

# 新疆伊犁北部石炭纪火山岩地球化学特征 及其地质意义

王 博<sup>1,2</sup> 舒良树<sup>1</sup> Cluzel D<sup>2</sup> Faure M<sup>2</sup> Charvet J<sup>2</sup> 马 前<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 奥尔良大学地球科学研究所, 法国 奥尔良 45067)

**摘要:**石炭纪火山岩广泛分布于西天山伊犁陆块周缘,其岩性复杂,并大多与陆源碎屑岩伴生或互层。其中伊宁阿希、尼勒克和那拉提 3 个剖面的火山岩岩石地球化学特征显示,这些火山岩属于钙碱性系列,由玄武岩、粗玄武岩、玄武质安山岩、玄武质粗面安山岩、安山岩、流纹岩、英安岩和粗面岩组成。稀土元素含量较高,轻稀土元素较重稀土元素富集。这些火山岩亏损高场强元素 Nb, Ta, Zr 等,而富集大离子亲石元素 Th, Rb 等,因而这些岩石的形成与板块俯冲有关。微量元素地球化学图解进一步表明,这些岩石形成于大陆岛弧环境。与之共生的早、中石炭世浅海—滨海相沉积地层以及伊犁陆块北缘巴音沟—莫托沙拉沟泥盆世—早石炭世蛇绿岩带的存在,表明伊犁陆块北缘在石炭纪时其环境为活动大陆边缘,石炭纪火山岩的形成可能与晚泥盆世—中石炭世早期北天山洋盆向南的俯冲作用有关。

**关键词:**火山岩;地球化学;构造环境;石炭纪;西天山;伊犁

**中图分类号:**P588;P591 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)03-0498-11

天山山脉东西延伸近 2500 km,以乌鲁木齐为界,向东至甘肃境内为东天山,向西则分为南北两支,分别延伸到哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦,两支统称为西天山,其南北两侧分别为塔里木盆地和准噶尔盆地。伊犁盆地就处在西天山的南北两支之间,呈喇叭形向西延伸(图 1)。天山是中亚地区一个重要的造山带,长期以来,它被认为是一个古生代多期造山作用的产物<sup>[1-4]</sup>,但碰撞造山作用之前的构造演化至今尚不清楚或存在争议。

在伊犁盆地的周缘,广泛分布有石炭纪和二叠纪的火山岩<sup>[5]</sup>,这些火山岩的特征对认识天山造山带的形成与演化具有重要意义。近 30 年来,前人对该地区部分剖面的火山岩进行了岩石学和地球化学研究,划分出两类不同成因环境的火山岩系,一类为钙碱性岛弧火山岩<sup>[6-7]</sup>,另一类为双峰式裂谷火山岩<sup>[8-10]</sup>。然而,这些火山岩的形成时代和各自代表的构造环境仍存在争议,即石炭纪火山岩为岛弧型而二叠纪火山岩为裂谷型<sup>[7]</sup>,或者石炭纪—二叠纪火山岩均为双峰式裂谷型<sup>[8-9]</sup>。对这些火山岩构造属性认识的差异,导致对北天山及伊犁陆块晚古生代构造的时空演化出现了完全不同的解

释。笔者选择伊犁北部 3 个典型的石炭纪火山岩剖面,通过详细的野外地质调查,综合研究火山岩岩石学和地球化学特征,旨在探讨其形成环境和构造意义。

## 1 区域地质背景

前人对天山古生代碰撞造山作用和新生代变形构造进行了深入的研究,认为天山是发育在前寒武纪结晶基底之上,经历了古生代塔里木板块、准噶尔板块、哈萨克斯坦板块和多个微陆块以及火山岛弧之间的多期俯冲—碰撞—拼贴增生造山作用的产物<sup>[1-4,6,10-16]</sup>。天山造山带通常被划分为 3 个主要的构造单元:南天山、中天山和北天山<sup>[15-17]</sup>。南天山主要为发育在元古宙结晶基底之上的早古生代地层,包括寒武系大理岩、凝灰岩和磷酸盐岩,奥陶系碎屑岩、变粒岩、大理岩和片岩以及志留系大理岩和石灰岩<sup>[5]</sup>,反映一种被动大陆边缘环境。中天山则主要由奥陶纪—志留纪火山岩地层所组成,其上被早石炭世红色粗碎屑岩不整合覆盖,不整合面之上为晚古生代浅海相沉积层。北天山由泥盆纪—石炭纪浊积相碎屑岩、石炭纪钙碱性火山岩、二叠纪碱性火山岩组成。伊

收稿日期:2005-10-14;改回日期:2006-01-25

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409804)资助。

作者简介:王博,男,1978 年生,博士生,从事构造地质学专业,E-mail:wangbo1996@nju.edu.cn。

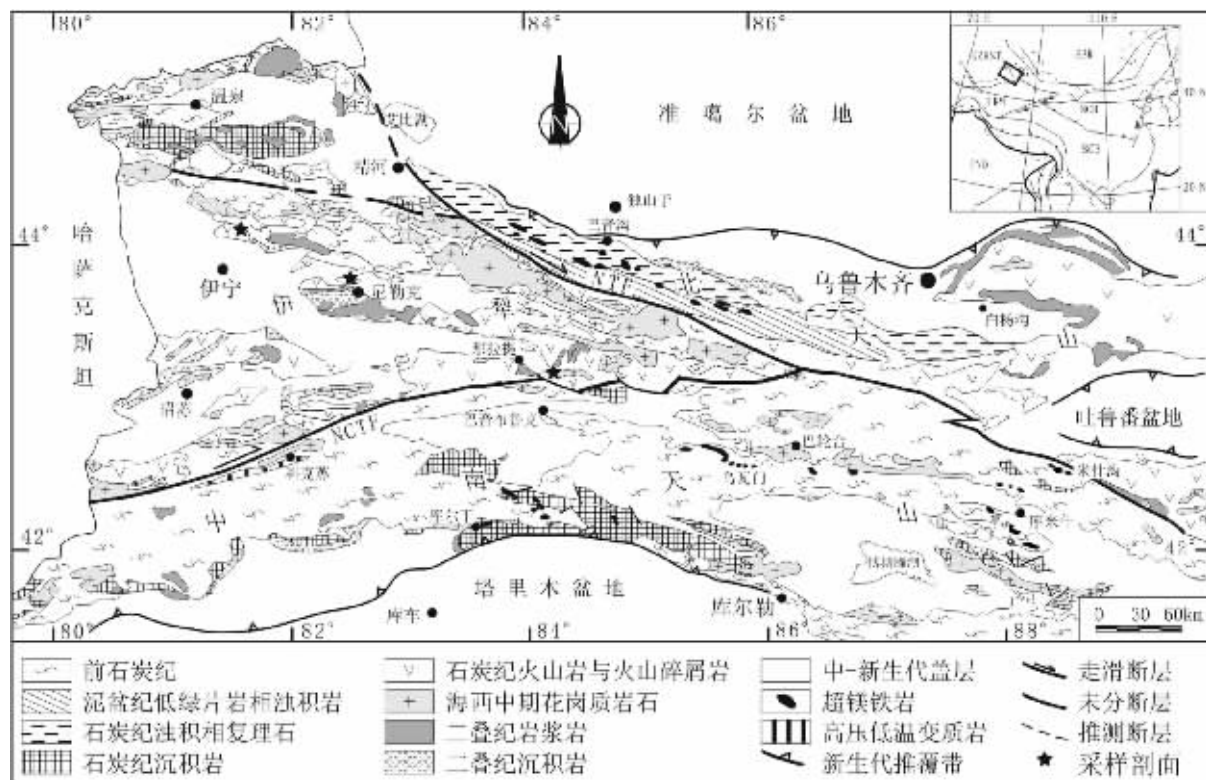


图 1 西天山造山带地质构造简图 (根据新疆 1:150 万地质图改编)

NTF—北天山断裂;NCTF—中天山北缘断裂

Fig. 1 Tectonic sketch map of the West Tianshan orogenic belt (modified from the 1:1 500 000 Geological Map of Xinjiang).

NTF—North Tianshan fault; NCTF—Northern Central Tianshan marginal fault

伊犁块体位于中天山与北天山之间,主要由早古生代稳定陆缘碎屑岩、石炭纪钙碱性火山岩和二叠纪碱性火山岩所构成,伊犁块体的构造属性目前尚不清楚。

西天山从南向北发育 3 条主要的构造缝合带:(1) 乌瓦门、库尔干地区的蛇绿混杂堆积岩带,库米什镁铁岩、超镁铁岩变质带,它们可能代表南天山边缘海<sup>[18-22,26-28]</sup>;(2) 米什沟—干沟蛇绿混杂岩<sup>[23]</sup>,科克苏河—长阿吾子一带的高压变质岩带<sup>[25-27]</sup>,它们被认为是早古生代古亚洲洋的缝合带(或称天山—蒙古大洋缝合带)<sup>[28-30]</sup>;(3) 巴音沟—莫托沙拉沟蛇绿混杂岩带,一直被认为是北天山洋盆最终关闭的产物<sup>[2,29-30]</sup>。

区域性晚二叠世红色磨拉石建造的普遍发育标志着天山造山作用的基本结束,至此,一个欧亚大陆的重要组成部分——天山造山带出现在中亚地区。从晚古生代末期开始,天山进入造山后的板内拉张阶段,形成一系列板内裂谷火山岩带<sup>[5,28,33]</sup>。中生代天山地区整体处于较为稳定的剥蚀和陆内河湖沉积环境。渐新世以来,印度—欧亚板块发生碰撞变形并向北传播,致使整个天山造山带在中新世早期发生了强烈的脆性构造变形<sup>[34-35]</sup>,同时导致塔里木板块和准噶尔板块向天山的陆内俯冲<sup>[36-37]</sup>。目前,与印度板块碰撞有关的变形仍在

继续,构造活动性在整个新疆地区依然存在<sup>[34,38-39]</sup>。

## 2 剖面特征

本文所研究的火山岩样品主要采自伊犁盆地北部的阿希、尼勒克和那拉提剖面(图 1~2)。阿希剖面位于伊宁县北 30 km 处,沿阿希金矿公路分布,为一背斜构造,脆性断裂发育,各时代地层多以断层接触。核部为奥陶纪—志留纪薄层灰岩、砂岩和硅质岩;背斜的南翼由早石炭世大哈拉军山组( $C_1d$ )、上石炭统脑盖图组( $C_2n$ )和奥依曼布拉克组( $C_3o$ )组成<sup>[5,40]</sup>,北翼则只发育下石炭统  $C_1d$ ,中石炭统缺失。 $C_1d$  主要由上部的凝灰砾岩、安山质角砾熔岩与下部的中—酸性火山碎屑岩、中—基性熔岩组成, $C_2n$  为中—酸性火山碎屑岩夹砂岩和砂砾岩, $C_3o$  下部主要为中—酸性熔岩、火山碎屑岩、凝灰质砂岩,上部主要为砂岩、薄层灰岩(图 2-a)。在  $C_3o$  中产有石炭纪 *Fusulinella* sp.)和珊瑚(*Timania*)化石。另外,李华芹等<sup>[41]</sup>在  $C_1d$  的安山岩中得到(345.9±9)Ma 的辉石 Rb—Sr 年龄和(325.1±0.6)Ma  $^{40}\text{Ar}$ — $^{39}\text{Ar}$  坪年龄。笔者所分析的样品是  $C_1d$  的火山岩。

尼勒克剖面位于尼勒克县城西北与加哈乌拉斯台之间

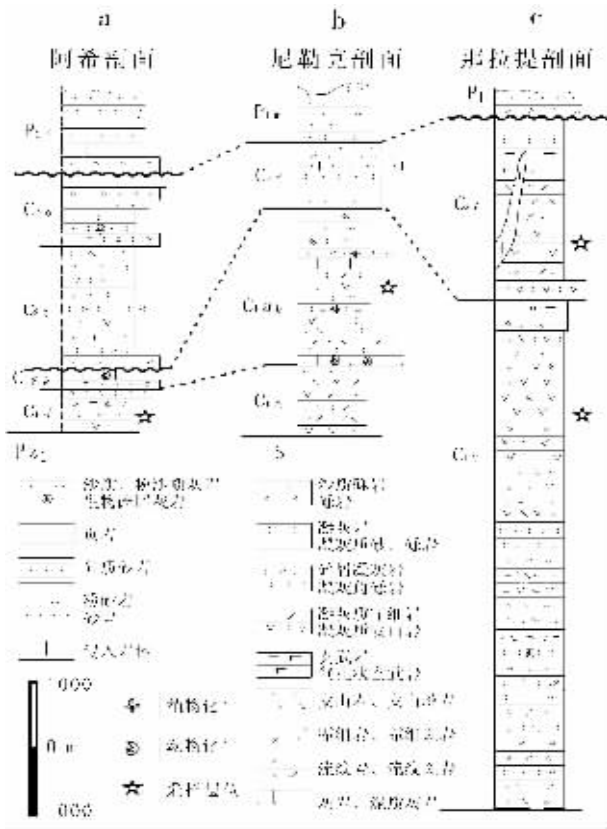


图2 新疆伊犁北部石炭纪地层对比  
(地层厚度根据新疆 1:20 万地质图)

$P_{2t}$ —中二叠统铁木里克组;  $P_{1-}$ —下二叠统;  $P_{1w}$ —下二叠统乌郎组;  
 $C_{2o}$ —上石炭统奥依曼布拉克组;  $C_{2n}$ —上石炭统脑盖图组;  $C_{2t}$ —上石  
 炭统吐尔拱河组;  $C_{2d}$ —上石炭统东图津河组;  $C_{1ak}$ —下石炭统阿克  
 沙克组;  $C_{1d}$ —下石炭统大哈拉军山组;  $C_{1m}$ —下石炭统美洛卡河组;  
 $C_{1y}$ —下石炭统雅满苏组; S—志留系;  $P_{z1-}$ —下古生界

Fig. 2 Schematic stratigraphic columns of Carboniferous strata in the north of the Ili block, Xinjiang (stratigraphic thickness after the 1:200,000 Geological Map of Xinjiang)

$P_{2t}$ —Middle Permian Tomorlog Formation;  $P_{1-}$ —Lower Permian;  
 $P_{1w}$ —Lower Permian Wuliang Formation;  $C_{2o}$ —Upper Carboniferous  
 Oyiman Bulak Formation;  $C_{2n}$ —Upper Carboniferous Naogaitu  
 Formation;  $C_{2t}$ —Upper Carboniferous Tuergonghe Formation;  
 $C_{2d}$ —Upper Carboniferous Dongtujinhe Formation;  $C_{1ak}$ —Lower  
 Carboniferous Akeshake Formation;  $C_{1d}$ —Lower Carboniferous  
 Dahalajunshan Formation;  $C_{1m}$ —Lower Carboniferous Meiluoka  
 Formation;  $C_{1y}$ —Lower Carboniferous Yamansu Formation;  
 S—Silurian;  $P_{z1-}$ —Lower Paleozoic

的 315 公路上,岩层为石炭纪阿恰勒河组( $C_{1a}$ ),主要由中—酸性火山碎屑岩和薄层灰岩、砂岩与砂砾岩组成,在砂岩和灰岩中存在芦木(*Calamites* sp.)等化石<sup>[2]</sup>(图 2-b)。

那拉提剖面可分为两段,第一段从那拉提沿 217 国道至玉希达坂,由大量上石炭统吐尔拱组( $C_{2t}$ )碎屑凝灰岩、安山玢岩、霏细斑岩、英安斑岩、石英钠长斑岩和玄武质熔岩等组成,底部还有少量紫红色凝灰质砂岩。大量红色花岗岩、花岗闪长岩侵入到火山岩中。第二段沿 218 国道分布于那拉提至巩乃斯之间,为下石炭统雅满苏组( $C_{1y}$ ),岩性主要由巨厚层安山玢岩、杏仁状安山玢岩、少量玄武玢岩和中—酸性晶屑、岩屑凝灰质火山岩组成,凝灰岩中含有珊瑚和腕足类化石<sup>[2]</sup>(图 2-c)。

### 3 岩石学特征

笔者经过多年的野外考察,从以上 3 个剖面中采集了数百件火山岩样品,这些火山岩大多呈致密块状,微晶—细粒状,少数为粗粒状,可见长石或石英斑晶。其中雅满苏组( $C_{1y}$ )安山玢岩以粗大的中长石斑晶为特征,中长石粒径达 2~5 cm。多数岩石为暗紫红色或灰绿色,很少有风化和蚀变。

经过对岩石薄片的显微观察,发现所有岩石都具有明显的火山结构:大量长石斑晶分散于玻璃质或微结晶的基质中,长石斑晶呈自形和半自形;在结晶基质中,长石多为针状,少数具有自形特征。有些长石具有环带构造或者双晶,部分长石矿物被后期交代为方解石或钠长石。在有些样品中可见气孔和杏仁构造,部分气孔被后期结晶的方解石或石英充填。在部分玄武岩和安山岩中可见辉石矿物斑晶,其中个别辉石被部分蚀变为绿帘石或绿泥石,或被氧化为铁的氧化物。

### 4 地球化学特征

对采自 3 个剖面中未经蚀变的 20 件火山岩样品进行了 XRF 主量元素分析和 ICP-MS(PE—Elan 6000 ICP-MS 分析仪)微量元素分析(表 1)。主量元素分析误差为 1%~1.5%,绝大部分微量元素的分析误差为 0.7%~5%,个别样品 U 和 Th 的误差接近 10%。

#### 4.1 主量元素

从表 1 可以看出,火山岩样品的挥发份(LOI)含量为 1%~9%,其中绝大部分小于 5%,个别大于 7%,说明大多数样品没有经过强烈的蚀变。 $SiO_2$  含量介于 46.5%和 68.7%之间(除了 XJ358 为 36.6%),并均匀分布。全碱( $ALK=Na_2O+K_2O$ )含量为 3.3%~10.2%(XJ358 为 0.33%),且大多数样品的  $K_2O < Na_2O$ 。在  $SiO_2$ —ALK 投影图<sup>[43-44]</sup>(图 3)上可以看出,伊犁北部 3 个剖面的火山岩均为完整的基性、中性到酸性的连续系列,由玄武岩、粗玄岩、玄武安山岩、玄武质粗安岩、安山岩、流纹岩、英安岩和粗面岩组成。同时图 3 还显示,阿希剖面的火山岩均处于钙碱性系列范围,而尼勒克剖面的火山岩处于从钙碱性系列到碱性系列的过渡区域,那拉提地区的火山岩则均为碱性系列。里特曼指数( $\sigma=ALK^2/(SiO_2-43)$ ,见表 1)也表明,阿希剖面( $\sigma < 3.3$ )为钙碱系列,尼勒克火山岩( $\sigma$  为 3.3~9)为过渡系列,而那拉提火山岩的  $\sigma$  大多为 3.3 和 9

表 1 伊犁北部石炭纪火山岩地球化学全分析

Table 1 Bulk geochemical analysis of Carboniferous volcanic rocks in the north of the Ili block

样品号	XJ-174	XJ-174-1	XJ-174-2	XJ-174-6	XJ-325	XJ-326	XJ-327	XJ-328	XJ-329	XJ-335
时代	下石炭统阿恰勒河组(C <sub>1</sub> ak)				下石炭统大哈拉军山组(C <sub>1</sub> d)					
剖面	尼勒克剖面				阿希剖面					
SiO <sub>2</sub> × 10 <sup>-2</sup>	49.70	50.61	46.52	66.54	53.42	54.04	53.18	55.19	59.21	68.81
TiO <sub>2</sub>	0.99	0.93	1.91	0.71	0.84	0.85	0.94	1.21	0.90	0.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.60	19.02	17.95	15.86	16.54	16.78	17.20	16.55	16.32	15.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.26	9.74	10.46	4.30	8.21	7.21	7.94	7.52	5.58	3.12
MnO	0.40	0.22	0.24	0.14	0.12	0.13	0.13	0.12	0.10	0.13
MgO	4.33	3.94	6.69	1.29	3.13	3.40	5.98	4.43	3.30	0.36
CaO	4.92	7.19	8.89	1.16	6.83	7.99	3.32	6.97	3.51	1.46
Na <sub>2</sub> O	4.80	4.12	3.38	5.36	3.05	2.80	5.21	3.21	3.32	3.88
K <sub>2</sub> O	0.99	1.22	0.24	4.01	0.60	0.52	0.22	2.24	2.97	4.12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.24	0.36	0.16	0.16	0.16	0.18	0.25	0.18	0.12
LOI	4.52	2.72	4.27	1.21	8.39	7.79	5.96	2.23	4.42	2.09
Total	100.75	99.95	100.90	100.72	101.29	101.67	100.26	99.91	99.79	100.23
ANKC	1.10	0.90	0.82	1.04	0.91	0.85	1.16	0.81	1.09	1.17
Mg#	0.49	0.48	0.59	0.40	0.46	0.51	0.63	0.57	0.57	0.21
σ	5.00	3.74	3.73	3.73	1.28	1.00	2.90	2.44	2.43	2.48
Sc × 10 <sup>-6</sup>	31.2	30.46	26.83	12.84	23.49	24.05	27.27	22.58	16.74	3.552
Ti	5655.1	5459.4	13942.3	4134.3	4746.1	5096.7	5484.9	8417	5237.1	2756.1
V	253.5	243.2	182.7	45.46	130.4	180.3	229.6	197.3	129.8	18.59
Cr	33.8	30.53	119.8	5.416	62	65.07	95.27	62.18	74.07	3.014
Mn	2865.6	1704.8	1833.2	989.7	866.8	937.8	975.8	920.9	738	939.9
Co	28.47	26.94	46.94	5.944	18.69	20.47	26.23	21.56	16.95	4.174
Ni	18.44	18.97	107.7	3.471	21.45	22.84	33.06	41.01	32.13	2.519
Cu	22.58	84.56	47.31	11.31	20.78	71.54	174.2	60.34	70.41	5.416
Zn	254.5	90.27	104.4	153.6	64.45	56.89	69.08	71.22	57.55	70.74
Ga	17.36	18.36	17.58	15.63	17.07	18.26	23	19.09	19.01	18.83
Ge	0.983	1.25	1.248	1.155	0.879	0.957	1.271	1.245	0.966	1.09
Rb	21.87	27.52	4.135	118.2	24.08	22.9	5.84	86.8	126	142.2
Sr	457.2	613.1	575.3	105.4	194.8	201.9	124.4	463.3	194.2	145.5
Y	18.78	19.55	30.76	34.7	19.29	21.09	23.3	30.77	26.19	26.9
Zr	62.81	78.11	192.6	261.8	124.7	134.5	165.2	220.2	209	208.8
Nb	3.158	3.16	5.297	13.33	5.976	6.396	8.115	10.35	11.11	34.39
Ba	197	339.7	124.6	933.2	575.6	180.4	26.37	353.8	538.4	638.4
La	10.23	10.18	10.67	36.72	14.73	15.17	18.67	23.11	27.55	49.49
Ce	22.99	22.28	31.3	73.64	32.35	34.03	41.36	50.95	58.06	93.61
Pr	3.109	2.979	4.694	8.309	3.938	4.202	5.078	6.22	6.757	10.19
Nd	13.96	13.48	21.97	32.66	15.99	17.42	20.14	25.38	26.29	35.51
Sm	3.237	3.257	5.353	6.592	3.7	3.878	4.389	5.507	5.571	6.021
Eu	1.189	1.13	1.984	1.52	0.99	1.053	1.232	1.307	1.169	1.181
Gd	3.757	3.653	6.306	6.897	3.874	3.998	4.641	5.682	5.267	4.922
Tb	0.573	0.559	0.95	1.051	0.62	0.642	0.707	0.904	0.839	0.807
Dy	3.441	3.346	5.457	6.177	3.551	3.769	4.176	5.268	4.875	4.623
Ho	0.695	0.674	1.097	1.27	0.709	0.746	0.858	1.06	0.988	0.916
Er	1.904	1.863	2.825	3.62	2.04	2.086	2.339	2.922	2.685	2.609
Tm	0.277	0.294	0.431	0.573	0.316	0.322	0.364	0.437	0.417	0.4
Yb	1.869	1.9	2.868	3.879	2.108	2.212	2.403	2.951	2.639	2.813
Lu	0.308	0.311	0.46	0.663	0.335	0.366	0.394	0.481	0.426	0.475
SREE	67.539	65.906	96.365	183.571	85.251	89.894	106.751	132.179	143.533	213.567
LREE/HR	4.267	4.231	3.725	6.608	5.290	5.357	5.722	5.708	6.914	11.159
(La/Yb) <sub>N</sub>	3.926	3.843	2.669	6.790	5.012	4.919	5.573	5.617	7.488	12.620
δ Eu	1.040	0.997	1.042	0.684	0.793	0.810	0.829	0.708	0.650	0.643
Hf	1.673	1.951	4.176	7.012	3.437	3.521	4.16	5.405	5.744	5.825
Ta	0.183	0.194	0.276	0.866	0.437	0.446	0.567	0.701	0.874	2.34
Th	1.272	1.217	0.502	11.12	4.016	4.128	5.895	7.989	10.87	23.85
U	0.39	0.337	0.26	2.846	1.043	1.139	1.558	1.994	3.119	4.147

续表 1

样品号	XJ-335-1	XJ-336	XJ-363	XJ-365	XJ-388	XJ-389	XJ-390	XJ-354	XJ-357	XJ-358
时 代	下石炭统大哈拉军山组		上石炭统吐尔拱组 (C <sub>2t</sub> )			下石炭统雅满苏组(C <sub>1y</sub> )		上石炭统吐尔拱组(C <sub>2t</sub> )		
剖 面	阿希剖面		那拉提剖面							
SiO <sub>2</sub> × 10 <sup>-2</sup>	67.42	68.83	57.43	68.71	46.63	46.56	50.05	56.15	55.93	36.55
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.43	0.98	0.89	0.94	0.90	1.11	0.85	2.22	1.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.15	15.62	17.51	13.00	18.44	17.28	18.60	17.63	13.86	26.61
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.91	2.52	7.33	4.18	8.32	8.96	9.65	8.49	10.48	24.62
MnO	0.19	0.11	0.19	0.13	0.70	1.18	0.30	0.20	0.36	0.15
MgO	0.41	0.36	1.56	0.69	3.57	2.67	2.94	1.95	2.82	0.02
CaO	5.06	1.75	2.63	1.12	8.83	6.55	4.52	1.81	3.97	0.26
Na <sub>2</sub> O	1.55	4.24	3.68	2.82	2.81	2.66	6.13	3.11	4.43	0.10
K <sub>2</sub> O	3.49	3.16	6.53	6.58	3.77	6.27	1.59	7.05	3.40	0.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.10	0.60	0.19	0.28	0.23	0.22	0.54	0.92	0.58
LOI	5.98	2.51	1.45	0.89	5.88	6.45	5.36	1.73	1.41	9.44
Total	100.64	99.63	99.88	99.20	100.18	99.69	100.46	99.50	99.80	100.36
ANKC	0.91	1.15	0.98	0.94	0.74	0.75	0.93	1.10	0.76	30.34
Mg#	0.32	0.24	0.32	0.27	0.49	0.40	0.41	0.34	0.38	0.00
σ	1.04	2.12	7.22	3.43	11.93	22.39	8.45	7.84	4.74	-0.02
Sc × 10 <sup>-6</sup>	2.978	3.022	13.86	26.52	24.7	16.64	11.25	27.81	28.36	22.29
Ti	2351.7	2557.1	4924.2	15014.2	10796.9	5405.7	4987.2	5444.6	4921.4	5844.7
V	21.31	15.8	102.4	169.6	572.9	105.4	12.17	278.6	241.8	231.4
Cr	2.759	5.727	10.58	2.697	50.92	5.476	10.77	85.73	16.89	10.82
Mn	1410.8	801.3	1502.7	2534	1029.5	1366.7	870.5	5174.8	6698.6	2034.2
Co	2.22	3.538	12.66	17.33	13.02	23.52	2.124	28.56	14.45	32.86
Ni	4.616	4.754	7.678	2.95	16.96	13.73	6.644	59.24	11.36	21.67
Cu	16.06	5.83	156.8	9.101	22.39	295.8	5.357	21.95	50	34.76
Zn	74.71	110	135.4	172.6	46.38	101.7	147.6	667.1	398	158.7
Ga	17.4	18.75	17.72	18.46	32.86	17.75	13.75	18.68	16	17.71
Ge	1.471	1.258	1.434	1.677	2.2	1.174	1.251	1.311	1.394	0.855
Rb	141.2	111.4	262.6	162.9	9.573	252.5	196.3	144.7	295.4	84.55
Sr	86.66	128.5	221.6	338.4	4382	344.2	19.96	486.8	509.3	306.7
Y	25.31	29.24	28.36	54.52	22.94	30.9	59.77	22.13	19.8	27.84
Zr	189.8	210.8	222.2	237.5	212.2	198.4	352.8	79.16	61.46	113.4
Nb	31.53	32.51	10.3	9.415	9.828	10.97	13.49	3.524	2.445	4.302
Ba	99.68	441.5	928.3	772.3	141.7	682.5	183.4	883.5	2234.9	108.2
La	41.37	50.25	29.06	26.29	38.68	37.54	25.54	19.29	12.6	10.73
Ce	81.05	95.04	68.6	62.48	164.6	79.44	62.73	37.59	26.94	25.06
Pr	8.941	10.63	8.586	8.559	39.01	10.51	8.941	4.793	3.529	3.541
Nd	31.35	36.66	34.45	39.06	213.2	42.66	39.34	20.68	16.06	15.63
Sm	5.839	6.225	7.41	9.726	36.19	8.467	9.875	4.86	3.835	4.046
Eu	1.422	1.164	1.462	2.719	5.207	1.72	2.317	1.297	0.953	1.335
Gd	5.164	5.132	6.581	11.17	7.621	7.151	11.03	4.89	4.202	4.921
Tb	0.817	0.834	0.961	1.664	0.782	1.025	1.729	0.72	0.614	0.776
Dy	4.31	4.694	5.204	9.904	3.867	5.476	10.37	4.113	3.555	4.787
Ho	0.816	0.952	1.025	1.974	0.842	1.091	2.115	0.815	0.728	0.995
Er	2.336	2.685	2.843	5.419	2.631	3.073	6.183	2.175	2.013	2.801
Tm	0.353	0.426	0.447	0.802	0.458	0.454	0.946	0.336	0.303	0.447
Yb	2.393	2.941	2.892	5.309	3.422	3.07	6.316	2.22	2	2.898
Lu	0.388	0.493	0.486	0.857	0.569	0.498	1.035	0.362	0.325	0.477
SREE	186.549	218.126	170.007	185.933	517.079	202.175	188.467	104.141	77.657	78.444
LREE/HREE	10.254	11.013	7.318	4.012	24.608	8.258	3.744	5.662	4.652	3.333
(La/Yb) <sub>N</sub>	12.401	12.256	7.208	3.552	8.108	8.771	2.901	6.233	4.519	2.656
δ Eu	0.775	0.611	0.627	0.796	0.656	0.658	0.676	0.805	0.722	0.914
Hf	5.012	5.577	4.807	5.962	4.996	4.989	9.168	2.066	1.692	2.804
Ta	2.087	2.193	0.666	0.611	0.558	0.686	0.845	0.204	0.146	0.261
Th	20.69	22.23	16.07	6.425	10.78	17.55	10.06	4.351	2.883	1.97
U	4.922	4.513	2.996	1.979	3.061	4.297	2.811	1.124	1.059	0.551

注: ANKC (铝饱和度) = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (N<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + CaO) mol; σ (里特曼指数) = (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) / (SiO<sub>2</sub> - 43);

Mg# = Mg / (Mg + FeT) mol; 样品由中国科学院广州地球化学研究所分析。

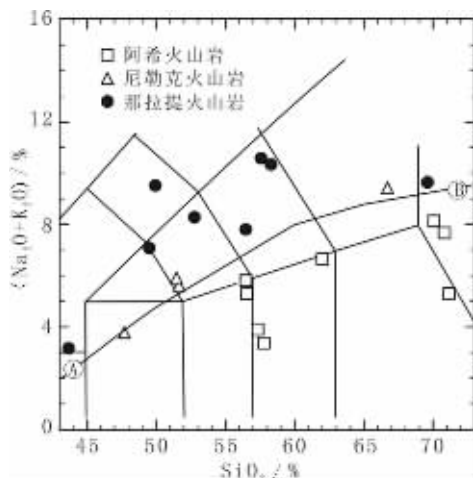


图 3 伊犁北部石炭纪火山岩 SiO<sub>2</sub>-ALK (TAS) 图解<sup>[45]</sup>  
Fig. 3 TAS (SiO<sub>2</sub>-ALK) diagram for Carboniferous volcanic rocks in the northern Ili block

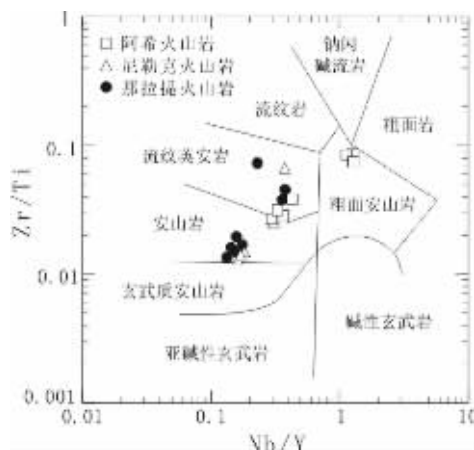


图 4 伊犁北部石炭纪火山岩 Nb/Y-Zr/Ti 图解  
Fig. 4 Nb/Y versus Zr/Ti diagram for Carboniferous volcanic rocks in the northern Ili block

之间,少数大于 9,为偏碱性系列。所有火山岩均含有较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13%~19.6%),其铝饱和度 ANKC 为 0.74~1.17 (除 XJ358 外)。MgO 含量较低 (<7%),Mg# 为 0.21~0.63,表明岩浆并没有发生明显的分异。同时,这些火山岩还有低 TiO<sub>2</sub>,CaO 的特点。

4.2 微量元素

相对于主量元素来说,微量元素在岩浆上升过程中和岩石形成以后,都比较稳定,不易受到大陆地壳混染和后期蚀变的影响,所以能更准确地反映岩浆来源和形成环境。在 Nb/Y-Zr/Ti 图解<sup>[46]</sup>(图 4)中,3 个剖面的火山岩主要为中-酸性的安山岩、流纹英安岩和中酸性粗面安山岩,以及少量的偏基性玄武质安山岩。从图 4 可见岩浆从中基性-中性-中酸性的线性演化趋势,具有典型的钙碱性火山岩系的特征。

3 个剖面的火山岩具有不同的稀土元素总量,其中阿希火山岩的稀土元素总量为 85×10<sup>-6</sup>~218×10<sup>-6</sup>,尼勒克火山岩为 66×10<sup>-6</sup>~184×10<sup>-6</sup>,而那拉提火山岩为 78×10<sup>-6</sup>~517×10<sup>-6</sup>,但它们均具有玄武岩或中性火山岩的特征。所有火山岩的轻稀土元素都比重稀土元素富集,ΣLREE/ΣHREE>3,同时,(La/Yb)<sub>N</sub> 值为 2.66~12.6,且大多小于 6,表明这些火山岩的稀土元素分配模式具有钙碱性火山岩的特征。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线向右缓倾(图 5),其中阿希火山岩最缓,尼勒克火山岩次之,而那拉提火山岩最陡,表现为从基性岩到中性、酸性岩,轻稀土元素富集程度有所增加,可能为岩浆部分分异的结果。除了尼勒克剖面的 2 个火山岩具有弱的 Eu 正异常(δEu=1.04)以外,其他火山岩样品均表现为弱的 Eu 负异常(δEu=0.611~0.997),反映了不同地区岩浆经历了类似

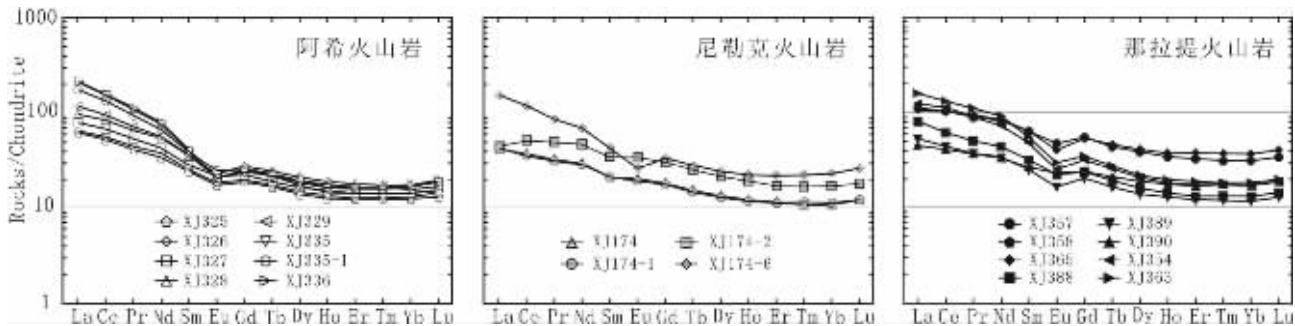


图 5 伊犁北部石炭纪火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线<sup>[47]</sup>

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns for Carboniferous volcanic rocks from Axi, Nileke and Nalati sections in the north of the Ili block

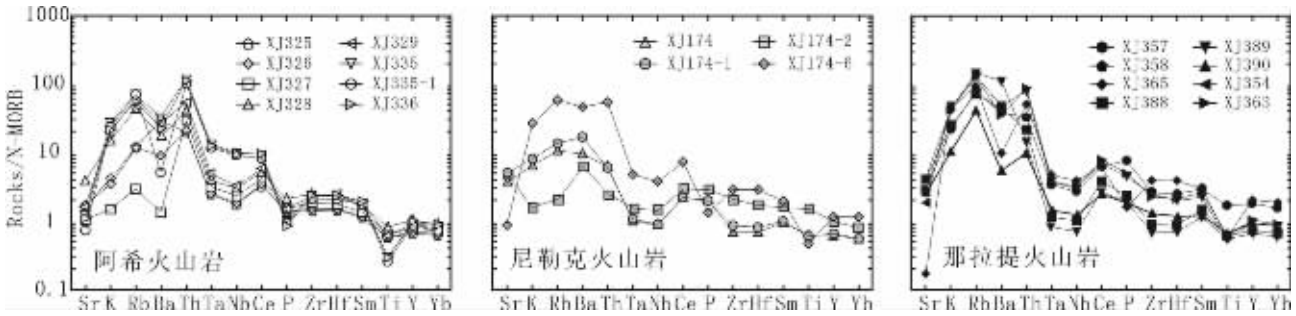


图 6 伊犁北部石炭纪火山岩的 N-MORB 标准化微量元素蛛网图<sup>[49-50]</sup>

Fig. 6 N-MORB-normalized spidergram for Carboniferous volcanic rocks from the Axi, Nileke and Nalati sections in the north of the Ili block

的长石结晶分异作用过程。

所有火山岩具有一个明显而共同的特征,即它们富集大离子亲石元素(LILE),如 K, Rb, Th 和 Ba 等。在正常洋脊玄武岩(N-MORB)标准化的微量元素蛛网图(图 6)上可以看出,这些元素在伊犁北部石炭纪火山岩中的含量明显高于它们在 N-MORB 中的含量。同时,这些火山岩不同程度地亏损高场强元素(HFSE),如 Nb, Ta, Zr, Hf 等,由图 6 中可见, HFSE 在这些火山岩中的含量与在 N-MORB 中比较接近或更低。另外,20 个火山岩样品的 Nb 含量均大于  $3 \times 10^{-6}$ , 接近大陆岛弧玄武岩的 Nb 含量  $(3.3 \pm 1.6) \times 10^{-6}$ , 而明显大于大洋

岛弧玄武岩的 Nb 含量  $(3.3 \pm 1.6) \times 10^{-6}$ , 也大于 MORB 中 Nb 的丰度  $(2.8 \pm 1.6) \times 10^{-6}$ 。

### 5 讨论

#### 5.1 火山岩构造环境

伊犁北部石炭纪火山岩富集 LILE 和相对亏损 HFSE 的地球化学特征(图 6),与形成于俯冲带的火山岩的特征<sup>[48]</sup>相当一致。其中 Nb, Ta 的显著亏损表明其岩浆来源于俯冲带熔融的上地幔或俯冲板片,而 Ba, Rb 和 Th 的相对富集则可能是由于这些岩浆在上升过程中被位于俯冲带之上地壳物质

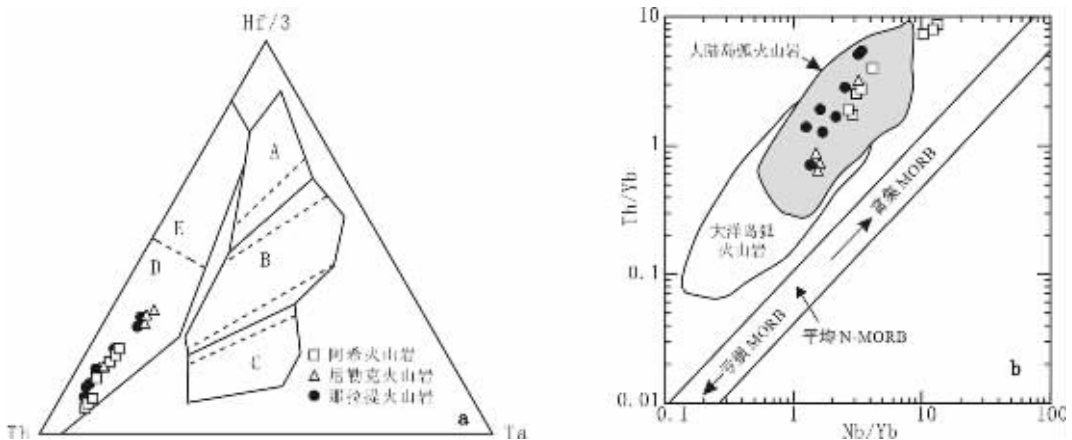


图 7 伊犁北部石炭纪火山岩的 Hf/3—Th—Ta 图解和 Th/Yb—Nb/Yb 图解

A—洋脊玄武岩;B—富集洋脊玄武岩和板内拉斑玄武岩;C—板内碱性玄武岩;D—钙碱性玄武岩;E—岛弧拉斑玄武岩

Fig. 7 Th-Hf/3-Ta discrimination diagram of Carboniferous volcanic rocks in the Ili block showing subduction-related calc-alkaline compositions; Th/Yb versus Nb/Yb diagram showing the subduction-related, continental arc affinities of the Carboniferous volcanic rocks of the Ili block

A—N-MORB; B—E-MORB and intraplate basalt; C—Intraplate alkali basalt; D—Calc-alkaline basalt; E—Island tholeiite

混染所致。

在  $Hf/3-Th-Ta$  三角图解<sup>[51]</sup>(图 7-a)中,所有火山岩均投影于钙碱性玄武岩区域,并且每个剖面的火山岩均有从岛弧型斑状玄武岩向钙碱性玄武岩演化的线性趋势,表明这些火山岩可能形成于会聚板块边缘,即俯冲型火山岛弧环境。在不相容元素 Yb 标准化的  $Th-Nb$  坐标系<sup>[52]</sup>(图 7-b)中,绝大多数样品落在大陆岛弧火山岩和大洋岛弧火山岩的重叠区域,但明显偏向大陆岛弧区域。其中阿希剖面的一个火山岩样品和那拉提剖面的两个火山岩样品均投影于大陆岛弧火山岩区域,另外还有阿希剖面的 3 个火山岩由于过高的 Th 含量而投影于偏向大陆岛弧火山岩的区域,表明这些火山岩更具有大陆火山岛弧亲缘性。

值得一提的是,该石炭纪火山岩均与同期的浅水相陆源沉积岩层相伴生或互层,如前所述,这些火山岩或覆于沉积岩之下,或伏于沉积岩之上,或者呈夹层产于沉积岩之间反复出现,反映了火山岩浆不连续、多次喷发的过程。另外,与这些火山岩所伴生的,还有大量海西中期的岛弧型花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩<sup>[5]</sup>。这些地质证据和岩石地球化学分析结果一致表明,该火山岩形成于俯冲带之上的活动大陆边缘环境。

## 5.2 火山岩地质意义

上述证据表明,伊犁北部阿希、尼勒克和那拉提地区的石炭纪火山岩均形成于板块俯冲有关的活动大陆边缘环境,其岩浆来源于俯冲板块和上地幔的部分熔融,岩浆在上升侵位过程中不同程度地受到俯冲带之上的大陆地壳物质的混染作用。

笔者研究结果证实,伊犁北缘的巴音沟—莫托沙拉沟蛇绿混杂岩带<sup>[2,32,53]</sup>是晚古生代北天山洋盆向南俯冲消减的产物。野外调查表明,该蛇绿混杂岩的地幔橄榄岩、辉长岩和洋壳沉积物等构造残片沿伊犁陆块的北缘边界延伸逾 250 km,出现在伊犁块体的北缘,与伊犁岛弧火山岩具有很好的空间配置关系。洋壳硅质岩中所含晚泥盆世—早石炭世的放射虫化石<sup>[23,24]</sup>以及斜长花岗岩中锆石的 U-Pb SHRIMP 年龄 $(325 \pm 7)Ma$ <sup>[53]</sup>,共同界定了该洋盆消减的时限(晚泥盆世—中石炭世),并与伊犁石炭纪火山岩的时代具有较好的吻合性。基于以上研究结果,笔者认为,伊犁北部石炭纪的火山岩可能是北天山洋盆在晚泥盆世—中石炭世早期向伊犁陆块俯冲过程中形成的。在晚石炭世,洋盆彻底关闭,俯冲作用停止,火山喷发结束,准噶尔板块与北天山—伊犁陆块发生碰撞,强烈的构造作用使洋壳残留物发生了混杂堆积和变形。

## 6 结 论

(1)伊犁北部石炭纪火山岩与陆源沉积岩伴生产出,表明其为活动陆缘火山活动的产物,由完整的基性—中性—酸性钙碱性系列的玄武岩、粗玄岩、玄武质安山岩、玄武质粗面安山岩、安山岩、流纹岩、英安岩和粗面岩组成。

(2)这些火山岩具有俯冲带火山岩所特有的微量元素特征,轻稀土元素较重稀土元素富集,且均富集大离子亲石元素(LILE),如 K, Rb, Th 和 Ba 等,亏损高场强元素(HSFE),如 Nb, Ta, Zr 和 Hf 等。因此,这些火山岩形成于俯冲带之上的活动大陆边缘环境。

(3)火山岩的形成可能与北天山洋盆在晚泥盆世—早石炭世早期向伊犁陆块的俯冲消减作用有关。

## 参考文献(References):

- [1] Allen M B, Windley B F, Zhang Chi. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tianshan, central Asia [J]. Tectonophysics, 1993, 220:89~115.
- [2] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及邻区大地构造[M]. 北京:地质出版社, 1992. 12~47.  
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and its Adjacent Regions [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1992. 12~7 (in Chinese with English abstract).
- [3] Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altai tectonic collage and Paleozoic crust growth in Eurasia [J]. Nature, 1993, 364:299~307.
- [4] Shu Liangshu, Charvet J, Guo Lingzhi, et al. A large-scale dextral ductile strike-slip zone: the Aqqikkudug-Weiya zone along the northern margin of the Central Tianshan belt, Xinjiang, NW China [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(2):148~162.
- [5] 新疆维吾尔自治区地质与矿产资源局. 新疆维吾尔自治区地质志[M]. 北京:地质出版社, 1993. 1~184.  
Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomy Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 1~841 (in Chinese with English abstract).
- [6] Gao Jun, Li Maosong, Xiao Xuchang, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northern China [J]. Tectonophysics, 1998, 287:213~231.
- [7] 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒山地区火山岩的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1995, 14(4):289~300.  
Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, et al. The change from island arc to rift valley: evidence from volcanic rocks of Awulale area [J]. Acta Petrologica et Mineralogical, 1995, 14(4):289~300 (in Chinese with English abstract).
- [8] 车自成, 刘良, 刘洪海, 等. 论伊犁裂谷[J]. 岩石学报, 1996, 12(3):478~490.  
Che Zicheng, Liu Liang, Liu Honghai, et al. Review on the ancient Yili rift, Xinjiang, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12(3):478~490 (in Chinese with English abstract).
- [9] Xia Linqi, Xu Xueyi, Xia Zuchun, et al. Carboniferous post-collisional rift volcanism of the Tianshan Mountains, Northwestern China [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(3):338~360.
- [10] 陈富文, 何国琦, 李华芹. 论东天山觉罗塔格造山带的大地构造



- 属性[J]. 中国地质, 2003, 30(04):361~366.
- Chen Fuwen, He Guoqi, Li Huaqin. Tectonic attribute of the Qoltag orogenic belt in the East Tianshan Mountains, northwestern China[J]. *Geology in China*, 2003, 30(4):361~366 (in Chinese with English abstract).
- [11] Berzin N, Coleman R G, Dobretsov N L, et al. Geodynamic map of the western part of the Paleasian ocean [J]. *Russ. Geol. Geophysics*, 1994, 35(7-8):5~22.
- [12] Burtman V S. Structural geology of the Variscan Tien Shan [J]. *American Journal of Science*, 1975, 275A.
- [13] Charvet J, Laurent-Charvet S, Shu Liangshu, et al. Paleozoic continental accretions in Central Asia around Junngar Block: new structural and geochronological data [J]. *Gondwana Research*, 2001, 4(4):590~592.
- [14] Dobretsov N L, Berzin N, Buslov M. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Int. Geol. Review*, 1995, 37:335~360.
- [15] Windley B F, Allen M B, Zhang Chi, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan range, Central Asia [J]. *Geology*, 1990, 18:128~131.
- [16] 白云来, 陈启林, 汤中立, 等. 塔里木板块东北边缘弧后裂谷系统基性、超基性岩特征[J]. 中国地质, 2004, 31(3):254~262.
- Bai Yunlai, Chen Qilin, Tang Zhongli, et al. The characteristics of basic-ultrabasic rocks in the back-arc rift system on the northeastern margin of the Tarim plate [J]. *Geology in China*, 2004, 31(3):254~262 (in Chinese with English abstract).
- [17] Coleman R G. Continental growth of northwest China [J]. *Tectonics*, 1989, 8(3):621~635.
- [18] 马瑞士, 叶尚夫, 王赐银, 等. 东天山造山带构造框架与演化[J]. 新疆地质科学, 1990, 2:21~36.
- Ma Ruishi, Ye Shangfu, Wang Ciyin, et al. Framework and evolution in the East Tianshan Orogenic belt [J]. *Geosci. Xinjiang*, 1990, 2:21~36 (in Chinese with English abstract).
- [19] 高俊, 何国琦, 李茂松. 西天山古生代造山过程[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(1):28~32.
- Gao Jun, He Guoqi, Li Maosong. Paleozoic orogenic processes of Western Tianshan Orogen [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(1): 28~32 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李向民, 董云鹏, 徐学义, 等. 中天山南缘乌瓦门地区发现蛇绿混杂岩[J]. 地质通报, 2002, 21(6):304~307.
- Li Xiangmin, Dong Yunpeng, Xu Xueyi, et al. Discovery of ophiolitic melange in the Wuwamen area on the southern margin of the Central Tianshan Mountains [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(6):304~307 (in Chinese with English abstract).
- [21] 郝杰, 刘小汉. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及大地构造意义[J]. 地质科学, 1993, 28(1):93~95.
- Hao Jie, Liu Xiaohan. Ophiolite melange time and tectonic evolutionary model in South Tien Shan area [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1993, 28(1):93~95 (in Chinese with English abstract).
- [22] 蔡东升, 卢华复, 贾东, 等. 南天山蛇绿混杂岩和中天山南缘糜棱岩的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及其大地构造意义[J]. 地质科学, 1996, 31(4):384~390.
- Cai Dongsheng, Lu Huafu, Jia Dong, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the ophiolite melange in the southern Tien Shan and the mylonite in the southern rim of central Tien Shan and their tectonic significance [J]. *Scientia Geologica Sinica* 1996, 31(4):384~390 (in Chinese with English abstract).
- [23] 吴文奎, 姜常义, 杨复, 等. 南天山榆树沟—铜花山构造杂岩体伟晶岩[J]. 西安地质学院学报, 1992, 14(1):8~13.
- Wu Wenkui, Jiang Changyi, Yang Fu, et al. The Yushugou-Tonghuashan structural mixite in Xinjiang [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1992, 14(1):8~13 (in Chinese with English abstract).
- [24] 高俊, 肖序常, 汤耀庆, 等. 南天山库米什蓝片岩的发现及其大地构造意义[J]. 中国区域地质, 1993, 4:343~347.
- Gao Jun, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, et al. The discovery of blueschist in Kumux of the southern Tien Shan and its tectonic significance [J]. *Regional Geology of China*, 1993, 4:344~347 (in Chinese with English abstract).
- [25] Gao Jun, Zhang Lifei, Liu Shengwei. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age record of formation and uplift of the blueschists and eclogites in the western Tianshan mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11):1047~1051.
- [26] Zhang Lifei, Ellis D J, Jiang Wenbo. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part I. Evidence from inclusions of coesite pseudomorphs in garnet and from quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites [J]. *American Mineralogist*, 2002, 87:853~860.
- [27] Li Xuping, Zhang Lifei, Ai Yonglian. Discovery and geological implication of rodingites derived from eclogites of ophiolites at Changawuzi, Western Tianshan, China [J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(12):901~907.
- [28] 舒良树, 卢华复, 印栋豪, 等. 中、南天山古生代增生-碰撞事件和变形运动学研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2003, 39(1):17~30.
- Shu Liangshu, Lu Huafu, Yin Donghao, et al. Paleozoic accretion-collision events and kinematics of ductile deformation in the Central-Southern Tianshan belt [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2003, 39(1):17~30 (in Chinese with English abstract).
- [29] Shu Liangshu, Chen Yuntang, Lu Huafu, et al. Paleozoic accretionary terranes in Northern Tianshan, NW China [J]. *Chinese Geochemistry*, 2000, 19(3):193~202.
- [30] Shu Liangshu, Charvet J, Lu Huafu, et al. Paleozoic accretion-collision events and kinematics of ductile deformation in the central-southern Tianshan belt, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(3):308~323.
- [31] 李向东. 新疆北天山晚古生代洋盆演化与推覆构造[J]. 新疆地质, 1993, 11(3):207~214.

- Li Xiangdong. Late Paleozoic evolution of oceanic basin and thrust structure in northern Tianshan, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 1993, 11(3):207~214 (in Chinese with English abstract).
- [32] 李生虎, 杜青. 乌苏县莫托沟-古尔图蛇绿岩[J]. 新疆地质, 1994, 12(3):265~271.
- Li Shenghu, Du Qing. The ophiolites in Motogou-Gurt of Wusu County [J]. Xinjiang Geology, 1994, 12(3):265~271 (in Chinese with English abstract).
- [33] 舒良树, 朱文斌, 王博, 等. 新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷和 水下滑塌构造[J]. 岩石学报, 2005, 21 (1):25~36.
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, et al. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda Mountains, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (1):25~36 (in Chinese with English abstract).
- [34] Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, et al. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan [J]. Journal of Geophysics Research, 1993, 98(B4):6755~6804.
- [35] Hendrix M S, Dumitru T A, Graham S A. Late Oligocene-Early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: An early effect of the India-Asia collision [J]. Geology, 1994, 22:487~490.
- [36] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision [J]. Science, 1975, 189(4201):419~426.
- [37] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baykal regions [J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84:3425~3459.
- [38] Burchfiel B C, Brown E T, Deng Q D, et al. Crustal shortening on the Margins of the Tien Shan, Xinjiang, China [J]. Int. Geol. Review, 1999, 41:665~700.
- [39] Nelson M R, McCaffrey R, Molnar P. Source parameters for eleven earthquakes in the Tien Shan, central Asia: Determined by P and SH waveform inversion [J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92:12629~12648.
- [40] 姜晓玮, 王永江. 西天山阿希型金成矿系列及其成因[J]. 中国地质, 2002, 29(2):203~207.
- Jiang Xiaowei, Wang Yongjiang. Characteristics and genesis of the minerogenetic series of the Axi type gold deposits in the West Tianshan [J]. Geology in China, 2002, 29(2):203~207 (in Chinese with English abstract).
- [41] 李华芹, 谢才富, 常海量, 等. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用 年代学[M]. 北京:地质出版社, 1998.100~127.
- Li Huaqin, Xie Caifu, Chang Hailiang, et al. Study on Metallogenic Chronology of Nonferrous and Precious Metallic Ore Deposits in North Xinjiang, China [M]. Beijing:Geology Publishing House, 1998.100~127 (in Chinese with English abstract).
- [42] 新疆地质局. 中华人民共和国 1:200 000 地质图巩留幅(K-44-V)及区域地质调查报告[R]. 1980.
- Bureau of Geological Survey of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Geological Map of People's Republic of China 1:200000, Gongliu Sheet (K-44-V) and Geological survey Report [R]. 1980 (in Chinese).
- [43] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. Journal of Petrology, 1986, 27:745~750.
- [44] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks [M]. Oxford:Blackwell Scientific Publications Ltd, 1989. 193.
- [45] Irvine T N, Baragar V R. A guide to the chemical classification of the volcanic rocks [J]. Can. J. Earth. Sci., 1971, 8:523~548.
- [46] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination; application to altered and metamorphosed basic igneous rocks [J]. Earth and Planetary Scientific Letters, 1976, 28:459~469.
- [47] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of ocean island basalts: implications for mantle composition and processes [A]. In: Saunders A D, Norry M J (eds). Magmatism in the Ocean Basins [C]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42:313~345.
- [48] McCulloch M T, Gamble J A. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 102:358~374.
- [49] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. In: Thorpe R S (ed). Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks [C]. Chichester: John Wiley & Sons, 1982.525~548.
- [50] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [A]. In: Hawkesworth C J, Norry M J (eds), Continental Basalts and Mantle Xenoliths [C]. Nantwich: Shiva Press, 1983.230~249.
- [51] Wood D A, Joron J L, Treuil M. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic setting [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1979, 45:326~336.
- [52] Pearce J A, Peatse D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. Annu. Rev. Earth Sci., 1995, 23:251~285.
- [53] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火山岩省与地幔柱 [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).

## Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous volcanic rocks in the northern part of the Ili Block, Xinjiang

WANG Bo<sup>1,2</sup>, SHU Liang-shu<sup>1</sup>, D. CLUZEL<sup>2</sup>,  
M. FAURE<sup>2</sup>, J. CHARVET<sup>2</sup>, MA Qian<sup>1</sup>

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

2. ISTO UMR 6113, University of Orléans, F45067, Orléans, Cedex 2, France)

**Abstract:** Carboniferous volcanic rocks are widespread at peripheries of the Ili block of the West Tianshan. They are complex in lithology and mostly are associated or alternate with terrigenous clastic rocks. Geochemical study of volcanic rocks from the Axi, Nileke and Nalati sections in Yining suggests that these rocks belong to the calc-alkaline series composed of basalt, trachybasalt, basaltic andesite, basaltic trachyandesite andesite, rhyolite, dacite and trachyte. They have relatively high REE concentrations and are enriched in LREE relative to HREE, and in addition, they display a pronounced enrichment of LILE such as Th and Rb relative to HFSE such as Nb, Ta and Zr. Therefore the formation of these rocks is related to plate subduction. The trace element geochemical diagram further indicates that these rocks formed in a continental island-arc environment. The Early-Mid Carboniferous neritic-littoral sediments associated with them and the existence of the Late Devonian-Early Carboniferous Bayan Gol-Motuoshala ophiolite belt suggest that the Carboniferous calc-alkaline volcanic rocks on the northern margin of the Ili block are likely to have erupted in an active continental-margin environment and probably resulted from the subduction of the North Tianshan oceanic basin southward beneath the Ili block during the Late Devonian-Mid Carboniferous.

**Key words:** volcanic rocks; geochemistry; tectonic environment; Carboniferous; West Tianshan; Ili

**About the first author:** WANG Bo, male, born in 1978, Ph. D student of Nanjing University and French Orleans University, majoring in structural geology; E-mail: wangbo1996@nju.edu.cn.