[35-37]。西南天山蛇绿岩带中硅质岩所含的放射虫化石,时代确定为晚泥盆世—早石炭世^[38],表明早石炭世代表了洋盆关闭的时代下限。西天山大面积分布的晚泥盆世—早石炭世火山岩

表 3 西天山大哈拉军山组火山岩年龄

Table 3 Volcanic rock ages of Dahalajunshan Formation in the West Tianshan Mountains

序号	地 点	岩性	方 法	年龄值/Ma	数据 来源
伊犁 地块 北 缘	1 吐拉苏盆地京希沟- 伊尔曼德的金矿	流纹岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	386.4±9.3	[11]
	2 阿希金矿(伊犁板块北缘 吐拉苏火山断陷盆地中)	石英安山岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	363.2±5.7	[2]
	3 阿希金矿富矿围岩	安山岩	全岩 Rb-Sr 等时线	345.9±9.0	[24]
	4 吐拉苏—也里莫敦 加曼特金矿区	英安岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	354.0±1.3	[25]
	5 尼勒克水泥厂北于赞一带	流纹岩 流纹岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	363.4±2.5 369.7±4.9	③
伊犁 盆地 内部	6 阿吾拉勒山北东衣生布谷	安山岩	全岩 Rb—Sr 等时线	337	[26]
	7 阿吾拉勒查岗诺尔铁矿区	流纹岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	321.2±2.3	[27]
伊犁 地块 南部 及南 缘	8 新源城南的那拉提山北坡	玄武岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	353.7±4.5	[9]
	9 特克斯县林场 (科克苏河东面)	辉长斑岩 (辉石)	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$	326.8±15.0	[1]
	10 特克斯科桑溶洞	英安岩	SHRIMP	368.3±1.7	[4]
	11	流纹岩	锆石 U-Pb	356.4±1.7	

与侵入岩体均被证实是板块持续俯冲—碰撞造山的结果^[10,39-41]。阿吾拉勒东部玉希莫勒盖达坂大哈拉军山组中玄武安山岩—高钾玄武安山岩—粗安岩组合的发现,说明其形成与俯冲作用有关,为造山最后演化阶段的产物^[42]。因此,众多区域资料表明,以中天山南缘蛇绿混杂岩带为代表的南天山洋盆俯冲消减是从晚志留世开始的,并且一直持续到晚泥盆世—早石炭世,最终在早石炭世末期洋盆闭合,大哈拉军山组火山岩形成于活动大陆边缘环境,应产在板块俯冲—碰撞的最后阶段。

研究区安山岩、玄武安山岩样品的地球化学表明,火山岩具有富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)、相对亏损高场强元素(HFSE)和重稀土元素(HREE)的特点,表明岩浆可能来源于一种富集的地幔,其形成可能与板块俯冲有关。中基性熔岩的 Nb、Ta、Ti 三种元素显著亏损和所有样品 Ta/Yb 比值小于 0.5,表明其源区岩浆为与俯冲有关的岛弧岩浆^[43]。在 Hf—Th—Ta 三元素图解(图 8-A)上,Hf/Th 比值介于 0.24~1.22 之间,都小于 3,样品点均落入岛弧火山岩区。但与典型岛弧火山岩的地

球化学特征不同,大哈拉军山组火山岩以高钾钙碱性系列为主(图略),安山岩的 K_2O 平均 3.25%, Al_2O_3 含量均大于 16%,具有活动大陆边缘火山岩的特点^[44]。在 Th/Yb—Ta/Yb 图解(图 8-B)上,大部分样品点落入陆缘弧火山岩区域内,并显示了从钙碱性向高钾钙碱性、钾玄系列演化的趋势,具有大陆火山岛弧的亲缘性。火山岩样品 $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{N}}=3.53\sim10.20(>>1)$, $\text{Nb}/\text{La}=0.37\sim1.31$ (主体小于 1),明显显示了地壳组分参与的影响。从而进一步佐证了大哈拉军山组火山岩形成于与板块俯冲有关的活动大陆边缘环境。

7 结 论

(1)乌孙山地区大哈拉军山组火山岩岩石类型由玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩及相应的火山碎屑岩组成,以安山岩和流纹岩分布最多。地层序列表现为:下部为安山质、流纹质熔岩和火山碎屑岩;中部为英安质、安山质熔岩和火山碎屑岩;上部为玄武质火山岩,具有多韵律喷发的特征。地球化学特征表明,火山岩属钙碱性系列,富集轻稀土

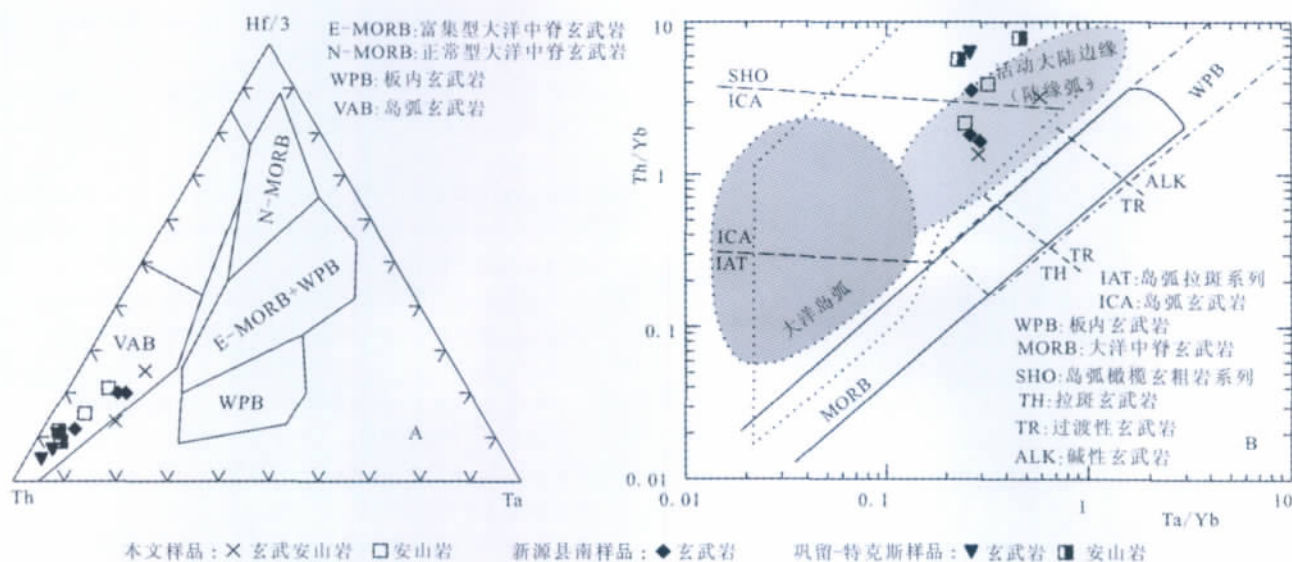
图 8 火山岩的 Hf-Th-Ta 图解^[46](A)和 Th/Yb-Ta/Yb 图解^[48](B)(巩留-特克斯数据引自参考文献^[2],新源县南数据引自参考文献^[10])

Fig. 8 Hf-Th-Ta diagram (A) and Th/Yb-Ta/Yb diagram of volcanic rocks-46(B)

元素和大离子亲石元素(如 Cs、Rb),亏损重稀土元素和高场强元素,具有明显的 Nb、Ta、Ti 负异常。结合中天山板块南缘的演化特征,笔者认为,大哈拉军山组形成于活动大陆边缘环境,产在板块俯冲的最后阶段。

(2)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示,安山岩和中部安山质晶屑凝灰熔岩分别形成于 $353.9\text{Ma} \pm 6.5\text{Ma}$ 和 $356.3\text{Ma} \pm 4.4\text{Ma}$,表明乌孙山地区大哈拉军山组形成于早石炭世早期。

(3)通过区域对比,西天山大哈拉军山组火山岩浆喷发特点为:中天山板块南北缘喷发时代较早,从晚泥盆世开始,而伊犁盆地内部相对较晚,即火山作用从伊犁地块南北缘向伊犁盆地内部时代逐渐年轻,且火山喷发时代差别不大(约 40Ma)。因此,将大哈拉军山组的形成时代限定在 363~326Ma 之间,即晚泥盆世晚期(不早于法门期)到早石炭世早期,主体是早石炭世杜内期—维宪期。

致谢:野外工作得到中国地质调查局西安地质调查中心王洪亮、马中平副研究员,孙吉明、唐卓、朱涛、李平工程师和张越、李现冰等同学的大力协助,样品测试过程中得到西北大学大陆动力学国家重点实验室和西安地质调查中心测试中心工作人员的指导,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]刘友梅,杨蔚华,高计元.新疆特克斯县林场大哈拉军山组火山岩年代学研究[J].地球化学,1994,23(1):99-104.
- [2]翟伟,孙晓明,高俊,等.新疆阿希金矿床赋矿围岩——大哈拉军山组火山岩 SHRIMP 锆石年龄及其地质意义[J].岩石学报,2006,22(5):1399-1404.
- [3]朱永峰,周晶,宋彪,等.新疆“大哈拉军山组”火山岩形成时代问题及其解题方案[J].中国地质,2006,33(3):487-497.
- [4]朱永峰,安芳,薛云兴,等.西南天山特克斯科桑溶洞火山岩的锆石 U-Pb 年代学研究[J].岩石学报,2010,26(8):2255-2263.
- [5]张芳荣,程春华,余泉,等.西天山乌孙山一带大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J].新疆地质,2009,27(3):231-235.
- [6]李永军,李注苍,周继兵,等.西天山阿吾拉勒一带石炭系岩石地层单位厘定[J].岩石学报,2009,25(6):1132-1140.
- [7]车自成,刘良,刘洪福,等.论伊犁裂谷[J].岩石学报,1996,12(3):478-490.
- [8]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.
- [9]夏林圻,李向民,夏祖春,等.天山石炭纪—二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱[J].西北地质,2006,39(1):1-49.
- [10]朱永峰,张立飞,古丽冰,等.西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J].科学通报,2005,50:2004-2014.
- [11]安芳,朱永峰.西北天山吐拉苏盆地火山岩 SHRIMP 年代学和微量元素地球化学研究[J].岩石学报,2006,24(12):2741-2748.
- [12]钱青,高俊,熊贤明,等.西天山昭苏北部石炭纪火山岩的地球化学特征、成因及形成环境[J].岩石学报,2006,22(5):1307-1323.
- [13]高俊,钱清,龙灵利,等.西天山的增生造山过程[J].地质通报,

- 2009,28(12):1804-1806.
- [14]刘伟,徐永波,衡星,等.赛里木地块北缘古元古界变质杂岩地质特征及构造意义[J].新疆地质,2009,27(3): 201-206.
- [15]于海峰,王福君,潘明臣,等.西天山古元古代木札尔特岩群地质特征及时代厘定[J].新疆地质,2011,29(1):20-25.
- [16]徐学义,夏林圻,李向民,等.下石炭统马鞍山组在天山构造演化中的地位[J].新疆地质,2002,20(4):338-341.
- [17]朱志新,李锦铁,董连慧,等.新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义[J].地学前缘,2011,18(2):170-179.
- [18]王博,舒良树,Dominiq,等.伊犁北部博罗霍努岩体年代学和地球化学研究及其大地构造意义[J].岩石学报,2007,23(8):1885-1900.
- [19]李永军,张天继,栾新东,等.西天山特克斯达坂组晚古生代若干不整合的厘定及其地质意义[J].地球学报,2008,29(2):145-153.
- [20]柳小明,高山,袁洪林,等.193nm LA-ICPMS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析[J].岩石学报,2002,18(3): 408-418.
- [21]Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000,18(4):423-439.
- [22]邓晋福,罗照华,苏尚国.岩石成因、构造环境与成矿作用[M].北京:地质出版社,2003:1-420.
- [23]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ.,1989,42: 313-345.
- [24]李华芹,谢才富,常海亮,等.新疆北部有色金属矿床成矿作用年代学[M].北京:地质出版社,1998:107-127.
- [25]白建科,李智佩,徐学义,等.新疆西天山吐拉苏-也里莫墩火山岩带年代学:对加曼特金矿成矿时代的约束[J].地球学报,2011,32(3):322-330.
- [26]李注苍,李永军,李景义,等.西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析[J].新疆地质,2006,(2):120-125.
- [27]冯金星,石福品,王帮耀,等.西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿[M].北京:地质出版社,2010.
- [28]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.
- [29]董云鹏,周鼎武,张国伟,等.中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境[J].岩石学报,2005,21(1):37-44.
- [30]郝杰,刘小汉.南天山蛇绿混杂岩形成时代及其大地构造意义[J].地质科学,1993,28(1):93-95.
- [31]杨经绥,徐向珍,李天福,等.新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石 U-Pb 同位素定年:早古生代洋盆的证据[J].岩石学报,2011,27(1):77-95.
- [32]高俊,张立飞,刘圣伟.西天山蓝片岩榴辉岩形成和抬升的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄记录[J].科学通报,2000,45(1):89-94.
- [33]高俊,龙灵利,钱青,等.南天山:晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? [J].岩石学报,2006,22(5):1049-1061.
- [34]周鼎武,苏犁,简平,等.南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J].科学通报,2004,49(14): 1411-1415.
- [35]马中平,夏林圻,徐学义,等.南天山北部志留系巴音布鲁克组火山-侵入杂岩的形成环境及构造意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(5):736-743.
- [36]徐学义,马中平,夏祖春,等.天山中西段古生代花岗岩 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素定年及岩石地球化学特征研究[J].西北地质,2006,39(1):50-75.
- [37]龙灵利,高俊,熊贤明,等.新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究[J].岩石学报,2007,23(4): 719-732.
- [38]舒良树,王博,朱文斌,等.南天山蛇绿混杂岩中放射虫化石的时代及其构造意义[J].地质学报,2007,81(9):1161-1168.
- [39]郭璇,朱永峰.新疆新源县城南石炭纪火山岩岩石学和元素地球化学研究[J].高校地质学报,2006,12(1):62-73.
- [40]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.
- [41]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.
- [42]罗勇,牛贺才,单强,等.西天山玉希莫勒盖达坂玄武安山岩-高钾玄武安山岩-粗安岩组合的发现及其地质意义[J].岩石学报,2009,25(4):934-943.
- [43]Candie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary: identification and significance [J]. Lithos, 1989,23:1-18.
- [44]Jakes P, White A J R. Major and Trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas[J]. Bull. Geol. Soc. Am., 1972,83:29-40.
- [45]Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1980,50:11-30.
- [46]Paerce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[C]//Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva Publications, Nantwich, Cheshire, 1983:230-249.
- ① 新疆地质矿产局区域地质调查大队一分队.昭苏幅 1:20 万区域地质调查报告.1978.
- ② 新疆地质矿产局第九地质大队,长安大学.巩留-特克斯一带 1:5 万区域地质调查报告.2005.
- ③ 新疆地质矿产局第九地质大队,长安大学.尼勒克胡吉尔台一带 1:5 万区域地质调查报告.2009.