

西秦岭北缘与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的斑岩型铜-钼-金成矿作用*

殷勇¹ 殷先明²

YIN Yong¹ and YIN XianMing²

1. 甘肃地矿科技信息中心, 兰州 730000

2. 甘肃省地质矿产勘查开发局, 兰州 730000

1. Gansu Geology and Mineral Resources Information Center, Lanzhou 730000, China

2. Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730000, China

2008-03-03 收稿, 2009-01-01 改回.

Yin Y and Yin XM. 2009. Porphyry Cu-Mo-Au mineralization related to adakite and Himalayan type granite in the northern margin of West Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5):1239–1252

Abstract Adakite is one of intermediate and acidic magmatite related to mineralization, and it has been taken the special attention and interest during the latest 20 years; Himalayan granite is a term which is introduced recently to describe a kind of granite related to crust thickening. The study results in this essay show that in the northern edge of West Qinling exist Indosinian adakite and Himalayan type granite which are related with mineralization of gold, copper and molybdenum. The adakite and Himalayan type granite in Ayishan and Dewulu-Heihe area are characterized by the high value of $Mg^{\#}$, which may be caused by the mixing of mantle magma and crustal magma in the bottom of thickening crust, but the low value of $Mg^{\#}$, which adakite and Himalayan granite in Wenquan and Chijiazhaung area have, should be caused by partial melting of thickened low crust. In this paper, the geological setting of porphyry Cu-Mo-Au orebelt in the northern section of West Qinling is introduced, the characteristics of adakite and type granite, and the relation with mineralization are analyzed. The study work reveal that orogenic zone of west Qinling formed in Triassic Period should be a favorable area for finding Cu-Mo-Au deposit due to the thick crust and frequently magmatic activities.

Key words West Qinling; Porphyry copper; Adakite; Himalayan type granite; Mineralization

摘要 埃达克岩是以往20年中特别引起人们兴趣和关注的与成矿有关的中酸性岩浆岩之一,而喜马拉雅型花岗岩是最近提出来的也与地壳加厚有关的花岗岩类。本文的研究表明,在西秦岭北缘存在印支期的埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩,而且它们均与金、铜、钼等成矿作用有关。研究表明,本区阿城山和德乌鲁-黑河地区的埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩具有较高的 $Mg^{\#}$ 数值,可能是加厚地壳底部幔源岩浆和壳源岩浆混合形成的,而温泉和柴家庄地区的埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩 $Mg^{\#}$ 低,应当是加厚的下地壳部分熔融形成的。文中介绍了西秦岭北带斑岩铜-钼-金矿带的地质背景,讨论了埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的特征及其与成矿作用的关系,提出了进一步找矿工作的建议。研究表明,三叠纪时期的西秦岭造山带地壳厚度大,岩浆活动频繁,找矿潜力巨大,是我国新一轮的铜钼金找矿区之一,发展前景很大。

关键词 西秦岭;斑岩铜矿;埃达克岩;喜马拉雅型花岗岩;成矿作用

中图法分类号 P588.121;P618.41

本文所指西秦岭斑岩铜矿带,西起同仁(青海),东至天水以东,北以临夏—漳县—武山—天水—拓石一线为界,南以夏河—临潭—凤县(陕西)一线为界,长约400km,最宽

50km。该带内有斑岩型铜矿、斑岩型铜钼矿、斑岩型金矿、斑岩型钼矿、夕卡岩-热液型铜矿及热液型金矿,是我国一个重要的铜、钼、金成矿带。由于气候、交通、开发要求及研究程

* 本文受国土资源大调查地质调查项目(1212010781066)资助。

第一作者简介:殷勇,男,1970年生,高级工程师,从事地质调查与矿产资源勘查与研究, E-mail: yinyrich@yahoo.com.cn

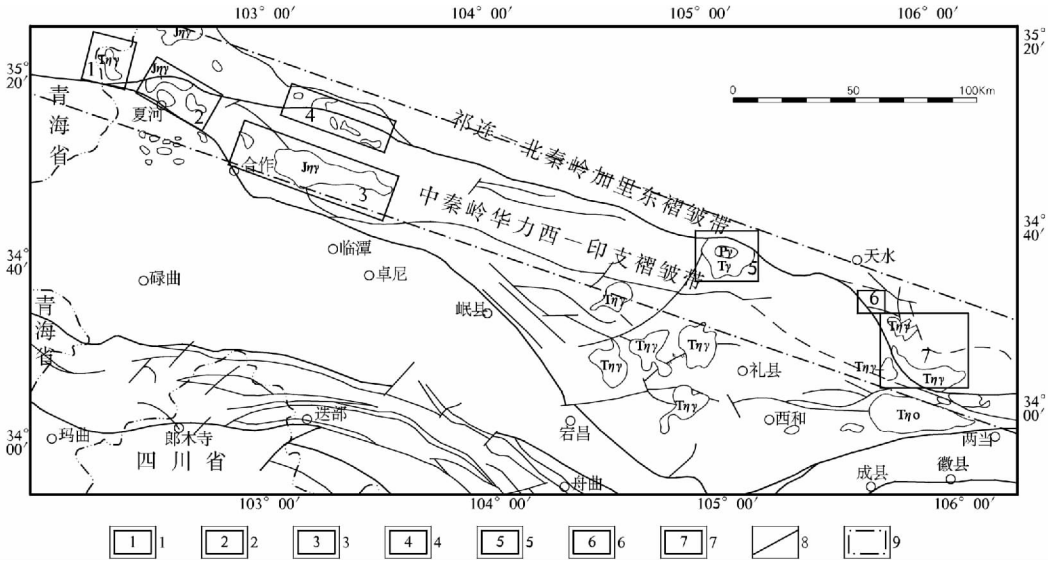


图1 西秦岭斑岩铜矿带花岗岩分布图

1-年木耳地区;2-阿姨山地区;3-德乌鲁-黑河地区;4-铁沟-兴时沟地区;5-温泉地区;6-太阳山地区;7-柴家庄地区;8-断层;9-研究区

Fig. 1 The sketch map showing the distribution of granites in porphyry copper zone of West Qinling

度的制约,该带研究广度和深度远逊于我国其他斑岩铜矿带。随着金矿勘查开发和国土资源大调查的开展,该带在金、钼矿勘查及研究取得了较大进展,发现并勘查了一批大中型矿床,对该带斑岩和热液型 Au、Cu、Mo 的找矿前景获得了新的认识。

斑岩铜矿作为一种最重要的铜-钼和铜-金矿床类型,近年来的研究发现,世界级规模的斑岩铜矿不仅产于岛弧或陆缘弧环境,还产于碰撞造山带环境,不论是岛弧或陆缘弧环境还是碰撞造山带环境,最具成矿潜力的含矿斑岩通常具有与埃达克质岩浆的亲合性。随着埃达克岩概念的引进,已经有一些作者对该带埃达克岩的特征进行了探讨(如金维俊等,2005;殷勇,2007;韩海涛等,2008a,b)。为进一步了解西秦岭斑岩铜矿带含矿斑岩埃达克岩岩浆亲合性和含矿潜在性,本文对该带的含矿斑岩及成矿作用进行了综合研究,着重分析了含矿斑岩的岩石化学和地球化学特征,指出该带不仅有大量的埃达克岩出露,还有许多喜马拉雅型花岗岩出露,且它们均与成矿作用有关,表明该区可能是一个 Cu、Mo、Au 斑岩型和热液型矿床的巨大潜在区,有望实现找矿的重大突破。

1 西秦岭北带斑岩型铜-钼-金矿带地质背景

西秦岭北带处于华北板块和扬子板块之间,祁连-北秦岭加里东褶皱带与中秦岭华里西-印支褶皱带的拼接部位,受到华北和扬子地块对接的强大影响,构造活动非常复杂(图1)。主体构造线呈 NW—近 EW 向展布,次级构造单元包括美武—新寺复背斜带,天水—拓石褶断带,合作—临潭北断裂带。NE 向构造发育,比较明显的断裂有临夏—夏

河,洛门—闫井、天水—礼县、柴家庄等 4 条断裂。NE 向隆起和拗陷相间排列,由东向西为火炎山—庙山隆起带、冶力关—大草滩拗陷带、合作拗陷带、甘加拗陷带,相对拗陷部位 NE 向断裂发育,EW 向和 NE 构造复合,控制了带内的岩浆侵入和成矿作用。

地层自老至新出露有:古元古界、中新元古界、下元古界、泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系。中酸性侵入岩发育,从时间序列看以印支期最为强烈,同位素年龄大多集中在 200~245Ma 之间。如温泉岩体黑云母 K-Ar 年龄为 223~226Ma,SHRIMP U-Pb 锆石年龄为 223 ± 7 Ma(张宏飞等,2005),韩海涛等(2008a)得出的时代为 201~218Ma。年木耳杂岩体年龄 200 ± 3.8 Ma(甘肃省地质局研究队,1978^①),冶力关和夏河岩体的 SHRIMP 年龄分别为 245 ± 6 Ma 和 238 ± 4 Ma(金维俊等,2005),美武岩体黑云母 K-Ar 年龄为 206~212Ma(张宏飞等,2005)。岩浆的侵入活动具明显的连续性和继承性,具多期、多次、多阶段侵入的特点,如温泉岩体以印支期(207~226Ma)为主,有 4 期 10 多次侵入(梁亚忠,2008)。

该带的中酸性侵入岩分布呈南北两带,EW 向岩体相对分段集中,形成几个岩体集中地段。中酸性侵入岩规模一般较小,多呈小岩株产出。该带构造岩浆矿化可分南北两带(图1):北带西起达里加经铁沟-兴时沟、温泉,更东至东秦岭大堡一带,出露岩体 70 余个;南带西起年木耳经阿姨山、德乌鲁-黑河、太阳山、柴家庄至磨扇沟,出露岩体 50 余个。依据岩浆矿化 EW 向分段集中的特点,划分为 7 个岩浆矿化集

① 甘肃省地质局研究队. 1978. 西秦岭内生铜矿地质特征及成矿规律研究

表 1 西秦岭北缘主要花岗岩岩体特征

Table 1 Characteristics of major granitoid bodies in the northern margin of West Qinling

地区	含矿岩体名称	岩性	产状规模	矿化情况
年木耳	年木耳	石英闪长岩、辉石闪长岩、石英闪长玢岩、花岗斑岩、花岗闪长斑岩	岩株,近椭圆形,11.6km ²	矿床、矿点共 10 处。阿芒沙吉、龙德岗斑岩铜矿 2 处,阿芒沙吉夕卡岩型铜矿 5 处,热液型铜矿 2 处
	羊龙青	中细粒二长花岗岩	岩株,椭圆形,4.7km ²	
	阿芒沙吉	花岗闪长斑岩	岩株,不规则,1.2km ²	
	阿芒沙吉北	辉石闪长岩	小岩株,扁豆状,0.5km ²	
	额里龙洼东南	红柱石化花岗斑岩	小岩株,枣核状,0.06km ²	
阿姨	夏河东	石英闪长玢岩		夕卡岩—热液型小型铜钼矿 1 处,铜(砷)矿点 3 处
	唐格日	中细粒闪长岩		
	曼日岗	细粒石英闪长岩	岩株,椭圆	
	酒索玛	中细粒黑云闪长岩	岩株,椭圆	
山	热果	中细粒黑云石英二长岩		夕卡岩—热液型小型铜钼矿 1 处,铜(砷)矿点 3 处
	阿尼亚日	含斑黑云花岗闪长岩	岩脉	
	瓦得	细粒二长花岗岩		
德乌鲁—黑河	恰石灾	细粒似斑状黑云花岗闪长岩		斑岩型尼克疆铜矿点 1 处,夕卡岩型、高中温热液型铜矿点 3 处,小型夕卡岩铜、铜砷矿各 1 处,夕卡岩—热液型铜矿点 1 处;小型夕卡岩铁铜矿 2 处
	贡宁尼哈	中细粒似斑状花岗闪长岩		
	达尔藏	花岗闪长岩、石英闪长岩		
	美武	花岗闪长岩、黑云母花岗岩	金鱼形岩基,423.4km ²	
铁沟—兴时沟	冶力关	石英闪长岩	岩株,不规则三角形,18km ²	斑岩型钼铜矿
	岗以	石英闪长岩	岩株,不规则扁豆状,0.33km ²	
	牙日尕北	花岗闪长斑岩	小岩株,透镜状,0.06km ²	
温泉	铁沟—兴时沟	二长花岗斑岩、石英二长斑岩、二长花岗斑岩	小岩株,球形,0.34km ²	夕卡岩热液型钼多金属矿 1 处,高温—中温热液型铜、铜钼矿各 1 处
	平山(大槐沟西、白石山)	闪长岩、石英闪长岩、辉石闪长岩、正长闪长岩、石英二长闪长岩,石英二长岩	岩株,岩枝,0.02—17.8km ²	
	小峡	石英闪长岩	岩枝,0.38km ²	
太阳山	温泉	闪长岩、花岗闪长岩、似斑状花岗岩、含斑黑云母二长花岗岩	岩基,253km ²	大型斑岩钼矿
	红铜沟—太阳山	石英二长斑岩、花岗闪长斑岩、正长斑岩	小岩株,有 33 个,长 50~180m	
	铜牛山	含黑云母二长花岗斑岩	岩墙,0.07km ²	
柴家庄	花树坪	角闪花岗岩	岩株,1.85km ²	斑岩型铜钼矿,斑岩型铜矿
	酒刺梁	二长花岗岩	8km ²	
	柴家庄	中细粒似斑状二长花岗岩	50km ²	
	八卦山	黑云母似斑状二长花岗岩	35km ²	
	天子山	二长花岗岩	133km ²	岩浆热液型金矿 6 处

中区,北带集中区有铁沟-兴时沟和温泉太阳山 3 个,南带有年木耳、阿姨山、德乌鲁-黑河、和柴家庄 4 个,其主要特征见表 1。

2 花岗岩岩石化学、地球化学特征

本文收集了该带 32 个岩体的岩石化学成份,27 个岩体的微量元素含量和 10 个岩体的稀土元素含量的资料。其中,夏河东、达尔藏、美武、冶力关、温泉、花树坪、酒刺沟、柴

家庄、八卦山、天子山等 10 个岩体的资料比较系统可靠(表 2~表 4),分别分布在 5 个岩浆矿化集中区。

从图 2 看,本区花岗岩大多属于高钾钙碱性系列,在图 2A 中,阿姨山部分贫 Si 的样品落入钙碱性岩区,而温泉地区的多数样品(以及太阳山的样品)位于钾玄岩区,指示岩浆富钾的特征。在图 2B 中,大多数样品的 $K_2O > Na_2O$ (如德乌鲁-黑河和温泉),部分样品的 K_2O/Na_2O 比值在 1 左右(阿姨山和柴家庄),表明本区花岗岩可能大多是下地壳底部部分熔融成因的。值得注意的是该区大多数样品均落入埃达

表2 阿姨山岩体集中区岩体主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)组成Table 2 Composition of major elements(wt%) and trace elements($\times 10^{-6}$) of intrusions in Ayishan concentration area

岩体名称	夏河东	曼日岗	酒索玛	热果	阿尼亚日	瓦得	恰石宰	贡宁尼哈	达尔藏					
岩石类型	石英闪长玢岩	细粒石英闪长岩	中细粒石英闪长岩	黑云闪长岩	中粒含斑黑云闪长岩	细粒二长花岗岩	细粒似斑状黑云花岗岩	中细粒似斑状花岗岩	石英闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩			
SiO ₂	61.83	58.37	60.02	63.74	68.02	67.14	71.79	68.43	69.83	67.45	67.76	59.86	64.81	64.59
TiO ₂	0.59	0.65	0.66	0.69	0.44	0.54	0.15	0.44	0.32	0.37	0.45	0.68	0.54	0.51
Al ₂ O ₃	16.62	16.73	16.68	16.17	15.05	15.61	14.60	15.81	14.80	15.46	15.32	16.85	15.53	15.00
Fe ₂ O ₃	5.28	0.13	0.62	1.13	0.53	0.16	0.45	0.35	0.67	1.06	0.43	5.84	4.28	3.97
FeO	3.25	5.70	4.28	3.72	2.46	3.34	0.52	2.24	1.52	1.76	1.88			
MnO	0.07	0.12	0.09	0.08	0.05	0.05	0.02	0.03	0.06	0.05	0.07	0.09	0.07	0.06
MgO	3.63	4.48	4.23	3.00	1.98	1.66	0.56	1.21	1.29	2.11	1.94	4.03	2.82	2.58
CaO	5.20	6.50	5.59	5.02	2.75	3.15	1.44	2.81	2.24	2.98	1.77	6.31	4.43	4.86
Na ₂ O	2.85	2.47	2.87	2.78	2.98	2.98	4.25	3.66	3.90	3.20	4.00	2.71	2.71	2.77
K ₂ O	2.32	1.88	2.13	3.15	3.50	3.50	4.75	4.00	4.16	4.04	3.74	1.90	2.82	2.89
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.12	0.21	0.11	0.19	0.11	0.17	0.15	0.18	0.19	0.13	0.10	0.09
Total	99.95	99.69	99.49	100.49	99.87	99.28	100.12	100.15	99.76	99.76	99.78	99.80	99.81	99.82
Ba	451	310	380	900	510	1765	420	1620	1030	1055	1410	392	438	417
Rb	107.1	74.6	56.8	113	148	147	241	169	167	167	137	66.7	109.4	112.2
Sr	390	230	350	520	230	505	160	540	410	550	460	397.3	336	322.8
Cs	6.86	5.3	4.6	6.5	8.1	9.1	12.7	10.8	8.7	13.4	7.2	5.00	11.64	9.59
Li	67.7													
Gd	20.6											19.79	17.91	18.54
Ta	0.69	0.8	1.1	2.0	0.88	1.0	1.9	1.6	3.4	1.4	1.6	0.65	1.00	0.86
Nb	9.6	6.9	7.7	14	11	14	10	12	17	13	13	8.09	9.16	8.69
Hf	3.86	4.0	4.5	4.3	7.0	6.3	3.1	6.4	6.3	6.0	5.6	4.35	4.10	4.62
Zr	154	140	140	165	185	210	89	200	190	160	180	105	110	136
Y	20	16.0	12.1	13.2	15.0	12.0	7.00	7.72	11.0	13.0	9.36	15.56	16.61	15.77
Th	10.6	6.9	4.6	12	16	19	9.1	14	21	19	19	8.12	16.16	14.77
U	1.94	1.3	2.1	7.8	3.5	3.1	4.0	3.0	2.4	1.8	2.1	1.75	1.71	2.38
Cr	149	82.1	27.3	28.6	47.4	21.6	7.44	8.4	19.3	39.5	22.3	144	115	98
Ni	31	18.1	89.6	6.8	12.2	4.5	5.1	3.2	8.4	12.9	10.9	63.72	37.00	23.04
Co	16.1											17.82	11.92	11.59
Sc	17											21.02	11.97	11.74
V	84											87.66	59.19	55.84
Cu	6.7											16.21	12.37	16.72
Zn	55.5											65.54	38.89	35.96
Be	2.86											2.10	2.40	2.46
La	29.5	25.3	24.3	46.4	37.5	74.6	21.3	64.9	54.0	49.6	54.2	26.77	34.92	33.35
Ce	58.3	46.1	41.8	78.6	67.8	120	36.1	102	85.1	86.8	82.3	56.80	67.88	64.87
Pr	6.45	4.46	4.2	7.8	6.25	11.1	3.4	8.81	7.11	6.97	7.55	6.24	8.08	7.53
Nd	25.2	21.5	20.1	36.8	28.3	51.8	14.6	40.5	31.0	33.0	32.7	25.85	28.88	26.40
Sm	4.75	3.97	3.77	6.66	5.07	8.34	3.37	6.43	5.05	5.51	5.39	5.02	5.03	4.87
Eu	1.04	0.99	0.90	1.41	0.87	1.46	0.44	1.25	0.85	1.25	1.08	1.10	0.92	0.96
Gd	4.42	4.39	3.79	5.97	4.96	6.52	2.91	5.02	4.07	4.76	4.04	3.98	4.42	4.37
Tb	0.6	0.62	0.46	0.60	0.55	0.71	0.40	0.76	0.69	0.49	0.61	0.55	0.63	0.54
Dy	3.20	3.61	2.74	3.48	3.49	3.22	1.72	2.23	2.61	3.01	2.45	3.20	3.30	3.11
Ho	0.62	0.67	0.52	0.61	0.62	0.50	0.25	0.31	0.46	0.53	0.38	0.62	0.63	0.59
Er	1.69	1.96	1.52	1.53	1.67	1.21	0.65	0.84	1.22	1.46	1.05	1.83	1.85	1.78
Tm	0.24	0.29	0.91	0.20	0.24	0.13	0.10	0.13	0.18	0.22	0.18	0.26	0.25	0.23
Yb	1.73	1.72	1.13	1.16	1.45	0.90	0.56	0.57	1.06	1.22	0.96	1.78	1.69	1.52
Lu	0.26	0.23	0.17	0.16	0.19	0.12	0.08	0.08	0.14	0.18	0.15	0.32	0.26	0.24
资料来源	(1)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)

资料来源: (1) 金维俊等(2005); (2) 邱庆伦等(2008); (3) 张宏飞等(2005); (4) 李永军等(2003); (5) 毕明波等(2006); (6) 宋忠宝等(2004); (7) 霍福臣和李永军(1994); (8) 韩海涛等(2008b); (9) 毕明波等(2006). 下表资料来源同此表

表3 温泉岩体主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)组成Table 3 Composition of major elements(wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of intrusions in Wenquan area

岩石类型	花岗闪长岩				二长花岗岩				二长花岗岩	似斑状二长黑云母花岗岩				
SiO ₂	66.74	67.17	67.18	67.34	58.39	64.27	63.08	70.25	71.39					
TiO ₂	0.57	0.55	0.51	0.53	0.87	0.57	0.55	0.33	0.29					
Al ₂ O ₃	14.73	14.99	15.02	14.83	14.06	16.20	16.49	14.58	13.63					
Fe ₂ O ₃					2.65	1.36	1.62	0.50	0.70					
FeO	3.80	3.28	3.33	3.47	3.58	3.16	3.07	2.32	1.37					
MnO	0.06	0.06	0.07	0.06	0.13	0.08	0.09	0.06	0.09					
MgO	1.72	1.38	1.53	1.52	4.99	1.74	1.89	0.85	0.82					
CaO	2.93	2.89	2.79	2.95	4.57	3.01	3.31	1.40	1.92					
Na ₂ O	3.12	3.28	3.41	3.16	3.03	3.66	3.82	4.08	3.43					
K ₂ O	4.89	4.73	4.40	4.66	4.57	3.01	3.31	4.89	4.97					
P ₂ O ₅	0.25	0.22	0.21	0.22					0.13					
Total	99.73	99.75	99.75	99.72	99.43	99.21	99.29	99.99	100.17					
Ba	350	1074	1040	854	775	1535	1795	721	240	283				
Rb	229.3	207.0	187.6	152.3	228	175	163	227						
Sr	187.8	429.1	487.8	447.1	340	760	845	253						
Cs	25.19	10.39	6.37	6.44										
Li					53	36	36	48						
Gd	20.77	19.21	17.01	18.12	19	26	26	24						
Ta	3	1.59	1.76	1.57	1.6	1.6	1.9	2.7						
Nb	21.43	24.33	16.82	15.95	21	20	19	24						
Hf	5.97	4.39	5.41	4.34	8	6	7	5						
Zr	186	166	194	157	260	215	225	149						
Y	23.97	17.11	20.54	15.91	23	15	18	12	12.69	15.20	14.30	12.80	10.61	16.00
Th	22.72	16.52	19.15	16.36	19	22	19	24						
U	4.91	3.60	2.99	2.48										
Cr	14.94	25.09	29.36	24.57	169	11	8.15	9.26	34	27				
Ni	6.45	13.02	13.99	11.70	81.7	3.8	6.15	7.02	9	5				
Co	4.67	7.36	8.01	8.02	19	9.7	11	5.3	6	5				
Sc	6.20	6.91	7.63	6.25	16	8.1	7.7	4.3						
V	28.36	55.88	62.28	57.89					84	77				
Cu	5.60	12.00	21.26	50.93	50.8	11	22.2	40.3	177	144				
Zn	63.85	45.79	34.59	54.18					56	39				
Be	6.61	3.81	3.01	4.23	2.3	4.1	2.7	3.5						
La	26.69	43.67	42.35	37.73	59.15	53.80	57.60	34.09	32.28	26.92	36.41	32.96	20.21	35.81
Ce	48.78	78.31	87.77	68.53	101.00	88.50	88.40	59.51	57.53	45.22	62.37	58.54	46.07	65.26
Pr	5.60	9.19	9.91	7.57	10.65	8.32	8.80	5.48	6.78	5.86	7.20	6.88	4.66	7.86
Nd	22.17	31.29	36.42	28.05	44.65	38.20	40.00	21.33	23.28	19.34	25.22	23.89	16.28	27.38
Sm	4.94	5.83	6.31	5.31	8.46	6.59	6.65	4.40	4.43	3.79	4.62	4.63	3.65	5.19
Eu	0.68	1.41	1.36	1.19	1.89	1.52	1.71	0.81	0.90	0.75	0.99	0.85	0.84	1.05
Gd	4.46	5.25	5.58	4.46	7.54	4.89	4.92	3.23	3.45	2.95	3.56	3.54	3.02	4.09
Tb	0.70	0.68	0.74	0.56	1.13	0.62	0.73	0.51	0.52	0.45	0.54	0.52	0.46	0.62
Dy	4.77	3.11	4.41	3.36	6.43	4.22	4.43	3.02	2.67	2.44	2.77	2.72	2.39	3.27
Ho	0.86	0.59	0.79	0.56	1.16	0.72	0.72	0.58	0.49	0.46	0.54	0.49	0.42	0.60
Er	2.23	1.62	1.98	1.39	2.89	1.96	1.97	1.54	1.26	1.2	1.45	1.28	0.69	1.61
Tm	0.31	0.23	0.25	0.20	0.48	0.30	0.29	0.23	0.19	0.19	0.24	0.18	0.12	0.25
Yb	2.40	1.49	1.87	1.42	2.10	1.65	1.74	1.25	1.12	1.18	1.34	1.10	0.85	1.48
Lu	0.36	0.22	0.28	0.20	0.27	0.22	0.23	0.17	0.17	0.18	0.21	0.17	0.14	0.22
资料来源	(3)	(3)	(3)	(3)	(4)	(4)	(4)	(4)	(5)	(5)	(6)	(6)	(6)	(6)

资料来源同表2

表4 德乌鲁-黑河、太阳山、柴家庄地区岩体主量元素 (wt%) 和微量和稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 组成Table 4 Composition of major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of intrusions in Dewulu-Heihe, Taiyangshan and Chaijiashuang area

岩体集中区	德乌鲁—黑河地区					太阳山	柴家庄						
岩体名称	冶力关	美武				花树坪	酒刺梁	柴家庄			八卦山	天子山	
岩石类型	石英闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	黑云母花岗岩	黑云母花岗岩	角闪花岗岩	二长花岗岩	中细粒似斑状二长花岗岩			黑云二长花岗岩	二长花岗岩	
SiO ₂	60.08	65.86	68.2	72.07	74.91	69.01		72.43	71.96	73.94	71.06	70.87	73.02
TiO ₂	0.66	0.74	0.43	0.32	0.19	0.29		0.2	0.4	0.07	0.25	0.36	0.14
Al ₂ O ₃	15.97	13.57	14.92	14.16	13.14	15.46		15.12	14.38	14.1	14.29	14.77	15.07
Fe ₂ O ₃	5.83					1.51		0.57	1.18	0.17	0.26	0.24	0.16
FeO	3.9	5.84	3.21	2.01	1.02	1.11		1.22	1.15	1.2	2.66	3	1.04
MnO	0.08	0.06	0.05	0.02	0.02	0.04		0.03	0.04	0.03	0.07	0.08	0.02
MgO	4.95	3.24	1.77	1.07	0.54	0.63		0.5	0.47	0.11	0.52	0.72	0.25
CaO	5.83	3.21	3.52	2.71	1.87	1.76		0.97	1.14	1.11	1.16	1.72	0.79
Na ₂ O	3	2.3	2.79	2.59	2.57	4.17		4.19	4.19	4.15	3.96	4.42	4.27
K ₂ O	2.72	4.25	3.93	3.99	4.77	4.53		4.63	4.41	3.93	4.47	3.59	4.35
P ₂ O ₅	0.14	0.13	0.1	0.06	0.06	0.1		0.06	0.04	0.02	0.1	0.13	0.04
Total	99.89	99.76	99.8	99.8	99.8	98.61		99.92	99.36	98.83	98.8	99.9	99.15
Ba	635.6	775	614	571	753			1927	2262	1610	890	580	2535
Rb	122.2	241.5	195.1	199.8	196.1			108	91	125	168	167	102
Sr	420	281.3	361.3	306.7	260.6			130	11.7	850	270	280	119
Cs	9.97	32.56	16.87	20.54	10.17								
Li	69.9							12.3	18.1	21.5	48.2	57.5	13.8
Gd	19.7	19.98	18.17	17.1	13.26			18.2	14	26	25	34	25
Ta	0.74	1.7	1.3	1.32	1.18			1.58	0.7	1.7	3.7	4.1	1.1
Nb	10	15.39	9.72	10.2	5.59			10	7	8.6	27	30	6
Hf	4.72	5.58	4.91	3.95	4.06			6	6	3.6	6.3	6.3	4.2
Zr	186	208	161	122	112			196	185	87	180	200	125
Y	20.4	27.21	20.7	14.03	15.79	10		9.21	9.21	3.27	20.1	25.1	2.84
Th	12.81	33.58	16.94	37.5	47.72			13	15	18.3	20.6	24.6	10
U	3.5	4.51	5.53	2.86	3.38								
Cr	217	92.79	53.38	34.68	16.75			8	18	8.5	9.2	10.8	6.6
Ni	61	49.58	22.92	13.6	10.68			6	16	3.8	4.1	3.7	3.6
Co	25.7	20.18	8.32	5.15	2.99			3	3	3.4	4.9	7.2	2.5
Sc	18.4	12.32	8.38	5.3	2.33			0.54	0.5	1.3	4.2	5.7	1.2
V	115	85.62	44.38	29.17	13.84								
Cu	23.2	9.95	7.59	3.56	2.54								
Zn	60.3	39.68	27.76	13.99	13.24								
Be	2.86	3.25	3.04	2.73	2.86			3.58	3.66	3.6	3.8	4.6	2
La	29.3	49.86	39.95	48.64	55.31	56.23	26.8	62.8	60.28	23.2	36.1	56.3	17.7
Ce	59.1	97.57	78.08	86.41	49.65	93.5	46.4	95.4	95.41	44.8	64	91.4	37.8
Pr	6.7	9.86	7.49	8.06	9.3	9.94		10.5	10.35	2.38	6.39	9.19	1.94
Nd	26.6	40.04	30.76	30.49	35.19	39.21	18.5	36.5	37.29	11	25.4	40.2	9.3
Sm	5.16	7.68	5.6	4.78	5.01	5.78	2.97	5.52	5.86	1.31	5.21	6.88	1.12
Eu	1.16	0.93	1	0.9	0.85	1.3	0.89	1.21	1.21	0.52	0.79	0.88	0.43
Gd	4.66	6.55	5.17	4.08	4.18	3.3	2.67	3.3	3.12	1.17	4.07	5.41	1.22
Tb	0.63	0.93	0.67	0.46	0.47	0.49	0.42	0.54	0.54	0.15	0.74	0.88	0.17
Dy	3.29	4.46	3.31	2.25	2.31	2.14		2	2	0.8	4.69	5.95	0.84
Ho	0.64	0.86	0.69	0.46	0.47	0.42	0.49	0.42	2.32	0.16	0.95	1.17	0.18
Er	1.71	2.59	1.99	1.3	1.51	0.76		0.73	0.73	0.41	2.67	3.31	0.44
Tm	0.24	0.38	0.31	0.19	0.24	0.19	0.17	0.16	0.16	0.06	0.4	0.51	0.06
Yb	1.73	2.43	1.88	1.14	1.51	0.82	0.99	0.8	0.8	0.39	2.41	3.01	0.34
Lu	0.26	0.35	0.31	0.18	0.24	0.18	0.15	0.22	0.22	0.06	0.3	0.37	0.045
资料来源	(1)	(3)	(3)	(3)	(3)	(7)	(8)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)	(9)

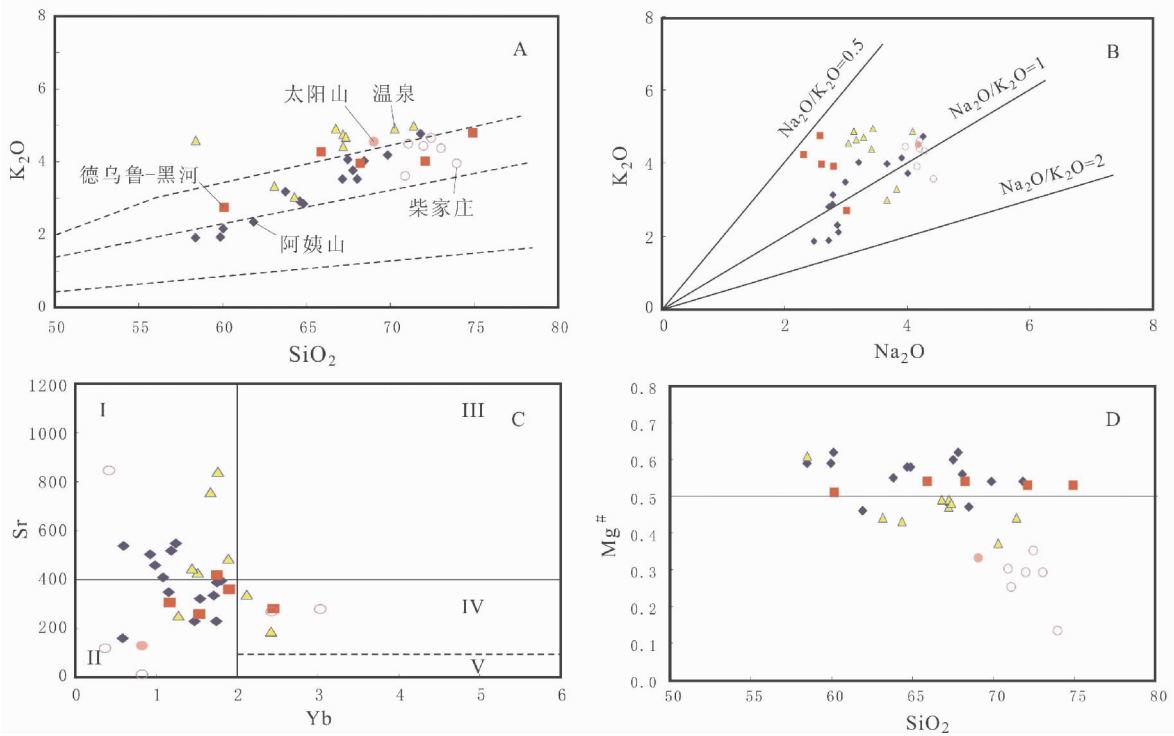


图2 西秦岭北缘花岗岩的 SiO₂-K₂O (A)、Na₂O-K₂O (B)、Sr-Yb (C) 和 SiO₂-Mg[#] (D) 图 (引自张旗等, 2006)

蓝色实心菱形-阿姨山地区;红色实心方块-德乌鲁-黑河地区;黄色实心三角-温泉地区;紫色空心圆-柴家庄地区;紫色实心圆-太阳山地区。
图2C: I-埃达克岩;II-喜马拉雅型花岗岩;III-广西型花岗岩;IV-浙闽型花岗岩;V-南岭型花岗岩 (据张旗等, 2006)

Fig. 2 SiO₂-K₂O (A), Na₂O-K₂O (B), Sr-Yb (C) and SiO₂-Mg[#] (D) diagram of granites in northern margin of West Qinling (after Zhang Q *et al.*, 2006)

克岩和喜马拉雅型花岗岩的范围 (图 2C), 如阿姨山地区, 夏河东、热果、瓦得、恰石宰、贡宁尼哈、达尔藏等具有埃达克岩的特征, 而唐格日、曼日岗、酒索玛、阿尼亚日岩体具有喜马拉雅型花岗岩的特征 (表 2), 温泉岩体大多数是富 Sr 贫 Yb 的, 为埃达克岩, 部分样品 (如部分二长花岗岩和二长黑云母花岗岩) 缺少 Sr 的数据 (表 3), 但是, Yb 仍然是贫的 ($< 1.5 \times 10^{-6}$), 推测不是埃达克岩就是喜马拉雅型花岗岩。德乌鲁-黑河地区的美武是喜马拉雅型的, 冶力关是埃达克岩 (数据较少不能肯定) (表 4), 太阳山只有一件样品, 且缺少 Sr 的数据, 但 Yb 很低 (0.82×10^{-6}) 非埃达克岩即喜马拉雅型花岗岩。柴家庄地区的数据比较分散 (表 4), 具体来说, 柴家庄岩体的 Sr 含量变化大, 从 $11 \times 10^{-6} \sim 845 \times 10^{-6}$, Yb 很低 ($0.4 \times 10^{-6} \sim 0.8 \times 10^{-6}$), 可能既有埃达克岩也有喜马拉雅型花岗岩; 天子山贫 Sr 和 Yb, 是喜马拉雅型的, 而八卦山的 2 件样品贫 Sr 富 Yb ($Sr = 270 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$, $Yb = 2.4 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$), 显然属于浙闽型花岗岩。年木耳和铁沟-兴时沟的数据较少且不系统 (表 5 和 6), 根据上述数据推测, 年木耳地区的花岗岩可能主要是喜马拉雅型的 ($Sr = 343 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$, $Y = 26 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$), 铁沟和兴时沟地区则比较复杂, 如铁沟-兴时沟可能是喜马拉雅型的, 平山和龙沟属于埃达克岩。

本区不同地区埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的 Mg[#] 数值变化大, 其中阿姨山和德乌鲁-黑河地区的花岗岩的 Mg[#] 大多 > 0.5 , 而温泉和柴家庄的 Mg[#] < 0.5 , 柴家庄的 Mg[#] 是最低的 (图 2D), 说明不同地区的源岩特征不同, 可能还有岩浆混合作用的影响。

图 3 展示了本区部分岩体的 REE 分布图, 从图 3 看, 不论埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩, 绝大多数样品均为 LREE 富集和 HREE 亏损的分布, 且有明显或不明显的负铕异常。有负铕异常是喜马拉雅型花岗岩的正常的特征, 而埃达克岩 (如阿姨山和德乌鲁-黑河地区, 图 3) 具有负铕异常则可能指示源区残存有少量斜长石 (张旗等, 2008)。柴家庄的 REE 分布比较分散, 其中具明显负铕异常和 HREE 丰度较高的 ($>$ 球粒陨石标准化的 10 倍) 两件样品显然系浙闽型花岗岩的特点 (见表 4)。

3 讨论

3.1 埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的成因

埃达克岩术语是上个世纪末提出来的 (Defant and Drummond, 1990), 以具有高 Sr 低 Yb 的地球化学为特征 ($Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$)。学术界对于中国东部中生代

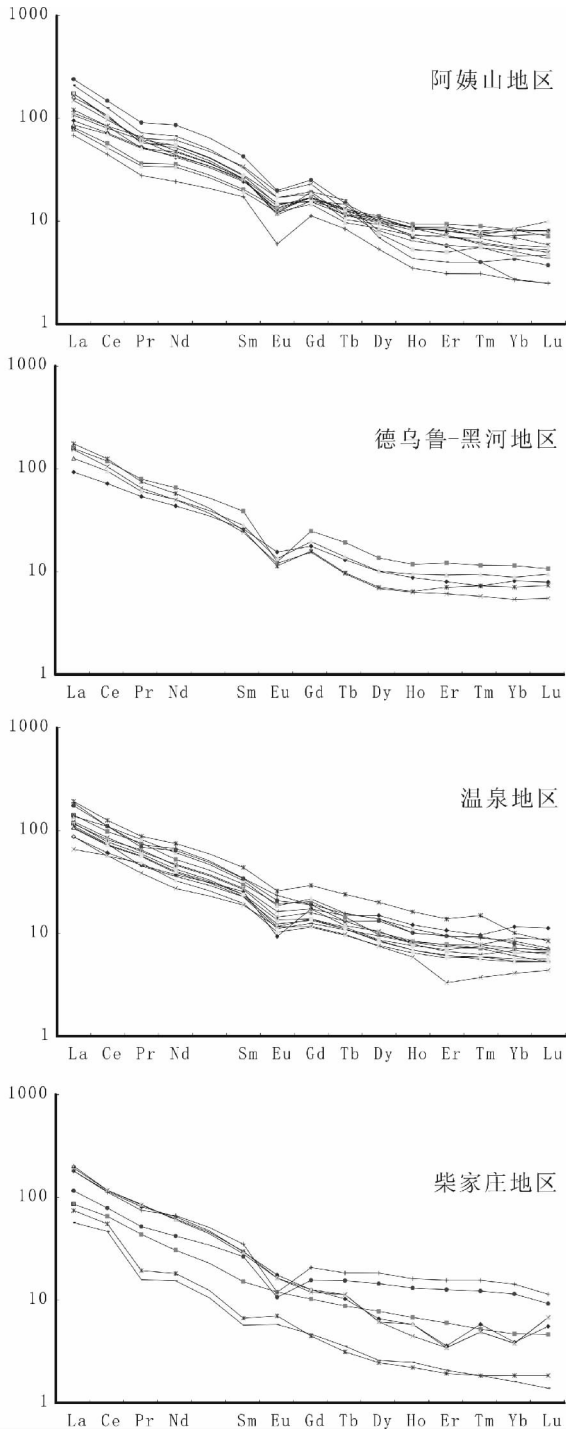


图3 西秦岭北带不同地区花岗岩 REE 图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE pattern of granites in different areas in the northern section of West Qinling

花岗岩是否具有埃达克岩的地球化学特征存在不同的认识。中国东部埃达克岩大多是高钾钙碱性的C型埃达克岩,认为是加厚的下地壳底部部分熔融形成的(张旗等,2001)。埃达克岩形成深度是一个争论很大的问题,大量的实验研究表明,在800~1000℃的范围内石榴石稳定的位置依据源岩成

分不同大约在0.9~1.4GPa之间(Beard and Lofgren, 1991; Rushmer, 1991; Winther and Newton, 1991; Sen and Dunn, 1994; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Watson, 1995)。Xiong *et al.* (2005)的研究表明,榴辉岩矿物组合中金红石是一个重要的成员,而金红石作为残留相出现的最低压力为1.5GPa。Xiao and Clemens (2007)对采自大别地区的钾玄质玄武岩的熔融实验得出的压力更大(一般>2GPa,至少>1.7GPa),对应的地壳厚度大约为56~66km。

喜马拉雅型花岗岩是一类Sr和Yb皆亏损的花岗岩($Sr < 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$),以在喜马拉雅地区最著名而命名(张旗等,2006)。早先的研究大多认为出露在高喜马拉雅地区的淡色花岗岩(喜马拉雅型)是浅部来源的,最近的研究认为其来源并不浅,大约相当于1.0~1.5GPa(杨晓松等,2001;刘树文等,2005)。喜马拉雅型花岗岩与埃达克岩有所不同:埃达克岩与石榴石+辉石平衡,在很高的压力下形成;喜马拉雅型花岗岩与石榴石+斜长石平衡,在较高的压力下形成(张旗等,2006)。

本区与金-铜-钼有关的印支期花岗岩大多具有埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的特征(图2C,表2~表6),埃达克岩有阿姨山地区的夏河东、热果、瓦得、恰石宰、贡宁尼哈、达尔藏、温泉地区和德乌鲁-黑河的冶力关岩体等,喜马拉雅型花岗岩有唐格日、曼日岗、酒索玛、阿尼亚日岩体(阿姨山地区,表2)、德乌鲁-黑河地区的美武岩体以及柴家庄地区的天子山岩体等。埃达克岩主要分布在该带的中部,喜马拉雅型花岗岩分布在该带的东西两端(如西端的年木耳和东端的柴家庄地区),反映本区在印支期时可能地壳厚度较大,反映花岗岩形成时的较大的压力,而压力大有利于金铜的成矿作用(见后)。

本区埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩 $Mg^{\#}$ 数值较高,如阿姨山地区花岗岩的 SiO_2 含量在58%~70%之间, MgO 含量较高(1.3%~4.5%), $Mg^{\#}$ 在0.46~0.62之间,平均为0.52。我们知道,来自板块俯冲带的埃达克岩由于与地幔发生混合作用,可以使埃达克岩的 $Mg^{\#}$ 数值增加,而来自下地壳玄武质岩石部分熔融形成的埃达克岩的 $Mg^{\#}$ 数值较低,通常不大于0.5(Rapp and Watson, 1995),本区的 $Mg^{\#}$ 数值与王蕊等(2007)报道的北京地区髻髻山组安粗岩的 $Mg^{\#}$ 数值接近,按照王蕊等(2007)的见解,应当是与壳幔岩浆混合的产物。从图2C看,德乌鲁-黑河地区的花岗岩 SiO_2 含量变化大(60%~75%,图2A),大多是富钾的(图2B),大多具有喜马拉雅型花岗岩的特点,其 $Mg^{\#}$ 数值统统>0.5(表4和图2D),其成因可能也与壳幔岩浆混合作用有关。

与上述地区不同的是,该带东部的温泉和柴家庄地区的花岗岩的 $Mg^{\#}$ 较低,大多<0.5,其中柴家庄的 $Mg^{\#}$ 是最低的(<0.4,图2D),显然是下地壳部分熔融形成的。温泉地区除一件样品的 SiO_2 含量较低(58.39%,表3), MgO (4.99%) and $Mg^{\#}$ 较高(0.61),类似高镁闪长岩,可能是幔源的(张旗等,2008),其余样品 SiO_2 含量较高(63%~71%), $Mg^{\#}$ 均<0.5,

表5 年木耳和铁沟-兴时沟地区主元素化学成分(wt%)

Table 5 Compositions of major elements in the Tiegou-Xingshigou area (wt%)

样品数	年木耳							铁沟-兴时沟						
	年木耳			阿芒沙吉		铁沟-兴时沟平山		白石山	窗儿山	月亮湾	月亮湾东	龙沟	大牛圈	藏布沟
	3	1	12	14	3	3	3	1	1	1	1	2	1	2
SiO ₂	62.68	70.67	66.89	66.74	66.78	68.46	62.82	58.57	62.57	67.17	60.14	57.29	61.55	62.08
TiO ₂	0.63	0.19	0.44	0.46	0.36	0.36	0.61	0.43	0.51	0.31	0.59	0.71	0.56	0.55
Al ₂ O ₃	17.11	15.17	16.12	16.15	16.33	14.73	15.75	20.34	16.69	17	17.48	17.63	16.77	17.91
Fe ₂ O ₃	0.43	0.23	0.52	0.41	0.25	0.71	1.9	1.13	1.56	0	0	0.26	1.29	0.34
FeO	4.54	1.92	3.61	3.58	4.18	1.62	2.4	1.94	3.34	2.62	4.7	5.84	3.66	3.93
MnO	0.05	0.01	0.05	0.05	0.07	0.01	0.07	0.04	0.09	0.07	0.1	0.13	0.06	0.09
MgO	2.88	1.2	0.99	0.97	0.85	1.63	3.69	2.58	2.48	1.47	3.37	4.45	2.64	2.39
CaO	4.75	1.95	3.93	3.99	3.82	2.15	4.1	6.83	4.39	2.97	6.01	6.96	5.4	5.61
Na ₂ O	2.8	3.86	3.17	3.25	3.15	3.76	3.69	4.72	3.1	3.99	3.05	3.42	3.75	4.12
K ₂ O	2.39	3.43	2.78	2.6	3.01	5.02	0.24	0.84	2.9	2.38	1.73	1.25	1.43	1.28
P ₂ O ₅	0.13	0.05	0.11	0.13	0.11	0.1		0.13	0.13	0.1		0.16	0.11	0.13
SO ₂	0.08	0.86	0.37	0.12	0.11	0.18					0.05			
CO ₂	0.79	0.03	0.14	0.14	0.16						0.59	0.26		0.23
H ₂ O ⁺	1.3	0.92	1.03	1.18	0.88	0.57	0.14	1.25	1.56		1.4	1.07		0.98
H ₂ O ⁻	0.19	0.13	0.23	0.25	0.14	0.91	0.66	1.56	1.58	2.38	0.34	0.13	1.93	0.14
总量	100.75	100.62	100.38	100.1	100.2	100.21	99.72	100.36	100.9	99.86	99.5	99.56	99.15	99.81

资料来源: 甘肃省地矿局研究院, 1978. 西秦岭内生铜矿地质特征及找矿规律研究(内部资料)

表6 年木耳和铁沟-兴时沟地区部分微量元素资料($\times 10^{-6}$)Table 6 Compositions of some trace elements in the Tiegou-Xingshigou areas ($\times 10^{-6}$)

样品数	年木耳					铁沟-兴时沟				
	年木耳		阿芒沙吉			铁沟-兴时沟	平山	大槐沟西	白石山	龙沟
	65	457	24	1	2	14	5	21	36	19
Cu	179	85	151	30	185	26	66	73	38	90
Pb	30	39	92	70	115	29		22	16	12
Zn	35	36	50			47	34	81	<100	
Ag	0.4	1.2	0.8	1		5	86			
As	400		248		200			300		
Bi	104	55								
Be	8	9	9	10	9	8	8	6	8	8
Sr	285	343	329	200	250	338	760	214	216	405
Ba	297	364	475	400	300	359	500	572	275	410
V	71	91	44	50	60	71	140	84	65	97
Cr	119	135	110	200	70	55	128	75	77	93
Nb			6	30		19				
W	57	106	48							
Li	90	152	91	100	90					
Zr	120	118	229	100	150	96	76	58		127
Sc	13	16	16	10	10		7		31	257
Y	13	19	26	10	20	5	5			15
Co	26	27	18	10	20	9	18	11	10	26
Ni	39	37	15	10	15	17	120	26	14	25
Sn	15	13	20	10	15	20	4			8
Mo			8			11		<10		

资料来源同表5

且具有钾玄岩的特征(图2A),应当是下地壳部分熔融形成的,富钾的原因很多,可能与部分熔融程度、源区组成以及压力有关(Rapp *et al.*, 2002),大别和可可西里有这种类型的埃达克岩出现,也许与更高的压力有关(Xiao and Clemens, 2007;张旗等,2008),温泉的情况如何解释本文还没有定论,需要继续研究。

柴家庄花岗岩富硅($\text{SiO}_2 > 70\%$),属于典型的高钾钙碱性系列, $\text{Mg}^\#$ 低,与华北大多数埃达克岩类似(张旗等,2006),显然是下地壳熔融形成的。柴家庄地区的柴家庄、八卦山和天子山岩体都是二长花岗岩,岩相学特征和主元素类似,很难予以区分(毕明波等,2006)。但是,它们的REE分布和微量元素不同:柴家庄和天子山的REE是明显的右侧型分布,强烈亏损HREE,负锶异常不明显;而八卦山LREE富集,HREE亏损不明显,有明显的负锶异常(图3)。柴家庄和天子山贫Yb,Sr富集或不富集,是埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩(图2C),而八卦山岩体为浙闽型花岗岩($\text{Sr} = 270 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} = 2.41 \times 10^{-6} \sim 3.01 \times 10^{-6}$)。上述资料的地球动力学含义是柴家庄和天子山来自加厚的下地壳的部分熔融,而八卦山代表正常地壳厚度的产物,应当是不同造山阶段的产物,而目前上述岩体仅有K-Ar法的年龄资料:柴家庄206Ma,八卦山211Ma,天子山214~221Ma,无法区分开来。看来,年龄测定可能是下一步研究的关键,如果地球化学资料是准确的,那么,八卦山岩体的时代应当不同于柴家庄和天子山。从找矿的角度,柴家庄已经发现金矿,天子山岩体外围已发现并勘查了中低温热液金矿6处,中型1处,小型1处,矿点4处,是找金有利的岩体,而八卦山目前未见明显的矿化现象,按照本文作者的认识,柴家庄和天子山有扩大找金的希望,而八卦山可能不行。

3.2 埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩形成的构造背景

该带位于华北板块南缘祁连—北秦岭加里东褶皱带和扬子板块北缘中秦岭海西褶皱带的拼接部位,中秦岭基底可能为扬子板块下古生界褶皱,是在华北与华南板块拼接过程中形成的前陆盆地的滨—浅海沉积(任纪舜,1991)。西秦岭基底具有扬子板块的构造属性,因此,将扬子块体的西北边界至少推至到西秦岭北侧(张宏飞等,2005)。中生代以来该区受到东部环太平洋构造域、西部特提斯构造域的作用,构造演化极其复杂。

位于中国核心部位的西秦岭构造带一直是国内学术界关注的焦点之一。张国伟等(2001)研究了西秦岭南带的勉略缝合带,指出勉略洋盆开启、发育时代为 $D_{2,3} \sim P_1$,俯冲与碰撞造山为 $P_2 \sim T_{2,3}$ (345 ~ 200Ma), T_3 之后转入后造山板内构造演化阶段,并认为西秦岭为一近 EW 向延伸的印支期俯冲碰撞缝合线带。冯益民等(2003)认为,该区从中晚泥盆世开始一直到中二叠世为板内伸展阶段,已经不是板块构造体制下的洋陆格局,而是以伸展海盆体系为主体的盆山格局和海陆格局。他们都认为陆陆碰撞造山阶段和陆内造山阶段发生在中三叠之后。姚书振等(2006)也指出,秦岭造山带是一个多旋回复合大陆碰撞造山带。本文作者认为,该带埃达克岩的侵入时代从印支早期开始到燕山早期,表明该区至少在二叠末—三叠初发生了一次地壳加厚的事件,这一事件可能是一复合构造事件,包括扬子板块与华北板块的碰撞作用,古特提斯洋盆北部的消减作用及 NE 向的环西太平洋断裂活动。关于该地区埃达克岩的成因,金维浚等(2005)倾向于来自加厚的下地壳,加厚下地壳熔融形成的埃达克岩有两种可能成因:与陆陆碰撞导致地壳加厚和加厚的活动陆缘环境有关。该埃达克岩带可能形成板块消减的活动陆缘环境,与活动陆缘加厚的下地壳熔融作用有关。

3.3 埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩与成矿作用的关系

Thieblemont *et al.* (1997) 统计了全球 43 个金、银、铜、钼低温热液和斑岩矿床,发现其中 38 个与埃达克岩有关。因此,他们得出结论:在全球规模上(美国西部、智利、巴布亚新几内亚),多数埃达克岩是重要的成矿省;在地区规模上,多数矿床的主岩即埃达克岩;在矿区规模上,当埃达克岩与非埃达克岩同时存在,成矿主要与埃达克岩有关。冷成彪等(2007)最新的统计表明,大约 95% 的与铜矿有关的斑岩是埃达克岩。埃达克岩与斑岩铜矿的关系说明,虽然我们不可能企望每个埃达克岩体都可以找到斑岩铜矿,但是,反过来,我们可以确信只要有了斑岩铜矿,该斑岩很可能就是埃达克岩(95% 的几率)。看来,斑岩铜矿与埃达克岩显然是须臾不可分的。

国内外的研究表明,埃达克岩与金铜成矿作用有关是埃达克岩一个极具经济价值之处。金铜与埃达克岩密切伴生推测可能与埃达克岩形成的条件有关。正如许多人认识到

的,埃达克岩岩浆有利于金铜成矿可能取决于下述三个原因:(1)埃达克岩岩浆以水含量高、氧逸度高和富硫为特征;(2)源区为基性岩,金铜等元素丰度高,与地幔关系密切(尤其 O 型埃达克岩);(3)形成的温度和压力高,角闪石脱水熔融带来大量流体有利于对成矿元素的萃取(Oyarzun *et al.*, 2001;刘红涛等,2004;赵振华等,2006;冷成彪等,2007)。埃达克岩不同于其他花岗岩的最大的特征是其形成的深度大、温度高、氧逸度高和黏性低。而金铜可能只有在高氧逸度和很大的压力下才能被流体萃取出来。

早先的资料大多认为,喜马拉雅型花岗岩形成的深度不及埃达克岩,喜马拉雅型花岗岩大多与金矿有关(李承东等,2004;张旗等,2006),还很少有人认为喜马拉雅型花岗岩与斑岩铜矿有关的。而本区的斑岩铜矿不仅与埃达克岩有关,有的还与喜马拉雅型花岗岩有关,如年木耳、德乌鲁、太阳山、铁沟—兴时沟岩体等大多具有喜马拉雅型花岗岩的特征,岩体内产出斑岩型铜矿或铜钼矿,说明斑岩铜矿不仅与埃达克岩有关,有些还可能与喜马拉雅型花岗岩有关,开辟了斑岩铜矿找矿的新思路。

通常认为金和铜来自地幔,这种解释适合于形成在板块消减带的金铜矿床,而很难解释由下地壳深熔作用形成的花岗岩及其矿床。因为,下地壳熔融的埃达克岩与地幔很少有关联。中国大多数金铜矿床与 C 型埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的密切关系说明,金和铜应当主要源于玄武岩而非地幔,金铜在玄武岩中的平均含量高于地幔也说明了这一点(如 Cu 在 N-MORB 中的平均含量为 74.4×10^{-6} ,地幔的 Cu 平均含量为 28×10^{-6} ,据 Hofmann, 1988)。例如,安第斯埃达克岩与斑岩铜矿有密切的关系,安第斯埃达克岩与中国东部埃达克岩有某些类似的特点,岩石均富 K,如秘鲁的 Cordellier Balanca 岩基和中安第斯火山岩带(Andean Central Volcanic Zone, CVZ)都属于高钾钙碱性系列(Atherton and Petford, 1993; Feeley and Hacker, 1995),CVZ 弧下陆壳厚度 70km。Kay and Kay(2002)认为安第斯埃达克岩的成因主要与玄武质岩浆底侵导致的下地壳加厚作用有关。安第斯中部和北部的埃达克岩源于加厚的下地壳底部的部分熔融,众多特大型斑岩铜矿的铜也很难用地幔的来源来解释。金铜来自玄武岩的认识也不排斥金铜幔源说,因为,通过玄武质岩浆的底侵作用可以将大量金铜从地幔带到下地壳底部。

本区埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩异常发育,表明本区可能是一与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的成矿省。据不完全统计,该带已发现与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的矿(点)床近 50 处。以 Cu、Au、Mo 矿为主,主要矿床类型为斑岩型、夕卡岩型和热液型。斑岩型矿(点)床有:阿芒沙吉铜矿、阿芒沙吉金矿、龙得岗铜矿、尼克疆铜矿、兴时沟钼铜矿、铁沟铜铅锌矿、上浪卡木铜矿、温泉钼矿、红铜沟铜矿、铜牛山钼铜矿、太阳山铜钼矿等 11 处(上述岩体中,阿芒沙吉、龙得岗、尼克疆、兴时沟、铁沟和太阳山等具喜马拉雅型花岗岩的特征,见表 4 和表 6)。除温泉斑岩钼矿经详查

为大型—超大型矿床外,其他斑岩矿床工作程度很低。斑岩型矿床多产于小岩株中,也有的产于爆破角砾岩中,产于岩基中的斑岩型矿床多产在多次侵入体中的晚期小岩株或大岩基的边缘相(细粒斑状结构的岩石)。在埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩与围岩的接触带往往可形成夕卡岩—热液型矿床。与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金矿主要为热液型,分布在该带的最东端,矿(点)床十分集中,计有6处,柴家庄金矿S、O同位素测定证明矿物质来源与岩浆有成因关系,流体包裹体测定证明矿床形成温度低,形成温度平均165~181℃(杨礼敬等,2004)。该带对不同含矿侵入体及矿(点)床共获得硫同位素资料140个,通过对硫源的分析,说明该带斑岩及接触交代—热液型矿(点)床的成矿物质来源于地幔, δS^{34} 接近陨石硫,且有明显的混合作用。该带矿化具有明显的分带(段),西段以Cu为主,中段Cu、Mo,东段为Au。

3.4 找矿工作建议

3.4.1 加强西秦岭埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩研究,实现找矿新突破

本区埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩广泛发育,说明两个问题:1,该区在三叠纪时期地壳厚度很大,可能属于扬子与华北对接的碰撞造山带;2,岩浆活动频繁说明碰撞时地幔处于活动状态。地幔活动有利于成矿,而地壳加厚有利于形成金铜等矿床。因此,本区是金铜成矿的有利地区。据现有资料,本区与花岗岩有关的矿床矿点星罗棋布,已发现斑岩铜矿(点)10余处,热液型铜金矿几十处,大型斑岩型钼矿1处。

该带已发现了7个埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩矿化集中区,温泉、柴家庄两地区正在勘查中,其他5个地区基本处于停顿状态。鉴于上述地区均有很大的找矿潜力,因此,建议首选年木耳和德乌鲁—黑河两地区对斑岩铜矿开展面上展开和重点突破的勘查和研究工作,其他3个地区可分层次安排工作。建议结合国土资源大调查开展1:5万区调和成矿预测;开展大比例尺的化探和物探(重点是激电法),选择物化探异常进行验证,如柴家庄一带的金矿是金化探异常的验证发现的,尼克疆斑岩铜矿是靠验证激电和化探综合异常发现的;蚀变带的特征与矿化关系应作为一项重点进行研究,钻探是实现找矿突破的关键,要选准地区。温泉钼矿是上世纪50年代发现的,由于覆盖20~50m,最后通过研究工作,少量露头的仔细观察,钻探勘查取得突破的。重要的是利用综合信息,选择不同层次的找矿靶区。

3.4.2 开拓找矿新思路,加快找矿新进展

成矿与成岩具有不同的特征。作者多年的研究表明,成岩作用和成矿作用不是一回事,成岩基本上是一个物理过程,花岗岩浆侵入到地壳上部大多因温度降低而定位;而成矿则复杂得多,矿液的沉淀与多种因素有关,其中最重要的是矿液性质的变化,这主要是一种化学反应。由于岩浆和

矿液上述不同的固结(沉淀)因素,因此,侵入体和矿床在空间上存在一定的差别是很容易理解的。此外,岩浆固结在很大程度上与构造作用有关,岩浆在什么时候、什么位置沿着什么通道上升,主要取决于构造因素。构造是地壳各种应力综合平衡的产物,与周围介质密切相关,不同时间不同地段构造的样式,是不同时间不同地段应力的集中体现,而成岩和成矿就直接与这种因素有关。众多的事实告诉我们,成矿通常晚于岩浆的侵位,我们很难想象岩浆固结后的构造能够完全继承岩浆固结前的构造。因此,基于上述原因,成矿与成岩的位置不可能完全一样。对于斑岩型矿床来说,岩体大体就是矿体,二者在空间上关系密切,时间上也接近。但是,对于其他类型矿床来说,成矿与岩体可能空间上并不密切,甚至是分开的,时间上也是滞后的。在同样一个地区,有的斑岩含矿,有的斑岩不含矿,情况很复杂,因此,从找矿的角度,就不应当拘泥于岩体本身,而要放宽视角,综合考虑各种因素,进行创造性的工作。在找矿思路,以埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩为找矿的前提,围绕埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩找矿。在找矿方法上,摒弃按部就班、步步为营的普查—详查—勘探的方法,采用异常+钻探的方法进行快速评价和快速找矿,三步并作一步走。也就是说,在埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩分布区内,更多的关注各种能够反映有矿的异常,而淡化蚀变、构造、矿化、岩浆、围岩等与成矿有关的因素的有利和不利,只要异常有利就可以下钻进行验证。

3.4.3 几点找矿建议

西秦岭北带斑岩铜钼矿带广泛分布埃达克和喜马拉雅型花岗岩,加强该带的找矿工作,以求找矿的重大突破,是完全可以实现的。在原有各类地质和物化探资料分析的基础上,提出以下几点建议:

(1) 该区在开展新一轮国土资源大调查中,重点关注印支期埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的分布及其与成矿作用的关系。

(2) 研究以前的物化探异常,进行新的有效物化探测量(结合岩体、蚀变矿化等),选择有成矿前景的物化探异常进行深部验证。

年木耳地区:已发现斑岩铜矿、斑岩金矿和隐爆角砾岩,次生晕异常明显,其中最大的异常近20km²,发现激电异常14个,其中在岩体内或边部的4个异常较好,应对较好的物化探异常进行深部的钻探检查、验证。

太阳山地区:已经有斑岩铜矿点3处,面型蚀变发育,并勘查了小型斑岩钼矿1处。红铜沟东激电异常与次生晕异常一致,经钻探验证见矿14~16m。郭家山激电异常与次生晕异常一致,钻探验证最厚的矿化段40m。铜牛山—太阳山一带水系测量、激电测量发现异常34个,是找铜钼的有利地区,应对太阳山地区铜钼矿化蚀变地段I、II、V号激电异常进行研究和适宜的深部检查验证。对验证取得效果的要加强深部工作以求突破。

德乌鲁—黑河地区:本区水系测量发现异常近60个,异

常范围从零点几到十几平方千米,其中最好的是尼克疆斑岩铜矿,根据激电进行深部验证已见矿5层以上。建议加强该地区物化探异常的验证工作。

(3) 对有希望的矿区开展深部和外围勘查。如温泉斑岩铜矿,已获铜资源量10万t以上,温泉岩体范围内以温泉铜矿床为中心40km²的范围内有42处铜矿(化)点,最大深度孔深小于600m,预计该矿区可能成为超大型铜矿。柴家庄为中型金矿,天子山岩体北部已发现和勘查36个矿床,有的已达中型以上,是一重要的金矿资源富集区,值得进一步勘查。

4 小结

(1) 埃达克岩是过去20年中特别引起人们兴趣与关注的与成矿有关的两类中酸性岩浆之一(另一类为橄榄玄粗岩,涂光炽,2001)。矿床学的研究史告诉我们,一个新的成矿理论或找矿思路的提出,往往会引发新一轮找矿的热潮,导致新类型矿床的发现。

(2) 西秦岭北缘印支期埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩广泛发育,其中,阿姨山和德乌鲁-黑河地区的埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩具有较高的Mg[#]数值,可能是加厚地壳底部幔源岩浆和壳源岩浆混合形成的,而温泉和柴家庄地区的埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩Mg[#]低,应当是加厚的下地壳部分熔融形成的。

(3) 埃达克岩最突出的是与斑岩铜矿的关系。这种关系密切的程度可以从上述关系的反面阐述来表达,即:所有斑岩铜矿的斑岩统统是埃达克岩(除少数例外)。岩浆岩与成矿关系的探讨和研究已经有很长的历史了,能够得出这样掷地有声的结论的情况可能是凤毛麟角了,足见埃达克岩的重要性,足见埃达克岩与成矿关系理论的可靠性和可预见性。埃达克岩与金铜成矿作用有关,源于埃达克岩独特的成因。主要决定于下列3方面的因素:(1)源于富集金铜的源岩-玄武岩;(2)角闪石分解起了至关重要的作用;(3)高压和高氧逸度条件。

(4) 喜马拉雅型花岗岩与成矿的关系是新近根据实际资料提出来的,本区的实例表明,喜马拉雅型花岗岩可能还与斑岩铜矿有关,开辟了喜马拉雅型花岗岩找矿的新途径。与埃达克岩类似,喜马拉雅型花岗岩有利于成矿可能也体现在压力上。但是,具体的机理还远不清楚,还有很多的工作需要做。

(5) 三叠纪时期的西秦岭造山带地壳厚度大,岩浆活动频繁,找矿潜力巨大,是我国新一轮的金铜钨找矿区之一,其发展前景不可限量。

References

Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas

- from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144 – 146
- Beard JM and Lofgren GE. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6, 9 kb. *J. Petrol.*, 32: 365 – 401
- Bi MB, Li YJ and Yang JQ. 2006. Litho-geochemical characteristics of Chaijiazhuang, Baguashan and Tianzishan granite in West Qinling. *Gansu Geology*, 15(1): 42 – 46 (in Chinese with English abstract)
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 347: 662 – 665
- Feeley TC and Hacker MD. 1995. Intracrustal derivation of Na-rich andesite and dacite magmas: An example from Volcan Ollag e. Andean Central Volcanic Zone. *J. Geol.*, 103: 213 – 225
- Feng YM, Cao XD, Zhang RM, Hu YX, Pang XP, Yang JL, Jia QZ and Li WM. 2003. Tectonic evolution framework and nature of West Qinling Orogenic belt. *Northwestern Geology*, 36(1): 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Han HT, Li YJ, Yang JQ and Ouyang YF. 2008a. Geology and genesis of Wenquan porphyry molybdenum deposit in the West Qingling area. *Geology and Prospecting*, 44(4): 1 – 7 (in Chinese with English abstract)
- Han HT, Liu JSh, Dong X, Zhou YG, Wang GR and Shi JJ. 2008b. Geochemical characteristics of the Wenquan molybdenum deposit in west Qinling area. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 32(2): 139 – 142
- Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90: 297 – 314
- Huo FC and Li YJ. 1994. Formation and Geological Evolution of West Qinling Orogenic Belt. Xi'an: Publishing House of Northwest University, 1 – 167 (in Chinese)
- Jin WJ, Zhang Q, He DF and Jia XQ. 2005. SHRIMP dating of adakites in western Qinling and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 959 – 966 (in Chinese with English abstract)
- Kay RW and Kay SM. 2002. Andean adakites: Three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 303 – 311
- Leng CB, Zhang XC, Chen YJ, Wang SX, Gou TH and Chen W. 2007. Discussion on the relationship between Chinese porphyry copper deposits and adakitic rocks. *Earth Science Frontiers*, 14: 199 – 210 (in Chinese with English abstract)
- Li CD, Zhang Q, Miao LC and Meng XF. 2004. Mesozoic high-Sr, low-Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei Province: Geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 269 – 284 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Liu ShH, Li ZhC and Li Y. 2003. The geochemical information of the magma mixing from the Wenquan Granite in the western Qingling. *Geology and Prospecting*, 39(6): 33 – 36 (in Chinese with English abstract)
- Liang YZ. 2008. Geological characteristics of Wenquan molybdenum deposit in Wushan County of Gansu Province. *Gansu Geology*, 17(2): 40 – 49 (in Chinese with English abstract)
- Liu HT, Zhang Q, Liu JM, Ye J, Zeng QD and Yu CM. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits: A possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessments. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 205 – 218 (in Chinese

- with English abstract)
- Liu SW, Zhang JJ, Su GM and Li QG. 2005. Mineral chemistry, *PTt* paths and exhumation process of mafic granulite in Dingjie of south Tibet. *Sciences in China (Series D)*, 35: 810–820 (in Chinese)
- Oyarzun R, M rquez A, Lillo J *et al.* 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineral Deposit*, 36: 794–798
- Qiu QL, Gong QS, Lu SW and Liu SX. 2008. Geochemical characteristics and geological significance of adakitic granitoids in Xiahe County of Gansu Province. *Gansu Geology*, 17(3): 6–12 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891–931
- Rapp RP, Xiao L and Shimizu N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 293–302
- Ren JS. 1991. The basic characteristics of the tectonic evolution of the continental lithosphere in China. *Regional Geology of China*, 40(4): 289–297 (in Chinese)
- Rushmer T. 1991. Partial melting of two amphibolites: Constrasting experimental results under fluid-absent conditions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 107: 41–59
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117: 394–409.
- Song ZB, Feng YM, He SP, He F, Li ZQ and Zhao LL. 2004. Lithochemical characters of Chaijiazhuang and Jiuciliang granites in West Qiling Mts. and its relation to the minerals. *Geological Survey and Research*. 27(2): 86–91 (in Chinese with English abstract)
- Thieblemont D, Stein G and Lescuyer JL. 1997. Gisements epithermaux et porphyriques: La connexion adakite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 325: 103–109
- Tu GZ. 2001. The development of the mineral deposit prospecting and research work in the past twenty years: A brief review. *Mineral Deposits*, 20: 1–9 (in Chinese with English abstract)
- Wang R, Chen B and Liu XM. 2007. Geochemical characteristics and origin of the Tiaojishan and Donglingtai Formations from Western Hills, Beijing. *Geological Journal of China Universities*, 13: 603–612 (in Chinese with Chinese abstract)
- Winther KT and Newton RC. 1991. Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: Evidence on the origin of Archean cratons. *Bull. Geol. Soc. Denmark*, 39: 213–228
- Wolf MB and Wyllie PJ. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: Effects of temperature and time. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115: 369–383
- Xiao L and Clemens JD. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos*, 95: 399–414
- 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: 339–359
- Yang XS, Jin ZM, Huenges E, Schilling FR and Wunder B. 2001. Experimental study on dehydration melting of natural biotite-plagioclase gneiss from High Himalayas and implications for Himalayan crust anatexis. *Chinese Science Bulletin*, 46: 867–872
- Yao SZ, Zhou ZG, Lv XB, Cheng SY, Ding ZJ and Wang P. 2006. Mineralization characteristics and prospecting potential of West Qinling metallogenic belt. *Northwestern Geology*, 39(2): 156–178 (in Chinese with English abstract)
- Yang LJ, Hu XL, Xu YL and Luo XH. 2004. On geologic features and metallogenic mechanism of Chaijiazhuang gold deposit, Tianshui City, Gansu Province. *Gold*, 24(8): 6–10 (in Chinese with English abstract)
- Yin Y. 2007. Metallogenesis and prospecting directions of porphyry copper in Gansu Province. *Gansu Geology*, 16(1–2): 23–27 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR and Yuan XC. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1–855 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Jin LL, Zhang L Nigel Harris, Zhou S, Hu SH and Zhang BR. 2005. Geochemistry of ganitoids in West Qinling and the limitation of Pb-Sr-Nd isotopic composition to basement and tectonic properties. *Science in China (Series D)*, 35(10): 914–926 (in Chinese)
- Zhang Q, Wang Y, Li CD, Wang YL, Jin WJ and Jia XQ. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249–2269 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo GJ. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significance of the adakites in Yanshan Period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236–244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Xiong XL and Li CD. 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. Beijing: China Land Press, 1–344 (in Chinese)
- Zhao ZH, Wang Q, Xiong XL, Zhang HX, Niu HC, Xu JF and Qiao YL. 2006. Two types of adakites in north Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 1249–1265 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 毕明波, 李永军, 杨俊泉. 2006. 西秦岭柴家庄、八卦山和天子山花岗岩体地球化学特征. *甘肃地质*, 15(1): 42–46
- 冯益民, 曹宣铎, 张仁明, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质. *西北地质*, 36(1): 1–10
- 韩海涛, 刘继顺, 董新, 欧阳玉飞. 2008a. 西秦岭温泉斑岩型钼矿床地质特征及成因浅析. *地质与勘探*, 44(4): 1–7
- 韩海涛, 刘继顺, 董新, 周余国, 王国仁, 史建军. 2008b. 西秦岭温泉斑岩型钼矿花岗岩类地球化学特征. *物探与化探*, 32(2): 139–142
- 霍福臣, 李永军. 1994. 西秦岭造山带的建造与地质演化. 西安: 西北大学出版社, 1–167
- 金维浚, 张旗, 何登发, 贾秀勤. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义. *岩石学报*, 21(3): 959–966
- 冷成彪, 张兴春, 陈衍景, 王守旭, 苟体忠, 陈伟. 2007. 中国斑岩铜矿与埃达克(质)岩关系探讨. *地学前缘*, 14: 199–210
- 李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪锋. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系. *岩石学*

- 报, 20: 269-284
- 李永军, 刘社华, 李注苍, 李英. 2003. 西秦岭温泉花岗岩体岩浆混合作用的地球化学信息. 地质与勘探, 39(6): 33-36
- 梁亚忠. 2008. 甘肃武山温泉铜矿床地质特征. 甘肃地质, 17(2): 40-49
- 刘红涛, 张旗, 刘建明, 叶杰, 曾庆栋, 于昌明. 2004. 埃达克岩与 Cu-Au 成矿作用: 有待深入研究的岩浆成矿关系. 岩石学报, 20(2): 205-218
- 刘树文, 张进江, 舒桂明, 李秋根. 2005. 藏南定结铁镁质麻粒岩矿物化学、*PTt* 轨迹和折返过程. 中国科学(D辑), 35: 810-820
- 邱庆伦, 龚全胜, 卢书伟, 柳生祥. 2008. 甘肃夏河地区印支期埃达克岩的厘定及其意义. 甘肃地质 17(3): 6-12
- 任纪舜. 1991. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征. 中国区域地质, 40(4): 289-297
- 宋忠宝, 冯益民, 何世平, 何芳, 李增庆, 赵利利. 2004. 西秦岭柴家庄和酒刺梁花岗岩地球化学与矿产的关系. 地质调查与研究, 27(2): 86-91
- 涂光炽. 2001. 过去 20 年矿床事业发展的概略回顾. 矿床地质, 20: 1-9
- 王蕊, 陈斌, 柳小明. 2007. 北京西山地区髻髻山组和东岭台组火山岩的地球化学特征与岩浆起源. 高校地质学报, 13: 603-612
- 杨晓松, 金振民, Huenges E, Schilling FR, Wunder B. 2001. 高喜马拉雅黑云片麻岩脱水熔融实验: 对青藏高原地壳深熔的启示. 科学通报, 46: 246-250
- 姚书振, 周宗桂, 吕新彪, 陈守余, 丁振举, 王苹. 2006. 秦岭成矿带成矿特征和找矿方向. 西北地质, 39(2): 156-178
- 杨礼敬, 胡晓隆, 许亚玲, 罗晓红. 2004. 甘肃天水柴家庄金矿床地质特征及成矿机制探讨. 黄金, 24(8): 6-10
- 殷勇. 2007. 甘肃省斑岩铜矿成矿作用及找矿方向. 甘肃地质, 16(1-2): 23-27
- 张国伟, 张本仁, 袁学城. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1-855
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, Harris N, 周烁, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制. 中国科学(D辑): 35(10): 914-926
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249-2269
- 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
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 中国大地出版社, 1-344
- 赵振华, 王强, 熊小林, 张海祥, 牛贺才, 许继峰, 白正华, 乔玉楼. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. 岩石学报, 22: 1249-1265