

新疆富蕴地区中泥盆统阿勒泰组喀腊曼哲火山岩地球化学特征及构造环境研究

张亚峰¹, 蔺新望¹, 郭岐明¹, 吕军利¹, 赵端昌¹, 王星¹,
王旭², 党晨¹, 申维娜¹

(1. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710016; 2. 西安地质矿产勘查开发院, 陕西 西安 710100)

摘要: 通过野外调研和相关地球化学研究, 表明出露于阿尔泰造山带南缘富蕴地区喀腊曼哲一带的中泥盆统阿勒泰组火山岩由玄武岩和流纹岩组成, 为一套典型的双峰式火山岩组合。其中, 玄武岩多变质为钠长阳起片岩、绿帘透闪片岩等, 属拉斑玄武岩系列, 低 SiO₂、K₂O, 高 Ti, 稀土配分曲线显示轻稀土略富集的平坦型, 无明显 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.92\sim 1.08$), 富 Th、U 等, Nb 负异常; 流纹岩属钙碱性系列, 高 SiO₂, 低 K₂O, 为钠质型, 稀土配分曲线显示 Eu 负异常 (δEu 为 0.29~0.58) 的右倾型, 富集 Th、U、La、Ce 和 Hf, 亏损 Sr、Nb、Ta、Zr、P、Ti。二者地球化学特征存在明显差异, 表明酸性火山岩并不是由基性岩浆分离结晶产生, 而可能是与基性下地壳经不同程度的部分熔融有关; 基性火山岩为经俯冲流体改造的亏损地幔部分熔融的产物。岩石地球化学分析结果虽然显示其兼具洋中脊和岛弧火山岩的地球化学特征, 但结合区域地质背景, 其可能并不是形成于弧后盆地环境, 而是岛弧裂谷的产物, 属于成熟岛弧。

关键词: 阿尔泰造山带南缘; 阿勒泰组; 双峰式火山岩; 岛弧裂谷

中图分类号: P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6248(2013)04-0066-15

Geochemical Characteristics and Tectonic Environment Studies of Altay Group Volcanic Rocks of Middle Devonian Epoch in Kalamanzhe Area of the Fuyun Region, Xinjiang

ZHANG Ya-feng¹, LIN Xin-wang¹, GUO Qi-ming¹, LÜ Jun-li¹, ZHAO Duan-chang¹,
WANG Xing¹, WANG Xu², DABG Chen¹, SHEN Wei-na¹

(1. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710016, Shaanxi, China;

2. Xi'an Institute of Geological And Mineral exploration, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: Field survey and geochemical study indicate that volcanic rocks of Aletai Formation, formed during Middle Devonian, outcropped in Fuyun county, Kalamanzhe area at the south margin of Altay Orogenic Belt. It generally consists of basalts and rhyolites, which are typical rock assemblages of bimodal volcanic rocks. Basaltic rocks are usually altered into albite-actinolite schist and epidote-tremolite schist, which belong to tholeiite series with low SiO₂, K₂O content, and high Ti content. Its REE distribution pattern is flat-type with LREE slightly enriched. Without any obvious Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.92\sim 1.08$), basalt is rich in Th and U, with an Nb negative anomaly. In comparison, the rhyolitic rocks belong to the calc-alkaline series with high SiO₂ and low K₂O, which are the agpaitic type. The REE distribution pattern goes rightward with an Eu negative anomaly ($\delta\text{Eu}=0.29\sim 0.58$). The MORB-normalized spider diagram

收稿日期: 2013-03-18; 修回日期: 2013-12-12

基金项目: 中国地质调查局“新疆 1:25 万可可托海幅、江德勒克幅区调修测”项目 (1212011120503)

作者简介: 张亚峰 (1984-), 男, 硕士, 主要从事区域地质调查工作。E-mail: aimom84@163.com

shows evident enrichment in Th, U, La, Ce and Hf and loss in Sr, Nb, Ta, Zr, P and Ti. In terms of REE and trace elements characteristics, there are prominent differences between the basalts and rhyolites, showing that the rhyolites may derive from different degrees of partial melt in the mafic lower crust rather than the fractional crystallization of the basic magma. Whereas, the basalts may derive from partial melt of depleted mantle which was altered by subduction fluid. Geochemical researches of the bimodal rocks reveal that the rocks have geochemical features of both OIB and arc-island, but combined with the regional geological setting, kalamanzhe bimodal volcanics are probably the products of island-arc rifts, and belongs to mature island arc instead of the back-arc basin.

Key words: south margin of Altay Orogenic Belt; Aletai Formation, bimodal volcanic rocks; island-arc rifts

阿尔泰造山带呈北西—南东向横贯于中、俄、哈、蒙4国，是由一系列块体、岛弧和增生杂岩构成的增生型造山带，是中亚造山系的重要组成部分(Sengor et al., 1996; Xiao et al., 2004)。其以复杂的构造、岩浆活动，以及丰富的有色金属和稀有金属矿产而闻名天下。因此，形成与演化长期以来一直是国内外学者研究的热点。尤其是南缘4个斜列的泥盆纪火山-沉积盆地(由西向东依次为阿舍勒盆地、冲乎尔盆地、克朗盆地、麦兹盆地)(图1)因相继发现丰富的矿产资源更是备受关注(陈毓川, 1996; 王京彬等, 1998; 秦克章, 2000)。前人对其中的火山岩做了较多的研究，但关于这些火山-沉积盆地的形成机制及构造属性却尚未达成共识。传统的研究观点有：阿勒泰造山带泥盆纪处于被动大陆边缘裂谷构造环境(何国琦等, 1990; 韩宝福等, 1991; 陈毓川等, 1996; 牟传龙等, 1996; 王京彬等, 1998; 王登红等, 2002); 而近年来的研究则认为，其形成于活动大陆边缘岛弧-弧后盆地构造环境(于学元等, 1995; 牛贺才等, 1999, 2006; 许继峰等, 2001; 陈斌等, 2002; Windely et al., 2002; Xiao et al., 2004; 单强等, 2005; 陈汉林等, 2006; 万博等, 2006; 张招崇等, 2007; 龙晓平, 2008; 曾乔松等, 2009)。产生这些分歧的主要原因是该地区复杂的地质演化背景以及对该套火山岩地球化学研究的多解性。

最近，笔者在富蕴地区1:25万区域地质调查工作中，对麦兹盆地东南部喀腊曼哲一带的中泥盆统阿勒泰组火山岩进行了地质特征、岩石地球化学等方面的详细研究，以此探讨其岩石成因、构造环境等，为进一步揭示有关阿勒泰造山带南缘晚古生

代构造岩浆演化过程等问题提供新证据。

1 区域地质背景

中国阿尔泰造山带位于新疆北部，呈北西向展布，大地构造位置位于西伯利亚板块南缘，北至中—蒙、中—俄及中—哈边境(何国琦等, 1990)，南以额尔齐斯-玛因鄂博构造带与准噶尔地块北缘相邻。由北向南，分别以红山嘴-诺尔特断裂和阿巴宫-库尔提断裂为界，可将其划分为北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰3个块体(何国琦等, 1994; Li et al., 2003; Xiao et al., 2004)(图1)。北阿尔泰块体主要由震旦纪—寒武纪、晚泥盆纪—早石炭纪火山-沉积岩组成，并发育晚加里东期花岗岩；中阿尔泰块体主要由震旦纪—早古生代深变质岩系和奥陶纪—二叠纪侵入岩组成，以泥盆纪花岗岩广泛发育为特征，其中可能有前寒武纪基底存在(HU et al., 2000)，具有微陆块的特点(Windley et al., 2002; Li et al., 2003; Xiao et al., 2004; Wang et al., 2006)；南阿尔泰块体由元古宇(?)片麻岩和泥盆纪火山-沉积岩系(主要为早泥盆世康布铁堡组和中泥盆世阿勒泰组)组成，其次是石炭纪火山-沉积岩系。

研究区阿勒泰组火山岩主要出露于南阿勒泰块体麦兹盆地东南部库尔提-苏普特-喀腊曼哲一带。其中，喀腊曼哲一带阿勒泰组分布于富蕴县库尔提镇西约20 km处，夹持于富蕴-锡泊渡断裂与阿巴宫-库尔提断裂之间，呈北西—南东向带状展布。其南、北分别与上石炭统喀喇额尔齐斯组和中元古界苏普特岩群均呈断层接触关系(图1)。通过本次剖面测制，认为其主要由一套碎屑岩和火山岩组

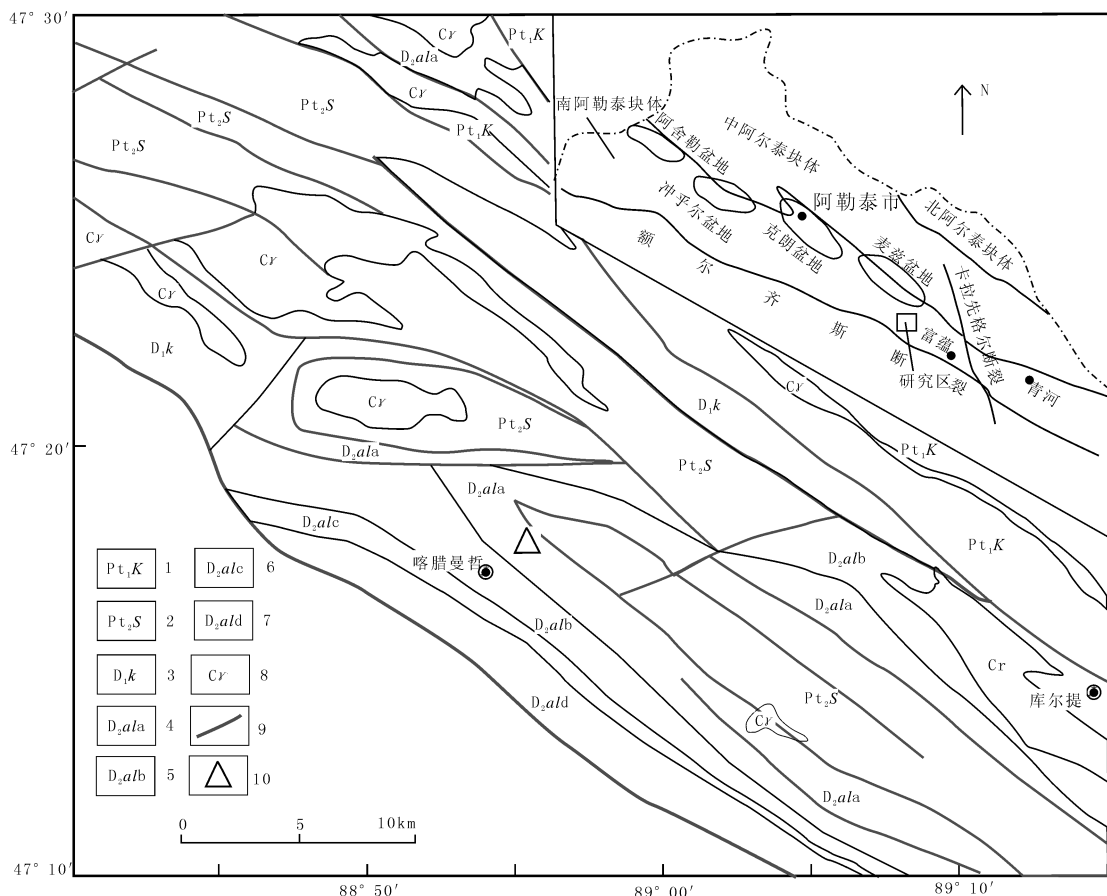


图1 阿尔泰造山带南缘富蕴县喀腊曼哲一带地质简图

Fig.1 Geological sketch map in Kalamanzhe area of Fuyun country, Altyr orogenic belt

1. 下元古界克木齐岩群; 2. 中元古界苏普特岩群; 3. 下泥盆统康布铁堡组; 4. 中泥盆统阿勒泰组 a 段; 5. 中泥盆统阿勒泰组 b 段; 6. 中泥盆统阿勒泰组 c 段; 7. 中泥盆统阿勒泰组 d 段; 8. 石炭纪花岗岩; 9. 断裂; 10. 采样点

成, 根据岩性组合特征可分为 a、b、c、d 4 段。a 段呈浅灰白色变流纹岩和浅绿色变玄武岩的互层产出 (图 2a)。其中, 流纹岩出露厚度大, 与玄武岩的比例约为 7 : 1, 组成典型的双峰式火山岩, 与前人研究成果一致 (韩宝福, 1991; 周刚等, 2007; 耿新霞等, 2010); b 段总体上为一套碎屑岩沉积、变质流纹岩和玄武岩组合。碎屑岩以粉砂岩、凝灰质粉砂岩和千枚岩为主, 厚度可达 523 m; 流纹岩厚度约 219 m, 与玄武岩出露厚度比例为约 8 : 1; c 段总体上为一套浅变质碎屑岩, 褶皱较为发育, 并有少量流纹岩出露; d 段总体上为一套双峰式火山岩, 局部见碎屑岩, 变质程度较低, 露头尺度褶皱较发育 (图 2b)。各段之间均呈整合接触关系。由喀腊曼哲向东至苏普特一带, 阿勒泰组火山岩相变为以玄武岩为主, 出露厚度远大于流纹岩 (周刚等, 2007)。

2 火山岩岩相学特征

喀腊曼哲一带火山岩普遍经受了区域变质作用。其中, 玄武岩多改造为钠长阳起片岩、绿帘透闪片岩等, 流纹岩也有不同程度的变质, 但岩石原岩结构尚存, 个别薄片镜下亦有变余火山结构。

变玄武岩: 灰绿-黑绿色, 变余斑状结构、基质具柱粒状变晶结构, 平行构造。变余斑晶主要为辉石和斜长石。其中辉石斑晶多呈半自形短柱状, 约 0.4~0.5 mm, 多蚀变为阳起石等; 斜长石斑晶多呈长约 0.3 mm 的半自形板条状; 变基质为细粒辉石和斜长石组成, 其中辉石呈短柱状, 发生阳起石化; 斜长石呈板条状, 具钠氏双晶, 大小约 0.1 mm×0.02 mm~0.15 mm×0.03 mm, 多被绿帘石交代。

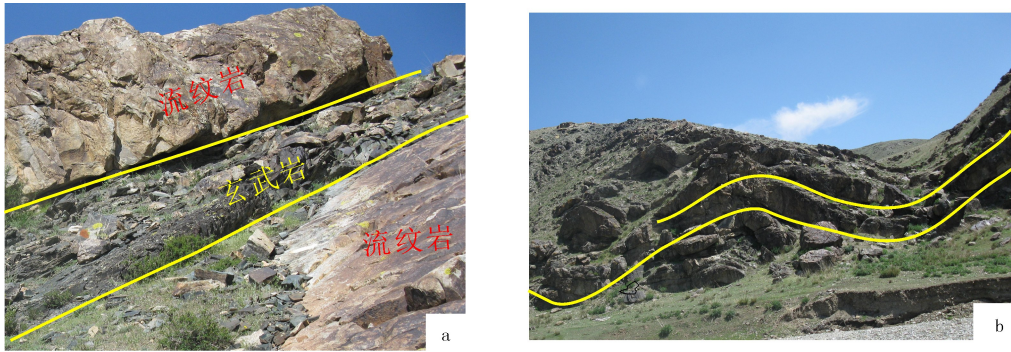


图 2 阿勒泰组喀腊曼哲火山岩地质特征图

Fig. 2 Geological characteristics of the Kalamanzhe volcano rocks of Aletai group

变流纹岩：浅灰-灰白色，显微晶质粒状结构，部分具变余斑状结构，层状构造。岩石中变余斑晶主要由斜长石（12%~13%）和石英（2%~3%）组成，其中斜长石呈半自形粒状，粒径 0.6~1 mm，钠氏双晶发育；石英多呈他形-半自形粒状结构；基质主要由斜长石、（32%~34%）、石英（21%~22%）、黑云母（7%~10%）、钾长石（8%~11%）和少量绿泥石（2%~4%）等组成。其中绿泥石等蚀变矿物呈鳞片状填充于其他矿物颗粒间。

3 岩石地球化学特征

本次工作选择新疆北部富蕴地区喀腊曼哲一带阿勒泰组 a 段新鲜、蚀变较轻的火山岩进行地球化学测试。分析在咸阳核工业 203 研究所分析测试中心完成。常量元素用常规湿法、容量法分析。其中，烧失量用重量法分析，微量元素用电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-AES）分析，稀土元素用电感耦合等离子体质谱法。常量元素的分析精度（相对标准差）一般小于 1%，微量元素和稀土元素分析精度优于 5%。

喀腊曼哲一带阿勒泰组火山岩由于受区域动力热流变质作用影响，达到绿片岩相变质，个别基性岩样品的烧失量（LOI）较高（变化为 0.82%~3.32%）。因此，笔者对主量元素进行了回式计算，并采用 HFSE 和 REE 等不活动的元素进行岩石的源区及演化特征讨论。

样品测试结果见表 1。

3.1 岩石化学特征

喀腊曼哲火山岩野外和室内薄片观察均表现为由变玄武岩和变流纹岩组成。在划分蚀变、变质火山岩系列最为有效的 $Zr/TiO_2 \times 0.0001-SiO_2$ 图解（图 3）中，样品分别落入亚碱性玄武岩区和流纹岩区域，显示缺失中性端元组分。从表 1 中可以看出，喀腊曼哲火山岩主量元素含量值呈 2 组分布，一组 SiO_2 含量为 47.57%~50.49%，平均值为 48.61%， TiO_2 含量变化为 2.32%~2.87%，平均值为 2.54%， MgO 含量为 5.35%~7.95%，平均

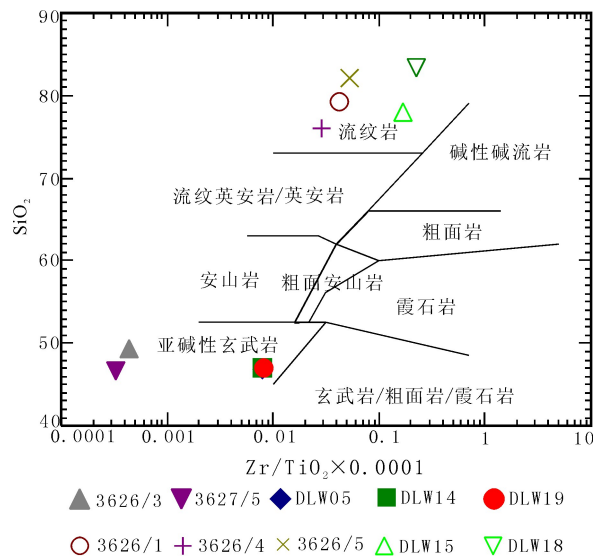


图 3 喀腊曼哲火山岩 $Zr/TiO_2 \times 0.0001-SiO_2$ 图
(据 Winchester et al. 1977)

Fig. 3 $Zr/TiO_2 \times 0.0001-SiO_2$ diagram of the Kalamanzhe volcano rocks
(After Winchester et al., 1977)

表1 新疆阿勒泰南缘喀腊曼哲火山岩岩石地球化学数据分析结果表

Tab.1 Geochemistry analysis of volcano rocks of Kalamanzhe

样号	岩性	氧化物含量(%)														烧失量					特征值				
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	σ	AR	Mg#	A/CNK	σ	AR	Mg#	A/CNK					
3626/1	流纹岩	79.31	0.15	9.72	0.86	1.98	0.05	0.72	1.40	3.78	1.03	0.05	1.15	0.64	2.52	31.79	0.98								
3626/4	流纹岩	76.05	0.20	12.05	1.23	2.19	0.06	0.75	0.45	5.73	0.77	0.04	0.45	1.28	3.17	28.85	1.09								
3626/5	流纹岩	82.13	0.15	9.03	0.65	1.61	0.05	0.49	0.23	4.20	1.22	0.05	0.23	0.75	3.82	28.47	1.04								
DLW15	流纹岩	77.98	0.10	11.42	1.27	0.61	0.04	0.39	1.49	5.20	0.39	0.02	0.46	0.89	2.53	28.40	0.98								
DLW18	流纹岩	83.37	0.08	9.58	0.18	0.24	0.01	0.09	0.75	4.58	0.44	0.02	0.20	0.62	2.89	28.52	1.02								
样号	岩性	稀土元素含量(×10 ⁻⁶)														特征值									
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu	δCe	(La/Yb) _N	ΣREE						
3626/1	流纹岩	16.80	41.70	5.01	24.40	6.83	1.09	7.46	1.34	9.91	2.19	6.54	0.96	6.25	0.92	0.46	1.06	1.82	131.40						
3626/4	流纹岩	5.50	18.60	1.95	10.30	3.41	0.59	4.55	0.88	7.29	1.69	5.19	0.82	5.43	0.80	0.46	1.33	0.68	67.00						
3626/5	流纹岩	14.00	32.00	3.63	17.30	4.76	0.95	5.12	0.86	6.21	1.35	4.19	0.63	4.36	0.65	0.58	1.03	2.17	96.01						
DLW15	流纹岩	28.87	63.49	7.80	30.05	6.45	0.85	6.15	1.10	7.58	1.68	5.12	0.82	5.95	0.98	0.41	0.98	3.28	166.87						
DLW18	流纹岩	31.56	72.68	9.30	38.60	9.10	0.84	8.56	1.52	9.85	1.94	5.43	0.81	5.16	0.80	0.29	0.99	4.13	196.14						
样号	岩性	微量元素含量(×10 ⁻⁶)														P	V	Ti	K	Al					
		Ba	Rb	Sr	Y	Nb	Ta	Cs	Th	U	Ga	Ni	Cr	Zr	Hf						Co	Cu	Pb		
D8626/1	流纹岩	54.6	7.01	145	53.4	5.8	0.5	0.25	5.18	1.39	16.1	5.75	4.9	63.8	4.74	2.01	6.8	3.7	23.2	130	895	8547	51459		
D8626/4	流纹岩	61.4	6.17	75.3	45.2	6.34	0.69	0.54	3.71	1.07	13.8	4.46	4.7	56.8	4.26	2.31	5.2	3.2	12.4	199	1386	6389	63794		
D8626/5	流纹岩	484	23.2	56	34	6.52	0.49	0.66	4.12	1.84	13.4	3.58	29.9	79.8	5.47	2.3	4.7	4.6	9.2	219	923	10123	47806		
DLW15	流纹岩	166.92	8.59	124.21	43.04	9.26	0.89	0.15	13.75	2.41	16.30	1.78	0.38	169.81	6.93	1.25	12.04	8.69	9.29	106	587	3236	60459		
DLW18	流纹岩	152.35	2.97	56.19	41.03	13.79	1.26	0.03	10.26	1.91	8.43	2.75	1.86	180.70	7.81	1.01	6.00	4.15	5.41	108	500	3651	50718		

续表 1

样号	岩性	氧化物含量(%)													烧失量						特征值					
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	σ	AR	Mg#	A/CNK	σ	AR	Mg#	A/CNK						
3626/3	玄武岩	49.32	2.80	14.12	3.92	9.05	0.18	6.28	7.88	3.78	0.13	0.23	2.25	2.42	1.43	47.09	0.68									
3627/5	玄武岩	46.72	2.40	15.95	3.92	9.76	0.01	7.69	6.43	3.46	0.13	0.22	3.08	3.46	1.38	50.78	0.91									
DLW05	玄武岩	46.84	2.23	16.65	5.96	5.18	0.17	5.14	9.37	3.87	0.39	0.27	3.32	4.73	1.39	46.50	0.70									
DLW14	玄武岩	46.94	2.28	15.51	4.99	8.37	0.21	6.29	9.33	3.54	0.24	0.28	1.94	3.63	1.36	46.58	0.67									
DLW19	玄武岩	46.95	2.67	13.53	5.68	8.34	0.20	6.55	12.09	2.14	0.22	0.33	0.82	1.41	1.20	46.47	0.52									
样号	岩性	稀土元素含量(×10 ⁻⁶)													特征值											
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu	δCe	(La/Yb) _N	∑REE							
3626/3	玄武岩	9.46	24.80	3.70	19.50	5.75	1.92	6.62	1.01	7.48	1.41	4.19	0.54	3.20	0.42	0.95	0.98	2.00	90.00							
3627/5	玄武岩	10.10	23.40	3.23	17.20	5.26	1.70	5.85	0.96	6.80	1.40	4.03	0.56	3.57	0.48	0.93	0.96	1.91	84.50							
DLW05	玄武岩	10.04	25.08	4.18	20.36	6.09	2.03	6.44	1.15	7.63	1.57	4.18	0.61	3.75	0.56	0.98	0.91	1.81	93.68							
DLW14	玄武岩	10.21	26.05	4.36	20.45	5.97	2.19	6.27	1.12	7.13	1.49	4.08	0.59	3.60	0.53	1.08	0.91	1.91	94.05							
DLW19	玄武岩	11.61	30.40	5.16	25.17	7.35	2.28	7.73	1.34	8.60	1.78	4.92	0.71	4.51	0.66	0.92	0.92	1.74	112.23							
样号	岩性	微量元素含量(×10 ⁻⁶)																								
		Ba	Rb	Sr	Y	Nb	Ta	Cs	Th	U	Ga	Ni	Cr	Zr	Hf	Co	Pb	V	P	Ti	K	Al				
3626/3	玄武岩	32.8	1.77	159	36.6	6.13	0.55	0.15	2.08	0.38	19	101	218	12.3	1.05	46.2	6.7	265	1216	11367	1079	74753				
3627/5	玄武岩	47.4	6.28	128	35.4	3.06	0.29	0.27	4.9	0.96	20.7	50.9	98.2	7.87	0.98	53.6	6	311	1245	8939	1079	84441				
DLW05	玄武岩	72.15	4.52	271.82	38.21	6.51	0.48	0.06	0.62	0.34	22.45	39.07	144.20	174.59	4.60	36.95	8.45	332.41	1159	13394	3236	88147				
DLW14	玄武岩	21.17	3.44	298.41	36.59	7.12	0.54	0.16	0.61	0.26	24.48	41.94	143.12	180.20	4.68	46.56	3.99	352.49	1213	13360	1991	82112				
DLW19	玄武岩	28.80	1.31	275.02	44.37	8.11	0.61	0.06	0.62	0.43	22.72	37.76	80.80	215.79	5.66	45.91	3.41	387.24	1426	15994	1826	71629				

注:3626/1,3626/3,3626/4,3626/5,3627/5 为本文资料;DLW05,DLW14,DLW15,DLW18,DLW19 数据引自耿新霞等所著《新疆阿尔泰南缘达拉乌兹双峰式火山岩年龄及岩石成因》。

值为 6.56%；另一组 SiO_2 含量为 76.42%~83.92%，平均为 80.31%， TiO_2 含量变化为 0.08%~0.20%，平均值为 0.14%， MgO 含量介于 0.09%~0.75%，平均值为 0.50%。由此可见，喀腊曼哲火山岩在地球化学方面也表现出明显的成分间断，显示双峰式火山岩的特征。

玄武岩样品里特曼指数 (σ) 只有样品 DLW05 大于 4，其他均介于 1.41~3.63；变流纹岩碱度率 (AR) 介于 2.52~3.82，属于亚碱性岩石系列，与图 3 结论一致。在 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}$ 图解 (图 4) 中，玄武岩集中分布在拉斑玄武岩区域，而流纹岩集中分布在钙碱性系列区域，且二者投影点均沿钙碱性火山岩和拉斑玄武岩间的分界线附近不连续分布。

玄武岩的 Al_2O_3 含量较高 (13.53%~16.65%)，全碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含量较低，介于 2.36%~4.26%，A/CNK 值介于 0.52~0.91，属于准铝质岩石；流纹岩的 Al_2O_3 含量为 9.03%~12.05%，A/CNK 值介于 0.98~1.09，具有准铝质-弱过铝质过渡的特点，全碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含

量相对较高，介于 4.81%~6.50%，且 K_2O 含量远低于 Na_2O ，显示钠质岩石特点，具有类似 I 型花岗岩的特征。在 Harker 图解 (图 5) 上，喀腊曼哲火山岩中酸性端元组分总体上显示出连续的演化

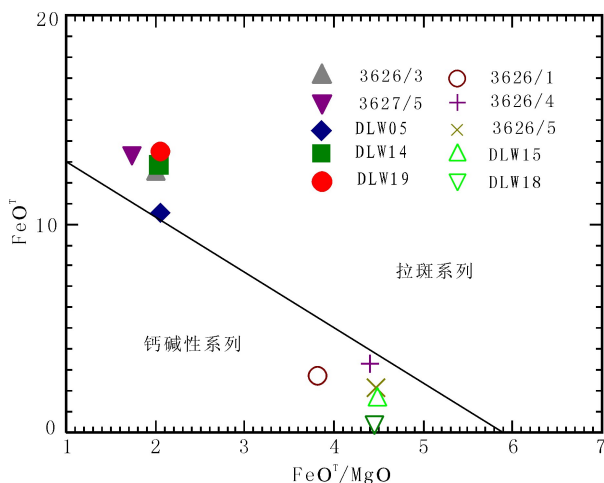


图 4 喀腊曼哲火山岩 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}$ 图
(据 Miyashiro, 1974)

Fig. 4 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-\text{FeO}^{\text{T}}$ diagram of the Kalamanzhe volcano rocks (After Miyashiro, 1974)

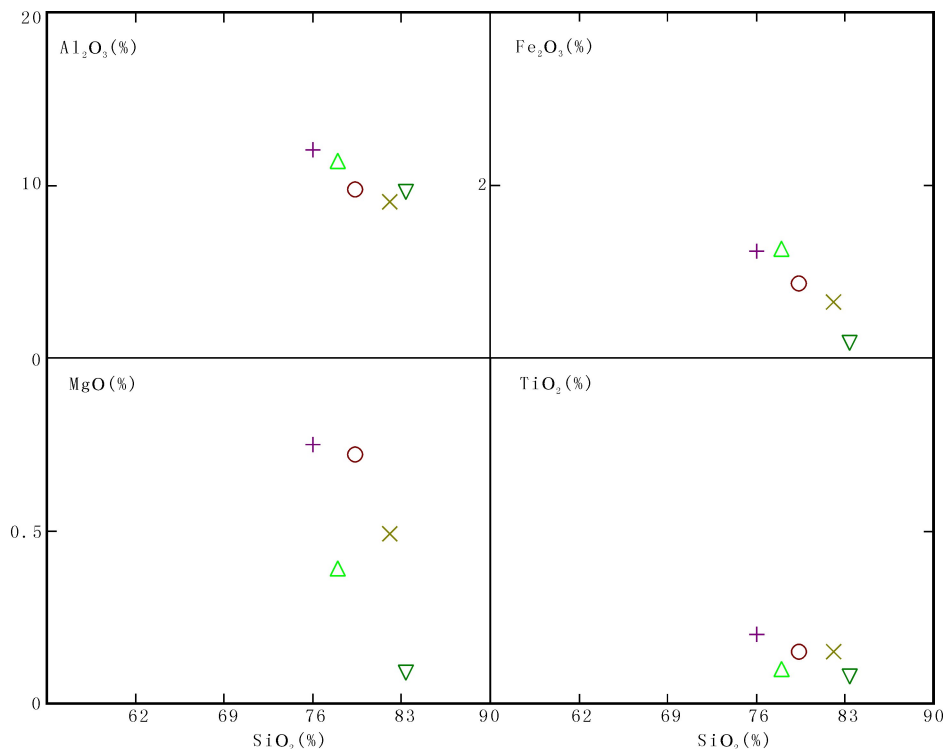


图 5 喀腊曼哲火山岩 Harker 图 (据 Bhatia, 1983)

Fig. 5 Harker variation diagram of the Kalamanzhe volcano rocks (After Bhatia, 1983)
(图例同图 3)

趋势,随着 SiO_2 增加, Al_2O_3 、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 、 MgO 、 TiO_2 和 Fe_2O_3 具有降低的趋势,暗示在岩浆演化过程中有暗色矿物(辉石、云母、角闪石等)和富钛矿物(钛铁矿等)等的分离结晶。

3.2 微量元素地球化学特征

喀腊曼哲火山岩稀土元素分析结果及其主要特征参数(表1)表明,玄武岩和流纹岩的稀土元素特征差异明显。其中,玄武岩 ΣREE 较低,且变化范围较小,其值为 $84.50 \times 10^{-6} \sim 112.23 \times 10^{-6}$

(平均为 94.89×10^{-6}),轻稀土相对富集,重稀土相对亏损,且二者分馏一般, Eu 异常不明显(δEu 为 $0.92 \sim 1.08$,平均为 0.97), δCe 为 $0.91 \sim 0.98$,平均为 0.93 。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图6a)呈轻稀土略富集的平坦型,表明岩浆可能起源于较深的地幔。岩石略富集 Th、U,亏损 Nb、K,个别样品强烈亏损 Zr,与微量元素原始地幔标准化蛛网图显示出较为一致的结果(图7a), Th、U 正异常, Nb、K 等较相邻元素呈负异常。

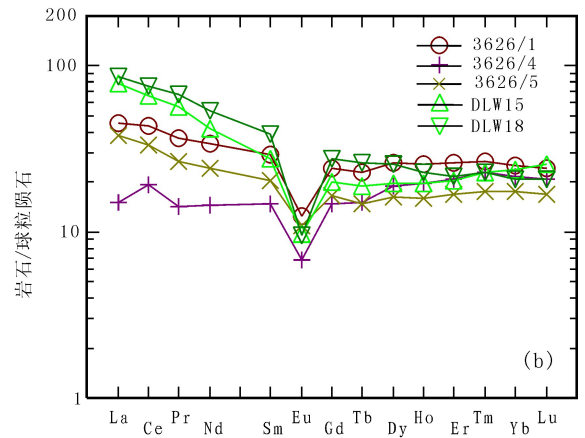
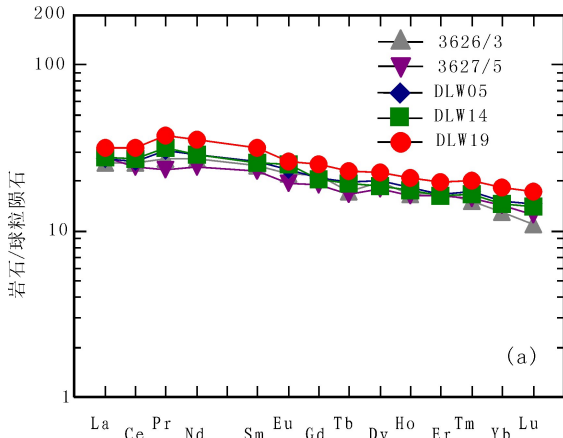


图6 喀腊曼哲火山岩稀土元素配分曲线图(球粒陨石标准化值据 Taylor, 1985)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for the Kalamanzhe volcano rocks (After Taylor, 1985)

流纹岩的 ΣREE 较高,且变化范围较大,为 $67.00 \times 10^{-6} \sim 196.14 \times 10^{-6}$,平均为 131.48×10^{-6} ,轻稀土变化范围较大(ΣLREE 为 $40.35 \times 10^{-6} \sim 162.07 \times 10^{-6}$),重稀土相对亏损,且二者间分馏明显, δEu 为 $0.29 \sim 0.58$,平均为 0.44 ,具有较为明显的负 Eu 异常,表明其岩浆结晶过程中可能存在斜长石的结晶分离作用或源区残余矿物组合中存在斜长石,稀土元素配分曲线(图6b)表现为 Eu 负异常的右倾型。在原始地幔标准化蛛网图(图7b)上,岩石表现出强烈富集 Th、U、La、Ce、Hf,亏损 Sr、Nb、Ta、Zr 等元素,强烈亏损 P、Ti 的特征,指示岩石形成过程中存在钛铁矿、磷灰石等的分离结晶作用。

4 岩石成因讨论

4.1 基性火山岩成因

喀腊曼哲玄武岩 MgO 含量低于 8%, $\text{Mg}^\#$ 为

$46.47 \sim 50.78$ ($< 70 \sim 80$), Cr、Ni 含量均远远低于 200×10^{-6} ,说明它们不具有与地幔橄榄岩平衡的熔体成分(Harmois L, 1989)。因而此基性火山岩并非直接来自地幔橄榄岩的原始岩浆,而可能为源于地幔源区的演化岩浆(wilson, 1989)。研究表明(Abratis, 1998), Ba 在流体中的活动性远高于 Th。因此, Ba/Th 的微量元素值可以度量与俯冲有关的流体对岩浆源区的贡献。喀腊曼哲玄武岩的 Th 含量较高, Ba/Th 值为 $9.67 \sim 46.46$,表明可能与俯冲流体中洋壳物质的带入有关。另外, Zr、Nb、Hf 等高场强(HFSE)不活动元素对后期的蚀变保持相对惰性,其比值常被用于指示源区性质。典型的 N-MORB 具有很高的 Zr/Nb 值($40 \sim 50$) (Erlank A J et al., 1976), E-MORB 和洋岛玄武岩(OIB)相似, Zr/Nb 值很低,约小于 10 (Wilson M, 1989),球粒陨石的 Zr/Nb 值为 $16 \sim 18$ (Sun S S et al., 1979)。喀腊曼哲玄武岩的 Zr/Nb 值为 $2.01 \sim 26.83$,大部分 Zr/Nb 值介于亏

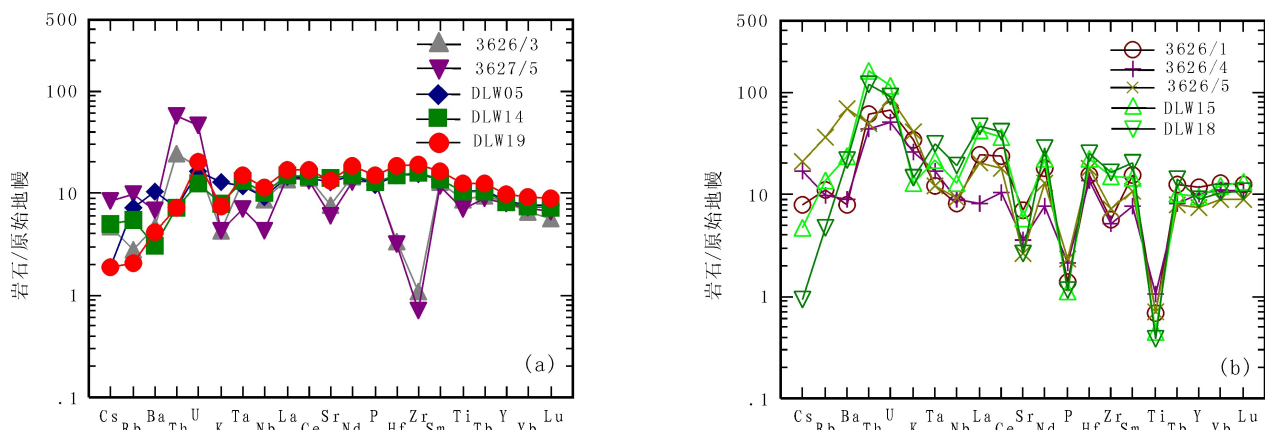


图7 喀腊曼哲火山岩微量元素蛛网图(原始地幔标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams for the Kalamanzhe volcano rocks

(After Sun et al., 1989)

损地幔与球粒陨石地幔间, Zr/Hf 值为 8.03 ~ 38.48, 表明它们可能是受俯冲流体改造的亏损地幔部分熔融的产物, 在演化过程中发生了分离结晶作用。

4.2 酸性火山岩成因

双峰式火山岩中的流纹岩成因机制主要有高压(大于 2 GPa)下玄武质岩浆不混熔作用和玄武岩同源分离结晶等观点, 但最为重要的一种机制是流纹岩和玄武岩分别来自不同的母岩浆, 酸性岩浆是地幔部分熔融形成的热基性岩浆侵入到地壳使地壳岩石发生部分熔融的产物(王焰等, 2000)。喀腊曼哲火山岩缺乏中性端元岩石, 流纹岩的 $Mg^{\#}$ 介于 28.40~31.79(小于 40), Rb 丰度(2.97~23.20)明显低于分异成因的岩浆岩(大于 270×10^{-6}) (Irvine et al., 1971), Nb/Ta 值为 9.19~13.31, 平均值为 11.10, 接近陆壳岩石 Nb/Ta 值(10~14) (Green, 1995), Th/U 值介于 2.24~5.71, 平均为 4.10, (下地壳 Th/U 值为 6.00) (Rudnick et al., 1993), Zr/Hf 值为 13.33~24.49, 平均值为 17.80 (原始地幔 Zr/Hf 为 36.00) (Sun et al., 1989), Rb/Sr 为 0.05~0.41, 平均值为 0.13, Rb/Ba 为 0.02~0.13, 平均值为 0.07, 2 个比值相对变化范围较大, 且平均值远高于原始地幔的相应值(分别为 0.029 和 0.088), 这表明喀腊曼哲流纹岩并非幔源岩浆分异的结果, 而可能是地壳部分熔融的产物。

相关研究表明 (Ma et al., 1998; Soesoo, 2000), 中酸性岩浆岩可以是幔源铁镁质母岩浆结晶分异或与同化混染的耦合作用的产物, 但更巨量酸性岩类的形成大多与地壳岩石的部分熔融相关。实验岩石学也已经证明 (Patiño Douce, 1999), 地壳中砂泥质岩的部分熔融通常产生化学成分偏酸性的过铝质花岗岩类, 而下地壳玄武质岩的部分熔融可以产生准铝质 I 型花岗岩类。喀腊曼哲火山岩的酸性端元岩石为一套低钾钙碱性、准铝质-弱过铝质系列的流纹质岩石, 结合其出露的规模, 推测其应当为下地壳变基性岩熔融的产物。此外, 与变泥质岩与杂砂岩起源的熔体相比, 由变质基性岩熔融形成的岩浆具低 $Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO + TiO_2)$ 、高 $Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO + TiO_2$ 的特征 (Altherr et al., 2000), 在源区类型判别图 (图 8) 中, 样品基本上落入下地壳镁铁质和角闪岩交叉区域, 进一步佐证喀腊曼哲火山岩的酸性端元-流纹岩岩浆来源于基性下地壳。

因此, 空间上与基性岩浆共生的流纹岩可能是地幔部分熔融形成的热岩浆上侵地壳而致使地壳岩石发生部分熔融的结果。露头上出现酸性岩与基性岩的频繁互层现象, 可能是二者沿同一岩浆通道上升喷发所形成的 (耿新霞等, 2010), 因为基性岩浆虽然起源深, 但黏度小, 上升速度快, 完全可能与起源浅但黏度大、上升速度慢的酸性岩浆同时或近同时到达地表 (海底), 由此而形成双峰组合。

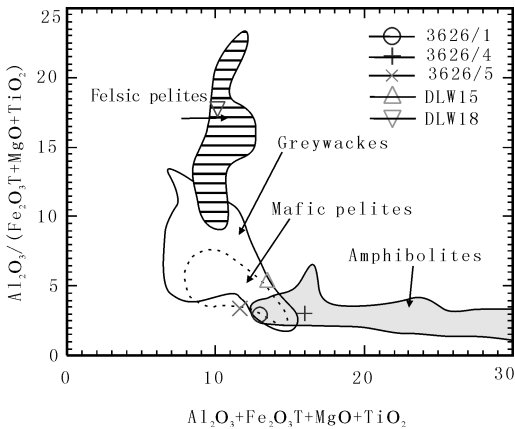


图8 喀腊曼哲流纹岩源区类型判别图

(据 Pati ño Douce, 1999)

Fig. 8 Discrimination diagram of the rhyolite source types of the Kalamanzhe volcano rocks

5 火山岩构造环境讨论

前已述及，前人对阿尔泰造山带中的晚古生代火山岩做了较多的研究，但对其构造环境的认识仍然存在分歧，在麦兹盆地东南部喀腊曼哲—苏普特一带出露的中泥盆统阿勒泰组火山岩同样存在不同认识，韩宝福等（1991）报道了该处发育一套双峰式火山岩，但无详细的岩石学描述及地球化学和年代学相关研究，而最近有学者在该区发现弧后盆地类型的蛇绿岩（许继峰等，2001；张海祥等，2004）。周刚等（2007）通过对该套双峰式火山岩的地质、地球化学特征的研究，认为其形成于弧后盆地构造环境，而耿新霞等（2010）认为其形成于活动大陆边缘局部拉张环境。

研究表明，双峰式火山岩是拉张环境下的产物，可以产生于大陆裂谷、洋内裂谷（王焰等，2000），根据近年来的研究结果，发现双峰式火山岩也可以形成于活动大陆边缘和弧后盆地的初始阶段等构造背景（Pin et al., 1997），并且在不同构造背景下具有不同的特征（Geist, 1992）。

喀腊曼哲火山岩的基性端元玄武岩的 $La/Nb > 1$ 、 $La/Ta > 15$ ，以及大部分样品 $Ti/Y < 350$ ，与岛弧玄武岩和亏损型洋中脊玄武岩特征一致（Condie, 1986）。微量元素标准化图解显示喀腊曼哲火山岩 LILE 总体上高于 MORB，并且具有 Nb 的负异常，这有点类似于岛弧火山岩的特征，因为 LILE 的富集可能代表了俯冲的洋壳物质或其释放

出的流体带入地幔楔的结果（Pearce et al., 1995）。但是其 TiO_2 （0.08%~2.80%，平均为 1.31×10^{-6} ）、Nb（ $3.06 \times 10^{-6} \sim 13.79 \times 10^{-6}$ ，平均为 7.27×10^{-6} ）、Ta（ $0.29 \times 10^{-6} \sim 1.26 \times 10^{-6}$ ，平均为 0.63×10^{-6} ）含量明显高于岛弧拉斑玄武岩的相应元素含量（分别为 0.8%、 $1.7 \times 10^{-6} \sim 2.71 \times 10^{-6}$ 、 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.18 \times 10^{-6}$ ）（Taylor et al., 1992）；球粒陨石标准化配分曲线略呈右倾型和 Nb、Ta、Ti 的亏损又有别于亏损型洋中脊玄武岩。在 Ba-Ba/Nb 构造环境判别图解（图 9a）中，玄武岩样品落入洋脊玄武岩和岛弧玄武岩区，兼具 MORB 和 IAB 的特征，这也表明喀腊曼哲火山岩的地球化学特征同时具有大洋中脊玄武岩和岛弧玄武岩的特征，这些特征与弧后盆地玄武岩地化特征较为一致（Hollings et al., 2004）。酸性端元流纹岩 AR 值为 2.52~3.82，小于 3.9，且 TiO_2 含量普遍较低，球粒陨石标准化配分曲线为轻稀土富集、Eu 亏损的右倾型曲线，原始地幔标准化蛛网图具有大离子亲石元素富集，Ta、Nb 等高场强元素亏损的特点，指示其具有岛弧火山岩的特征。在 Y+Nb-Rb 图解（图 9b）中，流纹岩样品落入靠近洋脊花岗岩的岛弧花岗岩区域，表明其可能与俯冲作用有关（Pearce, 1984）。

可见，喀腊曼哲火山岩与弧后盆地火山岩具有相似的地球化学特征，反映其形成的构造环境与弧后盆地相似，由此是否可以确定阿尔泰山南缘麦兹盆地阿勒泰组火山岩形成于弧后盆地环境呢？产于弧后盆地的双峰式火山岩一般出现于弧后盆地拉张的初始阶段，而喀腊曼哲火山岩喷发时代为中泥盆世，属于中泥盆统阿勒泰组，为火山沉积盆地中较晚期的产物。阿尔泰山南缘火山沉积盆地较早期主要为广泛分布的下泥盆统康布铁堡组，为一套碎屑岩夹碳酸盐岩及火山岩组合的沉积建造。多数研究认为该组火山岩形成于与俯冲作用密切相关的陆缘火山弧构造环境（Windely et al., 2002；Xiao et al., 2004；单强等，2005；陈汉林等，2006；万博等，2006；丛峰等，2007；曾乔松等，2009）。邻区阿舍勒组火山岩中的富 Mg 火山岩系及与之共生的岛弧拉斑玄武岩（牛贺才等，1999）、北塔山组的玻安岩（张海祥等，2003）和苦橄岩（张招崇等，2005）、托让格库都克组中的埃达克岩、富 Nb 玄武岩组合（张海祥等，2004），明显显示形成于与

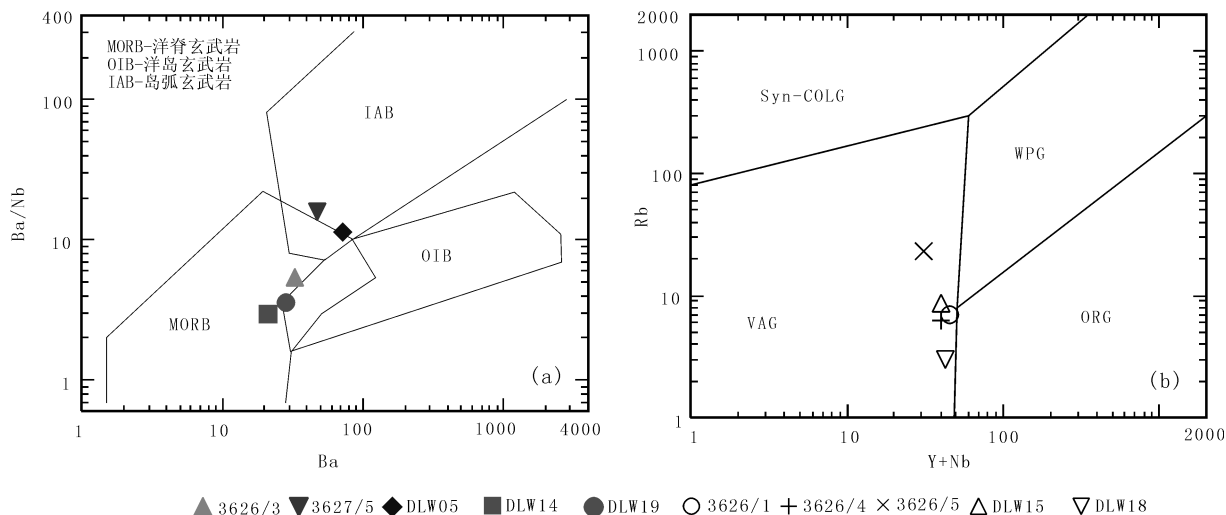


图9 阿尔泰山带喀腊曼哲火山岩构造环境判别图

Fig. 9 Tectonic setting discriminant plots for the Kalamanzhe volcano rocks

ORG. 大洋脊花岗岩; Syn. COLG; 同碰撞花岗岩; VAG. 火山弧花岗岩; WPG. 板内花岗岩

俯冲相关的岛弧环境。最近的研究发现 400 Ma 的花岗岩分布极其广泛, 岩浆活动强烈, 并持续到约 375 Ma (Wang et al., 2006)。笔者最近也获得了海子口岩体、青格里岩体和库勒萨伊岩体等年龄集中在 400 Ma 左右 (待刊), 这些岩体均为与俯冲有关的弧花岗岩 (张招崇等, 2006a; 童英等, 2007; 杨富全等, 2008; 刘国仁等, 2010)。另外, 龙晓平 (2008) 通过对阿尔泰山南缘康布铁堡组和阿勒泰组变质碎屑沉积岩地球化学特征、源区物质年代学及 Hf 同位素组成研究, 认为其形成于活动大陆边缘构造环境。阿勒泰组火山岩与康布铁堡组火山岩分布于相同的火山沉积盆地内, 只是在形成时间上略晚, 二者为整合或断层接触关系, 应为相同构造环境下不同演化阶段的产物。因此, 喀腊曼哲双峰式火山岩可能形成于岛弧裂谷环境, 属于成熟岛弧。

综上所述, 阿尔泰山带南缘晚古生代早期古亚洲洋向北俯冲增生剧烈 (沈晓明等, 2010), 受消减带俯冲下沉的板片对于软流圈的黏性拖曳作用影响, 发生板片后退和拆沉作用, 应力松弛, 加之板块间的推错, 使阿尔泰山带部分北西向活动基底断裂产生右行走滑, 在走滑作用下, 大陆边缘出现拉张作用 (王京彬等, 1998), 并逐渐裂解, 形成阿尔泰山南缘一系列火山-沉积盆地。喀腊曼哲-苏普特一带阿勒泰组发育的典型双峰式火山岩可能就是在这种局部拉张的环境下沿区内北西向断裂

(巴塞、可依洛甫、沙热布拉克断裂) 减压部位喷发就位, 伴随着拉张作用的加剧, 在库尔提一带形成弧后盆地, 并发育弧后盆地性质的蛇绿岩 (Xu et al., 2001, 2003; 张海洋等, 2003b)。此后, 弧后洋盆向北俯冲消减, 形成双陆弧环境 (Wang et al., 2010), 此于阿尔泰山南缘晚古生代大规模的弧花岗岩岩浆事件相耦合。

6 结论

(1) 阿尔泰山带南缘喀腊曼哲火山岩由一套玄武岩和流纹岩组成, 并互层产出, 缺失中-中酸性岩石端元, 为一套典型的双峰式火山岩。

(2) 该套玄武岩和流纹岩具有不同的物质来源。其中玄武岩可能是受俯冲流体改造的亏损地幔部分熔融的产物, 而流纹岩则与幔源岩浆上涌引发的下地壳物质的部分熔融密切相关。

(3) 喀腊曼哲火山岩岩石的地球化学特征兼具洋中脊和岛弧火山岩特征, 但不能代表其形成于弧后盆地环境, 结合区域资料, 可能是岛弧裂谷的产物, 属于成熟岛弧。

致谢: 论文撰写过程中得到了西安地质矿产研究所陈隽璐研究员的热心帮助和指导, 就某些问题与长安大学李瑞宝博士、陈国超博士等进行了有益探讨, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

- 陈毓川, 叶庆同, 冯京. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Chen Y. C., Ye Q. T., Feng J., et al. Ore-forming conditions and metallogenic prognosis of the Ashele Copper-zinc metallogenic belt, Xinjiang, China [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1996.
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 等. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- Wang J. B., Qin K. Z., Wu Z. L., et al. Volcanic exhalative sedimentary Lead-Zinc deposits in the southern margin of the Altai, Xinjiang [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1998.
- 秦克章. 新疆北部中亚型造山与成矿作用[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2000.
- Qin K. Z. Metallogenesis in Relation to Central-Asia Style Orogeny of Northern Xinjiang [R]. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2000.
- 韩宝福, 何国琦. 阿尔泰山南缘泥盆纪火山岩带的大地构造性质[J]. 新疆地质科学, 1991, 3: 89-100.
- Han B. F., He G. Q. Geotectonic setting of Devonian volcanic rocks belt in southern margin of the Altai Mountains, China [J]. Xinjiang Geoscience, 1991, 89-100 (in Chinese).
- 牟传龙, 刘宝珺, 朱晓镇, 等. 新疆阿舍勒—冲乎尔地区泥盆纪火山沉积盆地大地构造背景及其演化[J]. 特提斯地质, 1996, 20: 69-84.
- Mou C. L., Liu B. J., Zhu X. Z., et al. Tectonic setting and evolution of the Devonian volcanic sedimentary basin in the Ashele-Chonghur region, Xinjiang [J]. Tethyan Geology, 20: 70-84 (in Chinese with English abstract).
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- Wang D. H., Chen Y. C., Xu Z. G., et al. Metallogenic series and regularities in Altai metallogenic province [M]. Atomic Energy Press, Beijing, 2002 (in Chinese).
- 于学元, 梅厚钧, 姜福芝, 等. 额尔齐斯火山岩和成矿作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- Yu X. Y., Mei H. J., Jiang F. Z., et al. Ereqisi Volcanic Rocks and Their Mineralization [M]. Science Press, (in Chinese) Beijing, 1995.
- 牛贺才, 许继峰, 于学元, 等. 新疆阿尔泰富镁火山岩系的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 1999, 44 (9): 1002-1004.
- Niu H. C., Xu J. F., Yu X. Y., et al. Discovery of rich-Mg volcanic rock series and its geological implication [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (9): 1002-1004 (in Chinese).
- 牛贺才, 于学元, 许继峰, 等. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Niu H. C., Yu X. Y., Xu J. F., et al. Late Paleozoic Volcanism and Associated Metallogenesis in the Altai Area, Xinjiang, China [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2006.
- 许继峰, 陈繁荣, 于学元, 等. 新疆北部阿尔泰地区库尔特蛇绿岩: 古弧后盆地系统的产物[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20 (3): 344-352.
- Xu J. F., Chen F. R., Yu X. Y., et al. Kuerti Ophiolite in Altai Area of North Xinjiang: Magmatism of an Ancient Back-arc Basin [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2001, 20 (3): 344-352 (in Chinese with English abstract).
- 单强, 牛贺才, 于学元, 等. 新疆北部阿尔泰南缘晚古生代高钾高硅熔结凝灰岩的地球化学、岩浆成因及构造背景[J]. 岩石学报, 2007, 23 (7): 1721-1729.
- Shan Q., Niu H. C., Yu X. Y., et al. Geochemical characteristics, magmatic genesis and tectonic background of the late Paleozoic high potassium and high silicon ignimbrite on the southern margin of Altai, north Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (7): 1721-1729 (in Chinese with English abstract).
- 陈汉林, 杨树峰, 厉子龙, 等. 阿尔泰晚古生代早期长英质火山岩的地球化学特征及构造背景[J]. 地质学报, 2006, 80 (1): 38-42.
- Chen H. L., Yang S. F., Li Z. L., et al. Geochemistry and Tectonic Setting of Early Late Paleozoic Felsic Volcanic Rocks from the Altai Orogenic Belt, North Xinjiang [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (1): 38-42 (in Chinese with English abstract).
- 万博, 张连昌. 新疆阿尔泰南缘泥盆纪多金属成矿带 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学与构造背景探讨[J]. 岩石学报, 2006, 022 (1): 145-152.
- Wan B., Zhang L. C. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallic metallogenic belt on the Southern margin of Altai, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 022 (1): 145-152 (in

- Chinese with English abstract) .
- 张招崇, 周刚, 闫升好, 等. 阿尔泰山南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示[J]. 地质学报, 2007, 81 (3): 344-358.
- Zhang Z. C, Zhou G, Yan S. H, et al. Geology and Geochemistry of the Late Paleozoic Volcanic Rocks of the South Margin of the Altai Mountains and Implications for Tectonic Evolution [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (3): 344-358 (in Chinese with English abstract) .
- 龙晓平, 袁超, 孙敏, 等. 北疆阿尔泰山南缘泥盆系浅变质碎屑沉积岩地球化学特征及其形成环境[J]. 岩石学报, 2008, 24 (4): 718-732.
- Long X. P, Yuan C, Sun M, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environments of Devonian low metamorphic clastic sedimentary rocks in the southern margin of the Chinese Altai, North Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (4): 718-732 (in Chinese with English abstract) .
- 曾乔松, 陈广浩, 蔡佑星, 等. 阿尔泰山缘冲乎尔盆地酸性火山岩地球化学及年代学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 32 (4): 603-612.
- Zeng Q. S, Chen G. H, Cai Y. X, et al. Geochemical Characteristics of Acid Volcanic Rocks from Chonghuer Basin, Altai, Xinjiang and Their Geochronological Implication [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 32 (4): 603-612 (in Chinese with English abstract) .
- 何国琦, 韩宝福, 岳永君, 等. 中国阿尔泰山造山带的构造分区和地壳演化[J]. 新疆地质科学 (第2辑), 1990, (2): 9-20.
- He G. Q, Han B. F, Yue Y. J, et al. Tectonic division and crustal evolution of Altay orogenic belt in China [J]. Geoscience of Xinjiang, 1990, (2): 9-20.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 新疆人民出版社和香港文化教育出版社, 1994.
- He G. Q, Li M. S, Liu D. Q, et al. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China [M]. Xinjiang People's Publishing House, Urumuqi, 1994 (in Chinese) .
- 韩宝福. 新疆东准噶尔北部地区中泥盆世双峰式火山岩组合[J]. 地质学报, 1991, 4: 317-328.
- Han B. F. The Middle Devonian Bimodal Association of Volcanic Rocks in the Northern Area of East Junggar, Xinjiang [J]. Acta Geologica Sinica, 1991, 4: 317-328 (in Chinese with English abstract) .
- 周刚, 秦纪华, 张招崇, 等. 新疆富蕴县苏普特一带双峰式火山岩的发现及其地质意义[J]. 地质论评, 2007, 53 (3): 337-348.
- Zhou G, Qin J. H, Zhang Z. C, et al. The discovery of bimodal volcanics in supute area of Fuyun county, Xinjiang, and its geological significance [J]. Geological Review, 53 (3): 337-348 (in Chinese with English abstract) .
- 耿新霞, 柴凤梅, 杨福全, 等. 新疆阿尔泰山南缘达拉乌兹双峰式火山岩年龄及岩石成因[J]. 岩石学报, 2010, 026 (10): 2967-2980.
- Geng X. X, Chai F. M, Yang F. Q, et al. Geochronology and genesis of bimodal volcanic rocks in Dalawuzi from the southern margin of Altay, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 026 (10): 2967-2980 (in Chinese with English abstract) .
- 王焰, 钱青, 刘良, 等. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征[J]. 岩石学报, 2000, 016 (02): 169-173.
- Wang Y, Qian Q, Liu L, et al. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16 (2): 169-173 (in Chinese with English abstract) .
- 张海祥, 牛贺才, Hiroaki Sato, 等. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚洲洋板块南向俯冲的证据[J]. 高校地质学报, 2004, 10 (1): 106-113.
- Zhang H. X, Niu H. C, Hiroaki Sato, et al. Late Paleozoic Adakite and Nb-enriched Basalt from Northern Xinjiang: Evidence for the Southward Subduction of the Paleo-Asian Ocean [J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10 (1): 106-113 (in Chinese with English abstract) .
- 丛峰, 唐红峰, 苏玉平. 阿尔泰山南缘泥盆纪流纹岩的地球化学和大地构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31 (3): 359-364.
- Cong F, Tang H. F, Su Y. P. Geochemistry and tectonic setting of Devonian rhyolites in southern Altay, Xinjiang, northwest China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31 (3): 359-364 (in Chinese with English abstract) .
- 张海祥, 牛贺才, 于学元, 等. 新疆北部富蕴县沙尔布拉克玻安岩的地球化学特征及构造意义[J]. 地球化学, 2003a, 32 (2): 155-160.
- Zhang H. X, Niu H. C, Yu X. Y, et al. Geochemical characteristics of the Shaerbulake boninites and their tectonic significance, Fuyun County, northern

- Xinjiang, China. *Geochimica*, 2003a, 32 (2): 155-160 (in Chinese with English abstract).
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 阿尔泰造山带南缘中泥盆世苦橄岩及其大地构造和岩石学意义[J]. *地球科学*, 2005, 30 (3): 289-297.
- Zhang Z. C., Yan S. H., Chen B. L., et al. Middle Devonian Picrites of South Margin of Altay Orogenic Belt and Implications for Tectonic Setting and Petrogenesis [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30 (3): 289-297 (in Chinese with English abstract).
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. *科学通报*, 2006a, 55 (13): 1565-1574.
- Zhang Z. C., Yan S. H., Chen B. L., et al. SHRIMP-U-Pb zircon dating of the eastern Junggar subduction granite, Xinjiang, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006a, 51 (13): 1565-1574 (in Chinese with English abstract).
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23 (8): 1933-1944.
- Tong Y., Wang T., Hong D. W., et al. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (8): 1933-1944 (in Chinese with English abstract).
- 杨富全, 毛景文, 闫升好, 等. 新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. *地质学报*, 2008, 82 (4): 485-499.
- Yang F. Q., Mao J. W., Yan S. H., et al. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic Plagiogranite Pluton in Altay, Xinjiang [J]. *Acta Geological Sinica*, 2008, 82 (4): 485-499 (in Chinese with English abstract).
- 刘国仁, 董连慧, 高福平, 等. 新疆阿尔泰克拉克河中泥盆纪花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *地球学报*, 2010, 31 (4): 519-531.
- Liu G. R., Dong L. H., Gao F. P., et al. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Dating and Geochemistry of the Devonian Granites from the Middle Kelan River Valley of Altay in Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31 (4): 519-531 (in Chinese with English abstract).
- 沈晓明, 张海祥, 马林. 洋脊俯冲及其在新疆阿尔泰地区存在的可能证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34 (2): 181-195.
- Shen X. M., Zhang H. X., Ma L. Ridge Subduction and the Possible Evidences in Chinese Altay, Xinjiang [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34 (2): 181-195 (in Chinese with English abstract).
- 王涛, 童英, 李舫, 等. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义—以中国阿尔泰为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29 (6): 595-618.
- Wang T., Tong Y., Li S. et al. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29 (6): 595-618 (in Chinese with English abstract).
- Bhatia M. R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *J Geol*, 1983, 91 (6): 611-627.
- Seng ¨ r A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- Xiao W. J., Windley B F., Badarch G., et al. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: implications for the growth of Central Asia [J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161: 339-342.
- Chen B., Jahn B M. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of NW China and their tectonic impication [J]. *Geol. Mag.* 2002, 139 (1): 1-13.
- Windley B F, Kroner A, Guo J H, et al. Neoproterozoic to Palaeozoic geology of the Altai Orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution [J]. *Journal of Geology*, 2002, 110 (6): 719-737.
- Li J. Y., Xiao W. J., Wang K. Z., et al. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjian, N W China [A]. Mao J W, Goldfarb S, Wang X et al. *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tinanshan* [C]. *IACOD Cuidebook Series*, 2003, 10: 31-74.
- HU A. Q., Hahn B M., Zhang G. X., et al. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence, Part I. Isotopic characteristics of basement rocks [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328: 15-51.
- Wang T., Hong D. W., Jahn B M., et al. Tining, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest

- China: implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen [J]. *Journal of Geology*, 2006, 735-751.
- Wilson M. Igneous petrogenesis [M]. Unwin Hyman Press, London, 1989.
- Erlank A J, Kable E J D. The significance of incompatible elements in Mid-Atlantic Ridge basalts from 45N, with particular reference to Zr/Nb [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1976, 54: 281-291.
- Sun S S, Nesbitt R W. Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1979, 44: 119-138.
- Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, Can [J]. *J. Earth. Sci.*, 1971, 8: 523-548.
- Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, et al. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granite-iodine plutons from the Dabieshan high pressure and ultra high pressure metamorphic zone, east central China [J]. *Lithos*, 1998, 45: 431-456.
- Soesoo A. Fractional crystallization of mantle derived melts as a mechanism for some I-type granite petrogenesis: An example from Lachlan Fold Belt, Australia [J]. *J. Geol. Soc.*, London, 2000, 157: 135-149.
- Pati Douce, A E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro, A., Fernandez, C., Vigneresse, J. L. (Eds.), *Understanding granites: integrating new and classical techniques* [J]. Geological Society of London Special Publication, 1999, 168: 55-75.
- Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 2000, 50: 51-73.
- Xu J. F., Chen F. R., Yu X. Y., et al. Kuerti Ophiolite in Altay Area of North Xinjiang: Magmatism of an Ancient Back-arc Basin [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2001, 20 (3): 344-352 (in Chinese with English abstract).
- Pin C, Paquette J L. A mantle derived bimodal suite in the Hecynian belt: Nd isotope and trace elements evidence for a subduction-related origin of the late Devonian Brevennen metavolcanics, Massif Central (France) [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1997, 129: 222-238.
- Geist D J. An assessment of melting processes and the Galapagos hotspot: major and trace element evidence [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1992, 52: 65-82.
- Pearce J A, Peate D W, Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1995, 23: 51-285.
- Taylor R N, Lapierre H, Vidal P, et al. Igneous geochemistry and petrogenesis of the Izu-Bonin forearc basin [A]. Maddox, E. M. (Ed.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Bonin Arc-Trench System* [C]. *Scientific Results*, 1992, 126: 405-430.
- Hollings P, Kerrich R. Geochemical systematics of tholeiites from the 2.86 Ga Pickle Crow Assemblage, northwestern Ontario: arc basalts with positive and negative Nb-Hf anomalies [J]. *Precambrian Research*, 2004, 134: 1-20.
- Pearce J A. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of the granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956-983.
- Xu J. F., Castillo P R, Chen F. R., et al. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kurti area, Xinjiang, northwest China: implications for back-arc mantle evolution [J]. *Chemical Geology*, 2003, 193: 137-154.