

# 新疆北天山沙湾地区晚石炭世火山岩 地球化学特征及地质意义

刘 飞 杨经绥 李天福 陈松永 徐向珍 李金阳 贾 毅

(中国地质科学院地质研究所, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037)

**摘要:**天山北部沙湾地区火山岩由火山碎屑岩和火山熔岩组成, 主要包括安山质(岩屑)晶屑凝灰岩、英安质熔结凝灰岩、玄武安山岩和流纹岩, 为钙碱性系列。玄武安山岩和流纹岩主量元素平均含量分别为:  $\text{SiO}_2=51.03\%、77.33\%$ ,  $\text{TiO}_2=0.76\%、0.16\%$ ,  $\text{CaO}=10.30\%、0.43\%$ ,  $\text{MgO}=5.19\%、0.89\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}=2.10\%、1.27\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}=1.28\%、2.54\%$ ; 稀土元素特征分别为:  $\sum\text{REE}=369.1\times 10^{-6}、729.0\times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=5.0、3.5$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_N=2.7、2.4$ ,  $\delta\text{Eu}=0.82、0.54$ ; Sr、Nd、Pb 同位素特征分别为:  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.70680$  和  $0.70476$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i=0.52224$  和  $0.51225$ ,  $\varepsilon\text{Nd}(t)=0.2$  和  $0.1$ ,  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=17.775$  和  $17.720$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=15.790$  和  $15.826$ ,  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i=38.240$  和  $38.876$ 。火山熔岩亏损 Nb、Ta、Ti 和 P, 富集 K、Rb、U、Th、Zr 和 Hf, 玄武安山岩的 Zr 为  $117\times 10^{-6}\sim 121\times 10^{-6}$ , Zr/Y 比值为 5.63~5.82。流纹岩是玄武安山质岩浆结晶分异的产物, 流纹岩 LA-ICPMS 锆石的 U-Pb 年龄为  $(310\pm 2)$  Ma。本区火山岩原始岩浆产出于大陆板内拉张环境, 是源自软流圈地幔的大陆玄武岩浆受到岩石圈地幔和大陆上、下地壳混染的结果。玄武安山岩中辉石斑晶的结晶温度和压力分别为  $1176.4^\circ\text{C}$ , 4.13 kpa, 相当于 16.7 km 的深度, 反映了混染的大陆玄武岩浆在中、上地壳缓慢结晶形成单斜辉石斑晶后, 因陆壳的拉张、快速上升至地表的过程。

**关键词:**火山岩; 陆内拉张环境; Sr、Nd 和 Pb 同位素; 地球化学; 北天山; 新疆

**中图分类号:** P584 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)04-0868-22

## 1 前 言

中国天山造山带广泛发育的石炭纪火山岩系, 主要由基性玄武质熔岩组成, 其次为一定数量的中性和酸性熔岩及同成分的火山碎屑岩<sup>[1,2]</sup>。前人对天山北部火山岩进行了较详细的地球化学和年代学研究, 如天山东段觉罗塔格<sup>[3,4]</sup>和博格达山<sup>[5-7]</sup>, 天山中段后峡和乌什城沟<sup>[8]</sup>和巴仑台—骆驼沟<sup>[9]</sup>, 及天山西段伊犁地块周缘等<sup>[10-13]</sup>, 以上地区普遍存在基性和酸性熔岩的双峰式组合, 但构造环境解释不同, 认为觉罗塔格和天山中段地区早、晚石炭世为大陆裂谷或后陆拉伸盆地环境<sup>[3-9]</sup>, 而天山北部西段地区则为岛弧环境<sup>[10-12]</sup>或板内裂谷环境<sup>[13]</sup>, 夏林圪等<sup>[14]</sup>认为天山石炭纪—早二叠世火山岩与地幔柱活动有关。

北天山古生代造山带北侧以北部逆冲带为界<sup>[24]</sup>, 南部以北天山断裂带为界<sup>[18]</sup>, 内部未见寒武纪及更老地层, 整个古生代沉积均表现出较大的活动性<sup>[1,15,16]</sup>。其间分布一条晚古生代蛇绿岩带, 呈北西—南东展布于艾比湖—巴音沟—后峡一线<sup>[17]</sup>, 该蛇绿岩带被认为是准噶尔板块和伊犁—中天山板块之间的缝合带<sup>[18]</sup>, 并以巴音沟蛇绿岩为代表<sup>[19]</sup>。巴音沟蛇绿岩逆冲推覆于早石炭世阿克沙克组火山岩系之上, 上覆晚石炭世奇尔古斯套组<sup>[20,21]</sup>, 徐学义等根据其中的辉长岩和斜长花岗岩锆石 U-Pb 年龄(分别为  $(344.0\pm 3.4)$  Ma 和  $(324.8\pm 7.1)$  Ma), 厘定了该蛇绿岩形成于早石炭世<sup>[21,22]</sup>。北天山断裂带以北沿科古琴山—博罗科努山—依连哈比尔尕, 东至博罗科努山脉, 为一条以晚古生代为主的中酸性侵入岩带<sup>[18,23-30]</sup>,

收稿日期: 2011-06-28; 改回日期: 2011-07-02

基金项目: 中国石化海相前瞻性项目(YPH08110)和国土资源部公益性行业科研项目(201011034)联合资助。

作者简介: 刘飞, 男, 1982年生, 博士生, 主要从事大地构造和岩石矿物学研究; E-mail: lfhy112@126.com。

走向与蛇绿岩带近于平行。其中晚志留世—晚石炭世中酸性岩体均与洋壳向陆壳俯冲有关,而米什沟地区早二叠世花岗岩则产于碰撞后的拉伸环境<sup>[18]</sup>。鉴于天山北部蛇绿岩带和中酸性侵入岩带呈 NWW 向条带状分布,晚古生代火山岩呈面状分布等规律性的岩性分带特点,火山岩与蛇绿岩带和中酸性岩浆岩带有何关系,及前人将蛇绿岩带北部沙湾安集海地区划为新生代地层区<sup>[14,15]</sup>,没有对该区火山岩进行详细的岩石学和地球化学研究。笔者选择巴音沟蛇绿岩东北部沙湾火山岩为研究对象(图 1-a),通过较详细的岩相学、主微量和 Sr、Nd、Pd 同位素地球化学研究,试图为天山北部的构造演化提供依据。

## 2 区域地质背景

作为中亚造山带重要组成部分的中国天山造山带,分别以北部活动逆冲带和南部活动逆冲带为界与准噶尔板块和塔里木板块分开<sup>[24]</sup>,以乌鲁木齐为界,分为东天山和西天山两部分<sup>[31]</sup>,西天山构造带以中天山北缘断裂带和中天山南缘断裂带分为北天山、伊犁—中天山和南天山构造带<sup>[32]</sup>(图 1-a)。北天山活动陆缘或北天山古生代造山带,位于伊犁—中天山微板块和准噶尔板块之间,其间沿艾比湖—巴音沟—后峡一线分布一条走向北西西的晚古生代蛇绿岩带<sup>[17]</sup>。蛇绿岩带北部区域内未见寒武纪及更老地层,但从南到北,自志留纪到第四纪地层出露齐

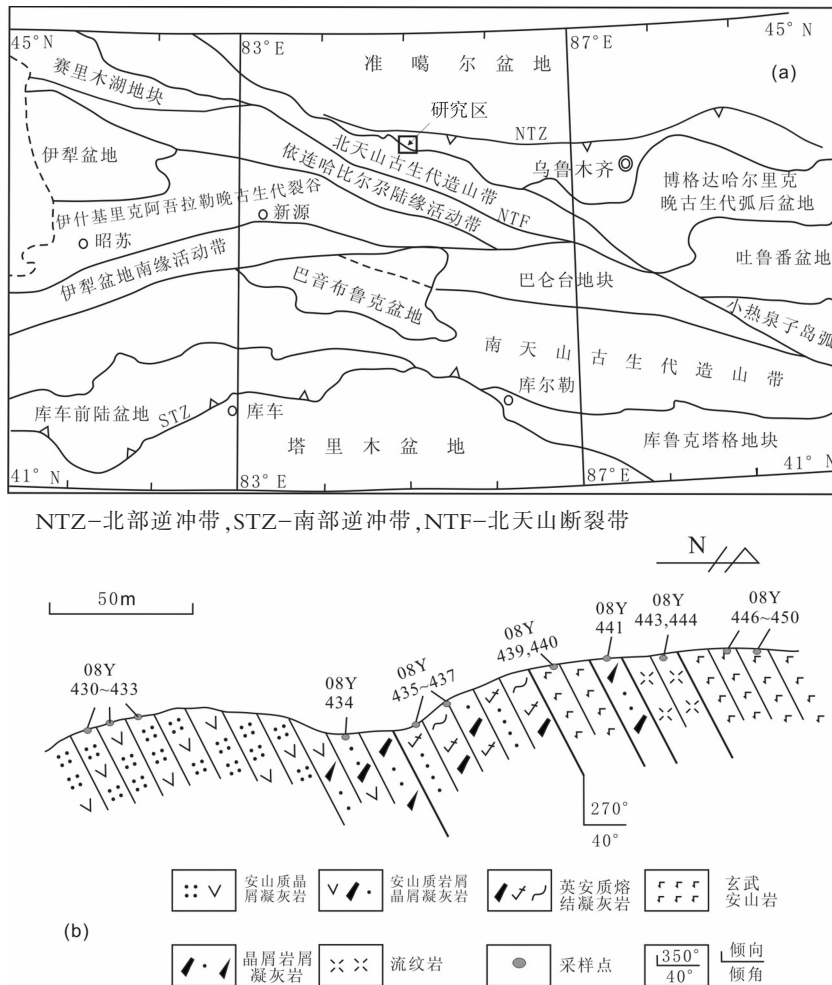


图 1 天山大地构造略图和研究区位置<sup>[25]</sup>(据朱志新等修改)(a)和北天山沙湾地区火山岩采样剖面图(b)  
Fig.1a, Sketch tectonic map of Tianshan, showing location of the study area (modified after Zu Zhixin et al., 2006)(a) and Geological section map of volcanic rocks in Shawan, northern Tianshan(b)

全,早志留世是一套碳酸盐类岩石,夹页岩和砂岩等;中志留世下部为千枚岩化和片理化砂岩、页岩和砾岩,上部为结晶灰岩、大理岩和蚀变中基性火山岩;晚志留世至早泥盆世为各种蚀变片岩、泥质灰岩、钙质砂岩、砂砾岩和中酸性火山岩等;早石炭世以灰岩、页岩、砂岩和板岩(粉砂岩)为主,不整合于老地层之上;晚石炭世以火山岩和火山碎屑岩为主。中生代地层为陆相湖盆沉积建造及含煤建造,以层理清晰的砂砾岩、砂岩、页岩、泥岩和成煤和生油地层为主;新生代地层为陆相沉积建造,以砾岩、砂岩、泥质岩及第四纪砂砾石层为主<sup>[5]</sup>。研究区的火山岩位于该套地层最北部地区,靠近准噶尔盆地南缘,中华人民共和国 1:100 万地质图阿勒泰幅、夏林圪和钟林等<sup>[4,5]</sup>均将其划为新生代地层区。本区火山岩出露于低矮山包,岩石露头整体较新鲜,变形较弱,灰绿色中基性火山岩与红褐色酸性熔岩呈互层状产出(图 1-b)。研究区火山岩顺层产出于石炭纪灰绿色砂岩、火山碎屑岩和棕褐色硅质岩等中。

### 3 火山岩岩性特征

研究区火山岩出露于沙湾县安集海镇东约 10 km(N44°20'25",E85°8'06")。火山岩露头较发育,整体较新鲜,局部被第四纪砂砾石土覆盖(图 1-a)。显微镜下观察结合成分分析,本区火山岩主要由安山质晶屑凝灰岩、安山质岩屑晶屑凝灰岩,酸性和基性火山熔岩等组成。

安山质晶屑凝灰岩(样品 08Y430~08Y433),浅灰绿色,凝灰结构,块状构造,由斜长石、单斜辉石和少量角闪石等晶屑及少量岩屑组成。晶屑粒径多位于 0.1~0.3 mm,棱角明显,裂纹发育,长石多已发生绢云母化、碳酸盐化,含量 70%,辉石呈不规则粒状、短柱状,局部绿泥石化,含量 5%。岩屑主要为微细粒的凝灰岩,呈次棱角状、饼状,粒径小于 0.5 mm,含量 5%~7%,岩屑晶屑之间为隐晶质的火山灰,局部脱玻化,含量 18%~20%(图 2-a)。

安山质岩屑晶屑凝灰岩(样品 08Y434),灰绿色,凝灰结构,块状构造,主要由岩屑和晶屑组成,颗粒支撑,晶屑粒径 0.1~0.7 mm,以 0.2~0.5 mm 为主,次棱角状,主要为斜长石(65%),含少量角闪石和单斜辉石(5%),斜长石普遍发生绢云母化、碳酸盐化,单斜辉石和角闪石较破碎;岩屑主要为微细粒凝灰岩,含少量微晶针状斜长石杂乱分布,粒径 0.5~

5 mm,局部达 8 mm,棱角明显,呈角砾状,少量弯曲或透镜状,弱定向性分布,反映了岩屑刚性—半塑性特征,含量 30%(图 2-b)。

英安质熔结凝灰岩(样品 08Y435、08Y437):紫红色,熔结凝灰结构、脱玻结构,假流纹构造、气孔构造、杏仁构造、熔结珍珠构造等。主要由大量玻屑和少量晶屑组成,隐晶质玻屑遇刚性碎屑明显弯曲,呈条纹状、透镜状,脱玻化中心由碳酸盐和隐晶质硅质岩充填,边部为霏细脱玻结构,暗化边发育,含量 80%~85%。晶屑主要为碱性长石和石英,粒径 0.2~0.6 mm,棱角明显,含量约 10%,长石局部粘土化,岩屑为安山质岩屑,呈浑圆状,含量约 5%(图 2-c)。

辉石安山岩分为两段,分别厚 30 m(样品 08Y439、08Y440)和 50 m(08Y446~450)。整体较新鲜,灰绿色—深绿色,斑状结构。斑晶为单斜辉石,粒径 0.12 mm×0.2 mm~1.4 mm×2.8 mm,局部可达 5 mm×7 mm,半自形—自形短柱状或粒状,部分发生绿泥石化,呈残斑结构、网状结构,含量 5%~8%。基质间粒结构或交织结构,长条状少量板状的斜长石杂乱分布,其格架被绿泥石化、碳酸盐化单斜辉石和半自形粒状磁铁矿充填,斜长石(70%~75%)弱粘土化(图 2-d)。

晶屑岩屑凝灰岩(样品 08Y441),棕褐色,粗粒结构,块状构造,主要由岩屑和晶屑组成。岩屑成分复杂,包括玄武岩、安山岩、微细粒晶屑凝灰岩及少量红褐色流纹岩,呈不规则粒状、次棱角状,粒径 0.5~1.5 mm,局部达 2.5 mm,含量 65%。晶屑以斜长石为主,普遍强碳酸盐化,矿物外形明显,呈不规则粒状、短柱状,棱角多被磨圆,粒径 0.1~0.4 mm,含量 35%(图 2-e)。

流纹岩(样品 08Y443,444),紫红色—红褐色,无斑细粒结构,流纹构造,以微细粒长英质为主,含量 95%,针状长条状长石和细粒石英定向排列,绕过少量石英晶屑和岩屑(约 5%)呈流动状(图 2-f)。流纹岩向北见少量晶屑凝灰岩,宽约 10 m,再向北为宽约 50 m 的辉石安山岩,流纹岩夹杂于辉石安山岩中(图 1-b)。

总之,本区火山岩主要由火山熔岩和火山碎屑岩组成,前者整体较新鲜,包括紫红色英安质熔结凝灰岩、流纹岩和灰绿色辉石安山岩;后者蚀变较强,主要发生斜长石的绢云母化、碳酸盐化及辉石的绿泥石化,晶屑主要为长石和少量辉石,岩屑除晶屑岩屑凝灰岩(样品 08Y441)含较复杂的岩屑成分外,均

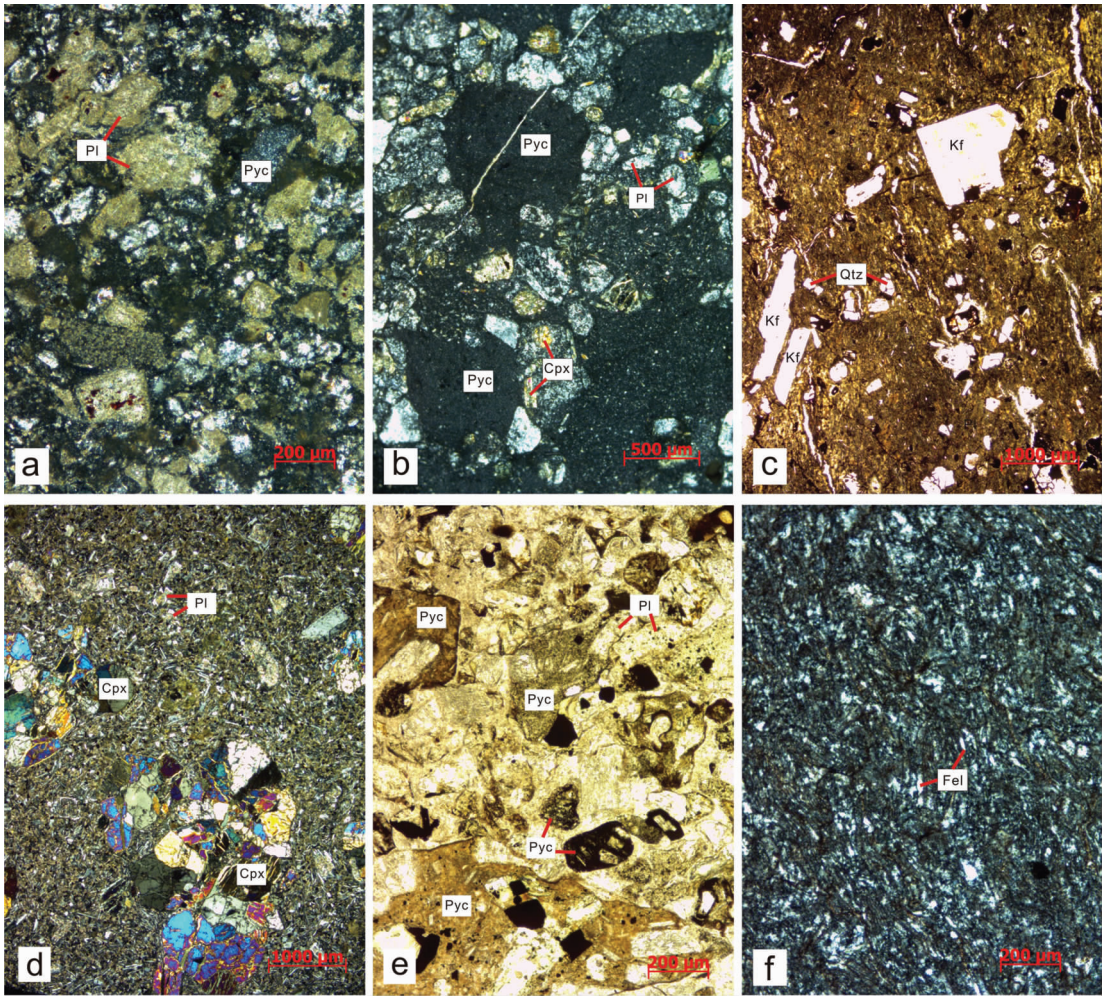


图 2 北天山玄武安山岩样品显微照片

a—08Y431 安山质晶屑凝灰岩; b—08Y434 安山质岩屑晶屑凝灰岩; c—08Y437 英安质熔结凝灰岩; d—08Y439 辉石安山岩; e—08Y441 晶屑岩屑凝灰岩; f—08Y443 流纹岩, 无斑细粒结构. Cpx—单斜辉石; Fel—微细粒长英质矿物; Kf—碱性长石; Qtz—石英; Pl—斜长石; Pyc—岩屑

Fig. 2 Microstructure of volcanic rocks from Anjihai area in northern Tianshan

a— 08Y431 andesitic crystal tuff; b—08Y434 andesitic debris crystal tuff; c—08Y437 dacite welded tuff; d—08Y439 pyroxene andesite; e—08Y441 crystal- debris tuff; f—08Y443 rhyolite, innoate fine grained texture; Cpx—Clinopyroxene; Fel—Fine particle felsic minerals; Kf—Alkali feldspar, Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Pyc—Detritus

为微细粒的凝灰岩岩屑,几乎没有陆壳物质的沉积。从南到北(图 1-b),火山碎屑物(晶屑和岩屑)粒径逐渐变大,岩屑和熔岩含量逐渐增高,从细粒晶屑凝灰岩过渡到中细粒晶屑岩屑凝灰岩和熔结凝灰岩,最后为酸性和基性火山熔岩组合,代表了爆发相和溢流相共存的火山喷发活动。

#### 4 火山岩的矿物学特征

火山岩中矿物的主量元素电子探针分析(EMPA),在中国地质科学院地质研究所电子探针

室完成,实验仪器型号为日本 JEOL 公司 JXA-8100、能谱仪 Inca Energy 型电子探针,探针束流 20 nA,加速电压 15.0 kV,电子束斑 5 μm,摄谱时间 10 s,ZAF 校正,SPI 组合标样校正和同类标准矿物精确校正,结果列于表 1~2。

本区玄武安山岩的辉石分为斑晶和基质两种类型,斑晶辉石无色,{110}解理不发育,无环带和聚片双晶,粒径为 0.5~3 mm,少量可达 7 mm,含量 5%左右,基质辉石充填于长条状斜长石格架中,构成间粒结构或交织结构。辉石斑晶具有 1011 cm<sup>-1</sup> 和 670

表 1 北天山安集海玄武安山岩中辉石和斜长石 EMPA 数据 (%)

Table 1 EMPA data (%) of clinopyroxene and plagioclase in basaltic andesite of Anjihai, northern Tianshan

样品	位置	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total
08Y439-1	斑晶辉石	52.296	0.434	2.573	7.642	0.191	15.954	21.341	0.219	0.002	0.059	100.711
08Y439-2	斑晶辉石	51.934	0.499	3.317	7.515	0.195	15.547	21.658	0.252	0.010	0.051	100.978
08Y439-3	斑晶辉石	50.129	0.718	4.724	8.933	0.169	14.452	21.167	0.337	0.000	0.007	100.636
08Y439-4	斑晶辉石	51.332	0.594	2.959	8.832	0.241	15.074	21.580	0.236	0.002	0.042	100.892
08Y439-12	斑晶辉石	51.025	0.615	3.227	8.645	0.235	15.079	21.426	0.252	0.004	0.075	100.614
08Y439-13	斑晶辉石	51.183	0.631	3.392	8.840	0.215	14.680	21.218	0.242	0.005	0.005	100.426
08Y440-3	斑晶辉石	51.036	0.610	3.099	8.782	0.171	14.977	21.232	0.254	0.004	0.046	100.233
08Y440-8	斑晶辉石	51.631	0.522	2.899	8.557	0.203	15.474	21.301	0.235	0.012	0.068	100.905
08Y440-9	斑晶辉石	50.803	0.600	4.628	8.195	0.182	14.734	21.153	0.35	0.000	0.022	100.696
08Y440-10	斑晶辉石	52.190	0.281	1.845	9.246	0.289	14.699	21.680	0.239	0.000	0.000	100.469
08Y440-11	斑晶辉石	50.278	0.661	3.331	8.835	0.225	14.808	21.108	0.311	0.006	0.000	99.563
08Y440-15	斑晶辉石	50.841	0.625	3.217	8.861	0.260	14.979	21.359	0.294	0.023	0.068	100.529
08Y440-16	斑晶辉石	51.845	0.300	2.514	5.950	0.099	16.087	22.674	0.273	0.000	0.092	99.876
08Y440-17	斑晶辉石	52.256	0.337	2.633	5.292	0.105	16.363	22.691	0.241	0.000	0.076	99.994
08Y440-18	斑晶辉石	53.660	0.210	1.477	5.260	0.145	17.557	21.933	0.174	0.007	0.077	100.529
08Y440-23	基质辉石	50.170	0.968	2.970	10.202	0.206	13.990	21.286	0.272	0.000	0.079	100.143
08Y440-28	基质辉石	49.166	1.159	3.504	11.833	0.290	13.231	20.954	0.311	0.04	0.032	100.52
08Y440-29	基质辉石	48.894	1.223	3.686	12.200	0.352	13.283	19.938	0.357	0.018	0.058	100.032
08Y440-30	基质辉石	50.777	0.884	2.477	12.717	0.351	14.245	18.516	0.243	0.003	0.000	100.232
08Y440-31	基质辉石	50.722	0.830	3.072	11.627	0.301	14.416	19.264	0.237	0.000	0.072	100.541
08Y440-36	基质辉石	50.643	0.849	3.128	10.147	0.309	14.140	20.638	0.256	0.008	0.110	100.228
08Y439-5	斜长石	52.089	0.029	28.961	0.858	0.010	0.167	14.070	3.601	0.268	0.014	100.067
08Y439-7	斜长石	55.299	0.047	27.102	0.720	0.000	0.088	10.579	5.058	0.546	0.032	99.505
08Y439-8	斜长石	52.299	0.045	28.576	0.863	0.000	0.132	13.410	4.060	0.289	0.011	99.712
08Y439-9	斜长石	53.041	0.034	28.465	0.781	0.028	0.101	12.422	4.140	0.337	0.000	99.362
08Y439-10	斜长石	51.381	0.000	30.173	0.706	0.009	0.147	14.468	3.506	0.206	0.000	100.612
08Y439-11	斜长石	52.309	0.032	29.655	0.753	0.013	0.147	13.620	3.835	0.230	0.000	100.632
08Y439-19	斜长石	50.900	0.025	29.730	0.728	0.009	0.107	14.200	3.421	0.224	0.004	99.348
08Y439-20	斜长石	52.170	0.030	29.252	0.808	0.020	0.158	13.789	3.613	0.260	0.006	100.106
08Y439-21	斜长石	53.032	0.059	28.856	0.938	0.017	0.145	13.347	3.975	0.398	0.024	100.794
08Y439-22	斜长石	51.784	0.007	29.170	0.881	0.034	0.148	13.815	3.672	0.355	0.012	99.878
08Y439-23	斜长石	52.796	0.059	28.520	0.790	0.025	0.178	13.088	4.211	0.357	0.015	100.039
08Y440-5	斜长石	53.133	0.045	28.835	0.730	0.024	0.137	13.822	3.418	0.348	0.000	100.492
08Y440-6	斜长石	52.522	0.055	28.727	0.839	0.010	0.100	13.152	4.001	0.267	0.007	99.706
08Y440-19	斜长石	51.317	0.024	29.601	0.781	0.009	0.151	14.266	3.436	0.222	0.000	99.814
08Y440-21	斜长石	50.601	0.032	31.090	0.679	0.005	0.111	14.920	3.045	0.161	0.000	100.654
08Y440-24	斜长石	51.936	0.033	30.260	0.798	0.000	0.162	13.723	3.658	0.235	0.000	100.813
08Y440-27	斜长石	51.679	0.072	29.039	0.988	0.078	0.210	13.791	3.767	0.224	0.032	99.897
08Y440-34	斜长石	53.410	0.042	28.026	0.960	0.038	0.170	12.339	4.502	0.348	0.008	99.851
08Y440-38	斜长石	51.848	0.017	29.947	0.882	0.007	0.165	13.948	3.594	0.248	0.000	100.656
08Y440-40	斜长石	52.217	0.021	29.824	0.791	0.000	0.155	13.341	3.813	0.238	0.014	100.414

表 2 北天山安集海玄武安山岩中辉石的阳离子数  
Table 2 Cation coefficients of basaltic andesite in Anjihai, northern Tianshan

样品	位置	Si <sup>4+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Ti <sup>4+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Σ
		T	T	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M2	M2	M2	M2	
Y439-1	斑晶辉石	1.913	0.087	0.024	0.012	0.052	0.04	0.002	0.87	0.142	0.006	0.837	0.016	4.000
Y439-2	斑晶辉石	1.896	0.104	0.038	0.014	0.055	0.045	0.001	0.846	0.129	0.006	0.847	0.018	4.000
Y439-3	斑晶辉石	1.844	0.156	0.049	0.020	0.090	0.048	0.000	0.793	0.136	0.005	0.834	0.024	4.000
Y439-4	斑晶辉石	1.885	0.115	0.013	0.016	0.085	0.060	0.001	0.825	0.127	0.007	0.849	0.017	4.000
Y439-12	斑晶辉石	1.878	0.122	0.017	0.017	0.087	0.05	0.002	0.827	0.130	0.007	0.845	0.018	4.000
Y439-13	斑晶辉石	1.890	0.110	0.037	0.018	0.054	0.082	0.000	0.808	0.136	0.007	0.839	0.017	4.000
Y440-3	斑晶辉石	1.886	0.114	0.021	0.017	0.076	0.060	0.001	0.825	0.136	0.005	0.841	0.018	4.000
Y440-8	斑晶辉石	1.892	0.108	0.017	0.014	0.078	0.044	0.002	0.845	0.140	0.006	0.836	0.017	4.000
Y440-9	斑晶辉石	1.864	0.136	0.064	0.017	0.063	0.05	0.001	0.806	0.138	0.006	0.831	0.025	4.000
Y440-10	斑晶辉石	1.930	0.070	0.011	0.008	0.061	0.111	0.000	0.810	0.115	0.009	0.859	0.017	4.000
Y440-11	斑晶辉石	1.869	0.131	0.015	0.018	0.101	0.045	0.000	0.821	0.129	0.007	0.841	0.022	4.000
Y440-15	斑晶辉石	1.873	0.127	0.012	0.017	0.100	0.046	0.002	0.822	0.127	0.008	0.843	0.021	4.000
Y440-16	斑晶辉石	1.903	0.097	0.012	0.008	0.085	0.012	0.003	0.880	0.086	0.003	0.892	0.019	4.000
Y440-17	斑晶辉石	1.911	0.089	0.025	0.009	0.060	0.012	0.002	0.892	0.090	0.003	0.889	0.017	4.000
Y440-18	斑晶辉石	1.948	0.052	0.012	0.006	0.039	0.000	0.002	0.942	0.121	0.004	0.853	0.012	3.999
Y440-23	基质辉石	1.869	0.130	0.000	0.027	0.093	0.100	0.002	0.777	0.124	0.007	0.850	0.02	4.000
Y440-28	基质辉石	1.835	0.154	0.000	0.033	0.123	0.108	0.001	0.736	0.128	0.009	0.838	0.023	4.000
Y440-29	基质辉石	1.835	0.163	0.000	0.035	0.121	0.100	0.002	0.743	0.160	0.011	0.802	0.026	4.000
Y440-30	基质辉石	1.901	0.099	0.010	0.025	0.056	0.113	0.000	0.795	0.228	0.011	0.743	0.018	3.998
Y440-31	基质辉石	1.886	0.114	0.020	0.023	0.062	0.093	0.002	0.799	0.206	0.009	0.767	0.017	3.999
Y440-36	基质辉石	1.884	0.116	0.021	0.024	0.062	0.105	0.003	0.784	0.149	0.010	0.823	0.018	4.000

cm<sup>-1</sup> 的拉曼光谱峰,结合 Wo-En-Fs 图解(图 3-a)可知,除少量为透辉石外,大部分为普通辉石,基质全部为普通辉石。基质中长条状、针状的斜长石绝大部分为拉长石,少量为倍长石(图 3-b)。

单斜辉石中 Al 的含量与压力关系密切,玄武岩岩浆在高压条件下结晶时,Al 易以 Al<sup>VI</sup> 进入单斜辉石中,在低压结晶时,Al 易以 Al<sup>IV</sup> 代替 Si 进入斜长石<sup>[33,34]</sup>。因此,辉石低压环境下,贫 Al,高 Al<sup>IV</sup>,高压条

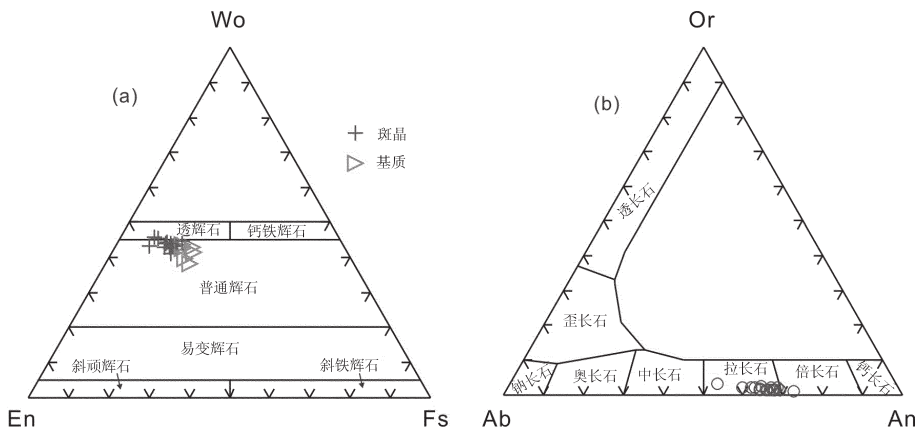


图 3 单斜辉石的 Wo-En-Fs 图解(Morimoto N. 1988)<sup>[7]</sup>(a)及长石 Or-Ab-An 图解(b)  
Fig.3 Wo-En-Fs diagrams of clinopyroxene (after Morimoto N., 1988)(a) and Or-Ab-An diagrams(b)

件下,富 Al,高 Al<sup>VI</sup>。斑晶辉石(15 个点)的 SiO<sub>2</sub> 为 50.0%~53.7%,平均 51.5%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 1.48%~4.72%,平均 3.06%;Al 总量为 0.064~0.205,平均 0.132;Al<sup>IV</sup> 为 0.07~0.156,平均 0.108;Al<sup>VI</sup> 为 0.011~0.064,平均 0.025。邱家骧根据 Thompson R. N.(1974)对富钙单斜辉石的高压高温数据求得 Al 含量与温度压力的回归方程式: $P(0.1\text{Gpa}) = -6.6360 + 81.3899(Al)$ ,  $r = 0.9548$ ;  $T(^{\circ}\text{C}) = 1057.0318 + 902.0416(Al)$ ,  $r = 0.9194$ <sup>[35]</sup>。斑晶辉石的平均压力和温度为 4.13 kpa, 1176.4°C, 由压力与深度换算公式:  $D = 4.2 + 3.03P$ <sup>[36]</sup>, 算得斑晶辉石结晶的平均深度为 16.7 km, 斑晶辉石结晶于中上地壳。

## 5 岩石地球化学特征

火山岩往往由于气孔及方解石或沸石等气孔充填物,或者受到后期蚀变影响,导致全岩化学分析结果产生较高的烧失量。为了减少这种影响,除了选择新鲜样品外,在进行全岩化学分析前需对样品进行仔细清洗和杏仁体的清除。Muller 和 Carr 认为火山岩 5%的烧失量可作为划分新鲜样品和蚀变样品的界限<sup>[38,39]</sup>, Scarrow 认为样品的烧失量小于 3.5%,则岩石的元素组成没有受到蚀变作用的影响<sup>[40]</sup>。本区火成岩的烧失量(除样品 08Y441)在 1.01%~6.30%之间,平均 3.30%,属较新鲜的样品。

岩石的常量元素、微量和稀土元素分析在国家地质测试中心完成,其中常量元素用熔片 X-射线荧光光谱法(XRF)测定,并采用等离子光谱和化学法测定进行互相检测;微量元素中 V、Cr、Co、Ni、Sr、Zr、Nb、Ta、Hf、Ba、Th、U 等元素用熔片 XRF 和酸溶等离子质谱(ICP-MS)法测定;Nb、Ta、Zr、Hf 是用碱溶法、沉淀酸提取、用等离子质谱法测定;稀土元素用 ICP-MS 法测定。火山岩的化学成分及稀土微量元素分析结果见表 3。

岩相学研究表明,除晶屑岩屑凝灰岩包含玄武岩、安山岩、微细粒晶屑凝灰岩及少量红褐色流纹岩等岩屑(样品 08Y441,图 2-e),安山质岩屑晶屑凝灰岩含少量微细粒凝灰岩岩屑外,火山岩几乎没有陆壳物质的混染。此外,除晶屑岩屑凝灰岩外,火山熔岩的烧失量较低(1.01%~6.3%),故采用全碱-硅(TAS)图解(图 4-a)对火山岩进行分类,并用 SiO<sub>2</sub>-Nb/Y 图解(图 4-b)验证。首先将分析数据烧失量去除,常量元素氧化物重新换算成 100%后投图,基

性火山岩样品均落入玄武安山岩区域内,与偏光显微镜下辉石安山岩特征相吻合。FeO<sup>T</sup>/MgO-SiO<sub>2</sub> 分类图解(图 4-c)中,本区中基性火山岩落入钙碱性系列区域内。

### 5.1 常量元素

安山质晶屑凝灰岩的 SiO<sub>2</sub> = 54.17%~56.99%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 15.43%~16.74%, A/CNK = 1.55~2.01, MgO 为 4.86%~5.20%, Mg<sup>#</sup> (Mg<sup>#</sup> = 100Mg/(Mg+Fe<sup>T</sup>)) 为 0.49~0.52, TiO<sub>2</sub> 为 0.37%~0.42%, FeO<sup>T</sup> 为 6.78%~7.45%, 平均 7.06%, CaO 为 3.89%~6.69%, 碱金属(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)为 3.94%~4.97%。安山质岩屑晶屑凝灰岩相比安山质晶屑凝灰岩 SiO<sub>2</sub> 偏高(58.59%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、A/CNK、MgO、FeO<sup>T</sup>、TiO<sub>2</sub> 偏低, 碱金属(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)含量偏高(5.46%),可能是由于微细粒凝灰岩岩屑中 长英质成分较高引起的。

英安质熔结凝灰岩 SiO<sub>2</sub> = 65.38%~68.54%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 14.94%~15.68%, A/CNK = 1.52~1.56, MgO 为 0.45%~0.69%, Mg<sup>#</sup> = 0.15~0.18, TiO<sub>2</sub> 为 0.69%~0.72%, FeO<sup>T</sup> 为 3.69%~4.45%, CaO 为 1.05%~1.18%, 碱金属(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)为 8.77%~8.85%。

玄武安山岩 SiO<sub>2</sub> = 50.63%~51.42%, 明显高于 N-MORB (48.77%), MgO 为 4.43%~5.59%, Mg<sup>#</sup> = 0.43~0.52, 比巴音沟蛇绿岩逆冲下伏的早石炭世基性火山岩(Mg<sup>#</sup> = 0.521~0.585)略低<sup>[41]</sup>, 较低的镁含量表明玄武质岩浆经历了明显的结晶分异作用(原始岩浆 MgO > 8%)<sup>[42]</sup>, TiO<sub>2</sub> 为 0.75%~0.77%, 接近于岛弧玄武岩<sup>[45]</sup>(0.8%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 14.62%~14.63%, A/CNK 为 1.05~1.09, 属于铝饱和系列, FeO<sup>T</sup> 为 7.79%~8.14%, 平均 7.97%, CaO 为 10.06%~10.54%, 碱金属(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)含量 3.37%~3.39%, K<sub>2</sub>O 含量低于 Na<sub>2</sub>O 含量, 为低钾钙碱性系列。

晶屑岩屑凝灰岩复杂的岩屑组分和长石强碳酸盐化,是导致 SiO<sub>2</sub> 含量较低(41.42%)和 16.71%烧失量的主要原因。

流纹岩 SiO<sub>2</sub> = 77.33%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 11.64%, K<sub>2</sub>O 为 2.54%, 高于 Na<sub>2</sub>O(1.27%), CaO、FeO<sup>T</sup>、MgO 含量很低,分别为 0.43%、2.64%、0.89%,反映了岩浆演化后期斜长石成分的减少,尤其钙长石含量的大量分异,矿物成分以石英为主,含少量钾长石的矿物组合特征。

随 SiO<sub>2</sub> 含量增加,火山岩碱金属(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)含量逐渐增加, CaO、MgO、FeO<sup>T</sup> 逐渐减少, TiO<sub>2</sub> 呈整体降低的趋势,除流纹岩外,其他火山岩 K<sub>2</sub>O 含

**表 3 北天山安集海地区火山岩主量元素(%)与微量、稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果**  
**Table 3 Major elements (%), minor and rare earth elements ( $10^{-6}$ ) of volcanic rocks in Anjihai area, northern Tianshan**

	08Y430	08Y431	08Y432	08Y433	08Y434	08Y435	08Y437	08Y439	08Y440	08Y441	08Y443
样品	安山质 晶屑凝灰岩			安山质晶屑 岩屑凝灰岩		英安质 熔结凝灰岩		玄武安山岩		晶屑岩屑 凝灰岩 流纹岩	
SiO <sub>2</sub>	54.80	54.17	56.99	55.27	58.59	68.54	65.38	50.63	51.42	41.42	77.33
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.42	0.39	0.37	0.38	0.72	0.69	0.77	0.75	0.76	0.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.74	16.73	15.72	15.43	14.29	14.94	15.68	14.62	14.63	12.82	11.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.37	2.66	1.83	1.19	1.82	3.60	4.64	4.10	3.17	2.98	0.15
FeO	4.65	5.06	5.53	5.75	4.71	0.45	0.27	4.45	4.94	2.75	2.51
MnO	0.13	0.13	0.12	0.14	0.12	0.05	0.06	0.35	0.30	0.24	0.02
MgO	5.15	5.06	4.86	5.20	4.59	0.45	0.69	4.43	5.95	4.20	0.89
CaO	6.69	5.10	3.89	5.01	4.99	1.05	1.18	10.54	10.06	15.12	0.43
Na <sub>2</sub> O	2.19	2.53	1.62	3.58	2.12	5.57	2.56	2.05	2.15	1.92	1.27
K <sub>2</sub> O	1.75	2.23	2.32	1.39	3.34	3.20	6.29	1.32	1.24	0.63	2.54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.30	0.33	0.30	0.28	0.28	0.16	0.18	0.18	0.18	0.24	0.02
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	3.78	4.26	4.20	3.80	3.40	1.00	1.86	2.14	3.22	4.78	2.32
CO <sub>2</sub>	0.73	1.41	2.17	2.68	1.66	0.31	0.31	4.29	2.25	12.42	0.39
LOI	3.90	5.18	6.07	5.63	4.26	1.01	1.80	6.30	4.74	16.71	2.28
Total	99.66	100.09	99.94	100.09	100.29	100.04	99.79	99.87	100.26	100.28	99.67
Mg <sup>d</sup>	0.52	0.49	0.49	0.52	0.50	0.55	0.18	0.43	0.52	0.52	0.32
VCNK	1.57	1.70	2.01	1.55	1.37	1.52	1.56	1.05	1.09	0.73	2.75
FeO <sup>T</sup>	6.78	7.45	7.18	6.82	6.35	3.69	4.45	8.14	7.79	5.43	2.64
Y	12.70	13.00	8.77	10.90	12.60	30.70	41.80	20.80	20.80	20.40	79.00
La	5.80	5.71	3.70	5.03	8.35	27.10	41.60	16.50	15.70	15.70	46.60
Ce	11.10	10.80	7.75	9.67	16.60	44.10	79.50	33.60	32.20	34.10	93.40
Pr	1.44	1.45	1.10	1.30	2.18	7.87	10.50	4.26	4.08	4.39	13.10
Nd	6.57	6.52	4.98	5.97	9.16	31.60	41.20	17.40	16.80	18.50	53.90
Sm	1.71	1.67	1.32	1.51	2.11	6.39	8.04	3.81	3.63	4.04	12.00
Eu	0.55	0.54	0.43	0.53	0.68	1.21	1.66	1.09	1.05	1.09	2.24
Gd	2.32	2.25	1.73	2.02	2.72	6.19	7.95	4.25	4.29	4.20	13.20
Tb	0.32	0.33	0.26	0.30	0.36	0.90	1.18	0.60	0.59	0.62	2.15
Dy	2.26	2.24	1.64	1.99	2.37	5.79	7.33	3.78	3.70	3.67	14.20
Ho	0.47	0.47	0.35	0.42	0.49	1.15	1.53	0.79	0.76	0.77	3.05
Er	1.47	1.50	1.05	1.27	1.42	3.51	4.59	2.27	2.25	2.23	8.95
Tm	0.20	0.23	0.15	0.19	0.21	0.51	0.68	0.34	0.31	0.31	1.32
Yb	1.49	1.53	1.07	1.39	1.47	3.45	4.56	2.17	2.21	2.16	9.03
Lu	0.24	0.24	0.17	0.21	0.22	0.53	0.69	0.32	0.31	0.32	1.35
Ni	21.70	22.40	33.10	20.70	26.80	8.47	7.58	31.60	36.20	34.30	4.42
Cr	41.00	47.30	85.50	39.90	63.40	16.00	14.70	74.00	94.40	79.60	7.40
V	301.00	348.00	302.00	304.00	235.00	44.10	44.60	194.00	198.00	152.00	5.58
Zr	16.50	14.80	15.50	14.20	35.50	432.00	495.00	121.00	117.00	151.00	507.00
Rb	49.40	74.40	75.90	40.70	73.90	80.70	205.00	33.30	26.80	22.70	63.80
Sr	721.00	797.00	518.00	537.00	593.00	339.00	272.00	356.00	367.00	298.00	52.30
Ba	612.00	525.00	460.00	476.00	868.00	971.00	1310.00	460.00	478.00	192.00	308.00
Th	1.70	1.69	1.76	1.58	3.26	13.50	18.40	5.27	4.89	3.19	13.90
U	0.76	0.63	0.70	0.68	1.17	4.37	5.41	1.59	1.51	1.04	2.99
Pb	85.50	5.19	10.50	53.30	13.40	19.90	23.60	14.40	10.10	6.68	18.10
Nb	1.20	1.22	1.32	1.12	2.37	20.80	26.10	8.08	7.95	8.69	18.40
Ta	0.11	0.10	0.13	0.10	0.23	1.70	2.12	0.75	0.69	0.65	1.64
Hf	0.74	0.66	0.69	0.67	1.32	11.50	12.90	3.66	3.59	4.43	14.70



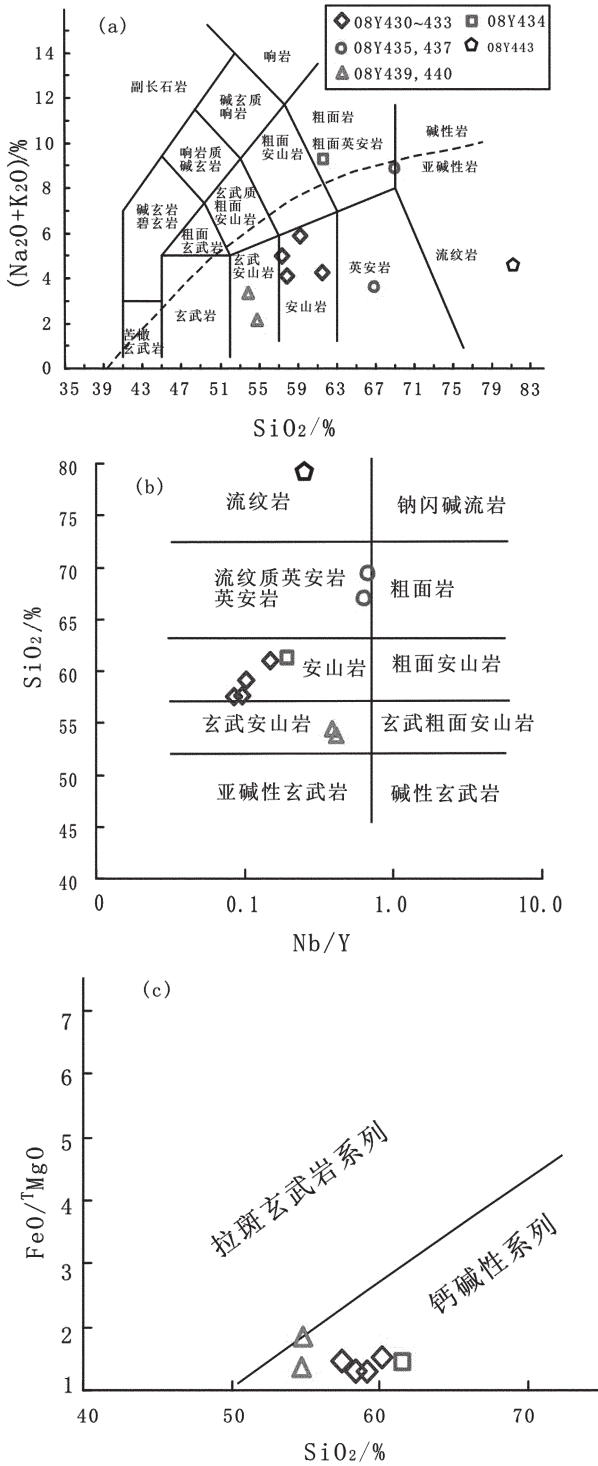


图4 北天山火山岩 TAS 图解(据 Le Martre et al.,1989)<sup>[4]</sup> (a)、SiO<sub>2</sub>-Nb/Y 图解(J.A.Winchester et al,1977;夏林圻等,2008 修改)<sup>[14,42]</sup>(b)及 FeO<sup>T</sup>/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解(Miyashiro, 1975; xia et al,2005,修改)<sup>[20,43]</sup>(c)

Fig.4 TAS plot of volcanic rocks from northern Tianshan (after Le Martre et al., 1989)(a); SiO<sub>2</sub>-Nb/Y diagram (modified after J. A. Winchester et al., 1977; Xia Linqi et al., 2008)(b); FeO<sup>T</sup>/MgO-SiO<sub>2</sub> diagram(modified after Miyashiro,1975; Xia et al., 2005)(c)

量小于 Na<sub>2</sub>O 含量,与巴音沟蛇绿岩中玄武岩、辉长岩、辉绿岩墙、闪长岩和斜长花岗岩脉等演化趋势相一致。TiO<sub>2</sub> 含量(0.37%~0.77%)低于巴音沟蛇绿岩中(除斜长花岗岩)所有基、中性岩 TiO<sub>2</sub> 的含量(0.75%~1.27%)<sup>[20]</sup>,可能反映两者不同的源区特征。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表现为先增大再减小的特征(11.64%~16.74%),斜长石中钙长石牌号逐渐减少。总之,火山岩主量元素的演化反映了本区火山岩可能为同源岩浆逐步结晶分异的特点,与火山岩分类图解(图4)表现的演化趋势相吻合。

5.2 稀土元素

安山质晶屑凝灰岩稀土总量  $\sum REE=122.70 \times 10^{-6} \sim 168.40 \times 10^{-6}$ , 平均  $152.60 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土比值(LREE/HREE) 为 1.22~1.26, (La/Yb)<sub>N</sub>=2.35~2.64, (La/Sm)<sub>N</sub>=1.75~2.14, 轻重稀土分馏不明显, Eu 略负异常,  $\delta Eu=0.84 \sim 0.93$ , 平均 0.87, 指示源区经历了斜长石的分离结晶作用。

安山质岩屑晶屑凝灰岩  $\sum REE=209.90 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE =1.70, (La/Yb)<sub>N</sub>=3.86, (La/Sm)<sub>N</sub>=2.47,  $\delta Eu=0.87$ 。玄武安山岩  $\sum REE=362.50 \times 10^{-6} \sim 375.80 \times 10^{-6}$ , 平均  $369.10 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE=2.03~2.07, (La/Yb)<sub>N</sub>=4.83~5.17, (Ce/Yb)<sub>N</sub>=3.83~4.07,  $\delta Eu=0.81 \sim 0.82$ 。

英安质熔结凝灰岩  $\sum REE=591.10 \times 10^{-6} \sim 835.40 \times 10^{-6}$ , 平均  $713.20 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE=2.17~2.44, (La/Yb)<sub>N</sub>=5.34~6.20, (La/Sm)<sub>N</sub>=2.65~3.23,  $\delta Eu=0.58 \sim 0.63$ 。流纹岩  $\sum REE=729.0 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE = 1.59, (La/Yb)<sub>N</sub>=3.51, (La/Sm)<sub>N</sub>=2.43,  $\delta Eu=0.54$ 。

从基性到中性火山岩,稀土元素总量、轻重稀土分异和 Eu 负异常程度逐渐增加,稀土元素配分曲线相互平行,表现了同源岩浆逐步分异的过程,与常量元素分异特征一致(图 6-a)。其中流纹岩的轻重稀土分异程度低于玄武安山岩和英安质熔结凝灰岩,可能由于岩浆演化后期,稀土元素大量富集,降低了轻重稀土分异程度。

5.3 微量元素

原始地幔标准化微量元素图中,安山质晶屑凝灰岩和安山质岩屑晶屑凝灰岩强烈亏损 Nb、Ta、Ti、Th、Zr 等高场强元素(HFSE),富集 K、Sr、Rb、Ba 等大离子亲石元素(LILE)及 P 和 Pb 不相容元素,Rb 和 Sr 含量分别为  $40.70 \times 10^{-6} \sim 75.90 \times 10^{-6}$  (平均  $60.10 \times 10^{-6}$ ) 和  $518 \sim 797 \times 10^{-6}$  (平均  $643 \times 10^{-6}$ ), Rb/Sr 比值分别为 0.069~0.147(平均 0.096)和 0.125

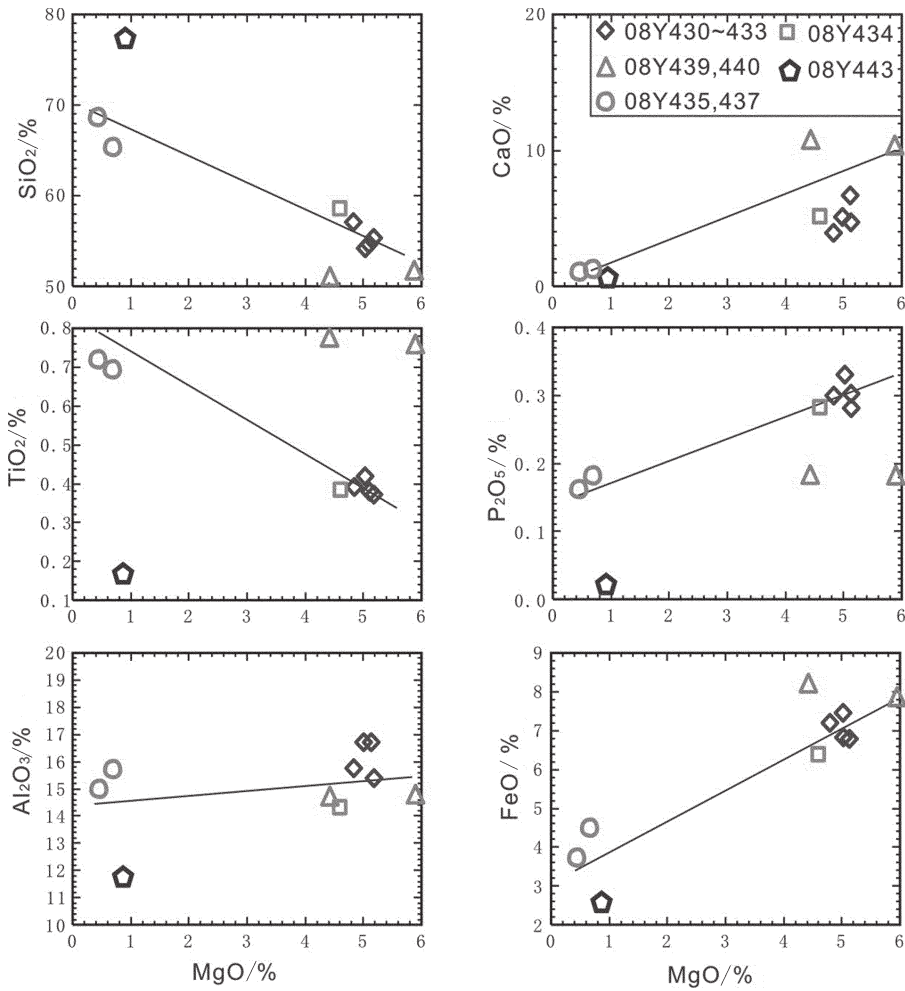


图 5 北天山安集海地区火山岩主要元素-MgO 协变图解

Fig.5 Major elements-MgO covariant diagrams of volcanic rocks in Anjihai, northern Tianshan

(图 6-b)。

玄武安山岩明显亏损 Nb、Ta 和 Ti，富集 K、Rb、Ba、Th、U、Hf 和 Zr，略微富集 Sr。Zr 为  $117 \times 10^{-6}$ ~ $121 \times 10^{-6}$ ，Zr/Y 为 5.6~5.8， $Rb = 26.80 \times 10^{-6}$ ~ $33.30 \times 10^{-6}$ ， $Sr = 356 \times 10^{-6}$ ~ $367 \times 10^{-6}$ ，Rb/Sr 比值为 0.073~0.094(图 6-b,c)。Ni 和 Cr 含量较低，分别为  $31.6 \times 10^{-6}$ ~ $36.2 \times 10^{-6}$  和  $74.0 \times 10^{-6}$ ~ $94.4 \times 10^{-6}$ ，与 Mg<sup>#</sup> 较低的演化趋势一致，可能反映了基性熔浆经历了橄榄石和辉石的结晶分离作用。Nb/Zr=0.067~0.068，与洋岛玄武岩接近<sup>[47]</sup>，Zr/Nb=14.72~14.98，位于巴音沟蛇绿岩逆冲推覆的下伏早石炭世基性火山岩(11.17~20.88)之间，低于巴音沟蛇绿岩中的基性熔岩(17.92~90.0)<sup>[20]</sup>。原始地幔标准化 $(Th/Nb)_N = 5.09$ ~5.4，显著高于巴音沟地区和中天山骆驼沟地区早石炭世基性熔岩(两者均<1)<sup>[20,48]</sup>。

英安质熔结凝灰岩和流纹岩亏损 Nb、Ta、Ti、Sr 和 P，明显富集 K、Rb、Hf、Zr、U、Th 和 Pb，其中流纹岩略微亏损 Ba，熔结凝灰岩富集 Ba。两者 Zr 含量分别为  $432 \times 10^{-6}$ ~ $495 \times 10^{-6}$  和  $507 \times 10^{-6}$ ，Rb 含量分别为  $81 \times 10^{-6}$ ~ $205 \times 10^{-6}$ (平均  $143 \times 10^{-6}$ )和  $63.80 \times 10^{-6}$ ，Sr 含量分别为  $272 \times 10^{-6}$ ~ $339 \times 10^{-6}$  (平均  $306 \times 10^{-6}$ )和  $52.30 \times 10^{-6}$ ，Rb/Sr 比值分别为 0.238~0.754 (平均 0.496)和 1.22。

从基性到中酸性岩，普遍亏损 Nb、Ta、Ti 和 P，富集 K、Rb、Th、U、Hf 和 Zr。此外，从玄武安山岩 Sr 略富集，P 略亏损，英安质熔结凝灰岩 Sr 略亏损 P 的明显亏损，到流纹岩 Sr 和 P 的强烈亏损，反映了同源岩浆相似的微量元素地球化学特征和部分活性元素演化的特点(图 6-b,c)。

在岩浆分离结晶作用过程中，Sr 趋向于在早期

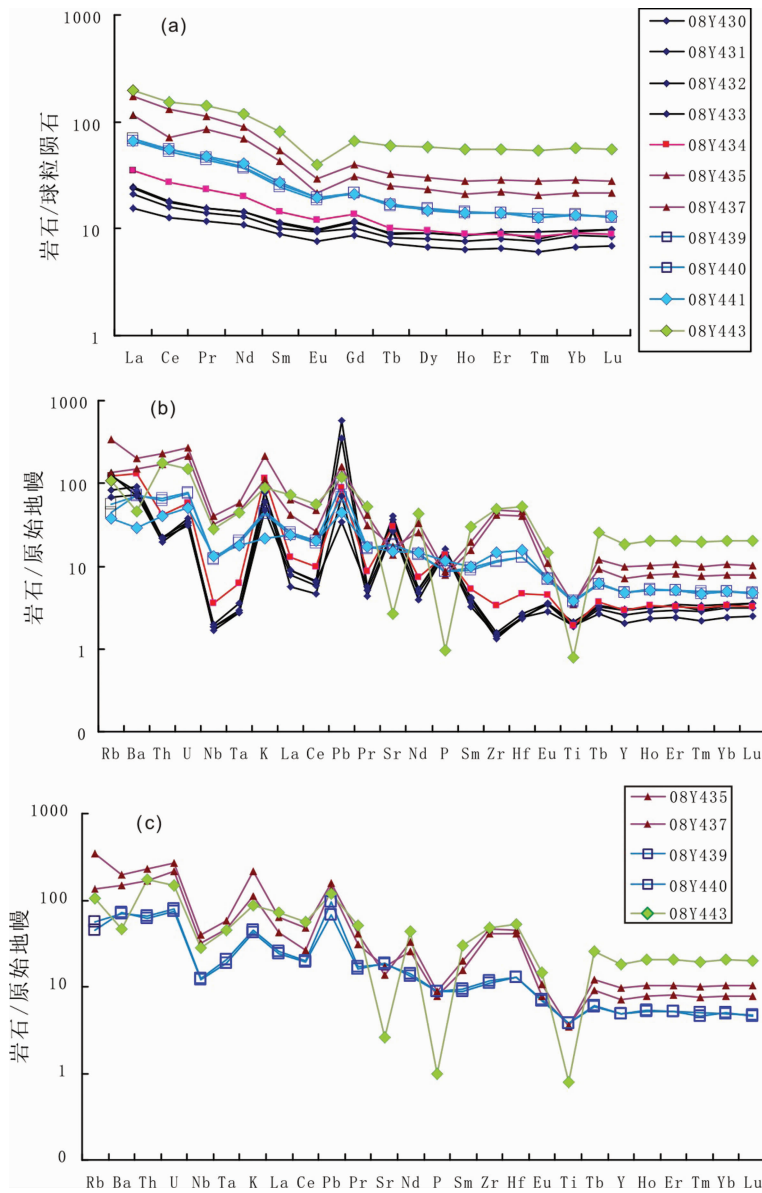


图6 新疆北天山安集海火山岩球粒陨石标准化稀土配分模式图和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (球粒陨石和原始地幔数据引自 Mc Donough W.F., et al.1995)<sup>[49]</sup>

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized rare elements diagrams for volcanic rocks of Anjihai in northern Tianshan, Xinjiang (chondrite and primitive mantle after Mc Donough W. F. et al., 1995)

形成的钙质斜长石中富集,而 Rb 留在液相中,在逐渐结晶过程中,残留岩浆的 Rb/Sr 比值可能逐渐增大<sup>[49]</sup>,本区基性、中酸性到酸性火山岩一系列的 Rb/Sr 比值分别为 0.083、0.096、0.125、0.496 和 1.22,除流纹岩外 Rb 的含量逐渐增高,分别为  $30.1 \times 10^{-6}$ 、 $60.1 \times 10^{-6}$ 、 $73.9 \times 10^{-6}$ 、 $142.9 \times 10^{-6}$  和  $63.8 \times 10^{-6}$ ,Sr 的含量整体逐渐降低,分别为  $361.5 \times 10^{-6}$ 、 $643.3 \times 10^{-6}$ 、 $593 \times 10^{-6}$ 、 $305.5 \times 10^{-6}$  和  $52.3 \times 10^{-6}$ ,表现出岩浆分离

结晶的过程。流纹岩中 Rb 含量较低可能由于  $K_2O$  含量的增高引起的,Rb 与 K 的离子半径非常相近,可以在所有含 K 的矿物中替代 K,结晶分异后期,岩浆中 K 含量很高,导致了 Rb 的降低。

### 6 流纹岩的锆石 U-Pb 年龄

锆石的激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪 (LA-MC-ICPMS)U-Pb 定年测试分析在中国地质科学

表 4 流纹岩(样品 08Y-443)的 LA-ICPMS 的锆石 U-Pb 测试数据  
Table 4 U-Th-Pb composition of zircons in rhyolite (08Y-443) as measured by LA-ICPMS

测试点	Th/ $10^{-6}$	U/ $10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	普通 Pb		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{237}\text{U}$		
				$10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	年龄 Ma	$\pm$	年龄 Ma	$\pm$
1	501	906	0.55	64.64	0.06	0.03	0.49	0.58	0.06	0.06	392	4	498	11
2	156	267	0.58	15.94	0.05	0.06	0.37	0.51	0.05	0.05	315	3	354	29
3	465	421	1.11	39.27	0.05	0.03	0.42	0.49	0.06	0.05	357	3	350	8
4	142	269	0.53	13.91	0.05	0.06	0.35	0.67	0.05	0.05	306	3	298	26
5	697	1037	0.67	84.86	0.06	0.02	0.55	0.65	0.07	0.09	432	5	494	1
6	476	418	1.14	50.43	0.07	0.08	0.62	0.86	0.07	0.08	428	5	783	24
7	760	799	0.95	55.89	0.05	0.02	0.36	0.33	0.05	0.04	308	3	322	7
8	613	365	1.68	41.36	0.05	0.03	0.36	0.33	0.05	0.05	311	3	300	11
9	251	265	0.95	57.00	0.20	0.96	2.22	19.76	0.07	0.02	420	13	2796	80
10	131	407	0.32	149.64	0.16	0.06	6.65	8.76	0.30	0.35	1667	18	2490	6
11	111	279	0.40	143.94	0.17	0.05	9.35	9.73	0.40	0.40	2169	19	2554	5
12	599	851	0.70	284.55	0.13	0.07	3.39	3.46	0.20	0.14	1146	8	2056	11
13	312	316	0.99	24.18	0.06	0.04	0.37	0.30	0.05	0.04	309	2	433	17
14	91	61	1.50	58.52	0.17	0.06	9.38	11.12	0.41	0.48	2202	22	2528	6
15	280	326	0.86	21.91	0.05	0.05	0.37	0.46	0.05	0.04	310	3	361	23
16	477	684	0.70	52.39	0.06	0.02	0.41	0.38	0.05	0.05	337	3	454	3

院矿床资源研究所 MC-ICPMS 实验室完成, 所用仪器为 Finnigan Neptune 型及与之配套的 Newwave UP213 激光剥蚀系统。激光剥蚀斑束直径为 25  $\mu\text{m}$ , 频率 10 Hz, 能量密度为 2.5  $\text{J}/\text{cm}^2$ , 以 He 为载气。数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器, 使之达到最优状态, 锆石 U-Pb 定年以 CJ-1 为外标, U、Th 含量以 M127 ( $\text{U}=923\times 10^{-6}$ ,  $\text{Th}=439\times 10^{-6}$ ,  $\text{Th}/\text{U}=0.475$ )<sup>[50]</sup>为外标进行校正, 结果见表 4。

本研究选择一个流纹岩(08Y443)样品开展锆石的 LA-ICPMS U-Pb 测年。共测了 16 个锆石,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分为 4 组 ( $1\sigma$ ): 1146~2202 Ma (4 个)、392~432 Ma (4 个)、337~357 Ma (2 个) 和 306~315Ma (6 个), 其中第一组锆石所对应的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为 2056~2528 Ma。一般认为岩浆成因的锆石具有震荡环带结构, Th/U 比值通常分布于 0.1~1.0, 而变质成因的锆石一般具有清晰的核和面状增生结

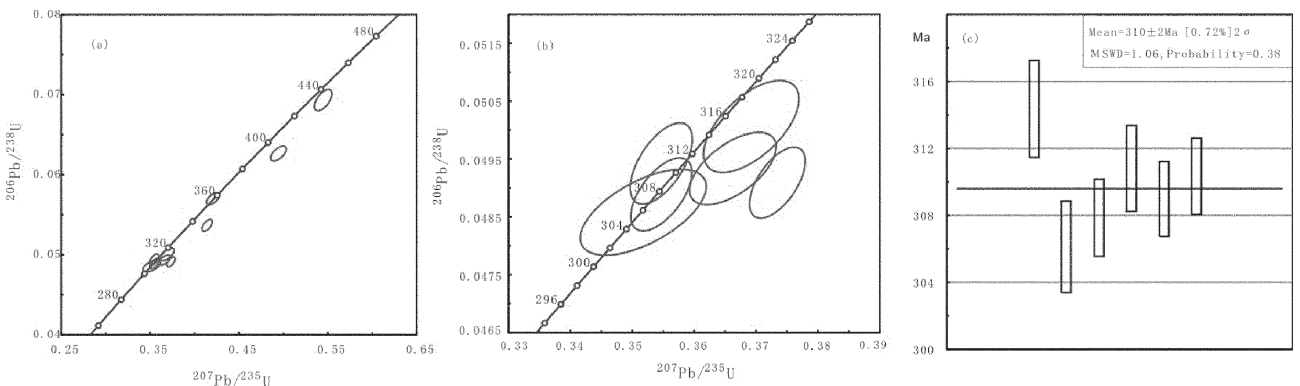


图 7 北天山流纹岩锆石的 U-Pb 谐和图和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄谱图  
Fig.7 LA-ICPMS zircon  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age diagrams from rhyolite in northern Tianshan

构, Th/U 比值小于 0.1<sup>[51,52]</sup>。

第一组锆石的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄包括: (2056±11) Ma、(2490±6) Ma、(2554±5) Ma 和 (2528±6) Ma, Th/U 比值分别为 0.70、0.32、0.40 和 1.50。前人的研究表明, 中天山东段尾亚-星星峡、帕尔冈塔格和库米什-干沟等变质地块主要形成于 1140~1220 Ma<sup>[53]</sup>,

胡霁琴等<sup>[54]</sup>认为天山造山带大陆地壳基底形成于 1800 Ma 前, 罗发祚<sup>[55]</sup>认为天山造山带东、中、西段 1800~2500 Ma 古元古代基底广泛发育。本研究获得的第一组锆石年龄与上述年龄值可以对比, 可能与天山造山带普遍存在的早、中元古代的基底有关。因此本组锆石可能是岩浆在上侵过程中从基底围岩中

表 5 新疆北天山安集海地区火山岩 Sr、Nd 和 Pb 同位素组成

Table 5 Sr, Nd and Pb isotope compositions from volcanic rocks of Anjihai in northern Tianshan, Xinjiang

样品号	08Y430	08Y431	08Y434	08Y435	08Y439	08Y440	08Y441	08Y443
Rb×10 <sup>-6</sup>	51.23	73.28	75.63	78.12	31.84	27.81	19.75	59.92
Sr×10 <sup>-6</sup>	730.6	802.7	603.7	341.5	352.6	368.1	302.5	48.52
<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	0.2075	0.2699	0.3672	0.6753	0.2475	0.2148	0.1861	3.638
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.707823	0.707828	0.707836	0.709105	0.707825	0.707816	0.707796	0.720814
Is	6	9	10	8	7	8	6	12
ε Sr(0)	47.2	47.2	47.4	65.4	47.2	47.1	46.8	231.6
ε Sr(t)	39.4	35.5	29.6	28.3	36.9	38.8	40.3	8.9
f <sub>Rb/Sr</sub>	1.51	2.26	3.44	7.17	1.99	1.60	1.25	42.99
( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>t</sub>	0.70691	0.70664	0.70622	0.70613	0.70673	0.70687	0.70697	0.70476
Sm×10 <sup>-6</sup>	1.824	1.702	2.308	6.402	3.914	3.502	3.995	11.85
Nd×10 <sup>-6</sup>	6.613	6.714	10.09	32.35	18.11	15.36	17.97	51.89
<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	0.1651	0.1567	0.1402	0.1226	0.1308	0.1425	0.1339	0.1386
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.512523	0.512518	0.512516	0.512511	0.512513	0.51252	0.512516	0.512527
Is	8	7	6	9	8	7	9	8
ε Nd(0)	-2.2	-2.3	-2.4	-2.5	-2.4	-2.3	-2.4	-2.2
ε Nd(t)	-1	-0.8	-0.1	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1
f <sub>Sm/Nd</sub>	-0.16	-0.20	-0.29	-0.38	-0.34	-0.28	-0.32	-0.30
( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>t</sub>	0.512188	0.512200	0.512231	0.512262	0.512248	0.512231	0.512244	0.512246
U×10 <sup>-6</sup>	0.6927	0.6107	1.206	4.219	1.634	1.498	1.116	3.116
Th×10 <sup>-6</sup>	1.813	1.754	3.378	15.16	5.318	4.937	3.224	14.55
Pb×10 <sup>-6</sup>	86.71	5.372	14.22	20.23	15.17	9.871	6.819	19.03
<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	18.301±25	18.295±27	18.284±23	18.257±26	18.263±31	18.224±23	18.306±30	18.312±25
<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	15.903±21	15.887±24	15.856±25	15.751±28	15.749±26	15.881±23	15.841±29	15.857±22
<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	38.813±23	38.786±25	38.805±24	38.749±20	38.703±26	38.748±23	38.648±29	38.749±25
( <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb) <sub>t</sub>	18.272	17.884	17.977	17.505	17.875	17.676	17.715	17.7201
( <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb) <sub>t</sub>	15.902	15.865	15.840	15.711	15.729	15.852	15.810	15.8259
( <sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb) <sub>t</sub>	38.789	38.413	38.534	37.895	38.304	38.177	38.109	37.8755
(Δ7/4) <sub>t</sub>	42.98	43.58	40.02	32.29	30.00	44.51	39.86	41.40
(Δ8/4) <sub>t</sub>	107.11	116.42	117.19	110.45	106.61	117.99	106.40	82.49
(ΔSr) <sub>t</sub>	69	66	62	61	67	69	70	48

注: (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>CHUR</sub> = 0.7045, (<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr)<sub>CHUR</sub> = 0.0827, λ<sub>Sr</sub> = .0000142Ma<sup>-1</sup>, λ<sub>Nd</sub> = 0.0000654Ma<sup>-1</sup>, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512638, <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd = 0.1967, 同位素校正年龄 = 310 Ma。

捕获的继承锆石。

第二组锆石的年龄包括:(392±4)Ma、(420±13)Ma、(428±5)Ma 和 (432±5)Ma, Th/U 比值分别为 0.55、0.95、1.14 和 0.67。第三组锆石的年龄包括:(337±3)Ma、(357±3)Ma, Th/U 比值前者为 1.10; 后者为 0.10。研究区南部,以巴音沟蛇绿岩为代表的北天山晚古生代蛇绿岩带以北,广泛出露志留纪至第四纪的连续地层<sup>[15]</sup>,392~432 Ma 和 337~357 Ma 两组锆石年龄很可能与火山岩原始岩浆混染志留纪—早石炭世地层有关。

第四组锆石的年龄包括:(306±3)Ma、(308±3)Ma、(309±3)Ma、(310±3)Ma、(311±3)Ma、(315±3)Ma, Th/U 比值分别为 0.53、0.95、0.99、0.86、1.68、0.58。由本组(306~315 Ma)锆石 U-Pb 年龄谱图(图 7)可知,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 (310±2)Ma (MSWD=1.06)为流纹岩的结晶年龄。该年龄与本区晚石炭世广泛发育的流纹岩、中基性凝灰岩和火山碎屑岩等火山喷发沉积建造<sup>[15]</sup>相一致,与北侧博罗科努中酸性岩基的闪长岩锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄(308.2±5.4)Ma<sup>[25]</sup>相对应,稍晚于西侧巴音沟蛇绿岩中辉长岩 (344.0±3.4 Ma) 和斜长花岗岩 (324.8±7.1 Ma)的年龄<sup>[21,22]</sup>。

## 7 Sr、Nd 和 Pd 同位素特征

Rb、Sr、Sm、Nd、U、Th 和 Pd 含量及其同位素比值在南京大学现代分析中心同位素质谱室测试完成,由 VG354 同位素质谱仪测试,铯钕同位素标准分别采用 NBS987 和 La Jolla, 以 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.1194 为标准化值,测得 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr =0.710236±7(标准 0.710340±260), 以 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.7219 标准化, 测得 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd =0.511864±3。测定 NBS 981 Pb 同位素标准, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb =16.941±8, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb =15.487±11, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=36.715±9,测定值均以 NBS981 进行标准化校正。流纹岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为(309±2.2)Ma,采用 310 Ma 作为 Sr、Nd、Pb 同位素初始年龄,结果见表 5。

本区火山岩总体具有中等含量的 Sr 同位素,及相对低的 Nd 同位素地球化学特征。安山质晶屑凝灰岩、安山质岩屑晶屑凝灰岩和英安质熔结凝灰岩的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 分别为 0.70664~0.70691,0.70622 和 0.70613, ε Nd(t)分别为 -1.0~-0.8, -0.1 和 0.5,玄武岩安山岩和流纹岩的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 分别为 0.70673~

0.70687 和 0.70476, ε Nd(t)分别为 0.2 和 0.1。ε Sr(t) 值除流纹岩为 8.9 外,其他值位于 28.3~40.3 之间。流纹岩的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 和 ε Sr(t) 值与其他岩石明显不同,反映在 Rb 和 Sr 含量的差别上,可能与流体作用有关,因为在热液环境中,Sr 相对不活泼,但 Rb 却较活泼<sup>[56]</sup>,流纹岩中 Rb 含量明显高于后期蚀变较弱的玄武安山岩和英安质熔结凝灰岩,而接近于蚀变较强的火山碎屑岩,Sr 含量较低主要与斜长石近乎完全分离结晶有关。火山岩中(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>t</sub>,英安质熔结凝灰岩含量最高,为 0.512262,安山质晶屑凝灰岩含量最低,为 0.512188~0.512231,玄武安山岩为 0.512231~0.512248,流纹岩为 0.512246,Sr、Nd 同位素初始比值接近于 Parana 地区的大陆溢流玄武岩(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.70468~0.71391, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.51221~0.51278)<sup>[56]</sup>。除流纹岩(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 值(0.70476)较小外,酸性和基性火山岩的 Sr、Nd 初始值表现出很好的一致性,反映了本区火山岩岩浆来源于地幔,同时发生了壳幔物质混染作用。从微量元素标准化蛛网图(图 6)可以看出,流纹岩的 LILE(Ba、Sr)曲线同其他岩石出现交叉,且 Sr 含量很低,说明流纹岩受到流体改造强烈,由于 Sr 在流纹岩中强烈亏损,考虑到本区火山岩的 ε Nd(t)值近于 0,Nd、Sm 受流体影响很小,因此流纹岩的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 初始值低于其他岩石很可能是流体作用的结果。ε Nd(t)-(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 图解和 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub>-(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>t</sub> 图解中,除流纹岩外,本区火山岩投影到 DM、HIMU、BSE 和 EM II 连接线上(图 8),并趋向于 EM II。一般情况下,富集作用与俯冲作用有关,EM II 与上部大陆地壳有亲缘关系<sup>[56]</sup>。

本区火山岩的 (<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>=17.505~18.272, (<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>=15.711~15.902, (<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>=37.876~38.789,玄武安山岩、英安质熔结凝灰岩和流纹岩的 (<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>、(<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub> 和 (<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub> 分别为 17.676~17.875、17.505 和 17.720;15.729~15.852、15.711 和 15.0826;38.177~38.304、37.895 和 37.876。根据 Hart(1984)通过一组数据中垂直偏离参照线确定 <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 和 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 异常,并分别用 Δ7/4、Δ8/4 和 ΔSr 表示。(Δ7/4)<sub>t</sub>、(Δ8/4)<sub>t</sub> 和 (ΔSr)<sub>t</sub> 分别代表 310 Ma 时 (<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>、(<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub> 和 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 的异常值,(Δ7/4)<sub>t</sub>=[(<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>-(<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>\*]×100;(Δ8/4)<sub>t</sub>=[(<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>-(<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>\*]×100 和 (ΔSr)<sub>t</sub>=[(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub>-0.7]×10000, 其中 (<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>\*=0.1084 (<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>+13.491, (<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>\*=

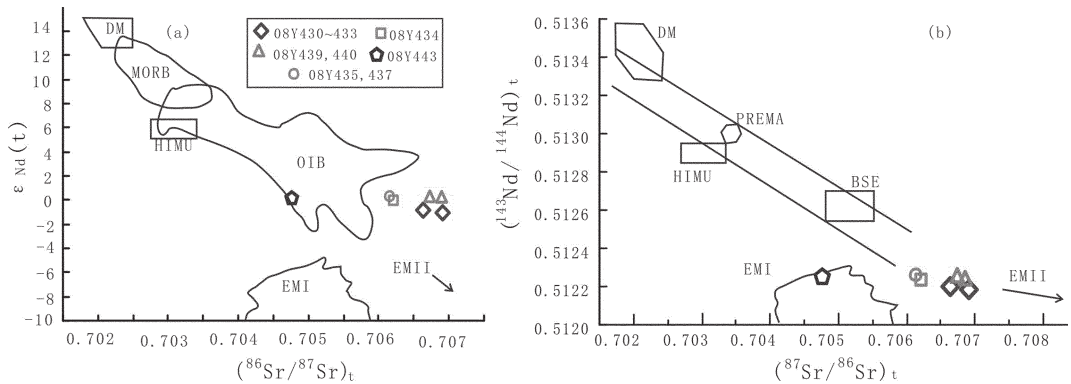


图 8 北天山火山岩  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - \epsilon \text{Nd}(t)$  相关图 (根据 Zindler and Hert, 1986)<sup>[58]</sup> (a) 和  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$  图解 (根据 Hugu R.R., 1994)<sup>[59]</sup> (b)

DM—亏损地幔; PREMA—原始地幔; BSE—地球总成分; EMI—I 型富集地幔; EMII—II 型富集地幔; HIMU—异常高  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  地幔  
Fig.8 Plot of initial  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - \epsilon \text{Nd}(t)$  of volcanic rocks in northern Tianshan (after Zindler and Hert, 1986) (a) and  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$  diagram (after Hugu R. R., 1994) (b)

DM—Depleted mantle; PREMA—Primitive mantle; BSE—Bulk Silicate Earth; EMI—I—enriched mantle;  
EMII—II—enriched mantle; HIMU:—exceptional high  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  mantle

$1.209(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t + 15.627$  (t 为 310Ma 时的值)<sup>[57]</sup>, 得出除流纹岩  $(\Delta \text{Sr})_t = 48$  外, 其他火山岩的  $(\Delta 7/4)_t$  为 30.0~44.51,  $(\Delta 8/4)_t$  为 82.49~117.99,  $(\Delta \text{Sr})_t$  为 61~70, 具有 DUPAL 异常特征:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7050$ ,  $\Delta 8/4 > 60$ ,  $\Delta 7/4$  偏高。

## 8 讨论

### 8.1 岩浆演化及源区性质

玄武安山岩  $\text{MgO} = 4.4\% \sim 5.6\%$  ( $\text{Mg}^\# = 0.52 \sim 0.59$ ),  $\text{Cr} = 74.0 \times 10^{-6} \sim 94.4 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Ni} = 31.6 \times 10^{-6} \sim 36.2 \times 10^{-6}$ ,  $\text{V} = 194 \times 10^{-6} \sim 198 \times 10^{-6}$ , 明显低于地幔橄榄岩相平衡的初始岩浆成分<sup>[60]</sup>, 说明玄武安山岩原始岩浆经历了结晶分离作用。从基性到酸性火山岩, 随  $\text{SiO}_2$  含量增加, 火山岩碱金属 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) 含量逐渐增加,  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}^\text{T}$  逐渐减少,  $\text{TiO}_2$  呈整体降低的趋势, 亏损 Nb、Ta、Ti 和 P, 富集 K、Rb、U、Th、Zr 和 Hf,  $\epsilon \text{Nd}(t)$  值近于一致, 火山熔岩的稀土元素标准化曲线和微量元素蛛网图曲线相互平行, 表明火山熔岩中流纹岩是玄武安山岩岩浆结晶分异的产物。安山质晶屑凝灰岩和安山质岩屑晶屑凝灰岩稀土元素标准化曲线相互平行, 同样表现出同源岩浆结晶分异的特点。值得一提的是, 火山碎屑岩微量元素标准化蛛网图中大离子元素曲线与火山熔岩曲线出现交叉现象, 且前者的 LILE (K、Rb、Sr、Ba) 及 Pb 的含量明显高于后者, HFSE (Nb、Ta、Zr、Hf、REE) 的含量低于后者, 可能是由于火山碎屑岩中斜长石

等晶屑强烈粘土化的结果。

基性火山岩的地球化学和同位素地球化学资料, 能对地幔岩浆源区性质作出有效约束, 但岩浆作用过程中的同化混染或岩浆混合作用很容易改变岩石的同位素组成<sup>[61]</sup>。韩吟文等 (2003)<sup>[62]</sup> 认为来自亏损地幔的物质,  $\epsilon \text{Nd}(t)$  值  $> 0$ ; 来自地壳或富集型地幔源的物质,  $\epsilon \text{Nd}(t)$  值  $< 0$ ;  $\epsilon \text{Nd}(t)$  值接近于 0, 表明物质来自球粒陨石型未分异的原始地幔。本区玄武安山岩、英安质熔结凝灰岩和流纹岩的  $\epsilon \text{Nd}(t)$  平均值分别为 0.2、0.5 和 0.1, 安山质晶屑凝灰岩和安山质岩屑晶屑凝灰岩的  $\epsilon \text{Nd}(t)$  平均值分别为 -0.9 和 -0.1, 火山熔岩接略大于 0, 反映本区火山岩岩浆可能来自球粒陨石型未分异的原始地幔。

受到岩石圈地幔混染的大陆玄武岩具有  $\text{Nb}/\text{La} < 1$ , 中等—低  $\epsilon \text{Nd}$  值 ( $< +2$ ) 和中等的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值 (0.704~0.707), 原始地幔标准化的  $(\text{Th}/\text{Nb})_N$  略大于 1 等特征; 而受地壳混染作用的大陆玄武岩具有较高的  $(\text{Th}/\text{Nb})_N$  值 ( $>> 1$ ), 较低的  $\epsilon \text{Nd}$  值 ( $< 0$ ) 和较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值 ( $> 0.706$ )<sup>[63]</sup>。本区玄武安山岩  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = 0.70673 \sim 0.70687$ ,  $\epsilon \text{Nd} = 0.2$ ,  $\text{Nb}/\text{La} = 0.49 \sim 0.51$ ,  $(\text{Th}/\text{Nb})_N = 5.09 \sim 5.40$ , 表明本区玄武安山岩初始岩浆受到了地壳和岩石圈地幔物质的混染。玄武安山岩的  $\text{Zr}/\text{Nb} = 14.7 \sim 15.0$ ,  $\text{La}/\text{Nb} = 1.97 \sim 2.04$ ,  $\text{Th}/\text{Nb} = 0.62 \sim 0.65$ ,  $\text{Th}/\text{La} = 0.31 \sim 0.32$ , 接近于大陆地壳的平均比值 (16.2、2.2、0.44 和 0.204)<sup>[64]</sup>, 同样显示大陆地壳物质的混染作用。

除流纹岩外,火山岩的锶同位素初始值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> 为 0.70613~0.70697, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> - ε Nd(t) 和 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> - ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>t</sub> 图解(图 8)中,火山岩趋向于 EM II, 在 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> 和 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>t</sub> 中,火山岩趋向于 EMI 和 EM II 混合的趋势(图 9-a,b), 一般情况下,EM II 与上部大陆地壳物质有亲缘关系<sup>[56]</sup>; ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> 和 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> 图解(图 10-a,b)中,本区火山岩投到 DUPAL 环境中,与(Δ7/4)<sub>t</sub> 为 30.0~44.51, (Δ8/4)<sub>t</sub> 为 82.49~117.99, (ΔSr)<sub>t</sub> 为 61~70, 具有 DUPAL 异常特征 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ >0.7050, Δ8/4Pb>60, Δ7/4Pb 偏高)一致。DUPAL 异常是由 Hart(1984) 识别出南半球存在一个规模很大明显富集 EMI 命名的,EMI 与下地壳具有相似性,可能代表再循环的地壳物质,或者是由地幔交代作用引起的<sup>[56]</sup>,说明本区火山岩原始岩浆受到岩石圈地幔和大陆上、下

地壳的混染作用。此外,流纹岩中存在古、中元古代(1146~2202 Ma) 和志留纪—早石炭世(337~432 Ma)继承锆石,同样反映了地壳混染作用。

玄武安山岩基质中的斜长石为拉长石,少量为倍长石,单斜辉石为普通辉石;斑晶中辉石以普通辉石为主,含微量透辉石,不发育斜长石斑晶。斑晶辉石相比基质辉石 SiO<sub>2</sub>、MgO 和 CaO 含量稍高,FeOT、TiO<sub>2</sub> 含量稍低,但整体成分差别不大,结合 Wo-En-Fs 图解(图 4)可知,斑晶和基质辉石属同源岩浆。辉石斑晶结晶于 17 km,粒径 1~3 mm,少量达 7 mm,含量约 5%,基质间粒结构或交织结构,可以推测来自软流圈地幔(或地幔柱)的玄武质岩浆在上侵的过程中与岩石圈地幔和大陆地壳经过充分的混染,在中、上地壳缓慢结晶形成单斜辉石斑晶后,随着陆壳的拉张,快速上升至地表。

总之,北天山安集海地区火山岩的岩相学、主微

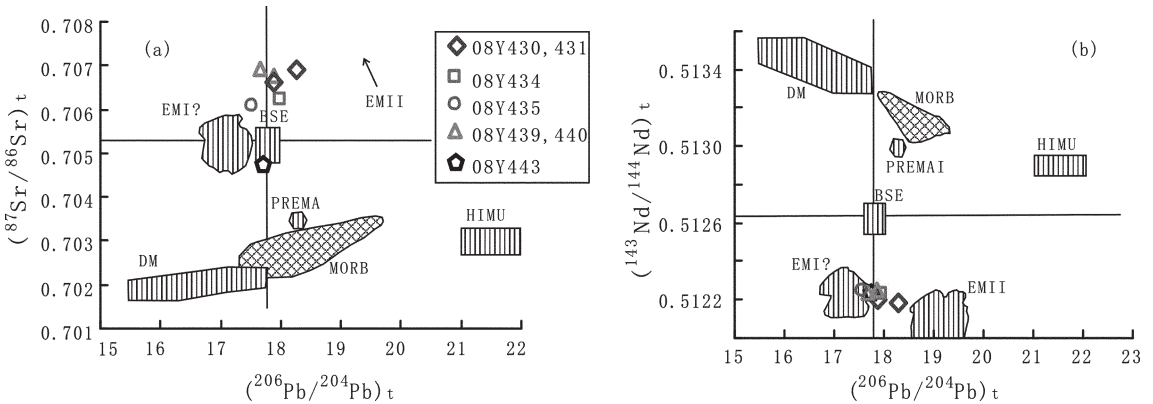


图 9 火山岩( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> 和 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>t</sub> 同位素相关曲线(根据 Zindler and Hart,1986)<sup>[58,59]</sup>  
Fig.9 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> and ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>t</sub> diagrams of volcanic rocks (after Zindler and Hart,1986)

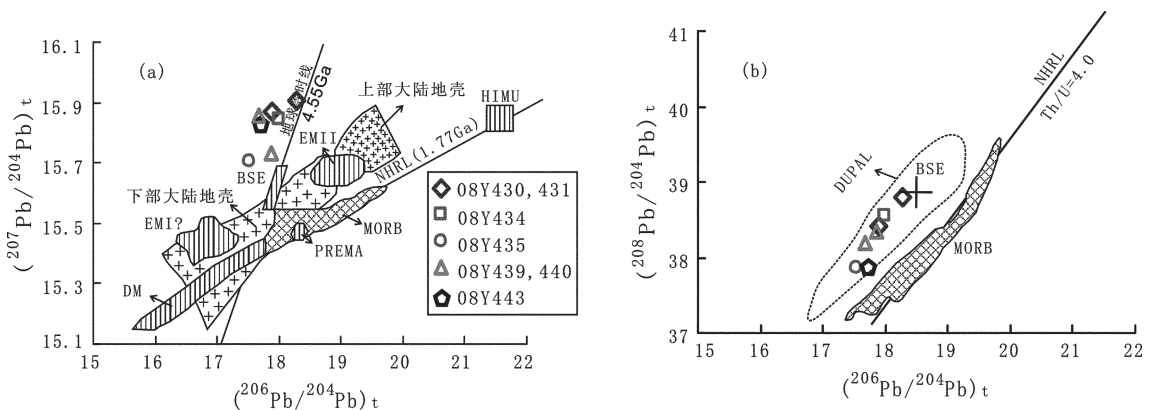


图 10 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> 和 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> 同位素相关曲线(根据 Wilson,1989)<sup>[64]</sup>,NHR 表示北半球参照线位置(根据 Hart,1984)<sup>[53]</sup>,DUPAL 异常引自(Xia,2005)<sup>[20]</sup>  
Fig.10 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> and ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> - ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> diagrams of volcanic rocks(after Wilson, 1989)



量及同位素地球化学均表现出同源岩浆结晶分异的特点,玄武安山岩初始岩浆是来自软流圈地幔(或地幔柱)的大陆玄武岩岩浆受地壳和岩石圈地幔混染的产物。

## 8.2 火山岩的构造背景和地质意义

研究区火山岩几乎没有陆壳物质的混染,晶屑凝灰岩(08Y-430~433)和岩屑晶屑凝灰岩(08Y-434)的 $\text{SiO}_2$ 含量随微细粒岩屑含量的增加而增大,两者晶屑主要由65%以上的斜长石和少量辉石组成,全岩分析中 $\text{SiO}_2$ 含量分布于安山岩范围内(图4),很可能由于来自同一个岩浆房的偏基性的晶屑成分与偏酸性的岩屑在火山喷发过程中不平衡混合造成的。与爆发相的火山碎屑岩相比,溢流相的火山熔岩野外产状为偏基性和酸性端元互层状产出(英安质熔结凝灰岩→玄武安山岩→流纹岩→玄武安山岩),不存在中性端元的火山熔岩组分,与火山碎屑岩基性和酸性端元具有类似的成分特征。

王焰等(2000)指出双峰式火山岩为一组时空上紧密伴生的, $\text{SiO}_2$ 含量集中分布在两个区间,其间存在一定成分间断的火山岩系,可以是流纹岩-玄武岩组合,也可以是玄武岩-中性岩或流纹岩-中性岩组合,他还总结了大陆裂谷、洋岛、大陆拉张减薄、弧后扩张、造山后拉张、洋内岛弧和成熟岛弧环境等7种不同构造环境下双峰式火山岩的主要特征,并且指出由玄武岩岩浆结晶分离的流纹岩,只有微量或者没有陆壳物质的加入,含量比玄武岩少的多,两者具有相似的微量元素和Nd同位素特征<sup>[69]</sup>。本区火山岩分布范围广,流纹岩组分少,玄武岩多。火山熔岩中流纹岩和玄武安山岩空间上密切共生,两者具有相似的稀土、微量元素和Nd同位素初始值,结合主量元素协变图解(图5)中酸性熔岩与中基性火山岩存在明显的成分间断,两者可能为双峰式组合。玄武安山岩轻度富集K、Rb、Zr和LREE, $\text{Zr}/\text{Nb}=14.7\sim 15.0$ , $\text{Zr}/\text{Y}=5.6\sim 5.8$ , $\varepsilon\text{Nd}(t)=0.2$ ,Nb具有不同程度的亏损,总体接近于大陆拉张减薄环境的双峰式特征。

夏林圻等(2007)<sup>[69]</sup>认为大多数基性熔岩的Nb、Ta和Ti等的含量在受到地壳混染时发生改变,Zr和Y的含量则没有多大影响,因此若利用包含有Nb、Ta和Ti元素的玄武岩构造环境判别图解,不能很好地区分岛弧玄武岩和受大陆地壳或岩石圈地幔混染的大陆玄武岩,而Zr含量和Zr/Y比值则可以有效判别,并归纳了岛弧玄武岩总体上以具有较

低的Zr含量( $<130\times 10^{-6}$ ),Zr/Y比值( $<4$ )为特征;而大陆玄武岩不管是否受到地壳或岩石圈地幔混染,均具有较高的的Zr含量( $>70\times 10^{-6}$ )和Zr/Y比值( $>3$ )。本区玄武安山岩的Zr含量为 $117\times 10^{-6}\sim 121\times 10^{-6}$ ,Zr/Y比值为5.63~5.82,显示了产出于板内拉伸环境下的大陆玄武岩的特征。

前人根据天山、准噶尔及塔里木盆地北缘地区早石炭世火山岩系与下伏地层(前寒武纪结晶基底和前石炭世褶皱基底)呈广泛的角度不整合接触,两者岩相古地理、变质程度和变质样式等明显不同,及不整合面之下普遍存在磨拉石建造的砾岩层,推断古生代洋盆(古亚洲洋)在早石炭世闭合后,天山及周缘发生了广泛的裂谷伸展作用;同时又根据前人对蛇绿岩(如卡拉麦里、库勒湖、达拉布特、唐巴勒、阿尔曼太和干沟—乌斯特沟等)中辉长辉绿岩的锆石年龄,蛇绿岩与上覆不整合地层的时代及蛇绿混杂岩带中蓝片岩—榴辉岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄,推断早石炭世为古亚洲洋闭合时限的上限<sup>[8,14]</sup>。徐学义等<sup>[21,22]</sup>根据巴音沟蛇绿岩中堆晶辉长岩及其伴生的斜长花岗岩的锆石年龄分别为 $(344\pm 3.4)$  Ma和 $324.8\pm 7.1$  Ma,认为以巴音沟蛇绿岩为代表的北天山蛇绿岩带形成于早石炭世。巴音沟蛇绿岩是原地生长的(autochthonous),蛇绿岩中的基性熔岩岩浆来自软流圈最上部亏损地幔的部分熔融,代表了大陆碎裂产生的“红海型”洋盆<sup>[14,20]</sup>。北天山蛇绿岩带南部分布一条中酸性岩浆岩带<sup>[23-30]</sup>,大致沿科古琴山—博罗科努山—依连哈比尔尕山分布,与蛇绿岩带走向近于平行。中酸性岩体形成年龄从中志留世(米什沟花岗岩,424.5 $\pm$ 2.6Ma)<sup>[27]</sup>到早二叠世(博罗科努山花岗岩体,285 $\pm$ 7Ma)<sup>[28]</sup>均有产出,其中中志留世到晚石炭世中酸性岩体均产于晚古生代洋盆向南俯冲的岛弧环境。地球物理资料显示,塔里木盆地高速体和准噶尔盆地高速体分别向北、向南俯冲于天山造山带之下,两个高速体插入软流圈地幔,可能在250 km以下汇合在一起<sup>[67,68]</sup>。向南俯冲的高速体可能是晚古生代洋盆闭合、碰撞板片的残余。

根据本区火山岩形成于大陆板内拉伸环境,及流纹岩的锆石LA-ICPMS U-Pb年龄为 $(310\pm 2)$  Ma,笔者提出天山北部晚古生代可能的构造演化模式:晚古生代洋盆(古亚洲洋)向南俯冲,于早石炭世闭合,在中天山北缘断裂带附近发育一条走向近东西的晚古生代中酸性岛弧带;由于俯冲板片的断裂

拆沉,软流圈物质的上涌,导致天山北部弧前地区的普遍拉张,形成以巴音沟蛇绿岩为代表的“红海型”天山北部蛇绿岩带;晚石炭世奇尔古斯套组角度不整合上覆于巴音沟蛇绿岩<sup>[20]</sup>,表明晚石炭世天山北部已经形成了统一的大陆,随后板内减薄拉伸作用导致了沙湾地区火山岩的形成。

## 9 结 论

(1)新疆北天山沙湾火山岩主要由安山质火山碎屑岩和火山熔岩组成,火山熔岩中流纹岩和玄武安山岩密切共生,可能构成双峰式组合。本区火山岩是同源岩浆结晶分异的产物。

(2)流纹岩的锆石 LA-ICPMS 的 U-Pb 年龄为  $(310 \pm 2)$  Ma,玄武安山岩斑晶为普通辉石,不发育斜长石斑晶;基质中斜长石为拉长石,少量为倍长石。辉石斑晶的温度和压力分别为  $1176.4^{\circ}\text{C}$ ,  $4.13 \text{ kPa}$ ,相当于  $16.7 \text{ km}$  的深度。

(3)本区火山岩形成于板内拉伸环境,玄武安山岩原始岩浆是来自软流圈亏损地幔的大陆玄武岩受到岩石圈地幔和大陆上、下地壳的混染。辉石斑晶结晶于  $17 \text{ km}$  左右,反映了混染的大陆玄武岩岩浆在中、上地壳缓慢结晶形成单斜辉石斑晶后,因陆壳的拉张、快速迁移至地表的过程。

**致谢:**中国地质科学院地质研究所电子探针室完成矿物的 EMPA 测试,国家地质测试中心完成火山岩的主微量元素测试,南京大学现代分析中心同位素质谱室完成 Sr、Nd、Pb 同位素测试,中国地质科学院矿产资源所 MC-ICPMS 实验室测试完成锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年。在成文过程中,与闫臻研究员、贺振宇博士、李源博士和高利娥硕士进行了有益的探讨,中国地质大学(北京)的凌潇潇博士和蔡佳硕士帮助搜集部分文献资料,吴才来研究员和张建新研究员两位审稿人提出了宝贵的修改意见,在此一并感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京:地质出版社, 1992:1-171.  
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. Tectonics in the North and Nearby Area in Xinjiang [J]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:1-171(in Chinese).
- [2] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 2004, 23(9/10):903-910.

- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9/10):903-910(in Chinese with English abstract).
- [3] 苏春乾, 姜常义, 夏明哲, 等. 北天山东段阿奇山组火山岩的地球化学特征及锆石的 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2009, 25(04):901-915(in Chinese with English abstract).  
Su Chunqian, Jiang Changyi, Xia Mingzhe, et al. Geochemistry and zircons SHRIMP U-Pb age of volcanic rocks of Aqishan Formation in the eastern area of north Tianshan, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (04):901-915 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李向民, 夏林圻, 夏祖春, 等. 企鹅山群火山岩的地球化学特征和构造环境[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007, 37(1):134-139.  
Li Xiangmin, Xia Linqi, Xia Zuchun, et al. Geochemical characteristics and tectonic environment of Qieshan Group volcanic rock [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2007, 37(1):134-139(in Chinese with English abstract).
- [5] 田黎萍, 王金荣, 汤中立, 等. 新疆博格达山东段早石炭世火山岩地球化学及其构造意义 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(4):30-41.  
Tian Liping, Wang Jinrong, Tang Zhongli, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of early Carboniferous volcanic rocks in eastern Bogda mountains of Xinjiang region [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2010, 46 (4):30-41(in Chinese with English abstract).
- [6] 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(05):1215-1224.  
Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, et al. Geochronology and Nd -Sr -Pb isotops of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(05):1215-1224 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究 [J]. 岩石学报, 2007, 23(7):1749-1755.  
Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, et al. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of Rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou group in eastern Tianshan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7):1749-1755(in Chinese with English abstract).
- [8] 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. 地质通报, 2002, 21(2):55-62.  
Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, et al. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (2):55-62 (in Chinese with English abstract).
- [9] 徐学义, 夏林圻, 张国伟, 等. 下石炭统马鞍桥组在天山构造演化中的地位[J]. 新疆地质, 2002, 20(4):338-341.  
Xu Xueyi, Xia Linqi, Zhang Guowei, et al. Maanqiao formation of

- Lower Carboniferous and its tectonic evolution of Tianshan mountains[J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(4):338-341(in Chinese with English abstract).
- [10] 王博, 舒良树, Cluzel D, 等. 新疆伊犁北部石炭纪火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2006, 33(3):498-508.  
Wang Bo, Shu Liangshu, Cluzel D, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous volcanic rocks in the northern part of the Ili Block, Xinjiang[J]. Geology in China, 2006, 33(3):498-508(in Chinese with English abstract).
- [11] 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.  
Guo Xuan, Zhu Yongfeng. Petrological and geochemical characteristics of the carboniferous volcanic rocks, south of the Xinyuan County, Xinjiang [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(1):62-73(in Chinese with English abstract).
- [12] 孙林华, 彭头平, 王岳军. 新疆特克斯东南大哈拉军山组玄武安山岩地球化学特征: 岩石成因和构造背景探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3):372-379.  
Sun Linhua, Peng Touping, Wang Yuejun. Geochemical characteristics of basaltic andesites from Dahalajunshan formation, southeastern Tekesi (Xinjiang): Petrogenesis and its Tectonic significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(3):372-379 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘静, 李永军, 王小刚, 等. 西天山阿吾拉勒一带伊什基里克组火山岩地球化学特征及构造环境 [J]. 新疆地质, 2006, 24(2): 105-108.  
Liu Jing, Li Yongjun, Wang Xiaogang, et al. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Yishijike formation volcanic rocks in the Awulale area of western Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 2006, 24(2):105-108(in Chinese with English abstract).
- [14] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J]. 西北地质, 2008, 41(4):1-68.  
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. Petrogenesis of Carboniferous—Early Permian rift-related volcanic rocks in the Tianshan and its neighboring areas, Northwestern China [J]. Northwestern Geology, 2008, 41(4):1-68(in Chinese with English abstract).
- [15] 钟林, 西北地质局新疆分局第三地质大队天山组. 新疆北天山北坡莫特河—玛纳斯河超基性岩带地质综合报告[R]. 1963:1-99.  
Zhong Lin, Tianshan Group of the Third Geological Brigade Xinjiang Substation Westnorth Bureau. General Geological Record of Mote River—Manasi River Ultramafic Rocks Belts in north Slope of Northern Tianshan, Xinjiang [R]. 1963:1-99 (in Chinese).
- [16] 舒良树, 郭召杰, 朱文彬, 等. 天山地区碰撞后构造与盆山演化 [J]. 高校地质学报, 2004, 10(3):393-404.  
Shu Liangshu, Guo Zhaojie, Zhu Wenbin, et al. Post-Collision tectonism and basin-range evolution in the Tianshan Belt [J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10 (3):393-404(in Chinese with English abstract).
- [17] 高长林, 崔可锐, 钱一雄, 等. 天山微板块构造与塔北盆地[M]. 北京:地质出版社, 1995:1-284.  
Gao Changlin, Cui Kerui, Qian Yixiong, et al. Tectonics of Tianshan Microplate and Northern Tarim Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:1-284(in Chinese with English abstract).
- [18] Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic magmatic rocks in the Lamasu - Dabate area, northwestern Tianshan (west China): Evidence for a tectonic transition from arc to post-collisional setting [J]. Lithos. 2010, 119:393-411(in Chinese with English abstract).
- [19] 郭继易, 刘成德. 新疆北天山巴音沟蛇绿岩的地质特征[J]. 岩石学报, 1989, 2:76-88.  
Wu Jiayi, Liu Chende. Geological feature of Bayingol ophiolitic suite of North Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 1989, 2:76-88(in Chinese with English abstract).
- [20] Xia L Q, Li X M, Xu X Y, et al. Petrogenetic evolution of the Bayan Gol ophiolite—Geological record of an Early Carboniferous “Red Sea Type” ocean basin in the Tianshan Mountains, Northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2):174-192.
- [21] 徐学义, 马中平, 夏林圻, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩锆石 SHRIMP 测年及地质意义[J]. 地质论评, 2005, 51(5):523-527.  
Xu Xueyi, Ma Zhongping, Xia Linqi, et al. SHRIMP dating of plagiogranite from Bayingou Ophiolite in the Northern Tianshan Mountains [J]. Geological Review, 2005, 51 (5):523-527 (in Chinese with English abstract).
- [22] 徐学义, 李向民, 马中平, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世: 来自辉长岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质学报, 2006, 80(8):1168-1176.  
Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, et al. LA-ICP MS zircon U-Pb dating of gabbro from the Bayingou Ophiolite in the Northern Tianshan Mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (8):1168-1176(in Chinese with English abstract).
- [23] 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 天山北部石炭纪埃达克岩—高镁安山岩—富 Nb 岛弧玄武质岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义[J]. 岩石学报, 2006, 022(01):11-30.  
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, et al. Carboniferous adakite-high Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 022(01):11-30(in Chinese with English abstract).
- [24] Wang B, Shu L S, Cluzel D, et al. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): Implication for the tectonic evolution of Western Tianshan [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29:148-159.
- [25] 朱志新, 王克卓, 徐达, 等. 依连哈比尔尕山石炭纪侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义 [J]. 地质通报, 2006, 25(8):

- 986-991.
- Zhu Zhixin, Wang Kezhuo, Xu Da, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from Carboniferous intrusive rocks on the active continental margin of Eren Habirga, western Tianshan, Xinjiang, China, and its geological implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(8):986-991(in Chinese with English abstract).
- [26] 徐学义, 马中平, 夏祖春, 等. 天山中西段中生代花岗岩 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.
- Xu Xueyi, Ma Zhongping, Xia Zuchun, et al. TIMS U-Pb isotopic dating and geochemical characteristics of Paleozoic granitic rocks from the middle-western section of Tianshan [J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39 (1):50-75 (in Chinese with English abstract).
- [27] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Syn- and post-collisional granitoids in the Central Tianshan orogen: Geochemistry, Geochronology and implications for tectonic evolution [J]. *Gondwana Research*, 2011, 606:1-14.
- [28] 王博, 舒良树, Cluzel D, 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.
- Wang Bo, Shu Liangshu, Cluzel D, et al. Geochronological and geochemical studies on the Borohoro plutons, north of Yili, NW Tianshan and their Tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8):1885-1900(in Chinese with English abstract).
- [29] 李伍平, 姜常义, 谢广成, 等. 博罗科努加里东褶皱带海西早期花岗岩地质特征[J]. *西安地质学院院报*, 1995, 17(1):43-49.
- Li Wuping, Jiang Changyi, Xie Guangcheng, et al. Geologic features for granites of the Variscian early period on the Beluohonu Caledonia fold belt [J]. *Journal of Xi'an Engineer University*, 1995, 17(1):43-49(in Chinese with English abstract).
- [30] 李伍平, 姜常义, 吴文奎, 等. 西天山海西中期花岗岩的地质特征及其构造环境[J]. *西安地质学院院报*, 1995, 17(4):1-6.
- Li Wuping, Jiang Changyi, Wu Wenkui, et al. Geologic features and tectonic environments of granites at the Variscian middle period in the west Tianshan mountain [J]. *Journal of Xi'an Engineer University*, 1995, 17(4):1-6(in Chinese with English abstract).
- [31] Wenjiao Xiao, Chunming Han, Chao Yuan, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32:102-117.
- [32] 高俊, 何国琦, 李茂松. 西天山造山带的中生代造山过程 [J]. *地球科学*, 1997, 22(1):27-32.
- Gao Jun, He Guoqi, Li Maosong. Paleozoic orogenic processes of western Tianshan orogen [J]. *Earth Science*, 1997, 22(1):27-32(in Chinese with English abstract).
- [33] Kushiro I. Si/Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks [J]. *American Journal of Science*, 1960, 258:518-551.
- [34] Thompson R N. Some high-pressure pyroxenes [J]. *Miner. Mag.*, 1974, 39:768-787.
- [35] 邱家骧, 廖群安. 中国东部新生代玄武岩中单斜辉石巨晶的主要特征及成因信息[J]. *岩石矿物学杂志*, 1987, 6(1):56-64.
- Qiu Jiaxiang, Liao Qun'an. The main characteristics and genetic information of clinopyroxene megacrysts in Cenozoic basalt of Eastern China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1987, 6(1):56-64(in Chinese with English abstract).
- [36] 喻学惠, 莫宣学, 曾普胜, 等. 云南马关地区新生代碧玄岩中地幔包体研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(03):621-630.
- Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Zeng Pusheng, et al. A study on the mantle xenoliths in the Cenozoic volcanic rocks from Maguan Area, Yunnan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(03):621-630(in Chinese with English abstract).
- [37] Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes [J]. *Mineralogical Magazine*, 1988, 52:535-550.
- [38] Muller D, Rock M N S, Groves D I. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks from different tectonic settings: A pilot study [J]. *Mineral. Petrol.*, 1992, 46:59-289.
- [39] Carr P F. Subduction related late Permian shoshonites of the Sydney basin, Australia [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1998, 63:49-71.
- [40] Scarrow J H, Leat P T, Wareham C D, et al. Geochemistry of mafic dikes in the Antarctic Peninsula continental-margin batholith: A record of Arc evolution [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1998, 131:289-305.
- [41] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms [C]//Recommendation of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: Blackwell, 1989.
- [42] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chem. Geol.* 1977, 20:325-343.
- [43] Miyashiro A. Classification, characteristics and origin of ophiolites [M]. *Geol.* 1975, 83:249-281.
- [44] Mckenzie D, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere [J]. *J. Petrol.* 1988, 29:625-679.
- [45] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩 [M]. 北京: 科学出版社, 2001:109-110.
- Zhang Qi, Zhou Guoqing. *Ophiolites in China* [M]. Beijing: Science Press, 2001:109-110(in Chinese).
- [46] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120:223-253.
- [47] Norman M D, Garcia M O. Primitive magmas and source characteristics of the Hawaiian plume: petrology and geochemistry of shield picrites [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999, 168:27-41.
- [48] Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, et al. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan northwestern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004.
- [49] Faure G. *Principles of Isotope Geology* (2nd edition, 589pp) [M].

- New York: Wiley.
- [50] Nasdala L, Hofmeister W, Norberg, et al. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, 32:247-265.
- [51] Vavra G, Gebauer D, Schimid R, et al. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996, 122:337-358.
- [52] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184:123-138.
- [53] 刘树文, 郭召杰, 张志诚, 等. 中天山东段前寒武纪变质地块的性质: 地质年代学和铀同位素地球化学的约束 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(5):395-403.  
Liu Shuwen, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, et al. The nature of Precambrian metamorphic block: Constrains from geochronology and Nd isotope geochemistry [J]. *Science in China (Ser. D)*, 2004, 34(5):395-403(in Chinese).
- [54] 胡霏琴, 张国新, 张前锋, 等. 天山造山带基底时代和地壳增生的 Nd 同位素制约 [J]. *中国科学(D 辑)*, 1999, 29(2):104-112.  
Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng, et al. The basement ageing of Tianshan orogenic belt and crust accretion: constrains from Nd isotope [J]. *Science in China(Ser. D)*, 1999, 29(2):104-112(in Chinese).
- [55] 罗发祥. 对中天山隆起(变质)带前寒武系的探讨 [J]. *新疆地质*, 1989, 7(4):24-34.  
Luo Fazuo. On Precambrian in Mid-Tianshan uplift (metamorphic) zone [J]. *Xinjiang Geology*, 1989, 7 (4):24-34 (in Chinese with English abstract).
- [56] 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜, 译(Hugh R. Rollison, 著). 岩石地球化学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000:1-275.  
Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen Shuangxi, (translator). Hugh R. Rollison. *Rock Geochemistry* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2000:1-275(in Chinese).
- [57] Hart S. R. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle [J]. *Nature*, 1984, 309:753-757.
- [58] Zindler A, Hart S R. Chemical geodynamics [J]. *Annual Rev. Earth Planet. Sci.* 1986, 14:493-571.
- [59] Hugh R, R. Using Geochemical Data Singapore: Longman Singapore Publishers [J]. 1993:234-240.
- [60] Cox K G. A model for flood basalt volcanism [J]. *J. Petrol.*, 1980, 21:629-650.
- [61] 高永丰, 候增谦, 魏瑞华, 等. 冈底斯基性次火山岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素: 碰撞后火山作用亏损地幔源区的约束 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(4):761-774.  
Gao Yongfeng, Hou Zengqian, Wei Ruihua, et al. The geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of basaltic subvolcanics from the Gangdese: Constraints on depleted mantle source for post-collisional volcanisms in the Tibetan plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4):761-774(in Chinese with English abstract).
- [62] 韩吟文, 马振东. 地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2003:213-231.  
Han Yinwen, Ma Zhendong. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003:213-231(in Chinese).
- [63] Saunders A D, Storey M, Kent R W, et al. Consequences of plume-lithosphere interaction [C]//Storey B C, Alabaster T, Pankhurst R J. *Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, London, 1992, 68:41-60.
- [64] Wilson M. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman, 1989, 464.
- [65] 王焰, 钱青, 刘良, 等. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征 [J]. *岩石学报*, 2000, 16(02):169-173.  
Wang Yan, Qian Qing, Liu Liang, et al. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(02):169-173(in Chinese with English abstract).
- [66] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1):77-89.  
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26 (1):77-89(in Chinese with English abstract).
- [67] 高锐, 肖序常, 高弘, 等. 西昆仑-塔里木-天山岩石圈深地震探测综述 [J]. *地质通报*, 2002, 21(1):11-18.  
Gao Rui, Xiao Xuchang, Gao Hong, et al. Summary of deep seismic probing of the lithospheric structure across the West Kunlun-Tarim-Tianshan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(1):11-18(in Chinese with English abstract).
- [68] Zhao J M, Liu G D, Lu Z X, et al. Crust-mantle transitional zone of Tianshan orogenic belt and Junggar Basin and its geodynamic implication [J]. *Science in China(Series D)*, 2001, 44(9): 824-837.

## Geochemical characteristics of Late Carboniferous volcanic rocks in northern Tianshan, Xinjiang, and their geological significance

LIU Fei, YANG Jing-sui, LI Tian-fu, CHEN Song-yong,  
XU Xiang-zhen, LI Jin-yang, JIA Yi

(State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China)

**Abstract:** Anjihai volcanic rocks in northern Tianshan are composed of pyroclastic rocks and lavas, which include andesite crystal tuff, andesite detritus crystal tuff, dacite welded tuff, basaltic andesite and rhyolite, thus being of calc-alkaline series. Major and rare earth element compositions of basaltic andesite and rhyolite are as follows:  $\text{SiO}_2=51.03\%, 77.33\%$ ,  $\text{TiO}_2=0.76\%, 0.16\%$ ,  $\text{CaO}=10.30\%, 0.43\%$ ,  $\text{MgO}=5.19\%, 0.89\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}=2.10\%, 1.27\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}=1.28\%, 2.54\%$ ,  $\sum \text{REE}=369.1\text{ppm}, 729.0\text{ppm}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=5.0, 3.5$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=2.7, 2.4$  and  $\delta \text{Eu}=0.82, 0.54$ . The primitive mantle normalized spider diagrams of volcanic rocks are characterized by depletion of HFSE (Nb, Ta, Ti and P) and enrichment of K, Rb, U, Th, Zr and Hf. One significant difference is that Sr and Ba display insignificant positive anomalies in basaltic andesite and distinct negative anomalies in rhyolite. Isotope geochemical characteristics of basaltic andesite and rhyolite show the following values:  $\epsilon \text{Nd}(t)=0.2, 0.1$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t=0.70680, 0.70476$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t=0.52224, 0.51225$ ,  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t=17.775, 17.720$ ,  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t=15.790, 15.826$  and  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t=38.240, 38.876$ . LA-ICPMS zircon U-Pb dating of rhyolite yielded the age of  $310 \pm 2$  Ma. Rhyolite was fractionated from the magma of basaltic andesite. The primary magma of volcanic rocks occurred in continental intraplate stretching setting, derived from asthenosphere (or plume)-generated continental basaltic magma, which was contaminated by lithosphere as well as upper and lower continental crust. Crystal temperature and pressure of phenocryst clinopyroxene are  $1176.4^\circ\text{C}$  and  $4.13$  kpa respectively, equivalent to the depth of  $16.7\text{km}$ . It is thus inferred that pyroxene phenocrysts were crystallized slowly from contaminated continental basaltic magma in middle-upper crust, and subsequently moved quickly to the surface of the earth, due to continental crust stretching.

**Key words:** volcanic rock; intraplate stretching setting; Sr-Nd-Pb isotope; geochemistry; northern Tianshan; Xinjiang.

**About the first author:** LIU Fei, male, born in 1982, doctor candidate, mainly engages in the study of ophiolite and tectonics; E-mail: lfhy112@126.com.