文章编号 10258-7106(2010)03-0501-09

江西城门山铜矿含矿斑岩体风化作用地球化学特征

吴俊华^{1,2} 龚 敏^{1,2} 袁承先^{1,2} 龚 鹏¹ 熊 燃¹ 赵 波¹ 曾键年¹ 冯振东¹

(1 中国地质大学,湖北 武汉 430074;2 江西省地矿资源勘查开发中心,江西 南昌 330030)

摘 要 文章利用城门山铜矿露天采坑系统地研究了含矿斑岩体风化作用过程中常量元素和微量元素的地球 化学行为。结果表明,含矿斑岩体具有2个明显的风化旋回,风化作用过程主要表现为铝硅酸盐矿物的水解、水化作 用,斑岩体中 Ca、Mg、Na、K等元素大量淋失, Ca、Mg、Na 淋失量可达 80%以上,而 Si、Al、Ti、Fe 残留在风化层中。城 门山铜矿含矿斑岩体具低 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf 和低稀土元素含量($\Sigma REE = 77.69 \times 10^{-6} \sim 104 \times 10^{-6}$),具有较稳定的 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值 稀土元素配分模式为较缓的右倾模式,无明显的铕异常($\delta Eu > 0.73$), $\Sigma Ce/\SigmaY$ 比值为 3~8。 这些特征可作为评价城门山铜矿含矿中酸性岩体主要的地球化学指标之一。

关键词 地球化学 含矿斑岩体 风化 城门山 ;江西 中图分类号:P618.41 文献标志码 :A

Weathering geochemical characteristics of ore-bearing porphyry in Chengmenshan copper deposit, Jiangxi Province

WU JunHua^{1,2}, GONG Min^{1,2}, YUAN ChengXian^{1,2}, GONG Peng¹, XIONG Ran¹, ZHAO Bo¹, ZENG JianNian¹ and MA ZhenDong¹

(1 China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2 Geology and Mineral Resource Exploration and Development Center of Jiangxi Province, Nanchang 330030, Jiangxi, China)

Abstract

Geochemical behaviors of major and trace elements in the weathering process of the ore-bearing porphyry within the Chengmenshan copper deposit were systematically studied by using the open pit system. The results show that the ore-bearing porphyry has experienced two evident cycles of weathering, and the process of weathering mainly finds expression in the hydrolysis of aluminosilicate minerals and hydration, the leaching of large quantities of Ca, Mg, Na, K and other elements (the leaching amount of Ca, Mg and Na up to 80%), and the preservation of Si, Al, Ti and Fe in the weathered layer. The ore-bearing porphyry in the Chengmenshan copper deposit has low content of Ti, Nb, Ta, Zr, Hf and REE($\Sigma REE = 77.69 \times 10^{-6} \sim 104 \times 10^{-6}$), relatively stable ratios of Nb/Ta and Zr/Hf, rather gently right-oblique REE patterns, and indistinct Eu anomaly($\delta Eu > 0.73$), with $\Sigma Ce/\Sigma Y$ ratio being $3 \sim 8$. These features can serve as one of the main geochemical indicators for ore-bearing intermediate-acid rocks in the Chengmenshan copper deposit.

Key words: geochemistry, ore-bearing porphyry, weathering, Chengmenshan, Jiangxi Province

本文得到国土资源部 资源与环境地球化学勘查与评价方法技术研究和推广 "子项目(1212010660404)的资助
 第一作者简介 吴俊华,男,1969年生,高级工程师,在读博士,矿产勘查专业。Email:875551337@qq.com
 收稿日期 2009-10-08;改回日期 2009-12-11。李 岩编辑。

地球表层系统是固体的岩石圈(矿化体)表生自 然体系(风化壳、土壤、沉积物)液态的水圈(地表 水、浅层地下水)气态的大气圈(CO₂、O₂)和生物圈 的交合部位,是作用(氧化、水解、酸化、生物作用等) 最活跃、现象最丰富、制约因素最多的复合体系。表 生风化作用一直是地球科学研究的热点问题,许多 学者对风化作用过程中元素的变化规律(Nesbitt, 1979;Nesbitt et al.,1982;1997;Geuveia, et al., 1993;Kurtz et al.,2002;Ma et al.,2007;黄成敏等, 2002;李伟强等,2006)影响因素(陈骏等,1997;马 英军等,2004)和元素迁移定量估算(宋照亮等, 2002;顾尚义等,2003;巫锡勇等,2004)等方面做了 大量的研究。

城门山铜矿是中国长江中下游铜多金属成矿带 中的一朵奇葩,前人从地质(黄恩邦等,1990;罗建 安 2003;2006;罗建安等,2007;潘灿军等,2007;谭 辉跃等 2009)构造(吴良士等,1999),岩浆岩(吴良 士等,1997),成矿模式(常印佛等,1992;孟良义, 1996;马振东等,1997)等各个方面对其进行了剖析, 但对其含矿斑岩体中元素的表生地球化学特征研究 相对较弱。从地球化学视角出发,城门山铜多金属 矿床也是表生自然体系的一个组成部分,构成了特 殊的表生环境。本文对城门山铜矿含矿斑岩体风化 作用过程中常量元素、微量元素的表生地球化学行 为的研究,是建立矿床地球化学找矿参数、评价指标 和原生晕找矿模式的基础,也可为开展深部和外围 成矿预测提供地球化学依据。

1 矿床地质特征

城门山"多位一体"(矽卡岩型、斑岩型、似层状 块状硫化物型)铜多金属矿床位于扬子陆块北缘。 矿区内燕山期中酸性小岩体侵入在中-古生代的碳 酸盐岩地层中。其岩浆岩主要由花岗闪长斑岩和石 英斑岩组成,呈岩株状产出,出露面积约0.8 km²,在 平面上呈近于等轴状,剖面上呈筒状,向北西倾伏, 倾角70~80°。其中,晚期与 Mo 成矿作用密切相关 的石英斑岩在平面上呈"L'形侵入于早期与 Cu 成矿 密切相关的花岗闪长斑岩中,在剖面上呈向西倾斜 的筒状或岩墙状,宽度上大下小(黄恩邦等,1990;罗 建安等,2007)。

在花岗闪长斑岩与灰岩的接触带中形成砂卡型 矿体,在石英斑岩、花岗闪长斑岩的小岩体中形成斑 岩型铜钼矿体(上铜下钼,铜帽钼柱),在中石炭统黄 龙组灰岩与上泥盆统五通组砂岩层面上形成了似层 状块状硫化物型矿体(图1),组成了<u>型(</u>油条烧饼 型)将大型铜多金属矿床,在多次成矿蚀变作用的叠 加下,在矿区不同类型矿体中形成迥异的蚀变矿化 分带和复杂的矿石矿物组合(马振东等,1997;吴良 士等,1999;罗建安等,2007)。

城门山地区气候湿热,年平均温度 15.5~17℃, 年降水量 1 150~1 450 mm,雨量充沛,阳光充足,夏 季酷热,冬季湿冷,属湿润中低山丘陵景观。地形舒 缓,水系湖泊发育,大面积被第四系和湖区所覆盖 (区内大的湖泊有赛城湖)。风化作用十分发育,铁 帽最深可达地表以下 260 m(罗建安,2003)。

2 样品采集与测试分析

本次研究在城门山铜矿露天采坑(+125~-45 m)较系统地采集了花岗闪长斑岩和石英斑岩中2条 风化剖面内的样品,其中花岗闪长斑岩从上至下共 11 件(表层土壤1件)石英斑岩共8件(表层土壤3 件)。采用连续刻槽法,每个样品重约2 kg,现场用 聚乙烯塑料袋密封后带回室内进行分析。

▶ 所采样品经粉碎、缩分,磨至 200 目以下。分析 测试由中国地质科学院地球物理地球化学研究所 (国土资源部勘查地球化学质量监督检测中心)完 成,测试方法为压片法 X-Ray 荧光光谱(XRF)和等 离子体质谱法(ICP-MS)。对于数据的准确度用国 家一级标样(GSR、GSD、GSS)进行控制,精密度用重 复样进行控制,另每批样品中插入密码样进行外部 控制,样品测试合格率为 100%。

3 结果与讨论

3.1 含矿斑岩体风化特征

处于长江中游温润低山丘陵区的城门山矿区, 三面临湖,风化作用强烈,氧化作用、次生淋滤和富 集现象十分明显,目前常用硅酸盐岩中的长石化学 风化指数(CIA,chemical index of alteration)来衡量 含矿岩体风化作用的程度(Nesbitt et al.,1982;顾尚 义等 2003,赵锦慧等 2004):

CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O)]×100 它可以较好地定量反映硅酸盐化学风化的程 度。前人研究(Nesbittetal.,1982)表明,未风化的



图 1 城门山铜矿地质构造略图●

1—下三叠统大冶组灰岩;2—上二叠统页岩;3—下二叠统茅口组灰岩;4—下二叠统栖霞组灰岩;5—上泥盆统武通组砂岩; 6—上志留统纱帽组砂岩;7—石英斑岩;8—花岗闪长斑岩;9—铁帽;10—硅化灰岩;11—矽卡岩;12—破碎带;13—断层

Fig. 1 Geological sketch map of the Chengmenshan copper deposit

1—Limestone of Lower Triassic Daye Formation; 2—Upper Permian shale; 3—Limestone of Lower Permian Maokou Formation; 4—Limestone of Lower Permian Qixia Formation; 5—Sandstone of Upper Devonian Wutong Formation; 6—Sandstone of Upper Silurian Shamao Formation; 7—Quartz porphyry; 8—Granodiorite porphyry; 9—Gossan; 10—Silicified limestone; 11—Skarn; 12—Fracture zone; 13—Fault

上地壳 CIA 风化指数介于 45~50 随着化学风化作用 程度的增强 CIA 风化指数不断提高 50~60 为弱风 化作用 60~80 为中等风化作用 80 以上则为强风化 或极强风化作用。城门山铜矿花岗闪长斑岩和石英 斑岩剖面化学风化指数(CIA)结果见图 2 和图 3。

从图 2 和图 3 中清晰可见(成矿元素地球化学 特征另有论文进行说明):

(1)在花岗闪长斑岩 125 m 至 - 44 m 高程之 间,存在 2 个明显的风化作用旋回:第一个风化作用 旋回是自 44 m 高程的极强风化花岗闪长斑岩[CIA = 97, α (K₂O)/ α (Na₂O)=0.5],至 - 44 m 高程的 中等风化程度花岗闪长斑岩[CIA = 73, ω (K₂O)/ α (Na₂O)=11.7];第二个风化作用旋回是自 120 m 左右高程的极强风化花岗闪长斑岩[CIA = 98, α (K₂O)/ α (Na₂O)=1.0],至 54 m 高程的中等风 化花岗闪长斑岩[CIA = 71, ω (K₂O)/ ω (Na₂O)= 7.0 J。

(2)出露高程 40 m 至 - 35 m 的石英斑岩(图3)亦呈现了从强风化程度至弱风化程度的变化特征,与花岗闪长斑岩第一风化作用旋回相对应(CIA:92→55,K/Na:4.1→16.1)。

(3)从 Fe³⁺/Fe²⁺[w(Fe₂O₃) w(FeO),下同] 比值分析,这 2 个风化作用旋回均处于强氧化带, Fe³⁺/Fe²⁺比值(3.4~71)远大于原岩中的该比值 (1.6~2.0);石英斑岩中的 Fe³⁺/Fe²⁺比值从上 (Fe³⁺/Fe²⁺=71)往下,下降趋势明显,至-35 m高 程接近未风化石英斑岩 Fe³⁺/Fe²⁺比值(3.4)。

3.2 表层含矿岩体中常量元素的地球化学性质

岩石(矿物)的化学、生物风化作用是极其复杂 的过程,要定量计算某元素在风化作用过程中减少 或增加的量是十分困难的,然而,可以假定某元素 在风化作用过程中是基本不变的。例如AI元素,因为

高程/m	样品号	岩 性	化学风化指数(CIA) 60 70 80 90	$w(K_2O)/w(Na_2O)$ 20 15 10 5	$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_2)$	w _{Cu} /10 ⁻⁶	$w_{Au}/10^{-6}$
125	CH-1-S	土壤				129	20
119	CH-2-1	极强风化 γδπ		1.0	8.7		
109	CH-3-1		98	21.5	11.9		
90	CH-4-1	强风化 γδπ	/9	5.7	11.8		
54	СН-5-1		71	7.0	10.1		
44	СН-6-1	极强风化 γδπ		0.5	13.8	240	5.5
28	СН-7-1		97	10.1	11.7	549	55
13	CH-8-1		79	12.8	4.3		
4	CH-9-1	强风化 γδπ		17.4	13.5		
-6	CH-10-1		81	6.8	6.0		
-44	CH-11-1		73	11.7	15.7		
赣西北北	地质大队	未风化 γδπ	59	2.5	1.6	596	30
迟清华	等,2007	下扬子地台γδπ	61	0.9	0.5	15	0.32

① 江西省地质矿产局赣西北地质大队. 1990. 江西九江-瑞昌地区铁帽型金矿的富集规律及远景预测. 内部资料.

图 2 城门山铜矿花岗闪长斑岩化学风化指数(CIA)

γδπ—花岗闪长斑岩

Fig. 2 Chemical index of alteration of granodiorite porphyry in the Chengmenshan copper deposit

γδπ—Granodiorite porphyry

						SF (Un.	~			
高程/m	样品号	岩性		化学风化指数(CIA) 60 70 80 90	0 20	$(K_2O)/$) 15	w(Na ₂ 0 10	D) 5	$w(Fe_2O_3)/w(Fe_3O_2)$	$w_{\rm Cu} / 10^{-6}$	$w_{\rm Au}/10^{-9}$
	试2-1	土壤A层		W War of						589	28
51~50	试2-2	土壤B层	10							226	36
	试2-3	土壤C层	R							257	48
40~32	CH ₂ -1-1	极强风化οπ	\bigotimes	92			4	4.1	71.0		
30	CH ₂ -2-1		\bigotimes	81			7.1		27.7		
7	CH ₂ -3-1	强风化οπ	\bigotimes	67		10	.7 🔀	\times	10.9	450	61
-9	CH ₂ -4-1		\bigotimes	66	1	6.5	XX	XX	8.6		
-35	CH ₂ -5-1	弱风化οπ		55		16.1	\times	XX	3.4		
赣西北	地质大队	未风化οπ		57	18.5				2.0	555	150
迟清华	等,2007	下扬子地台⑸		59		-		1.4	1.1	3.8	0.9

● 江西省地质矿产局赣西北地质大队. 1990. 江西九江-瑞昌地区铁帽型金矿的富集规律及远景预测. 内部资料.

图 3 城门山铜矿石英斑岩化学风化指数(CIA)

οπ—石英斑岩;ξγ—正长花岗岩

Fig. 3 Chemical index of alteration of quartz porphyry in the Chengmenshan copper deposit

 $o\pi$ —Quartz porphyry ; $\xi\gamma$ —Syenogranite

表 1 城门山铜矿含矿斑岩体化学风化作用中组分(wg/%)得失估算

Table 1 Estimates of content changes of ore-bearing porphyry in the process of chemical weathering in the Chengmenshan

copper deposit

组分	IO	IIO	I ₁ (4)	I ₂ (6)	II ₁ (5)	A_1	A_2	A ₃	B_{1}	B_2	B_3	C1	C ₂	C ₃
SiO_2	64.02	71.67	67.65	71.81	69.67	58.75	65.18	60.01	-5.27	1.16	-11.66	-8.2	1.8	-16.3
TiO_2	0.46	0.19	0.76	0.65	0.41	0.66	0.59	0.35	0.20	0.13	0.16	43.5	28.3	84.2
Al_2O_3	15.05	12.43	17.33	16.58	14.43	15.05	15.05	12.43	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	2.40	1.75	2.57	2.22	4.82	2.23	2.02	4.15	-0.17	-0.38	2.40	-7.0	-15.8	137.1
FeO	1.41	0.81	0.22	0.18	0.20	0.19	0.16	0.17	-1.22	-1.25	-0.64	-86.5	-88.7	-79.0
MnO	0.060	0.050	0.006	0.004	0.006	0.005	0.0036	0.005	-0.055	-0.056	-0.045	-91.7	-93.3	-90.0
MgO	1.59	0.74	0.58	0.23	0.20	0.50	0.21	0.17	-1.09	-1.38	-0.57	-68.6	-86.8	-77.0
CaO	3.42	1.34	0.52	0.07	0.03	0.45	0.06	0.026	-2.97	-3.36	-1.31	-86.6	-98.2	-97.8
Na ₂ O	2.76	0.47	0.43	0.40	0.52	0.37	0.36	0.45	-2.39	-2.40	-0.02	-86.6	-87.0	-4.7
K_2O	4.10	7.69	2.91	3.45	5.44	2.53	3.13	4.69	-1.57	-0.97	-3.00	-38.4	-23.7	- 39.1
P_2O_5	0.19	0.05	0.09	0.03	0.04	0.08	0.027	0.034	-0.11	-0.16	-0.02	- 57.9	-84.2	- 31.1
H_2O^+	3.88	1.44	5.95	3.79	3.41	5.17	3.44	2.94	1.29	-0.44	1.50	33.2	-11.3	104.0
CO_2			0.46	0.35	0.30	0.40	0.32	0.26						
LOI	3.88	1.88	5.98	5.07										
总量	99.34	98.63	99.48	99.76	99.48	86.84	90.77	86.14	- 13.36	-9.23	-13.86			

注:1为弱风化花岗闪长斑岩 J₁为花岗闪长斑岩第一风化旋回 J₂为花岗闪长斑岩第二风化旋回 ;II 为弱风化石英斑岩 ;II₁为石英斑岩第一 风化旋回 ;A₁=I×0.8684(风化系数: u(Al₂O₃)_{床风化岩石}/u(Al₂O₃)_{风化岩石}=15.05/17.33=0.8684 ,A₂、A₃ 计算方法同 A₁);A₂=I×0.9077; A₃=II×0.8614 B₁=A₁-I;B₂=A₂-I;B₃=A₃-II C₁=100×B₁/I;C₂=100×B₂/I;C₃=100×B₃/II 活号中为样品数。

Al₂O₃ 在风化作用中增加明显,而地表水中相对于其 他常量元素,Al的含量是最少的,因此可以认为 Al 在风化作用过程中是基本不变的(陈骏等,1997; 2004,顾尚义等2003)。这样,风化作用过程中常量 元素化学成分的估算可以按如下步骤进行(见表1)。

(1)重新计算风化后的各组分含量[*w*(B),下 同],将所有的组分归成百分之百,假定 Al₂O₃ 含量 不变,在风化作用过程中,由于 100 g 原生岩石在质 量上减少了,因此 Al₂O₃ 含量由 15.05% 增加到 17.33%(见表1中I和I₁),因此整个岩石减少的比 率为 15.05/17.33=0.8684(风化参数),也就是 100 g 变成了 86.84 g,在这 86.84 g 中各组分的含量等 于该风化系数与风化产物(I₁)中的组分数据之积,结 果为 A₁, A₂, A₃ 同理可得(见表 1)。

(2)由 A₁ 减去未风化岩石中的数据(I)相应所得的值为各组分在风化作用过程中减少或增加的量(B₁),同理得 B₂、B₃。

(3)由 B₁中的数值除以未风化岩石中相应的数 值(I)乘以 100,则为各元素减少或增加的百分数 (C₁),同理得 C₂、C₃。

表1定量地显示了常量元素在强风化作用过程 中的地球化学行为: (1)岩体(长石)中大量碱金属、碱土金属元素 被淋失,Ca 淋失 86.6%~98.2%,Mg 淋失了 68.6%~86.8%,Na 淋失 4.7%~87.0%,K 淋失 23.7%~39.1%。另外,从花岗闪长斑岩的碱金属 (除K外)碱土金属元素的淋失量分析,第一风化旋 回淋失量(C₂)大于第二风化旋回淋失量(C₁)。

(2) MnO、FeO、P₂O₅ 显著减少。

(3)Si、Al、Ti、Fe³⁺残留下来。

尽管含矿斑岩体(花岗闪长斑岩、石英斑岩)由 于富含硅而难以化学风化,但在九瑞地区炎热、湿 润、多雨的气候条件下,在长期的水-岩-生物化学作 用下,仍可导致岩石化学、矿物成分、岩石组构和结 构变化,发生元素含量的明显改变。从上述计算结 果来看,含矿斑岩体的化学风化作用首先表现为铝 硅酸盐矿物的水解、水化作用,在硫化物风化作用过 程中产生硫酸(地表硫酸铜随处可见),形成酸性环 境(矿区废水坑 pH 值可达 4 左右),并首先发生碱金 属(K⁺、Na⁺)和碱土金属(Ca²⁺、Mg²⁺)离子的水解 淋失,由于离子半径的差异,Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺(淋失 量平均约 80%)的水解和淋失要比 K⁺(淋失量平均 约 30%)容易得多,在低价金属离子水解淋失的同 时,伴生了铝硅酸盐矿物(如长石、云母、角闪石等)

[●] 江西省地质矿产局赣西北地质大队,1990. 江西九江-瑞昌地区铁帽型金矿的富集规律及远景预测. 内部资料.

的脱硅作用发生(SiO₂ 淋失量 – 1.8% ~ 16.3%) 吴 宏伟等,1999) 淋失量是本次计算的结果,和吴宏伟 得出的结论一致),使长石、云母、角闪石转化成伊利 石、蒙脱石、绿泥石等粘土矿物;在近地表氧化带岩 石中 Fe²⁺发生水解并迅速氧化成 Fe³⁺的氧化物和 氢氧化物,并由于其化学惰性而残留在风化壳的表 层,形成褐红色的氧化带;TiO₂则由于其他元素的相 对淋失而在风化层中含量大幅增加(富集量 28.3% ~84.2%)。

3.3 未风化含矿岩体中 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf 等元素 特征

为了恢复原岩(未风化含矿岩体)中 Ti、Nb、Ta、 Zr、Hf 等元素的含量 利用表 1 中所估算的花岗闪长 斑岩在第一风化旋回中 TiO₂ 增加了 28.3% ,第二风 化旋回中增加了 43.5% ,石英斑岩在第一风化旋回 中 TiO₂ 增加了 84.2%的信息 ,另由于 Nb、Ta、Zr、Hf 等元素与 Ti 的地球化学性质十分相似 ,在自然界各 种作用中往往形成完全的异价类质同像代换(陈骏 等 2004),为此,Nb、Ta、Zr、Hf等元素在原岩中含量 可参照 Ti 元素增加的比例来估算(表 2)。

由表2可见:

(1)风化的含矿花岗闪长斑岩、石英斑岩与正常 的花岗闪长斑岩、正长花岗岩(相当于石英斑岩)相 比 具有低 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf 的特征,尤其是含矿石英 斑岩 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf 等元素呈现明显偏低的特征。

(2)由于 Nb 与 Ta、Zr 和 Hf 元素的地球化学性 质十分相似,两者密切共生,即使在强烈的风化过程 中,花岗闪长斑岩中 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值基本保持 不变(Nb/Ta 为 11.0 ~ 14.4,Zr/Hf 为 25.6 ~ 29.7),石英斑岩中 Nb/Ta=10.4,Zr/Hf=27.1。

由此可见,城门山铜矿含矿中酸性小岩体具低 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf等元素丰度及较稳定的 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值的特征,可作为评价含矿中酸性小岩体重 要的地球化学指标之一。

表 2 城门山铜矿风化及未风化含矿斑岩体中 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf 等元素的丰度特征(wg/10⁻⁶)

Table 2 Element abundance characteristics of Ti , Nb , Ta , Zr , Hf in the weathered and fresh ore-bearing porphyry in the Chengmenshan copper deposit $w_{\rm B}/10^{-6}$)

网化按同五岩树五廿日日		风化岩石/未风化岩石								
风化旋凹及石性及样晶亏	Ti	Nb	Ta	Nb/Ta*	Zr	Hf	Zr/Hf*			
第二风化旋回花岗闪长斑岩		1 50	No 1							
CH-2-1	3729/2599	15.8/11.0	1.09/0.76	14.5	178/124	6.34/4.42	28.1			
CH-3-1	3437/2395	15.4/10.7	1.13/0.79	13.6	160/111	6.41/4.47	25.0			
CH-4-1	3930/2739	17.0/11.8	1.15/0.80	14.8	172/120	6.85/4.77	25.1			
Ch-5-1	3556/2478	13.7/9.5	0.93/0.65	14.7	155/108	6.38/4.46	24.3			
平均	3663/2553	15.5/10.8	1.01/0.75	14.4	166/116	6.50/4.53	25.6			
第一风化旋回花岗闪长斑岩										
CH-6-1	2939/2291	7.2/5.6	0.52/0.41	13.8	147/115	5.13/4.00	28.7			
CH-7-1	2850/2221	6.3/4.9	1.02/0.80	6.1	166/129	5.69/4.43	29.2			
CH-8-1	3139/2447	9.3/7.2	0.86/0.67	10.8	198/154	6.22/4.85	31.8			
CH-9-1	2701/2105	6.5/5.1	0.61/0.48	10.7	159/124	5.40/4.21	29.4			
CH-10-1	2998/2337	12.4/9.7	1.08/0.84	11.5	206/161	7.36/5.14	28.0			
Ch-11-1	2686/2094	5.6/4.4	0.44/0.34	12.7	158/123	5.06/3.94	31.2			
平均	2885/2249	7.9/6.2	0.76/0.59	11.0	172/134	5.81/4.53	29.7			
花岗闪长斑岩●	2775	11.4	0.86	3.3	160	4.9	32.7			
第一风化旋回石英斑岩										
CH2-1-1	3078/1675	7.8/4.2	0.61/0.33	12.8	143/78	4.74/2.57	30.2			
CH2-2-1	1611/875	3.3/1.8	0.36/0.20	9.2	130/71	4.76/2.58	27.3			
CH2-3-1	1656/899	3.6/2.0	0.34/0.18	10.6	127/69	4.73/2.56	26.8			
CH2-4-1	1502/815	5.4/2.9	0.65/0.35	8.3	133/72	4.43/2.40	30.0			
CH2-5-1	1220/662	3.8/2.1	0.34/0.18	11.2	102/55	4.75/2.58	27.2			
平均	1813/984	4.8/2.6	0.46/0.25	10.4	127/69	4.68/2.54	27.1			
正长花岗岩●	980.00	30.00	3.20	9.40	165.00	7.20	22.9			
花岗闪长斑岩第一风化旋回 T	iO ₂ 增加了 28.3%	。,第二风化旋	回 TiO ₂ 增加了,	43.5% ,石英斑	岩第一风化旋	回 TiO ₂ 增加了	84.2%(表1)			

化闭闪式斑石第一风化旋回 1102 增加 」 28.3% ,第二风化旋回 1102 增加 」 43.3% ,但英斑石第一风化旋回 1102 增加 」 84.2%(表 1) * 单位为 1。

① 江西省地质矿产局赣西北地质大队. 1990. 江西九江-瑞昌地区铁帽型金矿的富集规律及远景预测. 内部资料.

3.4 表层含矿斑岩体中稀土元素(REE)的地球化 学行为

城门山铜矿长期处于潮湿多氧、植被发育及有 机质来源丰富的景观条件下,含矿花岗闪长斑岩和 石英斑岩极易风化,但由于岩体矿物构成的差异,在 相同的景观下,花岗闪长斑岩和石英斑岩中的稀土 元素活动和分异有别:

(1)与 Cu 成矿关系密切的花岗闪长斑岩,斑晶 主要为斜长石、石英、黑云母和角闪石,基质主要由 石英、钾长石、斜长石组成,副矿物以磁铁矿为主,少 量磷灰石、锆石、金红石(黄恩邦等,1990;罗建安等, 2007)。在酸性条件下,含稀土元素的造岩矿物(长 石、黑云母等)大量分解,稀土元素从矿物中活化,可 呈含水络合物的形式迁移(刘英俊,1993),在风化壳 的表层贫化(见表3、图4),CIA为97的极强风化表 层 Σ REE 仅为 78.85 × 10⁻⁶,溶有稀土络合物的地 表水溶液随着不断往下渗滤在风化壳的下部富集 (Σ REE 可达 141.20 × 10⁻⁶)。

(2)与 Mo 成矿关系密切的石英斑岩,斑晶主要 由石英、钾长石组成,基质具微粒-霏细结构,石英呈 微粒状,副矿物主要为磷灰石、锆石、金红石(黄恩 邦,1990;罗建安等,2007)。石英斑岩中稀土元素以 类质同像形式赋存于副矿物中(刘英俊,1993),而磷 灰石、锆石、金红石等矿物抗风化能力强,常常在风 化壳的残积层中保存下来。因此,在石英斑岩风化 壳的极强风化表层(CIA=92)中稀土元素明显富集, SREE 为 193.86×10⁻⁶,是未风化石英斑岩(SREE =77.69×10⁻⁶)的2倍多(见表4、图5)。

(3)含矿花岗闪长斑岩、石英斑岩在风化作用 过程中稀土元素总量(<u>SREE</u>)有较大的变化,但是稀

表 3 城门山铜矿风化花岗闪长斑岩稀土元素地球化学特征

Table 3	Geochemical features	of REE in the weat	hering process of grand	odiorite porphyry in the	Chengmenshan copper deposit
---------	----------------------	--------------------	-------------------------	--------------------------	-----------------------------

风化旋回及样号		CIA	δEu*	$\Sigma Ce/\SigmaY^*$	ΣREE/10 ⁻⁶
第一风化旋回	CH-6-1	97	0.94	3.99	78.85
	CH-7-1	79	0.75	5.21	142.42
	CH-8-1	79	0.79	4.50	97.79
	CH-9-1	81	0.84	6.50	110.97
	CH-10-1	81	0.83	7.70	141.42
	CH-11-1	73	0.87	3.94	141.20
弱风化花岗闪长斑岩❶		559	0.81	6.00	104.98







Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of granodiorite porphyry in the Chengmenshan copper deposit



图 5 城门山铜矿石英斑岩稀土元素配分模式 Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of quartz porphyry in the Chengmenshan copper deposit

Table 4 Geochemical leat	ures of REE III the wo	eathering process of	quartz porphyry	In the Chengmensha	an copper deposit
风化旋回及样	号	CIA	δEu*	$\Sigma Ce/\Sigma Y^*$	$\Sigma \text{REE}/10^{-6}$
第一风化旋回	CH2-1-1	92	0.62	4.75	193.86
	CH2-2-1	81	0.62	5.06	139.33
	CH2-3-1	67	0.67	4.38	96.82
	CH2-4-1	66	0.87	4.45	94.58
	CH2-5-1	55	0.83	3.20	64.25
弱风化石英斑岩❶		57	0.73	3.30	77.69

表 4 城门山铜矿风化石英斑岩稀土元素地球化学特征

* 单位为 1。

土元素配分模式、 $\Sigma Ce/\Sigma Y$ 、 δEu 等特征基本保持不 变 稀土元素配分模式为较缓右倾型,无明显的铕异 常(花岗闪长斑岩 $\delta Eu = 0.81$ 、石英斑岩 $\delta Eu = 0.73$), $\Sigma Ce/\Sigma Y$:花岗闪长斑岩为 $4 \sim 8$,石英斑岩为 $3 \sim 5$ 。

综合来看,这些稀土元素特征亦可作为评价含 矿中酸性岩体主要的地球化学指标之一。

4 结 论

对江西城门山铜矿含矿斑岩体风化剖面地球化 学特征的研究表明,风化剖面具有 2 个明显的风化 作用旋回,在风化作用过程中主要表现为铝硅酸盐 矿物的水解、水化作用,含矿斑岩体中 Ca、Mg、Na、K 等元素发生大量淋失,而 Si、Al、Ti、Fe 则残留下来。 通过对比风化和未风化斑岩体中稳定元素的地球化 学特征,认为城门山铜矿含矿中酸性小岩体具低 Ti、 Nb、Ta、Zr、Hf 等元素丰度及较稳定的 Nb/Ta 和 Zr/ Hf 比值,并具有低的稀土元素含量(Σ REE = 77.69 ×10⁻⁶~104×10⁻⁶),稀土元素配分模式为较缓右 倾,无明显的铕异常(δ Eu>0.73), Σ Ce/ Σ Y 比值为 3 ~8。这些特征可作为评价含矿中酸性岩体主要的 地球化学指标之一。

志 谢 笔者在城门山工作期间得到了赣西北 地质大队和江西铜业集团城门山铜矿的大力帮助, 在此一并表示衷心的感谢。

References

Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Middle and lower reaches of Yangtze River[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 379p(in Chinese).

- Chen J , Ji J F , Chou G , Lu H H and Zhu H B. 1997. Geochemical characteristics of chemical weathering intensity of loess and paleosol from the Luochuan section , Shaanxi Province J J. Science in China (Series D), 27(6):531-536 in Chinese).
- Chen J and Wang H N. 2004. Geochemistry [M]. Beijing : Sci. Press. 280-282(in Chinese).
- Chi Q H and Yan M C. 1998. Applied geochemistry element abundances data manua[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 148p(in Chinese).
- Geuveia M , Prudgncio M and Figueiredo M. 1993. Behavior of REE and other trace and major elements during weathering of granitic rocks , Evora , Portuga[J]. Chem. Geol. , 107:293.
- Gu S Y , Wan G Q and Mao J Q. 2003. Chemical weathering for dacite in Pingxiang , Guangx []]. Geochimica , 32(4): 328-334(in Chinese with English abstract).
- Huang C M and Wang C S. 2002. Geochemical features of rare earth elements in process of rock weathering and soil formation[J]. Chinese Rare Earths, 23(5):46-49(in Chinese with English abstract).
- Huang E B , Zhang N T and Luo Z S. 1990. The genesis of the Chengmenshan and Wushan copper deposits J]. Mineral Deposits ,9(4): 291-300(in Chinese with English abstract).
- Kurtz A C , Derry L A and Chadwick O A. 2002. Refractory element mobility in volcanic soils J J. Geol. , 28:683-685.
- Li W Q , Gu L X and Tang J. 2006. Behavior of rare earth elements during weathering of sulphide at Wushan copper Mine , Jiangxi Province , Ching J J. J. Chinese Rare Earth Society , 24(3): 350-356(in Chinese with English abstract).
- Liu Y J. 1993. Element geochemistry [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 281 f(in Chinese).
- Luo J A. 2003. Research on hypergene change and secondary enrichment in Chengmenshan copper deposit J]. Jiangxi Nonferrous Metals , 17(4):11-13(in Chinese with English abstract).
- Luo J A. 2006. Occurrence and distribution on the gold and silver associated Chengmenshan copper deposit J J. Nonferrous Metals (Mining Section), 58(5):10-11(in Chinese with English abstract).
- Luo J A and Yang G C. 2007. Geological features and genesis of the Chengmenshan copper deposit[J]. Mining Technology , 21(3): 284-286(in Chinese with English abstract).

① 江西省地质矿产局赣西北地质大队. 1990. 江西九江-瑞昌地区铁帽型金矿的富集规律及远景预测. 内部资料.

- Ma J L , Wei G J , Xu Y G , Long W G and Sun W D. 2007. Mobilization and redistribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island , South China[J]. Geochim. Cosmochim. Acta , 71:3223-3237.
- Ma Y J , Huo R K and Xu Z F. 2004. REE behavior and influence factors during chemical weathering J]. Advance in Earth Sciences , 19 (1):87-94 (in Chinese with English abstract).
- Ma Z D and Shan G X. 1997. Geological geochemical studies of the formation mechanism of " integral whole of multiplaces " large and superlarge copper deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River J. Mineral Deposits, 16(3): 225-234(in Chinese with English abstract).
- Meng L Y. 1996. Metallogenic model of copper deposit of the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Science in China Series D), 26 (1):21-25 (in Chinese).
- Nesbitt H W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite J]. Nature , 279:206-210.
- Nesbitt H W and Yong G M. 1982. Early proterogic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 299:715-717.
- Nesbitt H W and Markovics G. 1997. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. J J. Geochim. Cosmochim. Acta, 61: 1653-1670.
- Pan C J , Xi C Z and Liu W. 2007. The study of enrichment and mineralization laws and prospecting direction at Chengmenshan copper-molybdenum deposit in Jiangxi Province J]. Mining and Metallurgical Engineering, 27(6):15-18(in Chinese with English abstract).
- Song Z L and Huang B. 2002. A discussion on quantitatively determining chemical element mobility of rock-weathering process. J J. Geotectonica et Metallogenia, 26(3): 300-305(in Chinese with English abstract).
- Tan H Y and Xi C Z. 2009. Geological features and genesis of the Chengmenshan copper-molybdenum deposits in Jiangxi Province
 [J]. West-China Exploration Engineering , 6:101-105(in Chinese with English abstract).
- Wu H W, Shang Y J, Qu Y X and Banna P M. 1999. Chemical weathering indices , classification , and zoning of weathered granitic rock in Hong Kong J J. J. Engineering Geol. , 7(2):125-134(in Chinese with English abstract).
- Wu L S and Zou X Q. 1997. Re-Os isotopic age study of the Chengmenshan copper deposit, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 16 (4):376-381(in Chinese with English abstract).
- Wu L S and Yu Z Z , 1999. Two mesozoic tectonic events in Jiurui area , Jiangxi Province and their controlling role in rock forming and ore forming activities J]. Mineral Deposits , 18(2): 129-137(in Chinese with English abstract).
- Wu X Y, Luo J and Wei Y Y. 2004. Research of rock weathering and chemical composition of rock J]. Geol. & Prospect. , 40(4):85-88(in Chinese with English abstract).
- Zhao JH, Wang D , Fan BS, LuHL , Zhang XY, QuWJ , Wen LJ and Li D P. 2004. Geochemical characteristics of the loess deposit

at Yan 'an and its implication to changes of East Asia summer monsoon during the past 130 ka[J]. Geochimica , 33(5): 495-500(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌.1992. 长江中下游铜铁成矿带[M].北京: 地质出版社.379页.
- 陈 骏,季俊峰,仇 刚,鹿化煌,朱洪兵.1997.陕西洛川黄土化学 风化程度的地球化学研究 J].中国科学(D辑),27(6):531-536.
- 陈 骏,王鹤年. 2004. 地球化学[M]. 北京:科学出版社. 280-282.
- 迟清华, 鄢明才. 1998. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社. 148页.
- 顾尚义,万国江,毛健全. 2003. 广西凭祥英安岩的化学风化作用研 究[J]. 地球化学,32(4):328-334.
- 黄成敏,王成善.2002.风化成土过程中稀土元素地球化学特征[J]. 稀土,23(5):46-49.
- 黄恩邦,张乃堂,罗钊生.1990.城门山、武山铜矿床成因[J].矿床 地质,4(9):291-300.

李伟强,顾连兴,唐 俊.2006. 江西武山块状硫化物矿石表生风化过程中稀土元素地球化学行为[J].中国稀土学报,24(3):350-356.

刘英俊. 1993. 元素地球化学导论[M]. 北京:地质出版社. 281页.

- 罗建安. 2003. 城门山铜矿床表生变化及次生富集作用的研究[J]. 江西有色金属,17(4):11-13.
- 罗建安. 2006. 浅谈城门山铜矿伴生金银的赋存状态及其分布规律 [J]. 有色金属(矿山部分),58(5):10-11.
- 罗建安,杨国才.2007.城门山铜矿地质特征及成因分析[J].矿产与 地质,21(3):284-286.
- 马英军,霍润科,徐志方.2004.化学风化作用中的稀土元素行为及 其影响因素J].地球科学进展,19(1):87-94.
- 马振东,单光祥.1997.长江中下游地区多位一体大型、特大型铜矿 形成机制的地质、地球化学研究[].矿床地质,16(3):225-234.
- 孟良义. 1996. 长江中、下游铜矿床的成矿模式[J]. 中国科学(D 辑), 26(1):21-25.
- 潘灿军,息朝庄,刘 伟. 2007. 江西城门山铜钼矿床矿化富集规律 及找矿方向研究[J]. 矿业工程,27(6):15-18.
- 宋照亮,彭 渤. 2002. 关于岩石风化过程中化学组分迁移的定量研 究方法[]. 大地构造与成矿学, 26(3): 300-305.
- 谭辉跃,息朝庄. 2009. 江西城门山铜钼矿床特征与成因研究 J]. 西 部探矿工程,6:101-105.
- 吴良士, 邹晓秋. 1997. 江西城门山铜矿铼-锇同位素年龄研究[J]. 矿床地质, 4(16): 376-381.
- 吴良士,余忠珍.1999. 江西九瑞地区中生代两次构造事件及其对成 岩成矿的控制[J]. 矿床地质,18(2):129-137.
- 吴宏伟,尚彦军,曲永新,Bann P M. 1999. 香港花岗岩风化分级化 学指标体系与风化壳分带[J]. 工程地质学报,7(2):125-134.
- 巫锡勇,罗健,魏有仪. 2004. 岩石风化与岩石化学成分的变化研 究[J]. 地质与勘探,40(4):85-88.
- 赵锦慧,王 丹,樊宝生,鹿化煜,张小曳,屈文军,汶玲娟,李东 平. 2004. 延安地区黄土堆积的地球化学特征与最近 13 万年东 亚夏季风气候的波动[J].地球化学,33(5):495-500.