1000-0569/2013/029(01)-0167-77 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

新疆东天山白山钼矿深部岩体地球化学特征及成因意义*

朱志敏[1,2] 熊小林[3**] 初凤友[1] 吴云辉[2]

ZHU ZhiMin[1,2], XIONG XiaoLin[3**], CHU FengYou[1] and WU YunHui[2]

1. 国家海洋局第二海洋研究所，国家海洋局海底科学重点实验室，杭州 310012
2. 中国科学院广州地球化学研究所，矿物学与成矿学重点实验室，广州 510640
3. 中国科学院广州地球化学研究所，同位素地球化学国家重点实验室，广州 510640

1. *Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou* 310012, *China*
2. *Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*
3. *State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*

2012-08-03 收稿，2012-11-01 改回.

Zhu ZM, Xiong XL, Chu FY and Wu YH. 2013. Geochemistry and petrogenesis of core samples from Baishan molybdenum deposit, East Tianshan Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 167 – 177

Abstract Samples from deep drill holes show that the mineralized granitic rocks related to Baishan molybdenum deposit, East Tianshan Mountains, Xinjiang are moyite, biotite-plagiogranite and granitic porphyry. The collected samples were used to investigate their geochemical features and petrogenesis for these rocks. All of the rocks are characterized by high Al_2O_3 and Na_2O and Sr contents, but low MgO, Y and Yb contents and high Sr/Y and La/Yb ratios, similar to the geochemical characteristics of adakitic rocks. These signatures suggest that the magmas of these rocks were derived from a deep garnet-bearing source. Evidence of rock ages and geochemical tectonic-discrimination-diagrams show these rocks were formed in post-orogenic environment. Based on the geochemical characteristics, we proposed that the magmas of these adakitic rocks (drill hole core samples) may have been formed by partial melting of the thickened lower crust. The mineralization of Baishan molybdenum deposit should be related to adakitic magma activity. The high Mo abundance of the crustal source, the fluid release from the magmas and high oxygen fugacity environment during the magmatic process may be the key factors for the molybdenum mineralization.

Key words Geochemistry; Granitic porphyries; Adakitic rocks; Baishan molybdenum deposit; East Tianshan Mountains

摘 要 白山钼矿深部钻探表明矿体下部存在着矿化花岗斑岩体，所获岩芯显示其岩性主要为似斑状钾长花岗岩、黑云母斜长花岗岩和花岗斑岩。该岩体具有高 Al、Na 和 Sr，低 Mg、Y 和 Yb，以及高 Sr/Y 和 La/Yb 比值等特点，类似于埃达克质岩的地球化学特征，暗示来源于较深的含石榴子石的源区；岩石形成时代和地球化学构造判别图解表明，岩体形成于造山后的构造环境。因此，白山钼矿岩体可能为加厚下地壳熔融的产物。白山钼矿床的成矿作用可能与埃达克质岩浆活动有关，其成矿过程得益于高 Mo 丰度的地壳源区、成岩过程中提供流体和岩浆高氧逸度环境等。

关键词 地球化学；花岗斑岩体；埃达克质岩；白山钼矿；东天山

中图法分类号 P588.121

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411303)、国家自然科学杰出青年基金项目(40825010)和国家自然科学青年基金项目(40906037)联合资助.

第一作者简介：朱志敏，男，1984 年生，博士，助理研究员，矿物学、岩石学、矿床学专业，E-mail: zhu_zhimin@126.com

** 通讯作者：熊小林，男，研究员，博导，岩石学专业，E-mail: xiongxl@gig.ac.cn

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引言

新疆东天山造山带位于中亚增生型造山带南缘,是全球显生宙陆壳增生与改造最显著的地区,其形成和演化过程经历了多岛海型俯冲增生、陆-陆碰撞和地体拼贴等复杂地质作用(李锦轶等,2006; Xiao *et al.*, 2004, 2009),发育多种类型成矿系统(陈衍景,2000; Chen *et al.*, 2007, 2012)。特别是晚古生代以来,东天山造山带进入大陆碰撞造山和后碰撞构造演化阶段,发育了多种与大陆碰撞及造山过程有关的成岩成矿作用(Chen, 1996; 陈衍景等, 1995),形成多种矿床类型,如康古尔-土屋-赤湖-黄山(铜、金、钼、镍等)多金属成矿带(秦克章等,2002; 王京彬和徐新,2006; 周涛发等,2010)。对这些矿床成岩和成矿过程的研究,无疑对深入认识该区大陆碰撞造山过程和成矿规律有重要意义。

东天山白山斑岩型钼(铜、铼)矿床位于吐哈盆地东缘,康古尔韧性剪切带东段南侧,属康古尔-土屋-赤湖-黄山成矿带的东延部分(秦克章等,2002)。目前已开展的研究主要集中在矿区内的地质特征、蚀变分带、成矿过程、成矿年代等(秦克章等,2002; 贺静等,2002; 邓刚等,2003, 2004; 李华芹等,2005, 2006; Zhang *et al.*, 2005; 张达玉等,2009),以及矿区周边出露花岗质岩体的岩石学、地球化学、同位素年代学等上(李华芹等,2005,2006; 周涛发等,2010)。但由于取样困难,与成矿密切相关的深部斑岩体相关研究至今仍为空白,已严重制约了对东天山白山斑岩型钼(铜、铼)矿床成岩成矿作用的认识和理解。幸运的是,近年来,随着新疆地勘局对白山钼矿开展深部找矿工作,进行了矿区超深钻孔岩芯取样,使得研究深部斑岩体成为可能。本文选择来之不易的深部斑岩体岩芯样品为研究对象,开展岩石学和地球化学研究,旨在确定深部斑岩体的岩石成因,并讨论岩体与钼矿化之间的成因联系。

2 区域地质特征

新疆东天山位于巴仑台以东,吐哈盆地以南的天山地区。该区地质构造单元主要为北天山晚古生代造山带、中天山地块和南部塔里木板块北缘。白山钼矿位于东天山觉罗塔格构造带的东部,区域上隶属于塔里木板块北缘觉罗塔格石炭纪岛弧带(秦克章等,2002)。该区区域断裂构造发育,从北向南依次分布有康古尔塔格深大断裂、镜儿泉大断裂和干墩大断裂等、镜儿泉和干墩等深大断裂(李华芹等,2006)。觉罗塔格也是重要的多金属成矿带,区内主要发育与基性-超基性杂岩带有关的黄山-镜儿泉铜、镍矿,康古尔塔格铬铁矿,与次火山岩有关的土屋-延东斑岩铜、金矿,东戈壁-白山斑岩钼矿,与火山和火山-沉积岩有关的红云滩-库姆塔格-雅满苏铁、铜、金矿等。

区内出露的地层主要有分布于矿区北部的长城系咸水泉岩组(Ch_x)斜长变粒岩和含石墨云英岩化云母斜长变粒岩;西部沿康古尔大断裂南侧呈近东西向条带状分布的蓟县系镜儿泉组(Jx_j)绿片岩相变质岩;矿区西北角的泥盆系大南湖组(D_1d)中基性-中酸性火山碎屑岩及火山熔岩;中南部的下石炭统干墩组(C_1g)含石榴子石二云母石英片岩、黑云母石英片岩、黑云母石英微晶片岩、黑云母长英质角岩、长石石英变粒岩;以及侏罗系野马泉组(J_1y)陆相碎屑沉积岩和第四系冲洪积砂砾石等(图1; 邓刚等,2004; 李华芹等,2005)。

白山地区广泛分布不同时代的侵入岩,以酸性岩为主,局部分布少量中-基性岩和超基性岩。主要分布在康古尔深大断裂和干墩大断裂间,包括加里东期斜长花岗岩-石英闪长岩、海西期斜长-二长花岗岩、海西期闪长岩类和基性-超基性岩类、燕山期黑云母花岗岩(图1; 李华芹等,2005)。区内脉岩发育,如花岗岩脉和花岗伟晶岩脉等,主要分布于任性剪切带和酸性侵入体附近(贺静等,2002)。

3 矿床地质特征

白山钼矿床呈近东西向展布,整个矿带长约10km,宽400~700m。矿区构造格局总体上受北部EW向干墩大断裂控制,其派生的次级断裂发育,走向NEE向,是区内的主导构造(邓刚等,2004; 张达玉等,2009)。矿区内矿体沿走向变化稳定,矿体形态较简单,以似层状为主,个别为透镜状(图2; 邓刚等,2004; 李华芹等,2006)。

矿床的赋矿围岩为干墩组(C_1g),干墩组(C_1g)从下到上可分为四个岩性段:第一岩性段(C_1g^1)为含碳黑云母微晶片岩,分布于矿区的北部、中部和南部;第二岩性段($C1g^2$)为黑云母长英质角岩夹堇青石二云母长英质角岩、黑云母微晶片岩和阳起绿帘片岩,主要分布于矿区中偏南部;第三岩性段($C1g^3$)为阳起片岩、黑云斜长角岩、透辉黝帘斜长角岩,分布于矿区中部。第四岩性段($C1g^4$)为炭质微晶片岩夹条带状黑云母变粒岩和二云母微晶片岩,分布于矿区的西部和北部(李华芹等,2005, 2006)。钼矿层位于第二岩性段下部层位的黑云变粒岩和黑云母微晶片岩中(邓刚等,2004; 李华芹等,2005,2006)。

矿区内岩浆侵入活动较发育,主要有东部的印支期黑云母斜长花岗岩、南部的燕山期黑云母斜长花岗岩和印支期黑云母斜长花岗斑岩(李华芹等,2005,2006)。这些侵入岩与干墩组(C_1g)地层侵入接触,界线清楚(张达玉等,2009)。另外,钻孔中发现蚀变的矿化花岗斑岩(邓刚等,2003),暗示矿区深部存在与矿化有关的花岗质斑岩体(邓刚等,2003, 2004; Zhang *et al.*, 2005)。

在钼矿化带范围内石英脉十分发育,钼矿体产出部位石英网脉更为发育,以钼矿体为中心,向两侧石英脉则渐变稀疏以至消失。矿体钼品位变化范围为0.030%~0.106%,矿区平均品位0.06%。矿石中伴生组分Re、S含量较高,其中

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

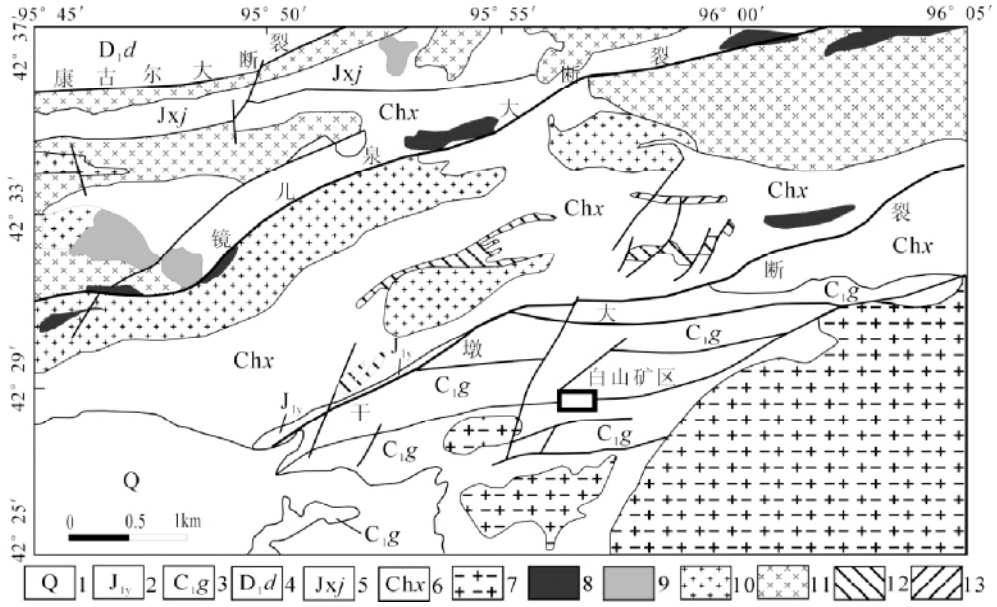


图 1 新疆东天山白山地区区域地质简图(据李华芹等,2005 修改)

1-第四系冲洪积砂砾石; 2-下侏罗统野马泉组; 3-下石炭统干墩组; 4-下泥盆统大南湖组; 5-蓟县系镜儿泉组; 6-长城系咸水泉组; 7-燕山期黑云母花岗岩; 8-海西期基性-超基性岩; 9-海西期闪长岩类; 10-海西期斜长-二长花岗岩; 11-加里东期斜长花岗岩-石英闪长岩; 12-花岗伟晶岩脉; 13-花岗岩脉

Fig. 1 Sketch geological map of Baishan area, East Tianshan Mountains, Xinjiang (after Li *et al.*, 2005)

1-Quaternary; 2-Lower Jurassic Yemaquan Formation; 3-Lower Carboniferous Gandun Formation; 4-Lower Devonian Dananhu Formation; 5-Jixianian Jing'erquan Formation; 6-Changchengian Xianshuiquan Formation; 7-Yanshanian biotite granite; 8-Hercynian basic-ultrabasic intrusions; 9-Hercynian diorites; 10-Hercynian plagiogranite-adamellite; 11-Caledonian plagiogranite-quartz diorite; 12-granitic pegmatite veins; 13-granite veins

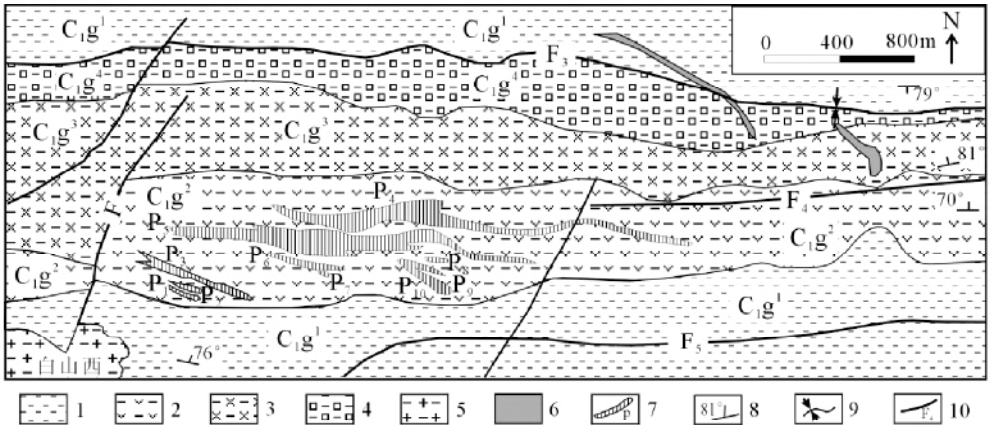


图 2 白山钼矿区地质图(据张达玉等,2009 修改)

1-干墩组第一岩性段含碳黑云母微晶片岩; 2-干墩组第二岩性段黑云母微晶片岩、绿帘石化片岩及少量黑云母长英质角岩; 3-干墩组第三岩性段黑云斜长角岩、黝帘石化斜长角岩; 4-干墩组第四岩性段碳质微晶片岩夹条带状黑云母变粒岩和二云母微晶片岩; 5-黑云母二长花岗岩; 6-花岗斑岩(脉); 7-矿体及编号; 8-产状; 9-向斜; 10-断层

Fig. 2 Sketch geological map of Baishan molybdenum deposit (after Zhang *et al.*, 2009)

1-1st lithologic section of Gandun Formation (carbon-bearing biotite microcrystalline schist); 2-2nd lithologic section of Gandun Formation (biotite microcrystalline schist, actinolite schist and biotite felsic hornstone); 3-3rd lithologic section of Gandun Formation (biotite-plagioclase hornstone, zoisitized plagioclase hornstone); 4-4th lithologic section of Gandun Formation (carbonaceous microcrystalline schist intercalated with banded biotite leptynite and two-mica microcrystalline schist); 5-biotite adamellite; 6-granite-porphyry; 7-ore body and its serial number; 8-attitude; 9-syncline; 10-fault

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

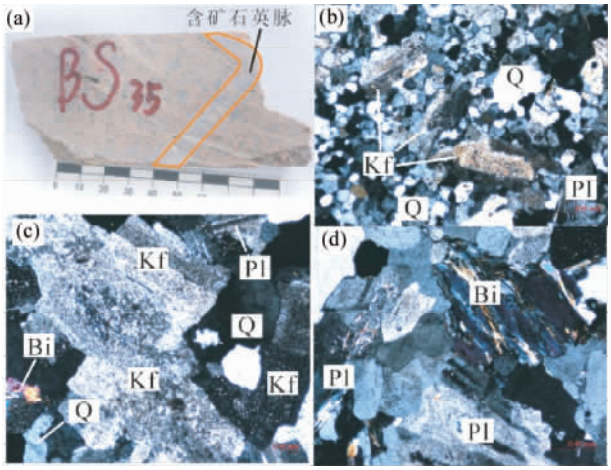


图 3 白山钼矿岩芯样品手标本及正交偏光显微照片

(a)-钾长花岗岩中的含矿石英脉; (b)-花岗斑岩; (c)-钾长花岗岩; (d)-黑云母斜长花岗岩. Bi-黑云母; Kf-钾长石; Pl-斜长石; Q-石英

Fig. 3 Photographs and crossed polarized light micrographs of the core samples from Baishan molybdenum deposit

(a)-quartz veinlet in moyite; (b)-granite-porphyry; (c)-moyite; (s)-biotite plagiogranite. Bi-biotite; Kf-K-feldspar; Pl-plagioclase; Q-quartz

Re 平均含量达 1.0×10^{-6}(邓刚等,2003, 2004)。矿区中的岩石蚀变类型复杂多样,与钼矿化关系比较密切的蚀变为硅化、钾化、黄铁矿化、碳酸盐化,围岩普遍具有热液接触变质现象,形成了黑云母长英质角岩(张达玉等,2009)。

4 样品和分析方法

白山钼矿岩芯样品来自 ZK31-2、ZK15-5 二个钻孔,岩性主要为似斑状钾长花岗岩和黑云母斜长花岗岩以及花岗斑岩,这些花岗质岩类通常被含矿的石英-钾长石脉体穿插(图 3a)。花岗斑岩呈浅肉红色,斑状结构,镜下主要见钾长石和石英斑晶,斜长石较少,见极少量角闪石,基质为细粒结构,成分主要为石英,副矿物为磁铁矿、榍石等(图 3b)。钾长花岗岩和黑云母斜长花岗岩均为似斑状中粒花岗结构,块状构造,前者为肉红色,主要矿物为钾长石、斜长石和石英,含少量黑云母;后者为灰白色,主要矿物为斜长石、石英、黑云母和微斜长石等,副矿物主要为磁铁矿、榍石、锆石等(图 3c, d)。

样品主量元素和微量元素的测定均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。首先,通过粗碎等方式剔除岩石样品中的热液脉体,然后用去离子水超声冲洗,晾干,再用碳化钨钵体磨成可过 200 目筛的粉末。每次换磨样品时,均先用自来水冲洗钵体并用酒精棉擦拭,以防止样品间相互污染。按实验流程,分别取适量样品利用碱熔法(测主量元素)和酸溶法(测微量元素)对样品进行前处理。主量元素的分析采用 Rigaku 100e 型 X 射线荧光光谱仪(XRF),分析精度优于 1% ~5%,详细前处理及分析步骤见刘颖等(1996)。微量元素的分析采用 Perkin-Elmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),分析精度一般为 2% ~5%,具体测试方法见 Li(1997)。白山钼矿岩芯样品的主量元素和微量元素测定结果见表 1。

4.1 主量元素

从表 1 中可以看出:样品 SiO_2 含量范围在 68.54% ~74.68%,以高 Na_2O(2.70% ~4.99%)和 Al_2O_3(13.66% ~15.05%)为特征,K_2O 含量也较高,范围在 3.36% ~6.84%,而 MgO 含量(0.34% ~0.68%)较低。在 K_2O-SiO_2 图解(图 4a)中,样品主要落入高钾钙碱性系列。样品的 A/CNK 范围为 0.9 ~1.1,表现为弱的准铝质到弱过铝质岩石性质(图 4b)。在 Ab-An-Or 标准矿物图解(图 5)中,所有样品均落入花岗岩范围。

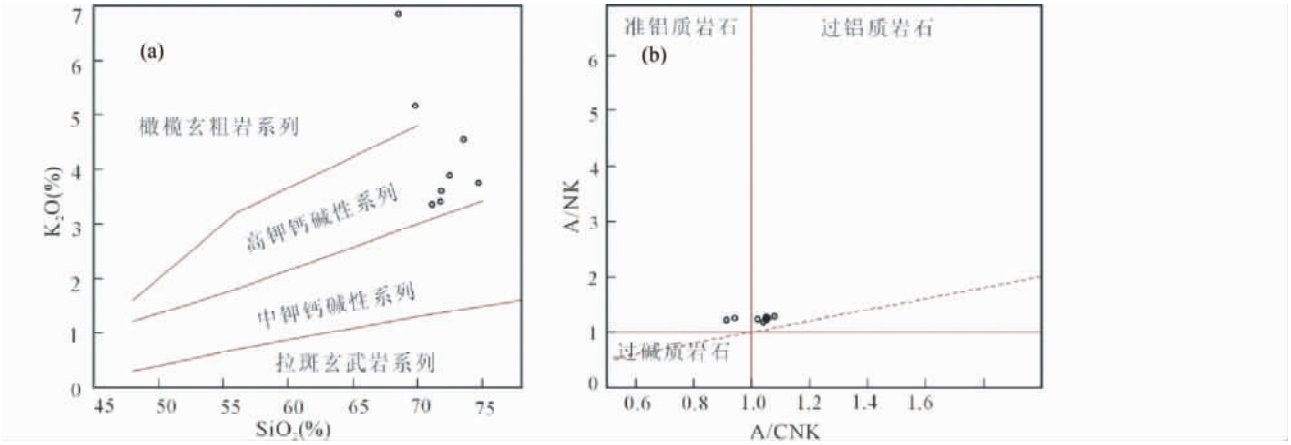


图 4 白山花岗岩类 K_2O-SiO_2 图解(a)和 A/NK-A/CNK 图解(b)

Fig. 4 K_2O-SiO_2 (a) and A/NK-A/CNK (b) diagrams of the Baishan granitoids

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 白山钼矿岩芯样品的主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)组成

Table 1 Major (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) composition of core samples from Baishan molybdenum deposit

样品号	BS1	BS2	BS6	BS10	BS12	BS30	BS35	BS36
岩性	钾长花岗岩	花岗斑岩	钾长花岗岩	黑云母斜长花岗岩	黑云母斜长花岗岩	黑云母斜长花岗岩	钾长花岗岩	钾长花岗岩
位置	钻孔 ZK31-2					钻孔 ZK15-5		
SiO_2	69.86	68.54	73.57	71.75	71.15	74.68	71.82	72.51
TiO_2	0.28	0.39	0.18	0.27	0.31	0.24	0.27	0.29
Al_2O_3	14.04	14.33	13.66	14.54	15.05	12.94	14.39	14.31
$Fe_2O_3^T$	1.92	1.89	1.25	1.71	1.87	1.74	1.73	1.68
MnO	0.02	0.04	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
MgO	0.48	0.68	0.34	0.50	0.60	0.45	0.51	0.50
CaO	1.99	2.09	0.88	1.28	1.13	0.79	1.26	1.06
Na_2O	3.47	2.70	3.92	4.98	4.99	4.21	4.57	4.50
K_2O	5.15	6.84	4.55	3.41	3.36	3.74	3.60	3.88
P_2O_5	0.11	0.16	0.06	0.09	0.10	0.08	0.09	0.10
L.O.I	2.34	1.96	1.23	1.18	1.11	0.75	1.46	0.83
Total	99.67	99.62	99.67	99.73	99.72	99.66	99.72	99.69
Ti	1768	2374	1097	1596	1828	1429	1492	1766
V	50.66	51.14	36.95	35	50.45	38.01	38.93	37.99
Cr	160.3	141.3	177.5	153.4	165.9	155	138.6	166.8
Mn	206.5	311.6	165.8	272.3	296.6	217.8	215.6	231.3
Co	3.828	2.151	1.683	2.625	2.81	2.246	2.734	2.35
Ni	6.458	6.764	4.284	4.801	5.269	3.809	4.011	4.462
Rb	148.7	180	118.3	95.02	97.32	98.1	80	96.04
Sr	224.6	340.7	288.5	478.6	521.2	281.9	379.6	393
Y	6.562	5.75	3.28	6.782	5.331	5.016	4.636	5.031
Zr	112.2	168.4	80.22	119	127.9	111.1	119.3	124.9
Nb	5.043	6.982	2.425	4.794	3.454	3.636	3.679	4.375
Cs	4.855	3.276	2.319	2.174	2.84	2.176	3.56	2.532
Ba	710	959	275	700	813	563	681	723
La	14.93	24.37	12.9	15.96	26.11	19.89	16.33	25.47
Ce	30.61	49.25	26.78	31.65	52.95	40.01	32.35	50.41
Pr	3.553	5.79	3.114	3.475	6.111	4.488	3.613	5.674
Nd	12.91	20.71	11.6	12.17	22.65	15.88	13	19.91
Sm	2.427	3.445	1.989	2.371	3.732	2.744	2.327	3.15
Eu	0.515	0.766	0.44	0.519	0.644	0.498	0.531	0.576
Gd	1.835	2.214	1.241	1.857	2.264	1.798	1.492	1.939
Tb	0.239	0.256	0.145	0.246	0.24	0.222	0.196	0.225
Dy	1.299	1.237	0.693	1.295	1.126	1.1	0.957	1.04
Ho	0.241	0.219	0.124	0.236	0.199	0.189	0.18	0.185
Er	0.629	0.528	0.32	0.651	0.515	0.485	0.445	0.456
Tm	0.093	0.082	0.048	0.097	0.076	0.075	0.065	0.067
Yb	0.567	0.514	0.304	0.629	0.523	0.472	0.398	0.446
Lu	0.087	0.082	0.051	0.101	0.084	0.075	0.063	0.07
Hf	2.673	3.736	2.605	3.341	3.278	2.9	3.127	3.134
Ta	0.435	0.334	0.313	0.473	0.34	0.415	0.384	0.511
Pb	18.59	21.01	19.92	16.27	16.66	16.51	15.89	16.8
Th	3.44	5.527	9.078	6.172	11.06	7.864	6.576	8.129
U	1.078	1.983	4.417	3.428	2.066	2.463	3.885	2.617
$Mg^{\#}$	36.9	45.6	39.0	40.6	42.9	37.6	40.9	41.0
Sr/Y	34.2	59.3	88.0	70.6	97.8	56.2	81.9	78.1
A/CNK	0.9	0.9	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1
δEu	0.7	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.9	0.7
La/Yb	26.3	47.4	42.4	25.4	49.9	42.1	41.0	57.1

注: $Mg^{\#} = MgO/(MgO + FeO^T)$ 分子比,FeO^T 表示全铁; $\delta Eu = Eu_N/(Sm_N * Gd_N)^{1/2}$,$Sm_N$ 和 Gd_N 为球粒陨石标准化值,球粒陨石数据引自 Boynton, 1984

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

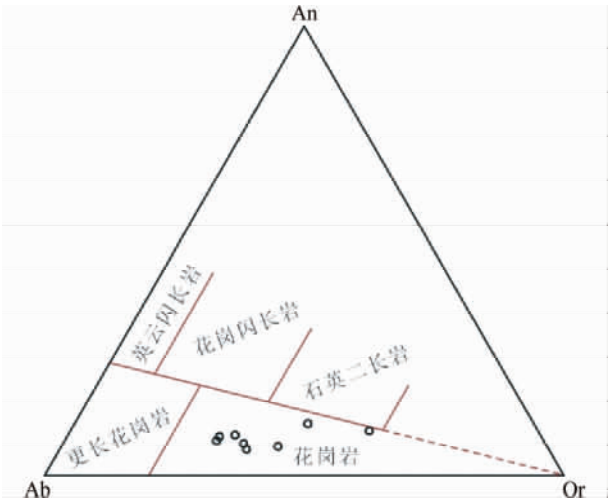


图5 白山花岗岩类 Ab–An–Or 标准矿物图解

Fig. 5 CIPW normative Ab–An–Or diagram of the Baishan granitoids

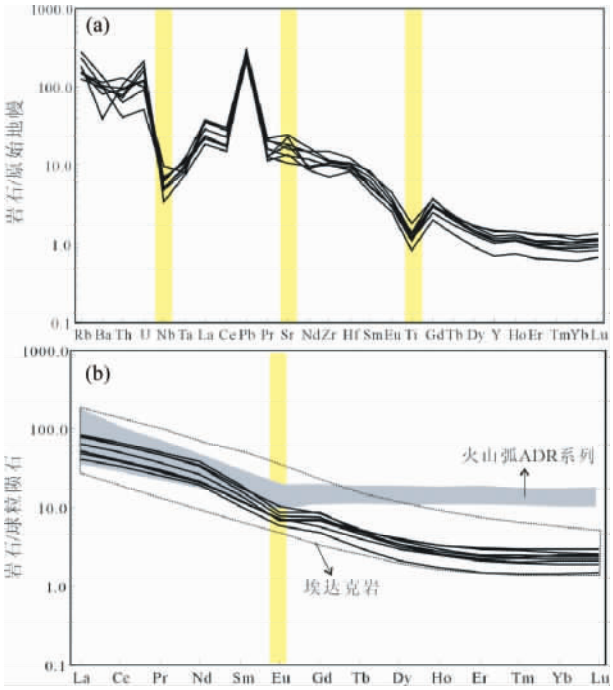


图6 白山花岗岩类微量元素蛛网图(a,原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)和稀土元素配分模式图(b,球粒陨石值据 Boynton, 1984;火山弧 ADR 系列及及埃达克岩范围据 Xiong *et al.*, 2001)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element diagrams of the Baishan granitoids

The data for primitive mantle and chondrite after Sun and McDonough (1989) and Boynton (1984), respectively; the domains of volcanic-arc ADR and adakite are after Xiong *et al.* (2001)

4.2 微量元素

所有样品的微量元素均表现为富集大离子亲石元素和亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素的特点,类似于钙碱性弧火成岩的特征(图6a)。但与典型火山弧安山岩-英安岩-流纹岩(ADR)系列岩石相比,白山钼矿岩芯样品具有明显的正 Sr 异常,且重稀土元素(HREE)非常亏损,Y 和 Yb 分别低至 $3.28\times10^{-6}\sim6.78\times10^{-6}$ 和 $0.304\times10^{-6}\sim0.629\times10^{-6}$,Eu 表现出弱负异常($\delta Eu=0.7\sim0.9$)(图6a)。

在稀土元素球粒陨石标准化图解(图6b)中,白山钼矿样品的稀土元素配分曲线呈现出陡峭的右倾斜特征,与典型的火山弧 ADR 系列等差别较大,暗示白山钼矿的花岗质岩类的形成演化可能受到地幔橄榄岩的影响较小。

考虑到其高 Sr 和低 Y、HREE 含量,具有类似埃达克质岩的地球化学特征,我们利用两组经典的埃达克岩判别图解(Martin, 1999)来划分。在 Sr/Y–Y 图解(图7a)和 $(La/Yb)_N$–$(Yb)_N$ 图解(图7b)中,白山钼矿岩芯样品均落入埃达克岩区域。

5 讨论

5.1 岩石成因

白山钼矿的深部岩体具有与埃达克质岩相似的高 Sr、Na_2O 和 Al_2O_3 含量,低 Y 和亏损 HREE 含量以及高 Sr/Y 和 La/Yb 比值等地球化学特征,在 Sr/Y–Y 和 $(La/Yb)_N$–$(Yb)_N$ 判别图解(图7)中落入埃达克岩的范围。因此,可以考虑用埃达克质岩的形成模式来探讨白山钼矿深部斑岩体的成因。

埃达克质岩石的成因模型至少包括:俯冲洋壳的熔融(Defant and Drummond, 1990; Gutscher *et al.*, 2000);增厚的下地壳镁铁质岩石熔融(Atherton and Petford, 1993; Xiong *et al.*, 2001, 2003; Wang *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2009);拆沉下地壳的熔融(Xu *et al.*, 2002; 王强等 2004);基性岩浆在厚的地壳底部通过石榴子石±角闪石结晶分异和混染作用(AFC 过程)而形成(Feeley and Hacker, 1995; Macpherson *et al.*, 2006; Richards, 2009, 2011)以及地幔岩浆与地壳岩浆的混合作用(Castillo, 2006; Guo *et al.*, 2007)等。

俯冲带环境地幔楔对熔体的交代作用以及地幔岩浆的混合作用,都会使得岩浆中 MgO 含量升高(Drummond *et al.*, 1996; Defant *et al.*, 2002; Castillo, 2006; Guo *et al.*, 2007),这与白山钼矿的埃达克质岩低 MgO 含量不符合。在 MgO–SiO_2 图解(图8a)中,白山钼矿样品的 MgO 含量甚至比加厚下地壳熔融成因的西天山尼勒克群吉萨依埃达克质岩的还要低,暗示不可能有地幔岩浆的混染。基性岩浆在厚的地壳底部通过石榴子石±角闪石结晶分异和混染作用(AFC 过程),使得岩浆中 Y 和 HREE 含量快速亏损,而对岩浆中的 Sr 和 LREE 含量几乎无影响,结果导致剩余岩浆中 Sr/Y 和 La/Yb 增大(Feeley and Hacker, 1995; Richards, 2009),这与本区埃达克质岩 Sr 含量不太高(Sr 含量为 $225\times10^{-6}\sim521\times10^{-6}$)、Y 和 Yb 较低、Sr/Y 和 La/Yb 比值较大比较相似。然

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

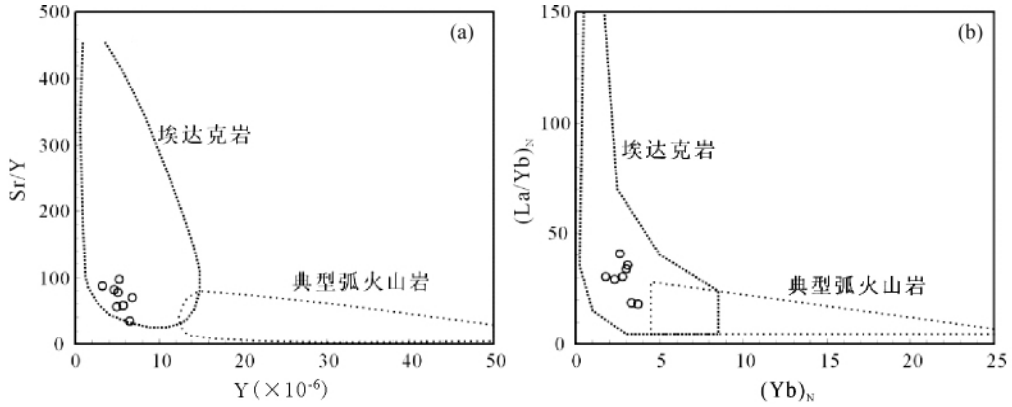


图 7　白山花岗岩类的 Sr/Y-Y 图解(a) 和(La/Yb) $_N$-(Yb) $_N$ 图解(b) (据 Martin，1999)

Fig. 7　Sr/Y-Y diagram (a) and (La/Yb) $_N$-(Yb) $_N$ diagram (b) of the Baishan granitoids (after Martin，1999)

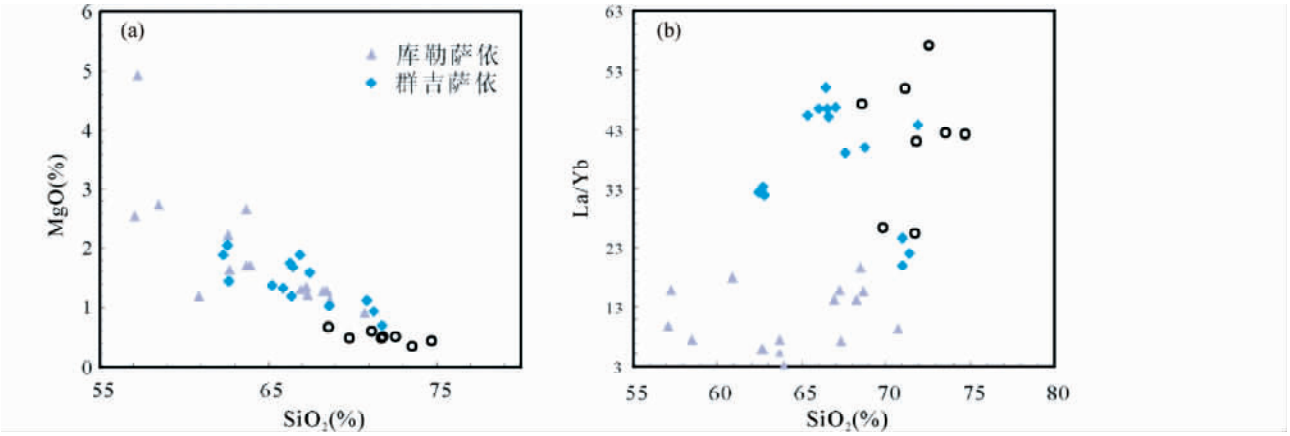


图 8　白山花岗岩类 MgO-SiO_2 图解(a) 和 La/Yb-SiO_2 图解(b)

库勒萨依样品数据引自李永军等(2008) 、朱志敏等(2012) ; 群吉萨依样品数据引自 Xiong *et al.* (2001) 、Zhao *et al.* (2008)

Fig. 8　MgO-SiO_2 diagram (a) and La/Yb-SiO_2 diagram (b) of the Baishan granitoids

Data of Kulesayi after Li *et al.* (2008) and Zhu *et al.* (2012) ; data of Qunjisayi after Xiong *et al.* (2001) and Zhao *et al.* (2008)

而本区未发现同源的基性和中性火成岩，因此由基性岩浆结晶分异而来的可能性不大。

拆沉下地壳熔融形成的埃达克岩通常因为与幔源岩浆发生混合，故而 $Mg^{\#}$**也会比较高(** Xu *et al.* **，** 2002) **。但白山钼矿岩芯样品的** $Mg^{\#}$**较低(** $Mg^{\#}$**范围为** 36. 9 ~ 45. 6) **，显示不可能混合了地幔橄榄岩。而增厚的下地壳镁铁质岩石熔融形成的埃达克质岩通常较富** Na、K **含量，**MgO **含量则较低(** Xiong *et al.* **，** 2003; Zhao *et al.* **，** 2009) **。对比之下，白山钼矿岩芯样品的地球化学特征更接近于增厚的下地壳熔融成因的埃达克质岩。将本区样品与新疆西天山两类典型埃达克质岩进行对比，在** MgO-SiO_2 **图解(图** 8a **) 和** La/Yb-SiO_2 **图解(图** 8b) **中可以看出，白山钼矿岩芯样品的** MgO **含量和** La/Yb **比值范围均与加厚下地壳熔融成因埃达克质岩(群吉萨依) 较为类似，而不同于俯冲板片熔融成因的埃达克质岩(库勒萨依) 。此外，白山钼矿岩芯样品的轻、重稀土元素发生了强烈分馏(** La/Yb **范围为** 25. 4 ~ 49. 9) **，说明源区有石榴子石残留。实验岩石学表明，符合埃达克质岩地球化学特征的岩浆形成压力至少在** 1. 5GPa(**熊小林等，**2005a; Xiong *et al.* **，** 2005，2009，2011) **，即白山钼矿区深部斑岩体的源区熔融深度可能在** 50km **以上。**

因此，白山钼矿岩芯样品的地球化学特征表明，矿区深部花岗斑岩体很可能与加厚的下地壳铁镁质岩石熔融有关。考虑到本区埃达克质岩 Sr **含量不高，**Sr/Y **和** La/Yb **比值较大，暗示岩浆在形成和演化过程中可能发生了一定的结晶分异作用。**

5. 2　岩石构造意义

前人对白山钼矿区周围的花岗质岩体(脉) 开展了一系列研究工作，以讨论与钼矿化有关的岩体的成岩和成矿背景。如李华芹等(2005，2006) 分别获得矿区西部白山西岩

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

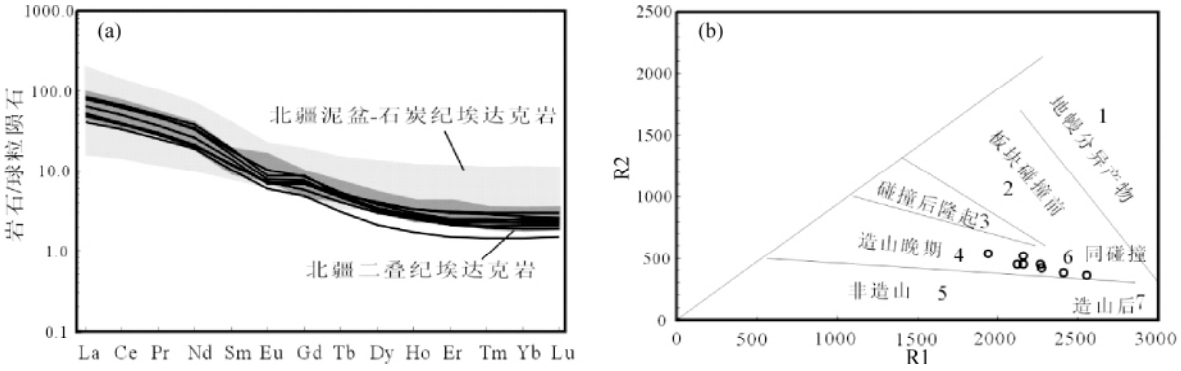


图 9 白山钼矿埃达克质岩的稀土元素配分模式图(a,球粒陨石值据 Boynton,1984)和 R1-R2 构造判别图解(b,据 De la Roche *et al.*,1980)

图(a)中北疆泥盆-石炭纪埃达克岩和二叠纪埃达克岩范围据朱志敏等,2012;图(b)中 R1 = 4Si-11(Na + K)-2(Fe + Ti);R2 = 6Ca + 2Mg + Al

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns (a, chondrite normalization values after Boynton, 1984) and R1-R2 diagram (b, after De la Roche *et al.*, 1980) of the Baishan granitoids

In Fig. 9a: adakite zones of North Xinjiang after Zhu *et al.*, 2012; in Fig. 9b: R1 = 4Si-11(Na + K)-2(Fe + Ti); R2 = 6Ca + 2Mg + Al

体黑云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 181 ± 3Ma、矿区南部斜长花岗斑岩 TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 235 ~ 245Ma 和东部红柳沟黑云母花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 239Ma ± 8Ma;周涛发等(2010)测得矿区东部花岗岩(狼井岩体)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 284.5 ± 4.5Ma。

另外,对白山钼矿矿石年龄的研究表明,钼矿化年龄与矿区周围花岗质岩类相近(李华芹等,2005,2006),暗示白山钼矿深部矿化斑岩体与这些花岗质岩类可能具有相似的形成背景。事实上,钻孔资料显示深部蚀变的花岗斑岩属燕山期(邓刚等,2003),即矿区深部斑岩体的岩浆活动时间与矿区周边花岗质岩类相近。

从白山钼矿岩芯样品的稀土元素配分模式图(图 9a)可以看出,样品表现出类似新疆北部二叠纪埃达克质岩的元素分布特征,暗示白山钼矿深部岩体来源于一个较深的熔融源区,熔融深度在角闪岩相-榴辉岩相过渡范围(熊小林等,2005a; Xiong *et al.*, 2005)。从花岗岩类 R1-R2 构造判别图解(图 9b)可看出,白山钼矿岩芯样品均分布于造山作用晚期向造山后演化的阶段,即由碰撞后伸展向板内演化的过程。因此,白山钼矿区深部的斑岩体形成于本区碰撞加厚下地壳的部分熔融。

区域大地构造和本区花岗质岩类研究表明,东天山觉罗塔格地区在二叠纪以后已经进入后碰撞演化阶段转向区域构造板内演化阶段(李锦轶等,2006;周涛发等,2010),且广泛发育与底侵作用有关的花岗质岩浆活动(顾连兴等,2006)。这些认识与本文研究结果一致。

5.3 成岩与矿化关系

关于白山钼矿成矿时代和成矿作用期次,尚有争议。主要观点有晚古生代石炭纪(含矿石英脉 Pb 同位素:314 ~ 326Ma,周济元等,1996)成矿,中三叠世(黄铁矿和辉钼矿 Re-Os:225Ma 和 224.8Ma,Zhang *et al.*, 2005;辉钼矿 Re-Os:225.8Ma,张达玉等,2009;辉钼矿 Re-Os 等时线:229Ma,李华芹等,2006)成矿,以及早侏罗世(含矿石英脉中石英 Rb-Sr 等时线和 ^{40}Ar-^{39}Ar 坪年龄:180 ~ 194Ma,李华芹等,2005)成矿。其中,李华芹等(2005,2006)认为该钼矿床经历了印支期和燕山期两期成矿作用,早期成岩成矿作用发生于中三叠世,晚期成岩成矿作用发生于早侏罗世。

大量的岩石和矿石年代学证据表明白山钼矿形成至少经历了中三叠世成岩、成矿事件,并与本区二叠纪以来的底侵作用及酸性岩浆活动密切相关。白山钼矿的矿床地质特征和地球化学特征表明该矿床是典型的斑岩型钼矿床,成矿物质主要来源于矿体深部的矿化花岗斑岩体(周济元等,1996;邓刚等,2003)。我们认为白山钼矿床的 Mo 矿化过程与深部的埃达克质岩(即钻孔中获得的样品)形成过程密切相关。

在全球范围内,埃达克质岩浆活动与斑岩型 Cu-Au-Mo-Ag 矿床存在时间和空间上的联系(Thielemont *et al.*, 1997; Sajona and Maury, 1998; Oyarzun *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2011)。埃达克质岩有利的成矿因素可能与其独特源区组成以及其形成过程中高氧逸度(f_{O_2})和富流体环境有关(Oyarzun *et al.*, 2001; 熊小林等,2005b)。

白山钼矿深部矿化斑岩体源区为加厚的下地壳,而地壳中 Mo 的丰度较高。白山地区花岗岩中 Mo 含量高于花岗岩克拉克值 7 ~ 8 倍(邓刚等,2003),表明本区源岩具有富 Mo 的特点。下地壳在受到底侵热源或自身加厚温压达到液相线时发生部分熔融,地壳中的 Mo 元素进入岩浆。埃达克质岩浆具有高 f_{O_2} 的特征(Oyarzun *et al.*, 2001),有效抑制了 Mo 的硫化物沉淀,使得成矿元素(Mo)能够在岩浆中富集。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

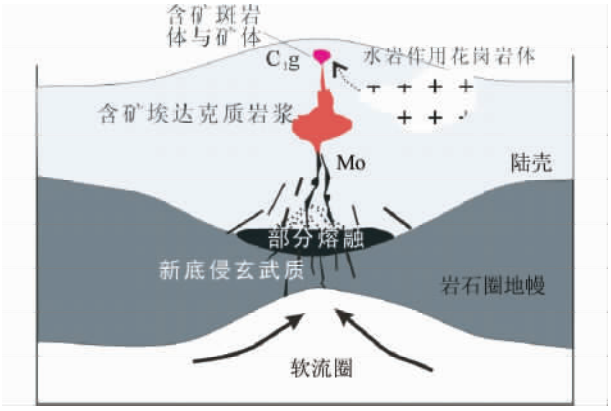


图 10　白山钼矿成岩成矿模式示意图(据赵振华等, 2004; 张达玉等,2009 修改)

Fig. 10　Sketch model of the mineralization for Baishan molybdenum deposit (after Zhao *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2009)

同时,埃达克质岩浆形成过程中伴随着角闪石分解脱水作用(Rapp *et al.*,1999),脱水形成的流体加大了埃达克质岩浆的运移、上侵能力,使之沿着岩浆通道富集和运移含矿熔体,形成含矿大岩浆房(图 10)。

富含 Mo 金属元素的埃达克质岩浆上升到地壳浅部时,压力快速释放,Mo 的配合物出溶并进入流体相,形成富 Mo 成矿热液。含矿热液沿着各种裂隙通道运移、循环,并可能与大气降水混合,使得成矿热液温度、压力下降和 pH 值升高(邓刚等,2004; 张达玉等,2009)。通过水-岩作用, Mo 等成矿物质沉淀富集,形成白山钼矿床。

6　结论

(1) 新疆东天山白山钼矿的深部钻探表明其深部存在与矿化有关的似斑状花岗岩和花岗斑岩,其岩性主要为钾长花岗岩、黑云母斜长花岗岩和花岗斑岩。这些样品具有高 Al_2O_3、Na_2O 和 Sr 含量,低 MgO、Y 和 Yb 含量等埃达克质岩的地球化学特征。

(2) 地球化学研究表明白山钼矿深部花岗质斑岩是典型的加厚下地壳熔融成因的埃达克质岩,形成于东天山碰撞后演化阶段转向板内演化阶段的构造背景。

(3) 白山钼矿床的成矿作用与埃达克质岩浆演化有关,加厚下地壳熔融成因的埃达克质岩由于其高 Mo 含量源区,成岩过程中提供流体以及岩浆高氧逸度环境等可能是成矿的关键因素。

致谢　野外工作得到中科院地质与地球物理研究所韩春明副研究员、中科院广州地化所赵太平研究员和新疆地勘局第六地质大队师宵杰、吴忧等工程师的指导和支持; 实验分析工作得到中科院广州地化所同位素地球化学国家重点实验室相关老师的帮助; 北京大学陈衍景教授在成文过程中给予指导和帮助; 两位评审专家提出了中肯宝贵的修改意见帮助本文提高了论证; 在此一并表示诚挚的感谢!

References

Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. Nature, 362(6461): 144-146

Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, 63-114

Castillo PR. 2006. An overview of adakite petrogenesis. Chinese Science Bulletin, 51(3): 257-268

Chen YJ, Fu SG, Wu DH, Wu XD and Jing J. 1995. The coupling of the gold mineralization with the collisional orogenesis and the distribution of gold deposits, northern Xinjiang. Gold Geology, 1(3): 8-16 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ. 1996. Mineralization during collisional orogenesis and its control of the distribution of gold deposits in Junggar Mountains, Xinjiang, China. Acta Geologica Sinica, 70(3): 253-261

Chen YJ. 2000. Progress in the study of Central Asia-type orogenesis-metallogenesis in Northwest China. Geological Journal of China Universities, 6(1): 17-22 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F, Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. Ore Geology Reviews, 31(1-4): 139-169

Chen YJ, Pirajno F, Wu G, Qi JP and Xiong XL. 2012. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China. International Journal of Earth Science, 101(4): 889-917

De La Roche H, Letterier J, Grandclaude P and Marchal M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1-R_2 diagrams and major element analyses-Its relationship with current nomenclature. Chemical Geology, 29(1-4): 183-210

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347(6269): 662-665

Defant MJ, Xu JF, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakites: Some variations on a theme. Acta Petrologica Sinica, 18(2): 129-142

Deng G, Yang ZF, Lu HF, Dai YC and Zhao XL. 2003. A large-type quartz network-porphry Mo deposit was discovered and proven in east Tianshan mountains. Mineral Deposits, 22(3): 317 (in Chinese)

Deng G, Wu H and Lu QM. 2004. Geological characteristics and prospecting mark of the Baishan porphyry Mo deposit, East Tianshan. Geological Bulletin of China, 23(11): 1132-11382 (in Chinese with English abstract)

Drummond MS, Defant MJ and Kepezhinskas PK. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences, 87(1-2): 205-215

Feeley TC and Hacker MD. 1995. Intracrustal derivation of Na-rich andesitic and dacitic magmas: An example from Volcano Olague, Andean Central Volcanic Zone. Journal of Geology, 103(2): 213-225

Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Wang YX, Tang JH, Wang CS, Xi AH and Zheng YC. 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China. Acta Petrologica Sinca, 22(5): 1103-1120 (in Chinese with English abstract)

Guo F, Nakamura E, Fan WM, Kobayashi K and Li CW. 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing in Yanji area, NE China. Journal of Petrology, 48(4): 661-692

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Gutscher MA, Maury R, Eissen JP and Bourdon E. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? Geology, 28(6): 535 – 538

He J, Mo XH, Peng MX and Shan JZ. 2002. Geological characteristics and genetic analysis of Baishan molybdenum deposit. West-China Exploration Engineering, 14(Suppl.): 163 – 165 (in Chinese)

Li HQ, Wu H, Chen FW, Deng G, Yang HM, Yang ZF, Mei YP and Guo J. 2005. Isotopic chronological evidence for Yanshanian diagenetic mineralization in Baishan rhenium molybdenum mine, E. Tianshan Mountains. Acta Geologica Sinica, 79(2): 249 – 255 (in Chinese with English abstract)

Li HQ, Chen FW, Li JY, Qu WJ, Wang DH, Wu H, Deng G and Mei YP. 2006. Age of mineralization and host rocks in the Baishan rhenium-molybdenum district, East Tianshan, Xinjiang, China: Revisited. Geological Bulletin of China, 25(8): 916 – 922 (in Chinese with English abstract)

Li JY, Wang KZ, Li YP, Sun GH, Chu CH, Li LQ and Zhu ZX. 2006. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains. Geological Bulletin of China, 25(8): 895 – 909 (in Chinese with English abstract)

Li XH. 1997. Geochemistry of the Longsheng ophiolite from the southern margin of Yangtze Craton, SE China. Geochemical Journal, 31(15): 323 – 337

Li YJ, Gu PY, Pang ZJ, Luan XD and Tong LP. 2008. Identification of the adakite rocks of Kulesayi series and its significance of Mo prospecting in the Tekesidaban of western Tianshan. Acta Petrologica Sinica, 24(12): 2713 – 2719 (in Chinese with English abstract)

Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace element in rock samples using ICP-MS. Geochimica, 25(6): 552 – 558 (in Chinese with English abstract)

Macpherson CG, Dreher ST and Thirlwall MF. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. EPSL, 243(3 – 4): 581 – 593

Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. Lithos, 46(3): 411 – 429

Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, Lopez I and Rivera S. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. Mineralium Deposita, 36(8): 794 – 798

Qin KZ, Fang TH, Wang SL, Zhu BQ, Feng YM, Yu HF and Xiu QY. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains, NW China. Xinjiang Geology, 20(4): 302 – 308 (in Chinese with English abstract)

Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8GPa. Chemical Geology, 160(4): 335 – 356

Richards JP. 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. Geology, 37(3): 247 – 250

Richards JP. 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits: Just add water. Economic Geology, 106(7): 1075 – 1081

Sajona FG and Maury RC. 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in Philippines. Comptes Rendus de I'Académie des Sciences-Series IIA-Earth & Planetary Sciences, 326(1): 27 – 34

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.) Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society London Special Publications, 42(1): 313 – 345

Sun WD, Zhang H, Ling MX, Ding X, Chung SL, Zhou J, Yang XY and Fan WM. 2011. The genetic association of adakites and Cu-Au ore deposits. International Geology Review, 53(5 – 6): 691 – 703

Thieblemont D, Stein G and Lescuyer JL. 1997. Epithermal and porphyry deposits: The adakite connection. Comptes Rendus de I'Académie des Sciences-Series IIA-Earth & Planetary Sciences, 325(2): 103 – 109

Wang JB and Xu X. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China. Acta Geologica Sinica, 80(1): 23 – 31 (in Chinese with English abstract)

Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Bai ZH, Wang JX and Liu CX. 2004. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (Delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 351 – 360 (in Chinese with English abstract)

Wang Q, McDermontt 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(6): 465 – 468

Xiao WJ, Zhang LC, Qin KJ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of Central Asia. American Journal of Science, 304(4): 370 – 395

Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to Mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. International Journal of Earth Sciences, 98(6): 1189 – 1217

Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH, Mei HJ, Wang YX, Wang Q, Xu JF, Niu HC 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(1): 1 – 7

Xiong XL, Li XH, Xu JF, Li WX, Zhao ZH, Wang Q and Chen XM. 2003. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate: The Zhantang andesites in the Huichang Basin of SE China. Geochemical Journal, 37(2): 233 – 252

Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. Chemical Geology, 218(3 – 4): 339 – 359

Xiong XL, Cai ZY, Niu HC, Chen YB, Wang Q, Zhao ZH and Wu JH. 2005. The late Paleozoic adakites in eastern Tianshan area and their metallogenetic significance. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 967 – 976 (in Chinese with English abstract)

Xiong XL, Adam J, Green TH, Niu HC, Wu JH and Cai ZY. 2006. Trace element characteristics of partial melts produced by melting of metabasalts at high pressures: Constraints on the formation conditions of adakitic melts. Science in China (Series D), 49(9): 915 – 925

Xiong XL, Keppler H, Audétat A, Gudfinnsson G, Sun WD, Song MS, Xiao WS and Li Y. 2009. Experimental constraints on rutile saturation during partial melting of metabasalt at the amphibolite to eclogite transition, with applications to TTG genesis. American Mineralogist, 94(8 – 9): 1175 – 1186

Xiong XL, Keppler H, Audétat A, Ni HW, Sun WD and Li Y. 2011. Partitioning of Nb and Ta between rutile and felsic melt and the fractionation of Nb/Ta during partial melting of hydrous metabasalt. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(7): 1673 – 1692

Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rock in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust? Geology, 30(12): 1111 – 1114

Zhang DY, Zhou TF, Yuan F, Fan Y, Liu S and Qu WJ. 2009. A genetic analysis of Baishan molybdenum deposit in East Tianshan area, Xinjiang. Mineral Deposits, 28(5): 663 – 672 (in Chinese with English abstract)

Zhang LC, Xiao WJ, Qin KZ, Qu WJ and Du AD. 2005. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance. Mineralium Deposita, 39(8): 960 – 969

Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Bai ZH and Mei HJ. 2004. A case study on porphyry Cu deposit related with adakitic quartz albite porphyry in Mosizaote, western Tianshan, Xinjiang, China. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 249 – 258 (in Chinese with English abstract)

Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Wyman DA, Bao ZW and Qiao YL.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2008. Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China. Lithos, 102(1-2): 374-391

Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Bai ZH and Qiao YL. 2009. Late Paleozoic underplating in North Xinjiang: Evidence from shoshonites and adakites. Gondwana Research, 16(2): 216-226

Zhou JY, Zhang B and Zhang CW. 1996. Geology of the Silver, Rhenium, Molybdenum, Gold and Copper Deposits in the Eastern Tianshan and Its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 105-133 (in Chinese)

Zhou TF, Yuan F, Zhang DY, fan Y, Liu S, Peng MX and Zhang JD. 2010. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 478-502 (in Chinese with English abstract)

Zhu ZM, Zhao ZH and Xiong XL. 2012. Geochemistry and geodynamics of intermediate-acid igneous rocks in northern Tekesi, western Tianshan Mountains. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2145-2157 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈衍景, 富士谷, 吴德华, 吴锡丹, 靖军. 1995. 新疆北部金矿化与碰撞造山作用的耦合及金等矿床的分布规律. 黄金地质, 1(3): 8-16

陈衍景. 2000. 中国西北地区中亚型造山——成矿作用的研究意义和进展. 高校地质学报, 6(1): 17-22

邓刚, 杨再峰, 卢鸿飞, 代育才, 赵献丽. 2003. 东天山发现并探明白山大型燕山期石英网脉-斑岩型钼矿床. 矿床地质, 22(3): 317

邓刚, 吴华, 卢全敏. 2004. 东天山白山斑岩型钼矿床的地质特征及找矿标志. 地质通报, 23(11): 1132-1138

顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 王银喜, 唐俊华, 汪传胜, 郗爱华, 郑远川. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. 岩石学报, 22(5): 1103-1120

贺静, 莫新华, 彭明兴, 单金忠. 2002. 白山钼矿地质特征及成因探讨. 西部探矿工程, 14(增刊): 163-165

李华芹, 吴华, 陈富文, 邓刚, 杨红梅, 杨再峰, 梅玉萍, 郭敬. 2005. 东天山白山铼钼矿区燕山期成岩成矿作用同位素年代学证据. 地质学报, 79(2): 249-255

李华芹, 陈富文, 李锦轶, 屈文俊, 王登红, 吴华, 邓刚, 梅玉萍. 2006. 再论东天山白山铼钼矿区成岩成矿时代. 地质通报, 25(8): 916-922

李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 孙桂华, 褚春华, 李丽群, 朱志新. 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化. 地质通报, 25(8): 895-909

李永军, 辜平阳, 庞振甲, 栾新东, 佟丽萍. 2008. 西天山特克斯达坂库勒萨依序列埃达克岩的确立及钼找矿意义. 岩石学报, 24(12): 2713-2719

刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用ICP-MS准确测定岩石样品中的40余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558

秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 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

王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报, 80(1): 23-31

王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. 岩石学报, 20(2): 351-360

熊小林, Adam J, Green TH, 牛贺才, 吴金花, 蔡志勇. 2005a. 变质玄武岩部分熔体微量元素特征及埃达克熔体产生条件. 中国科学(D辑), 35(9): 837-846

熊小林, 蔡志勇, 牛贺才, 陈义兵, 王强, 赵振华, 吴金花. 2005b. 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

张达玉, 周涛发, 袁峰, 范裕, 刘帅, 屈文俊. 2009. 新疆东天山地区白山钼矿床的成因分析. 矿床地质, 28(5): 663-672

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——一个与埃达克质岩有关的铜矿实例. 岩石学报, 20(2): 249-258

周济元, 张斌, 张朝文. 1996. 东天山古大陆及其边缘银、铼、钼、金和铜矿地质特征. 北京: 地质出版社, 105-133

周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究. 岩石学报, 26(2): 478-502

朱志敏, 赵振华, 熊小林. 2012. 西天山特克斯北中酸性火成岩地球化学特征及成因意义. 岩石学报, 28(7): 2145-2157

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net