

新疆北部的两类埃达克岩*

赵振华 王强 熊小林 张海洋 牛贺才 许继峰 白正华 乔玉楼

ZHAO ZhenHua, WANG Qiang, XIONG XiaoLin, ZHANG HaiXiang, NIU HeCai, XU JiFeng, BAI ZhengHua and QIAO YuLou

中国科学院广州地球化学研究所, 广州

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2005-12-20 收稿, 2006-04-10 改回.

Zhao ZH, Wang Q, Xiong XL, Zhang HX, Niu HC, Xu JF, Bai ZH and Qiao YL. 2006. Two types of adakites in north Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1249-1265

Abstract Two types of adakites were recognized in northern Xinjiang. The first one is subducted oceanic slab-related adakite and composed of Nb-enriched basalt (NEB) and high-Mg or Mg andesite (HMA or MA). The second one is underplating basalt-related. The first type of adakites were mainly generated during early-middle Devonian-late early Carboniferous ($\geq 320\text{Ma}$) and distributed in the western Tianshan (Alataw, Boloholo), central Tianshan (Luotuogou), eastern Tianshan (Tuwu-Yandong), south margin of Altay (Fuyun, south Qinghe), central Junggar basin (Luliang) and southern Kalamay (Baogutu). These adakites are characterized by depleted HFSE (Nb, Ta and Ti) and HREE (Yb and Y), enriched in Sr, high positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values, low T_{DM} model ages ($< 900\text{Ma}$) and low ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i ratios. The HMA or MA are of high $\text{Mg}^\#$ values, high contents of Cr and Ni and lower positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values. High contents of Nb and relative rich in Yb and Y are the typical features of NEB. These geochemical characteristics for the adakites, HMA and NEB have displayed that the subducted oceanic slab and mantle wedge are the main source materials for these adakite and associated rocks. Particularly, picritic rocks have been found in the south margin of Altay and associated closely spatially and temporally with adakite, HMA and NEB. The second type of adakite was mainly generated in mid-late Permian ($\leq 280\text{Ma}$) and distributed in Awulale mountain (west Tianshan) and Sanchakou (east Tianshan). No associated NEB and HMA have been found. Based on the distribution of two types of adakites and the close association of the first type of adakites with HMA, NEB and picritic rocks, it can be deduced that the crust accretion in north Xinjiang possesses multi-fashions. For accretion direction, the vertical and horizontal accretion are both exist. For the accretion tectonic process, the oblique subduction of oceanic slab, slab tear, slab window, subduction erosion and the underplating of basaltic materials are all able to generate the adakites, NEB, HMA and picritic rocks. For the accretion materials, there are subducted oceanic slab, mantle wedge, forearc prism, mantle wedge modified by adakitic melt, adakitic melt contaminated by the mantle wedge and upwelling asthenospheric thru the slab window. Relatively extensive Cu and Au mineralization associated with adakite, NEB and HMA have been found in north Xinjiang, particular for the first type of adakites. Some of them can be achieve large-scale and showing the high potential of adakite, NEB and HMA for the exploration of Cu and Au in north Xinjiang.

Key words Adakite, Nb-enriched basalt (NEB), High magnesium andesite (HMA, MA), Crust growth, Cu and Au mineralization, North Xinjiang

摘要 新疆北部有两类埃达克岩, 一是俯冲型, 形成于早、中泥盆世-早石炭世晚期 ($\geq 320\text{Ma}$), 包括了埃达克岩、富 Nb 玄武岩、高(富) Mg 安山岩。第二类埃达克岩是底侵型, 形成于中晚二叠世 ($\leq 280\text{Ma}$)。第一类埃达克岩分布于西天山的阿拉套山、博罗科努山, 中天山的骆驼沟和巴仑台, 东天山的土屋-延东, 阿尔泰山陆缘南富蕴-青河南, 准噶尔盆地中部陆梁, 克拉玛依等地。在阿尔泰山陆缘南, 苦橄岩与埃达克岩、富 Nb 玄武岩和高(富) Mg 安山岩密切组合。第二类埃达克岩分布于西天山的阿吾拉勒山和东天山的三岔口, 未发现富 Nb 玄武岩和高(富) Mg 安山岩组合。俯冲型埃达克岩、富 Nb 玄武岩和高(富) Mg 安山岩的高 Sr 低 Y、Yb、富 Eu 及高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($+1.5 \sim +10.0$), 低 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (< 0.7070) 的同位素组成, 均一致表明其源区物质为洋壳板片, 部分为地幔楔、弧前棱柱, 产于岛弧环境; 而底侵型埃达克岩源于底侵的幔源玄武质物质, 形成于后造山环

* 国家自然科学基金 40373017 及国家重点基础研究发展规划项目 2001CB409803 资助。

第一作者简介: 赵振华, 男, 1942 年生, 研究员, 博士生导师, 地球化学专业, E-mail: zhzhao@gig.ac.cn

境。两类埃达克岩及其组合岩石的地质及地球化学特点,展示了中亚型造山在本区晚古生代陆壳增生作用的多样性:在增生构造过程上,有洋壳板片的斜俯冲、俯冲板片的撕裂、板片窗、俯冲剥蚀及玄武质物质的底侵作用等;在增生方向上,有洋壳板片的侧向斜俯冲,也有玄武质物质垂向上底侵于壳-幔边界;在增生物质上,有洋壳板片、地幔楔、受地幔楔混染的洋壳板片熔体,弧前棱柱、地幔楔受板片熔体交代后形成熔体及底侵的幔源玄武质物质。与两类埃达克岩有关,尤其是第一类埃达克岩及其组合岩石,在本区广泛发育了 Cu、Au 成矿作用,其中部分达到大型-超大型规模。因此,对埃达克岩及其组合岩石的识别及相关 Cu、Au 成矿作用的找矿勘探应予以足够重视。

关键词 埃达克岩; 富 Nb 玄武岩; 富 Mg 安山岩; 陆壳增生; Cu、Au 成矿作用; 新疆北部

中图法分类号 P588.144

自 Defant 等 1990 年命名埃达克岩以来,由于其重要的地球动力学和成矿意义而愈来愈受到岩石学、地球化学和矿床学界广泛关注。埃达克岩的地球动力学研究主要集中于:俯冲洋壳板片及下地壳镁铁质岩石熔融形成埃达克岩浆的条件(Defant *et al.*, 1991, 2002; Rapp *et al.*, 1991, 1995, 1997; Winther *et al.*, 1996; Sen *et al.*, 1994; Prouteau, 2001; Xiong *et al.*, 2005); 基于太古代 TTG-英云闪长岩、奥长花岗岩、花岗闪长岩与埃达克岩地球化学特征的相似研究地球早期地壳形成方式(Martin, 1999; Martin *et al.*, 2002, 2005; Rapp, 2003; Smithies, 2000, 2001, 2003); 由埃达克岩、富 Nb 玄武岩(NEB)和富 Mg 安山岩(MA 或 HMA)的成岩机理研究壳幔相互作用多样性,如板片熔体与地幔楔的交代作用、洋脊俯冲(ridge subduction)、板片窗(slab window)形成、俯冲板片断离(break off)或撕裂(tear)、俯冲剥蚀(subduction erosion)等(Sajona *et al.*, 1996, 2003; Kepezhinskas *et al.*, 1996, Prouteau *et al.*, 1999; Polat *et al.*, 2001, Hollings *et al.*, 2000; Aguillon-Robles *et al.*, 2001; Reagan *et al.*, 1989; Yagodzhinski *et al.*, 1995, 2001, Kelemen *et al.*, 2003; Castillo, 2002; Abratis *et al.*, 2001; 熊小林等, 2001, 2005; 王强等, 赵振华等, 2004, Xu *et al.*, 2002, 张旗等, 2001, 2002, 2003; 侯增谦等, 2003, 2004)。对埃达克岩的成矿作用研究集中于全球的斑岩型 Cu(Au)矿床及 Au、Ag、Cu、Mo 低温热液型矿床,特别是超大型规模的矿床,从埃达克岩形成的构造环境以及埃达克岩浆特征的物理化学条件(如温度、氧逸度、挥发分等)等探讨其对上述矿床成矿的重要控制作用(Thiebbement *et al.*, 1997; Sajona *et al.*, 1998; Oyarzun *et al.*, 2001; Defant *et al.*, 2001, 2002; Mungall, 2002; Bissig *et al.*, 2003; Gonzalez-Partida *et al.*, 2003; 张旗等 2002, 2004; 王强等, 2001, 2002, 2004; 赵振华等, 2004; 侯增谦等, 2003, 2004; 张连昌等, 2004)。

新疆北部地处西伯利亚、哈萨克斯坦和塔里木板块的交汇处,也是中亚型造山带的中心部位,其岩石圈动力学演化及其成矿作用是近年来国内外地学界的研究热点。自 2000 年以来,在西天山、阿尔泰山南缘、准噶尔盆地中部和东天山土屋-延东等地相继发现了埃达克岩、富 Nb 玄武岩和富 Mg 安山岩(熊小林等, 2001a, b, 2005; 许继峰等, 2001; 王强等, 2003; 张海祥等, 2004; 赵振华等, 2004; Zhao *et al.*, 2004), 对这些岩石进行了较系统的岩石学、地球化学及其成岩机理

研究,初步探讨了它们的成矿作用。综合它们的岩石学和地球化学特征,本文将新疆北部的埃达克岩、富 Nb 玄武岩、高(富)Mg 安山岩划分为两种类型,一是洋壳俯冲型,简称俯冲型,形成于泥盆纪-早石炭世晚期($\geq 320\text{Ma}$),其形成与洋壳板片俯冲有关;另一类型为玄武质岩浆底侵型,简称底侵型,形成于中晚二叠世($\leq 280\text{Ma}$)。这两类埃达克岩的岩石学、地球化学及成矿作用特点均有一定的差异,可为探讨新疆北部的岩石圈动力学演化及成矿作用研究提供重要参考资料。

1 地质概况及岩石学特征

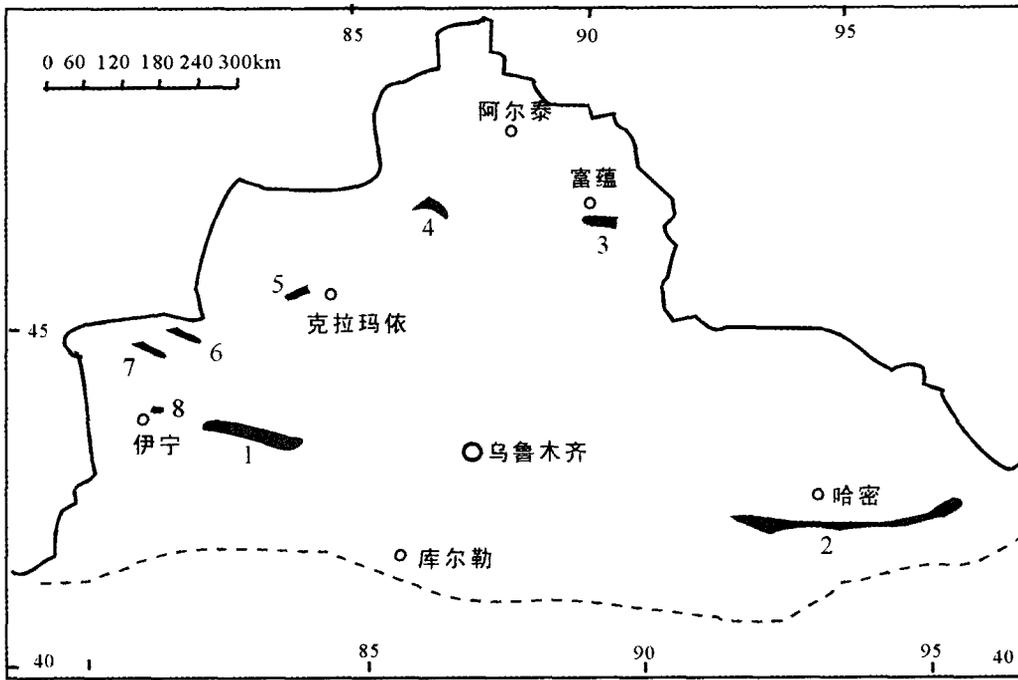
1.1 俯冲型埃达克岩

新疆北部晚古生代俯冲型埃达克岩及其家族岩石有富 Nb 玄武岩、高(富)Mg 安山岩,它们主要分布在阿拉套山、科古琴-博罗科努山(达巴特、果子沟、阿希)、中天山(骆驼沟和巴仑台)、东天山土屋-延东、阿尔泰陆缘南富蕴-青河南、准噶尔西缘克拉玛依及腹地陆梁等地区(图 1)。

阿拉套山位于博乐地体的北部,区内出露的最老岩石为元古代变质岩,缺失早古生代和中生代地层。晚古生代花岗岩类和火山岩分布广泛,晚古生代火山岩主要分布于艾比湖西侧和哈拉吐鲁克沟,主要包括了埃达克岩、富 Nb 玄武岩、富 Mg 安山岩及凝灰质安山岩、凝灰质英安岩和凝灰质角砾岩。

科古琴-博罗科努山地区出露地层有震旦系至志留系,晚古生代火山弧的中、上泥盆统主要为砂岩、灰岩、玄武岩及火山角砾岩;石炭纪有安山岩、安山玄武岩、凝灰岩、灰岩,其中有埃达克岩和富 Mg 安山岩。晚古生代富碱花岗岩分布较广。中生界地层仅分布在山间小盆地。

东天山土屋-延东地区属晚古生代大南湖岛弧带。区内出露的主要地层为泥盆纪(石炭纪?)企鹅山群火山岩,主要由玄武岩、安山岩、安山质角砾岩、火山角砾岩、岩屑砂岩、复成分砾岩和沉凝灰岩等组成;侏罗系含碳岩系覆盖其上(张连昌等, 2004)。区内晚古生代花岗岩广泛分布。本区的埃达克岩分布范围 $> 80\text{km}$, 有埃达克岩、高 Mg 安山岩(闪长岩)等,岩石类型有斜长花岗岩斑岩、英云闪长岩、闪长岩,主要呈小岩体侵入于企鹅山群中,并发育了强烈的 Cu(Au)成矿作用。



1.阿吾拉勒 2.上屋-延东,尾亚北,312国道东和西等 3.青河南,富蕴南
4.准噶尔盆地北部陆梁隆起 5.包古图 6.阿拉套山 7.果子沟 8.阿希

图1 新疆北部两类埃达克岩分布简图

Fig. 1 The distribution of two types of adakites, NEB and HMA in north Xinjiang

阿尔泰陆缘南青河南的埃达克岩分布于南卡依尔特-二台断裂和玛因鄂博断裂之间。区内出露地层主要为中泥盆统北塔山组,少量为下石炭统南明水组以及第三系和第四系。北塔山组分三个岩性段,主要为玄武岩、玄武安山岩、凝灰岩、火山角砾岩及辉斑玄武岩;含碳泥质粉砂岩、板岩、凝灰质砂岩;凝灰岩、沉凝灰岩、火山角砾岩组成(杨文平等,2005)。晚古生代花岗岩分布较广。埃达克岩主要为花岗闪长斑岩和石英闪长斑岩,呈小岩株赋存于石炭系火山岩中。富蕴南出露的地层为下泥盆统的托让库都克组,主要岩石组合为玄武岩、火山凝灰角砾岩、集块岩、含铁硅质岩;凝灰岩、安山岩;晶质凝灰岩、凝灰角砾岩、玄武岩;凝灰岩、玄武岩、安山岩(张海洋等,2004)。在区内东部,中泥盆统蕴都卡拉组、卡翁迪组以及下石炭统南明水组也有少量分布。除晚古生代花岗岩外,还发育有镁铁质侵入岩和超镁质岩石,最特征的是在乔夏哈拉-老山口分布有苦橄岩(陈毓川等,2004)。该区分布的埃达克岩为玄武质,并产出有富Nb玄武岩和高Mg安山岩(张海洋等,2003,2004),属早、中泥盆世。

准噶尔盆地陆梁产出的富Nb玄武岩分布于盆地中部,是盆地中的一个大型断隆带,呈北西-东西向展布。样品采于石油钻井中,隆起带被中、新生代沉积物覆盖,石炭系、二叠系火山岩分布于其下,隆起带凹陷部位厚度较大。火山岩主要为下石炭统包古图组,由火山碎屑岩、杂砂岩和火山熔岩组成。熔岩中除玄武岩外,出现大量流纹岩(王方正等,2002)。

克拉玛依南的埃达克岩分布于达拉布特断裂的东南侧包古图地区,区内出露中、上泥盆统至下石炭统的太勒古拉组火山熔岩和火山沉积岩,岩石类型有中-基性火山熔岩、硅质岩、凝灰岩、粉砂岩。分布最广的为下石炭统的包古图组,主要由两个岩性段组成:上段为凝灰质粉砂岩、细砂岩、粉砂质泥岩;下段主要为凝灰岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质粉砂质泥岩互层。在达拉布特以西和克拉玛依以北广泛分布晚古生代富碱花岗岩。本区埃达克岩主要以石英闪长岩、花岗闪长斑岩等中酸性小岩体产出(约20个)。

1.2 底侵型埃达克岩

新疆北部晚古生代底侵型埃达克岩主要分布于西天山阿吾拉勒山和东天山的哈密南三岔口(图1)。阿吾拉勒山位于伊犁地块的东北部,呈近东西向延伸。区内出露的主要地层为石炭纪和二叠纪火山沉积岩。区内东北部分布有中、下侏罗统砂砾岩,在黑山头以北有白垩纪砂砾岩。上石炭亚系的朔拉克组分布于阿吾拉勒山南坡,主要由基性至酸性火山岩组成,缺少流纹岩。区内分布最广的为二叠系火山沉积岩-下二叠统乌朗组和塔尔得套组。乌朗组主要由砂岩、玄武岩、玄武安山岩、流纹岩、橄榄玄粗岩(shoshonites)组成。塔尔得套组由薄层凝灰岩和粗面岩、橄榄玄粗岩、玄武岩、凝灰质粉砂岩、安山角砾岩组成。上二叠统由晓山萨依组和哈密斯坦组组成。哈密斯坦组上部为玄武岩和钠质英安岩、凝

灰岩、砂岩和砾岩互层,下部为杂色凝灰岩、凝灰角砾岩。晓山萨依组主要由泥灰岩、砂岩、凝灰质砂砾岩组成。区内埃达克质岩石主要以石英钠长斑岩、钠长斑岩及英安岩等浅成小岩体侵入于二叠系火山沉积岩中。

三岔口底侵型埃达克岩分布于东天山土屋-延东俯冲型埃达克岩区的东部。其岩石类型为英云闪长岩、斜长花岗斑岩。

1.3 两类埃达克岩的岩石学特征

俯冲型埃达克岩包括埃达克岩、富 Nb 玄武岩和高(富) Mg 安山岩,既有喷出的火山熔岩,也有浅侵位的斑岩,主要包括玄武安山岩、石英闪长斑岩、花岗闪长斑岩、斜长花岗斑岩、英云闪长岩和花岗闪长岩等中酸性岩石;高(富) Mg 安山岩为英安岩和安山岩,也有富 Mg 闪长岩。在造岩矿物组合上,斑岩中的斑晶为斜长石、角闪石和黑云母,基质为微粒、细粒结构,由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成;副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石等。英云闪长岩暗色矿物含量超过 10%,斜长石为中长石。准噶尔陆梁的富 Nb 玄武岩的斑晶中见有橄榄石、普通辉石(王方正等,2004)。

在岩石化学特征上(表 1),俯冲型埃达克岩 SiO₂ 含量 53%~71%,既有低 Si 型 LSA(SiO₂ < 60%),也有高 Si 型 HSA(SiO₂ > 60%); Al₂O₃ 含量高,范围 14.28%~18.86%,普遍高于 15%,A/NKC 1.05~1.66,属过铝质; Na₂O 含量较高,普遍高于 K₂O, Na₂O/K₂O 1.85~7.83(个别样品 Na₂O < K₂O),属中钾钙碱性系列(青河南的希勒克特哈腊苏岩体 K₂O 3.60%~4.58%,属橄榄玄粗岩系列); Mg[#] 中等 31~71,一般 < 50。上述特点与国外埃达克岩非常相似(Defant *et al.*, 1990)。富 Nb 玄武岩属低 Si 型, Al₂O₃ 含量低于埃达克岩, A/NKC 0.90~1.94, 属准铝质-过铝质; Na₂O > K₂O, 索尔库都克和准噶尔陆梁的富 Nb 玄武岩 Na、K 含量高,属碱性系列; Mg[#] 略低于埃达克岩 25~66。高 Mg 安山岩(闪长岩)的显著特点是 MgO 含量高, Mg[#] 值 54~74; Al₂O₃ 含量较低 9.59%~16.32%, 仅个别样品达 20.34%, A/NKC 0.68~1.88, 从 Al 不饱和到过铝质; K₂O 含量有时高于 Na₂O。

底侵型埃达克岩在岩石类型及岩石化学特点上与俯冲型埃达克岩明显不同(表 2),未发现富 Nb 玄武岩和高(富) Mg 安山岩。其岩石类型主要为浅侵位或侵入相,石英钠长斑岩、英云闪长岩、斜长花岗斑岩、英云闪长斑岩,部分为喷出相,如英安岩。石英钠长斑岩中的斑晶为钠长石、角闪石,少量黑云母;基质为钠长石、石英和碱性长石,呈玻晶交织结构和交织结构。SiO₂ 含量 62~71%, 均属高 Si 型埃达克岩 HSA。Al₂O₃ 含量 13.03%~16.32%, A/NKC 0.85~1.16, 个别达 1.22, 属准铝质到弱过铝质。在阿吾拉勒地区,该类型埃达克岩明显富碱,特别是富 K₂O, 含量 2.06%~4.62%, 属高钾钙碱性系列, K₂O + Na₂O 范围 6.46%~11.11%, 按 K₂O + Na₂O-SiO₂ 关系属碱性系列, 在时空上与橄榄玄粗岩密切组合。MgO 含量较低, < 3.0%, Mg[#] 范围 35~56 平均 45, 略低于俯冲型埃达克岩(表 2)。

2 稀土与微量元素地球化学

2.1 稀土元素地球化学

俯冲型埃达克岩明显富轻稀土, (La/Yb)_N 4.1~13(个别样品为 2.9), Yb 含量低, 0.59 μg/g~1.86 μg/g, 均低于 1.9 μg/g(Defant *et al.*, 1990), 仅两个样品分别为 2.23 μg/g 和 2.54 μg/g。Eu/Eu* 0.81~1.41, 属明显的 Eu 正异常, 部分为极弱的 Eu 负异常。REE 的球粒陨石标准化型式呈陡右倾斜平滑型(图 2)。富 Nb 玄武岩为轻稀土弱富集型, (La/Yb)_N 1.56~6.34; Yb 含量 2.2 μg/g~5.17 μg/g, 明显高于埃达克岩; Eu/Eu* 0.76~1.11(个别样品为 1.21), Eu 无异常-弱负异常。REE 球粒陨石标准化型式为较平缓右倾斜型(图 2)。高 Mg 安山岩(闪长岩)明显富集轻稀土, (La/Yb)_N 0.98~6.37; Yb 含量较低, 1.01 μg/g~2.37 μg/g, Eu/Eu* 为 0.82~1.10, Eu 呈无异常-弱负异常。REE 的球粒陨石标准化型式为右倾平滑型(图 2)。

底侵型埃达克岩强烈富轻稀土, 三岔口 (La/Yb)_N 4.9~5.1, 阿吾拉勒地区高达 13.35~33.46, Yb 含量很低, 为 0.32 μg/g~1.67 μg/g, 低于 1.9 μg/g, 也明显低于区内俯冲型埃达克岩; Eu 富集, 呈正异常, Eu/Eu* 1.02~1.27。REE 球粒陨石标准化型式呈右陡倾斜型(图 3)。

2.2 微量元素地球化学

俯冲型埃达克岩富 Sr, 含量 329 μg/g~1812 μg/g, 集中分布于 500 μg/g。Y 含量较低, 为 7.0 μg/g~18 μg/g, 普遍低于 18 μg/g(Defant *et al.*, 1990), 个别达 24 μg/g。Sr/Y 比值高, 为 18~100, 个别达 116, 普遍高于 20~40(Defant *et al.*, 1990)。在 Sr/Y-Y 图解中均分布于埃达克岩区(图 4), 与普通岛弧型火山岩明显不同。富 Nb 玄武岩 Sr 含量低于埃达克岩, 含量 260 μg/g~826 μg/g。Y 含量较高, 为 16 μg/g~64 μg/g, Sr/Y 比值低, 为 8.0~20.8。在 Sr/Y-Y 图解中与埃达克岩不同, 落入普通岛弧型安山岩-英安岩-流纹岩区(图 4)。高 Mg 安山岩(闪长岩)与埃达克岩相似, Sr 含量较高, 含量 225 μg/g~1007 μg/g, 个别样品低于 200 μg/g。Y 含量低, 含量为 8.0 μg/g~23.2 μg/g。Sr/Y 比值较高, 范围 5.45~125.9, 在 Sr/Y-Y 图解中主要落入埃达克岩区(图 4)。

在原始地幔(PM)标准化的微量元素蛛网图中, 埃达克岩、高 Mg 安山岩的 Sr 含量呈明显正异常, 大离子亲石元素 K、Rb、Ba 也明显富集, 而 Nb、Ta、Ti 呈明显负异常(图 5)。富 Nb 玄武岩与之不同, Sr 正异常不明显, Nb 含量较高, 含量范围 4.81 μg/g~24.0 μg/g, La/Nb 值较低 0.56~2.42, 多数低于 1.40, Ti 与 Nb 类似。在 PM 标准化蛛网图上 Nb、Ti 呈弱负异常-正异常(图 5)。

底侵型埃达克岩也具有 Sr 含量高、Y 含量低的显著特点。Sr 含量 303 μg/g~1633 μg/g, 集中分布于 800 μg/g; Y 含量 4 μg/g~15 μg/g, 均低于 18 μg/g; Sr/Y 比值高, 51~327,

表 1 新疆北部俯冲型埃达克岩的岩石化学、微量元素与稀土元素主要参数
Table 1 Major, trace elements and REE of subduction-related adakites in north Xinjiang

	埃达克岩					富 Nb 玄武岩					富 Mg 安山岩					
	阿拉套 (5*)	阿希 (2)	土屋- 延东 (4)	索尔库 都克 (9)	希勒克 特哈腊 苏(5)	包古图 (5)	阿拉套 (7)	骆驼沟 (14)	土屋- 延东 (3)	索尔库 都克 (9)	准噶尔 陆梁 (4)	阿拉套 (2)	果子沟 (3)	阿希 (4)	土屋- 延东 (4)	沙尔布 拉克 (7)
SiO ₂ %	61.23 ~ 63.64	60.10 ~ 66.09	65.81 ~ 70.65	54.47 ~ 64.52	62.97 ~ 65.45	56.05 ~ 60.20	46.07 ~ 54.67	48.00 ~ 53.31	42.89 ~ 48.26	49.86 ~ 54.21	43.36 ~ 47.45	56.99 ~ 57.04	52.28 ~ 55.28	55.41 ~ 60.32	51.35 ~ 59.17	52.13 ~ 60.45
Al ₂ O ₃ %	14.55 ~ 18.25	14.28 ~ 15.67	15.67 ~ 17.22	15.49 ~ 18.86	15.75 ~ 16.52	16.27 ~ 17.29	12.59 ~ 16.59	13.56 ~ 16.22	17.96 ~ 20.42	14.02 ~ 16.84	14.36 ~ 15.63	14.89 ~ 16.32	14.84 ~ 16.06	12.30 ~ 15.26	17.06 ~ 20.34	9.59 ~ 16.23
Na ₂ O/K ₂ O	2.37 ~ 3.32	1.85 ~ 3.42	2.45 ~ 7.83	2.08 ~ 5.00	0.84 ~ 1.53	2.82 ~ 4.10	2.03 ~ 6.18	1.10 ~ 13.76	34.8 ~	1.06 ~ 5.21	4.57 ~ 11.63	0.97 ~ 2.77	0.67 ~ 20.2	1.44 ~ 3.57	1.10 ~ 65.1	0.69 ~ 2.09
A/NKC	1.27 ~ 1.66	1.29 ~ 1.46	1.05 ~ 1.48	1.15 ~ 1.44	1.06 ~ 1.34	1.24 ~ 1.45	1.14 ~ 1.64	1.00 ~ 1.39	1.81 ~ 1.94	0.96 ~ 1.35	0.90 ~ 1.11	1.32 ~ 1.48	1.05 ~ 1.34	1.49 ~ 2.09	1.23 ~ 1.88	0.68 ~ 1.20
Mg [#]	53 ~ 58	56 ~ 71	44 ~ 60	39 ~ 52	31 ~ 43	50 ~ 54	25 ~ 53	36 ~ 56	54 ~ 59	38 ~ 49	48 ~ 53	55 ~ 59	56 ~ 60	70 ~ 74	54 ~ 71	51 ~ 70
Y μg/g	10.0 ~ 13.9	14.3 ~ 16.6	6.17 ~ 10.0	10.1 ~ 18.4	10.4 ~ 24.0	16 ~ 46	16 ~ 46	21.3 ~ 38.0	20 ~ 22	33.70 ~ 63.61	25.13 ~ 32.96	21.5 ~ 23.2	8.0 ~ 12.4	14.5 ~ 17.4	15.3 ~ 16.7	8.1 ~ 12.2
Sr/Y	29.0 ~ 52.8	19.1 ~ 25.9	31.6 ~ 100	29.0 ~ 116.2	15.8 ~ 43.0	360 ~ 651 (Sr/Yb)	8.0 ~ 20.8	3.8 ~ 14.8	12.2 ~ 20.8	10.9 ~ 20.5	8.5 ~ 16.1	10.5 ~ 11.4	5.45 ~ 125.9	5.45 ~ 44.2	99.8	14.6 ~ 97.6
Nb μg/g	3.56 ~ 5.01	5.35 ~ 9.53	3.13 ~ 4.50	3.05 ~ 12.4	3.18 ~ 5.35	5.87 ~ 12.90	5.87 ~ 12.90	4.81 ~ 24.0	6.9 ~ 7.5	12.61 ~ 20.92	7.8 ~ 14.0	6.92 ~ 7.30	1.24 ~ 9.00	4.34 ~ 6.02	2.86	0.70 ~ 3.10
La/Nb	1.60 ~ 2.83	1.31 ~ 2.07	3.51 ~ 3.71	1.39 ~ 5.62	1.03 ~ 3.27	0.83 ~ 1.68	0.83 ~ 1.68	0.56 ~ 1.05	0.92 ~ 1.49	1.77 ~ 2.41	1.03 ~ 1.60	1.60 ~ 1.96	1.74 ~ 5.05	1.88 ~ 2.53	5.31	1.56 ~ 4.59
(La/Yb) _N	4.12 ~ 6.14	4.53 ~ 5.74	8.08 ~ 12.95	3.78 ~ 12.72	2.70 ~ 4.00	3.6 ~ 7.0	1.56 ~ 2.87	1.64 ~ 3.54	1.61 ~ 2.65	4.21 ~ 6.57	3.10 ~ 4.51	3.17 ~ 4.65	2.89 ~ 4.48	4.56 ~ 5.51	4.25 ~ 6.37	0.98 ~ 5.74
Eu/Eu*	1.00 ~ 1.34	0.81 ~ 1.03	1.36 ~ 1.41	0.88 ~ 1.12	0.99 ~ 1.26	1.21 ~ 1.74	0.76 ~ 1.03	1.03 ~ 1.11	0.51 ~ 1.21	0.85 ~ 1.01	0.91 ~ 1.04	0.84 ~ 1.03	0.88 ~ 0.97	0.91 ~ 1.10	0.82 ~ 1.03	0.36 ~ 0.88
Yb μg/g	1.10 ~ 1.39	1.46 ~ 1.64	0.59 ~ 0.65	0.93 ~ 1.86	1.29 ~ 2.54	1.23 ~ 1.92	3.14 ~ 4.89	3.46 ~ 4.45	2.29 ~ 2.87	3.50 ~ 5.17	2.20 ~ 2.82	2.06 ~ 2.37	1.45 ~ 2.51	1.41 ~ 1.66	1.47 ~ 1.60	1.01 ~ 1.26
资料来源	1	1	2,3	1	4	5	1	1,6,7	5	1	8	1	1	1	1	1

* 样品数; 1. 本文; 2. 芮宗瑶等, 2002; 3. 张连昌等, 2004; 4. 杨文平等, 2005; 5. 沈远超等, 1992; 6. 陈丹玲等, 2001; 7. Xia et al., 2004; 8. 王方正等, 2002

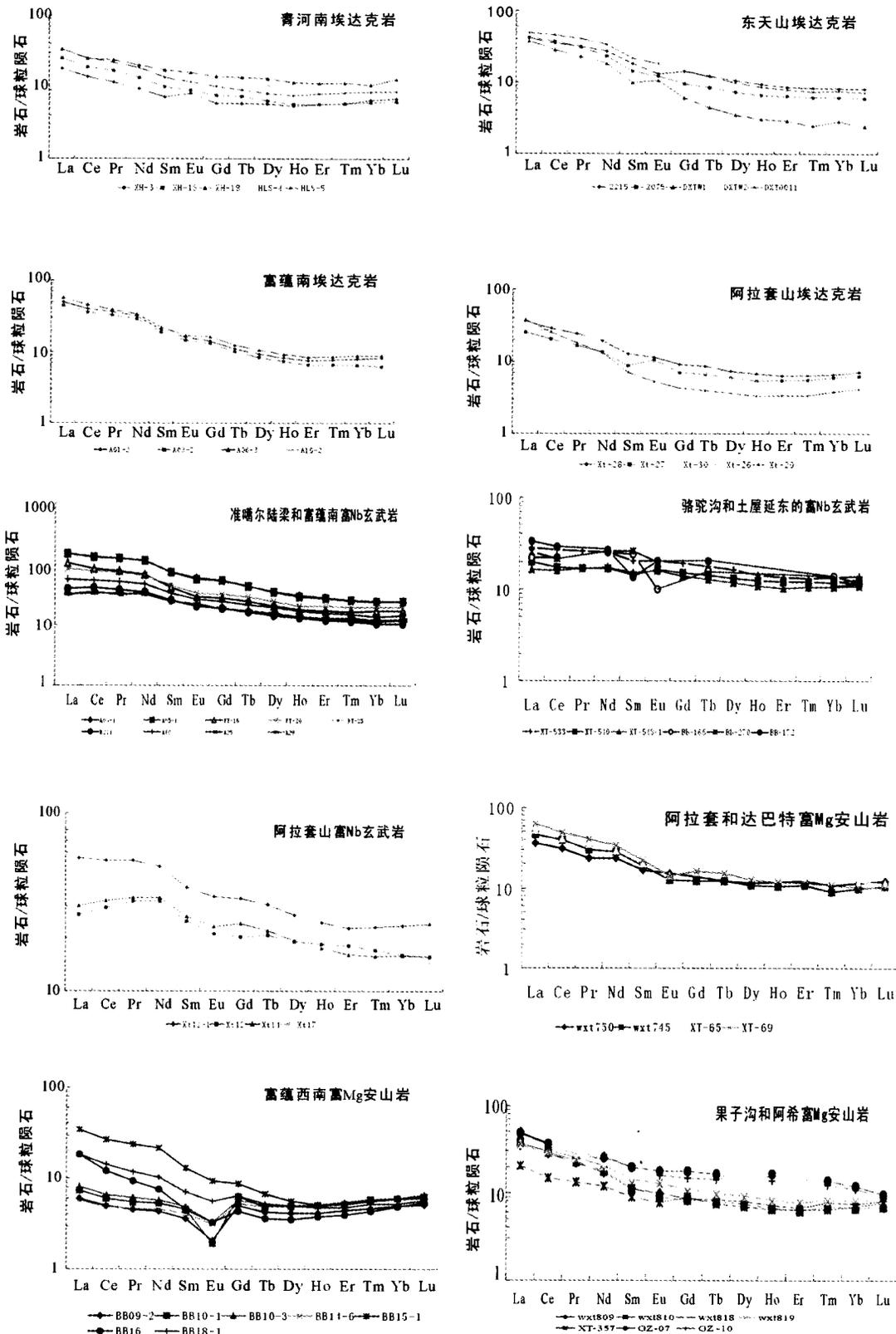


图2 俯冲型埃达克岩、富Nb玄武岩及富Mg安山岩REE球粒陨石标准化分布型式
 Fig.2 Chondrite-normalized REE patterns of subduction-related adakites, NEB and HMA

表2 新疆北部底侵型埃达克岩的岩石化学、微量元素与稀土元素主要参数

Table 2 Major, trace and REE of underplating basalt-related adakites in north Xinjiang

	莫斯早特 石英钠长斑岩 (3*)	特铁达坂 石英钠长斑岩 (3)	黑山头 钠长斑岩 (4)	群吉萨依 英安岩 (4)	三岔口 英云闪长岩 (3)
SiO ₂ (%)	65.39 ~ 68.74	70.97 ~ 71.35	62.41 ~ 67.04	66.39 ~ 67.59	62.47 ~ 66.17
Al ₂ O ₃ (%)	15.34 ~ 16.32	15.20 ~ 15.70	14.17 ~ 16.32	14.95 ~ 15.56	13.03 ~ 16.27
Na ₂ O/K ₂ O	1.59 ~ 2.58	2.35 ~ 16.50	1.82 ~ 4.22	2.13 ~ 3.24	5.75 ~ 9.33
A/NKC	0.87 ~ 1.01	1.03 ~ 1.15	0.85 ~ 1.15	0.92 ~ 1.21	1.03 ~ 1.22
Mg [#]	44 ~ 50	48 ~ 56	39 ~ 48	48 ~ 56	35 ~ 38
Y (μg/g)	4.0 ~ 5.0	5.0 ~ 6.0	6.0 ~ 7.0	3.9 ~ 5.0	12.22 ~ 15.17
Sr/Y	84 ~ 119	51 ~ 75	66 ~ 151	208 ~ 327	51 ~ 60
Nb (μg/g)	1.8 ~ 2.0	4.9 ~ 5.7	2.4 ~ 3.5	2.50 ~ 3.00	1.92 ~ 2.22
La/Nb	4.2 ~ 7.9	2.0 ~ 2.9	7.2 ~ 8.6	5.6 ~ 6.5	5.2 ~ 5.5
(La/Yb) _N	26.91 ~ 31.24	13.35 ~ 16.63	21.35 ~ 31.45	26.31 ~ 33.46	4.9 ~ 5.1
Eu/Eu*	1.26 ~ 1.27	1.01 ~ 1.15	1.14 ~ 1.21	1.16 ~ 1.24	1.02 ~ 1.21
Yb (μg/g)	0.32 ~ 0.34	0.51 ~ 0.59	0.54 ~ 0.65	0.36 ~ 0.40	1.32 ~ 1.67

* 括号内为样品数

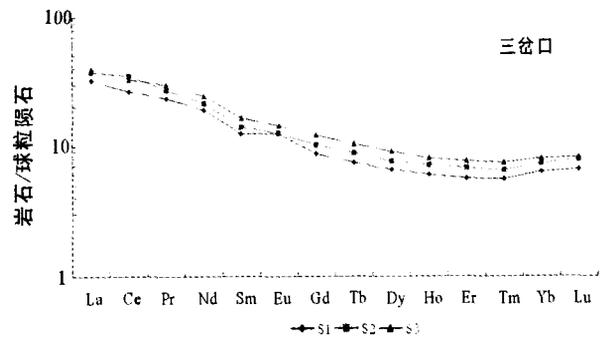
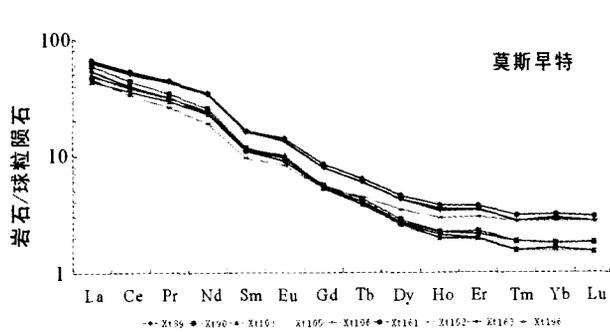


图3 底侵型埃达克岩 REE 球粒陨石标准化分布型式
a-阿吾拉勒地区; b-三岔口

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of underplating basalt-related adakites

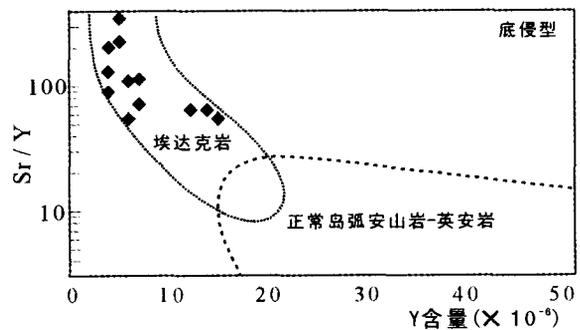
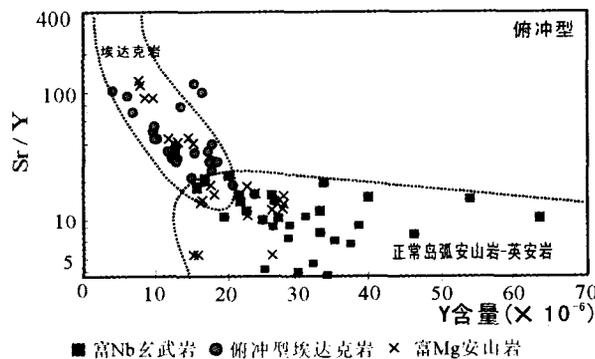


图4 两类埃达克岩、富 Nb 玄武岩及富 Mg 安山岩(闪长岩) Sr/Y-Y 图解
Fig. 4 Sr/Y plot for the two types of adakites, NEB and HMA

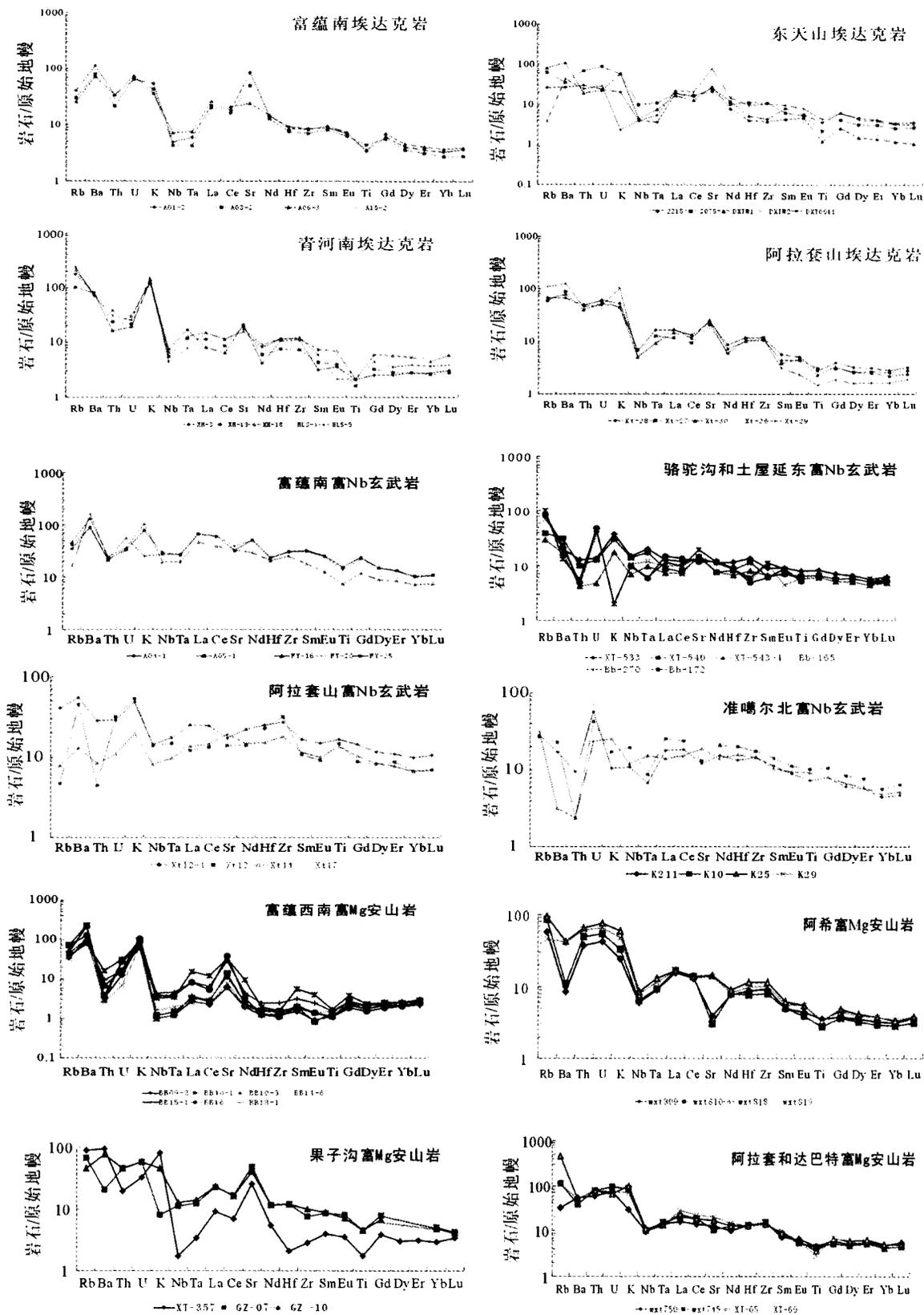


图5 俯冲型埃达克岩、高 Mg 安山岩(闪长岩)及富 Nb 玄武岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 5 Primitive mantle-normalized spidergram of trace elements for the subduction-related adakite, NEB and HMA

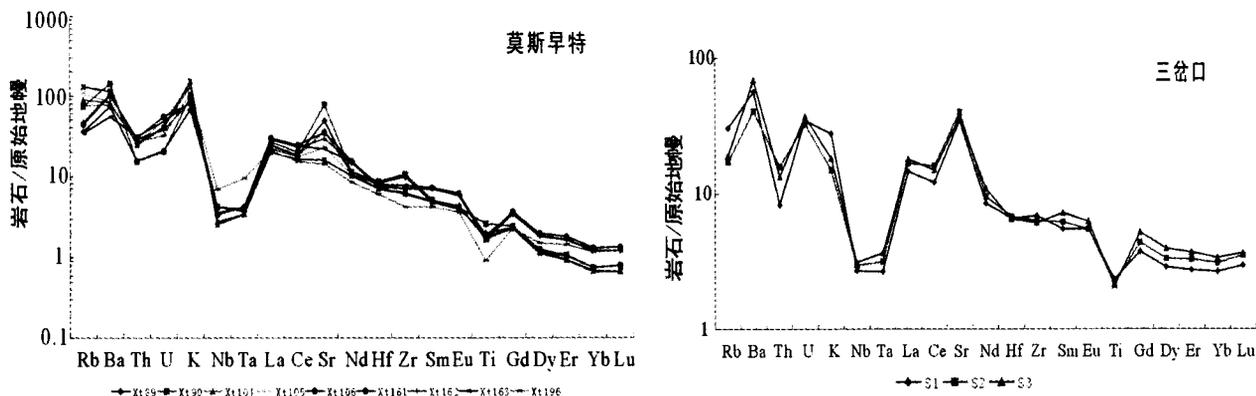


图6 底侵型埃达克岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized spidergram of trace elements for the underplating basalt-related adakites

表3 新疆北部两类埃达克岩富 Nb 玄武岩、富 Mg 安山岩同位素年龄资料

Table 3 Isotopic ages of two types of adakites, NEB and HMA in north Xinjiang

地点	岩石类型	同位素年龄/Ma	测年方法	资料来源
俯冲型				
阿拉套	埃达克岩	320.0 ± 1.2	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(坪年龄)	本文
	富 Nb 玄武岩	318.9 ± 2.2	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(坪年龄)	本文
骆驼沟	富 Nb 玄武岩	311.89 ± 0.65	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(坪年龄)	本文
	富 Nb 玄武岩	309.16 ± 6.18	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(等时线)	本文
巴音沟	富 Mg 安山岩	301.37 ± 1.82	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(坪年龄)	本文
	富 Mg 安山岩	332.70 ± 6.65	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(等时线)	本文
阿希	辉石安山岩*	325.1 ± 0.6	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(坪年龄)	李华芹等 1998
	辉石安山岩*	345.9 ± 9	Rb-Sr(全岩)	
土屋-延东	埃达克岩	334 ± 3	锆石 SHRIMP	陈富文等, 2005
	埃达克岩	333 ± 4	锆石 SHRIMP	
赤湖	埃达克岩	322 ± 10	锆石 SHRIMP	
希勒克特哈腊苏	埃达克岩	332.8 ± 8.5	Rb-Sr	杨文平, 2002
准噶尔陆梁	富 Nb 玄武岩	323	Rb-Sr	王方正, 2002
	富 Nb 玄武岩	345	锆石蒸发法	
包古图 V 号岩体	埃达克岩	322 ± 30	Rb-Sr	沈远超, 1992
	埃达克岩	322 ± 1.4	K-Ar	
包古图 I 号岩体	埃达克岩	305 ± 35	锆石 U-Pb(下交点)	
底侵型				
莫斯早特	埃达克岩	268 ± 5	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar(坪年龄)	本文
	埃达克岩	247.8 ± 5	Rb-Sr	李华芹, 2004
	埃达克岩	254.5	K-Ar	305 项目
三岔口	埃达克岩	278 ± 4	锆石 SHRIMP	李华芹, 2004
	埃达克岩	276	Rb-Sr	孙燕, 2002
	埃达克岩	269 ± 17	Rb-Sr(全岩 + 矿物)	芮宗瑶, 1989

* 无岩石化学数据,按采样描述应为富 Mg 安山岩

在 Sr/Y-Y 图解中均落入埃达克岩区(图 4);在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, Sr 呈正异常(图 6),但异常程度低于俯冲型埃达克岩。La/Nb_{2.9} ~ 8.6, Nb、Ta、Ti 负异常程度高于俯冲型埃达克岩。

3 同位素年龄

不同定年方法所测定的两类埃达克岩、富 Nb 玄武岩及富 Mg 安山岩同位素年龄列于表 3 中。它们的同位素年龄明

显分为两组,一组为 $\geq 320\text{Ma}$,相当于早石炭世(石炭纪二分界线年龄 $318.1 \pm 1.3\text{Ma}$, Gradstein *et al.*, 2004)。索尔库都克埃达克岩和富 Nb 玄武岩及沙尔布拉克的富 Mg 安山岩无同位素年龄资料,其产出的地层属中、下泥盆统。由此,新疆北部分布于阿拉套山、博罗霍洛、东天山、青河南、准噶尔陆梁隆起、准噶尔西包古图的埃达克岩、富 Nb 玄武岩及富 Mg 安山岩的形成时代为早石炭世末,而在富蕴周围属中、下泥盆统,它们均属洋壳俯冲型。

阿吾拉勒和东天山三岔口的底侵型埃达克岩同位素年龄 $\leq 280\text{Ma}$ (250~280Ma),属二叠纪。

4 Sr、Nd 同位素组成

两类埃达克岩、高(富)Mg 安山岩及富 Nb 玄武岩的 Sr、Nd 同位素组成列于表 4 中。

俯冲型埃达克岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值范围为 0.512310~0.512819, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为正值,范围+3.40~+9.11,集中分布于+5~+8。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值低,范围为 0.7032~0.7049。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解中集中分布于第二象限,沿地幔排列分布,与世界范围新生代洋壳板片熔融形成的埃达克岩一致(图 7)。富 Nb 玄武岩与之不同, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值较高, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为正值,+3.80~+10.0,其亏损程度高于埃达克岩。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值变化较大,0.7007~0.7063。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解中分布于 1~2 象限上部,呈近水平分布。高(富)Mg 安山岩(闪长岩)与埃达克岩和富 Nb 玄武岩明显不同, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为低正值,+1.59~+3.78, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 变化范围较大,0.7029~0.7061,分布于-1~2 象限,反映了俯冲剥蚀作用。

上述三类岩石的共同特点是 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为正值, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值低, Nd 模式年龄均很低, <900Ma, 反映了它们源区物质与俯冲洋壳的密切关系。

底侵型埃达克岩的 Nd、Sr 同位素组成与俯冲型有较明显的差异,其 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 值较低,0.512360~0.512570, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)+0.75\sim+3.26$, 平均+1.86, 仅一个样品为+5.69; ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 初始值高于俯冲型,为 0.7039~0.7054, 在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解中位于第一象限,在地幔排列线右侧,反映了其成岩过程中受到了下地壳的轻度混染。

5 两类埃达克岩成岩机理及其动力学意义

5.1 俯冲型埃达克岩及组合岩石

本区俯冲型埃达克岩的 Sr、Nd 同位素组成与洋中脊玄武岩及新生代俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩很相似(Defant *et al.*, 1992; Kay *et al.*, 1993; Stern *et al.*, 1996; Petford *et al.*, 1995), 均具有较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和较低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值(图 7), 表明本区的埃达克岩源区物质为洋壳板片。强烈亏

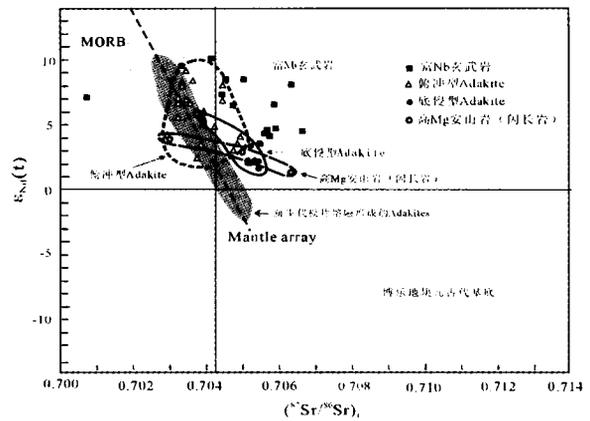


图 7 两类埃达克岩、富 Nb 玄武岩、高 Mg 安山岩

$\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解

Fig. 7 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram of two types of adakites, NEB and HMA

损高场强元素 Nb、Ta、Ti 也反映了它们的岛弧环境。它们的同位素年龄($\leq 320\text{Ma}$)以及产在早、中泥盆统火山岩中,是本区晚古生代多岛洋体系中洋壳分别向西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块(多向)俯冲期,因此,本区较广泛分布的埃达克岩及富 Nb 玄武岩、高(富)Mg 安山岩与晚古生代俯冲的洋壳部分熔融密切相关。轻稀土的强烈富集、Eu 的富集及高场强元素 Nb、Ta、Ti 的亏损表明,在洋壳部分熔融过程中残留相中含石榴子石、金红石,不含斜长石。而洋壳板片的熔融触发于角闪石的逐渐消失。综合石榴子石稳定(1.0Gpa 以上)和金红石稳定(1.5Gpa 以上)的条件,埃达克岩浆形成是在角闪岩向榴辉岩过渡,即 1.0~1.5Gpa 以上的压力(33km~50km 以下)(Defant *et al.*, 1990; Rapp *et al.*, 1991, 1995; Sen *et al.*, 1994; Prouteau *et al.*, 2001; 熊小林等, 2005)。

富 Nb 玄武岩与同一地区俯冲型埃达克岩不同, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值高, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值变化范围大, $\text{Mg}^{\#}$ 较高, Nb、Ta、Ti 含量较高, 轻稀土及 Eu 富集程度较低, 表明其源区具有俯冲洋壳及上覆地幔楔的共同特点, 是俯冲洋壳板片部分熔融形成埃达克质熔体上升过程中交代(熔体-固体反应)的地幔楔橄榄岩发生部分熔融所形成(Sajona *et al.*, 1993, 1996; Kepezinskas *et al.*, 1996)(图 8a)。

高(富)Mg 安山岩(闪长岩)与同一地区俯冲埃达克岩的微量元素、稀土元素及同位素组成均有差异(表 1, 4), 如其 Mg 含量高($\text{Mg}^{\#}$ 高达 70), Cr、Ni、Y、Yb 含量高, Sr/Y 比值降低, Eu 亏损增加; ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值较高(0.7029~0.7061), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低(+1.57~+3.78)。这些特点反映了源区有较多弧前增生物质, 是俯冲过程中受俯冲剥蚀作用(subduction erosion, Kay *et al.*, 2004, 会议报告)的弧前增生棱柱物质与洋壳共同熔融形成的埃达克质岩浆, 并在上升过程中受地幔楔橄榄岩混染作用(Yogodzinski *et al.*, 1995; Keleman *et al.*, 1995; Sen *et al.*, 1994)(图 8a)。

表 4 新疆北部俯冲型与底侵型埃达克岩类的 Sr、Nd 同位素组成

Table 4 Sr and Nd isotope composition of two types of adakites in north Xinjiang

岩石	地点	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$E_{\text{Nd}}(t)$	T_{DM}/Ma	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	资料来源	
俯冲型								
埃达克岩	阿拉套(5)	0.512678 ~ 0.512832	0.512400 ~ 0.512562	+3.4 ~ +6.6	570 ~ 890	0.7035 ~ 0.7042	本文	
	希勒克特哈萨(3)	0.512844 ~ 0.512957	0.512559 ~ 0.512627	+6.83 ~ +8.16	463 ~ 562	0.7033 ~ 0.7044	杨文平等, 2005	
	索尔库都克(3)	0.512624 ~ 0.512676	0.512310 ~ 0.512363	+3.02 ~ +4.06	839 ~ 936	0.7047 ~ 0.7049	本文	
	土屋-延东(7)	0.512730 ~ 0.512963	0.512502 ~ 0.512673	+5.77 ~ +9.11	349 ~ 583	0.7032 ~ 0.7037	芮宗瑶等, 2004	
	阿拉套(4)	0.512889 ~ 0.513032	0.512554 ~ 0.512819	+6.4 ~ +10.0	550 ~ 740	0.7007 ~ 0.7063	本文; Chen et al., 2000	
	索尔库都克(2)	0.512713 ~ 0.512730	0.512403 ~ 0.512424	+4.84 ~ +5.25	719 ~ 763	0.7039 ~ 0.7040	本文	
	准噶尔陆缘(3)	0.512916 ~ 0.512990	0.512591 ~ 0.512653	+7.20 ~ +8.40	454 ~ 597	0.7044 ~ 0.7050	王方正等, 2002	
	骆驼沟(7)	0.512751 ~ 0.512878	0.512398 ~ 0.512539	+3.80 ~ +6.53	463 ~ 705	0.7053 ~ 0.7067	陈丹玲等, 1996; Xia et al., 2004	
	土屋-延东(3)	0.512769 ~ 0.512977	0.512551	+5.90 ~ +9.66	869	0.7034 ~ 0.7039	Xia et al., 2004	
	富 Mg 安山岩	果子沟(1)	0.51266	0.51238	+2.72	764	0.7050	本文
312 国道(1)		0.512564	0.512554	+3.78	707	0.7029	本文	
埃达克岩	底侵型							
	莫斯早特	0.512518 ~ 0.512547	0.51236 ~ 0.51238	+0.75 ~ +1.57	620 ~ 699	0.7054	本文;	
	石英钠长斑岩(3)						李华芹等, 1998	
	特铁达坂	0.512589 ~ 0.512642	0.51241 ~ 0.51247	+2.15 ~ +3.26	472 ~ 571	0.7053	本文	
	石英钠长斑岩(2)							
	黑山头	0.512567 ~ 0.512578	0.512405 ~ 0.512414	+1.98 ~ +2.17	568 ~ 588	0.7051	本文	
	钠长斑岩(2)							
	群吉萨依	0.512556 ~ 0.512570	0.51239 ~ 0.51241	+1.84 ~ +2.09	578 ~ 598	0.7050 ~ 0.7054	本文	
	英安岩(3)							
	三岔口	0.512806	0.51257	+5.69	618	0.7039	本文	
英云闪长岩(1)								

5.2 底侵型埃达克岩

底侵型埃达克岩在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解中位于第一象限, 低正值的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和略高的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值, 显示其源区为源自地幔的、属新生的玄武质物质底侵于壳幔边界。与俯冲型埃达克岩明显不同的是, 在同一地区未发现与底侵埃达克岩同时的富 Nb 玄武岩或高(富) Mg 安山岩(闪长岩), 反映了其源区没有地幔楔的参与。结合同位素年龄和其产出的地层关系, 成岩时代属中、晚二叠世 ($\leq 280\text{Ma}$), 本区在该时期已进入造山过程的后碰撞-后造山阶段, 该阶段埃达克岩浆的形成已与俯冲无关。最可能的机制是玄武质岩浆底侵至壳幔界面, 由于地壳的加厚而发生熔融作用形成(图 8c)。Kay 和 Kay(1991, 1993), 均指出了加厚下地壳可能诱发下地壳熔融; 张旗等(2001)和熊小林等(2001, 2005)均详细论述了玄武质物质底侵于壳幔边界形成埃达克岩浆的过程和条件。新疆北部大量地质、地球物理和地球化学资料提供了该时期发生了底侵作用的证据, 它们主要有: 强烈增厚的地壳, 西天山地壳厚 52~62km, 准噶尔盆地 44~56km(李秋生等, 2001); 复杂的壳幔界面, 天山地区 20km 厚(7~8 层薄互层组成, 赵俊猛等, 2001); 高热流值(天山 100mw·m⁻²), 为塔里木的两倍; 具有幔源特征的晚古生代碱性花岗岩(赵振华等, 1996, Han *et al.*, 1997)、橄榄玄粗岩系火山岩 ($\leq 300\text{Ma}$, Zhao *et al.*, 2004)、基性岩墙群(241~272Ma, 李辛子等 2004)以及基性麻粒岩(279±5Ma, 陈汉林等 2005, 会议摘要)的产出等, 这些资料均一致提供了在晚古生代(二叠纪)时期新疆北部较广泛的底侵作用, 埃达克岩是这种作用的重要标志之一。

5.3 埃达克岩家族及富 Mg 火成岩组合的动力学意义

5.3.1 阿尔泰山南缘的板片窗

富蕴-青河南产出的埃达克岩、富 Nb 玄武岩和高(富) Mg 安山岩, 与该区中泥盆世苦橄岩(MgO 16~26%) (陈毓川等, 2004) 及喀拉通克的苏长岩、橄榄苏长岩(MgO 16~19%), 共同构成了晚古生代较完整的富 Mg 火成岩组合。这种特殊的岩石组合特点表明了本区在晚古生代特殊的动力学背景, 即地热梯度, 暗示本区发生了软流圈物质通过板片窗(slab window)上涌, 其产生的机制可能是俯冲板片发生撕裂、断离、随之软流圈上涌; 或者是洋(盆)脊俯冲至地幔楔下形成软流圈窗(Yogodzinski *et al.*, 2001; Kay *et al.*, 1993)(图 8b)。软流圈窗的形成导致本区形成高地热梯度, 进而形成了高 Mg 的岩浆和相关矿床。

5.3.2 新疆北部晚古生代陆壳增生方式的多样性-复式增生

自本文作者首次发现了阿尔泰山地区晚古生代花岗岩类具有高¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为正值, 并提出其源区物质为新生、不成熟地壳以来(赵振华等, 1989, 1993, 1996), 在东中亚地区显生宙的陆壳增生受到了越来越广泛关注(Jahn *et al.*, 1998, 2000; Han *et al.*, 1997; 洪大卫等, 2000; Wu *et al.*,

2000)。在新疆北部, 除传统的侧向增生方式(岛弧火山岩)外, 也提出了垂向增生方式(韩宝福, 1999; 熊小林等, 2001; Zhao *et al.*, 2000, 2004)。本工作对两类埃达克岩及富 Nb 玄武岩、高(富) Mg 安山岩(闪长岩)的厘定, 揭示了本区晚古生代陆壳增生方式具有明显的多样性(图 8): 在增生的构造过程上, 有泥盆纪-早石炭世晚期洋壳板片的斜俯冲; 俯冲洋壳板片的撕裂、板片窗; 俯冲剥蚀作用, 还有二叠纪时期玄武质物质的底侵; 在增生的物质上, 有地幔楔, 也有洋壳板片、洋壳板片熔体交代地幔楔形成的熔体(NEB)、受俯冲剥蚀作用的弧前增生棱柱物质、受地幔楔混染的洋壳板片熔体(HMA), 及底侵的幔源玄武质物质; 在增生的方向上, 有洋壳板片的侧向斜俯冲, 也有玄武质物质垂向上底侵于壳-幔边界层。这种复式增生应是中亚型造山增生过程的重要特征。

6 两类不同类型埃达克岩的成矿作用

与两类埃达克岩有关, 在新疆北部发育了较广泛的 Cu、Au 成矿作用, 其中与俯冲型埃达克岩有关的 Cu、Au 成矿作用尤为重要, 如东天山的土屋-延东斑岩型矿床与具埃达克岩特点的斜长花岗斑岩有关, 已达大型-超大型规模。在该 Cu 矿带的还有赤湖等 Cu 或 Cu、Au 矿床(点), 也与具埃达克岩特点的斜长花岗斑岩、花岗闪长岩、英云闪长斑岩、闪长岩等有关(张连昌等, 2004; 熊小林等, 2005)。在阿尔泰陆缘南的希勒克特哈腊苏斑岩 Cu 矿与石英闪长斑岩和花岗闪长斑岩有关(杨文平等, 2005)。西准噶尔克拉玛依南的包古图地区的 Cu、Au 矿床与石英闪长岩、花岗闪长斑岩有关。上述 Cu 矿或 Cu、Au 矿床有关的岩石均具有埃达克岩典型的岩石学和地球化学特征, 土屋-延东地区的斑岩 Cu 矿的围岩企鹅山群火山岩具有富 Nb 玄武岩特征。达巴特 Cu 矿、阿希 Au 矿围岩具高 Mg 安山岩特征。

在西天山阿吾拉勒地区, 与底侵型埃达克岩有关也发育了 Cu 的成矿作用, 代表性矿床(点)有尼勒克城南的莫斯早特、努拉赛、克孜克藏、群吉萨依、克孜布拉克、黑山头、109 矿等, 它们均与具埃达克岩典型特点的石英钠长斑岩、钠长斑岩或英安岩有关(赵振华等, 2004); 东天山三岔口斑岩 Cu 矿与具有典型埃达克岩特征的斜长花岗斑岩和英云闪长斑岩有关(熊小林等, 2005)。

与埃达克岩有关的广泛、较大规模 Cu(Au)成矿作用主要与其特殊的成岩机制及成岩构造背景有关。首先, 俯冲的玄武质洋壳含有大量成矿元素 Cu 和 Au, 同时, 俯冲的板片携带大量 Fe₂O₃, 由俯冲洋壳板片熔融形成的埃达克岩浆氧逸度(fO₂)高, 地幔楔的(fO₂)也随之增加, 这有利于 Cu 以硫酸盐形式进入熔体(Mungall, 2002; Oyarzun *et al.*, 2001); 第二是埃达克岩浆富挥发分 S 和 H₂O, 有利于 Cu、Au 的迁移。实验资料表明(Sen *et al.*, 1994; Rapp *et al.*, 1995; Xiong *et al.*, 2005), 埃达克岩浆是角闪岩向角闪榴辉岩相转变时形成, 角闪石的消失形成了富含 H₂O 熔体, 有利于 Cu、Au 等进

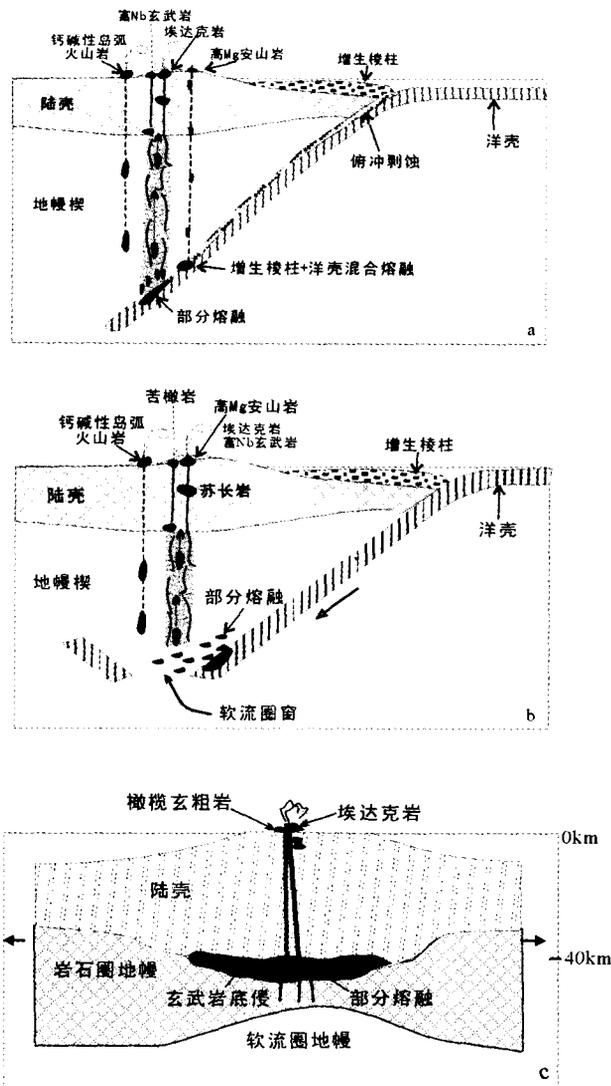


图8 新疆北部晚古生代地壳增生过程示意图
a-洋壳板片俯冲、熔融及相关俯冲剥蚀、交代或混染作用；b-板片窗形成；c-玄武质岩浆底侵作用

Fig. 8 The models of crust growth during late Paleozoic in north Xinjiang

人熔体和迁移。基于上述条件，与埃达克岩有关，无论在全球尺度，还是在区域尺度及矿床尺度上均发育了Cu、Au的大规模成矿作用(Thieblemont *et al.*, 1997; Defant *et al.*, 2001; Oyazun, 2001)，如全球范围的南、北美洲埃达克岩区产出Chuquibambilla、EL Salvador等超大型斑岩Cu矿，在菲律宾群岛和巴布亚新几内亚北部、巴拿马西部的超大型或浅成热液型Cu、Au矿床；在地区和矿床中，斑岩或浅成热液Cu、Au矿床的主岩是埃达克岩，非埃达克岩则成矿规模小。

底侵作用形成的埃达克岩由于其成岩过程中可能受下地壳混染，岩浆规模较小，以及岩浆中挥发分含量较低等因素，其Cu、Au成矿作用较俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩要弱，成矿规模相对较小，分布范围较局限。

Defant 2001年曾指出埃达克岩可以作为找矿标志，它与富Nb玄武岩对于找金矿和铜矿可以与用金伯利岩找金刚石相媲美。北疆地区埃达克岩家族岩石的广泛分布，显示了Cu、Au的成矿作用的巨大潜力，在今后找矿和勘探中应引起足够重视。

7 结论

新疆北部分布有两类埃达克岩，一是俯冲型，形成于早、中泥盆世-早石炭世晚期(≥320Ma)，属岛弧环境。除埃达克岩外，还有富Nb玄武岩(NEB)、高(富)Mg安山岩(闪长岩)(HMA)，组成了埃达克岩家族。此类埃达克岩既有高Si型，也有低Si型，均为过铝质， $Mg^{\#}$ 值较高， $\epsilon_{Nd}(t)$ 均为较高正值。第二类埃达克岩为底侵型，形成于中、晚二叠世(≤280Ma)，属后造山环境，未见有同时的富Nb玄武岩和富Mg安山岩产出，而与橄辉玄武岩密切组合。与俯冲型相比较，均为高Si型，为准铝-弱过铝值， $Mg^{\#}$ 值一般较低， $\epsilon_{Nd}(t)$ 均为较低正值。

两类埃达克岩及NEB、HMA的产出，以及在阿尔泰山南缘与苦橄岩的密切时空组合，揭示了中亚型造山陆壳增生的多样性：在增生构造过程上，有洋壳板片俯冲、俯冲板片撕裂、板片窗、俯冲剥蚀作用及玄武质物质的底侵作用；在增生方向上，有洋壳板片的侧向俯冲，也有玄武质物质垂向上底侵于壳-幔边界；在增生物质上，有洋壳板片、地幔楔、弧前增生棱柱、受地幔楔混染的洋壳板片熔体、板片熔体交代地幔楔形成的熔体，还有底侵的玄武质物质。

与两类埃达克岩有关，本区发育了较广泛的Cu、Au成矿作用，部分达到大型-超大型规模，显示北疆地区埃达克岩家族巨大的成矿潜力，应在找矿勘探上予以足够重视。

References

Abratis M, Womer G. 2001. Ridge collision, slab-window formation, and the flux of Pacific asthenosphere into the Caribbean realm. *Geology*, 29:127-130

Aguil n-Robles A, Caimus T, Bellon H, Maury R C, Cotton J, Bourgois J, Michaud F. 2001. Late Miocene adakite and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico; Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California. *Geology*, 29: 531-534

Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144-146

Bisig T, Clark A H, James K, Lee W, von Quardt A. 2003. Petrogenetic and metallogenetic responses in Miocene slab flattening: new constraints from the EL indio-Pascua Au, Ag, Cu belt, Chile/Argentina. *Mine. Depo.* 38:844-862

Che Z C, Liu L, Liu H F, Luo J H. 1996. Review on the Ancient Yili Rift, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 12: 478-490 (in Chinese with English abstract)

Chen D L, Liu L, Che Z C, Luo J H. 2001. Geochemical characteristics and tectonic implication of Carboniferous volcanites in the Luotouogou area of Middle Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 378-384

Chen J F, Zhou T X, Xie Z, Zhang X, Guo X S. 2000a. Formation of

- positive $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ granitoids from the Alataw Mountains, Xinjiang, China, by mixing and fractional crystallization; implication for Phanerozoic crustal growth. *Tectonophysics*, 328: 53–67
- Chen W M, Qu X M. 2002. Host rocks of Tuwu-Yandong (porphyry) copper deposit in Tianshan Mountains. *Mineral Deposits*, 21: 331–341
- Chen Y C, Liu D Q, Wang D H, Tang Y L, Zhou Y H, Chen Z Y. 2004. Discovery and geological significance of picritic rocks in north Junggar, Xinjiang. *Geological Bull. of China*, 23: 1059–1065
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Defant M J, Richerson P M, Deboer J Z, Stewart R H, Maury R C, Bellon H, Drummond M S, Feigenson M D, Jacques D. 1991. Dacite genesis via both slab melting and differentiation; petrogenesis of La Yegueda volcanic complex, Panama. *J. Petrol.*, 32: 1101–1142
- Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, *et al.* 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: An overview. *Journal of Geological Society (London)*, 149: 569–579
- Defant M J and Drummond M S. 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547–550
- Defant M J, Kepezhinskas P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS*, 82: 62–69
- Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q, Xiao L. 2002. Adakites: Some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 129–142
- Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskas P K. 1996. The petrogenesis of slab derived trondhjemite-tonalite-dacite/ adakite magmas. *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.* 87: 205–216
- Gonzalez-Partida E, Levressea G, Carrillo-Chavez A, Cheilletzb A, Gasquetb D, Jones D. 2003. Paleocene adakite Au-Fe bearing rocks, Mezcala, Mexico; evidence from geochemical characteristics. *J. of Geochemical Exploration*, 80: 25–40
- Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, Bleeker W, Lourens J L. 2004. A new geologic time scale with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 2: 83–100
- Gufscher M A, Maury R C, Eissen J P, Bourdon E. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*. 28: 535–538
- Han B F, Ji J Q, Song B, Chen L H, Li Z H. 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49: 2424–2429
- Han B F, Wang S G, Jahn B M, Hong D W, Kagami H, Sun Y L. 1997. Depleted-mantle magma source for the Ulungur River A-type granites from north Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implication for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138: 135–159
- Hollings P, Kerrich R. 2000. An Archean arc basalt-Nb-enriched basalt-adakite association: the 2.7 Ga confederation assemblage of the Birch-Uchi greenstone belt, Superior Province. *Contrib. to Mineralogy and Petrology*, 139: 208–226
- Hong DW, Wang SG, Xie XL, Zhang JS. 2000. Genesis of positive $\epsilon(\text{Nd}, t)$ granitoids in the Da Hinggan Mts-Mongolia Orogenic belt and growth of continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7: 441–456 (in Chinese with English abstract)
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, Rui Z Y, Mo X X. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 139–155
- Jahn B M, Griffin W L, Windley B F. 2000b. Continental growth in the Phanerozoic; evidence from Central Asia special issue. *Tectonophysics*, 328: 1–227
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. 2000a. Massive granitoid generation in Central Asia; Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Epidotes*, 23: 82–92
- Kamber B S, Ewart A, Collerson K D, Bruce M C, McDonald D. 2002. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archean crustal growth models. *Mineral Petrol.*, 144: 38–56
- Kay R W, Kay S M. 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 80: 259–278
- Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177–189
- Kay S M, Ramos V A, Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks of slab melting prior to ridge trench collision in southern South America. *The Journal of Geology*, 101: 703–714
- Kelemen P B. 1995. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120: 1–19
- Kelemen P B, Hanghol K, Green A R. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In Rudnick R L, Holland H D, Turekian K K; *Treatise on geochemistry*, Vol. 3, Amsterdam: Elsevier, 593–649
- Kepezhinskas P K, Defant M J, Drummond M. 1995. Na Metasomatism in the island-arc mantle by slab melt-peridotite interaction: evidence from mantle interaction: evidence from mantle xenoliths in the north Kamchatka arc. *J. of Petrology*. 36: 1505–1527
- Kepezhinskas P K, Defant M J, Drummond M S. 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 60: 1217–1229
- Kepper H. 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids. *Nature*, 380: 237–240
- Leaman W P, Smith D R, Hildreth W, Palacz Z & Rogers N. 1990. Compositional diversity of Late Cenozoic basalts in a transect across the Southern Washington Cascades; implications for subduction zone magmatism. *Journal of Geophysical Research*. 95: 19561–19582
- Li H Q, Xie C F, Chang H L, *et al.* 1998. Study on Metallogenetic Chronology of Nonferrous and Precious Metallic Ore Deposits in North Xinjiang, China, Beijing: Geological Publishing House, 107–127 (in Chinese with English abstract)
- Li Q S, Lu D R, Gao R, Zhang Z Y, Liu W, Li Y K, Li J W, Fan J Y, Xiong X M. 2001. An integrated study of deep seismic sounding profiling along Xinjiang global geoscience transect (Quanshuigou-Dushanzi). *Acta Geoscientia Sinica*, 22: 534–540 (in Chinese with English abstract)
- Li W M, Ren B C, Yang X K, *et al.* 2002. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significances in Eastern Tianshan region. *Xibei Geology*, 35: 41–64. (in Chinese with English abstract)
- Li X Z, Han B F, Ji J Q, Li Z H, Liu Z Q, Yang B. 2004. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarm from Xinjiang, China. *Geochimica*, 33: 574–584 (in Chinese with English abstract)
- Liu H T, Zhang Q, Liu J M, Ye J, Zeng Q D, Yu C M. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits; a possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessment. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 205–218 (in Chinese with English abstract)
- Makovsky Y, Kelemen S L, Ratschbacher L, Ratschbacher L, Aisdorf D. 1999. Midcrustal reflector on INDEPTH wide-angle profiles-an ophiolite slab beneath the India-Asia suture in southern Tibet. *Tectonics*. 18: 793–808
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*. 46: 411–429
- Martin H, Moyen J F. 2002. Secular changes in TTG composition as

- markers of the progressive cooling of the Earth. *Geology*, 30: 319 – 322
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1 – 24
- McCarro J J and Smellie J L. 1998. Tectonic implications of fore-arc magmatism and generation of high-magnesian andesites: Alexander Island, Antarctica. *Journal of Geological Society, London*, 155: 269 – 280
- Morris J D, Ryan J G. 2003. Subduction zone processes and implications for changing composition of the upper and lower mantle. In Holland H D and Turekian K K (ed): *Treatise on geochemistry (Vol. 2)*, Amsterdam: Elsevier, 456 – 462
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30: 915 – 918
- Oyarzún R, Márquez A, Lillo J, López I., Rivera S. 2001. Giant vs small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic vs normal calc-alkaline magmatism. *Mineral. Deposita*, 36: 794 – 798
- Polat A, Kerrich R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-Archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: implications for Late Archean subduction zone petrogenetic processes. *Contrib Mineral Petrol*, 141: 36 – 52
- Polat A, Kerrich R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-Archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: implications for Late Archean subduction zone petrogenetic processes. *Contrib. Miner. Petrol.*, 141: 36 – 52
- Prouteau G, Scallet B, Pichavant M, Maury R C. 2001. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts in subduction zones. *Nature*, 410: 197 – 200
- Rapp R P, Watson E B, Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemite and tonalite. *Precambrian Res*, 51: 1 – 25
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 – 32 kbar implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 38: 891 – 931
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335 – 356
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature*, 425: 605 – 609
- Reagan M K, & Gill J B. 1989. Coexisting calcalkaline and high-niobium basalts from Turrialba volcano, Costa Rica: implications for residual titanates in arc magma sources. *Journal of Geophysical Research*, 94: 4619 – 4633
- Reich M, Parada M A, Palacios C, Dietrich A, Schultz F, Lehmann B. 2003. Adakite-like signature of Late Miocene intrusions at the Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of central Chile: metallogenetic implications. *Mineral Deposita*, 38: 876 – 885
- Rui Z Y, Zhang L S, Chen Z Y, Wang L S, Liu Y L and Wang Y T. 2004. Approach on source rock or source region of porphyry copper deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 229 – 238 (in Chinese with English abstract)
- Sajona F G, Maury R C, Bellon H, Cotton J, Defant M. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao (Philippines). *J. of Petrology*, 37: 693 – 726
- Sajona F G, Maury R C. 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *Earth and Planetary Sciences*, 326: 27 – 34
- Schmidt M W, Poli S. 2003. Generation of mobile components during subduction of oceanic crust. in Rudnick R L, Holland H D (ed): *Treatise on geochemistry*, Vol. 3, Amsterdam: Elsevier, 567 – 588
- Sen C, Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117: 394 – 409
- Shen Yuanchao, Jin Chengwei *et al.* 1993. *Magmatism and gold mineralization in western Junggar*. Beijing: Science Press, 45 – 78 (in Chinese)
- Sillitoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*. 44: 373 – 388
- Smithies R H, Champion D C. 2000. The Archean high-Mg diorite suite: links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implication for early Archean crustal growth. *J. Petrol.*, 41: 1653 – 1671
- Smithies R H, Champion D C, Cassidy K F. 2003. Formation of Earth's early Archean continental crust. *Precambrian Res.* 127: 89 – 101
- Stern C R. 1974. Melting products of olivine tholeiite basalt in subduction zones. *Geology* 2: 227 – 230
- Stern C R, Kilian R R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Austral Volcanic Zone. *Contrib. Miner. Petrol.*, 123: 263 – 281
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In Saunders, AD and Norry MJ (eds.), *Implications for Mantle Composition and Processes, Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42, 313 – 345
- Tatsumi Y. 1981. Melting experiments on a high-magnesian andesites. *Earth and Planetary Science Letters*, 54: 357 – 365
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. 1997. Epithermal and porphyry deposits: the adakitic connection. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 325: 103 – 109
- Verma S P, Nelson S A. 1989. Isotopic and trace element constraints on the origin and evolution of alkaline and calc-alkaline magmas in the northwestern Mexican volcanic belt. *Journal of Geophysical Research*. 94: 4531 – 4544
- Wang F Z, Yang M Z, Zheng J P. 2002. Geochemical characteristics and geological environment of basement volcanic rocks in Luliang, central region in Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 9 – 16 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H, Xu J F, Bai Z H, Xiong X L, Dai T M, Li C F, Chu Z Y. 2005a. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan Range (western China): Implication for Phanerozoic crustal growth of Central Asia Orogenic Belt. *Chemical Geology* (submitted)
- Wang Q, Zhao Z H, Bai Z H, Bao Z W, Xu J F, Xiong X L, Mei H J, Wang Y X. 2003a. 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: 2108 – 2115
- Wang Y, Zhang Q, Qian Q. 2000. Adakite: Geochemical characteristics and tectonic significances. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251 – 256 (in Chinese with English abstract)
- Wang, H, Pen S L, Lai J Q, Shao Y J. 2000. Determination of volcanic edifice and its geological significance to Dabate copper ore deposit in Wenquan County, Xinjiang. *Contrib. Geology and Mineral Resource Research*, 15: 346 – 350
- Winther K T. 1996. An experimentally-based model for the origin of tonalite and trondhjemitic melts. *Chemical Geology*, 127: 43 – 59
- Wu F Y, Ge W C, Sun D Y. 2002. The definition, diacrimination of adakites and their geological role. in: Xiao Q H, Deng J F, Ma D Q *et al.*, eds. *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 172 – 191 (in Chinese)
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, Sun D Y. 2000. Phanerozoic crustal

- growth: U Pb and Sr Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89–113
- Wyman D A, Ayer J A, Devaney J R. 2000. Niobium-enriched basalts from the Wabigoon subprovince, Canada: Evidence for adakitic metasomatism above an Archean subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 179: 21–30
- Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, Li X M, Ma Z P, Wang L S. 2004a. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 419–433
- Xiong X L, Cai Z Y, Niu H C, Chen Y B, Wang Q, Zhao Z H, Wu J H. 2005. The late Paleozoic adakites in eastern Tianshan area and their metallogenetic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 967–976 (in Chinese with English abstract)
- Xiong X L, Zhao Z H, Bai Z H, Mei H J, Wang Y X, Wang Q, Xu J F, Bao Z W. 2001. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust. *Chinese Science Bulletin*, 46: 811–817
- Xu J F, Mei H J, Yu X Y, Bai Z H, Niu H C, Chen F R, Zhen Z P, Wang Q. 2001b. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: Products of slab melting, *Chinese Science Bulletin*, 46: 1312–1316
- Xu J F, Shinjio R, Defant M J, Wang Q, Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 12: 1111–1114
- Xu X Y, Ma Z P, Xia L Q, Li X M, Xia Z C, Wang L S. 2005. Accurate dating of Bayingou ophiolite in northern Tianshan mountains and its tectonic significance. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 27: 17–20 (in Chinese with English abstract)
- Yang W P, Zhang Z C, Zhou G, Yan S H, He L X, Chen B L. 2005. Discovery of the Xileketehalsu porphyry copper deposit on the southern margin of the Altay copper metallogenetic belt. *Geology in China*, 32: 107–114 (in Chinese with English abstract)
- Yogodzinski G M, Lees J M, Churkova T G, Dorondor F, Woerner G, Volynets N. 2001. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges, *Nature*, 409: 500–504
- Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, Koloskov A V, Kay S M. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geological Society of America Bulletin*, 107: 505–519
- Yogodzinski G M, Volynets O N, Koloskov A V, Seliverstov N I. 1994. Magnesian andesites and the subduction component in a strongly calcalkaline series at Pip Volcano, far western Aleutians. *J. of Petrology*, 34: 163–204
- Yogodzinski G M, Kelemen P B. 1998. Slab melting in the Aleutians: implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt, *Earth and Planetary Science Letters*, 158: 53–65
- Zhang H X, Niu H C, Yu X Y, Sato H, Ito J, Shan Q. 2003. Geochemical characteristics of the Shaerbulake boninites and their tectonic significance, Fuyun County, northern Xinjiang, China, *Geochimica*, 32: 155–160 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H X, Niu H C, Sato H, Yu X Y, Shan Q, Zhang B Y, Ito J, Nagao T. 2005. Late Paleozoic adakites and Nb-enriched basalts from northern Xinjiang, northwest China: Evidence for the southward subduction of the Paleo-Asian Oceanic Plate. *The Island Arc*, 14: 55–68
- Zhang L C, Qin K Z, Ying J F, Xia B and Shu J S. 2004. The relationship between ore-forming processes and adakitic rock in Tuwu-Yandong porphyry copper metallogenetic belt, eastern Tianshan Mountains. *Acta Petrologica*, 20 (2): 259–268. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qin K Z, Wang Y L, Zhang F Q, Liu H T, Wang Y. 2004b. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 195–204 (in Chinese with English abstract)
- Zhao J M, Liu G D, Lu Z X, Zhang X K, Zhao G Z. 2003. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin. *Tectonophysics*, 376: 199–239
- Zhao Z H, Wang Z G, Zou T R, Masuda A. 1993. The REE, isotopic composition of O, Pb, Sr and Nd and diagenetic model of granitoids in Altay region. in Tu G ed. "New improvement of solid geosciences in northern Xinjiang, Beijing: Science Press, 239–266 (in Chinese)
- Zhao Z H, Bai Z H, Xiong X L, Mei H J, Wang Y X. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronological study of Late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang. *Geochimica*, 32: 317–327 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Z H, Xiong X L, Wang Q, Bai Z H, Mei H J. 2004a. A case study on porphyry Cu deposit related with adakite quartz albite porphyry in Moszaote, Western Tianshan, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 249–258 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Z H, Xiong X L, Wang Q, Bai Z H, Xu J F, and Qiao Y L. 2004b. The Association of Late Paleozoic Adakitic Rocks and Shoshonitic Volcanic Rocks in Western Tianshan, China. *Acta Geologica Sinica*, 78: 68–72

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: 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: 378–384
- 陈文明, 曲晓明. 2002. 论东天山土屋-延东(斑岩)铜矿的容矿岩. *矿床地质*, 21: 331–340
- 陈毓川, 刘德权, 王登红, 唐延龄, 周汝洪, 陈振宇. 2004. 新疆北准噶尔苦橄岩的发现及其地质意义. *地质通报*, 23(11): 1060–1065
- 韩宝福, 何国琦, 王式洗. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. *中国科学(D辑)*, 29(1): 16–21
- 洪大卫, 王式洗, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon(\text{Nd}, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7: 441–456
- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲晓明, 黄伟. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜带: 埃达克质斑岩成因与构造控制. *岩石学报*. 20(2): 239–248
- 李华芹, 谢才富, 常海亮等. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学. 北京: 地质出版社, 107–127
- 李锦轶, 王克卓, 李文铅, 郭华春, 宋彪, 王瑜. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查. *新疆地质*, 20(4): 295–301
- 李秋生, 卢德源, 高锐, 张之英, 刘文, 李英康, 李敬卫, 范景义, 熊贤明. 2001. 新疆地学断面(泉水沟-独山子)深地震测深成果综合研究. *地球学报*. 22(6): 534–540
- 李文明, 任秉琛, 杨兴科等. 2002. 东天山中酸性侵入岩浆作用及其地球动力学意义. *西北地质*, 35(4): 41–64
- 李辛子, 韩宝福, 季建清, 李宗怀, 刘志强, 杨斌. 2004. 新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和 K-Ar 年代学. *地球化学*, 33(6): 574–584
- 刘德权, 陈毓川, 王登红, 唐延龄, 周汝洪, 王金良, 李华芹, 陈富文. 2003. 土屋-延东铜矿田与成矿有关问题的讨论. *矿床地质*, 22(4): 334–344

- 刘红涛, 张旗, 刘建明, 叶杰, 曾庆栋, 于昌明. 2004. 埃达克岩与斑岩铜矿-浅成热液金矿: 有待深入研究的岩浆成矿关系. 岩石学报, 20(2): 205-218
- 刘志强, 韩宝福, 李建清, 李宗怀. 2005. 新疆阿拉套山东部后碰撞岩浆活动的时代、地球化学性质及其对陆壳垂向增长的意义. 岩石学报, 21(3): 623-639
- 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
- 芮宗瑶, 张立生, 陈振宇, 王龙生, 刘玉琳, 王义天. 2004. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨. 岩石学报, 20(2): 229-238
- 沈远超, 金成伟等. 1993. 西准噶尔地区岩浆活动与金矿化作用. 北京: 科学出版社, 45-78
- 舒良树, 朱文斌, 王博, Faure M, Charvet J, Cluzel D. 2005. 新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷和 underwater 滑塌构造. 岩石学报, 21(1): 25-36
- 王核, 彭省临, 赖健清, 邵拥军. 2000. 新疆温泉达巴特铜矿火山机构的厘定及其意义. 地质找矿论丛, 15: 346-350
- 王核, 赵振华, 白正华, 熊小林, 梅厚钧, 许继峰, 包志伟, 王一先. 2003. 新疆阿拉套山石炭纪埃达克岩、富 Nb 岛弧玄武岩: 板片熔体与地幔橄榄岩相互作用及地壳增生. 科学通报 48(2): 1342-1349
- 王焰, 张旗, 钱青. 2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义. 地质科学, 35(2): 251-256
- 吴福元, 葛文春, 孙德有. 2002. 埃达克岩的概念、识别标志及其地质意义. 见: 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 172-191
- 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
- 熊小林, 蔡志勇, 牛贺才, 陈义兵, 王强, 赵振华, 吴金花. 2005a. 东天山晚古生代埃达克岩成因及铜金成矿意义. 岩石学报, 21(3): 967-976
- 熊小林, Adam J, Green T H, 牛贺才, 吴金花, 蔡志勇. 2005b. 变质玄武岩部分熔体微量元素特征及埃达克岩熔体产生条件, 中国科学, D 辑, 35(9): 837-846
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 王一先, 王强, 许继峰, 包志伟. 2001. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生. 科学通报, 46(4): 281-287
- 徐学义, 马中平, 夏林圻, 李向民, 夏祖春, 王立社. 2005. 北天山巴音沟蛇绿岩形成时代的精确厘定及意义. 地球科学与环境学报, 27(2): 17-20
- 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 白正华, 牛贺才, 陈繁荣, 郑作平, 王强. 2001. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩的发现及其大地构造意义. 科学通报, 46(8): 684-687
- 王方正, 杨梅珍, 郑建平. 2002. 准噶尔盆地陆梁地区基底火山岩的岩石地球化学及其构造环境. 岩石学报, 18(2): 9-16
- 杨文平, 张招崇, 周刚, 闫升好, 何立新, 陈柏林. 2005. 阿尔泰铜矿带南缘希勒克特哈拉苏斑岩铜矿的发现及其意义, 中国地质, 32(1): 107-114
- 张海洋, 牛贺才, Sato H, 单强, 于学元, Ito J, 张旗. 2004. 北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚洲洋板块向南俯冲的证据. 高校地质学报, 10(1): 106-113
- 张海洋, 牛贺才, 于学元, Sato H, Ito J, 单强. 2003. 新疆北部富蕴沙尔布拉克斑岩的地球化学特征及构造意义, 地球化学, 32(2): 155-180
- 张连昌, 秦克章, 英基丰, 夏斌, 舒建生. 2004. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系, 岩石学报, 20(2): 259-268
- 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面. 岩石学报, 20(2): 195-204
- 赵俊猛, 刘国栋, 卢造勋, 张先康, 赵国泽. 2001. 天山造山带与准噶尔盆地壳幔过渡带及其动力学含义. 中国科学(D 辑), 31(4): 272-282
- 赵振华, 白正华, 熊小林, 梅厚钧, 王一先. 2003. 西天山晚古生代火山-浅侵位火成岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素定年. 地球化学, 32(4): 317-327
- 赵振华, 熊小林, 王强, 白正华, 梅厚钧. 2004. 新疆西天山莫斯早特石英钠长斑岩铜矿床——一个与埃达克质岩石有关的铜矿实例. 岩石学报, 20(2): 249-258