

钦杭成矿带南段云浮硫铁矿黄铁矿微 组构特征及其对矿床成因的启示*

郭晓昱, 郑义, 周永章, 牛佳, 虞鹏鹏

(中山大学地球科学与地质工程学院//广东省地质过程与矿产资源
探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 云浮硫铁矿是位于钦杭结合带南段的超大型硫铁矿床, 长期以来对其成因类型及成矿构造背景存在争议。基于矿床地质和岩相矿相学观察, 应用最新的扫描电镜能谱技术(SEM-EDS)对其进行了细致研究。研究表明, 云浮硫铁矿黄铁矿矿石结构可分为条带状、浸染状、块状和脉状4种类型。手标本及镜下观察发现, 条带状矿石存在揉皱构造, 块状矿石中存在两种不同粒度的黄铁矿, 黄铁矿细脉普遍存在于各种矿石中。扫描电镜观察和能谱分析显示, 条带状矿石中黄铁矿主要呈立方体自形晶, 立方体表面生长层发育平整, 边缘平直, 晶体按照多个层位同时堆积的方式生长, 方铅矿等伴生矿物晶形也较好; 浸染状矿石中黄铁矿粒度要大于条带状矿石中黄铁矿, 但生长层不如后者平整; 块状矿石中黄铁矿紧密接触, 黄铁矿表面呈贝壳状断口, 晶体边缘较难分辨, 但样品表面也常见到近八面体晶形的晶体; 脉状矿石中黄铁矿粒度较大, 伴生有方铅矿等金属矿物, 但由于生长空间的限制, 晶形为半自形-他形。认为云浮硫铁矿具有2期叠加成矿的特点, 为改造加富的热液喷流沉积矿床。喷流沉积阶段形成条带状和浸染状黄铁矿, 其成矿温度较低, 成矿环境相对平静。后期热液叠加富集阶段形成块状和脉状黄铁矿, 其成矿温度较高。

关键词: 黄铁矿; 微组构; 扫描电镜; 成矿期次; 云浮硫铁矿

中图分类号: P611 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)03-0148-11

Micro-fabric characteristics of pyrite generations and their implications for genesis of Yunfu pyrite deposit, Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt, South China

GUO Xiaoyu, ZHENG Yi, ZHOU Yongzhang, NIU Jia, YU Pengpeng

(School of Earth Sciences & Geological Engineering//Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Yunfu pyrite deposit is a large-scaled deposit, located in the southern section of Qinzhou-Hangzhou Metallogenetic Belt. Ore textures in the Yunfu pyrite deposit can be classified into four types, including the banded, disseminated, massive and veiny. The specimens and microscopic observation show that banded ores suffered the subsequent crumpled structures, the massive ores are composed of two different particle sizes of pyrite, and the pyrite vein cut across all above-mentioned ores. The SEM (Scanning Electron Microscope) coupled with EDS (Energy Disperse Spectroscopy) measurements are carried out to yield the micro-fabric characteristics of all four types of pyrite. The pyrite grains in the ban-

* 收稿日期: 2016-04-01

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目(2016YFC0600408); 广东省自然科学基金(2016A030310210); 国家自然科学基金(41502068, 41402165); 广州市“珠江科技新星”计划项目(201710010027)

作者简介: 郭晓昱(1989年生), 男; 研究方向: 矿床成因与矿业权评估; E-mail: 742662957@qq.com

通信作者: 郑义(1984年生), 男; 研究方向: 矿床学教学与科研; E-mail: zhengy43@mail.sysu.edu.cn

ded ores present as cube euhedral crystal with the growth layer developed, implying that the crystal grows accompanying with multiple layer accumulation. The granularity of pyrite in the disseminated ores is commonly bigger than in banded ores, but the growth layer is inferior to the latter. The pyrite grains in the massive ores contact closely with conchoidal fracture developed on the surface, and therefore their crystal edges are difficult to be distinguished. The particle size of pyrite in the veiny ores is the largest among the four types of ores. The crystal shape presents as hypidiomorphic-xenomorphic implicating the limited growth space. It is conclude that the Yunfu pyrite deposit was developed with two main stages of mineralization, including an earlier exhalative sedimentary mineralization overprinted by subsequence metamorphism and deformation. The exhalative sedimentary stage is presented by the formation of banded and disseminated pyrites, whereas the later stage of hydrothermal superposition formatting is characterized by massive and veiny pyrites.

Key words: pyrite; micro-fabric characteristics; SEM; ore-forming stages; Yunfu pyrite deposit

钦杭带是一条与扬子-华夏古老板块结合带相对应的成矿带,带内分布有大量的热水喷流沉积矿床,如永平铜矿、弋阳铁砂街铜矿、东乡铜矿、江西良山铁矿等^[1-4]。文献[5]根据内部结构的不均一性和演化历史的差异,将钦杭结合带划分为北(东)、中、南(西)3段。中段与南岭带大体一致,北(东)段是指南岭以北地区,即绍兴-江山-萍乡一带;南段位于南岭以南,主要包括云开大山变质地块和十万大山盆地^[5-6]。

广东云浮硫铁矿位于钦杭带南段,是全国最大、世界第二的硫铁矿矿床^[7]。与钦杭成矿带内许多其他块状硫化物矿床不同,云浮硫铁矿是带内迄今发现的唯一以黄铁矿为主要金属矿物的超大型矿床。前人对云浮硫铁矿矿床地质、元素地球化学和同位素地球化学等诸多方面进行了许多研究^[7-20],并取得了一系列重要认识。目前云浮硫铁矿矿床成因主要有两种观点:受改造的热水喷流沉积矿床和单一热水喷流沉积矿床。张乾等认为云浮硫铁矿矿体产于震旦系浅变质火山沉积岩地层,原生热水沉积作用形成的Ⅲ号矿体与后期叠加改造作用形成的Ⅳ号矿体在元素地球化学和同位素地球化学方面特征差别较大^[7-18],矿床为受改造的热水沉积型矿床。而文献[19-20]认为后期改造作用并没有改变原始的沉积特征,矿层和伴生硅质岩主要是热水沉积作用所形成,Ⅲ号矿体与Ⅳ号矿体的差异缘于Ⅳ号矿体位于喷流口附近,因而在矿石结构构造、条带状黄铁矿与块状黄铁矿Co/Ni比值上出现了差异。

国内对黄铁矿的微组构和微成分研究刚刚兴起,文献[21]运用LA-ICP-MS分析新桥矿床黄铁矿的微量元素,探讨了各类黄铁矿的成因;文

献[22]对新桥铜硫铁矿床的结晶黄铁矿和独特的胶状黄铁矿进行主微量元素的电子探针原位微区定量分析,以利用黄铁矿的地球化学标型探讨研究区胶状黄铁矿的成因;文献[23]利用XRD、FE-SEM、HR-TEM对新桥矿床的胶装黄铁矿微组构、微形貌进行研究,为矿区黄铁矿成因及成矿作用提供了微尺度的支撑。

本文通过对云浮硫铁矿不同结构黄铁矿的微组构、微成分进行分析,同时结合矿床地质、收标本及矿物镜下特征,讨论云浮硫铁矿的矿床成因。矿物的结构构造及微形貌是矿物最直接的信息,通过这些信息可以反演矿物生成的环境^[24]。本研究对黄铁矿的微组构进行研究,为云浮硫铁矿矿床成因提供新的佐证,同时完善了扫描电镜在矿床学中的应用。

1 区域地质

云浮硫铁矿构造上位于钦杭成矿带南段的云开地区(图1)。云开地区位于两广交界地带,被认为是华夏地块西南部重要的前寒武纪变质基底出露区,也是华南地区重要的金属矿床产地之一^[25-26]。云开地区基底出露的地层有前寒武的高州杂岩、云开群和震旦系,局部也存在古生代和中新生代地层。其中高州杂岩是云开地区最古老的地层单位,原岩为基性-超基性岩和泥砂质沉积岩^[27],震旦系底部常以石英岩、含砾石英砂岩平行不整合于沙湾坪组之上。古生界地层中,早古生界发育不完整,主要是一套海相类复理石碎屑岩建造^[26]。泥盆系及以后中生界地层角度不整合覆盖其上,成为盖层。

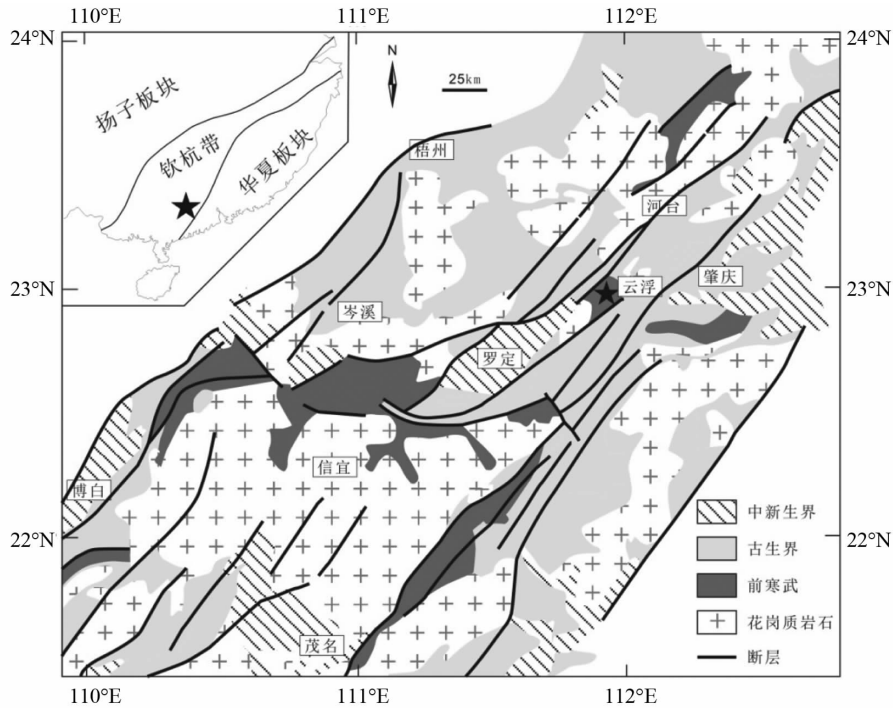


图 1 云开地区区域地质简图 (据参考文献 [26] 修改)

Fig. 1 Geological sketch of the Yunkai Area (modified from [26])

云浮硫铁矿位于吴川 - 四会断裂的北西侧, 吴川 - 四会断裂也是云开地区的东边界。该断裂西南起自吴川, 往北东经四会延至粤赣省界, 长 > 500 km, 宽 10 ~ 30 km, 总体走向 $NE35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。

前人研究显示, 云开基底在形成过程中花岗岩岩浆活动强烈, 形成加里东期、海西 - 印支期、燕山期等不同期次的花岗岩^[28-29]。加里东期花岗岩是云开地体中最为发育的一期花岗岩, 主要分布于云开大山的腹地复式背斜的轴部。海西 - 印支期花岗岩主要沿罗定 - 广宁断裂带及其邻侧分布。燕山期花岗岩岩浆活动强烈, 除有中酸性岩浆喷出活动外, 以花岗岩侵入为主^[5, 26]。

2 矿床地质

云浮矿区内出露的地层主要是震旦系、泥盆系、侏罗系和第四系 (图 2)。震旦系依其岩性可划分为 6 层, 各层为整合接触, 与下泥盆统桂头群呈不整合接触。其中第 4 层为主要含矿层位。由老至新各层特征为:

第 1 层: 含十字石、钠长石的片岩及变粒岩等;

第 2 层: 石英岩、片岩夹千枚岩;

第 3 层: 堇青石结晶灰岩、角岩、片岩及石英岩;

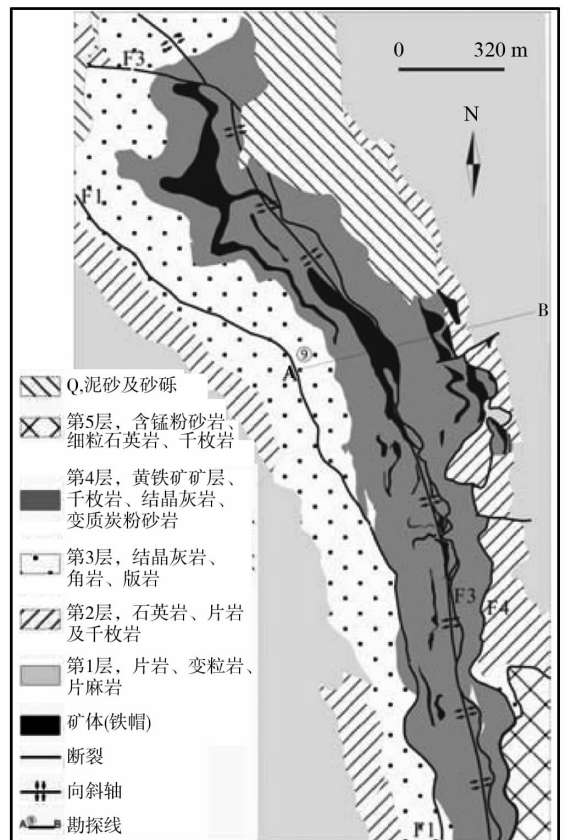


图 2 云浮硫铁矿矿区地质图

(据参考文献 [30] 修改)

Fig. 2 Geological sketch of the Yunfu Pyrite Deposits

(modified from [30])

第 4 层：变质炭质粉砂岩、千枚岩、结晶灰岩、钙质石英岩、黄铁矿；

第 5 层：含锰粉砂岩、细粒石英岩、千枚岩夹灰岩及层凝灰岩；

第 6 层：细粒石英岩、粉砂岩、千枚岩夹层凝灰岩。

区内褶皱构造、断裂构造均很发育，矿区处于大降坪旋卷构造中，大降坪旋卷构造主要由水源坑顶 - 竹篙山向斜、723（大台）背斜以及数条压扭性断裂所组成，主要褶皱轴及纵断裂均为向 NE 突出向 NW 撒开向南收敛的空间展布特点。

区段内的岩浆活动并不发育，仅在区段东南侧及外围见有花岗岩株侵入于中泥盆统桂头组地层中。围岩蚀变主要有角岩化、硅化、碳酸盐化、绿泥石化。

矿体产状与围岩一致，总的走向自南往北，由尖山区段的 NNE 到大降坪区段的 NS、NNW 至长排岭区段的 NW - NNW，呈向东凸出的弧形；倾向由南东东渐变为东、北东东及南西、南南西；倾角一般小于 50°。矿体沿走向总长 4 160 m，基本形态大致呈层状、似层状、透镜状产出。矿区内分 5 个矿体，I、III、V 号矿体位于 F₃ 断层以西，II、IV 号矿体位于 F₃ 断层以东，主要开采 III、IV、V 号矿体。矿体均分布在震旦系第 4 层中，矿体围岩以千枚岩、变质炭质粉砂岩、结晶灰岩、钙质石英岩为主。矿体在地表除部分水沟内见原生黄铁矿

外，其余均为氧化铁帽，铁帽为黄铁矿经过表生氧化淋滤形成的褐铁矿。矿区以 IV 号矿体规模最大、质量最好，主要为致密块状矿石，边部过渡为条带状矿石；III 号矿体次之，主要为条带状矿石。

3 矿石结构构造

云浮硫铁矿中金属矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿，伴生有白铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿。非金属矿物主要是方解石、绢云母、黑云母、石英等。矿石的构造主要有块状构造、浸染状构造、条带状构造、揉皱构造、脉状构造等，结构主要有半自形 - 他形粒状结构、自形粒状结构、碎裂结构、交代溶蚀结构等（图 4）。

手标本观察显示，条带状矿石与浸染状矿石中黄铁矿（图 4a、b、c）呈细粒结构，可见立方体自形晶出现；块状矿石黄铁矿（图 4e）颗粒肉眼不易分辨，常呈他形 - 半自形出现；脉状矿石中黄铁矿（图 4f）颗粒较小，晶形呈半自形状。在矿体局部出现暗红棕色条带，经镜下鉴定为闪锌矿，闪锌矿呈细粒结构（图 4d），部分可见黄铁矿等金属矿物伴生其中。条带状矿石中黄铁矿与石英、方解石、绢云母等矿物构成的非矿条带互层，常见揉皱构造，即含矿条带与非矿条带发生同步褶曲（图 4b）。矿石中常见脉状黄铁矿切穿条带状矿石（图 4a）、块状矿石、脉石。

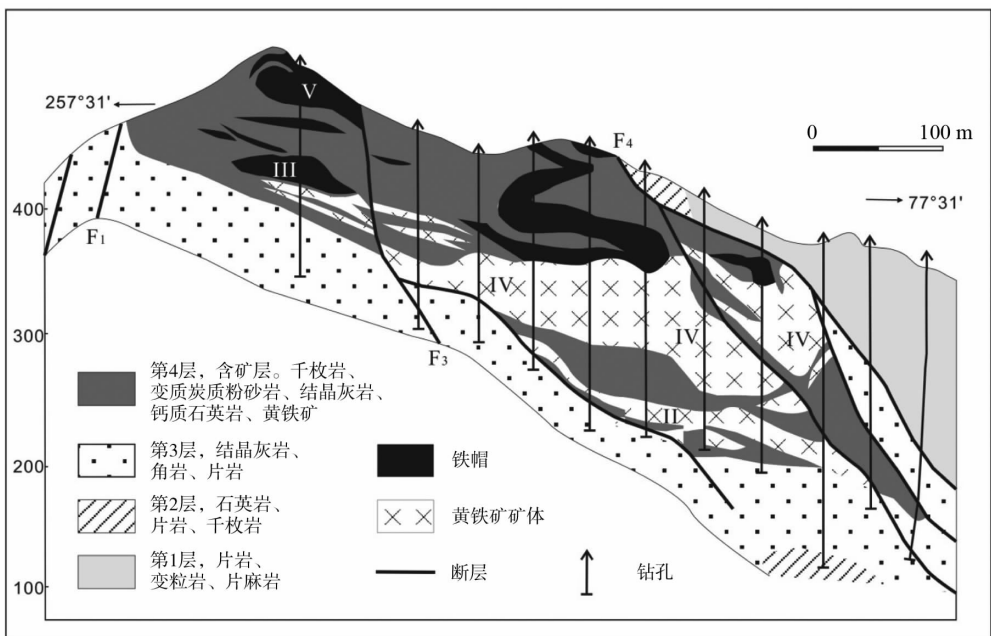


图 3 9 号勘探线剖面图（据参考文献 [31] 修改）

Fig. 3 Geological profiles of No. 9 exploration line (modified from [31])

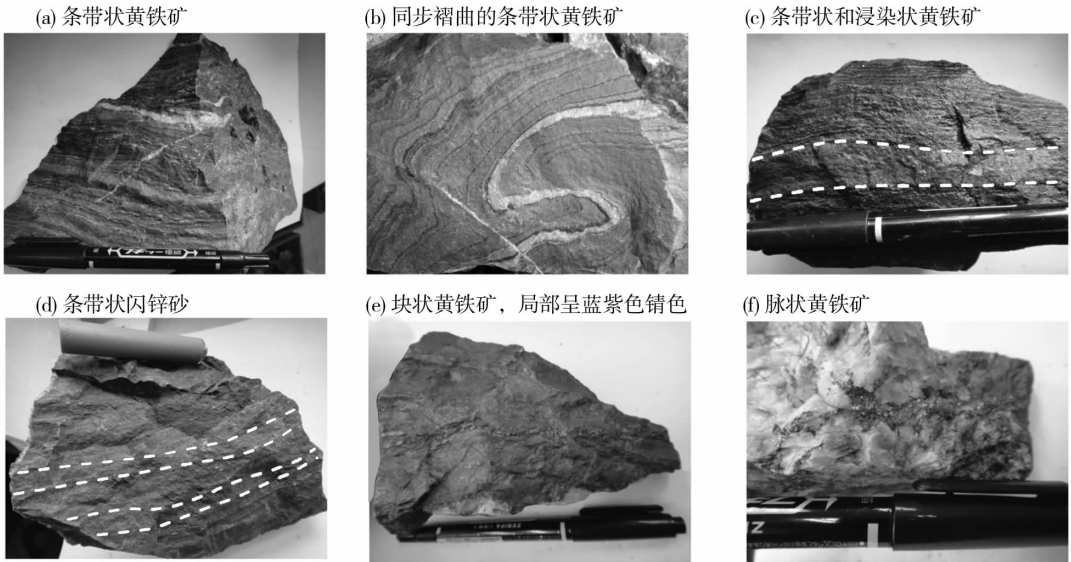


图 4 云浮硫铁矿黄铁矿及闪锌矿手标本照片

Fig. 4 Photos of pyrite and sphalerite specimen from the Yunfu Pyrite deposits

矿相镜下观察显示, 条带状黄铁矿与浸染状矿石中黄铁矿多呈半自形 - 自形结构 (图 5a、c); 块状矿石中黄铁矿呈板状出现, 颗粒之间紧密接触, 不易分辨, 呈他形 - 半自形 (图 5f); 脉状矿石中黄铁矿颗粒较小, 晶形呈他形 - 半自形 (图 5a)。在闪锌矿矿石存在条带状黄铁矿, 并且可见到方铅矿、磁黄铁矿以及黄铁矿的同质异象体白铁

矿与闪锌矿共生 (图 5d), 后期的黄铁矿交代前期形成的磁黄铁矿等金属矿物 (图 5b)。浸染状矿石中可以见到在前期形成的黄铁矿自形晶中由于受到应力作用产生的裂隙 (图 5c)。块状黄铁矿矿石在镜下观察可以见到两种粒度明显的黄铁矿 (图 5f), 粒度较小的黄铁矿板结在一起, 而粒度较大的黄铁矿呈脉状分布在前者中。

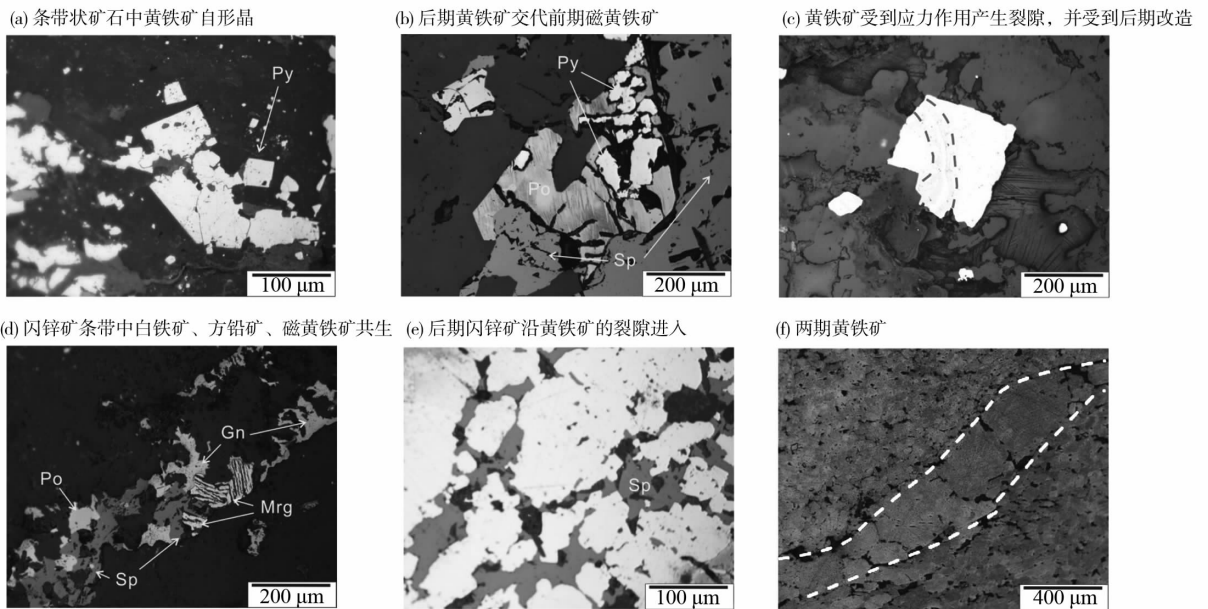


图 5 云浮硫铁矿金属矿物镜下照片

Py - 黄铁矿; SP - 闪锌矿; Gn - 方铅矿; Mrg - 白铁矿; Po - 磁黄铁矿

Fig. 5 Photos of metallic mineral under microscope from the Yunfu Pyrite deposits

4 微结构 SEM 研究

4.1 样品的采集、处理及测试方法

矿石样品采自云浮硫铁矿大降坪区段, 有条带状、浸染状、块状和脉状 4 种类型 (图 4)。根据手标本和镜下观察分别选取代表性区域各 2 处, 机械破碎后挑选表面较为平整的样品。清洗、干燥后进行喷金处理。样品的 SEM-EDS 测试工作在中山大学地球科学与工程学院扫描电镜室完成。扫描电镜室的扫描电镜是德国蔡司 (Zeiss) 公司的场发射 Σ IGMA 型扫描电镜, 20 kV 下分辨率可达 1.5 nm, 放大倍数 12 ~ 50 000X, 加速电压 100 V ~ 30 kV, 探针电流 4 pA ~ 40 nA。能谱仪是牛津仪器 X-Max 能谱仪, 探测器面积 150 mm², 最大计数率 20 000, 峰背比 20 000:1, 分辨率 200 eV。

4.2 黄铁矿微结构

本研究将 4 种类型黄铁矿在不同放大倍数下进行扫描电镜分析 (图 6、7)。目标矿物经能谱确认其成分为黄铁矿。

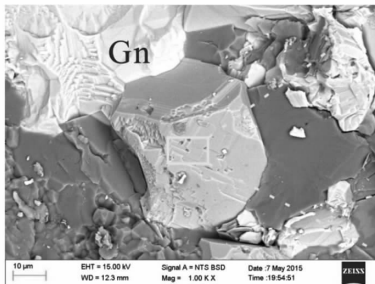
图 6a、b 为条带状黄铁矿的扫描电镜图像, 前者为 12.3 mm × 1 000 倍视野下背散射图像; 后者为 12.3 mm × 10 000 倍视野下的二次电子图像。图 6a 显示, 条带状矿石中黄铁矿呈立方体晶形分布于条带中, 且伴生有方铅矿等其他金属矿物, 伴生矿物晶形也多为自形。黄铁矿晶体颗粒较小, 多在 20 ~ 100 μ m 左右。图 6b 为图 6a 框选区进一步放

大图像。该图显示黄铁矿立方体的晶面发育良好, 晶体按照多个层位同时堆积的方式生长, 生长层光滑平整, 边缘平直。

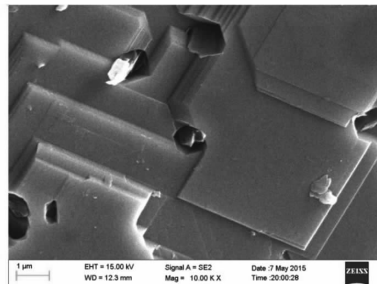
图 6c、d 为浸染状黄铁矿的扫描电镜图像, 前者为 10.4 mm × 501 倍背散射图像, 后者为 10.4 mm × 3 000 倍二次电子图像。图 6c 显示, 浸染状矿石中黄铁矿呈自形一半自形分布于样品中, 伴生有方铅矿等金属矿物 (图 8)。黄铁矿粒度要大于条带状矿石中黄铁矿, 一般在 100 ~ 200 μ m 左右。图 6d 为图 6c 黄铁矿晶面框选区进一步放大图像。该图显示浸染状矿石中黄铁矿也呈层状生长, 但生长层不如条带状矿石中黄铁矿平整, 生长层边缘呈曲线状。

图 7a-d 为块状矿石中黄铁矿的扫描电镜图像, 其中图 7a 为 9.8 mm × 502 倍二次电子图像, 图 7b 为 9.8 mm × 5 000 倍二次电子图像, 图 7c 为 9.8 mm × 1 010 倍二次电子图像, 图 7d 为 9.7 mm × 5 000 倍二次电子图像。图 7a 显示块状矿石中黄铁矿互相紧密接触, 大小不一且边界较难分辨, 从十几到几百 μ m 均可见, 几乎不存在其他金属矿物, 黄铁矿呈贝壳状断口状存在。图 7b 为图 7a 黄铁矿框选区进一步放大图像, 该图显示块状矿石中黄铁矿没有类似于条带状矿石和浸染状矿石那样的生长层, 取而代之的是类似于生长点的纳米颗粒。矿物的表面不平整, 边缘呈曲线状。图 7c 为块状矿石中样品表面的粒状黄铁矿, 该颗粒外围制样时

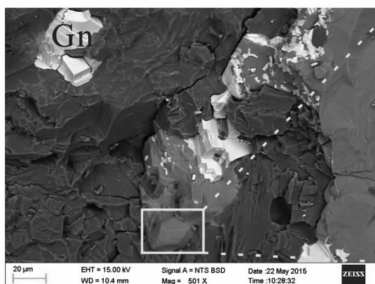
(a) 条带状矿石中黄铁矿自形晶



(b) 黄铁矿自形晶表面的阶梯状生长层



(c) 浸染状矿石中的黄铁矿自形晶



(d) 浸染状矿石中黄铁矿自形晶的微形貌

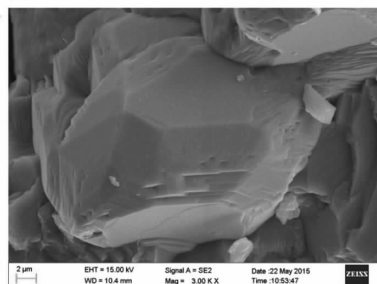


图 6 条带状矿石和浸染状矿石中黄铁矿的微形貌

Fig. 6 SEM photos of pyrite in banded and disseminated ores

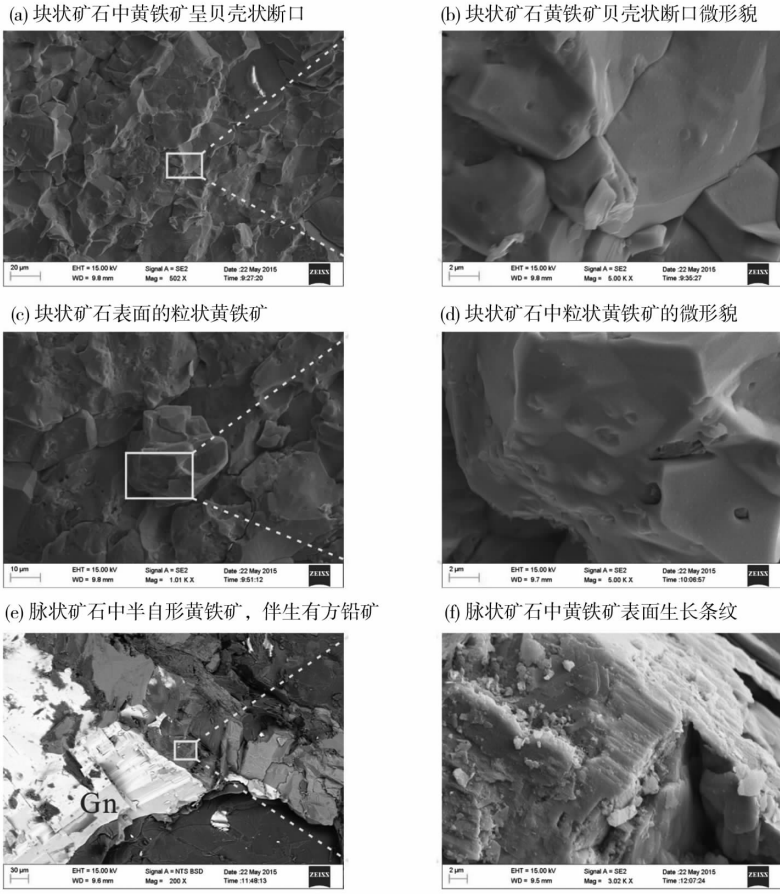


图 7 块状矿石与脉状矿石中黄铁矿的微形貌
Fig. 7 SEM photos of pyrite in massive and vein ore

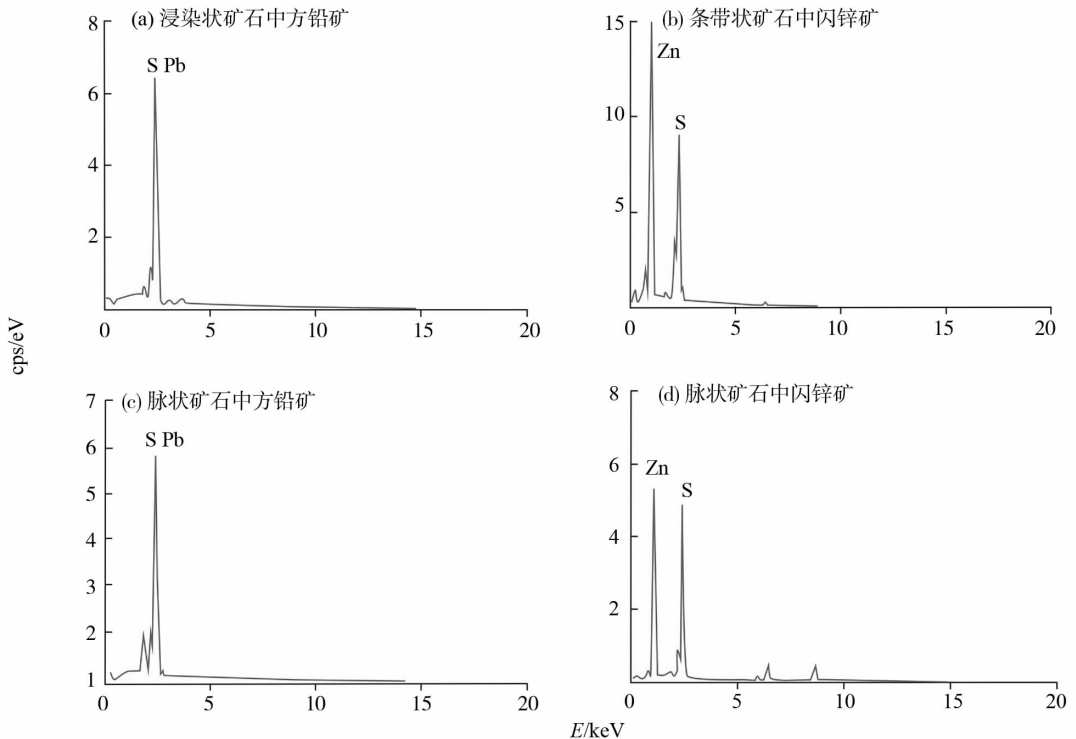


图 8 黄铁矿共生矿物的 EDS 谱图
Fig. 8 EDS spectrogram of mineral associated with pyrite

从紧密接触的黄铁矿集合体重脱离出来, 附于表面, 颗粒已经破碎, 但仍可见有类似于八面体的晶形。图7d为图7c框选区进一步放大的扫描电镜图像, 该图显示粒状黄铁矿中也没有类似于条带状矿石和浸染状矿石那样的生长层, 取而代之的是类似于生长点的纳米颗粒, 矿物的表面不平整, 凹坑发育, 边缘呈曲线状。

图7e、f为脉状矿石中黄铁矿的扫描电镜图像, 前者为9.6 mm×200倍背散射图像, 后者为9.5 mm×3 020倍二次电子图像。图7e显示脉状矿石中黄铁矿与方铅矿等金属矿物共生在一起(图8), 受到方铅矿及脉石矿物的限制, 黄铁矿晶形较差, 呈半自形—他形状, 晶面不完整。黄铁矿粒度多大于100 μm之间。图7f为图7e中框选区的进一步放大图像。该图显示脉状矿石中黄铁矿呈层状生长, 但生长层较条带状矿石黄铁矿为差, 生长层不够平整, 边缘也不如后者平直。

5 讨论

5.1 黄铁矿微组构与成矿期次划分

从矿床地质特征上看, III号矿体以条带状矿石为主, IV号矿体以块状矿石为主, 虽为不同类型, 但在深部却相连, 且IV号矿体中有条带状矿石残余, 说明矿体在前期形成后, 可能受到后期的改造作用。从矿石的结构构造上看, 条带状矿石中黄铁矿条带、“非矿条带”以及矿石的脉石矿物中(图4a、f)均出现被黄铁矿填满的裂隙, 块状矿石中常见后期热液脉穿插, 镜下观察其黄铁矿颗粒稍大, 边缘常被溶蚀呈港湾状(图5b), 说明矿石受到了后期的改造作用。浸染状黄铁矿出于条带状矿石的黄铁矿条带之间(图4c), 说明两者是同一期次所形成。块状矿石中存在粒度截然不同的两种黄铁矿, 说明块状矿石是经过后期的加富作用生成。从扫描电镜的图像看, 条带状矿石和浸染状矿石中黄铁矿晶形较好, 但颗粒较小, 脉状矿石晶形次之, 块状矿石晶形最难分辨, 但后两者颗粒较大, 这些现象印证了云浮硫铁矿两期成矿的观点。

综上所述, 云浮硫铁矿的形成至少经历了两个成矿阶段。第一阶段形成了条带状黄铁矿矿石及浸染状矿石, 根据条带状矿石、浸染状矿石的矿石矿物及脉石矿物组成可知, 该阶段形成的矿石矿物主要为磁黄铁矿、闪锌矿等矿物, 多呈自形—半自形, 多与石英、方解石、绢云母及炭质条带互层, 非矿条带中还可见炭质与黄铁矿的椭球状颗粒。在第二阶段, 根据块状矿石及脉状矿石中矿石矿物及

脉石矿物可知, 这一阶段形成的主要矿石矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿, 也有少量的白铁矿、方铅矿、黄铜矿生成。这一阶段出现的绿泥石等蚀变矿物也是与喷流阶段区分的良好指示。

5.2 黄铁矿微组构与形成环境

黄铁矿的结晶形态、习性与其生成温度有密切的关系。前人研究显示, 当温度达到或超过300℃时, 黄铁矿晶体通常以正八面体为主; 当温度介于300~200℃之间, 其晶形则明显向五角十二面体转变; 当温度降低至200℃以下, 黄铁矿通常以3组晶纹相互垂直的立方体出现^[32-35]。

根据扫描电镜观测结果, 条带状及浸染状矿石中黄铁矿以立方体为主(图6), 表明此时成矿系统温度在200℃以下, 而块状黄铁矿中出现粒状近似于正八面体黄铁矿, 此时成矿温度当在300℃以上(图7)。这印证了两期成矿的观点。

对云浮硫铁矿中不同类型黄铁矿的镜下及扫描电镜图像对比分析可知, 条带状矿石和浸染状矿石中黄铁矿的晶形最好, 但是颗粒较小(图6)。脉状矿石晶形次之, 块状矿石晶形最难分辨, 但两者颗粒较大(图7)。这显示在形成条带状矿石和浸染状矿石时, 成矿环境相对平静, 因而黄铁矿晶形发育较好; 而后期形成块状和脉状矿石时, 热液携带的成矿物质大量堆积, 黄铁矿晶体之间互相挤压, 导致晶形发育较差。

5.3 黄铁矿微组构与矿床成因

云浮硫铁矿矿体多呈层状、似层状和透镜状出于震旦系第4层中, 分布及产状严格受地层层位控制, 条带状矿石常见揉皱构造, 与围岩出现同步褶曲(图4a、b), 黄铁矿条带与石英、方解石、绢云母等条带呈互层产出, 这均是热水喷流沉积矿床的特点。

以块状矿石为主的IV号矿体和以条带状矿石为主的III号矿体在深部是相连的同一矿体, 且IV号矿体中有条带状矿石残余。条带状矿石中黄铁矿条带、“非矿条带”以及矿石的脉石矿物中均出现被黄铁矿填满的裂隙(图4a、f), 说明矿石受到了后期热液的改造作用。

黄铁矿中Co/Ni、S/Se的比值常被用来示踪其成因, 一般认为沉积及沉积改造矿床黄铁矿的Co/Ni比值小于1, S/Se比值大于10 000, 而热液矿床则相反^[36-37]。文献[11]的数据显示, 本区条带状黄铁矿单矿物Co/Ni比值小于1, 为0.43~0.95, 而块状黄铁矿单矿物比值大于1, 为1.02~1.53。以黄铁矿的标准硫含量(53.3%)粗略估

算 S/Se 比值均大于 100 万。因此其判断两种矿石均与沉积作用关系密切, 块状矿石受到后期改造的扰动。综合以上证据说明了 III 号矿体和 IV 号矿体均为热水沉积作用形成, 而 IV 号矿体叠加了后期热液的改造, 云浮硫铁矿是一个叠加了后期热液改造的热水喷流沉积矿床。

6 结 论

1) 云浮硫铁矿黄铁矿矿石按照结构构造可分为四类, 条带状、浸染状、块状、脉状。EDS 分析结果表明, 矿石中的金属矿物除黄铁矿及同质异象的白铁矿外, 存在的伴生矿物主要是方铅矿和闪锌矿。

2) 黄铁矿标型特征研究显示, 在早期热水喷流成矿阶段, 成矿温度较低, 可能低于 200 °C, 成矿环境相对平静; 而之后的热液改造阶段成矿温度较高, 可能高于 300 °C。

3) 除抬升至地表后的表生氧化阶段, 云浮硫铁矿可分为两个成矿期次。早期的热水喷流沉积阶段是主要成矿期, 主要形成了条带状矿石和浸染状矿石, 后期热液改造阶段对矿床有改造加富的作用, 形成了块状矿石和脉状矿石。

致谢: 本文野外工作得到了云硫集团地勘部门及中山大学何俊国博士的大力协助, 实验测试过程中得到中山大学周维丽硕士的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学: B 辑, 1987(4): 414-422.
SHUI T. Tectonic framework of the continental basement of south east China [J]. Science in China: Series B, 1987(4): 414-422.
- [2] 周新民, 朱云鹤. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质[J]. 中国科学: B 辑, 1992(3): 296-303.
ZHOU X M, ZHU Y H. Precambrian geology and magmatic mixing process in Jiangshao fault zone [J]. Science in China: Series B, 1992(3): 296-303.
- [3] GILDER S, GILL J, COE R, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[M]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101: 16137-16154.
- [4] 杨明桂, 梅勇文. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 1997(3): 52-59.
YANG M G, MEI Y W. Characteristics of geology and metallogenesis in the Qingzhou-Hangzhou paleoplate juncture [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 1997(3): 52-59.
- [5] 周永章, 曾长育, 李红中, 等. 钦州湾-杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向[J]. 地质通报, 2012, 31: 486-491.
ZHOU Y Z, ZENG C Y, LI H Z, et al. Geological evolution and ore-prospecting targets in southern segment of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay juncture orogenic belt, southern China [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(2/3): 486-491.
- [7] 杨荣勇, 曹建劲, 康显贵, 等. 广东云浮硫铁矿地质特征及成因[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1997, 36: 79-84.
YANG R Y, CAO J J, KANG X G, et al. The characteristics and genesis of Yunfu pyrite deposit in Guangdong Province [J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni, 1997, 36(4): 79-83.
- [8] 张乾, 张宝贵, 潘家永. 粤西大降坪黄铁矿矿床热水沉积硅质岩特征及稀土模式[J]. 科学通报, 1992, 37: 1588-1592.
ZHANG Q, ZHANG B G, PAN J Y, et al. Characteristics of hydrothermal sedimentary siliceous rocks and REE model of the Dajiangping pyrite deposit in western Guangdong [J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37: 1588-1592.
- [9] 张乾, 张宝贵, 曹裕波, 等. 粤西大降坪黄铁矿矿床硫、铅同位素组成初步研究[J]. 地质学报, 1993, 67: 232-242.
ZHANG Q, ZHANG B G, CAO Y B, et al. Preliminary discussion on sulfur and lead isotope compositions of the Dajiangping pyrite deposit in western Guangdong Province [J]. Acta Geologica Sinica, 1993, 67(3): 232-243.
- [10] 孙振家. 广东云浮硫铁矿矿床的成矿大地构造背景及其成矿特征[J]. 大地构造与成矿学, 1993(3): 63-70.
SUN Z J. Discussion on geotectonic setting and metallogenic characteristics of Yunfu pyrite deposit; Guangdong [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1993, 17(1): 63-70.
- [11] 张宝贵, 张乾, 潘家永. 粤西大降坪超大型黄铁矿矿床微量元素特征及其成因意义[J]. 地质与勘探, 1994(4): 66-71.
ZHANG B G, ZHANG Q, PAN J Y. Trace element characteristics and their geological significance of Dajiangping pyrite deposit, western Guangdong [J]. Geology and Exploration, 1994(4): 66-71.
- [12] 潘家永, 张乾, 张宝贵. 粤西大降坪黄铁矿矿床地球化学特征及成因探讨[J]. 地质与勘探, 1994, 13: 231-241.
PAN J Y, ZHANG Q, ZHANG B G. A preliminary discussion on geochemical characteristics and genesis of the

- Dajiangping pyrite deposit, western Guangdong Province [J]. *Geology and Prospecting*, 1994, 13(3): 231 - 241.
- [13] 王鹤年, 李红艳, 王银喜, 等. 广东大降坪块状硫化物矿床形成时代 - 硅质岩 Rb-Sr 同位素研究[J]. *科学通报*, 1996, 41: 1960 - 1962.
- WANG H N, LI H Y, WANG Y X, et al. The forming era of Dajiangping sulfide ore deposits in Guangdong Province—the Rb and Sr isotope study on silicalite [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(21): 1960 - 1962.
- [14] 曾晓东, 吴延之. 广东云浮硫铁矿矿床多成因复合富集机制[J]. *大地构造与成矿学*, 1998, 22(3): 242 - 251.
- ZENG X D, WU Y Z. Polygenetic mechanism for compound enriched Yunfu pyrite, Guangdong Province [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1998, 22(3): 242 - 251.
- [15] 李颀, 胡凯, 蒋少涌, 等. 粤西大降坪黄铁矿矿床 He-Ar 同位素和稀土元素组成及成矿物质来源探讨[J]. *南京大学学报*, 2006, 42: 611 - 620.
- LI K, HU K, JIANG S Y, et al. Geochemical characteristics of He-Ar isotopes and rare earth elements in Dajiangping pyrite deposit in western Guangdong, South China [J]. *Journal of Nanjing University*, 2006, 42: 611 - 620.
- [16] 宋世明, 胡凯, 温汉捷, 等. Mo 同位素对中低温热液成矿作用的指示: 以粤西大降坪黄铁矿矿床为例[J]. *科学通报*, 2011, 56: 1378 - 1385.
- SONG S M, HU K, WEN H J, et al. Molybdenum isotopic composition as a tracer for low-medium temperature hydrothermal ore-forming systems: A case study on the Dajiangping pyrite deposit, western Guangdong Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 1378 - 1385.
- [17] 宋世明. 广东大降坪和大宝山硫化物多元同位素与稀土元素地球化学示踪研究[D]. 南京: 南京大学, 2011: 1 - 153.
- SONG S M. Multi-isotopic and REE geochemistry on tracing forming of Dajiangping and Dabaoshan sulfide ore deposits in Guangdong Province, South China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011: 1 - 153.
- [18] 周永章, 刘建明, 陈多福, 等. 华南古海洋热水沉积作用研究概述及若干认识[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19: 114 - 118.
- ZHOU Y Z, LIU J M, CHEN D F, et al. Thread and knowledge to fossil sea-floor hydrothermal sedimentation of South China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2000, 19: 114 - 118.
- [19] 陈多福, 陈光谦, 潘晶铭. 广东云浮大降坪超大型黄铁矿矿床的热水沉积特征[J]. *地球化学*, 1998, 27(1): 12 - 19.
- CHEN D F, CHEN G Q, PAN J M, et al. Characteristics of the hydrothermal sedimentation of the Dajiangping superlarge pyrite deposit in Yunfu, Guangdong Province [J]. *Geochemistry*, 1998, 27(1): 12 - 19.
- [20] 陈多福, 马绍刚, 董维权, 等. 广东大降坪黄铁矿矿床的铅、钨同位素及金属成矿物质来源探讨[J]. *矿床地质*, 1998, 17(3): 215 - 223.
- CHEN D F, MA S G, DONG W Q, et al. Pb and Nd isotopes of the Dajiangping pyrite deposit, Guangdong province, and its metallic ore source [J]. *Mineral Deposits*, 1998, 17(3): 215 - 223.
- [21] 周涛发, 张乐骏, 袁峰, 等. 安徽铜陵新桥矿床 Cu - Au - S 黄铁矿微量元素 LA - ICP - MS 原位测定及其对矿床成因的制约[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 306 - 319.
- ZHOU T F, ZHANG L J, YUAN F, et al. LA-ICP-MS in situ trace element analysis of pyrite from the Xinqiao deposit Cu-Au-S deposit in Tongling, Anhui, and its constraints on the ore genesis [J]. *Geoscience Frontiers*, 2010, 17(2): 306 - 319.
- [22] 张宇, 邵拥军, 周鑫等. 安徽铜陵新桥铜硫铁矿床胶状黄铁矿主、微量元素特征[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(12): 3492 - 3502.
- ZHANG Y, SHAO Y J, ZHOU X, et al. Major and trace elements' characteristics of colloidal pyrites in Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling, Anhui Province, China [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(12): 3492 - 3502.
- [23] 谢巧勤, 陈天虎, 范子良, 等. 铜陵新桥硫铁矿床中胶状黄铁矿微尺度观察及其成因探讨[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(12): 2665 - 2674.
- XIE Q Q, CHEN T H, FAN Z L, et al. Morphological characteristics and genesis of colloform pyrite in Xinqiao Fe-S deposit, Tongling, Anhui Province [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2014, 44(12): 2665 - 2674.
- [24] 李胜荣. 成因矿物学在中国的传播与发展[J]. *地学前缘*, 2013, 20(3): 46 - 54.
- LI S R. On the dissemination and development of genetic mineralogy in China [J]. *Geoscience Frontiers*, 2013, 20(3): 46 - 54.
- [25] 周永章, 张恩, 陈炳辉, 等. 华南云开变质地体基底与成矿[J]. *矿床地质*, 2002, 21: 323 - 325.
- ZHOU Y Z, ZHANG E, CHEN B H, et al. Basement and its mineralization of Yunkai metamorphic block, south China [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21: 323 - 325.

- ter use efficiency of soil water in semi arid area of Agricultural Technology [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2007, 13(6): 434 - 435.
- [17] 姜逢清, 李珍, 胡汝骥. 20 世纪下半叶干旱对新疆农业的影响及灾害链效应[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(4): 465 - 473.
- JIANG F Q, LI Z, HU R J. Influences of drought on agriculture and disaster-chain effect during the second half of the 20th century in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(4): 465 - 473.
- [18] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 王树森, 邓根云. 地膜覆盖增温机制研究[J]. *中国农业科学*, 1991(3): 74 - 78.
- WANG S S, DENG G Y. Study on the mechanism of increasing temperature of plastic film mulching [J]. *Agricultural Sciences in China*, 1991(3): 74 - 78.
- [21] 王秀康, 李占斌, 邢英英. 覆膜和施肥对玉米产量和土壤温度、硝态氮分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 884 - 897.
- WANG X K, LI Z B, XING Y Y. Effects of mulching and fertilization on maize yield, soil temperature and nitrate-N distribution [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(4): 884 - 897.
- [22] 周丽敏. 黄土高原双垄覆膜和地槽集水技术对土壤水温、土壤养分及作物产量的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- ZHOU L M. How the techniques of double ridges and furrows with plastic mulch and rainwater harvest with subgroove facility affect soil moisture & temperature, soil fertility and crop yield in the semiarid Loess Plateau of China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [23] 寇江涛, 师尚礼, 周万海, 等. 垄覆膜集雨种植对二年龄苜蓿草地土壤养分的影响[J]. *草业学报*, 2011, 20(5): 207 - 216.
- KOU J T, SHI S L, ZHOU W H, et al. Soil nutrient in two-year alfalfa field on condition of film-mulching rainfall harvesting cultivation [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(5): 207 - 216.
- [24] 宋秋华, 李凤民, 王俊, 等. 覆膜对春小麦农田微生物数量和土壤养分的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2125 - 2132.
- SONG Q H, LI F M, WANG J, et al. Effect of various mulching durations with plastic film on soil microbial quantity and plant nutrients of spring wheat field in semi-arid loess plateau of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2125 - 2132.
- (上接第 157 页)
- [27] 周汉文, 游振东, 钟增球, 等. 粤西云开前寒武基底麻粒岩、紫苏花岗岩放射性元素分布特征与岩石成因讨论[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1996, 21(5): 529 - 535.
- ZHOU H W, YOU Z D, ZHONG Z Q, et al. Radioactive element distribution in the granulites and charnockites of the Precambrian basement of Yunkai, Western Guangdong [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1996, 21(5): 529 - 535.
- [30] 广东省地质局 723 地质大队. 广东云浮大降坪黄铁矿矿区详细勘探报告[R]. 1965: 1 - 61.
- The No. 723 Geological Brigade of Guangdong Geological Bureau. Detailed exploration report of the Dajiangping pyrite deposit in Yunfu, Guangdong [R]. 1965: 1 - 61.
- [31] 化工部地质勘探公司广东地质勘查大队. 广东省云浮市大降坪黄铁矿尖山区段勘探报告[R]. 1993: 1 - 61.
- Guangdong Geologic Exploration Institute of Chemical Industry. Exploration report of the Jianshan section in Dajiangping pyrite deposit, Yunfu, Guangdong province [R]. 1993: 1 - 61.
- [32] POURGHAMRANI P, AKHGAR B. Characterization of Structural Changes of Mechanically Activated Natural Pyrite Using XRD Line Profile Analysis [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 134: 23 - 28.
- [33] 于吉顺, 雷新荣, 张锦化, 等. 矿物 X 射线粉晶鉴定手册[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- YU S J, LEI X R, ZHANG J H, et al. Mineral X-ray powder identification manual [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011.
- [34] 廖立兵, 李国武. 粉晶 X 射线衍射在矿物岩石学研究中的应用[J]. *物理*, 2007, 36(6): 460 - 464.
- LIAO L B, LI G W. Application of powder X-ray diffraction in mineralogy and petrology [J]. *Physics*, 2007, 36(6): 460 - 464.
- [35] JHA V, SINGH S, VENKATESH A. Invisible Gold Occurrence Within The Quartz Reef Pyrite of Babaikundi Area, North Singhbhum Fold-and-Thrust Belt, Eastern Indian Shield: Evidence from Petrographic, SEM and EPMA Studies [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 426 - 432.
- [36] 涂光焱. 地球化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- TU G C. Geochemistry [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984.