

doi:10.3799/dqkx.2012.126

# 基于地质过程的闽西南马坑式铁多金属矿定量预测

左仁广, 夏庆霖, 张道军, 成秋明

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 矿床是地质过程的产物之一, 深入分析控制矿床形成和保存的关键地质过程是矿产资源定量预测与评价的基础. 闽西南马坑式铁多金属矿为矽卡岩型矿床, 燕山期的岩浆活动提供了热源、流体来源及部分的铁质来源; 热液沿着北东向断裂向上运移, 在岩体与石炭—二叠纪碳酸盐岩地层的接触面及石炭—二叠纪地层内部发生了热液交代作用, 形成了矽卡岩化; 铁主要来源于石炭—二叠纪碳酸盐岩建造, 后期燕山期岩浆的侵入, 使得铁进一步富集; 并在石炭—二叠纪地层中沉淀成矿. 基于上述关键成矿过程, 从“源”(热源、物质来源和流体来源)、“运”(流体通道)、“盖”(圈闭)、“储”(矿质沉淀场所)和“存”(矿床的后期保存条件)等方面提取了地质证据, 利用模糊逻辑综合地质证据得到了找矿有利度图. 结果显示所圈定的预测远景区与已知铁多金属矿床在空间上具有很强的相关性, 可作为进一步工作部署的依据. 基于地质过程的矿产资源定量预测与评价方法, 决定矿床能否形成的关键地质过程为评价依据, 可为闽西南进一步找寻马坑式铁多金属矿提供新的找矿思路和参考依据.

**关键词:** 矿产勘查; 地质过程; 成矿有利度; 马坑式铁多金属矿; 成矿预测; 矿床.

**中图分类号:** P624.6

**文章编号:** 1000-2383(2012)06-1183-08

**收稿日期:** 2012-07-19

## Geological Process-Based Mineral Resource Quantitative Prediction and Assessment for Makeng Type Iron Polymetallic Deposits in Fujian

ZUO Ren-guang, XIA Qing-lin, ZHANG Dao-jun, CHENG Qiu-ming

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Study of geological processes including: (1) establishment of energy gradients to drive the system, (2) generation of hydrothermal fluids, (3) extraction of metals and chemical ligands for metal complexation from suitable sources, (4) transportation of metals from sources regions to trap zones, (5) deposition of metals triggered by chemical and physical processes that alter the make-up of melts or fluids migrating through trap zones, and (6) preservation of mineral deposits through time is the basis for mineral resource quantitative prediction and assessment (MRQPA) since the forming and preservation of mineral deposits is a spatial-temporal function of geological processes. In this study, geological process-based mineral resource quantitative prediction and assessment for Makeng type iron polymetallic deposits in Fujian Province is implemented. The focuses are to study the critical geological processes and evidences that these processes have occurred, and to evaluate the probability of occurrences of the critical geological processes. This study offers a new prospective for mineral resource exploration, and provides a new strategy for further Makeng type iron polymetallic mineral exploration in Fujian province.

**Key words:** mineral resource exploration; geological process; ore-forming probability; Makeng type iron polymetallic deposit; ore prospecting; ore deposits.

随着国家对铁多金属资源需求的增加, 铁多金属矿找矿已成为当前矿产资源评价工作的重点. 马坑式铁多金属矿带是我国重要富铁矿带之一, 福建 98%

以上的铁矿储量都分布于此带. 福建省的铁矿找矿工作已从寻找地表矿转向寻找深部隐伏矿, 加之该区植被覆盖面积大, 传统找矿技术手段难以满足现实找矿

**基金项目:** “覆盖区矿产综合预测”计划项目 (No. 1212011085468); 国家自然科学基金 (No. 41002118); 中央高校基本科研业务费专项资金 (Nos. CUG120116, CUG120501); 国土资源部公益性行业科研专项 (No. 201211022); 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助 (No. MSFGPMR201203).

**作者简介:** 左仁广 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿产资源定量预测与评价的科研工作. E-mail: zrguang@cug.edu.cn

工作的需求,急需应用新的找矿思路及综合找矿方法开展该区的矿产资源预测与评价(福建省地质调查研究院,2010)。在该带开展基于地质过程的矿产资源定量预测与评价将为在福建进一步找寻马坑式铁多金属矿提供新的思路和重要的参考依据。

## 1 闽西南马坑式铁多金属成矿带

闽西南马坑式铁多金属成矿带位于闽西南拗陷中心地带,该带以出露大面积古生代地层及燕山期的中-酸性岩浆岩类为特点,为铁、铜、锌多金属矿的形成提供了较好的物质基础和成矿环境,极具寻找马坑式铁多金属矿的潜力(福建省地质调查研究院,2010)(图 1)。该带工作程度较高,已系统地开展了基础地质、矿床地质和矿产勘查与评价工作(福建省地质矿产局,1985;陶建华,1987;吴淦国等,2000;王果胜等,2009;林东燕,2011)。

长期以来,对马坑式铁多金属矿的成因没有统一认识,有人认为是海相火山沉积-热液改造矿床(陈述荣等,1982)、层控钙矽卡岩型(赵一鸣等,1983)、火山热液-沉积矿床(韩发和葛朝华,1983a)、海相火山沉积-热液改造型矿床(姜益丰,2007)、矽卡岩型构造控矿矿床(陈跃升,2010)、沉积-改造矿床(林东燕,2011)等。林东燕(2011)综合韩发和葛朝华(1983b)测定的石英磁铁矿 Rb-Sr 等时线年龄( $346 \pm 68$  Ma)和角闪石磁铁矿年龄( $334$  Ma)、王登红等(2010)测定的马坑铁矿含铂铁

矿石中辉钼矿的 Re-Os 年龄( $130.5 \pm 0.9$  Ma)以及毛建仁等(2006)测定的莒舟岩体单颗粒锆石 U-Pb 年龄( $136.0$  Ma 和  $133.9$  Ma),认为马坑铁矿床主矿体沉积成矿时代为海西期,岩浆侵位和热液叠加改造为燕山期。

在“全国矿产潜力评价项目”中,福建省地质调查研究院把福建省的铁矿预测工作划分出马坑式广义矽卡岩型(沉积-改造型,典型矿床为马坑铁矿)与汤泉式接触交代型(典型矿床为汤泉铁矿)2种矿产预测类型。马坑式广义矽卡岩型铁矿在古生代为沉积成矿,燕山期为后期热液叠加改造成矿,成矿与北东向的褶皱、断裂构造、石炭纪-二叠纪含铁碎屑岩建造、碳酸盐岩建造及燕山期的岩浆侵入有关,矿体主要赋存于石炭纪和二叠纪地层中。汤泉式矽卡岩型铁矿为典型的接触交代型,成矿与北东向断裂构造、石炭-二叠纪碳酸盐岩建造、燕山期的岩浆侵入有关,矿体主要赋存于石炭纪和二叠纪地层中(福建省地质调查研究院,2010)。

根据赵一鸣等(1983)分析的典型铁矿的资料,把主要氧化物数据投到  $TiO_2-Al_2O_3-MgO$  三角图和  $Ti-V-Ca-Al-Mg$  图中,发现闽西南典型的铁多金属矿大多落在沉积变质-接触交代区(图 2a)和矽卡岩区(图 2b, Dupuis and Beaudoin, 2011),且矿区内矽卡岩化现象普遍可见(陈跃升,2002),可推测闽西南铁多金属矿床为矽卡岩型。张承帅等(2012)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法测得莒舟花岗岩年龄为  $129.6 \pm 0.8$  Ma,利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法测得大洋花岗岩年龄为  $132.6 \pm 1.3$  Ma,与马坑铁矿辉钼矿 Re-Os 年龄( $130 \sim 133$  Ma)一致,成岩成矿的一致性有力地支持了马坑铁矿属于矽卡岩型矿床的认识。这些矿床与燕山期的岩浆侵入、石炭纪-二叠纪碳酸盐岩建造和北东向构造有关。

## 2 基于地质过程的矿产资源定量预测与评价

矿产资源定量预测与评价一直是国内外数学地球科学研究的前沿问题,也是目前我国正在实施的全国矿产资源潜力评价等重大科学工程的重要内容。自 1978 年国际地球科学联合会推荐 6 种矿产资源定量预测方法(Cargill and Clark, 1978)以来,大量的数学方法和模型被引入到矿产资源定量预测与评价中,这些方法可分为基于地质特征和基于成矿

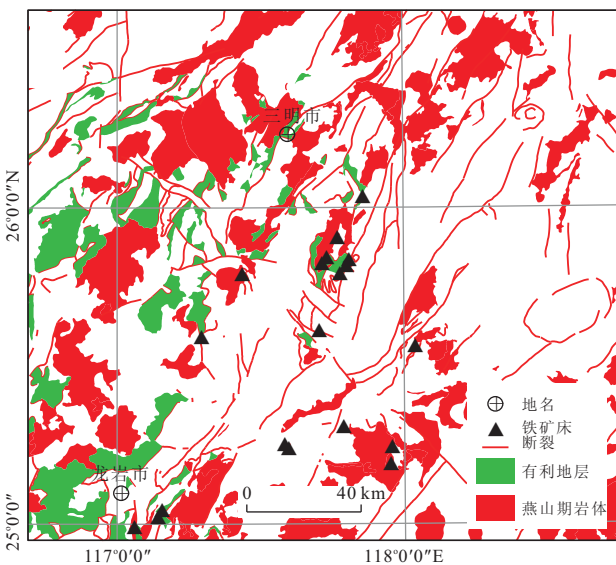


图 1 研究区地质(根据福建省 1:20 万区域地质图修编,2010)

Fig. 1 Simplified geological condition of study area

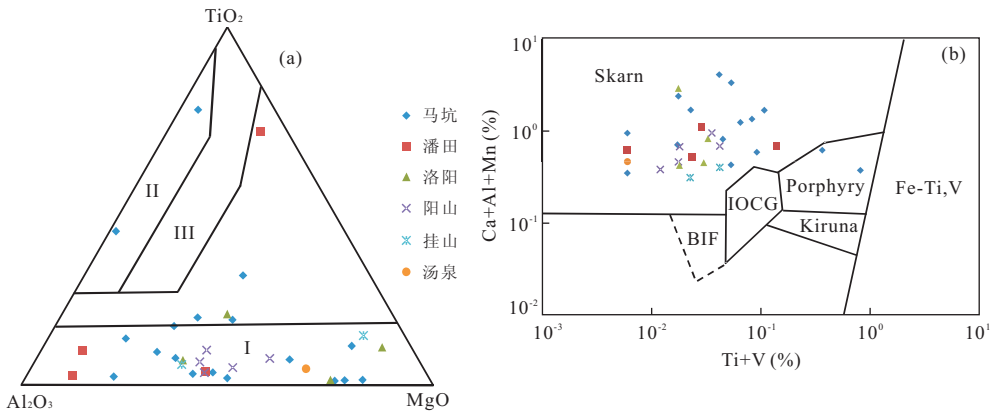


图 2 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO(a)和 Ti-V-Ca-Al-Mn 图解(b)(图 2 数据据赵一鸣等,1983;图 2a 底图据陈光远,1978;图 2b 底图据 Dupuis and Beaudoin,2011)

Fig. 2 Ternary plots of TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO (a) and Ti-V-Ca-Al-Mn (b)

I. 沉积变质-接触交代区;II. 超基性-基性-中性岩浆区;III. 酸性-碱性岩浆区;BIF. 条带状铁矿;IOCG. 铁氧化型铜金矿床;Skarn. 矽卡岩;Porphyry. 斑岩型;Kiruna. 基鲁纳

过程的矿产预测与评价方法两大类。

基于地质特征的矿产资源预测与评价方法是在成矿规律和成矿模式研究的基础上,提取能够指示矿床存在的地质特征(地层、岩浆岩、古地理、构造、地球化学异常、地球物理异常、遥感异常、重砂异常等),根据统计方法或地质经验研究矿床(点)与地质特征间的空间关系并对地质特征进行赋值,利用数学模型对地质特征进行综合,计算找矿有利度图(或概率图),进而圈定预测远景区(Agterberg, 1989, 2011; Bonham-Carter, 1994; Cheng and Agterberg, 1999; Carranza, 2008; Cheng, 2012)。

基于地质过程的矿产资源预测与评价方法是新近发展并逐渐被地质学家使用的方法,它强调矿床的形成与保存是诸多地质因素共同作用的结果,没有这些地质因素在时间和空间上的相互耦合,矿床将不能形成和保存下来。这些过程包括:(1)能量梯度的产生;(2)热液流体的生成;(3)成矿物质的萃取;(4)成矿物质的运移;(5)成矿物质的沉淀;(6)矿床的后期保存(Magoon and Dow, 1994; Wyborn *et al.*, 1994; Knox-Robinson and Groves, 1997; Lord *et al.*, 2001; Kreuzer *et al.*, 2008; McCuaig *et al.*, 2010; Porwal and Kreuzer, 2010; 赵鹏大和陈永清, 2011)。基于地质过程的矿产资源预测与评价方法包括 4 个步骤:(1)认清矿床形成和保存的关键地质过程;(2)查清可能触发上述关键地质因素的各种原因;(3)发掘在地质上能证实这些过程发生的证据;(4)通过直接或间接的方法提取地质变量来表达这些证据(McCuaig *et al.*, 2010)。例如,对一个

剪切带金矿成矿系统而言,一个关键的地质过程是金的沉淀过程。有 3 个次级地质过程可能导致金的沉淀:(1)流体的混合;(2)流体与围岩相互作用;(3)物理化学条件的改变。只要上述 3 个地质过程发生一个,金就可能沉淀。然而,地质上很难直接表达这些地质过程,只能通过找寻地质证据来证明该地质过程是否发生过。例如,对于由于流体和围岩发生水岩作用而形成的金矿,就可通过寻找水岩作用发生的证据来佐证该地质过程的发生,包括:(1)铁的矿化蚀变(如果水岩作用发生过,围岩中的铁会结合流体中的硫形成铁的硫化物,导致流体中硫的含量降低,从而降低流体中金的溶解度,导致金的沉淀);(2)特征矿化蚀变(水岩相互作用的结果将产生特征蚀变(如碳酸盐化和钾化),它有别于区域变质作用产生的矿物组合);(3)地球化学梯度带(水岩相互作用将产生地球化学梯度带,可通过矿物分带,岩石地球化学或光谱分析识别)(McCuaig *et al.*, 2010)。通过地质解释或地球物理推断等方法来表达这些地质证据,并评价这些地质过程发生的概率,进而圈定预测远景区。

### 3 闽西南铁多金属矿产资源定量预测与评价

基于地质过程矿产资源定量预测与评价方法强调深入研究矿床形成和保存的关键地质过程(产生能量梯度、生成热液流体、萃取成矿物质、成矿物质的迁移、成矿物质的沉淀及矿床的后期保存),以探

测这些地质过程发生过的地质证据为目标,以评价地质过程发生的概率为依据圈定预测远景区,并假定成矿概率  $P_{\text{Mineralization}}$  是  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  和  $P_6$  等关键地质过程的函数:

$$P_{\text{Mineralization}} = f(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6), \quad (1)$$

式中:  $P_1$  为热源,  $P_2$  为成矿物质和流体来源,  $P_3$  为流体通道,  $P_4$  为圈闭,  $P_5$  为矿质沉淀场所,  $P_6$  为后期保存条件.  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  和  $P_6$  的赋值区间为  $[0, 1]$ , 可根据地质经验或基于 GIS 统计的这些地质证据和已知矿床的空间关系进行赋值.

$P_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6) = 0$ , 代表该地质过程完全没有发生;

$P_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6) = 1$ , 代表该地质过程已发生;

$P_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6) = 0.5$ , 代表不能确定该地质过程是否发生过, 或信息不充分或缺失.

$P_{\text{Mineralization}} = 1$ , 代表该区域与已知的成矿模型完全相符, 极有可能发现新的矿床;

$P_{\text{Mineralization}} = 0$ , 代表该区域内某个或多个关键地质过程缺失, 在该区发现新矿床的概率为 0, 基本上不可能发现新的矿床.

## 4 结果

图 3 显示了闽西南铁多金属成矿带铁的成矿模

式: 燕山期的岩浆活动提供了热源、流体来源及部分的铁质来源, 流体沿着北东向断裂向上运移, 在岩体与石炭一二叠纪碳酸盐岩地层的接触面及石炭一二叠纪地层内部发生了热液交代作用, 形成了矽卡岩化、钾长石化、钠长石化、绿帘-绿泥石化等围岩蚀变. 铁主要来源于石炭一二叠纪碳酸盐岩建造, 后期燕山期岩浆的侵入, 使得铁进一步富集, 并在石炭一二叠纪地层中沉淀成矿. 由于数据水平的影响, 该研究重点关注源 ( $P_1$ )、流体通道 ( $P_3$ ) 和矿质沉淀场所 ( $P_5$ ), 而圈闭 ( $P_4$ ) 和后期保存条件 ( $P_6$ ) 目前暂难以准确评价, 但从研究区广泛发育铁多金属矿床(点)的现象推断, 可初步认为这 2 个条件都是有利于铁多金属成矿和保存的, 其值设置为 1, 即在预测评价中不用单独考虑了.

(1) 源  $P_1$ . 研究区广泛出露燕山期的中-酸性岩浆岩类, 为铁多金属成矿提供了充足的热源、流体来源和部分的铁质来源. 根据地球化学常量元素、重力和航磁等信息可推断研究区内岩体 ( $P_{11-Granites}$ ) 的分布(图 4a), 赋值如下:

$P_{11-Granites} = 0.7$ , 出露的燕山期岩体;

$P_{11-Granites} = 0.5$ , 在已出露岩体周边 4 km 以内推断的岩体;

$P_{11-Granites} = 0.3$ , 推断的岩体不在已出露岩体的周边.

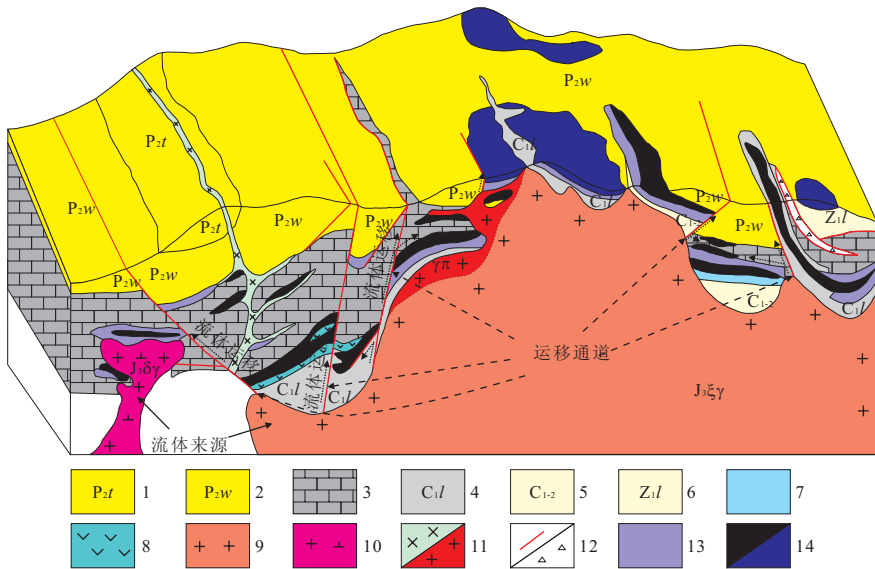


图 3 矽卡岩型矿床模型(据福建省地质调查研究院, 2010 修改)

Fig. 3 Skarn-type Fe mineral deposit model

1. 童子岩组细碎屑岩; 2. 文笔山组泥质粉砂岩; 3. 经畲组一栖霞组灰岩(大理岩); 4. 林地组砂砾岩; 5. 中下石炭统片岩(变质粉砂岩); 6. 楼子坝组石英云母片岩; 7. 中酸性火山碎屑岩; 8. 安山玄武岩; 9. 燕山期花岗岩; 10. 燕山期花岗闪长岩; 11. 辉绿岩/花岗斑岩; 12. 断层及破碎带; 13. 矽卡岩; 14. 原生铁矿、风化铁矿

石炭—二叠纪碳酸盐岩建造( $P_{12-Formation}$ )提供了主要的铁质来源,赋值如下:

- $P_{12-Formation} = 1.0$ , C-P 碳酸盐地层;
- $P_{12-Formation} = 0.1$ , 其他地层.

(2)流体通道  $P_3$ . 研究区发育 NNE 向的构造和 N-W 向构造,为铁多金属成矿提供了流体通道. 先对断裂构造做 10 环的缓冲区,环距为 1 km(图 4b),再根据断裂缓冲区与已知铁矿的空间关系,对断裂缓冲区( $P_{31-Faults}$ )赋值如下:

- $P_{31-Faults} = 0.8$ , 缓冲区距离  $\leq 2$  km;
- $P_{31-Faults} = 0.6$ ,  $2 \text{ km} < \text{缓冲区距离} \leq 6$  km;
- $P_{31-Faults} = 0.5$ ,  $6 \text{ km} < \text{缓冲区距离} \leq 10$  km;
- $P_{31-Faults} = 0.3$ , 缓冲区距离  $> 10$  km.

利用重力梯度带解译的断裂构造

( $P_{32-Inferred faults}$ ),赋值如下:

- $P_{32-Inferred faults} = 0.8$ , 高重力异常;
- $P_{32-Inferred faults} = 0.6$ , 中等重力异常;
- $P_{32-Inferred faults} = 0.3$ , 低重力异常.

(3)矿质沉淀场所  $P_5$ . 断裂的交汇处往往发育多金属矿,是有利的赋矿部位. 对断裂交汇点做 10 环的缓冲区,环距为 1 km(图 4c),根据断裂交汇点缓冲区与已知铁矿的空间关系,对断裂交汇点缓冲区( $P_{51-Fault intersections}$ )赋值如下:

- $P_{51-Fault intersections} = 0.8$ , 缓冲区距离  $\leq 2$  km;
- $P_{51-Fault intersections} = 0.7$ ,  $2 \text{ km} < \text{缓冲区距离} \leq 6$  km;
- $P_{51-Fault intersections} = 0.5$ ,  $6 \text{ km} < \text{缓冲区距离} \leq 10$  km;
- $P_{51-Fault intersections} = 0.2$ , 缓冲区距离  $> 10$  km.

岩体与碳酸盐接触处也是有利的赋矿部位. 对

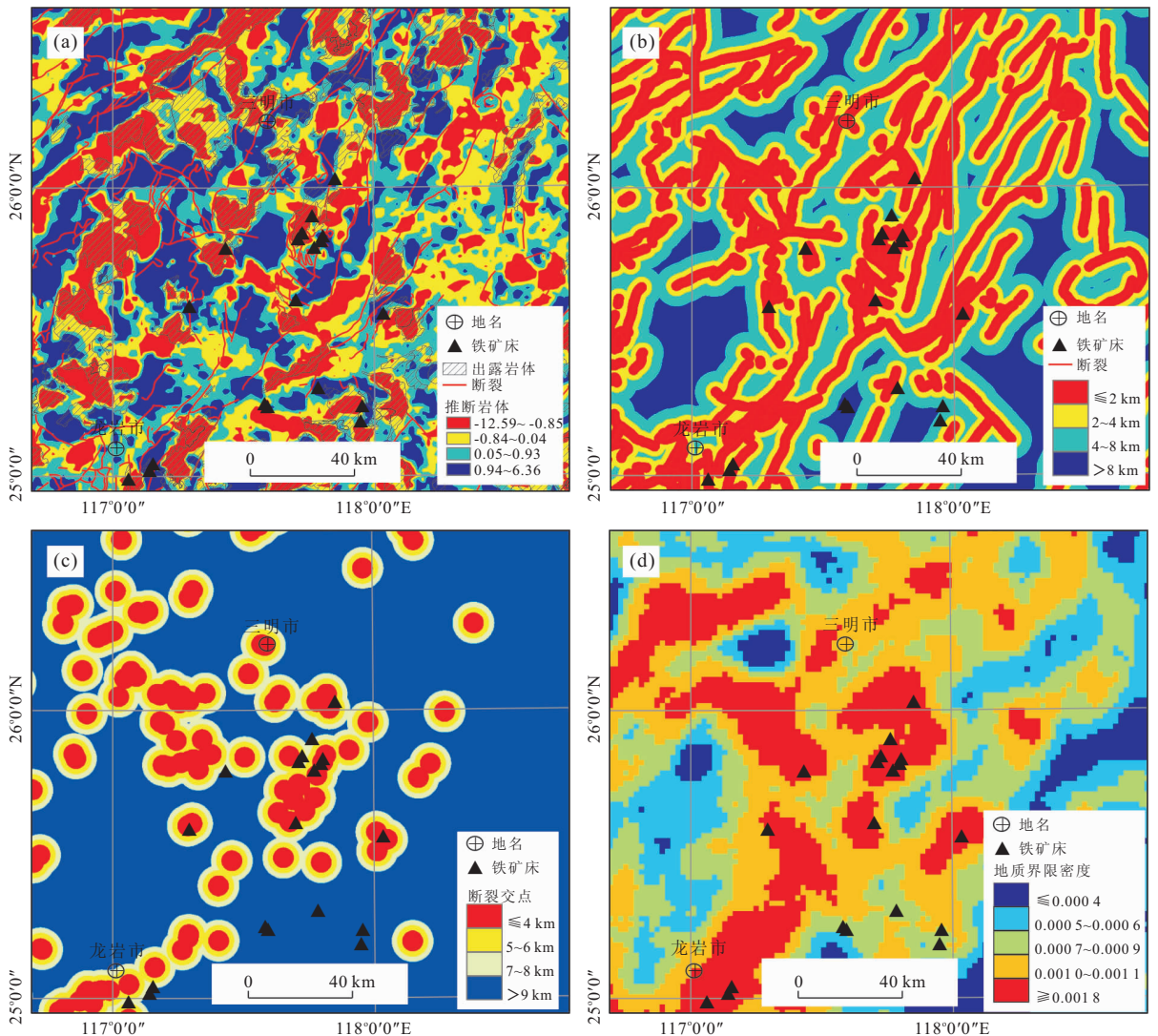


图 4 地质证据:(a)推断岩体;(b)断裂缓冲区;(c)断裂交点;(d)地质界限密度

Fig. 4 Geological Evidences for inferred granites (a), buffered faults (b), fault intersections (c) and density of geological contact (d)

地质界限做 10 环的缓冲区,环距为 1 km(图 4d),根据地质界限缓冲区与已知铁矿的空间关系,对地质界限缓冲区( $P_{52}$ -Formation contact)赋值如下:

- $P_{52}$ -Formation contact = 0.8,缓冲区距离 ≤ 2 km;
- $P_{52}$ -Formation contact = 0.7, 2 km < 缓冲区距离 ≤ 6 km;
- $P_{52}$ -Formation contact = 0.5, 6 km < 缓冲区距离 ≤ 10 km;
- $P_{52}$ -Formation contact = 0.2,缓冲区距离 > 10 km.

矽卡岩型铁多金属矿主要赋存在古生代地层( $P_{53}$ -Formation)中,赋值如下:

- $P_{53}$ -Formation = 1.0, C-P 碳酸盐地层;
- $P_{53}$ -Formation = 0.1, 其他地层.

铁多金属在区域上表现为 Fe、Cu、Pb、Zn 和 Mn 的综合异常( $P_{54}$ -Geochemical anomaly),赋值如下:

- $P_{54}$ -Geochemical anomaly = 1.0, 高的 Fe、Cu、Pb、Zn 和 Mn 组合异常;
- $P_{54}$ -Geochemical anomaly = 0.7, 中等的 Fe、Cu、Pb、Zn 和 Mn 组合异常;
- $P_{54}$ -Geochemical anomaly = 0.1, 低的 Fe、Cu、Pb、Zn 和 Mn 组合异常.

铁矿在区域上表现为航磁异常高,赋值如下:

- $P_{55}$ -Magnetic anomaly = 1.0, 高的航磁异常;
- $P_{55}$ -Magnetic anomaly = 0.7, 中等的航磁异常;
- $P_{55}$ -Magnetic anomaly = 0.1, 低的航磁异常.

图 5 为预测模型,利用公式 2 的“模糊或”算法综合  $P_1, P_3$  和  $P_5$ , 得到:

$$P_5 = Fuzzy\ or\ \{P_{51}, P_{52}, P_{53}, P_{54}, P_{55}\} = \max\{P_{51}, P_{52}, P_{53}, P_{54}, P_{55}\}, \quad (2)$$

利用公式(3)的“模糊  $\gamma$  算法”(Fuzzy  $\gamma$ ) 综合  $P_1, P_3$  和  $P_5$ , 得到:

$$P_{mineralization} = Fuzzy\ \gamma\ \{P_1, P_3, P_5\} = \left(\prod_{i=1}^n p_i\right)^{1-\gamma} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)\right), \quad (0 < \gamma < 1). \quad (3)$$

图 6 显示  $\gamma=0.9$  的预测结果,可以看出 80% 的已知铁多金属矿床都落在较高的有利成矿度区域,说明基于地质过程的矿产资源定量预测与评价方法可行.由于数据精度和覆盖层的影响,某些区域的关键地质过程发生的地质证据提取有些困难,致使几个已知矿床不在预测远景区内.

### 5 结论

矿产资源定量预测与评价的研究内容涉及矿产资源形成背景、成矿环境、成矿过程和时空分布规律

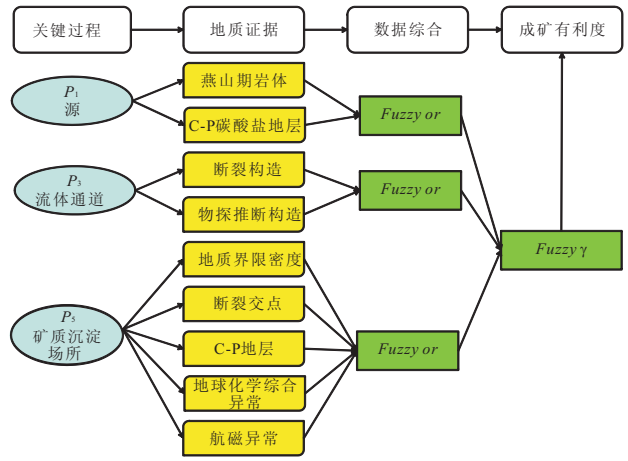


图 5 基于关键地质过程的数据综合模型  
Fig. 5 Integrated model based on critical geological processes

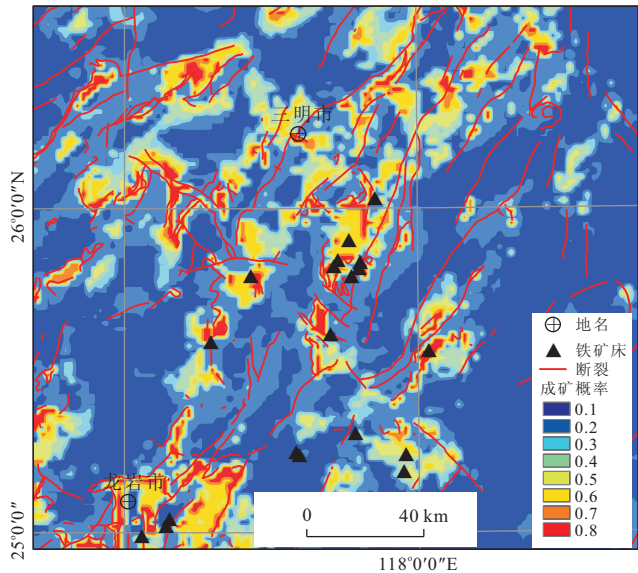


图 6 成矿有利度

Fig. 6 The fuzzy prospectivity for skarn Fe polymetallic deposits

等基础性问题,也涉及到矿产勘查与评价的相关理论、方法和技术问题.基于地质过程的矿产资源定量预测与评价方法强调研究矿床形成和保存的关键地质过程,以探测关键地质过程发生的证据为出发点,使得提取的变量具有明确的地质内涵,同时提高了矿产预测与评价的合理性,其结果更易解释.该方法直观、简单,它从控制矿床能否形成的关键地质过程出发圈定预测远景区并对预测远景区进行排序,能很快将新的找矿信息融入到该方法中,适于非专业人员和野外现场操作,同样适于覆盖区矿产预测与评价,并可圈定不同成矿概率下的预测远景区(Porwal and Kreuzer, 2010).此外,不同类型的矿床可能成矿过程类似,因此,该方法可发现新类型的矿床

(McCuaig *et al.*, 2010; Porwal and Kreuzer, 2010). 本文提出的预测模型同样适用于产于石炭—二叠纪碳酸盐岩地层中与燕山期岩体有关的矿床,因此在具有高概率的预测远景区内,不仅要关注找铁,也要注意找热液型 Cu、Pb 和 Zn 矿床。

致谢:感谢福建省地质调查研究院提供了部分地质资料。福建省地质调查研究院周珍琦院长,陈润生总工,黄昌旗主任、刘诗光主任、陈兴高所长,吴伯兴高工、福建马坑矿业王华峰副总经理,任浩高工、刘武刚高工等,以及闽西南地质八队罗锦昌总工等给予了大量帮助,博士生张振杰帮助绘制了部分图件,在此一并表示感谢。

## References

- Agterberg, F. P., 1989. Computer programs for mineral exploration. *Science*, 245(4913): 76—81. doi:10.1126/science.245.4913.76
- Agterberg, F. P., 2011. A modified weights-of-evidence method for regional mineral resource estimation. *Natural Resources Research*, 20(2): 95—101. doi:10.1007/s11053-011-9138-0
- Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Pergamon, Ontario, 398.
- Cargill, S. M., Clark, A. L., 1978. Report on the activity of IGCP Project 98. *Mathematical Geology*, 10(5): 411—417. doi:10.1007/BF02461973
- Carranza, E. J. M., 2008. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Elsevier Science, Amsterdam.
- Chen, G. Y., 1978. Genetic and Prospecting Mineralogy. Chongqing Publishing House, Chongqing (in Chinese).
- Chen, S. R., Xie, J. H., Xu, C. N., et al., 1982. Discussion of the relationship between volcanic rock and the origin of iron in Makeng deposit. *Geological Science and Technology Information*, (S1): 69—72 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. S., 2002. New knowledge of the information cause of ore deposit during the exploitation process of Makeng iron mine. *Metal Mine*, 11: 50—59 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. S., 2010. New understanding of ore control structure feature of Fujian Makeng iron mine. *Metal Mine*, 2: 96—99, 144 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q., 2012. Multiplicative cascade processes and information integration for predictive mapping. *Nonlinear Processes Geophysics*, 19(1): 57—68. doi:10.5194/npg-19-57-2012
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., 1999. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 8(1): 27—35. doi:10.1023/A:1021677510649
- Dupuis, C., Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Miner Deposita*, 46(4): 319—335. doi:10.1007/s00126-011-0334-y
- Fujian Bureau of Geology and Mineral Resources, 1985. Regional geology of Fujian. Geological Press, Beijing (in Chinese).
- Geological Survey Institute of Fujian, 2010. The report of iron potential evaluation, 148 (in Chinese).
- Han, F., Ge, C. H., 1983a. Geological and geochemical features of submarine volcanic hydrothermal-sedimentary mineralization of Makeng iron deposit, Fujian Province. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, 2: 60—87 (in Chinese).
- Han, F., Ge, C. H., 1983b. Makeng iron deposit: a submarine volcanic hydrothermal sedimentary deposit. *Science in China (Ser. B)*, 5: 438—455 (in Chinese).
- Jiang, Y. F., 2007. Discussion the genesis of the middle section of Makeng iron ore deposit. *Express Information of Mining Industry*, 7: 69—77 (in Chinese).
- Knox-Robinson, C. M., Groves, D. I., 1997. Gold prospectivity mapping using a geographic information system (GIS) with examples from the Yilgarn Block of Western Australia. *Chron. Rech. Min.*, 529: 127—138.
- Kreuzer, O. P., Etheridge, M. A., Guj, P., et al., 2008. Linking mineral deposit models to quantitative risk analysis and decision-making in exploration. *Economic Geology*, 103(4): 829—850. doi:10.2113/gsecongeo.103.4.829
- Lin, D. Y., 2011. Research on Late Paleozoic-Triassic tectonic evolution and metallogenetic regularities of iron-poly-metallic deposits in the southwestern Fujian Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Lord, D., Etheridge, M., Willson, M., et al., 2001. Measuring exploration success: an alternative to the discovery-cost-per-ounce method of quantifying exploration effectiveness. *SEG Newsletter*, 45: 1—16.
- Magoon, L. B., Dow, W. G., 1994. The petroleum system. In: Magoon, L. B., Dow, W. G., eds., *The petroleum system; from source to trap*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 60: 3—24.
- Mao, J. R., Chen, R., Li, J. Y., et al., 2006. Geochronology and geochemical characteristics of Late Mesozoic gra-

- notic rocks from southwestern Fujian and their tectonic evolution, *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1723—1734 (in Chinese with English abstract).
- McCuaig, T. C., Beresford, S., Hronsky, J., 2010. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system. *Ore Geology Reviews*, 38(3): 128—138. doi: 10.1016/j.oregeorev.2010.05.008
- Porwal, A. K., Kreuzer, O. P., 2010. Introduction to the special issue: mineral prospectivity analysis and quantitative resource estimation. *Ore Geology Reviews*, 38(3): 121—127. doi: 10.1016/j.oregeorev.2010.06.002
- Tao, J. H., 1987. An overthrust tectonic in southwest Fujian and its mechanism of formation. *Geology of Fujian*, 6(4): 249—270 (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, G. S., Ma, W. P., Zhu, W. P., 2009. The Late Paleozoic-Early Triassic sedimentary characteristics and its tectonic significance in southwestern Fujian, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(1): 87—91 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. G., Zhang, D., Chen, B. L., et al., 2000. Transformation of Mesozoic tectonic domain and its relation to mineralization in southeastern China: an evidence of southwestern Fujian Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 390—396 (in Chinese with English abstract).
- Wyborn, L. A. I., Heinrich, C. A., Jaques, A. L., 1994. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. In: Hallenstein, P. C., ed., *Australian mining looks north—the challenges and choices*. Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, Darwin, 5: 109—115.
- Zhang, C. S., Su, H. M., Yu, M., et al., 2012. Zircon U-Pb age and Nd-Sr-Pb isotopic characteristics of Dayang-Juzhou granite in Longyan, Fujian Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 225—242 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Chen, Y. Q., 2011. Theories and approaches on scientific targeting at mineral deposits. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 181—188 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. M., Tan, H. J., Xu, Z. N., et al., 1983. The calcic-skarn iron ore deposit of Makeng type in southwestern Fujian. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1: 1—141 (in Chinese with English abstract).

### 附中参考文献

- 陈光远, 1978. 成因矿物学与找矿矿物学. 重庆: 重庆出版社.
- 陈述荣, 谢家亨, 许超南, 等, 1982. 马坑铁矿区火山岩与铁矿原始铁质来源关系的初步探讨. 地质科技情报, (S1): 69—72.
- 陈跃升, 2002. 马坑铁矿开发过程中对矿床成因的新认识. 金属矿山, 11: 50—59.
- 陈跃升, 2010. 对福建马坑铁矿床控矿构造特征的新认识. 金属矿山, 2: 96—99, 144.
- 福建省地质矿产局, 1985. 福建省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 福建省地质调查研究院, 2010. 福建省铁矿资源潜力评价成果报告, 148.
- 韩发, 葛朝华, 1983a. 福建马坑铁矿床海底火山热液—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: 60—87.
- 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—455.
- 姜益丰, 2007. 马坑铁矿中矿段矿床成因浅析. 矿业快报, 7: 69—77.
- 林东燕, 2011. 闽西南地区晚古生代—三叠纪构造演化与铁多金属矿成矿规律研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 毛建仁, 陈荣, 李寄岬, 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.
- 陶建华, 1987. 闽西南地区东部逆冲推覆构造及其形成机制. 福建地质, 6(4): 249—270.
- 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.
- 王果胜, 马文璞, 朱卫平, 2009. 闽西南晚古生代—早三叠世沉积特征及其大地构造意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(1): 87—91.
- 吴淦国, 张达, 陈柏林, 等, 2000. 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. 地球科学——中国地质大学学报, 25(4): 390—396.
- 张承帅, 苏慧敏, 于森, 等, 2012. 福建龙岩大洋—莒舟花岗岩岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 28(1): 225—242.
- 赵鹏大, 陈永清, 2011. 科学选靶的理论与方法. 地球科学——中国地质大学学报, 36(2): 181—188.
- 赵一鸣, 谭惠静, 许振南, 等, 1983. 闽西南地区马坑式钙矽卡岩型铁矿床. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1: 1—141.