

西天山阿吾拉勒地区二叠系塔尔得套组双峰式火山岩地球化学研究*

陈根文¹ 邓腾^{1,2} 刘睿^{1,2} 夏换^{1,2} 刘群^{1,2}

CHEN GenWen¹, DENG Teng^{1,2}, LIU Rui^{1,2}, XIA Huan^{1,2} and LIU Qun^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100039

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Gangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

2013-12-17 收稿, 2014-05-01 改回.

Chen GW, Deng T, Liu R, Xia H and Liu Q. 2015. Geochemistry of bimodal volcanic rocks in Permian Taerdetao Formation in Awulale area of western Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1):105–118

Abstract The Late Paleozoic is considered as an important stage during the evolution of the western Tianshan. In this paper, we report the petrology, geochemistry of Permian Taerdetao bimodal volcanic rocks to characterize the post-collisional tectonic evolution in Late Paleozoic. The volcanic rocks in Permian Taerdetao Formation at Awulale area comprise mainly of basalts, basaltic andesites and rhyolites. Their SiO₂ content varies from 49.1% ~ 76.0%, and exhibits a gap between 62.8% and 70.8%, display a good bimodal geochemical distribution. The basalts have high Ti, Nb (8.13×10^{-6} ~ 14.9×10^{-6}) and high field strength elements (HFSE), just like the characteristics of Nb-enriched basalts. The rhyolites are characterized by high SiO₂, K₂O + Na₂O, FeO^T, FeO^T/MgO, and low Al₂O₃, CaO and MgO, enriched Th, Nb, Ta, Zr, Hf, Ga and Y, with the geochemical affinity of A-type granite. Both the basalts and rhyolites are enriched in light rare earth elements (LREE) and large ion lithophile elements (LILE), and are depleted in HFSE. Basalts, basaltic andesites and rhyolites have positive $\varepsilon_{Nd}(t)$ values (0.05 ~ 2.72). Based on Nd isotopic compositions and contents of major and trace elements, we suggest that all basalts, basaltic andesites and rhyolites of Permian Awulale Formation were formed by partial melting of a mantle contaminated by delaminated lower crust. Basaltic andesites and rhyolites have mainly originated by fractionation of primary mafic melt coupled with contamination of continental crust. This bimodal volcanism indicated western Tianshan was in extension environment at Permian period. A-type granites in bimodal volcanic rocks can demonstrate that the North Tianshan Ocean was closed before Permian and entered the post-orogenic stage.

Key words Bimodal volcanic rocks; A-type granite; Nb-enriched basalt; Western Tianshan

摘要 西天山阿吾拉勒地区二叠系塔尔得套组火山岩由玄武岩、粗玄岩、玄武质粗安岩、流纹岩组成,其 SiO₂ 含量为 49.1% ~ 76.0%,在 62.8% ~ 70.8% 之间存在一明显的间断,显示出双峰式火山岩的特征。玄武岩具有较高的 Ti、Nb (8.13×10^{-6} ~ 14.9×10^{-6}) 及 HFSE 含量,表现出富铌玄武岩的特征。流纹岩含高的 SiO₂、K₂O + Na₂O、FeO^T、FeO^T/MgO、低 Al₂O₃、CaO 和 MgO,同时富集 Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Ga 和 Y 等 HFSE,具有 A 型花岗岩地球化学特征。玄武岩、玄武安山岩及流纹岩具有相似的钕同位素组成, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为 0.05 ~ 2.72。根据钕同位素和岩石主微量元素特征判断它们同形成于受到拆沉下地壳混染的亏损地幔部分熔融。玄武安山岩和流纹岩是玄武岩浆上升过程中受地壳物质的混染并在中地壳岩浆房内发生充分的岩浆结晶分异后形成的。本区塔尔得套组双峰式火山岩的存在说明阿吾拉勒地区在二叠纪处于伸展构造背景,而 A 型花岗质流纹岩的确定进一步肯定了该区处于碰撞后的伸展阶段,从而证明西天山地区在二叠纪时北天山洋已完全封闭,并开始进入碰撞后的伸展发育阶段。

关键词 双峰式火山岩; A 型花岗岩; 富铌玄武岩; 西天山

中图法分类号 P588.14

* 本文受国家 305 项目(2011BAB06B02-03)和国家自然科学基金项目(40773014)联合资助。

第一作者简介: 陈根文,男,1964 年生,博士,从事岩石学及矿床学研究, E-mail: chengw@gig.ac.cn

1 引言

长期以来,有关西天山地区的构造演化问题一直存在较大的争议。特别是围绕石炭-二叠纪时期该地区所处的构造背景及不同构造阶段形成的时间界限的讨论,分歧很大(肖序常等, 1992; 何国琦等, 1994; 高长林等, 1995; Xiao *et al.*, 2008, 2010; 肖文交等, 2006; 高俊等, 2006, 2009; Gao *et al.*, 2009; 韩宝福等, 2006; 李锦轶等, 2006; 李永军等, 2008, 2009a, b, 2010; Tang *et al.*, 2014)。因此正确认识和鉴定西天山地区早二叠世的构造背景对了解整个西天山地区石炭-二叠纪这段地质历史至关重要。虽然部分研究者已经注意到了区内早二叠世的地质问题,并开展了一些研究工作,如陈衍景等(2004a, b)和罗勇等(2011)对早二叠世艾肯达坂组高钾橄榄安粗岩系研究认为该套岩系形成于 260 ~

270Ma 之间,代表了碰撞晚期的伸展垮塌环境。韩宝福等(2006)、童英等(2010)系统分析了新疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩的特征及分布情况,认为这一时期碱性岩非常发育,可能揭示了不同构造背景下的伸展特点。一些学者(吴明仁等, 2006; 潘明臣等, 2011; 李鸿等, 2011)对西天山地区早二叠世乌郎组双峰式火山岩进行过研究。本文拟通过对西天山阿拉勒地区早二叠世塔尔得套组一套双峰式火山岩的研究,为探讨西天山晚古生代构造演化提供一些新的证据。

2 区域地质背景及岩石学特征

塔尔得套组时代属早二叠世,区域上分布在伊犁盆地北部的阿吾拉勒山一带(图 1)。地层在不同位置与下部的上石炭统东图津河组呈断层或不整合接触,其上被上二叠统晓山萨依组不整合覆盖。塔尔得套组为一套陆相火山熔岩及

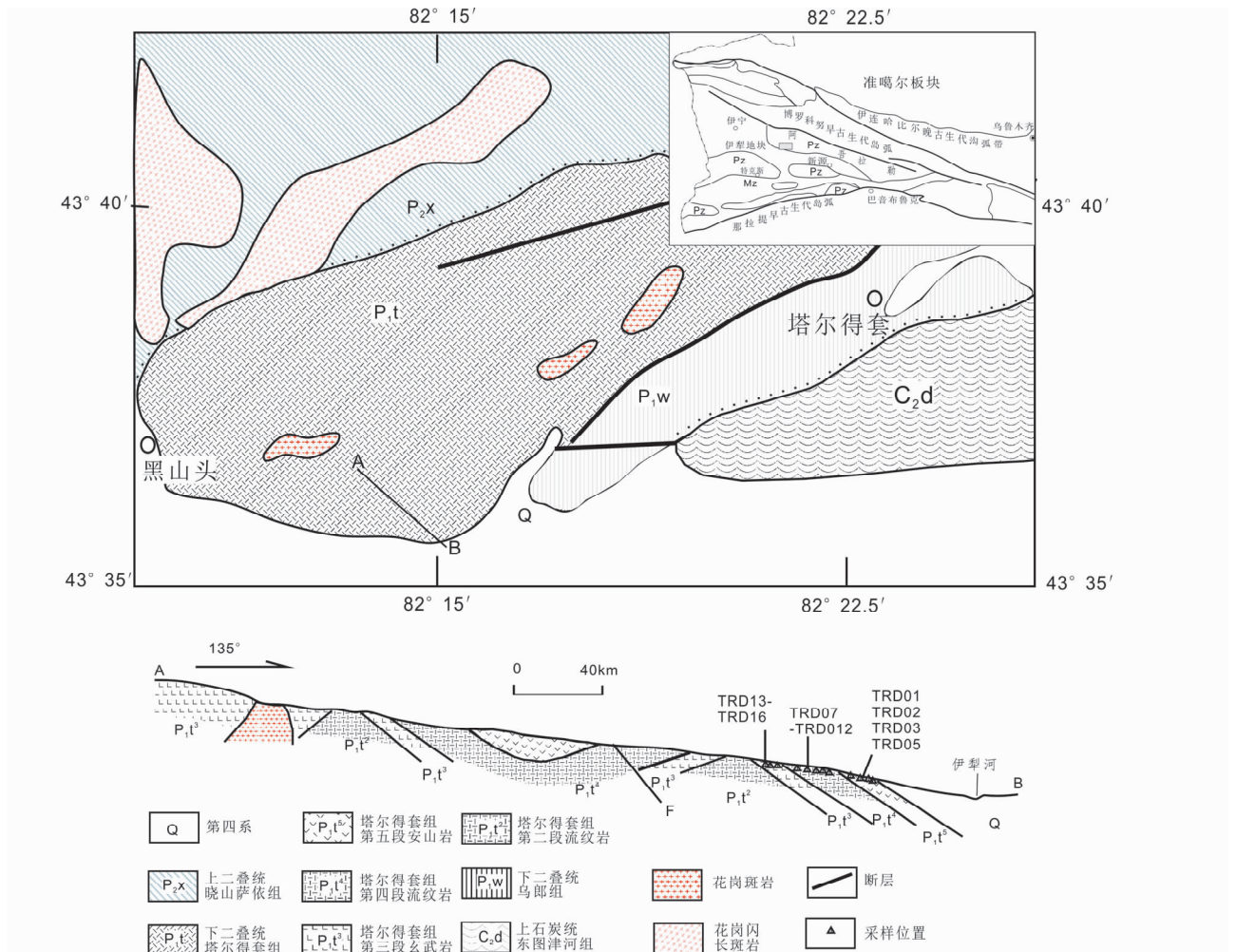


图 1 研究区早二叠世塔尔德组火山岩分布图(据新疆地矿局第九地质大队,1983^①改绘)

Fig. 1 Distribution of the Early Permian Taerdetao Formation volcanic rocks in the western Tianshan

① 新疆地矿局第九地质大队. 1983. 新疆伊犁阿吾拉勒山西段 1:5 地质矿产调查总结报告

碎屑岩组合,颜色以紫灰、紫红、暗紫色为主,具杏仁构造,岩石较新鲜,未受区域变质作用影响。塔尔得套组火山岩由基性火山岩与酸性火山岩呈韵律状分布。从下到上该组地层可分为五个岩性段:(1)砂砾岩玄武岩段(P_1t^1),由紫色凝灰质砂岩、粉砂岩、砾岩、玄武岩组成。最大厚度 250m。分布在塔尔得套-包尔斯坦坂一带;(2)下部钾质流纹斑岩段(P_1t^2),由灰紫色巨厚层状钾质流纹岩、含角砾熔岩、凝灰质细砂岩组成;(3)下部玄武岩段(P_1t^3)由玄武岩及凝灰质砂岩组成;(4)上部钾质流纹斑岩段(P_1t^4),由暗紫红色流纹斑岩、流纹岩及角砾岩组成;(5)上部玄武安山岩(P_1t^5),由灰紫色、暗灰绿色玄武安山岩组成,夹凝灰岩、角砾状凝灰岩及凝灰质砂岩。

本次研究的样品取自阿吾拉勒山西段新源县黑山头以东约 8km 处。该处发育有塔尔得套组第二至第五四个岩性段(图 1)。本次采样主要包括 P_1t^3 - P_1t^5 三套岩石,其中, P_1t^5 为玄武安山岩(样品号 TRD1-5), P_1t^4 为流纹岩(包括 TRD7-12 共 6 个样), P_1t^3 为玄武岩(包括 TRD13-16 号样)。

3 样品分析

主量和微量元素在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室测定。主量元素的测定采用 X 射线荧光光谱法(XRF),其过程大致如下:首先称取 0.7g 样品,然后加入适量硼酸高温熔融成玻璃片,最后在 XRF(仪器型号为 PANalytical AXIOS)上用外标法测定氧化物含量,氧化物总量分析误差为 1%~3%。微量元素测定采用等离子质谱(ICPMS)法:首先称取 50mg 样品,用酸溶样制成溶液,然后在 ICP-MS(仪器型号为 ELAN DRC-e)上用内标法进行测定,分析精度优于 10%。微量元素具体分析方法见 Qi *et al.* (2000)。

Sm-Nd 同位素分析在中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室测定。同位素用 TIMS(Thermo Fisher 公司 TRITON 质谱仪)分析, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 标准化,Nd 同位素国际标准样品 JNdi-1 测试值为 0.512096 ± 5 。分析方法参见李晓彪(2009)。

4 地球化学特征

阿吾拉勒地区二叠系塔尔得套组火山岩的主微量元素分析结果见表 1。

4.1 主量元素特征

从表 1 和岩石硅碱图(图 2)中可以看出,塔尔得套火山岩岩石组分表现出不连续分布, SiO_2 为 49.1%~76.0%,但在 62.8%~70.8% 之间存在一明显的间断,显示出双峰式火山岩的特征。特别是 P_1t^3 与 P_1t^4 两套岩石只有基性和酸性

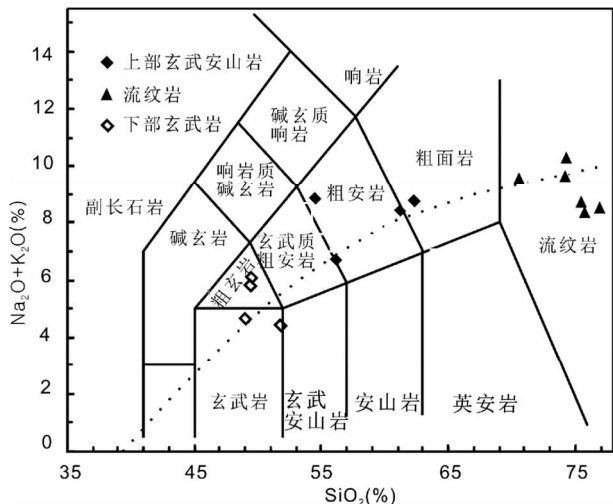


图 2 塔尔得套组火山岩硅碱图

图 4-图 10 图例同此图

Fig. 2 TAS plots of the bimodal volcanic rocks in the Taerdetao Formation

两端元组分。整套火山岩包括玄武岩、粗玄武岩、玄武质粗安岩、流纹岩。玄武岩(下面称下部玄武岩段)的 SiO_2 含量为 49.1%~51.8%, TiO_2 含量为 1.49%~1.70%,岩石中 Al_2O_3 含量为 16.4%~17.7%。玄武安山岩(下面称上部玄武安山岩段)的 SiO_2 含量为 54.3%~62.8%, TiO_2 含量为 1.22%~2.14%, Al_2O_3 含量为 13.4%~15.5%。玄武岩和玄武安山岩的 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$,碱含量较高,岩石属碱性系列。这两套火山岩在化学成分上存在一定差异。除 SiO_2 、 Al_2O_3 和 TiO_2 外,下部玄武岩二价铁含量明显高于上部玄武安山岩(FeO 的含量分别为 3.22%~5.90%和 1.25%~2.33%),可能形成更还原的环境。下部玄武岩还具有更高的 MgO (分别为 4.91%~5.73%和 1.04%~2.10%)和更低的碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 分别为 4.47%~6.11%和 6.83%~8.87%)。塔尔得套组酸性岩表现为高硅($\text{SiO}_2 = 70.8\% \sim 76.0\%$)、低铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.0\% \sim 12.8\%$)、钙($\text{CaO} = 0.07\% \sim 0.40\%$)、磷($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.01\% \sim 0.06\%$)、贫镁($\text{MgO} = 0.02\% \sim 0.10\%$)、相对富碱和高 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 值(22.3~105), $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO}) = 0.96 \sim 0.99$ 的特征,类似于典型的 A-型花岗岩的主量元素特征(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990)。

4.2 稀土元素特征

玄武岩和玄武安山岩的稀土总量(ΣREE)为 $122.7 \times 10^{-6} \sim 204.7 \times 10^{-6}$ 。在稀土元素球粒陨石标准化图上(图 3),两套火山岩的分布型式相似,其铕异常不明显($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.91 \sim 1.12$),都为右倾型。上部玄武安山岩的重稀土(HREE)含量明显高于下部玄武岩(其中 Yb 含量分别为 $4.56 \times 10^{-6} \sim 5.87 \times 10^{-6}$ 和 $3.36 \times 10^{-6} \sim 3.53 \times 10^{-6}$,表 1)。酸性火山岩的 ΣREE 含量较高,为 $159.3 \times 10^{-6} \sim 253.9 \times 10^{-6}$,

表1 阿吾拉勒地区二叠系塔尔得套组火山岩主量(wt%)、微量($\times 10^{-6}$)元素分析结果Table 1 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of the Early Permian volcanic rocks in Taerdetao Formation in Awulale area

样品号	TRD01	TRD02	TRD03	TRD05	TRD07	TRD08	TRD09	TRD10	TRD11	TRD12	TRD13	TRD14	TRD15	TRD16
SiO ₂	54.29	61.44	56.32	62.76	70.82	74.27	75.57	74.74	75.70	75.99	49.11	51.82	49.33	49.75
Al ₂ O ₃	15.46	13.51	13.44	15.16	12.82	12.04	11.99	12.33	12.03	12.07	17.71	16.38	16.50	16.63
Fe ₂ O ₃	8.01	6.83	5.71	3.74	4.98	2.35	2.26	2.13	2.17	2.25	4.81	5.85	8.98	8.34
FeO	1.50	1.25	2.33	2.27	0.33	0.16	0.16	0.48	0.20	0.16	5.90	4.31	3.22	3.60
MgO	1.04	1.14	2.10	1.92	0.05	0.10	0.03	0.02	0.02	0.03	5.73	4.97	4.91	5.05
CaO	4.90	3.16	5.59	1.98	0.31	0.07	0.34	0.08	0.40	0.33	7.18	8.24	6.15	5.53
Na ₂ O	5.48	4.19	4.60	4.79	2.78	0.65	3.07	1.99	2.59	3.09	3.35	2.94	4.37	4.15
K ₂ O	3.39	3.84	2.23	3.79	6.74	9.58	5.63	7.58	6.16	5.26	1.41	1.53	1.49	1.96
MnO	0.16	0.12	0.24	0.18	0.07	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.27	0.18	0.24	0.18
P ₂ O ₅	1.04	0.89	0.92	0.42	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.52	0.82	0.51	0.52
TiO ₂	2.14	1.83	1.90	1.22	0.28	0.13	0.14	0.15	0.13	0.13	1.56	1.49	1.70	1.70
LOI	2.38	1.75	4.38	1.65	0.50	0.38	0.47	0.27	0.44	0.51	2.45	1.38	2.53	2.53
Total	99.80	99.97	99.76	99.89	99.75	99.76	99.70	99.80	99.85	99.84	100.00	99.97	99.92	99.94
Mg [#]	0.18	0.22	0.34	0.38	0.02	0.07	0.03	0.02	0.02	0.02	0.50	0.48	0.44	0.45
Ba	555	652	548	932	357	509	215	371	302	337	425	466	499	457
Be	1.11	1.41	0.97	1.59	2.55	1.82	1.15	1.31	2.02	3.02	1.39	1.87	1.35	1.26
Co	15.6	25.9	22.9	15.7	24.0	24.9	66.7	42.0	28.6	36.6	44.1	34.6	47.0	47.5
Cr	5.50	6.60	11.2	0.70	7.00	1.50	2.00	1.50	5.00	3.30	86.9	62.1	72.2	79.9
Cu	19.2	9.75	8.09	5.39	5.25	1.75	1.68	2.47	2.35	2.01	22.3	19.4	9.65	20.2
Ga	17.3	17.4	17.5	18.9	17.5	13.9	17.6	17.7	20.9	20.1	21.3	20.9	21.0	21.0
Hf	5.72	4.64	4.17	7.52	8.19	9.62	10.4	10.2	9.87	9.12	3.45	4.83	4.02	3.82
Li	7.22	13.49	15.97	15.86	1.22	2.23	2.12	2.66	3.72	2.66	55.63	29.26	50.32	47.19
Nb	9.91	9.34	8.13	13.5	13.5	17.3	16.6	16.4	16.6	17.7	8.42	14.9	9.10	9.33
Ni	3.01	2.98	7.74	1.54	2.48	1.72	1.98	1.80	1.54	1.56	63.4	34.4	52.8	52.7
Pb	13.9	14.3	6.77	8.91	4.89	5.14	4.73	6.09	3.85	4.44	8.98	11.9	13.0	15.2
Rb	109	114	80.4	140	222	387	211	292	234	194	37.8	31.3	52.6	70.2
Sc	29.4	27.4	26.1	18.6	11.4	7.63	7.21	8.45	6.44	6.46	31.9	30.0	33.9	34.4
Sr	82.0	63.0	115	203	46.1	64.0	60.6	49.4	43.8	41.8	605	708	436	507
Ta	0.69	0.67	0.59	0.91	1.00	1.30	1.35	1.24	1.21	1.34	0.50	0.81	0.53	0.53
Th	6.29	5.93	6.64	8.77	15.03	18.16	17.07	17.80	18.44	18.93	2.92	3.26	1.23	1.43
U	2.23	2.41	1.94	2.67	4.34	5.26	4.01	4.33	4.66	4.90	0.80	1.02	0.54	0.57
Zn	286	300	484	344	34.8	11.1	6.77	11.8	14.6	20.2	146	123	194	145
Zr	261	213	202	386	414	455	481	503	453	434	165	257	174	180
La	23.9	22.8	26.7	20.6	34.0	30.2	33.1	28.9	49.3	29.2	20.7	38.3	20.5	19.1
Ce	57.2	55.7	62.0	51.5	67.7	51.8	72.3	60.4	99.9	62.9	45.1	81.4	45.0	42.1
Pr	8.36	7.92	8.92	7.46	9.02	7.42	7.48	7.15	11.6	8.13	6.11	10.10	6.13	5.73
Nd	38.1	35.6	40.7	33.6	38.2	28.7	28.2	27.7	45.4	32.9	26.2	40.5	26.7	25.4
Sm	9.07	8.50	10.98	8.48	8.61	5.78	5.43	5.41	9.17	7.66	5.90	7.79	6.16	5.83
Eu	3.29	3.30	3.51	2.62	0.56	0.24	0.27	0.25	0.30	0.25	1.88	2.30	1.96	1.88
Gd	9.89	9.54	11.79	8.76	9.39	5.98	4.97	5.05	8.42	8.62	5.91	7.20	6.38	6.15
Tb	1.67	1.55	1.95	1.56	1.65	1.22	0.87	0.94	1.53	1.81	0.99	1.13	1.09	1.05
Dy	10.3	9.35	11.5	9.78	10.5	8.95	5.63	6.71	10.0	12.3	6.15	6.61	6.63	6.35
Ho	2.10	1.84	2.15	1.96	2.19	2.10	1.25	1.63	2.13	2.64	1.21	1.26	1.30	1.27
Er	5.71	4.86	5.50	5.45	6.39	6.62	4.00	5.80	6.50	7.73	3.39	3.48	3.54	3.46
Tm	0.88	0.71	0.80	0.87	1.04	1.13	0.70	1.02	1.05	1.25	0.50	0.52	0.52	0.53
Yb	5.87	4.56	5.07	5.63	7.12	8.02	4.99	7.69	7.50	8.37	3.36	3.53	3.38	3.39
Lu	0.88	0.70	0.76	0.85	1.12	1.23	0.81	1.26	1.13	1.28	0.51	0.53	0.49	0.50
Y	50.1	44.0	57.9	46.5	56.8	47.9	34.5	39.4	54.0	66.0	29.3	31.0	31.2	30.5
ΣREE	177.1	166.9	192.2	159.0	197.4	159.3	169.9	159.8	253.9	185.0	127.9	204.7	129.7	122.7
(Gd/Yb) _N	1.36	1.69	1.88	1.26	1.06	0.60	0.80	0.53	0.91	0.83	1.42	1.65	1.52	1.46
(La/Nb) _N	2.50	2.54	3.40	1.59	2.61	1.81	2.07	1.82	3.08	1.72	2.55	2.67	2.33	2.12

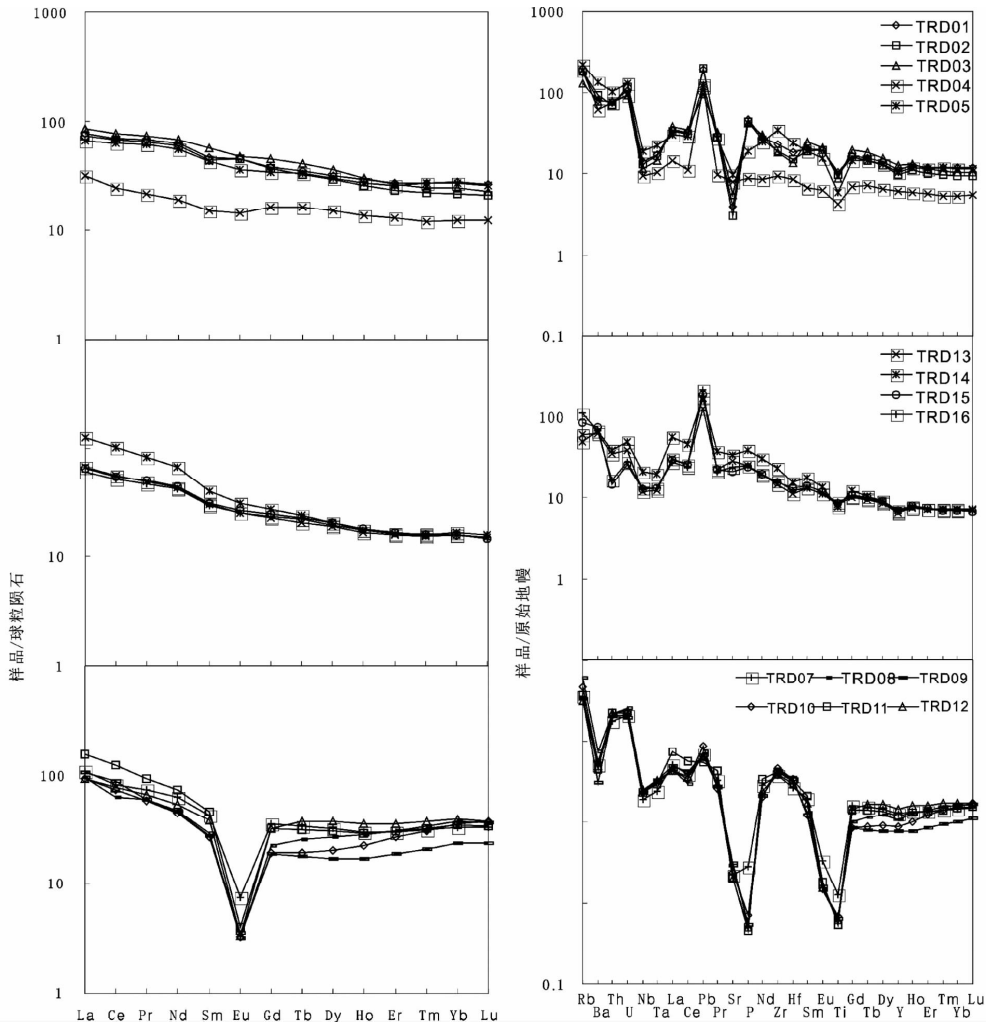


图3 塔尔得组火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化值据 Boynton, 1984)及微量元素标准化蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns (normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (normalization values after Sun and McDonough, 1989) of the volcanic rocks in Taerdetao Formation

具有明显的负铕异常 ($Eu/Eu^* = 0.09 \sim 0.27$) (图3), 其分布型式为海鸥型, 反映酸性火山岩受到斜长石分异的影响。中到重稀土元素分异不明显, 在稀土元素模式图上表现为MREE亏损, 重稀土元素呈较平坦的分布, $(Gd/Yb)_N$ 比值在1~2之间, 表明分异过程受到了角闪石的控制, 源区或结晶分异过程中残余有角闪石。

4.3 微量元素特征

基性火山岩与酸性火山岩在微量元素地球化学方面的具有明显的差异(表1)。在微量元素蛛网图上, 上下两套基性岩大离子亲石元素(LILE)和高场强元素(HFSE)含量较高, 玄武岩 Nb 的含量在 $8.13 \times 10^{-6} \sim 14.9 \times 10^{-6}$ 之间。 $(La/Nb)_{PM}$ 介于 1.59 ~ 3.40 之间。但两者也具有一定的差异, 在蛛网图上表现为在 Pb 之前, 两者具有相似的分布型式, 但在 Pb 之后因为上部玄武安山岩亏损 Sr 和 Ti 明显不

同。玄武安山岩 Sr、P 和 Ti 的亏损可能表明岩浆曾在低压下经历过斜长石、磷灰石和尖晶石等的结晶分异。在微量元素蛛网图上(图3), 酸性火山岩表现出 Sr、Ba、Eu、Ti 和 P 等元素严重亏损, 与 A 型花岗岩相似。基性岩与酸性岩均表现为 Nb 和 Ta 亏损。但与酸性岩相比, 基性、中基性火山岩明显富集 U 和 Pb。

4.4 Sm-Nd 同位素组成

本区岩石中由于岩浆岩强烈演化具有很高的 Rb 含量, 最后得到的 Sr 同位素比值失去成因意义, 这里只列出了 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值(表2), 初始同位素比值按 270Ma 进行校正。两套基性岩具有比较一致的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(0.05 ~ 2.72), 可能两者均来源于略为亏损的上地幔。流纹岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 2.01 ~ 2.59, 与基性岩的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值相近。

表2 塔尔得套组火山岩钕同位素比值特征

Table 2 Nd isotopic compositions of the volcanic rocks in Taerdetao Formation

样品号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}(\pm\sigma)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
TRD04	2.95	11.34	0.15845	0.512582 \pm 0.000004	0.23
TRD05	8.48	33.55	0.15395	0.512702 \pm 0.000002	2.72
TRD07	8.61	38.15	0.13746	0.512645 \pm 0.000002	2.18
TRD08	5.78	28.67	0.12279	0.512621 \pm 0.000002	2.22
TRD10	5.41	27.73	0.11883	0.512633 \pm 0.000002	2.59
TRD13	5.90	26.19	0.13721	0.512636 \pm 0.000002	2.01
TRD14	7.79	40.50	0.11715	0.512500 \pm 0.000002	0.05
TRD15	6.16	26.74	0.14031	0.512628 \pm 0.000002	1.75
TRD16	5.83	25.41	0.13974	0.512641 \pm 0.000003	2.02

5 讨论

5.1 双峰式火山岩的成因

双峰式火山岩按流纹岩与玄武岩的同源关系有两种成因认识:一是流纹岩和玄武岩具有共同的幔源母岩浆,流纹岩是经玄武质岩浆结晶分异作用形成的,其中只有少量或没有陆壳物质的加入(Grove and Donnelly-Nolan, 1986; MacDonald, 1987)。一般认为,岩浆的分离结晶作用只产生成分连续变化的岩浆系列。但在某些情况下,分离结晶作用也可以产生双峰式火山岩组合(MacDonald, 1987; Chung *et al.*, 1997; 李献华等, 2002)。低压下(0.1~0.2GPa)钙碱性系列岩浆的分离结晶作用,由于岩浆房中普通辉石+斜方辉石的大量沉淀,引起残留岩浆中SiO₂含量、挥发份和其它因素的迅速变化,可导致流纹质残余熔体的形成,从而形成双峰式组合(Grove and Donnelly-Nolan, 1986; Brophy, 1991)。这种来源相同的玄武岩和流纹岩一般具有相似的微量元素和Nd同位素特征(Brouxel *et al.*, 1987; Hochstaedter *et al.*, 1990; Geist *et al.*, 1998)。但生成的流纹岩比玄武岩要少得多。双峰式火山岩另一种成因观点认为流纹岩和玄武岩可分别来自不同的母岩浆,二者虽然在空间上共生,但其源区并不相同,两者的共生可能只是与同一热事件有关。例如,由地幔部分熔融形成的热的基性岩浆侵入到冷的地壳岩石中,使地壳岩石发生部分熔融,从而产生酸性岩浆。基性岩浆和酸性岩浆的交替喷出即形成双峰式火山岩。这种流纹岩的露出面积通常比玄武岩要大得多(Hildreth, 1981; Doe *et al.*, 1982; Davies and MacDonald, 1987; Huppert and Sparks, 1988)。由于这种基性岩浆和酸性岩浆来源不同,生成的玄武岩和流纹岩在微量元素和Sr、Nd、Pb同位素组成上就有很大的差异(Doe *et al.*, 1982; Davies and MacDonald, 1987),这也是判别双峰式火山岩成因的重要依据。

5.1.1 基性火山岩的成因

一般认为双峰式火山岩中的基性岩来自地幔。研究区内的下部玄武岩和上部玄武安山岩具有相近的较高的Nd同位素组成,同时两套岩石具有相似的稀土分布型式,说明两

者具有相似的源区,推测均来自略亏损地幔区。如上所述,上部玄武安山岩与下部玄武岩相比,仍表现出一些不同的地球化学特征,比如,岩石具有更高的SiO₂和Na₂O+K₂O,更低的MgO、Al₂O₃,而且岩石主微量元素含量变化也大。在微量元素方面玄武安山岩明显贫Sr、Ba、P和Ti,富Th和U。其特征介于下部玄武岩与流纹岩之间。地质上,常用性质相近的元素比值来讨论岩浆岩形成的源区差异,如Nb和Ta, Th和Ta等。本区塔尔得套火山岩下部玄武岩(TRD13-16)的Nb/Ta比值为16.9至18.4,落在原始地幔值(17.5 \pm 2)范围内。而上部玄武安山岩(TRD1-5)的Nb/Ta比值为13.7~15.5,介于原始地幔与大陆地壳的值(平均11)之间,可能指示前述的亏损地幔源区或者幔源岩浆在上升过程中受到过地壳物质的混染。同样,本区P₁t³内的下部玄武岩Th的含量较低,Th/Ta比值为2.32~5.88,接近于原始地幔中的Th/Ta比值(~2.3, Sun and McDonough, 1989)。但在上部玄武安山岩中,Th/Ta比值变化较大,从8.79到14.88,高于原始地幔中的Th/Ta比值,而与上地壳UCC的10及陆内初始裂谷的10相近。Th是流体不活动元素,Th的富集与俯冲流体的加入无关,而更可能是地壳物质加入引起的。这一变化同样可能说明地幔源区物质或地幔源的岩浆受到来自地壳物质的混染。

本区塔尔得套组的玄武岩普遍具有较高的Nb含量,同时TiO₂(1%~2%)、P及HFSE含量也较高,HFSE特别是Nb的含量明显高于N-MORB、IAB(分别为3.1 $\times 10^{-6}$ 和0.7 $\times 10^{-6}$; Sun, 1980),而低HREE含量,与富铌玄武岩相似(Sajona *et al.*, 1993)。夏林圻等(2008)和Xia *et al.* (2004)提出在石炭-二叠纪时期,西天山一带存在一个大火成岩省,认为这套双峰式火山岩就是大火成岩省的一部分。从Nb、Ta和Ti含量看,这套岩石确实与LIPs玄武岩有些相似。但LIPs和板内玄武岩往往具有正Nb、Ta异常,如埃塞俄比亚溢流玄武岩(Mohr, 1983)。本区玄武岩虽然Nb、Ta含量较高,但与一些典型的OIB(平均Nb、Ta含量分别为53 $\times 10^{-6}$ 和3 $\times 10^{-6}$; Sun, 1980)及LIPs玄武岩(如肯尼亚裂谷Nb含量为20 $\times 10^{-6}$ ~91 $\times 10^{-6}$; Rogers *et al.*, 2000)相比仍然较低,并且在微量元素蛛网图上研究区内的玄武岩仍表现出明显的负异常,与OIB型玄武岩或与LIPs玄武岩标志性的Nb、Ta正异常不同,而与一些岛弧玄武岩相似。另外OIB通常具有稳定的Nb/U和Ce/Pb比值,分别为47 \pm 10和25 \pm 5(Hofmann *et al.*, 1986)。而本区玄武岩的Nb/U和Ce/Pb比值分别为10.5 $\times 10^{-6}$ ~16.9 $\times 10^{-6}$ 和2.77 $\times 10^{-6}$ ~6.85 $\times 10^{-6}$,远低于OIB。因此这套玄武岩更可能为一套富铌玄武岩。

世界范围内的富铌玄武岩常常与埃达克岩紧密共生。同样地,本区广泛发育有二叠纪埃达克岩(熊小林等, 2001)。目前学术界普遍认为富铌玄武岩是来源于70~100km深处、主要形成于岛弧环境,是由受俯冲板片熔融产生的埃达克熔体交代过的地幔楔橄榄岩部分熔融形成的(Defant *et al.*,

1992; Defant and Drummond, 1993)。但问题是本区无论是在空间上还是时间上都不具备俯冲板片熔融的条件。从空间上讲,本区埃达克岩普遍分布的阿吾拉勒地区离当时的俯冲带(以巴音沟蛇绿岩为代表)的水平距离至少超过 150km(还未考虑后期陆陆碰撞产生的地壳缩短)。从时间上看,整个新疆地区的板块俯冲碰撞在早石炭世末已经结束(Gao *et al.*, 2009; 熊小林等, 2001),阿吾拉勒埃达克质英安岩和钠长斑岩形成于早二叠世,显然不可能是洋壳俯冲的产物。学术界曾经讨论过富铌的玄武岩形成的几个可能途径:(1)类似于 OIB 源区的富集地幔部分熔融;(2)地壳物质的混染;(3)俯冲带之上、受埃达克岩浆交代地幔楔的部分熔融。前面已经讨论过本区玄武岩不可能是类似于 OIB 的地幔源区熔融的产物,同时也不存在俯冲板片,基本上排除了第(1)、(3)两种可能性。另外,从本区玄武岩的正的钕同位素比值及主要样品 Th/Ta 比值和 Th/Ta 比值与原始地幔相近看,玄武岩很少或没有受到地壳物质的混染。因此本区富铌玄武岩可能是通过其它途径形成的。世界各地富铌玄武岩与埃达克岩共生的事实说明,两类岩石之间存在成因上的联系。在解释岛弧区富铌玄武岩与埃达克岩共生时比较普遍的观点是富铌玄武岩是受埃达克质岩浆交代的地幔部分熔融形成。虽然本区在二叠纪时并不存在俯冲板片的证据,但是否可能是由其它非板片熔融产生的埃达克岩浆的交代地幔后形成?我们认为这种可能性是存在的。熊小林等(2001)认为阿吾拉勒地区二叠埃达克岩为底侵玄武质下地壳熔融形成。显然底侵玄武岩部分熔融产生的岩浆不可能向下交代地幔物质的。但从本区埃达克岩部分具有较高的 MgO 含量和较低 SiO₂ 含量(分别为 1.96%~2.00% 和 63.3%~64.9%,本人未发表资料)看,这些埃达克岩非常类似于王强等(2004)报道的铜山口下地壳拆沉作用形成的埃达克岩。这种拆沉的底侵玄武岩在地幔中部分熔融形成的埃达克质岩浆时,除了石榴石和辉石作为残留相外,金红石也是常见的残留相,因此,埃达克质熔体通常具有 Nb、Ti 的负异常,而残余物质则富集 Nb、Ti。在抬升软流圈加热及岩石圈伸展减薄减压双重作用下,亏损地幔与这些残余物质混合后发生部分熔融就可能形成富铌的玄武质岩浆。

5.1.2 酸性火山的成因

塔尔得套组流纹岩具有较高的 SiO₂、K₂O + Na₂O、FeO^T、FeO^T/MgO,低 Al₂O₃、CaO 和 MgO 同时富集 Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Ga 和 Y 等 HFS,表现在稀土配分图上为呈 Eu 亏损的燕式分布,在微量元素标准化图上显示出 Ba、Nb-Ta、Sr-P 和 Ti 的亏损,与 A 型花岗岩具有相似的地球化学特征(张旗和李承东,2012;张旗等,2012)。所有样品在 10000Ga/Al-Zr 图上均落在 A 型花岗岩区(图 4),同样说明这套流纹岩具有 A 型花岗岩的特征。锆石是花岗质岩浆体系中较早结晶的副矿物,其晶体能够在很长的地质时间上保持稳定,锆石中 Zr 的分配系数对温度极度敏感,而其他因素对其影响较小,锆石饱和温度可近似代表花岗质岩石近液相线的温度,可用来估

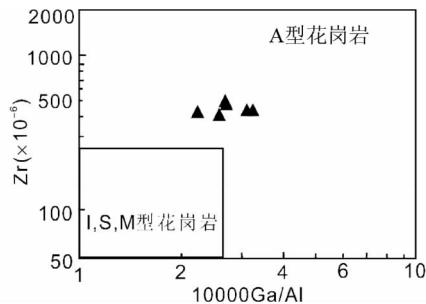


图 4 A 型花岗岩判别图(底图据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 4 10000Ga/Al-Zr diagram (after Whalen *et al.*, 1987)

算岩浆结晶温度。根据下述公式来计算锆饱和温度(Watson and Harrison, 1983): $T_{Zr} = 12900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496.000 / Zr_{melt})]$,其中 $D_{Zr}^{Zircon/melt}$ 是锆元素在锆石和岩浆中浓度的比值, T 为开氏温度(K), M 是阳离子含量比值,由 $(Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)$ 计算得出。根据流纹岩的主微量元素含量计算得的成岩温度(除一个样品为 498℃ 与地质实际事实不符外)在 834~869℃ 之间,说明岩浆形成于较高的温度条件,这与 A 型花岗岩形成于较高的温度条件一致。

多数学者认为大部分 A 型花岗质岩浆起源于幔源物质占支配地位的源区(Turner *et al.*, 1992; Bonin *et al.*, 2004; Jahn *et al.*, 2004)。但学术界仍然有地幔来源的镁铁质岩浆分离结晶、地幔镁铁质岩浆与地壳岩浆混合、下地壳麻粒岩部分熔融、底侵的 I 型英闪质地壳重熔、玄武质岩石部分熔融及下地壳 I 型岩浆结晶分异等不同认识(许保良等, 1998)。

阿吾拉勒地区二叠纪塔尔得套组双峰式火山岩中流纹岩含相对较低的放射性同位素, $\epsilon_{Nd}(t)$ 在 2.18~2.59 之间,与另外两套玄武岩和玄武安山岩一致,说明流纹岩与塔尔得套组下部玄武岩和上部玄武安山岩可能具有相同的来源。另外,在 Nb-Ta 和 Nb-U 图上(图 5),玄武安山岩与流纹岩样品分布在一条演化线上。同样在 Zr-Zr/Sm、Th-Ti/Zr 和 Hf-Hf/Sm 图解上(图 6),玄武安山岩与流纹岩均分布在同一条岩浆演化线上,说明两者是通过结晶分异形成的。一般认为基性岩结晶形成的流纹岩体积较小,这与本区流纹岩含量较少是一致的。与玄武岩相比,流纹岩具有相对较低的 Nb/Ta 比值(12.3~13.7)和 Th/Ta 比值(12.7~15.2),与上部玄武安山岩相似,也说明流纹岩和玄武岩可能为玄武质岩浆在上升过程中受到过地壳物质的混染。这种特征与土耳其 Galatean 火山岩省内的双峰式火山岩相似(Varol *et al.*, 2014)。

本区流纹岩属高度演化的岩浆岩,地球化学上表现出很低的 Ba 和 Sr 丰度、极强的负 Eu 异常以及很高 Rb/Sr 比值,所有这些都要求其母岩浆在上升过程中经历过大量的长石分离结晶作用。从微量元素蛛网图(图 3)贫 Ba 富 Pb 的分布特征来看这些交代组分应该是沉积物熔体而不是板片流体,因为在来自俯冲板片的交代组分中流体富 Ba 而沉积物

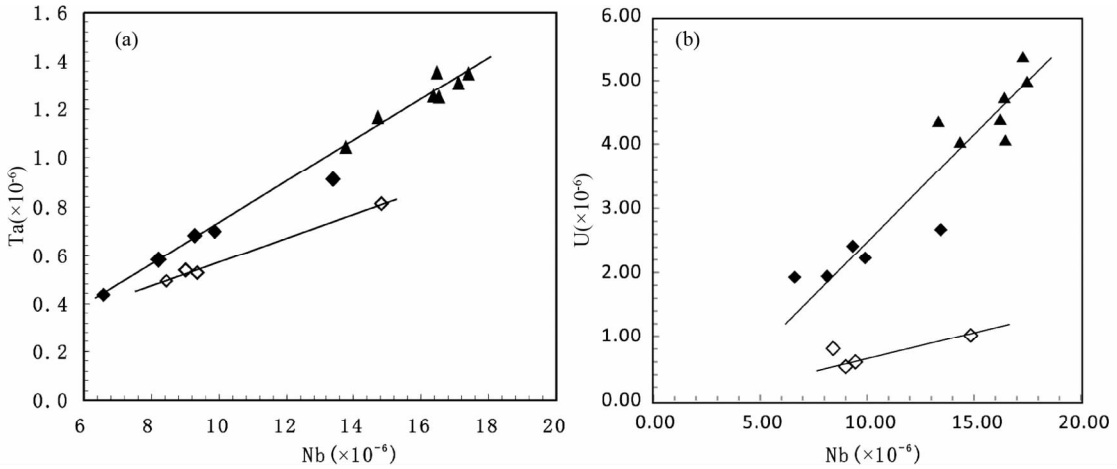


图5 塔尔得套组火山岩 Nb-Ta 和 Nb-U 关系图

Fig. 5 Covariation diagrams of Nb vs. Ta and Nb vs. U of the volcanic rocks in Taerdetao Formation

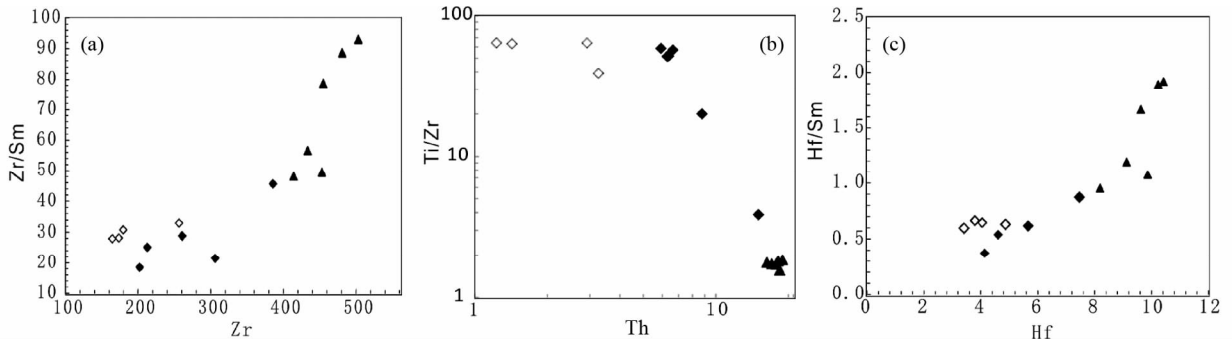


图6 Zr-Zr/Sm、Th-Ti/Zr 和 Hf-Hf/Sm 图解

Fig. 6 Zr vs. Zr/Sm, Th vs. Ti/Zr and Hf vs. Hf/Sm diagrams

熔体高度富 Pb。Goodenough *et al.* (2010) 指出早期受到俯冲组分交代富集的大陆下岩石圈地幔是碰撞后 A 型花岗岩的有利源区, 这些交代组分是沉积物熔体。

Ti/Yb 和 Nb/Th 比值可以很好的反映幔源性岩浆受地壳物质的混染, 将本区三类火山岩样品投到 Ti/Yb-Nb/Th 相关图上 (图 7), 该图可以较好地反映三类岩石的演化过程。图中玄武岩样品主要落在大陆岩石圈地幔附近, 部分样品可能受到过地壳物质的混染。上部玄武安山岩可能为大陆岩石圈地幔来源的岩浆在上升过程中受到中地壳物质混染后的产物。而流纹岩则是受地壳混染的玄武安山岩结晶分异形成。这种解释能够很好地解释前面提到的这几类岩石的地质地球化学特征。我们可以用这样一个模式来总结本区双峰式火山岩的形成: 在早二叠世, 阿吾拉勒地区岩石圈由于加厚失稳导致岩石圈拆沉并发生伸展作用, 拆沉的下地壳物质部分熔融形成具有埃达克质特征的岩浆, 留下富 Nb、Ta、Ti 和 Hf 等 HFSE 的残余物混入到地幔中。岩石圈的伸展作用使软流圈物质上隆导致上地幔地温梯度升高而压力降低使地幔发生部分熔融产生玄武质岩浆。这些岩浆在上升过程中, 一部分直接喷出地表形成下部玄武岩, 另一部

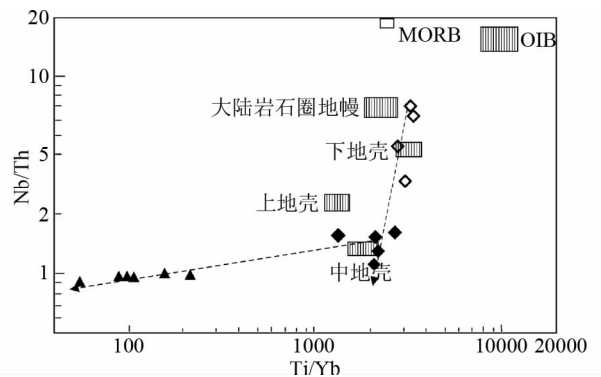


图7 塔尔得套组火山岩的 Ti/Yb-Nb/Th 图解 (底图据李献华等, 2002)

Fig. 7 Plot of Ti/Yb vs. Nb/Th of the volcanic rocks in Taerdetao Formation (after Li *et al.*, 2002)

分岩浆侵入到中地壳形成一个“双扩散”岩浆房 (MacDonald, 1987), 并与地壳物质反应。受地壳物质混染的岩浆在岩浆房通过结晶分异和重力作用分离形成两套性质不同的岩浆, 下部形成中基性的玄武安山质岩浆, 上部形成具 A 型花岗岩

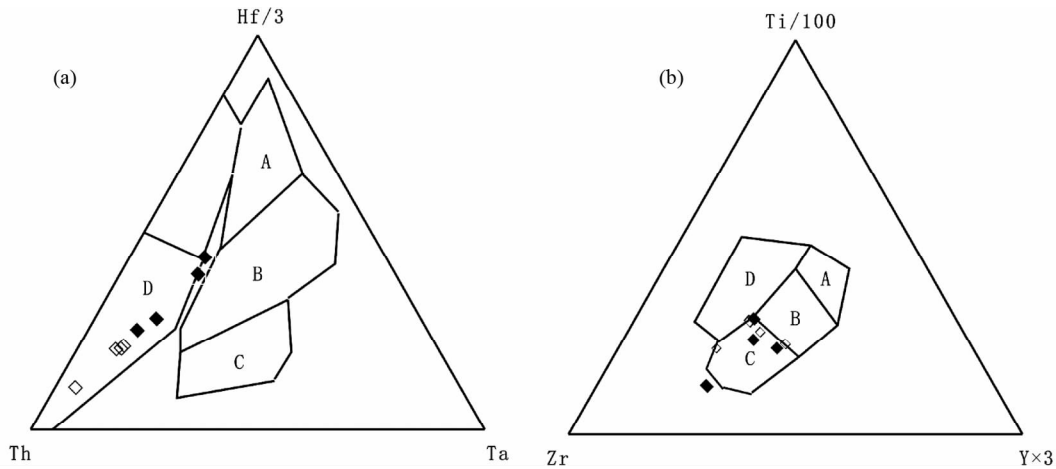


图8 塔尔得套火山岩的 Hf-Th-Ta 判别图解(a, 据 Wood, 1980) 及 Ti-Zr-Y (b, 底图据 Pearce and Cann, 1973)

图(a)中:A-N-MORB, B-E-MORB, C-碱性板内玄武岩, D-火山弧玄武岩, 其中 $Hf/Th > 3$ 为岛弧拉斑玄武岩, $Hf/Th < 3$ 为钙碱性玄武岩; 图(b)中:A-岛弧拉斑玄武岩, B-MORB、岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩, C-钙碱性玄武岩, D-板内玄武岩

Fig. 8 Hf-Th-Ta (a, after Wood, 1980) and Ti-Zr-Y (b, after Pearce and Cann, 1973) discriminant diagrams of the volcanic rocks in Taerdetao Formation

特征的酸性岩浆。酸性岩浆由于高度分异, 随着斜长石、角闪石及磷灰石、尖晶石等副矿物分离出来而形成具 A 型花岗岩特征的岩浆。这些岩浆在构造作用下喷出地表, 上面的酸性岩浆喷发形成流纹岩, 下面的中基性岩浆喷发形成上部的玄武安山岩。

5.2 构造意义

天山造山带的形成与演化一直存在争论。特别是古亚洲洋消亡的时间问题一直存在不同的观点:(1) 早石炭世晚期-晚石炭世(高俊等, 2006; Gao *et al.*, 2009; 熊小林等, 2001; Zhu *et al.*, 2009; 陈衍景等, 2004a, b; 罗勇等, 2010; 李永军等, 2008, 2009a, 2010); (2) 早二叠世(肖序常等, 1992; 李继亮, 1989); (3) 三叠纪(肖文交等, 2006; 李曰俊等, 2005; 张立飞等, 2005; Tang *et al.*, 2014)。在塔里木盆地北缘的柯坪与库车地区和伊犁盆地内都发现有二叠纪陆相红色磨拉石普遍发育。这些磨拉石建造呈带状平行于天山造山带展布。与此相对应, 早二叠世红色磨拉石还广泛发育于准噶尔盆地及博格达山北麓的乌鲁木齐一带。说明从早二叠世开始天山地区处于快速的隆升阶段, 这一阶段可能是陆-陆碰撞的时期。

本区早二叠统塔尔得套组双峰式岩的存在说明其形成于典型的伸展构造背景(钱青和王焰, 1999; 王焰等, 2000)。这样的伸展构造背景可以包括大陆裂谷带、大陆减薄区、碰撞后伸展环境、与俯冲有关的洋内岛弧、活动陆缘和弧后盆地(Hochstaedter *et al.*, 1990)。根据阿吾拉勒二叠纪的区域地质情况, 本区在早二叠不存在洋内岛弧的其它证据, 因为区域内的二叠系地层出现大量的红色磨拉石及紫色的火山岩, 显示该区处于陆相氧化环境, 同时这一时期至今

未发现岛弧侵入岩, 因此可以初步排除洋内岛弧和弧后盆地几种情况。另外, 前人也有人认为在西天山地区存在石炭-二叠纪的大陆裂谷, 但大陆裂谷火山通常具有较高的 TiO_2 含量及 Nb、Ta 正异常, 这与本区火山岩的地球化学特征不一致。利用基性火山岩的构造环境图解可以帮助我们判别岩石形成的构造环境。塔尔得套组基性火山岩在 Hf-Th-Ta 判别图解(图 8a)、Ti-Zr-Y 图解(图 8b)中投点均落在钙碱性玄武岩区。再结合流纹岩的构造差别图解, 可以较好地限制岩石的形成环境。在 $\lg(Y + Nb) - \lg Rb$ 判别图(图 9a)上样品投在碰撞后或板内构造环境内, 再根据 R1-R2 图解(图 9b)进一步分析, 样品落在非造山向造山后的过渡区。将地球化学判别图与区内双峰式火山岩的分布及前面的分析综合起来, 我们基本上可以判断塔尔得套组火山岩形成于造山后的伸展区。

本区塔尔得套组 A 型花岗质流纹岩的存在有助于进一步限制区域构造背景。A 型花岗岩可以分为 A1 型和 A2 型两个亚类(或 AA, PA, 洪大卫等, 1995), 其中 A1 型花岗岩形成于板内伸展阶段, 主要与地幔热柱活动有关的裂谷环境, 源区物质可能是亏损地幔和富集地幔的混合物。A2 型花岗岩与板块俯冲有关的物质参与, 通常形成于后碰撞或后造山的张性构造环境(Eby, 1992; Clemens *et al.*, 1986; Whalen *et al.*, 1987)。本区流纹岩在 $Y/Nb - Rb/Nb$ 图(图 10a)、 $Nb - Y - 3Ga$ (图 10b) 和 $Nb - Y - Ce$ 图上(图 10c)均落在 A2 型花岗岩区, 指示流纹岩形成于碰撞后的伸展阶段。

近来, 西天山及周边地区报道了多处形成于晚古生代的 A 型花岗岩(韩宝福等, 2006; 童英等, 2010), 如西准噶尔北部恰其海岩体形成年龄为 280Ma(靳松等, 2010)、达巴特岩体的侵位年龄为 288.9 ± 2.3 Ma(唐功建等, 2008)、东准噶尔大加山碱性花岗岩年龄为 284 ± 1 Ma(毛启贵等, 2008)、

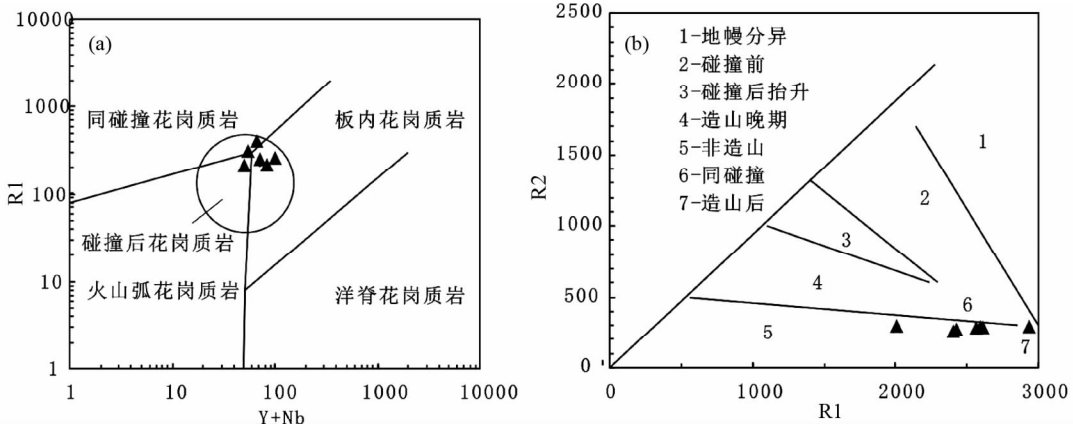


图9 $\lg(Y+Nb)$ - $\lg Rb$ (a, 据 Pearce *et al.*, 1984)和 $R1$ - $R2$ (b, 据 Batchelor and Bowden, 1985)判别图

Fig. 9 $\lg(Y+Nb)$ vs. $\lg Rb$ (a, after Pearce *et al.*, 1984) and $R1$ vs. $R2$ (b, after Batchelor and Bowden, 1985) discriminant diagrams

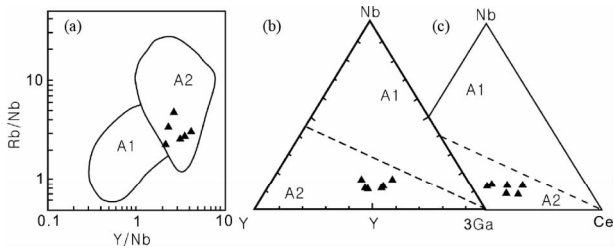


图10 A型花岗岩分类图(据 Eby, 1992)

Fig. 10 Plots of the volcanic rocks in Taerdetao Formation in Y/Nb vs. Rb/Nb , Nb - Y - $3Ga$ and Nb - Y - Ce (after Eby, 1992)

贝勒库都克含锡黑云母正长花岗岩年龄为 $283 \pm 2Ma$ (李永军等, 2009b; 杨高学等, 2010), 西南天山巴雷公钾长花岗岩形成年龄为 $273.4 \pm 2Ma$ (王超等, 2007), 这些 A 型花岗岩和碱性花岗岩大都集中出现在晚石炭-早二叠世, 说明新疆北部在晚石炭-早二叠时期普遍存在造山期后的伸展作用。

综上所述, 本区塔尔得套组双峰式火山岩的存在说明阿吾拉勒地区在二叠纪时期处于伸展构造背景, 而 A 型花岗质流纹岩的确定进一步肯定了该区处于碰撞后的伸展阶段, 从而有力地证明西天山地区在二叠纪时北天山洋已完全封闭, 并开始进入碰撞后的伸展发育阶段。

6 结论

阿吾拉勒地区二叠统塔尔得套组火山岩具双峰式分布特征, 整套火山岩包括玄武岩、玄武安山岩、流纹岩。其玄武岩普遍具有较高的 Nb 含量, 为富铌玄武岩, 形成于受到拆沉下地壳混染的亏损地幔部分熔融。玄武安山岩是玄武质岩浆在上升过程中, 及侵入到中地壳岩浆房后与地壳物质混染

并发生结晶分异形成。流纹岩具有 A 型花岗岩地球化学特征, 是由玄武安山岩在岩浆房内结晶分异形成的。本区塔尔得套组双峰式火山岩的存在说明阿吾拉勒地区在二叠纪时期处于伸展构造背景, 而 A 型花岗质流纹岩的确定进一步肯定了该区处于碰撞后的伸展阶段, 从而证明西天山地区在二叠纪时北天山洋已完全封闭, 并开始进入碰撞后的伸展发育阶段。

致谢 本文在完成过程中得 305 办公室的大力支持; 主、微量元素和钕同位素分析得到中国科学院地球化学研究所的胡小燕、李晓彪高级工程师的帮助; 两位审稿人提出了非常宝贵的修改意见; 在此一并深表谢意。

References

- Batchelor RA and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chem. Geol.*, 48(1-4): 43-55
- Bonin B, Ethien R, Gerbe MC, Cottin JY, Féraud G, Gagnevin D, Giret A, Michon G and Moine B. 2004. The Neogene to Recent Rallier-du-Baty nested ring complex, Kerguelen Archipelago (TAAF, Indian Ocean): Stratigraphy revisited, implications for cauldron subsidence. In: Breikreuz C and Petford N (eds.). *Physical Geology of High-Level Magmatic Systems*. Geological Society, London, Special Publications, 234: 125-149
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63-114
- Brophy JG. 1991. Composition gaps, critical crystallinity, and fractional crystallization in orogenic (calc-alkaline) magmatic systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 109(2): 173-182
- Brouxel M, Lapierre H, Michard A and Albarède F. 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: Geochemistry of the Copley-Balaklala series, northern California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 85(4): 386-400
- Chen YJ, Bao JX, Zhang ZJ, Liu YL, Chen HY, Cai WJ and Helmstaedt H. 2004a. Tectonic setting and element geochemistry of the Aikendaban Formation volcanic rocks in West Tianshan. *J. Mineral.*

- Petrol. , 24(3) : 36 - 45 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Liu YL, Bao JX, Zhang ZJ, Chen HY, Cai WJ and Helmstaedt H. 2004b. Isotopic dating for the volcanic rocks of the Aikendaban Formation in West Tianshan, China, and its tectonic implication. *J. Mineral. Petrol.* , 24(1) : 52 - 55 (in Chinese with English abstract)
- Chung SL, Chen H, Jahn BM, O'Reilly SY and Zhu BQ. 1997. Major, trace element and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China Sea opening. *Lithos*, 40(2-4) : 203 - 220
- Clemens JD, Holloway JR and White AJR. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. *American Mineralogist*, 71(3-4) : 317 - 324
- Davies GR and MacDonald R. 1987. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-comendite complex: Combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints. *J. Petrol.* , 28(6) : 1009 - 1031
- Defant MJ, Jackson TE, Drummond MS, de Boer JZ, Bellon H, Feigenson MD, Maury RC and Stewart RH. 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: An overview. *Journal of the Geological Society*, 149(4) : 569 - 579
- Defant MJ and Drummond MS. 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21(6) : 547 - 550
- Doe BR, Leeman WP, Christlansen RL and Hedge CE. 1982. Lead and strontium isotopes and related trace elements as genetic tracers in the Upper Cenozoic rhyolite-basalt association of the Yellowstone plateau volcanic field. *J. Geophys. Res.* , 87(B6) : 4785 - 4806
- Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1-2) : 115 - 134
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7) : 641 - 644
- Gao CL, Cui KR, Qian YX, Liu B, Ding DG and Yin Y. 1995. Microplate Tectonics in the Tianshan and the North Tarim Basin. Beijing: Geological Publication House, 1 - 265 (in Chinese)
- Gao J, Long LL, Qian Q, Huang D, Su W and Klemd R. 2006. South Tianshan: A Late Paleozoic or a Triassic orogen? *Acta Petrologica Sinica*, 22(5) : 1049 - 1061 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Long LL, Klemd R, Qian Q, Liu DY, Xiong XM, Su W, Liu W, Wang YT and Yang FQ. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan Orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6) : 1221 - 1238
- Gao J, Qian Q, Long LL, Zhang X, Li JL and Su W. 2009. Accretionary orogenic process of western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12) : 1804 - 1816 (in Chinese with English abstract)
- Geist D, Howard KA and Larch P. 1998. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation: The basalt-rhyolite association at Volcán Alcedo, Galápagos Archipelago. *J. Petrology* , 36(4) : 965 - 982
- Goodenough KM, Thomas RJ, De Waele B, Key RM, Schofield DI, Bauer W, Tucker RD, Kafahatelo JM, Rabrیمانana M, Ralison AV and Randriamananjara T. 2010. Post-collisional magmatism in the central East African orogen: The Maevarano suite of North Madagascar. *Lithos*, 116(1-2) : 18 - 34
- Grove TL and Donnelly-Nolan JM. 1986. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake volcano, California: Implications for the origin of compositional gaps in calc-alkaline series Lavas. *Contrib. Mineral. Petrology* , 92(3) : 281 - 302
- Han BF, Ji JQ, Song B *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continent arc crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5) : 1077 - 1086 (in Chinese)
- He GQ, Li MS, Liu DQ *et al.* 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, Hong Kong: The Hong Kong Cultural Education Publishing House, 1 - 437 (in Chinese with English abstract)
- Hildreth W. 1981. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *J. Geophys. Res.* , 86(B11) : 10153 - 10192
- Hochstaedter AG, Gill JB, Kusakabe M, Newman S, Prinle M, Taylor B and Fryer P. 1990. Volcanism in the Sumisu Rift I: Major element, volatile, and stable isotope geochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 100(1-3) : 179 - 194
- Hofmann AW, Jochum KP, Seufert M *et al.* 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1-2) : 33 - 45
- Hong DW, Wang SG, Han BF *et al.* 1995. The tectonic environment classification and identifying features of the alkali granite. *Science in China (Series B)* , 25(4) : 418 - 426 (in Chinese)
- Huppert HE and Sparks RSJ. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *J. Petrol.* , 29(3) : 599 - 624
- Jahn BM, Capdevila R, Liu DY, Vernon A and Badarch G. 2004. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5) : 629 - 653
- Jiang N, Zhang SQ, Zhou WG and Liu YS. 2009. Origin of a Mesozoic granite with A-type characteristics from the North China craton: Highly fractionated from I-type magmas? *Contrib. Mineral. Petrology* , 158(1) : 113 - 130
- Jin S, Zhang ZY, Chen ZB, Yang HB, Yang JJ and Kang GJ. 2010. Geochemical characteristics, geochronology and tectonic implications of A-type granite from Qiaqihai intrusion in Jeminay County, Xinjiang. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(6) : 803 - 812 (in Chinese with English abstract)
- Li H, Zhou JB, Hu KL, Li YJ and Jin Z. 2011. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Wulang Formation volcanic rocks in the Awulake area of western Tianshan. *Xinjiang Geology*, 29(4) : 381 - 384 (in Chinese with English abstract)
- Li JL. 1989. The Junggar backarc remnant basin and its tectonic relationship to the Tianshan Orogenic belt. *Journal of Sedimentology*, (Suppl.) : 112 - 120
- Li JY. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China. *Geological Review*, 50(3) : 304 - 322 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, He GQ, Xu XX *et al.* 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1) : 148 - 168 (in Chinese)
- Li XB. 2009. Sr-Nd-Pb isotope determination of standard samples of thermal ionization mass spectrometry (TIMS). *Acta Mineralogica Sinica*, 29(Suppl.) : 609 - 610 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou HW, Li ZX and Liu Y. 2002. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanics in western Sichuan and its tectonic implications: Geochemical and Sm-Nd isotopic constraints. *Chinese Journal of Geology*, 37(3) : 264 - 276 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Sun LD, Wu HR, Wang GL, Yang CS and Peng GX. 2005. Permo-Carboniferous radiolaria from the Wupatarkan Group, west terminal of Chinese South Tianshan. *Chinese Journal of Geology*, 40(2) : 220 - 226 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Zhang TJ, Luan XD, Wang XG, Yang GX and Tong LM. 2008. Clarification of Late Paleozoic unconformities in the Tekes Daban area of West Tianshan and its geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(2) : 145 - 153 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Yang GX, Wu HE, Si GH, Jin Z and Zhang YZ. 2009a. The determination of Beilekuduke aluminous A type granites in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(1) : 17 - 25 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Yang GX, Zhang TJ, Luan XD and Wang XG. 2009b. Definition of the major fold episode Shanshan Movement in Yining massif, western Tianshan Mountains, and its geological significance.

- Advances in Earth Science, 24(4): 420–428 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Li ZC, Tong LL, Gao ZH and Tong LM. 2010. Revisit the constraints on the closure of the Tianshan ancient oceanic basin: New evidence from Yining block of the Carboniferous. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2905–2912 (in Chinese with English abstract)
- Luo Y, Niu HC, Shan Q, Yang WB, Zhang B, Zhou CP, Liao SP and Yu XY. 2010. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Aikendaban Permian shoshonite in the western Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2925–2934 (in Chinese with English abstract)
- MacDonald R. 1987. Quaternary peralkaline silicic rocks and caldera volcanoes of Kenya. In: Fitton JG and Upton BGJ (eds.). *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society, London, Special Publications, 30: 313–333
- Mao QG, Xiao WJ, Han CM *et al.* 2008. Late Paleozoic south-ward accretionary polarity of the eastern Junggar orogenic belt: Insight from the Dajishan and other A-type granites. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 733–742 (in Chinese with English abstract)
- Mohr P. 1983. Ethiopian flood basalt province. *Nature*, 303(5918): 577–584
- Pan MC, Yu HF, Liang YW, Wang FJ, Wang FL, Ding W, Li Y, Li HM, Zhao LJ and Xu GY. 2011. Geochemistry of volcanic rocks of the Lower Permian Wulang Formation in Wulasitai area, Xinjiang. *Geology and Resources*, 20(6): 452–457 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19(2): 290–300
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25(4): 956–983
- Qi L, Hu J and Grégoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507–513
- Qian Q and Wang Y. 1999. Geochemical characteristics of bimodal volcanic suites from different tectonic settings. *Geology Geochemistry*, 27(4): 29–32 (in Chinese with English abstract)
- Qian Q, Gao J, Xiong XM, Long LL and Huang DZ. 2006. Petrogenesis and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from North Zhaosu, western Tianshan Mountains: Constraints from petrology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1307–1323 (in Chinese with English abstract)
- Rogers N, MacDonald R, Fitton JG, George R, Smith M and Barreiro B. 2000. Two mantle plumes beneath the East African rift system; Sr, Nd and Pb isotope evidence from Kenya Rift basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 176(3–4): 387–400
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H *et al.* 1993. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 21(11): 1007–1010
- Sigurdsson H. 1977. Generation of Icelandic rhyolites by melting of plagiogranites in the oceanic layer. *Nature*, 269(5623): 25–28
- Sun SS. 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 297(1431): 409–445
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tang GJ, Chen HH, Wang Q *et al.* 2008. Geochronological age and tectonic background of the Dabate A-type granite pluton in the West Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 947–958 (in Chinese with English abstract)
- Tang GJ, Chung SL, Wang Q, Wyman DA, Dan W, Chen HY and Zhao ZH. 2014. Petrogenesis of a Late Carboniferous mafic dike-granitoid association in the western Tianshan: Response to the geodynamics of oceanic subduction. *Lithos*, 202–203: 85–99
- Tong Y, Wang T, Hong DW, Han BF, Zhang JJ, Shi XJ and Wang C. 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619–641 (in Chinese with English abstract)
- Turner SP, Foden JD and Morrison RS. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2): 151–179
- Varol E, Temel A, Yürür T, Gourgaud A and Bellon H. 2014. Petrogenesis of the Neogene bimodal magmatism of the Galatean volcanic province, Central Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 280: 14–29
- Wang C, Liu L, Luo JH *et al.* 2007. Late Paleozoic post collisional magmatism in the southwestern Tianshan orogenic belt: Take the Baleigong pluton in the Kokshal region as an example. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1830–1840 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Bai ZH, Wang JX and Liu CX. 2004. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (Delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 351–360 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Qign Q, Liu L and Zhang Q. 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 169–173 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 64(2): 295–304
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Miner. Petrology*, 95(4): 407–419
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50(1): 11–30
- Wu MR, Lou FS, Song ZR, Xiao XL, Ling LH and Cheng CH. 2006. Tectonic setting and geochemistry of the Wulang Formation in Taeretao, West Tianshan. *Journal of East China Institute of Technology*, 29(3): 217–224 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC *et al.* 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 116(3): 419–433
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2008. Petrogenesis of Carboniferous-Early Permian rift-related volcanic rocks in the Tianshan and its neighboring areas, northwestern China. *Northwestern Geology*, 41(4): 1–68 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Lin SF, Li ZL, Mao QG, Zhang JE, Sun S and Li JL. 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1062–1076 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen HL, Li JL and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 102–117
- Xiao WJ, Huang BC, Han CM *et al.* 2010. A review of the western part of the Altai: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. *Gondwana Research*, 18(2–3): 253–273
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM *et al.* 1992. *Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions*. Beijing: Geological Publishing House, 1–171 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH, Mei HJ, Xu JF and Wang Q. 2001.

- Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 514–522 (in Chinese with English abstract)
- Xu BL, Yan GH, Zhang C *et al.* 1998. Petrological subdivision and source material of A-type granites. *Earth Science Frontiers*, 5(3): 113–124 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Si GH, Wu HE and Jin Z. 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age, Geochemistry and genesis of the aluminous A-type granite in Beilekuduke, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1759–1769 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LF, Ai YL, Li Q, Li XP, Song SG and Wei CJ. 2005. The formation and tectonic evolution of UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1029–1038 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q and Li CD. 2012. Granites: Implications for Continental Geodynamics. Beijing: Ocean Press, 5–12 (in Chinese)
- Zhang Q, Ran H and Li CD. 2012. A-type granite: What is the essence? *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621–626 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Xuan G, Song B, Zhang LF and Gu LB. 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains Xinjiang, NW China. *Journal of the Geological Society*, 166(6): 1085–1099
- 附中文参考文献**
- 陈衍景, 鲍景新, 张增杰, 刘玉琳, 陈华勇, 蔡文俊, Helmstaedt H. 2004a. 西天山艾肯达坂组火山岩系的元素地球化学特征和构造环境. *矿物岩石*, 24(3): 36–45
- 陈衍景, 刘玉琳, 鲍景新, 张增杰, 陈华勇, 蔡文俊, Helmstaedt H. 2004b. 西天山艾肯达坂组火山岩系同位素定年及其构造意义. *矿物岩石*, 24(1): 52–55
- 高长林, 崔可锐, 钱一雄, 刘斌, 丁道桂, 殷勇. 1995. 天山微板块构造与塔北盆地. 北京: 地质出版社, 1–265
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 黄德志, 苏文, Klemd R. 2006. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? *岩石学报*, 22(5): 1049–1061
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 张喜, 李继磊, 苏文. 2009. 西天山的增生造山过程. *地质通报*, 28(12): 1804–1816
- 韩宝福, 季建清, 朱彪等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5): 1077–1086
- 何国琦, 李茂松, 刘德权等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 香港: 香港文化教育出版社, 1–437
- 洪大卫, 王式洸, 韩宝福等. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志. *中国科学(B辑)*, 25(4): 418–426
- 靳松, 张兆祯, 陈志彬, 杨红宾, 杨进京, 康贵军. 2010. 新疆吉木乃县恰其海 A 型花岗岩的地球化学特征、年代学及构造意义. *地球学报*, 31(6): 803–812
- 李鸿, 周继兵, 胡克亮, 李永军, 金朝. 2011. 西天山阿吾拉勒地区下二叠统乌郎组火山岩地球化学特征及构造环境. *新疆地质*, 29(4): 381–384
- 李继亮. 1989. 准噶尔弧后残余盆地与天山造山带大地构造关系. *沉积学报*, (增刊): 112–120
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. *地质论评*, 50(3): 304–322
- 李锦轶, 何国琦, 徐新等. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. *地质学报*, 80(1): 148–168
- 李晓彪. 2009. 热电离质谱(TIMS)的 Sr-Nd-Pb 同位素标样测定. *矿物学报*, 29(增刊): 609–610
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖. 2002. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和 Sm-Nd 同位素制约及其大地构造意义. *地质科学*, 37(3): 264–276
- 李曰俊, 孙龙德, 吴浩若, 王国林, 杨朝世, 彭更新. 2005. 南天山西端乌帕塔尔坎群发现石炭-二叠纪放射虫化石. *地质科学*, 40(2): 220–226
- 李永军, 张天继, 栾新东, 王小刚, 杨高学, 佟黎明. 2008. 西天山特克斯达坂晚古生代若干不整合的厘定及地质意义. *地球学报*, 29(2): 145–153
- 李永军, 杨高学, 吴宏恩, 司国辉, 金朝, 张永智. 2009a. 东准噶尔贝勒库都克铝质 A 型花岗岩的厘定及意义. *岩石矿物学杂志*, 28(1): 17–25
- 李永军, 杨高学, 张天继, 栾新东, 王晓刚. 2009b. 西天山伊宁地块主褶皱幕部善运动的确立及地质意义. *地球科学进展*, 24(4): 420–428
- 李永军, 李注苍, 佟丽莉, 高占华, 佟黎明. 2010. 论天山古洋盆关闭的地质时限——来自伊宁地块石炭系的新证据. *岩石学报*, 26(10): 2905–2912
- 罗勇, 牛贺才, 单强, 杨武斌, 张兵, 周昌平, 廖思平, 于学元. 2010. 西天山艾肯达坂二叠纪钾质火山岩的地球化学特征及岩石成因. *岩石学报*, 26(10): 2925–2934
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明等. 2008. 东准噶尔地区晚古生代向南增生: 来自 A 型花岗岩的启示. *岩石学报*, 24(4): 733–742
- 潘明臣, 于海峰, 梁有为, 王福君, 王粉丽, 丁伟, 李艳, 李红梅, 赵丽君, 徐桂岩. 2011. 新疆吾拉斯台一带下二叠统乌郎组火山岩地球化学特征. *地质与资源*, 20(6): 452–457
- 钱青, 王焰. 1999. 不同构造环境中双峰式火山岩的地球化学特征. *地质地球化学*, 27(4): 29–32
- 钱青, 高俊, 熊贤明, 龙灵利, 黄德志. 2006. 西天山昭苏北部石炭纪火山岩的岩石地球化学特征、成因及形成环境. *岩石学报*, 22(5): 1307–1323
- 唐功建, 陈海红, 王强等. 2008. 西天山达巴特 A 型花岗岩的形成时代与构造背景. *岩石学报*, 24(5): 947–958
- 童英, 王涛, 洪大卫, 韩宝福, 张建军, 史兴俊, 王超. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 619–641
- 王超, 刘良, 罗金海等. 2007. 西南天山晚古生代后碰撞岩浆作用: 以阔克萨彦岭地区巴雷公花岗岩为例. *岩石学报*, 23(8): 1830–1840
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. *岩石学报*, 20(2): 351–360
- 王焰, 钱青, 刘良, 张旗. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征. *岩石学报*, 16(2): 169–173
- 吴明仁, 楼法生, 宋志瑞, 肖晓林, 凌联海, 程春华. 2006. 西天山塔尔得套地区乌郎组地球化学特征和构造环境. *东华理工学院学报*, 29(3): 217–224

- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2008. 天山及邻区石炭纪-早二叠世裂谷火山岩岩石成因. 西北地质, 41(4): 1-68
- 肖文交, 韩春明, 袁超, 陈汉林, 孙敏, 林寿发, 厉子龙, 毛启贵, 张继恩, 孙枢, 李继亮. 2006. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约. 岩石学报, 22(5): 1062-1076
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1-171
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 许继峰, 王强. 2001. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因: Nd 和 Sr 同位素组成的限制. 岩石学报, 17(4): 514-522
- 许保良, 阎国翰, 张臣等. 1998. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源. 地学前缘, 5(3): 113-124
- 杨高学, 李永军, 司国辉, 吴宏恩, 金朝. 2010. 新疆贝勒库都克铝质 A 型花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其成因. 地质学报, 84(12): 1759-1769
- 张立飞, 艾永亮, 李强, 李旭平, 宋述光, 魏春景. 2005. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化. 岩石学报, 21(4): 1029-1038
- 张旗, 李承东. 2012. 花岗岩: 地球动力学意义. 北京: 海洋出版社, 5-12
- 张旗, 冉晔, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么? 岩石矿物学杂志, 31(4): 621-626