

天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩：对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义*

王强¹ 赵振华¹ 许继峰¹ Derek A. WYMAN² 熊小林¹ 资峰¹ 白正华¹
WANG Qiang¹, ZHAO ZhenHua¹, XU JiFeng¹, Derek A. WYMAN², XIONG XiaoLin¹, ZI Feng¹ and BAI ZhengHua¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学与地球化学重点实验室, 广州 510640

2. 悉尼大学地球科学学院地质与地球物理系, 新南威尔士 2006, 澳大利亚

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. School of Geosciences, Division of Geology and Geophysics, The University of Sydney, NSW 2006, Australia

2005-11-22 收稿, 2005-12-09 改回.

Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Wyman DA, Xiong XL, Zi F and Bai ZH. 2006. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 11-30

Abstract Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched arc basalt and basaltic andesite (NEB) suites occur in the Northern Tianshan area (Xinjiang), many are associated with copper (gold) deposits (e. g., Dabate, Axi, Tuwu-Yandong, Chihu, etc). The adakites are characterized by high $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratios, high Sr but low Y and Yb contents, positive Sr anomalies, Nb and Ti depletions but no significant Eu anomalies. The high-Mg andesites (or diorites), documented for the first time in this study, are characterized by similar chemical signatures but display relatively high MgO, Cr and Ni contents. It is notable that the Axi high-Mg andesites are similar to the sanukitoid of the Cenozoic Setouchi arc volcanic belt in southeastern Japan. The NEBs are sodium-rich but potassium-poor, and differ from the vast majority of normal arc basalts in their higher Nb/La ratios and minor negative to positive anomalies in Ba, Nb and Ti. The adakites have $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (+3.4 ~ +9.0) and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ratios (0.7032 ~ 0.7043). The NEBs exhibit more variable $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.6 ~ +11.6) and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ratios (0.7007 ~ 0.7067). Our study suggests that the Carboniferous adakite-high-Mg andesite-NEB suites in the Northern Tianshan area are an example of the adakite metasomatic arc volcanic (or magmatic) series. The adakites were most probably derived by partial melting of subducting young oceanic crust of the Carboniferous Northern Tianshan Ocean. Additionally, slab melts and minor fluids derived from the subducting slab likely metasomatized or interacted with mantle wedge peridotites. Partial melting of the metasomatized mantle wedge peridotites was probably triggered by these processes, which led to the formation of the NEBs. Conversely, addition of a mantle component to the slab melts ultimately led to the formation of high-Mg andesites. Therefore, the Carboniferous adakite-high-Mg andesite-NEB suites in the Northern Tianshan area suggest that: (1) in the Carboniferous, the Northern Tianshan area was in an arc rather than continental rift setting; (2) lateral accretion processes must have dominated crustal growth in the Tianshan area in the Carboniferous; (3) partial melting of subducting oceanic crust played an important role in this crustal growth along with the depleted upper mantle; (4) owing to their high oxygen fugacity (f_{O_2}), the interaction of slab-derived adakitic magmas with mantle wedge peridotites may have caused decomposition of metal sulfides, thereby allowing Cu (or Au) to enter the magmas. This process may represent the fundamental reason why Cu (or Au) mineralization is closely associated with many adakites, high-Mg andesites and NEBs in the Northern Tianshan area.

Key words Adakite, Sanukitoid, High-Mg andesite, Nb-enriched basaltic rocks, Crustal growth, Porphyry copper deposit, Au deposit, Xinjiang

* 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409803)、国家自然科学基金项目(40421303、40372041、40572042、40425003)和中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-122, KZCX2-SW-117 和 A15-041107)的资助。

第一作者简介: 王强, 男, 1971年1月生, 博士, 副研究员, 岩浆岩岩石学与地球化学, E-mail: wqiang@gig.ac.cn

摘要 新疆天山北部地区存在有石炭纪的埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 玄武质岩组合,并且其中许多岩石与铜(金)矿床伴生(如达巴特、阿希、土屋-延东、赤湖,等等)。埃达克岩富钠、高 Sr 但亏损 Y 与 Yb,无明显 Eu-正 Eu 异常以及正 Sr 异常与 Nb、Ti 亏损。高镁安山(闪长)岩是本次研究首次报道的,这些岩石无明显 Eu-正 Eu 异常以及 Nb、Ti 亏损,普遍具有高的 MgO 和 Cr、Ni 含量,其中阿希金矿区一些样品类似于日本西南新生代 Setouchi 弧火山岩带中的赞岐岩类。富 Nb 玄武质岩富钠贫钾,具有微弱负-正 Ba、Nb 和 Ti 异常以及高的 Nb/La 比值,不同于大多数正常岛弧玄武岩。天山北部地区石炭纪埃达克岩具有高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.4 ~ +9.0) 和低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.7032 ~ 0.7043)。富 Nb 玄武质岩具有变化的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.6 ~ +11.6) 和 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.7007 ~ 0.7067)。我们的研究表明,天山北部地区石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 玄武质岩组合可能是“埃达克岩交代的岛弧岩浆岩系列”。埃达克岩最有可能由石炭纪北天山洋的年轻洋壳在俯冲过程中熔融形成。另外,俯冲板片产生的熔体以及所释放的少量流体在上升过程中可能交代地幔楔橄榄岩或与其发生反应:一方面,触发地幔楔橄榄岩发生熔融形成富 Nb 岛弧玄武质岩;另一方面,地幔组分迅速进入到板片熔体中,导致其地幔组分增加,乃至形成高镁安山岩。因此,天山北部地区石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 玄武质岩组合表明:(1)天山北部地区石炭纪可能为岛弧环境而非裂谷环境;(2)天山地区石炭纪的地壳生长可能以侧向增生为主;(3)除了亏损地幔之外,俯冲洋壳的熔融可能也在地壳的生长中发挥了重要的作用;(4)俯冲板片产生的埃达克质岩浆具有高的氧逸度,而与其地幔楔橄榄岩的强烈相互作用将导致地幔中的金属硫化物分解,成矿金属元素进入到岩浆中。这可能是新疆北部铜金矿化与一些埃达克岩、高镁安山(闪长)岩或富 Nb 岛弧玄武质岩密切共生的基本原因。

关键词 埃达克岩;赞岐岩类;高镁安山岩;富 Nb 玄武质岩;地壳生长;斑岩铜矿;金矿;新疆

中图分类号 P588.145; P618.41; P618.51

1 引言

天山北部存在大面积的石炭纪岩浆岩,其中相当一部分岩石与铜金等成矿作用极为密切(如,李锦轶等,2002;李文明等,2002;毛景文等,2002;芮宗瑶等,2002;Qin KZ *et al.*, 2006; Wang JB *et al.*, 2004),如土屋-延东、赤湖、喇嘛苏、达巴特、莱历斯高尔斑岩铜矿以及阿希岩浆热液金矿床等。然而,这些石炭纪岩浆岩究竟是形成于岛弧环境(如,李锦轶等,2002; Zhou MF *et al.*, 2004; 朱永峰等,2005,等等),还是裂谷环境(车自成等,1996;陈丹玲等,2001;顾连兴等,2000; Xia LQ *et al.*, 2004a)或与地幔柱活动有关(夏林圻等,2004),至今仍存在激烈的争论。我们对天山北部的部分岩浆岩进行了年代学与岩石地球化学研究,并结合前人的一些研究成果,发现天山北部石炭纪岩浆岩中存在埃达克岩-高镁安山(或闪长)岩-富 Nb 玄武质岩组合。如果该岩浆组合是“埃达克岩交代的弧火山岩系列”(adakite metasomatic arc volcanic series) (Defant MJ and Kepezhinskas P, 2001),那么我们的研究将会为解决上述争论提供重要的岩石学证据。

2 地质背景

天山造山带属于中亚造山带的一部分,夹于准噶尔板块与塔里木板块之间,在其南北两侧有两条晚古生代的缝合带(图1)。这两条缝合线以一些不连续分布的蛇绿岩或榴辉岩作为标志(肖序常等,1992;何国琦等,1994; Gao J *et al.*, 1998, 1999; Gao J and Klemd R, 2000, 2003; 李锦轶等, 2002; 董云鹏等,2005)。天山北侧晚古生代的岩浆岩主要形成于石炭纪(李华芹等,1998; Chen JF *et al.*, 2000a; 李文

明等,2002; 刘德权等,2003; Xia LQ *et al.*, 2004a; 朱永峰等,2005),但也有一些形成于二叠纪(赵振华等,2003; Han BF *et al.*, 2004; Zhou MF *et al.*, 2004; 刘志强等,2005)。一些研究表明,在这些岩浆岩中发现有埃达克岩(Xiong XL *et al.*, 2001; Wang Q *et al.*, 2003a, 2006a; 刘德权等,2003; 张连昌等, 2004; 熊小林等, 2005)以及富 Nb 玄武质岩(Wang Q *et al.*, 2003a, 2006a)。我们对天山北部的阿拉套、达巴特、果子沟、阿希、巴音沟(北独库公路)、巴仑台-骆驼沟以及延东-土屋等地区进行了考察(图1),并结合前人的研究资料(车自成等,1996;陈丹玲等,2001;李文明等,2002;陈文明和曲晓明,2002;芮宗瑶等,2002,2004; Xia LQ *et al.*, 2004a),发现上述地区除了有埃达克岩、富 Nb 玄武质岩外,还存在高镁安山(闪长)岩。

3 分析方法

我们测定火山岩年龄采用全岩以及长石斑晶 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 方法。样品用纯铝箔包装,叠放成四方柱状,样品间插放标样(ZBH-25,黑云母),再用纯铝箔包装后放入玻璃安瓶密封,由中国原子能研究院将安瓶用锡包裹后半部装入铝罐,置于反应堆照射 2.387 天。氩同位素组成在桂林矿产地质研究院 MM-1200 气体质谱上测定。详细分析流程见戴撞模和洪阿实(1982)。对于进行主量、微量元素分析的样品,先将火山岩样品碎成小片,然后放到稀盐酸中浸泡一个小时,去掉次生的碳酸盐矿物,然后用去离子水在超声波中清洗样品。阿拉套地区的两个样品的主量元素在湖北地矿局地质实验研究所用 X 荧光光谱分析,分析误差小于 2%。这两个样品的微量元素在中国地质大学(武汉)分析,详细的分析流程见 Hu AQ *et al.* (2000),微量元素分析精度优于 3%。其

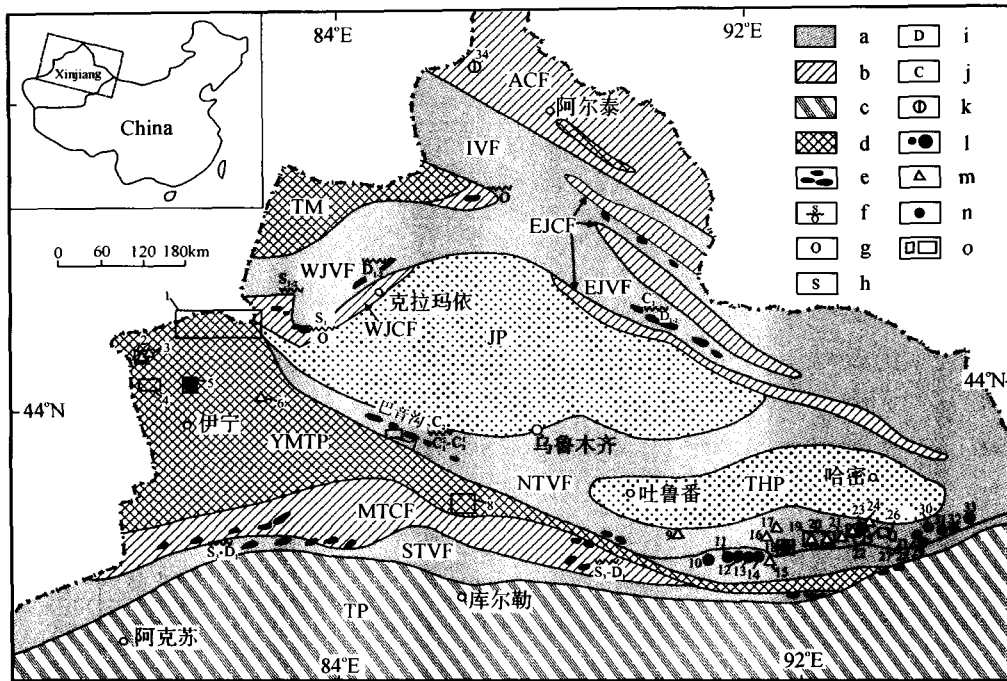


图1 新疆北部的构造单元和金属矿床示意图(肖序常等, 1992; Qin KZ *et al.*, 2002)

a-晚古生代的褶皱带, b-早-中古生代的褶皱带, c-早元古基底, d-晚元古基底, e-蛇绿岩, f-蛇绿岩的形成和侵位时代, g-奥陶纪, h-志留纪, i-泥盆纪, j-石炭纪, k-Cu-Zn 矿床, l-Au 矿床, m-Cu 矿床, n-Cu-Ni 矿床, o-本文涉及的岩浆岩区域。ACF-阿尔泰加里东褶皱带, IVF-额尔齐斯华力西褶皱带; TM-塔城地体, WJVF-西准噶尔华力西褶皱带, WJCF-西准噶尔加里东褶皱带, EJVF-东准噶尔华力西褶皱带, EJCF-东准噶尔加里东褶皱带, JB-准噶尔板块, THB-吐鲁番-哈密板块, NTVF-北天山华力西褶皱带, YMTP-伊犁-中天山板块, STVF-南天山华力西褶皱带, MTCF-南中天山加里东褶皱带, TP-塔里木板块。1-阿拉套, 2-达巴特, 3-喇嘛苏, 4-果子沟, 5-阿希, 6-肯登高尔, 7-巴音沟(独库公路), 8-巴仑台-骆驼沟, 9-小热泉子, 10-西滩, 11-麻黄沟, 12-康西, 13-康古尔, 14-马头滩, 15-维权, 16-康古尔塔格东, 17-卡拉塔格, 18-企鹤山, 19-延东, 20-土屋, 21-灵龙, 22-赤湖, 23-小红山, 24-大南湖, 25-312 国道西, 26-312 国道东, 27-尾亚北, 28-土墩, 29-二红洼, 30-香山, 31-黄山, 32-黄山东, 33-梧桐窝子南, 34-阿舍勒。

Fig. 1 Schematic map of tectonic units and metal deposits of Northern Xinjiang(Xiao XC *et al.*, 1992; Qin KZ *et al.*, 2002)

它主量元素和微量元素在中国科学院广州地球化学研究所分别用 ICP-AES 和 ICP-MS 分析,详细的分析流程见 Li XH *et al.* (2002)。微量元素分析精度优于 3%。

4 结果

4.1 年代学

进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄的研究的两个样品分别采自于独库公路巴音沟以及巴仑台骆驼沟的石炭纪火山岩中。火山岩沉积夹层中的古生物资料显示,这些火山岩均形成于早石炭世(车自成等, 1996; Xia LQ *et al.*, 2005)。两个样品的全岩、长石的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄数据见表 1。在两个年龄中,样品 wxt707(高镁安山岩:独库公路巴音沟)的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄和等时线年龄存在一些差别,前者为 301.37 ± 1.82 Ma,后者为 332.7 ± 6.65 Ma(表 1,图 2a, b)。但是,样品 wxt789 玄武岩:巴仑台骆驼沟)的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄和等时线年龄在误差范围内非常一致,分别为 311.89 ± 0.65 Ma,后者为 309.16 ± 6.18 Ma。两个样品⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄都显示了晚石炭世

的年龄,与古生物资料所显示的早石炭世年龄存在一定的差异。我们认为所测定的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄很可能受到了后期地质事件的影响,而使得测试的年龄略微偏年轻。

4.2 元素地球化学

天山北部石炭纪岩埃达克岩、高镁安山岩、富 Nb 玄武质岩的主量、微量和稀土元素见表 2。埃达克岩主要分布于阿拉套、达巴特、果子沟、阿希金矿区、巴仑台、土屋-延东、国道东、国道西、尾亚北、达巴特、果子沟以及赤湖等地,其 SiO₂ > 60.0% (除去 H₂O + CO₂ 或烧失量(LOI)后,其它主量元素再换算为 100%,下同), Na₂O/K₂O > 1.51, Sr = (301 ~ 839) × 10⁻⁶, Y = (4.18 ~ 17.81) × 10⁻⁶, 轻稀土元素富集,重稀土元素亏损(如 Yb = (0.38 ~ 1.72) × 10⁻⁶),无明显-正 Eu、正 Sr 异常以及 Nb、Ta、Ti 亏损(表 2; 图 3),在 Sr/Y-Y 图解中落入埃达克岩区(图 4a, b)。另外,部分低 SiO₂ 的埃达克岩显示了高的 MgO 或 Mg[#] 和 Cr、Ni 含量,如阿希、果子沟地区的埃达克 MgO = 5.56% ~ 6.78%, Mg[#] = 61 ~ 71, Cr = (148 ~ 789) × 10⁻⁶, Ni = (185 ~ 191) × 10⁻⁶, 类似

表 1 Ar 同位素测试结果

Table 1 Summary of Argon isotopic analyzing results

T(°C)	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁹ Ar/ ³⁶ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	F	³⁹ Ar(×10 ⁻¹² mol)	³⁹ Ar(%)	⁴⁰ Ar*(%)	年龄±1σ(Ma)
WXT707, 全岩(J=0.004082, W=0.226g), t _p =301.37±1.82Ma, t _f =298.99±2.01Ma, t _i =332.70±6.65Ma								
350	423.5952	3.4182	1.8483	37.4742	0.0181	1.84	30.24	256.8 19.6
480	539.8246	5.5288	5.3717	44.1909	0.0516	5.26	45.26	299.2 5.5
600	620.0168	7.3123	3.6084	44.3798	0.0806	8.36	52.33	300.4 3.9
750	637.1281	7.7815	2.9712	43.9025	0.1047	10.67	53.61	297.4 3.7
850	644.4929	7.8699	1.9138	44.3450	0.1520	15.48	54.14	300.1 2.5
980	659.7455	8.1666	1.7707	44.6017	0.1830	18.64	55.20	301.7 2.5
1120	646.0429	7.9348	1.5477	44.1781	0.2126	21.66	54.25	299.1 2.2
1200	667.2399	8.3617	1.3882	44.4577	0.1506	15.34	55.71	300.8 2.5
1250	705.5753	8.7977	10.6582	46.6116	0.0199	2.03	58.11	314.2±22.4
1350	698.4095	13.6508	20.2478	48.9276	0.0085	0.87	57.68	328.5±41.7
WXT789, 斜长石(J=0.004091, W=0.1122g), t _p =311.89±0.65Ma, t _f =315.27±0.70Ma, t _i =309.16±6.18Ma								
350	1451.3752	22.2151	0.0142	52.0309	0.0588	1.04	79.63	348.1 5.2
480	1806.2347	32.0147	0.0149	47.1888	0.1328	2.35	83.63	318.4 2.0
600	3862.7451	79.1990	0.0049	45.0415	0.4285	7.66	92.33	305.1 0.7
750	4518.3486	90.1713	0.0079	46.8314	0.4890	8.65	93.44	316.2 0.8
850	5596.5909	112.7798	0.0020	47.0039	0.8123	14.37	94.70	317.3 0.5
980	7859.0426	162.6273	0.0026	46.5084	1.2227	21.63	96.22	314.2 0.4
1120	10368.4211	220.4761	0.0024	45.6871	1.3256	23.45	97.13	309.1 0.3
1200	10478.7941	225.2669	0.0033	45.2055	0.9661	17.09	97.16	306.1 0.4
1250	11726.4634	244.0807	0.0118	46.8327	0.1402	2.48	97.46	316.2±3.0
1350	13555.6021	278.4072	0.0214	48.1431	0.0769	1.36	97.80	324.3±4.2

t_p 为坪年龄, t_f 为全熔年龄, t_i 为等时线年龄

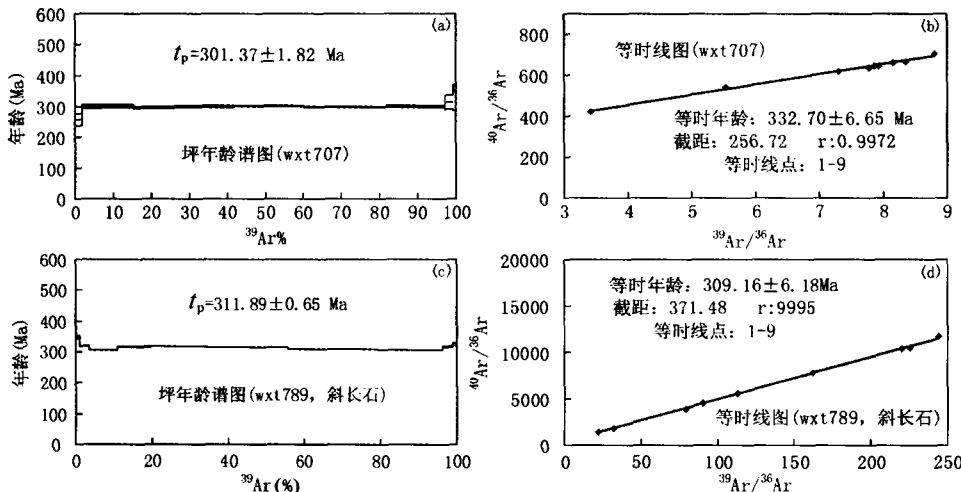


图 2 天山北部火山岩的全岩和长石⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄及等时线年龄

Fig. 2 ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau and isochronal ages for whole rock and feldspar of volcanic rocks in the Northern Tianshan area

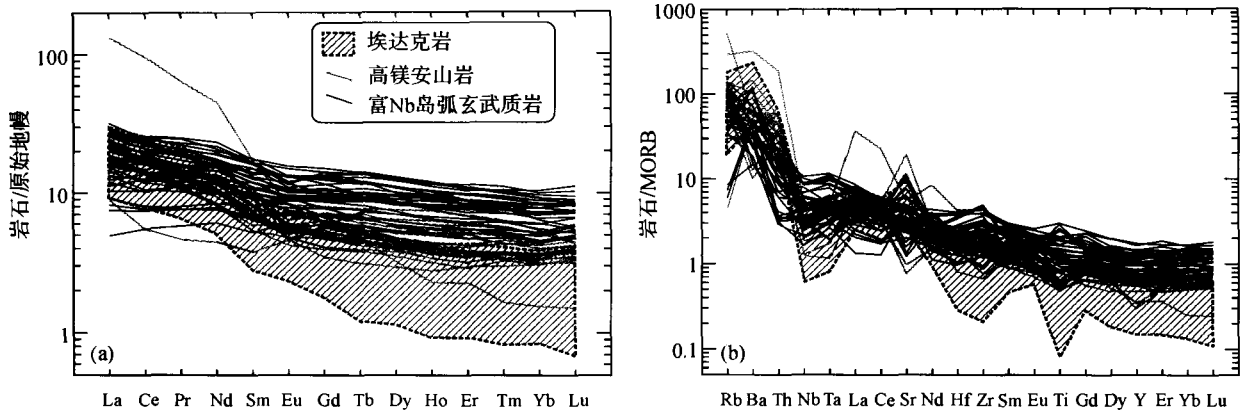


图3 原始地幔标准化的稀土元素(a)以及 N-MORB 标准化的多元素(b)图解

图中数据资料来源: 车自成等(1996)、陈丹玲等(2001)、李文明等(2002)、陈文明和曲晓明(2002)、芮宗瑶等(2002,2004)、Wang Q *et al.* (2003a,2006a)、Xia LQ *et al.* (2004a)、张连昌等(2004)、熊小林等(2005)以及这次的研究(表2)。

Fig.3 Primitive mantle-normalized rare earth element (REE) patterns (a) and N-MORB-normalized multi-elements profiles

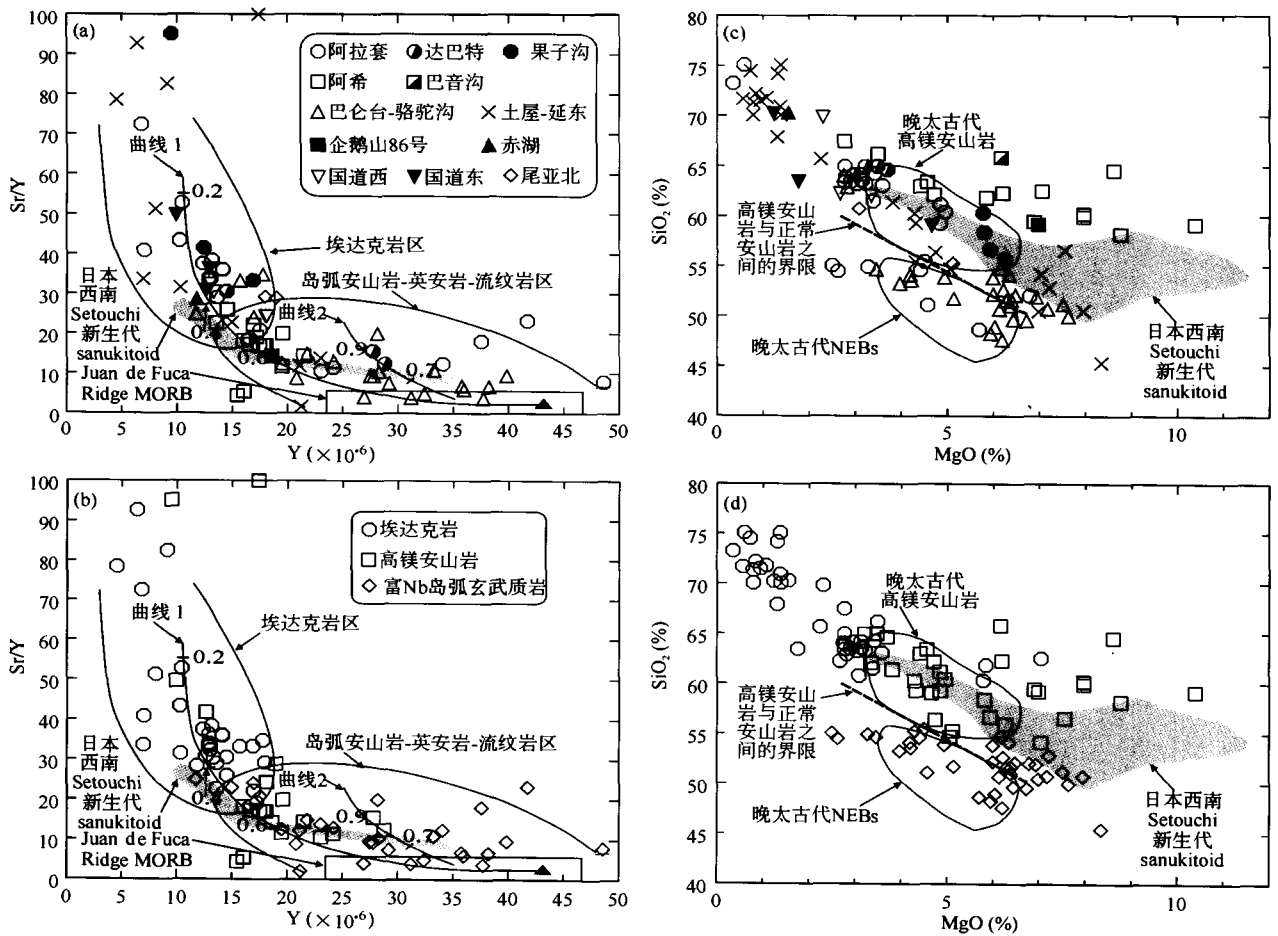


图4 Sr/Y-Y 图解(a,b) (Defant MJ and Drummond P, 1993) 和 SiO₂ - MgO 图解(c,d) (McCarro JJ and Smellie JL, 1998)

Juan de Fuca 玄武岩区和曲线1,2 引自 Defant MJ and Drummond P (1993)。曲线1 表示部分熔融,曲线2 表示分离结晶。图中数据资料来源同图3。

Fig.4 Sr/Y vs. Y (a, b) (Defant MJ and Drummond P, 1993) and SiO₂ vs. MgO (McCarro JJ and Smellie JL, 1998) diagrams.

表2 天山北部石炭纪埃达克岩、高镁安山(闪长)岩、高 Nb 玄武质岩代表性样品的主量(wt%)、微量元素($\times 10^{-6}$)成分
Table 2 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) element data of the representative samples for Carboniferous adakites, high-Mg andesites (or diorite) and Nb-enriched basaltic rocks in the Northern Tianshan area

地点 岩石 文献 样品	阿拉套			达巴特			果子沟			阿希			巴音沟					
	AD	HM	NEB	AD	HM	XT-69	XT-71	XT-358	XT-357	GZ-07	GZ-10	wxt809	wxt810	wxt818	wxt819	wxt821	wxt825	wxt707
SiO ₂	62.31	57.04	56.99	50.67	63.13	62.90	61.86	58.48	52.28	54.53	55.29	55.41	60.32	57.93	56.23	60.10	66.09	63.17
TiO ₂	0.56	1.01	0.94	2.33	0.64	0.79	0.68	0.98	0.38	0.96	0.96	0.77	0.60	0.72	0.74	0.68	0.51	0.76
Al ₂ O ₃	16.60	16.32	14.89	15.15	15.00	14.77	14.85	14.89	16.06	14.84	14.85	14.59	12.30	15.19	15.26	14.28	15.67	14.33
Fe ₂ O ₃	2.88	2.25	2.39	2.25	1.27	2.32	3.20	2.66	2.04	4.21	3.02	7.54	6.29	5.36	7.26	5.38	4.23	1.46
FeO	1.73	4.65	3.37	8.20	4.08	2.48	2.91	4.85	5.19	4.07	4.78							3.80
MnO	0.06	0.08	0.06	0.12	0.02	0.04	0.07	0.12	0.16	0.14	0.12	0.07	0.08	0.06	0.07	0.07	0.04	0.06
MgO	3.08	4.66	4.52	4.09	3.60	3.12	2.85	5.60	5.81	5.70	5.50	9.72	8.05	7.65	8.47	6.78	2.71	5.92
CaO	5.75	6.80	4.69	5.72	1.59	3.87	5.01	4.06	7.39	6.47	4.82	2.18	3.13	4.90	4.38	5.88	0.72	2.16
Na ₂ O	3.59	2.41	2.54	2.94	4.50	4.16	2.95	3.66	1.61	4.84	3.80	2.57	1.65	2.54	2.65	2.26	5.17	3.67
K ₂ O	1.41	0.87	2.62	1.02	2.97	2.10	1.96	1.51	2.40	0.24	1.37	0.72	0.98	1.76	1.45	0.66	2.79	0.56
P ₂ O ₅	0.09	0.12	0.15	0.29	0.15	0.36	0.19	0.11	0.34	0.15	0.14	0.09	0.08	0.08	0.06	0.07	0.04	0.11
H ₂ O	0.04	1.00	3.89	2.83	2.11	3.33	1.97	2.78										0.04
CO ₂	1.68	2.59	2.75	4.05				0.02										3.73
LOI							1.57		5.83	3.94	3.63	6.42	6.70	3.36	3.92	3.20	2.02	
Σ	99.78	99.80	99.80	99.66	99.45	100.55	99.99	99.72	99.49	100.09	98.28	100.08	100.17	99.56	100.49	99.34	99.99	99.77
Mg*	56	55	59	42	55	55	47	58	60	56	57	72	72	74	70	71	56	67
Sc	14.4	24.7	16.6	26.5	19	15	7	24.6	42.9			20.4	13.0	17.0	15.3	17.4	7.25	14.3
V	96.1	158	107	242	72	98	105	193	299		276	120	99.4	117	118	114	79.3	110
Cr	132	253	254	39.4	72	73	66	148	79.1		166	1132	467	790	768	789	103	13.8
Co	16.1	24.3	24.9	35.8	8	16	17	22.2	25.6		29.5	33.1	24.9	26.6	27.2	26.4	12.2	7.85
Ni	98.8	76.2	161	38.6	43	40	42	28	29.0		276	171	182	183	186	78.6	8.09	
Ga	18.1	19.1	17.9	19.6	19	20	19	17.6	14.2		14.0	12.9	16.1	16.1	16.1	15.1	14.7	16.3
Rb	29.8	20.8	73.2	19.0	286	71	14	27.0	56.1	42.3	28.6	36.4	53.8	59.4	29.5	14.2	105	26.7

续表 2

Continued Table 2

地点 岩石	骆驼沟			巴仑台			土屋-延东						企鹅山			赤湖		312国道东		尾亚北			
	NEB	NEB	NEB	AD	AD	AD	HM			AD			HMD	AD	HMD	HMD	HMD	HMD	HMD				
文献	2	2	2	4	4	4	6	6	6	6	6	6	7	7	6	6	3	3	8	8	4	4	
样品	XT-533	XT-540	XT-543-1	2037	Bb-165	Bb-270	BB-172	DXT0011	TW-34	R-3	R-4	R-5	DXTW1	TW208	TW28	Bb-152	B201	Beh14	Beh14	2079	2215	2215	
Y	27.1	23.5	21.3	15.5	22	20	20	16.7	15.3				6.32	6.17		10	18.1	11.4	11.4	9.82	18.7	18.7	
Zr	152	129	90.0	132	62.2	66.8	54.2	120				42.5	41.9		82.1	165	131	131	315	315	48.9	48.9	
Nb	10.6	9.86	4.81	6.52	7.5	7.1	6.9	2.86				3.13	3.15		4.5	5.7	2.8	2.8	11.4	11.4	2.84	2.84	
Ba	143	217	116	554	186	92.3	151	298				768	1483		321	374	512	512	2023	2023	187	187	
Hf	3.59	2.57	2.05	3.57	2.59	2.58	2.77	2.97				1.25	1.23		3.91	2.98	2.97	2.97	8.57	8.57	1.6	1.6	
Ta	0.816	0.713	0.399	0.39	0.494	0.244	0.238	0.22				0.31	0.321		0.499				0.65	0.65	0.15	0.15	
Pb	9.13	2.13	1.35																				
Th	1.07	0.836	0.348	3.58	0.364	0.467	0.411	2.08				1.61	1.6		6.16	3.22	3.81	3.81	22.4	22.4	2.53	2.53	
U	0.287	0.27	0.099		0.779	0.96	1.01						0.41		1.7								
La	8.79	6.08	5.04	15.1	6.87	7.88	10.3	15.2	9.33			11.6	11.4		15.8	14.9	11.4	11.4	89.9	89.9	12.7	12.7	
Ce	21.4	13.9	12.8	34.6	17.8	17.2	23.8	37.0	19.8			22.8	23.5		32.2	28.6	21	21	167	167	28.4	28.4	
Pr	3.21	2.05	2.05	4.93				4.95	2.86			2.81	2.78		2.56				17.3	17.3	3.86	3.86	
Nd	15.4	10.0	10.3	19.6	15.4	15.8	16.3	20.3	13.1			11.0	11		10.8	17.1	16.9	11.3	60.1	60.1	16.3	16.3	
Sm	4.01	2.79	2.92	3.74	4.65	5.05	2.65	4.26	3.1			1.95	1.93		3.54	4	2.66	2.66	7.42	7.42	3.59	3.59	
Eu	1.50	1.20	1.17	1.04	0.738	1.47	1.49	1.35	0.82			0.78	0.808		0.66	1.35	0.692	0.692	1.35	1.35	0.97	0.97	
Gd	4.94	3.94	3.64	3.17				3.78	3.02			1.58	1.6		1.29	3.93	2.44	2.44	3.65	3.65	3.7	3.7	
Tb	0.848	0.677	0.614	0.5	0.76	0.683	0.971	0.57	0.47			0.21	0.199		0.3	0.565	0.64	0.381	0.49	0.49	0.58	0.58	
Dy	5.21	4.22	3.83	2.74				3.18	2.83			1.12	1.11		0.98				2.32	2.32	3.44	3.44	
Ho	1.02	0.891	0.79	0.54				0.62	0.56			0.22	0.211		0.2				0.37	0.37	0.68	0.68	
Er	2.826	2.518	2.188	1.46				1.67	1.61			0.61	0.59		0.58				1.07	1.07	1.81	1.81	
Tm	0.432	0.388	0.341	0.22				0.24	0.24			0.08	0.08		0.10				0.12	0.12	0.27	0.27	
Yb	2.82	2.49	2.18	1.46	2.87	2.29	2.6	1.6	1.47			0.6	0.59		0.65	1.31	1.91	1.45	0.75	0.75	1.72	1.72	
Lu	0.466	0.428	0.356	0.23	0.393	0.383	0.366	0.24	0.22			0.08	0.08		0.10	0.195	0.302	0.244	0.11	0.11	0.27	0.27	

1- Wang Q et al. (2005a); 2- 本次研究; 3- Xia LQ et al. (2004a); 4- 熊小林等 (2005); 5- 陈文明和曲晓明 (2002); 6- 芮宗瑶等 (2002); 7- 张连昌等 (2004); 8- 李文明等 (2002). AD-埃达克岩; HM-高镁安山岩; HMD-高镁闪长岩; NEB-富 Nb 玄武质岩.

高镁安山岩(图 4c,d)。天山地区高镁安山(闪长)岩,高镁安山(闪长)岩是本次研究首次发现的,主要出现在阿希、果子沟、阿拉套、达巴特、巴音沟、土屋-延东、企鹅山、国道东以及尾亚北等地,岩石普遍具有高的 MgO 或 $Mg^{\#}$ 和 Cr、Ni 含量,类似高镁安山岩(图 4c,d)。在这些高镁安山(闪长)岩中,阿希金矿区的 MgO 含量非常高,类似于日本西南 Setouchi 火山岩带新生代赞岐岩类(sanukitoid)(Tatsumi Y, 1981)(张旗等(2004a)将“sanukite”译为“赞岐岩”),但其 SiO_2 含量更高(图 4c,d)。一些阿希金矿区的高镁安山岩的 $Mg^{\#}$ 可达 74, Cr 可达 1132×10^{-6} , Ni 可达 276×10^{-6} , 类似于原始岩浆(Tatsumi Y, 1981)。一些高镁安山岩与埃达克岩密切共生,如阿希、果子沟、阿拉套、达巴特、土屋-延东、国道东以及尾亚北等地区。几乎所有高镁安山都具有无明显正 Eu 异常以及 Nb、Ta、Ti 亏损(表 2; 图 3)。但同埃达克岩相比,高镁安山总体显示了略微偏高的 Y 和重稀土元素含量以及部分样品具有负 Sr 异常(图 3,4a,b)。富

Nb 玄武质岩主要出现在阿拉套、骆驼沟、土屋-延东等地区,它们具有共同的地球化学特征,如 $Na_2O/K_2O > 1.10$ (表 2), 轻重稀土元素分异不明显,同时具有微弱负-正 Ba、Nb 和 Ti 异常(图 3),具有高的 Nb/La、Nb/U 比值,类似于典型的富 Nb 玄武质岩(图 5),而且它们大多与埃达克岩-高镁安山共生。

4.3 Nd-Sr 同位素地球化学

本研究没有进行新的 Nd-Sr 同位素分析,但是我们对阿拉套以及东天山地区的埃达克岩-富 Nb 玄武质岩的 Nd-Sr 同位素资料(表 3)。天山北部石炭纪埃达克岩的显示了高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (+3.4 ~ +9.0) 和低的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.7032 ~ 0.7043), 落入了巴音沟石炭纪蛇绿岩的成分范围中(图 6a), 但与天山元古代的基底变质岩的成分完全不同(图 6)。天山北部石炭纪富 Nb 玄武质岩具有变化的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (+3.6 ~ +11.6) 和 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.7007 ~ 0.7067)。

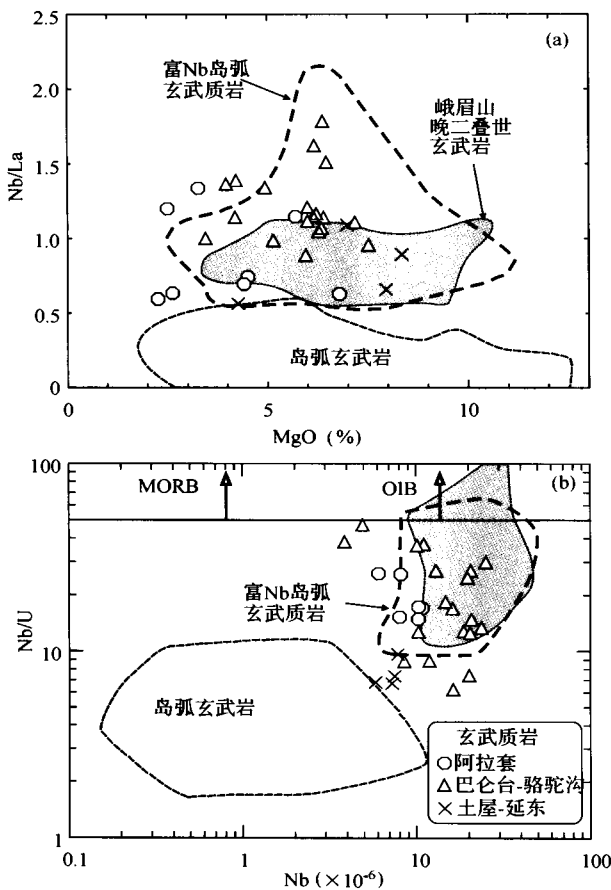


图 5 Nb/La-MgO (a) 和 Nb/U-Nb (b) 图解 (Kepezhinskas PK et al., 1996) 峨眉山玄武岩的资料引自 Xu XG et al. (2001)。图中数据资料来源同图 3。
Fig. 5 Nb/La vs. MgO (a) and Nb/U vs. Nb diagrams (Kepezhinskas PK et al., 1996)

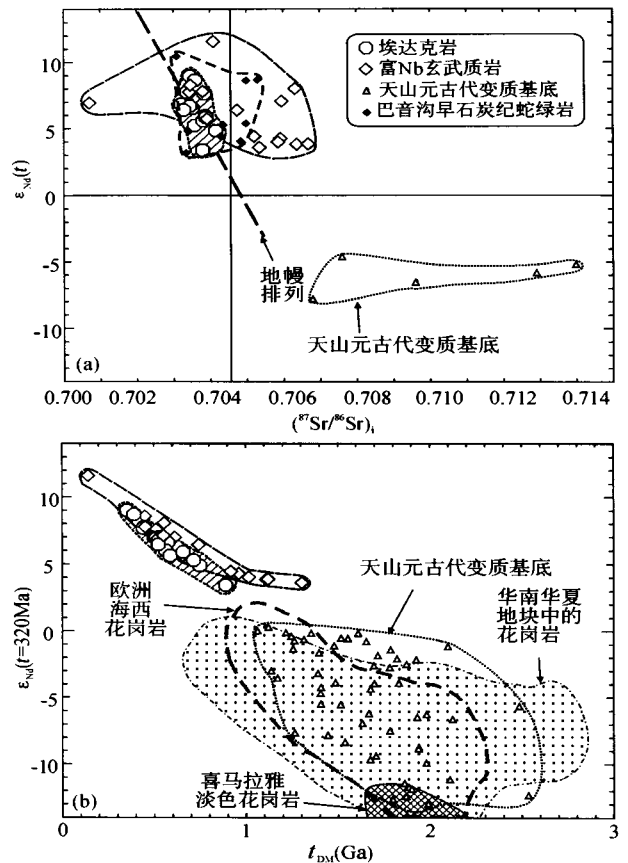


图 6 Nd-Sr 同位素成分(a)和 $\epsilon_{Nd}(t = 320Ma) - t_{DM}(Ga)$ 图解 欧洲、华夏和喜马拉雅花岗岩资料引自 Jahn BM et al. (2000a) 及其所引文献。天山元古代变质基底资料引自 Chen JF et al. (2000) 和 Hu SH et al. (2000)。图中数据资料来源见表 3。
Fig. 6 Nd-Sr isotope (a) and $\epsilon_{Nd}(t = 320Ma)$ vs. TDM (Ga) diagrams

表 3 天山北部埃达克岩和富 Nb 玄武质岩的 Nd-Sr 同位素成分

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of adakites and Nb-enriched basaltic rocks in the Northern Tianshan area

样品	区域	岩石	文献	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	t (Ma)	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$
F201	阿拉套	NEB	Chen JF <i>et al.</i> (2000)	5.07	26.45	0.1159	0.513062	7	320	-0.41	0.512819	11.58	0.14	5.24	388.5	0.039	0.70427	2	0.7041
P154-3	阿拉套	NEB	Chen JF <i>et al.</i> (2000)	7.2	28.97	0.1503	0.512897	6	320	-0.24	0.512582	6.95	0.61	9.81	335.0	0.08	0.70107	4	0.7007
Xi-17	阿拉套	NEB	Wang Q <i>et al.</i> (2006a)	8.057	30.50	0.1598	0.512889	7	320	-0.19	0.512554	6.41	0.74	4.0	354	0.1708	0.705518	24	0.7047
WXT1721	阿拉套	NEB	Wang Q <i>et al.</i> (2006a)	5.808	20.66	0.1710	0.512996	12	320	-0.13	0.512638	8.04	0.55	18.22	905.0	0.05824	0.706584	11	0.7063
XT-27	阿拉套	AD	Wang Q <i>et al.</i> (2006a)	1.709	8.077	0.1287	0.512832	14	320	-0.35	0.512562	6.56	0.57	36.80	431.6	0.2466	0.704643	9	0.7035
XT-28	阿拉套	AD	Wang Q <i>et al.</i> (2006a)	2.722	12.43	0.1325	0.512678	6	320	-0.33	0.512400	3.40	0.89	43.28	493.4	0.2453	0.704918	23	0.7038
XT-29	阿拉套	AD	Wang Q <i>et al.</i> (2006a)	1.377	7.956	0.1053	0.512753	13	320	-0.46	0.512532	5.98	0.56	68.63	486.2	0.4083	0.705729	11	0.7039
XT-30	阿拉套	AD	Wang Q <i>et al.</i> (2006a)	1.803	8.27	0.132	0.512751	10	320	-0.33	0.512474	4.85	0.74	36.03	509.2	0.2048	0.705092	19	0.7042
WXT-742	阿拉套	AD	Wang Q <i>et al.</i> (2006a)	2.451	11.15	0.1331	0.512774	14	320	-0.32	0.512495	5.25	0.71	37.06	409.8	0.2596	0.704762	16	0.7036
Btw38	土屋-延东	AD	李文明等 (2002)	2.096	9.90	0.1281	0.512853	9	320	-0.35	0.512585	7.00	0.53	37.67	552	0.1967	0.70425	3	0.7034
Tw92	土屋-延东	AD	李文明等 (2002)	1.452	7.943	0.1106	0.512814	11	320	-0.44	0.512582	6.95	0.50	22.82	302.2	0.2176	0.70436	5	0.7034
TW3	土屋-延东	AD	芮宗瑶等 (2002)	5.102	22.16	0.1393	0.512760	8	320	-0.29	0.512468	4.73	0.80	2.723	1191	0.006618	0.704292	12	0.7043
ZK001-637	土屋-延东	AD	芮宗瑶等 (2002)	1.89	10.22	0.1119	0.512812	9	320	-0.43	0.512578	6.86	0.51	25.85	456.9	0.1638	0.703955	14	0.7032
ZK002-367	土屋-延东	AD	芮宗瑶等 (2002)	2.051	10.04	0.1235	0.512944	10	320	-0.37	0.512685	8.96	0.35	20.07	623.8	0.09316	0.703877	12	0.7035
ZK705-519	土屋-延东	AD	芮宗瑶等 (2002)	1.521	8.168	0.1126	0.512806	9	320	-0.43	0.512570	6.72	0.52	19.05	390.6	0.1412	0.704099	11	0.7035
YZK001-462	土屋-延东	AD	芮宗瑶等 (2002)	2.485	14.86	0.1012	0.512767	8	320	-0.49	0.512555	6.42	0.52	58.04	452.1	0.3717	0.704975	11	0.7033
ZK705-846-2	土屋-延东	AD	芮宗瑶等 (2002)	0.7032	3.621	0.1175	0.512870	9	320	-0.40	0.512624	7.76	0.44	20.15	327.2	0.1783	0.704175	13	0.7034

续表 3
Continued Table 3

样品	区域	岩石	文献	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$
TC11-1	土屋-延东	AD	芮宗瑶等 (2002)	0.1038	0.512730	7	320	-0.47	0.512513	5.59	0.58	293.2	0.6427	0.706739	24	0.7038
DX1012	土屋-延东	AD	熊小林等 (2005)	0.1505	0.512963	13	320	-0.23	0.512648	8.23	0.45		0.00187	0.703598	13	0.7036
ZK705-274	土屋-延东	NEB(?)	芮宗瑶等 (2002)	0.1435	0.512917	8	320	-0.27	0.512616	7.62	0.51	192	0.3195	0.704937	10	0.7035
Bb-172	土屋-延东	NEB	Xia LQ <i>et al.</i> (2004b)	0.1224	0.512977	8	320	-0.38	0.512721	9.65	0.29		0.011	0.703404	16	0.7034
Bb-70	土屋-延东	NEB	Xia LQ <i>et al.</i> (2004b)	0.1149	0.512769	10	320	-0.42	0.512528	5.90	0.59		0.0086	0.703920	15	0.7039
Bb-185	土屋-延东	NEB	Xia LQ <i>et al.</i> (2004b)	0.1493	0.512861	10	320	-0.24	0.512548	6.29	0.68		0.052	0.704030	16	0.7038
Teh14	赤湖	AD	李文明等 (2002)	0.1381	0.512835	11	320	-0.30	0.512546	6.24	0.64	470.5	0.3026	0.70522	4	0.7038
Bl-02	骆驼沟	NEB	陈丹玲等 (2001)	0.1595	0.512878	5	320	-0.19	0.512544	6.20	0.77		0.4613	0.708050	60	0.7059
Bl-05	骆驼沟	NEB	陈丹玲等 (2001)	0.1684	0.512756	9	320	-0.14	0.512403	3.46	1.32		0.3786	0.708085	30	0.7064
Bl-07	骆驼沟	NEB	陈丹玲等 (2001)	0.1605	0.512763	6	320	-0.18	0.512427	3.92	1.11		0.2543	0.706500	50	0.7053
Bl-10	骆驼沟	NEB	陈丹玲等 (2001)	0.1522	0.512760	15	320	-0.23	0.512441	4.20	0.97		0.1471	0.707344	30	0.7067
Bl-24	骆驼沟	NEB	陈丹玲等 (2001)	0.1496	0.512764	7	320	-0.24	0.512451	4.38	0.92		0.0888	0.706325	40	0.7059
Bb-263-4	骆驼沟	NEB	Xia LQ <i>et al.</i> (2004b)	0.154	0.512766	8	320	-0.22	0.512443	4.24	0.98		0.612	0.707990	19	0.7052
Bb-263-5	骆驼沟	NEB	Xia LQ <i>et al.</i> (2004b)	0.1544	0.512754	9	320	-0.22	0.512431	3.99	1.02		0.296	0.707202	19	0.7059
2079	312 国道东	AD	熊小林等 (2005)	0.0746	0.512564	12	320	-0.62	0.512408	3.55	0.64		0.96826	0.707546	16	0.7031

NEB-富 Nb 玄武质岩; AD-埃达克岩。

5 讨论

5.1 时代

近年来,一些研究者开展了天山地区火山岩的年代学研究。Chen JF *et al.* (2000) 报道了阿拉套地区石炭纪的 340 ~ 310Ma 的火山岩和侵入岩。我们最近报道了阿拉套埃达克岩-富 Nb 玄武质岩以及正常火山岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄分别为 320.0 ± 1.2Ma, 318.9 ± 2.2Ma 和 306.3 ± 3.5Ma (Wang Q *et al.*, 2006a)。李华芹等(1998)给出阿希金矿区岩浆岩的形成时代为 346 ~ 321Ma。东天山企鹅山石英闪长岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 308.52Ma, 赤湖石英闪长岩的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 329.44Ma 和 330.22Ma (转引自刘德权等, 2003)。

李文明等(2002)认为东天山存在大量石炭纪(345 ~ 308Ma)的中酸性侵入岩。朱永峰等(2005)报道了西天山石炭纪(354 ~ 313Ma)火山岩的年龄资料。

时代比较有争议的地区就是土屋-延东地区的岩浆岩。首先是土屋-延东地区火山岩的形成时代。芮宗瑶等(2002)通过 Sm-Nd 等时线法和单颗粒锆石 U-Pb 法锆石获得该区火山岩的年龄为 416 ~ 360 Ma, 但同时指出:(1)火山岩的锆石中存在继承锆石, 因此其年龄肯定小于(443 ± 26) Ma; (2)获得 Sm-Nd 等时线年龄图谱中呈线性关系的点太少和误差太大(年龄:416 ± 120Ma), 该年龄的意义在应用时应引起注意。刘德权等(2003)对该区火山岩中的玄武岩进行了细致的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究, 认为这些火山岩形成于 334.6 ~ 320 Ma, 这个年龄很好地与火山岩中的沉积岩夹层所包含的大量石炭纪古生物化石相一致(刘德权等, 2003)。另外, 芮宗瑶等(2002)和秦克章等(2002)报道土屋-延东斑岩铜矿区蚀变矿化斜长花岗斑岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄分别为 360.8 ± 7.8 Ma, 356 ± 8Ma。但根据芮宗瑶等(2002)所提供的锆石图像, 其所测的锆石明显含有老的锆石核(芮宗瑶等(2002)文中图 2)。刘德权等(2003)对土屋-延东斑岩铜矿区斜长花岗斑岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究, 不同晶形的锆石给出了两地斜长花岗斑岩的形成时代分别为 333 ± 2Ma, 334 ± 2Ma, 这可能是目前为止所获得的土屋-延东地区斜长花岗斑岩的最好年龄。

综上所述, 并结合本文所获得的巴音沟以及骆驼沟地区火山岩的年龄资料, 我们认为天山北部地区存在广泛的石炭纪岩浆活动, 这些岩石中包含有埃达克岩(如阿拉套、土屋-延东、赤湖等)、高镁安山(闪长)岩(如阿希、巴音沟、企鹅山等)以及富 Nb 玄武质岩(如阿拉套、骆驼沟、土屋-延东等)。

5.2 岩石成因

5.2.1 埃达克岩

近年来, 有关埃达克岩及其地球化学特征类似岩石的研究受到国内学者的广泛关注, 成因模式包括俯冲洋壳熔融

(Xu JF *et al.*, 2000; 王焰等, 2000; Wang Q *et al.*, 2003a, 2006a; 熊小林等, 2005; Zhang HX *et al.*, 2005)、增厚下地壳熔融(张旗等, 2001, 2004b; Xiong XL *et al.*, 2001; Liu S *et al.*, 2003; Wang Q *et al.*, 2003b, 2005; Hou SH *et al.*, 2004; Ma CQ *et al.*, 2004; 刘红涛等, 2004; 翟明国, 2004; 肖龙等, 2004)、拆沉下地壳熔融(Xu JF *et al.*, 2002; Gao S *et al.*, 2004; Wang Q *et al.*, 2004b, c, 2006b, c)、与幔源岩浆活动有关(Qian Q *et al.*, 2003; Chen B *et al.*, 2003), 等等。我们认为天山北部石炭纪埃达克岩最有可能起源于俯冲洋壳的熔融。首先, 这些埃达克岩具有与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩类似的地球化学特征:(a) 富钠贫钾, 类似于洋壳组分, 但不同于由下地壳熔融形成的较富钾的埃达克质岩石(张旗等, 2001; Wang Q *et al.*, 2004a, 2005); (b) 类似于洋壳而不同于变质基底的 Nd-Sr 同位素组分(图 6); (c) 高 MgO 或 Mg[#], 不同于变玄武质岩、榴辉岩在高压(1.0 ~ 4.0GPa)下熔融形成的实验熔体, 但类似于这些实验熔体受橄榄岩混染后的熔体(Rapp RP *et al.*, 1999)(图 7)。因此, 天山北部石炭纪埃达克岩的源岩最可能是俯冲洋壳, 并且俯冲洋壳熔融形成的岩浆与地幔橄榄岩发生了相互作用, 导致岩浆中的 MgO 或 Mg[#] 显著增高(图 7)。其次, 构造-矿床的资料显示, 一个晚古生代的洋可能于石炭纪在天山北部闭合, 并且洋壳向南俯冲到伊犁-中天山板块之下, 在北部形成一个石炭纪的岛弧(李锦铁等, 2002; 毛景文等, 2002; 芮宗瑶等, 2002; Qin KZ *et al.*, 2002 a, b; Zhou MF *et al.*, 2004)。最近年代学的资料表明, 天山北部的巴音沟蛇绿岩中斜长花岗岩的形成时代为 324.8 ± 7.1 Ma (徐学义等, 2005)。这个年龄与天山北部的一些埃达克岩的形成时代(334 ~ 320Ma; 阿拉套、土屋-延东、赤湖)在误差范围内一致, 暗示天山北部的洋很可能在石炭纪形成又在石炭纪闭合, 即天山北部地区在石炭纪发生了年轻且热的洋壳的俯冲和熔融作用(Wang Q *et al.*, 2006a)。

5.2.2 富 Nb 玄武质岩

前人和我们的研究工作都注意到天山北部石炭纪的一些玄武质岩具有高的 Nb/La 比值(> 0.5), 不同于典型的岛弧玄武质岩(图 5a)(车自成等, 1996; 陈丹玲等, 2001; Wang *et al.*, 2003a, 2006a; 夏林圻等, 2004; Xia LQ *et al.*, 2004b)。因此, 前人认为这些岩浆起源于裂谷环境(车自成等, 1996; 陈丹玲等, 2001; 夏林圻等, 2004; Xia LQ *et al.*, 2004b), 并可能与地幔柱活动有关(如, 夏林圻等, 2004)。这里需要说明的是:(a) 尽管高 Nb/La 比值(> 0.5)的玄武岩的地球化学特征不同于典型的(即俯冲流体交代的地幔楔熔融形成的)岛弧玄武质岩, 但它们仍旧可以存在于岛弧环境中, 许多新生代的岛弧就存在有这类玄武岩, 如西阿留申岛(Yogodzinski GM *et al.*, 1994)、菲律宾(Sajona FG *et al.*, 1996)、中美洲(Defant MJ *et al.*, 1992)以及勘察加半岛(Kepezhinskas PK *et al.*, 1996); (b) 天山北部石炭纪玄武质岩低的 Nb/U 比值(< 50), 暗示其源区不同于典型的“MORB

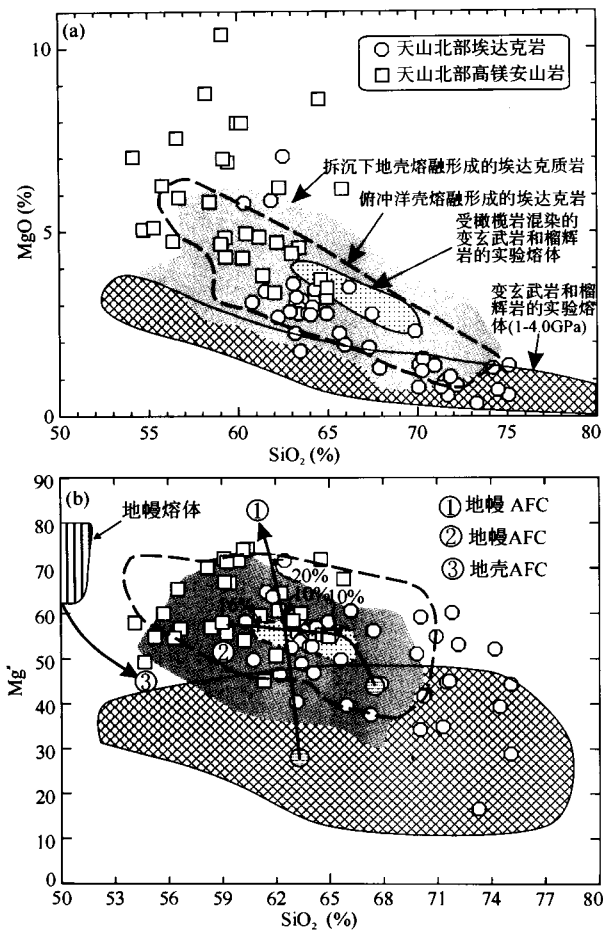


图7 MgO-SiO₂ (a) 和 Mg[#] (100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe^T)) - SiO₂ 图解

俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩、拆沉下地壳熔融形成的埃达克质岩以及变玄武岩和榴辉岩实验熔体(1.0~4.0 GPa)的成分区域转引自 Wang Q *et al.* (2006b, c)。被橄辉岩混染的变玄武岩和榴辉岩实验熔体的成分区域引自 Rapp RP *et al.* (1999)。图中数据资料来源同图3。

Fig. 7 MgO vs. SiO₂ and Mg[#] (100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe^T)) vs. SiO₂ diagrams

或 OIB-like”源区(图5b)。天山北部石炭纪玄武质岩地球化学特征(见前面)(图3,5)显示,它们更可能是出露于岛弧环境中的富 Nb 玄武质岩。

一般认为出露于岛弧环境中的富 Nb 玄武质岩主要可能起源于板片熔体(即埃达克岩)交代的地幔楔(Defant MJ and Kepezhinskias P, 2001)。天山北部富 Nb 玄武质岩的出露区(阿拉套、巴仑台-骆驼沟、土屋-延东)同时也有大致同期的埃达克岩出露,并且这些埃达克岩很可能由俯冲的年轻且热的洋壳熔融形成。因此,天山北部富 Nb 玄武质岩很可能由埃达克岩交代的地幔楔熔融形成。但是,天山北部石炭纪的富 Nb 玄武质岩具有变化的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (+3.6 ~ +11.6) 和

(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.7007 ~ 0.7067), 以及部分样品显示了微弱的负 Nb、Ti 异常, 这表明: (1) 它们的源区可能是不均匀的或进一步被板片熔体以外的组分——流体所交代(Wang Q *et al.*, 2006a); 或(2) 它们可能经历了古老地壳的混染(Wang Q *et al.*, 2006a) (图6)。在 (Nb/La)_{MN} - (La/Yb)_{MN}、(Nb/Yb)_{MN} 图解中(图8a, b) 则进一步暗示, 天山北部石炭纪富 Nb 玄武质岩不同于那些热点岩浆(如 Marquesas 玄武岩)(Sajona FG *et al.*, 1996) 或地幔柱岩浆(峨眉山玄武岩)(Xu YG *et al.*, 2001), 但 AFC 过程或俯冲流体对地幔楔的贡献, 或二者都在它们的成因中发挥了作用(Wang Q *et al.*, 2006a)。但必须说明是, 不管是 AFC 过程、还是俯冲流体对地幔楔贡献, 都不可能导致具有 Nb/La > 1.0 的玄武质岩的形成, 这类岩浆需要来自板片熔体的贡献(Wang Q *et al.*, 2006a)。此外, Sc-La-Yb 体系(图8c) 暗示, 在天山北部地区, 埃达克岩交代的地幔源区的部分熔融很可能发生在在板片熔融区之上的较浅处(Sajona FG *et al.*, 1996; Wyman DA *et al.*, 2000)。

5.2.3 高镁安山岩

在天山北部地区, 石炭纪的高镁安山岩大多与埃达克岩或富 Nb 玄武岩岩质共生。因此, 这些高镁安山岩很可能与板片熔体与地幔楔橄辉岩之间强烈的相互作用有关(Defant MJ and Kepezhinskias P, 2001)。同埃达克岩相比, 高镁安山岩总体显示了略微偏高的 Y 和重稀土元素含量, 且部分样品具有负 Sr 异常, 这可能与熔体-地幔橄辉岩的作用发生在较浅处(即板片熔融区之上)且熔体中包含比埃达克岩更多的地幔组分有关。这里必须强调的是, 此次研究中在阿希金矿区发现有类似于日本西南 Setouchi 新生代岛弧火山岩带中的赞岐岩类的高镁安山岩(表2; 图4c)。这些高硅的安山岩异常高的 MgO 以及 Cr、Ni 含量, 暗示其成因与地幔熔融或含有相当多的地幔组分有关。实验岩石学的资料(Tatsumi Y, 1981) 显示, 这些异常高镁的安山岩不可能来自于干的地幔橄辉岩的熔融, 而只能来自于橄辉岩-H₂O 体系的熔融或与其相关的过程。这表明, 这些岩石很难来自于板内的伸展或裂谷环境, 而最可能来自于与俯冲共生的岛弧环境。

5.3 动力学过程及意义

5.3.1 石炭纪动力学背景

长期以来, 天山造山带的构造演化受到广泛关注。一些研究者认为, 在天山北部可能存在“石炭纪北天山洋”、“石炭纪亚洲洋”或“早石炭纪的有限洋盆”(黄汲清等, 1990; 肖序常等, 1992; 何国琦等, 1994)。近期所报道的巴音沟蛇绿岩的 324.8 ± 7.1 Ma 的年龄资料(徐学义等, 2005) 则证实了上述认识。我们所发现的北天山地区石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩组合, 特别是阿希地区赞岐岩类的首次发现, 暗示天山北部的石炭纪洋可能在早石炭世晚期已经开始闭合。这样, 根据天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩组合的成因, 我们提

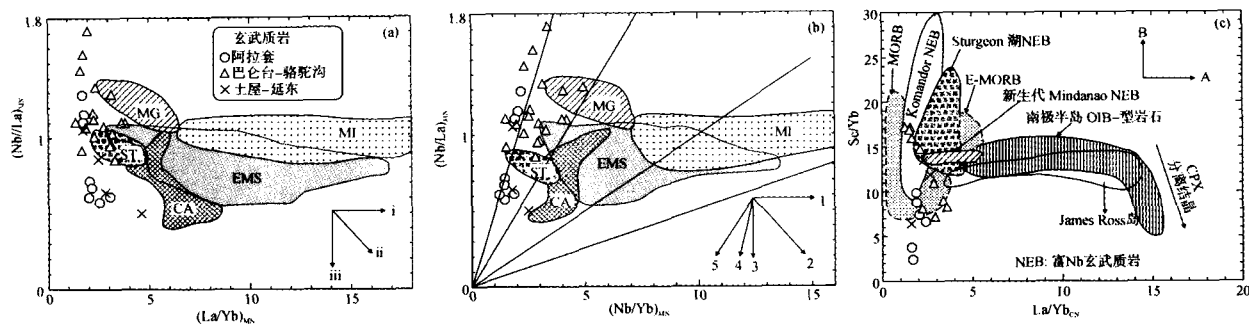


图 8 $(Nb/La)_{MN}-(Nb/Yb)_{MN}$ (Sajona FG *et al.*, 1996)、 $(Nb/La)_{MN}-(Nb/Yb)_{MN}$ (Sajona FG *et al.*, 1996) 和 $Sc/Yb-(La/Yb)_{CN}$ (Wyman AD *et al.*, 2000) 图解

图 a 中 i 为没有含 Ti 相的部分熔融; ii 为有含 Ti 相 + 板片流体的部分熔融或开放系统的分离结晶; ii 为在封闭系统中, 对元素 Nb 具有高 Kd 的矿物的分离结晶或通过橄辉岩的混染, 且混染的质量等于结晶的质量。图 b 中 1 为没有含 Ti 相的部分熔融; 2 为有含 Ti 相的部分熔融; 3 为 La 通过板片流体加入或含 Nb 相在封闭系统中的分离结晶; 4 为开放系统的分离结晶, 且分离结晶的质量大于混染的质量; 5 为开放系统的分离结晶, 且分离结晶的质量与混染的质量相等。Marquesas 岛的玄武岩和 MG、CA 富 Nb 玄武质岩的资料引自 Sajona FG *et al.* (1996)。Sturgeon Lake NEBs 富 Nb 玄武质岩的资料引自 Wyman AD *et al.* (2000)。峨眉山玄武岩的资料引自 Xu YG *et al.* (2001)。图 c 中 A 为在石榴石稳定区中的部分熔融; B 为在石榴石稳定区之上的熔融。图中数据资料来源同图 3。

Fig. 8 $(Nb/La)_{MN}$ vs. $(Nb/Yb)_{MN}$ (Sajona FG *et al.*, 1996), $(Nb/La)_{MN}$ vs. $(Nb/Yb)_{MN}$ (Sajona FG *et al.*, 1996) and $Sc/Yb-(La/Yb)_{CN}$ (Wyman AD *et al.*, 2000) diagrams

出产生该岩浆组合的模式(图 9a、b)。在早石炭世晚期, 北天山洋的洋壳向南俯冲到伊犁-中天山微板块之下, 并形成天山北部的石炭纪岛弧(图 9b)。在俯冲过程中, 俯冲的洋壳在浅处(60~70km)释放流体(如, 水)在地幔楔中形成含水相(Sajona FG *et al.*, 1996)。同时, 俯冲的年轻洋壳很快达到固相线, 在榴辉岩相(70~85 km)的条件下发生熔融形成埃达克质岩浆。埃达克质岩浆以及少量板片流体在上升过程中交代地幔楔橄辉岩或与其发生反应: 一方面, 触发地幔楔橄辉岩发生熔融形成富 Nb 岛弧玄武质岩; 另一方面, 地幔组分迅速进入到板片熔体中, 导致其地幔组分增加, 乃至形成高镁安山岩(图 9b)。

5.3.2 地壳增生

包括天山造山带在内的中亚造山带显生宙地壳生长最重要的地区之一(Sengör AMC *et al.*, 1993; Jahn BM *et al.*, 2000a, b)。但是, 有关其地壳生长的机制却仍旧在争论之中。Sengör AMC *et al.* (1993) 认为中亚造山带显生宙近一半新生地壳是俯冲期间由亏损地幔加入到地壳中的, 即地壳生长以侧向增生为主。这个模式得到大量的新元古代-古生代的蛇绿岩(肖序常等, 1992; 何国琦等, 1994; Gao J and Klemd R, 2003; Xiao WJ *et al.*, 2003; Xu JF *et al.*, 2003; 董云鹏等, 2005) 和一些古生代的岛弧岩浆的支持(如, Chen *et al.*, 2000b; Heinhorst J *et al.*, 2000)。但是许多研究者认为显生宙的巨量花岗岩, 特别是具有正 ϵ_{Nd} 的 A 型花岗岩可能形成于造山后或板内伸展背景中(Han BF *et al.*, 1997; Jahn BM *et al.*, 2000a, b; Wu FY *et al.*, 2000, 2002; Liu W, 2002), 其形成可能与大量玄武质岩浆的底侵作用、岩浆混合或 AFC 过程有关, 地壳生长可能以垂向为主(Han BF *et al.*,

1997; Jahn BM *et al.*, 2000a, b; Wu FY *et al.*, 2000, 2002)。最近, 一些研究者报道了天山及其周边地区的镁铁-超镁铁质侵入岩、基性岩墙群的形成时代为 289~241Ma(李辛子等, 2004; Zhou MF *et al.*, 2004; Han BF *et al.*, 2004; 舒良树等, 2005)。Zhou MF *et al.* (2004) 认为晚二叠世(≈ 270 Ma)黄山侵入岩可能与地幔柱活动有关, 并且晚二叠世地幔柱活动可能为同期 A 型花岗岩的形成提供了热源。精确的年代学的资料显示, 中亚造山带 A 型花岗岩的形成时代可能主要集中于 300~120 Ma(即二叠纪-白垩纪)(洪大卫等, 2000; Heinhorst J *et al.*, 2000; Jahn BM *et al.*, 2000a, b; Wu FY *et al.*, 2000, 2002)。因此, 我们认为, 中亚造山带的地壳垂向生长可能主要开始于二叠纪。天山北部地区石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩组合的存在表明, 天山地区石炭纪的地壳生长仍以侧向增生为主(Sengör AMC *et al.*, 1993)。因此, 早二叠世(≈ 289 Ma)以前, 中亚造山带的地壳增生方式主要为侧向增生, 但此后, 可能以垂向增生为主(Han BF *et al.*, 1997, 2004; Jahn BM *et al.*, 2000a, b; Wu FY *et al.*, 2000, 2002; 刘志强等, 2005)。另外, 天山北部地区石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武质岩组合的存在也表明, 除了亏损地幔之外, 俯冲洋壳的熔融也对中亚地壳的生长发挥了重要的作用, 并且这种地壳生长方式可能是增生型造山带地壳生长的重要方式之一。

5.4 Cu-Au 成矿以及勘探意义

亲铜元素一般存在于地幔中(Sillitoe RH, 1997; Mungall JE, 2002)。俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩之所以有利于铜

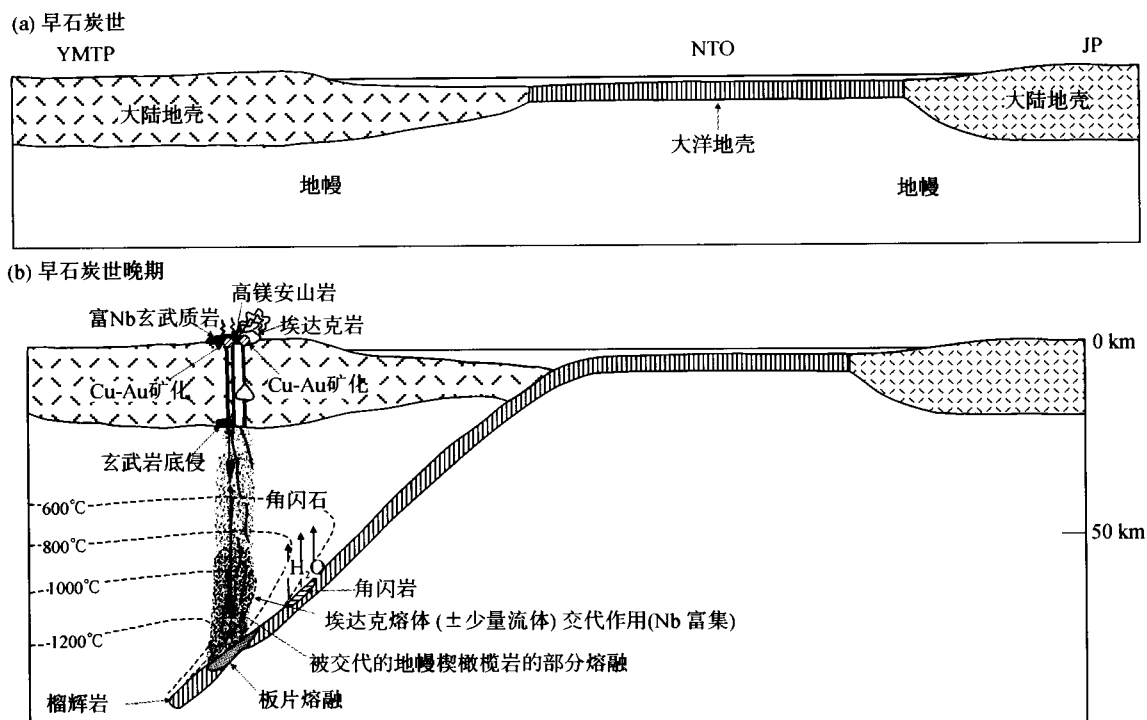


图9 天山北部地区石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富Nb玄武质岩以及相关的铜(金)矿床的形成模式

图a示早石炭纪位于伊犁-中天山板块与准噶尔板块之间的早石炭纪北天山洋;图b示早石炭世晚期,北天山的年轻洋壳向南俯冲,板片发生熔融,同时少量流体释放出来。板片熔体以及少量流体上升交代地幔楔橄榄岩或与其发生反应,这也触发了地幔楔橄榄岩的熔融以及地幔中金属硫化物被氧化,地幔熔融形成玄武质岩浆,同时包括Cu(Au)等成矿物质在内的地幔物质进入到板片熔体中,最终导致埃达克岩-高镁安山岩-富Nb玄武质岩以及相关的铜(金)矿床的形成。JB-准噶尔板块;NTO-北天山洋;YMTF-伊犁-中天山板块。

Fig. 9 A suggested model to produce Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites and associated with Cu(Au) deposits in the Northern Tianshan area

金成矿,一个非常重要的原因是板片熔体的高氧逸度(f_{O_2}),即板片熔体可以携带大量的 Fe_2O_3 ,当携带大量 Fe_2O_3 的板片熔体进入到富含金属硫化物的地幔楔时,将会导致地幔楔橄榄岩 f_{O_2} 的增高,地幔中的金属硫化物将被氧化,亲铜元素(如Au, Cu)等将顺利进入到板片熔体或岛弧岩浆中,有利于成矿(Mungall JE, 2002)。Mungall JE(2002)甚至认为只有俯冲洋壳产生的高 f_{O_2} 的熔体或超临界流体能够导致大型Cu-Au矿床的形成,玄武质下地壳熔融形成的埃达克质岩浆由于其低的 f_{O_2} 则不利于铜-金矿化。实质上,影响铜金矿化的两个最基本的因素就是成矿物质的来源与氧逸度(f_{O_2}) (Wang Q *et al.*, 2006b, c)。我们最近的研究认为,包含有残留洋壳或岛弧岩浆物质的榴辉岩质下地壳拆沉进入到地幔中发生熔融产生埃达克质岩浆也能够产生铜金矿化(Wang Q *et al.*, 2006b, c),这是因为:(a)这种埃达克质岩浆同样具有高 f_{O_2} ; (b)岩浆穿过了富含金属硫化物的地幔。

新疆北部石炭纪一些铜金矿化与埃达克岩有关,如达巴特、阿希、土屋、延东、赤湖等等。但是,新疆北部石炭纪的铜金矿化并不仅仅与埃达克岩有关,如阿希金矿脉主要与高镁

安山密切共生,土屋-延东铜矿化还与富Nb玄武质岩有关,企鹅山金矿与高镁闪长岩有关。可见,天山北部石炭纪的铜金矿化与“埃达克岩交代的弧火山岩系列”有密切的成因联系。我们认为,在石炭纪,天山北部俯冲的年轻洋壳熔融形成的埃达克质岩浆与地幔楔橄榄岩发生强烈相互作用,当携带大量的 Fe_2O_3 的板片熔体进入到地幔楔时,将会导致地幔楔橄榄岩的 f_{O_2} 增高,地幔中的金属硫化物将被氧化,亲铜元素(如Au, Cu)等顺利进入到板片熔体、高镁安山岩浆或富Nb玄武质岩浆中,从而导致了铜金矿床的形成(图9b)。因此,天山北部的石炭纪埃达克岩-高镁安山(闪长)岩-富Nb岛弧玄武质岩与铜金成矿关系密切,具有重要的铜金勘探意义。

6 结论

(1)天山北部地区存在有石炭纪的埃达克岩-高镁安山岩-富Nb玄武质岩组合,它们可能是“埃达克岩交代的岛弧岩浆岩系列”。

(2)天山北部埃达克岩最有可能由石炭纪北天山洋的年

轻洋壳在俯冲过程中熔融形成。

(3)天山北部高镁安山岩中存在有赞岐岩类(如阿希金矿区),这些高镁安山岩可能由板片熔体与地幔楔橄榄岩的相互作用形成。

(4)天山北部石炭纪富 Nb 玄武质岩不是裂谷或地幔柱火山岩,而可能是由俯冲的板片熔体以及少量流体交代的地幔楔橄榄岩熔融形成。

(5)天山地区石炭纪的地壳生长可能以侧向为主,但石炭纪之后,可能以垂向为主。

(6)天山地区的埃达克岩、高镁安山(闪长)岩、富 Nb 岛弧玄武质岩可能具有重要的铜金勘探意义。

致谢 第一作者衷心地感谢高俊研究员、刘伟研究员一直对本研究的关心和支持。张旗研究员、钱青博士对本文的初稿提出了宝贵的建议,戴植模研究员帮助进行了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄分析,唐功建帮助收集了部分资料,一并表示感谢!

References

- Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1996. Review on the Ancient Yili Rift, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 478 - 490 (in Chinese with English abstract)
- Chen B, Jahn BM, Wilde S and Xu B. 2000. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328: 157 - 182
- Chen B, Zhai MG and Shao J. 2003. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang complex; Major and trace element evidence. *Science in China Series D*, 46: 941 - 953
- Chen DL, Liu L, Che ZC and Luo JH. 2001. Geochemical characteristics and tectonic implication of Carboniferous volcanites in the Luotougou area of Middle Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 378 - 384 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF, Zhou TX, Xie Z, Zhang X and Guo XS. 2000. Formation of positive (Nd (T) granitoids from the Alataw Mountains, Xinjiang, China, by mixing and fractional crystallization: implication for Phanerozoic crustal growth. *Tectonophysics*, 328: 53 - 67
- Chen WM and Qu XM. 2002b. Host rocks of Tuwu-Yandong (porphyry) copper deposit in Tianshan Mountains. *Mineral Deposits*, 21(4): 331-341 (in Chinese with English abstract)
- Dai TM and Hong AS. 1982. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar dating and some isotopic determinations on Himalaya biotites from granitoid rocks in southern Tibet. *Geochimica*, 11: 48 - 55 (in Chinese with English abstract)
- Defant MJ and Drummond MS. 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547 - 550
- Defant MJ, Jackson TE and Drummond MS, 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 MJ and Kepezhinskis P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS*, 82: 62 - 69
- Dong YP, Zhang GW, Zhou DW, Luo JH, Zhang CL, Xia LQ, Xu XY and Li XM. 2005. The ascertainment and tectonic implication of the Bingdaban ophiolites in the northern margin of the Middle Tianshan area. *Science in China Series D*, 35(6): 552 - 560 (in Chinese with English abstract)
- Gao J, Klemd R, Zhang L, Wang Z and Xiao X. 1999. P-T path of high pressure low temperature rocks and tectonic implications in the western Tianshan Mountains (NW China). *J. Metamorph. Geol.*, 17: 621 - 636
- Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints. *Lithos*, 66: 1 - 22
- Gao J, Li M, He G, Xiao X and Tang Y. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287: 213 - 231
- Gao J and Klemd R. 2000. Eclogite occurrences in the western Tianshan high-pressure belt, Xinjiang, western China. *Gondwana Res.*, 3: 33 - 38
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Lin WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892 - 897
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Li HY, Xiao XJ and Yan ZF. 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan; their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 305 - 316 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 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(22): 2424 - 2429
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 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
- He GQ, Li MS, Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 1994. Paleozoic evolution and metallogenesis in Xinjiang, China. *Wulumiqi: Xinjiang People's Publishing House and Hongkong, Educational and Cultural Press Ltd.* 1 - 437 (in Chinese)
- Heinhorst J, Lehmann B, Ermolov V, Serykh V and Zhurutin S. 2000. Paleozoic crustal growth and metallogeny of Central Asia: evidence from magmatic-hydrothermal ore systems of Central Kazakhstan. *Tectonophysics*, 328: 69 - 87
- Hong DW, Wang SG, Xie XL and Zhang J S. 2000. Geogenesis of positive $\epsilon(\text{Nd}, t)$ granitoids in the Da Hinggan Mts-Mongolia Orogenic belt and growth of continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441 - 456 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Gao YF, Qu XM, Rui ZY and Mo XX. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 139 - 155
- Hu AQ, Jahn BM, Zhang GX, Chen YB and Zhang QF. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence; Part I. Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328: 15 - 51
- Hu SH, Chen AF, Lin SL, Yuan HL and Gao S. 2000. Study of ICP-MS analysis of 40 trace and ultratrace elements in geological samples. *Earth Science*, 25: 286 - 290
- Huang JQ, Jiang CF and Wang ZX. 1990. Plate tectonics and accordion-type movement. *Xinjiang Geological Science*, 1(1): 3 - 16 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Griffin WL and Windley BF. 2000b. Continental growth in the Phanerozoic: evidence from Central Asia special issue. *Tectonophysics*, 328: 1 - 227
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000a. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Epidotides*, 23: 82 - 92
- Kepezhinskis PK, Defant MJ and Drummond MS. 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred

- from Kamchatka xenoliths. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 60: 1217 - 1229
- Li HQ, Xie CF, Chang HL, *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 JY, Wang KH, Li WQ, Guo HC, Song B and Wang Y. 2002. Tectonic evolution since the late Paleozoic and mineral prospecting in eastern Tianshan Mountains, NW China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 295 - 301 (in Chinese with English abstract)
- Li WM, Ren BC, Yang XK, *et al.* 2002. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significances in Eastern Tianshan region. *Xibei Geology*, 35(4): 41 - 64 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Zhou HW, Liu Y and Kinny PD. 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoprozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of south China: Implications for the initial rifting of Rodinia. *Precambrian Research*, 113: 135 - 154
- Liu DQ, Chen YC, Wang DH, Tang YL, Zhou RH, Wang JL, Li HQ and Chen FW. 2003. A Discussion on Problems Related to Mineralization of Tuwu-Yandong Cu-Mo Orefield in Hami, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 22(4): 334 - 344 (in Chinese with English abstract)
- Liu HT, Zhang Q, Liu JM, Ye J, Zeng QD and Yu CM. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits: a possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessment. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 205 - 218 (in Chinese with English abstract)
- Liu S, Hu RZ, Feng CX, Chi XG, Li C, Yang RH, Wang TW and Jin W. 2003. Cenozoic adakite-type volcanic rocks in Qiangtang, Tibet and its significance. *Acta Geologica Sinica*, 77: 187 - 193
- Liu W. 2002. Fluid rock interaction during subsolidus microtextural development of alkali granite as exemplified by the Saertielieke pluton, Ulungur of the northern Xinjiang, China. *Chemical Geology*, 182: 473 - 482
- Li XZ, Han BF, Ji JQ, Li ZH, Liu ZQ and Yang B. 2004. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarm from Xinjiang, China. *Geochimica*, 33(6): 574 - 584 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZQ, Han BF, Ji JQ and Li ZH. 2005. Ages and geochemistry of the post-collisional granitic rocks from Eastern Alataw Mountains, Xinjiang, and implications for vertical crustal growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 623 - 639 (in Chinese with English abstract)
- Ma CQ, Yang KG, Ming HL, *et al.* 2004. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites. *Science in China Series D*, 47: 453 - 462
- Mao JW, Yang JM and Han CM. 2002. Metallogenetic system and dynamic mode of Cu-Au and polymetallic ore deposits in eastern Tianshan. *Earth Sciences*, 27(4): 413 - 424 (in Chinese with English abstract)
- McCarro JJ and Smellie JL. 1998. Tectonic implications of fore-arc magmatism and generation of high-magnesian andesites: Alexander Island, Antarctica. *Journal of Geological Society, London*, 155: 269 - 280
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30: 915 - 918
- Qian Q, Chung SL, Lee TY and Wen DJ. 2003. Mesozoic high-Ba Sr granitoids from North China: geochemical characteristics and geological implications. *Terra Nova*, 15: 272 - 278
- Qin KZ, Fang TH and Wang SL. 2002a. Plate tectonics division, evolution and metallogenetic settings in eastern Tianshan Mountains, NW China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 302 - 308 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Sun S, Li JL, Fang TH, Wang SL and Liu W. 2002b. Paleozoic epithermal Au and porphyry Cu Deposits in North Xinjiang, China: Epochs, Features, Tectonic Linkage and Exploration Significance. *Resource Geology*, 52(4): 291 - 300
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335 - 356.
- Rui ZY, Zhang LS, Chen ZY, Wang LS, Liu YL and Wang YT. 2004. Approach on source rock or source region of porphyry copper deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 229 - 238 (in Chinese with English abstract)
- Rui ZY, Liu YL, Wang LS and Wang YT. 2002. The eastern Tianshan porphyry copper belt in Xinjiang and its tectonic framework. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 83 - 94 (in Chinese with English abstract)
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H, Cotton J and Defant MJ. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao (Philippines). *Journal of Petrology*, 37: 693 - 726
- Sengör AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299 - 307
- Shu LS, Zhu WB, Wang B, Faure M, Charvet J and Cluzel D. 2005. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 25 - 36 (in Chinese with English abstract)
- Sillitoe RH. 1997. Characteristic 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
- Tatsumi Y. 1981. Melting experiments on a high-magnesian andesites. *Earth and Planetary Science Letters*, 54: 357 - 365
- Wang JB, Wang YW and Wang LJ. 2004. The Junggar Immature Continental Crust Province and Its Mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 78: 337 - 344
- Wang Q, Zhao ZH, Bai ZH, Bao ZW, Xu JF, Xiong XL, Mei HJ and Wang YX. 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(19): 2108 - 2115
- Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Li XH, Bao ZW, Xiong XL and Liu YM. 2003b. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block. *Science in China, Series D*, 46(Supp): 164 - 176
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZH, Bao ZW, Xu W and Xiong XL. 2004a. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal*, 38: 417 - 434
- Wang Q, Zhao ZH, Bao ZW, Xu JF, Liu W, Li CF, Bai ZH and Xiong XL. 2004b. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in southeast Hubei, east China. *Resource Geology*, 54: 137 - 152
- Wang Q, McDermott F, Xu JF, Bellon H and Zhu YT. 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting. *Geology*, 33: 465 - 468
- Wang Q, Wyman DA, Zhao ZH, Xu JF, Bai ZH, Xiong XL, Dai TM, Li CF and Chu ZY. 2006a. 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* (in review)
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma

- JL. 2006b. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic settings in Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 46: 119 – 144
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai Z H. 2006c. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos* (in press)
- Wang Y, Zhang Q and Qian Q. 2000. Adakite: Geochemical characteristics and tectonic significances. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251 – 256 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Jahn BM, Wilde S and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U Pb and Sr Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89 – 113
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143 – 173
- Wyman DA, Ayer JA and Devaney JR. 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 LQ, Li XM, Xu XY, Xia ZC, Ma Z P and Wang LS. 2005. Petrogenetic evolution of the Bayan Gol Ophiolite Geological record of an early Carboniferous “Red Sea Type” Ocean Basin in the Tianshan Mountains, Northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 79: 174 – 192
- Xia LQ, Xu XY, Xia ZC, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004a. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 116: 419 – 433
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004b. Carboniferous Tianshan large igneous province and mantle plume. *Geol. Bull. China*, 23(9 – 10): 903 – 910 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, inner Mongolier, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics* 22(6): 1069, doi: 10.1029/2002TC001484
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Region. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 180 (in Chinese)
- Xiao L, Rapp PR and Xu JF. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 219 – 228 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Cai ZY, Niu HC, Chen YB, Wang Q, Zhao ZH and Wu J H. 2005. The late Paleozoic adakites in eastern Tianshan area and their metallogenic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 967 – 976 (in Chinese with English abstract)
- Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH, Mei HJ, Wang YX, Wang Q, Xu JF and Bao ZW. 2001. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan; Significance for the vertical growth of continental crust. *Chinese Science Bulletin*, 46(10): 811 – 817
- Xu JF, Castillo PR, Chen FF, Niu HC, Yu XY and Zhen ZP. 2003. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: implications for backarc mantle evolution. *Chemical Geology*, 193: 137 – 154
- Xu JF, Shinjio R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 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 JF, Wang Q and Yu XY. 2000. Geochemistry of high-Mg Andesite and Adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust and its implication. *Geochemical Journal*, 34: 359 – 377
- Xu XY, Ma ZP, Xia LQ, Li XM, Xia ZC and Wang LS. 2005. Accurate dating of Bayingou ophiolite in northern Tianshan mountains and its tectonic significance. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 27(2): 17 – 20 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Chung SL, Jahn BM and Wu GY. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145 – 168
- Yogodzinski GM, Volynets ON, Koloskov AV and Seliverstov NI. 1994. Magnesian andesites and the subduction component in a strongly calcalkaline series at Piip Volcano, far western Aleutians. *Journal of Petrology*, 34: 163 – 204
- Zhai MG. 2004. Adakite and related granitoids from partial melting of continental lower crust. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 193 – 194 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HX, Niu HC, Sato H, Yu XY, Shan Q, Zhang BY, Ito J and 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 LC, Qin KZ, Ying JF, Xia B and Shu JS. 2004. The relationship between ore-forming processes and adakitic rock in Tuwu-Yandong porphyry copper metallogenic belt, eastern Tianshan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 259 – 268 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qin KZ, Wang YL, Zhang FQ, Liu HT and Wang Y. 2004b. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 195 – 204 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang YL, Qian Q, Zhai MG, Jin WJ, Wang YL and Jian P. 2004a. Sanukite of late Archean and early earth evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1355 1362 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic- metallogenic significance of the adakites in Yanshan Period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236 – 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL, Mei HJ and Wang YX. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronological study of Late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang. *Geochimica*, 32(4): 317 – 327 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Leshner CM, Yang ZY, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni Cu (PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209: 233 – 257
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005. SHRIMP geochronology and element geochemistry of Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan area. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2004 – 2014 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1996. 论伊犁裂谷. *岩石学报*, 12(3): 478 – 490
- 陈丹玲, 刘良, 车自成, 罗金海. 2001. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境. *岩石学报*, 17(3): 378 – 384
- 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(4): 331 – 340
- 戴植模, 洪阿实. 1982. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{A}$ 记时及西藏南部喜马拉雅期几个黑

- 云母年龄的测定. 地球化学, 11(1): 48-55
- 董云鹏, 张国伟, 周鼎武, 罗金海, 张成立, 夏林圻, 徐学义, 李向民. 2005. 中天山北缘冰达坂蛇绿混杂岩的厘定及其构造意义. 中国科学 D 辑, 35(6): 552-560
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 李宏宇, 肖新建, 严正富. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. 岩石学报, 16(3): 305-316
- 何国琦, 李茂松, 刘德权等. 1994. 新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 香港: 香港文化教育出版社. 177-208
- 洪大卫, 王式沈, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘, 7(2): 441-456
- 黄汲清, 姜春发, 王作勋. 1990. 新疆及邻区板块构造及手风琴式运动. 新疆地质科学, 第 1 辑, 3-16
- 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
- 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-延东铜铅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: 205-218
- 刘志强, 韩宝福, 季建清, 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
- 毛景文, 杨建民, 韩春明. 2002. 东天山铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型. 地球科学, 27(4): 413-424
- 秦克章, 方同辉, 王书来. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究. 新疆地质, 20(4): 302-308
- 芮宗瑶, 刘玉琳, 王龙生, 王义天. 2002. 新疆东天山斑岩铜矿带及其大地构造意义. 地质学报, 76(1): 83-94
- 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
- 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下水滑塌构造. 岩石学报, 21(1): 25-36
- 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
- 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
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1-11, 93-103
- 肖龙, Rapp PR, 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约. 岩石学报, 20: 219-228
- 熊小林, 蔡志勇, 牛贺才, 陈义兵, 王强, 赵振华, 吴金花. 2005. 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
- 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
- 翟明国. 2004. 埃达克岩和大陆下地壳重熔的花岗岩类. 岩石学报, 20: 193-194
- 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, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17: 236-244
- 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004b. 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
- 张旗, 王焰, 钱青, 翟明国, 金惟俊, 王元龙, 简平. 2004a. 晚太古代 Sanukite(赞岐岩)与地球早期演化. 岩石学报, 20: 1355-1362
- 赵振华, 白正华, 熊小林, 梅厚均, 王一先. 2003. 西天山晚古生代火山-浅侵位火成岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素定年. 地球化学, 32(4): 317-327
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 郭璇, 周晶. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究. 科学通报, 50(18): 2004-2014
- 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