

西准噶尔早泥盆世马拉苏组火山岩岩石成因研究*

李平^{1,2} 王洪亮¹ 徐学义^{1,2} 陈隽璐¹ 过磊¹ 奚仁刚¹

LI Ping^{1,2}, WANG HongLiang¹, XU XueYi^{1,2}, CHEN JunLu¹, GUO Lei¹ and XI RenGang¹

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054

2. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安 710054

1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China

2. MLR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Deposits, Xi'an 710054, China

2014-01-01 收稿, 2014-05-08 改回.

Li P, Wang HL, Xu XY, Chen JL, Guo L and Xi RG. 2014. Petrogenesis of volcanic rocks from Early Devonian Marasu Formation, West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12):3553–3568

Abstract Volcanic rocks from Marasu Formation of Early Devonian, occurred in northern West Junggar, are sodium-rich and Low-K tholeiitic series, these basaltic andesites and basalts on the north side of Xiemistai fault are generally distributed in the outcrops of pyroclastic rocks intermittently. The Hark diagrams of $Mg^{\#}$ versus major and trace elements and plots of Th-Th/Nd suggest these basic- and intermediate-lavas were not formed only by the comagmatic evolution. The basaltic andesites in this study are characterized by enrichments in large ion lithophile elements (LILE) and depleted in high field-strength elements (HFSE), low Th contents and high Hf/Th and $(Nb/Th)_{PM}$ ratios, all of which show the typical geochemical features of subduction zones. The basalts have nearly flat REE patterns, high Th contents and low Hf/Th and $(Nb/Th)_{PM}$ ratios, similar to the geochemical features of MORB. Although they also show various enrichments in LILE and depleted in HFSE, the high La/Nb ratios suggest that they are related to the added crust or subducting materials. Besides, some geotectonic discrimination diagrams also can reflect they are MORB-like basalts. HFSE/HFSE ratios (e. g. Zr/Nb, Hf/Ta) of both are similar to that of mid-oceanic ridge basalts, which should be the partial melting products of MORB sources. The primitive mantle normalized ratios of La/Yb and Gd/Yb suggest the basaltic andesites were originated from garnet-bearing or spinel-garnet mantle peridotites with subducting sediments or crustal materials added, and MORB-like basalts were formed by the partial melting of the spinel-bearing mantle peridotites. Several lines of evidence suggest that the Marasu volcanic rocks in northern West Junggar, with both geochemical characteristics of island arc and MORB-like volcanics, may be the magmatic records of back-arc spreading in tectonic collage.

Key words Marasu Formation; Basic- and intermediate-volcanic rocks; Geochemical features; Back-arc basin; West Junggar

摘要 新疆西准噶尔北部地区的早泥盆世马拉苏组出露有少量富钠低钾的拉斑质中基性熔岩, 这些分布于谢米斯台断裂北侧的玄武安山岩和玄武岩多呈夹层状断续产于火山碎屑岩之中。马拉苏中基性熔岩的 $Mg^{\#}$ 与主、微量元素协变关系及 Th-Th/Nd 图反映了其并非同源岩浆演化的结果。马拉苏火山岩中的玄武安山岩富集 LILE、亏损 HFSE, 具有较高的 Th 含量及较低的 Hf/Th 和 $(Nb/Th)_{PM}$ 比值, 显示出弧火山岩的地球化学特征。其中的玄武岩则具有略为平坦的稀土元素分配样式, 较低的 Th 含量及较高的 Hf/Th 和 $(Nb/Th)_{PM}$ 比值, 此同 MORB 地球化学特征极为相似; 虽然其也显示有轻微的 LILE 富集、HFSE 亏损, 但是较高的 La/Nb 比值则暗示这同地壳或俯冲物质组分的卷入有关, 且一系列构造环境判别图解也进一步印证了马拉苏组内的玄武岩应属似 MORB 基性熔岩。此外, 两类岩石的高场强元素比值 Zr/Nb、Hf/Ta 同全球平均大洋中脊玄武岩的相应比值极为接近, 反映了马拉苏组中基性火山岩的物质源区主体均为 MORB 地幔物质源区。La/Yb-Gd/Yb 原始地幔标准化比值的模拟计算进一步显示了马拉苏组玄武安山岩与受改造(俯冲沉积物或地壳物质的混染)的石榴子石或尖晶石-石榴子石地幔橄辉岩物质源区的部分熔融作用有关, 而似 MORB 型玄武岩则源自尖晶石地幔橄辉岩源区的部分熔融。结合

* 本文受中国地质调查局地质矿产调查评价项目(12120114020501、1212011220649、1212011085009)和国家自然科学基金项目(40872061、41202044)联合资助。

第一作者简介: 李平, 男, 1983 年生, 助理研究员, 从事矿物学、岩石学相关工作, E-mail: gogogis@qq.com

区内同期的蛇绿岩、火山岩和碱性花岗岩的地球化学研究,我们可以进一步推断此类兼具有似 MORB 和弧火山岩地球化学特征的早泥盆世马拉苏火山岩应当是西准噶尔地块北部在早古生代受后期俯冲作用影响下经历弧后扩张形成的火山-岩浆地质记录。

关键词 马拉苏组;中基性火山岩;地球化学征;弧后盆地;西准噶尔

中图法分类号 P588.144; P588.145

中亚造山带是世界上典型的增生型造山带,是由古亚洲洋在经历了长期而复杂的俯冲消减以及不同地体拼贴、碰撞和相关火山-岩浆作用下形成的 (Feng *et al.*, 1989; Allen *et al.*, 1993; Windley *et al.*, 2007), 西准噶尔地区一系列岩浆弧和增生杂岩的生长、拼贴可能表明包括准噶尔在内的中亚地区在古生代发生有广泛的俯冲增生事件 (肖文交等, 2006)。但是,西准噶尔洋盆的闭合时限问题至今仍有多种不同的认识,主要表现为以下四种观点:(1)一部分研究者认为自早古生代至二叠纪 (肖文交等, 2006; Xiao *et al.*, 2008, 2009; Windley *et al.*, 2007), 西准噶尔大规模的构造-岩浆作用同古亚洲洋持续的俯冲消减事件密切相关。一系列沿此地区活动陆缘发育的岩浆事件表明区内可能存有向南的持续增生活动 (Xiao *et al.*, 2010), 西准晚古生代埃达克岩、高镁闪长岩和紫苏花岗岩 (Geng *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010; 刘希军等, 2009; 张继恩等, 2010) 可能于大洋板块俯冲过程中的板片窗环境下的岩浆活动密切相关 (Karsten *et al.*, 1996; Santosh and Kusky, 2010)。(2)晚泥盆世广泛出露的陆相沉积 (车自成等, 2011) 可能暗示西准噶尔地区在该阶段已经大体完成了洋-陆转换 (徐学义等, 2008)。(3)何国琦等 (1995) 认为经早、晚古生代洋盆的逐次闭合后,至泥盆纪末期整个西准噶尔全面进入汇聚阶段。西准噶尔奥陶纪首先出现大洋活动的地质记录,且唐巴勒蛇绿岩所代表的洋盆在早古生代已完成了闭合 (何国琦等, 1995); 随后晚古生代自碱滩蛇绿岩 (徐新等, 2006) 以及弧后盆地性质的达拉布特蛇绿岩 (辜平阳等, 2009) 的发现进一步暗示了西准噶尔地区晚古生代洋盆的再次活动。(4)徐学义等 (2014) 认为新疆北部古生代以多陆块、多洋盆相间格局为主,随着唐巴勒洋-北天山洋向北俯冲消减,至志留纪洋盆闭合。西准噶尔微陆块、准噶尔-吐哈微陆块与中天山微陆块、伊犁微陆块等相继拼合,形成哈萨克斯坦板块,北疆地区形成三块 (塔里木板块、哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块) 两带 (额尔齐斯洋、南天山洋) 构造格局。

通过以上比较可以看出,广泛存在的俯冲增生事件无疑对于西准古生代构造格局的建立具有重要的意义,但是此地区弧火山岩及 SSZ 型蛇绿岩等所反映的洋陆转换过程却存有较大分歧。因而西准噶尔地区志留纪至晚古生代阶段火山岩形成背景可以对该地区古生代洋盆的洋陆转换过程及古洋盆的闭合时限提供一定程度上的制约。近年来,西准噶尔地区古生代弧火山岩、俯冲及碰撞成因侵入体岩石成因研究已积累了大量的资料,这一系列进展直接影响着对古亚洲洋及西准噶尔造山带构造演化的认识。值得关注的是西准

噶尔泥盆纪熔岩仅在其北部地区少量出露,且其岩浆形成机制及所代表的地质意义尚不十分明确。本文以新疆北部西准噶尔地区早泥盆世马拉苏组中基性熔岩为研究对象,在岩石学研究基础上进行详细的地球化学特征分析,以揭示其形成构造环境和岩浆演化机制,从而为探讨准噶尔造山带古生代构造演化史提供基本依据。

1 地质背景与岩相学

西准噶尔地区广泛分布有晚古生代和中生代地层,亦有奥陶系和志留系出露。奥陶系主要出露于唐巴勒南部和东南部、塔城及禾布克赛尔地区,志留系则主体分布于沙布沙尔提山东部和玛依拉山地区,均为一套以火山岩和火山碎屑岩为主的建造组合且二者多呈不整合接触关系。泥盆系在西准噶尔地区大规模出露且多被断层分割,部分地区显示有多次沉积间断和角度不整合 (徐新等, 2010), 其中区内大部分晚泥盆世地层显示有海陆交互或陆相沉积的特征 (车自成等, 2011)。泥盆纪火山岩则主要分布在塔尔巴哈台山、萨吾阿尔山、额敏山、沙布布尔提山、巴尔雷克山、玛依勒山、玛依勒山和成吉思汗山地区,成份上以中酸性火山岩为主 (徐学义等, 2008; 肖序常等, 2010; Shen *et al.*, 2012), 本次研究所在地额敏山一带自早泥盆世先后爆发有多个火山喷发旋回 (徐新等, 2010)。石炭系总体上是一套由陆源碎屑岩和火山岩构成的建造组合。自晚泥盆世至早石炭世西准地区显示有从陆相或海陆相转变为浅海相,火山活动由微弱到强烈的特点,发育有退积型沉积序列; 而石炭纪晚期该地区则以发育有进积型沉积系列为特征。西准地区二叠纪地层则零星分布,主要由陆相的中酸性火山岩和碎屑岩构成 (新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1999)。

西准噶尔北部地区的断裂系统多分布于谢米斯台、萨吾尔山等岩浆岩带内且呈近东西向展布 (图 1); 中南部地区则以北西、北东向断裂发育为特征,且多受控于二叠纪晚期至三叠纪和新生代的地质构造 (徐芹芹等, 2009)。整个地区经历有古陆缘系统下洋-陆俯冲到陆陆碰撞过程,并叠加了后期的冲断、逆冲推覆和随后的断裂走滑、岩浆侵位等地质构造作用,为多期次破坏了的不同陆缘系统的构造混杂体 (李荣社等, 2008)。区内蛇绿岩均呈残片状分布于古生代地层之中 (董莲慧等, 2010)。其中,境外的含早寒武世至中奥陶世牙形石的巴尔别克蛇绿岩、含早寒武世至早奥陶世牙形石的扎乌尔-塔金蛇绿岩 (何国琦和李茂松, 2000), 及西准噶尔北部地区的早奥陶世库吉拜蛇绿岩 (朱永峰和徐新, 2006)、

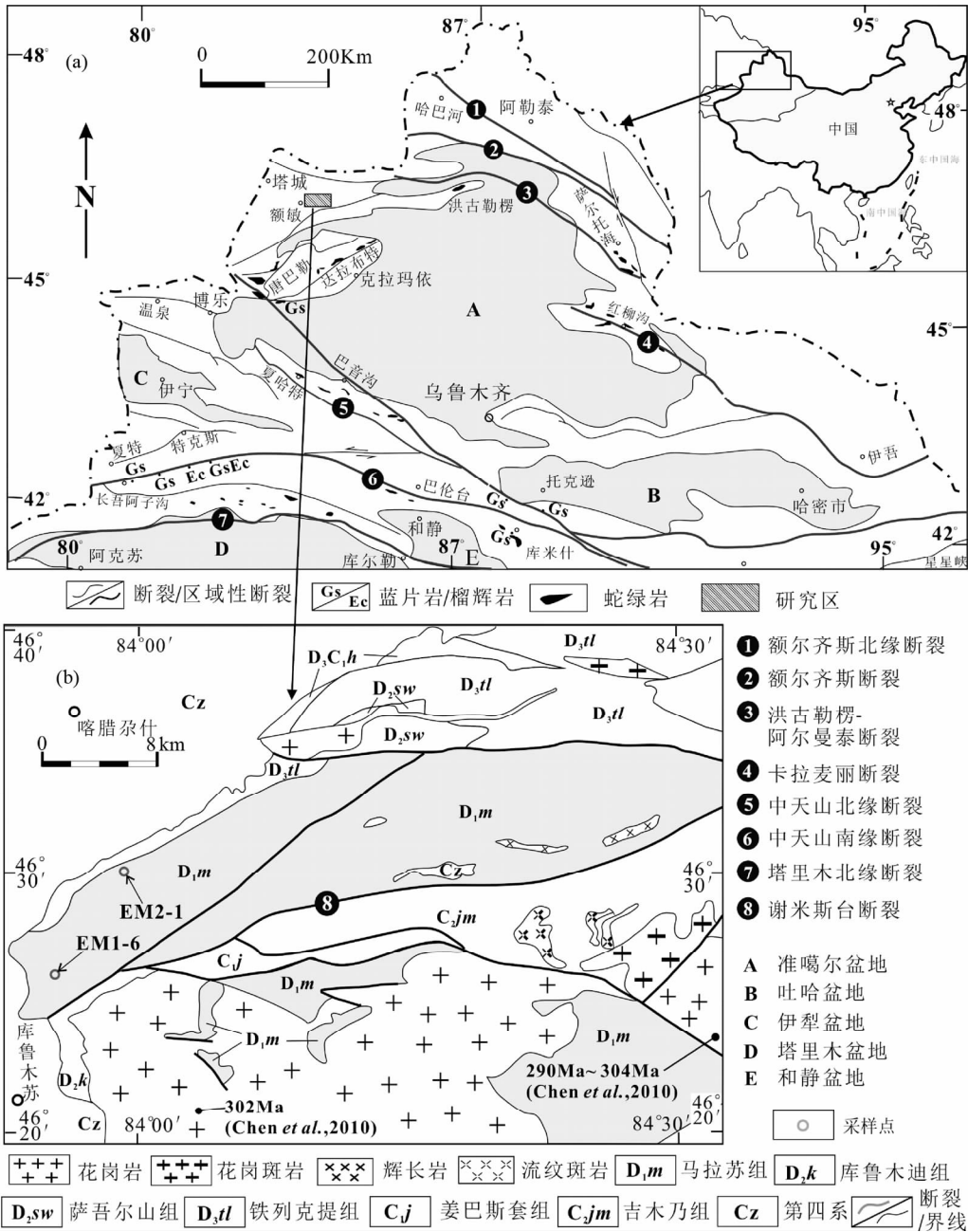


图1 新疆北部大地构造示意图(a,据西安地质矿产研究所,2008^①修改)和西准噶尔马拉苏组分布位置地质简图(b,据新疆地质局区域地质调查队,1978^②)

Fig. 1 Sketch geotectonic map of North Xinjiang (a) and simplified geological map of distribution of Marasu Formation in West Junggar (b)

早寒武世查干陶勒盖蛇绿岩(赵磊等,2013)和早奥陶世洪古勒蛇绿岩(张元元和郭召杰,2010)共同构成了一条早古生代蛇绿混杂岩带,为该地区早古生代早中期大洋活动的地质记录。西准噶尔南部的唐巴勒蛇绿岩同样也是一条早古生代蛇绿岩(张弛和黄萱,1992),此蛇绿岩套被下志留统不整

合覆盖且蓝片岩的角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年结果在 458 ~ 470Ma 之间(张立飞,1997)。值得关注的是,西准噶尔南部的达拉布特蛇绿岩为一条晚古生代蛇绿岩,其中变辉长岩形成时代为 391.9Ma(辜平阳等,2009),属中泥盆世。

整个地区古生代侵入岩岩浆活动同西天山地区花岗岩

① 西安地质矿产研究所. 2008. 1 : 200 万西北地区(北部)断裂系统图

② 新疆地质局区域地质调查队. 1978. 1 : 20 万额敏幅地质矿产图

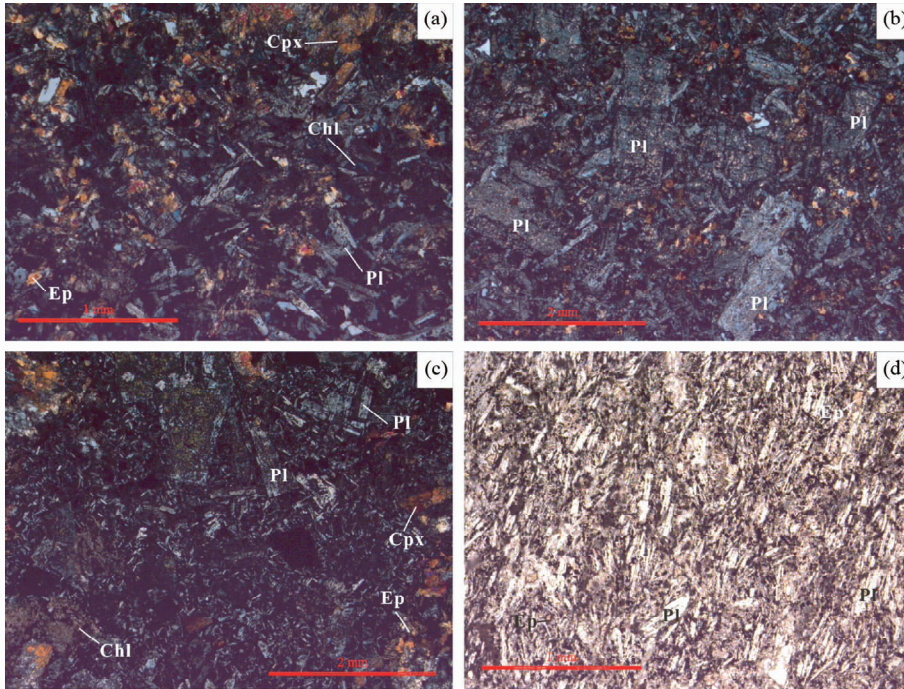


图2 马拉苏中基性火山岩显微照片

(a)-间隐-间粒结构,长石微晶间隙由若干绿帘石和不透明矿物填充;(b)-斑状结构,斑晶主体由板柱状斜长石构成;(c)-斑状结构,斑晶为斜长石和少量单斜辉石;(d)-交织结构,单偏光下基质中细小的板柱状斜长石半定向排列,部分磁铁矿颗粒填充. Pl-斜长石;Cpx-单斜辉石;Chl-绿泥石;Ep-绿帘石

Fig.2 Microphotograph of intermediate and basic volcanic rocks from Marasu Formation

(a)-intergranular- and intersertal-texture; epidotes and opaque ores occupy the spaces between plagioclase crystals; (b)-porphyritic texture, lath-shaped plagioclases is the only phenocryst; (c)-porphyritic texture, phenocrysts are mainly composed of plagioclases and a small amount of clinopyroxenes; (d)-pilotaxitic texture: lath-shaped plagioclases display a sub-parallel alignment in the groundmass, in the PPL view. Pl-plagioclase; Cpx-clinopyroxene; Chl-chlorite; Ep-epidote

年代学格架(Xu *et al.*, 2013; 李平等, 2012; Long *et al.*, 2011)较为相似,主要集中于422~405Ma、346~321Ma和315~287Ma三个阶段(Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010; 韩宝福等, 2006; 袁锋等, 2006)。其中,晚志留世-早泥盆世中酸性岩体绝大多数侵入于西准噶尔北部的谢米斯台山和塞山地区的古生代地层之中(Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010);早石炭世花岗岩类主要呈带状出露于塔尔巴哈台山和萨吾尔山地区,且多属钙碱性的I型花岗岩(陈家富等, 2010),此类侵入岩岩石组合通常形成于大洋俯冲或碰撞造山过程;晚石炭世末期至二叠纪侵入体多为呈面状分布的碱性花岗岩类(韩宝福等, 2010; Tang *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2008),特别是在达拉布特断裂以南的包古图出露有同Cu-Mo-Au矿化作用密切相关的晚石炭世斑岩体(Shen *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2010)。韩宝福等(2006)提出西准噶尔后碰撞深成岩浆活动发生在340~275Ma之间,而且晚石炭世至二叠纪中酸性侵入体(如庙尔沟、阿克巴斯陶和克拉玛依侵入体等)形态学特征同洋壳俯冲作用产生的岩浆弧时空分布特征有所差异(韩宝福等, 2010)。

西准噶尔马拉苏组(图1b)位于玛依拉山南部山前断裂

的西北侧,呈北东-南西向带状展布,受后期构造作用影响多呈断块状分布于额敏县、白杨河-玛依拉山一带(新疆地质局区域地质调查队, 1978)。该套地层的岩性组合比较稳定,主要为一套火山岩和陆相、海陆过渡相的碎屑岩沉积。岩石建造组合总体表明该地区的火山活动具有间歇式喷发的特点,且活动强度不大(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1999)。其沉积地层中古生物化石以腕足、腹足类及生物遗迹化石为主且保存完整性较好,生物化石组合和鉴定结果可以进一步断定马拉苏组应属早泥盆世(魏荣珠等, 2011)。

此次研究的早泥盆世马拉苏组(图1b)中基性火山岩主要呈夹层状断续出露于区内的晶屑凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩和凝灰质粉砂岩夹层之中,主要由玄武岩和玄武安山岩构成,多呈灰色或灰褐色,具斑状结构、块状构造;亦有部分流纹岩沿阿克加苏沟出露,但酸性火山岩并不作为讨论的重点。本工作选取的马拉苏玄武岩(EM1-6:46°26'56.6"; 83°55'20")出露于马拉苏河山坡公路北侧,据1:20万区域地质调查成果可以断定其属于马拉苏组第三亚组(新疆地质局区域地质调查队, 1978)。玄武岩内斑晶占总含量的5%~15%,主要组成矿物为板柱状斜长石(~2mm,局部发生钠黝

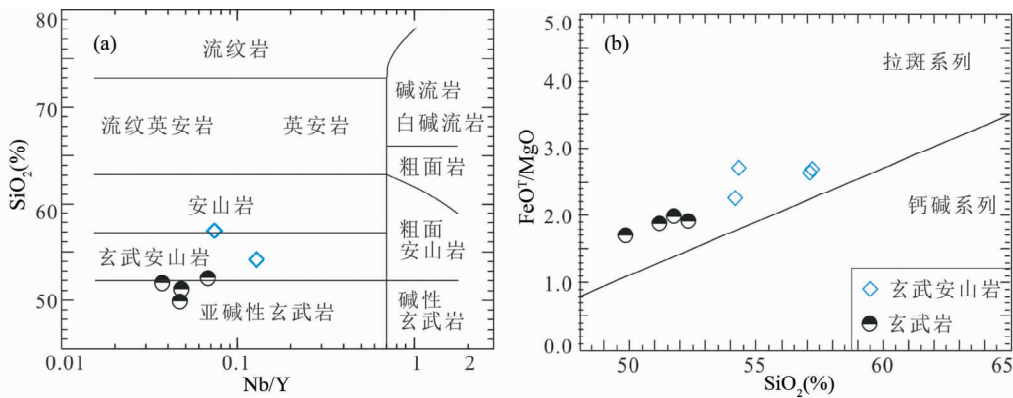


图3 SiO₂-Nb/Y 图解(a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和 SiO₂-FeO^T/MgO 图解(b, 据 Miyashiro, 1975)

图4-图9 图例同此图

Fig. 3 Classification diagrams of SiO₂ vs. Nb/Y (a, after Winchester and Floyd, 1977) and diagrams of SiO₂ vs. FeO^T/MgO (b, after Miyashiro, 1975)

The legend is same for the Fig 4-Fig 9

帘石化、绢云母化)和少量单斜辉石;基质呈间隐-间粒结构,主要由斜长石(多小于0.5mm,部分呈束状集合体)、辉石、绿帘石、绿泥石及不透明矿物组成(图2a, c)。玄武安山岩(EM2-1; 46°30'1.6"; 83°59'12.8")则在马拉苏河北侧和阿克加苏沟均有出露,主体为马拉苏组第二亚组(新疆地质局区域地质调查队, 1978)内的火山岩夹层。所采样品均发育有斑状结构,斑晶主要为自形的板柱状斜长石且含量变化较大,受后期蚀变作用影响斜长石斑晶多发生有绢云母化;基质中暗色矿物角闪石和不透明矿物填充于斜长石间隙构成了间隐-间粒结构(图2b),也可以观察到斜长石微晶半定向排列构成的交织结构(图2d)。马拉苏组玄武岩和玄武安山岩中,部分填充于斜长石微晶中的绿泥石和绿帘石仍保持有角闪石等暗色矿物晶形,但此类蚀变矿物含量较低。

2 样品采集与分析方法

由于工作地区受后期风化蚀变作用较强,本次对仅发生轻微蚀变的岩石样品进行了化学全分析,样品的主量、微量元素和稀土元素的测试工作均由中国地质调查局西安地质调查中心承担。氧化物含量用X荧光光谱仪3080E进行测试,通过插入部分样品(GBW07101-07114)反复测试进行质量监控,各项主量元素分析精度达1%,测试结果见表1。执行标准如下:Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、P₂O₅、K₂O、CaO、TiO₂、MnO、Fe₂O₃和FeO参照GB/T 14506.28—1993标准;LOI的分析则按LY/T 1253—1999标准执行。表1为原始测定结果,其余文中氧化物的含量均为扣除烧失量后重新换算成100%的结果。

稀土元素La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y和微量元素Cu、Pb、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co和Ni采用离子质谱测试,执行DZ/T 0223—2001标准;微量元素

Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、Zr、Ga采用X荧光光谱仪2100测试,执行标准为JY/T 016—1996。测试过程中使用GSR1、GSR2和GSR3为标样来进行质量监控,采用标准曲线法(外标法)来校正,以In内标校正仪器漂移,分析精度一般在5%左右,分析结果参见表1。

3 地球化学特征

3.1 主量元素地球化学特征及岩石类型划分

所有样品的SiO₂含量变化在49.86%~57.23%之间,结合图3a, b可见,马拉苏火山岩主体为拉斑系列的玄武岩和玄武安山岩。样品的K₂O含量变化范围较大但总含量较低,介于0.03%~0.98%之间;Na₂O含量变化较为有限,介于2.22%~5.38%之间。同时,所有样品的Na₂O/K₂O比值均大于1%(最小为4.12%),属于钠质中基性火山岩。所选样品的TiO₂含量在0.83%~1.34%之间,Al₂O₃含量在14.70%~20.64%(平均值为18.05%),具有典型俯冲消减带火山岩高Al、低Ti的地球化学特征(Gill, 1981; Wilson, 1989; Dobretsov, 2010)。所分析样品均具有相对较高的LOI值(LOI=2.62%~3.98%),该火山岩系的部分岩石可能在喷发后多遭受有不同程度的风化和蚀变。低级变质作用、热液活动等均会导致性质活泼的主量元素(如:K、Na和Ca等)发生明显的迁移,从而使传统的SiO₂-TAS图并不能很准确的反映受后期作用有较大影响的火山岩岩石类型(夏林圪等, 2007),故本文采用SiO₂-Nb/Y图解(Winchester and Floyd, 1977)和SiO₂-FeO^T/MgO图解(Miyashiro, 1975)对马拉苏火山岩进行岩石类型的划分。

中基性火山岩的Mg[#]可分为两类:基性火山岩具有较高的Mg[#]值(51.2~55.1),而基性程度略低的玄武安山岩则具有较低的Mg[#]值(43.8~48.2)。同时,所有样品的Mg[#]值均

表1 马拉苏组中基性火山岩主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)Table 1 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements for the intermediate- and basic-volcanic rocks from Marasu Formation

样品号	08EM1 -3	08EM1 -4	08EM2 -1	08EM2 -2	08EM1 -5	08EM1 -6	08EM2 -4	08EM2 -5	样品号	08EM1 -3	08EM1 -4	08EM2 -1	08EM2 -2	08EM1 -5	08EM1 -6	08EM2 -4	08EM2 -5
岩性	玄武安山岩				玄武岩				岩性	玄武安山岩				玄武岩			
SiO ₂	52.16	52.26	55.48	55.28	49.84	48.33	49.85	50.71	Hf	2.43	2.31	1.69	1.62	0.83	0.82	0.96	0.95
TiO ₂	1.29	1.14	1.25	1.28	0.81	0.80	0.94	0.93	Zr	84.3	80.9	55.2	54.2	25.9	25.6	32.5	32.2
Al ₂ O ₃	16.04	17.28	14.30	14.23	19.98	20.01	19.16	18.73	Sc	35.9	33.8	36.8	36.4	25.2	24.6	34.2	23.3
Fe ₂ O ₃	4.64	3.71	5.69	5.67	2.96	3.43	4.52	3.25	Cr	17.7	26.1	25.2	23.0	21.9	23.6	50.1	55.1
FeO	5.80	5.83	5.30	5.38	6.20	5.98	4.37	5.38	Co	42.9	35.6	37.8	42.8	44.3	44.9	47.5	44.9
MnO	0.17	0.16	0.19	0.20	0.15	0.16	0.16	0.14	Ni	9.6	12.4	11.9	12.2	29.4	39.8	34.7	36.3
MgO	3.70	4.07	3.89	3.98	4.73	5.30	4.22	4.34	Cu	83.2	144	181	24.2	106	98.0	128	87.2
CaO	8.44	6.47	4.93	4.77	9.34	9.43	10.51	9.55	Zn	89.7	83.1	102	100	83.9	89.9	80.0	77.9
Na ₂ O	3.54	3.92	5.15	5.21	3.17	2.83	2.14	3.08	Ga	18.8	17.6	15.7	15.6	18.5	19.1	19.9	18.9
K ₂ O	0.19	0.95	0.03	0.03	0.09	0.07	0.10	0.11	Rb	3.08	19.40	0.21	0.08	1.42	0.46	1.00	0.32
P ₂ O ₅	0.30	0.26	0.25	0.26	0.12	0.12	0.19	0.18	Nb	3.30	2.99	1.72	1.70	0.70	0.69	1.02	0.95
LOI	3.98	3.52	3.06	3.23	2.62	3.07	3.63	3.10	Cs	0.11	0.53	0.08	0.07	0.04	0.03	0.10	0.06
Total	100.25	99.57	99.52	99.52	100.01	99.53	99.79	99.50	Ta	0.22	0.19	0.12	0.12	0.07	0.07	0.14	0.11
Mg [#]	43.8	48.3	43.9	44.4	52.9	55.1	51.3	52.4	Pb	3.64	2.68	3.37	2.00	1.70	1.73	0.79	1.17
La	11.1	10.2	6.4	6.5	3.0	3.0	4.0	3.8	Th	1.64	1.56	0.59	0.47	0.06	0.06	0.11	0.06
Ce	23.5	20.9	14.6	14.7	6.6	6.8	9.5	9.1	U	0.53	0.51	0.22	0.20	0.06	0.05	0.13	0.14
Pr	3.60	3.28	2.40	2.38	1.19	1.20	1.48	1.46	Ba	250	731	58.6	55.6	71.7	66.4	43.5	104
Nd	16.5	15.0	11.7	11.7	6.22	6.07	7.83	7.71	Sr	234	474	248	243	484	454	606	600
Sm	4.21	3.88	3.35	3.40	1.83	1.86	2.14	2.25	V	317	285	335	324	234	260	265	253
Eu	1.32	1.25	1.11	1.10	0.77	0.81	0.78	0.77	Li	5.79	5.64	6.31	6.42	3.85	4.24	7.21	6.06
Gd	4.40	4.16	3.86	3.74	2.27	2.32	2.49	2.42	REE	102.7	92.7	78.0	77.7	43.2	43.5	62.0	47.9
Tb	0.74	0.62	0.61	0.64	0.36	0.36	0.40	0.39	(La/Yb) _N	3.52	3.47	2.16	2.09	1.64	1.59	2.50	2.39
Dy	4.52	3.94	3.94	4.00	2.42	2.41	2.55	2.49	(La/Sm) _N	1.70	1.70	1.25	1.24	1.06	1.06	1.21	1.11
Ho	0.96	0.87	0.85	0.89	0.54	0.55	0.53	0.51	(Gd/Yb) _N	1.61	1.63	1.49	1.38	1.42	1.40	1.79	1.73
Er	2.73	2.43	2.52	2.51	1.55	1.56	1.37	1.38	δEu	0.94	0.95	0.94	0.94	1.15	1.19	1.03	1.01
Tm	0.40	0.38	0.40	0.40	0.24	0.25	0.21	0.21	Zr/Nb	25.55	27.06	32.09	31.88	37.00	37.10	31.86	33.89
Yb	2.26	2.11	2.15	2.24	1.32	1.37	1.15	1.16	Hf/Ta	11.05	12.16	14.08	13.50	12.77	12.62	6.86	8.64
Lu	0.38	0.35	0.36	0.40	0.22	0.23	0.20	0.21	(Nb/Th) _{PM}	0.24	0.23	0.35	0.43	1.30	1.32	1.10	1.88
Y	26.1	23.4	23.7	23.1	14.6	14.7	27.3	14.0	Hf/Th	1.48	1.48	2.86	3.45	12.97	13.23	8.73	15.83

注: Mg[#] = 100 × mol MgO / (MgO + 0.8Fe₂O₃^T), 其中 MgO 和 Fe₂O₃ 含量为扣除烧失量后重新换算结果; (Nb/Th)_{PM} 为原始地幔标准化比值, 标准化值据 Sun and McDonough (1989)

低于原生岩浆的 Mg[#] 值, 表明马拉苏组中基性熔岩基本上是一种经历有演化的火山岩。在主量元素和 Mg[#] 分异指数的协变关系图中(图4), 除 Al₂O₃、TiO₂ 和 Mg[#] 分异指数呈现出略为明显的正相关趋势外, 其余主要氧化物含量同 Mg[#] 值多呈负相关或杂乱排布关系。由此可以推测, 两组稀土元素具有显著差异的中基性熔岩可能在岩浆上升过程中并未经历有显著的结晶分异作用。

3.2 微量元素特征

样品的稀土元素球粒陨石标准化图解具有两类(图5a): 玄武岩稀土元素总含量较低, ΣREE 含量在 43.2 × 10⁻⁶ ~ 62.0 × 10⁻⁶ 之间, 为球粒陨石稀土总含量的 13 ~ 19 倍。此组样品的球粒陨石标准化分配样式为微弱右倾状((La/Yb)_N = 1.59 ~ 2.50)且轻稀土呈平坦型((La/Sm)_N = 1.06 ~ 1.21), 无 Eu 负异常(δEu = 1.00 ~ 1.19)。另一组玄武安山岩稀土元素总含量介于 77.7 × 10⁻⁶ ~ 102.7 × 10⁻⁶ 之间, 为

球粒陨石稀土总含量的 23 ~ 31 倍, ΣREE 值相对前一组明显较高。此次选取的玄武安山岩的球粒陨石标准化分配样式为明显的右倾型((La/Yb)_N = 2.09 ~ 3.52)且富集轻稀土元素((La/Sm)_N = 1.24 ~ 1.70), 具有十分微弱的 Eu 负异常(δEu = 0.94 ~ 0.95)。两组样品的 Yb 含量分别为 1.15 × 10⁻⁶ ~ 1.37 × 10⁻⁶ 和 2.11 × 10⁻⁶ ~ 2.26 × 10⁻⁶, 都呈现出明显的 Yb 亏损(图5a)。

在微量元素原始地幔标准化图解中(图5b), 马拉苏组火山岩的大离子亲石元素(如 Ba, Sr 和 Pb 等)均具有不同程度的富集; 而高场强元素 Nb, Ta, Zr 和 Hf 则也表现出不同程度的亏损。所有被测样品所显示的 Nb-Ta 负异常暗示了玄武岩和玄武安山岩的物质源区中具有一定含量的 Nb-Ta 难熔矿物(钛铁矿、金红石或非闪石), 这通常存在于俯冲消减带中流体作用交代的亏损地幔中(Hawkins, 2003)。此外, 这些熔岩较低的不相容元素含量进一步反映了其形成于亏损地幔, 同时和地幔源区较高的部分熔融程度有一定的关联

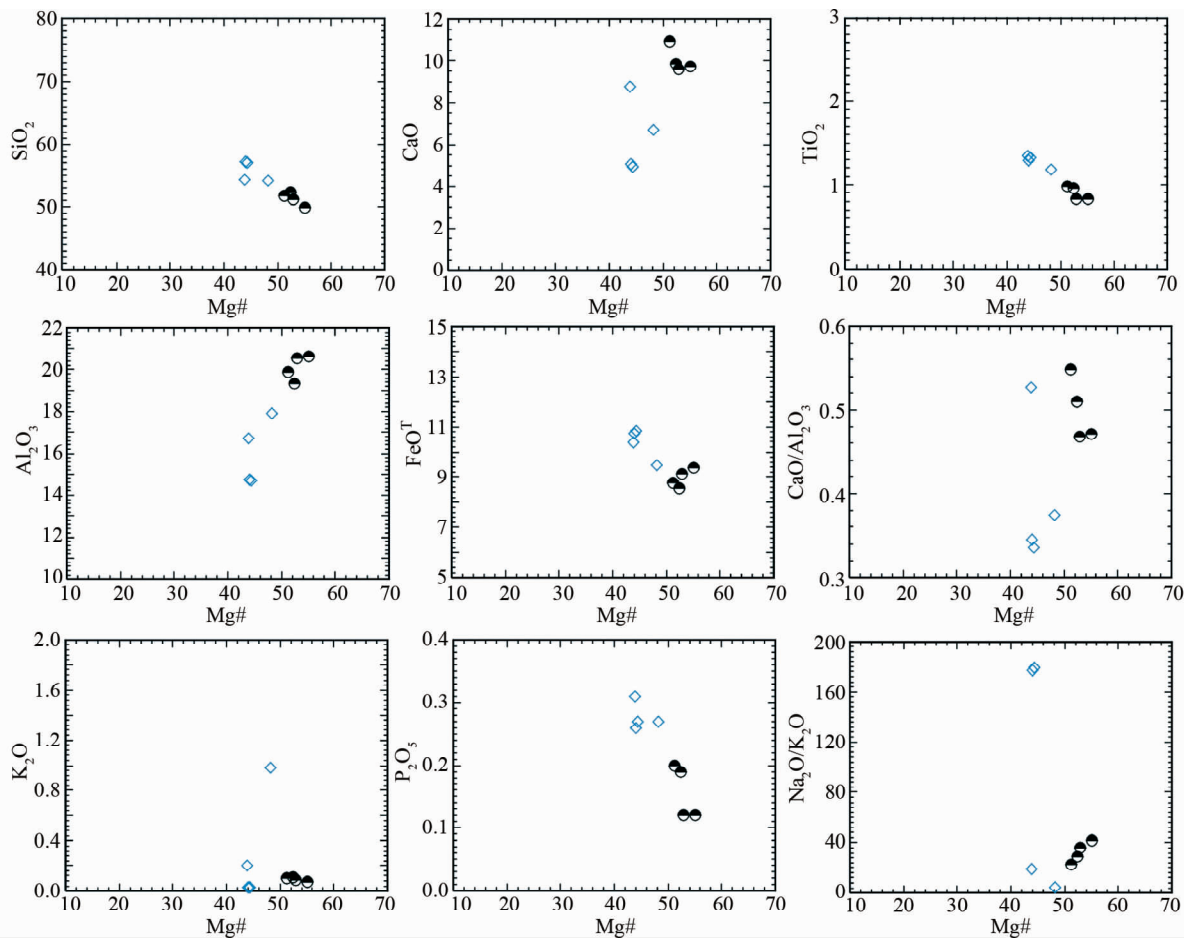


图4 马拉苏组中基性火山岩主要元素 Hark 图解

Fig.4 The Hark diagrams of major elements for the intermediate- and basic-volcanic rocks from Marasu Formation

$$Mg\# = 100 \times \text{mol MgO} / (\text{MgO} + 0.85\text{FeO}^T)$$

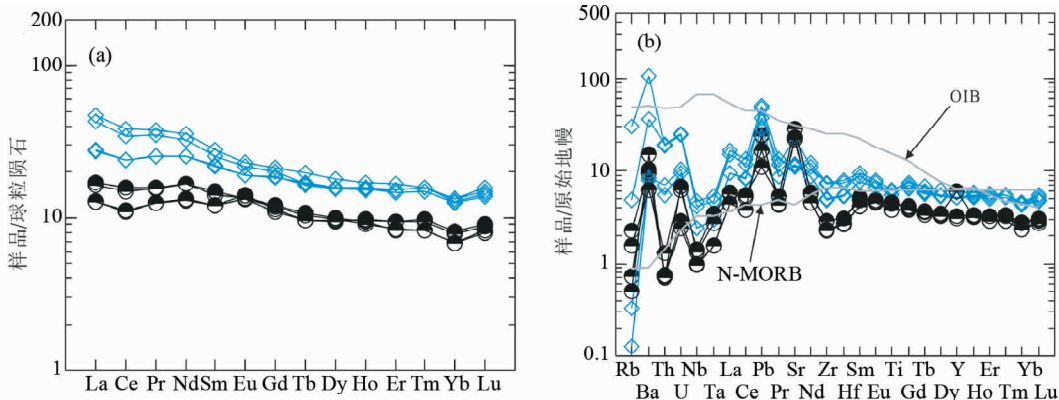


图5 稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-element variation diagram (b)

(normalization values after Sun and McDonough, 1989)

(Wilson, 1989)。

虽然在 $Mg\#$ 分异指数和微量元素含量的协变关系图中 (图6) 微量元素 Sr 同 $Mg\#$ 值具有一定的正相关性, 但 δEu 变

化范围极小且无明显负异常 (0.94 ~ 1.19), 亦暗示两类火山岩岩浆形成后可能并未显著经历有斜长石的结晶分离。通过 Th/Nd-Th 图 (图7) 我们也可以进一步断定马拉苏组中一

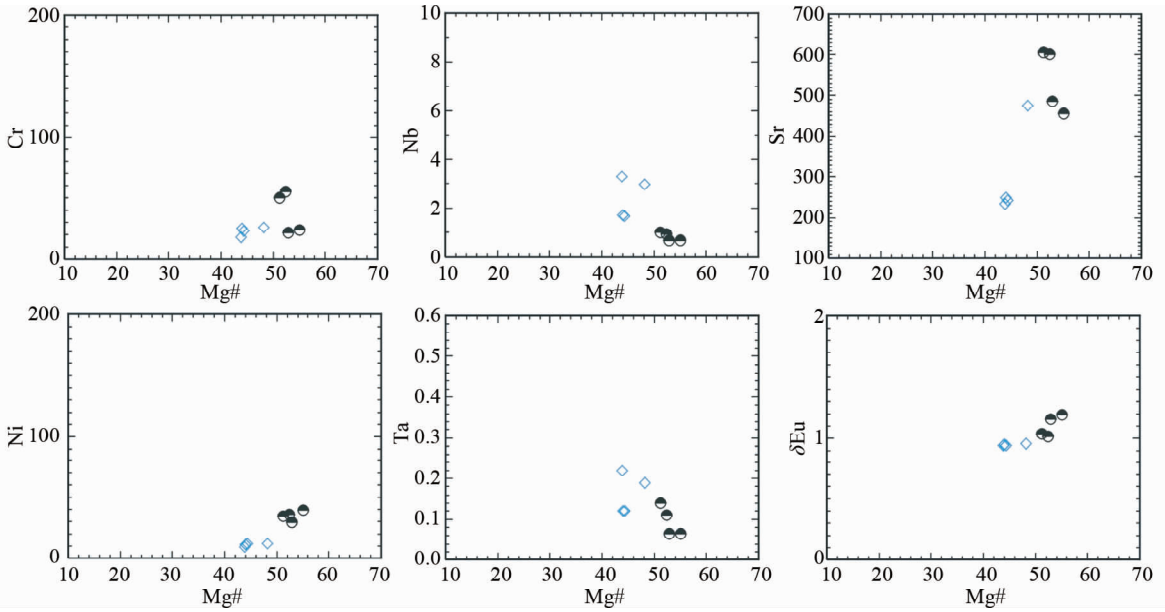


图6 马拉苏组中基性火山岩微量元素 Hark 图解

Fig. 6 The Hark diagrams of trace elements for the intermediate- and basic-volcanic rocks

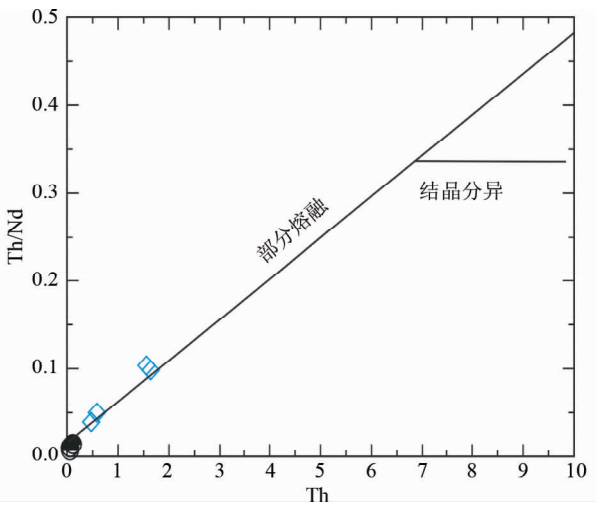


图7 马拉苏组中基性熔岩 ($\text{SiO}_2 \leq 56\%$) Th/Nd-Th 图解
(据 Schiano *et al.*, 2010)

Fig. 7 The diagram of Th/Nd vs. Th for Marasu Formation
($\text{SiO}_2 \leq 56\%$) (after Schiano *et al.*, 2010)

系列火山岩的形成并非由岩浆结晶分异作用直接控制。此外,两组火山岩之间的 $\text{Mg}^\#$ 与主量元素、微量元素 (除 Al_2O_3 和 Ni 外) 协变关系并未显示有较为明显的正相关关系,而且 ΣHREE 含量和 Gd/Yb 比值均具有一定的差异,暗示区内出露的玄武岩和玄武安山岩可能并不具有岩浆演化特征上的亲缘性。因而本文讨论的两组具有不同地球化学特征的火山岩极有可能为不同物质组分熔融的产物,且在岩浆演化过程中并未经历有显著的结晶分异作用。

4 讨论

4.1 岩石形成环境讨论

泥盆纪马拉苏组火山岩均具有较低的 K、较高的 Ti 含量及部分相同的微量元素配分样式,此似乎都与弧岩浆有所差异。但岛弧地区也会出现有低钾拉斑系列火山岩以及低钾钙碱性侵入岩组合。同时,马拉苏组弧火山岩虽具有相对较高的 TiO_2 含量,但其数值 (1.14% ~ 1.29%) 同安第斯地区中基性熔岩的 TiO_2 含量 (0.95% ~ 1.27%) 仍十分相似 (Wilson, 1989)。可见,略低的 K 和较高的 Ti 含量并不能说明马拉苏组火山岩与弧岩浆作用无关。此外,马拉苏玄武岩较为平坦的稀土元素配分样式似乎又与 N-MORB 相类似,因此马拉苏组中基性熔岩组合可能具有不同的岩石成因。马拉苏组玄武岩和玄武安山岩的 LREE 和 HREE 稀土元素分配样式及含量均显著不同,结合两类岩石 ΣHREE 含量差异所反映源区性质不同的基础上,LREE 含量的差异也验证了两类岩石具有不同的岩浆演化过程。由此可以将马拉苏组中基性熔岩明显分为两类,一类玄武安山岩的轻稀土和大离子亲石元素显著富集,且高场强元素明显亏损,具有典型俯冲消减带火山岩的岩石地球化学特征 (Gill, 1981; Wilson, 1989; Tatsumi and Suzuki, 2009; Dobretsov, 2010)。结合 Hf/3-Th-Nb/16 (图 8a) 和 Hf/3-Th-Ta (图 8b) 构造环境判别图,可以进一步推断区内此类岩石形成于弧岩浆作用中。另一类玄武岩的轻稀土呈平坦型,而且具有较低的 Th/Yb 比值 (0.05 ~ 0.10),这些同岛弧和大陆活动边缘环境下形成的火山岩具有明显差异 (图 8c)。与消减作用有关的马拉苏组玄

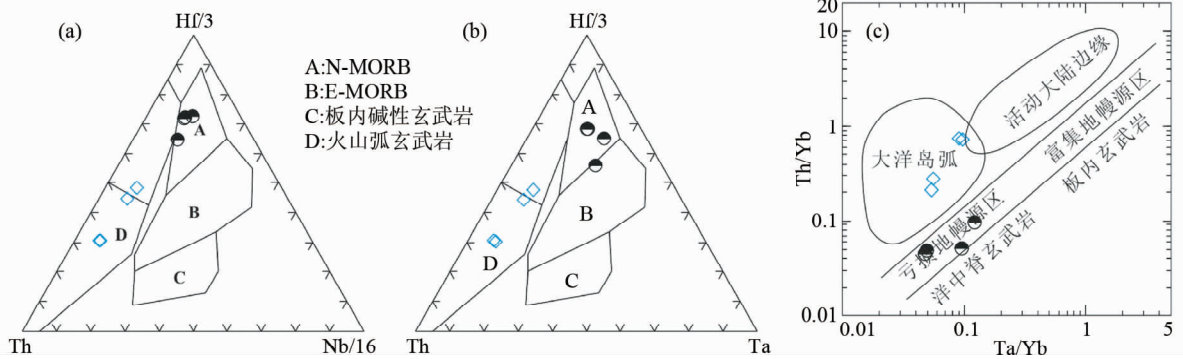


图8 马拉苏组中基性火山岩构造环境判别图解

(a) HF-Th-Nb 图 (Pearce, 1983); (b) HF/3-Th-Ta 图 (Pearce, 1983); (c) Th/Yb-Ta/Yb 图 (Wood, 1980)

Fig. 8 Geotectonic discrimination diagrams for the intermediate- and basic-volcanic rocks

(a) HF/3-Th-Nb/16 diagram (Pearce *et al.*, 1983); (b) HF/3-Th-Ta diagram (Pearce, 1983); (c) Th/Yb-Ta/Yb diagram (Wood, 1980)

武安山岩 LREE 总含量明显高于 N-MORB 玄武岩,说明岩浆形成过程中俯冲物质的加入(马中平等,2008)。与之相对的,马拉苏玄武岩的 LREE 呈平坦型分布且具较低 Σ LREE 含量,此更类似于 N-MORB 型玄武岩。

虽然所有样品在微量元素原始地幔标准化图解中仍轻微表现出大离子亲石元素的富集和高场强元素的微弱亏损,但是其 La/Nb 比值介于 2.21 ~ 3.49 之间,极有可能同岩浆形成过程中陆缘碎屑物质或俯冲沉积物的混染有关。因为相关研究表明全球俯冲沉积物平均化学组分(3.22; Plank and Langmuir, 1998)和上地壳平均组分(2.58; Rudnick and Gao, 2003)的 La/Nb 比值明显高于原始地幔(0.96; McDonough and Sun, 1995),在火山岩浆演化过程中此类物质的加入势必会引起 LILE 略微富集、HFSE 亏损以及 Rb、Ba、Cs 活性元素在不同范围的变化(Davidson, 1987)。但玄武岩样品均为拉斑系列且在一系列构造环境判别图(图8)中也都落入 MORB 区域内,因而本文认为此类基性熔岩同被富集岩石圈物质改造的 MORB 玄武岩相似。此外,马拉苏组似 MORB 玄武岩的 Ti 含量在 0.81 ~ 0.9 之间,一方面可能与略高的 LOI 值(2.62% ~ 3.63%)或与前述的地壳混染作用有关;另一方面也可能与弧后拉伸机制下, MORB 岩浆演化过程中俯冲消减带富集物质的混入有关(Godard *et al.*, 2006; Ishizuka *et al.*, 2010)。

如上所述,西准噶尔地区马拉苏组中基性熔岩从地球化学岩石类型上来看其分别由岛弧火山岩和似 MORB 型玄武岩组成,此种岩石组合通常可以产生在成熟岛弧裂谷拉伸环境、洋脊俯冲环境或弧后盆地环境之中。但是具体到西准噶尔地区早泥盆世的马拉苏组中基性火山岩本文更倾向于其形成于俯冲消减带上的弧后盆地,主要有以下几个方面的原因:(1)通常情况下,形成于成熟岛弧裂谷阶段火山岩普遍属富钾和钾玄系列岩石,如:伊豆-小笠原和马里亚纳之间成熟岛弧初始拉伸阶段形成有大量钾玄系列的碱性火山岩(Ishizuka *et al.*, 2010)。从岩石系列上看,属低钾拉斑系列

的马拉苏中基性火山岩与成熟岛弧裂谷拉伸环境下形成的高钾系列火山岩存有明显差异。(2)大洋板片俯冲过程中冷的大洋岩石圈可能会发生板片拆离,致使俯冲消减带板片窗环境下热的幔源物质大量上涌,与此同时可以形成具有亏损和富集特征的火山岩(Santosh and Kusky, 2010)。虽然已有部分岩石学研究成果(刘希军等, 2009; Geng *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010)表明西准噶尔地区在晚古生代有发生过洋脊俯冲的可能性,但仍缺乏强有力的地球物理方面的相关证据。即便是前人通过火山-侵入岩岩石地球化学和同位素年代学的研究认为西准噶尔地区可能存在的洋脊俯冲发生在石炭纪(Tang *et al.*, 2010),从时代上来看同形成于早泥盆世的马拉苏组火山岩并不具有可对比性。(3)弧后盆地扩张环境类似于洋中脊的海底扩张作用,同时其演化过程中不可避免的受到消减组分等外来物质的影响,以致弧后盆地初始裂解阶段形成的火山岩往往为兼具某些岛弧岩浆特征的 N-MORB(或似 MORB)型玄武岩。而且随着弧后盆地的进一步拉伸裂解,可以生成具有此 E-MORB 或 OIB 地球化学特征的玄武岩(Wilson, 1989; Ishizuka *et al.*, 2009; Coira *et al.*, 2009; Varekamp *et al.*, 2010)。因而,我们认为此类兼具岛弧火山岩和似 MORB 玄武岩地球化学特征的岩石组合并非成熟岛弧裂谷化或板片窗环境下岩浆活动的产物,其极有可能形成于俯冲消减带之上的弧后拉伸盆地。

4.2 地球化学特征对物质源区及的约束

在俯冲消减带中,消减板片及其所携沉积物质的加入可以改变源区中某些微量元素的绝对丰度,使得岩浆中活性元素与活性元素,活性元素与高场强元素的比值发生不同程度的改变;但由于 HFSE(Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 和 Y)的相对惰性和他们之间相近的不相容性,使得岩浆中 HFSE 之间的比值并不会因消减板片源物质的卷入以及结晶分离作用等岩浆演化过程而发生明显的变化(Condie, 2003, 2005; Marini *et al.*, 2005; Handley *et al.*, 2007; 马中平等, 2008)。

因而,高场强元素之间的比值可以作为判别火山岩主要源区的有效工具。区内岩石的 Zr/Nb (25.55 ~ 37.10, 平均为 32.05)、 Hf/Ta (6.86 ~ 14.08, 平均为 11.46) 比值与 N-MORB (Sun and McDonough, 1989) 的 Zr/Nb 、 Hf/Ta 比值 (30、15.5) 或全球平均 MORB (Arevalo and McDonough, 2010) 的相应比值 (26.18、10.71) 极为接近, 而同 OIB (Sun and McDonough, 1989) 的相应比值 (5.8、2.9) 具有明显的差别。因而, 马拉苏组中的玄武岩和玄武安山岩整体上均应有 MORB 地幔物质源区物质组分的贡献。

Th 通常被认作一种不活动性元素, 广泛的存在于俯冲沉积体系 (Sato and Amano, 1991; Plank and Langmuir, 1998; Plank, 2005; Handley *et al.*, 2007) 或流体之中 (Gertisser and Keller, 2003)。以伊豆-小笠原俯冲消减带为例, 该地区弧后岩浆相对于幔源岩浆明显的具有 Th 的富集, 并被认为和板片俯冲过程中富 Th 物质的带入有关 (Ishizuka *et al.*, 2009)。本文两组不同类型火山岩的 Th 含量具有明显差异, 岛弧型玄武安山岩具有明显较高的 Th 含量 (0.47 ~ 1.64); 而似 MORB 型玄武岩的 Th 含量则十分有限 (0.06 ~ 0.11), 亦暗示了两者物质源区的差异可能源自俯冲沉积体系或流体物质的参与。而且, 亦有研究表明 N-MORB 的 Hf/Th 比值一般不小于 8, 岛弧玄武岩的 Hf/Th 比值则多小于 8 (Condie, 1989)。文中两类基性程度不同的火山岩的 Th/Hf 比值也体现了类似的特征: 似 MORB 玄武岩具有较高的 Hf/Th 比值 (8.73 ~ 15.83), 而岛弧型玄武安山岩的 Hf/Th 比值则显著较低 (1.48 ~ 3.45)。此外, Niu and O' Hara (2009) 认为由地幔熔融而来的洋中脊玄武岩 (MORB) 以 $(Nb/Th)_{PM} > 1$ 为显著特征, 本文所选取的似 MORB 玄武岩的 $(Nb/Th)_{PM}$ 值介于 1.11 ~ 1.89 之间, 而岛弧火山岩的 $(Nb/Th)_{PM}$ 标准化比值则明显小于 1, 介于 0.23 ~ 0.43 之间, 这也可以说明研究区内两种不同类型的火山岩可能形成于不同的岩浆过程或物质源区之中。因此, 马拉苏组中两类熔岩的源区主体同 MORB 较为相似, 应当为地幔橄榄岩部分熔融的产物; 而俯冲沉积物等物质组分的参与可以对马拉苏火山岩物质源区进行改造或交代, 从而使部分玄武安山岩显示出弧岩浆作用的地球化学特征。

4.3 地球化学特征对岩浆演化机制的制约

研究对象所处的西准噶尔地区在古生代曾遭受过多次的构造事件的影响, 此会致使那些性质活泼的主量元素和大离子亲石元素极容易在后期的地质运动中发生活化而不利于岩石模拟反演。为了能够更近似的反映出马拉苏火山岩源区物质特征和地幔熔融条件, 笔者拟采用批式熔融的方法 (Shaw, 1970), 通过 La/Yb - Gd/Yb 不相容元素比值的计算来对马拉苏火山岩的岩石学成因进行论证。如前文所述高场强元素之间的比值可以作为判别火山岩主要源区的有效工具, La/Yb 比值则通常受岩浆演化过程中物质源区熔融程度 (Reichow *et al.*, 2005; 李平等, 2011) 和富集组分加入的

影响; 而 Gd/Yb 所代表的重稀土分异程度通常受物质源区中富含 HREE 元素的石榴子石等残余矿物的影响 (Watkins *et al.*, 2007; Perez *et al.*, 2009), 进而可以从一定程度上去反映岩石形成过程的物质源区 (李平等, 2011)。

本文共选择三种幔源类型进行熔融计算和作图, 从而在一定程度上更好的去揭示马拉苏火山岩的物质源区和岩浆过程: ①具有原始地幔成分 (BSE, McDonough and Sun, 1995) 的尖晶石地幔橄榄岩; ②具有亏损地幔成分 (DMM, Workman and Hart, 2005) 的尖晶石地幔橄榄岩; ③有富集成分卷入 (少量地壳或俯冲沉积物卷入) 的石榴子石、尖晶石或尖晶石-石榴子石橄榄岩。

由图 9 可以看出, 前述的两类火山岩在 $(La/Yb)_{PM}$ - $(Gd/Yb)_{PM}$ 图解中呈明显的两组。第一组似 MORB 火山岩主要分布在 DMM 部分熔融的演化曲线之上, 且地幔源区属尖晶石地幔橄榄岩。但在图 5a 中我们可以看出这类玄武岩与典型的 MORB 相比, 其轻稀土呈平坦或略微富集型, 可能同典型 MORB 相对略低的部分熔融程度有关。第二组岛弧玄武安山岩则具有部分富集组分 (3% 的全球俯冲沉积物组分加入到 BSE 或上地壳物质成分加入到 DMM 中) 的加入, 且与石榴子石或尖晶石-石榴子石地幔橄榄岩的物质源区发生较大程度的部分熔融作用有关。因而此类富集大离子亲石元素富集、亏损高场强元素的火山岩, 可能与俯冲板片释放的流体或部分富集物质的卷入所诱发的亏损地幔物质的部分熔融作用有关。此外 Robinson and Wood (1998) 的研究表明石榴子石-尖晶石过渡带通常存在于 2.8 ~ 3.1 GPa 的压力条件下, 可能表明此组火山岩至少源于 100km 的深度范围。如前所述两组火山岩中 Th 与部分不相容元素比值具有明显差异, 而且结合图 9 我们可以进一步推断马拉苏组火山岩所含的玄武岩和玄武安山岩分别源自 MORB 物质源区, 且俯冲成份的加入和熔融程度的差异 (图 9) 也进一步造成了其地球化学特征的差异性。

4.4 大地构造意义

西准噶尔北部的奥陶系、志留系主要出露在沙尔布尔提山一带, 并与塔城、吉尔吉斯-塔尔巴哈台共同构成了一条早古生带岩浆弧 (何国琦和李茂松, 2001), 且塔尔巴哈台的早古生代火山沉积岩系为区内的早泥盆世地层提供了物质来源 (卫巍等, 2009)。西准噶尔南部地区虽然普遍缺失早泥盆统, 但在唐巴勒-玛依拉山一带的奥陶-志留纪地层中也出露有弧性质的火山岩 (何国琦和李茂松, 2001)。此外, 另有一种观点认为在此阶段西准噶尔北部地区可能已经进入了后碰撞伸展或者板内拉伸阶段, 自志留纪至早泥盆世谢米斯台断裂以北大范围出露的碱性花岗岩、具有典型碱性暗色矿物的 A 型花岗岩 (Chen *et al.*, 2010) 为此提供了依据。但是在综合部分地质研究资料的基础上, 笔者认为志留纪末期至早泥盆世该地区可能仍处于古生代洋盆俯冲消减环境之下, 而且研究区内的马拉苏组火山岩及同期形成的碱性花岗岩与

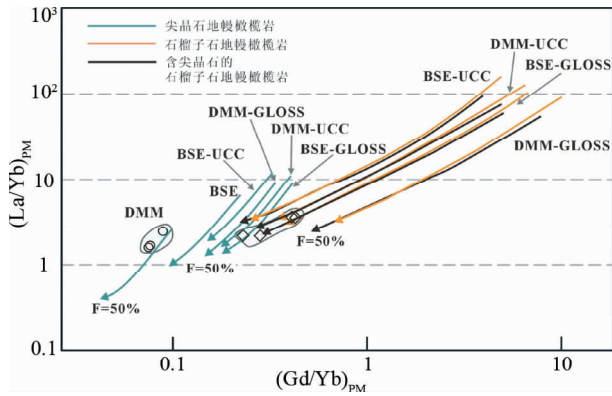


图9 $(La/Yb)_{PM}-(Gd/Yb)_{PM}$ 图解

原始地幔标准化值据 Sun and McDonough (1989); 地幔橄辉岩中橄榄石、尖晶石、单斜辉石、斜方辉石、石榴子石的百分含量参见 McKenzie and O'Nions (1991) 和 Walter (1998); 玄武岩岩浆演化过程中 La、Yb、Gd 在石榴子石、尖晶石、单斜辉石、斜方辉石和石榴子石的分配系数 Kd 均引自 McKenzie and O'Nions (1991) 和 Green *et al.* (2000), 亦参见 <http://earthref.org/GERM/>. 模拟计算过程参见 Shaw (1970), 曲线箭头处标注为不同物质源区在 50% 熔融条件下形成的熔体组分. BSE: 原始地幔 (McDonough and Sun, 1995); DMM: 亏损地幔 (Workman and Hart, 2005); GLOSS: 全球俯冲沉积物组分 (Plank and Langmuir, 1998); UCC: 上地壳 (Rudnick and Gao, 2003); BSE-UCC/GLOSS: 原始地幔添加 3% 的上地壳或全球俯冲沉积物平均组分; DMM-UCC/GLOSS: 亏损地幔添加 3% 的上地壳或全球俯冲沉积物平均组分

Fig. 9 Diagram of $(La/Yb)_{PM}$ vs. $(Gd/Yb)_{PM}$

Normalization values after Sun and McDonough (1989); the compositions of olivine, spinel, clinopyroxene, orthopyroxene and garnet in mantle peridotites after McKenzie and Onions (1991) and Walter (1998); Kds of olivine, spinel, clinopyroxene, orthopyroxene and garnet in the evolution process of basaltic magma after McKenzie and O'Nions (1991), Green *et al.* (2000), and <http://earthref.org/GERM/>. The calculation methods of melting processes are from Shaw (1970), and the marked arrows of curves mean the compositions of basaltic melts formed in different sources at $F=50\%$. BSE: Bulk Silicate Earth (McDonough and Sun, 1995); DMM: Depleted MORB Mantle (Rhea and Stanley, 2005); GLOSS: Global Subducting Sediments (Plank and Langmuir, 1998); UCC: Upper Continental Crust (Rudnick and Gao, 2003); BSE-UCC/GLOSS: BSE with an addition of 3% UCC or GLOSS; DMM-UCC/GLOSS: DMM with an addition of 3% UCC or GLOSS

后碰撞或板内拉伸环境无关, 应当是陆缘裂解或弧后拉伸岩浆事件的结果, 主要证据如下:

(1) 位于中国西北部的准噶尔地区是中亚复合造山系的重要组成部分, 自早古生代至晚古生代中期新疆北部发育有多条蛇绿岩带, 这些呈带状断续出露的蛇绿岩残片大多是古生代次级洋盆扩张或板块陆缘增生造山过程中形成的(肖文

交等, 2006; 徐学义等, 2008; 肖序常等, 1992)。西准噶尔南部达拉布特蛇绿中辉长岩的锆石 U-Pb 同位素测年结果为 $391 \pm 6\text{Ma}$ (辜平等, 2009), 相关证据显示这套蛇绿岩应属板块俯冲消减过程中弧后盆地拉伸机制下的产物(夏林圻等, 2007; 辜平等, 2011)。区内晚泥盆-早石炭世磨拉石序列不整合覆盖在库吉拜和禾布可塞尔蛇绿岩套之上(Chen *et al.*, 2010), 表明西准噶尔北部地区古生代洋盆可能于晚泥盆世早期已经闭合($\sim 380\text{Ma}$, Philippova *et al.*, 2001)。因此, 研究区内达拉布特蛇绿岩所反映的弧后拉伸活动可以持续至中泥盆世, 而且西准噶尔北部地区的古生代洋盆活动至晚泥盆世初期结束。

(2) 西准噶尔北部谢米斯台地区的火山岩锆石 SIMS U-Pb 高精度测年结果集中在 $422 \sim 411\text{Ma}$ 之间, Pb-Sr-Nd 同位素表明此套火山岩源自成熟岛弧且经历有地壳混染作用, 其富集大离子亲石元素、亏损高场强元素的特征及较高的 Ba/La 、 Ba/Na 和 Ba/Zr 比值均暗示了该阶段准噶尔古洋盆存有俯冲消减事件(孟磊等, 2010; Shen *et al.*, 2012); 至早泥盆世, 谢米斯台断裂北侧的中基性熔岩同样也显示出明显的弧地球化学特征(翁凯等, 2013)。此外, 晚志留世玛依拉山群的中基性火山岩在形成过程中同时具有亏损地幔和富集成份的加入, 其应当形成于俯冲带上的弧后扩张环境(杨高等, 2012)。尤其是本文选取的早泥盆世中基性火山岩, 其兼具 MROB 和 IAB 火山岩的地球化学特征极有可能源自于弧后或陆缘拉伸环境下不同物质源区的部分熔融作用。可见, 志留纪末期-早泥盆世谢米斯台和萨乌尔地区的火山岩浆作用应当形成于俯冲消减带上, 而且该阶段部分地区的火山岩为陆缘裂解或弧后拉伸过程的岩石学记录。

(3) 西准噶尔北部地区在志留纪至早泥盆世存有十分明显的花岗岩岩浆活动(Chen *et al.*, 2010; 陈家富等, 2010; 袁锋等, 2006; Zhou *et al.*, 2008), 暗示该阶段存有一期较为强烈的碱性花岗岩岩浆事件。虽然碱性花岗岩的集中出露可能与后碰撞伸展或者板内拉伸阶段岩浆作用活动有关, 但是前人研究也表明陆缘裂解或弧后拉伸条件下均可以形成 A 型花岗岩以及碱性花岗岩系列(Smith *et al.*, 1977; Bonin, 2007)。因而, 俯冲消减环境下的陆缘裂解或弧后盆地环境也可以很好的解释准噶尔北部地区碱性花岗岩的出露。

(4) 早泥盆世花岗岩在宏观形态上多呈条带状及不规则状产出, 同阿尔泰及西天山地区二叠纪伸展环境下花岗岩多呈现的圆形或椭圆状有明显差别(王涛等, 2010); 而且, 志留纪-泥盆纪之间早古生代地层发生有强烈的褶皱变形、变质作用(孟磊等, 2010; 何国琦和李茂松, 2001)。因此从区域地层及花岗岩形态特征上来看, 该期花岗岩的形态特征可能并非后碰撞或板内条件下岩浆相对自由侵位的结果。

西准噶尔地区所在的哈萨克斯坦板块并不存在一个统一的前寒武纪的古陆核, 其由漂移于古亚洲洋的多个前寒武纪陆块及早古生代增生体拼贴而成(李春昱等, 1982), 是一

个早古生代增生板块;在晚古生代时期它是由陆壳、过渡壳与部分残余洋壳构成的联合板块(徐新等,2010)。西准噶尔谢米斯台以北的和布克赛尔、萨吾尔山一带大量发育的弧岩浆岩证明该地区在早古生代末期至泥盆纪俯冲消减事件的存在,结合同时期蛇绿岩及花岗岩成因学研究:笔者认为在早古生代,西准噶尔地块北部形成有一期陆缘伸展事件。马拉苏组火山岩可能是哈萨克斯坦陆缘体系下多岛弧盆系演化的地质记录,其兼具似 MORB 和弧火山岩地球化学特征印证了马拉苏中基性火山岩应当为西准噶尔地块北部在早古生代后期强烈伸展作用下岩浆活动的地质记录。

5 结论

(1) 马拉苏组火山岩均为亚碱性拉斑系列岩石,结合微量元素特征判别图可以认为其中一类属于具有典型俯冲消减带地球化学特征的玄武安山岩,另一类玄武岩具有与 MORB 相似的地球化学特征。这套兼具似 MORB 和弧火山岩地球化学特征的岩石组合应当形成于俯冲消减带上的弧后盆地。

(2) 高场强元素 Hf/Ta、Zr/Nb 比值反映了马拉苏组内两类中基性火山岩均主体源自 MORB 物质源区。但 $Mg^{\#}$ 与主、微量元素协变图反映了马拉苏中基性火山岩非同源演化成因的;而轻稀土元素、Th 元素的含量差异,及 Th 与部分不相容元素比值(Hf、Nb)比值的差异进一步反映了两类火山岩分别源于亏损地幔的部分熔融,及受改造的亏损地幔(交代地幔)的部分熔融。

(3) La/Yb-Gd/Yb 微量元素地球化学模拟计算表明:似 MORB 火山岩源自尖晶石地幔橄榄岩源区的部分熔融;弧火山岩则与石榴子石或尖晶石-石榴子石地幔橄榄岩物质源区较高级度的部分熔融作用有关,而且物质源区明显经历有俯冲沉积物或地壳物质的卷入。

(4) 结合西准噶尔地区蛇绿岩、晚志留-早泥盆世火山岩和碱性花岗岩的同位素年代学和地球化学研究可以进一步推断西准噶尔北部地区的马拉苏组中基性火山岩为区内早古生代强烈伸展作用下岩浆活动的产物。

致谢 感谢西安地质矿产研究所马中平研究员、何世平研究员以及西北大学张成立教授在成文过程中给予的宝贵意见。

References

Allen MB, Windley BF and Zhang C. 1993. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, central Asia. *Tectonophysics*, 220(1-4): 89-115
 Arevalo JR and McDonough WF. 2010. Chemical variations and regional diversity observed in MORB. *Chemical Geology*, 271(1): 70-85
 Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a

concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1-2): 1-29
 Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1999. *Stratigraphy (Lithostratic) of Xinjiang Uygur Autonomous Region*. Wuhan: China University of Geosciences, 12-23 (in Chinese)
 Che ZC, Luo JH and Liu L. 2001. *The Regional Tectonic of China and Its Neighbors*. Beijing: Science Press, 193-206 (in Chinese)
 Chen JF, Han BF, Ji JQ, Zheng L, Xu Z, He GQ and Wang T. 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China. *Lithos*, 115(1-4): 137-152
 Chen JF, Han BF and Zhang L. 2010. Geochemistry, Sr-Nd isotopes and tectonic implications of two generations of Late Paleozoic plutons in northern West Junggar, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2317-2335 (in Chinese with English abstract)
 Coira B, Kirschbaumb A, Hongn F, Pérez B and Menegatti N. 2009. Basic magmatism in northeastern Puna, Argentina: Chemical composition and tectonic setting in the Ordovician back-arc. *Journal of South American Earth Sciences*, 28(4): 374-382
 Condie KC. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, 23(1-2): 1-18
 Condie KC. 2003. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(1): 1-28
 Condie KC. 2005. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes? *Lithos*, 79(3-4): 491-504
 Davidson JP. 1987. Crustal contamination versus subduction zone enrichment: Examples from the Lesser Antilles and implications for mantle source compositions of island arc volcanic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(8): 2185-2198
 Dobretsov NL. 2010. Distinctive petrological, geochemical, and geodynamic features of subduction related magmatism. *Petrology*, 18(1): 84-106
 Dong LH, Zhu ZX, Qu X, Wang KZ and Zhao TY. 2010. Spatial distribution, geological features and latest research progress of the main ophiolite zones in Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2894-2904 (in Chinese with English abstract)
 Feng YM, Coleman RG, Tilton G and Xiao X. 1989. Tectonic evolution of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 729-752
 Filipova IB, Bush VA and Didenko AN. 2001. Middle Paleozoic subduction belts: The leading factor in the formation of the Central Asian fold-and-thrust belt. *Russian Journal of Earth Sciences*, 3: 405-426
 Geng HY, Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Xian WS, Zhao GC, Zhang LF, Wong K and Wu FY. 2009. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? *Chemical Geology*, 266(3-4): 364-389
 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
 Gill JB. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin: Springer
 Godard M, Bosh D and Einaudi F. 2006. A MORB source for low-Ti magmatism in the Semail ophiolite. *Chemical Geology*, 234(1-2): 58-78
 Green TH, Blundy JD, Adam J and Yaxley GM. 2000. SIMS determination of trace element partition coefficients between garnet, clinopyroxene and hydrous basaltic liquids at 2-7.5 GPa and 1080-1200°C. *Lithos*, 53(3-4): 165-187
 Gu PY, Li YJ, Zhang B, Tong LL and Wang JN. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1364-1372 (in

- Chinese with English abstract)
- Gu PY, Li YJ, Wang XG, Zhang HW and Wang JN. 2011. Geochemical evidences and tectonic significances of Dalabute SSZ-type ophiolitic mélange, western Junggar Basin. *Geological Review*, 57(1): 36 – 44 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077 – 1086 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Guo ZJ and He GQ. 2010. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2233 – 2246 (in Chinese with English abstract)
- Handley HK, Macpherson CG, Davidson JP, Berlo K and Lowry D. 2007. Constraining fluid and sediment contributions to subduction-related magmatism in Indonesia: Ijen volcanic complex. *Journal of Petrology*, 48(6): 1155 – 1183
- 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*. Geological Society of America Special Paper, 373: 227 – 268
- He GQ, Liu DQ, Li MS, Tang YL and Zhou RH. 1995. The five-stage model of crust evolution and metallogenic series of chief orogenic belts in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 13(2): 99 – 194 (in Chinese with English abstract)
- He GQ and Li MS. 2000. New achievement in researching ophiolitic belts in Central Asia and its significance in the links of tectonic belts between northern Xinjiang and adjacent area. *Xinjiang Geology*, 18(3): 193 – 202 (in Chinese with English abstract)
- He GQ and Li MS. 2001. Significance of paleostructure and paleogeography of Ordovician-Silurian rock associations in northern Xinjiang, China. *Acta Scientiarum Naturalium University Pekinensis*, 37(1): 99 – 110 (in Chinese with English abstract)
- Ishizuka O, Yuasa M, Taylor RN and Sakamoto I. 2009. Two contrasting magmatic types coexist after the cessation of back-arc spreading. *Chemical Geology*, 266(3 – 4): 274 – 296
- Ishizuka O, Yuasa M, Tamura Y, Shukuno H, Stern RJ, Naka J, Joshima M and Taylor RN. 2010. Migrating shoshonitic magmatism tracks Izu-Bonin-Mariana intra-oceanic arc rift propagation. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(1 – 2): 111 – 122
- Karsten JL, Klein EM and Sherman SB. 1996. Subduction zone geochemical characteristics in ocean ridge basalts from the southern Chile ridge: Implications of modern ridge subduction systems for the Archean. *Lithos*, 37(2 – 3): 143 – 161
- Li CY, Wang Q, Liu XY and Tang YQ. 1982. 1: 8000000 Tectonic Map of Asia. Beijing: Cartographic Publisher House (in Chinese)
- Li P, Chen JL, Xu XY, Wang HL, Li T and Gao T. 2011. Petrogenesis and LA-ICPMS zircon U-Pb dating of the Wuguan intrusive body in North Qinling. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 610 – 624 (in Chinese with English abstract)
- Li P, Xu XY, Wang HL, Zhu T and Wan XM. 2012. Petrogenesis of Nalati alkali granites in South Central Tianshan Mountains: Evidence from zircon trace elements and Hf isotope. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 1949 – 1964 (in Chinese with English abstract)
- Li RS, Xu XY and Ji WH. 2008. Some problems of geological study in the western China orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2020 – 2025 (in Chinese with English abstract)
- Liu XJ, Xu JF, Wang SQ, Hou QY, Bai ZH and Lei M. 2009. Geochemistry and dating of E-MORB type mafic rocks from Dalabute ophiolite in West Junggar, Xinjiang and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1373 – 1389 (in Chinese with English abstract)
- Long LL, Gao J, Klemd R, Beier C, Qian Q, Zhang X, Wang JB and Jiang T. 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 126(3 – 4): 321 – 340
- 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 (in Chinese with English abstract)
- Marini JC, Chauvel C and Maury RC. 2005. Hf isotope compositions of northern Luzon arc lavas suggest involvement of pelagic sediments in their source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(2): 216 – 232
- McDonough DF and Sun SS. 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120(3 – 4): 223 – 253
- McKenzie D and O'Nions RK. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32(5): 1021 – 1091
- Meng L, Shen P, Shen YC, Liu TB, Song GX, Dai WH, Li CK and Lang ZS. 2010. Igneous rocks geochemistry, zircon U-Pb age and its geological significance in the central section of Xiemisitai area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3047 – 3056 (in Chinese with English abstract)
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics, and origin of ophiolites. *The Journal of Geology*, 83(2): 249 – 281
- Niu YL and O'Hara MJ. 2009. MORB mantle hosts the missing Eu (Sr, Nb, Ta and Ti) in the continental crust: New perspectives on crustal growth, crust-mantle differentiation and chemical structure of oceanic upper mantle. *Lithos*, 112(1 – 2): 1 – 17
- Pearce JA. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Cambridge, MA: Shiva Publishing Ltd., 272
- Perez RA, Müntener O and Ulmer P. 2009. Igneous garnet and amphibole fractionation in the roots of island arcs: Experimental constraints on andesitic liquids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(4): 541 – 558
- Plank T and Langmuir CH. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145(3 – 4): 325 – 394
- Plank T. 2005. Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents. *Journal of Petrology*, 46(5): 921 – 944
- Reichow MK, Saunders AD, White RV, Al' Mukhamedov AI and Medvedev AI. 2005. Geochemistry and petrogenesis of basalts from the West Siberian Basin: An extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia. *Lithos*, 79(3 – 4): 425 – 452
- Robinson JA and Wood BJ. 1998. The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(1 – 2): 277 – 284
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, Vol. 3. Amsterdam: Elsevier, 1 – 64
- Santosh M and Kusky K. 2010. Origin of paired high pressure-ultrahigh-temperature orogens: A ridge subduction and slab window mode. *Terra Nova*, 22(1): 35 – 42
- Sato H and Amano K. 1991. Relationship between tectonics, volcanism, sedimentation and basin development, Late Cenozoic, central part of Northern Honshu, Japan. *Sedimentary Geology*, 74(1 – 4): 323 – 343
- Schiano P, Monzier M, Eissen JP, Martin H and Koga KT. 2010. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(2): 297 – 312
- Shaw DM. 1970. Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(2): 237 – 24
- Shen P, Shen YC, Wang JB, Zhu HP, Wang LJ and Meng L. 2010. Methane-rich fluid evolution of the Baogutu porphyry Cu-Mo-Au deposit, Xinjiang, NW China. *Chemical Geology*, 275(1 – 2): 78 – 98
- Shen P, Shen YC, Li XH, Pan HD, Zhu HP, Meng L and Dai HW. 2012. Northwestern Junggar Basin, Xiemisitai Mountains, China: A geochemical and geochronological approach. *Lithos*, 140 – 141: 103

- Smith IEM, Chappell BW, Ward GK and Freeman RS. 1977. Peralkaline rhyolites associated with andesitic arcs of the Southwest Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 37(2): 230–236
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Li ZX, Zhao ZH, Jia XH and Jiang ZQ. 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (West China). *Chemical Geology*, 277(3–4): 281–300
- Tatsumi Y and Suzuki T. 2009. Tholeiitic vs. Calc-alkalic differentiation and evolution of arc crust: Constraints from melting experiments on a basalt from the Izu-Bonin-Mariana arc. *Journal of Petrology*, 50(8): 1575–1603
- Varekamp JC, Hesse A and Mandeville CW. 2010. Back-arc basalts from the Loncopue graben (Province of Neuquen, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197(1–4): 313–328
- Walter MJ. 1998. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere. *Journal of Petrology*, 39(1): 29–60
- Wang T, Tong Y, Li S, Zhang JJ, Shi XJ, Li JY, Han BF and Hong DW. 2010. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: Perspectives from Chinese Altay. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 595–618 (in Chinese with English abstract)
- Watkins JM, Clemens JD and Treloar PJ. 2007. Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: Melting of sodic metatonalites at 0.6–1.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(1): 91–110
- Wei RZ, Dong AG, Li S, Wang RJ and Chai JZ. 2011. Discovery and significance of Early Devonian fossils in the Mayileshan area, western Junggar, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 30(1): 101–105 (in Chinese with English abstract)
- Wei W, Pang XY, Wang Y and Xu B. 2009. Sediment facies, provenance evolution and their implications of the Lower Devonian to Lower Carboniferous in Shaerbuerti Mountain in North Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 689–698 (in Chinese with English abstract)
- Weng K, Xu XY, Ma ZP, Sun JM and Zhang T. 2013. U-Pb Zircon dating and geochemical research of Devonian volcanic rocks in Ur kashgar of western Junggar. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 515–524 (in Chinese with English abstract)
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenensis*. London: Unwin Hyman
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ, Kroner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31–47
- 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 and Planetary Science Letters*, 50(1): 11–30
- Workman RK and Hart SR. 2005. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1–2): 53–72
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2007. *Magmatism in the Tianshan*. Beijing: Chinese Earth Publishing House, 1–350 (in Chinese)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Lin SF, Li ZL, Mao QG, Zhang JE, Sun S and Li JL. 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1062–1076 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen HL, Li ZL, Li JL and Sun M. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 102–117
- Xiao WJ, Windley BF, Yuan C, Sun M, Han CM, Lin SF, Chen HL, Yan QR, Liu DY, Qin KZ, Li JL and Sun S. 2009. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altai. *American Journal of Science*, 309(3): 221–270
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Zhao GC and Shan YH. 2010. Transitions among Mariana-, Japan-, Cordillera-, and Alaska-type arc systems and their final juxtapositions leading to accretionary and collisional orogenesis. In: Kusky T, Zhai MG and Xiao WJ (eds.). *The Evolving Continent: Understanding Processes of Continental Growth*. Geological Society of London Special Publication, 338: 35–53
- Xiao XC, Tang YQ and Feng YM. 1992. *Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xiao XC, He GQ, Xu X, Li JY, Hao J, Cheng SD, Deng ZQ and Li YA. 2010. *Crustal Tectonic Framework and Geological Evolution of Xinjiang Uygur Autonomous Region of China*. Beijing: Geological Publishing House, 169–173 (in Chinese)
- Xu QQ, Ji JQ, Gong JF, Zhao L, Tu JY, Sun DX, Tao T, Zhu ZH, He GQ and Hou JJ. 2009. Structural style and deformation sequence of western Junggar, Xinjiang, since Late Paleozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 636–644 (in Chinese with English abstract)
- Xu X, He GQ, Li HQ, Ding TF, Liu XY and Mei SW. 2006. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating. *Geology in China*, 33(3): 1075–1086 (in Chinese with English abstract)
- Xu X, Zhou KF and Wang Y. 2010. Study on extinction of the remnant oceanic basin and tectonic setting of West Junggar during Late Paleozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3206–3214 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, He SP, Wang HL, Chen JL, Zhang EP and Feng YM. 2008. *Outline of the Geology of NW China: Qinling, Qilian and Tianshan Areas*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Xu XY, Wang HL, Li P, Chen JL, Ma ZP, Zhu T, Wang N and Dong YP. 2013. Geochemistry and geochronology of Paleozoic intrusions in the Nalati (Narati) area in western Tianshan, Xinjiang, China: Implications for Paleozoic tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 33–62
- Xu XY, Li RS, Chen JL, Ma ZP, Li ZP, Wang HL, Bai JK and Tang Z. 2014. New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1521–1534 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Liu ZW, Yang BK, Zhang HW and Tong LL. 2012. Geochemistry of the basalts from the Silurian Maylashan Formation in the West Junggar and its tectonic implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(1): 127–136 (in Chinese with English abstract)
- Yuan F, Zhou TF, Tan LG, Fan Y, Yang WP, He LX and Yue SC. 2006. Isotopic ages of the I-type granites in West Junggar Sawuer region. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1238–1248 (in Chinese with English abstract)
- Zhang C and Huang X. 1992. The ages and tectonic settings of ophiolites in West Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 38(6): 509–524 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JE, Xiao WJ, Han CM, Guo QQ, Mao QG and Ao SJ. 2010. Magmatism of mid-oceanic ridge subduction during Carboniferous in western Junggar: Evidence from Maliya ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3272–3282 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LF. 1997. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar Ar metamorphic ages of Tangbale blueschists and their geological significance in West Junggar of Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 42(20): 2178–2181 (in Chinese)
- Zhang YY and Guo ZJ. 2010. New constraints on formation ages of ophiolites in northern Junggar and comparative study on their

- connection. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 422–430 (in Chinese with English abstract)
- Zhao L, He GQ and Zhu YB. 2013. Discovery and its tectonic significance of the ophiolite in the south of Xiemisitai Mountain, West Junggar, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 32(1): 195–205 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Yuan F, Fan Y, Zhang DY, Cooke D and Zhao GC. 2008. Granites in the Sawuer region of the West Junggar, Xinjiang Province, China: Geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance. *Lithos*, 106(3–4): 191–206
- Zhu YF and Xu X. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite mélange in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2833–2842 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 车自成, 罗金海, 刘良. 2011. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社, 193–206
- 陈家富, 韩宝福, 张磊. 2010. 西准噶尔北部晚古生代两期侵入岩的地球化学、Sr-Nd 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(8): 2317–2335
- 董莲慧, 朱志新, 屈迅, 王克卓, 赵同阳. 2010. 新疆蛇绿岩带的分布、特征及研究新进展. *岩石学报*, 26(10): 2894–2904
- 辜平阳, 李永军, 张兵, 佟丽莉, 王军年. 2009. 西准达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年. *岩石学报*, 25(6): 1364–1372
- 辜平阳, 李永军, 王晓刚, 张洪伟, 王军年. 2011. 西准噶尔达尔布特 SSZ 型蛇绿杂岩的地球化学证据及构造意义. *地质评论*, 57(1): 36–44
- 韩宝福, 李建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5): 1077–1086
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限. *岩石学报*, 26(8): 2233–2246
- 何国琦, 刘德权, 李茂松, 唐延龄, 周汝洪. 1995. 新疆主要造山带地壳发展的五阶段模式及成矿系列. *新疆地质*, 13(2): 99–194
- 何国琦, 李茂松. 2000. 中亚蛇绿岩带研究进展及区域构造连接. *新疆地质*, 18(3): 193–202
- 何国琦, 李茂松. 2001. 中国新疆北部奥陶-志留系岩石组合的古构造、古地理意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 134(1): 99–110
- 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 汤耀庆. 1982. 亚洲大地构造图(1: 800 万)说明书. 北京: 地图出版社
- 李平, 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 李婷, 高婷. 2011. 北秦岭武关岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究. *岩石矿物学杂志*, 30(4): 610–624
- 李平, 徐学义, 王洪亮, 朱涛, 万晓明. 2012. 中天山南缘那拉提碱性花岗岩岩石学成因——来自锆石微量元素和 Hf 同位素证据. *地质通报*, 31(12): 1949–1964
- 李荣社, 徐学义, 计文化. 2008. 对中国西部造山带地质研究若干问题的思考. *地质通报*, 27(12): 2020–2025
- 刘希军, 许继峰, 王树庆, 候青叶, 白正华, 雷敏. 2009. 新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩 E-MORB 型镁铁质岩的地球化学、年代学及其地质意义. *岩石学报*, 25(6): 1373–1389
- 马中平, 夏林圻, 徐学义, 夏祖春, 李向民, 王立社. 2008. 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. *岩石学报*, 24(10): 2289–2300
- 孟磊, 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 宋国学, 代华五, 李成凯, 郎泽松. 2010. 新疆谢米斯台中段火山岩岩石地球化学特征. 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 26(10): 3047–3056
- 王涛, 童英, 李舫, 张建军, 史兴俊, 李锦轶, 韩宝福, 洪大卫. 2010. 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. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 595–618
- 魏荣珠, 董挨管, 李嵩, 王瑞军, 柴金钟. 2011. 西准噶尔玛依勒山一带早泥盆世生物化石的发现及其意义. *地质通报*, 30(1): 101–105
- 卫巍, 庞绪勇, 王宇, 徐备. 2009. 北疆沙尔布尔提山地区早泥盆-早石炭世沉积物、物源演变及其意义. *岩石学报*, 25(3): 689–698
- 翁凯, 徐学义, 马中平, 孙吉明, 张涛. 2013. 西准噶尔吾尔喀什尔地区泥盆纪火山岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究. *地质学报*, 87(4): 515–524
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王立社. 2007. 天山岩浆作用. 北京: 地质出版社
- 肖文交, 韩春明, 袁超, 陈汉林, 孙敏, 林寿发, 历子龙, 毛启贵, 张继恩, 李继亮. 2006. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约. *岩石学报*, 22(5): 1062–1076
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社
- 肖序常, 何国琦, 徐新, 李锦轶, 郝杰, 成守德, 邓振球, 李永安. 2010. 中国新疆地壳结构与地质演化. 北京: 地质出版社, 169–173
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 12–23
- 徐芹芹, 季建清, 龚俊峰, 赵磊, 涂继耀, 孙东霞, 陶涛, 朱自虎, 何国琦, 侯建军. 2009. 新疆西准噶尔晚古生代以来构造样式与变形序列研究. *岩石学报*, 25(3): 636–644
- 徐新, 何国琦, 李华芹, 丁天府, 刘兴义, 梅绍武. 2006. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息. *中国地质*, 33(3): 1075–1086
- 徐新, 周可法, 王煜. 2010. 西准噶尔晚古生代残余洋盆消亡时间与构造背景研究. *岩石学报*, 26(11): 3206–3214
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 张二朋, 冯益民. 2008. 中国西北部地质概论——秦岭、祁连、天山地区. 北京: 科学出版社
- 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 马中平, 李智佩, 王洪亮, 白建科, 唐卓. 2014. 新疆北部古生代构造演化的几点认识. *岩石学报*, 30(6): 1521–1534
- 杨高学, 李永军, 刘振伟, 杨宝凯, 张洪伟, 佟丽莉. 2012. 西准噶尔玛依拉山组志留纪玄武岩的地球化学特征及构造意义. *大地构造与成矿学*, 36(1): 127–136
- 袁锋, 周涛发, 谭绿贵, 范裕, 杨文平, 何立新, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区 I 型花岗岩同位素精确定年及其意义. *岩石学报*, 22(5): 1238–1248

- 张弛, 黄莹. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨. 地质论评, 38(6): 509–524
- 张继恩, 肖文交, 韩春明, 郭谦谦, 毛启贵, 敖松坚. 2010. 西准噶尔石炭纪洋中脊俯冲岩浆活动: 以玛里雅蛇绿岩为例. 岩石学报, 26(11): 3272–3282
- 张立飞. 1997. 新疆西准噶尔唐巴勒蓝片岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义. 科学通报, 42(20): 2178–2181
- 张元元, 郭召杰. 2010. 准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究. 岩石学报, 26(2): 422–430
- 赵磊, 何国琦, 朱亚兵. 2013. 新疆西准噶尔北部谢米斯台山西坡蛇绿岩带的发现及其意义. 地质通报, 32(1): 195–205
- 朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩. 岩石学报, 22(12): 2833–2842