

doi:10.3799/dqkx.2015.086

安徽庐江泥河铁矿床蚀变—矿化作用及元素迁移规律

江满容, 张均*, 刘文浩, 熊索菲

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 传统方法不能明确揭示泥河铁矿床多阶段热液叠加蚀变过程中元素迁移的继承性特征. 运用等浓度图法(the isocon diagram), 根据该区晚阶段蚀变都是叠加在稍早阶段蚀变之上的实际情况, 采用早期蚀变岩石为原岩与稍晚期蚀变岩石的不活动元素拟合最佳等浓度方程, 定量揭示主量元素在热液蚀变过程的迁移规律. 研究表明, 泥河铁矿床阳离子的沉淀顺序大致为: Na→Ca、Mg、Fe、P→Ca、Fe→Al、Si. 从早到晚, 元素的带入和带出是连续互补的, 蚀变矿化作用是一个连续的过程. 钠长石的大量出现是Na质沉淀的标志, 代表铁矿化的开始; 石膏岩化是Ca、Mg、Fe质沉淀的表现形式, 为磁铁矿体的近矿和容矿蚀变; 次生石英岩化、高岭石化是早期迁移出的Al、Si质沉淀的结果, 是磁铁矿化远程指示性蚀变.

关键词: 元素迁移; 蚀变矿化带; 铁矿床; 地球化学.

中图分类号: P614

文章编号: 1000—2383(2015)06—1034—18

收稿日期: 2014—08—11

Alteration-Mineralization and Element Migration Features of Nihe Iron Deposit in Lujiang, Anhui Province

Jiang Manrong, Zhang Jun*, Liu Wenhao, Xiong Suofei

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The inheritance of elements migration can't be definitely revealed by traditional methods from Nihe iron ore deposit, which has a multi-stage hydrothermal superimposed alteration process. The quantitative features of the main and trace element migration in the process of hydrothermal alteration is presented in the paper by exploring its prospecting significance by adopting the early alteration rock for original rock and then fitting the best concentration equation between slightly late alteration rock with immobile elements by isocon diagram method. It is found that the cations precipitation sequence is roughly from Na to Ca, Mg, Fe, P to Ca, Fe and to Al, Si in Nihe iron deposit. As elements into and out of the system are continuous complementary for both early to late alterations, the alteration and mineralization are considered as a continuous process. The extensive albitization is a sign of Na qualitative precipitation, marking the beginning of iron ore mineralization. Anhydrite-diopside mineralization is the result of Ca, Mg and Fe qualitative precipitation which is the ore-closing and ore-hosting alteration. Secondary quartzite and kaolinization is the Al, Si qualitative precipitation migrated from early alteration, which is the long-distance indicative alteration of magnetite.

Key words: element migration; alteration mineralization zone; iron deposits; geochemistry.

等浓度图法(the isocon diagram)是 Grant (1986)基于 Gresens(1967)方程提出的, 可以揭示

主微量元素在热液蚀变过程的迁移规律. 等地球化学浓度图的纵坐标和横坐标分别代表了蚀变岩和原

基金项目: 全国危机矿山找矿典型矿床研究专项(No. 20109904).

作者简介: 江满容(1986—), 女, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业. E-mail: jiangmanrong00@163.com

* **通讯作者:** 张均, E-mail: zhangjun@cug.edu.cn

引用格式: 江满容, 张均, 刘文浩, 等, 2015. 安徽庐江泥河铁矿床蚀变—矿化作用及元素迁移规律. 地球科学——中国地质大学学报, 40(6): 1034—1051.

岩的元素浓度,图中一条过原点的直线(即等浓度线,其连接了所有具等地球化学浓度的点).在热液活动过程中,未发生迁移行为的元素将落在等浓度线上,位于其上方的元素表示该元素被热液带入体系而富集,而位于直线下方的元素表示从原岩中被迁出而发生了亏损.蚀变岩及其原岩对应的组分浓度的对比结果,可以在一定程度上作为热液中元素活动性的衡量指标,该方法因其简单易行已受到广大地质工作者的推崇(Salvi and Williams-Jones, 1996; Grant, 2005; Parsapoor *et al.*, 2009; Hezarkhani, 2010; 王翠云等, 2012).对不同类型矿床的蚀变岩进行主量元素、微量元素及稀土元素的精细研究旨在定量的探讨岩石的蚀变强度,并取得了良好的研究效果(Sillitoe, 1995; Eilu *et al.*, 1997; Large *et al.*, 2001; Gifkins *et al.*, 2005; Benavides *et al.*, 2008; Van *et al.*, 2010; Karakaya *et al.*, 2012).前人通常以新鲜岩石为原岩,以弱蚀变、较强蚀变、强蚀变岩石的不活动元素进行最佳等浓度方程拟合,但是由于区内多阶段热液蚀变叠加强烈,该方法不能明确揭示多阶段热液叠加过程中元素迁移的继承性特征.本次研究将辅以详实的野外地质岩心观察及室内显微鉴定,并以早期蚀变岩石为原岩拟合稍晚期蚀变-矿化岩石的不活动元素得出最佳等浓度方程,探讨多阶段叠加蚀变矿化作用过程中元素迁移富集规律.

庐枞火山岩盆地是我国长江中下游地区7个中生代陆相火山岩盆地的典型代表,区内发育众多的陆相火山岩型铁矿.随着庐枞地区研究的深入,学者们精确厘定了庐枞盆地岩浆作用时空格架(范裕等, 2008; Zhou *et al.*, 2008; 周涛发等, 2008, 2010),并且通过中生代岩浆的起源、演化及深部地球动力学过程反演(Zou *et al.*, 2000; 谢智等, 2007; 袁峰等, 2008; 张乐骏, 2011),总结了成矿流体系统、成矿作用过程及成矿规律(江永宏, 2010; 汤家富等, 2010; 张荣华等, 2010; 吴礼彬等, 2011; Yuan *et al.*, 2011; 范裕等, 2012),探讨了庐枞矿集区的深部探测与深部结构(马立成, 2009; 董树文等, 2010; 高锐等, 2010; 吕庆田等, 2010)以及庐枞盆地次火山岩型铁矿床成矿深度和成矿后抬升剥蚀情况(Liu *et al.*, 2014).

泥河铁矿床自2007年发现至今,对矿床地质特征(吴明安等, 2011; 吴礼彬等, 2011; 赵文广等, 2011)、岩石学特征(范裕等, 2010; 周涛发等, 2011)、岩石地球化学(覃永军, 2010; 钱兵, 2011; 张乐骏,

2011)、围岩蚀变(马良, 2011; 夏庆霖等, 2011; 赵文广等, 2011; 车英丹, 2014)、矿床成因(赵文广等, 2011)、成矿流体(郝麟, 2011; 范裕等, 2012; 王崇, 2012)、成矿年代学(范裕等, 2010; 周涛发等, 2011)、成矿规律及其深部探测方面(匡海阳, 2012; 毛景文等, 2012; 张明明等, 2013)均有研究.泥河铁矿床埋藏于-600 m以下,蚀变矿化保存完整,蚀变分带对磁铁矿、硫铁矿、硬石膏3种矿体有明确的指示作用(郝麟, 2011; 马良, 2011; 夏庆霖等, 2011; 赵文广等, 2011; 范裕等, 2012; 王崇, 2012; 车英丹, 2014),但尚没有较为合适的方法揭示泥河铁矿床多阶段热液叠加过程中元素迁移的继承性特征.本文在详实的野外及室内研究基础上,依据矿物共生组合及蚀变与矿化的关系将泥河铁矿床划分为4个蚀变矿化带;并针对泥河铁矿特有的蚀变矿化特征进行蚀变岩主量元素分析,以早期蚀变岩石为原岩,与稍晚期蚀变岩石的不活动元素拟合最佳等浓度方程,采用改良后的等浓度图法定量探讨蚀变矿化分带的时空分布和地球化学晕,揭示火山岩型铁矿床成矿元素迁移规律及矿床形成机制,为该类型铁矿床找矿勘探提供一定的理论依据.

1 成矿地质背景

庐江-枞阳盆地位于长江中下游断裂凹陷带中(图1),该盆地地处扬子板块的北缘,西邻郟庐断裂带,并与扬子和华北两大板块碰撞带造山形成的大别造山带毗邻(任启江等, 1991),是中国东部长江中下游成矿带的重要铁铜矿集区(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 吕庆田等, 2004; 董树文等, 2007; 周涛发等, 2008).

庐枞火山岩盆地是由4个边界断裂围限(图1)、呈北东延伸的非对称“箕状”盆地(任启江等, 1991; 翟裕生等, 1992; 吕庆田等, 2014),北、东两翼的深大断裂(庐江-黄姑闸-铜陵拆离断层和陶家湾-施家湾断裂)控制着火山岩盆地的发展与演化(吕庆田等, 2014).庐枞盆地结构上由“两拗一隆”构成,构造上存在“三横六竖”断裂系统,NE-SW枞阳-黄屯基底断裂控制庐枞火山岩盆地,而且是深部岩浆活动的主要通道(Lü *et al.*, 2013; 吕庆田等, 2014).受区域上中一晚侏罗世古太平洋板块NW向挤压的远程效应,长江中下游地区强烈变形,甚至发生陆内俯冲(吕庆田等, 2014),随后的区域伸展或缘于古太平洋板块挤压应力突然减弱,或缘于

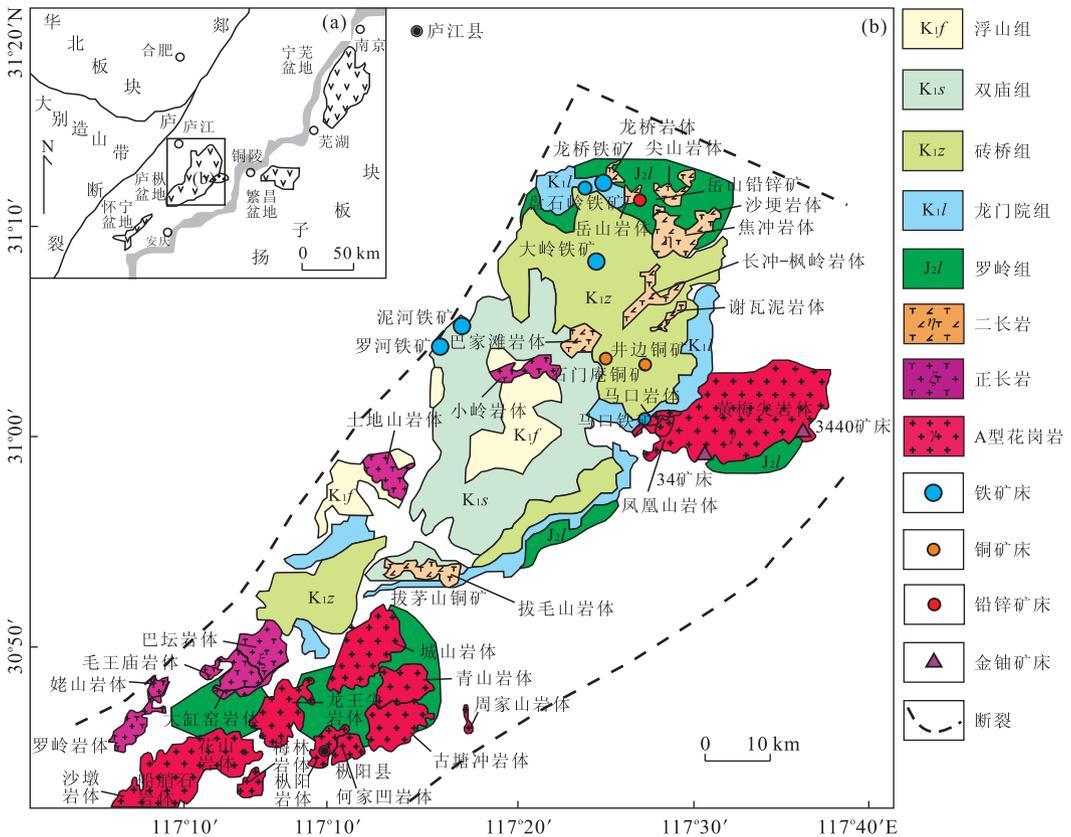


图 1 庐枞盆地地质矿产略图(据周涛发等,2010)

Fig. 1 Sketch map of geological and mineral resources in Lu-Zong volcanic basin

增厚的岩石圈拆沉,造成了研究区大规模伸展、岩浆活动和相伴的成矿作用(吕庆田等,2014)。

区内出露的沉积地层主要为中侏罗统罗岭组(J_2l)陆相碎屑沉积岩,与白垩纪火山岩系(Zhou *et al.*, 2008;覃永军等,2010;曾键年等,2010)呈不整合接触关系(任启江等,1991)。

早白垩世火山岩自早到晚、自盆地边缘至中心依次为龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组,大体上呈同心圆状展布,火山岩类由熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩及次火山岩组成(周涛发等,2010),4个旋回的火山岩系总体上呈现粗面玄武岩—玄武粗安岩—粗安岩—粗面岩组合(吕庆田等,2014)。各旋回之间岩石组成上略有差异,龙门院旋回以玄武粗安岩为主;砖桥旋回主要以辉石粗安岩、玄武粗安岩为主;双庙旋回则以粗面玄武岩为主;而浮山旋回主要为粗面岩类(周涛发等,2010;吕庆田等,2014)。区内普遍发育一系列与各组火山岩相对应的浅成—超浅成的次火山岩、侵入岩和脉岩。砖桥组分布在庐枞火山岩盆地的内圈,构成火山岩区的主体部分,是铁、硫、铜及铅锌矿化的主要层位,伴随强烈的硅化、泥化等蚀变作用。庐枞盆地内发育着丰富的黑色、有色及贵

金属矿产(图 1),如大中型铁矿床包括泥河铁矿床、罗河铁矿床、龙桥铁矿床、大岭铁矿床、大包庄、小包庄铁矿床等。泥河铁矿床产于庐枞盆地西部边界断裂南东侧,与砖桥组火山岩一次火山岩关系密切。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

泥河铁矿床位于庐枞盆地西北部边缘,罗河—义津桥基底断裂南东侧,距罗河铁矿床东北部约 3 km 处。泥河矿区岩浆岩活动强烈,砖桥组火山岩晚期有浅成—超浅成的辉石闪长玢岩(图 2)次火山岩体的形成及相伴的铁矿化;晚期形成的二长岩、正长岩等侵入岩和安山玢岩、辉绿玢岩等脉岩穿插早期的火山岩一次火山岩以及早期的铁矿体(赵文广等,2011;范裕等,2014)。目前矿区大面积遭受第四系覆盖。

矿区构造较为简单,褶皱构造不明显,总体呈向 NW 倾斜的单斜构造;断裂构造比较发育,绝大部分断裂都发育在铁矿体之上的火山岩中,为成矿前断裂,部分为成矿期后的浅层断裂;火山构造发育,泥

表 1 安徽庐江泥河铁矿床蚀变—矿化分带特征

Table 1 Alteration and mineralization zoning from Nihe iron deposit in Lujiang, Anhui

蚀变分带	矿化分带	蚀变亚带	矿物共生组合	产出部位	标高范围*
上部浅色蚀变带	硅化—泥化带	高岭石—云母化带	高岭石—云母—石英(石膏)—碳酸盐	闪长玢岩上部砖桥旋回火山岩中	-198~-578 m
		次生石英岩化带	胶状赤铁矿—浅色硬石膏—石英		
叠加蚀变带	硬石膏—黄铁矿化带	硬石膏矿化带	石英—黄铁矿—浅色硬石膏	闪长玢岩上部砖桥旋回火山岩中	-700 m 以下
		黄铁矿化带	浅色硬石膏—(菱铁矿)—赤铁矿—黄铁矿, 局部发育磁黄铁矿、黄铜矿等	闪长玢岩体与砖桥旋回火山岩外接触带	-532~-971 m
深色蚀变带	磁铁矿化带	硬石膏—辉石(石榴子石)—磁铁矿带	紫色硬石膏—透辉石(石榴子石)—磷灰石—磁铁矿	闪长玢岩体与砖桥旋回火山岩内接触带	-579 m 以下
下部浅色蚀变带	碱性长石岩化带		辉石—钾长石—钠长石—磷灰石—紫色硬石膏	矿体下部闪长玢岩中	-900 m 以下

注: * 标高范围数值参考赵文广等(2011).

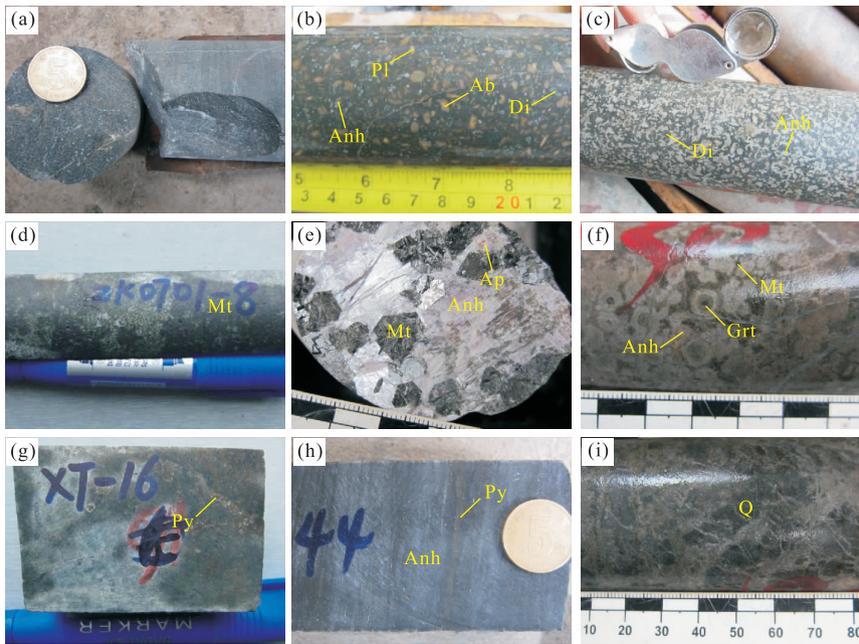


图 3 泥河铁矿床典型蚀变—矿化手标本

Fig. 3 Typical hand specimen of alteration and mineralization in Nihe iron deposit

a. 新鲜辉石闪长玢岩; b. 碱性长石岩化带:斜长石钠长石化蚀变岩石; c. 深色蚀变带为矿化石膏辉岩; d. 深色蚀变带中等浸染状磁铁矿化; e. 磁铁矿胶结早期形成的透辉石、磷灰石等矿物颗粒; f. 石榴岩; g. 含浅色硬石膏—黄铁矿; h. 黄铁矿—硬石膏带, 硬石膏与黄铁矿呈似条带状; i. 次生石英岩. 矿物名称缩写: Ab. 钠长石; Anh. 硬石膏; Ap. 磷灰石; Bt. 黑云母; Chl. 绿泥石; Cp. 黄铜矿; Di. 透辉石; Ep. 绿帘石; Grt. 石榴子石; Hem. 赤铁矿; Kln. 高岭石; Mt. 磁铁矿; Pl. 斜长石; Po. 磁黄铁矿; Py. 黄铁矿; Q. 石英

分布及共生组合特征, 自下而上可将其划分为 4 个蚀变矿化带(图 2): 下部浅色蚀变带(I)、深色蚀变带(II)、叠加蚀变带(III)及上部浅色蚀变带(IV). 根据矿物共生组合及矿化指示意义将区内铁成矿岩浆期后—热液改造期划分为: 碱性长石化作用阶段、石膏(榴)岩—磁铁矿化阶段、硬石膏—黄铁矿化阶段及硅化—泥化阶段, 与蚀变矿化带一一对应. 各蚀变带特征(表 1)分述如下.

3.1 下部浅色蚀变带

该蚀变带(图 2, 表 1)顶部界线钻孔揭露不完整, 图 2 中顶部界线为根据野外地质调查及邻区罗河铁矿下部浅色蚀变带碱性长石岩化岩带顶部界线(黄清涛, 1989)推测得出. 下部浅色蚀变带标志着区内铁矿化富集作用的开始, 以发育斜长石碱性长石化为特征, 共生矿物为少量辉石、硬石膏等(图 3b), 局部发育榴石、磷灰石和金云母. 长石表面浑浊不

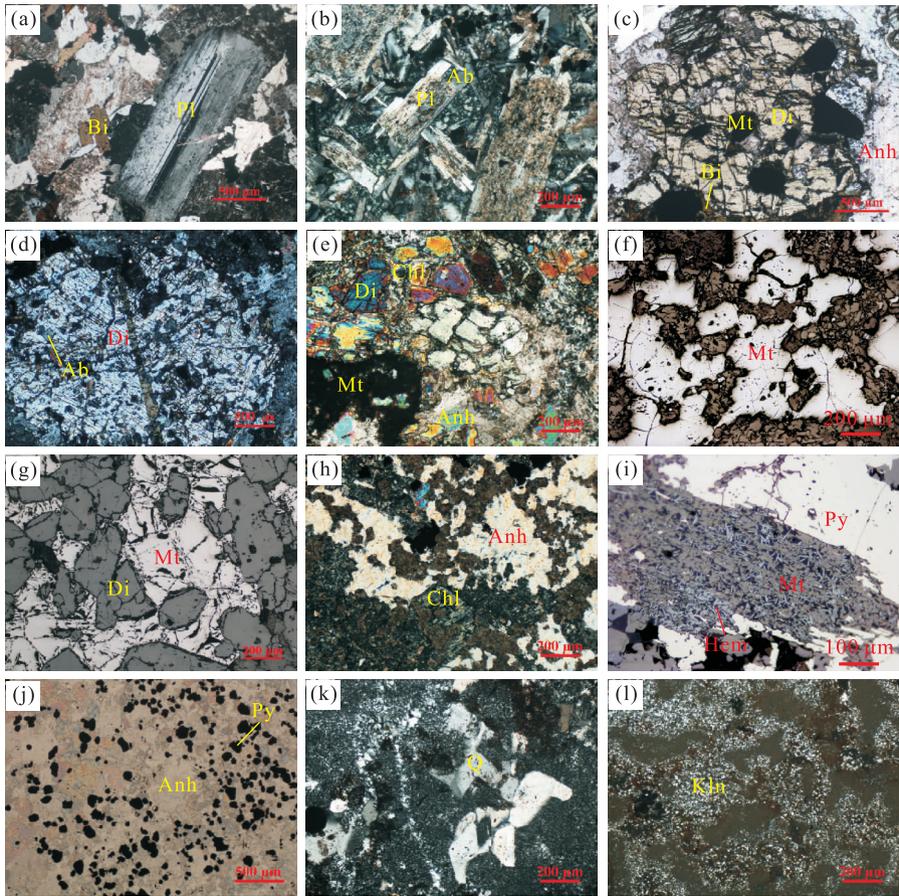


图 4 泥河铁矿床典型蚀变-矿化显微镜下照片

Fig. 4 Typical micrograph of alteration and mineralization in Nihe iron deposit

a. 新鲜辉石闪长玢岩中的斜长石,正交偏光;b. 碱性长石岩化带:钠长石化净边结构,正交偏光;c. 膏辉岩-磁铁矿化带:磁铁矿沿透辉石颗粒裂隙及边缘分布;d. 膏辉岩化带:第 2 世代钠长石沿透辉石颗粒裂隙交代;e. 膏辉岩-磁铁矿化带:膏辉岩弱绿泥石化、碳酸盐化水解,正交偏光;f. 磁铁矿胶结早期形成的透辉石、磷灰石等矿物颗粒;g. 磁铁矿化带:它形磁铁矿颗粒胶结稍早形成的自形透辉石颗粒;h. 硬石膏-黄铁矿化带,硬石膏化、透辉石绿泥石化假象;i. 叠加蚀变带:赤铁矿、黄铁矿交代溶蚀早期磁铁矿;j. 黄铁矿-硬石膏带,黄铁矿颗粒分布于硬石膏颗粒间隙中,单偏光;k. 次生石英岩化带,石英颗粒重结晶,正交偏光;l. 高岭石化带,强高岭石化,正交偏光. 矿物名称缩写同图 3

清,沿裂隙及边缘可见钠长石呈净边结构交代分布(图 4b),证明矿区深部发育的碱性长石化带为钠长石化带。

3.2 深色蚀变带

该蚀变带(图 2,表 1)主要由透辉石+紫色硬石膏(膏辉岩)、磷灰石和磁铁矿等组成(图 3c),局部发育由硬石膏、石榴子石组成的膏榴岩(图 3f),其次发育少量的楣石和黄铁矿等,深色蚀变带下部靠近碱性长石化带发育第 2 世代的钠长石化(图 4d)。磁铁矿多呈细粒浸染状分布(图 3d),可见其呈席列结构沿透辉石颗粒裂隙交代分布(图 4c、4e),或胶结稍早形成的自形透辉石、磷灰石颗粒等呈包含结构(图 4f、4g),磁铁矿应稍晚于大规模膏辉岩化形成。沿岩石裂隙可见“纸脉状”膏辉岩沿岩石破碎裂隙分布,常见伟晶状硬石膏-磷灰石-磁铁矿具梳

状结构分带特征,为稍晚阶段磁铁矿化,局部可见磁铁矿等呈自形等轴粒状分布在膏辉岩中呈“筛状结构”(图 3e)。

3.3 叠加蚀变带

叠加蚀变带是叠加在早期形成的蚀变岩之上,实际上是深色蚀变阶段的气液在物理化学条件变化的情况下所发生的改造(王崇,2012)。根据主要蚀变矿物组合及黄铁矿与硬石膏矿体空间分布特征,可将其划分为 2 个蚀变亚带(图 2,表 1):①黄铁矿化蚀变亚带(Ⅲ₁)以白色硬石膏及黄铁矿为主(图 3g),含少量磁黄铁矿、黄铜矿等,碳酸盐化、绿帘石化、绿泥石化强烈(图 4h),可见磁铁矿赤铁矿化(图 4i)、菱铁矿化和铁碧玉化等,局部可见膏辉岩水解变质(图 4e)后的残余结构(赵文广等,2011),常见黄铁矿呈网脉状交代胶结磁铁矿等;②硬石膏化蚀

变亚带(Ⅲ₂)为硬石膏矿体的主要赋存层位,硬石膏主要呈白色或肉红色糖粒状集合体(图 3h),少量黄铁矿呈稀疏浸染状分布于硬石膏中(图 4j),在颗粒粗大的硬石膏中常见到结晶较好的黄铁矿顺其解理生长,二者构成共生关系。

3.4 上部浅色蚀变带

本蚀变带按蚀变矿物组合可自下而上进一步划分为 2 个蚀变岩亚带(图 2,表 1),即次生石英岩化蚀变亚带和水云母—高岭石化蚀变亚带。

次生石英岩化蚀变亚带(Ⅳ₁)典型岩石多呈灰色、灰白色,呈块状,主要以石英为主(图 4k),其次可见白色或浅肉红色糖粒状硬石膏、高岭石及黄铁矿,局部可见少量胶状赤铁矿分布于石英颗粒边缘,局部发育有黄铁矿和黄铜矿化,具各种交代假象结构及残余结构特征,可见硅化角砾凝灰岩、硅化粗安岩、硅化膏辉岩和交代石英岩等。硅化强烈地段形成次生石英岩(图 3i)。一般而言,下部磁铁矿化发育,顶部多发育次生石英岩化,该蚀变带对区内铁矿找矿具有特征的指示意义。

水云母—高岭石化蚀变亚带(Ⅳ₂),为区内最浅部的蚀变岩带,呈似层状、不规则状分布于次生石英岩化带之上,其下部与次生石英岩化蚀变亚带可交替出现或为过渡关系。主要矿物为高岭石(图 4l)、水云母、地开石和绢云母,次要矿物为碳酸盐、硬石膏、明矾石和石英,蚀变原岩为砖桥组粗安岩或碎屑岩,本蚀变带的上界是未蚀变的紫红色凝灰岩,穿过此凝灰岩层则再无蚀变。

4 蚀变岩地球化学特征

为了更精确研究各蚀变带间的组分变化,本次研究选取每个蚀变的典型样品,进行了主量、微量、稀土元素测试,以此来定量探讨蚀变过程中元素的迁移及各种蚀变、各个蚀变带与矿化之间的联系。

4.1 样品及分析方法

新鲜辉石闪长玢岩样品来自区内铁矿化外围钻孔深部,各蚀变带典型样品为手标本及镜下鉴定(图 3、图 4)之后筛选所得,由于区内蚀变强烈,晚阶段蚀变对早阶段蚀变有不同程度的影响,因此为使此次研究具有针对性及全面性,尽量选取受晚阶段叠加蚀变影响较小、不同标高的岩石进行测试分析。

样品测试工作在澳实分析检测(广州)有限公司分析测试中心(CMA 资质单位)完成。将样品低温烘干,一次破碎至约 2 mm 以下,缩分约 300 g 做正

样,用无污染钵振动研磨至约 200 目,正样用无污染钵振动研磨至 200 目做分析用。主量元素采用电感耦合等离子体—原子发射光谱法(ICP-AES)分析,检出限为 0.01%;部分样品(XT-29,XT-30)主量元素采用 X 射线荧光光谱定量法(ME-XRF)分析,检出限为 0.01%。

4.2 主量元素分析结果及数据处理

泥河铁矿床各典型蚀变岩带主量元素分析结果见表 2 及表 3,结合马良(2011)对该蚀变带主量元素测试数据进行分析。

4.2.1 等浓度线法分析过程简介 蚀变岩及其原岩对应的组分浓度的对比结果,可以在一定程度上作为热液中元素活动性的衡量指标。泥河铁矿床具有多阶段热液蚀变叠加强烈、晚阶段蚀变都是叠加在稍早阶段蚀变之上、且早晚蚀变发生在不同的原岩中的特征。为较好地揭示多阶段热液叠加蚀变作用过程中的元素迁移规律,本次研究以早期蚀变岩石为原岩拟合稍晚期蚀变—矿化岩石的不活动元素得出最佳等浓度方程,如发育于次火山岩体中各蚀变矿化带利用新鲜辉石闪长玢岩(图 3a)与蚀变早期碱性长石化岩(图 3b)、碱性长石化岩与叠加其上的膏辉岩(图 3c)、膏辉岩与硬石膏—黄铁矿化岩(图 3g)的不活动元素拟合出最佳等浓度方程,而发育于砖桥组火山岩中蚀变矿化带,利用砖桥组新鲜火山岩与叠加其上的黄铁矿—硬石膏矿化岩(图 3h)、次生石英岩(图 3i)及水云母—高岭石化岩(图 4l)的不活动元素拟合最佳等浓度方程,公式如下:

$$C_x^A = (M^O/M^A) \cdot (C_x^O + \Delta C_x), \quad (1)$$

式中: C_x^A 为蚀变岩中 x 元素的含量(%), C_x^O 为原岩中新鲜辉石闪长玢岩或者稍早期蚀变岩中 x 元素的含量(%), M^A 、 M^O 为蚀变岩和原岩样品的质量; ΔC_x 为活动元素 x 的浓度变化值(%), $\Delta C_x > 0$ 时, x 元素在蚀变过程中被带入, $\Delta C_x < 0$ 时,元素被带出。

$$\Delta C_x = \Delta M_x/M^O. \quad (2)$$

对每一蚀变元素 M^O/M^A 恒定,而对于不活动元素,即蚀变先后未发生质量迁移的元素, $\Delta C_x = 0$,此时:

$$C_x^A = (M^O/M^A) \cdot C_x^O, \quad (3)$$

据此公式进行 $C_x^A-C_x^O$ 图解投点得出趋势线的 M^O/M^A ,不活动元素在图解上构成穿过原点(0,0)的直线,即为地球化学等浓度线(isocon),此时直线方程式为:

$$C_x^A = (M^O/M^A) \cdot C_x^O = (C_{\text{immobile}}^A/C_{\text{immobile}}^O) \cdot C_x^O, \quad (4)$$

表2 安徽庐江泥河铁矿床各蚀变矿化带主要元素分析值(%)
Table 2 The main elements analysis value of each altered and mineralization belt from Nihe iron deposit in Lujiang, Anhui Province

蚀变带 岩性	下部浅色蚀变带				深色蚀变带				叠加蚀变带				砖桥组火山岩				
	辉石粗安玢岩		碱性长石化		膏辉岩化		浸染状磁铁矿体膏辉岩		硬石膏—黄铁矿化		粗安岩、含砾凝灰粉砂岩						
编号	ZK0101-10	NH-129	NH-132	XT-2	XT-3	XT-1	XT-5	XT-4	XT-6	XT-7	XT-8	XT-14	XT-16	XT-17	XT-26	ZQ-4	ZK0101-5
SiO ₂	55.90	58.00	55.90	46.70	45.30	40.30	45.30	46.40	38.40	30.20	23.20	24.30	31.00	52.60	60.80	56.00	55.40
Al ₂ O ₃	16.05	17.45	16.85	12.30	13.05	13.20	9.41	5.33	10.05	7.32	0.81	9.62	7.19	16.80	12.45	16.50	17.70
Fe ₂ O ₃	6.24	5.71	9.14	4.97	4.50	4.93	5.66	8.63	18.70	28.8	40.50	20.1	23.60	7.71	5.01	8.15	6.14
CaO	2.67	3.03	1.20	12.90	15.45	11.80	18.00	17.85	14.55	12.10	13.80	11.50	13.15	5.11	5.10	2.45	4.76
MgO	1.95	0.78	0.90	4.39	4.95	3.96	6.81	8.03	5.17	3.57	6.27	4.55	3.43	3.07	1.56	2.84	1.48
Nb ₂ O	2.85	4.98	2.37	5.45	4.82	5.14	3.60	3.19	2.41	2.84	0.90	1.03	1.98	3.84	1.55	4.39	4.40
K ₂ O	5.42	2.86	6.94	1.17	0.74	1.09	0.72	0.33	1.58	0.81	0.22	2.82	0.73	5.01	3.93	4.39	5.22
Cr ₂ O ₃	—	—	—	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01
TiO ₂	0.78	0.81	0.79	0.67	0.82	0.86	0.83	1.09	0.49	0.32	0.30	0.15	0.28	0.82	0.62	0.80	0.77
MnO	0.13	0.08	0.06	0.14	0.13	0.23	0.20	0.19	0.24	0.22	0.31	0.50	0.21	0.12	0.10	0.33	0.23
P ₂ O ₅	0.39	0.49	0.40	0.05	0.07	0.11	0.12	0.07	0.07	2.51	0.30	0.13	1.31	0.46	0.16	0.44	0.44
SrO	0.06	0.05	0.05	0.10	0.13	0.08	0.07	0.05	0.07	0.04	0.05	0.03	0.05	0.07	0.04	0.04	0.15
BaO	0.06	0.04	0.11	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	<0.01	0.01	0.03	0.04	0.07	0.10	0.07
LOI	—	—	—	3.37	3.80	9.12	3.26	3.02	4.26	5.09	3.21	12.70	7.74	4.78	7.94	—	—
Total	92.50	94.28	94.71	92.24	93.79	90.85	94.03	94.21	96.03	93.85	89.88	87.45	90.71	100.43	99.34	—	—
钻孔	ZK0101	ZK0520	ZK0502	ZK0506	ZK0114	ZK0201	ZK0201	ZK0205	ZK0201	ZK0201	ZK0701	ZK0201	ZK0201	ZK0509	ZK0201	地表	ZK0101
数据来源	本次研究																

蚀变带 岩性	上部浅色蚀变带				上部浅黄色蚀变带				次生石英岩化带				高岭石—云母化带				
	黄铁矿—硬石膏粗安岩		含硬石膏粗安岩		含硬石膏粗安岩		含高岭石化次生石英岩		含高岭石化次生石英岩		含硬石膏高岭石化粗安岩		含硬石膏高岭石化粗安岩		含硬石膏高岭石化粗安岩		
编号	ZK2201-821	ZK2201-868	ZK1001-836	ZK1001-593	XT-30	XT-29	ZK1001-740	XT-20	XT-21	XT-23	XT-24	XT-19	XT-19	ZK2201-657	ZK1001-544		
SiO ₂	49.04	61.25	47.03	42.01	0.68	0.21	0.08	82.70	91.70	96.80	96.30	26.70	26.70	48.99	52.00		
Al ₂ O ₃	14.05	12.81	2.88	13.73	0.53	0.23	0.05	2.49	4.24	0.33	1.13	19.50	19.50	16.53	21.50		
Fe ₂ O ₃	3.85	1.18	3.05	6.44	12.10	0.61	1.10	0.82	0.69	0.51	0.58	3.35	3.35	10.96	7.45		
CaO	7.39	6.95	18.07	10.68	32.70	40.50	39.06	2.16	0.11	0.05	0.05	14.10	14.10	1.96	0.91		
MgO	0.35	0.08	0.09	0.30	0.04	<0.01	0.07	0.05	0.08	0.02	0.03	0.51	0.51	1.30	0.98		
Nb ₂ O	0.15	0.08	0.05	0.07	0.11	0.09	0.02	0.57	0.37	0.26	0.26	0.89	0.89	1.50	0.15		
K ₂ O	5.96	0.44	0.51	2.01	0.06	0.05	0.01	0.09	1.20	0.04	0.18	5.43	5.43	5.18	9.06		
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
TiO ₂	0.60	0.35	0.07	0.59	0.02	0.02	<0.01	0.70	1.05	0.90	1.18	0.39	0.39	0.80	1.18		
MnO	0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.51	0.08		
P ₂ O ₅	0.22	0.12	0.07	0.28	0.03	0.02	0.03	0.05	0.04	<0.01	<0.01	0.34	0.38	0.38	0.57		
BaO	0.15	0.18	0.21	0.12	0.25	0.27	0.51	0.05	0.06	<0.01	0.01	0.20	0.03	0.03	0.06		
SrO	0.16	0.25	0.59	0.01	0.05	0.06	0.65	0.15	<0.01	0.05	0.27	0.36	0.08	0.08	0.04		
LOI	10.20	7.84	3.26	11.25	13.35	0.83	1.15	2.34	1.33	0.50	0.43	10.90	10.90	10.10	5.77		
Total	92.12	91.53	75.88	87.49	59.93	42.90	42.75	92.17	100.88	99.48	100.43	82.71	82.71	98.32	99.74		
钻孔	ZK2201	ZK2201	ZK1001	ZK1001	ZK1001	ZK1001	ZK1001	ZK1001	ZK0201	ZK0201	ZK0509	ZK0201	ZK0201	ZK2201	ZK1001		
数据来源	马良,2011																

注:表中Fe₂O₃为全铁含量。

表 3 安徽庐江泥河铁矿床各蚀变矿化带主量元素质量迁移 ($\Delta C_x/C_x^0$) 计算结果

Table 3 Calculated result of elements migration in each altered and mineralization belt from Nihe iron deposit

元素	碱性长石化均值	膏辉岩化均值	磁铁矿化均值	黄铁矿化均值	黄铁矿—硬石膏化带均值	硬石膏矿体均值	次生石英岩均值	高岭石化均值
SiO ₂	-0.01	0.07	-0.25	-0.07	-0.13	-0.99	0.46	-0.23
Al ₂ O ₃	-0.03	-0.41	-0.08	0.80	-0.30	-0.97	-0.88	0.29
Fe ₂ O ₃	-0.13	0.53	3.62	1.85	-0.44	0.40	-0.91	0.18
CaO	6.38	0.38	-0.15	-0.34	1.62	2.84	-0.87	0.44
MgO	3.64	0.73	-0.24	-0.41	-0.90	-0.78	-0.98	-0.51
Na ₂ O	0.92	-0.32	-0.32	-0.20	-0.97	-0.07	-0.90	-0.74
K ₂ O	-0.75	-0.46	0.86	5.45	-0.51	-0.98	-0.92	0.52
TiO ₂	0.25	0.26	-0.57	-0.48	-0.45	-0.95	0.20	0.13
MnO	1.35	0.21	0.48	0.68	-0.95	-0.08	-0.96	-0.00
P ₂ O ₅	-0.77	0.28	10.36	6.91	-0.50	-0.82	-0.93	0.29
SrO	1.46	-0.40	-0.00	-0.01	1.16	1.30	-0.61	0.32
BaO	-0.70	0.24	0.41	0.58	2.09	0.11	0.34	1.04
LOI	—	-0.40	0.50	2.18	0.02	-0.31	-0.87	0.17

注:表中 Fe₂O₃ 为全铁含量。

式中: M^0/M^A 、 $C_{\text{immobile}}^A/C_{\text{mobile}}^0$ 为直线斜率, C_{immobile}^A 代表弱蚀变岩中不活动组分的浓度(%), C_{immobile}^0 代表新鲜辉石闪长玢岩或者稍早期蚀变岩中的不活动组分的浓度(%). 前人研究表明不活动组分 immobile 为 Al₂O₃、TiO₂、P₂O₅、Zr、Hf、Nb、Ta 和 Y (Winchester and Floyd, 1977; Hynes, 1980; Grant, 1986; Salvi and Williams-Jones, 1996; Jiang *et al.*, 2003; Küpeli, 2010; Karakaya *et al.*, 2012), 不同岩石的蚀变和矿化作用过程中 Na₂O、MgO、SiO₂、FeO 等亦可能是不活动组分 (Grant, 1986), 要依据实际情况进行具体分析。

蚀变岩相对于原岩各组分的富集与亏损程度可以利用公式(1)两边同除以 C_x^0 来表征, 即:

$$\frac{C_x^A}{C_x^0} = \frac{M^0}{M^A} \left(\frac{C_x^0}{C_x^0} + \frac{\Delta C_x}{C_x^0} \right), \quad (5)$$

整理后得:

$$\begin{aligned} (\Delta C_x/C_x^0) \times 100\% = \\ [(C_{\text{immobile}}^0/C_{\text{immobile}}^A)(C_x^A/C_x^0) - 1] \times 100\%, \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $(\Delta C_x/C_x^0) \times 100\%$ 是蚀变岩相对于原岩组分 x 的百分比。

4.2.2 各蚀变带岩石主量元素的等浓度图 各组分在相应蚀变过程的迁移和富集见图 5。

(1)碱性长石化带. 由碱性长石化蚀变闪长玢岩均值主量元素数据拟合的等浓度图(图 5a)可知, 最佳拟合等浓度线的斜率 ($C_{\text{immobile}}^A/C_{\text{mobile}}^0$) 约为 0.79, 表明在水岩相互作用过程中碱性长石化闪长玢岩的质量增加了约 26.8%. 由图 5a 可知, 碱性长石化岩相对于原岩在热液交代作用下以强烈富集

CaO、MgO 和 Na₂O, 明显亏损 K₂O、P₂O₅, 略亏损 Fe₂O₃ 为特征, 此蚀变作用过程中 SiO₂、Al₂O₃ 及 TiO₂ 为不活动组分。

(2)膏辉岩—磁铁矿化带. 由未矿化膏辉岩化蚀变岩与碱性长石化蚀变岩主量元素数据拟合的等浓度图(图 5b)可知, 最佳拟合等浓度线的斜率 ($C_{\text{immobile}}^A/C_{\text{mobile}}^0$) 约为 0.97, 表明在水岩相互作用过程中膏辉岩化蚀变岩的岩石质量变化较小, 仅相对增加了约 3%. 由图 5b 可知, 膏辉岩化蚀变岩相对碱性长石化蚀变岩在热液交代作用下以强烈富集 Fe₂O₃、CaO 和 MgO, 弱富集 P₂O₅, 较强烈亏损 Na₂O、K₂O、Al₂O₃ 和 LOI 为特征, TiO₂ 和 SiO₂ 为不活动组分。

由稀疏浸染状磁铁矿化膏辉岩与未矿化膏辉岩化蚀变岩主量元素数据拟合的等浓度图(图 5c)可知, 最佳拟合等浓度线的斜率 ($C_{\text{immobile}}^A/C_{\text{mobile}}^0$) 约为 0.89, 表明在水岩相互作用过程中磁铁矿化膏辉岩的质量增加了约 12.4%. 由图 5c 可知, 磁铁矿化膏辉岩相对未矿化膏辉岩化蚀变岩在热液交代作用下以强烈富集 Fe₂O₃ 和 P₂O₅, 弱富集 K₂O 和 LOI; 较亏损 SiO₂、TiO₂ 和 Na₂O, 弱亏损 CaO 与 MgO; Al₂O₃ 为不活动组分。

(3)硬石膏—黄铁矿化带. 硬石膏—黄铁矿化带产于早期膏辉岩化蚀变岩中, 由硬石膏—黄铁矿化蚀变岩与未矿化膏辉岩主量元素数据拟合的等浓度图(图 5d)可知, 最佳拟合等浓度线的斜率 ($C_{\text{immobile}}^A/C_{\text{mobile}}^0$) 约为 0.84, 表明在水岩相互作用过程中硬石膏—黄铁矿化蚀变岩相对膏辉岩的质量增加了约 18.7%. 由图 5d 可知, 硬石膏—黄铁矿化

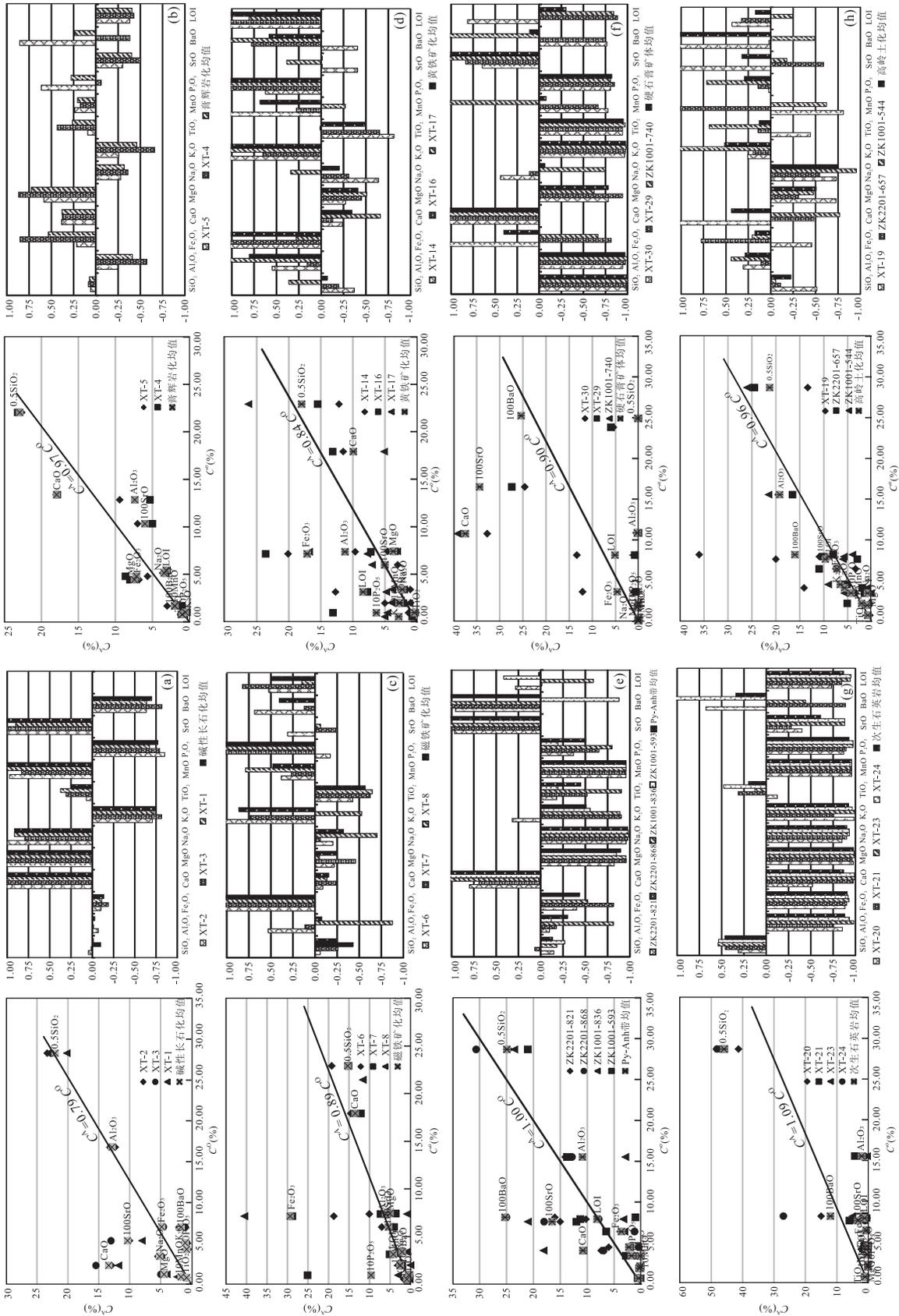


图5 安徽庐江泥河铁矿床火山岩中不同矿化变带的等浓度带的等浓度图及其相应组分的亏损与富集柱状图

Fig. 5 Isocon diagram of the different alteration styles identified in sub-volcanic rock in Nihe iron deposit and histograms showing gains and losses of selected elements during hydrothermal alteration as calculated from isocon diagram method

为了直观表现等浓度图,笔者将原始数值进行了0.5、10、100倍的缩放

蚀变岩相对磁铁矿化膏辉岩在热液交代作用下以强烈富集 Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 K_2O 和 LOI, 较富集 Al_2O_3 , 较亏损 CaO 和 MgO , 弱亏损 Na_2O 和 SiO_2 为特征; TiO_2 为不活动组分。

(4) 黄铁矿—硬石膏矿化带. 由弱黄铁矿—硬石膏矿化蚀变岩与砖桥组火山岩主量元素数据拟合的等浓度图(图 5e、5f)可知, 最佳拟合等浓度线的斜率($C_{\text{immobile}}^{\text{A}}/C_{\text{immobile}}^{\text{O}}$)约为 1.0, 表明在水岩相互作用过程中弱黄铁矿—硬石膏矿化带蚀变岩蚀变前后的质量基本保持不变. 而含硬石膏矿体蚀变岩与砖桥组火山旋回主量元素数据拟合的等浓度图(图 5f)显示最佳拟合等浓度线的斜率($C_{\text{immobile}}^{\text{A}}/C_{\text{immobile}}^{\text{O}}$)约为 0.90, 蚀变作用过程中含硬石膏矿体蚀变粗安岩相对质量增加了约 10.5%. 由图 5e、5f 可知, 硬石膏矿化蚀变岩相对砖桥组火山旋回在热液交代作用下以强烈富集 CaO 、 SrO 和 BaO , 强烈亏损 Al_2O_3 、 SiO_2 、 K_2O 、 MgO 和 Na_2O , 较亏损 LOI、 P_2O_5 为特征; TiO_2 为不活动组分. 硬石膏矿体中黄铁矿化较强, 相对弱黄铁矿—硬石膏矿化蚀变岩中 Fe_2O_3 略有富集。

(5) 次生石英岩化带. 由次生石英岩化带蚀变岩与砖桥组火山旋回主量元素数据拟合的等浓度图(图 5g)可知, 最佳拟合等浓度线的斜率($C_{\text{immobile}}^{\text{A}}/C_{\text{immobile}}^{\text{O}}$)约为 1.09, 表明在水岩相互作用过程中砖桥组火山岩的质量减少了约 8.6%. 由图 5g 可知, 次生石英岩化带蚀变岩相对砖桥组火山旋回在热液交代作用下以强烈富集 SiO_2 , 而 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 P_2O_5 及 LOI 等均发生不同程度的亏损为特征; TiO_2 为不活动组分。

(6) 水云母—高岭石化蚀变带. 由水云母—高岭石化蚀变带与砖桥组火山旋回主量元素数据拟合的等浓度图(图 5h)可知, 最佳拟合等浓度线的斜率($C_{\text{immobile}}^{\text{A}}/C_{\text{immobile}}^{\text{O}}$)约为 0.96, 表明在水岩相互作用过程中砖桥组火山岩的质量增加了约 4.3%. 由图 5h 可知, 水云母—高岭石化蚀变带相对砖桥组火山旋回在热液交代作用下以富集 K_2O 、 Al_2O_3 , 较强烈亏损 SiO_2 、 Na_2O 和 MgO 等为特征; TiO_2 为不活动组分。

5 讨论

5.1 蚀变带元素迁移规律

蚀变过程中元素的带入带出使蚀变分带特征明显. 泥河铁矿床围岩蚀变大致划分 4 个蚀变带和 6 个蚀变亚带, 根据各蚀变—矿化带元素迁移特征可将泥河铁矿床围岩蚀变大致划分为 4 个阶段, 分别

为早期碱交代作用(钠化)阶段, 铁、镁、钙交代作用阶段, 铁、硫、钙充填交代作用阶段及硅、钾、铝水热交代作用阶段. 泥河铁矿床蚀变矿化特征及元素迁移富集规律详述如下:

(1) 下部浅色蚀变带以发育钠长石为特征, 蚀变岩石主要以富集 Mg 、 Ca 及 Na , 亏损 K 、 P 、 Fe 元素为特征, Al 、 Ti 为不活动组分. 实验研究表明, 钠的浓度的增高会降低硅酸盐熔体的粘度和熔点, 使低铁氧化(刘英俊和曹励明, 1987). 前人实验证明, Na 起着促使铁的氧化物熔离的作用, 王玉荣等(1981)实验研究表明岩浆出溶的高温高盐度岩浆流体在大于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时呈碱性, 而次生钠长石形成于过碱性的流体(Martin and Prwinsky, 1969). 而在 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时, 铁以 Cl 的络合物运移, 其形成形式为 $\text{Na}(\text{FeCl}_4)$ 或 $\text{Na}_2(\text{FeCl}_4)$, 这 2 种络合物存在以下平衡(Pirajno, 2009): $\text{FeCl}_4^- \rightarrow \text{FeCl}_3 + \text{Cl}^-$ 或 $\text{FeCl}_4^{2-} \rightarrow \text{FeCl}_2 + 2\text{Cl}^-$, 提高 Cl^- 浓度以及酸性条件有利于铁的 Cl 络合物的稳定, 使得其发生长期的迁移(Holsor and Schmeer, 1961; Chou and Eugster, 1977; Crerar *et al.*, 1978; Eugster and Chou, 1979; 中国科学院地球化学研究所, 1987).

泥河铁矿床早期碱交代作用过程中, 在富含 Na 、 Ca 和 Mg 的碱性条件下, 岩浆流体与岩浆岩中的斜长石、辉石及角闪石等作用, 溶液中的钠置换钾, 导致熔浆的去硅作用, Na^+ 不断被消耗进入固相, 形成钠长石反应边(胡受奚等, 2004), 而将 Ca 和 Al 释放出来(沈宝丰等, 1977), 成矿流体逐渐转变为酸性. 同时钠长石化过程也导致了 Ca^{2+} 和 $(\text{Mg}, \text{Fe})^{2+}$ 进入溶液中(黄清涛, 1989), Na^+ 的消耗亦使得流体中的 Cl^- 的浓度大大提高, 为后期的钙化和铁进入流体创造了物质基础. 碱性长石化作用过程中释放出来的含 Ca 、 Mg 成矿流体与次火山岩岩石发生对流循环交代作用, 萃取辉石等 Fe 硅酸盐矿物中的铁质, 流体中铁的溶解度随着介质酸度增大以及 Na^+ 和 K^+ 浓度增高而增大, 暗示了富铁流体主要是以 Na-Fe-Cl 为主的络合物存在(侯通, 2014), 并使铁相对富集(刘英俊和曹励明, 1987), 形成富铁流体, 代表着铁矿化作用的开始。

(2) 深色蚀变带以发育紫色硬石膏—磷灰石—透辉石(石榴子石)—磁铁矿为特征, 发育于辉石闪长玢岩体与火山岩接触带内部, 为磁铁矿体的赋存层位, 磁铁矿以浸染状及网脉状矿化为特征, 蚀变过程以铁、镁、钙交代作用为主. 膏辉(榴)岩化为磁铁矿体的近矿及容矿围岩蚀变, 岩石以强烈富集 Ca 、

Mg,弱富集 Fe、P,亏损 Al、LOI、Na 和 K, Ti 和 Si 为不活动组分为特征。膏辉岩化过程为钠长石化之后富含 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的成矿流体与围岩发生重结晶作用形成大量的透辉石-次透辉石(中国科学院地球化学研究所,1987),含矿流体沿着岩体边缘及裂隙渗入,并与岩石中的斜长石、次透辉石及磁铁矿作用(Holsor and Schneer, 1961; Chou and Eugter, 1977),进一步充分萃取围岩中的铁质。磁铁矿化过程以强烈富集 Fe、P,弱富集 K 和 LOI, Si、Ca、Mg 和 Na 迁移亏损, Al 为不活动组分为特征。泥河铁矿床 Fe 质富集特征显示浸染状及脉状磁铁矿化均略晚于大规模膏辉岩化形成,早期萃取出的铁质在近水平的岩浆冷缩裂隙系统中贯入沉淀,于次火山岩体接触带或内接触带部位形成不规则的似层状和穹窿状分布磁铁矿矿体。铁质迁移、沉淀的过程中与 Na 的富集呈负相关,而与 P 则呈正相关关系,正好对应两个世代的钠长石化及磷灰石的产出。

(3) 叠加蚀变带以赤铁矿-(菱铁矿)-浅色硬石膏-黄铁矿沉淀为特征,发育于辉石闪长玢岩体与火山岩内外接触带部位,为黄铁矿体、硬石膏矿体赋存部位,主要发生铁、硫、钙充填交代作用。含硬石膏-黄铁矿化蚀变叠加于膏辉岩化岩石及粗安岩火山岩之上,以富集 Fe、P 和 LOI,较亏损 Ca、Mg、Ti 为不活动组分为特征。早期磁铁矿大规模沉淀之后的中高温(马良,2011;范裕等,2012)成矿热液流体富含 Si^{4+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+} 等,在硬石膏-黄铁矿化过程中先交代溶蚀部分磁铁矿(黄清涛,1989),同时萃取上升空间周围岩石中的铁质,在次火山岩体与砖桥组火山旋回底部接触带部位的横向裂隙空间铁质沉淀形成似层状黄铁矿体,此过程中无水硅酸盐矿物退蚀变为绿泥石化、绿帘石化等含水硅酸盐矿物及碳酸盐矿物(马良,2011;张乐骏,2011),形成含石英-绿泥石-菱铁矿-赤铁矿-黄铁矿组合,此时成矿流体中富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} (中国科学院地球化学研究所,1987)。黄铁矿-硬石膏化蚀变岩强烈富集 Ca、Sr 和 Ba,强烈亏损 Al、Si、K、Mg 和 Na,较亏损 P, Ti 为不活动组分。黄铁矿-硬石膏化蚀变过程中,早期磁铁矿化及黄铁矿化过程中迁移出的富 Ca 热液流体由于温度降低(马良,2011;范裕等,2012),成矿物理化学条件的转变在次火山岩体外接触带上部的横向裂隙系统中形成硬石膏矿体, Sr 和 Ba 大离子亲石元素富集可能与硬石膏大规模沉淀有关。

(4) 上部浅色蚀变带以发育硅化-泥化为特征,

发育于砖桥组下段火山岩中,该蚀变过程以硅、钾、铝水热交代作用为特征。硅化带强烈富集 Si,其他元素均发生不同程度亏损;水云母-高岭石泥化带富集 K、Al,亏损 Si、Na 等为特征, Ti 为不活动组分。残余成矿流体对围岩的酸性淋滤形成水云母-高岭石等(马良,2011), Si 质被迁移出来,与早期膏辉岩化、黄铁矿-硬石膏化等过程迁移出的 Si 质,在重力作用及顶部凝灰质粉砂岩的阻挡作用在酸性减弱及近地表的强氧化环境 SiO_2 卸载沉淀形成次生石英岩壳。空间上呈舌状位于膏辉岩的顶部并且有大约 200~500 m 的间隔距离,且次生石英岩的发育程度与磁铁矿化存在正相关性,一般磁铁矿化越强,被迁移硅质含量越多,磁铁矿体顶部硅质岩壳则越发育,仅在次火山穹窿顶部可能由于热液受重力作用发生侧向迁移时减薄,在附近低洼部位沉淀。区内硅质的大规模沉淀标志着铁矿成矿作用过程全部结束。

泥河铁矿床阳离子的沉淀顺序大致为: Na(钠长石化)→Ca、Mg、Fe、P(透辉石、石榴子石、硬石膏、磷灰石、磁铁矿化)→Ca、Fe(硬石膏、黄铁矿)→Al、Si(高岭石、石英),从早到晚,元素的带入和带出是连续互补的,蚀变矿化作用是一个连续的过程。

5.2 矿化元素迁移富集规律及其找矿意义

泥河铁矿成矿之后不久即被双庙组火山岩覆盖,后期区域性构造抬升剥蚀较为缓慢而稳定(Liu *et al.*, 2014),尚未剥露至浅色蚀变带,使泥河铁矿矿体目前仍然埋深于地下 600~1 000 m,矿体及其围岩蚀变特征保存完整。根据前面的围岩蚀变元素迁移机制的分析,可知围岩蚀变与矿化是伴随发生的,每种围岩蚀变都对应或记录着相应的成矿信息。

根据前人对宁芜玢岩铁矿、邻近的罗河铁矿围岩蚀变研究成果及国内外对铁矿床成岩成矿研究成果(中国科学院地球化学研究所,1987;黄清涛,1989;梁祥济,2000;张荣华等,2002, 2010;曾贻善,2003; Pirajno, 2009; Mirvakili *et al.*, 2012),结合泥河铁矿床各蚀变矿化带之间矿物穿插关系、空间分布、矿物共生组合、元素迁移富集状态及物理化学条件(郝麟,2011;范裕等,2012;王崇,2012),对陆相次火山岩铁矿床进行详细的蚀变矿化分带解剖,探讨该类型铁矿床元素迁移富集规律、成矿作用过程可为该类型矿床攻深找盲、找矿勘探提供明确的方向。

泥河铁矿床矿化与蚀变的关系密切,磁铁矿体均产于深色蚀变带,硫铁矿体在深色到叠加蚀变带

下部中均有分布,硬石膏矿体产于叠加蚀变带上部。该矿床元素迁移富集具有明显的成矿指示意义:(1)Na 质仅在碱性长石化带明显带入,在其他各带均表现为带出特征。钠质在高温条件($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$)下沉淀,以钠长石化为特征。深部的钠长石化有 2 个阶段,时间相差不大,早期钠长石化发生于膏辉岩化之前,晚期与大规模膏辉岩化几乎同时,总体上 Fe 迁移明显与 Na 的富集呈负相关,伴随 P 的溶蚀迁移,钠长石化的大量出现标志着铁矿化的开始。(2)Fe 质在深色蚀变带及早期叠加蚀变带以带入为特征,在深色蚀变带近于同时或稍晚于 Ca、Mg 的带入沉淀,以形成硬石膏—透辉石(膏辉岩)—磁铁矿高温矿物组合为特征,浸染状及脉状磁铁矿稍晚于膏辉岩形成;在叠加蚀变带 Fe 质富集于含硬石膏—黄铁矿亚带,以形成赤铁矿—(菱铁矿)—硬石膏—黄铁矿组合为特征,该过程伴随强烈的硅酸盐矿物绿泥石化、绿帘石化水解。(3)P 元素主要以磷灰石产出,与 Fe 质迁移呈正相关关系,在早期碱性长石化带中溶蚀迁出,而在早期膏辉岩—磁铁矿化带及黄铁矿化带中以迁入富集为特征。(4)Ca、Mg 质主要在膏辉岩化带及叠加蚀变带晚期迁入富集,作为膏辉岩及含黄铁矿—硬石膏蚀变岩的造岩矿物而富集。(5)Al、Si 元素在以闪长玢岩体为背景的早期蚀变带中迁移不明显,表现出一定的差异性,但在以粗安岩为背景的叠加蚀变带中大量淋失,并在浅色蚀变带中沉淀。K、Al 在水云母—高岭石带迁入富集,而早期蚀变迁移出的 Si 质在后期沉淀形成次生石英岩壳。

综上所述,钠长石化的大量出现是 Na 质沉淀的标志,代表铁矿化的开始;膏辉岩化是 Ca、Mg、Fe 质沉淀的表现形式,为磁铁矿体的近矿和容矿蚀变;次生石英岩化、高岭石化是早期迁移出的 Al、Si 质沉淀的结果,是磁铁矿化远程指示性蚀变。

6 结论

(1)各蚀变带典型蚀变岩主量元素等浓度线法分析结果表明,早期碱交代作用阶段以 Na 质富集为主,钠长石化为特征,代表着铁矿化作用的开始。Fe 质迁移与 Na 质富集为负相关,与 P 富集呈正相关关系。深色蚀变带以铁、镁、钙交代作用为主,膏辉岩以强烈富集 Ca、Mg,弱富集 Fe、Si 为特征,为磁铁矿化过程富集 Fe、P 提供物质基础。叠加蚀变带以铁、硫、钙充填交代作用为主,早期赤铁矿—(菱铁矿)—硬石膏—黄铁矿化过程伴随强烈的硅酸盐矿

物绿泥石化、绿帘石化水解,富集 Fe、P、S 和 LOI,强烈亏损 Ca、Mg;黄铁矿—硬石膏化蚀变岩以强烈富集 Ca、Sr 和 Ba,强烈亏损 Al、Si、K、Mg 和 Na,较亏损 P 为特征,Ba、Sr 等大离子亲石元素富集可能与硬石膏大规模沉淀有关。上部浅色蚀变带以硅、钾、铝水热交代作用为主,水云母—高岭石带富集 K、Al,而早期蚀变迁移出的 Si 质则在次生石英岩化带沉淀形成硅质岩壳,磁铁矿化强度与硅化强度呈正相关关系,区内硅质的大规模沉淀标志着铁矿成矿作用过程全部结束。

(2)泥河铁矿床阳离子的沉淀顺序大致为:Na(钠长石化) \rightarrow Ca、Mg、Fe、P(透辉石、石榴子石、硬石膏、磷灰石、磁铁矿化) \rightarrow Ca、Fe(硬石膏、黄铁矿) \rightarrow Al、Si(高岭石、石英),从早到晚,元素的带入和带出是连续互补的,蚀变矿化作用是一个连续的过程。Ti 元素仅在磁铁矿大规模沉淀时发生类质同象置换而迁移,在其他蚀变过程中均以不活动组分存在。

(3)泥河铁矿的围岩蚀变分带对磁铁矿体、硫铁矿体、硬石膏矿体均表现出明显的指示作用,磁铁矿体均产于深色蚀变带,硫铁矿体在深色到叠加蚀变带下部中均有分布,硬石膏矿体产于叠加蚀变带上部。泥河铁矿床蚀变—矿化特征及元素迁移富集规律显示,钠长石的大量出现是 Na 质沉淀的标志,亦为铁矿化的开始;膏辉岩化是 Ca、Mg、Fe 质沉淀的表现形式,为磁铁矿体的近矿和容矿蚀变;次生石英岩化、高岭石化是早期迁移出的 Al、Si 质沉淀的结果,是磁铁矿化远程指示性蚀变。

致谢:野外工作得到安徽省地质调查院、安徽五鑫矿业开发有限公司的大力支持和马钢罗河矿业公司孙仕平工程师的热情帮助,同时感谢陆建培老师和杨梅珍老师在岩相学鉴定中悉心指导,在此表示衷心感谢!

References

- Benavides, J., Kyser, T. K., Clark, A. H., et al., 2008. Exploration Guidelines for Copper-Rich Iron Oxide-Copper-Gold Deposits in the Mantoverde Area, Northern Chile: The Integration of Host-Rock Molar Element Ratios and Oxygen Isotope Compositions. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 8 (3-4): 343-367.
- Chang, Y. F., Liu, X. P., Wu, Y. C., 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Geological Publishing House, Bei-

- jing, 71—76 (in Chinese).
- Crerar, D. A., Susak, N. J., Borcsik, M., et al., 1978. Solubility of the Buffer Assemblage Pyrite-Pyrrhotite-Magnetite in NaCl Solutions from 200 to 350 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(9): 1427—1437. doi: 10.1016/0016-7037(78)90048-0
- Che, Y. D., 2014. A Study on the Characteristics of Leucocratic Alteration Zone of Nihe Iron Deposit, Lujiang, Anhui (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Chou, I. M., Eugster, H. P., 1977. Solubility of Magnetite in Supercritical Chloride Solutions. *Amer. Jour. Sci.*, 277: 1296—1314.
- Dong, S. W., Xiang, H. S., Gao, R., et al., 2010. Deep Structure and Ore Formation within Lujiang-Zongyang Volcanic Ore Concentrated Area in Middle to Lower Reaches of Yangtze River. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2529—2542 (in Chinese with English abstract).
- Dong, S. W., Zhang, Y. Q., Long, C. X., et al., 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).
- Eilu, P., Mikucki, E. J., Groves, D. L., 1997. Wallrock Alteration and Primary Geochemical Dispersion in Lode-Gold Exploration; Notes from Short Course, Fourth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Turku, 11(13): 65.
- Eugster, H. P., Chou, I. M., 1979. A Model for the Deposition of Cornwall Type Magnetite Deposit. *Economic Geology*, 74(4): 763—774. doi: 10.2113/gsecongeo.74.4.763
- Fan, Y., Liu, Y. N., Zhou, T. F., et al., 2014. Geochronology of the Nihe Deposit and in the Lu-Zong Basin and Its Metallogenic Significances. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1369—1381 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Y., Zhou, T. F., Hao, L., et al., 2012. Ore-Forming Fluid Characteristic of Nihe Iron Deposit in Lu-Zong Basin, Anhui Province and Its Significance to Ore Genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3113—3124 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Y., Zhou, T. F., Yuan, F., et al., 2008. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of the A-Type Granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) Area and Their Geological Significances. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1715—1724 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Y., Zhou, T. F., Yuan, F., et al., 2010. High Sulfidation Epithermal Hydrothermal System in Lu-Zong Volcanic Basin; Evidence from Geological Characteristics and Sulfur Isotope Data of Fanshan Alunite Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3657—3666 (in Chinese with English abstract).
- Gao, R., Lu, Z. W., Liu, J. K., et al., 2010. A Result of Interpreting from Deep Seismic Reflection Profile; Revealing Fine Structure of the Crust and Tracing Deep Process of the Mineralization in Luzong Deposit Area. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2543—2552 (in Chinese with English abstract).
- Gifkins, C., Herrmann, W., Large, R., 2005. Altered Volcanic Rocks—A Guide to Description and Interpretation. Centre Ore Depos. Res., Univ. Tasmania, Hobart.
- Grant, J. A., 1986. The Isocon Diagram; A Simple Solution to Gresens' Equation for Metasomatic Alteration. *Economic Geology*, 81(8): 1976—1982.
- Grant, J. A., 2005. Isocon Analysis; A Brief Review of the Method and Applications. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(17—18): 997—1004.
- Gresens, R. L., 1967. Composition-Volume Relationships of Metasomatism. *Chemical Geology*, 2: 47—65.
- Hao, L., 2011. Study on the Ore-Forming Fluid of Nihe Iron Deposit in Lujiang County, Anhui Province (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Hezarkhani, A., 2010. Geochemical Element Mobility during Alteration/Mineralization in the Sungun Porphyry Copper Deposit, Azerbaijan-Iran. *International Geology Review*, 53(8): 980—1002.
- Holser, W. T., Schineer, L. J., 1961. Hydrothermal Magnetite. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 72: 369—386.
- Hou, T., 2014. Super-Efficient Enrichment Mechanism of Iron in the Intermediate-Basic Magmatic System—Case Studies on Typical Iron Deposits (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. X., Ye, Y., Fang, C. Q., 2004. Petrology of Metasomatically Altered Rocks and Its Significance in Prospecting. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Huang, Q. T., 1989. Iron Ore Deposit of Luohe in Lujiang, Anhui Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hynes, A., 1980. Carbonatization and Mobility of Ti, Y, and Zr in a Scot Formation Metabasalts, SE Quebec. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 75(1): 79—87.
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1987. Metallogenic Mechanism for the Porphyrite Iron

- Deposits of Ningwu. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Jiang, N. , Sun, S. , Chu, X. , et al. , 2003. Mobilization and Enrichment of High-Field Strength Elements during Late- and Post-Magmatic Processes in the Shuiquangou Syenitic Complex, Northern China. *Chemical Geology* , 200(1-2): 117-128.
- Jiang, Y. H. , 2010. Metallogenic Regularity and Prospecting of Fe-Cu Deposit in Lujiang-Zongyang Area of Anhui. *Global Geology* , 29 (3): 372 - 382 (in Chinese with English abstract).
- Karakaya, M. C. , Karakaya, N. , Kuoei, S. , et al. , 2012. Mineralogy and Geochemical Behavior of Trace Elements of Hydrothermal Alteration Types in the Volcanogenic Massive Sulfide Deposits, NE Turkey. *Ore Geology Reviews* , 48:197-224.
- Kuang, H. Y. , 2012. Study on Deep Prospecting by Electromagnetic Prospecting and Gravity and Magnetic 3D Inversion of Nihe Iron Deposit, Anhui Province (Dissertation). East China Institute of Technology, Nanchang (in Chinese with English abstract).
- Küpel, S. , 2010. Trace and Rare-Earth Element Behaviors during Alteration and Mineralization in the Attepe Iron Deposits (Feke-Adana, Southern Turkey). *Journal of Geochemical Exploration* , 105(3): 51-74.
- Large, R. R. , Gemmeil, J. B. , Paulick H. , 2001. The Alteration Box Plot—A Simple Approach to Understanding the Relationship between Alteration Mineralogy and Litho-geochemistry Associated with Volcanic-Hosted Massive Sulphide Deposits. *Economic Geology* , 96: 957-971.
- Liang, X. J. , 2000. Experimental Studies on the Mechanism of the Formation of Skarns and Skarn Ore Deposits in China. Academy Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, W. H. , Zhang, J. , Sun, T. , et al. , 2014. Application of Apatite U-Pb and Fission-Track Double Dating to Determine the Preservation Potential of Magnetite-Apatite Deposits in the Luzong and Ningwu Volcanic Basins, Eastern China. *Journal of Geochemical Exploration* , 138:22-32. doi:10. 1016/j. gexplo. 2013. 12. 006
- Liu, Y. J. , Cao, L. M. , 1987. Introduction to Element Geochemistry. Geological Publishing House, Beijing 113 - 137 (in Chinese).
- Lü, Q. T. , Han, L. G. , Yan, J. Y. , et al. , 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).
- Lü, Q. T. , Hou, Z. Q. , Yang, Z. S. , et al. , 2004. Upplating 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, Q. T. , Liu, Z. D. , Tang, J. T. , et al. , 2014. Upper Crustal Structure and Deformation of Lu-Zong Ore District: Constraints from Integrated Geophysical Data. *Acta Geologica Sinica* , 88(4): 447 - 465 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Q. T. , Yan, J. Y. , Shi, D. N. , et al. , 2013. Reflection Seismic Imaging of the Lujiang-Zongyang Volcanic Basin, Yangtze Metallogenic Belt; An Insight into the Crustal Structure and Geodynamics of an Ore District. *Tectonophysics* , 606: 60 - 77. doi: 10. 1016/j. tecto. 2013. 04. 006
- Ma, L. , 2011. Study on the Characteristics of Wall-Rock Alteration of the Nihe Iron Deposit in Lujiang, Anhui Province, China (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Ma, L. C. , 2009. The Deep Tectonics and Metallogenesis in Lu-Zong Volcanic Basin, Anhui, China (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Martin, A. F. , Prwinsky, A. J. , 1969. Experimental Data Bearing on the Movement of Iron in an Aqueous Vapor. *Economic Geology* , 64 (7): 798 - 803. doi: 10. 2113/ gsecongeo. 64. 7. 798
- Mao, J. W. , Duan, C. , Liu, J. L. , et al. , 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).
- Mirvakili, A. , Rahimpour, M. R. , Jahanmiri, A. , 2012. Experimental Study of Iron-Control Agents Selection for High Temperature Sour Gas and Oil Wells Acidizing Process. *Chemical Engineering Research & Design* , 90 (11): 1823-1833.
- Parsapoor, A. , Khalili, M. , Mackizadeh, M. A. , 2009. The Behaviour of Trace and Rare Earth Elements (REE) during Hydrothermal Alteration in the Rangan Area (Central Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* , 34 (2): 123-134.
- Pirajno, F. , 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Springer.
- Qian, B. , 2011. Geological and Geochemical Characteristics of Nihe Iron Deposit in Lu-Zong, Anhui, China (Disserta-

- tion). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y. J., Zeng, J. N., Zeng, Y., et al., 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Ore-Bearing Pyroxene-Trachyandesite Porphyry and Its Geological Significance in Luohe-Nihe Iron Ore Field in Luzong Basin, Southern Anhui, China. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 851—862 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Q. J., Liu, X. S., Xu, Z. W., et al., 1991. Mesozoic Volcano-Tectonic Depression and Its Mineralizing Process in Lujiang-Zongyang Area, Anhui Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Salvi, S., Williams-Jones, A. E., 1996. The Role of Hydrothermal Processes in Concentrating High-Field Strength Elements in the Strange Lake Peralkaline Complex, Northeastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(11):1917—1932.
- Shen, B. F., Lu, S. N., Yu, E. Z., et al., 1977. The Characteristics of Sodium Metasomatism in Magnetite Deposits of a Certain Region and Its Prospecting Significance. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 263—274 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe, R. H., 1995. Exploration of Porphyry Copper Lithocaps. In: Mauk, J. L., St. George, J. D., eds., Proceedings PACRIM Congress. Australasia Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 95(9):527—532.
- Tang, J. F., Lu, S. M., Li, J. S., et al., 2010. The Basement Structural Deformation, Evolution and Its Control Action on Deposit Distribution in Luzong Volcanic Basin and Its Adjacent Area in Anhui Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2587—2597 (in Chinese with English abstract).
- Van, D. M., Weinberg, R. F., Tomkins, A. G., 2010. REE, Y, Ti, and P Remobilization in Magmatic Rocks by Hydrothermal Alteration during Cu-Au Deposit Formation. *Economic Geology*, 105(4): 763—776.
- Wang, C., 2012. Study on the Numerical Simulation of the Ore-Forming Fluid System of Nihe Iron Deposit in Lujiang, Anhui Province, China (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Li, X. F., Xiao, R., et al., 2012. Elements Mobilization of Mineralized Porphyry Rocks during Hydrothermal Alteration at Zhushahong Porphyry Copper Deposit, Dexing District, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3869—3886 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. R., Fan, W. L., Yu, Y. M., 1981. Geochemical Mechanism of Alkali Metasomatism and the Formation of Iron Deposits. *Geochimica*, 10(1): 95—103 (in Chinese with English abstract).
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325—343.
- Wu, L. B., Chen, F., Liu, B. Q., et al., 2011. Geological Characteristics and Metallogenic Model of Luohe-Type Iron Deposit in Lujiang County, Anhui Province. *Journal of Hefei University of Technology*, 34(6): 899—904 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1003—5060.2011.06.024
- Wu, M. A., Wang, Q. S., Zheng, G. W., et al., 2011. Discovery of the Nihe Iron Deposit in Lujiang, Anhui, and Its Exploration Significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 802—809 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Q. L., Cheng, Q. M., Lu, J. P., et al., 2011. Application of Portable XRF Technology to Identification of Mineralization and Alteration along Drill in the Nihe Iron Deposit, Anhui, East China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 336—340 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2011.035
- Xie, Z., Li, Q. Z., Chen, J. F., et al., 2007. The Geochemical Characteristics of the Early-Cretaceous Volcanics in Luzong Region and Their Source Significances. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 235—249 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Zhou, T. F., Fan, Y., et al., 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).
- Yuan, F., Zhou, T. F., Liu, J., et al., 2011. Petrogenesis of Volcanic and Intrusive Rocks of the Zhuanqiao Stage, Luzong Basin, Yangtze Metallogenic Belt, East China: Implications for Ore Deposition. *International Geology Review*, 53(5): 526—541.
- Zeng, J. N., Qin, Y. J., Guo, K. Y., et al., 2010. Zircon U-Pb Dating of Ore-Bearing Magmatic Rocks and Its Constraint on the Formation Time of the Ore Deposits in Luzong Basin, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 84(4): 466—478 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Y. S., 2003. Experimental Geochemistry (Second Edition). Peking University Press, Beijing (in Chinese).
- Zhai, Y. S., Yao, S. Z., Lin, X. D., et al., 1992. Regularities

- of Metallogenesis for Copper (Gold) Deposits in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, L. J., 2011. Polymetallic Mineralisation and Associated Magmatic and Volcanic Activity in the Luzong Basin, Anhui Province, Eastern China (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. M., Li, X. H., Zhou, T. F., et al., 2013. Reserves Dynamic Estimation of the Nihe Deposit Based on Three-Dimensional Mineralized Domain Model. *Geological Review*, 59(1): 122—128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. H., Hu, S. M., Wang, J., et al., 2002. Water-Rock Interaction Study for Typical Volcanic Areas in the Middle-Lower Yangtze River Valley. China Land Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, R. H., Zhang, X. T., Hu, S. M., 2010. Deep Rocks and Ore-Forming Processes in Luzong Volcanic Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2665—2680 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. G., Wu, M. A., Zhang, Y. Y., et al., 2011. Geological Characteristics and Genesis of the Nihe-Fe-S Deposit, Lujiang County, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 789—801 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 2008. Chronology and Its Meaning of Volcanic Rocks in Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) Basin, Anhui Province. *Science in China (Series D)*, 38(11): 1342—1353 (in Chinese).
- Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 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. doi: 10. 1007/s11430-008-0111-7
- Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 2010. Temporal-Spatial Framework of Magmatic Intrusions in Luzong Volcanic Basin in East China and Their Constraint to Mineralizations. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2694—2714 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 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). doi: CNKI: 11—1951/P. 20110511. 2140. 00
- Zou, H. B., Zindler, A., Xu, X. S., et al. 2000. Major, Trace Element, and Nd, Sr and Pb Isotope Studies of Cenozoic Basalts in SE China; Mantle Sources, Regional Variations, and Tectonic Significance. *Chemical Geology*, 171(1—2): 33—47.

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.
- 车英丹, 2014. 安徽庐江泥河铁矿浅色蚀变带地质特征研究 (硕士学位论文). 合肥: 合肥工业大学.
- 董树文, 项怀顺, 高锐, 等, 2010. 长江中下游庐江—枞阳火山岩矿集区深部结构与成矿作用. *岩石学报*, 26(9): 2529—2542.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等, 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.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 等, 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(08): 1715—1724.
- 范裕, 刘一男, 周涛发, 等, 2014. 安徽庐枞盆地泥河铁矿床年代学研究及其意义. *岩石学报*, 30(05): 1369—1381.
- 范裕, 周涛发, 郝麟, 等, 2012. 安徽庐枞盆地泥河铁矿床成矿流体特征及其对矿床成因的指示. *岩石学报*, 28(10): 3113—3124.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 等, 2010. 庐枞盆地高硫化型浅成低温热液成矿系统: 来自矾山明矾石矿床地质特征和硫同位素地球化学的证据. *岩石学报*, 26(12): 3657—3666.
- 高锐, 卢占武, 刘金凯, 等, 2010. 庐—枞金属矿集区深地震反射剖面解释结果——揭露地壳精细结构, 追踪成矿深部过程. *岩石学报*, 26(9): 2543—2552.
- 郝麟, 2011. 安徽省庐江泥河铁矿床成矿流体研究 (硕士学位论文). 合肥: 合肥工业大学.
- 侯通, 2014. 中基性岩浆系统中铁的超常富集机理: 以典型铁矿为例 (博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 胡受奚, 叶瑛, 方长泉, 2004. 交代蚀变岩岩石学及其找矿意义. 北京: 地质出版社.
- 黄清涛, 1989. 安徽庐江罗河铁矿. 北京: 地质出版社.
- 中国科学院地球化学研究所, 1987. 宁芜型铁矿床形成机理. 北京: 科学出版社.
- 江永宏, 2010. 安徽庐枞地区铁—铜矿成矿规律与找矿. *世界地质*, 29(3): 372—382.
- 匡海阳, 2012. 安徽泥河铁矿深部找矿综合地质地球物理研究 (硕士学位论文). 南昌: 东华理工大学.
- 梁祥济, 2000. 中国矽卡岩和矽卡岩矿床形成机理的实验研究. 北京: 学苑出版社.
- 刘英俊, 曹励明, 1987. 元素地球化学导论. 北京: 地质出版社, 113—137.
- 吕庆田, 韩立国, 严加永, 等, 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*, 34(9): 2598—2612.

- 吕庆田,侯增谦,杨竹森,等,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,刘振东,汤井田,等,2014.庐枞矿集区上地壳结构与变形:综合地球物理探测结果.地质学报,88(4):447-465.
- 马良,2011.安徽庐江泥河铁矿床围岩蚀变特征研究(硕士学位论文).合肥:合肥工业大学.
- 马立成,2009.庐一枞火山岩盆地深部构造作用与成矿(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 毛景文,段超,刘佳林,等,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.
- 钱兵,2011.安徽庐枞盆地泥河铁矿床地质地球化学特征研究(硕士学位论文).合肥:合肥工业大学.
- 覃永军,曾键年,曾勇,等,2010.安徽南部庐枞盆地罗河-泥河铁矿田含矿辉石粗安玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义.地质通报,29(6):851-862.
- 任启江,刘孝善,徐兆文,等,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.
- 沈保丰,陆松年,于恩泽,等,1977.某区磁铁矿床中钠质交代作用的特征及其找矿意义.地质科学,3:263-274.
- 汤家富,陆三明,李建设,等,2010.安徽庐枞火山岩盆地与邻区基底构造变形、形成演化及其对矿床分布的控制.岩石学报,26(9):2587-2597.
- 王崇,2012.安徽庐江泥河铁矿床成矿流体系统数值模拟研究(硕士学位论文).合肥:合肥工业大学.
- 王翠云,李晓峰,肖荣,等,2012.德兴朱砂红斑岩铜矿热液蚀变作用及元素地球化学迁移规律.岩石学报,28(12):3869-3886.
- 王玉荣,樊文苓,郁云妹,1981.碱交代与铁矿形成的地球化学机理探讨.地球化学,10(1):95-103.
- 吴礼彬,陈芳,柳丙全,等,2011.安徽省庐江县罗河式铁矿床地质特征与成矿模式.合肥工业大学学报(自然科学版),34(6):899-904.
- 吴明安,汪青松,郑光文,等,2011.安徽庐江泥河铁矿的发现及意义.地质学报,85(5):802-809.
- 夏庆霖,成秋明,陆建培,等,2011.便携式 X 射线荧光光谱技术在泥河铁矿岩心矿化蚀变信息识别中的应用.地球科学——中国地质大学学报,36(2):336-340.
- 谢智,李全忠,陈江峰,等,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,等,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.
- 曾键年,覃永军,郭坤一,等,2010.安徽庐枞盆地含矿岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时限的约束.地质学报,84(4):466-478.
- 曾贻善,2003.实验地球化学(第二版).北京:北京大学出版社.
- 翟裕生,姚书振,林新多,等,1992.长江中下游地区铁铜(金)成矿规律.北京:地质出版社.
- 张乐骏,2011.安徽庐枞盆地成岩成矿作用研究(硕士学位论文).合肥:合肥工业大学.
- 张明明,李晓晖,周涛发,等,2013.基于三维矿化域模型的泥河铁矿床动态储量估算.地质论评,59(1):122-128.
- 张荣华,胡书敏,王军,等,2002.长江中下游典型火山岩区水-岩相互作用.北京:中国人地出版社.
- 张荣华,张雪彤,胡书敏,2010.庐枞火山盆地深部岩石与成矿过程.岩石学报,26(9):2665-2680.
- 赵文广,吴明安,张宜勇,等,2011.安徽省庐江县泥河铁硫矿床地质特征及成因初步分析.地质学报,85(5):789-801.
- 周涛发,范裕,袁峰,等,2008.安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义.中国科学(D辑),38(11):1342-1353.
- 周涛发,范裕,袁峰,等,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,等,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.