

# 福建漳平洛阳铁矿床成岩成矿年代学及其地质意义

张 达<sup>1,2</sup>, 吴淦国<sup>1,2</sup>, 狄永军<sup>1</sup>, 王长明<sup>1</sup>, 姚继明<sup>1</sup>,  
张垚垚<sup>1</sup>, 吕良冀<sup>1</sup>, 袁 远<sup>1</sup>, 石建基<sup>3</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083  
2. 中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083  
3. 福建省地质矿产勘查开发局, 福建福州 350003

**摘要:**为了确定闽西南地区铁矿床成矿时代及主要成矿作用特征,选取洛阳铁矿床开展花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测龄及辉钼矿 Re-Os 同位素年代学研究。结果表明洛阳铁矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为  $(133.0 \pm 1.9) \sim (134.0 \pm 4.2)$  Ma, 为早白垩世成矿。矿区花岗斑岩结晶年龄为  $131 \pm 1$  Ma, 细粒斑状花岗岩结晶年龄为  $131.64 \pm 0.62$  Ma, 说明岩体都形成于早白垩世。通过对洛阳铁矿床花岗岩、磁铁矿体及辉钼矿体空间分布规律及矿化蚀变综合分析,结合岩体与矿床年代学结果,可以得出洛阳铁矿床主要形成于早白垩世,与早白垩世花岗岩岩浆热液接触交代石炭纪碎屑岩—碳酸盐岩地层密切相关。

**关键词:**Re-Os 同位素年龄; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学; 辉钼矿; 洛阳铁矿; 岩石学; 成矿预测; 矿床。

中图分类号: P611.1 文章编号: 1000-2383(2012)06-1217-15 收稿日期: 2012-07-19

## Geochronology of Diagenesis and Mineralization of the Luoyang Iron Deposit in Zhangping City, Fujian Province and Its Geological Significance

ZHANG Da<sup>1,2</sup>, WU Gan-guo<sup>1,2</sup>, DI Yong-jun<sup>1</sup>, WANG Chang-ming<sup>1</sup>, YAO Ji-ming<sup>1</sup>,  
ZHANG Yao-yao<sup>1</sup>, LV Liang-ji<sup>1</sup>, YUAN Yuan<sup>1</sup>, SHI Jian-ji<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Lithoprobing Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Bureau of Geology and Mineral Resources of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

**Abstract:** In order to determine the main mineralization time and ore forming genesis in the southwestern Fujian Province, this paper selects the Luoyang iron deposit to develop the study of LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating for granite and Re-Os geochronology for molybdenite from the iron ore body. According to the results, the molybdenite Re-Os isotopic model date is  $(133.0 \pm 1.9)$  to  $(134.0 \pm 4.2)$  Ma, which belongs to Early Cretaceous; and LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dates for the granite porphyry and fine grain porphyritic granite are  $(131 \pm 1)$  Ma and  $(131.64 \pm 0.62)$  Ma respectively, which is very close to the mineralization time achieved by the Re-Os isotopic dating. According to the analysis of the granites, spatial distribution of magnetite and molybdenite ore bodies, and the mineralization and alteration characteristics, combining with the above granite and deposit chronological data, it is suggested that the Luoyang iron deposit mainly formed at Early Cretaceous when the contact thermofluid metasomatism occurred between the Early Cretaceous granites and the Carboniferous clastic and carbonate strata.

**Key words:** Re-Os isotopic age; LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating; molybdenite; Luoyang iron deposit; petrology; ore prospecting; ore deposits.

福建漳平洛阳铁矿床位于闽西南晚古生代盆地东缘,属闽西南多金属成矿区“马坑式”铁矿的重要组成矿床之一。漳平洛阳铁矿与龙岩马坑、安溪潘田、德化阳山等铁矿床一起构成区域上一条重要的铁多金属矿带。闽西南盆地作为华夏古陆重要构造成矿单元,历经了前泥盆纪基底形成、晚古生代盆地形成与发育、中生代以来强烈构造岩浆改造等几个重要的演化阶段,并伴随不同时期的岩浆及成矿作用。

前寒武纪基底地层中富含 Fe、Pb、Zn、Cu、Au、S 等成矿物质,是区域成矿的重要基础。晚古生代由于裂陷作用,闽西南地区形成北东向的被动陆缘与陆表海盆地,成为古特提斯洋在东部的重要分支,先后沉积了早石炭世林地组( $C_1 l$ )粗碎屑岩建造,中石炭世经畲组( $C_2 j$ )硅质岩建造、老虎洞组碳酸盐岩建造,晚石炭世船山组( $C_3 c$ )碳酸盐岩建造和早二叠世栖霞组( $P_1 q$ )碳酸盐建造、细碎屑岩建造。这些碎屑岩—碳酸盐岩建造区域上构成“马坑式”铁矿的重要赋矿层位。区内重要铁矿床的主矿体赋存于早石炭世与中晚石炭世之间的不整合界面及中晚石炭世—早二叠世碳酸盐岩中,并受到燕山期构造岩浆作用的控制。正因如此,闽西南地区被认为存在晚古生代与石炭一二叠纪特定层位有关的 Fe、Cu、Mn、Pb、Zn 矿床成矿系列(高天钧等, 1999)。但由于燕山期花岗质岩浆在铁矿床范围内广泛存在,并产生了强烈的蚀变及矿化现象,因此有关“马坑式”铁矿床的形成时代及成因类型一直存在较多争议。归纳起来主要包括:陆源沉积—热液改造矿床说:铁矿铁质来源于铁丰度值高的前泥盆纪基底岩系,经长期陆相风化预富集、海相沉积成矿而形成;海相火山沉积—热液改造矿床说(葛朝华等, 1981; 邹天人等, 1981; 韩发和葛朝华, 1983a, 1983b; 葛朝华和韩发, 1984);认为铁质来源与海相火山作用有密切的成生关系;复合叠生层状矿床说(潘廓祥等, 1982);认为铁质来源于基底岩系风化带来的铁质沉积及早、中石炭世的火山活动(福建省地质八队, 1982);层控钙矽卡岩型铁矿床说(赵一鸣等, 1982);主控矿层位为黄龙组( $C_2 h$ )—栖霞组( $P_1 q$ )的贫镁碳酸盐岩层,燕山期岩浆携带的矿质以及气液交代含铁围岩释放的铁质构成了马坑铁矿铁质的主要来源,并形成含铁矽卡岩带。虽然对铁矿床的成因具不同观点,但都强调中生代岩浆作用对铁矿床形成的叠加富集作用。因此铁矿床形成时代及相应岩浆作用时代的研究是探讨铁矿床成因的重要内容之一。闽西南“马坑式”

铁矿年代学研究工作相对较少,相关工作只有 20 世纪 80 年代初开展的针对马坑铁矿床石英磁铁矿、角闪石磁铁矿及赋矿围岩的 Rb-Sr 等时线年龄测定以及含氯角闪石钾—氩法年龄测定(韩发和葛朝华, 1983a)。近年来,对与马坑铁矿相伴生的辉钼矿以及矿区内地层开展了 Re-Os 同位素年代学(王登红等, 2010)、锆石 U-Pb 年龄研究(毛建仁等, 2006)。而对于闽西南铁矿区内其他矿床年代学以及在此基础上的矿床成因研究较为薄弱,为了进一步深化闽西南地区铁多金属矿床成矿作用时代及成因研究,笔者拟选取漳平洛阳铁矿床开展辉钼矿 Re-Os 同位素测年及花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,并通过区域铁多金属形成环境及成矿作用对比,探讨成岩成矿年代学的地质意义。

## 1 区域地质背景

漳平洛阳铁矿床所属的闽西南拗陷是加里东运动后在华夏古陆裂陷槽基础上沉积晚古生代地层而形成的。闽西南拗陷的主体处于区域政和一大埔断裂带西侧,但由于闽东中生代火山岩的覆盖,位于政和一大埔断裂带东侧的闽西南拗陷东南缘,晚古生代—早三叠世地层表现为零星出露。洛阳铁矿就处于拗陷东南缘潘田—洛阳晚古生代地层出露区内。

闽西南拗陷以晚古生代—早中生代地层发育为特色(张达等, 2006)。尤其以上古生界—中下三叠统分布最广,侏罗系陆相火山岩呈孤岛状沿断陷盆地分布。上古生界—中下三叠统以一套浅海相、海陆交互相沉积为主,从老至新有上泥盆统一石炭系( $D_3-C_1$ )粗碎屑岩,上石炭统船山组一下二叠统栖霞组( $C_3 c-P_1 q$ )灰岩、硅质岩,下二叠统文笔山组—中三叠统( $P_1 w-T_2$ )海陆交互相含煤细碎屑岩、浅海相含钙细碎屑岩。带内自南西往北东,石炭、二叠纪碳酸盐岩成岩作用在时间上具有明显的穿时性,在空间上具有超覆(穿层),构成本区铁、硫、多金属矿的主要含矿层位。

研究区内北东向褶皱较发育,有长坑—感德背斜、洛阳背斜以及夹持其间的后坪山向斜,背斜核部地层主要为林地组,并大部分被中生代花岗岩体侵位破坏,两翼为中上石炭统一下三叠统。断裂构造以 NE、NNE 及 NW 为主,分别为政和一大埔、永安—晋江断裂带的组成部分。此外,沿上古生界不同地层岩性界面(如  $D_3-C_1$  与  $C_3 c-P_1 q$ 、 $Pt_1 my$  与  $C_3 c-P_1 q$ 、 $P_1 q$  与  $P_1 w$ 、 $P_1 t$  等)普遍发育的缓倾斜推覆构造和

层间滑脱断裂破碎带,往往造成地层重复或缺失,并成为十分有利的控矿容矿构造。

研究区所在的闽西南地区与成矿有关的岩浆岩主要可分为 3 期:燕山早期以石英闪长岩、辉石闪长岩、花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩为主,主要为同熔型与重熔型,有关矿种为 Mo、Pb、Zn、Ag、Cu、Sn 等;燕山中期以花岗岩类为主,岩石以高硅、钾、钠和贫钙、镁为特征,岩性有黑云母花岗岩、似斑状花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩和花岗斑岩,与 W、Mo、Sn 矿化关系密切;燕山晚期以花岗闪长岩和花岗斑岩类为主,次为花岗岩类,主要岩性包括花岗闪长岩、石英闪长岩、石英闪长斑岩、花岗斑岩、闪长岩、二长花岗岩等,与 Cu、Mo、Au、Sn、Pb、Zn、Ag 等矿化有关。研究区以燕山早期花岗岩、花岗斑岩广泛发育,并与铁、铅、锌、钼矿关系密切。

不同类型的矿床在区内广泛发育。其中紫金山铜金矿床、马坑铁矿等为区内主要大型矿床。主要矿种有 Cu、Pb、Zn、Fe、W、Sn、Mo、Au、U、Sb、Ag、硫铁矿等,主要矿床类型有陆相火山一次火山热液型、斑岩型、岩浆热液型、层控矽卡岩型、热液型等,并因此而形成马坑式、紫金山式等多种矿床模式。

## 2 矿床及岩体地质特征

### 2.1 矿床地质特征

洛阳铁矿区出露的地层主要为下石炭统林地组( $C_1l$ )、上石炭统船山组( $C_3c$ )、下二叠统栖霞组( $P_1q$ )、文笔山组( $P_1w$ )、童子岩组( $P_1t$ )、上二叠统翠屏山组( $P_2cp$ )、下三叠统溪口组( $T_1x$ )、上三叠统文宾山组( $T_3w$ )、上侏罗统长林组( $J_3c$ )、上侏罗统南园组( $J_3n$ ) (图 1)。其中与铁矿有关的地层有林地组( $C_1l$ )粉砂岩、船山组( $C_3c$ )及栖霞组( $P_1q$ )灰岩,特别是船山组( $C_3c$ )及栖霞组( $P_1q$ )灰岩地层与铁矿关系尤其密切。矿区中具有工业价值的铁矿床绝大部分产于船山组( $C_3c$ )下部较纯的厚层灰岩中。

矿区构造主要有轴向 NNE—SSW 向、微向 NNE 向倾伏的宽缓短轴背斜以及不同方向的断裂组成。背斜构造受到后期花岗岩侵入及断裂构造的破坏。主要断裂构造有 NWW 向、NE 向以及层间断裂。这些断裂大多被岩体、矿体或矿化蚀变角砾岩所充填,可能是区内岩浆或热液的主要通道。除上述构造外,矿区不同地质单元发育大量不同程度的裂隙,其中多数裂隙都充填有岩浆或矿化物质。

矿区侵入岩约占总面积的 1/4,以燕山早期酸

性岩为主,常呈岩株、岩枝、岩墙及岩脉产出,主要受 NWW 向、NE 向及层间滑脱断裂控制。与成矿关系密切的侵入岩主要有中细粒斑状花岗岩、花岗斑岩、中细粒斑状花岗岩多处于矿区南部及矿床深部,呈岩株产出。花岗斑岩在整个矿区都有分布,受断裂控制而呈 NWW 及 NE 向展布。其中沿 NWW 向断裂侵入的花岗斑岩规模最大,沿 NE 向断裂展布的花岗斑岩在地表断续出露,而沿栖霞组( $P_1q$ )和文笔山组( $P_1w$ )层间断层侵入的花岗斑岩规模较小。前两者产状一般较陡,呈岩墙及岩脉产出,后者产状平缓。细粒花岗岩与林地组( $C_1l$ )粉砂岩、船山组( $C_3c$ )及栖霞组( $P_1q$ )灰岩内外接触带蚀变较发育,其中岩体内接触带常见绢云母化、钾长石化和绿泥石化,同时裂隙面上常见薄膜状的辉钼矿;外接触带蚀变带非常发育,其中钾化带、矽卡岩化带和角岩化带明显。花岗斑岩常见硅化和绢云母化,局部见矽卡岩化、钾长石化、萤石化。硅化和绢云母化强烈地段的辉钼矿化相应增强。细粒花岗岩及花岗斑岩与灰岩接触带常见不同程度的磁铁矿化体或铁矿体,且矿(化)体厚度及品位随着接触面起伏或离岩体远近而变化,并在远离岩体的外围见有中低温热液类的铅锌多金属矿化现象。有关 2 类成矿岩体岩性特征将在下文中介绍。

矿区内围岩蚀变发育,总体上受中细粒斑状花岗岩及花岗斑岩与围岩岩性控制。主要蚀变类型有钾长石化、矽卡岩化、萤石化、硅化、绿泥石化、叶腊石化、绢云母化等。这些蚀变类型围绕深部细粒花岗岩及浅部花岗斑岩表现出不同的分带性。围绕细粒斑状花岗岩的蚀变自岩体向外分为钾化、矽卡岩化和角岩化等 4 带;围绕花岗斑岩自内而外则为硅化—绢云母化带及绿泥石—黄铁矿化带。

钾化带选择性地分布在中细粒斑状花岗岩及林地组粉砂岩地层中,其中在钾质溶液充填交代下易造成粉砂质碎屑岩的铁镁质的活化与迁出。矽卡岩化带在矿区南部的强度及厚度均较大,船山组( $C_3c$ )—栖霞组( $P_1q$ )灰岩几乎全被交代成矽卡岩,相应的磁铁矿体的规模及品位大而高。矽卡岩化带又可细分为石榴子石矽卡岩化、阳起石或透闪石矽卡岩化、透辉石矽卡岩化及方解石矽卡岩化带。

硅化—绢云母化带发育于花岗斑岩的前缘部位,蚀变岩石为灰白色,具有变余斑状结构、变余微花岗结构、交代蚕蚀与交代包含结构。该蚀变带辉钼矿呈细脉、浸染状产出,局部见矽卡岩化、磁铁矿化、钾长石化、萤石化和泥化等蚀变现象。

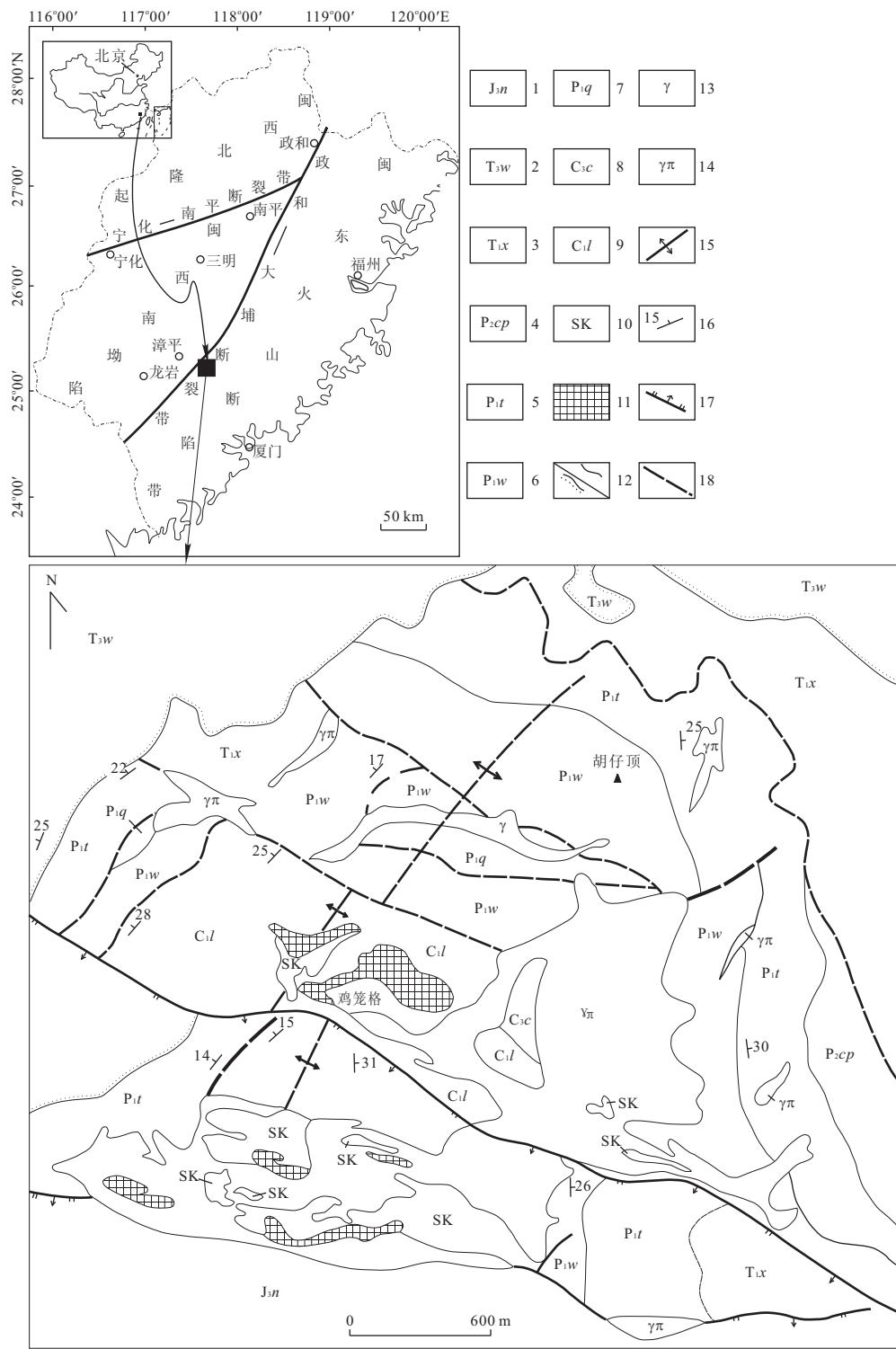


图 1 福建漳平洛阳铁矿床地质略图(据闽东南地质大队,1982,洛阳剑斗地域 1:5 万区域地质矿产调查报告修改)

Fig. 1 Luoyang iron deposit in Zhangping City, Fujian Province

1. 南园组;2. 文宾山组;3. 溪口组;4. 翠屏山组;5. 童子岩组;6. 文笔山组;7. 栖霞组;8. 船山组;9. 林地组;10. 砂卡岩;11. 铁矿;12. 整合界线/不整合界线;13. 中细粒斑状花岗岩;14. 花岗斑岩;15. 背斜;16. 岩层产状;17. 正断层;18. 推测断层

洛阳铁矿是一个以中型铁矿为主伴(共)生锌、硫及小型钼矿床等矿产的综合性矿床。全区共有铁多金属矿体超过 190 余处,其中矿区南部分布的矿

体占全区总储量的 70%以上。铁矿体呈近东西向展布,单个矿体走向多为北西—南东向,倾向北东,倾角 10°~30°。根据矿体在不同部位赋存特征,矿体形

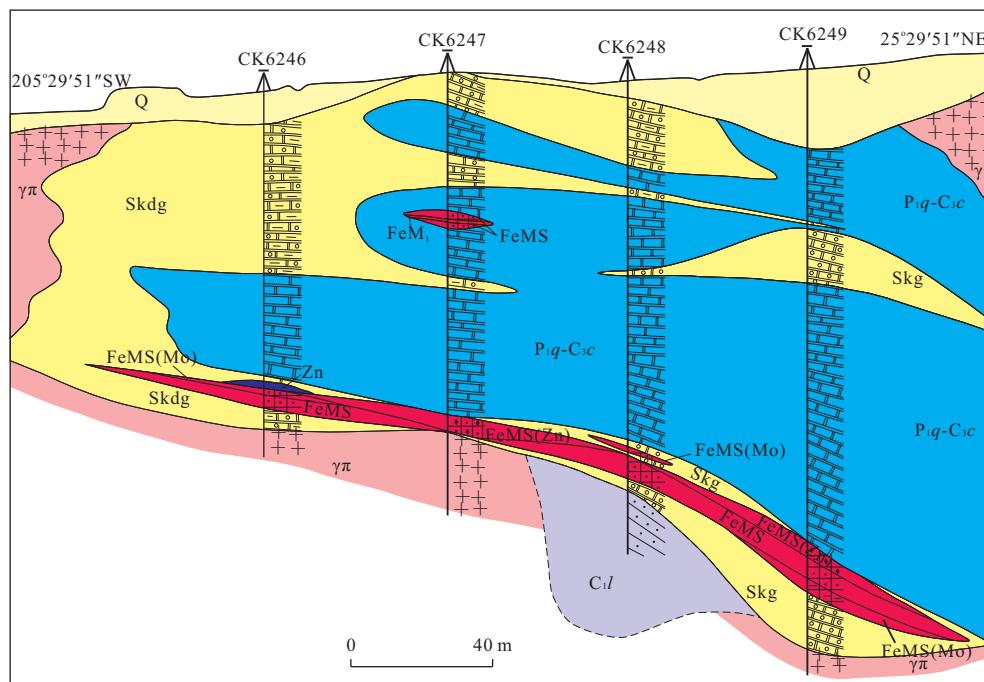


图2 福建漳平洛阳铁矿床8线勘查剖面图(据闽东南地质大队,1984,福建省漳平且洛阳铁矿南段详细勘探暨矿区普查地质报告修改)

Fig. 2 Geological section map of No. 8 exploration line of the Luoyang iron deposit in Zhangping City, Fujian Province  
FeM<sub>1</sub>. 磁铁矿富矿; FeMS. 含硫磁铁矿; FeMS(Mo). 含钼磁铁矿; FeMS(Zn). 含锌磁铁矿; Zn. 锌矿; C<sub>1</sub>l. 林地组; P<sub>1</sub>q-C<sub>3</sub>c. 栖霞组—船山组; Skg. 石榴子石矽卡岩; Skdg. 透辉石矽卡岩; γπ. 花岗斑岩; Q. 第四纪覆盖层

态表现不同。如赋存于林地组(C<sub>1</sub>l)粉砂岩与船山组(C<sub>3</sub>c)或栖霞组(P<sub>1</sub>q)灰岩层间断裂带上的矿体主要呈厚薄不均的似层状、豆荚状,并且矿体规模大、品位高;赋存于船山组(C<sub>3</sub>c)—栖霞组(P<sub>1</sub>q)灰岩中的矿体主要呈透镜状、囊状(图2),局部似层状或似透镜状,矿体成群出现,规模不大但品位较高;花岗斑岩或中细粒斑状花岗岩体中常见大量的灰岩捕虏体,其中铁矿体成群分布,矿体常呈透镜状、扁豆状、囊状等;林地组(C<sub>1</sub>l)顶部碎屑岩中也常见规模小、品位低的矿体。

洛阳铁矿床主要金属矿物为磁铁矿,次为黄铁矿、闪锌矿、赤铁矿、褐铁矿、辉钼矿等,脉石矿物主要有钙铁榴石、透辉石,次有方解石、石英、阳起石、透闪石、绿泥石、金云母、萤石等。磁铁矿常呈他形一半自形等轴粒状,部分呈不规则状或八面体自形晶,至少有2个世代:早期颗粒较细,晚期较粗,多呈脉状产出。辉钼矿常呈细脉状、短脉状、浸染状充填于铁矿石裂隙、磁铁矿和脉石矿物的晶隙之中(图3)。

矿床矿石结构主要有粒状结构和交代结构,其中交代结构最为发育,主要有交代蚕蚀结构、交代残余结构、交代假象结构和交代熔蚀边结构等;矿石构造主要有浸染状构造、块状构造、条带(纹)状构造和细脉—网脉状构造等。

洛阳铁矿床主要分为3个主要成矿期:矽卡岩期、石英—硫化物期及表生氧化期。其中矽卡岩期分为无矽卡岩阶段及磁铁矿阶段;石英—硫化物期分为辉钼矿阶段及闪锌矿阶段。

## 2.2 成矿花岗岩地质特征

洛阳铁矿区与铁锌钼硫成矿关系密切的侵入岩主要有中细粒斑状花岗岩、花岗斑岩。

中细粒斑状花岗岩呈灰白、肉红色,具中细粒斑状结构、似斑状结构,边缘部分由于交代或同化混染作用而呈花岗变晶结构,块状构造。矿物成分主要为钾长石、斜长石和石英,并含少量黑云母、磁铁矿、锆石、金红石、榍石、钛铁矿和磷灰石等。钾长石多数呈半自形柱状、他形—不规则粒状,显示卡律双晶,粒度0.045~1.450 mm。斜长石一般呈半自形板状及他形不规则粒状,粒度0.05~1.40 mm,少数呈斑晶产出,具钠律双晶。石英呈他形—不规则粒状,分布不均匀,或呈分散状。岩石中SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、MgO含量偏高,FeO、MnO含量近似,其余偏低。

花岗斑岩呈肉红色、浅肉红色,局部因蚀变或同化混染而呈浅灰—灰绿色,风化后呈灰白色或浅肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶由石英、钾长石和斜长石组成,含量一般在2%~15%之间。局部可达35%。石英呈自形六方双锥,部分颗粒熔蚀成浑圆状

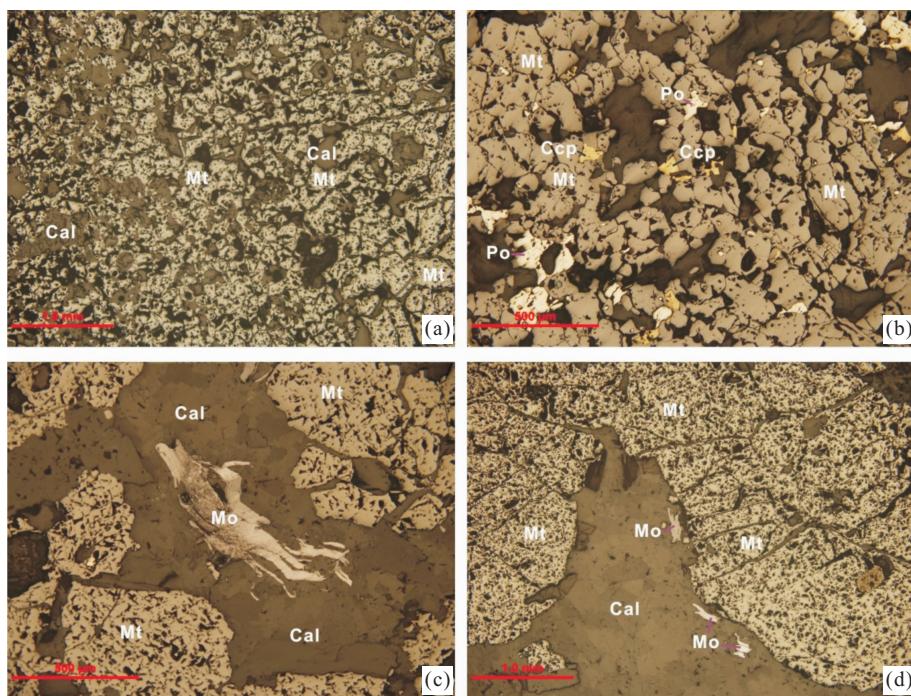


图 3 福建漳平洛阳铁矿床矿物组合

Fig. 3 Mineral assemblages of the Luoyang iron deposit in Zhangping City, Fujian Province

a. 粒状结构磁铁矿(Mt); b. 磁铁矿(Mt)、黄铜矿(Ccp)及磁黄铁矿(Po)共生产出; c. 辉钼矿(Mo)、磁铁矿(Mt)及方解石(Cal)共生; d. 辉钼矿(Mo)位于磁铁矿(Mt)与方解石(Cal)接触部位

或港湾状,粒度为0.27~2.50 mm。钾长石半自形—自形柱状,具卡律双晶,少部分颗粒熔蚀成晶屑状。斜长石为半自形—自形板状,具钠律双晶,An=21~24,属更长石,部分呈聚斑状产出,粒度为0.34~2.25 mm。

### 3 样品及测试方法描述

#### 3.1 Re-Os 同位素测试

自洛阳铁矿床2个钻孔中分别取3件钼矿石样品,各件样品编号及采样位置如下:B128采自ZK1108钻孔,36.00 m矿心,B129采自1108钻孔,44.10 m矿心,B134采自ZK1804钻孔。辉钼矿样品都取自岩体接触带含辉钼矿的矽卡岩浸染状、脉状或网脉状矿石中。辉钼矿脉粗细不一。通过对所获得的3件样品进行重力、磁法分离,获得纯度均大于99%辉钼矿样品。3件辉钼矿样品送至国家地质测试中心Re-Os同位素实验室完成测试工作。

(1)分解样品。准确称取待分析样品,通过长细颈漏斗加入到Carius管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶)底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,调节温度到-50~-80 °C。将装好样的Carius管放到

该保温杯中,通过长细颈漏斗把准确称取的<sup>185</sup>Re和<sup>190</sup>Os混合稀释剂加入Carius管底部,再加入2 mL 10 mol/L的HCl和4 mL 16 mol/L的HNO<sub>3</sub>,当管底溶液冰冻后,用丙烷氧气火焰加热封好Carius管的细颈部分。放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到200 °C,保温24 h。在底部冷冻的情况下,打开Carius管,并用40 mL水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

(2)蒸馏分离锇。于105~110 °C蒸馏50 min,用10 mL水吸收蒸出的OsO<sub>4</sub>。用于ICP-MS(等离子体质谱仪测定)测定Os同位素比值。将蒸馏残液倒入150 mL Teflon烧杯中待分离铼。

(3)萃取分离Re。将第1次蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干。重复2次以降低酸度。加入10 mL 5 mol/L的NaOH,稍微加热,转为碱性介质。转入50 mL聚丙烯离心管中,离心,取上清液转入120 mL Teflon分液漏斗中。加入10 mL丙酮,振荡1 min萃取Re。静止分相,弃去水相。加2 mL 5 mol/L的NaOH溶液到分液漏斗中,振荡2 min,洗去丙酮相中的杂质。离心分相,弃去水相。排丙酮到150 mL已加有2 mL水的Teflon烧杯中。在电热板上50 °C加热以蒸发丙酮。加热溶液至

干. 加数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢, 加热蒸干以除去残存的锇. 用数毫升稀 HNO<sub>3</sub> 溶解残渣, 稀释到硝酸浓度为 2%. 备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值.

(4) 质谱测定. 采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series ICP-MS 测定同位素比值. 对于 Re: 选择质量数 185、187. 用 190 监测 Os. 对于 Os: 选择质量数为 186、187、188、189、190、192. 用 185 监测 Re. 普 Os 是根据原子量表和同位素丰度表通过 <sup>192</sup>Os/<sup>190</sup>Os 测量比计算得出.

### 3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测龄

选取矿区中细粒斑状花岗岩(BL46 取自 ZK1407 钻孔 833.40 m 处)及花岗斑岩样品(LY1407-3 取自 ZK1407 钻孔 230.00 m 处)各 1 件开展岩石中锆石测年工作. 锆石选取工作由河北省区域地质调查研究所完成, 具体步骤是用常规方法将岩石样品粉碎至约 300 μm, 经磁法和密度分选后, 淘洗, 挑纯. 将锆石样品和标样(TEMORA)一起用环氧树脂固定于样品靶上, 样品靶表面经研磨抛光, 直至锆石新鲜截面露出. 对靶上锆石进行镜下反射光、透射光照射后, 进行 CL 分析. 样品靶制作与阴极发光成像(CL)在中国地质科学院离子探针实验室完成.

锆石 U-Pb 同位素年龄采用天津地质矿产研究所同位素实验室安装的一套激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)系统进行测定. 该套系统的多接收器电感耦合等离子体质谱仪为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune, 其离子光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计, 并采用动态变焦(ZOOM)使质量色散达到 17%; 仪器配有 9 个法拉第杯接收器和 4 个离子计数器接收器, 除了中心杯和离子计数器外, 其余 8 个法拉第杯配置在中心杯的两侧, 并以马达驱动进行精确的位置调节, 4 个离子计数器捆绑在 L4 法拉第杯上. 激光器为美国 ESI 公司生产的 UP193-FX ArF 准分子激光器, 激光波长 193 nm, 脉冲宽度 5 ns, 束斑直径为 1、2、10、20、25、35、50、75、76、100 和 150 μm 可调, 脉冲频率 1~200 Hz 连续可调(李惠民等, 2009).

根据锆石阴极发光照片、反射光和透射光照片选择锆石的合适(感兴趣)的测年晶域, 利用 193 nm 激光器对锆石进行剥蚀, 通常采用的激光剥蚀的斑束直径为 35 μm 或 50 μm, 激光能量密度为 13~14 J/cm<sup>2</sup>, 频率为 8~10 Hz, 激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune, 利用动态变焦扩大色散可以同

时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素从而进行锆石 U-Pb 同位素原位测定, 选用 TEMORA 作为外部锆石年龄标准. 测得数据用 ICP-MSDataCal 和 Isoplot 程序进行处理, 并用 <sup>208</sup>Pb 校正法对普通铅进行校正. 利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量.

实验条件和关键参数: 接收器设置: L4, <sup>206</sup>Pb; L3, <sup>207</sup>Pb; L4, <sup>208</sup>Pb; C, 219.26; H2, <sup>232</sup>Th; H4, <sup>238</sup>U. 冷却气体 16 L/min, 辅助气体 0.75 L/min, Ar 载气 0.968 L/min, He 载气 0.86 L/min. RF 功率 1 251 W, 积分时间 0.131 s, 样品信号采集时间 60 s(其中 20 秒为空白的测定).

利用 LA-MC-ICP-MS 开展了洛阳铁矿细粒斑状花岗岩与花岗斑岩体的锆石 U-Pb 同位素测年.

## 4 测试结果

### 4.1 Re-Os 同位素测试结果

Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差. 置信水平 95%. 模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%), 置信水平 95%. 模式年龄 *t* 按下式计算:

$$t = \frac{1}{\lambda [\ln(1 + \frac{\text{Os}}{\text{Re}})]}.$$

通过对 3 件样品开展上述方法的测试, 获得 3 个测试数据, 分析结果列于表 1 中. 表 1 中所列单个数据点的误差均为  $1\sigma$ , 加权平均年龄具 95% 的置信度. 3 个样品的模式年龄集中在  $(133.0 \pm 1.9) \sim (134.0 \pm 4.2)$  Ma, 代表洛阳铁矿辉钼矿的形成时代.

### 4.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测龄结果

中细粒斑花岗岩锆石的形态较为单一, 主要为长条形锆石(图 4a), 晶体长约 70~150 μm, 宽约 35~65 μm, 长宽比大约为 2:1~3:1. 总体上该组锆石形态及大小差别不大, 具明显的振荡环带和扇形环带, 锆石中少见核. Th/U 比值为 0.06~2.16, 大部分集中在 0.88~1.41 之间, 表明锆石具明显岩浆成因.

本次工作分析了 24 个锆石颗粒, 分析结果列于表 2 中. 所有分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 5a), <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为  $132 \pm 1$  Ma, 方

表1 漳平洛阳铁矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素测定( $\times 10^{-9}$ )

Table 1 Re-Os isotopic data of molybdenite from the Luoyang iron deposit in Zhangping City

样品编号	Re		普 Os		$^{187}\text{Re}$		$^{187}\text{Os}$		模式年龄(Ma)	
	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
B128	29 420	0.23	0.506 1	0.044 4	18 490	0.150	41.02	0.35	133.0	1.9
B129	82 160	1.05	0.164 0	0.014 2	51 640	0.660	114.60	1.00	133.1	2.3
B134	14 450	0.21	0.834 4	0.296 8	9 081	0.135	20.29	0.53	134.0	4.2

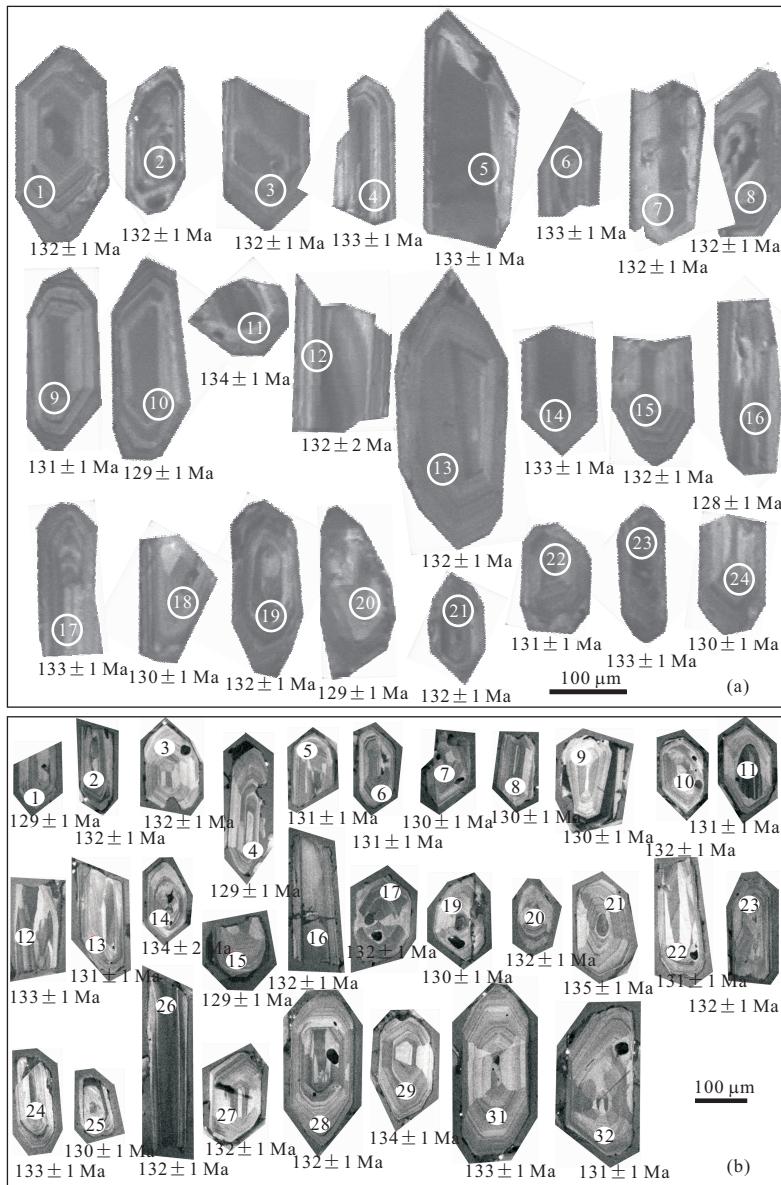


图4 洛阳铁矿区中细粒斑状花岗岩(a)及花岗斑岩(b)锆石 CL 图像(圆圈代表分析点位)

Fig. 4 CL images for zircons from the medium-fine grain porphyry granite (a) and granite porphyry (b) of the Luoyang iron deposit

差2.1,应该代表洛阳铁矿区中细粒斑花岗岩的结晶年龄。

花岗斑岩锆石的形态主要有2组(图4b):第1组为长条形锆石(点1,2,4,12,13,16,22,23,26,31)晶体长约200~600 μm,宽约70~100 μm,长宽比大约为3:1~6:1。总体上该组锆石形态及大小

差别不大,具明显的振荡环带和扇形环带,锆石中少见核。Th/U比值为0.91~2.10,为明显岩浆成因锆石。

第2组锆石呈宽板状(点3,5~11,14,15,17,19~21,24,25,27~29,32),晶体长约100~300 μm,宽约50~150 μm,长宽比一般小于2:1。锆

表2 洛阳铁矿区中细粒花岗岩及花岗斑岩锆石U-Pb同位素LA-MC-ICP-MS分析结果

Table 2 LA-MC-ICP-MS U-Pb isotopic data for zircons from medium-grained granite and granite porphyry of the Lucyang iron deposit

样品 点号	含量 Pb U	同位素比值						年龄(Ma)									
		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$		
BL461																	
1	4	190	0.0207	0.0001	0.64	0.1416	0.0085	6.03	0.0496	0.0030	6.02	0.0040	0.0000	0.107	1.0026	0.0051	0.50
2	6	228	0.0206	0.0001	0.63	0.1399	0.0063	4.50	0.0492	0.0022	4.41	0.0047	0.0000	0.64	1.4059	0.0037	0.26
3	5	195	0.0208	0.0001	0.66	0.1403	0.0077	5.50	0.0490	0.0027	5.45	0.0052	0.0001	0.99	1.1628	0.0019	0.16
4	3	117	0.0208	0.0002	0.89	0.1409	0.0149	10.60	0.0491	0.0052	10.60	0.0061	0.0001	1.43	1.2749	0.0160	1.26
5	7	225	0.0208	0.0002	0.78	0.1407	0.0071	5.01	0.0490	0.0025	5.05	0.0067	0.0000	0.46	2.1599	0.0214	0.99
6	6	232	0.0208	0.0002	0.77	0.1400	0.0078	5.56	0.0488	0.0026	5.39	0.0072	0.0001	0.81	1.1321	0.0118	1.04
7	4	154	0.0207	0.0002	0.91	0.1415	0.0111	7.85	0.0496	0.0039	7.82	0.0071	0.0001	1.52	0.9989	0.0055	0.55
8	3	136	0.0208	0.0002	0.89	0.1410	0.0117	8.27	0.0493	0.0040	8.09	0.0073	0.0001	1.39	1.0733	0.0030	0.28
9	6	226	0.0205	0.0001	0.72	0.1376	0.0065	4.75	0.0488	0.0023	4.70	0.0066	0.0001	0.88	1.0784	0.0092	0.86
10	6	242	0.0202	0.0001	0.72	0.1377	0.0070	5.12	0.0494	0.0025	4.99	0.0060	0.0001	0.88	1.0333	0.0043	0.42
11	12	446	0.0210	0.0001	0.69	0.1407	0.0041	2.90	0.0487	0.0014	2.83	0.0065	0.0000	0.64	1.2642	0.0027	0.21
12	3	128	0.0207	0.0002	1.14	0.1395	0.0144	10.31	0.0488	0.0049	10.06	0.0064	0.0002	2.69	0.7652	0.0021	0.28
13	4	173	0.0207	0.0002	0.81	0.1420	0.0081	5.71	0.0497	0.0028	5.71	0.0062	0.0001	0.92	1.1725	0.0079	0.67
14	11	427	0.0208	0.0002	0.89	0.1420	0.0043	3.03	0.0495	0.0014	2.91	0.0065	0.0000	0.64	1.2142	0.0078	0.64
15	8	299	0.0207	0.0002	0.74	0.1384	0.0058	4.20	0.0486	0.0020	4.18	0.0064	0.0000	0.56	1.4303	0.0085	0.60
16	5	253	0.0201	0.0002	1.09	0.1372	0.0143	10.40	0.0496	0.0047	9.50	0.0073	0.0001	1.82	0.3169	0.0027	0.86
17	5	162	0.0208	0.0002	0.78	0.1408	0.0110	7.83	0.0491	0.0038	7.70	0.0077	0.0001	0.94	1.3969	0.0113	0.81
18	6	228	0.0203	0.0002	0.77	0.1376	0.0063	4.57	0.0491	0.0023	4.58	0.0069	0.0000	0.65	1.5104	0.0225	1.49
19	8	420	0.0207	0.0001	0.64	0.1394	0.0044	3.16	0.0488	0.0015	3.08	0.0071	0.0000	0.58	0.0628	0.0007	1.07
20	4	173	0.0201	0.0001	0.74	0.1382	0.0092	6.62	0.0497	0.0033	6.61	0.0068	0.0001	1.44	0.8810	0.0085	0.96
21	5	224	0.0206	0.0002	0.85	0.1386	0.0076	5.49	0.0487	0.0026	5.34	0.0067	0.0001	1.06	0.9078	0.0021	0.23
22	5	205	0.0205	0.0002	0.78	0.1401	0.0078	5.56	0.0495	0.0028	5.55	0.0067	0.0001	0.99	1.2165	0.0123	1.01
23	12	468	0.0208	0.0002	0.75	0.1415	0.0036	2.51	0.0493	0.0012	2.39	0.0064	0.0000	0.59	1.1135	0.0038	0.34
24	7	282	0.0204	0.0002	0.78	0.1402	0.0056	3.99	0.0498	0.0019	3.86	0.0066	0.0001	0.80	1.1082	0.0091	0.82

注:含量的单位为 $10^{-6}$ ;表中所列误差均为 $1\sigma$ ;1~24号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $132\pm1$  Ma;err单位为%.

续表 2

样品 点号	含量( $\times 10^{-6}$ )												同位素值													
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	err	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	err	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	err	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	err	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	err	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	err	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	err	$^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	
年齡(Ma)																										
LY1407-3																										
1	7.9838	317.3913	0.02018	0.0001	0.6848	0.1372	0.0031	2.2657	0.0493	0.0010	2.1035	0.0066	0.0002	2.8180	1.1889	0.0075	0.6304	128.7808	0.8819	130.5693	2.9581	163.0674	3.4300			
2	9.5098	353.0799	0.02066	0.0001	0.6743	0.1434	0.0022	1.5266	0.0504	0.0008	1.5324	0.0073	0.0002	2.8891	1.2803	0.0135	1.0541	131.8036	0.8888	136.1068	2.0778	211.8874	3.2470			
3	3.3090	154.5663	0.02071	0.0001	0.7233	0.1383	0.0045	3.2397	0.0484	0.0015	3.1887	0.0068	0.0002	2.8412	1.0868	0.0042	0.3833	132.1448	0.9557	131.5590	4.2621	120.8994	3.8581			
4	6.0934	247.7889	0.02017	0.0001	0.6847	0.1365	0.0036	2.6667	0.0491	0.0013	2.5745	0.0068	0.0002	2.8829	1.0559	0.0040	0.3816	128.7613	0.8817	129.8775	3.4595	150.3494	3.8708			
5	7.9260	307.1889	0.02052	0.0001	0.6486	0.1412	0.0027	1.9321	0.0499	0.0009	1.8929	0.0070	0.0002	2.7836	1.1719	0.0059	0.5037	130.9385	0.8493	134.1017	2.5910	190.4965	3.6058			
6	7.0818	263.2727	0.02046	0.0001	0.7300	0.1395	0.0020	1.4424	0.0495	0.0007	1.3908	0.0074	0.0002	2.8357	1.2774	0.0060	0.4697	130.5350	0.9529	132.5727	1.9122	169.2407	2.3537			
7	4.0779	188.5323	0.02034	0.0001	0.6496	0.1399	0.0085	6.0629	0.0499	0.0030	5.9670	0.0058	0.0002	2.9037	1.1212	0.0048	0.4245	129.7932	0.8431	132.1212	8.6583	189.0326	11.2795			
8	3.1649	117.8951	0.02037	0.0002	0.7696	0.1386	0.0071	5.0874	0.0493	0.0024	4.9189	0.0068	0.0002	2.8818	1.3988	0.0065	0.4653	130.0244	1.0007	131.8150	6.7059	164.2091	8.0773			
9	2.9353	118.9259	0.02036	0.0002	0.9593	0.1383	0.0137	5.9295	0.0499	0.0047	5.9515	0.0063	0.0002	2.9831	1.1247	0.0083	0.7387	129.9599	1.1917	131.5223	13.0596	159.8545	15.3325			
10	5.4769	216.6858	0.02063	0.0001	0.6859	0.1422	0.0046	3.2147	0.0500	0.0017	3.2018	0.0062	0.0002	2.8018	1.1947	0.0070	0.5821	131.6284	0.9028	134.9238	4.3374	193.3225	6.4358			
11	12.1948	444.1968	0.02045	0.0001	0.6621	0.1399	0.0025	1.8144	0.0496	0.0009	1.8021	0.0062	0.0002	2.7796	1.6379	0.0131	0.7982	130.5100	0.8841	132.9517	2.4123	176.7993	3.1862			
12	7.6008	255.7516	0.02083	0.0001	0.6531	0.1394	0.0066	4.7024	0.0485	0.0023	4.6756	0.0059	0.0002	2.7886	1.2105	0.0086	0.4074	132.8951	0.8880	132.5209	6.2317	125.8189	5.8828			
13	4.8311	194.8917	0.02057	0.0001	0.7110	0.1377	0.0071	5.1788	0.0486	0.0025	5.0910	0.0060	0.0002	2.9126	1.1645	0.0074	0.6379	131.2269	0.9330	131.0074	6.7847	127.0301	6.4671			
14	4.4571	146.4059	0.02035	0.0002	1.4043	0.1430	0.0054	4.4578	0.0495	0.0017	3.3544	0.0096	0.0004	3.7948	1.3658	0.0057	0.4152	133.6271	1.5237	135.7434	6.6512	172.9270	5.8007			
15	17.045	624.6336	0.02018	0.0001	0.6459	0.1376	0.0021	1.4956	0.0495	0.0006	1.2036	0.0060	0.0002	2.8005	1.3150	0.0051	0.3892	128.7967	0.8316	130.9423	1.9584	170.0502	2.0468			
16	5.9237	246.8616	0.02069	0.0001	0.7041	0.1421	0.0071	5.9666	0.0498	0.0025	5.0518	0.0057	0.0002	2.8900	1.0390	0.0210	0.2021	132.0421	0.9261	134.9364	6.7018	186.1810	9.4055			
17	8.1935	307.8016	0.02065	0.0001	0.6605	0.1382	0.0042	3.0566	0.0485	0.0014	2.9782	0.0055	0.0002	2.8129	1.6268	0.0069	0.4237	131.7509	0.8702	131.4566	4.0182	126.1413	3.7567			
18	3.8116	157.4293	0.02037	0.0001	0.7261	0.1407	0.0056	3.9940	0.0501	0.0019	3.7784	0.0060	0.0002	2.8722	1.0906	0.0086	0.7849	130.0028	0.9440	133.6282	5.3371	198.5608	7.5023			
20	4.6234	176.2500	0.02061	0.0001	0.6965	0.1432	0.0058	4.0153	0.0504	0.0020	3.8718	0.0061	0.0002	2.8413	1.4035	0.0116	0.8298	131.5377	0.9162	135.8983	5.4568	212.823	8.2386			
21	4.9108	175.4359	0.02018	0.0002	0.7159	0.1423	0.0065	4.5509	0.0487	0.0019	3.8589	0.0066	0.0002	3.3101	1.5180	0.0093	0.6117	135.1345	0.9875	135.0677	6.1548	133.8934	5.1668			
22	3.8264	152.2637	0.02049	0.0002	0.7738	0.1383	0.0073	5.2589	0.0489	0.0026	5.2310	0.0056	0.0002	2.9887	1.3297	0.0071	0.5537	130.7703	0.8119	131.5225	6.9166	145.1299	7.5917			
23	7.4305	308.0837	0.02075	0.0001	0.6538	0.1420	0.0044	3.1176	0.0496	0.0016	3.1297	0.0055	0.0002	2.8589	1.0969	0.0123	1.1222	132.3965	0.8657	134.8175	4.0189	203.1777	5.5621			
24	6.0023	240.9879	0.02081	0.0002	0.7873	0.1422	0.0056	4.3560	0.0496	0.0020	3.9670	0.0059	0.0002	3.0614	1.1557	0.0076	0.6574	132.7483	1.0452	134.9919	5.8802	174.6459	6.9282			
25	6.5534	257.0264	0.02035	0.0002	1.0552	0.1416	0.0097	6.8296	0.0505	0.0028	5.5619	0.0060	0.0002	3.7233	1.3126	0.0061	0.4673	129.8760	1.3705	134.4619	9.1832	216.2433	12.0273			
26	18.0017	638.9671	0.02068	0.0001	0.6125	0.1400	0.0023	1.6358	0.0491	0.0008	1.6657	0.0053	0.0001	2.7770	2.0128	0.0094	0.4674	131.9652	0.8082	133.0338	2.1762	152.1558	5.2345			
27	5.4547	218.1172	0.02064	0.0002	0.7399	0.1399	0.0044	3.1162	0.0492	0.0015	3.1457	0.0053	0.0002	2.8472	1.3474	0.0145	0.4750	131.6842	0.9744	132.9434	4.1428	155.5009	4.8916			
28	2.8341	111.8427	0.02072	0.0002	0.7706	0.1395	0.0093	6.6929	0.0488	0.0033	6.8114	0.0093	0.0003	3.1049	0.8004	0.0034	0.4275	132.2324	1.0189	132.6665	8.8753	139.3132	9.4896			
29	4.6194	179.4082	0.02104	0.0001	0.6537	0.1405	0.0063	4.3107	0.0502	0.0021	4.2061	0.0093	0.0003	4.0514	1.0819	0.0045	0.4932	134.2283	0.8825	138.1016	5.9532	205.2126	8.6312			
31	3.1298	125.6190	0.02080	0.0002	0.6380	0.1395	0.0162	11.6413	0.0487	0.0064	11.2617	0.0076	0.0007	9.4791	0.9056	0.0045	0.5008	132.6819	1.4038	132.6334	15.4403	131.1833	7.3444			
32	3.4688	142.3462	0.02047	0.0002	0.7129	0.1412	0.0060	4.2625	0.0500	0.0019	3.8884	0.0068	0.0002	2.9990	0.9669	0.0066	0.6782	130.6133	0.9704	134.1411	5.7179	197.1195	7.6649			

注: 表中所列误差均为 $1\sigma$ ; $17.19\sim29.31\sim32$ 号共30点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $131\pm1\text{ Ma}$ ; $3.18\sim30$ 号点测试异常已删去; err 单位为%。

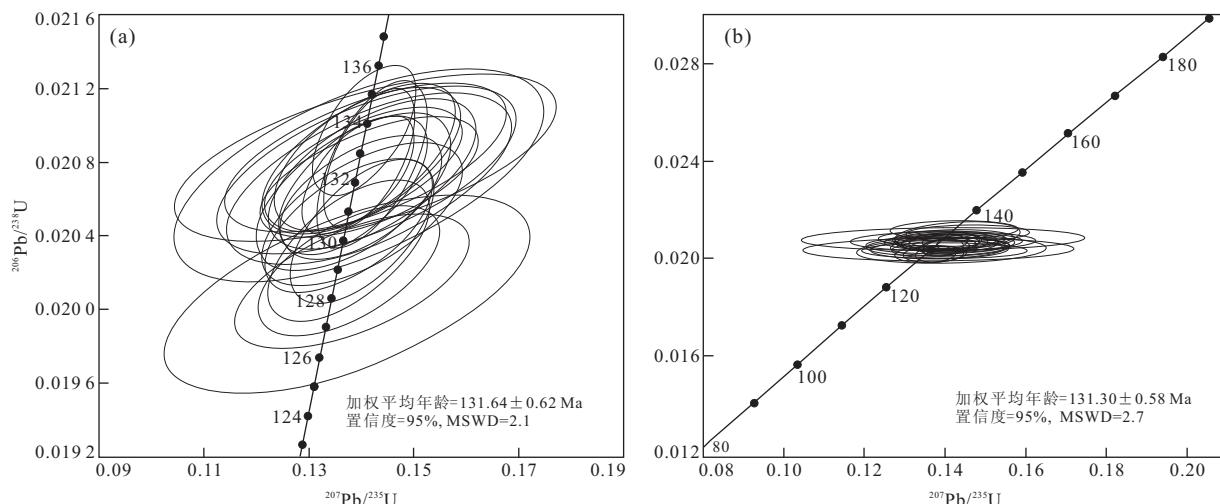


图5 洛阳铁矿区中细粒斑状花岗岩(a)及花岗斑岩(b)锆石U-Pb谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagram for zircons from the medium-fine grain porphyry granite (a) and granite porphyry (b) of the Luoyang iron deposit

石边缘环带发育,比较密集,边部棱角清晰。Th/U比非常高,为 $0.80\sim1.63$ ,也为明显的岩浆锆石。

本次工作分析了32个不同类型锆石颗粒,分析结果列于表2中。其中18,30号点由于测试异常被删除,其余30个颗粒的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图5b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $131\pm1\text{ Ma}$ ,方差2.7。应该代表洛阳铁矿花岗斑岩的结晶年龄。

## 5 成岩成矿时代讨论

### 5.1 成岩成矿时代及矿床成因

通过对洛阳铁矿床中辉钼矿Re-Os同位素模式年龄结果分析,矿床中辉钼矿床的主要形成时代为 $(133.0\pm1.9)\sim(134.0\pm4.2)\text{ Ma}$ ,为早白垩世成矿。矿区花岗斑岩结晶年龄为 $131\pm1\text{ Ma}$ ,中细粒斑状花岗岩结晶年龄为 $(131.64\pm0.62)\text{ Ma}$ ,说明2类岩体成岩时代基本同时,都形成于早白垩世。根据以上成岩成矿时代测试结果,可以得出洛阳铁矿床辉钼矿的成矿时代与花岗岩成岩时代非常吻合。

根据洛阳铁矿地表地质调查以及铁矿床深部勘查成果可知,中细粒斑状花岗岩主要呈岩株状产于南矿区深部,花岗斑岩则位于中细粒斑状花岗岩上部,并沿着不同方向的断裂切层或顺层侵位而呈现岩脉或岩床出露于地壳浅表,零星分布于整个矿区。2类花岗岩之间呈渐变关系,无明显分界线,说明中细粒斑状花岗岩侵入地壳后,由于岩浆分异作用在

较高部位形成花岗斑岩岩浆,并沿浅表断层侵位。2类岩体相似的同位素年龄也说明成岩时代的一致性。早白垩世洛阳铁矿区中细粒斑状花岗岩形成,且自下而上侵位于林地组( $C_1l$ )粉砂岩、船山组( $C_3c$ )及栖霞组( $P_1q$ )灰岩中(图6)。在林地组( $C_1l$ )粉砂岩与岩体接触带附近,发生强烈的钾质及钠质交代作用。林地组( $C_1l$ )上部由于钾质溶液沿碎屑岩孔隙或裂隙进一步扩散交代,形成钾化带。这种发生在林地组( $C_1l$ )粉砂岩中的强烈交代作用会促使分散在碎屑岩中的铁质活化和迁移,部分矿液在粉砂岩顶部沉淀形成一些规模小、品位低的矿体。与此同时侵入岩浆与船山组( $C_3c$ )—栖霞组( $P_1q$ )灰岩发生交代作用,形成含透辉石、柘榴子石的无水矽卡岩。由于交代作用早期含挥发份流体中铁质含量低,矽卡岩中未见具规模的磁铁矿体。随后来自林地组( $C_1l$ )粉砂岩中富含铁质的流体与残余岩浆进一步分异的大量富含挥发份的流体结合,沿着先存切层断裂上升,顺层间破碎带或由于岩体侵位在围岩中形成的裂隙扩散对早期无矽卡岩重新叠加交代,形成含磁铁矿的矽卡岩。大量细粒磁铁矿晶体在林地组( $C_1l$ )粉砂岩与船山组( $C_3c$ )灰岩界面及层间破碎带沉淀,形成厚薄不均的规模大、品位高的层状、豆荚状矿体;在船山组( $C_3c$ )—栖霞组( $P_1q$ )灰岩中形成品位较高的透镜状、囊状矿体;岩体中赋存于灰岩捕虏体的铁矿体常呈透镜状、扁豆状、囊状等。此阶段热液含少量 $\text{H}_2\text{S}$ 与铁钼等反应形成黄铁矿、辉钼矿等细脉状矿(化)体。

地壳浅层形成的花岗斑岩呈岩墙、岩脉或岩床

等侵位于围岩断裂系统中。岩浆热液由于富含一定量  $H_2S$  挥发份沿花岗斑岩前缘部位或矽卡岩及磁铁矿体中的裂隙扩散交代而发育硅化—绢云母化，并形成呈细脉、浸染状产出的辉钼矿、黄铁矿、磁黄铁矿以及少量磁铁矿化、钾长石化、萤石化和泥化等蚀变现象。

综上所述，虽然洛阳铁矿床中磁铁矿与辉钼矿主矿体分别形成于矽卡岩期和石英—硫化物期，但实际上矽卡岩期也有少量的辉钼矿(化)体，石英—硫化物期也见小规模的脉状磁铁矿体。而且来自于深部的富铁流体对灰岩地层反复交代形成富磁铁矿体的矽卡岩化过程中，叠加了形成辉钼矿细脉的、来自浅层花岗斑岩岩浆热液的硅化—绢云母化蚀变作用。2期成矿作用总体上虽有先后关系，但也有部分阶段出现重叠，磁铁矿与辉钼矿形成时代非常相近。因此，洛阳铁矿辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄  $(133.0 \pm 1.9) \sim (134.0 \pm 4.2)$  Ma 可以作为该矿床的主要成矿时代。

洛阳铁矿被认为是“马坑式”铁矿的重要代表矿床之一。“马坑式”铁矿存在有多种成因观点，其中之一认为磁铁矿形成于晚古生代的海底火山沉积，并受到燕山期热液改造(邹天人等，1981；葛朝华等，1981；韩发和葛朝华，1983b；葛朝华和韩发，1984)。在此认识基础上获得马坑铁矿主矿体石英磁铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为  $346 \pm 68$  Ma、角闪石磁铁矿年龄为 334 Ma，与矿体呈互层的安山玄武岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $364 \pm 46$  Ma，从而得出马坑铁矿主矿体成矿时代为中石炭—早二叠世(韩发和葛朝华，1983a)。根据洛阳铁矿勘查结果，磁铁矿体除层状、似层状外，还存在透镜状、囊状矿体、扁豆状，甚至部分脉状矿体。矿体赋层部位主要有岩性界面、层间破碎带、褶皱核部、岩体接触带。磁铁矿体规模、品位等在岩体附近相对大而高，而远离岩体则小而贫，并逐渐消失。矿区围岩蚀变也以岩体为中心分带性较明显。围岩岩性较为简单，主要为粉砂岩及灰岩地层，未见灰岩地层中存在火山岩夹层。因此洛阳铁矿床的形成与燕山期岩浆热液作用关系密切，主要矿体为典型的层控矽卡岩型(赵一鸣等，1982)。

闽西南地区有晚古生代存在海相火山沉积岩的报道(福建省地质八队，1982；王绍雄，2003)，但其分布及规模相对有限，一些早期认为的海西期火山岩也存在争议(潘廓祥等，1982)。即使存在海西期火山作用，根据火山岩夹层的厚度判断火山作用的规模难以与闽西南地区铁矿床规模相匹配(潘廓祥等，

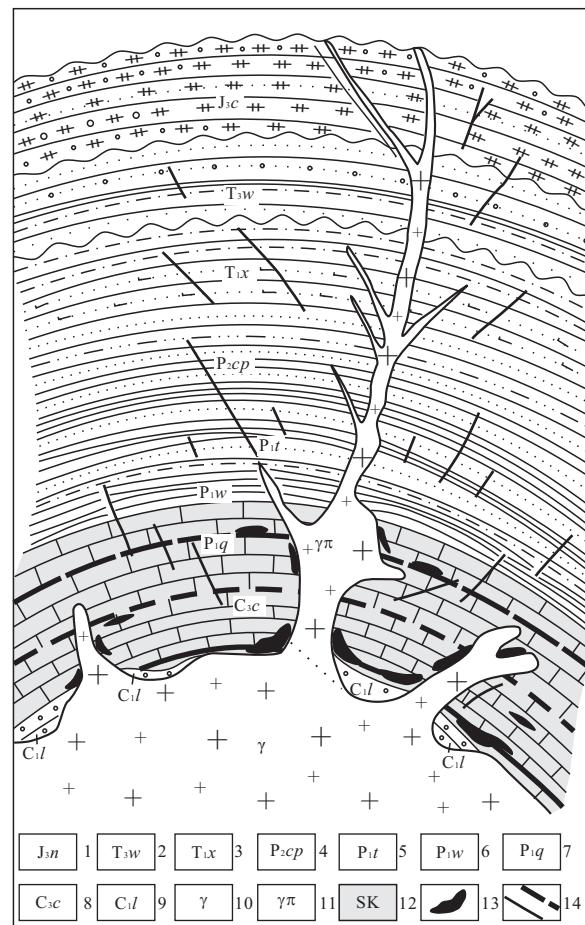


图 6 福建漳平洛阳铁矿床成矿过程示意(据闽东南地质大队，1982，洛阳剑斗地区 1:5 万区域地质矿产调查报告修改)

Fig. 6 Mineralization process of the Luoyang iron deposit in Zhangping City, Fujian Province

1. 南园组；2. 文宾山组；3. 溪口组；4. 翠屏山组；5. 童子岩组；6. 文笔山组；7. 栖霞组；8. 船山组；9. 林地组；10. 中细粒斑状花岗岩；11. 花岗斑岩；12. 矽卡岩；13. 铁(钼、锌)矿体；14. 切层断裂及顺层断裂

1982)。早期针对马坑铁矿角闪石 K-Ar 法测年获得 101 Ma 年龄值(中国地质科学院地质矿产研究所第三铁矿研究队矿床组，1978，福建龙岩马坑铁矿地质特征及其形成条件的研究)。近年来，王登红等(2010)获得马坑铁矿伴生辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为  $130.50 \pm 0.92$  Ma，与矿区菖舟岩体获得的单颗粒锆石 U-Pb 年龄 136 Ma 和 133.9 Ma 较吻合(毛建仁等，2006)，表明马坑铁矿床成矿作用与中生代花岗岩浆侵入作用有关，其成岩与成矿时代也与本文所获得的洛阳铁矿年代学数据非常接近。进一步说明了区域上有重要找矿意义的“马坑式”铁矿床为早白垩世成矿。

## 5.2 成矿时代的区域地质意义

东南大陆位于中国东部中新生代巨型构造—岩

浆岩带之上,尤以中生代岩浆及成矿最为宏伟壮观。闽西南拗陷作为东南大陆上的一个主要构造单元,应该经历了特提斯向环太平洋构造域的转换,并都留下相应的成矿作用记录。随着中侏罗世—晚侏罗世早期(170~160 Ma)古太平洋板块向欧亚板块俯冲,表现为大规模陆内挤压,标志着构造域转换开始(Wu et al., 2000)。晚侏罗世中晚期(160~145 Ma)古太平洋板块俯冲作用所影响的范围逐步扩大(张岳桥等,2009),标志着特提斯向环太平洋构造域的转换达到高峰。在此之后加厚的岩石圈开始表现为伸展变形,出现大规模的岩浆作用与伸展空间而成矿,以早白垩世135~100 Ma期间的成矿作用广泛发育。闽西南一带以紫金山矿床铜金成矿作用为代表。其成矿时代有122±4 Ma和100±3 Ma(石英Rb-Sr等时线,周肃和陈好寿,1996)、(94.7±2.3)~(91.5±0.4) Ma(冰长石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar,张德全等,2003;刘晓东和华仁民,2005),与东南沿海其他矿床,如江西寻坞铜坑障钼矿床Re-Os年龄(134.3±1.6)~(133.4±1.8) Ma(许建祥等,2007)、莲花山钨矿床113.2~119.5 Ma(云英岩中白云母K-Ar,徐晓春等,1999)、西岭锡矿床98.8±2.9 Ma(含锡绢英岩K-Ar,徐晓春等,1999)、毫石银矿床100 Ma左右(蚀变绢云母K-Ar法及石英流体包裹体的Rb-Sr法,徐步台等,1994)、大岭口银铅锌矿床100 Ma(蚀变岩K-Ar法,徐晓春等,1999)等总体上处于同一阶段,马坑及洛阳铁矿床分别获得的130.50±0.92 Ma及(133.0±1.9)~(134.0±4.2) Ma Re-Os同位素年龄,说明除铜(钼)钨锡外,早白垩世伸展背景下闽西南地区存在重要的铁(钼)成矿作用,也与华南早中白垩世(134~80 Ma)大规模成矿作用时代相对应(毛景文等,2007,2008)。

## 6 结论

根据洛阳铁矿床开展的花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测龄及辉钼矿Re-Os同位素年代学研究结果,可以得出洛阳铁矿床中辉钼矿Re-Os同位素模式年龄为(133.0±1.9)~(134.0±4.2) Ma,为早白垩世成矿,矿区花岗斑岩结晶年龄为131±1 Ma,中细粒斑状花岗岩结晶年龄为131.64±0.62 Ma,说明岩体都形成于早白垩世。通过对洛阳铁矿床花岗岩、磁铁矿体及辉钼矿体空间分布规律及矿化蚀变特征综合分析,结合岩体与矿床年代学结果,可以得出洛阳铁矿床主要形成于早白垩世,与

早白垩世花岗岩岩浆热液接触交代石炭纪碎屑岩—碳酸盐岩地层密切相关。

致谢:福建省闽东南地质大队黄启春高工在外取样过程中提供了帮助,国家地质测试中心Re-Os同位素实验室及天津地质矿产研究所同位素实验室为年代学测定提供了大力帮助,在此表示感谢!

## References

- 8th Geological Team of Fujian Bureau of Geology, 1982. The geological features of the Makeng (Longyan, Fujian Province) iron ore deposit and the discussion on its origin. *Geology of Fujian*, (1): 2—31 (in Chinese with English abstract).
- Gao, T. J. , Wang, Z. M. , Wu, K. L. , et al. , 1999. Tectonic and magmatic evolution and mineralization of Taiwan Strait and its adjacent region. *Geological Publishing House, Beijing* (in Chinese).
- Ge, C. H. , Han, F. , 1984. Geochemistry of rare earth elements in the Makeng iron deposit. *Mineral Deposits*, 3 (1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Ge, C. H. , Han, F. , Zou, T. R. , et al. , 1981. Geological characteristics of the Makeng iron deposit of marine volcano-sedimentary origin. *Bulletin Chinese Academy of Geological Sciences*, 3 (1): 47—69 (in Chinese with English abstract).
- Han, F. , Ge, C. H. , 1983a. Geological and geochemical characteristics of the Makeng submarine volcanic hydrothermal-sedimentary iron ore. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences*, (2): 1—118 (in Chinese with English abstract).
- Han, F. , Ge, C. H. , 1983b. Makeng iron deposit—a submarine volcanic hydrothermal-sedimentary ore. *Science in China (Ser. B)*, (5): 438—445 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. M. , Geng, J. Z. , Hao, S. , et al. , 2009. Study of zircon U-Pb isotopic age dating using LA-MC-ICP-MS. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(Suppl.): 313 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. D. , Hua, R. M. , 2005. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of adularia from the Bitian gold-silver-copper deposit, Fujian Province. *Geological Review*, 51(2): 151—155 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. R. , Chen, R. , Li, J. Y. , et al. , 2006. Geochronology and geochemical characteristics of Late Mesozoic granitic rocks from southwestern Fujian and their tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1723—1734

- (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: metallogenetic ages and corresponding geodynamic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329—2338(in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie G. Q., Guo, C. L., et al., 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenetic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510—526(in Chinese with English abstract).
- Pan, K. X., Lian, T. P., Lin, Y. S., 1982. Discussion on sedimento-altered (reformed) genesis of Makeng type iron deposit. *Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci.*, 3(2): 1—14(in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Chen, Z. H., Chen, Y. C., et al., 2010. New data of the rock-forming and ore-forming chronology for China's important mineral resources areas. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 1030—1040(in Chinese with English abstract).
- Wang, S. X., 2003. On spatial distribution and signification of Carboniferous marine volcanic rocks in the southwest Fujian depression. *Geology of Fujian*, 24(4): 217—220(in Chinese with English abstract).
- Wu, G. G., Zhang, D., Chen, B. L., et al., 2000. Post-Mesozoic transformation of tectonic domain in southeastern China and its geodynamic mechanism. *Journal of China University of Geosciences*, 11(3): 288—292.
- Xu, B. T., Li, C. J., Chen, H. S., 1994. Mineral deposit, mineralization chronology and isotopic geochemistry of the Haoshi silver deposit in Zhejiang Province. *Mineral Deposits*, 13(3): 271—281(in Chinese with English abstract).
- Xu, J. X., Zeng, Z. L., Li, X. Q., et al., 2007. Geological characteristics and mineralization age of the Tongkeng-zhang molybdenum deposit in Xunwu County, South Jiangxi Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 924—928(in Chinese with English abstract).
- Xu, X. C., Yue, S. C., Pan C. R., 1999. Controlling factors of the metallogenetic time-space distribution of the ore deposits in southeastern China coast. *Geology of Anhui*, 9(1): 42—44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D., Gao, T. J., Wu, G. G., et al., 2006. Metallogenesis, deep process and potential assessment of resources in the Wuyishan-Taiwan geological corridor area. Geological Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, D. Q., Feng, C. Y., Li, D. X., et al., 2003.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of adularia from Bitian sericite-adularia type epithermal Ag-Au deposit in Fujian Province and its geological significance. *Mineral Deposits*, 22(4): 360—364 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Xu, X. B., Jia, D., et al., 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234—247(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. M., Tan, H. J., Sun, J. H., 1982. Characteristics of the skarn zoning of the Makeng and Yangshan iron ore deposits in Fujian and their relationship with the mineralization zoning. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1(1): 11—22 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S., Chen, H. S., 1996. Geochronology and geological significance of the Zijinshan copper-gold deposit. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 15(4): 216—219 (in Chinese with English abstract).
- Zou, T. R., Ge, C. H., Han, F., et al., 1981. On the minero-genetic characteristics of the Makeng iron deposits and their conditions of formation. *Institute of Mineral Deposit Geology Branch of Bulletin Chinese Academy of Geological Sciences*, 2(1): 1—24(in Chinese with English abstract).
- ## 附中文参考文献
- 福建省地质八队,1982. 福建龙岩马坑铁矿床地质特征及其成因探讨. *福建地质*,(1):2—31.
- 高天钧,王振民,吴克隆,等,1999. 台湾海峡及其周边地区构造岩浆演化与成矿作用. 北京:地质出版社.
- 葛朝华,韩发,1984. 马坑铁矿床稀土元素地球化学研究. 矿床地质,3(1):1—10.
- 葛朝华,韩发,邹天人,等,1981. 马坑铁矿火山沉积成因探讨. 中国地质科学院院报,3(1):47—69.
- 韩发,葛朝华,1983a. 福建马坑铁矿床海相火山热液—沉积成因的地质地球化学特征. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊,(2):1—118.
- 韩发,葛朝华,1983b. 马坑铁矿——一个海相火山热液—沉积型矿床. 中国科学(B辑),(5):438—445.
- 李惠民,耿建珍,郝爽,等,2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. *矿物学报*,28(增刊):313.
- 刘晓东,华仁民,2005. 福建碧田金银铜矿床冰长石的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄. *地质论评*,51(2):151—155.
- 毛建仁,陈荣,李寄嶠,等,2006. 闽西南地区晚中生代花岗质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化. *岩石学*

- 报,22(6):1723—1734.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2007.南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用:成矿时限及地球动力学背景.岩石学报,23(10):2329—2338.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2008.华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境.高校地质学报,14(4):510—526.
- 潘廓祥,连天萍,林永生,1982.再论马坑式铁矿的沉积—改造(再造)成因.中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,3(2):1—14.
- 王登红,陈郑辉,陈毓川,等,2010.我国重要矿产地成岩成矿年代学研究新数据.地质学报,84(7):1030—1040.
- 王绍雄,2003.闽西南拗陷内石炭纪海相火山岩类的空间分布及其意义.福建地质,24(4):217—220.
- 徐步台,李长江,陈好寿,1994.浙江毫石银矿床成矿年代学和同位素地球化学.矿床地质,13(3):271—281.
- 许建祥,曾载淋,李雪琴,等,2007.江西寻乌铜坑嶂钼矿床地质特征及其成矿时代.地质学报,81(7):924—928.
- 徐晓春,岳书仓,潘成荣,1999.中国东南沿海金属矿床时空分布的控制因素.安徽地质,9(1):42—44.
- 张达,高天钧,吴淦国,等,2006.武夷—台湾走廊带成矿作用、深部过程与资源潜力.北京:地质出版社.
- 张德全,丰成友,李大新,等,2003.福建碧田矿床冰长石的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义.矿床地质,22(4):360—364.
- 张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录.地学前缘,16(1):234—247.
- 赵一鸣,谭惠静,孙静华,1982.福建马坑、阳山铁矿床的矽卡岩分带特征及其与矿化分带的关系.岩矿测试,1(1):11—22.
- 周肃,陈好寿,1996.紫金山铜金矿同位素年代学及其地质意义.矿物岩石地球化学通报,15(4):216—219.
- 邹天人,葛朝华,韩发,等,1981.论马坑铁矿的成矿特征和形成条件.中国地质科学院矿床地质研究所文集,2(1):1—24.