

国土资源大调查计划项目“中国大陆周边地区主要成矿带成矿规律对比及潜力评价”系列成果

中国地质调查局《中美矿产资源评价合作研究》项目成果

项目编号：200310200081、1212010561502

“十一五”国家科技支撑计划项目（课题编号：2006BAB01A03）资助  
科学技术部国际合作重点项目（项目编号：2007DFA21380）

# 中国斑岩铜矿砂岩铜矿资源潜力 定量评价

严光生 邱瑞照 连长云 等著  
李锦轶 肖克炎 毛景文



地质出版社

国土资源大调查计划项目“中国大陆周边地区主要成矿带成矿规律对比及潜

中国地质调查局《中美矿产资源评价合作研究》项目成果

项目编号：200310200081、1212010561502

“十一五”国家科技支撑计划项目（课题编号：2006BAB01A03）

科学技术部国际合作重点项目（项目编号：2007DFA21380）

资助

# 中国斑岩铜矿砂岩铜矿 资源潜力定量评价

严光生 邱瑞照 连长云 李锦轶 肖克炎 等著  
毛景文 谢桂青 丁建华 王 荃 陈秀法

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书采用美国“三部式”矿产资源评价方法,对我国斑岩铜矿、砂岩铜矿资源潜力进行了评价;圈定斑岩铜矿找矿可行地段46处、砂岩铜矿找矿可行地段16处,估计了每个可行地段的未发现矿床个数,并计算了资源量,定量地评价了中国斑岩铜矿、砂岩铜矿的资源潜力。同时,开展了中美矿产资源评价方法对比研究,评述了“三部式”矿产资源评价方法的适用性,探索了深部地质作用在资源评价中的重要性及资源选区部署、深部找矿空间等问题。

本书可供从事地质、矿产研究和教学的人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

中国斑岩铜矿砂岩铜矿资源潜力定量评价/严光生,邱瑞照等著. —北京:地质出版社,2010.6

ISBN 978-7-116-06595-6

I. ①中… II. ①严…②邱… III. ①斑岩矿床-铜矿床-矿产资源-资源评价-中国②砂岩-铜矿床-矿产资源-资源评价-中国 IV. ①P618.410.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第029901号

---

责任编辑:祁向雷 沈 阳

责任校对:杜 悦

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)82324577(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787 mm × 1092 mm<sup>1/16</sup>

印 张:14.5

字 数:400千字

版 次:2010年6月北京第1版·第1次印刷

定 价:78.00元

审 图 号:GS(2010)584号

书 号:ISBN 978-7-116-06595-6

---

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 序

矿产资源定量评价是矿床学和矿产勘查学研究的重要内容，依照成矿理论，采用合理技术方法，查明一个国家或地区乃至全球的重要矿产资源潜力，是制定一个国家国民经济发展战略的必要依据，也是提高矿产勘查成效的重要保证。如何开展矿产资源战略评价，尽快摸清资源“家底”已成为各国地球科学家们竞相探索的重要科学问题。

铜是我国最为紧缺的矿种之一，随着我国国民经济的快速发展，铜资源的对外依存度不断提高，近年来一直保持在70%左右，供需矛盾十分突出。为缓解这一困难，摸清我国铜矿资源潜力，制定科学的铜资源供需战略，已引起广泛关注。为此，中国地质调查局开展了“中美矿产资源评价合作研究”项目，目的是借鉴美国的矿产资源评价方法，建立适合我国地矿特点的矿产资源评价模型与方法体系；并以此为基本手段，重点开展我国铜矿资源的潜力评价，这对于保障我国经济社会的可持续发展具有重要的意义。

该项研究在引进、消化、吸收美国地质调查局“三部曲”（“三步式”）资源潜力评价方法的基础上，全面收集、整理了我国的斑岩铜矿、砂岩铜矿资料，建立了数据库，总结了矿床分布特征，研究了成矿规律，初步建立了适合我国特点的潜力评价模型；针对成矿地质环境和控矿因素，综合圈定了斑岩铜矿和砂岩铜矿的可能赋矿地段；开发了相关软件，估算了这两类铜矿的潜在资源量。通过实际研究体会，对“三部曲”方法的适用性作了评述，并针对我国大陆动力学特点，强调了深部构造-岩浆-成矿作用及成矿后改造研究在资源潜力评价中的作用，提出了通过“地质过程解析”进行综合评价与选区的思路。上述成果对于在我国全面开展资源潜力评价工作有重要借鉴作用。

项目研究集体通过密切的国际合作，发挥多学科协作的优势，取得了十分可喜的成绩，既完成了这部富有创新成果的《中国斑岩铜矿砂岩铜矿资源潜力定量评价》专著，又培养了对外合作交流人员和熟悉了全球矿产资源评价现状，开阔了视野。我热诚祝贺这一科技探索项目的圆满成功，并向为国际地学交流合作做出贡献的专家们表示由衷的敬意！

刘裕生



# 前 言

中国国土资源部与美国地质调查局于2002年签定了“全球矿产资源评价”的项目合作协议，为落实中美资源评价合作协议，中国地质调查局将有关合作研究内容列入国土资源大调查计划中，其中“中美矿产资源评价合作研究”作为中国地质调查局下达的工作项目，隶属“中国大陆周边地区主要成矿带成矿规律对比及潜力评价”计划项目，项目编号：200310200081（2003~2004）和1212010561502（2005~2007）；工作起止年限2003~2007年。本项目的主要目标任务是，全面学习和借鉴美国先进的矿产资源评价方法技术，开展中美矿产资源评价体系与方法对比研究，建立适合我国特点的矿产资源评价模型与方法体系；并以此为手段，开展我国斑岩铜矿、砂岩铜矿等重要矿产资源的潜力评价。

本项目由中国地质调查局发展研究中心、中国地质科学院矿产资源研究所、中国地质科学院地质研究所共同承担完成，中国地质调查局发展研究中心为负责组织牵头单位。为有效地组织好本项研究工作，成立了项目领导与协调组、构造研究组、矿床研究组、GIS研究组、数据综合组。

## （1）组织机构：

领导与协调组，组长：彭齐鸣；组员：严光生，蒋仕金

构造研究组，组长：李锦轶

矿床研究组，组长：毛景文

GIS研究组，组长：肖克炎

数据综合组，组长：连长云

（2）项目负责人：严光生，连长云，邱瑞照

## （3）研究人员：

严光生，中国地质调查局，中国北京，100037

连长云，中国地质调查局，中国北京，100037

邱瑞照，中国地质调查局发展研究中心，中国北京，100037

毛景文，中国地质科学院矿产资源研究所，中国北京，100037

李锦轶，中国地质科学院地质研究所，中国北京，100037

肖克炎，中国地质科学院矿产资源研究所，中国北京，100037

陈秀法，中国地质调查局发展研究中心，中国北京，100037

刘大文，中国地质调查局发展研究中心，中国北京，100037

元春华，中国地质调查局发展研究中心，中国北京，100037

王靓靓，中国地质调查局发展研究中心，中国北京，100037

韩九曦，中国地质调查局发展研究中心，中国北京，100037

陈正，中国地质调查局发展研究中心，中国北京，100037

陈玉明, 中国地质调查局发展研究中心, 中国北京, 100037  
王荃, 中国地质科学院地质研究所, 中国北京, 100037  
王方国, 中国地质调查局成都地调中心, 中国成都, 610081  
李晓峰, 中国地质科学院矿产资源研究所, 中国北京, 100037  
谢桂青, 中国地质科学院矿产资源研究所, 中国北京, 100037  
丁建华, 中国地质科学院矿产资源研究所, 中国北京, 100037  
张晓华, 中国地质科学院矿产资源研究所, 中国北京, 100037  
李楠, 中国地质科学院矿产资源研究所, 中国北京, 100037  
娄德波, 中国地质科学院矿产资源研究所, 中国北京, 100037

#### (4) 研究分工:

构造环境: 李锦轶, 王荃, 王方国

矿床模型: 毛景文, 谢桂青, 李晓峰

数据综合: 连长云, 邱瑞照, 陈秀法

GIS 编辑: 肖克炎, 丁建华, 张晓华, 李楠, 娄德波

资源分析: 严光生, 彭齐鸣, 肖克炎, 李锦轶, 毛景文, 连长云, 邱瑞照, 陈秀法, 刘大文, 元春华, 韩九曦, 王靓靓, 陈正, 陈玉明

《中国斑岩铜矿床和砂岩铜矿评价》报告英文出版稿审核、校对: Paul B. Barton, Henry C. Berg, Donald H. Richter、连长云、邱瑞照

#### (5) 咨询专家:

1) 参与斑岩铜矿、砂岩铜矿可行地段 (tracts) 圈定和未发现矿床估计:

邵俭波, 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 研究员, 中国辽宁省沈阳市, 110032

翟刚毅, 中国地质调查局, 教授级高级工程师, 中国北京, 100037

杜玉良, 中国地质调查局西安地质调查中心, 教授级高级工程师, 中国陕西省西安市, 710054

叶天竺, 中国地质调查局, 教授级高级工程师, 中国北京, 100037

王保良, 中国地质调查局, 教授级高级工程师, 中国北京, 100037

2) 参与铂族元素矿床可行地段 (Tracts) 圈定和未发现矿床估计:

李文渊, 中国地质调查局西安地调中心, 研究员, 中国陕西省西安市, 710054

陈尔臻, 吉林省地质矿产勘查开发局, 教授级高级工程师, 中国吉林省长春市, 130028

成杭新, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 研究员, 中国河北省廊坊市, 065000

吕林素, 中国地质博物馆, 研究员, 中国北京, 100034

张作衡, 中国地质科学院资源研究所, 研究员, 中国北京, 100037

王保良, 中国地质调查局, 教授级高级工程师, 中国北京, 100037

项目自 2003 年启动以来, 在学习美国“三部曲”资源评价工作方法的基础上, 选择长江中下游地区进行了试验研究; 2004 年完成全国斑岩铜矿、砂岩铜矿资源潜力评价; 2005 年开展钾盐、铂族元素矿床初步研究; 2006 年完成全国铂族元素矿床资源潜力评价; 2007 年开展全国铅锌矿床资源潜力研究; 2008 ~ 2009 年主要开展了综合研究, 评述了

“三部式”资源潜力评价方法的适用性，从战略层面和战术层面对美国“三部式”和中国综合信息评价方法进行了对比，并对深部构造在资源评价中的作用进行了探索。在项目实施过程中，因为工作关系变动，先后分别由严光生、连长云和邱瑞照任项目负责人。

项目工作得益于项目负责单位、参加单位人员的密切配合，顺利完成了任务。完成的主要工作如下：

1) 编制了1:100万比例尺的《长江中下游地区地质构造图》，为该区斑岩型铜矿含矿潜力评价提供了基础图件，同时，为同类图件的编图原则和编图单元的确定提供了借鉴。在全面收集、分析有关资料的基础上，编制1:1000万《中国大陆构造纲要图》，为全国斑岩铜矿等重要矿产资源评价提供了背景材料和基础图件。建立了我国斑岩铜矿、砂岩铜矿、铂族元素矿床、铅锌矿床、钾岩矿床矿产地数据库；针对我国具体情况，建立了适合我国矿产资源特点的工作方法和操作流程，开发了资源评价相关软件。

2) 在整理、分析已有研究资料的基础上，按照大地构造背景和地质特征，把中国斑岩铜矿划分为15个成矿区带，建立中国斑岩铜矿试验区（赣东北地区 and 长江中下游地区）典型矿床的描述性模型以及该区的成矿模型。试验区的成矿模型可以分为：①典型斑岩铜矿成矿模型（如，沙溪、朱砂红、铜厂和富家坞）；②与矽卡岩有关的斑岩铜矿（如，城门山、封三洞和铜山口）；③与陆相火山作用有关的斑岩铜矿（如，银山）。在上述工作的基础上，和其他课题成员一起勾绘试验区斑岩铜矿成矿可行地段图；圈定全国斑岩铜矿成矿可行地段46处；根据已知砂岩铜矿和盆地演化分析，圈定全国砂岩铜矿成矿可行地段16处；计算了中国大陆斑岩铜矿和砂岩铜矿的潜在资源量。

3) 根据地质关系、同位素年龄，结合区域地质历史，探讨了成矿作用与区域构造—岩浆事件之间的关系，为评价中国主要基性—超基性岩的含矿潜力及铂族金属资源潜力提供了基础。通过对柴达木、罗布泊、云南等钾盐矿区、西藏盐湖等的综合研究，结合动力学背景，探讨了中国盆地演化与钾盐矿床形成、空间分布的关系。编制了1:500万《中国铂族元素矿床分布图》和1:500万《中国基性—超基性岩分布图》。根据综合研究以及地质证据的共同约束，阐明中国大陆不同时期的动力学环境及其变迁过程，为铂族金属、钾盐矿成矿地质构造背景研究和资源潜力评价提供依据。通过对中国铂族金属矿床的综合研究，提出了中国铂族金属矿床的成矿模型建立的准则，以及成矿模型建立的指导思想，指出成矿模型划分的依据以及成矿模型的要素组成，评价资源潜力和划分可行地段。基本建立了中国铂族金属矿床的描述模型、成矿模型和找矿模型。圈出中国大陆25个铂族元素矿床成矿可行地段（tracts），对各可行地段的资源潜力进行了计算。

4) 针对铅锌矿资源潜力评价，编制了中国1:500万中酸性岩分布图、1:500万铅锌矿分布图，翻译了有关资料。完成全国铅锌矿产地数据的收集、整理和建库工作，结合中国铅锌矿床特征、区域地质背景、成矿规律，初步圈定了31个可行地段。

5) 在本项目研究基础上，申请了科技部国际合作重点项目（2008）“中美环太平洋成矿带动力学背景与资源评价新方法研究”（编号：2007DFA21380）；完成《Assessment of Undiscovered Porphyry Cu, Cu-Au, and Cu-Mo Deposits and Sediment-Hosted Cu Deposits of China》英文出版稿（出版中）。

6) 在实际应用的基础上，对美国“三部式”资源评价方法的适用性进行了评述，并从战略层面和战术层面对美国“三部式”和中国综合信息评价方法进行了对比；通过总

结,提出了“地质过程解析——资源评价与选区”的新思路。

7) 在项目实施过程中,中美专家召开了多次工作会议(2003年2月于泰国曼谷;2004年2月于美国 Menlo Park;2005年2月于中国昆明;2005年8月、9月于中国北京;2007年9月于美国 Spokane),就中国斑岩铜矿床和砂岩铜矿评价、中蒙边境地区可行地段的接图、矿床模型建立、PGE 矿床的资源潜力评价方法、中国斑岩铜矿床和砂岩铜矿评价成果报告修改、成果表达、出版等等多方面问题进行了研讨;2007年12月完成了《中国斑岩铜矿床和砂岩铜矿评价》报告英文出版稿(二次校对)。2004年2月中美工作会后,中美专家对美国西部的一些典型斑岩铜矿床进行了野外考察;2007年9月中美专家工作会议期间,考察了 Stillwater PGE 矿床;2009年4月,与 David Leach 教授一起对辽宁的青城子铅锌矿床、红透山铜锌矿床及其外围进行了考察;2009年11月,与来华讲学的 Donald A. Singer 博士,考察了湖北大冶铜录山、安徽铜陵铜山、新桥等矿床。通过中美合作项目的实施,培养了对外合作交流人员,了解了全球资源评价方法现状,扩大了视野,对我国开展资源评价工作有重要借鉴作用。

本书是在项目总报告基础上完成,选择其中的中国斑岩铜矿、砂岩铜矿资源评价成果编辑出版。全书共分六章,各章节分工编写如下:前言:严光生、邱瑞照、连长云;第一章,第一节:严光生、连长云、曹黎、陈秀法;第二、第三节:邱瑞照、陈秀法、王靓靓、元春华、陈正、韩九曦、张新元;第二章,第一节:李锦轶、王荃;第二节:邱瑞照、李廷栋、邓晋福、周肃、肖庆辉;第三章,第一节:邱瑞照、肖庆辉;第二节:李锦轶、王荃、邱瑞照;第三节:邱瑞照、肖庆辉、李廷栋、邓晋福、周肃、叶天竺、耿树方;第四节:谢桂青、毛景文、李晓峰;第五节:严光生、邱瑞照、连长云、肖克炎、李锦轶、毛景文、李晓峰、谢桂青、丁建华、刘大文、陈秀法、韩九曦、王靓靓、元春华、陈正;第六节:肖克炎、丁建华;第四章,第一节:李锦轶、王荃;第二节:谢桂青、毛景文、李晓峰;第三节:连长云、陈秀法、严光生、邱瑞照、肖克炎、李锦轶、毛景文、李晓峰、谢桂青、丁建华、元春华、刘大文、韩九曦、王靓靓、陈正;第四节:肖克炎、丁建华;第五章,第一节:邱瑞照;第二节:肖克炎、丁建华;第三节:邱瑞照、陈秀法、王靓靓、元春华、陈正、韩九曦;第六章:严光生、邱瑞照、连长云。全书由邱瑞照统编。

本项目实施过程中,得到“十一五”国家科技支撑计划项目“中国与周边国家毗邻地区重点成矿带成矿规律对比研究”课题(课题编号:2006BAB01A03)和科学技术部国际合作重点项目“中美环太平洋成矿带动力学背景与资源评价新方法研究”(项目编号:2007DFA21380)资助。

本项目的完成,得益于国土资源部、中国地质调查局、中国地质调查局发展研究中心等单位 and 领导的关心和大力支持。原国土资源部国际合作与科技司司长彭齐鸣(现任地勘司司长),处长马永正十分关心此项工作;中国地质调查局科技外事部主任叶建良、副主任卢民杰,处长蒋仕金等多次给予协调指导;中国地质调查局发展研究中心主任邓志奇和总工程师谭永杰十分重视此项工作,从多方面提供保障和业务指导;中国地质调查局发展研究中心科技处、财务处、办公室等职能处室人员在许多具体事务上给予了很多帮助;在项目实施过程中,得到叶天竺、肖庆辉、王保良等专家的指导,在此一并致谢。

特别要感谢翟裕生院士在百忙中为本书作序。



# 目 录

序

前 言

第一章 “三部式”评价方法与实例 .....	(1)
1.1 “三部式”评价方法 .....	(1)
1.1.1 矿床模型 .....	(2)
1.1.2 可行地段圈定 .....	(4)
1.1.3 品位-吨位模型 .....	(7)
1.1.4 未发现矿床个数估计 .....	(9)
1.2 “三部式”评价有关术语 .....	(10)
1.2.1 资源评价目的 .....	(11)
1.2.2 矿产资源 .....	(11)
1.2.3 矿床模型 .....	(11)
1.2.4 实施评价 .....	(12)
1.2.5 模拟 .....	(13)
1.2.6 数据库 .....	(13)
1.2.7 若干建议 .....	(14)
1.3 “三部式”资源评价实例：1998年美国金、银、铜、铅、锌矿床评价 .....	(14)
1.3.1 评价内容 .....	(15)
1.3.2 评价方法 .....	(17)
1.3.3 评价结果 .....	(19)
1.3.4 有关问题讨论及意义 .....	(26)
第二章 中国大陆形成和演化 .....	(31)
2.1 中国大陆地壳分区与演化 .....	(31)
2.1.1 中国大地构造研究现状 .....	(31)
2.1.2 中国大陆地质演化 .....	(37)
2.1.3 中国陆区地壳的构造分区 .....	(52)
2.1.4 中国陆区地壳的地质特征 .....	(59)
2.1.5 中国大陆地壳形成与构造演化 .....	(67)
2.1.6 1:1000万中国陆地大地构造纲要图特点 .....	(77)
2.2 中国大陆岩石圈演化 .....	(78)
2.2.1 中国大陆岩石圈类型 .....	(78)

2.2.2	中国大陆新生代以来大地构造格局	(83)
2.2.3	中国大陆岩石圈演化过程	(84)
<b>第三章</b>	<b>中国斑岩铜矿资源潜力评价</b>	<b>(85)</b>
3.1	中国大陆主要造山带中酸性火成岩特征	(85)
3.2	中国斑岩铜矿成矿背景	(92)
3.2.1	古生代活动大陆边缘的斑岩铜矿	(92)
3.2.2	中生代活动大陆边缘的斑岩铜矿	(94)
3.2.3	新生代后碰撞阶段的斑岩铜矿	(94)
3.2.4	斑岩铜矿成矿可行地段地质构造背景	(96)
3.3	中国大陆造山带岩石圈演化对大规模成矿作用的约束	(97)
3.3.1	中国大陆区域成矿特点	(97)
3.3.2	造山带型岩石圈演化与大规模成矿作用	(101)
3.3.3	中国大陆斑岩铜矿形成主要模式探讨	(105)
3.4	中国斑岩铜矿成矿规律与成矿模型	(107)
3.4.1	概况	(107)
3.4.2	中国斑岩铜矿的时空分布特征	(113)
3.4.3	中国斑岩铜矿成矿规律与典型矿床	(118)
3.4.4	中国斑岩铜矿成矿模型	(131)
3.5	中国斑岩铜矿可行地段圈定和未发现矿床数估计	(137)
3.5.1	可行地段圈定	(137)
3.5.2	斑岩铜矿可行地段圈定举例	(139)
3.5.3	未发现矿床数估计	(145)
3.6	中国斑岩铜矿资源量估算	(146)
3.6.1	中国斑岩铜矿品位、吨位分布特征	(146)
3.6.2	中国斑岩铜矿品位-吨位模型	(151)
3.6.3	中国斑岩铜矿资源量估算	(152)
<b>第四章</b>	<b>中国砂岩铜矿资源潜力评价</b>	<b>(164)</b>
4.1	中国砂岩铜矿成矿背景	(164)
4.1.1	中国砂岩铜矿的成矿地质背景	(164)
4.1.2	砂岩铜矿可行地段的地质构造背景	(164)
4.2	中国砂岩铜矿成矿规律与成矿模型	(165)
4.2.1	中国砂岩铜矿的分布规律和类型	(165)
4.2.2	中国砂岩铜矿的模型	(170)
4.3	中国砂岩铜矿成矿可行地段圈定与未发现矿床数估计	(173)
4.3.1	可行地段圈定原则与举例	(173)
4.3.2	可行地段圈定和未发现砂岩铜矿床数估计	(183)
4.4	中国砂岩铜矿资源量估算	(183)

4.4.1	中国砂岩铜矿品位、吨位分布特征 .....	(183)
4.4.2	中国砂岩铜矿品位、吨位模型 .....	(185)
4.4.3	中国砂岩铜矿资源量估算 .....	(188)
<b>第五章</b>	<b>资源评价方法对比研究与启示 .....</b>	<b>(189)</b>
5.1	资源评价方法概述 .....	(189)
5.2	“三部式”矿产资源评价方法评述 .....	(190)
5.2.1	评价方法先进性问题 .....	(190)
5.2.2	构造建造编图问题 .....	(191)
5.2.3	多元勘查信息综合应用问题 .....	(191)
5.2.4	关于可行地段矿床个数问题 .....	(192)
5.2.5	关于可行地段尺度问题 .....	(193)
5.2.6	品位-吨位模型问题 .....	(193)
5.2.7	经济成本滤波器模型 .....	(193)
5.3	“三部式”矿产资源评价方法启示 .....	(194)
5.3.1	美国“三部式”和中国“综合信息法”比较 .....	(194)
5.3.2	大陆动力学演化在矿产资源评价中的重要性 .....	(195)
5.3.3	矿产资源综合评价与选区问题探讨 .....	(199)
<b>第六章</b>	<b>主要结论 .....</b>	<b>(204)</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>(206)</b>

# 第一章 “三部曲”评价方法与实例

本章介绍的“三部曲”资源评价方法，是 Singer 及其同事们（1993）对该方法的一次系统总结，最新的总结（Singer 和 Menzie, 2010）尚未包含其中，实例是 1998 年对美国金、银、铜、铅、锌未发现矿床的评价。

## 1.1 “三部曲”评价方法

1975 年以来，矿产资源潜力评价已在美国本土 27 个地区  $5 \times 10^6 \text{ km}^2$  范围内实施，使用的方法是目前称为“三部曲”的定量评价方法。“三部曲”评价（图 1.1）包括：①根据矿床类型的可能地质环境圈定可行地段；②品位-吨位模型研究；③矿床数估计。可行地段圈定是该区域边界以外发现该类型矿床的概率可以忽略不计。品位-吨位模型是将地质估计结果转化为经济专家使用的语言。估计矿床数是可行地段存在未发现矿床的概率（置信度），估计必须和矿床类型、品位-吨位模型一致。关于矿床个数估计的一般原则是：①已知勘探区矿床分布密度；②矿床局部外推；③统计异常和矿产地概率；④过程限制；⑤相对频率；⑥空间面积。在大多数条件下，估计是主观的，就像气象、博弈和地质解释等。在“三部曲”评价方法中，在本质上估计具有一致性。因为可行地段圈定必须和描述模型一致，矿床数估计必须和品位-吨位模型一致，所有有用的信息必须使用，不确定性也要表达出来。

矿产资源定量评价的目的是对资源勘探工作可能获得的结果进行预测。利用评价成果，我们能够进行勘探区划，指导土地利用，进行区域经济规划和估计在不同条件下矿产的可利用性。简要地说，主要是预测未发现矿床。因为矿床是未发现的，不确定性就成为主要问题。首次对该问题进行阐述的论文是 Allais（1957）关于阿尔及利亚撒哈拉矿床勘探可能结果的评价，近年来，许多文章论述了矿产资源评价的不同的方法和形式（Singer 和 Mosier, 1981b; Harris, 1984; Shulman 等, 1992），介绍美国 27 个区域使用“三部曲”方法对非燃料矿产进行定量评价的情况。美国地质调查局在 1975 年就开始使用“三部曲”定量评价方法，当初的目的是提供一种与经济分析相匹配的矿产资源定量信息，这样矿产资源价值就可以与土地其他利用所产生的价值相对比（Singer, 1975）。最初应用在阿拉斯加土地分类问题中，现在概率模拟功能也加了进来（Root 等, 1992）。

使用“三部曲”评价方法完成了美国北部、中部和南部  $5 \times 10^6 \text{ km}^2$  范围内不同比例尺、不同地质环境和不同信息水平下的资源评价工作。“三部曲”（图 1.1）评价过程中地质图是必备的，最好还要有矿产地、地球物理资料和地球化学信息，这些信息在圈定可行地段时必须与圈定该矿床类型的地质建造结合起来。品位-吨位模型在定量评价和勘探规划中十分有用，确定要找寻的矿床可能的价值对勘探规划十分关键。据 Sangster（1986），品位-吨位模型与矿床数联合是将地质专家资源评价转化为经济专家能够理解的

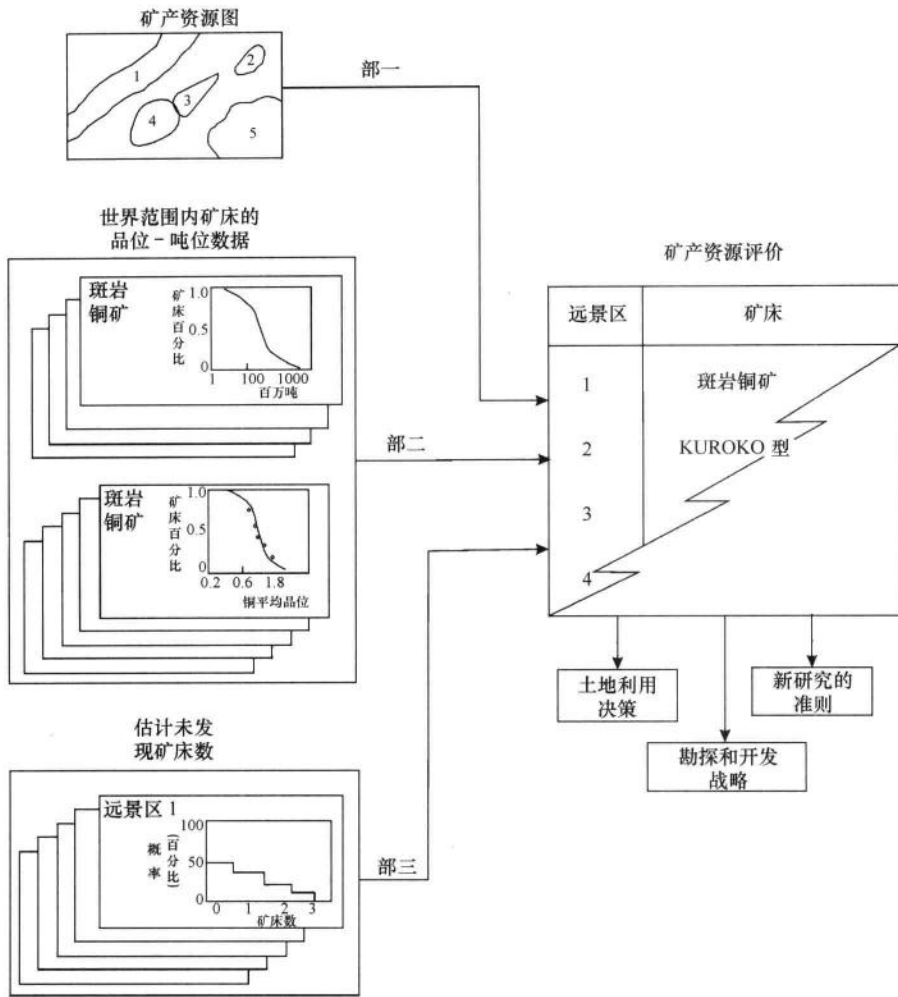


图 1.1 “三部式”矿产资源评价流程

基础。在“三部式”评价方法中，应使用标准的品位-吨位模型，除非本地模型明显与一般模型不一致。矿床数估计目前是以不确定性概率形式表达的，使用这种估计主要应考虑矿床数与品位-吨位的一致性。矿床模型是矿产资源评价中使用地质、矿产、地球化学、地球物理等多元信息的“黏合剂”（图 1.2）。区划工作的能力和资源评价的好坏都取决于矿床模型的质量。

### 1.1.1 矿床模型

在“三部式”评价方法中，主要依赖两种模型：描述性模型和品位-吨位模型。第三种代表单位面积内产出矿床数模型（矿床密度模型）近年也正在研究中（Bliss, 1987, 1992b; Singer, 1988）。模型的内容取决于模型使用的目标，理想状况是，矿床模型能够提供足够的和必须的信息来区分成矿环境和非矿环境以及不同类型的成矿作用。在“三部式”评价中（Singer 和 Cox, 1988），矿床模型用来区分成矿作用与地质背景、不同成



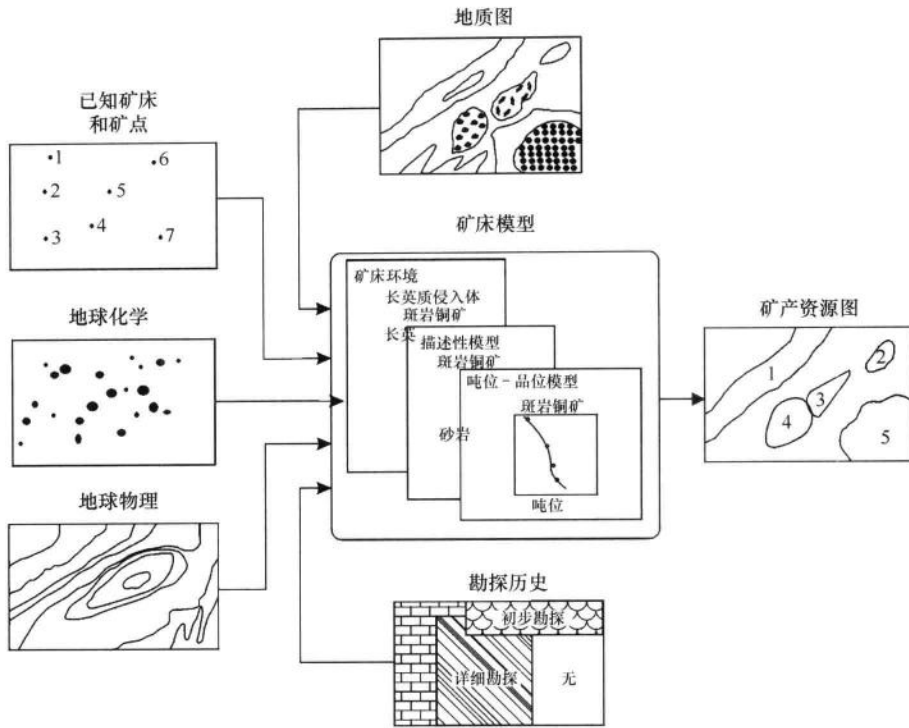


图 1.2 在矿产资源评价中使用矿床模型综合多元信息

矿作用类型等，在矿产资源评价中，应该使用各种多学科信息，而将这些多学科信息综合的关键是矿床模型（Cox 和 Singer, 1986; Bliss, 1992）。标准矿床模型允许地质学家将矿床类型与地质环境对应起来：矿床是有足够大小和品位的矿产地；大多数情况下必须有经济价值（Cox 等, 1986）。这是“三部曲”评价的目标。因为每个矿床之间都存在或多或少的差异，因此模型必须能够代表一类矿床，并能表达该类矿床的共同属性。

描述性模型有两部分：第一部分是矿床形成的地质环境，第二部分是矿床标志特征。第一部分在圈定矿床可行地段时起着基础作用，第二部分可以帮助对矿床或矿产地进行分类，辅助可行地段圈定。在一些情况下，在地质图上没有反映出的成矿环境可以通过矿床、矿产地来识别，模型的组建通过矿床分类来完成。本次模型分类重点是在主岩岩性和构造环境上，这些因素在地质图上容易被识别出。品位-吨位模型是用勘探程度高的已知矿床类型的矿床品位-吨位数据表达的，它们作为相同的地质环境、相同矿床类型的品位-吨位模型的标准模型。虽然对该模型的研究已持续 15 年以上，但最近出版的 69 个品位-吨位模型（Cox 和 Singer, 1986; Bliss, 1992）仍是矿产资源评价的最大模型集。模型表达成累积概率曲线和统计参数，并提供了根据均值和标准方差而生成的标准对数正态分布拟合曲线。要注意，这些模型帮助定义了一个矿床而不是矿产地。

构造品位-吨位模型包含多个步骤（Singer, 1993），第一步识别一组研究程度高、类型一致的矿床，统一的描述性模型也要准备好，选择的矿床要根据其属性与描述性模型进行比较，以确证它们是同一类型。每个矿床收集的信息包括：每个金属的平均品位，基于整个产量、储量和边界品位上的资源量吨位。从资源量吨位意义来说，这些数据代表了已

知矿床的资源潜力。最终模型代表整个未发现矿床的资源潜力。统计表明，大多数矿床吨位服从对数正态分布，但是吨位与品位没有明显的相关性（表 1.1），关于频率分布和相关性信息在构造模拟时是需要的。在实际中相同类型不同矿床的品位-吨位很少出现边界品位，事实上，边界品位只有在极少数情况下才出现。数据收集考虑的第二个问题是采样单位问题。矿区、矿床、矿体的吨位数据差别很大，一些情况下过去的生产数据是有用的，而另一些情况下新的生产数据是有用的。最常见的错误是将过去的生产数据与矿床的其他资源数据混在一起。采用相同的样本单位对模型是非常重要的，将矿床与矿区、新数据与老数据混在一起将产生双峰或非对数正态分布，变量之间的相关性也是人为混合样本引起的。使用混合数据将对品位-吨位频率曲线产生重大影响，因为该曲线就是由矿床数比例构成的。在资源评价中使用这些模型可以帮助对模型进行扩展，将模型中一个属性出现和多个属性同时出现的情况相混淆将会导致模型被错误地使用，如一个属性在大多数矿床都可能出现，但同时只有少量矿床、甚至没有矿床能出现所有标志。定量矿床属性是必要的，而且统计分类也需要。对区分矿与非矿，模型信息是必须的但并不是充分的，对非矿环境的定量属性研究也是必须的，构造定量属性模型和矿床密度模型对“三部曲”评价也是必要的，否则资源评价结果从根本上达不到一致。

### 1.1.2 可行地段圈定

圈定含有某种类型矿床的区域是通过与已知矿床地质环境类比方式进行的（Lasky, 1948）。圈定可行地段，需要地质图、地球物理、地球化学、勘探和矿产地等信息。这些信息必须对不同矿床类型地质环境条件进行综合，策略之一是将已知矿床边界外移，这称为圈定可行地段（tracts）。在“三部曲”评价中，我们圈定的是可行地段，虽然所有有利地段是可行地段的子集，但是它们代表着不同的概念，它们的边界只有在勘探工作覆盖完整和有效的情况下才能相一致，这种情况极少出现。此外圈定可行地段的难度在于不同的人往往使用不同的方法，现在还没有一个通用的方法。已知矿床和矿产地可以帮助圈定和扩展可行地段，但这不是限定条件。

为了兼容性达到统一的标准，可行地段被定义为在地质环境上存在一种或多种矿床的区域，圈定标准是依据矿床模型，而矿床模型是建立在研究区或世界其他地方已知矿床上的。可行地段边界被定义为在该边界之外，该类型矿床存在的概率可以忽略（小于十万分之一或百万分之一）。根据上述定义，可以将可行地段分成几个亚地段，分别代表不同的矿床数和信息，如 Costa Rica（Singer 等，1987）的含金石英脉或阿拉斯加部分斑岩铜矿（Singer 和 MacKevett, 1977）。其他一些不是很严格的圈定边界的定义也应该有所考虑。但它们有两个缺点：很难同时达到一致性和兼容性。它们可能排除了矿床个数少但规模大的矿床区域。漏矿错误的成本将导致贝叶斯（Bayesian）决策错误（错判最小成本）。

可行地段可以包含或不包含已知矿床，可以根据地质环境参数、不成功的勘探工作和上覆厚度超过 1 km，将不成矿地区排除。因此圈定地段的基础信息是地质图和通过地质、地球物理资料外推的覆盖地质单元资料。地球化学和矿产地信息能够帮助排除一些地区环境因素。如低硫含金石英矿床通常包含有冲积砂矿，如果没有砂金，该类型矿床就可能不存在。

表 1.1 主要矿床类型的吨位对数正态分布和吨位-品位相关性的检验统计

矿床类型	吨位偏移	吨位峰值	柯尔莫戈罗夫-斯 米尔诺夫概率	矿床数目	吨位与主要类型 的相关系数
阿尔戈马和苏必利尔型铁矿	0.46	1.07	0.131	66	-0.168
层状重晶石矿	-0.2	-0.98	0.634	25	-0.019
别子型块状硫化物矿	0.77	-0.41	0.012	44	0.123
碳酸盐岩	-0.55	-0.24	0.909	20	-0.222
克拉马克铅矿	-0.89	0.17	0.688	9	-0.013
科姆斯托克型热液脉状矿床	-0.16	0.21	0.539	41	0.041
基德型热液脉状矿床	-0.21	-0.68	0.840	27	-0.373
矽卡岩型铜矿	-0.02	-0.41	1.000	64	-0.303
塞浦路斯型块状硫化物矿	0.14	0.74	0.513	49	-0.089
远源浸染型银-金矿	-0.51	-0.57	0.859	10	-0.553
纯橄岩型镍-铜矿	-0.32	-0.83	0.362	22	-0.54 **
热液型锰矿	-0.24	-0.02	0.979	59	-0.276
热液型石英-明矾石金矿	-0.35	-0.69	0.985	9	-0.160
霍姆斯塔克型金矿	-0.04	0.27	0.189	118	-0.088
热泉型金矿	-0.58	0.36	0.821	17	0.379
热泉型汞矿	-0.06	-0.98	0.625	20	-0.042
矽卡岩型铁矿	-0.01	-0.2	0.602	169	-0.070
岩溶型铝土矿	-0.32	-0.33	0.088	41	0.123
科马提岩型镍-铜矿	0.23	-0.91	0.053	31	-0.47 **
黑矿型块状硫化物矿床	0.09	-0.45	0.474	432	-0.168 **
黑矿型块状硫化物矿 Sierran 型矿	0.47	-0.69	0.240	23	-0.030
红土型铝土矿	-0.06	-0.59	0.353	122	-0.047
红土型镍矿	0.17	0.85	0.360	71	-0.31 **
低硫石英脉型金矿	0.15	-0.38	0.457	333	-0.298 **
低硫石英脉型金 Chugach 型金矿	-0.14	-0.7	0.589	29	-0.120
上涌型磷酸盐矿	0.09	-0.22	0.163	60	-0.148
暖流型磷酸盐矿	0.43	-0.48	0.657	18	-0.536
金-铂族砂矿	-0.4	-0.93 **	0.597	65	-0.347 **
铂族-金砂矿	0.03	-0.56	0.068	83	-0.423 **
透镜状铬铁矿（主要矿物）	0.47 **	-0.07	0.020	174	-0.014
透镜状铬铁矿（次要矿物）	0.55 **	0.13	0.025	435	-0.254 **
多金属交代型矿床	0.05	-0.72	1.000	52	0.160
多金属脉状矿	0.25	-0.93 **	0.140	75	-0.277
斑岩型铜矿	-0.16	0.32	1.000	209	0.108
斑岩型铜矿与矽卡岩有关的铜矿	0.5	-1.04	0.485	18	0.078

续表

矿床类型	吨位偏移	吨位峰值	柯尔莫戈罗夫-斯 米尔诺夫概率	矿床数目	吨位与主要类型 的相关系数
斑岩型铜-金矿	-0.06	-0.24	0.339	40	0.099
斑岩型铜-钼矿	0.56	0.18	0.501	16	0.436
低氟斑岩型钼矿	0.03	-0.17	1.000	33	-0.229
交代型锰矿	0.42	-0.96	0.188	37	-0.257
交代型锡矿	-0.4	-0.55	1.000	6	0.259
流纹岩中的锡矿	0.04	-0.11	0.435	132	0.359**
Sado 热液脉型	0.37	-0.46	1.000	20	-0.132
砂岩型铅-锌矿	-0.01	-0.4	0.537	20	-0.111
东南密苏里型铅锌矿阿巴拉契亚型锌矿	-0.13	-0.96	1.000	20	-0.055
沉积岩型金矿	0.61	0.57	0.923	39	-0.090
沉积岩型铜矿	-0.02	-0.56	0.571	57	-0.029
沉积喷气型铅-锌矿	-0.25	-0.81	0.570	45	0.087
沉积型锰矿	-0.08	-0.74	1.000	38	-0.113
蛇纹岩中的石棉矿	-0.29	-0.06	0.310	50	-0.133
海岸冲积型钛矿	-0.29	-0.19	0.243	61	-0.162
硅酸-碳酸盐型汞矿	0.49	-0.48	0.382	28	0.077
单锑矿床	0.09	-0.03	0.133	81	-0.219
单锑矿床, 浸染型锑矿床	0.04	-1.1	0.983	23	0.137
云英岩型锡矿	0.2	-1.48	0.481	10	-0.353
砂卡岩型锡矿	-0.09	-1.82	0.558	4	-0.808
脉状锡矿	-0.15	-0.9	0.037	43	-0.195
同造山期-同火山期的镍-铜矿	-0.07	-0.7	0.602	32	-0.260
不整合型铀矿	-0.32	-0.62	0.132	36	-0.122
火山岩型磁铁矿	0.08	-0.75	0.538	39	-0.015
火山岩型锰矿, Cuban 型	-0.74**	-0.17	0.383	93	-0.216
火山岩型锰矿, Cyprus 型	0.26	-1.04	0.496	7	-0.265
火山岩型锰矿, 弗兰斯科型	0.37	-0.07	0.444	184	-0.110
火山岩型锰矿, Oly Pen 型	0.09	-0.16	0.477	17	0.210
火山岩型铀矿	0.11	-0.24	0.732	21	-0.346
砂卡岩型钨矿	-0.54	-0.11	0.759	28	-0.178
脉状钨矿	-0.12	-1.24	0.293	16	-0.333
砂卡岩铅-锌矿	-0.06	-0.93	0.816	34	-0.045

注: \*\* 有效性水平为 1%。