



地

国外地学信息

主编：薛山顺 王淑玲 李万伦

GUOWAI
DIXUE XINXI

中国地质图书馆

(内部资料)

地学情报专辑一

国外地学信息

主 编：薛山顺 王淑玲 李万伦

中国地质图书馆

二〇一一年十一月

编委会

主任：顾晓华

副主任：刘丽兰 单昌昊 薛山顺

委员：（按姓氏笔划排列）

马伯永 王学评 王春宁 王海华（科技处）

王淑玲 史 静 李淑英 金真针

主编：薛山顺 王淑玲 李万伦

编者：（按姓氏笔划排列）

马少平 王海华（情报室） 刘永权 刘吉成

吕 鹏 宋学信 宋 清 张 凡 张孟伯 张 炜

张 莓 李万伦 李 莉 李 瑞 陈 晶 周 峰

项仁杰 徐佳佳 徐 晟 常 艳 黄文斌 戴自希

前 言

《国外地学信息》这份地学情报专辑是以中国地质图书馆·中国地质调查局地学文献中心主办的《国外地学动态》(以下简称《动态》)为基础编辑而成的。《动态》是中国地质图书馆文献信息工作的一个窗口,其办刊宗旨是为高层管理者和有关专家、学者提供当今世界上地球科学最新、最前沿的信息,为科技创新与决策提供咨询服务;目的是通过刊物报道促进地学图书情报研究,为大家搭建一个成果发布平台;内容主要是与地质大调查相关的国外地学动态信息,包括研究热点、新技术和新方法、调查指南、地勘工作管理和计划、国外地学会议信息及其他与地学相关的行业动态等;读者对象为国土资源部、中国地质调查局的相关领导和管理部门、科研院所和地调单位的领导层和管理人员,以及大专院校师生和从事地学研究的广大科技工作者。

《国外地学信息》内容来自于国外重要期刊、图书和研究报告中最新的资料、政府部门和地学协会/组织的网站或专题报告、国外研究机构的年报和专题报告以及媒体报道。选题突出3个方面:①学科领域,包括学科热点和前沿,学科研究简史和发展动态,新理论、新方法及其运用;②资源环境管理,包括科技政策和法规,学科和地勘工作发展战略与规划,环境研究和保护,以及灾害评价、监测和防治;③社会化服务,包括经济和社会发展对地勘工作和矿业的需求和影响,地勘工作的经济效益和社会效益,地学社会化服务的方式和效果检验以及地学科普工作。

本地学情报专辑选录的85篇文章主要来自近两年出版的《动态》,还有部分专家的约稿。这些文章我们按矿产资源、环境及其他三部分进行了编排,重点是前两部分内容。矿产资源是本专辑的重点,所收录的文章范围比较广,从矿种来看,既涉及能源矿产,也涉及黑色金属、有色金属、贵金属、稀有稀土金属以及我国紧缺的非金属;从文章的研究领域来看,既包括矿产资源形势分析、矿产资源定量评价、资源管理,又包括海洋矿产、区域矿产、矿产勘查以及非传统能源(如天然气水合物、页岩气等)和高新技术矿产(如锂、稀土等)的开发和利用等。

环境问题是近30年来世界关注的热点,也是本专辑的另一个重点。环境问题中最引人注目的是全球气候变化,本专辑中收录的文章涉及了气候变化的原因和预测,特别探讨了引起气候变化的CO₂排放问题。环境污染是人类工业化进程中的一个突出问题,本专辑中也收录了与此有关的一些文章。地

质灾害,如地震、滑坡、泥石流等给人们的生命财产造成了巨大损失,尤其是像我国的汶川大地震和日本等国的大地震给人类带来的灾难是巨大,作为情报研究,我们对此也给予了关注,收录的许多文章探讨了地震的预测以及泥石流、滑坡等地质灾害的防治和监测。

本专辑除了矿产资源和环境两大部分内容外,还收录了有关地球科学的重大问题和基础学科方面的一些论文,如地球和生命的起源、地球动力学和地层学等其他内容。

中国地质图书馆是亚洲最大的地学专业图书馆,每年收编上千种期刊和连续出版物、近万册图书和各种图件,为了发挥这些图书资料的作用,更好地服务于行业和社会,馆领导做出了加强图书情报研究工作的决定。可以说,“动态”和本专辑就是这个决定的产物。我们深信,地质图书情报研究工作有中国地质图书馆丰富的图书文献为基础,有相关领导的关心和支持作动力,有全馆同志和我们聘请的专家作保证,今后将会取得更多的成果,做出更大的贡献。

本专辑汇编得到了中国地质图书馆顾晓华馆长、刘丽兰副馆长、单昌昊副馆长、薛山顺副馆长、王学评研究员、马伯永副主任、王春宁教授级高工、王海华副研究员、史静副研究馆员、李淑英副研究馆员和金真针主任的大力支持和帮助,他们提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢!

感谢项仁杰、戴自希、宋学信和吴传璧4位老专家为本专辑的选题、稿件审校付出的大量心血。感谢项仁杰、戴自希、刘吉成、张蓓等专家的撰稿。此外,感谢中国地质大学的杨永强,中国地质图书馆的王学评、刘振峰承担的部分稿件的校对工作。感谢地质出版社的孙亚芸对本专辑的审稿。

薛山顺、王淑玲负责本专辑的策划、统稿和审稿。李万伦、吕鹏、王海华、张炜、张凡和李莉参与了本专辑的汇编、整理、校对等工作。

由于水平有限且编辑时间短促,本专辑定会存在不足之处,敬请读者批评指正。

中国地质图书馆文献情报室

2011年11月26日

目 录

前言	I
目录	III
 第一篇 矿产资源	(1)
• 资源评价 •	
矿产资源综合定量评价进展	(2)
成矿远景预测分析与资源定量评价	(5)
矿床和资源量密度模型——西澳 Kalgoorlie 地带硫化镍矿产资源潜力评价	(7)
芬兰铂族元素矿产资源潜力评价	(9)
• 矿产勘查 •	
近十年来世界固体矿产勘查态势与进展	(11)
加拿大国家地学填图计划 (NATMAP) 十年回顾	(16)
铜—镍—铂族硫化物矿床的岩石圈、克拉通与地球动力学背景	(21)
与前寒武纪含铁建造共生的铁矿床	(26)
基于时间序列的齐普夫定律在判断地体资源禀赋和矿产勘查成熟度中的应用	(28)
澳大利亚世界级世纪 Zn - Pb - Ag 矿床的古地磁学研究	(30)
可见光与近红外反射光谱自动岩心测量——以澳大利亚奥林匹克坝铁氧化物铜金矿床 (IOCG) 为例	(32)
利用高密度残差资料对大规模合成孔径雷达干涉测量 (InSAR) 成像的相位解缠中的多补丁算法 (MPA) 和中心扩展算法 (CEA) 的研究	(34)
用 LA - MC - ICP - MS 法分析肖德贝里构造的流体源和热液体系结构中的绿帘石和方解石热液中的锶同位素	(35)
应用中值指示克里格法和神经网络法评估铁矿床的品位	(36)
流体包裹体研究在矿床中的应用	(38)
近地表二氧化硅沉积物中微量元素的组成——检测热液矿物和能源的有力工具	(40)
提取黄铁矿矿石中离子形式的金	(42)
贵金属矿床形成过程中纳米级金、银、铅粒子的作用	(44)
• 资源形势 •	
全球矿业 20 强和全球矿业总产值	(47)
1989 ~ 2008 年铜矿勘查回报评价	(49)
新世纪全球铜业的机遇与挑战	(52)
2009 ~ 2010 年印度矿业要事要闻	(56)
近年美国地质调查局矿产资源对外研究计划 (MRERP)	(60)
加拿大地调局：在研项目进展和相关资源	(62)
世界主要国家地调机构及油气资源管理	(64)
• 区域矿产 •	
俄罗斯的矿产资源和矿产工业	(70)

矿业——蒙古的经济支柱	(76)
哈萨克斯坦规划第一个工业规模的钾盐矿床	(80)
乌克兰铁矿工业现状和发展前景	(82)
乌兹别克斯坦卡利马克尔铜 - 金 - 铂斑岩矿床矿石中的铂族元素——全岩地球化学和激光 烧蚀 ICP - MS 数据	(87)
巴布亚新几内亚正在生产的矿山和高级勘查项目	(89)
越南矿产前景	(91)
加拿大新不伦瑞克省巴瑟斯特采矿区贱金属和共生铁矿床的反射地震成像及物理性质	(95)
铂族金属工业、矿床模型和勘探实践评述：对澳大利亚铂族金属资源潜力的影响	(97)
西澳 Yilgarn 克拉通岩浆型镍硫化物矿床成矿远景预测	(103)
西澳大利亚哈默斯利省所罗门铁矿的发现	(106)
澳大利亚西部的页岩气	(111)
巴西亚马逊盆地页岩气、石油和固体矿物开发利用的综合考虑	(116)
· 海洋矿产 ·	
世界大洋矿物原料资源的研究现状及开发问题	(120)
海洋采矿：国家需求的重要领域	(127)
现代海底块状硫化物矿床——一种新的全球性的贵、贱金属资源	(130)
首批矿点的第一个多金属结核：印度洋深海矿产资源开发	(132)
海洋沉积物中铁矿物对其化学环境的记录	(135)
· 战略矿产 ·	
铀成矿系统	(139)
俄罗斯铀资源潜力现状	(142)
俄罗斯东部铀金共生矿床形成条件	(144)
西西伯利亚板块东部发现含氢型铀矿化的可能性	(146)
在 Кодаро - удоканской 区域查明新的工业综合铀矿床远景的研究方法	(150)
古河谷矿床中铀钛团块形成的新机制	(153)
锂：具有良好潜力，抑或需要来一个飞跃？	(156)
铂族元素（PGE）地球化学：理解地球地幔的化学演化	(159)
数字时代的稀土矿产资源——轻重稀土是今天最先进技术市场的基石	(163)
冰岛火山钻探表明岩浆可能成为高级能源	(166)
第二篇 环境	(167)
· 气候变化 ·	
最新模型研究显示二氧化碳控制着地球温度	(168)
全球火山湖 CO ₂ 排放量	(169)
首次估算出地球二氧化碳自然释放和吸收量	(173)
地球的热历史可能是未来气候变暖的序幕	(175)
俄罗斯储存温室气体的地质条件	(177)
远古时期的极端全球变暖	(181)
非洲西北地区上涌流系统的季节性变化和温度变化的研究	(182)
北极木乃伊化远古森林：未来气候变暖影响的线索	(183)
古化石中预测未来气候变化的线索	(184)
没有证据表明过去 1200 万年全球侵蚀或风化速率增加	(185)
利用 SPOT 遥感影像技术监测绿叶二氧化碳置换速率	(186)
· IV ·	

• 地下水 •

全球地下水问题与对策 (187)

南亚和东南亚地下水中砷的时空变化 (190)

土壤中的硒和碘异常及健康 (191)

水文数据驱动模型技术预测能力的实验研究 (193)

深水地层格架演化 (194)

在地中海海洋湿地利用遥感影像结构识别土壤覆盖变化情况 (196)

• 地质灾害 •

破译气候变化对滑坡活动的影响 (197)

滑坡敏感性评价及影响因素分析——人工神经网络反向传播及其二元逻辑回归模型与频率比的比较
..... (199)

罗马尼亚全国范围滑坡敏感性空间评价 (200)

一个新的泥石流灾害估算方法——以冰岛西部峡湾地区为例 (201)

泥石流研究进展：流体力学、视频影像和激光扫描的现场测定 (203)

日本大地震和余震的声音——来自水下的观测 (204)

辨别汶川地震后岷江上游潜在泥石流地质灾害发生地的方法 (205)

俄罗斯 Altay-Sayan 地区 GIS 工具在构造与地震相关性方面的应用 (207)

第三篇 其他 (208)

一个关于行星地球起源的全新观点 (209)

地球内核正在熔融和冻结 (211)

过渡态金属催化剂可能是生命起源的关键 (212)

古老的酶：地球早期生命生活在热的酸性环境中 (213)

层序地层学标准化：准层序的概念应重新定义抑或摒弃？ (215)

磁性地层学——概念、定义和应用 (217)

利用水动力差异分选锆石年龄群 (222)

第一篇 矿产资源

矿产资源是经济社会可持续发展的基础，我国正处在工业化进程加快时期，也是矿产品高速消耗时期，在今后相当长的时期内，对矿产品的需求还将成倍增长。因此，及时获取、了解世界各地新理论、新技术、新的勘查进展，为我们以全球视角，选择勘查、开发目标提供依据，为国内找矿提供参考。

保证矿产资源满足我国经济发展的需要是一项重要的战略任务。我们以此为宗旨，近年来围绕矿产资源做了大量的信息研究工作。这里从我们的研究成果中精选了 53 篇文章，按照资源评价、矿产勘查、资源形势、区域矿产、海洋矿产、战略矿产等方面予以汇集。其中：

资源评价部分的代表性文章“矿产资源综合定量评价进展”全面总结了 30 年来三部式评价方法的发展和演化。

矿产勘查部分“近十年来世界固体矿产勘查态势与进展”一文全面总结了近十年来世界非燃料固体矿产勘查投资的变化，重要的矿产的储量变化以及世界新发现的 62 个重要金属矿床。此外还介绍了国外测试分析技术的新进展，例如古地磁学技术在澳大利亚 Zn - Pb - Ag 矿床中的应用、用热化学法从完全分解的硫化物矿石及其精矿中定量测定离子金的技术、LA - MC - ICP - MS 法分析铍同位素、使用 ICP - MS 法分析岩石和土壤样品中的微量元素组成及 Rb - Sr 同位素值对热液矿物和能源的指示作用等等。

资源形势部分“全球矿业 20 强和全球矿业总产值”一文反映了当前世界矿业现状，“1989 ~ 2008 年铜矿勘查回报评价”对近 20 年来的铜矿勘查回报做了回顾。

区域矿产部分介绍了巴布亚新几内亚、蒙古、越南、哈萨克斯坦等国的矿产资源。值得注意的是“哈萨克斯坦规划第一个工业规模的钾盐矿床”一文明确地指出他们的目标是中国市场：“我们具有充足的钾盐资源，可供应中国 50 年”。

海洋矿产部分“世界大洋矿物原料资源的研究现状及开发问题”一文对大洋矿产资源及开发作了全面介绍。另外两篇也对海底块状硫化物矿床和多金属结核作了总结。

战略矿产部分精选多篇有关铀的文章介绍了铀的成矿、资源潜力及勘查。锂是 21 世纪的能源金属，“锂：具有良好潜力，抑或需要来一个飞跃？”一文介绍了锂在电池方面的应用前景，以及世界锂资源和开发现状。稀土金属是当今一种重要的新材料，“数字时代的稀土矿产资源——轻重稀土是今天最先进技术市场的基石”一文介绍了稀土金属在新技术中的应用。

由于篇幅有限，这些文章只是我们近年来图书情报信息研究成果的一小部分，希望这些资料能为我国社会经济持续发展所需的矿产资源提供一点有用信息。

矿产资源综合定量评价进展

现在广泛应用的资源定量评价方法主要是 30 年前美国地调局由 D. A. Singer 等提出的三部式评价法。最近 Singer 在《Ore Geology Reviews》2010 年最新一期上发表了关于综合资源量化评价方法最新进展的文章，总结了 30 年来三部式评价方法的发展和演化。

1 三部式评价方法的发展过程

40 年前，由于部分公司在有限资金的基础上需要研究区域范围内未发现矿床的个数、矿床可能价值以及发现的几率，量化不确定性分析和勘探风险投资等相关信息，开始了最初的方法研究。早期的资料显示 Richter 在阿拉斯加 1:250000 比例尺范围内按照矿床类型采用地质信息和品位-吨位模型评价了未发现矿床；另一个关于哥伦比亚矿产资源的评价，由 37 名科学家综合编纂的矿床模型作为品位-吨位模型的初期模式得以公开发表；1993 年 Singer 最终将这些用于支持矿产资源评价的方法、过程、模型命名为“三部式”，这里强调采用“三部式”而不是“三步式”，主要是因为这些评价并不是总按照固定的程序开展，重点在于评价采用多种综合方法的集合，任何一个模型和步骤都不是孤立的。随后一系列评价技术方法和模型不断得到改进，美国地调局、智利地调局、阿根廷地调局、哥伦比亚地调局、秘鲁地调局等多国机构共同开展了矿产资源评价的合作。

2 矿床模型

矿床模型是三部式评价方法的核心部分，这些模型综合了资源评价和矿产勘查中的地质信息、矿床露头、地球物理和地球化学等不同的地质信息，不同的矿床类型需要不同的矿床模型。

2.1 描述模型

描述模型对于评价的第一部分至关重要，对于第二部分矿床类型的区分提供了基础地质资料。

1983 年 Cox 和 Singer 指出描述模型主要包括两方面内容：第一方面首先描述发现矿床位置的地质环境；第二方面给出区分矿床类型的具体特征，比如矿物组合、蚀变特征、地球化学和地球物理特征等。在一些例子中，已知矿床和矿点类型的地质环境不能直接从地质图上获得，但人们所需要的地质描述模型（集中在主岩岩性和构造特征上）要素通常容易从地质图上获得。

在已经公布的模型中，通常不同比例尺的地质图反映了不同的地质信息，选取地质图的比例很重要。“年龄范围”描述成矿的年龄，“成矿环境”描述地质环境和具体位置，“构造位置”描述相关主要构造特征或成矿省，“有关矿床类型”主要描述形成典型矿床类型的合适条件。以上讨论的描述模型主要建立在专家知识的基础上。随着经济的发展，另一种选择是：通过收集每一种矿床类型的已勘查的矿床数据，由专家按照那些共同特征和不同特征进行分类来建立描述模型。量化矿床特征对于下一步统计汇总分类已知矿床类型至关重要。

2.2 成本模型

判断未发现矿床是否具备经济价值是发展三部式资源评价方法的初衷之一。在评价方法中，三部式评价方法中成本模型用来排除即使发现也是没有经济价值的矿床，具备经济价值的矿床再进一步建立品位-吨位模型。这些成本模型采用矿床的储量、品位和埋深参数评价运行成本和固定成本，采取不同的采矿方法和每日采矿量会有不同的结果，最后通过经济滤波器筛选出具有经济价值和没有经济价值的矿床模型。这些模型能够应用到大量不同矿床类型的矿床评价中，同时需要根据矿床的位置和矿产品的价格波动进行调整。

2.3 密度模型

在预测矿床个数方面，建立在矿床密度基础上的方法相对比较完善，通过统计勘查情况较好的地区每单位面积矿床的个数，利用概率来预测未发现矿床的个数。矿床密度模型直接应用于预测未发现矿床个数或者为其他方法提供重要依据。

2005 年 Singer 总结了全球斑岩型铜矿床的矿床密度模型。2009 年 Singer 进一步改进和增加了矿床个数精度，通过控制区矿床类型和控制区矿床数量精确性之间的关系研究，得到斑岩型矿床线性回归和区间相关预测方程组如下：

$$R_{50} = -1.0252 + 0.42788 \log_{10}(\text{面积}) \tag{1}$$

$$L_{90}, U_{10} = R_{50} \pm t_{s_{y|x}} \sqrt{(1 + 1/n + (\log_{10}(\text{面积}) - 4.622)^2 / (n - 1)s_x^2)} \tag{2}$$

找矿地质可行地段平均面积 4.622 km²， $t = t_{10,31df} = 1.309$ ， $s_{y|x} = 0.2444$ ， $n = 33$ ， $s_x^2 = 0.2912$ ，同时 R_{50} ， L_{90} 以及 U_{10} 依照 10 的对数函数进行评估，预计矿床个数 (N):

$$\log_{10} E(N) = \log_{10}(N_{50}) + (((\log_{10}(N_{10}) - \log_{10}(N_{50}))/t)^2)/2 \tag{3}$$

这种方法用来评估评价区的矿床总数。预测未发现矿床时，评价区已知矿床个数需要通过公式 (3) 的计算剔除。这需要按照 90% 和 10% 的概率修正期望值和方差。回归方差预测如下：

$$Var(N) = ((\log_{10}(N_{10}) - \log_{10}(N_{50}))/t)^2 \tag{4}$$

修正的已知矿床个数的平均数调整对数公式：

$$\log_{10}(N_{50}) = \log_{10}(10^{E(N)} - \text{已知矿床个数}) - Var(N)/2 \tag{5}$$

$\log_{10}(N_{50})$ 指公式 (2) 中在已知矿床统计基础上未知矿床的概率性估计。

最近 Mosier 等人进一步建立了火山成因块状硫化物矿床的密度模型。密度模型近来发展成为预测未发现矿床个数的有效工具，在大部分情况下普遍的回归模型可以提供较无偏差、合理的结果。

2.4 品位-吨位模型

品位-吨位模型是根据某类型矿床或某种矿产的大量矿床的矿石品位和储量资料，统计整理编制的能反映其品位和储量基本情况的图解。一种图解是采用某一类矿床的矿石品位和储量吨位得到的频率累计曲线，用以展示不同品位或储量吨位所占的比例。另一类图解则以矿石品位和吨位为纵横坐标，绘出某一类矿产不同类型矿床的分布范围，用以比较各类型矿床的矿石贫富和储量大小。品位-吨位模型作为三部式评价方法的一部分，采用坐标图的方式表示，易于比较各类型矿床和显示数据。横坐标一般采用对数刻度表示吨位或品位，纵坐标表示矿床的累积百分数。图中的每一个点代表一个矿床的数值从小到大顺序排列，并计算每个矿床的对应变量值的百分比在坐标图上的投点。最后，根据品位或吨位对数值的平均值和标准差以及正态分布表对图中的观测值进行曲线拟合，拟合曲线一般呈向后的 S 形。拟合曲线提供了估计未发现矿床品位和吨位的基础。

3 综合方法评价

三部式资源定量评价方法运用过程是多种方法综合应用的结果，根据实际情况，选择不同的矿床模型，并且在模型基础上结合实际调整和修正，应用多种评价软件和蒙特卡洛模拟进行评价。近来神经网络方法也引入到评价方法中，矿产资源综合定量评价方法还有待进一步发展和改进。

(李莉编译自: Donald A. Singer. 2010. Progress in integrated quantitative mineral resource assessments. Ore Geology Reviews, 38: 242 ~ 250)

成矿远景预测分析与资源定量评价

1 成矿远景预测分析

成矿远景分析主要应用于矿区规模大比例尺的矿产勘查预测工作，通常用于特定勘查目标，较少应用于直接的勘查工作当中。

成矿远景预测分析的传统方法：在地质人员经验和地物化资料的基础上划出远景区；圈定区块或矿体边界，目标评价受到目标矿床成因模型的指导，利用成矿带或其他相似成矿带上已知成矿类型矿床的地质特征以及过去的勘查数据，在地质图上标出远景目标区以及相关类型的矿体边界。

这些方法相对容易操作、快速并且有效，但是局限性在于存在偏差和较高的主观性，同时也缺乏透明度和可重复性。这是因为矿床模型一般建立在矿床尺度上，因而在大范围内的成矿潜力预测有效性减弱；矿床模型建立的地质特征主观性强。McCuaig 等人指出了建立在特征基础上潜力分析的一些局限性。

成矿远景预测分析法的第一个主要改变是统计模拟技术应用于成矿远景预测分析，在 20 世纪 60 年代末到 70 年代初期，针对成矿远景预测分析的主观偏差和不可复制性，一群美国和加拿大数学地质学家开始尝试将统计模型应用于矿产远景预测分析和资源定量评价，该技术主要对比在勘查基础好的特定成矿带内已知矿床和地质特征的数据，建立空间关系模型，应用模型推断成矿带其他勘查基础薄弱地区的目标矿床的概率。与此同时，斯坦福研究所开发了用于评价资源潜力的专家系统——Prospector，Prospector 系统广泛应用于美国和加拿大不同矿床类型的远景分析。

作为预案及分析的最后组成，数据驱动和知识驱动统计方法形成了这一领域后来发展的基础。20 世纪 80 年代中期到末期，地理信息系统（GIS）的商业化发展加速了远景成矿分析统计模型的发展，通过自动联系空间特征和非空间特征，GIS 环境使统计和计算机软件应用于非空间领域或者需要更先进程序技术的领域。到 20 世纪 80 年代末，F. P. Agterberg, G. F. Bonham-Carter 合作开发了 Bayesian 权重模型（证据权模型）。在 GIS 环境下开展成矿远景分析，证据权模型具有客观、易于操作和解释的特征，它是成矿远景预测分析中应用最为广泛的数学模型之一。

20 世纪 90 年代末到 21 世纪初，应用计算机软件技术成为成矿远景分析中的新潮流。模糊逻辑模型最初由 An 等人应用在成矿远景预测分析中，Singer、Kouda、Harris 和 Pan 等人则证明人工神经网络相比证据权模型能提供更为精确的远景预测。神经网络法虽然不同于证据权法，不需要参数之间相对强度的解释，但是它也有其局限性，神经网络需要大量的训练数据（已知矿床）进行最优化操作，最近有关支持向量机和遗传算法系统及项目的研究显示这些机器学习算法将有助于克服以上局限。近来数据驱动和知识驱动交互的方法，如模糊证据权法和神经模糊法模型，同时在成矿远景预测中优化利用了某些概念和经验数据。

成矿远景预测分析的第二次主要的转变是成矿体系概念的引入。随着这一体系的应用，焦点从建立在特有地质特征的固定矿床模型转移到建立在成矿过程的填图特征基础上更灵活的成矿体系模型。在成矿体系中，形成矿床关键的成矿作用包括①成矿动力学背景、成矿动力学机制；②热液流体的来源；③金属成矿物质和金属化合物化学配位基的物质来源（金属成矿物质来源）；④金属成矿物质运移的区域（流体通道）；⑤金属成矿过程，通过圈闭地区流体运移或熔融作用所引起的化学物理过程的改变；⑥成矿时间。成矿体系方法的主要优势在于给定的成矿模型可以在不同比例（规模）的成矿

远景分析中都能应用。

过去的研究主要集中在将数学模型的统计和方法学应用在成矿远景分析中。然而，数据的质量和可靠性，以及应用模型的知识基础同样重要。

2 资源定量评价

成矿远景预测分析回答“哪里”的问题（在哪里最有可能发现矿床），资源定量评价回答“有多少”的问题（未发现矿床含有多少金属量）。

资源定量评价的倡导者主要是美国地调局的 D. A. Singer，Singer 开展了 40 多年有关资源定量评价的概念和方法研究，其中最著名的是三部式评价系统：根据实测地质条件确定评价区可能的矿床类型，以与之对应的矿床模型为基础，客观综合多源地学数据，圈定可能赋存该类型矿产资源的地质找矿可行地段；用与区内推断矿床模型相一致的全球矿床品位 - 吨位模型评估每个有利地段各类型矿床可能出现的数目；根据相应品位 - 吨位模型估计有利地段未发现矿产的资源规模。未发现矿床的数量估计可以利用 Mark3 软件来实现。

USGS 三部式评价系统广泛应用于矿产资源定量评估。最近，Mamuse 等人采用该方法开展了西澳 Kalgoorlie Terrane 硫化镍矿床密度模型分析。

同时，近几年，还出现了替代技术的研究潮流，特别是齐普夫定律。齐普夫定律广泛应用于神经和社会经济系统的频率分级分布的建模，到 20 世纪 70 ~ 80 年代，为了预测油气田剩余资源量采用了此方法。Merriam 等人于 2004 年再次发现了齐普夫定律在解决地质问题中的可应用性。Fagan, McCuaig 和 Guj 的后续工作证明齐普夫定律能够用来估计矿产资源，尤其是剩余储量。

另一种资源定量评价的替代方法是单一能级预测，这一方法是 McCammon 和 Kork 等人提出的，单一能级预测方法的利用成为实现大区域估计金属量的一种数值方法。

（李莉编译自：Porwal, Alok K, Kreuzer, Oliver P. 2010 Introduction to the special issue: mineral prospectivity analysis and quantitative resource Estimation. Ore Geology Reviews, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2010.06.002.）

矿床和资源量密度模型——西澳 Kalgoorlie 地带硫化镍矿产资源潜力评价

1 矿床与资源量密度模型

矿床和资源量密度模型是三部式评价方法的重要组成部分，三部式评价方法包括三大步骤：①根据所要预测的矿床类型圈定找矿地质可行地段；②运用与预测矿床类型相适应的标准品位-吨位模型估计可能发现矿床的金属量及质量特征；③估计成矿远景区内可能发现的矿床个数。

第三步对未发现矿床数量的估计是矿产资源定量评价的一项重要内容，目的是为了表达在可行地段存在未发现矿床的概率（可信度）。可直接或间接用于这种估计的技术方法很多，这里主要运用矿床模型法，根据已勘探区内单位面积的矿床数来计算，结果为矿床的频率分布，可用直方图表示。矿床个数估计必须和矿床类型及品位-吨位模型相一致，同时还要求服从如下原则：已知勘探区矿床分布密度；局部矿床外推；统计异常和矿产地概率；过程限制；相对频率；空间面积。

通过参照较好勘查控制区单位面积的矿床数量和产生的频率分布模型评估，可以直接或间接地指导未发现可行地段矿床个数的最终估计。矿床密度现在可以用来为专家评判未知的矿床个数或者直接用于统计大多数类型未知的矿床数量提供指南。

2 西澳 Kalgoorlie 地带硫化镍矿产资源潜力评价

利用矿床密度回归模型来预测这个未知的矿床数字，在矿产资源评价方法中是认可的。当前使用的矿床密度回归模型是建立在已有的矿床密度（矿床数/平方公里）和全球范围内勘查情况良好地区含矿岩石区域（控制面积）之间的幂定律关系基础上的。虽然这些通用的或者全球矿床密度的模型可以对区块规模的地区起到指导评估的作用，但是在局部地段基础上推导出的矿床密度回归模型可能产生与此地区更为相关准确的估计。在西澳 Kalgoorlie 地带选择了 12 个控制地区，我们发现控制地区面积和硫化物矿床密度及镍储量密度（镍金属/平方公里）具有幂定律关系。回归分析显示两者有 5% 统计学函数幂律关系的水平偏差，说明镍硫化物矿床和资源量密度模型可用于预测 Kalgoorlie 地带勘查活动较少的科马提岩未知镍硫化物的矿床和数量。该研究表明，全球地质关系可以有效地减小到当地的地质条件以支持这个矿床形成过程和保存规模独立性和自相似性的假设。

对提取的 12 个控制区的数据进行了研究归纳，其中包括 92 个岩浆矿床组，109 个矿床。两个镍矿床密度和镍储量密度结果显示 12 个控制区内科马提矿体的面积范围和 Kalgoorlie 地带呈现函数相关关系。回归分析显示 12 个科马提岩岩体呈现 95% 的置信度。在西澳 Kalgoorlie 岩层 12 个控制区中科马提岩岩体地区和镍硫化物矿床密度以及镍资源量密度之间统计存在 ($p < 0.05$) 函数关系。建立上述统计学差异基础上的线性回归模型可以用来估计 Kalgoorlie 区岩层较薄弱勘查控制地区镍硫化物矿床的个数和镍金属量。在该研究中开发的模型可以为研究工作和勘查工作薄弱的科马提岩地区提供指导，比如非洲南部、加拿大和巴西等地。随着在这些区域勘查成熟度的提高，可使用此次研究采用的方法根据当地科马提岩的控制面积，建立地区矿床和资源密度模型，以便对镍硫化物矿产资源进行更

加准确的评价。我们在此项研究中采用的方法也可利用于其他成矿系统，比如火山成因块状硫化物矿床系统。

(李莉编译自: Antony Mamuse, Steve Beresford, Alok Porwal, Oliver Kreuzer. Assessment of undiscovered nickel sulphide resources, Kalgoorlie Terrane, Western Australia. Part 1. Deposit and endowment density models. Ore Geology Reviews, 2010, 37: 141 ~ 157)

芬兰铂族元素矿产资源潜力评价

芬兰的大部分铂族元素资源是与铁镁质—超铁镁质层状侵入体有关的接触交代型和 Reef 型矿床。这些侵入体预计可能包含大部分芬兰尚未发现的大量矿体，使用三部式评估方法开展 Pt、Pd、Au、Ni 和 Cu 资源潜力评价，预测在地表以下 1000 米深接触交代型和 Reef 型矿床。

1 芬兰铂族元素资源潜力

在过去几十年里多种方法应用于评价尚未发现的矿产资源，但是整个过程一直面临挑战而且还没有得到广泛接受的固定程序。此次资源潜力评价采用的方法以美国地调局的三部式量化评价方法为基础，该方法从 1975 年开始为美国地调局和其他机构采用。该方法提供了一个在不确定条件下评价未发现矿产资源的决策体系框架。评价方法使用数据统计方法分析和整合，灵活地整合大量不同的地质客观数据和专家主观认识，从而产生可复制的评价结果。

第一步，选择 19 个接触交代型和 24 个 Reef 型评价地区。根据选定评价区进行数据采集，收集所有可以利用的芬兰层状侵入体铂族元素矿床和露头的资料，包括编辑的地质图和数据、地球化学和地球物理调查数据、矿床的报告和出版物以及其他任何与芬兰层状侵入体和侵入相关的铂族元素矿床有关的信息。此次评价采用的地质图主要来源于芬兰地调局 2008 ~ 2009 年更新的数字化基岩数据；地球物理信息包括覆盖整个芬兰的低空航磁、电磁和放射性调查数据，以及覆盖大部分侵入体的重力数据；地球化学数据和钻孔数据主要来源于芬兰地调局。随后开展评价区域的基本情况描述，评价区域建立在北部芬兰地区大量研究和已开发矿床的基础上，由 3 个芬兰专家分别描述 Reef 型矿床和接触交代型矿床类型。

第二步，矿床模型的建立是整个三部式量化评价过程的基石，三部式评价方法包含不同的矿床模型，根据此次评价的目的，我们仅使用描述模型和品位—吨位模型。描述模型包含必要矿床特征的描述，主要用于描述不同矿床类型的地质特征和地质环境。品位—吨位模型包含特定类型的吨位和平均品位。这些数据用来描述在相似地质条件下未发现矿床的品位—吨位分布频率。

统计结果显示芬兰的接触交代型矿床的品位—吨位与全球矿床接触交代型模型相比，吨位偏低，Ni 和 Cu 的品位偏高。因此，该地区需要采用地区的品位—吨位模型，最终模型包括 8 个矿床（6 个来自芬兰，2 个来自俄罗斯）；Reef 型矿床模型情况也比较特殊，按照每个脉状评价区修改了标准三部式方法的标准模型，每一个单独的 Reef 型矿床评价区采用单独的吨位，所有 Reef 型评价区采用统一的品位。对于每一个 Reef 型矿床评价区，未发现矿床可能存在的吨位通过 Systat 软件进行蒙特卡洛模拟。

第三步，预计评价区的未发现矿床个数，矿床类型预测必须与品位—吨位模型相一致。评价区按照不同的接触交代型矿床和 Reef 型矿床开展预测，采用 Eminers 软件预测包含不同概率分布的未发现矿床品位和吨位情况，将评价区按照不同的概率 90%、50%、10% 可能存在的未知矿床的个数和品位—吨位模型数据输入 Eminers 软件，得到评价区的非参数频数分布的未发现矿床的平均数，采用 Singer 和 Menzie 定义的公式计算预计矿床的标准误差和非参数分布。软件采用蒙特卡洛模拟方法根据经验曲线和对数正态分布预计品位—吨位模型的矿石吨位和金属品位。预计未发现矿床个数为接触交代型 29 个、Reef 型矿床个数 23 个；如果按照 50% 的概率水平，芬兰铂族元素资源潜力预计为：Pt5600 吨，Pd12000 吨，Au430 吨，Ni4.2 百万吨，Cu5.7 百万吨。按照 90% 的概率水平，类似的预计