

德兴斑岩铜矿床研究新进展

周清^{1,2)}, 姜耀辉²⁾, 廖世勇¹⁾, 靳国栋³⁾, 赵鹏²⁾, 刘铮²⁾, 贾儒雅²⁾

1) 中国地质调查局成都地质矿产研究所, 成都, 610081; 2) 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210093;

3) 中国地质调查局南京地质矿产研究所, 南京, 210016

内容提要:江西德兴铜矿是中国东部最大的斑岩型铜矿床, 前人对该矿床的成矿流体来源及演化方面的研究取得了较为一致的认识, 但在含矿斑岩成因、成矿物质来源、成矿环境等其它方面还存在有较大的争论。最新研究成果表明, 德兴铜矿的含矿斑岩形成于中侏罗世早期(170.2~171.0 Ma)古太平洋板块向欧亚大陆俯冲形成的大陆边缘环境, 由俯冲大洋板片(主要为上覆沉积物)部分熔融形成的具有高 Sr、Sr/Y 和 La/Yb 比值特征的高钾钙—碱性熔体, 在其上升过程中与岩石圈地幔相互作用所形成。超大型的 Cu—Au 多金属成矿作用与岩浆侵入作用几乎同时发生, 成矿物质主要由洋片(P-MORB)中富含 Fe³⁺ 的岩浆释放出的流体或熔体在上升途中与上覆岩石圈地幔相互作用后从岩石圈地幔中萃取出来。而在晚侏罗世中期(约 153.5 Ma), 区内转换为由俯冲大洋板片 rollback 形成的弧后伸展环境, 形成了壳—幔混源成因的闪长质侵入岩脉群, 但没有显示出良好的矿化作用; 到了早白垩世晚期(100.9~106.5 Ma), 德兴斑岩铜矿区内发生一次热液成因的 Cu(—Au?) 成矿作用事件, 叠加于原先大规模的主成矿事件之上。

关键词: 德兴斑岩铜矿; 岩石学成因; 成矿物质源; 板块俯冲; 热液锆石

德兴特大型斑岩铜矿床位于中国东南部江西省德兴市内, 属于环太平洋金属成矿带西带的一部分(图 1a)。该矿床构造上位于扬子地块东南缘的江南台隆上, 靠近扬子地块与华夏地块新元古代缝合线——江绍(江山—绍兴)断裂带, 距矿床东南侧约 50 km 处, 为北东—南西向的赣—杭裂谷(图 1b)。区内广泛出露中—新元古界(前南华系)变质老地层及新元古界(南华系—震旦系)、古生界和中生界地层(图 1c)。德兴铜矿是中国东部最大的斑岩型铜矿产地, 含有矿石 1500 Mt, 约含铜 6.45 Mt, 钼 0.25 Mt, 金 24 t 和银 285 t(Zaw et al., 2007)。该矿床包括铜厂、富家坞和朱砂红三个矿床, 分别受控于呈 NW 向分布的三个小侵入斑岩体(图 1d)。斑岩体的岩石类型主要为花岗闪长斑岩。在目前已经开采的铜厂和富家坞矿区中, 前者主要产铜, 后者则产铜和钼。

前人(如朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984)对德兴铜矿已进行了大量的调查和研究, 基本查明了该矿

床的地质特征、热液蚀变(包括围岩蚀变类型和分带型式)及矿化等特征。在成矿流体来源及演化方面取得了较为一致的认识: 主要来源于原始岩浆, 变质水和大气降水也有不同比例的介入(如金章东等, 1998; 郭新生等, 1999; Jin Zhangdong et al., 2001; 2002; 朱金初等, 2002; 毛景文等, 2010; Mao Jingwen et al., 2011)。然而, 在其它方面尚存在较大的争议。在含矿(花岗闪长质)斑岩的形成时代方面, 全岩或矿物的年龄从早侏罗世(193 Ma)到晚白垩世(112 Ma)都有报道(朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984; 朱金初等, 1990; 华仁民等, 2000; 金章东等, 2002; Wang Qiang et al., 2006)。对德兴斑岩铜矿床的成矿年龄报道少, 仅在毛景文等(2006)的专著中有所提及(铜厂辉钼矿 Re-Os 等时线年龄: 170.4 Ma)。

另外, 对该矿床含矿斑岩成因及构造环境的认识主要有: ① 消减环境下(Jiang Yaohui et al., 2005; 2009; 2011; Sun Weidong et al., 2007; 蒋少涌

注: 本文为国家自然科学基金青年基金资助项目(编号 41202067, 41202048)、重点项目(编号 40730313)和国家“973”计划(编号 2012CB416706, 2011CB403105)及中国地质调查局项目(编号 12120113036000)的成果。

收稿日期: 2012-08-06; 改回日期: 2013-06-28; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 周清, 男, 1983 年生。南京大学地球科学与工程学院矿床学博士。主要从事花岗岩成岩成矿研究。现工作于成都地质矿产研究所。Email: zhouq556@163.com。通讯作者: 姜耀辉, 南京大学地球科学与工程学院教授, Email: yhj186@hotmail.com。

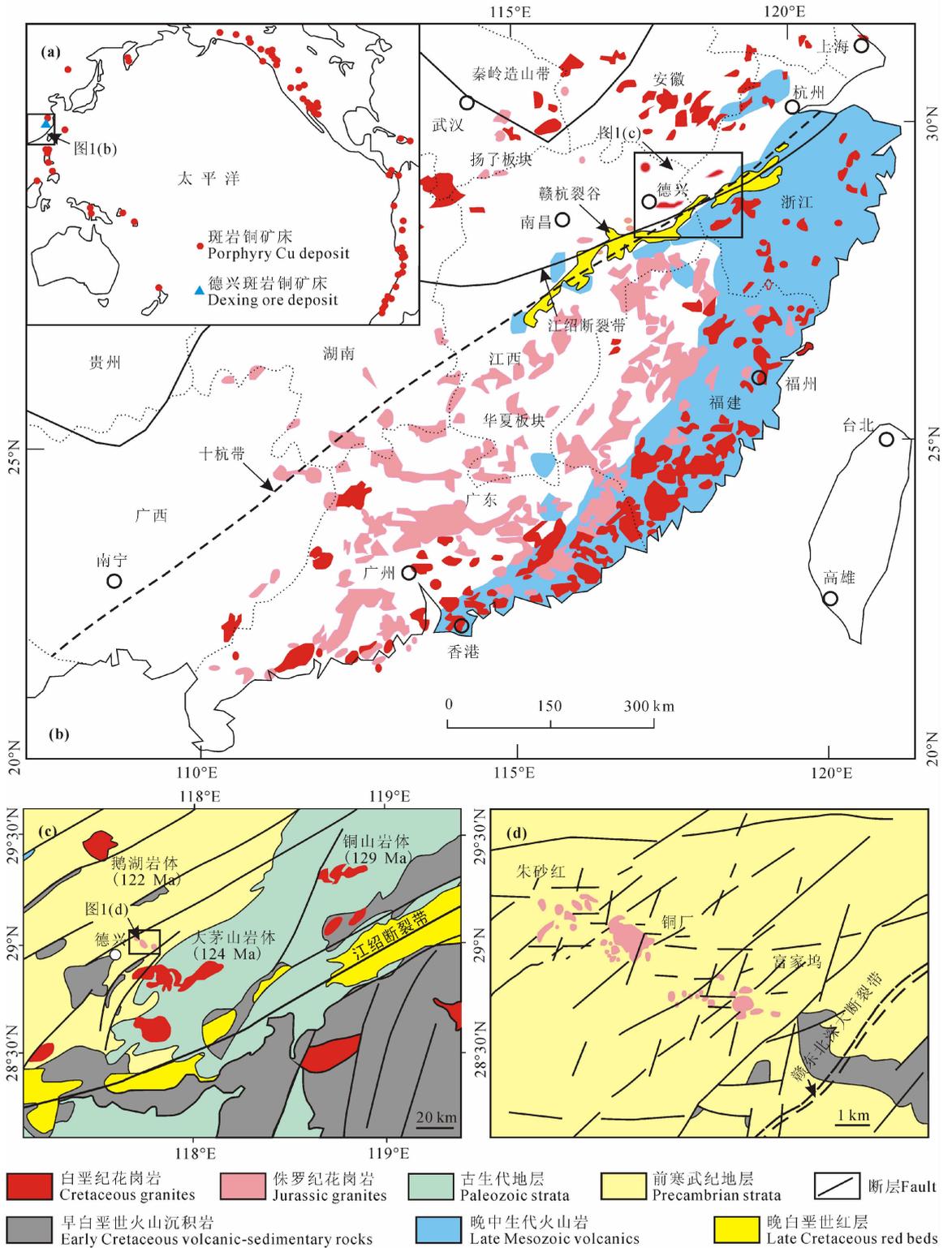


图 1 德兴铜矿区域及矿床地质图：(a) 环太平洋斑岩型成矿带简图；(b) 华南晚中生代火山—侵入岩套简图；(c) 德兴斑岩铜矿区域地质简图；(d) 德兴斑岩铜矿区地质简图(周清等, 2012)

Fig. 1 The regional and deposit geology sketch maps of the Dexing porphyry copper deposit: (a) the circum-Pacific porphyry copper ore belt; (b) the late Mesozoic volcanic—intrusive complex belt in SE China; (c) the regional geology of the Dexing porphyry copper deposit; (d) the Dexing porphyry copper deposit (Zhou Qing et al. , 2012)

等,2008;Ling Mingxing et al.,2009)地幔熔体受地壳物质混染(朱训等,1983;刘姝群等,1983;芮宗瑶等,1984;Zhou Xinmin and Li Wuxian,2000;华仁民等,2005;Mao Jingwen et al.,2011);②陆内拉张环境下(Li Zengxiang and Li Xianhua,2007)加厚拆沉下地壳部分熔融(如Wang Qiang et al.,2006);③前寒武纪具火山弧特征的残留下地壳部分重熔(Liu Xuan et al.,2012)。对成矿物质来源的认识:季克俭等(1989)、梁祥济(1995)认为铜主要来源于前震旦系双桥山群老变质岩地层;而朱训等(1983)、刘姝群等(1983)、朱金初等(2002)、毛景文等(2008,2010)、Jin Zhangdong等(2001,2002)、Wang Qiang等(2006)、Mao Jingwen等(2011)则坚持成矿物质主要来源于中酸性母岩岩浆,其中不少观点也认为不排除成矿流体曾受到地层物质的混染。对岩浆来源的学者观点,又有所分歧,除多数(如朱训等,1983;芮宗瑶等,1984;钱鹏等,2003;Mao Jingwen et al.,2011)支持成矿物质主要来源于地幔外,还有少数学者认为来源于具火山弧特征的残留下地壳(Liu Xuan et al.,2012),或是形成于加厚拆沉下地壳部分熔融成因的岩浆与岩石圈地幔的相互作用(如Wang Qiang et al.,2006)。此外,对该矿床内出现的脉状石英闪长玢岩却缺乏较多的关注和研究,仅在朱训等(1983)专著中略有提及;对矿区内出现的后期大脉型矿床的研究同样尚无文献记载。

最近,笔者等在上述方面做了不少工作,并取得了一些进展,为澄清这些争议、进一步制约德兴超大型铜矿床的成岩、成矿机制提供了良好的证据。

1 含矿斑岩成因研究

1.1 成岩时代

Zhou Qing et al. (2012a)对德兴铜矿铜厂、富家坞、朱砂红3个矿区的含矿斑岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学研究,结果表明其锆石加权平均年龄分别为 171.00 ± 0.84 Ma ($N = 22$, $MSWD = 0.86$)、 170.16 ± 0.88 Ma ($N = 22$, $MSWD = 0.61$)、 170.73 ± 0.84 Ma ($N = 22$, $MSWD = 0.60$)。这些结果与Wang Qiang et al. (2006)发表的德兴铜厂、富家坞斑岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄(171 ± 3 Ma)和Liu Xuan et al. (2012)报道的铜厂斑岩体的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄(172.5 ± 0.5 Ma)极为相近,而不同于先前朱训等(1983)、芮宗瑶等(1984)、朱金初等(1990)、华仁民等(2000)、金章东等(2002)对全岩或矿物Rb-Sr、K-Ar、Sm-Nd

宽泛年龄(112~193 Ma)的报道。由于全岩或矿物的Rb-Sr、K-Ar等体系的封闭温度较低,介于200~550°C之间(Van Breemen et al.,1979;Cliff,1985),易受蚀变的影响;而锆石的U-Pb体系封闭温度高,可达900~1100°C(Van Breemen et al.,1979;Cliff,1985;Lee et al.,1997;Cherniak et al.,2003),不易受外界条件的影响,其U-Pb同位素年龄目今被公认为可以代表岩体确切的侵入时间。因此,笔者倾向性地认为,近期这几次相近的锆石U-Pb年龄应能较精确地代表含矿花岗闪长斑岩的形成时代——即德兴铜矿三个含矿斑岩体近乎同时形成于中侏罗世早期。

1.2 岩石成因

先前与最近对弱蚀变岩石的测试分析(朱训等,1983;芮宗瑶等,1984;Wang Qiang et al.,2006;Liu Xuan et al.,2012;Zhou Qing et al.,2012a)均表明,德兴铜厂、富家坞和朱砂红三个矿床中的含矿斑岩具有一致的主、微量元素特征,呈中—酸性高钾钙碱性系列,少部分呈钙碱性系列;其 $Mg^{\#} = n(Mg) / [n(Mg) + n(Fe^T)]$ 高于纯的地壳部分熔融体。斑岩体富集轻稀土元素(LREE),不见显著的负Eu异常。岩石均富集大离子亲石元素(LILE)而相对亏损高场强元素(HFSE),并在微量元素蛛网图中显示较强的Nb、Ta负异常。由于德兴斑岩体显示由Defant和Drummond(1990)所定义的Adakite的某些地球化学特征,诸如: $SiO_2 (\geq 56\%)$ 和 Al_2O_3 含量($\geq 15\%$);亏损Y($< 18 \times 10^{-6}$)和Yb($< 1.9 \times 10^{-6}$)但富集Sr,Sr极少情况下低于 400×10^{-6} (Wang Qiang et al.,2006;Zhou Qing et al.,2012a);具有高的Sr/Y和La/Yb值。因而Wang Qiang等(2006)曾将其直接定义成德兴埃达克斑岩,Zhou Qing等(2012a)也使用“(类)埃达克质(adakite-like)”的说法。然而,Defant和Drummond(1990)关于adakite的初始定义主要是根据一套特定的岩石地球化学特征,并不代表为新的一种岩石类型,其指示的只是特定环境(大洋板片俯冲)下以产地(Adak)命名的一种特殊的岩石。对于目前“埃达克岩”在国内被广泛发现,其原始的定义被扩大,甚至被作为一种岩石分类,华仁民(2011,2012)、王登红(2011)等提出了强烈的反对意见,据此笔者等放弃Zhou Qing等(2012a)使用的“(类)埃达克质(adakite-like)”术语,恢复使用德兴含矿花岗闪长斑岩一词。

Wang Qiang et al. (2006)先前通过德兴铜矿含

矿斑岩的主、微量地球化学和 Sr—Nd 同位素特征 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 为 0.7044 ~ 0.7047; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -1.14 ~ 1.80) 认为其成因为加厚拆沉下地壳的部分熔融。而 Zhou Qing 等 (2012a) 近期对含矿斑岩较弱蚀变样品 Pb 同位素的研究结果 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$ 可达 18.41; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$ 可达 15.61) 既高于下地壳, 又高于亏损地幔, 因而排除了该成因模式; 并结合新的锆石原位 Hf 同位素 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 2.6 ~ 4.6) 和先前的 Sr—Nd 同位素特征, 提出德兴铜矿含矿斑岩可能是古太平洋板片及其上覆沉积物部分熔融后的熔体在上升过程中与地幔楔橄榄岩相互作用后的产物; 此外, 根据德兴含矿斑岩较高的 Mg# 值及岩石的 MgO 含量和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值之间呈两种趋势的线性负相关这一特征, 进一步认为板片熔体很可能受到了富集岩石圈地幔橄榄岩的选择性混染。

1.3 成岩构造环境及模式

长久以来, 高钾钙碱性岩浆作用被认为是可以形成于活动大陆边缘环境 (如 Condie, 1976)。Pearce 等 (1984) 发现形成于火山弧环境的花岗质岩石具有相对低的 Yb 和 Ta 含量, 而前面提到, 德兴含矿斑岩样品显示出这种地球化学特征, 因此 Zhou Qing 等 (2012a) 提出其形成于俯冲环境这一观点, 且认为该观点得到上述含矿斑岩 Sr—Nd—Pb—Hf 同位素组成特征的进一步支持: 这些同位素特征揭示出德兴含矿斑岩很有可能起源于俯冲沉积物和洋片的部分熔融, 并伴随熔体在其上升过程中与上覆地幔楔橄榄岩发生相互作用——该成岩过程与陆缘弧环境是相吻合的。朱训等 (1983)、华仁民等 (2005)、Jiang Yaohui 等 (2005, 2009, 2011)、Sun Weidong 等 (2007)、蒋少涌等 (2008)、Ling Mingxing 等 (2009)、Mao Jingwen 等 (2011) 等学者的前期研

究结果也表明华南在早一中侏罗世处于与古太平洋俯冲相关的陆缘弧环境。

据此, Zhou Qing 等 (2012a) 提出德兴斑岩铜矿含矿斑岩新的成岩模式 (图 2): 在大约 171 Ma 前, 古太平洋板块已呈低角度俯冲到中国东南大陆之下, 俯冲板片 (及其上覆沉积物) 发生部分熔融, 这种部分熔融体在其上升过程中与岩石圈地幔发生相互作用, 最终侵位到地壳浅部双桥山群地层中, 形成德兴具高 Sr、Sr/Y 和 La/Yb 值特征的高钾钙—碱性含矿花岗闪长斑岩。

2 矿床成因研究

2.1 成矿时代

最近 Zhou Qing 等 (2012a) 对德兴铜矿富家坞矿区中与黄铜矿、黄铁矿共生的辉钼矿进行 Re—Os 定年, 得到模式年龄加权平均值为 170.9 ± 1.1 Ma (2σ), 与等时线年龄为 172.3 ± 2.3 Ma (2σ) 在误差范围内一致。该加权平均模式年龄与铜厂矿床的辉钼矿 Re—Os 同位素年龄 170.4 ± 1.8 Ma (毛景文等, 2006) 非常相近; 也与前面提到含矿斑岩的锆石 U—Pb 年龄 (约 171 Ma) 较一致; 由此证实德兴斑岩型铜矿各矿床的主成矿作用与斑岩体成岩作用基本同时, 均发生在中侏罗世早期。

2.2 成矿物质来源

周清等 (2013) 对德兴铜矿铜厂和富家坞矿床中主要类型矿石硫化物的 Pb 同位素进行了研究, 结果表明德兴铜矿的成矿物质主要来源于含矿花岗闪长斑岩体, 而不是赣东北双桥山群新元古代的轻微变质老地层, 这与较早的研究结果 (如朱训等, 1983; 毛景文等, 2010; Mao Jingwen et al., 2011) 较为一致。在 Zartman 和 Doe (1981) 的 Pb 构造判别图解中, 黄铁矿所有样品全投在地幔 Pb 的演化线上面或附近, 暗示其成矿物质源区主要来源于地幔。另外, Zhou Qing 等 (2013) 通过总结前人 (朱训等, 1983; Li Xiaofeng and Sasaki, 2007) 对德兴铜矿中矿石 S 同位素的研究结果也表明, 该矿床三矿区的成矿物质主要来源于地幔, 俯冲大洋板片也可能贡献有一定成矿物质。

这一结论进一步得到了矿床中辉钼矿 Re—Os 同位素特征的支持。Zhou Qing 等 (2012a) 总结了国内外多个斑岩型、矽卡岩型等类型含钼矿床辉钼矿中的 Re (及相应的放射性 ^{187}Os) 含量变化范围及其相应的物质来源与成矿环境后认为: 幔源成因辉钼矿中 Re 含量非常高, 一般都超过 75×10^{-6} ; 相反, 壳

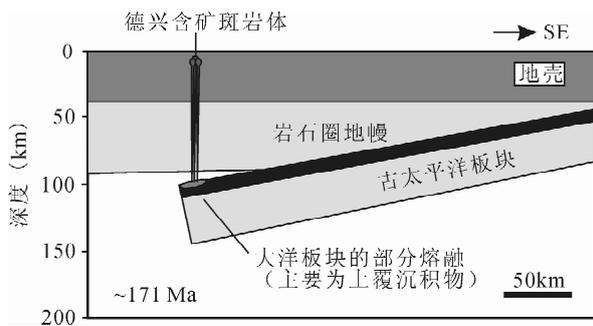


图 2 德兴斑岩铜矿含矿斑岩成岩模式 (Zhou 等, 2012a)

Fig. 2 A single tectonic model for the generation of the Dexing ore-bearing porphyries (Zhou et al., 2012a)

源成因辉钼矿中 Re 含量非常低,普遍低于 10×10^{-6} ;壳幔混源成因的辉钼矿 Re 含量则介于两者之间。该规律与 Mao Jingwen 等(1999)先前得出的结论极为吻合:即从幔源、壳幔混源到壳源辉钼矿中 Re 含量由 $n \times 10^{-4} \sim n \times 10^{-5} \sim n \times 10^{-6}$ 各递降一个数量级。而德兴铜矿铜厂、富家坞矿区中辉钼矿的 Re 以及相应的 ^{187}Os 含量非常高,其中 Re 主要变化于 $172.3 \times 10^{-6} \sim 1199.9 \times 10^{-6}$ (Zhou Qing et al., 2012a; 毛景文等, 2006)。根据上面得到的规律, Zhou Qing et al. (2013) 认为德兴铜矿的成矿物质主要来源于深部地幔,这与 Liu Xuan 等(2012)近期对德兴铜矿含矿斑岩锆石中的氧同位素研究结果具幔源特征是非常一致的。

2.3 成矿机制

德兴含矿斑岩起源于俯冲板片(及上覆沉积物)的部分熔融(毛景文等, 2008; Zhou Qing et al., 2012a), 伴随熔体与地幔楔的相互作用, 这种俯冲板片部分熔融形成的熔体, 富含大量的 Fe^{3+} (Sillitoe, 1997), 在其向上运移过程中与地幔楔橄榄岩发生交代反应时, Fe^{3+} 会氧化地幔中的硫化物而转化为 Fe^{2+} , 而硫化物中的 Cu(Mo) 和 Au 则被释放出来进入岩浆。岩浆与地幔楔橄榄岩的相互反应, 大幅度提高了熔体的 Fe、Cr、Ni 含量 (Kay, 1978; Keleman, 1995), 从而增大硫在熔体中的溶解度。周清等(2013)认为这种相互反应也将提高幔岩的氧逸度, 更有利于幔岩中的金属氧化并进入岩浆系统; 携带有大量 Cu—Mo—Au 等金属的高钾钙碱性岩浆上侵入到地壳浅部有利构造部位, 在岩体内外接触带发生沉淀而形成矿体, 其形成(约 170.9 Ma) 几乎与含矿花岗闪长斑岩(约 171 Ma) 同时 (Zhou Qing et al., 2012a)。这与毛景文等(2011)提出的: 华南中晚侏罗世斑岩—矽卡岩—热液脉状铜多金属矿床可能由俯冲板片沿古钦杭结合部位发生局部重熔, 形成高钾钙碱性花岗岩, 然后上侵定位和成矿这一观点是一致的。

3 闪长玢岩研究

在德兴铜厂矿区内, 周清等(2012)研究发现有的晚期的侵入石英闪长玢岩脉, 其特征与朱训等(1983)曾提及的较为一致。该类岩石呈浅灰色细粒斑状结构, 暗色矿物较多, 超过 70%; 斑晶含量不超过 15%, 斑晶主要为斜长石(3~5 mm) 和石英(1~2 mm), 其次为黑云母(约 2 mm) 和角闪石(约 2 mm), 基质为斜长石、石英和黑云母。岩石蚀变较强

烈(烧失量达 12.07), 镜下只见到少量蚀变后的角闪石、斜长石及原生石英晶形。玢岩中较少见到矿化现象。

周清等(2012)通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究表明闪长玢岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄区间为 $150.6 \pm 1.8 \sim 159.0 \pm 2.4$ Ma, 加权平均值为 153.5 ± 2.4 Ma (2σ , MSWD = 2.5), 揭示该玢岩脉体形成于晚侏罗世。德兴脉状石英闪长玢岩处于华南地区十杭带北带, 其形成时代与同处十杭带南带的 A 型花岗岩形成时代(151~163 Ma) 较为一致(如蒋少涌等, 2008; Jiang Yaohui et al., 2009; 2011; Zhao Kuidong et al., 2012), 因此, 它们形成的构造背景也应相同, 即很可能同形成于弧后伸展的构造背景(周清等, 2012)。结合锆石原位 Hf(ϵ_{Hf} 值 ~ 4.73) 和全岩 Nd 同位素(ϵ_{Nd} 值 ~ 0.5) 的研究结果, 周清等(2012)认为德兴脉状闪长玢岩很可能形成于古太平洋板块西向俯冲引起的弧后或弧内拉张环境下, 为幔源玄武质岩浆底侵后受地壳物质混染所致。与早期的含矿花岗闪长斑岩不同, 该期闪长质岩浆侵入事件则尚未显示出与成矿有紧密的联系。

4 大脉型矿石研究

朱训等(1983)前期工作表明德兴铜矿的矿石主要呈浸染状、细脉状、细脉浸染状和薄膜状构造。矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿, 次为辉钼矿, 再次为砷黝铜矿、斑铜矿等。而 Zhou Qing 等(2012b) 近期还鉴别出另一种矿石类型——大脉型矿石, 与上述细脉型矿石有较大区别。该类型矿石矿物组成简单, 主要由黄铁矿和黄铜矿组成, 赋存于石英(或方解石)脉中, 脉宽普遍在 5 cm 以上(上述细脉型矿石脉宽通常小于 1 cm)。并对其中一条脉宽达 20 cm 的含矿石英大脉中的锆石在国土资源部北京离子探针中心的 SHRIMP II 型离子探针仪器上进行了 U-Pb 测年分析, 结果显示出一新一老两个年龄序列: 老锆石谐和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $735.5 \pm 5.6 \sim 899.5 \pm 9.8$ Ma 之间; 年轻锆石显示两组谐和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值, 分别为 $106.5 \pm 0.9 \sim 100.9 \pm 3.5$ Ma。

CL 图像特征表明, 这些老锆石棱角鲜明, 较自形, 粒度较大(长 100~150 μm), 且具有韵律环带。这类锆石显示较低的 U($77 \sim 823 \times 10^{-6}$)、Th($64 \sim 538 \times 10^{-6}$) 和普 Pb(主要 < 0.42), 但具有较高的 Th/U 比值(~ 1.27) (Zhou Qing et al., 2012b)。而年轻锆石晶形则呈他形, 粒度较小(长 50~80 μm),

不显韵律环带。该类锆石具有较高的 U (主要为 $1227 \sim 8094 \times 10^{-6}$, 个别高达 10603×10^{-6})、Th (主要为 $703 \sim 2505 \times 10^{-6}$, 个别高达 5504×10^{-6}) 和普 Pb (主要 > 0.60) 含量及较低的 Th/U 比值 ($0.08 \sim 0.54$) (Zhou Qing et al., 2012b)。这些特征与 Watson 等 (1997)、Hoskin (2005)、朱永峰和宋彪 (2006) 等报道的热液锆石特征非常相似。因此, Zhou Qing 等 (2012b) 以这组年轻锆石的年龄代表含矿石英脉的形成时代。

为进一步区分上述两类锆石的成因, Zhou Qing 等 (2012b) 在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室进行了锆石原位 LA-ICP-MS 激光剥蚀微量元素测试, 结果显示它们具有不同的微量元素地球化学特征——年轻锆石相对富集轻稀土元素, 并具有弱的负 Ce 异常, 而老锆石则亏损轻稀土元素, 并显示明显的正 Ce 异常。在 $(\text{Sm}/\text{La})_N$ 对 La 以及 Ce/Ce^* 对 $(\text{Sm}/\text{La})_N$ 投图中 (详见 Zhou Qing et al., 2012b), 年轻锆石投入热液锆石区域中, 而年老锆石除一颗具有较低的 Ce/Ce^* 和 $(\text{Sm}/\text{La})_N$ 值外, 其他均介于岩浆锆石和热液锆石区域之间。Zhou Qing 等 (2012b) 认为老锆石年龄与新元古代围岩地层时代相一致, 应为从围岩地层中捕获的锆石。

上述研究结果表明热液锆石和捕获围岩地层锆石, 在形态学、CL 图像特征、放射性同位素地球化学以及微量地球化学等特征方面均存在明显的区别。因而 Zhou Qing 等 (2012b) 认为石英大脉中的年轻锆石为新生的热液锆石, 其 U-Pb 年龄正可代表该期热液成矿年龄, 该年龄较之上面的主成矿期年龄晚约 70 Ma, 从而表明德兴斑岩铜矿还存在一次早白垩世晚期的 Cu (—Au?) 成矿作用事件, 叠加于大规模的主成矿事件之上。对德兴铜矿含矿石英大脉中流体包裹体测温的结果则表明铜厂和富家坞矿床本期成矿热液均属中低温低盐度热液 (Zhou Qing et al., 2012b); 不同于朱训等 (1983) 对德兴斑岩铜矿早期主成矿流体的研究结果: 经历了从高温到中温再到低温的过程。该期热液成矿事件, 与毛景文等 (2009) 提出的华南白垩纪浅成低温热液型铜金银成矿阶段较一致, 很可能隶属于同一个成矿系统。

5 结论

中生代为中国东部成矿大爆发时期, 该期间华南发生了大规模的成矿作用, 被称为中生代成矿爆发事件。华仁民等 (2005) 认为中国华南地区中生

代发生了 3 次大规模成矿作用, 且都在燕山期。其中, 第一次发生在燕山早期 (180 ~ 170 Ma), 以赣东北和湘东南的 Cu、Pb—Zn (Au) 矿化为代表。第二次发生在燕山中期的第二阶段 (约 150 ~ 139 Ma), 主要是南岭及相邻地区以 W、Sn、Nb、Ta 等有色—稀有金属矿化为主的成矿作用。第三次是发生在燕山晚期 (125 ~ 98 Ma) 的以南岭地区 Sn、U 矿化和东南沿海地带的 Au—Cu—Pb—Zn—Ag 矿化为代表的成矿作用。李晓峰等 (2008) 同样认为华南地区 10 个典型的与 Cu 有关的矿床主要发生在 180 ~ 170 Ma、160 ~ 150 Ma 以及 105 ~ 90 Ma 三个时期。而毛景文等 (2008, 2009, 2011) 也提出华南地区中生代主要金属矿床出现了三个阶段, 并相应地建立了 4 个矿床模型: 其中包括 170 ~ 160 Ma 中侏罗世斑岩—矽卡岩型铜矿模型, 160 ~ 150 Ma 晚侏罗世与花岗岩有关的钨锡矿床模型; 早—中白垩世阶段 (134 ~ 80 Ma, 集中在 110 ~ 80 Ma) 包括浅成低温热液型铜金银矿床模型及锡钨多金属矿床模型。以上观点大体上是比较一致的。

通过总结德兴斑岩铜矿最近的研究成果, 笔者认为上述重要的 3 个阶段, 同样在该矿床中相应地有所体现:

(1) 在中侏罗世早期 (~ 171.0 Ma), 古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲, 形成了活动大陆边缘环境, 俯冲大洋板片及上覆沉积物部分熔融形成的高钾钙碱性熔体, 在其上升过程中与岩石圈地幔相互作用, 最终形成了高钾钙碱性的德兴含矿花岗岩闪长质岩浆。超大型的 Cu—Au 多金属成矿作用与岩浆侵入作用几乎同时发生 (170.4 ~ 170.9 Ma), 成矿物质主要由上述板片起源的高钾钙碱性岩浆通过与岩石圈地幔相互作用后从岩石圈地幔中萃取出来。

(2) 在晚侏罗世中期 (~ 153.5 Ma), 华南转换为由俯冲大洋板片 rollback 形成的弧后伸展环境, 并形成了壳—幔混源成因的闪长质侵入岩脉群, 但没有显示良好的矿化作用。

(3) 在早白垩世晚期 (100.9 ~ 106.5 Ma), 德兴斑岩铜矿区内还存在一次热液成因的 Cu (—Au?) 成矿作用事件, 叠加于原先大规模的主成矿事件之上。有关该期成矿事件的形成机制及在矿床学和经济学上的意义, 值得做进一步的研究。

致谢: 野外工作得到江西德兴铜矿集团张映红科长和陈乐晃主任等的热心帮助, 审稿专家和责任编辑为本文提出了很好的修改建议, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献 / References

- 郭新生,季克俭,黄耀生,陈江峰. 1999. 德兴斑岩铜矿成矿热液来源及其演化——花岗岩长斑岩的氧同位素制约. 高校地质学报, 5(3): 260 ~ 268.
- 华仁民,李晓峰,陆建军,陈培荣,邱德同,王果. 2000. 德兴大型铜金矿集区构造环境和成矿流体研究进展. 地球科学进展, 15(5): 525 ~ 533.
- 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(2): 99 ~ 107.
- 华仁民. 2011. 关于花岗岩成因分类与花岗岩成矿作用若干基本问题的思考——与张旗先生等商榷. 矿床地质, 30(1): 163 ~ 170.
- 华仁民,王登红. 2012. 关于花岗岩与成矿作用若干基本概念的再认识. 矿床地质, 31(1): 165 ~ 175.
- 季克俭,吴学汉,张国柄. 1989. 热液矿床的矿源、水源和热源及矿床分布规律. 北京:北京科学技术出版社.
- 蒋少涌,赵葵东,姜耀辉,戴宝章. 2008. 十杭带湘南—桂北段中生代A型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论. 高校地质学报, 14(4): 496 ~ 509.
- 金章东,朱金初. 1998. 关于德兴斑岩铜矿成矿物质来源——与梁祥济研究员商榷. 地质论评, 44(5): 464 ~ 469.
- 金章东,朱金初,李福春. 2002. 德兴斑岩铜矿成矿过程的氧、锶、钨同位素证据. 矿床地质, 21(4): 342 ~ 350.
- 李晓峰, Watanabe Y, 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.
- 梁祥济. 1995. 江西德兴斑岩铜矿成矿物质来源的实验研究. 地质论评, 41(5): 463 ~ 471.
- 刘娟群,杨世义,张秀兰,陈长江. 1983. 德兴斑岩铜矿斑岩和围岩蚀变特征及斑岩和成矿物质来源的讨论. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所刊, 7: 77 ~ 95.
- 毛景文,胡瑞忠,陈毓川,王义天. 2006. 大规模成矿作用与大型矿集区. 北京:地质出版社, 1 ~ 1030.
- 毛景文,谢桂青,郭丽春,元顺达,程彦博,陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510 ~ 526.
- 毛景文,谢桂青,程彦博,陈毓川. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型. 地质论评, 55(3): 347 ~ 354.
- 毛景文,张建东,郭丽春. 2010. 斑岩铜矿—浅成低温热液银铅锌—远接触带热液金矿床模型: 一个新的矿床模型——以德兴地区为例. 地球科学与环境学报, 32(1): 1 ~ 14.
- 毛景文,陈懋弘,袁顺达,郭春丽. 2011. 华南地区钦坎成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85(5): 636 ~ 658.
- 钱鹏,陆建军,姚春亮. 2003. 德兴斑岩铜矿成矿流体演化与来源的流体包裹体研究. 南京大学学报(自然科学), 39(3): 319 ~ 326.
- 芮宗瑶,黄崇軻,齐国明,徐钰,张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京:地质出版社, 1 ~ 140.
- 王登红. 2011. 关于矿床学研究方法的一点看法——就“埃达克岩”与成矿的关系问题与张旗先生商榷. 矿床地质, 30(1): 171 ~ 175.
- 周清,姜耀辉,廖世勇,赵鹏,靳国栋,贾儒雅,刘铮,徐深谋. 2012. 德兴铜矿闪长玢岩 SHRIMP 锆石 U—Pb 定年及原位 Hf 同位素研究. 地质学报, 86(11): 1726 ~ 1734.
- 周清,姜耀辉,廖世勇,赵鹏,靳国栋,贾儒雅,刘铮,徐深谋. 2013. Pb 同位素对德兴铜矿成矿物质源的制约. 地质学报, 87(8): 1124 ~ 1135.
- 朱金初,沈渭洲,刘昌实,徐士进. 1990. 华南中生代同熔系列花岗岩类的 Nd—Sr 同位素特征及成因讨论. 岩石矿物学杂志, 9(2): 97 ~ 104.
- 朱金初,金章东,饶冰,李富春. 2002. 德兴铜厂斑岩铜矿流体过程. 南京大学学报(自然科学), 38(3): 418 ~ 434.
- 朱永峰,宋彪. 2006. 新疆塔格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年. 岩石学报, 22(1): 135 ~ 144.
- 朱训,黄崇軻,芮宗瑶. 1983. 德兴斑岩铜矿. 北京:地质出版社, 1 ~ 336.
- Cherniak D J, Watson E B, Grove M, Harrison T M. 2003. Pb diffusion in monazites: a combined RBS/SIMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 829 ~ 840.
- Cliff R A. 1985. Isotopic dating in metamorphic belts. *Journal of the Geological Society*, 142: 97 ~ 110.
- Condie K C. 1976. *Plate Tectonics and Crustal Evolution*, 2nd edition. New York: Pergamon Press.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662 ~ 665.
- Hoskin P W O. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 637 ~ 648.
- Jiang Yaohui, Ling Hongfei, Jiang Shaoyong, Fan Honghai, Shen Weizhou, Ni Pei. 2005. Petrogenesis of a Late Jurassic peraluminous volcanic complex and its high-Mg, potassic, quenched enclaves at Xiangshan, Southeast China. *Journal of Petrology*, 46: 1121 ~ 1154.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Dai Baozhang, Liao Shiyong, Zhao Kuidong, Ling Hongfei. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107: 185 ~ 204.
- Jiang Yaohui, Zhao Peng, Zhou Qing, Liao Shiyong, Jin Guodong. 2011. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China. *Lithos*, 121: 55 ~ 73.
- Jin Zhangdong, Zhu Jinchu, Ji Junfeng, Lu Xinwei, Li Fuchun. 2001. Ore-forming fluid constraints on illite crystallinity (IC) at Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province. *Science in China (Series D)*, 44: 177 ~ 184.
- Jin Zhangdong, Zhu Jinchu, Ji Junfeng, Li Fuchun, Lu Xinwei. 2002. Two origins of illite at the Dexing porphyry Cu deposit, East China: implications for ore-forming fluid constraint on illite crystallinity. *Clays and Clay Minerals*, 50: 381 ~ 387.
- Kay R W J. 1978. Aleutian magnesium andesites: melts from subducted Pacific oceanic crust. *Jour. Volcan. Geotherm. Res.*, 4: 117 ~ 132.
- Keleman B P. 1995. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust. *Contribute to Mineralogy and Petrology*, 120: 1 ~ 19.
- Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, 390: 159 ~ 161.
- Li Xiaofeng, Sasaki M. 2007. Hydrothermal Alteration and Mineralization of Middle Jurassic Dexing Porphyry Cu—Mo Deposit, Southeast China. *Resource Geology*, 57: 409 ~ 426.
- Li Zengxiang, Li Xianhua. 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.
- Ling Mingxing, Wang Fangyue, Ding Xing, Hu Yanhua, Zhou Jibin, Zartman R E, Yang Xiaoyong, Sun Weidong. 2009. Cretaceous ridge subduction along the lower Yangtze River belt, eastern China.

- Economic Geology, 104: 303 ~ 321.
- Liu Xuan, Fan Hongrui, Santosh M, Hu Fangfang, Yang Kuifeng, Li Qiuli, Yang Yueheng, Liu Yongsheng. 2012. Remelting of Neoproterozoic relict volcanics in the Middle Jurassic: Implication for the formation of the Dexing porphyry copper deposit, Southeastern China. *Lithos*, 150: 85 ~ 100.
- Mao Jingwen, Zhang Jiandong, Pirajno F, Ishiyama D, Su Huimin, Guo Chunli, Chen Yuchuan. 2011. Porphyry Cu—Au—Mo—epithermal Ag—Pb—Zn—distal hydrothermal Au deposits in the Dexing area, Jiangxi province, East China—a linked ore system. *Ore Geology Reviews*, 43: 203 ~ 216.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956 ~ 983.
- Sillitoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper—gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44: 373 ~ 388.
- Sun Weidong, Ding Xing, Hu Yanhua. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262: 533 ~ 542.
- Vance Breemen O, Aftalion M, Pankhurst R J, Richardson S W. 1979. Age of the Glen Dessary syenite Inverness-shire: Diachronous Palaeozoic metamorphism across the great Glen. *Scottish Journal of Geology*, 15: 49 ~ 62.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Jian Ping, Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua, Li Chaofeng, Xiong Xiaolin, Ma Jinlong. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47 (1): 119 ~ 144.
- Watson E B, Cherniak D J, Hanchar J M, Harrison T M, Wark D A. 1997. The incorporation of Pb into zircon. *Chemical Geology*, 141: 19 ~ 31.
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumb tectonics—the model tectonophysics. *Tectonophysics*, 75: 125 ~ 177.
- Zaw K, Peters S G, Cromie P, Burrett C, Hou Zengqian. 2007. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China: . *Ore Geology Reviews*, 31: 3 ~ 47.
- Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Yang Shuiyuan, Dai Baozhang, Lu Jianjun. 2012. Mineral chemistry, trace elements and Sr—Nd—Hf isotope geochemistry and petrogenesis of Cailing and Furong granites and mafic enclaves from the Qitianling batholith in the Shi-Hang zone, South China. *Gondwana Research*, 22: 310 ~ 324.
- Zhou Qing, Jiang Yaohui, Zhao Peng, Liao Shiyong, Jin Guodong. 2012a. Origin of the Dexing ore-bearing porphyries, South China: elemental and Sr—Nd—Pb—Hf isotopic constraints. *International Geology Review*, 54: 572 ~ 592.
- Zhou Qing, Jiang Yaohui, Zhao Peng, Liao Shiyong, Jin Guodong, Jia Ruya, Liu Zheng. 2012b. SHRIMP U—Pb dating and trace-element compositions of hydrothermal zircon from the Dexing porphyry copper deposit, SE China. *Economic Geology*, 1.7: 1507 ~ 1504.
- Zhou Qing, Jiang Yaohui, Zhang Huihua, Liao Shiyong, Jin Guodong, Zhao Peng, Jia Ruya, Liu Zheng, 2013. Mantle Origin of the Dexing Porphyry Copper Deposit. *International Geology Review*, 55: 337 ~ 349.
- Zhou Xinmin, Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269 ~ 287.

New Research Progress of the Dexing Porphyry Copper Deposit

ZHOU Qing^{1, 2)}, JIANG Yaohui²⁾, LIAO Shiyong¹⁾, JIN Guodong³⁾, ZHAO Peng²⁾, LIU Zheng²⁾, JIA Ruya²⁾

1) *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Geological Survey, Chengdu, 610081;*

2) *Department of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210093;*

3) *Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Geological Survey, Nanjing, 210016*

Abstract: The Dexing porphyry copper deposit, Jiangxi Province, is the largest porphyry copper deposit in eastern China. Previous studies indicated that the ore-forming fluids were dominantly derived from the magmatic system, plus additional meteoric water, but there have been some controversies on the petrogenesis of the ore-bearing porphyries and the tectonic setting and ore-forming source of this deposit. Our new studies have suggested that the Dexing porphyries were emplaced in a continental arc setting coupled with the westward subduction of the Palaeo-Pacific plate in the early Middle Jurassic (170.2 ~ 171.0 Ma). Partial melting of the subducted slab (mainly overlying sediments), with subsequent melts interacting with the lithospheric mantle wedge, formed the high-K calc-alkaline porphyry magmas with high Sr, Sr/Y and La/Yb affinities. The large scale Cu—Mo—Au mineralization was nearly contemporaneous with the magmatism, and the ore-forming source were extracted from the Fe³⁺-rich fluids/magmas released by the P-MORB interacting with the lithospheric mantle wedge. However, during the middle Late Jurassic (~153.5 Ma), Dexing area had been converted to a back-arc or an intra-arc extension environment triggered by the rollback of the palaeo-Pacific plate, and there formed the ore-barren dioritic intrusions with a crust—mantle mixing source. Moreover, there had formed a hydrothermal Cu (Au?) metallogenic event superimposed on the porphyry Cu—Mo—Au mineralization during the late Early Cretaceous.

Key words: Dexing porphyry copper deposit; petrogenesis; ore-forming source; subduction of plate; hydrothermal zircon