

# 天山地区新元古代—早寒武世火山岩地球 化学和岩石成因

李向民<sup>1,2</sup>, 夏林圻<sup>2</sup>, 夏祖春<sup>2</sup>, 徐学义<sup>2</sup>, 马中平<sup>1,2</sup>, 王立社<sup>2</sup>

(1. 西北大学 陕西 西安 710069; 2. 西安地质矿产研究所 陕西 西安 710054)

**摘要:** 天山地区新元古代—早寒武世玄武质熔岩包括拉斑玄武质和碱性玄武质两个主要岩浆系列,前者是早期(早南华世贝义西组、早震旦世扎摩克提组)喷发的火山岩系的主要组成,后者是晚期(早震旦世苏盖特布拉克组、晚震旦世水泉组、早寒武世西山布拉克组)喷发的火山岩系的主要组成。稀土、微量元素和 Sr、Nd 同位素特征揭示,这些火山岩均形成于大陆裂谷环境,其源区可能是源于一种似洋岛玄武岩源的软流圈地幔源,并且在岩浆上侵喷发过程中发生了岩石圈的混染。

**关键词:** 新元古代—早寒武世; 火山岩; 地球化学; 岩石成因; 天山

中图分类号: P588.14; P59; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)05-0412-11

## Geochemical characteristics and petrogenesis of Neoproterozoic-Early Cambrian volcanic rocks in Tianshan area

LI Xiang-min<sup>1,2</sup>, XIA Lin-qi<sup>2</sup>, XIA Zu-chun<sup>2</sup>, XU Xue-yi<sup>2</sup>, MA Zhong-ping<sup>1,2</sup> and WANG Li-she<sup>2</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The Neoproterozoic-Early Cambrian basic lava in Tianshan and its adjacent areas consists of two magma series, namely, tholeiitic and alkaline basaltic magma series. The tholeiitic magma series is the major component part of the early volcanic rocks (Early Nanhua Beiyixi Formation and Early Sinian Zamoketi Formation), the alkaline basaltic magma series is the main component part of the late volcanic rocks (Early Sinian Sugaitibulake Formation, Neosinian Suiquan Formation and Early Cambrian Xishanbulake Formation). REE, trace elements and Nd, Sr isotopic compositions reveal that the volcanic rocks were formed in a continental-rift environment, and their source resembled an asthenospheric mantle of ocean-island basalt and was contaminated by geosphere during the upward migration and eruption of the magma.

**Key words:** Neoproterozoic-Early Cambrian; volcanic rock; geochemistry; petrogenesis; Tianshan Mountains

造山带古老火山岩系的研究为重溯造山带地质构造历史的演化具有重要的意义。天山造山带及其两侧分布着一些由前寒武纪地质体构成的微地块,其中在库鲁克塔格微地块、阿克苏-柯坪微地块、卡瓦布拉克微地块、塞里木微地块上的新元古代—

早寒武世地层中均分布有火山岩。前人(高振家等, 1984, 1985, 1987, 1993, 2003; 刘鸿允等, 1991)对这些地区的南华系和震旦系开展过较为详细的地层学研究工作。综合这些研究成果,可以发现在震旦系的上覆寒武系地层的底部,恒定地发育有一套含

收稿日期: 2006-01-16; 修订日期: 2006-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40472044); 中国地质调查局综合科研项目(200313000063, 1212010611804, 200313000028)

作者简介: 李向民(1964-), 男, 研究员, 博士研究生, 长期从事火山岩岩石学及有关矿产的研究工作。

磷岩层,在震旦系和南华系地层中存在 2~3 层大致可以对比的冰成岩或冰碛岩,表明这些前寒武纪地块和微地块,在新元古代中晚期,应当是一个统一的联合古陆,它们可能是 Rodinia 超级古大陆的组成部分(肖序常等,1991,1992)。其中对库鲁克塔格地区新元古代—早寒武世火山岩研究认为其可能形成于大陆裂谷环境(姜常义等,2001),而卡瓦布拉克地区新元古代—早寒武世火山岩可以和库鲁克塔格地区对比(新疆地调院,2004)<sup>①</sup>。近年来许多中外地质学家除致力于 Rodinia 古大陆的重建研究,也将注意力投向了该大陆解体事件的探索。新元古代广泛发育的裂谷火山事件的研究对于查明 Rodinia 古大陆的裂解及古亚洲洋的开启可以提供重要的约束,同时,对于探索这一时期诸多超大型矿床(如中国金川的超大型镍矿床等)形成的地质背景也具有重要的指向性意义。有的学者(Li *et al.*, 2001, 2003)甚至已经提出用地幔柱、超级地幔柱假说来解释新元古代中晚期大陆裂谷岩浆活动和 Rodinia 古大陆裂解的地球动力学机制。总的说来,目前对于新元古代中晚期这套火山岩的研究只是处于起步阶段,特别是

有关我国中西部新元古裂谷火山岩系的分布范围、确切性质和精确时限尚存在许多疑点和不确定性,应当进一步深入研究。为重塑天山造山带地质演化过程,本文对天山地区分布的新元古代—早寒武世火山岩地球化学特征、性质进行综合分析研究,以确立其形成的构造环境,并探讨其岩石成因。

### 1 地质背景

天山造山带及其两侧分布着一些由前寒武纪地质体构成的微地块,自西向东有塞里木微地块、那拉提微地块、阿克乔喀微地块、阿克苏-柯坪微地块、巴仑台微地块、库鲁克塔格微地块和卡瓦布拉克微地块等(图 1)。天山地区新元古代—早寒武世火山岩就分布于这些前寒武纪微地块上的南华系、震旦系和下寒武统地层中,以库鲁克塔格微地块最为发育,从老到新有贝义西(早南华世)、扎摩克提(早震旦世)、水泉(晚震旦世)和西山布拉克(早寒武世)4 个喷发期。阿克苏-柯坪微陆块上新元古代火山岩系位于苏盖特布拉克组的中下部,喷发时代与扎摩克

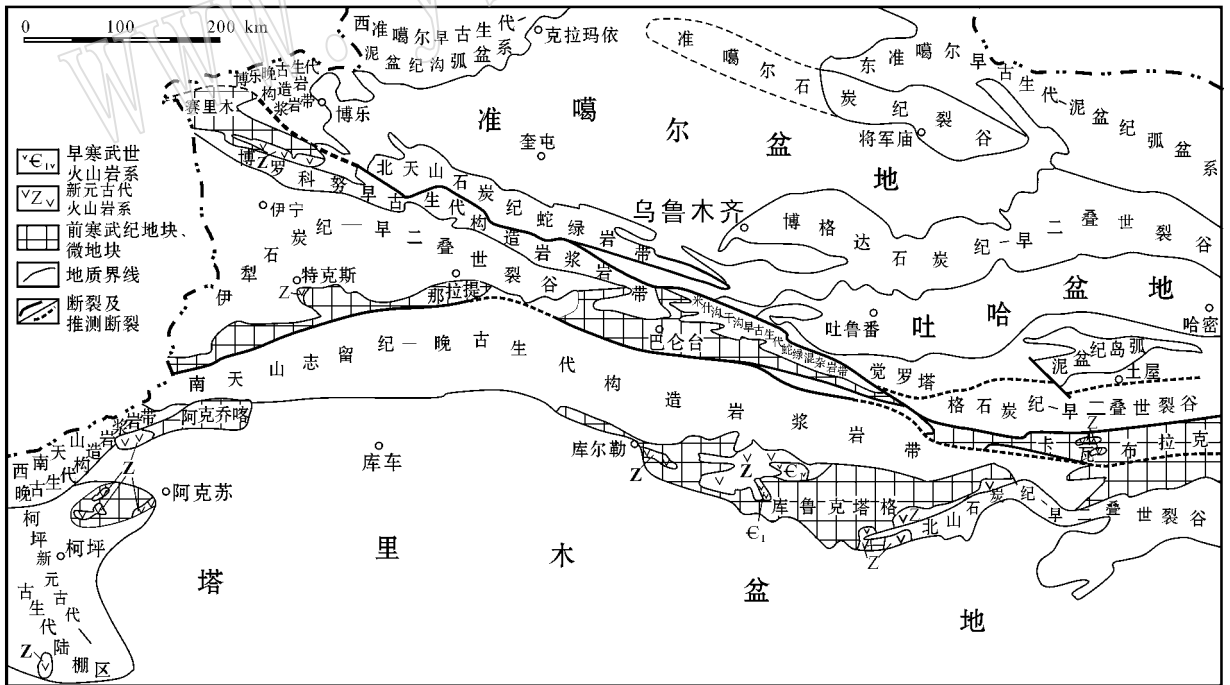


图 1 天山地区新元古代—早寒武世火山岩分布略图(据夏林圻等(2002)修编)

Fig. 1 Geological sketch map showing distribution of Neoproterozoic-Early Cambrian volcanic rocks in Tianshan area (after Xia Linqi *et al.*, 2002)

① 新疆地调院. 2004. 新疆东天山 K46C003002(大黑山幅)1:25 万区域地质调查报告.

提期(早震旦世)相当。卡瓦布拉克微地块上分布的新元古代和早寒武世火山岩系分别产于南华系底部的贝义西组和下寒武统的黄山组之中。塞里木微地块上新元古代火山岩则位于南华系底部库鲁铁克提组的中部。前人通过对天山地区微陆上分布的南华系和震旦系地层学研究,认为天山造山带及其邻区的各个微地块在早寒武世以前可能是一个统一大陆块(高振家等,1984,1985,1987,1993,2003;刘鸿允等,1991;肖序常等,1991,1992)。

库鲁克塔格地区贝义西期火山岩分布最为广泛,岩性复杂,从酸性到基性都较为发育,火山熔岩-火山碎屑岩均有产出;扎摩克提期火山岩分布于库鲁克塔格微地块的中西部,岩性较为单一,为基性熔岩,局部有火山碎屑岩,水泉期和西山布拉克期火山岩分布零星,为基性火山岩。阿克苏-乌什一带苏盖特布拉克组火山岩分布也较广,但岩性单一,为基性火山熔岩,局部可见火山角砾岩,笔者所分析火山岩样品均采于此。卡瓦布拉克微地块上贝义西组火山岩分布较广,岩性较为复杂,基性、中性、酸性火山岩均有产出,而早寒武世黄山组零星分布,岩性为基性凝灰岩。果子沟-科古琴山新元古代火山岩为基性火山熔岩和凝灰岩。

柯坪微地块位于塔里木板块北缘(图1),主要由基底和盖层组成。基底为元古界阿克苏群,盖层由震旦系一二叠系沉积-火山岩系组成。震旦系中含有冰碛岩及火山岩,其中苏盖特布拉克组主要为中-薄层的粉砂岩、砂岩,其间夹有数层基性火山熔岩,早古生界为陆棚碳酸盐建造(孙庆峰等,2006),泥盆系为深海复理石建造,石炭纪后进入了碰撞后的陆内演化阶段(夏林圻等,2002)。

## 2 样品特征与分析方法

### 2.1 样品特征

阿克苏-柯坪微地块上的新元古代火山岩分布较广,但厚度不大,从几米到几十米,产于苏盖特布拉克组中部,为一套基性火山岩组合,主要的岩石类型有玄武岩、杏仁状玄武岩、橄榄玄武岩、玄武质火山角砾岩及基性凝灰岩等。通过路线地质调查,对该火山岩系进行系统采样,经详细镜下观察研究,选择蚀变弱、较新鲜、无杏仁体、具代表性的样品(5件)

进行分析测试。

基性火山岩褐红色、黑绿色、灰绿色,斑状结构,块状构造、杏仁状构造,基质呈交织结构、间粒-间隐结构。斑晶含量5%~15%,主要为钠长石(70%~80%),单斜辉石(20%~30%)部分已蚀变为次生闪石或绿泥石,偶见橄榄石(已蚀变为伊丁石)、紫苏辉石。基质中长石为半自形长条状杂乱排列,大部分发育绢云母化或钠黝帘石化,辉石、含Ti磁铁矿呈半自形或他形粒状间杂于斜长石晶体组成的间隙内,辉石多已蚀变为闪石、绿泥石,副矿物有楣石、磁铁矿和磷灰石。

### 2.2 分析方法

首先对样品进行粗碎,在粗碎过程中除去样品的风化面及少量的脉体,然后在GJ-4型密封式研磨机上碎至200目进行系统的主量、微量元素化学分析及Sr、Nd同位素测试。主量元素在中国科学院地球化学研究所用X荧光光谱法(XRF)分析(分析者:李荪蓉),微量元素和稀土元素在中国科学院高能物理所核技术应用部用中子活化(INAA)法分析(分析者:韩松、贾秀琴);Y、Nb在国家地质实验测试中心用IRIS仪分析(分析者:王尔良);Rb-Sr和Sm-Nd同位素均在中科院地质地球物理研究所同位素超净实验室完成(分析者:乔广生等),样品用HF+HClO<sub>4</sub>在Teflon容器中低温溶解,采用AG50W×8(H<sup>+</sup>)阳离子交换柱分离出纯净的Rb、Sr和Sm、Nd,在VG345固体同位素质谱计上进行同位素测量,Sr同位素分馏用<sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr=0.1194校正,Rb-Sr全流程空白本底约为 $2 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-10}$ g,Nd同位素分馏用<sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.7219校正,Sm-Nd全流程空白本底约为 $5 \times 10^{-11} \sim 10 \times 10^{-11}$ g。分析数据见表1、表2。

## 3 岩石地球化学特征

虽然前人对天山及其邻区南华系、震旦系和寒武系地层开展过大量的研究工作,但是对其中新元古代-早寒武世火山岩系统的岩石学研究却很少,仅姜常义等(2001)对库鲁克塔格的新元古代-早寒武世火山岩开展过系统的岩石地球化学研究工作。此外,1:25万大黑山幅区域地质调查<sup>①</sup>也对卡瓦布拉克微地块上的早南华世和早寒武世火山岩的主元

① 新疆地调院. 2004. 新疆东天山 K46C00300X(大黑山幅) 1:25万区域地质调查报告.

表 1 天山地区新元古代—早寒武世火山岩的主元素( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )组成

Table 1 Major( $w_B/\%$ ) and trace element( $w_B/10^{-6}$ ) composition of Neoproterozoic-Early Cambrian volcanic rocks in Tianshan area

地 点 岩石类型 时代 地层 样号	库鲁克塔格微地块											
	碱性玄武岩						玄武岩					
	早寒武世				晚震旦世			早震旦世				早南华世
	西山布拉克组				水泉组			扎摩克提组				贝义西组
	XX <sub>3</sub> B <sub>2</sub>	XX <sub>10</sub> B <sub>1</sub>	XX <sub>12</sub> B <sub>1</sub>	XX <sub>12</sub> B <sub>2</sub>	XX <sub>18</sub> B <sub>3</sub> 6	XX <sub>22</sub> B <sub>2</sub>	XX <sub>22</sub> B <sub>3</sub>	KL <sub>16</sub> B <sub>1</sub>	KL <sub>16</sub> B <sub>2</sub>	KL <sub>16</sub> B <sub>4</sub>	KL <sub>16</sub> B <sub>5</sub>	TV <sub>7</sub> B <sub>1</sub>
SiO <sub>2</sub>	47.88	47.66	47.00	50.01	47.26	47.34	48.44	46.98	49.28	48.68	50.16	52.32
TiO <sub>2</sub>	1.91	1.07	1.37	1.91	1.53	1.79	1.60	1.81	1.66	1.73	1.08	0.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.39	14.56	17.78	13.36	16.00	15.17	16.39	13.33	13.73	13.58	13.89	14.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.06	5.37	3.32	4.40	4.47	3.44	3.06	8.96	7.85	8.79	7.81	3.64
FeO	3.10	1.03	4.73	2.73	7.05	7.47	7.45	6.71	6.81	6.13	5.34	4.12
MnO	0.16	0.16	0.12	0.15	0.15	0.15	0.16	0.12	0.09	0.094	0.11	0.14
MgO	4.06	3.31	7.25	2.81	6.10	5.56	6.65	8.70	8.25	7.70	7.55	5.9
CaO	7.85	8.20	4.30	7.55	7.33	7.69	7.43	8.44	4.53	7.96	7.61	8.55
Na <sub>2</sub> O	4.97	4.64	4.73	3.20	4.20	4.74	4.47	1.12	3.69	2.16	2.92	2.88
K <sub>2</sub> O	2.26	2.39	1.90	3.84	0.48	1.02	0.36	0.57	0.58	0.48	0.75	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.47	0.41	0.51	0.72	0.31	0.49	0.35	0.12	0.15	0.14	0.10	0.18
LOI	8.58	10.50	7.49	8.57	5.42	5.17	4.27	3.53	3.31	3.29	3.37	6.80
总量	99.69	99.30	100.50	99.34	100.3	100.12	100.63	100.39	99.93	100.73	100.69	100.02
Mg <sup>#</sup>	0.60	0.65	0.68	0.53	0.55	0.53	0.58	0.60	0.60	0.59	0.61	0.65
Ba	1 092.1	2 493.4	1 769.2	7 741.5	334.49	1 477.8	319.16	209.41	220.19	391.81	404.06	67.87
Rb	16.51	19.24	17.33	29.43	8.15	14.26	8.79	9.45	8.41	9.44	9.82	1.82
Sr	448.85	228.35	296.07	350.57	490.31	912.54	580.32	418.29	136.98	386.62	340.71	967.05
Y	20.04	16.52	18.04	29.12	15.56	15.85	12.76	24.16	20.15	21.09	18.04	16.08
Zr	181.39	98.05	122.84	235.31	104.06	107.98	88.88	104.34	98.7	129.64	65.12	84.98
Nb	26.52	14.73	13.2	35.22	14.66	23.49	19.98	8.32	8.14	7.58	5.69	6.16
Th	2.22	1.31	1.88	3.31	1.56	1.49	1.07	1.08	0.99	0.79	0.74	2.25
Pb	3.52	2.57	2.72	2.69	5.74	4.05	3.19	7.37	3.25	7.36	18.02	13.21
Ni	46.04	410.04	91.55	23.16	90.1	58.96	102.16	68.35	56.54	83.37	86.07	160.81
Cr	125.26	234.35	170.19	82.54	198.48	209.20	327.42	152.85	139.06	213.42	275.99	441.51
Hf	5.58	2.48	2.77	5.57	3.12	1.99	1.66	3.22	2.8	3.54	2.2	1.37
Cs	0.61	1.43	0.5	0.94	0.95	0.21	9.2	0.71	0.66	0.26	0.4	0.18
Ta	2.09	0.89	1.25	2.44	1.02	1.16	0.88	0.73	0.66	0.45	0.41	0.25
U	1.55	2.16	0.56	1.49	0.44	0.38	0.31	0.4	0.4	0.48	3.9	0.16
Sn	1.90	1.15	1.40	1.65	1.33	1.44	1.19	1.7	0.78	0.88	1.09	1.01
La	24.77	16.45	24.74	41.91	17.12	21.04	15.18	11.27	10.65	9.27	11.14	22.55
Ce	52.64	33.06	47.26	89.10	25.61	41.63	31.24	25.9	24.54	21.02	21.14	40.72
Pr	6.44	4.07	6.04	10.03	4.1	4.87	3.73	3.29	2.97	2.67	2.52	4.24
Nd	26.30	17.34	25.80	41.44	17.97	20.87	16.04	14.93	13.46	12.41	12.02	16.93
Sm	5.32	3.69	5.97	9.04	3.88	4.64	3.41	4.2	3.41	3.18	2.85	3.64
Eu	2.07	1.66	2.12	4.06	1.6	1.97	1.33	1.33	1.09	1.37	1.17	1.24
Gd	6.01	4.78	5.73	9.40	4.53	4.94	4.09	4.77	3.89	3.98	3.61	4.09
Tb	0.78	0.60	0.73	1.18	0.56	0.64	0.51	0.72	0.67	0.6	0.55	0.54
Dy	3.85	2.61	3.18	4.93	2.95	3.00	2.54	3.95	3.63	3.61	2.98	3.11
Ho	0.65	0.55	0.55	0.90	0.53	0.53	0.48	0.83	0.73	0.76	0.62	0.5
Er	1.72	1.24	1.35	2.24	1.38	1.33	1.02	2.05	2.02	1.94	1.16	1.64
Tm	0.26	0.22	0.20	0.37	0.20	0.22	0.20	0.36	0.28	0.26	0.25	0.26
Yb	1.70	1.12	1.01	1.63	1.05	0.91	0.85	1.62	1.45	1.62	1.43	1.49
Lu	0.20	0.16	0.16	0.28	0.19	0.19	0.14	0.23	0.2	0.24	0.25	0.18
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.82	9.90	16.51	17.33	10.99	15.59	12.04	4.69	4.95	3.86	5.25	10.20

续表 1

Continued Table 1

地 点 岩石类型 时代 地层 样号	库鲁克塔格微地块			阿克苏-柯坪微地块					卡瓦布拉克微地块			
	玄武安山岩	安山岩	流纹英安岩	碱性玄武岩					玄武岩	碱性玄武岩	安山岩	流纹英安岩
	早南华世			早震旦世					早南华世			
	贝义西组			苏盖特布拉克组					贝义西组			
	TV <sub>10</sub> B <sub>2</sub>	TV <sub>13</sub> B <sub>1</sub>	TV <sub>11</sub> B <sub>2</sub>	L4B2	L4B3-1	L4B3-2	L4B3-3	L4B6	X-12	XXI-33	XI-19	XXIII-8
SiO <sub>2</sub>	55.28	59.88	71.40	44.93	45.19	47.07	49.44	49.02	46.25	48.32	56.89	70.51
TiO <sub>2</sub>	0.81	0.57	0.54	2.50	2.60	2.55	2.65	2.17	0.58	1.99	0.95	0.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.32	15.35	11.00	16.29	17.18	16.06	15.08	18.10	7.15	12.34	16.06	12.77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.47	2.84	2.23	8.10	8.91	8.00	7.20	7.75	4.94	5.59	4.42	1.37
FeO	1.90	3.04	4.71	7.00	6.69	6.50	7.20	6.10	5.45	5.00	3.00	2.55
MnO	0.08	0.11	0.13	0.21	0.24	0.18	0.24	0.09	0.14	0.14	0.12	0.13
MgO	2.54	3.68	1.28	6.10	5.80	5.30	5.06	5.30	18.38	6.33	5.00	0.69
CaO	5.61	5.22	1.95	5.30	4.60	6.00	5.00	4.00	9.76	12.06	6.39	1.96
Na <sub>2</sub> O	2.83	5.00	2.31	3.67	3.82	3.87	3.14	3.06	0.84	2.91	2.44	3.29
K <sub>2</sub> O	3.88	0.67	2.96	1.01	1.07	0.52	1.20	0.60	0.37	0.48	1.67	4.31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.11	0.22	0.53	0.47	0.57	0.60	0.43	0.11	0.48	0.23	0.11
LOI	2.84	3.43	1.35	4.18	3.22	3.01	3.08	3.03	5.17	4.03	2.45	1.29
总量	100.67	99.9	100.08	99.82	99.79	99.63	99.89	99.65	99.14	99.67	99.62	99.35
Mg <sup>#</sup>	0.53	0.61	0.29	0.51	0.50	0.49	0.47	0.51	0.81	0.61	0.65	0.28
Ba	971.89	278.88	2 531.6	414	581	344	367	330	120	184	392	624
Rb	143.73	10.2	49.55	15.1	21.7	11.7	20.3	16	12.3	5.2	81.1	140
Sr	380.55	329.93	427.82	497	334	226	282	392	139	509	295	104
Y	21.41	29.13	29.51	31.7	33.3	31.8	33.5	26.8	17.6	7.7	28.6	47.5
Zr	147.01	102.77	272.25	193	179	162	172	175	57.4	213	172	465
Nb	11.59	6.06	9.57	22.5	23.5	22	23.3	19.8	5.1	23.5	14.1	18.3
Th	7.04	4.03	4.14	2	2.01	2.02	2.1	2.04	4.6	8.8	11.8	20
Pb	12.98	19.94	5.13									
Ni	20.69	32.02	4.72	72.3	70.6	198	88.9	133				
Cr	194.3	181.93	81.96	57.4	73.5	64.4	60.5	58.9				
Hf	3.5	2.86	5.72	5.47	5.5	5.17	5.62	5.18	4.3	5.6	5.4	6.6
Cs	2.05	0.24	0.45	0.338	0.331	0.327	0.18	0.315				
Sc									32.3	3.6	20.6	6.7
Ta	0.93	0.43	0.45	1.43	1.34	1.35	1.45	1.31				
U	0.74	0.7	1.18	0.834	0.778	0.753	0.98	0.908	1.5	1.9	2.2	2.8
Sn	1.91	1.15	1.12									
La	27.62	27.29	37.52	28.5	32.3	29.8	26.4	28.1	8	19.9	32.5	65.3
Ce	53.43	44.83	74.59	52.6	54	52.8	51.1	48.3	18	34.4	50.6	109
Pr	5.77	5.56	7.94						3.3	3.7	6.8	13.6
Nd	23.99	21.48	32.11	30.5	31.4	32	33	26.7	12.8	17.2	27.7	55.2
Sm	5.25	4.09	7.31	6.82	6.6	6.57	7.05	6.38	3	2.9	5.7	12.1
Eu	1.29	0.97	2.71	2.3	2.14	2.19	2.26	2.31	0.94	0.87	1.4	1.5
Gd	5.38	5.4	7.28						3.7	2.8	6.4	11.2
Tb	0.75	0.66	1.01	0.99	1.02	1.09	1.08	1.06	0.58	0.37	0.93	1.7
Dy	4.16	4.15	4.9						3.1	2.4	5.5	13.8
Ho	0.84	0.89	0.94						0.7	0.26	1	2
Er	2.00	2.41	2.59						1.7	0.69	3.1	5.4
Tm	0.28	0.35	0.45						0.28	0.10	0.52	0.83
Yb	1.68	2.08	2.12	2.86	3.22	2.85	3.14	2.99	1.7	0.57	3.3	5.6
Lu	0.29	0.3	0.33	0.44	0.47	0.4	0.46	0.4	0.49	0.08	0.48	0.82
(La/Yb) <sub>N</sub>	11.08	8.85	11.93	6.72	6.76	7.05	5.67	6.34	3.17	23.54	6.69	7.86

资料来源:库鲁克塔格微地块据姜常义等(2001);卡瓦布拉克微地块据1:25万大黑山幅区域地质调查报告(2004)。

素和微量元素分析数据做过比较系统地报道。结合本文对阿克苏-柯坪两个微地块对新元古代火山岩的分析资料,目前可以利用的分析数据如表 1 所示。

### 3.1 岩浆系列和分类

由于天山地区火山岩均经历了变质和蚀变作用的影响,其 K、Na 和低场强元素在变质和蚀变过程中为活泼元素而有可能发生了迁移,因此,通常 TAS 图不能准确地进行岩石类型的划分,笔者主要采用不活泼元素进行岩石分类、元素地球化学特征探讨。

据  $SiO_2 - Nb/Y$  和  $<FeO>/MgO - SiO_2$  图解(图 2),库鲁克塔格、阿克苏-柯坪和卡瓦布拉克 3 个微地块新元古代—早寒武世火山岩系的下部(早南华世贝义西组、早震旦世扎摩克提组),除 2 个样品(TV<sub>13</sub>B1、XI-19)属钙碱性系列和 1 个样品(XXI-33)属碱性系列外,其余均为拉斑玄武质火山岩系,所包含的岩石类型有:玄武岩、碱性玄武岩、玄武安山岩、安山岩和流纹英安岩,而上部层位(早震旦世苏盖特布拉克组、晚震旦世水泉组、早寒武世西山布拉克组)则均属碱性玄武质火山岩系,单一地为碱性玄武岩。

### 3.2 主元素特点

天山地区新元古代—早寒武世火山岩系  $SiO_2$  含量变化较大,介于 44.93%~71.40%。其中玄武岩的  $SiO_2$  含量为 44.93%~52.32%,中性熔岩的  $SiO_2$  含量为 55.28%~59.88%,2 个酸性熔岩样品的  $SiO_2$  含量分别为 70.51%和 71.40%。不同喷发期火山岩的基性程度有明显差异:早南华世贝义西

喷发期火山岩中,基性、中性、酸性熔岩均有产出, $SiO_2$  含量分别为 44.93%~52.32%、55.28%~59.88%、70.51%~71.40%;震旦世的扎摩克提喷发期和水泉喷发期以及早寒武世西山布拉克喷发期火山岩的  $SiO_2$  含量为 46.98%~50.16%,均属基性火山岩。玄武岩的  $Al_2O_3$  含量变化介于 7.15%~19.32%。贝义西组、水泉组和西山布拉克组玄武岩中除 3 个样品(XX<sub>12</sub>B1、XX<sub>22</sub>B3、TV<sub>10</sub>B<sub>2</sub>)的  $Al_2O_3$  含量大于 16%外,大多数样品的  $Al_2O_3$  含量小于 16%,属低铝玄武岩;苏盖特布拉克组玄武岩的 5 个样品中,只有 1 个样品(L4B3-3)的  $Al_2O_3$  含量小于 16%,其余样品的  $Al_2O_3$  含量均大于 16%,属高铝玄武岩。所有样品除 1 个玄武岩样品(X-12)的 MgO 含量(18.38%)和  $Mg^\#$ (0.81)较高外,其它所有样品的 MgO 含量( $<8.70\%$ )和  $Mg^\#$ (0.65~0.28)均较低。

### 3.3 稀土元素特点

天山地区新元古代—早寒武世火山岩的稀土元素(REE)分配型式彼此相似,具有轻稀土(LREE)富集( $(La/Yb)_N = 3.17 \sim 23.54$ )的特点(图 3)。库鲁克塔格微地块和卡瓦布拉克微地块上贝义西组火山岩除显示轻稀土富集外,还具有重稀土(HREE)相对平坦、Eu 负异常明显、中稀土(MREE)至重稀土(HREE)微微下凸和 HREE 微微上凹的分配型式(图 3e、f)。在早南华世贝义西组火山岩系中,基性、中性和酸性熔岩的稀土元素球粒陨石标准化分配曲线相互平行(图 3e、f),显示它们之间可能是分异结晶关系。

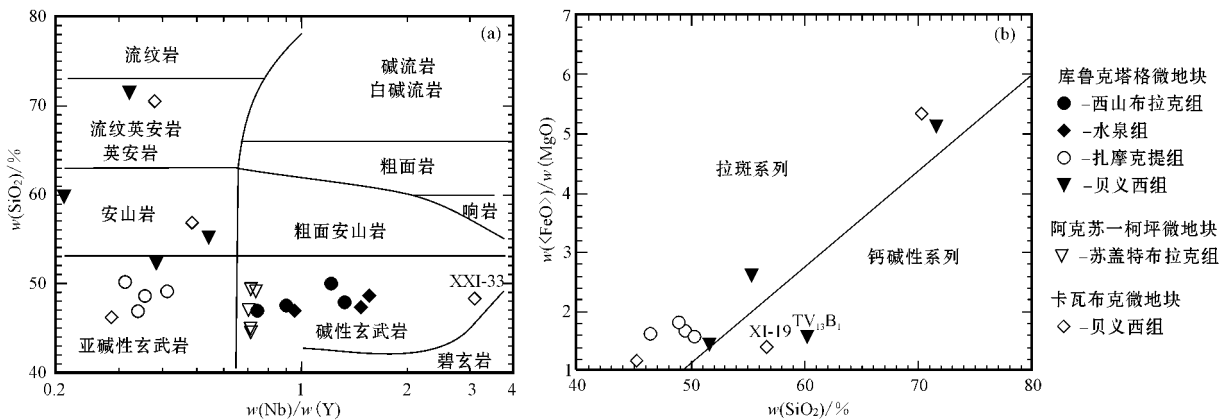


图 2 天山地区新元古代—早寒武世火山岩  $SiO_2 - Nb/Y$  (a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和  $<FeO>/MgO - SiO_2$  (b, 据 Miyashiro, 1975) 图解

Fig. 2  $SiO_2$  versus  $Nb/Y$  (a, after Winchester and Floyd, 1977) and  $<FeO>/MgO$  versus  $SiO_2$  (b, after Miyashiro, 1975) diagrams of Neoproterozoic-Early Cambrian volcanic rocks in Tianshan area

### 3.4 微量元素特点

天山地区新元古代—早寒武世火山岩呈现3类不同的微量元素原始地幔标准化分配型式(图4)。第1类为位于天山及邻区新元古代—早寒武世火山

岩系上部层位的苏盖特布拉克组(早震旦世)、水泉组(晚震旦世)和西山布拉克组(早寒武世)玄武岩,它们在多元素原始地幔标准化蛛网图中,显示醒目的负Th异常,相伴有清楚的正Nb、Ta异常(图4d、

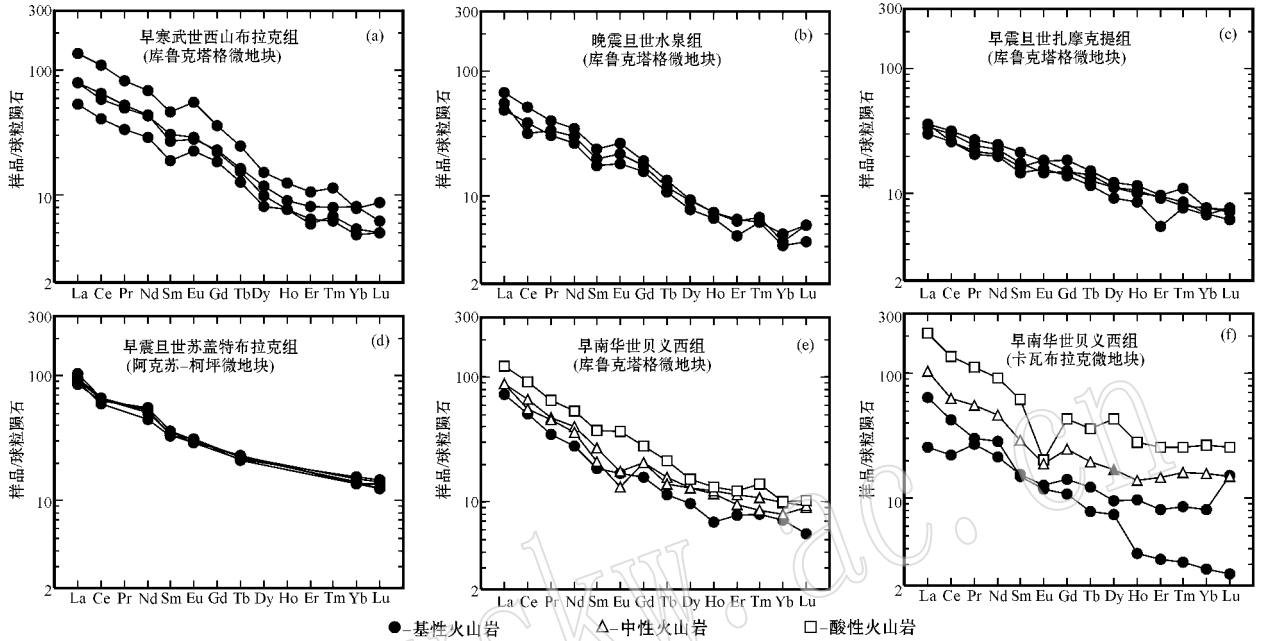


图3 天山地区新元古代—早寒武世火山岩的稀土元素分配型式(标准化值据 Boynton, 1984)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of Neoproterozoic-Early Cambrian volcanic rocks in Tianshan area (Normalizing values after Boynton, 1984)

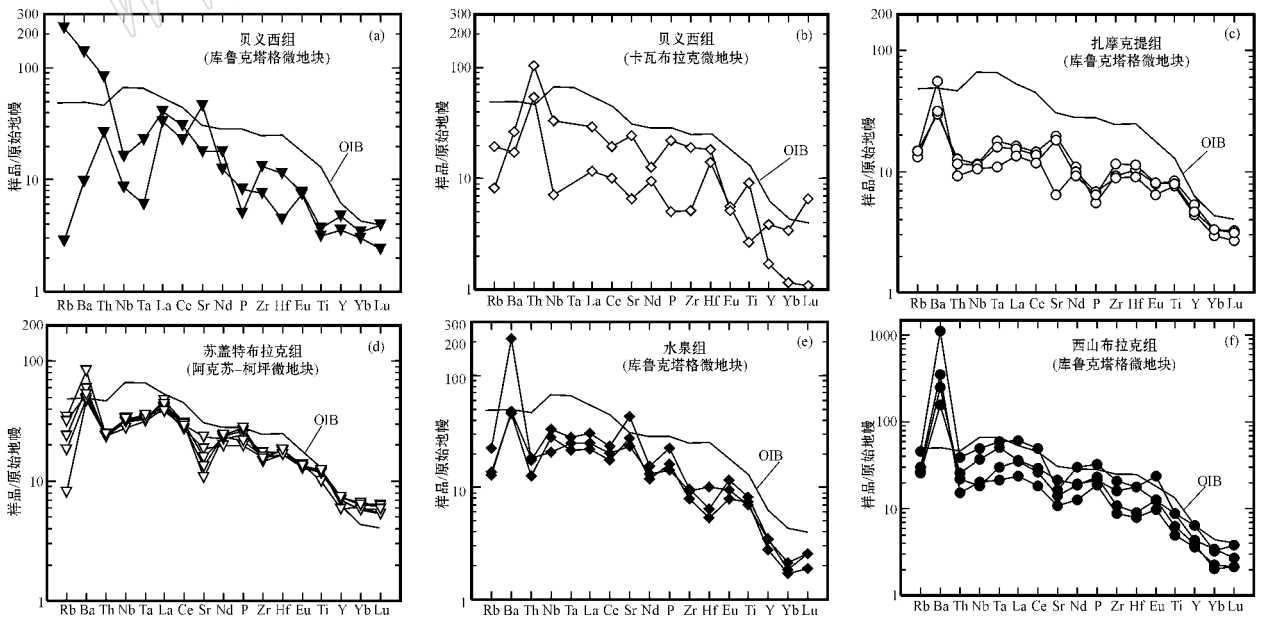


图4 天山地区新元古代—早寒武世基性火山岩多元素变异图(标准化值和平均洋岛玄武岩(OIB)成分据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 4 Diagrams of trace element variation patterns of Neoproterozoic-Early Cambrian basic lavas in Tianshan area (Normalizing values and average OIB composition after Sun and McDonough, 1989)

e、f)。其他一些微量元素的变化特点,会因岩组不同而出现些许差异。如:苏盖特布拉克组玄武岩的微量元素原始地幔标准化分配型式,除具有明显的 Th 负异常外,还存在明显的 Sr 负异常和弱的 Zr 负异常(图 4d);水泉组玄武岩的微量元素原始地幔标准化分配型式,除出现 Th 亏损外,还显示中等的 Ce、Nd 和 Zr-Hf 亏损(图 4e);西山布拉克组玄武岩的微量元素原始地幔标准化分配型式,除显示 Th 负异常外,还出现中等 Sr 和 Zr-Hf 负异常(图 4f)。第 2 类为位于中部层位的扎摩克提组(早震旦世)玄武岩,该类玄武岩的微量元素原始地幔标准化分配型式是以出现 Nb 相对于 Th 的轻微亏损(或轻微富集)及存在明显的 P、Eu 负异常为特征(图 4c)。位于下部层位的贝义西组(早南华世)玄武岩属于第 3 类,这一类玄武岩的微量元素原始地幔标准化分配型式均具有共同的 Nb、Ta 相对于 Th 强烈亏损的特点(图 4a、b)。

### 3.5 Sr、Nd 同位素比值变化特点

天山地区新元古代—早寒武世火山岩的同位素地球化学研究程度较低,迄今为止,仅本文对阿克苏—柯坪微地块上的早震旦世苏盖特布拉克组的 5 个碱性玄武岩样品进行过 Sr、Nd 同位素比值测定。<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 的测量值和年龄校正值列于表 2。前人(高振家,1985、1987)生物地层学研究表明苏盖特布拉克组形成于早震旦世,而苏盖特布拉克组火山岩又缺乏精确的同位素定年资料,因而采用全国地层委员会(2001)所确定的震旦系底界年龄 680 Ma 进行同位素年龄校正。由 εNd(t) - (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 相关图解(图 5)可以看出,虽然苏盖特布拉克组玄武岩的样品成分点靠近“地幔相关线”分布,但是,只有 1 个成分点 [εNd(t) = 3.58, (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> = 0.703 612] 落于洋岛玄武岩(OIB)范围内,其他 4 个成分点均向着 εNd(t) 值降低、(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 比值增高的方向漂移。

表 2 柯坪地区震旦纪苏盖特布拉克组火山岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 2 Sr, Nd isotopic composition of volcanic rocks from Early Sinian Sugaitibulake Formation in Keping area

样品号	样品名称	( <sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr) <sub>m</sub>	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>m</sub>	( <sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd) <sub>m</sub>	( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>m</sub>	εNd(t)	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>t</sub>	( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>t</sub>	t <sub>DM</sub>
L4B2	碱性玄武岩	0.081 220	0.710 232 ± 15	0.134 60	0.512 395 ± 14	0.66	0.709 444	0.511 795	1 452.54
L4B3-1	碱性玄武岩	0.131 400	0.704 887 ± 20	0.134 10	0.512 542 ± 10	3.58	0.703 612	0.511 944	1 163.48
L4B3-2	碱性玄武岩	0.088 220	0.707 985 ± 15	0.135 50	0.512 386 ± 10	0.41	0.707 129	0.511 782	1 486.61
L4B3-3	碱性玄武岩	0.175 000	0.708 767 ± 19	0.137 10	0.512 414 ± 7	0.81	0.707 069	0.511 802	1 462.15
L4B6	碱性玄武岩	0.058 090	0.707 204 ± 11	0.132 40	0.512 546 ± 16	3.80	0.706 640	0.511 955	1 131.78

注: t ( = 680 Ma ) 值为对 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值、<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值和 εNd 值做年龄校正时所采用的年龄值,测量值的误差表示到小数点后第 6 位。

## 4 讨 论

### 4.1 火山岩的形成环境

在微量元素构造环境判别图解(图 6)中,几乎所有玄武岩样品的成分点都落在板内玄武岩区域。此外,这些玄武岩的多元素原始地幔标准化分配曲线(图 4),也明显具有大陆板内玄武岩(包括大陆裂谷玄武岩和大陆溢流玄武岩)所特有的“大隆起”分配型式,只是下部层位的贝义西组玄武岩由于受到较强烈的地壳混染作用,才出现比较明显的 Nb、Ta 亏损。因此,笔者认为天山及其邻区新元古代—早寒武世火山岩形成于大陆板内环境。

前文已提及,根据地层学和沉积学研究,已有较多的学者认为,新疆北部天山两侧分布的诸多前寒武纪微陆块,在新元古代中晚期(南华纪—震旦纪)

至早寒武世早期,极有可能是一个统一的古超级大陆(即 Rodinia 超级联合古陆)的组成部分。也就是说,目前分布于天山及其邻区诸前寒武纪微陆块之上的新元古代—早寒武世裂谷火山岩系,在当时应当出于一个统一大陆的环境之中,只是在早寒武世之后,由于裂谷化的加剧,这个古大陆发生裂解,形成包括古亚洲洋在内的古劳亚大洋,而原有的古大陆被碎裂成许多小陆块散布于新生的大洋之中,在古亚洲洋消亡之后,它们当中没有参与洋壳消减被再循环到地幔之中的残余块体,又以新的方式相互拼接并被新生的陆壳所焊合。

### 4.2 火山岩岩石成因

地球上大多数大陆裂谷火山岩系的形成均与软流圈地幔(或地幔柱)有关。而且,几乎所有的大陆裂谷火山岩至少在其喷发序列中显示有岩石圈卷入的成分特点。



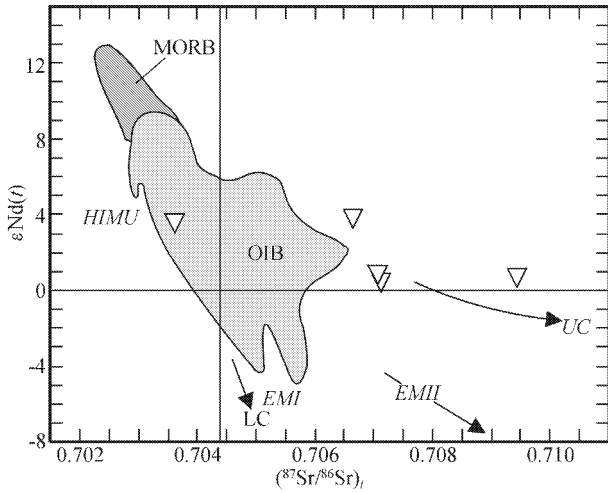


图 5 早震旦世苏盖特布拉克组基性火山岩  $\epsilon Nd(t)$  -  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  图解 (据 DePaolo, 1979; Zindler 和 Hart, 1986)

Fig. 5  $\epsilon Nd(t)$  versus  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  diagrams of basic volcanic rocks from Early Sinian Sugaitibulake Formation (After DePaolo, 1979; Zindler and Hart, 1986)

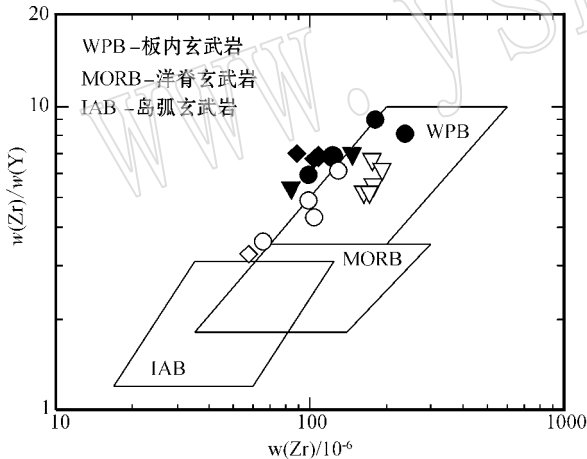


图 6 玄武岩类 Zr/Y - Zr 构造环境判别图 (据 Pearce, 1984 图例同图 2)

Fig. 6 Discrimination of tectonic setting of basalt (After Pearce, 1984, legend as for Fig. 2)

4.2.1 软流圈卷入的证据

在多种不相容元素图解 (图 7) 中, 可以看出天山及邻区新元古代—早寒武世裂谷基性熔岩成分投点范围相对于洋岛玄武岩 (OIB) 的区域。部分新元古代—早寒武世裂谷基性熔岩的成分点与 OIB 区域重叠, 表明它们之间在源区性质和深部形成过程上有某种共同点; 部分新元古代—早寒武世岩石相对于

OIB 具有较高的 La/Nb 比值和较低的 La/Ba 比值, 基性熔岩数据相对于 OIB 发生偏离, 表明它们并不是简单地一种似 OIB 软流圈地幔源。

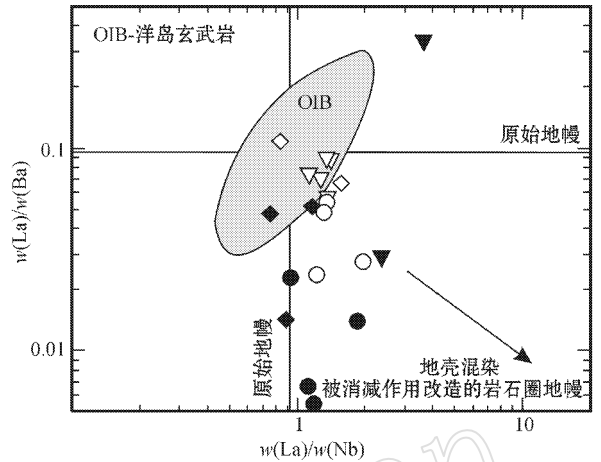


图 7 天山地区新元古代—早寒武世基性火山岩 La/Ba - La/Nb 图解

Fig. 7 La/Ba versus La/Nb diagrams of Neoproterozoic-Early Cambrian basic volcanic rocks in Tianshan area

软流圈 (或地幔柱) 组分是以低  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值和高  $\epsilon Nd$  值为特征 (Saunders *et al.*, 1992)。早震旦世苏盖特布拉克组的某些基性熔岩中已有似地幔柱组分 [ $\epsilon Nd(t) = 3.58$  ( $^{87}Sr/^{86}Sr)_t = 0.703612$ ] (表 2, 图 5) 这一组分子位于 OIB 的范围之内。

此外, 这套火山岩系上部层位的早震旦世苏盖特布拉克组、晚震旦世水泉组和早寒武世西山布拉克组裂谷基性熔岩微量元素的原始地幔标准化分配形式, 总体上与 OIB 相似 (图 5d, e, f), 它们的微量元素比值也绝大部分与 OIB 区域重叠 (图 7)。而且这 3 个岩组的基性熔岩的地幔标准化 Th/Nb 比值明显小于 1 (图 5d, e, f), 这也正是与地幔柱有关玄武岩的典型特征 (Saunders *et al.*, 1992)。因此天山及邻区新元古代—早寒武世裂谷玄武岩的形成中有软流圈或地幔柱组分卷入。

4.2.2 岩石圈卷入的证据

除了前面已经讨论过的软流圈或地幔柱组分之外, 在新元古代—早寒武世裂谷玄武岩中, 也有来自地壳和壳下岩石圈地幔参与的重要记录。

第 1 种组分是壳下岩石圈地幔 (CLM) 组分。它主要见于库鲁克塔格微地块早震旦世扎摩克提组的 2 个玄武岩样品 (KL<sub>16</sub>B<sub>1</sub>、KL<sub>16</sub>B<sub>2</sub>) 之中。根据微量元素地球化学特点, 此类玄武岩的原始地幔标准化 Th/Nb 比值略大于 1 (图 5c), 该比值既有别于前述

具有地幔柱特点的玄武岩的 $(Th/Nb)_N$ 比值( $<1$ )，也远远小于受到地壳混染的玄武岩的 $(Th/Nb)_N$ 比值(Saunders *et al.*, 1992)，后者的 $(Th/Nb)_N$ 比值大大地高于1(Saunders *et al.*, 1992)。此类玄武岩的微量元素原始地幔标准化分配型式显示了一种地幔柱源或软流圈源岩浆与岩石圈地幔间的相互作用，表明在岩浆形成过程中有岩石圈地幔卷入。

第2种组分是地壳组分。这种组分见于新元古代—早寒武世裂谷火山岩系下部层位贝义西组(早南华纪)玄武岩之中。该组分以高 $La/Nb$ 比值和高 $(Th/Nb)_N$ 比值为特征(图5a、b、图7)。特别应当指出，这些玄武岩具非常高的原始地幔标准化 $(Th/Nb)_N$ 比值，即该比值远大于1，说明岩浆在演化过程中发生了地壳混染，在它们的微量元素原始地幔标准化分配曲线上，出现十分明显且陡度很大的Nb-Ta负异常。

从上述可见，新元古代—早寒武世裂谷火山岩系下部层位南华纪贝义西组所有玄武岩均发生了地壳混染，早震旦世扎摩克提组火山岩部分发生了岩石圈地幔卷入，而早震旦世苏盖特布拉克组、晚震旦世水泉组和早寒武世西山布拉克组火山岩形成于软流圈地幔。很有可能，大陆拉张构造环境下火山作用早期阶段喷发的岩浆，由于要建立通往地表的通道，受岩石圈混染最为强烈，一旦通道建立，尔后喷出的岩浆在上升途中受岩石圈混染的程度就会降低。因此，受岩石圈混染最强的岩浆应当是产出于火山岩层序的下部。

## 5 结 论

(1)天山地区的新元古代—早寒武世玄武质熔岩可以分为拉斑玄武质和碱性玄武质两个主要岩浆系列。前者是早期(早南华世贝义西期、早震旦世扎摩克提期)喷发的火山岩系的主要组成；后者是晚期(早震旦世苏盖特布拉克组、晚震旦世水泉期、早寒武世西山布拉克期)喷发的火山岩系的主要组成。

(2)天山地区新元古代—早寒武世火山岩形成于大陆裂谷环境，它们可能是Rodinia超级古大陆裂解作用的深部地球动力学的地表响应，是古亚洲洋开启的前兆标志。

(3)天山地区新元古代—早寒武世大陆裂谷火山岩系极有可能是源于一种似洋岛玄武岩源的软流圈地幔柱源，在岩浆上侵喷发过程发生了岩石圈地

幔和地壳的混染；大陆拉张早期阶段喷发的岩浆，由于要建立通往地表的通道，受岩石圈混染最为强烈，一旦通道建立，尔后喷出的岩浆在上升途中受岩石圈混染的程度就会降低，受岩石圈混染最强的岩浆应当是产出于火山岩层序的下部。

## References

- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [C]. Elsevier 63~114.
- China Stratum Committee. 2001. China Stratum Companion and China Stratum Companion Explaining [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~59 (in Chinese).
- Depaolo D J and Wasserburg G J. 1979. Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43: 615~627.
- Fitton J G, James D and Leman W P. 1991. Basic magmatism associated with the late Cenozoic extension in the western United States: Compositional variations in space and time [J]. *Geoph. Res.*, 96: 13 693~13 711.
- Gao Zhenjia, Chen Jinbiao, Lu Songnian, *et al.* 1993. The Precambrian Geology in Northern Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~134 (in Chinese).
- Gao Zhenjia, Wang Wuyan, Peng Changwen, *et al.* 1985. The Sinian System of Xinjiang [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1~173 (in Chinese).
- Gao Zhenjia, Zhu Chengshun, *et al.* 1984. Precambrian Geology in Xingjiang [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1~103 (in Chinese).
- Gao Zhenjia, Wang Wuyan, Peng Changwen, *et al.* 1985. The Sinian System On Aksu-Wushl Region, Xinjiang, China [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1~55 (in Chinese).
- Gao Zhenjia and Chen Keqiang. 2003. The Nanhuan System of Xinjiang and some Geological Issues of Nanhuan System in China [J]. *Geological Survey and Research*, 26(1): 8~14 (in Chinese).
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Li Liangcheng, *et al.* 2001. Phanerozoic Eon Tectonic Evolution of The Easter in The South Tianshan [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1~60. (in Chinese).
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al.* 2001. Does it take a superplume to breakup a supercontinent?—a case for Rodinia [J]. *Geol. Soc. Aust. Abst.*, 65: 74~77.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, *et al.* 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. *Precam. Res.*, 122: 85~109.
- Liu Hongyun, *et al.* 1991. The Sinian System of China [M]. Beijing: Science Publishing House. 1~187 (in Chinese).
- Miyashiro. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites

- [J]. *Journal of Geology*, 83 :249~281.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle N G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Petrol.* 25 :956~983.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, *et al.* 1992. Consequences of plume-lithosphere interaction [A]. Storey B C, Alabaster T, Pankhurst R J. *Magmatism and the Causes of Continental Break-up* [C]. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, London, 68 :41~60.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and Processes [A]. Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. London: *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 42 :313~345.
- Sun Qingfeng. 2006. Thesidimentary environment and genesis of Middle Ordovician nodular limestone in Keping, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2):137~147 (in Chinese with English abstract).
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical descrimination of different magmas series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chem. Geol.*, 20 :325~344.
- Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, *et al.* 2002. Constraints on the timing of opening and closing of the Tinshan and Carboniferous volcanic rocks [J]. *Geological Bulletin China*, 21(2) 55~62. (in Chinese).
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, *et al.* 1991. *Tectonic Evolution of The Southern Margin of The Paleo-Asian Composite Megasuture* [M]. Beijing Scientific and Technical Publishing House, 109~124 (in Chinese).
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, *et al.* 1992. *Tectonic Evolution of The Northern Xinjiang And Its Adjacent Region* [M]. Beijing: Geological Publishing house, 1~157 (in Chinese).
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14 :493~571.

## 附中文参考文献

- 高振家, 陈晋镛, 陆松年, 等. 1993. 新疆北部前寒武系 [M]. 北京: 地质出版社, 1~134.
- 高振家, 陈克强. 2003. 新疆的南华系及我国南华系的几个地质问题——纪念恩师王日伦先生诞辰一百周年 [J]. *地质调查与研究*. 26(1) 8~14.
- 高振家, 王务严, 彭昌文, 等. 1985. 新疆阿克苏-乌什地区震旦系 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1~103.
- 高振家, 王务严, 彭昌文, 等. 1987. 新疆震旦系 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1~173.
- 高振家, 朱诚顺, 等. 1984. 新疆前寒武纪地质 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1~103.
- 姜常义, 吴文奎, 李良辰, 等. 2001. 南天山东段显生宙构造演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1~160.
- 刘鸿允, 等. 1991. 中国震旦系 [M]. 北京: 科学出版社, 1~187.
- 全国地层委员会. 2001. 中国地层指南及中国地层指南说明书 [M]. 北京: 地质出版社, 1~59.
- 孙庆峰. 2006. 新疆柯坪中奥陶统结核状灰岩的沉积环境及成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 25(2):137~147.
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 2002. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据 [J]. *地质通报*, 21(2) 54~62.
- 肖序常, 汤耀庆, 等. 1991. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1~29.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1~157.