

安徽铜陵马山层控金铜硫矿床成因

邵毅¹, 张遵忠¹, 吴昌志², 李爱菊¹, 顾连兴^{1,2}

(1. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 南京 210007;

2. 南京大学地球科学系, 南京 210093)

摘要: 安徽铜陵马山金铜硫矿床产于中石炭统黄龙组白云岩与灰岩地层之间, 主矿体呈层状。矿石结构构造、成矿元素地层学分带、硫化物矿物微量元素地球化学和硫、铅同位素等特征表明, 该矿床是中石炭世海底喷流沉积的块状硫化物矿床, 成矿后在燕山期又受到了石英闪长岩体的改造和叠加。在长江中、下游断裂拗陷带中有许多硫化物矿床在成因上与马山相似。研究表明, 在晚古生代, 有一片洋壳拖着扬子板块往北向华北板块俯冲, 故这类矿床形成于扬子古陆北缘的被动大陆边缘环境。

关键词: 海底喷流; 块状硫化物矿床; 马山金铜硫矿床; 安徽省

中图分类号: P611; P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2010)04-0310-09

0 前言

马山金铜硫矿床位于安徽省铜陵市郊、著名的铜官山铜矿床的北东侧, 目前正在进行井下开采。多年来, 已有众多学者对其作过研究^[1-3], 但是关于其成因, 迄今仍有海底喷流沉积^[4-5]和岩浆热液之争。近年来, 作者对此矿床及其外围作了考察和研究, 在此基础上本文将进一步探讨其成因和成矿地质背景。

1 矿床地质概况

马山矿区位于长江中、下游断裂拗陷带铜陵后印支隆起区铜官山背斜北东倾伏端。矿区出露志留系一下三叠统(表 1), 在中三叠世的印支期发生了褶皱。含矿地层主要为中石炭统黄龙组白云岩段。

天鹅抱蛋岩体侵入于马山矿区北部(图 1), 其面积约 0.8 km², 岩性主要为石英闪长岩, 钾氩法年龄为 137 Ma^[6], 应为燕山期产物。

区内除天鹅抱蛋岩体接触带附近的夕卡岩型小型铜金矿体出露地表外, 层状主矿体均隐伏于岩体的东侧和南侧(图 1), 其南侧从 23 线经鹅头山和

黄狮涝山一直延伸到梅家山一带。在钻探工程的基础上, 1985 年算得主要有用元素储量: Au 储量 6.3 t, 品位 $w(\text{Au}) = 10.1 \times 10^{-6}$; Cu 储量 1.0 万 t, 品位 $w(\text{Cu}) = 0.13\%$; S 储量 807 万 t, 品位 $w(\text{S}) = 33.5\%$ 。有害元素 $w(\text{As})$ 平均 4.27%^①。

矿石绝大部分呈块状构造, 金属矿物主要为磁黄铁矿、黄铁矿、胶黄铁矿和毒砂, 其次有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、白铁矿和磁铁矿等; 硫化物矿石主要呈块状构造, 金主要以自然金和银金矿的颗粒散布于硫化物矿石中。脉石矿物主要为石英和碳酸盐矿物。

2 硫化物矿体的沉积-变质特征

2.1 矿体的层控特征

马山矿区的矿化主要受中石炭统黄龙组下部海相地层控制。硫化物主矿体呈层状, 整合于黄龙组下段白云岩与灰岩之间, 沿地层走向延展达 2 000 m, 沿倾斜延深 1 200 m 尚未终止, 并与围岩同步褶皱(图 2)。层状矿体与上、下盘碳酸盐岩地层界线清晰, 缺乏明显的热液蚀变。

在马山矿区外围, 铜官山、冬瓜山、新桥等矿区

收稿日期: 2009-09-04

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403506)资助。

作者简介: 邵毅(1953), 男, 浙江余姚人, 研究员, 硕士, 现为中南大学信息物理工程学院博士研究生, 从事经济管理与矿业开发工作。

通信地址: 江苏省南京市白下区大光路 26 号; 邮政编码: 210007; E-mail: shaoyi@china-ecce.com

通讯作者: 张遵忠。通信地址: 南京市大光路 26 号, 江苏省有色金属华东地质勘查局深部找矿研究院; 邮政编码: 210007; E-mail: njuzhang@126.com

均受黄龙组下部地层控制。在铜官山背斜西翼, 从松树山往南西经老庙基山、小铜官山、宝山到老山一带, 该层位的矿化连续达 2~ 3 km; 再往南西, 矿化随白云岩层位被断层切错而潜匿, 西至戴家冲一带, 五通组砂岩顶面上的铁帽连续展布又达 2~ 3 km, 戴家冲已露天开采黄龙组底部的层状硫化物矿体。

表 1 马山矿区地层表
Table 1 Stratigraphy of the Mashan deposit

地层				岩性描述	厚度(m)
系	统	组	符号		
第四系		近代堆积	Q	黏土、砂、砾石	0~ 20
三叠系	下统	殷坑组	T _{1y}	灰绿色钙质页岩、泥岩夹薄层灰岩	67~ 148
		大隆组	P _{2d}	硅质页岩夹灰岩	27~ 52
二叠系	上统	龙潭组	P _{2l}	页岩夹砂岩、顶部夹碳质页岩	60~ 90
		孤峰组	P _{1g}	硅质页岩夹含锰灰岩	20~ 30
	下统	栖霞组	P _{1q}	深灰色至灰黑色沥青质灰岩, 上部含燧石结核	180~ 260
石炭系	上统	船山组	C _{3c}	厚层灰岩、具球状构造的灰岩	1020
	中统	黄龙组	C _{2h}	上段: 块状灰岩; 下段: 厚层白云岩, 顶部硫化物矿层含 Au, Cu	7~ 20
泥盆系	上统	五通组	D _{3w}	上段: 泥质粉砂岩、细砂岩; 下段: 石英砂岩夹砾岩	102
志留系	上统	寨山组	S _{3z}	厚层砂岩夹粉砂岩、页岩	303

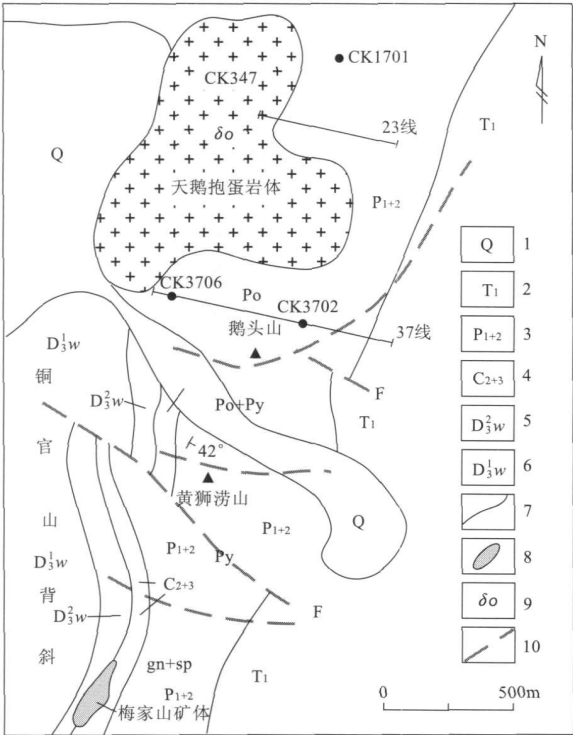


图 1 马山矿区地质平面图
(含铁硫化物矿物相分带)

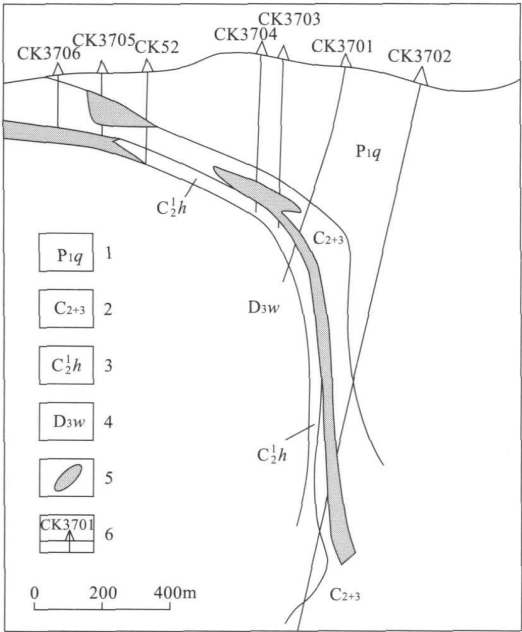


图 2 马山矿区 37 线剖面图
Fig. 2 Geology of Profile 37 across the Mashan deposit

1. 栖霞组灰岩 2. 黄龙组- 船山组灰岩 3. 黄龙组底部白云岩
4. 五通组砂页岩 5. 硫化物矿体 6. 钻孔及编号

2.2 金属的地层学垂直分带

按照岩浆热液的传统观念, 垂直分带是指金属含量随所处深度不同有规律地变化所形成的分带, 即所谓深度垂直分带。斑岩铜矿的矿化和蚀变垂直分带^[7]以及江西银山矿区深部为铜而浅部为铅锌的分带^[8]即是深度垂直分带的典型例子。然而, 马山

Fig. 1 Geological plan of the Mashan deposit with mineral zoning of the iron sulphides
1. 第四系 2. 青龙组页岩和灰岩 3. 栖霞组灰岩和孤峰组硅质灰岩
4. 黄龙组- 船山组灰岩、白云岩 5. 五通组上段页岩和砂岩
6. 五通组下段砂岩 7. 地质界线 8. 地表铅锌矿体
9. 石英闪长岩 10. 矿物分带界线;
矿物分带: po. 磁黄铁矿带 po+ py. 磁黄铁矿+ 黄铁矿带
py. 黄铁矿带 gn+ sp. 方铅矿+ 闪锌矿+ 黄铁矿带

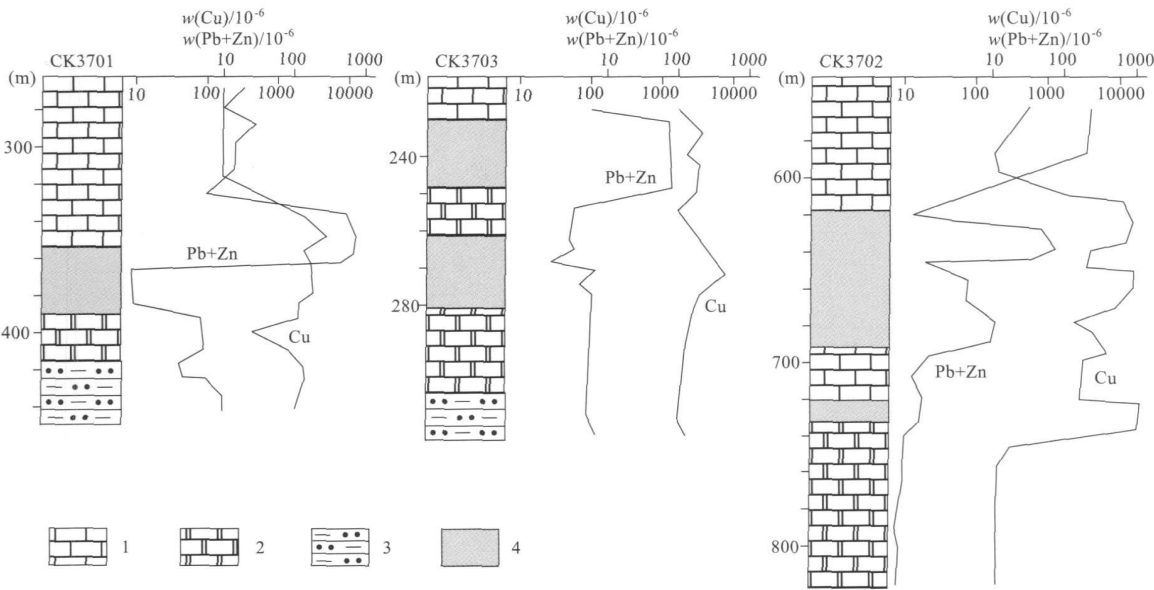


图 3 马山矿区 37 线钻孔 Cu 和 Pb+ Zn 原生晕柱状图(据华东冶金地质 812 队资料整理)

Fig. 3 Cu and Pb+ Zn contents of rock chips from drill holes on Profile 37 across the Mashan deposit

1. 黄龙组灰岩 2. 黄龙组白云岩 3. 五通组砂岩、粉砂岩 4. 硫化物矿体

矿区的金属分带却发生于赋矿地层层位由老到新的方向上,顾连兴等(1994)称之为地层学垂直分带。

作者根据矿区原生晕光谱分析数据绘制了 37 线 3 个钻孔(图 1,图 2)在主矿层附近的 Cu, Pb, Zn 含量变化图(图 3)。

这 3 个钻孔中的 Cu, Pb, Zn 虽未构成独立的工业矿体,但 Pb, Zn 富集于较上层位,而 Cu 富集于较下层位。这种 Pb, Zn 在上而 Cu 在下的地层学垂直分带特征在许多海底喷流块状硫化物矿床中也有大量存在的,以往普遍认为其成因与不同金属的幕式喷流或沉积分异有关 (Large, 1977; Solomon, 1977; 顾连兴等, 1984),而近年来则认为与海底环境的带状提炼(zone refining)有关^[9-10]。

2.3 矿石结构构造

马山层状矿体中的硫化物矿石以块状构造为主,但反映沉积层理的层纹状构造也不鲜见。层纹通常由白云石、蛇纹石与硫化物(磁黄铁矿或黄铁矿)相间而成,层纹受揉皱后便形成揉皱状构造(图 4A)。当揉皱状矿石中的硫化物微层为黄铁矿时,这种微层常被拉断而成石香肠构造,表明揉皱作用发生于黄铁矿的脆性状态之下。在铜陵地区的铜官山、冬瓜山和新桥等矿区的相同层位均可见到这种层纹-揉皱状矿石。

在马山矿区及其外围,黄铁矿的胶状结构十分普遍。除有些切割块状硫化物矿石的脉状胶黄铁矿为后期热液产物外,相当数量的块状胶黄铁矿反映

了矿石的沉积成因。块状胶黄铁矿在马山层状矿体南部黄狮涝山以南地区广泛发育。与铜陵松树山、新桥和江西武山、永平、东乡等矿区松软易碎的胶黄铁矿不同的是,马山矿区块状胶黄铁矿矿石致密坚硬,这是因为矿石中含大量硅质之故。不过,马山的胶黄铁矿矿石也比晶质矿石容易氧化,氧化后生成大量无色透明的针状硫酸盐(俗称盐霜)。在显微镜下,胶黄铁矿矿石中也可见到同心环状和放射状收缩裂纹。胶黄铁矿常见于海底喷流沉积矿床中,在现代洋脊热水沉积物中也广泛分布,并被认为是喷硫热液与海水混合过程中硫化物快速沉淀的产物^[11]。

2.4 矿物共生顺序

对于矿石结构构造的详细研究表明,在马山矿床层状矿体中,Fe-S-O 系矿物的典型共生顺序不是热液矿床中从高温到低温的沉淀顺序,而主要是从低温到高温的变质反应顺序。

块状胶黄铁矿是矿区最早形成的金属矿物,而黄铁矿则是其重结晶的产物。黄铁矿的变晶生长可在胶黄铁矿基质中形成斑点状变晶集合体或立方体自形变斑晶(图 4B)。当变晶生长沿着后期裂隙发生时可造成黄铁矿对块状胶黄铁矿的脉状或网脉状穿插。胶黄铁矿中的斑状变晶结构在现代洋脊热水沉积物中也有报导(Xu and Scott, 2005)。关于黄铁矿变斑晶的生长机制,文献^[12-13]中已作过充分的论述。

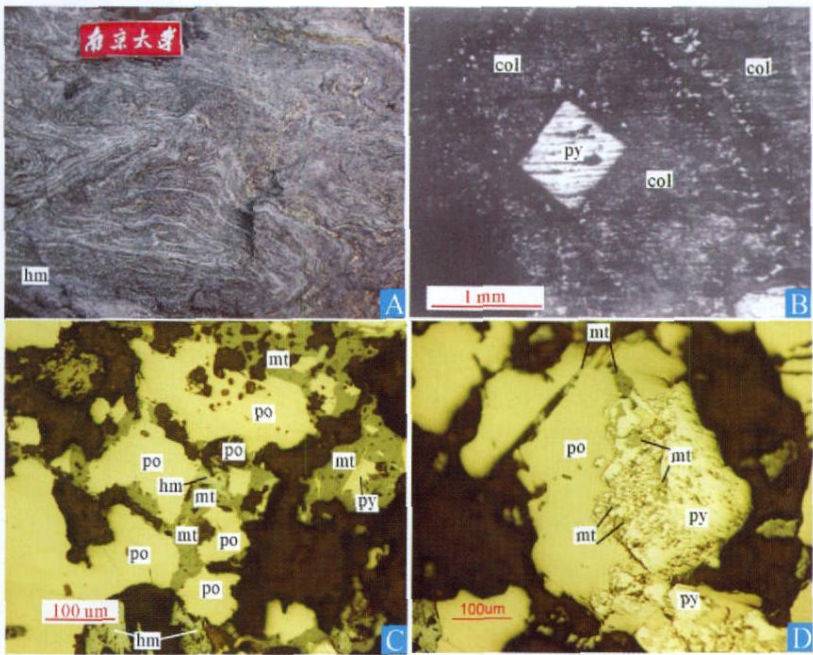


图 4 马山矿区层状矿体矿石结构构造

Fig. 4 Ore textures and structures in the stratiform orebody of the Mashan deposit

Col. 胶黄铁矿 hm. 赤铁矿 mt. 磁铁矿 po. 磁黄铁矿 py. 黄铁矿

- A. 由碳酸盐、蛇纹石与磁黄铁矿相间而成的揉皱状矿石光面
- B. 胶黄铁矿中的立方体黄铁矿自形“变晶”, 平面反射光
- C. 同一个磁黄铁矿晶体被磁铁矿切割成光性连续的若干颗粒, 平面反射光
- D. 磁黄铁矿被磁铁矿和黄铁矿的后成合晶交代, 后期赤铁矿又交代磁铁矿, 平面反射光

作为马山层状矿体的重要矿石矿物, 磁黄铁矿多为黄铁矿的变质产物, 黄铁矿被磁黄铁矿脉穿插或被磁黄铁矿交代成港湾状, 乃至骸晶状等结构十分普遍。在变质强烈之处, 黄铁矿可全部被磁黄铁矿替代而形成块状磁黄铁矿矿石。顾连兴等 (1988)^[14]曾研究过该矿区磁黄铁矿的内部结构特征, 发现多数磁黄铁矿颗粒为单斜与六方变体的交生体, 交生体的结构又可分为两种类型: ①单斜磁黄铁矿呈叶片状均匀分布于六方磁黄铁矿基质之中; ②单斜磁黄铁矿沿六方磁黄铁矿的颗粒边界或晶内裂隙分布。现在看来, 均匀分布的叶片状单斜变体是由黄铁矿变质而成的六方磁黄铁矿在冷却过程中出溶的产物, 而沿裂隙分布的单斜变体则是六方磁黄铁矿受后期富硫热液交代而成^[15]。

马山矿区磁铁矿的形成晚于黄铁矿和磁黄铁矿。在光片中常可见到黄铁矿和磁黄铁矿被磁铁矿穿插, 或被磁铁矿交代成港湾状、不规则状 (图 4C)。磁黄铁矿被磁铁矿交代成若干个光性连续的孤岛的现象也不鲜见 (图 4C), 这些孤岛在正交偏光下呈现同时消光。当硫逸度和氧逸度均较高时, 磁黄铁矿

可被磁铁矿与黄铁矿的后成合晶交代 (图 4D)。

表 2 马山矿区不同产出状态磁铁矿单矿物微量元素特征

Table 2 Trace element analyses for magnetite separates in various modes of occurrences from the Mashan deposit

磁铁矿 产出状态	标本号	Ti	V	Cr
		$w_B / 10^{-6}$		
层状矿体 中的变晶	M 454	1457	129	17
	M 503	1638	59	19
	M 614	1465	71	35
	M 679	1539	69	20
	M 615	1490	61	30
	平均	1518	78	24
岩体中的 副矿物	M 601 (1)	3063	1431	374
	M 601 (2)	3098	1441	375
	M 602	3364	1624	206
	平均	3175	1498	318

测试单位: 江苏冶金地质研究所 ICP-AAS 测定。

我们将层状矿体中变晶磁铁矿与马山石英闪长岩体中的副矿物磁铁矿分别作了微量元素分析, 由表 2 可知, 两种磁铁矿的微量元素特征显然有别。与岩

体中的副矿物磁铁矿相比,层状矿体中磁铁矿变晶的 V、Ti、Cr 的含量甚低,反映其物质来源与岩体关系较疏而与层状矿体中的沉积硫化物密切相关。

综上所述,马山矿床中 Fe-S-O 系主要金属矿物的生成顺序是胶黄铁矿→黄铁矿→磁黄铁矿→磁铁矿。这一顺序代表了沉积硫化物从低温到高温变质反应的过程。

2.5 铁矿物相的变质分带

马山矿区铁的不同矿物相围绕侵入体呈带状分布。如图 1 所示,自岩体往南依次为磁黄铁矿带→磁黄铁矿、黄铁矿带→黄铁矿带。在黄铁矿带的南部还存在大量胶黄铁矿,而磁铁矿仅在岩体的接触带附近的少数钻孔中见到。前已阐明,马山矿区 Fe-S-O 系矿物的共生顺序是由低温到高温的变质顺序,故矿区的这种分带是沉积成因胶黄铁矿和黄铁矿在岩体热力作用下发生不同程度接触变质而造成的变质分带。

3 成矿物质来源的地球化学特征

3.1 微量元素特征

(1) As。Goldschmidt (1954)^[16] 早已注意到,热液产物中 As 含量较高而正常海相沉积物中的 As 含量均极低。在马山矿区,As 主要产在毒砂中,其次在硫化物中以替代硫的形式赋存。金矿体中 As 平均高达 3.9%,硫矿体中高达 1.23%^①,表明马山矿区的 As 并非正常海相沉积物,而可能是海底热液注入水盆地后的产物。作者将 37 线(图 2)各钻孔全部矿心分析数据对于所代表的矿心长度进行加权平均后得到每个钻孔矿石中 As 和 Au 质量分数的加权平均值,并据此制作了该剖面的 As、Au 质量

分数变化图(图 5)。由图中可知,该剖面远离石英闪长岩体的部位 As、Au 质量分数要比靠近岩体的部位高得多。这似乎表明,As、Au 本来就是层状矿体的富集组分,在燕山期岩浆热液改造过程中,两种元素发生了同步的再活化。

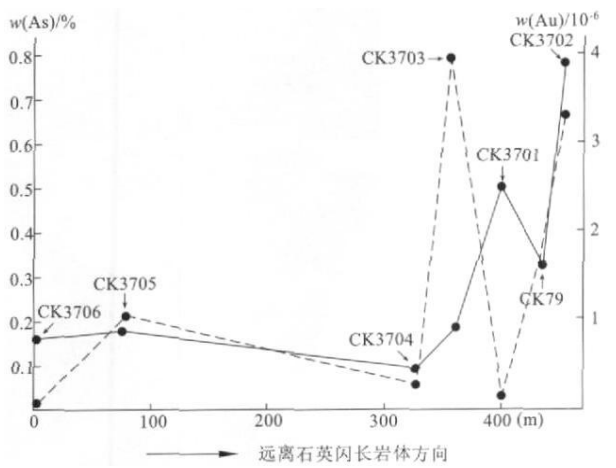


图 5 马山矿区第 37 线各钻孔矿心 As、Au 质量分数加权平均值变化图

Fig. 5 Variation of weighted averages of As and Au for ores from different drill cores on Profile 37 of the Mashan deposit
横坐标表示各钻孔见矿部位与 CK3706 之间的水平距离

(2) Se。硒在马山矿区主要赋存在硫化物中,未发现其独立矿物。作者选取矿石中的硫化物单矿物作了 S、As、Se 和 Te 含量分析(表 3)。由表 3 可知,马山矿区硫化物的 Se 质量分数均甚低,仅为 10⁻⁶ 量级;S/Se 比值变化于 44 425~ 255 000 之间。黄铁矿和磁黄铁矿的 S/Se 比值平均值分别为 174 394 和 108 938。

表 3 马山矿区黄铁矿和磁黄铁矿单矿物 S、As、Se、Te 的质量分数

Table 3 Analyses of S, As, Se and Te for pyrite and pyrrhotite separates from the Mashan deposit

矿物	标本号	标本类型	w _B /%				计算值	平均值
			S	As	Se	Te		
黄铁矿	M652	块状黄铁矿-磁黄铁矿	50.40	0.57	0.0002	0.00021	252000	174394
	B3	块状黄铁矿-磁黄铁矿	52.54	0.0012	0.0008	0.0016	65675	
	M650	块状黄铁矿	51.00	0.16	0.0002	0.00008	255000	
	M661	黄铁矿化白云岩	49.96	2.55	0.0004	0.00088	124900	
磁黄铁矿	B3	块状黄铁矿-磁黄铁矿	35.54	0.0012	0.0008	0.0010	44425	108938
	M652	块状黄铁矿-磁黄铁矿	34.69	0.172	0.0002	0.00011	173450	

测试单位: 桂林冶金地质研究所。

Goldschmidt (1954) 早已发现,与海相硫酸盐有关的沉积成因黄铁矿,其 S/Se 比值在 200 000 土;而

深源热液成因的黄铁矿, 其 S/Se 比值可低至 10 000 ~ 20 000。马山矿区的数值介于两种类型黄铁矿之间, 表明矿区的 Se 以及 Se 行为相似的硫可能兼具深源热液和海水硫酸盐两种来源。

(3) Co 和 Ni。Co/Ni < 1 并且离散度较小的黄铁矿属于沉积成因, 而 Co/Ni > 1 并且离散度较大的黄铁矿属于岩浆热液或海底喷流成因, 这规律已被普遍接受^[17-18]。在马山矿区未发现 Co 和 Ni 的独立矿物, 黄铜矿和闪锌矿的量也很少, 故 Co 和 Ni 主要以固溶体形式赋存于铁硫化物矿物中。作者挑选了马山层状矿体中的黄铁矿和磁黄铁单矿物矿样品, 分别作了 Co, Ni 分析(表 4), 所获结果黄铁矿的 Co/Ni 比值离散度较大, 平均高达 12.6, 单个样品的最高值达 37.5, 表明这些具有沉积特征的黄铁矿不是正常的海相沉积, 而是海底喷流产物。

Loftus-Hills and Solomon(1967)^[19]指出, 当黄铁矿与磁黄铁矿共存时, Co 趋于进入黄铁矿的晶格而 Ni 进入磁黄铁矿。Cambel and Jarkovsky(1968)^[20]和 Cook(1993)^[21]的研究都得出结论, 在变质过程中, Ni 在磁黄铁矿中富集而 Co 在黄铁矿

中富集。在表 4 中, 马山黄铁矿 Co 的质量分数极高(平均 215.8×10^{-6}), Co/Ni 比值达 12.6, 而马山磁黄铁矿 Co 的质量分数平均值仅为 27.5×10^{-6} , Co/Ni 比值降至 2.9。由此可见, 马山的 Co, Ni 在两种硫化物中的分配与 Cambel and Jarkovsky(1968)和 Cook(1993)在研究变质块状硫化物矿床时所得出的结论完全一致, 表明黄铁矿在转变为磁黄铁矿的过程中发生了 Co, Ni 的再分配。

3.2 同位素组成

3.2.1 硫同位素组成

根据本课题组样品(表 5)及前人测定数据, 我们绘制了马山矿区 $\delta(^{34}\text{S})$ 分布频率直方图(图 6)。由图 6 可知, 主矿层硫化物的 $\delta(^{34}\text{S})$ 呈塔式分布, 表明矿层中的硫主要为深部来源, 或者在热液进入海底之前经历了较为充分的均一化作用。其同位素具有一定的正值, 表明部分硫可能来自海水硫酸盐的无机还原。此外, 作者在紧靠矿体底板的五通组砂岩中采了 2 个团块状黄铁矿样品, 其 $\delta(^{34}\text{S})$ 值分别为 -35.36×10^{-3} 和 -38.57×10^{-3} , 表明生物硫在局部地段可能也有一定的贡献。

表 4 马山矿区黄铁矿和磁黄铁矿单矿物 Co, Ni 的质量分数
Table 4 Analyses of Co and Ni for pyrite and pyrrhotite separates from the Mashan deposit

标本号	标本类型	分析矿物	$w_B/10^{-6}$		Co/Ni 比值
			Co	Ni	
M 650	块状黄铁矿矿石	黄铁矿	340.0	28.0	12.1
M 661	黄铁矿化白云岩	黄铁矿	45.0	20.0	2.3
M 803	戴冲铁帽中块状黄铁矿	黄铁矿	32.0	11.0	2.9
M 411	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石	黄铁矿	23.0	5.0	4.6
M 651	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石	黄铁矿	637.0	17.0	37.5
M 652	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石	黄铁矿	208.0	25.0	8.3
B3(2)	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石	黄铁矿	399.0	13.0	30.7
M626(a)	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石	黄铁矿	43.0	18.0	2.4
	黄铁矿平均值		215.8	17.1	12.6
M 421	块状磁黄铁矿-黄铁矿-磁铁矿矿石	磁黄铁矿	21.5	18.0	1.2
M 666	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石	磁黄铁矿	45.0	11.0	4.1
M 474	磁黄铁矿化白云岩	磁黄铁矿	22.0	10.0	2.2
M 483	块状磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	32.0	10.0	3.2
M 409	块状磁黄铁矿矿石	磁黄铁矿	22.0	7.0	3.1
M 415	白云石与磁黄铁矿互层矿石	磁黄铁矿	21.0	8.0	2.6
M 411	白云石与磁黄铁矿互层矿石	磁黄铁矿	28.0	6.0	4.7
M 651	白云石与磁黄铁矿互层矿石	磁黄铁矿	25.0	10.0	2.5
M 652	白云石与磁黄铁矿互层矿石	磁黄铁矿	28.0	9.0	3.1
B3(2)	白云石与磁黄铁矿互层矿石	磁黄铁矿	30.0	12.0	2.5
	磁黄铁矿平均值		27.5	10.1	2.9

测试单位: 江苏冶金地质研究所 ICP-AAS 测定(报告编号: T83-034)。

表 5 马山矿区硫化物硫同位素测定数据
Table 5 Analyses of sulphur isotope composition for
sulphide minerals from the Mashan deposit

样品号	样品名称	$\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$	硫化物产出状态
M415	磁黄铁矿	4.01	与白云石相间的层纹状磁黄铁矿
M474	磁黄铁矿	3.66	白云岩中的花斑状磁黄铁矿
B ₃₋₂	磁黄铁矿	5.61	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石
B ₃₋₂	黄铁矿	5.61	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石
M493	黄铁矿	8.72	白云岩中浸染状黄铁矿
M661	黄铁矿	6.99	白云岩中花斑状黄铁矿
M804	黄铁矿	4.71	铁帽中的块状黄铁矿
M803	黄铁矿	7.47	铁帽中的块状黄铁矿
M483	黄铁矿	7.7*	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石
M411	黄铁矿	9.9*	块状磁黄铁矿-黄铁矿矿石
M433	黄铁矿	6.57	底板粉砂岩中黄铁矿团块
M725	黄铁矿	-35.36	底板粉砂岩中黄铁矿团块
M724	黄铁矿	-38.57	底板粉砂岩中黄铁矿团块
M625	黄铁矿	10.6*	块状铅锌黄铁矿矿石
M625	方铅矿	7.2*	块状铅锌黄铁矿矿石
M486	方铅矿	1.79	块状铅锌黄铁矿矿石
M486	闪锌矿	4.94	块状铅锌黄铁矿矿石

说明: 标有* 的数据系吉林冶金地质研究所测定, 其余为南京大学地球科学系同位素实验室测定。

接近于 0 值, 可能表明该样品是受地壳物质污染最小的样品。样品 M486 的单阶段模式年龄 (321 Ma) 恰与赋矿地层地质年代 (中石炭世) 相一致 (从另一个侧面佐证了矿床的沉积成因)。以此样为起点, 将表 6 中 7 个方铅矿样品加以线性回归后所得的直线斜率 $R=0.177$ (图 7), 表明这些样品是以 M486 为代表的深源正常铅受到 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值平均为 0.177 的异常铅不同程度混染后的产物。根据 R 值, 按照 Faure (1986)^[22] 的公式所算的瞬时增长和连续增长模式年龄为 1 600 Ma。

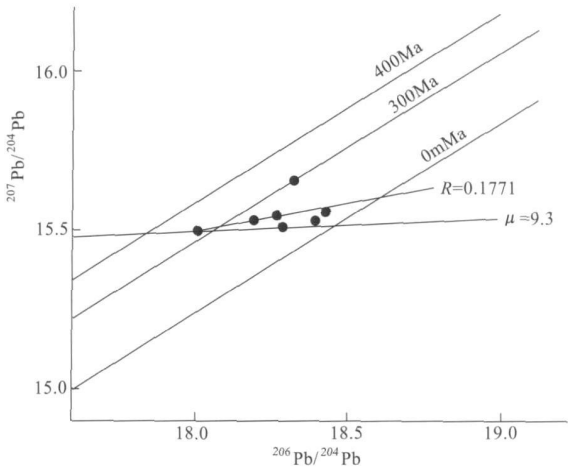


图 7 马山矿区铅同位素单阶段模式年龄分布图
Fig. 7 Distribution of single-stage lead isotope
model ages for Mashan deposit

在 Doe 和 Zartman (1979)^[23] 的铅同位素演化图 (图 8) 上, 马山矿区的矿石铅样品点均落在造山带增长曲线附近, 与日本黑矿位置相近, 表明其中的铅兼具地幔和大陆地壳两种来源。

4 矿床成因和成矿地质环境

综上所述, 马山矿床的多种特征表明, 以块状矿石为主的层状主矿体是海相沉积作用的产物, 并且其成矿物质不是来自陆源, 而是来自中石炭世海底喷流热液。按照 Franklin et al (1981)^[24] 的定义, 该矿床可被称为块状硫化物矿床。不过, 该矿床在中生代又受到了燕山期天鹅抱蛋石英闪长岩体的改造和叠加。改造和叠加主要表现为: ①层状矿体发生热接触变质, 造成了前述的矿石从低温到高温的变质反应共生顺序和铁矿物相的变质分带; ②在岩浆热液作用下, 沉积矿质发生再活化, 并在有利地段重

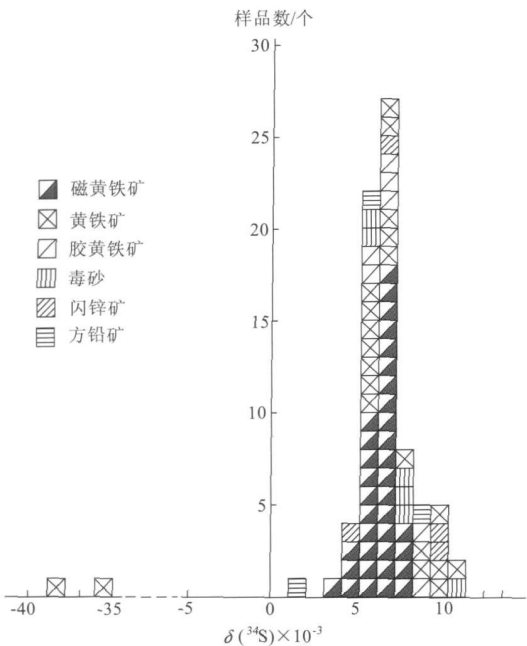


图 6 马山矿区硫化物硫同位素组成直方图
Fig. 6 Sulphur isotope histogramme for sulphide
minerals from the Mashan deposit

3.2.2 铅同位素组成

作者测定了马山矿区不同类型矿石中方铅矿单矿物样品的铅同位素组成。由表 6 可知, 样品 M486 的放射性成因的铅含量最低, 其 $\delta(^{34}\text{S})$ 也最

新富集; ③岩浆热液带来的矿质叠加于层状矿体之上, 在接触带附近形成了少量夕卡岩型矿石。

表 6 马山矿区方铅矿样品铅同位素测定数据和单阶段模式年龄计算结果

Table 6 Analyses of lead isotope composition for galena from the Mashan deposit with calculation results of single- stage model ages					取样位置	样品描述
样品号	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	模式年龄/ Ma		
M681	18.294	15.534	38.23	155	CK2601/246 m	铅锌矿化白云岩
M676	18.273	15.554	38.273	210	梅家山地表	铁帽中的方铅矿团块
M726	18.471	15.542	38.193	50	CK2401/223 m	块状硫化物矿石中的方铅矿
M625	18.475	15.554	38.232	61	CK2501/353.8 m	块状铅锌黄铁矿矿石
M504	180.204	15.53	38.205	231	CK3308/582.2 m	花斑状铅锌矿化白云岩
M486	18.033	15.502	38.139	321	CK3701/356.7 m	块状铅锌黄铁矿矿石
M630	18.377	15.665	38.528	299	CK2501/370.5 m	块状方铅矿矿石

测试单位: 宜昌地质矿产研究所, 计算所用参数为: $a_0=9.307$, $b_0=10.294$, $T=4430$ Ma。

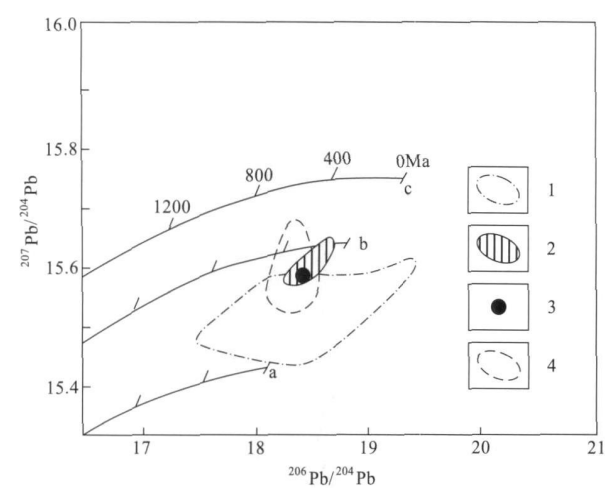


图 8 Doe and Zartman (1979) 铅同位素演化图

Fig. 8 Distribution of lead isotope compositions on the evolution diagram of Doe and Zartman (1979) for the Mashan deposit

1. 大洋玄武岩 2. 日本黑矿 3. 塞浦路斯含铜黄铁矿 4. 马山方铅矿
a. 地幔增长曲线 b. 造山带增长曲线 c. 大陆壳增长曲线

在长江中、下游范围内, 与马山矿床特征和成因相似的还有铜陵地区的铜官山、新桥和冬瓜山, 九江地区的武山和城门山等矿床。在新桥和武山矿床, 含矿层位中已分别发现了中石炭世海相火山岩^[25-26], 因此, 这类矿床的海底喷流成矿作用可能与区域火山- 岩浆活动和地热异常有着密切联系。

徐克勤等(1978)和 Gu Lianxing 等(1993) 将长江中、下游晚古生代的地质环境确定为具有陆壳基底的断裂拗陷带, 但是该断裂拗陷带究竟位于大陆内部还是大陆边缘, 这一问题尚在探讨之中。最近 20 年的研究进展表明, 大别- 苏鲁榴辉岩带代表了华北与华南两个大陆板块三叠纪时期的碰撞带, 这

两个大陆之间在晚古生代时期曾有一个向北俯冲的大洋, 而南大别的宿松群和苏北的海洲群等前寒武纪岩系不过是碰撞(印支运动)过程中被推覆上来的扬子大陆基底而已^[27-29]。由此可见, 长江中、下游断裂拗陷带在石炭纪成矿时应当处于被动陆缘环境, 而中三叠世以后的黄马青组和象山群以碎屑岩为主的地层则属于前陆盆地沉积。前人早已认识到, 被动陆缘也可发生火山活动^[30-31], 并可形成块状硫化物矿床^[32], 但是, 迄今为止被确定为被动陆缘环境的矿床仍为数不多。因此, 长江中、下游断裂拗陷带内中石炭世海底喷流块状硫化物矿床的确定, 为国内外提供了一个产在被动陆缘环境的这类矿床的实例。

5 结论

马山金铜硫矿床为中石炭世海底喷流沉积的块状硫化物矿床, 至中生代又受到了燕山期岩浆- 热液的改造和叠加。在中石炭世喷流沉积成矿时期, 长江中、下游断裂拗陷带处于扬子古陆北缘的被动大陆边缘环境, 因此马山矿床可以作为被动陆缘块状硫化物矿床的一个实例。

注释:

①安徽冶金地质勘探公司 812 队. 马山金(硫)矿床评价地质报告. 合肥: 华东冶金地质勘探局, 1985.

参考文献:

[1] 徐克勤, 朱金初. 我国东南部几个断裂拗陷带中沉积(或火山沉

- 积) - 热液叠加类铁铜矿床成因的探讨[J]. 福建地质科技情报, 1978, (4): 1-68.
- [2] 周真. 铜陵马山金矿床成因的研究[J]. 地质论评, 1984, 30(5): 467-476.
- [3] Gu Lianxing, Hu Wenxuan, He Jinxiang, *et al.* Geology and genesis of the Upper Paleozoic massive sulphide deposits in South China[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B: Applied earth science, 1993, May-August: 83-96.
- [4] Pan Y M, Dong P. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 15: 177-242.
- [5] 曾普胜, 裴荣富, 侯增谦, 等. 安徽铜陵地块沉积-喷流块状硫化物矿床[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 532-535.
- [6] 陈好寿. 同位素地球化学研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994: 1-340.
- [7] Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. Econ. Geol., 1970, 65: 373-408.
- [8] 叶庆同. 江西银山铜铅锌矿床原生矿化分带的初步研究[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所刊, 1983, 4(1): 1-15.
- [9] Large R R. Australian volcanic-hosted massive sulphide deposits: features, styles, and genetic models[J]. Econ. Geol., 1992, 87: 471-510.
- [10] Gu Lianxing, Zhou Bing, Zhang Wenlan. Chalcopyrite intergrowths in sphalerite in the Meixian lead-zinc deposit, Fujian Province and their metallogenetic significance[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1998, 17(4): 311-319.
- [11] Xu Q D, Scott S D. Spherulitic pyrites in seafloor hydrothermal deposits: Products of rapid crystallization from mixing fluid. In: Mao J and Bierlein F P, Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge [C]. Proceedings of the 8th Biennial SGA Meeting, Beijing, China, 18-21 August. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 711-713.
- [12] Schoonen M A A, Barnes H L. Reactions forming pyrite and marcasite from solution: I. Nucleation of FeS₂ Below 100°C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55(6): 1495-1504.
- [13] Gu Lianxing, Zheng Yuanchuan, Tang Xiaoqian, *et al.* Advances in research of sulphide ore textures and their implications for ore genesis[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(10): 1007-1021.
- [14] 顾连兴, 郑素娟, 陆建军. 安徽省马山华南型块状硫化物矿床中磁黄铁矿同质多像变体的交生特征及成因[J]. 矿物岩石学论丛, 1988, (5): 21-28.
- [15] Gu Lianxing, Vokes F M. Intergrowth of hexagonal and monoclinic pyrrhotites in some sulphide ores from Norway [J]. Mineralogical Magazine, 1996, 60(2): 304-316.
- [16] Goldschmidt V M. Geochemistry [M]. London: Clarendon Press, 1954: 1-730.
- [17] Bralio A, Sabatini G, Troja F. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems: evidences from southern Tuscany pyritic deposits[J]. Mineralium Deposita, 1979, 14: 353-374.
- [18] Clark C, Grguric B, Mumm A S. Genetic implications of pyrite chemistry from the Palaeoproterozoic Olary Domain and overlying Neoproterozoic Adelaidean sequences, northeastern South Australia[J]. Ore Geology Reviews, 2004, 25: 237-257.
- [19] Loftus-Hills G, Solomon M. Cobalt, nickel and selenium as indicators of ore genesis[J]. Mineralium Deposita, 1967(2): 228-242.
- [20] Cambel B, Jarkovsky J. Geochemistry of nickel and cobalt in pyrrhotites of different genetic types[C] // Proc. 23rd. Int. Geol. Congr., Prague. Geochemistry, 1968(6): 169-183.
- [21] Cook N J. Mineralogy of the sulphide deposits at Sulitjelma, northern Norway[J]. Ore Geology Reviews. 1996(11): 303-338.
- [22] Faure G. Principles of Isotope Geology [M]. Second edition. New York: John Wiley and Sons, 1986: 1-589.
- [23] Doe B R, Zartman R E. Plumbotectonics, the Phanerozoic [C] // Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Second edition. New York: John Wiley & Sons, 1979: 22-79.
- [24] Franklin J M, Lydon J W, Sangster D F. Volcanogenic massive sulphide deposits[J]. Econ. Geol., 1981, 75: 458-627.
- [25] 富士谷, 阎学义, 袁成祥. 长江中、下游成矿带石炭纪海底火山-喷发沉积黄铁矿型矿床的地质特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 1977, (4): 43-67.
- [26] 顾连兴, 徐克勤. 江西武山中石炭世海相火山岩和块状硫化物矿床[J]. 桂林地质学院学报, 1984, 4(4): 91-102.
- [27] Zhang K J. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalt around the Tanlu fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China: an extended discussion[J]. Geol., 2000, 108(6): 739-743.
- [28] 孟祥化, 葛铭, 柳永清, 等. 华南震旦-三叠纪前陆盆地(带)沉积大地构造、旋回层序和相对海平面变化[C] // 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京: 地震出版社, 1998: 584-593.
- [29] 朱光, 徐嘉伟, 刘国生, 等. 下扬子地区沿江前陆盆地形成的构造控制[J]. 地质论评, 1998, 44(2): 120-129.
- [30] Lister G S, Etheridge M A, Symonds P A. Detachment faulting and the evolution of passive continental margins[J]. Geology, 1986, 14: 246-250.
- [31] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 香港: 香港文化教育出版社, 1994: 1-437.
- [32] Wang Jingbin, Deng Jinui, Zhang Jingong, *et al.* Massive sulphide deposits related to the volcanic passive continental margin in the Altay region[J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 1999, 73(3): 253-263.

形式赋存在石英-硫化物中; 热液活动晚期, 温度进一步下降, 溶液中的碳酸钙达到过饱和, 在部分地段出现碳酸盐化, 标志着热液活动的结束。

参考文献:

[1] 邹存海, 苏大勇. 新疆哈巴河县托库孜巴依金矿普查报告[R]. 乌鲁木齐: 中冶总局新疆地质勘察院, 2008.

- [2] 黄文海. 新疆哈巴河县赛都金矿 II 号矿床地质普查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质矿产勘查局, 2001.
- [3] 徐九华, 张国瑞, 谢玉铃, 等. 阿尔泰赛都金矿床成矿流体初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(增刊): 330-332.
- [4] 程忠富, 芮行键. 哈巴河县赛都金矿成矿特征探讨[J]. 新疆地质, 1996, 14(3): 247-254.
- [5] 陈柏林, 董法先, 李中坚. 韧性剪切带型金成矿模式[J]. 地质论评, 1999, 45(2): 186-191.
- [6] 董永观, 张传林, 芮行键, 等. 哈巴河-布尔津河流域金、铜成矿条件研究[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SAIDU GOLD DEPOSIT IN HABAHE COUNTY OF XINJIANG AUTOMOMOUS REGION

MI Deng-jiag, SU Da-yong, ZOU Cun-hai, TANG Xiao-dong

(Xinjiang Geological Prospecting Institute of China Metallurgical geological Bureau, Ürümqi 830006, China)

Abstract: Saidu gold deposit is located in back arc basin at south margin of the west Altaishan mountain with favorable metallogenic background. Maerkakuli fault is the ore-control structure. The gold deposit occurs in marine greywacke of Middle Carboniferous Altai Formation. In the prospect are developed sericitization, chloritization, silicification, pyritization, limonitization and malachitization. The wall rock alteration intensity is proportion to the deformation intensity. Isotopic analysis shows that the ore fluid is a mixture of meteoric, magmatic and metamorphic water and sulfur from deep crust. Geochemically, Upper sub-formation of Altai Formation is the source bed. The gold deposit is a medium-low temperature one controlled by ductile shear zone.

Key Words: Saidu gold deposit; geological characteristics; ductile shear zone; genesis of the deposit; Xinjiang

(上接第 318)

GENESIS OF THE MASHAN Au-Cu-S DEPOSIT, TONGLING, ANHUI PROVINCE

SHAO Yi¹, ZHANG Zun-zhong¹, WU Chang-zhi², LI Ai-ju¹, GU Lian-xing^{1,2}

(1. East China Mineral Exploration and Development Bureau for Non-Ferrous Metals, Nanjing 210007, China; 2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The main ore body of Mashan gold-copper-sulphur deposit in Tongling, Anhui Province is in stratiform occurring between the dolomite and limestone of the Middle Carboniferous Huanglong Formation. Ore textures and structures, stratigraphical zoning of ore-forming elements, trace element geochemistry of sulphide minerals, and sulphur and lead isotopes indicate that it is a Carboniferous Sedex massive sulphide deposit that was exposed to reworking and overprinting of Yanshanian quartz diorite intrusion. A number of sulphide deposits are similar genetically to the deposit in the lower Yangtze fault depression zone. In late Palaeozoic, an oceanic crust, with the Yangtze plate being anchored on its southern side, was subducting northwards beneath the North China plate. It follows that these deposits were originally formed on the passive continental margin north to the Yangtze plate.

Key Words: submarine exhalation; massive sulphide deposit; Mashan Au-Cu-S deposit; Anhui province