

海南石碌铁钴铜矿床成因及其成矿模式

杜保峰^{1,2} 魏俊浩¹ 李艳军¹

石文杰¹ 燕长海² 赵少卿¹ 裴中朝² 白国典²

(1.中国地质大学资源学院,湖北 武汉 430074; 2.河南省地质调查院,河南 郑州 450001)

摘要:海南石碌矿床是以富铁矿为主,并伴生有钴铜等矿产的著名大型矿集区。通过对该矿床控矿地质条件的再认识,并对其成矿物质来源、岩浆活动与成矿的关系、成矿时代进行了讨论,认为铁钴铜等物质来源很可能来自原始火山沉积地层石碌群中,后期区域变质作用和岩浆活动对其形成起重要的改造富集作用,初步定义其为火山-沉积变质+多期热液叠加改造型矿床。该矿床成矿模式概括为:1)新元古代海底火山喷流沉积期,奠定了铁钴铜等成矿物质的基础;2)加里东—海西期的变质改造成矿期,形成了沉积变质型贫矿体;3)印支—燕山早期热液叠加改造富化期,石碌矿床发生了重要的改造富集作用,形成了富铁矿体;4)燕山晚期热液叠加改造富化期,对原来矿体进行改造富集,并形成了脉状、角砾状铁矿体及伴生的铜钴矿体。

关键词:石碌;铁钴铜矿床;成矿模式;火山沉积-变质;热液叠加

中图分类号:P618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)01-0170-13

海南石碌铁钴铜矿床,因其铁矿品位高著称,曾被誉“亚洲最大的富铁矿”。目前已在矿区内发现大大小小铁矿体 38 个、钴矿体 17 个、铜矿体 41 个,所探明铁矿石储量达 4.17 亿 t 以上(平均品位 51.15%、最高达 69%以上)、钴矿储量约 4.07 Mt(平均品位 0.294%、最高达 1.1%以上)、铜矿储量约 6.65 Mt(平均品位 1.18%、最高达 18%以上)。然而,经过 50 余年的勘查开发,该矿已步入中等危机矿山行列^[1]。因此,加强石碌铁钴铜矿床成因研究对丰富和发展成矿理论及找矿实践具有重要的科学和经济意义。

数十年来,不少地质工作者对石碌铁钴铜矿床进行过研究,对其成因也提出过多种观点,如沉积成矿、高温热液接触交代、沉积变质-热液交代、卤水成矿及火山沉积-变质等^[2-7],较为主流的观点是偏向于火山沉积-变质成因,该观点又有两种不同解释:一种是原始沉积的贫铁矿在韧性剪切带构造透视镜体形成过程中经过塑性流动富集、压溶去硅等构

造-成岩成矿作用,使贫铁变富铁,形成厚大的“北—”式矿体^[8],此观点强调了构造变形作用,但忽略了中生代构造-岩浆活动的热液改造作用;另一种是矿床在海底火山沉积后遭受了区域变质,后期可能发生了部分岩浆热液改造,但其认为岩浆热液改造作用较弱^[4,7]。近年来,围绕国家危机矿山典型矿床研究项目的开展,笔者对石碌铁钴铜矿床控矿地质条件进行了再认识,结合前人有关成果,认为后期岩浆活动亦对成矿具有重要的改造作用,并对其成因进行了讨论,建立了该矿床的成矿模式。

1 区域地质背景

以南部九所—陵水断裂为界,海南岛划分为属于华南褶皱系的岛北五指山褶皱带和属于南海地台的琼南微板块^[9]。石碌铁钴铜矿床则位于五指山褶皱带西段(图 1)。多期次的构造活动和变质-岩浆再造作用,形成了以 EW 向构造-岩浆带和 NE 向构造-岩浆带交接复合而成的构造格局。区域出露的

收稿日期:2011-06-15;改回日期:2011-11-07

基金项目:全国危机矿山典型矿床成矿规律研究项目(20089946)和教育部创新团队发展计划项目(IR T0755)资助。

作者简介:杜保峰,男,1985 年生,硕士,主要从事矿床学及成矿预测研究工作;E-mail:dubaofeng517 @163.com。

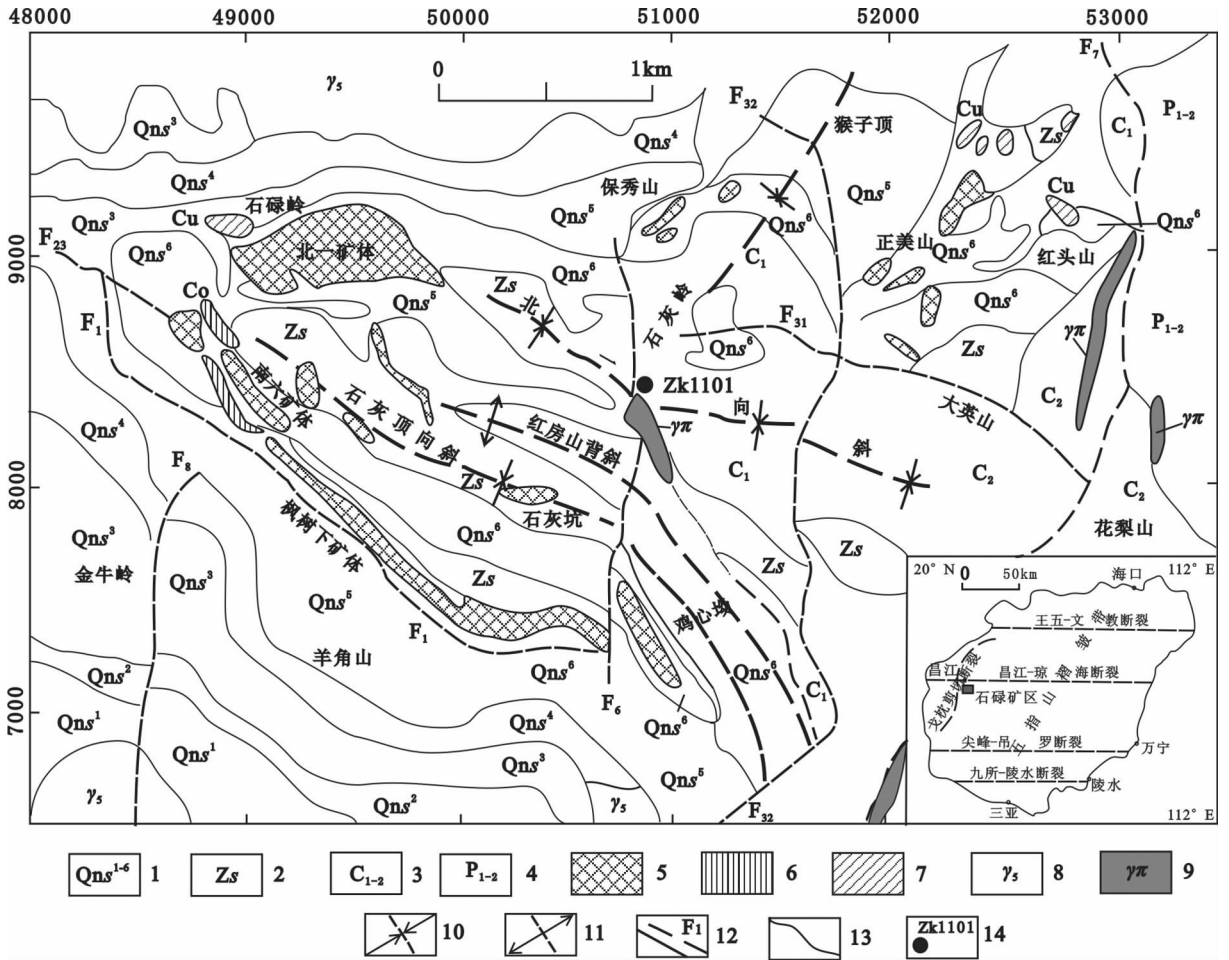


图 1 海南石碌铁钴铜矿区地质略图(据许德如等^[10]修改)

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—印支—燕山早期花岗岩;9—燕山晚期花岗斑岩;10—向斜;11—背斜;12—实测及推测断裂;13—地质界线;14—钻孔

Fig.1 Geological sketch map of the Shilu Fe-Co-Cu ore district in Hainan Province

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- Indosinian-early Yanshanian granite;9- Late Yanshanian granitic porphyry;10- Syncline;11- Anticline;12- Measured and inferred faults;13- Geological boundary;14- Drill hole

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—青天峡组、二叠系峨查组—鹅顶组、南龙组等。区域侵入岩分布广泛,主要有中元古代片麻状花岗岩、古生代镁铁质—镁铁质岩、海西末期—燕山早期似斑状花岗岩和燕山晚期花岗岩等。区域构造主要发育 EW 向的昌江—琼海构造带和 NE 向戈枕断裂带。

2 矿床地质特征

2.1 赋矿地层

矿区出露地层主要有青白口系石碌群和震旦系

石灰顶组、石炭系南好组—青天峡组、二叠系峨查组—鹅顶组、南龙组。其中,青白口系石碌群是矿区铁钴铜矿主要赋存层位,系一套(低)绿片岩相变质为主的浅海相、浅海—潟湖相和/或浅海相—滨海相(含铁)火山—碎屑沉积岩和碳酸盐岩建造^[7]。石碌群按岩性可分为 6 层,第一、三、四、五层为灰白色、深灰—灰紫色等杂色千枚岩、石英片岩或石英绢云母千枚岩、石英岩等硅铝质岩石,普遍含有红柱石,第五层还夹有一层岩屑凝灰岩;第二、六层为灰白色—浅灰色白云岩、透辉石透闪石化白云岩、透辉石透闪石岩、铁质千枚岩、石英岩等。第六层为铁、钴、铜矿

产的主要赋矿岩层,按岩性组合及与成矿关系,又可细分为3段:下段含钴铜层位,中段含铁层位,上段白云岩夹炭质千枚岩为无铁矿段,但为白云岩矿含矿层。铁钴铜矿体主要呈层状、似层状,大多与石碌群围岩呈整合接触,并呈现同步褶皱变形特征(图2-a),局部呈突变接触关系(图2-b)。

2.2 控矿构造

石碌铁钴铜矿床处于近EW向昌江—琼海深大断裂与NE向戈枕韧—脆性断裂的交汇部位(图1)。赋矿地层及其内矿体主要受一轴向NW-SE

向、局部倒转的复式向斜控制。自北向南,该复式向斜由北一向斜、红房山背斜和石灰顶向斜等一系列次级褶皱组成,铁矿体、钴铜矿体即赋存在其槽部及两翼向槽部过渡的部位。该复式向斜向西扬起收敛,向东南倾伏开阔,并为次级近SN向的横跨褶皱所叠加,总体显示“S”型构造特征。由于挤压作用,伴随石碌复式向斜等褶皱构造形成的同时,石碌群及矿体不同层位间也发育有大量小型背斜和向斜等层间褶皱构造(图2-c),甚至一个露头标本中也可见微型褶皱(图2-d)。

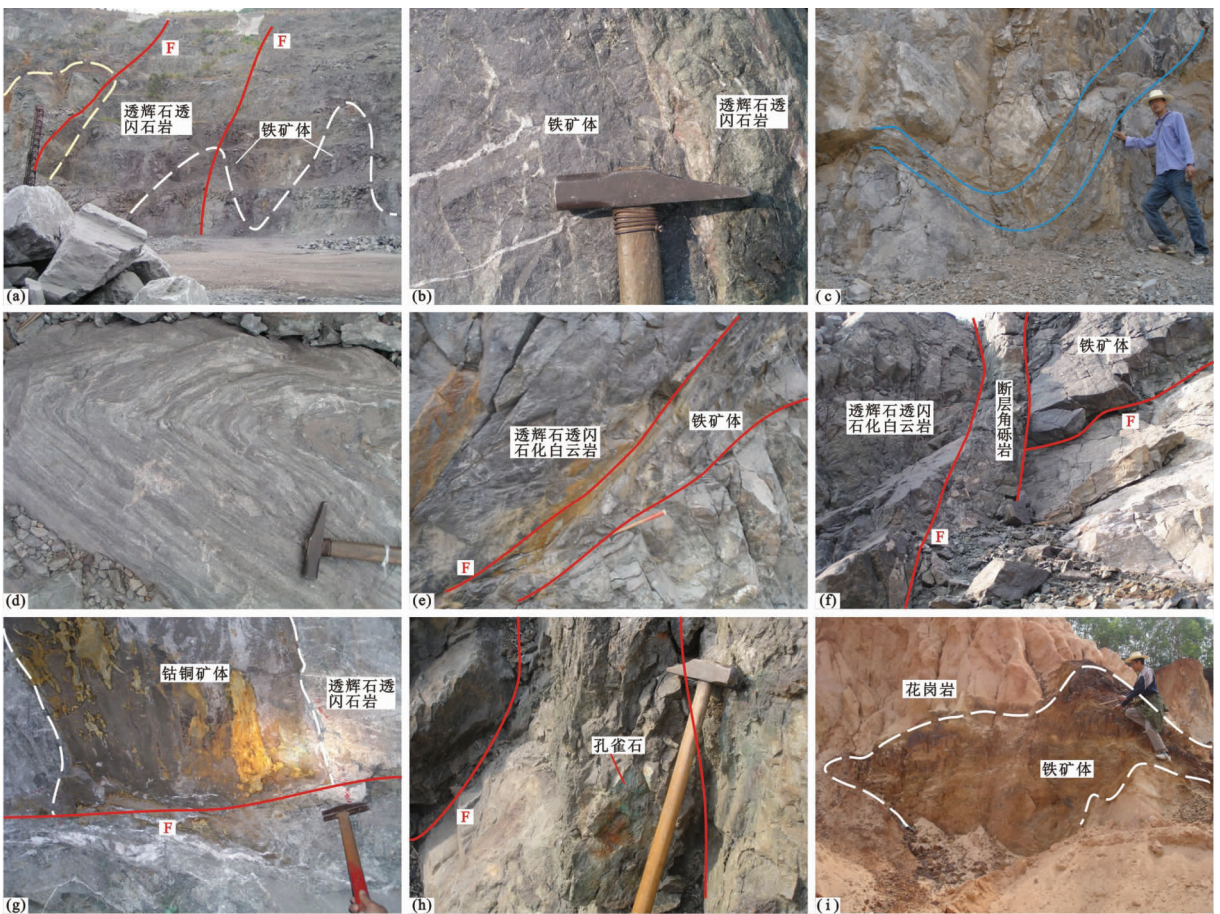


图2 石碌矿区野外典型照片

- a—北一采坑中矿体与地层同步褶皱变形,褶皱核部又被断层切穿;b—北一采坑中矿体与透辉石透闪石岩呈突变接触关系;
- c—南六采坑石碌群第六层透辉石透闪石化白云岩中的层间褶皱;d—北一采坑透辉石透闪石化白云岩中的小褶皱;
- e—北一采坑南侧被断裂控制的脉状铁矿体;f—北一采坑东南侧矿体被两组断裂控制;g—200 m中段的钴铜矿体被断裂错段;
- h—北一采坑中断裂破碎带内的孔雀石;i—正美区段花岗岩顺铁矿体片理侵入包围透透镜状铁矿体

Fig.2 Typical field photographs of the Shilu ore district

- a— The iron ore body and the formation assuming synchronous folding, and fold core cut by the fault, Beiyi pit; b—Sharp contact between the ore body and the diopside-tremolite rock, Beiyi pit; c— Layer fold of tremolite-diopside dolomite in the sixth formation of Shilu Group, Nanliu pit; d— Small fold of diopside-tremolite dolomite, Beiyi pit; e— Vein iron ore bodies controlled by fault, south side of Beiyi pit;
- f— The iron ore body controlled by two faults, southeast of Beiyi pit; g— Co-Cu ore body displaced by the fault, -200m level;
- h— Malachite in fractured zone, Beiyi pit; i— The lenticular iron ore body surrounded by granite along its schistosity, Zhengmei section

伴随褶皱发生,矿区断裂构造也较发育,计有 NW-NNW、NEE-EW 及 NNE-近 SN 向 3 组断裂,其中矿区中南部的 NNW 向 F_1 断裂可能为一横贯矿区的主导矿构造;而一系列近 SN(NNW/NNE)向断层则不仅在矿区东部横截复向斜,而且使断层东盘矿体滑移、并自西向东埋深加大^[10]。矿区内部断裂切穿矿体或褶皱核部的现象相当普遍(图 2-a,g),局部见到矿体位于断裂一侧或两组断裂夹持中(图 2-e,f),反映后期断裂构造对矿体形成具有一定程度的改造和控制。许多方解石脉、绿泥石脉沿断裂裂隙充填,并依存于似层状和脉状矿体的旁侧,局部断裂破碎带内可见到原生硫化物表生氧化为孔雀石(图 2-h)。

2.3 岩浆岩

矿区南、北、西三面为侵入岩所环绕,岩石类型以花岗岩类为主。矿区南部、北部为印支—燕山早期斑状/似斑状(角闪)黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩。K-Ar、Rb-Sr 和锆石 U-Pb 同位素年龄为 240~170 Ma^[11-14],该期花岗岩属伸展环境下陆壳改造型钙碱性花岗岩^[13]。矿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,K-Ar 同位素年龄为 134~128 Ma 和 100~97 Ma^[11-12]。花岗斑岩是矿区分布最多的一种脉岩,这些岩脉呈“S”形态主要沿 NNW-NW 向和 NNE-NE 向两组断裂和/或不同岩层界面分布,侵入中心位于矿区东南面。

2.4 矿体分布及产出特征

矿区内主要矿体有北一、南六、枫树下铁矿体,一号、四号铜矿体及一号、三号钴矿体,占总储量的 90%以上。矿区西部主矿体形态多为透镜状、似层状,与石碌群各套地层同步褶皱,在地表及浅处多呈枝杈状分布,而在深部逐渐复合,矿体亦变得更为集中厚大,品位亦更高。局部矿体呈脉状产出,并与地层呈断层接触。

铁钴铜矿体从平面分布看,大致以北一复向斜轴为中心,分北、中、南 3 个矿带(图 1):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。中矿带位于复向斜的槽部,南、北矿带则分别位于复向斜南翼和北翼。垂向上,铁矿体通常位于钴铜矿体之上,当构造起伏倒转时,钴铜矿体才位于铁矿体之上。除个别地段外,两者通常保持在 30~60 m 的距离(图 3),总

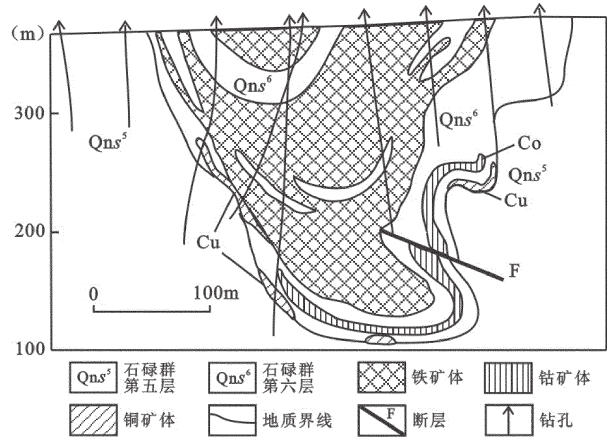


图 3 石碌矿区 VIIIa 勘探线剖面图

(据中科院华南富铁科研队^[4]修改)

Fig.3 Geological section along No. VIIIa exploration line in the Shilu ore deposit

体是西近东远,南翼近而北翼远。因而,矿区自上而下大致呈铁→钴铜的顺序排列、平行叠置,空间展布上有极大一致性,但大小各异,一般铁矿体规模大,钴、铜矿体规模也大。

2.5 矿石类型及组构

铁矿石按自然类型分为原生矿和坡积矿两类。依据矿石主要有用及有害组分含量,将原生铁矿石划分为 5 个工业品级,即平炉富铁矿石(H_1)、低硫高炉富铁矿石(H_2)、高硫高炉富铁矿石(H_3)、贫矿石(H_4)和表外次贫矿石(H_5)。根据矿相学观察,富铁矿石主要由赤铁矿(约 75%)和少量磁铁矿±镜铁矿($\leq 10\%$)组成,脉石矿物主要是石英(15%)和绢云母。但贫铁矿成分较为复杂,主要矿石矿物为赤铁矿(25%~50%)和磁铁矿(15%~35%),脉石矿物有钙铁—钙铝榴石(20%~25%)、石英(约 19%),长石类(约 5%)、透辉石和透闪石(约 4%)、绿帘石、绿泥石、白云石、绢云母、方解石以及少量的碧玉、重晶石。矿石构造以块状构造(图 4-a)、片状构造为主,其次为角砾状构造(图 4-b)。矿石结构主要有细鳞片状结构(图 4-g)、鳞片变晶结构(图 4-f),其次为自形—半自形晶结构(图 4-e)、他形填隙结构(图 4-h)、浸蚀结构(图 4-i,图 4-j)等。其中,铁碧玉中发育有半自形的磁铁矿(图 4-e),反映其可能为火山沉积过程中形成了部分铁氧化物;细鳞片状赤铁矿因受变质作用而结晶变大且定向排布构成鳞片变晶结构(图 4-f),反映变质作用过程中亦形成了部分铁氧化物;

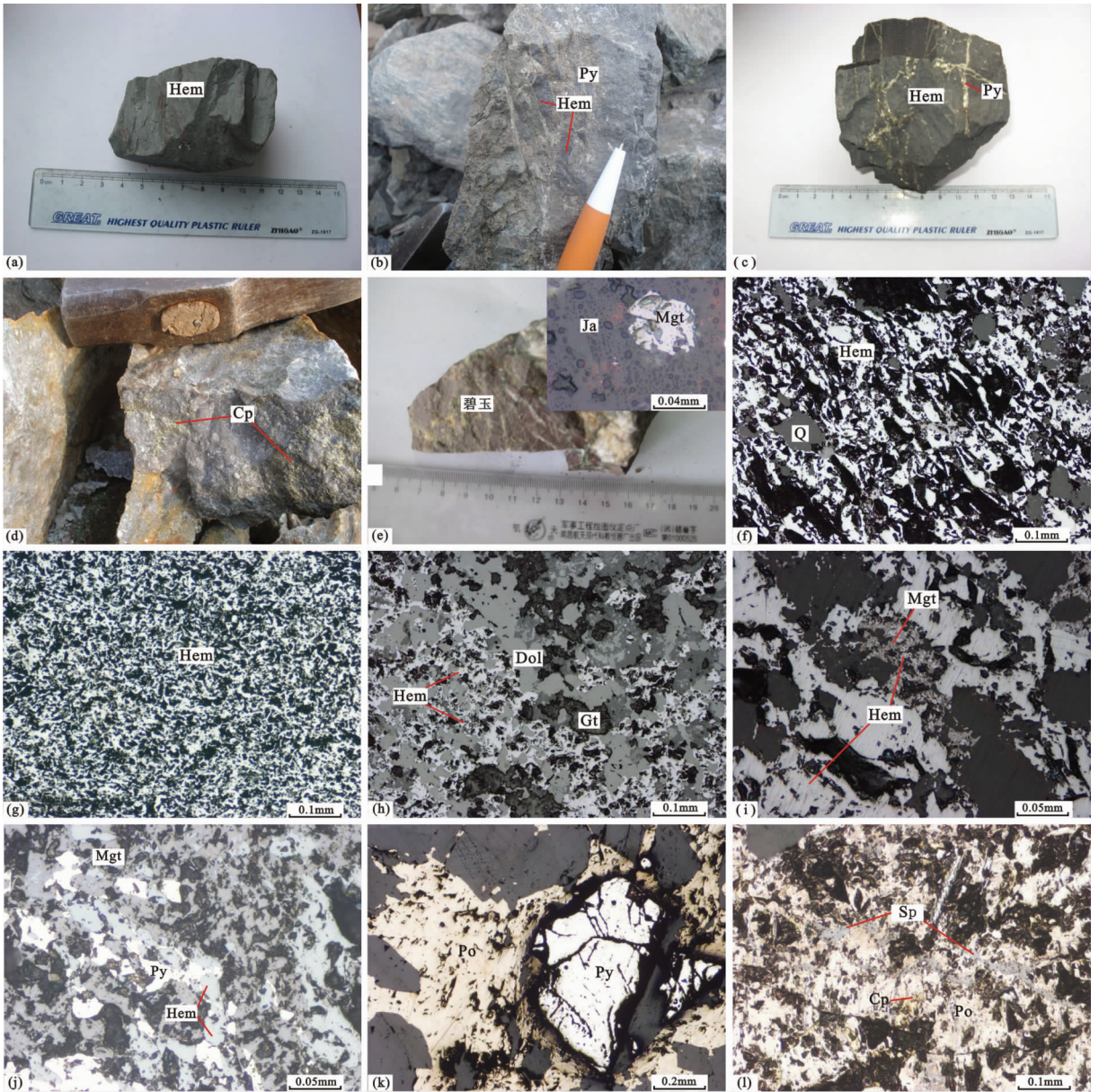


图4 石碌矿床矿石组构特征

a—致密块状铁矿石;b—赤铁矿呈角砾状被黄铁矿胶结;c—赤铁矿石中的网脉状黄铁矿;d—浸染状分布的黄铜矿石;e—铁碧玉中伴生的半自形磁铁矿;f—细鳞片状赤铁矿因受变质作用而结晶变大且定向排列;g—赤铁矿呈细小鳞片状杂乱不定向分布;h—赤铁矿沿石榴石等脉石矿物边缘充填交代;i—磁铁矿被赤铁矿沿其内部和边缘交代;j—黄铁矿沿赤铁矿和磁铁矿边缘交代;k—黄铁矿被磁黄铁矿交代呈残余骸晶状;l—闪锌矿呈不规则脉状沿磁黄铁矿和黄铜矿边缘裂隙交代;Hem—赤铁矿;Ja—碧玉;Mgt—磁铁矿;Dol—白云石;Q—石英;Py—黄铁矿;Po—磁黄铁矿;Sp—闪锌矿;Cp—黄铜矿;Gt—石榴石

Fig.4 Ore fabric characteristics of the Shilu ore deposit

a- Compact massive iron ore; b- Breccia hematite cemented by pyrite; c- Stockwork pyrite of hematite ore; d- Disseminated chalcopyrite distributed in the ore; e- Associated subhedral magnetite in jasper; f- Large crystallized flaky hematite assuming directional arrangement due to metamorphism; g- Tiny flaky hematite in disordered and non-directional distribution; h- Hematite filled in or replacing garnet and other gangue minerals along their edges; i- Magnetite replaced by hematite in its interior and along its edge; j- Pyrite replacing hematite and magnetite along their edges; k- Pyrite occurring as skeletal crystal replaced by pyrrhotite; l- Irregular vein sphalerite replacing pyrrhotite and chalcopyrite along their edges; Hem- Hematite; Ja- Jasper; Mgt- Magnetite; Dol- Dolomite; Q- Quartz; Py- Pyrite; Po- Pyrrhotite; Sp- Sphalerite; Cp- Chalcopyrite; Gt- Garnet

赤铁矿呈细小鳞片状杂乱不定向分布 (图 4-g), 反映其可能为热液改造形成的致密分布的铁氧化物。各矿物生成顺序见图 5。

钴铜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, 并主要分布在北一矿段西段及北一向斜南翼。主要矿石矿物为含钴黄铁矿、黄铜矿、含钴磁黄铁矿, 局部出现少量的辉钴矿、斑铜矿、辉铜矿、闪锌矿等, 脉石矿物与铁矿石类似。约 80% 的金属钴以类质同像赋存在含钴黄铁矿、含钴磁黄铁矿、辉钴矿和黄铜矿中, 约 20% 以辉钴矿形式出现。铜则大部分以黄铜矿形式出现, 少量呈辉铜矿和斑铜矿产出。钴铜矿石构造也较为复杂, 主要为块状构造和条带状构造, 其次网脉状和浸染状构造 (图 4-c, 图 4-d)。矿石结构

主要有自形-半自形粒状结构、交代残余结构、交错脉状结构。其中磁黄铁矿交代早期黄铁矿 (图 4-k), 或闪锌矿交代磁黄铁矿和黄铜矿 (图 4-l), 亦反映硫化物为热液改造形成。

2.6 蚀变类型及分带

矿区内围岩蚀变相对较为发育, 分布较广泛的主要有矽卡岩化 (透闪石化、透辉石化及少量石榴石化)、绿帘石化、绿泥石化、硅化、碳酸盐化 (图 6)。蚀变分带不是很明显, 大体上: 以矿体为中心, 向外侧依次为硅化黄铁矿化透辉石透闪石化带—绿帘石化透辉石透闪石化白云岩—碳酸盐化绿泥石化透闪石化白云岩 (或石英岩) (图 7), 可以推断为早期发生了高温热液蚀变 (透辉石化、透闪石化), 后叠加有绿帘石化、黄铁矿化、硅化以及更晚的绿泥石化、碳酸盐化。

矿物	喷流沉积期	变质成矿期	热液成矿期			表生期
			高温热液阶段	铁氧化物阶段	中低温硫化物阶段	
碧玉						
赤铁矿						
磁铁矿						
黄铁矿						
石榴石						
透辉石						
透闪石						
阳起石						
黑云母						
石英						
绿帘石						
绢云母						
绿泥石						
磁黄铁矿						
黄铜矿						
斑铜矿						
辉钴矿						
辉铜矿						
闪锌矿						
方解石						
铜蓝						
褐铁矿						
孔雀石						

图 5 石碌矿床矿物生成顺序

Fig.5 Generalized formation sequence of minerals in the Shilu ore deposit

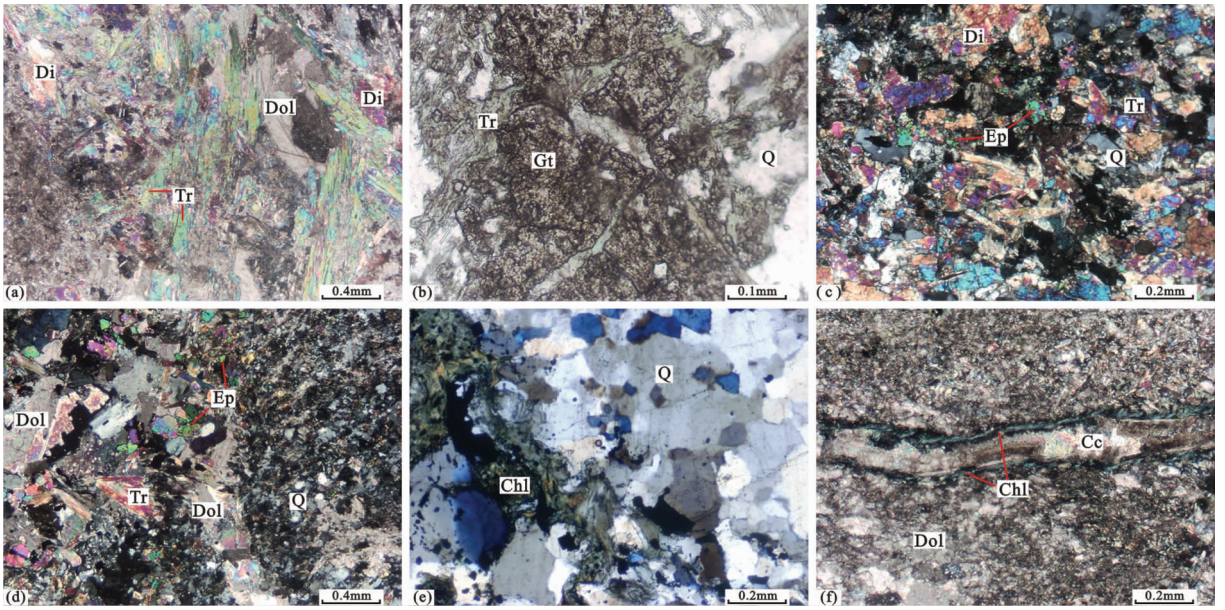


图6 石碌矿区典型热液蚀变显微照片

a—白云岩发生了透闪石化、透辉石化;b—透闪石沿早期形成的石榴石边缘充填交代;c—透辉石透闪石岩中的后期绿帘石化、硅化;d—白云岩发生了强烈透闪石化、绿帘石化和硅化;e—强烈硅化蚀变岩中的石英和绿泥石;f—绿泥石和方解石沿白云岩裂隙充填,方解石脉位于中间,绿泥石脉位于两侧;Di—透辉石;Tr—透闪石;Dol—白云石;Gt—石榴石;Q—石英;Ep—绿帘石;Chl—绿泥石;Cc—方解石

Fig.6 Microphotographs of typical hydrothermal alterations in the Shilu ore deposit

a- Tremolitization and diopsidization in dolomite; b- Tremolite filling or replacing garnet along its edge; c- Epidotization and silicification in diopside-tremolite rock; d- Strong tremolitization, epidotization and silicification in dolomite; e- Quartz and chlorite in strongly silicified altered rock; f- Chlorite and calcite veins filling fractures of dolomite, with calcite veins in the middle and chlorite veins on both sides; Di- Diopside; Tr- Tremolite; Dol- Dolomite; Gt- Garnet; Q- Quartz; Ep- Epidote; Chl- Chlorite; Cc- Calcite

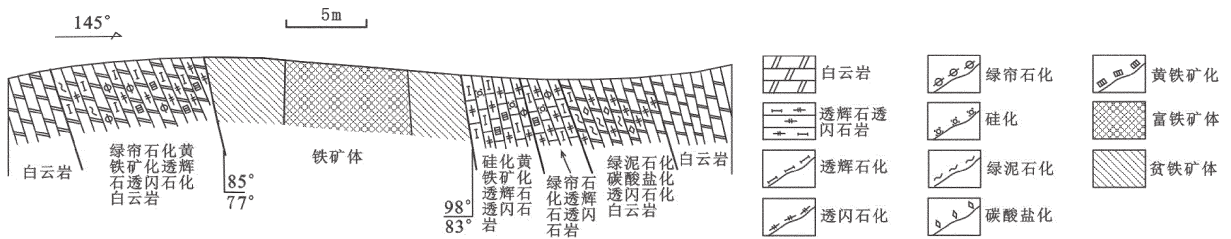


图7 石碌矿区北一采坑东缘蚀变分带图

Fig.7 Alteration zoning of eastern edge of Beiyi pit in the Shilu ore district

3 矿床成因讨论

3.1 成矿物质来源

对于确定矿床成因类型最重要的依据仍是成矿物质来源,许多证据均指示石碌铁钴铜矿床物质来源与原始海底火山作用关系紧密:

(1)前人认识:王寒竹^[15]在石碌群第五层中发现富钾流纹质熔结凝灰岩,并指出石碌矿床的成矿物质来源于海底火山喷发;通过对石碌矿床的石英等进行成因矿物学研究^[16],认为石英既有火山成因也

有热液成因。前人^[4,17]根据矿区 O、S 同位素和包裹体分析数据,推测该矿床的含矿热液可能主要来源于火山热液,但具体成矿流体和物质来源并未确定。胡志高^[18]则明确提出成矿热液为海底火山热液、区域变质热液和地下水的混合来源。吕古贤^[19]通过对石碌矿区火山岩类的发现,推测其成矿物质主要来自海底近源火山喷发作用。熔融包裹体的发现以及成矿物质和成矿流体的示踪^[20-21],共同反映了铁钴铜成矿与火山活动和深部流体活动有关。

(2)矿区内不同地质体中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$:铁矿

体为 3.1‰~19.5‰; 钴铜矿体为 10.8‰~17.2‰; 赋矿围岩为 -3.8‰~20.9‰; 侵入花岗岩为 2.1‰~4.3‰; 侵入岩脉为 4.5‰~8.9‰^[4,22]。矿石与围岩硫同位素组成比较一致(图 8), 可能体现物质来源的一致性, 说明矿石中的硫很可能来源于围岩; 而矿石与岩浆岩有明显的差异, 且 -10‰~10‰ 作为岩浆来源硫同位素的常见分布区, 因此硫源与侵入岩浆岩可能无关。同时根据硫同位素组成分布范围(图 8), 以及数据离散程度大, 推测矿床成矿物质可能是沉积来源。然而其又与典型沉积矿床不尽相同, 80% 以上样品的同位素组成变化范围在 8‰~18‰, 富集 ³⁴S, 相似于火山型矿床。

(3) 石碌矿床中 $\delta^{18}\text{O}$: 赤铁矿为 1.1‰~10.7‰, 平均值为 4.8‰; 磁铁矿为 2.4‰~10.87‰, 平均值为 5.9‰^[4,21,23-24]。赤铁矿与磁铁矿的氧同位素变化范围一致, 且均为正值, 可排除陆源沉积来源, 而与火成岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 范围(5‰~13‰) 较为接近, 但平均值略低于火成岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 。此外贫铁矿石的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 8.4‰~10.7‰, 明显高于富铁矿石(4.7‰~7.3‰), 说明作用于贫铁矿石的热液具有负的 $\delta^{18}\text{O}$ 。因此推测铁成矿热液很可能既有岩浆(火山)来源, 后期也有呈负值 $\delta^{18}\text{O}$ 的大气降水加入。

综上所述, 石碌矿床的铁钴铜等物质来源主要为海相火山岩浆源, 可能来自原始火山喷发后的沉积地层中, 即石碌群。

3.2 岩浆活动与成矿作用的关系

石碌铁钴铜矿床形成与原始海底火山作用有关, 如赋矿围岩的变余沉积结构和代表火山活动的玻璃包裹体、变杏仁状和火焰状构造以及碧玉的出现、富钾流纹质熔结凝灰岩等火山岩的发现等^[4,15-16,19,25-26]。笔者在石碌铁钴铜矿床调研中也发现石碌群第六层出现许多碧玉, 镜下碧玉中共生有赤铁矿和磁铁矿(图 4-e), 反映新元古代原始海相火山喷流成矿的发生, 并可能为石碌铁钴铜成矿提供了初始矿源。

石碌矿床各矿体主要赋存于新元古代石碌群第六层中, 与后期侵入体在空间上并不直接相关, 但矿区及近外围印支—燕山期侵入活动多见, 局部见到侵入体包围铁矿体(图 2-i)。尤其是钴铜矿化可能与后期侵入活动关系更为紧密^[10,21], 热液叠加改造早期火山沉积—变质作用形成的铁矿, 进一步富集钴铜, 使其成为工业可利用的矿体。

根据矿物包裹体爆裂法测温结果^[4,27]显示, 北一

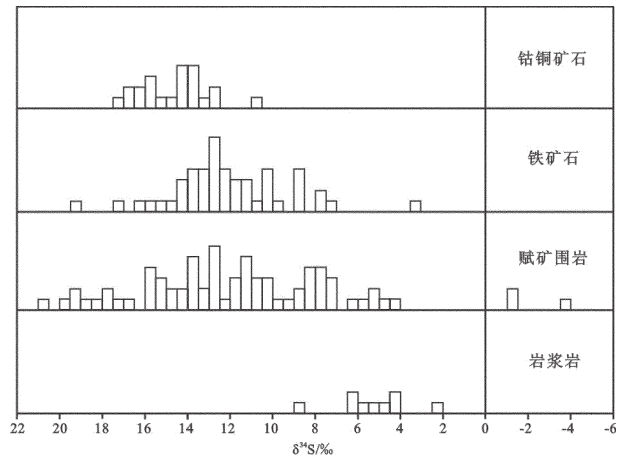


图 8 石碌矿区铁矿石、钴铜矿石、赋矿围岩、岩浆岩硫同位素分布特征

(数据源自中科院华南富铁科研队^[4]; 罗年华^[23])

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

矿体的赤铁矿在垂直方向由下往上温度递减, 即由 366℃→257℃, 磁铁矿则稍低, 即由 313℃→256℃; 在水平方向上, 自北向南, 赤铁矿 345℃→285℃, 磁铁矿为 313℃→284℃。这都反映出热液改造活动的方向为从下到上, 由北向南, 热源很可能与矿区近外围的印支—燕山期岩浆活动有关^[3,18]。另外, 赵劲松等^[20]发现早期形成的石榴子石和透辉石中含有赤铁矿, 认为铁矿床的形成温度条件与该矿床石榴石、透辉石的高温条件相同。而根据钙铁榴石与透辉石共存, 认为其形成环境为高氧逸度、中—碱性^[21], 因而有利于铁以三价形式进入石榴石中, 并在早期广泛发生磁铁矿化, 部分见赤铁矿产出^[28], 这亦与矿相学观察到赤铁矿交代早期磁铁矿, 而磁铁矿则具残留结构等相一致(图 4-i)。以上均显示印支期以来的岩浆活动对石碌矿床的形成具有重要的改造作用, 为铁钴铜的成矿作用提供了热和动力来源, 但可能并没有带来多少成矿物质, 成矿物质主要由石碌群火山沉积地层提供。

3.3 成矿时代

由于国内学者长期将石碌铁矿归于沉积变质成因, 因而认为其成矿时代与赋矿地层青白口系石碌群的形成时代相同, 对石碌矿区中透辉石透闪石岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄主要变化于 $(1\ 333 \pm 115) \sim (894 \pm 25)\text{Ma}$ ^[29], 铁矿石 Sm-Nd 法获得石碌铁矿的年龄为 $(841 \pm 20)\text{Ma}$ ^[5]。

汪啸凤等^[9]曾获得石碌群第六层黑色炭质板岩为

(459±13)Ma 的 Rb-Sr 全岩等时限年龄;伍勤生^[30]得出石碌群第五、六层岩(矿)石的 Rb-Sr 同位素年龄值为 588~499 Ma。结合矿区外围变基性岩、变花岗质岩和变碎屑沉积岩 Rb-Sr、Sm-Nd 全岩或单矿物同位素定年及碎屑颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 定年,均反映矿区及近外围主要经历了加里东期变质阶段^[31-34],即 590~450 Ma 可理解为石碌地区加里东期区域变质事件的记录。刘宏英^[35]则按相同层位和相同变质程度的样品分组原则,对石碌群第五、六层 Rb-Sr 全岩同位素数据进行重新处理,获得第六层 Rb-Sr 全岩等时线年龄 340~315 Ma、第五层参考等时线年龄 315 Ma、上覆震旦系石灰顶组年龄为 324 Ma,这些年龄很可能代表海西期变质事件的时代,许德如等^[10]则认为 340~270 Ma 的变质事件也是石碌铁矿的一个重要成矿时代。以上两次变质事件中还可能形成了轴向 NW(W)-SE(E) 向的石碌复式向斜及近 SN 向的叠加褶皱^[4,9,21,25,36]。

石碌矿区及周围印支—燕山早期岩浆岩的 K-Ar、Rb-Sr 和锆石 U-Pb 同位素年龄为 240~170 Ma。对石碌群第五层强劈理化带劈理面上的绢云母通过 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 法获得坪年龄 (190.2 ± 5.1)Ma 和等时限年龄 (186.9 ± 3.1) Ma^[37],认为海南岛印支期构造-热事件很可能持续至早侏罗世末。许德如等^[21]通过石榴石的 Sm-Nd 法和透闪石的 Ar-Ar 法,推测其后期热液改造主要时代可能在印支期 (240~205 Ma),其次为燕山晚期(约 130 Ma)。矿区内燕山晚期花岗斑岩等脉岩 K-Ar 年龄 134~128 Ma。通过对石碌矿床北一矿体富铁矿石中热液锆石采用 LA-ICP-MS U-Pb 定年,获得两组年龄:一组加权平均年龄为 (178.6 ± 3.7) Ma,另一组加权平均年龄为 (133.2 ± 3.5)Ma(本课题组未发表),其中前一组年龄可能代表燕山早期铁矿热液成矿期时代,而后一组年龄可能代表燕山晚期钴铜矿热液改造时代。因此 240~170 Ma 及 135 Ma 左右,石碌矿区发生了两次热液改造事件,对成矿具有重要的改造富集作用,并最终形成了今日的富铁矿体及可能伴生的铜钴矿体。

通过以上成因讨论,石碌铁钴铜矿床具有一定的特殊性,成因较为复杂,多期构造活动及伴随的变质作用和热液活动对其形成起主要控制,即它是在新元古代火山沉积的基础上,后经古生代变质改造及中生代热液叠加改造富化而最终形成的。因此,文章将其定义为火山-沉积变质+多期热液叠加改造

型矿床。

4 成矿模式

石碌铁钴铜矿床属火山-沉积变质+多期热液叠加改造型矿床,其成矿过程可划分为以下 4 个成矿期(图 9)。

1)海底火山喷流沉积期(~840 Ma)。新元古代时期,因地壳强烈活动形成的拗陷带内沉积了一套富铁钴铜成矿元素的火山-碎屑沉积岩和碳酸盐岩,即青白口系石碌群,其作为矿源层可能为石碌矿床奠定了铁钴铜等成矿物质的基础,并形成少量的喷流沉积型矿体。

2)变质改造成矿期(590~270 Ma)。加里东—海西期时先后发生构造挤压作用及伴随的区域变质作用,导致了石碌群 NW(NWW)和近 SN 向褶皱构造变形及矿区绿片岩相变质,所产生的变质流体可能促使了矿源层中成矿元素发生活化、迁移和富集,从而形成了沉积变质型贫矿体。

3)印支—燕山早期热液叠加改造富化期(240~170 Ma)。该时期因古特提斯洋封闭导致的弧-陆/陆陆碰撞晚期^[34,38],发生了印支—燕山早期挤压-伸展型花岗岩的广泛侵入。因花岗岩侵入而产生的热能驱动含矿热液沿有利构造和岩性界面上升、运移和渗透,导致了石碌群第六层发生透闪石化、透辉石化和绿帘石化等蚀变,并改造了原来矿体,使得石碌矿床发生了重要的改造富集作用,并形成了富铁矿体。

4)燕山晚期热液叠加改造富化期(135 Ma~)。此阶段矿区内发生了多次构造-岩浆活动,形成了燕山晚期花岗斑岩等脉岩,并驱使矿源层和/或先成矿床中的矿物质再次活化,同时又沿断裂上升带来新的成矿热液,使得原来矿体发生改造富集,并形成了脉状、角砾状铁矿体及伴生的铜钴矿体。

5 结 论

(1)石碌矿床主要赋存于石碌群第六层中,受复式向斜严格控制,铁钴铜矿体主要呈层状、似层状和少量脉状产出,矿区内蚀变比较广泛,主要以透辉石化和透闪石化为主。

(2)石碌矿床铁钴铜等物质来源很可能来自原始火山沉积地层石碌群中,后期区域变质作用和岩浆活动对其形成起重要的改造富集作用。

(3)石碌铁钴铜矿床属火山-沉积变质+多期热

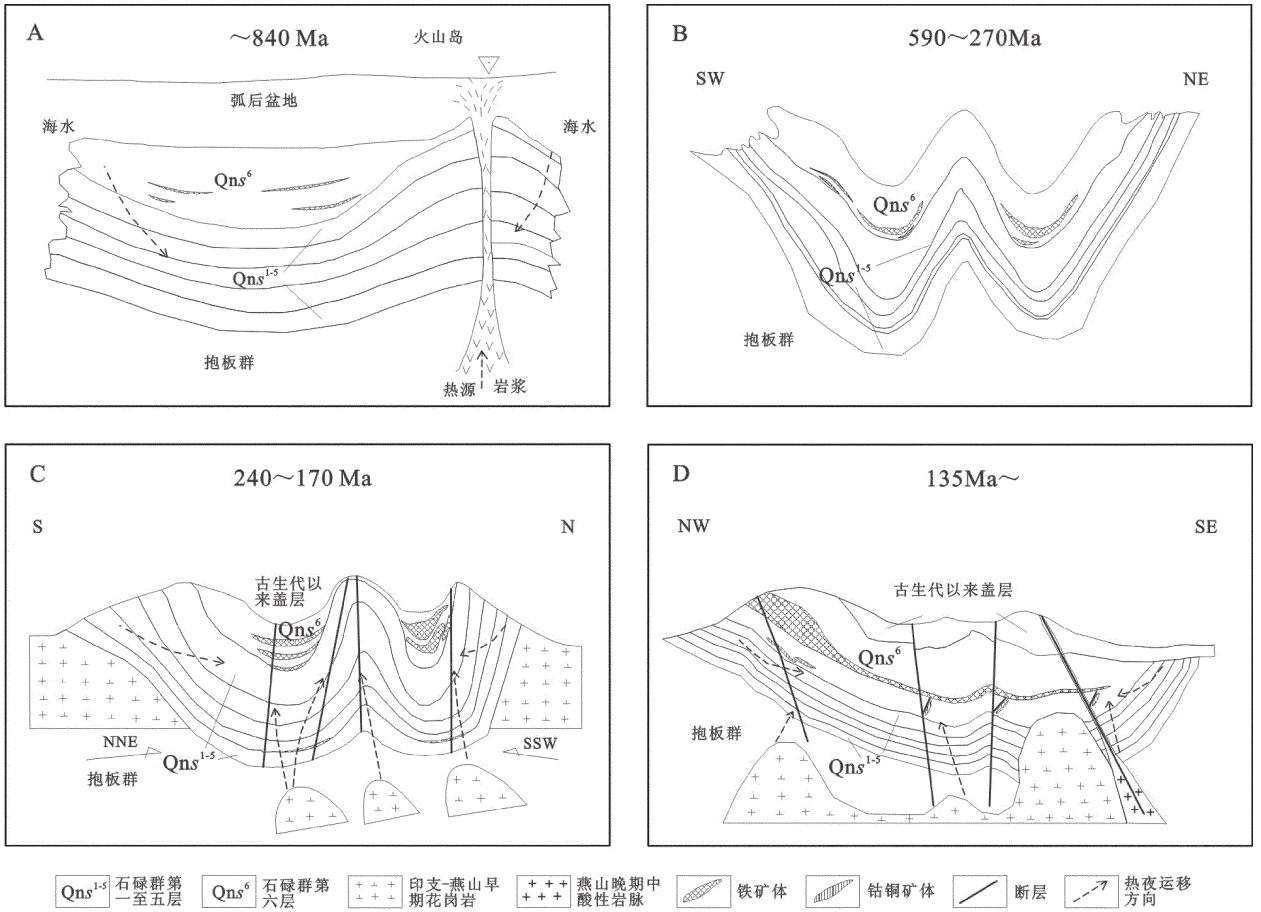


图 9 石碌铁钴铜矿床成矿模式图

A—新元古代海底火山喷流沉积期;B—加里东—海西期变质改造成矿期;C—印支—燕山早期热液改造富化期;D—燕山晚期热液改造富化期

Fig.9 Metallogenic model of the Shilu Fe-Co-Cu deposit

A- Submarine volcanic exhalation stage in Neoproterozoic period; B-Metamorphic metallogenic stage in Caledonian-Hercynian period; C- Hydrothermal transformation stage of Indosinian-early Yanshanian period;

D- Hydrothermal transformation stage of late Yanshanian period

液叠加改造型矿床,其成矿过程可划分为以下 4 个成矿期:1) 新元古代海底火山喷流沉积期;2) 加里东—海西期的变质改造成矿期;3) 印支—燕山早期热液叠加改造富化期;4) 燕山晚期热液叠加改造富化期。

致谢:文章撰写过程中得到了中国地质大学(武汉)资源学院的付乐兵、陈冲、高翔、翟亚峰等人的支持和帮助,审稿专家也提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

[1] 肖勇,蔡仁杰,符启基,等.海南岛石碌铁、钴、铜多金属矿集区地质特征及找矿方向[J].矿产与地质,2010,24(3):251-255.
Xiao Yong, Cai Renjie, Fu Qiji, et al. Geological characteristics and

prospecting orientation of Shilu iron, cobalt and copper polymetallic ore accumulation zone[J]. Mineral Resources and Geology, 2010, 24 (3): 251-255(in Chinese with English abstract).
[2] 黎鉴廷.海南铁矿床成因探讨[J].地质与勘探,1976,12(2):6-11.
Li Jianjing. Discussion on the origin of Shilu iron deposit, Hainan island[J]. Geology and Prospecting, 1976, 12(2):6-11 (in Chinese with English abstract).
[3] Yu Cimei, Lu Huanzhang. An investigation into the genesis of the Shilu iron deposit with special reference to its fluid inclusions[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1983, 2(2):127-141.
[4] 中国科学院华南富铁科学研究队.海南岛地质与石碌铁矿地球化学[M].北京:科学出版社,1986:1-376.
Study Seam of Iron Ore Deposits in South China, Chinese Academy of Sciences. Geology of Hainan Island and Geochemistry

- of Iron Ore Deposit in Shilu, Hainan Island [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1-376 (in Chinese).
- [5] 张仁杰, 马国干, 冯少南, 等. 海南石碌铁矿的 Sm-Nd 法年龄及其意义[J]. 地质科学, 1992, (1): 38-43.
Zhang Renjie, Ma Guogan, Feng Shaonan, et al. The Sm-Nd isotopic age of Shilu iron ore in Hainan Island and its implications [J]. Scientia Geologica Sinica, 1992, (1): 38-43 (in Chinese with English abstract).
- [6] 覃慕陶, 刘师先, 朱淮江. 广东—海南成矿带成矿系列地质特征及其演化规律[J]. 地球化学, 1998, 27(4): 391-399.
Qin Mutaotao, Liu Shixian, Zhu Huaijiang. Geological characteristics and evolutionary regularities of metallogenetic belts and series in Guangdong and Hainan [J]. Geochimica, 1998, 27 (4): 391-399 (in Chinese with English abstract).
- [7] 许德如, 肖勇, 马驰, 等. 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, 2007, 34(增刊): 84-96.
Xu Deru, Xiao Yong, Ma Chi, et al. Fundamental features of the Proterozoic granite-greenrock belt in Hainan Island and its relationship to iron polymetallic oredeposit [J]. Geology of China, 2007, 34(Supp.): 84-96 (in Chinese).
- [8] 侯威, 肖勇, 陈翻身. 海南岛石碌韧性剪切带的主要特征与“北一”式铁矿的成因[J]. 地质科学, 2007, 42(3): 483-495.
Hou Wei, Xiao Yong, Chen Fansheng. Main features of the Shilu ductile shear zone in Hainan island and metallogeny of the “Bei-yi-type” iron ore deposit [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(3): 483-495.
- [9] 汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 海南岛地质: (三) 构造地质[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-140.
Wang Xiaofeng, Ma Daquan and Jiang Dahai. Geology of Hainan Island: (3) Structural Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-140 (in Chinese).
- [10] 许德如, 王力, 肖勇, 等. “石碌式”铁氧化物—铜(金)—钴矿床成矿模式初探[J]. 矿床地质, 2008, 27(6): 681-694.
Xu Deru, Wang Li, Xiao Yong, et al. A preliminary discussion on metallogenic model for Shilu-type iron oxide-copper-gold-cobalt ore deposit [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(6): 681-694 (in Chinese with English abstract).
- [11] 汪啸风, 马大铨, 蒋大海. 海南岛地质: (二) 岩浆岩[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-274.
Wang Xiaofeng, Ma Daquan, Jiang Dahai. Geology of Hainan Island: (2) Magmatic rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-274 (in Chinese).
- [12] 侯威, 陈惠芳, 王可伏, 等. 海南岛大地构造与金成矿学 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-229.
Hou Wei, Chen Hui Fang, Wang Kefu, et al. Geotectonics of Hainan Island and Gold Metallogeny [M]. Beijing: Science Press, 1996: 1-229 (in Chinese).
- [13] 葛小月. 海南岛中生代岩浆作用及其构造意义 [D]. 中国科学院广州地球化学研究所, 2003: 1-87.
Ge Xiaoyue. Mesozoic Magmatism in Hainan Island and Its Tectonic Significance [D]. Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2003: 1-87 (in Chinese).
- [14] Li Xianhua, Li Zhengxian, Li Wuxian and Wang Yuejun. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island [J]. The Journal of Geology, 2006, 114: 341-353.
- [15] 王寒竹. 广东海南岛石碌铁矿富钾流纹质熔结凝灰岩的发现及其意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1983, 8 (2): 99-103.
Wang Hanzhu. Discovery of potassium-rich rhyolitic ignimbrite in the Shilu iron ore deposit of Hainan island and its significance [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1983, 8(2): 99-103 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王寒竹. 广东海南岛石碌铁石英的研究及其意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1985, 10(2): 77-83.
Wang Hanzhu. The research of quartz in Shilu iron deposits of Hainan island and its significance [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1985, 10(2): 77-83 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘裕庆. 海南石碌铁钴铜矿床硫同位素研究和矿床成因讨论[J]. 中国地质科学院院报, 1981, 2(1): 49-63.
Liu Yuqing. Sulfur isotope studies and origin of the iron-cobalt-copper deposit of Shilu, Hainan island [J]. Journal of Chinese Academy of Geological Sciences, 1981, 2 (1): 49-63 (in Chinese with English abstract).
- [18] 胡志高. 热液对石碌矿床的影响[J]. 海南矿冶, 1998, (2): 20-23.
Hu Zhigao. The hydrothermal impact on Shilu ore deposit [J]. Mining and Metallurgy in Hainan, 1998, (2): 20-23 (in Chinese with English abstract).
- [19] 吕古贤. 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, 1988, (1): 53-56.
Lv Guxian. New discovery of volcanic rocks in ore-bearing rock series in the Shilu iron deposit on Hainan Island [J]. Regional Geology of China, 1988, (1): 53-56 (in Chinese with English abstract).
- [20] 赵劲松, 夏斌, 丘学林, 等. 海南岛石碌砂卡岩铁矿石中石榴子石的熔融包裹体及其意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(1): 149-160.
Zhao Jinsong, Xia Bin, Qiu Xuelin, et al. Finding of melt inclusion in garnet from skarn of Shilu iron deposit, Hainan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(1): 149-160 (in Chinese with English abstract).
- [21] 许德如, 肖勇, 夏斌, 等. 海南石碌铁矿床成矿模式与找矿预测 [M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1-331.
Xu Deru, Xiao Yong, Xia Bin, et al. Metallogenic Model and Ore Prediction of Shilu Iron Deposit in Hainan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 1-331 (in Chinese).
- [22] 罗年华. 从地球化学特征看海南铁矿的成因 [J]. 地质与勘探, 1978, (2): 23-28.
Luo Nianhua. Genesis of Hainan iron deposit through its geochemistry [J]. Geology and Prospecting, 1978, (2): 23-28 (in

- Chinese with English abstract).
- [23] 冯建良,王静纯.论海南石碌铁矿成因[J].地质与勘探,1980,(12):21-28.
Feng Jianliang, Wang Jingchun. Discussion on genesis of Shilu iron deposit in Hainan[J]. Geology and Prospecting, 1980, (12):21-28 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘宏英.海南石碌铁矿硫、氧同位素组成特征及矿床成因分析[J].矿产与地质,1982,(1):133-138.
Liu Hongying. Sulfur and oxygen isotopic composition and genesis of Shilu iron deposit in Hainan[J]. Mineral Resources and Geology, 1982, (1):133-138(in Chinese with English abstract).
- [25] 袁奎荣,候光汉,李公时,等.海南石碌铁矿的成因和富铁矿与构造的关系[J].中南大学学报(自然科学版),1977,(3):26-43.
Yuan Kuirong, Hou Guanghan, Li Gongshi, et al. Genesis and the relationship of rich iron orebody and structural of Shilu iron deposit in Hainan [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 1977, (3):26-43 (in Chinese with English abstract).
- [26] 杨开庆,董法先,王建平,等.海南石碌矿区铁、金、铜、钴矿构造动力成矿作用的研究[J].地质力学学报,1988,(1):83-152.
Yang Kaiqing, Dong Faxian, Wang Jianping, et al. Study of tectono - metallogenesis of iron-gold-copper-cobalt ores of Shilu mining area in Hainan island [J]. Journal of Geomechanics, 1988, (1):83-152 (in Chinese with English abstract).
- [27] 桂林冶金地质研究所包裹体研究小组.海南铁矿矿物包裹体特征及形成温度测定[J].地质与勘探,1978,(2):19-22.
Inclusions study group of Research institute of Guilin metallurgy geology. mineral inclusions and measurement to formation temperature of Hainan iron ore deposit [J]. Geology and Prospecting, 1978, (2):19-22 (in Chinese with English abstract).
- [28] 林文蔚.砂卡岩矿床共生单斜辉石-石榴石氧逸度计及主要金属矿化类型砂卡岩生成的氧逸度条件[J].岩石矿物学杂志,1990,9(3):255-262.
Lin Wenwei. The oxygen fugacity indicator of the paragenetic clinopyroxene-garnet pair in skarn deposits and the formation conditions of skarns related to major metallization types [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1990, 9(3):255-262 (in Chinese with English abstract).
- [29] 许德如,马驰,李鹏春,等.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,2007,81(3):381-393.
Xu Deru, Ma Chi, Li Pengchun, et al. U-Pb SHRIMP dating of zircon domains from metaclastic sedimentary rocks in Hainan Island, South China, and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(3):381-393(in Chinese with English abstract).
- [30] 伍勤生.中国南方部分中浅变质岩系的 Rb-Sr 年龄及其意义的探讨[J].大地构造与成矿学,1985,9(3):245-262.
Wu Qinsheng. Rb -Sr ages of some moderately -weakly metamorphosed rocks in South China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1985, 9 (3): 245 -262 (in Chinese with English abstract).
- [31] 何龙清,余凤鸣,刘国庆.海南戈枕剪切带的构造变形与演化[J].华南地质与矿产,1996,(3):46-53.
He Longqing, Yu Fengming, Liu Guoqing. Deformation and evolution of the Gezhen shear zone, Hainan island[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 1996, (3): 46-53 (in Chinese with English abstract).
- [32] Ding Shijing, Hu Jianmin, Song Biao, et al. 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), 2005, 48 (12):2092-2103.
- [33] 许德如,夏斌,Nonna B C,等.海南岛屯昌晨星地区变基性岩变质特征及构造意义[J].岩石学报,2006,22(12):2987-3006.
Xu Deru, Xia Bin, Nonna B C, et al. Metamorphic characteristics of the Chenxing metabasite massif in Tunchang area, Hainan Island, South China and its tectonic implication [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (12):2987-3006 (in Chinese with English abstract).
- [34] Xu Deru, Xia Bin, Li Pengchun, et al. 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]. The Island Arc, 2007, 16 (4):575-597.
- [35] 刘宏英.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,1981,(11):47-51.
Liu Hongying. Again understanding for whole rock Rb -Sr isochron age of Shilu group [J]. Geology and Prospecting, 1981, (11):47-51(in Chinese with English abstract).
- [36] 陈国达,关尹文,邓景,等.海南岛石碌式铁矿的大地构造成矿条件初探[J].大地构造与成矿学,1978,(2):1-12.
Chen Guoda, Guan Yinwen, Deng Jing, et al. Shilu type iron metallogenic conditions of the tectonic in Hainan island [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1978, (2):1-12 (in Chinese with English abstract).
- [37] 陈新跃,王岳军,韦牧,等.海南公爱 NW 向韧性剪切带构造特征及其 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学约束 [J].大地构造与成矿学,2006,30(3):312-319.
Chen Xinyue, Wang Yuejun, Wei Mu, et al. Microstructural characteristics of the NW-trending shear zones of Gong Ai region in Hainan island and its $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2006, 30 (3):312-319 (in Chinese with English abstract).
- [38] Li Xianhua, Zhou Hanwen, Chung Sunli, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island, South China and their tectonic significance [J]. The Island Arc, 2002, 11(3):193-205.

Ore genesis and metallogenic model of the Shilu Fe-Co-Cu deposit in Hainan Province

DU Bao-feng^{1,2}, WEI Jun-hao¹, LI Yan-jun¹, SHI Wen-jie¹, YAN Chang-hai²,
ZHAO Shao-qing¹, PEI Zhong-chao², BAI Guo-dian²

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: The Shihlu ore deposit in Hainan is one of the famous mining areas not only for large amounts of iron but also for considerable economic values of associated minerals such as copper and cobalt. This paper reevaluated the major factors controlling the orientations of ore bodies, and discussed the source of metallogenic materials, the relationship between magmatic activity and the metallogenic process, and the metallogenic epoch. The results show that the metallogenic materials of the Shilu ore deposit were possibly derived from the Shilu Group of primary volcanic-sedimentary formations, and later regional metamorphism and magmatic activity played an important role in the transformation and concentration of these material. On such a basis, the authors defined initially it as the type of the volcano-sedimentary metamorphic and multi-period hydrothermal superimposition transformation. This paper summarized the metallogenic model of the Shilu ore deposit as follows: 1) Submarine volcanic exhalation stage in Neoproterozoic period, which established the foundation of metallogenic materials of Fe-Co-Cu; 2) Metamorphic metallogenic stage in Caledonian-Hercynian period, which formed the lean metamorphic ore bodies; 3) Hydrothermal transformation stage of Indosinian-early Yanshanian period, which caused important transformation and concentration of the ore deposit, and produced rich iron ore bodies; 4) Hydrothermal transformation stage of late Yanshanian period, which transformed the original ore bodies, and produced the vein/breccia iron ore bodies and also the associated copper-cobalt ore bodies.

Key words: Shilu; Fe-Co-Co deposit; metallogenic model; volcano-sedimentary metamorphism; hydrothermal superimposition

About the first author: DU Bao-feng, male, born in 1985, master, mainly engages in the study of mineral deposits and metallogenic prediction; E-mail: dubaofeng517@163.com.