

# 钦-杭结合带斑岩型铜矿的基本地质特征及成因分析\*

梁锦<sup>1 2 3</sup> 周永章<sup>1 2 3\*\*</sup> 李红中<sup>3 #</sup> 尹缀缀<sup>1 2 3</sup> 周留煜<sup>1 2 3</sup> 曾长育<sup>1 2 3</sup> 虞鹏鹏<sup>1 2 3</sup>

LIANG Jin<sup>1 2 3</sup>, ZHOU YongZhang<sup>1 2 3\*\*</sup>, LI HongZhong<sup>3 #</sup>, YIN ZhuiZhui<sup>1 2 3</sup>, ZHOU LiuYu<sup>1 2 3</sup>, ZENG ChangYu<sup>1 2 3</sup> and YU PengPeng<sup>1 2 3</sup>

1. 中山大学地球科学系 广州 510275

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室 广州 510275

3. 中山大学地球环境与地球资源研究中心 广州 510275

4. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029

1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2. Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey, Guangzhou 510275, China

3. Center for Earth Environment & Resources, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

4. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China

2012-06-01 收稿, 2012-08-21 改回.

Liang J, Zhou YZ, Li HZ, Yin ZZ, Zhou LY, Zeng CY and Yu PP. 2012. Geological characteristics and genesis of porphyry copper deposits in Qinzhou-Hangzhou suture zone, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3361–3372

**Abstract** The Qinzhou Bay-Hangzhou Bay suture zone (QHSZ) is an important porphyry copper deposits (PCD) belt. PCDs are well distributed in the northern, the middle and the south sections of the QHSZ. They are mainly formed in the Yanshanian Period. Porphyries related to copper mineralization are mainly granodiorite porphyry, granite porphyry and sub-dacite porphyry, which belong to the calc-alkaline magma series of acidic rock. The porphyries above have similar trace element geochemical characteristics of the Neoproterozoic island arc igneous rock. They are derived from the partial melting of a mixture of magma in asthenosphere and the lower crustal material, and are related to the lithospheric mantle affected by earlier plate subduction, with evident crust-mantle contamination. The geodynamic setting of the Yanshanian petrogenesis and metallogenesis of the QHSZ is characterized by subduction of the Pacific plate, while the Yanshanian porphyries and copper ore bodies have the trait of island arc magma system, which is related to the geological evolution before the Mesozoic tectonic transition event in South China. It is concluded that such acidic porphyries of the QHSZ resulted from the partial melting of the Proterozoic island arc basaltic rocks during the Mesozoic, and the associated PCDs have the gene of island arc subduction environment.

**Key words** Porphyry copper deposit; Magma system of ancient island arc; Plate tectonic; Qinzhou Bay-Hangzhou Bay suture zone

**摘 要** 钦-杭结合带是重要的斑岩铜矿带。斑岩铜矿在北、中、南三段均有产出, 主成岩成矿年龄主要集中燕山期。钦-杭结合带与成矿有关的斑岩主要为钙碱性岩浆系列的中酸性岩, 岩石类型主要为花岗闪长斑岩、花岗斑岩和次英安斑岩等, 具有与新元古代岛弧火成岩类似微量元素特征。它们来源于软流圈的岩浆与中下地壳物质混合后部分熔融的结果, 与受到过早期俯冲作用影响的岩石圈地幔有关, 存在壳幔混染现象。钦-杭结合带燕山期的斑岩铜矿成岩成矿的动力学背景与太平洋板块俯冲关系密切, 但斑岩和铜矿体在地球化学特征上显示出的具有弧岩浆作用特点, 这与华南地区中生代构造转折事件发生以前的地质演化有关。钦-杭结合带的中酸性斑岩体来自于元古代岛弧底部玄武质岩石(下地壳)在中生代时期的部分熔融, 本质上该类矿床带有岛弧俯冲环境的特征遗传。

**关键词** 斑岩铜矿; 古岛弧岩浆; 板块构造; 钦州湾-杭州湾结合带

中图法分类号 P618.41

钦-杭结合带及其连接的扬子地块和华夏地块是南中国最重要的地质体。最近, 中国地质调查局把钦州湾-杭州湾

结合带列为重要成矿带, 并部署了一系列的重点矿产勘查任务。本文作者在承担钦-杭成矿带南段庞西垌成矿远景区的

\* 本文受中国地质调查局项目(资[2010]矿评01-45-33)资助。

第一作者简介: 梁锦, 男, 1986年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: kamleung@yahoo.cn

\*\* 通讯作者: 周永章, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 从事矿床地质与地球化学研究, E-mail: zhouyz@mail.sysu.edu.cn

地质调查中,在工区检查地球化学异常时,发现了斑岩型铜(钼)矿床,并充分注意它的潜力和价值。本研究源于中国地质调查局钦-杭成矿带矿产远景调查项目的任务,拟重点分析钦-杭结合带斑岩型铜矿床的总体分布和地质特征以及它们的成因。

## 1 斑岩型铜矿床的时空分布

钦(州湾)-杭(州湾)结合带是位于扬子与华夏两大古陆块中间巨型构造结合带。它从西南端广西钦州湾,经湘东和赣中延伸到东北端浙江杭州湾地区,全长近2000km,宽100~150km,总体呈反S状弧形展布(杨明桂和梅勇文,1997)。钦-杭结合带内部结构存在一定程度的不均一性。据此,中国地质调查局资源评价部等(2010<sup>①</sup>)将其划分为两段:东段和西段。东段大体相当于江山-绍兴带分布区域,西段包括南岭及其以南地区。周永章等(2012)把钦-杭结合带分为北、中、南三段,并认为三段划分方案在优势矿种的区域分布上有很好的体现。其中,中段与南岭带大体一致,主要分布在北纬24°~27°之间;北段指南岭以北地区,即绍兴-江山-萍乡一带,与前人的划分一致;南段位于南岭以南区域,

大致云开-十万大山带相当。

钦-杭成矿带斑岩铜矿经常与钼、金、多金属矿共生产出,并且在北、中、南段均有产出。斑岩铜(钼)矿空间分布如图1所示。

钦-杭成矿带斑岩铜矿首先在北段发现,以德兴斑岩铜矿和永平斑岩铜矿最为典型。研究显示,北段德兴斑岩铜矿受江山-绍兴断裂及其次级断裂弋阳-德兴断裂控制(朱训等,1983),永平斑岩铜矿产于钱塘江-信江拗陷带中(丁昕等,2005)。其中,德兴斑岩铜矿的区域岩浆岩主要为燕山期“1”型花岗岩。成矿岩体主体为燕山早期第二阶段的花岗闪长斑岩,成矿斑岩呈小岩株状产出,岩浆分异程度高。铜矿体赋存于成矿斑岩体内、外接触带,以外带为主(中国地质调查局资源评价部等,2010)。

中段斑岩型铜矿以铜山岭铜矿、宝山铜多金属矿床和水口山铜多金属矿田为代表,产于湘东南中生代花岗闪长质岩浆岩带中(王岳军等,2001)。其中,铜山岭铜矿则受株洲-衡阳-道县断裂带影响(谭克仁,1983),宝山铜多金属矿位于南岭东西向构造带的中段北缘,耒阳-临武南北向构造带的南端(路远发等,2006),水口山多金属矿田位于耒阳-临武南北向构造带的北端(马丽艳等,2006)。

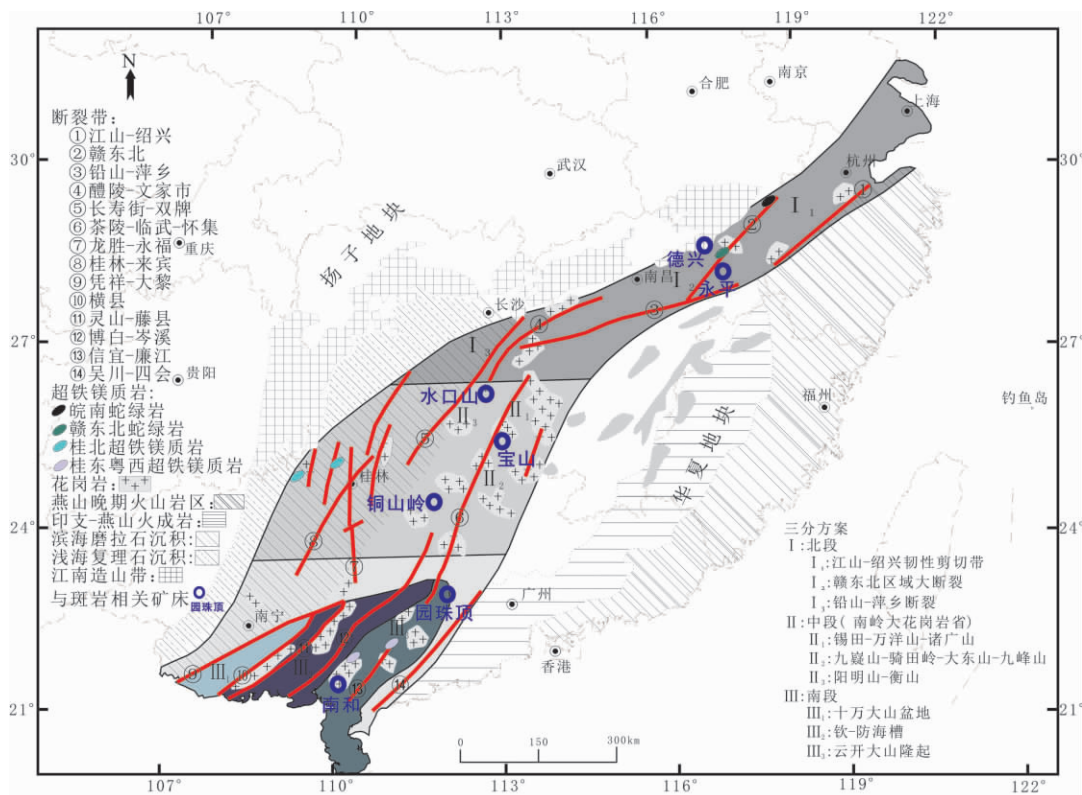


图1 钦-杭结合带内斑岩铜矿分布示意图(钦-杭结合带构造分区底图据周永章等,2012)

Fig. 1 Simplified tectonic division of Qinzhou-Hangzhou suture zone, showing locations of key porphyry copper deposits (after Zhou et al., 2012)

① 中国地质调查局资源评价部等. 2010. 钦杭成矿带重要矿产勘查部署方案

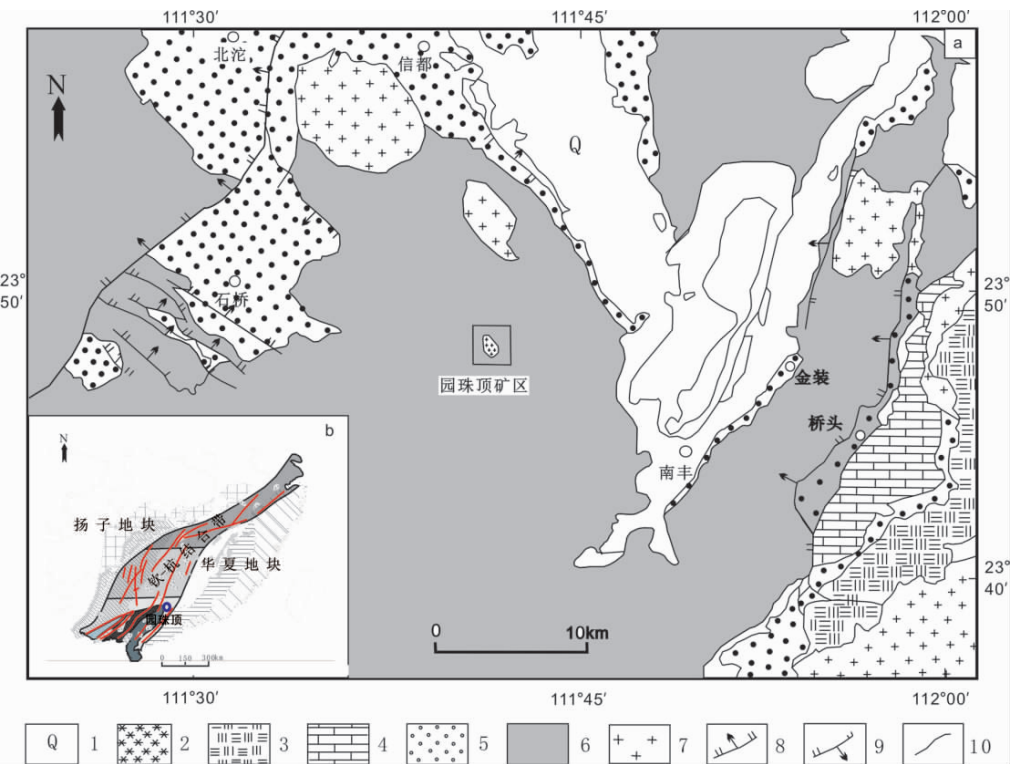


图2 园珠顶矿区及其在区域地质图中的位置(a 据广东省地质局 719 地质队 2008; b 据周永章等 2012)  
1-第四系砂、泥; 2-下第三系碎屑岩; 3-白垩系碎屑岩; 4-石炭系灰岩、白云质灰岩和白云岩; 5-泥盆系页岩、碳酸盐岩和砂岩; 6-寒武系砂页岩; 7-加里东期、印支期和燕山期侵入岩; 8-正断层; 9-逆断层; 10-地质界线  
Fig. 2 The Yuanzhuding ore district and its location in regional geological map (b , after Zhou *et al.* 2012)  
1-Quaternary sand and clay; 2-Palaeogene clastic rock; 3-Cretaceous clastic rock; 4-Carboniferous limestone , dolomitic limestone and dolomite; 5-Devonian shale , sandstone and carbonate; 6-Cambrian shale and sandstone; 7-Paleozoic-Mesozoic igneous rock; 8-normal fault; 9-thrust fault; 10-geological boundary

南段斑岩型铜矿的发现是最近几年的地质调查结果。其中,封开园珠顶大型斑岩型铜钼矿位于云开地区北部(图2)。经由广东省地质局 719 地质队(2008<sup>①</sup>)完成的勘探评价,钻孔见矿率达 90% 以上。矿体主要分布在斑岩体外接触带的砂岩地层中,工业矿体分布在岩体外接触带约 0~400m 范围内,平面上呈环形围绕着岩体分布(图3),矿床类型为细脉浸染型铜钼矿床。铜、钼矿体为渐变过渡。矿床类型为细脉浸染型铜钼矿床。

廉江南和铜(钼)矿床位于云开地块西南缘庞西垌工区,它产于钦-杭成矿带南段古城-沙铲断裂带内的燕山期斑岩体与古老混合岩及地层的内外接触带中(图4)。岩体岩性主要为黑云母花岗斑岩,围岩主要为闪长岩,金属矿物赋存在花岗斑岩脉中(图5)。区域出露还有石英斑岩、煌斑岩。矿体主要以细网脉型层状为主。

前人对钦-杭成矿带斑岩铜矿的成矿时代做过较多的研究。统计表明(表1),成矿带斑岩铜矿的成岩成矿年龄主要集中于 180~150Ma,形成于燕山晚期。

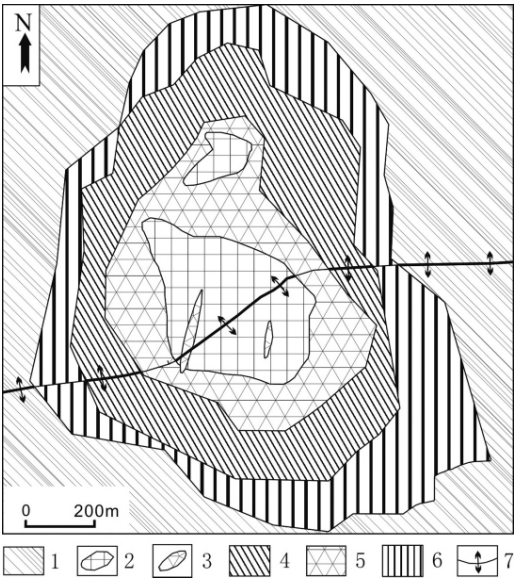


图3 园珠顶铜钼矿床地质图(广东省地质局 719 地质队, 2008)  
1-寒武系水口群; 2-园珠顶斑岩体; 3-石英脉; 4-钼矿投影范围; 5-铜钼投影重叠范围; 6-铜矿投影范围; 7-断裂产状  
Fig. 3 Geological map of the Yuanzhuding Cu-Mo deposit  
1-Shuikou Group of Cambrian; 2-Yuanzhuding porphyry body; 3-quartz vein; 4-projective localization of molybdenum ore; 5-overlap range of molybdenum and copper; 6-projective localization of copper ore; 7-occurrence of fault

① 广东省地质局 719 地质队. 2008. 广东省封开县园珠顶矿区铜钼矿勘探报告





表1 钦-杭结合带主要斑岩相关 Cu 矿床及其成岩成矿年龄

Table 1 Porphyry-related copper deposits and their dating of diagenesis and mineralization in QHSZ, southern China

序号	矿床名称	矿床类型	侵入体类型	侵入体年龄		成矿年龄		资料来源
				测试方法	年龄( Ma)	测试方法	年龄( Ma)	
1	德兴	Cu-Au-Mo	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	171 ± 3	辉钼矿 Re-Os	170. 4 ± 1. 8	王强等，2004
2	永平	Cu-W-Mo	石英斑岩	锆石 U-Pb	160 ± 2. 3;	辉钼矿 Re-Os	156. 7 ± 2. 8	丁昕等，2005
					135 ± 7. 4		155. 7 ± 3. 6	李晓峰等，2008
3	铜山岭	Cu 多金属	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	178. 9 ± 1. 7 181. 5 ± 8. 8			王岳军等，2001
4	宝山	Cu-Mo-W	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	173 ± 1. 9	黄铁矿 Rb-Sr	174 ± 7	王岳军等，2001 姚军明等，2006
5	水口山	Cu 多金属	花岗闪长斑岩	锆石 U-Pb	172. 3 ± 1. 6			王岳军等，2001
6	园珠顶	Cu-Mo	花岗斑岩	未知	150. 2 ± 1. 7	辉钼矿 Re-Os	155. 6 ± 3. 4	陈懋弘 2011 <sup>①</sup> 钟立峰等，2010
7	南和	Cu-Mo	花岗斑岩	待测				

相邻,呈规则脉状,新鲜呈灰白色,斑状结构。成分主要为钾长石(30%~35%)、斜长石(10%~15%)、石英(20%~25%)、少量黑云母。斑晶和基质成分相同。斑晶呈自形至半自形。蚀变主要有硅化、黄铁绢英岩化等。

3 成矿斑岩地球化学特征

本研究分析了南段园珠顶与南和含矿斑岩的微量元素及稀土元素特征。它们的微量元素及稀土元素分析结果列于表2和表3中。作为对比,钦-杭结合带其他主要斑岩铜矿含矿斑岩的微量元素及稀土元素参数一并列表于表4中。

经球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图(图6左)显示,钦-杭成矿带斑岩铜矿的含矿斑岩均表现为轻稀土(LREE)富集、轻稀土(LREE)和重稀土(HREE)分异较明显的特征,轻稀土(LREE)右倾斜较陡,重稀土(HREE)部分曲线形态较水平。德兴、永平以及南和的含矿斑岩的REE含量以及HREE含量明显低于其余矿床含量。(La/Yb)<sub>N</sub>比值显示,德兴和永平相对较高,平均值为23.3~23.6;园珠顶、南和相对中等,平均值为15.8~18.0;而铜山岭、宝山、水口山则相对较低,平均值为8.77~16.0。此外,德兴和永平含矿斑岩则显示Eu异常较弱;宝山、水口山、铜山岭、园珠顶和南和的含矿斑岩则显示比较明显的Eu负异常。

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图6右)显示,整个成矿带各斑岩铜矿床的含矿斑岩微量元素总体趋势类似,呈右倾特征;Rb、Ba、Th、U等大离子亲石元素(LILE)富集。各地含矿斑岩均显示Nb负异常。此外,铜山岭、宝山、水口山、园珠顶含矿斑岩还呈现一定程度的Ba、Sr负异常,而德兴含矿斑岩则显示较强的Ba、Sr正异常,南和斑岩则Sr异常不明

显。结合带内含矿斑岩的Zr/Hf比值比较接近,但铜山岭、宝山、水口山等相对较低,平均值为29.1~32.5。水口山、园珠顶、南和含矿斑岩Nb/Ta比值平均值较大,为14.0~15.3,德兴、永平、铜山岭、宝山则相对较低,为9.69~12.7。差异较大的为Sr/Y比值,显示为德兴和南和较大,平均值分别为83.8和42.2,其余则相对较小,平均值介于4.20~13.2。南和含矿斑岩具有高Sr(>400×10<sup>-6</sup>)、低Y(<18×10<sup>-6</sup>)、低Yb(<1.9×10<sup>-6</sup>)特征。

4 讨论

4.1 成矿特征

钦-杭结合带是由华夏板块与扬子板块拼贴的产物,在长期的地质历史过程中,华南地区处于“两陆夹一盆”的构造格局(水涛,1987;杨明桂和梅勇文,1997)。从已知的斑岩铜矿在钦-杭结合带的空间分布来看,它们具有岩浆弧环境特征,与钦-杭构造结合带有直接关系。

从成岩成矿时代来看,钦-杭结合带斑岩铜矿分布存在“南-中-北”三段性的分带规律,具体为:中段有铜山岭、水口山、宝山铜钼矿及多金属矿(190~170Ma),北段则有德兴和永平铜钼矿(170~150Ma),南段主要有园珠顶和南和铜钼矿(150Ma左右)。而且各段内部也存在一定成矿时代差异,例如南段园珠顶成岩成矿时代早于南和地区(燕山晚期)。而前人研究显示,两个古板块的碰撞时代为900Ma左右(水涛,1995;Chen *et al.*,1998;周新民,2003),两个板块前缘长期相互作用,多次开裂并于晋宁期、加里东期及印支期发生碰撞拼贴造山作用,中生代构造转折事件使华南地区进入太平洋构造域,构造动力学背景从印支期以挤压为主迅速调

① 陈懋弘. 2011. 钦-杭成矿带(西段)地质矿产调查年度工作研讨会报告

表2 园珠顶花岗斑岩微量元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )Table 2 Trace elements concentrations of Yuanzhuding porphyries ( $\times 10^{-6}$ )

样品号	YZD-001	YZD-002	YZD-003	YZD-004	YZD-005	YZD-006	YZD-007	YZD-008	YZD-009
Sc	5.8	5.7	7.8	11.6	10.7	16.1	8.0	7.9	5.6
V	44.5	38.8	62.7	62.9	65.6	93.1	78.4	61.2	33.3
Cr	81.7	104.2	115.3	51.1	160.8	89.2	22.9	124.4	104.7
Co	9.0	5.3	7.8	27.6	15.2	33.0	19.5	24.9	4.4
Ga	16.0	16.2	14.4	16.3	15.5	20.7	4.6	17.9	13.2
Rb	161.6	214.5	199.3	203.1	188.4	244.7	29.6	145.0	153.9
Sr	253.1	267.6	33.6	29.9	54.6	70.1	101.9	105.0	493.2
Y	10.1	9.1	23.2	24.3	26.4	29.8	15.6	32.1	10.0
Zr	173.5	152.4	230.0	269.4	208.3	130.7	73.5	110.4	125.6
Nb	8.6	8.8	10.4	12.4	13.1	15.2	4.4	8.1	7.4
Cs	7.1	5.6	3.6	5.7	13.2	15.6	2.5	34.0	8.7
Ba	599.3	760.4	497.5	620.7	537.5	719.1	15.7	201.5	420.6
Hf	4.0	3.7	5.9	6.9	5.4	3.4	1.8	2.8	2.9
Ta	0.5	0.5	0.6	1.1	1.0	1.6	0.6	0.7	0.5
Pb	18.0	13.7	3.0	5.0	6.0	9.0	57.9	2.6	21.2
Th	15.3	13.3	13.8	18.3	15.1	16.9	4.9	9.4	12.2
U	3.2	1.8	2.1	2.3	4.0	4.3	18.0	4.6	2.7
Sr/Y	25.0	29.6	1.45	1.23	2.07	2.35	6.53	3.27	49.4
Zr/Hf	42.9	41.1	38.9	39.2	38.6	38.3	40.4	38.8	42.8
Nb/Ta	16.9	17.8	17.5	11.2	13.5	9.60	6.78	12.0	14.1
La	39.0	41.0	51.7	50.3	44.7	42.3	13.3	26.6	33.5
Ce	75.1	85.7	143.3	140.5	94.8	91.4	25.8	57.4	58.3
Pr	6.3	6.7	10.3	10.2	9.2	9.1	2.9	6.9	6.0
Nd	22.3	24.0	40.0	40.1	34.1	34.1	11.2	27.2	20.6
Sm	3.3	3.6	7.0	7.2	6.3	6.5	2.3	5.5	3.2
Eu	0.9	0.8	1.2	1.4	1.1	1.1	0.5	1.2	0.8
Gd	3.2	3.4	6.2	6.6	5.7	6.0	2.4	5.3	2.8
Tb	0.3	0.3	0.7	0.8	0.8	0.9	0.4	0.8	0.3
Dy	1.9	1.9	4.1	4.7	4.4	4.9	2.4	4.7	1.7
Ho	0.3	0.3	0.7	0.8	0.9	1.0	0.5	0.9	0.3
Er	1.1	0.9	2.4	2.7	2.5	2.8	1.4	2.7	0.9
Tm	0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4	0.1
Yb	1.0	0.9	2.1	2.6	2.4	2.6	1.2	2.4	0.8
Lu	0.2	0.1	0.3	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.1
$\Sigma$ REE	154.9	169.8	270.4	268.8	207.5	203.5	64.5	142.2	129.5
LREE	146.8	161.9	253.6	249.7	190.2	184.6	55.9	124.6	122.4
HREE	8.1	7.9	16.8	19.1	17.3	18.9	8.6	17.5	7.1
LREE/HREE	18.22	20.50	15.09	13.07	10.98	9.77	6.50	7.11	17.33
(La/Yb) <sub>N</sub>	27.6	34.6	17.6	13.7	13.6	11.6	7.88	8.03	29.9
$\delta$ Eu	0.85	0.71	0.54	0.60	0.53	0.55	0.61	0.65	0.84
$\delta$ Ce	1.07	1.15	1.43	1.44	1.09	1.09	0.97	1.02	0.93

注: 样品由广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室测试

表3 南和花岗斑岩微量元素分析结果 ( $\times 10^{-6}$ )Table 3 Trace elements concentrations ( $\times 10^{-6}$ ) of Nanhe porphyries

样品号	9019-1	9019-2	9019-3	9019-4	9019-7	9019-8	9019-9	9019-10	9019-11	9019-12
Sc	4.2	3.8	3.8	4.3	4.2	4.2	4.4	4.1	6.6	13.5
V	14.0	13.8	14.4	15.1	16.2	14.8	14.5	14.1	16.9	95.5
Cr	2.5	57.3	2.4	48.1	63.5	47.8	55.0	2.1	2.1	150.4
Co	28.1	0.5	33.0	0.9	1.6	2.4	1.1	33.7	34.9	17.5
Ga	17.5	14.2	17.2	17.4	17.2	17.2	17.1	18.4	19.4	24.7
Rb	237.8	575.8	280.4	288.4	293.7	346.7	228.0	252.7	264.9	471.2
Sr	573.1	392.7	630.5	639.0	477.9	524.4	584.2	523.3	554.1	440.1
Y	13.5	12.1	11.9	14.4	10.7	13.4	11.7	11.2	12.3	18.8
Zr	153.4	119.1	138.6	131.0	128.5	119.3	130.5	140.6	138.5	184.4
Nb	8.7	7.9	7.7	7.5	7.6	8.9	7.8	7.9	8.2	11.1
Cs	2.6	6.0	3.8	3.7	3.3	4.1	2.7	3.2	3.4	10.3
Ba	746.7	1666	1060	1085	883.5	1321	846.3	904.3	939.3	502.0
Hf	4.5	3.4	3.9	3.7	3.5	3.3	3.6	3.8	3.7	4.5
Ta	1.1	0.5	1.1	0.4	0.4	0.5	0.4	1.1	1.2	0.4
Pb	21.5	29.9	22.5	22.5	22.0	23.7	20.7	22.1	23.4	8.6
Th	14.4	13.9	11.0	9.8	11.6	12.8	10.8	11.2	11.0	7.2
U	1.4	1.1	1.5	1.2	1.7	2.3	1.1	1.5	0.9	1.3
Sr/Y	42.6	32.5	53.1	44.4	44.8	39.3	49.9	46.6	45.1	23.4
Zr/Hf	34.3	34.7	35.6	35.4	36.9	36.3	36.3	36.7	37.1	40.6
Nb/Ta	7.64	16.1	6.78	17.5	17.4	17.5	18.2	7.10	7.01	25.5
La	32.0	29.5	30.2	27.9	25.7	29.7	30.1	31.1	29.8	32.0
Ce	61.9	57.2	57.8	53.0	49.4	56.7	57.3	58.7	57.0	67.4
Pr	6.1	5.6	5.6	5.1	4.8	5.5	5.6	5.7	5.6	7.1
Nd	23.2	21.1	21.3	19.5	18.2	21.1	21.5	21.6	21.2	30.1
Sm	4.1	3.7	3.7	3.4	3.2	3.8	3.8	3.8	3.7	5.6
Eu	0.9	0.8	0.9	0.9	0.7	1.0	0.9	0.9	0.9	1.5
Gd	3.8	3.4	3.4	3.3	3.0	3.5	3.4	3.4	3.4	5.2
Tb	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6
Dy	2.6	2.4	2.3	2.6	2.0	2.5	2.2	2.2	2.3	3.7
Ho	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6
Er	1.5	1.3	1.3	1.6	1.2	1.4	1.2	1.2	1.3	2.0
Tm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
Yb	1.5	1.3	1.3	1.6	1.2	1.4	1.2	1.2	1.3	1.8
Lu	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
ΣREE	138.9	127.6	129.1	120.3	110.4	127.9	128.3	130.9	127.7	158.3
LREE	128.1	117.9	119.6	109.8	102.0	117.8	119.1	121.8	118.2	143.7
HREE	10.8	9.7	9.6	10.4	8.4	10.1	9.1	9.2	9.6	14.6
LREE/HREE	11.91	12.20	12.50	10.54	12.13	11.72	13.06	13.30	12.35	9.87
(La/Yb) <sub>N</sub>	15.2	16.3	16.6	12.8	15.5	15.6	18.6	18.4	16.4	12.5
δEu	0.66	0.66	0.78	0.82	0.72	0.81	0.72	0.73	0.77	0.85
δCe	1.02	1.02	1.01	1.01	1.02	1.01	1.00	1.00	1.01	1.05

注: 样品由广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室测试

表4 钦-杭结合带主要含矿斑岩部分地球化学数据统计对比表

Table 4 Statistics for geochemical data of ore-bearing porphyric rocks from QHSZ

元素	数据范围	德兴 n = 30	永平 n = 11	铜山岭 n = 9	宝山 n = 6	水口山 n = 5
ΣREE	分布范围	56. 75 ~ 187. 8	50. 41 ~ 154. 9	102. 6 ~ 161. 0	130. 5 ~ 173. 4	119. 6 ~ 186. 6
	平均值	110. 5	109. 7	134. 5	151. 5	155. 9
LREE	分布范围	53. 00 ~ 180. 7	49. 53 ~ 146. 0	90. 46 ~ 147. 2	116. 7 ~ 155. 5	107. 8 ~ 172. 0
	平均值	103. 7	104. 2	120. 4	135. 5	143. 8
HREE	分布范围	3. 75 ~ 10. 15	0. 88 ~ 10. 24	10. 79 ~ 17. 24	13. 82 ~ 17. 88	9. 8 ~ 14. 64
	平均值	6. 76	5. 49	14. 15	16. 09	12. 16
LREE/HREE	分布范围	7. 55 ~ 25. 27	12. 05 ~ 18. 96	6. 725 ~ 11. 37	8. 13 ~ 8. 70	9. 120 ~ 14. 34
	平均值	15. 48	33. 78	8. 58	8. 41	11. 88
( La/Yb) <sub>N</sub>	分布范围	8. 92 ~ 47. 0	16. 5 ~ 38. 9	7. 07 ~ 14. 2	7. 79 ~ 9. 73	9. 51 ~ 20. 9
	平均值	23. 6	23. 3	9. 68	8. 77	16. 0
δEu	分布范围	0. 72 ~ 1. 32	0. 84 ~ 1. 07	0. 61 ~ 0. 86	0. 71 ~ 0. 80	0. 78 ~ 0. 89
	平均值	0. 99	0. 89	0. 76	0. 75	0. 82
δCe	分布范围	0. 85 ~ 1. 04	0. 94 ~ 0. 98	0. 91 ~ 0. 99	0. 94 ~ 1. 07	0. 92 ~ 1. 22
	平均值	0. 89	0. 96	0. 95	0. 99	1. 01
Sr/Y	分布范围	11. 5 ~ 400	1. 12 ~ 36. 3	9. 23 ~ 22. 0	2. 22 ~ 6. 62	5. 52 ~ 16. 2
	平均值	83. 8	13. 2	14. 0	4. 20	10. 5
Zr/Hf	分布范围	26. 0 ~ 44. 1	33. 5 ~ 49. 7	25. 5 ~ 32. 5	26. 9 ~ 31. 3	30. 8 ~ 33. 5
	平均值	37. 6	40. 7	29. 1	29. 6	32. 5
Nb/Ta	分布范围	5. 17 ~ 13. 8	11. 1 ~ 13. 6	7. 58 ~ 12. 2	11. 8 ~ 13. 5	14. 5 ~ 16. 4
	平均值	11. 6	12. 6	9. 69	12. 7	15. 3

n = 30 表示统计的样品数量. 数据来源: 王岳军等, 2001; 钱鹏和陆建军, 2005; Wang *et al.* 2006; 路远发等, 2006; 马丽艳等, 2006; Li and Sasaki, 2007; 李晓峰等, 2007; 魏道芳等, 2007

整为燕山期以伸展为主(赵越等, 2004; 董树文等, 2007; 胡瑞忠等, 2007, 2010; 张岳桥等, 2009)。也就是说, 该结合带在晋宁期以来, 既不存在直接的洋陆俯冲作用, 也不存在直接的陆陆碰撞作用。因此, 从燕山期成矿看, 钦-杭成矿带斑岩铜矿应该属于“非俯冲”斑岩型铜矿。对成矿元素铜的来源的分析, 是进一步理解钦-杭成矿带斑岩铜矿成矿机理的重要方面。

4. 2 成矿物质的来源

最近对钦-杭结合带元古代岛弧火成岩的认识, 为解释“非俯冲”斑岩型铜矿提供了重要的视角。在中元古代时期, 钦-杭结合带是一古洋盆或多岛弧盆地。目前观察到得片麻-条带-眼球状岩石即为中元古代岛弧花岗质岩石, 是中元古代扬子板块和华夏板块碰撞作用的产物。“非俯冲”斑岩的形成与中元古代岛弧在中生代重融有关, 因而本质上, 仍带有岛弧俯冲环境的基因。上述推想得到系列地球化学数据的支持。

前人研究显示, 钦-杭成矿带含矿斑岩基本上均为高钾钙碱性系列岩石(朱训等, 1983; 王岳军等, 2001; 路远发等, 2006; 马丽艳等, 2006; 魏道芳等, 2007), 其来源可能

源于软流圈的岩浆与中下地壳物质混合后部分熔融的结果, 与受到过早期俯冲作用影响的岩石圈地幔有关。表2至表4数据显示, 尽管钦-杭结合带主要斑岩铜矿含矿斑岩的 Zr/Hf 比值及( La/Yb)<sub>N</sub>、δEu、δCe 等稀土元素参数存在一定差异, 说明斑岩源区存在差异, 但均反映了以幔源为主, 存在壳幔混染现象。

在( La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> 图(图7a)和 Sr/Y-Y 图(图7b)上, 德兴斑岩铜矿的样品基本落在典型埃达克岩范围内, 南和含矿斑岩也具有类埃达克岩地球化学组合特征。同样位于大陆板块内部, 与太平洋东海岸岛弧型斑岩矿床难以类比, 位于南段的南和与北段德兴含矿斑岩具有这一特征, 说明整个钦-杭结合带斑岩应该具有类似的岩浆来源, 并具有一致的动力背景。

研究显示(刘玄等, 2011), 德兴花岗闪长斑岩具有与新元古代岛弧火成岩(双溪坞群角斑岩及侵入其中的花岗质侵入岩)极为类似微量元素特征, 较高的全岩 ε<sub>Nd</sub>(*t*) 值( -0. 28 ~ 0. 25), 正的锆石 ε<sub>Hf</sub>(*t*) 值( 2 ~ 7), 对应的两阶段亏损地幔 Nd 模式年龄和 Hf 模式年龄分别为 940 ~ 980Ma 和 800 ~ 1100Ma(平均为 ~ 920Ma)。在 Nd 及 Hf 同位素演化图上, 德兴花岗闪长斑岩与双溪坞群岩石及侵入其中的花岗质



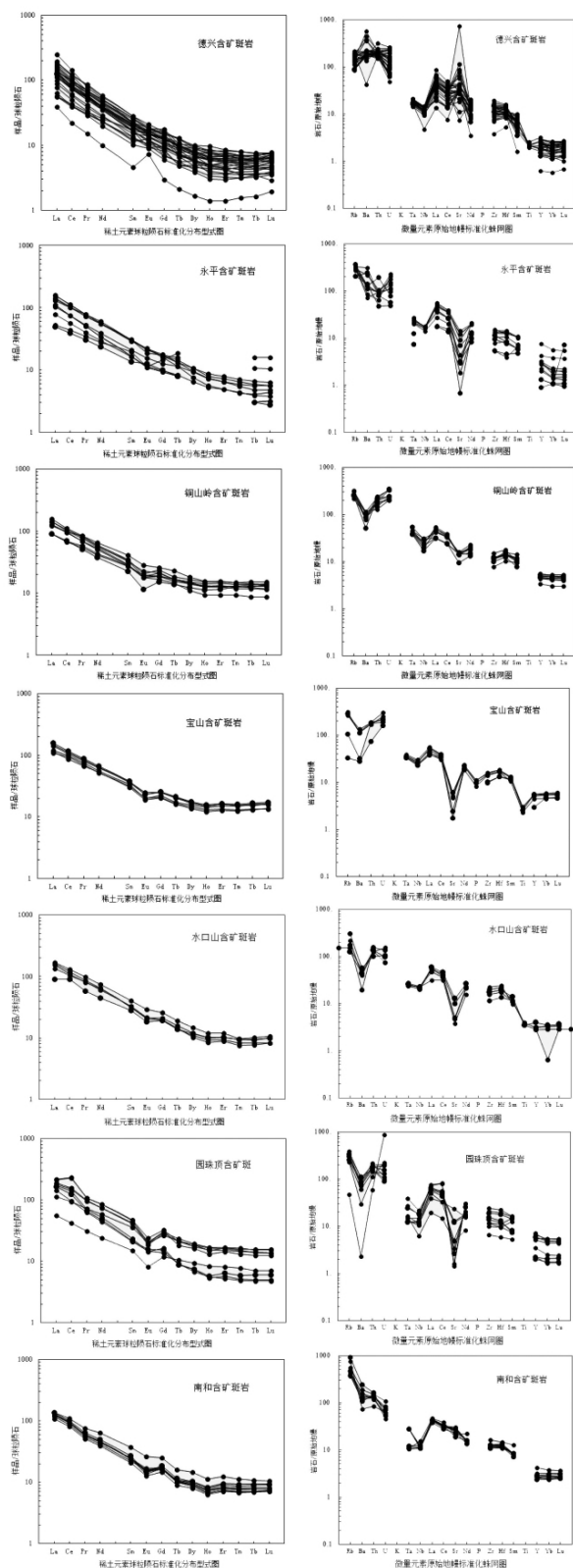


图6 钦-杭结合带含矿斑岩的球粒陨石标准化稀土配分图(左)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(右)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern (left) and multi-element patterns normalized to the primitive mantle (right) (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

侵入岩所代表的新元古代岛弧岩石演化至中侏罗世相吻合。花岗闪长斑岩锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值非常均一 ( $4.7\text{‰} \sim 5.9\text{‰}$ ) ,指示岩浆源区岩石为幔源火成岩,没有经历过浅表地质过程(风化、高温热液蚀变等)。

据此可以推测,德兴花岗闪长斑岩可能来自于该岛弧底部玄武质岩石(下地壳)的部分熔融,由洋-陆俯冲形成的岛弧下地壳岩石自新元古代早期开始经历了6亿多年的地质过程,一直保存在壳幔边界上。直到中侏罗世岩石圈减薄的大地构造背景下,上涌的软流圈地幔带来大量的热量加热这些岩石使之由发生重熔,形成的含矿岩浆沿着赣东北深断裂带上升并侵入、演化生成斑岩铜矿(水涛,1987;周新民,2003)。鉴于钦-杭结合带整体具有一致的开-合历史,上述推测同样适用于钦-杭结合带南段的斑岩型矿床。

#### 4.3 地球动力学背景

由于燕山期是钦-杭成矿带斑岩铜矿的主成矿期,因此对燕山期斑岩体的认识是十分重要的。长期以来,华南燕山期花岗岩形成的构造背景一直是研究的重要热点问题,学者提出了华南燕山期花岗岩形成的不同大地构造背景的主要观点。近年来,Chen et al (2007) 认为华夏和扬子在三叠纪沿湘赣浙缝合带碰撞,燕山期成矿是碰撞体制(含后碰撞体制)的结果。“弧后环境”(孙涛等,2003)、“受太平洋板块俯冲作用控制的大陆边缘”(Xu et al., 1999; Zhou and Li, 2000; Sun et al., 2007)、“洋脊/洋岭俯冲”(李晓峰等,2008;孙卫东等,2010)等观点则更直接关注华南燕山期构造演化的动力来源,指出其主要受板块聚合的影响,燕山期斑岩铜矿成岩成矿可能是太平洋板块俯冲作用的远程效应。

本研究认为,钦-杭结合带燕山期的斑岩铜矿成岩成矿的动力学背景与太平洋板块俯冲关系密切,但斑岩和铜矿体显示出的弧岩浆作用特点,则与华南地区中生代构造转折事件发生以前的地质演化有关。

钦-杭结合带特别是南段,远离现在的太平洋俯冲带且切割俯冲带方向,应是在古太平洋板块的斜向运动动力学背景下,使得元古代岛弧底部玄武质岩石(下地壳)在古太平洋板块俯冲期的催化发生部分熔融形成埃达克岩。因此本质上钦-杭结合带的斑岩矿床带有岛弧俯冲环境的遗传特征。

矿床区域分布规律与构造演化、地球动力学背景之间存在密切的关系,矿床及其组合的产出和分布代表着特定的地球动力学事件。这对南段斑岩型矿床的理论研究和寻找是具有指导意义的。

## 5 结论

从上述讨论,可以形成如下认识:

(1) 钦-杭成矿带斑岩铜矿在北、中、南三段均有产出,主

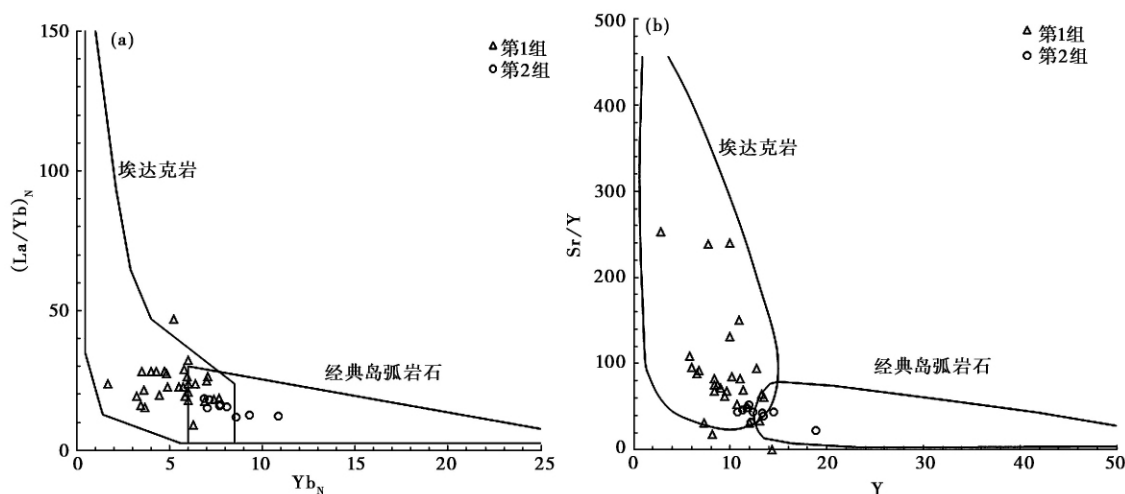


图7 钦-杭结合带含矿斑岩的 $(La/Yb)_N$ - $Yb_N$ 图(a)和 $Sr/Y$ - $Y$ 图(b) (底图据 Defant and Drummond, 1990)

第1组-德兴; 第2组-南和

Fig. 7  $(La/Yb)_N$ - $Yb_N$  (a) and  $Sr/Y$ - $Y$  (b) diagrams for ore-bearing porphyries in the suture zone (after Defant and Drummond, 1990)

成岩成矿年龄主要集中燕山期。钦-杭结合带与成矿有关的斑岩主要为钙碱性岩浆系列的中酸性岩, 岩石类型主要为花岗闪长斑岩、花岗斑岩和次英安斑岩等。

(3) 含矿斑岩具有与新元古代岛弧火成岩类似微量元素特征, 指示其来源于软流圈的岩浆与中下地壳物质混合后部分熔融的结果, 与受到过早期俯冲作用影响的岩石圈地幔有关, 存在壳幔混染现象。

(3) 钦-杭结合带燕山期的斑岩铜矿成岩成矿的动力学背景与太平洋板块俯冲关系密切, 但斑岩和铜矿体显示出的弧岩浆作用特点, 则与华南地区中生代构造转折事件发生以前的地质演化有关。钦-杭结合带的中酸性斑岩体来自于元古代岛弧底部玄武质岩石(下地壳)在中生代时期的部分熔融, 本质上该类矿床带有岛弧俯冲环境的基因。

## References

- Chen YJ, Guo GJ and Li X. 1998. Metallogenic geodynamic background of Mesozoic gold deposits in granite-greenstone terrains of North China Craton. *Science in China (Series D)*, 41(2): 113-120
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 139-169
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665
- Ding X, Jiang SY, Ni P, Gu LX and Jiang YH. 2005. Zircon SIMS U-Pb geochronology of host granitoids in Wushan and Yongping copper deposits, Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 383-389 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Zhang YQ, Long CX, Yang ZY, Ji Q, Wang T and Chen XH. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449-1461 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Bi XW, Peng JT, Liu S, Zhong H, Zhao JH and Jiang GH. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China. *Mineral Deposits*, 26(2): 139-152 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Mao JW, Fan WM, Hua RM, Bi XW, Zhong H, Song XY and Tao Y. 2010. Some scientific questions on the intra-continental metallogeny in the South China continent. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 13-26 (in Chinese with English abstract)
- Li XF and Sasaki M. 2007. Hydrothermal alteration and mineralization of Middle Jurassic Dexing porphyry Cu-Mo deposit, Southeast China. *Resource Geology*, 57(4): 409-426
- Li XF, Yasushi W and Qu WJ. 2007. Textures and geochemical characteristics of granitic rocks in the Yongping climax-type Cu-Mo deposit, Jiangxi, southeastern China, and their alteration, mineralization and tectonic regime. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2353-2365 (in Chinese with English abstract)
- Li XF, Yasushi W, Huan RM and Mao JW. 2008. Mesozoic Cu-Mo-W-Sn mineralization and Ridge/Triple subduction in South China. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 625-640 (in Chinese with English abstract)
- Liu X, Fan HR and Hu FF. 2011. Remelting of lower crust derived from residual Neoproterozoic island arc: Formation of Dexing porphyry copper deposit. Xi'an: Abstract of Petrology and Geodynamics Symposium in 2011 (in Chinese)
- Lu YF, Ma LY, Qu WJ, Mei YP and Chen XQ. 2006. U-Pb and Re-Os isotope geochronology of Baoshan Cu-Mo polymetallic ore deposit in Hunan province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2483-2492 (in Chinese with English abstract)
- Ma LY, Lu YF, Mei YP and Chen XQ. 2006. Zircon shrimp U-Pb dating of granodiorite from shuikoushan ore-field, Hunan Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2475-2482 (in Chinese with English abstract)
- Qian P and Lu JJ. 2005. The material resources of granodiorite porphyry in the dexing copper ore district: A study on trace elements. *Contributions To Geology and Mineral Resources Research*, 20(2): 75-79, 150 (in Chinese with English abstract)
- Shui T. 1987. Tectonic evolution of edge continental paleo-basement in southeastern China. *Bulletin of Science and Technology*, 5(5): 32-34 (in Chinese)
- Shui T. 1995. Cathaysia collision orogenic zone. *Geology of Zhejiang*, 11

- (2): 25–32 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Sun T, Zhou XM, Chen PR, Li HM, Zhou HY, Wang ZC and Shen WZ. 2003. Petrogenesis and tectonic significances of the Mesozoic strongly peraluminous granitoids in eastern Nanling region. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1209–1218 (in Chinese)
- Sun WD, Ding X, Hu YH and Li XH. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 533–542
- Sun WD, Ling MX, Yang XY, Fan WM, Ding X and Liang HY. 2010. Ridge subduction and porphyry copper gold mineralization: An overview. *Scientia Sinica (Terrae)*, 40(2): 127–137 (in Chinese)
- Tan KR. 1983. Geochemical characteristics and mineralization of Tongshanling grano-diorite, Hunan. *Geotectonica et Metallogenia*, 7(1): 66–80 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xu JF, Bao ZW and Ma JL. 2004. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315–324 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89(3–4): 424–446
- Wang YJ, Fan WM, Guo F, Li HM and Liang XQ. 2001. U-Pb dating of zircons from granodiorites in southeastern Hunan Province: Implications for petrogenesis. *Science in China (Series D)*, 31(9): 745–751 (in Chinese)
- Wei DF, Bao ZY, Fu JM. 2007. Geochemical characteristics and zircon SHRIMP U-Pb dating of the tongshanling granite in Hunan Province, South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(4): 482–489 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, Dong CW, Li WX and Zhou XM. 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: The significance of the gabbro-diorite-granite association. *Lithos*, 46(2): 299–315
- Yang MG and Mei YW. 1997. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou-Hangzhou paleoplate juncture. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 52–59 (in Chinese with English abstract)
- Yao JM, Hua RM and Lin JF. 2006. Rb-Sr isotope geochemistry, and Rb-Sr isochron age of pyrites in the Baoshan deposit, South Hunan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1045–1054 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Xu XB, Jia D and Shu LS. 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234–247 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Xu G, Zhang SH, Yang ZY, Zhang YQ and Hu JM. 2004. Yanshanian Movement and conversion of tectonic regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319–328 (in Chinese with English abstract)
- Zhong LF, Xia B, Liu LW, Li J, Lin XG, Xu LF and Lin LZ. 2010. Metallogenic geochronology of Yuanzhuding Cu-Mo deposit in western Guangdong-eastern Guangxi metallogenic belt and its geological significance. *Mineral Deposits*, 29(3): 395–404 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3–4): 269–287
- Zhou XM. 2003. My thinking about granite geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556–565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou YZ, Zeng CY, Li HZ, An YF, Liang J, Lü WC, Yang ZJ, He JG and Shen WJ. 2012. Geological evolution and oreprospecting targets in southern segment of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay juncture orogenic belt, southern China. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3): 486–491 (in Chinese with English abstract)
- Zhu X, Huang CK, Rui ZY, Zhou YH, Zhu XJ, Hu ZS and Mei ZK. 1983. *Dexing Porphyry Copper Deposits*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

## 附中文参考文献

- 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 顾连兴, 姜耀辉. 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗质岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学. *高校地质学报*, 11(3): 383–389
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, 81(11): 1449–1461
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘燊, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题. *矿床地质*, 26(2): 139–152
- 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 华仁民, 毕献武, 钟宏, 宋谢炎, 陶琰. 2010. 华南陆块陆内成矿作用的一些科学问题. *地学前缘*, 17(2): 13–26
- 李晓峰, Yasushi W, 屈文俊. 2007. 江西永平铜矿花岗质岩石的岩石结构、地球化学特征及其成矿意义. *岩石学报*, 23(10): 2353–2365
- 李晓峰, Yasushi W, 华仁民, 毛景文. 2008. 华南地区中生代 Cu-(Mo)-W-Sn 矿床成矿作用与洋岭/转换断层俯冲. *地质学报*, 82(5): 625–640
- 刘玄, 范宏瑞, 胡芳芳. 2011. 江西德兴斑岩铜矿的形成: 新元古代残留岛弧下地壳重熔. 西安: 2011 年岩石学与地球动力学研讨会论文摘要
- 路远发, 马丽艳, 屈文俊, 梅玉萍, 陈希清. 2006. 湖南宝山铜-钼多金属矿床成岩成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年研究. *岩石学报*, 22(10): 2483–2492
- 马丽艳, 路远发, 梅玉萍, 陈希清. 2006. 湖南水口山矿区花岗闪长岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 22(10): 2475–2482
- 钱鹏, 陆建军. 2005. 德兴铜矿花岗闪长斑岩物质来源的微量元素研究. *地质找矿论丛*, 20(2): 75–79, 150
- 水涛. 1987. 中国东南边缘大陆古基底构造演化. *科技通报*, 3(5): 32–34
- 水涛. 1995. 华夏碰撞造山带. *浙江地质*, 11(2): 25–32
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 李惠民, 周红英, 王志成, 沈渭洲. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. *中国科学 (D 辑)*, 33(12): 1209–1218
- 孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 范蔚茗, 丁兴, 梁华英. 2010. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿. *中国科学 (地球科学)*, 40(2): 127–137
- 谭克仁. 1983. 湖南铜山岭花岗闪长斑岩地球化学特征及其成矿作用. *大地构造与成矿学*, 7(1): 66–80
- 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 2004. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. *岩石学报*, 20(2): 315–324

- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 李惠民, 梁新权. 2001. 湘东南中生代花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 法定年及其成因指示. 中国科学(D 辑), 31(9): 745-751
- 魏道芳, 鲍征宇, 付建明. 2007. 湖南铜山岭花岗岩体的地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年. 大地构造与成矿学, 31(4): 482-489
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产, (3): 52-59
- 姚军明, 华仁民, 林锦富. 2006. 湘南宝山矿床 REE、Pb-S 同位素地球化学及黄铁矿 Rb-Sr 同位素定年. 地质学报, 80(7): 1045-1054
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘, 16(1): 234-247
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11(3): 319-328
- 钟立峰, 夏斌, 刘立文, 李杰, 林秀广, 徐力峰, 林良庄. 2010. 粤西-桂东成矿带园珠顶铜钼矿床成矿年代学及其地质意义. 矿床地质, 29(3): 395-404
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556-565
- 周永章, 曾长育, 李红中, 安燕飞, 梁锦, 吕文超, 杨志军, 何俊国, 沈文杰. 2012. 钦州湾-杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向. 地质通报, 31(2-3): 486-491
- 朱训, 黄崇轲, 芮宗瑶, 周跃华, 朱贤甲, 胡淙声, 梅占魁. 1983. 德兴斑岩铜矿. 北京: 地质出版社