

文章编号: 1006-6616 (2016) 02-0223-09

成矿预测的发展现状及趋势

刘林^{1,2}, 芮会超³

(1. 陕西省矿产资源勘查与综合利用重点实验室, 西安 710054;

2. 陕西省地质矿产勘查开发总公司, 西安 710054;

3. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710064)

摘要: 在对成矿预测学起源、研究现状及存在问题进行概括、分析与总结的基础上, 阐述了相关的成矿预测理论、常用的成矿预测方法和矿体定位预测研究, 并从四方面论述了成矿预测学的发展趋势, 以为成矿预测提供一些有益的参考。

关键词: 成矿预测; 地质异常; 预测方法; 定位预测; 综合信息

中图分类号: P612

文献标识码: A

成矿预测学是介于矿产勘查学和预测学之间的边缘学科, 以成矿规律研究为基础, 以现有成矿理论、预测学理论为指导, 直接服务于找矿工作, 为国民经济的客观决策及矿产勘查的具体实施提供科学依据。目前, 社会经济迅猛发展, 人类对矿产需求日益增长, 已发现的各种矿产资源储量在不断减少, 找矿工作面临着勘查对象由地表矿、浅部矿和易识别矿向深部矿、隐伏矿和难识别矿的转变, 成矿预测已成为当今成矿学研究领域的前沿和热点。但是, 由于作为该学科理论指导的现代成矿理论不断创新发展, 并且该学科应用性较强, 加之地质问题的复杂性等缘故, 虽然从学科的发展现状来看, 成矿预测学已经完全发展成为独立的学科, 但在生产实践中, 它和成矿规律研究的“仆”、“主”关系并未转换, 至今仍有相当一部分人将成矿预测视为成矿规律学的研究内容之一, 这种状况较大地影响了该学科的发展和当前的找矿突破行动。本文对成矿预测学的起源、研究现状及存在问题进行了分析和总结, 并从四方面论述了成矿预测学的发展趋势, 以为成矿预测提供一些有益的建议和参考。

1 成矿预测学研究进展

目前, 成矿预测工作在地质找矿领域得到了较全面的普及, 继一轮、二轮区划工作后, 我国又开展了全国重要矿产资源潜力评价, 通过5年时间, 按照“五统一”原则, 完成全国25种重要矿产资源的潜力评价工作^[1]。全国危机矿山找矿工作也证明, 成矿预测学在矿产勘查中的作用巨大, 且在今年的找矿突破行动中得到了较高的重视。

成矿预测学的发展与作为该学科理论指导的现代成矿理论和新技术、新方法的发展密不可分。本文以前人对成矿预测学发展阶段的划分为基础, 将成矿预测学的发展细分为4个阶段: 20世纪40—50年代为萌芽阶段; 20世纪60年代至1978年为创立阶段; 1978年至20

收稿日期: 2015-11-30

作者简介: 刘林 (1967-), 男, 硕士, 地质高级工程师、计算机技术讲师, 现主要从事地质矿产勘查、数据挖掘工作。E-mail: liulin1885@163.com

世纪 80 年代是发展阶段,在此期间西方欧美国家发展了以计算机为基础的矿产定量预测方法,尤其值得提出的是,1975—1980 年间,国际地质相关计划 (IGCP) 第 4 组实施了题为“资源研究中计算机应用标准”的第 98 号专题,总结推广了 6 种定量成矿预测方法 (区域价值估计法、体积估计法、丰度估计法、矿床模拟估计法、德尔菲估计法以及特征分析法)^[2]; 20 世纪 80 年代至今, GIS 高新技术、大数据挖掘进入成矿预测领域,基于 GIS 的成矿预测方法——经验方法和概念方法^[3]以及数字化的矿产资源勘查数据库得到显著发展,空间数据挖掘具有了坚实的基础。

虽然目前中国地质大学等多所高校都设有成矿预测学专业,但是人们对预测理论、预测方法分类及矿体定位预测的认识还存在着较大的分歧。近年来的成果也多集中在基于三维地质模型的成矿预测,如陈建平等的《基于数字矿床模型的陕西潼关县 Q8 号金矿脉西段三维成矿预测》^[4]、史蕊等的《云南个旧竹林矿段三维成矿预测及靶区优选》^[5], 这些方法大多缺少与地质背景、成矿规律、找矿模型等含有地质“内涵”因素的融合,更多地偏重于计算机技术与图形学方法,而缺乏对地学模型本身的重视^[6]。这种现状有将该学科严格化的趋势,也将制约该学科的发展。本文中,笔者进一步对成矿预测学发展进行了多方面的细化研究。

1.1 成矿预测理论研究

成矿预测是以现有成矿理论、预测学理论为指导的预测工作,其本质是从成矿规律研究出发,对高度提炼的成矿理论和成矿模型的再应用,其核心是创新的成矿理论,其典型代表就是模型找矿。当前,“成矿流体”理论^[7]、“边缘成矿”理论、“三源”成矿理论、“地幔热柱控矿”理论^[8]、“同位成矿”理论、“矿集区”与“成矿大爆发”、大型—超大型矿床成矿及找矿理论^[9]、“成矿系列”理论^[10]、“地球化学块体及地球气深穿透”理论^[11]以及成矿谱系到成矿体系的研究不断完善。这一方面反映了对成矿认识不断深入的过程,展示出从简单到复杂、从个体到整体、从具体到抽象、从静态到动态的研究途径;另一方面也为成矿预测奠定了良好的基础。同时,国内外大量的成功范例也说明,在当前形势下,模型找矿仍是成矿预测的主要方法和手段。

1.2 成矿预测方法研究

1.2.1 成矿预测方法分类

目前成矿预测方法分类研究相对薄弱,有关这方面的文献较少。表 1 列出了国内外部分专家的成矿预测方法分类,从中可以看出,这些分类方法极不一致。究其原因,主要是分类的原则和角度不同;另一方面也反映出随着社会科学技术的发展,成矿预测方法分类的研究正不断取得新的进展。笔者从当前我国矿产勘查实践出发,认为刘石年在 1993 年的分类(见表 2)更符合当前的现实。

1.2.2 成矿预测方法研究现状

自 20 世纪 80 年代以来国内外创建并研究总结了矿产预测的理论和科学技术方法,如:地质异常“三段式”成矿预测理论方法、综合信息预测方法技术、“三步式”矿产资源评价方法、成矿系列缺位预测方法、基于地球化学块体理论的资源量估算方法、固体矿产矿床模型综合地质信息预测技术以及勘查区“三位一体”地质模型找矿预测方法等。

1.2.2.1 地质异常“三段式”成矿预测理论方法

“三段式”成矿预测及定量评价方法^[14~15]由赵鹏大院士提出,该方法以地质异常分析为基础,以分析成矿多样性为目标,以研究区域矿床谱系为依据,将地质异常、成矿多样性及矿床谱系三方面定量化研究紧密结合,将作为预测对象的矿床放到预测地区的地质成矿时

表1 国内外有关学者的成矿预测方法分类一览表^[12]

Table 1 Classification of methods of metallogenic prediction from different researchers

序号	学者姓名	分类方法
1	秋也夫(前苏联)	①启发式预测(专家预测);②数学模型预测
2	沙利文(美国) 克雷康贝(美国)	①定性预测法;②时间序列预测法;③因果模型预测法
3	道勃罗夫(前苏联)	①专家评估法;②趋势外推法;③模型法。进一步分为8组19种
4	琼斯(美国) 特维斯(美国)	①定性预测;②定量预测;③时间预测;④概率预测
5	哈里斯(美国)	①多元统计预测法;②主观评价法
6	龙得克维斯特	①地质—几何法;②历史演化法;③共生分析法;④构造—建造—岩相法
7	赵鹏大(1983)	①资源潜力评价方法;②成矿远景区评价方法;③地质标志评价方法
8	朱裕生(1984)	①地质标志评价方法;②主观评价方法;③简单地质标志评价方法;④成矿地质标志评价方法;⑤定性地质标志评价方法;⑥成因地质模型评价法
9	王世称(1986)	按预测目的分5类,每类又按离散型、连续型、混合型3分,共分15种
10	卢作祥等(1988)	①归纳法(编图法);②类比法;③统计分析法;④综合法
11	刘石年(1993)	①相似类比;②求异法;③资源总量预测和潜力评价方法;④预测矿床可能规模方法
12	曹新志(1993)	①趋势外推法;②归纳法;③类比法;④综合法
13	范永香(2002)	①地质分析类比法;②数理统计法;③物化探综合信息法;④基于GIS的成矿预测法

表2 成矿预测方法分类简表^[13]

Table 2 Simplified classification of methods of metallogenic prediction

内容	成矿预测方法分类		主要预测目标和方法
	类	亚类	
找矿靶区 预测	相似类比	环境类比法	查明成矿背景和环境,建立环境类比模型
		条件分析法	查明控矿条件的作用及最优组合和部位,建立条件控矿模型
		综合信息法	查明成矿信息及最优组合和部位,建立综合信息模型
		地质几何法	对控地质界面进行模拟及矿体空间定位,建立地质几何模型
	求异法	时间系列法	查明主要成矿期次及演化规律,预测矿产时空分布
		共生分析法	查明矿床组合及成矿系列,预测共生矿种和矿床
		矿床模型法	建立矿床成因模型或综合类比模型,对工作地区进行预测
		定性组合求异法	对地质异常进行体线面点组合求异厦预坝
资源定量 预测	资源总量预测和潜力评价方法	定量组和求异法	对矿冈素和矿化信息进行取值、变换、定量组合求异
		区域价值法,体积估算法、丰度估算法、矿床模型法、德尔菲法、蒙特卡洛法、综合法	
	预测矿床可能规模方法	回归分析法、判别分析法、聚类分析法、逻辑信息法、系统模拟法、克里金法	

空及成因演化系统中考察,而不是孤立、静止、无序地预测各类矿产资源。“三段式”成矿预测评价法要求“四定”,即:一定远景区空间位置,二定可能有的资源量、品位、矿产价值,三定找矿概率大小、精确及可靠程度,四定成矿因素、最佳定量组合,以确定可能的找矿范围。矿产资源定量预测评价的关键是地质异常模型、成矿多样特征模型和矿床成矿谱系模型。目前国内该方法研究主要集中在中国地质大学赵鹏大科研团队。

1.2.2.2 综合信息预测方法技术

综合信息预测方法^[16~17]是王世称教授于1980年研究建立的一种矿产预测新理论和新方法,其核心是以地质信息为基础,研究地质、地球物理、地球化学、遥感信息以及它们之间信息的转换规律,建立以矿产资源体为单元,应用间接信息找寻隐伏矿产资源体和盲矿产资源的综合信息找矿模型。矿产资源体有不同的等级(矿床密集区、矿田、矿床、矿体等),不同等级的找矿模型是统计性模型而不是确定性模型。该方法是数学地质在矿床学和

找矿勘探地质学中的应用。地质学数据的预处理是该方法研究的难点和热点。

1.2.2.3 “三步式”矿产资源评价方法

“三步式”(Three-Part Form)评价方法^[18~19]由美国的辛格尔提出,是20世纪90年代美国形成的较为完善的矿产资源评价方法体系。该定量评价方法实质是三大步骤: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。它包括了哈里斯的矿产资源经济定量评价模型、考克斯和辛格的矿床模型与标准品位-吨位模型、麦卡门的定量评价与专家系统以及Drew的MARK3软件等^[19],是美国众多矿产资源评价专家研究成果的集成,也是美国地质调查局(USGS)在20世纪80年代末的标准评价方法。“三步式”评价方法体系的特色是地质矿床模型的应用,这在理论上保证了其合理性;但地质上常会出现同一地质环境多种成矿类型共生的现象,据此圈定的不同类型、不同矿种的可能地段就会出现重复,从而使预测工作更加复杂,也是“三步式”评价方法尚需解决的技术问题。

1.2.2.4 成矿系列缺位预测方法

该方法由陈毓川院士基于成矿系列理论而建立^[14,20],运用矿床成矿系列和成矿系列缺位概念,在一定的区域内,通过对区域地质演化历史、矿床形成地质环境、成矿作用、成矿物质、矿床时空分布规律、成矿系列模式、成矿体系等的系统研究,在确定的成矿体系中,预测各个序次的成矿系列在空间、时代、矿床类型、成矿元素(矿种)等方面应当存在而尚未被发现的部分。成矿系列缺位类别分为4种,即缺位空间、缺位时代、缺位类型、缺位成矿元素(矿种)。4种类型的成矿系列缺位既是成矿系列研究中一个问题从不同角度的反映,又是矿床成矿系列概念中强调的4个“一定”(一定历史时期,一定地质构造单元,一定地质成矿作用和具有一定成因联系的一组矿床)内涵的全面反映。该方法近年来在燕山地区、宁芜庐枞地区取得了较好成果,也得到了国内外专家和同行的认同。

1.2.2.5 基于地球化学块体理论的资源量估算方法^[21~22]

谢学锦院士在对中国的区域化探扫面工作中,摒弃单一图幅研究或区域性异常比较研究的传统思路,用综观全局的新思路,将各省取得的数据置于一起观察,认为水系沉积物中宽阔的地球化学模式是岩石或土壤中的金属元素在地表风化过程中迁移到河流中的,它们是富含某种或某些金属元素的巨大岩块在地表的显示^[21]。如果给出一个岩块的厚度,就能够计算出整个岩块中金属的供应量,通过剖析它的内部结构就能够追踪金属聚集形成矿床的踪迹。该方法将面积大于和等于地球化学省的巨大岩块定名为“地球化学块体”,进而对筛选出的有远景的靶区,利用成矿系数大致定量预测靶区内的远景储量。它是矿产勘查战略研究方法。

1.2.2.6 固体矿产矿床模型综合地质信息预测技术和勘查区“三位一体”地质模型找矿预测方法^[23~24]

叶天竺、夏庆霖等提出的综合地质信息预测技术以基础地质矿产勘查与研究资料为基础,以板块构造学、区域成矿学、矿产预测学理论为指导,按照成矿地质要素划分矿产预测类型;在典型矿床研究基础上建立矿床地质实体模型,进而建立预测模型;采用GIS技术和数学地质方法对未知区进行类比预测,圈定预测区,采用体积法等方法估算资源量。

“三位一体”地质模型找矿预测方法在充分利用勘查区地质、物探、化探、遥感等资料基础上,以地球化学、矿物学、矿床学理论为指导,通过大比例尺专题填图,确定成矿地质体、成矿结构面、矿化蚀变和各种成矿信息,研究成矿地质作用,确定成矿作用特征标志,

总结成矿要素及预测标志,建立找矿预测地质模型;再结合必要的物、化、探工作,通过综合研究推测矿体位置,通过工程验证发现并查明矿体(床)。

全国矿产资源潜力评价工作证明,上述固体矿产矿床模型综合地质信息预测技术和勘查区“三位一体”地质模型找矿预测方法目前已经成为适合我国资料基础和现有技术水平的矿产预测主流技术,被广大一线勘查技术人员采用。

1.3 矿体定位预测研究

矿体定位预测研究的热点在预测的有效途径和方法上,目前主要集中于控矿构造研究和地质-物探-化探-遥感综合分析以及数学理论研究3个方面。

自20世纪90年代至今,强调从构造研究入手,以构造解析为手段进行预测。这是因为多数矿床的形成都受构造控制,这些构造既是矿化流体(矿液)的运移通道,也是矿体的存储空间。因而隐伏矿床定位预测的主要目标就是判断深部最有利的成矿与赋矿部位,控矿构造解析也自然成为成矿预测的主要手段。

基于地质、物探、化探、遥感诸方面的成矿综合信息分析法作为地学的一个新分支,尽管其出现时间较短,但由于地质找矿的客观需要,目前无论从理论或方法上都发展较快。其主要发展趋势是系列化、立体化和定量化。

基于数学理论的预测方法较多,如模糊综合评判(FCA)模型、神经网络方法等,但是基于原始数据处理的研究较少,大量不确定性数据的处理仍是困扰此类方法发展的瓶颈。

2 成矿预测学的发展趋势

2.1 学科建设的理论研究应进一步统一认识

成矿预测学是以成矿规律研究为基础的介于矿产勘查学和预测学之间的边缘学科,迄今为止人们较多地注重了预测学理论及其在实践中的应用研究,而忽视了成矿理论研究的重要性,导致许多人将成矿理论与成矿预测学割裂开来,这既使学科建设进展缓慢,也影响相应的预测实践。因此,在今后的发展中应重视开展下列几方面的深入研究:

①大数据的相关性预测方法和常用的综合信息矿产预测方法是一致的,矿产预测模型理论、多学科信息相关性分析、预测地质求异理论、矿产区域趋势分析方法是矿产资源评价的4项基本理论^[25]。加强成矿预测学的成矿理论基础研究和矿产资源评价工作的总结,强化与预测学基本原理的结合,拓宽其交叉融合空间是未来成矿预测学发展的方向。

②数字地质是地质科学中的数据科学,其特点是:以数字形式表示地质对象的规律性,包括地质对象的结构特征、空间特征、统计特征、几何特征、演化特征的查明等;以海量数据为特征,可对各种地质过程进行数字模拟;数量化和数字化是充分提取信息的基础和前提;数据分析是提取各种信息的必要手段,是定量评价的依据,是查明地质体变异性、差异性、相似性、相关性、非线性、复杂性等的手段;数字特征是鉴别地质体、区分地质体的客观依据;可对事件结果的多解性、不确定性和模糊性进行定量估计和评价,对事件和现象的发展趋势定量预测;是进行专家系统智慧找矿的前提。数字知识和数字规律是对事物本质的高度凝炼,是事物客观规律的定量表征,是定义、划分、鉴别不同事物的客观标准,是科学管理、科学预测乃至科学发展的基本依据^[26]。因此,建立和发展适应大数据时代特征的成矿预测方法,是成矿预测学发展的方向。

③迄今为止的成矿预测研究中,多重视预测方法的研究,很少有人问津地质数据的预处理

理,更少有人关注地质数据的不确定性。地质数据来源广、类型多,且贯穿整个预测过程,其不确定性是数据预处理的难点,也是目前影响定量预测方法准确性的瓶颈。目前,数字形式的矿产资源勘查数据库以及勘查数据库数字化处理的能力得到显著发展,尤其是在空间数据的采集、检索、校正以及可视化方面取得了实质性的进展。但是还没有建立起一个普遍可接受的数据模型,能够投入使用的数字地质图还只是限于图件生成,通过重新分类(单元重新编码)对图件进行综合,寻找具有特殊特征的空间目标^[27]。随着数据量越来越大,面对海量的数据,基于大数据挖掘的预测方法,如云理论等,将会不断发展完善。而作为基础的数据预处理研究虽然难度较大,但它是一条必须逾越的鸿沟,避开它极易导致预测工作出现失误。因此加强地质数据的预处理研究是拓展预测方法和提高预测精度的关键问题之一。

2.2 预测方法的多样化发展

随着计算机技术的迅猛发展和各种新技术、新方法的引用,更多的与成矿有关的信息不断地被挖掘出来;同时非线性理论在成矿预测中还只是处于尝试阶段,先进理论的不断渗透必将对成矿预测的发展产生深远的影响,涌现出更多的预测方法。

2.3 预测结果向可视化发展

随着计算机技术,尤其是虚拟现实等技术的进步,三维可视化正以其独特的视角、清晰直观的画面、特有的三维框图、动态巡航功能以及掘进工程动态模拟等特征,成为研究的热点。目前,国内外针对隐伏矿体的三维成矿预测研究已取得了一些成果, Caumon 等^[28]、Fallara 等^[29]、Martin 等^[30]、Malehmir 等^[31]、Wang 等^[32]、陈建平等^[4-5,33-34]、毛先成等^[35-36]分别对不同地区的成矿潜力进行了三维预测。但目前尚缺乏系统的研究,工作方法体系仍有待深入探讨。总体而言我国三维地质填图正处于试验阶段,成矿预测可视化发展前景广阔。

2.4 物化探异常的计算机模拟将是成矿预测学研究的热点

成矿预测学往往侧重于预测学理论的应用研究,如逻辑回归法、证据权法^[37-38]、神经网络法^[39-40]、贝叶斯校正法、模糊逻辑法^[41-42]、Dempster Shafer 信任函数^[43]等。面对大数据,在计算机作为处理与显示设备的今天,对物化探异常的计算机模拟尚相对较少,进一步导致了目前许多研究仅限于预测理论的实践应用,而忽视了异常分析在成矿理论研究中的作用。因此,在今后的发展中重视物化探异常的计算机模拟将是成矿预测学研究的热点。

参 考 文 献

- [1] 肖克炎, 娄德波, 孙莉, 等. 全国重要矿产资源潜力评价一些基本预测理论方法的进展 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43 (4): 1073 ~ 1082.
XIAO Ke-yan, LOU De-bo, SUN Li, et al. Some progresses of mineral prediction theory and method in important mineral resource potential assessment of China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2013, 43 (4): 1073 ~ 1082.
- [2] 阳正熙. 西方国家的“成矿规律和成矿预测”的发展和现状 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2000, (Z1): 259 ~ 263.
YANG Zheng-xi. Development and current state of metallogenetic regularities and predictions in western countries [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2000, (Z1): 259 ~ 263.
- [3] Knox Robinson C M, Wyborn L A I. Towards a holistic exploration strategy: Using geographic information systems as a tool to enhance exploration [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44: 453 ~ 463.
- [4] 陈建平, 史蕊, 王丽梅, 等. 基于数字矿床模型的陕西潼关县 Q8 号金矿脉西段三维成矿预测 [J]. 地质学刊, 2012, 36 (3): 237 ~ 242.
CHEN Jian-ping, SHI rui, WANG Li-mei, et al. 3D metallogenetic prediction for western section of Q8 gold deposit in

- Tongguan County of Shaanxi based on digital mineral deposit model [J]. *Journal of Geology*, 2012, 36 (3): 237 ~ 242.
- [5] 史蕊, 陈建平, 王刚, 等. 云南个旧竹林矿段三维成矿预测及靶区优选 [J]. *地质通报*, 2015, 34 (5): 944 ~ 952.
- SHI Rui, CHEN Jian-ping, WANG Gang, et al. The 3D metallogenic prediction and optimization of targets in the Zhulin ore block of Gejiu, Yunnan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34 (5): 944 ~ 952.
- [6] 于萍萍, 陈建平, 柴福山, 等. 基于地质大数据理念的模型驱动矿产资源定量预测 [J]. *地质通报*, 2015, 34 (7): 1333 ~ 1343.
- YU Ping-Ping, CHEN Jian-ping, CHAI Fu-Shan, et al. Research on model-driven quantitative prediction and evaluation of mineral resources based on geological big data concept [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34 (7): 1333 ~ 1343.
- [7] 梁婷, 高景刚, 朱文戈. 成矿流体类型及研究方法综述 [J]. *西安文理学院学报*, 2005, 8 (4): 36 ~ 42.
- LIANG Ting, GAO Jing-gang, ZHU Wen-ge. A Summary on the Types of Ore-Forming Fluids and Research Methods [J]. *Journal of Xi'an University of Arts & Science: Natural Science Edition*, 2005, 8 (4): 36 ~ 42.
- [8] 毕金龙. 地幔柱及其成矿作用综述 [J]. *地质与资源*, 2005, 14 (3): 223 ~ 226.
- BI Jin-long. A Review on mantle plume and ITS ore-forming process [J]. *Geology and Resources*, 2005, 14 (3): 223 ~ 226.
- [9] 涂光炽. 超大型矿床的找寻和理论研究 [J]. *矿产与地质*, 1989, (1): 1 ~ 8.
- TU Guang-zhi. Discovery of super-large mineral deposits and its theoretical study [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1989, (1): 1 ~ 8.
- [10] 翟裕生. 成矿系列研究问题 [J]. *现代地质*, 1992, 6 (3): 301 ~ 308.
- ZHAI Yu-sheng. Some problems on the study of metallogenic series [J]. *Geoscience Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 1992, 6 (3): 301 ~ 308.
- [11] 谢学锦. 战术性与战略性的深穿透地球化学方法 [J]. *地学前缘*, 1998, 5 (2): 171 ~ 183.
- XIE Xue-jin. Tactical and strategic deep penetration geochemical surveys [J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5 (2): 171 ~ 183.
- [12] 范永香. 成矿规律与成矿预测 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- FAN Yong-xiang. *Metallogenic Regularities and Prediction* [M]. Xuzhou: China University and Technology Press, 2003.
- [13] 刘石年. 成矿预测学 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993.
- LIU Shi-nian. *Study of metallogenic prediction* [M]. Changsha: Central South University Press, 1993.
- [14] 赵鹏大. 三联式资源定量预测与评价-数字找矿理论与实践探讨 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2002, 27 (5): 482 ~ 489.
- ZHAO Peng-da. "Three-Component" Quantitative Resource Prediction and Assessments: Theory and Practice of Digital Mineral Prospecting [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27 (5): 482 ~ 489.
- [15] 赵鹏大, 陈建平, 张寿庭. 三联式成矿预测新进展 [J]. *地学前缘*, 2003, 10 (2): 455 ~ 462.
- ZHAO Peng-da, CHEN Jian-ping, ZHANG Shou-ting. The new development of "Three Components" Quantitative Mineral Prediction [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10 (2): 455 ~ 463.
- [16] 王世称. 综合信息矿产预测理论与方法体系新进展 [J]. *地质通报*, 2010, 29 (10): 1399 ~ 1403.
- WANG Shi-cheng. The new development of theory and method of synthetic information mineral resources prognosis [J]. *Geological Bulletin OF China*, 2010, 29 (10): 1399 ~ 1403.
- [17] 陈永清, 王世称. 综合信息成矿系列预测的基本原理与方法 [J]. *山东地质*, 1995, 11 (1): 55 ~ 62.
- CHEN Yong-qing, WANG Shi-cheng. The Basic Principles and Methods ore-Forming Series Prognosis of Comprehensive information [J]. *Geology of Shandong*, 1995, 11 (1): 55 ~ 62.
- [18] 侯翠霞, 刘向冲, 张文斌, 等. 成矿预测理论与方法新进展 [J]. *地质通报*, 2010, 26 (6): 953 ~ 960.
- HOU Cui-xia, LIU Xiang-chong, ZHANG Wen-bin, et al. New method and theory of metallogenic prediction. *Geological Bulletin of China*, 2010, 26 (6): 953 ~ 960.
- [19] 肖克炎, 丁建华, 刘锐. 美国“三步式”固体矿产资源潜力评价方法评述 [J]. *地质论评*, 2006, 52 (6): 793 ~ 798.
- XIAO Ke-yan, DING Jian-hua, LIU Rui. The Discussion of Three-part Form of Non-fuel Mineral Resource Assessment [J]. *Geological Review*, 2006, 52 (6): 793 ~ 798.
- [20] 赵鹏大. 三联式资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2002, 27 (5): 482 ~ 489.

- ZHAO Peng-da. " Three-Component" Quantitative Resource Prediction and Assessments: Theory and Practice of Digital Mineral Prospecting [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27 (5): 482 ~ 489.
- [21] 谢学锦, 刘大文, 向运川, 等. 地球化学块体——概念和方法学的发展 [J]. *中国地质*, 2002, 29 (3): 225 ~ 233.
XIE Xue-jing, LIU Da-wen, XIANG Yun-chuan, et al. Geochemical blocks-Development of concept and methodology [J]. *Chinese Geology*, 2002, 29 (3): 225 ~ 233.
- [22] 李随民, 吴景霞, 栾文楼, 等. 地球化学块体方法在冀北金矿资源潜力估算中的应用 [J]. *中国地质*, 2009, 26 (2): 443 ~ 449.
LI Sui-min, WU Jing-xia, LUAN Wen-lou, et al. The application of geochemical block method to gold resource assessment in northern Hebei Province [J]. *Chinese Geology*, 2009, 26 (2): 443 ~ 449.
- [23] 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.
YE Tian-zhu, XIAO Ke-yan, YAN Guang-sheng. Methodology of deposit modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (5): 11 ~ 19.
- [24] 叶天竺. 矿床模型综合地质信息预测技术方法理论框架 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2013, 43 (4): 1053 ~ 1072.
YE Tian-zhu. Theoretical Framework of Methodology of Deposit Modeling and Integrated Geological Information for Mineral Resource Potential Assessment [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2013, 43 (4): 1053 ~ 1072.
- [25] 肖克炎, 李楠, 王琨, 等. 大数据思维下的矿产资源评价 [J]. *地质通报*, 2015 (7): 1266 ~ 1272.
XIAO Ke-yan, LI Nan, WANG Kun, et al. Mineral resources assessment under the thought of big data [J]. *Geological Bulletin OF China*, 2015 (7): 1266 ~ 1272.
- [26] 赵鹏大. 大数据时代数字找矿与定量评价 [J]. *地质通报*, 2015 (7): 1255 ~ 1259.
ZHAO Peng-da. Digital mineral exploration and quantitative evaluation in the big data age [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015 (7): 1255 ~ 1259.
- [27] 阳正熙. 西方国家的“成矿规律和成矿预测”的发展和现状 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2000, (Z1): 259 ~ 263.
YANG Zheng-xi. Development and current state of metallogenetic regularities and predictions in western countries [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2000, (Z1): 259 ~ 263.
- [28] Caumon G, Ortiz J M, Rabeau O. A comparative study of three data-driven Mineral Potential Mapping techniques. 2006, In: IAMG06. Belgium.
- [29] Fallara F, Legault M, Rabeau O. 3D integrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Quebec, Canada): Techniques and applications [J]. *Exploration and Mining Geology*, 2006, 15 (1/2): 27 ~ 43.
- [30] Martin L, Perron G, Masson M. Discovery from 3D visualization and quantitative modelling [C] //Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration. Toronto.
- [31] Malehmir A, Thunehed H, Tryggvason A. The Paleoproterozoic Kristineberg mining area, northern Sweden: Results from integrated 3D geophysical and geologic modeling, and implications for targeting ore deposits *Geophysics*, 2008, 74 (1): 9 ~ 22.
- [32] Wang G, Zhang S, Yan C, et al. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region [J]. *China. Computers & Geosciences*, 2011, 37 (12): 1976 ~ 1988.
- [33] 陈建平, 尚北川, 吕鹏, 等. 云南个旧矿区某隐伏矿床大比例尺三维预测 [J]. *地质科学*, 2009, 44 (1): 324 ~ 337.
CHEN Jian-ping, SHANG Bei-chuan, LÜ Peng, et al. Three-dimensional prediction in big scales to a concealed ore bodies in Gejiu, Yunnan. *Geological Science*, 2009, 44 (1): 324 ~ 337.
- [34] 陈建平, 董庆吉, 郝金华, 等. 基于GIS的证据权重法青海“三江”北段斑岩型钼铜矿产资源成矿预测 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30 (3): 519 ~ 529.
CHEN Jian-ping, DONG Qing-ji, HAO Jin-hua, et al. Metallogenic prognosis of porphyry molybdenum-copper resources in northern Sanjiang region of Qinghai Province based on weight-of-evidence method and GIS [J]. 2011, 30 (3): 519 ~ 529.
- [35] 毛先成, 戴塔根, 吴湘滨, 等. 危机矿山深部隐伏矿体立体定量预测研究——以广西大厂锡多金属矿床为例 [J]. *中国地质*, 2009, 36 (2): 424 ~ 435.
MAO Xian-cheng, DAI Ta-gen, WU Xiang-bin, et al. The stereoscopic quantitative prediction of concealed ore bodies in the deep and marginal parts of crisis mines: a case study of the Dachang tin polymetallic ore deposit in Guangxi [J]. *Geology in China*, 2009, 36 (2): 424 ~ 435.
- [36] 毛先成, 邹艳红, 陈进, 等. 危机矿山深部、边部隐伏矿体的三维可视化预测——以安徽铜陵凤凰山矿田为例

[J]. 地质通报, 2010, 29 (2/3): 401~413.

MAO Xian-cheng, ZOU Yan-hong, CHEN Jin, et al. Three-dimensional visual prediction of concealed ore bodies in the deep and marginal parts of crisis mines: a case study of the Fenghuangshan ore field in Tongling, Anhui, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29 (2/3): 401~413.

- [37] 徐善法, 陈建平, 叶继华. 证据权法在三江北段铜金矿床成矿预测中的应用研究 [J]. 地质与勘探, 2006, (2): 54~59.
- XU Shan-fa, CHEN Jian-ping, YE Ji-hua. Application of evidence weight method in the copper-gold mineral resources prediction in the north section of the sanjiang region. [J]. Geology and prospecting, 2006, (2): 54~59.
- [38] 陈刚, 姚仲友, 刘君安, 等. 基于证据权法的伊尔岗地块金矿成矿预测 [J]. 地质通报, 2014, 33 (2/3): 210~214.
- CHEN Gang, YAO Zhong-you, LIU Jun-an, et al. Prognosis of gold deposits in Yilgarn block based on weights of evidence [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33 (2/3): 210~214.
- [39] 邵拥军, 贺辉, 张贻舟, 等. 基于BP神经网络的湘西金矿成矿预测 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38 (6): 1192~1198.
- SHAO Yong-jun, HE Hui, ZHANG Yi-zhou, et al. Metallogenic prediction of Xiangxi gold deposit based on BP neural networks [J]. Central South University: Science and Technology, 2007, 38 (6): 1192~1198.
- [40] 孙祥, 杨子荣, 徐大地. 基于模糊神经网络的义县萤石成矿预测 [J]. 地质找矿论丛, 2008, (2): 149~152.
- SUN Xiang, YANG Zi-rong, XU da-di. The fuzzy-neural network-based fluorite deposit prediction in yixian [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2008, (2): 149~152.
- [41] 商伟, 陈守余, 赵江南. 秦岭地区铅锌矿床模糊逻辑法找矿远景区优选 [J]. 地质找矿论丛, 2009, (1): 47~50, 55.
- SHANG Wei, CHEN Shou-yu, ZHAO Jiang-nan. Potential areas for pb-zn deposit in qinling region optimized with the fuzzy logic method [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2009, (1): 47~50, 55.
- [42] 邢学文, 胡光道. 模糊逻辑法在秦岭-松潘成矿区金矿潜力预测中的应用 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36 (2): 298~304.
- XING Xue-wen, HU Guang-dao. The Application of Fuzzy logic method gold deposit prediction in Qinling-Songpan area [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36 (2): 298~304.
- [43] 王淑晴, 孙翠羽. 基于Dempster-Shafer证据理论的矿山遥感分类 [J]. 吉林师范大学学报: 自然科学版, 2015, (2): 139~142.
- WANG Shu-qing, SUN Cui-yu. Classification of mine remote sensing image based on the D-S theory [J]. Journal of Jilin Normal University: Natural Science Edition, 2015, (2): 139~142.

PRESENT SITUATION AND DEVELOPMENT TENDENCY OF METALLOGENIC PREDICTION

LIU Lin^{1,2}, RUI Hui-chao³

(1. Shaanxi Key Laboratory of exploration and comprehensive utilization of mineral resources, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Geological and mineral Survey and development corporation, Xi'an 710065, China;

3. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on the summarization and generalization of the metallogenic prediction development process, we illuminated the related theory and the commonly used methods of metallogenic prediction as well as the orebody location prediction research. We discussed the development trends of metallogenic prediction from four different aspects, with aim to provide some useful advises and references for prediction of mineralization.

Key words: metallogenic prediction; geological anomalies; prediction method; locating predication; integrated information