

文章编号 0258-7106 (2010) 03-0517-12

河北小寺沟铜钼矿埃达克岩：年龄、地球化学特征及其地质意义*

戴雪灵, 彭省临, 胡祥昭

(中南大学地质与环境工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要 小寺沟斑岩型铜钼矿产于华北板块北缘, 其主体岩体类型为英云闪长岩和二长花岗岩类, 矿物组合为斜长石 + 角闪石 + 石英 + 钾长石 ± 黑云母 ± 辉石 + 不透明矿物, 岩性为钙碱性 I 型侵入岩。K-Ar 法测得小寺沟岩体花岗岩年龄为 (122.83 ± 2.46) Ma。岩石主量元素具有高 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 $\text{Mg}^\#$, 低 K_2O 、 TiO_2 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 特征。稀土元素具有负 Eu 异常不明显, 低 HREE 和 Y, 轻、重稀土元素强烈分异特征。研究认为, 小寺沟岩体与埃达克岩相似, 其初始岩浆主要为加厚下地壳的部分熔融产物, 即小寺沟埃达克岩为 C 型埃达克岩, 其初始岩浆中可能还有部分地幔物质。小寺沟大型斑岩型铜钼矿的形成与埃达克岩的成矿专属性、华北板块北缘特殊构造环境密切相关。

关键词 地球化学 埃达克岩 斑岩 年龄 小寺沟 河北

中图分类号 : P618.41 P618.65

文献标志码 : A

Adakite in Xiaosigou porphyry copper-molybdenum deposit, Hebei Province: Age, geochemical characteristics and geological implications

DAI XueLing, PENG ShengLin and HU XiangZhao

(College of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract

The Xiaosigou porphyry deposit occurs in the northern margin of North China craton, which belongs to the East Circum-Pacific metallogenic domain. The Xiaosigou pluton is comprised of tonalite and monzonitic granite, which are both I-type granites, with the mineral assemblage being plagioclase + amphibole + quartz + potassium feldspar ± biotite ± pyroxene + some opaque minerals. K-Ar dating of unaltered granite-porphyry yielded an age of (122.83 ± 2.46) Ma. SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O and $\text{Mg}^\#$ are high whereas K_2O , TiO_2 , MgO , CaO and P_2O_5 are relatively low. The Xiaosigou pluton is characterized by slightly negative to positive δEu anomalies, the lowness of HREE and Y, and the intense fractionation of LREE from HREE. These characteristics suggest that the Xiaosigou pluton is extremely similar to adakite. The primitive magma of the Xiaosigou pluton was derived from the partially melted lower crust as well as some mantle materials. The Xiaosigou large-size porphyry copper-molybdenum deposit is genetically in close connection with adakite and the tectonic environment of the northern edge of North China craton.

Key words: geochemistry, adakite, porphyry, age, Xiaosigou, Hebei Province

本文得到科技部国家‘十一五’科技支撑计划(2006BA01B07)和国家‘973’计划前期研究专项(1007CB416608)的联合资助

第一作者简介 戴雪灵, 女, 1979 年生, 博士研究生, 岩石学、矿物学、矿床学专业。Email: daixueling666@sohu.com

收稿日期 2009-08-24; 改回日期 2009-11-25。李德先编辑。

埃达克岩是一种具富硅($\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $w(\text{B})$,下同),高铝($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$),富钠($\text{Na}_2\text{O} \geq 3.5\%$),低 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (~ 0.42)比值, MgO 通常 $< 3\%$ (很少 $> 6\%$),高 $\text{Mg}^\#$ (~ 0.51),低亏损HREE与Y($w(\text{Y}) \leq 18 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) \leq 1.9 \times 10^{-6}$),轻、重稀土元素强烈分异等地球化学性质的火成岩系列。自1990年Defant等正式提出的埃达克岩以来引起了广泛关注(Drummond et al., 1990; Defant et al., 1990; 1991; 1993; Morris, 1995; Yogodzinski et al., 1995; Stern et al., 1996; Kepezhinskis et al., 1996; Martin, 1999; Rapp et al., 1995; 1999; Sen et al., 1994; Atherton et al., 1993; Peacock et al., 1994; 1999; Hollings et al., 2000; 王强等, 2000),而中国在本世纪才关注此岩类,尤其是近年来在中国东部发现的大量具埃达克岩地球化学性质的中生代火成岩,引起了学术界的颇多争议,但埃达克岩与中国东部(超)大型斑岩型矿床的成因联系已为广大学者所接受,特别是在华北板块北缘发现的大量埃达克岩对判别该区的构造、成矿等地质环境具有深远的意义(张旗等, 2001a; 2001b; 2003a; 2003b; 王强等, 2001; 2004; 王元龙等, 2004; Xu et al., 2002; Chung et al., 2003)。

小寺沟斑岩型铜钼矿作为中国东部成矿域中的燕山斑岩铜钼矿带内的(韩秀丽等, 1999; 柏天宝等, 1990)一个大型斑岩型铜钼矿,前人曾对本区及其外围的岩体地球化学特征及矿床特征进行了一些探讨(柏天宝等 1990; 韩秀丽等, 1999; 孙冀凡等, 2004),但从未将小寺沟岩体划归为埃达克岩。本文从岩体的地质特征、年代学特征、主元素及稀土元素特征等方面,探讨了岩体的形成机制和地质意义,以期为华北板块北缘燕山带乃至整个东部成矿域的埃达克岩的特征及其地质意义研究提供一些依据。

1 成矿地质背景

小寺沟斑岩型铜钼矿地处华北板块北缘,冀北隆起带与燕山沉降带的交接处,EW向的承德-平泉深大断裂和NNE向桑园-平房深大断裂交汇的锐角部位(翟裕生等, 1997; 孙冀凡等, 2004; 张洪涛等, 2004)。自加里东运动开始,华北板块北面的洋壳向南俯冲挤压,至晚古生代末西伯利亚板块与华北微板块碰撞对接,燕山期,本区由于受西伯利亚板块与华北微板块碰撞后的伸展构造作用和滨西太平洋挤压构造体系的影响,形成北东向构造岩浆带。

矿床产于小寺沟岩体北东接触带的内外侧,目前已圈定铜矿体4个、钼矿体3个。具代表性的I号铜矿体受岩体接触带控制,走向 $300 \sim 320^\circ$,倾向 $210 \sim 230^\circ$,倾角 $50 \sim 85^\circ$,矿体延长大于700 m,厚4~45 m,呈似层状产出;具代表性的I号钼矿体走向 $320 \sim 330^\circ$,倾向 $230 \sim 240^\circ$,倾角 $60 \sim 80^\circ$,矿体长大于800 m,厚度10~80 m,平均厚度16 m,钼矿石平均品位0.1%。

2 岩体及其岩石学特征

小寺沟岩体呈岩枝状产出,总出露面积约 7 km^2 ,其岩石组合为闪长辉长岩-石英闪长斑岩-二长斑岩-花岗斑岩。岩体接触带形态复杂,岩体中有大量大理岩捕虏体、顶垂体,剥蚀较浅。据野外观察,构成岩体主体的花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长斑岩由北东至南西依次产出,三者之间无截然界线,呈渐变过渡关系(图1)。

岩体北东部的花岗斑岩呈灰白色,斑状结构,块状构造,斑晶主要由斜长石、石英、钾长石及黑云母组成,基质成分主要为石英和斜长石,其次为角闪石和钾长石,钾长石为正长石和微斜长石,斜长石 A_n 牌号25左右,属更长石,副矿物为磷灰石和锆石。中部的花岗闪长斑岩和南西部的石英闪长斑岩则为似斑状结构的斜长石-角闪石-石英-钾长石-黑云母-辉石组合。

3 样品采集、分析方法及分析结果

测试样品均采自小寺沟岩体的不同部位、不同岩相段,绝大部分为钻孔样品。样品经显微镜下观察,均未见明显变形、变质或蚀变。

3.1 K-Ar 测年方法及结果

将样品切去表面氧化层,破碎、过筛、挑选岩石基质部分,清洗后进行测量。利用火焰光度计测K,同位素稀释法测Ar。测Ar所用仪器为MM-5400静态真空质谱计,离子源高压为4500 V,离子源接收电流为 $400 \mu\text{A}$,用海棉钛炉和锆铝泵进行气体纯化,接收器为法拉第杯, ^{38}Ar 稀释剂的纯度为99.98%。样品在 1500°C 左右熔化的同时,加入准确定量的 ^{38}Ar 稀释剂,测定混合稀释剂后的同位素比值($^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$)总和($^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)总,求出样品的放射性成因 ^{40}Ar ,再根据测量出的K和Ar含量计算样品的K-

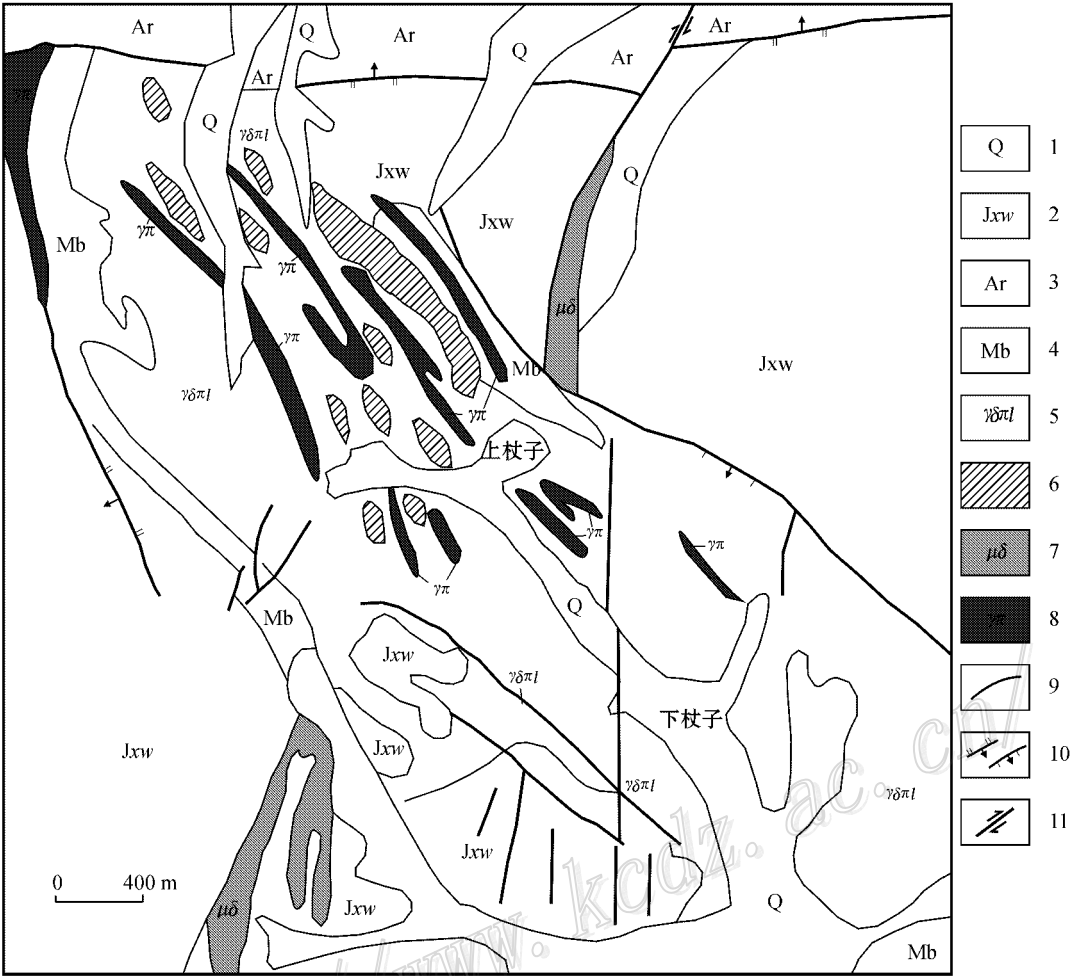


图 1 小寺沟矿床地质略图(据韩秀丽等,1999)

1—第四系；2—雾迷山组白云岩；3—太古界变质岩系；4—大理岩；5—花岗闪长斑岩；6—绢英岩化岩；7—辉长闪长岩；8—花岗斑岩；9—地层界线；10—正(逆)断层；11—走滑断裂

Fig. 1 Simplified geological a map of the Xiaosigou ore deposit (after Han et al. , 1999)

1—Quaternary；2—Dolomite of Wumishan Formation；3—Archean metamorphic rocks；4—Marble；5—Granodiorite porphyry；6—Phyllic rocks；7—Gabbro monzonite；8—Granite porphyry；9—Stratigraphic boundary；10—Normal (reverse) fault

表 1 小寺沟岩体 K-Ar 测年结果
Table 1 K-Ar dating of Xiaosigou pluton

样品名称	<i>m</i> /mg	<i>w</i> (K)/%	⁴⁰ Ar/ ³⁸ Ar _总	(³⁸ Ar/ ³⁶ Ar) _总	(⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar) _总	<i>w</i> (⁴⁰ K)/ (10 ⁻⁹ mol/g)	<i>w</i> (⁴⁰ Ar [*])/ (10 ⁻⁹ mol/g)	⁴⁰ Ar _放 / ⁴⁰ Ar _总	⁴⁰ Ar _放 / ⁴⁰ K	<i>t</i> /Ma
花岗斑岩	0.07595	2.99	1.7668	736.42	1301.07	89.241	0.59724	77.70%	0.006692	122.83±2.46
二长斑岩脉	0.07766	3.84	2.0874	5916.09	5916.09	114.611	0.84644	95.34%	0.007385	111.65±2.23

分析单位 桂林地质矿产研究院。分析者：陈民扬。

Ar 年龄。计算过程采用的常数为 $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10}/a$ ； $\lambda_\beta = 4.692 \times 10^{-10}/a$ ； $^{40}K/K = 1.167 \times 10^{-4}$ 。获得的小寺沟岩体花岗斑岩 K-Ar 年龄为 $(122.83 \pm 2.46)Ma$ (表 1),与前人采用的 K-Ar 法测得的年龄 $(129 Ma$ ；韩秀丽等,1999)十分接近,属于燕山晚期,与中生代中国东部高原埃达克岩形成时

代基本一致。

3.2 主量元素特征

主量元素和稀土元素的分析在湖北省武汉市综合岩矿测试中心完成。测试仪器为 ICP-AES,除 SiO₂ 采用碱溶法测定外,其他氧化物采用酸溶法测定,分析精度优于 2%。主量元素组成见表 2,其特

表 2 小寺沟岩体主量元素[$w(B)/\%$]及 CIPW 标准矿物分子数
Table 2 Major element content [$w(B)/\%$] and CIPW standard minerals of Xiaosigou pluton

	花岗岩岩						石英闪长斑岩	花岗闪长斑岩	
	D26-1	D24-1	D25-1	D25-3	D26-2	D24-2	$\delta\lambda\pi$	D13-3	D13-2
SiO ₂	65.66	63.9	70.55	69.24	67.56	65.42	65.91	64.39	65.81
TiO ₂	0.61	0.66	0.35	0.44	0.56	0.68	0.57	0.59	0.55
Al ₂ O ₃	15.22	15.84	14.11	14.98	15.53	15.69	15.72	15.27	15.17
Fe ₂ O ₃	1.44	2.97	1.38	1.78	2.49	2.48	1.86	1.02	1.69
FeO	2.31	2.19	1.39	1.37	1.43	1.72	1.84	1.62	2.47
MnO	0.05	0.07	0.03	0.04	0.04	0.06	0.05	0.03	0.05
MgO	1.7	1.23	0.9	1.15	1.22	1.36	1.2	1.5	1.5
CaO	2.9	3.97	1.9	2.42	3.1	3.32	2.8	3.7	2.9
Na ₂ O	4.76	4.12	4.16	4.74	4.21	4.16	4.74	4.56	4.48
K ₂ O	3.62	3.71	3.62	3.14	3.52	3.88	3.68	6.84	3.9
P ₂ O ₅	0.2	0.3	0.13	0.07	0.03	0.32	0.19	0.19	0.19
烧失量	0.99	1.75	1.02	0.54	0.4	0.51	1.08	1.66	1.07
总和	99.46	100.71	99.54	99.91	100.09	99.6	99.64	101.37	99.78
ALK	8.38	7.83	7.78	7.88	7.73	8.04	8.42	11.4	8.38
σ	3.06	2.9	2.18	2.36	2.43	2.86	3.06	6.06	3.04
Na ₂ O/K ₂ O*	1.31	1.11	1.15	1.51	1.20	1.07	1.29	0.67	1.15
CaO/Na ₂ O*	0.61	0.96	0.46	0.51	0.74	0.8	0.59	0.81	0.65
Al ₂ O ₃ /TiO ₂ *	24.99	24	40.2	34.05	27.73	23.07	27.72	25.97	27.58
A/CNK*	0.894	0.879	0.993	0.96	0.949	0.919	0.932	0.706	0.9
Mg [#] *	0.46	0.38	0.39	0.42	0.38	0.39	0.40	0.51	0.41
R ₁	1748	1794	2328	2114	2073	1864	1760	988	1779
R ₂	704	805	533	614	700	738	677	772	691
石英(Q)	15.98	16.14	27.27	22.74	20.97	17.89	16.99	5	16.8
钙长石(An)	9.62	13.92	8.71	10.39	13.13	12.8	10.91	1	9.89
钠长石(Ab)	40.9	35.26	35.74	40.38	35.76	35.55	40.7	38.7	38.4
正长石(Or)	21.73	22.17	21.72	18.68	20.88	23.16	22.07	40.54	23.35
刚玉(C)	/	/	0.21	/	/	/	/	/	/
透辉石(Di)	2.97	3.3	1	1.72	1.39	1.56	10.37	2.79	
紫苏辉石(Hy)	5.03	4.01	3.58	3.8	3.96	4.48	3.77		4.78
硅灰石(Wo)	/	/	/	/	/	/	/	1.34	/
钛铁矿(Il)	1.18	1.27	0.67	0.84	1.07	1.3	1.1	1.12	1.06
磁铁矿(Mt)	2.12	3.23	1.8	2.01	2.44	2.67	2.45	1.48	2.48
磷灰石(Ap)	0.47	0.7	0.31	0.16	0.07	0.75	0.45	0.44	0.45

* 单位为 1。/为低于检出限。ALK=Na₂O+K₂O; $\sigma=(Na_2O+K_2O)/(SiO_2-43)$; $R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$; $R_2=6Ca+2Mg+Al$;
Mg[#]=Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺); A/CNK=Al₂O₃/(NaO+KO+CaO)。

征如下：

(1) $w(SiO_2)$ 在 63.9%~70.55% 之间,平均值为 66.49%,属高硅系列 在 R_1 - R_2 分类命名图解(图 2)中,本岩体属英云闪长岩和花岗闪长岩类;
 $w(Al_2O_3)$ 在 14.11%~15.84% 之间,属高铝岩类;
 $w(Na_2O)>w(K_2O)$,属富钠系列;灼失量较少,小于 3%,说明样品蚀变较弱。

(2) $w(TiO_2)$ 、 $w(MgO)$ 、 $w(CaO)$ 、 $w(P_2O_5)$ 总体较低, $w(CaO)/w(Na_2O)$ 比值小于 1。岩石的 A/CNK 均小于 1.1。通过 CIPW 标准矿物计算,矿物基本上不出现刚玉,这些特征均与 I 型花岗岩一致

(Chappell et al., 1974;周刚等,2007;Silverster, 1998) 在 K_2O - Na_2O 图解(秦江峰等,2007 图 3)上,小寺沟岩体均投影于 I 型花岗岩中。

(3) 里特曼指数(σ)2.18~6.06,平均 3.11,在碱度率判别图(图 4) { $AR=[Al_2O_3+CaO+(Na_2O+K_2O)]/[Al_2O_3+CaO-(Na_2O+K_2O)]$ } 上,本岩体也投影至钙碱性至偏碱性系列。岩石的碱含量 ALK 高于世界花岗岩的平均值(7.71;胡祥昭,1988),属富碱岩体。

(4) 在 R_1 - R_2 多参数阳离子图解(图 5;Batchlo et al.,1985)上,本区花岗岩位于板块碰撞隆起区花

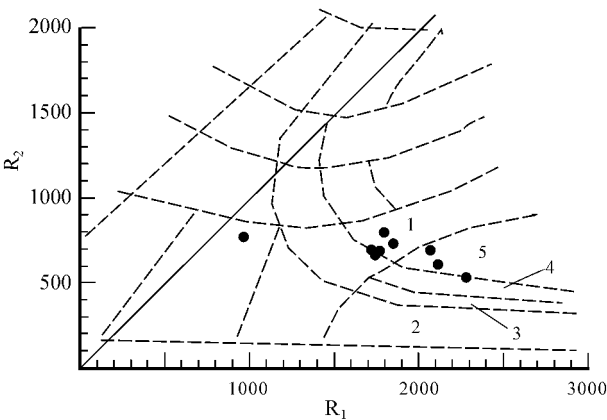


图 2 深成岩 R_1 - R_2 分类命名图解(底图据 Batchlo et al., 1985)
1—英云闪长岩；2—碱性花岗岩；3—正长花岗岩；4—二长花岗岩；5—花岗闪长岩
Fig. 2 R_1 - R_2 classification of pluton (basemap after Batchlo et al., 1985)
1—Tonalite；2—Alkaline granite；3—Syenogranite；4—Monzogranite；5—Granodiorite

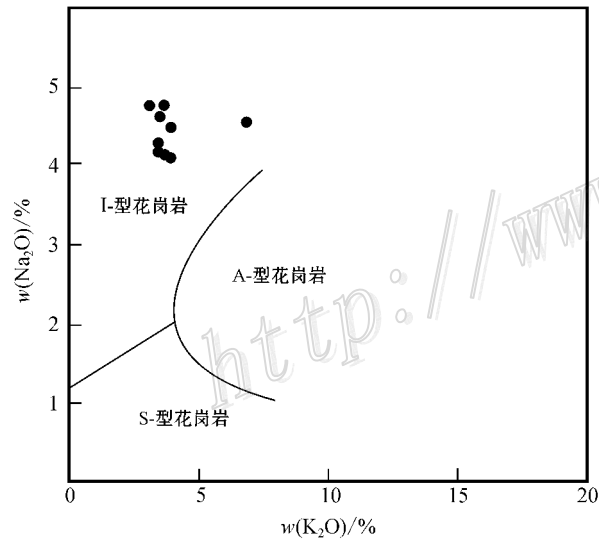


图 3 小寺沟岩体 K_2O - Na_2O 图解(底图据 秦江峰等, 2007)

Fig. 3 K_2O - Na_2O diagram of Xiaosigou pluton (basemap after Qin et al., 2007)

花岗岩和同碰撞期花岗岩及其附近,说明本区花岗岩总体形成于板块碰撞期(尹冰川等,1997;Patino, 1997;Nelson,1992;Rapp et al.,1991)。

(5) 由下地壳铁镁质岩石直接部分熔融所形成的岩浆的 $Mg^\#$ [(Mg^{2+})/($Mg^{2+} + Fe^{2+}$) 比值] 值一般不超过 0.40 (许立权等,2003),洋中脊玄武岩(MORB)部分熔融所产生的熔体的 $Mg^\#$ 值不会超过

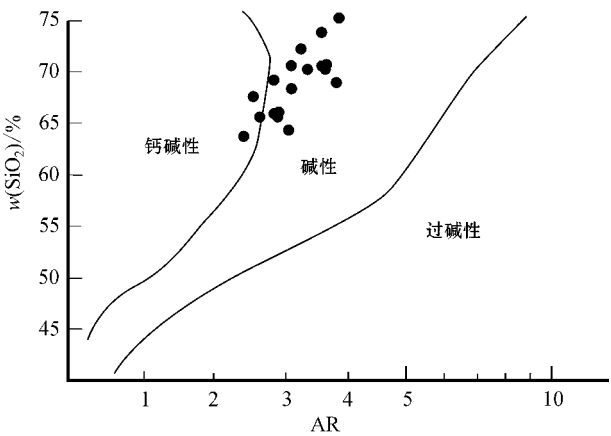


图 4 碱度率图解
Fig. 4 Diagram of alkalinity ratio

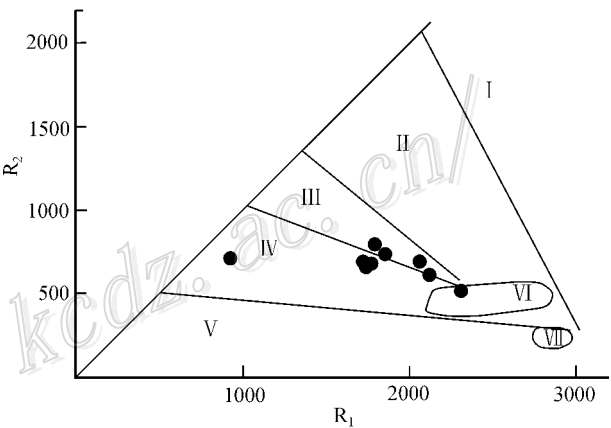


图 5 花岗岩 R_1 - R_2 多参数阳离子图解
(底图据 Batchlo et al., 1985)

I. 幔源花岗岩；II. 板块碰撞前消减地区花岗岩；III. 板块碰撞隆起区花岗岩；IV. 造山晚期花岗岩；V. 非造山区的 A 型花岗岩；VI. 同碰撞期花岗岩；VII. 造山期后花岗岩
Fig. 5 R_1 - R_2 multication diagram of granites (basemap after Batchlo et al., 1985)
I. Mantle granite；II. Plate collision mitigation area prior to granite；III. Plate collision uplift granite；IV. Late orogenic granite；V. Non-orogenic region A-type granite；VI. Syn-collisional granite；VII. Post-orogenic granite

0.45。由 MORB 产生的熔体在上升过程中与地幔楔发生交代作用则 $Mg^\#$ 值可超过 0.50 (Marc et al., 2002; 高宝顺等, 2006; 肖庆辉等, 2002)。小寺沟岩体的 $Mg^\#$ 值在 0.38~0.51 之间, 平均为 0.43, 高于下地壳铁镁质岩石直接部分熔融的 $Mg^\#$ 值(0.40), 这可能是由于幔源岩浆的混染作用导致 $Mg^\#$ 值的升高, 而少数几个样品 $Mg^\#$ 值低于 0.40, 则可能是岩浆上升过程中, 有部分铁镁矿物的分离结晶作用或地壳混染作用的结果。

(6) 由 CIPW 岩石分类法标准矿物计算表明(表 2),碱性长石体积分数高, $\varphi(\text{Or} + \text{Ab})$ 为 56.64% ~ 79.24%, 平均 61.74%, 钙长石体积分子数低, $\varphi(\text{An})$ 为 1% ~ 13.13% 据 $\varphi(\text{Q} + \text{Or}) - \varphi(\text{Mt} + \text{Il})$ 图解(图 6),小寺沟岩体属于磁铁矿系列花岗岩。

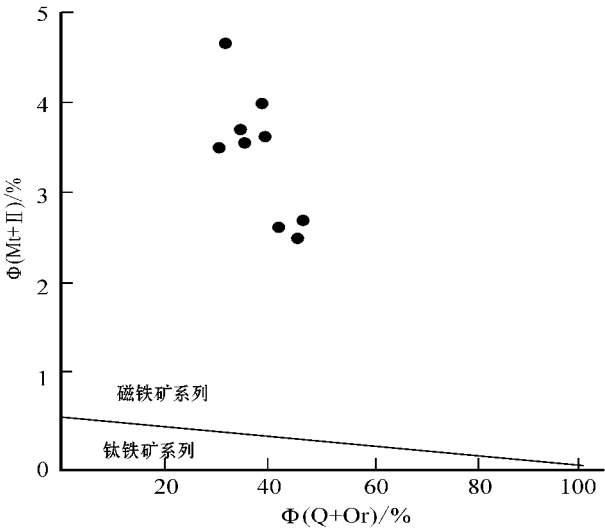


图 6 小寺沟岩体 $\varphi(\text{Q} + \text{Or}) - \varphi(\text{Mt} + \text{Il})$ 图解
底图据 Isbilara,1977
Fig. 6 $\varphi(\text{Q} + \text{Or}) - \varphi(\text{Mt} + \text{Il})$ diagram of Xiaosigou pluton
basemap after Isbilara,1977

3.3 稀土元素特征

稀土元素测试采用 PE Elan6000 型等离子体质谱(ICP-MS),方法为碱溶法测定,分析精度优于 1% ~ 2%,稀土元素组成见表 3。对稀土元素研究是示踪地球化学行为的有效途径(Philip et al.,1998 ;Xie et al.,2006 方维萱等,2007)。小寺沟岩体稀土元素总体上看:

(1) ΣREE 为 $82.54 \times 10^{-6} \sim 159.36 \times 10^{-6}$, LREE 为 $77 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$,HREE 为 $5.1 \times 10^{-6} \sim 9.5 \times 10^{-6}$,具稀土元素总量较低,富集轻稀土元素的特点。

(2) LREE/HREE 比值为 13.54 ~ 17.39, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值为 18.63 ~ 30.01。球粒陨石标准化分布图(图 7)为陡右倾型,说明轻、重稀土元素分异明显。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 比值较高(4.39 ~ 6.20),表明轻稀土元素分馏明显; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值较低(1.50 ~ 2.57),表明重稀土元素分馏不明显。

(3) δEu 为除 2 个样品外,其余的均表现为弱的负 Eu 异常至正异常,反映结晶分异作用在斑岩岩浆演化过程中不占主导地位,且斑岩岩浆中地壳物质混染较少,说明岩浆源区没有长石等矿物大量残余

表 3 小寺沟岩体及矿石稀土元素含量 [$w(\text{B})/10^{-6}$]
Table 3 REE contents in Xiaosigou pluton [$w(\text{B})/10^{-6}$]

	花岗岩岩						石英闪长斑岩	花岗闪长斑岩	
	D26-1	D24-1	D25-1	D25-3	D26-2	D24-2	$\delta\lambda\pi$	D13-3	D13-2
La	28.87	29.48	39.43	33.29	31.59	21.44	41.28	38.72	39.17
Ce	55.74	46.48	65.28	56.55	54.1	35.41	68.68	63.74	66.47
Pr	6.83	5.48	7.77	6.703	6.526	4.11	7.8	7.57	7.45
Nd	24.44	18.16	25.6	22.21	22.06	13.48	26.45	24.82	24.6
Sm	4.11	3.04	4.27	3.683	3.579	2.23	4.47	4.24	3.95
Eu	1.05	0.8	1.12	0.72	0.79	0.78	1.15	1.12	1.13
Gd	3.18	2.11	3.16	3.603	3.525	2.131	3.34	2.95	2.87
Tb	0.46	0.31	0.43	0.464	0.453	0.275	0.48	0.41	0.41
Dy	2.5	1.62	2.2	2.11	2.075	1.173	2.59	2.18	2.45
Ho	0.45	0.31	0.42	0.399	0.387	0.219	0.49	0.42	0.46
Er	1.14	0.79	1.01	1.095	1.08	0.62	1.24	1.1	1.25
Tm	0.16	0.11	0.14	0.142	0.139	0.082	0.19	0.17	0.18
Yb	0.92	0.69	0.78	0.866	0.84	0.508	1.05	1.01	1.17
Lu	0.13	0.1	0.11	0.132	0.13	0.081	0.15	0.15	0.16
Y	11.71	7.24	10.36	7.32	8.54	9.46	11.94	9.83	10.9
ΣREE	129.98	109.48	151.72	131.76	127.27	82.54	159.36	148.60	151.75
LREE/HREE*	13.54	17.13	17.39	13.98	13.75	15.22	15.72	16.71	15.95
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}^*$	18.63	25.37	30.01	22.82	22.33	25.06	23.34	22.76	19.88
δEu^*	0.93	1.00	0.97	0.66	0.74	1.19	0.95	1.00	1.07
δCe^*	0.81	0.72	0.74	0.75	0.75	0.74	0.75	0.74	0.77
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}^*$	4.39	6.06	5.77	5.65	5.52	6.01	5.77	5.71	6.20
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}^*$	2.12	1.87	2.48	2.55	2.57	2.57	1.95	1.79	1.50

* 单位为 1

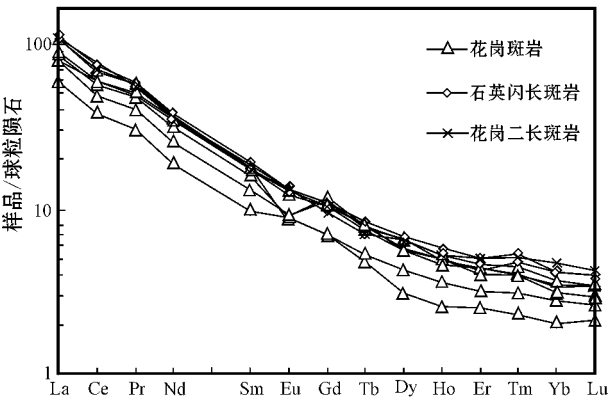


图 7 小寺沟岩体稀土元素配分模式图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of Xiaosigou pluton

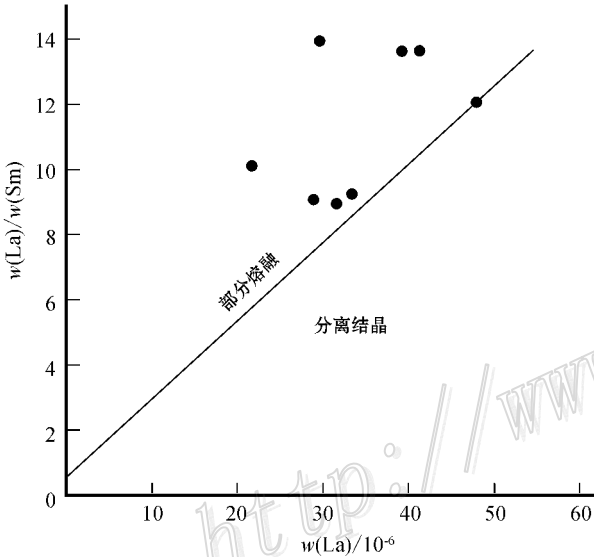


图 8 小寺沟岩体 $w(\text{La})$ - $w(\text{La})/w(\text{Sm})$ 图解

底图据高宝顺等, 2006

Fig. 8 $w(\text{La})$ - $w(\text{La})/w(\text{Sm})$ patterns of Xiaosigou pluton basemap after Gao et al., 2006

(高宝顺等, 2006; 李文昌等, 2007), 小寺沟岩体的成岩岩浆主体应为下地壳的部分熔融, 这也与图 8 相吻合。

4 讨论

斑岩型铜钼矿床的岩体化学特征研究一直都是一个倍受关注的课题 (Sillitoe 1972; Hollister et al., 1974; 药宗瑶等, 1984; 张洪涛等, 2004), 且形成了许多共识, 如斑岩型铜钼矿的成矿前提为花岗质岩浆侵位至浅成-超浅成环境形成的小型斑岩体, 控矿岩

体主要为钙碱性石英二长岩和花岗闪长岩类, 少数为偏碱性花岗岩类, 岩体产状多为岩株、岩钟、岩枝, 一般为 I 型花岗岩, 轻稀土元素富集, Eu 异常不明显; 汇聚板块边缘的造山作用为最有利的成矿地质背景等。侯增谦等 (2003) 认为埃达克岩可能为斑岩铜矿的一种重要的含矿母岩。

4.1 地球化学特征

张旗等 (2001a, 2004, 2003a) 认为还存在相对较老 ($>25 \text{ Ma}$) 的埃达克岩, 特别是近年来在中国东部发现的由加厚的玄武质下地壳部分熔融产生的埃达克岩更是支持了这一观点 (张旗, 2008; 王强等, 2001, 2004; 王元龙等, 2004; Xu et al., 2002; Chung et al., 2003)。Defant 也提出, 埃达克岩是指具有 adakite 地球化学特征的岩石 (余良范等, 2008; 王焰等, 2000)。表 4 将埃达克岩的地球化学特征与小寺沟岩体进行了对比。

富 Si 说明是地壳熔融的, 贫 Y 暗示部分熔融时有石榴子石稳定存在; 高铝、Eu 正异常说明熔融时斜长石在源区不稳定 (张旗等, 2003a)。本文的两个样品的负钨异常 ($\delta\text{Eu}=0.66, 0.74$) 则可能是岩浆上升过程中混染了上地壳物质或部分地发生了结晶分异作用; 由加厚的下地壳部分熔融形成的埃达克岩有一个重要特征是富 K ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值 ≥ 1 , 很少 ≤ 1 , 张旗等, 2003b), 富钾的原因可能为源区原岩富钾、部分熔融程度较低和压力较高等 (Rapp et al., 2002)。总体上, 小寺沟岩体与埃达克岩特征基本一致, 个别数据稍有偏差可能与本区的原岩、混染作用、岩体侵位时的温压条件等有关。

4.2 地质意义

O 型埃达克岩与板块的消减作用有关, C 型埃达克岩 (陆相) 主要是地壳加厚条件下部分熔融的产物 (张旗等, 2001a, 2001b)。埃达克岩一般不是由分离结晶作用形成的 (Defant et al., 1990; Atherton et al., 1993), 图 8 和 Eu 异常特征反映, 本区岩浆主体不是由分离结晶作用形成的, 即本区埃达克岩没有经过充分的演化, 是快速上升的产物, 其来源至少大于 50 km, 压力大于 1.5 GPa (张旗等, 2001), 下地壳的部分熔融形成的中酸性岩浆大量移出可导致地壳密度加大 (张旗等, 2006), 下地壳密度增加能引发拆沉作用的发生, 可使地壳减薄。小寺沟岩体可能为下地壳部分熔融形成的埃达克岩快速上升并在较浅成的环境中侵位的产物。多位学者也曾关注中生代中国东部存在加厚陆壳的问题 (邓晋福等, 1996; 2000; 董树文等, 2000; 任纪舜, 1999)。小寺沟埃达克岩形成时该区的地壳厚度应大于现在, 由于埃达

表 4 小寺沟岩体与埃达克岩地球化学参数对比表

Table 4 Contrastive table of geochemical parameters between adakites and Xiaosigou pluton

对比参数	小寺沟岩体	埃达克岩
$w(\text{SiO}_2)$	平均 66.49%	>56%
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	平均 15.28%	>15%
$w(\text{Na}_2\text{O})$	平均 4.44%	$3.5\% < \text{Na}_2\text{O} < 7.5\%$
$w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})$	仅 D13-3 (0.67) 小于 1.00	>1.00
$w(\text{MgO})$	平均 1.31%	<3%
$w(\text{Mg}^\#)$	约 0.51	~0.51
δEu	负 Eu 异常不明显	无负 Eu 异常
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	平均 23.36%	>10%
$w(\text{Yb})$	平均 0.87×10^{-6}	1.9×10^{-6}
$w(\text{Y})$	平均 9.7×10^{-6}	$< 10 \times 10^{-6}$
岩类	英云闪长岩和花岗闪长岩	岛弧安山岩、英安岩、流纹岩或英云闪长岩和奥长花岗岩类
岩性	钙碱性至弱碱性	钙碱性

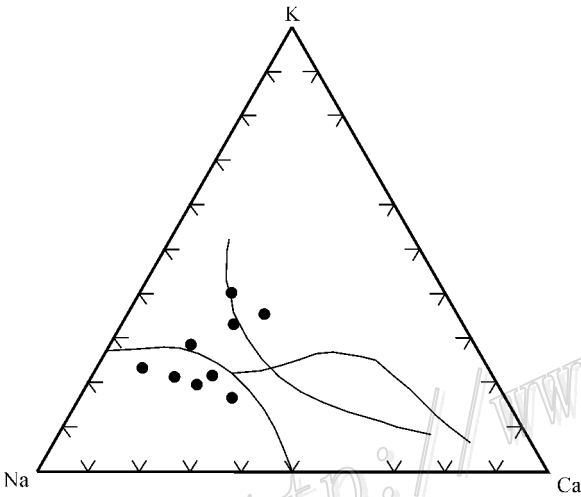


图 9 埃达克岩 K-Na-Ca 三角图解
底图据 Martin et al., 1987

Fig. 9 Adakite in K-Na-Ca diagram
basemap after Martin et al., 1987

克岩浆的移出,发生的拆沉作用才使地壳减薄至现在的局面。

埃达克岩浆是玄武质岩石(镁铁质岩石)在高压、高温和含水条件下熔融形成的(图 9)。本区主要为玄武质岩浆源,其形成埃达克岩时角闪石的脱水作用产生的大量流体对金属元素的富集是非常有利的(王元龙等,2003),岩浆的快速上升对成矿物质的迁移具有重要的作用(Springer et al., 1997),低分异的岩浆有利于斑岩型矿床的形成(Sillito, 1998)。小寺沟岩体的初始岩浆为部分熔融的下地壳物质与混染的少量地幔物质,大量的 Cu、Mo 元素来源有 2 个(赵文津,2007):一为上地幔上来的,二为从镁铁

质下地壳萃取来的,所以笔者认为小寺沟岩体的初始岩浆即为“矿浆”。陆相环境下大型斑岩铜(钼)矿成矿要有一个挤压构造环境(赵文津,2007),燕山期本区受滨西太平洋俯冲作用影响,有挤压构造的环境,同时西伯利亚板块与华北微板块碰撞后的伸展构造作用更是为岩浆侵位提供了条件。“矿浆”在上升过程中由于有挤压构造的影响,促使矿质(Cu、Mo)得到了萃取而沉淀成矿,小寺沟岩体为磁铁矿花岗岩(图 6),有利于成矿。可以说本区的构造环境、岩体含矿性和岩体类型造就了小寺沟大型斑岩型铜(钼)矿。

大型斑岩型矿床具线性分布特征(涂光炽, 1989),这说明本矿床也可能不是独立的。在华北板块北部存在着一个地壳加厚带,但目前该区已确定为埃达克岩的有安家营子、山岳沟、裴家屯、旧门、碱厂、大梁山等(张旗,2003a; Gregory, 2003),笔者认为华北板块北缘地壳加厚带中可能还存在有尚未被认识的埃达克岩。埃达克岩与斑岩型 Cu、Cu-Mo、Cu-Au 及浅成低温热液型 Au-Ag 矿床有密切关系, Thieblemont 等(1997) 等统计了全球 43 个 Au、Ag、Cu、Mo 低温热液和斑岩矿床,发现其中 38 个与埃达克岩有关。所以虽然在全球范围内, 140~90 Ma 已知的斑岩铜矿仅有少数几个,但如果能在华北板块北缘发现埃达克岩,则可能为该时代斑岩铜矿增加新的数据。

5 结 论

(1) 小寺沟岩体与埃达克岩的地球化学特征基本吻合,其初始岩浆主要源于下地壳的部分熔融,成

矿物质可能源于玄武质岩浆部分混染了地幔物质。

(2) 小寺沟岩体为燕山晚期侵入体,当时该区存在一个加厚地壳。

(3) 在华北板块北缘还可能找到埃达克岩,该区有极好的寻找斑岩型铜钼矿的空间。

References

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 362 : 144-146.
- Batchlo R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granotoid rock series using multination parameters [J]. *Chem. Geol.*, 48 (1/4) : 43-55.
- Bo T B and Zhao B. 1990. Geological and geochemical evidence of contemporaneity and consanguinity of the Xiaosigou porphyry deposit and its coexisting skarn deposits [J]. *Geochemical*, 2 : 166-174 (in Chinese with English abstract).
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite type [J]. *Pacific Geology*, 173-174.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, Chu M F, Lee H Y, Wen D J, Lo C H, Lee T Y, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zone: Melting of thickened lower-crust beneath southeast Tibet [J]. *Geology*, 31(11) : 1021-1024.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 347 : 662-665.
- Defant M J, Richerson M, De Boer J Z, Stewart R H, Maury R C, Bellon H, Drummond M S, Feigenson M D and Jackson T E. 1991. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: Petrogenesis of La Yeguada volcanic complex [J]. *Panama J. Petrol.*, 32 : 1101-1142.
- Defant M J and Drummond M S. 1993. Mount St Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc [J]. *Geology*, 21 : 547- 550.
- Deng J F, Zhao H L, Mo X X and Luo Z H. 1996. The key of continental root- pole tectonics and the dynamics in china [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-110 (in Chinese).
- Deng J F, Zhao G C, Zhao J L, Luo Z H, Dai S Q and Li K M. 2000. Yanshanian igneous petroectonic assemblages and orogenic-deep processes in east China [J]. *Geological Review*, 46(1) : 41- 48 (in Chinese with English abstract).
- Dong S W, Wu X H, Wu Z H, Deng J F, Gao Y and Wang C S. 2000. On tectonic seesawing of the east Asia continent-global implication of the Yanshanian movement [J]. *Geological Review*, 46(1) : 8-13 (in Chinese with English abstract).
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemitic-tonalite adakitic genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. *Geophys. Res.*, 95 : 21503-21521.
- Fang W X, Yang S F, Liu Z T, Wei X L and Zhang B C. 2007. Geochemical characteristics and significance of major element, trace elements and REE in mineralized altered rocks of large scale Tsagaan Suvarga Cu-Mo porphyry deposit in Mongolia [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 25(1), 85-94 (in Chinese with English abstract).
- Gao B S and Zheng Y Y. 2006. Geochemical controlling of mineralization in Qulong super-large porphyry copper deposit, Tibet [J]. *Geological Science and Technology Information*, 25(2) : 41-46 (in Chinese with English abstract).
- Gregory A Davis. 2003. The Yanshanian belt of north China: Tectonics, adakitic magmatism, and crustal evolution [J]. *Earth Science Frontiers*, 12(4) : 373-384.
- Han X L and Yin L J. 1999. The study on the ore-controlled factors and metallogenic regularity of Xiaosigou Cu-Mo deposit [J]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 21(2) : 62-66 (in Chinese with English abstract).
- Hollister V F and Sirvas E B. 1974. The Michiquillay porphyry copper deposit [J]. *Mineraium Deposita*, 9(2) : 261-269.
- Hollings P and Kerrich R. 2000. An Archean arc basalt-Nb-enriched basalt-adakite association: The 2.7 Ga confederation assemblages of the Birch-Uchi greenstone belt, Superior Province [J]. *Contrions to Mineralogy and Petrology*, 139 : 208-226.
- Hou Z Q, Mo X X, Gao Y F, Qu X M and Meng X J. 2003. Adakite, A possible host rock for porphyry copper deposits: Case studies of porphyry copper belts in Tibetan plateau and in northern Chile [J]. *Mineral Deposits*, 22(1) : 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Hu X Z. 1988. Discussion of characteristics and genesis in Yejiwei quartz porphyry rocks with tin [A]. In: Huxiang Zhao Technology [C]. Changsha: Central South University Press. 24-30 (in Chinese with English abstract).
- Isibara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks [J]. *Mining Geology*, 27 : 293-305.
- Kepezhinskas P K, Defant M J and Drummond M S. 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60 : 1217- 1229.
- Li W C and Zeng P S. 2007. Characteristics and metallogenic model of the Pulang super-large porphyry copper deposit in Yunnan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 34(4) : 436-446 (in Chinese with English abstract).
- Marc J D, Xu J F, Pavel K, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakites: Some variations on a theme [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2) : 129-142.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids [J]. *Lithos*, 46 : 411-429.
- Morris P A. 1995. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwestern Japan [J]. *Geology*, 23 : 395-398.
- Nelson K D. 1992. Are crustal thickness variations in old mountain belt like the Appalachians a consequence of lithospheres delaminating [J]? *Geology*, 20(06) : 498-502.

- Patino Douce A E. 1997. Generation of metal minerals : A-type granites by low pressure melting of calc-alkaline granites[J]. *Geology*, 25 (02) : 743-746.
- Peacock S M, Rushmer T and Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 121 : 227-244.
- Peacock S M and Wang K. 1999. Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism : Examples from southwest and northeast Japan[J]. *Sciences*, 286 : 937-939.
- Philip R W and James F L. 1998. Rare earth element metasomatism in hydrothermal systems : The Willsboro-Lewis wollastonite ores, New York, USA [J]. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 62 (17) : 2964-2968.
- Qin J F, Lai S C and Li Y F. 2007. Genesis of the Indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian-Lueyang (Mianlue) suture, south Qingling, and its tectonic implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(4) : 466-471 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolites ecologies and the origin of Achaean trend emits and tonalities [J]. *Precambrian Research*, 51(05) : 1-25.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 Kbar : Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Petrol.*, 36 : 891-931.
- Rapp R P, Shimizu N and Norman M D. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge : Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 160 : 335-356.
- Rapp R P, Xiao L and Shimizu N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3) : 293-302.
- Ren J S. 1999. Tectonic map of China and adjacent region[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-50 (in Chinese).
- Rui Z Y, Hang C K and Qi M G. 1984. Porphyry copper (molybdenum) in China[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-350 (in Chinese).
- Sen C and Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa : Implications for the origin of adakites[J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 117 : 394-409.
- Sillitoe R H. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits[J]. *Econ. Geol.*, 67 : 184-197.
- Springer W and Seck H A. 1997. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 Kbar : Implications for the origin of TTG magmas[J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 127 : 30-45.
- Stern C R and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Austral volcanic zone[J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 123 : 263-281.
- Sun J F, Wang H W and Xu Z H. 2004. Study on the Ag mineral resource potential in the surrounding of Xiaosigou Cu-Mo deposit in the north Hebei Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 9 (1) : 20-23 (in Chinese with English abstract).
- Sylvester P J. 1998. Post-collision strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45 : 29-44.
- Thieblemont D and Lehrberger J L. 1997. Gisements epithermal and porphyry : A connection adakite [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 325 : 103-109.
- Tu G Z. 1989. Prospecting and theory about super-large deposits [J]. *Advance in Earth Sciences*, 6 : 14-20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Xu J F, Wang J X, Zhao Z H, Wang R J, Qiu J X, Xiong X L, Sang L K and Peng L H. 2000. The recognition of adakite-type gneisses in the north Dabie Mountains and the relationship between them and ultrahigh pressure metamorphism [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46 (10) : 1017-1024 (in Chinese).
- Wang Q, Zhao Z H, Xiong X L and Xu J F. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust : Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui Province, China[J]. *Geochimica*, 30(4) : 353-362 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao Z H, Xu J F, Bai Z H, Wang J X and Liu C X. 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 [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2) : 351-360 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Zhang Q and Qian Q. 2000. Adakite geochemical characteristics and tectonic significances[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2) : 251-256 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y L, Zhang Q, Wang Q, Liu H T and Wang Y. 2003. Study on adakitic rock and Cu-Au mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3) : 543-550 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y L, Wang Y, Zhang Q, Jia X Q and Han S. 2004. The geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis geodynamic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2) : 325-338 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Q H, Deng F Q, Ma D S, Hong D W and Mo X X. 2002. The thought and meanings in the granites research[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 12-63 (in Chinese).
- Xie Q Q, Xu X C, Li X X, Cheng T H and Lu S M. 2006. Rare earth elements geochemistry of Laowan gold deposit in Henan Province : Trace to source of ore-forming materials [J]. *Journal of Rare Earths*, 24(1) : 114-119.
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J and Wang Q. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China : Partial melting of delaminated lower continental crust [J]. *Geology*, 30 : 1111-1114.
- Xu L Q, Deng J F, Chen Z Y and Tao J X. 2003. The identification of Ordovician adakites and its signification in northern Damiao, inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 17(4) : 428-434 (in Chinese with English abstract).
- Yin B C and Yan Q C. 1997. The tectonic environments of metallogenesis of Duobaoshan super-large copper deposit [J]. *Acta Miner-*

- ologica Sinica, 17(2):220-224 (in Chinese with English abstract).
- Yogodzinski G M, Kay R W, Volynets O N, Kay S M and Koloskov A V. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge [J]. Geol. Society Am. Bull., 107:505-519.
- Yu L F, Yang X Y, Sun W D, Chi Y Y and Zhang Q M. 2008. The adakite and mineralization of the Shaxi porphyry copper-gold deposit, central Anhui [J]. Geology in China, 35(6):1150-1161 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Zhang H and Song J L. 1997. Large tectonics and super-large deposits [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 152-169 (in Chinese).
- Zhang H T, Chen R Y and Han F L. 2004. Re-understanding of metallogenic geological conditions of porphyry copper deposits in China [J]. Mineral Deposits, 23(2):150-163 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Qian Q, Wang E C, Wang Y, Zaho T P, Hao J and Guo G J. 2001a. An east China plateau in mid-late Yanshanian period: Implication from adakites [J]. Chinese Journal of Geology, 36(2):248-255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y and Wang Y L. 2001b. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 17(4):505-513 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y, Liu H T, Wang Y L and Li Z T. 2003a. On the spacetime distribution and geodynamic environments of adakites in China annex: Controversies over differing opinions for adakites in China [J]. Earth Science Frontiers, 10(4):385-400 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y and Wang Y L. 2003b. On the relationship between Adakite and its tectonic setting [J]. Geotectonica et Metallogenia, 27(02):101-108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Xu J F, Wang Y, Xiao L, Liu H T and Wang Y L. 2004. Diversity of adakite [J]. Geological Bulletin of China, 23(9/10):959-965 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Jin W J, Wang Y L, Li C D, Wang Y and Jia X Q. 2006. Ocean lithosphere delamination and the lower crust delamination: The different mechanism and geological implication: Comment on the delamination model of lower crust and lithosphere mantle [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(11):2631-2638 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q. 2008. Adakite research: Retrospect and prospect [J]. Geology in China, 35(1):32-39 (in Chinese with English abstract).
- Zhao W J. 2007. Deep tectono-magmatic setting for metallogenesis of large porphyry copper deposits [J]. Geology in China, 34(2):179-205 (in Chinese with English abstract).
- Zhou G, Zhang Z C, Luo S B, He B, Wang X, Ying L J, Zhao H, Li A H and He Y K. 2007. Confirmation of high-temperature strongly peraluminous Mayin 'ebo granites in the south margin of Altay, Xinjiang: Age, geochemistry and tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(8):1909-1020 (in Chinese with English abstract).
- 柏天宝, 赵斌. 1990. 小寺沟斑岩矿床及其共生的矽卡岩矿床的周期性、同源性的地质地球化学证据 [J]. 地球化学, (2):166-174.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 罗照华. 1996. 中国大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社. 1-110.
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 戴圣潜, 李凯明. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山深部过程 [J]. 地质论评, 46:41-48.
- 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 邓晋福, 高锐, 王成善. 2000. 论东亚大陆的构造渐变——燕山运动的全球意义 [J]. 地质论评, 46:8-13.
- 方维萱, 杨杜锋, 刘正桃, 韦星林, 张宝琛. 2007. 蒙古查干苏布尔加 (Tsagaan Suvarga) 大型斑岩型铜钼矿床含矿蚀变岩常量、微量和稀土元素地球化学特征及意义 [J]. 中国稀土学报, 25(1):85-94.
- 高宝顺, 郑有业. 2006. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床成矿作用的地球化学控制 [J]. 地质科技情报, 25(2):41-46.
- 韩秀丽, 尹力军. 1999. 小寺沟铜钼矿床控矿因素及成矿规律 [J]. 河北理工学院学报, 21(2):62-66.
- 候增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 2003. 埃达克岩斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩 [J]. 矿床地质, 22(1):1-12.
- 胡祥昭. 1988. 野鸡尾含锡石英斑岩的岩石学特征及成因探讨 [A]. 胡祥昭论文集 [C]. 长沙: 中南大学出版社. 24-30.
- 李文昌, 曾普胜. 2007. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型 [J]. 成都理工大学学报, 34(4):436-446.
- 秦江峰, 赖绍聪, 李永飞. 2007. 南秦岭勉县-略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义 [J]. 地质通报, 26(4):466-471.
- 任纪舜. 1999. 中国及邻区大地构造图 [M]. 北京: 地质出版社. 1-50.
- 芮宗瑶, 黄崇祠, 齐国明. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床 [M]. 北京: 地质出版社. 1-350.
- 孙冀凡, 王会文, 许振海. 2004. 冀北小寺沟铜钼矿外国银金资源潜力浅析 [J]. 地质找矿丛论, 19(1):20-23.
- 涂光炽. 1989. 关于超大型矿床的寻找和理论研究 [J]. 地球科学进展, (6):14-20.
- 王强, 许继锋, 王建新, 赵振华, 王人镜, 邱家骥, 熊小林, 桑隆康, 彭练红. 2000. 大别山 adakite 岩型灰色片麻岩的确立及其与超高压变质作用的关系 [J]. 科学通报, 46(10):1017-1024.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继锋. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融——来自安徽沙溪 adakite 质富钠英闪长玢岩的证据 [J]. 地球化学, 30(4):353-362.
- 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 (adakite) 的侵入岩地球化学特征对比: (折沉) 下地壳熔融与斑岩铜矿的成因 [J]. 岩石学报, 20(2):351-360.
- 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 [J]. 地质科学, 35(2):251-256.

附中文参考文献

- 王元龙,张旗,王强,刘红涛,王焰. 2003. 埃达克质岩与 Cu-Au 成矿作用关系的初步探讨[J]. 岩石学报, 19(3):543-550.
- 王元龙,王焰,张旗,贾秀琴,韩松. 2004. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿——地球动力学意义[J]. 岩石学报, 20:325-338.
- 肖庆辉,邓晋福,马大铨,洪大卫,莫宣学. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京:地质出版社. 12-63.
- 许立权,邓晋福,陈志勇,陶继雄. 2003. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义[J]. 现代地质, 17(4):428-434.
- 尹冰川,冉清昌. 1997. 多宝山超大型铜矿床的成矿构造环境[J]. 矿物学报, 17(2):220-224.
- 余良范,杨晓勇,孙卫东,池月余,张千明. 2008. 埃达克岩与皖中沙溪斑岩铜矿的成矿作用[J]. 中国地质, 35(6):1150-1161.
- 翟裕生,张湖,宋鸿林. 1997. 大型构造与超大型矿床[M]. 北京:地质出版社. 152-169.
- 张洪涛,陈仁义,韩芳林. 2004. 重新认识中国斑岩铜矿的成矿地质条件[J]. 矿床地质, 23(2):150-163.
- 张旗,钱青,王二七,王焰,赵太平,郝杰,郭光军. 2001a. 燕山中晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 36(2):248-255.
- 张旗,王焰,王元龙. 2001b. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探:埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约[J]. 岩石学报, 17(4):505-512.
- 张旗,王焰,刘红涛,王元龙,李之彤. 2003a. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景附:国内关于埃达克岩的争论[J]. 地质前缘, 10(4):385-400.
- 张旗,王焰,王元龙. 2003b. 埃达克岩与构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 27(2):101-108.
- 张旗,许继峰,王焰,肖龙,刘红涛,王元龙. 2004. 埃达克岩的多样性[J]. 地质通报, 23(9/10):959-965.
- 张旗,金惟俊,王元龙,李承东,王焰,贾秀勤. 2006. 大洋岩石圈拆沉与大陆下地壳拆沉:不同的机制及意义——兼评“下地壳+岩石圈地幔拆沉模式”[J]. 岩石学报, 22(11):2631-2738.
- 张旗. 2008. 埃达克岩研究的回顾和前瞻[J]. 中国地质, 35(1):32-39.
- 赵文津. 2007. 大型斑岩铜矿成矿的深部构造岩浆活动背景[J]. 中国地质, 34(2):179-205.
- 周刚,张招崇,罗世宾,何斌,王祥,应立娟,赵华,李爱红,贺永康. 2007. 新疆阿尔泰山南缘玛因鄂博高温型强过铝花岗岩:年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(8):1909-1020.