

“我国典型金属矿科学基地研究”项目系列丛书

江西德兴斑岩铜矿 科学基地研究

赵元艺 水新芳 曹冲 黄道袞 等 编著



地质出版社

“我国典型金属矿科学基地研究”项目系列丛书

江西德兴斑岩铜矿 科学基地研究

赵元艺 水新芳 曹 冲 黄道袞 编著
吴德新 郭 硕 李小赛 刘 妍

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

德兴地区是我国重要的 Cu-Mo-Au-Pb-Zn-Ag 矿产资源产地,它聚集了大型的德兴斑岩铜矿、银山多金属矿床以及与韧性剪切带有关的金山金矿,构成了我国单位面积成矿强度最大的地区之一。本次工作选择以德兴斑岩铜矿床为主要研究对象,在前人勘查、开发与科学研究成果的基础上,系统地查明矿床的形成过程,建立矿床成矿模型;总结矿床发现、勘查的技术方法组合,提出找矿模型;探讨矿集区 3 类矿床的成因联系,指导在已知矿床深部和外围以及在相似地质背景下开展找矿勘查;汇编有关图件,形成彩色图集,与正在建设的“德兴矿山公园”结合,以有关的实物资料等成果为主,为建立野外科学基地提供基础资料,供今后进行科学研究、地学教学与科普教育等使用。

本书附有大量的野外地质现象、标本、显微镜下、扫描电镜下的照片及原始分析数据,供感兴趣的科技人员在进一步研究时参考。

本书是关于德兴斑岩铜矿科学基地的系统专著,可供从事有关的矿物学、岩石学、矿床地质学、地球化学、矿产勘查学等学科的科研和教学工作人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

江西德兴斑岩铜矿科学基地研究 / 赵元艺等编. —北京:地质出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-116-09162-7

I. ①江… II. ①赵… III. ①斑岩矿床—铜矿床—研究—德兴县 IV. ①P618.410.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 035985 号

责任编辑:白铁 李华 李佳 吕静

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010) 66554643 (邮购部); (010) 66554625 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:889 mm × 1194 mm ¹/₁₆

印 张:16

字 数:400 千字

版 次:2015 年 5 月北京第 1 版

印 次:2015 年 5 月北京第 1 次印刷

定 价:60.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-09162-7

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

总前言

矿产资源是一种不可再生的自然资源，是人类社会赖以生存和发展的物质基础。中国是世界上地质演化历史悠久、成矿作用具有多样性的国家之一，自太古宙以来的各个地质历史时期的构造运动在中国都或多或少地留下了记录并伴随有不同规模的成矿作用。世界上最重要的三大成矿域（古亚洲成矿域、滨太平洋成矿域和特提斯-喜马拉雅成矿域）在空间上交汇于中国。多期复合造山铸就了中国独具特色的成矿体系。对于深化中国特色成矿规律的研究，亟须一套代表中国各类矿床的“字典”和科学研究基地作为矿产地质研究的示范区，并成为创新研究基地以及文化普及的园地。

我国已成为世界上最大矿产品进口国和生产国，而且随着国民经济的高速发展，矿产资源短缺的形势将更加严峻，迫切需要破解矿产资源不足之“瓶颈”。只有加大勘查力度，才能有效保障矿产资源供给。迄今，越来越多的老矿山面临资源枯竭或“硃老山空”的严峻局面。在过去 10 多年，我国部署了一系列国家计划项目，例如，“973”计划、科技支撑计划和地质调查专项等，开展区域成矿规律、勘查技术方法以及新区的矿产调查和勘查等。相比之下，对于典型大型矿床，尤其是正在开采的大型老矿山缺乏系统解剖研究，而这些大型矿山揭露出的地质现象极其丰富，往往是成矿新理论和新思维的发源地，对其进行立典性解剖研究，将会大大提升成矿理论。一个大型-超大型矿床从发现-勘查-开采以及开采过程中的多次补充勘查，都拥有一部史诗，包括运用不同勘查技术方法组合开展地质勘查，既有成功的经验，也有失败的教训，对其进行挖掘和总结，不仅能促进对该矿床深部及外围找矿，而且可以运用这些新认识和技术组合在相同景观下有效地开展找矿勘查。

目前，不少大型矿山经过多年的开采资源逐渐枯竭，甚至即将闭坑。一旦关闭和掩埋，许多丰富的地质现象，特别是独一无二的现象将荡然无存。因此，迫切需要在闭坑之前，把每一个重要矿床的地质特征客观地记录下来，以便后人参考。同时，将闭坑老矿山建成博物馆或科普旅游基地向社会开放，必将提高普通民众认识地球、了解资源及其形成过程的认知水平，有益于提升全民保护环境和节约资源的意识。因此，开展大型矿床的立典研究，既是科学技术创新研究和推动找矿勘查的需要，也是保护“历史科学资料”和提高全民科学素质之必须。

典型矿床科学基地有机地融合了创新、教学和科普，在推动全民科学文化素质和科技普及方面越来越发挥着重要作用。典型矿床基地既是科学研究的基地，也是专业教学和科学普及的园地。一些发达国家的矿山在开采阶段乃至闭坑后，都以矿石、岩石和开采历史及其相应的图集和图册为主体建立了一座座矿山博物馆或科技馆。这些博物馆和科技馆逐渐被开发为地球科学技术培训以及古矿业遗迹的参观基地，极大地促进了旅游业的发展和矿业科学技术的普及。

为此，国土资源部于 2009 年启动公益性行业科研专项经费项目“我国典型金属矿科学基地研究”，对我国重要矿种 29 个大型-超大型金属矿床开展立典研究，并建立科学基地。具体包括江西德兴斑岩型铜矿、西藏甲马斑岩-矽卡岩型铜钼矿、云南北衙斑岩-矽卡岩型金（铜）矿、安徽铜陵矽卡岩型铜多金属矿、新疆阿舍勒块状硫化物矿床（VMS 型）铜锌矿、云南东川砂岩型铜矿、甘肃金川岩浆型铜镍矿、河南南泥湖-三道庄斑岩-矽卡岩型钼钨矿、陕西金堆城斑岩型钼矿、新疆可可托海伟晶岩型锂铍铷钽矿、湖南柿竹园矽卡岩-云英岩钨锡钼铋矿、云南个旧矽卡岩型锡多金属矿、广西大厂锡石硫化物型锡矿、湖南锡矿山中低温热液型铋矿、辽宁弓长岭 BIF 型铁矿、甘肃镜铁山海底喷流沉积型铁矿、安徽四山玢岩型铁矿、湖北大冶矽卡岩型铁矿、内蒙古白云鄂博铁稀土建造矿、云南会泽密西西比型（MVT）铅锌矿、甘肃厂坝-代家庄热液型铅锌矿、内蒙古东升庙 SEDEX 型铅锌矿、云南金顶热液型铅锌矿、海南石碌沉积变质型铁矿、四川攀枝花岩浆型铁钛磁铁矿、福建紫金山浅成低温热液型铜金矿、山东焦家-玲珑石英脉-蚀变岩型金矿、贵州烂泥沟卡林型金矿、江

西冷水坑次火山岩热液型银铅锌矿。这些矿床都是储量巨大、成矿类型具有代表性、成矿方式具有特殊性，而且在我国国民经济建设中曾经或正在发挥重要作用。

此次工作对矿床的矿石组合、结构构造、成矿期次和阶段、围岩蚀变、找矿标志、形成时代、成矿物质来源、成矿物理化学条件、同位素地球化学特征、成矿环境等开展了系统研究，同时，针对各种不同类型矿床研究中存在的关键科学问题开展攻关研究：斑岩型铜矿形成期间从岩浆凝固晚期到成矿流体析出转变过程中组分演变特征与相应的物理化学条件；斑岩铜矿和斑岩钼矿形成环境和物质来源的异同性；古盆地流体来源和运移的驱动力，流体汇聚的规律性；与 A 型或高分异性 I 型花岗岩有关的稀有和钨锡矿床的物质来源，地幔对成矿的贡献及含矿岩体的主要辨别要素；变质古海底喷流型矿床的环境恢复等方面，取得了一系列重要创新成果，在综合研究的基础上，建立了矿床模型。通过收集和整理典型矿床勘查、开采过程中所采用的勘查技术和方法，梳理出不同类型矿床勘查的有效方法组合，提供了矿床成功勘查的范例。

在国土资源部公益性行业科研专项经费的支持下，基于前人找矿勘查和研究成果，结合此次补充研究，编著了“我国典型金属矿科学基地研究”项目系列丛书，既客观地反映这些大型 - 超大型矿床的基本特点和勘查开发与研究的历史，也充分展示了最新的研究水平。

历时 5 年，项目的顺利执行以及丛书的及时出版，得到了各级主管部门、承担单位和有关矿山企业的大力支持，得益于陈毓川、李廷栋、裴荣富、叶天竺、吴淦国等专家的殷切指导和同行们的热情帮助，值此谨代表项目执行团队 200 余位同仁深表谢忱。

矿床学的研究是一个不断探索、不断深化的过程，尽管编著者付诸很大努力，仍然存在一些不足或错误之处，请读者批评指正。

毛景文 张作衡 吕志成

“我国典型金属矿科学基地研究”项目首席科学家

2014 年 1 月

前言

德兴地区是我国重要的 Cu-Mo-Au-Pb-Zn-Ag 矿产资源产地，它聚集了中国大型的德兴斑岩铜矿（铜金属资源量大于 960 万 t）、银山多金属矿床（其中银资源量大于 10000 t）及与韧性剪切带有关的金山金矿（金储量 300 t），构成了我国单位面积成矿强度最大的地区之一（毛景文等，2010；李晓峰等，2012）。它不仅在我国矿业经济中占有一席之地，而且还因其独特的成矿作用而受到国内外地学界的广泛关注。

本次工作选择德兴斑岩铜矿床为研究对象，在前人丰富的勘查与研究成果的基础上，运用现代思维和新技术，系统地研究矿床的形成过程和背景，建立矿床模型；总结矿床发现、勘查的技术方法组合，提出矿床的找矿模型，指导在已知矿床深部和外围及在相似地质背景下开展找矿勘查。野外开展典型地质剖面的测制，采集德兴铜矿床铜厂、富家坞、朱砂红、银山和金山 5 个矿区的铜（钼）矿石和有关岩石（包括地层、岩浆岩、各蚀变矿化带）标本，并磨制相应光薄片，完善铜厂—富家坞—朱砂红成岩成矿年代学谱系，确定铜矿与金山、银山之间的成因关系。进行宏观和微观的细致观察描述，通过研究，出版反映德兴铜矿的最新研究成果的专著一部，对典型的科学问题发表学术论文；汇编德兴铜矿床区域地质图、铜厂铜矿床地质平面图和剖面图及岩石、矿石和矿物的彩色照片，形成一套彩版图集。同时，对正在开采的铜厂与富家坞铜矿规划保留典型地质遗迹提出建议。另外，与正在建设的德兴“矿山公园”项目（程凯，2010）结合，以有关的实物资料等成果为主，为建立野外科学基地提供基础资料，供今后进行科学研究、地学教学与科普教育等使用。

一、项目来源与技术路线

本书是国土资源部公益性行业科研专项“江西德兴斑岩铜矿科学基地研究”课题（编号：200911007-01）和“德兴铜矿及生产过程中 Re 等元素分布规律研究”项目（编号：201311072）关于德兴斑岩铜矿床区域成矿规律、典型矿床及其堆浸生产过程中 Re 等元素赋存状态和分布规律的研究成果。以德兴矿集区斑岩型铜矿床为重点，并兼顾周边的金山金矿及银山铜银铅锌多金属矿床，在全面收集前人地质调查、矿产勘查、科学研究、矿产开发等各方面的资料的基础上，以大陆动力学理论为指导，开展了系统的野外地质调查、样品采集、室内分析测试、综合研究等工作。全面完成了任务要求，并有诸多新发现，为该成矿带的进一步找矿与科学研究提供了较为系统的资料。同时，对德兴低品位铜矿石堆浸场开展了 Re, Co, Ag, Au 赋存状态的初步研究，为资源的综合利用提供了理论依据。

二、完成的实物工作量

完成的实物工作量见表 0-1。

表 0-1 完成的实物工作量

| 序号 | 类别 | 数量 | 备注 |
|----|------------|-----------|------------------|
| 1 | 开展野外地质调查工作 | 10 次，12 月 | 平均每次 5 人 |
| 2 | 调查矿床 | 5 处 | 铜厂、富家坞、朱砂红、金山、银山 |
| 3 | 野外照片 | 600 张 | |
| 4 | 标本照相 | 230 张 | |
| 5 | 探针片 | 450 件 | |

续表

| 序号 | 类别 | 数量 | 备注 |
|----|------------------|--------------|----|
| 6 | 光薄片显微镜照相 | 280 张 | |
| 8 | 岩矿鉴定 | 265 件 | |
| 9 | 扫描电镜 | 32 件, 65 点 | |
| 10 | 单矿物分选 | 350 件 | |
| 11 | 金银含量测试 | 60 件 | |
| 12 | 主量与微量元素测试 | 366 件 | |
| 13 | 锆石 U-Pb 测年 | 6 件, 105 点 | |
| 14 | 锆石 Hf 同位素与微量元素测试 | 4 件/80 点 | |
| 15 | Re-Os 测年 | 15 件, 3 条等时线 | |
| 16 | 拉曼光谱气体测试 | 249 点 | |
| 17 | 包裹体温度盐度测试 | 150 点 | |
| 18 | 氢氧同位素测试 | 23 件 | |
| 19 | 硫同位素测试 | 23 件 | |
| 20 | 铅铋钨同位素测试 | 11 件 | |

三、工作方法

(一) 野外工作方法

首先,在所研究的德兴矿集区五个矿床,开展路线地质调查,将路线布设在已发现的矿化蚀变带或矿化岩石附近,以穿越法为主、追索法为辅,重点观察和记录含矿地层、侵入岩及其蚀变类型和矿物组合、控矿构造的几何学特征与分布范围,对构造蚀变带、岩体接触带和含矿蚀变带要特别注意加密追索观测。地质观察点采用 GPS 定位,观察和记录的内容包括露头与岩性等。地质观察点描述包括岩石名称、颜色、结构构造、矿物成分及其含量、构造的性质与产状、几何特征、矿化特征、蚀变带与矿化体的关系及所采集样品的编号和适当的素描图、照片、信手剖面等。

(二) 室内工作方法

1. 光薄片磨制、扫描电镜与电镜能谱

光薄片的磨制工作由廊坊科大矿物分选科技有限公司完成。

扫描电子显微镜与电镜能谱分析:将探针片进行喷碳处理,然后用 LEO-435VP 型扫描电子显微镜对样品进行观察并对有代表性的图像拍照;对典型的图像用 LINK-ISIS 型 X-射线能谱仪进行成分分析。测试条件:20 kV,100 PA。执行标准为:SY/T5162-1997 岩石样品扫描电子显微镜分析方法。测试单位为中国石油勘探开发研究院石油地质试验研究中心。

2. 主量元素、微量元素和稀土元素测试

主量元素、微量元素和稀土元素的测定依据与方法为 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法测定主、微量元素含量,测试仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪,测定单位为核工业地质研究院分析测试研究中心和北京安利来科技有限责任公司神光测试技术中心。

3. 锆石的挑选及测试

岩石样品经粉碎、细磨、筛选、淘洗、磁选和重液分离,将锆石从岩石样品中分离出来,在双目镜下尽量挑选无包裹体、无裂纹、透明度好的单颗粒锆石作为测试样品。将测试样品固定于环氧树脂中制靶,待固结后将锆石颗粒抛磨至其厚度的一半左右,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石的透射、CL 显微图像及 LA-ICP-MS 方法测定锆石的 U-Pb 同位素年龄。

激光剥蚀等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 锆石微区原位单点定年测试是在 Agilent7500 型 ICP-MS 和

德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器 (工作物质 ArF、波长 193 nm) 及 MicroLas 公司的 GeoLas200M 光学系统的联机上进行测试的。实验室中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质剥蚀, 数据采集选用一个质量峰一个点的跳峰方式, 每完成 4~5 个测点的样品测定加测标样一次, 测试工作按照 Andersen 的方法, 用 LA-ICP-MS Common Lead Correction (ver3.15) 对其进行了普通铅校正。所有样品均采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 年龄计算及谐和图采用 Isoplot (ver3.0) 完成。测年单位为中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部重点实验室。在锆石测年点位的边部测试 Lu-Hf 同位素, 测试单位为西北大学大陆动力学国家重点实验室。

4. Re-Os 测年

辉钼矿 Re-Os 测年样品先后经过重力分离、电磁分离和人工双目显微镜挑选获得, 辉钼矿纯度达 95% 以上。铼钼化学分离步骤和质谱测定请参照文献 (Du et al, 2004; 杜安道等, 1994; 杜安道等, 2001; 屈文俊等, 2003), 测试工作在国家地质实验测试中心铼-钼同位素实验室完成。具体过程如下。

分解样品 准确称取待分析样品, 通过长细颈漏斗加入到 Carius 管 (一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶) 底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中, 调节温度到 $-50 \sim -80^\circ\text{C}$ 。放装好样的 Carius 管到该保温杯中, 通过长细颈漏斗把准确称取的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底部, 再加入 2 mL 10 mol/L HCl, 4 mL 16 mol/L HNO_3 , 1 mL 30% H_2O_2 , 当管底溶液冰冻后, 用丙烷氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内, 待回到室温后, 逐渐升温到 200°C , 保温 24 h。在底部冷冻的情况下, 打开 Carius 管, 并用 40 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

蒸馏分离铼 于 $105 \sim 110^\circ\text{C}$ 蒸馏 50 min, 用 10 mL 水吸收蒸出的 OsO_4 。用于 ICP-MS (等离子体质谱仪测定) 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液倒入 150 mL Teflon 烧杯中待分离铼。

萃取分离铼 将第一次蒸馏残液置于电热板上, 加热近干。加少量水, 加热近干。重复两次以降低酸度。加入 10 mL 5 mol/L NaOH, 稍微加热, 转为碱性介质。转入 50 mL 聚丙烯离心管中, 离心, 取上清液转入 120 mL Teflon 分液漏斗中。加入 10 mL 丙酮, 振荡 5 min, 萃取 Re。静止分相, 弃去水相。加 2 mL 5 mol/L NaOH 溶液到分液漏斗中, 振荡 2 min, 洗去丙酮相中的杂质。弃去水相, 排丙酮到 150 mL 已加有 2 mL 水的 Teflon 烧杯中。在电热板上 50°C 加热以蒸发丙酮。加热溶液至干。加数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢, 加热蒸干以除去残存的铼。用数毫升稀 HNO_3 溶解残渣, 稀释到硝酸浓度为 2%。备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。如含铼溶液中盐量超过 1 mg/mL, 需采用阳离子交换柱除去钠。

质谱测定 采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series ICP-MS 测定同位素比值。对于 Re: 选择质量数 185, 187, 用 190 监测 Os。对于 Os: 选择质量数为 186, 187, 188, 189, 190, 192, 用 185 监测 Re。

测试结果 年代学数据是用国家地质试验测试中心的电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 进行测量的。普 Os 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度, 通过 $^{192}\text{Os}/^{190}\text{Os}$ 测量比计算得出, ^{187}Os 是 ^{187}Os 同位素总量。Re, Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差。置信水平 95%。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度 (1.02%), 置信水平 95%。模式年龄 t 按下式计算:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left[\ln \left(1 + \frac{^{187}\text{Os}}{^{187}\text{Re}} \right) \right]$$

式中: λ (^{187}Re 衰变常数) = $1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。

5. 包裹体温度、盐度测定及拉曼光谱分析

流体包裹体的显微测温分析是在中国地质科学院矿产资源研究所经校正的法国产 Chajxmeca 冷热台上进行的, 冷冻试验先于加热试验, 升温速率为 $1^\circ\text{C}/\text{min}$, 在相变化温度附近, 升温速率适当减

小。 $H_2O-NaCl$ 包裹体的盐度是用测得的冰点通过 Bodnar (1993) 的方程计算而得, 然后再用均一温度和盐度数据在相应体系压力-温度-盐度-密度参数表中求得密度值。对 CO_2-H_2O 包裹体, 首先根据 CO_2 固相熔化温度判定是否含有其他挥发分, 利用 CO_2 笼形物熔化温度通过 Bozzo et al. (1973) 给出的温度-盐度关系式计算出水溶液的盐度, 根据含 CO_2 包裹体完全均一温度和水溶液的盐度在 $NaCl-H_2O$ 体系参数表中查出相应包裹体水溶液的密度, 用 CO_2 部分均一温度值在 CO_2 气-液相均一时的温度-密度参数表中查得相应的包裹体 CO_2 相密度, CO_2 包裹体流体的总密度根据刘斌等 (1999) 的方程计算获得。激光拉曼光谱 (LRM) 仪器为英国 Renishaw 公司产的 System 2000 型显微共焦激光拉曼光谱仪, 激光波长 51453 nm, 激光功率 20 mW, 最小激光束斑直径 1 μm , 扫描范围 100~4500 cm^{-1} , 分辨率 1~2 cm^{-1} 。测试工作在国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。

6. 同位素测试

H, O 同位素样品测试时先将样品破碎到 200 目, 用稀盐酸浸泡, 蒸馏反复冲洗, 空气干燥。分析方法及步骤如下: H, O 同位素测试的石英样品首先经过双目镜挑选提纯, 纯度达到 99% 以上, 分别制备 10 g 和 0.1 g, 磨制至 100 目和 200 目。本次 H, O 同位素研究工作是依据天然水中氢同位素锌还原法测定, 测试矿物为含矿的石英脉中挑选的石英。 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 根据公式 $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.09 \times 10^6 / T_2 - 3.29$ 计算所得。硫同位素测试是将金属硫化物单矿物与氧化亚铜按一定比例研磨、混合均匀后进行氧化反应, 生成 SO_2 并用冷冻法收集, 然后用 MAT251 气体同位素质谱仪分析硫同位素组成, 测量结果以 V-CDT 为标准, 分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。Pb, Sm, Nd 同位素的测试采用 MAT261 质谱计。测试方法是采用 HF 在高温高压条件下将粉末样品完全熔融后, 再蒸干样品溶液, 用 HCl 将氟化物转化为氯化物, 蒸干后用 HBr 提取样品, 再分离提纯铅样品。Pb 同位素是采用热表面电离质谱方法测量的, 相对湿度为 20%, 温度 20 $^{\circ}C$, 检测方法和依据是按照 GB/T17672-1999 《岩石中铅铋钨同位素测定方法》进行的, 测量仪器型号是 ISOPROBE-T 热电离质谱仪, 仪器编号为 7734, 铅同位素比值误差以 2σ 计。Sm, Nd 的同位素稀释法定量测定和 Nd, Sr 同位素比值测定仪器同样为 ISOPROBE-T 型热电离质谱仪 (TIMS), 编号为 7734。铷铯和钐钕同位素比值测定方法和依据按照 EJ/T 692-92 《岩石矿物铷铯等时年龄测定》和 EJ/T 546-91 《岩石矿物钐钕等时年龄测定》, 相对湿度为 40%, 温度为 20 $^{\circ}C$, 误差以 2σ 计。测试工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

四、国内外研究现状及发展趋势

(一) 斑岩铜矿床研究现状

斑岩铜矿, 最早源于 20 世纪初, 美国人开采亚利桑那州和新墨西哥州石英二长斑岩和花岗闪长斑岩中的大规模铜矿时采矿工人的叫法。1904 年, Ransome 通过对美国亚利桑那州“浸染状铜矿”的详细野外考察, 提出了浸染状铜矿化与斑岩体成因有关的学术思想, 从而拉开了斑岩铜矿研究的大幕。后来, Emmons 正式把这种与斑岩体有关的“浸染状铜矿”定名为斑岩铜矿 (Emmons, 1918)。通过近 100 年的研究, 目前大多数学者认可的斑岩铜矿的定义可以描述如下: 是指在时间上、空间上、成因上与斑状结构的钙碱性、碱性、中酸性浅成或超浅成小侵入体 (花岗闪长斑岩、石英二长斑岩、石英斑岩等) 有关, 并具有钾、氢蚀变矿物晕和铜、钼、金、银、铅、锌、硫等地球化学晕的岩浆期后中-高温热液阶段形成的细脉浸染状硫化物铜矿床。斑岩型铜矿床的主要特征可以概括为“埋藏浅、品位低、规模大、露天采”, 铜品位通常在 0.4% 左右, 少数可达 0.8%。矿石中除铜外, 还伴生钼、金、银等元素, 可综合利用 (陈军强等, 2012)。

斑岩铜矿的形成时代主要集中在新生代, 约占 59.5%; 其次是中生代, 约占 35%; 再次是古生代, 前寒武纪斑岩铜矿床目前发现较少。形成这种时间分布特征的原因有两种认识: 一种认为斑岩铜矿多形成于板块汇聚区, 而在前寒武纪全球板块活动机制尚未完善, 大规模板块活动尚未开始, 斑岩铜矿化自然较少。而中生代是板块活动的最强烈时期, 也是斑岩铜矿形成的高峰期; 另一种则认为, 斑岩铜矿主要形成于板块俯冲带, 而这些带后期往往发育成造山带, 成为主要的剥蚀区, 且斑岩

铜矿多赋存于浅成-超浅成侵入体中,岩体及围岩节理、裂隙发育,有利于剥蚀作用形成,随着时间推移古老的斑岩铜矿很难保存。众所周知,世界上有三大成矿带,分别是环太平洋成矿带、特提斯-喜马拉雅成矿带、古亚洲洋成矿带(中亚成矿带)(Force E. R., 1998)。据戴自希(1996)统计,世界上铜储量超过500万t的斑岩铜矿共34处,在空间分布上主要集中于环太平洋带(28处)、特提斯-喜马拉雅成矿带(3处)、古亚洲洋成矿带(1处)和印度克拉通成矿带(1处)。

前人的大量研究资料表明,板块构造对全球斑岩型铜矿床的形成有重要影响,不同的大地构造单元及其火山-深成岩建造对斑岩铜矿床的成矿具有明显的控制作用。主要有两种构造环境,一种是由大洋板片俯冲产生的陆缘弧和岛弧环境,另一种是与大洋板片俯冲作用无关的大陆环境。经典的斑岩铜矿板块构造模型提出斑岩铜矿主要在板块俯冲背景下的主动陆缘钙碱性火山岩带中形成,金属来源与板块俯冲作用导致的岩浆活动有关(Sillitoe, 1972),并在后来环太平洋成矿带斑岩型矿床的勘查中取得重大突破,成为科学理论指导矿床勘查的典范。汇聚板块边缘的挤压构造背景对斑岩铜矿的形成有重要作用,并识别出挤压环境有利于斑岩型矿床形成的一些关键因素:①挤压环境能形成比伸展环境更大的浅部岩浆房;②挤压环境能够促进岩浆房的结晶分异,进一步导致挥发分饱和及形成大规模岩浆热液;③挤压环境下很难发育陡立张性断裂,有利于岩浆热液的聚集(Sillitoe, 1997)。大陆环境斑岩铜矿研究起步较晚,随着近年来大陆环境斑岩铜矿的大量发现,研究程度在逐渐加深。Hollister(1974)首次开展碰撞造山环境斑岩铜矿的研究,拓展了经典斑岩铜矿的成矿模型。近年来,中国的矿床学家也发现,斑岩铜矿不仅产于岛弧和陆缘弧环境中,还可以产于碰撞造山带中(如青藏高原),甚至可以形成于陆内环境中(如江西德兴)。有些斑岩铜矿的形成与板块的俯冲作用没有明显的成因联系,可能是由板内构造岩浆活化作用或走滑断裂带作用导致深源花岗质岩浆作用上侵形成(芮宗瑶等, 2004)。中国大陆内部斑岩铜矿产出的构造背景与大洋板块俯冲无关,可以划分出四类构造环境:晚碰撞走滑环境、后碰撞伸展环境、后造山伸展环境和非造山崩塌环境(侯增谦等, 2007)。

关于斑岩型铜矿床的成因,目前主要有以下几种观点。

岩浆热液说 也称为正岩浆成因模式,是目前国内外多数学者所认同的学说。该学说认为斑岩铜矿的矿质、成矿热液及其相伴生的中酸性岩体都来自上地幔(或下地壳)。矿质和成矿热液是由中酸性岩浆在上侵过程及侵位后的结晶过程中,依次出现钾化带、石英-绢云母化带、泥化带和青磐岩化带,由于温度、压力等物理化学条件的改变而析出,并在有利部位富集成矿(Nielsen, 1968; Lowell et al., 1970; Burnham, 1972)。

板块构造成矿说 也称为洋壳重熔成矿。该学说认为斑岩铜矿是含铜的大洋壳沿消亡带俯冲到地幔中发生局部熔融,在熔化过程中析出金属,并同钙碱性岩浆一起上升,然后在岩体的顶部富含氯化物的液相中富集成矿(Sillitoe, 1972)。

活动转移说 该学说认为高侵位的中酸性斑岩体含水量较小,在温度下降、岩浆结晶过程中不会析出流体,矿质与成矿热液主要来自围岩,岩浆岩主要起热动力源的作用。即由于岩浆的活动,使原赋存于地层中的地下水或层间裂隙水活化,并萃取围岩中的有用组分成为含矿热液,在岩浆热动力源的带动下,沿着一定的构造系统循环,并在有利部位成矿(White, 1968; 季克俭等, 1991)。

变质岩浆成矿说 该学说应追溯到19世纪60年代美国人亨特提出的“花岗岩的变质成因说”,认为金属富集成矿是含金属的沉积物转变为花岗岩的伴生现象(陈文明, 2002)。同时,认为所有的内生矿床(包括斑岩铜矿)都是再生矿床(Snyder, 1963)。另外中国学者也有人认为斑岩铜矿具有“层控”的特点,它保留了原层状矿床的很多特征,如矿床在一定区域内产生于一定时代地层和一定的含铜岩石建造中,矿体主要产于含铜建造中两种岩相的过渡部位,矿床的产出还受岩相古地理(指含斑岩体赋存的最老围岩时代的古地理)控制(陈文明, 1984)。

(二) 德兴铜矿勘查、开发与研究历史和现状

德兴斑岩铜矿为亚洲开采规模最大的铜矿山,包括铜厂、富家坞、朱砂红三个矿区,目前开采对象为铜厂和富家坞两个矿区。现今矿山处于“稳产高产阶段”,矿区有着诸多的开采平台,矿山拥有

大量的原始资料。这些为本项目的实施奠定了良好的野外工作条件。

1. 勘查历史与现状

关于德兴铜矿的早期勘查历史，在《中国矿床发现史》（朱训等，2001）中有详细的记录。最近几年，关于朱砂红铜矿的勘查又有一些新进展。现总结如下。

中华人民共和国成立前，矿区所做地质工作甚少。1939年秋，江西地质调查所曾派人到德兴调查地质及矿产。

1954年，地质部中南地质局四〇九地质队到朱砂红、铜厂、大屋（坞）头、官帽山一带进行踏勘，发现古采矿遗址多处，并在老窟口附近，观察到产于千枚岩中的含黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和孔雀石的石英脉。

1955年，四〇九地质队对孔雀山地段（铜厂矿区的北山中部地段）进行地表普查工作，通过老窿调查和地质路线观测，终于找到了含孔雀石、黄铜矿、黄铁矿的废石堆和含矿斑岩露头，对斑岩体地表出露范围进行了大致的圈定，经取样分析结果表明，有部分样品的铜品位达到了工业要求。

1956年初，中南地质局四二〇地质队（后改称为江西省地质局铜厂地质队，铜矿普查勘探大队）承担铜厂的普查勘探任务。当时认为铜矿是沿花岗闪长斑岩与千枚岩接触带分布的“铁铜石英脉型矿床”，后来认为铜厂铜矿应属“细脉浸染型铜矿”。随后，于1956年7月勘探。勘探的第一个钻孔（3号孔）位于铜厂矿区中部，揭示铜矿体垂深达100余米。

铜矿普查勘探大队于1959年11月，提交了《江西德兴铜矿区最终储量报告（包括朱砂红铜矿区）》，共投入机械岩心钻8万余米，探明储量金属铜为363万吨。与此同时，对矿床的地质特征进行了较深入的研究，对指导矿区勘探起到了重要作用。铜厂铜矿床围岩蚀变及其分带的研究成果，属于世界斑岩铜矿研究之最早纪录。

1957年12月，江西省地质局铜矿普查勘探大队（原中南地质局四二〇队）在官帽山东侧的山崖与深谷陡坡地带普查时，又发现了花岗闪长斑岩露头，并在其附近的千枚岩中见到了与铜厂类似的热液蚀变和矿化。1:2000地质草测和原生晕铜金属量测量都显示铜矿颇有远景。与铜厂矿区类比，认为是“铜厂式”铜矿床。1958年春，在矿区施工了第一个钻孔，揭露到铜矿垂深厚约400m。至此，继铜厂之后发现了第二个矿区——富家坞铜矿区。同年6月转入初步勘探，前期任务由江西省地质局铜矿普查勘探大队承担，后期由江西省地质局九〇五地质大队完成。初勘工作结束于1961年3月。1963年提交了《江西德兴富家坞铜钼矿区地质初勘报告书》。经江西省地质局核实，探明储量金属铜为141.9万吨（由于钻探质量低，其中工业储量仅20.4万吨）、金属钼为11.3万吨。

1957年12月，江西省地质局铜矿普查勘探大队普查组，根据水化学异常和斑岩体及蚀变带在地表的分布，在铜厂矿区北西侧，相继又发现了朱砂红铜矿床。经1958年以钻探为主要手段的普查评价，在浅部（-200m标高以上）提交金属铜储量24.3万吨，伴生金属钼5500吨。20世纪60年代初，由于国家遇到暂时的经济困难，后来又经10年“文化大革命”，德兴铜矿田地质勘探和研究工作中断了10余年。

自1973年开始，江西省地质局赣东北地质大队和江西地质科学研究所反复对德兴铜矿进行旨在扩大远景的研究，认为德兴铜矿有进一步扩大远景的可能。1975年夏，江西省地质局决定对铜厂、朱砂红两矿区进行地质工作会战，有江西省地质局九一二地质大队、九一六地质大队、九〇一地质大队和赣东北地质大队、区域地质调查大队和物化探大队、地质局实验室等单位参加。此外还有中国地质科学院地矿所和江苏省地质局实验室等单位参加，共约1000余人，开动钻机11台。于1978年5月提交了《江西省德兴县铜厂矿区铜矿补充勘探地质报告》。补勘增长储量金属铜196万吨，其中，尤其对金、银、钼、铼、硫等伴生矿产进行了详细的研究并做出了定量的评价，都达到了大型矿床的规模。

从1972年开始，江西冶金地质勘探公司对富家坞铜矿进行了旨在扩大铜矿远景和伴生元素的研究，1975年冶金工业部对富家坞铜（钼）矿，进行勘探会战。参加会战的有江西冶金地质勘探公司一队、二队、三队和山东冶金地质勘探公司一队，共有13台钻机施工。1977年11月底结束全部勘

探工程,共投入钻探工作量 48290 m。1978 年由冶金地质勘探公司四队提交了《富家坞铜(钼)矿地质勘探总结报告》,新增可供利用储量铜 115.4 万吨、钼 5.48 万吨,对伴生的金、银、钴、铼、硒、碲、硫等元素都做了详细的研究并进行了定量评价。至此富家坞铜矿累计探明可供利用的储量铜 257.3 万吨、钼 16.9 万吨、伴生硫 883.4 万吨,为铜厂矿田内的又一个特大型斑岩铜钼矿床。

对朱砂红铜矿区详细普查评价,继会战之后,由江西省地质局赣东北大队一〇一队于 1982 年提交了《江西省德兴县朱砂红矿区铜矿详细普查地质报告》。共探明铜金属储量 184.4 万吨,其中可供利用储量 60.6 万吨,并计算了伴生的金、银、硫和钼等矿种的储量。

目前开采以铜厂和富家坞为主,朱砂红矿区于 2011 年底完成详查报告。德兴铜矿铜厂平均含铜品位 0.476%;采场出矿石量由最初的 0.65 万吨/日增至现今的 13 万吨/日;累计已探明可采矿石量 11.06 亿吨,其中铜金属量 517 万吨、金 241 吨、银 1234 吨;目前,年产铜金属量 12 万多吨、金 5.3 吨、银 24 吨。2011 年新增探明铜矿石量约 1200 万吨,铜约 6.5 万吨、金约 8 吨、银约 17 吨。富家坞采场与铜厂采场直线距离 1.5 km,已探明矿石量 5.4 亿吨,平均铜品位 0.488%,钼 0.031%;铜金属量 265 万吨,钼金属量 16.7 万吨。2011 年由德兴铜矿主持,在铜厂周边及深部找矿过程中新增铜矿石量约 1.3 亿吨,其中铜金属量 56 万吨、金 27 吨、银 125 吨。

通过这些工作,德兴铜矿三个矿区已探明铜的金属总量 965.8 万吨以上,可供利用的储量 842.4 万吨,钼 29.6 万吨。铜厂铜 524.5 万吨、钼 12.8 万吨;富家坞矿床铜 257.3 万吨、钼 16.8 万吨;朱砂红铜 184.49 万吨。矿床平均品位:铜厂,铜 0.46%、钼 0.01%;富家坞,铜 0.5%、钼 0.03%;朱砂红,铜 0.42%。三个矿床都伴生金、银、铼、硒、碲、硫等有益组分,颇有综合利用价值。

2. 开采历史与现状

德兴铜矿的开采有着悠久的历史。据史书记载,铜厂铜矿系一古矿区,唐宋年间采冶颇盛,至今在大坞头见有大量的废石堆;在铜厂采场边部,见有古人采矿的洞穴;在朱砂红一带见有古代炉渣物。1949 年前,铜的最高年产量达到 5 万余斤^①,留下的老窟甚多,最大的采空区长 22 m,宽 17 m,高 4 m。

铜厂铜矿一直由德兴铜矿开采,矿山由上饶地区创建于 1958 年,1965 年 7 月 1 日正式投产,现划归江西铜业集团公司。建矿之初,采选能力只有 2.5 千吨/日,矿石主要来自北山坑采。1971 年开始在南山露采。1979 年 6 月北山坑采闭坑。生产规模至 1990 年底,达 2 万吨/日。至 1995 年,采选能力总规模达到 9 万吨/日,选矿能力达 10 万吨/日。至 1990 年底,产出铜精矿折合铜量 37 万吨。

富家坞铜矿最初由县办的大茅山铜矿开采,创建于 1954 年,采、选能力为 500 吨/日,1988 年起生产能力达 1500 吨/日。2006 年归德兴铜矿开采。

德兴铜矿现有两个选厂,分别是泗洲选厂和大山子选厂,两个选厂的日采选能力达到 13 万吨。目前,年产铜金属 12 万吨以上,金 5 吨,银 22 吨,钼 3500 吨,硫 36 万吨。在多年的开采中,已累计生产铜精矿含铜 198.6 万吨,金 83.5 吨,银 344.8 吨,其中,产铜约占全国的五分之一,居全国之首。

3. 研究历史与现状

新中国成立以来,我国地质工作者对德兴斑岩铜矿床开展了大量的研究工作,积累了丰富的资料,如《德兴斑岩铜矿》(朱训,1983)、《中国斑岩铜(钼)矿床》(芮宗瑶等,1984)《中国矿床》(《中国矿床》编委会 1989),其中矿床地质的研究为我国大中型斑岩铜矿床的发现过程起到了指导和示范作用。近年来,国土资源部组织实施的“全国重要矿产资源潜力评价”项目以德兴铜矿为典型矿床。国土资源部实施的“全国重要矿产储量利用”项目也将德兴铜矿作为重点矿床。

另外,近些年有一些科技人员分别从不同的角度对德兴铜矿进行过研究。例如,铜厂花岗闪长斑岩锆石的 U-Pb 法年龄 171 ± 3 Ma;富家坞花岗闪长斑岩年龄为 166~177 Ma(王强等,2004;Zhou et

① 1 斤 = 0.5 kg

al., 2013); 花岗闪长斑岩的形成年龄包括: 193 Ma (叶松等, 1999), 184 Ma (朱金初等, 1990; 华仁民等, 2000), 179 Ma (芮宗瑶等, 1984), 172 Ma (朱训等, 1983), 165 Ma (金章东等, 2002), 157 Ma (朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984), 140 Ma (Chen et al., 1998), 110 ~ 121 Ma (朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984)。其中 165 ~ 193 Ma 的年龄主要是全岩或全岩 - 矿物 Rb-Sr 等时线年龄, 而 110 ~ 157 Ma 的年龄主要是全岩或矿物的 K-Ar 法年龄。铜厂辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄 170.4 Ma (毛景文等, 2006)。铜厂矿区发育有 ACDE 四种脉体, 它们代表了不同的蚀变矿化阶段及硫化物沉淀阶段 (Li et al., 2007)。朱砂红矿区内的脉体分为 A 脉、B 脉、D 脉及后期碳酸盐和硫酸盐脉, A、B 及 D 脉为主要的矿化脉 (张天福等, 2012)。基于氧、锶、钨、碳、硅、铜等同位素的分析研究同位素分析结果表明, 铜厂铜矿成矿过程中起主导作用的是岩浆流体, 成矿流体演化晚期有大气降水的加入 (郭新生等, 1999; 金章东等, 2002; 钱鹏等, 2003, 2006; 潘小菲等, 2009, 2012)。对铜厂和富家坞花岗闪长斑岩样品的微量元素和稀土元素研究表明, 两个斑岩体均由混有少量地壳物质的地幔岩浆演化而来 (《中国矿床》编委会, 1989; 钱鹏等, 2005), 成矿作用是热液流体将成矿元素从岩体内部迁移到接触带附近富集而成 (朱金初等, 2002; 《中国矿床》编委会, 1989)。在相关工作的基础上, 建立了大陆边缘与中酸性侵入岩有关的 (德兴式) “斑岩铜矿床模式” (陈毓川等, 1993; 芮宗瑶等, 2004)。关于成矿物质来源, 有着明显截然相反的观点, 依据铜厂的流体包裹体研究结果认为, 成矿金属主要源自岩浆 (左丽艳等, 2007)。而依据区域地球化学场的研究结果, 则认为矿床存在以矿体为中心, 向外依次为矿化场、正晕场、降低场和背景场, 成矿金属主要源自围岩 (季克俭等, 1989, 2007)。

2002 年至 2007 年 3 月, 由中国地质科学院矿产资源研究所负责的国土资源部两权专项子项目“矿床地质环境模型与环境评价”, 重点在德兴矿集区开展工作, 建立了德兴铜矿床的地质环境模型 (赵元艺等, 2007), 为我国最早的矿床地质环境模型之一。

总之, 可以看出从《德兴斑岩铜矿》(朱训, 1983) 与《中国斑岩铜 (钼) 矿床》(德兴斑岩铜矿为重要矿床之一) (芮宗瑶等, 1984) 至今已经有 40 余年的时间, 同时也是矿山大规模开采时期, 这期间有诸多新技术新方法出现。在本次工作之前的研究成果重点在铜厂, 对富家坞的研究较少, 对朱砂红的研究极少。矿集区内的矿床在空间上紧密联系, 它们的成因是否也紧密相连自然而然的引起学者们的关注, 开展了大量的研究工作, 得到了各自能合理解释的结论, 但有关认识常有矛盾。这些研究成果, 为今后进一步开展研究工作奠定了基础。

因此, 基于前人研究, 本次工作将通过野外工作和室内分析测试与综合研究, 系统总结矿集区矿床成矿规律。

(三) 科学基地建设

典型矿床基地既是科学研究的基地, 也是专业教学和科学普及的园地, 通常由实物、图集和声电系统组成。由于矿床图集的科学性、实用性和科普性, 在矿床研究和勘查、开采过程通常都形成一系列典型矿床图集, 最早图集是西方矿业公司在介绍自己的矿山时, 以图文并茂形式编辑出版矿床图册或图集。典型矿床内容从简单的矿床特点描述到加入成矿过程和成矿背景等科学内涵, 以及找矿标志等实用内涵, 编著成大型彩色图册。地质找矿和采矿是运用科学与技术产生巨大经济效益的过程, 在这些过程中产生了特殊的文化。因此, 在西方社会无论是在开采还是闭坑的矿山都以矿石、岩石和开采历史为主体建立了一座座的矿山博物馆和科技馆。这些博物馆和科技馆逐渐被开发为地球科学技术培训及古矿业遗迹的参观基地, 促进了旅游业的发展和矿业科学技术的普及。

目前, 德兴市正在建设集观光、旅游等功能于一体的“矿山公园”。本次科学基地的建设过程中将充分利用“矿山公园”的资料。

(四) 本次工作的目的与意义

本次工作在前人研究德兴矿集区内三类矿床已有成果的基础上, 以德兴斑岩铜矿为主, 运用新技术新方法深入研究矿集区矿床的成因关系, 建立或更新矿床模型。完善德兴地区的区域成矿理论, 从

而能够服务于矿山, 指导该地区和其他区域上的找矿。同时收集相关资料, 编制彩色图册, 为建设科学基地提供基本素材。

五、书稿的完成人与主要内容

本书共八章, 第一章为成矿地质背景, 由郭硕、水新芳、曹冲和吴德新编写。第二章为德兴铜金矿集区矿床地质特征, 由吴德新、赵元艺与水新芳编写。第三章为岩石地球化学特征, 由刘妍、赵元艺、吴德新及郭硕编写。第四章为年代学, 由吴德新、刘妍、黄道裘、郭硕和李小赛编写。第五章为流体包裹体特征, 由吴德新与赵元艺编写。第六章为同位素地球化学特征, 由水新芳、赵元艺和郭硕编写。第七章为矿集区成矿作用, 由吴德新、水新芳编写。第八章为找矿模型, 由郭硕与赵元艺编写。其余部分由赵元艺编写。书中包括大量的野外与室内标本彩色照片及测试数据。由赵元艺与水新芳、曹冲及黄道裘统稿定稿, 不足之处敬请指正。

六、主要成果

(一) 人才培养

本项目在研期间, 已有 1 位大学本科生与 2 位硕士研究生完成与项目相关的毕业论文, 并且均获得优异的学习成绩 (表 0-2)。

表 0-2 与课题相关人才完成学位论文统计表

| 姓名 | 论文题目 | 年份 | 学校 | 备注 |
|-----|---------------------------|------|-------------|--------------------------------------|
| 郭硕 | 江西德兴朱砂红斑岩铜矿成矿年代学与地球化学特征研究 | 2011 | 中国地质大学 (北京) | 本科论文, 2012 年获得国家奖学金, 为校级优秀论文 |
| 吴德新 | 江西德兴矿集区成岩成矿作用研究 | 2013 | 中国地质大学 (北京) | 硕士学位论文, 2012 年获得研究生国家奖学金, 为校级优秀学位论文 |
| 水新芳 | 江西德兴朱砂红斑岩铜矿成矿作用与外围找矿潜力 | 2014 | 中国地质大学 (北京) | 硕士学位论文, 2013 年度获得研究生国家奖学金, 为校级优秀学位论文 |

(二) 论文发表

截至目前, 完成的标注本课题的论文共有 16 篇, 其中 SCI 论文、科普论文和 EI 论文各 1 篇。具体如下:

1) 吴德新, 赵元艺, 刘妍, 郭硕, 水新芳, 沙俊生. 2012. 江西金山金矿“硅质超糜棱岩”的新认识及意义 [J]. 矿床地质, 31 (S): 803 ~ 804.

2) 水新芳, 赵元艺, 郭硕, 吴德新, 朱小云, 王增科. 2012. 德兴矿集区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义 [J]. 中国地质, 39 (6): 1543 ~ 1562.

3) 张佳文, 薛强, 郭科, 赵元艺, 柳建平. 2012. 江西德兴大坞河流域土壤重金属环境质量及演化趋势 [J]. 国土资源科技管理, 29 (6): 129 ~ 134.

4) Guo Shuo, Zhao Yuanyi, Qu Huanchun, Wu Dexin, Xu Hong, Li Chao, Liu Yan, Zhu Xiaoyun and Wang Zengke. 2012. Geological Characteristics and Ore-forming Time of the Dexing Porphyry Copper Ore Mine in Jiangxi Province [J]. Acta Geologica Sinica. 86 (3): 691 ~ 699.

5) 水新芳, 赵元艺, 刘妍, 吴德新, 郭硕, 沙俊生. 2012. 德兴铜矿岩矿相学研究过程中的新发现及意义初探 [J]. 矿床地质, 31 (S): 709 ~ 710.

6) 王晓亮, 赵元艺, 柳建平, 路璐, 杨永强, 初娜. 2013. 德兴铜矿大坞河流域土壤中 Cd 的环境地球化学特征及意义 [J]. 地质论评, 59 (4): 781 ~ 788.

7) 柳建平, 赵元艺, 王晓亮, 路璐, 张光弟. 2013. 德兴铜矿对环境的影响与对策建议 [J]. 科学之友. 01: 137 ~ 139 (科普论文).

- 8) 吴德新, 赵元艺, 吕立娜, 许虹, 郭硕, 刘妍, 朱小云, 王增科, 水新芳. 2013. 江西德兴朱砂红岩铜矿流体包裹体特征及其成矿意义 [J]. 地质学报, 87 (5): 677-690.
- 9) 赵元艺, 曾辉, 徐友宁, 路璐. 2014. 金属矿集区地球化学环境累积效应的理论与工作方法 [J]. 地质通报, 33 (8): 1106~1113.
- 10) 路璐, 赵元艺, 薛强, 王晓亮, 柳建平. 2014. 江西德兴铜矿集区土壤地球化学基准值方法的适用性 [J]. 地质通报, 33 (8): 1114~1120.
- 11) 薛强, 赵元艺, 张佳文, 郭科, 柳建平, 路璐. 2014. 基于农作物食用安全的土壤重金属风险阈值 [J]. 地质通报, 33 (8): 1132~1139.
- 12) 柳建平, 赵元艺, 薛强, 路璐. 2014. 德兴铜矿大坞河流域土壤重金属元素累积特征及成因分析 [J]. 地质通报, 33 (8): 1154~1166.
- 13) 路璐, 赵元艺, 柳建平, 薛强. 2014. 江西德兴铜矿区大坞河流域环境介质中 Cu 含量变化趋势分析 [J]. 地质通报, 33 (8): 1205~1212.
- 14) 王爱云, 李瑞萍, 倪善芹. 2014. 江西乐安江流域稻田土重金属累积变化与德兴矿集区关系 [J]. 地质通报, 33 (8): 1213~1219.
- 15) 赵元艺, 王晓亮, 赵希涛, 柳建平, 路璐, 杨永强. 2014. 赣东北乐安江德兴铜矿段河流阶地的发育及环境意义 [J]. 地球学报, 35 (4): 454~462 (EI 论文).
- 16) 赵元艺, 李小赛, 吴德新, 许虹, 沙俊生. 2014. 江西德兴金山金矿晋宁期花岗质超糜棱岩的发现及意义 [J]. 地质与勘探, 50 (5), 805~822.

(三) 研究成果

1. 对德兴铜矿和银山银铅锌矿的成矿主岩的物源区进行了对比研究, 获得重要认识

德兴铜矿和银山矿床的斑岩的主量元素和稀土元素曲线特征表明燕山期的斑岩体均为介于 I 型和 S 型过渡型花岗岩, 为火山弧环境所形成。同时, Ba, Sr 和 P 的负异常, 表明岩浆源区存在一定数量的地壳物质参与, 其中, 银山斑岩中 Sr, P 的明显亏损与 Sr 的初始值 (0.7043~0.7083) 和 T_{DM} 值 (782~934 Ma) 偏大及 $\varepsilon_{Nd}(t)$ (-1.5~-0.3) 偏小, 表明相比德兴铜矿斑岩, 银山斑岩体的形成有更多地壳成分混入。

2. 提出金山金矿超糜棱岩为花岗质超糜棱岩的新认识

金山金矿超糜棱岩中锆石明显的环带及 Th/U 值 (0.57~2.04) 等特征综合表明是岩浆成因锆石; 锆石 U-Pb 年龄 (834.1 Ma) 表明花岗质岩石形成于晋宁期晚期, 为 I 型和 S 型过渡型花岗岩, 为火山弧构造背景。同时, 岩石主微量元素特征、锆石及其年龄一致等特征也证实超糜棱岩的原岩为花岗质岩石。

3. 通过系统的研究, 新发现几种矿物

在对朱砂红岩铜矿岩矿相学研究中, 新发现了含铍白钨矿、方铁矿; 并在地表发现稀有矿物针绿矾, 针绿矾主要出现在干旱或半干旱地区, 而本次在德兴这种湿润地区的干早期发现, 在世界范围内尚属首次, 通过对针绿矾的扫描电镜研究, 发现针绿矾呈叶片状集合体, 与在其他地方发现的针绿矾有很大的差别。

4. 建立了矿床找矿模型

经统计分析研究认为, 德兴铜矿的 Cu 与 In, Bi, Sb, Ni, Na₂O, Cr 含量具有相关性, 因此 In, Bi, Sb, Ni, Na₂O, Cr 可以作为评价 Cu 富集与贫化的地球化学指标。建立了斑岩铜矿的区域成矿模型、找矿模型和典型矿床模型与找矿范例。

5. 成功申报德兴斑岩型铜矿为首批国家级野外科学观测基地之一

通过本次工作申报, 德兴斑岩型铜矿为国土资源部于 2011 年首批确定的 84 个野外科学观测研究基地拟进行命名与建设 (国土资源部 2011【183】号文件) 之一, 并已经完成建设规划计划书, 明确建设工作由德兴矿管局完成。

七、致 谢

本书的工作得到中国地质科学院矿产资源研究所毛景文研究员、张作衡研究员及中国地质调查局发展研究中心吕志成研究员的指导。工作得到中国地质科学院矿产资源研究所张佳文书记、科技处孙文泓副处长和孙艳博士及所办元锋主任的大力支持。工作思路得到中国地质科学院矿产资源研究所王宗起副所长和中国科学院贵阳地球化学研究所李晓峰研究员的启示。野外工作期间,得到德兴铜矿程乐晃总工程师和胡保根主任的大力帮助,同时得到江西地勘局黄水保处长与唐维新处长、江西省地矿局赣东北大队罗平总工程师、德兴矿管局裔刚局长和曾智勇副局长的积极协助。在同位素测试工作过程中得到万德芳研究员的大力协助。薄片磨制工作由中国地质大学(北京)磨片室、廊坊市科达矿物分选技术服务有限公司完成,标本与显微镜下的照相工作得到中国地质科学院矿产资源研究所沙俊生工程师的积极协助,锆石的 LA-ICP-MS 法 U-Pb 年龄、Hf 同位素与微量元素的测试由中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士与西北大学第五春荣完成,扫描电镜与电镜能谱的工作由魏宝和与朱德升高级工程师完成。样品碎样、单矿物分选等工作由廊坊市科达矿物分选技术服务有限公司完成;主量与微量元素的测试工作由张彦辉等同志完成;包裹体测温和拉曼光谱测试由吕立娜硕士完成,包裹体测试实验与数据的处理得力于中国地质科学院矿产资源研究所包裹体测温实验室陈伟十老师的帮助。中国地质大学(北京)的硕士研究生常玉虎同学在书稿图件制作方面给予了大力帮助。在此对上述单位与人员一并表示衷心的感谢。

目 录

总前言

前 言

| | |
|--------------------------------|--------|
| 第一章 德兴矿集区区域地质背景 | (1) |
| 第一节 区域地层 | (1) |
| 第二节 区域构造 | (5) |
| 第三节 岩浆活动及其与成矿的关系 | (9) |
| 第四节 变质作用 | (12) |
| 第五节 矿集区成矿效应 | (13) |
| 第二章 德兴矿集区矿床地质特征 | (14) |
| 第一节 德兴铜矿 | (14) |
| 第二节 银山银铅锌矿 | (24) |
| 第三节 金山金矿 | (29) |
| 第四节 小结 | (33) |
| 第三章 德兴矿集区岩石地球化学特征 | (34) |
| 第一节 德兴铜矿与银山矿床岩石地球化学特征 | (34) |
| 第二节 金山金矿 120 平硐岩矿石地球化学特征 | (40) |
| 第三节 朱砂红外围张家畈地区岩石地球化学特征 | (47) |
| 第四节 小结 | (50) |
| 第四章 德兴矿集区成岩成矿年代学 | (51) |
| 第一节 德兴铜矿与银山矿床年代学 | (51) |
| 第二节 金山金矿花岗质超糜棱岩年代学 | (58) |
| 第三节 朱砂红外围张家畈地区闪长岩年代学 | (60) |
| 第四节 小结 | (61) |
| 第五章 德兴铜矿流体包裹体特征 | (63) |
| 第一节 样品采集 | (63) |
| 第二节 包裹体特征 | (64) |
| 第三节 成矿作用 | (72) |
| 第四节 小结 | (76) |
| 第六章 德兴铜矿同位素地球化学特征 | (77) |
| 第一节 氢氧同位素 | (77) |
| 第二节 硫同位素 | (80) |
| 第三节 铅同位素 | (82) |
| 第四节 铋钨同位素 | (85) |
| 第五节 碳硅铜同位素 | (86) |