

文章编号 10258-7106 (2008) 06-0681-14

“石碌式”铁氧化物-铜(金)-钴矿床成矿模式初探*

许德如¹, 王力^{1,2}, 肖勇³, 刘朝露³, 符启基³, 蔡周荣^{1,2}, 黄居锐³

(1 中国科学院广州地球化学研究所石油天然气与矿产资源研究中心, 广东 广州 510640; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3 海南省地质矿产勘查开发局资源环境调查院, 海南 海口 570260)

摘 要 石碌铁矿是中国著名的以富赤铁矿为主的大型矿集区, 除铁矿外, 还共生或伴生铜、钴、镍、银、铅、锌等金属矿产和白云岩、石英岩、重晶石、石膏、硫等非金属矿产。文章通过对石碌铁矿的成矿地质条件和控矿因素的再认识, 结合成矿时代的探讨和矿床地球化学资料, 认为该矿床严格受层位(主要为青白口纪石碌群第 6 层)、岩性(钙镁质砂卡岩等)、构造(复式向斜、层间滑脱带、片理和劈理)和/或岩性界面等控制, 并强调石碌铁矿所经历的成岩成矿作用与海西期-印支期花岗岩侵位所导致的伸展构造(变质核杂岩构造)密切相关, 而岩浆热扰动则是导致深部含矿热卤水形成、上升并渗滤、交代矿源层的重要因素。最后, 作者将该矿床称之为“石碌式”热液铁氧化物-铜(金)-钴矿床, 初步将其归属为 IOCG(即热液铁氧化物-铜-金-钴)型层控式钙镁质砂卡岩矿床, 并初步构建了该类型矿床的成岩成矿模式。

关键词 地质学; 成矿地质条件; 控矿因素; 成岩成矿模式; “石碌式”热液铁氧化物-铜(金)-钴矿床; 海南省
中图分类号: P618.31, P618.41, P618.62 **文献标志码**: A

A preliminary discussion on metallogenic model for Shilu-type iron oxide-copper-gold-cobalt ore deposit

XU DeRu¹, WANG Li^{1,2}, XIAO Yong³, LIU ZhaoLu³, FU QiJi³, CAI ZhouRong^{1,2} and HUANG JuRui³

(1 Research Center of Petroleum, Natural Gas and Mineral Resources, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Hainan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Haikou 570260, Hainan, China)

Abstract

The Shilu iron ore deposit in Hainan Island is one of the famous mining areas in China not only for large amounts of hematite resources but also for considerable economic values of associated metals such as copper, cobalt, nickel, silver, lead and zinc as well as of nonmetallic resources like dolomite, quartzite, barite, gypsum and sulfur. The authors re-studied geological conditions responsible for the formation of the Shilu ore deposit and re-evaluated the major factors controlling the orientations of iron, copper and cobalt ore bodies. The results obtained and the evidence of ore-forming age and geochemical data show that the Shilu ore deposit is strictly controlled by strata (mainly the upper 6th formation of the Meso-Neoproterozoic Shilu Group), lithologies (chiefly the magnesian skarn), structures (syncline, interlayer-surging belt, schist and cleavage) and/or interfaces between different lithologies. Diagenesis and metallogenesis in the studied deposit are closely associated with the extension structure, i. e., the metamorphic core complex, which was induced by the emplacement of Hercynian-

* 本文得到全国危机矿山接替资源找矿项目(编码:200646092)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(编码:2009CB421001)和国家自然科学基金项目(编码:40773017)的联合资助

第一作者简介 许德如,男,1966 年生,博士,研究员,主要从事大陆边缘构造与成矿学研究。E-mail: xuderu@gig.ac.cn

收稿日期 2008-01-07; 改回日期 2008-09-03。许德焕编辑。

Indosinian granites. However, magmatic energy after the late Paleozoic not only led to the formation of the ore-bearing hydrothermal brine at depth but also resulted in the upward migration of the ore-bearing hydrothermal water along various structural pathways and/or interfaces between lithologies. During this process, the ore-bearing hydrothermal brine might infiltrate into and interact with host rocks. As a result, the iron, cobalt and copper-polymetallic ore deposit was formed. Based on the above understanding, the authors have named it for the first time Shilu-type iron oxide-copper-gold-cobalt deposit, and assigned the studied deposit to IOCG-type, i. e., iron oxide-copper-gold-cobalt-type strata-bound skarn deposit. A metallogenic model for the studied deposit is also put forward in this paper.

Key words: geology, geological conditions for mineralization, ore-controlling factor, petrogenetic and metallogenic model, Shilu-type iron oxide-copper-gold-cobalt deposit, Hainan Province

位于海南省昌江县境内的石碌铁矿是以铁矿石为主(主要是赤铁矿,少量为磁铁矿等),共生或伴生有钴、铜、镍、铅锌、银(金)等金属矿产以及白云岩、重晶石、石膏、硫等非金属矿产的大型矿床,曾被誉为“亚洲最大的富铁矿”。已探明该矿区铁矿石储量达 4.16 亿 t 以上(平均品位 51.15%,最高达 68%),钴矿石储量为 3.52 Mt(平均品位 0.31%,最高达 1.1%),铜矿石储量为 2.08 Mt(平均品位 1.58%,最高达 18%),因而,该矿床具有很高的经济价值和重要的研究意义。

石碌铁矿已有 50 多年地质勘探和开采历史,前人还围绕该矿床的成因和找矿方向进行过诸多研究(中国科学院华南富铁科学研究队,1986)。但因该矿床的成矿地质条件复杂、矿床地质特殊,故对其成因一直未能取得统一认识,尚存在下列不同观点:①铁、钴铜矿床均为高温热液接触交代成因;②铁矿床为沉积变质成因,钴铜矿床为热液成因;③铁、钴铜矿床均为卤水沉积变质成因;④铁、钴铜矿床均为火山-沉积变质成因(许德如等,2007a)。近年来,围绕新一轮深边部找矿部署,笔者据成矿和控矿地质条件,对该矿床的成因进行了重新认识,并初步总结了该类型矿床的成矿模式,同时提出了尚需解决的问题。

1 成矿构造背景

海南岛位于欧亚板块、印度-澳大利亚板块和太平洋板块的交接部位。以九所-陵水断裂带为界,可将其划分为 2 个不同的大地构造单元,即北部的华南褶皱系和南部的琼南微陆块(南海地台)(汪啸凤等,1991;海南省地质矿产勘查开发局,1997),石碌铁矿即分布于华南褶皱系海南五指山褶皱带的西

段。石碌铁矿区及近外围出露的地层主要有长城系抱板群、青白口系石碌群、震旦系石灰顶组、志留系空列村组、石炭系南好组和青天峡组、二叠系峨查组、鹅顶组和南龙组等(图 1)。区域侵入岩分布广泛,主要有海西期-印支期似斑状花岗岩和燕山期花岗岩,其次为中元古代片麻状花岗岩等。区域构造主要发育近 EW 向昌江-琼海构造带和 NE 向戈枕断裂带。在矿区的近外围,已发现有铁、铜、铅锌、钨、锡、金等金属矿床(点)及石灰岩、粘土等非金属矿床(点)多处。

2 矿床地质特征

2.1 主要控矿构造

石碌铁矿位于琼西近 EW 向昌江-琼海深大断裂和 NE 向戈枕韧-脆性断裂的交汇部位。一个轴向近 EW 的复式向斜主要控制了该矿区赋矿地层(主要为石碌群)和矿体的产出(图 2),铁矿体、钴铜矿体即赋存在该复式向斜的槽部及两翼向槽部过渡的部位(图 3)。该复式向斜的西段紧闭且翘起,向东倾伏开阔,并为次级近 SN 向的横跨褶皱所叠加,总体显示“S”型褶皱构造特征,即褶皱轴线在平面上呈“S”型展布,轴面的三维空间形态呈麻花状,褶皱中段轴面近于直立,西段轴面倾向 NE,东段轴面呈波状起伏。该矿区内,NW-NNW 向、NEE-近 EW 向和 NNE-近 SN 向的断裂构造亦较发育,其中,矿区南部 of the NNW 向 F1 断裂(图 2)则可能为一横贯矿区的主导矿构造;而一系列近 SN(NNW/NNE)向的正断层不仅在矿区东部横截该复式向斜,而且使断层东盘的矿体滑移,并自西向东,矿体的埋深逐渐加大(图 4)。

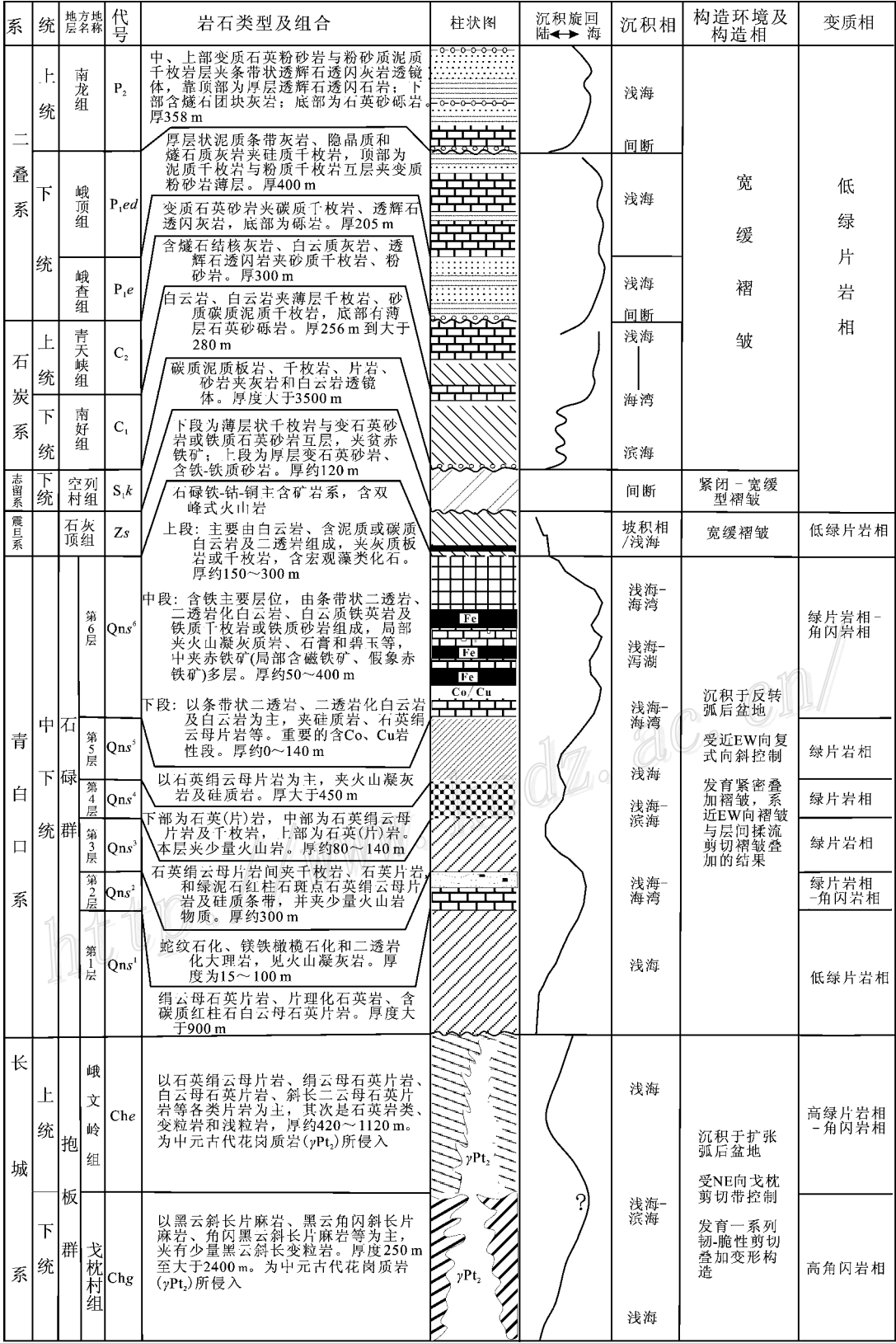


图 1 海南石碌铁矿区及邻区地层综合柱状图
二透岩指透辉石透闪岩(diopside and tremolite rock); γPt₂—中元古代片麻状花岗岩
Fig. 1 Composite stratigraphic column of Shilu iron ore district in Hainan Province and its adjacent areas
γPt₂—Mesoproterozoic gneissic granite

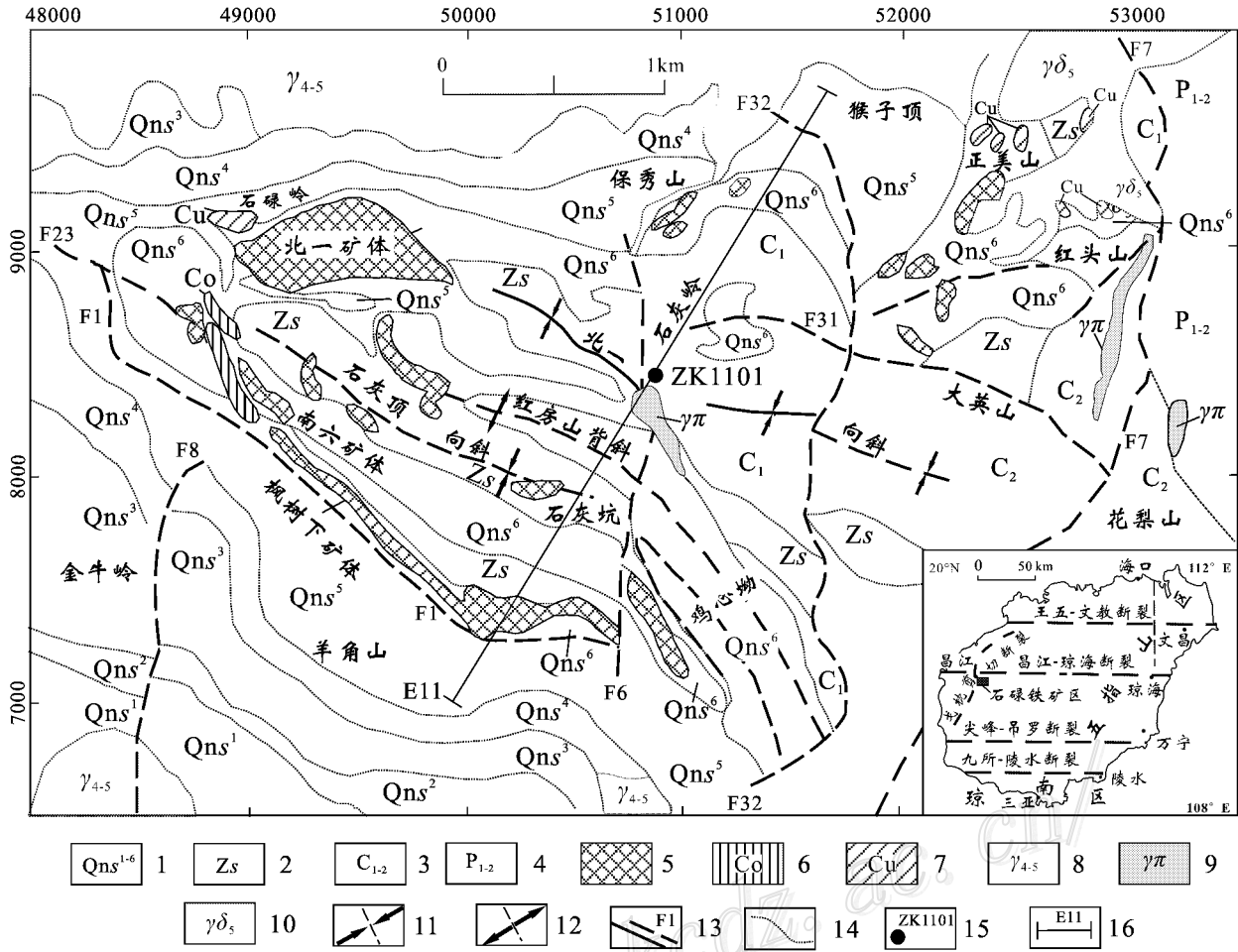


图 2 海南石碌铁矿区地质略图(据许德如等, 2007b 修改)

1—石碌群第 1 至第 6 层; 2—震旦系石灰顶组; 3—上、下石炭统; 4—上、下二叠统; 5—铁矿体; 6—钴矿体; 7—铜矿体; 8—海西期-印支期花岗岩; 9—燕山晚期花岗岩斑岩; 10—印支期粗中粒斑状黑云母花岗岩闪长岩; 11—向斜; 12—背斜; 13—实测及推测断裂; 14—地质界线; 15—钻孔; 16—勘探剖面线。图中地层代号见图 1

Fig. 2 Geological sketch map of Shilu iron ore district in Hainan Province(modified after Xu et al. 2007b)

1—1st~6th layers of Shilu Group; 2—Sinian Shihuiding Formation; 3—Lower-Upper Carboniferous; 4—Lower-Upper Permian; 5—Iron ore body; 6—Cobalt ore body; 7—Copper ore body; 8—Hercynian-Indosinian granite; 9—Late Yanshanian granitic porphyry; 10—Indosinian middle to coarse grained biotite-bearing granodiorite; 11—Syncline; 12—Anticline; 13—Measured and inferred faults; 14—Geological boundary; 15—Drill hole; 16—Cross section through orebody. Symbols of strata in Fig. 2 as for Fig. 1

2.2 赋矿围岩

石碌铁矿区出露的地层有石碌群、震旦系、石炭系和二叠系等,而寒武系至泥盆系在该矿区缺失。各地层的岩石类型、厚度和含矿性等见图 1。其中,石碌群是该矿区的主要赋矿地层,是一套以(低)绿片岩相变质为主的、浅海相和浅海-泻湖相(含铁)火山-碎屑沉积岩和碳酸盐岩建造。该建造自下而上可分为 6 层(图 1),其中,第 1、3、4、5 层主要为千枚岩、石英绢云母片岩、石英岩等,第 5 层还夹一层岩屑凝灰岩,普遍含红柱石,少见电气石。第 2 层为结晶白云岩,普遍透辉石透闪石化及镁铁橄榄石化、蛇

纹石化,局部含燧石结核、菱镁矿和火山凝灰岩。第 6 层是铁、钴铜等矿产的主要赋存层位,又可细分为 3 段:上段为含白云岩的无铁矿层,主要由白云岩、含泥质或碳质白云岩及二透岩(即透辉石透闪石岩)组成,夹灰质板岩或千枚岩;中段是赤铁矿(少为磁铁矿等)的主要含铁层位,由条带状含石榴子石二透岩、二透岩化白云岩、铁质千枚岩或铁质砂岩组成,局部夹石膏、重晶石和碧玉等;下段是重要的含钴铜层位,以条带状二透岩、二透岩化白云岩及白云岩为主,夹硅质岩和石英绢云母片岩等。第 6 层顶部还出现火山凝灰质熔岩、火山碎屑岩(吕古贤, 1988)。

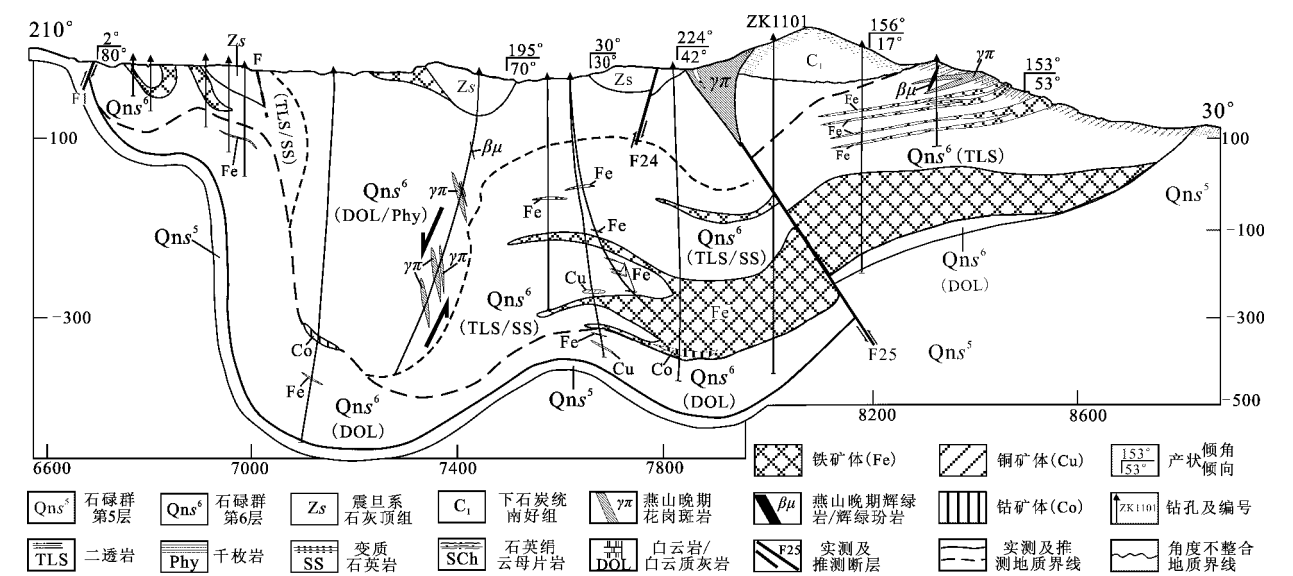


图 3 石碌铁矿区 E11 勘探线剖面图
E11 勘探剖面线的位置见图 2
Fig. 3 Geological section through the ore body and strata in Shilu iron ore district
Location of E11 exploration section line as for Fig. 2

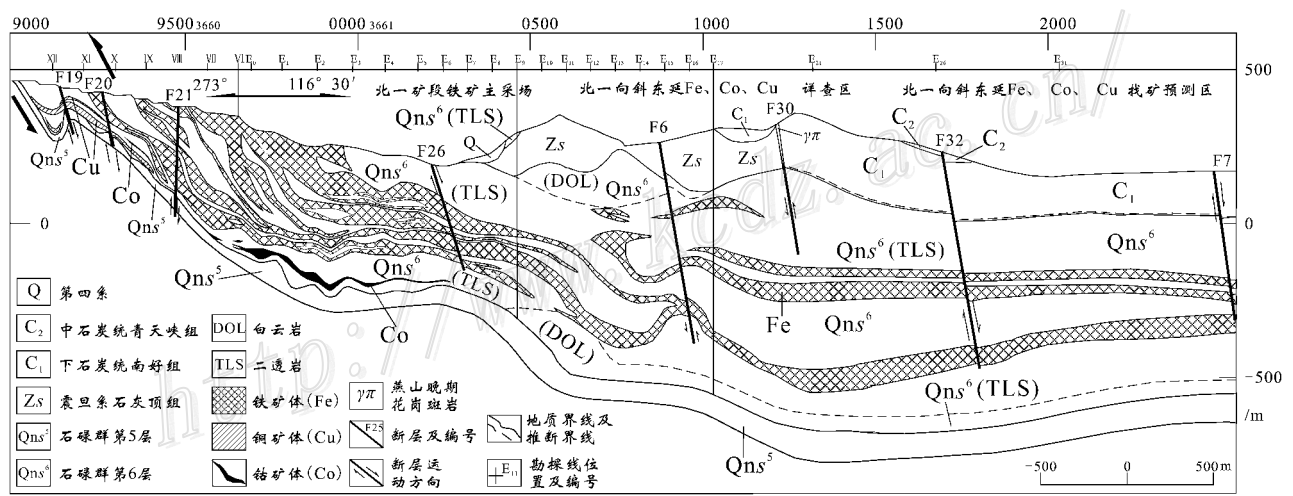


图 4 石碌铁矿区北一-花梨山区段纵剖面图
Fig. 4 Vertical section of Baiyi-Hualishan segment in Shilu iron ore district

震旦系石灰顶组是该矿区的次要含铁(锰)层位,为一套由厚层变石英砂岩、含铁石英砂岩夹砂质碳质千枚岩及石英粉砂岩等组成的陆源碎屑岩,与下伏的青白口系石碌群呈断层不整合接触。

2.3 矿区花岗岩特征

岩体主要分布在石碌矿区的南部、北部和西部。南部和北部为海西期-印支期斑状/似斑状(角闪)黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩(图 2),普遍具片麻状构造,部分为条带状、眼球状构造(许德如等, 2007a),其 K-Ar、Rb-Sr 和锆石 U-Pb 同位素年龄为

190~320 Ma(汪啸风等,1991;侯威等,1996)。矿区西部为燕山晚期花岗岩、角闪黑云母二长花岗岩,其 K-Ar 同位素年龄为 128~134 Ma(汪啸风等, 1991;侯威等,1996)。海西期-印支期花岗岩属陆壳改造型钙碱性花岗岩: $\epsilon_{Nd}(t) = -17.2 \sim -4.2$, $I_{Sr} = 0.7063 \sim 0.7118$,具中等偏高的硅($SiO_2 = 68.8\% \sim 73.5\%$)和铝($Al_2O_3 = 12.8\% \sim 15.2\%$),其稀土元素球粒陨石标准化模式为向右陡倾且呈显著负 Eu 异常的“V”字型曲线[(La/Yb) $_N = 17.4$, $\delta Eu = 0.49$]。燕山晚期花岗岩属同熔型钙碱性-碱性花岗

岩: $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.5 \sim -2.5$, 具有高硅($\text{SiO}_2 = 73.3\% \sim 75.8\%$)、高碱[($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)平均为 8%]和高铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.5\% \sim 12.9\%$)、稀土元素球粒陨石标准化模式变化较大[(La/Yb) $_N = 0.51 \sim 36.0$, $\delta\text{Eu} = 0.06 \sim 0.96$]等特征。这 2 期花岗岩均以壳源为主, 但有下地壳或地幔成分的加入, 其中, 燕山期幔源组分偏多。

该区内还发育有花岗斑岩、石英斑岩、闪长岩、煌斑岩、辉绿岩等燕山晚期岩脉, 其 K-Ar 同位素年龄为 97~100 Ma(侯威等, 1996)。花岗斑岩是分布最多的脉岩, 在平面上, 呈“S”形主要沿 NNW 至 NW 向和 NNE 至 NE 向 2 组断裂和/或不同岩层接触带分布(图 2), 侵入中心则位于该矿区的东南面; 在垂向上, 侵入于石碌群第 6 层(主含矿层)的一系列岩脉则位于矿体上方或旁侧, 且呈小型透镜体作雁列式左行斜列(图 3), 与 NNW 至 NW 向逆冲断层的运动方向一致。岩脉、岩脉就位的断裂、赋矿地层及矿体的“S”形形态, 指示这 4 者具有密切的成因联系。

2.4 矿床空间分布

在该矿区约 11 km² 范围内, 共计有铁矿体 38 个、钴矿体 17 个及铜矿体 41 个, 其中规模较大者有北一、南六、枫树下铁矿体和一号、四号铜矿体及一号、三号钴矿体, 占总储量的 90% 以上。在平面上, 铁、钴铜矿体大致以复向斜轴为中心, 分北、中、南 3 个矿带。北矿带分布于保秀-正美-红头山一带, 中矿带分布于石碌岭(包括红房山背斜南翼)-小英山-三棱山-大英山一带, 南矿带分布于南矿-枫树下一带(图 2)。中矿带位于复向斜的槽部, 南、北矿带则分别位于复向斜的南翼和北翼。前人据该矿区的地球物理和地球化学勘查资料, 共圈定出 14 个磁异常、11 个重力异常和一批 Pb、Zn、Cu 等次生晕异常。据已验证异常的结果看, 在具备石碌群第 6 层(含矿层)等有利成矿条件的地段, 凡有磁力和重力异常相叠加的部位, 往往可找到与之相应的铁矿体。

2.5 矿体产出特征

在垂向上, 铁矿体通常在上, 钴铜矿体在下, 自上而下大致呈铁→钴(金)顺序平行叠置, 且保持在 30~60 m 的距离(图 3 和图 4)。但无论是在垂向上还是在平面上, 铁、钴铜矿体均呈层状、似层状的“S”或反“S”形透镜体产出, 与构造面理(片理、劈理)及共轭剪张节理密切相关(许德如等, 2007a)。呈厚大透镜状的北一铁矿体还呈现分枝尖灭, 暗示在深

部连成一体。铁矿体与赋矿围岩主要呈突变关系, 出现断裂时则由含铁围岩向硅化围岩到贫铁矿再到富铁矿渐变过渡(许德如等, 2007a)。而呈小透镜体(中间膨大部位厚 7~9 m)连续产出的钴铜矿体则主要赋存于石碌群第 5 层顶部与第 6 层底部的白云岩、二透岩过渡带或构造破碎带内(图 5), 显示出菱形块状或囊状、条带状、不规则脉状和网脉状等, 在强构造应变带内则呈雁列式透镜状矿体。

2.6 矿石类型及结构构造

铁矿石分为原生矿和坡积矿 2 类; 其中原生矿又分为平炉矿(H1)、低硫高炉矿(H2)、高硫高炉矿(H3)、贫矿(H4)和表外次贫矿(H5) 5 个工业品级。矿石矿物主要是赤铁矿, 次为磁铁矿等; 富铁矿的脉石矿物主要是石英和绢云母, 而贫铁矿的则有石英、透辉石、透闪石、石榴子石、绿帘石、绿泥石、绢云母、方解石、白云石和重晶石等。矿石构造以鳞片状为主(图 6a), 次为菱形块状及条带状, 角砾状少见; 矿石结构以细鳞状变晶为主, 次为变余粉砂和鲕状结构等。有害杂质硫、磷(P_2O_5 普遍低于 0.05%) 等含量低, 且含有镓、铟、锗等。

钴铜矿矿石主要有含钴黄铁矿型钴矿石、含钴磁黄铁矿型钴矿石和黄铜矿型铜矿石等 3 种工业类型, 次为氧化矿石。主要矿石矿物为含钴黄铁矿、黄铜矿、含钴磁黄铁矿, 局部出现辉钴矿、斑铜矿、辉铜矿等; 脉石矿物与铁矿石类似, 矿石多伴生 Ni、Ag、S 等有用元素, 有害杂质 As、Zn、Sb、Hg 等含量则普遍较低。矿石构造主要有条带状(图 6b)、致密块状、不规则脉状和网脉状等, 局部为角砾状; 矿石结构主要有胶状、隐晶(微晶)致密块状, 次为细粒、中粗粒及他形-半自形粒状; 含钴黄铁矿呈胶状-隐晶状、细晶状、斑晶状和粗晶状结构, 而不含钴磁铁矿结晶粗大, 呈脉状、浸染状出现在矿石及围岩裂隙中。

2.7 蚀变类型

在该区内, 除区域变质和热接触变质导致产生绿片岩相变质岩、赤铁矿片理化及近接触带红柱石角岩化、部分赤铁矿体磁铁矿化和侵入体边缘少量的石榴子石和透辉石化外, 热液蚀变主要有 3 期(图 6c、6d 和图 7): 第 1 期热液蚀变导致钙镁质砂卡岩化, 并形成赋存于此类砂卡岩内的铁、钴铜矿体, 其岩性包括条带状石榴子石二透岩、条带状黑云母二透岩、条带状含钾长石眼球二透岩、二透岩化白云岩。钙镁质砂卡岩化又可分为 2 个亚期: 早期产生石榴子石、透辉石、磁铁矿和石英、方解石等, 石榴

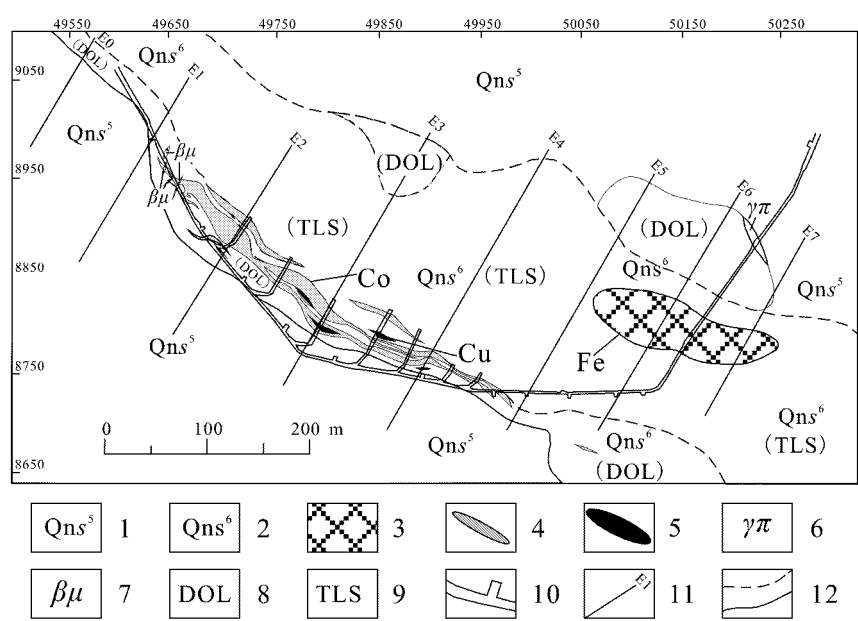


图 5 石碌铁矿矿区北一矿段 -150 m 标高钴铜矿体平面分布图

1—石碌群第 5 层；2—石碌群第 6 层；3—铁矿体（Fe）；4—钴矿体（Co）；5—铜矿体（Cu）；6—燕山晚期花岗斑岩；7—燕山晚期辉绿岩脉；8—白云岩；9—二透岩；10—坑道；11—勘探线；12—地质（岩层）界线

Fig. 5 Planar map showing distribution of cobalt and copper ore bodies at -150 m level in Beiyi segment of Shilu iron ore district

1—5th layer of Shilu Group；2—6th layer of Shilu Group；3—Fe orebody；4—Co orebody；5—Cu orebody；6—Late Yanshanian granitic porphyry；7—Late Yanshanian diabase dike；8—Dolomite；9—Diopside and tranolite rock；10—Gallery；11—Exploration line；12—Geological (lithologic) boundary

子石呈浅红色,主要为钙铁榴石,次为钙铝榴石和锰铝榴石,沿贫铁矿体和富铁矿体的片理面产出,遭受强构造应变后呈藕节状石香肠和钩状褶皱(图 6c);晚期因部分透辉石蚀变及伴随的氧化蚀变,形成透辉石、透闪石(阳起石)、绿帘石、黑云母、方解石、石英、赤铁矿(磁铁矿)和/或镁橄榄石、蛇纹石、金云母及金属硫化物矿化等。第 2 期热液蚀变显示青磐岩化,产生绢云母、绿泥石、方解石、石英和金属硫化物矿化等,与燕山期花岗岩侵位有关。第 3 期热液蚀变与 NNE-NE 向和 NNW-NW 向共轭断裂及岩脉侵位有关,产生方解石脉、金属硫化物矿脉以及硅质岩、碎裂角砾岩。碧玉岩、含碧玉角砾的赤铁矿石中广泛出现 2 期以上的硫化物(主要为黄铁矿)矿脉及方解石脉,也反映出具有多期热液活动(图 6d)。

2.8 矿床构造变形

矿体和近矿围岩韧-脆性变形强烈。据矿区构造形迹,初步可划分出 D1、D2、D3、D4 等 4 个变形期(图 6e—h)(许德如等 2007a)。D1 期,受近 SN 向挤压而形成轴向近 EW 的紧闭褶皱;D2 期,为顺层伸展韧性剪切,构造式样有层内剪切褶皱(包括箭鞘褶皱)、膝状褶皱、无根钩状褶皱、顺层密集流劈理(片

理)、糜棱面理、条带条纹构造和拉伸线理等,D3 期,以发育韧-脆性褶皱-逆冲推覆断裂为特征,主要构造形迹有逆冲断层、断层劈理、“S”型反转褶皱和共轭剪张节理等,D4 期,为浅层次脆性变形,产生一系列近 SN 向平移正断层及菱形块状或角砾状铁矿、(胶状)角砾型钴铜矿。据海西期-印支期花岗岩显示出同构造侵位的特征,D2—D4 期构造变形实质上与花岗岩体上隆所导致的伸展构造(变质核杂岩?)有关。

3 讨论

3.1 成矿时代

到目前为止,石碌铁矿仍没有一个准确可信的年代学数据,这严重制约了对该矿床成矿机制的理解,主要原因之一是自上世纪 80 年代末以来,有关石碌铁矿的科研和找矿工作已基本停止,新的(成矿)地质理论和新的技术方法均未在该处得到应用。由于中国地质工作者长期以来将石碌铁矿归于沉积变质成因,因而认为,其主要成矿时代与其赋矿地层(即青白口系石碌群)的形成时代相同(张仁杰等,1992)。然而,因缺乏确切的古生物化石以及同位素

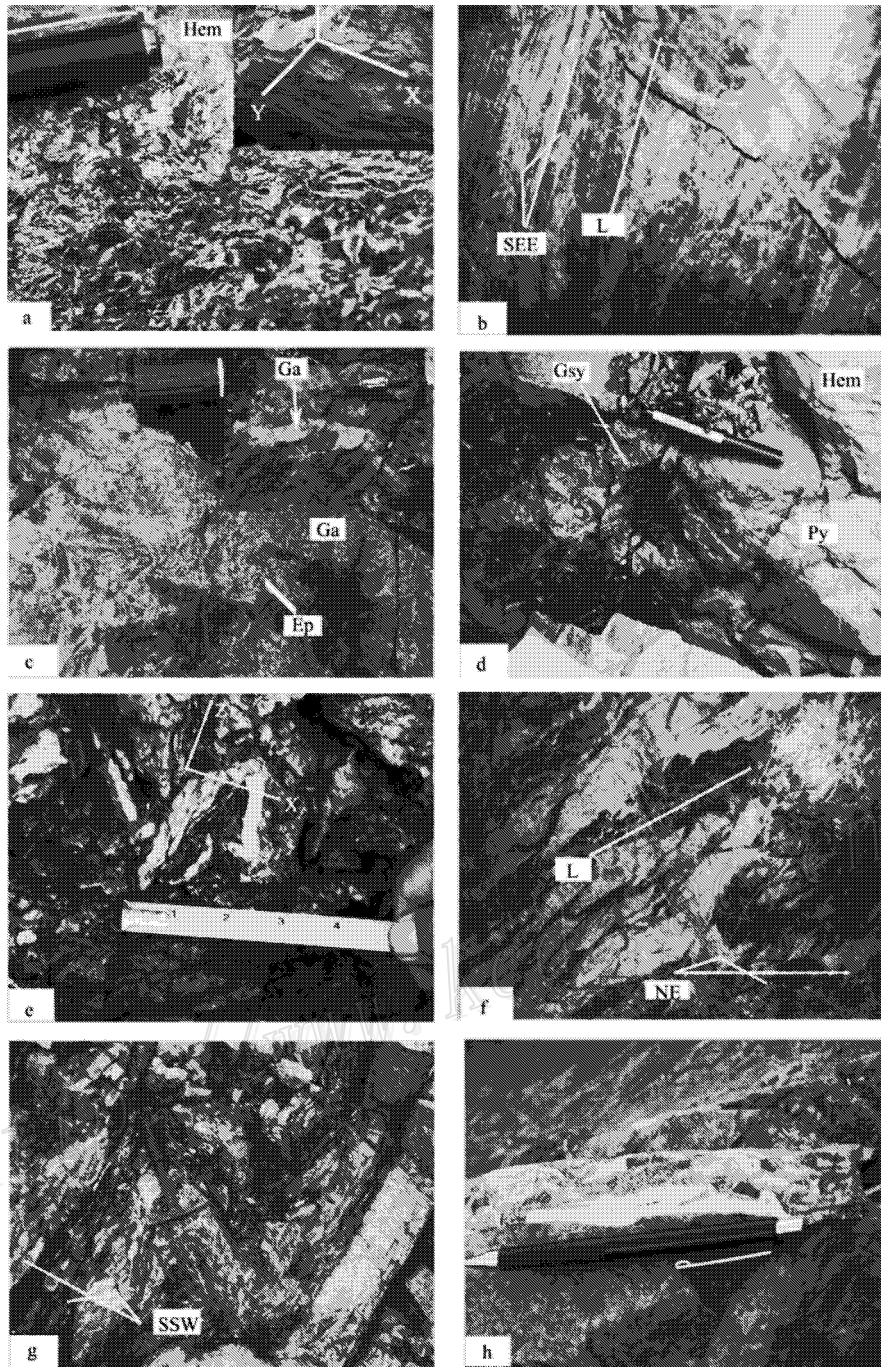


图 6 石碌铁矿区野外照片

a. 鳞片状赤铁矿(Hem)及其内 3 组片理(X、Y、Z 右上角插图); b. 条带状钴铜矿及拉伸线理(L); c. 贫铁矿内无根钩状褶皱的石榴子石(Ga) 右上角插图)及晚期绿帘石(Ep); d. 赤铁矿(Hem)内碧玉(Gsy)及晚期黄铁矿(Py); e. 韧性变形阶段形成的箭鞘褶皱(示 X-Z 面); f. 二透岩化白云岩发育的拉伸线理(L); g. 脆-韧性变形阶段形成的层间劈理; h. 脆性变形阶段形成的含赤铁矿角砾岩

Fig. 6 Field photograph of Shilu iron ore district

a. Microplaty hematite(Hem) and three suits of schist ,i.e. X, Y and Z(inset in upper right); b. Stretching lineation(L) in banded Co/Cu ore ; c. Garnet(Ga) displaying rootless unciform fold(inset in upper right) and late epidote(Ep) in iron-poor ore ; d. Jasper(Gsy) and late pyrite in hematite(Hem); e. Scabbard fold formed during ductile shear stage , showing X-Z face; f. Stretching lineation(L) in diopside-and tremolite-bearing dolomite ; g. bedding cleavage during brittle-ductile shear stage ; h. Hematite-bearing breccia during brittle shear stage

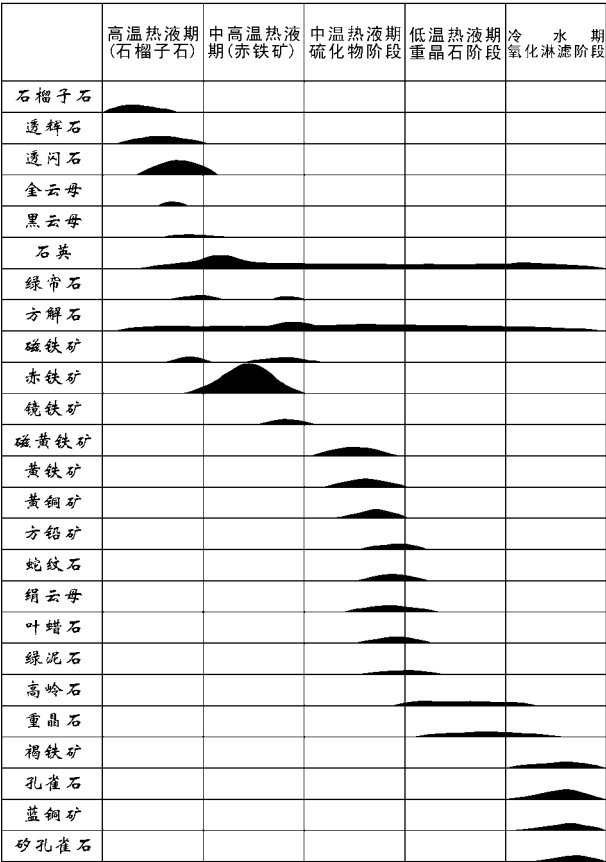


图 7 石碌铁矿区热液蚀变期次划分及与矿化关系图解
Fig. 7 Diagram showing various stages of hydrothermal alteration and their relationships to mineralization in Shilu iron ore district

数据稀少, 再加之石碌群被强烈构造置换、变质程度不一(如其上部第 6 层达角闪岩相), 石碌群本身的沉积时代也存在争论(彭格林, 1990; 许德如等, 2007b)。例如, 许德如等(2007b)最近对石碌群第 6 层内的二透岩开展了阴极发光成像制约下的碎屑颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年龄研究, 推测其沉积上限约为 960 Ma, 下限约为 1 300 Ma, 并认为石碌群, 至少是其第 6 层的源岩, 可能主要为邻区长城纪抱板群和中元古代花岗质岩石, 格林威尔造山事件是导致石碌群沉积和铁矿原始富集的主要因素。刘宏英(1981)则按相同层位和相同变质程度的样品分组的原则, 对前人所报道的石碌群第 5、6 层的 Rb-Sr 全岩同位素数据进行了重新处理, 获得第 6 层的 Rb-Sr 全岩等时线年龄为 315~340 Ma, 第 5 层的参考等时线年龄为 315 Ma, 上覆震旦系石灰顶组的年龄为 324 Ma, 但这些年龄更可能代表同一变质事件的时代。矿区外围变基性岩、变花岗质岩和变碎屑沉积

岩的 Rb-Sr、Sm-Nd 全岩或单矿物同位素定年, 以及碎屑颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 还反映出海南岛主要经历了 3 个变质阶段, 即 527~450 Ma、330~240 Ma 和 130~90 Ma(丁式江等, 2005; 许德如等, 2006; Xu et al., 2007c)。结合该矿区地质特征及近外围岩浆活动的时代, 笔者认为, 330~240 Ma 可能是石碌铁矿的主要成矿时代。

3.2 矿床类型

据上述矿床地质特征及成矿时代的讨论, 可将“石碌式”铁氧化物-铜(金)-钴矿床归为 IOCC(即热液铁氧化物-铜-金-钴)型层控式矽卡岩矿床, 主要包括层控式矽卡岩型铁矿床、层控式矽卡岩型钴铜矿床、脉状-网脉状钴铜矿床、角砾状钴铜矿床和脉型铅锌矿床。该矿床严格受层位(石碌群第 6 层)岩性(钙镁质矽卡岩)及构造(复式向斜、层间滑脱带、构造面理)或岩性界面等控制(常印佛等, 1983)。

该矿区内的钙镁质矽卡岩化实质上是显示出由早期高温进变质向晚期中-低温叠加退变质递变的 2 阶段热液蚀变(Kwak, 1986)。各类矿石和脉石矿物内包裹体的爆裂温度也基本分为 2 组, 即 465~536℃和 344~396℃, 且以第 2 组为主(中国科学院华南富铁科学研究队, 1986)。但与典型矽卡岩型矿床的含矿热液主要来源于岩浆不同的是(Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005), 该矿区的矽卡岩与侵入岩不存在明显的空间关系, 属外矽卡岩型。其硫同位素组成(图 8)还显示, 矿石和赋矿围岩均富重硫(+10.7‰~+20.3‰), 呈塔式分布, 与侵入岩不同; 赤铁矿和磁铁矿($\delta^{18}\text{O}$ 值 = +1.1‰~+10.3‰), 白云石和石英($\delta^{18}\text{O}$ 值 = +12.6‰~+23.3‰)等矿物的氧同位素值(中国科学院华南富铁科学研究队, 1986)与岩浆热液来源的矽卡岩型矿床差别较大(Meinert et al., 2003)。此外, 该矿区的铁矿石以鳞片状赤铁矿为主, 也不同于以磁铁矿为主的典型镁质矽卡岩型铁矿(Hall et al., 1988), 而与澳大利亚奥林匹克坝矿床(Hitzman et al., 1992)、西澳 Hamersley 铁矿床(Taylor et al., 2001)、巴西 Mato Grosso do Sul 省新元古代铁矿床(Klein et al., 2004)等的矿石类型一致。其赋矿围岩的变余沉积结构和代表海相火山-沉积的玻璃包裹体、变杏仁状和火焰状构造, 以及变鲕状赤铁矿(中国科学院华南富铁科学研究队, 1986)和矿体产出特征等, 均暗示其与喷流成因和/或地下热卤水交代成因的层控式矽卡岩相类似(潘凤雏等, 1997; 路远发等, 1998; Meinert et

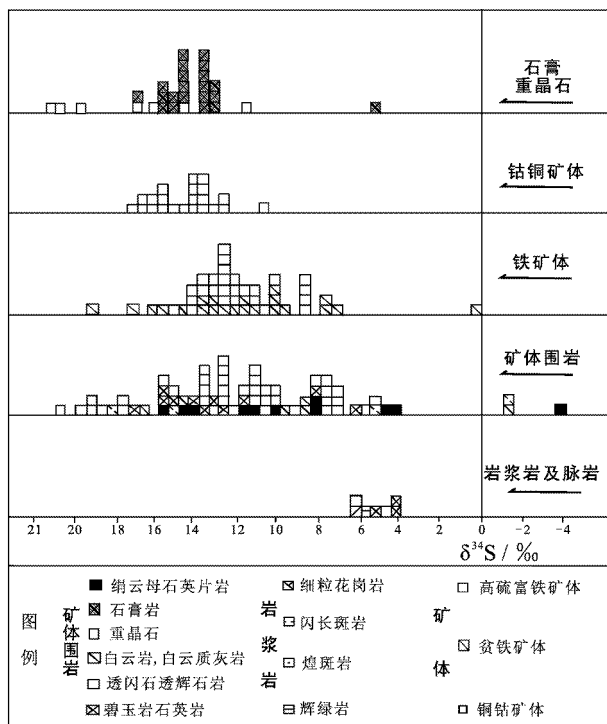


图 8 石碌铁矿区矿石、赋矿围岩及岩浆岩的硫同位素组成

Fig. 8 $\delta^{34}\text{S}$ values of various ore types, host rocks and magmatic rocks in Shilu iron ore district

al. 2005)。这说明以改造作用为主的成矿作用是该类型矿床的主要形成方式,岩浆热液只是起到热驱动作用,使源于深部的含矿卤水沿断裂带或层间滑脱剪切带、不同岩性界面和构造面理上升、渗透,并交代具渗透性的钙镁质白云岩、不纯白云岩,从而引起钙镁质砂卡岩化和铁钴铜等多金属矿床的形成。但因空间上矿体与钙镁质砂卡岩紧密关联、脉岩围绕矿体出现、向斜部位出现低航磁异常,以及热接触变质矿物如红柱石的产生,可能暗示该矿区的深部有隐伏岩体存在(如 Meinert et al. 2005)。

该类型矿床同时兼具 IOCG(即热液铁氧化物-铜-金-钴)型矿床的许多特征(Hitzman et al. 1992; Williams et al. 2005; Weihed et al. 2005; de Haller, 2006; 毛景文等 2008): ①产于元古代变质地层(即石碌群)内; ②储量大,但 Au 品位低,且以富赤铁矿为主; ③主要受复式向斜等构造控制,与褶皱-逆冲系统有关; ④具 Cu、Co、Ni、Au、As 等元素组合; ⑤未出现石英脉; ⑥主要为交代层控式砂卡岩矿床,其次为脉型-网脉型和热液角砾岩型; ⑦广泛发育绢云母化和绿泥石化; ⑧与花岗岩并无紧密的关系,

等等。该类型矿床早期也以磁铁矿和/或赤铁矿矿化为主,稍晚期则以钴铜硫化物矿化为主。其包裹体爆裂测温 and 流体包裹体成分(中国科学院华南富铁科学研究队, 1986)显示,铁矿由 $396\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 251\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、铜钴矿由 $314\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 265\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、含钴黄铁矿由 $307\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 213\text{ }^{\circ}\text{C}$, 成矿流体主要为源于盆地的高盐度($\text{NaCl} + \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$)且富 CO_2 的碱性卤水($\text{pH} = 8 \sim 10$)。有越来越多的证据使研究者趋于认为,形成 IOCG 型矿床的高盐度流体要么来源于岩浆(Pollard, 2002, 2006; Sillitoe, 2003), 要么来源于遭受附近侵入体热扰动的盆地卤水(Barton et al. 1996; Haynes, 2000)。特别是产于褶皱系统内的 IOCG 型矿床,其成矿流体来源于盆地流体、变质流体和/或与蒸发岩有关的高盐度卤水(Porter, 2002; Skirrow et al. 2002)。而在逆冲-褶皱系统发展过程中或之后,造山垮塌又可引起低角度正断层的形成,有利于富氧的大气流体渗透到深部,与深部从逆冲-褶皱系统内排泄出来的具盐度的流体混合(Powell et al. 1999)。这与该矿区以绢云母化为主的蚀变、富赤铁矿、且与褶皱-逆冲系统相关是一致的,说明其形成于地壳较浅层次的低温环境,因而,必然有地表流体渗入到含矿卤水热液系统内。

该类型矿床的赋矿围岩还具有苏必利尔湖型铁矿产源层的特征(Gross, 1980): ①与元古代沉积碎屑岩和沉积碳酸盐岩有关; ②未出现明显的火山岩系列; ③有鲕状铁矿石出现; ④含丰富的铁铝硅酸盐矿物; ⑤很少有硅质岩出现; ⑥沉积于浅海、浅海-泻湖等被动边缘海环境; ⑦透镜状铁矿体赋存在条纹条带状二透岩内,主要含绿泥石、绢云母和副矿物磷灰石。因而,与苏必利尔湖型白云质铁英岩或闪石质铁英岩矿源层相类似(Dorr, 1969; Spier et al. 2003, 2007),先前的成因矿物学研究也揭示了其海相火山来源的信息(王寒竹, 1985)。对矿区内与赤铁矿体直接接触的二透岩中碎屑颗粒锆石所进行的阴极发光研究及 U-Pb 测年也初步表明,其源区至少有一部分为一成熟的多旋回火成岩体(许德如等, 2007b)。

3.3 成矿模式

石碌矿区的成矿作用主要与源自深部的经过海西期-印支期以来侵位的岩浆加热的含矿卤水沿层间滑脱剪切带、不同岩性界面、岩层构造面,渗透并交代具有渗透性的钙镁质白云岩和不纯白云岩等有密切关系。前人曾在该矿区划分出 4 个成矿阶段:

矽卡岩阶段、赤铁矿阶段（主要成矿阶段）、硫化物阶段和氧化淋滤阶段。根据沉积建造、变质建造、构造型相和岩浆建造，以及成矿期温度变化、矿物共生组合和交代关系，笔者将石碌铁矿的成矿作用划分为 5 期，其成岩-成矿模式如下。

第 1 期，为中新元古代矿源岩同生沉积期，形成一套含矿火山（喷流）沉积岩（石碌群），为该类型矿床奠定了 Fe、Co、Cu 等成矿物质基础。已有研究（中国科学院华南富铁科学研究队，1986；侯威等，1996）表明，石碌群中，B、Ba、Fe、Mn、Ti、Ni、Co、Cu、Pb、Zn、Au 等元素具有较高的丰度，反映出石碌群与海底火山-沉积作用有关。第 2 期，为区域变质成矿期（约 450 Ma），加里东造山运动（汪啸风等，1991；Xu et al.，2007）虽然导致石碌群褶皱变形（近 EW 向的向斜）和低绿片岩相变质，但仅使矿源层中的成矿元素预富集，或仅局部形成沉积-变质型贫矿体。第 3 期，为矽卡岩化成矿期（330~240 Ma），因古特提斯洋封闭导致弧-陆、陆-陆碰撞（Li et al.，2002；Xu

et al.，2007），海西期-印支期花岗岩大面积侵位，不仅造成海南全岛的前寒武纪地层隆升、剥蚀，而且，在该矿区内出现标志伸展构造（变质核杂岩构造）的顺层剪切褶皱、“S”型反转褶皱、S-L 构造岩、褶皱层和高角度正断层等（图 9），致使寒武纪至泥盆纪地层在该矿区内整个缺失，此时，岩浆热扰动还导致在岩体上部的沉积岩或火山（喷流）沉积岩内形成含矿热卤水，这些流体在岩浆热动力驱动下，顺着有利的层间断裂或滑脱剪切带、不同岩性界面和构造面理（片理和劈理）上升、渗滤，并交代钙镁质白云岩、不纯白云岩，形成钙镁质矽卡岩和层控式矽卡岩型铁铜钴矿床。因温度和热液条件的变化，第 3 期又可分为 2 个次级阶段，即早期硅酸盐阶段及晚期硫化物阶段，早期阶段形成石榴子石、透辉石等矽卡岩矿物，并产生磁铁矿矿化，稍后，由退变质蚀变形成了以透辉石、闪石类（透闪石、阳起石）、绿帘石为主的矽卡岩矿物及钴铜硫化物矿化，同时，由强烈构造活动所导致的深部氧化作用，产生了赤铁矿矿体，晚期

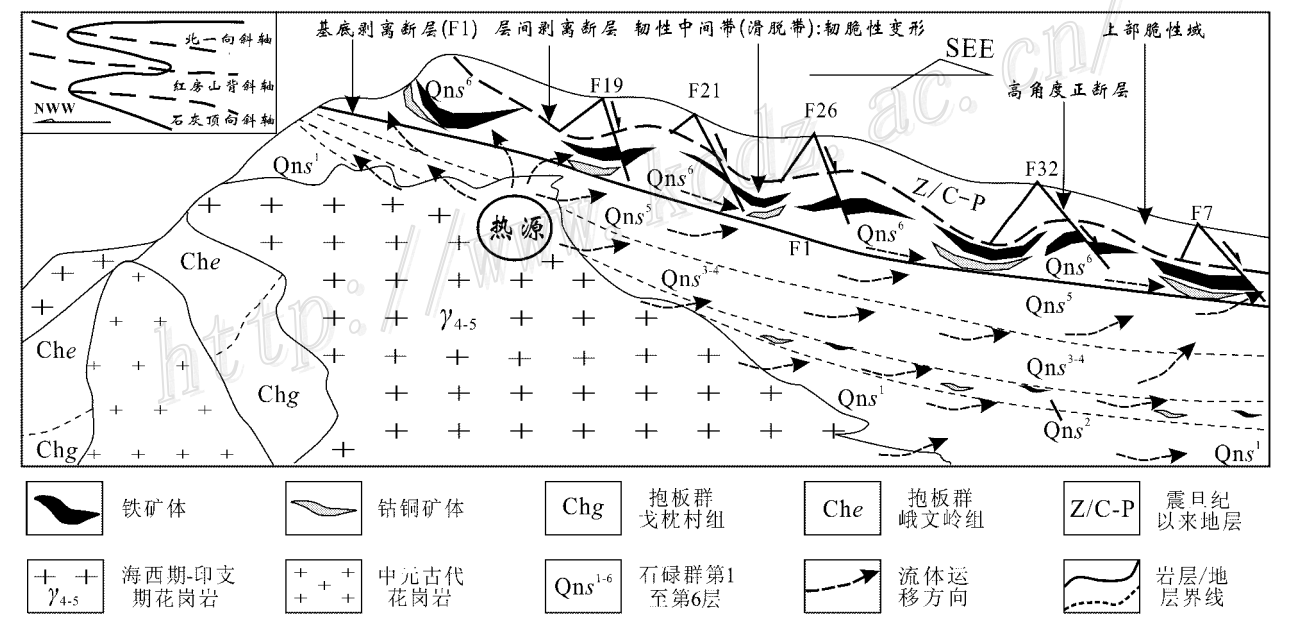


图 9 石碌铁矿区伸展构造(变质核杂岩?)成岩成矿模式示意图

左上角小图显示石碌矿区复式向斜构造。变质核杂岩构造由基底剥离断层(图中 F1)韧性中间滑脱带(石碌群第 6 层 Qns⁶)、层间剥离断层(图中粗虚线)及一系列高角度正断层(如 F19、F21、F26、F32、F7 等)组成，可能是海西期-印支期以来花岗岩上隆、侵位的结果

Fig. 9 Sketch map of petrogenetic and metallogenic model related to the development of extensional tectonics (metamorphic core complex) of Shilu iron ore district

Top left insert roughly shows compound syncline of Shilu iron ore district. Metamorphic core complex, which was probably induced by emplacement of granites since Hercynian-Indosinian, is composed of basement detachment fault (i.e., F1 in the Figure), ductile rheological layer [i.e. 6th layer of Shilu Group (Qns⁶)], bedding detachment fault (i.e. coarse dashed line) and a series of high-angle normal faults (e.g. F19, F21, F26, F32 and F7, etc.).

阶段温度急剧下降,形成了绿泥石、绢云母、方解石、石英等矿物组合,进一步产生金属硫化物矿化。第4期(90~130 Ma),与燕山期断裂重新活动和小型岩脉侵位有关,形成脉状、网脉状、胶状(热液型)角砾岩等矽卡岩型铜钴矿体及角砾岩型铁矿体,成矿流体部分来源于岩浆。第5期,为氧化淋滤阶段,形成坡积铁矿和风化壳型褐铁矿。第3和第4期是主要成矿时期,但含火山物质的初始矿源层对形成层控式矽卡岩型铁氧化物-钴-铜矿床起着重要作用。由上说明,该类型矿床由于成岩-成矿作用持续时间长且后期叠加改造显著,因而,最终导致石碌矿区形成了以特大型富赤铁矿为主的多金属矿床。

4 结论及存在的问题

根据对“石碌式”铁氧化物-铜(金)钴矿床的沉积建造、岩浆建造、变质建造和构造型相以及矿物共生组合和交代关系等地质特征的进一步研究,并结合区域成矿地质背景、矿床地球化学和成矿时代的讨论,可获得如下初步结论:

① 石碌矿床可归属为 IOCG(即热液铁氧化物-铜-金-钴)型层控式矽卡岩矿床,并认为该类型矿床受层位(石碌群第6层)、岩性(钙镁质矽卡岩)及构造(复式向斜、层间剪切滑脱带、岩性界面和构造面理)等的严格控制。

② 该矿床可划分出5个成岩-成矿期,据此提出变质核杂岩构造成岩-成矿模式。笔者认为,由海西期-印支期以来花岗岩的上隆和侵位所导致的变质核杂岩构造是“石碌式”铁氧化物-铜(金)钴多金属矿床重要的成岩-成矿和控岩-控矿构造。

③ 该矿床至少可划分出3个热液活动期,含矿热液主要来源于遭受海西期-印支期以来花岗岩热扰动的深部盆地卤水。

然而,上述有关认识仍有待大量证据的支持。例如,本研究虽认为330~240 Ma可能是石碌铁-钴-铜等多金属矿床的主要形成时期,但既缺少同位素地质年代学定年的工作,又对不同金属矿产间的成矿关系未予以明确;再如,成矿流体和成矿物质的来源、性质及驱动机制等,也是今后需要重点研究的内容。这些对正确揭示石碌矿区铁-钴-铜多金属成矿物质的富集过程和富集规律、指导找矿工作等,均具有重要的理论和实际意义。

志 谢 感谢海南省地质矿产勘查开发局黄居锐工程师、陈勇工程师和海南省钢铁公司郭凤芳总工程师、梁将工程师等在本项目组进行矿山和区域地质调查期间所给予的大力支持和配合;感谢评审专家为论文的完善所提出的建设性建议和宝贵意见;感谢毛景文研究员对本文的撰写所给予的鼓励!

References

- Barton M D and Johnson D A. 1996. Evaporitic source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization [J]. *Geology*, 24: 259-262.
- Chang Y F and Liu X G. 1983. On strata-bound skarn deposits [J]. *Mineral Deposits*, 2(1): 11-19 (in Chinese with English abstract).
- de Haller A, Corfu F, Fontboté L, Schaltegger U, Barra F, Chiaradia M, Frank M and Alvarado J Z. 2006. Geology, geochronology, and Hf and Pb isotope data of the Raúl-Condestable iron oxide-copper-gold deposit, Central Coast of Peru [J]. *Econ. Geol.*, 101: 281-310.
- Ding S J, Hu J M, Song B, Chen M L, Xie S Z and Fan Y. 2005. U-Pb dating on zircons in deep-melted granites emplacing along the Baoban Group in Hainan Island, and its tectonic implication [J]. *Sciences in China (Series D)*, 35(10): 937-948 (in Chinese).
- Dorr J V N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil [M]. Washington: USGS prof. paper, 641-A. A1-A103.
- Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits [J]. *Econ. Geol.*, 75: 317-391.
- Gross G A. 1980. A classification of iron formations based on depositional environments [J]. *Canadian Mineralogist*, 18: 215-222.
- Hainan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development. 1997. Stratigraphy (lithostratic) of Hainan Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 7-15 (in Chinese).
- Hall D L and Cohen L H. 1988. Hydrothermal alteration associated with the iron Hat iron skarn deposit, eastern Mojave Desert, San Bernardino County, California [J]. *Econ. Geol.*, 83: 568-587.
- Haynes D W. 2000. Iron oxide copper (-gold) deposits: Their position in the ore deposit spectrum and modes of origin [A]. In: Porter T M, ed. *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective* [C]. Adelaide: Australian Mineral Foundation. 71-90.
- Hitzman M W, Oreskes N and Einaudi M T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits [J]. *Precambrian Research*, 58: 241-287.
- Hou W, Chen H F, Wang K F, Peng G L, Tang H F, Liang X Q and Xu D R. 1996. Geotectonics of Hainan Island and gold metallogeny [M]. Beijing: Science Press. 618p (in Chinese).
- Klein C and Ladeira E A. 2004. Geochemistry and mineralogy of Neoproterozoic banded iron-formations and some selected, siliceous manganese formations from the Urucum district, Mato Grosso do Sul,

- Brazi[J]. *Econ. Geol.* , 99 : 1233-1244.
- Kwak T A P. 1986. Fluid inclusions in skarns (carbonate replacement deposits) [J]. *Journal of Metamorphic Geology* , 4 : 363-384.
- Li X H , Zhou H W , Chung S L , Ding S J , Liu Y , Lee C Y , Ge W C , Zhang Y M and Zhang R J. 2002. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island , South China and their tectonic significance [J]. *The Island Arc* , 11 : 193-205.
- Liu H Y. 1981. Recognizing on Rb-Sr whole-rock isochronic ages of the Shilu Group [J]. *Geology and Prospecting* , (11) : 47-51 (in Chinese with English abstract).
- Lu Y F , Chen K X and Zhan M G. 1998. Geochemical evidences for sedimentation-exhalation genesis of the Lilong strata-bound copper ore deposit in the western Yunnan Province [J]. *Mineral Deposits* , 17 (Supp.) : 705-708 (in Chinese with English abstract).
- Lü G X. 1988. New discovery of volcanic rocks in ore-bearing rock series in the Shilu iron deposit on Hainan Island [J]. *Regional Geology of China* , (1) 53-56 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W , Yu J J , Yuan S D , Cheng Y B , Xie G Q , Hou K J , Xiang J F and Yang Z X. 2008. Iron oxide-copper-gold deposits : characteristics , present research situation and ore prospecting [J]. *Mineral Deposits* , 27 (3) : 267-278 (in Chinese with English abstract).
- Meinert L D , Hedenquist J W , Satoh H and Matsuhisa Y. 2003. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluid [J]. *Econ. Geol.* , 98 : 147-156.
- Meinert L D , Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposit [J]. *Econ. Geol.* , 100 : 299-336.
- Pan F C , Su D K , Yao P and Du G S. 1997. Geological features of Jia-ma sedimentation-exhalation skarn-type copper polymetallic deposit in Tibet [J]. *Geology in Tibet* , (2) : 62-75 (in Chinese with English abstract).
- Peng G L. 1990. Characteristics of sedimentary formations and some geotectonic problems on Hainan Island , China [J]. *Geotectonica et Metallogenia* , 14 (4) : 293-303 (in Chinese with English abstract).
- Pollard P J. 2002. Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization [A]. In : Porter T M , ed. *Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits : A global perspective* (vol. 1 [C]). Adelaide : PGC Publishing. 27-41.
- Pollard P J. 2006. An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces [J]. *Mineral Deposits* , 41 : 179-187.
- Porter T M. 2002. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits : A global perspective [M]. Linden Park : Porter Geoconsulting Publishing. 377p.
- Powell C M , Oliver N H S , Li Z X , Martin D M and Ronaszecki J. 1999. Synorogenic hydrothermal origin for giant Hamersley iron oxide ore bodies [J]. *Geology* , 27 : 175-178.
- Sillitoe R H. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits : An Andean view [J]. *Mineral Deposits* , 38 : 787-812.
- Skirrow R G and Walsche J L. 2002. Reduced and oxidized Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek Inlier , Australia : An integrated geologic and chemical model [J]. *Econ. Geol.* , 97 : 1167-1202.
- South China Iron-rich Scientific Search Team of CAS. 1986. *Geology of Hainan Island and geochemistry of iron ore deposits in Shilu* [M]. Beijing : Science Press. 371p (in Chinese).
- Spier C A , de Oliveira S M B and Rosière C A. 2003. *Geology and geochemistry of the águas Claras Quadrilátero Ferrífero , Minas Gerais , Brazil* [J]. *Mineral Deposits* , 38 : 751-774.
- Spier C A , de Oliveira S M B , Sial A N and Rios F J. 2007. *Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Caue Formation , Quadrilátero Ferrífero , Minas Gerais , Brazil* [J]. *Precambrian Research* , 152 : 170-206.
- Taylor D , Dalstra H J , Harding A E , Broadbent G C and Barley M E. 2001. Genesis of high-grade hematite orebodies of the Hamersley province , Western Australia [J]. *Econ. Geol.* , 96 : 837-873.
- Wang H Z. 1985. The Research of quartz in Shilu iron deposits of Hainan Island and its significance [J]. *Earth Science* , 10 (2) : 77-83 (in Chinese with English abstract).
- Wang X F , Ma D Q and Jiang D H. 1991. *Geology of Hainan Island : (1) Stratum and paleobiology* [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 7-32 (in Chinese).
- Weihed P , Arndt N , Billström K , Duchesne J C , Eilu P , Martinsson O , Papunen H and Lahtinen R. 2005. Precambrian geodynamics and ore formation : The Fennoscandian Shield [J]. *Ore Geology Reviews* , 27 : 273-322.
- Williams P J , Barton M D , Johnson D A , Fontboté L , de Haller A , Mark G , Oliver N H S and Marschik R. 2005. Iron oxide copper-gold deposits : Geology , space-time distribution , and possible mode of origin [J]. *Econ. Geol.* , 100 : 371-405.
- Xu D R , Xia B , Nonna B C , Ma C , Li P C , Robert B and Chen G H. 2006. Metamorphic characteristics of the Chenxing metabasite massif in Tunchang area , Hainan Island , South China and its tectonic implication [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 22 (12) : 2987-3006 (in Chinese with English abstract).
- Xu D R , Xia Y , Ma C , Hou W , Cai Z R , Fu Q J , Li W Q and Wang Li. 2007a. Fundamental features of the Proterozoic granite-green rock belt in Hainan Island and its relationship to iron polymetallic ore deposits [J]. *Geology of China* , 34 (Supp.) : 84-96 (in Chinese).
- Xu D R , Ma C , Li P C , Xia B and Zhang Y Q. 2007b. U-Pb SHRIMP-dating of zircon domains from metaclastic sedimentary rocks in Hainan Island , South China , and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica* , 81 (3) : 383-391 (in Chinese with English abstract).
- Xu D R , Xia B , Li P C , Chen G H , Ma C and Zhang Y Q. 2007c. Protolith natures and U-Pb sensitive high mass-resolution ion microprobe (SHRIMP) zircon ages of the metabasites in Hainan Island , South China : Implications for geodynamic evolution since the Late Precambrian [J]. *Island Arc* , 16 (4) : 575-597.
- Zhang R J , Ma G G , Feng S N and Yan D P. 1992. The Sm-Nd isotopic age of Shilu iron ore in Hainan Island and its implication [J]. *Scientia Geologica Sinica* , (1) : 38-43 (in Chinese with English ab-

stract).

附中文参考文献

- 常印佛,刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例[J]. 矿床地质, 2(1):11-19.
- 丁式江,胡健民,宋彪,陈沐龙,谢盛周,范渊. 2005. 海南岛抱板群内顺层侵位深熔花岗岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 35(10):937-948.
- 海南省地质矿产勘查开发局. 1997. 海南省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 7-15.
- 侯威,陈惠芳,王可伏,彭格林,唐红峰,梁新权,许德如. 1996. 海南岛大地构造与金成矿学[M]. 北京:科学出版社. 618 页.
- 刘宏英. 1981. 对石碌群地层铷-锶全岩等时线年龄的再认识[J]. 地质与勘探, (11):47-51.
- 路远发,陈开旭,战明国. 1998. 滇西里农层状矽卡岩铜矿喷流-沉积成因的地球化学证据[J]. 矿床地质, 17(增刊):705-708.
- 吕古贤. 1988. 海南岛石碌铁矿含矿岩系中火山岩类的新发现与研究[J]. 中国区域地质, (1):53-56.
- 毛景文,余金杰,袁顺达,程彦博,谢桂青,侯可军,向君峰,杨宗喜. 2008. 铁氧化物-铜-金(IOCG)型矿床:基本特征、研究现状与找矿勘查[J]. 矿床地质, 27(3):267-278.

- 潘凤雏,栗登逵,姚鹏,杜光树. 1997. 西藏甲马喷流矽卡岩型铜多金属矿床地质特征[J]. 西藏地质, (2):62-75.
- 彭格林. 1990. 海南岛沉积建造特征及大地构造问题[J]. 大地构造与成矿学, 14(4):293-303.
- 王寒竹. 1985. 广东海南岛石碌铁石英的研究及其意义[J]. 地球科学, 10(2):77-83.
- 汪啸风,马大铨,蒋大海. 1991. 海南岛地质:(一)地层古生物[M]. 北京:地质出版社. 7-32.
- 许德如,夏斌,Nonna B C,马驰,李鹏春,Robert B,陈广浩. 2006. 海南岛中东部屯昌晨星地区变基性岩变质特征及构造意义[J]. 岩石学报, 22(12):2987-3006.
- 许德如,肖勇,马驰,侯威,蔡周荣,符启基,李文铅,王力. 2007a. 海南岛元古宙花岗岩-绿岩带基本特征及其与铁多金属矿产关系[J]. 中国地质, 34(增刊):84-96.
- 许德如,马驰,李鹏春,夏斌,张玉泉. 2007b. 海南岛变碎屑沉积岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质学报, 81(3):383-391.
- 张仁杰,马国干,冯少南,鄢道平. 1992. 海南石碌铁矿的 Sm-Nd 法年龄及其意义[J]. 地质科学, (1):38-43.
- 中国科学院华南富铁科学研究队. 1986. 海南岛地质与石碌铁矿地球化学[M]. 北京:科学出版社. 371 页.

<http://www.kcdz.ac.cn/>