



安徽龙桥铁矿床辉长闪长岩的发现及其岩石学和年代学研究*

刘一男^{1,2}, 范裕^{1,2,*}, 周涛发^{1,2}, 洪浩澜^{1,2}, 张维^{1,2}, 欧邦国³

(1 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2 矿床成因与勘查技术研究中心, 安徽 合肥 230009;

3 安徽省庐江龙桥矿业有限公司, 安徽 合肥 231555)

摘要 龙桥铁矿床是长江中下游成矿带内的大型铁矿床,主矿体呈似层状赋存于三叠系东马鞍山组泥灰岩、角砾状灰岩和泥质粉砂岩中,单个矿体铁矿石资源量大于1亿吨,具有鲜明的成矿特色。前人研究认为,矿区内正长岩类侵入岩与成矿关系密切,龙桥矿床是成矿带内唯一与正长岩有关的大型铁矿床。随着生产勘探,在矿床中部井下巷道中发现辉长闪长岩侵入体,为矿床成因以及成矿模式提供了新的线索。文章在详细的野外地质工作基础上,开展了辉长闪长岩的岩石学、地球化学和年代学研究。辉长闪长岩岩体呈岩株状产出,被正长岩体穿切破坏,靠近矿体部位发育透辉石矽卡岩化蚀变。辉长闪长岩主要由拉长石(60%)、钾长石(10%)、普通辉石(10%)和角闪石(5%)组成,与正长岩相比,辉长闪长岩明显具有低硅、低钾、高镁铁特征。锆石 LA ICP-MS 定年结果表明其成岩时代为 $(133.5 \pm 0.8) \text{Ma}$ 。在前人对龙桥矿床研究的基础上,笔者认为龙桥铁矿床辉长闪长岩与铁成矿作用关系更为密切,成岩成矿作用几乎同时发生,而正长岩为成矿期后破矿岩体。通过与庐枞矿集区和长江中下游成矿带内铁矿床对比表明,庐枞矿集区内大型铁矿床与正长岩无成因联系,而闪长质侵入岩则是庐枞矿集区内重要的成矿母岩。龙桥铁矿床与长江中下游成矿带庐枞、宁芜矿集区内玢岩型铁矿床以及鄂东南矿集区内矽卡岩型铁矿床在成岩成矿时代方面相近,属长江中下游第二期成岩成矿作用的产物。闪长质侵入岩是成矿带内矽卡岩型及玢岩型铁矿成矿的必要条件,而正长岩类侵入岩的形成大多晚于闪长岩,与铁成矿作用无直接关系。

关键词 地球化学 龙桥铁矿床 辉长闪长岩 成岩成矿时代 矽卡岩矿床 庐枞矿集区

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Discovery of gabbro diorite in Longqiao deposit of Lu-Zong volcanic Basin, eastern China, and its petrology and chronology

LIU YiNan^{1,2}, FAN Yu^{1,2}, ZHOU TaoFa^{1,2}, HONG HaoLan^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2} and OU BangGuo³

(1 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2 Ore Deposit and Exploration Center, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 3 Longqiao Mining Co., Ltd., Hefei 231555, Anhui, China)

Abstract

The Longqiao iron deposit is a large iron deposit in the middle and lower reaches of the Yangtze River metallogenic belt. The main orebody is located in marlite, brecciated limestone and argillaceous siltstone of Tri-

* 本文得到国家重点研发计划(批准号:2016YFC0600206)、国家自然科学基金项目(批准号:41672081、41320104003、41172084)和安徽省国土资源科技项目(批准号:2015-K-2、2015-K-3)的资助

第一作者简介 刘一男,男,1989年生,博士研究生,主要从事矿床学方面的科研工作。Email: thoumianyouren@sina.com

** 通讯作者 范裕,男,1982年生,教授,主要从事矿床学和地球化学方面的科研工作。Email: fanyu@hfut.edu.cn

收稿日期 2016-10-03 改回日期 2017-07-11。秦思婷编辑。

assic Dongmaanshan Formation, the single iron orebody resources have reached more than 100 million tons, with distinct metallogenic characteristics, but its genesis remains a problem of much controversy. Previous researchers thought that syenite intrusion in the mining area is closely related to mineralization. During the exploration of the Longqiao iron deposit, the authors found gabbro diorite in the depth of the central part of the deposit, thus providing new clues to the genesis of the Longqiao deposit. In this paper, the authors carried out petrologic, geochemical and chronological study of gabbro diorite on the basis of detailed geological field work. Gabbro diorite rock occurs as a stock, and is cut by syenite. Some near-ore parts develop diopside skarn alteration. Gabbro diorite is composed mainly of feldspar (60%), potassium feldspar (10%), augite (10%), and hornblende (5%). Compared with syenite, gabbro diorite obviously has characteristics of low silicon, low potassium and high iron content. Zircon LA ICP-MS dating results show that the gabbro diorite age is (133.5 ± 0.8) Ma. Based on previous researches on the Longqiao deposits, the authors hold that gabbro diorite is closely related to mineralization of the Longqiao deposit, diagenetic and metallogenic processes took place almost at the same time, and syenite as a later intrusion cut across the orebody. Through a comparison with Lu-Zong volcanic basin and other iron ore deposits, the authors consider that the syenite had nothing to do with mineralization, and diorite intrusive rock was the mother rock of mineralization in Lu-Zong volcanic basin. The Longqiao iron ore deposit is close to Lu-Zong basin, Ningwu porphyrite type iron ore deposit and southeast Hubei skarn type iron ore deposit in diagenetic and metallogenic epoch, belonging to the second period product of the mineralization and diagenetic activities in the middle and lower reaches of the Yangtze River metallogenic belt. Diorite intrusive rock was a necessary condition for the skarn and porphyrite iron ore mineralization in the metallogenic belt. Syenite intrusive rocks were later than the second stage of magmatism and mineralization, and hence had nothing to do with the iron mineralization.

Key words: geochemistry, Longqiao iron deposit, diorite, diagenetic and metallogenic epoch, skarn deposit, Lu-Zong Basin

长江中下游地区是中国东部重要的多金属成矿带,从西向东区内依次分布有鄂东南、九瑞、安庆-贵池、庐枞、铜陵、宁芜、宁镇 7 个大型矿集区,产出各类铁、铜、金矿床约 200 余处(Pan et al., 1999; Mao et al., 2006; 周涛发等, 2008; 2012)。长期以来,众多研究者对该区的成岩成矿作用进行了广泛而深入的研究工作,积累了丰富的基础地质资料,对矿床成因取得了许多重要认识(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 唐永成等, 1998; 周涛发等, 2008; 2010; 2012; 蒋少涌等, 2010; 宋传中等, 2010; Xie et al., 2011; Mao et al., 2011)。对成矿带内玢岩型和砂卡岩型铁矿床的研究表明,铁成矿作用与 130 Ma 左右形成的闪长质侵入岩关系密切已经基本达成共识(谢桂青等, 2009; 袁顺达等, 2010; 侯可军等, 2010; 周涛发等, 2010; 2011; 范裕等, 2010);但也有学者认为部分铁矿床,如龙桥铁矿床的形成与正长岩关系密切(张荣华等, 2010; 汪启江等, 1991; 吴明安等, 1996)。

庐枞矿集区位于长江中下游成矿带的中段(常印佛等, 1991),目前已发现的大中型矿床有 12 处,

龙桥铁矿床为矿集区内大型隐伏产出的铁矿床,铁矿石储量约 1.1 亿吨(吴明安等, 1996)。自 20 世纪 80 年代发现龙桥铁矿床以来,很多学者对龙桥铁矿床的成因开展了研究,提出了“龙桥式铁矿床”成矿模式和找矿模型,认为龙桥铁矿床的形成与矿区内大规模发育的正长岩-二长岩侵入岩体关系密切(任启江等, 1991; 倪若水等, 1994; 陆三明等, 2010; 吴明安等, 1996; 翟裕生等, 1992; Zhou et al., 2011),但这种模式明显与长江中下游成矿带的总体砂卡岩型铁成矿模式(谢桂青等, 2009; 宁芜研究项目编写小组, 1977)不符,后者认为铁矿床与闪长质侵入体有关。随着龙桥铁矿床的生产勘探,在新近开拓的巷道中发现了规模较大的闪长质侵入体,该岩体的发现使人们重新审视龙桥铁矿床的成因模式。本次工作在详细野外地质工作基础上,对新发现的闪长质侵入体开展了岩石学、地球化学以及成岩年代学研究,结合前人研究成果,提出了龙桥铁矿床成因的新认识,并与庐枞矿集区和长江中下游成矿带玢岩型和砂卡岩型铁矿床进行了对比,为庐枞矿集区内寻

找龙桥式铁矿床的找矿勘探提供新思路。

1 区域地质背景

庐枞矿集区介于安徽省庐江县(庐)和枞阳县(枞)之间,是长江中下游多金属成矿带中的一个重要的多金属矿集区(常印佛等,1991;翟裕生等,1992)。庐枞矿集区的展布受3组深大断裂所控制,形状上呈耳壳状,长约56 km,宽约24 km,面积约1032 km²(图1a)。庐枞矿集区的地层属于下扬子地层分区,地层发育较全(常印佛等,1991;任启江等,1991),寒武系—第四系均有出露;寒武系—奥陶系碳酸盐岩及碎屑岩主要出露于庐枞火山岩盆地外围北部,志留系—中三叠统主要出露于盆地周边,盆地内部主要被早白垩世陆相火山岩覆盖,与下部侏罗系呈不整合接触,自下而上依次可划分为龙门院组、砖桥组、双庙组、浮山组,岩性主要为粗安岩、安山岩、凝灰岩。火山岩层的分布特征呈半环形,由老到新,从盆地北、东和南部向盆地西部及中心地区依次分布(安徽省地矿局327队,1961)。庐枞矿集区内部有30余个侵入岩岩体分布(周涛发等,2007;2010;范裕等,2008),主要岩性包括正长岩、二长岩和花岗岩(图1b)。庐枞矿集区内主要矿床包括罗河、龙桥和泥河等大型铁矿床、岳山中型铅锌银矿床、井边石门庵、天头山、拔茅山等小型铜金矿床以及矾山等大型明矾石矿床,此外还有马口、杨桥、吴桥和3440、34等铁-铜-金-铀多金属矿床(点)(图1b),探明的铁矿石储量约15亿吨。

2 矿区地质特征

龙桥矿区内出露地层有中三叠统东马鞍山组、中侏罗统罗岭组、下白垩统龙门院组和砖桥组(图2)。其中,东马鞍山组、磨山组、罗岭组为火山岩系前积地层;龙门院组和砖桥组为火山岩地层。龙桥铁矿床主矿体赋存于东马鞍山组一套厚度20~150 m的泥灰岩、角砾状灰岩、粉砂岩、中细粒-粗粒长石石英砂岩及炭质页岩中(吴明安等,1996)。

矿区内火山岩系中褶皱构造不发育,地层基本上呈单斜产出。火山岩地层走向约为110°,倾向南西,倾角10°~20°,局部地段由于受到断裂及岩浆侵入作用的影响,地层的产状有所变化。矿区内断裂

构造较为发育(图2),断裂构造按其发育的层位又可进一步划分为基底断裂和火山岩系中的断层。矿区内的基底隐伏断裂主要有3条,即近EW向的龙门桥断裂和石马滩-黄屯断裂以及NNE向的石马滩-黄姑滩断裂。其中,龙门桥断裂与石马滩-黄姑滩断裂控制了中三叠统东马鞍山组含矿地层的空间分布,并使得东马鞍山组与罗岭组不整合接触,石马滩-黄屯基底断裂控制了矿床底部正长岩-二长岩体的产出。矿区内火山岩系中的断层较发育,尤其是矿床东部断层更为发育。依据断层的走向可将矿区内的断层划分为NE向、NNE向、NW向、近SN向4组。

矿区内的侵入岩主要为矿床底部的正长岩-黑云母二长岩侵入岩体和新发现的辉长闪长岩体,此外在矿体上部发育龙门院旋回次火山岩粗安玢岩(图2)。正长岩-黑云母二长岩呈岩株状产出,其中,钾长石含量约55%~80%,斜长石含量约35%~45%,黑云母含量约10%,并含少量磷灰石、磁铁矿等副矿物。正长岩与黑云母二长岩之间没有明显界线,为同一个侵入岩体不同的岩相,主要侵位于三叠系沉积地层,时代为 (131.1 ± 1.5) Ma(周涛发等,2008),下文统称为正长岩体。龙桥铁矿床生产勘探巷道在-420 m深度发现辉长闪长岩,位于矿区中部,巷道内揭露厚度大于50 m(图3,图4a)。

龙桥铁矿床主矿体呈层状-似层状,埋深340~550 m左右,组成较为单一,形态简单。矿体顺层产出,受三叠系层位控制,矿体顶底板均为粉砂岩。矿体产状总体平缓,倾角一般10°~20°,厚度平均27.20 m(图3)。矿石中主要金属矿物为磁铁矿、黄铁矿,少量黄铜矿、镜铁矿、赤铁矿、菱铁矿等。矿体平均品位TFe 44%,mFe 39%,矿石品位在空间上具有南部高、北部低,东部高、西部低的特点。矿石构造主要有块状构造、浸染状构造、团块状构造、角砾状构造、气孔状构造、粉末状构造、条带状构造、条纹状构造等。

3 辉长闪长岩岩石学及地球化学特征

3.1 岩石学特征

本次工作采集了龙桥铁矿床中辉长闪长岩样品,开展了详细的镜下鉴定工作,并对长石和辉石造岩矿物开展了电子探针测定工作。本次探针分析测试在合肥工业大学电子探针实验室进行。电子探针

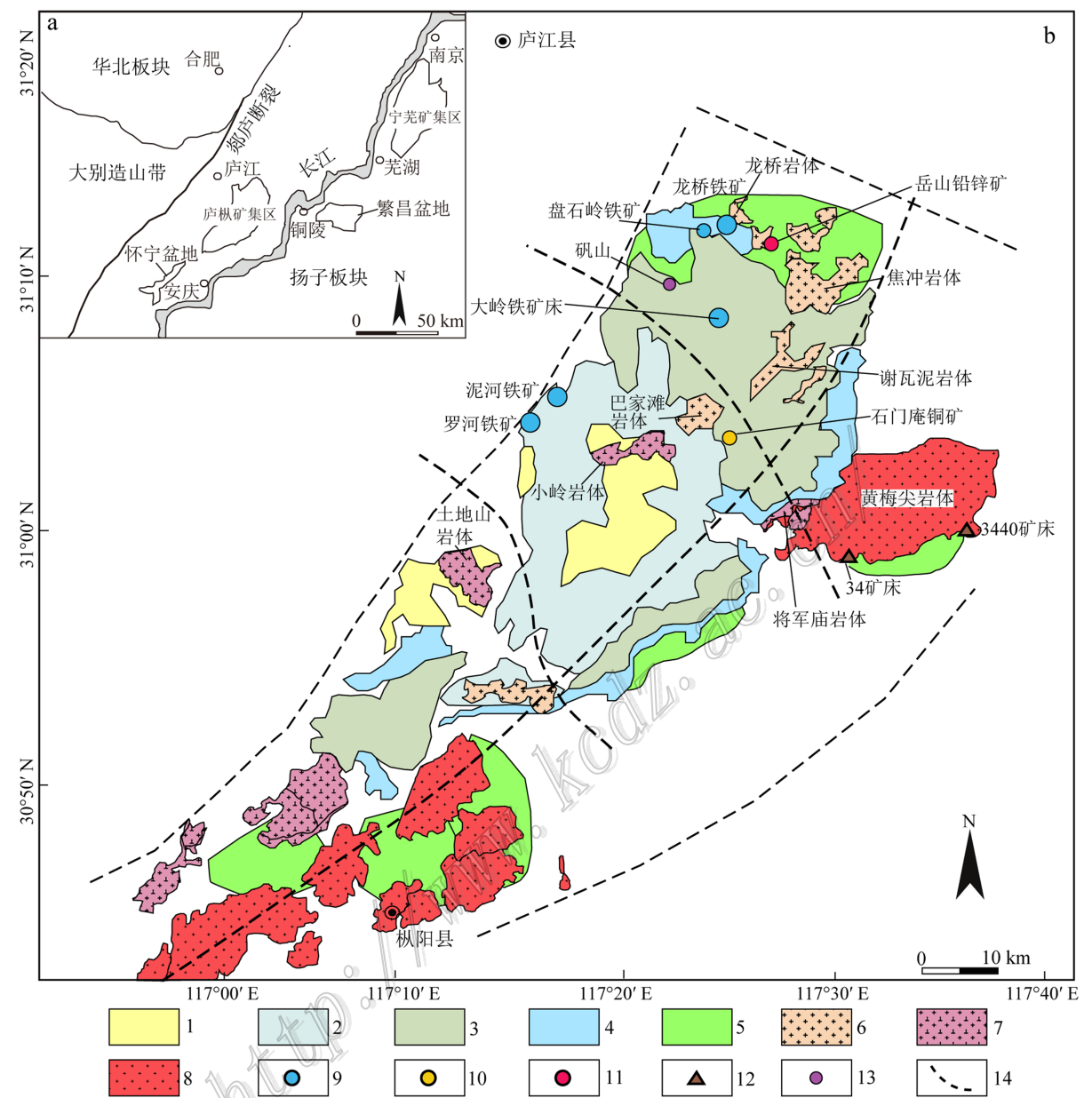


图 1 庐枞矿集区大地构造位置(a)及地质略图(b)(据周涛发等,2010)

1—白垩系浮山组火山岩; 2—白垩系双庙组火山岩; 3—白垩系砖桥组火山岩; 4—白垩系龙门组火山岩; 5—侏罗系罗岭组砂页岩;
6—白垩纪二长岩; 7—白垩纪正长岩; 8—白垩纪花岗岩; 9—铁矿床; 10—铜矿床; 11—铅锌矿床; 12—金铀矿床; 13—明矾石矿床;
14—断裂

Fig. 1 Tectonic position (a) and geological sketch map (b) of Lu-Zong volcanic basin(after Zhou et al. , 2010)

1—Cretaceous Fushan Formation; 2—Cretaceous Shuangmiao Formation; 3—Cretaceous Zhuanqiao Formation; 4—Cretaceous Longmenyuan Formation; 5—Jurassic Luoling Formation; 6—Cretaceous monzonite; 7—Cretaceous syenite; 8—Cretaceous granite; 9—Iron deposit; 10—Copper deposit; 11—Lead-zinc deposit; 12—Gold-uranium deposit; 13—Alunite deposit; 14—Fault

分析测试条件为:加速电压 15 kV,束斑直径 3 μm,探针电流 20 nA。标准样品使用的是美国 SPI 公司 53 种矿物。基体效应应用 PRZ 方法修正。元素分析精度为 1%~5%。

新鲜辉长闪长岩手标本呈灰黑色,可见长石及暗色矿物斑晶。镜下呈似斑状结构,单偏光下为无色-浅红色,斜长石表面干净,正低-负低突起,正交偏光下大多可见聚片双晶及环带(图4b),干涉色一级

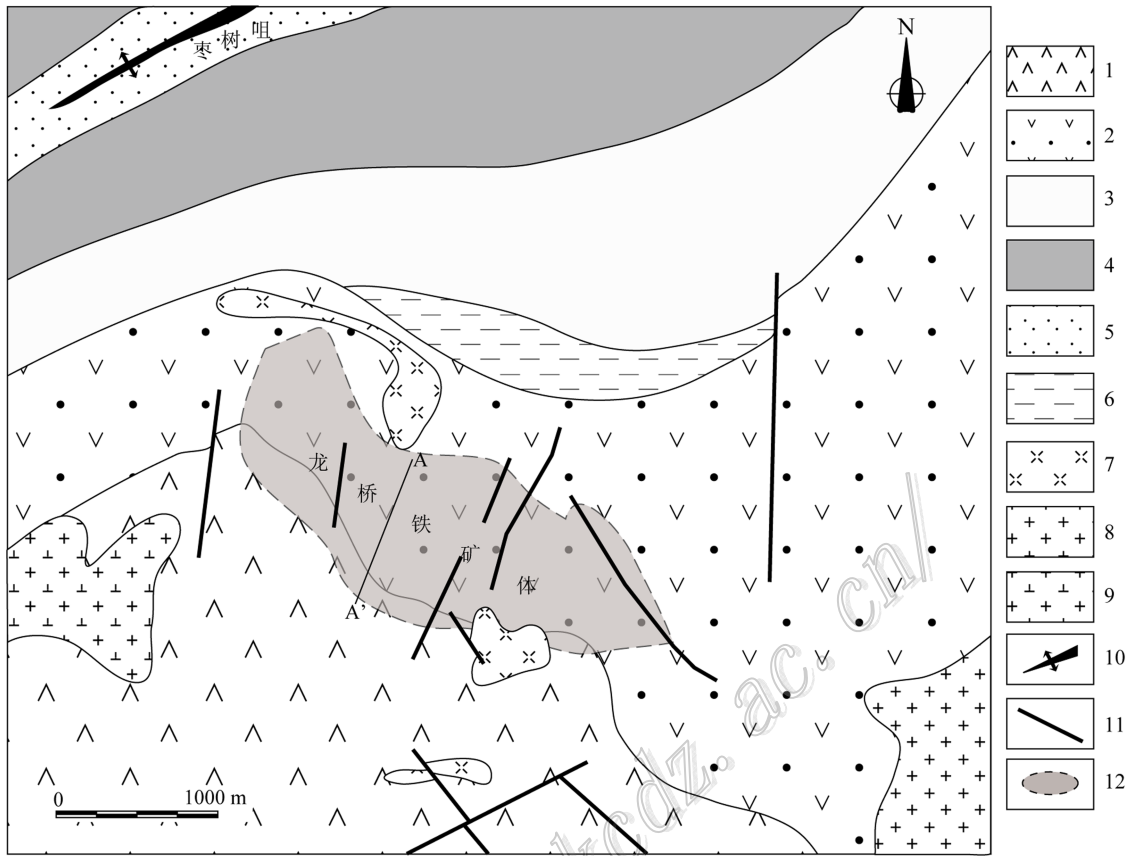


图 2 龙桥铁矿床地质平面图(据吴明安等,1996 修改)

1—白垩系砖桥组火山岩; 2—白垩系龙门院组火山岩; 3—侏罗系罗岭组中段砂页岩; 4—侏罗系罗岭组下段粉砂岩; 5—侏罗系磨山组粉砂岩; 6—三叠系东马鞍山组钙质粉砂岩; 7—白垩纪粗安玢岩; 8—白垩纪正长岩; 9—白垩纪二长岩; 10—背斜轴部; 11—断层; 12—铁矿体平面投影

Fig. 2 Simplified geological map of the area around the Longqiao iron deposit (modified after Wu et al., 1996)

1—Cretaceous Zhuanqiao Formation; 2—Cretaceous Longmenyuan Formation; 3—Jurassic middle Luoling Formation; 4—Jurassic lower Luoling Formation; 5—Jurassic Moshan Formation; 6—Triassic Dongmaanshan Formation; 7—Cretaceous andesitic porphyrite dike; 8—Cretaceous syenite; 9—Cretaceous monzonite; 10—Anticlinal axis; 11—Fault; 12—Plane projection of orebody

灰白,经电子探针分析大多为拉长石(图 5a,表 1),含量约 60%,BSE 图像显示出长石由中心向边缘 An 牌号有所降低(图 4c)。在自形斜长石之间发育少量钾长石,含量约 10%,呈他形,单偏光下无色,负低突起,干涉色一级白,晶面较亮,大多比较新鲜(图 4b,图 5a)。暗色矿物多为辉石,含量约 10%,单偏光下呈无色-淡绿色,正高突起,干涉色二级蓝-橙(图 4b),近垂直消光,经电子探针分析,辉石为普通辉石(图 5b,表 2)。角闪石较少,含量不到 5%。

靠近矿体的辉长闪长岩发育更长石化,透辉石化、绿帘石化和绿泥石化等蚀变。手标本呈灰黑色-灰绿色,颜色不均匀(图 4d)。长石和暗色矿物斑晶模糊不清。样品中的斜长石由于钠化脱钙作用导致牌号降低而蚀变为更长石或钠长石(图 4e,图 5a,表

1),钠长石晶形模糊不清,晶面较脏,而后又被后期透辉石和磁铁矿交代(图 4e)。可见部分辉石蚀变为绿泥石。透辉石既可以呈浸染状交代长石,也可呈脉状穿切辉长闪长岩(图 4f)。经电子探针分析,其 Mg 端员占主导地位,Fe 含量较少,落于透辉石区域(图 5b)。

3.2 侵入岩地球化学特征

测试工作在广州澳实矿物实验室完成,辉长闪长岩主量元素组成见表 3,辉长闪长岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 50.75%~53.50%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 3.79%~4.82%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 2.99%~3.48%, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为 8.37%~9.49%。与矿区内正长岩主量元素特征(吴明安等,1996)对比可知,正长岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 在 62.01%~64.01%之间,平均值 62.37%; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 在 3.46%~

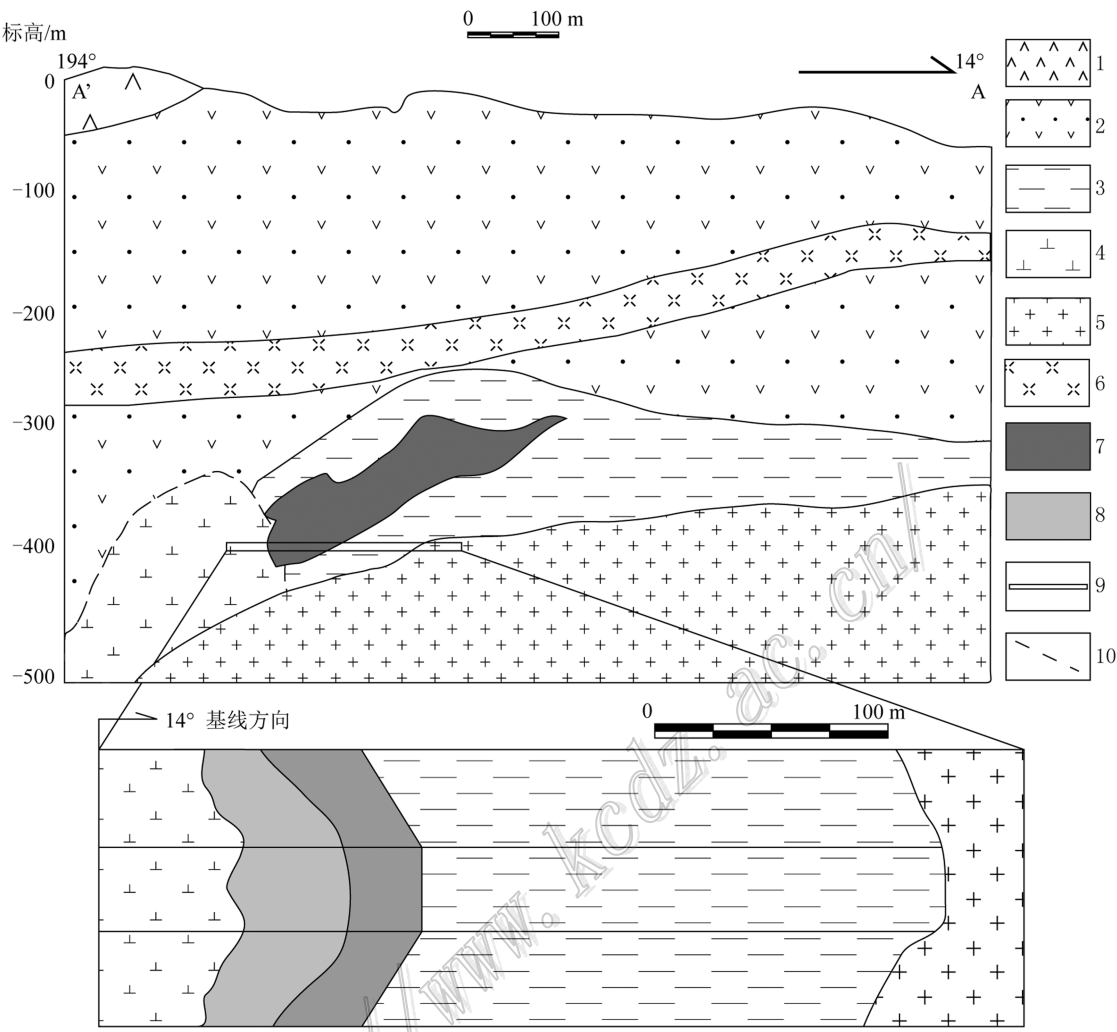


图 3 龙桥铁矿床 A-A'线剖面图(据吴明安等,1996 修改)

1—白垩系砖桥组火山岩; 2—白垩系龙门院组火山岩; 3—三叠系东马鞍山组钙质粉砂岩; 4—白垩纪辉长闪长岩; 5—白垩纪正长岩; 6—白垩纪粗安玢岩; 7—砂卡岩; 8—矿体; 9—巷道; 10—推测地质界线

Fig. 3 Geological section along A-A' line (modified after Wu et al., 1996)

1—Cretaceous Zhuanqiao Formation; 2—Cretaceous Longmenyuan Formation; 3—Triassic Dongmaanshan Formation; 4—Cretaceous gabbro-diorite; 5—Cretaceous syenite; 6—Cretaceous andesitic porphyrite dike; 7—Orebody; 8—Skarn; 9—Tunnel; 10—Inferred geological boundary

4.41% 之间, 平均值 4.00%; $w(K_2O)$ 在 6.61% ~ 7.97% 之间, 平均值 7.28%; $w(TFe_2O_3)$ 在 2.10% ~ 3.63% 之间, 平均值 2.96%; $w(MgO)$ 在 3.09% ~ 3.75% 之间, 平均值 3.50%。由此可见, 较正长岩而言, 龙桥铁矿床中辉长闪长岩具有低硅(SiO_2)、低钾(K_2O)、高铁镁质的特征。

在侵入岩 TAS 分类图解(图 6a)中, 辉长闪长岩样品与宁芜闪长玢岩均落于二长闪长岩区域, 正长岩样品均落于正长岩区域, 通过电子探针分析可以看出, 辉长闪长岩中斜长石部分发育碱性长石化, 使得全岩碱质含量增高落入二长闪长岩区域,

这种变化在宁芜地区闪长玢岩中也有所体现(图 6a)。在 A/NK-A/CNK 图解(图 6b)中, 龙桥 2 类侵入岩均属于准铝质岩石类型, 其中正长岩较比辉长闪长岩具有更低的 A/NK 值, 其 A/NK 值 < 1.5, 更偏碱性。

4 侵入岩锆石 LA-ICP-MS 定年

4.1 测试方法

用于锆石年代学测试的辉长闪长岩样品(LQ15-13)首先经过破碎, 经浮选和电磁选等方法挑选出单

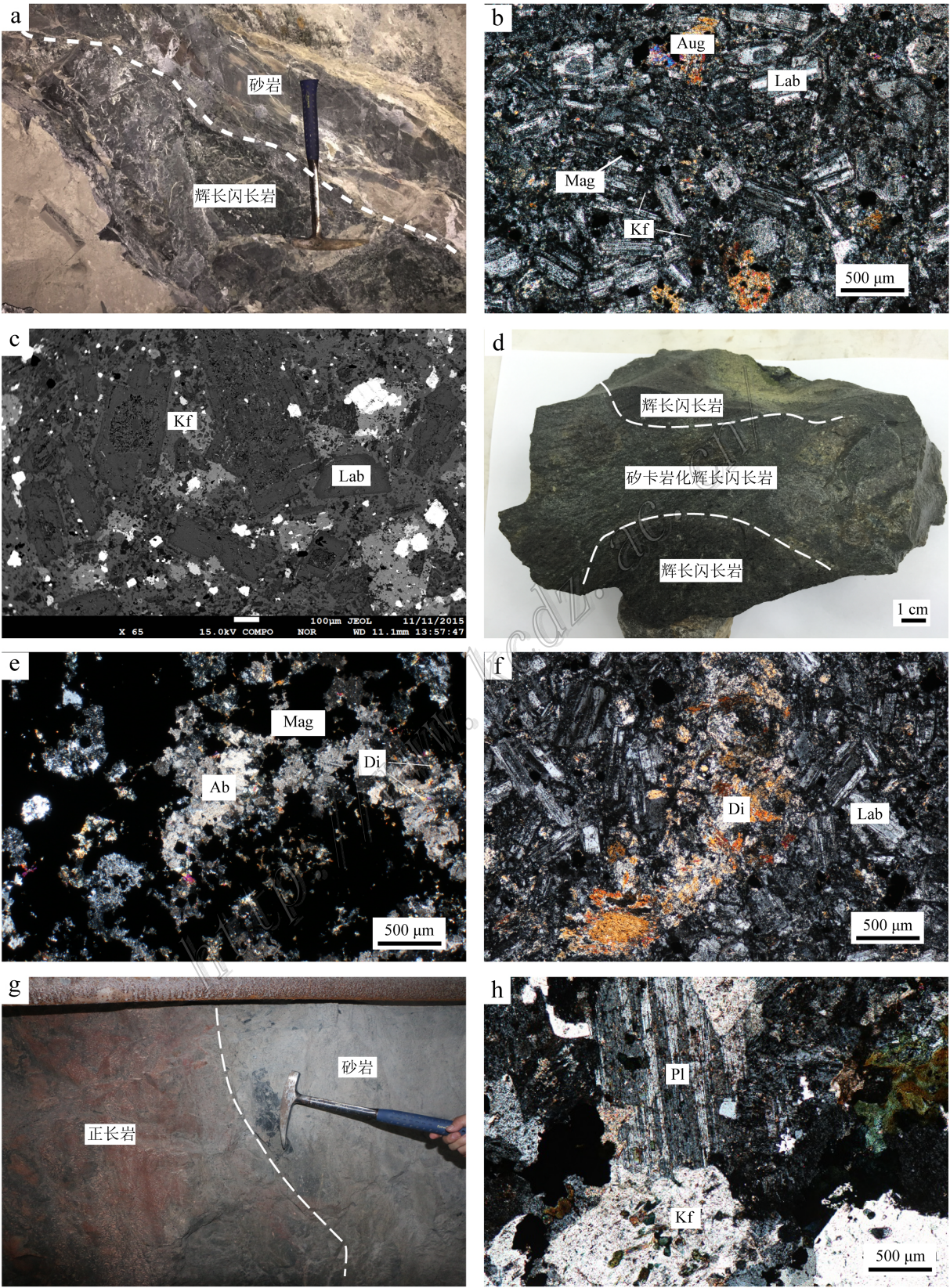


图 4 龙桥铁矿床中辉长闪长岩和正长岩相关照片及图像

a. 辉长闪长岩与砂岩接触界线, 辉长闪长岩中发育矽卡岩化; b. 新鲜辉长闪长岩镜下照片(正交); c. 辉长闪长岩 BSE 图像; d. 矽卡岩化

辉长闪长岩手标本照片；e. 钠长石化辉长闪长岩中发育透辉石磁铁矿化(正交)；f. 透辉石脉穿切新鲜辉长闪长岩(正交)；
g. 井下正长岩与砂岩接触界线；h. 龙桥正长岩镜下照片(正交)

Ab—钠长石；Aug—普通辉石；Di—透辉石；Lab—拉长石；Pl—斜长石；Kf—钾长石；Mag—磁铁矿

Fig. 4 Photograph and images of gabbro diorite and syenite in the Longqiao deposit

a. Contact line of gabbro diorite and skarn, with gabbro diorite subjected to skarn alteration；b. Photomicrograph of fresh gabbro diorite (crossed nicols)；c. Back-scattered electron images of gabbro diorite；d. Hand sample photo of gabbro diorite subjected to skarn alteration；e. Albitized gabbro diorite with diopside and magnetite (crossed nicols)；f. Diopside vein cutting fresh gabbro diorite (crossed nicols)；g. Contact line of syenite and sandstone；h. Photomicrograph of syenite (crossed nicols)

Ab—Albite；Aug—Augite；Di—Diopside；Lab—Labradorite；Pl—Plagioclase；Kf—Orthoclase；Mag—Magnetite

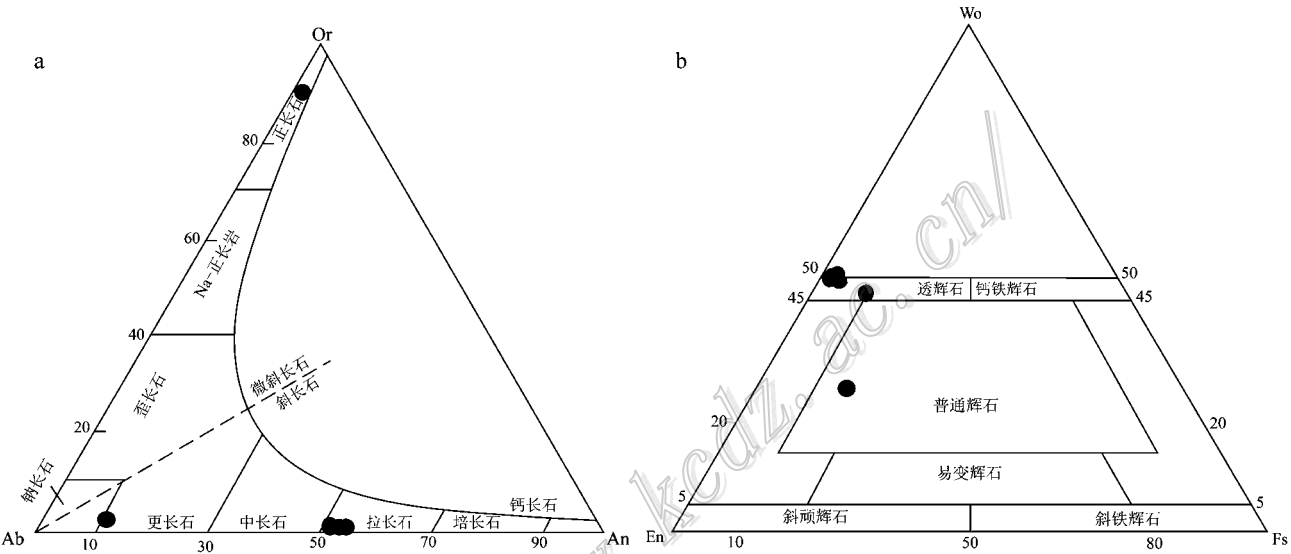


图 5 龙桥铁矿床中辉长闪长岩长石(a)和辉石(b)分类图解

Ab—钠长石；An—钙长石；Or—正长石

Fig. 5 Classification diagram of feldspars (a) and pyroxene (b) in the Longqiao deposit

Ab—Albite；An—Anorthite；Or—Orthoclase

表 1 龙桥铁矿床中辉长闪长岩长石电子探针分析结果

Table 1 Results of electron microprobe analysis of feldspar from the Longqiao iron deposit

样品号	wt(B)/%					基于 8 个氧原子计算							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Si	Al	Ca	Na	K	An	Ab	Or
LQ-14-1	64.054	24.841	2.447	9.755	0.557	2.7781	1.2698	0.1137	0.8203	0.0308	11.79	85.02	3.19
LQ-13-1	54.366	27.756	10.706	5.085	0.213	2.4948	1.5011	0.5264	0.4524	0.0125	53.10	45.64	1.26
LQ-13-2	54.110	27.796	10.846	4.863	0.210	2.4903	1.5077	0.5348	0.4339	0.0123	54.51	44.23	1.26
LQ-13-3	54.591	27.405	10.364	5.263	0.257	2.5099	1.4850	0.5106	0.4692	0.0151	51.32	47.16	1.52
LQ-14-1	64.264	18.426	0.114	0.686	15.842	2.9891	1.0101	0.0057	0.0619	0.9400	0.56	6.14	93.30

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进行阴极发光(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。本文的锆石 U-Pb 年龄在合肥

工业大学资源与环境工程学院激光-等离子体质谱实验室开展,使用和 ICP-MS 联接起来的激光剥蚀系统完成。ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent 7500a,该仪器独有的屏蔽炬(ShieldTorch)可明显提高分析灵敏度。激光剥蚀系统为美国 Coherent Inc. 公司生产的 GeoLasPro,该系统为工作波长 193 nm 的 ComPex102 ArF 准分子激光器,样品上的光斑

表 2 龙桥铁矿床中辉长闪长岩辉石电子探针分析结果
Table 2 Results of electron microprobe analysis of pyroxene from the Longqiao iron deposit

组分	LQ-15-1	LQ-15-2	LQ-15-3	LQ-15-4	LQ-13-1	LQ-13-2
w(B)/%						
SiO ₂	52.037	54.213	52.482	51.488	54.252	52.673
TiO ₂	0.408	0.136	0.716	1.17	0.020	0.606
Al ₂ O ₃	3.102	1.435	2.899	3.704	0.450	3.465
Cr ₂ O ₃	0.008	0	0.005	0.016	0	0
TFeO	2.164	0.979	1.430	1.570	5.885	8.722
MnO	0.135	0.183	0.140	0.201	0.361	0.208
MgO	16.792	17.663	16.871	16.535	15.520	18.093
CaO	25.759	26.285	25.984	25.847	24.184	12.612
Na ₂ O	0.013	0.001	0	0.004	0.188	0.550
K ₂ O	0.010	0	0.004	0	0.006	0.408
基于 6 个氧原子计算						
Si	1.8951	1.9520	1.9029	1.8708	1.9874	1.9614
Al(Ⅳ)	0.1050	0.0480	0.0971	0.1292	0.0127	0.0387
Al(Ⅵ)	0.0282	0.0129	0.0268	0.0294	0.0068	0.1134
Ti	0.0112	0.0037	0.0195	0.0320	0.0006	0.0170
Cr	0.0002	0	0.0001	0.0005	0	0
Fe ³⁺	0.0828	0.0415	0.0468	0.0533	0.0275	0
Fe ²⁺	0	0	0	0	0.1523	0.2733
Mn	0.0042	0.0056	0.0043	0.0062	0.0112	0.0066
Mg	0.9116	0.9481	0.9119	0.8956	0.8475	1.0044
Ca	1.0051	1.0141	1.0095	1.0062	0.9492	0.5032
Na	0.0009	0.0001	0	0.0003	0.0134	0.0397
K	0.0005	0	0.0002	0	0.0003	0.0194
Wo	50.58	50.77	51.27	51.45	47.43	27.54
En	45.87	47.47	46.32	45.79	42.35	54.97
Fs	3.50	1.75	2.41	2.74	9.55	15.32
Ac	0.05	0	0	0.01	0.67	2.17

注：Wo—硅灰石；En—顽火辉石；Fs—蔷薇辉石；Ac—霓石。

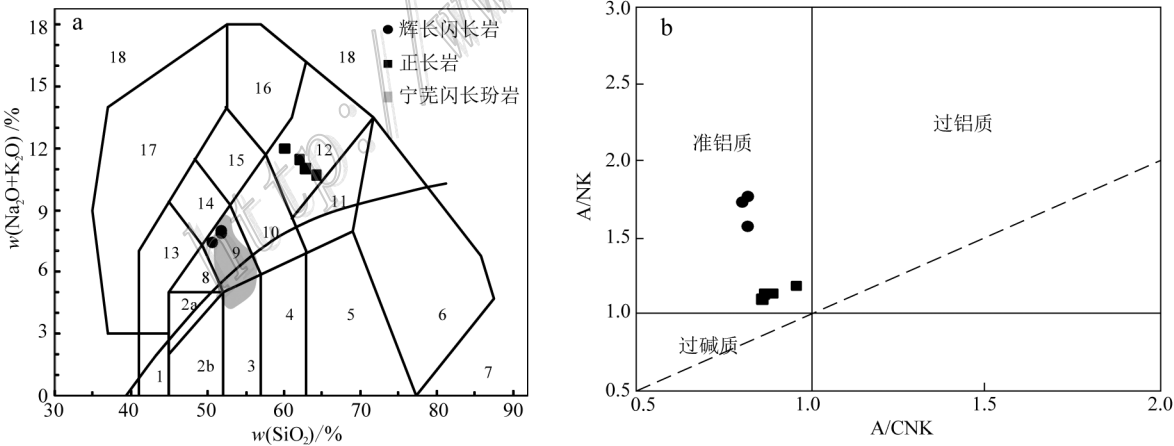


图 6 龙桥铁矿床中辉长闪长岩和正长岩侵入岩 TAS 图解(a, 底图据 Middlemost, 1994)和 A/NK-A/CNK 图解 (b, 底图据 Maniar et al., 1989)(宁芜闪长玢岩数据据宁芜研究项目编写小组, 1977)

图中数字分别代表：1—橄榄辉长岩；2a—碱性辉长岩；2b—亚碱性辉长岩；3—辉长闪长岩；4—闪长岩；5—花岗闪长岩；6—花岗岩；7—石英岩；8—二长辉长岩；9—二长闪长岩；10—二长岩；11—石英二长岩；12—正长岩；13—副长石辉长岩；14—副长石二长闪长岩；15—副长石二长正长岩；16—副长正长岩；17—副长深成岩；18—霓方钠岩/磷霞岩/白榴岩

Fig. 6 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) diagram of concealed gabbro diorite and syenite from the Longqiao iron deposit (a, base map after Middlemost, 1994) and A/NK-A/CNK diagram of the ongqiao iron deposit (b, base map after Maniar et al., 1989)(data in Ningwu diorite after Ningwu Project Group, 1977)

The number in the diagram represent: 1—Olivine gabbro; 2a—Alkali gabbro; 2b—Sub-alkali gabbro; 3—Gabbro diorite; 4—Diorite; 5—Granodiorite; 6—Granite; 7—Quartzolite; 8—Monzogabbro; 9—Monzodiorite; 10—Monzonite; 11—Quartz monzonite; 12—Syenite; 13—Foid gabbro; 14—Foid monzodiorite; 15—Foid monzosyenite; 16—Foid syenite; 17—Foid plutonite; 18—Tawite/urtite/leucite

表 3 龙桥铁矿床中辉长闪长岩和正长岩主量元素组成

Table 3 Major elements analytical results of concealed gabbro diorite and syenite intrusions in the Longqiao iron deposit														
岩石类型	样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	总和	数据来源
w(B)/%														
辉长闪长岩	LQ15-13	50.75	17.60	6.93	9.49	3.48	3.75	0.17	3.90	0.56	1.12	1.40	99.15	本文
辉长闪长岩	LQ-10	53.31	17.42	7.07	9.05	3.36	3.09	0.19	3.79	0.50	0.88	1.41	100.07	本文
辉长闪长岩	LQ-15-17	53.50	17.08	5.86	8.37	2.99	3.66	0.17	4.82	0.47	0.87	2.10	99.89	本文
正长岩	zk604-676	62.01	15.92	1.66	3.25	7.97	1.27	0.06	3.46	0.14	0.30	1.62	100.46	吴明安等,1996
正长岩	zk608-562	64.23	15.36	1.66	2.87	6.61	0.88	0.07	4.07	0.19	0.39	1.59	100.10	吴明安等,1996
正长岩	zk521-585	63.00	16.34	1.39	2.10	6.93	0.88	0.06	4.05	0.11	0.36	2.35	100.31	吴明安等,1996
正长岩	zk521-748	60.24	17.09	2.01	3.63	7.60	1.47	0.10	4.41	0.14	0.38	2.38	98.99	吴明安等,1996

大小为 4~160 μm,能量密度范围 1~45 J/cm²,单脉冲能量可达 200 mJ,最高重复频率 20 Hz。采用高纯度的氦气和氩气(99.999%),²⁰⁴Pb 和²⁰²Hg 的背景<100 cps。每测定 5 个样品点测定两次标准锆石 91500(减少偶然因素的影响),每测 10 个样品点测一次 NIST610 和年龄监控样 Mud Tank。每个分析点的气体背景采集时间为 20~30 s(一般为 25 s),信号采集时间为 40~50 s(一般为 50 s)。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氦气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck 等(1995)。采用标准锆石 Mud Tank(intercept age of (732±5) Ma,Black et al.,1978)作为监控样,控制年龄的分析精度。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex-ver3(Ludwig,2003)完成。锆石 U-Th-Pb 同位素比值及年龄数据的单次测量的标准偏差为 1σ,求的加权平均年龄采用 2σ。因为²⁰⁴Pb 的信号极低,以及载气中²⁰⁴Hg 的信号

干扰,所以 LA-ICPMS 不能精确测点样品中²⁰⁴Pb 的含量,因此,使用嵌入的 EXCEL 的 ComPbCorr#3.18 程序(Andersen,2002)进行普通 Pb 校正。

4.2 定年结果

辉长闪长岩的 LA-ICP-MS 法测年数据见表 4,谐和图见图 7a。岩浆岩样品的锆石均为无色透明或浅黄色,结晶较好,呈典型的长柱状晶形。锆石中的 Th/U 比值可以指示锆石的成因(表 4)。岩浆锆石的 Th/U 比值一般大于 0.1,而变质锆石的 Th/U 比值一般小于 0.1(Belousova et al.,2001)。辉长闪长岩中锆石的 Th/U 比值变化范围在 0.70~2.54 之间,均大于 0.1,属于典型的岩浆成因锆石。由锆石的阴极发光图像可以看出(图 7b),所有的锆石均具有清晰的内部结构和典型的岩浆震荡环带,不具有核-幔结构,无后期变质壳,表明这些锆石是岩浆形成后一次结晶形成的,应代表的是岩浆冷却结晶的时代。测试结果表明辉长闪长岩样品的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(133.5±0.8) Ma。

表 4 龙桥铁矿床中辉长闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年数据

Table 4 LA-ICP MS zircons U-Pb isotopic data of gabbro diorite intrusion from the Longqiao deposit															
分析点	$w(B)/10^{-6}$		U/Th	比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ
LQ15-13-11	7128	2702	0.38	0.0451	0.0028	0.0209	0.0006	0.0081	0.0005	133.3	3.8	134.0	4.6	162.2	10.4
LQ15-13-27	5806	2547	0.44	0.0481	0.0024	0.0212	0.0005	0.0100	0.0029	134.9	3.2	136.41	3.8	201.7	58.0
LQ15-13-34	2878	2355	0.82	0.0492	0.0010	0.0208	0.0001	0.0057	0.0006	132.7	0.9	134.7	2.1	115.8	11.6
LQ15-13-12	15768	6143	0.39	0.0505	0.0009	0.0209	0.0001	0.0069	0.0001	133.3	0.9	138.4	2.3	139.5	1.8
LQ15-13-33	5129	2673	0.52	0.0512	0.0015	0.0209	0.0002	0.0069	0.0001	133.4	1.2	140.7	4.0	139.3	2.4
LQ15-13-39	12353	10206	0.83	0.0527	0.0024	0.0208	0.0002	0.0061	0.0005	132.6	1.5	141.5	5.6	123.4	10.4
LQ15-13-19	464	419	0.90	0.0520	0.0013	0.0211	0.0003	0.0065	0.0001	134.3	1.7	143.5	3.7	131.1	2.6
LQ15-13-13	11257	3358	0.30	0.0530	0.0017	0.0210	0.0002	0.0066	0.0001	133.7	1.2	145.5	4.3	133.0	2.2
LQ15-13-35	850	623	0.73	0.0544	0.0026	0.0210	0.0002	0.0065	0.0001	133.9	1.5	147.3	6.1	130.7	2.5
LQ15-13-10	1332	885	0.66	0.0629	0.0168	0.0208	0.0005	0.0065	0.0010	132.5	3.0	145.7	17.7	131.4	19.2
LQ15-13-09	442	368	0.83	0.0554	0.0036	0.0210	0.0003	0.0076	0.0002	133.9	2.0	147.7	8.0	152.7	4.0
LQ15-13-26	209	208	0.99	0.0540	0.0023	0.0211	0.0002	0.0070	0.0002	134.9	1.5	148.4	5.7	141.2	3.0

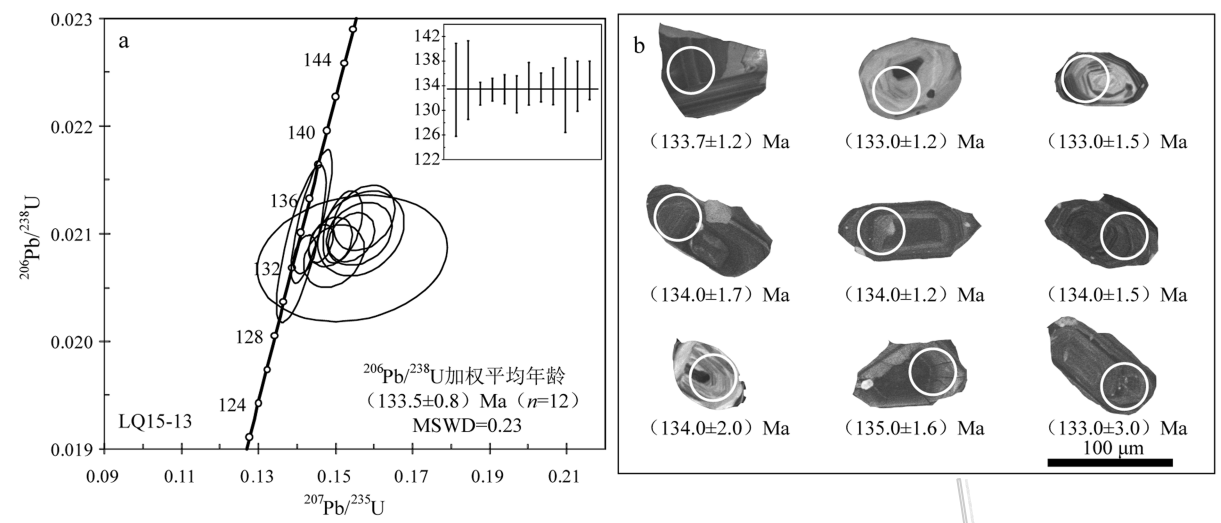


图 7 龙桥铁矿床中辉长闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图(a)和测试样品部分阴极发光(CL)图像测试位置及结果(b)

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and cathodeluminescence (CL) images (b) of selected zircons for gabbro diorite from the Longqiao deposit

5 讨 论

5.1 辉长闪长岩与成矿作用的关系

龙桥铁矿床自 20 世纪 80 年代发现以来其成因一直备受争议,大部分学者均认为该矿床为沉积-热液改造型矿床,主要证据是纹层状矿石中磁铁矿交代菱铁矿的交代残余结构(段超,2009),表明存在原始正常沉积的矿胚层,而磁铁矿的铅同位素特征、氢氧同位素特征、硫同位素特征指示磁铁矿的形成与热液活动密切相关(段超,2009;Zhou et al., 2011)。此外,矿床中磁铁矿 Co/Ni 比值范围较大,表明矿床具沉积和热液叠加改造的复合成因(吴明安等,1996;唐永成等,1998)。由于在此之前,矿区内规模较大的侵入岩体仅发现正长岩体,虽然正长岩体的地质特征显示其很可能与铁成矿作用无关,由于一直没有闪长质侵入岩的发现,绝大部分学者(任启江等,1991;吴明安,1996;段超,2009;Zhou et al., 2011)还是认为其叠加改造热液来自于矿区深部的正长岩体,这种认识与长江中下游成矿带铁矿床的成矿规律明显不一致;目前成矿带内已发现的矽卡岩型铁矿床和“玢岩型”铁矿床(宁芜玢岩铁矿研究小组,1977)均与辉长闪长岩或辉石闪长岩等侵入岩或次火山岩有成因关系。

通过对龙桥铁矿床中辉长闪长岩体和正长岩体的地质特征分析可知,正长岩与铁矿体和蚀变带空

间上明显分离,且距离较远(图 3),局部可见正长岩体穿切铁矿体(内部编录资料)。正长岩本身非常新鲜,几乎无任何蚀变,正长岩含铁量极低($w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为 2.10%~3.63%),通常很难提供大量成矿物质。本次在巷道中观察可见,辉长闪长岩体与铁矿体则具有明显的岩体-内矽卡岩-矿体-外矽卡岩的蚀变分带特征(图 3),结合矿区内正长岩穿切辉长闪长岩和铁矿体(内部编录资料),这些正长岩明显为成矿期后侵入岩。前人研究表明,虽然三叠纪膏盐层为矿床的形成可能提供了部分铁质,但主要成矿物质仍受控于燕山期的岩浆作用和热液活动(宁芜玢岩铁矿研究小组,1977;华仁民等,1999;毛景文等,2005),因此,推测其成矿物质主要来自于辉长闪长岩。从本次测得的成岩年龄上看,辉长闪长岩($(133.5\pm0.8)\text{ Ma}$)是砖桥旋回火山岩浆活动末期的产物,龙桥铁矿床的成矿年龄为 131~133 Ma(周涛发等,2010;张乐骏,2011;马立成等,2011),三者年龄非常相近,表明成岩成矿作用几乎同时发生。矿区正长岩的成岩时代($(131.5\pm1.5)\text{ Ma}$)(周涛发等,2010),小于矿床成矿年龄和辉长闪长岩的年龄,以上年代学测试结果与地质关系吻合。综合上述龙桥铁矿床地质特征和年代学研究,本文认为龙桥铁矿床的形成与辉长闪长岩关系密切,矿床类型与层控矽卡岩型铁矿床较为相似。

5.2 区域侵入岩成岩时代及成岩岩体对比

庐枞矿集区内有 30 余个侵入岩体分布,单个岩

体出露面积 $0.1 \sim 50 \text{ km}^2$ 不等,前人对庐枞矿集区侵入岩做了大量年代学工作(范裕等,2008;覃永军等,2010;周涛发等,2007,2010;张乐骏,2011;邱宏,2014)。根据庐枞地区侵入岩成岩时代、岩性和穿插关系可将侵入岩划分为3个阶段(图1) 第一阶段为闪长岩类,均为隐伏岩体,与铁矿化关系密切,其形成时代在 $134 \sim 132 \text{ Ma}$ 之间;第二阶段为二长岩、正长岩类其形成时代在 $134 \sim 130 \text{ Ma}$ 之间,主要分布在庐枞地区的北部;第三阶段为石英正长岩类和花岗岩类,其形成时代在 $129 \sim 123 \text{ Ma}$ 之间,主要分布在庐枞地区南部。龙桥铁矿床中辉长闪长岩年龄为 $(133.5 \pm 0.8) \text{ Ma}$,属于庐枞矿集区早期第一阶段的产物(图1)。庐枞矿集区中泥河、杨山等铁矿床成矿岩体均为闪长岩,正长岩均为成矿后期产物,与成矿作用无关(范裕等,2014;张乐骏,2011)。庐枞矿集区内铁矿床的成矿规律表明,铁矿床均与闪长质侵入岩关系密切,区域内与正长岩有关的马口铁矿床(周涛发等,2012),笔者最近的研究表明,赋围岩并非正长岩,而是钠化闪长岩,其成矿作用仍与闪长岩有关(内部资料,待发表)。

除庐枞矿集区外,长江中下游成矿带铁矿床还集中产出在宁芜和鄂东南2个矿集区,前人对宁芜盆地中与铁矿成矿相关的闪长玢岩的定年工作表明,闪长玢岩的形成时代集中于 $128 \sim 131 \text{ Ma}$ (范裕等,2010;侯可军等,2010;段超等,2011;袁峰等,2011;汪丽娟等,2014),而盆地中偏酸性侵入岩如石英正长岩的年龄集中在 $126 \sim 130 \text{ Ma}$ 之间,稍晚于闪长玢岩的形成时代(侯可军等,2010;袁峰等,2011),虽然二者在年龄上并未表现出明显差别,但野外可明显观察到晚期正长岩穿切铁矿体。在鄂东南矿集区矽卡岩型铁矿床成矿年龄为 $133 \sim 132 \text{ Ma}$,该期成矿作用与 $133 \sim 127 \text{ Ma}$ 的石英闪长岩关系密切(Xie et al., 2012;瞿泓滢等,2012;姚磊等,2013;夏金龙等,2009),矿集区内至今未有与正长岩类有关的铁成矿的报道。

在成矿岩体方面,宁芜矿集区中新鲜辉长闪长玢岩主要矿物组成为斜长石($>70\%$)、辉石以及少量角闪石,晚期二长岩-花岗岩类侵入岩主要矿物为石英($20\% \sim 30\%$)、钾长石($60\% \sim 70\%$)、斜长石($8\% \sim 10\%$)以及少量黑云母(宁芜玢岩铁矿研究小组,1977)。鄂东南地区与矽卡岩型铁矿床有关的石英闪长岩主要组成为斜长石($50\% \sim 60\%$)、钾长石($15\% \sim 20\%$)、石英($5\% \sim 15\%$)、角闪石($5\% \sim$

15%)和黑云母(5%),而较晚的花岗岩类主要由钾长石($45\% \sim 55\%$)、斜长石($13\% \sim 18\%$)、石英($30\% \sim 35\%$)和少量黑云母组成。通过对不同矿集区铁矿床成矿与不成矿岩体对比可以看出,成矿岩体大多为闪长质岩石,具有较高的斜长石以及暗色矿物含量,与正长岩及花岗岩类侵入岩在矿物组合上具有较大差别。在成矿模式方面,龙桥铁矿床与宁芜地区的白象山铁矿床以及鄂东南大冶铁山铁矿较为相似,它们均为闪长质侵入岩侵位到三叠系碳酸盐地层中形成的,只是龙桥铁矿床受地层构造控制明显顺层产出形成了层状矿体,并非典型的接触带成矿。因此,可以看出整个长江中下游成矿带与铁矿床有关的岩体绝大部分为闪长质岩体,正长岩形成铁矿显然与区域成矿规律相违背。本次工作测得龙桥铁矿床辉长闪长岩成岩时代为 $(133.5 \pm 0.8) \text{ Ma}$,符合这一岩浆岩控矿规律,龙桥铁矿床属于长江中下游成矿带第二期岩浆作用的产物(周涛发等,2008),辉长闪长岩是形成龙桥式铁矿床的主要控矿因素。

5.3 庐枞矿集区龙桥式铁矿床找矿方向

庐枞矿集区内深大断裂控制的隐伏闪长岩和三叠系是龙桥式铁矿床的重要控矿因素,而晚期正长岩体则是矿床形成后的破矿岩体。因此,庐枞矿集区中正长岩体大规模出露地区,不具备形成大型铁矿床的成矿潜力,而在庐枞矿集区北部边缘和西部边缘三叠系和隐伏闪长岩体交汇部位具有寻找‘龙桥式’铁矿床的潜力。庐枞矿集区西南缘新近发现的许家咀矿床具有龙桥式铁矿床的特征,矿体产于闪长岩和三叠系接触带,说明在庐枞矿集区闪长岩附近的三叠系中寻找‘龙桥式’铁矿床是完全可能的,庐枞矿集区仍具有较大的铁矿找矿潜力。

6 结 论

(1) 庐枞矿集区龙桥铁矿床井下发现辉长闪长岩的成岩时代为 $(133.5 \pm 0.8) \text{ Ma}$,较比正长岩与成矿作用关系更为密切,成岩成矿作用几乎同时发生。

(2) 庐枞矿集区龙桥铁矿床中辉长闪长岩成岩时代与宁芜盆地玢岩型铁矿床、鄂东南矽卡岩铁矿床成矿岩浆岩时代基本一致。进一步证明长江中下游成矿带铁矿床岩浆岩具有明显的成矿专属性,闪长质侵入岩是矽卡岩型及玢岩型铁矿成矿的有利条件,而正长岩类侵入岩与铁成矿作用无明显成因联

系。

(3) 庐枞矿集区内深大断裂控制的隐伏闪长岩体和三叠系是龙桥式铁矿床的重要控矿因素, 庐枞矿集区仍具有寻找龙桥式铁矿床的找矿潜力。

References

- 327 Geological Team in Anhui Province. 1961. Geology exploration report of Hejiada Ling iron deposit in Lujiang [R]. (in Chinese).
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Belousova E A, Walters S, Griffin, W L and O'Reilly S Y. 2001. Trace-element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 603-619.
- Black L P and Culson B L. 1978. The age of the Mud Tank carbonatite, strangelands range, northern Territory [J]. *BMR J. Aust. Geophys*, 3: 227-232.
- Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper iron belt of the lower and middle reaches of the Changjiang River [M]. Beijing: Geological Publishing House. 71-76 (in Chinese).
- Duan C. 2009. Geological and geochemical characteristics and genesis of Longqiao iron deposit in Luzong basin, Anhui, China (Master's Thesis) [D]. Mentor Zhou T F. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Duan C, Mao J W, Li Y H, Hou K J, Yuan S D, Zhang C and Liu J L. 2011. Zircon U-Pb geochronology of the gabbro-diorite porphyry and granodiorite porphyry from the Washan iron deposit in Ningwu Basin, and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85 (7): 1159-1171. (in Chinese with English abstract)
- Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Qian C C, Lu S M and Cooke D. 2008. LA-ICP MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) area and their geological significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (8): 1715-1724 (in Chinese with English abstract)
- Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Zhang L J, Qian B, Ma L and Cooke D. 2010. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning-Wu basin and their metallogenic significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (9): 2715-2728 (in Chinese with English abstract).
- Fan Y, Liu Y N, Zhou T F, Zhang L J, Yuan F and Wang W C. 2014. Geochronology of the Nihe deposit and in the Luzong basin and its metallogenic significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (5): 1369-1381 (in Chinese with English abstract).
- Hou K J and Yuan S D. 2010. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the volcanic and sub-volcanic rocks in the Ningwu basin and their geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (3): 888-902 (in Chinese with English abstract).
- Hua R M and Mao J W. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China [J]. *Mineral Deposits*, 18 (4): 300-307 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Sun Y, Sun M Z, Bian L Z, Xiong Y G, Yang S Y, Cao Z Q and Wu Y M. 2010. Reiterative fault systems and superimposed mineralization in the Jiurui metallogenic cluster district, Middle and Lower Yangtze River mineralization belt, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (9): 2751-2767 (in Chinese with English abstract).
- Lu S M, Li J S, Zhao L L and Wei D Z. 2010. Geochemical characteristics of ore-bearing strata and their prospecting implications for the Longqiao-type iron deposit in Lujiang-Zongyang basin, Anhui Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (9): 2577-2586 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California.
- Ma L C, Dong S W, Zhong Y B, Zhang Q M and Gao C S. 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 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 58 (7): 1206-1214 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 615-643.
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Wang Y T and Lehmann B. 2006. 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*, 29 (3-4): 307-324.
- Mao J W, Xie G Q, Pirajno F, Ye H S, Wang Y B, Li Y F, Xiang J F and Zhao H J. 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in eastern Qinling, central eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57: 51-78.
- Mao J W, Xie G Q, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen Y C. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower

- Yangtze River Valley, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 43 (1), 294-314.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in magma/igneous rock system[J]. *Earth Sci. Rev.*, 37:215-224.
- Ni R S, Wu Q Q, Wang X Y, Wu M A and Zhang Q M. 1994. New data and evolutionary model of polymetallogenization for the Longqiao iron deposit, Lujiang, Anhui[J]. *Geological Review*, 40 (6): 565-575 (in Chinese with English abstract).
- Ningwu Project Group. 1977. The Porphyrite iron deposit in Ningwu area[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-320 (in Chinese).
- Pan Y M and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, East China: Intrusion and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 15: 117-242.
- Qin Y J. 2010. Research on Yanshanian metallogenic geodynamic setting and metallogenic model in Lu-Zong Basin, Anhui Province (master's thesis) [D]. Mentor Zeng J N. Wuhan China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Qiu H. 2014. Diagenesis of intermediate-acidic intrusive rock in the Lu-zong areas, Anhui Province (master's thesis) [D]. Mentor Zhou T F. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Qu H Y, Wang H L, Pei R F, Yao L, Wang Y L and Zheng Z G. 2012. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Tieshan and Jinshandian plutons in the southeastern Hubei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (1): 147-165 (in Chinese with English abstract).
- Ren Q j, Liu X S and Xu Z W. 1991. Mesozoic volcano tectonic depression and its mineralizing process in Lujiang-Zongyang area, Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-206 (in Chinese).
- Song C Z, Lin S F, Zhou T F, Yan J, Ren S L, Li J H, Tu W C and Zhang Y. 2010. Mesozoic tectonic regime transition of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River and its adjacent area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (9): 2835-2849 (in Chinese with English abstract).
- Tang Y C, Wu Y C and Chu G Z. 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 60-85 (in Chinese).
- Wang L J, Wang R C, Yu J H, Yang Y H, Huang J P and Zhang S Q. 2014. Geochronology, geochemistry of volcanic-intrusive rocks in the Ningwu basin and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88 (7): 1247-1272 (in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19: 1-23.
- Wu M A, Zhang Q M, Wang X Y, Gao C S, Shang S G and Wang M H. 1996. Longqiao iron deposit in Lujiang, Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xia J L, Hu M A, Xu B J, Zhang W S, Yang Z and Wang L. 2009. Geochemistry constraint on the ore-forming materials of the Chengchao iron deposit, Hubei Province [J]. *Geoscience*, 23 (2): 285-291 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q, Zhao H J, Zhao C S, Li X Q, Hou K J and Pan H J. 2009. Re-Os dating of molybdenite from Tonglushan ore district in southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 28 (3): 227-239 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q, Mao J W, Zhao H J, Wei K T, Jin S G, Pan H J and Ke Y F. 2011. Timing of skarn deposit formation of the Tonglushan ore district, southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt and its implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 62-77.
- Xie G Q, Mao J W and Zhao H J. 2012. Zircon U-Pb and phlogopite ^{40}Ar - ^{39}Ar Age of the Chengchao and Jinshandian skarn Fe deposits, southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt, China [J]. *Mineralium Deposita*, 47 (6): 633-652.
- Yao L, Xie Q Q, Lv Z C, Zhao C S, Wang J, Zheng X W, He Z F and Li W. 2013. Zircon U-Pb ages, geochemistry and Hf isotopes of granitoids and diorite in the Chengchao Fe deposit in southeastern Hubei ore cluster and its significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43 (5): 1393-1422 (in Chinese with English abstract).
- Yuan F, Zhou T F, Fan Y, Zhang L J, Ma L and Qian B. 2011. Zircon U-Pb ages and isotopic characteristics of the granitoids in the Ningwu basin, China, and their significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85 (5): 821-833 (in Chinese with English abstract).
- Yuan S D, Hou K J and Liu M. 2010. Timing of mineralization and geodynamic framework of iron-oxide-apatite deposits in Ningwu Cretaceous basin in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, China: Constraints from Ar-Ar dating on phlogopites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (3): 797-808 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Yao S Z and Ling X D. 1992. Regularities of metallogenesis for copper (gold) deposits in the Middle and Lower reaches of the Yangtze River area [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-120

(in Chinese).

Zhang L J. 2011. Polymetallic mineralisation and associated magmatic and volcanic activity in the Luzong basin, Anhui Province, eastern China (PhD Thesis) [D]. Mentor: Zhou T F. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).

Zhang R H, Zhang X T and Hu S M. 2010. Deep rocks and ore-forming processes in Luzong volcanic basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (9): 2656-2680 (in Chinese with English abstract).

Zhou T F, Song M Y, Fan Y, Yuan F, Liu J, Wu M A, Qian C C and Lu S M. 2007. Chronology of the Bajiatan intrusion in the Luzong basin, Anhui, and its significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2379-2386 (in Chinese with English abstract).

Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Lu S M, Shang S G, Cooke D, Sebastien M and Zhao G C. 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) basin and its significance [J]. *Science China (D)*, 51 (10): 1342-1353 (in Chinese with English abstract).

Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Song C Z, Zhang L J, Qian C C, Lu S M and Cooke D. 2010. Temporal-spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constrain to mineralizations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (9): 2694-2714 (in Chinese with English abstract).

Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Zhang L J, Ma L, Qian B and Xie J. 2011. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle and Lower Yangtze metallogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85 (5): 712-730 (in Chinese with English abstract).

Zhou T F, Wu M A, Fan Y, Duan C, Yuan F, Zhang L J, Liu J, Qian B, Pirajno F and Cooke D. 2011. Geological, geochemical characteristics and isotope systematics of the Longqiao iron deposit in the Lu-Zong volcano-sedimentary basin, Middle-Lower Yangtze (Changjiang) River Valley, eastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 43 (1): 154-169.

Zhou T F, Wang B, Fan Y, Yuan F, Zhang L J and Zhong G X. 2012. Apatite-actinolite-magnetite deposit related to A-type granite in Luzong basin: Evidence from Makou iron deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (10): 3087-3098.

附中文参考文献

安徽省地矿局 327 地质队. 1961. 安徽庐江何家大岭铁矿地质勘查最终报告 [R].

常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带 [M]. 北京: 地质出版社.

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) [D]. 周涛发. 合肥工业大学. 1-111.

段超, 毛景文, 李延河, 侯可军, 袁顺达, 张成, 刘佳林. 2011. 宁芜

盆地凹山铁矿床辉长闪长玢岩和花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *地质学报*, 85 (7): 1159-1171.

范裕, 周涛发, 袁峰, 钱存超, 陆三明, Cooke D. 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 [J]. *岩石学报*, 24 (8): 1715-1724.

范裕, 周涛发, 袁峰, 张乐骏, 钱兵, 马良, Cooke D. 2010. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义 [J]. *岩石学报*, 26 (9): 2715-2728.

范裕, 刘一男, 周涛发, 张乐骏, 袁峰, 王文财. 2014. 安徽庐枞盆地泥河铁矿床年代学研究及其意义 [J]. *岩石学报*, 30 (5): 1369-1381.

侯可军, 袁顺达. 2010. 宁芜盆地火山-次火山岩的锆石 U-Pb 年龄, Hf 同位素组成及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 26 (3): 888-902.

华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发 [J]. *矿床地质*, 8 (4): 300-307.

蒋少涌, 孙岩, 孙明志, 边立曾, 熊永根, 杨水源, 曹钟清, 吴亚民. 2010. 长江中下游成矿带九瑞矿集区叠合断裂系统和叠加成矿作用 [J]. *岩石学报*, 26 (9): 2751-2767.

陆三明, 李建设, 赵丽丽, 韦导忠. 2010. 庐枞矿集区龙桥式铁矿床含矿层位地球化学特征及找矿意义 [J]. *岩石学报*, 26 (7): 2577-2586.

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 [J]. *地质学报*, 58 (7): 1206-1214.

毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方大规模成矿作用的期次及大陆动力学背景 [J]. *岩石学报*, 21 (1): 169-188.

倪若水, 吴其切, 汪祥云, 吴明安, 张千明. 1994. 安徽庐江龙桥矿层新资料及成矿作用多阶段演化模式 [J]. *地质论评*, 40 (6): 565-575.

宁芜研究项目编写小组. 1977. 宁芜玢岩铁矿 [M]. 北京: 地质出版社.

覃永军. 2010. 安徽庐枞盆地燕山期找矿地球动力学背景及成矿模式 (硕士学位论文) [D]. 导师: 曾健年. 武汉: 中国地质大学. 1-162.

邱宏. 2014. 安徽庐枞地区中酸性侵入岩成岩作用研究 (硕士学位论文) [D]. 导师: 周涛发. 安徽: 合肥工业大学. 1-117.

瞿泓滢, 王浩琳, 裴荣富, 姚磊, 王永磊, 郑志刚. 2012. 鄂东南地区与铁山和金山店铁矿有关的花岗质岩体锆石 LA-ICP-MS 年龄和 Hf 同位素组成及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 28 (1): 147-165.

任启江, 刘孝善, 徐兆文. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社. 1-206.

宋传中, Lin S F, 周涛发, 闫峻, 任升莲, 李加好, 涂文传, 张妍. 2010. 长江中下游及其邻区中生代构造体制转换 [J]. *岩石学报*,

26(9):2835-2849.

唐永成, 吴言昌, 储国正. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社.

王丽娟, 王汝成, 于津海, 杨颖鹤, 黄建平, 张少琴. 2014. 宁芜盆地火山-侵入岩的时代、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 88(7):1247-1272.

吴明安, 张千明, 汪祥云, 高昌生, 尚世贵, 王明华. 1996. 安徽庐江龙桥铁矿[M]. 北京: 地质出版社.

夏金龙, 胡明安, 徐伯骏, 张旺生, 杨振, 王磊. 2009. 湖北程潮铁矿成矿物质来源的地球化学制约[J]. 现代地质, 23(2):285-291.

谢桂青, 赵海杰, 赵财胜, 李向前, 侯可军, 潘怀军. 2009. 鄂东南铜绿山矿田矽卡岩型铜铁金矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(3):227-239.

姚磊, 谢桂青, 吕志成, 赵财胜, 王建, 郑先伟, 何哲峰, 李伟. 2013. 鄂东南程潮铁矿床花岗岩质和闪长岩的岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、地球化学和 Hf 同位素新证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(5):1393-1422.

袁峰, 周涛发, 范裕, 张乐骏, 马良, 钱兵. 2011. 宁芜盆地花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、同位素特征及其意义[J]. 地质学报, 85(5):821-833.

袁顺达, 侯可军, 刘敏. 2010. 安徽宁芜地区铁氧化物-磷灰石矿床中金云母 Ar-Ar 定年及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 26

(3):797-808.

翟裕生, 姚书振, 林新多, 周●若, 万天丰, 金福全, 周永桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 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(博士学位论文)[D]. 导师: 周涛发. 安徽: 合肥工业大学. 1-289.

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[J]. 岩石学报, 26(9):2665-2680.

周涛发, 宋明义, 范裕, 袁峰, 刘●, 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[J]. 岩石学报, 23(10):2379-2386.

周涛发, 范裕, 袁峰, 陆三明, 尚世贵, Cooke D, Sebastien M, 赵国春. 2008. 安徽庐枞(庐江-枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义[J]. 中国科学(D辑), 38(11):1342-1353.

周涛发, 范裕, 袁峰, 宋传中, 张乐骏, 钱存超, 陆三明, Cooke D. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架和对成矿制约[J]. 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[J]. 地质学报, 85(50):712-729.

周涛发, 王彪, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 钟国雄. 2012. 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[J]. 岩石学报, 28(10):3087-3098.