

文章编号:1000-4734(2012)01-0074-09

云南金平铜厂斑岩铜钼矿区岩体锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值及其对成矿的指示意义

胥磊落^{1,2}, 毕献武^{1*}, 陈佑纬¹, 齐有强¹

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:对金沙江—红河成矿带南段铜厂斑岩铜钼矿区含矿的石英正长斑岩和无矿的细粒正长岩开展了锆石的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值、 δCe 及 δEu 值的研究, 结果显示含矿的 4 个石英正长斑岩样品的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值变化范围为 208 ~ 336, 平均比值为 265, δCe 值变化范围为 17.6 ~ 60.6, 平均值为 33.8, δEu 值变化范围为 0.592 ~ 0.628, 平均值为 0.611, 不含矿的 1 个细粒正长岩样品的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值为 61, δCe 值为 8.50, δEu 值为 0.424, 含矿的石英正长斑岩的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值、 δCe 及 δEu 值均明显高于不含矿的细粒正长岩, 反映了与成矿有关的岩浆具有相对高的氧化状态。对比金沙江—红河成矿带北段的玉龙斑岩铜钼矿带和中段的马厂箐斑岩铜钼矿的含矿与无矿岩体, 它们的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值与南段铜厂斑岩铜钼矿含矿及无矿岩体具有基本类似的特征, 含矿岩体的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值通常大于 200, 而不含矿岩体的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值基本上都小于 120。这种差异对进一步认识金沙江—红河成矿带斑岩铜钼矿的岩浆氧逸度特征具有重要的理论意义, 对斑岩铜钼矿的找矿工作具有一定的指导意义。

关键词:金沙江—红河成矿带; 铜厂斑岩铜钼矿; 锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值

中图分类号: P597; P611; P612 **文献标识码:** A

作者简介:胥磊落, 男, 1982 年生, 博士研究生, 矿床地球化学专业。Email: leiluoxu@sina.com

岩浆氧逸度是制约铜、金成矿的重要因素之一, 铜、金为亲硫元素, 岩浆结晶分异过程中如果 S^{2-} 大量存在就会导致铜、金硫化物过饱和而过早沉淀, 不利于残余岩浆中铜、金的富集和晚阶段含铜、金岩浆流体的形成, 因而不利于铜、金矿床的形成。高氧逸度条件下, 岩浆中的硫绝大多数以 SO_4^{2-} 和 SO_2 形式溶解在硅酸盐熔体中, 能形成硫化物的 S^{2-} 含量很低, 硫化物难以达到饱和, 从而利于铜、金在残余岩浆中逐渐富集并最终分配进入岩浆流体相^[1-7]。

大量的研究表明产在弧环境的斑岩铜金矿的含矿岩浆是一种氧化型花岗质岩浆^[8-17]。由于大陆环境产出的斑岩铜金矿在国外并不十分发育, 因而对这类斑岩铜金矿的岩浆氧逸度的研究相对

还比较薄弱。金沙江—红河斑岩铜钼金矿带是一个具有代表性的陆内环境产出的斑岩铜钼金矿带, 矿带内产出了一系列规模不等的与喜山期富碱斑岩有关的斑岩铜钼金矿床(如: 玉龙铜钼矿、马厂箐铜钼矿及姚安金矿等; 图 1)。前人利用锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值及黑云母的 $Fe^{2+}-Fe^{3+}-Mg^{2+}$ 三端元成分图解对金沙江—红河成矿带北段的玉龙铜钼矿带、中段的马厂箐铜钼矿和姚安金矿的含矿及无矿岩体的岩浆氧逸度开展了研究工作^[18-22], 结果显示含矿岩浆的氧逸度要明显高于不含矿岩浆, 与金成矿有关的岩浆氧逸度要稍高于与铜成矿有关的岩浆的氧逸度, 但截止目前尚未有关该带南段斑岩铜钼矿岩浆氧逸度特征的报道。由于矿带南北段成矿特征存在差异, 因此系统研究该带南段斑岩铜钼矿岩浆氧逸度特征对认识该带斑岩铜钼矿成矿特征和机制是非常必要的。本研究选取铜厂斑岩铜钼矿开展岩浆的氧逸度研究工作, 研究工作对进一步认识金沙江—红河成矿带斑岩铜钼矿的形成机制具有重要意义。

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: 中国科学院方向项目(编号: KZCX2-YW-Q04-01); 国家自然科学基金项目(批准号: 40873037); 中国科学院方向项目(编号: KZCX2-YW-Q04-01); 国家基金重点项目(批准号: 41130423); 国家 973 项目(编号: 2009CB421005)

* 通讯作者, Email: bixianwu@vip.gyig.ac.cn

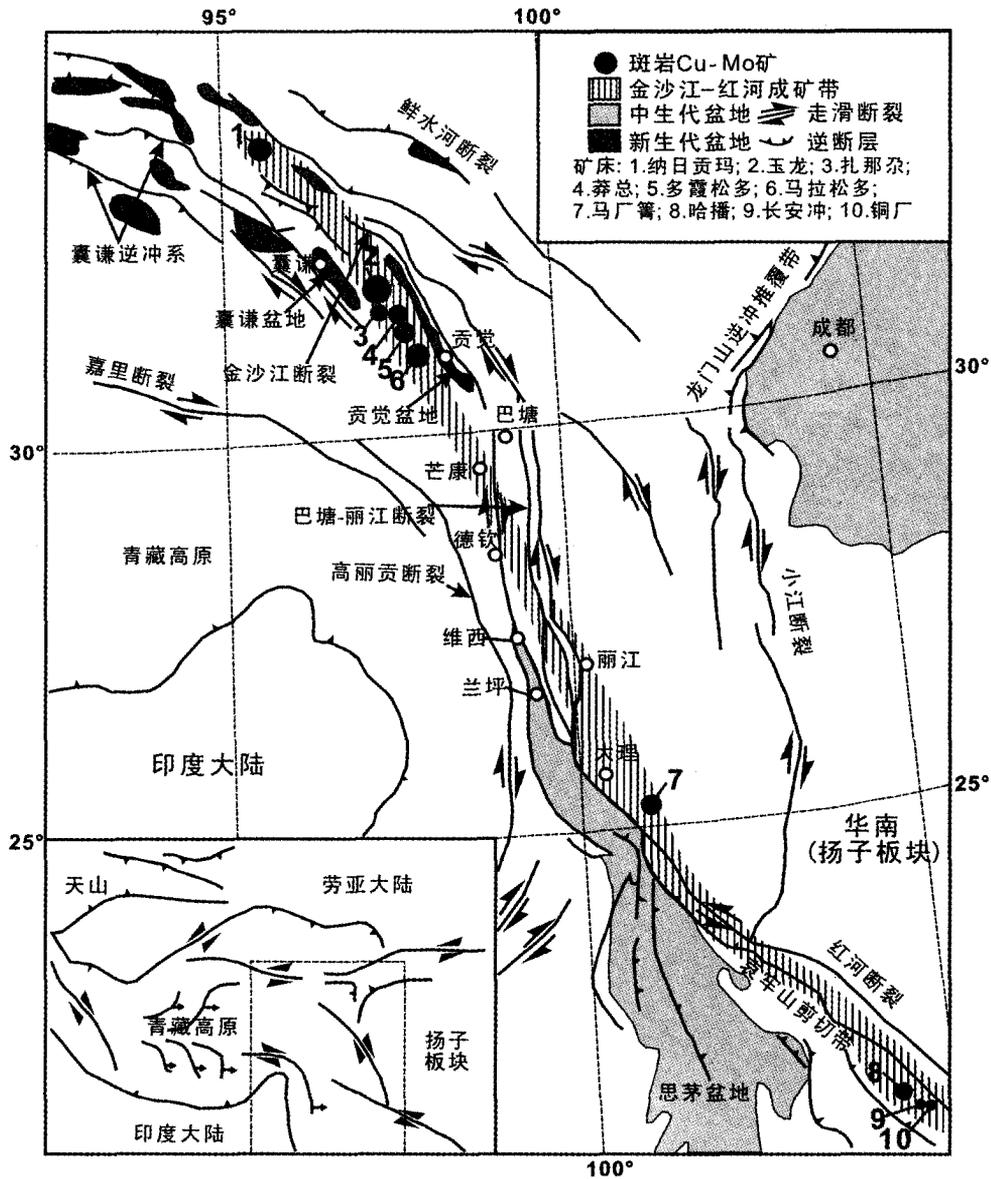


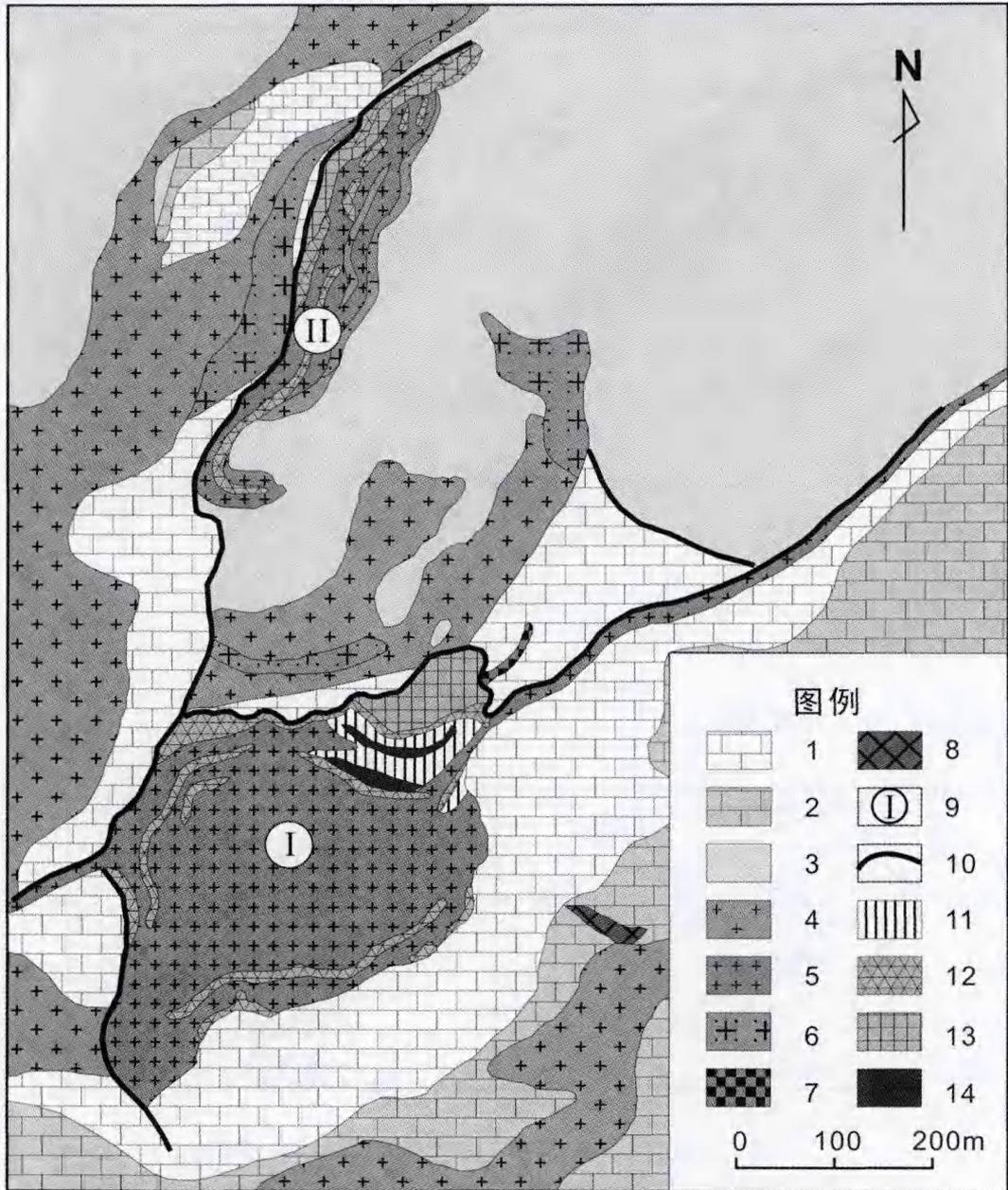
图1 金沙江—红河成矿带地质简图(据 Wang 等^[25]和 Hou 等^[26]修改)

Fig. 1. Simplified geological map showing the Cenozoic tectonic framework and the distribution of porphyry Cu-Mo deposits in the Jinshajiang-Red River metallogenic belt.

1 地质背景

铜厂斑岩铜钼矿床位于云南省金平县铜厂乡,大地构造位置上位于金沙江—红河成矿带的南段(图1),处于哀牢山逆冲深大断裂与藤条河断裂所夹持的金平微地块内。矿区内出露的地层主要有中奥陶统长石砂岩和中志留统含灰质白云岩。矿区内出露的岩浆岩为一套复式岩体,主要有早阶段侵位的细粒正长岩,中阶段侵位的石英正长斑岩,晚阶段侵位的正长斑岩岩脉和辉绿岩岩脉等。细粒正长岩为灰白色,块状构造,细粒等

粒结构,矿物成分以正长石、斜长石为主,含少量石英、黑云母与黄铁矿。赋矿岩体为石英正长斑岩,肉红色,块状构造,斑状结构,斑晶由正长石、斜长石、石英、角闪石及黑云母组成,基质为显晶质,成分与斑晶类似,副矿物主要为锆石、磷灰石和榍石。石英正长斑岩呈岩株状主要侵入于中志留统含灰质白云岩内,自岩体内部向外,依次形成具钾硅化和绢云母化蚀变的内蚀变带、具透辉石和镁橄榄石化蚀变的夕卡岩带和大理岩带,钼矿体主要赋存在内蚀变带内,铜矿体主要赋存在夕卡岩带内(图2)。赋矿岩体的锆石 U-Pb 年龄



1-S₂ 含灰质白云大理岩; 2-S₂ 含灰质白云岩; 3-O₂ 长石砂岩; 4-细粒正长岩; 5-石英正长斑岩; 6-正长斑岩; 7-辉绿岩; 8-辉绿辉长岩; 9-石英正长斑岩岩体编号; 10-断裂; 11-内蚀变带; 12-夕卡岩带; 13-铜矿体; 14-钼矿体

图2 铜厂斑岩铜钼矿地质简图(据云南省地质局第十五地质队内部资料修改)

Fig. 2. Simplified geological map of the Tongchang porphyry Cu-Mo deposit.

(35.1 ± 0.3 Ma, 黄波等^[27])和辉钼矿的 Re-Os 年龄(34.38 ± 0.5 Ma, 王登红等^[28])显示成岩和成矿具有密切的时间继承关系。

2 样品选取与分析

选取铜厂复式岩体内与铜钼成矿关系密切的4个比较新鲜的石英正长斑岩样品(TC806-1、TC814、TC815 和 TC818)以及早阶段侵位的不含

矿的1个细粒正长岩样品(TC806-2)无污染地粉碎至200目。全岩微量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,全岩微量元素分析采用四级杆型电感耦合等离子质谱(Q-ICP-MS),仪器型号为PerkinElmer ELAN DRC-e。微量元素分析方法参见文献[29],测试精度优于10%。

用于微量元素分析的锆石单矿物均从岩石样

品(石英正长斑岩:TC806-1、TC814、TC815 和 TC818;细粒正长岩:TC806-2)中分离出来。锆石分离出来后,在双目镜下选取颗粒大、晶形好、裂隙少及透明度高的锆石颗粒作为测试对象并置于环氧树脂上,磨去一半的厚度,高度剖光,进行透射光和反射光的拍照。喷金后在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成 CL 图像照相。最后选取锆石边部震荡环带较发育且无裂隙的位置进行激光剥蚀。

锆石微量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用配有 Geolas200M 激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 四极杆等离子质谱(Q-ICP-MS)测定,激光剥蚀束斑直径为 44 μm,激光剥蚀时间控制在 40 s,激光剥蚀深度控制在 20 ~ 40 μm,采用 NIST610 作为锆石微量测定的外部标样,具体分析步骤见文献[30]。

3 结果与讨论

3.1 微量元素特征

表 1 给出了铜厂岩体全岩和锆石的微量元素分析结果,每个样品锆石的微量元素分析点数均在 20 个以上。锆石和全岩的稀土元素分别进行了球粒陨石标准化投图(图 3a, b)。

从 Th/U 比值来看(表 1),2 种岩性的锆石均为典型的岩浆锆石^[31-33](0.1 < Th/U < 1),细粒正长岩锆石低于石英正长斑岩锆石的 Th/U 比值。在稀土元素配分模式图上(图 3a),所有样品的锆

石也均显示典型岩浆锆石的稀土配分模式,即:轻稀土亏损、重稀土逐步富集、明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常等特征。锆石中 Ce 正异常是在相对氧化的环境下 Ce⁴⁺ 较 Ce³⁺ 优先进入锆石晶格的结果。还原环境下 Eu²⁺ 从 REE 整体分离会造成锆石中 Eu 出现负异常。细粒正长岩中锆石的 Ce 正异常和 Eu 负异常程度要明显低于石英正长斑岩中锆石的 Ce 正异常和高于 Eu 负异常程度,反映了石英正长斑岩较细粒正长岩具有相对高的氧化状态。细粒正长岩样品中锆石稀土元素的含量较高(ΣREE 为 908 × 10⁻⁶);石英正长斑岩样品中锆石的稀土元素含量较细粒正长岩样品中锆石低且变化不大(ΣREE 为 638 × 10⁻⁶ ~ 755 × 10⁻⁶,平均 696 × 10⁻⁶);石英正长斑岩中锆石轻重稀土元素的分馏指数(LREE/HREE 为 0.09 ~ 0.11,平均 0.10)要高于细粒正长岩中锆石轻重稀土元素的分馏指数(LREE/HREE 为 0.05),这与全岩的轻重稀土元素的分馏指数特征相一致(石英正长斑岩的 LREE/HREE 为 23.8 ~ 25.3,平均 24.1;细粒正长岩的 LREE/HREE 为 15.2),反映了锆石对岩浆的稀土元素组成具有一定的继承性。

在全岩稀土元素配分模式图上(图 3b),2 种岩性的稀土配分曲线变化特征和变化趋势基本一致,均显示轻稀土富集,轻重稀土元素分馏明显及弱的 Eu 负异常,反映了具有同源岩浆演化的特征。石英正长斑岩的稀土元素含量明显高于细粒正长岩的稀土元素含量 1 个数量级。

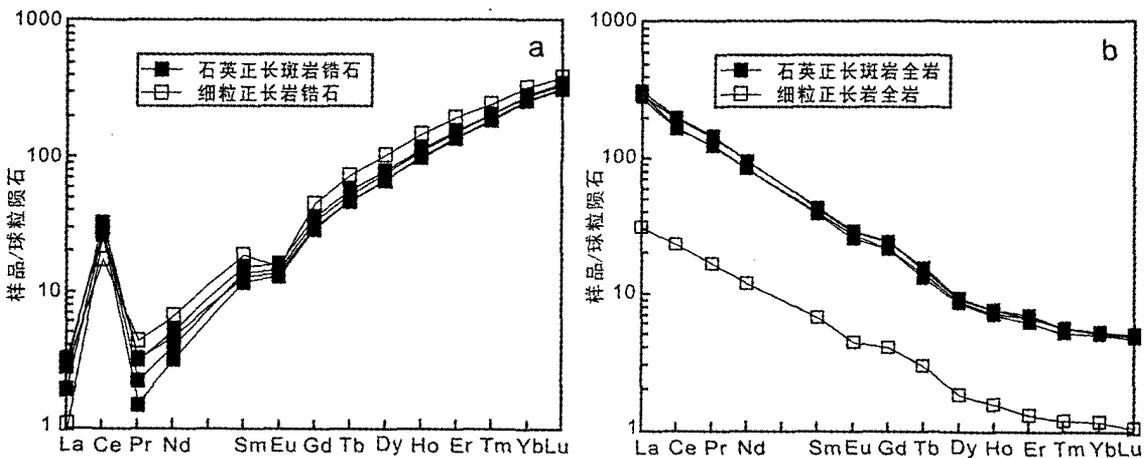


图 3 铜厂斑岩铜钼矿岩体锆石(a)和全岩(b)稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (球粒陨石标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3. Zircon (a) and whole-rock (b) chondrite-normalized REE distribution patterns of the Tongchang intrusions.

表1 铜厂岩体全岩和锆石微量元素的分析结果 ($w_B/10^{-6}$) 及参数Table 1. Zircon and whole-rock trace-element analytical results ($w_B/10^{-6}$) and parameters of the Tongchang intrusions

样品号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	
TC806-1	锆石 (n=24)	0.220	46.4	0.160	2.15	4.02	1.74	18.2	6.17	67.7	25.1	113	26.4	
	全岩	67.0	102	12.0	39.7	6.13	1.61	4.41	0.496	2.17	0.399	1.02	0.133	
TC814	石英 正长斑岩	锆石 (n=30)	0.970	63.8	0.440	4.20	5.85	2.32	24.6	7.99	85.2	31.0	136	30.3
	全岩	70.0	120	13.7	45.5	6.72	1.71	5.07	0.585	2.37	0.440	1.18	0.145	
TC815	石英 正长斑岩	锆石 (n=30)	0.570	53.7	0.280	3.04	5.03	2.07	21.8	7.35	79.9	29.6	133	30.3
	全岩	74.6	125	14.1	45.6	6.54	1.65	4.98	0.561	2.32	0.432	1.12	0.145	
TC818	石英 正长斑岩	锆石 (n=32)	1.12	51.4	0.460	3.74	4.60	1.93	19.2	6.44	69.7	25.8	116	26.7
	全岩	71.6	103	11.9	39.3	5.99	1.50	4.39	0.525	2.25	0.411	1.11	0.145	
TC806-2	细粒 正长岩	锆石 (n=27)	0.920	27.2	0.670	5.90	7.71	2.22	33.2	11.3	123	44.0	186	38.3
	全岩	7.36	14.4	1.58	5.56	1.04	0.258	0.829	0.112	0.476	0.090	0.220	0.031	
样品号		Yb	Lu	U	Th	Th/U	Σ REE	LREE	HREE	LREE/ HREE	La_N/Yb_N	δEu	δCe	
TC806-1	石英 正长斑岩	锆石 (n=24)	273	52.9	646	419	0.65	638	54.7	583	0.0938	0.00058	0.622	60.6
	全岩	0.855	0.120	6.18	19.0		238	228	9.60	23.8	56.2	0.944	0.882	
TC814	石英 正长斑岩	锆石 (n=30)	302	59.4	667	491	0.74	755	77.6	677	0.115	0.00230	0.592	23.9
	全岩	0.905	0.129	4.47	17.2		268	258	10.82	23.8	55.5	0.897	0.950	
TC815	石英 正长斑岩	锆石 (n=30)	309	61.3	761	549	0.72	736	64.7	672	0.0963	0.00132	0.604	32.9
	全岩	0.900	0.126	4.30	16.8		278	267	10.59	25.3	59.5	0.886	0.945	
TC818	石英 正长斑岩	锆石 (n=32)	274	53.8	637	460	0.72	655	63.3	591	0.107	0.00293	0.628	17.6
	全岩	0.878	0.126	5.28	18.0		243	233	9.84	23.7	58.5	0.892	0.865	
TC806-2	细粒 正长岩	锆石 (n=27)	360	68.0	764	326	0.43	908	44.6	863	0.0517	0.00183	0.424	8.50
	全岩	0.201	0.027	2.83	4.30		32.2	30.2	1.99	15.2	26.3	0.851	1.04	

注:样品 TC806-1、TC814、TC815 和 TC818 为含矿的石英正长斑岩,TC806-2 为无矿的细粒正长岩;锆石后面括号中数字代表分析点数。

3.2 锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值对岩浆氧逸度的制约

锆石是中酸性岩浆岩中一种常见的副矿物,它对微量元素具有非常高的封闭温度,且其抗蚀变和抗风化能力很强,不容易受到后期作用的影响^[34-36]。锆石中的 Ce^{4+} 和 Ce^{3+} 分异能力很强,对岩浆形成时的氧化状态反应敏感,由于锆石结晶早且不容易受到后期作用的影响,锆石中的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值常用来判定岩浆的相对氧化状态。

锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值的计算方法参见 Ballard 等^[17] 和辛洪波等^[37],这里不再进行赘述。由于锆石中的 Hf 元素含量非常高(可作为主量元素),在分析过程中会对质谱造成相当大的污染,影响其它元素的分析精度,所以本次研究中没有

分析锆石 Hf 元素的含量,需要指出的是,在计算 Ce^{4+} 在锆石/熔体间的分配系数时,理论上是需要利用 Th、U 和 Hf 三个元素在锆石/熔体间的分配系数,在没有 Hf 元素含量的情况下,如果按照两点就能成一条直线的原则,根据 Th、U 的分配系数,同样可以计算出 Ce^{4+} 在锆石/熔体间的分配系数,只是最终计算出的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值要稍微 \leq 理论值(综合利用 Th、U 和 Hf 三个元素在锆石/熔体间分配系数的情况下),对结果造成的影响非常小,这在 Ballard 等^[27] 和辛洪波等^[46] 的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值的计算中均有体现。根据 Ballard 等^[17] 建立的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值的计算方法,对铜厂岩体的石英正长斑岩和细粒正长岩进行了锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值的计算,计算结果见

表2 铜厂岩体锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值Table 2. Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios of Zircon from the Tongchang intrusions

岩体	样品号	$D_{Ce(3+)}^{zircon/rock}$	$D_{Ce(4+)}^{zircon/rock}$	$(Ce^{4+}/Ce^{3+})_{\text{锆石}}$
石英正长斑岩	TC806-1	0.0017040	176	266
	TC814	0.0021118	259	251
	TC815	0.0012756	311	336
	TC818	0.0023988	202	208
	平均			265
细粒正长岩	TC806-2	0.0306691	412	61

注: $D_{Ce(3+)}^{zircon/rock}$ 和 $D_{Ce(4+)}^{zircon/rock}$ 分别表示 +3 价和 +4 价 Ce 在锆石和熔体相(全岩)的分配系数。

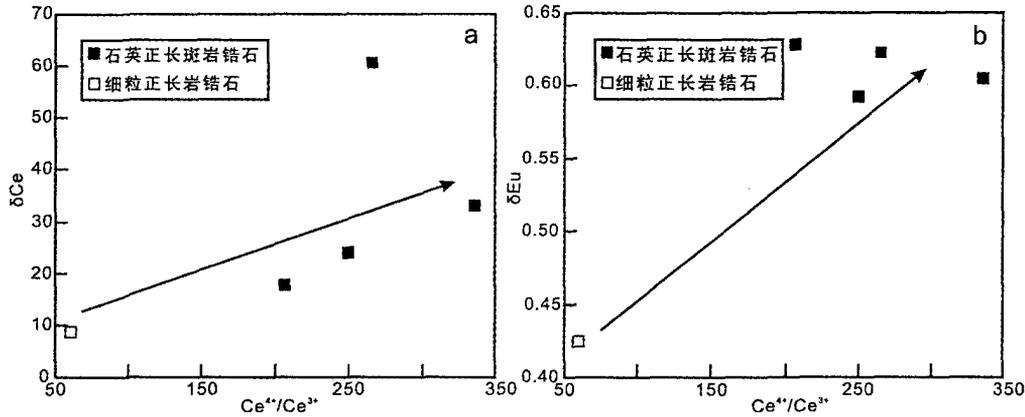
图4 铜厂岩体锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} - δCe 图(a)和 Ce^{4+}/Ce^{3+} - δEu 图(b)Fig. 4. Ce^{4+}/Ce^{3+} - δCe (a) and Ce^{4+}/Ce^{3+} - δEu (b) diagrams for zircon from the Tongchang intrusions.

表2。石英正长斑岩的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值为 208 ~ 336, 平均比值为 265, 而细粒正长岩的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值为 61。含矿的石英正长斑岩的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值明显高于不含矿的细粒正长岩的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值, 说明铜厂矿区与成矿有关的岩浆的氧逸度要高于不成矿的岩浆的氧逸度。

δCe 和 δEu 值常作为判断体系氧化还原状态的重要参数, 主要是因为 Ce 和 Eu 存在两种价态, 氧化还原条件的改变易造成不同价态元素间的分馏。利用锆石的微量元素组成计算出了铜厂岩体锆石的 δCe 和 δEu 值 [$\delta Ce = w_N(Ce)/[w_N(La) \times w_N(Pr)]^{1/2}$, $\delta Eu = w_N(Eu)/[w_N(Sm) \times w_N(Gd)]^{1/2}$], 结果列于表 1。含矿的 4 个石英正长斑岩样品的锆石 δCe 值变化范围为 17.6 ~ 60.6, 平均值为 33.8, δEu 值变化范围为 0.592 ~ 0.628, 平均值为 0.611, 不含矿的一个细粒正长岩样品的锆石 δCe 值为 8.50, δEu 值为 0.424, 含矿岩体锆石的 δCe 值及 δEu 值均明显高于不含矿的岩体。根据锆石的 Ce^{4+}/Ce^{3+} - δCe 和 Ce^{4+}/Ce^{3+} - δEu 二元相关图解(图 4a, b), δCe 值及 δEu 值与 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值显示一定的正相关性, 说明铜厂岩体锆石的 δCe 与 δEu 值一定程度

上均可以反应岩浆的相对氧化状态。

Liang 等^[29,30]对金沙江—红河成矿带北段的玉龙铜钼矿带和中段的马厂箐铜钼矿的岩体开展了锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值的研究, 我们对这些数据进行了总结(表 3), 遗憾的是他们没有给出锆石的 δCe 与 δEu 值, 也没有锆石的微量元素数据, 因而也就无从知道玉龙铜钼矿带和马厂箐铜钼矿的岩体的 δCe 与 δEu 值。通过对比铜厂岩体、玉龙岩体和马厂箐岩体的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值, 不难发现, 所有的含矿岩体的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值基本上都大于 200, 而无矿岩体的基本上都小于 120, 因此从现有的数据来看, 锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值 > 200 可作为金沙江—红河成矿带内判别斑岩铜矿成矿的地球化学标志。辛洪波等^[37]对产于陆内环境的冈底斯成矿带上的拉抗俄、冲江和南木 3 个斑岩铜矿开展了锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值的研究, 认为锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值 > 260、 $\delta Eu > 0.14$ 是冈底斯成矿带斑岩铜矿成矿的地球化学标志。Ballard 等^[17]对产于弧环境的智利北部的斑岩铜矿开展了锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值的研究, 认为锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值 > 300、 $\delta Eu > 0.4$ 是智利北部斑岩铜矿成矿的地球化学标志。由此看来, 用于判

表3 金沙江—红河成矿带一些典型斑岩铜钼矿含矿岩体及无矿岩体的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值
Table 3. Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios of zircon from ore-bearing and barren intrusions from several typical porphyry
Cu-Mo deposits in the Jinshajiang-Red River metallogenic belt

位置	矿床	岩体	$(Ce^{4+}/Ce^{3+})_{\text{锆石}}$ 平均值	资料来源
玉龙矿带	玉龙铜钼矿		204	[29]
	扎那杂铜钼矿		334	
	莽总铜钼矿	含矿岩体	201	
	多霞松多铜钼矿		250	
	马拉松多铜钼矿		258	
	83-810		112	
马厂箐矿区	马厂箐铜钼矿		81-862	[30]
		无矿岩体	93	
		含矿岩体	264	
		无矿岩体	102	
铜厂矿区	铜厂铜钼矿	含矿岩体	265	本文
		无矿岩体	61	
			93	

别成矿标志的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值还存在一定的差别,但是不论处于大陆环境金沙江—红河成矿带以及冈底斯成矿带,还是处于弧环境的智利北部斑岩铜矿带,与斑岩铜矿成矿有关的岩体的锆石均显示了较高的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值,反映了较高的氧逸度特征,是寻找斑岩铜矿的一个强有力的地球化学指标。

Ballard 等^[17] 和 Liang 等^[19] 分别对智利北部斑岩铜矿岩体与玉龙矿带岩体锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值与锆石 U-Pb 年龄进行了相关性研究,均发现锆石 U-Pb 年龄与锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值存在负相关关系,即随锆石 U-Pb 年龄逐渐变年轻,锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值逐渐增大。虽然在铜厂矿区我们还没有细粒正长岩的确切的锆石 U-Pb 年龄,但根据岩体间的侵入接触关系,从早阶段侵位的细粒正长岩到中阶段侵位的石英正长斑岩,锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值同样存在逐渐增加的趋势。这种特征一定程度上也验证了复式岩体中晚阶段侵位

的岩浆更有利于成矿。

4 结论

(1) 铜厂铜钼矿区含矿的石英正长斑岩锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值(平均 265), δCe (平均 33.8) 及 δEu 值(平均 0.611) 均明显高于不含矿的细粒正长岩锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值(61), δCe (8.50) 及 δEu 值(0.424), 说明与成矿有关的岩浆具有相对高的氧化状态。

(2) 对比同一成矿带上的北段的玉龙斑岩铜钼矿带和中段的马厂箐斑岩铜钼矿的含矿及无矿岩体,含矿岩体的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值通常大于 200, 而不含矿岩体的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值基本上都小于 120, 这种差异对进一步认识金沙江—红河成矿带斑岩铜钼矿的岩浆氧逸度特征具有重要的理论意义,对斑岩铜钼矿的找矿工作具有一定的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] Carroll M, Rutherford J M. The stability of igneous anhydrite: Experimental results and implications for sulfur behavior in the 1982 El Chichon trachyandesite and other evolved magmas [J]. *Journal of Petrology*, 1987, 28: 781-801.
- [2] Spooner E T G, Magmatic sulphide/volatile interaction as a mechanism for producing chalcophile element enriched, Archean Au-quartz, epithermal Au-Ag and Au skarn hydrothermal ore fluids [J]. *Ore Geology Reviews*, 1993, 7: 359-379.
- [3] Wyborn D, Sun S S. Sulfur-undersaturated magmatism: A key factor for generating magma-related copper-gold deposits [J]. *AGSO Research Newsletter*, 1994, 21: 7-8.
- [4] Streck J M, Dilles J H. Sulfur evolution of oxidized arc magmas as recorded in apatite from a porphyry copper batholith [J]. *Geology*, 1998, 26: 523-526.
- [5] Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposit [J]. *Geology*, 2002, 30: 915-918.
- [6] Richards J P. Alkalic-type epithermal gold deposits: A reviews, Mineralogical Association of Canada Short Course Series [Z]. Mineralogical

- Society of Canada, 1995, 376-406.
- [7] Richards J P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation [J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 1515-1533.
- [8] Richards J P. Petrology and geochemistry of alkaline intrusives at the Porgera gold deposit, Papua New Guinea [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, 35: 141-199.
- [9] Sillitoe R H. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits [J]. *Economic Geology*, 1972, 67: 184-197.
- [10] Sillitoe R H. Characteristics and controls of the largest porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits in the circum-Pacific region [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1997, 44: 373-388.
- [11] Sillitoe R H. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration [J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 4-13.
- [12] Mitchell A H G. Metallogenic belts and angle of dip of Benioff zones [J]. *Nature*, 1973, 245: 49-52.
- [13] Muller D, Groves D I. Direct and indirect association between potassic igneous rocks, shoshonites and gold-copper deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 1993, 8: 383-406.
- [14] Muller D, Franz L, Herzig PM, Hunt S. Potassic igneous rocks from the vicinity of epithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea [J]. *Lithos*, 2001, 57: 163-186.
- [15] Ulrich T, Guether D, Heinrich C A. Gold concentrations of magmatic brines and the metalbudget of porphyry copper deposit [J]. *Nature*, 1999, 399: 676-679.
- [16] Ulrich T, Heinrich C A. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina [J]. *Economic Geology*, 2001, 96: 1719-1742.
- [17] Ballard J R, Palin J M, Campbell I H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144: 347-364.
- [18] 毕献武, 胡瑞忠, Mungall J E, Hanley J J, 彭建堂, 吴开兴, 李鸿莉, 等. 与铜、金矿化有关的富碱侵入岩矿物化学研究 [J]. *矿物学报*, 2006, 26(4): 377-386.
- [19] Liang H Y, Campbell I H, Allen C, Sun W D, Liu C Q, Yu H X, Xie Y W, Zhang Y Q. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(2): 152-159.
- [20] Liang H Y, Yu H X, Mo C H, Zhang Y Q, Xie Y W. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age, Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and the geochemical features of the Machangqing complex associated with copper deposit [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2006, 25(3): 223-229.
- [21] Liang H Y, Sun W D, Su W C, Zartman R E. Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China, promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(4): 587-596.
- [22] Bi X W, Hu R Z, Hanley J J, Mungall J E, Peng J T, Shang L B, et al. Crystallisation conditions (T, P, f_{O_2}) from mineral chemistry of Cu- and Au-mineralised alkaline intrusions in the Red River-Jinshajiang alkaline igneous belt, western Yunnan Province, China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2009, 96(1-2): 43-58.
- [23] 梁华英, 莫济海, 孙卫东, 喻亨祥, 张玉泉, Allen C M, 等. 藏东玉龙超大型斑岩铜矿床成岩成矿系统时间跨度分析 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(10): 2352-2358.
- [24] 薛步高. 云南金矿带划分及成矿规律 [J]. *云南地质*, 2008, 27(3): 261-277.
- [25] Wang J H, Yin A, Harrison T M. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 88: 123-133.
- [26] Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, Zhang Y Q, Wang M J, Wang Z, Pan G T, Tang R L. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet [J]. *Economic Geology*, 2003, 98(1): 125-145.
- [27] 黄波, 梁华英, 莫济海, 谢应雯, 等. 金平铜厂铜钼矿床赋矿岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 34(4): 598-602.
- [28] 王登红, 屈文俊, 李志伟, 应汉龙, 陈毓川, 等. 金沙江—红河成矿带斑岩铜钼矿的成矿集中期: Re-Os 同位素定年 [J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(4): 345-349.
- [29] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51: 507-513.
- [30] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace elements determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma Mass spectrometry [J]. *Geostandards Newsletter*, 2004, 28: 353-370.
- [31] Williams I S, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97: 205-217.
- [32] Schifft L, Compston W, Bridgwater D. U-Th-Pb ages of single zircons in Archean supracrustals from Nain Province, Labrador, Canada [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1988, 26: 2636-2644.
- [33] Kinny P D, Wijbrans J R, Froude D O, Williams I S, Compston W. Age constraints on the geological evolution of the Narryer Gneiss Com-

- plex, Western Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1990, 37: 51-69.
- [34] Cherniak D J, Hanchar J M, Watson E B. Rare-earth diffusion in zircon [J]. *Chemical Geology*, 1997, 134(4): 289-301.
- [35] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon [J]. *Chemical Geology*, 2000, 172(1-2): 5-24.
- [36] Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon [J]. *Nature*, 1997, 390(13): 159-162.
- [37] 辛洪波, 曲晓明. 西藏冈底斯斑岩铜矿带含矿岩体的相对氧化状态: 来自锆石 Ce(IV)/Ce(III) 比值的约束 [J]. *矿物学报*, 2008, 28(2): 152-160.

Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} Ratios of the Tongchang Intrusions in Jinping County, Yunnan Province: Implications for Mineralization

XU Lei-luo^{1,2}, BI Xian-wu¹, CHEN You-wei^{1,2}, QI You-qiang¹

(1. *The State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: The Tongchang porphyry Cu-Mo deposit is situated in southern segment of the Jinshajiang-Red River metallogenic belt. Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios, δCe and δEu of zircon from the Tongchang intrusions were investigated. Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios, δCe and δEu of zircon from four ore-bearing quartz syenite porphyry samples range from 208 to 336, 17.6 to 60.6, 0.592 to 0.628, and with the averages of 265, 33.8 and 0.611, respectively. However, Ce^{4+}/Ce^{3+} ratio, δCe and δEu of zircon from one barren fine-grained syenite sample are 61, 8.50 and 0.424, respectively. Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios, δCe and δEu of zircon from ore-bearing quartz syenite porphyry samples are all higher than those from barren fine-grained syenite sample, reflecting ore-bearing quartz syenite porphyry intrusions with higher oxidation state than barren fine-grained syenite intrusions. In contrast to Yulong porphyry Cu-Mo ore belt in northern segment and Machangqing porphyry Cu-Mo deposit in the central area of the Jinshajiang-Red River metallogenic belt, Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios of zircon from these deposits are basically similar, Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios of zircon from ore-bearing intrusions are generally >200 , whereas those from barren intrusions are <120 on the whole. This is extremely helpful for understanding magmatic oxygen fugacity features of porphyry Cu-Mo deposits and exploration of porphyry Cu-Mo deposits in the Jinshajiang-Red River metallogenic belt to some extent.

Key words: Jinshajiang-Red River; metallogenic belt; Tongchang; porphyry; Cu-Mo deposit; zircon; Ce^{4+}/Ce^{3+}