

浙赣皖相邻区燕山期花岗质岩类 含矿性及其氧逸度特征*

李鹏举, 余心起, 邱骏挺, 李红英, 周翔
(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 对浙赣皖相邻区燕山期两类花岗岩的岩石学、地球化学及成矿元素研究发现, 燕山早期岩体主要岩石类型为花岗闪长岩, 岩石偏中性, 成矿元素方面更富含 Au、Ag、Cu、Mo、Ni 等深源元素, 研究区大部分铜金钼矿床都与其有关; 燕山晚期岩体主要岩石类型是花岗(斑)岩, 岩石偏酸性, 成矿元素相对缺乏 Au、Ag、Cu、Mo、Ni 等深源元素, 与之伴生的铜金钼矿床罕见。可见, 花岗质侵入体与研究区的金、铜、钼等成矿作用密切相关。通过锆石 Ce 异常计算出的岩浆氧逸度结果显示, 早期花岗质侵入体的氧逸度范围介于 FMQ (铁橄榄石-磁铁矿-石英缓冲对) 和 MH (磁铁矿-赤铁矿缓冲对) 之间, 平均值为 FMQ + 2.7, 氧逸度较高; 晚期氧逸度小于 FMQ, 平均值为 FMQ - 1.1。因此, 氧逸度对部分元素(如铜、金、钼)的成矿有重要影响, 氧逸度高, 更有利于形成铜、金、钼等矿床。由于锆石成分分析的普及, 获得锆石中的稀土微量元素含量越来越便利, 利用锆石成分来计算岩浆的氧逸度具有非常广阔的应用前景。

关键词: 含矿性; 氧逸度; 铜金钼矿床; 燕山期花岗岩; 浙赣皖相邻区

中图分类号: P611 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2013)05-0161-08

The Ore-bearing Potential and Oxygen Fugacity of the Yanshanian Granites in the Intersection Area of Zhejiang, Jiangxi, and Anhui Provinces, SE China

LI Pengju, YU Xinqi, QIU Junting, LI Hongying, ZHOU Xiang

(School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Two intense tectonic-magmatic activities during the Yanshanian have been identified in the adjacent area of Zhejiang, Jiangxi, and Anhui provinces (the WZG region). Correspondingly, there are two entirely different kinds of granites. The early Yanshanian granites are composed of granodiorite, and the rock is nearly neutral, enriched in Au, Ag, Cu, Mo, and Ni elements. The late Yanshanian granites are composed of granite porphyry, and the rock is acidic, depleted in these metallogenic elements. Therefore, the Cu, Au, Mo mineralization in the study region is related to these Yanshanian plutons. The oxygen fugacity (f_{O_2}) of the magma calculated by zircon Ce anomalies and Ti-in-zircon temperatures shows that the average magmatic f_{O_2} for the early Yanshanian granites in the study area is fayalite-magnetite-quartz (FMQ) + 2.7, much higher than that of the late Yanshanian granites (FMQ - 1.1). Thus, the high oxygen fugacity contributes to the formation of Cu, Au, and Mo deposits. With the popularity of the zircon analysis, it is much easier to obtain the content of rare earth elements in zircon. Using zircon trace element to calculate the oxygen fugacity tends to have a broad prospect.

Key words: ore-bearing potential; oxygen fugacity; Cu, Au, Mo deposit; Yanshanian granites; the intersection region between zhejiang; Anhui and Jiangxi Provinces

* 收稿日期: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272232)

作者简介: 李鹏举(1986年生), 男; 通讯作者: 余心起; E-mail: yuxinqi@cugb.edu.cn

浙西、赣东北和皖南地区 (简称浙赣皖相邻区) 在地质构造上属于新元古代弧 - 陆碰撞型造山带 (即江南造山带) 的东段, 它位于江绍断裂带北侧、扬子地块东南缘, 是我国重要的铜金银铅锌钨铀成矿区, 闻名遐迩的德兴铜金矿集区就位于研究区内。大量的研究表明, 研究区的绝大部分矿床与燕山期构造 - 岩浆活动有着成因上的密切联系^[1-3]。因此, 研究区的燕山期花岗岩具有重要的研究价值, 并成为众多地质工作者研究的热点。早在上个世纪, 就有学者对研究区内的花岗岩体进行了分类, 认为它们可分为同熔型花岗岩和重熔型花岗岩^[4]。近十几年来, 随着岩石地球化学和同位素地球化学分析方法和技术的革新, 研究区花岗岩的研究取得了长足进展, 并取得了一些比较公认的认识, 研究区燕山期花岗岩大致可分为燕山早期 (180 ~ 145 Ma) 和燕山晚期 (< 140 Ma) 两

类; 燕山晚期 A 型花岗岩大规模出露^[5-8]。戚建中等^[1]更是论述了研究区铜金资源的潜力, 并认为铜、金矿化主要与燕山早期 I 型中酸性花岗岩类有关。

研究区的铜金钼矿床具有非常明显的分布特点: ① 受 NNE、NE 和 NW 向 3 组断裂的控制定位; ② 绝大部分矿床形成于燕山早期, 与燕山早期花岗闪长岩紧密相关 (矿床形成时间见表 1); ③ 与燕山晚期花岗岩关系不大。本文通过测定燕山早期和燕山晚期花岗岩体的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、W、Sn 等成矿元素的含量, 并结合岩体的岩石、地球化学特征、形成时代、氧逸度, 试图讨论两期岩体含矿性的差异, 继而揭露造成这种成矿差异的主要原因, 以期对实际的找矿工作带来些许启示。

表 1 浙赣皖地区及邻区铜金钼等矿床成矿时间

Table 1 Metallogenic time of the Cu, Au, Mo deposits in the intersection area of Zhejiang, Jiangxi, and Anhui provinces

省份	地区	矿床	测年对象 (或岩性)	测试方法	年龄/Ma	参考文献
江西	德兴市	银山铜铅锌金银矿床	英安斑岩	锆石 U - Pb	181.3 ± 2.1	[9]
			白云母	⁴⁰ Ar - ³⁹ Ar	178.2 ± 1.4	[10]
江西	德兴市	德兴铜矿	花岗闪长斑岩	锆石 U - Pb	171.0 ± 0.84	[11]
			辉钼矿	Re - Os	170.9 ± 1.1	
江西	高安县	村前铜多金属矿床	斜长花岗斑岩	锆石 U - Pb	169.3 ± 1.1	[12]
浙江	开化县	桐村铜钼矿	花岗斑岩	锆石 U - Pb	167.6 ~ 155.6	[13]
			辉钼矿	Re - Os	163.9 ± 1.9	[14]
江西	安远县	园岭寨钼矿	辉钼矿	Re - Os	161.1 ~ 162	[15]
江西	寻乌县	葛廷坑钼矿	辉钼矿	Re - Os	158.8 ~ 159.4	[16]
江西	铅山县	永平铜矿	辉钼矿	Re - Os	156	[17]
江西	铅山县	篁碧铅锌矿	辉钼矿	Re - Os	153.8 ± 1.1	[18]
江西	金溪县	熊家山钼矿	辉钼矿	Re - Os	152	[19]
浙江	淳安县	开岭脚钼铜矿	花岗闪长岩	锆石 U - Pb	151 ± 3	[20]
浙江	淳安县	里陈家钼铜矿	花岗闪长岩	锆石 U - Pb	148 ± 2	[20]
江西	瑞昌市	武山铜矿	辉钼矿	Re - Os	146.4 ± 2.6	[21]
安徽	祁门县	东源钨钼矿	花岗闪长斑岩	锆石 U - Pb	146 ± 0.73	[22]
			辉钼矿	Re - Os	146.4 ± 2.3	
安徽	歙县	邓家坞钼矿	辉钼矿	Re - Os	141.8 ± 2.2	[23]
安徽	铜陵市	舒家店铜矿	辉钼矿	Re - Os	140.6 ± 2.0	[24]

1 花岗质侵入体概况

如图 1 所示, 研究区内分布着大大小小上百个花岗质侵入体, 分别形成于晋宁期和燕山期。晋宁期形成的有休宁、歙县、许村等花岗闪长岩体和灵山、莲花山、石耳山花岗 (斑) 岩体。而在燕山期, 浙赣皖相邻区经历了规模最大, 最强烈的一次

岩浆侵入活动, 所形成的花岗岩体无论在岩体个数、面积和岩类发育程度诸方面均远超晋宁期。研究区绝大多数内生金属矿床, 如铅、锌、钨、钼、铜、金、银等无不与本期的岩浆侵入活动有关, 是最重要的一次成矿期。如上文所述, 研究区燕山期花岗岩可分为两期, 一种形成于燕山早期, 如铜厂、富家坞、逍遥、东源、太平、桐村等岩体; 另

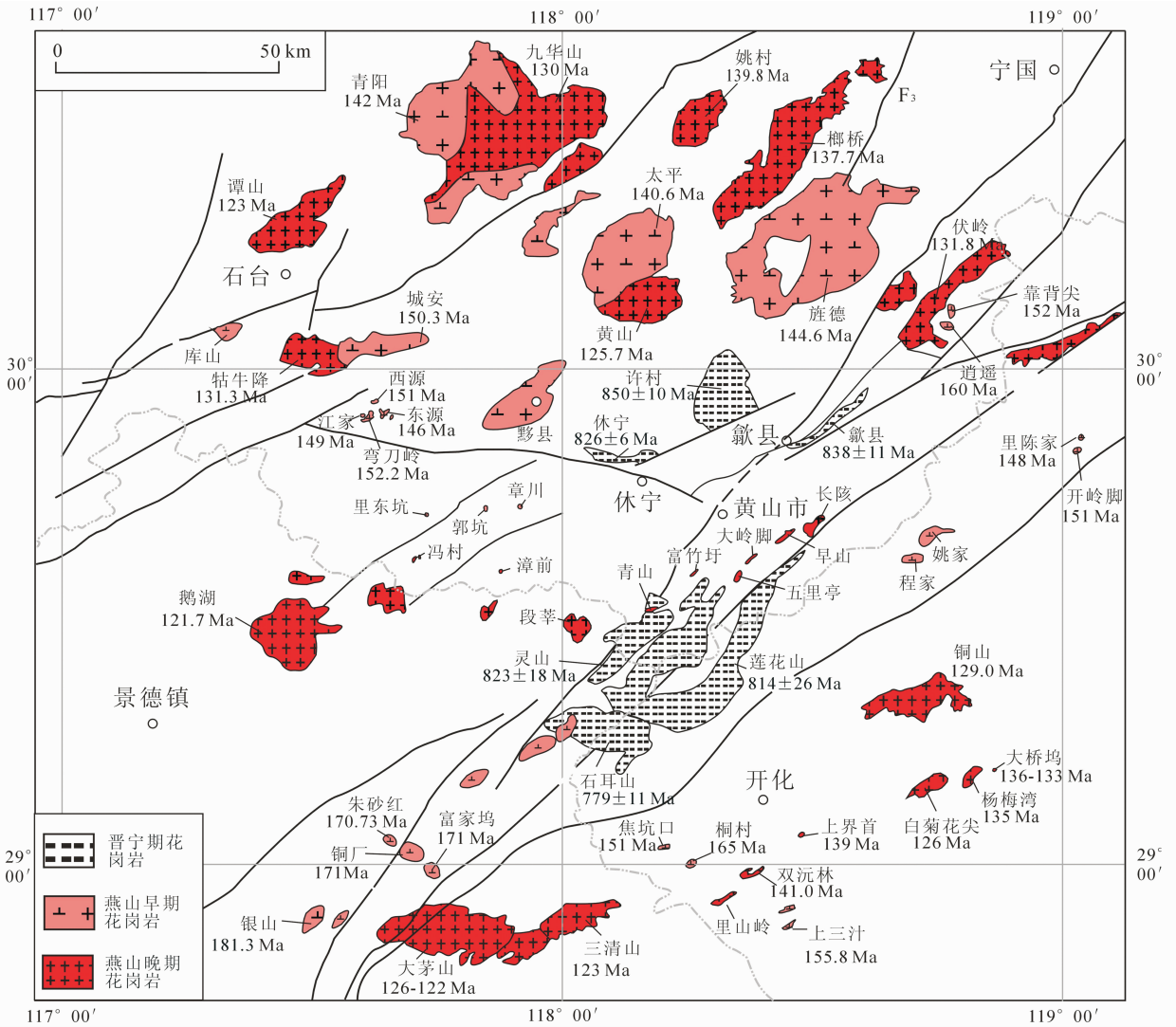


图 1 浙赣皖相邻区花岗质岩类分布图 (据 [25] 修改)

Fig. 1 Distribution of the granitoid rocks in the intersection area of Zhejiang, Jiangxi, and Anhui provinces (Modified from [25])

一种形成于燕山晚期，如大茅山、三清山、黄山、九华山、铜山、白菊花尖等岩体。

2 岩石学和地球化学特征

燕山早期主要岩石类型为花岗闪长岩，新鲜面呈灰白色，其矿物组合包括角闪石、斜长石、钾长石、石英、黑云母等，斜长石偏中性；SiO₂ 含量较低，一般低于 70%，铝饱和指数较低，多数显示为准铝质或弱过铝质；稀土元素配分图呈右倾型，Eu 没有明显的异常；富集大离子亲石元素，相对亏损高场强元素，显示较强的 Nb, Ta 负异常 (图 2a, b)。在 Y-Nb 和 Yb-Ta 构造判别图解上 (图 3a, b)，燕山早期花岗岩落入火山弧环境，暗示该期花岗岩的形成可能受到板块俯冲的影响。在以 10⁴ × Ga/Al 值为基础的判别图解上，燕山早期

花岗岩具有 I 或 S 型花岗岩的特点 (图 3c, d)。

燕山晚期花岗岩体的主要岩石类型是花岗岩或花岗斑岩，与燕山早期岩体有显著区别，其矿物组合包括钾长石、斜长石、石英、黑云母，斜长石偏酸性；SiO₂ 含量一般高于 75%，铝饱和指数较高，一般属于过铝质；轻重稀土分馏不明显，Eu 呈强烈负异常，反映了斜长石的分离结晶，稀土配分曲线呈海鸥型；相对富集 Rb、Th、U、Nb、Ta 等元素，强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti (图 2a, b)。在 Y-Nb 和 Yb-Ta 图解上 (图 3a, b)，燕山晚期花岗岩落入板内环境；在以 10⁴ × Ga/Al 值为基础的判别图解上，燕山晚期花岗岩具有 A 型花岗岩的特点 (图 3c, d)。说明进入白垩纪后，研究区构造环境发生改变，形成的花岗岩与板内伸展环境有关。

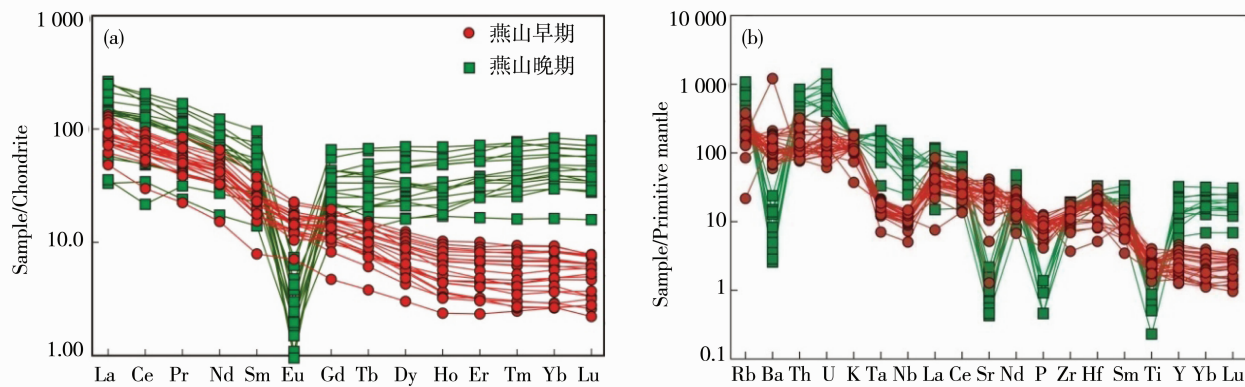


图 2 燕山期花岗岩球粒陨石标准化^[26] 稀土配分图 (a) 和原始地幔标准化^[27] 蛛网图 (b) (数据来源: [25])

Fig. 2 Chondrite-normalized^[26] REE diagrams (a) and primitive mantle-normalized^[27] spider diagram (b) for the Yanshanian granites (The data are from [25])

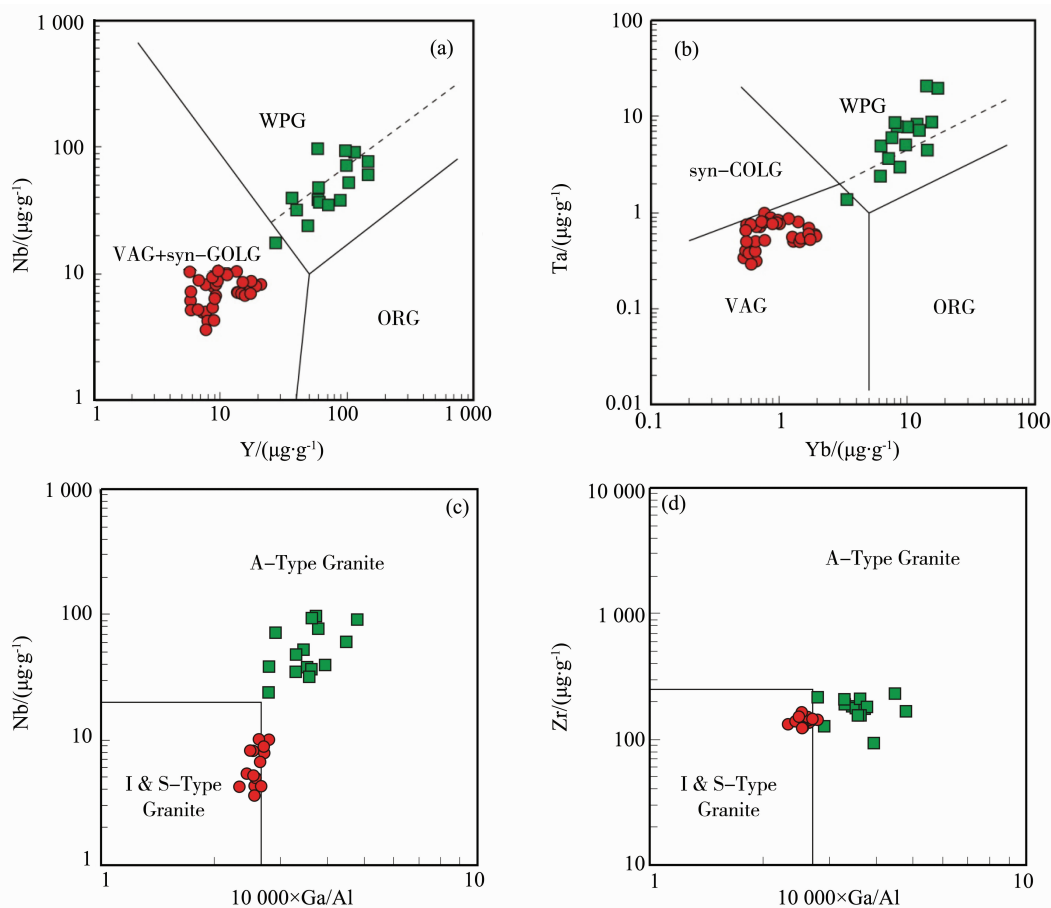


图 3 燕山期花岗岩 Y-Nb (a) 和 Yb-Ta (b) 图解^[28]; $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ vs. Nb 图解 (c) 和 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ vs. Zr 图解 (d) (数据来源同图 2)

Fig. 3 The Y-Nb (a) and Yb-Ta (b) diagram of the Yanshanian granites^[28]; $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ vs. Nb (c) and $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ vs. Zr (d) (The data are from [25])

3 岩石含矿性差异

花岗质岩石与许多重要的内生金属矿产具有密切的时空和成因联系。前人的研究表明，不同类型的花岗岩往往具有不同的成矿专属性。例如，S 型或 A 型花岗岩多与钨、锡矿化有关；I 型花岗岩多与铜、钼、金等矿床有关^[1]。本文对浙赣皖相邻区多个燕山期花岗岩的成矿元素进行了测定，结果如表 2。我们发现燕山早期花岗岩具有相对较高的金 (0.74~4.33 ng/g)、银 (74.43~1 041.49 ng/g)、铜 (31.86~165.3 μg/g)、钼 (0.99~21.99 μg/g)、镍 (2.07~82.29 μg/g) 平均含量，而燕山晚期花岗岩的这些元素含量相对较低：金 (0.3~1.07 ng/g)、银 (47~338.42 ng/g)、铜 (1.8~28.88 μg/g)、钼 (0.27~2.8 μg/g)、镍 (1.03~4.69 μg/g)。在铅、锌、钨、锡元素的含量方面，燕山早期花岗质侵入体与晚期花岗质侵入体的区别

不大。因此，两期花岗岩成矿元素的差异可以解释研究区的铜、钼、金矿床多形成于燕山早期的原因。

矿床中的成矿元素主要来自于地层还是花岗质侵入体一直是众多地质工作者争论的焦点。有的学者认为矿床中的铜、金等元素主要来自岩浆，只有少量来自围岩，如金章东等^[29]提出了德兴铜厂斑岩铜矿体系金属物质的正岩浆来源，认为铜与侵入岩浆为单一体系，铜主要来自岩浆本身，围岩矿质仅少量掺入于斑岩体上盘下部的低品位区；而有的学者则认为围岩可提供相当巨量的成矿元素，认为围岩是德兴斑岩铜矿的矿源层^[30]。通过本文对成矿元素的测定可以发现，燕山早期花岗质侵入体铜金等成矿元素含量要远高于燕山晚期花岗质侵入体，并且形成的大中型铜金钼矿床主要集中于燕山早期，因此本文支持“矿床中铜、金等元素主要来自岩浆”的说法。

表 2 燕山期花岗质侵入体成矿元素含量平均值

Table 2 The average content of metallogenic elements in the Yanshanian granites

岩体	岩体 年龄/Ma	Au	Ag	Cu	Mo	Pb	Zn	Sn	W	Ni	样品数 个	资料 ¹⁾ 来源
		(ng · g ⁻¹)										
桐村	165	3.24	102.43	163.40	19.22	13.86	25.72	1.43	14.05	9.76	7	本文
荆桐崖	161.2	1.22	159.91	144.77	2.27	14.65	96.91	1.95	5.05	11.79	2	本文
逍遥	160.0	1.18	74.43	58.29	15.34	13.03	41.41	1.66	14.76	11.12	9	本文
上三汊	155.8	1.62	162.15	53.49	1.27	12.19	182.76	3.00	13.06	11.98	1	本文
靠背尖	152.7	1.79	181.56	91.97	19.66	16.95	47.28	2.35	43.89	8.47	16	本文
弯刀岭	152.2	2.89	118.89	31.86	5.32	24.78	93.51	4.10	14.51	3.06	11	本文
西源	151	2.06	129.13	58.87	15.10	22.11	59.90	3.56	11.59	2.11	11	本文
蕉坑口	150.9	4.33	1 041.49	53.70	0.99	16.31	82.88	1.16	5.00	82.29	3	本文
江家	149	0.74	183.46	122.25	21.99	37.04	53.35	4.25	10.09	2.07	23	本文
东源	146	1.53	428.94	165.30	7.05	24.00	91.60	4.58	103.13	2.64	17	本文
双沅林	141	0.59	338.42	28.88	0.42	27.70	67.04	2.68	2.74	1.03	3	本文
上界首	139.9	1.07	51	18	0.266	12	40	2.42	2.90	4.69	1	本文
铜山	129	0.65	70.00	4.90	1.15	33.70	30.00		4.11		1	(1)
大茅山	126~122	0.30	69.00	2.50	2.80	290.00	31.00	7.20	12.90		1	[31]
黄山	125.7	0.40	47.00	1.80	0.51	43.00	21.00	1.70	6.30		1	[31]

1) 本文成矿元素测试分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成。年龄数据来自于 [25]；(1) 胡永和等。浙江省铜矿成矿地质条件与找矿前景，1993。

4 氧逸度及其对成矿的影响

岩浆氧逸度对多种金属的成矿作用起着非常重要的制约作用，并且在现代技术条件下，可以通过多种方式进行量化，例如测定尖晶石中 Fe³⁺ 含量或用穆斯鲍尔谱测定 Fe³⁺ 与 Fe²⁺ 含量比值，或计算锆石中的 Ce⁴⁺/Ce³⁺ 比值。研究表明，高氧逸度

是 Cu、Au 成矿的重要因素，因为 Cu、Au 是亲硫元素，岩浆结晶分异过程中如果 S²⁻ 大量存在就会导致 Cu、Au 硫化物过饱和而过早沉淀，不利于残余岩浆中 Cu、Au 元素的富集，而高氧逸度条件下，岩浆中的硫绝大多数以 SO₄²⁻ 和 SO₂ 形式溶解在硅酸盐熔体中，能形成硫化物的 S²⁻ 含量很低，硫化物难以达到饱和，从而有利于 Cu、Au 在残余

岩浆中逐渐富集以致最终成矿^[32-33]。

Ballard 等^[34]最早使用锆石成分来反映岩浆氧化还原程度,他们将北智利的超大型斑岩铜矿作为研究对象,以锆石中的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值探讨成矿的氧化状态。在氧化条件下,锆石中的 Zr^{4+} 容易被 Ce^{4+} 离子取代,因此,可以通过 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值来判断岩浆氧逸度的相对高低。锆石中 Ce^{4+}/Ce^{3+} 的关系表达式为:

$$\left[\frac{Ce^{4+}}{Ce^{3+}} \right]_{\text{锆石}} = \left(\frac{Ce_{\text{熔体}} - \frac{Ce_{\text{锆石}}}{D_{\text{锆石}/\text{熔体}}}}{D_{\text{锆石}/\text{熔体}} - Ce_{\text{熔体}}} \right)$$

结果显示,具斑岩铜矿化的花岗质侵入体的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 值 >300 (氧逸度高),不含矿的花岗质侵入体小于此值。该计算方法在我国实际中的应用很多,如玉龙斑岩铜矿、邦铺钼(铜)矿床、德兴斑岩铜矿、冈底斯斑岩铜矿带、云南金平铜厂铜钼矿,通过对上述矿床的锆石氧逸度进行计算,得出这些富矿花岗质侵入体都具有高的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 值(即高的氧逸度),研究区德兴铜矿的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 值更是高达 830~1 600,这与全球第二大的丘基卡马塔斑岩铜矿的高氧逸度具有相同的特征^[35-38]。但是通过 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值只能反映岩体的氧逸度的相对高低,不能求出氧逸度的绝对值。

Trail et al.^[39]通过标定锆石 Ce 异常、温度、氧逸度之间的关系,给出如下经验公式,可以直接测定岩体的氧逸度:

$$\ln \left(\frac{Ce}{Ce^*} \right)_D = (0.1156 \pm 0.0050) \times \ln (f_{O_2}) + \frac{13860 \pm 708}{T} - 6.125 \pm 0.484$$

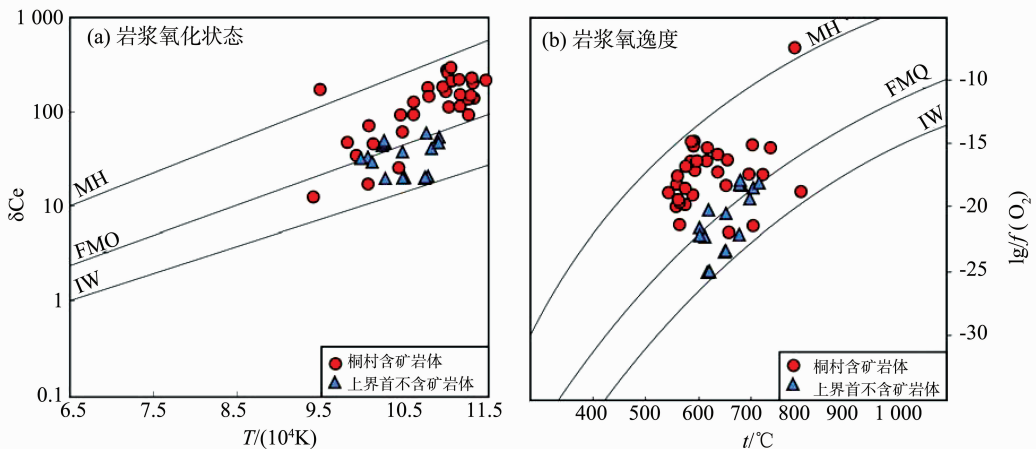


图 4 桐村、上界首岩体的岩浆氧化状态 (a) 和岩浆氧逸度 (b) (数据来自 [40])

Fig. 4 Magma oxygen states of the Tongcun, Shangjiesshou pluton (a) and magma oxygen fugacities of Tongcun, Shangjiesshou pluton (b) (The data are from [40])

其中 f_{O_2} 是氧逸度, T 是绝对温度。

前期工作中,我们利用 Trail 的经验公式通过锆石中的 Ce 异常计算了浙西地区燕山早期花岗岩和燕山晚期花岗岩的氧逸度。其中,燕山早期样品采自开化县桐村花岗斑岩,其锆石 U-Pb 年龄 165 Ma 左右,辉钼矿 Re-Os 年龄 163.9 ± 1.9 Ma。通过对样品成矿元素的含量分析,发现桐村花岗斑岩具有非常高的铜金钼等元素含量(表 2),相应形成了铜钼矿床,据估测可达到中型矿床规模。使用 Trail et al.^[39]的计算方法确定含矿岩体的氧逸度范围介于 FMQ (铁橄榄石-磁铁矿-石英缓冲对)和 MH (磁铁矿-赤铁矿缓冲对)之间,平均值为 $FMQ + 2.7$,氧逸度较高。燕山晚期的花岗岩样品采自桐村花岗斑岩附近的上界首细粒花岗岩,其锆石 U-Pb 年龄 139.9 Ma。成矿元素的含量分析结果显示,上界首细粒花岗岩铜金钼等深源元素含量低,在实际找矿中也未发现明显矿化。计算得到上界首细粒花岗岩的氧逸度小于 FMQ,平均值为 $FMQ - 1.1$ ^[40]。

总之,燕山早期花岗岩的氧逸度较高,铜金钼等成矿元素含量也高;燕山晚期花岗岩的氧逸度较低,相应的这些岩体的铜金钼等成矿元素含量也低,即高氧逸度于铜金钼成矿更为有利。近年来,由于锆石成分分析的普及,对于地质工作者来说,获得锆石中的稀土微量元素含量越来越便利。因此,利用锆石中稀土元素的含量来计算岩浆的氧逸度具有非常广阔的应用前景。

5 结 论

1) 浙赣皖相邻区在燕山期出露两期花岗质岩类, 燕山早期岩石类型多属花岗闪长岩, 地球化学特征显示其具有 I 或 S 型花岗岩的特点, 可能形成于火山弧环境; 燕山晚期花岗岩偏酸性, 岩石类型一般为花岗岩或花岗斑岩, 具有 A 型花岗岩的特点, 其形成可能与板内伸展环境有关。

2) 燕山早期花岗质侵入体具有较高的氧逸度, 而晚期氧逸度偏低, 与之对应燕山早期的花岗质岩类更富含金、银、铜、钼、镍等深源元素, 而燕山晚期岩体的铜金钼含量偏低, 故高氧逸度于铜金钼成矿更为有利。使用锆石中稀土元素的含量可以有效计算岩浆的氧逸度。

参考文献:

[1] 戚建中, 刘红樱, 王文冈, 等. 论浙、赣、皖相邻地区铜金资源潜力—成矿的断裂网络分级定位和矿田级斑岩铜矿体系研究[J]. 火山地质与矿产, 1999, 20(3): 155-171.

[2] 周涛发, 袁峰, 侯明金, 等. 江南隆起带东段皖赣相邻区燕山期花岗岩类的成因及形成的地球动力学背景[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3): 65-70.

[3] YUAN F, ZHOU T F, YUE S C, et al. Rare earths of magmatic rocks in Yanshanian stage in adjacent region of Anhui and Jiangxi provinces, Jiangnan uplift [J]. Journal of Rare Earths, 2003, 21(5): 591-594.

[4] 赵玉琛. 皖南两花岗岩体的岩石学特征及成矿专属性判别[J]. 安徽地质, 1994, 4(4): 31-43.

[5] WONG J, SUN M, XING G F, et al. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijuehuajian metaluminous A-type granite: Extension at 125-100 Ma and its tectonic significance for South China[J]. Lithos, 2009, 112: 289-305.

[6] ZHANG S, ZHANG Z C. Petrology and geochemistry of the Huangshan granitic intrusion in Anhui province, Southeast China: implications for petrogenesis and geodynamics [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2010, 84(3): 581-596.

[7] JIANG Y H, ZHAO P, ZHOU Q, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China [J]. Lithos, 2011, 121: 55-73.

[8] YANG S Y, JIANG S Y, ZHAO K D, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China [J]. Lithos, 2012, 150: 155-170.

[9] 杨昔林, 曹殿华, 李以科, 等. 江西德兴孔家—银山火山盆地的时代归属: 锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 中

国地质, 2011, 38(1): 86-93.

[10] LI X F, YASUSHI W, MAO J W, et al. Sensitive high-resolution Ion microprobe U-Pb zircon and ^{40}Ar - ^{39}Ar muscovite ages of the Yinshan deposit in the Northeast Jiangxi province, south China [J]. Resource Geology, 2007, 57: 325-337.

[11] ZHOU Q, JIANG Y H, ZHAO P, et al. Origin of the Dexing Cu-bearing porphyries, SE China: elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints [J]. International Geology Review, 2011, 54: 572-592.

[12] 王强, 孙燕, 张雪辉, 等. 江西省村前铜多金属矿床斜长花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1143-1150.

[13] 邱骏挺, 余心起, 张德会, 等. 浙西开化地区桐村花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2011, 30(9): 1360-1368.

[14] ZENG Q D, WANG Y B, ZHANG S, et al. U - Pb and Re - Os geochronology of the Tongcun molybdenum deposit and Zhilintou gold-silver deposit in Zhejiang province, Southeast China, and its geological implications [J]. Resource Geology, 2012, 63(1): 99-109.

[15] 周雪桂, 吴俊华, 屈文俊, 等. 赣南园岭寨钼矿辉钼矿 Re - Os 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(4): 690-698.

[16] 吴俊华, 赵赣, 屈文俊, 等. 赣南葛廷坑钼矿辉钼矿 Re - Os 年龄及其地质意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 261-267.

[17] 李晓峰, YASUSHI W, 屈文俊. 江西永平铜矿花岗岩质岩石的岩石结构、地球化学特征及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2353-2365.

[18] 邱骏挺, 余心起, 吴淦国, 等. 北武夷篁碧矿区逆冲推覆构造及其与铅、钼-锌成矿作用关系[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 243-255.

[19] 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 等. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其 Re - Os 年龄[J]. 地质学报, 2007, 81(7): 946-951.

[20] 汪建国, 汪隆武, 陈小友, 等. 浙西开岭脚和里陈家花岗闪长岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1559-1565.

[21] 李进文, 李旭辉, 裴荣富, 等. 江西武山铜矿南矿带辉钼矿 Re - Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 801-807.

[22] 周翔, 余心起, 王德恩, 等. 皖南东源含 W、Mo 花岗闪长斑岩及成矿年代学研究[J]. 现代地质, 2011, 25(2): 201-210.

[23] 李双, 杨晓勇, 孙卫东. 皖南歙县邓家坞钼矿床年代学及 Hf 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 3980-3992.

[24] 吕玉琢, 周涛发, 袁峰, 等. 安徽铜陵矿集区舒家店矿床辉钼矿 Re - Os 同位素年龄[J]. 矿物学报,

- 2011, (增刊): 621–622.
- [25] LI P J, YU X Q, LI H Y, et al. Jurassic-Cretaceous tectonic evolution of SE China: geochronological and geochemical constraints of Yanshanian granitoids [J]. *International Geology Review*, 2013, 55:1202–1219.
- [26] BOYNTON W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Amsterdam: Elsevier, 1984, 63–114.
- [27] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. SAUNDERS A D, NORRY M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol Soc Spec Publ* 42, 1989. 313–345.
- [28] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956–983.
- [29] 金章东, 朱金初. 关于德兴斑岩铜矿的成矿物质来源——与梁祥济研究员商榷 [J]. *地质论评*, 1998, 44(5): 464–469.
- [30] 梁祥济. 江西德兴斑岩铜矿成矿物质来源的实验研究 [J]. *地质论评*, 1995, 41(5): 463–471.
- [31] 马振东, 张本仁, 蒋敬业, 等. 长江中下游及邻区基底和花岗岩成矿元素丰度背景的研究 [J]. *地质学报*, 1998, 72(3): 267–275.
- [32] 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.
- [33] MENGASON M J. Metals in arc magmas: The role of Cu-rich sulfide phases [D]. Ph. D. thesis, University of Maryland, 2011.
- [34] 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.
- [35] LIANG H Y, CAMPBELL I H, ALLEN C, et al. Zircon Ce⁴⁺/Ce³⁺ ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet [J]. *Miner Deposita*, 2006, 41: 152–159.
- [36] 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.
- [37] 罗茂澄, 王立强, 冷秋锋, 等. 邦铺钼(铜)矿床二长花岗岩斑岩、黑云二长花岗岩锆石 Hf 同位素和 Ce⁴⁺/Ce³⁺ 比值 [J]. *矿床地质*, 2011, 30(2): 266–278.
- [38] 胥磊落, 毕献武, 陈佑纬, 等. 云南金平铜厂斑岩铜钼矿区岩体锆石 Ce⁴⁺/Ce³⁺ 比值及其对成矿的指示意义 [J]. *矿物学报*, 2012, 1: 74–82.
- [39] TRAIL D, WATSON E B, TAILBY N D. Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for oxidation state of magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 97: 70–87.
- [40] QIU J T, YU X Q, SANTOSH M, et al. Geochronology and magmatic oxygen fugacity of the Tongcun molybdenum deposit, northwest Zhejiang, SE China [J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48:545–556.

(上接第 160 页)

- [9] 肖名忠, 张强, 陈晓宏. 基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究 [J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 83–92.
- [10] 常远勇, 侯西勇, 毋亭, 等. 1998~2010 年全球中低纬度降水时空特征分析 [J]. *水科学进展*, 2012, 23(4): 475–484.
- [11] HAMED K, RAO A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204: 182–196.
- [12] 张永, 陈发虎, 勾晓华, 等. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布——基于 PDSI 数据 [J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1142–1152.
- [13] RICHMAN M B. Rotation of principal components [J]. *Journal of Climatology*, 1986, 6: 293–335.
- [14] LIAN, T, CHEN D. An Evaluation of Rotated EOF Analysis and Its Application to Tropical Pacific SST Variability [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25:5361–5373.
- [15] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61–78.
- [16] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11:561–566.
- [17] ZHANG Q, XU C Y, ZHANG Z X. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the Standardized Precipitation Index and Aridity Index [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 98: 89–99.
- [18] WANG H J. The weakening of the Asian Monsoon circulation after the end of the 1970s [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2001, 18: 376–386.
- [19] 曾剑, 张强, 王同美. 东亚冬季风与中国南方冬季降水的关系分析 [J]. *高原气象*, 2010, 29(4): 975–981.
- [20] 徐建军, 朱乾根, 周铁汉. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性 [J]. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 1–8.
- [21] 孙秀荣, 陈隆勋, 何金海. 东亚海陆热力差指数及其与环流和降水的年际变化关系 [J]. *气象学报*, 2002, 60(2): 164–172.