地学前缘
EARTH SCIENCE FRONTIERS

基于风险分析的商业性找矿预测新方法与应用

方维萱， 郭玉乾

1. 有色金属矿产地质调查中心 北京资源勘查技术中心，北京 100012
2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室，北京 100083

Fang Weixuan， Guo Yuqian

1. *Centre of Beijing Resource Survey Technology*, *China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey*, *Beijing* 100012, *China*
2. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing* 100083, *China*

Fang Weixuan, Guo Yuqian. New ore prospecting methodologies based on risk analysis in commercial assessments and their applications. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 209-226

Abstract: The new ore prospecting methodologies based on risk analysis in commercial ore exploration and assessments are to focus on ore prospecting in the vicinities and deep parts of metal mines and on the venture capital investment in commercial ore exploration and assessments. We have systemically reviewed the achievements in ore prospecting from the views of risk analysis and economic geology, and summed up the following methodologies that can be widely used in ore prospecting for metal mines: those are the patterns of ore-forming and geochemical halo-forming and the related predicating system of geology-geochemistry; the tectonic geochemistry; the balance sheets of exploration-exploitation of orebody; the optimization of occurrences and anomalies in the scope study, such as mineralization probability of occurrences and anomalies; the extensive assessments and quantitative predication. The mineral-geochemistry and the sublithofacies and microlithofacies mapping of lithofacies may also be broadly applied for ore prospecting and predication but only after making some improvement. With the development of ore prospecting methodologies based on risk analysis in commercial ore prospecting and assessments, the demands of the drastically increasing tasks of commercial ore-exploration overseas can be steadily met. Thereby the management of ore exploration and exploitation will be promoted in the future.

Key words: metal mine; vicinities and deep parts of mines; risk analysis; ore predication; new methodology

摘　要：基于风险分析的商业性找矿预测新方法主要限于针对矿山深部和外围找矿预测与风险投资中的商业性矿产勘探。从风险分析和经济地质学角度对以往研究成果进行系统总结，认为成矿成晕模式与地质地球化学找矿预测系统、构造地球化学方法、矿体探采对比、广度搜索选优评价(矿点与异常成矿概率法)、深度解剖评价与定量预测等技术方法在金属矿山(床)找矿预测中应用前景广阔，矿物地球化学、岩相学亚相-微相填编图等新预测方法完善后可广泛推广应用。基于风险分析的商业性找矿预测方法技术不断发展，有助于满足境外矿产勘查迅猛发展和矿业权交易量增加的商业性矿产勘查新局势需求，推动矿产勘查和开发项目现代管理水平的提升。

收稿日期：2008-07-05；**修回日期**：2008-10-06
基金项目：科学技术部“十一五”国家科技支撑计划项目“危机矿山接替资源勘查技术与示范研究”；东川—易门铜矿山深部及外围勘查技术及示范研究(2006BAB01B09)
作者简介：方维萱(1961—)，男，研究员，博士生导师，长期从事矿山地质找矿、生态地球化学、境外矿产勘探开发与项目评估的研究与教学工作。E-mail: fangweixuan@tom.com

关键词:金属矿山;矿山外围和深部;风险分析;找矿预测;新技术方法
中图分类号:P618.109 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2009)02-0209-18

从20世纪60年代开始,在我国矿山地质找矿取得进展中,较为著名的成功案例有辽宁青城子铅锌矿、广东凡口铅锌矿、湖南水口山铅锌矿、云南个旧锡多金属矿和东川—易门铜矿、杨家杖子钼矿、湖南锡矿山锑矿、赣南钨矿、湘南钨矿等一系列找矿突破。原中国有色金属工业总公司地质局于1991年10月在云南个旧召开了全国有色金属系统老矿区(田)二轮找矿研讨会,并内部出版了《全国有色重点老矿区(田)二轮找矿研究会议论文专辑》,在矿山地质找矿成功案例总结的基础上,在金属矿产找矿预测上形成了较为完善的"四新"(新矿段、新层位、新类型和新矿种)思维。在欧阳宗圻和刘泉清等人主持下,从20世纪70年代后期开始,先后完成了有色金属、贵金属矿床地球化学异常模式和勘查模型研究,涉及21个省(区)、32个典型地区,建立了铜、钼、铅锌、银、金、锑、钨、锡多金属、铌钽等矿种不同成因类型、不同层次的矿田和矿床地球化学异常模式与勘查模型58例;矿床地球化学异常模式与勘查模型[1-3]汇集了我国有色金属、贵金属矿(田)床研究成果,该项研究对我国金属矿产大比例尺找矿预测发展起了推动作用,取得了很好的找矿效果。20世纪90年代至今,该研究领域得到更深入发展和持续的方法技术创新,如李惠等[4-5]完成的金矿床构造叠加晕模式和盲矿预测模型,方维萱[6-10]完成的陕西凤太和小秦岭地区金多金属矿床成矿成晕模式和地质地球化学预测系统等研究和应用,为金属矿山(床)外围和深部隐伏矿体预测和找矿、金属成矿区带和矿区化探异常优选评价提供了一些有效的新技术方法。构造地球化学、地层地球化学、岩浆岩地球化学、矿物地球化学、火山岩-热水沉积岩岩相的亚相-微相以及其他新技术方法的[11-12]逐渐完善为商业性金属矿产大比例尺找矿预测提供了新技术方法;但这些预测方法中对于风险分析基本没有涉及,成矿预测必然具有不确定性,基于风险分析和度量进行找矿预测是当前矿产勘查中常被忽略的问题。矿产勘查是一项高风险、长周期和高回报率的投资过程,重视风险投资中风险分析与度量,制订应对风险措施进行风险管理是今后一项十分重要的研究方向和课题。投资风险与投资收益是一对孪生兄弟,如果投资风险因素分析和评估比较合理,并且在矿产勘查过程中比较好的控制和应对风险,常可以得到高回报率。特别是在境外进行矿产勘查,风险因素和类型比国内更为复杂和多变。在商业性矿产勘查与找矿预测中,有效控制风险是地质学家执业的新要求,也是现代项目工程管理学中必须研究的问题。

在近年来国际矿产品价格迅速攀升、矿山后备资源不足、可供新建设的矿产地短缺,危机矿山接替资源找矿项目的实施,矿产地普查和勘探的项目可行性研究,以及国内具有普查和勘探的矿业权交易过程和境外矿产地(矿业权)收购等商业性地质找矿活动中,基于风险分析的商业性金属矿产大比例尺找矿预测(包括金属矿山和矿产地的深部和外围资源潜力评估等问题)成为当前急需探讨和解决的科学技术问题。国际上矿业大国矿业资本市场较为成熟,已经建立了矿产勘查地资源潜力评估与交易行规、矿业权商业价值判断预测的方法技术[13],我国由于商业性地质找矿工作尚处于起步阶段,对于矿产地的商业价值评估和资源潜力评价还处于初期阶段,但随着我国培育和发展矿业资本市场[14]和矿业权交易市场不断完善和规范[15],商业性矿产勘查和境外矿产勘查不断加速等新局面出现,具有预查、普查和勘探价值的矿产地的矿业权交易过程中对于价值判断和预测已成为关键问题和热点。本文旨在总结、探索和完善基于风险分析的商业性金属矿产大比例尺找矿预测,供同行批评指正。

1 基本性质、原则与任务

1.1 基本性质

基于风险分析的商业性金属矿产大比例尺找矿预测(包括金属矿山、矿床和矿产地等)一般为1∶10 000~1∶500比例尺,具有经济地质学与风险投资决策中战术性与作战方案制订过程的特殊性。它是成矿理论、成矿预测与矿产勘查实践之间的"桥梁",是成矿理论应用于矿产勘查的基本途径之一,也是成矿预测结果验证的关键过程。因此认为找矿预测是成矿理论研究、成矿预测与矿产勘查的紧密结合形式,也是理论与实践结合的连续过程,这一连续过程贯穿于当前实施的矿产地普查、勘探和开采

可行性研究之中。近年来实施的危机矿山接替资源潜力评价、立项与勘查、生产勘探与试验性开采过程中,具有普查和勘探的矿业权交易过程与勘探投资计划制定、境外矿产勘查中选区、申请登记、资源潜力评价、普查、矿业权放弃、矿业权面积缩减与延续登记过程中表现最为明显,而这些商业性矿产勘查过程的连续实现与矿业权的部分权益延续、放弃或终止一般都需要进行找矿预测成果来支持项目决策,这是我国矿产勘查界当前和今后必须面临和解决的技术经济和矿产勘查的综合性复杂问题。随着境外矿产勘查项目的实施,这个问题表现得十分突出。除技术援助地质项目外,境外矿产勘查首先是国际投资学问题,项目本身只是货币、时间与投资机会成本、技术和人力资源的投资载体,也是现金投资完成后生产的具有可交易价值的实物资产(矿业权);进行矿业权区的找矿预测是判断矿业权资源潜力和商业价值依据,也是进行投资预测和规划、项目投资评估和投资返回能力预测的基础。

(1)基于风险分析的找矿预测是在商业性矿产地普查和勘探与矿山生产勘探中的一项前期和勘查工作过程中的专项研究工作。基于风险分析的找矿预测主要分为区域性择优选点评价、普查与勘探前期规划研究和勘查过程中专项研究 3 个层次,与成矿预测方法技术组合[16]具有明显差别,主要是预测者与勘查者属于同一主体并涉及风险投资的资金安排使用。对于这一连续过程受到相应机构的监督与管理,预测者要承担风险投资使用的效果后效评估中的对预测者进行资信评估,这些特点在矿业权交易中表现得最为显著。一般具有相应的实物工作量和专项勘查技术方法投入,需要对矿体进行三维空间上定位和定量预测。找矿预测以具体矿产勘查方法投入和技术创新为主要特点,依据矿产勘查和综合研究成果,以部分山地工程验证揭露为手段和勘查工程揭露矿(化)体参数(见矿厚度、品位和小体重(矿石的平均密度)等测试数据)为依据,对找矿靶区与靶位进行大比例尺(1∶5 000～1∶500)定位定量预测,估算 334? 类资源量,直接进行重型山地工程布置验证。在矿产地普查和勘探与矿山生产勘探中,基于风险分析的找矿预测更注重应用基础理论和技术创新,具有更浓厚的矿产勘查-综合研究性质,即解决矿产勘查过程中实践性问题,并制订详细的、经济可行的勘查工作方案和技术路线。

(2)基于风险分析的找矿预测是危机矿山深部和外围的找矿预测接替资源找矿的决策依据之一。从技术经济地质角度看,基于风险分析的找矿预测基本理解为对矿产勘查区实际成矿地质条件进行研究,以现代成矿理论和矿产勘查理论为指导,在有效勘查方法探测基础上,对矿体三维空间分布规律和范围进行定位定量预测,在可行性分析、不确定性分析、风险分析和预期经济效益分析基础上,优化和制订矿产勘查方案,预测和圈定金属矿体空间位置,进行价值判断和预测。在矿山深部和外围找矿预测中,估算和预测项目投入费用的投入-产出比是首先需要回答的技术经济学和资源勘查工程学问题,对于找矿靶位进行资源潜力评价和找矿预测,这是我国危机矿山深部和外围找矿预测面临最大的新挑战。如国土资源部组织实施,截至 2007 年完成的千余个全国主要固体矿产大中型矿山资源潜力调查报告中,在对矿山的资源潜力预测中,对预测区概况、预测依据(包括地质依据和勘查工程依据)、预测的资源储量、勘查工作部署原则与方案、预计工作量、预期成果、经费进行估算。其中,有色金属矿产地质调查中心在对有色金属危机矿山进行同行专家资源潜力评估中①,要求评估专家按照前期工作基础(矿区地质勘查工作程度、矿山地质工作程度、近外围及外围地质工作程度)、预测区(深部、边部、近外围和外围 4 个部位)、预测区地质工作程度(地质、物探、化探、探矿工程)等依据进行地质勘查工作类别划分,预测区矿业权属、预测区勘查工作类别及资源潜力、预期成果的社会经济意义、国民经济需求程度和调查报告质量等进行评估与评述,最终进行危机矿山资源潜力评估。这也是商业性地质找矿中必须回答的基本问题。

(3)基于风险分析的找矿预测技术成为当前各矿业集团公司研发的核心关键技术之一。公益性地质勘查是由国家和地方政府投资并获得投资收益,承担投资风险,预期取得长期的宏观收益和区域经济发展,而商业性矿产勘查和开发主体是由矿业企业、风险投资基金、社会投资人和投资机构等进行投资,风险投资需要重视投资收益并承担投资风险,预期取得近期微观经济效益和可变现能力强,推动投资主体内部不断发展,因此需要基于风险分析的找

① 孙肇均,方维萱,袁继明,等. 全国有色金属矿产主要大中型矿山资源潜力调查评估工作报告[R]. 北京:有色金属矿产地质调查中心,2005: 1-70.

矿预测。尽管目前还缺乏公认完整的商业性矿业和勘探投资评价体系,但基于风险分析的找矿预测方法技术体系是有助于探索建立的新方法途径之一;国外已经形成了风险投资与矿业权交易评估规则、行业标准[13],一些勘探项目的商业价值判断和预测方法核心技术多处于商业保密状态,因此,基于风险分析的找矿预测技术成为当前各矿业集团公司研发的核心关键技术之一。基于风险分析的找矿预测与快速评价技术在矿业公司实物资产(矿业权)的实物期权评估与预测中也是新发展领域,是在市场经济条件下矿业公司核心竞争力的表现形式之一。随着现今全球矿产品涨价、矿产勘探投入费用不断增加、勘探项目交易量攀升等新局面,在矿业项目管理与交易中,对矿产地普查或勘探项目进行基于风险分析的商业价值判断和预测成为首要问题,需要对矿产地普查或勘探项目找矿前景进行预测,预测找矿潜力与投入-产出比,实现矿业项目商业投资价值再发现,减小投资风险,提高投资成功率和投资效益。

(4) 基于风险分析的找矿预测是矿产勘查项目成长性评估的重要依据之一。矿业权包括探矿权和采矿权。在勘探权交易和联合风险探矿中,矿业权地的预查、普查、详查和勘探是4种不同勘查阶段和探矿工程控制程度,也是不同程度基础上的新工作起点,4种不同矿业权地内的拟投资额度、不确定性、未来投资风险程度和度量方法差异很大,合资经营双方或多方的股权比例和投资方式也是极不相同,都需要进行基于风险分析的找矿预测。依据矿业权地的资源潜力评价结果进行项目风险分析和风险度量,最终评估这类矿产勘查项目的未来成长性;依据项目成长性、项目生命周期、投资方式、风险类型等综合因素进行风险投资决策。矿产勘探权属于复合期权,它是基于看涨期权基础,但不确定性很多且大,必须进行项目不确定性分析。勘探过程是不断减少不确定性的过程,因此具有复合期权特点。影响这种复合期权的不确定性主要有两种,即地质资源不确定性和矿产品价格不确定性,具有风险投资属性。因此,在投资之前需要进行基于风险分析的找矿预测,依据项目不确定性分析进行商业价值判断和预测。如在法律上,智利矿业权中探矿权与采矿权两权并置中,探矿权没有排他性,采矿权具有排他性,地面土地使用权具有可协商协调特征取得共同协议。对于探矿权与采矿权分别进行基于风险分析的找矿预测与资源潜力评估,在法律不确定性分析、资源潜力评估、环境预评估等基础上,预测矿产勘查项目的成长性就显得十分重要。

矿产开采权属于看涨期权,勘探阶段已经基本消除地质的不确定性,因而开采阶段影响项目价值波动的主要因素为市场矿产品价格,因此,矿产开采权属于看涨期权,具有投资-收益属性。矿业实物期权价值估算涉及6个参数:项目的当前价值(A)、项目价值的波动率(U)、预期的勘探成本(X)、无风险利率(r)、现金流量年度折损率(S)和项目到期时间(T)。对于矿产勘探权和开采权分别按照复合期权和看涨期权进行实物期权交易价值预测;但可比价格、可变价值需要基于找矿预测结果和风险度量预测综合判断,更加具有商业-金融属性,这种价值发现完全不同于现货交易中的价值发现原理,更多的是基于科学技术与商业交易的融合。如在境外对小型采矿权收购与合作风险勘探是缩短投资的时间和成本的有效路径,具有科学家的理念与商人价值结合过程的特点,进行小型开采项目深部和外围找矿预测结果和进行项目成长性预测就显得十分突出和重要,而基于风险分析的找矿预测研究结果是评估选择收购矿业项目与风险勘查投资的主要决策依据之一。

1.2 基本原则与任务

基于风险分析的找矿预测基本原则主要为"以实际成矿地质特征为依据,以矿床工业类型和现代成矿理论为指导,以找矿预测思维方法创新为核心,以有效勘查方法投入为原则,以可行性分析为准则,以应对风险为关键,以效益最大化为目的,开展优质矿产大规模勘查前期准备工作"。这是遵循技术经济地质学观点的资源勘查工程学思路,核心是如何圈定预测矿体,进行不确定性分析、价值判断和预测,分析风险类型和管理风险,估算费用投入-产出比等社会经济和生态环境效益。基本任务主要有以下6个方面:

1.2.1 圈定找矿靶区

遵循"以实际成矿地质特征为依据"原则圈定找矿靶区,要解决找什么矿和到哪里找矿的问题。成矿理论研究尤其是成矿系统新理论[16-29]在找矿预测中具有十分重要的作用,这是识别是否具有成矿条件、成矿作用发生的环境和基础,也是进行找矿预测的基本前提。基于风险分析的找矿预测关键在于采用什么勘查方法,如何寻找和识别有效的找矿标志,并圈定和预测这些标志体的空间分布范围,进行必

要探矿工程验证和揭露,证实可靠性后进行三维空间定位定量预测。因此,需要依托以往的矿产勘查资料,以现代地质科学理论[16-29](特别是成岩-成矿理论)为指导,研究预测区成矿条件和矿产特征,提取矿体形成和分布规律信息;以矿产勘查模型为桥梁,科学地把相关成矿科学理论、规律和经验(包括大地构造学、岩石学、岩相学、矿田-矿床构造学、地球化学、地球物理学、矿床学等相关科学理论和方法)与工作区的地质矿产成矿环境和成矿条件、矿产出现标志和找矿模型等有机融合,以预测矿体产出三维空间位置为目标,并据此提出合理的矿产勘查工作方案。

1.2.2 分析主攻类型

分析预测工作区矿产勘查的主攻类型要回答找什么类型的矿种? 在进行规模性矿产勘查工作实施前,都有一个找矿预测过程,作为地质勘查工作的前期准备,将会大大提高找矿发现率和找矿效果,节约勘查成本,降低勘查风险。因此需要在结合实际地质条件的基础上,以矿床工业类型和现代成矿理论为指导,分析预测工作区矿产勘查的主攻类型,并根据主攻类型选择合适的找矿预测方法和勘查方法。

1.2.3 找矿思维创新

工作地区和勘查目标不同,找矿思维方法具有明显差异。因地区差异的勘查目标不同,找矿预测思维方法需要以找矿预测思维方法创新为核心:如境外找矿以大型矿床和快速评价为目标;新成矿区带找矿以寻找超大型—大型成矿集中区、长远勘查目标——国家新资源基地为目标;危机矿山接替资源找矿以在矿山深部和近外围寻找矿山生产急需资源储量为目标,以便延长矿山服务年限,保障矿山长远发展的需要。

矿产勘查阶段不同,找矿预测思维和勘查目标不同。找矿预测思维需要依据不同勘查阶段制订不同策略:①预查阶段以圈定找矿靶区,提交预测的(334? 类)资源量为主;②普查阶段需要预测矿体的空间位置和规模,提出探矿过程设计,提交推断的+预测的(333+334? 类)资源量;③勘探阶段以系统预测矿体的三维空间位置,提出勘探设计方案,提交控制的+推断的+预测的(332+333+334? 类)资源量;④生产勘探阶段依据市场价格和采选成本,提出优化勘探和采矿方案,估算经济可采储量。

1.2.4 可行性论证

"以有效勘查方法投入为原则,以可行性分析为准则",开展必要的勘查方法试验,探索勘查方法有效性,进行技术、经济、人员等方面可行性论证,选择合理、有效和经济的可行方案。依据找矿靶位预测的(334? 类)资源量或推断的+预测的(333+334? 类)资源量确定勘探目标、投资规模与技术力量投入在时间序列上与实施执行可行性,包括技术、经济和人员与时间安排等方面。

1.2.5 风险分析

找矿预测结果(预测的(334? 类)资源量)必然具有不确定性,因此,必须开展不确定性分析。不确定性包括矿产品加工波动、技术设备先进性、勘查团队构成与勘查能力、技术障碍因素、资金链、施工期及其进度等。如利用物探电法异常的多解性来预测矿体空间变化的可能性等。考虑风险分析是不确定性分析深度延伸,风险分析应侧重于不确定因素由随机性原因引起的实际值和估计值(以出现的概率值进行预期估算)之间的差异。笔者认为以基于风险分析为基础探索商业性找矿预测,尤其是在矿山接替资源找矿与境外矿产勘查中,不确定性分析的核心应偏重管理和应对风险,以提高预期社会经济效益为关键思路。具体操作如下:

(1)识辨风险。笔者在以往境外矿产勘查学习和实践中,从不确定性分析中筛选出的主要风险类型有资料风险(如坐标系统差别、分析误差、粒金效应等)、政策风险(政策不确定性分析)、进度风险(项目拨款进度、钻探坑探进度、样品分析进度等)、技术风险(找矿预测结果的不确定性)和认识障碍(不同专家勘查思维形式差异和分歧)等,而且这些风险类型都可能影响到对于项目合同履行带来的影响,以及造成的国际投资风险。

(2)评估风险-制订预案。寻找和系统分析不确定性因素,制订应对风险对策和预案。针对影响进度因素(人员、运输、设备运入和搬迁),制订保障实施进度方案;针对技术风险,如干旱荒漠区盐碱壳干扰对物探工作影响,厚层风化壳和外来运积物对钻探施工影响和钻探工艺等制订技术改进方案;针对影响成本的关键因素制订成本控制方案;针对国际混合勘查团队(如矿山企业-施工单位-勘查单位)进行团队协调能力提高和培训,目的在于提高团队的矿产勘查协同工作能力,集中团队优势进行重点突破。

(3)风险度量(risk evaluation)与风险投资。首先,要对勘探项目整体风险进行风险度量。矿产勘查是一个周期长、高风险的活动,为保证勘查成功率

和有效规避风险,对风险勘查项目不但要进行找矿预测,还要进行风险预测。本文提出项目风险度量公式为

$$R=F(P,L\&O)=(P\times L\&O) \quad (1)$$

式(1)中,R(risk)为矿业项目风险,P(probability)为项目风险发生概率,L(loss)为项目风险损失的大小,O(opportunity)为项目风险机遇的大小。依据找矿预测和风险预测之间权衡,决定进入或退出(farm-in or farm-out)。

其次,对于预测目标物(矿点、物化探异常)成矿概率进行估算,按照概率法则(0,1)进行归一化处理,减小风险度量中小概率事件发生几率[8]。

$$FP=(SP/SP_{max})\times 100\% \quad (2)$$

式(2)中,FP 为预测目标物(矿点、物化探异常)成矿概率,SP 为具体预测对象的累加数量化指标总和,SP_{max}为已知矿床的累加数量化指标总和的极大值。

第三,依据已知矿体统计分析确定风险系数,对资源储量预测结果扣除风险系数。如方维萱(1987—1989 年)①对陕西凤太地区进行找矿预测,采用风险系数进行风险度量,确定后的 K 值在已知矿体上进行验证,对比预测资源储量和探明储量的差别,确定预测资源储量结果的风险度量值(风险系数),即:

$$F=PQ/IR \quad (3)$$

式(3)中,PQ 为预测资源量, IR 为探明储量,F 为风险系数。当风险系数 $F>1$ 时,则应从预测资源储量中扣除风险系数;当 $F<1$ 时,可不考虑扣除值。

以上 3 个不同层次的风险度量可以构成一个大型勘探项目风险分析不同方面。

(4)管理与应对风险。进行找矿预测时依据风险类型不同和应对风险机制,制订勘探计划书。降低风险主要是寻找和分析不确定性因素,制订应对风险的对策和预案。如当深部远景区潜力大、风险大时,大胆验证开拓找矿新空间;如采用物化探异常进行找矿预测时,对已经验证的物化探异常,可以根据验证探矿工程确定风险系数,但依然是风险与机遇同存,需要保留风险,进行风险投资。如有些物化探异常可以推断解释为矿致异常,但在设计钻孔验证前也最好布设精测地质-物探-化探综合剖面,为钻孔开孔方位和角度提供设计依据,进行风险管理。在境外进行矿产勘查时,采用转移风险(寻找具有一定工作基础的项目)、分担风险(合伙合资经营)、联合勘查(joint-venture)和战略联盟等形式规避、管理和应对风险。

1.2.6 效益分析

对于 CTO、CEO 或 CFO 重视项目"以效益最大化为目的",但在效益分析中都存在专业障碍和交流上的差异。项目效益分析主要用于找矿预测意见和技术方案的经济可行性和资金收益率,尤其在不确定性分析、勘探方案对比和优化中,可采用财务内部收益率(IRR)进行评估和对比分析,以实现最小投资和收益最大化,在于衡量对比不同勘查方案、投资方案占有资金补偿与回收能力。

在矿床勘探和矿山生产勘探中,在坑探和钻探等方案对比优化中,经项目敏感性分析确定关键敏感因素后(如探采结合使用的坑道探矿与钻探-坑探结合的探矿方案对比分析中),可采用投资回收期法进行对比(坑道一般在财务科目中被列为固定资产投资),本文提出:

静态投资回收期=(总勘探费用-非钻坑探费用)/(坑道创造的年利润+年折旧额)

对比与优选:钻探和坑探结合的探矿方案探获资源储量规模大,资金回收期长,资金效益相对低;坑探方案风险大,但资金回收期短,资金效益高、探获资源储量类别高。在对比分析中可以采用折中可行方案,或者为对比方案有投资决策者进行决策。

在重大矿产勘探和开发的投资效益分析预测中,经常采用对比方案进行投资收益分析,不同方案大多依据找矿预测结果进行设计。由于投资者承担投资风险,技术经济分析和投资风险分析受到高度重视,对于不同勘探方案要求必须进行风险因素和类型度量,这也在很大程度上提高了矿产勘查投资效益。尽管目前还缺乏公认的基于风险分析的定量化投资效益分析方法和工具,但进行静态风险分析已被接受和使用,并将在找矿预测结果(预测的资源储量)中扣除风险系数作为控制风险的有效方法。

2 基于风险分析的找矿预测基本流程

基于风险分析的找矿预测的基本流程、成果表达方式与用途如图 1、2 所示。

① 方维萱. 陕西省凤太矿田次生地球化学异常模式及成矿预测研究报告[R]. 西安:西北有色金属地质勘查局物化探总队,1989.

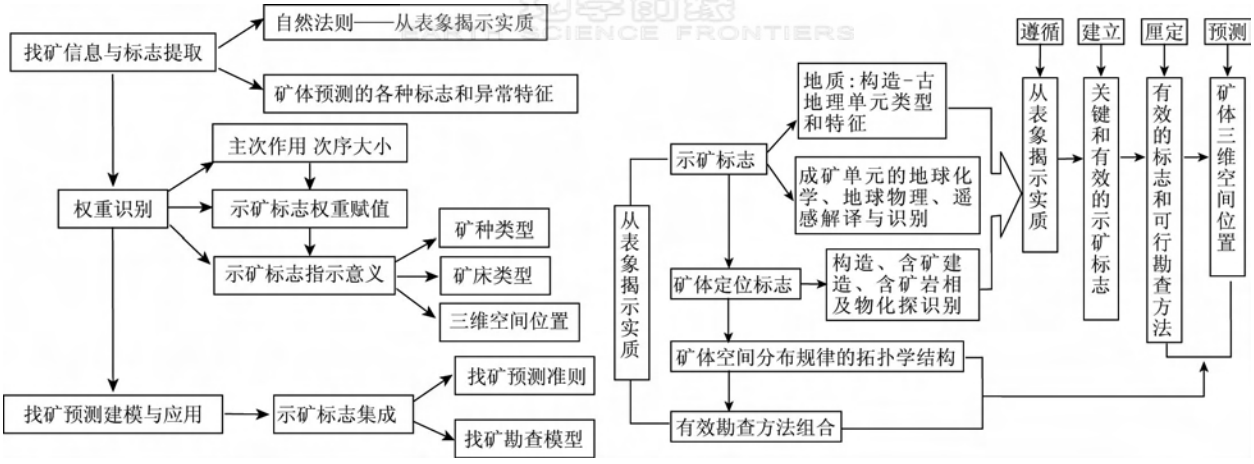


图 1 示矿标志提取基本内容和程序

Fig. 1 The basic contents and procedures for extracting ore-indicating index

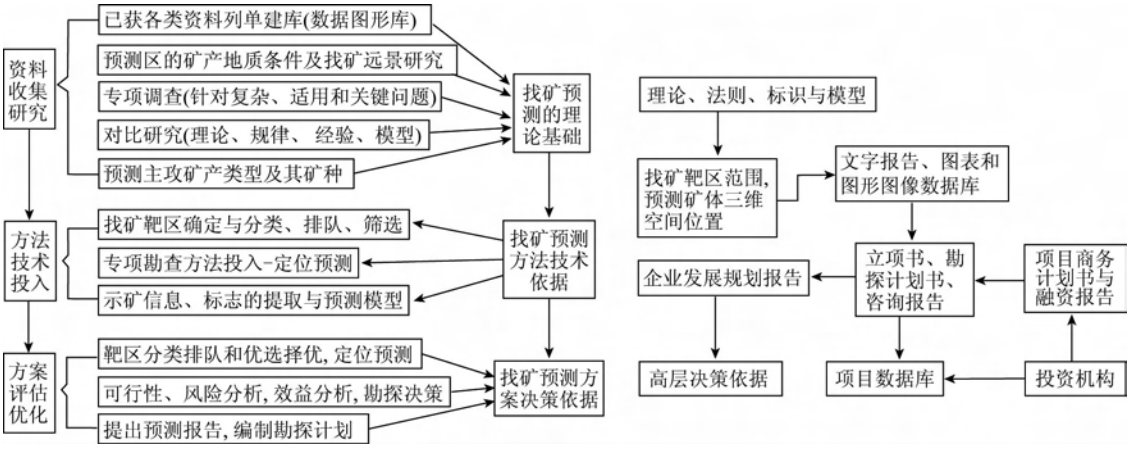


图 2 找矿预测的基本流程图、成果表达方式与用途

Fig. 2 The basic processes and achievement expressions of ore-finding prediction and their applications

3 基于风险分析的找矿预测方法技术研究与应用

3.1 成矿成晕模式与地质地球化学找矿预测系统

於崇文(1981)[29]以江西德兴斑岩铜矿床的成矿成晕机理及地球化学勘查意义首次论述成矿成晕研究在找矿预测中应用,开拓了该研究领域。刘泉清和欧阳宗圻[1]于 1983 年提出进行成矿成晕模式研究,认为系统化、信息化、定量化的模式研究为成矿理论和成矿预测的飞跃准备了条件,建立矿体—矿床—矿田—成矿系列的不同级次地球化学异常模式是重要的研究领域,其后一系列研究成果及应用也证明了这样思想的有效性[2-7]。在成矿成晕模式研究的基础上建立的地质-地球化学-地球物理找矿综合预测系统(图 3)与人工智能找矿预测系统是有效途径[6-10,30],综合方法找矿预测系统(图 3)为境内外的金属矿山(床)深部和外围、成矿区带中矿点和物化探异常评价提供了技术方法,这对工作程度较高的地区可以提高成功率,降低和控制风险。

3.2 构造地球化学方法

刘泉清(1981)[31]提出构造-地球化学用于寻找金属矿产,现已成为预测和寻找隐伏矿体的有效方法之一[32-39]。韩润生等[38,39]在滇东北隐伏铅锌矿体预测研究中,提出的主要成矿构造体系、构造控矿型式、控矿构造模式及矿床成矿模式,明确指出麒麟厂矿床主矿体向 SW 向侧伏的规律;采用构造地球化学方法进行隐伏矿体定位预测,依据发现的 Cu、Zn、Pb、In、Ag、Cd、Tl、Hg、Sb、Mn 等元素构造地球化学异常,提出了 1571 中段 44～62 剖面线间的深

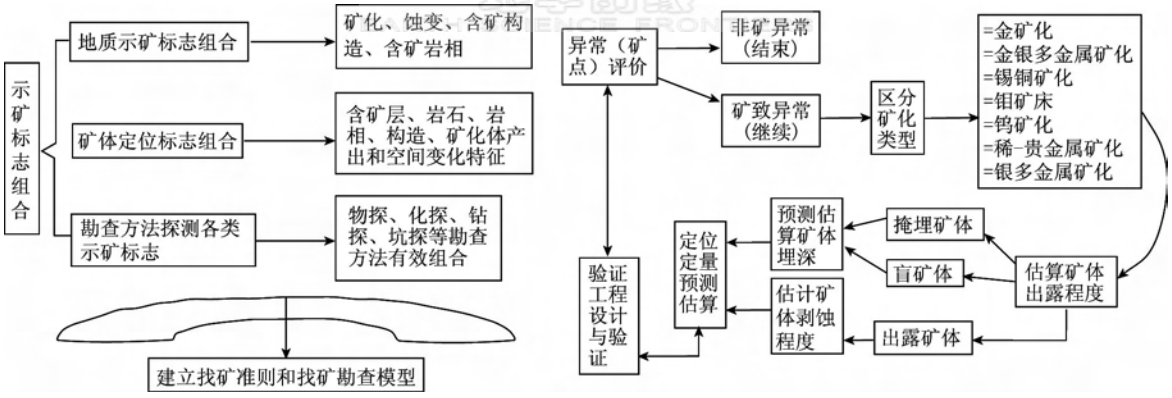


图 3 矿点(物化探异常)评价与综合方法找矿预测系统流程图

Fig. 3 Flow charts for anomaly assessments and for comprehensive ore-finding prediction

部等重点定位找矿靶区,已被验证工程证实,新发现八号隐伏矿体。方维萱等[34-37]对小秦岭、甘肃北山、东天山、云南墨江等金和多金属进行了构造地球化学研究和找矿预测,并提出构造-矿物-地球化学、构造变形筛分-同位素地球化学约束等新研究方向和找矿预测方法,实践证明[32-39]构造地球化学找矿预测方法对于受构造控制定位的隐伏金属矿体和矿山深部找矿预测较为有效。

3.3 矿物地球化学新方法

在基于风险分析的找矿预测中,矿产可利用性评价和选优评价常存在的问题有:(1)在矿点和地球化学异常的检查评价中,查明主要异常元素和主工业组分的赋存状态是首先要解决的技术课题;(2)在复杂的地球化学场解析和研究中,引起地球化学场的场源复杂难辨,给异常优选排队带来极大困难;(3)多期、多阶段形成的矿石中,组成矿物及化探异常的元素组合复杂多变,同一种元素赋存在多种矿物之中,给矿点和异常评价带来极大难度,难以识别主成矿元素,特别是共伴生组分查定和综合评价工业可利用性与未来开发方案密切相关;(4)复杂构造变形历史或采用应力矿物野外难以识别构造变形历史分析时,直接影响到找矿预测工作;(5)成矿物质大量聚集和流体大规模成矿作用常发生在氧化-还原界面、酸碱反应界面附近的古地球化学界面中,现代识别和恢复这种非平衡环境主要依靠矿物-地球化学手段。

经过不断探索研究,初步建立了矿物-地球化学找矿预测新方法[40-43],对小秦岭、陕西金多金属矿床和云南墨江镍金矿床矿物-地球化学找矿预测研究证明:该方法在标型矿物组合与元素组合关系的研究、查明异常源性质、多建造晕的研究与预测、确定矿体的元素垂向分带序列、显微构造储矿特征研究、确定矿床的指示元素、区分不同的矿化类型、显微构造研究、成矿预测、矿床成因分析、地球化学场解析、成矿流体示踪(氧化-还原环境、酸碱环境)等 12 个方面具有较大的应用价值和前景。该方法主要是探索解决不确定性,将与矿产勘查和未来开发的关键性问题明确化,预测和判断今后工业可利用对象是否存在。

构造-矿物-地球化学、构造变形筛分-同位素地球化学约束是新研究方向和成矿预测方法。在找矿预测方面,矿物地球化学研究的核心是采用现代显微分析和成像技术,根据蚀变矿物组合类型识别成矿环境的酸碱性和氧化-还原条件,对找矿预测可在现场进行肉眼辨别的矿物组合类型,如在秦岭造山带中,铁元素的不同矿物组合和 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值可以指示成矿环境的氧化-还原条件,在秦岭泥盆系中 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值和铁矿物组合对成矿环境具有明显指示意义,Fe^{2+}/Fe^{3+} 高值(≥1.5)和菱铁矿-铁白云石指示铅锌大规模成矿作用发生的空间部位,是良好的找矿标志;氧化-还原界面、偏氧化-偏还原流体混合导致大规模热水沉积成矿,因此,识别高氧化、偏酸性环境指示矿物(重晶石-磁铁矿)和强还原、偏碱性(菱铁矿-铁白云石)是重要的找矿预测标志。在大陆造山带中,一般金矿床多具有多期、多阶段成矿的特点,对这种具有复杂长期构造演化过程的矿床的成矿期次的划分和厘定至今一直是难点,如秦岭造山带中的金矿、哀牢山造山带中金镍矿、河北金厂峪金钼矿等。应用研究证明,矿物地球化学新方法对于多矿种共伴生问题,多期、多阶段成矿作用的复

杂金属矿找矿预测较为有效[40-43]。

3.4 岩相学亚相-微相填编图-勘查地球化学新方法研发

岩相学亚相-微相填编图-勘查地球化学方法[44-47]是秦岭泥盆系铅锌矿定位预测方法之一。先后采用该方法对陕西银硐子银多金属矿床、二台子铜金矿床,贵州大河边重晶石矿床和八方山多金属矿床等进行应用研究,取得了初步效果。近期在云南省个旧锡多金属矿区和东川铜矿区进行应用性试验研究,取得一定新进展。但目前该方法需要开展持续研发和推广应用研究。岩相学亚相-微相填编图-勘查地球化学对于受沉积盆地和火山喷发机构控制的金属矿找矿预测较为有效。

3.5 矿体探采对比与找矿预测

矿体勘探和开采资料对比研究是全面验证地质勘查成果的真实性、可靠性,确定矿床合理勘探网度和勘探程度的有效方法。矿床探采对比研究的作用有:①合理地确定矿床勘探类型,指导今后地质勘查工作部署;②确定矿床勘探的风险系数;③发现新的成矿规律,指导矿山新一轮找矿;④指导复杂勘探类型矿体的找矿预测指标(如面含矿系数、体含矿系数等),估算资源/储量的远景。经探采对比确定的矿床勘探类型最为切合实际(实证分析法-先验论)。

3.5.1 金属矿体探采对比与三维空间定量找矿预测、资源经济预测新技术研究

此项研究主要包括:(1)多工业组分共生和伴生矿体的综合经济工业指标确定;(2)论证并合理地确定接替资源勘查区的勘探类型,为今后地质勘查的工作部署提供依据;(3)经探采对比后,估算和确定预测矿体的地质勘查风险系数;(4)合理矿床勘探网度确定依据及资源经济效益的实证分析;(5)矿石综合回收率、损失率和贫化率的实证分析研究等;(6)依据以上研究,总结和发现新的成矿规律,建立新的空间定量找矿预测指标体系和数学模型,开展三维空间的定量找矿预测,进行验证探矿工程设计和布置。

如云南大姚铜矿小河—石门坎矿段是危机矿山接替资源勘查试点项目,按照2003年产量计算,矿山生产仅能维持不到5 a服务年限。预测的地质依据是:(1)本区大姚六苴矿区及其外围的含铜砂岩成矿带北起团山—六苴—郝家河—石板河弧形成矿带,南北长156 km,东西宽24～36 km,已知有145个铜矿床(点),探明铜金属储量119万t,占楚雄盆地探明储量的92.08%。特别是六苴—龙街矿化集中区已探明铜金属储量53万t,占矿带探明总储量的44.17%,是楚雄盆地内的最佳成矿区。(2)通过前期大量研究和勘探工作认为,该矿区深部及外围具有很大的找矿潜力。特别是矿区深部及其近外围的小河—石门坎、火箭山—界牌等地具有铜品位高、矿化稳定、伴生银含量高、开采技术条件和选矿工艺条件好、经济价值高,是楚雄盆地中最佳的找矿靶区。预测的探矿工程依据是:(1)小河矿段钻孔见矿厚度20.04 m,含铜1.29%,未封边,证明矿体继续南延;南部在石门坎矿段见矿厚10.17 m,含铜1.02%～1.16%,证明矿体继续北延,中东部施工的钻孔全部在"全浅色"黄铁矿带中。(2)经探采对比研究分析,"刀把"矿体宽160～200 m,铜品位1.346%,银品位26 g/t,每100 m平均探获铜金属9 350 t。(3)南部石门坎矿段在长120 m,宽150 m范围内探获铜金属7 572 t,品位1.09%,银品位66 g/t,每100 m长度平均探获铜金属6 310 t。预测矿化的地段长4 000 m(平面长3 400 m),宽160 m,每100 m平均探获铜金属7 830 t。预测矿段的铜资源量(金属量)为313 200 t,铜品位1.22%;银品位按"刀把"矿段平均银品位26 g/t计算,预测银金属达670 t。(4)经昆明有色金属冶金设计院2002年进行的开发可行性概略研究认为,预测矿段可利用原有的井下生产系统、选厂、尾矿坝建成年产矿石能力80万t(精矿含铜8 062 t,伴生银14 t),总投资26 892.52万元(含探矿投资5 600万元)服务年限20 a以上的生产矿段,开发投资利润率9.57%、税后投资收益率7.14%和静态投资回收期15 a。(5)扣除风险系数(按照0.65)后,预期可获333类铜金属资源量20万t(原预测的资源量为31万t)。本项目具有较好的可行性与投资价值,有色金属矿产地质调查中心向国土资源部推荐将该项目作为危机矿山试点项目,延长矿山服务年限10 a左右,预期的经济和社会效益显著。(6)经近年来的普查,现初步控制铜金属资源储量14万t,初步验证了找矿预测结果。

3.5.2 探采对比研究有助于寻找和总结新的找矿规律

如贵州晴隆锑矿历年来新增可采工业储量约9.1万t(至2003年底),相当于探明一个大型锑矿床,比原地质储量(10.12万t)增长了90%。我们进行探采对比后(图4)发现生产矿段的深部和近外围地质找矿工作是扩大和新增锑矿工业储量的有效途

径;发现富矿体产在构造交汇部位、古岩溶构造等新的富矿体定位规律,也直接说明了晴隆锑矿深部及外围(约 400 km²)锑金找矿潜力很大,值得开展进一步已知矿段的深—边部预测矿体勘探工作。这些矿段主要包括三望坪区(A 区)、固路南区(B 区)、铜厂沟区(C 区)和矿田西部新寨区(D 区),合计预测的(334?)锑资源量 19 万 t,预测的(334?)资源量分布规律与特征是部署勘查工程的主要依据。

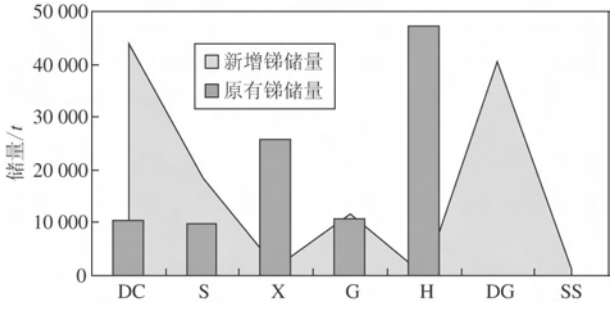


图 4 贵州省晴隆锑矿原有锑储量与新增锑储量对比图

Fig. 4 Comparison between the original reserves and the newly added reserves in Qinglong antimony mine in Guizhou Province

DC—大厂矿段;S—水井湾矿段;X—西舍矿段;G—固路矿段;H—后坡南新矿段;DG—滴戛矿段;SS—彬树林矿段

3.5.3 矿体规模预测参数确定原则

(1)在采矿中段和有少量工程控制下,预测矿体延伸(深)长度采用下延(外延)有限外推;结合地质、物化探异常推断或预测矿体规模。(2)在矿体类型特征相近条件下,采用已知探(采)矿工程中矿体品位和体重作为预测矿体品位,采用类比原则确定勘查类型和矿石选冶性质,进行预测矿体资源储量估算,其可靠性相对较高。(3)在矿体和品位的连续性方面,采用含矿率(指单脉体含矿系数)、含脉率(指含矿构造蚀变带中含矿脉体的比例)等进行描述;按照系数确定的样品空间拓扑学结构,可分为线、面、体含矿率或含脉率。这些都是找矿预测的关键参数,也是预测矿体资源量估算的依据。(4)通过矿体探采对比研究,可以获得比较切合实际的数据,为找矿靶区资源量估算提供可靠依据。如晴隆锑矿探采对比确定的体含矿系数在 30%～70%,由于含矿层产状较缓(小于 20°),采用水平投影法估算,预测含矿层体积乘以体含矿系数估算资源量。(5)其他找矿预测中预测的资源量估算依据有稀疏工程揭露、已知矿体下延和外延伸外推、单工程揭露等一些关键的探矿工程揭露矿体的有关参数。

以贵州晴隆锑矿三望坪区(A 区)为例:(1)A 区位于大厂矿田中部,水井湾—大厂—固路近东西向矿带与野猪塘—西舍北东向矿带复合部位,东接大厂矿区,西南部为西舍矿区的北东延长部,具备优越的成矿地质环境。(2)A 区北东向断裂构造发育,且处于北东向断裂系与近 EW 向隐伏基底构造的交汇处。从大厂矿区西部直到西舍矿区北部 NE 向断裂系主要由 F_9、F_3、F_4、F_{12}、F_{11}、F_{10},以及雷钵洞断层组成,它们近等距排列,其中 F_9 及 F_3 断层控制着大厂矿区的主矿体,F_{10}是西舍矿区主控矿断裂的北部延长。除 NE 向断裂外,近 EW 向 F_1 断裂分布于预测区南部,NW 向的 F_5 和 F_6 断层经大厂矿区进入该预测区。(3)A 区含矿层位“大厂层”基本隐伏在龙潭组地层和峨眉山玄武岩组之下,仅在预测区东北部野猪塘附近沟谷中有所出露,一般厚 8～13 m。探矿工程依据有:(1)A 区野猪塘南部大厂层出露处有多处民采点,锑矿体呈似层状、扁豆状产出,w(Sb)为 0.95%～2.41%,最高 4.2%。在地表或坑道及钻孔中,该层中段(P_2d^2)硅化蚀变粘土岩发育,锑矿化显著,在预测区东南部与大厂矿区衔接部,ZK126-96、ZK126-98、ZK125-99、ZK125-101 四个钻孔在大厂层中见矿,大厂层厚 8.2～15.8 m,锑矿体厚 1.2～2.3 m,平均厚 1.6 m,w(Sb)为 0.98%～4.2%,平均 3%。(2)A 区经生产坑道验证见含矿体长度大于 150 m,宽 24～55 m,厚 1.0～3.1 m,Sb 品位最高达 7.7%,并向北继续延伸。预测区东部的已完工钻孔 ZK129-107,虽未见矿,但穿越大厂层厚 13 m,二段粘土岩及三段变余玄武岩硅化蚀变明显。位于该预测区西南侧的西舍矿区 3 号矿体规模大且产状稳定,锑品位较高,受北东向断裂控制特征明显。三望坪预测区即处于该矿体的 NE 向延长部位。3 号矿体北部地区已完工钻孔 5 个,虽未控制工业矿体,但显示了大厂层厚度较大,具较强硅化蚀变,断层构造发育,地层局部错动明显。如:东侧的 ZK5-14 大厂层标高为 1 662 m,西侧的 ZK8-14 孔大厂层标高为 1 649 m,相差十余米。此外,ZK8-14 及 ZK109-114 中均见锑矿化,w(Sb)为 0.31%～0.45%,局部见绿石英。(3)A 区预测结果:三望坪区是矿山近外围最具找矿潜力的预测区,推测矿化带长 1 500 m,宽 800 m,水平投影面积 1.04 km²,可采厚度为 1.0 m,类比矿石体重为 2.93 t/m³。依据工程与采矿矿石品位特点,预测 Sb 的品位为 2.0%,预测的矿石量为 304 万 t,锑金属量 6 万 t,按照含矿率为 50%～70%,扣除风险系数,预

测的锑金属资源量在3～4.2万t。(4)2007年底初步探矿工程揭露后,估算锑金属资源储量为7 000 t,随着探矿工程施工,将逐渐增加资源储量。

3.6 矿业项目生命周期预测

在矿业项目不确定分析中,需要对项目投资额度、生产成本、产品价格和生命周期等一系列不确定性因素进行变化规律与变化程度研究。我国危机矿山新一轮找矿预测技术先行基本思路和有效途径包括新一轮资料开发、加强矿体探采对比研究、进行探边摸底、重视异常检查评价、选用最佳技术方法组合、选优勘查、敢于验证深部和勇于探索新区等[48-49],其中,矿山剩余服务年限与预期可延长矿山服务年限(年)是综合各项因素后较为全面揭示项目总体概况的一项指标,也是对项目起点与项目成长性评价的一项综合指标。

3.6.1 矿业项目生命周期估算

矿业项目生命周期(或矿山服务年限)是指一个矿山从投产到开采完毕的全部时间。矿山服务年限(ML)与矿山年产量(A)和可采储量(Q_c)一般存在如下的关系式:

$$ML=(\mu\times Q_c\times\lambda)/A(1-\beta) \quad (4)$$

式(4)中,ML为矿山生命周期;μ为矿石综合回采率;Q_c为可采储量(当采用基础储量估算时,可利用系数一般为0.65);A为矿山年产量;β为采矿贫化率;λ为基础储量的设计利用率(其中设计利用率(λ)即考虑了现行经济技术水平下的不可回采因素)。采用式(4)可依据基础储量(Q)进行矿山服务年限和拟建矿业项目生命周期估算预测。

3.6.2 矿山剩余服务年限估算

剩余服务年限(residual mine life,RML)估算以基础储量为准时,估算方法有两种:

估算方法1:以现保有的基础储量除以矿山生产所需的年均消耗地质储量。

其中,年均消耗地质储量=3 a消耗地质储量合计/(3 a),RML=现保有的基础储量/年均消耗地质储量。计算单位采用矿石储量(万t/a)或金属量(t或kg/a)。因年均消耗地质储量包含了设计和采矿损耗表述,在目前技术经济水平下的经济可采矿石量。

估算方法2:以现保有的基础储量除以矿山的现年均生产规模。

其中,现年均生产规模=前3 a生产规模合计/(3 a),现保有的基础储量在估算时应扣除设计和采矿损失率,即将原地基础储量的不可回采因素和损失率扣除,但不扣除精矿粉在冶炼过程的冶炼损失率。综合回采率(%)据以往3 a的年平均值计算。

以矿石储量进行估算时,可以直接采用下式估算:

RML=现保有的基础储量×综合回采率/现年均生产规模。若采用金属量进行估算时,需考虑扣除冶炼损失率因素等。

以上估算预测方法适用于对中小型矿山项目收购或上市矿业项目的价值评估中。

3.6.3 预期可延长矿山服务年限估算预测

预期可延长矿山服务年限:预测资源量需扣除合理的综合损失率(设计和采矿损失率等)和风险系数后,除以矿山企业的现年均生产规模(按矿石量或金属量/a)估算,估算方法如下:

预期可延长矿山服务年限(a)=预测资源量×综合回采率×风险系数/矿山现年均生产规模(矿石量万t/a、金属量t/a)

若采用金属量进行估算时,需考虑扣除冶炼回收率因素等。

预测新增资源储量类别:需说明预测资源量的预测方法(如地质块段法、含矿率系数法等)和采用的有关参数(如体重、品位、规模等)确定的依据。

估计新增资源储量潜在价值:对预测资源量扣除合理的综合(设计和采矿)损失率和风险系数后得到相对合理的中间数据,然后估计新增资源/储量潜在价值。

3.7 广度搜索选优评价与矿点和异常优选排队

概率分析是研究矿业与勘探项目不确定分析和风险分析的主要定量方法之一,通常采用期望值法、决策树法、效用函数和模拟分析法等,一般评价中多采用经验丰富专家等知识与经验的主观概率原则。本文矿点和异常成矿概率(FP)是广度搜索选优评价原理,采用主观概率原则,以客观存在的已知矿床参数集合标准化,促进这种方法尽量与实际客观吻合程度的提高。

通过选优评价实现减少风险因素和不确定性因素,提高找矿发现的成功概率。例如,随着全国勘查地球化学普-详查工作不断完成,圈定出大量的化探异常和矿化点,除部分化探异常和矿化点得到检查评价外,仍有大量异常和矿化点没有得到检查评价。如何在大量化探异常和矿化点中选优评价,以最少经济投入取得最佳找矿效果成为目前地质勘查中关

键技术难题之一,在找矿难度逐渐增大的市场经济机制下,研究和探索化探异常和矿化点优选排队新方法尤为重要。矿点和异常的综合评价序列(SP)将化探、地质等三项数量化指标累加综合得到综合评价序列:

$$SP = \sum_{i=1}^{5} AP + \sum_{i=1}^{3} GP + \sum_{i=1}^{3} DP$$

式中,AP 为化探异常数量化指标,GP 为物探异常数量化指标,DP 为地质特征数量化指标。

矿点和异常成矿概率(FP)是该矿点和异常成矿可能性的一种度量,对于风险因素进行已知条件约定,减小和降低风险概率。从数量化理论看,它是各项量化指标最高数量指数的总和,按概率法则 FP(0,1)归一化。

$$FP = SP_i / SP_{max} \times 100\%$$

式中,SP_i 为第 i 矿点和异常的累加数量化指标的总和;SP_{max} 为已知同类矿床上累加数量化指标的总和极大值。

以小秦岭北坡陡倾斜及缓倾斜含金石英脉为例,区别两类地质条件的主要原因是与这两类构造有关的含金石英脉和化探异常有一定差别。采用统一的综合信息和具有代表性的 Q2142(陡倾斜)和 Q505(缓倾斜)已知金矿床上累加量化指标总和计算成矿概率并进行归一化,可使基准度量处于同一水平和同类地质条件,其优选结果见表 1、2。采用广度搜索选优评价进行矿点与异常优选排队是利用人工智能原理探索工程优化过程。在典型矿床成矿成晕模式研究的基础上,依据其研究成果建立地质-地球化学预测系统和人工智能预测系统,在陕西小秦岭、凤太,新疆东天山库姆塔格铁矿—雅满苏等地区应用取得了良好效果[8-10],为金和多金属矿山外围及深部隐伏矿体预测和找矿、矿点和化探异常优选排队、选优评价提供了一些有效的新方法技术。

表 1 小秦岭北坡与陡倾斜构造有关的化探异常优选表

Table 1 Optimization and queuing of soil geochemical anomalies relating to high-angle faulting zone in Xiaoqinling Area

优选序次	异常编号	SP	FP/%	优选序次	异常编号	SP	FP/%
1	91-6	76.82	111.9	16	92-4	38.45	50.8
2	92-13	68.64	100.0	17	92-20	34.04	49.6
3	91-1	67.14	97.8	18	92-30	32.63	47.5
4	91-8	60.83	88.6	19	91-18	30.02	43.7
5	91-7	60.36	87.9	20	91-5	29.85	43.5
6	91-24	55.09	80.3	21	91-10	28.46	41.5
7	91-14	51.31	74.7	22	91-11	27.97	40.8
8	92-27	51.31	74.7	23	92-25	27.47	40.0
9	92-26	50.42	73.5	24	92-29	26.41	38.5
10	91-22	48.41	70.5	25	91-9	25.88	37.7
11	91-3	48.23	70.3	26	92-21	23.39	34.1
12	92-23	47-34	70.0	27	91-17	12.88	18.8
13	91-16	44.20	64.4	28	91-21	8.84	12.8
14	91-12	41.75	60.8	29	91-22	7.97	11.6
15	92-28	40.06	58.4				

表 2 小秦岭北坡与缓倾斜构造有关的化探异常优选表

Table 2 Optimization and queuing of soil geochemical anomalies relating to low-angle faulting zone in Xiaoqinling Area

优选序次	异常编号	SP	FP/%	优选序次	异常编号	SP	FP/%
1	91-2-2	48.41	100.0	10	92-35	27.74	57.3
2	92-36	45.04	93.0	11	92-40	25.43	52.5
3	92-33	42.99	88.8	12	92-43	24.23	50.1
4	92-39	41.45	85.6	13	92-42	22.17	45.8
5	92-23	41.02	84.7	14	92-38	21.80	45.0
6	91-2-3	41.02	84.7	15	92-41	20.22	41.8
7	92-22	40.91	84.5	16	92-44	18.95	39.1
8	91-2-1	34.04	70.3	17	92-34	16.16	33.4
9	92-37	31.53	65.1	18	92-31	14.41	29.8

3.8 深度解剖评价与深部定位定量预测技术

通过广度搜索选优评价可以将矿点与异常优选排队。深度解剖评价主要采用协同学思想,即采用不同学科方法研究同一地质问题。由于隐伏矿体找矿预测是十分复杂的问题,需要从不同学科研究角度进行深度解剖评价和证伪研究,现以陕西凤太地区铅锌矿为例重点讨论深部定位定量预测技术。

3.8.1 预测隐伏矿体掩埋深度

方维萱(1989)①对于陕西凤太铅锌矿田银硐梁—手搬崖矿带、峰崖矿床已有比较系统工程控制的勘探线剖面中隐伏矿体深度与地表土壤地球化学异常的线金属量关系进行研究,发现线金属量和分带指数与出露矿体-隐伏矿体不同埋深有明显关系,对不同剖面线金属量随矿体埋深增大而呈负相关的变化规律,进行回归分析,回归方程如表 3。从回归分析所得的相关系数与置信度(α=1%)的临界相关值比较,说明上述方程均比较可靠。在未知区评价时,将线金属量代入上述方程式可定量预测隐伏矿体掩埋深度。

适用范围的界定:用 Zn、Ag 线金属量预则掩埋深度最大达300 m,Ag、Cu线金属量预测掩埋深度

① 方维萱. 陕西省凤太矿田次生地球化学异常模式及成矿预测研究报告[R]. 西安:西北有色金属地质勘查局物化探总队. 1989.

表 3 银硐梁、手搬崖和峰崖矿床隐伏矿体深度与土壤地球化学异常线金属量回归方程

Table 3 Regression equations between line metal amounts of soil geochemical anomalies and buried depths of orebodies in Yindongliang, Shoubanya and Fengya lead-zinc deposits

回归方程式(d 为矿体埋深,m;ML 为线金属量,m·%)	勘探线剖面数量	相关系数	置信度	临界相关系数
$d=311.06-50.90\ln(ML_{Zn}+ML_{Hg})$	12	−0.85	$\alpha=1\%$	0.78
$d=300.9-49.47\ln(ML_{Hg})$	12	−0.84	$\alpha=1\%$	0.78
$d=214.47-73.41\ln(ML_{Zn})$	12	−0.90	$\alpha=1\%$	0.78
$d=182.65-34.95\ln(ML_{Ag})$	10	−0.91	$\alpha=1\%$	0.76
$d=182.59-19.72\ln(ML_{Cu})$	7	−0.92	$\alpha=1\%$	0.87
$d=101.91-20.82\ln(ML_{Cu}+ML_{Ag})$	8	−0.95	$\alpha=1\%$	0.83
$d=135.07-42.09\ln(ML_{Pb})$	10	−0.90	$\alpha=1\%$	0.76

180 m,Pb 的预测埋深 130 m,若 7 个方程式联合使用,最有效埋深在 5～150 m,其综合误差在±20 m 左右。

验证方法:预测最埋深的元素序次与原生异常分带序列是一致的(Hg-Zn-Cu-Ag-Pb)。

87-6 号土壤地球化学异常预测实例:元素组合为 Cu、Pb、Zn、Ag、Hg、As,东西长 120 m,南北宽 100～200 m,Pb、Zn 最高质量分数大于 800×10^{-6}。通过计算参数代入上述回归方程式,预测埋深在 50 m 以内。1989 年在异常检查时发现宽 80 m 的 Cu、Pb、Zn、Ag、As 原生异常,地表拣块样 Pb、Zn 均达工业品位以上,如 Pb 品位为 0.45%～1.00%;Zn,0.55%～2.28%;说明地表存在铅、锌矿化体。结合原生异常,87-6 号异常反映了浅埋深的隐伏矿体,估计延深在 200 m 以上,有较大的工业价值。

3.8.2 矿化体资源量估算预测

为了判断一个地区或勘探项目的找矿潜力或商业投资价值,必须对预期可探获的资源储量进行估算预测,这是潜在商业价值发现原理所决定的。

在一定矿区对应一种矿种和矿床类型,矿体内的金属量与次生异常的面金属量存在比例关系,即:

$$K=m_{MS}/m_{CL}$$

式中 m_{CL} 为矿体储量,m_{MS} 为面金属量(m^2·%),K 为比例系数。

在一定景观条件下,矿体中(或矿床氧化带中)成矿元素的平均品位和次生异常中元素平均含量基本呈函数关系,比值波动于某一范围,即:

$$E_q=C_y/C_k$$

式中 E_q 为富集系数,C_y 为土壤地球化学异常元素平均含量(%),C_k 为矿体(或氧化矿体)平均品位(%)。通过研究 E_q 值变化规律,有助于研究土壤地球化学异常面金属量与矿体金属量间相互关系。当 $E_q>1$ 时,反映在特定景观条件下元素发生富集;当 $E_q<1$ 时,反映元素发生贫化。

比例系数(K)在一定范围内变化,通过对研究不同典型异常,平均 K 值具有较好代表性,即

$$K=\sum K_i/N$$

式中 K_i 表示某一地段的比例系数,N 为参加统计的样品数。平均 K 值应在已知矿体上进行验证,对比预测资源储量和探明储量之间差别,确定预测资源量结果的风险度量值(风险系数)。

适用范围:本方法只适用出露-半隐伏矿体,对埋深在 100 m 以下的隐伏矿体不适用。用面金属量预测量时,应考虑扣除矿体剥蚀程度因素,当矿体基本未被剥蚀时,则可直接计算;若矿体剥蚀到中部时,可取预测值的 1/2;若矿体剥蚀到尾部时则按 1/3 取值。

手搬崖—银硐梁矿带中 K_i 值一般变化于 0.017～0.045,仅 Pb 有 2 个 K_i 值较高,变化于 0.103～0.131,取平均值 $K_{(Pb+Zn)}=0.059$。

预测资源量 $PQ=m_{MS}/0.059$,本带累计预测的铅锌资源量 206 万 t,除已探明储量,1989 年预测的资源量有 116 万 t。

4 讨论与结论

与成矿理论的预测[50]和基于矿床模型成矿区带预测技术[51]不同,本文提出方法技术应基于风险分析,对矿(床)山、矿产地和矿业权区更小范围内和大比例尺(1∶10 000～1∶500)商业性找矿预测,由于商业性找矿、境外矿产勘查迅猛发展、矿业权交易和项目评估的需求,在不确定性和敏感性分析研究基础上,重视对矿产项目价值判断和项目成长性预测,对找矿预测结果进行风险分析与度量,扣除风险

系数进行风险控制,在进行矿产项目投资风险评估后,制订矿产勘探方案和投资计划;按照项目实施过程的不同时间序列进行风险管理和风险控制;按照矿产项目预评估、跟踪评估、年度实施执行评估、中期评估、收尾评估等外部独立专家与评估机构和内控专家与监督部门评估与咨询建议,及时调整勘探与投资计划,减小投资风险进行风险应对管理,促进找矿突破,保障和提高投资收益。根据专家与评估机构评估结果对项目进行实施过程管理,即矿业权面积缩减、放弃或申请延续,对项目实施加大投资、放缓进度、寻求合作、股权转让等一系列项目决策。

(1)针对矿点与异常成矿概率法归一化风险因素,应提高找矿成功率,降低风险。矿产勘查的点选项准确性高,可以提高成功率来降低投资风险。对于境内外的矿(床)山外围、矿产地和矿业权区内找矿预测而言,首先是要对找矿靶区进行优选排序,采用广度搜索选优评价对已知矿点与异常优选排队,可有利于明确主要找矿靶区,筛选最有希望靶区进行深度解剖评价与深部定位定量找矿技术,最终对于一个成矿远景区进行总资源潜力评估,提供工作决策依据。其他方法在本阶段也具有明显的应用效果[11-12,50-51]。由于找矿预测结果具有风险和不确定性,本文的方法旨在面积性具体矿化点与物化探异常优选排队与深部找矿预测结合基础上,采用合适方法估算风险系数,进行风险度量。采用扣除风险系数来应对管理风险,为风险投资与风险勘探提供决策依据。应用研究证明可适用范围是境内外的金属成矿区带、矿(床)山外围、矿产地和矿业权区内找矿预测。

(2)探索、解决矿产勘查中的不确定性,排除不确定因素,降低风险。将与矿产勘查和未来开发的关键性问题明确化,预测和判断今后工业可利用对象是否存在,也是控制风险的一种有效思路。如矿物地球化学新方法适用于多矿种共伴生和多期、多阶段成矿作用发育的复杂矿山(床)外围靶位优选排队与深部找矿预测解剖研究,构造-地球化学方法对于受构造控制定位的隐伏矿体预测,岩相学亚相-微相填编图-勘查地球化学新方法对于受沉积盆地与火山机构控制定位的金属矿体预测有效。这是在成矿规律研究基础上发展起来的深部找矿预测技术方法,实践证明也是探索解决矿产勘查中不确定性问题的有效方法。

(3)采用扣除风险系数法进行风险控制。对于成矿地质条件复杂或资料不详时,可以采用同类矿种的含矿系数进行找矿预测,并采用扣除风险系数法进行风险控制。经生产矿山探采对比研究后确定的含矿系数(面含矿系数、体含矿系数)是具有先验条件,适用于本矿山深部与外围同类成矿靶区找矿预测与资源量估算中。在生产矿山中,对于矿体和品位的连续性常采用含矿率(指单脉体含矿系数)、含脉率(指含矿构造蚀变带中含矿脉体的比例)等进行描述;按照系数确定的样品空间拓扑学结构,可分为线、面、体含矿率或含脉率,这都是预测矿体资源量估算的依据。通过矿体探采对比研究,可以获得比较切合实际的数据,为找矿靶区资源量估算提供可靠依据。生产矿山尤其是老矿山积累了很好的勘探与开采储量资料,进行矿体探采对比研究确定体或面含矿系数,对于找矿靶位资源量估算较为接近实际情况,钨锡、锑金、铜铅锌矿等Ⅲ类或Ⅲ类偏复杂勘查类型的矿体找矿预测尤为有效,如上述贵州晴隆锑矿;对于Ⅱ类勘查类型的矿体可靠性则会增加,如前述的大姚铜矿小河—石门坎地段。

(4)对具有长期勘探和开发基础的成矿集中区适于进行系统研究,以技术方法和理论创新应对风险。对于以往工作程度较高地区以提高成功率的思路降低和控制风险,如成矿成晕模式与地质-地球化学找矿预测系统。

(5)建立时间序列与风险类型清单,进行风险因素列表分析与制订控制方案。项目生命周期估算是风险分析中的一项重要的时间序列参数,随着项目的不断实施和新进展的取得,风险因素不断发生变化,需要重新制订管理风险的措施;同时,因项目初始设计的缺陷引起内部技术风险已经难以控制,控制风险的成本逐渐增大。有些项目在初期决策和启动过程可采用保留风险原则;但随着项目实施进度不断推进,各类资料逐渐增加,需要进行找矿预测为依据的项目资源潜力评估与生命周期预测,按照时间序列进行风险管理。

(6)基于风险分析的找矿预测是矿产勘查和开发的风险投资决策依据。由于在境内外商业性找矿中风险管理的需要,必须对找矿预测结果进行风险度量和风险评估。尤其是在境外矿产勘查中,需要进行国别与主攻矿种筛选、识辨项目风险类型。依据风险度量方法(如风险系数)进行风险评估、选区选点,制订风险投资方案与技术方案,按照时间序列

进行项目实施与风险管理及应对,最终才能高效保障投资收益与投资返还。在这些研究工作基础上,编制项目可行性与投资机会研究报告。如果应对和管理风险措施不当,都会造成投资损益很大甚至放弃项目。影响较大的风险类型有政治风险、法律风险、合同风险与恶性商业欺诈等。在对找矿预测结果进行风险评估基础上制订勘查方案,进行投资决策。

本文既是初步探索,也是笔者长期在从事境外矿产勘查中,对基于风险分析的找矿预测一些粗浅体会,欢迎同行专家批评指正,迎接境内外商业性矿产勘查新挑战与发展机遇。

作者非常感谢审稿人提出的修改意见与建议,感谢《地学前缘》编辑部给予作者的指导与帮助。

References:

[1] Liu Q Q, Ouyang Z Q. Geochemical patterns for ore-forming and halo-forming and their research implications[J]. Journal of Guilin Metallurgical Geology Institute, 1983(1): 53-65(in Chinese).

[2] Ouyang Z Q, Li H, Liu H Z. Geochemical Anomaly Patterns of Typical Non-ferrous Metal Deposits[M]. Beijing: Science Press, 1990(in Chinese).

[3] Zou G H, Ouyang Z Q, Zhou Q L. Selected Papers on Exploration Models for Major Types of Gold Deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 248-258 (in Chinese).

[4] Li H, Zhang W H, Chang F C, et al. Patterns of Primary Superimposing Halos on Predications for Large and Super-large size Gold Deposits[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998(in Chinese).

[5] Li H, Zhang W H, Liu B L, et al. The study on axial zonality sequence of primary halo and some criteria for the application of this sequence for major types of gold deposits in China [J]. Geology & Prospecting, 1999, 35(1): 32-35(in Chinese).

[6] Fang W X. Ore-forming and halo-forming models and predicting system of geology-geochemistry on polymetallic deposits in Fengtai area, Shaanxi Province[C]// Ruan T J, Wu C R, Zhu Y G, et al. Selected Papers of Fourth Academic Session of Chinese Geochemical Prospecting. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 49-55(in Chinese).

[7] Fang W X. Ore-forming and halo-forming models and predicting system of geology-geochemistry on gold deposits in Xiaoqinling area[C]// Ruan T J, Wu C R. Selected Papers of Fifth Academic Session of Chinese Geochemical Prospecting. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1995: 35-41 (in Chinese).

[8] Fang W X, Wu P W, Fan Z H. On metallogenic predication and prospecting assessment of Yuewangmiao Area in Xiaoqinling District[C]// Fu S X, Zhu X Y. Marching on New Century of Geosciences. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 371-376(in Chinese).

[9] Fang W X, Xu J, Liu Z T, et al. Optimization and queuing of rock fragment geochemical anomalies in the Kumutage-Shaquanzi Area of Eastern Xinjiang[J]. Geology & Prospecting, 2003, 39(5): 57-62(in Chinese).

[10] Fang W X, Zhang H L. Study on prospecting assessment system of comprehensive methods gold deposits and its applications in Xiaoqinling Area[C]// Geology Society of China. Selected Papers for Academic Exchange Meeting of Key Achievements in Geology of Science and Technology During the Eighth Five Year Program. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 716-720(in Chinese).

[11] Geng W H, Jing R Z, Wei L M, et al. Ore predicting method and its application for sustainable development of nonferrous metal mine[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18 (4): 353-355(in Chinese).

[12] Zheng S G. Geological characteristics of Longshan gold antimony deposit and resource forecast[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2006, 4: 15-21(in Chinese).

[13] Xiao Z M. Assessment of Exploration Property and Investment Economics in the Western[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-139(in Chinese).

[14] Wang M. Cultivating and developing mining capital market in China[J]. Mining Market of China, 2007(1): 12-13(in Chinese).

[15] Editorial Department of Mining Market of China. To take a heavy burden and embark on a long road on the way to the second-class mining property market[J]. Mining Market of China, 2007(1): 78-79(in Chinese).

[16] Zhu Y S, Xiao K Y, Ding P F, et al. Methods of Metallogenic Predication[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-330(in Chinese).

[17] Zhai Y S. Prospects and methodology of the geology of mineral deposits[J]. Earth Science Frontiers, 1994, 1(3): 1-8 (in Chinese).

[18] Yu C W. Dynamics of ore-forming processes—Systematics and methodology[J]. Earth Science Frontiers, 1994, 1(3): 54-82(in Chinese).

[19] Zhai Y S. Earth system sciences and the study on metallogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 1-10(in Chinese).

[20] Zhang Z W, Cai K Q, Xu Z H. Study methodology on metallogenic predict at large-scale[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 12(in Chinese).

[21] Zhai Y S. On the metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 13-27(in Chinese).

[22] Li R S, Zhu H P. System structure and ore-forming function [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 103-113(in Chi-

nese).
[23] Yu C W. Large ore deposits and metallogenic districts at the edge of chaos[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(2): 195-217(in Chinese).
[24] Zhai Y S, Peng R M, Deng J, et al. Metallogenic system analysis and new type ore deposits forecast[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1): 125-132(in Chinese).
[25] Yu C W. Fractal growth of ore-forming dynamical systems at the edge of chaos—A new metallogeny and methodology (First half)[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(3): 9-28 (in Chinese).
[26] Yu C W. Fractal growth of ore-forming dynamical systems at the edge of chaos—A new metallogeny and methodology (Second half)[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 471-489(in Chinese).
[27] Yu C W. Fractal dilatation of multiple hydraulic fracturing[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 11-44(in Chinese).
[28] Zhai Y S. Earth system, metallogenic system to exploration system[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(1): 172-181 (in Chinese).
[29] Yu C W. Preliminary study on ore-forming and halo-forming mechanism of Tongchang porphyry copper deposit and its geochemical prospecting implications in Dexing, Jiangxi Province[J]. Earth Science, 1981(2): 111-132(in Chinese).
[30] Fang W X. Prospecting models of gold-bearing quartz veins and gold-bearing altered rocks in tectonic zone in Xiaoqinling area, Shaanxi Province[C]//Zou G H, Ouyang Z Q, Zhou Q L, et al. Selected Papers on Exploration Models for Major Types of Gold Deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 48-62(in Chinese).
[31] Liu Q Q. Study on tectonic geochemistry and its applications [J]. Geology & Prospecting, 1981(4): 53-61(in Chinese).
[32] Sun Y, Shen Z X, Liu S H. Preliminary study on features of fault geochemistry[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1984, 8(1): 22-49(in Chinese).
[33] Xu G R. Considerations on tectonic geochemistry of gold and gold prospecting issues[J]. Geology & Prospecting, 1986 (10): 57-61(in Chinese).
[34] Fang W X. Geochemical signatures of fracture structures in the Xiaoqinling district, Shaanxi Province[J]. Geology & Prospecting, 1990, 26(12): 40-43(in Chinese).
[35] Fang W X. The characteristics, prospecting and predication of the gold deposits hotsed in altered fractures in the Huangjianqiu-Yuejinshan Area, Gansu[J]. Geological Exploration for Nonferrous Metals, 1998, 7(4): 210-215(in Chinese).
[36] Fang W X, Li Y L, Huang Z Y. On dynamics of metallogenic geochemistry for gold deposits in the Xiaoqinling Area[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24(2): 155-162(in Chinese).
[37] Fang W X, Hu R Z, Qi L, et al. Characteristics of tectonic geochemistry and spatial-temporal evolution of green Ni-Au-bearing altered rocks in Mojiang Ni-Au deposits, Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(1): 31-38(in Chinese).
[38] Han R S, Chen J, Li Y, et al. Tectono-geochemical features and orientation prognosis of concealed ores of Qilinchang lead-zinc deposit in Huize[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21 (2): 266-269(in Chinese).
[39] Han R S, Chen J, Gao D R, et al. Application of tectono-geochemical ore-finding method in orientation prognosis of concealed ores[J]. Geology & Prospecting, 2003, 39(6): 25-28 (in Chinese).
[40] Fang W X. Study on mineral geochemistry for the auriferous quartz veins in Xiaoqinling[J]. Geology & Prospecting, 1996, 32(3): 40-50(in Chinese).
[41] Fang W X. Research on mineral geochemistry of Qiandongshan lead-zinc deposit, a large sized deposit in Fengxian County, Shaanxi[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1999, 19(2): 198-205(in Chinese).
[42] Fang W X, Huang Z Y, Liu F J. Research on tectonics-mineral-geochemistry of superlarge Baguamiao gold deposit, Fengxian County, Shaanxi[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(2): 121-127(in Chinese).
[43] Fang W X, Hu R Z, Wang M Z, et al. Mineral geochemistry on microstructures in the Mojiang Au-bearing brittle-ductile shear zone in Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21(4): 602-608(in Chinese).
[44] Fang W X. Characteristics of sedimentary facies of hydrothermal for Qiantongshan giant lead-zinc ore deposit, Feng County, Shaanxi Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 44-50(in Chinese).
[45] Fang W X, Zhang G W, Hu R Z, et al. On classification and characteristics of the Devonian hydrothermal sedimentary facies in the Qinling orogen[J]. Geology & Prospecting, 2001, 37(2): 50-54(in Chinese).
[46] Fang W X, Zhang G W, Hu R Z, et al. On implications of the Devonian hydrothermal sedimentary facies in the Qinling Orogeny[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 48-54(in Chinese).
[47] Fang W X, Hu R Z, Su W C, et al. Geochemical characteristics of Dahebian-Gongxi superlarge barite deposits and analysis on its background of tectonic geology, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(2): 247-256(in Chinese).
[48] Fang W X, Sun Z J, Zhou S H. Assessment of resource potentiality in advance in a new-round ore prospecting for crisis mines[J]. Nonferrous Industry of China, 2004, 12: 20-21(in Chinese).
[49] Fang W X. On effective ways to a new-round ore prospecting for crisis mines in China[J]. Nonferrous Industry of China, 2005, 7: 42-45(in Chinese).
[50] Liu L M. Predictive capability of metallogenic theory and its facilitating approaches[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (5): 82-91(in Chinese).
[51] Ye T Z, Xiao K Y, Yan G S. Methodology of deposit model-

ing and mineral resource potential assessment using integrated geological information[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (5): 11-19(in Chinese).

参考文献:

[1] 刘泉清, 欧阳宗圻. 成矿-成晕地球化学模式及其研究意义[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1983(1): 53-65.
[2] 欧阳宗圻, 李惠, 刘汉中. 典型有色金属矿床地球化学异常模式[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
[3] 邹光华, 欧阳宗圻, 周庆来. 中国主要类型金矿床找矿模型论文集[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 248-258.
[4] 李惠, 张文华, 常凤池, 等. 大型、特大型金矿盲矿预测的原生叠加晕模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
[5] 李惠, 张文华, 刘宝林, 等. 中国主要类型金矿床的原生晕轴向分带序列研究及其应用准则[J]. 地质与勘探, 1999, 35 (1): 32-35.
[6] 方维萱. 陕西省凤太多金属矿床成矿成晕模式及地球化学找矿预测系统[C]//阮天健, 吴昌荣, 朱有光, 等. 第四届勘查地球化学学术讨论会论文选编, 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 49-55.
[7] 方维萱. 小秦岭金矿成矿成晕模式及地质地球化学预测系统[C]//阮天健, 吴昌荣. 第五届全国勘查地球化学学术讨论会论文选集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995: 35-41.
[8] 方维萱, 兀鹏武, 樊子辉. 论小秦岭岳王庙地区成矿预测及找矿预测[C]//傅水兴, 祝新友. 走向地学新世纪. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 371-376.
[9] 方维萱, 徐杰, 刘正桃, 等. 东疆库姆塔格—沙泉子地区岩屑地球化学异常优选排队方法[J]. 地质与勘探, 2003, 39 (5): 57-62.
[10] 方维萱, 张慧灵. 小秦岭金矿综合方法预测系统研究及应用效果[C]//中国地质学会. "八五"地质科技重要成果学术交流会会议论文选集. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 716-720.
[11] 耿文辉, 敬荣中, 韦龙明, 等. 有色金属矿山可持续发展找矿预测方法与应用[J]. 矿产与地质, 2004, 18(4): 353-355.
[12] 郑时干. 龙山金锑矿地质特征及深部找矿预测[J]. 华南地质与矿产, 2006, 4: 15-21.
[13] 肖振民. 西方矿产勘查地评估和投资经济[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-139.
[14] 汪民. 培育和发展矿业资本市场[J]. 中国矿业资本, 2007 (1): 12-13.
[15] 《中国矿业资本》编辑部. 建设规范的矿业权交易二级市场任重道远[J]. 中国矿业资本, 2007(1): 78-79.
[16] 朱裕生, 肖克炎, 丁鹏飞, 等. 成矿预测方法[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-330.
[17] 翟裕生. 矿床地质学的发展前景和思维方法[J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 1-8.
[18] 於崇文. 成矿作用动力学——理论体系和方法论[J]. 地学前缘, 1994, 1(3): 54-82.
[19] 翟裕生. 地球系统科学与成矿学研究[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 1-10.
[20] 张正伟, 蔡克勤, 徐章华. 大比例尺成矿预测研究方法[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 12.
[21] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13-27.
[22] 李人澍, 朱华平. 成矿系统的结构与聚矿功能[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 103-113.
[23] 於崇文. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 195-217.
[24] 翟裕生, 彭润民, 邓军, 等. 成矿系统分析与新类型矿床预测[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 125-132.
[25] 於崇文. 成矿动力系统在混沌边缘分形生长——一种新的成矿理论与方法论(上)[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 9-28.
[26] 於崇文. 成矿动力系统在混沌边缘分形生长——一种新的成矿理论与方法论(下)[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 471-489.
[27] 於崇文. 多重水力断裂的分形扩张[J]. 地学前缘, 2004, 11 (1): 11-44.
[28] 翟裕生. 地球系统、成矿系统到勘查系统[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 172-181.
[29] 於崇文. 江西德兴铜厂斑岩铜矿床的成矿成晕机理及其地球化学勘查意义的初步研究[J]. 地球科学, 1981(2): 111-132.
[30] 方维萱. 陕西小秦岭构造破碎蚀变岩型及含金石英脉型金矿床找矿模型[C]//邹光华, 欧阳宗圻, 周庆来, 等. 中国主要类型金矿床找矿模型论文集. 北京: 地质出版社, 1996: 48-62.
[31] 刘泉清. 构造地球化学的研究及应用[J]. 地质与勘探, 1981 (4): 53-61.
[32] 孙岩, 沈志修, 刘寿和. 断裂构造地球化学特征的初探[J]. 大地构造与成矿学, 1984, 8(1): 22-49.
[33] 徐光荣. 试论金的构造地球化学及其找矿的几个问题[J]. 地质与勘探, 1986(10): 57-61.
[34] 方维萱. 陕西省小秦岭地区断裂构造地球化学特征[J]. 地质与勘探, 1990, 26(12): 40-43.
[35] 方维萱. 北山黄尖丘-跃进山蚀变岩型金矿特征、找矿标志[J]. 有色金属矿产与勘查, 1998, 7(4): 210-215.
[36] 方维萱, 李亚林, 黄转莹. 论小秦岭地区金矿床成矿构造地球化学动力学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 155-162.
[37] 方维萱, 胡瑞忠, 漆亮, 等. 云南墨江金矿含镍金绿色蚀变岩的构造地球化学特征及时空演化[J]. 矿物学报, 2004, 24 (1): 31-38.
[38] 韩润生, 陈进, 李元, 等. 云南会泽铅锌矿床构造控矿研究规律及其隐伏矿预测[J]. 矿物学报, 2001, 21(2): 266-269.
[39] 韩润生, 陈进, 高德荣, 等. 构造地球化学在隐伏矿定位预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2003, 39(6): 25-28.
[40] 方维萱. 小秦岭含金石英脉矿物地球化学研究[J]. 地质与勘探. 1996, 32(3): 40-50.
[41] 方维萱. 陕西凤县铅硐山大型铅锌矿床矿物地球化学研究[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 198-205.
[42] 方维萱, 黄转莹, 刘方杰. 八卦庙超大型金矿床构造-矿物-地球化学[J]. 矿物学报, 2000, 20(2): 121-127.
[43] 方维萱, 胡瑞忠, 王明再, 等. 云南墨江含金脆-韧性剪切构造带中显微构造的矿物地球化学研究[J]. 矿物学报, 2001, 21(4): 602-608.
[44] 方维萱. 陕西铅硐山大型铅锌矿床热水沉积岩相特征[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 44-50.

[45] 方维萱，张国伟，胡瑞忠，等. 秦岭造山带泥盆系热水沉积岩相的亚相和微相划分及特征[J]. 地质与勘探，2001，37(2)：50-54.

[46] 方维萱，张国伟，胡瑞忠，等. 秦岭造山带泥盆系热水沉积岩相应用研究及实例[J]. 沉积学报，2001，19(1)：48-54.

[47] 方维萱，胡瑞忠，苏文超，等. 大河边—新晃超大型重晶石矿床地球化学特征及形成的地质背景[J]. 岩石学报，2002，18(2)：247-256.

[48] 方维萱，孙肇均，周圣华. 新一轮找矿危机矿山资源潜力评价先行[J]. 中国有色金属工业，2004，12：20-21.

[49] 方维萱. 论我国有色金属危机矿山新一轮找矿的有效途径[J]. 中国有色金属工业，2005，7：42-45.

[50] 刘亮明. 成矿理论的预测能力及其改善途径[J]. 地学前缘，2007，14(5)：82-91.

[51] 叶天竺，肖克炎，严光生. 矿床模型综合地质信息预测技术研究[J]. 地学前缘，2007，14(5)：11-19.

致《地学前缘》爱思唯尔(Elsevier)英文版作者

尊敬的作者：您好！

《地学前缘》被世界最大的科技出版公司 Elsevier 选入中国合作期刊，并获得了国际标准刊号(ISSN 1872-5791)。从 2007 年起入选的《地学前缘》文章英文版将在 ScienceDirect 在线全文平台上发表，Elsevier 的近 2 000 万用户，包括全球著名的大学、图书馆、科研机构等都可以进行在线阅读。

中国期刊在全球科技网 ScienceDirect 上发表，将会扩大中国期刊的读者范围，提高中国期刊论文的国际引用率，促进中、外科技界间的学术交流。

送交 Elsevier 发表的稿件是从被《地学前缘》录用的中文稿件中选出并同步译成的英文稿件。英文稿件要求：

(1)译文的标题、姓名、单位、关键词、公式、插图、表格、引文、编号及参考文献等应与《地学前缘》中文原文保持一致，译文内容应与中文主要内容相同，但参考文献的著录格式要遵从下面(6)之规定。

(2)摘要一般为 50～200 个英文词，应能概括全文内容(研究目的、过程、方法、结论)；不能含有方程、图表、参考文献等；如用缩略语，应有说明；第一句话不应与题名重复；尽量使用简单句和主动语态，并使动词靠近主语。英文版文章摘要可以与中文原文的英文摘要不同。

(3)关键词一般为 3～8 个；除专有名词大写外，全部小写；缩略语应先写全称再写简称；关键词之间用“;”分隔。具体要求与中文文章的关键词一致。

(4)图中文字的正斜体要与正文统一，图中文字用 7.5 磅 Times New Roman 字体；坐标轴标题和图中每段注释文字的首字母大写；图中字体：江河湖海左斜，山脉右斜；在坐标系中，坐标原点用 O，坐标名称用物理量与其单位之比，量符号用斜体，单位用正体，如“p/MPa”，标线刻度统一朝内侧。

(5)图件要求提供 CorelDRAW 或 Illustrator 软件制图格式，或上述软件可处理的矢量图，灰度图存为 600 dpi，彩图存为 300 dpi。半栏图图不宽于 8 cm；通栏图图不宽于 16.5 cm，整版图请控制在 16.5 cm×22.5 cm 内。表名在表的上方居中排，表头表述方式一般用物理量与其单位之比，如“p/MPa”。

(6)参考文献。英文版文章的文后参考文献姓全写，名缩写。参考文献采用阿拉伯数字依其在文中第一次出现的先后顺序编号；参考文献中的期刊名用全称或标准缩略形式表示；对于已经同意发表或出版的文章、图书但尚未正式出版的，参考文献列表中应该标明“in press”以说明。参考文献的基本格式示例如下：

For a book: Wang N L, Yang J C, Xia Z K, et al. The Cenozoic Sediments and Tectonic Geomorphology of the Graben System in Shanxi Province. Beijing, China: Science Press, 1996.

For a paper in a journal: Zadeh L A. Towards a generalized theory of uncertainty (GTU)—An outline. Information Sciences, 2005, 172: 1-40.

For a paper in a contributed volume: Keene A J. A brief comparison of some evolutionary optimization methods. In: Rayward-Smith V, Osman I, Reeves C, et al. (eds.), Modern Heuristic Search Methods. New York: Wiley, 1996: 255-272.

For a paper in a conference proceedings: Ishibuchi H, Nozaki K, Tanaka H. Fuzzy data mining: Effect of fuzzy discretization. In: Proc. 1st IEEE International Conference on Data Mining, San Jose, CA, 2001: 241-248.

For an unpublished paper: Kryszkiewicz M. Knowledge reduction in information systems. Acta Mathematica Scientia, in press.

《地学前缘》Elsevier 英文版编辑部

联 系 人：尹牡丹

电　　话：82321855

电子信箱：esf@cugb.edu.cn