



中国地质调查成果 (ISBN 978-7-5625-3279-8)

2013年湖北省社会公益出版专项资金 资助

中国铜矿地质地球化学找矿模型 及地球化学定量预测方法研究

Zhongguo Tongkuang Dizhi Diqu Huaxue Zhaokuang Moxing ji
Diqu Huaxue Dingliang Yuce Fangfa Yanjiu

马振东 龚鹏 龚敏 胡小梅 李娟 等编著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

中国地质调查局全国重要矿产资源潜力评价项目
2013年湖北省社会公益出版专项资金 资助
全国化探资料应用研究系列丛书

中国铜矿地质地球化学找矿模型及 地球化学定量预测方法研究

Zhongguo Tongkuang Dizhi Diqiu Huaxue Zhaokuang Moxing Ji
Diqiu Huaxue Dingliang Yuce Fangfa Yanjiu

马振东 龚鹏 龚敏 胡小梅 李娟 等编著

内 容 简 介

本书以全国矿产资源潜力评价理论和方法为指导,提出了我国铜矿资源地球化学定量预测的工作思路和方法技术,并以长江中下游、西藏冈底斯、云南香格里拉铜多金属成矿带及滇中层控砂岩型铜矿为例,进行了“建模”“圈区”“算量”铜矿地球化学定量预测的核心过程。

本书在充分吸收前人成果的基础上,建立了我国斑岩型、矽卡岩型、海相火山岩型、陆相火山岩型、铜镍硫化物型、海相黑色岩系型、海相杂色岩系型、陆相红色砂岩型及热液脉型等 9 类 25 个铜矿床地质地球化学找矿模型;汇总集成了全国各省(市、自治区)完成的铜矿定量预测成果,共圈定了 1 184 个铜预测区,采用类比法和面金属量法预测我国铜矿潜在资源量约 $1.8 \times 10^8 \text{ t}$ 。

本书内容丰富、资料翔实、数据可靠,可供从事矿产资源潜力评价、勘查地球化学研究人员及矿床、地球化学专业的师生参考。

封面为江西九江城门山“三位一体”铜钼多金属矿床(马振东摄于 2006 年)

图书在版编目(CIP)数据

中国铜矿地质地球化学找矿模型及地球化学定量预测方法研究/马振东,龚鹏,龚敏,胡小梅,李娟等编著. —武汉:中国地质大学出版社,2014.5

ISBN 978-7-5625-3279-8

I. ①中…

II. ①马…②龚…③龚…④胡…⑤李…

III. ①铜矿床-地球化学勘探-中国②铜矿床-地球化学-成矿预测-中国

IV. ①P618.410.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 079000 号

中国铜矿地质地球化学找矿模型 及地球化学定量预测方法研究

马振东 龚鹏 龚敏 胡小梅 李娟 等编著

责任编辑:段连秀

策划编辑:蓝翔 段连秀

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:880 毫米×1230 毫米 1/16

字数:970 千字 印张:28.5 图版:24

版次:2014 年 8 月第 1 版

印次:2014 年 8 月第 1 次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-3279-8

定价:490.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

中国地质大学(武汉)以马振东教授为首的科研群体编著了《中国铜矿地质地球化学找矿模型及地球化学定量预测方法研究》一书,它是全国矿产资源潜力评价项目中的一项子课题的成果。在2008年至2013年期间,本书自以全国矿产资源潜力评价理论和方法为指导,在进行长江中下游铜多金属成矿带、西藏冈底斯铜多金属成矿带铜矿地球化学定量预测方法试点研究的基础上,提出了我国铜矿资源地球化学定量预测的工作思路与方法技术,并指导开展了全国各个省(市、自治区)铜矿资源地球化学定量预测工作,使我国勘查地球化学从定性走向定量预测迈出了重要的一步。

本书作者在充分吸收前人研究思路、成果的基础上,以我国已有的1:20万或1:50万区域地球化学数据为主,综合利用1:5万~1:1万中大比例尺的地球化学资料,以现代成矿、成晕理论为指导,以信息技术为手段,以“源”→“动”→“储”→“变”为基本建模思路,在Ⅲ级成矿带的尺度上,研究成矿区(带)的基础地质、成岩成矿规律、理论地球化学及勘查地球化学特征,研究总结典型矿床(矿田)的异常特征,建立了斑岩型、矽卡岩型、海相火山岩型、陆相火山岩型、铜镍硫化物型、海相黑色岩系型、海相杂色岩系型、陆相红色砂岩型及热液脉型等9类25个铜矿床地质地球化学找矿模型,为我国铜矿资源预测区的圈定和铜矿资源地球化学定量预测提供可类比的“标准样本”依据。

本书在长江中下游成矿带、西藏冈底斯及藏东“三江”成矿带铜矿地球化学定量预测研究成果基础上,汇总集成了各省(市、自治区)完成的铜矿定量预测成果,编制形成了全国铜矿资源潜力(预测区数量、预测资源量)地球化学预测成果图。全国共圈定了1184个铜预测区,采用类比法和面金属量法,预测我国铜矿潜在资源量 $18\,258.9\times 10^4\text{t}$ 。

本书作者在全国Ⅲ级成矿带上开展铜矿地球化学定量预测研究过程中,以成矿元素演化为主线,突出了地质、地球化学结合,地质科学与现代信息技术的结合,优选出一批具有找矿潜力的预测区,估算出具有一定可信度的资源量,其核心可概括为:“建模”“圈区”“算量”。在这一过程中,创建了地球化学定量预测的理论、方法体系,开创了我国中比例尺地球化学定量预测的先河,为全国其他矿产的地球化学定量预测起到了示范作用。

承担此项研究的中国地质大学(武汉)地球化学研究所师生是一个优秀的科研团队,他们基于海量基础数据、前人的成果及学校人才优势的宽广平台,在勘查地球化学学科领域上自强不息、务实严谨、善于思考、敢于创新,默默无闻地劳作着、反复地摸索尝试着……。今天专著终于付梓了,这里凝聚着他们六年来日日夜夜的心血,也是全国勘查地球化学界的专家、同仁们集体智慧的结晶。在此,特向作者们和全国勘查地球化学界的专家、同仁们表示衷心的感谢。

在勘查地球化学领域,无论是矿区尺度,还是区域甚至全国尺度,均积累了大量的地球化学调查数据,如何运用新思路、新方法、新技术,深入挖掘数据背后隐藏的成矿信息,从而揭示成矿规律,为矿产勘查提供科学依据,将一直是现代勘查地球化学界的热点和难点。本次铜矿资源地球化学模型与定量预测研究为其他矿种资源量预测提供一个可借鉴思路和方法。当前,迫切需要对其他紧缺矿种地球化学定量评价方法开展研究。为此,我殷切期望有关部门把这项研究列入长期工作规划,稳定支持,逐步完善,不断创新发展,为我国矿产勘查、社会经济发展作出新贡献!

A handwritten signature in black ink, reading '叶天平' (Ye Tianping) from right to left. The signature is stylized and fluid.

2014 年 5 月

全国矿产资源潜力评价项目,是我国矿产资源方面的一次重要的国情调查。其目的是通过系统总结地质调查和矿产勘查工作成果,全面掌握矿产资源现状,科学评价未查明矿产资源潜力,建立真实准确的矿产资源数据,为实现找矿重大新突破提供资源勘查依据。矿产资源地球化学模型建立与定量预测研究为其中的一项子课题,中国地质大学(武汉)自2008年承担该课题至今,先后在长江中下游铜多金属成矿带(2008年)、西藏冈底斯铜多金属成矿带(2009年)开展了铜矿资源定量预测的试点研究,探索出一套斑岩型(矽卡岩型)铜矿产资源地球化学模型建立和定量预测的方法技术。2010年6月在苏州举办了全国矿产资源潜力评价化探定量预测培训班,之后在全国各省(市、自治区)以本课题的方法技术为指南进行铜矿产资源地球化学定量预测。经过全国各个省的实践表明,该方法圈定的预测区和估算的资源量具有较好的可信度(龚鹏等,2012)。通过五年多来的不断尝试和总结,初步形成了以基础地质、成岩成矿机制、理论地球化学、勘查地球化学及GIS技术为一体的综合性研究思路。

项目在充分吸收前人研究思路、成果的基础上,以我国已有的1:20万(1:50万)区域地球化学数据为主,综合利用1:5万~1:1万中大比例尺的地球化学资料,以现代成矿、成晕理论为指导,以现代计算机技术为手段,以“源”→“动”→“储”为基本建模思路,在Ⅲ级成矿带的尺度上,充分研究成矿区带的基础地质、成岩成矿规律、理论地球化学及勘查地球化学特征,研究总结典型矿床(矿田)的异常特征,建立矿床(矿田)、成矿带的地球化学找矿模型,为预测区的圈定和资源量的估算提供可类比的依据。简而言之,建立典型矿床地球化学找矿模型是一个“源”→“动”→“储”→“变”的正演过程;而成矿区带内预测区的圈定及资源量的估算是一个“变”→“储”→“动”→“源”的反演追踪过程。

根据工作思路,在Ⅲ级成矿带上开展地球化学定量预测,制定的技术路线是地质、地球化学宏观与微观结合的过程(元素→矿石矿物→矿体→矿床→矿田→矿集区→矿带),也是地学与现代信息技术(GIS)学科交叉的过程,在这个过程中优选出一批具有找矿潜力的预测区,估算出具有一定可信度的资源量。其过程的核心可概括为:“建模”、“圈区”(异常识别和异常评价)和“算量”。

“建模”:地质-地球化学找矿模型的建立是区域找矿预测区圈定和资源量估算的基础,它是作为从已知到未知类比的“标准样本”,它的科学合理性与否直接关系到找矿预测区圈定和资源量估算的可信度。

“圈区”:从地球化学异常识别和评价的视角进行预测区的圈定,其关键在于元素组合选取的合理性和遵循成岩-成矿-成晕同系统性以及多参数联合示踪的指导原则。

“算量”:类比法和面金属量法为本次全国铜定量预测中两种资源量估算方法,与前人估算方法相比,其特色在于重视成矿作用“源”→“动”→“储”→“变”的研究和深入挖掘不同尺度勘查地球化学数据隐藏的成矿信息,强调成矿作用与地球化学信息的关联性分析。并首次把相似系数和剥蚀系数两个参数引入了估算资源量的计算公式中,使估算的资源量与客观实际更加吻合。

在以上研究思路指导下,通过五年多来的不断尝试和总结,获得了以下主要成果。

(1)以全国矿产资源潜力评价理论和方法为基础,在开展长江中下游和冈底斯铜成矿带地球化学

定量预测方法试点的基础上,提出了我国铜矿资源地球化学定量预测工作思路和方法技术,即以我国已有的1:20万(1:50万)区域地球化学数据为主,综合利用1:5万~1:1万中大比例尺的地球化学资料,以现代成矿、成矿理论为指导,以现代计算机技术为手段,以“源”→“动”→“储”为基本建模思路,在Ⅲ级成矿带的尺度上,充分研究成矿区带的基础地质、成岩成矿规律、理论地球化学及勘查地球化学特征,研究总结典型矿床(矿田)的异常特征,建立矿床(矿田)、成矿带的地球化学找矿模型,为预测区的圈定和资源量的估算提供可类比的依据。

(2)提出了我国铜矿地质-地球化学找矿模型建立的思路和方法,以前人(1980—2012年)资料归纳整理为主,建立了斑岩型、矽卡岩型、海相火山岩型、陆相火山岩型、铜镍硫化物型、海相黑色岩系型、海相杂色岩系型、陆相红色砂岩型及热液脉型9类25个铜矿床地质-地球化学找矿模型,为我国铜矿资源地球化学定量预测奠定了基础。

(3)指导了全国各省(市、自治区)开展了全国铜矿资源地球化学定量预测工作,在此基础上,汇总集成了全国各省(市、自治区)完成的铜矿地球化学定量预测成果,编制形成了全国铜矿资源潜力地球化学定量预测成果图,并圈定了1184个铜矿预测区,采用类比法和面金属量法,预测全国铜资源量为 $18\,258.9\times 10^4\text{t}$ 。

(4)通过全国铜矿地球化学定量预测,研究并初步总结了地球化学定量预测的理论、方法体系,开创了我国中比例尺地球化学定量预测的先河,为全国其他矿种的地球化学定量预测起到了示范作用,使我国勘查地球化学从定性走向定量预测迈出了重要的一步。

本书是依托矿产资源地球化学模型建立与定量预测研究项目编写的,始于2011年6月,历时2年,是全国各省铜矿资源地球化学定量预测的共同成果。本书由前言、六个章节和结束语组成,其中第一章为国内外研究现状,第二章为中国铜矿资源概况,第三章介绍了中国铜矿资源地球化学定量预测的理论基础、工作思路及方法技术,第四章为建立的25个中国重要铜矿地质、地球化学找矿模型,第五章为4个中国铜矿资源地球化学定量预测研究实例,第六章为中国铜矿资源潜力预测成果。其具体编写和分工如下:

前言、第一章、第二章和第三章主要由马振东、龚鹏、龚敏编写;第四章主要由龚鹏、龚敏、胡小梅、李娟、熊燃、赵波、金希、刘文博、仇一凡、张航、吴亚飞等编写和绘图;第五章主要由龚敏、龚鹏、熊燃、赵波、金希、胡小梅、李娟、仇一凡、宋圆圆、余根华等计算、绘图和编写;第六章主要由龚鹏、胡小梅、李娟、仇一凡、马振东等计算、绘图和编写;结束语由马振东和龚鹏编写。任天祥对全书地球化学部分的文章图逐一作了审阅,并提出修改建议。全书由马振东和龚鹏统稿。

本书研究自始至终是在中国地质调查局、全国矿产资源潜力评价项目办公室、中国地质调查局发展研究中心和化探资料应用汇总组领导和专家的指导下开展的,叶天竺、王全明、奚小环、牟绪赞、任天祥、邓志奇、谭永杰、向运川、施俊法、王永华、陈国光、张华、汪明启、龚庆杰、吴轩、刘荣梅等对本项目研究给予了大力支持和指导,提出了许多宝贵的建议和修改意见;中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所张振海、孔牧、徐仁廷及各大区、各省化探项目组负责人对研究工作的顺利开展也给予了积极的协作和诚恳的帮助(表1);中国地质大学(武汉)张锦高、王焰新、邢相勤、欧阳建平、周爱国、张克信、邢作云、曾键年、成秋明、郑有业、夏庆霖、李长安、鲍征宇、凌其聪、张志、刘修国、闭向阳、任利民、王德琿、贾先巧、刘大毛、涂玲等领导和老师提供了良好的科研工作环境和氛围;另外,在研究工作开展及本书编写过程中引用了前人(1980—2012年)专著、期刊论文、博士硕士论文、专题报告等大量资料,在此一并表示诚挚的感谢!

编著者

2013年5月

表 1 各省(市、自治区)参加研究工作的主要完成人员名单

省(市、自治区)名称	主要完成人员	报告名称
辽宁	李玉超、乌爱军	辽宁省矿产资源潜力评价——辽宁省铜地球化学定量预测成果报告
吉林	杨复顶、李任时	吉林省铜定量预测成果报告
黑龙江	那晓红、胡晓芳	黑龙江省矿产资源潜力评价——黑龙江省铜地球化学定量预测成果报告
河北	宫进忠、师淑娟、刘俊长、王轶轲	河北省矿产资源潜力评价——铜地球化学定量预测成果报告
河南	丁汉铎、张燕平、解庆锋	河南省铜矿地球化学定量预测成果报告
内蒙古	张青、马志超、樊永刚	内蒙古自治区铜矿地球化学定量预测成果报告
山东	韩健、邢宝石、韩轲	山东省化探资料应用成果报告
山西	张双奎、靳职斌	山西省铜地球化学定量预测成果报告
北京	程新彬、郭熙凤	北京市铜矿资源定量预测报告
天津	王卫星	天津市矿产资源潜力评价化探资料应用成果报告(第七章)
福建	夏春金、黄茜	福建省潜力评价化探资料应用成果研究报告(第七章)
江苏	杨用彪、黄顺生	江苏省(含上海市)铜矿地球化学定量预测专题报告
江西	江俊杰、张娟	江西省矿产资源潜力评价化探资料应用成果报告(第七章)
浙江	康占军、刘军保	浙江省铜地球化学定量预测报告
安徽	赵华荣、李明辉、盛岑	安徽省矿产资源潜力评价化探资料应用成果报告(第六章)
广东	严己宽、玉强忠	广东省铜矿地球化学定量预测报告
广西	钟志标、何儒芳	广西铜矿地球化学模型建立与定量预测研究成果报告
湖北	严向军、徐春燕、胡晓明	湖北省铜地球化学定量预测报告
湖南	苏正伟、黄逢秋	湖南省铜矿地球化学模型建立与定量预测研究成果报告
海南	何玉生、张固城	海南省铜矿地球化学模型建立与定量预测研究成果报告
云南	李开毕、杨功	云南省铜矿地球化学模型建立与定量预测研究工作报告
西藏	惠广领、杜光伟、陈惠强	西藏自治区矿产资源潜力评价——地球化学定量预测方法研究报告
贵州	胡从亮、袁义生、刘应忠	贵州省矿产资源潜力评价化探资料应用成果报告
四川	周雪梅、刘应平	四川省矿产资源潜力评价——铜矿资源量地球化学定量预测报告
重庆	刘应平、周雪梅、谭德军	重庆市矿产资源潜力评价——铜矿资源量地球化学定量预测报告
甘肃	刘元平、刘养雄、宋秉田、高洋	甘肃省矿产资源铜矿地球化学定量预测成果总结
宁夏	李新虎、王志强、王超	宁夏回族自治区铜地球化学定量预测报告
青海	许光、李明喜、任智斌	青海省铜地球化学定量预测报告
陕西	安兴	陕西省矿产资源潜力评价——铜资源量地球化学定量预测成果报告
新疆	周军、李惠、任燕	新疆矿产资源潜力评价——铜地球化学定量预测成果报告

目 录

第一章 国内外研究现状	(1)
第一节 国内外矿产预测方法概述	(1)
一、矿产资源预测研究现状	(1)
二、地球化学定量预测方法评述	(1)
第二节 找矿模型研究进展	(3)
一、找矿模型概况	(3)
二、地球化学找矿模型的历史沿革及问题	(3)
第二章 中国铜矿资源概况	(5)
第一节 铜矿床类型	(5)
第二节 铜矿床的时空分布特征	(7)
第三节 我国铜矿产品产销状况	(8)
第四节 我国铜矿资源的主要特点	(8)
第三章 中国铜矿资源地球化学定量预测的理论基础、工作思路及方法技术	(10)
第一节 铜矿资源地球化学定量预测的理论基础	(10)
一、铜矿资源地球化学定量预测的基本单元——Ⅲ级成矿区带	(10)
二、Ⅲ级成矿区带内成矿作用的“源”“动”“储”分析	(12)
三、成矿后环境演变过程中成矿元素的“变”与“不变”	(16)
第二节 铜矿资源地球化学定量预测的工作思路与方法技术	(24)
一、工作思路	(24)
二、方法技术	(25)
第四章 中国重要铜矿地质、地球化学找矿模型	(37)
第一节 建立地质、地球化学找矿模型的理论基础	(37)
一、建模的基本思路	(37)
二、建模的理论基础	(37)
三、建模的几个基本概念	(38)
四、地质、地球化学找矿模型的构建内容	(39)
第二节 地质、地球化学找矿模型实例	(40)
一、矿床地质特征	(41)

二、矿床地球化学特征	(43)
三、表生地球化学异常特征	(47)
四、成矿模式	(50)
五、重要控矿因素	(51)
第三节 我国重要Ⅲ级成矿区带的铜矿床地质、地球化学找矿模型	(52)
一、斑岩型铜矿床地质、地球化学找矿模型	(52)
二、矽卡岩型铜矿床地质、地球化学找矿模型	(137)
三、海相火山岩型铜矿床地质、地球化学找矿模型	(158)
四、陆相火山岩型铜矿床地质、地球化学找矿模型	(201)
五、铜镍硫化物型铜矿床地质、地球化学找矿模型	(210)
六、海相黑色岩系铜矿床地质、地球化学找矿模型	(233)
七、海相杂色岩系铜矿床地质、地球化学找矿模型	(261)
八、陆相杂色岩系铜矿床地质、地球化学找矿模型	(283)
九、热液型铜矿床地质、地球化学找矿模型	(290)
十、铜矿床地质、地球化学找矿模型中成矿作用分析(“源”“动”“储”)	(300)
第五章 中国铜矿资源地球化学定量预测研究实例	(312)
第一节 长江中下游铜多金属成矿带铜矿资源地球化学定量预测	(312)
一、矿田地质、地球化学找矿模型	(313)
二、矿带区域地质、地球化学特征	(318)
三、预测区的圈定与铜矿资源量的估算	(327)
第二节 西藏冈底斯铜多金属成矿带铜矿资源地球化学定量预测	(333)
一、矿田地质、地球化学找矿模型	(334)
二、矿带区域地质、地球化学特征	(341)
三、矿带地质、地球化学找矿模型	(354)
四、预测区的圈定与铜矿资源量的估算	(354)
第三节 香格里拉陆块铜多金属成矿带铜矿资源地球化学定量预测	(360)
一、香格里拉陆块铜矿床地质、地球化学找矿模型	(361)
二、香格里拉陆块矿带区域地球化学特征	(379)
三、预测区圈定依据与分级准则	(386)
四、香格里拉铜多金属成矿带铜矿资源量估算	(386)
五、香格里拉铜多金属成矿带铜矿预测区与云南省铜矿预测工作区对比	(388)
第四节 上扬子成矿省滇中层控型铜矿资源地球化学定量预测	(388)

一、滇中铜矿床地质特征	(388)
二、滇中铜矿床地球化学特征	(391)
三、滇中砂岩型铜矿区域地球化学特征	(394)
四、地质、地球化学找矿标志	(401)
五、预测区圈定准则及成矿远景区的圈定	(403)
第六章 中国铜矿资源潜力预测成果	(406)
第一节 汇编原则和基本思路	(406)
第二节 铜矿(参与资源量估算)资源储量的统计分布特征	(409)
一、铜矿床(参与资源量估算)数量分布特征	(409)
二、铜矿床资源储量分布特征	(410)
三、矿床规模分布特征	(412)
四、矿床类型分布特征	(414)
第三节 预测铜矿资源潜力的统计分布特征	(415)
一、预测区数量分布特征	(415)
二、预测资源量分布特征	(416)
三、预测区规模分布特征	(419)
四、预测类型分布特征	(420)
第四节 铜矿床(参与资源量估算)及其预测区的空间分布特征	(421)
第五节 铜矿资源预测结果的可信度评价	(424)
第六节 预测成果的量及时空分布特征分析	(426)
第七节 部分重要预测区成果剖析	(427)
一、昌都-普洱成矿带(Ⅲ-36)A-YC-2 预测区	(428)
二、东昆仑成矿带(Ⅲ-26)A1-YC-402 预测区	(429)
三、觉罗塔格-黑鹰山成矿带(Ⅲ-8)B-YC-26 预测区	(429)
四、东乌珠穆沁旗-嫩江成矿带——多宝山-黑河成矿亚带(Ⅲ-48-①)A-YC-2 预测区	(430)
五、突泉-翁牛特成矿带(Ⅲ-50)Cu-22-2 预测区	(431)
六、武功山-杭州湾成矿带(Ⅲ-71)A-YC-2 预测区	(432)
第七章 结束语	(433)
参考文献	(435)

第一章 国内外研究现状

第一节 国内外矿产预测方法概述

矿产资源一直是发展中国家工业化进程推进和发达国家经济持续发展的重要保障之一,统计数据表明,近年来我国各类大宗重要矿产品消耗量与日俱增且越来越依赖于国外进口,为尽快扭转这样的不利局面,必须在全球新一轮的矿产资源勘查热潮中做到立足国内,面向全球。那么如何对我国已取得的丰富地质资料进行综合研究,科学地评估其矿产资源的潜力呢?2006年中国地质调查局启动了全国矿产资源潜力评价项目,其重要目标之一就是构建出一套行之有效的评价技术体系,完成全国25个重要矿种的资源潜力的全面“体检”。

在此背景下,作为全国矿产资源潜力评价的重要组成部分之一的地球化学定量预测,我们在充分总结和吸纳前人矿产资源预测研究成果的基础上,提出了以现代成矿理论和地球化学成晕理论为指导,以区域地球化学调查数据为主,以现代信息技术(GIS)为手段,在Ⅲ级成矿带尺度上探索矿产资源地球化学定量预测的方法技术,其核心为地质、地球化学找矿模型的建立和定量预测方法的选取。

一、矿产资源预测研究现状

矿产资源预测的核心是研究矿产资源在某一地区“有没有”、“在哪里”以及“有多少”的问题,分别对应定性预测、定位预测和定量预测。我国矿产资源预测工作的快速发展始于20世纪80年代,经过不断吸收国外理论和一定自主创新后,近10年来取得了一大批丰硕的成果。尤其是伴随着GIS技术的成熟,逐渐朝数字化、自动化方向迈进。其中开发了一系列基于GIS平台或独立运行的应用软件评价系统,如具有代表性的MARK3(Duval J S, 2000; Lisitsin V, 2010)、Arc-WofE(Porwal A K, *et al*, 2006; 陈建平等, 2005)、MRAS(肖克炎等, 2006; 黄文斌等, 2011)、GeoDAS(成秋明, 2006)、MORPAS(秦东悦, 2010)、MRQP(Wang Y, *et al*, 2008)、MRPM(Chen Y L, 2004)、KCYC(叶水盛, 2007)、DPIS(百万成等, 2004)、单元簇等应用系统(张振飞等, 2001)。

上述开发的矿产资源预测系统主要是以数理统计理论为基础,在数据源上注重多元地学信息的融合(地质矿产、地球物理、地球化学、遥感、重砂等),预测数学模型以各类证据权模型占主导地位,大部分是基于GIS平台二次开发而成,其目标主要应用于区域远景找矿区的优选和资源潜力的定量评价。其中基于MRAS、GeoDAS和MORPAS已经在国内外发表了诸多研究成果,特别是MRAS和GeoDAS在全国矿产资源评价项目中已被列为矿产预测的重要辅助决策系统(娄德波等, 2010a; 成秋明等, 2009)。最近“Ore Geology Reviews”期刊出版了关于资源勘查和定量估算的论文专辑(Porwal A K, *et al*, 2010),汇编了国外在矿产资源预测中的最新研究成果。

二、地球化学定量预测方法评述

地球化学定量预测属于矿产资源预测研究的一部分,是以不同尺度地球化学调查数据为主,对相应尺度的矿产资源潜力进行定性和定量评价。早在20世纪美国学者就发现美国本土26个元素的地壳丰度与可采储量的吨位呈线性关系(McKelvey V E, 1960),之后很多学者跟进相关的研究并做了大量卓有成效的工作,取得了众多成果(Garrett R G, 1978; Mookherjee A, *et al*, 1994; Nishiyama T, *et al*, 1995)。前苏联学者索诺沃夫很早就研究了分散晕内金属量的计算、位移的估计以及含矿程度的评价(阮天健等译,

1964),并创立了估算资源量的面金属量法;之后,欧美学者建立了应用于某一岩石类型单元、区域及地质省的丰度关系模型(Celenk O,*et al*,1978);我国学者谢学锦和刘大文等提出了地球化学块体法(谢学锦等,2002;刘大文,2002),从巨型矿床有巨量成矿物质供应的角度,用地球化学块体代表巨量物源供应的地区,给出了块体内矿产资源定量估算的方法,地球化学块体法针对我国不同地区和不同矿种进行了较为广泛的应用(刘大文等,2005;刘长征等,2011)。

需要指出的是,无论哪一种地球化学定量预测方法,均需要扎实的成矿地质基础和对成矿规律的深刻理解,只有建立在这样的基础上,才可能使挑选的各类预测变量符合或接近成矿的客观实际。近年来通过西藏冈底斯成矿带的找矿实践表明,在西部工作程度极低的地区可以优选出少量相互关联、目标一致、最能揭示某种类型成矿本质特征的关键信息组合,就可能导致该类型矿床被发现(郑有业等,2009)。而区域1:20万、1:50万水系沉积物测量地球化学异常是关键信息组合之一,因此,预测时必须强调变量的关联性 & 关键信息的合理组合。

目前丰度法、面金属量法、地球化学块体法是勘查地球化学界中应用最广泛的三种定量预测方法。从表1-1中获知,三种方法涉及的预测矿种较多,研究尺度跨越较大,计算原理均为相似类比,资源量估算公式也均得到不同程度的修正和完善。三种方法的差异之处在于丰度法要求矿床的勘探数据最为详细(储量、相对密度等),其次是面金属量法,最后是地球化学块体法;丰度法估算对象可从矿田→矿带→成矿省,乃至全球,而面金属量法和地球化学块体法主要应用于矿田和矿带尺度;面金属量法已被集成至MRAS系统中(娄德波等,2010a)。近年来有学者在GeoMDIS2000系统中开发了地球化学块体谱系树图自动绘制方法(周晓东等,2007),通过谱系树图自动绘制的实现,大幅度提高了出图结果的工作效率和精确度,但仍未开发出集地球化学块体筛选、谱系树图绘制和资源量估算为一体化的应用程序。

表 1-1 地球化学定量预测方法分类

预测方法	预测矿种	研究区	主要数据特征	公式是否修正	文献来源
丰度法	Cu	安徽罗昌河-月山	勘探数据、水系沉积物测量		赵鹏大等,1994 (1980年预测)
	Fe	攀西钒钛磁铁矿地区	勘探数据、岩体Fe平均含量等	是	杨本瑞等,1985
	Mn	中国陆壳	储量、丰度等	是	黎彤,1992
	Cu、Mo	玉龙斑岩铜矿带	勘探数据、2条1:20万岩石测量剖面	综合	罗怀松,1992
	Sn、W等	湘南	勘探数据、1:20万水系沉积物测量	是	罗长清,1993
	Au	刺猬沟-苍林	勘探数据、1:5万水系沉积物测量	是	裴尧,2008
面金属量法	Ag	大兴安岭东南部	勘探数据及地球化学数据等	是	叶水盛等,2008
	斑岩型Cu	东天山地区	1:20万水系沉积物测量	是	丁建华等,2007; 丁建华等,2010
	Cu、Pb、Zn等	香格里拉地区			卢映祥等,2010
	铜镍型Cu	东天山地区		是	娄德波等,2010b
地球化学块体法	Sn	中国			刘大文,2002
	W	中国华南			谢学锦等,2002
	B	辽东地区		是	周永恒等,2011

尽管地球化学块体法已被作为全国重要矿产总量预测的五种方法之一(肖克炎等,2007),但是在实际应用中仍需进一步探索和完善以下几个方面的问题:

(1)地球化学块体法的初衷是对大型或巨型矿床而提出的,这对块体的面积提出了一定的要求($>1\,000\text{km}^2$),其决定因素不仅在于成矿物质的大量供应需要尺度的支撑,而且还取决于采样密度(一个

组合样在 1 : 20 万水系沉积物测量中代表 4km^2); 因此, 地球化学谱系树的划分只有在一定尺度上进行才能和采样密度相匹配, 这样资源量的估算更具参考价值。

(2) 成矿率参数的计算主要受矿种、矿床类型、块体级别、景观条件、勘查程度等因素的制约, 因此, 必须科学合理地计算成矿率, 这就需要利用已知矿床最新的储量资料和地球化学块体内“原生态”的数据。

(3) 块体级别的划分需符合客观实际, 块体级别的划分尚无细则, 尤其是块体下限、空间数据的插值参数怎样设置最佳, 需要反复试验后而定; 地球化学块体划定不仅仅从几何形态上区分, 更要注重结合成矿地质背景、成矿机制及多元素共存的实际情况, 尝试进一步区分不同成因类型的块体和多元素叠合的块体是很有必要的, 单纯考虑成矿物质质量的供应有一定的局限性。

(4) 由于地球化学块体法本质上也是基于相似类比的原理, 因此预测时需要注意预测深度和预测矿床类型的合理外延, 尤其是对于预测深度而言, 并非所有的矿种或者地区的预测深度均能高达 1km , 只有与实际研究区的矿床类型、预测矿种的勘探现状、自然景观等因素结合起来, 选取一个合理的预测深度, 这样预测结果可能更具说服力。另外, 地球化学块体法仅适用于成矿物质的源区处于所研究的地球化学块体内, 然而不少矿床的物源是深源的 ($>1\text{km}$), 成矿作用基本不受 1km 之内表壳岩系元素丰度的制约, 这样对该方法应用的矿床类型应有所限制。

综上所述, 无论是丰度法, 还是面金属量法和地球化学块体法, 均需在实践过程中不断完善, 特别是计算参数的补充和修正。因此, 如何从区域地球化学数据入手, 充分提取其中有利的成矿信息? 如何通过这些有利的成矿信息进行预测区的优选和资源量的估算? 如何对已有估算方法进一步完善和修正? ……对于这些问题的深入探讨, 将会促进地球化学定量预测工作的发展具有重要的现实意义和科学价值。五年多来, 项目组通过全国铜矿资源地球化学定量预测方法技术的研究实践, 总结出一套研究思路、评价技术和估算方法, 特别是对资源量的计算方法中的参数进行了适当的修正和完善。

第二节 找矿模型研究进展

一、找矿模型概况

找矿模型在成矿理论研究、矿产勘查及资源预测评价中具有十分重要的地位。我国不同学者从各自的视角表述了其内涵: 施俊法等认为找矿模型是以找矿为目的, 包括概述、地质特征、矿床成因和找矿标志等内容构成的有机整体(施俊法等, 2011), 并出版了《世界找矿模型与矿产勘查》专著。毛景文等把找矿模型和成矿模型统称为矿床模型, 是矿床形成的地质背景、过程、时空分布规律和找矿标志的高度概括(毛景文等, 2012)。按照不同的区分原则对找矿模型进行分类: 如按研究内容将找矿模型分为地质找矿模型、地球物理找矿模型、地球化学找矿模型、遥感找矿模型和地质-地球物理-地球化学找矿模型等; 有的按研究尺度分为区域找矿模型、矿田找矿模型和矿床找矿模型等; 还有按维数分为二维找矿模型和三维找矿模型等。

项目组在 2008—2012 年进行我国铜矿资源地球化学模型建立与定量预测研究过程中, 充分认识到地质-地球化学找矿模型的建立是区域找矿预测区圈定和资源量估算的基础, 是从已知到未知类比过程中的“标准样本”, 关系到找矿预测区圈定和资源量估算的可信度, 在矿产资源潜力评价中占有极其重要的地位。

二、地球化学找矿模型的历史沿革及问题

前人是以地球化学异常特征为主要内容来构建找矿模型。侧重勘查地球化学的原生晕分带理论, 针对 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Mo 等矿种建立了众多矿床原生晕找矿模型, 列出了原生晕的轴向(垂向)、水平分带序列, 提出了判别剥蚀深度的元素组合比值等指标, 其目的主要应用于矿区及外围盲矿的预测。

刘泉清等 1983 年提出了成矿-成晕地球化学模式(刘泉清等, 1983), 他们总结了成矿和成晕的统一性、多元性、系列性与层次性的特点; 然后, 吴承烈等进一步提出了“地球化学概念模型”和“地球化学异常

模式”的术语及二者间的异同(吴承烈,1993;吴承烈等,1998),即“异常模式”是指对地球化学异常的形态、结构、元素组合、含量变化等各种特征所做的客观描述,而“概念模型”是指在一系列实测的矿床地球化学异常模式基础上,按矿种和类型进行综合、归纳,以文字、图件、表格等形式对某类矿床地球化学特征的概括。

除从找矿模型概念的角度探讨外,不少研究者还从大量找矿实践中汇编了众多典型矿床的原生地球化学找矿模型(模式)研究范例,如早期有色金属工业总公司北京矿产地质研究所编的10个有色及贵金属矿田(床)地球化学异常模式(中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所编,1987),接着欧阳宗圻等主编的15个《典型有色金属矿床地球化学异常模式》(欧阳宗圻等,1990),以及李惠编著的《石英脉和蚀变岩型金矿床地球化学异常模式》(李惠,1991);至90年代,邹光华等汇编了绿岩带型、变质碎屑岩型、沉积岩系及火山-次火山岩型4种类型共计65个金矿的找矿模型实例(邹光华等,1996),吴承烈等主编了斑岩型、矽卡岩型、复合型、铜镍硫化物型、海相火山岩型、沉积变质热液改造型及热液型7类铜矿床的《中国主要类型铜矿勘查地球化学模型》(吴承烈等,1998)和同年李惠等编著出版的《大型、特大型金矿盲矿预测的原生叠加晕模型》(李惠等,1998);2011年李惠等又系统总结了以金矿为主的构造叠加晕找矿模型最新的成果(李惠等,2011);2006年刘崇民列举了Cu、Pb-Zn、Au等矿种的原生地球化学异常模式(刘崇民,2006)。除原生地球化学异常模式的系统总结外,2002年史长义等系统论述了13个矿田2个矿带(近40个铜矿床)的区域地质、地球化学异常结构模式(史长义等,2002)。

从上述地球化学找矿模型的历史沿革中发现:

(1)以往所建立地球化学找矿模型由于缺乏成岩-成矿-成晕同系统建模的思想,往往侧重成晕部分,忽略了成晕母体的成岩、成矿作用的系统研究。

(2)内生成矿作用和表生风化作用的关联性研究不够,缺少内生与表生之间“量(成矿元素丰度)、质(赋存形式)、动(成矿物质活化迁移的动力机制和有关的物理化学环境)”的有机联系,局限于土壤和岩石测量的中大比例尺地球化学数据的多元统计分析;另外,示踪的元素种类偏少,与1:20万水系沉积物测量的39种元素不配套,而且以往测试分析方法迥异和分析测试精度参差不齐。

(3)缺乏多介质、多参数指标的空间统计分析和地球化学异常的成因,大部分是以展示元素含量空间变化的地球化学图为主,较少从成矿作用“源”“动”“储”的视角解释评价异常形成的内在机制。

(4)建立的找矿模型多是描述性的地球化学异常模型,综合矿床地质、成岩与成矿机制、理论地球化学和勘查地球化学等内容为一体的找矿模型研究较少,这势必降低了预测区的圈定和资源量估算的可信度。

第二章 中国铜矿资源概况

我国地处欧亚板块、印度洋板块和太平洋板块三大板块的交汇处,加之,世界三大铜成矿域(古亚洲成矿域、滨太平洋成矿域、特提斯-喜马拉雅成矿域)均通过我国,因此地质构造复杂、铜成矿条件多样、矿床类型齐全。

第一节 铜矿床类型

据赵一鸣(2006)、黄崇轲(2001)等统计表明,全球各种主要铜矿类型在我国境内均已发现,包括斑岩型、矽卡岩型、海相火山岩型、陆相火山岩型、铜镍硫化物型、海相杂色岩系型、陆相杂色岩系型、海相黑色岩系型(Sedex)和热液型等(表 2-1)和本次研究的我国 25 个各类典型矿床的分布见图 2-1。其中斑岩型、矽卡岩型和海相火山岩型铜矿床为我国主要的工业类型,其储量合计占全国各类铜矿床总储量的 80%左右(王全明,2005)。

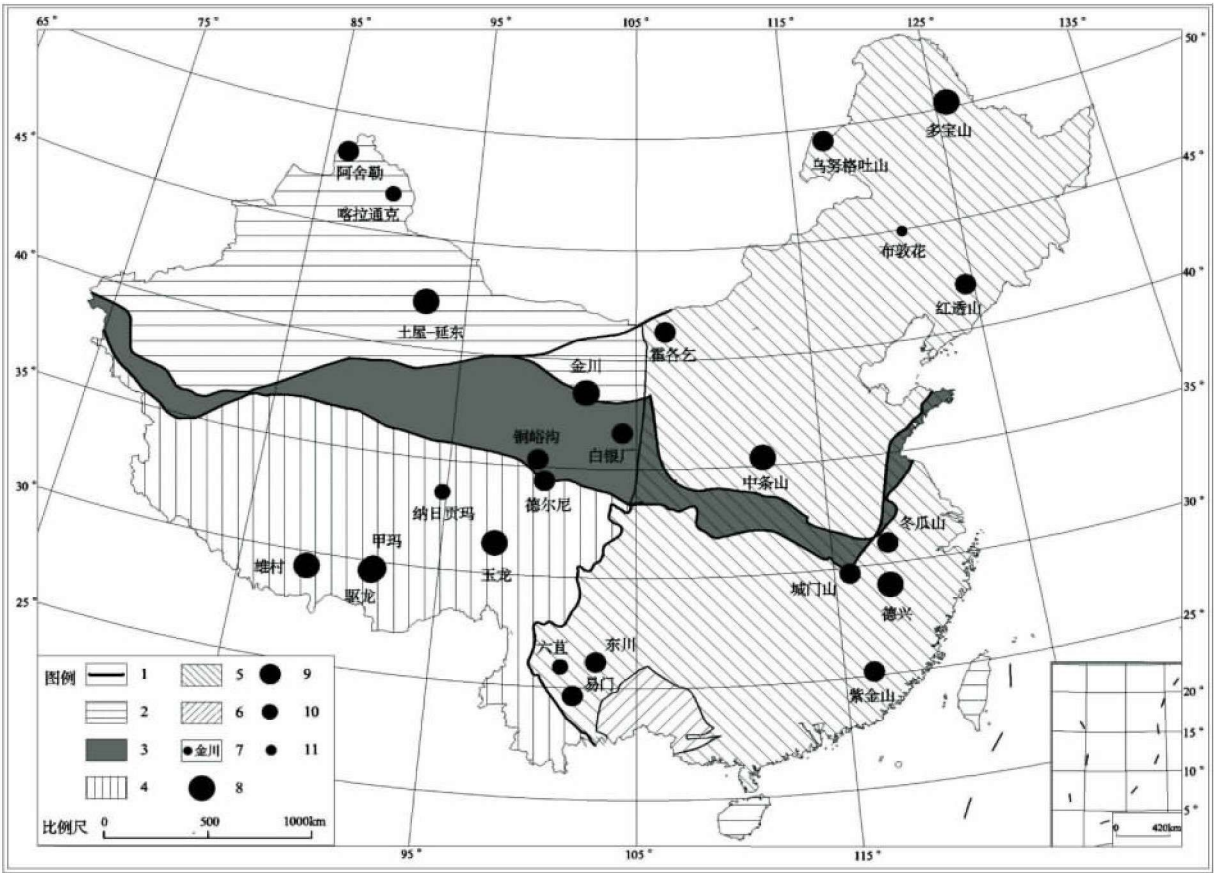


图 2-1 25 个典型铜矿床的空间分布

1—成矿域界线;2—古亚洲成矿域;3—秦祁昆成矿域;4—特提斯成矿域;5—滨太平洋成矿域;
6—受特提斯影响地区;7—铜矿床名称;8—超大型;9—大型;10—中型;11—小型

表 2-1 我国铜矿床的主要类型及主要地质特征(据赵一鸣,2006;任天祥等,1998 修改补充)

矿床类型	地质背景	含矿围岩	围岩蚀变	金属矿物组合	成矿元素	伴生元素	典型矿床
与中酸性侵入岩有关	斑岩型铜矿床	两大构造单元汇聚部位及构造隆起单元的边部,矿田(床)受复合构造控制	钙碱性到碱性钙性和碱性系列的斑岩及硅铝质外接触带岩石	具强烈的面型钾化带-石英绢云母化带-泥化带-青磐岩化带蚀变	黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、少量方铅矿、闪锌矿等	Cu(Mo) Au、Ag、Bi、Mo、Re、Pb、Zn、Se、Te	江西德兴,西藏玉龙、驱龙,云南普朗,黑龙江多宝山
	矽卡岩型铜矿床	板内构造岩浆活动带,矿带受深大断裂控制	深源中酸性侵入岩与碳酸盐岩的内接触带或附近	强烈钙镁矽卡岩化、硅化、大理岩化、碳酸盐化	黄铜矿、辉钼矿、磁铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿、辉铜矿、闪锌矿	Cu、W、Sn、Mo Fe、Au、Ag、Pb、Zn、Bi、Se、Te	湖北铜绿山,江西城门山、武山,安徽铜官山
海相火山岩型	与绿岩有关的黄铁矿型矿床	洋脊、弧后拉张盆地裂陷扩张带	镁铁-超镁铁岩(蛇绿岩)-基性火山岩系列	强烈碳酸盐化、蛇纹石化,其次为透闪石化、硅化、绿泥石化、滑石化、金云母化	主要为黄铁矿,次为黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、磁铁矿、(钴镍黄铁矿)赤铁矿等	Cu、Zn; Cu、Co Au、Ag、Cd、Se,次要 Ga、In、Ni、Tl、Te、Ge、Pt 族元素等	辽宁红透山,青海德尔尼
	与细碧角斑岩有关的黄铁矿型矿床	岛弧带、弧后盆地大陆边缘裂谷带	偏碱性海相火山岩、细碧角斑岩及流纹-安山-玄武岩系列	强硅化、绿泥石化、绢云母化、钠长石化、碳酸盐化	主要为黄铁矿,其次为黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、白铁矿	Cu; Cu、Zn; Cu、Zn、Pb Au、Ag、Bi、Pb、Zn、Cd	新疆阿舍勒,甘肃白银厂,云南大红山,浙江西裘
陆相火山岩型矿床(中酸性陆相火山岩型)	火山断陷盆地中火山岩建造,受深大断裂控制	富含钾质的英安斑岩-流纹岩系列	强烈的硅化、石英-明矾石化、石英-迪开石化、石英-绢云母化、冰长石化等	自然金、黄铁矿、黄铜矿	Cu、Au	Ag、Bi、Pb、Zn、Cd	福建紫金山
与基性-超基性有关的铜镍硫化物矿床	沿古大陆边缘、陆内裂谷或陆内深大断裂分布拉张环境中,地幔岩上涌的产物	为分异良好的高镁铁质基性-超基性杂岩体	强烈蛇纹石化、滑石化、次闪石化、绿泥石化、金云母化、绢云母化、碳酸盐化等	磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿	Cu、Ni、(Co)	Au、Ag、Co、Cr、Pt、Pb、Se、Te	甘肃金川,新疆克拉通克,吉林红旗岭
海相杂色岩系铜矿床	受陆内裂谷(坳拉槽)或隆起区的边缘海槽控制	碳酸盐岩建造,粉砂岩、砂页岩、砂岩等细碎屑岩建造	弱硅化、碳酸盐化、绿泥石化、重晶石化等	辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿	Cu	Au、Ag、Pb、Zn	云南东川,云南易门
陆相杂色岩系铜矿床	产于中生代沉积盆地(云南滇中盆地、湖南沅陵盆地、衡阳盆地及云南兰坪-普洱盆地)	陆相杂色碎屑岩系	蚀变弱,紫色岩石褪色化、碳酸盐化	辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、辉银矿、自然银	Cu、Ag	Au、Pb、Zn(U)	云南六苴,湖南麻阳九曲湾,湖南柏坊
海相黑色岩系铜矿床(Sedex 型)	产于裂谷或裂陷槽(中元古代)	海底热水沉积建造(碳质板岩、重晶石、碳酸盐岩等)	硅化、电气石化、透辉-透闪石化、白云母化、阳起石化、绿泥石化、碳酸盐化	黄铜矿、硫黄铁矿、黄铁矿、斑铜矿、辉铜矿、硫钴矿、钴镍黄铁矿	Cu、Pb、Zn	Ag、As、Au、Co、Mo、Se	内蒙古霍各乞,山西中条山,青海铜峪沟
热液型铜矿床	位于线性构造(断裂破碎带,不整合面等)地段	硅铝质(碎屑岩、中酸性火山岩、花岗岩类等)岩石	蚀变范围窄,硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、萤石化等	黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉银矿	Cu、Pb、Zn	Pb、Zn、Au、Ag、Mo、W	内蒙古布敦花,江西朱溪,福建管查,广东钟丘洋