赣南和赣北-皖南钨成矿带含钨花岗岩及其成矿作用特征对比研究

苏慧敏¹, 蒋少涌^{1,2*}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 资源学院和紧缺矿产资源勘查协同创新中心, 武汉 430074;

2. 南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093

* 通讯作者, E-mail: shyjiang@cug.edu.cn, shyjiang@nju.edu.cn

收稿日期: 2017-01-04; 接受日期: 2017-06-09; 网络版发表日期: 2017-07-25

国家自然科学基金项目(批准号: 41473042, 41503019)、科技部重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600204)、中国博士后科学基金面上项目(编号: 2015M582297)资助

摘要 赣南和赣北-皖南是华南两个最重要的钨成矿带, 其中赣南发育有“崇-余-犹”矿集区、于都矿集区、“三南”矿集区等, 产有西华山、漂塘、盘古山和大吉山等重要钨矿床. 近年来, 赣北-皖南地区钨矿找矿工作取得重大突破, 新发现了一系列与晚中生代岩浆活动有关的中型、大型甚至超大型的钨-铜(钼)矿床(如大湖塘、朱溪、东源、百丈岩等), 使该区成为了华南又一个重要的钨矿带. 本文旨在将这一新的钨矿带与赣南钨矿带中的含钨花岗岩的时空分布、岩石地球化学特征、物质起源及其含矿性差异等方面进行对比研究, 以利于对华南含钨花岗岩及其成矿作用机制有更深入的理解. 结果表明: (1) 赣南钨矿的成岩成矿时代主要集中在晚侏罗世(165~150Ma), 赣北-皖南地区钨-铜(钼)矿的成岩成矿时代则分为两期: 晚侏罗世-早白垩世(150~140Ma)和早白垩世(135~120Ma); (2) 赣北-皖南和赣南含钨花岗岩都属于高度演化的岩石, 赣南花岗岩可能经历了更高分异和更为强烈的流体-熔体相互作用; (3) 赣北-皖南地区含钨花岗岩的源岩可能来自于新元古代双桥山群中一套砂质-泥质岩夹变火山岩岩系, 赣南含钨花岗岩则起源于中元古代富粘土质泥岩的重熔. 本文认为, 赣北-皖南地区钨-铜(钼)矿和赣南钨矿不同的成矿作用特征主要是受花岗岩岩浆的源区物质控制以及演化分异程度的影响.

关键词 含钨花岗岩, 物质来源, 成矿特征, 赣北-皖南, 赣南

1 引言

华南是中国钨业的发祥地, 是中国钨矿开采和出口主产地. 早期发现的钨矿床均分布在江西南部一带, 如著名的西华山、漂塘、盘古山和大吉山钨矿等, 因而赣南具有“世界钨都”之称(朱焱龄等, 1981; 林黎等,

2006; 裴荣富等, 2009). 而在江西北部, 虽然早在20世纪70年代就发现了阳储岭钨(钼)矿床, 但是主要以德兴斑岩铜矿床及其他数个中大型铜多金属矿床为特色, 因此江西的资源格局一直是“南钨北铜”. 然而, 近年来, 随着江西北部武宁县大湖塘、景德镇朱溪和修水县香炉山等大型-超大型钨-铜(钼)矿的相继发现,

中文引用格式: 苏慧敏, 蒋少涌. 2017. 赣南和赣北-皖南钨成矿带含钨花岗岩及其成矿作用特征对比研究. 中国科学: 地球科学, 47: 1292-1308, doi: 10.1360/N072016-00304

英文引用格式: Su H M, Jiang S Y. 2017. A comparison study of tungsten-bearing granite and related mineralization in the northern Jiangxi-southern Anhui provinces and southern Jiangxi Province in South China. Science China Earth Sciences, 60: 1942-1958, doi: 10.1007/s11430-016-9071-6

打破了这一传统格局. 此外, 与赣北临近的皖南地区也陆续发现了祁门县东源、宁国县大坞尖、青阳县百丈岩等中-大型钨-铜(钼)矿床. 继赣南之后, 赣北-皖南地区成为中国又一个重要的钨成矿带(陈国华等, 2015; 蒋少涌等, 2015; 王先广等, 2015; 周洁等, 2015).

虽然赣北-皖南和赣南地区钨矿的成矿时代均为燕山期, 但是两个地区的成矿特征差异明显. 赣南地区的钨矿以黑钨矿为主(Guo等, 2012), 且以单一钨矿为特点, 而赣北-皖南地区发现的钨矿多以白钨矿为主, 且往往存在钨-铜(钼)共生的组合标志. 那么造成这些差异的原因何在? 已有的研究表明两个地区的钨矿床都与燕山期中酸性侵入岩体关系密切. 那么与赣

北-皖南钨-铜(钼)矿床和赣南钨矿床有关的花岗岩在成因类型上是否相同? 在物质来源上是否有差异? 这些差别是造成两个地区成矿专属性存在差异的主要原因吗? 鉴于上述问题, 本文选择了与赣北-皖南和赣南地区代表性钨矿床有关的花岗岩类为研究对象, 通过对比其空间分布、岩石学、年代学和地球化学特征, 揭示其起源和演化特征, 并据此探讨两地区成矿元素富集机制的差异.

2 时空分布特点

赣南地区位于南岭东段(图1), 分布有3个重要的

图1 赣北-皖南和赣南主要钨多金属矿床分布图

1, 香炉山钨矿; 2, 大湖塘钨铜矿; 3, 阳储岭钨矿; 4, 塔前钨钼矿; 5, 朱溪钨铜矿; 6, 青木下钨矿; 7, 东源钨钼矿; 8, 高家塆钨钼矿; 9, 百丈岩钨钼矿; 10, 大坞尖钨钼矿; 11, 竹溪岭钨钼矿; 12, 画眉坳钨矿; 13, 焦里钨矿; 14, 淘锡坑钨矿; 15, 宝山钨矿; 16, 木梓园钨矿; 17, 九龙脑钨矿; 18, 西华山钨矿; 19, 漂塘钨矿; 20, 牛岭钨矿; 21, 左拔钨矿; 22, 樟斗钨矿; 23, 红桃岭钨矿; 24, 茅坪钨矿; 25, 石雷钨矿; 26, 天门山钨矿; 27, 盘古山钨矿; 28, 黄沙钨矿; 29, 上坪钨矿; 30, 黄婆地钨矿; 31, 大吉山钨矿. 据Zhou等(2006)修改

钨矿集区: (1) “崇-余-犹(崇义-大余-上犹)”矿集区, 典型矿床包括著名的西华山、漂塘、淘锡坑和焦里等矿床; (2) 于都矿集区, 典型矿床包括盘古山、黄沙和画眉坳等; (3) “三南(龙南-全南-定南)”矿集区, 典型矿床包括大吉山和岵美山等矿床. 赣北-皖南地区在大地构造位置上处于扬子板块东南缘江南造山带中东段, 著名的矿床包括大湖塘W-Cu矿、朱溪W-Cu矿和香炉山W矿等(图1).

诸多学者运用锆石U-Pb法、辉钼矿Re-Os法等方法对赣北-皖南和赣南地区钨矿床的成岩成矿年龄进行了测定, 构建了该区成岩成矿作用的年代格架. 总体而言, 赣南和赣北-皖南地区与钨矿化有关的成岩成矿作用主要集中在晚中生代, 但二者在时间上呈现出一定的差异性.

已有的研究和本次统计结果均表明, 包括赣南在内的南岭东段钨锡多金属矿床的成岩成矿时代相对集中, 为165~150Ma(表1, 毛景文等, 2007; 郭春丽等, 2013). 然而, 赣北-皖南地区钨-铜(钼)矿床成岩成矿作用的时间跨度较大. 不同学者利用辉钼矿Re-Os法和白钨矿Sm-Nd法测定了大湖塘的成矿年龄为150~139Ma(丰成友等, 2012a; 项新葵等, 2012a; Mao等, 2013; 张志辉, 2014; 蒋少涌等, 2015); 李春海(2016)、李斌等(2015)测得赣北阳储岭和皖南大坞尖W-Mo矿床辉钼矿Re-Os年龄分别为(147±1)和(144±2)Ma; 秦燕等(2010a)和李春海(2016)分别利用辉钼矿Re-Os法获得皖南百丈岩矿床中W-Mo矿化年龄为(136±3)和(135±1)Ma; 张家菁等(2008)报道了赣北香炉山白钨矿的Sm-Nd年龄为(121±11)Ma. 虽然关于赣北-皖南地区钨-铜(钼)矿床的精确成矿时代的报道仍然偏少, 但是上述已有的结果表明该区成矿年龄跨度达30Ma. 相对而言, 对本区与矿化有关的花岗质岩石已经获得了一批高精度定年数据. 已有的统计结果表明(表1), 该区可能存在两期岩浆活动. 一期为晚侏罗世-早白垩世, 主要集中在150~140Ma. 例如, 不同学者利用锆石LA-ICP-MS U-Pb法测得朱溪W-Cu矿区与成矿有关花岗岩和花岗斑岩的年龄集中在151~147Ma(李岩等, 2014; 陈国华等, 2015; 王先广等, 2015); 秦燕等(2010b)获得皖南东源W-Mo矿区含矿斑岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄为(149±2)Ma, 李斌等(2015)报道了大坞尖W-Mo矿床中花岗闪长斑岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为(148±2)Ma. 另一期则集中在早白垩世, 为135~120Ma. 例如, 赣北

香炉山成矿细粒花岗岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为(120±1)Ma(李春海, 2016); 皖南百丈岩细粒花岗岩中锆石的SHRIMP U-Pb和LA-ICP-MS年龄分别为(130±2)和(135±1)Ma(秦燕等, 2010a; 李春海, 2016). 值得注意的是, 上述两期岩浆活动在大湖塘矿区均有报道(表1). 虽然目前该矿区获得的若干成矿年龄主要集中在150~139Ma(丰成友等, 2012a; 项新葵等, 2012a; Mao等, 2013; 张志辉, 2014; 蒋少涌等, 2015), 显示矿化主要与第一期成岩作用关系密切. 但是前人对该矿区135~130Ma岩浆岩的岩相学和地球化学研究, 表明这一期岩浆岩中也发现了与硅酸盐矿物密切共生的岩浆成因的黑钨矿和白钨矿, 且其元素地球化学组成和同位素特征与第一期花岗岩类似, 因此推测其应该也与成矿密切相关(Huang和Jiang, 2014; 蒋少涌等, 2015). 综上所述, 赣南地区钨矿床的成岩成矿作用是一次相对集中的事件, 而赣北-皖南地区钨-铜(钼)矿床的成岩成矿作用呈现年龄新、跨度大、期次多的特点.

3 岩石学和地球化学特征对比

为了更好地对赣北-皖南和赣南地区与钨矿有关的花岗质岩石进行对比, 本文重点收集了前人已发表的且明确注明与钨矿有关的花岗质岩石的分析数据, 对其岩性特征和地球化学特征进行对比研究.

赣北-皖南地区含钨花岗岩的岩性以二云母花岗岩、花岗斑岩、钾长花岗岩为主. 主要的结构包括似斑状、斑状结构以及中细粒、细粒结构. 主要组成矿物包括石英、钾长石, 少量斜长石和黑云母. 此外, 在赣北大湖塘、朱溪和皖南下桐岭矿区, 还存在与W-Cu(Mo)矿化有关的白云母花岗岩, 其中的云母主要为原生白云母. 斑晶主要由石英和钾长石组成. 副矿物为锆石、磷灰石、独居石和榍石等. 赣南地区含矿花岗岩的岩性以花岗斑岩、二云母花岗岩、黑云母花岗岩、钾长花岗岩为主. 主要结构构造和矿物组成与赣北-皖南花岗岩类似. 不同的是, 赣南花岗岩中的云母几乎都为黑云母, 偶见原生白云母. 钾长石是其主要的斑晶矿物, 且其副矿物除了锆石、独居石、榍石和磷灰石外, 还常见黄玉、萤石等.

上述两个地区的含钨花岗岩在岩石地球化学特征上显示较多相似之处, 但也存在一些明显的差异. 赣北-皖南和赣南地区含钨花岗岩都是富硅的高钾钙

表 1 赣北-皖南和赣南地区钨多金属矿床成岩成矿年龄统计

地区	矿床名称	岩石类型	成岩年龄	参考文献	成矿年龄	参考文献
赣北	大湖塘W-Cu矿狮尾洞段	似斑状白云母花岗岩	(144±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	黄兰椿和蒋少涌, 2012		
		富钨花岗斑岩	(135±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	黄兰椿和蒋少涌, 2013	(141±4)Ma(辉钼矿 Re-Os)	丰成友等, 2012a
		似斑状二云母花岗岩	(144±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Huang和Jiang, 2014	(142±9)Ma(白钨矿 Sm-Nd)	蒋少涌等, 2015
		斑状二云母花岗岩	(130±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Huang和Jiang, 2014		
	大湖塘W-Cu矿石门寺段	似斑状黑云母花岗岩	138Ma(锆石 LA-ICP-MS)	项新葵等, 2012a		
		花岗斑岩	135Ma(锆石 LA-ICP-MS)	项新葵等, 2012a		
		似斑状黑云母花岗岩	(147±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Mao等, 2015	(144±1)Ma(辉钼矿 Re-Os)	丰成友等, 2012a
		似斑状黑云母花岗岩	(148±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Mao等, 2015	(150±1)Ma(辉钼矿 Re-Os)	项新葵等, 2013
		细粒黑云母花岗岩	(145±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Mao等, 2015	(139±1)Ma(辉钼矿 Re-Os)	Mao等, 2013
		细粒黑云母花岗岩	(146±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Mao等, 2015	(144±1)Ma(辉钼矿 Re-Os)	张志辉, 2014
		花岗斑岩	(143±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Mao等, 2015		
		花岗斑岩	(143±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Mao等, 2015		
	大湖塘W-Cu矿大岭上段	中细粒白云母花岗岩	(134±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Huang和Jiang, 2014		
		细粒二云母花岗岩	(131±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	Huang和Jiang, 2014		
		黑云母花岗斑岩	(130±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	彭花明等, 2015		
	大湖塘W-Cu矿平苗段	花岗斑岩	(149±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	孟亚飞和蒋少涌, 2015		
	朱溪W-Cu矿	白云母花岗岩	(147±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	王先广等, 2015		
		蚀变花岗岩	(149±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	陈国华等, 2015		
		蚀变花岗斑岩	(148±3)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	陈国华等, 2015		
		花岗斑岩	(151±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	李岩等, 2014		
		花岗斑岩	(150±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	李岩等, 2014		
	阳储岭W矿	花岗斑岩	(146±3)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	李春海, 2016		
	香炉山W矿	黑云母花岗岩	(120±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	李春海, 2016	(121±11)Ma(白钨矿 Sm-Nd)	张家菁等, 2008
皖南	百丈岩W-Mo矿	细粒花岗岩	(130±2)Ma(锆石 SHRIMP)	秦燕等, 2010a	(136±3)Ma(辉钼矿 Re-Os)	秦燕等, 2010a
		细粒花岗岩	(135±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	李春海, 2016	(135±1)Ma(辉钼矿 Re-Os)	李春海, 2016
	东源W-Mo矿	花岗斑岩	(149±2)Ma(锆石 SHRIMP)	秦燕等, 2010b		
	大坞尖W-Mo矿	花岗闪长斑岩	(148±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	李斌等, 2015	(144±2)Ma(辉钼矿 Re-Os)	李斌等, 2015
			(141±1)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	陈雪霏等, 2013		
(139±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)			陈雪霏等, 2013			
竹溪岭	花岗岩	(142±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	陈雪霏等, 2013			
赣南	西华山W矿	斑状中粒黑云母花岗岩	(159±1)Ma(锆石 SIMS)	Guo等, 2012		
		含石榴石细粒黑云母花岗岩	(161±3)Ma(锆石 SIMS)	Guo等, 2012	(158±1)Ma(辉钼矿 Re-Os)	Hu等, 2012
		含石榴石细粒斑状黑云母花岗岩	(159±2)Ma(锆石 SIMS)	Guo等, 2012	(153±2)Ma(白云母 Ar-Ar)	Hu等, 2012
		微细粒斑状黑云母花岗岩	(158±2)Ma(锆石 SIMS)	Guo等, 2012		
	荡坪W矿	斑状花岗岩	(159±3)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	杨競红等, 2009		
斑状黑云母花岗岩		(155±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	杨競红等, 2009			
中细粒斑状花岗岩		(157±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	杨競红等, 2009			
黑云母花岗岩		(158±2)Ma(锆石 LA-ICP-MS)	杨競红等, 2009			

续表1						
地区	矿床名称	岩石类型	成岩年龄	参考文献	成矿年龄	参考文献
赣南	淘锡坑W矿	花岗岩	(159±4)Ma(锆石SHRIMP)	郭春丽等, 2007	(154±4)Ma(辉钼矿Re-Os)	陈郑辉等, 2006
		花岗岩	(158±4)Ma(锆石SHRIMP)	郭春丽等, 2007	(154±4)Ma(石英Rb-Sr)	郭春丽等, 2007
					(157±3)Ma(石英Rb-Sr)	郭春丽等, 2007
					(161±4)Ma(石英Rb-Sr)	郭春丽等, 2007
	洪水寨W矿	九龙脑岩体	(156±1)Ma(锆石SHRIMP)	丰成友等, 2011	(156±1)Ma(辉钼矿Re-Os)	丰成友等, 2011
	漂塘W-Sn矿	斑状黑云母花岗岩	(162±1)Ma(锆石U-Pb)	张文兰等, 2009	(152±2)Ma(白云母Ar-Ar)	张文兰等, 2009
					(153±1)Ma(白云母Ar-Ar)	Bai等, 2013
					(157±1)Ma(白云母Ar-Ar)	Bai等, 2013
					(157±1)Ma(白云母Ar-Ar)	Bai等, 2013
					(159±1)Ma(白云母Ar-Ar)	Bai等, 2013
					(159±1)Ma(锡石Ar-Ar)	Bai等, 2013)
					(154±3)Ma(黑钨矿Ar-Ar)	Bai等, 2013
					(161±9)Ma(黑钨矿Ar-Ar)	Bai等, 2013
					(157±1)Ma(黑钨矿Ar-Ar)	Bai等, 2013
	木梓园W-Sn矿	含云母花岗岩	(153±2)Ma(锆石U-Pb)	张文兰等, 2009	(151±9)Ma(辉钼矿Re-Os)	张文兰等, 2009
	大吉山W矿	花岗岩	(152±2)Ma(锆石U-Pb)	张文兰等, 2006	(144±1)Ma(云母Ar-Ar)	张文兰等, 2006
					(147±2)Ma(云母Ar-Ar)	张文兰等, 2006
					(153±2)Ma(白云母K-Ar)	蒋国豪等, 2004
					(158±3)Ma(白云母K-Ar)	蒋国豪等, 2004
	盘古山W矿	花岗岩	(162±2)Ma(锆石LA-ICP-MS)	方贵聪等, 2014	(155±3)Ma(辉钼矿Re-Os)	方贵聪等, 2014
	岿美山W矿	黑云母花岗岩	(158±3)Ma(锆石SHRIMP)	李丽侠等, 2014	(158±1)Ma(辉钼矿Re-Os)	曾载淋等, 2011
	焦里W矿	斑状花岗闪长岩	(164±1)Ma(锆石SHRIMP)	丰成友等, 2012b	(159±6)Ma(辉钼矿Re-Os)	曾载淋等, 2011
	宝山W矿	花岗岩	(157±4)Ma(锆石SHRIMP)	丰成友等, 2012b	(161±2)Ma(辉钼矿Re-Os)	丰成友等, 2012b
		花岗岩	(158±3)Ma(锆石SHRIMP)	郭春丽等, 2011		
	摇篮寨W矿	张天堂白云母花岗岩	(157±2)Ma(锆石SHRIMP)	Feng等, 2011)	(156±3)Ma(辉钼矿Re-Os)	Feng等, 2011
	茅坪W-Sn矿	天门山黑云母花岗岩	(152±2)Ma(锆石SHRIMP)	刘善宝等, 2007	(157±4)Ma(辉钼矿Re-Os)	曾载淋等, 2009
		天门山黑云母花岗岩	(152±3)Ma(锆石SHRIMP)	刘善宝等, 2007	(155±3)Ma(辉钼矿Re-Os)	Feng等, 2011
		天门山花岗斑岩	(151±2)Ma(锆石SHRIMP)	刘善宝等, 2007	(150±3)Ma(辉钼矿Re-Os)	Feng等, 2011
		天门山黑云母花岗岩	(167±5)Ma(锆石SHRIMP)	曾庆涛等, 2007		
	牛岭W矿	红桃岭黑云母花岗岩	(151±3)Ma(锆石SHRIMP)	Feng等, 2011	(155±10)Ma(辉钼矿Re-Os)	Feng等, 2011
	樟斗W矿	黑云母花岗岩	(151±3)Ma(锆石SHRIMP)	Feng等, 2011	(155±4)Ma(辉钼矿Re-Os)	Feng等, 2011
	八仙脑W矿	黑云母花岗岩	(157±2)Ma(锆石SHRIMP)	Feng等, 2011	(149±7)Ma(辉钼矿Re-Os)	Feng等, 2011
		斑状黑云母二长花岗岩	(152±3)Ma(锆石SHRIMP)	Feng等, 2011		
	画眉坳W矿	黑云母花岗岩	(160±1)Ma(锆石LA-ICP-MS)	Feng等, 2015	(159±3)Ma(辉钼矿Re-Os)	Feng等, 2015
					(158±1)Ma(白云母Ar-Ar)	Feng等, 2015

苏慧敏等:赣南和赣北-皖南钨成矿带含钨花岗岩及其成矿作用特征对比研究

碱性系列岩石,但赣南花岗岩具有更高的 SiO_2 含量(图2)。此外,与赣北-皖南含钨花岗岩相比,赣南花岗岩具有偏低的 Al_2O_3 、 TiO_2 和 MgO 含量以及显著低的 P_2O_5 含量。在 A/CNK-A/NK 图解上(图3),两个地区的含钨花岗岩均属于铝过饱和岩石,但是赣南地区含钨花岗岩以弱过铝质为主,而赣北-皖南地区则变化范围较大,既有弱过铝质的,也有强过铝质的岩石。

从球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上可以看出(图4和5),除了大湖塘矿区少量的高分异白云母花岗岩外,赣北-皖南地区含钨花岗岩总体呈现右倾斜的配分曲线特征,总体上富集轻稀土, $(\text{La}/\text{Yb})_N=1.80\sim39.45$,轻重稀土分馏明显,且大部分样品具有中等的Eu负异常。赣南地区含钨花岗岩则总体呈现水平形式,特别

图3 赣北-皖南和赣南含钨花岗岩 A/NK-A/CNK 图解
数据来源: 朱溪(王先广等, 2015); 西华山(Guo等, 2012); 其他数据同图2, 图例同图2

图2 赣北-皖南和赣南含钨花岗岩 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O+Na}_2\text{O}$ (a)和 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ (b)图解

数据来源: 大湖塘(黄兰椿和蒋少涌, 2012, 2013; 项新葵等, 2012b; Huang和Jiang, 2014; 张志辉, 2014; Mao等, 2015; 彭花明, 2015); 朱溪(陈国华等, 2015; 王先广等, 2015); 竹溪岭(陈雪霏等, 2013); 香炉山和百丈岩(李春海, 2016); 西华山(肖剑等, 2009; 吕科等, 2011; Guo等, 2012); 九龙岗(丰成友等, 2011; 郭春丽等, 2011); 淘锡坑(郭春丽等, 2011); 漂塘和大吉山(华仁民等, 2003). (a) Cox等(1979)

是西华山, 淘锡坑和漂塘矿区的花岗岩, 呈现典型的“海鸥式”稀土配分型式, $(\text{La}/\text{Yb})_N=0.15\sim5.33$, 轻重稀土分异不明显。相较于赣北-皖南地区含钨花岗岩, 赣南地区含钨花岗岩的另一个显著特征是具有较强烈的Eu负异常。

赣北-皖南和赣南含钨花岗岩的微量元素组成特征总体上也存在诸多相似之处, 例如二者均显示明显富集Rb、U、Th等大离子亲石元素, 亏损Nb、Zr和Ti等高场强元素, 且相对亏损Ba、Sr、P等元素(图4和5)。值得注意的是, 赣南地区含钨花岗岩的Sr、P、Eu和Ti的亏损程度明显比赣北-皖南地区含钨花岗岩的更为强烈, 暗示前者经历了更高层次的斜长石、磷灰石和钛铁矿的分离结晶。

K/Rb比值可以反映岩浆分异演化的程度, 低K/Rb比值通常是高演化岩浆体系的重要特征之一(Shaw, 1968; Irber, 1999)。赣北-皖南和赣南地区含矿花岗岩的K/Rb比值普遍偏低, 平均值分别为120.3和65.56, 表明二者都经历了较高级的演化, 并且赣南地区花岗岩的演化程度整体高于赣北-皖南地区含矿花岗岩。岩石的Zr/Hf比值是表征岩浆体系演化程度及是否发生流体交代作用的一个重要参数, 花岗岩的这一比值随着演化程度的增加或流体交代作用的发生而降低(Shaw, 1968; Irber, 1999)。赣北-皖南和赣南含钨花岗岩的Zr/Hf平均比值分别为26.52和15.62, 明显低于一般花岗岩的平均值(39), 表明他们都发生了强烈的岩浆分异作用或流体交代作用。相比赣北-皖南地区含钨花岗岩, 赣南地区的含钨花岗岩具有偏低的Zr/Hf比值,

图4 赣北-皖南含钨花岗岩稀土元素球粒陨石标准化型式图((a), (c), (e), (g), (i))和微量元素原始地幔标准化型式图((b), (d), (f), (h), (j))

球粒陨石和原始地幔标准化的值分别据Taylor和McLennan(1995)、Sun和McDonough(1989)。数据来源: 大湖塘(黄兰椿和蒋少涌, 2012, 2013; Huang和Jiang, 2014; 张志辉, 2014; Mao等, 2015; 彭花明, 2015), 朱溪(李岩等, 2014; 陈国华等, 2015; 王先广等, 2015); 其他数据同图2

图5 赣南含钨花岗岩稀土元素球粒陨石标准化型式图(a), (c), (e), (g), (i)和微量元素原始地幔标准化型式图(b), (d), (f), (h), (j)

球粒陨石和原始地幔标准化的值分别据Taylor和McLennan(1995)、Sun和McDonough(1989). 数据来源: 西华山、九龙脑、淘锡坑、漂塘和大吉山数据同图2

指示其演化程度更高,同时也说明其发生了更大规模的流体交代作用.研究表明,由于高度演化的熔体中挥发分和碱性元素的富集会降低残余花岗质体系的固相线温度(Glyuk和Anfilogov, 1973; Kovalenko, 1978; Manning, 1981; Xiong等, 1999),导致岩浆-热液体系的共存(Burnham和Ohmoto, 1980; London, 1986; London等, 1989; Bau, 1996),因此流体/熔体相互作用是控制花岗岩产生四分组效应的重要因素(Irber, 1999; Zhao等, 2002).赣南地区多个钨矿床中花岗岩的稀土元素配分模式都显示典型的“四分组效应”(如西华山、漂塘、大吉山等, 华仁民等, 2003; Guo等, 2012),同样表明赣南花岗岩在岩浆结晶作用晚期可能经受了更为强烈的富挥发分流体交代作用.

已有研究表明,随着壳幔的分离和陆壳的逐渐演化, Rb倾向于富集在成熟度高,演化充分的地壳中,而Sr则倾向于在成熟度较低,演化不充分的地壳中富集(王德滋和刘昌实, 1993).因此,高的Rb/Sr比值可能表明其物源组来自于演化程度较高的成熟地壳.总体而言,赣北-皖南和赣南的含钨花岗岩均具有较高的Rb/Sr比值(平均值分别为10.06和27.26),远高于大陆地壳的平均值(0.24).相较之下,赣南花岗岩的Rb/Sr比值明显偏高,表明赣南地区含矿花岗岩可能来源于更为成熟的地壳,且经历了更强烈的分异过程.这也与上述微量元素组成特征所反映的结果一致.总体而言,赣北-皖南和赣南地区含钨花岗岩都是分异演化程度较高的岩石,并且赣南地区含矿花岗岩经历了更高程度的分异过程以及遭受了更为强烈

的流体交代作用.

4 物质来源分析

虽然赣北-皖南和赣南地区含钨花岗岩的地球化学特征(华仁民等, 2003; 郭春丽等, 2011; Huang和Jiang, 2014)总体上类似于华南陆壳改造型花岗岩(刘英俊等, 1984; 徐克勤等, 1984),但是赣南地区含矿花岗岩相较于赣北-皖南地区含矿花岗岩具有更高的SiO₂含量,较高的Rb/Sr比值,较低的Zr/Hf和LREE/HREE比值和Eu/Eu*值,表明二者的源区物质在成分上存在着一定的差异.

实验表明,不同成分的源区物质经过部分熔融形成的过铝质花岗岩会造成不同的CaO/Na₂O比值:泥岩生成的花岗岩的CaO/Na₂O比值(<0.3)要小于碎屑岩生成花岗岩的CaO/Na₂O比值(>0.3, Sylvester, 1998).此外,由于过铝花岗岩中Rb、Sr、Ba等元素主要赋存在长石和黑云母中,因此Rb/Ba和Rb/Sr比值也可以灵敏地记录源区成分的变化.赣北朱溪花岗岩具有较高的CaO/Na₂O比值(>0.3)和较低的Rb/Sr比值,暗示其可能起源于贫粘土的砂屑岩的源区(图6).赣北大湖塘花岗岩已有的元素地球化学数据在Rb/Sr-CaO/Na₂O图解中落入了砂屑岩和泥质岩源区的交界区,在Rb/Sr-Rb/Ba图解中(图6a),则主要落入富粘土源区,但也有少量数据点落入了贫粘土源区.如上所述,岩石的高度分异也会造成Rb/Sr比值偏大.因此赣北大湖塘花岗岩的源岩既有泥质岩,也有砂屑岩.而赣南的含钨花岗岩

图6 赣北-皖南和赣南含钨花岗岩的Rb/Sr-Rb/Ba(a)和Rb/Sr-CaO/Na₂O(b)图解

数据来源: 大湖塘(黄兰椿和蒋少涌, 2012, 2013; Huang和Jiang, 2014; 张志辉, 2014; Mao等, 2015; 彭花明, 2015); 朱溪(王先广等, 2015), 其他数据同图2. 据Sylvester(1998)

在Rb/Sr-CaO/Na₂O图解上(图6b)绝大部分落入了泥质岩源区,在Rb/Sr-Rb/Ba图解中(图6a)则全部落入富粘土源区,表明赣南地区含矿花岗岩的源区为富粘土的泥质岩。综上所述,赣南含钨花岗岩比赣北-皖南岩石具有更为成熟的物质源区。

赣北-皖南和赣南地区的含钨花岗岩都具有负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,变化范围分别在-9.36~4.06和-11.41~9.10,

利用两阶段模式年龄计算出来的Nd同位素模式年龄分别为1349~1689Ma和1686~1872Ma,表明它们主要是由壳源物质重熔的产物。需要指出的是,在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 图解上(图7a),二者呈现出一定的差异性。赣北-皖南含钨花岗岩的Nd同位素数据主要落在华南元古代陆壳演化线A线附近,且主要位于该区新元古界基底岩石双桥山群演化线范围的中部,而赣南地区含矿花岗岩则

图7 赣北-皖南和赣南含钨花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t (a)和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t (b)图解

数据来源: (a) 大湖塘(黄兰椿和蒋少涌, 2012, 2013; Huang和Jiang, 2014; Mao等, 2015; 彭花明, 2015); 香炉山(李春海, 2016); 东源(周洁等, 2015); 西华山(沈渭洲和王银喜, 1994); 九龙脑和淘锡坑(郭春丽等, 2011); (b) 大湖塘(黄兰椿和蒋少涌, 2013; Huang和Jiang, 2014; 张志辉, 201; 彭花明, 2015); 朱溪(李岩等, 2014; 陈国华等, 2015); 竹溪岭(陈雪霏等, 2013); 东源(周洁等, 2015); 西华山(Guo等, 2012). (a) 沈渭洲等(1995)

位于华南元古代地壳Nd同位素演化线范围内。前人总结了华南江南造山带和华夏地块基底变质岩的Nd-Sr同位素组成, 江南造山带的古老变质沉积岩基底主要包括上溪群/双桥山群/板溪群/四堡群(同一地层在不同地区的名称有所差异), 华夏地块则为陈蔡群。根据Sm-Nd资料统计, 江南造山带的变质基底代表了成熟度较低、形成较晚的元古代地壳, 而华夏地块变质沉积岩则代表了成熟度较高、形成较早的元古代地壳(沈渭洲等, 1995)。这些特征也反映了赣北-皖南含钨花岗岩是由成熟度较低的, 形成时代较新的新元古代双桥山群的砂质岩和泥质岩衍生而成的产物, 而赣南地区含矿花岗岩则主要来自于成熟度较高的, 形成较早的中元古代富粘土质泥岩。

花岗岩的形成过程中是否有幔源岩浆的参与以及幔源岩浆参与的形式和比例已经引起了越来越多的重视和研究。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解上(图7b), 赣南地区含矿花岗岩主要位于下地壳的演化线上, 表明其主要起源于下地壳岩石的部分熔融。华仁民等(2010)指出, 在赣南-粤北地区大量与钨矿化相关的花岗岩在其形成和演化过程中, 很少或几乎没有地幔物质的参与。Guo等(2012)对西华山矿区花岗岩中锆石的O同位素进行了测定, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 的值变化于6.93~11.23‰(平均值为9.0‰), 加上其较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-14.0~-4.8, 平均为-10.21), 表明没有或只有少量幔源物质的卷入。王旭东等(2009)对漂塘钨矿硫化物中流体包裹体的He同位素组成进行测定, 得出其成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.17~0.86Ra。该值介于地壳(0.01~0.05Ra)和饱和大气水(1Ra)之间而明显低于地幔的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(6~9Ra), 表明漂塘钨矿床成矿流体以混有部分饱和大气水的地壳流体为主, 没有明显幔源流体参与。

相比于赣南地区含矿花岗岩, 赣北-皖南地区含矿花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显偏高, 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解上主要位于下地壳和球粒陨石演化线之间(图7b)。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄频率直方图上也可以看出明显的规律(图8): 与赣南含矿花岗岩相比, 赣北-皖南含钨花岗岩具有更高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 峰值和更年轻的二阶段Hf同位素模式年龄。但是, 笔者认为在赣北-皖南含矿花岗岩的形成过程中亦没有显著的地幔起源的岩浆被卷入进来, 理由如下: (1) 如上所述, 在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 图解上(图7a), 赣北-皖南地区含矿花岗岩主要落于江南造山带上广泛出露的变质基底——低成熟度的双桥山群中。双桥

山群的岩性主要是千枚岩、板岩和变质砂岩等夹少量的变质火成岩。当将这套变质基底岩石的Sr-Nd同位素组成校对到 t 为140~120Ma, 双桥山群岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别变化于0.715~0.742和-2.1~-10.6(Chen等, 1991; 马长信和项新葵, 1993; Chen和Jahn, 1998; Li等, 2008; Xie等, 2011), 与赣北-皖南地区含钨花岗岩的对应值基本一致; (2) 南岭含锡花岗岩锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-8~-2)明显高于南岭含钨花岗岩(-14~-8), 且含锡花岗岩中常见暗色包体, 其形成温度也明显高于含钨花岗岩, 暗示在含锡花岗岩的物源中可能有明显地幔物质的贡献(陈骏等, 2014)。虽然赣北-皖南地区含钨花岗岩与南岭含锡花岗岩具有相似的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 但是在赣北-皖南地区含钨花岗岩中未见到典型的地幔岩浆侵入作用的“暗色包体”或“基性岩脉”特征。再者, 利用Watson和Harrison(1983)所提出的花岗岩锆石饱和温度计计算得知, 赣北-皖南地区含钨花岗岩的成岩温度集中在650~776℃(平均值为737℃), 可见其成岩温度并不高, 明显低于南岭含锡花岗岩(>850℃, 陈骏等, 2014), 而与赣南地区含钨花岗岩的成岩温度一致(集中在661~789℃, 平均为744℃), 进一步表明赣北-皖南地区含矿花岗岩的形成过程中没有明显幔源物质的参与。综上所述, 赣北-皖南和赣南地区含钨花岗岩主要是壳源形成的, 在其形成过程中均没有明显地幔组分的加入。二者的物质源区呈现明显差异的原因主要是由于它们是由不同性质的变质基底部分熔融而形成的。

5 形成环境对比

如上所述, 不管是赣北-皖南与钨-铜(钼)相关的还是赣南与钨相关的花岗岩都经历了高度的演化。高度演化花岗岩类的一个共同特征是F、Cl、B、Li等挥发组分的富集(华仁民等, 2003)。而挥发分含量的增加会大大提高花岗质岩浆活动的流动性, 从而使其可以上侵至较高的位置。华仁民等(2005)研究发现华南燕山期多金属成矿作用往往与侵位深度较浅的小岩体关系密切。利用花岗岩中黑云母的全铝含量, 可以计算成岩的压力, 从而换算出岩体侵位深度(Uchida等, 2007)。依据上述方法计算得知, 赣北-皖南和赣南地区含矿花岗岩体的形成深度都比较浅(不超过20km)。

根据花岗岩中与长石共生黑云母的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和

图8 赣北-皖南和赣南含钨花岗岩的锆石Hf同位素对比

数据来源: 赣北-皖南(陈雪霏等, 2013; 黄兰椿和蒋少涌, 2013; Huang和Jiang, 2014; 李岩等, 2014; 张志辉, 2014; 陈国华等, 2015; 彭花明, 2015; 周洁等, 2015); 赣南(Guo等, 2012)

Mg^{2+} 的原子百分数可以估算岩浆体系的氧逸度(Wones和Eugster, 1965; Barrière和Cotten, 1979). 在黑云母的 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+} 三元图解上可以看出(图9), 虽然赣北-皖南和赣南钨矿区的花岗岩中黑云母样品落在了一个很宽的范围内, 但是与成矿密切相关的或者演化晚阶段的花岗岩中的黑云母基本都落在了NNO缓冲线以下(图9中灰色阴影部分), 表明其形成于较低的氧逸度环境.

6 含矿性差异探讨

根据上述赣北-皖南和赣南含钨花岗岩的地球化学特征和形成环境的对比分析, 笔者认为二者之所以形成不同的矿化组合, 不是岩体类型和形成环境的差异所致, 而是受花岗岩岩浆的源区物质控制以及演化

图9 赣北-皖南和赣南含钨花岗岩中黑云母的 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+} 三元图解

数据来源: 赣北-皖南(Huang和Jiang, 2014; 王辉等, 2015); 赣南(蒋国豪等, 2005; 李洁等, 2013). 底图据Wones和Eugster(1965)

分异程度的影响.

W是一种不相容性极强的亲氧元素, 易于在富含泥质的细碎沉积物中富集, 在自然界中呈+6价态. 目前在自然界已经查明的含W矿物有20余种, 均以化合

物状态存在, 具有工业经济价值的主要为黑钨矿和白钨矿(Ertel等, 1996). 对于赣南乃至整个南岭东段形成大量以W为主矿床的成因, 前人已经进行了较为详尽的研究和总结(毛景文等, 2007; 华仁民等, 2010; 陈骏等, 2014; 郭春丽等, 2014). 赣南地区不仅与W矿有关的花岗岩体具有较高的W背景值(肖剑等, 2009), 而且该类矿床的围岩地层也具有较高的W含量, 其晚元古界、寒武系和泥盆系地层中的W含量是大陆地壳平均含量的几倍甚至几十倍(华仁民等, 2010). 这些地层有可能为该区大型-超大型W矿的形成提供了物质基础.

与赣南以单一钨矿为主的特征不同, 位于江南造山带上的赣北-皖南地区往往出现钨-铜(钼)等多金属组合. 从元素本身的地球化学性质来看, 钨与铜存在着巨大的差异. 与钨强烈的亲氧性特征不同, 铜属于典型的亲硫元素, 在自然界中主要形成硫化物. 钨倾向于在地壳中富集, 而铜则起源于地幔. 因此, 如赣北-皖南地区出现的钨-铜密切共生的成矿现象在国际上也是不多见的(蒋少涌等, 2015). 前人的研究已经表明, 该区钨-铜(钼)矿化的形成与燕山期花岗岩存在着密切的时空及成因联系. 如前所述, 这些花岗岩主要起源于新元古代双桥山群——一套成熟度比较低的变质泥砂质夹变玄武质-安山质岩系组合. 这套新元古代岩石中不仅有很高的钨含量, 而且铜、金、铅、锌等金属元素的含量也很高. 例如该地层中钨和铜的含量分别达到了9.13和38.1ppm, 是现代地壳平均值的9倍和1.4倍(现代大陆地壳中钨平均值为1ppm, 铜为27ppm, Rudnick和Gao, 2004), 而其中所夹的中基性火山岩——细碧角斑岩中Cu的含量更是高达84.2~174ppm(彭花明, 2015), 是地壳平均值的3.1~6.4倍. 另外, 从区域地质背景来看, 沿杭州至萍乡一带的中-新元古代地层中发现和探明了一系列海底喷流沉积型铜锌矿床, 如浙江绍兴的平水铜矿、江西弋阳铁砂街铜矿和江西万载县罗城铜矿等, 组成了钦杭带上一个重要的新元古代海底喷流沉积型铜多金属成矿系列(毛景文等, 2011). 中元古代蓟县群细碧角斑岩系中段上部的含火山碎屑岩及富含钾质、泥质的泥灰岩是铁砂街铜矿的重要赋矿层位. 罗平(2010)利用锆石SHRIMP U-Pb定年测得该层位中的细碧角斑岩和绢云千枚岩的年龄分别为(1153±38)和(902±23)Ma, 而贺菊瑞等(2008)测得该矿区铜矿石的Re-Os同位素年龄为858Ma. 浙江平水铜矿的容矿围岩为晚元古代双溪坞群细碧角斑岩, 陈

辉等(2016)对其中的细碧岩和角斑岩分别进行了锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄测定, 得出其加权平均年龄分别为(952±5)和(954±8)Ma, 表明该矿床形成于新元古代早期. 这些细碧角斑岩系都属于典型的岛弧火山岩(陈志洪等, 2009; 李春海等, 2010), 铜和锌等成矿物质可能来源于洋壳(毛景文等, 2011). 因此推测, 新元古代地层中铜多金属的富集可能与这些富铜的岛弧火山岩及其风化剥蚀产物有成因联系, 这些新元古代的泥砂质和玄武质-安山质岩系在早白垩世发生部分熔融, 便形成了含钨铜矿质的花岗质岩浆.

赣北-皖南地区的另一个显著特征是大量白钨矿的出现. 赣南地区的钨矿以石英脉型为主, 还有云英岩型、矽卡岩型、破碎带型和斑岩型等多种类型, 且以产出黑钨矿为主, 仅有个别为矽卡岩型白钨矿床(如焦里矿区), 而赣北-皖南地区则以岩浆-热液型和矽卡岩型白钨矿矿床为主. 钨在成矿热液中以络阴离子形式 $[\text{WO}_4]^{2-}$ 与 Fe^{2+} 或 Mn^{2+} 结合形成黑钨矿族, 与 Ca^{2+} 结合形成白钨矿. 世界上的白钨矿主要为矽卡岩型, 可见白钨矿的形成受钙质围岩成分的影响最为显著. 赣南地区钨矿床的赋矿围岩主要为寒武系的变质砂板岩, 次为震旦系、奥陶系和上泥盆统的碎屑岩建造, 岩性包括石英砂岩、粉砂岩和含砾石英粗砂岩, 局部变质为变余砂岩、板岩和千枚岩等. 赣北-皖南地区钨矿床的赋矿围岩则多为奥陶系-二叠系的灰岩、泥灰岩、粉砂质泥岩等钙质围岩, 少量为元古代浅变质火山-陆源碎屑硅铝质岩石, 矿体受花岗岩和围岩碳酸盐地层的控制明显. 可见, 赣北-皖南钨矿体的围岩碳酸盐地层为其提供了钙质来源. 因此, 赋矿围岩的岩性不同可能是导致赣北-皖南和赣南钨矿种属差异的主要原因.

大湖塘钨矿床是赣北地区一个代表性的矿床, 该矿床中细脉浸染状白钨矿体的出现使其一跃成为一个世界瞩目的超大型矿床. 然而, 与该区其他的白钨矿床以碳酸盐岩地层为主要赋矿围岩不同, 大湖塘矿区大量出露的晋宁期花岗闪长岩是其最重要的赋矿围岩. 前人的研究表明, 该花岗闪长岩中的钙质成分较高(胡正华, 2015), 其中的长石主要为中长石(王辉等, 2015), 且角闪石发生了广泛的黑鳞云母化. 因此推测, 在云英岩化和钠长石化过程中, 包含在斜长石中和角闪石中的大量 Ca^{2+} 被置换出来, 为这些围岩中沉淀大规模的细脉浸染状白钨矿矿体提供了钙源. 显

然,上述推论与我们的传统认识,即白钨矿矿床的钙源主要来自于碳酸盐地层,截然不同.这也为我们寻找新类型的钨矿床提供了开拓性的思路.

7 含钨花岗岩形成的构造背景

已有的研究表明,在晚中生代,包括华南在内的整个中国东部发生了大规模的花岗岩侵位和火山喷发,并伴随着大规模的成矿作用(陶奎元等, 1999; 华仁民和毛景文, 1999; 毛景文等, 1999).虽然前人进行了广泛的研究,但是对于这些多金属矿床及其相关的花岗质岩石形成的地球动力学背景仍然存在很大的争议.争论的焦点是是与特提斯造山机制有关,还是与古太平洋俯冲作用有关(Gilder等, 1996; Chen等, 2007; Li和Li, 2007).不同的学者试图从与成矿作用有关的花岗质岩石或成矿体系本身进行论述.如Zhong等(2017a, 2017b)收集了华南中生代的Mo矿床和浅成低温热液矿床,并提出这些矿床在早燕山期(180~130Ma)形成于古特提斯闭合后的同碰撞到后碰撞构造背景下;而郭春丽等(2013)以及毛景文等(2011)通过对钦杭带上与侏罗纪两套不同成矿系列(中侏罗世斑岩-矽卡岩-热液脉状铜金多金属矿床和晚侏罗世云英岩-石英脉-矽卡岩钨锡多金属矿床)及其有关的花岗岩进行对比研究,提出该带大规模的成岩成矿事件形成于与太平洋俯冲作用有关的弧后伸展环境中.

虽然具体的成岩成矿动力学机制仍有不同的认识,但是对于华南晚侏罗世-早白垩世的多金属矿床及其相关的花岗质岩石主要形成于岩石圈拉张-伸展的构造背景已经被越来越多的学者所接受(Wang等, 2013).不管是赣北-皖南地区W-Cu(Mo)矿床所处的江南造山带,还是赣南地区W矿床所处的南岭构造带都是构造薄弱带,容易在后期的地质作用下再次活化.在晚侏罗世-早白垩世,大陆岩石圈的持续拉张-减薄导致了玄武质岩浆的底侵,并诱发了大规模的地壳物质发生部分熔融,而这些构造薄弱带成为了岩浆活动和成矿作用的中心.此外,由于江南造山带和南岭地区古老变质基底的显著不同,形成了赣北-皖南以W-Cu(Mo)的矿种组合而赣南以单一W矿床为主的成矿差异性.

8 结论

(1) 赣南地区钨矿床的成岩成矿作用是一次相对

集中的事件,时间集中在晚侏罗世(165~150Ma).赣北-皖南地区钨-铜(钼)矿床的成岩成矿作用则呈现出年龄新,跨度大,期次多的特点.

(2) 赣北-皖南和赣南地区含钨花岗岩都是富硅的高钾钙碱性系列岩石,其元素地球化学特征显示,二者都属于分异演化程度比较高的岩石,赣南含钨花岗岩经历了更高分异并遭受了更为强烈的流体交代作用.

(3) 赣北-皖南地区含钨花岗岩是由成熟度较低的,形成时代较年轻的新元古代双桥山群中一套砂质-泥质岩夹变火山岩岩系部分熔融形成的;赣南地区含钨花岗岩则是由成熟度比较高的,形成较早的中元古代富粘土质泥岩部分熔融而成的.

(4) 赣北-皖南地区钨-铜(钼)矿和赣南地区钨矿在成矿作用上的差别,主要受花岗岩岩浆的源区物质控制以及演化分异程度的影响.

致谢 承蒙两位审稿人及特约编委提出建设性修改意见,在此表示衷心的感谢.

参考文献

- 陈国华, 舒良树, 舒立旻, 张诚, 欧阳永棚. 2015. 江南东段朱溪钨(铜)多金属矿床的地质特征与成矿背景. 中国科学: 地球科学, 45: 1799-1818
- 陈辉, 倪培, 陈仁义, 吕志成, 庞振山, 王国光, 袁慧香. 2016. 浙西北平水铜矿细碧角斑岩成岩年龄及其地质意义. 中国地质, 43: 410-418
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 陆建军, 马东升. 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用. 中国科学: 地球科学, 44: 111-121
- 陈雪霏, 汪应庚, 孙卫东, 杨晓勇. 2013. 皖南宁国竹溪岭地区花岗岩锆石U-Pb年代学及地球化学及其成因研究. 地质学报, 87: 1662-1678
- 陈郑辉, 王登红, 屈文俊, 陈毓川, 王平安, 许建祥, 张家菁, 许敏林. 2006. 赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代. 地质通报, 25: 496-501
- 陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 董永观, 陈荣, 曾勇, 李龙明, 贺振宇, 赵玲. 2009. 浙江平水群角斑岩的成因: 锆石U-Pb年龄和Hf同位素制约. 科学通报, 54: 610-617
- 方贵聪, 陈毓川, 陈郑辉, 曾载淋, 张永忠, 童启荃, 孙杰, 黄鸿新, 郭娜欣. 2014. 赣南盘古山钨矿床锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄及其意义. 地球学报, 35: 76-84
- 丰成友, 黄凡, 曾载淋, 屈文俊, 丁明. 2011. 赣南九龙脑岩体及洪水寨云英岩型钨矿年代学. 吉林大学学报(地球科学版), 41: 111-121

- 丰成友, 张德全, 项新葵, 李大新, 瞿泓滢, 刘建楠, 肖晔. 2012a. 赣西北大湖塘钨矿床辉钼矿Re-Os同位素定年及其意义. 岩石学报, 28: 3858-3868
- 丰成友, 曾载淋, 王松, 梁景时, 丁明. 2012b. 赣南砂卡岩型钨矿成岩成矿年代学及地质意义——以焦里和宝山矿床为例. 大地构造与成矿学, 36: 337-349
- 郭春丽, 王登红, 陈毓川, 王彦斌, 陈郑辉, 刘善宝. 2007. 赣南中生代淘锡坑钨矿区花岗岩锆石SHRIMP年龄及石英脉Rb-Sr年龄测定. 矿床地质, 26: 432-442
- 郭春丽, 陈毓川, 黎传标, 陈郑辉, 楼法生. 2011. 赣南晚侏罗世九龙脑钨锡铅锌矿集区不同成矿类型花岗岩年龄、地球化学特征对比及其地质意义. 地质学报, 85: 1188-1205
- 郭春丽, 许以明, 楼法生, 郑佳浩. 2013. 钦杭带侏罗纪与铜和锡矿有关的两类花岗岩对比及动力学背景探讨. 岩石矿物学杂志, 32: 463-484
- 郭春丽, 陈振宇, 楼法生, 许以明. 2014. 南岭与钨锡矿床有关晚侏罗世花岗岩的成矿专属性研究. 大地构造与成矿学, 38: 301-311
- 贺菊瑞, 王爱国, 芮行健, 曾勇, 李春海. 2008. 江西弋阳铁砂街中元古代海底火山喷流成矿作用. 资源调查与环境, 29: 261-269
- 胡正华. 2015. 赣东北朱溪钨多金属矿床形成条件与成矿规律. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学. 1-194
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. 矿床地质, 18: 300-308
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 王汝成. 2003. 赣南大吉山与漂塘花岗岩及有关成矿作用特征对比. 高校地质学报, 9: 609-619
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用. 矿床地质, 24: 99-107
- 华仁民, 李光来, 张文兰, 胡东泉, 陈培荣, 陈卫锋, 王旭东. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探. 矿床地质, 29: 9-23
- 黄兰椿, 蒋少涌. 2012. 江西大湖塘钨矿床似斑状白云母花岗岩锆石U-Pb年代学、地球化学及成因研究. 岩石学报, 28: 3887-3900
- 黄兰椿, 蒋少涌. 2013. 江西大湖塘富钨花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及成因研究. 岩石学报, 29: 4323-4335
- 蒋国豪, 胡瑞忠, 谢桂青, 赵军红, 唐群力. 2004. 江西大吉山钨矿成矿年代学研究. 矿物学报, 24: 253-256
- 蒋国豪, 胡瑞忠, 谢桂青, 赵军红. 2005. 大吉山花岗岩体黑云母地球化学特征及其成岩成矿意义. 矿物岩石, 25: 58-61
- 蒋少涌, 彭宁俊, 黄兰椿, 徐耀明, 占岗乐, 但小华. 2015. 赣北大湖塘矿集区超大型钨矿地质特征及成因探讨. 岩石学报, 31: 639-655
- 李斌, 张赞赞, 吴明安, 周涛发, 赵文广, 蔡晓兵, 狄勤松. 2015. 皖南宁国大坞尖钨钼矿床成岩成矿年龄——以花岗闪长斑岩锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄为依据. 地质通报, 34: 569-578
- 李春海, 邢光福, 姜耀辉, 董永观, 俞锡明, 陈志洪, 姜杨, 陈荣. 2010. 浙江平水铜矿含硫化物石英脉锆石U-Pb定年及其地质意义. 中国地质, 37: 477-487
- 李春海. 2016. 扬子板块东南缘北东段钨矿成矿作用年代学及成矿机制研究. 博士学位论文. 南京大学. 1-116
- 李洁, 钟军伟, 于洋, 黄小龙. 2013. 赣南西华山花岗岩的云母成分特征及其对岩浆演化与成矿过程的指示. 地球化学, 42: 393-404
- 李丽侠, 陈郑辉, 施光海, 张思明, 屈文俊, 应立娟, 秦燕, 丁琼. 2014. 江西岢美山钨矿矿床的成矿年龄及地质特征. 岩矿测试, 33: 287-295
- 李岩, 潘小菲, 赵苗, 陈国华, 张天福, 刘茜, 张诚. 2014. 景德镇朱溪钨(铜)矿床花岗岩斑岩的锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其与成矿关系探讨. 地质论评, 60: 693-708
- 林黎, 占岗乐, 喻晓平. 2006. 江西大湖塘钨(锡)矿田地质特征及远景分析. 资源调查与环境, 27: 25-32
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 许建祥, 曾载林, 应立娟, 王成辉. 2007. 南岭东段赣南地区天门山花岗岩体及花岗岩斑岩脉的SHRIMP定年及其意义. 地质学报, 81: 972-978
- 刘英俊, 张景荣, 孙承轅, 马东升, 乔恩光, 陈骏. 1984. 华南花岗岩类中微量元素的地球化学特征. 见: 徐克勤和涂光灿, 编. 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科学技术出版社. 511-525
- 罗平. 2010. 江西北武夷地区铜多金属矿成矿规律及找矿方向研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1-180
- 吕科, 王勇, 肖剑. 2011. 西华山复式花岗岩株地球化学特征及构造环境探讨. 东华理工大学学报(自然科学版), 34: 117-128
- 马长信, 项新葵. 1993. 赣东北前寒武纪变质地层钨模式年龄初步研究. 地质科学, 28: 145-150
- 毛景文, 华仁民, 李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区. 矿床地质, 18: 291-299
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23: 2329-2338
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85: 636-658
- 孟亚飞, 蒋少涌. 2015. 江西大湖塘超大型钨矿床平苗矿段花岗岩的年代学和地球化学及成矿意义. 矿物学报, 增刊: 715-716
- 裴荣富, 王永磊, 王浩琳. 2009. 南岭钨锡多金属矿床成矿系列与构造岩浆侵位接触构造动力成矿专属. 中国地质, 36: 483-489
- 彭花明, 袁琪, 李秋耘, 夏菲, 张博譔, 但小华, 张中山, 董晓峰. 2015. 赣西北大岭上钨矿黑云母花岗岩斑岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素及其与W、Cu矿化的关系. 地质论评, 61: 1089-1098
- 彭花明. 2015. 江西大湖塘钨矿含矿花岗岩成因研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1-175
- 秦燕, 王登红, 李延河, 王克友, 吴礼彬, 梅玉萍. 2010a. 安徽青阳百丈岩钨钼矿床成岩成矿年龄测定及地质意义. 地学前缘, 17: 170-177
- 秦燕, 王登红, 吴礼彬, 王克友, 梅玉萍. 2010b. 安徽东源钨矿含矿斑岩中的锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义. 地质学报, 84: 479-484
- 沈渭洲, 王银喜. 1994. 西华山花岗岩的Nd-Sr同位素研究. 科学通

- 报, 39: 154–154
- 沈渭洲, 王德滋, 刘昌实. 1995. 华南含锡斑岩的同位素地球化学特征与物质来源. 地质学报, 69: 349–359
- 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 杨祝良, 赵宇. 1999. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发. 矿床地质, 18: 316–322
- 王德滋, 刘昌实. 1993. 桐庐I型和相山S型两类碎斑岩对比. 岩石学报, 9: 279–285
- 王辉, 丰成友, 李大新, 项新葵, 周建厚. 2015. 赣北大湖塘钨矿成岩成矿物质来源的矿物学和同位素示踪研究. 岩石学报, 31: 725–739
- 王先广, 刘战庆, 刘善宝, 王成辉, 刘建光, 万浩章, 陈国华, 张树德, 刘小林. 2015. 江西朱溪铜钨矿细粒花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和岩石地球化学研究. 岩矿测试, 34: 592–599
- 王旭东, 倪培, 蒋少涌, 赵葵东, 王天刚. 2009. 江西漂塘钨矿成矿流体来源的He和Ar同位素证据. 科学通报, 54: 3338–3344
- 项新葵, 刘显沐, 詹国年. 2012a. 江西省大湖塘石门寺矿区超大型钨矿的发现及找矿意义. 资源调查与环境, 33: 141–151
- 项新葵, 陈茂松, 詹国年, 钱振义, 李辉, 许建华. 2012b. 赣北石门寺矿区钨多金属矿床成矿地质条件. 地质找矿论丛, 27: 143–155
- 项新葵, 王朋, 孙德明, 钟波. 2013. 赣北石门寺钨多金属矿床辉钼矿Re-Os同位素年龄及其地质意义. 地质通报, 32: 1824–1831
- 肖剑, 王勇, 洪应龙, 周玉振, 谢明璜, 王定生, 郭家松. 2009. 西华山钨矿花岗岩地球化学特征及与钨成矿的关系. 东华理工大学学报(自然科学版), 32: 22–31
- 徐克勤, 孙鼐, 王德滋, 胡受奚, 刘英俊, 季寿元. 1984. 华南花岗岩成因与成矿. 见: 徐克勤, 涂光炽, 编. 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科学技术出版社. 1–20
- 杨競红, 陈欣阳, 王旭东. 2009. 江西荡萍钨矿花岗岩年代学与成矿流体地球化学研究. 矿物学报, 29(增刊): 339–340
- 曾庆涛, 毛建仁, 张传林, 赵希林. 2007. 赣南天门山岩体锆石SHRIMP定年和冷却史及其矿床学意义. 矿物岩石地球化学通报, 26(增刊): 348–349
- 曾载淋, 张永忠, 朱祥培, 陈郑辉, 王成辉, 屈文俊. 2009. 赣南崇义地区茅坪钨锡矿床铼-钨同位素定年及其地质意义. 岩矿测试, 28: 209–214
- 曾载淋, 张永忠, 陈郑辉, 陈毓川, 朱祥培, 童启荃, 郑兵华, 周瑶. 2011. 江西省于都县盘古山钨(铼)矿床地质特征及成矿年代学研究. 矿床地质, 30: 949–958
- 张家菁, 梅玉萍, 王登红, 李华芹. 2008. 赣北香炉山白钨矿床的同位素年代学研究及其地质意义. 地质学报, 82: 927–931
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 陈培荣, 李惠民. 2006. 赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究. 地质学报, 80: 956–962
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 李惠民, 屈文俊, 季建清. 2009. 赣南漂塘钨矿花岗岩成岩年龄与成矿年龄的精确测定. 地质学报, 83: 659–670
- 张志辉. 2014. 江西武宁县大湖塘钨多金属矿田成矿作用研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1–174
- 周洁, 葛伟亚, 姜耀辉, 徐生发, 傅建真. 2015. 江南造山带东段东源含钨岩体的岩石化学、矿物学特征研究. 地球化学, 44: 117–130
- 朱焱龄, 李崇佑, 林运淮. 1981. 赣南钨矿地质. 南昌: 江西人民出版社. 440
- Bai X J, Wang M, Jiang Y D, Qiu H N. 2013. Direct dating of tin-tungsten mineralization of the Piaotang tungsten deposit, South China, by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ progressive crushing. *Geochim Cosmochim Acta*, 114: 1–12
- Barrière M, Cotten J. 1979. Biotites and associated minerals as markers of magmatic fractionation and deuteric equilibration in granites. *Contrib Mineral Petrol*, 70: 183–192
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contrib Mineral Petrol*, 123: 323–333
- Burnham C W, Ohmoto H. 1980. Late stage processes of felsic magmatism. In: Ishihara S, Takenouchi S, eds. *Granite Magmatism and Related Mineralization*. Mining Geol, 8: 1–11
- Chen J F, Foland K A, Xing F M, Xiang X, Zhou T X. 1991. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China. *Geology*, 19: 815–818
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101–133
- Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, Pirajno F, Zhang Z J. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geol Rev*, 31: 139–169
- Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. Berlin: Springer Science and Business Media. 450
- Ertel W, O'Neill H S C, Dingwell D B, Spettel B. 1996. Solubility of tungsten in a haplobasaltic melt as a function of temperature and oxygen fugacity. *Geochim Cosmochim Acta*, 60: 1171–1180
- Feng C Y, Zeng Z L, Zhang D Q, Qu W J, Du A D, Li D X, She H Q. 2011. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os isotopic dating of the tungsten deposits in the Tianmenshan-Hongtaoling W-Sn ore-field, southern Jiangxi Province, China, and geological implications. *Ore Geol Rev*, 43: 8–25
- Feng C Y, Zhao Z, Qu W J, Zeng Z L. 2015. Temporal consistency between granite evolution and tungsten mineralization in Huamei'ao, southern Jiangxi Province, China: Evidence from precise zircon U-Pb, molybdenite Re-Os, and muscovite ^{40}Ar - ^{39}Ar isotope geochronology. *Ore Geol Rev*, 65: 1005–1020
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao X X, Liu Z W, Wang G X, Yuan K R, Liu W L, Kuang G D, Wu H R. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *J Geophys Res*, 101: 16137–16154
- Glyuk D S, Anfilogov V N. 1973. Phase relation in the system granite-

- H₂O-HF at a pressure of 1000 kg/cm. *Geochem Int*, 9: 321–325
- Guo C L, Chen Y C, Zeng Z L, Lou F S. 2012. Petrogenesis of the Xihuashan granites in southeastern China: Constraints from geochemistry and *in-situ* analyses of zircon U-Pb-Hf-O isotopes. *Lithos*, 148: 209–227
- Hu R Z, Wei W F, Bi X W, Peng J T, Qi Y Q, Wu L Y, Chen Y W. 2012. Molybdenite Re-Os and muscovite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Xihuashan tungsten deposit, central Nanling district, South China. *Lithos*, 150: 111–118
- Huang L C, Jiang S Y. 2014. Highly fractionated S-type granites from the giant Dahutang tungsten deposit in Jiangnan Orogen, Southeast China: Geochronology, petrogenesis and their relationship with W-mineralization. *Lithos*, 202–203: 207–226
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim Cosmochim Acta*, 63: 489–508
- Kovalenko V I. 1978. The reactions between granite and aqueous hydrofluoric acid in relation to the origin of fluorine-bearing granites. *Geochem Int*, 14: 108–118
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, Vasconcelos P, Ma C Q, Deng X D, de Souza Z S, Zhao Y X, Wu G. 2008. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze craton, Eastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. *Miner Deposita*, 43: 315–336
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35: 179–182
- London D. 1986. Magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare-element pegmatite: Evidence from fluid inclusions and phase-equilibrium experiments. *Am Mineral*, 71: 376–395
- London D, Morgan G B, Hervig R L. 1989. Vapor-undersaturated experiments with Macusani glass+H₂O at 200 MPa, and the internal differentiation of granitic pegmatites. *Contrib Mineral Petrol*, 102: 1–17
- Manning D A C. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kb. *Contrib Mineral Petrol*, 76: 206–215
- Mao Z H, Cheng Y B, Liu J J, Yuan S D, Wu S H, Xiang X K, Luo X H. 2013. Geology and molybdenite Re-Os age of the Dahutang granite-related veinlets-disseminated tungsten ore field in the Jiangxin Province, China. *Ore Geol Rev*, 53: 422–433
- Mao Z H, Liu J J, Mao J W, Deng J, Zhang F, Meng X Y, Xiong B K, Xiang X K, Luo X H. 2015. Geochronology and geochemistry of granitoids related to the giant Dahutang tungsten deposit, middle Yangtze River region, China: Implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization. *Gondwana Res*, 28: 816–836
- Rudnick R L, Gao S. 2004. Composition of the continental crust. In: Rudnick R L, ed. *Treatise on Geochemistry*. New York: Elsevier. 3: 1–64
- Shaw D M. 1968. A review of K-Rb fractionation trends by covariance analysis. *Geochim Cosmochim Acta*, 32: 573–601
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 42: 313–345
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29–44
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev Geophys*, 33: 241–265
- Uchida E, Endo S, Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits. *Resource Geol*, 57: 47–56
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, Zhang Y H. 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies. *Gondwana Res*, 23: 1273–1305
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth Planet Sci Lett*, 64: 295–304
- Wones D R, Eugster H P. 1965. Stability of biotite: Experiment theory, and application. *Am Mineral*, 50: 1228–1272
- Xie G, Mao J, Zhao H. 2011. 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. *Lithos*, 125: 693–710
- Xiong X L, Zhu J C, Rao B, Lai M Y. 1999. Phase relations in the albite granite H₂O-HF system and the genesis of topaz-bearing granitic rocks. *Geol Rev*, 45: 313–322
- Zhao Z H, Xiong X L, Han X D, Wang Y X, Wang Q, Bao Z W, Borming J. 2002. Controls on the REE tetrad effect in granites: Evidence from the Qianlishan and Baerzhe Granites, China. *Geochem J*, 36: 527–543
- Zhong J, Chen Y J, Pirajno F. 2017a. Geology, geochemistry and tectonic settings of the molybdenum deposits in South China: A review. *Ore Geol Rev*, 81: 829–855
- Zhong J, Pirajno F, Chen Y J. 2017b. Epithermal deposits in South China: Geology, geochemistry, geochronology and tectonic setting. *Gondwana Res*, 42: 193–219
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China a response to tectonic evolution. *Episodes*, 29: 26–33