

祁连山 岩浆作用有关 金属硫化物矿床成矿与找矿

李文渊 著



地质出版社

祁连山岩浆作用有关金属硫化物 矿床成矿与找矿

李文渊 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

祁连山是中国最为重要的早古生代与海相火山岩有关的块状硫化物 (VHMS) 铜多金属矿床成矿带, 其北邻的龙首山则为中国元古宙最主要的岩浆铜镍硫化物 (铂族金属) 矿床成矿带。本书从区域成矿发展的角度, 将两成矿带视为一个紧密联系的整体谓之广义的祁连山成矿带予以研究, 重点摘取元古宙、早古生代成矿作用片段作为研究的主要对象。通过现存于祁连山和龙首山不同陆块、微陆块基底中的元古宙喷出的大陆溢流玄武岩、科马提岩、基性岩墙群, 侵入的镁铁-超镁铁岩体和熔离成因的岩浆铜镍硫化物 (铂族金属) 矿体的研究, 提出祁连山在 1.5Ga 左右时期曾发生大规模岩浆作用形成了大火成岩省的认识。金川世界级超大型岩浆铜镍硫化物 (铂族金属) 矿床即是这一古大火成岩省作用的结果。通过对北祁连山奥陶纪石居里沟塞浦路斯型 VHMS 矿床的研究, 探讨了北祁连山早古生代形成于弧后新生洋盆 VHMS 矿床的成矿作用和成矿地质背景; 提出了奥陶纪北祁连山向北俯冲消减模式存在构造转换的新认识——中东段为洋-洋碰撞的沟弧盆地, 西段则为洋-陆碰撞的活动大陆边缘, 为进一步寻找塞浦路斯型富铜矿床提供了新的地质背景认识。

本书可供从事区域地质、矿床勘查、科研和教学人员参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

祁连山岩浆作用有关金属硫化物矿床成矿与找矿/李文渊著. —北京: 地质出版社, 2006. 4

ISBN 7-116-04722-0

I. 祁... II. 李... III. 祁连山-硫化物矿床-岩浆作用-研究 IV. P618. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 015669 号

QILIANSHAN YANJIANG ZUOYONG YOUGUAN JINSHU
LIUHUAWU KUANGCHUANG CHENGKUANG YU ZHAOKUANG

责任编辑: 曹美芳 李凯明

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324576 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京中科印刷有限公司

开 本: 787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张: 13.75 图版: 7 页

字 数: 320 千字

印 数: 1—700 册

版 次: 2006 年 4 月北京第一版·第一次印刷

审 图 号: GS (2006) 074 号

定 价: 45.00 元

ISBN 7-116-04722-0/P · 2646

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)

前 言

2004 年底, 在香港大学召开了题为 “Recent Advances in Magmatic Ore Systems in Mafic – Ultramafic Rocks” 的学术会议, 会上感受到了近年来世界上对岩浆铜镍硫化物矿床的热烈关注。最近在北京召开的第八届国际矿床地质大会, 更是对岩浆铜镍硫化物矿床异常关注。作者曾于 1996 年出版的《中国岩浆铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学》拙著, 突然也增加了许多研究者开始索要。这反映了在国内冷寂了多年的岩浆硫化物矿床由于与地幔柱理论的直接关联和镍价的飞速上涨, 再一次激起了人们的研究热情。这势必将对我国岩浆铜镍硫化物矿床的研究和勘查有极大的推动作用。

研究我国的岩浆铜镍硫化物矿床, 不能不首先关注金川矿床的形成。因为它不仅是世界上镍金属储量排名第二的巨型岩浆硫化物矿床, 更是一个超镁铁质侵入体就含有 540 余万吨镍和约 300 万吨铜的超常富集的矿床, 而周围近 40 年的勘查又再无矿床发现, 这样的例子在世界上绝无仅有。因此, 对这样的矿床再如何关注都不为过, 它是矿床发现史上的奇迹。自从 20 世纪 80 年代末, 金川矿床的发现者汤中立院士将作者引进这个神奇的研究世界后, 对它的探求就再也没有离开过自己的脑海。后来又师从夏林圻研究员进行祁连山海相火山岩及其有关块状硫化物矿床的研究工作, 禁不住大胆地将祁连山造山带中的火山岩引向与金川含矿侵入体的关系思考上。作者一直渴望有一种新的思路或者更系统的认识对金川矿床的形成及其所代表的地质过程进行诠释。本书即是作者近几年的研究思考所得, 同时出于申请博士学位论文更多创新的思考, 又拓展了对祁连山块状硫化物矿床的研究内容。由于我国铜矿资源的匮乏, 加之我国铜金属原材料基地 (白银矿山) 资源的枯竭, 着重对北祁连山与基性火山岩有关塞浦路斯型铜锌矿床的积极探索构成了本书的另一个特色。

祁连山是我国最重要的早古生代与海相火山岩有关的块状硫化物 (VHMS) 铜多金属矿床成矿带, 其北邻的龙首山则为我国元古宙最主要的岩浆铜镍硫化物 (铂族金属) 矿床成矿带。从成矿发展的角度, 本书将两成矿带视为一个紧密联系的整体谓之广义的祁连山成矿带予以研究, 并重点摘取元古宙、早古生代成矿作用片段作为研究的主要对象。元古宙岩浆铜镍硫化物 (铂族金属) 矿床成矿作用范围覆盖整个广义祁连山的前长城纪古老基底陆块和微陆块, 而早古生代 VHMS 铜多金属矿床成矿作用仅发育于狭义祁连山早古生代海相火山岩作用范围 (局部可为新元古代末)。

元古宙岩浆铜镍硫化物 (铂族金属) 矿床成矿作用以金川世界级超大型矿床为典型代表, 岩石 – 矿物 Sm – Nd 等时线定年为 $(1508 \pm 31) \text{Ma}$, 其西邻的具科马提岩特点的藏布太不含矿蚀变超镁铁岩 Sm – Nd 等时线定年为 $(1511 \pm 67) \text{Ma}$, 北祁连西段镜铁山微陆块朱龙关群中鉴别出的大陆溢流玄武岩 (CFB), 不同方法定年数据形成了较大的时间跨度 $(1780 \sim 604 \text{Ma})$, 但也处于元古宙, 而南祁连化隆微地块中分布的几乎为全岩矿化的

拉水峡小型岩浆铜镍硫化物（铂族金属）矿床等相邻镁铁-超镁铁岩侵入体，尽管目前尚无确切的定年数据，但形成于元古宙无疑。作者认为这些现存于不同陆块、微陆块基底中的元古宙喷出的大陆溢流玄武岩（CFB）、科马提岩，侵入的镁铁-超镁铁岩体和熔离成因的岩浆铜镍硫化物（铂族金属）矿体，是响应 Columbia 超大陆裂解，祁连古陆在 1.5Ga 左右时期伴随拉张作用，发生大规模岩浆作用导致形成大火成岩省（LIP）的结果。源于核幔边界“D”层的地幔柱上升作用于岩石圈底部发生部分熔融，形成多物质来源的大规模岩浆，最终上涌喷出（CFB、科马提岩）、形成喷发管道（基性岩墙群，镜铁山微陆块、龙首山微陆块中的大量出现的辉长岩脉集中分布）、上侵形成层状侵入体和岩浆铜镍硫化物（铂族金属）矿体（成带分布的镁铁-超镁铁岩体群和局部高矿化率的岩体）构成了祁连古大火成岩省。

与世界上大部分著名的大火成岩省形成后一直处于稳定的克拉通状态不同，祁连古陆形成大火成岩省后，在早古生代即遭解体而支离破碎，并演化成为造山带而横亘于中国西部。因此，祁连古大火成岩省的恢复较为困难。事实上，愈来愈多的证据表明世界上大部分大规模的岩浆铜镍硫化物（铂族金属）矿床均为地幔柱作用的结果，可分为核幔边界来源和次生的软流圈地幔来源两种地幔柱作用，前者可形成大规模的铜镍矿床，后者主要形成于造山作用期后，难有大规模的铜镍聚集。

金川矿床的地质地球化学特征表明，整体岩石化学成分为二辉橄榄岩，矿化率高达 60%，拉水峡高达 90%，如此之高的金属硫化物聚集绝非岩浆就地熔离所为，肯定为深部更大岩浆房不混溶形成含金属硫化物岩浆，甚至金属硫化物液相（矿浆）直接贯入所致；岩体 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.9 \sim -4.3$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 5.39 ~ 79.15 之间，平均值 15.04, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 在 0.702547 ~ 0.711761 之间， $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 多大于零，甚至高达 +128.8，说明成矿岩浆遭受地壳物质混染，或示踪了下地幔物质来源的信息，藏布太不含矿超镁铁岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +2.6 \sim +2.9$ ，则指示了地壳物质的加入对产生硫饱和的重要作用；金川岩体西段 ΣREE $(3.39 \sim 23.57) \times 10^{-6}$ ，平均值 14.12×10^{-6} ， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 5.39 ~ 14.01，平均值 7.50，而东段 ΣREE $(15.25 \sim 55.87) \times 10^{-6}$ ，平均值达 30.64×10^{-6} ， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 7.02 ~ 79.15，平均值 23.52，东、西段差异明显，且岩体西段 PGE 富集，东段含量较低，反映了多期次岩浆上侵贯入，至少两种不同端元岩浆形成；早期堆晶矿物橄榄石、尖晶石中的镍、钴显著亏损，指示了硫化物液相的不混溶发生于早期，在深部岩浆房即已熔离。这些成矿个例特征说明，祁连古陆元古宙大火成岩省，其中成矿的侵入体是地幔柱头部与岩石圈底部减压作用发生局部熔融形成的基性熔体上涌至地壳深部，由于地壳物质的介入而发生硫过饱和形成硫化物液相的不混溶，并贯入高位含硫化物岩浆房成矿的。深部岩浆房不止一个，且有多次不同成分岩浆的不断补充，深部岩浆房向高位含硫化物岩浆房的上侵和贯入也是多期次的。这些认识，提供了祁连山寻找金川型矿床新靶区的判断标准，南祁连化隆微陆块的拉脊山一带应是金川型矿床重要的找矿靶区。

祁连山早古生代 VHMS 矿床成矿作用可分为形成于陆壳（包括岛弧壳）环境的和洋壳（包括洋盆和弧后新生洋盆）环境的两种类型。前者以白银厂为代表，主要表现为中酸性火山岩发育，成矿元素整体上有陆壳来源的铅的富集，祁连山早古生代与海相火山岩有关 VHMS 矿床的以往找矿对象主要是该类目标；后者由于祁连洋盆的俯冲消减使成矿产物难以被保存下来，因此只有弧后盆地洋壳环境成矿可能得以保存。近年来新发现的石

居里沟矿床即是代表,主要表现为组成蛇绿岩的基性火山岩发育,成矿元素中铅贫乏,富铜,有时锌高等特点。由于全球与蛇绿岩有关的古生代 VHMS 矿床潜力尚不十分清楚,仅有 1/4 的蛇绿岩发现了 VHMS 矿化,中国被确切报道与蛇绿岩有关的 VHMS 矿床也仅见于北祁连山,且以石居里沟矿床为典型代表,因此石居里沟矿床的研究和勘查具有重要意义。相伴北祁连山 VHMS 矿床成矿背景的研究,本书从沉积学角度论证了新元古代末即伴随 Rodinia 超大陆裂解开始发生大陆裂谷的事实,并提出了奥陶纪北祁连洋盆向北俯冲消减模式存在构造转换的新认识,中东段为洋-洋碰撞的沟弧盆系,西段则为洋-陆碰撞的活动大陆边缘。愈向西俯冲消减的位置愈趋向大陆,所以处于中西段的石居里沟地区即为岛弧自身的裂解,进而由岛弧裂谷发展为弧后盆地,火山岩组成中有较多岛弧的物质,但由于成矿作用取决于火山活动之后的岩浆流体,弧后洋壳型岩浆流体提供成矿热液形成了典型的洋壳型成矿金属组成特征。

石居里沟矿区玄武岩 TiO_2 量高 (1.30% ~ 1.21%), 紧依铜矿的碧玉岩 $\delta^{30}\text{Si} = -0.1\text{‰} \sim -0.9\text{‰}$, 其值接近于玄武岩的, 黄铁矿、黄铜矿 $\delta^{34}\text{S} = +4.95\text{‰} \sim +8.88\text{‰}$, 有海水中硫加入, 矿石中石英 $\delta^{18}\text{O} = +11.1\text{‰} \sim +18.6\text{‰}$, 相近于聚敛型板块边界岩浆流体 (+2.7‰ ~ +8‰)。这些特征表明, 受火山机构控制的原生裂隙热液成矿系统, 岩浆流体是成矿物质的主要供给者。

本书还以整个祁连山固体金属矿产资源勘查为背景, 提出了以寻找大型、特大型矿床为目标的战略性矿产勘查新区开辟, 面积性物化探工作筛选靶区, 重点地区勘查突破的三部曲勘查思路。指出战略新区开辟必须以基础研究为依托的重要性, 并以南祁连化隆一带的靶区优选实践为根据, 较深入地研究了祁连山地区岩浆铜镍硫化物(铂族金属)矿床找矿靶区优选指示剂的确定和应用问题; 以石居里沟矿床勘查为依据, 探索了祁连山与蛇绿岩有关 VHMS 矿床的勘查思路和勘查方法组合的适用性问题。

本书的完成并得以出版, 首先要感谢两位导师。一位是夏林圻研究员, 他真正将我引入了祁连山这块神奇的地质领地。1998 年在夏林圻研究员指导下, 由作者主持野外工作, 开展对北祁连山弧后盆地扩张脊型富铜块状硫化物矿床勘查研究工作, 并由此开始不断熟悉了导师百余篇论著的见的, 深导师学术功底深厚, 思维敏捷而思路新锐。导师早年留学法国, 在短短两年时间内即攻克法语, 将当时中国还几乎处于研究空白的火山岩岩浆包裹体研究作为研究方向, 成为了 20 世纪 80 年代初少数几个访问学者中获得博士学位的佼佼者。导师的刻苦、勤奋、钻研和聪慧, 作者一直引以为荣并作为楷模, 激励自己不断进步。在此向导师致以衷心的感谢!

另一位是汤中立院士, 他是作者走向科研之路的引路人, 也是作者的硕士研究生导师, 更是终生之师。自 20 世纪 80 年代末将作者带入岩浆铜镍矿床研究领域以后, 工作和学术上一直得到他热情的关心和帮助。本书撰写中始终给予了作者许多的关怀, 再次致以衷心的感谢!

本书的完成一半原因是出于申请博士学位的学位论文写作, 所以要特别感谢以张国伟院士为首的学位论文答辩委员会, 各位教授专家的鼓励和中肯意见, 是形成本书的重要修改依据。张国伟院士是一位学识渊博精深的学者, 感谢他多年来对作者的关心、鼓励和帮助。还要特别感谢赫英教授和夏祖春研究员对论文的评审, 以及西北大学按要求匿名聘请中国地质大学(武汉)胡朋安教授、周宗桂教授和成都理工大学温春齐教授、唐菊兴教

授对论文的评审,后面四位教授素未谋面,但他们的鼓励给予作者的印象是深刻的。教授们所给予的热情鼓励和中肯的修改意见亦已成为完成本书的主要修改依据。

本书形成过程中作者承担了两项课题,一项是国土资源部的矿产资源勘查补偿费项目,该项目的立项是作者与杨合群研究员、赵东宏研究员一起完成的,立项后由作者和赵东宏研究员、宋忠宝研究员共同组织实施的。因此,作者要特别感谢在石居里沟式塞浦路斯型块状硫化物矿床探索上他们给予的帮助。另一项是西澳矿业公司勘探部资助的岩浆铜镍矿床找矿靶区优选项目,作者与西澳矿业公司勘探部的专家们研讨给予了作者很大的启发,他们是资深的铜镍矿勘查专家 Grant Alan Osborne 高级地质师、高占林高级地质师和张鹏高级地质师。在完成这一项目过程当中,在成矿认识和地质背景研究上徐学义研究员给予了很大支持,刘宽厚教授级高级工程师、李保强教授级高级工程师和伍跃中教授级高级工程师杰出的地球物理工作、地球化学工作及遥感技术工作,给予了作者专业上的支持,作者在书中引用了由他们分别制作的精美图件(已在图下注明),作者在此一并向他们表示衷心的感谢!

在本书撰写过程中,许多人给予了作者帮助和关心。他们是长安大学姜常义教授、钱壮志教授、裴先治教授,与作者在地幔岩石地球化学和构造地质学方面进行了许多有益的探讨,彭建兵教授、王文科教授给予了关心;中国地质科学院资源研究所毛景文研究员、侯增谦研究员赠送作者的新著给予了作者很大启发,毛景文研究员还对作者的单篇主题论文给予了认真审阅,地质研究所张招崇研究员对作者有关镁铁-超镁铁岩研究的单篇论文的审阅意见,显示了扎实的学术功底,给作者留下了深刻影响,苏梨博士用 E-mail 给作者发送了李献华与她刚刚发表的有关金川超镁铁岩的定年论文;中国地质调查局发展研究中心施俊法研究员给作者推荐了澳大利亚地质调查局学者 Pirajno Franco 2000 年出版的《Ore deposits and mantle plumes》,对作者有很大启发;西北大学周鼎武教授赠送了由他主编的新的教科书,董永鹏教授给予了很大帮助。在甘肃和青海野外工作期间,甘肃省地勘局的张新虎博士给予了帮助,青海省地质调查院张雪亭博士给予了帮助。还要感谢作者的工作单位西安地质矿产研究所许多同志在作者撰写论文期给予的帮助,他们是冯益民研究员、邬介人研究员、任秉琛研究员和杜玉良教授级高级工程师,赵仁夫高级工程师帮助作者利用 CorelDRAW 软件设计了许多精美的插图,感谢侯光才教授级高级工程师、张茂生研究员在治学上的研讨和相互启发,申少宁副研究员、张百志工程师给予了作者多方面的帮助,郭周平硕士、王伟硕士给予了帮助。特别要感谢西安地质矿产研究所李向所长和樊钧副所长对作者兄长般的关心和爱护。

最后,感谢我的家人对我撰写本书的鼓励,在深感科研的艰辛和不易时所给予的无微不至的关怀和关心,我的妻子黄杏女士在自己单位工作同时承担了大部分家务,在此深表感激之情!

作者

2005 年 10 月 5 日于西安

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
一、选题由来和科学意义	(1)
二、主要研究内容	(3)
三、学术指导思想和研究途径	(5)
四、主要学术认识	(9)
第二章 岩浆作用有关金属硫化物矿床研究现状	(10)
第一节 世界岩浆作用有关金属硫化物矿床的类型和分布	(10)
一、概念及研究范畴	(10)
二、火山成因块状硫化物矿床 (VMS) 的类型及分布	(11)
三、岩浆硫化物矿床的类型及分布	(22)
第二节 火山成因块状硫化物矿床 (VMS) 成矿作用的研究进展	(27)
一、现代海底热液成矿作用的研究	(27)
二、蛇绿岩及其成矿	(30)
三、成矿环境及成矿物质来源	(34)
四、成矿流体性质与来源	(39)
五、热液循环成矿机制	(40)
第三节 岩浆硫化物矿床成矿作用的研究进展	(42)
一、Voisey's Bay 矿床的发现及其意义	(42)
二、大火成岩省与岩浆硫化物矿床成矿	(45)
三、不混溶成矿作用与硫化物饱和度控制	(49)
四、地壳污染和岩浆混合对硫化物溶解度的影响	(51)
五、复合热液作用对岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的成矿贡献	(52)
第三章 祁连山岩浆作用有关金属硫化物矿床的成矿背景与成矿地质条件	(53)
第一节 祁连山构造格架及地质演化	(53)
一、大地构造位置	(53)
二、构造单元划分	(54)
三、区域构造演化	(57)
第二节 祁连山古微陆块及中元古代大陆溢流玄武岩	(61)

一、主要微陆块地质归属	(61)
二、中元古代大陆溢流玄武岩	(65)
第三节 祁连山中元古代镁铁-超镁铁质侵入岩	(68)
一、中元古代镁铁-超镁铁岩分布及形成特征	(68)
二、中元古代镁铁-超镁铁岩的成岩演化	(75)
第四节 祁连山新元古代大陆裂解的沉积学证据和火山作用响应	(77)
一、新元古代大陆裂解的沉积学证据	(77)
二、碎屑流沉积的构造指相意义及火山作用响应	(81)
第五节 北祁连山加里东期聚敛作用的构造转换及岩浆作用特征	(84)
一、北祁连山加里东期聚敛作用的构造转换	(84)
二、区域岩浆作用指相及成矿响应	(87)
三、两种构造聚敛模式转换动力学机制	(90)
第六节 祁连山区域成矿构造环境及动力学分析	(91)
一、祁连山区域成矿构造环境	(91)
二、区域成矿动力学分析	(93)
第四章 祁连山岩浆作用有关金属硫化物矿床的成矿作用	(95)
第一节 祁连山主要矿床组合及特征	(95)
一、主要矿床组合及其成矿作用	(95)
二、早古生代火山岩成因块状硫化物矿床区域成矿特征	(101)
三、中元古代早期岩浆熔离型铜镍矿床区域成矿特征	(110)
四、早古生代晚期砂卡岩-石英脉型钨矿床主要成矿特征	(111)
五、贵金属主要成矿特征及与金属硫化物矿床成矿关系分析	(112)
第二节 北祁连塞浦路斯型铜-锌矿床成矿作用	(112)
一、北祁连山塞浦路斯型铜-锌矿床发现的地质找矿意义	(112)
二、北祁连赋矿弧后盆地火山岩系	(115)
三、石居里沟塞浦路斯型铜-锌矿床成矿地质地球化学特征	(118)
四、中晚奥陶世北祁连弧后扩张及海底热液循环成矿	(128)
第三节 祁连山元古宙大规模岩浆铜镍硫化物矿床的成矿作用	(133)
一、金川岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床的地质对比及其成矿指示意义	(133)
二、金川岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床的地质地球化学特征	(136)
三、元古宙祁连古陆块大规模岩浆事件及熔离成矿	(152)
第五章 祁连山岩浆作用有关金属硫化物矿床找矿潜力	(158)
第一节 祁连山暨西北地区金属矿床在全国金属矿产勘查中的地位	(158)
一、西北地区古生代主要金属矿床成矿特点	(158)
二、西北地区成矿背景及成矿条件约束	(161)
第二节 南祁连化隆地区金川型岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床找矿靶区优选	(168)
一、找矿战略靶区筛选的指示剂	(168)

二、地质条件与成矿显示的对比	(172)
三、物化遥异常信息及找矿靶区筛选	(180)
第三节 北祁连中西段塞浦路斯型铜矿找矿潜力	(182)
一、古火山机构及控矿原生裂隙系统判别	(182)
二、音频可控源大地电磁测深探矿	(184)
三、找矿潜力分析	(186)
 第六章 结语	(189)
一、主要结论	(189)
二、未来研究的一些思考	(190)
 参考文献	(192)
英文摘要	(205)
彩图	

第一章 绪 论

一、选题由来和科学意义

20 世纪 80 年代初笔者开始在龙首山地区开展 1:5 万地质填图工作,在填图中对前寒武纪地层形成构造环境的认识一直存在着一个疑惑的问题:作为华北陆块西南缘的龙首山隆起,其构造演化过程中与南相邻的北祁连造山带是一种什么样的关系?限于知识水平未能理出清晰的认识(李文渊,1990,1991)。80 年代末师从汤中立院士,他引我进入了铜镍硫化物矿床这样一个瑰丽的研究世界,并开始接触西北地区惟一的世界级超大型矿床——金川铜镍硫化物矿床的研究,在提出金川矿床形成于中元古代早期大陆裂谷拱曲阶段认识中(汤中立等,1995),尽管未阐述其是大陆边缘裂谷还是大陆中裂谷(mid-continental rift),但实际上已认为属大陆中裂谷,并认定裂解后的南部陆块在祁连山,但未限定裂谷南部陆块可能的南界。事实上,已将龙首山与北祁连中元古代早期以前的地质体联系在一起。90 年代后期,在夏林圪研究员的指导下,开始步入北祁连山海相火山岩有关的块状硫化物矿床这一新的研究领域,项目实践中夏林圪研究员提出镜铁山微陆块中朱龙关群变质基性火山岩是大陆溢流玄武岩(夏林圪等,2000),并进而推测其与金川超镁铁岩侵入体是同一岩浆活动的产物,极大地激发了笔者对龙首山与祁连山地质体演化关系构造-岩浆-成矿事件响应的思考,并积极引入到所从事课题的相关内容的研究中。

1997 年底夏林圪先生引我进入新发现北祁连中西段石居里沟塞浦路斯型富铜矿的研究田地(夏林圪等,1998,2001;李文渊等,1999a,1999b)。对比国外研究发现,不论是“塞浦路斯型”还是“黑矿型”块状硫化物矿床的形成均与海底的火山岩系有关(Franklin et al., 1981)。因此,块状硫化物矿床成矿过程中,海水的加入和海底火山作用是肯定存在的,现代海底热液矿床的发现又为岩浆流体对成矿扮演了重要角色提供了证据(Yang, 1997, 1998)。而且在洋壳环境形成的块状硫化物矿床(以塞浦路斯型矿床为代表),为单一的拉斑玄武岩为赋矿火山岩系,只有相对高含量的 Cu 和少量 Zn,基本不含 Pb,伴生有 Au;相反,在岛弧或薄的陆壳环境形成的块状硫化物矿床(以黑矿型多金属矿床为典型),赋矿岩石为长英质火山岩和火山沉积岩,因此,矿床中出现大量 Pb,并含较多 Ag,而 Cu、Au 相对减少(Hutchinson, 1988; Rona et al., 1993; Ohmoto et al., 1983; Hezig et al., 1995)。然而,这些中生代以来或现代矿床的总结认识,当应用于祁连山早古生代块状硫化物矿床的系统研究时,并不能把发现矿石组分作为成矿环境清晰的判断标志。例如,白银厂铜多金属块状硫化物矿床,其中折腰山、火焰山为 Cu-Zn 组合,伴有少量 Au、Ag,而小铁山为 Pb-Zn-Cu 组合,伴生 Au、Ag。但是,矿床整体矿石中 Pb 含量,可能是判断成矿中是否有地壳物质加入的重要信息,这种加入是多渠道的。为进一步深入探索,将雪泉富铜矿床纳入整个北祁连山块状硫化物矿床的形成系统中考

察，它是祁连山块状硫化物矿床两大类的一类，属于与洋壳环境有关的块状硫化物矿床类型。尽管目前尚未发现大的具工业价值的矿床，但具有重要找矿远景，更令人鼓舞的是，西北地区乃至中国大陆古洋壳残余的蛇绿岩带发现日益增多，提供了在其中寻找塞浦路斯型 Cu - (Zn) 块状硫化物矿床的潜力。

十余年在从事祁连山（广义的，包括龙首山地区，见图 1 - 1）岩浆硫化物矿床和块状硫化物两种矿床的调查研究工作中，尽管深知前者是岩浆熔离（不混溶）作用的产物，后者属于热液矿床类型，但其与地壳拉张环境下，上升岩浆作用的密切相关关系，还是不自觉地将它们联系起来认识考虑：为什么形成于三叠纪之前的岩浆铜 - 镍 - 铂族硫化物矿床只形成于大陆环境；而形成于整个地质历史时期的 Cu - (Pb - Zn) 块状硫化物矿床主要形成于洋壳或岛弧环境；也有形成于大陆壳环境的块状硫化物矿床，比如中亚的许多矿床，它们所在的大陆壳环境与形成岩浆硫化物矿床的大陆壳环境有什么根本的不同；当它们同处祁连山形成于不同时代所代表的构造环境和岩浆形成演化就位的本质差异又是什么。搞清这些问题无疑是有意义的。

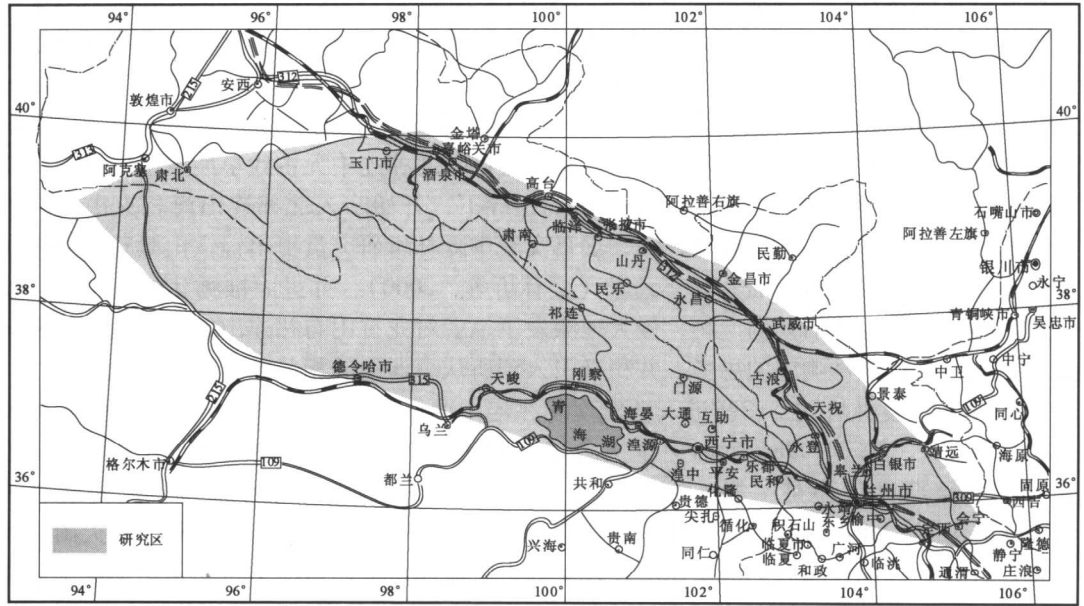


图 1 - 1 研究区交通位置图

本研究课题的创新性概括起来主要为：

(1) 运用构造活动和构造联系的观点，开拓性地将岩浆硫化物矿床和块状硫化物矿床纳入到祁连山统一构造单元进行研究，通过矿床赋存岩石和地球化学信息的追溯，从区域主要金属矿床成矿的角度构建祁连山构造 - 岩浆作用 - 成矿演化史，从时空演化的视角认识祁连山与岩浆作用有关的金属硫化物矿床的成矿特征和成矿规律，进而指导进一步找矿实践。

(2) 利用岩浆铜镍矿化、镁铁 - 超镁铁岩小型成矿侵入体、相伴火山作用和基底围岩地质地球化学判别的方法，重建中元古代早期祁连山（华北古陆西南部）存在的大规模岩浆作用和成矿事件，与全球早期 Columbia 超大陆裂解作用相联系（Rogers et al. ,

2002), 从大尺度上判断其独特的地质和成矿意义。充分汲取前人成果, 进一步从整体信息集成出发, 探索其岩浆演化过程中硫化物熔离和萃取金属成矿的机制, 并预测祁连山新的最有利成矿靶区。

(3) 与 Rodinia 超大陆裂解相联系 (Hoffman, 1992), 在前人研究基础上, 进一步探索了祁连山自新元古代晚期至早古生代大陆裂解-成洋-汇聚过程中, 不同构造环境可能存在的块状硫化物矿床成矿响应和成矿特征上的差异, 着重对形成于洋壳环境的北祁连雪泉塞浦路斯型富铜块状硫化物矿床的形成构造-火山相、成矿特征和找矿标志进行了较为深入的研究, 提供了中国该类矿床的一种典型形成模式。并创造性地提出北祁连早古生代洋壳消减聚敛模式存在构造转换, 西段为洋壳直接俯冲于陆壳之下形成类似安第斯山型的活动大陆边缘成矿构造环境, 中东段则为洋壳俯冲于洋壳之下形成类似马里亚纳型的沟-弧-盆系大陆边缘成矿构造环境, 较好地解释了东西两段存在的成矿差异。

(4) 从区域找矿的有效性上进行了探索。将祁连山成矿带纳入整个西北地区进行成矿类型及成矿强度对比, 以此突出找矿重点, 在更大构造尺度上认识成矿背景, 研究重要成矿类型的成矿规律, 借助综合找矿技术, 筛选找矿靶区, 有序开展不同工作程度的勘查工作。

二、主要研究内容

本书主要研究内容和研究目标为:

(1) 较为全面地搜集了截止至 2003 年底以来有关岩浆硫化物矿床、块状硫化物矿床和祁连山地区相关区域构造、岩石、地球化学以及成矿学研究方面的重要国内外文献, 从较高起点上把握了岩浆硫化物矿床和块状硫化物矿床的国内外研究现状及热点研究问题, 并针对祁连山的研究和勘查状况, 提出了存在的主要问题和可能解决的研究途径, 以保持总体研究目标上的先进性和创新性。

(2) 从全球视野分析研究了世界岩浆铜镍硫化物矿床的大地构造分布和成岩成矿类型, 特别是通过俄罗斯 Noril'sk 和加拿大 Voisey's Bay 等全球 8 个世界级矿床特征的对比研究, 突出强调大火成岩省对大规模岩浆硫化物矿床形成的意义, 从更加宏观的角度审视了世界级岩浆硫化物矿床形成的地质背景和岩浆作用条件, 为金川超大型岩浆铜-镍-铂族硫化物矿床的深入研究提供了参照背景, 以对比研究金川矿床在世界级岩浆硫化物矿床中的共性和特殊性。

(3) 从古代和现代块状硫化物矿床成矿特征对比角度, 总结分析世界重要古代造山带中块状硫化物矿床和现代海底喷流的块状硫化物成矿堆积, 对块状硫化物矿床成矿的可能背景进行分析归纳, 分析了现代海底块状硫化物成矿主要形成于洋壳和岛弧环境的实际观察结果 (欧美学者), 与古造山带中块状硫化物矿床成矿除洋壳和岛弧环境外, 尚有大陆裂谷环境认识 (俄罗斯和中国学者) 的差异, 更全面地概括了块状硫化物矿床的成矿背景和成矿类型, 突出强调了洋壳环境和岛弧或陆壳环境两种成矿环境对成矿类型的分类, 并探讨了由于洋-陆转化过程中, 过渡环境的存在对两种成矿类型亦存在过渡的成矿复杂性, 为更加全面认识祁连山块状硫化物矿床提供借鉴。

(4) 评述分析了当代岩浆硫化物矿床成矿中, 幔源岩浆中硫化物液相不混溶 (熔离)

的演化轨迹,对岩浆萃取地壳中的硫改变硫化物饱和度促成不混溶作用发生的可能性和条件进行了探讨,进一步探讨了岩浆演化过程中,亲铜元素(Ni、Cu、Co、Pt和Pd等)进入硫化物液相成为金属硫化物或先期进入先结晶的橄榄石、辉石矿物成为氧化物的物理化学行为,并通过加拿大Sudbury陨石撞击构造成因矿床复合热液对硫化物矿体形成贡献的讨论,提出了热液作用对岩浆硫化物矿床成矿的可能贡献,初步对金川矿床存在的热液成矿作用进行判断。

(5) 评述了当代块状硫化物矿床成矿研究的热点问题,对上地幔部分熔融岩浆来源与地壳物质可能带入、火山喷发岩浆系列的演化和对热液成矿作用的控制进行了讨论,研究了岩浆流体对成矿的重要贡献和控制作用,对比分析了成矿热液循环体系形成的条件和模式,重点探索了古造山带中残存洋壳蛇绿岩形成块状硫化物矿床的机理和保存模式,对北祁连山以雪泉为代表的洋壳型块状硫化物矿床的成矿研究提供了理论框架,以提高其典型性研究程度。

(6) 金川矿床是中国惟一的世界级超大型岩浆铜-镍-铂族硫化物矿床,金属镍储量占据世界级矿床第二位,其成矿环境和成矿机理的研究是世界岩浆硫化物矿床研究中的重要命题。汤中立院士关于“小岩体成大矿”的理论认识,已愈来愈得到了世界上重要矿床实例研究的证实,例如Noril'sk和Voisey's Bay矿床等。实际从另一侧面解释了大火成岩省利于成大规模铜镍矿床的判断,因为大火成岩省最终成矿的侵入体并不大,而含矿率却很高。因此,进一步开阔视野对金川矿床产出背景有更全面的认识。是认识金川矿床成矿的有效途径。本研究以中元古代早期大陆裂谷作用可能波及的范围和后期可能离散位置为研究半径,重点是南半径,进行侵入体和古老围岩对比,寻找响应的喷出火山岩,厘定成矿构造环境和岩浆作用范围,进而结合金川矿床本身赋矿超镁铁岩、矿体和矿石地质地球化学和同位素示踪信息的深入研究,进一步刻画金川矿床的整体成矿特征和成矿过程及成矿后演化,并为进一步提供新勘查靶区提供思路。

(7) 祁连山是中国最著名的早古生代加里东成矿带,并以产出块状硫化物矿床为特征,是中国重要的铜金属资源基地,半个多世纪的开采活动,已使著名的铜城白银厂矿山资源全面枯竭,加强外围的区域成矿研究和勘查工作是解决危机矿山的重要出路。以夏林圪研究员为首的研究群体已对北祁连海相火山岩及其块状硫化物矿床进行了卓有成效的研究,搞清了不同构造微相环境的成矿作用,为在更大视野研究北祁连块状硫化物矿床的成矿特征提供了坚实基础。历来对北祁连洋的规模和消减模式有争议,但就整个祁连山的洋陆格局与确认的古亚洲洋和古特提斯洋的关系却未能深入研究,近年来柴达木北缘可能存在更大洋盆的认识(许志琴等,2003)提供了进一步认识祁连山块状硫化物矿床成矿环境的新的视角,本研究中初步对祁连山南北两洋关系提出研究思考,并特别对与洋壳有关的雪泉塞浦路斯型Cu-(Zn)块状硫化物矿床进行较为详细的研究,以总结祁连山弧后扩张环境保存下来的残余洋壳蛇绿岩块状硫化物矿床的典型特征,为面上展开同类矿床的找矿突破提供依据。

(8) 依据目前认识,祁连山在漫长的地质演化历程中,在中元古代早期的大陆拉张作用形成了岩浆铜-镍-铂族硫化物矿床,而在新元古代晚期的再次大陆拉张作用并持续拉张成洋和消减中形成了块状硫化物矿床,同为大陆拉张作用形成了不同的成矿类型,对其成矿地质背景和岩浆作用的对比研究应是有意义的。通过岩浆来源、规模及其演化历程

的对比研究,以证实是否形成岩浆铜镍硫化物矿床的岩浆作用是地幔深处超地幔柱作用的结果,其有更大的能量,之所以含矿侵入体显示的岩石圈地幔的特征是上升的热地幔柱头熔化了岩石圈地幔物质而假设的结果,而且陆壳厚度较大,岩浆房作用时间长,提供了在地壳中岩浆不断补充和充分熔离作用发生的可能,金川矿床含矿侵入体岩石-矿物 Sm-Nd 同位素等时线定年为 1508Ma 左右,海绵陨铁状铜镍硫化物矿石 Re-Os 定年为 960Ma,相差达 500Ma 之久;而形成块状硫化物矿床的岩浆作用是上地幔部分熔融的产物,并由于较薄的地壳不允许在岩浆作用阶段在岩浆房发生重要的熔离作用,成矿主要依靠火山作用的间歇期,持续的岩浆流体与海水反应形成成矿热液体系在水岩界面进行循环作用而成矿。

(9) 随着勘查工作程度的提高,区域性矿产资源勘查工作愈来愈依靠先期的和贯穿于矿产勘查全过程的研究工作作为基础,中国未来矿产资源勘查队伍的格局必然趋向国外风险勘查的机制,但现阶段公益性的矿产资源工作更多的可能还要深入于商业性勘查工作,为商业风险勘查提供更多的基础工作。因此,对一个成矿带的研究和勘查工作的模式研究具有现实意义。

三、学术指导思想 and 研究途径

研究工作遵循的总的指导思想是以系统的、联系的和综合的观点把握研究工作重点,从点到面、再面到体并以循环的技术路线突出工作方向。注重文献的研究,继承前人成果,更重视通过文献对比发现问题提出新的观点,用野外实践证实或进一步修正认识。并保持宏观思维的扩张与测试野外数据的充分扣合。**学术思想**可概括为:

(1) 将矿床纳入岩石,将含矿地质体纳入构造单元的演化,以系统的观点进行研究工作。研究思维上,具体从全球重要岩浆硫化物矿床和块状硫化物矿床的地质分布入手,概括其成矿时空分布特征,对中国岩浆硫化物矿床和块状硫化物矿床的类型和地质分布与全球对比,归纳中国两类重要矿床的成矿特点,在此基础上研究祁连山岩浆硫化物矿床和块状硫化物矿床的成矿特征,探索其成矿规律。

矿床作为一种具有重要使用价值的特殊岩石,它是地质作用过程中一定条件下形成的产物,一定地质构造单元在一定的构造活动过程中必然产生各种相互关联的分支作用,并在不同的地质部位形成与特定地质作用关系最为密切的矿床成矿组合。祁连山新元古代晚期—早古生代大陆裂解发生、洋盆出现、俯冲消减和构造汇聚的完整过程形成了不同的成矿响应,例如形成与大陆裂谷、岛弧裂谷和弧后扩张脊有关的块状硫化物矿床(分别以白银厂、浪里克和雪泉为代表的有色金属矿床)、与活动大陆边缘有关的矽卡岩型钨(铜、钼)矿床(以小柳沟为代表)和低温浅成热液贵金属矿床(以寒山为代表),以及与构造汇聚后前陆盆地有关的砂岩型铜矿床(以天鹿为代表),这是以一个构造演化为主线表现出来的成矿系统。按类似的完整成矿系统,在活动大陆边缘和成熟岛弧环境中,预测还应有形成斑岩型铜(钼)矿床的可能,但迄今未发现可能是无形成这种矿床的重要条件,也可能是勘查工作程度还不够而造成的,不论哪种情形成矿系统仅是一种系统观点的认识,由于不同地区和不同时代地质条件的差异,在成矿组合和成矿强度上是不同的。但从研究角度讲,可提供一种探索的思路。本书着重于特定矿床类型的研究,重点是同类

矿床在不同微相中的可能成生形式的研究。

(2) 将相邻构造单元的同类矿床纳入一个体系,以联系的观点进行研究工作。世界勘查成功的实例中,运用联系的观点进行成矿背景和成矿条件的研究,选取靶区找矿成功的例子是很多的,这是当今找矿勘查中运用较多的地质对比方法,是一种联系的成矿观点。例如西澳大利亚的 Olympic Dam 超大型铀铜矿床,就是通过与赞比亚超大型铜矿地质背景对比进行勘查成功的;还有美国地调局对美国东北部威斯康星州的苏必利湖 1Ga 的大陆裂谷玄武岩与俄罗斯 Noril'sk 和加拿大 Voisey's Bay 大陆溢流玄武岩进行对比,认为同属超地幔柱作用大火成岩省的结果。龙首山地区的金川超镁铁岩可能与南祁连的拉脊山拉水峡全岩矿化的超镁铁岩属同一大规模岩浆作用认识,是本研究用联系的观点进行研究的实践。联系的观点还表现在矿床形成与基础地质研究成果的紧密结合上,运用地质历史上超大陆形成和裂解块体重塑的成果,可为开展区域找矿提供新的思路,同时矿床的发现又可作为大陆聚散的重要证据。

(3) 将矿床研究与岩石学、构造地质学和地球化学等学科紧密结合,以综合的观点进行研究工作。对于与岩浆作用密切相关的金属硫化物矿床,对矿床形成的全面认识,单一的矿床学研究方法不可能取得深入的成果,这也是当代矿床学研究的的发展趋势,充分汲取其他学科研究方法和成果认识,以矿床学研究为基础向综合学科方向发展。本书研究中强调对区域成矿作用的探索,特别重视综合火成岩成因岩石学、微量元素地球化学、同位素地质学和前寒武纪大陆重建、区域构造地质的最新认识成果应用,旨在试图对祁连山与岩浆作用有关的金属硫化物矿床提供一种新的研究框架,力图对前人的研究成果有所发展、补充和创新。

本书研究选取两种重要的金属矿床类型,以一个成矿带范围进行研究,主要锁定在两类矿床的区域成矿作用研究和区域找矿潜力分析上。具体采取的技术路线为:

(1) 文献收集分析,提出研究重点。在前人工作的基础上,充分收集已有的文献和成果资料,在综合分析研究提出问题的基础上,进一步收集国内外最新有关文献,对比研读后选取研究的主要内容,并突出重点,作为主要研究内容。

(2) 依托执行项目,针对性开展野外工作。以正在开展的项目工作为基础,精心设计野外调研内容,通过路线地质剖面、大比例尺构造-岩相填图和专门样品采集等工作方式收集野外资料,并对重要矿体的硐探和采场进行现场观察研究,进行资料综合,提出新的问题。

(3) 修正认识,明晰研究思路。在野外资料综合成果与前人成果复查对比研究基础上,借鉴国内外新认识新发现,与国内外重要矿床和所在成矿区带进行对比研究,形成新的研究思路,并在进一步的野外工作中证实和完善。

(4) 深化成果,完善论文研究提纲。对初步研究成果和新的认识成果撰写专门论文,以进一步深化认识,明晰总体论文框架,在修改专门论文的同时,逐步形成总体论文的目标和研究内容结构,完善论文提纲。

(5) 突出重点,争取创新成果。科学研究的灵魂是创新,而创新的源泉是反复实践。在研究提纲明确后,针对研究存在的薄弱环节进一步收集资料和开展野外工作予以弥补,日臻完善研究成果。

在研究工作中特别思考了该两类大型、特大型矿床的找矿问题。进入 21 世纪以后,

随着全球经济的快速发展,对大宗金属矿产资源的需求飞速发展,据国际铜业协会的统计^①,2000 年全球铜消费量达到 1520 万吨,其中:中国达到 250 万吨,占到全球铜消费量的 17%,目前中国已取代美国成为世界第一大铜消费国,中国铜需求年增长速度高达 10%~15%,估计 2004 年中国铜市场可能将会出现约 30 万吨的供给缺口。可见中国铜矿找矿任务的艰巨。镍矿全球性价格回升,国际矿业市场镍价已达 12250 美元/t,镍已成为世界性的战略资源,全球寻找镍矿的热情大大高涨,目前中国大部分与镁铁-超镁铁岩有关的岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床成矿带均已外国勘探公司介入,也反映了世界矿业界对镍矿找矿的迫切需求。

世界最大的岩浆硫化镍矿床加拿大 Sudbury 镍矿深部找矿, Falconbridge 公司从 2001 年起重新拟定了矿区的勘查战略,试图寻找埋深 1500m 左右,在矿区附近可以立即开采的新矿体。勘查中使用三维模式,利用过去井中电磁异常资料。重测了 1996 年施工的 MAC-100 号钻孔,使用 UTEM IV 井中 EM 系统。通过钻探验证在 Sudbury 火成杂岩体东沿的南侧,发现了新的 Sudbury 接触带矿化,即浸染状-稠密浸染状和块状磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿。下盘的矿化宽 0.5~20m。目前已控制推测资源量矿石 460 万吨,含镍 2.17%、铜 4.9%、金 2.6g/t、铂 3.66g/t、银 18.56g/t。这是一个老矿区深部找矿的重要实例。研究区内金川矿床作为世界级的巨型岩浆硫化镍矿床同样存在进一步找矿问题,而且这一问题开始变得日益重要。按英国力拓矿业开发有限公司与甘肃省秦祁矿业公司近期签订的合作合同,双方将共同对甘肃龙首山铜镍矿进行风险勘探。英国力拓公司将运用高精度航空磁法测量,对甘肃龙首山大约 2000km² 的地区进行风险地质勘探,以寻找新的具有世界级别的铜、镍矿床。上述成功的勘查实例和勘查实际的需求,启发我们应积极对该地区找矿新区的开辟加大研究力度。

据报道中国铜城白银由于矿产资源枯竭,铜城风采已不再^②。当年折腰山、火焰山两个露天矿年出矿量达 400 万吨以上,可谓“日出斗金”,从 1956 年矿山开采到 20 世纪 80 年代中期相继闭坑,两采场共贡献铜金属量 81.3 万吨,但目前白银公司累计亏损已达 47 亿元,资产负债率 160%。寻找新的矿山,开辟新的矿区应是白银的出路之一,对北祁连山塞浦路斯型富铜矿床的研究勘查,极具理论价值和现实意义。

本书的研究工作是在以前工作的基础上,主要依托笔者参加国土资源大调查项目“中国超大型铜镍(铂族)岩浆硫化物矿床预测研究(编号 200110200058)”(2001~2003)和主持国土资源部矿产资源补偿费项目“甘肃省肃南裕固族自治县雪泉铜矿普查(编号 2002001)”(2002~2003)及中澳合作项目“中国青海东部拉脊山地区金川型 Cu-Ni-PGE 矿床找矿潜力评价研究”(2003~2004)等项目工作开展的。

“中国超大型铜镍(铂族)岩浆硫化物矿床预测研究(编号 200110200058)”项目是汤中立院士集多年研究之大成,主持开展的一项全国性的铜镍矿床成矿规律及找矿预测项目,目标旨在对中国大陆背景、镁铁-超镁铁岩特征与世界上重要世界级铜镍岩浆硫化物矿床成矿环境和含矿岩石特征对比研究,预测中国形成超大型铜镍岩浆硫化物矿床的可能及其类型和地区。笔者有幸参加了这一项目。该项目研究重点是对中国大陆岩浆硫化物矿

① <http://www.chinamining.com.cn/index.asp>

② 国土资源报,2003 年 12 月 15 日