

“十二五”国家重点图书出版规划项目

有色金属文库

NON-FERROUS METALS LIBRARY

粤北凡口式铅锌硫化物矿床 关键成矿控制系统及成矿预测研究

KEY METALLOGENIC CONTROL SYSTEM AND METALLOGENIC PREDICTION RESEARCH
ON FANKOU TYPE LEAD AND ZINC SULFIDE ORE DEPOSITS IN NORTHERN GUANGDONG PROVINCE

张术根 姚翠霞 杨汉壮 原桂强◎等著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

“十二五”国家重点图书出版规划项目

有色金属文库

国家“十一五”科技支撑计划项目资助

粤北凡口式铅锌硫化物矿床 关键成矿控制系统及成矿预测研究

KEY METALLOGENIC CONTROL SYSTEM AND
METALLOGENIC PREDICTION RESEARCH ON
FANKOU TYPE LEAD AND ZINC SULFIDE ORE
DEPOSITS IN NORTHERN GUANGDONG PROVINCE

张术根 姚翠霞 杨汉壮 原桂强 等著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

粤北凡口式铅锌硫化物矿床关键成矿控制系统及成矿预测研究/
张术根,姚翠霞,杨汉壮,原桂强等著. —长沙:中南大学出版社,
2012. 12

ISBN 978-7-5487-0740-0

I. 粤... II. ①张... ②姚... ③杨... ④原... III. ①铅锌矿床
- 硫化物矿床 - 成矿控制系统 - 研究 - 韶关市 ②铅锌矿床 - 硫化物
矿床 - 成矿预测 - 研究 - 韶关市 IV. P618.420.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 311303 号

粤北凡口式铅锌硫化物矿床 关键成矿控制系统及成矿预测研究

张术根 姚翠霞 杨汉壮 原桂强 等著

☐责任编辑 刘石年

☐责任印制 周颖

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

发行科电话:0731-88876770

☐印 装 长沙市利君漾印刷厂

邮编:410083

传真:0731-88876482



☐开 本 720 × 1000 B5 ☐印张 17 ☐字数 333 千字

☐版 次 2013 年 1 月第 1 版 ☐2013 年 1 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 0740 - 0

☐定 价 68.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容提要

该书全面阐述了粤北凡口式铅锌硫化物矿床关键成矿控制系统，成矿预测研究的指导理论，以及实际有效的思想方法和技术手段。主要内容包括：以粤北曲仁盆地北缘为研究区域，以递进成矿论为指导，运用成矿系统论的思想方法，通过地、物、化、遥多元信息综合研究，厘定凡口式铅锌硫化物矿床的成矿系统属性，研究源、流、运、储关键控制系统及其耦合与临界转换成矿机制，探索网络节点时空分布规律，建立成矿系统模式和多元信息成矿预测模型，进行区域成矿预测，优选勘查靶区。该书将陈国达院士创立的递进成矿论和翟裕生院士所倡导的成矿系统论思想进行融合并开展多因复成矿床成矿系统即叠加成矿系统的多元信息综合分析，在成矿理论和找矿预测方法应用研究等方面获得了重要创新。

本书可供在铅锌铜铁等多金属矿床区域和深边部找矿预测等领域从事矿山生产、研究的工作人员使用。

前 言

粤北曲仁盆地北缘上古生界碳酸盐岩建造内赋存了凡口超大型铅锌矿矿床,并在凡口矿区西侧有杨柳塘、西岗寨、罗村等中小型铅锌或黄铁矿矿床,东侧有铁屎岭、羊角山等小型铅锌或黄铁矿矿床,是我国南岭地区重要的铅锌多金属矿聚集区。从20世纪80年代至今,众多地质研究者或较为全面、或从不同侧面对该地区铅锌硫化物矿床的成因机制、成矿模式及成矿规律等进行了研究,但其研究结论及应用效果差异明显。研究结论及应用效果差异化的核心问题体现在这些矿床的成矿关键控制系统、成矿系统属性及成矿模式认识方面。

本专著共分为6章。第1章简要介绍曲仁盆地北缘铅锌硫化物矿床成矿理论与勘查找矿历史和现状,概述碳酸盐岩盆地MVT铅锌硫化物矿床成矿理论与成矿预测研究现状,提出曲仁盆地北缘铅锌矿床成矿关键控制系统问题,介绍专著所涉及论题的研究思路、方法及手段;第2章论述区域地质成矿背景,包括区域地质、地球物理、地球化学、遥感异常以及盆地地质演化及其动力学环境;第3章主要介绍曲仁盆地北缘代表性黄铁矿矿床和铅锌矿床的地质及矿化特征,并进行对比研究,总结曲仁盆地北缘凡口式MVT铅锌硫化物矿床的成矿作用演化过程;第4章在系统把握曲仁盆地北缘黄铁矿矿床和铅锌矿床地质矿化特征的基础上,重点讨论曲仁盆地北缘黄铁矿矿床、铅锌硫化物矿床及相关地质体的地质地球化学特征专门问题;第5章探讨曲仁盆地北缘成矿物质(包括成矿流体)来源和成矿时代,总结曲仁盆地北缘凡口式MVT铅锌硫化物矿床的成矿系统属性,成矿流体传输与汇集机制、成矿要素耦合与临界转换成矿机制,确定凡口式MVT铅锌硫化物矿床的关键成矿控制系统,建立系统成矿模式;第6章以粤北曲仁盆地北缘凡口式MVT铅锌硫化物矿床的系统成矿模式为指导,运用多元信息综合找矿方法,圈定并优选找矿预测靶区。第7章总结专著研究的主要结论。

该专著的突出特色是融合陈国达院士创立的递进成矿论和翟裕生院士所倡导的成矿系统论思想,针对粤北曲仁盆地北缘地质环境及演化历程复杂、铅锌硫化物矿床控矿因素及成矿机制复杂、找矿技术应用条件复杂、成矿预测制约因素复杂的实际特点,以曲仁盆地北缘凡口式MVT铅锌硫化物矿床关键成矿控制系统研究为突破口,综合地、物、化、遥多元地质成矿及找矿信息,厘定凡口式铅锌硫

化物矿床的成矿系统属性,研究源、流、运、储关键控制系统及其耦合与临界转换成矿机制,探索网络节点时空分布规律,建立成矿系统模式和多元信息找矿预测模型,以期实现粤北曲仁盆地北缘凡口式铅锌矿床成矿理论研究和成矿预测的新突破,并对以碳酸盐岩为赋矿围岩的铅锌硫化物矿床的成因机制和成矿规律的研究有借鉴与参考价值。

本专著编写分工是:张术根负责编写前言第1章、第2章、第5章1.1节及第7章,参与第4章大部分内容及第5章部分内容的编写;姚翠霞负责编写第3章及第5章,参与第4章部分内容的编写,杨汉壮、原桂强参与编写第1章和第5章的部分内容;李明高参加编写了第3章的部分内容;张木毅参加编写了第1章的部分内容。全书初稿完成后,由张术根指导全部专著内容的修改定稿。本专著插图由姚翠霞负责编绘。

本专著是在1999—2001年中南大学与凡口铅锌矿合作完成“凡口铅锌矿东矿带成矿规律与成矿预测研究”课题、2006—2009年中南大学与凡口铅锌矿及广东有色地质勘查研究院合作完成“凡口铅锌矿深、边部及外围成矿预测与找矿研究”课题并取得显著找矿效果的基础上,凝练科技部“十一五”科技支撑计划项目“东部铁铜铅锌重要矿集区深部资源勘查技术与示范”的“MVT型铅锌矿深部勘查技术与找矿示范研究”课题(课题编号2009BAB43B05)的部分研究成果而完成的。

在上述项目研究期间,中南大学地球科学与信息物理学院、中南大学科技处、深圳中金岭南凡口铅锌矿、广东有色地质勘查研究院给予了大力支持,在此表示衷心感谢!除作者外,广东有色地质勘查研究院李明高,深圳中金岭南凡口铅锌矿于新业、陈尚周、罗文升、颜克俊等参加了大量现场地质调查和资料综合研究工作,中南大学硕士研究生王晶、李桂秀、薛培等参加了大量室内岩矿鉴定与测试分析研究工作,在此表示衷心感谢。

本书引用了许多研究者公开发表的研究资料,这些都已经是在参考文献中标明,还有其他许多没有引用的前人研究成果也为我们的研究创造了良好的学术条件,我们在此一并致谢!

因为作者水平有限和研究条件有限,缺点错误在所难免,希望读者批评指正。

张术根

2012年11月15日

目 录

第 1 章 概 论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.1.1 地质勘查简史	(1)
1.1.2 地质科研简史	(2)
1.1.3 矿床成因主要观点	(3)
1.1.4 主要成矿模式	(4)
1.1.5 以往地质找矿成果简评	(9)
1.1.6 曲仁盆地北缘铅锌矿床关键成矿控制系统问题	(11)
1.2 碳酸盐岩盆地 MVT 铅锌硫化物矿床成矿理论与成矿预测研究现状	(11)
1.2.1 碳酸盐岩盆地铅锌矿床的主要类型	(12)
1.2.2 MVT 矿床的地质矿化特征及其与曲仁盆地北缘铅锌矿床简要对比	(13)
1.2.3 国内外 MVT 铅锌矿床成矿理论和成矿预测研究现状	(15)
1.3 研究思路和方法及手段	(23)
1.3.1 曲仁盆地北缘铅锌矿床成矿理论研究与成矿预测的复杂性	(23)
1.3.2 递进成矿论与成矿系统论思想融合	(26)
1.3.3 具体研究程序	(28)
1.3.4 技术手段	(28)
第 2 章 区域地质成矿背景	(31)
2.1 区域地质简况	(31)
2.1.1 地层	(31)
2.1.2 构造	(38)
2.1.3 岩浆岩	(44)
2.2 区域地球物理	(49)

2.2.1	区域重力场特征	(49)
2.2.2	区域航磁场特征	(51)
2.2.3	区域重磁异常与矿化	(51)
2.3	区域地球化学	(52)
2.3.1	区域地层的微量元素丰度	(52)
2.3.2	铅锌及有关元素的富集特性	(54)
2.3.3	地球化学异常分带	(55)
2.4	区域遥感异常信息	(59)
2.4.1	区域线环构造解译	(60)
2.4.2	区域蚀变信息解译	(60)
2.5	盆地地质演化及其动力学环境	(63)
2.5.1	盆地地质演化历程	(63)
2.5.2	盆地演化动力学环境	(65)
第3章	代表性矿床的地质矿化特征研究	(68)
3.1	矿区地质特征	(68)
3.1.1	凡口矿区地质特征	(68)
3.1.2	杨柳塘矿区地质特征	(83)
3.1.3	西岗寨矿区地质特征	(85)
3.2	代表性矿床矿化特征对比研究	(87)
3.2.1	矿体形态、规模及分布	(87)
3.2.2	矿化就位特征	(91)
3.2.3	围岩蚀变特征	(92)
3.2.4	矿石组构与矿物组合特征	(95)
第4章	曲仁盆地北缘地质地球化学专门问题综合研究	(117)
4.1	曲仁盆地北缘岩浆岩初步研究	(117)
4.1.1	曲仁盆地内部岩浆岩	(117)
4.1.2	诸广山复式岩体研究	(121)
4.2	硫化物成因矿物学特征	(136)
4.2.1	黄铁矿成因矿物学特征	(136)

4.2.2 闪锌矿成因矿物学特征	(144)
4.3 矿石及相关地质体的地球化学特征	(155)
4.3.1 铅锌硫化物矿石及相关地质体的同位素地质地球化学特征	(155)
4.3.2 铅锌硫化物矿石及相关地质体的元素地球化学特征	(159)
4.3.3 构造地球化学特征	(180)

第5章 凡口式 MVT 铅锌硫化物矿床关键成矿控制系统

(188)

5.1 成矿流体来源及成矿时代研究	(188)
5.1.1 成矿时代	(188)
5.1.2 成矿流体来源	(190)
5.1.3 成矿金属元素来源	(191)
5.1.4 硫的来源	(192)
5.1.5 热源形成	(193)
5.2 成矿机理简析	(194)
5.2.1 流体运移驱动	(194)
5.2.2 成矿流体运移通道网络	(194)
5.2.3 成矿元素活化运移	(195)
5.2.4 卸载沉淀	(196)
5.2.5 两期热液耦合叠加	(197)
5.2.6 矿化空间就位	(197)
5.3 控矿因素	(198)
5.3.1 赋矿地层沉积环境	(198)
5.3.2 地质构造	(200)
5.3.3 地层层位	(201)
5.3.4 岩浆热事件	(203)
5.3.5 水文地球化学环境	(204)
5.4 成矿系统厘定	(207)
5.5 成矿流体传输与汇聚机制	(208)
5.5.1 黄铁矿热液成矿期	(208)
5.5.2 铅锌矿热液成矿期	(209)
5.6 成矿要素耦合与临界转换成矿机制	(209)

4 / 粤北凡口式铅锌硫化物矿床关键成矿控制系统及成矿预测研究

5.7 关键成矿控制系统	(212)
5.7.1 黄铁矿热液成矿期的关键控矿要素及系统	(212)
5.7.2 铅锌矿热液成矿期的关键成矿要素及系统	(215)
5.8 系统成矿模式研究	(217)
第6章 粤北凡口式 MVT 铅锌硫化物矿化网络与成矿预测	(221)
6.1 矿化网络节点时空分布规律	(221)
6.1.1 典型矿化网络节点的矿体空间分布结构	(221)
6.1.2 区域矿化网络中各类矿床的成矿时间、成因关系	(224)
6.1.3 矿化网络节点的时空分布规律	(225)
6.2 多元信息综合找矿预测	(227)
6.2.1 直接找矿预测信息	(230)
6.2.2 间接找矿预测信息	(240)
6.2.3 评判找矿预测信息	(241)
6.2.4 建立多元信息综合找矿预测模型	(243)
6.3 找矿靶区优选	(244)
6.3.1 I 找矿远景区	(245)
6.3.2 II 找矿远景区	(247)
6.3.3 III 找矿远景区	(248)
6.3.4 IV 找矿远景区	(248)
6.4 研究结论	(249)
6.4.1 系统把握凡口式 MVT 铅锌硫化物矿床的成矿模式	(249)
6.4.2 厘定粤北曲仁盆地北缘凡口式 MVT 铅锌硫化物矿床的关键成矿控制 系统	(250)
6.4.3 确定曲仁盆地北缘铅锌硫化物矿化网络格局及矿化网络节点分布 规律	(251)
6.4.4 建立凡口式 MVT 铅锌硫化物矿床多元信息综合找矿预测模型	(252)
6.4.5 曲仁盆地北缘铅锌硫化物矿床找矿靶区的划分和优选	(253)
第7章 主要研究结论	(254)
参考文献	(256)

第1章 概论

1.1 问题的提出

粤北曲江—仁化盆地(简称曲仁盆地)为中生代断陷盆地。盆地内部被中生界碎屑岩建造大面积覆盖,盆地北缘出露上古生界碳酸盐岩建造。因为曲仁盆地北缘上古生界碳酸盐岩建造内赋存了凡口超大型铅锌矿矿床,并在凡口矿区西侧有杨柳塘、西岗寨、罗村等中小型铅锌或黄铁矿矿床,东侧有铁屎岭、羊角山等小型铅锌或黄铁矿矿床,类比国内外碳酸盐岩盆地边缘铅锌矿床的成矿条件、成因机制、成矿规模及成矿规律,所以该盆地北缘显示仍具有较好的铅锌硫化物矿床找矿潜力。随着国内外碳酸盐盆地铅锌硫化物矿床新的成矿理论和成矿预测方法体系的不断发展与成功应用,该盆地北缘铅锌硫化物矿床的成矿理论与成矿预测研究受到越来越多的地质成矿研究者的高度重视。但各方面认识众说纷纭,其认识差异的核心问题集中在矿床成因方面。

1.1.1 地质勘查简史

曲仁盆地北缘铅锌矿床正式地质找矿工作始于20世纪50年代中期,1963年由广东地矿局706队先后完成凡口铅锌矿首份正式储量报告和地质勘探报告,除对庙背岭、凡口岭、富屋等矿段进行了初步评价外,以金星岭为突破口,向南发现了隐伏的狮岭矿段,勘查提交了金星岭和狮岭-300 m以上标高的铅锌储量,为矿床的大规模开发利用奠定了坚实的资源基础。

此后,广东地矿局706队和广东有色932队又相继开展了更深入的矿床勘探与找矿评价,直至20世纪90年代早期广东有色932队仍未完全撤离。经过这些后续的勘探工作,不仅对金星岭和狮岭矿段-300~-700 m标高的深部进行了勘探,基本完整地查明了这两个矿段的铅锌地质储量。更有突破意义的是,在1975—1982年间,932队在706队工作的基础上,在狮岭南段获得重大找矿突破,在上泥盆统余田桥组(原中泥盆统东岗岭组上亚组)碳酸盐岩层位找到厚大的似层状矿体,不仅显著扩大了矿床规模,更重要的是使找矿前景更乐观,找矿思路

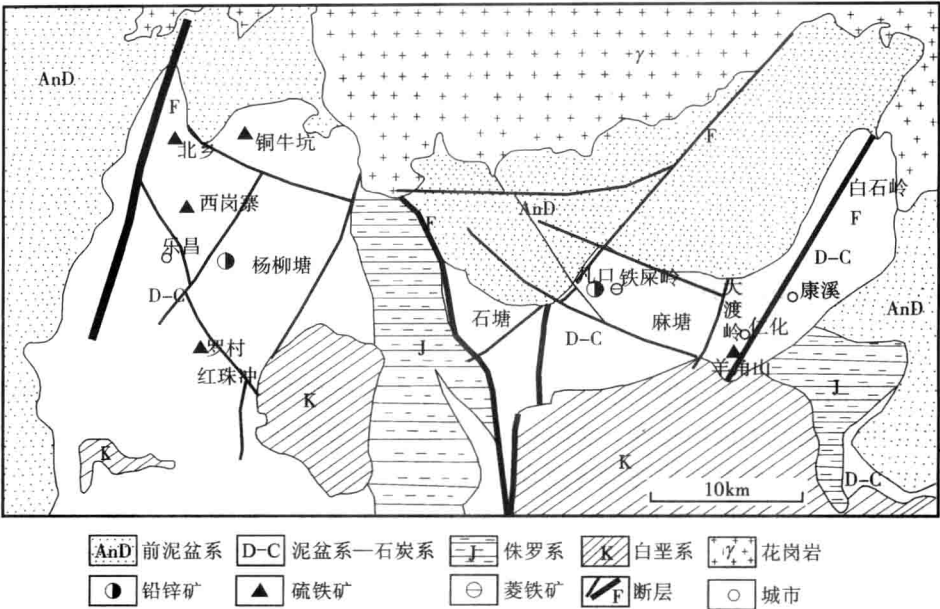


图 1-1 粤北曲仁盆地北缘铅锌铁硫化物矿床分布图

更开阔。

20 世纪 90 年代以来，在地质找矿科研指引下，广东有色 932 队和凡口铅锌矿地质科又在金星岭至狮岭南的主矿带东侧及外围，加强找矿勘探工作，发现了东矿带，并对近外围的铁屎岭进行了初步评价。在东矿带初步稀疏控制了部分矿体，直至目前，东矿带仍为找矿勘探工作的重点地段，有望获得 100 万吨以上的铅锌地质储量。

1.1.2 地质科研简史

继凡口矿区找矿勘探取得显著成效后，矿区基础地质、成矿条件、成矿机理、成矿规律以及找矿方向研究引起了众多研究者的浓厚兴趣与高度重视，特别是 20 世纪 80—90 年代，随着“六五”至“七五”期间国家、相关部委及广东省地质与有色勘查部门相继在南岭成矿带设置基础地质和矿产地质专题，众多研究者纷至沓来，或较全面系统、或从不同侧面研究，发表论文、撰写专著，就矿床矿化特征、矿床成因、成矿机理、成矿模式等方面各抒己见。

较有影响、较为全面系统的科研成果主要有《粤北地区铅锌成矿条件及找矿方向研究》(1984, 郑庆年主编)、《湘南粤北铅锌矿床成矿条件与找矿方向研究》(1985, 吴延之主编)、《粤北泥盆系中主要金属矿床成矿地质条件》(1984, 赖应

钱主编)、《南岭地区区域地球化学》(於崇文等著,1987)、《南岭泥盆系层控矿床》(曾允孚等著,1987)以及《广东凡口铅锌矿床》(郑庆年著,1996)等。1999—2001年间,与凡口铅锌矿合作,中南大学承担了“凡口铅锌矿东矿带成矿规律与成矿预测研究”科研课题,于2001年6月提交了课题研究总结报告。在该项目成果应用于东矿带取得显著找矿成果后,2006—2009年间,由中南大学牵头,凡口铅锌矿及广东有色地质勘查院共同参与,组成联合科研团队,承担了“凡口铅锌矿深、边部及外围成矿预测与找矿研究”科研课题,于2009年6月提交了相应课题研究总结报告。此外,赖应钱(1984,1988,1990)、陈学明(1983,1988,1992,1998)、邱小平(1988,1991,1993)、尹汉辉(1984)、吴健民(1987)、卢焕章(1984)、郑耀钦等(1984,1988)、翟裕生(1997)、路远发(1998)、张术根(2001,2010)等许多研究者以及生产、勘探机构的众多地质工作者先后通过专著、学术论文、学术会议、情报交流、内部刊物等形式介绍研究成果,论述有关矿床矿化特征、成矿地质条件、矿床成因、成矿机理、成矿模式以及成矿规律等方面的认识。虽然这些研究成果在上述各方面的认识众说纷纭,但系统分析对比后可以发现,其核心问题集中在矿床成因认识、关键成矿控制系统及成矿系统属性方面。而由于获取成因信息的途径、信息解译方法、信息可靠性以及系统性的差异,成因认识结论也有差异,进而导致成矿机理、成矿模式以及成矿规律等方面的认识有较大差别。

1.1.3 矿床成因主要观点

在矿床成因认识方面,除传统的远成低温热液成矿论外,20世纪80年代以来,关于凡口铅锌矿的成因,有多种比较具有代表性的观点。

1.1.3.1 (准)同生卤水沉积成矿说

该观点强调“生长断层”活动和受其控制的海底热卤水对流循环的成矿控制,认为由生长断层控制的海水—基岩局域环流导致成矿物质经循环流体沿生长断层面上侵,与海水硫酸盐反应,形成硫化物沉淀,沿生长断裂及其旁侧分布(赖应钱,1984,1988,1990,1991)。

1.1.3.2 海底热泉喷流堆积成矿说

该观点强调“生长断层”活动、深部热流活动以及受两者制约的海底热泉喷流成矿作用,认为铅锌矿化物矿物直接由海底热泉沿喷溢口喷溢堆积而成(陈学明,1983,1988,1992)。

1.1.3.3 沉积—渗流热卤水交代成矿说

该观点强调成矿物质为沉积源,后期改造流体为盆地源或大气降水演化而成或两者混合而成的热卤水,因而又有单源热卤水和双源热卤水之分,也有单向热卤水和双向热卤水之分,但都强调通过热卤水渗流淋滤获取成矿物质,经断层导通,形成盆地内热卤水环流系统,沿断层及旁侧有利层位交代成矿(吴健民等,1987;张理刚,1989)。

1.1.3.4 沉积—成岩—成岩后改造富集成矿说

该观点认为沉积期间沿生长断层及旁侧有利岩相部位形成矿源层和贫矿层,成岩期间经盆地源热卤水(成岩热卤水)在上述部位进一步富化,成岩期后自流盆地水再度沿上述部位发生改造富集,经长期继承式改造而最终成矿(赖应钱,1988;翟裕生等,1993)。很显然,该观点既强调生长断层、岩相古地理环境的成矿控制,又强调成岩期及成岩期后盆地源流体及盆地源成矿物质活化迁移和继承式富化作用控制。

1.1.3.5 多因复成矿床说

该观点认为凡口矿区铅锌硫化物矿床与MVT铅锌矿床既有许多共性特点,又独具成矿特色,可称为“凡口式”MVT铅锌矿床(张术根等,2009)。这类矿床以沉积成岩型黄铁矿矿床为基础,经中低温含铅锌银热液的改造、叠加和部分继承,具有多成矿大地构造阶段、多成矿物质来源、多控矿因素组合类型、多成矿作用方式和多成因类型的特点,为典型多因复成矿床(张术根等,2001,2010)。

1.1.4 主要成矿模式

1.1.4.1 沉积—成岩—改造复合成矿模式(黄生文,1983)

该成矿模式认为凡口铅锌矿的全部成矿过程是由沉积—成岩改造—后生热液改造“三部曲”组成的,成矿作用主要包括了初始的沉积作用、随后的成岩作用及晚期的后生热液作用这样三个主要阶段,每一个成矿阶段又包含了一系列较复杂的成矿环节和具体的成矿作用。其中沉积作用主要表现为金属—有机配位化合物的沉淀、水合氧化物与碳酸盐软泥及陆源碎屑吸附金属共沉淀、被生物活体吸收吸附的金属随生物遗体共同沉淀等;成岩作用主要表现为在初始沉积的基础上对那些软散的沉积堆积物质进行压溶、分解、扩散、胶结、加固、夯实,并伴随着一系列有机与无机地球化学作用使初始沉积物中的金属释放、解吸、还原出来集

中在某些特定的部位,经无机化合作用和重结晶作用形成矿(化)体;后生热液改造作用主要表现为来自深层的热卤水或低矿(化)度的大气降水溶解碳酸盐岩围岩不断循环萃取底部及围岩中的成矿元素后,形成富含矿质的溶液反复叠加富集到先成矿(化)体上,形成矿体或富矿体。该成矿模式相对更偏重于强调成岩改造及后生热液改造这两个环节的成矿作用,认为改造是凡口铅锌矿床得以形成的关键。

1.1.4.2 矿源层固结交代两期成矿模式(陈耀钦等,1984)

该成矿模式认为凡口铅锌矿的主要形成机理与诞生过程为:被有机质和胶体等吸附及形成配合物的贱金属是在酸性氧化介质中搬运的,当到了碳酸盐沉积盆地后,由于酸碱中和、胶体解体,多数又回到了水体中,但在盆地底部有机质(包括异地和原地生物)腐烂产生腐殖酸,使水体中的贱金属又被有机质及碳酸盐软泥等吸附于底部沉积物中。当沉积物被埋藏后,厌氧细菌大量繁殖,有机质进一步菌解。一方面使环境转入酸性还原,另一方面使粒间水(实际上是海水)中硫酸盐还原产生 H_2S ,并与吸附在沉积物中的贱金属结合产生金属硫化物,形成矿源层。矿源层固结后,经历一系列的构造破坏与地下水渗滤,形成了含贱金属的卤水,随着卤水向深部渗透、 E_h 降低、pH 增加,当 $pH \approx 7$ 时为卤水中 SiO_2 主要析出阶段,形成了区内完好的石英晶体。按舒曼交代序列和溶度积大小次序,黄铁矿比闪锌矿、方铅矿的亲硫性强且溶度积小,故先晶出,因而黄铁矿紧接石英析出后大量结晶,形成了矿区内石英黄铁矿富矿石,且普遍交代石英,这是凡口铅锌矿区第一个主要成矿期。随着石英、黄铁矿的大量晶出,加之碱金属及碳酸钙($CaCO_3$)的浓度增加,使含矿卤水的 pH 进一步升高,进入第二成矿期,即铅锌成矿期,此为凡口铅锌矿床最主要的成矿期。此期除初期闪锌矿、黄铁矿结晶较好外,绝大部分为脉状矿石,而且多数充填交代第一期矿石形成石英—铅锌—黄铁矿的各类矿石。到此为止,该矿床规模基本定局。

1.1.4.3 双源卤水成矿模式(吴健民等,1987)

该成矿模式认为凡口铅锌矿床成矿作用复杂,其成矿作用既不同于密西西比型铅锌矿床,也不属于典型的喷气—沉积矿床,而是由双源卤水(深循环地下热卤水和浅源层间卤水)沉积—叠加改造而成。凡口矿区在沉积成岩期形成矿源(胚)层、硫化物矿层(局部可为富矿层)的基础上,经多次后期构造活动,促使双源热卤水的长期作用,最终形成了凡口特大型富厚铅锌矿床。其成矿过程主要包含三个成矿期。

(1)同生沉积成矿期:来自古陆和海底回流作用的成矿金属组分,在生物礁(滩)后缘凹陷内聚集,可能由于深部隐伏花岗岩浆热力作用驱动,深部富含金属

的富氯贫硫中低温热卤水沿生长断裂上升、喷溢至海底,一部分向礁后凹陷迁移,一部分在同生(生长)断裂附近与海水发生反应而富集成矿层(胚)或硫化物富集体。

(2)成岩成矿期:是形成凡口铅锌矿床的较早期双源热卤水成矿阶段。一方面由于 H_2S 、 HS^- 、 S^{2-} 的大量产生,沉积物中金属离子与之反应形成广泛的具硫化物沉淀的矿源层,在有利部位(如礁后凹陷中)形成贫矿层;另一方面深部(深循环)含矿热卤水继续上涌至半固结或未完全固结的沉积物中,参与成矿作用,在同生断裂带附近及凹地中形成矿体或富矿体。

(3)后期双源热卤水改造富集成矿期:由于强烈的印支—燕山运动,形成了凡口北西向继承性向斜,并产生不同方向的叠加褶曲和断裂,在浅部产生富金属、富硫层间水的循环,在有利部位形成层状、似层状(改造)矿体;同时,深部含矿热卤水沿再次活动的北东向断裂上升,在构造交切部位,与浅部层间含矿卤水混合而形成大、富、厚的硫化物矿体。

1.1.4.4 热水沉积多阶段成岩成矿模式(赖应钱,1988)

该成矿模式认为凡口铅锌矿主要形成于地层的成岩阶段,成矿物质主要来自沉积建造,其成矿过程大致为:在加里东运动不整合面之上发展起来的粤北泥盆纪沉积海盆内,形成了下部由碎屑岩、上部主要由碳酸盐岩组成的沉积建造,海盆边缘碎屑岩与碳酸盐岩相变地带靠后者一侧还存在有古隆起,其上发育有同生断层。因区域地热梯度可能较高,成岩期间的孔隙水的水温水质随成岩阶段的不同而演化,先后获得对不同金属物质的淋取能力,并在地层厚度差异引起的压力差驱动下,不断向着构造高地迁移和汇集,并沿同生断层向海盆排泄。同生断层在不同深度上所切过的沉积建造其所处的成岩阶段有所不同,位于上部即处于早期成岩阶段者,成岩孔隙水温度较低且富含 H_2S ,形成一道地球化学屏障;位于中部即处于中期成岩阶段者温度较高并富含铁的有机配合物;位于下部即处于晚期成岩阶段者则温度更高,并富含 Pb 、 Zn 的氯配合物。当后两者先后沿同生断层上流经过早期形成的 H_2S 障壁地带时,发生了不同水质的混合,各项物理化学条件均急剧变化,造成配合物的分解、破坏,形成难溶的硫化物沉淀在该不同水质混合带上,构成矿体的初始堆积物。矿物晶体的晶出很可能是在后来成岩作用过程中随埋深增大和地热升高而逐步结晶形成的,因而更接近于成岩的温度。本矿床的形成主要不是由于含矿热液直接与海水发生混合沉淀于深海的水底空间,而是发生在紧靠海底之下处于早期成岩阶段富含 H_2S 的滨海—浅海碳酸盐带淤泥内,金属物质是通过酸性介质溶液并发生诸如 $\text{ZnCl}_2 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{ZnS} + 2\text{HCl}$ 一类化学反应,从而溶解与交代碳酸盐颗粒和软泥而获得沉淀空间的,因而矿石常具有模拟岩石的交代结构。经过上述 H_2S 障壁带捕捉大量成矿物质之后的残余溶液,

仍沿同生断层继续上升排泄于海底。此时由于金属离子浓度已大大降低,而且海盆又处于浅水氧化环境,因此当它与海水发生再次混合时,直接沉淀出热液硫化物的可能性是很小的,但对于排泄口即同生断层带附近的沉积物仍有明显影响,表现为矿床地段泥盆系中铅、锌含量比之区域正常沉积环境中的同时期沉积物高出2~5倍。上述成矿作用是随上覆沉积物的不断加厚,成岩作用阶段随之不断地往上推移而逐步向上进行的。一直到中石炭世开始了壶天群的沉积时,同生断层才停止活动,地下径流系统也随之窒息,成矿活动相应终止。之后,已经形成的矿化堆积体及围岩经历了漫长的区域地质发展演化进程,接受同样的后期地质构造作用的影响、破坏和改造,直至最后定型为现今状态的超大型层控铅锌矿床。

1.1.4.5 区域重力驱动的地下水充填交代三期成矿模式(翟裕生等,1997)

该成矿模式认为凡口超大型铅锌矿床的形成不是孤立的成矿事件,是整个粤北晚古生代一早中生代沉积盆地演化的产物,同生断层的多期活动对成矿起了重要的控制作用。矿床的主要矿体属于后生成因,它们是复杂成因的地下水沿复活的同生断裂活动、充填交代碳酸盐围岩而成,总体上属于以碳酸盐岩为主岩的区域重力驱动的地下水(流体)成矿方式的MVT型铅锌矿床。该矿床由三期成矿作用叠加而成。

(1)中一晚泥盆($D_2-D_3^1$)单一黄铁矿层成矿期(早期)。从早泥盆世开始,由于古特提斯和古西太平洋构造域的联合作用,华南加里东基底发生活化、裂解形成海西—印支期沉积盆地。中一晚泥盆世早期,粤北盆地处于快速拉张走滑阶段,同生断层是盆地中最主要的构造形式,凡口矿区位于盆地北缘局部隆升地带,并发育同生断层。压实流体系统数值模拟表明,流体以 $(n \times 10^{-12}) \sim (n \times 10^{-13})$ m/s的速度向同生断裂带汇聚,但没有在断裂带引起热异常。成矿流体中呈氯配合物或有机配合物形式迁移的 Fe^{2+} 与地层中的 H_2S 地球化学障相遇,形成顺层展布的单一黄铁矿矿体。

(2)早石炭末期—中石炭世(C_1 末— C_2)铅锌黄铁矿成矿期(中期亦即主成矿期),伴随西太平洋裂谷的强烈扩张和大规模火山喷发,粤北凡口一带在早石炭世末期隆升,并在中石炭世发生微型裂陷(壶天沟)和基性岩浆的侵入。在海底一定范围内形成热水(海水和深部流体)循环系统,深部富含 CO_2 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 的高温流体沿着再活动的同生断裂带上涌,浅部富含 HCO_3^- 的海水顺同生断层及裂隙下渗,并汲取地层中的Pb、Zn等矿质。两种流体在松软沉积物(壶天群)之下的引张扩容带(包括早期同生断层、新生断层和层间断裂带)汇聚,在 H_2S 屏障作用下,形成了规模巨大、形态复杂的铅锌黄铁矿体,并叠加在早期形成的黄铁矿层之上。