

闽西南马坑式铁矿成矿结构面特征及找矿意义

王森^{1,2,3}, 张达¹, 吴淦国¹, 易锦俊¹, 李兴俭¹,
宇腾达¹, 白昱¹, 高孝巧¹

(1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国地质调查局北京探矿工程研究所, 北京 100083;
3. 内蒙古矿业发展有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 马坑式铁矿位于闽西南晚古生代拗陷盆地内, 是福建省境内最主要的矽卡岩型铁-多金属矿床。矿体主要受岩性界面及构造结构面控制, 尤以硅钙面控矿作用显著。马坑式铁矿主矿体定位于林地组 (C_1l) 石英砂岩与经畲—栖霞组 (C_2j-P_2q) 碳酸盐岩的岩性界面 (硅钙面)。通过对马坑式铁矿硅钙面的基本特征进行分析, 划分了五类主要的成矿结构面类型: 林地组与经畲组—栖霞组、经畲组—栖霞组与文笔山组、经畲—栖霞组内部碎屑岩与灰岩、经畲组—栖霞组与花岗岩类以及推覆 (滑脱) 界面。研究认为马坑式铁矿主矿体受不同的物理化学岩性界面 (硅钙面) 控制, 这种界面在构造活动及流体参与过程中容易形成扩容空间, 构成成矿地球化学障, 有利于成矿物质的沉淀富集。在以上认识基础上, 建立了以硅钙面为主要成矿作用标志的马坑式铁矿成矿模式, 认为运用硅钙面控矿理论指导闽西南地区找矿预测的具有重要的找矿指导意义。

关键词: 马坑式铁矿; 成矿结构面; 硅钙面; 闽西南

中图分类号: P611

文献标识码: A

METALLOGENIC STRUCTURAL PLANE CHARACTERISTICS AND ITS PROSPECTING IMPORTANCE FOR THE MAKENG TYPE IRON DEPOSITS IN SOUTHWESTERN FUJIAN PROVINCE

WANG Sen^{1,2,3}, ZHANG Da¹, WU Ganguo¹, YI Jinjun¹, LI Xingjian¹, YU Tengda¹,
BAI Yu¹, GAO Xiaoqiao¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. Beijing Institute of Exploration Engineering, China Geological Survey, Beijing 100083, China;
3. Inner Mongolia Mining Development Limited Liability Company, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: Located in the Late Paleozoic depression of southwestern Fujian, the Makeng type iron deposits are the main skarn iron polymetallic deposits. The major ore bodies are generally controlled by lithologic boundaries and tectonic structural planes, especially the interface between silica and calcareous bed, and they are located above the quartz sandstone of the Lower Carboniferous Lindi formation (C_1l) and below the carbonate rocks of the Upper Carboniferous Jingshe formation-Upper Permian Qixia formation (C_2j-P_2q). In order to reveal the genesis and mineralization mechanism of the Makeng type

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120114028701, 12120113089600, 1212011085472)

作者简介: 王森 (1986-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业。E-mail: wangsen_cug@163.com

通讯作者: 张达 (1967-), 男, 教授, 主要从事构造地质学与区域成矿规律研究。E-mail: zhangda@cugb.edu.cn

收稿日期: 2017-07-28; 修回日期: 2018-02-27

范二平编辑

iron deposits, the Si/Ca surface ore-controlling theory was used to discuss the metallogenic structural plane characteristics and its ore-controlling mechanism. Five types of metallogenic interfaces were divided according to their features in this research. We deemed that the main ore bodies of Makeng type iron deposits were controlled by the physical and chemical differences between these Ca/Si surfaces, and it is easy to form expansion space and geochemical barrier near the surfaces in the process of tectonic and fluidic activities. Based on the understanding above, the metallogenic model of the Makeng type iron deposits was built using the Si/Ca surface ore-controlling theory. This work is thought to be meaningful to conduct prospecting research of iron polymetallic deposits in southwestern Fujian Province.

Key words: Makeng type iron deposit; metallogenic structural plane; Si/Ca surface; southwestern Fujian

0 引言

闽西南地区位于华南大陆东南缘,是环西太平洋构造—岩浆—成矿带的重要组成部分。区内矿产资源丰富,矿床成因类型多样,以浅成低温热液型—斑岩型“紫金山式”铜金矿和层控矽卡岩型“马坑式”铁-多金属矿为特色。其中“马坑式”铁矿是指赋存于闽西南永梅坳陷带东侧大田—龙岩复式向斜内的大中型铁矿,层位上多位于上石炭统经畚组—下二叠统栖霞组碳酸盐岩之下,下石炭统林地组碎屑岩之上,以层状、似层状为特征,主要有马坑、潘田、洛阳、阳山、银顶格等铁矿,尤以马坑铁矿最为典型,故称为马坑式铁矿^[1-4]。自20世纪60年代马坑铁矿被发现以来,矿床成因问题一直存在争议,控制闽西南地区马坑式铁矿集中形成的关键因素尚无定论。目前对马坑式铁矿成矿作用的研究主要集中在矿床成因、成矿时代、成矿岩体及成矿物质来源等方面^[5-11],对成矿结构面的研究相对薄弱。根据叶天竺^[12]的定义,成矿结构面是指成矿作用过程中赋存矿体的显性或隐性存在的岩石物理化学性质不连续面。研究发现,该类矽卡岩型铁-多金属矿床受岩相/岩性界面、构造面及物理化学界面组成的成矿结构面控制,成矿结构面发育地段往往是富厚矿体的赋存部位。

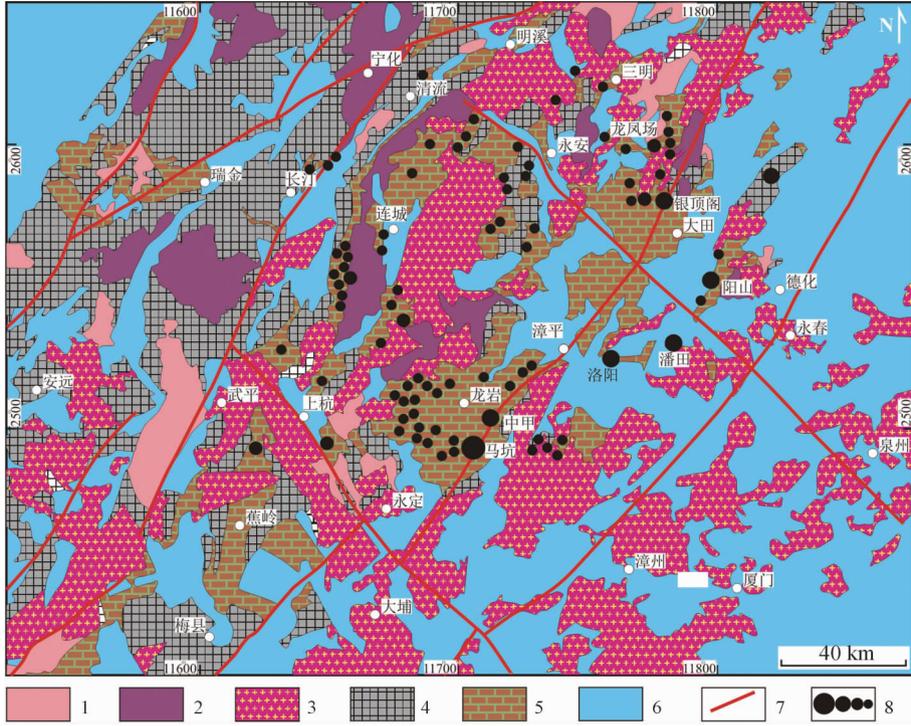
有关岩性界面控矿作用已有学者进行了探索性研究,认为成矿作用与岩性界面的空间关系密切,并且界面中应力、物理、化学条件差异是致矿的主要因素^[12-14]。随着研究的深入,一些学者提出了不同成矿作用体系中的硅钙界面控矿观点^[15-16]。所谓“硅钙面”是指碳酸盐岩类与碎屑岩类之间的界面,即碳酸盐岩与硅铝酸岩的岩性

界面,是一种重要的成矿地球化学障^[13, 15, 17-18]。硅钙面作为一种重要的成矿结构面,已经逐渐应用于铅锌等多金属找矿研究工作^[16, 19]。在对龙岩马坑—大田汤泉铁矿整装勘查区找矿预测专题研究中,发现马坑式铁矿受结构面控制作用显著,磁铁矿体多沿硅钙界面呈层状、似层状分布。目前对马坑式铁矿成矿结构面的研究比较薄弱,能否应用硅钙面控矿理论探讨马坑式铁矿的控矿因素有待进一步探讨。因此,通过对闽西南铁矿床成矿特征及矿体定位空间进行初步分析,探讨结构面控矿理论对闽西南地区铁多金属矿勘探具有重要意义,可为该区铁多金属矿找矿勘查工作提供指导依据。

1 地质背景

研究区位于华夏板块东南缘,东临太平洋板块,为环太平洋中生带构造—岩浆陆缘活动带的重要组成部分^[20]。区域上位于政和—大浦断裂以西,南平—宁化断裂带以南的晚古生代坳陷带。研究区除缺失志留系与下泥盆统外,其它地层均有发育,尤以晚古生代上泥盆世—早中生代地层为特色,主要为前泥盆系基底变质岩系,上古生界—中三叠系碳酸盐岩、沉积碎屑岩,以及中生系陆相碎屑—火山岩系(见图1)。其中,晚古生代晚泥盆纪—早、中三叠纪地层以浅海相、海陆交互相沉积为主,由老至新依次为上泥盆统一下石炭统(D_3-C_1)粗碎屑岩,上石炭统经畚组—二叠系栖霞组(C_2j-P_2q)灰岩、硅质岩,上二叠统文笔山组—中三叠统文宾山组(P_2w-T_2w)海陆交互相含煤细碎屑岩、浅海相含钙细碎屑岩。晚古生代岩相古地理具有震荡式变化特征,发育多个海陆交互的岩性分界面,尤以碎屑岩与碳

酸盐岩界面为主, 这种界面往往控制着闽西南地区铁多金属矿(化)体的分布。



1—前泥盆纪侵入岩; 2—海西-印支期侵入岩; 3—燕山期侵入岩; 4—基底岩系; 5—盖层岩系;
6—燕山期火山岩系; 7—主干断层; 8—铁矿床(矿点)

图1 闽西南区域地质图及马坑式铁矿床(矿化点)分布图

Fig. 1 Regional geological sketch and location of the Makeng type iron deposits (mineral occurrence) in southwestern Fujian Province

晚古生代以来, 闽西南地区经历了多期挤压—伸展构造演化阶段, 尤以中生代推覆(滑脱)构造为特色, 表现为由震旦系、下古生界及部分上泥盆统一下石炭统地层组成的外来岩系逆冲推覆到上石炭统一下三叠统溪口组及下侏罗统梨山组之上。区内构造变形复杂多样, 主要为不同性质及规模的断层与褶皱构造, 断层及褶皱主轴主要呈北东及北西向展布(见图1), 其次为近东西向, 少量为近南北向。该区普遍发育以北东向为主的区域性复式褶皱, 造成闽西南盆地内部出现局部隆起及凹陷, 自西向东主要有宣和复式向斜、胡坊—永定复式背斜及大田—龙岩复式向斜, 褶皱的核部为成矿作用提供了较好的储矿空间, 常形成厚大矿体。推覆(滑脱)构造控制着整个闽西南地区铁、铅、锌等多金属矿床的分布。推覆构造一方面导致上泥盆—下石炭系粗碎屑岩直接逆冲覆盖于晚石炭—上二叠统岩系之上, 另一方面导致晚石炭—上二叠统岩系地层相互重叠, 形成了多个碳酸盐岩与碎屑岩的岩性界面, 构成了

成矿有利条件。

研究区自加里东至喜马拉雅期均有强弱不同的岩浆活动, 以中生代酸性—中性侵入岩及火山岩为特色, 火山盆地和侵入岩体的形态展布受北东向构造控制特征显著。晚中生代酸性、中酸性侵入岩在闽西南地区广泛发育, 并且与该区铁、铅、锌等多金属矿关系密切。

闽西南地区矿产资源主要有浅成低温热液型斑岩型铜金矿, 层控矽卡岩型铁、铅、锌多金属矿, 斑岩型锡矿等, 以紫金山铜金矿床和马坑铁矿为代表。“马坑式”铁矿遍布整个闽西南地区, 主要有马坑、洛阳、阳山、潘田、洛阳等铁矿床。

2 成矿结构面特征

闽西南地区与矽卡岩相关的铁、铅、锌等多金属矿矿体多沿不同岩性的界面或者构造面呈层状、似层状产出, 结构面控矿特征显著。研究区广泛发育的中生代推覆及伸展滑脱构造形成了一

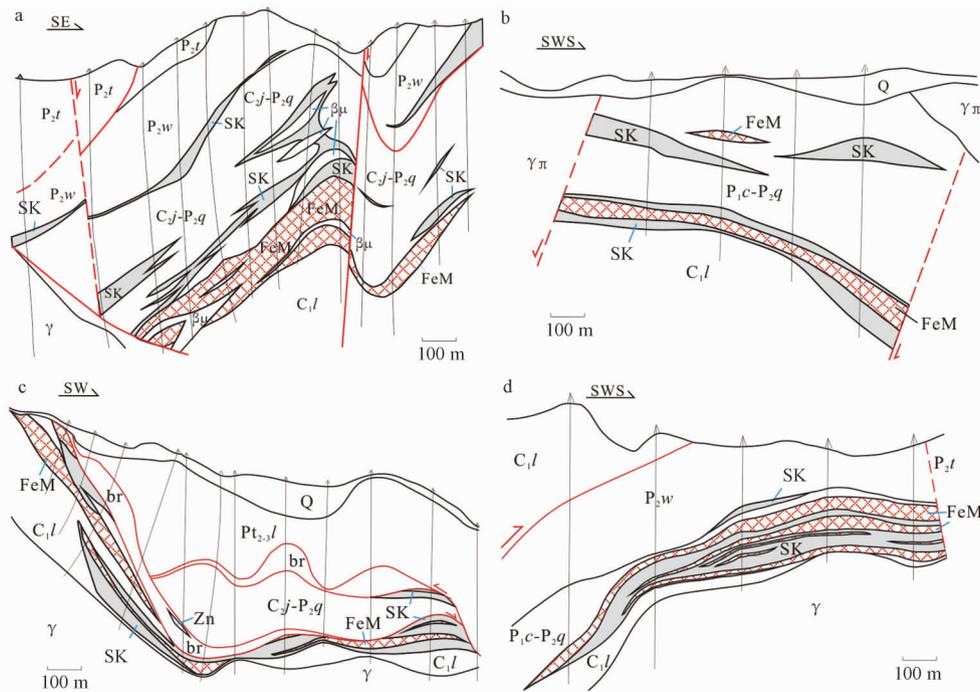
系列构造界面, 这些构造界面通常控制着区内铁-多金属矿床的分布。其中与推覆构造有关的构造界面主要有: 前泥盆纪基底地层与中上泥盆统一下石炭统之间 (AnD/D_3-C_1l)、上泥盆统一下石炭统与上石炭统一下二叠统栖霞组之间 (D_3-C_1l/C_2j-P_2q)、下二叠统栖霞组与其以上地层之间 (P_2q/P_2w-P_2q) 以及上二叠统童子岩组上下段之间 (P_2t^1/P_2t^3)。下石炭统林地组与上石炭统经畚组一下二叠统栖霞组 (C_1l/C_2j-P_2q) 之间的界面在区域上广泛存在, 并且控制着闽西南地区的主要铁-多金属矿床 (见图 2)。

2.1 马坑式铁矿床特征

(1) 马坑铁矿

马坑铁矿位于永梅晚古生代拗陷东部, 大田—龙岩复式向斜的南段。主矿体呈层状、似层状产于林地组 (C_1l) 与经畚组—栖霞组 (C_2j-P_2q) 界面的上侧, 矿体受层位及构造界面控制作用显著 (见图 2a)。小矿体多呈透镜体状赋存于上石炭统经畚组一下二叠统栖霞组内部及其与

上覆文笔山组地层接触界面附近。主矿体赋存于经畚组—栖霞组灰岩下部与林地组上部的构造破碎带, 易于产生层间破碎、虚脱, 为矿液的运移和容矿提供了有利空间^[21]。主矿体走向为北东向, 总体倾向北西, 与围岩产状较一致, 呈假整合接触, 并同步褶皱 (见图 2a)。矿体底板硅质石英砂岩为矿体的定位提供了较好的屏蔽层, 并且与矿体顶板碳酸盐岩共同构成岩石物理化学差异性界面, 在超临界流体作用下容易形成成矿地球化学障。马坑矿区地表矿化强烈, 发育多条褐铁矿化、矽卡岩矿化蚀变带, 矿化带主要沿林地组石英砂岩与上石炭统经畚组—上二叠统栖霞组 (C_2j-P_2q) 碳酸盐岩岩性界面分布, 少量沿碳酸盐岩与上覆文笔山组 (P_2w) 粉砂岩界面分布 (见图 3)。总体看来, 马坑铁矿主矿体定位于碳酸盐岩与石英砂岩的接触带附近, 明显受硅质与钙质岩性界面 (Si/Ca 面) 的控制, 其中小矿体多呈透镜状沿经畚组内部碳酸盐岩与细碎屑岩的接触界面分布。



Q—第四纪沉积物; P_2w —中二叠统文笔山组; P_2t —中二叠统童子岩组; P_2q —中二叠统栖霞组灰岩; P_1c —下二叠统船山组灰岩; C_2j —上石炭统经畚组灰岩; C_1l —下石炭统林地组石英砂岩; $Pt_{2.3l}$ —中上元古界马面山群龙北溪组; γ —花岗岩; $\gamma\pi$ —花岗斑岩; br —构造角砾岩; $\beta\mu$ —辉绿岩; SK—矽卡岩; FeM—磁铁矿; Zn—锌矿脉

a—马坑铁矿 61 线; b—洛阳铁矿南段 6 线; c—潘田铁矿 8 线; d—德化阳山铁矿 S72 线

图 2 马坑式铁矿床地质剖面图 (据文献 [22])

Fig. 2 Geological sections of Makeng type iron deposits (after [22])

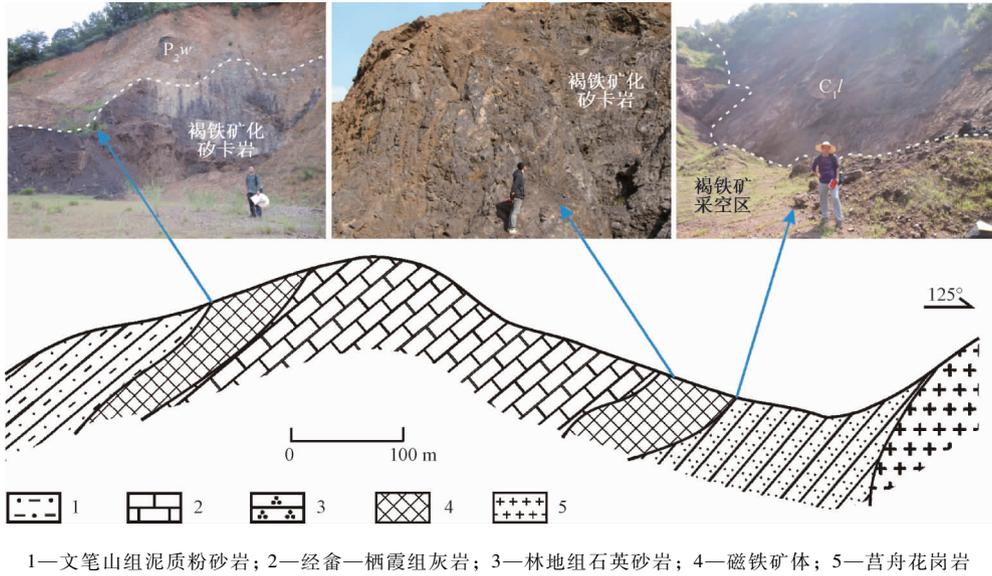


图 3 马坑矿区褐铁矿化砂卡岩带分布示意图

Fig. 3 Diagram of ferritization and skarnized alteration zoning in Makeng ore area

(2) 洛阳铁矿

洛阳铁矿处于龙岩东北部的漳平市境内, 与马坑铁矿同位于闽西南拗陷带的东缘, 是一个以中型铁矿为主, 伴(共)生锌、硫及小型铅矿床等矿产的综合性矿床, 属闽西南“马坑式”铁矿的重要组成矿床之一^[23]。矿体主要赋存于林地组(C₁l)碎屑岩与船山组一栖霞组(P₁c—P₂q)灰岩之间的层间破碎带, 以及花岗斑岩与上述碳酸盐岩的接触带附近(见图 2b), 多呈似层状、透镜状、豆荚状等。主矿体底板为林地组硅质石英砂岩及花岗斑岩, 成分上为硅铝酸盐, 与矿体顶板碳酸盐岩构成了 Si/Ca 岩性界面, 洛阳铁矿主矿体的定位受硅钙界面控制。

(3) 潘田铁矿

潘田铁矿床位于闽南安溪县西北部矿体赋存于北西走向的潘田背斜北东翼, 主矿体呈似层状赋存于林地组(C₁l)砂岩与经畚组一栖霞组(C₂j—P₂q)碳酸盐岩层间的构造面及其附近, 小矿体多呈透镜体状赋存于船山组一栖霞组大理岩及断层构造带附近(见图 2c)。硅钙岩性界面控制了主矿体的定位, 成矿机制与花岗岩结晶分异出的富含挥发分、携带大量铁等金属络合剂的超临界流体有关^[24]。

(4) 阳山铁矿

阳山铁矿位于德化县西南部, 闽西南拗陷带东北边缘, 主矿体及砂卡岩矿化带呈层状、似层状赋存于林地组(C₁l)砂岩与船山组一栖霞组

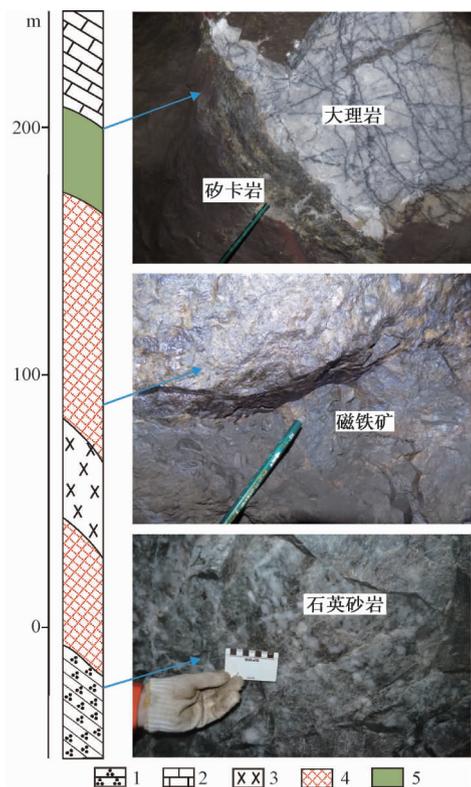
(P₁c—P₂q)碳酸盐岩之间(见图 2d)。小矿化体呈透镜体状分布于船山组一栖霞组大理岩与上覆文笔山组细碎屑岩界面附近。此外, 在花岗岩与碳酸盐岩的接触部位赋存一些小规模的矿化体。以上特征表明, 阳山铁矿矿化体受岩性界面控制作用明显, 主矿体定位于硅钙面附近, 与成矿关系密切的硅钙面主要为 C₁l 与 P₁c—P₂q 的界面, 其次为花岗岩与 P₁c—P₂q 的界面。

2.2 成矿结构面类型

通过对上述矿床特征分析总结, 可以看出闽西南马坑式铁矿并非受单一层位控制, 而是受一定的岩性—构造界面控制, 硅钙面控矿特征显著。归纳起来, 控制闽西南地区铁多金属矿床的结构面主要有以下几种。

(1) 林地组/经畚组—栖霞组界面: 闽西南地区铁-多金属矿最主要的成矿界面, 尤以马坑铁矿为特色, 矿体底板为林地组石英砂岩、砂砾岩, 顶板为经畚组—栖霞碳酸盐岩(见图 4)。马坑矿区主矿体与大洋—莒舟花岗岩体并未直接接触, 而是赋存于由底板石英砂岩和顶板大理岩组成的硅钙界面处。这种硅钙面控矿特征在马坑、洛阳、潘田、阳山等铁矿表现较为突出。此外, 这种典型的石英砂岩与碳酸盐岩的界面往往控制着闽西南地区铜铅锌等多金属矿矿体的分布, 如大田龙凤场、上京等铅锌矿床^[25]。

(2) 经畚组—栖霞组/文笔山组界面: 该界面在马坑矿区比较常见, 常常控制着一些规模较小



1—林地组石英砂岩；2—经畚组大理岩；3—辉绿岩；
4—磁铁矿体；5—矽卡岩

图4 马坑铁矿钻孔柱状简图

Fig. 4 Simplified bore histogram of the Makeng iron deposits

的矿体及矿化蚀变带，在马坑、潘田及阳山矿区表现尤为突出（见图2、图3）。文笔山组细砂、粉砂岩与经畚—栖霞组碳酸盐岩之间存在明显的岩性差异界面，这种特征一方面为成矿作用提供了较好的成矿界面（硅钙面），另一方面由于岩石物理性质的差异性，容易在经畚组—栖霞组/文笔山界面处形成滑脱空间，提供了储矿空间。

(3) 经畚组—栖霞组碎屑岩/灰岩界面：经畚组—栖霞组作为闽西南地区重要的赋矿层位，据福建省岩石地层资料^[26]，经畚组以生物碎屑灰岩为主，局部夹含薄层状细碎屑岩及硅质岩；栖霞组以泥晶生物灰岩为主，并夹有数层硅质岩、粉砂岩，具有震荡式海陆交互相沉积特征。在马坑铁矿矿体顶板 C_2j-P_2q 岩系中发育许多规模较小的透镜体状、层状、似层状小矿体和矽卡岩矿化体（见图2a），这些小矿体多顺层产出。碳酸盐岩与夹于其中的薄层碎屑岩构成了有利成矿的硅钙面，硅质碎屑岩夹层为薄层状且规模较小，这也是经畚组—栖霞组层内矿体规模较小的原因。

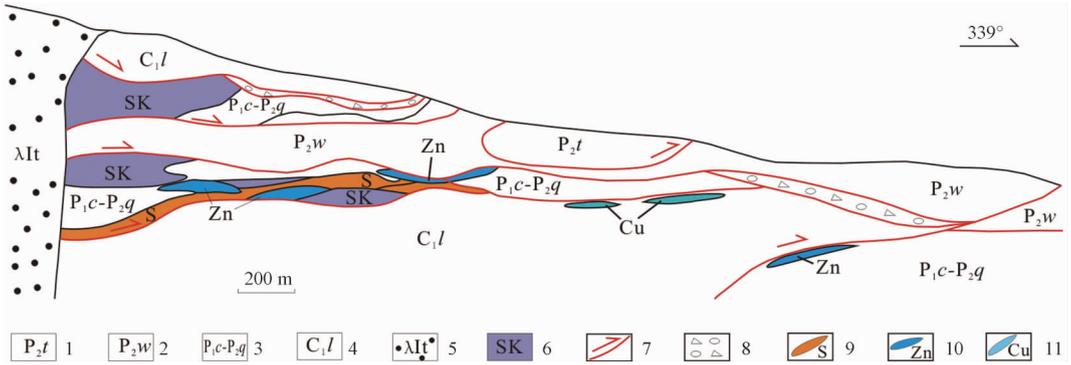
(4) 经畚组—栖霞组/花岗岩类界面：该类属

于碳酸盐岩与中酸性岩构成的硅钙面。在闽西南地区，与成矿有关的岩体主要为晚中生代花岗岩类，由于中—酸性岩浆的热液蚀变作用，在界面处往往发生矽卡岩化，相应地形成了与岩浆作用有关的矽卡岩型矿体。该类界面定位的铁-多金属矿在闽西南地区是广泛存在的，如大排铅锌矿、汤泉铁矿等。在马坑矿区，莒舟岩体与碳酸盐岩接触部位发育多条褐铁矿化矽卡岩蚀变带^[8]。潘田铁矿和阳山铁矿的成矿结构面以石英砂岩与碳酸盐岩构成的硅钙面为主，局部为花岗岩类与碳酸盐岩构成岩石差异性界面，说明碳酸盐岩与花岗岩类构成的岩性界面也是马坑式铁矿的一种重要的成矿结构面。

(5) 推覆（滑脱）界面：林地组是闽西南推覆体的主要组成部分，常作为外来岩系直接覆盖于上石炭统一下三叠统地层之上。当外来岩系林地组砂岩与上石炭统一上二叠统碳酸盐岩接触时，就构成了有利成矿的硅钙界面。这是一种典型的推覆构造控矿的成矿结构面，这类界面成矿的现象在闽西南铁-多金属矿床中是比较常见的，例如龙凤场多金属矿（见图5），元沙铅锌矿等。界面处常见透镜状的磁铁矿、矽卡岩化褐铁矿体。该类界面与前述4类界面成矿机制相同，但由于该区域强烈的构造活动导致成矿界面的规模及延伸性相对较差，从而限制了单个矿（化）体的规模，常形成小规模的多金属矿体或矿化带。

4 矿床成因机理探讨

矿床成因问题一直是马坑铁矿的研究热点，相关学者对马坑铁矿的赋矿层位、成矿围岩、控矿构造、矿床特征及成矿物理化学条件等进行了大量的研究^[5, 7, 10, 21, 28-34]，由于研究侧重点的不同，矿床成因机制问题仍然存在争议。一些学者认为马坑铁矿与大洋、莒舟岩体有关，但是经过系统的矿区及井下调查，发现马坑铁矿体与花岗岩体无直接接触，矿体主要赋存于经畚组—栖霞组碳酸盐岩与林地组石英砂岩之间，这使得传统的矽卡岩成因观点饱受质疑。近年来，一些学者对矽卡岩成因的研究取得了一些进展：Foucault and Raoult^[35]认为矽卡岩不仅发育于中酸性侵入岩与碳酸岩接触带，也可形成于基性—超基性侵入岩与围岩的接触带；Fulignati^[36-37]提出矽卡岩的



1—早二叠世童子岩组; 2—早二叠世文笔山组; 3—早二叠世栖霞组—晚石炭世船山组; 4—早石炭世林地组; 5—隐爆火山岩; 6—矽卡岩; 7—推覆构造; 8—构造角砾岩; 9—硫铁矿; 10—闪锌矿; 11—黄铜矿

图 5 龙凤场铁多金属矿剖面图 (据文献[27]修改)

Fig. 5 Sectional drawing of Longfengchang iron polymetallic deposits (after [27])

形成与接触交代并无直接关系, 而与钙硅质流体交代作用有关; Zhao 等^[38] 和 Gaeta 等^[39] 根据矽卡岩矿物中熔融包裹体的发现, 提出了岩浆矽卡岩成因。马坑式铁矿为层控矽卡岩型矿床, 考虑到矽卡岩成因的多解性, 马坑铁矿成因显得更加复杂。

闽西南地区自晚古生代以来经历了多期构造活动叠加, 表现为挤压与伸展构造交替进行^[40], 导致不同地层的叠加和缺失, 矿床成因较为复杂。然而, 通过对闽西南马坑式铁矿进行对比研究, 发现马坑式铁矿具有一些共性特征。除了被普遍认同的马坑式铁矿赋存于上石炭统经畲组—上二叠统栖霞组 (C_2j-P_2q) 碳酸盐岩层位外, 研究发现马坑式铁矿明显受结构面控制, 主矿体定位于碳酸盐岩与硅铝酸盐岩的构造—岩性界面, 成矿作用受 Si/Ca 面控制。马坑铁矿主矿体赋矿层位为林地组硅化砂岩与碳酸盐岩的过渡层, 上部碳酸盐岩中仅发育透镜体状小矿体, 规模较小, 常沿构造、岩性薄弱界面分布, 这说明成矿受碳酸盐岩与硅质碎屑岩之间的构造—岩性界面控制, 并非受单一层位控制。硅钙面成矿作用的机制是一个复杂的过程, 硅钙面不仅提供了成矿空间, 还为成矿提供了良好的物理、化学作用条件。硅钙面作为一种重要的地球化学障, 对成矿流体的形成、演变及运移具有一定的控制作用。

4.1 物理机制

闽西南地区铁矿床受地层岩性、岩相及沉积环境控制作用明显, 矿体、矿化体多靠近两种岩性构成的物理差异性界面, 海相的碎屑岩向碳酸盐岩沉积过渡地段更有利于铁-多金属矿的形成,

研究区铁矿的形成受沉积建造的物理界面控制明显, 成矿作用多发生在岩性过渡界面及其附近, 其中上石炭统经畲组—上二叠统栖霞组灰岩底部与下伏岩系的接触界面间为闽西南马坑式铁矿的最重要赋矿层位 (见图 6)。马坑式铁矿具有明显的“层控”特征, 但矿床并不严格局限于某一层位上, 矿化可以出现于灰岩地层的不同部位, 以上石炭统碳酸盐岩底部与下伏林地组碎屑岩之间的物理界面为主要的成矿部位。通过收集马坑、阳山、洛阳、潘田等矿床资料, 统计 485 个钻孔的 1060 个观察点的矿床顶底板岩性比例, 结果表明 (见表 1), 矿体顶底板岩性中矽卡岩比率较高, 这为矽卡岩型矿床成因提供了依据。除矽卡岩之外, 矿体的顶板为大理岩以及底板为碎屑岩的比率较高, 这说明该区铁-多金属矿床的形成与岩性差异性界面 (即硅钙面) 相关。

表 1 闽西南地区铁矿顶底板岩性比例

Table 1 Lithologic proportion of top and bottom plates of iron deposits from southwestern Fujian Province

岩石类型	顶板	底板
灰岩、大理岩	28.19%	4.59%
石榴石透辉石矽卡岩类	54.9%	51.38%
酸性侵入岩	7.58%	11.38%
中基性岩体	3.5%	2.76%
沉积碎屑岩	5.82%	29.89%

典型矽卡岩通常是岩浆及其后期热液与大理岩等围岩进行接触交代所形成的, 而受硅钙面控制的远端矽卡岩多数远离岩体发育, 大部分为流体交代或改造围岩的产物^[42]。硅钙面是一种物理变化界面, 界面两侧岩石具有不同的岩性、岩石

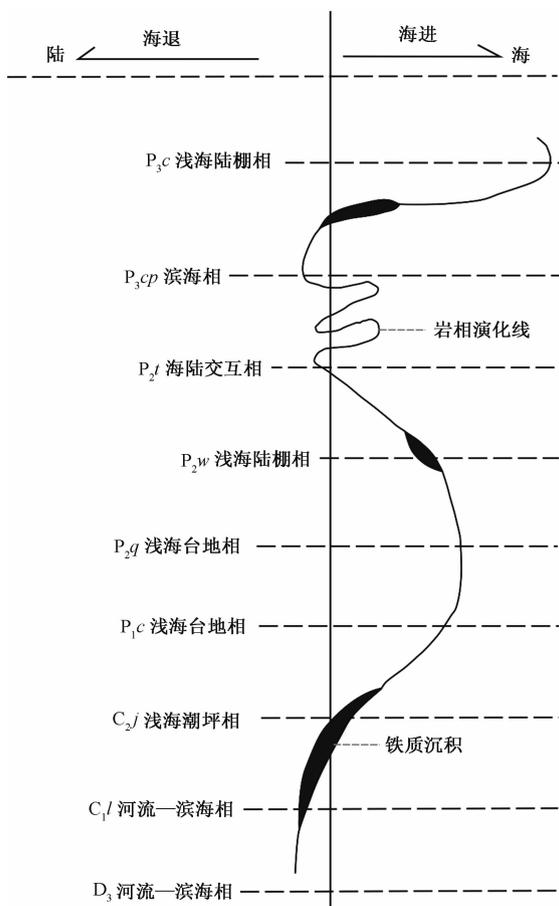


图6 晚古生代闽西南海水进退及沉积铁矿形成示意图(据文献[41])

Fig. 6 Late Paleozoic transgression and regression, and ore-forming schematic diagram (AFTER [41])

能干性、岩石成分、岩石渗透率、压力、温度等差异性。岩石的物理性质对成矿作用方式、矿化强度及矿体的产状等具有一定的控制作用,矿体底板硅质层化学性质相对稳定^[19],从而为流体的运移及水岩反应提供了良好的物理化学条件。钙质岩石具有低硬度、脆性及遇酸易溶解等特征,而硅质岩则具有高硬度、可塑性大、化学性质稳定的特征,两种岩性之间存在显著的物性差异^[16]。马坑铁矿表现出顶板韧性强而底板脆性强的物理性质差异性,这种物性差异性有利于构造活动过程中形成扩容空间。当遭受区域挤压应力作用时,由于物理性质的差异往往导致在界面附近形成层间滑脱面或者褶皱虚脱,从而构成有利成矿的空间。化学性质活泼的碳酸盐岩可与含矿热液进行交代作用,在这种层间滑脱或褶皱转折端空间形成矽卡岩型或热液交代型矿体。此外,钙质层具有易碎、易溶等特点,当含矿热液进入到碳

酸盐岩地层时,容易产生破碎、溶解、扩容等现象,从而为成矿物质的沉淀提供了容矿空间,在马坑矿区主要表现为一系列透镜状小矿体赋存于经畚组碳酸盐岩中。

4.2 化学机制

硅钙面是岩石物理差异性界面,同时也是地球化学差异性界面,属于一种地球化学动力学界面,硅钙面不仅反映了外界物理条件(如岩性、能干性、渗透率等)的变化,同时也反映了化学条件的变化,如氧化还原电位、酸碱环境等,这些构成了地质体之间的转化界面^[15]。目前一些学者对水—岩反应界面的成矿机理进行了研究^[43-46],认为界面两侧岩石酸碱度的变化、氧化还原条件的改变控制了热液矿床的定位。由于这两套地层岩石化学性质的差异性,在超临界流体作用下容易形成成矿地球化学障,从而引起流体物理化学条件的急剧变化,构成了地球化学动力学界面,从而导致大量成矿物质的沉淀。马坑铁矿石榴石矽卡岩具有垂向分带性,靠近底板硅质层则为钙铁榴石系列,而靠近矿体顶板钙质层主要为钙铝榴石系列。相关研究结果表明^[4],钙铁榴石通常形成于温度为450~660℃、PH值为4.0~11.0、氧化—弱氧化环境,而钙铝榴石则常形成于550~700℃、中—酸性、弱氧化—弱还原的条件。这表明成矿热液在水岩反应过程中靠近底板位置具有相对偏酸和还原特征,靠近顶板则具有相对偏碱性和氧化特征,顶底板之间流体的酸碱性及氧逸度的差异构成地球化学障,从而促进了成矿物质的富集沉淀。赵一鸣等^[41]对闽西南地区出露较好的经畚组、林地组地层进行了含铁测定,结果如表2。从表中可以看出,碎屑岩中的细砂岩和粉砂岩含铁量偏高,明显高于花岗岩类。当这些含铁层被重熔、花岗岩化或高温汽液过程中,部分铁质可以被活化迁移并富集。

此外,卤族元素对铁矿的形成具有重要的作用。谢家亨等^[22]对马坑矿区不同地层的氟氯元素含量进行统计发现,卤族元素在不同的层位表现出明显的差异性,除铁矿体的卤族元素含量较高之外,矿体底板林地组卤族元素含量也较高,铁质沉积主要发生在卤族元素含量较高的林地组之上(见图7);同时F、Cl分布态势与主矿体及小矿体的空间形态基本一致,说明卤族元素对成矿起到重要作用。上述结果表明,马坑铁矿主矿体

表2 闽西南地区相关岩石中含铁性统计一览表^[44]

Table 2 Iron content of different rocks from southwestern Fujian Province

岩石名称	岩石地层单元	全铁含量/%	采样地点	分析样品数
碳质板岩	童子岩组	5.0	阳山	2
板岩	文笔山组	4.99	阳山	4
粉砂质泥岩、粉砂岩	经畚组	3.01 ~ 7.39	中甲剖面	6
粉砂岩	林地组	4.76 ~ 7.25		21
细砂岩	林地组	1.76 ~ 5.47	中甲、上园、连城等剖面	11
石英砾岩和粗砂岩	林地组	1.01 ~ 1.61		14
砂岩、粉砂岩	桃子坑组	6.75	桃子坑剖面	7
变质粉砂岩	奥陶—志留纪	3.68 ~ 6.91	中甲101孔	11
花岗岩	燕山期	1.3 ~ 2.5	区内各矿区有关花岗岩总平均数	

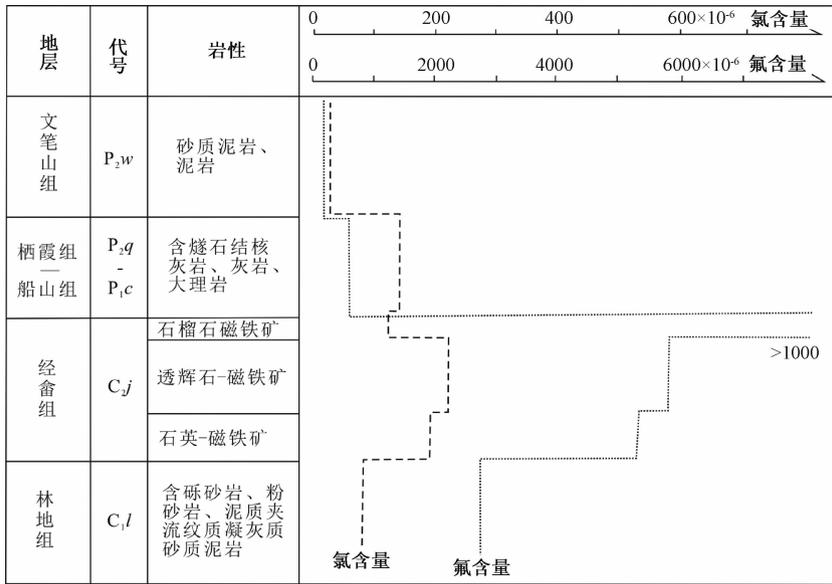


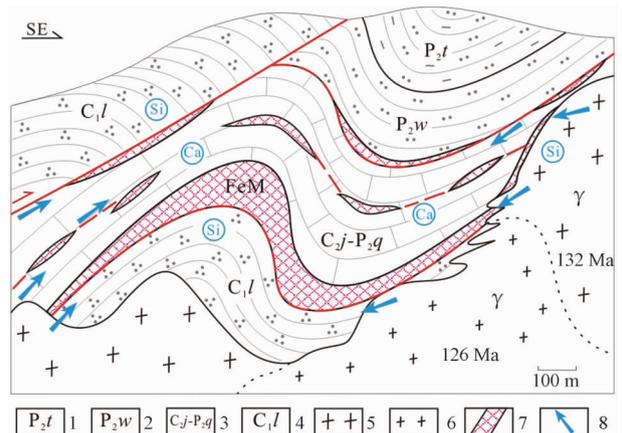
图7 马坑矿区不同地层氟氯元素平均含量曲线^[22]

Fig. 7 Curves of average content of fluorine and chlorine elements from different strata of the Makeng ore area

顶底存在显著的地球化学差异性, 磁铁矿成矿作用受地球化学差异性界面控制。

4.3 成矿模式

在以上认识基础上, 分析认为硅钙界面是控制闽西南地区铁、铅锌等多金属矿的主要因素, 这种岩性界面是隔开不同物理化学场的一种结构面, 其两侧的异相差异性为成矿作用提供了动力保障, 界面两侧地质体的物理化学差异性有利于成矿物质的沉淀和富集。据相关资料表明^[41], 闽西南地区晚古生代经历了多次交替进行海退和海进过程, 形成了一系列海相/陆相及海陆交互相岩性差异性界面, 矿体、矿化体多靠近两种岩性接触界面附近, 尤其在 C_1l 河流滨海相与 C_2j 浅海潮坪相之间形成了规模较大的铁矿富集 (见图6)。马坑矿区主矿体赋存于林地组石英砂岩和经畚—栖霞碳酸盐岩之间, 矿体受一定的层位控制, 成



1—中二叠统童子岩组; 2—中二叠统文笔山组;
 3—上石炭统经畚组—中二叠统栖霞组; 4—下石炭统林地组;
 5—粗粒花岗岩; 6—细粒花岗岩; 7—磁铁矿体;
 8—成矿热液流动方向

图8 马坑式铁矿成矿模式图

Fig. 8 Metallogenic model of Makeng type iron deposits

矿作用与岩浆侵入作用、岩浆热液改造有关(见图8)。此外,上石炭统经畚组—中二叠统栖霞组通常被视为闽西南地区铁多金属矿床的赋矿层位,其主要原因是这套碳酸盐岩内部夹有多层沉积碎屑岩,构成了有利于成矿物质富集的岩性界面(Si/Ca面)。

5 找矿意义

闽西南地区铁-多金属矿受成矿结构面控制,矿体多赋存于岩相/岩性界面、构造结构面及物理化学不连续界面附近。硅钙面作为一种重要的成矿结构面,控制着闽西南地区马坑式铁矿的分布,在这些不同类型的岩性界面处,往往发育不同程度的矿化蚀变或一定规模的矿体。闽西南地区硅钙面以林地组与经畚组—栖霞组的界面为主,其次为经畚组—栖霞组/文笔山界面、经畚组—栖霞组内部碎屑岩/灰岩界面、经畚组—栖霞组/花岗岩类界面以及推覆(滑脱)界面。在找矿预测中,这类界面直接逼近、定位矿体,具备成矿系统中物质转移、能量交换和传递的条件。以硅铝酸盐岩与碳酸盐岩之间的界面(硅钙面)为找矿方向,是一种直接有效的找矿标志,应用硅钙面理论在闽西南地区寻找铁多金属矿具有重要的现实指导意义。

闽西南地区以发育晚古生代地层为特色,下石炭统林地组硅质岩系与上石炭统经畚组—中二叠统栖霞组钙质地层广泛发育,再加上后期推覆(滑脱)构造的叠加改造,导致硅钙面在本区广泛发育。推覆构造往往导致下石炭统林地组砂岩直接覆盖于晚石炭—二叠系地层之上,在林地组硅质岩系与经畚—栖霞组钙质岩系接触部位处形成有利成矿的构造—岩性界面。因此,结合推覆构造找矿理论方法,在闽西南地区推覆体下寻找深部有利于成矿的硅钙面,开展深部找矿预测具有重要的指导意义。硅钙面是一种物理异常界面,这种地质异常界面在地球物理勘查中易于识别,在准确识别硅钙面的基础上,可运用硅钙面成矿理论对找矿探查中所发现的致矿异常进行解译。

6 结论

(1) 闽西南马坑式铁矿主矿体并非受单一地

层控制,矿体主要赋存于下石炭统林地组硅质砂岩与经畚组—栖霞组灰岩的岩性界面(硅钙面)。

(2) 马坑式铁多金属矿主要受五类成矿结构面控制:林地组与经畚组—栖霞组界面;经畚组—栖霞组与文笔山组界面;经畚组—栖霞组内部碎屑岩与灰岩界面;经畚组—栖霞组与花岗岩类界面;推覆(滑脱)界面。

(3) 马坑式铁矿成矿结构面属于物理化学差异性界面,物理性质差异界面构成有利的成矿空间,有利于流体沿界面持续运移及发生水岩反应,化学性质差异界面在超临界流体作用下容易形成成矿地球化学障,构成了地球化学动力学界面,有利于成矿物质的沉淀和富集。

(4) 经畚组—栖霞组与林地组之间的岩性界面(硅钙面)是闽西南地区铁-多金属矿主要找矿标志,运用硅钙面控矿与推覆构造控矿理论指导该区域找矿勘查工作,具有重要的理论及现实指导意义。

参考文献/References

- [1] 李希敏,吴歧,吴小林,等.福建省“马坑式”铁矿含矿层位的初步探讨[J].地质学杂志,1980,4(1):60~63.
LI Ximin, WU Qi, WU Xiaolin, et al. Preliminary discussion on ore-bearing stability of “Makeng type” iron ore in Fujian province [J]. Journal of Stratigraphy, 1980, 4(1): 60~63. (in Chinese with English abstract)
- [2] 梁士奎,秦元喜,薛虎.闽西南马坑式铁矿的区域地质背景及控矿构造的力学分析[J].中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,1982,3(2):15~29.
LIANG Shikui, QIN Yuanxi, XUE Hu. Regional geological background and mechanics analysis of ore-controlling structure of Makeng-type iron deposit in southwestern Fujian province [J]. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1982, 3(2): 15~29. (in Chinese)
- [3] 王东坡,高浚,蔡维智,等.福建马坑式铁矿沉积形成作用的古地理及古构造特征[J].长春地质学院学报,1982,(3):43~58.
WANG Dongpo, SHANG Jun, CAI Weizhi, et al. Paleogeographic and paleotectonic control of iron ore sedimentation in Makeng, Fujian [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1982, (3): 43~58. (in Chinese)
- [4] Vrooman H A. Semi-automated detection of white matter lesions by contrast optimization and 3D region growing in MR data of the brain [A]. Proceedings of the 87th Scientific Assembly and Annual Meeting of the Radiological Society of North America [C]. Chicago, Illinois: McCormick Place, 2001,

- 460~460.
- [5] Zhang Z J, Zuo R G. Sr-Nd-Pb isotope systematics of magnetite: implications for the genesis of Makeng Fe deposit, southern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 53~60.
- [6] 葛朝华, 韩发, 邹天人, 等. 马坑铁火山沉积成因探讨 [J]. *中国地质科学院院报*, 1981, 3 (1): 47~69.
GE Chaohua, HAN Fa, ZOU Tianren, et al. Geological characteristics of the Makeng iron deposit of marine volcano-sedimentary origin [J]. *Bulletin Chinese Academy of Geological Sciences*, 1981, 3 (1): 47~69. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王森, 张达, VATUVA A, 等. 福建龙岩大洋一莒舟花岗岩地球化学、年代学、Hf 同位素特征及其地质意义 [J]. *地球化学*, 2015, 44 (5): 450~468.
WANG Sen, ZHANG Da, VATUVA A, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotope compositions of the Dayang and Juzhou granites in Longyan, Fujian and their geological implications [J]. *Geochimica*, 2015, 44 (5): 450~468. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张承帅, 毛景文, 张长青, 等. 福建马坑矽卡岩型铁 (钼) 矿床流体包裹体特征及成矿机制研究 [J]. *矿床地质*, 2013, 32 (2): 289~307.
ZHANG Chengshuai, MAO Jingwen, ZHANG Changqing, et al. Fluid inclusion characteristics and metallogenic mechanism of Makeng skarn Fe-Mo deposit in Fujian province [J]. *Mineral Deposits*, 2015, 32 (2): 289~307. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张承帅, 苏慧敏, 于森, 等. 福建龙岩大洋一莒舟花岗岩锆石 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] 张志, 张承帅. 福建马坑铁 (钼) 矿床矽卡岩矿物学特征及分带研究 [J]. *岩石学报*, 2014, 30 (5): 1339~1354.
ZHANG Zhi, ZHANG Chengshuai. Skarn mineral characteristics and zonation of the Makeng Fe-Mo deposit in Fujian Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30 (5): 1339~1354. (in Chinese with English abstract)
- [11] 毛建仁, 陈荣, 李寄岷, 等. 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 [J]. *岩石学报*, 2006, 22 (6): 1723~1734.
MAO Jianren, CHEN Rong, LI Jiyu, et al. Geochronology and geochemical characteristics of late Mesozoic granitic rocks from southwestern Fujian and their tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (6): 1723~1734. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邓军, 吕古贤, 杨立强, 等. 构造应力场转换与界面成矿 [J]. *地球学报*, 1998, 19 (3): 244~250.
DENG Jun, LÜ Guxian, YANG Liqiang, et al. The transformation of tectonic stress field and interfacial metallogenesis [J]. *Acta Geoscientia Sinica: Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1998, 19 (3): 244~250. (in Chinese with English abstract)
- [13] 倪师军, 张成江, 滕彦国. 成矿流体地球化学界面: I 概念的由来及发展 [J]. *地质地球化学*, 2001, 29 (3): 19~21.
NI Shijun, ZHANG Chengjiang, TENG Yanguo. Ore-forming fluid geochemical interface: I. Origin and development [J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29 (3): 19~21. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吕古贤, 邓军, 倪师军, 等. 构造物理化学成矿理论问题探讨 [J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27 (3): 250~263.
LÜ Guxian, DENG Jun, NI Shijun, et al. Research on metallogenic theory of Tectono-physicochemistry [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27 (3): 250~263. (in Chinese with English abstract)
- [15] 叶天竺, 薛建玲. 金属矿床深部找矿中的地质研究 [J]. *中国地质*, 2007, 34 (5): 855~869.
YE Tianzhu, XUE Jianling. Geological study in search of metallic ore deposits at depth [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (5): 855~869. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张长青, 叶天竺, 吴越, 等. Si/Ca 界面对铅锌矿床定位的控制作用及其找矿意义 [J]. *矿床地质*, 2012, 31 (3): 405~416.
ZHANG Changqing, YE Tianzhu, WU Yue, et al. Discussion on controlling role of Si-Ca boundary in locating Pb-Zn deposits and its prospecting significance [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31 (3): 405~416. (in Chinese with English abstract)
- [17] 滕彦国, 倪师军, 张成江, 等. 成矿流体地球化学界面: III 应用实例研究 [J]. *地质地球化学*, 2001, 29 (3): 26~31.
TENG Yanguo, NI Shijun, ZHANG Chengjiang, et al. Ore-forming fluid geochemical interface: III case study [J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29 (3): 26~31. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张成江, 滕彦国, 倪师军. 成矿流体地球化学界面: II 组成及标志 [J]. *地质地球化学*, 2001, 29 (3): 22~25.
ZHANG Chengjiang, TENG Yanguo, NI Shijun. Ore-forming fluid geochemical interface: II. Composition and indicators [J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29 (3): 22~25. (in Chinese with English abstract)
- [19] 姚晓峰, 叶天竺, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛矿床硅钙界面对矽卡岩成岩及多金属成矿的影响 [J]. *中国地质*, 2014, 41 (5): 1577~1593.
YAO Xiaofeng, YE Tianzhu, TANG Juxing, et al. The effect of Si-Ca interface on skarn formation and polymetallic mineralization in the Jiama deposit, Tibet [J]. *Geology in China*, 2014, 41 (5): 1577~1593. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陶建华, 陈福龙. 福建推覆构造研究 [J]. *石油实验地质*,

- 2006, 28 (3): 259 ~ 263, 285.
- TAO Jianhua, CHEN Fulong. Nappe structure in Fujian Province [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28 (3): 259 ~ 263, 285. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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——中国地质大学学报*, 2012, 37 (6): 1217 ~ 1231.
- ZAHNG 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—Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37 (6): 1217 ~ 1231. (in Chinese with English abstract)
- [22] 谢家亨, 许超南, 郑颖煜, 等. 福建省龙岩市马坑铁矿床地质特征及成矿地质条件 [M]. 厦门: 闽西地质大队, 1983, 1 ~ 172.
- XIE Jiaheng, XU Chaonan, ZHENG Yingyu, et al. Geological characteristics and ore-forming geological conditions of Makeng Iron deposit in Longyan City, Fujian province [M]. Xiamen: Minxi Geological Brigade, 1983, 1 ~ 172. (in Chinese)
- [23] 陈跃升. 对福建马坑铁矿床控矿构造特征的新认识 [J]. *金属矿山*, 2010, (2): 96 ~ 99, 144.
- CHEN Yuesheng. New understanding of ore ~ control structure feature of Fujian Makeng iron mine [J]. *Metal Mine*, 2010, (2): 96 ~ 99, 144. (in Chinese with English abstract)
- [24] 来守华, 陈仁义, 张达, 等. 福建潘田铁矿床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)
- [25] 刘聪, 王尔康, 毕东. 福建龙凤场黄铁矿型多金属矿床成因研究及找矿方向 [J]. *地质找矿论丛*, 1987, 2 (2): 14 ~ 27.
- LIU Cong, WANG Erkang, BI Dong. Study on genesis of Longfengchang pyritetype sulfur and polymetallic ore deposit and exploration guidance, in Fujian Province [J]. *Geological Prospecting Review*, 1987, 2 (2): 14 ~ 27. (in Chinese with English abstract)
- [26] 福建省地质矿产局. 福建省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997, 1 ~ 216.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Fujian Province. Rock stratum of Fujian province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997, 1 ~ 216. (in Chinese)
- [27] 黄仁生. 福建大田广平推覆构造与隐伏煤、多金属矿 [J]. *福建地质*, 2007, 26 (3): 142 ~ 150.
- HUANG Rensheng. Guangping Nappe structures, hidden coals and polymetallic ores in Datian County, Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 2007, 26 (3): 142 ~ 150. (in Chinese with English abstract)
- [28] 康丛轩, 宗雯, 刘晓文. 福建马坑矽卡岩型铁矿床成矿模式 [J]. *有色金属 (矿山部分)*, 2013, 65 (2): 44 ~ 49.
- KANG Congxuan, ZONG Wen, LIU Xiaowen. Metallogenic model of Makeng skarn type iron deposit in Fujian province [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2013, 65 (2): 44 ~ 49. (in Chinese with English abstract)
- [29] 狄永军, 张达, 吴淦国, 等. 武夷山覆盖区马坑式铁矿层位及找矿方向 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37 (6): 1232 ~ 1242.
- DI Yongjun, ZHANG Da, WU Ganguo, et al. Strata hosted Makeng type iron deposits and prospecting orientation in the Wuyishan covered region [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37 (6): 1232 ~ 1242. (in Chinese with English abstract)
- [30] 姜益丰. 马坑铁矿床成矿地质特征分析 [J]. *现代矿业*, 2000, 484: 89 ~ 91.
- JIANG Yifeng. Makeng iron ore deposit ore-forming geological characteristics analysis [J]. *Modern Mining*, 2000, 484: 89 ~ 91. (in Chinese)
- [31] 王森. 闽西南马坑铁矿成矿要素及找矿预测研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.
- WANG Sen. Ore-forming factors and metallogenic prediction of Makeng iron ore, southwestern Fujian province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016. (in Chinese with English abstract)
- [32] Wang S, Zhang D, Wu G G, et al. Late Paleozoic to Mesozoic extension in southwestern Fujian Province, South China: geochemical, geochronological and Hf isotopic constraints from basic-intermediate dykes [J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8 (3): 529 ~ 540.
- [33] Wang S, Zhang D, Wu G G, et al. New geochronologic evidence of diabases and their metallogenic relationship with the Makeng-type iron deposits in southwest Fujian, SE China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91 (6): 2324 ~ 2326.
- [34] Wang S, Zhang D, Wu G G, et al. Late Mesozoic tectonic evolution of Southwestern Fujian Province, South China: Constraints from magnetic fabric, zircon U-Pb geochronology and structural deformation [J]. *Earth Science*, 2017, doi: 10. 1007/s12583-017-0968-5. (in press)
- [35] Foucault A, Raoult J F. *Dictionnaire de Géologie* [M]. Paris: Jean-Francois Raoult, 2001.
- [36] Fulignati P, Kamenetsky V S, Marianelli P, et al. Melt inclusion record of immiscibility between silicate, hydrosaline, and carbonate melts: applications to skarn genesis at Mount Vesuvius [J]. *Geology*, 2001, 29: 1043 ~ 1046.
- [37] Fulignati P, Marianelli P, Santacroce R, et al. The skarn shell of the 1944 Vesuvius magma chamber. Genesis and P-T-X conditions from melt and fluid inclusion data [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2000, 12 (5): 1025 ~ 1039.
- [38] Zhao B, Zhao J S, Li Z L, et al. Characteristics of melt

- inclusions in skarn minerals from Fe, Cu (Au) and Au (Cu) ore deposits in the region from Daye to Jiujiang [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46 (5): 481 ~ 497.
- [39] Gaeta M, Di Rocco T, Freda C. Carbonate assimilation in open magmatic systems: the role of melt-bearing skarns and cumulate-forming processes [J]. *Journal of Petrol*, 2009, 50 (2): 361 ~ 385.
- [40] 王森, 张达, 吕良冀, 等. 闽西南晚古生代以来伸展构造演化: 中基性岩墙群的年代学、地球化学制约 [J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39 (5): 889 ~ 902.
WANG Sen, ZHANG Da, LV Liangji, et al. The extensional tectonic evolution of Southwestern Fujian since Neopaleozoic: constraints from geochemistry and Geochemistry of the basic-intermediate dikes [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39 (5): 889 ~ 902. (in Chinese with English abstract)
- [41] 赵一鸣, 谭惠静, 许振南, 等. 闽西南地区马坑式钙矽卡岩型铁矿床专辑 1 [A]. *中国地质科学院矿床地质研究所文集 (7)* [C]. 北京: 地质出版社, 1983, 1 ~ 143.
ZHAO Yiming, TAN Huijing, XU Zhennan, et al. The Makeng Type calcium skarn type iron deposit in the southwest of Fujian [A]. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1983, 1 ~ 143. (in Chinese)
- [42] Sillitoe R H. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105 (1): 3 ~ 41.
- [43] Hochella M F. The changing face of mineral-fluid interface chemistry [A]. Arechart G B, Hulston J R. *Water-Rock Interaction, Proceeding of the 9th International Symposium on Water-Rock Interaction* [C]. Rotterdam: Book Field, 1992, 7 ~ 12.
- [44] Barnes H L, Gould W W. Hydrothermal replacement of carbonates by sulfides [A]. *Proceedings-International Symposium on Water-Rock Interaction* [C], 1992, 1565 ~ 1567.
- [45] Moller P, Kersten G. Electrochemical accumulation of visible gold on pyrite and arsenopyrite surfaces [J]. *Mineralium Deposita*, 1994, 29 (5): 404 ~ 413.
- [46] Giggenbach W F. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52 (12): 2749 ~ 2765.