

文章编号: 1004-5589 (2010) 03-0372-11

安徽庐枞地区铁—铜矿成矿规律与找矿

江永宏^{1, 2}

1. 中国地质调查局 发展研究中心情报室, 北京 100037;
2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

摘要: 构建庐枞地区燕山期 Fe、Cu、Au 成矿系列, 根据成矿构造背景和含矿岩浆岩特点, 将其划分为 3 个成矿亚系列: 以矽卡岩型 Cu、Mo、Au 矿为主的亚系列, 以矽卡岩型 Fe 及 Fe、Cu 矿为主的亚系列和以玢岩铁矿为主的火山—次火山岩型铁矿亚系列。该区具较大找矿远景的靶区有: ① 沙溪铜(金)找矿靶区; ② 清水塘—岳山铁、锌找矿靶区; ③ 井边—巴家滩铜矿找矿靶区。其中, 井边—巴家滩地区成矿地质条件良好, 深部存在斑岩型铜矿的可能性较大, 具有寻找大型斑岩型铜矿的找矿远景, 应对该区进行深入研究和普查评价工作, 以实现庐枞盆地内部铜矿找矿的突破。经预测, 应对泥河、罗河和龙桥等大型超亿吨铁矿外围进行勘探, 以达到建立 20~25 亿吨大型钢铁基地的目标。

关键词: 铁铜矿床; 成矿规律; 找矿方向; 庐枞地区; 安徽

中图分类号: P618.31; P618.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1004-5589.2010.03.003

Metallogenic regularity and prospecting of Fe—Cu deposit in Lujiang—Zongyang area of Anhui

JIANG Yong-hong^{1, 2}

1. Information Department of Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;
2. State Key-Lab of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The authors made clear on the Fe, Cu and Au metallogenic series of Yanshanian in Luzong area and divided it into three metallogenic sub-series based on structural background of mineralization and characteristics of ore-bearing magmatic rocks, including the sub-series mainly by skarn-type Cu, Mo and Au deposits, the sub-series mainly by skarn-type Fe and Fe, Cu deposits, and the sub-series of igneous and sub-igneous rock iron deposit mainly by porphyrite iron deposits. The prospecting target areas in Lujiang—Zongyang areas are: ① Shaxi copper (gold) prospecting area; ② Qingshuitang—Yueshan iron and zinc prospecting area; ③ Jingbian—Bajiatan copper deposit prospecting area. The Jingbian—Bajiatan area has pretty good geological situation of mineralization with very large probability of existing porphyry copper deposit in its deep part and prospecting perspective of porphyry copper deposit, which is necessary to do further research and evaluate for breakthrough of copper deposit prospecting in Luzong Basin. Based on the prediction, the periphery exploration of Nihe, Luohe and Longqiao large super-billion tons iron deposits should be carried out, so as to reach the main goal of building 2~2.5 billion tons steel and iron base.

Key words: iron and copper deposit; metallogenic regularity; prospecting direction; Luzong area; Anhui

收稿日期: 2010-03-19; 改回日期: 2010-06-04

基金项目: 国土资源大调查项目 (20001020223023, 200313000068-02), 国家自然科学基金项目 (40073012) 联合资助。

0 引言

中国铁矿可分为古老变质岩中的条带状铁矿(鞍山式)、矽卡岩型铁矿(大冶式)、钒钛磁铁矿型铁矿(攀枝花式)、海相火山岩型铁矿(镜铁山式)、陆相火山岩型铁矿(庐枞式)及鲕状赤铁矿型铁矿(宣龙式)。中国铁矿资源比较丰富,但很难达到巨型。在郅庐断裂带,由北向南有冀东—北京、鲁中、安徽霍邱及宁芜—庐枞4个重要的铁矿集中区。在庐枞地区的罗河、龙桥和泥河发现大型铁矿和铜矿,目前已探明铁矿石储量 >12 亿t,硫铁矿储量6.7亿t,铜金属储量150万t。根据地质资料,安徽长江以南地区的和尚桥、凹山、尖山、黄梅山、钟山、白象及姑山均位于南北向的构造带中,而利用构造成矿理论,长江北部:如2008年开钻的泥河矿区和罗昌河、大鲍庄及钟山地区,也极有可能为大型岩浆驱动成矿域,在此巨型南北向构造带中,找到新的外围和深部矿床。

安徽庐江县泥河铁矿勘查取得的突破性进展为:①2002年以来,安徽省加大铁矿勘查力度,开展勘查项目44个,取得一批新成果,发现和评价庐江泥河等大中型铁矿床9处,新增和有望新增铁资源量6亿t±。预测可发现大中型矿产地8~10处,预测资源储量20~25亿t±。庐江泥河铁矿是在系统总结区域成矿地质条件、成矿规律及控矿地质因素的前提下,利用玢岩铁矿找矿模式,选择1/5万航磁异常与重力异常套合地区,通过大比例尺地磁、重力测量,利用钻探对磁重异常进行验证而一孔命中(ZK0501),预获333+334资源量1亿t±。②2007年3月以来,在国土资源部深部找矿战略指引下,庐江县国土资源局积极配合省地调院利用电法和磁法,首次探明泥河地区铁矿矿体厚度187.54m,平均品位45.7%,储量 >2 亿t,庐枞地区有望再探明5亿t铁矿。③自2008年启动新一轮铁矿勘查后,投入近3亿元铁矿勘查资金,成果较为显著,有望新增资源量11.5亿t±。两年来,铁矿勘查成果丰富,共新增和有望新增大中型矿产地13处。其中,在国土资源部整装勘查重点示范区庐(江)—枞(阳)矿集区的罗河铁矿床南侧和西侧发现磁铁矿体,初步推测该区新增资源量5000万t,其中罗河铁矿储量3.4亿t,TFE品位35.8%,计划年产1500万t至1800万

t,估计在罗河铁矿床及其外围储量有望达到7.5亿t。

泥河铁矿是庐枞地区乃至长江中下游地区近20年来找矿的重大发现之一,为整个庐枞地区开展进一步勘查、开拓找矿空间和寻找深部矿的局面提供了新的依据,预示在长江中下游地区进一步开展深部找矿工作具有十分广阔的前景,必将对长江中下游地区深部找矿工作起到积极的推动作用。在这些理论认识的基础上,采用统计计算与专家价值相结合的方法和综合信息量计算法进行区域成矿预测,提出4个成矿远景区和4个找矿靶区,为寻找新的普查勘探基地提供了地质依据。在成矿规律研究和综合预测的基础上,提出在本区进行中长期找矿的系统建议,明确指出今后找矿重点地区及矿床类型和深部找矿中应特别注意的矿床类型^[1]。为加强建设20~25亿t的钢铁基地,研究庐枞地区重点矿山如罗河、沙溪、龙桥、何家小岭和泥河等将有很强的现实意义。前人做了不少矿床类型、形成条件、成矿演化及同位素地球化学的研究工作,但随着研究程度的加深,如何扩大找矿的范围,如何应用成熟的理论和方法,进行深部和外围找矿,尤为重要。结合近年来的地质、物质来源、地质年代、找矿靶区和地球化学等工作,对本地区的成矿规律和找矿理论,加强概括研究极其必要。

1 地质概况

庐枞中生代火山岩盆地位于华北板块和扬子板块对接带的大别山造山带东侧,北东向紧邻郅庐断裂东侧展布,在太平洋板块向欧亚板块俯冲所影响的范围内,主要分布有玢岩型火山—次火山铁矿(表1)。该盆地中生代陆相火山盆地,其基底为志留系、三叠系和中下侏罗统的一套碎屑岩建造。陆相火山岩系为上侏罗统一下白垩统,厚达3000m^[3]。

火山岩系自下而上分为龙门院、砖桥、双庙和浮山4个喷发喷溢旋回。火山岩层呈半环状分布,由老到新,从盆地北、东和南部向西部迁移。每一旋回均从爆发相开始,继之以溢流相,最后以火山沉积相告终。将本区所收集到的146个火山岩样品投影于岩石化学分类图上,整个火山岩系呈粗面玄武岩—玄武粗安岩—粗安岩—粗面岩组合,属富碱岩系,其中龙门院旋回以玄武粗安岩为主,伴有少量粗面玄武岩、粗安岩和安山岩;砖桥旋回主要以粗

安岩、玄武粗安岩为主，伴有少量粗面岩；双庙旋回则以粗面玄武岩为主，同时出现少量玄武粗安岩和粗面岩；浮山旋回主要为粗面岩类，上部出现少量碱性粗面岩和含似长石碱玄岩。在砖桥旋回和双庙之间存在着岩性的重大转折，结合两旋回之间存在沉积间断的地质事实，可以把4个旋回归纳为龙门院—砖桥和双庙—浮山2个大旋回^[3]。类似于合肥盆地，上侏罗统毛坦厂组火山岩沿大别山前呈带状分布，岩性以粗安岩、粗面岩、粗面英安岩及流纹岩为主^[4]。火山岩层的分布特征呈半环状，由老到新，从盆地北、东和南部向盆地西部及中心地区依次分布。主体岩层是龙门院组和砖桥组，双庙组和浮山组集中于盆地中部地区。岩石化学性质由基性向富碱方向演化，喷发方向由裂隙—中心式向

典型的中心式喷发发展^[3]。

2 研究进展

对本区中生代不同地质时代的构造应力场进行定量研究，总结其构造变形特征，确定板内岩石圈断裂是控岩控矿的主导构造。在燕山早期，以NW—NWW向为主的张剪性岩石圈断裂控制了铜及铜矿业带的形成，而燕山晚期，主要是NE—NNE向张剪性岩石圈断裂控制了铁矿亚带的形成^[1]。

(1) 矿床形成环境：根据新的构造理论资料（包括壳幔结构特征及古地磁资料等），运用活动论观点，将该成矿带的地质构造演化历史划分为基底形成、板块迁移、盖层沉积及板内变形3个阶段，从全球构造角度讨论了中生代欧亚板块与太平

表 1 安徽庐枞地区主要矿床类型及其地质特征^[2]
Table 1 Main deposit types and geological characteristics of Luzong area in Anhui

矿床类型	罗河式铁矿	沙溪式斑岩铜矿	岳山式铅锌矿	龙桥式铁矿
分布范围	火山岩盆地中北部	盆地西侧外围郊庐断裂带内	盆地的东北边缘	盆地的东北部
分布范围	砖桥组 (J _{3zh}) 辉石粗安岩	罗岭组 (J ₂₁)、高家边组 (S _{1g}) 砂页岩、闪长玢岩	龙门院组 (J _{3l}) 粗安斑岩，拉犁尖组 (T _{3l})、磨山组 (J _{1m}) 砂页岩	东马鞍山组 (T _{2d}) 铁质泥质粉砂岩和碳酸盐岩，龙门院组 (T _{3l}) 粗安斑岩，磨山组 (J _{1m}) 砂页岩
控矿构造	NNE、NW、EW 向断裂、火山穹隆	NE 向断裂、背斜核部、岩体接触带	NS、NE 向基地断裂、岩体接触带	NNE、NW、NE 向断裂带
岩浆岩	粗安斑岩	石英闪长斑岩	粗安斑岩、闪长斑岩	粗安斑岩、正长 (二长) 岩、闪长玢岩
围岩蚀变	碱性长石、石膏、硬石膏、辉石、石英、高岭石、水云母	石英、绢云母、绿泥石、钾长石、硬石膏、绿帘石、碳酸盐及硅化	石英、高岭石、水云母、电气石、钾长石、次生石英	透辉石、石榴石、金云母、绢云母、硬石膏、钾长石、碱性长石、绿泥石
矿体形态、产状	透镜状、扁豆状	钾状、透镜状	透镜状、似层状	透镜状、似层状
矿物组合	磁铁矿、黄铁矿、赤铁矿、黄铜矿、硬石膏、辉石、磷灰石、石榴石、钠长石、钾长石、绿泥石	黄铜矿、黄铁矿、石英、钾长石、斑铜矿、自然金、黑云母、硬石膏	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、黄铜矿	磁铁矿、黄铁矿、赤铁矿、黄铜矿、菱铁矿、银金矿、闪锌矿、磁黄铁矿、透辉石、绿泥石、钙铝榴石
主要元素组合	Fe、V、Ti、P、Cu、S	Cu、S、Au	Pb、Zn、S、Cu、Fe	Fe、Cu、Au、Pb、Zn
结构、构造	块状、浸染状、网脉状、角砾状、条带状构造、半自形晶、它形晶、交代假象残余网脉状结构、筛状叶片状结构	浸染状，细脉浸染状、网脉状	浸染状、条带状、不规则状	条带状，层纹状、角砾状、块状浸染状、
规模	大型	中—大型	中型	大型
成因类型	岩浆—岩浆热液	斑岩型	斑岩型	沉积—热液叠改型
典型矿床	罗河、杨山、大岭	凤台山	岳山	龙桥

洋板块和印度—澳大利亚板块相互作用的重要性及构造岩浆活动和成矿的关系,认为该成矿带在印支—燕山早期具有造山带(挤压带)性质,燕山晚期具有拉张和准裂谷性质的演化过程,属于大陆板块内部的断块和裂陷交织的构造—岩浆—成矿带,共分成 4 期构造岩浆活动^[1]。表 2 简要归纳了安徽沿江地区燕山期构造—岩浆—成矿事件序列^[5]。

(2) 采用地质、地球物理和遥感技术相结合

的方法,系统解译了本区的环形构造,划分了环形构造成因类型,建立本区矿田构造垂直分带模式—“三层结构”,即深部为隐伏岩基、中部为构造—岩浆柱、上部为含矿岩株。这一分带模式的建立,对本区矿田构造和矿化垂直分带研究具有重要指导意义^[1]。考虑到地壳纵向分层、横向分块结构特征,把褶皱构造及断裂构造作为分块分层的边界,安徽沿江扬子块区地壳的 3 维空间结构特征见表 3^[6]。

表 2 安徽庐枞地区燕山期构造—岩浆—成矿事件序列表

Table 2 Sequence of Yanshanian structure—magma—mineralization in Luzong area of Anhui

时代	构造—岩浆事件	成矿事件
> 137 Ma	高钾钙碱性系列侵入岩(陆壳收缩后加厚)	矽卡岩型铜(铁)矿床、斑岩型铜(金)矿床
137 ~ 130 Ma	(宁静期、转换机制)	热液型银多金属矿床
130 ~ 125 Ma	橄榄安粗岩系列火山—侵入岩 (底侵岩浆侵位、岩石圈拆沉、减薄)	玢岩型铁矿床、矽卡岩型铁铜矿床、 热液型多金属矿床
< 125 Ma	碱性岩系列火山岩、A 型花岗岩(岩石圈大规模拆沉)	

表 3 沿江扬子地块地壳 3 层结构特征

Table 3 Characteristics of three-layer strcture of crust along Yangtzi platform

	上地壳	中地壳	下地壳
构成	沉积相对较厚,除局部隆起地段外,陆相中、新生界及海相中、古生界部分地段达—10 km,其下为变质程度较浅的片岩系	由以麻粒岩相、角闪岩相为主的深变质岩系和混合花岗岩类构成深变质岩	为硅镁质的结晶岩系,厚约 12 km。
物性	具有低速、低阻、低密、低磁特征。V: 5.7 ~ 5.8; ρ_s : 5 ~ 10; δ : 2.60; J: $10^1 \sim 10^2$ 。	具高速、高阻、高密、高磁特征。V: 6.0 ~ 7.0; ρ_s : 1 000 ~ 1 500; δ : 2.90 ~ 3.0; J: $n \times 10^3$ 。	具有高速、高密、高电阻的特征。V: 6.8 ~ 7.6; ρ_s : $10^3 \sim 10^4$; δ : 3.0 ~ 3.2
性质	为一相对柔软物质层,在水平力作用下可成为滑移(或拆离)层面,地壳上层紧闭褶皱及一些冲断推复作用受这一滑脱层面制约,多数表层断裂可能消失于这一层面内。	其底界埋深一般为 20 km \pm , 顶界埋深一般 < 10 km。	磁性地壳的底界面(层里温度面)分布于该层。

注: 物性单位,磁性 $J \times 10^{-3} A/m$, 密度 $\delta \times 10^3 kg/m^3$, 波速 $v (km/s)$; 电阻率 $\rho (\Omega \cdot m)$ 。

(3) 成矿与深部岩浆岩的关系: 大包庄、罗河矿区,岩体均在地表以下 300 ~ 400 m 处。小岭矿区潜伏在地下的粗安玢岩与火山碎屑岩在接触带形成大型硫铁矿体,而暴露在地表的粗安玢岩未见工业矿体。一般岩体规模大者,形成的矿体规模也大,反之,岩体愈小,成矿作用也较差,如罗河矿区辉石粗安玢岩厚度 > 600 m,大包庄矿区辉石粗安玢岩厚度 > 500 m,二者在深部相连,面积至少 > 5 km²,故在罗河、大包庄形成大型硫铁矿床^[7]。

3 成矿时代

3.1 年代测定

对庐断断裂南端沙溪含铜斑岩体中黑云母和斜长石单矿物的高精度 Ar/Ar 同位素测定,获得 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 平均年龄为 (132.62 \pm 0.28) Ma, ⁴⁰Ar/³⁹Ar 等时线平均年龄为 (132.59 \pm 0.46) Ma,而最小平均视年龄为 86 Ma \pm ,可能表示后期的一次热事件,对应于斑岩体与 Cu—Au 矿化有关的热液活动。这些年龄值比前人在该区及邻区获得的 K—Ar

和 Rb-Sr 年龄更精确地代表沙溪含铜斑岩体的侵入时代。132.6 Ma ± 的年龄代表该区含铜（金）斑岩体的侵入时代，铜（金）斑岩型矿床是在稍后的大规模热液蚀变下形成的^[8]。

邻区长江中下游地区的其他含铜岩体测年结果，如徐夕生等研究铜官山石英闪长岩中单颗粒锆石的定年结果表明该岩体的结晶年龄为（137.5 ± 11.1）Ma 以及陈江峰等研究的安庆地区含铜岩体的 Ar/Ar 年龄为 136 Ma，这些侵入体代表着长江中下游燕山期大规模的岩浆活动的时代^[8]。

据胡文暄等统计，区内主要岩浆活动期为（155 ~ 100）Ma。巴家滩辉石二长岩 Rb-Sr 等时线年龄为（150.1 ± 0.9）Ma^[9]，相当于晚侏罗世；矾山-石马滩正长斑岩体 Rb-Sr 等时线年龄为（129.6 ± 1.1）Ma^[10]，相当于早白垩世。结合野外地质资料，可以推断本区火山活动应始于晚侏罗世，止于早白垩世^[11]。

沙溪石英闪长斑岩（⁸⁷Sr/⁸⁶Sr）初始比值为 0.705 8，表明石英闪长斑岩成岩物质主要来自于上地幔，可能在岩浆上侵过程中遭受地壳物质混染，这些特征与石英闪长斑岩中暗色矿物富 Mg、Ni，贫 Al、Fe 和稀土元素中 Sm/Nd 比值低等特征基本吻合。沙溪石英闪长斑岩形成时代为（127.9 ± 1.6）Ma，属燕山晚期产物，相当于庐枞火山盆地内的白垩系下统火山岩的双庙旋回与浮山旋回之间的间歇期。这一结果与⁴⁰Ar/³⁹Ar 分析年龄 126 Ma 较相近^[12]。

3.2 阶段划分

中三叠世 在庐枞盆地边缘（龙桥-马鞍山一带）和西南缘（城山-大创山一带）沉积了赤铁矿、菱铁矿及黄铁矿矿胚层，出现龙桥式铁矿的雏形。

晚侏罗世早-中期 砖桥旋回火山喷发的较早期，与基底断裂活动有关，在局部小的水盆地中形成了盘石岭式的热泉沉积型赤铁矿-硫铁矿床，为小岭式硫、铁、铜矿床，大鲍庄和罗河矿部分铁、硫矿的形成奠定了物质基础。

晚侏罗世晚期 相当于砖桥旋回的晚期，在庐枞盆地北部的矾山破火山口外围及边缘，与富铁辉石粗安岩浆岩及大规模热液活动有关，形成了罗河、大鲍庄、大岭、小岭和杨山一带的玢岩型铁矿，以及这些矿床中的热液型黄铁矿、黄铜矿。小

岭式硫铁矿最终形成于此时期。在较晚期主要是在盆地的中部及南部，形成了位于龙门院组及砖桥组火山岩中的第一期脉铜矿。井边、拔茅山及石门庵等小型铜矿即形成于这一时期。

早白垩世较早期 与双庙旋回火山岩浆活动有关，在盆地的边缘和外围最终形成了沉积-热液叠加改造型的龙桥式铁矿、大创山式铜矿、大缸窑式细脉浸染型铜钼矿化及沙溪式斑岩型铜（金）矿床。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

SiO₂ 含量为 45 % ~ 64 %，属硅近饱和系列。玄武岩中标准矿物 Ne 和 Ol 出现频率较大，但 Ne 含量 < 5 %；玄武粗安岩中普遍出现标准矿物 Q，但含量很低；粗面岩中部分样品出现 Q（一般 < 5 %）和 Hg。庐枞火山岩系 K₂O 随 SiO₂ 变化，当 SiO₂ 为 45 % ~ 54 % 时，K₂O 和 SiO₂ 呈正相关，而当 SiO₂ 为 54 % ~ 59 % 时，斜率为零甚至呈负相关，这种现象是橄榄玄粗岩系的特征之一^[12]。SiO₂ > 59 % 的晚期粗面岩样品点比较分散，这说明在火山晚期，岩石碱性逐渐升高，但从岩石矿物组合来看，碱性暗色矿物和副长石不出现或出现很少，仍为碱性岩石。

K₂O/Na₂O 值较大，粗面玄武岩、玄武粗安岩和粗安岩的 K₂O/Na₂O 值多集中在 1.0 附近，晚期粗面岩 K₂O/Na₂O 值最高，平均值达 2.16。

Al₂O₃ 含量高且变化大（14 % ~ 20 %），TiO₂ 含量较低（< 1.3 %），Fe₂O₃/FeO 值高，Na₂O + K₂O、Al₂O₃ 和 K₂O/Na₂O 随 SiO₂ 升高而逐渐增大，TiO₂、全铁、CaO（包括 MgO）随 SiO₂ 升高而逐渐降低。庐枞火山岩系的特征既不同于碱性岩系列，也明显有别于岛弧和大陆边缘安山岩系，而与典型橄榄粗安岩系特征相同。但是，与岛弧和活动大陆边缘橄榄玄粗岩系相比，庐枞火山岩系全碱（尤其是 K₂O）更加富集，而 MgO、CaO 则明显亏损^[11]。

4.2 硫稳定同位素

对 5 个黄铁矿单矿物样品进行了硫稳定同位素测定，从表 4 可见火山沉积成因的黄铁矿，其 δ³⁴S × 10⁻³ 值为负值，说明这种硫来自上地幔或深部地壳。叠加改造成因、火山热液成因的黄铁矿，其

$\delta^{34}\text{S}$ 值明显增加, 但是增加的值低于同一构造区深埋的罗河铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (罗河铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 最大值为 $(15 \sim 18) \times 10^{-3}$, 而小岭地区 $\delta^{34}\text{S}$ 最大值仅为 6.24×10^{-3})。小岭硫铁矿的硫主要是深源的, 并在向上运移过程中可能混染了少量地壳中的硫^[3]。

表 4 何家小岭不同成因黄铁石英黄铁矿硫同位素值^[3]
Table 4 Sulfur isotopic value of quartz pyrite deposit in pyrite with different geneses in Hejiaxiaoling

样品号	岩性	单矿石	$\delta^{34}\text{S} \times 10^{-3}$
D1-06	沉凝灰岩矿石	黄铁矿	-1.68
XZU-04	-	黄铁矿	-1.08
R1-03	脉状黄铁矿矿石	黄铁矿	6.24
ZK425-023	块状	黄铁矿	4.76
R1-06	矿化硅化脉	黄铁矿	4.03

4.3 成矿特征

本区存在两个成矿系列: 沉积成矿系列和岩浆成矿系列。沉积成矿系列以古生代沉积建造序列为主体, 岩浆成矿系列以燕山期为主体。由于区域构造演化的继承性, 造成沉积成矿系列和岩浆成矿系列的叠加、复合。本区燕山期 Fe、Cu、Au 成矿系列, 根据成矿构造背景和含矿岩浆岩特点, 划分为 3 个成矿亚系列: 以矽卡岩型 Cu、Mo、Au 矿为主的亚系列, 以矽卡岩型 Fe 及 Fe、Cu 矿为主的亚系列和以玢岩铁矿为主的火山—次火山岩型铁矿亚系列。系统总结了各亚系列的地质特征, 建立了较完整的区域成矿模式, 为进一步找矿提供了理论依据。

5 找矿靶区

沙溪铜 (金) 找矿靶区 位于庐江县沙溪一带, 是典型的陆内斑岩型铜 (金) 矿^[2]。该区位于庐庐断裂、黄庙断裂与桐城—铜陵断裂的复合部位, 庐枞火山盆地西北部边缘。自北而南分布棋盘山、凤台山、铜泉山、鼓架山和断龙颈等矿床 (点)。区内岩浆活动强烈, 岩浆岩主要是沿着铜泉山背斜核部及断裂侵位而成的碱性中酸性杂岩体。铜 (金) 矿体主要赋存在石英闪长斑岩中, 少量产于围岩。重、磁、化异常明显, 相互套合,

异常带长达 10 km, 宽约 2 km。
铜矿体空间分布具有浅部为脉状, 上部呈斜板状, 深部为钟状的特征。其蚀变、矿化特征与闪长岩模式相近, 具明显的分带现象, 从上至下依次为: 青磐岩化带、石英绢云母化带及钾化带, 泥化带不发育, 主矿体赋存于石英绢云母带和钾化带中。

根据对凤台山矿段铜矿床特征的研究, 沙溪地区浅部为脉状铜 (金) 矿体, 下部存在着规模较大的含矿斑岩体。在凤台山矿段深部找矿已得到证实, 且铜矿资源量可观。因此, 沙溪地区深部找矿应具有巨大远景, 应进一步寻找深部隐伏的“钟状”含矿斑岩体, 扩大矿床的规模。
根据沙溪地区成矿地质条件和物化探异常特征综合分析, 除凤台山矿段深部存在着“钟状”含矿岩体外, 棋盘山、铜泉山、鼓架山及断龙颈等矿段均有与凤台山矿段相同的地质特征, 其深部均相应存在着规模较大的含矿岩体。

此外, 在沙溪已有矿床东北部外围的胡家碾、胡家院, 南西部的菖蒲山、下沙溪地区, 矿体埋深可能较浅, 这些地区应重点寻找浅而富的铜 (金) 矿体。

清水塘—岳山铁、铅锌找矿靶区 清水塘—岳山找矿靶区是庐枞盆地北部的 Fe、Cu、Pb、Zn、Ag、S 等成矿区^[2], 沿区矿床 (点) 众多, 主要有: ① 龙桥铁矿、马鞍山铁矿、黄屯硫铁矿及岳山铅锌银矿; ② 胡家院铁矿点, 水口冲、矮岭、燕土墩和三驿桥等铅锌银矿点。经对该区成矿地质条件和已有的物化探综合找矿信息研究, 该远景区是庐枞盆地基底中三叠统东马鞍山组地层的分布区。该区存在一条明显的呈近东西向分布的航磁异常带, 龙桥与马鞍山铁矿即位于该异常带中、东部。异常带西部的清水塘和西马滩地区具有与龙桥铁矿相同的成矿地质条件和物化探异常特征, 因此是寻找“龙桥式”铁矿最有利的地区。

根据成矿元素水平分带的特点, 与东马鞍山组地层有关的铁矿床, 前段带均具有 Pb、Zn 异常或矿化, 在清水塘矿区北部的袁大墩地区的钻孔中见矿床深达 12 m, Pb + Zn 平均品位 6.5 % 的铅锌矿体。因此, 该区内寻找与中三叠统东马鞍山组地层中有关的 Pb、Zn 等金属矿床也具有广阔前景。

井边—巴家滩铜矿找矿靶区 区内岩浆岩活动

强烈,与板块边缘的活动带和碰撞带有关^[2]。巴家滩岩体是多次岩浆活动的产物,其中的包体代表的侵入时代可能相当于龙门院旋回晚期,岩体主体的侵入时代可能相当于砖桥旋回晚期。因此,巴家滩岩体与区内的(龙门院旋回和砖桥旋回)火山岩为多期次岩浆活动产生的火山-侵入杂岩。

巴家滩岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.705\,92 \pm 0.000\,01$,显示出幔源成因特点。 $\text{Sm}-\text{Nd}$ 同位素研究及 $\varepsilon\text{Sr}/\varepsilon\text{Nd}$ 相关关系特征均显示出巴家滩岩体的幔源特征,且源区具有富集地幔的特点。

井边-巴家滩地区铜异常面积是庐枞盆地中最大的异常地区,且地表脉状铜矿发育,这些铜矿床(点)基本上都围绕着巴家滩岩体四周分布,显示出巴家滩岩系对该区铜矿的形成具有一定的控制作用。此外,巴家滩岩体本身含铜丰富,可达 $(136 \sim 450) \times 10^{-6}$,说明该岩浆岩具备丰富的铜矿物质来源。

此外,该区火山岩浆的直接基底应为中三叠世铜头尖组,该层位中夹有多层含铜砂页岩。在后期火山-岩浆活动过程中可以将这些含铜砂页岩中的铜进一步活化、迁移,而富集成矿。

区内围岩蚀变强烈,除围绕脉状铜矿出现明显的线性蚀变外,在寨基山、黄庄、王家门及虎栈等地出现了较强的面型蚀变,其围岩蚀变特征与斑岩型铜矿的围岩蚀变非常相似,具有明显的绢云母化、硅化、青盘岩化和钾化等,伴随围岩蚀变还不同程度地出现黄铜矿化。最新找矿成果表明,在巴家滩岩体中发现铜矿化较强的含矿包体,这种包体与其围岩辉石二长岩的界线明显,包体中黄铜矿、辉铜矿极为发育,矿物组合为黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿和磁铁矿,该包体原岩为较细粒的辉石二长岩,因此,巴家滩岩体深部可能存在早期的、规模较大的含矿(岩)体。

巴家滩岩体的东部是斑岩型铜矿最有利的找矿地区,应进一步深入工作,以取得斑岩型铜矿的找矿突破。

6 讨论

6.1 主要控制因素

(1) 地幔柱

关于该区幔隆问题前人已多次强调过:①前人认为该区存在幔隆构造,有些还与现代地震测深

资料相矛盾,本次研究中深部柱状岩浆房所反映的地幔柱可直接指示出幔隆的存在;②幔隆及其地幔柱可能是导致沿江地区出现拉伸的动力机制和导致长江断裂带等追踪性断裂产生的原因。深部几个岩浆房或地幔柱也处在基底过渡带上(近北部基底一侧),也许有着某种潜在的联系^[13]。

(2) 地幔根

根据提供的地震层析成像资料分析,中国东部45 km深度的上地幔中有明显的3处低速区,其中洞庭湖-鄱阳湖-太湖-巢湖低速区即落在与长江中下游成矿带相邻的江南隆起上,推测可能存在“幔根”(实为壳根)。尽管这里45 km深处的低速区也是现代地球物理的反映。

经研究,区内存在着“大别基底”和“扬子基底”,后者又可进一步分为“董岭式”和“江南式”。“董岭式”基底以及“董岭式”基底与“江南式”过渡带与成矿关系最为密切^[13]。

6.2 庐枞盆地的形成

长江中下游断裂拗陷带处于华北、扬子和东部古太平洋板块相互作用的三角区内。自印支晚期开始,南北两板块相向运动、对接,古太平洋板块也逐渐向西北方向俯冲,最终使该区隆起为陆,并在沿长江一带形成统一的河、湖盆体系。早中侏罗世时期,太平洋板块的进一步俯冲,将盆地中心向西北推移到含山-枞阳一线,形成一套河、湖相碎屑岩沉积。到中侏罗世晚期或晚侏罗世早期,燕山期地壳运动开始发生,表现为强烈的以断裂构造为主的活动,差异升降十分显著,因而在中国东部形成一系列中(新)生代断陷盆地,庐枞盆地便是其中规模较大者之一。

由于庐枞盆地周围为断裂切割,外围基底地层抬升,内部则呈阶梯状断陷,从而形成封闭性的构造断陷盆地。这种封闭性盆地为水体的集中、盐类物质的富集及卤水的最终形成提供了基础^[5]。

6.3 矿化围岩

何家小岭硫铁矿是中国8个主要硫铁矿床之一。矿床内蚀变作用强烈,除在上部粗安斑岩的局部地段及深部石英正长斑岩中可见到未蚀变的岩石外,其余均已发生了不同程度的蚀变与矿化。矿床内蚀变作用强烈,蚀变与火山-侵入活动所伴随的气液作用有关,呈面型分布,范围广、强度大,具多期次特征。自下而上分为深色蚀变、叠加蚀变及

浅色蚀变, 相应有高温蚀变矿物组合逐渐转变为中、低温蚀变矿物组合, 在主要金属矿物方面, 沉淀分带规律 (硫铁矿→赤铁矿→黄铁矿→黄铜矿) 也很明显^[5]。根据矿石的结构、构造、矿化期矿化阶段和有关地球化学参数综合因素, 将本区硫铁矿床分为 4 种成因类型: ① 火山沉积型; ② 次火山型; ③ 叠加改造型; ④ 火山热液型。火山沉积型为火山堆积期形成; 次火山型为浅成岩热液期形成, 此类型矿石主要根据原岩是次火山相粗安斑岩而定; 叠加改造型为潜火山岩硫化物早期热液形成; 火山热液型为潜火山岩硫化物晚期热液形成^[5]。

沙溪石英闪长斑岩是郯庐深大断裂内部岩浆侵入的产物, 其矿物学、岩石学与地球化学特征研究表明石英闪长斑岩的岩浆主要来自上地幔, 并有大量地壳物质混入。据 Rb-Sr 同位素年龄研究和⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄研究推测, 石英闪长斑岩形成于燕山运动晚期。在燕山运动晚期, 太平洋板块由

SE 向 NW 向俯冲、消减, 印度板块由 SW 向 NE 方向陆-陆碰撞, 以及华南与华北对接碰撞造山作用, 导致了郯庐断裂带活动增强, 引起了郯庐断裂带内部与邻区强烈的岩浆活动, 沙溪石英闪长斑岩就是这种环境下形成。研究表明, 燕山晚期该区有大量中酸性岩浆侵入, 并形成了与其相关的沙溪斑岩铜(金)矿床^[12]。

6.4 成矿温度

由于矿区透明矿物石英中的包裹体很小, 仅测得两个石英矿物中的包裹体 (气液比均为 1:10), 均一化温度分别为 180 ℃ 和 210 ℃。因此借助不透明矿物, 黄铁矿的爆裂法测温来帮助确定成矿温度, 一般用最低爆裂温度代替。选取不同成因类型黄铁矿石, 通过重砂筛选和双目镜下挑选黄铁矿单矿物, 纯度达 99 % 以上, 做了 5 个黄铁矿单矿物样品爆裂法测温 (表 5), 所测温度结果显示各种成因的黄铁矿属中低温形成^[5]。

表 5 何家小岭不同成因类型黄铁矿包体爆裂法测温数据^[5]
Table 5 Temperature measurement data of decrepitation method of pyrite with different geneses in Hejiaxiaoling

样品号	岩性	成因类型	矿物	温度/℃	
				起爆	最高峰
R-01	沉积黄铁矿石	火山沉积	黄铁矿	300	310
D1-06	沉积黄铁矿石	火山沉积	黄铁矿	275	300
R1-03	脉状黄铁矿石	叠加改造	黄铁矿	350	360
+120-4	块状黄铁矿石	叠加改造	黄铁矿	300	340
R1-06	硅化脉	火山热液	黄铁矿	300	330

6.5 成矿机制

(1) 龙桥铁矿位于庐枞火山盆地边缘, 是一个基底具有不均衡性的断陷火山岩盆地, 盆地的主干断裂呈北北东向, 受制于郯庐断裂和长江断裂, 具有剪切性质。控岩控矿构造为区域性挤压压力场下的张扭性构造。

矿区的侵入岩主要有正长岩类 (石英正长岩), 全岩同位素年龄 95.8 ~ 99.9 Ma, 属燕山晚期侵入。矿区外围有燕山早期闪长玢岩 (黄屯岩体)。正长岩多呈岩株状, 局部为岩枝状, 与成矿关系密切。物探资料反映盆地下部有浅部岩浆房, 在其侵位过程中, 基底沉积岩受到岩浆同化, 矿源层受到热变质后菱铁矿分解置换成磁铁矿, 后期岩浆侵入体随热液叠加改造。

(2) 含矿层的地球化学特征

经灰岩中硼含量的分析对比, 微量元素硼在海相沉积物中的反应比较敏感。将龙桥铁矿的灰岩硼含量与南京石膏矿的灰岩及高淳蛇山中侏罗统灰岩的硼含量进行对比。龙桥铁矿的灰岩与南京石膏矿的灰岩均属高硼含量, 与现代海相沉积物相近, 而高淳蛇山中侏罗统灰岩为低硼含量, 属非海相沉积物。

周冲村组碳酸盐岩中含有较高的有机质 (0.15 %), 龙桥矿区含矿层位中的有机炭含量 (0.14 % ~ 0.05 %) 与南京地区、巢湖地区周冲村组有机炭含量接近且变化较大。

龙桥矿区碳酸盐岩地层中的铜、铅、锌含量变化较大, 与长江中下游其他地区的相应中三叠世地

层中的铜、铅、锌丰度值对比,共同点是其在白云质岩石中的丰度值比灰岩中的高,普遍高于全球碳酸盐岩中的含量。

(3) 含矿层位的时代

从含矿层位的展布与区域构造的关系来分析,龙桥矿区位于庐枞火山盆地边缘,含矿地层为火山岩盆地的基底地层,其展布既受基底地层的区域构造控制,又受火山岩盆地的构造影响。本矿区成矿作用经历了3个阶段的演化,第一阶段开始于中三叠世东马鞍山期(周冲村期)萨布哈-泻湖相沉积环境,主要形成菱铁矿-磁铁矿-碳酸盐岩建造,其次是赤铁矿-碎屑岩建造,属于沉积作用(I级阶)。第二阶段发生于燕山期岩浆岩侵位时期,含矿层位受到热变质作用,形成类砂卡岩、角岩,矿源层中的菱铁矿被置换交代成磁铁矿,形成磁铁矿-类砂卡岩、角岩建造(II阶段)。随后,燕山晚期正长岩类侵入,形成热液叠加改造,最终形成磁铁矿-砂卡岩建造(III阶段)。

(4) 成矿作用阶段

小岭硫铁矿的成矿机制可能与海底火山、次火山作用引起的热卤水对流循环有关。火山爆发-喷溢-沉积作用形成砖桥组下段第一韵律层火山碎屑堆积物,同时在火山堆积期山间凹陷水盆地中,静水还原环境条件下形成与地层产状基本一致的似层状硫铁矿初始矿化层。随后海底火山岩浆活动产生的巨大热能,在火山机构或次火山岩体附近,引起热水对流循环,因为地表卤水向下渗透,与火山岩类发生水-岩交换反应。热卤水中丰富的 Na^+ 及部分 K^+ 形成大量钠化及钾化蚀变,析出的铁与卤水中 S_2^{2-} 等形成稳定络合物,随着对流循环的持续进行,金属物质浓度越来越大,形成热卤水,最终发生海相沉淀,或者对初始矿化层进一步充填交代而成矿^[5]。

由表6可见,小岭地区不同成因类型的黄铁矿只有沉积凝灰岩矿石中黄铁矿Ni/Co比为1.09,其余皆为0.125~0.400,平均值0.238, Ni/Co<1说明矿化物质来源为火成岩,而不是沉积岩。其Sr/Ba比值除了矿化硅化矿石和沉凝灰岩矿石分别为505.4和25.2外,其余皆为0.193~1.27,平均值0.628,也说明Ba的供应主要来自于水热活动,与火山有区别。综上所述,何家小岭硫铁矿床不是单一火山岩浆作用的产物,而是内、外生条件综合

作用的产物。火山、次火山岩浆活动提供了强大热能及金属物质来源,地表卤水盆地提供矿液的水源以及萃取、富集和搬运金属元素的大量碱金属离子和络阴离子。两者在时、空上的有机结合,形成了热卤水对流循环成矿体系,该体系的有效运行才最终形成规模巨大的矿床^[5]。

沙溪斑岩铜矿成矿岩体中富碱、钠、轻稀土和大离子亲石元素,并具较低的铍同位素初始比值($I_{\text{sr}}=0.7058$),为壳幔混源岩浆演化分异的产物。矿床的蚀变和矿化分带模式与闪长岩模式相似。成矿流体具较高的含盐度, CO_2 、 Ca^{2+} 、Na和 Cl^- 组分高。主成矿期包裹体均一温度为 $280\text{ }^\circ\text{C}\sim 420\text{ }^\circ\text{C}$,成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $3.51\text{ }^\circ\text{‰}\sim 5.52\text{ }^\circ\text{‰}$, δD 值为 $82.4\text{ }^\circ\text{‰}\sim -59.8\text{ }^\circ\text{‰}$,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.3\text{ }^\circ\text{‰}\sim -2.49\text{ }^\circ\text{‰}$,包裹体中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-2.66\text{ }^\circ\text{‰}\sim -6.53\text{ }^\circ\text{‰}$,同位素资料显示沙溪斑岩铜矿床成矿热液及成矿物质主要来自于岩浆体系^[12]。

(5) 演化模式

① 沉积成矿阶段:中三叠世开始(220~200 Ma),本区整体上升,海平面急剧下降,海底地貌复杂化,海水流动受限制,局限台地上的微环境发生分异,呈萨布哈-泻湖环境的沉积。由泥、微晶灰岩-微晶白云岩、去膏化白云岩、盐溶角砾岩-石膏-白云质灰岩和泥晶灰岩组成一级韵律沉积。古陆抬升后,剥蚀加剧,供应海水的金属离子浓度增大,在萨布哈-泻湖晚期阶段,水体中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度增大,蓄集到一定浓度后,破坏了与泥晶间的平衡系统而发生交代作用,形成菱铁矿、铁白云石及磁铁矿,沉积了菱铁矿-磁铁矿-碳酸盐岩建造,形成了龙桥铁矿的矿源层,随着氧化还原条件的变化,在外围分布有铅-锌矿层(岳山)、硫铁矿层(黄屯)。② 热变质成矿作用阶段:晚侏罗世到早白垩世(160~135 Ma)是本区火山岩浆作用的主要活动期,岩浆房的高位上升产生强大的热能,也影响到火山盆地边缘的地层,由于地温梯度剧增,引起了本区矿源层的热变质作用,使菱铁矿分解或置换成磁铁矿(温度 $>275\text{ }^\circ\text{C}$),钙质、泥质岩石产生类砂卡岩、角岩。矿化较前期有所集中。③ 热液叠加改造成矿作用阶段:燕山期晚期(135~100 Ma),伴随正长岩类的高位侵入,使火山盆地边缘的中三叠世含碳酸盐岩与之直接接触,形成接触变质和岩浆期后热液的叠加,在原矿源层

的基础上进一步富集形成了矽卡岩—磁铁矿建造。由于含矿层位是含膏蒸发岩系,富含 Ca、Mg、SO₄、Na、K、Cl、F、CO₂等,岩浆入侵同化膏盐地层过程中,使碱性组分和挥发组分增加,加速岩浆分异使岩浆期后气液浓集,有利于金属元素的分离、迁移和叠加富集^[14]。

表 6 何家小岭矿床不同成因类型黄铁矿 Sr/Ba 和 Ni/Co 比值^[3]

Table 6 Sr/Ba and Ni/Co ratios of pyrite with different geneses in Heji Xiaoling

	Sr/Ba	Ni/Co
沉积黄铁矿矿石	0.193	0.135
沉积凝灰岩矿石	1.27	1.09
矿化粗安斑岩	1.00	0.155
沉凝灰岩矿石	25.2	0.333
脉状黄铁矿矿石	0.149	0.400
矿化硅化脉石	505.4	0.165

6.6 找矿地质前提、标志及找矿方向

(1) 找矿地质前提、标志

岩侵型火山隆起、几组断裂交汇地段、角砾岩筒及次火山岩岩体接触带等构造部位是硫铁矿重要的找矿地质前提。

凝灰岩、火山角砾岩、角砾凝灰岩等粗安质火山碎屑岩及前火山岩系地层中的泥灰岩、钙质粉砂岩是有利的成矿围岩。

砖桥旋回和龙门院旋回中的中偏基性贫硅富碱的粗安玢岩是寻找硫矿的岩浆岩线索。

赋矿层位除砖桥组和龙门院组外,火山岩系基底,即侏罗系中统罗岭组、下统磨山组及三叠系也有较好的前景。

蚀变分带与矿化在空间、时间上密切相关,运用蚀变组合规律和蚀变分带,是寻找硫铁矿的有效方法之一。

与中基性火山—次火山活动有关的黄铁矿矿床,与磁铁矿、赤铁矿紧密伴生或共生,具有清楚的成矿分带,黄铁矿矿体产于上部或边部,构成铁矿的外壳。

综合物探异常的特征和分布情况,是寻找硫铁矿床的重要线索。重力、激电、电阻率异常的吻合处往往是寻找硫铁矿的有利部位。地勘工作已证

实,硫铁矿所产生的重力异常具有强度大、梯度大的特点,在重力布伽异常平面图上形成封闭的局部异常或等值线发生明显扭曲,在高次导数平面图上均形成孤立的封闭异常。激电异常也是预测硫化矿床较重要的依据,在杂乱的异常中局部出现较规则的异常,可能为深部矿体的叠加所致^[7]。

(2) 找矿方向

寨基山—大山岭—大公山—龙门院—黄屯—岳山一带,矿山范围广、矿床多、局部重力异常多。找矿的重点一是在已知矿床的边部和深部,扩大矿区储量;二是在已知矿床的中间地带、盆地的边缘及隆起区与拗陷区的交接部位找寻新的矿床。

大包庄—矾母山—双树井一带。

米家庄—毛竹园—汪家院—上龙山一带^[7]。

7 结论

(1) 庐枞地区具有较大找矿远景的靶区有:

① 沙溪铜(金)找矿靶区;② 清水塘—岳山铁、锌找矿靶区;③ 井边—巴家滩铜矿找矿靶区。虽然泥河、罗河的详细开采地质仍然处于探索阶段,应对泥河、罗河及龙桥等大型超亿吨铁矿外围进行勘探,以达到建立 20~25 亿 t 大型钢铁基地的主要目标。

(2) 叠加改造成因、火山热液成因的黄铁矿,其 δ³⁴S 值明显增加,但是增加的值低于同一构造区深埋的罗河铁矿的 δ³⁴S 值(罗河铁矿的 δ³⁴S 最大值达 15‰~18‰,而小岭地区 δ³⁴S 最大值仅为 6.24‰),说明小岭硫铁矿的硫主要为深源的,并在向上运移过程中可能混染了少量地壳中的硫。

(3) 庐枞地区在早白垩世(双庙—浮山旋回火山活动期)未形成重要的矿床类型,与水下热液活动有关的热泉沉积型矿源层或矿胚,均出现于断堑或火山沉陷的主要阶段。与玢岩铁矿有关的特殊含矿岩浆或岩浆热液主要形成于复活—隆起阶段,与从深部补充上升的岩浆有关,脉状铜矿或铜—金矿均形成于主要抬升阶段的早期,处于大的火山岩浆—构造旋回结束期,在区域地热梯度减少、地壳上部开始抬升、断裂—裂隙系统呈引张状态的地质环境下,这类浅成低温热液矿床形成以后,又遭受进一步剥蚀,使其上部矿化难以保存。所以今后应注意后期热液叠加改造型铁铜矿床的寻找。

参考文献:

- [1] 姚书振. 长江中下游铁、铜等成矿规律及隐伏矿床预测研究成果 [J]. 地质科技情报, 1990, 19 (4): 100, 101.
YAO Shu-zhen. Mineralization rule and hidden deposit prediction research "achievement of the Yangtze river middle and lower division" [J]. Geological Science and Technology Information, 1990, 19 (4): 100, 101.
- [2] 吴明安, 侯明金, 赵文广. 安徽省庐枞地区成矿规律及找矿方向 [J]. 资源调查与环境, 2007, 28 (4): 269-277.
WU Ming-an, HOU Ming-jin, ZHAO Wen-guang. Resources survey & environment, mineralization regularity and exploration direction in Luzong area, Anhui [J]. Resources Survey and Environment, 2007, 28 (4): 269-277.
- [3] 吴长年, 任启江, 阮惠础, 等. 安徽庐枞盆地何家小岭黄铁矿床特征和成因研究 [J]. 大地构造与成矿学, 1993, 17 (3): 229-237.
WU Chang-nian, REN Qi-jiang, RUAN Hui-chu, et al. Pyrite deposit of the Hejia-Xiaoling mine, Lujiang-Zongyang Basin, Anhui Province: characteristics and genesis [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1993, 17 (3): 229-237.
- [4] 张艳, 王璞珺, 程日辉, 等. 合肥盆地上侏罗统毛坦厂组火山岩地球化学特征及其对盆地性质的指示作用 [J]. 世界地质, 2006, 25 (3): 237-244.
ZHANG Yan, WANG Pu-jun, CHENG Ri-hui, et al. Geochemistry of Late Jurassic volcanic rocks of Maotanchang Formation and its indication to Hefei Basin [J]. Global Geology, 2006, 25 (3): 237-244.
- [5] 杜建国, 戴圣潜, 莫宣学, 等. 安徽沿江地区燕山期火山岩成岩成矿地质背景 [J]. 地质前缘, 2003, 10 (4): 551-560.
DU Jian-guo, DAI Sheng-qian, MO Xuan-xue, et al. Petrogenic and metallogenic settings of area along Yangtze river in Yanshanian, Anhui Province [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (4): 551-560.
- [6] 刘同庆, 高尔根, 齐文凯, 等. 安徽沿江地区地壳结构三维空间特征的探讨 [J]. 地质与勘探, 1999, 35 (6): 48-51.
LIU Tong-qing, GAO Er-gen, QI Wen-kai, et al. On the three-dimension characteristics of crustal structure of the Reparian sites along Yangtze river in Anhui Province [J]. Geology and Prospecting, 1999, 35 (6): 48-51.
- [7] 杨晓勇. 庐断断裂带南段沙溪含铜斑岩体的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及意义 [J]. 矿物岩石, 2006, 26 (2): 52-56.
YANG Xiao-yong. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and geological significance on the Cu-bearing porphyrite of Shaxi from southern Tanlu fault belt [J]. Journal of Petrology and Mineralogy, 2006, 26 (2): 52-56.
- [8] 任启江, 王德滋, 刘孝善, 等. 安徽庐枞地区巴家滩和矾山-石马滩岩体的时代和岩浆物质来源 [J]. 科学通报, 1991 (10): 771-773.
REN Qi-jiang, WANG De-zi, LIU Xiao-shan, et al. The age and magma material resource of the Bajiatan rock body and Fanshan-Shimatan rock body in the Luzong area of Anhui [J]. Science Bulletin, 1991 (10): 771-773.
- [9] 孙冶东, 杨荣勇, 任启江, 等. 安徽庐枞中生代火山岩系的特征及其形成的构造背景 [J]. 岩石学报, 1994, 10 (1): 94-103.
SUN Ye-dong, YANG Rong-yong, REN Qi-jiang, et al. Discussion on the characteristics and tectonic setting of the Mesozoic volcanic sequences in Lujiang-Zongyang area [J]. Acta Petrologica Sinica, 1994, 10 (1): 94-103.
- [10] 孙冶东, 刘孝善, 褚立明. 安徽庐枞地区正长岩类稳定同位素研究 [J]. 岩石学报, 1991, 7 (3): 95-97.
SUN Ye-dong, LIU Xiao-shan, CHU Li-ming. The stable isotope study of syenitoid in Lujiang-Zongyang area, Anhui Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 1991, 7 (3): 95-97.
- [11] 徐兆文, 徐文艺, 邱检生, 等. 与沙溪斑岩铜(金)矿床有关的石英闪长斑岩地质地球化学特征及形成时代研究 [J]. 地质与勘探, 2000, 36 (4): 36-40.
XU Zhao-wen, XU Wen-yi, QIU Jian-sheng, et al. An investigation of the age and geological-geochemical characteristics of quartz diorite porphyry in Shaxi porphyry copper (gold) deposit [J]. Geology and Exploration, 2000, 36 (4): 36-40.
- [12] Gregg W. Morrison, stratigraphic control of Cu-Fe skarn ore distribution and genesis at Craigmont, British Columbia [J]. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Bulletin, 1980, 73 (820): 109-123.
- [13] 倪若水, 吴其初, 汪祥云, 等. 安徽庐江龙桥铁矿层新资料及成矿作用多阶段演化模式 [J]. 地质论评, 1994, 40 (6): 565-575.
NI Ruoshui, WU Qichu, WANG Xiangyun, et al. New data and evolutionary model of polymetallogenesis for the Longqiao iron deposit, Lujiang, Anhui [J]. Geological Review, 1994, 40 (6): 565-575.
- [14] 刘昌涛. 安徽庐枞盆地硫铁矿床地质特征及控矿因素 [J]. 化工地质, 1994, 16 (3): 163-171.
LIU Chang-tao. Geological characters and ore-controlling factors of the pyrite deposits in Luzong Basin, Anhui [J]. Geological of Chemical Minerals, 1994, 16 (3): 163-171.