

庐枞盆地与 A 型花岗岩有关的磁铁矿-阳起石-磷灰石矿床——以马口铁矿床为例*

周涛发¹ 王彪² 范裕¹ 袁峰¹ 张乐骏^{1,3} 钟国雄¹

ZHOU TaoFa¹, WANG Biao², FAN Yu¹, YUAN Feng¹ and ZHANG LeJun^{1,3} and ZHONG GuoXiong¹

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

2. 华东冶金地质勘查研究院, 合肥 230088

3. Centre of Excellence in Ore Deposit (CODES), University of Tasmania, Private Bag 79, Hobart, Australia

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. East China Metallurgical Institute of Geology and Exploration, Hefei 230088, China

3. Centre of Excellence in Ore Deposit (CODES), University of Tasmania, Private Bag 79, Hobart, Australia

2012-07-20 收稿, 2012-09-10 改回.

Zhou TF, Wang B, Fan Y, Yuan F, Zhang LJ and Zhong GX. 2012. Apatite-actinolite-magnetite deposit related to A-type granite in Luzong basin: Evidence from Makou iron deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10):3087–3098

Abstract The Luzong Mesozoic volcanic basin is located in the Middle-Lower Yangtze River fault-depression zone, which is located in the northern margin of the Yangtze Block. The volcanic rocks and intrusive plutons occur widely in Luzong basin, including four groups of volcanic rocks, such as Longmenyuan Group, Zhuangqiao Group, Shuangmiao Group and Fushan Group and 34 intrusive plutons. A lot of metallic and nonmetallic deposits such as iron, copper, gold, lead, zinc, uranium, alunite and anhydrite deposits occur in the basin. A new type of iron ore deposit, Makou iron deposit, related with syenite has been discovered in the southern part of Luzong basin. Based on detailed field investigations and laboratory study, we have carried out study of geological characteristics geochronology and ore-forming hydrothermal fluid characteristics of this iron deposit. The orebodies occur along tectonic fracture zone in quartz syenite porphyry and the range of altered halo is limited. Four stages of hydrothermal ore-forming processes are recognized, including alkali-feldspar stage, magnetite stage, quartz-sulphide stage and carbonate stage. The predominant mineralization associates with magnetite stage. The magnetite-actinolite-apatite mineral assemblage of iron ore is similar to Ningwu porphyrite iron deposits. The homogenization temperatures of fluid inclusions in apatites range from 252.2°C to 322.6°C, which indicates the temperature of mineralization is slightly lower than typical porphyrite iron deposit. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating of quartz syenite porphyry is 129.4 ± 1.4 Ma and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of phlogopite is 127.3 ± 0.8 Ma. Combining with geological characteristics of ore deposit, it is concluded that the quartz-syenite intrusion has merely provided ore-bearing space and the mineralization is not directly related with the quartz syenite porphyry but probably relates to the Huangmeijian A-type granite. The Makou iron ore deposit is the product of the final stage of mineralization in Luzong basin and probably represents the latest metallogenic event in the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt.

Key words Makou iron ore deposit; Magnetite-actinolite-apatite; Luzong basin; A-type granite; The Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt

摘要 庐枞中生代火山岩盆地处于长江中下游断陷带内, 地处扬子板块的北缘。庐枞盆地内的火山岩和侵入岩分布广泛, 包括龙门院、砖桥、双庙和浮山四组火山岩以及 34 个侵入岩体。最近在庐枞盆地南部正长岩中发现一种新类型铁矿床——马口铁矿床。本次工作通过详细野外地质和室内研究, 系统开展了马口铁矿床地质特征、成矿年代学和成矿流体特征研究。马口铁矿床的矿体沿石英正长斑岩体中构造破碎带产出, 产状严格受构造破碎带控制, 矿床围岩蚀变晕范围较为局限。矿床的成矿作用可分为碱性长石阶段、磁铁矿阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐阶段, 其中磁铁矿阶段是主要成矿阶段, 形成与宁芜岩型铁矿床相类似磁铁矿-磷灰石-阳起石三矿物组合。矿床中与磁铁矿共生的磷灰石流体包裹体均一温度范

* 本文受国家自然科学基金项目(41172086, 40830426, 41172084)、中国地质调查局地质调查工作项目(1212011121115)、国家“深部探测技术与实验研究专项计划”专题(SinoProbe-03-02-05)、高等学校博士学科点专项科研基金(20100111110010)和国家重点基础研究发展规划 973 项目(2012CB416802)联合资助。

第一作者简介: 周涛发, 男, 1964 年生, 教授、博士生导师, 主要从事矿床学等方面的教学和科研工作, E-mail: tfzhou@hfut.edu.cn

围为 252.2~322.6°C,反映其成矿温度略低于典型的玢岩铁矿床。通过赋矿岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和金云母 Ar-Ar 方法,确定马口铁矿床的成矿时代为 127.3 ± 0.8 Ma,赋矿岩体的形成时代为 129.4 ± 1.4 Ma,结合矿床地质特征,可以得出矿区石英正长斑岩只是提供了赋矿空间,矿床的形成与其无直接成因联系,而可能与黄梅尖 A 型花岗岩体有关。马口铁矿床是庐枞盆地成矿作用最后阶段的产物,也可能是长江中下游成矿带中最晚一次成矿事件的代表,具有显著的特色。

关键词 马口铁矿床;磁铁矿-阳起石-磷灰石组合;庐枞盆地;A 型花岗岩;长江中下游成矿带

中图法分类号 P611; P618.31

庐枞(庐江-枞阳)中生代火山盆地处于长江中下游断陷带内,地处扬子板块的北缘,郟庐断裂带的南段(图 1),是长江中下游成矿带中最重要的中生代火山岩盆地和矿集区之一,近年来相关基础地质和成岩成矿作用研究取得了一系列重要成果(常印佛等,1991;任启江等,1991;翟裕生等,1992;唐永成等,1998;刘洪等,2002;吕庆田等,2004,2010;Wang *et al.*, 2006;董树文等,2007,2011;周涛发等,2007,2008,2010,2011;Zhou *et al.*, 2008;刘珺等,2007;袁峰等,2008;谢智等,2007;范裕等,2008;毛景文等,2012)。包括庐枞盆地在内的长江中下游成矿带中生代铜铁金多金属矿床主要类型有:

(1)与高钾钙碱性岩系有关的矽卡岩-斑岩型矿床(常印佛等,1991;翟裕生等,1992;唐永成等,1998;Pan and Dong, 1999;周涛发和岳书仓,2000;Mao *et al.*, 2006)矿床;(2)与橄安粗岩系有关的“玢岩铁矿型”铁矿床(宁芜玢岩铁矿编写组,1978;陈毓川等,2006;Mao *et al.*, 2006);(3)与 A 型花岗岩有关的氧化物-铜-金(钼)矿床成矿系统(郑永飞等,1997;范裕等,2008),其中前两类成矿系统的研究程度很高,但关于成矿带中与 A 型花岗岩有关矿床的研究,除对安庆枞阳地区与大龙山岩体有关的钼矿床 D012、D015 进行过年代学和氧同位素研究外(郑永飞等,1997),鲜有报道。庐枞盆

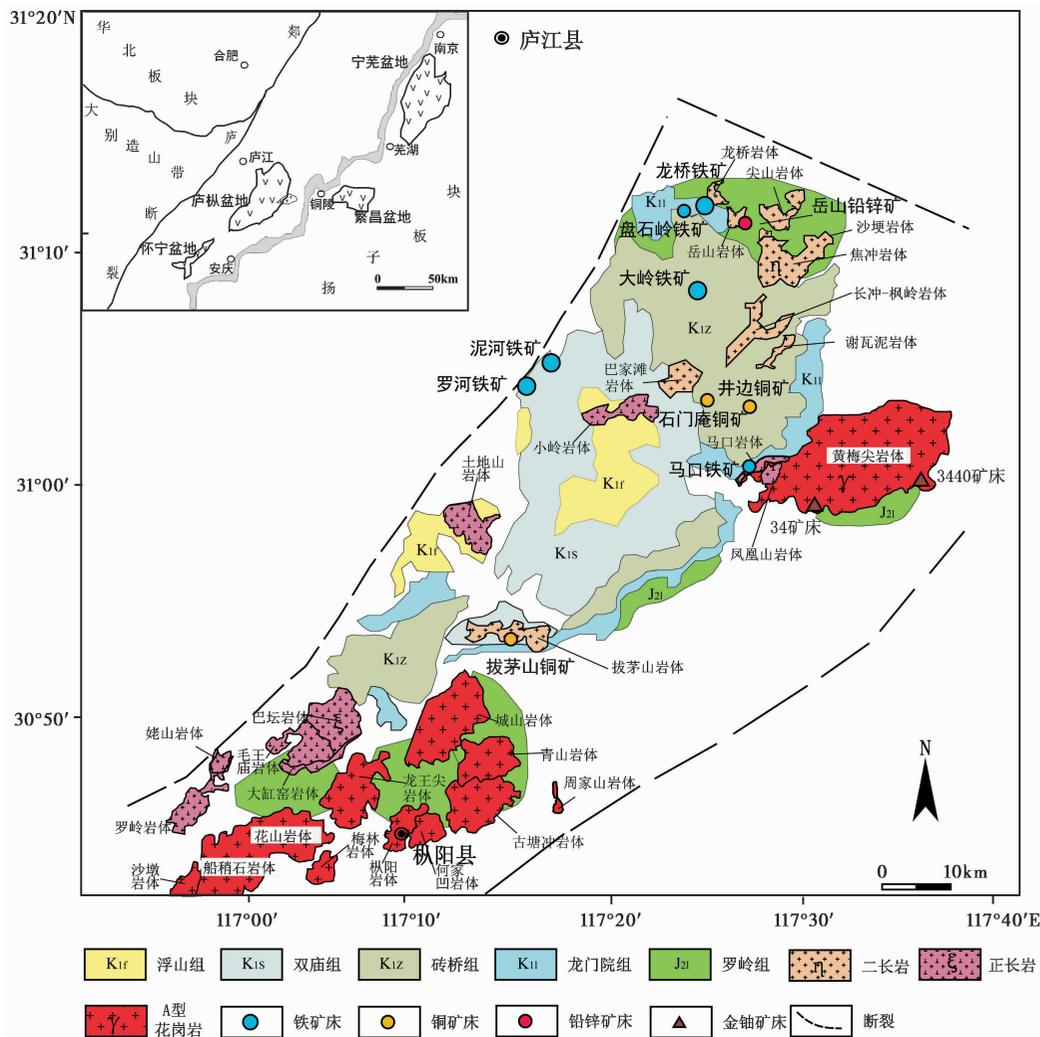


图 1 庐枞盆地地质略图(据周涛发等,2010)

Fig. 1 Geological sketch map of Luzong volcanic basin (after Zhou *et al.*, 2010)

地南部正长岩中产出的铁矿床是长江中下游成矿带内新发现的一种矿床类型,矿床中矿石发育的磷灰石-阳起石-磁铁矿矿物组合与“玢岩型铁矿床”十分相似,但与成矿有关的岩浆岩明显不同,不是辉石闪长玢岩或闪长岩,而是正长岩-花岗岩类岩石。因此,开展此类矿床的地质地球化学特征,成矿年代学和矿床成因研究,并与已有的玢岩型铁矿床进行对比研究,对丰富和发展我国矿床学家于 20 世纪 70 年代建立起来的“玢岩铁矿”成矿理论,深化和提高庐枞盆地乃至长江中下游成矿带成矿系统的研究程度具有重要意义。为此,本文在作者已开展的庐枞盆地相关研究工作基础上,以马口铁矿床为研究对象,通过深入细致的野外地质工作和室内镜下工作,确定了矿床地质特征,并通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和金云母 Ar-Ar 定年方法和包裹体显微测温等测试方法确定了矿床的年代学和流体特征,结合已有的庐枞盆地成矿时空格架,厘定了马口铁矿床在庐枞盆地成矿序列中的位置,并在此基础上与典型玢岩型铁矿床进行对比,为丰富长江中下游成矿带成矿规律和区域成矿理论研究提供新的资料。

1 庐枞盆地地质概况

庐枞盆地位于安徽省庐江县(庐)和枞阳县(枞)之间,为 4 组深大断裂控制(图 1),盆地基底东浅西深,属于继承式的中生代陆相盆地(任启江等,1991),火山岩出露面积约 800km²。出露的沉积地层主要为中侏罗统罗岭组(J₂l)陆相碎屑沉积岩,与火山岩系呈不整合接触。火山岩由老至新分为龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组,4 组火山岩在空间上大致呈同心环状分布,自盆地边缘至盆地中心依次出露龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组,各组之间均为喷发不整合接触(任启江等,1991;周涛发等,2008),构成 4 个旋回。各旋回的火山活动均由爆发相开始,此后溢流相逐渐增多,最后以火山沉积相结束,喷发方式由裂隙-中心式向典型的中心式喷发演化。火山岩类由熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩及次

火山岩组成,火山碎屑岩的总量高于熔岩类。其中,龙门院组主要分布在盆地边缘,以角闪粗安岩为特征岩性标志;砖桥组主要分布在庐枞火山岩盆地中部,以辉石粗安岩为特征岩性标志,构成了庐枞盆地火山岩的主体部分;双庙组主要分布在庐枞盆地中部和南部,以粗面玄武岩为特征岩性标志;浮山组仅在庐枞盆地中部零星分布,出露面积较小,以粗面质火山岩为主(图 1)。

庐枞盆地内部有 34 个侵入岩岩体分布,侵入岩体的形成与区域火山活动有着极为密切的关系(图 1),这些岩体按岩性可主要分为 3 种,一种为二长岩体,主要分布在盆地的北部,出露面积较大岩体有巴家滩岩体,龙桥岩体和罗岭岩体等,第二种为正长岩体,出露面积较大岩体有土地山岩体、凤凰山岩体等,第三种为 A 型花岗岩,出露面积较大岩体有城山岩体,花山岩体、黄梅尖岩体等(周涛发等,2007,2010;范裕等,2008)。

庐枞盆地是一个铁、硫、铜、铅锌、明矾石、金、铀等多种矿床构成的矿集区(图 1),盆地西侧产出斑岩型沙溪铜(金)矿床,盆地内矿床类型主要有:(1)与龙门院旋回有关的次火山热液型 Pb、Zn 矿床,如岳山铅锌银矿床;(2)与砖桥旋回有关的玢岩型铁矿床,如罗河铁矿床,龙桥铁矿床,泥河铁矿床、小岭硫铁矿床、大包庄硫铁矿床;高硫型矿床,如矾山明矾石矿床等,以及中温热液型铜金矿床,如井边石门庵、天头山、拔茅山脉状铜金矿床等。(3)与正长岩类侵入岩有关的铁氧化物-铜-金(铀)矿床,如马口、杨桥、吴桥、3440 和 34 等铁-铜-金(铀)矿床(点)。

2 马口铁矿床地质特征

马口铁矿床位于庐枞火山岩盆地中南部,行政区划隶属安徽省枞阳县钱铺乡,距枞阳县城约 42km,是庐枞盆地中新近发现的一个小型铁矿床,本次工作对马口铁矿床开展了详细的野外地质和室内分析研究工作,确定了矿床的地质特征。

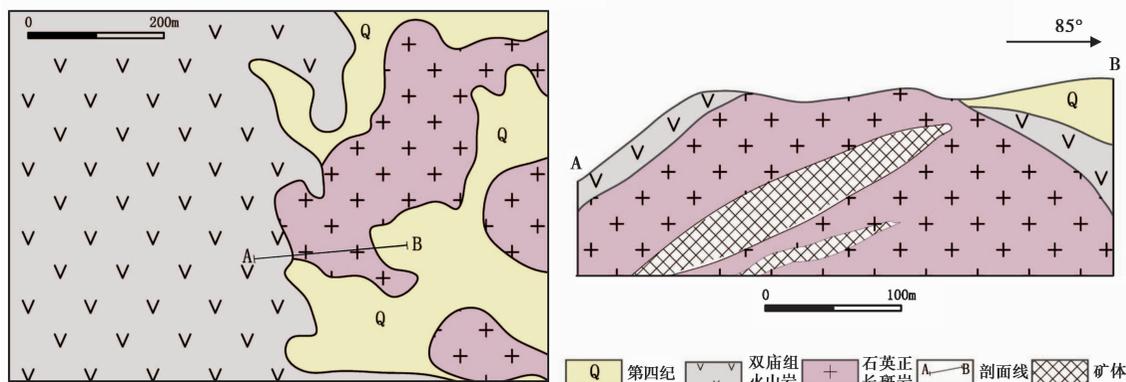


图 2 马口铁矿床地质简图(左)及剖面图(右)

Fig. 2 Geological map (left) and section map (right) of Makou iron deposit

2.1 地层

矿区裸露地层较为简单,主要为双庙组玄武粗安质火山岩和第四系残坡积物(图2)。火山岩的岩性以粗面玄武岩、粗面玄武质角砾熔岩为主,与下伏砖桥旋回火山岩呈不整合接触。

2.2 构造

矿区内的构造以断裂为主,野外地质观察确定矿区内存在1条破碎带,为矿区主要的导矿和控矿构造,野外可以观察到断层擦痕和阶步(图3a)。该破碎带走向325°,倾向南西,倾角72°,属张扭性质,北段出露长约220m,南段出露长约250m,中段被第四系覆盖。该破碎带主要发育于石英正长斑岩中,破碎带附近节理较为发育,解理面平整,少数被镜铁矿、硅质和泥质充填。

2.3 岩浆岩

矿区内主要侵入岩为马口岩体,在岩体中可见双庙组地层的俘虏体,表明其侵位时代晚于双庙旋回火山岩(图3b)。马口岩体可能属于凤凰山岩体西北延伸的岩枝(图1),其岩性为石英正长斑岩,似斑状结构。主要矿物为正长石85%、条纹长石5%、石英10%。正长石呈他形斑状晶形,泥化较发育,粒径0.3~1mm,条纹长石含量较少,聚片双晶发育,石英他形粒状,充填于长石颗粒间隙中,粒径为0.5mm。

2.4 矿化及围岩蚀变特征

马口铁矿床的矿体主要赋存于石英正长斑岩体中的构造破碎带中,矿体局部呈脉状,网脉状产出,脉宽5~50cm不等(图3c, d),产状严格受构造破碎带控制(图4a),矿体总体上呈似层状,矿体走向上延伸可达250m,矿体单层厚度可达5.1m,沿倾向延伸可达50m,矿体与石英正长斑岩的接触关系截然,并在局部穿插石英正长斑岩(图4a, b)。矿床中主要有两种矿石类型,在破碎带的上部(即岩体的上部)发育有薄层状、脉状、网脉状矿石(图4b);在破碎带的下部(也即岩体的下部)发育有厚层的块状磁铁矿矿石(图4c)。薄层状、脉状、网脉状矿石,含约35%磁铁矿、约20%磷灰石、约15%镜铁矿和10%石英和少量金云母;块状矿石中含约50%的磁铁矿、约30%磷灰石(±阳起石)、约10%黄铁矿以及少量的赤铁矿、星点状黄铜矿、石英和黑云母(图4d, e),部分磁铁矿颗粒的边部已发生赤铁矿化(图4d, f)。矿石中磁铁矿与磷灰石(±阳起石)紧密共生,构成了与宁芜玢岩型铁矿床中类似的典型三矿物组合(宁芜玢岩铁矿编写组, 1978)。矿脉两侧蚀变晕较窄,赋石英正长斑岩发育碱性长石化,主要为钾长石化,伴随少量的钠长石化。

2.5 成矿阶段和成矿期

根据矿物共生组合及相互穿插关系,将马口铁矿床的蚀变矿化分成热液期和表生期(表1),热液期分为:碱性长石

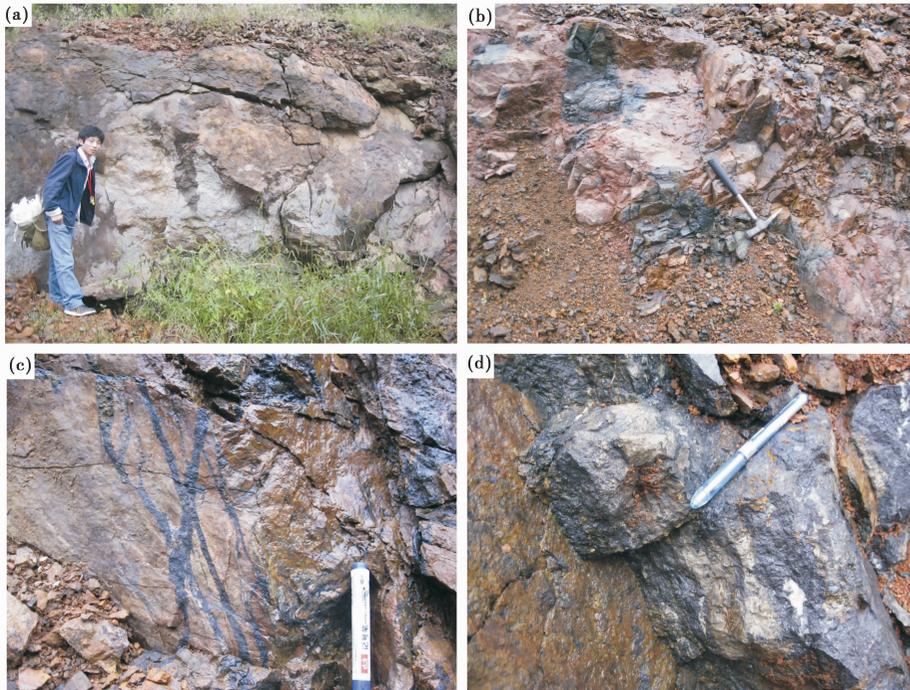


图3 马口铁矿床地质特征野外照片

(a) 断层擦痕和阶步; (b) 马口岩体中双庙组地层的俘虏体; (c, d) 脉状, 网脉状磁铁矿体

Fig. 3 Photography of geological characteristics of Makou iron deposit

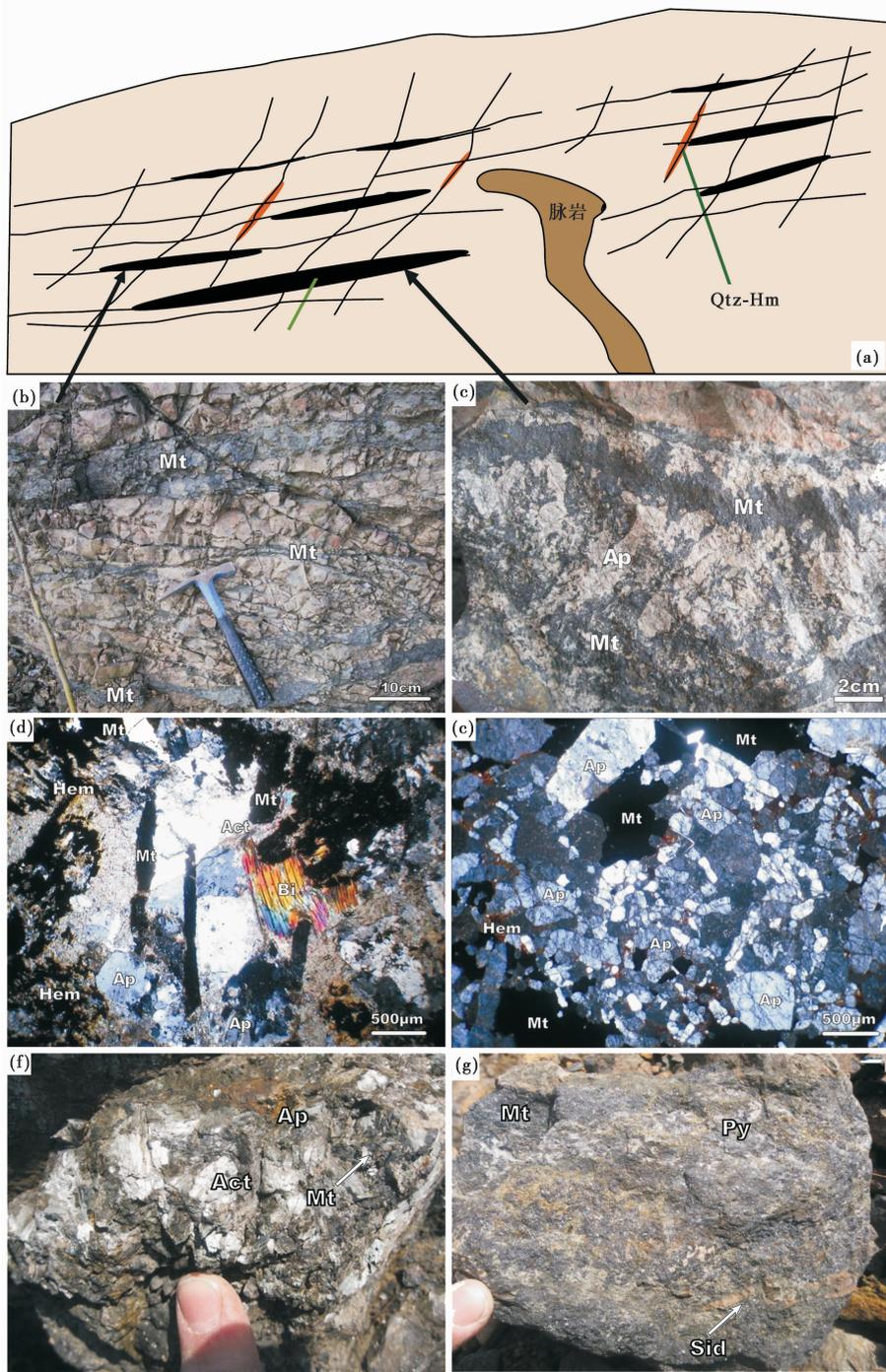


图4 马口铁矿床典型矿石手标本和镜下照片

(a)-采坑剖面素描图;(b)-薄层状、脉状、网脉状磁铁矿矿石;(c)-粗脉状、块状磁铁矿矿石;(d)-磁铁矿-磷灰石-阳起石组合,含少量金云母,部分磁铁矿已赤铁矿化;(e)-磁铁矿-磷灰石组合;(f)-粗晶的阳起石与磁铁矿和磷灰石构成三组合脉;(g)-叠加有石英硫化物的磁铁矿矿石,含有晚期的菱铁矿脉

Fig. 4 Photographs of main ore and alteration rock and ore of Makou iron deposit

(a)-sketch map of mine face;(b)-thin-bedded, vein and net-veined magnetite ore;(c)-big vein and massive magnetite ore;(d)-magnetite-apatite-actinolite assemblage containing few phlogopite;(e)-magnetite-apatite assemblage;(f)-coarse-crystallized anctinite-magnetite-apatite;(g)-magnetite altered by later sulphide and siderite

阶段(阶段 I),磁铁矿阶段(阶段 II),石英-硫化物阶段(阶段 III)和碳酸盐阶段(阶段 IV),表生期主要组成矿物为褐铁矿和镜铁矿。

碱性长石阶段形成少量的钠长石和钾长石,磁铁矿阶段是主要成矿阶段,形成与宁芜岩型铁矿床中相类似磁铁矿-磷灰石-阳起石三矿物组合。在磁铁矿化阶段的晚期出现

表1 马口铁矿床蚀变矿化期次表

Table 1 Mineralization and alteration period of Makou iron deposit

矿物种类	热液期				表生期
	阶段I	阶段II	阶段III	阶段IV	
钠长石	●				
钾长石	●				
阳起石		●			
磷灰石		●			
磁铁矿		●			
金云母		●			
石英			●		
黄铁矿			●		
黄铜矿			●		
绿泥石			●		
赤铁矿			●		
镜铁矿			●		
菱铁矿				●	
方解石				●	
褐铁矿					●
镜铁矿					●

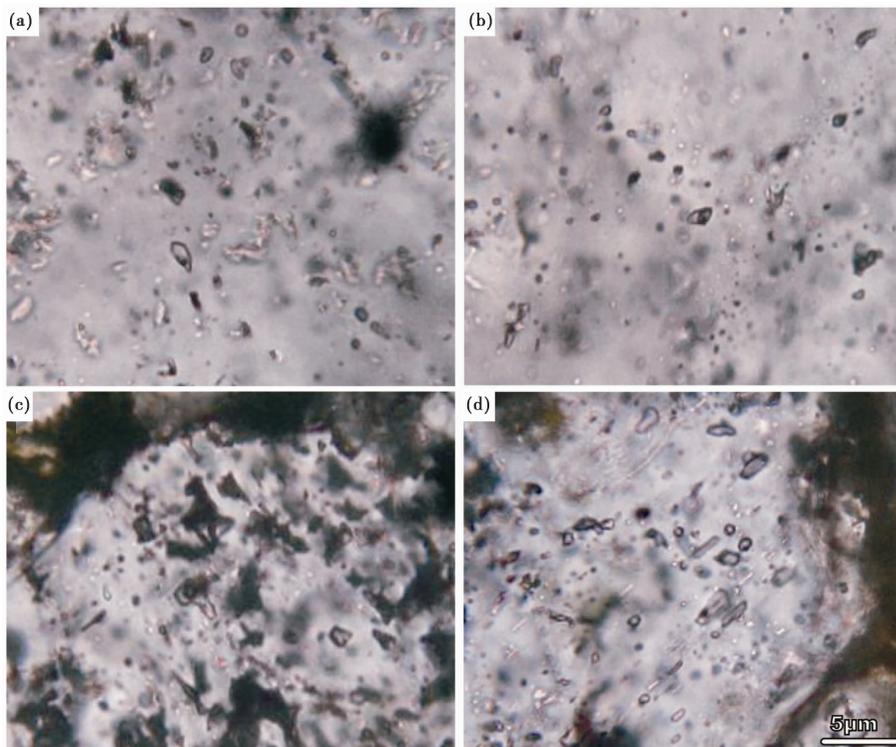


图5 马口铁矿床不同类型流体包裹体显微照片

(a,b)-磁铁矿阶段磷灰石中包裹体;(c,d)-石英-硫化物阶段石英中流体包裹体

Fig. 5 Photographs of fluid inclusions in quartz from Makou iron deposit

石英-硫化物,并伴随着少量的绿泥石化和碳酸盐化。硫化物呈脉状或斑点状产出于磁铁矿矿石中,主要矿物组合为石英-黄铁矿±黄铜矿(图4g)。退蚀变叠加在磁铁矿化带上,

主要体现在上一阶段的阳起石蚀变成绿泥石,并伴随着绿泥石-碳酸盐化。另外,上一阶段生成的磁铁矿部分的发生赤铁矿化或镜铁矿化(图4d)。晚期碳酸盐阶段的脉体比

较发育,穿插在围岩或矿化层中,脉的主要类型为方解石脉或菱铁矿脉。

3 马口铁矿床成矿流体特征

3.1 样品特征

根据马口铁矿床的蚀变矿化期次,本次工作选择磁铁矿阶段的磷灰石和石英-硫化物阶段的石英进行包裹体研究(图 4e, g),查明矿床主要成矿阶段的成矿流体特征。通过包裹体岩相学观察得出,石英-硫化物阶段石英中包裹体不甚发育,研究中所观察到的包裹体主要为气液两相包裹体。气液包裹体在室温下呈气液两相,室温下气液比 5%~20% (室温下肉眼观察),它们具有各种形态,常见的有浑圆状、负晶形和不规则状等,包裹体较细小,最长轴大多约为 5 μm 。它们孤立产出或成群产出,其附近无愈合的裂隙,多数为原生包裹体(图 5a, b)。马口铁矿床磁铁矿阶段磷灰石中包裹体较为发育,主要为气液包裹体,未见含子晶的包裹体。气液包裹体一类为形态不规则状或者椭圆状,呈孤立分布,大小均小于 10 μm (图 5c)。另一类为管状,或者针状,长轴长度约为 5~10 μm ,宽度多为 2~3 μm ,甚至更细(图 5d)。

3.2 包裹体显微测温结果

包裹体显微测温工作在合肥工业大学资源与环境工程学院的流体包裹体实验室完成。实验流程为均一法和冷冻法,详见卢焕章等(1990)。显微测温仪器为英国 LINKAM THMS600 型冷热台温控范围 -196~600 $^{\circ}\text{C}$,控温偏差 <0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。显微测温结果表明,矿床中与磁铁矿共生的磷灰石中流体包裹体的均一温度范围为 252.2~322.6 $^{\circ}\text{C}$,平均值为 279 $^{\circ}\text{C}$,矿床中石英硫化物阶段中的石英中流体包裹体均一温度的范围为 120.1~189.2 $^{\circ}\text{C}$,平均为 163.1 $^{\circ}\text{C}$ 。与马芳等(2006)获得的宁芜地区磷灰石中流体包裹体的均一温度偏低,同时也比庐枞盆地内玢岩型铁矿床如泥河铁矿床和罗河铁矿床的成矿流体温度要低。

4 马口铁矿床成岩成矿时代

4.1 样品特征

4.1.1 石英正长斑岩样品特征

采集马口岩体新鲜的石英正长斑岩样品(MK-30),为似斑状结构,主要矿物为正长石 85%、条纹长石 5%、石英 10%。正长石呈他形斑状晶形,泥化较发育,粒径 0.3~1mm,条纹长石含量较少,聚片双晶发育,石英他形粒状,充填于长石颗粒间隙中,粒径为 0.5mm。

4.1.2 金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年样品特征

采集马口铁矿床中金云母样品(样号 MK-16)进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法定年。金云母在单偏光下呈褐黄色,一组完全解理,平行消光,粒径约 0.2~0.6mm,与磁铁矿密切共生(图 4e)。

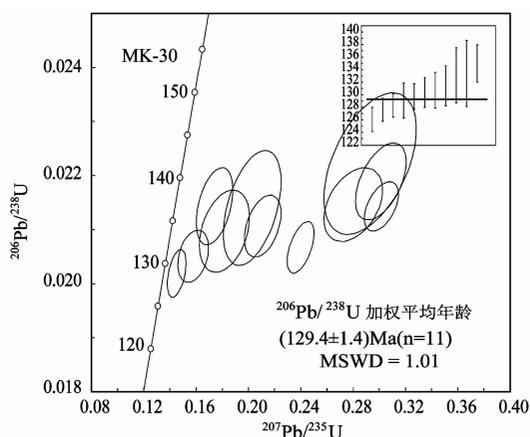


图 6 庐枞盆地马口铁矿床中石英正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb diagrams of zircons from the syenite porphyry samples in the iron deposits in the Luzong volcanic basin

4.2 测年方法

用于锆石年代学测试的样品首先经过破碎,经浮选和电磁选等方法挑选出单颗粒锆石,然后在双目镜下挑纯,选样工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。手工挑出晶形完好、透明度和色泽度好的锆石,粘于环氧树脂表面,经抛光后进行透射光和反射光照相,据此选择晶体特征良好的锆石阴极发光(CL)分析,最后根据阴极发光照射结果选择典型的岩浆锆石进行 LA-ICP-MS 测年分析,锆石的 CL 图像和 U-Pb 年龄测定分别在澳大利亚塔斯马尼亚大学国家优秀矿床研究中心(CODES of Excellence, University of Tasmania)电子探针分析室和 LA-ICP-MS 室完成。分析仪器为 HP4500 型四极杆质谱仪和德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M 型激光剥蚀系统。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 NIST SRM610 进行仪器最佳化。

^{40}Ar - ^{39}Ar 定年样品经粉碎过筛,对碎样样品进行水漂、磁选和重液分离等步骤,分选出 60~80 目粒度的金云母样品,最后在双目镜下手工挑选其中与磁铁矿共生的金云母 200mg,样品纯度达到 99.9% 以上后送实验室进行测试。选纯的金云母用超声波清洗。超声波清洗过程中要注意清洗液的选择和严格控制时间。一般先用经过两次亚沸蒸馏净化的纯净水清洗 3 次,每次 3min,在此过程中矿物表面和解理缝中在天然状态下和碎样过程中吸附的粉末和杂质被清除。然后在丙酮中清洗两次,每次 3min,在此过程中,矿物表面吸附的油污等有机物质被清除。

清洗后的样品被封进石英瓶中送核反应接受中子照射,照射工作是在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行的。使用 H8 孔道,中子流密度约为 $6.0 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ S}^{-1}$ 。照射总时间为 3000min,积分中子通量为 $1.13 \times 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

样品的阶段升温加热使用电子轰击炉,每一个阶段加热 30min,净化 30min。质谱分析是在中国地质科学院地质研究所 Ar-Ar 年代学同位素实验室 MM-1200B 质谱计上进行的,每个峰值均采集 8 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。系统空白水平: $m/e = 40, 39, 37, 36$ 分别小于 $6 \times 10^{-15} \text{ mol}, 4 \times 10^{-16} \text{ mol}, 8 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 和 $2 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_0)_{\text{Ca}} = 0.0002389$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0.004782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_0)_{\text{Ca}} = 0.000806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正; ^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ 年}^{-1}$ (Steiger *et al.*, 1977)。用 ISOPLOT 程序计算坪年龄和等时线年龄 (Ludwig, 2003), 坪年龄误差以 2s 给出。中子照射、样品处理和仪器测试均用国内标样黑云母 (ZBH-25 标准年龄为 132.7Ma, K 含量为 7.6%) (王松山, 1983) 做监控。详细实验流程见有关文章 (陈文等, 2006)。

4.3 定年结果

4.3.1 石英正长斑岩锆石 La ICP MS 定年结果

锆石 U-Pb 年龄分析采用的光斑直径为 $30\mu\text{m}$, 并采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质, 外标校正方法为每隔 4~5 个样品分析点测一次标准, 保证标准和样品的仪器条件完全一致。样品的同位素数据处理采用 Glitter (4.0 版) 软件进行, 普通铅校正采用 Andersen 的方法 (Andersen, 2002), 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot (3.23 版) 进行 (Ludwig, 2003), 测试中的误差标准为 1σ , 实验详细的流程参见 Black *et al.* (2004)。本次实验有效的测试数据为 11 个, 具体分析结果见表 2。

马口矿区的石英正长斑岩样品 (MK-30) 中锆石颗粒呈无色, 透明, 自形, 长柱状, 长约 $50 \sim 150\mu\text{m}$, 宽度约 $50 \sim$

$100\mu\text{m}$ 。阴极发光 (CL) 图像显示, 该样品中的锆石均清晰的韵律环带, 不含其它的矿物包体, 为典型的岩浆成因锆石。该样品共进行了 11 个点的分析, 分析结果显示锆石中 Th 的含量变化范围较大为 $301 \times 10^{-6} \sim 1716 \times 10^{-6}$, U 的含量变化范围为 $308 \times 10^{-6} \sim 1893 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 $0.91 \sim 1.32$ 。11 个分析点均投影在谐和线上或附近, 且成群分布 (图 6), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $129.4 \pm 2.0 \text{ Ma}$, 代表了马口铁矿床中石英正长斑岩的形成年龄。

4.3.2 金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法定年结果

马口铁矿床中与磁铁矿密切共生的金云母 (MK-16) 的阶段加热 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄的数据见表 3, 阶段升温年龄图谱及坪年龄见图 7, 所有构成坪年龄的数据点均进行了相应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线图拟合。坪年龄计算据 Dalrymple and Lanphere (1971) 提出的标准 (存在不少于三个加热阶段且释放 ^{39}Ar 达 50% 以上) 加以计算。

马口铁矿床磁铁矿矿石中的金云母低温释放阶段 ($700 \sim 880^\circ\text{C}$) 视年龄变化较大, 变化范围为 $102 \pm 23 \text{ Ma} \sim 121.4 \pm 2.3 \text{ Ma}$, ^{39}Ar 仅占总析出量 5.4%。10 个高温释放阶段 ($930 \sim 1400^\circ\text{C}$) 形成了 $127.3 \pm 0.8 \text{ Ma}$ (2s) 年龄坪 (^{39}Ar 占总析出量 94.6%) (图 7), 等时线年龄为 $126.4 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (图 7), 初始值 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为 308 ± 21 , $\text{MSWD} = 1.8$, 等时线年龄与坪年龄在误差范围内完全一致, 样品初始值误差相对较大, 绝对值略低于尼尔值 (295.5 ± 5), 但两者在误差范围内基本一致, 表明本次工作所测的数据是可靠的。因此, MK-16 金云母所给出的 $127.3 \pm 0.8 \text{ Ma}$ 的坪年龄具有地质意义, 代表了金云母形成的冷却年龄。

4.4 马口铁矿床的成岩成矿时代

如前所述, 磁铁矿与金云母密切共生, 为同一矿化蚀变阶段的产物。因此, 金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄可以近似代表金

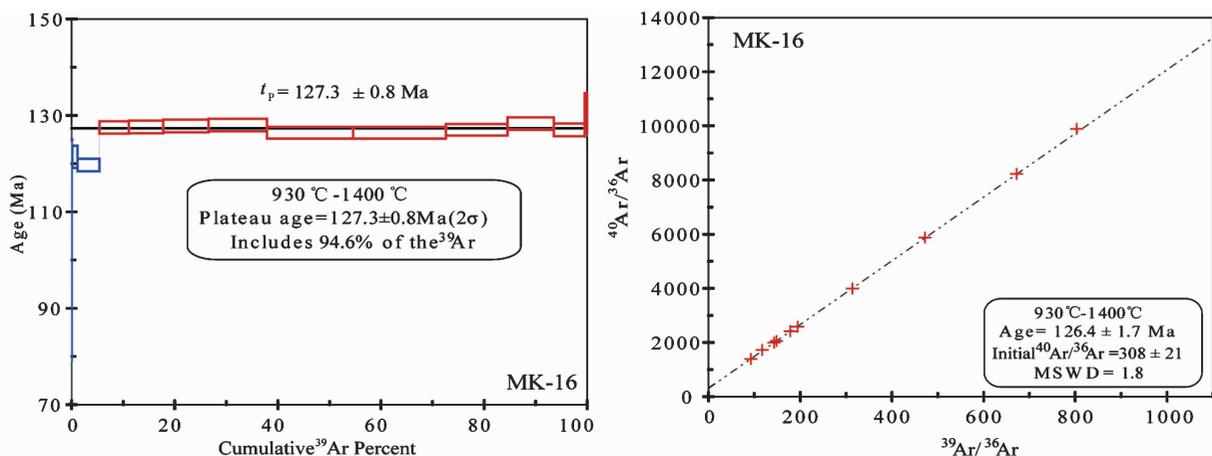
表 2 庐枞盆地马口铁矿床石英正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果

Table 2 LA-ICP MS U-Pb analytic results of zircon from syenite porphyry samples in the Luzong volcanic basin

测点号	U		Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	($\times 10^{-6}$)		Th/U	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ
MK-30-1	1716	1893	0.91	0.0842	0.0236	0.0207	0.0152	0.0063	0.0385	126	2	1297	46	127	5
MK-30-2	379	383	0.99	0.1021	0.0247	0.0214	0.0140	0.0091	0.0380	128	2	1662	46	184	7
MK-30-3	835	635	1.32	0.0522	0.0291	0.0202	0.0144	0.0064	0.0354	128	2	293	66	130	5
MK-30-4	552	466	1.18	0.0947	0.0484	0.0215	0.0209	0.0081	0.0469	129	3	1521	91	164	8
MK-30-5	320	327	0.98	0.0558	0.0464	0.0205	0.0155	0.0063	0.0456	130	2	444	103	126	6
MK-30-6	533	465	1.14	0.0726	0.0398	0.0211	0.0180	0.0069	0.0435	130	2	1004	81	139	6
MK-30-7	592	517	1.14	0.0998	0.0365	0.0219	0.0214	0.0078	0.0529	131	3	1620	68	158	8
MK-30-8	301	308	0.98	0.0628	0.0651	0.0210	0.0239	0.0070	0.0537	131	3	703	139	140	8
MK-30-9	500	387	1.29	0.0688	0.0635	0.0214	0.0328	0.0070	0.0515	133	4	892	131	142	7
MK-30-10	434	431	1.01	0.0957	0.0693	0.0222	0.0389	0.0088	0.0694	133	5	1541	130	177	12
MK-30-11	559	519	1.08	0.0589	0.0479	0.0214	0.0219	0.0069	0.0491	135	3	565	104	140	7

表 3 庐枞盆地马口铁矿床中的金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄测定结果Table 3 ⁴⁰Ar-³⁹Ar data for phlogopite in the Makou iron deposit from Luzong basin

加热阶段	加热温度 (°C)	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	⁴⁰ Ar (%)	⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar	³⁹ Ar (× 10 ⁻¹⁴ mol)	³⁹ Ar (Cum.) (%)	视年龄 (Ma) (± 1σ)
样品号: MK-16 测试参数: W = 30.49mg, J = 0.006172										
1	700	198.5314	0.6400	0	0.1694	4.74	9.4195	0.04	0.12	102.0 ± 23.0
2	800	58.4517	0.1598	0.5160	0.0631	19.29	11.2802	0.33	1.13	121.4 ± 2.3
3	880	23.5330	0.042	0.0384	0.0383	47.24	11.1166	1.39	5.39	119.7 ± 1.3
4	930	15.0697	0.0108	0.0359	0.0296	78.76	11.8690	1.85	11.09	127.5 ± 1.3
5	980	13.8699	0.0067	0.0227	0.0282	85.60	11.8728	2.17	17.77	127.6 ± 1.3
6	1030	13.9686	0.0070	0	0.0294	85.15	11.8948	2.85	26.55	127.8 ± 1.3
7	1080	13.5716	0.0056	0.0355	0.0292	87.76	11.9111	3.68	37.87	128.0 ± 1.3
8	1120	13.2849	0.0051	0.0183	0.0284	88.53	11.7614	5.44	54.61	126.4 ± 1.2
9	1160	12.7072	0.0032	0.0157	0.0265	92.56	11.7619	5.85	72.61	126.4 ± 1.2
10	1200	12.4440	0.0021	0.0511	0.0259	94.92	11.8127	3.89	84.57	127.0 ± 1.2
11	1250	12.3199	0.0012	0	0.0253	96.97	11.9470	2.92	93.55	128.3 ± 1.3
12	1320	12.2592	0.0015	0	0.0252	96.37	11.8144	1.94	99.52	127.0 ± 1.3
13	1400	14.6751	0.0086	0.3728	0.0258	82.81	12.1562	0.16	100.00	130.5 ± 4.1

图 7 庐枞盆地马口铁矿床中云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄和等时线年龄图Fig. 7 The ⁴⁰Ar-³⁹Ar spectrum and isochronal age diagram of phlogopite in the Makou iron deposit

云母和磁铁矿的形成年龄。本文所测得马口铁矿床中金云母坪年龄为 $127.3 \pm 0.8\text{Ma}$, 代表马口铁矿床成矿作用发生的时间。马口铁矿床赋矿岩石—石英正长斑岩的形成时代为 $129.4 \pm 1.4\text{Ma}$, 明显早于成矿时代。野外地质关系表明, 马口铁矿床的矿化完全受岩体中的构造破碎带控制, 而且矿体与赋矿岩体的接触界限非常截然, 矿脉两侧的蚀变晕较窄。流体包裹体研究表明, 该矿床的形成温度相对较低 ($252 \sim 323^\circ\text{C}$), 成矿岩浆热液如直接来自于赋矿围岩石石英正长斑岩, 其温度应相对较高, 表明区内石英正长斑岩只是提供了赋矿空间, 与矿床的形成没有直接成因联系。从图 1 可见, 马口正长岩体为凤凰山岩体的西北岩枝, 且凤凰山岩体的成岩时代为 $128.4 \pm 0.9\text{Ma}$ (周涛发等, 2010), 与马口岩体一

致, 而凤凰山岩体西侧的黄梅尖岩体, 穿切凤凰山岩体, 为形成时代较晚的 A 型花岗岩, 其形成时代为 127Ma (范裕等, 2008), 与马口铁矿床的成矿时代一致。庐枞盆地南缘以黄梅尖岩体为代表的 A 型花岗岩中广泛发育 Au-U 矿化, 产出一系列脉状铜-金-铀矿床 (点), 如城山矿床、3340 和 34U 矿床 (点)。因此, 作者推测庐枞盆地中这一类 Fe-Cu-Au-U 矿床的形成可能与 A 型花岗岩密切相关。

5 讨论

近年来, 庐枞盆地相关成矿时代学研究已广泛开展, 综合前人对盆地内不同类型矿床成矿时代的研究成果 (段超

等,2009;张乐骏等,2010;周涛发等,2010;2011;马立成等,2011)可以得出庐枞盆地中成矿作用主要发生在砖桥旋回,最早形成的是盘石岭火山沉积型铁矿床,其形成时代与砖桥旋回火山喷发活动的时间基本一致,为134Ma左右;随后形成与砖桥旋回次火山岩有关的岳山铅锌矿床和以井边为代表的脉状铜矿床,成矿时代为133~132Ma左右;紧接着是与砖桥旋回火山岩浆活动末期闪长玢岩有关的玢岩型铁矿床(包括罗河铁矿床、泥河铁矿床、龙桥铁矿床、马鞭山铁矿床、杨山铁矿床、大岭铁矿床以及大鲍庄硫铁矿床等),成矿时代为130Ma左右,这一时期在砖桥组下段火山岩中还形成了矾山明矾石矿床。继砖桥旋回后的双庙旋回火山-岩浆活动,成矿作用较弱,形成了区内与A型花岗岩有关的马口铁矿床和一系列金铀矿床,其成矿时代为127Ma左右,它们是庐枞盆地内最后一次成矿作用的产物。

上述盆地内不同类型矿床的空间分布也有一定的规律:火山沉积型铁矿床分布在盆地北部,热液脉型铅锌矿床主要分布于盆地西北缘;热液脉状铜金矿床分布于盆地的中部,玢岩型铁矿床主要分布盆地西部和西北部边缘,矾山明矾石矿床位于庐枞盆地的中东部,在盆地的南部主要为A型花岗岩出露,其中产出铁-铜-金-铀矿床。

庐枞盆地南部与A型花岗岩有关的以马口铁矿床为代表的磁铁矿-阳起石-磷灰石矿床是长江中下游成矿带中一个新的矿床类型,其矿床类型在庐枞地区以及长江中下游地区较为独特;磁铁矿矿体产于石英正长斑岩体的构造裂隙中,且磁铁矿与磷灰石和阳起石紧密共生,构成了与宁芜玢岩型铁矿床中类似的典型三矿物组合(宁芜玢岩铁矿编写小组,1977),但迄今宁芜盆地中尚未发现与马口式铁矿床相似的在正长岩和A型花岗岩有关的铁矿床。马口铁矿床的成矿时代明显晚于玢岩型铁矿床的主成矿期130Ma(周涛发等,2011;范裕等,2011),可能代表了长江中下游成矿带中最晚一次成矿事件。马口铁矿床的地质特征与南美Carajas地区(Tazava and de Oliveira,2000; Dreher *et al.*, 2008)和瑞典的Kiruna地区(Hitzman *et al.*, 1992)、芬兰的Kolari和Misi地区(Niiranen,2005)分布的IOCG型矿床在矿床地质特征也存在一些相似之处,但与成矿有关的岩浆岩则有明显差异,马口铁矿床与成矿有关的岩浆岩不是高钾钙碱性系列的岩石,也不是橄榄安粗岩系岩石,而是A型花岗岩。IOCG型矿床既与基性-中性岩浆岩(辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩)有关,也与中性-酸性高温含水的岩浆岩(花岗岩)有关(Barton *et al.*, 1996; Sillitoe,2003),主要岩性为闪长岩、辉石闪长岩和花岗闪长岩,但迄今尚未见有与A型花岗岩有关的IOCG型矿床的报道。

综上所述,在长江中下游成矿带庐枞盆地中新发现的在矿物组合上类似于玢岩型铁矿和IOCG型矿床的磷灰石-阳起石-磁铁矿矿床,与A型花岗岩关系密切,具有显著的特色,该矿床的研究为区域成矿系统理论的发展和长江中下游成矿带陆内成矿作用研究提供了新的补充,并为矿产资源勘查

实践提供了新的方向。

6 结论

(1)马口铁矿床的主要赋矿岩体为石英正长斑岩,矿体主要赋存于石英正长斑岩体中的构造破碎带中,产状严格受构造破碎带控制。矿床的成矿作用可分为碱性长石阶段、磁铁矿阶段、绿泥石阶段和碳酸盐阶段,其中磁铁矿阶段是主要成矿阶段,形成与宁芜玢岩型铁矿床中相类似磁铁矿-磷灰石-阳起石三矿物组合。

(2)矿床中与磁铁矿共生的磷灰石中流体包裹体的均一温度范围为252.2~322.6℃,平均值为279℃,矿床中石英硫化物阶段中的石英中流体包裹体均一温度的范围为120.1~189.2℃,平均为163.1℃,成矿温度低于宁芜盆地和庐枞盆地内玢岩型铁矿床。

(3)马口铁矿床的成矿时代为127.3±0.8Ma,赋矿围岩石英正长斑岩的形成时代为129.4±1.4Ma,结合矿床地质特征,矿区内石英正长斑岩只是提供了赋矿空间,与矿床的形成没有直接成因联系,可能与黄梅尖A型花岗岩有关。

(4)马口铁矿床是庐枞盆地成矿作用最后阶段的产物,也可能是长江中下游成矿带中最晚一次成矿事件的代表,具有显著的特色,将其与玢岩铁矿床和IOCG矿床进行对比研究,具有重要的研究价值和找矿意义。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Barton MD and Johnson DA. 1996. Evaporitic-source model for igneous-related Fe-oxide (-REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology*, 24(3): 259-262
- Black LP, Kamo SL, Allen CM, Davis DW, Aleinikoff JN, Valley JW, Mundil R, Campbell IH, Korsch RJ, Williams IS and Foudoulis C. 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element related matrix effect: SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chemical Geology*, 205(1): 115-140
- Chang YF, Liu XP and Wu YC. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 71-76 (in Chinese)
- Chen W, Zhang Y, Zhang YQ, Jin GS and Wang QL. 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau: Evidence from Ar-Ar thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867-872 (in Chinese with English abstract)
- Chen YC, Pei RF and Wang DH. 2006. On minerogenetic (metallogenetic) series: Third discussion. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1501-1508 (in Chinese with English abstract)
- Dalrymple GB and Lanphere MA. 1971. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ technique of K-Ar dating: A comparison with the conventional technique. *Earth and Planetary Science Letters*, 12(3): 300-3088
- Dong SW, Zhang YQ, Long CX, Yang ZY, Ji Q, Wang T, Hu JM and Chen XH. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449-1461 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Ma LC, Liu G, Xue HM, Shi W and Li JH. 2011. On dynamics of the metallogenic belt of Middle-Lower Reaches of

- Yangtze River, eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 612–625 (in Chinese with English abstract)
- Dreher AM, Xavier RP, Taylor BE and Margtini SL. 2008. New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarap Bahia Cu-Au deposit, Carajs province, Brazil. *Mineralium Deposita*, 43(2): 161–184
- Duan C. 2009. Geological and geochemical characteristics and genesis of Longqiao Iron Deposit in Luzong Basin, Anhui, China. Master Degree Thesis. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English summary)
- Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Qian CC, Lu SM and Cooke DR. 2008. LA-ICP MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) area and their significances. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1715–1724 (in Chinese with English abstract)
- Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Zhang LJ, Qian B, Ma L, Xie J and Yang XF. 2011. Geochronology of the porphyry-like type iron deposits in Ning-Wu basin; Evidence from ^{40}Ar - ^{39}Ar phlogopite dating. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 810–820
- Hitzman MW, Oreskes N and Einaudi MT. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1–4): 241–287
- Liu H, Qiu JS, Luo QH, Xu XS, Ling WL and Wang DZ. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzhong basin, Anhui Province; Geochemical constraints. *Geochimica*, 31(2): 129–140 (in Chinese with English abstract)
- Liu J, Zhou TF, Yuan F, Fan Y, Wu MA, Lu SM and Qian CC. 2007. Rock geochemistry and genesis of Bajiatan intrusion in the Lujiang-Zongyang volcanic basin, Anhui. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2615–2622 (in Chinese with English abstract)
- Lu HZ. 1990. Fluid-melt inclusions. *Geochemistry*, 10(3): 225–229 (in Chinese with English abstract)
- Lü QT, Hou ZQ, Yang ZS and Shi DN. 2004. Uplating process and dynamics evolution mode in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River: Constrains of physical geography information. *Science in China (Series D)*, 34(9): 783–794 (in Chinese)
- Lü QT, Han LG, Yan JY and Lian YG Shi DN and Yan TJ. 2010. Seismic imaging of volcanic hydrothermal iron-sulfur deposits and its hosting structure in Luzong ore district. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2598–2612 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. *ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1–70
- Ma F, Jiang SY, Jiang YH, Wang RC, Ling HF and Ni P. 2006. Pb isotope research of porphyrite Fe deposits in the Ning-Wu Area. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 279–286 (in Chinese with English abstract)
- Ma LC, Dong SW, Zhong YB, Zhang QM and Gao CS. 2011. Metallogenic epoch of the Longqiao iron deposits at the Lujiang-Zongyang ore concentrated area in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, China. *Acta Geologica Sinica*, 85(7): 1206–1214 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Wang YT, Lehmann B, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications. *Ore Geology Reviews*, 29(3–4): 307–324
- Mao JW, Duan C, Liu JL and Zhang C. 2012. Metallogeny and corresponding mineral deposit model of the Cretaceous terrestrial volcanic-intrusive rocks-related polymetallic iron deposits in Middle-Lower Yangtze River Valley. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 1–14 (in Chinese with English abstract)
- Niiranen T. 2005. Ironoxide-copper gold deposits in Finland; Case studies from the Peroph jaschist belt and the Central Lapland greenstone belt. Ph. D. Dissertation. Helsinki: University of Helsinki
- Ningwu Project Group. 1978. *The Porphyrite Iron Deposit of Ningwu*. Beijing: Geological Publishing House, 1–320 (in Chinese)
- Pan YM and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China; Intrusion-and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geology Reviews*, 15(4): 177–241
- Ren QJ, Liu XS, Xu ZW, Hu SX and Hu WX. 1991. Mesozoic Volcano-Tectonic Depression and Its Mineralizing Process in Lujiang-Zongyang Area, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1–206 (in Chinese)
- Sillitoe RH. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: An Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7): 787–812
- Steiger RH and Jäger E. 1977. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(3): 359–362
- Steiger RH and Jäger E. 2006. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters* 36(3): 359–362
- Tang YC, Wu YC, Chu GZ, Xing FM, Wang YM, Cao FY and Chang YF. 1998. *Geology of Copper-Gold Polymetallic Deposits in the along-Changjiang Area of Anhui Province*. Beijing: Geological Publishing House, 60–85 (in Chinese)
- Tazava E and de Oliveira CG. 2000. The Igarapé Bahia Au-Cu-(REE-U) deposit, Caraja mineral province, Northern Brazil. *Mineralogical Magazine*, 71: 347–363
- Wang Q, Derek AW, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rock in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89(3–4): 424–446
- Wang SS. 1983. Age determinations of ^{40}Ar - ^{40}K , ^{40}Ar - ^{39}Ar and radiogenic ^{40}Ar released characteristics. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 315–323 (in Chinese with English abstract)
- Xie Z, Li QZ, Chen JF and Gao TS. 2007. The geochemical characteristics of the Early-Cretaceous volcanics in Luzhong region and their source significances. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 235–249 (in Chinese with English abstract)
- Yuan F, Zhou TF, Fan Y, Lu SM, Qian CC, Zhang LJ, Duan C and Tang MH. 2008. Source, evolution and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Luzong basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1691–1702 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Yao SZ and Ling XD. 1992. Regularities of Metallogenesis for Copper (Gold) Deposits in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Area. Beijing: Geological Publishing House, 1–120 (in Chinese)
- Zhang LJ, Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Ma L and Qian B. 2010. Dating of copper mineralization in Jingbian deposit and its prospecting significance in Luzong basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2729–2738 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF, Wei CS, Wang ZR, Huang YS and Zhang H. 1997. An isotope study on the cooling history of the Dalongshan granitic massif and its bearing on mineralizing process. *Scientia Geologica Sinica*, 32(4): 455–477 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF and Yue SC. 2000. Forming conditions and mechanism for the fluid ore-forming system of the copper, gold deposits in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Area. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 36(5): 697–707 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Song MY, Fan Y, Yuan F, Liu J, Wu MA, Qian CC and Lu SM. 2007. Chronology of the Bajiatan intrusion in the Luzong basin, Anhui, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2379–2386 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Lu SM, Shang SG, Cooke D, Meffre S and Zhao GC. 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) basin and its significance. *Science in China (Series D)*, 51(10): 1470–1482
- Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665–1678 (in Chinese with English abstract)

- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Song CZ, Zhang LJ, Qian CC, Lu SM and Cooke DR. 2010. Temporal-spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constrain to mineralizations. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2694 – 2714 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Zhang LJ, Ma L, Qian B and Xie J. 2011. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic Basins in the Middle and Lower Yangtze metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 712 – 730 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 71 – 76
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 金贵善, 王清利. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据. *岩石学报*, 22(4): 867 – 872
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红. 2006. 三论矿床的成矿系列问题. *地质学报*, 80(10): 1501 – 1508
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡健民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. *地质学报*, 81(11): 1449 – 1461
- 董树文, 马立成, 刘刚, 薛怀民, 施炜, 李建华. 2011. 论长江中下游成矿动力学. *地质学报*, 85(5): 612 – 625
- 段超. 2009. 安徽庐枞盆地龙桥铁矿床地质地球化学特征和矿床成因研究. 硕士学位论文. 合肥: 合肥工业大学
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 钱存超, 陆三明, Cooke DR. 2008. 安徽庐江-枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP MS 定年及其地质意义. *岩石学报*, 24(8): 1715 – 1724
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, 谢杰, 杨西飞. 2011. 宁芜盆地玢岩型铁矿床的成矿时代: 金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年代学研究. *地质学报*, 85(5): 810 – 820
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 徐夕生, 凌文黎, 王德滋. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约. *地球化学*, 31(2): 129 – 140
- 刘珺, 周涛发, 袁峰, 范裕, 吴明安, 陆三明. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的岩石地球化学特征及成因. *岩石学报*, 23(10): 561 – 572
- 卢焕章. 1990. 流体熔融包裹体. *地球化学*, 10(3): 225 – 229
- 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 史大年. 2004. 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. *中国科学(D 辑)*, 34(9): 783 – 794
- 吕庆田, 韩立国, 严加永, 廉玉广, 史大年, 颜廷杰. 2010. 庐枞矿集区火山气液型铁、硫矿床及控矿构造的反射地震成像. *岩石学报*, 26(9): 2598 – 2612
- 马芳, 蒋少涌, 姜耀辉, 王汝成, 凌洪飞, 倪培. 2006. 宁芜地区玢岩铁矿 Pb 同位素研究. *地质学报*, 80(2): 279 – 286
- 马立成, 董树文, 仲玉斌, 张千明, 高昌生. 2011. 长江中下游庐江-枞阳矿集区龙桥铁矿成矿时代研究. *地质学报*, 85(7): 1206 – 1214
- 毛景文, 段超, 刘佳林, 张成. 2012. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例. *岩石学报*, 28(1): 1 – 14
- 宁芜玢岩铁矿编写组. 1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京: 地质出版社, 1 – 320
- 任启江, 刘孝善, 徐兆文, 胡受奚, 胡文璋. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京: 地质出版社, 1 – 206
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 60 – 85
- 王松山. 1983. 我国 K-Ar 法标准样 ^{40}Ar - ^{40}K 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定及放射成因 ^{40}Ar 的析出特征. *地质科学*, (4): 315 – 323
- 谢智, 李全忠, 陈江峰, 高天山. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义. *高校地质学报*, 13(2): 235 – 249
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏惠. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. *岩石学报*, 24(8): 1691 – 1702
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床. 北京: 地质出版社, 1 – 120
- 张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰, 马良, 钱兵. 2010. 安徽庐枞盆地井边铜矿床的成矿时代及其找矿指示意义. *岩石学报*, 26(9): 2729 – 2738
- 郑永飞, 魏春生, 王峥嵘, 黄耀生, 张宏. 1997. 大龙山岩体冷却史及其成矿关系的同位素研究. *地质科学*, 32(4): 455 – 477
- 周涛发, 岳书仓. 2000. 长江中下游铜、金矿床成矿流体系统的形成条件及机理. *北京大学学报(自然科学版)*, 36(5): 697 – 707
- 周涛发, 宋明义, 范裕, 袁峰, 刘珺, 吴明安, 钱存超, 陆三明. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义. *岩石学报*, 23(10): 583 – 591
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. *岩石学报*, 24(8): 1665 – 1678
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 宋传中, 张乐骏, 钱存超, 陆三明, Cooke DR. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约. *岩石学报*, 26(9): 2694 – 2714
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 马良, 钱兵, 谢杰. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用. *地质学报*, 85(5): 712 – 730