

赵希林, 于胜尧, 余明刚, 等. 福建省永定大排铁铅锌多金属矿床特征及成矿时代[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 174–187.
Zhao Xilin, Yu Shengyao, Yu Minggang, et al. Geological characteristics and metallogenic epochs of the Dapai Fe–Pb–Zn polymetallic deposit in Yongding County, Fujian Province[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 174–187(in Chinese with English abstract).

福建省永定大排铁铅锌多金属矿床特征及成矿时代

赵希林¹ 于胜尧² 余明刚¹ 姜 杨¹ 刘 凯¹ 毛建仁¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 福建永定大排铁铅锌多金属矿床是闽西南地区近年来发现的大型多金属矿床。对矿区内蚀变花岗岩的锆石 SHRIMP U–Pb 定年和辉钼矿 Re–Os 同位素测年结果显示其分别形成于(127.0±1.8) Ma 和(133.5±4.1) Ma, 这一年龄与区内马坑铁矿及潘田铁矿的成岩成矿年龄相一致, 指示区域上该期铁铅锌多金属矿与区内花岗质岩浆作用有密切的时间和成因联系, 大排铁铅锌多金属的主成矿期可能为燕山期。结合已有的区域地质资料及研究成果, 认为福建永定大排铁铅锌多金属矿床可能为层控矽卡岩型–斑岩型复合型矿床。

关键词: 大排铁铅锌矿; 锆石 SHRIMP U–Pb 年龄; 辉钼矿 Re–Os 等时线年龄; 复合型矿床

中图分类号: P618.31; P618.42~43; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2016)01–0174–14

Geological characteristics and metallogenic epochs of the Dapai Fe–Pb–Zn polymetallic deposit in Yongding County, Fujian Province

ZHAO Xi–lin¹, YU Sheng–yao², YU Ming–gang¹, JIANG Yang¹, LIU Kai¹, MAO Jian–ren¹

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Dapai Fe–Pb–Zn polymetallic ore deposit in Yongding County of southwestern Fujian Province is a large-sized polymetallic deposit discovered in recent years. Zircon SHRIMP U–Pb dating of Dapai altered granodiorite is (127±1.8) Ma, equal to the Re–Os isotopic age (133.5±4.1) Ma of the granodiorite porphyry. Both ages are consistent with the age of Makeng and Pantian iron ore deposit in the same area, indicating genetic relation between the granitic magmatism and the Fe–Pb–Zn metallogenesis in the area, with the main metallogenic epoch being Yanshanian. Based on the previous research results and data obtained by the authors, it is inferred that the Dapai Fe–Pb–Zn polymetallic ore deposit belongs to stratabound skarn–porphyry type composite deposit.

Key words: Dapai Fe–Pb–Zn deposit; zircon SHRIMP U–Pb age; Re–Os isochron age; composite deposit

About the first author: ZHAO Xi–lin, male, born in 1980, associate researcher, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit geology, mainly engages in the study of petrology and geochemistry; E–mail: zx124@126.com.

收稿日期: 2014–11–29; 改回日期: 2015–01–16

基金项目: 中国地质调查局基础地质调查项目(12120113070800, 1212011085446)资助。

作者简介: 赵希林, 汉族, 男, 1980年生, 副研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E–mail: zx124@126.com 或 zxlqjm@sina.com.cn。

通讯作者: 于胜尧, 汉族, 男, 1982年生, 副研究员, 岩石学专业; E–mail: 23287567@qq.com。

About the corresponding author: YU Sheng-yao, male, born in 1982, associate professor, majors in petrology, mainly engages in the study of geotectonics; E-mail: 23287567@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey programs (No.12120113070800, No.1212011085446).

福建省永定县大排铁铅锌多金属矿是近年来武夷山成矿带新发现的大型铁铅锌多金属矿,该矿床位于闽西南—粤北拗陷内,区内已发现众多的大中型金属矿床(图1),如上杭紫金山铜金多金属矿、上杭罗卜岭铜钼矿、漳平北坑场钼矿、马坑铁矿、攀洛铁矿、汤泉铁矿、玉水铜矿、中甲铁锡多金属矿等,并已有众多的地质学家对该区进行过地质研究工作,对区内岩浆作用、成矿作用、区域成矿模式等提出了许多认识^[1-10],这些资料极大的丰富了闽西南地区金属矿床的研究内容。有关闽西南地区铜、铅、锌等金属矿床的成因,前人提出了许多不同的观点:如矽卡岩型(马坑铁矿)、火山热液型(紫金山铜金矿)、斑岩型(罗卜岭铜钼矿)等。福建省永定县大排地区地质工作开展较早,20世纪70年代永定大排矿区及其外围已进行过多次矿产勘查工作,大排铅锌矿被认为是小型矽卡岩型矿床。近年来,大排铁

铅锌多金属矿的找矿工作取得了重大进展,陆续在矿区内新发现的铅锌矿资源量达到大型规模,伴生的金属钼和铁均达到中型规模。但是,对大排铁铅锌多金属矿的成岩成矿时代、成因模式、物质来源等仍然缺乏系统性研究工作,本研究对与成矿作用有关的蚀变花岗岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年,并对辉钼矿进行了 Re-Os 同位素定年测试,精确厘定了大排铁铅锌多金属矿的成岩成矿时代,在对区域矿床资料进行研究的基础上,初步探讨了其成因模式。

1 区域地质及矿床地质特征

福建永定地区地处闽西南—粤北拗陷带内次一级拗陷带大田—龙岩拗陷带南部,政和—大埔深大断裂西侧,特提斯东西向构造域与环太平洋构造域的交界部位^[11, 12],在漫长的地质演化过程中受到多期构

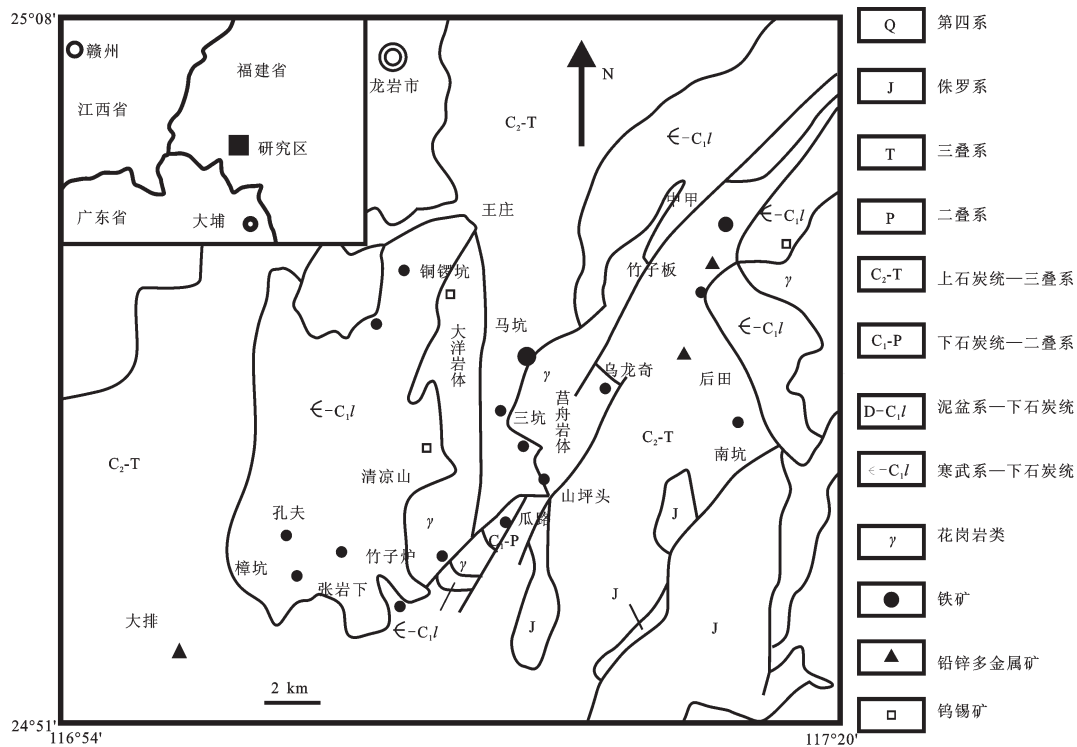


图1 福建龙岩地区地质矿产略图^[18]

Fig.1 Geological sketch map of Longyan area in Fujian Province^[18]

造-岩浆事件的强烈改造,构造格局复杂多样,使区内蕴藏着丰富的Fe、Cu、Pb、Zn、Au、Sn等多金属矿床(点),是武夷山成矿带重要的成矿地段^[9, 13-18]。

1.1 矿区地层

矿区地层由老至新主要为石炭系下统林地组(C₁l)、石炭系中-上统船山组(C₂₋₃c)、二叠系下统栖霞组(P₁q)、二叠系下统文笔山组(P₁w)、二叠系下统童子岩组(P₁t)、第四系(Q) (图2)^①。

石炭系下统林地组(C₁l): 仅见于钻孔中(如ZK1501孔), 为一套浅海-滨海相碎屑岩沉积, 岩性为浅灰-灰白色、厚层状、中-细粒石英砂岩夹透镜状灰岩, 局部夹灰-深灰色粉砂岩薄层, 具有较强的硅化、大理岩化、砂卡岩化。

石炭系中-上统船山组(C₂₋₃c): 为一套海相碳酸盐岩沉积, 岩性为浅灰-灰白色厚层状质灰岩、含白云质灰岩, 夹硅质薄层或具硅质条带。

二叠系下统栖霞组(P₁q): 是该矿区的主要含矿层位, 出露于矿区中及东北部为一套浅海相碳酸盐岩。其下部为灰-深灰色中厚层状质灰岩, 具泥质

条带, 含硅质团块或燧石团块, 夹泥灰岩、薄层钙质粉砂岩。该组岩石大部分已大理岩化或变质成大理岩, 泥质条带具不同程度地角岩化; 上部为深灰-灰黑色薄-中厚层状灰岩, 含燧石结核、燧石条带和泥质条带, 夹含钙泥岩薄层; 顶部则为深灰-浅灰色硅质岩夹薄层泥岩; 该组地层底部以灰岩夹含钙质细碎屑岩与下伏船山组地层分界, 顶部则以硅质岩与文笔山组地层分界。

二叠系下统文笔山组(P₁w): 为海湾湖相碎屑沉积, 岩性以泥岩、粉砂质泥岩及粉砂岩为主, 夹细砂岩薄层, 具泥质-粉砂质条带, 在泥岩、粉砂质泥岩中含粉砂质、泥质、黄铁矿结核, 含动物化石, 中上部见植物化石碎片沿层面分布, 局部较为完整。

二叠系下统童子岩组(P₁t): 大范围分布于矿区东部、南部, 为一套海陆交互相碎屑岩沉积, 岩性主要为泥岩、粉砂质泥岩及粉砂岩, 夹细砂岩薄层、煤层、煤线; 岩石层理发育, 在细碎屑岩中有沿层面分布的铁质、泥质或粉砂质结核, 文笔山组为本区次要含矿层位。

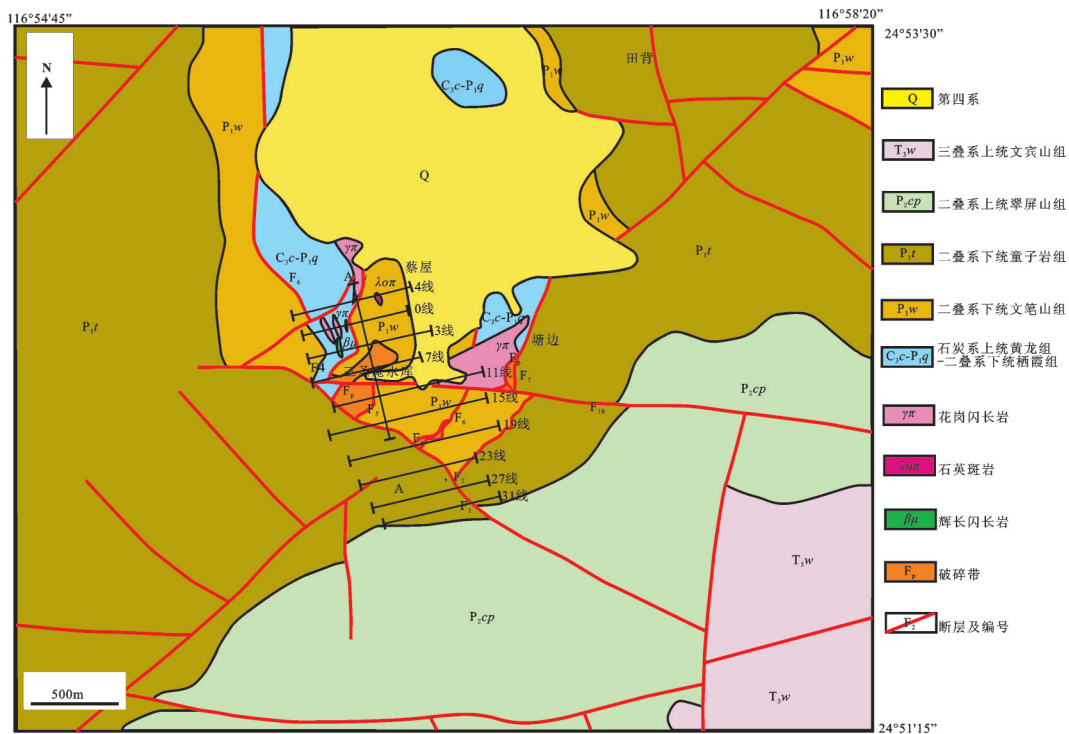


图2 福建永定大排铜铅锌多金属矿区地质简图
Fig.2 Geological sketch map of Dapai area, Yongding County, Fujian Province

①南京地质矿产研究所. 福建省永定县大排铅锌矿详查地质报告. 2008.

第四系(Q): 分布于矿区中—北部, 为一套堆积、洪积及残坡积层, 由黄土层、砂粘土层和砂砾层等组成, 砾石成分以砂岩、粉砂岩、硅质岩及铁锰矿等为主, 次为花岗斑岩, 砂质泥岩和泥岩等。

1.2 矿区构造特征

矿区褶皱构造及断裂构造极为发育。

褶皱构造以大排复式倒转背斜为主, 在7线以北表现明显, 7线以南由于岩体侵入破坏而表现不明显。其轴部位于矿区北部第四系覆盖区, 轴向NNW, 轴面倾向NE, 倾角约 50° , 核部地层为二叠系栖霞组灰岩, 东西两翼由文笔山组、童子岩组构成, 地层倾向总体NE-SE, 倾角 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。其中背斜东翼由于受F2断层和二长花岗斑岩侵入的影响而表现不明显。背斜西翼次一级褶皱较强烈, 由于遭受断层破坏, 地层重复出现。

矿区东南部童子岩组内, 有一组褶皱构造, 由一向斜和一背斜组成。向斜轴向从南端的NNE转为北端的NNW, 轴面倾向W, 倾角约 80° , 东翼地层倾向SW, 倾角 $36^{\circ}\sim 58^{\circ}$; 西翼产状变化较大, 倾向NNW-SSE, 倾角 $14^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。背斜轴向从南端的NW变化为北端的NNW, 轴面倾向W, 倾角约 70° , 东翼地层倾向NE, 倾角 $25^{\circ}\sim 61^{\circ}$; 西翼地层倾向NW-SW, 倾角 $20^{\circ}\sim 31^{\circ}$ 。

断裂构造主要有近南北向、北西向、北东向3组。

近南北向断裂是矿区规模较大、最为发育的一组断裂, 从西向东, 主要有F3、F4、F5等3条主断裂。F3断裂为一隐伏逆冲断层, 位于深部栖霞组与文笔山组地层交界处, 长大于500 m, 延深大于550 m, 断层倾向东, 倾角总体 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 断层面总体平缓, 略呈波状起伏, 该断层造成栖霞组顶部地层缺失, 局部表现为构造破碎带。F3断裂对41、42号矿体起很大的控制作用, 为成矿提供导矿通道和赋矿空间, 矿体基本紧贴于断层之下。F4、F5位于矿区西部, 为一组逆冲断层, 倾向东, 倾角总体 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 沿倾向弯曲起伏大, 呈阶梯陡坎状, 在它们之间夹持着一条大的层间构造破碎带(Fp), 破碎带上下盘均为文笔山组地层^[2]。破碎带长大于800 m, 延深大于450 m, 宽100~200 m, 主要由二叠系下统栖霞组中上部含铁锰质破碎大理岩、硅质岩、砂卡岩、滑石化糜棱岩等组成, 其中见有铅、锌、铜、钼、铁、锰、银、钨等多种氧化矿产, 是区内主要的多金属矿控

矿和容矿构造, 控制了上含矿层的矿体产出特征和氧化矿的分布范围。破碎带往南被F1断裂拦截, 往东南被二长花岗斑岩或F2拦截。

北西向断裂F1: 位于矿区西南角, 为一逆断层, 上盘为栖霞组、文笔山组地层, 下盘为童子岩组地层。断裂长大于700 m, 走向NW, 倾向NE, 倾角 66° , 该断裂拦截了近南北向的F3、F4、F5断裂, 同时也限制了区内多金属矿体的南延。

北东向断裂F2: 位于矿区东南部, 斜贯全区, 长大于1500 m, 为一正断层, 上盘童子岩组地层, 下盘为栖霞组、文笔山组地层及二长花岗斑岩等。断裂走向NE, 倾向NE, 倾角 35° 左右, 局部较陡。该断裂拦截了F1断裂, 同时也限制了花岗岩体及其他各地层往东南部的延伸。

1.3 岩浆岩

矿区出露的岩浆岩主要为花岗闪长(斑)岩, 其次还有呈脉状的钾长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩、辉绿岩、辉长闪长岩、辉绿玢岩等(图3)。其中花岗闪长(斑)岩与成矿关系密切, 地表分布长约800 m, 宽约280 m, 呈北东向展布。深部于ZK301、ZK1102、ZK1501、ZK1502、ZK1504、CK2均有分布, 岩体顶面倾向总趋势是自南东往北西方向逐渐降低, 被北东向F2断层切断。

花岗闪长(斑)岩呈肉红色, 斑状结构, 基质具花岗结构, 块状构造, 斑晶以更长石为主, 斑晶分布不均, 含量一般为 $5\%\sim 10\%$; 基质主要由石英、条纹长石与更长石、黑云母等组成, 副矿物为锆石、磁铁矿、磷灰石、黄铁矿、独居石等。岩石蚀变较强, 斜长石多已绢云母化、钾长石化、碳酸盐化, 黑云母出现绿泥石化。从15线剖面可看出, 直接与围岩接触的为花岗闪长斑岩。

钾长花岗岩: 分布零星, 仅见于15线剖面的深部钻孔中, 呈脉状穿插在二长花岗斑岩体中, 脉宽2~10 m, 具肉红色, 文象结构。成分主要为钾长石和石英, 二者呈标准的文象交生。斜长石、黑云母少量, 副矿物有钛铁矿、白钛石、黄铁矿。蚀变有绢云母化、绿泥石化。

花岗斑岩、石英斑岩: 地表出露于矿区西北部, 呈脉状或透镜状侵入断裂带和靠近断裂带的围岩中, 多呈北北西向展布, 长一般50~200 m, 个别大于400 m, 宽一般10~20 m, 个别达60 m, 深部(如:

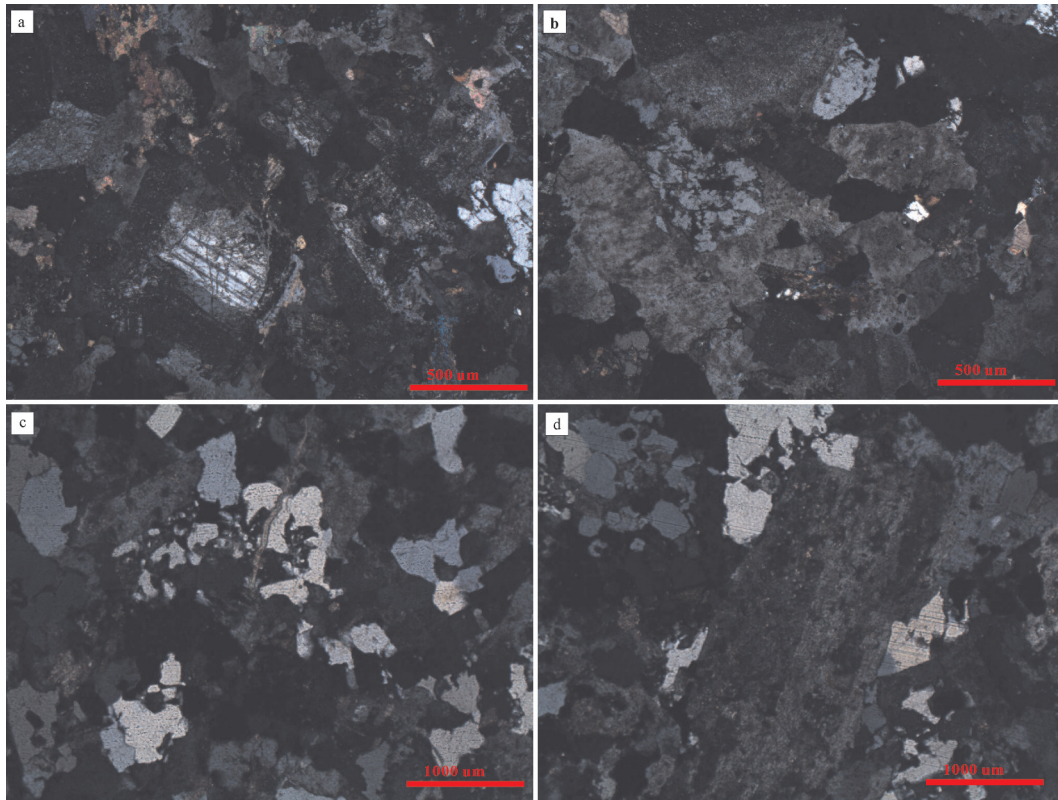


图3 大排矿区蚀变花岗闪长岩及花岗闪长斑岩镜下特征

a—蚀变花岗闪长岩中蚀变矿物特征,黑云母多绿泥石化,长石高岭土化蚀变作用明显;b—蚀变花岗闪长岩中长石的蚀变特征,钾长石表面较“脏”,高岭土化作用明显;c—花岗闪长斑岩结构特征,斑晶为石英和钾长石;d—花岗闪长斑岩的似斑状花岗结构,显示巨大的钾长石斑晶,并伴随着高岭土化作用

Fig.3 Microphotographs of altered granodiorite and granodiorite porphyry

a—Characteristics of altered minerals in altered granodiorite, chloritization of biotite and kaolinization of feldspar; b—Characteristics of altered feldspars in altered granodiorite, obvious kaolinization of feldspars, with dirty feldspars surface; c—Characteristics of texture of granodiorite porphyry, with the phenocryst being feldspars; d—Porphyritic texture of granodiorite porphyry, K-feldspar megacryst with kaolinization

ZK301)也有零星分布。石英斑岩多为花岗斑岩边缘相,二者均强烈风化,与地表氧化矿在空间紧密相随。花岗斑岩:肉红色,斑状结构,块状构造,斑晶量约占20%,成分为石英、钾长石,二者量近等,粒度为0.5~5 mm,基质具球粒结构,由钾长石、石英呈纤维状微晶围绕某一中心作放射状排列而成球粒,斜长石均已绢云母化;石英斑岩:灰色,斑状结构,块状构造,斑晶为自形石英,具熔蚀边,基质具显微嵌晶结构,在不规则石英微晶内嵌布有杂乱排列的小条状长石微晶。

辉绿岩、辉绿闪长岩:地表零星出露,深部也有见及,呈脉状或透镜状产于断裂带中,有的穿插于二长花岗斑岩中,辉绿岩与辉绿闪长岩为相变关系。辉绿岩呈灰绿色,辉绿结构,块状构造,斜长石约65%(部分被水云母交代),粒度0.5~0.8 mm,呈长

条状,铁镁矿物(具绿泥石化)约30%,副矿物有少量钛铁矿;辉绿闪长岩具灰、灰绿色,辉绿结构与半自形柱粒状结构,块状构造,斜长石量约55%,粒度1~1.5 mm,暗色矿物(以角闪石为主)量约40%,粒度1 mm左右,石英量1%~4%呈他形粒状充填在斜长石、铁镁矿物晶粒之间。副矿物有钛磁铁矿、磷灰石。蚀变普遍,斜长石具水云母化,暗色矿物往往绿泥石化,钛磁铁矿已风化成白钛矿。

辉绿玢岩:仅见于ZK301深部,呈脉状穿插于二长花岗斑岩中,其与斑岩体接触倾角为70°,脉宽5~70 cm。岩石呈深灰色,斑状结构,流动构造。斑晶量约35%,主要为斜长石长条状自形晶,其次为橄榄石自形、半自形晶;基质均为棕色的基性火山玻璃。

1.4 矿体形态及规模

大排铅锌矿体主要产于花岗闪长斑岩体的外

接触带的地层中,主要赋矿层位为二叠系下统栖霞组(P_{1q})。可以划分为上、下2个铅锌矿含矿层,上含矿层矿体产于F4断层之上,赋矿标高在130 m标高之上,有氧化铅锌矿、氧化铜矿、氧化银矿、氧化锰矿和硫化铅锌矿、硫化钼矿;下含矿层矿体主要产于F3断层之下深部二叠系下统栖霞组(P_{1q})、石炭系上统船山组(C_{3c})、石炭系下统林地组(C_{1l})中,赋矿标高在100 m标高之下,有硫化铅锌矿、硫化钼矿、硫化铜矿。上、下2含矿层经分析原来应为同一含矿层,后被F4、F5两条逆冲断层破坏造成现在的重复现象。其中氧化铅锌矿品位如下: Pb 2.25%、Zn 2.88%、Pb+Zn: 5.13%, 矿石中主要有益组分为Pb和Zn,并伴生有碳酸锰矿和银矿, Mn品位一般小于10%, Ag品位9~36 g/t; 氧化铅锌钼矿品位相对较高, Pb 2.00%、Zn 3.51%、Pb+Zn 5.50%、Mo 0.149%, 主要有益组分为Pb、Zn、Mo,并伴生有Ag、Cu矿, Ag品位10~18 g/t, Cu品位0.31%~0.67%。

大排铁铅锌多金属矿床具有铅锌铁锰铜银钼等多种金属矿化,其中磁铁矿化、铅锌矿化、钼矿化

和铜矿化为该矿床的主要矿化类型。其中铅锌矿已达大型规模,钼矿达中型规模,铁矿资源量达小型规模。铁铅锌多金属矿体主要贮存于一系列逆冲断裂带之间的晚石炭世经畚组至中二叠世栖霞组中的层间裂隙中,呈层状、似层状及豆夹状,主矿体具多层、复杂性的特点。矿体数量较多,共见65个铅锌多金属及磁铁矿体,其中9个矿体规模较大,主要为铅锌矿,次之为铁矿、铜矿、钼矿。总体产状走向北北西,倾向北东东,倾角5°~35°。矿体分布面积约1 km², 矿石类型空间上从上至下为铅锌矿、含铜铅锌矿、含铁铅锌矿、磁铁矿;走向上北部为磁铁矿,中部以硫化铅锌矿为主,在铅锌矿体的深部伴生黄铜矿、磁铁矿(局部见异体共生铜、铁矿),于南部过渡为磁铁矿。矿体展布总体稳定,受构造及岩体影响,矿体中部厚度较大,南北两端及深部变薄(图4), 铅锌矿体普遍伴生银。铅锌多金属主矿体在垂向上具有上铅锌、中下共生铜矿、下部局部含磁铁矿的分布特征,所以认为矿床贫铜富铅锌,金属元素垂直分带明显,类似于沉积矿床中块状硫化

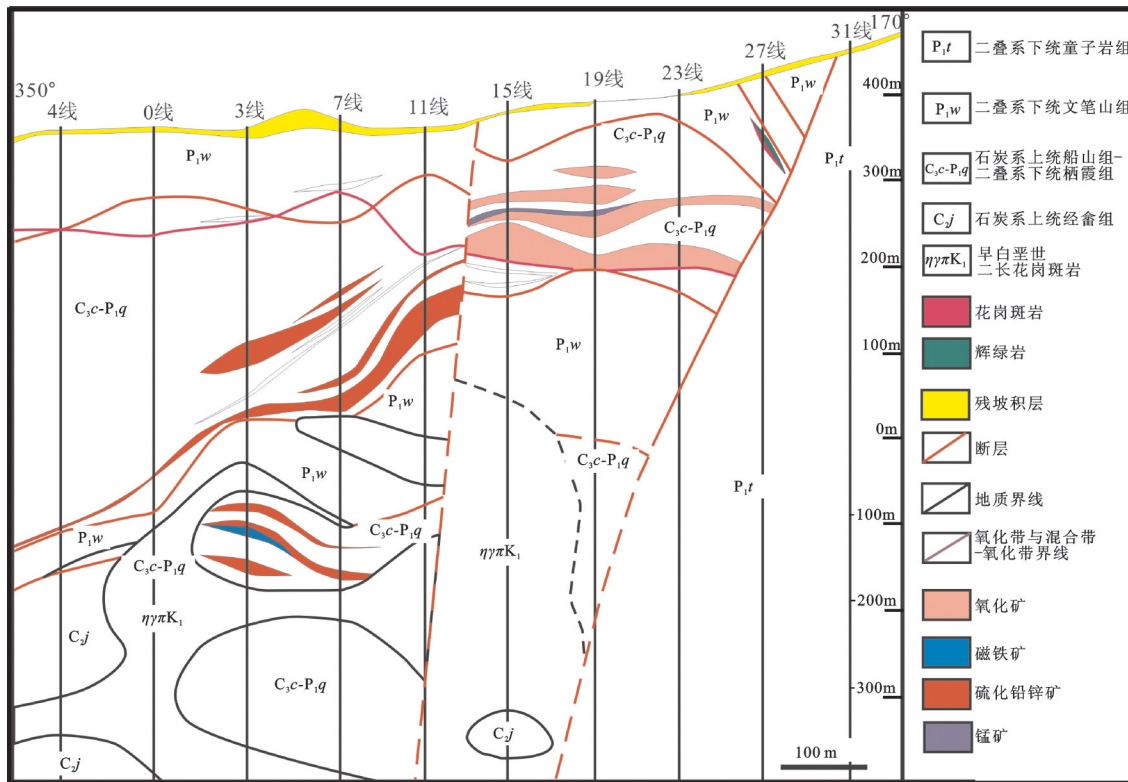


图4 福建永定大排铁铅锌多金属矿 A-A'地质剖面图
Fig.4 A-A' geologic section of the Dapai Fe-Pb-Zn deposit, Yongding County, Fujian Province

物矿种的垂直分带规律。矿体顶、底板为大理岩、矽卡岩、凝灰质粉砂岩、硅质岩、凝灰质硅泥岩等。

1.5 矿石类型及矿物成分

矿区内矿石类型主要为铅锌矿石(包括氧化铅锌矿石和硫化铅锌矿石)和磁铁矿石。硫化铅锌矿石和磁铁矿石及其特征见表1。

1.6 蚀变类型

区内变质作用强烈,可以分为接触热变质作用和接触交代变质作用。其中接触热变质作用影响的地层主要为二叠系文笔山组、栖霞组及船山组地层,童子岩组及林地组地层中的碎屑岩也受到一定的影响,但是此类变质作用并无物质成分的带入或带出,仅使泥质、碳酸盐类在低—中—高温的条件下发生重结晶现象,但与矿化的关系不密切。

接触交代作用是区内广泛发育的一种变质作用。根据物质成分及产出部位的不同可分为内、外矽卡岩带。内矽卡岩带不甚发育,蚀变岩石多为单成分的绿帘石组成,系交代石英二长闪长岩和花岗岩闪长岩中斜长石、角闪石而成。矽卡岩常呈不规则的团块状或细脉状产于岩体之中,如在15线ZK1501孔的535.51~536.81 m、557.55~561.55 m、576.41~577.61 m、605.30~606.10 m处等均可见,多形成绿帘石矽卡岩,内接触带与矿化关系不大,仅局部绿帘石矽卡岩被铅锌矿交代成矿(小矿脉),且伴有磁铁矿化和黄铜矿化。

外矽卡岩带在栖霞组及船山组灰岩中均很发育,依据矿物组合主要可分为:次透辉石矽卡岩、石榴石矽卡岩、石榴石次透辉石矽卡岩、锰钙辉石矽卡岩等。其中次透辉石矽卡岩与铅、锌、铜矿关系密切,而石榴石矽卡岩与磁铁矿关系较为密切。

次透辉石矽卡岩:是区内主要的一种矽卡岩,常见有次透辉石矽卡岩为石榴石矽卡岩所穿切交代,局部见有后期方解石脉、绿泥石脉交代该矽卡

岩。次透辉石矽卡岩多产于外接触带附近的灰岩、大理岩中,常被不规则的团块状、浸染状、细脉状和星点状多金属(铜、铅、锌)硫化物所交代,与铜、铅、锌矿化关系十分密切,当交代作用强烈时,往往形成工业矿体,且与磁铁矿化和辉钼矿化也有相当密切的关系。

石榴石矽卡岩:分布范围仅次于次透辉石矽卡岩,主要见于接触带边缘和外接触带附近的灰岩、大理岩中。常见不规则的团块状、浸染状和细脉状磁铁矿和少量铜、铅、锌硫化物交代石榴石矽卡岩,并形成大小不同的矿体。局部见有石榴石晶体被交代后的残余假象,也见有后期石榴石矽卡岩呈脉状穿插交代次透辉石矽卡岩,部分已形成磁铁矿脉,可见石榴石矽卡岩在区内有两期作用,并对该区磁铁矿的形成有一定关系,同时也伴有铜、铅、锌的矿化。

石榴石次透辉石矽卡岩:主要分布于-130 m标高以下的外接触带附近的灰岩、大理岩之中,少数发育在地表破碎带和文笔山组的围岩裂隙中,常与石榴石矽卡岩和次透辉石矽卡岩共生,见星点状、团块状和浸染状辉钼矿交代该矽卡岩,形成工业矿体,如在15线ZK1501孔深部518~746 m表现更为明显。因此区内钼矿化往往与次透辉石石榴石矽卡岩有关,局部地段常伴有少量的铜、铅、锌的矿化和磁铁矿化。

锰钙辉石矽卡岩:仅发育在3线ZK301孔附近地表、23线12号桩地表附近和15线200 m标高以上的破碎带角砾中,锰钙辉石晶体粗大,大者个别 $\alpha \geq 10$ cm,自形程度好,多呈现放射状集合体产出。该矽卡岩遭受强烈风化淋滤后常形成质量较好的保持辉石假象的软锰矿,且伴有铅、锌、银的矿化,局部尚可达到氧化铅锌矿的要求。锰钙辉石矽卡岩中辉石为锰钙辉石($MnO=16.9\% \sim 17.5\%$)(表2)。通

表1 福建永定大排铁铅锌多金属矿主要矿石类型及其特征

Table 1 Main ore types and characteristics in the Dapai Fe-Pb-Zn deposit

矿石种类	硫化铅锌矿石	磁铁矿石
主要金属矿物	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿为主, 次为黄铁矿	磁铁矿, 少量穆磁铁矿、赤铁矿
伴生金属矿物	局部伴生辉钼矿、磁铁矿、穆磁铁矿、赤铁矿	闪锌矿、黄铜矿、辉钼矿及黄铁矿
脉石矿物	次透辉石、石榴石、绿帘石、锰钙辉石、黑柱石及石英、方解石	石榴石、透辉石、次透辉石、方解石、金云母、绿泥石及石英等
矿石结构	以粒状变晶镶嵌结构、变余凝灰结构、交代充填结构同生边结构、固溶体结构为主, 次为半自形粒状结构、他形粒状结构及碎裂结构、包裹结构等(图5)	全自形粒状集合体结构、他形-半自形粒状结构为主, 次为交代熔融结构及交代残留结构(图5)
矿石构造	块状(团块状)、条带状、层纹状、浸染状为主, 次为细脉状	块状构造、斑杂状构造、浸染状构造、条带状构造、层纹状构造

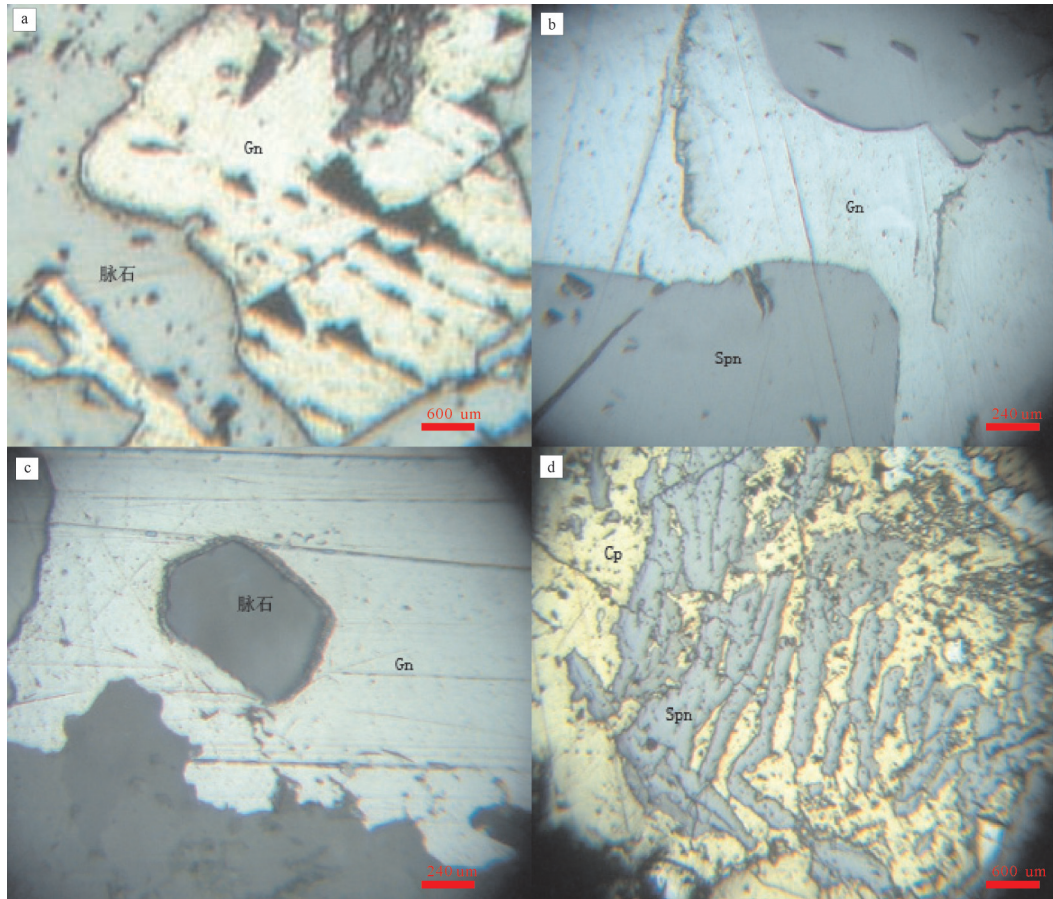


图5 福建永定大排铁铅锌多金属矿床矿石矿物显微特征

a—充填交代结构—方铅矿不规则状充填交代脉石矿物; b—共生边结构—方铅矿与闪锌矿相互生成关系为共生边; c—包裹结构—方铅矿包裹脉石; d—固溶体结构—黄铜矿与赋存于其中的肠状闪锌矿呈固溶体; Gn—方铅矿; Spn—闪锌矿; Cp—黄铜矿

Fig.5 Microcharacteristics of ore minerals in the Dapai Fe-Pb-Zn deposit, Yongding County, Fujian Province

a-Infilling and metasomatic structure—galena infilling and replacing gangue minerals; b-Syngenetic marginal texture—galena and sphalerite syngenetic margin, respectively; c-Wrapping structure—galena wrapping gangue; d-Solid-solution texture—chalcopyrite and enteroid sphalerite composing solid-solution; Gn—Galena; Spn—Sphalerite; Cp—Chalcopyrite

常锰质矽卡岩是评价含Pb-Zn-Ag矽卡岩矿床的重要找矿标志, 锰质矽卡岩化不但可形成颇具规模的典型矽卡岩型铅锌矿床, 而且可对早期海底火山喷发沉积初始矿源层产生强烈的构造-岩浆热液顺层渗滤交代作用, 对矿质富集和矿体最终定位具有重要意义, 大排铁铅锌矿的矽卡岩富含锰, 为锰石榴石矽卡岩和含锰透辉石矽卡岩。

2 样品采集与测试方法

本次用于测试锆石 SHRIMP U-Pb 样品来自于大排矿区蚀变花岗闪长岩(N24°52'47.6", E116°56'13.14"), 4件辉钼矿 Re-Os 同位素样品来自于 ZK1104孔(孔深367 m处)花岗闪长斑岩。

花岗闪长岩呈灰色、灰白色, 中细粒花岗结构, 块状构造。斜长石量约55%, 粒度1~1.5 mm。暗色矿物(以角闪石为主)约40%, 粒度1 mm左右。石英含量1%~4%, 呈他形粒状充填在斜长石、铁镁矿物晶粒之间。钾长石微量与石英组成显微文象结构。副矿物有钛磁铁矿、磷灰石。蚀变普遍, 斜长石具水云母化, 暗色矿物往往绿泥石化, 钛磁铁矿已风化成白钛矿。锆石的选样工作是在河北省区调所实验室完成的, 样品破碎后手工淘洗分离出重砂, 经磁选和电磁选后, 在双目镜下挑出锆石(大于1000粒), 然后与RSE(澳大利亚国立大学地质地球科学研究所)标准锆石TEM用环氧树脂制靶。

花岗闪长(斑)岩呈肉红色, 斑状结构, 基质具花

表2 福建永定大排铁铅锌矿床辉石电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of pyroxenes from Yongding Dapai Fe-Pb-Zn deposit in Fujian Province

样品号	矿物名称	化学组成/%										端员组成/%		
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总计	Di	Hed	Jo
Dp5-1	锰钙辉石	49.58	0.00	0.23	8.16	16.97	1.50	22.57	0.20	0.00	99.21	9.5	29.1	61.3
Dp5-2	锰钙辉石	49.79	0.00	0.24	7.77	17.32	1.70	22.71	0.09	0.00	99.66	10.7	27.4	61.9
Dp5-3	锰钙辉石	50.16	0.00	0.19	7.37	17.58	1.66	22.30	0.09	0.00	99.36	10.5	26.2	63.3

注: 样品由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室分析; Di-透辉石; Hed-钙铁辉石; Jo-锰钙辉石。

岗结构, 块状构造, 斑晶以更长石为主, 斑晶分布不均, 含量一般5%~10%; 基质主要由石英、条纹长石与更长石、黑云母等组成, 副矿物为锆石、磁铁矿、磷灰石、黄铁矿、独居石等。岩石蚀变较强, 斜长石多已绢云母化、钾长石化、碳酸盐化, 黑云母出现绿泥石化。共采集辉钼矿样品4件供Re-Os同位素分析测试使用。辉钼矿样品挑选由河北省区调所实验室完成, 含辉钼矿石英脉经过手工破碎, 在双目镜下分选辉钼矿。辉钼矿单矿物纯度在98%以上, 经水清洗干净后, 用玛瑙研钵研磨至200目。为避免交叉污染, 处理完每个单矿物样品后, 所用工具都用酒精浸泡并擦洗干净。

2.1 锆石 SHRIMP U-Pb 测试

锆石 SHRIMP 测试工作在北京离子探针中心完成, 测定原理及方法见文献[19]。分析时离子束斑直径为20~30 μm, 数据处理采用 Ludwig 的 SQUID1.0d 及 Isoplot2.49h 程序, 采用 TEMORA 标样(约417 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.06683$)进行校正, 详细的测试流程见文献[20]。

2.2 辉钼矿 Re-Os 测试

辉钼矿 Re-Os 测试工作是在国家地质实验测试中心利用电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS 完成的。普 Os 是根据原子量表^[21]和同位素

丰度表^[22], 通过 $^{192}\text{Os}/^{190}\text{Os}$ 测量比计算得出。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%, $\lambda(^{187}\text{Re} \text{ 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。详细的测试流程见文献[23-26]。

3 测试结果

通常认为高的 Th/U 比值(>0.4)和韵律环带被认为是岩浆成因锆石的特征, 而无环带和低的 Th/U 比值(<0.1)被认为是变质成因锆石的特征^[27]。样品 D82-1 中锆石为无色透明, CL 图像显示岩石中大部分锆石晶形发育良好, 具有韵律环带, 显示岩浆锆石的特征(图6-a)。本次研究选取韵律环带较发育的岩浆期锆石进行测试, 样品的测试数据见表3, 单个数据点的误差 1σ 。对14粒锆石的测试结果表明, 有谐和的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄, 数据点全部落入谐和线上或者附近区域(图6-b), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(127.0 \pm 1.8) \text{ Ma}$ ($n=14$, $\text{MSWD}=1.2$), 测试误差小于2%, 该年龄代表了岩体的形成年龄, 属于早白垩世。

大排辉钼矿4件 Re-Os 样品的测试结果列于表

表3 大排蚀变花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄数据(D82)

Table 3 SHRIMP U-Pb dating of zircons from alteration granodiorite in ores of the Dapai Fe-Pb-Zn

测点号	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	Th/U	$f_{206}^{\#}/\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}(\pm 1)$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}(\pm 1)$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*(\pm 1)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 /Ma (± 1)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 /Ma (± 1)					
1	1334	1512	1.17	1.06	0.0201	2.5	0.13	5.5	0.0485	4.9	128.0	4.0	121	115
2	178	158	0.92	5.54	0.0194	2.8	0.15	27.9	0.0549	27.7	123.7	4.5	408	619
3	670	896	1.38	0.75	0.0206	2.5	0.14	4.6	0.0482	3.8	131.3	4.3	110	90
4	957	1979	2.14	1.15	0.0206	2.5	0.13	5.8	0.0475	5.3	131.6	5.2	75	125
5	332	307	0.96	4.00	0.0203	2.7	0.10	20.2	0.0383	20.1	129.3	4.1	-467	530
6	764	798	1.08	1.11	0.0207	2.6	0.14	7.9	0.0501	7.4	132.3	4.1	200	173
7	669	1076	1.66	0.96	0.0203	2.5	0.14	6.5	0.0515	5.9	129.3	4.6	264	136
8	515	589	1.18	1.11	0.0185	2.6	0.13	7.8	0.0511	7.4	118.3	3.9	248	169
9	705	781	1.14	2.15	0.0203	2.5	0.11	8.9	0.0405	8.6	129.3	4.1	-319	220
10	642	981	1.58	1.30	0.0202	2.5	0.15	11.5	0.0522	11.2	128.8	4.5	295	257
11	654	619	0.98	1.10	0.0198	2.5	0.14	10.0	0.0522	9.7	126.3	3.9	294	221
12	550	707	1.33	1.00	0.0190	2.8	0.12	7.5	0.0459	6.9	121.2	4.4	-5	166
13	479	440	0.95	1.73	0.0197	2.6	0.13	10.3	0.0491	9.9	125.9	3.9	152	233
14	857	692	0.83	0.94	0.0201	2.6	0.13	7.0	0.0471	6.4	128.3	3.9	54	154

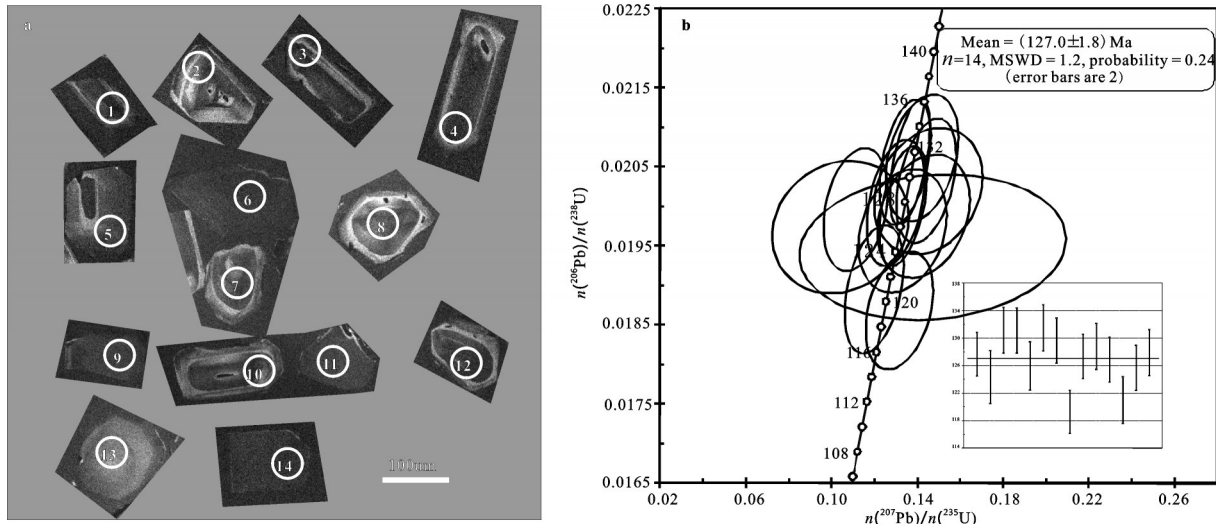


图6 大排蚀变花岗岩(D82-1)锆石的SHRIMP CL测点位置及U-Pb年龄谐和图
Fig.6 CL images and analytical spots of the zircons and U-Pb concordia diagrams for the Dapai granodiorite

表4 福建大排铁铅锌矿花岗岩闪长斑岩中辉钼矿 Re-Os 同位素数据
Table 4 Re-Os isotopic analyses of molybdenite from ores of the Dapai Fe-Pb-Zn deposit

样号	样重/g	$w_{(Re)} / 10^{-6}$		$w_{(Os)} / 10^{-6}$		$w_{(^{187}Re)} / 10^{-6}$		$w_{(^{187}Os)} / 10^{-9}$		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
ZK-4	0.00603	99.54	0.82	0.0102	0.0342	62.56	0.51	137.6	1.2	131.8	1.9
ZK-2	0.00170	192.8	1.6	2.516	0.267	121.1	1.0	264.9	3.1	131.1	2.2
ZK-3	0.00213	830.7	6.5	3.119	0.262	522.1	4.1	1164	9	133.7	1.9
ZK-6	0.00508	442.7	4.7	1.066	0.179	278.3	3.0	610.5	5.2	131.5	2.1

4. 辉钼矿中 Re 含量较高, 介于 $99.54 \times 10^{-6} \sim 830.7 \times 10^{-6}$, 其模式年龄介于 131.1~133.7 Ma, 加权平均年龄为 $(132.1 \pm 1.8) \text{ Ma} (n=4, \text{MSWD}=1.4)$ (图 7-b), 利用 ISOPLOT 软件对 4 件辉钼矿样品年龄进行等时线拟合, 获得的 Re-Os 等时线年龄为 $(135.5 \pm 4.1) \text{ Ma} (n=4, \text{MSWD}=2.2)$ (图 7-a)。

在误差范围内, 锆石 U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 等时线年龄相一致, 表明二者同时形成。

4 讨 论

大排铁铅锌多金属矿矿体受构造、岩性、层位及岩浆岩等控制明显。地表氧化矿及 65 号矿体均产于 F3、F4 之间的构造破碎带内, 有用矿物是作为破碎带中的角砾和胶结物出现; 矿体严格受构造控制, 矿体范围未超出构造破碎带之外。本时期区域上属裂陷拉张盆地, 早石炭世林地组为陆源冲积相, 晚石炭世经畲组、船山组以碳酸盐岩沉积为主, 中二叠世栖霞期海侵进一步扩大, 拗陷盆地基底地形起伏, 这一古

地理环境为玉水式铜矿、马坑式铁矿、大排铁铅锌多金属矿的形成提供了基础, 区内显示在这一层位上均有 Cu、Fe、Mn、Pb、Zn 矿化。大排铁铅锌多金属矿的成矿作用具有以下地质特征:

(1) 大排铁铅锌多金属矿的矿体位于特定的层位, 受地层控制明显, 矿体主要产于二叠系下统栖霞组(P_{1q})、石炭系上统船山组(C_{3c})、石炭系下统林地组(C_{1l})地层中(图 8), 这些地层的岩石基本以碳酸盐岩——灰岩、大理岩为主, 含钙泥岩为次, 是易于受交代的岩石, 并可能交代成矽卡岩矿床。矿体与矽卡岩关系密切, 矿体往往就在矽卡岩之中, 矿体顶底板为矽卡岩的占 80%, 为大理岩、灰岩, 少数是岩体及泥岩, 矿石结构以交代结构、交代熔融结构及交代残留结构为主。区内的灰岩、大理岩在交代作用下形成众多的矽卡岩, 还见多种金属元素交代了矽卡岩。矿石的金属矿物组合为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿及磁铁矿等。脉石矿物组合为石榴石、透辉石、次透辉石、黑柱石、绿帘石、

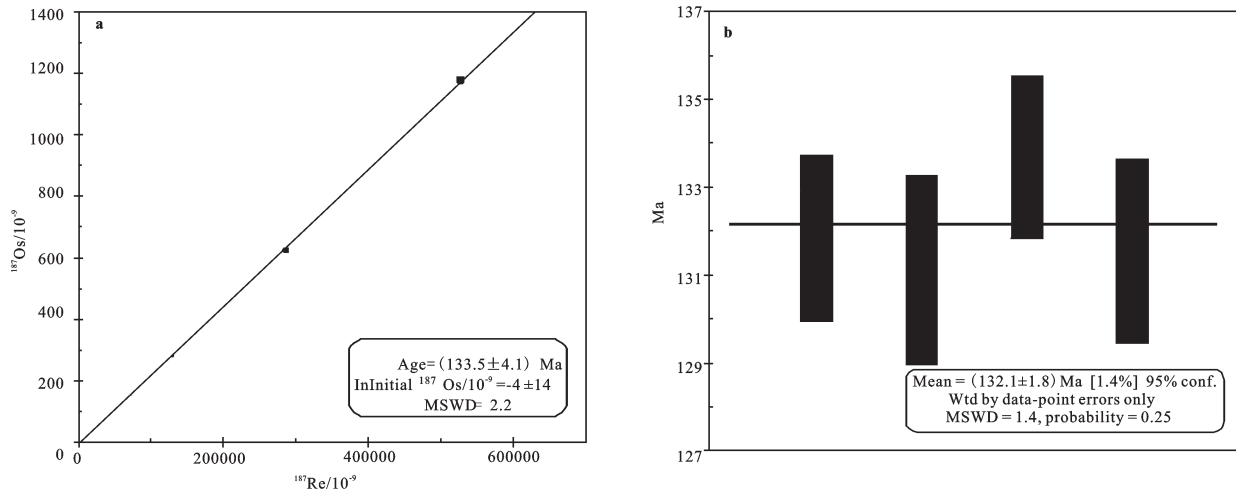


图7 大排辉钼矿 Re-Os 等时线和加权平均年龄图

Fig.7 Re-Os isochron diagram of molybdenite and weight diagram from ores of the Dapai Fe-Pb-Zn deposit

石英、方解石等,为一套典型的含矿矽卡岩组合,具矽卡岩型矿床的特征。同时,矿体均具明显的层状、似层状特征(图3,图8),矿石具沉积岩类的结构、构造,矿石矿物组分、主矿体的化学变化均反映出沉积-热液改造特征。大排铁铅锌多金属矿与区内玉水式铜矿、马坑式铁矿相似,矿床成因上与层控矽卡岩型矿床相类似。

(2)成矿受燕山期岩浆活动的影响,兼具斑岩型矿床的特征,主成矿期发生在燕山期,该时期也是中国东南部的一个重要成矿期^[4, 5, 9, 13, 28-34]。大排铅锌矿体主要产于花岗闪长斑岩体的外接触带(图8),特别是岩体的分叉、枝状部位,更利于矿体的赋存和有用元素的富集,在ZK1501孔表现明显。矿区内的花岗闪长斑岩具较强烈的钾长石化,含有一定量的铜、铅、锌等成矿元素,与围岩接触处成矿元素含量明显增加(表5)。另一方面斑岩体围岩接触面多呈叉状、手指状,为利于挥发分集中交代成矿的构造部位。岩体接触带附近岩石多具绿帘石矽卡岩化、石榴石矽卡岩化、透辉石矽卡岩化等,矿体多赋存于外接触带,在空间上与斑岩体关系密切,斑岩体可能主要为成矿并提供含多金属矿化热液,并对沉积介质中的铁铅锌多金属起到活化、叠加、转移和富集的作用,类似于斑岩型矿床的特征;该时期也是区域上一个重要的成矿期^[33-34],如张承帅^[33]和王登红等^[34]分别测得马坑铁矿辉钼矿年龄分别为133 Ma和130 Ma,该年龄与本文所测得的蚀变花岗闪长岩锆石U-Pb年龄及花岗闪长斑岩中的辉钼矿

年龄相一致,也与福建潘田铁矿与成矿作用有关的花岗岩(131.7±0.5) Ma的锆石U-Pb年龄^[35],福建洛阳铁矿辉钼矿 Re-Os 同位素年龄(133.0±1.9) Ma和(134.0±4.2) Ma相接近^[36],基于上述事实,笔者认为大排铁铅锌多金属矿的成矿期可能为燕山期。

(3)成矿物质来源复杂多样,古生代的海相火山热水沉积地层、古生代火山活动、中生代岩浆岩都为成矿作用提供了物质来源。大排铁铅锌多金属矿的含矿层属于沉积环境,区内早石炭世林地组为陆源冲积相,晚石炭世经畚组、船山组以碳酸盐岩沉积为主,区内地质资料显示在这一层位上均有Cu、Fe、Mn、Pb、Zn矿化,晚石炭世经畚组一中二叠世栖霞组的海相火山热水沉积的钙硅泥岩建造为矿区物质来源之一;同时,区内石炭纪一二叠纪火山活动频繁,马坑矿区在经畚组中见玄武安山岩、英安质凝灰岩等火山碎屑岩层位,大排矿区内见凝灰质灰岩、硅泥岩、凝灰质碎屑岩,火山活动造成地幔物质的注入、地壳物质循环,是区内成矿物质的又一来源;矿区内的花岗闪长斑岩体也是区内成矿物质的来源之一。

综上所述,大排铁铅锌多金属矿应属于层控矽卡岩型-斑岩型复合多金属矿床,其主要成矿期是燕山期。

5 结 论

(1)蚀变花岗岩和辉钼矿化花岗闪长岩的锆石SHRIMP U-Pb定年和辉钼矿 Re-Os 同位素年龄分

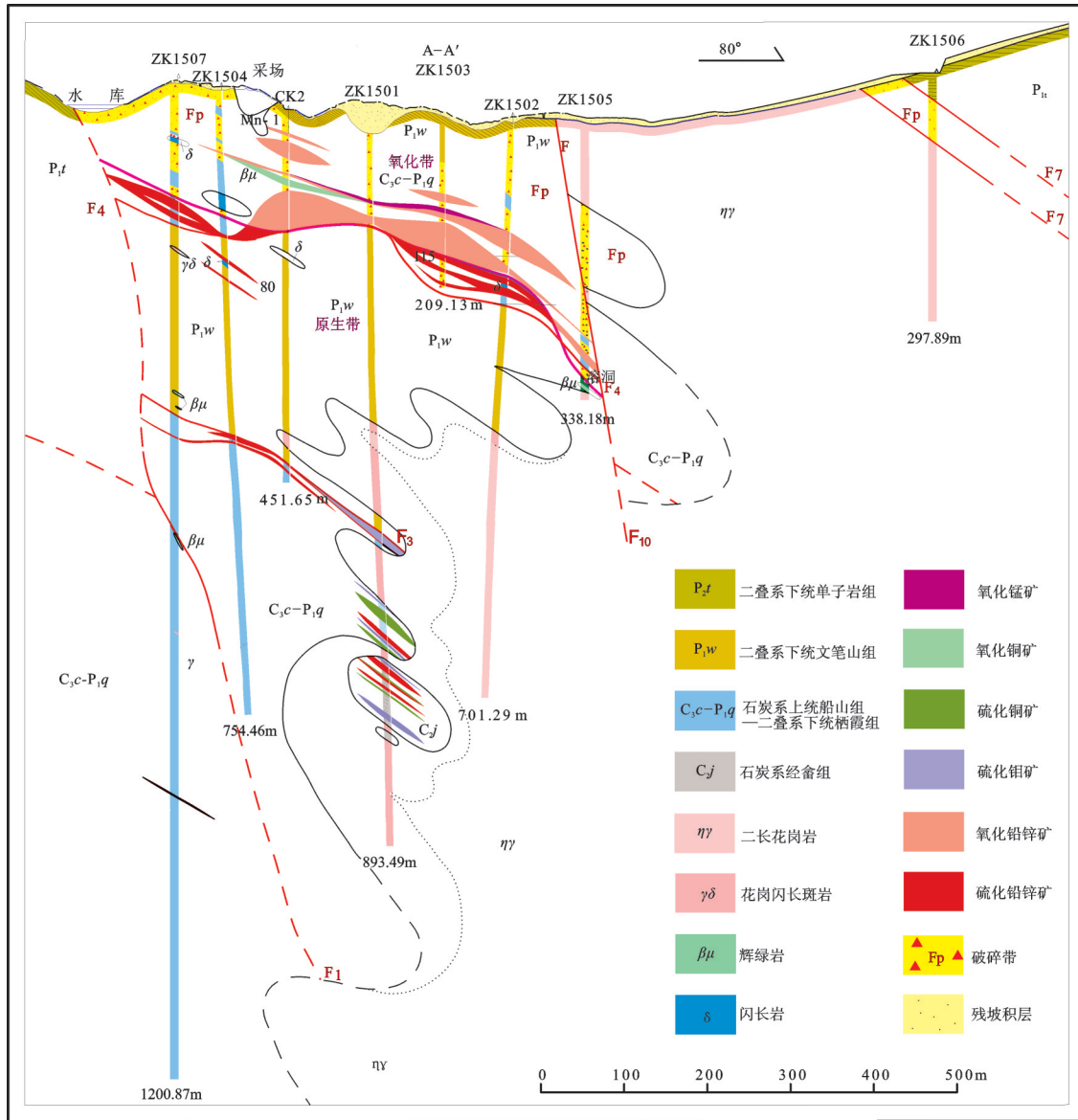


图8 大排铁铅锌多金属矿15线地质剖面图

Fig.8 Geological section along No. 15 line of the Dapai Fe-Pb-Zn deposit

表5 二长花岗斑岩等4种元素含量(10⁻⁶)

Table 5 Four elements of monzonitic granite porphyry from the Dapai Fe-Pb-Zn deposit (10⁻⁶)

类别	Cu	Pb	Zn	Mo
二长花岗斑岩	20~60	20~80	< 100	≤10~20
蚀变辉绿闪长岩(D82-1)	15.5	28.8	364.35	270
矽卡岩化岩体与外接接触带	200~340	150~200	250	10

别为(127.0±1.8) Ma 和(133.5±4.1) Ma, 这一成矿年龄与区内马坑铁矿及潘田铁矿的成矿年龄相一致, 指示区域上该期铁铅锌多金属矿与区内花岗质岩浆作用有密切的时间和成因联系。

(2)区内成矿物质来源具有多样性, 古生代的海相火山热水沉积地层、古生代火山活动、中生代岩浆岩都为成矿作用提供了物质来源。

(3)大排铁铅锌多金属矿应属于层控矽卡岩型-斑岩型复合多金属矿床, 其主要成矿期是燕山期。

致谢: 匿名审稿人及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

[1] 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 等. 闽西南地区才溪岩体锆石 SHRIMP 定年及其地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(3): 223-231.

- Zhao Xilin, Mao Jianren, Chen Rong, et al. Zircon SHRIMP age and geochemical characteristics of the Caixi pluton in southwestern Fujian Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(3): 223–231(in Chinese with English abstract).
- [2] 许乃政, 毛建仁, 叶海敏, 等. 福建省永定县大排铁铅锌矿床成矿地质特征及找矿新进展[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(4): 20–23.
Xu Naizheng, Mao Jianren, Ye Haimin, et al. Geological characteristics and new ore-finding progress in the Dapai lead and zinc deposit of Yongding county, Fujian Province [J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(4): 20–23 (in Chinese with English abstract).
- [3] 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 等. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2008, 35(4): 590–597.
Zhao Xilin, Mao Jianren, Chen Rong, et al. Zircon SHRIMP age and their implications of the Zijinshan pluton from southwestern Fujian Province[J]. *Geology in China*, 2008, 35(4): 590–597 (in Chinese with English abstract).
- [4] 赵希林, 毛建仁, 叶海敏, 等. 福建省上杭地区晚中生代花岗质岩体黑云母的地球化学特征及成因意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2009, 28(2): 162–168.
Zhao Xilin, Mao Jianren, Ye Haimin, et al. The geochemical characteristics of biotite and its petrogenesis implication in the Caixi pluton and Sifang pluton from Shanghang area of Fujian Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2009, 28(2): 162–168 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陈静, 陈衍景, 钟军, 等. 福建省紫金山矿田五子骑龙铜矿床流体包裹体研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1425–1438.
Chen Jing, Chen Yanjing, Zhong Jun, et al. Fluid inclusion study of the Wuziqilong Cu deposit in the Zijinshan ore field, Fujian Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (5): 1425–1438 (in Chinese with English abstract).
- [6] 黄文婷, 李晶, 梁华英, 等. 福建紫金山矿田罗卜岭铜钼矿化斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及成矿岩浆高氧化特征研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29: 283–293.
Huang Wenting, Li Jing, Liang Huaying, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and highly oxidized features of magma associated with Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in Zijinshan ore field, Fujian Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29: 283–293 (in Chinese with English abstract).
- [7] 钟军, 陈衍景, 陈静, 等. 福建省紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿床流体包裹体研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1410–1424.
Zhong Jun, Chen Yanjing, Chen Jing, et al. Fluid inclusion study of the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in the Zijinshan ore field, Fujian Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(5): 1410–1424 (in Chinese with English abstract).
- [8] 梁清玲, 江思宏, 王少怀, 等. 福建省紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 定年及地质意义[J]. *地质学报*, 2012, 86(7): 1113–1118.
Liang Qingling, Jiang Sihong, Wang Shaohuai, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in the Zijinshan ore field of Fujian Province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86: 1113–1118 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张承帅, 苏慧敏, 于森, 等. 福建龙岩大洋—莒舟花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 225–242.
Zhang Chengshuai, Su Huimin, Yu Miao, et al. Zircon U-Pb age and Nd-Sr-Pb isotopic characteristics of dayang Juzhou granite in Longyan, Fujian Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1): 225–242 (in Chinese with English abstract).
- [10] 赵希林, 刘凯, 毛建仁, 等. 华南燕山早期晚阶段两类花岗质岩体与成矿作用: 以赣南—闽西南地区为例[J]. *中国地质*, 2012, 39(4): 871–885.
Zhao Xilin, Liu Kai, Mao Jianren, et al. Metallogeneses of two types late-stage of Early Yanshanian Granitoids in South China: South Jiangxi and Southwest Fujian Province[J]. *Geology in China*, 2012, 39(4): 871–885 (in Chinese with English abstract).
- [11] Hsu K J, Li Jiliang, Chen Haihong et al. Tectonics of South China: key to understanding west pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 1990, 183: 9–39.
- [12] Chen Yanjing, Chen Huayong, Khin Zaw, et al. Geodynamic setting and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31: 139–169.
- [13] 毛建仁, 许乃政, 胡青, 等. 闽西南地区中生代花岗闪长质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2004, 34(1), 12–20.
Mao Jianren, Xu Naizheng, Hu Qing, et al. Geochronology and geochemical characteristics in Mesozoic granodioritic rocks in southwestern Fujian, and their tectonic evolution[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, 34(1): 12–20 (in Chinese with English abstract).
- [14] 吴淦国, 张达, 陈柏林, 等. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系——以闽西南地区为例[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2000, 25(4): 390–396.
Wu Ganguo, Zhang Da, Chen Bailin, et al. Transformation of Mesozoic tectonic domain and its relation to mineralization in south eastern China: an evidence of southwestern Fujian province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(4): 390–396 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张德全, 李大新, 丰成友, 等. 紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义[J]. *地球学报*, 2001, 22(5): 403–408.
Zhang Dequan, Li Daxin, Feng Chengyou, et al. The temporal and spatila framework of the Mesozoic magmatic system in Zijinshan area and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(5): 403–408 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张德全, 丰成友, 李大新, 等. 紫金山地区斑岩-浅成热液成矿系统的成矿流体演化[J]. *地球学报*, 2005, 26(2): 127–136.
Zhang Dequan, Feng Chengyou, Li Daxin, et al. The evolution of ore-forming fluids in the porphyry-epithermal metallogenic system of Zijinshan area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2005, 26(2): 127–136 (in Chinese with English abstract).
- [17] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用[J]. *矿床地质*, 2005, 24(2): 99–107.
Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. *Mineral*

- Deposits, 2005, 24(2): 99–107 (in Chinese with English abstract).
- [18] 倪建辉. 福建永定大排铁铅锌多金属矿床地质特征及找矿模式探讨[J]. 福建地质, 2012, 31(3): 206–214.
Ni Jianhui. Geological characteristics and prospecting model of Dapai iron–lead–zinc polymetallic deposit[J]. *Geology in Fujian*, 2012, 3: 206–214 (in Chinese with English abstract).
- [19] Williams I S. U–Th–Pb geochronology by iron microprobe[J]. *Reviews in Economic Geology*, 1998, 7: 1–35.
- [20] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, (增刊): 26–30.
Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, et al. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating[J]. *Geological Review*, 2002, (supp.): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- [21] Wieser M E. Atomic weights of the elements 2005 (IUPAC Technical report) [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2006, 78(11): 2051–2066.
- [22] Bohlke J K, Laeter J R De, Bievre P De, et al. Isotopic Compositions of the Elements[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2005, 34(1): 57–67.
- [23] Du Andao, Wu Shuqi, Sun Dezhong, et al. Preparation and certification of Re–Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 2004, 28 (1): 41–52.
- [24] Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low–blank rhenium–osmium analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 1995, 67 (13): 2136–2141.
- [25] 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 等. Carius管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼–钨同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 2001, 20(4): 247–252.
Du Aadao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, et al. Precise Re–Os dating for molybdenite by ID–NTIMS with Carius Tube sample Preparation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2001, 20(4): 247–252 (in Chinese with English abstract).
- [26] 屈文俊, 杜安道. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼–钨地质年龄[J]. 岩矿测试, 2003, 22(4): 254–262.
Qu Wenjun, Du Andao. Highly Precise Re–Os dating of molybdenite by ICP–MS with Carius tube sample digestion[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2003, 22(4): 254–262 (in Chinese with English abstract).
- [27] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U–Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589–1604.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genesis of Zircon and its constraints for the U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 1589–604 (in Chinese).
- [28] 王加恩, 刘远栋, 姜禹, 等. 浙江双黄地区含钼岩体地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 814–823.
Wang Jiaen, Liu Yuandong, Jiang Yu, et al. Geochemistry and zircon SHRIMP U–Pb dating of Mo–bearing granite bodies in Shuanghuang area, southern Zhejiang[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 814–823(in Chinese with English abstract).
- [29] 张建芳, 解怀生, 许兴苗, 等. 浙江漓渚地区栅溪–广山岩体地质地球化学特征、构造及找矿意义[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 403–413.
Zhang Jianfang, Xie Huaisheng, Xu Xingmiao, et al. Geological and geochemical characteristics and tectonic and prospecting significance of the Shanxi–Guangshan intrusions in Lizhu area, Zhejiang[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 403–413(in Chinese with English abstract).
- [30] Jiang Shaohuai, Liang Qingling, Bagasa, et al. Geodynamic setting of the Zijinshan porphyry–epithermal Cu–Au–Mo–Ag ore system, SW Fujian Province, China: constraints from the geochronology and geochemistry of the igneous rocks[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 287–305.
- [31] Liu Lei, Xu Xisheng, Zou Haibo. Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences in southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo–Pacific subduction[J]. *Lithos*, 2012, 154: 166–180.
- [32] Mao Jingwen, Cheng Yanbo, Chen Maohong, et al. Major types and time–space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48: 267–294.
- [33] 张承帅. 福建马坑铁钼多金属矿床地质特征研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(增刊): 123–124.
Zhang Chengshuai. Geological characteristics of Fe–Mo deposit in Fujian Makeng area [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(S1): 123–124(in Chinese).
- [34] 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 等. 我国重要矿产地成岩成矿年代学研究新数据[J]. 地质学报, 2010, 84(7): 1–11.
Wang Denghong, Chen Zhenghui, Chen Yuchuan, et al. New data of the rock–forming and ore–forming chronology for China’s important mineral resources areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(7): 1–11(in Chinese with English abstract).
- [35] 来守华, 陈仁义, 张达, 等. 福建潘田铁钼花岗岩岩石地球化学特征、锆石 U–Pb 年代学及其与成矿的关系[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1780–1792.
Lai Shouhua, Chen Renyi, Zhang Da, et al. Petrogeochemical features and zircon LA–ICP–MS U–Pb ages of granite in the Pantian iron ore deposit, Fujian Province and their relationship with mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1780–1792(in Chinese with English abstract).
- [36] 张达, 吴淦国, 狄永军, 等. 福建漳平洛阳铁矿床成岩成矿年代学及其地质意义[J]. 地球科学, 2012, 37(6): 1217–1231.
Zhang Da, Wu Ganguo, Di Yongjun, et al. Geochronology of diagenesis and mineralization of the Luoyang iron deposit in Zhangping City, Fujian Province and its geological significance[J]. *Earth Science*, 2012, 37(6): 1217–1231(in Chinese with English abstract).