

南天山北部巴音布鲁克早古生代火成岩的地球化学特征与岩石成因*

马中平 夏林圻 徐学义 夏祖春 李向民 王立社

MA ZhongPing, XIA LinQi, XU XueYi, XIA ZuChun, LI XiangMin and WANG LiShe

西安地质矿产研究所, 西安 710054

Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Xi'an 710054, China

2008-02-19 收稿, 2008-09-17 改回.

Ma ZP, Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM and Wang LS. 2008. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Early Paleozoic igneous rocks from Bayinbuluke, Southern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2289–2300

Abstract The volcanics of Upper-Silurian Bayinbuluke Formation in the north of Southern Tianshan are mostly composed of intermediate-basic extrusive rocks with gabbro intrusion and abundant pyroclastic rocks. These volcanics and gabbros are enriched in LILEs and LREEs with $(La/Yb)_N$ values 2.92 ~ 5.21, and depleted in HFSEs, especially Nb and Ta negative anomaly with Nb/La values 0.22 ~ 0.33, similar to the magmatic rock in island arc settings. The Zr/Nb ratios (26 ~ 47) and Hf/Ta ratios (11.9 ~ 19.9) indicate their sources are depleted mantle sources similar to N-MORB. The higher contents of HFSEs than typical island arc basalt (IAB) and the linear negative correlation between $\epsilon_{Nd}(t)$ (+3.23 ~ +6.15) and $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ values (0.7044 ~ 0.7063) which display negative and positive correlation with LILE/HFSE, respectively, suggest that both fluid-sediments and silicate melts derived from subducted oceanic slab are involved in the genesis of Bayinbuluke magmas, and these rocks are the intergradation between normal island arc basalt (IAB) and Nb-enriched arc basalt (NEAB). According to the distributing location of Bayinbuluke Formation adjacent to the ophiolitic mélangé belt on the southern margin of Central Tianshan and its chronologic age corresponding with the subducting age of Southern Tianshan Ocean, it stands a good chance that the formation of these volcanics and gabbros owes to the Late-Silurian subduction of Southern Tianshan Ocean.

Key words Igneous rock; Geochemistry; Petrogenesis; Upper-Silurian; Bayinbuluke Formation; Southern Tianshan

摘要 南天山北部上志留统巴音布鲁克组火山岩系以中基性喷出岩为主, 并有辉长岩侵入, 其矿物组合中都含有角闪石, 岩层中爆发相火山碎屑岩极为发育。各种火山—侵入岩的 LREE 和 LILE 强烈富集、HFSE 相对亏损, 出现明显的 Ta、Nb 负异常, $(La/Yb)_N = 2.92 \sim 5.21$, $Nb/La = 0.22 \sim 0.33$, 具有岛弧岩浆岩的特征。Zr/Nb = 26 ~ 47、Hf/Ta = 11.9 ~ 19.9, 暗示其源区为类似于 N-MORB 的亏损地幔; 高的 Th、LREE 含量和高于正常岛弧玄武岩、低于洋岛玄武岩(OIB)的 HFSE 绝对丰度, 较小的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+3.23 ~ +6.15)、较大的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ 值(0.7044 ~ 0.7063), $\epsilon_{Nd}(t)$ 与 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ 间呈明显的线性负相关关系, 并且分别与 LILE/HFSE 之间呈负相关和正相关关系。上述特征反映出巴音布鲁克火成岩的岩石成因中既有俯冲洋壳板片流体—沉积物的加入, 也有板片熔体组分的贡献, 在地球化学上具有正常岛弧玄武岩(IAB)与富铌岛弧玄武岩(NEAB)之间过渡系列的特征。该套火成岩与中天山南缘蛇绿混杂岩带紧邻, 地层时代也与南天山洋俯冲—消减时代相当, 它应当是南天山洋盆于晚志留统时发生的俯冲—消减所引发的岛弧火山—岩浆作用的地质记录。

关键词 火成岩; 地球化学; 岩石成因; 上志留统; 巴音布鲁克组; 南天山

中图法分类号 P588.125

南天山造山带位于伊犁—哈萨克斯坦板块和塔里木—卡拉库姆板块之间, 它是于晚前寒武纪就已形成的南天山洋

盆在其后的俯冲消减闭合过程中, 两侧陆块及其间的增生杂岩等逐渐拼贴碰撞而形成的碰撞造山带, 是“中亚型造山带”

* 中国地质调查局项目(1212010611804, 200313000063)和国家自然科学基金项目(40472044)资助。

第一作者简介: 马中平, 男, 1970 年生, 博士, 副研究员, 矿物岩石矿床学专业, E-mail: xamzhongping@cgs.gov.cn

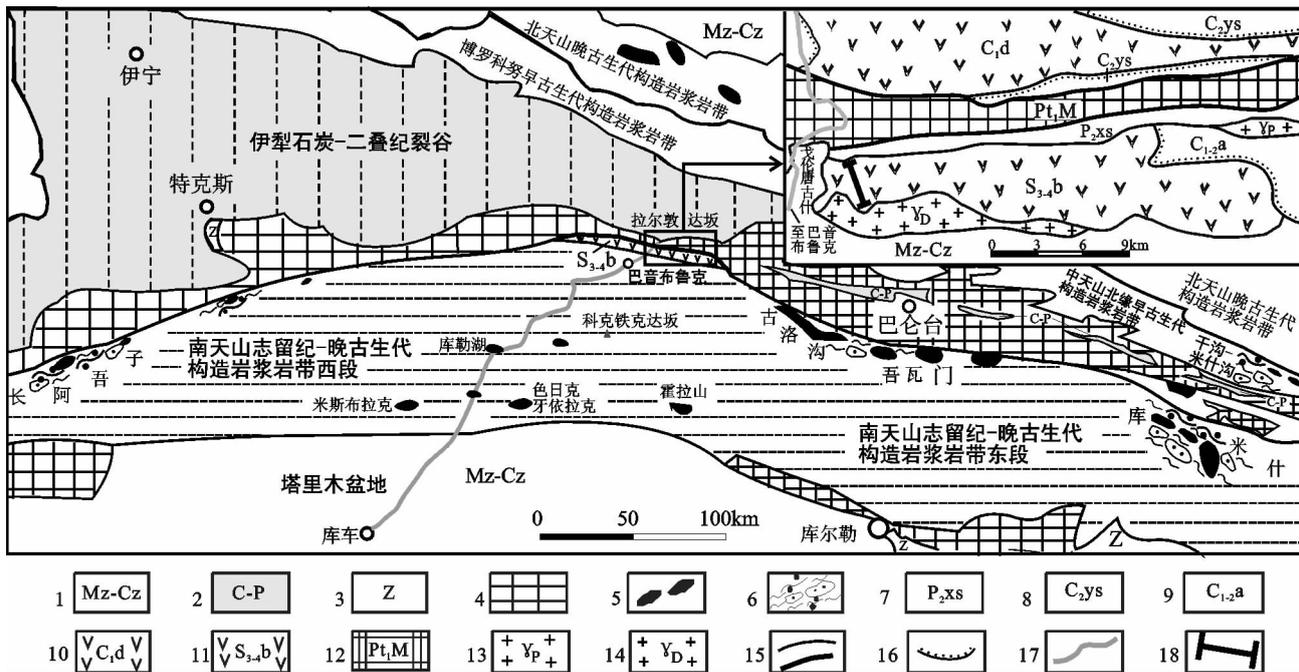


图1 巴音布鲁克组的分布位置及天山造山带构造单元分区略图(据 Xia *et al.*, 2003, 2004)

1-中、新生界; 2-石炭二叠纪裂谷火山—沉积岩系; 3-震旦系火山岩; 4-前寒武纪地块、微陆块; 5-超基性岩或蛇绿岩; 6-蛇绿混杂岩; 7-中二叠统晓山萨依组; 8-上石炭统伊什基里克组; 9-石炭系阿克苏组; 10-下石炭统大哈拉军山组; 11-中—上志留统巴音布鲁克组; 12-古元古界木扎尔特群; 13-二叠纪花岗岩; 14-泥盆纪花岗岩; 15-断裂; 16-不整合面; 17-公路; 18-采样剖面位置

Fig. 1 Sketch map of geological tectonic units of Tianshan orogenic belt (after Xia *et al.*, 2003, 2004)

1-Mesozoic and Cenozoic covers; 2-Carboniferous and Permian rift volcanic-sedimentary rocks; 3-Sinian volcanic rocks; 4-Precambrian continental blocks; 5-Ultrabasic rocks; 6-Ophiolitic mélange; 7-Middle Permian Xiaoshanshayi formation; 8-Upper Carboniferous Yishijilike formation; 9-Carboniferous Akesarke formation; 10-Lower Carboniferous Dahalajunshan formation; 11-Upper Silurian Bayinbuluke formation; 12-Paleoproterozoic Mozhaerte group; 13-Permian granitic rocks; 14-Devonian granitic rocks; 15-Fault; 16-unconformable interface; 17-Road; 18-Sampling section location

的典型代表之一(高俊等, 2006)。对于南天山洋盆俯冲阶段的岩浆作用的研究, 近年来多集中在伊犁—中天山南缘大规模分布的晚古生代花岗岩的研究中(杨天南和王小平, 2006; 杨天南等, 2006; 朱志新等, 2006; 高俊等, 2006); 而早古生代作为南天山洋盆大规模扩张和洋壳初始俯冲的并存阶段, 因与之相关的火成岩出露面积有限, 对其研究也相对较少, 但它却是完整理解南天山洋盆形成、演化过程的至关重要的一环。南天山北部早古生代火山岩发育时代主要为中—晚志留世, 被命名为巴音布鲁克组($S_{3-4}b$) (图1), 对该组火山岩早期的研究认为其形成于岛弧环境(蔡东升等, 1995; 刘本培等, 1996; Gao *et al.*, 1998), 但没有报道过它们的岩石地球化学以及同位素研究数据, 而1:25万新源县幅区域地质调查认为其形成于洋岛环境。为了进一步对巴音布鲁克组火山岩的形成环境、地幔源区特征以及岩浆演化等进行研究, 我们在位于该组地层原始定名地的新疆和静县巴音布鲁克镇戈伦唐古什地区(图1)进行了调研, 并对其中的各类火山岩与辉长岩进行了系统的岩石地球化学分析和Nd-Sr同位素测试。

1 地质概况

巴音布鲁克组($S_{3-4}b$)火山岩主要分布于新疆巴音布鲁克大草原以北的南天山北部(图1), 沿那拉提山东段断续出露。区域上与含有蛇绿混杂岩的中天山南缘长阿吾子—古洛沟—吾瓦门—库米什断裂带相邻。研究区内(图1)该组地层北与中二叠统陆相碎屑岩断层相接, 南被草原第四系沉积物覆盖或被晚古生代(D-C)花岗岩侵入, 东被石炭系灰岩、生物碎屑灰岩不整合覆盖。其主要岩石类型为一套以中基性火山熔岩为主(少量酸性火山熔岩), 夹有大量凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩等火山碎屑岩组合, 其中有辉长岩小岩株侵入。1:20万巴音布鲁克幅地质图及说明书^①、刘本培等(1996)在该组地层中的大理岩化灰岩夹层中发现有晚志留世珊瑚(*Heliolites sp.*, *Mesofavosites kfalfini*等), 腕足类(*Atrypa*

① 新疆地质矿产局. 1969. 巴音布鲁克幅地质图(1:200000)及其说明书

kaiduheensis, *A. conga*, *A. sowerbyi*), 三叶虫 (*Coronocephalus* sp. 和 *Encrinuridae*) 及层孔虫 (*Amphipora* sp.) 化石。

2 样品采集与分析

在巴音布鲁克组的原始定名地——和静县巴音布鲁克镇戈伦唐古什地区, 系统采集该组地层中的各类火山岩及侵入于其中的辉长岩小岩株等岩石样品 (样品采集点即图 1 局部放大框中采样剖面位置), 经显微镜观察后挑选有代表性且蚀变弱的样品进行测试分析。主元素分析在中国科学院地球化学研究所 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 上进行, 通过插入部分样品重复测试进行分析质量监控, 各项主量元素分析误差均低于 5%。微量元素在中国地质大学 (北京) 地学实验中心电感耦合等离子质谱 (ICP-MS) 法分析, 并用国际标准物质 BHVO-1、AGV-1、G-2 做分析样品元素浓度的校正标准, 分析精度一般优于 5%。Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所同位素超净实验室进行, 用 HF + HClO₄ 在 Teflon 容器中低温溶解, 采用 AG50W × 8(H⁺) 阳离子交换柱分离出纯净的 Rb 和 Sr 及纯净的 Sm 和 Nd (Sm-Nd 分离时另用 P507 萃淋树脂), 在 VG354 固体同位素质谱计上进行测试; Sr 同位素质量分馏用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 校正, 国际标样 NBS987 的测试结果为 0.710254 ± 16 (*n* = 8, 2σ), 参考值为 0.710240; NBS607 测试结果为 1.20032 ± 3 (*n* = 2, 2σ), 参考值为 1.20039 ± 3。Rb-Sr 全流程空白本底约为 2 × 10⁻¹⁰ g ~ 5 × 10⁻¹⁰ g。Nd 同位素分馏用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正, 国际标样 La Jolla 的测定结果为 0.511862 ± 7 (*n* = 6, 2σ), 参考值为 0.511859; BCR-1 测试结果为 0.512626 ± 9 (*n* = 2, 2σ), 参考值为 0.512638。Sm-Nd 全流程空白本底约为 5 × 10⁻¹¹ g ~ 10 × 10⁻¹¹ g。

3 岩相学特征

辉长岩有含石英辉长岩 (样品 03T-62、-64) 和角闪辉长岩 (样品 03T-69), 具辉长辉绿结构—嵌晶含长结构。含石英辉长岩除含有约 4% ~ 5% 的他形粒状石英外, 其余矿物组成与角闪辉长岩基本一致。主要矿物组合为斜长石 + 角闪石 + 辉石, 其中, 斜长石 (主要为中-拉长石) 60% ~ 70%, 多具有环带构造, 有帘石化现象; 角闪石含量 25% ~ 15%, 辉石含量 4% ~ 6%, 绿泥石化较强。副矿物主要由铁氧化物、磷灰石、少量锆石等组成。

基性—中基性火山岩类以粒玄岩 (样品 02T-65、-74)、玄武岩 (样品 02T-68、-78) 和玄武安山岩 (02T-73、-80) 为代表。其共同特征是: 均为斑状结构, 斑晶矿物主要由数量不等的斜长石 (50% ~ 65%, 有帘石化现象) 和角闪石 (30% ~ 15%, 绿泥石化较强) 组成。基质具间粒结构—间粒间隐—脱玻间隐结构, 主要由斜长石、角闪石、铁氧化物、玻璃质等组成。另外, 样品 02T-74、-78、-80 中含有少量的钾钠长石斑晶,

基质中含有少量黑云母微晶。

流纹岩 (样品 03T-75): 具稀疏斑状结构, 斑晶由长石 (钾钠长石、斜长石共计 5% 左右) 和少量石英 (3% ~ 5%) 等组成; 基质为他形粒状极细粒石英和长石 (微晶或雏晶) 以及隐晶质物质组成。

4 地球化学特征

4.1 主元素特征及岩石系列划分

巴音布鲁克各火山—侵入岩的主元素分析结果见表 1。各岩石间 SiO₂ 变化较大 (48.30% ~ 77.65%), 但多集中于 50% ~ 56% 之间; MgO 含量除流纹岩 (样品 03T-75) 较低 (0.26%) 及一个玄武岩 (样品 03T-68) 较高 (8.29%) 外, 其余样品的 MgO 含量在 3.14% ~ 5.61% 之间变化; 除流纹岩的 Mg[#]、Al₂O₃ 含量较低 (分别为 12、12.6%) 外, 其余样品的 Mg[#] 和 Al₂O₃ 含量较高 (分别为 44 ~ 67 和 15.4% ~ 19.7%); K₂O 和 Na₂O 含量变化较大, 分别在 0.43% ~ 7.84% 和 0.48% ~ 5.52% 之间, 从 K₂O 和 Na₂O 的含量相对大小来看, 既有钠质岩石, 也有钾质岩石; TiO₂ 含量除两个样品小于 1.0% 外, 其余样品在 1.06% ~ 2.20% 之间变化; FeO^T 和 CaO 含量变化大, 分别介于 3.28% ~ 9.17% 和 0.26% ~ 9.02% 之间。考虑到所研究的样品时代古老, K、Na 等元素的活动性较强, 易在后期蚀变过程中发生活化迁移, 故采用 Nb/Y-SiO₂ (图 2a) 和 SiO₂-FeO^T/MgO (图 2b) 进行岩石系列划分。在 Nb/Y-SiO₂ 图中 (图 2a), 本区各火山—侵入岩均落入亚碱性系列范围内; 在 SiO₂-FeO^T/MgO 图中 (图 2b), 这些岩石既有拉斑系列, 也有钙碱性系列。各主量元素与 Mg[#] 值的协变关系见 (图 3)。

4.2 稀土和微量元素特征及形成环境

各类火成岩的稀土及微量元素测试数据见表 1。各类岩石间的稀土总量 (ΣREE) 变化较大, 介于 55.67 × 10⁻⁶ ~ 262.86 × 10⁻⁶ 之间, 为球粒陨石的 17 ~ 80 倍; 轻重稀土元素间分异明显, 在 REE 的球粒陨石标准化配分曲线图中均表现为轻稀土元素 (LREE) 富集、重稀土元素 (HREE) 亏损型 (图 4a), 但 (La/Yb)_N 比值相对集中, 介于 2.92 ~ 5.21 之间; δEu_N 值变化较大, 介于 0.55 ~ 1.12 之间, 其中的流纹岩具有最低的 δEu_N 值 (0.55), 显示出明显的 Eu 负异常, 表明该流纹岩在喷出前曾经历了较明显的斜长石分异结晶。在正常型洋中脊玄武岩 (N-MORB) 标准化的微量元素分布图上 (图 4b), 巴音布鲁克各火成岩的大离子亲石元素 (LILE), 如 Cs、Rb、Ba、K、Pb 和 U, 以及 Th 等强烈富集, 高场强元素 (HFSE), 如 Ta、Nb、Zr、Hf、P、Ti 等相对亏损 (尤其出现明显的 Ta、Nb 的负异常), 这一特征与洋壳俯冲—消减作用有关, 通常被解释为消减洋壳板片变质脱水后形成的富含 LILE 的流体进入楔形地幔源区, 导致地幔源区中的 LILE/HFSE 比值升高的缘故 (Davis and Stevenson, 1992; Stolz *et al.* ,

表1 巴音布鲁克火成岩主元素(wt%)、稀土及微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) analysis of volcanic-intrusive rocks from Bayinbuluke

岩石名称 样品号	含石英辉长岩 03T-62	含石英辉长岩 03T-64	粒玄武岩 03T-65	玄武岩 03T-68	角闪辉长岩 03T-69	玄武安山岩 03T-73-1	粒玄武岩 03T-74	流纹岩 03T-75	玄武岩 03T-78	玄武安山岩 03T-80
SiO ₂	51.49	53.45	52.34	48.30	51.56	55.53	50.13	77.65	51.13	56.04
TiO ₂	1.06	0.93	1.67	1.33	1.17	2.20	1.67	0.57	1.54	2.17
Al ₂ O ₃	19.47	19.70	17.68	17.93	18.69	15.40	17.18	12.60	16.67	16.68
Fe ₂ O ₃	3.97	2.87	3.34	5.09	4.00	5.50	3.51	2.48	4.04	4.03
FeO	2.01	1.90	4.05	4.10	2.67	4.22	2.75	1.05	3.10	4.48
MnO	0.07	0.05	0.10	0.25	0.36	0.27	0.16	0.04	0.22	0.39
MgO	5.37	5.19	5.07	8.29	5.61	5.34	4.59	0.26	3.14	3.51
CaO	9.02	8.04	7.77	2.32	8.40	5.58	4.61	0.26	4.12	3.24
Na ₂ O	3.79	3.80	5.06	5.27	4.38	0.59	5.11	0.48	5.52	5.17
K ₂ O	0.58	0.85	0.99	2.31	0.43	0.65	7.51	1.74	7.84	1.34
P ₂ O ₅	0.37	0.38	0.37	0.52	0.47	0.58	0.34	0.28	0.55	0.75
CO ₂	0.7									
烧失量	1.90	2.42	1.30	4.04	1.76	3.61	1.97	1.92	1.81	2.00
总量	99.80	99.58	99.74	99.75	99.50	99.47	99.53	99.33	99.68	99.80
Mg [#]	63.17	67.37	56.14	63.00	61.46	50.93	58.06	12.38	45.37	43.55
Ba	153	171	222	253	310	2421	332	995	300	340
Rb	25	35	14	7.7	17	209	52	163	40	26
Sr	519	601	517	175	544	176	306	41	154	148
Cs	0.5	0.37	1	0.49	0.59	1.41	1.02	0.28	0.58	0.33
Ta	0.16	0.18	0.11	0.22	0.24	0.35	0.26	0.79	0.34	0.34
Nb	2.7	2.89	1.86	2.46	3.58	6.2	4.13	12.97	4.96	5.67
Hf	1.91	2.33	1.53	2.64	3.15	6.98	3.49	14.6	5.18	5.66
Zr	71	97	55	104	131	264	144	610	191	224
Y	19	12	18	17	23	42	24	64	36	39
Pb	11.8	3.97	2.8	4.49	7.57	24.9	14.3	15.9	5.73	31
Th	1.56	1.83	0.99	3.43	1.25	2.72	1.51	7.1	1.77	2.51
U	0.4	0.34	0.28	0.87	0.41	0.8	0.55	2.02	0.68	0.87
Cr	178	75	86	154	168	44	88	5.9	43	29
Ni	59	142	29	74	111	35	55	2.9	21	22
La	10.5	9.9	8.4	9.6	11.6	19	13	42	16	20
Ce	22.1	21.5	19.5	20.7	26.6	48	29	98	40	49
Pr	2.91	2.76	2.76	2.7	3.7	6.61	4.28	13	5.64	6.77
Nd	13	10.7	12.4	12.6	16.2	30	18	55	27	31
Sm	3.15	2.12	3.11	2.81	4.64	6.88	4.35	11.34	6.49	7.19
Eu	0.97	0.73	1.13	1.06	1.26	2.08	1.3	2.02	1.88	2.13
Gd	3.1	2.27	3.32	2.94	3.84	7.56	4.63	10.9	6.99	7.59
Tb	0.46	0.35	0.56	0.46	0.64	1.23	0.69	1.82	1.08	1.17
Dy	3.04	1.97	3.08	3.1	4.12	7.46	4.19	10.87	6.51	6.96
Ho	0.6	0.43	0.6	0.62	0.78	1.44	0.82	2.15	1.25	1.35
Er	1.76	1.27	2.05	1.83	2.34	4.46	2.45	6.66	3.84	4.08
Tm	0.26	0.2	0.25	0.28	0.37	0.65	0.38	1.09	0.55	0.56
Yb	1.88	1.28	1.63	1.79	2.23	4.36	2.32	6.97	3.7	3.43
Lu	0.25	0.19	0.2	0.26	0.31	0.63	0.33	1.04	0.5	0.53
δEu_N	0.94	1.01	1.07	1.12	0.89	0.88	0.88	0.55	0.85	0.88
(La/Yb) _N	3.77	5.21	3.47	3.62	3.51	2.94	3.78	4.06	2.92	3.93

1996),也导致其后发生部分熔融时所形成的岛弧岩浆中的相应比值升高,与印度尼西亚 Sunda 弧(Gertisser and Keller, 2003)火山岩相比,本区各类岩石的各种不相容元素(LILE、REE、HFSE)除有稍大的变化范围外,其分布型式与 Sunda 弧火山岩几乎完全一致(图4b);与洋岛玄武岩(OIB)(Sun and

McDonough,1989)相比,本区岩石(流纹岩除外)的 HFSE 和 LREE 都明显低于 OIB 相应元素的含量(图略),尤其 OIB 不出现 Ta 和 Nb 的亏损,与本区岩石有明显的区别。此外,本区岩石的 Nb/La 比值为 0.22~0.33,平均 0.29,与 Li *et al.* (2003)给出的岛弧岩浆岩的 Nb/La 比值(约 0.3)相一致,而

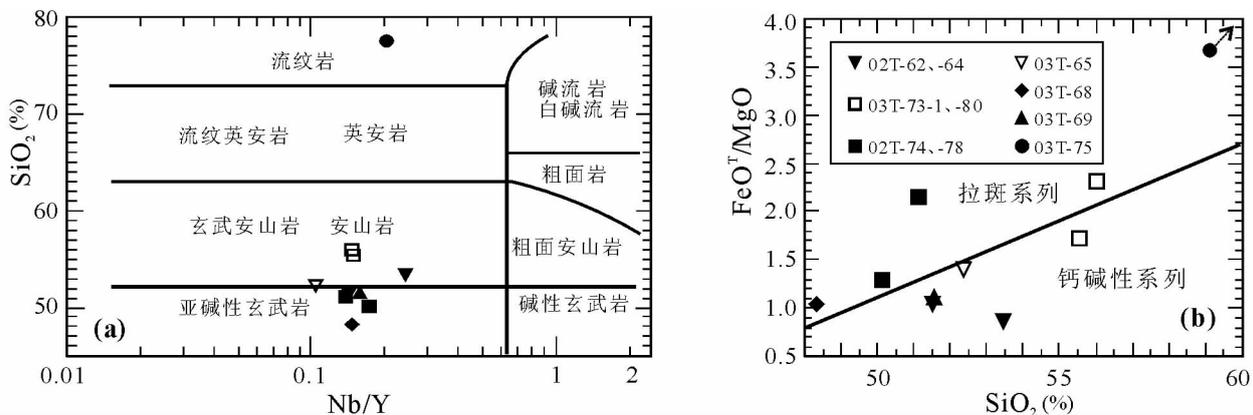


图2 SiO₂-Nb/Y (据 Winchester and Floyd, 1977) 和 FeO^T/MgO-SiO₂ (据 Miyashiro, 1975) 图解

Fig. 2 The diagram of SiO₂-Nb/Y (after Winchester and Floyd, 1977) and FeO^T/MgO-SiO₂ (after Miyashiro, 1975)

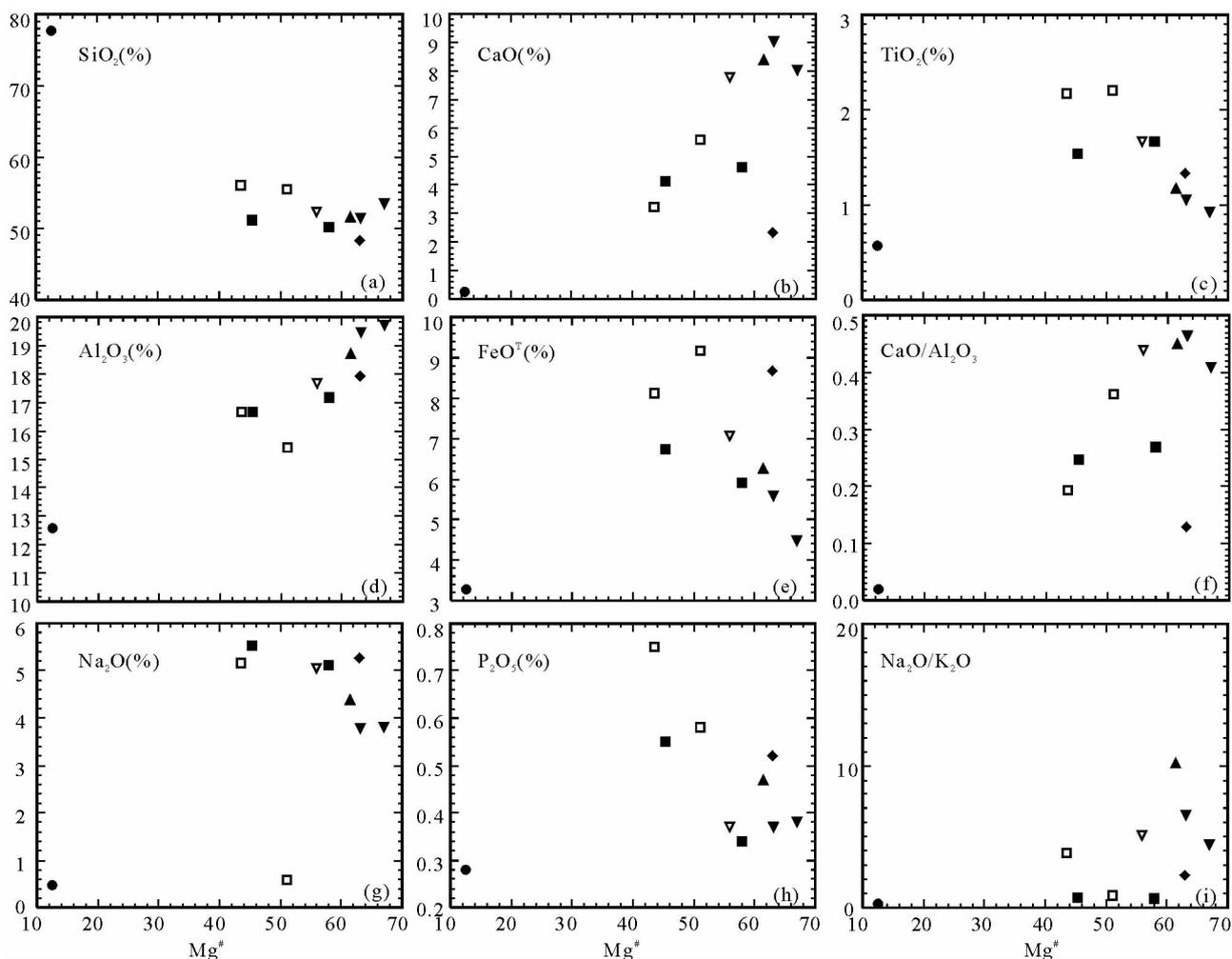


图3 巴音布鲁克火成岩主元素(氧化物)与 Mg[#]间协变关系

Fig. 3 Mg[#] vs. oxides correlation diagrams for volcanic rocks and gabbros from Bayinbuluke

与 OIB 的 Nb/La 比值(1.30)相差甚远。在不活动元素构造环境判别图,如,在 Hf/3-Th-Ta 及 Tb × 3-Th-Ta × 2 图解(图 5a、b)中,本区岩石落入火山弧玄武岩(VAB)或岛弧拉

斑玄武岩(IAT)或岛弧钙碱性玄武岩(IAC)范围内;而在 Th/Yb-Ta/Yb 协变图中(图 5c),除个别样品外,其余样品均落入大洋岛弧范围内。

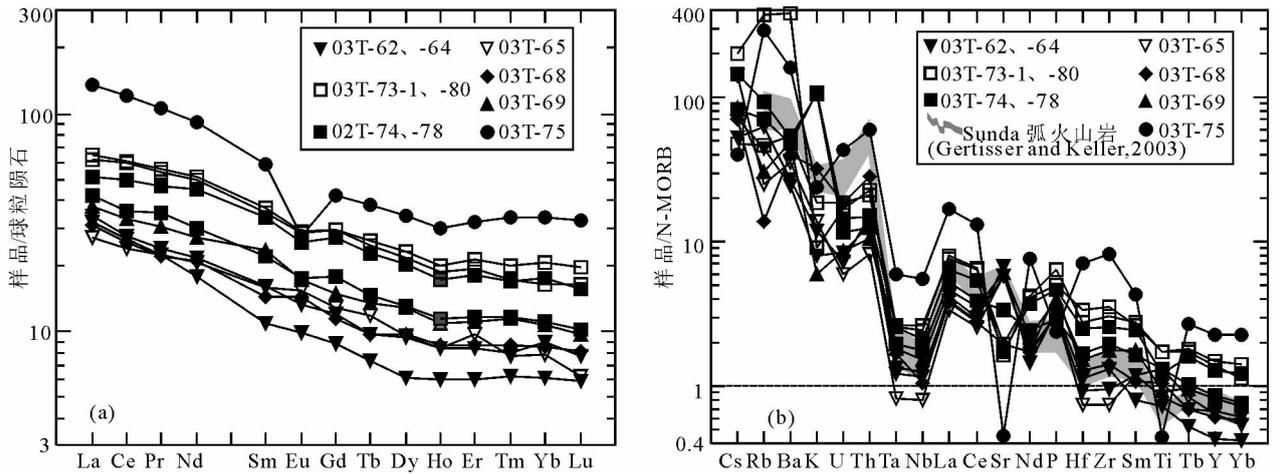


图4 (a) 稀土元素的球粒陨石 (Boyton, 1984) 标准化分布曲线和 (b) 微量元素的 N-MORB (Sun and McDonough, 1989) 标准化分布曲线

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and N-MORB-normalized trace element patterns for volcanic-intrusive rocks from Bayinbuluke. Chondrite from Boyton (1984), N-MORB from Sun and McDonough (1989)

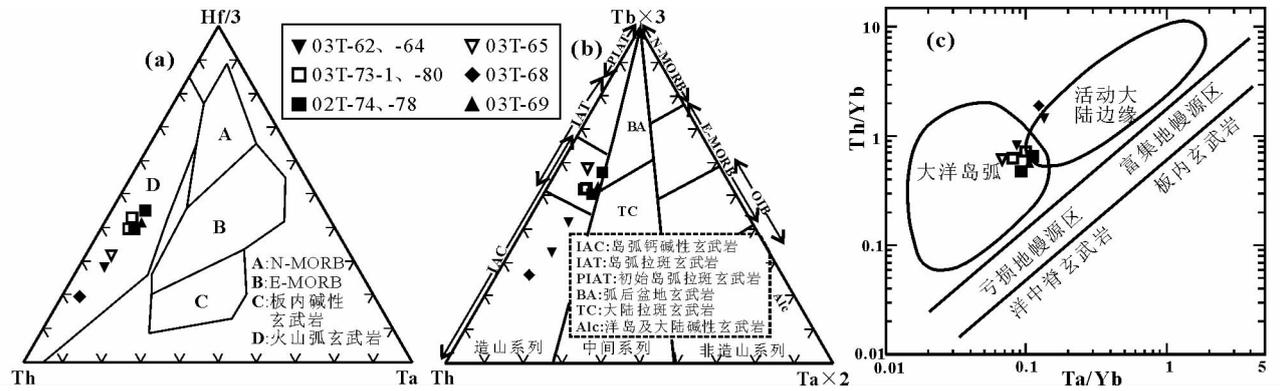


图5 巴音布鲁克火山—侵入岩 ($\text{SiO}_2 \leq 56\%$) 构造环境判别图 (底图分别据: Wood, 1980; Cabanis and Thiéblemont, 1988; Pearce, 1983)

Fig. 5 Tectonic discrimination diagrams for volcanic-intrusive rocks from Bayinbuluke (after Wood, 1980; Cabanis and Thiéblemont, 1988; Pearce, 1983, respectively)

综合上述地球化学特征,巴音布鲁克火山—侵入岩具有 LREE 及 LILE 强烈富集、HFSE 相对亏损等显示出岛弧岩浆岩的地球化学特征,各 HFSE 的特征比值显示其地幔源区与 N-MORB 的源区相近,为亏损地幔源区,结合 HFSE 与 LREE 的特征比值和不活动元素及部分主量元素的协变关系的构造环境判别,以及岩层中凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩等爆发相火山碎屑岩的发育等,我们认为巴音布鲁克组岩石应形成于大洋岛弧构造环境(而非洋岛环境)。考虑到该组岩层中的岩石既有拉斑玄武岩系列(图2),也有钙碱性玄武岩系列,以中基性岩石为主(少量基性和酸性岩石),各主量元素及 $\text{Mg}^\#$ 变化范围大等特征,它应当是一个较为成熟的岛弧。

4.3 Nd-Sr 同位素特征

巴音布鲁克火成岩的 Sr-Nd 同位素测试数据列于表 2。由表可见,这些火成岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低,介于 $+3.23 \sim +6.15$ 之间; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 值较高,介于 $0.7044 \sim 0.7063$ 之间。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图6)中,除一个玄武岩样品(03T-68)的具有异常高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 值而明显不协调外,其它样品的数据点落入 OIB 范围内(或其边界线附近),并且保持着与地幔阵列近于平行的线性负相关关系。样品 03T-68 具有最高的烧失量(LOI = 4.04%,表1),但其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与其余样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化范围一致,表明该样品异常高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 值是由于海水蚀变作用的结果(Yogodzinski *et al.*, 1996)。

表2 巴音布鲁克火山-侵入岩的 Nd-Sr 同位素组成

Table 2 Sr and Nd isotopic composition of volcanic rocks and gabbros from Bayinbuluke, Southern Tianshan

Sample	03T-62	03T-64	03T-65	03T-68	03T-69	03T-78	03T-80
Sm($\times 10^{-6}$)	3.15	2.12	3.11	2.81	4.64	6.49	7.19
Nd($\times 10^{-6}$)	13.0	10.7	12.4	12.6	16.2	27	31.0
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1465	0.1198	0.1517	0.1349	0.1732	0.1454	0.1403
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}2\sigma$	0.512725 ± 11	0.512656 ± 9	0.512760 ± 12	0.512781 ± 13	0.512738 ± 13	0.512783 ± 11	0.512754 ± 11
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$	0.512317	0.512323	0.512338	0.512406	0.512256	0.512378	0.512363
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	1.70	0.35	2.38	2.79	1.95	2.83	2.26
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	4.43	4.53	4.83	6.15	3.23	5.62	5.33
Rb($\times 10^{-6}$)	25	35	14	7.7	17	40	26
Sr($\times 10^{-6}$)	519	601	517	175	544	154	148
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.1393	0.1685	0.0783	0.1273	0.0904	0.7516	0.5083
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}2\sigma$	0.705545 ± 12	0.705643 ± 18	0.705054 ± 11	0.707021 ± 12	0.705513 ± 9	0.708907 ± 12	0.708023 ± 12
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	0.704702	0.704623	0.704580	0.706250	0.704966	0.704357	0.704946

注: $t = 425 \text{ Ma}$; 2σ 为绝对误差, ± 11 示 2σ 绝对误差为 ± 0.000011

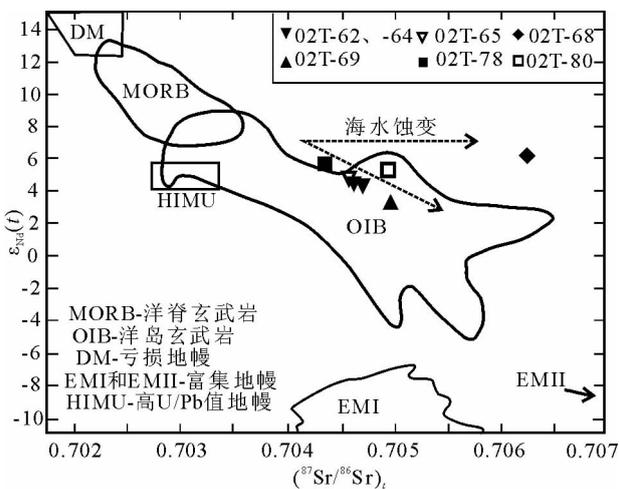


图6 巴音布鲁克火成岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 相关图 (据 Zindler and Hart, 1986)

Fig. 6 Diagram of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ of volcanic and intrusive rocks from Bayinbuluke, Southern Tianshan (after Zindler and Hart, 1986)

5 岩石成因讨论

5.1 微量元素比值及 Sr-Nd 同位素比率对源区性质的约束

典型岛弧岩浆岩的地幔源区是“水化亏损地幔楔橄榄岩”(刘红涛等, 2004)。消减板片物质可以使岩浆的 LILE/HFSE 和 LREE/HFSE 比值升高, 但是对于 HFSE 来说, 由于其相对的惰性和它们之间相近似的地球化学性质, 使得地幔源区中 HFSE 与 HFSE 之间的比值不因消减板片物质的加入、以及岩浆演化过程中的结晶分异和同化混染作用 (AFC) 而发生显著改变, 因此 HFSE 之间的比值可以用来示踪消减

板片物质介入前的地幔源区特征 (McCulloch and Gamble, 1991; Woodhead *et al.*, 1993)。本区岩石的 Zr/Nb (26 ~ 47, 平均 37)、Hf/Ta (11.9 ~ 19.9, 平均 14.8) 等均与 N-MORB (Sun and McDonough, 1989) 的相应比值 (分别为 30、15.5) 相接近, 而与 OIB 的相应比值 (分别为 5.8、2.9) 相差很大, 表明本区岩石的源区与 N-MORB 的地幔源区相类似, 应为亏损地幔, 而与 OIB 源区完全不同。

本区样品的 Sr-Nd 同位素比率偏离了 MORB 的范围, 而落入 OIB 范围内 (或其边界线附近, 除一个受海水蚀变作用较强的样品 03T-68 外), 并且 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 值存在与地幔阵列近平行的线型负相关关系 (图 6), 这些特征表明, 要么是这些岩石的地幔源区有地壳物质 (消减洋壳所携带的沉积物) 的加入, 要么是由于岩浆上升至地表过程中地壳物质的混染所造成。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 Ba/Zr 和 Rb/Zr 之间的负相关 (图 7 a, b) 以及 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 与 Ba/Zr 间的正相关 (图 7c) 关系, 结合 Ba/Zr 和 Rb/Zr 值并不随 $\text{Mg}^\#$ 的下降而上升 (图 8), 反映出本区岩石的地幔源区中有流体活动性元素 (如富含 LILE 的洋壳沉积物) 加入, 并且这种岩浆中 LILE 的增加并不是由其后的岩浆分离结晶和同化混染 (AFC) 过程中地壳的混染所造成, 应该代表源区的特征。在 Nb/Ta-La/Yb 关系图上 (图略), 本区岩石的标绘点非常分散, 无负相关关系, 也不显示明显地壳混染的信号 (Mnker, 1998)。

5.2 微量元素丰度对源区特征的指示

在流体中, Th 和 LREE 被认为是一种不活动元素。而本区各类岩石中的 Th 含量 ($0.99 \times 10^{-6} \sim 7.1 \times 10^{-6}$) 和 LREE 较 N-MORB 明显要高 (表 1、图 3), 可能意味着它们的源区有俯冲板片熔体的加入 (Gertisser and Keller, 2003; Hawkins, 2003)。另外, 本区火成岩的微量元素特征从整体上看与典

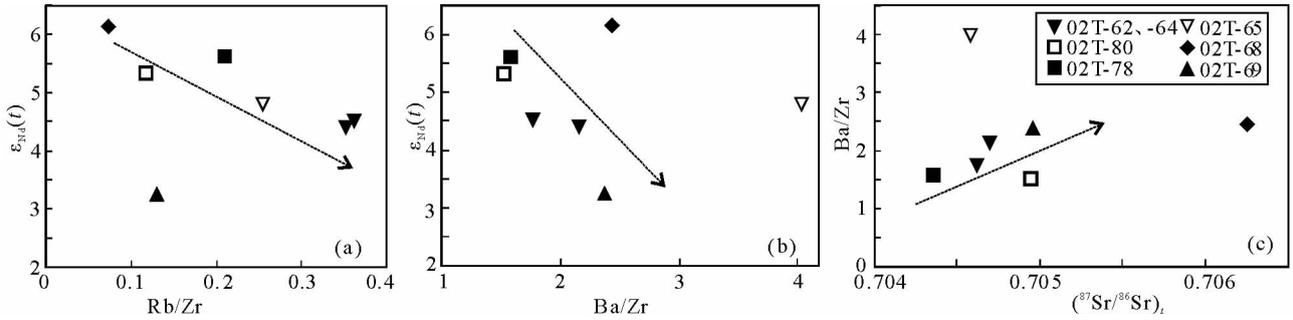


图7 巴音布鲁克火山—侵入岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值随 Rb/Zr、Ba/Zr (a,b), 及 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ 值随 Ba/Zr (c) 的变化关系图

Fig. 7 Diagrams of $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. Rb/Zr and Ba/Zr (a,b) and $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$ vs. Ba/Zr

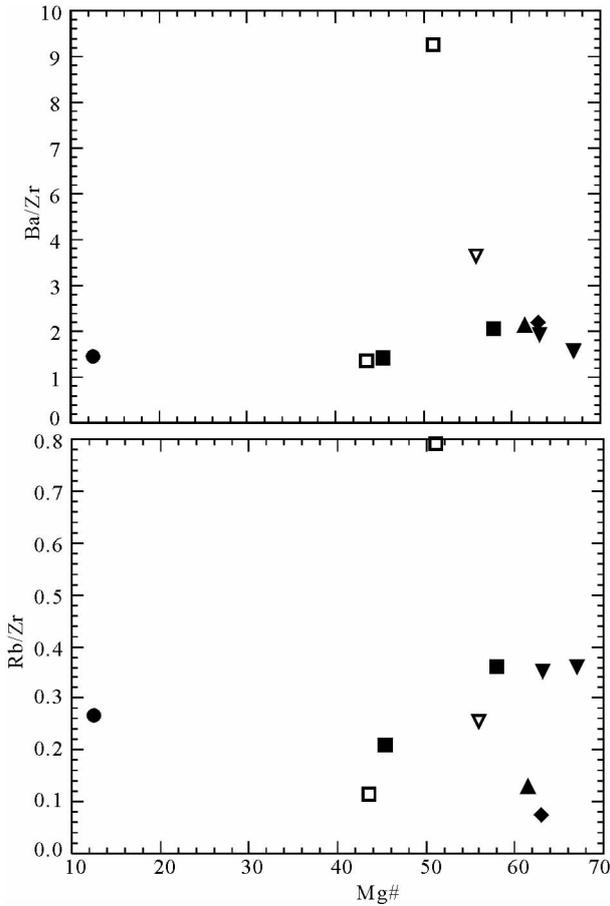


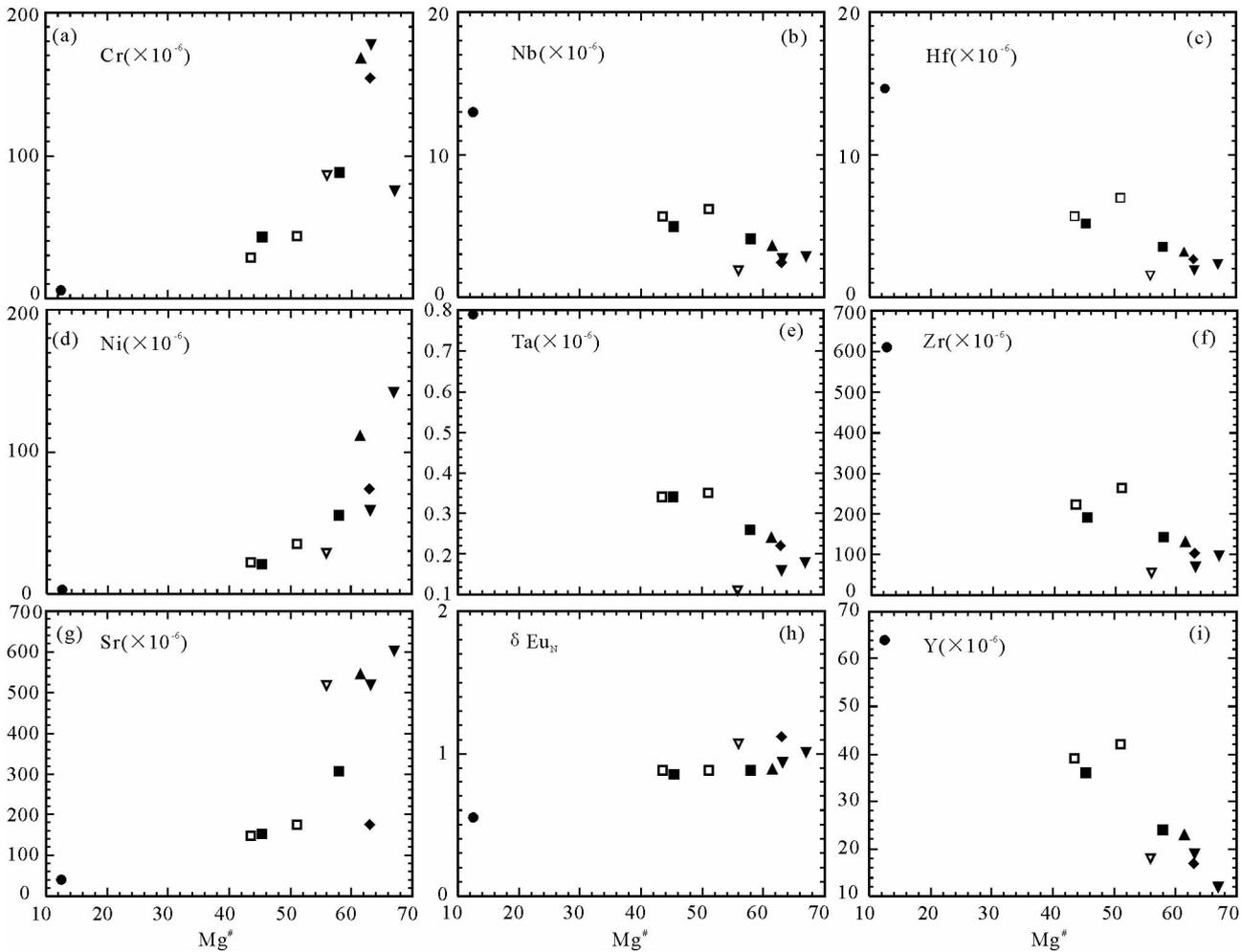
图8 巴音布鲁克火山—侵入岩 $Mg^\#$ 与 Ba/Zr、Rb/Zr 间相关图

Fig. 8 Diagrams of $Mg^\#$ vs. Rb/Zr and Ba/Zr

型岛弧岩浆岩的相类似。但从 HFSE 元素的绝对丰度来看, 与典型岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩的 Ta 含量为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.18 \times 10^{-6}$ 、Nb 为 $1.7 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ 、Zr 含量平均值为 40×10^{-6} 和 71×10^{-6} 、Hf 含量平均值为 1.17×10^{-6} 和 2.23×10^{-6} (Pearce, 1982)。而本区即便是接近于原生岩浆 (primary magma) 性质的四个样品 (03T-62、-64、-68、-69, 其 $Mg^\#$ 变化于 61 ~ 67 之

间, 且与本区其它样品相比具有最高的 Cr、Ni 含量) 的 HFSE 含量 (Zr = $71 \times 10^{-6} \sim 131 \times 10^{-6}$ 、Hf = $1.91 \times 10^{-6} \sim 3.15 \times 10^{-6}$ 、Ta = $0.16 \times 10^{-6} \sim 0.24 \times 10^{-6}$ 、Nb = $2.46 \times 10^{-6} \sim 3.58 \times 10^{-6}$) 虽有最低的 (与本区其它更具演化性质的岩浆相比)、接近于弧岩浆岩的 HFSE 含量, 但它们仍略高于典型弧岩浆岩的 HFSE 含量。

上述特征表明巴音布鲁克岛弧岩石不可能单纯由来自被消减洋壳流体沉积物所交代的地幔楔橄榄岩部分熔融形成。大量研究 (包括实验岩石学研究) 表明, 地幔楔在受到俯冲洋壳于榴辉岩相条件下部分熔融作用所产生的熔体交代后, 可以明显提高其后形成的岛弧岩浆中 HFSE 的含量 (Crawford *et al.*, 1987; Kepezhinskas *et al.*, 1996; Klein *et al.*, 1997; Defant *et al.*, 2002)。本区岩石样品中, 前述四个具有接近于原生岩浆性质的样品 (03T-62、-64、-68、-69), 具有高的 Sr 含量 (除一个为 175×10^{-6} , 其余介于 $519 \times 10^{-6} \sim 601 \times 10^{-6}$ 之间)、Eu 异常不明显到正 Eu 异常 (δEu_N 为 $0.88 \sim 1.12$)、低的 Y 含量 ($12 \times 10^{-6} \sim 23 \times 10^{-6}$, 平均 17.8×10^{-6}) 和 Yb 含量 ($1.28 \times 10^{-6} \sim 2.23 \times 10^{-6}$, 平均 1.80×10^{-6}) 等特点, 表明其源区深度较深, 为石榴子石稳定区, 而斜长石不稳定大量分解进入熔体, 导致熔体中高的 Sr 含量及正 Eu 异常; Y 及 Yb 则因与石榴子石相容而被大量残留在源区。这些特征表明, 巴音布鲁克岛弧火成岩的地幔源区深度具有俯冲洋壳板片发生部分熔融所需的压力条件 (角闪岩相—榴辉岩相), 并且, 与本区火成岩位于同一构造线的西南天山长阿吾子地区 (图 1) 有原岩为 MORB 的榴辉岩的存在 (高俊, 1997; 高俊等, 2006; Gao and Klemd, 2003; Klemd *et al.*, 2005) 也表明南天山俯冲洋壳曾达榴辉岩相变质稳定区, 在初始消减阶段 (具有高热状态), 洋壳板片即有可能发生部分熔融 (Yogodzinski *et al.*, 2001; Defant *et al.*, 2002; Defant and Drummond, 1990), 其产生的板片熔体对地幔楔发生交代作用, 可以提高地幔楔及其后再发生部分熔融所产生的岛弧岩浆中 HFSE 的含量, 这一过程类似于富铋岛弧玄武岩 (Nb-enriched arc basalts; NEAB) 的形成机制 (Sajona *et al.*, 1996; Polat and Kerrich, 2001; Aguilon *et al.*, 2001; 王强等, 2003)。但与典型 NEAB 的 Nb 含量和过渡族元素如

图9 巴音布鲁克火成岩 $Mg^{\#}$ 与各微量元素间相关图Fig. 9 $Mg^{\#}$ vs. trace elements correlation diagrams for volcanic rocks and gabbros from Bayinbuluke

Cr、Ni 的含量 ($Nb = 3.85 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ 、 $Cr = 135 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ 、 $Ni = 70 \times 10^{-6} \sim 190 \times 10^{-6}$, Sajona *et al.*, 1996; Polat and Kerrich, 2001; Aguilon *et al.*, 2001; 王强等, 2003) 相比, 巴音布鲁克岛弧火成岩中四个接近于原生岩浆性质的样品的 Nb 含量 ($2.46 \times 10^{-6} \sim 3.58 \times 10^{-6}$) 及 Cr、Ni 含量 (分别为 $75 \times 10^{-6} \sim 178 \times 10^{-6}$ 和 $59 \times 10^{-6} \sim 142 \times 10^{-6}$) 相对较低, 这可能与板片熔体与地幔楔橄榄岩的交代反应程度较低及地幔楔橄榄岩的部分熔融程度较低有关 (王强等, 2003)。

综上所述, 巴音布鲁克火山—侵入岩的地幔源区应为受俯冲洋壳板片沉积物流体及板片熔体双重交代的楔形亏损地幔源区, 但流体—沉积物对地幔楔的交代作用仍占主导地位, 板片熔体的交代作用程度相对较低。所形成的原生岩浆在地球化学特征上, 介于正常岛弧玄武岩 (IAB) 岩浆与富铈岛弧玄武岩 (NEAB) 岩浆之间, 为二者间的过渡系列。

5.3 岩浆演化

岛弧地幔楔橄榄岩部分熔融产生的原生玄武岩浆在上

升至地表过程中往往会经历复杂的 AFC 过程, 形成更具演化特征的岩浆。结晶分异作用只能改变元素的丰度 (尤其是降低相容元素的丰度), 而岩浆的同位素比值会基本保持恒定; 地壳混染既可以改变岩浆中元素的丰度 (尤其是提高 LILE 的丰度) 还可以使岩浆的同位素比值发生明显改变 (Gertisser and Keller, 2003; Xia *et al.*, 2005)。

整体上, 巴音布鲁克组岛弧火山岩 (无论基性岩还是中酸性岩) 和辉长岩中主要矿物组成基本相同, 都含有富水矿物 (如角闪石), 所有样品的 REE 配分模式及微量元素 N-MORB 标准化分布型式相近 (图 4), 具有一致的 HFSE/HFSE 特征比值和相近的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 及 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_1$ 值 (表 2), 表明这些岩石有着共同的地幔源区。 $Mg^{\#}$ 与 SiO_2 呈负相关 (图 3a), 与 Cr、Ni 呈正相关 (图 9a, d), 表明本区岛弧岩浆上升过程中曾经历了较为明显的铬尖晶石、橄榄石矿物的分离结晶; Sr、 δEu_N 、 Al_2O_3 、CaO 及 CaO/Al_2O_3 与 $Mg^{\#}$ 间明显的正相关关系 (图 9g, h; 图 3 b, d, f), 除表明有明显的斜长石结晶外, 还存在强烈的单斜辉石的分离结晶, 并且单斜辉石的结晶比斜

长石结晶占更大优势; TiO_2 、 FeO^{T} 、 P_2O_5 在基性及中基性岩浆中开始时升高,在酸性岩浆中明显降低(图 3c, e, h),表明本区酸性岩浆经历了强烈的铁-钛氧化物和磷灰石的分离结晶; Ta、Nb、Zr、Hf 及 Y 与 $\text{Mg}^{\#}$ 间一致的正相关关系(图 9b, c, e, f, i),表明 HFSE 在更加演化的岩浆中富集。而 LILE/HFSE 值(如 Ba/Zr、Rb/Zr)并不随 $\text{Mg}^{\#}$ 的下降而上升(甚至有一定程度的下降)(图 8),表明 AFC 过程中的地壳混染相对于结晶分异作用对岩浆演化的贡献几乎可以忽略。同时,这一关系也可表明 LILE 在岩浆中的相对富集是源区所固有的属性(富 LILE 的物质加入到了源区中,如洋壳变质流体及沉积物),并非岩浆上升中地壳混染所致。此外, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 值并不随 $\text{Mg}^{\#}$ 的下降而发生显著改变(图略),也不支持岩浆上升过程中存在有明显地壳混染的模式。

综上所述,巴音布鲁克组岛弧岩浆岩中 $\text{Mg}^{\#}$ 变化范围大,高分异的演化型岩浆与具有原生岩浆性质的岩浆岩共存,且二者有着共同的源区。早期部分熔融产生的原生岩浆上升到达浅部岩浆房中,经历了较强烈的铬尖晶石、橄榄石、单斜辉石及斜长石结晶分异作用后喷出地表(如本区中酸性火山岩),而稍后产生的原生岩浆多数未经结晶分异(或分异结晶不明显)直接上侵(如本区辉长岩类)于早期形成的喷出岩中,仅有少量喷出地表。

6 构造意义

已有的研究表明,以长阿吾子—古洛沟—吾瓦门—库米什蛇绿混杂岩为代表的中天山南缘蛇绿混杂岩带(图 1)(及其西延境外吉尔吉斯斯坦部分)被认为是古生代南天山洋盆消减—闭合后的残迹。其中,东段库米什榆树沟蛇绿岩中锆石 U-Pb 不一致线与谐合线的上交点年龄 $440 \pm 18\text{Ma}$ (王润三等,1998)与西段长阿吾子蛇绿岩中辉石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 439Ma (郝杰和刘小汉,1993)相一致,代表了中天山南缘蛇绿岩的形成年龄,表明古南天山洋至少在早志留世时就已经打开并存在;关于该洋盆的俯冲消减时代,国内外众多学者针对中天山南缘绿岩混杂岩带内的高压变质岩石(原岩为 N-MORB、E-MORB 或 OIB)进行了同位素测年,如:西段长阿吾子榴辉岩的峰期变质年龄为 $401 \pm 1\text{Ma}$ (高俊等,2000)、特克斯穹库什太蓝片岩峰期变质年龄为 $415.4 \pm 2.2\text{Ma}$ (高俊等,1994;汤耀庆等,1995)(均为 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄);东段库米什地区,榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩的锆石 SHRIMP 年龄为 $390 \sim 392\text{Ma}$ (周鼎武等,2004)。上述这些同位素测年结果表明,至少在晚志留世—(中)泥盆世时,南天山洋盆就已开始俯冲消减并遭受高压变质作用。而本次研究的南天山北部上志留统巴音布鲁克岛弧火山岩与上述中天山南缘蛇绿混杂岩带紧邻(图 1),时代上也与南天山洋盆的俯冲时代相当,因此它很有可能是古南天山洋盆于晚志留世时发生的洋壳俯冲—消减,所引发的岛弧火山—岩浆作用的地质记录。

7 结论

巴音布鲁克组火山岩及辉长岩的 LILE 和 LREE 明显富集, HFSE 强烈亏损,尤其出现明显的 Nb、Ta 负异常,岩层中爆发相火山碎屑岩发育等表明它们应形成于岛弧环境; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 具有 OIB 的同位素特征,但存在线性负相关关系,并且分别与 LILE/HFSE 之间呈负相关和正相关关系,以及特征的 HFSE/HFSE 比值、高的 Th、LREE 含量和高于正常弧火山岩、低于洋岛玄武岩(OIB)的 HFSE 绝对丰度等,表明它们的岩石成因中既有俯冲洋壳板片流体—沉积物的加入,也有及板片熔体组分的贡献,在地球化学上具有正常岛弧玄武岩浆(IAB)与富铈岛弧玄武岩(NEAB)岩浆之间过渡系列的特征;地幔楔橄榄岩早期部分熔融产生的原生岩浆上升至浅部岩浆房中,经历了较强烈的铬尖晶石、橄榄石、单斜辉石及斜长石的分异结晶作用后喷出地表,稍后部分熔融产生的原生岩浆,未经明显的结晶分异,多直接上侵于早期的同源喷出岩中。该套火成岩与中天山南缘蛇绿混杂岩带紧邻,地层时代也与南天山洋的俯冲—消减时代相当,它应当是南天山洋盆于晚志留世时发生的洋内俯冲—消减,所引发的岛弧火山—岩浆作用的地质记录。

References

- Aguillon RA, Caimus T and Bellon H. 2001. Late Miocene adakite and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico; Indication of East Pacific Rise subduction below southern Baja California. *Geology*, 29: 531–534
- Boynott WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 63–114
- Cabanis PB and Thiéblemont D. 1988. La discrimination des tholéiites continentales et des basalts arrière-arc. Proposition d'un nouveau diagramme, le triangle Th-Tb $\times 3$ -Ta $\times 2$. *Bull. Soc. Géol. France*, 4(6): 927–935
- Cai DS, Lu HF, Jia D and Wu SM. 1995. Paleozoic plate tectonic evolution of southern Tianshan. *Geology Review*, 41(5): 432–442 (in Chinese with English abstract)
- Crawford AJ, Fallon TJ and Eggins S. 1987. The origin of island arc high-alumina basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 417–430
- Davis JH and Stevenson DJ. 1992. Physical model of source region of subduction volcanics. *Journal of Geophysical Research*, 97: 2037–2070
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Defant MJ, Xu JF, Pavel K, Wang Q, Zhan Q and Xiao L. 2002. Adakites: Some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129–142
- Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ and He GQ. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orgen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287: 213–231
- Gao J, Long LL, Qian Q, Huang DZ, 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, Xiao XC and Tang YQ. 1994. The metamorphic *PTDt* path of blueschists and tectonic evolution in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang. *Geol. Rev.*, 40(6): 544–553 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Zhang LF and Liu SW. 2000. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age record of formation and uplift of the blueschists and eclogites in the Western Tianshan Mountains. *Chin. Sci. Bull.*, 45(1): 89–94 (in Chinese)
- Gao J. 1997. The discovery of eclogites in southwestern Tianshan and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 42(7): 737–740 (in Chinese)
- Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP–LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints. *Lithos*, 66: 1–22
- Gertisser R and Keller J. 2003. Trace element and Sr, Nd, Pb and O isotope variations in Medium-K and High-K volcanic rocks from Merapi volcano, Central Java, Indonesia: Evidence for the involvement of subducted sediments in Sunda Arc magma genesis. *Journal of Petrology*, 44(3): 457–489
- Hao J and Liu XH. 1993. Ophiolite mélange time and tectonic evolutionary model in south Tianshan area. *Chinese J. Geol.*, 28(1): 93–95 (in Chinese with English abstract)
- Hawkins JW. 2003. Geology of supra-subduction zones: Implications for the origin of ophiolites. In: Dilek Y and Newcomb S (eds.). *Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought*. Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 373: 227–286
- Kepezhinskas PK, Defant MF and Drummond MS. 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1217–1229
- Klein M, Stosch HG and Seck HA. 1997. Partitioning of high field-strength and rare-earth elements between amphibole and quartzdioritic to tonalitic melts: Experimental study. *Chemical Geology*, 138: 257–271
- Klemd R, Bröcker M, Hacker BR, Gao J, Gans P and Wemmer K. 2005. New age constraints on the metamorphic evolution of the high-pressure/low-temperature belt in the Western Tianshan Mountains, NW China. *The Journal of Geology*, 113: 157–168
- Li XH, Chen ZG, Liu DY and Li WX. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from Southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin and tectonic significance. *International Geology Review*, 45: 1–24
- Liu BP, Wang ZQ, Zhang CH, Ma HW, Zhou HR, Gong YM and Jia WM. 1996. *Tectonic Framework and Evolution in Southwest Tianshan Mountains, China*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–120 (in Chinese with English abstract)
- Liu HT, Zhang Q, Liu JM, Ye J, Zeng QD and Yu CM. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits: A possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessment. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 205–218 (in Chinese with English abstract)
- McCulloch MT and Gamble JA. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letter*, 102: 358–374
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites. *Journal of Geology*, 83: 249–281
- Mnker C. 1998. Nb/Ta fraction in a Cambrian arc-back system, New Zealand: Source constraints and application of refined ICPMS techniques. *Chem. Geol.*, 144: 23–45
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe RS (ed.). *Andesites; Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester: Wiley, 525–548
- Pearce JA. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: Hawkesworth *et al.* (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich shiva, 230–249
- Polat A and Kerrich R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: Implications for Late Archean subduction zone petrogenetic processes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141: 36–52
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H, Cotton J and Defant M. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao Philippines. *Journal of Petrology*, 37: 693–726
- Stolz AJ, Jochum KP, Spettel B and Hofmann AW. 1996. Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts. *Geology*, 24: 587–590
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean basins*. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 42: 313–345
- Tang YQ, Gao J, Zhao M, Li JY and Wang J. 1995. The Ophiolites and Blueschists in Southwestern Tianshan Orogenic Belt, Xinjiang, North China. Beijing: Geological Publishing House, 1–133 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL, Mei HJ, Xu JF, Bao ZW and Wang YX. 2003. The carboniferous adakites and Nb-enriched basalts from Alatao, Xinjiang: Crustal accretion and interaction between slab melts and peridotite. *Chinese Sci. Bulletin*, 48(12): 1342–1348 (in Chinese)
- Wang RS, Wang Y, Li HM, Zhou DW and Wang JL. 1998. Zircon U-Pb age and its geological significance of high-pressure terrane of granulite facies in Yushugou area, south Tianshan mountain. *Geochimica*, 27(6): 517–522 (in Chinese with English abstract)
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation of products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- 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: 11–30
- Woodhead J, Eggins S and Gamble J. 1993. High field strength and transition element systematics in island arc and back-arc basin basalts: Evidence for multi-phase melt extraction and a depleted mantle wedge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 114: 491–504
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2005. Relationship between basic and silicic magmatism in continental rift settings: A petrogeochemical study of Carboniferous post-collisional rift silicic volcanics in Tianshan, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 633–653
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2003. Carboniferous post-collisional rift volcanism of the Tianshan Mountains, Northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 338–360
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 116(3): 419–433
- Yang TN and Wang XP. 2006. Geochronology, petrochemistry and tectonic implications of Early Devonian plutons in Kumux area, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(5): 401–411 (in Chinese with English abstract)
- Yang TN, Li JY, Sun GH and Wang YB. 2006. Earlier Devonian active continental arc in Central Tianshan: Evidence of geochemical analyses and zircon SHRIMP dating on mylonitized granitic rock.

- Acta Petrologica Sinica, 22(1):41-48 (in Chinese with English abstract)
- Yogodzinski GM, Lees JM, Churikova TG, Dorendorf F, Woerner G and Volynets ON. 2001. Geochemical evidence for the melting of subducting ocean lithosphere at plate edges. *Nature*, 409: 500-504
- Yogodzinski GM, Naumann TR, Smith EI, Bradshaw TK and Walker JD. 1996. Crustal assimilation by alkalic basalt and the evolution of a mafic volcanic field in the central Great Basin, south-central Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 101:17425-17445
- Zhou DW, Shu L, Jian P, Wang RS, Liu XM, Lu GX and Wang JL. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb age and its geological significance of high-pressure terrane of granulite facies from Yushugou Ophiolite, Southern Tianshan. *Chinese Sci. Bull.*, 49(14): 1411-1415 (in Chinese)
- Zhu ZX, Wang KZ, Zheng YJ, Sun GH, Zhang C and Li YP. 2006. The zircon SHRIMP dating of Silurian and Devonian granitic intrusions in the southern Yili Block, Xinjiang and preliminary discussion on their tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1193-1200 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493-571
- 附中文参考文献**
- 蔡东升, 卢华复, 贾东等. 1995. 南天山古生代板块构造演化. *地质论评*, 41(5): 432-442
- 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, 肖序常, 汤耀庆. 1994. 新疆西南天山蓝片岩的变质作用 *PTDt* 轨迹及构造演化. *地质论评*, 40(6): 544-553
- 高俊, 张立飞, 刘圣伟. 2000. 西天山蓝片岩榴辉岩形成和抬升的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄记录. *科学通报*, 45(1): 89-94
- 高俊. 1997. 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义. *科学通报*, 42(7): 737-740
- 郝杰, 刘小汉. 1993. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及其大地构造意义. *地质科学*, 28(1): 93-95
- 刘本培, 王自强, 张传恒, 马鸿文, 周洪瑞, 朱鸿, 龚一鸣, 贾维民. 1996. 西南天山构造格局与演化. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-120
- 刘红涛, 张旗, 刘建明, 叶杰, 曾庆栋, 于昌明. 2004. 埃达克岩与 Cu-Au 成矿作用: 有待深入研究的岩浆成矿关系. *岩石学报*, 20(2): 205-218
- 汤耀庆, 高俊, 赵民, 李锦轶, 王军. 1995. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩. 北京: 地质出版社, 1-133
- 王强, 赵振华, 白正华, 熊小林, 梅厚钧, 许继峰, 包志伟, 王一先. 2003. 新疆阿拉套山石炭纪埃达克岩、富 Nb 岛弧玄武岩: 板片熔体与地幔橄榄岩相互作用及地壳增生. *科学通报*, 48(12): 1342-1348
- 王润三, 王焰, 李惠民, 周鼎武, 王居里. 1998. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *地球化学*, 27(6): 517-522
- 杨天南, 李锦轶, 孙桂华, 王彦斌. 2006. 中天山早泥盆世陆弧: 来自花岗岩糜棱岩地球化学及 SHRIMP U-Pb 定年的证据. *岩石学报*, 22(1): 41-48
- 杨天南, 王小平. 2006. 新疆库米什早泥盆世侵入岩时代、地球化学及大地构造意义. *岩石矿物学杂志*, 25(5): 401-411
- 周鼎武, 苏犁, 简平, 王润三, 柳小明, 陆关祥, 王居里. 2004. 南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义. *科学通报*, 49(14): 1411-1415
- 朱志新, 王克卓, 郑玉洁, 孙桂华, 张超, 李亚萍. 2006. 新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗岩侵入体锆石 SHRIMP 定年及其形成时构造背景初步探讨. *岩石学报*, 22(5): 1193-1200