

文章编号:1005-6157(2011)02-0119-12

安徽铜陵矿集区矿床勘查与地质研究新进展

徐晓春¹, 楼金伟^{1, 2}, 梁建峰¹, 肖秋香¹, 张赞赞¹, 刘启能¹, 王 萍¹

(1 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2安徽省公益性地质调查管理中心, 安徽 合肥 230001)

摘要: 文章在概略综述铜陵矿集区地质背景的基础上, 着重介绍了近年来该区矿床勘查的新成果和地质科学研究的新进展, 提出了尚待进一步加强研究的科学问题, 旨在为该区今后找矿实践和理论研究提供有益参考和启示。

关键词: 新进展; 矿床勘查; 地质研究; 成矿作用; 岩浆作用; 铜陵矿集区

中图分类号: P624; P618

献标志码: A

0 引言

安徽铜陵是长江中下游成矿带中的一个重要的铜金多金属矿集区, 面积约1000km², 周边被4条深大断裂围限而呈近似菱形, 南北分别以东西向隐伏断裂为界, 东西分别以北北东向断裂带与中-新生代盆地相邻。该区成矿地质条件优越, 找矿潜力巨大, 很长时期内一直被列为国家的重点找矿区之一。近年来, 随着国家危机矿山接替资源找矿和新一轮国土资源大调查等项目的实施, 矿床勘查取得了新的突破。与此同时, 该区成矿作用及相关的岩浆作用等基础地质研究亦取得了新的进展。本文着重介绍了近年来该区矿床勘查取得的新发现和科学研究取得的新认识, 并针对该区矿床勘查和成矿理论研究现状, 提出了尚待进一步深入研究的科学问题, 以期为该区找矿实践和理论研究提供有益的参考和启示。

1 区域地质背景

铜陵矿集区大地构造上位于扬子克拉通北缘与华北克拉通的结合部位, 大别造山带前陆盆地中的次级隆起区。唐永成等(1998)认为该区属下扬子台坳中的贵池—繁昌凹断褶皱束的一部分。铜陵矿集区大地构造演化经历了活动(基底形成) - 稳定(盖层发育) - 再活动(板内变形)3个发展演化阶

段(Ma and Ge, 1989; 王鸿祯等, 1996), 分别为前震旦纪基底形成发展阶段、震旦纪一早三叠世稳定的盖层发育阶段、中一晚三叠世至新生代碰撞造山及造山后板内变形阶段。

铜陵矿集区出露的地层主要为志留系至第四系, 累计厚度在4500m以上。志留系主要为深海—浅海相的页岩和砂岩; 泥盆系中统和下统缺失, 上统五通组为内陆盆地相的砂岩、细砂岩和粉砂岩; 二叠系至三叠系下统上部南陵湖组, 除下二叠统栖霞组下部及上二叠统龙潭组为海陆交互相含煤砂页岩外, 其余均为海相灰岩、泥质灰岩和硅质岩等; 中三叠统下部东马鞍山组主要为泻湖相的含膏盐白云岩、白云质灰岩夹少量灰岩等; 中三叠统中部月山组至古近纪大通组均为陆相的砾岩、砂岩、细砂岩、粉砂质页岩。

铜陵矿集区岩浆活动强烈, 广泛发育燕山期中酸性侵入岩, 全区出露大小岩体共有76个, 面积有70km², 主要集中分布于铜官山、狮子山、新桥、凤凰山、沙滩角等地区, 受东西向铜陵—戴家汇基底断裂带控制, 空间上构成近东西向的岩浆岩带。侵入岩岩石类型主要有石英二长闪长岩、辉石二长闪长岩、花岗闪长岩和花岗闪长斑岩等。

2 矿床勘查进展

安徽铜陵以铜都著称于世, 铜矿的采冶历史可以上溯到3000多年前的西周时期, 唐宋明清各朝代铜矿的开采和冶炼长盛不衰, 古采坑、老矿窿、

收稿日期: 2011-05-21

作者简介: 徐晓春(1961-), 男, 安徽潜山人, 博士, 教授, 博导, 主要从事矿床学、矿床地球化学教学和研究工作。

古炼渣等遍布铜官山、狮子山、新桥、凤凰山等矿区。近代中国国力衰败,虽有张景明、叶良辅、孟宪民、孙建初、谢家荣等先后在该区开展地质和矿产调查,但矿产资源勘查工作未能深入进行。1938年日寇侵华,铜陵沦陷,日本八幡钢铁所和华中矿业公司在铜官山开采铁矿石,并在老庙基山施工钻孔和开凿平巷,采掘铜矿石(中国矿床发现史·安徽卷编委会,1996)。新中国成立后,铜陵矿集区的矿产资源勘查、开采和冶炼进入了新时代,经过地矿321地质队、冶金812地质队、803地质队、铜陵有色金属公司地质队等单位以及一大批专业技术人员数十年艰苦卓绝的努力,铜陵矿集区现已发现金属矿产地308处,集中分布于铜官山、狮子山、新桥、凤凰山、沙滩脚5个矿田,其中大型矿产地10处,中型矿产地44处,探明铜金属资源量大于 $400 \times 10^4 \text{t}$,金大于100t,还有大量的银、铅、锌、钼、铁等金属资源(吴才来等,2010)。

进入21世纪,随着我国改革开放以来社会经济的快速发展和国力的日渐增强,同时也由于部分矿山资源面临枯竭的现实,国家和地方政府不断加大政策支持、资金投入和工作力度,先后开展了危机矿山接替资源找矿和新一轮国土资源大调查等项目,地质找矿取得一系列重大突破。铜陵矿集区在这一轮找矿勘查中也取得了重大突破和重要进展,在矿集区沙滩脚矿田发现了姚家岭大型锌金多金属矿床,在狮子山矿田发现了胡村南铜钼矿床、长龙山铜硫矿床和刺山金矿床,在铜官山、新桥、凤凰山矿田深部和外围也有新的找矿成果,或发现了新的矿体,或扩大了矿体延伸。其中姚家岭锌金多金属矿床和胡村南铜钼矿床的发现不仅具有重要的社会经济价值,而且具有非常重要的地质理论意义。

2.1 姚家岭锌金多金属矿床

姚家岭锌金多金属矿床位于铜陵矿集区东部的沙滩脚矿田,是近年来在长江中下游铜铁硫金成矿带中新发现的一个大型矿床。该矿床于2002年由安徽省国土资源厅批准立项普查,2004年成功发现厚大的铅、锌、铜矿体。经华东冶金地质勘查局812地质队历时8年的勘查,共施工钻探54孔,投入钻探工作量46289m,控制矿带长1600m、宽500~800m,圈定铜金矿体18个,铅锌银矿体70个,金矿体1个,硫矿体7个,获得金属资源量分别为:锌 $117.41 \times 10^4 \text{t}$,平均品位3.64%;金32t,平均品位5.02g/t;铅 $20.42 \times 10^4 \text{t}$,平均品位2.09%;铜 $13.3 \times 10^4 \text{t}$,平均品位0.89%;银367.07t,平均品位132.8g/t。另有伴生

金19t,伴生银586t,锌和金达大型规模,铅、铜、银均达中型规模(蒋其胜等,2008)。

姚家岭矿床位于铜陵隆起与繁昌拗陷的交界处。矿区褶皱构造为戴公山背斜,北西翼地层倒转;断裂构造发育,主要有北东向、北西向和近南北向3组。矿区出露地层主要为志留系上统茅山组、泥盆系上统五通组、石炭系中上统船山组、二叠系下统栖霞组、三叠系下统殷坑组和和龙山组、白垩系下统蝌蚪山组、上统宣南组。志留系至泥盆系五通组是以海退为特征的半深海相笔石页岩和内陆盆地相碎屑岩,石炭系黄龙组至三叠系铜头尖组为滨海-浅海相碳酸盐岩交互半深海硅质岩和海陆交互碎屑岩,白垩系为陆相碎屑岩夹火山碎屑岩。矿区岩浆岩发育,出露沙滩脚花岗闪长岩体和小青塘花岗闪长斑岩体及花岗斑岩脉,北部出露大片白垩系蝌蚪山旋回流纹岩、安山岩和玄武岩。沙滩脚花岗闪长岩体位于矿区西部,平面上呈半圆状,面积约 5.5km^2 ,岩体蚀变较强,周边形成多处小型铜矿点,伴生金、银等。小青塘岩体平面上呈向南微突出的月牙状,长约2km,宽300~500m,面积约 0.75km^2 。岩体南缘接触带倾向南,倾角较陡,北缘接触带倾向北,倾角略缓,超覆在二叠系下统栖霞灰岩之上。岩石发育较强的高岭石化、钾长石化、绿泥石化和黄铁矿化,地表见“火烧皮”现象。

姚家岭矿床即与小青塘花岗闪长斑岩密切相关,矿床赋存于小青塘花岗闪长斑体内,矿体产于隐爆角砾岩带中的角砾状斑岩和栖霞组大理岩捕虏体上下接触带及层间裂隙中。矿床围岩蚀变主要有硅化、高岭石化、碳酸盐化、绿泥石化、阳起石化等。矿体主要呈透镜状和脉状,矿石具半自形-他形粒状结构,块状、稠密浸染状和稀疏浸染状构造。矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿,少量磁铁矿,金主要以他形粒状和树枝状自然金分布于黄铁矿和黄铜矿的晶隙中。脉石矿物主要有石英、方解石,其次为长石、阳起石等。根据矿床地质特征,蒋其胜等(2008)认为该矿床是与燕山期斑岩侵入体密切相关的浅成热液充填交代-斑岩型矿床,并认为该矿床的发现突破了铜陵矿集区矽卡岩型、层控叠加改造型两个传统的成矿模式。

2.2 胡村南铜钼矿床

胡村南铜钼矿床位于狮子山矿田胡村铜矿床的南部,构造上处在青山背斜北东段的南东翼或朱村向斜的北西翼。矿区发育近南北向、北北西向和北北东向断裂,平面上呈“Y”字形,控制了胡村花岗

闪长岩体和陈家冲花岗闪长岩体的分布。胡村花岗闪长岩体长700m,宽500m,出露面积 0.35km^2 ,呈不规则小岩株状由南向北侵入,南深北浅,向北逐渐过渡为花岗闪长斑岩,边缘有不规则岩枝伸入围岩,锆石SHRIMP U-Pb年龄为 $140.0\pm 2.6\text{Ma}$ (徐晓春等,2008a)和 $141.6\pm 3.5\text{Ma}$ (吴才来等,2008)。陈家冲岩体位于胡村岩体南东400m处,出露面积约为 0.15km^2 ,钻孔揭露其在深部与胡村岩体贯通。地表出露地层为三叠系中统分水岭组,由于岩浆侵入,地层中的石灰岩变质成大理岩,钙质及泥质页岩、粉砂质岩石变质成角岩。岩体周边及其围岩发育不同程度的接触交代变质作用。热液蚀变以硅化、绿泥石化、碳酸盐化、绿帘石化为主,其次为黄铁矿化、赤铁矿化、高岭石化。

胡村铜矿床是早先业已发现的铜矿床,发育于地表以下300~600m深度,为矽卡岩型。矿体赋存于岩体与三叠系下统和龙山组和南陵湖组围岩的接触带上,剖面上呈不规则透镜状或凹凸不平的薄板状,平面上为不完整的环状。矿体在岩体接触带的弧形转弯处以及剖面上陡缓变化处常常厚度增大,铜品位变富。主矿体长400m,延深约400m。自岩体向外依次发育矽卡岩化花岗闪长岩→内矽卡岩→块状矽卡岩→层状矽卡岩→大理岩或角岩。热液蚀变主要有矽卡岩化、绿泥石化、碳酸盐化、绿帘石化。主要矿石矿物有黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿,次为辉钼矿、闪锌矿、方铅矿、白铁矿,少量毒砂、金银矿、辉铋矿、蓝辉铜矿、穆磁铁矿等。铜金属资源量 $7.56\times 10^4\text{t}$,平均品位1.13%,伴生元素有S、Au、Ag、Co、Mo、Bi、Se、Te、In和Ga。矿石具自形-半自形或他形粒状结构和交代结构,脉状、浸染状构造。

胡村南铜钼矿床隐伏于地表以下1000m深度以下,主要有发育于二叠系栖霞组地层中和发育于胡村花岗闪长岩体及其接触带中的两类矿体,有些层间矿体与接触带矿体在剖面上连成一体。根据初步勘探结果,发育于二叠系栖霞组地层中的矿体形态较简单,呈层状或似层状产出,厚度较稳定,具收缩、膨胀、分枝现象,矿化以铜为主,部分层位发育钼矿化。矿体产状与围岩产状基本一致,走向 30° ,倾向 120° ,倾角 $20^\circ\sim 35^\circ$ 。初步控制矿体长700m,宽400m。矿体赋存标高-1060~-1550m(安徽省地质矿产勘查局321地质队,2009)。矿化蚀变类型和矿石矿物组合与北侧浅部的胡村铜矿床基本一致。

发育于花岗闪长岩体内部及其接触带中的矿体在不同部位矿化表现不同:岩体南西侧和北东侧邻近接触带处以铜矿化为主,往北东方向的岩体内部逐渐转为单一钼矿化。矿体呈透镜状,走向北东 30° ,倾向南东,倾角 $40^\circ\sim 55^\circ$ 。现已控制走向长度700m,埋藏标高-840~-1750m。铜矿体见矿厚度6.30~19.40m,品位 $0.54\%\sim 0.69\%$;铜矿化主要呈细粒浸染状产出,矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿等。钼矿体最大见矿厚度116.71m,品位 $0.069\%\sim 0.107\%$ (安徽省地质矿产勘查局321地质队,2009)。钼矿化主要呈细脉浸染状产出,并均与细粒石英一起构成细脉和网脉穿插于花岗闪长岩中,有时石英辉钼矿脉在钾长石脉中呈梳状生长。脉体较细,一般1~5mm,个别1~2cm。矿石矿物主要为辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿。赋矿花岗闪长岩体发育钾长石化、黑云母化、云英岩化、硅化、绢云母化、绿帘石化等,分带不明显。

综上所述,胡村南铜钼矿床发育于花岗闪长岩体内及其接触带围岩中,成矿与花岗闪长岩具有密切的成因联系。矿床在围岩地层及接触带中发育矽卡岩类蚀变矿物组合,产出矽卡岩型矿石,而在花岗闪长岩体中发育斑岩型蚀变和矿化,产出细脉浸染状矿石。因此,该矿床属于斑岩-矽卡岩型矿床(徐晓春等,2011a)。

3 地质研究进展

铜陵矿集区是长江中下游成矿带中成矿地质条件优越、找矿潜力巨大的铜金多金属矿集区,对于该区成矿地质背景、控矿地质因素、成矿作用机制、矿床成因类型等一直是地质学家尤其是矿床地质学家们关注的热点和重点。近二十多年的科学研究日益深入,成果亦日益丰富。

3.1 深部结构与浅部构造

根据地质和地球物理资料,铜陵矿集区所处下扬子地区的区域壳幔岩石圈具有明显的层圈结构,目前倾向于划分为6大构造层,自下而上依次为岩石圈地幔、下地壳硅镁层、中地壳深变质岩系、上地壳浅变质岩系、海相古生界-下三叠统和陆相中-新生界,其间有6个重要的滑移(拆离)面和3个均衡调节层(陈沪生,1988,1993;翟裕生等,1992,1999;唐永成等,1998)。区域航磁和重力等地球物理资料显示,现在的大别山、幕阜山和皖南等地对应于莫霍面沉降区,表现为地壳的明显增厚,最厚达36.5km,而铜陵、九瑞、鄂东南等沿江构

造-岩浆-成矿带对应于莫霍面隆升区,最小深度为30~31km。常印佛等(1991)、唐永成等(1998)认为安徽沿江地区壳下存在一条平面上作喇叭形的地幔隆起带,其展布范围和延伸方向与沿江构造岩浆岩带基本一致。吴言昌等(1999)认为,虽然该地幔隆起带主要是现代地球物理场的反映,但这种两两对应的关系不能完全视为偶然的巧合,而是本区地质发展和演变的产物。这一地幔隆起带与区域构造-岩浆-成矿带的基本吻合反映了其可能是区内成岩成矿带形成的主导控制因素。常印佛等(1996)认为扬子克拉通与大别山前陆褶断带具有统一的盖层,但具有两个性质不同的基底,分别为江南型和江北型(董树文等,1993;邢凤鸣等,1993;涂荫玖等,2001),其分界线可能位于铜陵隆起的下方。深地震反射探测、高分辨率地震反射探测和首波层析成像研究表明,铜陵矿集区地壳总体上呈双层结构特征(吕庆田等,2004),下地壳表现为“层状”强反射,上地壳则为“透明”反射,“层状”强反射可能是岩浆强烈底侵作用的结果。反射叠加剖面显示以丁桥镇-戴家汇断裂为界,南北具有不同的地壳结构和变形特征以及不同的地壳构造活动特征,反映扬子克拉通与前陆褶断带在盖层形成之前存在不同的演化历史和地壳结构。

铜陵矿集区发育不同期次、不同性质和不同方向的构造,它们相互复合成复杂的网络状构造系统(常印佛等,1991;翟裕生等,1992;刘文灿,1996;李锦轶,2001;李进文,2004;邓军等,2006;Deng et al., 2011)。这个系统主要分为2个层次:一是基底断裂,二是盖层构造。基底断裂主要有近东西向、北东向和南北向3组。这些断裂一般认为经历了长期的演化历史,印支期或印支期前即已形成,中生代又有活动。盖层构造以印支期“S”形北东向展布的褶皱构造为主(李东旭等,1989),同时伴有强烈的层间滑脱构造(储国正等,1991;邓军等,2004,2006),对岩浆就位与矿化分布具有重要的控制作用,而燕山期近东西向、北东向、近南北向和北西向断裂构造规模一般较小。宏观上区内近东西向和南北向基底构造及其与盖层构造的交汇部位控制着成岩成矿作用,尤其以近东西向的铜陵-戴家汇隐伏断裂带最为重要,直接控制了该区岩浆活动和成矿作用,矿集区内各类侵入岩体和几个较大的铜金矿田或矿床如铜官山、新桥、狮子山等均位于该构造-岩浆带上的格子构造交汇点及其附近。

3.2 岩浆作用与深部过程

铜陵矿集区广泛发育燕山期侵入岩。区域上岩体分布与矿田分布一致,沿铜陵-戴家汇隐伏断裂成群展布,形成一条近东西向宽约10km、长40km的构造-岩浆-成矿带(常印佛等,1991;吴才来等,2003)。单个岩体的空间展布方向大致与区域构造线一致,呈北东-北北东向分布,地表出露形态多呈椭圆形或长椭圆形,长轴方向主要为北东向。岩体主要呈小岩株、岩墙状,其次为岩床、岩枝及岩脉状侵入于地层之中,边部常顺层贯入围岩。岩体规模多为小型,单个岩体出露面积一般为0.5~5km²,大者达10km²,小者不到0.1km²。铜陵矿集区的侵入体空间分带明显:浅部(-1000m以上)构成一个浅成-超浅成相“树枝状”或网络状岩墙-岩枝系,中深部(-1000~-2000m)岩体主要呈东西向、南北向和北东向展布,深部(-2000m以下)据航磁异常资料推测岩体连成一片,即在铜陵隆起下面可能存在一个巨大的中酸性岩基(常印佛等,1991;储国正,2003)。区内侵入岩的岩石类型多样,以中酸性为主,岩性主要为石英二长闪长岩($\delta \eta o$)、石英闪长岩(δo)、花岗闪长岩($\gamma \delta$)、花岗闪长斑岩($\gamma \delta \pi$)、二长花岗斑岩($\eta \gamma \pi$)等;也有一些中基性侵入体,岩性为辉石二长闪长岩($\delta \eta v$)、辉长岩(v)和辉长辉绿岩($v \beta$)等(邢凤鸣等,1996,1999;唐永成等,1998;秦新龙,2007),也有学者将部分侵入体命名为石英二长岩(ηo)、石英二长斑岩($\eta o \pi$)、辉石二长岩(ηv)、二长岩(η)(吴才来等,2003;吴淦国等,2008)。部分侵入体中发育辉长质岩石包体及辉石和角闪石巨晶及其堆积岩包体(周珣若等,1993;杜杨松等,1997;2004a, b)。

包括铜陵矿集区在内的长江中下游成矿带燕山期岩浆岩为扬子式花岗岩(谢家荣,1963)、同熔系列花岗岩(徐克勤等,1982;毛建仁等,1990;常印佛等,1991),也有学者划归I型或磁铁矿型花岗质岩类(Pei et al., 1995; Xie et al., 2008)。多数学者认为矿集区内的侵入岩属高钾钙碱性系列(邢凤鸣等,1996;唐永成等,1998;徐晓春等,2009),也有学者将区内侵入岩划分为高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列(或橄榄玄粗质系列)2类(周珣若等,1993;王强等,2003;吴才来等,2003;2010)。近年来还有研究者认为铜陵地区存在埃达克质的岩石(张旗等,2001)。

对于岩浆岩的形成时代,前人在上个世纪80年

代及以前应用包括K-Ar、Rb-Sr和U-Pb等方法获得同位素年龄为87~185.8Ma,最老年龄和最轻年龄相差约100Ma,且部分分析结果未给出原始分析数据和测试误差,个别样品甚至具体测试对象也不很明确,使人难以对数据的可靠性进行判断。随后的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年方法获得了部分侵入体的同位素年龄在135.8~139.8Ma之间(Chen et al., 1985; 周泰禧等, 1987; 吴才来等, 1996),但这些年龄应解释为侵入体冷却至角闪石或黑云母对Ar封闭时的年龄。近几年来广泛采用了高精度SHRIMP和LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素年代学方法获得侵入岩的年龄为132~152Ma,主要集中于135~146Ma之间(徐夕生等, 2004; 王彦斌等, 2004a, b, c; Di et al., 2005; 张达等, 2006; 杜杨松, 2007; 杨小男等, 2007; 吴才来等, 2008, 2010; 谢建成等, 2008; 徐晓春等, 2008b; 吴淦国等, 2008; 瞿泓滢等, 2010)。锆石SHRIMP定年结果还表明,同一个岩体中不同的锆石具有不同的年龄,年龄相差一般为10Ma左右(吴才来等, 2008)。因此,铜陵矿集区岩浆活动时代为晚侏罗世,岩浆活动持续时间为10~15Ma。

对于矿田岩浆岩的时序及演化,常印佛等(1991)研究认为狮子山矿田岩浆岩为逆演化序列。储国正(2003)根据狮子山矿田岩浆岩体野外接触关系,认为其相互穿插,难分早晚。李进文(2004)研究认为,狮子山矿田岩浆岩的侵位时序由早到晚为:辉石二长闪长岩→石英二长闪长岩→花岗闪长岩,即所谓的正常演化序列。吴淦国等(2008)根据SHRIMP锆石U-Pb年龄分析结果认为,铜陵地区侵入岩从老至新依次出现石英二长斑岩→辉石二长岩→二长岩→花岗闪长岩→石英二长闪长岩,不同岩性的侵入岩具不同的结晶年龄可能说明了铜陵地区侵入岩经历了深部岩浆的演化过程。徐晓春等(2008a)根据同位素地质年代学结合岩石主量元素和微量元素地球化学研究认为,偏酸性的花岗闪长岩和偏基性岩的辉石二长闪长岩侵位较早,相对中性的石英二长闪长岩形成较晚,岩浆演化不同于鲍文反应序列,其成因可能是岩浆聚集到岩浆房中以后,在滞留的过程中发生了一定程度的分离结晶作用(亦或伴有熔离分异作用),但仍呈流体状态、尚未固结,成分上显示了一定的带状分布,并先后与构造运动引发的裂隙相沟通,随机地上升侵位冷凝结晶所致。同位素年代学研究也显示本区燕山期地壳深部热活动频繁,表现在岩浆活动方式是脉动式侵位的(吴才来等, 2008)。

对于岩浆岩的成岩物质来源及形成动力学机制,杨学明等(1988)和杜杨松等(1997)认为属古老下地壳深变质岩熔融形成的花岗岩质岩石,在深部形成深位岩浆房,由于深部岩浆房的不断积聚和分异,在浅部形成浅位岩浆房。常印佛等(1991)认为其原生(始)岩浆来源于上地幔,是上地幔局部熔融产生的。邓晋福等(1992, 2001)、陈江峰等(1993)认为是由幔壳岩浆混合或幔源岩浆经过AFC过程形成的,但古老的地壳物质起了重要的作用。邢凤鸣等(1996)、唐永成等(1998)从Sr-Nd同位素的角度分析也认为本区侵入岩成因属于AFC过程,幔源高钾碱性玄武岩岩浆同化下地壳,同时伴随结晶分异。张旗等(2001)认为该区中生代期间存在加厚的地壳,侵入岩是由古老的扬子下地壳熔融形成的。王强等(2003)认为铜陵地区 $\text{SiO}_2 > 55\%$ 的高钾钙碱性系列岩石与埃达克岩有许多类似地球化学特征,可能由幔源岩浆与玄武质下地壳熔融形成的埃达克质岩浆混合形成,来自地幔的橄榄玄粗质岩浆底侵可能为下地壳熔融提供了热量。狄永军等(2005)认为该区岩浆岩是幔源玄武岩岩浆、正长岩岩浆和花岗岩岩浆3端元岩浆混合形成的。高庚等(2006)认为其为壳幔岩浆混合的产物,成岩物质起源于扬子下地壳与富集岩石圈地幔的部分熔融。锆石阴极发光照片及SHRIMP和LA-ICP-MS同位素年龄分析表明,多数侵入岩中均发育继承性锆石核,说明地壳部分熔融在该区侵入岩形成过程中起了重要作用(吴淦国等, 2008; 杨小男等, 2008; 吴才来等, 2010)。杜杨松等(2010)根据侵入岩中镁铁质团块和角闪石堆积晶、微粒闪长质包体、寄主岩中的辉石和角闪石内的硫化物-氧化物包裹体研究认为,铜陵地区侵入岩的原生岩浆为起源于上地幔到下地壳范围内的碱性玄武质岩浆,随着岩浆上侵及结晶温度和深度的降低,在中-上地壳范围内受到地壳物质混染的程度逐渐增大。综合以上研究观点可见,对于该区侵入岩的成因主要有以下3种认识:(1)由幔壳岩浆混合或幔源岩浆经过AFC过程形成,但古老的地壳物质起了重要的作用;(2)岩石圈地幔部分熔融形成的玄武质岩浆在上升过程中经历了AFC过程,新生地幔物质在岩石中占主导地位;(3)由古老的扬子下地壳熔融形成。

对于岩浆岩成岩构造背景,常印佛等(1991)、唐永成等(1998)强调地幔上隆和长江断裂带的控制作用。翟裕生等(1992)认为该区中

生代位于板内断块岩浆活动带。董树文等(1993)认为大别山前陆挤压环境控制该区的成岩成矿作用。邢凤鸣等(1999)提出该区的成岩成矿构造背景为板内裂谷带。陈衍景等(2004)认为该区的成岩成矿作用发生于华北和扬子陆块碰撞过程中的挤压-伸展转换期。Mao et al.(2006)认为大别造山带的演化造就了长江中下游地区深部近东西向的地幔隆起背景,并对燕山期成岩成矿起控制作用。很多学者认为该区岩浆作用受控于陆内造山、地幔上隆、玄武岩浆底侵及拆沉作用(张旗等, 2001; 王强等, 2003; 狄永军等, 2005)。张国伟等(2011)认为中国东部东西向的陆壳强烈挤压收缩性的陆内造山带显然非为西太平洋板块作用所致,同时也不是同期的鄂霍茨克洋关闭碰撞造山板块作用远程效应所为,可能是非板块动力的陆内中新代华北与华南等不同陆块间长期的从深部到浅层的相互作用的陆内动力学作用所导致。但长期以来很多学者仍然强调古太平洋板块(Izanagi 板块)西向(或北西向)运动对该区的影响(吴利仁等, 1982; Jahn et al., 1990; 邓晋福等, 1992; Maruyama et al., 1997; 杜旭东等, 2000; Zhou and Li, 2000; 张旗等, 2001; 王强等, 2001; 朱光等, 2003; 汪洋等, 2004; 杨晓勇, 2008; Wang et al., 2011)。一些学者分别尝试用多板块汇聚与岩石圈拆沉(董树文等, 2007)、平板(flat-slab)俯冲(Li and Li, 2007)、板片窗(Sun et al., 2007)等模式解释包括铜陵矿集区、长江中下游成矿带乃至整个中国东部的构造-岩浆作用。吴淦国等(2008)认为, T_3 末期扬子陆块与华北陆块完成拼合, 铜陵地区进入新的挤压造山运动期, 即进入了太平洋动力学体系。 J_2-J_3 期间, 随着 Izanagi 板块向欧亚板块之下俯冲, 该区受到的北西向挤压作用, 形成北东向褶皱, 并导致地壳增厚。在地壳下部形成高密度的榴辉岩相岩石, 造成深部岩石圈地幔及下地壳拆沉, 诱使热的软流圈物质上涌, 减压熔融产生的玄武质岩浆, 发生底侵作用, 并引起下地壳受热熔融产生花岗质岩浆, 这些岩浆经过不同的作用过程最终沿深大断裂上侵, 形成不同岩性的侵入岩体。

3.3 成矿作用与成矿模式

铜陵矿集区铜金多金属矿床的成矿物质来源及成矿作用机制已有很多学者开展了大量深入的研究。矿床地质及微量元素、稀土元素、同位素及流体包裹体地球化学研究表明, 岩浆作用是矿床形成的主导控制因素, 铜、金、钼等成矿金属元素有岩

浆和地层两个来源, 但以前者为主, 矿床是岩浆分异热液携带和淋滤围岩而富集而成(黄许陈等, 1994; 王训成等, 2000; 凌其聪, 2002; 储国正, 2003; 田世洪等, 2004; Xu et al., 2006; 陆三明等, 2007)。杜杨松等(1997)、邓晋福(2002)从岩浆岩岩石包体和成矿流体等不同角度进行了研究, 均认为岩浆提供了大部分的成矿物质。秦新龙(2002)通过对花岗闪长岩中的角闪石堆晶研究, 证实了燕山期侵入岩在原始岩浆中已含有一定量的 Cu、S 和 F 等成矿物质。肖新建等(2002)研究发现, 东狮子山隐爆角砾岩型和西狮子山矽卡岩型矿床的成矿流体为高温、高盐度流体, 均来源于岩浆热液, 并且流体的沸腾对成矿起到了重要作用。陆建军等(2003)通过对铜陵冬瓜山铜矿床层状铜矿体中的黄铜矿进行铜的同位素测试, 发现铜来自燕山期的花岗质岩浆系统, 但也认为矿石中的硫可能部分为同生沉积。徐兆文等(2005)通过对冬瓜山矿床石英闪长斑岩中的石英斑晶和矽卡岩矿物中的流体包裹体显微测温及流体氢氧同位素研究认为, 早期矽卡岩的形成可能涉及高温岩浆流体过程。李进文(2006)、徐晓春等(2008b)通过对铜陵矿集区狮子山矿田成矿流体地球化学的系统研究认为成矿流体源自岩浆流体, 经历了从高温、高盐度向中温、中低盐度的持续演化过程, 在演化过程中有一定比例的大气降水或地下水的参与, 降温、减压、流体沸腾是导致流体中巨量成矿金属元素卸载的主要因素。成矿流体中的铜和金以络合物形式存在, 络合物类型和溶解度的差异及其对物理化学条件变化作出的响应不同, 铜在较高温度及偏酸性条件下即开始沉淀, 而金则在较低温度和弱碱性条件下开始沉淀, 因而导致铜和金的时空分离(徐晓春等, 2011b)。

铜陵矿集区的矿床成因问题长期存在争议。郭宗山(1957)、郭文魁(1957, 1963)对铜官山等矿床的研究认为, 这些矿床是与花岗岩有关的矽卡岩-热液矿床。随着沉积地层中的块状硫化物矿体的发现, 海相沉积或火山沉积蒸发成矿的同生成因模式正式提出, 如孟宪民(1963)对该区石炭纪黄龙灰岩底部的层状-似层状矿提出了同生成因观点。徐克勤等(1978)提出海相沉积叠加中生代热液改造的观点。王道华等(1987)提出海底喷流沉积矿床的成因观点。喻钢等(2004)对老鸦岭层状钼矿床进行铅同位素研究表明, 含矿黑色页岩可能具沉积成因, 因而认为老鸦岭钼矿床是同生沉积型

矿床,与燕山期岩浆活动无关。很多学者赞成海西期海底喷流沉积叠加燕山期的岩浆热液改造的成因观点(富士谷等,1977;徐克勤等,1978;顾连兴等,1986a, b;岳文浙等,1993;王文斌等,1994;胡欢等,2001;王训诚等,2002,2007;肖新建等,2002;曾普胜等,2002;陆建军,2003;徐九华等,2004;杨竹森等,2004;李红阳等,2004,2008;Gu et al., 2007),认为除了矽卡岩矿体之外,在泥盆系与石炭系之间以及石炭系、二叠系和三叠系内或其间发育诸多层状和似层状矿体,一些矿床或矿体显示出某些同生的层纹状构造和同生角砾岩,发育胶状黄铁矿、菱铁矿层等等,因而提出这些矿床的成因经历了两次成矿作用,第一次是石炭纪中期的海底喷流作用形成了块状硫化物矿床,第二次是燕山期岩浆侵入,岩浆热液交代围岩形成矽卡岩型矿床,同时岩浆热液对已形成的块状硫化物矿体进行叠加改造,进一步富集成矿。常印佛等(1983,1991)发现这些层状矿尽管有同生矿床的某些特征,但总是出现于中生代花岗岩体周围,而且与矽卡岩-斑岩矿体密切共生,因而建议为层控矽卡岩型矿床。也有很多学者认为包括铜陵矿集区在内的中国东部中生代大规模成矿作用是燕山期岩浆活动的产物,成矿与岩浆活动及其热液作用密切相关(翟裕生等,1992,1995,1996; Pan and Dong, 1999; 邢凤鸣等,1999; Xu et al., 2001; 邓晋福等,2002; 王元龙等,2004, 毛景文等,2005),并提出了广义矽卡岩型-斑岩型-热液型矿床成矿模式(唐永成等,1998)和斑岩-矽卡岩型成矿模式(毛景文等,2009)。铜陵矿集区发育于泥盆系和石炭系不整合界面上的黄铁矿层和菱铁矿层可能属于正常沉积成岩阶段形成的(常印佛等,1991;藏文栓等,2007),但也有学者认为是后期热液活动充填岩石和矿石孔隙并改造岩矿石的产物(李学军,2006)。矿床氢-氧、硫和铅同位素组分显示曾经历过均一化过程,主要表现为岩浆热液的产物(Pan and Dong, 1999; Lu et al., 2007)。徐晓春等(2010)根据硫同位素地球化学研究认为,铜陵矿集区冬瓜山矿床与Sedex型和VHMS矿床不同而与斑岩型矿床相似,虽然硫同位素组成特征显示区域沉积岩的成岩过程中经历了明显的海水沉积作用和细菌还原作用,但矿床矿石没有保存海西期沉积成矿的硫同位素证据。周涛发等(2010)根据新桥矿床黄铁矿的岩相学和原位LA-ICP MS微量元素分析认为,胶状黄铁矿可能形成于前人提出的晚古生代海

底沉积或喷流沉积环境,而细粒他形黄铁矿和中粗粒自形黄铁矿形成于中生代构造变形-热液叠加改造的过渡环境及热液环境,成矿物质Cu、Pb、Zn、Au、Ag等主要来自燕山期岩浆侵入作用形成的热液成矿系统。倪培等(2010)研究新桥铜金硫矿床底板五通组砂岩中发育的网脉状矿化,发现其中石英中有气液两相和含子晶多相流体包裹体,并具高温高盐度特征,显示岩浆热液作用的特点。因此,燕山期岩浆热液成矿作用占主导地位,改造甚至重置了海西期的沉积作用及成矿。

关于矿床的成矿时代,目前获取的同位素地质年龄数据差异较大。顾连兴(1986a)测得新桥块状硫化物矿石的U-Pb法同位素年龄为321Ma,与含矿地层中-上石炭统地层的沉积年龄相当;谢华光等(1995)也获得铜陵新桥矿床层状矿体的铷-锶等时线年龄为(313.2 ± 32.7)Ma;徐文艺等(2004)对采自铜陵矿集区南部的峙门口块状硫化物矿床中的黄铁矿样品进行了Re-Os同位素测年,得出Re-Os同位素等时线年龄为(303 ± 33)Ma,因而认为矿床主要由海西期沉积成矿作用组成;杨刚等(2004)对狮子山矿田老鸦岭矿床中二叠系大隆组含钼黑色页岩进行了Re-Os同位素(ICP-MS)定年,测得等时线年龄为234.2 ± 7.3 Ma,认为老鸦岭钼矿床是同生沉积型矿床,与燕山期岩浆活动无关。但王彦斌等(2004d)用Rb-Sr等时线法测得新桥铜金矿床黄铁矿的同位素年龄为112.6 ± 7.8Ma,并对谢光华等(1995)的数据应用ISOPLLOT (2.10版)重新计算得到313 ± 93Ma, $I_{Sr}=0.7103 \pm 0.0012$, MSWD=102,年龄误差较大,年龄拟合的MSWD值亦过大,因而认为其不具有定年意义,不足以说明其形成于中晚石炭世。谢建成(2009)测得新桥黄铁矿的Re-Os年龄为126 ± 11Ma,显示矿床主成矿期为燕山晚期。毛景文(2004)、梅燕雄等(2005)对长江中下游若干矿床辉钼矿样品(包括大团山铜矿床的5件样品)进行Re-Os同位素测年,发现大团山铜矿床的辉钼矿模式年龄平均为139.3 ± 2.6Ma,等时线年龄为139.1 ± 2.7 Ma,即形成于燕山期,暗示了燕山期成矿的重要性,同时认为长江中下游地区铜金矿床为中生代第二期大规模成矿作用的产物。陆三明(2007)对狮子山矿田冬瓜山矿床层状硫化物石英脉和矽卡岩两类不同矿石类型中的辉钼矿进行了Re-Os年龄测定,得到模式年龄为139.1Ma和139.4Ma,与矿田岩浆岩的成岩年龄接近,显示成岩与成矿密切的成因联系。郭维民(2010)在条带状

含铜蛇纹石矿石中获得了31 颗碎屑锆石,其中最年轻的21 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在310.1~323.9Ma 之间。这些锆石都呈自形短柱状,发育震荡环带,绝大部分Th/U 比值都大于0.5,为岩浆成因。因而认为这些锆石可能是来源于同时期的岩浆活动,在海底喷流沉积成矿过程中混入并保存在层状硫化物矿体之中,其加权平均年龄 $318.3 \pm 2.6\text{Ma}$ 代表着同生沉积成矿年龄。新桥块状硫化物矿床层状硫化物矿体底板五通组砂岩脉状矿化中的黄铁矿Re-Os 同位素定年,得到 $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$ 等时线年龄为 $319 \pm 13\text{Ma}$ (MSWD=16),显示为同生沉积成矿年龄,并与冬瓜山矿床条带状含铜蛇纹石矿石中碎屑锆石年龄一致(郭维民,2010)。总之,不同学者对铜陵矿集区所测得的同位素地质年龄存在巨大差异,其中海西期的同位素地质年龄值相差较大,误差一般也较大,可靠性有待进一步确认,是否存在海西期海底喷流沉积或同生沉积仍有待探索。

4 有待进一步研究的科学问题

铜陵矿集区的地质勘查和科学研究程度均较高,但是,随着地质理论和测试技术的发展以及找矿工作的新要求,需要新的地质理论支持以进一步开拓思路,深化找矿勘查和地质研究。除了上述取得的重大找矿成果和研究进展以外,仍有诸多尚未达成一致观点和不甚明确的地质问题亟待开展深入系统的科学研究:

(1)在对华北克拉通破坏和华南大陆再造研究的基础上,进一步认识矿集区、长江中下游乃至中国东部燕山期岩浆作用的地球动力学背景,明确区域中生代构造体制和机制及其转换对成岩成矿的控制和影响,探索岩浆作用的深部动力学过程与浅部成矿响应。

(2)重视对矿集区乃至我国华南地区晚古生代尤其是中-晚石炭世沉积古地理环境的深入了解,进一步找寻海西期与海底喷流或同生沉积有关的火山活动及同生断裂活动等有力地质证据,全面论证海西期区域沉积地质背景,准确厘定海西期沉积事件及其对成矿作用的贡献。

(3)系统了解矿集区铜、金、铅、锌、银、金、钼多金属矿床的时空分布特征及其控制因素,深入探索成矿物质来源及其与岩浆起源和演化的关系、成矿物质富集和沉淀与成矿流体迁移和演化的关系、矿床定位与构造的配置关系等,进一步明确成矿的主导控制因素,为找矿勘查提供有益信息。

总之,尽管以往在铜陵矿集区的地质找矿和科学研究获得了丰硕的成果,但仍存在诸多有待探索和深化的科学问题。因此,有必要针对这些重要地质问题,运用现代测试技术和新的成岩成矿理论,开展成矿带、矿集区、矿田、矿床等不同尺度的成岩成矿作用地质地球化学研究,探索矿集区成岩成矿的宏观地球动力学背景、深部地球动力学过程、浅部富集沉淀就位机制等,丰富成岩成矿理论。同时,大量的勘查资料和研究成果以及新的找矿成就表明,该区仍具有较大的资源潜力,进一步深入开展地质科学研究,不仅能丰富成岩成矿理论研究成果,而且将为有效地认识区域成矿规律、扩大找矿远景、寻找矿山接替资源等提供科学依据。

谨以此文祝贺常印佛院士80华诞!

参考文献:

- [1] Chen JF, Foland KA, Zhou TX. Mesozoic granitoids of the Yangtze foldbelt, China: isotopic constraints on the magma sources [M]. In: Wu L R, Yang T M, Yuan K R, et al, eds. The Crust: the Significance of Granite Gneisses in the Lithosphere. Athens: Theophrastus Publications, 1985. 217~237.
- [2] Deng J, Wang QF, Xiao CH et al. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China [J]. International Geology Review, 2011, 53(5-6), 449~476.
- [3] Di YJ, Wu GG, Zhang D, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Xiaotongguanshan and Shatanjiao intrusions and its petrological implications in the Tongling area, Anhui [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6):795~802.
- [4] Gu LX, Khin Zaw, Hu WX, et al. Distinctive features of late palaeozoic massive sulphide deposits in South China[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31: 107~138.
- [5] Jahn BM, Zhou XH and Li JL. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints [J]. Tectonophysics, 1983: 145~160.
- [6] Li ZX, and Li XH. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. Geology, 2007, 35: 179~182.
- [7] Lu SM, Xu XC, Xie QQ, et al. Chemical and stable isotopic geochemical characteristics of ore-forming fluid of the Shizishan copper and gold orefield, Tongling, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(1): 177~184.
- [8] Pan YM and Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China:

- intrusion and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 1999, 15: 177~242.
- [9] Pei RF and Hong DW. The granites of South China and their metallogeny [J]. *Episodes*, 1995, 18: 77~86.
- [10] Ma X, and Ge H. Precambrian crustal evolution of eastern Asia [J]. *J Asia Earth Sci.*, 1989, 3: 9~15.
- [11] Mao JW, Wang YT, Lehmann B, et al. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29: 307~324.
- [12] Maruyama S, Isozaki Y, and Kimura G. Paleogeographic maps of the Japanese island: Plate tectonic synthesis from 750Ma to the present [J]. *Island Arc*, 1997, 6: 121~142.
- [13] Sun WD, Ding X, Hu YH, et al., The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3-4): 533~542.
- [14] Wang QF, Deng J, Huang DH, et al. Deformation model for the Tongling ore cluster region, east-central China [J]. *International Geology Review*, 2011, 53: 562~579.
- [15] Xie GQ, Mao JW, Li RL et al. 2008. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 104: 216~230.
- [16] Xu G, and Zhou J. The Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling mineral district, China: synorogenic remobilization of a stratiform sulfide deposit [J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18: 77~94.
- [17] Xu XC, Lu SM, Xie QQ, et al. Rara earth element geochemistry on magmatic rocks and gold deposits in Shizishan district of Tongling, China [J]. *Journal of Rare Earths*, 2006, 24: 17~625.
- [18] Zhou XM, and Li WX. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326: 269~287.
- [19] 安徽省地质矿产勘查局321地质队. 安徽省铜陵市鸡冠山-长龙山金铜硫矿普查报告[R]. 2009.
- [20] 常印佛, 董树文, 黄德志. 论中-下扬子“一盖多底”格局与演化[J]. *火山地质与矿产*, 1996, 17(1-2): 1~15.
- [21] 常印佛, 刘学圭. 关于层控式矽卡岩型矿床—以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例[J]. *矿床地质*, 1983, 2(1): 11~20.
- [22] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 1~379.
- [23] 陈沪生. 下扬子地区HQ13线的综合地球物理调查及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 1988, (3): 8~17.
- [24] 陈沪生. 1:100000中国东部灵宝-奉贤(HQ13)地学断面图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [25] 陈江峰, 周泰禧, 李学明, 等. 安徽南部燕山期中酸性侵入岩源区的锶/钕同位素制约[J]. *地球化学*, 1993, (3): 261~281.
- [26] 陈衍景, 陈华勇, ZAW K, 等. 中国陆区大规模成矿的地球动力学: 以矽卡岩型金矿为例[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 57~82.
- [27] 储国正, 李东旭. 顺层滑动构造对安徽狮子山矿田“多层楼”矿床的控制[J]. *现代地质*, 1991, 6(4): 504~512.
- [28] 储国正. 铜陵狮子山铜金矿田成矿系统及其找矿意义[D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文, 2003, 1~149.
- [29] 瞿泓滢, 裴荣富, 李进文, 等. 安徽铜陵凤凰山石英二长闪长岩和花岗闪长岩锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(3): 581~590.
- [30] 邓军, 王庆飞, 王定华, 等. 铜陵矿集区燕山期地壳浅部成矿流体活动的构造控制[J]. *矿床地质*, 2004, 23(3): 399~404.
- [31] 邓军, 王庆飞, 王定华, 等. 铜陵矿集区浅层含矿岩浆输运网络与运移机制[J]. *中国科学(D)*, 2006, 36(3): 252~260.
- [32] 邓晋福, 戴圣潜, 赵海玲, 等. 铜陵Cu-Au(Ag)成矿区岩浆流体-成矿系统和亚系统的识别[J]. *矿床地质*, 2002, 21(4): 317~322.
- [33] 邓晋福, 吴宗絮. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游Cu、Fe成矿带[J]. *安徽地质*, 2001, 11(2): 86~95.
- [34] 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 等. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992, 1~184.
- [35] 狄永军, 赵海玲, 吴淦国, 等. 铜陵地区燕山期侵入岩成因与三端元岩浆混合作用[J]. *地质论评*, 2005, 51(5): 528~538.
- [36] 董树文, 邱瑞龙. 安庆-月山地区构造作用与岩浆活动[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [37] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1449~1461.
- [38] 杜旭东, 漆家福, 张一伟, 等. 中国东部晚侏罗早白垩纪盆地火山岩系的确认及成盆构造背景分析[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2000, 24(1): 1~5.
- [39] 杜杨松, 李学军. 安徽铜陵典型矿区岩石包体研究及其岩浆-成矿作用过程探讨[J]. *高校地质学报*, 1997, 3(2): 171~181.
- [40] 杜杨松, 秦新龙, 田世洪. 安徽铜陵铜官山矿区内中生代岩浆-热液过程: 来自岩石包体及其寄主岩的证据[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 339~350.
- [41] 杜杨松, 李铨具. 安徽铜陵岩浆岩中辉长质岩石包体

- 的发现及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 332~342.
- [42] 杜杨松, 李顺庭, 曹毅, 等. 安徽铜陵铜官山矿区中生代侵入岩的形成过程—岩浆底侵、同化混染和分离结晶[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 71~77.
- [43] 杜杨松, 秦新龙, 曹毅. 安徽铜陵中生代侵入岩及其岩石包体中的硫化物-氧化物包裹体研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(2): 71~84.
- [44] 富士谷, 阎学义, 袁成祥, 等. 长江中下游成矿带中石炭纪海底火山喷发-沉积黄铁矿型铜矿地质特征[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1977, (1): 43~67.
- [45] 高庚, 徐兆文, 杨小男, 等. 安徽铜陵白芒山辉石闪长岩体的成因: Sr、Nd、Pb、O同位素制约[J]. 南京大学学报(自然科学), 2006, 42(3): 269~79.
- [46] 顾连兴, 徐克勤. 论长江中下游石炭纪海底块状硫化物矿床[J]. 地质学报, 1986a, 2: 176~188.
- [47] 顾连兴, 徐克勤. 论大陆地壳断裂凹陷带中的华南型块状硫化物矿床[J]. 矿床地质, 1986b, 5(2): 1~13.
- [48] 郭维民. 安徽铜陵冬瓜山矿床叠加改造造成矿机制及岩石地球化学和矿物学研究[D]. 南京: 南京大学博士学位论文, 2010, 1~100.
- [49] 郭文魁. 论安徽省铜官山铜矿[J]. 地质学报, 1957, 37(3): 317~332.
- [50] 郭文魁. 某些金属矿床的原生分带及其成因[J]. 地质学报, 1963, 43(3): 247~270.
- [51] 郭宗山. 扬子江下游某些砂卡岩型铜矿床[J]. 地质学报, 1957, 37(1): 1~10.
- [52] 胡欢, 王汝成, 陆建军, 等. 安徽铜陵狮子山矿田砂卡岩型金矿床的矿物组合、化学成分及成因意义[J]. 矿床地质, 2001, 20(1): 86~98.
- [53] 黄许陈, 储国正, 周捷, 等. 安徽铜陵地区成矿物质和含矿流体来源问题的探讨[J]. 安徽地质, 1994, 4(3): 1~9.
- [54] 蒋其胜, 韩长生, 黄建满. 安徽南陵姚家岭铜铅锌矿床的发现及意义[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 314~321.
- [55] 李东旭. 谭以安. 限制型“S”状构造及其模拟—以铜陵地区为例[J]. 现代地质, 1989, 3(3): 309~318.
- [56] 李锦轶. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式—长江中下游地区震旦纪-侏罗纪沉积环境的演变[J]. 地质学报, 2001, 75(1): 25~34.
- [57] 李进文. 铜陵矿集区矿田构造垂直分带[J]. 矿床地质, 2004, 23(2): 702~512.
- [58] 李进文. 安徽铜陵狮子山铜(金)矿田成矿流体地球化学研究[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 427~437.
- [59] 李红阳, 杨竹森, 蒙义峰, 等. 铜陵矿集区块状硫化物矿床地质特征[J]. 矿床地质, 2004, 23: 327~333.
- [60] 李红阳, 李英杰, 康桂玲. 安徽铜官山铜-铁-金-硫矿床的地球化学特征[J]. 地质科学, 2008, 43(2): 370~376.
- [61] 李学军. 铜陵地区控矿因素及成矿模式研究[D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文, 2006, 1~118.
- [62] 凌其聪, 刘从强. 冬瓜山层控砂卡岩型铜矿床成矿流体特征及其成因意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002a, 32(3): 219~224.
- [63] 凌其聪, 刘从强, 鲍征宇. 地质流体的输运-化学反应与成矿作用微观机制研究—以安徽冬瓜山层控砂卡岩铜矿为例[J]. 大地构造和成矿, 2002b, 26(1): 55~61.
- [64] 刘文灿, 高德臻, 储国正. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [65] 楼亚儿, 杜杨松. 安徽繁昌中生代侵入岩的特征和锆石 SHRIMP测年[J]. 地球化学, 2005, 35(4): 359~366.
- [66] 陆建军, 华仁民, 徐兆文, 等. 安徽铜陵冬瓜山铜、金矿床两阶段成矿模式[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 678~690.
- [67] 陆三明, 徐晓春, 谢巧勤, 等. 铜陵狮子山铜金矿田成矿流体成分及稳定同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2007, 23(1): 177~184.
- [68] 陆三明. 安徽铜陵狮子山铜金矿田岩浆作用和流体成矿[D]. 合肥: 合肥工业大学博士学位论文, 2007, 1~158.
- [69] 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 等. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(9): 783~794.
- [70] 毛建仁, 苏郁香, 陈三元. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [71] 毛景文, Holly S, 杜安道, 等. 长江中下游地区辉钼矿 Re-0s年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 2004, 78(1): 121~131.
- [72] 毛景文, 谢桂青, 张作衡. 中国北方中生代大规模成矿作用的其次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 170~188.
- [73] 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 等. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 109~119.
- [74] 梅燕雄, 毛景文, 李进文, 等. 安徽铜陵大团山铜矿床层状砂卡岩矿体中辉钼矿 Re-0s年龄测定及其地质意义[J]. 地球学报, 2005, 26(4): 327~331.
- [75] 孟宪民. 矿床分类与找矿方向[C]// 矿床学论文集. 北京: 科学出版社, 1963, 1~72.
- [76] 秦新龙. 安徽铜陵中生代侵入岩及其岩石包体中硫化物-金属氧化物包裹体研究[D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文, 2007, 1~170.
- [77] 秦新龙, 杜杨松, 田世洪, 等. 安徽铜陵地区含磁黄铁矿黄铜矿角闪石巨晶的首次发现[J]. 自然科学进展, 2002, 12: 834~838.
- [78] 唐永成, 吴言昌, 储国正. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1998, 1~351.
- [79] 田世洪, 丁悌平, 杨竹森, 等. 安徽铜陵朝山金矿床稳定同位素、稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 365~374.
- [80] 涂荫玖, 杨晓勇, 郑永飞, 等. 皖东南片麻岩的U-Pb年龄

- [J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 157~160.
- [81] 王 强, 许继峰, 赵振华, 等. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(4): 323~334.
- [82] 汪 洋, 邓晋福, 姬广义. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 297~311.
- [83] 王道华, 傅德鑫, 吴履秀. 长江中下游区域铜金铁硫矿床基本特征及成矿作用[M]. 北京: 地质出版社. 1987, 1~196.
- [84] 王鸿祯, 莫宣学. 中国地质构造述要[J]. 中国地质, 1996, (8): 4~9.
- [85] 王文斌, 李文达, 董 平, 等. 论长江中下游地区含铜黄铁矿型矿床成因[J]. 火山地质与矿产. 1994, 15(2): 25~34.
- [86] 王训成, 吴多元, 周育才, 等. 安徽铜陵鸡冠石银金矿床稀土元素地球化学特征[J]. 安徽地质, 2000, 10(1): 51~55.
- [87] 王训成, 姜章平, 蒙义峰, 等. 铜陵地区构造流体体系初探[J]. 矿床地质, 2002, 21 (增刊): 1045~1047.
- [88] 王训成, 刘良根, 郭祥焱, 等. 铜陵地区喷流-沉积块状硫化物矿床[J]. 安徽地质, 2007, 17(2): 95~98.
- [89] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代—铜山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地球学报, 2004a, 25(4): 423~427.
- [90] 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. 中国地质, 2004b, 31(2): 169~173.
- [91] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄及其成因指示[J]. 岩石矿物学杂志[J], 2004c, 23(4): 298~304.
- [92] 王彦斌, 唐索寒, 王进辉. 安徽铜陵新桥铜金矿床黄铁矿 Rb-Sr 同位素年龄数据—燕山晚期成矿作用的证据[J]. 地质论评, 2004d, 50(5): 538~542.
- [93] 王元龙, 王焰, 张旗, 等. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿—地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 325~338.
- [94] 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究[J]. 岩石矿物学杂志. 1996, 15(4): 299~307.
- [95] 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 等. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因[J]. 地球学报. 2003, 24(1): 41~48.
- [96] 吴才来, 董树文, 国和平, 等. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1801~1812.
- [97] 吴才来, 高前明, 国和平, 等. 铜陵中酸性侵入岩成因及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2630~2652.
- [98] 吴淦国, 张 达, 狄永军, 等. 铜陵矿集区侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其深部动力学背景[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(5): 630~645.
- [99] 吴利仁, 齐进英, 王昕度, 等. 中国东部中生代火山岩[J]. 地质学报, 1982, 56(3): 223~234.
- [100] 吴言昌, 曹奋扬, 常印佛. 初论安徽沿江地区成矿系统的深部构造-岩浆控制[J]. 地质前缘. 1999, 6(2): 582~692.
- [101] 肖新建, 顾连兴, 倪培. 安徽铜陵狮子山铜、金矿床流体多次沸腾及其与成矿的关系[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(3): 199~206.
- [102] 谢华光, 王文斌, 李文达. 安徽新桥铜硫矿床成矿时代及成矿物质来源[J]. 火山地质与成矿. 1995, 16(2): 101~107.
- [103] 谢家荣. 论矿床的分类[C]// 矿床学论文集. 北京: 科学出版社, 1963, 19~28.
- [104] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 安徽铜陵新桥 Cu-Au-Fe-S 黄铁矿 Re-Os 定年及成矿意义[J]. 地质科学, 2009, 44(1): 183~192.
- [105] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 铜陵地区中生代侵入岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年代学及 Cu-Au 成矿指示意义[J]. 岩石学报, 2008a, 24(8): 1782~1800.
- [106] 邢凤鸣, 徐祥, 李志昌. 长江中下游早元古代基底的发现及意义[J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1883~1886.
- [107] 邢凤鸣, 徐祥. 铜陵地区高钾钙碱系列侵入岩地球化学[J]. 1996, 25(1): 29~38.
- [108] 邢凤鸣, 徐祥. 安徽扬子岩浆岩带与成矿[M]. 合肥: 安徽人民出版社, 1999.
- [109] 徐九华, 谢玉玲, 侯增谦, 等. 安徽铜陵矿集区海底喷流沉积体系的流体包裹体微量元素对比[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 344~352.
- [110] 徐克勤, 孙明志, 叶俭. 华南二个成矿系列花岗岩类及其成矿特点[J]. 矿床地质, 1982, 1(2): 1~14.
- [111] 徐克勤, 朱金初. 我国东南部几个断裂凹陷带中沉积(或火山沉积)-热液叠加类铁铜矿床成因探讨[J]. 福建地质科学情报, 1978, (4): 1~68.
- [112] 徐文艺, 杨竹森, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵矿集区块状硫化物矿床成因模型与成矿流体动力学迁移[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 354~365.
- [113] 徐夕生, 范钦成, O'Reilly SY, 等. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨[J]. 科学通报, 2004, 49(18): 1883~1890.
- [114] 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 等. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义[J]. 地质学报. 2008a, 82(4): 500~510.
- [115] 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 等. 安徽铜陵冬瓜山铜金矿床流体包裹体微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2008b, 24(8): 1865~1874.
- [116] 徐晓春, 楼金伟, 尹 滔, 等. 论安徽铜陵地区侵入岩的岩石系列[J]. 矿物学报, 2009a, 29(增刊): 34~35.
- [117] 徐晓春, 尹滔, 楼金伟, 等. 铜陵冬瓜山层控矽卡岩型铜金矿床的成因机制: 硫同位素制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2739~2750.

- [118] 徐晓春, 楼金伟, 陈林杰, 等. 安徽铜陵狮子山矿田胡村铜钼矿床的地质特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011a, 30(Suppl.): 233~234.
- [119] 徐晓春, 楼金伟, 谢巧勤, 等. 安徽铜陵狮子山矿田铜、金共生与分离的热力学研究[J]. 地质学报, 2011b, 85(5).
- [120] 徐兆文, 黄顺生, 倪培, 等. 铜陵冬瓜山铜矿成矿流体特征和演化[J]. 地质论评, 2005, 51(1): 36~41.
- [121] 杨刚, 陈江峰, 杜安道, 等. 安徽铜陵老鸦岭含钼碳质页岩的Re-Os定年[J]. 科学通报, 2004, 49(12): 1205~1208.
- [122] 杨小男, 徐兆文, 徐夕生, 等. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石U-Pb年龄意义[J]. 地质学报, 2008, 82(4): 511~516.
- [123] 杨晓勇, 余良范, 孙卫东, 等. 论太平洋板块俯冲对长江中下游地区铜(金)矿床的控制[C]//第九届全国矿床会议论文集, 北京: 地质出版社, 2008, 513~516.
- [124] 杨学明, 林文通. 铜官山火成杂岩体成岩机理研究[J]. 地质论评, 1988, 34(1): 25~35.
- [125] 杨竹森, 侯增谦, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵矿集区海西期喷流沉积流体系统时空结构[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 282~295.
- [126] 喻钢, 陈江峰, 钱卉, 等. 铜陵地区老鸦岭层状钼矿床铅同位素组成研究[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 424~432.
- [127] 岳文浙, 业治静, 魏乃颐, 等. 长江中下游威宁期沉积地质及硫化物矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1993, 1~163.
- [128] 曾普胜, 裴荣富, 侯增谦, 等. 安徽铜陵地块沉积-喷流块状硫化物矿床[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 532~535.
- [129] 臧文拴, 吴淦国, 张达, 等. 浅析安徽省新桥S-Fe矿田的成因[J]. 矿床地质, 2007, 26: 464~474.
- [130] 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社1992, 1~235.
- [131] 翟裕生, 姚书振, 周宗桂, 等. 长江中下游铁铜金矿床矿田构造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999, 153~167.
- [132] 翟裕生. 陆缘凹陷带中与中酸性侵入岩有关的(铜陵式)铜(金)矿床模式[M]. 北京: 地质出版社, 1995, 265~267.
- [133] 翟裕生. 关于构造-流体-成矿作用研究的几个问题[J]. 1996, 3(3-4): 230~235.
- [134] 张达, 吴淦国, 狄永军, 等. 铜陵凤凰山岩体SHRIMP锆石U-Pb年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约[J]. 地球科学, 2006, 31(6): 823~829.
- [135] 张旗, 王焰, 王元龙. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探—埃达克质岩Sr-Nd同位素制约[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 505~513.
- [136] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 中国大陆东部构造思考[K]. 合肥: 香山会议主题报告, 2011, 22~30.
- [137] 中国矿床发现史·安徽卷编委会. 中国矿床发现史·安徽卷[M]. 1996, 79~93.
- [138] 周涛发, 张乐俊, 袁峰, 等. 安徽新桥Cu-Au-Sb矿床黄铁矿LA-ICP-MS原位测定及其对矿床成因的制约[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 306~318.
- [139] 周珣若, 吴才来, 黄许陈, 等. 铜陵中酸性侵入岩同源包体特征及岩浆动力学[J]. 岩石矿物学杂志, 1993, 12(1): 20~30.
- [140] 周泰禧, 李学明, 赵俊深, 等. 安徽铜陵铜官山矿田火成岩的同位素地质年龄[J]. 中国科学技术大学学报, 1987, 17(3): 403~407.
- [141] 朱光, 刘国生, 牛曼兰, 等. 庐断裂带的平移运动与成因[J]. 地质通报, 2003, 22(3): 200~207.

LATEST PROGRESS IN ORE DEPOSIT EXPLORATION AND GEOLOGICAL RESEARCH IN THE TONGLING ORE CONCENTRATION AREA, ANHUI

XU Xiao-chun¹, LOU Jin-wei^{1,2}, LIANG Jian-feng¹, XIAO Qiu-xiang¹, ZHANG Zan-zan¹,
LIU Qin-neng¹, WANG Ping¹

(1 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009; 2. Public Geological Survey Management Center of Anhui Province, Hefei, Anhui 230001, China)

Abstract: On the basis of a summary on geological setting of the Tongling ore concentration area, this paper placed emphasis on introduction of progress made in ore deposit exploration and geoscientific research in the area in recent years, put forward some scientific issues awaiting further efforts to solve, aiming to be a help to ore prospecting and theoretical study of the area in the future.

Keywords: latest progress; ore deposit exploration; geological research; metallogeny; magmatism; Tongling ore concentration area