

新疆博格达造山带晚古生代构造-岩浆演化过程： 火山岩组合及地球化学证据*

王金荣¹ 李泰德² 田黎萍¹ 于漫¹ 王怀涛¹ 赵志雄¹ 汤中立¹

WANG JinRong¹, LI TaiDe², TIAN LiPing¹, YU Man¹, WANG HuaiTao¹, ZHAO ZhiXiong¹ and TANG ZhongLi¹

1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

2. 新疆有色地质矿产勘查局物探大队, 乌鲁木齐 830011

1. *Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2. *Exploration Team of Geophysics, Xinjiang Bureau of Nonferrous Geological and Mineral Exploration, Urumqi 830011, China*

2009-03-16 收稿, 2010-03-28 改回.

Wang JR, Li TD, Tian LP, Yu M, Wang HT, Zhao ZX and Tang ZL. 2010. Late Paleozoic tectono-magmatic evolution in Bogda Orogenic Belt, Xinjiang: Evidence from geochemistry of volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4):1103–1115

Abstract The Late Carboniferous bimodal volcanic rocks and Early Permian acidic volcanic rocks were revealed recently in Yiqi-Xiaohongxia of the northern margin of the eastern section of Bogda Mountain, Xinjiang, but in petrogenesis the former different from those in the Qijiaoqing Region south to the studied area. The bimodal volcanic suite in the studied area is composed of basalts and a less amount of rhyolites (rhyolites/basalts = ~1/4). The basalts have high-Al ($Al_2O_3 = 16.2\% \sim 16.68\%$), -Mg ($MgO = 8.12\% \sim 9.54\%$, $Mg^{\#} = 61 \sim 64$), and -Na ($Na_2O = 2.24\% \sim 3.63\%$), but low-K contents ($K_2O = 0.18\% \sim 0.45\%$), and low $K_2O/TiO_2 = 0.1 \sim 0.27$ and $K_2O/P_2O_5 = 0.63 \sim 1.68$ ratios, belonging to tholeiitic series, and indicating no fractional crystallization of plagioclase during the basaltic magmatism; and have $TiO_2 = 1.66\% \sim 1.71\%$, slightly higher than MORB's, and low Rb/Sr ratio ($0.01 \sim 0.02$), Th/Yb (< 0.2) and Ta/Yb (~ 0.1), high Zr/Nb ($21.6 \sim 39.7$) and Zr/Y ($5.38 \sim 7.47$) ratios, slightly enriched in incompatible elements Ba, Zr, Hf, and LREE, $(La/Yb)_N = 1.8 \sim 1.9$, no Eu anomalies ($\delta Eu = 1.07 \sim 1.12$), but relatively depleted in Nb-Ta and Th, and positive $\epsilon_{Nd}(t)$ value ($+5.63 \sim +5.89$), $(^{143}Nd/^{144}Nd)_1 = 0.512927 \sim 0.512944$, showing that the basalts have geochemical features indicative of basalts formed within continent and originated from depleted mantle, and that the continent crust became thinner and thinner due to extension for a long time. The rhyolites of bimodal volcanic rocks with Rb-Sr isochron age of $296 \pm 2Ma$ (1σ), have high-Si ($SiO_2 = 76\% \sim 79.76\%$), - K_2O but low Na_2O ($K_2O = 5.14\% \sim 5.65\%$, $Na_2O = 0.94\% \sim 2.03\%$), Al ($Al_2O_3 = 7.90\% \sim 10.39\%$), Ti, CaO and P_2O_5 contents, showing they are high-K calc-alkaline series; and exhibit relatively rich in trace elements Rb, Th, Zr, Hf, K and LREE, $(La/Yb)_N = 5.1 \sim 7.1$, significantly depleted in Ba, Sr, P, Ti, Nb, Ta, and strongly negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.17 \sim 0.2$), $(^{87}Sr/^{86}Sr)_1 = 0.7051 \sim 0.7052$, $\delta^{18}O = 11.6\%$, suggesting that the rocks, similar to the geochemistry of the rhyolites formed in continental rifts, originated from the melting of lower crust with plagioclase as an important relic mineral in the source. Early Permian rhyolites (Rb-Sr isochron age of $278 \pm 2Ma$ (1σ)) with high SiO_2 ($73.62\% \sim 74.24\%$), K-rich and Na-depleted, $K_2O/Na_2O > 2$, low Al_2O_3 ($11.06\% \sim 11.4\%$), as well as low P and Ti contents, belonging to high-K calc-alkaline series; enriched in incompatible elements Rb, Ba, Th, U, K, La, Ce and LREE, $(La/Yb)_N = 5 \sim 6$, obviously depleted in HFSE (Nb, Ta, P, Ti) and Sr and HREE, as well as strongly negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.31 \sim 0.39$), $(^{87}Sr/^{86}Sr)_1 = 0.7069$, and $\delta^{18}O = 11.97\%$, resulted obviously from partial melting of lower crustal materials by underplating of basaltic magma or mantle diapirism in the tectonic setting of post-orogenic extension. The studied results indicate that magmatism of the Bogda rifting started in the Early Carboniferous, ended in the end of Late Carboniferous, and then transformed into the post-orogenic evolution of the extension in the end of Early Permian.

Key words Bogda Orogenic Belt; Late Paleozoic; Tectono-magmatism; Bimodal volcanic rocks; Continental rift; Post-orogeny

摘要 最近, 笔者在博格达山东段北部的西地-伊齐-小红柳峡一带的地质调查中发现, 该区发育有大量晚石炭世柳树沟

* 本文受国家自然科学基金重点项目(40534020)与新疆国土资源厅项目(QD200509)联合资助。

第一作者简介: 王金荣, 男, 1958年生, 博士, 教授, 岩石大地构造学专业, E-mail: jrwang@lzu.edu.cn

组双峰式火山岩及早二叠世卡拉岗组酸性火山岩建造,但双峰式火山岩性质及成因有别于其南侧七角井早石炭世双峰式火山岩。玄武岩富钠贫钾 ($K_2O = 0.18\% \sim 0.45\%$, $Na_2O = 2.24\% \sim 3.63\%$), 属拉斑系列; $TiO_2 = 1.6\% \sim 1.7\%$, 略高于 MORB, 较高的 Al ($Al_2O_3 = 16.2\% \sim 16.7\%$)、高 Mg ($MgO = 8.12\% \sim 9.54\%$, $Mg^{\#} = 61 \sim 64$), 以及低 K_2O/TiO_2 和 K_2O/P_2O_5 比值 (分别为 $0.1 \sim 0.27$ 、 $0.63 \sim 1.68$), 反映了在岩浆演化过程中分离结晶作用不明显; Rb/Sr 比值 $0.01 \sim 0.02$, $Zr/Nb = 21.6 \sim 39.7$, $Zr/Y = 5.38 \sim 7.47$, 以及不相容元素 Ba、Zr、Hf 相对略富集、Nb-Ta 和 Th 相对亏损, 显示岩石具有板内玄武岩的特点; 稀土元素球粒陨石标准化配分图上整体接近于平坦型, $(La/Yb)_N = 1.8 \sim 1.9$, Eu 无异常至轻微正异常 ($\delta Eu = 1.07 \sim 1.12$), 正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值 ($+5.63 \sim +5.89$), $(^{143}Nd/^{144}Nd)_1 = 0.512927 \sim 0.512944$, $Th/Yb < 0.2$, $Ta/Yb = 0.1$, 表明玄武岩浆源于亏损软流圈地幔, 且在演化过程中不曾发生过斜长石的分离结晶作用, 并暗示当时的大陆地壳可能由于拉张而变得较薄, 玄武岩浆形成后快速上升至地表喷发。双峰式火山岩中的流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $296 \pm 2Ma$ (1σ), 具高 Si ($SiO_2 = 76\% \sim 80\%$), 富钾贫钠 ($K_2O = 5.1\% \sim 5.7\%$, $Na_2O = 0.94\% \sim 2.03\%$); 低 Al ($Al_2O_3 = 7.9\% \sim 10.4\%$); 低 Ti、Ca 和 P 含量, 属高钾钙碱性系列; 微量元素 Rb、Th、Zr、Hf、K 相对富集, Ba、Sr、P、Ti、Nb、Ta 为显著亏损; 轻稀土元素适度富集且轻、重稀土分馏程度低, $(La/Yb)_N = 5.1 \sim 7.1$, $(La/Sm)_N = 2$ 、 $(Gd/Yb)_N = 1.6 \sim 2.2$, 以及强烈的负 Eu 异常 ($\delta Eu = 0.17 \sim 0.2$), $(^{87}Sr/^{86}Sr)_1 = 0.7051 \sim 0.7052$, $\delta^{18}O = 11.6\text{‰}$, 指示岩石源于地壳物质的部分熔融, 源区存在有斜长石残留, 形成于大陆裂谷环境。早二叠世末流纹岩 (Rb-Sr 等时线年龄为 $278 \pm 2Ma$) 具高 Si ($SiO_2 = 74\%$), 富钾贫钠 ($K_2O/Na_2O > 2$), 低 Al ($Al_2O_3 = 11.0\%$) 以及较低的 Ti 和 P 含量的特征, 岩石为高钾钙碱性系列; 微量元素 PM 标准化图解上表现为 Rb、Ba、Th、U、K、La、Ce 不相容元素相对富集, 高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 以及 Sr 为明显的负异常; 轻稀土轻度富集, $(La/Yb)_N = 5 \sim 6$, $(La/Sm)_N = 3$, $(Gd/Yb)_N = 1.3 \sim 1.4$, 以及强烈的负 Eu 异常 ($\delta Eu = 0.31 \sim 0.39$), $(^{87}Sr/^{86}Sr)_1$ 为 0.7069 , $\delta^{18}O = 11.97\text{‰}$, 指示源于地壳物质部分熔融的产物, 形成于伸展垮塌的构造环境。综合研究结果表明, 博格达山前身裂谷岩浆作用始于早石炭世, 结束于晚石炭世末期, 早二叠世末进入后造山伸展的演化阶段。

关键词 博格达造山带; 晚古生代; 构造岩浆作用; 双峰式火山岩; 大陆裂谷; 后造山作用

中图法分类号 P588.14; P534.45

博格达造山带南北分别被吐哈和准噶尔盆地所夹持, 东邻克拉麦里-莫钦乌拉蛇绿岩带, 大地构造位置十分重要。但到目前为止, 博格达造山带晚古生代的构造属性仍有裂谷 (吴庆福, 1986; 王利利等, 1986; 何国琦等, 1994; Han *et al.*, 1999)、弧后盆地 (李锦轶, 2004) 和岛弧 (成守德等, 1986; Coleman, 1989; 方国庆, 1993; 马瑞士等, 1997) 观点之争。然而, 随着研究的不断深入, 越来越多的岩石学、岩石地球化学和同位素地球化学证据表明, 博格达晚古生代的构造属性倾向于裂谷环境 (顾连兴等, 2000, 2001a, b; 王银喜等, 2005, 2006), 裂谷作用始于早石炭世 (七角井的双峰式火山岩组合中的玄武岩和流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄分别为 $342.0 \pm 3.2Ma$ 和 $340.3 \pm 3.4Ma$, 王银喜等, 2006), 发生闭合及区域隆起的时间为 $307.1 \pm 1.3Ma$ (大石头乡流纹岩 Rb-Sr 同位素年龄, 王银喜等, 2005), 由碰撞挤压到伸展拉张的转折期是在 $298.4 \pm 0.76Ma$ (中酸性侵入体 Rb-Sr 等时线年龄, 顾连兴等, 2001a), 之后博格达造山带进入后造山演化阶段。尽管如此, 迄今仍未见报道晚石炭世裂谷火山岩组合。笔者最近在博格达东段北部的伊齐-小红柳峡一带的地质调查中发现, 该区发育有大量晚石炭世晚期双峰式火山岩组合 (流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄 $296 \pm 2Ma$) 以及后造山伸展体制下形成的酸性火山岩 (流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄 $278 \pm 2Ma$), 但双峰式火山岩性质及其成因有别于天山其它地区, 也不同于其南侧七角井早石炭世双峰式火山岩。本文将侧重探讨研究区晚古生代晚期构造岩浆演化过程, 为深入理解天山构造动力学演化过程提供地质依据。

1 地质概况及火山岩岩石学特征

研究区位于博格达造山带东段北部, 北邻准噶尔盆地, 东以红柳峡-苏吉断裂带与克拉麦里-莫钦乌拉晚古生代蛇绿混杂岩带相接, 是三个主要大地构造单元交汇的部位 (图 1)。区内以上石炭统柳树沟组火山岩发育为特征, 出露面积大于 $200km^2$, 主要由枕状玄武岩、流纹岩和流纹质火山凝灰岩组成, 玄武岩中夹有少量的中、薄层的生物碎屑灰岩 (含海百合茎), 见有晚期侵入的细晶花岗岩和花岗闪长岩、钾长花岗岩小岩体 (图 1)。在剖面上可见玄武岩与流纹岩、流纹质凝灰岩呈互层产出, 但整体上以爆发相 (火山碎屑岩类) → 溢流相 (玄武岩到流纹岩) → 爆发-沉积相 (凝灰岩、凝灰质砂岩) 韵律构成一个大的晚古生代火山喷发旋回, 局部见有火山喷发不整合 (图 1)。在构造上以一系列向西倾伏的近东西向展布的褶皱为特征。

伊齐-小红柳峡柳树沟组主要以枕状、块状玄武岩-流纹岩构成典型的双峰式火山岩组合, 玄武岩约占 75% 以上, 流纹岩小于 25%。玄武岩为灰黑色-灰绿色, 气孔-杏仁构造发育, 斑状或少斑结构, 斑晶 ($10\% \pm$) 为紫苏辉石和长条状的斜长石, 基质 ($90\% \pm$) 为斜长石 + 普通辉石 + 易变辉石 + 基性火山玻璃, 斜长石以拉长石为主, 适量的中长石 ($An_{46}Ab_{54}-An_{63}Ab_{37}$), CIPW 标准矿物计算显示 Hy 含量均大于 3%, 且有 Ol 无 Q, 具拉斑玄武结构, 为橄榄拉斑玄武岩; 流纹岩多为紫红色, 斑状结构, 斑晶 ($10\% \sim 15\%$) 以石英

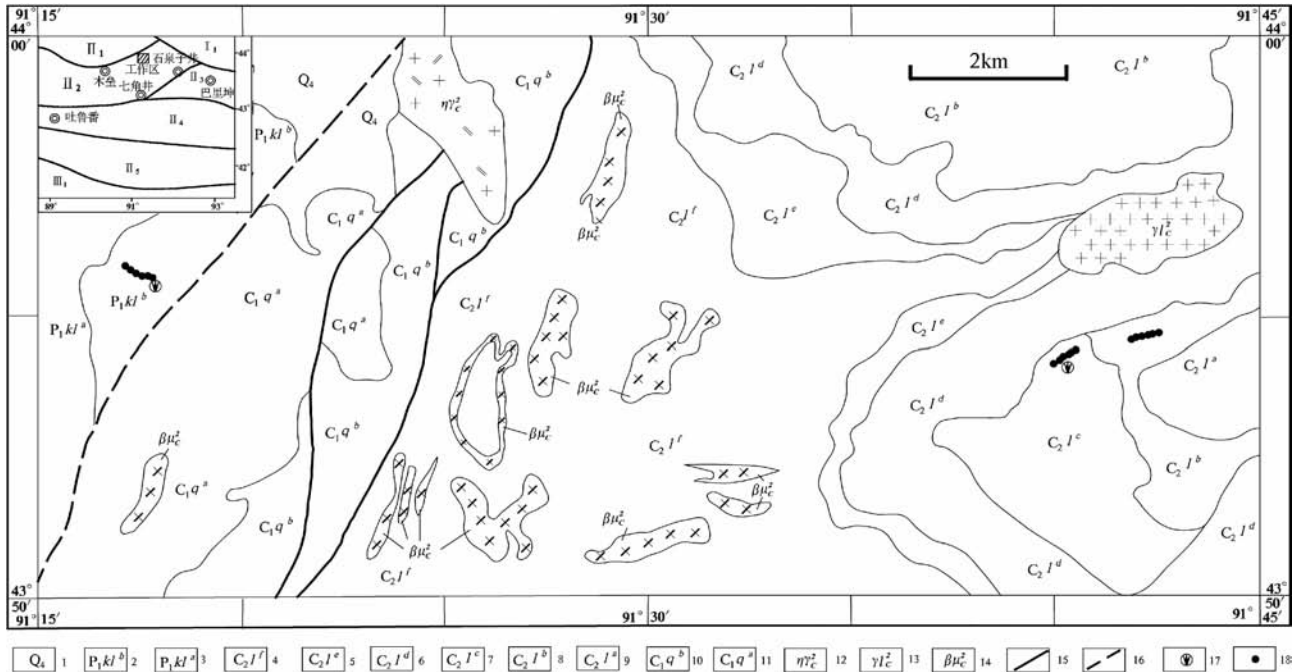


图1 博格达造山带东段区域地质略图

1-第四系; 2-卡拉岗组流纹岩; 3-卡拉岗组火山碎屑岩; 4-柳树沟组 f 段火山碎屑岩; 5-柳树沟组 e 段玄武岩; 6-柳树沟组 d 段火山碎屑岩; 7-柳树沟组 c 段流纹岩; 8-柳树沟组 b 段玄武岩; 9-柳树沟组 a 段火山碎屑岩; 10-七角井组 a 岩段; 11-七角井组 b 岩段; 12-晚石炭世二长花岗岩; 13-晚石炭世细晶花岗岩; 14-晚石炭世辉绿岩; 15-断裂带; 16-推测的断裂带; 17-同位素样品点; 18-采样点; I 1-东准噶尔造山带; II 1-准噶尔盆地; II 2-博格达造山带; II 3-哈尔里克晚古生代岛弧; II 4-吐哈地块; II 5-觉罗塔格晚古生代岛弧; III 1-南天山古生代岛弧

Fig. 1 Geological sketch of the eastern section of Bogda Orogenic Belt, Xinjiang

为主,他形粒状,少量自形-半自形正长石和斜长石(钠长石),基质(85%~90%)为长英质微晶,似霏细结构,流纹构造。

位于西地-伊齐西侧的阿布奥章-布尔根得-阔斯阔腊分布有大量的早二叠世酸性火山岩,主要为流纹岩及流纹质凝灰岩以及火山集块岩和火山角砾岩,夹少量安山岩,根据同位素年龄(见下述)及区域地层对比划归早二叠世晚期的卡拉岗组,与柳树沟组不同的是其中未见辉绿岩墙(脉)侵入。流纹岩在露头上呈暗紫色、灰紫色,具斑状结构或无斑隐晶结构,斑晶含量约5%~10%,成分以石英、斜长石和钾长石为主,石英为灰白色,他形粒状,大小在0.5mm左右;斜长石为灰白色,半自形-自形板状,粒径在0.5~2mm之间;钾长石为肉红色,半自形-自形板状,粒径在1~2mm之间。基质为隐晶质。岩石具有块状构造、流纹构造。

2 样品采集与测试

柳树沟组双峰式火山岩和卡拉岗组流纹岩样品分别采集于伊齐萨依南侧和阔斯阔腊(图1)。选择新鲜,隐晶质结构,经镜下薄片鉴定和严格筛选的样品进行化学分析。样品委托国土资源部宜昌地质矿产研究所中心实验室测定,主量元素除 FeO 和 LOI 采用标准湿化学分析外,其余的利用帕拉

科生产的 AXIOS 型 XRF 分析,精度一般优于5%;稀土、微量元素采用美国 ThermoFisher 公司生产的 XII Series 型 ICP-MS 分析,利用国家一级标准物质进行质量监控(GB/T 14506—1993),分析结果采用 DZ130—1991 进行数据检查,测试精度介于5%~10%;Rb-Sr 同位素测定中的 Rb 与 Sr 及其它杂质的分离采用 Dowex50×8(200~400)阳离子交换技术,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值用 MAT-216 可调接收质谱计上直接测定,Rb、Sr 含量采用同位素稀释质谱法,在整个同位素分析过程中利用 NBS987 和 GBW04411 标准物质对仪器和分析流程进行监控;Sm-Nd 同位素分析在德国产 Finnigan MAT26 和 Triton 多接收质谱计完成,采用 JMC 和 Zkbz Nd 控制仪器工作状态,国家一级标准物质 GBW04419 (Sm-Nd) 监控分析流程。

3 地球化学特征

3.1 主元素

研究区内火山岩地球化学分析结果见表1。从表1可以看出,柳树沟组火山岩 SiO₂ 介于46%~47%和76%~80%之间,具 Daly 成分间断,在时空上构成典型的双峰式火山岩组合。在 SiO₂-K₂O 图解上玄武岩为拉斑系列,流纹岩为高钾钙碱性系列(图2)。Nb/Y 比值是确定玄武岩碱度的一个

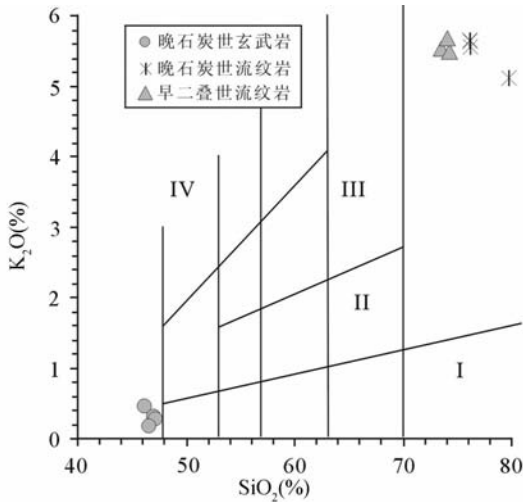


图2 火山岩 SiO_2 - K_2O 图解(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

I-低钾拉斑质系列; II-钙碱性系列; III-高钾钙碱性系列; IV-橄榄安粗岩系列

Fig. 2 SiO_2 - K_2O diagram for volcanic rocks from Xiaohongliuxia (after Peccerillo and Taylor, 1976)

良好指标,其几乎只受碱度的影响而与分异作用无关,玄武岩 Nb/Y 值在 0.13 ~ 0.22 范围内,亦表明其为拉斑质岩石系列。玄武岩富钠贫钾, K_2O 含量为 0.18% ~ 0.45%, Na_2O 为 2.24% ~ 3.63%; TiO_2 含量在 1.66% ~ 1.71% 之间,略高于 MORB,高 Al ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 16.2\% \sim 16.68\%$)、高 Mg ($\text{MgO} = 8.12\% \sim 9.54\%$, $\text{Mg}^\# = 61 \sim 64$),高于典型的 MORB 的 $\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}^\# = 60$, Rapp, 1997); $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2 = 0.1 \sim 0.27$ 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5 = 0.63 \sim 1.68$,比值低且变化范围较小,反映了在岩浆演化过程中地壳混染不强烈(Guo *et al.*, 2005)。上述主量元素的总体特征反映了玄武岩浆分离结晶作用不明显,有别于博格达造山带东段南侧的七角井双峰式火山岩中之玄武岩,后者经历过较为强烈的分离结晶作用(王银喜等,2006)。流纹岩具高 Si ($\text{SiO}_2 = 76\% \sim 80\%$),富钾贫钠(K_2O 含量介于 5.14% ~ 5.65% 之间, Na_2O 为 0.94% ~ 2.03%);低 Al ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 7.9\% \sim 10.39\%$)和 Ca ($\text{CaO} = 0.16\% \sim 0.95\%$,平均为 0.33%),提示在源岩部分熔融过程中存在有斜长石残留;低 Ti 和 P ($\text{TiO}_2 = 0.17\% \sim 0.23\%$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.02\% \sim 0.4\%$),应归属低 Ti 流纹岩类(Riley *et al.*, 2001); $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2 = 24.4 \sim 30.6$ 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5 = 141 \sim 302$,明显高于与其伴生的玄武岩。上述特征反映了该区流纹岩可能是大陆地壳厚度较薄的下地壳中基性物质部分熔融的产物(Condie, 1986; 郭锋等,2001),有别于七角井双峰式火山岩之流纹岩,后者被认为是玄武岩浆分异作用形成的(王银喜等,2006)。

分布在阿布奥章-布尔根得-阔斯阔腊的早二叠世晚期流纹岩具有高 Si ($\text{SiO}_2 = 74\%$),富钾贫钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 2$, K_2O

$= 5.51\% \sim 5.66\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 2.33\% \sim 2.89\%$),全碱含量较高(7.84% ~ 8.55%)的特征,归属高钾钙碱性系列(图2);低 Al 和 Ca ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.0\%$, $\text{CaO} = 0.3\%$);全铁含量为 5.0%; $\text{TiO}_2 = 0.29\% \sim 0.48\%$ 以及较低的 P ($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.039\% \sim 0.073\%$);火山岩 CIPW 计算结果显示,流纹岩斜长石成分主要为钠长石($\text{An}_5\text{Ab}_{95} \sim \text{An}_6\text{Ab}_{94}$),分异指数 DI 介于 90 ~ 93 之间,表明酸性岩浆分异程度高;A/CNK 值介于 0.99 ~ 1.06 之间,属准铝质系列。上述特征表明流纹岩可能源于大陆下地壳,源区存在有斜长石残留。

3.2 微量元素和稀土元素

柳树沟组玄武岩除了具有较高的 MgO 外,微量元素 Ni ($109 \times 10^{-6} \sim 131 \times 10^{-6}$) 和 Cr ($142 \times 10^{-6} \sim 301 \times 10^{-6}$) 也高于七角井玄武岩的(王银喜等,2006),但低于判别原始岩浆的参考值(Wendlandt *et al.*, 1995),表明玄武岩浆早期演化过程中可能发生过橄榄石、辉石的分离结晶作用;Rb/Sr 比值 0.01 ~ 0.02, Th/Yb < 0.2, Ta/Yb 约 0.1, Zr/Nb 比值在 21.6 ~ 39.7 之间 (> 16), Zr/Y 比值在 5.38 ~ 7.47 之间(仅一个样品为 2.87),以及在 Zr/Y-Zr 图解上(图3)均显示源自亏损地幔的板内玄武岩(Condie, 1989)。柳树沟组流纹岩的 Ba/Sr 比值介于 2.96 ~ 4.95 之间,平均为 3.6,与东非肯尼亚裂谷流纹岩的 Ba/Sr 比值一致(Macdonald *et al.*, 1987; Davies *et al.*, 1987),Rb/Sr 比值在 2.6 ~ 5.17 之间 (> 0.5),指示其成因与大陆地壳物质的部分熔融有关。早二叠世流纹岩 Ba/Sr 比值在 4.3 ~ 5.6, Rb/Sr 比值在 1.5 ~ 2.3,与柳树沟组有所差异,但仍类似于板内环境伸展构造体制下地壳物质部分熔融的产物。

柳树沟组玄武岩和流纹岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(图4、图5)显示,玄武岩不相容元素 Ba、Zr、Hf 相对略富集、Nb-Ta 以及 Th 呈相对亏损,表明在玄武岩浆作用过程中可能发生过下地壳物质的混染作用,形成于板内环境;流纹岩分配型式与玄武岩明显迥异,反映二者之间缺乏成因联系,前者配分曲线表现为 K、Rb、Th、La、Ce、Zr、Hf、Sm 等元素

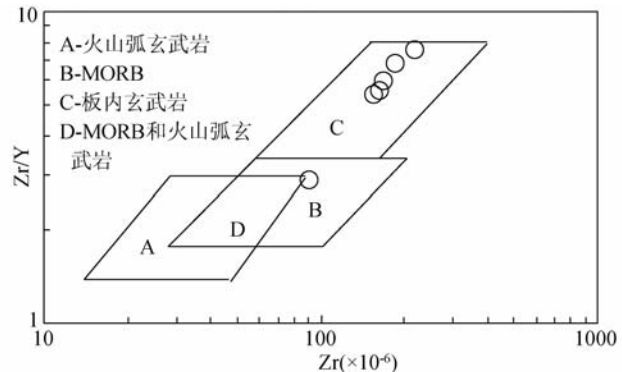


图3 玄武岩 Zr/Y-Zr 图解(据 Pearce and Norry, 1979)

Fig. 3 Zr/Y-Zr diagram for the basalts from Xiaohongliuxia (after Pearce and Norry, 1979)

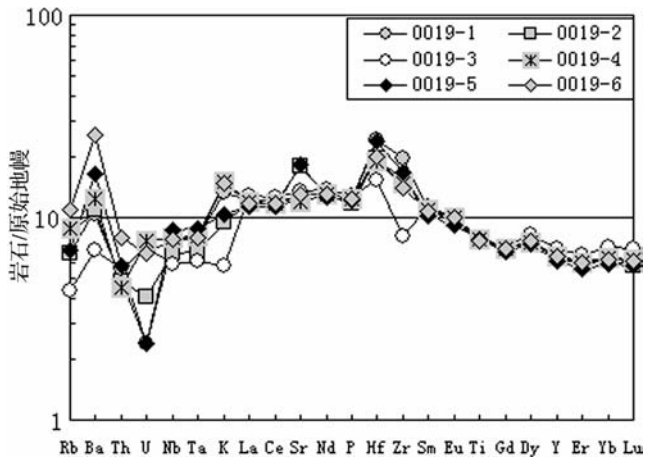


图4 玄武岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 4 PM-normalized trace element patterns of basalts from Xiaohongliuxia (normalized-values from Sun and Mcdonough, 1989)

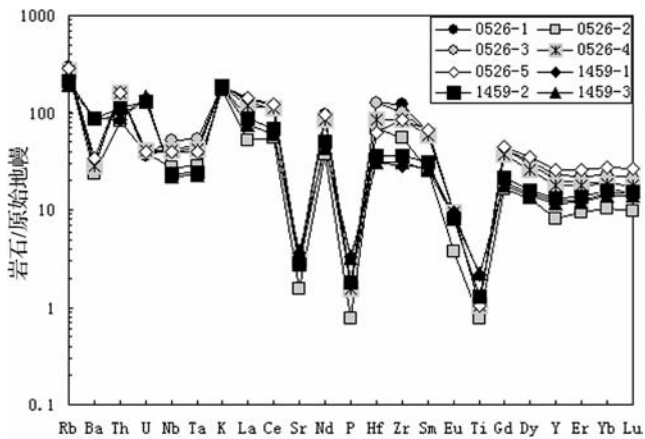


图5 流纹岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 5 N-MORB-normalized trace element patterns of rhyolites from Xiaohongliuxia (normalized-values from Sun and Mcdonough, 1989)

相对富集, Ba、Sr、P、Ti 等元素为显著亏损, Ta、Nb 为中等亏损, 具典型的 A 型花岗岩的地球化学特征, 表明流纹岩是在伸展拉张背景下岩浆作用的结果, 类似于陆内裂谷流纹岩 (Condie, 1986; Davies *et al.*, 1987)。早二叠世流纹岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5)显示: 总体上表现为 Rb、Ba、Th、U、K、La、Ce 不相容元素相对富集, 高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 以及 Sr 等具有明显的负异常, 总体特征也类似于板内(陆内)流纹岩, 暗示早二叠世流纹岩应为下地壳中基性物质部分熔融的产物, 源区可能存在斜长石残留。

上石炭统柳树沟组玄武岩和流纹岩稀土元素分析结果见表 1。由表 1 可知: 流纹岩稀土元素总量明显高于玄武岩

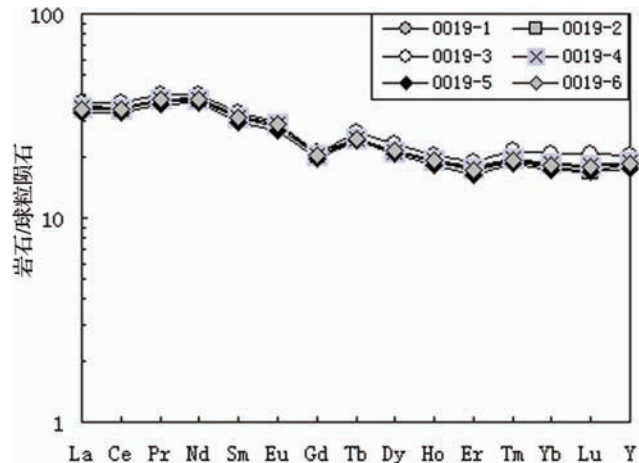


图6 玄武岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(标准值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for basalts from Xiaohongliuxia (normalized-values from Sun and Mcdonough, 1989)

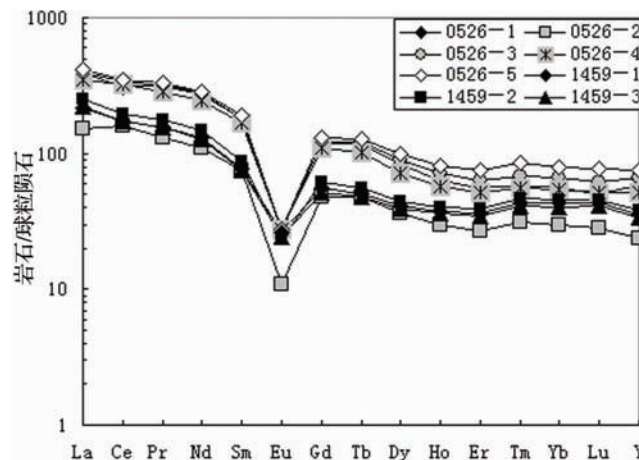


图7 流纹岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(标准值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns for rhyolites from Xiaohongliuxia (normalized-values from Sun and Mcdonough, 1989)

且 LREE 相对富集, 玄武岩 ΣREE 为 $99.6 \times 10^{-6} \sim 112 \times 10^{-6}$, 平均值为 105×10^{-6} , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 1.2$, 流纹岩 ΣREE 为 $596 \times 10^{-6} \sim 713 \times 10^{-6}$, 平均值为 654×10^{-6} , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 2.4 \sim 3.0$ 。玄武岩在球粒陨石配分图(图 6)上表现为 LREE 轻度富集, 稀土元素之间不存在明显的分馏过程, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.1$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.1 \sim 1.2$, 以及 Eu 无异常至轻微正异常 ($\delta\text{Eu} = 1.07 \sim 1.12$), 整体上接近平坦型的配分型式, 表明玄武岩浆源于亏损的软流圈地幔或轻微富集的地幔, 且在玄武岩浆演化过程中不曾发生过斜长石分离结晶作用。柳树沟组流纹岩轻稀土元素为

表1 伊齐-小红柳峡火山岩主量元素(wt%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析数据Table 1 Major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) composition of the volcanic rocks

岩性 样品号	柳树沟组玄武岩						柳树沟组流纹岩					卡拉岗组流纹岩		
	0019-1	0019-2	0019-3	0019-4	0019-5	0019-6	0526-1	0526-2	0526-3	0526-4	0526-5	1459-1	1459-2	1459-3
SiO ₂	46.52	47.16	46.50	46.05	47.09	46.22	76.12	79.76	76.00	76.25	76.22	74.24	73.98	73.62
Al ₂ O ₃	16.68	16.16	16.21	16.56	16.20	16.51	10.22	7.90	10.34	10.39	10.40	11.06	11.34	11.40
Fe ₂ O ₃	1.84	1.72	1.26	1.97	1.50	2.04	2.59	2.55	2.77	2.65	2.72	3.33	3.11	2.75
FeO	7.82	8.13	8.13	7.88	8.34	7.88	2.48	1.66	2.47	2.05	2.14	1.63	1.84	2.31
CaO	9.46	7.63	10.38	9.38	7.62	9.37	0.20	0.95	0.15	0.20	0.16	0.34	0.31	0.31
MgO	9.16	9.10	8.12	9.54	9.24	9.37	0.14	0.11	0.13	0.13	0.16	0.40	0.19	0.40
K ₂ O	0.40	0.29	0.18	0.45	0.31	0.44	5.65	5.14	5.65	5.55	5.62	5.51	5.66	5.54
Na ₂ O	2.24	3.50	3.63	2.26	3.48	2.25	1.84	0.94	1.79	2.03	1.82	2.33	2.89	2.57
TiO ₂	1.66	1.66	1.71	1.69	1.68	1.66	0.23	0.17	0.23	0.23	0.23	0.47	0.29	0.48
P ₂ O ₅	0.27	0.26	0.28	0.27	0.27	0.27	0.04	0.02	0.04	0.03	0.04	0.07	0.04	0.07
MnO	0.15	0.15	0.18	0.15	0.16	0.15	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.09	0.08	0.08
H ₂ O+	2.82	3.29	3.32	3.25	3.96	3.71	0.58	0.72	0.56	0.46	0.60	0.70	0.26	0.77
H ₂ O-	1.04	0.81	0.27	0.58	0.52	0.61	0.12	0.08	0.07	0.08	0.13	0.28	0.20	0.09
CO ₂	0.01	0.10	0.11	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	0.05	0.08	0.01	0.05	0.13	0.01
Total	100.1	99.95	100.3	100.1	100.4	100.5	100.2	100.0	100.3	100.2	100.3	100.5	100.3	100.4
Mg [#]	63.3	62.6	61.0	63.8	63.0	63.2								
Rb	5.55	4.26	2.76	5.57	4.35	6.90	185	169	182	172	180	119	135	123
Cs	0.95	0.44	0.48	1.42	0.46	1.26	3.25	5.23	2.83	3.63	2.92	4.07	4.43	4.17
Sr	253	381	287	254	384	276	60.6	32.7	60.4	66.2	66.5	78.3	58.5	78.6
Ba	72.2	75.9	47.8	86.0	114	178	205	162	190	196	236	439	250	342
Sc	31.2	33.9	35.4	33.9	34.0	35.4	0.78	0.65	0.62	0.99	1.06	6.98	3.78	6.09
Nb	5.51	4.71	4.22	5.62	6.17	5.56	30.8	19.6	36.9	29.0	27.9	15.8	16.8	15.9
Ta	0.33	0.28	0.25	0.33	0.36	0.33	1.81	1.15	2.17	1.71	1.64	0.93	0.99	0.94
Zr	219	171	91.2	164	187	156	1350	623	1140	948	944	314	406	343
Hf	7.44	6.08	4.70	5.82	7.41	6.20	38.70	20.90	39.40	25.80	19.50	9.62	11.20	9.62
U	0.05	0.09	0.15	0.16	0.05	0.14	0.75	0.80	0.79	0.86	0.83	3.00	2.75	3.08
Th	0.42	0.41	0.47	0.38	0.49	0.67	13.70	6.93	14.00	13.70	13.80	7.26	9.32	7.70
Cr	301	218	177	158	142	229	7.09	12.0	5.85	7.22	<1	7.09	23.3	15.4
Ni	131	112	128	124	109	149	4.69	4.94	20.0	4.31	3.86	5.88	7.17	5.58
La	8.36	8.05	8.75	8.22	7.81	8.07	93.10	36.00	94.60	82.10	97.20	51.20	59.80	52.20
Ce	21.40	20.90	22.40	21.00	20.20	20.80	187.0	96.70	210.0	196.0	214.0	106.0	120.0	106.0
Pr	3.64	3.57	3.85	3.61	3.43	3.64	30.90	12.50	30.00	27.20	31.70	14.70	16.90	14.80
Nd	17.80	17.30	18.50	17.60	16.90	17.60	128.0	50.40	125.0	114.0	131.0	60.10	67.40	59.00
Sm	4.87	4.79	5.05	4.83	4.52	4.79	28.00	11.60	28.10	26.00	29.60	12.10	13.70	11.60
Eu	1.68	1.61	1.69	1.68	1.54	1.68	1.54	0.63	1.55	1.60	1.59	1.52	1.34	1.42
Gd	4.28	4.15	4.43	4.20	4.04	4.19	25.20	9.80	25.20	22.40	26.70	11.40	12.60	10.70
Tb	0.92	0.89	0.98	0.92	0.89	0.92	4.33	1.77	4.49	3.80	4.77	1.89	2.08	1.80
Dy	5.37	5.33	5.86	5.36	5.21	5.41	21.10	9.30	22.70	18.40	25.00	10.50	11.30	9.94
Ho	1.08	1.06	1.15	1.08	1.03	1.08	3.61	1.66	4.10	3.22	4.63	2.12	2.26	2.04
Er	2.92	2.82	3.12	2.88	2.67	2.85	9.22	4.47	10.50	8.52	12.40	6.03	6.43	5.76
Tm	0.50	0.48	0.55	0.50	0.47	0.49	1.51	0.79	1.74	1.42	2.15	1.10	1.18	1.06
Yb	3.10	3.03	3.50	3.11	2.89	3.08	9.43	5.11	11.20	9.18	13.50	7.32	7.72	6.86
Lu	0.45	0.43	0.52	0.46	0.43	0.45	1.29	0.71	1.58	1.31	1.95	1.11	1.15	1.04
Y	29.30	28.80	31.80	29.40	27.60	29.00	90.80	37.10	103.00	80.90	117.00	55.70	59.90	53.20
∑REE	105.7	103.2	112.2	104.9	99.63	104.1	635.0	278.5	673.8	596.1	713.2	342.8	383.8	337.4
(La/Yb) _N	1.93	1.91	1.79	1.90	1.94	1.88	7.08	5.05	6.06	6.42	5.16	5.02	5.56	5.46
δEu	1.10	1.08	1.07	1.11	1.08	1.12	0.17	0.18	0.17	0.20	0.17	0.40	0.31	0.40

注: Mg[#] = 100Mg²⁺ / (Mg²⁺ + ∑Fe)

表2 伊齐-小红柳峡火山岩 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素分析结果

Table 2 Sm-Nd and Rb-Sr isotopic composition of the volcanic rocks from Yiqi-Xiaohongliuxia

岩性	柳树沟组玄武岩					
样品号	0019-1	0019-2	0019-3	0019-4	0019-5	
Sm($\times 10^{-6}$)	4.785	4.554	4.792	4.73	4.721	
Nd($\times 10^{-6}$)	17.64	16.8	17.57	17.35	17.27	
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1641	0.164	0.165	0.165	0.1654	
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512935	0.512940	0.512927	0.512940	0.512936	
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_1$	0.512935	0.512944	0.512927	0.512944	0.512936	
$\varepsilon_{\text{Nd}}(t=296\text{Ma})$	+5.7936	+5.8911	+5.6375	+5.8911	+5.8131	
岩性	卡拉岗组流纹岩					
样品号	1459-1	1459-2	1459-3	1459-4	1459-5	
Rb($\times 10^{-6}$)	192.3	66.87	194.8	202.5	70.11	
Sr($\times 10^{-6}$)	69.77	47.64	69.21	71.97	49.63	
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	7.972	4.053	8.14	8.136	4.079	
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2\sigma)$	0.73848	0.72306	0.73937	0.73906	0.72302	
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_1$	0.7071	0.7070	0.7072	0.7069	0.7069	
岩性	柳树沟组流纹岩					
样品号	0526-1	0526-2	0526-3	0526-4	0526-5	0526-6
Rb($\times 10^{-6}$)	123.4	95.93	123.2	126.6	126.3	185.4
Sr($\times 10^{-6}$)	80.92	74.86	85.27	78.86	80.52	69.37
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	4.404	3.699	4.173	4.637	4.53	7.727
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.72396	0.72098	0.72303	0.72495	0.72448	0.73747
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_1$	0.7054	0.7054	0.7055	0.7054	0.7054	0.7069

注: 柳树沟组流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄 $296 \pm 2\text{Ma}(1\sigma)$, 卡拉岗组流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄 $278 \pm 2\text{Ma}(1\sigma)$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_1$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_1$ 按岩石形成时计算的初始值. 样品测试单位: 国土资源部宜昌地质矿产研究所中心实验室

中等富集(图7), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.1 \sim 7.1$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.0 \sim 2.2$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.6 \sim 2.2$, 轻重稀土之间分馏程度较低, 但具有强烈的 Eu 负异常, $\delta\text{Eu} = 0.17 \sim 0.2$, 平均为 0.18; 早二叠世流纹岩稀土元素总量较柳树沟组流纹岩低, 变化范围为 $337 \times 10^{-6} \sim 384 \times 10^{-6}$ 之间, 在球粒陨石标准化图上(图7), 轻稀土适度富集, $\text{LREE}/\text{HREE} = 5.9 \sim 6.2$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.3$, 稀土元素之间分馏不明显, 以及强烈 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.31 \sim 0.39$) 的地球化学特征. 结合流纹岩微量元素地球化学特征可以推断, 晚石炭世和早二叠世流纹岩的形成应与下地壳基性物质部分熔融作用有关, 且在岩浆作用过程中可能发生过斜长石的分离结晶作用或源区有斜长石矿物残留。

上述微量元素及稀土元素地球化学研究表明, 该区晚石炭世双峰式火山岩中的玄武岩和流纹岩为不同成因类型, 前者源自亏损的软流圈地幔, 后者应来自下地壳中基性物质的部分熔融, 源区有斜长石残留, 形成于拉张、地壳减薄(厚度 $< 30\text{km}$) 的裂谷环境, 其成因与天山其它地区的石炭纪火山岩有所不同. 近年来新的研究成果更倾向于西天山石炭纪火山岩系是由古南天山洋俯冲流体参与的岩浆作用的产物(大哈拉将军组玄武岩具有明显的 LILE 富集和相对亏损 HFSE(Nb-Ta, Ti)(朱永峰等, 2005, 2006; 龙灵利等, 2008),

东天山其它地区的石炭纪火山岩系, 如分布在觉罗塔格构造带及其附近地区的石炭纪岛弧火山岩, 为康古尔古大洋南北俯冲作用的产物(李锦轶, 2004; 侯广顺等, 2006; 李文铅等, 2006)。

3.3 同位素地球化学特征

柳树沟组双峰式火山岩及卡拉岗组流纹岩 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素测定结果见表2。

假设现代 N-MORB 型亏损地幔的 ε_{Nd} 平均值($+10 \pm 2$) 是太古代(4.0Ga)球粒陨石分异地幔演化的产物, 则 300Ma 前的 MORB 型亏损地幔的 ε_{Nd} 平均值约为 $+9 \pm 2$ 。伊齐-小红柳峡柳树沟组玄武岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($+5.63 \sim +5.89$) 低于同时期的 MORB 型亏损地幔的下限值; 其次 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_1 = 0.512927 \sim 0.512944$, 大于现代地球平均值(> 0.512638 , Wilson, 1988), 表明伊齐-小红柳峡玄武岩的源区为亏损地幔, 且在岩浆作用过程中可能受到大陆地壳物质一定程度的混染. 柳树沟组流纹岩 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于 $3.70 \sim 6.60$ 之间, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_1$ 介于 $0.7051 \sim 0.7052$ 之间, 略大于 0.7045; 氧同位素 $\delta^{18}\text{O} = 11.6\text{‰}$, 属高 $\delta^{18}\text{O}$ 流纹岩(Taylor, 1968), 其成因可能与陆壳物质部分熔融有关. 早二叠世流纹岩

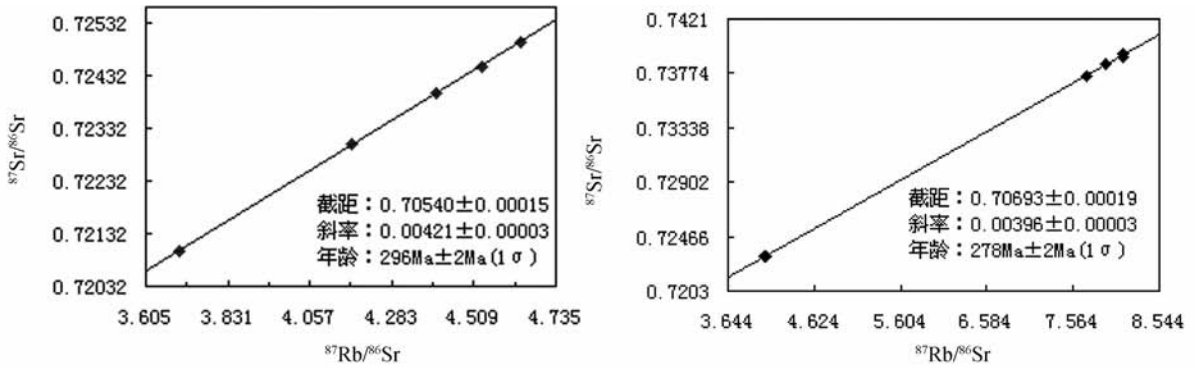


图8 柳树沟组(左)和卡拉岗组(右)流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄图

Fig. 8 Rb-Sr isochron diagram for rhyolites in Liushugou Formation (left) and Kalagang Formation (right) from Xiaohongliuxia

($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₁ 为 0.7070, $\delta^{18}\text{O} = 11.97\text{‰}$, 指示岩浆并非成由于幔源玄武岩岩浆分异作用, 是中下地壳岩石部分熔融的结果。

3.4 火山岩形成时代

柳树沟组双峰式火山岩组合由火山爆发相、溢流相(玄武岩→流纹岩)到火山爆发-沉积相构成一个大的旋回, 其中具有枕状构造的玄武岩中含有多层薄-中厚层的生物碎屑灰岩(海百合茎), 指示岩石形成于浅海环境。本文选择新鲜具隐晶结构的流纹岩进行 Rb-Sr 同位素年龄测定(结果见表 2), 获得了柳树沟组流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $296 \pm 2\text{Ma}$ (1σ)、卡拉岗组流纹岩为 $278 \pm 2\text{Ma}$ (1σ)(图 8), 流纹岩为快速冷凝, 可以代表岩石形成的时代, 分别归入晚石炭世晚期和早二叠世晚期。

大量同位素年龄研究表明, 新疆北部板块碰撞和造山运动主要发生在 $300 \pm 10\text{Ma}$ 左右(胡霁琴等, 1997)。在天山大部地区, 广泛出露一套石炭纪火山岩, 但其构造属性与博格达地区有所差异。西天山石炭纪火山岩(大哈拉将军组)主要沿伊犁盆地南北缘分布, 火山岩-次火山岩的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 和 K-Ar 年龄在 $290 \sim 306\text{Ma}$ (赵振华等, 2004) 和 $\sim 326\text{Ma}$ (刘友梅等, 1994), 最近在这套火山岩中获得了锆石 SHRIMP 年龄分别为 $353.7 \pm 4.5\text{Ma}$ 和 $312.8 \pm 4.2\text{Ma}$ (朱永峰等, 2005), 分属早石炭世早期和晚石炭世早期, 并被认为是代表古南天山洋的火山岛弧(Zhu *et al.*, 2005, 2009; 龙灵利等, 2008), 并具有自西向东逐渐消亡, 至晚石炭世被碰撞后富钾岩浆喷发所替代(朱永峰等, 2006), 或被推测是大陆边缘弧后拉张的产物(钱青等, 2006), 尽管这套火山岩系曾被视为碰撞后大陆裂谷环境(车自成等, 1996; 顾连兴等, 2001a, b; 夏林圻等, 2004; Xia *et al.*, 2004) 或古地幔柱岩浆作用的产物(夏林圻等, 2004)。在东天山地区, 分布在觉罗塔格构造带及其附近地区的石炭纪火山岩, 分属企鹅山群、雅满苏组、干墩组和梧桐窝子组, 企鹅山群安山岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 334Ma (侯广顺等, 2005), 玄武岩锆石 U-Pb 年龄为 $322.6 \pm 2.0\text{Ma}$ 和酸性火山岩为 $319.9 \pm 1.6\text{Ma}$ (李向民等, 2004), 并被认为形成于大陆裂谷环境(李向民

等, 2006), 但最近的火山岩和花岗岩地球化学研究表明, 早石炭世火山岩形成于岛弧环境, 与康古尔古大洋南北俯冲作用有关(侯广顺等, 2006; 李文铅等, 2006)。上述研究结果显示, 在天山大部地区, 石炭纪火山岩倾向于俯冲流体参与下的岩浆作用的产物, 与研究区有所不同。研究区内与柳树沟组呈断层接触的七角井组玄武岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $322 \pm 2\text{Ma}$ (王金荣等, 待发表), 南侧大石头-色皮口流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $307.1 \pm 1.3\text{Ma}$ (王银喜等, 2005), 在博格达山南缘的白杨沟、红山口、车辘辘泉等地形成于伸展拉张环境下的双峰式火山岩中的流纹岩 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $293.3 \pm 1.7\text{Ma}$, $294.6 \pm 2\text{Ma}$, $293.6 \pm 2.3\text{Ma}$, 基性岩年龄分别为 $295.8 \pm 2.8\text{Ma}$, $294.5 \pm 3.6\text{Ma}$ (陈希节和舒良树, 2010^①)。此外, 在博格达造山带东段发育大量侵入于柳树沟组中的辉绿岩, 其锆石 $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $288.9 \pm 4.7\text{Ma}$ (王觉富, 1998), 东邻的哈尔里克造山带碰撞后碱性花岗岩的形成时代为 $289 \pm 6.2\text{Ma}$ (Gu *et al.*, 1999), 即整个天山地区从 290Ma 开始出现大规模的后碰撞陆内伸展裂陷岩浆活动。上述年龄数据与研究区柳树沟组流纹岩和后造山卡拉岗组流纹岩的 Rb-Sr 等时线年龄(分别为 $296 \pm 2\text{Ma}$ 、 $278 \pm 2\text{Ma}$) 较为吻合, 同时提示柳树沟组双峰式火山岩是博格达晚古生代裂谷晚期岩浆作用的产物。

4 岩石成因及构造-岩浆演化过程

4.1 岩石成因机制

地质证据表明, 双峰式火山岩可以出现在不同的构造背景中, 如大陆裂谷、大陆伸展减薄环境、岩浆弧、洋岛及弧后盆地等构造环境(Duncan *et al.*, 1984; Frey *et al.*, 1984; Coulon *et al.*, 1986; Brouxel *et al.*, 1987; Wilson, 1989; Hochstaedter *et al.*, 1990; Pin *et al.*, 1993, 1997; Geist *et al.*, 1995; Garland *et al.*, 1995; 王焰等, 2000)。由此可见,

① 陈希节, 舒良树. 2010. 新疆东天山晚古生代后碰撞-岩浆事件研究. 第二届构造地质与地球动力学学术研讨会会议摘要, 广州

双峰式火山岩并不只是大陆裂谷环境的产物,只要岩浆作用的地质条件许可均可出现在不同的构造环境中(王焰等,2000)。形成于陆壳基底上的岩浆弧,其岩浆活动总是以安山岩类的大量出现为特征,但在博格达地区具有明显的Daly成分间断。此外,在该区迄今也未发现晚古生代的大洋地壳和海沟沉积物、蛇绿混杂岩、双变质带和板块俯冲的其它证据,东邻的克拉麦里古大洋在早石炭世或更早就已闭合(Coleman,1989;李锦轶等,1990,1999;何国琦等,1994;李锦轶,1995),同时,具有明显亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)、富集大离子亲石元素以及经常出现斜长石分离结晶作用和Eu负异常的陆缘弧玄武岩地球化学特征在研究区并未出现。因此,研究区双峰式火山岩亦可排除形成于火山弧环境的可能。前述的岩石地球化学特征所反映的源岩性质、部分熔融的物理条件(特别是压力)以及岩浆作用过程,表明双峰式火山岩形成于大陆裂谷环境,与天山其它地区石炭纪火山岩形成于火山弧环境(姜常义等,1995;马瑞士等,1997;赵振华等,2001;Wang *et al.*,2003;朱永峰等,2005,2006;侯广顺等,2006;李文铅等,2006;王强等,2006;龙灵利等,2008;Zhu *et al.*,2009)明显不同。

前人研究成果表明,天山地区石炭纪火山岩形成的构造背景有大陆裂谷(车自成等,1996;顾连兴等,2001a,b;夏林圻等,2004;Xia *et al.*,2004)或大陆减薄拉张环境(陈丹玲等,2001),或与地幔柱岩浆作用有关(夏林圻等,2004)、火山弧(姜常义等,1995;马瑞士等,1997;赵振华等,2001;朱永峰等,2005)等观点。但近年来取得的岩石地球化学数据的研究结果大多都支持火山弧的观点(Wang *et al.*,2003;朱永峰等,2006;侯广顺等,2006;李文铅等,2006;王强等,2006;龙灵利等,2008;Zhu *et al.*,2009)。果真如此,那么,博格达石炭纪双峰式火山岩的形成环境则有别于天山大部地区,其动力学体制可能与石炭纪古大洋消减引起的陆内伸展拉张作用有关,曾也被称为弧后盆地(李锦轶,2004)。

双峰式火山岩中的玄武岩源于地幔橄榄岩的部分熔融已被学者所公认,但流纹岩却有两种截然不同的成因机制,即有幔源玄武岩浆分异和地壳物质部分熔融的结果(Condie,1986;Wilson,1989)。由玄武岩浆分异作用形成的流纹岩通常地壳混染物极少或没有,因而两者在微量元素和Nd-Sr同位素地球化学特征上极为相似(Brouxel *et al.*,1987;Wilson,1989;Hochstaedter *et al.*,1990;Geist *et al.*,1995),但玄武岩出露面积大与其伴生的流纹岩小(Duncan *et al.*,1984;Lightfoot *et al.*,1987;Geist *et al.*,1995;Garland *et al.*,1995)。由地壳物质部分熔融形成的流纹岩,其分布范围则远远大于与其伴生的玄武岩(Davies *et al.*,1987;Davies *et al.*,1987;Cull *et al.*,1991),且在微量元素、Sr-Nd-Pb同位素组成上具有很大的差异(Doe *et al.*,1982;Davies *et al.*,1987)。研究区双峰式火山岩微量元素、稀土元素和同位素地球化学特征,特别是流纹岩具有独特的Sr、P和Ti显著负异常、Ba、Nb、Ta中等负异常、强烈的负Eu异常(图5、

图7)以及同位素地球化学特征与其伴生的玄武岩明显有别,表明玄武岩与流纹岩为异源的,玄武岩来自亏损地幔的部分熔融,在岩浆作用过程中可能发生过橄榄石、辉石的分离结晶,但斜长石的分离结晶作用不明显,而流纹岩应来自玄武岩浆底侵作用/地幔底辟体提供的热能导致下地壳物质(包括先存的底侵物质)的重熔,岩浆源区存在有斜长石的残留,暗示当时的大陆地壳应处于拉张减薄的过渡型地壳结构特征(地壳厚度<30km)。考虑到双峰式火山岩形成在裂谷发育晚期,地壳厚度薄,利于岩浆快速上侵的断裂发育,以及酸性岩浆在很大程度上表现为晶粥体(Pitcher,1997),其发生分离结晶作用的可能性大为降低(吴福元等,2007),甚至是不大可能的(张旗等,2007,2008),因而将流纹岩的Sr、Eu相对亏损及低Al₂O₃含量的地球化学归因于源岩部分熔融过程中存在有斜长石的残留,而非结晶分离作用的结果。在一般情况下,这种成因的双峰式火山岩其流纹岩分布范围远大于玄武岩。但是,研究区的双峰式岩石组合比例却是个例外。

研究区晚石炭世双峰式火山岩中的玄武岩与流纹岩呈交替出现,且玄武岩分布范围大于流纹岩(流纹岩/玄武岩约为1/4,图1),不同于典型的异源双峰式火山岩的分布规律(流纹岩分布比例远大于玄武岩,Davies *et al.*,1987;Cull *et al.*,1991)。更令人感兴趣的是在同一裂谷带的南北两侧,其岩石成因也存在明显不同。在博格达裂谷带东段南缘的七角井早石炭世双峰式火山岩为同源岩浆作用的产物,玄武岩来自亏损地幔的部分熔融,流纹岩形成于幔源玄武岩浆分异作用,分布比例流纹岩/玄武岩约为1/7(王银喜等,2006),而其北侧的伊齐-小红柳峡晚石炭世晚期双峰式火山岩为非同源的,流纹岩分布的相对比例则大于七角井地区。这种差异可能与博格达裂谷不同演化阶段的岩浆作用过程有关。

4.2 构造岩浆演化过程

岩石学、岩石地球化学及同位素年代学研究表明,博格达石炭纪裂谷岩浆作用在时空上具有明显的差异性和物质来源的不均一性,显示出火山岩具有多源性及多成因的特点(顾连兴等,2000),即使同在博格达裂谷带东段也表现出不同的双峰式火山岩成因类型。究其原因,可能与裂谷不同演化阶段的岩浆作用过程有关。在早石炭世裂谷发育初期,地壳拉张减薄可能仅引起软流圈地幔上隆降压形成玄武岩浆,玄武岩浆除了喷发地表外在相对较厚的地壳内聚集成一定规模的岩浆房,为结晶分异形成少量的中酸性火山岩提供了有利的地质条件,其可能为七角井双峰式火山岩形成之起因。而在晚石炭世的裂谷演化晚期阶段,地壳处于进一步拉伸减薄,在软流圈地幔上隆降压形成玄武岩岩浆喷发以及底侵的同时,还可能在一定规模热的地幔底辟体进入下地壳促使较大规模的重熔作用,相应形成了壳源流纹岩以及较高的流纹岩/玄武岩分布比例的伊齐-小红柳峡双峰式火山

岩组合。

区域岩石-构造组合研究表明,博格达裂谷岩浆作用始于早石炭世(七角井地区双峰式火山岩之玄武岩和流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄分别为 $342.0 \pm 3.2\text{Ma}$ 和 $340.3 \pm 3.4\text{Ma}$, 王银喜等,2006),结束于晚石炭世晚期(流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄分别为 $296 \pm 2\text{Ma}$)。顾连兴等(2001a)根据晚古生代辉绿岩及中酸性侵入体(Rb-Sr 等时线年龄 $298.4 \pm 0.76\text{Ma}$)的岩石学、地球化学研究指出,中酸性侵入体定位是紧随博格达陆内造山带的碰撞,是代表地球动力学环境由挤压变为拉张的转折期。王银喜等(2005)获得了博格达大石头-色皮口流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $307.1 \pm 1.3\text{Ma}$,认为它是博格达裂谷闭合和区域隆起造山阶段的产物。但是,伊齐-小红柳峡双峰式火山岩之流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $296 \pm 2\text{Ma}$,表明博格达裂谷作用在晚石炭世晚期仍在进行。早二叠世晚期后造山伸展环境下形成的酸性火山岩建造(流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $278 \pm 2\text{Ma}$)及七角井地区下二叠统陆相磨拉石建造角度不整合覆盖在双峰式火山岩之上(周济元等,1994)标志着博格达造山作用的结束。

5 结论

(1) 博格达裂谷开启于早石炭世,闭合于晚石炭世末期,早二叠世末博格达进入后造山伸展垮塌的演化阶段。

(2) 博格达山东段早、晚石炭世双峰式火山岩形成于大陆裂谷环境,但属不同的岩石成因类型。南部七角井地区早石炭世双峰式火山岩为同源的,流纹岩是幔源玄武岩浆分异作用的产物,而北部伊齐-小红柳峡晚石炭世双峰式火山岩为异源的,流纹岩是玄武岩浆底侵作用/地幔底辟体导致下地壳物质重熔的产物,斜长石为源区主要的残留相。

(3) 晚石炭世伊齐-小红柳峡双峰式火山岩中的流纹岩/玄武岩分布的相对比例约为 1/4,明显不同于典型的异源双峰式火山岩的分布规律,其可能与裂谷晚期阶段的构造岩浆作用有关。

致谢 两位审稿人提出许多中肯、有益的意见对作者正确认识天山石炭纪火山岩的地球化学性质及形成的构造动力学过程很有帮助;在野外工作中得到了新疆有色地质勘查局物探大队王永新、魏清峰高级工程师的大力支持;参加野外工作的还有兰州大学王晓伟、第鹏飞、王玉玺、欧阳京、吴春俊、吴继承、贾志磊、刘晓煌等,作者在此深表感谢!

References

Brouxel M, Lapierre H, Michard A and Albrede F. 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: Geochemistry of the Copley-Blaklala series, northern California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 85:386-400

Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1996. Review on the ancient Yili

rift, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3):478-490 (in Chinese with English abstract)

Chen DL, Liu L, Che ZC and Luo JH. 2001. Geochemical characteristics and tectonic implication of Carboniferous volcanites in the Luotuoqiao area of Middle Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3):374-384 (in Chinese with English abstract)

Cheng SD Wang GR and Yang SD. 1986. The paleo-plate tectonics of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 4(2):1-13 (in Chinese with English abstract)

Coleman RG. 1989. Continental growth of North China. *Tectonics*, 8(1):621-625

Condie KC. 1986. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic supercrustal rocks in the Southwestern United States. *J. Geology*, 94:845-864

Condie KC. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, 23:1-18

Coulon C, Maluski H, Bollinger C and Wang S. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{39}Ar - ^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamic significance. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79:281-302

Cull JP, Oreilly SY and Griffin WL. 1991. Xenolith geotherms and crustal models in eastern Australia. *Tectonophysics*, 192:359-366

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

Doe BR, Leeman WP, Christiansen 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.*, 87:4785-4806

Duncan AR, Erlank AJ and Marsh JS. 1984. Regional geochemistry of the Karoo igneous province. *Spec. Publ. Geol. Soc. Afr.*, 13:355-388

Fang GQ. 1993. Sedimentological evidence of late Paleozoic Bogda island arc. *Acta Sedimentologica Sinica*. 11(3):31-36 (in Chinese with English abstract)

Frey FA, Gerlach DC, Hickey RL, Escobar LL and Villavicencio FM. 1984. Petrogenesis of the Lagunael Maule volcanic complex, Chile (36°S). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88:133-149

Garland F, Hawkesworth CJ and Mantovani MSM. 1995. Description and petrogenesis of the Parana rhyolites, Southern Brazil. *J. Petrol.*, 36:1193-1227

Geist D, Howard KA and Larson P. 1995. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation: The basalt-rhyolite association at Volcan Alcedo, Galapagos Archipelago. *Journal of Petrology*, 36:965-982

Gu LX, Hu SX, Chu Q, Yu CS and Xiao XJ. 1999. Pre-collision granites and post-collision intrusive assemblage of the Kelameili-Harlik orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 73:316-329

Gu LX, Hu SX, Yu CS and Li HY. 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3):305-316 (in Chinese with English abstract)

Gu LX, Hu SX, Yu CS, Zhao M, Wu CZ and Li HY. 2001a. Intrusive activities during compression-extension tectonic conversion in the

- Bogda intracontinental orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2):187-198 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Wu CZ *et al.* 2001b. Initiation and evolution of the Bogda subduction-torn-type rift. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4):585-597 (in Chinese with English abstract)
- Guo F, Fan WM, Wang YJ *et al.* 2001. Petrogenesis of the Late Mesozoic bimodal volcanic rocks in the southern Da Hinggan Mts, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1):161-168 (in Chinese with English abstract)
- Guo F, Fan WM, Wang YJ *et al.* 2005. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous high-K calc-alkaline volcanic rocks in the Laiyany basin of the Sulu belt, eastern China. *The Island Arc*, 14:69-90
- Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar basin. *Science in China (Series D)*, 42(2):113-119
- He GQ, Li MS, Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 1994. Paleozoic crustal evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumuqi and Hongkong: Xinjiang People's Publication House and Education and Cultural Press TD, 1-437 (in Chinese with English abstract)
- Hochstaedter AG, Gill JB, Kusakabe M, Newman S, Pringle M, Taylor B and Fryer P. 1990. Volcanism in the Sumisu Rift. I. Element, volatile and stable geochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100:179-194
- Hou GS, Tang HF, Liu CQ and Wang YB. 2005. Isotope-chronological and geochemical study on the wallrock of Tuwu-Yandong porphyrycopper deposits, eastern Tianshan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6):1729-1736 (in Chinese with English abstract)
- Hou GS, Tang HF and Liu CQ. 2006. Geochemical characteristics of the Late Paleozoic volcanics in Jueluotage tectonic belt, eastern Tianshan and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1167-1177 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Wang ZG and Tu GC. 1997. Geological evolution, Petrogenesis and Metallogeny of Noth Xinjiang. Beijing: Science Press, 1-246 (in Chinese)
- Jiang CY, Wu WK, Zhang XR and Cui SS. 1995. The change from island arc to rift valley: Evidence from volcanic rocks in Awulale area. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(4):289-300 (in Chinese with English abstract)
- Li JY, Zhu BQ and Feng YM. 1990. The recent development of Nanminghu Formation in Kalamaili of East Junggar. *Geoscience of Xinjiang*. Beijing: Geological Publishing House, 2:1-8 (in Chinese)
- Li JY. 1995. Main characteristics and emplacement processes of the East Junggar ophiolites, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(Suppl.):73-84 (in Chinese with English abstract)
- Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 34:405-419 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China. *Geological Review*, 50:304-322 (in Chinese with English abstract)
- Li WQ, Xia B, Wang KZ, Wang Q and Wang H. 2006. Zircon SHRIMP age and geochemistry of Caizhong granite from east Tianshan, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1):43-52 (in Chinese with English abstract)
- Li XM, Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Ma ZP and Wang LS. 2004. Zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks of the Qi'eshan Group in the east Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 23(12):1215-1220 (in Chinese with English abstract)
- Li XM, Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Ma ZP and Wang LS. 2006. Petrogenesis of the Carboniferous Qi'eshan Group volcanic rocks in the east Tianshan. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(3):336-341 (in Chinese with English abstract)
- Lightfoot PC, Hawkesworth CJ and Sethna SF. 1987. Petrogenesis of rhyolites and trachytes from the Deccan Trap; Sr, Nd and Pb isotope and trace element evidence. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95:44-54
- Liu YM, Yang WH and Gao JY. 1994. Study on isotopic age of Dahalajunshan formation in Tekesi forestry of Xinjiang. *Geochemica*, 23:99-104 (in Chinese with English abstract)
- Long LL, Gao J, Qian Q, Xiong XM, Wang JB, Wang YW and Gao LM. 2008. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks from Yili region, western Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4):699-710 (in Chinese with English abstract)
- Ma RS, Shu LS and Sun JQ. 1997. Tectonic Evolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1-202 (in Chinese with English abstract)
- Macdonald R, Davies GR, Bliss CM *et al.* 1987. Geochemistry of high-silica peralkaline rhyolites. Naivasha. Kenya rift valley. *J. Petrol.*, 28(6):979-1008
- Pearce JA and Norry MJ. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Yb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69:33-47
- Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58:63-81
- Pin C and Marini F. 1993. Early Ordovician break-up in Variscan Europe: Nd-Sr isotope and trace element evidence from bimodal igneous associations of the Southern Massif Central, France. *Lithos*, 29:177-196
- Pin C and Paquette JL. 1997. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian belt: Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the late Devonian Brevenne metavolcanics; Massif Central (France). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 129:222-238
- Pitcher WS. 1997. *The Nature and Origin of Granite*. 2nd edition. London: Chapman and Hall, 386
- 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: Constrains from petrology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1307-1323 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP. 1997. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. In: Wit MJ and Ashwal LD (eds.). *Green Stone Belts*. Oxford: Oxford University Press, 35-37
- Riley TR, Leat PT, Pankhurst RJ and Harris C. 2001. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting. *Journal of Petrology*, 42(6):1052-1065
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes.

- In; Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. London Spec. Publ. 42:313–345
- Taylor HP. 1968. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks. Earth Planet. Sci. Lett., 38: 177–210
- Wang JF. 1998. The basic characteristics and tectonic evolution of the rift system of Tuha terrene. Master Degree Thesis. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English summary)
- Wang LL, Zhang K and Gao MY. 1986. Characteristics of structural evolution and oil-gas potential prediction in southern margin area of Junggar Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 7: 1–9 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Bai ZH, Bao ZW, Xu JF, Xiong XL, Mei HJ and Wang YX. 2003. Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basaltic rocks association in the Alataw Mountains, north Xinjiang: Interactions between slab melt and mantle peridotite and implications for crustal growth. Chinese Science Bulletin, 48(19):2108–2115
- Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Xiong XL, Zi F and Bai ZH. 2006. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au mineralization. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 11–30 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Qian Q, Liu L and Zhang Q. 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments. Acta Petrologica Sinica, 16: 169–173 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Gu LX and Zhang ZZ, Zhang KJ, Li HM, Wu CZ and Yang JD. 2005. Isotopic chronologic evidence of Bogda rift closure and regional uplift and geological significance. Acta Geoscientica Sinica, 26(Suppl.): 102–104 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Zhang KJ, Li HM and Yang JD. 2006. Geochemistry and Nd-Sr-Pb isotope of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift. Acta Petrologica Sinica, 22:1215–1224 (in Chinese with English abstract)
- Wendlandt RF, Altherr R, Neumann ER and Baldrige WS. 1995. Petrology, geochemistry, isotopes. In: Olsen KH (ed.). Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics. Amsterdam: Elsevier, 47–60
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis. London: Unwin Hyman, 1–466
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu QF. 1986. Structural evolution and prospects of Junggar Basin. Xinjiang Geology, 4: 1–19 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume. Geological Bulletin of China, 23: 903–910 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Petrogenesis of Carboniferous releted-rift volcanic rocks in the Tianshan, Northwestern China. Geological Society of America Bulletin, 116:419–433
- Zhang Q, Pan GQ, Li CD, Jin WJ and Jia XQ. 2007. Does fractional crystallization occur in granitic magma? Some crucial questions on granite study (2). Acta Petrologica Sinica, 23: 1239–1251 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Xiong XL and Li CD. 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. Beijing: China Land Press, 179–256 (in Chinese)
- Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL *et al.* 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology study of Late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang. Geochemica, 32:317–327 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JY, Mao YS and Huang ZX. 1994. Volcanic Geology of Palaeo-Continental Margin in East Tianshan Mountains. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1–280 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. Chinese Science Bulletin, 50: 2201–2212
- Zhu YF, Zhou J and Guo X. 2006. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1341–1350 (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, London, 166: 1085–1099

附中文参考文献

- 车自成,刘良,刘洪福,罗金海. 1996. 论伊犁裂谷. 岩石学报, 12(3):478–490
- 陈丹玲,刘良,车自成,罗金海. 2001. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境. 岩石学报, 17(3):378–384
- 成守德,王广端,杨树德. 1986. 新疆古板块构造. 新疆地质, 4(2): 1–26
- 方国庆. 1993. 博格达晚古生代岛弧的沉积岩石学证据. 沉积学报, 11(3):31–36
- 顾连兴,胡受奚,于春水等. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. 岩石学报, 16(3): 305–316
- 顾连兴,胡受奚,于春水,赵明,吴昌志,李宏宇. 2001a. 博格达陆内碰撞造山带挤压-拉张构造转折期的侵入活动. 岩石学报, 17(2):187–198
- 顾连兴,胡受奚,于春水等. 2001b. 论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化. 岩石学报, 17(4):585–597
- 郭锋,范蔚茗,王岳军等. 2001. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用. 岩石学报, 17(1): 161–168
- 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:教育和文化出版社, 1–437
- 侯广顺,唐红峰,刘丛强,王彦斌. 2005. 东天山土屋-延东斑岩铜矿围岩的同位素年代和地球化学研究. 岩石学报, 21(6):1729–1736
- 侯广顺,唐红峰,刘丛强. 2006. 东天山觉罗塔格构造带晚古生代火山眼地球化学特征及意义. 岩石学报, 22(5):1167–1177
- 胡霁琴,王中刚,涂光炽. 1997. 新疆北部地质演化及成岩成矿规律. 北京: 科学出版社, 1–246

- 姜常义,吴文奎,张学仁,崔尚森. 1995. 从岛弧到裂谷的变迁-来自阿吾拉勒地区火山岩的证据. 岩石矿物学杂志,14(4): 289 - 300
- 李锦轶,朱宝清,冯益民. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里南明水组研究的新进展. 新疆地质科学(第二辑). 北京:地质出版社,1-8
- 李锦轶. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史. 岩石学报,11(增刊):73-84
- 李锦轶,肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. 地质科学,34:405-419
- 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
- 李文铅,夏斌,王克卓,王茜,王核. 2006. 新疆东天山彩中花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄及地球化学特征. 地质学报,80(1):43-52
- 李向民,夏林圻,夏祖春,徐学义,马中平,王立社. 2004. 东天山石炭纪企鹅山群火山岩锆石 U-Pb 年代学. 地质通报,23(12):1215-1220
- 李向民,夏林圻,夏祖春,徐学义,马中平,王立社. 2006. 东天山石炭纪企鹅山群火山岩岩石成因. 吉林大学学报(地球科学版),36(3):336-341
- 刘友梅,杨蔚华,高计元. 1994. 新疆特克斯县林场大哈拉军山组火山岩年代学研究. 地球化学,23:99-104
- 龙灵利,高俊,钱青,熊贤民,王京彬,王玉往,高立明. 2008. 西天山伊犁地区石炭纪火山眼地球化学特征及构造环境. 岩石学报,24(4):699-710
- 马瑞士,舒良树,孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京:地质出版社,1-202
- 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
- 王觉富. 1998. 吐哈地体裂谷系基本特征与构造演化. 硕士学位论文. 南京:南京大学
- 王利利,张恺,高明远. 1986. 准噶尔盆地南缘的构造演化特征及含油气预测. 新疆石油地质,7(2):1-9
- 王强,赵振华,许继峰,Derek A Wyman,熊小林,资峰,白正华. 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富铌玄武质岩:对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义. 岩石学报,22(1):11-30
- 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
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,张开均,李慧民,吴昌志,张杰东. 2005. 博格达裂谷闭合与区域隆起的同位素年代学证据及地质意义. 地球学报,26(增刊):102-104
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,吴昌志,张开均,李慧民,张杰东. 2006. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学特征. 岩石学报,22(5):1215-1224
- 吴福元,李献华,杨进辉,郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报,23(6):1217-1238
- 吴庆福. 1986. 准噶尔盆地构造演化及含油气远景. 新疆地质,4(3):1-19
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,李向民,马中平,王立社. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱. 地质通报,23:903-910
- 张旗,潘国强,李承东,金帷俊,贾秀琴. 2007. 花岗岩结晶分离作用问题——关于花岗岩研究的思考之二. 岩石学报,23:1239-1251
- 张旗,王焰,熊小林,李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇. 北京:中国大地出版社,179-256
- 赵振华,白正华,熊小林等. 2004. 西天山北部晚古生代火山-浅侵入岩浆岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素定年. 地球化学,32:317-327
- 周济元,茅燕石,黄志勋. 1994. 东天山古大陆边缘火山地质. 成都:成都科技大学出版社,1-280
- 朱永峰,张立飞,古丽冰,郭璇,周晶. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究. 科学通报 50: 2004-2014
- 朱永峰,周晶,郭璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报,22(5):1341-1350