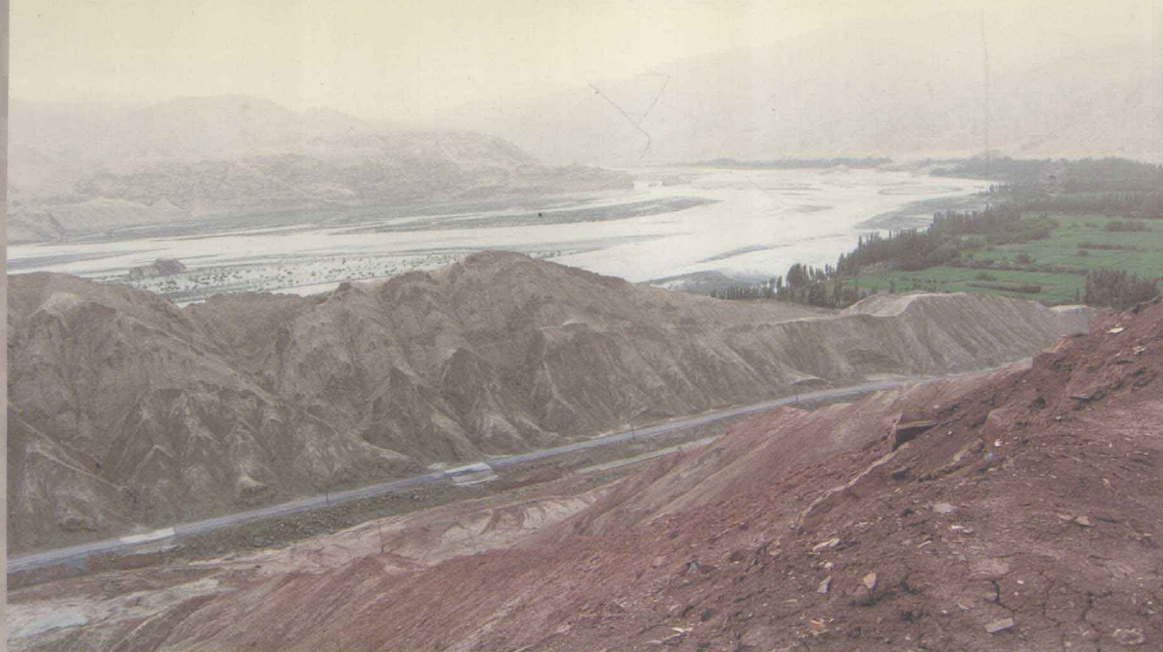


中国地球物理学术丛书



西昆仑碳酸盐岩层控—改造型铅锌矿床 成矿模式与找矿评价

张正伟 彭建堂 沈能平 朱笑青 等著
肖加飞 刘 燊 戚华文 周灵洁

中国科学技术大学出版社

中国地球物理学术丛书

西昆仑碳酸盐岩层控一改造型铅锌矿床 成矿模式与找矿评价

张正伟 彭建堂 沈能平 朱笑青 等著
肖加飞 刘 燊 戚华文 周灵洁



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书根据西昆仑地区地质成矿条件和收集的资料,将晚古生代地层有关的碳酸盐岩层控型铅锌矿床分布作为研究区,基于前人之工作基础,在成矿地质构造背景、矿床地球化学、区域成矿规律和成矿预测方面取得了新的进展。本书所及内容,多为首次发表,可供相关科技工作者和大专院校高年级学生、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

西昆仑碳酸盐岩层控—改造型铅锌矿床成矿模式与找矿评价/张正伟,彭建堂,沈能平等著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2011.12

ISBN 978-7-312-02844-1

I. 西… II. ①张… ②彭… ③沈… III. ①铅锌矿床—成矿模式—研究—新疆 ②铅锌矿床—找矿—研究—新疆 IV. P618.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 076285 号

责任编辑:张善金

出 版 者:中国科学技术大学出版社

地址:安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026

网址: <http://press.ustc.edu.cn>

印 刷 者:合肥银联文化投资有限公司

发 行 者:中国科学技术大学出版社

经 销 者:全国新华书店

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:13.75

字 数:326 千

版 次:2011 年 12 月第 1 版

印 次:2011 年 12 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元

前 言

根据西昆仑地区地质成矿条件和收集的资料,将晚古生代地层有关的碳酸盐岩层控型铅锌矿床分布区作为研究区。涉及新疆阿克陶县克孜勒陶乡、库斯拉甫乡,莎车县达木斯乡,叶城县棋盘乡。矿带呈北北西向,长约 110km,宽 4km~10km,面积约 750km²的不规则矩形,其地理坐标为东经 76°00′~76°45′,北纬 37°30′~38°40′。研究区交通尚属方便,南疆铁路终点站喀什市位于测区北西部,由喀什经英吉沙到叶城有 314 国道沿山前盆地边缘通过。研究区需要进山,一般有多级公路和山区便道。研究区 1:5 万地形图幅为 10-43-57-丙、10-43-69-甲、10-43-69-乙、10-43-69-丁、10-43-81-乙、10-43-81-丁、10-43-93-乙。覆盖全区的最新地质图幅为 1:25 万英吉沙县幅(J43C002003)、叶城县幅(J43C003004)和塔什库尔干塔吉克自治县幅(J43C003003)。

研究区为塔里木盆地西南边缘的中高山区,海拔高度为 1710m~3766m,大部分地段在 2800m 以上,山势陡峭,切割剧烈,沟系发育,基岩裸露,植被稀少,一般相对高差为 300m~500m 不等。为典型的大陆性暖温带气候,冬季寒冷,最低气温可达零下 25℃,夏季炎热,最高气温达 30℃ 以上,昼夜温差变化较大,一般气温在 10℃~30℃ 之间。年降水量约为 200mm。除测区北部的塔木萨依、七美干萨依、考库亚等沟系有少量溪流,测区南部的吐孜阿勒克、中部的坎迪尔里克等沟系有少量溪流,测区中部的叶尔羌河为常年流水外,其他沟谷均为干沟。除在塔木、阿巴列克、库斯拉甫、坎迪尔里克、萨让乌依以及测区边部莎车县的阿热塔什有柯尔克孜族及维吾尔族居民外,其他地段均无居民。近年来在塔木、卡兰古、托库孜阿特等矿区,有矿山民工居住。

在西昆仑地区,由于泥盆纪—早石炭世古特提斯开始裂解,形成塔西南边缘台地相碎屑岩—碳酸盐岩建造,在这些层位产出层控型铅锌铜矿床(孙海田等,2003),经过区域扩张和构造转换阶段后,在二叠纪末—三叠纪古特提斯关闭,结果是在麻扎北部形成了三叠系塞力亚克达坂群山间磨拉石沉积(计文化,2005),然而在西昆仑北部表现为强烈隆升作用,三叠纪地层缺失,完成了盆山转换(陈守建等,2010)。在这一构造演化过程中,后期的造山作用很可能引发了先期沉积矿床的后期热液改造成矿作用。

关于上述层控型铅锌铜矿床,经历了长期的研究过程。在 20 世纪 40 年代,前苏联学者开展了路线地质调查并发现成矿线索(Belyaevsky,1949)。50 年代新疆冶金 702 地质大队对部分矿床进行勘探,认为矿床属岩浆期后热液型。80 年代中期,新疆地质矿产局第二地质大队编制新疆南疆西部矿产图(1:50 万),认为这些矿床属沉积改造型成因(汪玉珍等,1985)。90 年代后期以来,开展了三轮研究工作,一是汪东波等(1996~2000)完成的“塔木—卡兰古铅锌矿带成矿条件及评价研究”(96-915-06-02-01),提出矿床成因类似于密西西

比河谷型(MVT)矿床(祝新友等,1997,1998,1999b,2000a;王书来等,2001;匡文龙等,2002a,2002b,2002c,2003,2005;常雪生,2003;匡文龙,2003;匡文龙和刘文伟,2006);二是有色金属矿产地质调查中心新疆地质调查所(2001~2005)完成的“新疆西昆仑库斯拉甫—他龙一带铅锌铜矿资源调查评价”(编号:200210200021),认为矿床形成于热水沉积环境(田培仁和胡庆雯,2010);三是吉林大学(2007)承担的“新疆西昆仑地区成矿条件研究”(项目编号:1212010630708),提出了受地层与构造联合控制的中低温热液脉状铅锌矿床的观点(袁波,2007)。上述不同的矿床成因解释都具有地质事实支撑和理论推断依据。我们在研究这些矿床过程中也发现存在矿床多成因现象,如层状矿体与脉状矿体分别有不同的展布方向;成矿年龄分别有晚古生代和中生代;成矿物质有原地源和异地源等地质事实;包裹体性质类似于沉积—改造型矿床特点(简称STT,涂光炽,1984)。前人对研究区卡兰古、塔木铅锌矿的区域、矿床地质特征已经有了一定的认识,但这些认识主要建立在早期提交的一些勘探报告和野外地质调查基础之上,对于区域地球动力学演化以及矿床的矿化富集规律的认识明显不足,并且对该矿床的成矿作用和成因类型并没有形成一个系统的认识。

碳酸盐岩层控型铅锌矿床是西昆仑地区已发现矿床的重要类型,经多轮研究,矿床成因观点不一,反映了成矿特点的复杂性和矿床成因的多面性。进一步研究查明矿床的成因,指导矿产勘查,实现地质找矿的重大突破,是本研究项目的科技目标任务。在“十一五”期间,研究工作得到国家科技支撑计划重点项目“新疆大型矿集区预测与勘查开发关键技术研究”(编号:2006BAB07B00)下设研究“西昆仑碳酸盐岩层控铅锌矿预测找矿评价技术与应用研究”(编号:2006BAB07B04-04)的支持。同时也得到中国科学院知识创新工程重要方向项目“新疆重点大型矿集区预测与勘查关键技术集成研究”下设课题“西昆仑碳酸盐岩层控型铅锌矿预测和找矿评价”(编号:KZCX2-YW-107-6)的支持。项目参加单位和人员有:中国科学院地球化学研究所张正伟、彭建堂、朱笑青、肖加飞、沈能平、刘燊、戚华文,研究生杨向荣、张中山、游富华、冯光英、周灵洁和王富东;新疆鑫汇地质矿业公司和桂新矿业开发有限责任公司刘杰、张正顺;聘请王中刚研究员、田培仁教授级高工和成守德教授级高工担任技术顾问。

攻关总体目标:本研究以碳酸盐岩层控型铅锌矿为主要研究对象,系统研究该区铅锌矿床的地质、地球化学特征,总结成矿规律,建立成矿模式和综合找矿标志。运用地质、化探、物探、遥感等综合技术手段开展区域成矿潜力评价,筛选总结出一套区域上快速圈定找矿靶区和进行矿体定位预测的最佳方法技术组合。锻炼造就一批从事新疆地质矿产研究和开发的人才。

研究目标任务:① 查明西昆仑地区层控型铅锌矿成矿地质背景和成矿规律;② 建立典型矿床成矿模式与综合找矿模型;③ 探索、建立碳酸盐岩层控型铅锌矿床预测与评价方法技术体系;④ 圈定大型矿集区1处,提交大中型矿床勘查评价基地1处,找矿靶区2~3处,提交预测资源量:铅锌60万吨。

研究内容:① 成矿背景的研究:在对西昆仑地区的地层、构造、岩浆活动和矿产分布进行详细野外调研的基础上,研究该区碳酸盐岩层控铅锌矿形成的地质、地球物理和地球化学背景;② 典型矿床的解剖:对塔木、卡兰古、铁克里克等典型矿床的赋矿层位、赋矿岩性及岩

石组合、矿体的空间分布、矿石类型及其矿物组合、矿床成矿物质来源和形成时代等进行系统研究;③ 建立西昆仑地区典型碳酸盐岩层控铅锌矿床的成矿模式;④ 成矿预测:在查明成矿背景和总结成矿规律的基础上,系统地研究该区铅锌矿床的各种控矿因素,建立找矿模式和找矿标志,编制该区铅锌矿床的成矿规律图和预测图,圈定有利成矿区段和优先勘查靶区;⑤ 靶区评价:筛选成矿远景最优的地段进行异常点检查与矿点查证,并借助不同方法手段,对其进行资源评价,提交预测资源量,并与产业部门合作,对部分地段进行验证。

任务完成情况:2007~2010年间,每年2~3个月开展野外工作,野外考察主要包括以下三方面的内容:① 实测了3条地质、地球化学剖面,全长大约为60km,共采集地层岩石样品80多件;② 考察矿床(点)14处。外围矿化点20处,矿区路线剖面12条。共采集各种矿石、围岩、岩石样品860余件;③ 指导矿山勘探工程布局一处,获得钻孔见矿的效果。

室内工作:主要内容为① 对所采样品进行了整理,对其进行统一编号、照相和详细描述。② 挑选有代表性的样品磨制光薄片,制备测试样品。③ 挑选单矿物。④ 测试分析,主要包括:a. 元素地球化学;b. 同位素地球化学;c. 岩石、矿石物质成分和结构构造鉴定;d. 电子探针分析;e. X射线粉晶衍射(XRD);f. 流体包裹体测试;g. 图件的整理和预测区的圈定。

研究报告各章编写分工:第1章由张正伟、彭建堂编写;第2章由肖加飞、张中山、杨向荣编写;第3章由沈能平、杨向荣、张中山、游富华编写;第4章由刘燊、沈能平、杨向荣、张中山、游富华、冯光英编写;第5章由张正伟、田培仁、张正顺、张中山、游富华编写;第6章由朱笑青、周灵洁、韩涛、王富东编写;第7章由张正伟、田培仁、刘杰、张正顺、张中山、游富华编写;第8章由张正伟、刘杰编写。全部书稿完成后,由沈能平、张正伟统纂定稿。

研究报告取得的主要成果:

1. 基础研究

(1) 成矿年龄:1:25区调报告认为成矿是海西期,前人几乎没有测年龄,本次通过同位素定年获得突破。阿巴列克铜铅矿床黄铜矿、黄铁矿的Re-Os等时年龄 $331.3 \pm 5.2\text{Ma}$ 。塔木铅锌矿床的闪锌矿Rb-Sr等时线定年 337Ma 。铁克里克铅铜矿床黄铜矿的Re-Os模式年龄为 $210.1 \pm 10.2\text{Ma}$ 。阿拉尔恰锌铅矿床中石英Ar-Ar年龄 235Ma 。总体上反映两期成矿,即先在石炭纪同生沉积成矿,后期为印支期造山过程中的改造成矿。

(2) 成矿物质来源:大量Pb、S和少量C、O同位素的测定数据分析表明,研究区矿床Pb同位素与典型的MVT型矿床(朱炳泉等,1998)相异明显,方铅矿中的铅(可能也包括闪锌矿和黄铁矿)主要来源于赋矿围岩和下伏的基底,而基底是黄铜矿的唯一铅源;总体上铅同位素投影呈线性分布,但不具有等时线特点,表明不同样品的 ^{204}Pb 反映的 μ 值差异较大,只是具有不同的物质来源。硫同位素显示,可能存在两种不同性质的含硫流体相混合而形成铅锌矿床,硫主要来自地层硫酸盐。因此,成矿物质有可能多来源或多其次活动。C、O同位素研究表明,成矿热液作用过程中存在大气降水的参与。

(3) 流体包裹体:除了制约成矿流体的中—低温、中等密度和中—低盐度外,显示成矿流体的多源性特征,可能存在两种或两种以上流体的混合。表明矿床成因的复杂性。

(4) 含矿角砾岩带:发现卡兰古、塔木等铅锌矿床的角砾岩带为断层的组成部分,出现

内碎屑角砾、成岩期角砾、后生角砾、崩塌角砾和断层角砾共生的现象,推断了同沉积断层的存在。

(5) 通过大量矿石结构构造研究,明确锌铅矿演化具有三个清晰的期次:沉积期、成岩期和后生期。矿化是成岩期和后生期的产物,主要为后生期。矿体大规模矿化是层状、似层状或透镜状产出的微细浸染状矿石,而后期脉状产出的细脉状、块状矿石与前者在时空上差异很大。

2. 区域成矿条件与成矿规律研究

(1) 通过区域构造研究,明确“古特提斯”的初始扩张控制塔西南晚古生代陆缘凹陷盆地内的同生沉积成矿作用,而“古特提斯”关闭致使三叠纪造山运动制约了后成改造成矿作用。

(2) 研究了成矿带赋矿地层与成矿层位,确认赋矿层位具有镁质碳酸盐的特定性,局限在 $D_2 \sim C_1$ 时代。同沉积断层的喷口系统决定了原始沉积成矿的空间分布,即矿床产出在空间上的等间距性。

(3) 发现成矿类型具有多样性,矿化的主体作用是同生沉积—后成改造成矿作用。在理论上分析塔南缘铅锌矿带中很可能存在喷流沉积型(SEDEX)、密西西比河谷型(MVT)、砂岩型(SST)和沉积改造型(STT)矿床的多种成矿现象。同时,本次研究也提供证据说明,泥盆纪—早石炭世发生同生沉积成矿(333Ma~338Ma),而在晚古生代末—三叠纪改造成矿(206Ma~220Ma),后期改造热液形成脉状矿体叠加在先期层状矿体之上。

(4) 建立了新的成矿模式——同生沉积—后成改造成矿模式。根据矿区层次评价模型指导重点矿区进行深部探矿收到较好的效果,新增 333 级别以上铅锌资源量 50 万吨。

(5) 由成矿模式延伸出找矿评价模型,实现从成矿理论研究到找矿实践的连接。结合实际找矿区域,提出了区域层次评价模型和矿区层次评价模型。前者应用于区域成矿预测,后者针对具体矿区进行了隐伏矿体预测。

3. 区域成矿预测

(1) 建立了找矿标志:最重要的找矿标志有:矿化标志、构造标志、地层标志、化探标志、遥感标志和假铁冒白云岩等。

(2) 划分成矿预测区:根据地质、化探和遥感综合信息,划定成矿预测靶区。划分出Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级三个层次的预测区。

(3) 根据矿区层次评价模型指导重点矿区进行深部探矿收到较好的效果。

(4) 优选预测靶区开展了野外检查,检验找矿标志的有效性。

4. 在探索、建立碳酸盐岩层控型铅锌矿床预测与评价方法技术体系方面取得进展

研究认为,利用成矿标志预测法,结合化探、遥感资料,可以快速评价预测区,由区域层次延伸到矿区层次进行隐伏矿寻找。

本研究执行过程中,始终得到中国科学院地球化学研究所、国家 305 项目办的关心和支持。中国科学院地球化学研究所胡瑞忠研究员和王中刚研究员、新疆鑫汇地质矿业公司田培仁教授级高工和新疆地矿局成守德教授级高工给予积极有效的指导。桂新矿业开发有限

责任公司刘杰经理给予研究组大力支持和帮助。新疆地矿局研究所高鹏教授级高工对本研究的研究鼎力相助。区域地层构造研究引用了河南省地调院(2006)的最新成果。可以说,如果没有上述单位和专家的关心、支持,那么研究组是不可能很好地完成任务的。借此机会,一并表示诚挚的谢意。

应该指出,本研究工作基于前人工作基础,并在成矿地质构造背景、矿床地球化学、区域成矿规律和成矿预测方面都有新的进展。但由于科研经费、项目研究人员水平、野外工作条件等诸多因素的限制,难免出现某些工作的不到位和研究报告中的差错,敬请同行专家和读者批评指正。

张正伟

2011年6月20日

目次

前言	(i)
第 1 章 绪论	(1)
1.1 沉积层控型铅锌矿床研究现状	(1)
1.1.1 矿床类型	(1)
1.1.2 层控铅锌矿床成因特点	(1)
1.1.3 STT 与 Sedex、MVT 铅锌矿的对比	(3)
1.2 MVT 铅锌矿床的地球化学研究成果及其成矿系统探讨	(7)
1.2.1 MVT 铅锌矿床的地球化学研究成果	(8)
1.2.2 成矿系统探讨	(14)
1.3 研究思路、研究内容和技术路线	(16)
1.3.1 主要科学问题和技术难点	(16)
1.3.2 研究的创新点和内容	(18)
1.3.3 研究思路	(18)
1.3.4 研究方法和技术路线	(18)
第 2 章 区域地质	(19)
2.1 地层	(19)
2.1.1 泥盆系	(19)
2.1.2 石炭系	(20)
2.1.3 二叠系	(23)
2.1.4 三叠系	(23)
2.1.5 侏罗系	(24)
2.1.6 白垩系	(24)
2.2 塔里木地层区古生代沉积盆地分析	(24)
2.2.1 泥盆纪沉积盆地	(24)
2.2.2 石炭纪沉积盆地	(25)
2.2.3 二叠纪沉积盆地	(26)
2.3 岩浆岩	(27)
2.4 构造	(29)
2.4.1 主要边界断裂特征	(29)

2.4.2 逆冲推覆构造带的变形特征	(31)
2.4.3 近南北向的正断层	(31)
2.5 区域构造演化	(32)
2.5.1 中泥盆世至二叠纪时期(400Ma~205Ma)	(32)
2.5.2 三叠纪以后(205Ma 至今)	(32)
第3章 矿床地质特征	(34)
3.1 典型矿床基本特征	(34)
3.1.1 铁克里克铅铜矿床	(34)
3.1.2 塔木锌铅矿床	(36)
3.1.3 卡拉牙斯卡克铅铜矿床	(39)
3.1.4 阿巴列克铜铅矿床及铁矿床	(40)
3.1.5 卡兰古铅矿床	(41)
3.1.6 托库孜阿特铅锌矿床	(43)
3.2 围岩蚀变	(43)
3.3 矿物组合与矿石类型	(45)
3.3.1 矿物组合	(45)
3.3.2 矿石类型	(47)
3.4 矿石的组构特征	(47)
3.5 成矿阶段	(53)
第4章 矿床地球化学	(55)
4.1 微量元素地球化学	(55)
4.1.1 铁克里克矿区含矿地层元素地球化学特征	(55)
4.1.2 阿巴列克地区地层样品稀土元素地球化学特征	(57)
4.1.3 塔木锌铅矿床角砾、填隙物微量元素特征	(67)
4.2 流体包裹体地球化学	(70)
4.2.1 代表性矿床流体包裹体特征	(70)
4.2.2 成矿流体的性质对比与来源	(77)
4.3 硫同位素地球化学	(79)
4.4 铅同位素地球化学	(86)
4.5 年代学研究	(99)
4.5.1 阿巴列克铜铅矿床 Re-Os 同位素体系	(99)
4.5.2 塔木锌铅矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素体系	(103)
4.5.3 阿拉尔恰锌铅矿床石英 Ar-Ar 同位素体系	(106)
第5章 区域成矿模式及评价模型	(109)
5.1 区域地层地球化学制约	(109)
5.1.1 研究概述	(109)

5.1.2 区域地层背景	(110)
5.1.3 路线地球化学剖面	(110)
5.1.4 成矿制约	(114)
5.2 赋矿层位成矿制约	(123)
5.2.1 含矿岩系与赋矿层位成矿制约	(123)
5.2.2 岩相古地理成矿制约	(126)
5.3 构造演化与成矿制约	(127)
5.4 矿床地球化学与成矿制约	(130)
5.5 矿床成矿模式	(131)
5.5.1 矿床成矿模式	(131)
5.5.2 矿床多成因解释	(132)
5.6 找矿评价模型	(133)
5.6.1 区域层次评价模型	(133)
5.6.2 矿区层次评价模型	(134)
第6章 区域遥感、化探、物探信息应用	(135)
6.1 多光谱遥感找矿信息提取及解译	(135)
6.1.1 解译范围及工作内容	(135)
6.1.2 遥感找矿工作方法	(136)
6.1.3 遥感异常信息提取与解译	(143)
6.1.4 遥感解译对成矿预测的指导意义	(148)
6.1.5 遥感解译成矿预测区	(148)
6.2 区域化探找矿信息提取	(149)
6.2.1 区域主要岩石部分元素的地球化学丰度	(149)
6.2.2 化探成果对找矿与资源评价提供的信息	(153)
6.2.3 铅铜锌成矿元素异常展布特征	(156)
6.2.4 化探综合异常	(157)
6.2.5 找矿远景区	(162)
6.3 区域地球物理特征	(165)
6.3.1 区域重力场基本特征和地壳结构	(165)
6.3.2 大地电磁测深和深部结构	(166)
6.3.3 地震和深部结构	(167)
第7章 成矿预测及找矿靶区	(168)
7.1 描述性模型和区域成矿预测评价模型	(168)
7.1.1 描述性模型	(168)
7.1.2 区域成矿预测评价模型	(169)
7.1.3 矿区尺度隐伏矿预测模型	(169)

7.2 物、化、遥信息与地质信息技术组合	(170)
7.2.1 预测方法概述	(170)
7.2.2 成矿模式与成矿标志及成矿预测	(171)
7.3 成矿预测结果	(172)
7.3.1 找矿标志的建立	(172)
7.3.2 成矿预测区	(175)
7.4 预测靶区查证	(178)
7.4.1 按成矿标志预测法在典型矿区预测寻找隐伏矿体	(178)
7.4.2 优选预测靶区野外查证	(181)
第8章 结论与建议	(183)
8.1 结论	(183)
8.2 存在问题及建议	(188)
8.2.1 存在问题	(188)
8.2.2 工作建议	(188)
参考文献	(190)

第 1 章 绪 论

1.1 沉积层控型铅锌矿床研究现状

1.1.1 矿床类型

就铅锌矿床的类型而言,可分为与岩浆活动及热液有关的矿床、变质矿床和沉积岩型矿床等。从世界铅锌矿床的成矿类型看,以沉积岩容矿的矿床类型复杂、储量巨大,是世界上铅锌资源的主要来源(Cox 等,1986;Leach 等,2005)。根据赋矿围岩岩性和成矿元素组合的不同以及成矿作用过程的差异,可进一步分为砂岩型(Sandstone-type,简称 SST)铅锌矿(Eugster,1989)、密西西比河谷型(Mississippi Valley-type,简称 MVT)铅锌矿(Anderson,1975)、沉积喷流型(Sedimentary exhalative,简称 SEDEX)铅锌矿(Perkins,1984)和沉积—改造型(Sedimentary transformed-type,简称 STT,涂光炽等,1984)铅锌矿 4 类。

其中,STT 铅锌矿的提出是建立在中国本土层控铅锌矿床研究基础上(涂光炽等,1984),某些方面相当于传统意义上的碳酸盐岩层中的热液交代铅锌(银)矿床。它具有“沉积改造”特定的含义,专指矿床或矿化地层于沉积形成后受另一次或多次地质作用,在不到绿片岩相变质程度的温度压力范围(温度 $<400^{\circ}\text{C}$,压力 $<100\text{MPa}$),不均一围压和宏观破裂中的各种改变。并进一步强调专指元素低含量地质体或矿床于形成后在另一次或多次地质作用中处于开放体系和较浅深度中的改变(涂光炽等,1988)。沉积物的“改造”成矿作用也可发生于成岩阶段本身,强调成矿物质在“改造”过程中的重新分配和迁移富集(华仁民,1995)。由此可见,改造不是变质,也不包括后期岩浆活动对矿床或矿化地层的叠加,而是强调沉积成岩后改造热液的成矿过程(后生)。如果追溯到“改造”之前沉积成岩以及成岩以后的成矿作用,那么在理论上讲,以碎屑岩和碳酸盐岩为容矿围岩的沉积建造有可能在不同的成矿条件下分别形成 SST(同生或后生)、SEDEX(同生)、MVT(后成)型矿床。

1.1.2 层控铅锌矿床成因特点

许多层控铅锌矿床具有复合成因特点,是引发矿床成因之争的主要原因,这些特点主要有:

(1) 矿床具有明显的后期改造成矿特色:中国层控铅锌矿床主要有云南金顶、广东凡口、甘肃厂坝、内蒙古东升庙、广西大厂、四川大梁子、江西冷水坑、湖南水口山、青海锡铁山和新疆可可塔勒等(戴自希,2005),其中以沉积岩容矿的矿床占有重要地位,除了典型的

SEDEX 型(马国良等,1996;陈学明等,1998;韩发和孙海田,1999;彭润民等,2000;张德全等,2005)和 MVT(刘文均和郑荣才,2000;王晓虎等,2008;杨弘忠等,2008)铅锌矿床外,许多矿床形成时代在赋矿地层形成之后,并反映为后期造陆或造山过程中不同构造类型控制的成矿作用,矿体的赋存类型也以构造控制为主要特点,矿床地球化学特点明显有别于前者。西昆仑地区碳酸盐岩和碎屑岩容矿的铅锌矿床,其很多地质特征可与 MVT(Anderson,1975)对比,然而由于它们早期的沉积作用和后期改造作用非常明显,具有很强的区域性特色,因此有学者以容矿沉积建造为特征定名为层控碳酸盐岩型(孙海田等,2003),这在我国湘西(钟九思和毛昌明,2007)和滇川黔地区(王奖臻等,2001)同样也有明显的表现。有些矿床的后期改造程度接近变质程度,如柴河铅锌矿床(祁建誉,2004)。基于此,涂光炽等(1984)在对中国大量铅锌矿床研究基础上提出了沉积—改造成因模式(简称 STT),并以此对成矿机制、成矿流体等方面开展了大量研究(涂光炽等,1988)。

(2) 矿床具有沉积和后期改造热液活动的双重特点:西昆仑塔木—卡兰古铅锌矿,在 20 世纪 50 年代,新疆冶金 702 地质大队对其进行过初步勘探,认为矿床属岩浆期后热液型;进入 21 世纪,新的研究成果出现多种观点,多数认为是 MVT(祝新友等,1998;王书来等,2001;匡文龙等,2002a,2002b,2002c,2005),也有人认为是海底热卤水喷流成矿(胡庆雯等,2007)和受地层与构造联合控制的中低温热液脉状铅锌矿床(袁波,2007)。类似的争论还有四川大梁子、跑马、底苏(王小春,1991;朱赖民和袁海华,1995;朱赖民等,1998;贺光兴等,2006),云南天生关、金沙厂等铅锌矿床(陆生林等,2006;郭欣,2007),甘肃代家庄等铅锌矿床(张忠平和朱永新,2005),湖南禾青、董家河、后江桥等铅锌矿床(蒋兴煊,1989;李祥能,2002;曾勇和李成君,2007),以及广西老厂铅锌矿床(张相训,1995)。

(3) 盆地沉积以及后期构造变化过程中的其他成矿作用发生“兼容性”并存现象:实际上成矿作用是复杂的,对一个矿床来讲,矿床特点可能以某种成因表现最为明显,而兼有其他成因类型特征(Jowett,1986;Eugster,1989;Oszczepalski,1989),或者随着研究程度的提高和深化,提出不同的成矿模式(Wedepohl,1971;Smith 等,1978;Perkins,1984;Swager,1985;Bell 等,1988;Heinrich 等,1989),在不同地区或盆地的不同位置会产出不同成因的矿床(Vaughan 等,1989)。正因为如此,对这些铅锌矿床的成因问题经常会发生争论,很久以来就有“同生”和“后生”以及“后成”的观点之争(White,1942;Garlick,1964;沃尔夫,1978)。我国川滇黔、西昆仑、湘桂粤等地区许多沉积岩型的铅锌矿床的成因争论现象也非常普遍。因此,简单地用同生或后成来解释它的成因显然是不够的,根据矿床部分特征套用某种流行的成矿模式也不利于指导找矿。

在川滇黔交界地区,震旦系灯影组白云岩中赋存大量的铅锌矿床,其成因争论很有代表性。首先是区域性研究的成因观点不同,主要是 MVT(王奖臻等,2001;张长青等,2005)和 STT(秦德先和孟清,1994;邵世才和李朝阳,1996)之争,还有构造主导控矿观点(刘文周和徐新煌,1996),并提出“高压活化迁移、低压沉淀富集”的成矿机制。对单个矿床研究结果则多数认为是 STT(林方成,1994;朱赖民和袁海华,1995;蒋济兵和刘兴林,1999;贺光兴等,2006)。如云南金沙场铅锌矿是一个产于碳酸盐岩的典型矿床,由于明显地受构造岩相带及岩性组合控制以及铅同位素显示基底源区特点,被定为 MVT(刘文周,1989)。随后的研究

则根据矿体产在褶皱的轴部虚脱部位或层间剥离、层间破碎带等构造控矿因素,以及矿床的流体包裹体特点,认为矿床成因属于 STT(刘文周和徐新煌,1996;贺柳昌和林文达,1999),并认为改造热液的热源来源于峨眉大火成岩省的活动(贺柳昌,1995)。最近研究发现赋矿地层中存在一些热水沉积成因的矿物组合证据,并同时存在改造成矿的显示,因此定为海底热水喷流沉积+后期改造型层控矿床(郭欣,2007)。与上述相比,四川大梁子铅锌矿床赋矿围岩的热水沉积成因特点可能要多一些,但后期改造的重要现象同样引起研究者的重视。如采用单颗粒闪锌矿 Rb-Sr 同位素测年方法,测得大梁子铅锌矿床成矿年龄为 366.3 ± 7.7 Ma, 锶同位素初始比值测试结果表明大梁子铅锌矿床成矿物质可能主要源自围岩碳酸盐岩或基底地层,矿床的形成可能与晚加里东期扬子地台西缘构造活动有关(Zheng 和 Wang, 1991;张长青等,2008)。对矿区外围的白云岩和硅质白云岩以及矿石的 Pb、Zn、Cd、Ga 成矿元素的富集特征研究,认为大梁子和天宝山铅锌矿床的成矿物质主要来源于灯影组白云岩和硅质白云岩(付绍洪等,2007),表明成矿物质来源于震旦纪的矿源岩,但成矿作用却发生在古生代。矿床地质地球化学研究表明,成矿铅锌金属来源于热水沉积矿石及矿区外围地层岩石,矿化剂硫来源于赋矿震旦系灯影组白云岩,大气降水在构造活动中形成含矿改造热液,形成改造充填型矿床(朱赖民和袁海华,1995)。根据成矿地质和地球化学研究认为,成矿物质主要来自“地层源”,属大气降水成因热液溶滤成矿,其形成经历了矿质的初步聚集和后生的活化、迁移和再富集两个阶段,具有明显的沉积改造成因特征(王小春,1991)。控矿构造系由富含有机碳的成矿流体经改造而发生黑色碳化的张性断裂破碎带形成“黑破带”,深大断裂和基底断裂起导矿—控矿作用(林方成,1994)。

尽管有许多矿床被认为是 MVT 或 SEDEX 型铅锌矿,但其中也不乏后期改造现象,特别是在构造控矿方面,褶皱轴部与断裂交切部位控制成矿元素活化、转移、富集的现象非常普遍。如湘西铅锌矿床(杨绍祥和劳可通,2007a,2007b;张金河,2007;钟九思和毛昌明,2007)、黔东南铅锌矿床(陈国勇,2002;黄远成,2003)、秦岭铅锌矿床(张复新和王俊发,1991;侯满堂等,2000;谭运金等,2000)等。广东凡口铅锌矿床是一个典型的复成因矿床(SEDEX:陈学明等,1998;MVT,戴自希,2005;STT:涂光炽等,1988;同构造热液型:王濮等,1995;王力等,2003)。

1.1.3 STT 与 SEDEX、MVT 铅锌矿的对比

在这几类铅锌矿床中,尤以 SEDEX 型最为重要,矿床数占超巨型铅锌矿床数的 36%,其储量占超巨型矿床铅锌储量的 42%。其次是 MVT 型矿床,其矿床数和储量分别占超巨型铅锌矿床数和储量的 24%和 23%。它们是铅锌矿床最重要的矿床类型(戴自希,2005)。SEDEX 矿床是一种在页岩状沉积岩中,并且上有正常沉积、下有角砾岩带分带性的致密块状及半致密块状铅锌硫化物矿床(Russell 等,1981),产地以澳大利亚布罗肯希尔(Broken Hill)、麦克阿瑟河(McArthur River)矿床,加拿大的沙利文(Sullivan)和霍华兹山口(Howards Pass)等矿床为典型,在我国有厂坝、青城子、东升庙、白牛厂、锡铁山等。MVT 矿床是北美的特产,指赋存于台地碳酸盐岩中,成因与岩浆活动无关的浅成后生层状铅锌矿床,是在 $50^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 条件下从稠密的盆地卤水中沉淀形成的(Leach 和 Sangster, 1993),世

界其他地区也有但分布较为分散,以美国维伯那姆、加拿大派因波因特和爱尔兰纳凡(Navan)为典型,在我国有湖南花垣、渝东南、陕西马元、贵州杜家桥、四川团宝山、云南螺丝塘、河南栾川等地。SST 铅锌矿类似于铜矿床分类中的“砂页岩型铜矿”(Vaughan 等, 1989),只不过其中产出的金属以铅、锌为主,相对于砂岩型铜矿来讲,这类矿床的中、小型矿床较多,以哈萨克斯坦杰兹卡兹甘矿床(Zhezkazgan)以及我国云南金顶矿床为代表(刘春涌, 2006)。这些矿床特征列于表 1.1。

(1) 形成环境对比:SEDEX 型矿床的成矿构造环境是沉降、张裂和裂谷环境,产于受裂谷控制的克拉通内或其边缘拗陷沉积盆地内,控矿构造标志是同生断层。MVT 铅锌矿床多数形成于造山带前陆盆地中,少数在逆冲推覆带中,极少数存在于大陆伸展环境中(Leach 和 Sangster, 1993; Bradley 和 Leach, 2003)。其由大规模成矿流体在相邻造山带重力驱动下,流经前陆盆地时发生金属硫化物沉淀形成(Garven, 1985; Ge 和 Garven, 1992; Appold 和 Garven, 1999),控矿构造标志是基底断层,围岩、盆地卤水、流体驱动力及矿体沉淀场所等对矿床形成起着至关重要的作用(Leach 和 Sangster, 1993)。STT 铅锌矿床多数形成于地台边缘,由陆内造山作用或陆内表层构造以及区域性断裂导致的宏观破裂环境(涂光炽等, 1988),叠加在盆地碎屑岩和碳酸盐岩沉积的基础之上的开放性构造活动,是形成改造热液并完成成矿物质“源、运、储”过程的主要动力条件。控矿构造标志反映在两个方面,从矿源岩的角度,赋矿层位呈区域性的分布;从改造热液成矿的角度,矿床产在局部性的褶皱与断层(带)。

(2) 矿床特征对比:SEDEX 型矿床的容矿岩石为较细粒的以碎屑沉积物为主的岩石,包括页岩、粉砂岩和碳酸盐岩,以及静海或封闭海相沉积岩(Briskey, 1985),如黑色页岩和浊积岩,发育有特征的热液化学沉积硅质岩,其他较典型的有电气石岩、钠长质岩石等。赋矿层上有正常沉积部分,该沉积由一层或多层硫化物组成的席状或似透镜状的矿体,沿层从硫化物相演变为重晶石相,由重晶石相再演变到铁氧化物相,矿体与上覆地层总是呈截然突变的接触关系。在层状硫化物和重晶石矿石内常夹有极细的燧石,是海底喷气的证据。下有角砾岩带,呈网脉状、浸染状或脉状矿化带,但并不是在所有的矿床中都能见到这种角砾岩带。角砾岩是由沉积作用同期的生长断层形成的,许多矿床的一侧都以这种断层为界,生长断层控制着盆地的下沉,也可能是金属流体的通道。层状硫化物矿石的矿物组成较简单,含有细粒的黄铁矿和(或)磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿,以及少量黄铜矿,有时还有白铁矿和毒砂出现。脉石矿物有燧石和重晶石、钡长石、高岭石、铁白云石等。在层状矿体中发育条带状构造、纹层状构造、粒级层理、韵律层和软沉积滑动变形构造,黄铁矿同生沉积、早期成岩结构十分发育,如显微雏晶、莓球/球粒结构及成岩环带增生晶等。

MVT 铅锌矿床显然是后生的,赋矿围岩主要为地台或浅水碳酸盐岩,尤其是产在白云岩中。矿体常常产在岩溶、岩礁、不整合、岩层相变、岩层尖灭和盖层裂隙中,一般为层状,局部可能呈现裂隙或断层充填,与赋矿围岩不整合接触,硫化物侵位于早先存在的孔隙内,这种孔隙通常出现在岩化了的碳酸盐岩内的角砾带或古岩溶中。矿物组成比较简单,主要矿石矿物有方铅矿和(或)闪锌矿,常伴有黄铁矿和(或)白铁矿,脉石矿物常见白云石、方解石。矿石结构以开放孔隙充填结构为主,呈条带状、浸染状、胶状和树枝状,交代构造、溶蚀崩塌

表 1.1 碳酸盐岩与碎屑岩容矿的铅锌矿床分类与特征表

矿床类型	产出背景	形成作用	赋矿地层岩石	矿体形态产状	矿石结构构造	矿物组合	流体特征	S、Pb同位素特征	矿床实例
沉积喷流型铅锌矿床 (SEDEX)	硅铝质岩浆地槽张性环境,受裂谷控制	形成于海底热液对流动系统,活动的环境,水下热流排放通道周围堆积,热流体沿断层底喷出海底形成作用	细碎屑岩(页岩、粉砂岩)和碳酸盐岩,巨厚陆源碎屑岩—碳酸盐岩建造的正常沉积层(黑色页岩、浊积岩等),常覆盖在英—长石碎屑沉积层序之上	上部层状矿体,下部网脉状矿体,层状矿体上部与顶部相变关系密切,而与下部网脉带为过渡关系	同生沉积/早期成岩结构十分发育,显微晶、莓球/球粒结构及成岩环带增生等,条带状构造、纹层状构造、韵律层和软沉积滑动变形构造、块状、网脉状、角砾状构造	以黄铁矿、磁铁矿为主,其次有方铅矿、闪锌矿和少量黄铜矿、毒砂、白铁矿和银矿物,有电气石、重晶石和硅质岩等特殊矿物与岩石组合	成矿温度 130℃~150℃,成矿流体主要来自盆地中沉积物压实过程中释放水及其它成分;含盐度 15%~20% (w _{SaCl} , %), Na ⁺ 型体系	$\delta^{34}\text{S}$ 组成变化较大,而硫酸盐的硫同位素组成稳定;铅同位素以正常铅为主,年龄值范围较大,模式年龄接近成矿年龄,成矿物质来源于赋矿地层或深部	加拿大霍华兹山口和沙利文 ^[1] ,如澳大利亚布罗肯希爾和麦克阿瑟河 ^[2] ,厂坝 ^[3] ,青城子 ^[4] ,东升庙 ^[5] ,白牛厂 ^[6] 、铁山 ^[7]
密西西比河谷型铅锌矿床 (MVT)	造山带的前陆盆地,逆冲推覆带等,于边缘、挤压带少数陆内伸展环境	形成于盆地热卤水侧向流动系统;a. 充填(密西西比河谷型);b. 充填(阿帕拉契型);c. 同生充填交代(阿尔卑斯型)	偏向于白云岩的碳酸盐岩中,或地台碳酸盐岩与盆地页岩的界面上	层状与赋矿围岩不整合接触,或硫化物充填于早期的砾岩或喀斯特空隙中,断层充填	条带状、浸染状、胶状和树枝状、交代构造、溶蚀崩塌角砾岩构造、断层面角砾、沉积角砾、落雪角砾、伪角砾构造、斑马构造、韵律构造、洞穴构造等	矿石矿物以方铅矿、闪锌矿为主,伴有黄铁矿、白铁矿、萤石和重晶石在局部地区常见(有的能形成工业矿体),少黄铜矿	矿化温度 80℃~200℃,流体包裹体均一温度通常 100℃~150℃,成矿流体主要来自盆地中沉积物压实淋滤金属的热卤水,为高盐度盆地卤水,含盐度 > 15% (w _{SaCl} , %), Na ⁺ -Ca ²⁺ -Cl ⁻ 型体系	$\delta^{34}\text{S}$ 在 +10‰ ~ +25‰ 之间,铅同位素组成较单一,模式年龄(基于底年年龄)大于含矿地层的年龄,成矿物质来源于基底或深部	美国维伯那姆 ^[8] ,加拿大派因波特 ^[9] ,爱尔兰纳凡 ^[10] ,湖南花垣 ^[11] ,黔东南南 ^[12] ,陕西马元 ^[13] ,贵州杜家桥 ^[14] ,四川团宝山 ^[15] ,云南螺蛳塘 ^[16] ,河南栾川 ^[17]