

· 专题研究 ·

西天山阿吾拉勒西段早二叠世粗安岩年代学和地球化学特征

丁振信¹, 薛春纪², 赵晓波², 田建吉³, 闫永红⁴, 罗 晖⁵

(1. 北京大学出版社有限公司, 北京 100871; 2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 核工业北京地质研究院 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029; 4. 中信矿业科技发展有限公司, 北京 100004; 5. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 阿吾拉勒构造岩浆带(ATMB)是西天山重要的Fe-Cu多金属矿带, 尤其阿吾拉勒西段多见Cu矿床/矿点, 但对该地区二叠纪的地球动力学背景和成矿环境的认识还存在分歧。本文在阿吾拉勒西段群吉萨依地区乌郎组火山岩的下部发现了中高钾钙碱性粗安岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年显示该粗安岩的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 300 ± 11 Ma。群吉萨依粗安岩富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素(LILE, 如 Rb、Ba、K), 重稀土元素(HREE)配分平坦, 具有 Nb、Ta、Ti 的强烈亏损, 同时 Nd 同位素相对亏损, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +4.5 \sim +4.9$, Nd 同位素模式年龄(t_{DM})为 808~765 Ma, 具有受俯冲流体交代的地幔岩浆源区特征。群吉萨依粗安岩与中亚造山带北部出露的大量花岗岩具有相似的较为年轻的 t_{DM} 年龄, 与研究区内酸性岩具有相似的同位素地球化学特征, 岩浆很可能来源于新生玄武质下地壳的部分熔融。西天山在早二叠世已经进入后碰撞演化阶段, 很可能在北天山洋岩石圈南向俯冲的地球动力学背景下, 俯冲板片尾部发生断离, 软流圈上涌, 触发新生玄武质下地壳发生部分熔融, 引发具有岛弧特征的高钾钙碱性粗安岩岩浆的喷发, 从而形成群吉萨依粗安岩, 其为造山过程演化到最后阶段的标志, 此时构造体制也相应地由俯冲挤压转换为伸展拉张背景。

关键词: 中高钾钙碱性粗安岩; 早二叠世; 阿吾拉勒西段; 西天山; 年代学; 地球化学

中图分类号: P588.14; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)05-0587-19

Geochronology and geochemistry of the Early Permian trachyandesites in the western Awulale area, West Tianshan Mountains

DING Zhen-xin¹, XUE Chun-ji², ZHAO Xiao-bo², TIAN Jian-ji³, YAN Yong-hong⁴ and LUO Hui⁵

(1. Peking University Press Co., Ltd, Beijing 100871, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 4. CITIC Mining Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100004, China; 5. Geological Survey Institute of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Awulale tectonic magmatic belt is an important Fe-Cu metallogenic zone in western Tianshan Mountains, with especially lots of Cu deposits and ore spots discovered in the western Awulale. Nevertheless, the

收稿日期: 2018-08-12; 接受日期: 2019-06-05; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAB06B02); 国家自然科学基金项目(U1303292, 41072069); 中国地质调查局项目(12120113057300, 1212011220926)

作者简介: 丁振信(1989-), 男, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: ding821032987@163.com; 通讯作者: 薛春纪(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产普查与勘探专业的教学与研究, E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn。

Permian geodynamic background and the metallogenic environments in this area remain unclear. Middle-high potassium calc-alkaline trachyandesite newly discovered at the bottom of Wulang Formation section of volcanic rocks in Qunjisayi area was studied in this paper. La-ICP-MS zircon U-Pb dating of trachyandesite yielded a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age of $300 \pm 11\text{Ma}$. Trachyandesites in Qunjisayi area are geochemically characterized by enrichment of light rare earth elements (LREE) and large-ion lithophile elements (LILE, such as Rb, Ba, and K) and flat distribution of heavy rare earth elements (HREE), together with strong negative Nb, Ta, Ti anomalies. The rocks have whole-rock $\varepsilon\text{Nd}(t)$ values of $+4.5$ to $+4.9$, and Nd isotopic model ages (t_{DM}) of $808 \sim 765\text{Ma}$, indicating that the rocks originated from a fluid metasomatic mantle magma source. Similar to features of a large amount of granite exposed in the northern part of the central Asian orogenic belt, the t_{DM} values are relatively young, and the acidic rocks in the study area have similar isotope geochemical characteristics. The magma probably came from the partial melting of the new basaltic lower crust. The West Tianshan Mountains entered the past-collision evolution stage in the Early Permian, and the formation of the high potassium calc-alkaline trachyandesite magma with arc features might have been related to the partial melting process of the new basaltic lower crust during the upwelling of asthenosphere material and energy that resulted from the break-off of the oceanic lithosphere plate tail that postdated the closure of the North Tianshan Ocean, which was the mark of the final stage of the evolution of the orogenic process. Meanwhile, the tectonic system correspondingly changed from the subduction extrusion background to the extensional tension background.

Key words: intermediate-high potassium calc-alkaline trachyandesite; Early Permian; western Awulale; West Tianshan Mountains; geochronology; geochemistry

Fund support: National Science and Technology Support Plan(2011BAB06B02); National Natural Science Fund Project(U1303292, 41072069); Project of China Geological Survey(12120113057300, 1212011220926)

阿吾拉勒构造岩浆带(ATMB)是西天山重要Fe-Cu多金属矿带(骆文娟等, 2018), 尤其阿吾拉勒西段尼勒克一带与二叠纪构造-岩浆-热液相关的Cu矿床/矿点多见, 地质找矿突破令人期待(蒋宗胜等, 2012; 薛春纪等, 2015; Zhao *et al.*, 2018)。阿吾拉勒地区已有的构造-岩浆-成矿作用多发生在二叠纪(姜常义等, 1996; 陈根文等, 2011; 张贺等, 2012; 赵军等, 2012, 2013), 该时期岩浆活动的时空分布特征、岩石成因以及岩石圈动力学背景等对于揭示区域成矿作用至关重要, 但是已有的研究成果存在较大的分歧。部分学者认为阿吾拉勒西段火山岩是碰撞后岩石圈拆沉作用的结果(李宁波等, 2012; 赵军等, 2013; 陈根文等, 2015)或者可能与塔里木二叠纪地幔柱作用有关(叶海敏等, 2013); 也有部分学者认为西天山早二叠世北天山洋壳岩石圈发生板片断离作用, 伴随新生地幔物质底侵作用, 造成阿吾拉勒地区大规模岩浆活动(Han *et al.*, 2010; Long *et al.*, 2011; 丁振信等, 2014)。目前关于西天山晚古生代末期的岩石圈动力学背景的观点可归纳为岩石圈拆沉作用、地幔柱作用和板片断离作用3种。

阿吾拉勒西段广泛出露石炭-二叠纪火山岩, 以下二叠统乌郎组陆相火山岩为主。本文在阿吾拉勒西段群吉萨依地区乌郎组火山岩剖面下部发现一套粗安岩, 明显与剖面上部双峰式火山岩石组合不同, 于是对其开展了年代学、岩石学、元素和同位素地球化学研究, 探讨其岩石成因和岩浆起源, 试图揭示西天山二叠纪的岩石圈背景和成矿环境。

1 区域背景

阿吾拉勒构造岩浆带(ATMB)位于伊犁板块东北部(图1a)。阿吾拉勒西段发现较多铜矿/矿点(如群吉萨依、群吉、奴拉赛等, 蒋宗胜等, 2012)。阿吾拉勒西段元古宙变质结晶基底与上古生界陆生火山岩和磨拉石序列不整合接触(图1b)。元古宙变质结晶基底主要由中元古界特克斯群花岗片麻岩、二长片麻岩和黑云母麻粒岩变质复合体组成(图1b)。特克斯群复合体中的麻粒岩相花岗片麻岩的锆石U-Pb年龄为 $1\,609 \pm 40\text{Ma}$ (李继磊等, 2009)。上古生界从下到上主要包括上石炭统伊什基里克组海相火山岩夹粉砂岩, 下二叠统乌郎组陆相火山岩

和火山碎屑岩,中二叠统晓山萨依组、哈密斯特组和铁木里克组陆源砾岩和砂岩以及上二叠统巴斯尔干组砂岩和泥岩(图1b、1c、图2)。

下二叠统乌郎组主要由陆相火山岩和火山碎屑岩组成,其中火山岩主要为碱性玄武岩、玄武安山岩、流纹岩、粗安岩,火山碎屑岩包括火山角砾岩、火

山集块岩和凝灰质砂岩,厚度达约4 000 m(图1c、图2)。按照岩石组合的差异,乌郎组可划分为3段(P_1w^1 、 P_1w^2 、 P_1w^3)(图1c),详细的岩石描述见图2。乌郎组火山岩中的玄武岩 Rb-Sr 等时线年龄为 298 ± 7 Ma (李华芹等, 1997),流纹岩中相对年轻的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 296.3 ± 3.1 Ma 和 $290.9 \pm$

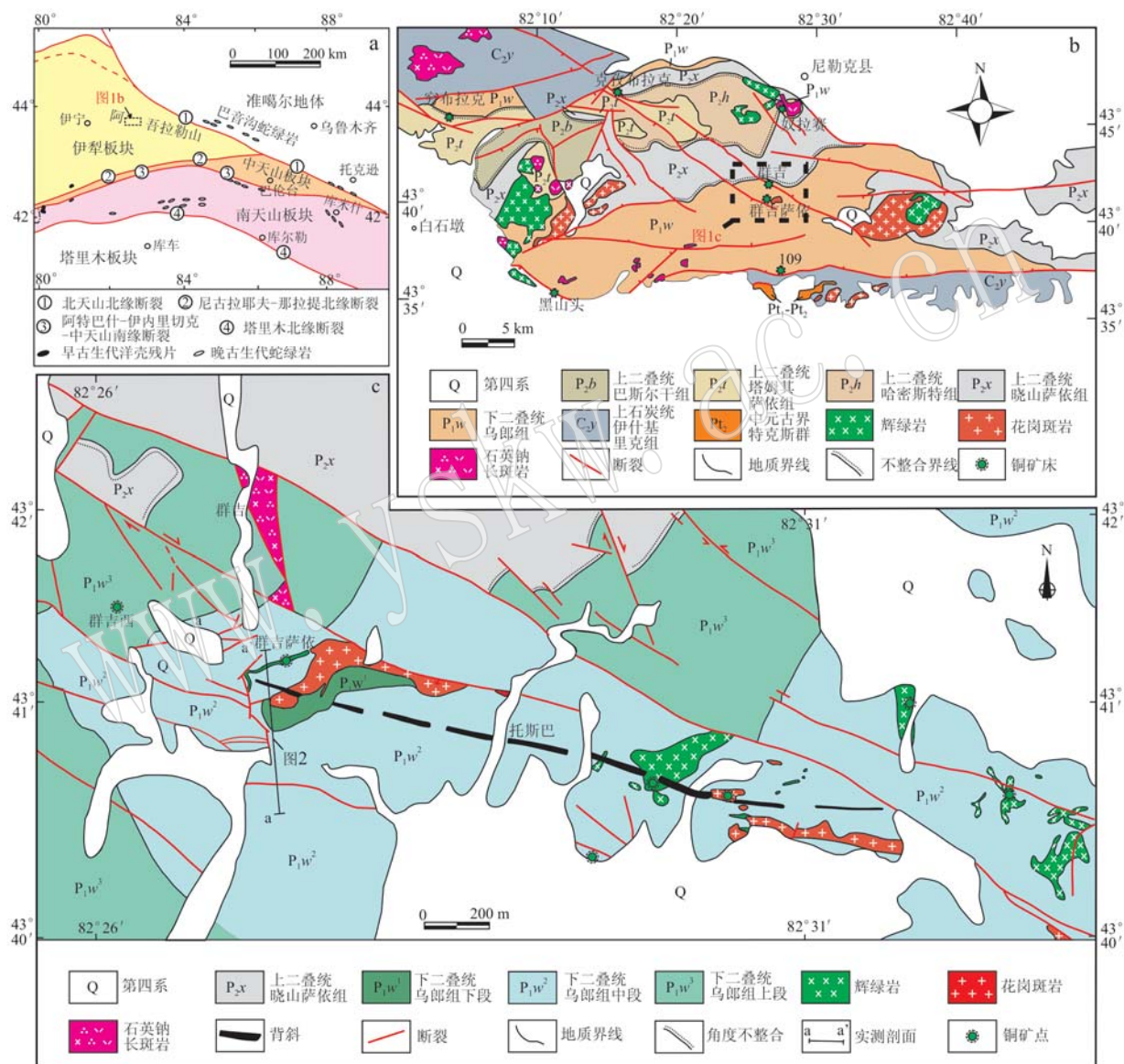


图1 新疆西天山地质纲要图[a, 据 Biske 等(2010)、Gao 等(2011)和 Xiao 等(2013)修改]、阿吾拉勒西段地质图[b, 据新疆维吾尔自治区地质局(1979)^①和宋志瑞等(2005)修改]及阿吾拉勒西段群吉萨依地区地质图[c, 据邵行来等(2010)^②修改]
Fig.1 Geological map of the Chinese western Tianshan Mountains showing the major sutures (a, modified after Biske *et al.*, 2010, Gao *et al.*, 2011 and Xiao *et al.*, 2013), regional geological map of the western Awulale region (b, modified after Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1979^① and Song Zhirui *et al.*, 2005), and geological map of the Qunjisayi area, western Awulale (c, modified after Shao Xinglai *et al.*, 2010^②)

① 新疆维吾尔自治区地质局. 1979. 1:20 万区域地质调查报告(巩留幅 K-44-V).

② 邵行来等. 2010. 新疆尼勒克县群吉萨依铜矿及外围普查物探工作报告.

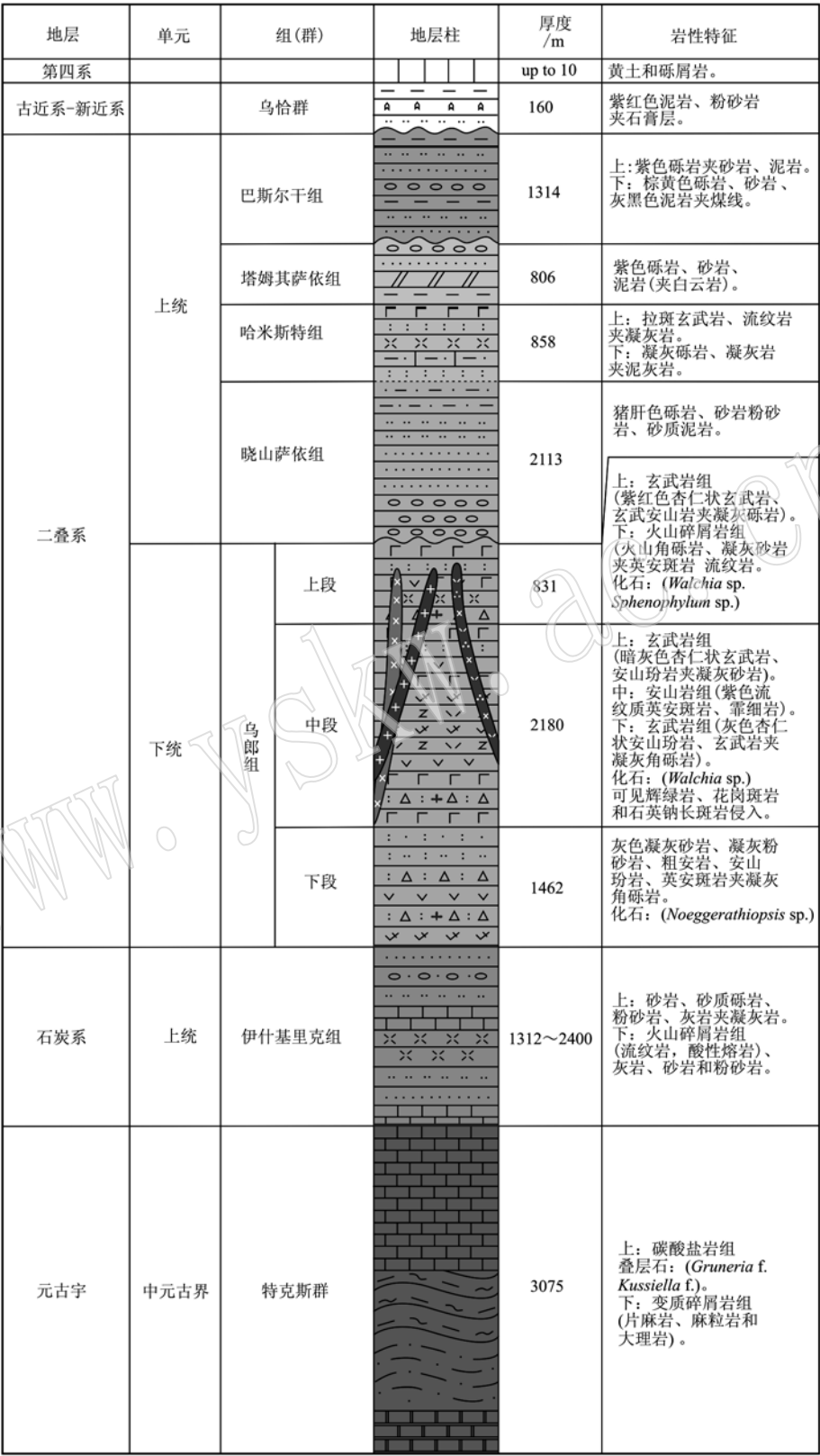


图 2 西天山阿吾拉勒西段区域地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the western Awulale region and main rock types

3.3 Ma (丁振信等, 2014)。乌郎组火山岩是重要的赋矿围岩, 产出群吉萨依、群吉、109 和黑山头等铜矿床。

阿吾拉勒西段二叠纪浅成侵入体广泛侵入于二叠纪火山-沉积岩序列中(图 1b), 岩石类型包括花岗斑岩、石英钠长斑岩和辉绿岩体。这些侵入体与铜矿化有着密切的空间关系(图 1b)。前人对石英钠长斑岩进行的 Rb-Sr 同位素、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素和锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年得出 268 ~ 248 Ma 的年龄(李华芹等, 1998; 赵振华等, 2003; Zhao *et al.*, 2008) 和 303 Ma (刘睿等, 2017)。花岗斑岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 302 ± 4 Ma (闫永红等, 2013)。阿吾拉勒西段受东西向到北西向破碎断层控制, 断层经历了右旋走滑改造, 与区域内岩浆岩出露情况和铜矿化可能存在一定的关系(图 1b)。区内显著发育一系列北东和北-北东向破碎断层(赵军等, 2012)。

群吉萨依地区二叠系主要为下二叠统乌郎组(P_1w)和上二叠统晓山萨依组(P_2x), 北部上二叠统晓山萨依组呈断裂或角度不整合覆于乌郎组之上(图 1c)。乌郎组是本区最主要的火山岩地层, 产状稳定, 倾角较小, 主要为一套陆相火山熔岩-火山碎屑岩建造, 包括橄榄玄武岩、杏仁状安山岩、英安岩、流纹岩、粗安岩、霏细岩、火山角砾岩、熔凝灰岩、凝灰岩等。熔岩多为块状, 层理不清, 厚度变化大呈不均匀透镜体产出(朱志新等, 2012), 酸性和基性地层韵律产出, 具有典型的双峰式火山岩特征。上覆晓山萨依组岩性主要包括中厚层砾岩、砂岩、粉砂

岩、碎屑灰岩和晶屑凝灰岩, 层理发育, 岩层上部可见泥岩、页岩等, 可能代表了一个快速隆升的构造环境。区域构造主要表现为 NWW 向断裂及托斯巴背斜。沿托斯巴背斜核部辉绿岩、花岗斑岩及石英钠长斑岩呈岩株、岩脉状侵入于下二叠统乌郎组火山岩中(图 1c), 侵入岩锆石 U-Pb 年龄为 300 ~ 290 Ma, 形成于后碰撞伸展环境(闫永红等, 2013; Zhao *et al.*, 2018)。

2 样品采集和岩相学特征

本文样品采自西天山阿吾拉勒西段群吉萨依地区下二叠统乌郎组下段(P_1w^1)出露的一套粗安岩, 样品新鲜, 未见明显的热液蚀变和表生风化, 采集位置见野外地质剖面图(图 3)。对 7 件粗安岩样品进行了全岩主量、微量元素分析, 4 件样品进行了 Sr-Nd 同位素分析, 1 件样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年和锆石微量元素测定。

粗安岩样品呈灰色或暗红色(图 4a、4b), 具斑状结构(图 4c), 块状构造, 斑晶含量大约为 25%, 主要为斜长石和单斜辉石。斜长石斑晶呈长条状, 含量为 20%, 大小为 0.3 ~ 0.7 cm; 辉石斑晶呈五角状或短柱状, 含量为 5%, 大小为 0.1 ~ 0.2 cm。基质呈细晶状, 具交织结构, 斜长石微晶呈平行排列或近似平行排列, 辉石和磁铁矿分布于其中, 少见玻璃质及显微隐晶质, 斜长石表面发生轻微蚀变, 主要为绿泥石化或绢云母化。

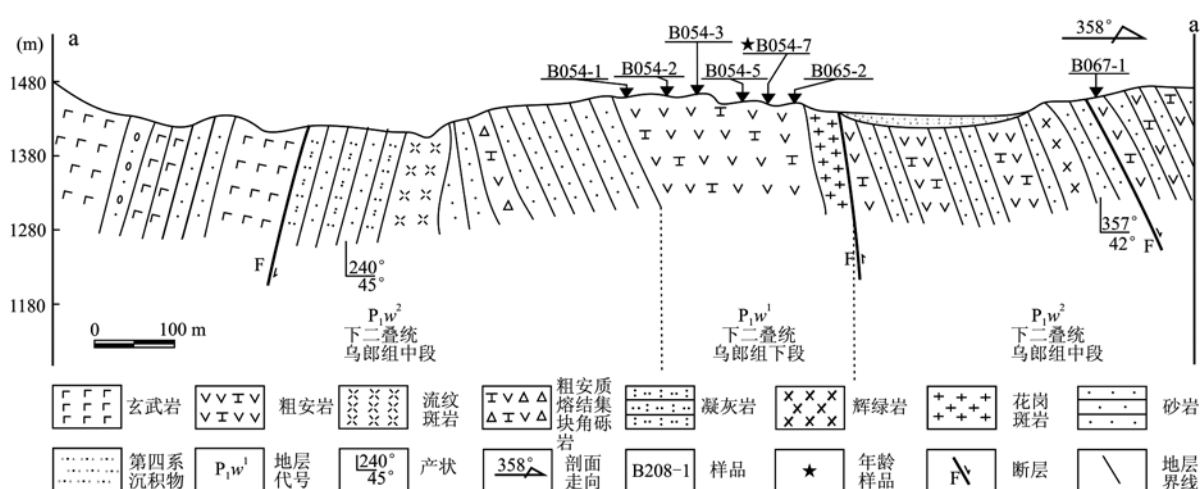


图 3 新疆阿吾拉勒西段下二叠统乌郎组火山岩实测剖面图

Fig. 3 Geological section of volcanic rocks of the Lower Permian Wulang Formation, western Awulale, Xinjiang

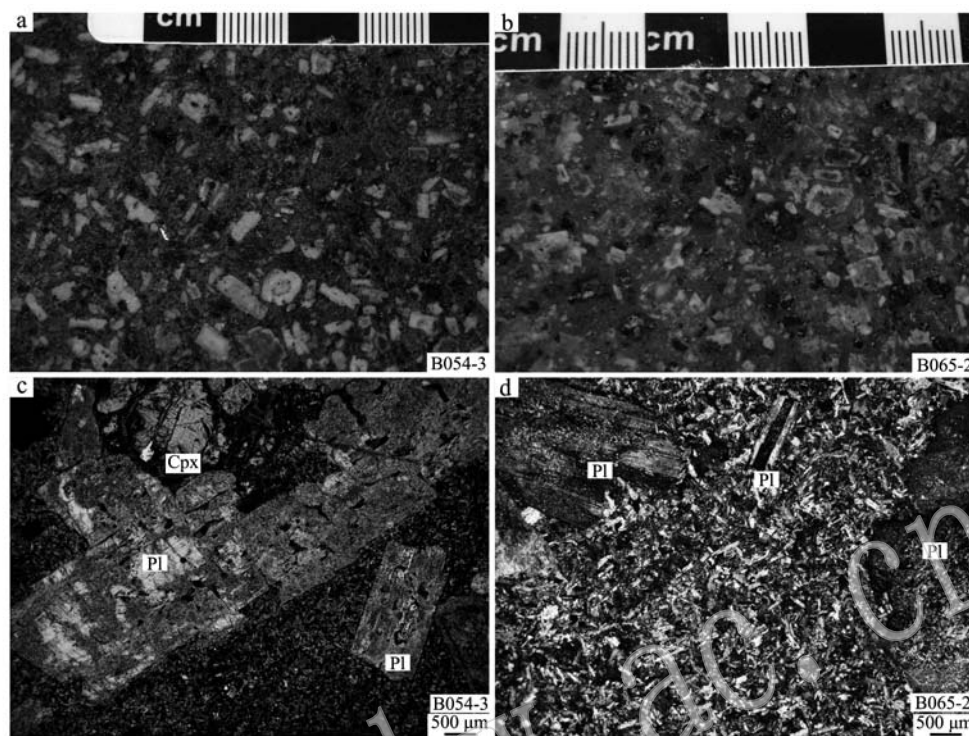


图4 粗安岩手标本(a,b)和显微镜下照片(c,d,正交偏光)

Fig. 4 Hand specimen photos (a, b) and microphotographs (c, d, crossed nicols) of trachyandesites

Pl—斜长石; Cpx—单斜辉石

Pl—plagioclase; Cpx—clinopyroxene

3 分析方法

锆石分选在河北廊坊区域地质调查研究所采用浮选和电磁选等方法完成。锆石的挑选工序为:先将样品洗净自然风干,粉碎至60~70目,通过重液法、磁法、电磁法、酒精淘洗、双目镜下手工挑选等工序,选择其中均一、透明、颜色相同且在荧光下无矿物包裹的锆石颗粒,然后使用环氧树脂固定,制成锆石靶。在进行LA-ICP-MS分析之前,需将锆石靶样表面抛光磨平并在酸容器中清洗。通过偏光显微镜透反射和阴极发光观测、照相分析锆石表面特征和内部结构并选择测点位置。锆石透反射观测在中国地质大学(北京)显微镜实验室完成,阴极发光照相在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针与电镜实验室 Cameca 电子探针仪器上完成,分析电压为50 kV,电流为15 nA,阴极发光照片被用来检查锆石的内部结构和选择分析区域。

锆石 U-Pb 同位素定年工作在北京大学大陆动力学国家重点实验室使用带有 Geolas2005 激光剥蚀

系统的 Agilent 7500a ICP-MS 仪器上完成,测试时室内温度为20℃,相对湿度30%,激光束斑直径为30 μm,剥蚀深度为20~40 μm,载气为He,气流速度为270 mL/min,工作电压为27.1 kV,激光能量密度为29 J/cm²。详细分析步骤和定年数据处理方法详见文献(Yuan *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2012)。实验过程采用 Nist 610、GJ-1 和 91500 内标控制的方法,每隔5个数据点分别用两个91500标样校正。采用软件 GLITTER4.0 对分析数据进行离线处理,以²⁹Si作为内标校正锆石微量元素。采用 Andersen(2002)进行普通铅校正。锆石 U-Pb 年龄谱和图的绘制和 MSWD 的计算均采用 Isoplot4.0(Ludwig, 2003)。对于年龄小于1 000 Ma 的岩浆锆石,采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,对大于1 000 Ma 的锆石,采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄。

新鲜岩石样品经去表皮、蒸馏水洗净自然干燥后粉碎至200目以备主微量元素分析,所有样品的全岩主微量地球化学分析均由核工业北京地质研究院分析测试中心完成。主量元素测试方法为固态 X 射线荧光光谱仪,测试仪器型号为飞利浦 PW2404-X,分析精度优于3%。微量元素测试方法为溶液稀释法

电感耦合等离子质谱(ICP-MS), 测试仪器型号为 Finnigan MAT 的 HR-ICP-MS(Element I), 测试过程中分析精度优于 6%。测试过程中每 10 个样品选取一个进行重复测定。分析测试方法详见闻欣等(2001)。

Sr-Nd 同位素分离和测试均在中国科学技术大学地球与空间科学学院固体同位素地球化学实验室进行。测试方法为热电离质谱(TIMS), 测试仪器型号为德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电离质谱仪, 采用 NBS987 和 BCR-1 国际标样进质量监控。全流程 Sr 和 Nd 实验本底分别约为 <300 pg 和 <50 pg, 测试分析过程中分析精度优于 0.5%。Sr 和 Nd 同位素比值测定分别采用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化。标样 NBS987 Sr 的平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.710254 ± 12 ($n=27, 2$), 标

样 JMC 和 AMES 的平均 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值分别为 0.51187 ± 7 ($n=8, 2$) 和 0.512145 ± 12 ($n=15, 2$)。分析测试流程参考 Chen 等(2007)。

4 分析结果

4.1 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学和微量元素分析

粗安岩中大多数锆石呈自形-半自形长条状、短柱状, 长度 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ 左右, 长宽比介于 $1 \sim 3$ 之间。锆石并没有显示典型的岩浆锆石振荡环带的特征, 而是呈现条带状, 很多锆石颗粒内部含有继承内核(图 5a)。粗安岩样品 B054-7 中所有锆石颗粒的 U-Pb 测年数据列于表 1, 锆石谐和图见图 5b。25 个测点的 Th 含量为 $32.11 \times 10^{-6} \sim 305.10 \times 10^{-6}$, U 含量

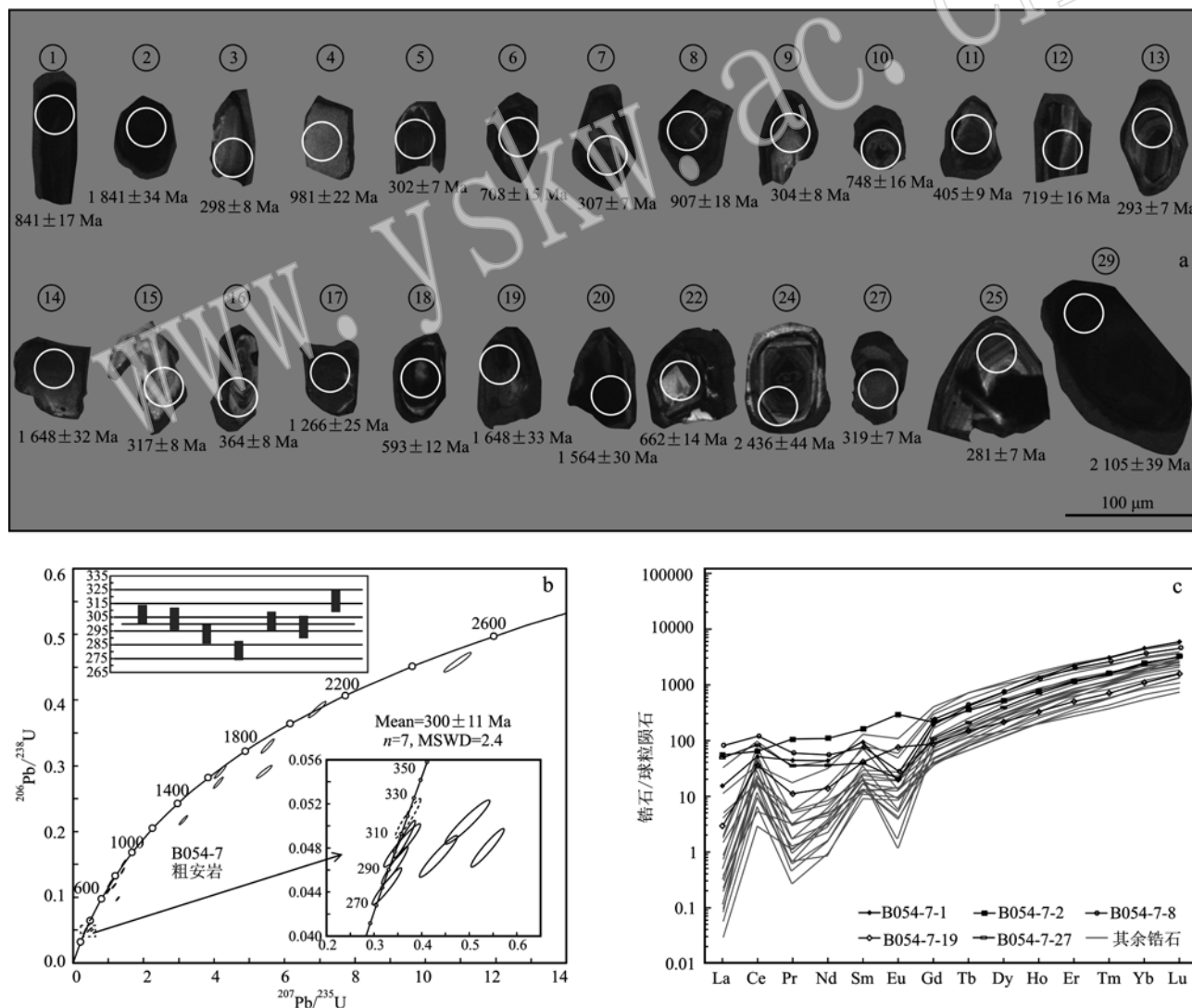


图 5 群吉萨依粗安岩锆石的阴极发光图像(a)、锆石 U-Pb 年龄协和图(b)和锆石稀土元素球粒陨石配分模式图(c)
Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images (a), U-Pb concordia diagram (b) and chondrite-normalized REE patterns (c) of zircon grains of the Qunjisayi trachyandesite in the Awulale area

表 1 阿吾拉勒西段群吉萨依早二叠世粗安岩(B054-7)锆石 U-Pb 年龄数据
Table 1 Zircon U-Pb data of the Lower Permian trachyandesites in the Qunjisayi area, western Awulale, Xinjiang

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	普通 Pb 校正同位素比值				普通 Pb 校正同位素年龄							
	U	Th	Pb		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
					$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$						
B054-7-1	849.30	183.98	132.61	0.22	0.073 53	0.002 36	1.413 53	0.034 58	0.139 42	0.003 03	1 029	64	895	15	841	17
B054-7-2	540.00	84.73	208.16	0.16	0.121 33	0.003 65	5.528 85	0.120 97	0.330 48	0.007 11	1 976	53	1 905	19	1 841	34
B054-7-3	197.72	66.77	11.07	0.34	0.066 77	0.004 40	0.434 89	0.026 58	0.047 24	0.001 25	831	132	367	19	298	8
B054-7-4	62.73	42.28	26.19	0.67	0.438 60	0.014 76	9.937 54	0.255 51	0.164 31	0.003 94	4 047	49	2 429	24	981	22
B054-7-5	209.18	251.56	14.78	1.20	0.081 40	0.003 95	0.539 07	0.023 09	0.048 02	0.001 15	1 231	92	438	15	302	7
B054-7-6	330.35	305.10	51.10	0.92	0.072 53	0.002 78	1.160 66	0.036 89	0.116 04	0.002 61	1 001	76	782	17	708	15
B054-7-7	267.17	113.90	15.06	0.43	0.053 98	0.002 53	0.363 36	0.015 00	0.048 81	0.001 12	370	102	315	11	307	7
B054-7-8	377.21	217.77	69.44	0.58	0.068 92	0.002 29	1.435 36	0.036 84	0.151 03	0.003 28	896	67	904	15	907	18
B054-7-9	152.22	44.85	8.27	0.29	0.053 85	0.004 08	0.358 22	0.025 58	0.048 24	0.001 30	365	162	311	19	304	8
B054-7-10	153.24	158.43	25.20	1.03	0.063 91	0.002 67	1.083 65	0.038 74	0.122 95	0.002 81	739	86	745	19	748	16
B054-7-11	281.66	90.72	20.65	0.32	0.055 95	0.002 53	0.500 57	0.019 73	0.064 88	0.001 48	450	98	412	13	405	9
B054-7-12	160.57	134.33	24.53	0.84	0.064 05	0.002 84	1.042 22	0.040 13	0.117 99	0.002 73	743	91	725	20	719	16
B054-7-13	235.39	166.62	13.68	0.71	0.053 53	0.003 13	0.342 72	0.018 34	0.046 42	0.001 13	351	126	299	14	293	7
B054-7-14	109.20	42.25	37.78	0.39	0.103 92	0.003 56	4.175 92	0.112 25	0.291 36	0.006 49	1 695	62	1 669	22	1 648	32
B054-7-15	79.21	84.01	5.77	1.06	0.071 47	0.004 85	0.496 39	0.031 28	0.050 36	0.001 32	971	133	409	21	317	8
B054-7-16	393.17	84.30	25.51	0.21	0.060 09	0.002 68	0.481 95	0.018 59	0.058 16	0.001 32	607	94	399	13	364	8
B054-7-17	222.04	167.34	63.87	0.75	0.104 67	0.003 46	3.133 57	0.079 27	0.217 06	0.004 74	1 709	60	1 441	19	1 266	25
B054-7-18	531.93	42.37	57.68	0.08	0.096 17	0.003 17	1.277 43	0.031 89	0.096 31	0.002 08	1 551	61	836	14	593	12
B054-7-19	86.32	38.23	31.68	0.44	0.135 27	0.004 66	5.433 00	0.146 69	0.291 21	0.006 56	2 168	59	1 890	23	1 648	33
B054-7-20	923.12	292.52	297.41	0.32	0.108 97	0.003 33	4.127 89	0.090 61	0.274 65	0.005 83	1 782	55	1 660	18	1 564	30
B054-7-22	173.58	184.21	25.38	1.06	0.066 77	0.002 72	0.996 66	0.034 06	0.108 22	0.002 43	831	83	702	17	662	14
B054-7-24	140.96	32.11	78.31	0.23	0.172 55	0.005 46	10.927 37	0.255 20	0.459 17	0.009 98	2 583	52	2 517	22	2 436	44
B054-7-25	157.42	74.49	8.25	0.47	0.053 12	0.003 58	0.326 15	0.020 49	0.044 52	0.001 11	334	145	287	16	281	7
B054-7-27	197.20	146.46	12.58	0.74	0.052 97	0.002 83	0.370 40	0.017 82	0.050 71	0.001 18	327	117	320	13	319	7
B054-7-29	198.57	55.29	90.46	0.28	0.130 24	0.004 16	6.937 67	0.163 21	0.386 24	0.008 31	2 101	55	2 104	21	2 105	39

注：放射成因 * Pb 同位素比值和年龄是通过普通 Pb 校正的数据，校正方法据文献(Andersen, 2002)。

为 $62.73 \times 10^{-6} \sim 923.12 \times 10^{-6}$ 。锆石的 Th/U 值为 $0.08 \sim 1.20$, 多数锆石颗粒的 Th/U 值大于 0.4, 与岩浆成因锆石一致 (Hoskin and Schaltegger, 2003)。部分年龄较大的锆石颗粒可能为岩浆房或者喷发过程中围岩捕虏体中的继承锆石, 部分锆石颗粒年龄不谐和, 选取 7 个锆石颗粒得出 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄为 300 ± 11 Ma ($n=7$, MSWD=2.4), 与阿吾拉勒西段尼勒克县铜矿区内乌郎组 8 件基性玄武岩 Sr-Nd 同位素年龄 298 ± 7 Ma (李华芹等, 1997) 和同样来自群吉萨依乌郎组火山岩中的流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 290.9 ± 3.3 Ma (MSWD=1.3) 和 296.3 ± 3.1 Ma (MSWD=1.3) 基本一致 (丁振信等, 2014), 说明乌郎组火山岩喷发时代为早二叠世。

粗安岩中锆石的稀土元素含量见表 2。除少数测点外, 多数测点的 $(\text{Sm}/\text{La})_N$ 值在 $13 \sim 1206$ 之间, 与岩浆成因的锆石一致 (Hoskin, 2005)。在锆石稀土元素球粒陨石标准化图解 (图 5c) 中, 多数测点配分曲线向左陡倾, 具明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常, 少数测点具有轻微的 Ce 正异常和高的 La 含量, 并没有明显的 Eu 亏损。

4.2 元素和同位素地球化学

粗安岩主量元素和微量元素分析结果见表 3。从表 3 中可以看出, 样品烧失量相对较低 (LOI) ($1.04\% \sim 2.17\%$), 表明样品均经历了很小程度的蚀变。粗安岩样品 SiO_2 含量为 $54.93\% \sim 57.18\%$, 具有相对低的 TiO_2 含量 ($0.93\% \sim 1.07\%$), MgO 含量 ($3.24\% \sim 4.44\%$), TFe_2O_3 的含量为 $7.41\% \sim 9.66\%$, $\text{Mg}^\#$ 值为 $41.87 \sim 52.29$ 。粗安岩的 CaO 含量为 $3.32\% \sim 4.22\%$, P_2O_5 含量为 $0.32\% \sim 0.47\%$, 均为准铝质, 具有较低的 A/CNK 值 ($0.77 \sim 0.85$) 和较高的 A/NK 值 ($1.16 \sim 1.31$), 具有高的碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.00\% \sim 9.52\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.02 \sim 0.92$), 除个别样品外, 大多数样品属于中高钾钙碱性岩浆系列 (图 6)。

球粒陨石标准化稀土配分模式图解 (图 7a) 中, 所有的粗安岩均显示出一致的稀土元素配分模式, 富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值分别为 $3.34 \sim 6.79$ 和 $1.92 \sim 3.65$ (表 3), 存在一定程度的轻重稀土元素分馏。所有样品均显示出中等或轻微的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.55 \sim 0.77$), 表明粗安岩发生了一定程度的斜长石分离结晶作用, 重稀土元素有一定程度的亏损。在原始地

幔标准化蛛网图 (图 7b), 粗安岩样品显示亏损高场强元素 Nb、Ta 和 Ti, 富集大离子亲石元素 Rb、K。

4 件粗安岩样品的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为 $0.2407 \sim 0.9459$ 和 $0.706227 \sim 0.709225$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 分别为 $0.1325 \sim 0.1407$ 和 $0.512744 \sim 0.512779$ (表 4)。群吉萨依粗安岩具有相对高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 ($0.70519 \sim 0.70586$), 正的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值 ($+4.53 \sim +4.90$) ($t=300$ Ma), 其 Nd 同位素单阶段模式年龄 (t_{DM}) 为 $808 \sim 765$ Ma, 在 $\varepsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解 (图 8) 中, 粗安岩均投影在地幔演化序列中。与伊犁板块的古元古代花岗岩片麻岩基底 [$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7200$, $\varepsilon\text{Nd}(t) = -7$, 胡霭琴等, 2010] 相比, 粗安岩有着更低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和高的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值。群吉萨依粗安岩数据位于西天山晚石炭世粗安岩区域中和右侧 (图 8)。

5 讨论

5.1 岩石成因

群吉萨依地区下二叠统乌郎组火山岩经历了不同程度的热液蚀变, 其中粗安岩表现出轻微蚀变 ($\text{LOI} = 1.04\% \sim 2.17\%$), 显微镜下可见斜长石发生轻微的绿泥石化或绢云母化, 但在这种低温的蚀变过程中, 一些元素如 Fe、Al、Ca、Mg、REE 和 HFSE (如 Nb、Ta) 是相对稳定的 (Beswick, 1982; Barnes *et al.*, 1985), 另外如前文所述, 除个别样品外, 大部分样品的稀土和微量元素配分模式图较为一致 (图 7), 因此, 可以认为蚀变过程并没有对主量、稀土和高场强元素产生明显的影响, 这些稳定元素的变化很可能归因于岩浆过程或源区的特征, 可以用来限制岩石成因和构造环境。

群吉萨依粗安岩轻稀土元素富集、重稀土元素亏损, Ho、Yb 轻微亏损 (图 7a), 表明其源区残留相富集尖晶石 (Zhu *et al.*, 2008)。Nb、Ta 和 Ti 的负异常 (图 7b) 可能暗示岩浆源区有金红石等富 Ti 矿物残留。群吉萨依粗安岩表现出富集大离子亲石元素、亏损高场强元素的地球化学特征, 并具有高的 Th/Ta 值 ($16.59 \sim 21.59$) 和 La/Nb 值 ($1.95 \sim 3.95$), 暗示其原始岩浆起源于受俯冲板块成因的流体或熔体交代的地幔楔 (Conly *et al.*, 2005), 其形成可能与大洋板块俯冲释放出的流体有关 (Condie, 2003; Innocenti *et al.*, 2005)。在稀土元素配分模式

表2 阿吾拉勒西段群吉萨依早二叠世粗安岩(B054-7)锆石稀土元素分析数据
Table 2 Rare earth element content data of zircons from the Lower Permian trachyandesites in the Qunjisayi area, western Awulale, Xinjiang

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Total	δEu	δCe	$w_B/10^{-6}$
B054-7-1	3.67	31.69	4.21	20.40	14.38	1.13	39.36	15.59	187.64	76.13	361.03	79.06	775.86	151.43	1 761.58	0.14	1.73	6.07
B054-7-2	13.24	39.42	10.21	51.18	24.60	17.16	43.83	12.93	129.36	44.37	193.44	40.95	423.13	81.31	1 125.13	1.58	0.79	2.88
B054-7-3	0.09	3.29	0.31	4.82	12.52	3.52	70.38	27.42	269.32	81.89	315.22	60.76	522.07	95.15	1 466.76	0.29	2.93	215.49
B054-7-4	0.20	14.04	0.17	1.47	1.83	0.82	7.92	2.50	29.55	11.47	52.04	11.20	113.72	22.29	269.22	0.56	17.59	13.90
B054-7-5	7.67	58.96	3.25	20.07	14.96	2.82	60.92	20.59	236.04	88.49	380.17	77.66	734.50	137.42	1 843.52	0.25	2.89	3.02
B054-7-6	0.46	46.14	0.49	3.48	3.97	1.37	20.67	7.20	92.39	36.23	170.44	37.95	382.56	77.53	880.88	0.37	21.24	13.37
B054-7-7	0.95	11.16	0.31	2.10	2.03	0.23	12.62	4.98	68.88	28.51	137.80	29.97	297.09	59.13	655.76	0.11	5.04	3.31
B054-7-8	19.23	73.38	5.63	25.62	11.60	1.61	49.80	16.59	191.46	73.23	327.48	66.74	622.17	116.31	1 600.85	0.17	1.71	0.93
B054-7-9	0.01	1.80	0.11	1.84	5.45	0.35	34.54	14.01	173.79	65.93	282.31	57.67	553.27	103.58	1 294.66	0.06	5.04	1 206.02
B054-7-10	0.43	28.67	0.30	2.50	3.73	1.15	19.05	6.55	80.83	31.52	146.25	31.73	336.74	69.97	759.42	0.34	18.95	13.41
B054-7-11	<0.05	5.71	0.13	1.08	2.65	0.32	17.00	5.96	79.31	29.23	130.23	26.15	246.69	47.91	592.37	0.11	12.12	77.45
B054-7-12	2.68	22.53	1.72	15.13	20.19	6.42	85.42	27.77	291.40	99.84	413.40	82.17	748.05	143.16	1 959.88	0.40	2.50	11.67
B054-7-13	0.08	10.91	0.05	0.74	2.05	0.75	9.97	3.73	51.53	22.85	117.18	28.78	321.16	74.27	644.04	0.42	44.88	41.78
B054-7-14	0.12	18.57	0.11	1.35	3.56	0.10	23.84	9.42	122.15	48.34	218.68	44.02	378.08	65.15	933.49	0.03	36.65	46.73
B054-7-15	0.18	34.73	0.17	2.98	4.65	1.63	21.12	6.72	71.64	25.31	108.10	22.08	210.90	42.28	552.49	0.42	44.34	41.16
B054-7-16	0.03	12.16	0.07	0.41	1.70	0.57	8.24	3.12	40.46	18.23	101.29	25.22	313.06	77.91	602.46	0.38	48.51	97.53
B054-7-17	0.07	12.91	0.52	7.54	10.72	0.76	42.50	13.04	140.49	50.02	204.00	38.09	324.91	57.28	902.85	0.09	7.29	240.66
B054-7-18	0.05	6.95	0.06	0.75	2.59	0.81	13.46	4.29	37.00	11.44	45.02	9.69	91.50	19.03	242.63	0.34	28.01	89.15
B054-7-19	0.70	21.99	1.06	6.47	6.36	4.40	17.83	5.64	54.88	18.61	83.63	18.19	187.58	40.33	467.67	1.18	5.09	14.07
B054-7-20	0.02	5.98	0.07	1.61	3.10	0.07	15.17	5.48	67.51	26.02	124.57	27.18	281.71	54.78	613.27	0.03	24.36	208.78
B054-7-22	0.02	27.12	0.10	1.65	3.17	1.14	13.46	4.49	58.62	24.37	119.78	28.38	299.85	66.55	648.70	0.46	81.73	245.52
B054-7-24	0.01	3.91	0.03	0.44	1.36	0.50	7.34	2.95	35.71	14.51	67.59	14.89	155.59	33.37	338.20	0.39	38.89	162.05
B054-7-25	1.19	10.55	0.30	2.34	1.98	0.25	9.64	3.42	40.94	16.05	72.08	15.20	144.32	27.55	345.80	0.14	4.23	2.58
B054-7-27	11.75	50.81	3.39	16.83	6.04	1.21	22.18	7.87	100.51	40.41	187.29	40.14	399.48	81.67	969.58	0.28	1.95	0.80
B054-7-29	0.34	9.71	0.52	3.89	2.93	0.54	8.26	2.53	30.27	11.87	59.88	14.49	157.95	34.28	337.47	0.31	4.55	13.19

注: $\delta\text{Eu} = 2 \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$; $\delta\text{Ce} = 2 \text{Ce}_N / (\text{La}_N + \text{Pr}_N)$; 下标 N 代表球粒陨石标准化; 所有球粒陨石标准化值参见文献(Sun and McDonough, 1989)。

表3 群吉萨依早二叠世粗安岩全岩主量($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)地球化学数据

Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements data of the Lower Permian trachyandesites in the western Awulale, Xinjiang

样品号	D054-1	D054-2	D054-3	D054-5	D054-7	D067-1	D065-2
SiO ₂	54.93	56.99	55.97	56.13	56.32	55.36	57.18
TiO ₂	0.97	0.93	0.98	0.99	0.95	1.07	1.00
Al ₂ O ₃	16.06	15.18	15.74	15.70	16.00	15.71	16.25
TF ₂ O ₃	9.10	8.91	9.08	8.95	8.76	9.66	7.41
MnO	0.27	0.15	0.16	0.14	0.20	0.29	0.11
MgO	4.36	3.24	4.44	4.32	3.98	3.97	4.10
CaO	3.64	3.60	3.62	3.91	4.01	3.32	4.22
Na ₂ O	6.22	4.95	6.85	6.89	6.97	7.99	7.01
K ₂ O	1.86	4.57	1.07	1.11	1.20	0.19	1.16
P ₂ O ₅	0.34	0.34	0.32	0.33	0.33	0.47	0.36
A/CNK	0.85	0.77	0.83	0.80	0.80	0.81	0.79
A/NK	1.31	1.16	1.27	1.25	1.25	1.18	1.27
FeO	4.20	3.15	3.65	3.25	3.45	3.50	2.70
Mg [#]	48.70	41.87	49.21	48.88	47.37	44.88	52.29
LOI	2.17	1.04	1.70	1.45	1.18	1.91	1.11
TOTAL	99.92	99.90	99.93	99.92	99.90	99.94	99.91
Be	1.29	3.02	3.44	4.54	2.00	4.35	5.05
Sc	25.60	23.90	25.00	29.10	18.90	27.00	28.40
V	346	354	356	325	339	280	316
Cr	40.60	39.50	42.30	46.10	41.40	31.40	36.40
Co	21.60	20.90	18.80	20.20	17.80	28.60	13.30
Ni	23.10	17.90	23.30	21.30	20.00	16.20	19.40
Cu	42.40	104.00	10.70	8.40	13.30	1628.00	9.33
Zn	258	282	142	134	90	91	46
Ga	17.30	13.50	16.90	16.20	14.70	17.50	16.40
Rb	52.30	103.00	38.10	44.90	33.00	8.02	47.20
Sr	160	152	218	233	231	96	273
Y	29.60	29.40	27.70	29.50	22.50	31.90	30.80
Zr	258	252	262	260	235	299	274
Nb	7.88	7.76	8.02	7.66	7.16	9.74	8.13
Mo	1.31	7.16	1.48	1.34	0.74	2.02	1.99
Cs	0.63	0.73	0.58	0.51	0.37	0.35	0.46
Ba	265	755	204	349	308	41	422
La	15.40	20.80	19.80	18.90	15.50	20.00	32.10
Ce	37.60	44.30	42.20	41.30	35.40	46.40	51.60
Pr	5.07	5.78	5.45	5.55	4.60	6.29	5.91
Nd	22.30	24.60	24.10	24.00	21.10	28.30	24.80
Sm	5.19	5.52	5.57	5.49	4.88	6.20	5.68
Eu	1.27	1.34	1.25	1.33	1.12	1.26	1.34
Gd	5.08	4.97	5.23	4.87	4.19	5.75	5.12
Tb	0.92	0.91	0.92	0.87	0.79	1.04	0.90
Dy	5.44	5.33	5.10	5.42	4.65	6.36	5.47
Ho	1.01	1.05	0.99	1.07	0.93	1.19	1.08
Er	3.17	3.21	3.03	3.19	2.74	3.64	3.40
Tm	0.49	0.54	0.51	0.56	0.45	0.61	0.53
Yb	3.31	3.31	3.30	3.34	2.78	3.68	3.39
Lu	0.56	0.60	0.54	0.55	0.49	0.60	0.55
Hf	6.68	6.81	7.46	6.89	6.16	8.08	7.41
Ta	0.53	0.49	0.52	0.56	0.44	0.62	0.56
Pb	78.20	178.00	25.10	28.60	77.80	7.42	8.00
Th	8.89	9.23	9.39	9.26	7.27	13.30	9.91
U	2.67	2.79	2.89	2.28	1.86	3.88	2.59
(La/Yb) _N	3.34	4.51	4.30	4.06	4.00	3.90	6.79
(La/Sm) _N	1.92	2.43	2.29	2.22	2.05	2.08	3.65

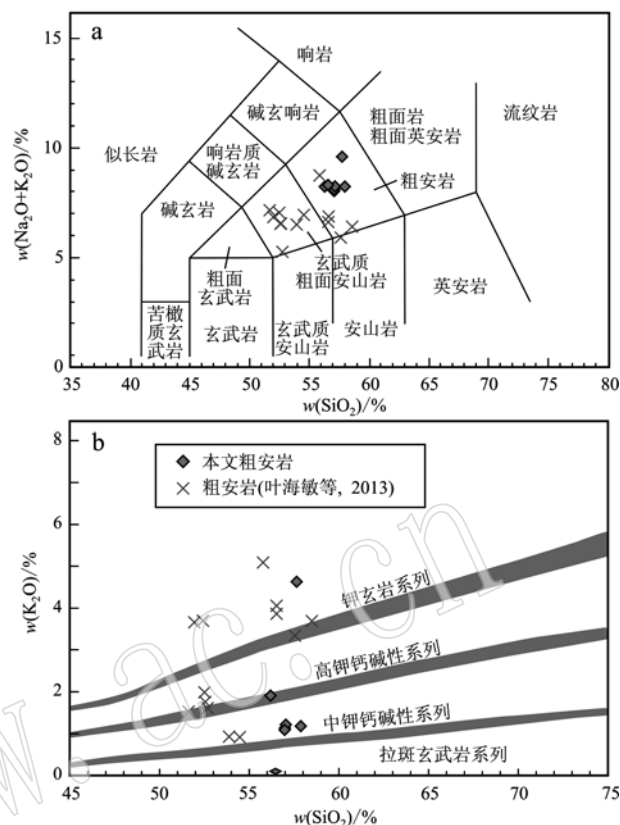


图6 群吉萨依粗安岩火山岩 TAS 分类图解 (a, 据 Le Maitre, 1989) 和 K_2O-SiO_2 分类图解 (b, 据 Rickwood, 1989)

Fig. 6 The TAS (a, after Le Maitre, 1989) and K_2O-SiO_2 (b, after Rickwood, 1989) diagrams of the trachyandesites in the Qunjisayi area

图(图7a)和微量元素蛛网图(图7b)中,群吉萨依粗安岩与大哈拉军山组火山岩表现出相似的配分模式,指示两者可能具有相似的岩浆源区,而在伊犁盆地两侧及博罗科努山一带广泛发育的下石炭统大哈拉军山组,为一套以中酸性为主的火山岩建造,其形成被认为是与俯冲板片来源的流体交代的地幔楔发生部分熔融有关(朱永峰等, 2005; 罗勇等, 2009; zhu *et al.*, 2009; 夏换等, 2011; An *et al.*, 2013; 宁文涛等, 2019)。

在图8中,粗安岩均投影在地幔演化序列中,与晚石炭世大哈拉军山组粗安岩有着相似的岩浆源区特征。粗安岩同位素 t_{DM} 值为 808 ~ 765 Ma, 与西天山晚石炭世玉希莫勒盖达坂大哈拉军山组火山岩(991 ~ 637 Ma)和拉尔敦达坂大哈拉军山组火山岩(1 070 ~ 810 Ma)的 t_{DM} 值非常相似(朱永峰等, 2006; Zhu *et al.*, 2009), 指示其具岛弧火山岩地球化学特征, 具有亏损地幔的岩浆特点。前人对西天山中

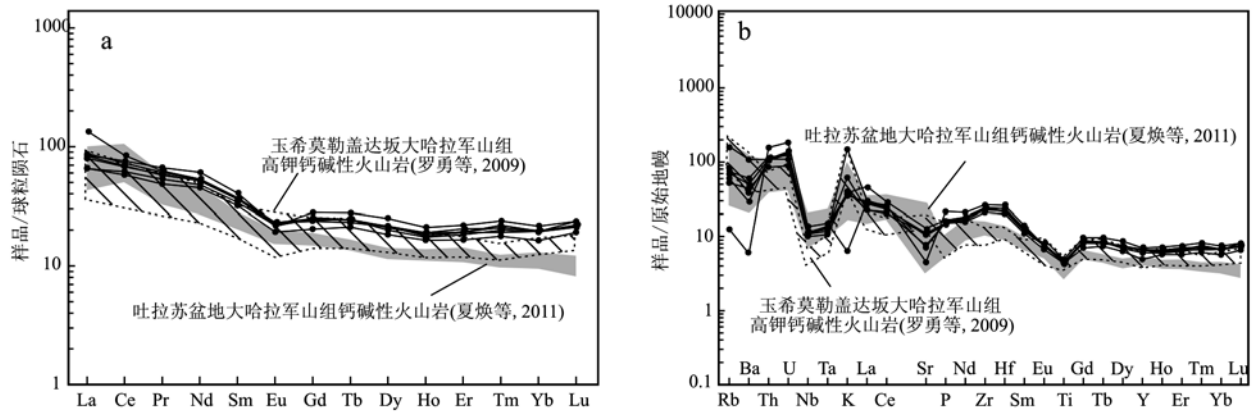


图7 群吉萨依粗安岩稀土元素球粒陨石标准化(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b)(标准化值据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig.7 Chondrite-normalized REE (a) and primitive mantle-normalized trace element (b) patterns for the trachyandesites in the Qunjisayi area (after Sun and McDonough, 1989)

表4 群吉萨依早二叠世粗安岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 4 Sr-Nd isotopic data of the Lower Permian trachyandesites from Qunjisayi area

	D054-1	D054-3	D054-7	D067-1
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.945 9	0.505 7	0.413 3	0.240 7
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.709 225	0.707 794	0.707 622	0.706 227
$\pm 2\sigma$	0.000 011	0.000 011	0.000 011	0.000 011
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.705 19	0.705 64	0.705 86	0.705 20
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.140 7	0.139 7	0.139 8	0.132 5
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 779	0.512 770	0.512 760	0.512 744
$\pm 2\sigma$	0.000 011	0.000 006	0.000 006	0.000 009
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512 50	0.512 50	0.512 49	0.512 48
$\varepsilon\text{Nd}(t)$	4.90	4.76	4.56	4.53
t_{DM}/Ma	778	786	808	765
t_{DM2}/Ma	665	676	692	695

t_{DM2} 为二阶段模式年龄,参数数据文献(Keto and Jacobsen, 1987),计算 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值使用年龄为300 Ma。

西部火山岩 Sr-Nd 同位素地球化学研究结果显示,西天山中西部地区中酸性火山岩有两种可能的成因:一是幔源基性岩浆经历广泛结晶分异作用和同化混染作用的产物;二是新生地壳部分熔融的产物(蒋宗胜, 2014)。而群吉萨依粗安岩样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为0.705 20~0.705 86, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为+4.53~+4.90,具有相对较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和正的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值,与研究区内玄武岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值(+5.05~+6.86)(作者未刊数据)相近,暗示粗安岩可能由玄武质岩浆结晶分异或由新生地壳部分熔融产生。然而,在哈克图解中,群吉萨依玄武岩与粗安岩不存在分离结晶趋势(图9)(作者未刊数据),

意味着粗安岩不太可能由玄武质岩浆通过结晶分异而形成。粗安岩(808~765 Ma)与中亚造山带北部出露的大量花岗岩具有相似的较年轻的 t_{DM} 值(闫永红等, 2013),表明粗安岩的源区为新生下地壳。粗安岩与研究区内同期的流纹岩(+4.66~+5.13, 丁振信等, 2014)、花岗斑岩(+2.11~+2.70, 闫永红, 2013)和钠长斑岩(+4.19~+5.19, 李睿等, 2017)的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值在误差范围一致,表明这些粗安岩很可能由新生玄武质下地壳部分熔融而来。本区双峰式火山岩的发育及二叠纪大量埃达克岩的产出,也同样证实了该地区同期经历了大量的玄武质地壳的部分熔融(熊小林等, 2001)。

5.2 构造背景和动力演化模式

阿吾拉勒西段群吉萨依乌郎组剖面下部的中高钾钙碱性粗安岩,富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K、Pb)和Th、U等微量元素,相对亏损高场强元素(Nb、Ta和Ti),这些特征类似形成于俯冲带火山岩的地球化学特征(McCulloch *et al.*, 1991)。在 $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5 - \text{Zr}/\text{TiO}_2$ 图解中(图10),粗安岩的投影点比较集中,均投影在大陆弧环境,暗示群吉萨依粗安岩可能为北天山洋壳南向哈萨克斯坦-伊犁板块之下俯冲背景下的大陆岛弧岩浆产物。前人对于西天山洋陆俯冲过程已有很多的认识和研究(Zonenshain *et al.*, 1990; Mossakovsky *et al.*, 1993; Sengör *et al.*, 1993; 姜常义等, 1995; Sengör and Natal'in, 1996; Jahn *et al.*, 2000; Kovalenko *et al.*, 2004; 朱永峰, 2005; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2013)。西天山在晚古生代发生了典型的洋陆俯

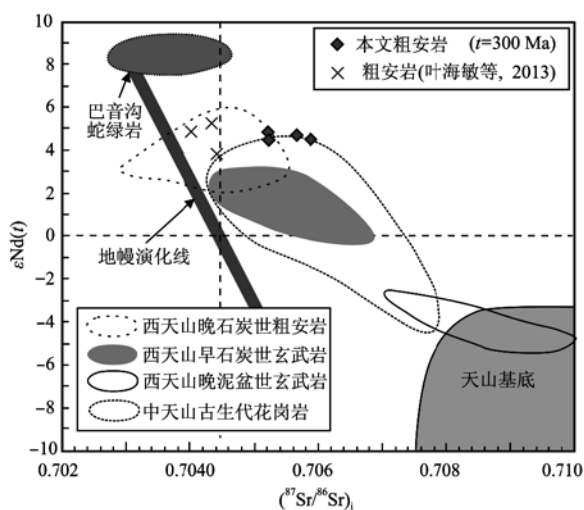
图8 群吉萨依粗安岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ — $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解

Fig. 8 The $\varepsilon\text{Nd}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram of Qunjisayi trachyandesites

巴音沟蛇绿岩数据来自徐学义等(2006), 西天山晚石炭世粗安岩、早石炭世玄武岩、晚泥盆世玄武岩数据来自Zhu等(2009); 中天山古生代花岗岩数据来自Long等(2011); 天山基底数据来自胡霁琴等(2010)

data for Bayingou ophiolites after Xu *et al.*, 2006, data for Late Paleozoic volcanic rocks in the western Tianshan Mountains after Zhu *et al.*, 2009, the Central Tianshan Mountains Paleozoic granitoids after Long *et al.*, 2011, the Tianshan Mountains basement after Hu Aiqin *et al.*, 2010

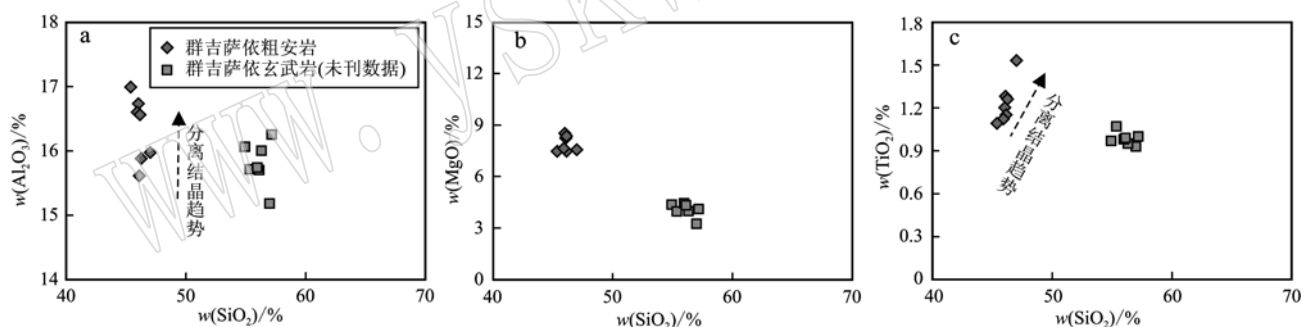
图9 Al_2O_3 、 MgO 和 TiO_2 对 SiO_2 共变关系图

Fig. 9 The Al_2O_3 , MgO , and TiO_2 versus SiO_2 co-variations diagrams

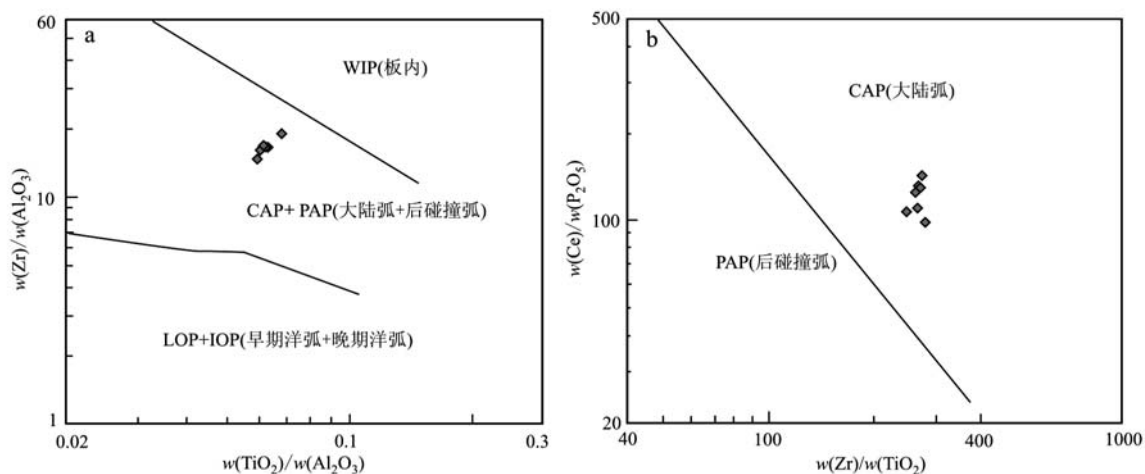


图10 中性岩大地构造判别图解(据 Muller and Groves, 1997)

Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams for intermediate rocks (after Muller and Groves, 1997)

冲-碰撞造山过程, 北天山洋在晚石炭世(325 ~ 316 Ma)已经关闭, 西天山在早二叠世已经进入后碰撞演化阶段(Gao *et al.*, 2009, 2011; Han *et al.*, 2010, 2011; Long *et al.*, 2011)。由于在先前的俯冲碰撞过程中源区受板块来源的流体或熔体所交代(Turner *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2009), 后碰撞的岩浆一般都继承了与俯冲作用有关的地球化学特征。赵军等(2013)通过对阿吾拉勒西段下二叠统火山岩的研究, 提出乌郎组火山岩形成于板内裂谷环境; 乌郎组上部的流纹岩和流纹斑岩均显示了板内花岗质岩浆的特征(丁振信等, 2014); 晚期侵入于乌郎组的早二叠世花岗斑岩显示了富硅准铝质、低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、正 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值等碱性的板内花岗岩特征(闫永红等, 2013); 群吉纳长斑岩与下二叠统玄武岩呈侵入接触关系, 岩体具有A型花岗岩的特征(刘睿等, 2017), 表明早二叠世乌郎组下部的高钾钙碱性粗面安山质岩浆很可能形成于板内环境, 而非岛弧环境。

前人通过大量年代学、地球化学和同位素研究,

提出岩石圈拆沉(李宁波等, 2012; 赵军等, 2013; 陈根文等, 2015)、地幔柱(叶海敏等, 2013)和板片断离模型(Chen B *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2010; Long *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018; He *et al.*, 2018)来解释早二叠世新疆西天山岩浆事件。岩石圈拆沉模型并不能很好地解释早二叠世西天山阿吾拉勒地区大量 I 型和 A 型花岗岩侵位、缺失 S 型花岗岩的现象(闫永红等, 2013; 刘睿等, 2017)。西天山阿吾拉勒地区尼勒克大规模玄武质火山岩的形成可能和塔里木二叠纪地幔柱活动有关, 但是这些玄武岩在地球化学特征上与塔里木同时代二叠纪玄武岩有显著差别(Zhang *et al.*, 2010), 并且塔里木二叠纪地幔柱的影响区域范围仍有争议(Liu *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2015)。与其他几种地球动力学背景相比, 笔者认为板片断离模型更为合理, 主要有以下几个方面的原因: ① 新疆西天山阿吾拉勒下二叠统乌郎组火山岩出露于一个与北天山晚古生代缝合带平行的相对狭窄的东西向的构造带内(图 1); ② 大陆碰撞发生之后, 火山岩的喷发几乎与区域抬升事件同时发生, 该地区中二叠统与下二叠统之间、中二叠统各组地层之间和中二叠统与上二叠统之间均为平行不整合或角度不整合接触, 结合中二叠统的岩性构造特征, 均表明中二叠世以后该地区进入了抬升剥蚀的构造体制中, 构造应力从区域拉伸转为挤压, 火山活动减弱, 接受了陆相沉积(赵军等, 2013); ③ 后碰撞的火山岩作用时间大概为 20 ~ 15 Ma, 这与笔者采集火山岩测试的年龄(作者未刊数据)和区域地层化石的研究也是相对一致的(朱志新等, 2012); ④ 火山岩受到强烈的地壳混染作用(叶海敏等, 2013; 赵军等, 2013); ⑤ 乌郎组火山岩投图在碱性岩与亚碱性岩之间(叶海敏等, 2013), 随着喷发的进行, 碱性的火山岩逐渐增加; ⑥ 研究区内大规模具成分多样性的同期岩浆作用(包括高钾钙碱性粗安岩、流纹岩, 石英钠长斑岩、花岗斑岩等碱性侵入岩体(脉)及板内玄武岩特征的镁铁质岩浆作用)是鉴别板片断离的岩石学标志(朱弟成等, 2017); ⑦ 阿吾拉勒西段下二叠统乌郎组中上部出现了双峰式火山岩组合和磨拉石建造(二叠系铁木里克组)。因此, 笔者认为乌郎组下部的这套高钾钙碱性粗安岩和中上部的双峰式火山岩组合的出现(赵军等, 2013; 陈根文等, 2015), 标志着阿吾拉勒西段在早二叠世已经进入了造山带的最后演化阶段, 而板片断离很可能是造成这种特殊地

球动力学背景的可能机制。

综合上述研究来看, 早二叠世新疆西天山阿吾拉勒西段处于碰撞造山后板内构造环境, 推测北天山洋俯冲关闭后, 伴随北天山洋壳岩石圈向南持续俯冲, 板块不断变陡, 俯冲洋壳的尾部很可能发生断离, 出现伸展背景, 地幔软流圈物质和能量从断离窗上涌(Chen *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2010; Long *et al.*, 2011; 丁振信等, 2014; Li *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2018; He *et al.*, 2018), 俯冲板片断裂后, 其下部热的软流圈上涌, 触发新生玄武质下地壳发生部分熔融, 经历结晶分异作用形成高钾钙碱性粗安质岩浆。该岩浆在地球化学上继承了前期洋-陆俯冲过程中被改造的地幔楔的元素和同位素特征。此时的构造体制已开始由陆-陆碰撞的俯冲挤压环境转换为碰撞造山阶段后伸展背景(Muller *et al.*, 1992; 罗勇等, 2009)。

6 结论

(1) 在西天山阿吾拉勒西段群吉萨依乌郎组下部发现了粗安岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年得到其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 300 ± 11 Ma, 锆石微量元素具有典型的岩浆锆石特征, 表明这套粗安质火山岩大概喷发于早二叠世早期。

(2) 岩石学和地球化学数据表明, 该粗安岩属于中高钾钙碱性岩浆系列; 岩石的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $+4.5 \sim +4.9$, 并与中亚造山带北部出露的大量花岗岩有着相似的较为年轻的 t_{DM} 值, 与研究区内酸性岩火山岩有着相似的同位素地球化学特征, 岩浆很可能来源于新生玄武质下地壳的部分熔融。

(3) 早二叠世北天山洋壳南向伊犁板块之下俯冲过程中, 很可能在 300 ~ 291 Ma 发生板片断离并使得上覆岩石圈板块处于伸展背景, 板片断离事件触发的软流圈地幔岩浆底侵作用导致新生玄武质下地壳发生重熔, 形成群吉萨依中高钾钙碱性粗安质岩浆, 此时构造体制也相应地开始由俯冲挤压转换为伸展背景。

致谢 工作中得到中国地质大学(北京)地质过程和矿产资源国家重点实验室的大力资金支持, 测试工作得到西北大学大陆动力学国家重点实验室、核工业北京地质研究院分析测试中心的大力协助, 审稿人和编辑为论文修改提出建设性建议, 在此一

并表示诚挚感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1): 59 ~ 79.
- An F, Zhu Y F, Wei S N, *et al.* 2013. An Early Devonian to Early Carboniferous volcanic arc in North Tianshan, NW China: Geochronological and geochemical evidence from volcanic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78(12): 100 ~ 113.
- Barnes S J, Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas [J]. *Chemical Geology*, 53(3): 303 ~ 323.
- Beswick A E. 1982. Some geochemical aspects of alteration and genetic relations in komatiitic suites[A]. Arndt N T and Nisbet E G. *Komatiities*[C]. London: George Allen and Unwin, 283 ~ 308.
- Biske Y S and Seltnann R. 2010. Paleozoic Tian-Shan as a transitional region between the Rheic and Urals-Turkestan oceans[J]. *Gondwana Research*, 17(2 ~ 3): 602 ~ 613.
- Chen B and Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5): 1 307 ~ 1 320.
- Chen F K, Li X H, Wang X L, *et al.* 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6): 1 179 ~ 1 194.
- Chen Genwen, Deng Teng, Liu Rui, *et al.* 2015. Geochemistry of bimodal volcanic rocks in Permian Taerdetao Formation in Awulale area of western Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 105 ~ 118(in Chinese with English abstract).
- Chen Genwen, Liu Qun, Xia Huan, *et al.* 2011. Geological characteristics and metallogenic prospect evaluation of Porphyry copper deposits in western Awulale Mountain metallogenic belt, Xinjiang[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 747 ~ 748(in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 2003. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(1): 1 ~ 28.
- Conly A G, Brenan J M, Bellon H, *et al.* 2005. Arc to rift transitional volcanism in the Santa Rosalía Region, Baja California Sur, Mexico [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 142(3 ~ 4): 303 ~ 341.
- Ding Zhenxin, Xue Chunji, Zhao Xiaobo, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Early Permian rhyolite and its constraints on the lithosphere deep processes of the Western Awulale, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 196 ~ 210(in Chinese with English abstract).
- Gao J, Long L L, Klemd R, *et al.* 2009. Tectonic evolution of the South Tien Shan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1 221 ~ 1 238.
- Gao J, Klemd R, Qian Q, *et al.* 2011. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tien Shan Orogen[J]. *Tectonophysics*, 499(1): 118 ~ 131.
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, *et al.* 2009. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tianshan suture zone, western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3 ~ 4): 627 ~ 640.
- He J W, Zhang Y Z, Wang Y J, *et al.* 2018. Late Paleozoic post-collisional setting of the North Tianshan, NW China: New insights from geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic compositions of the Permian Nileke volcanic rocks[J]. *Lithos*, 318 ~ 319: 314 ~ 325.
- Hu Ai-qin, Wei Gang-jian, Jiang Bo-ming, *et al.* 2010. Formation of the 0.9 Ga Neoproterozoic granitoids in the Tianshan Orogen, NW China: Constraints from the SHRIMP zircon age determination and its tectonic significance[J]. *Geochimica*, 39(3): 197 ~ 211(in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, *et al.* 1995. The change from island arc to rift valley—Evidence from volcanic rocks in Awulale area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(4): 289 ~ 300(in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, *et al.* 1996. Magma action and tectonic evolution in Awulale district, Western Tianshan Mountain[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 18(2): 18 ~ 24(in Chinese with English abstract).
- Jiang Zongsheng. 2014. Carboniferous Volcanism and Fe Mineralization at the Zhibo Iron Deposit in the Western Tianshan (Ph. D. Dissertation)[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English summary).
- Jiang Zongsheng, Zhang Zuoheng, Hou Kejun, *et al.* 2012. Geochemistry and zircon U-Pb age of volcanic rocks from the Chagangnuoer and

- Zhibo iron deposits, western Tianshan, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2 074 ~ 2 088 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 91(1 ~ 2): 181 ~ 193.
- Keto L S and Jacobsen S B. 1987. Nd and Sr isotopic variations of Early Paleozoic oceans[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 84(1): 27 ~ 41.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, *et al.* 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian Mobile Belt: Geological and isotopic evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 605 ~ 627.
- Le Maitre K W. 1989. A Classification of Igneous Rock and Glossary of Terms[M]. Oxford: Blackwell Science Publication.
- Li Huaqin, Zhou Su and Cai Hong. 1997. Chronology of mineralization of the Nileike Copper Deposit in northern Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 18(Z): 185 ~ 187 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaqin, Xie Caifu and Chang Hailiang. 1998. Dating of Metallogenesis of Metal Ore Deposits in North Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publication House, 195 ~ 201 (in Chinese with English abstract).
- Li Jilei, Su Wen, Zhang Xi, *et al.* 2009. Zircon Cameca U-Pb dating and its significance for granulite-facies gneisses from the western Awulale Mountains, Western Tianshan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28: 1 852 ~ 1 862 (in Chinese with English abstract).
- Li Ningbo, Shan Qiang, Zhang Yongping, *et al.* 2012. Study on the A-type rhyolite porphyries from the Awulale Area, western Tianshan [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(4): 624 ~ 633 (in Chinese with English abstract).
- Li N B, Niu H C, Shang Q, *et al.* 2015. Two episodes of Late Paleozoic A-type magmatism in the Qunjisayi area, western Tianshan: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(1): 238 ~ 253.
- Liu D D, Guo Z J, Jollvet M, *et al.* 2014. Petrology and geochemistry of Early Permian volcanic rocks in South Tian Shan, NW China: Implications for the tectonic evolution and Phanerozoic continental growth [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 103: 737 ~ 756.
- Liu Rui, Wang Lixing and Chen Genwen. 2017. Genesis, geological significance and metallogenic potentiality of A-type granites in the Awulale area of the western Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(6): 1 741 ~ 1 754 (in Chinese with English abstract).
- Long L L, Gao J, Klemd R, *et al.* 2011. 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*, 126(3 ~ 4): 321 ~ 340.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. California: Berkeley Geochronology Center.
- Luo Wenjuan, Zhang Zuoheng, Duan Shigang, *et al.* 2018. Geochronology and geochemistry of the Beizhan basic-ultrabasic pluton in West Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and geodynamical implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(5): 733 ~ 753 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yong, Niu Hecai, Shan Qiang, *et al.* 2009. Discovery of the basaltic andesite-high-K basaltic andesite-trachyandesite association in the Yuximolegai Daban, West Tianshan and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 934 ~ 943 (in Chinese with English abstract).
- McCulloch M T and Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 102(3 ~ 4): 358 ~ 374.
- Mossakovsky A. 1993. Central Asian fold belt: Geodynamic evolution and history of formation[J]. *Geotectonics*, 6: 3 ~ 33.
- Müller D and Groves D I. 1997. Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-Copper Mineralization[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1 ~ 210.
- Müller D, Stumpfl E F and Taylor W R. 1992. Shoshonitic and alkaline lamprophyres with elevated Au and PGE concentrations from the Kreuzeck Mountains, Eastern Alps, Austria[J]. *Mineralogy and Petrology*, 46(1): 23 ~ 42.
- Ning Wentao, Li Yongjun, Wang Zhenyu, *et al.* 2019. Geochemical characteristics of the bimodal volcanic rocks in Upper Carboniferous Yishijilike Formation in Tekes Daban area of Yining landmass[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(1): 1 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247 ~ 263.
- Sengör A M C and Natalin B A. 1996. Palaeotectonics of Asia: Fragments and synthesis[A]. Yin A and Harrison M. The Tectonic Evolution of Asia[C]. Cambridge University Press, 486 ~ 640.
- Sengör A M C, Natalin B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Al-taid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364(6 435): 299 ~ 307.
- Song Zhirui, Xiao Xiaolin, Luo Chunlin, *et al.* 2005. New advances in the study of permian stratigraphy at Nileke in the Yining basin, Xin-

- jiang[J]. *Xinjiang Geology*, 23(4): 334 ~ 338 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. Geological Society Special Publication, London, 313 ~ 345.
- Turner S P, Arnaud N, Liu J, *et al.* 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts[J]. *Journal of Petrology*, 37(1): 45 ~ 71.
- Wang K L, Chung S L, O Reilly S Y, *et al.* 2004. Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and geodynamic evolution of the Northern Taiwan Region[J]. *Journal of Petrology*, 45: 975 ~ 1 011.
- Wang S J, Li S G, An S C, *et al.* 2012. A granulite record of multistage metamorphism and REE behavior in the Dabie orogen: Constraints from zircon and rock-forming minerals[J]. *Lithos*, 136 ~ 139: 109 ~ 125.
- Wang X S, Zhang X, Gao J, *et al.* 2018. A slab break-off model for the submarine volcanic-hosted iron mineralization in the Chinese Western Tianshan: Insights from Paleozoic subduction-related to post-collisional magmatism[J]. *Ore geology Reviews*, 92: 144 ~ 160.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295 ~ 304.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Geological Society of London Special Publication, 164: 31 ~ 47.
- Xia Huan, Chen Genwen, Liu Qun, *et al.* 2011. Geochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks in the Tulasu Basin of Western Tianshan and its tectonic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3): 429 ~ 438 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B, *et al.* 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tien Shan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 316 ~ 1 341.
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, *et al.* 2001. Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 514 ~ 522 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongpin, *et al.* 2006. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of gabbro from the Bayingou Ophiolite in the northern Tianshan Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(8): 1 168 ~ 1 176 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Zhang Guozhen, *et al.* 2015. Metallogenic environments, ore-forming types and prospecting potential of Au-Cu-Zn-Pb resources in Western Tianshan Mountains[J]. *Geology in China*, 42(3): 381 ~ 410 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xin and Xu Ronghua. 2002. Determination of Zr, Hf, Nb, Ta in Rocks by ICP-MS[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 20(4): 458 ~ 460 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yonghong, Xue Chunji, Zhang Zhaochong, *et al.* 2013. Geochemistry and genesis of the Qunjisayi granite porphyry in the west of Awulale area, Western Tianshan Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 139 ~ 153 (in Chinese with English abstract).
- Ye Haimin, Ye Xiantao and Zhang Chuanlin. 2013. Geochemistry and geodynamic implications of Nileke Permian volcanic rocks in Western Tianshan, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3 389 ~ 3 401 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, *et al.* 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 247(1 ~ 2): 100 ~ 118.
- Zhang He, Liu Min, Zhao Jun, *et al.* 2012. Fluid inclusion and stable isotope studies of Nulasai copper deposit in Awulale Mountain, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 1 087 ~ 1 100 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Zhou G, Kusky T M, *et al.* 2009. Late Paleozoic volcanic record of the Eastern Junggar terrane, Xinjiang, Northwestern China: Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 16: 201 ~ 215.
- Zhang C L, Li Z X, Li X H, *et al.* 2010. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275Ma mantle plume? [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 2 020 ~ 2 040.
- Zhao Jun, Zhang Zuoheng, Liu Xiaoyang, *et al.* 2012. Carbon, oxygen, sulfur and lead isotope constraints on the ore source and metallogenesis of copper deposits in western Awulale Mountain metallogenic belt, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 999 ~ 1 013 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jun, Zhang Zuoheng, Zhang He, *et al.* 2013. Geochemistry, petrogenesis and tectonic settings of the Lower Permian series volcanic rocks from western Awulale Mountain, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 525 ~ 541 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X B, Xue C J, Chi G X, *et al.* 2018. Diabase-hosted copper mineralization in the Qunjisai deposit, West Tianshan, NW China: Geological

- ical, geochemical and geochronological characteristics and mineralization mechanism[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 430 ~ 448.
- Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, Xiong Xiaolin, *et al.* 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronological study of Late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 32(4): 317 ~ 327(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Xiong X L, Wang Q, *et al.* 2008. Underplating-related adakites in Xinjiang Tien Shan, China[J]. *Lithos*, 102: 374 ~ 391.
- Zhu D C, Pan G T, Chung S L, *et al.* 2008. SHRIMP Zircon Age and Geochemical Constraints on the Origin of Lower Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation, Southern Gangdese, South Tibet [J]. *International Geology Review*, 50(5): 442 ~ 471.
- Zhu D C, Wang Q and Zhao Z D. 2017. Constraining quantitatively the timing and process of continent-continent collision using magmatic record: Method and examples[J]. *Science China Earth Sciences*, 60: 1 040 ~ 1 056.
- Zhu Y F, Guo X, Song B, *et al.* 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of the Geological Society*, 166(6): 1 085 ~ 1 099.
- Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, *et al.* 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(19): 2 201 ~ 2 212(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, Zhou Jing and Guo Xuan. 2006. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 341 ~ 1 350(in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhixin, Dong Lianhui, Liu Shucong, *et al.* 2012. Volcanic rock geological characteristics and tectonic significance of the Late Paleozoic Yili Block in the Western Tianshan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 30(3): 258 ~ 263(in Chinese with English abstract).
- Zonenshain L P, Kuzmin M I and Natapov L M. 1990. *Geology of the USSR: A Plate Tectonic Synthesis*, *Geodynamic Monograph*, Amer [M]. *Geophys. Union*, Washington, 242.
- 地质特征及成矿远景评价[J]. *矿物学报*, 31(S1): 747 ~ 748.
- 丁振信, 薛春纪, 赵晓波, 等. 2014. 新疆阿吾拉勒西段流纹岩及其对该区岩石圈深部过程的约束[J]. *地学前缘*, 21(5): 196 ~ 210.
- 胡霭琴, 韦刚健, 江博明, 等. 2010. 天山 0.9 Ga 新元古代花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地球化学*, 39(3): 197 ~ 212.
- 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 1995. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 14(4): 289 ~ 300.
- 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 1996. 西天山阿吾拉勒地区岩浆活动与构造演化[J]. *西安地质学院学报*, 18(2): 18 ~ 24.
- 蒋宗胜. 2014. 西天山智博铁矿区炭纪火山作用与铁成矿研究(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 蒋宗胜, 张作衡, 侯可军, 等. 2012. 西天山查岗诺尔和智博铁矿区火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *岩石学报*, 28(7): 2 074 ~ 2 088.
- 李华芹, 谢才富, 常海量. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 地质出版社, 1 ~ 201.
- 李华芹, 周 肃, 蔡 红. 1997. 新疆北部尼勒克铜矿成矿作用年代学研究[J]. *地球学报*, 18(Z): 185 ~ 187.
- 李继磊, 苏 文, 张 喜, 等. 2009. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 28(12): 1 852 ~ 1 862.
- 李宁波, 单 强, 张永平, 等. 2012. 西天山阿吾拉勒地区 A 型流纹斑岩的初步研究[J]. *大地构造与成矿学*, 36(4): 624 ~ 633.
- 刘 睿, 王厉星, 陈根文. 2017. 西天山阿吾拉勒成矿带群吉 A 型花岗岩成因、地质意义及成矿潜力评价[J]. *岩石学报*, 33(6): 1 741 ~ 1 754.
- 骆文娟, 张作衡, 段士刚, 等. 2018. 新疆西天山各战基性-超基性岩年代学和岩石地球化学研究及其对铁成矿背景的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(5): 733 ~ 753.
- 罗 勇, 牛贺才, 单 强, 等. 2009. 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*, 25(4): 934 ~ 943.
- 宁文涛, 李永军, 汪振宇, 等. 2019. 伊宁地块特克斯达坂晚石炭世伊什基里克组双峰式火山岩地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 38(1): 1 ~ 20.
- 宋志瑞, 肖晓林, 罗春林, 等. 2005. 新疆伊宁盆地尼勒克地区二叠纪地层研究新进展[J]. *新疆地质*, 23(4): 334 ~ 338.
- 夏 换, 陈根文, 刘 群, 等. 2011. 西天山吐拉苏盆地大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 35(3): 429 ~ 438.

附中文参考文献

- 陈根文, 邓 腾, 刘 睿, 等. 2015. 西天山阿吾拉勒地区二叠系塔尔德套组双峰式火山岩地球化学研究[J]. *岩石学报*, 31(1): 105 ~ 118.
- 陈根文, 刘 群, 夏 换, 等. 2011. 新疆阿吾拉勒成矿带斑岩铜矿

- 熊小林, 赵振华, 白正华, 等. 2001. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因:Nd 和 Sr 同位素组成的限制[J]. 岩石学报, 17(4): 514 ~ 522.
- 徐学义, 李向民, 马中平, 等. 2006. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世: 来自辉长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质学报, 80(8): 1 168 ~ 1 176.
- 薛春纪, 赵晓波, 张国震, 等. 2015. 西天山金铜多金属重要成矿类型、成矿环境及找矿潜力[J]. 中国地质, 42(3): 381 ~ 410.
- 闫欣, 许荣华. 2001. 等离子体质谱法测定岩石中的锆、铪、铌、钽[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 458 ~ 460.
- 闫永红, 薛春纪, 张招崇, 等. 2013. 西天山阿吾拉勒西段群吉萨依花岗岩地球化学特征及其成因[J]. 岩石矿物学杂志, 32(2): 139 ~ 153.
- 叶海敏, 叶现韬, 张传林. 2013. 新疆西天山尼勒克二叠纪火山岩的地球化学特征及构造意义[J]. 岩石学报, 29(10): 3 389 ~ 3 401.
- 张贺, 刘敏, 赵军, 等. 2012. 新疆阿吾拉勒山奴拉赛铜矿床流体包裹体和稳定同位素研究[J]. 矿床地质, 31(5): 1 087 ~ 1 100.
- 赵军, 张作衡, 刘晓阳, 等. 2012. 新疆阿吾拉勒成矿带西段铜矿床碳、氧、硫、铅同位素研究——成矿物质来源及成矿环境探讨[J]. 矿床地质, 31(5): 999 ~ 1013.
- 赵军, 张作衡, 张贺, 等. 2013. 新疆阿吾拉勒山西段下二叠统陆相火山岩岩石地球化学特征、成因及构造背景[J]. 地质学报, 87(4): 525 ~ 541.
- 赵振华, 白正华, 熊小林, 等. 2003. 西天山北部晚古生代火山—浅侵位岩浆岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年[J]. 地球化学, 32(4): 317 ~ 327.
- 朱弟成, 王青, 赵志丹. 2017. 岩浆岩定量限定陆—陆碰撞时间和过程的方法和实例[J]. 中国科学: 地球科学, 47(6): 657 ~ 673.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 2005. 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, 50(18): 78 ~ 88.
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5): 1 341 ~ 1 350.
- 朱志新, 董连慧, 刘淑聪, 等. 2012. 新疆西天山伊犁地块晚古生代火山岩地质特征及构造意义[J]. 新疆地质, 30(3): 258 ~ 263.