

以“智慧” 改变地勘

——信息风云下的前沿探索与实践

Smart Prospecting in Geological Field:
A Frontier Exploration of Practices in Information Era

宋震 吴龙华 陈剑 周超 编著



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

以“智慧”改变地勘

——信息风云下的前沿探索与实践

宋震 吴龙华 陈剑 周超 编著



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

图书在版编目(CIP)数据

以“智慧”改变地勘:信息风云下的前沿探索与实践/宋震,吴龙华,陈剑,周超编著. —武汉:
中国地质大学出版社,2014.4
ISBN 978-7-5625-2986-6

I. ①以…

II. ①宋…②吴…③陈…④周…

III. ①信息技术-应用有色金属矿石-找矿-研究

IV. ①TD952-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 062392 号

以“智慧”改变地勘——信息风云下的前沿探索与实践 宋震 吴龙华 陈剑 周超 编著

责任编辑:陈琪 舒丽霞 阎娟

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:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:384 千字 印张:15

版次:2014 年 4 月第 1 版

印次:2014 年 4 月第 1 次印刷

印刷:湖北新新城际数字出版印刷技术有限公司

ISBN 978-7-5625-2986-6

定价:118.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

我国目前已进入“十二五”科学发展的关键时期,为实现地质找矿重大突破、缓解资源瓶颈制约、提高国内资源保障能力,国土资源部相继出台了《国土资源部关于构建地质找矿新机制的若干意见》《国土资源部关于促进国有地勘单位改革发展指导意见》和《国土资源部关于建立健全矿业权有形市场的通知》,构建了以“公益先行,基金衔接,商业跟进,整装勘查,快速突破”的新机制,提出了全国地质找矿三年有重大进展、五年有重大突破、八年重塑地质矿产勘查开发格局的“358”目标。因此,在我国步入“十二五”关键发展时期,如何贯彻落实国土资源部提出的地质找矿“358”行动,探索和实践地质找矿新机制落地的方法途径和政策措施,研究新技术新方法改善和提升传统地质找矿工作,提高深部找矿的技术水平,已成为找矿科研工作的重点攻关领域。同时,随着地质找矿勘查难度的日益增大,找矿工作重心已经转向寻找隐伏矿、发现难识别矿。矿产勘查的成功越来越依赖于深入的成矿规律研究和科学的矿产资源预测评价理论与方法。矿产勘查已从直接找矿进入基于理论和新技术的科学找矿阶段。

准确把握这一现状后,2010年,江苏省有色金属华东地质勘查局(以下简称华东有色)正式提出“智慧勘探”理念,发出了“以信息化推动勘查技术革新、全面快速提升地质找矿水平”的动员令。通过在传统地质找矿工作方法的基础上吸收借鉴国外先进的定量分析找矿技术方法,在一线地勘单位中开展地质找矿工作全流程信息化与智能化平台建设,对我国地勘单位现有地质找矿理念和工作方式进行创新。经过三年时间的自主研发,智慧勘探系统已形成数字采集系统、地质数据综合管理系统、地质找矿业务综合服务系统等三大系统研发成果,实现野外数据动态采集、地质数据标准化入库与规范化管理、综合地质研究、资源储量估算、勘探设计、

成果编制等地质找矿工作全流程信息化和智能化,从而整体提升地质找矿工作的规范性,加强地质资料的一体化集成与统一管理,提高地质找矿质量和勘探精度,降低风险,为地勘单位开展全球地质找矿与矿业开发工作提供了技术支撑。

本书是对华东有色三年来地质找矿业务信息化建设经验与成果的总结,共由以下三部分组成。

“上篇——地质找矿理念的创新:从定性到定量”,主要总结我国传统地勘单位地质找矿工作方式中的问题,提出通过智慧勘探系统研发实现地质找矿信息化、定量化、智能化,全面提升地质找矿效率的主题思想。同时,对国内外现有的找矿定量分析理论以及支撑上述理论的信息技术方法等进行回归和分析。

“中篇——地质找矿工作模式的创新:从手工到智能”,提出地勘单位地质找矿工作信息化、定量化、智能化实现思路与智慧勘探系统设计方案。对其中涉及的野外地质数据动态回传、实时处理与远程指导,地质三维建模与可视化分析,矿床资源储量标准估算与预可研,地质找矿智能化分析及定量预测等关键技术进行原理分析及详细设计。

“下篇——创新理念与模式的实施:从研发到应用”,从实例出发,系统讲述了智慧勘探系统在安徽马头铜钼矿区深部找矿、福建尤溪丁家山铅锌矿床深部资源定量预测、云南播卡铜矿资源潜力评价等地质找矿工作中取得的应用效果。

作 者

2013年6月

上篇 地质找矿理念的创新:从定性到定量

1 绪 论	(3)
1.1 我国传统矿产勘查行业面临的机遇与挑战	(3)
1.2 国内地质工作信息化现状分析	(4)
1.2.1 我国公益性地质工作信息化研究进展概述	(4)
1.2.2 我国地质勘查信息系统建设概述	(4)
1.3 “智慧勘探”助推地勘单位地质找矿能力提升	(5)
1.4 小结	(6)
2 国内外定量找矿理论与方法	(7)
2.1 矿产资源定量评价理论	(7)
2.1.1 “三部式”矿产资源评价方法	(7)
2.1.2 “三联式”数字找矿方法	(14)
2.1.3 基于“奇异性—多重分形”的非线性找矿方法	(17)
2.2 地质矿产资源潜力评价	(19)
2.2.1 矿产资源潜力区的概念	(19)
2.2.2 矿产资源评价中的地学信息	(20)
2.2.3 信息关联和转换	(23)
2.2.4 信息量化与集成	(23)
2.2.5 矿产资源潜力评价	(24)
2.3 小结	(25)
3 国内外支撑定量分析的信息技术	(26)
3.1 地质信息集成管理技术	(26)

3.1.1	地质资料分类	(26)
3.1.2	地质资料数字标准化总体路线	(28)
3.1.3	地质资料数据库分层结构	(28)
3.2	地质数据处理与成果编制技术	(29)
3.2.1	单工程矿体圈定	(29)
3.2.2	剖面矿体连接	(29)
3.2.3	基于传统方法的资源储量估算	(30)
3.2.4	基于三维块体模型的资源储量估算	(31)
3.2.5	地质成果自动化编制	(31)
3.3	三维地质建模与可视化技术	(32)
3.3.1	勘查(探)工程建模	(32)
3.3.2	三维地质建模	(33)
3.3.3	三维地质模型可视化分析	(36)
3.4	小结	(37)

中篇 地质找矿工作模式的创新:从手工到智能

4	地质找矿全流程智能化信息平台建设	(41)
4.1	智慧勘探系统总体架构	(41)
4.2	智慧勘探系统特点	(42)
4.3	系统功能与工作机制	(43)
4.3.1	野外数据采集系统	(44)
4.3.2	地质数据综合管理系统	(45)
4.3.3	地质找矿业务综合服务系统	(52)
4.4	小结	(58)
5	地质数据野外动态采集、实时处理与远程指导	(59)
5.1	野外地质资料的数字化采集技术	(59)
5.1.1	侧重于数据管理与处理的软件	(59)
5.1.2	涉及野外数据采集的软件	(61)
5.2	基于手持智能终端的野外数据动态采集过程	(62)
5.2.1	野外数据采集系统总体架构	(62)
5.2.2	野外地质数据的标准化采集	(63)

5.2.3	野外采集资料的远程回传与人员定位	(63)
5.2.4	地质研究成果的实时反馈与远程指导	(64)
5.3	小结	(65)
6	地质三维建模与可视化分析	(66)
6.1	面向地质矿产勘查的数字矿床建模技术	(66)
6.1.1	数字矿床建模流程	(67)
6.1.2	单工程矿体圈定	(67)
6.1.3	基于语义识别的矿体剖面自动连接	(71)
6.1.4	矿体空间模型的建立	(72)
6.1.5	矿体属性模型的建立	(73)
6.2	矿床资源储量的标准化统计	(77)
6.2.1	传统法矿床资源储量的标准化统计	(78)
6.2.2	克里格法矿床资源储量的标准化统计	(79)
6.3	矿区预可行性研究定量评价	(79)
6.3.1	矿区预可行性定量化研究评价技术	(80)
6.3.2	矿区预可行性定量化评价流程	(80)
6.3.3	矿区预可行性研究报告的自动化生成	(82)
6.4	小结	(82)
7	地质统计学矿床资源储量估算技术	(83)
7.1	品位数据的预处理	(83)
7.1.1	区域化变量选择	(83)
7.1.2	特高品位的处理	(84)
7.1.3	不同性质样品的处理	(85)
7.1.4	缺失样品的处理	(85)
7.1.5	样品的组合及统计分布特征	(86)
7.2	实验变异函数计算	(87)
7.2.1	变异函数的定义	(87)
7.2.2	变异函数的性质	(87)
7.2.3	引起区域化变量之间品位变异的因素	(88)
7.2.4	影响实验变异函数的因素	(88)
7.3	变异函数的理论模型	(96)
7.3.1	常用的变异函数拟合模型	(96)

7.3.2	变异函数结构套合的方法	(97)
7.4	矿床品位的克里格模拟	(98)
7.4.1	普通克里格法	(99)
7.4.2	指示克里格法	(100)
7.4.3	评价模型精确度的指标	(102)
7.5	小结	(102)
8	地质找矿智能化分析及定量预测	(103)
8.1	矿床智能化分析与预测总体实现思路	(103)
8.2	综合控矿地质模型构建方法	(105)
8.3	控矿地质因素的定量提取技术	(107)
8.3.1	地质控矿要素定量提取的主要思想	(107)
8.3.2	地质控矿要素定量提取流程设计	(109)
8.4	矿床成因智能化分析	(115)
8.4.1	矿床成因智能化分析的关键技术	(115)
8.4.2	矿床模式认知库建设的主要思路	(116)
8.4.3	矿床模式认知库地质成矿要素的分类	(118)
8.5	深部矿床资源的定量预测评价	(118)
8.5.1	矿化空间分析的目的	(119)
8.5.2	隐伏矿体立体定量评价模型	(120)
8.6	小结	(121)

下篇 创新理念与模式的实施:从研发到应用

9	“智慧勘探”应用案例 1:安徽池州马头铜钼矿深部找矿	(125)
9.1	区域与矿区地质概述	(125)
9.1.1	区域地质背景	(125)
9.1.2	矿床地质特征	(125)
9.2	矿区地质勘探数据库构建	(128)
9.2.1	勘查区地形地质数据	(128)
9.2.2	物化探资料处理	(129)
9.2.3	地质勘探资料处理	(129)
9.3	数字矿床模型构建	(130)

9.3.1	主要建模流程	(130)
9.3.2	控矿地质模型	(132)
9.3.3	下冲矿段钼矿体三维模型	(133)
9.4	数字矿床模型成果应用	(134)
9.4.1	马头铜钼矿区钼空间品位分布模拟	(134)
9.4.2	基于证据权法的地质找矿辅助评价	(140)
9.4.3	三维勘探辅助设计技术在本矿区的应用	(144)
9.5	小结	(144)
10	“智慧勘探”应用案例 2:福建尤溪丁家山铅锌矿床深部资源定量预测	(146)
10.1	区域与矿区地质概述	(146)
10.1.1	区域地质概述	(146)
10.1.2	矿田地质构造	(147)
10.1.3	矿区地质概况	(147)
10.1.4	矿床地质特征	(148)
10.2	矿床控矿条件分析	(149)
10.2.1	矿床成因分析	(149)
10.2.2	找矿标志分析	(150)
10.3	矿区找矿概念模型构建	(151)
10.3.1	各地质要素与成矿之间的关系	(151)
10.3.2	矿体定位规律与定位预测概念模型	(153)
10.4	矿区空间地质数据库构建	(154)
10.4.1	地质资料的标准数字编码	(154)
10.4.2	地质勘探工程的数字化	(155)
10.4.3	空间地质数据库构建	(155)
10.5	矿床三维地质建模	(155)
10.5.1	面向业务的地质矿产三维建模流程	(155)
10.5.2	矿区三维勘探工程模型构建	(156)
10.5.3	矿区三维地形地质模型构建	(156)
10.5.4	矿区三维铅锌矿体实体模型构建	(156)
10.5.5	矿区三维地层模型构建	(161)
10.5.6	矿区断层模型的构建	(162)
10.5.7	地质界面模型的建立	(163)

10.6	矿床空间品位分布模拟	(163)
10.6.1	矿床分布特征	(163)
10.6.2	三维地质模型块体化	(165)
10.6.3	Pb-Zn 品位的空间模拟	(166)
10.6.4	Pb-Zn 品位分布的空间拟合	(171)
10.7	矿床控矿因素定量分析	(180)
10.7.1	矿床控矿因素分析研究区定义	(181)
10.7.2	控矿模型定量评价	(182)
10.7.3	控矿评价模型构建	(189)
10.8	矿床深部定量预测	(190)
10.8.1	矿床深部预测研究区定义	(190)
10.8.2	矿床深部定量预测	(194)
10.8.3	预测成果及统计	(197)
10.8.4	预测结果统计	(198)
10.8.5	预测成果图件自动化编制	(198)
10.9	小结	(203)
11	“智慧勘探”应用案例 3:云南东川人占石铜矿床深部资源潜力评价	(204)
11.1	矿区地质概况	(204)
11.1.1	矿区地层特征	(204)
11.1.2	构造特征	(206)
11.1.3	岩浆岩	(207)
11.2	矿床地质特征	(207)
11.2.1	控矿构造	(207)
11.2.2	矿体特征	(207)
11.2.3	成矿规律	(208)
11.3	三维数字矿床构建	(208)
11.3.1	基础数据处理	(208)
11.3.2	地形地质模型	(209)
11.3.3	勘探工程模型	(209)
11.3.4	矿区地层模型	(209)
11.3.5	矿区构造模型	(211)
11.3.6	矿区主要岩体模型	(211)

11.3.7 铜矿体模型	(213)
11.4 找矿数字模型构建与分析	(214)
11.4.1 找矿概念模型构建	(214)
11.4.2 成矿信息三维可视化分析	(214)
11.5 矿产资源三维预测与评价	(216)
11.5.1 预测模型的建立	(216)
11.5.2 三维证据权预测	(217)
11.5.3 远景区圈定	(218)
11.6 小结	(219)
主要参考文献	(220)

上

篇

地质找矿理念的创新：

从定性到定量

1 绪 论

长期以来,地勘行业作为我国工业化建设的基础性、保障性行业,受管理理念、经营条件和职工素质的限制,存在着信息渠道闭塞、科技水平滞后、管理方式老套等诸多问题。在本章中作者将主要分析我国传统地勘单位地质找矿工作面临的机遇与挑战,总结目前我国地勘单位地质勘查业务信息化研究现状,提出通过智慧勘探系统研发实现地质找矿信息化、定量化、智能化,全面提升地质找矿效率的主题思想。

1.1 我国传统矿产勘查行业面临的机遇与挑战

全球矿业自进入 21 世纪以来一直呈现蓬勃发展的势头,固体矿产勘查的投资资金持续飙升,从 2002 年 19 亿美元迅速提高至 2008 年 144 亿美元,增长了近 7 倍。但是受到国际金融危机的影响,自 2008 年下半年至 2009 年上半年,全球对矿产资源的需求呈明显下降趋势,矿产品的价格持续下降,矿产勘查的资金投入趋缓,全球矿业进入新的调整期。2009 年下半年,随着全球经济的复苏,拉动了全球能源与矿产品需求恢复性增长。很多专家认为,以目前国际矿产品价格出现的逐步回升趋势预测,全球矿业将迎来新一轮的增长。

矿产勘查全球化是矿业全球化的主要表现。目前,全球主要国家都大力开展境外矿业勘查与开发活动,同时将矿产资源勘查、开发和利用的重点逐渐转向亚洲、拉丁美洲和非洲等地区,通过组建国际矿业公司,在全球范围内进一步开展地质矿产勘查活动。我国近年来也进一步加大了公益性地质矿产勘查的力度,使地质矿产勘查投资主体呈现日益多元化的趋势。随着我国对地质矿产勘查领域投资和投入的不断增加,我国的地质矿产勘查工作也取得了一批重要成果。同时我国矿业对外合作的步伐也在日益加快,中国与国际矿业的深入合作取得了巨大的成果。以矿业改革与发展为契机,融入全球矿业大环境中,使我国矿业产值得以快速增长,矿产品贸易也迅速发展。面对 2008 年以来国际矿产品价格大幅下挫,国际矿产勘查投入趋缓的形势,我国加大了投资力度,并带动社会投入,推动了全国地质矿产勘查工作的开展。

在取得丰硕成果的同时,我国地质找矿工作也面临着巨大的挑战。据资料统计,截至 2008 年,在全球新发现的、较为重要的矿床中有近 58% 是找矿新区,在老矿区附近新发现的矿床占到 23%,而在已知的成矿带中新发现的矿床只占 19%。这充分表明了,随着全球矿产资源勘查、开发与利用的不断深入,地质矿产勘查的难度正日益增大,易识别矿、地表矿和浅部矿正逐渐减少,而难识别矿、深部矿和隐伏矿的发现则成了当今地质找矿的重要方向。通过新的方法和技术,研究改善和更新现有矿产勘查技术,在已知矿区的深、边部及未知矿区内寻找新的隐伏矿床,已成为目前地质矿产勘查工作中不可缺少的部分。

1.2 国内地质工作信息化现状分析

1.2.1 我国公益性地质工作信息化研究进展概述

自 2000 年以来,我国公益性地质工作在新技术、新方法研究方面开展了大量的工作,特别是在基于信息技术提升和改善地质工作方面,取得了显著的成果,主要表现在以下几方面。

(1)地质调查项目管理方面

通过 2000—2007 年“国家地质调查项目管理信息系统”工作项目(隶属于数字国土工程项目)、2008—2010 年“国家地质调查项目管理信息系统”专题项目(隶属于“国家地质工作业务管理信息系统”工作项目)等工作的开展,已基本实现了国家地质调查项目的任务书编写、下达、设计审查、任务变更申报与审批、工作进展、质量检查、野外验收和成果评审等过程的计算机流程化管理,使国家地质调查项目现代化管理水平有了显著提高。

(2)地质调查项目业务应用方面

通过 2002—2010 年在国土资源大调查项目中设立数字国土地质调查信息项目,开展数字地质调查系统(DGSS)研究,目前,我国已全面实现了基础地质调查、矿产地质调查与勘查数据采集的全过程数字化,并实现了固体矿产调查全流程信息化处理与三维建模,形成了覆盖地质矿产调查主流程的数字地质调查软件体系。

(3)地质资料社会化服务方面

由国土资源部等相关部门牵头启动的地质资料信息服务集群化、产业化研究,其目的是通过地质资料信息集群化、产业化服务为社会提供多元多层次的信息服务,发挥地质资料的社会效益和经济价值。目前,我国地质资料信息服务集群化、产业化研究已初见成效,建立了全国岩石数据库、地质钻孔数据库,开展了地质资料图文数据化工作,形成了丰富的地质信息储量,同时开展了各种地质资料信息的快速检索、3D 立体显示、数据共享平台和咨询系统的开发。上海、山东、湖南、湖北、安徽和青海六省市被指定为地质资料信息服务集群化、产业化试点地区,为我国的地质资料信息服务集群化、产业化提供了示范作用。

1.2.2 我国地质勘查信息系统建设概述

近几年来,我国在地质勘探领域的信息化研究也取得了很大的进展,形成了一系列具有自主知识产权的软件系统,其中的典型代表包括:中国地质调查局发展研究中心与中国地质大学(武汉)教育部地理信息系统软件及应用工程中心合作开发的 iExploration-EM(资源量估算与三维建模系统),该系统是一款面向数字地质勘查成果编制的软件。作为中国地质调查局数字地质调查系统(DGSS)的组成部分,iExploration-EM 以 MapGIS6X 和 MapGIS-TDE 平台开发,系统数据库原型按照我国固体矿产地质勘查数据编录规范设计,支持基础地质资料、测量成果资料、储量估算数据、成果图件及三维模型数据等多源异构地质矿产勘查综合资料数据的一体化存储与管理,保证了采集、存储、处理等各阶段数据的继承性和零交换。iExploration-EM 在

地质统计学法资源储量估算功能部分,主要提供以下五部分内容:变异函数计算和拟合、理论变差函数计算和拟合、结构套合功能、搜索椭球设置、交叉验证,根据选择的克立金估值算法进行矿体块体的估值计算与储量类型分类,完全满足地质统计学法资源储量估算成果编制的需要。同时,iExploration-EM已在多个矿区进行了试点应用并获得了全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室和储量评审中心有关专家的认可。iExploration-EM于2008年8月1日,通过了由全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室组织的“资源储量估算与矿体三维建模系统”软件与试点成果评审,目前已作为全国危机矿山接替资源找矿项目及其他固体矿产勘查项目资源储量估算的软件工具,完成了多个矿区的试点和资源量估算工作。昆明理工大学(2001年)开发的矿床数学经济模型软件包,实现了地质数据编录、样品组合及统计分析、地形和岩性模型构建、变异函数分析及拟合、交叉验证、品位估值和储量计算、经济评价、采空设计、图形绘制等功能,目前该软件已在我国一些矿山进行了应用。QuantiMine(2008)是由中国地质大学(武汉)资源学院国土资源信息系统研究所与福建紫金矿业集团合作研究开发的矿山信息处理软件,实现了矿山信息的数据库管理,提供了矿山生产与管理所需的图件辅助绘制和表格生成,在三维地质建模和资源评价方面,该软件实现了传统和地质统计学两种资源储量估算方法,并实现了地质模型的三维可视化。地质勘查探矿者软件(2010)由中国地质科学院矿产资源所科研人员攻关开发完成,提供了数据管理、辅助制图、储量估算与地物化信息综合分析等功能,应用于地质勘探领域,该软件通过了“危机矿山三维信息评价系统”项目的实际测试和示范应用。

1.3 “智慧勘探”助推地勘单位地质找矿能力提升

从上述分析可以看到,目前以GIS技术为核心,将地质统计定量分析、三维地质建模与可视化等技术方法有机地融入地质勘查与找矿工作中,实现地质勘查业务全流程的信息化、智能化已成为地质找矿技术革新的重要发展方向之一。西方发达国家在地质找矿信息化研究方面起步较早,已形成多款商业应用软件,但是这些商业软件在应用到我国地质勘查数据处理与成果编制过程时存在不少问题:①不适合我国地质找矿初级勘查阶段的地质数据处理需求;②在数据组织和管理模式上不符合我国地质资料管理与成果编制的规范;③除了克里格估计,缺少对矿体、地质体进行进一步分析评价的工具;④价格较为昂贵。

我国在地质找矿信息化建设方面尚处于起步阶段。虽然目前中国地质调查局在地质调查、地质资料社会化服务等领域的信息化工作取得了丰硕的成果;在业务应用系统研发方面,以MRAS、GeoExplo、DGSS等应用软件为支撑已建立了从基础地质调查、基础矿产调查到地质矿产勘查阶段地质数据综合建库、管理、成果编制和三维展示的信息化处理流程。而在地质勘探领域,虽然也研发了多款业务处理与三维可视化软件,但主要侧重数据管理、建模与辅助成图等功能,还没有一套涵盖地质找矿信息化处理与分析技术的软件平台,没有实现地质找矿工作全流程的自动化与计算机辅助化,没有真正建立以信息技术为依托、地质统计定量分析技术为基础的地质找矿工作平台。

可以说,目前在我国的地质单位中没有一套适用于地质勘探的数据处理与分析平台,没有