

# “协优”成矿预测方法的理论探索与实践

郑有业<sup>1,2,3</sup>, 陈仁义<sup>4</sup>, 庞迎春<sup>2</sup>, 施俊法<sup>4</sup>, 高顺宝<sup>2</sup>, 左仁广<sup>2</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
3. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
4. 中国地质调查局, 北京 100037

**摘要:** 根据西藏野外地质工作难度大、工作程度极低、找矿信息少且获取极其困难这一实际, 在认真学习、吸收前辈成矿预测理论精髓及大量找矿实践和理论思考的基础上, 基于系统性、关联性、目标一致性、不充足判据的充足化、复杂与精确的反比性原则, 提出了西部工作程度极低地区快速逼近找矿目标的“协优”成矿预测法, 即只要优选出少量相互关联、目标一致、最能揭示某种类型成矿本质特征的关键信息组合, 就可能导致该类型矿床被发现。强调直接信息的先导作用及少数相互关联信息的明确指示意义, 突出信息与预测目标的一致性, 这样可有效减少信息的不确定性和多解性, 从而降低找矿风险, 试图从另一个视角、另一种思路来认识和探讨西部工作程度极低地区的成矿预测问题。该方法应用于冈底斯、北喜马拉雅及念青唐古拉等成矿带的勘查实践, 找矿取得了巨大突破。这对促进冈底斯相邻地区乃至整个西部地区的找矿评价、技术方法进步等具有重要的参考与借鉴意义。

**关键词:** 西部地区; 快速逼近找矿目标; 矿床地质; “协优”成矿预测法; 理论探索与实践。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2009)03-0511-14

收稿日期: 2008-11-01

## “Xieyou” Metallogenic Prediction Method: Theoretical Exploration and Practice

ZHENG You-ye<sup>1,2,3</sup>, CHEN Ren-yi<sup>4</sup>, PANG Ying-chun<sup>2</sup>, SHI Jun-fa<sup>4</sup>, GAO Shun-bao<sup>2</sup>, ZUO Ren-guang<sup>2</sup>

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. China Geological Survey, Beijing 100037, China

**Abstract:** Geological field work in Tibet is rather tough and some information is unavailable for metallogenic prediction. Based on the former research achievements and the principle that highlights systematic, relevant, consistent in terms of target, integrated in criteria and contrasted in complexity and high accuracy, a new location prediction theory—“Xieyou” metallogenic prediction method, for areas with very bad conditions in West China is proposed, which is a “rapid approach to the prospecting target”. This theory holds that only by selecting the combination of several key pieces of information which are relevant to each other, have a consistent target and reflect some characteristics of the special deposit, can we find such special deposit. The key point is that great stress should be laid on the leading function of the direct information and the implication of some relevant information, so as to highlight the coincidence between information and the prediction target, with which uncertainty and multi-solutions of information can be decreased and the prospecting risks can be reduced. This theory tries to discuss the metallogenic prediction from another aspect in prospecting field, which is practised in the areas with very bad conditions in West China. Lots of ore deposits were found in Gangdese, north Himalaya and Nyainqentanglha metallogenic belts by applying this method, which may accelerate the ore prospecting process and improve prospecting method in Gangdese area, or even in all the west areas of China.

**Key words:** West of China; rapid approach to the prospecting target; ore deposit geology; “Xieyou” metallogenic prediction method; theoretical exploration and practice.

基金项目: 教育部重大项目 (No. 308018); 国家科技支撑计划项目 (No. 2006BAB01A04); 国家重大基础研究发展计划 973 项目 (No. 2002CB412610).

作者简介: 郑有业 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事基础地质、成矿规律及矿产勘查评价工作。E-mail: zhyouye@163.com

## 0 引言

矿产勘查有着巨大的风险,有效地减少风险与不确定性因素,有赖于新战略、新思路的提出及新方法、新手段的应用。因此,要应用新的思路及方法进行成矿预测及勘查选区研究,选取准成矿有利靶区是地区找矿取得突破的关键。科学观的更新决定数据、解释和结论的更新(杜乐天,2003)。地质源头创新的关键在于思路创新及科学、详实的野外地质调查。找矿实践告诉我们,一个新的成矿理论的提出,往往会引发新一轮找矿热潮;而一个新的找矿思路或找矿技术的应用会导致新的找矿重大突破。这里最想强调的是:世界上没有两个相同的矿床,在找矿中善于吸取前人的经验教训,开拓思路,敢于大胆实践,才是最关键的(芮宗瑶等,2002)<sup>①</sup>。

矿床是在一个广阔的空间、漫长的时间、多种介质及多种地质作用的条件下形成的,因此成矿是一个非常复杂的系统,会产生海量的成矿信息。在进行成矿预测时,人们通常从地、物、化、遥等方面入手,选取了数十个、甚至近百个信息(变量)进行研究、计算、分析,力求不漏掉任何信息。然而成矿预测时,特别是在我国西部工作程度极低、获取信息极其困难的情况下进行成矿预测,是否一定需要如此多的信息或变量呢?这是非常值得商讨、探索的问题。笔者在认真学习、研究当前国内外成矿预测领域内不同学派学术思想的基础上,特别是吸收了赵鹏大院士、陈毓川院士、翟裕生院士、王世称教授、朱裕生研究员等的理论精髓,并结合近年来的大量找矿实践和理论思考,提出了西部工作程度极低地区快速逼近找矿目标的“协优”成矿预测法。试图从另一个视角、另一种思路来认识、探讨成矿预测问题,本着一切服务于实践与效果的指导思想,力求简洁、方便、实用。

## 1 成矿预测理论的国内外研究现状

国内外矿产资源预测评价经历了由简单到复杂,由粗略到精细,从抽象到具体的演变过程。

### 1.1 国外成矿预测理论研究现状

法国学者 Allais(1957)开创了定量成矿预测的先河,他在对美国西部含矿盆地进行成矿预测时,把预测区划分成许多面积相等的单元,提出每个单元

中的矿床数目服从泊松分布。

20 世纪 60 年代至 20 世纪 80 年代中期,随着计算机技术的逐步发展,采用概率论和数理统计方法进行成矿预测取得了突破性的进展(Harris, 1965, 1973; Agterberg and Kelly, 1971; Agterberg *et al.*, 1972; Agterberg, 1974)。自从 Bonham-Carter *et al.* (1988)报导了利用 GIS 对加拿大新斯科舍省的 Meguma 地区进行金矿成矿预测的研究后,GIS 在矿产勘查中的应用不断扩大,目前已普遍利用 GIS 综合勘查数据(阳正熙,2000)。

在美国,矿产定量预测及评价领域的研究十分活跃。在矿种上,既研究油气资源,也研究金属、非金属等固体矿产;在理论与方法上,既有综合分析性研究,也有个别技术及数学模型的研究,特别突出的是矿产资源评价与国土资源合理利用及环境保护问题日益相关。如 Adams and Putnam(1992)以卡林型金矿为例,提出了隐伏矿预测的“资料—过程—准则”模型的思路与方法,导致了在已知矿带深部及外围找矿的重大突破;近 10 年来,有影响的矿产勘查评价方法为 Singer(1993)提出的“三部式”资源评价法。其概要为:(1)根据所要找寻的矿床类型确定找矿地质可行地段,即地质可行地段的确定要与矿床模型相一致,其圈定范围大小以不漏失主要矿床或漏失概率最小为原则;(2)应用所要找寻矿床类型的吨位—品位模型估计可能发现矿床的矿石数量和质量特征,吨位—品位模型的选择或建立要与区内已知矿床模型相一致;(3)确定研究区内可能发现的矿床个数,对个数的估计要与所建立的吨位—品位模型相一致。

前苏联在大力应用成矿建造分析方法进行区域成矿远景预测评价的同时,于 20 世纪 90 年代初先后创造性地提出了“系统勘查”、“局部预测”、“立体填图”、“目标预测”和“预测普查组合”等新思路和新方法,特别是“预测普查组合法”对资源定量预测及评价具有较大影响。该方法要求在地质勘查的每个阶段都将要寻找“对象”、这些对象或目标所具有的一套“标志”和为查明这些标志所采用的一套“方法”有机地、系统地加以组合,即根据地质勘查工作的不同阶段,按“对象—标志—方法”三要素进行系统找矿评价工作。

地理信息系统、专家系统与成矿预测结合是成矿预测工作的一大亮点。以美国斯坦福大学国际研究所人工智能中心建立的勘探者(Prospector)专家系统为代表,它是世界上最早的成矿预测专家系统;

<sup>①</sup>芮宗瑶,秦克章,王登红,等,2002. 国内外斑岩铜矿研究进展. 中国地质调查局.

以加拿大学者 Agterberg 为代表提出的基于证据权法的 GIS 成矿预测方法等也具有较大的影响。

## 1.2 国内成矿预测理论研究现状

目前国内具代表性的是赵鹏大院士提出的相似类比理论、求异理论和定量组合控矿理论,并提出了“求异”理论的地质异常理论。在此基础上提出了“三联式”数字找矿及资源定量评价理论(赵鹏大等,2001),认为地质异常是基础,以成矿多样性分析与矿床谱系研究为指导,将地质异常、成矿多样性及矿床谱系 3 方面量化研究紧密结合形成矿产预测及定量评价的切入点,是实现“数字找矿”的创新探索。近来又指出矿床是具有高经济价值的地质异常(赵鹏大等,2003)。

鉴于预测对象是工业矿床,因此矿床的共生组合及其形成机制,始终是成矿学研究核心。

1979 年程裕琪院士提出的成矿系列理论,经过近 30 年诸多学者的共同努力,特别是陈毓川院士等老一辈矿床学家做的大量工作(陈毓川,1999;陈毓川等,1999),使成矿系列理论得到了重大发展,同时找矿也取得了重大突破。该理论强调成矿系列是在一定地质环境中形成的,在时间上、空间上和成因上有密切联系的一组共生矿床,包括一种或几种成矿元素组成和 2 个以上的矿床成因类型组成,强调成矿系列本身是四维空间的成矿整体。

以翟裕生院士等为代表提出的成矿系统理论(翟裕生,1998,1999,2003),指出“成矿系统是在一定的时空域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用动力过程,以及所形成的矿床系列、异常系列构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统”。成矿系统的概念中包括了控矿要素、成矿作用过程、形成的矿床系列和异常系列,以及成矿后变化保存等 4 个方面基本内容,体现了矿床形成有关的物质、运动、时间、空间、形成、演化的统一性、整体性和历史观,即用系统论的观点研究成矿问题。

综合信息矿产预测理论是由王世称教授等提出,该理论强调应用能够反映矿床形成、分布规律和控矿因素的地质、地球物理、地球化学、遥感地质等一系列方法所获得的有关资料,在成矿系列等理论指导下,通过信息之间的相互检验、关联、转换,总结出能客观反映地质体和矿产资源体特征的有用信息集合(王世称和陈永清,1995;赵震宇等,2002)。

裴荣富和熊群尧(1999)、裴荣富等(2001)提出的“金属成矿省时空演化及等级体制”理论,即“景”、“场”、“相”、“床”4 个不同等级的成矿组成,并随地

质历史演化、按不同层次的耦合规律成矿。此外,他们提出以地质的、技术经济的和合理投资的矿产勘查评价 3 个原则,还建立了满足等级体制成矿研究程度和技术—经济条件研究程度双因素控制的“双控论”,以及相对性和优选性的“合理域”评价模式的设想。

朱裕生等(2003)、朱裕生(2006)等提出的多源信息预测理论,在新一轮固体矿产资源预测评价中得到了较好的应用,取得了很好的成效。其核心是通过建立基础地质、地球物理、地球化学、遥感解译的空间数据库,综合运用多“S”技术(GIS、RS、GPS、ES 等)进行矿产资源预测。

季克俭和王立本(1994)根据热液交代成矿原理提出的“三源”成矿预测方法。他强调矿床的成矿热液既非来自岩浆,又非来自变质作用,而是水与岩石相互作用或交代作用的产物,称为交代热液。交代热液矿床的形成与其附近存在的矿质、水和热 3 种源有密切的关系。其基础是矿质(金属)来自围岩,热液水主要是外生的,热源来自岩浆。

孙启祯(1986,1994)从成矿边缘效应的观点提出了边缘成矿理论。他指出成矿边缘在时间和空间上是相互联系的,早期和晚期与边缘部位是对应的。成矿边缘可以划分为 5 级,控制着全球性成矿带、区域性成矿带、矿田、矿床和矿体。

谢树成和殷鸿福(1997)、殷鸿福等(1999)系统论述了生物成矿系统。指出生物—有机质—有机流体在成岩、成矿的不同阶段,对金属矿床的形成起着十分重要的作用。具体说生物—有机质—有机流体的参与为矿质的活化迁移和预富集创造条件。

朱章森等(1991)、朱章森和朱磊(1998)以求异和亲合度理论为指导提出了无模型成矿预测方法。它是对比研究区域中各单元间的差异与相似而预测矿化有利靶区的方法。无模型预测法不建立统计模型,以寻找差异为主,在区域中寻找异常或相似单元的预测方法。

其他的理论还有:谢学锦(1997)提出的“地球化学块体及地球气深穿透”理论与方法;常印佛、汤中立等院士关于矿区成矿规律及找矿方向研究;戴自希和王家枢(2004)关于找矿思路及应用方面的研究;张均(1997)应用成矿场理论提出的矿化时空结构分析方法;崔彬和李忠(1998)提出的物质场、能量场、空间场“三场”综合成矿预测等。

“就矿找矿”是长期以来行之有效的矿产勘查方

法. 叶天竺和陈永清(2003)<sup>②</sup>做了大量的研究工作, 近年来为解决危机矿山, 找矿问题更加倍受关注, 它包括矿山周边找矿和深部找矿, 并取得了一系列重大进展.

另外, 成矿预测专家系统国内起步较晚, 其中以赵鹏大院士领导建立的矿床统计预测专家系统(MILASP); 王世称教授领导完成的综合信息成矿系列预测专家系统; 胡光道等结合 GIS 等信息技术研制的矿产资源评价分析系统(MORPAS); 肖克炎等(1999)结合 GIS 等信息技术研制的矿产资源评价系统(MRAS)等.

## 2 关于成矿预测理论及找矿战略的思考

### 2.1 关于成矿预测理论的思考

矿产预测作为一门专门的学科是 20 世纪 50 年代以来发展起来的, 半个世纪以来, 总的发展趋势是由经验式类比发展到模式类比和多元统计预测, 由定性到定量, 由单一方法到综合技术方法, 以及今天的系统化、动态化和可视化预测. 计算机技术在矿产勘查工作中的应用, 为矿产预测方法的发展提供了条件, 矿产预测方法也发生了巨大的变化. 我国自 20 世纪 80 年代以来, 由赵鹏大院士、陈毓川院士、翟裕生院士、常印佛院士、汤中立院士、朱裕生研究员、王世称教授等为代表的地质矿床学家, 在成矿理论及成矿预测研究方面做出了创新性的工作, 形成了各具特色的学术思想, 在理论研究、方法技术和应用推广等方面取得了显著的成绩, 地质找矿取得了巨大的突破, 开创了我国成矿理论及矿床预测的新时代.

由于不同的研究人员对同一地质现象和地质规律有不同的认识, 这里不考虑成矿理论. 单就各种统计预测理论而言, 主要都是建立在相似类比理论、求异及求同理论之上的矿床预测方法. 然而不管是基于相似类比理论、有序度理论的矿床模型定量类比预测法, 基于求异理论、求同理论的无模型预测法, 还是基于专家集体智慧的主观概率法; 不管是基于 GIS 的空间数据分析预测、统计定量预测、综合信息预测还是通过成矿理论预测等, 到目前为止, 矿产资源评价领域的各种方法尚有待进一步完善. 例如矿

产预测评价时使用较多的证据权法, 其在研究程度极低、各证据层之间相互独立的判断、大矿的作用体现、专家知识的影响等方面就存在明显不足. 因此, 在成矿预测的道路上仍有许多亟需研究、探索和解决的理论、思路和方法问题, 也是广大地质科学工作者值得为之终身奋斗的目标. 如:

(1) 怎样有效地减少找矿风险与不确定性、快速缩小找矿靶区、降低找矿成本?

(2) 怎样理解找矿过程中的“高、大、全”异常与“弱小”异常? 怎样优化各类异常的筛选准则, 特别是从常规“弱小、无”异常中筛选出最可能与矿化有关的异常, 强化与成矿关系密切的微弱信息, 捕捉隐蔽信息, 发现在通常情况下不易发现的矿床或不太注意的远景区带?

(3) 怎样赋予各种信息以客观的地质内涵(这也是矿床预测成功的关键)?

(4) 在西部工作程度极低的地区, 综合信息到底需要综合到什么程度, 信息是越多越好吗? 在很少或没有典型矿床的情况下, 怎样进行成矿预测?

(5) 如何提取最关键找矿信息? 以及他们之间相互作用、相互联系的意义与内涵?

(6) 怎样看待直接找矿信息与间接找矿信息在勘查选区中的作用?

### 2.2 关于找矿战略的思考

当代矿产勘查与成矿理论研究逐渐形成了目标一致, 但研究内容和研究出发点与解决问题的方法途径各异的 2 个方向, 常常称为理论勘查战略与经验勘查战略. 下面综合施俊法(2003)<sup>③</sup>、施俊法等(2005)的观点, 对找矿战略进行初步的思考.

理论勘查主要从控制成矿的各种因素及其最佳组配入手, 注重成矿理论和矿床成因探讨, 以类比法为主要思路, 以成因模型为研究手段, 指导同类型矿床的勘查. 实践表明, 它在找矿中发挥了积极的作用. 其中最典型的实例是斑岩铜矿床模型的研究, 导致了一系列矿床的发现.

经验勘查强调勘查的实用性和有效性, 重视各种成矿标志和特征的观测资料收集, 不拘泥于成因研究, 以普查(标志)模型为研究手段, 以判断矿在何处并取得成功为主要目标. 它避开矿床成因的复杂性、过渡性和关联性等复杂理论问题, 直接地收集和判断成矿标志, 也显示了这种战略的成效.

因理论勘查与经验勘查之间立足点的差异, 两

<sup>②</sup>叶天竺, 陈永清, 2003. 矿产资源评价示范指南. 中国地质调查局.

<sup>③</sup>施俊法, 2003. 经验勘查与理论勘查关系的探讨. 地质调查情报动态.

者的争论是习以为常的,正如张炳熹(1999)指出的那样,“学术研究者责备从事勘查实践者不重视理论研究,后者又指责前者的工作成果不切实际、无助于解决问题。实际上,问题的发生是双方都把问题简单化了,都没有把对方和己方问题的实际性和现阶段的科技实际水平的局限性考虑进去,双方又缺少足够的互相尊重、一步一步地协同前进、探索解决难题途径的精神”。

理论研究者们经常解决的关键问题是“如何”,发现更多的矿床,是为了使他们的假说得到支持,而不是真正有价值的目标本身,这正如前国际矿床成因协会主席里奇(1983)所说的,“我一生花费了大部分时间,力求解释矿床成因,我从中得到了许多学术上的满足,但我不能说通过这种努力究竟找到了什么矿”。Warin(1997)将其称为“科学贵族”(scientific aristocrats)。然而,人们在某一阶段的认识永远不可能是最完善的模式,它是一把双刃剑,已建立的模型势必会制约找矿思路,漏掉或延迟客观存在的矿床的发现。一些很重要的大型、特大型矿床,不是完全遵循着人们预定的矿床类型的思路找到的。对于著名的奥林匹克坝铜—金—铀矿床来说,在发现之前也曾作过精细的成因模型研究,但所发现的巨大成矿客体不属于原先认为的任何一种成因概念。在找矿实践中,类似的例子还有很多。

而经验勘查战略继承了“传统”找矿时代直接、简便的优点。正如 Legge(1995)指出的:“经验是基于在已知指示元素物化响应及其他关系的观测结果,从而确定勘查准则,而与矿床成因解释无关”。经验研究者经常思考的问题是矿“在哪里?”。他们深信,只要能够充分描述矿床是在哪里形成的,就能够发现重要地质信息,那么就肯定会发现矿床。他们追求的是成功,而不是思想的光辉。Warin(1997)将其称为“中产阶级自由民”(yeomen middle class)。其缺点是太依附熟悉的东西,其优点也就是其最大的敌人。实践告诉我们:看到一个事实并不见得就理解了这个事实。在某些情况下,找到了重大的成矿线索,由于没能深入综合分析所获得的信息,反倒让第二个公司“拣漏”。

时至今日,矿产勘查战略向全局性、综合性方向发展的趋势越来越明显,人们都开始摆脱一开始便将目标放在具体矿床上的做法,而是从区域着眼,通过研究区域控矿地质因素及其地球物理和地球化学标志。建模是勘查工作中深化资料收集和认识的运行过程,而不是终结。从历史发展看,一种战略思想

的形成,总是带有战略制定者对科学和技术发展成果的理解和应用能力、对已有勘查经验的理解程度、以及主要战略目标取向意图等不同的色彩。但无论如何,经验勘查与理论勘查战略的兼容并蓄是找矿的成功之路(施俊法,2003)。我们赞成 Woodall(1994)辩证地提出“当理论和经验证据相印证、理论与实际观察有力地证实是可信时,就可能发现新矿床”的观点。我们认为,应以“科学找矿战略”作为这种新的矿产勘查战略的名称,实质上是原有经验勘查和理论勘查战略的继承和发展,有其相应的内涵。

### 3 “协优”成矿预测法的理论依据

成矿预测是进行科学找矿决策的基础和前提,也是矿产勘查工作正确部署的依据。任何找矿人员在刚开始工作时头脑中都有一定的“经验”、“模式”或“概念”在起作用。著名的矿床学家 Lowell 通过对美国圣马纽尔斑岩铜矿蚀变分带的详细研究,建立了蚀变分带模式,导致了卡拉马祖斑岩铜矿的成功发现。正是由于他对于斑岩铜矿成矿作用的理性认识,使他能够接二连三地发现许多斑岩铜矿,包括1978年由他制定计划在智利北部实施铜矿勘查项目而发现的埃斯康迪达等世界级斑岩铜矿(芮宗瑶等,2002)<sup>①</sup>。

笔者在认真学习、研究当前国内外成矿预测领域内不同学派学术思想的基础上,特别是吸收了赵鹏大院士、陈毓川院士、翟裕生院士、王世称教授、朱裕生研究员等专家的成矿找矿理论精髓,并结合近年来的大量找矿实践和理论思考,提出了西藏特殊景观区快速逼近找矿目标的定位预测新方法——“协优”成矿预测法。这是笔者在成矿预测领域所进行的初步探索,试图从另一个视角、另一个思路来认识、探讨成矿预测问题,本着一切服务于实践与效果的指导思想,力求简洁、方便、实用。其理论依据如下。

#### 3.1 系统性原则

将事物作为一个相互作用和反作用的动态整体来研究,不单是研究事物的本身,而且要将事物本身与周围的环境组成一个系统综合体来研究。也就是说将矿床作为一个相互作用和反作用的动态整体来研究,不单是研究矿床本身,而且要将矿床与周围的环境组成一个系统综合体来研究。例如有一个中等强度的斑岩铜矿致地球化学异常,异常周围的氧化还原环境不同,其代表的地质意义是完全不一样的。

假若异常周围是一个强酸环境,那么这个异常就非常具有找矿意义.因为风化淋滤出来的铜被大量带走的情况下,还能达到中等强度,说明铜的源区有大量充足的物源;相反假如异常周围是一个强碱性环境,特别是还有大量碳酸盐岩分布的情况下,风化淋滤出来的铜几乎全部在原地沉淀,其形成的铜异常才达到中等强度,说明铜的源区物源匮乏,该异常找矿意义不大(不考虑埋深).其他原则就不一一展开.

### 3.2 关联性原则

预测对象与相关因素之间存在某种联系及依存关系,应对其进行全面分析.有时可以对本质上并不重要的因素忽略不计,而突出抓主要矛盾.

### 3.3 目标一致性原则

对于复杂的系统,海量的各种信息之间不一定是相辅相成关系,目标一致的信息必然是部分或少量的.因此我们只有找出那些与工作目标一致的信息,剔除与目标不一致的“干扰”信息,才能达到事半功倍的效果.

### 3.4 不充足判据的充足化原则

对于熟悉的事物,人们只要观察到一部分,即可以推测全貌.所以,人们认识一事物并不需要把它所有的特征都观察准确才能认识,主要是找出那些最关键的信息.例如沙堆里埋了一部自行车,实际上不需要全部露出来人们也能知道埋的是一辆自行车,只要露出一个把手和半只轮子就可以了(杜乐天,2003).

### 3.5 复杂与精确的反比性原则

这是控制论中的一个原理.当一个系统复杂性增大时,要使它精确化的能力将减小.也就是说人们只有不断地努力减少系统的复杂性(消除那些不重要的变量),预测时才能达到更精确地把握系统规律的目的.否则顾此失彼,可能导致预测失败(吴清烈和蒋尚华,2004).

## 4 “协优”成矿预测法

### 4.1 “协优”成矿预测法的定义

“协优”成矿预测法:是指在复杂的成矿系统中,以异常或地质体为研究对象,在赋予各种信息以客观的地质内涵的前提下,建立特定的异常筛选准则,强调从直接找矿信息着手,以少数相互联系、目标一致的关键信息为核心,捕捉及强化与成矿关系密切的弱信息,达到快速缩小找矿靶区、发现矿床之

目的.

具体来说:“协优”有两层意思:“协”是指相互作用和内在联系;“优”是指最优(关键)和优化(选优),而且最优的信息必然是少量的.因此,“协优”成矿预测的核心思想:就是通过优选少数相互作用、相互依存的、揭示成矿本质特征的找矿信息组合,而导致矿床最后被发现的一种成矿预测方法.它强调的信息应具有少量、联系、目标一致和揭示成矿本质4大特点.它的提取及应用可能导致地质人员将目光投向矿床产出的位置而发现矿床.其基本思想是:只要优选出少量相互关联、目标一致、最能揭示成矿特征的关键信息,就可能导致矿床被发现,而不用去提取大量相互联系并不紧密、目标并不一致、成矿意义不明确的信息.其要点是强调直接信息的先导作用及少数相互关联信息的明确指示意义,突出信息与预测目标的一致性.这样可有效减少间接信息的不确定性和多解性,从而降低找矿风险.而对一个地区地质特征、成矿背景和成矿环境的熟悉程度成为该方法预测成败的关键所在.

### 4.2 “协优”成矿预测法的基本内涵(解读“协优”成矿预测法)

4.2.1 以异常或地质体(自然单元)为研究对象单元的划分必须以保证信息的完整性为原则,因此,以地质体、地质异常、构造界面以及汇水流域等作为圈定单元的边界,力避网格法划分单元所造成的信息分割及损失(不同规模和等级的地质体划分以相应比例尺地质图为准).

4.2.2 特定的异常筛选准则 这里有两层意思:其一,任何信息或异常的有利度是相对的,有无异常受所选取的异常筛选准则控制,不同准则下的异常评序是完全不一样的.换句话说就是强信息不一定与矿床有关,弱信息不一定与矿床无关.有些弱的信息常常是潜在矿床的反映,采用特殊的思路和方法强化与成矿关系密切的微弱信息,捕捉隐蔽信息,压低或剔除强的干扰信息,有可能发现在通常情况下不易发现的矿床或不太注意的远景区带.就象“隐形”飞机一样,并不是飞机(异常或矿床)不存在,庞大的飞机仍然飞在天空,只是雷达(原有准则)发现不了而已.换一种能够消除屏蔽的雷达(新的准则),庞大的飞机(异常或矿床)就会展现在你的面前;现实工作中少数人抱怨一些近地表矿床甚至大矿在做化探扫面工作时并没有发现异常,这正说明除了采样因素外,一定是选区时圈定与筛选异常的准则有问题,矿床周围的异常一定是客观存在的.其二,具有不同

知识基础的人对信息或异常的评价是不同的;就是同一个信息或异常,不同知识基础的人也会得出不同的结论.即预测人员对预测区地质情况的熟悉程度及认识程度都会影响对信息或异常的评序.一方面表现在“眼见不为实”,特别是在自己不熟悉、不了解的事件上,观察的失误和错觉是相当严重的(如魔术表演).另一方面表现在我们看到一个事实并不见得就理解了这个事实.我们不知道的恐怕也看不见,或者视而不见,或者熟视无睹,或者忽略放过.就像歌德所说:“我们见到的只是我们知道的.”若我们对某类型矿床不熟悉时,即使见到了非常重要的找矿标志也会视而不见或忽略放过.甚至在某些情况下,找到了重大的成矿线索,也打了钻,由于没能掌握所获信息的重大意义,反倒弃之而去,让另一个单位“拣漏”,而导致矿床的发现.这种现象时有发生,一些矿床甚至出现了几上几下的情况就说明了这一点.西藏驱龙斑岩铜矿的几上几下,现已探明铜 $333+334_1$ 资源量700万吨以上就是一个很好的例证(具体见本章第四节);正如爱因斯坦所说:“你不能观察眼前的现象决定于运用什么样的理论.理论决定着你到底能观察到什么.”这方面的例子不胜枚举.

**4.2.3 以直接找矿信息为先导** 成矿预测工作中,成矿直接信息的收集和运用最为重要.整个矿产勘查过程,实际上是直接信息由少到多,由分散到集中,最后见到矿化和矿体的过程(陈永清和刘红光,2001).因此在成矿预测过程中,最直接的找矿信息应当属于地球化学信息(因为成矿元素地球化学信息对任何矿种都是一种直接找矿信息,其异常本身的特征在一定程度上直接反映了矿产资源体的特征)和蚀变或矿化露头了,他们是获得找矿信息的关键一步.如何以直接信息为先导开展找矿评价是隐伏区、新矿种、新类型找矿的关键问题.但这一点既容易被人们忽视,又是难以解决、亟待探索的问题.随着分析技术水平的提高,化探信息使人们肉眼观察成矿元素的能力提高了数千万倍,这样人们在较大范围内容易追溯到异常源.事实上,很多巨型矿床的发现均与化探异常及地表的蚀变或矿化显示有关.另一方面,强调直接信息的先导作用,可有效减少间接信息的不确定性和多解性,从而降低矿产勘查的风险,而且能够迅速掌握全局,局部缩小靶区.

**4.2.4 以少数相互联系、目标一致的关键信息为核心** 在进行成矿预测时,人们通常从地、物、化、遥等方面入手,选取了数十甚至近百个信息(变量)进

行研究、计算、分析,力求不漏掉任何信息.就像综合信息成矿预测法的定义“广泛利用现代地质勘查手段所获得的地质、地球物理和地球化学等全部信息……发现有经济价值的矿床为目的”(王世称等,2000).地质异常理论在论述变量选择的必要性和充分性时也强调“……在变量选择正确的前提下,信息与变量数目成正比,因而应选择尽可能多的变量,提高成矿预测的精度”(赵鹏大等,1999).而成矿预测时,特别是我国西部工作程度极低地区、获取信息极其困难情况下的成矿预测时,是否一定需要如此多的信息或变量呢?结论是不一定.原因有4点:

(1)不充足判据的充足化原则.仔细研究人们会发现,认识一事物绝不会是把它所有的特征都观察准确才能认识.主要是找出那些最关键、最重要的信息,舍弃其他方面的信息.也就是窥一斑可知全貌.例如美国人普赖斯运用小波变换处理一张人头像,当仅取原来照片信息的23%所得照片与原照片相比并没有什么两样.这就证明原照片中77%的信息是可以舍弃的.

(2)复杂与精确的反比性原则.成矿系统应是一个复杂的系统,实践表明当一个系统复杂性增大时,要使它精确化的能力减小.也就是说,我们开展成矿预测工作,当选择的变量(信息)越来越多时,那么我们精确地把握矿床产出规律的能力越来越弱,预测的结果反而具有更大的不确定性.因此,我们只有不断地努力减少系统的复杂性,忽略那些本质上并不重要(不关联)的变量(信息),突出抓少数相互作用、相互依存的最能揭示成矿特征的找矿信息组合,才能达到事半功倍的找矿效果.

(3)信息与目标的一致性原则.在复杂的成矿系统中,成矿信息是海量的.但我们所需要的并不是所有的这些信息,而是需要为达到找矿目的的少量关键信息.因为成矿信息之间不一定是相辅相成或累加累乘关系,有些成矿信息与预测目标不一致,包含有不一致成分的成矿信息,笔者称为“干扰”.因此要将这些与预测目标不一致的信息剔除掉,只需优选出少量相互关联、目标一致、最能揭示成矿特征的关键找矿信息(组合),导致最后发现矿床.

(4)这里特别强调提取找矿信息之间的相互作用、相互依存关系,因为只有相互关联的找矿信息之间才可能目标一致;只有相互关联的找矿信息之间的相互作用才会衍生出新的信息( $1+1>2$ ),才最能揭示成矿的内在本质特征,才有可能用最少的找矿信息达到最佳的找矿效果.比如在一个地区我们发

现有多期次侵入的复式斑岩体或大片火山岩存在,又发现了以 Cu、Mo 为主、伴有 Au、Ag、Pb、Zn 等元素组合的化探异常(本身有多解性)与之套合,那么从这 2 个信息的关联,我们会想到这个地区可能有斑岩铜矿化存在。所以这 2 条信息就足以让我们派人去野外查证。

**4.2.5 赋予各种信息以客观的地质内涵** 这是“协优”成矿预测理论的精髓,而对一个地区地质情况及规律的熟悉程度就成为矿床预测成败的关键。因为相同找矿信息,特别是定量信息在不同的成矿背景、成矿环境及成矿条件下,具有不同的成矿意义,即各种信息是受地质客体控制的。所以对不同的成矿背景、成矿环境、成矿规律、控矿因素、矿化标志的客观认识,对“成矿系列”理论、“区域成矿学”、“地质异常”理论、“含矿建造分析”等的掌握程度,并将各种信息分析与地质成矿时空分析、矿床成因演化系统分析有机结合起来,赋予各种信息以客观的地质内涵,是勘查选区成功的关键。就化探而言,同一类重砂矿物组合异常可能是不同地质体的产物,同一类水系沉积物中元素组合异常也可能属于不同源区原岩中的物质。例如在福建西北部的铌钽矿化带,同一类锡石—铌钽铁矿组合异常就存在于前震旦系变质岩、中生代岩体以及伟晶岩脉 3 种不同的地质体发育区,而只有锡石型为短双锥八面体的锡石—铌钽矿物组合异常才是矿致异常,即来自成矿的伟晶岩脉(王世称等,2002)。因此,熟悉预测区的地质特征、成矿背景和成矿环境就显得异常重要。

**4.2.6 强化与成矿关系密切的微弱信息** 成矿是地质过程中的小概率事件,也是地质异常事件(赵鹏大等,2003)。而与这种地质异常事件相关的信息与整个地质过程中所产生的信息相比,应属相对弱信息。另一方面,物、化探标志和遥感影像信息强者不一定与矿床有关,弱者与矿床不一定无关。有些弱的信息常常是潜在矿床的反映。在预测靶区优选过程中,有必要对一些成矿信息较为隐蔽、显示性不强的信息,采用特殊的方法进行“强化”处理,压低或剔除强的干扰信息,强化与成矿关系密切的微弱信息、捕捉隐蔽信息,突出这类成矿信息与预测目标的一致性。有可能在地质找矿中发现在通常情况下不易发现的隐伏矿床,或平时不太注意的远景区带。例如,化探数据处理过程中,常出现低背景区弱异常被削弱或掩盖的问题。通过对反映不同矿化类型的元素衬值进行累加处理,使那些与某一矿化类型有关的低缓异常凸现出来。

**4.2.7 快速缩小靶区** 矿床赋存于多种控矿地质因素综合作用形成的地质环境变异地区。对地质异常的优选与评价,是成矿预测的重要内容,它是对成矿信息的再浓缩和再综合的过程。优选就是把与成矿关系最密切的信息保留下来,不密切或不明确的部分压制下去,干扰的信息再一次剔除掉,进一步突出找矿标志,达到快速缩小靶区的目的。

**4.3 “协优”成矿预测的方法途径**

“协优”成矿预测方法要求预测者对与预测目标相关的成矿理论,预测区的成矿背景、成矿环境、成矿特征比较熟悉的情况下,以异常或地质体为研究对象,赋予各类信息以客观的地质内涵,也就是说要搞清楚各类信息在特定的背景、环境下所代表的地质意义,在此基础上建立起针对特定找矿目标(特定矿床类型)的异常筛选准则。这里特别强调从直接找矿信息着手,对各类数据、图像资料等进行综合处理、分析,从中提取具有少量、相互联系、目标一致、揭示成矿本质特征这 4 大特点的关键信息组合,来强化与特定找矿目标关系密切的微弱信息、凸现矿致异常。因此根据特定找矿目标选择最佳勘查手段组合,就能达到快速缩小找矿靶区、迅速逼近找矿目标、迅速发现矿床之目的。其方法途径:从成矿理论和认识→关键找矿信息的提取与优选→最佳勘查手段组合→发现矿床。具体定位预测方法流程如图 1。

这里要说明的是:预测者所具备的成矿找矿理论基础,对预测地区野外地质特征、成矿背景、成矿环境的熟悉程度,能否融汇贯通及开展创新思维就

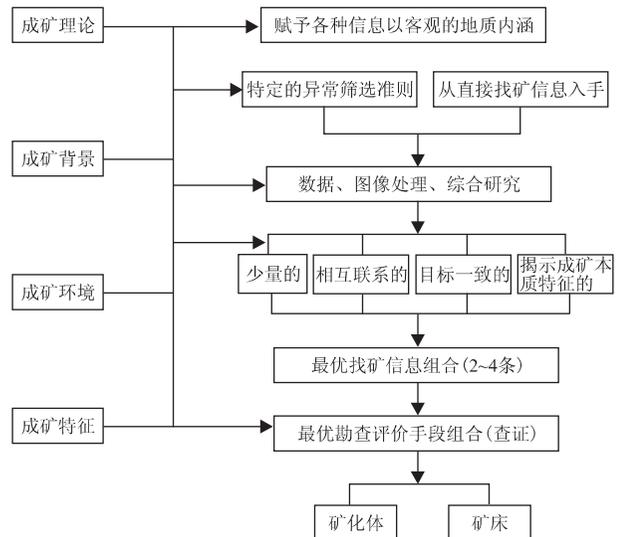


图 1 “协优”成矿预测方法流程

Fig. 1 Flow chart of “Xieyou” metallogenic prediction method

成为该方法预测成果优劣的关键所在。

但无论如何,该方法在野外一线、特别在西部工作程度极低的地区推广应用,对加速找矿进程、降低勘查风险和<sub>提高找矿效率大有裨益。</sub>

## 5 “协优”成矿预测法的实践效果

西藏地域面积大,交通不便,高寒缺氧,气候恶劣,野外地质工作难度大、效益低。以雅江流域为例,该区自 2000 年以前找矿效果一直不太理想。笔者在西藏多年的找矿勘查实践中,不断探索快速逼近找矿目标的“协优”成矿预测法,通过运用非线性信息提取技术以及化探信息的衬值累加、分背景处理技术等,将雅江流域的地质、地球化学、遥感等异常从背景中分离出来,特别是通过赋予不同信息以客观的地质内涵,来识别和提取低缓、微弱及隐蔽信息,强化矿致异常,进行勘查选区研究,快速缩小找矿靶区,在冈底斯、北喜马拉雅、念青唐古拉等地先后发现或评价了驱龙超大型斑岩铜矿床(我国第一),冲江、朱诺大型斑岩铜矿床,蒙亚啊、洞中松多、洞中拉大型铅锌矿床,查拉普大型金矿、车穷卓布大型锑矿床等一系列矿床,累计已提交新增  $333+334_1$  资源量:铜 983.42 万吨,伴生钼 50.54 万吨,伴生银 6 846.93 吨,金 13.25 吨,铅锌 78.82 万吨,锑 33.45 万吨,其潜在经济价值达万亿元,大大加速了斑岩铜矿及金锑多金属矿的勘查进程,取得我国铜矿评价的重大突破,也是世界三大斑岩成矿带之一的特提斯—喜马拉雅构造域近年来找矿的重大突破,我国最大的铜矿资源战略接续基地初步形成。

限于篇幅,下面以朱诺、吉如、驱龙斑岩铜矿床为例,来简述在前人区域化探图上“无”铜异常无编号、有“弱小”铜异常但无编号、存在“高、大、全”铜矿致异常且先后做过三检、二检及矿点检查的基础上,笔者运用“协优”成矿预测法及地球化学“弱”信息提取技术怎样发现大一超大型矿床的。在化探数据处理过程中,人们筛选与评价异常的主要依据是异常本身,即选择成矿元素含量高、异常规模大、元素组合比较齐全,也就是对“高、大、全”异常进行查证,这在找矿实践中取得了非常明显的效果,而且全国大多数“高、大、全”异常几乎都进行过查证。但是否只有查证“高、大、全”异常才能找大矿呢?全国有数万个“弱小”异常仍未查证,怎样看待“弱小”异常的找矿意义呢?

### 5.1 朱诺斑岩铜矿床的找矿突破——“无”铜异常找大铜矿的范例

**5.1.1 发现过程** 1989—1991 年,江西地矿局物化探队开展了日喀则幅(8-45-丁)1:50 万水系沉积物测量工作,在其提交的地球化学图上,昂仁县朱诺附近没有圈定任何异常;2003 年 6 月笔者在对冈底斯带的化探数据进行重新处理时,在朱诺地区出现明显的 Au 元素地球化学异常(郑有业等,2006),异常面积约  $60 \text{ km}^2$ ,浓集中心明显,为日喀则幅区域化探图中最强的 Au 元素异常。根据雅江北岸发育东西向明显带状分布的 Au、As、Sb 浅成热液矿床组合异常这一事实,笔者对该区 Au、As、Sb 异常衬值进行累加处理,结果原本最强的 Au 元素异常反而变成了弱小异常,说明不是该类型金矿床引起。随后对该幅地球化学图进行仔细检查,结果在朱诺地区未发现任何有编号的异常,综合异常图也无反映;但在检查原始数据时发现朱诺地区存在一个高值的单金点(Au 达  $160 \times 10^{-9}$ ,估计作为特高值进行了),并伴有微弱的 Cu、Mo、W、Ag、Pb、Bi 异常或高背景;随后对该区斑岩铜矿相关元素 Cu、Mo、Au、Ag 异常衬值进行累加处理,结果出现了较强的斑岩铜矿组合异常;进一步对朱诺地区所处的构造背景及成矿环境进行了系统的分析研究,发现该异常位于雅江缝合带的北侧,距缝合带约 40 km,正是斑岩铜矿极易产出的空间部位,且大片出露第三系英安质火山熔岩、凝灰岩及花岗斑岩,南部大面积分布花岗闪长岩,地质条件有利;同时符合空间等距性规律及伴有微弱斑岩铜矿异常组合,说明在排除人为因素外,化探数据处理时出现的金异常不一定是假异常,也许是斑岩铜矿化伴生金矿化引起,很有必要进行野外查证。

2003 年 8 月开始野外加密采样工作,同年 10 月 1:5 万水系沉积物测量结果出来:异常元素组合为 Cu、Mo、W、Au、Pb、Zn、Ag,异常面积约  $80 \text{ km}^2$ ,形态呈椭圆形,浓集中心明显,具三级浓度分带,其中 Cu、Mo、W 异常规模最大,强度最高,异常浓集中心最明显。异常峰值为:Cu:  $114\ 500 \times 10^{-6}$ ; Mo:  $101 \times 10^{-6}$ ; W:  $29.6 \times 10^{-6}$ ; Pb:  $467 \times 10^{-6}$ ; Zn:  $258 \times 10^{-6}$ ; Ag:  $7.63 \times 10^{-6}$ ; Au:  $23 \times 10^{-9}$ 。

经野外勘查,证实为典型的斑岩型铜矿致异常。随后进行查证,发现 3 个含矿斑岩体。2004—2005 年主要对 Cu I 矿体进行初步工程控制,平均品位铜 0.83%;银 2.65 g/t。已控制  $333+334_1$  铜资源量 107 万吨,伴生银 340 吨,预测总资源量 200 万吨以

上,至此一个新的大型—特大型斑岩铜矿诞生了.该铜矿以其高品位及特殊意义被中国地质调查局发布为 2004 年中国地质调查工作重大新闻第二名(地质成果第一名):“通过加强区域化探资料分析处理和成矿预测,新发现朱诺斑岩铜矿床,经初步工程验证表明其矿石质量好、找矿前景大,使冈底斯成矿带铜矿勘查区域向西扩大了数百千米,有望发展成为巨型斑岩铜矿带”。

**5.1.2 小结** 朱诺斑岩铜矿床是笔者运用“协优”成矿预测思路,在对前人 1:50 万日喀则幅区域化探图上“无”铜异常、更无编号的情况下,对原始化探数据进行二次开发时,通过(1)单 Au 异常(同时伴有微弱斑岩铜矿异常组合);(2)可能的成矿类型(以金找铜),并结合;(3)成矿环境;(4)矿床等距性规律,这 4 条相互联系、目标一致、揭示成矿本质的信息发现的,这正是“协优”成矿预测思路的具体体现。

## 5.2 驱龙超大型斑岩铜矿床的找矿突破——“高、大、全”铜异常找大铜矿的范例

**5.2.1 发现过程** 1986—1988 年西藏区调队在进行 1:20 万拉萨幅区域化探扫面时在驱龙发现了拉 27 号“高、大、全”异常,随后安排了 3 级异常查证,证实为矿致异常;1993—1994 年西藏区调队在该区进一步开展了二级异常查证,发现了 4 个铜(钼)矿化体.但由于地表铜最高品位只有 0.16%,加之部分学者据该异常的 W、Mo 含量非常高且面积大、地表铜品位低的事实,推断该矿“可能剥蚀到了尾部”等认识,影响了该矿床的继续勘查;1999—2000 年西藏桑海矿业公司在矿区开展了 2 年评价工作后放弃。

2000 年 6 月受东天山斑岩铜矿找矿取得重大进展的鼓舞,开始大量查阅、研究冈底斯矿带的地、物、化、遥及矿产资料,并进行资料二次开发,发现了一些非常有价值的信息:

(1)在拉萨河的南东岸出现了一条走向 NE,由 SW 向 NE;从普下到日乌多 Cu 异常在空间上有序排列,延伸 180 km 以上,伴有 Mo、W、Ag、Au、Pb、Cd 等元素组合,而且两侧出现了明显的负铜异常带,属构造隐(显)性地球化学边界,是深部构造等在化探异常上的反映;(2)理论上讲矿集区也是成矿物质交换作用最强烈的地区,而多种地质作用的叠加改造必然造成各种复杂的元素在空间上的聚集,致使元素分带性较差.驱龙异常从 W、Mo、Bi 到 Cu、Pb、Zn、Cd 再到 Au、Ag、As、Sb、B 等元素异常,不管是高中低温、还是前中尾晕元素在此叠加,分带性不明显,反映该地区

多期次成矿地质作用叠加,造成大量成矿物质在此聚集,并在 NE 向分布的众多异常中呈“鹤立鸡群”,这与驱龙含矿斑岩体为多期次侵入的复式杂岩体的事实是一致的;(3)就成矿环境而言,控制驱龙等 NE 向铜异常带的构造与著名的左旋张扭性羊八井—乌郁大断裂近于平行,分布在拉萨—日多弧间盆地的南东边缘,属火山—岩浆弧与拉萨—日多弧间盆地的盆—弧转换部位,早期主要表现为盆缘同生断裂,控制了以叶巴组为主的火山弧的形成;晚期主要表现为控岩和控矿断裂,控制了普下、拉抗俄、驱龙、象背山、塔龙尾等含矿斑岩体的空间线状展布,具有多期性和继承性大型构造特点。

根据上述特点,经实地考查发现驱龙异常高 Mo 是由晚期的辉钼矿石英脉风化污染所致,并非“剥蚀到了尾部”。结合驱龙异常下游两侧分别产出长 6 km 与 3 km 的“孔雀河”这一重要找矿标志,确认驱龙铜矿具备形成超大型矿床的必要条件.遂于 2001 年 5 月由西藏地调院完成的“西藏冈底斯东段铜金多金属成矿带矿产资源评价及找矿突破”立项论证报告中将其列为首选勘查靶区.而且该带的推出被评为 2001 年全国地调工作十大进展的第五名.自此掀开了冈底斯斑岩铜矿勘查工作的新篇章。

2002 年,地调局重大项目《西藏雅鲁藏布江成矿区东段铜多金属矿勘查》正式实施,普查圈定 4 个含矿斑岩体,矿体平均厚度 474 m,最大厚度 572 m,平均品位铜 0.502%;钼 0.032%;银 3.805 g/t.经核实,到 2006 年底控制 333+334<sub>1</sub> 资源量:铜 789.65 万吨;伴生钼 50.54 万吨;伴生银 5 931.8 吨;同时提交新增低品位资源量:铜 156.86 万吨;伴生钼 15.57 万吨;伴生银 1 463.82 吨.考虑到该矿床深部及边界仍未得到有效控制,预测铜总资源量 1 000 万吨以上。

**5.2.2 小结** 驱龙超大型斑岩铜矿床是在前人 1986 年已发现“高、大、全”斑岩铜矿致异常、1987—1994 年又先后做过三级异常查证、二级异常查证以及普查的基础上,通过:(1)“高、大、全”异常位于盆—弧转换部位,受早期控盆、晚期控岩控矿的多期性、继承性大型走滑构造控制;(2)180 km 长的北东向线性异常带,属构造隐(显)性地球化学边界,与深部大型构造密切相关,且在北东向异常带中属“鹤立鸡群”;(3)多期次侵入的复式含矿杂岩体、复杂的元素套合,反映多期次成矿作用叠加;(4)驱龙矿区下游长达 6 km 的“孔雀河”,其规模之大为斑岩铜矿中罕见,这 4 条相互联系、目标一致、揭示成矿本质的

关键信息均与大—超大型矿床形成的条件有着密切的关系,这正是“协优”成矿预测思路的具体体现。

### 5.3 吉如斑岩铜矿床的找矿进展——“弱”铜异常找大铜矿的范例

**5.3.1 发现过程** 1989—1991年完成的西藏日喀则幅1:50万地球化学图上,吉如地区未获得有编号的异常。2001年,笔者在对冈底斯东段地球化学数据进行统一背景处理时,发现在谢通门—吉如一带存在多元素大面积的高背景场和面积的低缓异常(郑有业等,2007)。随后对该区地球化学数据进行分析,发现该区的东部为中等地质背景中的高强度异常区;西北部为低背景中的极低缓异常区;而吉如地区所在的西南部为高背景中的“弱”异常区,且尤以Cu、Mo、W、Pb、Zn等高值场强度较高,重合性好,出现近7000 km<sup>2</sup>的范围。随后对该幅地球化学图进行检查,结果在吉如地区未发现任何有编号的异常。那么这些大面积“弱”异常对找矿有何指示意义?怎样使这近7000 km<sup>2</sup>的低缓异常找矿目标更加明确,提高野外找矿效率呢?

笔者针对谢通门—吉如一带地球化学背景很高而异常很低这一实际,决定对原始数据进行分背景处理,结果在吉如、熊村、勒宗等地出现了明显的铜异常(熊村、勒宗也先后发现铜矿)。随后对吉如地区所处的构造背景及成矿环境进行了研究,发现该区大片出露火山岩及黑云二长花岗岩、花岗斑岩等,地质条件有利;且该异常位于雅江缝合带的北侧,距缝合带约40 km,与东部已知的斑岩铜矿处于同一个异常带上,成矿背景有相似性,东西具等距性,故推测该区有存在斑岩铜矿的可能;接着对Cu、Mo、Au、Ag元素的衬值进行累加处理,结果异常明显增强、更显示斑岩铜矿致异常特征,说明很可能是斑岩铜矿化引起,很有必要进行野外查证。

同年9月派出项目组对圈出的吉如铜异常进行三级异常查证,1:5万水系沉积物查证结果获得了一个以Cu、Mo、W为主,伴有Bi、Ag、Pb、Zn的组合异常。异常面积大于12.5 km<sup>2</sup>,具有三级浓度分带,异常梯度大,峰值Cu:  $2.699 \times 10^{-6}$ 、Mo:  $36.4 \times 10^{-6}$ ,具典型的斑岩铜矿异常组合特征。后经预查证明为典型的斑岩铜矿致异常,至此一个新的斑岩铜矿诞生了。

**5.3.2 小结** 吉如斑岩铜矿床是在前人1989—1991年开展的1:50万日喀则幅区域化探图上存在“弱小”铜异常、但并无编号的情况下,利用(1)“弱小”异常、(2)空间位置、(3)成矿环境这3条信息发

现线索而找矿取得重大发现的,这正是“协优”成矿预测思路的具体体现。

## 6 结论

(1)针对性明显。该方法是在充分了解一个地区的地质特征、成矿背景、成矿环境的前提下,明确找矿目标,以提取少数相互联系、目标一致、最能揭示某种类型成矿本质特征的关键信息为核心,而优选勘查靶区的科学找矿方法。它特别适用于我国西部工作程度极低、获取信息困难的地区或尚未发现矿床的新区以及新矿种、新类型矿床的预测。

(2)可操作性强。该方法本着服务于实践与效果的指导思想,因而具有很强的目的性、实用性。常用的工具软件就能解决问题;它强调的是成矿信息筛选的理念与原则,简单易懂,特别适用于广大野外一线地质工作者随时随地的应用与探索,同时对促进西部地区的找矿评价、技术方法进步等具有重要的参考价值与借鉴意义。

(3)可快速逼近找矿目标。在进行成矿预测,特别是我国西部工作程度极低地区的成矿预测时,选取的变量或找矿信息不一定“越多越好”。它强调直接信息的先导作用及少数相互关联信息的明确指示意义,突出信息与预测目标的一致性,可有效减少找矿风险与不确定性、快速缩小找矿靶区、降低找矿成本。这一点在西藏工作程度极低地区显得尤为重要,只有这样才能取得最佳的找矿效果。

(4)赋予各种信息以客观的地质内涵是勘查成功的关键。找矿过程中优选异常时不单是要研究异常本身,而且要将异常与周围的成矿环境组成一个系统整体来研究,才能得出正确的结论。异常“高低、有无”受所选取的异常筛选准则控制,“弱小”异常不一定就成小矿,“无”异常也不一定就不成矿,这一点应引起足够的重视。

(5)该方法是在找矿实践中不断探索和总结出来的,是在成矿预测过程中的一种理论思索,还不系统、完善,需要在今后的工作过程中不断修正与提高。

致谢:成文过程中得到姚书振教授、翟裕生院士的悉心指导及学术思想的启迪,成文后赵鹏大院士对初稿进行了详细的审阅并提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

## References

- Adams, S. S., Putnam, B. R. III., 1992. In: Annel, A. E., ed., Case histories and methods in mineral resource evaluation, *Geological Society Special Publication*, (63): 1—23.
- Agterberg, F. P., 1974. Geomathematics—Mathematical background and geo-science applications. Elsevier, Amsterdam, 596.
- Agterberg, F. P., Chung, C. F., Fabbri, G. A., et al., 1972. Geomathematical evaluation of copper and zinc potential of the Abitibi area, Ontario and Quebec. Paper-Geological Survey of Canada, 71—41, 43.
- Agterberg, F. P., Kelly, A. M., 1971. Geomathematical methods for use in prospecting. *Canadian Mining Journal*, 92(5): 61—72.
- Allais, M., 1957. Method of appraising economic prospects of mining exploration over large territories—Algerian Sahara case study. *Management Science*, 3(4): 285—347.
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., Wright, D. F., 1988. GIS for mineral exploration: Gold exploration in Nova Scotia (in GIS; integrating technology and geoscience applications, Thomas). Natl. Acad. Sci., Washington, DC, United States, 22—23.
- Chen, Y. C., 1999. Modern theories and methods on exploration and assessment of mineral resources. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Chen, Y. C., Ye, T. Z., Zhang, H. T., 1999. Mineral resources assessment of major metallogenic provinces in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, Y. Q., Liu, H. G., 2001. A preliminary view on digital pattern for mineral exploration based on geoanomaly. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 129—134 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y. Q., Chen, Y. C., Zhao, Y. M., 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits. *Acta Geoscientia Sinica*, 1(1): 32—58 (in Chinese with English abstract).
- Cui, B., Li, Z., 1998. Synthetic metallogenic prediction in the material field-energy field-spatial field. *Geoscience—Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 12(4): 501—505 (in Chinese with English abstract).
- Dai, Z. X., Wang, J. S., 2004. Hundred years of mineral exploration. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Du, L. T., 2003. Lore of searching: Dialectics of “seeking”. China Land Press, Beijing, 132 (in Chinese).
- Harris, D. P., 1965. An application of multivariate statistical analysis to mineral exploration. Pennsylvania State University at University Park, University Park, PA, United States, Doctoral Thesis, 278.
- Harris, D. P., 1973. A subjective probability appraisal of metal endowment of northern Sonora, Mexico. *Economic Geology*, 68(8): 1345—1346.
- Ji, K. J., Wang, L. B., 1994. The significant research progress of the source of hydrothermal solution and “triple-source” metasomatic hydrothermal metallogeny. *Earth Science Frontiers*, 1(3—4): 126—132 (in Chinese with English abstract).
- Legge, P. J., 1995. Geoscience 1994 and beyond: Thoughts on geology and exploration for world-class ore deposits. *Australian Journal of Earth Sciences*, 42(1): 1—10.
- Pei, R. F., Xiong, Q. Y., 1999. Hierarchy systematic metallogeny of a metallogenic province and assessment of mineral exploration. In: Chen, Y. C., ed., Modern theories and methods on exploration and assessment of mineral resources. Seismological Press, Beijing, 134—142 (in Chinese).
- Pei, R. F., Xiong, Q. Y., Shen, B. F., et al., 2001. Geological assessment of mineral resources potential for hard-identified concealed large and rich ore deposits. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Shi, J. F., Yao, H. J., Li, Y. Z., et al., 2005. 100 examples for strategy of informational exploration and exploitation. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Singer, D. A., 1993. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources. *Nonrenewable Resources*, 2(2): 69—81.
- Sun, Q. Z., 1986. Marginal metallogeny: Interrelationship of spatiotemporal distribution and genesis of mineral deposits. *Geology and Prospecting*, 22(1): 7—14 (in Chinese).
- Sun, Q. Z., 1994. Marginal mineralization and mineralization marginal effects. *Earth Science Frontiers*, 1(4): 176—183 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. C., Chen, Y. L., Xia, L. X., 2002. The theory and method of mineral resources prediction of synthetic information. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, S. C., Chen, Y. Q., 1995. The theoretical system of comprehensive prognosis for gold ore-forming series. *Gold Geology*, 1(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Warin, O. N., 1997. Mineral exploration into the millennium! *Geoscientist*, 7(3): 5—6.

- Woodall, R. , 1994. Empiricism and concept in successful mineral exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 41(1): 1—10.
- Wu, Q. L. , Jiang, S. H. , 2004. The analysis of predicting and decision-making. Southeast University Press, Nanjing (in Chinese).
- Xiao, K. Y. , Zhang, X. H. , Song, G. Y. , et al. , 1999. Development of GIS—Based mineral resources assessment system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(5): 525—528 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C. , Yin, H. F. , 1997. Metallogenic system of organism-organic matter-fluid. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Xie, X. J. , 1997. New strategy for exploration of ore resources. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 21(6): 402—410 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. X. , 2000. Development and current state of metallogenic regularities and predictions in western countries. *Journal of Chengdu University of Technology*, 27(Suppl. ): 259—263 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F. , Zhang, W. H. , Zhang, Z. J. , et al. , 1999. The biometallogenesis system. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, B. X. , 1999. A thinking for the studies of mineral deposits and the practice of exploration. *Earth Science Frontiers*, 6(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. , 1997. Present studying situation and trends of the location prediction of orebody. *Advance in Earth Sciences*, 12(3): 242—246 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S. , 1998. The fabric frame and basic types of metallogenic system. In: Institute of Geochemistry of Chinese Academy of Sciences, ed. , The symposium of seminar on resources and environment science about China sustainable development. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhai, Y. S. , 1999. On the metallogenic system. *Earth Science Frontiers*, 6(1): 13—27 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S. , 2003. Research on metallogenic system. *Geological Survey and Research*, 26(2): 65—71 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D. , Chen, J. P. , Chen, J. G. , 2001. On diversity of mineralization and the spectrum of ore deposits. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 111—117 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D. , Chen, J. P. , Zhang, S. T. , 2003. The new development of “three components” quantitative mineral prediction. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 455—463 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D. , Chen, Y. Q. , Li, J. P. , et al. , 1999. Theory and practice of geoanomaly in mineral exploration. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhao, Z. Y. , Wang, S. C. , Xu, Y. M. , et al. , 2002. Application and research of theory of mineral resources prognosis of synthetic information in the crises mine. *World Geology*, 21(3): 283—286, 299 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y. , Duo, J. , Zhang, G. Y. , et al. , 2007. Discovery of Jiru porphyry copper deposit in Tibet and its significance. *Mineral Deposits*, 26(3): 317—431 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y. , Gao, S. B. , Zhang, D. Q. , et al. , 2006. The discovery of the Zhunuo porphyry copper deposit in Tibet and its significance. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 233—239 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. S. , 2006. Basic theory of mineral resources assessment—Theory system between regional metallogeny to mineral exploration. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1518—1527 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. S. , Wang, F. T. , Long, B. L. , et al. , 2003. Polygenic information prospecting model for Tuwu-Yandong porphyry Cu-Mo deposits. *Mineral Deposits*, 26(3): 287—294 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. S. , Zhang, Q. X. , Yang, L. Q. , et al. , 1991. The seeking anomaly theory and nonmodel prediction. In: The fourth national conference of mathematical geology and the international reference of statistical prediction of ore deposits in Wuhan, China mathematical geology (3). Geological Publishing House, Beijing, 49—55 (in Chinese).
- Zhu, Z. S. , Zhu, L. , 1998. Prediction theory and method system of deposits in China. *Journal of Chengdu University of Technology*, 25(Suppl. ): 1—7 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈毓川, 1999. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法. 北京: 地震出版社.
- 陈毓川, 叶天竺, 张洪涛, 等, 1999. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价. 北京: 地质出版社.
- 陈永清, 刘红光, 2001. 初论地质异常数字找矿模型. 地球科学——中国地质大学学报, 26(2): 129—134.

- 程裕淇,陈毓川,赵一鸣,1979. 初论矿床的成矿系列问题. 地球学报,1(1):32—58.
- 崔彬,李忠,1998. 物质场—能量场—空间场综合成矿预测. 现代地质,12(4):501—505.
- 戴自希,王家枢,2004. 矿产勘查百年. 北京:地震出版社.
- 杜乐天,2003. 搜索学:“找”的辩证法. 北京:中国大地出版社.
- 季克俭,王立本,1994. 热液源研究的重要进展和“三源”交代热液成矿学说. 地学前缘,1(3—4):126—132.
- 裴荣富,熊群尧,1999. 金属成矿省等级体制成矿与矿产勘查评价. 见:陈永清编,当代矿产勘查评价的理论与方法. 北京:地震出版社.
- 裴荣富,熊群尧,沈保丰,等,2001. 难识别及隐伏大矿、富矿资源潜力的地质评价. 北京:地质出版社.
- 施俊法,姚华军,李友枝,等,2005. 信息找矿战略与勘查百例. 北京:地质出版社.
- 孙启祯,1986. 论边缘成矿——关于金属矿床的时空分布及其成因联系. 地质与勘探,22(1):7—14.
- 孙启祯,1994. 边缘成矿与成矿边缘效应. 地学前缘,1(4):176—183.
- 王世称,陈永良,夏立显,2002. 综合信息矿产预测理论与方法. 北京:科学出版社.
- 王世称,陈永清,1995. 金矿综合信息成矿系列预测理论体系. 黄金地质,1(1):1—7.
- 吴清烈,蒋尚华,2004. 预测与决策分析. 南京:东南大学出版社.
- 肖克炎,张晓华,宋国耀,等,1999. 应用 GIS 技术研制矿产资源评价系统. 地球科学——中国地质大学学报,24(5):525—528.
- 谢树成,殷鸿福,1997. 生物—有机质—流体成矿系统——以南京栖霞山铅锌银锰多金属矿床为例. 武汉:中国地质大学出版社.
- 谢学锦,1997. 矿产勘查的新战略. 物探与化探,21(6):402—410.
- 阳正熙,2000. 西方国家的“成矿规律和成矿预测”的发展和现状. 成都理工学院学报,27(增刊):259—263.
- 殷鸿福,张文淮,张志坚,等,1999. 生物成矿系统论. 武汉:中国地质大学出版社.
- 张炳熹,1999. 浅谈矿床研究与勘查实践. 地学前缘,6(1):1—12.
- 张均,1997. 矿体定位预测的研究现状及趋向. 地球科学进展,12(3):242—246.
- 翟裕生,1998. 成矿系统的结构框架和基本类型. 见:中国科学院地球化学研究所编,资源环境与可持续发展论文集. 北京:科学出版社.
- 翟裕生,1999. 论成矿系统. 地学前缘,6(1):13—27.
- 翟裕生,2003. 成矿系统研究与找矿. 地质调查与研究,26(2):65—71.
- 赵鹏大,陈建平,陈建国,2001. 成矿多样性与矿床谱系. 地球科学——中国地质大学学报,26(2):111—117.
- 赵鹏大,陈建平,张寿庭,2003. “三联式”成矿预测新进展. 地学前缘,10(2):455—463.
- 赵鹏大,陈永清,刘吉平,等,1999. 地质异常成矿预测理论与实践. 武汉:中国地质大学出版社.
- 赵震宇,王世称,许亚明,等,2002. 综合信息矿产预测理论在危机矿山资源预测中的应用思考. 世界地质,21(3):283—286,299.
- 郑有业,多吉,张刚阳,等,2007. 西藏吉如斑岩铜矿床的发现过程及意义. 矿床地质,26(3):317—431.
- 郑有业,高顺宝,张大全,等,2006. 西藏朱诺斑岩铜矿床发现的重大意义及启示. 地学前缘,13(4):233—239.
- 朱裕生,2006. 矿产预测理论——区域成矿学向矿产勘查延伸的理论体系. 地质学报,80(10):1518—1527.
- 朱裕生,王福同,龙宝林,等,2003. 土屋—延东斑岩型铜(钼)矿床多源信息找矿模型. 矿床地质,26(3):287—294.
- 朱章森,张庆希,杨丽清,等,1991. 求异理论与无模型预测. 见:第四届全国数学地质会议—武汉国际矿床统计预测会议集,中国数学地质(3). 北京:地质出版社,49—55.
- 朱章森,朱磊,1998. 矿床定量预测理论与方法体系. 成都理工学院学报,25(增刊):1—7.