

安徽马头铜钼多金属矿区复式花岗岩体成因及与成矿的关系

谢兴楠^{1,2}, 马 春², 柳建新¹, 胡 建^{2,3}, 肖 娥²

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 南京 210007;

3. 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘 要: 马头矿区复式花岗岩体发育于江南过渡带池州段, 主要由花岗闪长(斑)岩和钾长花岗岩组成, 与该地区铜钼等多金属矿化有着密切的联系。花岗闪长(斑)岩表现出类似埃达克质岩的地球化学特征, 富集 LILE(尤其是 Sr 和 Ba)和 LREE, Eu 负异常不显著, 相对亏损 HREE 和 Y, 被认为是富集岩石圈地幔部分熔融的产物, 在成岩过程中也有一定程度的地壳组分混染。钾长花岗岩则表现出高硅、高钾的地球化学特征, 其锆石饱和温度(近液相线温度)接近于低共熔花岗岩, 很可能是早期形成岩体在压力释放过程中再次熔融的产物。综合来看, 在马头矿区, 铜钼(金)等亲硫成矿元素的物质来源很可能与花岗闪长(斑)岩的侵位有关, 但钾长花岗岩在钼的富集和强烈矿化过程中起到了催化媒介的作用。

关键词: 马头铜钼多金属矿区; 复式花岗岩; 埃达克质岩; 部分熔融

中图分类号: P588.121, P597

文献标志码: A

Petrogenesis of compound granites and its relationships with mineralization in Matou Cu-Mo polymetallic orefield, Anhui Province, China

XIE Xing-nan^{1,2}, MA Chun², LIU Jian-xin¹, HU Jian^{2,3}, XIAO E²,

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. East China Mineral Exploration and Development Bureau for Non-Ferrous, Nanjing 210007, China;

3. State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Matou compound granites occur in the Chizhou segment of Jiangnan transitional zone, consist mainly of granodiorite-porphyry and moyite, and are closely related to the Cu-Mo polymetallic mineralization in this area. The granodiorite-porphyry has high LILEs (especially Sr and Ba) and LREEs, and low HREEs and Y contents and insignificant negative Eu anomalies, similar to the adakitic rocks. It is identified that the product is derived from the partial melting of enriched lithospheric mantle, and also contaminates some crustal components in its diagenetic processes. The moyite is characterized by high silica and high potassium, and its zircon saturation temperature is close to that of eutectic granite. It may be the product of the partial melting of the pre-exist granites during the depressurizing. In Matou Cu-Mo polymetallic orefield, the materials source of the sulfur ore-forming elements, such as Cu, Au and Mo, is probably related to that of the emplaced granodiorite-porphyry, and the moyite plays a catalytic role in the molybdenum concentration and intensive mineralization.

Key words: Matou Cu-Mo polymetallic orefield; compound granites; adakitic rock; partial melting

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102036, 41174103); 教育部博士点基金资助项目(20110162130008); 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测试基金资助项目

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 谢兴楠, 教授级高级工程师; 电话: 13611575858; E-mail: xiexingnan@china-ece.com

马头铜钼多金属矿是江南过渡带池州段近几年新探明的中型斑岩型铜钼(金)多金属矿床,位于安徽省池州市南约28 km的梅村乡境内。该矿床最早为安徽省321地质队于地表踏勘与地表矿点检查时发现,后经江苏省有色金属华东地质勘查局下属地质勘查单位2009—2010年普查和详查,提交下冲矿段钼金属量约31 741 t(Mo平均品位0.052%),铜金属量11 688 t(Cu平均品位0.293%),矿床规模达到中型。最近,在马头矿区下冲矿段南侧又连续施工了若干深孔,见矿程度均较好,并发现了新类型的富钼(铜)矿体,显示该矿床有升级为大型铜钼多金属矿床的远景和潜力。

现有研究认为,马头矿区铜钼矿成矿应主要与地表出露的花岗闪长(斑)岩有关,并相应地取得了一系列的研究成果^[1-3]。然而,随着勘探工作的不断深入,发现在马头矿区深部发育有浅灰白色钾长花岗岩,侵入花岗闪长(斑)岩中,且在二岩体接触带附近钾化蚀变较为强烈,出现强烈细脉-浸染状矿化,表明钼的矿化至少还与钾长花岗岩有紧密的联系。因此,本次研究主要选取马头矿区钻孔中新鲜花岗闪长(斑)岩和深部钾长花岗岩作为研究对象,以期查明这两类岩石的物质来源以及成岩过程,并尝试探讨该复式花岗岩体与铜钼多金属矿之间成因关系。

1 地质概况及岩相学特征

马头矿区出露最老地层为志留系下统高家边组层状粉砂质页岩夹粉砂岩,除第四系外,最新地层为泥盆系上统五通组石英砂岩、砾岩(见图1)。

矿区岩体主体侵入志留系坟头组地层中,受NNE向F1韧性剪切断裂带、NW向张性断裂带F2及其次级断裂构造所控制,两组断裂的交汇处及其附近为岩体侵位的主要部位(见图1)。岩性以花岗闪长(斑)岩为主,钻孔深部可见钾长花岗岩,此外,局部地段还可见辉绿岩脉。

花岗闪长(斑)岩主要呈灰白-青灰色,是矿区出露的主要岩石类型,深部表现为花岗闪长岩,而至浅部(似)斑状构造逐渐明显。岩石的主要矿物成分为斜长石、石英、碱性长石、普通角闪石和黑云母等,副矿物主要有磷灰石、锆石、榍石和不透明矿物等。斑晶以斜长石(20%~35%)、石英(~10%)为主,黑云母(5%~10%)、普通角闪石(5%~8%)和碱性长石(~5%)次之。基质(25%~40%)呈显晶质,半自形粒状结构,矿物成分与斑晶类似。

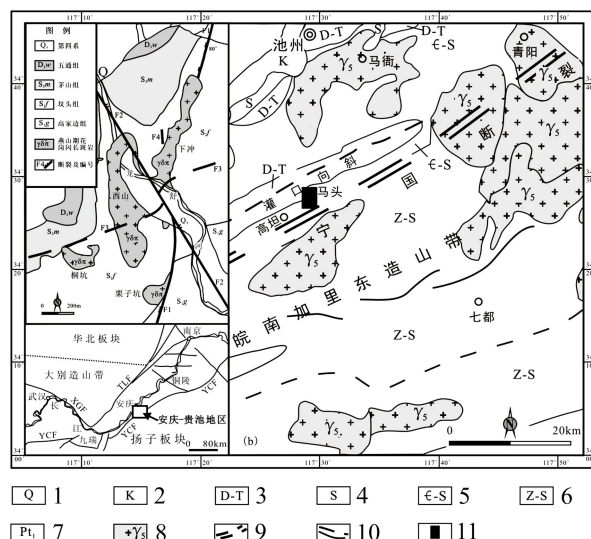


图1 马头铜钼多金属矿区地质简图: 1—第四系; 2—白垩系; 3—泥盆-三叠系; 4—志留系; 5—寒武-志留系; 6—震旦-志留系; 7—古元古界; 8—燕山期花岗岩类; 9—超壳断裂; 10—区域断裂; 11—马头矿区

Fig. 1 Sketch geological map of Matou Cu-Mo polymetallic orefield: 1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Devonian-Triassic; 4—Silurian; 5—Cambrian-Silurian; 6—Sinian-Silurian; 7—Proterozoic; 8—Yanshanian granitoid; 9—Supercrustal fault; 10—Tectonic fault; 11—Matou orefield

钾长花岗岩主要见于钻孔深部。岩石呈灰白-浅肉红色,半自形粒状结构、显微文象结构,块状或脉状构造。主要组成矿物为钾长石(55%~70%)、石英(30%~35%)和少量斜长石(<2%),几乎不含暗色矿物,副矿物为磷灰石、锆石、榍石等,偶见。

矿区内围岩及含矿岩体蚀变极为发育,蚀变类型主要有硅化、绢云母化和钾长石化,其次有粘土化、绿泥石化和碳酸盐化,以及少量白云母化、钠长石化、铁白云石化和绿帘石化等。

2 元素地球化学

本次研究对马头复式花岗岩体中花岗闪长(斑)岩和钾长花岗岩进行了主、微量及稀土元素测试,相关实验在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,分析结果列于表1~3。由表1~3可以看出,马头花岗闪长岩与钾长花岗岩相比,前者 $w(\text{SiO}_2)$ 为61.19%~63.78%,后者 $w(\text{SiO}_2)$ 为67.80%~74.54%, SiO_2 含量明显偏低。二者均为准铝-弱过铝质花岗岩,铝饱和指数 $[A/\text{CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$,分子比]

表 1 马头铜钼多金属矿区复式花岗岩主量元素化学组成及主要地球化学参数

Table 1 Chemical compositions and predominant geochemical parameters of major elements of compound granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield

Composition	w/%									
	花岗闪长(斑)岩								钾长花岗岩	
	CZB49	CZB51	CZB96	CZB97	CZB98	CZB168	CZB171	CZB172	CZB82	CZB87
SiO ₂	61.19	61.95	62.94	63.17	62.78	63.75	63.25	63.27	67.80	74.54
TiO ₂	0.73	0.67	0.62	0.65	0.64	0.59	0.62	0.64	0.12	0.08
Al ₂ O ₃	15.11	15.36	15.75	15.69	15.94	15.71	16.17	15.89	15.09	12.40
TF ₂ O ₃	5.26	4.32	4.65	4.97	4.80	4.27	4.15	4.63	0.17	0.14
MnO	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00
MgO	1.97	2.04	1.96	1.97	1.99	1.99	2.13	1.88	0.08	0.13
CaO	3.46	3.67	4.39	4.13	4.22	4.23	4.29	4.13	0.14	0.21
Na ₂ O	3.30	3.32	4.16	3.99	4.01	4.04	4.21	4.10	1.05	1.00
K ₂ O	2.88	4.30	2.70	2.74	2.72	2.66	2.60	2.37	12.10	9.80
P ₂ O ₅	0.22	0.22	0.19	0.21	0.21	0.19	0.20	0.22	0.02	0.01
LOI	4.05	2.92	1.26	1.27	1.22	1.23	0.89	0.94	0.37	0.10
Total	98.22	98.83	98.68	98.86	98.60	98.70	98.55	98.14	96.94	98.40
A/CNK	1.02	0.91	0.89	0.92	0.92	0.91	0.92	0.94	1.00	0.98
AKI	0.57	0.66	0.62	0.61	0.60	0.61	0.60	0.59	0.98	0.99

主量元素采用熔片法经 Thermo Scientific ARL Series XRF 测定, 分析精度优于 1%。TF₂O₃ 为全铁, A/CNK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O+CaO), 分子比; AKI=(Na₂O+K₂O+CaO)/Al₂O₃, 分子比。

表 2 马头铜钼多金属矿区复式花岗岩微量元素化学组成及主要地球化学参数有关

Table 2 Chemical compositions and predominant geochemical parameters of trace elements of compound granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield

Composition	w/10 ⁻⁶									
	花岗闪长(斑)岩								钾长花岗岩	
	CZB49	CZB51	CZB96	CZB97	CZB98	CZB168	CZB171	CZB172	CZB82	CZB87
Cs	5.17	4.59	1.98	2.75	2.28	1.97	1.78	2.03	3.12	3.45
Rb	108.46	145.13	85.46	87.84	86.31	85.80	77.94	64.59	296.50	302.95
Sr	366.46	436.32	398.25	349.03	408.12	458.02	532.28	484.12	135.92	134.74
Ba	385.44	634.77	523.38	442.67	507.21	634.25	700.03	623.22	230.56	429.55
Th	5.97	7.55	6.44	5.83	6.21	6.40	5.47	6.42	10.63	9.72
U	2.17	2.61	2.05	1.85	1.97	2.41	1.87	1.81	2.97	3.65
Nb	16.96	19.74	17.26	16.14	18.94	14.20	13.54	13.37	3.98	4.99
Ta	1.41	1.40	1.33	1.27	1.44	1.14	1.06	1.05	0.44	0.39
Y	18.18	20.35	16.52	12.60	16.92	13.75	12.63	11.97	2.38	1.12
Zr	164.11	208.45	179.32	48.82	192.45	175.92	167.58	174.50	57.08	40.01
Hf	4.65	5.95	5.06	1.78	5.68	5.05	4.90	5.09	2.53	2.09
Pb	6.59	6.58	5.70	5.01	6.86	5.61	6.98	4.85	9.53	10.74
Sc	10.86	11.88	9.20	5.66	8.60	8.41	8.38	7.13	0.30	0.20
Ga	20.25	22.80	20.96	16.56	22.04	22.64	22.18	24.06	12.44	11.38
V	111.62	121.40	88.87	82.38	90.43	100.81	98.81	107.15	4.74	4.74
Cr	29.90	33.07	30.78	38.55	30.77	53.93	50.68	34.47	13.18	15.99
Co	12.07	12.65	9.93	8.70	10.12	11.97	9.68	9.70	0.26	0.24
Ni	14.17	15.73	15.48	19.43	15.42	27.19	21.74	15.96	8.32	9.48
Sr/Y*	20.15	21.44	24.11	27.70	24.13	33.31	42.13	40.44	57.17	120.29

微量元素分析采用酸溶(HF+HNO₃)方法, 用 Finnigan Element II 型 HR-ICP-MS 测定, 相对标准偏差优于 10%, 详细的分析方法参见文献[4]。

表 3 马头铜钼多金属矿区复式花岗岩稀土元素化学组成及主要地球化学参数有关

Table 3 Chemical compositions and predominant geochemical parameters of rare earth elements of compound granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield

Composition	$w/10^{-6}$									
	花岗闪长(斑)岩								钾长花岗岩	
	CZB49	CZB51	CZB96	CZB97	CZB98	CZB168	CZB171	CZB172	CZB82	CZB87
La	28.91	29.86	28.13	25.54	28.30	28.99	27.19	28.06	7.32	3.95
Ce	53.70	59.43	54.91	49.65	53.98	51.93	51.49	52.32	12.39	6.78
Pr	6.32	7.08	6.38	5.57	6.68	6.17	6.04	6.41	1.14	0.52
Nd	25.09	28.06	25.68	21.79	27.16	23.97	23.50	25.34	4.00	1.72
Sm	4.85	5.54	4.94	4.14	5.36	4.53	4.39	4.84	0.67	0.28
Eu	1.28	1.39	1.28	1.01	1.40	1.24	1.25	1.31	0.17	0.10
Gd	4.28	4.76	4.23	3.45	4.52	3.66	3.62	3.85	0.54	0.27
Tb	0.56	0.64	0.54	0.45	0.56	0.46	0.44	0.45	0.06	0.03
Dy	3.64	4.05	3.30	2.62	3.47	2.91	2.54	2.62	0.40	0.17
Ho	0.74	0.82	0.66	0.51	0.68	0.55	0.51	0.49	0.10	0.04
Er	2.03	2.25	1.73	1.32	1.80	1.52	1.35	1.29	0.31	0.11
Tm	0.30	0.34	0.26	0.20	0.27	0.23	0.20	0.18	0.05	0.02
Yb	1.90	2.00	1.54	1.21	1.62	1.33	1.22	1.10	0.30	0.12
Lu	0.29	0.31	0.23	0.18	0.26	0.22	0.19	0.17	0.05	0.02
ΣREE^*	133.90	146.52	133.80	117.62	136.05	127.72	123.94	128.42	27.53	14.14
δEu^*	0.86	0.82	0.85	0.82	0.87	0.93	0.96	0.92	0.87	1.16
δCe^*	0.93	0.96	0.96	0.98	0.92	0.91	0.94	0.91	1.00	1.11

稀土元素分析采用酸溶(HF+HNO₃)方法, 用 Finnigan Element II 型 HR-ICP-MS 测定, 相对标准偏差优于 10%, 详细的分析方法参见文献[4]。 $\delta\text{Eu}=\text{Eu}_\text{N}/\sqrt{\text{Sm}_\text{N}\times\text{Gd}_\text{N}}$; $\delta\text{Ce}=\text{Ce}_\text{N}/\sqrt{\text{La}_\text{N}\times\text{Pr}_\text{N}}$

分别为 0.89~1.02 和 0.98~1.00, CIPW 计算未见刚玉分子或含量极低, 明显区别于典型的强过铝 S 型花岗岩^[5]。在碱金属元素方面, 花岗闪长岩与钾长花岗岩钾和钠含量明显有别, 前者表现出相对偏低的全碱含量及钾钠比值, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 2.37%~4.30%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 3.30%~4.21%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.58~1.30, 而钾长花岗岩全碱含量则较高, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 9.80%~12.10%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 1.00%~1.05%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 高达 9.80~11.52。二岩体碱铝指数($\text{AKI}=(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$, 分子比)分别为 0.57~0.66 和 0.98~0.99, 在 A/CNK — AKI 关系图上(见图 2), 除个别点外, 绝大多数样品点投影在亚碱准铝质区域, 如按洪大卫等^[6]提出的碱性(>1.0)、偏碱性(0.9~1.0)和钙碱性(<0.9)花岗岩 AKI 值变化范围, 花岗闪长岩应属钙碱性花岗岩, 而钾长花岗岩则可归为偏碱性花岗岩。

从微量元素蛛网图上(见图 3(a)和(b))可以看出, 无论是花岗闪长岩还是钾长花岗岩均强烈富集 Ba、Sr 等大离子亲石元素以及轻稀土元素(LREE), 而在 Nb、Ta、Y 等高场强元素和重稀土元素(HREE)方面, 钾长

花岗岩较花岗闪长岩更为亏损, 明显区别于典型的 I 型或 S 型花岗岩, 显示埃达克质岩石或高 Ba-Sr 花岗岩的地球化学特征。其中, 花岗闪长岩相对钾长花岗岩

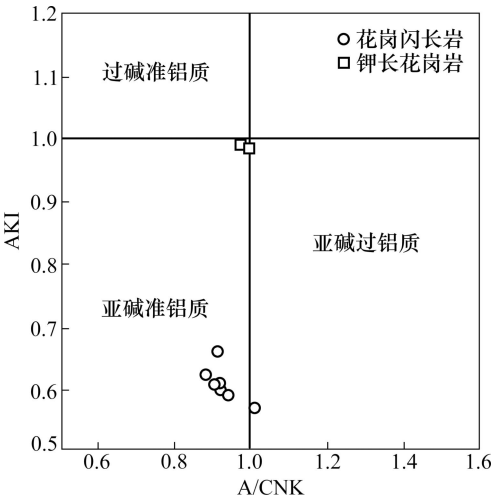


图 2 马头矿区复式花岗岩 A/CNK — AKI 判别图解
Fig. 2 A/CNK — AKI diagrams for compound granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield

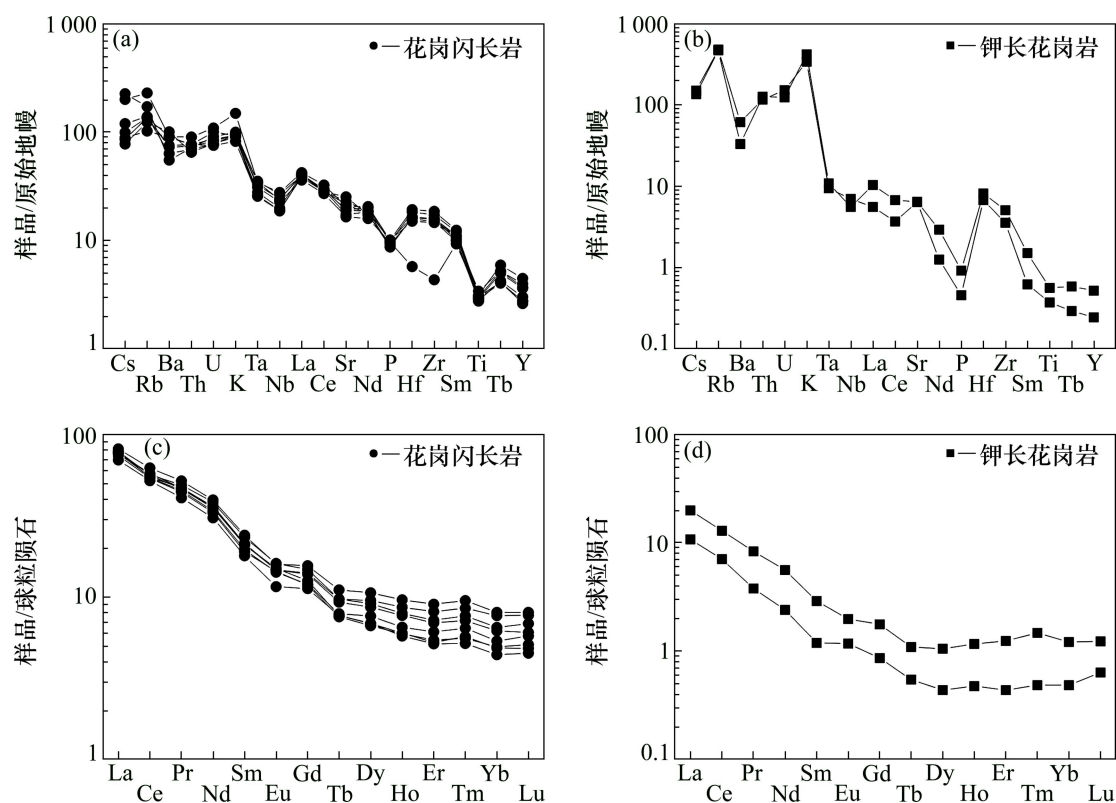


图3 马头矿区复式花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a), (b)及稀土球粒陨石标准化配分曲线(c), (d)(原始地幔标准化值据文献[7], 球粒陨石标准化值据文献[8])

Fig. 3 Primitive mantle-normalized spidergrams (a), (b) and chondrite normalized REE distribution patterns (c), (d) for compound granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield (Primitive mantle-normalized values from Ref. [7]; Chondrite normalized values from Ref. [8])

岩 Rb/Sr 和 Rb/Ba 比值较低,前者 Rb/Sr 为 0.13~0.33, Rb/Ba 为 0.10~0.28, 后者 Rb/Sr 为 2.18~2.25, Rb/Ba 为 0.71~1.29, 表明钾长花岗岩具有更高的演化程度。

在稀土元素方面, 花岗闪长岩和钾长花岗岩总量均偏低, 前者 REE 为 $117.62 \times 10^{-6} \sim 146.52 \times 10^{-6}$, 后者 REE 总量仅为 $14.14 \times 10^{-6} \sim 27.53 \times 10^{-6}$, 且强烈富集轻稀土元素, 亏损中-重稀土, 两者的 $(La/Yb)_N$ 比值分别为 10.11~17.28 和 16.35~22.03, 表现出明显右倾的稀土配分模式(见图 3(c)和(d))。此外, 所有样品中轻稀土元素均显示比重稀土更加明显的分馏趋势, 花岗闪长岩中 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 值分别为 6.85~8.96 和 1.46~1.77, 而钾长花岗岩 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 值分别为 3.32~4.03 和 1.82~2.84, 表现在稀土配分模式图上, 重稀土较轻稀土相对平坦。

3 岩浆来源及岩石成因

从主微量元素来看, 马头花岗闪长(斑)岩表现出

相似埃达克岩的地球化学特征, 主要表现为: $w(SiO_2) > 56\%$, $w(Al_2O_3) > 15\%$, 富集 LILE ($w(Ba) > 400 \times 10^{-6}$, $w(Sr) > 400 \times 10^{-6}$) 和 LREE, Eu 负异常不显著, 相对亏损 HREE ($Yb < 1.9 \times 10^{-6}$) 和 Y ($< 18 \times 10^{-6}$), 轻重稀土高度分异, $(La/Yb)_N > 10$, 且 $Sr/Y > 20$ 。目前, 对埃达克质岩石具有多种成因观点已得到普遍共识, 比如与板片消减作用有关的类似环太平洋地区的 O 型埃达克岩以及与地壳加厚条件下中基性岩部分熔融产物有关的 C 型埃达克岩^[9]。当然, 对长江中下游地区的具体的埃达克质岩来说, 尚有更多的分歧, 比如存在加厚或拆沉下地壳(至少大于 40 km)的部分熔融、壳幔岩浆混合作用、幔源岩浆分离结晶以及俯冲洋壳部分熔融产生的熔体与富集岩石圈地幔组分混合作用等成因观点^[3, 10-12]。

尽管高 Ba、Sr 含量和轻稀土富集可能与俯冲板片上的远洋沉积物有关, 因为 Sr 含量的强烈变化主要受碳酸盐岩的控制, 源于 Sr 对 Ca 元素的置换, 而 Ba 含量的富集则是生物作用的结果或受到热液过程的影响^[13-15], 但就远洋沉积物而言, 稀土元素的分配主要

归结于碎屑岩和泥质岩的物质平衡,通常表现出 Ce 负异常特征^[13]。马头花岗闪长(斑)岩 La/Yb 比值较高,变化于 14.96~25.57,轻稀土显著富集,然而却几乎不显示 Ce 负异常特征($\delta\text{Ce}=0.91\sim0.98$),表明马头花岗闪长(斑)岩并非直接来源于俯冲洋壳板片的部分熔融或有洋壳部分熔融产生的熔体参与成岩,其高 Ba、Sr 特征应主要继承自源岩的地球化学性质。刘园园等^[3]对贵池地区的部分花岗岩体分别开展了锆石 Hf 同位素以及全岩 Sr-Nd 同位素测试,获得马头花岗闪长(斑)岩 $\delta\text{Hf}(t)$ 为 $-5.42\sim-1.96$ 和 $\delta\text{Nd}(t)$ 为 $-6.55\sim-7.52$,该系列同位素测试结果显示与该地区源自富集岩石圈地幔的基性岩较为相似,据此认为马头地区花岗闪长(斑)岩可能与富集岩石圈地幔存在联系^[3]。当然,锆石年代学测试结果显示,马头花岗闪长(斑)岩存在多组残留锆石信息,特别古元古代古老地壳物质印记的存在,表明该岩石在形成过程中还经历了一定程度地壳混染作用^[3]。

对马头地区钾长花岗岩来说,其主要由钾长石(55%~70%)、石英(30%~35%)以及极少量斜长石(<2%)组成,几乎缺失暗色矿物,计算标准矿物,获得其分异指数高达 99.4%~99.6%,较类似于岩浆演化晚期具高度分异特征的白岗岩^[16]。然而,从不相容元素含量来看,马头钾长花岗岩湿亲岩浆元素含量相对较低,在高分异花岗岩判别图解上,仅投影于正常花岗岩区域,与高分异花岗岩仍有一定区别(见图 4),因为不相容元素和高场强元素往往倾向于在高度分异的晚期熔体相中富集。此外,锆石饱和温度计算^[17]结果也显示,花岗闪长(斑)岩锆石饱和温度为 668~779 °C,平均值 756 °C,而钾长花岗岩明显偏低,仅为 676~696 °C,平均值为 686 °C,较之高分异花岗岩的锆石饱和温度也明显偏低^[18],更接近于花岗岩的低共熔温度(~670 °C)。从锆石年代学测试结果来看,马头花岗闪长(斑)岩形成时代约为 145 Ma,而钾长花岗岩形成稍晚,在 141 Ma 左右(另文发表),短短的几百万年时间,不太可能是二期岩浆事件的产物,而更倾向于同一期岩浆事件的脉动式侵位。假设没有新的热事件产生的话,那么很可能就是由于区域构造背景趋于引张环境转变,已经侵位的花岗闪长岩由于压力降低,发生部分熔融,生成类似于低共熔组分的钾长花岗岩,并顺着先期花岗闪长(斑)岩上升通道,再次侵位并穿插于花岗闪长(斑)岩或其构造裂隙之中。

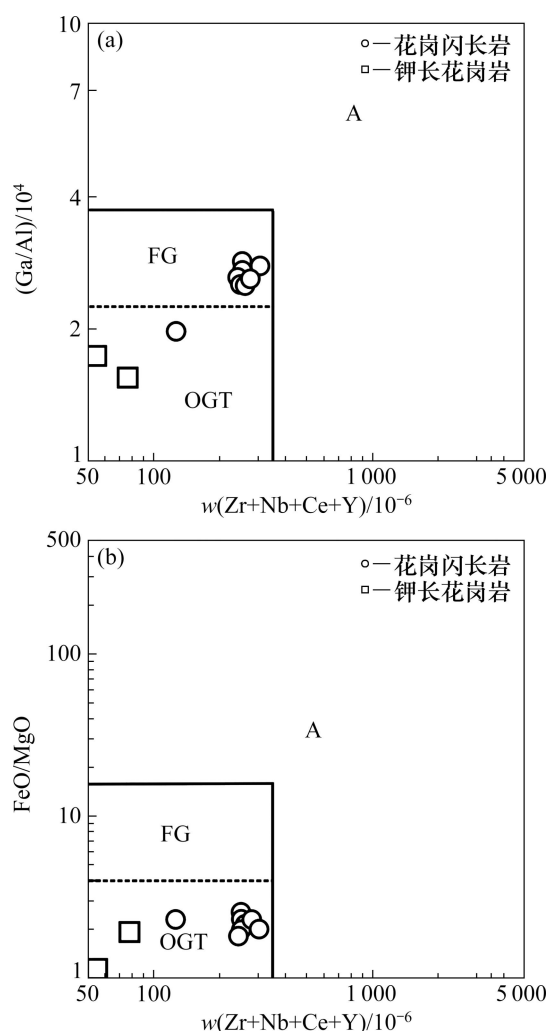


图 4 马头铜钼多金属矿区复式花岗岩的 $w(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 与 Ga/Al 及 FeO/MgO 的关系图(OGT—I、S 和 M 型花岗岩区, FG—分异的 I、S 型花岗岩区, 底图据文献[19])

Fig. 4 Relationships between $w(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ vs Ga/Al and FeO/MgO of compound granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield: (a) Ga/Al ; (b) FeO/MgO (OGT—I, S and M types of granites; FG—Differential I and S types of granites; Base map from Ref. [19])

4 成矿指示意义

前人研究成果显示,埃达克质岩浆体系由于其特殊的岩石属性,往往与金铜等亲硫元素金属矿产有关,原因在于来自俯冲洋壳板片或洋壳沉积物或拆沉的大陆地壳产生的熔体或释放的超临界流体与地幔相互作用,可能导致高 Fe_2O_3 含量的熔体或超临界流体对地幔交代,使得地幔氧逸度升高,地幔金属硫化物被氧化分解,有利于铜金等矿化^[20]。马头花岗闪长(斑)岩

表现出似埃达克质岩石的地球化学特征,物质来源可能与被交代的富集岩石圈地幔有关,形成于碰撞造山后向板内伸展阶段,成岩过程遭受了不同程度地壳物质的混染,因此,马头地区的铜(金)矿化很可能与该类岩石的侵位有较为紧密的联系。

然而,作为马头矿区主要的经济成矿元素钼来说,其物质来源既可能与地幔有关,也可能来自于地壳组分(改造过的富钼岩石体系)。但无论来自何处,该元素的富集,一定与流体的运移有直接的关系。例如,CANDELA和HOLLAND^[21]通过实验对Mo元素在熔体和流体中的分配行为进行了详细研究,认为Mo为典型的不相容元素($D_{\text{fluid/melt}}^{\text{Mo}}=2.5$),同样,AUDETAT等^[22]也分析了花岗岩中共存的流体包裹体和熔浆包裹体的钼含量,得出钼在流体与岩浆之间更倾向于流体分析的特性^[21]。因此,拥有足够的流体很可能是形成富钼矿体的一个基本条件。

辉钼矿是钼最主要的赋存矿物形式^[23],往往有网状石英-辉钼矿细脉、石英-辉钼矿大脉以及角砾岩或片状和薄膜状等矿化方式,其中网状-细脉状辉钼矿化是斑岩型钼矿最常见的矿化方式^[23]。在马头矿区,辉钼矿的矿化方式主要以细脉浸染状和脉状矿化为主,出现范围相对集中,主要分布在岩体深部,位于钾长花岗岩外侧与花岗闪长斑岩的接触带附近,而石英脉带矿化主要产在石英绢云母化带中,以石英细(网)脉为主,受节理和裂隙控制,分布范围较广,但品位较低,主要出现于岩体上部,在岩体深部常表现为穿插早期形成的脉体。从矿区整体来看,石英脉型矿化常与石英绢云母化和线型钾长石化有关,而细脉-浸染型矿化往往与面型钾长石化关系密切。已有研究表明,在岩浆-热液系统中,富含 K^+ 的溶液在各种微小裂隙,甚至粒间、矿物的解理、双晶面等都具有很强的扩散能力和渗滤能力,能与成矿元素组成各种易溶的配合物,促使它们活化转移或成矿。发生钾长石化的区间很广泛($>100\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$),尤其是高温流体中钾能广泛交代各种岩石和矿物。Mo属于酸性元素,在碱性介质中易于形成络合物,具有较强的搬运能力,实验显示成矿前Mo主要以钼酸根(H_2MoO_4 或 KHM oO_4)的形式进行搬运^[23-25];伴随着流体的运移,交代类型逐渐从碱交代向酸交代(或氢交代)过渡,此时开始出现大量的绢英岩化或黄铁绢英岩化,铜钼矿化即集中出现于钾长石化和绢英岩化阶段。因此,马头矿区部分熔融产出的钾长花岗岩应该是该地区钼矿化的主要

催化媒介,制约着钼元素的富集与成矿。

5 结论

1) 马头铜钼多金属矿区花岗闪长(斑)岩具有类似埃达克质岩石的地球化学特征,富集LILE(尤其是Sr和Ba)和LREE, Eu负异常不显著,相对亏损HREE和Y,很可能是富集岩石圈地幔部分熔融的产物,但在成岩过程中经历有一定程度地壳组分混染。而钾长花岗岩则表现出高硅、高钾的地球化学特征,其锆石饱和温度(近液相线温度)接近于低共熔花岗岩,很可能是早期形成岩体在压力释放过程中再次熔融的产物。

2) 马头铜钼多金属矿区铜钼(金)等亲硫成矿元素的物质来源很可能与花岗闪长(斑)岩的侵位有关,但钾长花岗岩在钼的富集和强烈矿化过程中起到了催化媒介的作用。

REFERENCES

- [1] 宋国学, 秦克章, 李光明. 长江中下游池州地区矽卡岩-斑岩型W-Mo矿床流体包裹体与H、O、S同位素研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2768-2782.
SONG Guo-xue, QIN Ke-zhang, LI Guang-ming. Study on the fluid inclusions and S-H-O isotopic compositions of skarn-porphyry-type W-Mo deposits in Chizhou area in the Middle-Lower Yangtze Valley[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2768-2782.
- [2] 王伟华. 安徽池州马头铜钼矿床特征及找矿思路[J]. 地质学刊, 2011, 35(3): 311-316.
WANG Wei-hua. On Matou Cu-Mo deposit properties and ore prospecting thoughts in Chizhou of Anhui[J]. Journal of Geology, 2011, 35(3): 311-316.
- [3] 刘园园, 马昌前, 吕昭英, 黄卫平. 长江中下游贵池矿集区燕山期岩浆作用及其地质意义: 年代学、地球化学及Sr-Nd-Hf同位素证据[J]. 岩石学报, 2012, 28(10): 3287-3305.
LIU Yuan-yuan, MA Chang-qian, LÜ Zhao-ying, HUANG Wei-ping. Zircon U-Pb age, element and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Late Mesozoic magmatism from the Guichi metallogenic district in the middle and lower reaches of the Yangtze River Region[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(10): 3287-3305.
- [4] 高建峰, 陆建军, 赖鸣远, 林雨萍, 濮巍. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2003, 39(6): 844-850.
GAO Jian-feng, LU Jian-jun, LAI Ming-yuan, LIN Yu-ping, PU Wei. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences,

- 2003, 39(6): 844–850.
- [5] CHAPPELL B W, WHITE A J R. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australia J Earth Sci*, 2001, 48: 489–499.
- [6] 洪大卫, 郭文歧, 李戈晶. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1987: 1–132.
- HONG Da-wei, GUO Wen-qi, LI Ge-jing. Petrology of the miarolitic granite belt in the southeast coast of Fujian province and their petrogenesis[M]. Beijing: Science and Technology Press of Beijing, 1987: 1–132.
- [7] McDONOUGH W F, SUN S S. The composition of the Earth[J]. *Chem Geol*, 1995, 120: 223–253.
- [8] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]//Henderson P. *Rare Earth Elements Geochemistry*, Amsterdam, 1984: 63–144.
- [9] 张旗, 王焰, 刘红涛, 王元龙, 李之彤. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景[J]. *地学前缘*, 2003, 10(4): 385–416.
- ZHANG Qi, WANG Yan, LIU Hong-tao, WANG Yuan-long, LI Zhi-tong. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 385–416.
- [10] LING M X, WANG F Y, DING X, ZHOU J B, SUN W D. Different origins of adakites from the Dabie mountains and the Lower Yangtze River Belt, Eastern China: Geochemical constraints[J]. *International Geology Review*, 2011, 53: 727–740.
- [11] WANG Q, WYMAN D A, XU J F, JIAN P, ZI F. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of Eastern China: Implications for Cu-Au mineralization[J]. *Journal of Geology*, 2007, 115(2): 149–161.
- [12] XIE G Q, MAO J W, ZHAO H J. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the Southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt (MLYRB), East China[J]. *Lithos*, 2011, 125(1/2): 693–710.
- [13] PLANK T, LANGMUIR C H. The geochemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. *Chem Geol*, 1998, 145: 325–344.
- [14] ZANETTI A, MAZZUCHELLI M, RIVALENTI G, VANNUCCI R. The Finero phlogopite-peridotite massif: An example of subduction-related metasomatism[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 107–122.
- [15] FOWLER M B, KOCKS H, DARBYSHIRE D P F, GREENWOOD P B. Petrogenesis of high Ba-Sr plutons from the northern highlands terrane of the British Caledonian Province[J]. *Lithos*, 2008, 105(1/2): 129–148.
- [16] WU F Y, JAHN B M, WILDE S A. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 2003, 66(3/4): 241–273.
- [17] WATSON E B, HARRISON T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planet Science Letters*, 1983, 64: 295–304.
- [18] 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2008, 24(11): 2468–2484.
- QIU Jian-sheng, XIAO E, HU Jian, XU Xi-sheng, JIANG Shao-yong, LI Zhen. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(11): 2468–2484.
- [19] EBY G N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 1990, 26(1/2): 115–134.
- [20] 王强, 唐功建, 贾小辉, 资峰, 姜子琦, 许继峰, 赵振华. 埃达克质岩的金属成矿作用[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(3): 350–364.
- WANG Qiang, TANG Gong-jian, JIA Xiao-hui, ZI Feng, JIANG Zi-qi, XU Ji-feng, ZHAO Zhen-hua. The metalliferous mineralization associated with adakitic rocks[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(3): 350–364.
- [21] CANDELA P A, HOLLAND D. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48: 373–380.
- [22] AUDETAT A, PETTKE T. The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: A melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Canada Pinabete plutons in northern New Mexico (USA)[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 97–121.
- [23] 简伟, 柳维, 石黎红. 斑岩型钼矿床研究进展[J]. *矿床地质*, 2010, 29(2): 308–316.
- JIAN Wei, LIU Wei, SHI Li-hong. Advances in study of porphyry molybdenum deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(2): 308–316.
- [24] FARGES F, SIEWERT R, PONADER C W, BROWN G E, PICHAVANT M, BEHRENS H. Structural environments around molybdenum in silicate glasses and melts. II. Effect of temperature, pressure, H₂O, halogens and sulfur[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2006, 44(3): 755–773.
- [25] ULRICH T, MAVROGENES J. An experimental study of the solubility of molybdenum in H₂O and KCl-H₂O solutions from 500 °C to 800 °C, and 150 to 300 MPa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(9): 2316–2330.

(编辑 何学锋)