

内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义*

陈志广^{1,2} 张连昌^{1**} 卢百志³ 李占龙³ 吴华英^{1,2} 相鹏^{1,2} 黄世武⁴

CHEN ZhiGuang^{1,2}, ZHANG LianChang^{1**}, LU BaiZhi³, LI ZhanLong³, WU HuaYing^{1,2}, XIANG Peng^{1,2} and HUANG ShiWu⁴

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 北京矿产地质研究院, 北京 100012

4. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China

4. The Civil and Environment Engineering school of University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2010-02-01 收稿, 2010-04-01 改回.

Chen ZG, Zhang LC, Lu BZ, Li ZL, Wu HY, Xiang P and Huang SW. 2010. Geochronology and geochemistry of the Taipingchuan copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, and its geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (5):1437 – 1449

Abstract Recently discovered Taipingchuan porphyry Cu-Mo deposit is located in the north of Derbugan metallogenic belt, Ergun city of Inner Mongolia. Concentric rings of hydrothermal alteration and Cu-Mo mineralization occurred surrounding the granodiorite porphyry. Two hydrothermal alteration zones from the host porphyry to wall rocks have been recognized in Taipingchuan mine: A silicified-sericite zone and an argillic alteration zone. The Cu-Mo mineralization is clearly controlled by the silicified-sericite alteration. By using the zircon U-Pb dating methods a precise age data of the host porphyry is obtained. The dating data show that the age of host porphyry is 202 ± 5.7 Ma. The inherited zircon (784Ma) has also been found in the host porphyry, which indicates that a Proterozoic block was probably located in the study area. Geochemically, the host porphyry of Wunugetushan possesses some geochemical characteristics of adakite (i. e., high SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O and Sr contents, as well as La/Yb ratios, low MgO, Y and HREE contents). Some geochemical characteristics of the host porphyry, including relatively high SiO_2 , Yb contents and Th/Nb, Ce/Nb ratios and relatively low Al_2O_3 , TiO_2 , MgO, Sr, Th contents and Th/Ce ratio indicate that the porphyry derived from partial melting of the subducted slab. The Sr-Nd isotopic composition of the porphyry displays an initial ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i ratio of 0.70943 to 0.71019, a negative $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of -3.4 to -3.9. The Sr-Nd isotopic data indicates that Proterozoic block had some contribution to the magma sources of the host porphyry. Combining the regional geology, we infer that the subduction of Mongol-Okhotsk ocean slab under the Ergun block led to the host porphyry forming, and Taipingchuan Cu-Mo deposit was related to a continental arc environment.

Key words Derbugan metallogenic belt; Porphyry Cu-Mo deposit; Zircon U-Pb age; Geochemistry; Adakite; Continental arc environment; Mongol-Okhotsk Ocean

摘要 内蒙古太平川 Cu-Mo 矿床位于得尔布干成矿带北段额尔古纳地区, 为新近发现的斑岩型矿床。矿区内发育环带状热液蚀变, 由内向外主要为硅化-绢云母化和泥化。热液蚀变围绕花岗岩长斑岩分布, Cu-Mo 矿化主要受控于硅化-绢云母化蚀变, 主要分布在花岗岩长斑岩中。本文获得成矿斑岩岩浆锆石 U-Pb 谐和年龄为 202 ± 5.7 Ma, 指示该矿床可能形成于晚

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403006)和南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金项目(14-08-9)联合资助。

第一作者简介: 陈志广, 男, 1982 年生, 博士研究生, 矿床地质专业, E-mail: zgchen@mail.iggcas.ac.cn

** 通讯作者: 张连昌, 研究员, 矿床地质专业, E-mail: lc Zhang@mail.iggcas.ac.cn

三叠世。同时在样品中也发现继承锆石(784Ma),表明该地区可能存在晚元古基底。成矿斑岩的元素地球化学数据表明,主量元素 SiO_2 (65.86% ~ 68.84%) > 56%、 Al_2O_3 (15.18% ~ 16.28%) > 15%、 MgO (0.84% ~ 1.06%) < 3%、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ > 1; 微量元素亏损重稀土, Sr (471×10^{-6} ~ 513×10^{-6}) > 400×10^{-6} 、 Y (15.0×10^{-6} ~ 17.9×10^{-6}) < 18×10^{-6} 、 Yb (1.27×10^{-6} ~ 1.81×10^{-6}) < 1.9×10^{-6} , 表明该花岗闪长斑岩具有明显的埃达克质岩石的地球化学特征。同时成矿斑岩具有相对高的 SiO_2 、 Yb 含量和 Th/Nb 、 Ce/Nb 比值,而相对低的 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 Sr 、 Th 含量和 Th/Ce 比值,这些特征与源于俯冲板片的埃达克岩相似。然而成矿斑岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t (0.70943 ~ 0.71019) 较大, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -3.4 ~ -3.9, 我们推测额尔古纳地块在岩浆上升过程中贡献了部分物质。结合区域构造演化,我们认为该矿区成矿斑岩岩浆形成于俯冲洋壳的部分熔融,矿床形成背景为早中生代蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块俯冲的陆缘弧环境。

关键词 得尔布干成矿带; 斑岩 Cu-Mo 矿床; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 埃达克岩; 陆缘弧环境; 蒙古-鄂霍茨克洋

中图法分类号 P588.13; P597.3

1 引言

得尔布干成矿带位于内蒙古东北部,是我国北方重要的多金属成矿带,产出乌奴格吐山大型斑岩 Cu-Mo 矿,甲乌拉查干布拉根热液脉状 Ag-Pb-Zn 矿和额仁陶勒盖 Ag 矿。在该成矿带的俄-蒙邻区,已发现规模不等的 Au、Cu、Pb、Zn 和 Ag 等金属矿床 500 多个,其中大型-超大型矿床 40 个,包括 U-Mo 矿 21 个、Au 矿 3 个、Pb-Zn 矿 5 个和 Cu 矿 5 个,已发展成大型-超大型金属矿床密集区(顾巧根和季绍新, 1996; 赵一鸣和张德全, 1997; 阎鸿铨等, 1998), 预示着得尔布干成矿带金属矿床潜力巨大。得尔布干成矿带成矿作用的研究相比俄-蒙邻区明显落后,尚存在着一系列没有解决的科学问题,如:该成矿带中生代火山-岩浆成矿作用的成矿时代、矿床成因、成矿背景以及成矿规律等,这些问题已经严重制约了地质找矿工作的进展。

太平川 Cu-Mo 矿是近年来新发现的斑岩型矿床,该矿床所在的额尔古纳地区研究和地质勘查程度低,还没有发现规模较大的矿床,目前认为太平川斑岩 Cu-Mo 矿床可能是个突破。鉴于太平川斑岩 Cu-Mo 矿缺乏年代学和地球化学研究,我们通过对矿床的成矿斑岩锆石 U-Pb 年代学和主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学研究来讨论该矿床的成因和区域构造演化意义。

2 区域地质

得尔布干成矿带位于中亚造山带的东端、蒙古-鄂霍茨克造山带南缘、古太平洋俯冲带的西侧(图 1a)。自古生代以来,先后经历了古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨克洋和古太平洋的演化,形成了复杂的构造-岩浆体系。区域出露地层主要为前寒武系的兴华渡口群、加伦组,中生界塔木兰沟组、上库力组、伊列克得组火山岩地层,零星分布有寒武系额尔古纳河组和古生界石炭系莫尔根河组(图 1b)。本区岩浆岩十分发育,出露面积较大,均呈北东向展布,时代主要为古元古代、新元古代、晚古生代和中生代。古元古代岩浆岩主要为具片麻状构造的中基-酸性杂岩,出露总面积约 180km²,变质程度较高。该类杂岩侵入到新华渡口群地层中,并被其后各

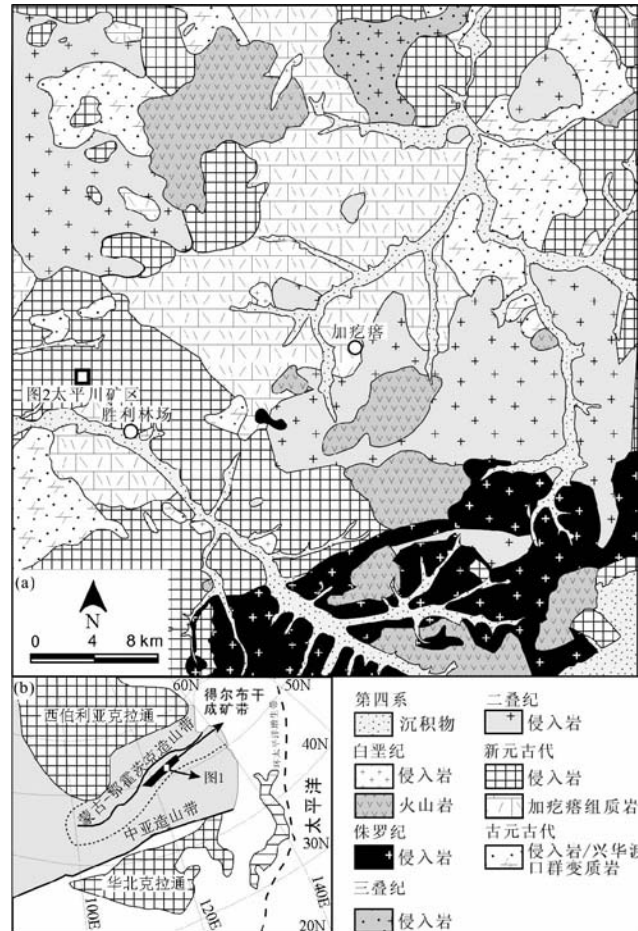


图1 内蒙古额尔古纳区域地质略图(a,据李占龙等, 2009 简化①; b,据 Safonova, 2009)

Fig. 1 Geological sketch map of the Ergun area of Inner Mongolia, NE China (after Safonova, 2009)

时代岩浆岩侵入,局部被白垩纪火山岩地层覆盖。新元古代岩浆活动强烈,出露面积最大者达 2500km²。岩性主要为中基性杂岩、黑云母钾长花岗岩、黑云母石英二长闪长岩和花岗闪长岩。各种岩石均发生了不同程度的变形,虽具有一定

① 李占龙, 卢白志, 赫修忠等. 2009. 内蒙古自治区额尔古纳市太平川铜钼矿床详查报告

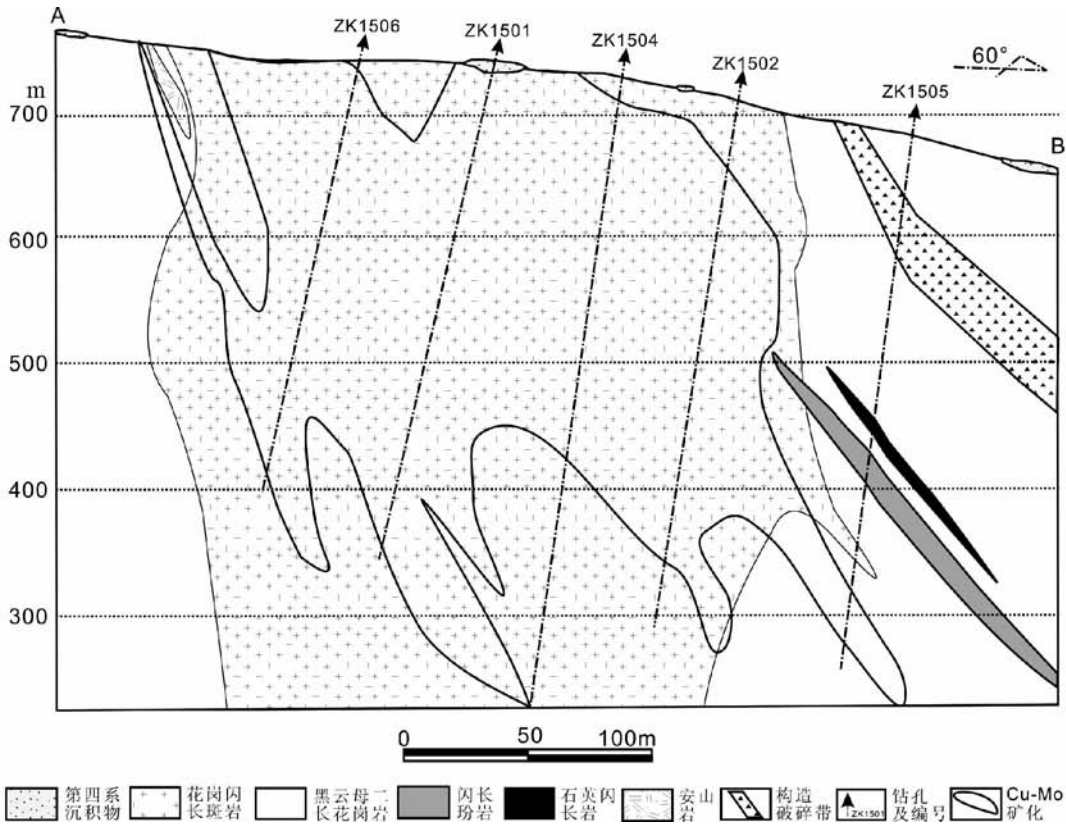


图3 太平川矿区勘探剖面地质图(修改自李占龙等, 2009)

Fig. 3 NE geological section of the Taipingchuan Cu-Mo mine

绢云母化蚀变带中。

3.2.1 硅化-绢云母化

硅化-绢云母化主要发育在花岗闪长斑岩中,局部的黑云母二长花岗岩也发生硅化-绢云母化。该蚀变以出现大量绢云母为特征,蚀变矿物主要为石英、绢云母和少量的白云母。由于叠加了晚期的泥化蚀变,该蚀变带中常出现少量的高岭土、绿泥石等蚀变矿物。硅化-绢云母化蚀变带内出现大量的石英脉,宽度变化范围为几毫米到几厘米。岩石中的斜长石、钾长石和黑云母等矿物易热液蚀变,形成石英、绢云母、高岭土和绿泥石等矿物。硅化-绢云母化蚀变带呈似环带状,宽度大于300m。Cu-Mo矿化主要分布在该蚀变带中,形成Cu-Mo矿体。Cu-Mo矿体一般呈板状、脉状,均倾向北东,倾角变化范围为 $55^{\circ} \sim 70^{\circ}$,矿体厚度变化范围为1~10m。Cu-Mo矿石金属硫化物组成为黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿和少量斑铜矿、黝铜矿,偶见闪锌矿、方铅矿。硫化物常呈脉状、网脉状、浸染状、团斑状分布(图4c, d, e),脉状的金属硫化物常沿裂隙分布,粗大石英脉中常出现巨斑状的辉钼矿(图4f)。

3.2.2 泥化

矿区内泥化蚀变主要发育在黑云母二长花岗岩和局部花岗闪长斑岩中,岩石由于发生泥化而呈灰绿色或灰白色。该蚀变以出现高岭土、绿泥石和绢云母的蚀变矿物组成为特征。岩石中的斜长石、钾长石发生高岭土化,绢云母化,黑云

母、角闪石等矿物发生绿泥石化、绿帘石化。在该蚀变带偶见浸染状的黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿和一些石英硫化物脉,但未形成矿体。

4 样品采集和实验方法

在矿区内采集成矿斑岩岩芯样品,样品经过破碎、淘洗、重液浮选和地磁分离方法挑选出来锆石,然后将锆石在双目镜下观察,挑选出具有代表性的锆石样品,制作成靶。锆石阴极发光(CL)图像在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室完成,所用仪器为德国LEO 1450VP型扫描电子显微镜(SEM)。LA-ICP-MS锆石U-Pb分析在南京大学内生金属矿床机制国家重点实验室完成。实验采用美国Agilent公司Agilent 7500a型ICP-MS和New Wave UP213激光剥蚀系统。工作参数为:等离子气体 $Ar\ 16L \cdot mi^{-1}$,辅助气体 $Ar\ 1L \cdot mi^{-1}$,剥蚀物质载气 $He\ 0.9 \sim 1.2L \cdot mi^{-1}$ 。激光剥蚀系统波长213nm,激光脉冲频率5Hz,宽度5ns,剥蚀孔径 $40\mu m$,剥蚀时间80s,背景测量时间40s,脉冲能量为 $10 \sim 20 J \cdot cm^{-2}$, ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 的停留时间依次为15ms、30ms、10ms、10ms、15ms。实验原理和测试方法见Jackson *et al.* (2004)。质谱的分析数据通过GLITTER (Van Achterbergh *et al.*, 2001)软件计算获得相应的同位素比值、

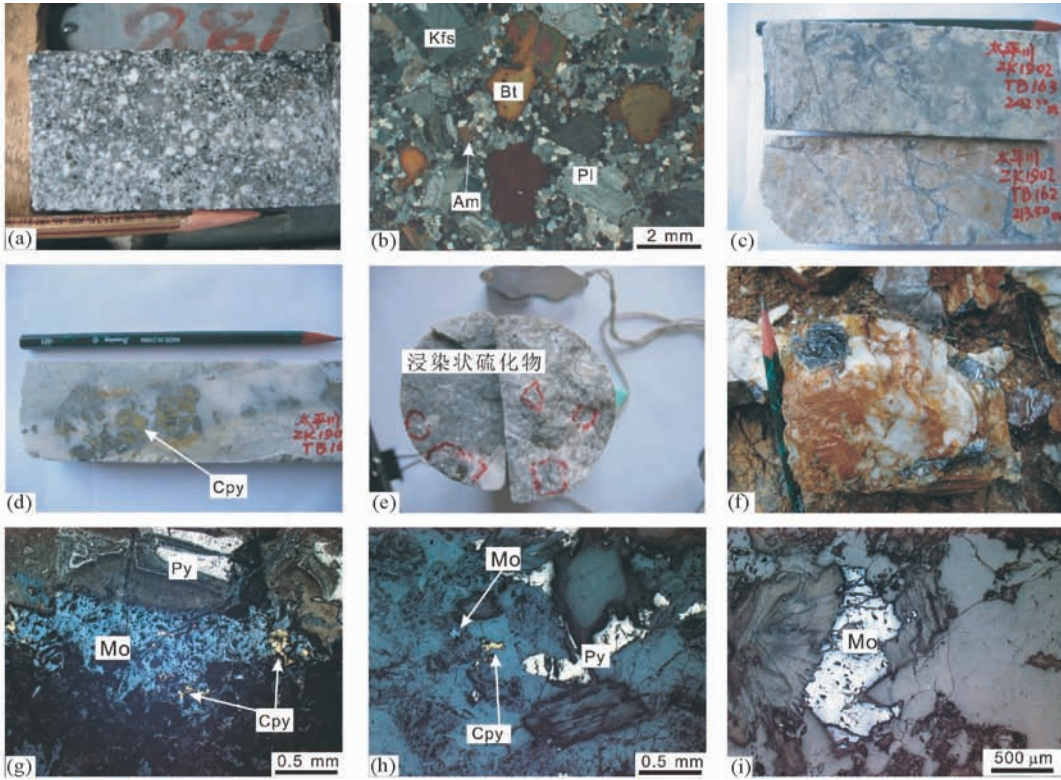


图4 太平川矿区成矿斑岩和矿石照片及显微照片

Kf-钾长石；Pl-斜长石；Bl-黑云母；Am-角闪石；Mo-辉钼矿；Py-黄铁矿；Cpy-黄铜矿

Fig. 4 Photographs and photomicrographs of the granodiorite porphyry and Cu-Mo ore from Taipingchuan mine

年龄以及误差,数据结果应用 Isoplot 程序 (Ludwig, 1999) 完成年龄计算和谐和图的绘制。

岩石地球化学样品采自矿区深部岩芯。选择 8 件新鲜成矿斑岩 (花岗闪长斑岩) 样品进行主、微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学分析。所有样品测试工作均在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。主量元素使用 X 射线荧光光谱仪 (XRF-1500) 测试完成,分析误差优于 5%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用 ICP-MS (Element) 测试完成,分析精度为:当元素含量大于 10×10^{-6} 时,精度优于 5%,当含量小于 10×10^{-6} 时,精度优于 10%。Rb、Sr、Sm、Nd 同位素数据测试仪器在德国 Finnigan 公司 MAT-262 型质谱计上完成,化学处理和同位素比值测试流程参见 Jackson *et al.* (2004)。质谱的分析数据通过 GLITTER (Van Achterbergh *et al.*, 2001) 软件计算获得相应的同位素比值、年龄以及误差,数据结果应用 Isoplot 程序 (Ludwig, 1999)。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年代学

矿区成矿花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年代学数据列于表 1 中。显微镜观察表明,样品 07TPC-1 的锆石均呈柱状自形

晶,长 $100 \sim 200 \mu\text{m}$,长短轴比大多 $1:2$ 至 $1:4$ 之间。在阴极发光 (CL) 图像上 (图 5),多数锆石表现出很好的结晶环带,反映为岩浆锆石。也见有一些锆石颗粒具有残留锆石核,残留核发生有溶蚀和退晶化现象。锆石 LA-ICP-MS 分析

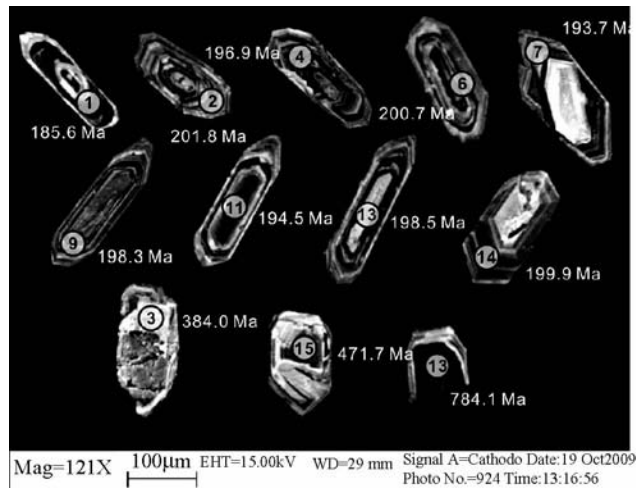


图5 太平川矿区成矿斑岩 U-Pb 同位素分析锆石阴极发光图像

Fig. 5 CL images of zircon grains for the granodiorite porphyry sample from Taipingchuan Cu-Mo mine

表1 太平川矿区成矿斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analyses for the granodiorite porphyry sample from Taipingchuan Cu-Mo mine

分析号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
				$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ
1	94	187	1.99	0.05010	570	0.20172	2225	0.02921	89	185.6	5.6	186.6	18.8	199.5	244.3
2	182	266	1.46	0.05009	373	0.21966	1580	0.03181	76	201.8	4.8	201.6	13.2	199.0	164.1
3	372	435	1.17	0.05482	207	0.46381	1680	0.06138	96	384.0	5.8	386.9	11.7	404.7	81.6
4	437	178	0.41	0.05073	179	0.21697	752	0.03102	49	196.9	3.1	199.4	6.3	228.8	79.7
6	417	235	0.56	0.05020	234	0.21879	986	0.03162	57	200.7	3.6	200.9	8.2	204.3	104.5
7	436	377	0.87	0.05390	158	0.22669	656	0.03051	45	193.7	2.8	207.5	5.4	366.7	64.7
9	93	64	0.69	0.05106	347	0.21989	1452	0.03123	64	198.3	4.0	201.8	12.1	243.6	149.4
11	777	793	1.02	0.05072	115	0.21419	474	0.03063	38	194.5	2.4	197.1	4.0	227.9	51.4
13	337	235	0.70	0.05133	182	0.22128	765	0.03127	48	198.5	3.0	203.0	6.4	255.7	79.5
14	302	139	0.46	0.05101	140	0.22154	600	0.03150	43	199.9	2.7	203.2	5.0	241.2	62.1
15	145	134	0.93	0.05695	142	0.59603	1458	0.07591	101	471.7	6.0	474.7	9.3	489.0	54.6
16	220	386	1.76	0.05045	199	0.22696	865	0.03263	50	207.0	3.1	207.7	7.2	215.6	88.7
17	252	171	0.68	0.06541	180	1.16649	3144	0.12934	189	784.1	10.8	785.0	14.7	787.7	56.6
20	383	116	0.30	0.05355	139	0.23316	592	0.03158	42	200.4	2.6	212.8	4.9	352.0	57.6

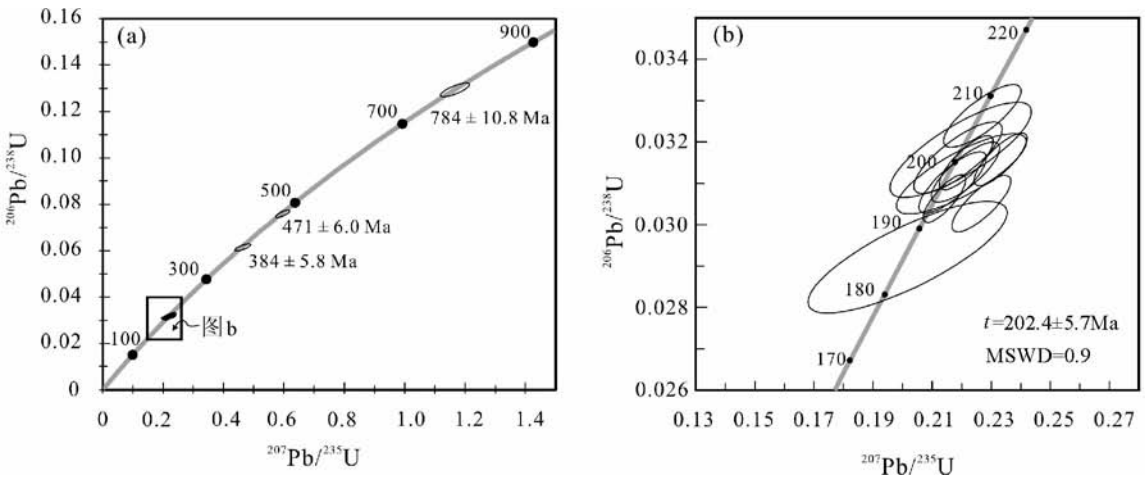


图6 平川矿区成矿斑岩 U-Pb 谐和曲线

Fig. 6 U-Pb concordia diagram of the zircon samples of the granodiorite porphyry in Taipingchuan Cu-Mo mine

数据显示,这些岩浆锆石的 $U = 93 \times 10^{-6} \sim 777 \times 10^{-6}$, $Th = 64 \times 10^{-6} \sim 793 \times 10^{-6}$, $Th/U = 0.30 \sim 1.99$ 。剔除个别明显偏离谐和线的分析点后,有较好结晶环带的岩浆锆石获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 $202 \pm 5.7\text{Ma}$ ($MSWD = 0.9$),代表岩浆结晶年龄(图 6b)。部分继承锆石分别给出 $784.1 \pm 10.8\text{Ma}$ 、 $384.0 \pm 5.8\text{Ma}$ 和 $471.7 \pm 6.0\text{Ma}$,其中 13 号锆石点 ($784.1 \pm 10.8\text{Ma}$) 可能代表了继承锆石的年龄,而 3 号点 ($384.0 \pm 5.8\text{Ma}$)、15 号点 ($471.7 \pm 6.0\text{Ma}$) 继承锆石可能由于遭受到了退晶化变质作用,放射性衰变损伤积累,导致其在后期重熔过程中更容易退晶变质,结果放射性成因铅丢失,而使其年龄完全再造(图 6a)。

5.2 主、微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学

岩石主、微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学测试数据结果分别列于表 2 和表 3。

太平川斑岩 Cu-Mo 矿床成矿斑岩主量元素数据(表 2)显示其具有高硅、铝和钠含量而低镁含量的特征。 SiO_2 和 Al_2O_3 含量变化范围分别为 $65.86\% \sim 68.84\%$ 、 $15.18\% \sim 16.28\%$; Na_2O 、 K_2O 含量及 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值分别为 $3.13\% \sim 3.64\%$ 、 $2.60\% \sim 3.78\%$ 和 $0.83 \sim 1.32$; MgO 、 CaO 和 FeO^T 含量分别为 $0.84\% \sim 1.06\%$ 、 $2.88\% \sim 3.49\%$ 和 $2.66\% \sim 3.27\%$ 。 P_2O_5 含量较低,全部小于 0.2% 。在标准矿物石英

表2 太平川矿区成矿斑岩样品主量(wt%)、微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 2 Composition of major (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the host porphyry samples from Taipingchuan Cu-Mo mine

样品号	TPC07-2	TPC07-3	TPC07-4	TPC07-5	TPC07-6	TPC07-7	TPC07-8	TPC07-9
SiO ₂	67.94	68.75	67.37	66.37	65.86	68.80	67.80	68.84
TiO ₂	0.38	0.37	0.35	0.44	0.35	0.37	0.38	0.36
Al ₂ O ₃	15.20	15.35	15.49	16.28	15.31	15.18	15.88	15.22
Fe ₂ O ₃	1.51	1.13	1.13	1.28	0.92	0.95	1.05	0.89
FeO	2.29	2.31	2.49	2.58	2.36	2.20	2.26	2.30
MnO	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.03
MgO	1.06	0.96	0.84	1.05	0.84	0.85	0.90	0.85
CaO	3.28	2.88	2.99	3.49	3.00	3.05	3.15	3.03
Na ₂ O	3.44	3.16	3.13	3.41	3.20	3.25	3.64	3.23
K ₂ O	2.60	2.98	3.78	3.06	3.58	3.14	3.35	3.13
P ₂ O ₅	0.13	0.13	0.12	0.15	0.12	0.13	0.13	0.13
烧失量	1.90	2.26	2.10	1.74	1.70	1.86	1.60	1.86
总量	99.77	100.3	99.84	99.90	97.29	99.81	100.2	99.87
Ga	20.1	20.4	20.5	22.2	20.7	19.3	20.4	20.2
Rb	126	129	120	122	123	103	113	110
Sr	513	492	486	497	495	498	480	471
Y	17.9	21.4	16.0	16.6	16.8	15.0	17.6	17.5
Zr	180	183	176	201	211	200	201	194
Nb	11.3	10.2	9.0	10.2	10.0	9.6	10.6	10.4
Ba	723	933	1105	1059	999	996	939	925
La	29.2	27.5	34.2	32.8	33.7	23.6	35.8	35.6
Ce	52.8	49.8	62.3	59.6	63.3	44.1	67.4	68.6
Pr	5.98	5.97	7.21	7.02	7.33	5.69	8.09	7.84
Nd	21.5	22.9	26.3	25.8	27.2	20.8	28.9	29.4
Sm	3.65	4.11	4.11	4.41	4.49	3.72	4.80	4.85
Eu	0.96	1.04	1.02	1.11	1.16	1.05	1.11	1.12
Gd	3.38	3.81	3.56	4.04	3.87	3.27	3.92	4.13
Tb	0.51	0.61	0.51	0.54	0.56	0.47	0.56	0.57
Dy	2.94	3.67	2.87	3.02	3.08	2.69	3.16	3.26
Ho	0.60	0.73	0.53	0.56	0.61	0.53	0.64	0.64
Er	1.64	1.92	1.43	1.45	1.70	1.40	1.75	1.76
Tm	0.23	0.29	0.20	0.21	0.27	0.21	0.27	0.28
Yb	1.58	1.91	1.27	1.35	1.62	1.34	1.81	1.81
Lu	0.23	0.28	0.18	0.21	0.25	0.20	0.27	0.27
Hf	4.84	5.00	4.53	5.25	5.71	5.22	5.19	5.13
Ta	0.94	0.92	0.80	0.76	0.91	0.79	0.88	0.91
Pb	8.4	9.7	14.8	9.4	14.5	10.1	12.2	12.1
Th	5.91	5.53	6.44	5.57	7.51	6.07	7.91	8.05
U	2.02	1.95	2.26	2.06	2.54	2.12	2.65	2.57
Eu/Eu*	0.83	0.80	0.82	0.80	0.85	0.92	0.78	0.77
La/Yb	19	14	27	24	21	18	20	20
Sr/Y	28.66	22.99	30.38	29.94	29.46	33.20	27.27	26.91
La/Yb _N	12.49	9.71	18.20	16.36	14.02	11.85	13.29	13.26
Th/Nb	0.52	0.54	0.72	0.55	0.75	0.63	0.75	0.77
Th/Ce	0.11	0.11	0.10	0.09	0.12	0.14	0.12	0.12
Ce/Nb	4.67	4.88	6.92	5.84	6.33	4.59	6.36	6.60

注：测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室测试完成；Eu* = $(Sm \times Gd)_N^{1/2}$ 为球粒陨石标准化，标准化数据据 Sun and McDougall (1989)

表3 太平川矿区成矿斑岩 Sr 和 Nd 同位素分析结果

Table 3 Sr and Nd isotope composition of host porphyry from Taipingchuan Cu-Mo mine

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/$ ^{86}Sr	$^{87}\text{Sr}/$ ^{86}Sr	2σ	$^{87}\text{Sr}/$ $^{86}\text{Sr}_{(i)}$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/$ ^{144}Nd	$^{143}\text{Nd}/$ ^{144}Nd	2σ	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM} (Ma)
TPC07-1	207	242	2.48	0.716821	11	0.70969	3.358	17.14	0.1186	0.512361	13	-3.4	1266
TPC07-2	124	500	0.72	0.712248	10	0.71019	4.110	23.09	0.1078	0.512334	12	-3.6	1176
TPC07-3	126	469	0.78	0.712344	14	0.71010	4.070	20.04	0.1229	0.512361	14	-3.5	1328
TPC07-4	122	478	0.74	0.711634	10	0.70950	4.202	24.50	0.1038	0.512318	14	-3.9	1156
TPC07-5	119	477	0.73	0.711638	12	0.70955	4.288	23.51	0.1104	0.512351	12	-3.4	1180
TPC07-6	122	469	0.75	0.711588	13	0.70943	4.400	25.21	0.1057	0.512334	12	-3.6	1153
TPC07-7	102	481	0.62	0.711407	9	0.70964	3.457	18.41	0.1137	0.512328	13	-3.9	1255
TPC07-8	113	459	0.71	0.711499	12	0.70945	4.634	27.00	0.1039	0.512331	11	-3.6	1138

注:测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室完成;成矿斑岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 按年龄为202Ma计算;所用参数 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(\text{CHUR})0} = 0.512638$, $^{144}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{(\text{CHUR})0} = 0.1967$, $\lambda_{\text{Rb}}^{87} = 1.42 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$, $\lambda_{\text{Sm}}^{147} = 6.57 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$

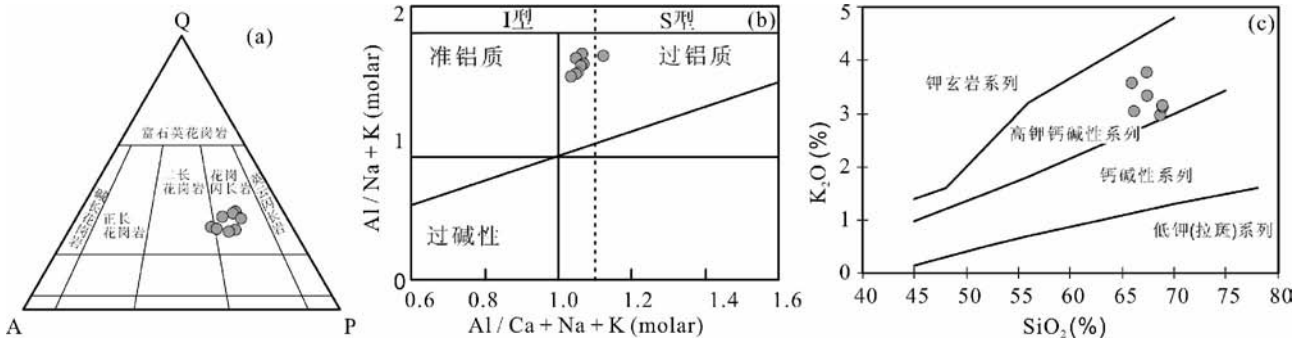


图7 太平川矿区成矿斑岩标准矿物相关图(a, 据 Streckeisen, 1976)、Al/Ca-Na-K 相关图(b, 据 Shand, 1943)和 SiO₂-K₂O 相关图(c)

Fig. 7 QAP (a, after Streckeisen, 1976), Al/(Ca + Na + K) vs. Al/(Ca + Na + K) (b, after Shand, 1943) and SiO₂ vs. K₂O (c) of the host porphyry samples from Taipingchuan Cu-Mo mine

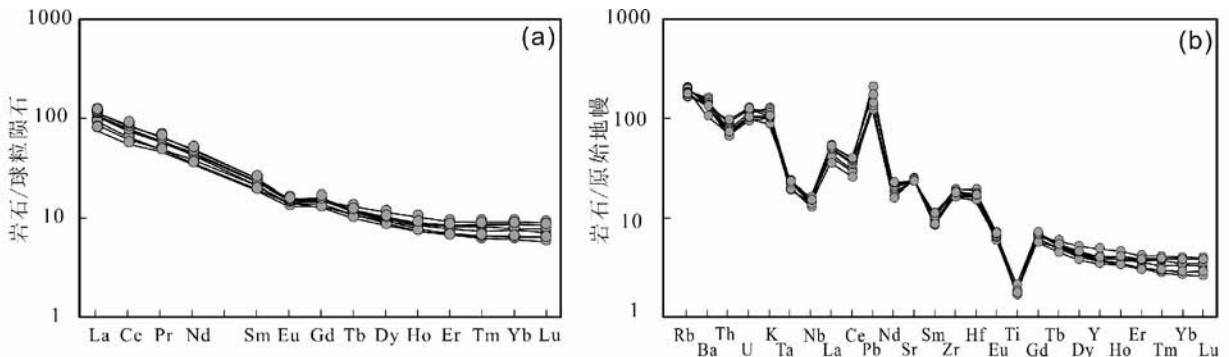


图8 太平川矿区成矿斑岩稀土元素配分曲线(a, 球粒陨石标准化值据 Boynton, 1984)和微量元素蛛网图(b, 原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE diagram (a, chondrite data from Boynton, 1984) and primitive mantle normalized trace element spider-diagram (b, primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989) of the host porphyry from Taipingchuan Cu-Mo Mine

与长石(CIPW 计算)相关图上(图7a),成矿斑岩样品投在花岗闪长岩区域内。在 Al/Ca-Na-K 和 SiO₂-K₂O 的相关图上(图7b, c),成矿斑岩为过铝质 I 型花岗岩,并具有高钾钙碱

性特征。

从稀土元素数据及球粒陨石标准化稀土元素配分图上(图8a),可以看出成矿斑岩具有轻稀土元素(LREE)富集、

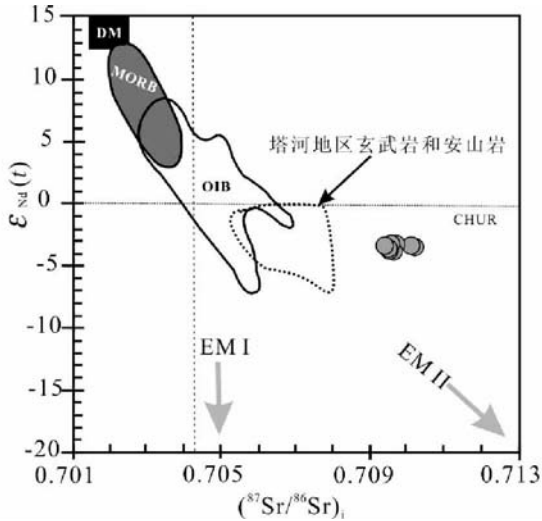


图9 太平川矿区成矿斑岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解
塔河火山岩数据引自周新华等, 2009

Fig. 9 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ plot of host porphyry from the Taipingschuan Cu-Mo mine

重稀土元素(HREE)亏损,较强烈的轻重稀土元素分馏(La/Yb = 14 ~ 27),Eu 负异常不明显(Eu/Eu* = 0.77 ~ 0.92)的特征。同时成矿斑岩富集 Rb、Ba、Th、U、K 和 Pb 等大离子亲石元素(LILE),亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSE)(图 8b)。成矿斑岩的稀土、微量元素显示出岛弧岩浆作用的特征(Wilson, 1989)。

成矿斑岩具有较大的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i和负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化范围分别为0.70943 ~ 0.71019和-3.4 ~ -3.9(表3)。在($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 相关图上,成矿斑岩样品具有向EMII变化的趋势(图9)。前人在研究区北侧的塔河地区,发现晚中生代的玄武岩、安山岩同样具有较大的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i和负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的特征,并认为是古老的额尔古纳地块对岩浆源区贡献所致(周新华等, 2009)。相对比塔河基性和中性火山岩,研究区成矿斑岩具有相似的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和更大的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i。

6 讨论

6.1 成岩成矿时代

对于得尔布干成矿带的形成时代,前人曾主要针对典型矿区的矿石、蚀变矿物和岩石进行了Rb-Sr和K-Ar同位素定年,已公布的年龄数据显示该成矿带成矿作用均发生在燕山期。成矿带中的乌奴格吐山斑岩Cu-Mo矿年龄数据较多,秦克章等(1999)通过对矿区成矿二长花岗斑岩的锆石和全岩Rb-Sr以及蚀变矿物绢云母的Rb-Sr进行同位素定年,获得188 ~ 182Ma的年龄,最近一些学者再次通过对矿石中的辉钼矿和含矿二长花岗斑岩分别进行Re-Os和Rb-Sr同位素进

行定年研究,分别获得 $178 \pm 10\text{Ma}$ 和 $178 \pm 9.2\text{Ma}$ 的年龄(李诺等, 2007; 陈志广等, 2008),确定乌奴格吐山斑岩Cu-Mo矿床可能形成于早侏罗世;甲乌拉Pb-Zn-Ag矿区和查干布拉根Ag-Pb-Zn矿区与成矿关系密切的石英斑岩和长石斑岩的K-Ar同位素年龄分别为114 ~ 116Ma(杨竞红, 1991)和132Ma(潘龙驹和孙恩守, 1990),而额仁陶勒盖Ag矿区内分布的侵入岩时代为120 ~ 156Ma(陈祥等, 1997; 顾巧根和季绍新, 1996)。这些年代学数据表明该成矿带浅成热液型矿床主要形成于早白垩世。得尔布干成矿带大面积分布有中生代火山岩,为这些浅成热液矿床的主要围岩,最近火山岩锆石U-Pb和Ar-Ar年代学研究结果表明其时代为164 ~ 150Ma(陈志广等, 2006; Ying et al., 2008),根据围岩火山岩的时代,我们推测研究区浅成热液型矿床形成不早于晚侏罗世。蒙古-鄂霍茨克造山带的俄罗斯、蒙古相邻地区的金属矿床成矿时代与得尔布干成矿带成矿时代相似,其时代主要集中在晚中生代,以斑岩矿床为代表的中高温深成热液矿床形成较早,主要形成于侏罗纪(145 ~ 150Ma),而浅成热液型矿床主要形成于早白垩世(110 ~ 140Ma)。

前人年代学研究数据认为得尔布干成矿带的成矿作用主要为燕山期成矿,并没有印支期成矿作用发生。但本研究获得太平川斑岩Cu-Mo矿床成矿斑岩锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $202 \pm 5.7\text{Ma}$,而最近完成的矿区内矿石辉钼矿样品Re-Os数据显示成矿时代约为203Ma(未刊资料)。矿区内成矿斑岩的锆石U-Pb年龄与辉钼矿Re-Os年龄在误差范围内一致,指示太平川斑岩Cu-Mo矿床成岩成矿作用发生在印支期。在得尔布干成矿带首次发现印支期成矿作用,对研究区域成矿作用、成矿规律以及找矿工作具有重要的意义。

6.2 成矿斑岩的埃达克岩属性及成因

成矿斑岩地球化学数据表明其具有明显的埃达克岩特征,如主量元素SiO₂(65.86% ~ 68.84%) > 56%、Al₂O₃(15.18% ~ 16.28%) > 15%、MgO(0.84% ~ 1.06%) < 3%、Na₂O/K₂O(除两个样品) > 1;微量元素亏损重稀土,高Sr含量、低Y、Yb的含量,所有样品Sr(471×10^{-6} ~ 513×10^{-6})、除一个样品外,所有样品Y(15.0×10^{-6} ~ 17.9×10^{-6}) < 18×10^{-6} 、Yb(1.27×10^{-6} ~ 1.81×10^{-6}) < 1.9×10^{-6} 。在埃达克岩Y-Sr/Y(Defant and Drummond, 1990)和(La/Yb)_N-Yb_N(Martin, 1999)判别图上(图10a, b),成矿斑岩几乎全部投在埃达克岩区域。根据以上地球化学特征,我们认为太平川矿区的成矿斑岩为埃达克岩。

因埃达克岩特殊的地球化学特征及特别的构造意义,吸引了众多学者的关注。同时随着对埃达克岩的研究,学者们对埃达克岩提出了多种成因学说,如:(1)古老洋壳(>25Ma)发生低角度斜向俯冲时,俯冲板片发生部分熔融形成埃达克岩(Sajona et al., 1993; Yagodinski et al., 1995; Martin et al., 2005);(2)埃达克岩可以形成于加厚陆壳下的底侵玄武岩的部分熔融过程(Atherton and Petford, 1993;

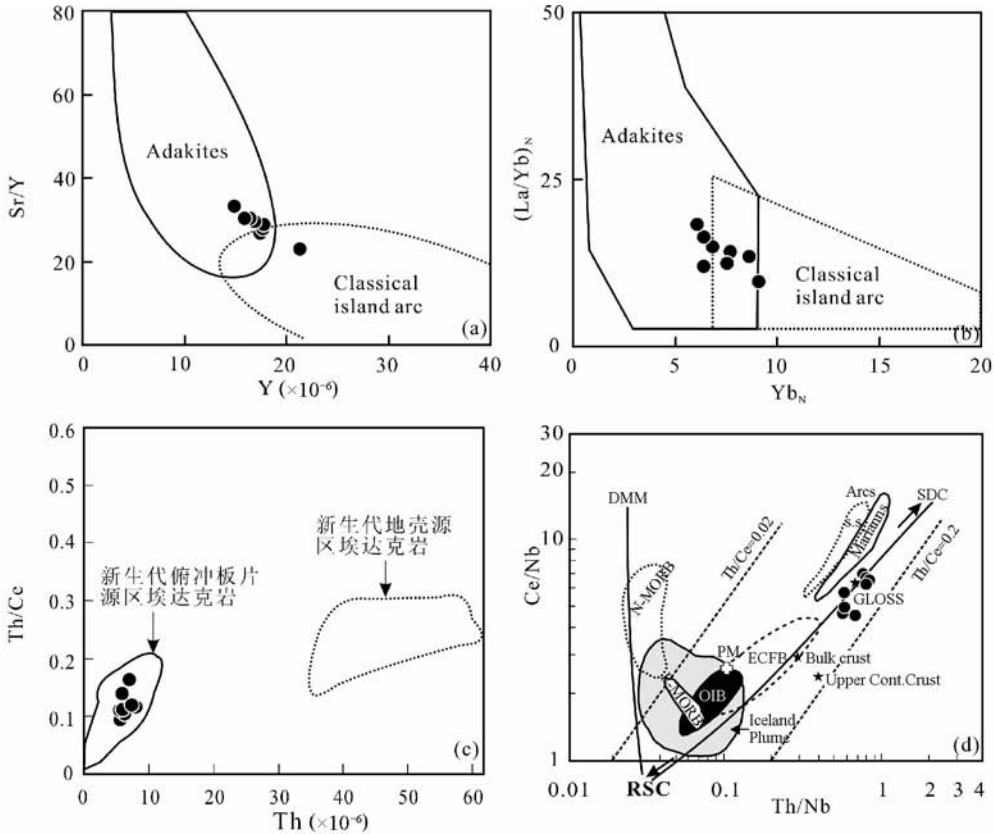


图 10 太平川矿区成矿斑岩 Y-Sr/Y (a, 据 Defant and Drummond, 1993)、 Yb_N -(La/Yb)_N (b, 据 Martin, 1999)、Th-Th/Ce (c, Wang *et al.*, 2008) 和 Th/Nb-Ce/Nb (d, Song *et al.*, 2004) 图解

DDM-亏损地幔; SDC-再循环俯冲组份; S-岛弧环境俯冲沉积物; RSC-再循环残留板片组分; OIB-洋岛玄武岩; N-MORB-正常大洋中脊玄武岩; E-MORB-富集大洋中脊玄武岩; PM-原始地幔; Upper Cont. Crust-大陆上地壳; Bulk crust-大陆地壳; Iceland plume-冰岛地幔柱; GLOSS-地球俯冲沉积物组分

Fig. 10 Y vs. Sr/Y (a, after Defant and Drummond, 1993)、 Yb_N vs. (La/Yb)_N (b, after Martin, 1999)、Th vs. Th/Ce (c, after Wang *et al.*, 2008) and Th/Nb vs. Ce/Nb (d, after Song *et al.*, 2004) diagrams of granodiorite porphyry from Taipinchuan Cu-Mo mine

Xu *et al.*, 2000; 张旗等, 2001; Zhao *et al.*, 2008); (3) 下地壳拆沉作用有关的岩浆活动也可以形成埃达克岩 (Gao *et al.*, 2004; Kay and Kay, 1993; Wang Q *et al.*, 2006); (4) 最近一些研究表明玄武质岩浆分离结晶作用也可以形成与埃达克岩相似地球化学特征的岩石 (Castillo, 2006; Macpherson *et al.*, 2006; Petrone and Ferrari, 2008; Gao *et al.*, 2009)。

太平川矿区成矿斑岩主量元素数据显示其为花岗闪长岩, 具有过铝质、高钾钙碱性 I 型花岗岩特征 (图 7)。同时成矿斑岩的轻、重稀土元素强烈分馏, Eu 无明显负异常, 微量元素富集 LILE (Ba, Rb, U, Th, Pb), 亏损 HFSE (Nb, Ta, Ti) (图 8), 这些特征与典型岛弧构造环境岩浆作用地球化学特征相一致 (Tatsumi *et al.*, 1986; Wilson, 1989)。Wang *et al.* (2008) 通过对比新生代的不同源区的埃达克岩发现, 源于俯冲板片源区的埃达克岩具有较低的 Th 含量和 Th/Ce 值, 而源于壳源的埃达克岩则具有较高的 Th 含量和 Th/Ce 值。太

平川斑岩 Cu-Mo 成矿斑岩则具有较低的 Th 含量和 Th/Ce 值, 在 Th 和 Th/Ce 相关图上 (图 10c), 成矿斑岩投在新生代源于俯冲板片熔融源区的埃达克岩范围内。同时成矿斑岩与壳源埃达克岩相比, 具有相对高的 SiO₂、Yb 含量而相对低的 Al₂O₃、TiO₂、MgO 和 Sr 含量和 Th/Ce 比值, 同样与源于俯冲洋壳埃达克岩相似 (Martin *et al.*, 2005; Wang Q *et al.*, 2006b)。在 Th/Nb 和 Ce/Nb 相关图上 (图 10d), 成矿斑岩沿再循环俯冲洋壳组分线性分布, 并分布在岛弧区域附近的全球俯冲沉积物区域内, 指示成矿斑岩并非大陆地壳源区而是源于俯冲洋壳。

通过以上分析, 可以看出太平川斑岩 Cu-Mo 成矿斑岩具有源于俯冲洋壳埃达克岩的地球化学特征, 因此我们认为成矿斑岩的初始岩浆源区应为俯冲洋壳。然而成矿斑岩具有较大的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.70943 ~ 0.71019) 和负的 ε_{Nd}(t) (-3.4 ~ -3.9) (图 9), 我们认为古老的额尔古纳地块可能存在对成矿斑岩岩浆的贡献, 导致了成矿斑岩具有这样

Sr-Nd 同位素组成的特征。证据如下: (1) 成矿斑岩年代学样品中发现新元古代的继承锆石 ($784.1 \pm 10.8 \text{ Ma}$) (表 1、图 6), 指示成矿斑岩初始岩浆受到了古老地壳物质的混染; (2) 成矿斑岩主量元素数据中 Al_2O_3 (15.18% ~ 16.28%)、 Na_2O (3.13% ~ 3.64%)、 K_2O (2.60% ~ 3.78%)、 CaO (2.88% ~ 3.49%) 含量表明成矿斑岩具有过铝质花岗岩特征, 指示岩浆源区存在陆壳物质的加入; (3) 前人在研究区北侧的塔河地区, 发现晚中生代的玄武岩、安山岩同样具有较大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的特征, 认为是得尔布干成矿带北部地区存在古老的额尔古纳地块 (周新华等, 2009)。相对比塔河火山岩, 研究区成矿斑岩具有相似的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和更大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值, 我们认为成矿斑岩源于俯冲洋壳的初始岩浆也受到了额尔古纳地块物质混染的影响。

综上所述, 本文认为太平川 Cu-Mo 矿成矿斑岩的初始岩浆的源区为俯冲洋壳, 俯冲洋壳达到 70 ~ 80 km 深处角闪岩相与榴辉岩相过渡带附近, 发生部分熔融, 形成本矿区成矿斑岩的初始岩浆, 在初始岩浆上升过程中, 加入了古老额尔古纳地块的物质组份, 使之形成具有较大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 并具有埃达克岩地球化学特征的成矿斑岩。

6.3 矿床形成于蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲?

鉴于太平川 Cu-Mo 矿床成矿斑岩形成于晚三叠纪 (202 Ma), 为俯冲洋壳部分熔融的埃达克岩。那么很重要的一个问题, 该成矿斑岩与哪个大洋板片俯冲有关? 我国东北的得尔布干成矿带, 位于中亚造山带的东端, 蒙古-鄂霍茨克造山带南缘, 又濒临古太平洋俯冲带。鉴于这种特殊的构造位置, 那么可能情况无非有三种: 古亚洲洋、古太平洋或蒙古-鄂霍茨克洋演化过程中的俯冲阶段。

首先古亚洲洋演化经历了较为复杂的过程, 包括多期次的洋盆形成、俯冲-消减和闭合, 最终是三叠纪之前古亚洲洋完成闭合, 塔里木-中朝板块与西伯利亚克拉通之间发生大陆碰撞作用 (Şengör and Natal'in, 1996; Bazhenov *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2003, 2004; Zhang *et al.*, 2007; 李文博等, 2008)。显然古亚洲洋的演化不能解释太平川晚三叠世的源于俯冲洋壳的成矿斑岩。一些学者通过对中国东部花岗岩和火山岩的研究发现, 这些花岗岩和火山岩时代主要为晚侏罗世和早白垩世, 其成因与古太平洋活动有关 (Wu *et al.*, 2002, 2005; Wang F *et al.*, 2006a; Zhang JH *et al.*, 2008a; Zhang LC *et al.*, 2008), 认为太平洋俯冲对中国东部的影响主要在晚侏罗世之后, 所以古太平洋演化也不能解释研究区成矿斑岩的形成。对于蒙古-鄂霍茨克洋的演化, 目前学者均认为三叠纪时, 该洋还未闭合 (Halim *et al.*, 1998; Kravchinsky *et al.*, 2002; Cogne *et al.*, 2005; Tomurtogoo *et al.*, 2005; 陈志广等, 2006; Metelkin *et al.*, 2007; Sorokin *et al.*, 2007; Ying *et al.*, 2008; Ruzhentsev and Nekrasov, 2009), 同时 Badarch *et al.* (2002) 通过对蒙古全区地质研究认为, 在蒙古-鄂霍茨克海南缘存在二叠纪-三叠纪的增生地

体, 认为蒙古鄂霍茨克洋二叠纪-三叠纪一直存在向南俯冲。因此我们认为太平川矿区成矿斑岩形成与蒙古-鄂霍茨克洋演化有关, 该斑岩 Cu-Mo 矿床形成于晚三叠世蒙古-鄂霍茨克洋向其南侧的额尔古纳地块俯冲的陆缘弧环境。

对于蒙古-鄂霍茨克洋中生代的演化, 目前学者们的主流观点认为从晚二叠纪开始蒙古-鄂霍茨克洋向北部西伯利亚克拉通方向俯冲, 而蒙古-鄂霍茨克洋此时停止向南俯冲, 导致中-蒙联合板块北缘转变为被动大陆边缘 (Van der Voo *et al.*, 1999; Zorin, 1999; Zorin *et al.*, 2001; Meng, 2003)。但是晚三叠世太平川斑岩 Cu-Mo 矿的发现, 无疑给重新认识蒙古-鄂霍茨克洋中生代的演化一个很好的证据, 我们认为蒙古-鄂霍茨克洋在中生代存在向南俯冲的证据。

7 结论

对太平川斑岩 Cu-Mo 矿床的成矿斑岩的年代学和地球化学研究获得了以下结论:

(1) 太平川斑岩 Cu-Mo 矿床成矿斑岩锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $202 \pm 5.7 \text{ Ma}$, 表明该矿床形成于印支期。

(2) 成矿具有高 SiO_2 (> 56%) 和 Al_2O_3 (> 15%) 含量, 低 MgO (< 3%) 含量, 微量元素高 Sr (> 400×10^{-6}) 含量、低 Y 和 Yb 的含量, 除一个样品外, 所有样品 $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$, 具有典型埃达克岩的地球化学特征。

(3) 地球化学数据及 Sr-Nd 同位素组成表明, 成矿斑岩的初始岩浆源区为俯冲洋壳, 而洋壳熔融的初始岩浆在上升过程中加入了额尔古纳陆块的部分物质。

(4) 太平川斑岩 Cu-Mo 矿床形成于三叠纪蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块俯冲的陆缘弧环境。

致谢 张旗和秦克章老师对本文作者提出了一些宝贵意见和研究思路; 在内蒙古额尔古纳地区野外考察过程中, 得到了北京矿产地质研究院的刘福诺、赵伟等人的帮助; 另外还得到了南京大学内生金属矿床成矿作用研究国家重点实验室蒋少涌、徐夕生和张文兰等老师的帮助, 在此一并表示衷心感谢!

References

- Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144 - 146
- Badarch G, Dickson Cunningham W and Windley BF. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia; implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21 (1): 87 - 110
- Bazhenov ML, Collins AQ, Degtyarev KE, Levashova NM, Mikolaichuk AV, Pavlov VE and Van der Voo R. 2003. Paleozoic northward drift of the North Tien Shan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism. *Tectonophysics*, 366(1-2): 113 - 141
- Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; Meteorite

- studies. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 63–114
- Castillo PR. 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257–268
- Chen X, Li HN and Duan GZ. 1997. Origin of the Erentaolegai granite and its relations to silver deposit, Inner Mongolia. *Mineral Resources and Geology*, 11(58): 91–98 (in Chinese with English abstract)
- Chen ZG, Zhang LC, Zhou XH, Wan B, Ying JF and Wang F. 2006. Geochronology and geochemical characteristics of volcanic rocks section in Manzhouli Xinyouqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2971–2986 (in Chinese with English abstract)
- Chen ZG, Zhang LC, Wan B, Zhang YT and Wu HY. 2008. Geochemistry and geology significances of ore-forming porphyry with low Sr and Yb value in Wunugetushan copper-molybdenum deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 115–128 (in Chinese with English abstract)
- Cogne JP, Kravchinsky VA, Halim N and Hankard F. 2005. Late Jurassic-Early Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Transbaikalian area (SE Siberia). *Geophysical Journal International*, 163(2): 813–832
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- 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(6): 547–550
- Gao J, Reiner K, Long LL, Xiong XM and Qian Q. 2009. Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neo-Proterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic mélange belt, South China. *Lithos*, 110: 277–293
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(7019): 892–897
- Gu QG and Ji SX. 1996. Volcanic rocks-intrusive complex and their metallogenesis in Derbugan metallogenic belt. *Bulletin of Nanjing Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 18: 58–65
- Halim N, Kravchinsky V, Gilder S, Cogné JP, Alexyutin M, Sorokin A, Courtillot V and Chen Y. 1998. A palaeomagnetic study from the Mongol-Okhotsk region: Rotated Early Cretaceous volcanics and remagnetized Mesozoic sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 159(3–4): 133–145
- Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1–2): 47–69
- Kay RW and Kay SM. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219(1–3): 177–189
- Kravchinsky VA, Cogne JP, Harbert WP and Kuzmin MI. 2002. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia. *Geophysical Journal International*, 148(1): 34–57
- Li N, Sun YL, Li J and Li WB. 2007. Molybdenite Re/Os isochron age of the Wunugetushan porphyry Cu/Mo deposit, Inner Mongolia and its implication for metallogenetic geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2881–2888 (in Chinese with English abstract)
- Li WB, Chen YJ, Lai Y and Ji JQ. 2008. Metallogenic time and tectonic setting of the Bainaimiao Cu-Au deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 890–898 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 1999. Isoplot/Ex version 2.00: A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2
- Macpherson CG, Dreher ST and Thirlwall MF. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3–4): 581–593
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429
- Meng QR. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369(3–4): 155–174
- Metelkin DV, Gordienko IV and Klimuk VS. 2007. Paleomagnetism of Upper Jurassic basalts from Transbaikalia: New data on the time of closure of the Mongol-Okhotsk Ocean and Mesozoic intraplate tectonics of Central Asia. *Russian Geology and Geophysics*, 48(10): 825–834
- Pan LJ and Sun EY. 1990. Geological characteristics of the Jiawula silver-lead-zinc deposit, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 11(1): 45–53 (in Chinese with English abstract)
- Petrone CM and Ferrari L. 2008. Quaternary adakite-Nb-enriched basalt association in the western Trans-Mexican Volcanic Belt: Is there any slab melt evidence? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156(1): 73–86
- Qin KZ, Li HM, Li WS and Ishunso Ishihara. 1999. Intrusion and mineralization ages of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, Northwestern China. *Geological Review*, 5(2): 180–185 (in Chinese with English abstract)
- Ruzhentsev SV and Nekrasov GE. 2009. Tectonics of the Aga Zone, Mongolia-Okhotsk belt. *Geotectonics*, 43(1): 34–50
- Safonova IY. 2009. Intraplate magmatism and oceanic plate stratigraphy of the Paleo-Asian and Paleo-Pacific Oceans from 600 to 140Ma. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 137–154
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H, Cotten J, Defant MJ and Pubellier M. 1993. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 21(11): 1007
- Sengör AMC and Natal'in BA. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. In: Yin A and Harrison H (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 486–640
- Shand SJ. 1943. Their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorite. In: Sons JW (ed.). *Eruptive Rocks*. New York, 1–44
- Song XY, Zhou MF, Cao ZM and Robinson PT. 2004. Late Permian rifting of the South China Craton caused by the Emeishan mantle plume? *Journal of the Geological Society*, 161(5): 773
- Sorokin AA, Kudryashov NM and Kotov AB. 2007. Age and geochemistry of the Early Mesozoic granitoid massifs of the southern Bureya terrane of the Russian Far East. *Russian Journal of Pacific Geology*, 1(5): 454–463
- Streckeisen A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12: 1–33
- Sun SS and Medonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basins: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (ed.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London and Blackwell Scientific Publications, London, 313–345
- Tatsumi Y, Hamilton DL and Nesbitt RW. 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: Evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29(1–4): 293–309
- Tomurtogoo O, Windley BF, Kroner A, Badarch G and Liu DY. 2005. Zircon age and occurrence of the Adaaatsag ophiolite and Muron shear zone, central Mongolia: Constraints on the evolution of the Mongol-Okhotsk ocean, suture and orogen. *Journal of the Geological Society, London*, 162(1): 125–134
- Van Acherbergh E, Ryan CG, Jackson SE and Griffin WL. 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS. *Laser-Ablation-ICPMS in the earth sciences-principles and applications*. Miner Assoc Can (short

- course series), 29: 239 – 243
- Van der Voo R, Spakman W and Bijwaard H. 1999. Mesozoic subducted slabs under Siberia. *Nature*, 397(6716): 246 – 249
- Wang F, Zhou XH, Zhang LC, Ying JF, Zhang YT, Wu FY and Zhu RX. 2006. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): Timing and implications for the dynamic setting of NE Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1 – 2): 179 – 198
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Wan YS, Li CF, Zi F, Jiang ZQ, Qiu HN, Chu ZY, Zhao ZH and Dong YH. 2008. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): Evidence for metasomatism by slab-derived melts in mantle wedge. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155: 473 – 490
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman
- 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
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA, Zhang XO and Yang JH. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1 – 2): 103 – 119
- Xiao WJ, Windley BF, J. H and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069 – 1089
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, 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
- Xu JF, Wang Q and Yu XY. 2000. Geochemistry of high-Mg andesites 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. *Geochemical Journal*, 34(5): 359 – 378
- Yan HQ, Hu SK, Ye M and Xiang WD. 1998. Ore-forming dense area and super-large deposits in China, Russia and Mongolia border. *Science in China (Series D)* 28: 43 – 48
- Yang JH. 1991. A study on stable isotope of ErgunaHunlun metallogenic province, Inner Mongolia. *Geological Exploration for Metals*, 3: 55 – 56 (in Chinese)
- Ying JF, Zhou XH, Zhang LC, Wang F and Zhang YT. 2008. Geochronological and geochemical investigation of the Late Mesozoic volcanic rocks from the Northern Great Xing'an Range and their tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s00531 – 008 – 0395 – z
- Yogodzinski GM, Kay RW, Volynets ON, Koloskov AV and Kay SM. 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(5): 505 – 519
- Zhang JH, Ge WC, Wu FY, Simon AW, Yang JH and Liu XM. 2008. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China. *Lithos*, 102: 138 – 157
- Zhang LC, Zhou XH, Ying JF, Wang F, Guo F, Wan B and Chen ZC. 2008. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xing'an Range, NE China: Implications for their origin and mantle source characteristics. *Chemical Geology*, 256(1 – 2): 12 – 23
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenetic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236 – 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Song B, Yang ZY, Hu JM and Wu H. 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a late Palaeozoic active continental margin. *Journal of the Geological Society*, 164(2): 451
- Zhao YM and Zhang DQ. 1997. Metallogeny and Prospective Evolution of Copper-Polymetallic Deposits in the Da Hinggan Mountains and Its Adjacent Regions. Beijing: Seismological Press, 1 – 318 (in Chinese)
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Wyman DA, Bao ZW, Bai ZH and Qiao YL. 2008. Underplating-related adakites in Xinjiang Tianshan, China. *Lithos*, 102(1 – 2): 374 – 391
- Zhou XH, Ying JF, Zhang LC and Zhang YT. 2009. The petrogenesis of Late Mesozoic volcanic rock and the contributions from ancient microcontinents: Constraints from the zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic systematics. *Earth Science*, 34(1): 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Zorin YA. 1999. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal region (Russia) and Mongolia. *Tectonophysics*, 306(1): 33 – 56
- Zorin YA, Zorina LD, Spiridonov AM and Rutshtein IG. 2001. Geodynamic setting of gold deposits in Eastern and Central Trans-Baikal (Chita Region, Russia). *Ore Geology Reviews*, 17: 215 – 232

附中文参考文献

- 陈祥, 李鹤年, 段国正. 1997. 内蒙古额仁陶勒盖花岗岩成因与银矿床的形成. *矿产与地质*, 11(2): 91 – 98
- 陈志广, 张连昌, 周新华, 万博, 英基丰, 王非. 2006. 满洲里新右旗火山岩剖面年代学和地球化学特征. *岩石学报*, 22(12): 2971 – 2986
- 陈志广, 张连昌, 万博, 张玉涛, 吴华英. 2008. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床低 Sr-Yb 型成矿斑岩地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, 24(1): 115 – 128
- 顾巧根, 季绍新. 1996. 得尔布干成矿带的火山-侵入杂岩及成矿作用. *中国地质科学院南京地质研究所刊*, 18: 58 – 65
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 李文博. 2007. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿铼锇等时线年龄及其成矿地球动力学背景. *岩石学报*, 23(11): 2881 – 2888
- 李文博, 陈衍景, 赖勇, 季建清. 2008. 内蒙古白乃庙铜金矿床的成矿时代和成矿构造背景. *岩石学报*, 24(004): 890 – 898
- 潘龙驹, 孙恩守. 1990. 内蒙古查干布拉根银铅锌矿床地质特征. *矿产与勘查*, 5: 1 – 9
- 秦克章, 李惠民, 李伟实, Ishihara S. 1999. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床的成岩, 成矿时代. *地质论评*, 45(2): 180 – 185
- 阎鸿铨, 胡绍康, 叶茂, 向伟东. 1998. 中、俄、蒙边境成矿密集区与超大型矿床. *中国科学(D辑)*, 28: 43 – 48
- 杨竞红. 1991. 内蒙额尔古纳-呼伦多金属成矿带的稳定同位素研究. *矿产与勘查*, 3: 50 – 56
- 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(2): 236 – 244
- 赵一鸣, 张德全. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价. 北京: 地震出版社, 1 – 318
- 周新华, 英基丰, 张连昌, 张玉涛. 2009. 大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献: 锆石 U-Pb 年龄及多元同位素制约. *地球科学*, 34(1): 1 – 10