·矿产资源·

深部找矿:地质理论、勘查技术、投资决策的难题及对策

刘亮明,蔡爱良
LIU Liang-ming, CAI Ai-liang

中南大学计算地学研究中心,湖南 长沙 410083
Computational Geosciences Research Centre, Central South University, Changsha 410083, *Hunan, China*

摘要:通过对国内外深部找矿的实例、矿产勘查的当前水平和发展趋势分析,探讨了深部找矿勘查对地质理论、勘查技术、投资决策的挑战和我们应采取的对策。深部找矿的特殊性使之在地质理论、勘查技术和投资决策方面临更大的挑战,主要难题是:①成矿理论缺乏足够的预测能力;②地质构造理论推断深部地质构造格架及其演化历程带有比较大的不确定性;③传统地质思维难以适应复杂的非线性系统;④"遥测"信息的多解性制约了对深部地质的了解;⑤钻探仍是控制勘查成本的关键性因素;⑥避免投资决策管理的失误并不容易。针对这些困难,可以采取的对策有:①切实提高成矿理论的预测能力;②在发展信息探测技术的同时重视信息应用技术的创新;③充分利用好每一个深部钻孔;④建立基于长远规划的科学支持的投资决策机制;⑤真正重视人的作用。

关键词:深部找矿;地质理论;勘查技术;投资决策;铜山铜矿
中图分类号:P62 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2009)07-0923-10

Liu L M, Cai A L. Deep ore-prospecting: challenges and solutions in terms of geological theory, exploration technology and investment decision-making. *Geological Bulletin of China,* 2009, 28(7): 923-932

Abstract: By comprehensive analysis on the typical cases of deep ore exploration and current level and trends of the exploration geology, it is demonstrated that the geological theories, exploration technologies and investment decision are not only important but also challenge to the deep ore exploration, because of the specific features of the deep ore exploration. The major difficulties challenging the deep ore exploration include that, ①the current metallogenic theories are not compellent in predictive capability; ②the geotectonic theories are not capable to deduce the exact architecture and evolution processes of the deep structure; ③the traditional linear intellection is not suitable for researching the nonlinear complex geosystems; ④ multi-choosing solution of the remote detecting information are not exact enough reflecting the reality of the deep structures and deep ore-related factors; ⑤drilling is so far the critical cost factor that is vital for deep ore exploration projects; and ⑥it is not easy for making correct investment decision to avoiding failure. To deal with these difficulties, the practicable strategies are suggested, ①to promote predictive capability of the metallogenic theories; ②to develop the information exploring technologies as well as innovate information application methods; ③to ensure the most efficient application of every deep drill hole; ④to construct scientific mechanism of making investment decision based on long term plan; and ⑤to really attach importance to the role of the intellectual people.

Key words: deep ore exploration; geological theory; exploration technology; investment decision making; Tongshan copper deposit

随着浅部矿产资源的日益减少,深部尚未发现的矿产资源将是 21 世纪满足人类日益增长的矿产需求的主要来源之一,因而深部找矿已成为全球矿产勘查的一个主要方向[1-4]。俄罗斯的乌拉尔成矿区[5]、加拿大的 Sudbury 矿集区[6-7]、美国的 Carlin 成矿区[8],中国青海锡铁山矿区[9]、云南会泽麒麟厂铅锌矿区[10]、安徽铜山铜矿[11]、安徽安庆铜矿[12]等著名的成矿区带和矿床深部的引人瞩目的找矿发现无疑

收稿日期:2009-02-27;**修订日期**:2009-03-04
基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40772195);"十一五"国家科技支撑计划课题(编号:2006BAB01B04)资助
作者简介:刘亮明(1964-),男,博士,教授,从事找矿预测与成矿动力学研究。E-mail: lmliu@mail.csu.edu.cn
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

也表明了深部找矿的巨大潜力。

但是，深部找矿勘查的巨大潜力与巨大困难是并存的[2]。正是因为潜力与困难并存，研究组织和学术团体才越来越重视深部找矿理论和技术难题的研究，以期促进深部矿产资源的预测性发现(predictive discovery)、提高深部找矿勘查的效率。作为矿业大国的澳大利亚对深部找矿理论和技术的研究尤为重视，澳联邦政府最高研究机构 CSIRO(Commonwealth Science and Industry Research Organization) 2000 年在联邦政府的支持下发起目前仍在进行的前缘性研究计划——"Glass Earth"；2007 年联邦政府以 3200 万澳元支持以 CSIRO 为主开展另一前缘性引导(澳称 flagship)项目——"Minerals Down Under"。在这 2 个重大研究计划中，深部找矿的理论和技术都是主要内容。国际矿床地质协会(Society of Geology Applied to Mineral Deposits, 简称 SGA)于 2007 年 8 月在 Dublin 召开的第九届矿床地质会议将会议的主题定为"Mineral Exploration and Research: Digging Deeper"。中国国土资源部也于 2007 年 9 月在合肥组织召开了"全国深部找矿工作研讨会"，并于 2008 年 1 月正式发布《关于促进深部找矿工作指导意见》，将深部找矿作为中国今后找矿勘查的主要方向之一[13]。近年来，国内也有众多学者对深部找矿的一些基础问题进行研究，取得了不少有益的成果[1-3, 14-17]。本文在综合分析国内外深部找矿勘查典型实例与相关研究成果的基础上，就深部找矿的特殊性及其对地质理论、勘查技术与投资决策方面的挑战进行了分析，并就如何应对这些挑战进行了探讨。

1 深部找矿与浅部找矿的差异

随着找矿的目标由浅部向深部(国内常以地下 500 m 深度为界)的转变，勘查目标的地质环境、工程环境和经济属性都要发生巨大的变化，对勘查技术的要求和管理都必须进行实质性的调整，否则就不可能顺利推动深部找矿勘查的进行，也难以取得深部矿体的发现。所以深部找矿勘查并不只是勘探深度的简单增加，实际上深部找矿与浅部找矿勘查相比，在勘查目标、勘查模型，对勘查技术、工作方法及勘查主体的要求等方面都存在巨大的差异(表 1)。

表 1 浅部找矿和深部找矿的特点与要求对比

Table 1 Comparison of features and requirements of shallow and deep ore-prospecting

对比项目		浅 部 找 矿	深 部 找 矿
勘查目标及模型	目 标	不同品位和规模的各种类型的矿体	高品位大规模的几种类型的矿体
	模 型	主要针对矿体的描述性模型	主要针对成矿系统的预测性模型
对勘查技术的要求	钻 探	可用许多钻孔，对钻探技术要求弱	更少的钻孔，更多的深部测井，特别强调钻探新技术
	勘查技术	强调某种特别技术	强调多种技术集成
	工 具	集中于基于实验室和野外的常规工具	集中于"遥测"和钻孔深部探测工具
对工作方法的要求	学科关系	地质、地球物理等项目通常分开进行	各种地学项目必须联合进行
	地质研究	重点为描述性活动，突出岩石类型的重要性，强调地球系统的孤立要素，重点放在岩石类型的分布方面	重点为集成性和预测性活动，突出岩石性质的重要性，强调地球系统的整体方法，重点放在成矿系统的分布方面
	填 图	地表地质填图	地下地质"遥测"填图
	推理方法	是什么……就会怎么样的类比推理	为什么……会在哪里出现的假设推理
对勘探者的要求	公 司	各种规模的公司都可以	只有大公司和银团才可以
	管 理	保守的管理	风险管理

注：根据 Williams[4]及有关资料修改整理，表中"遥测"并不是通常意义的航天遥感，而是指远距离的非接触探测

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

正是深部找矿勘查的这些特殊性，使得现有的地质理论、勘查技术和投资决策管理机制在用于深部找矿勘查时都会面临严峻的挑战。

2　地质理论、勘查技术和投资决策管理对深部找矿的重要性

2.1　地质理论和勘查技术对深部找矿的重要性

现代找矿勘查项目，特别是深部找矿勘查项目都是预测性的勘查项目[18]，其基本流程如图 1 所示。这种项目的成功与否关键取决于预测的准确和详细程度。由于探测技术是获取预测推理依据的主要手段，而地质理论，特别是地质构造理论及成矿理论，是进行预测推理的主要理论工具，因此，探测技术和地质理论是决定成矿预测准确性和详细程度的两大法码。对深部找矿而言，勘查技术（包括探测技术和钻探技术）和地质理论的重要性更加突出，原因在于：①对深部地质信息的了解基本依赖于“遥测”的探测技术；②以“遥测”技术探获的有关深部地质构造和矿产的信息都是具有多解性的间接信息，因此对深部构造特征的解译和深部矿体的预测更加依靠推测的理论依据（即地质构造演化理论和成矿理论）；③钻探技术不仅能提供地下深部准确的地质信息，更是最终证实矿体的必不可少的手段，其钻进的控制精度、效率和成本对最终探获储量的精度和成本会起着决定性的作用。

2.2　投资决策管理对深部找矿的重要性

找矿勘查中虽然涉及到大量的研究工作，但找矿勘查的投资是不同于一般意义的研究与发展（即 R&D）投资，其根本目标并不是发展技术和创造知识，而是通过找到有经济价值的矿体获取投资回报。找矿勘查本来就是一项高风险的投资[18]，深部找矿勘查的风险更高，其原因在于：①深部的矿体更难预测，选准勘查目标的难度更大；②深部找矿勘查的成本更高；③深部找矿中影响勘查工程和成果的不确定因素更多。面对深部找矿勘查的高风险性，没有正确的投资决策管理支持，就不可能取得高回报的找

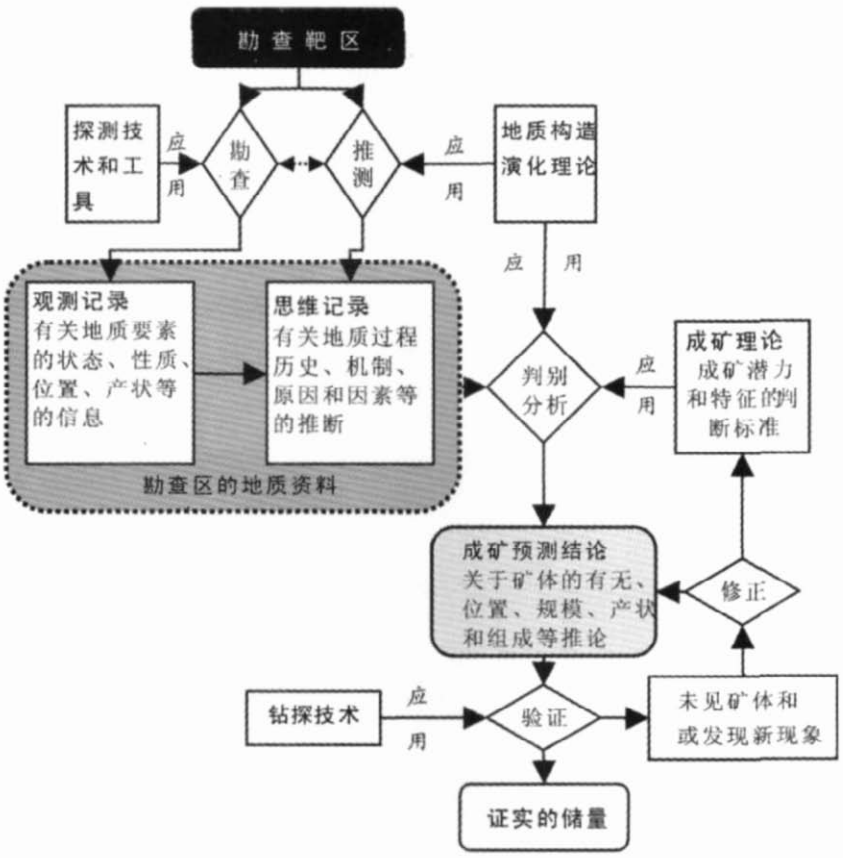


图 1　预测性找矿勘查的流程

Fig. 1　Flow chart of predictive ore-prospecting activities

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

矿成果。正确的投资决策管理对深部找矿的作用主要表现在：①对正确的勘查方向给予足够的资金支持，使其不会因资金不足而功亏一篑；②促使勘查方向不正确的项目尽早调整勘查方向，避免不正确的项目造成不必要的浪费。

事实上，对于找矿勘查而言，即使从地质上得出正确的预测分析，如果没有正确的投资决策的支持，项目想成功也是不可能的。Hemlo 金矿和 Olympic Dam 铜金铀矿的发现史就充分说明了这一点。Hemlo 金矿是加拿大的一个超大型矿床(760 t Au、142.5 t Ag、9.5×10^4t Mo 和 1273×10^4t 重晶石)。早在 David Bell 发现 Hemlo 的 20 年前，在该区进行找矿勘查的 Lake Supper 金矿聘请的地质专家 Trevor Page 就做出了基本正确的推测，只因几次钻探见矿不佳，Lake Supper 便放弃了该项目的投资，使之成为一个失败的项目。而 David Bell 替 Corona 公司负责 Hemlo 地区的金矿勘查后，并没有任何认识上的创新，也没有使用任何先进技术，却坚持不懈地按已有的思路施工钻孔，在连续 75 个钻孔见矿不好的情况下，Corona 的老板 Murray Peizim 还继续该项目的投资，终于在第 76 个钻孔打到了厚而富的主矿体，使之成为最成功的勘查项目[19]。同一个地区，基于相同的地质认识，只因投资决策管理不一样，出现了 2 种截然不同的结果。澳大利亚的 Olympic Dam 是一个隐伏在地下 300 m 以下的巨型铜金铀多金属矿床(约 3000×10^4t 铜，93×10^4t 氧化铀、1200 t 金、6700 t 银和约 1000×10^4t 稀土金属)，其发现经历了 20 年(1957—1976 年)，找遍了大半个澳大利亚国土。当在 Olympic Dam 地区的第 1 个见矿钻孔完成时，其投资已达 3000 万澳元，而此后 1 年多的时间内又花费了近 300 万澳元，施工了 8 个钻孔，未打到有价值的矿体，项目面临下马，只因地质人员的坚持，才继续施工第 10 个钻孔，终于打到主矿体，使之成为找矿巨大成功的实例[20]。如果在施工完第 9 个孔时就不再投资，该项目无疑会是一个损失巨大的投资失败的项目。巨大的成功和失败之间实际上只是一念之差。

3 深部找矿地质理论、勘查技术与投资决策管理之不足

虽然现代地质理论、勘查技术与投资决策管理体制都在迅速发展，但却并不足以应对深部找矿勘查面临的巨大困难，这种不足主要表现在以下 6 个方面。

(1)成矿理论缺乏足够的预测能力

成矿理论从数量上来看并不稀缺，全世界现已发现的所有矿床不管开发与否，可能都被研究过，都总结出了成矿模式并发表了论文，但大多数的成矿理论都属于“事后诸葛亮式”的，是对已发现的事实进行解释的假说，缺乏科学理论所必备的预测能力[21]。

成矿模式本是成矿理论成果的高度概括，也是指导勘查目标(区)选择和矿床(体)预测的主要标准。由于现在的大多数模式只满足于对已有事实的解释，对控制矿床形成和定位的关键地质过程缺乏足够详细准确的了解，除了预测“克隆”型矿床(体)外，对未发现矿床(体)的预测能力并不令人满意[22]。预测能力的不足使这些模式难以在深部找矿勘查中发挥有效的作用，原因在于：①大多成矿模式对矿床的预测都是经验式的，有赖于足够的地质信息，而深部找矿最缺乏的正是有关深部的地质信息；②在目前的技术条件下，对深部的三维构造格架演化历程都不可能有准确而详细的结论，这恰是理论模式预测的必要前提；③深部钻探可以为深部矿体预测提供非常有用的信息，但其高成本不容许以增加尝试钻孔的数量详细解剖深部地质；④目前成矿研究主要依靠对揭露矿体及地质环境发现的经验事实的积累和类比分析，这种方法对了解地质过程及相关的成矿作用并非完全有效。

缺乏足够预测能力的成矿理论用于指导深部找矿勘查时，必然结果是：①预测不正确或者不准确，从而大大增加了无效的工程量，增加了勘查的成本。②每一次预测的失败都会在投资者心里留下阴影，从而降低投资者的信心，使之面对可能成功的项目时也不敢再投资。这 2 个方面的结果都是使项目走向失败。

(2)根据地质构造理论推断深部构造格架及其演化历程带有比较大的不确定性

地质构造理论是推断地质构造格架及其演化历程的主要工具，对一个地区的地质构造格架及其时空演化历程了解的准确和详细程度是推断深部成矿作用、进行矿床预测的关键性前提条件。面对深部找矿勘查的特殊环境，特别是经历了多次地壳构造活动的复杂环境，应用地质构造理论推断其地质构造

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

格架及时空演化历程时,带有比较大的不确定性,即不同的人得出的结论会有较大的差异,原因主要在于:①有关地质构造演化的理论基本都停留在假说阶段,对相同现象的解释会存在多种假说,目前地球科学研究和探测技术还难以提供充分的事实或设计可操作的实验来证实和评判这些假说;②由于缺乏充分的事实和实验支持,地质构造理论对地质演化历史的推断也只能是模糊的和笼统的;③深部信息探测面临的困难降低了根据地质构造演化理论推测深部构造格架及其演化历程的可靠程度。对深部地质了解的不确定性必然会导致深部成矿预测的不确定性。

(3)传统地质思维难以适应非线性的复杂系统

成矿预测和关于地质过程的推测是思维的结果,地质资料中有很大一部分也属于思维的记录(图1),所以思维方式是地质理论应用的核心。传统的地质思维是一种基于均变论的定性的线性推理,基本定式是:大致相同的原因产生大致相同的结果,大致相同的结果也会存在大致相同的原因,原因因素的线性相加会造成结果的线性相加。这种思维方式对于简单的线性系统是适用的,但对于复杂的非线性系统则是不适用的。包括成矿系统在内的地质系统大多是复杂的非线性系统,深部地质构造系统和深部成矿系统更是复杂的非线性系统,原因在于:①中国大部分的成矿区带都是经历了多个大地构造活动阶段的"地洼区",其深部地质构造系统是多次构造活动叠加作用的结果,这种叠加不可能是线性的,其结果必然是使系统复杂化;②通常看起来相似的地质环境成矿结果却有极大的差异,有的能形成大型矿床,有的却什么都没有,这实际上就是成矿作用的非线性效应,原因的细微差异能导致结果的极大差异;③与浅部地质系统相比,深部地质系统可能经历了更加久远的演化历史,各种地质要素之间的关系也就更加复杂。对于这种复杂的地质系统,简单的线性定性思维方式显然难以推导出可靠的结论。

(4)遥测信息的多解性制约对深部地质的了解

地表遥测的信息不管是地球物理的还是地球化学的,多解性一直是制约其应用的主要难题,这对深部找矿的影响更甚,原因在于:①对于深部地质构造和成矿因素的了解主要依靠于地表遥测的各种信息,在钻孔施工前,基本没有其他来源的信息可以纠正对遥测信息解译的错误;②地球物理信息探测技术本身就在识别和分离方面存在先天性不足,有关深部信息在地表又往往表现为有用信息弱、干扰背景强的特点,更增加了识别和分离的难度;③地表遥测信息与深部地质要素之间的关系是非常复杂的非线性关系,探测深度越大,地质背景越复杂,其关系越复杂,信息反演的难度增加,根据探测到的信息推测深部地质情况的难度越大;④地球化学探测技术在分离多源叠加异常及确定异常的深度方面还没有成熟的对策;⑤深部地球物理信息的三维反演是牵涉到众多学科的前缘性科学难题,不同的反演方法得出的结果会出现较大的差异。由于遥测信息的多解性,对深部地质情况的解译必然产生较大的不确定性,不仅不同的遥测信息会解译出不同的结果,同一套遥测数据经不同的人解译也可能得出不同的结果,这就势必降低了深部成矿预测的准确度。

(5)钻探仍是控制勘查成本的关键性因素

深部钻探是最终探明深部矿产储量及其要素的必不可少的手段,而且也是深部找矿勘查的最大投

表 2　安庆铜矿不同区段施工钻孔的增储效率

Table 2　Efficiency in enhancing the resource base by means of drilling in different sectors for Anqing copper mine

年份	施工钻孔数	总进尺/m	平均孔深/m	探明储量/10^4t		平均每米钻孔探明储量/t·m^{-1}		勘探矿体(深度/m)	勘探依据
				铜	铁矿石	铜	铁矿石		
1958—1977	172	76725.1	446.1	42.39	3060	5.5	398.9	西马鞍山(-200~-500)	强磁异常中心
1981—1987	28	22420.1	800.7	2.025	891.08	0.9	397.45	马头山(-300~-900)	矽卡岩化找矿标志及磁异常
1984—1988	33	28281.31	857	7.558	626.21	2.67	221.42	东马鞍山(-450~-900)	已发现矿体的追索及磁异常

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

资所在。从纯技术的角度来看,深部钻探技术是相对成熟的。但由于找矿勘查不仅仅是一种技术活动,更是一种经济活动,任何一种技术的投入都需要考虑其成本。随着勘探目标体深度的加大,不仅钻探的单位成本会增加,钻探的增储效率也会大大降低,对安庆铜矿勘探数据的统计结果就充分证明了这一点(表 2)。所以深部钻探面临的主要挑战主要是如何降低钻探的成本,提高钻探的效率。

(6)避免投资决策管理的失误不容易

深部找矿勘查是一项投资花费大、回报周期长的复杂的系统工程,正确的投资决策管理是保证项目顺利进行并最终取得高回报找矿成果的必要条件。然而,要做到正确的投资决策管理并不容易,原因是找矿勘查本来就是不确定因素多的高风险行业[18],深部找矿勘查的不确定因素更多、风险更大,主要表现在:①由于深部地质信息探测和地质理论的局限性(如前述),深部成矿预测更加不准;②深部成矿预测的不准必然会导致勘查技术路线和工作量的偏差;③技术路线和工作量的偏差必然会导致勘查成本难以确定;④项目周期长会增加影响项目的不可预见的因素。正是这些不确定的因素使得投资者极不容易判断项目的前景,因而也就难以做出正确的投资决策。

面对找矿勘查的高风险性,Slichter[23]作过精辟的分析,认为找矿勘查适合于赌博定律,避免勘查者像赌徒一样走向毁灭的唯一方法就是有足够的资金进行足够多的尝试,这样最终总会成功。事实上,任何投资者容忍失败的耐心都是有限的,在钻探验证失败以后,肯定都会面临"坚持或放弃"的抉择,目前还没有成熟的方法可以帮助决策者判别哪些项目值得坚持,哪些项目应尽早放弃。正是由于投资决策的困难,不可避免地会出现因过早放弃而与像Olympic Dam、Hemlo 一样的巨大发现失之交臂,或因非理性的坚持而造成更大的投资损失。

4 应对深部找矿挑战的对策探讨

针对深部找矿的困难,要真正提高深部找矿勘查的成功率,应该根据现有的地质科学、勘查技术水平和勘查投资的管理体制现状寻找对策,目前应该从如下 5 个方面开展工作。

(1)切实提高成矿理论的预测能力

成矿理论的预测能力不高是制约深部找矿的核心难题。要切实提高成矿理论的预测能力,必须针对当前科学界和工业界在创造和应用成矿理论时的种种弊病采取切实可行的措施,有效的措施应包括如下 5 个方面:①不受已有矿床经验的约束,从成矿动力学角度分析成矿的可能性,构建成矿理论模式,基于动力学的成矿理论模式更能揭示成矿的本质[2, 12, 21],对成矿动力学模型的计算模拟不仅可以检验模式的可靠性,计算所得的流场、运动场、温度场和化学场等结果,还可以定量地约束预测结论[24-27]。②构建成矿模式和地质构造演化理论模式都不应放大单因素的作用,应重视系统的非线性效应。③不能单纯地将预测结论基于经验模式的定性类比推理,应重视计算,定性类比推理有较大的随意性,即类比条件对结论的约束不严格。利用地理信息系统(GIS)平台,通过数据驱动和知识驱动计算方法在三维空间内定量确定成矿的最有利部位,能从推理机制上提高成矿预测的合理性和严格性,从而提高成矿预测成功的概率[28-29]。④准确详细的野外调查、钻孔编录和地质填图是创造出有实用成矿理论的基础,单纯依靠"高新技术"的高成本测试数据或依靠新名词和流行概念的炒作只会产生华而不实的"玄论"和"空论",而非实用的理论[21]。⑤去掉多余的假设,使理论的内核尽量简单化,真正的科学理论是简单的,不需要过多的假设条件,如果需要附加很多假设才能解释已发现的事实,那就是伪科学,如托勒密的"地心学说"[21]。

具有预测能力的成矿理论模式的创造并不一定非要大量高成本的测试数据,只要在扎实的野外地质基础上抓住成矿的主要控制因素,就可以创造出促成突破性找矿成果的理论模式。安徽铜山铜矿深部找矿实践就很好地证明了这一点。始建于 1959 年的铜山铜矿是一个浅部矿体已基本开采殆尽的老矿山。2001 年刘亮明①在分析铜山矿田的找矿前景时,发现铜山铜矿的矿体受与接触带套合的断层的控制,而且矿体的膨大部位是陡倾斜的部位,矿体变小并趋于尖灭的部位是缓倾斜的部位,考虑到成矿区域的地质背景和地壳演化特征,提出了接触带波状断裂的伸展剪切扩容构造控矿模式(图 2)。2005 年笔者在进行铜山铜矿接替资源勘查项目的论证和设计时,应用这一模式进行矿体预测分析,认为现有的 4 号、29 号等主矿体沿倾向尖灭后,在深部还会尖灭再现。对于这一预测结论,在未进行任何物化探工作

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

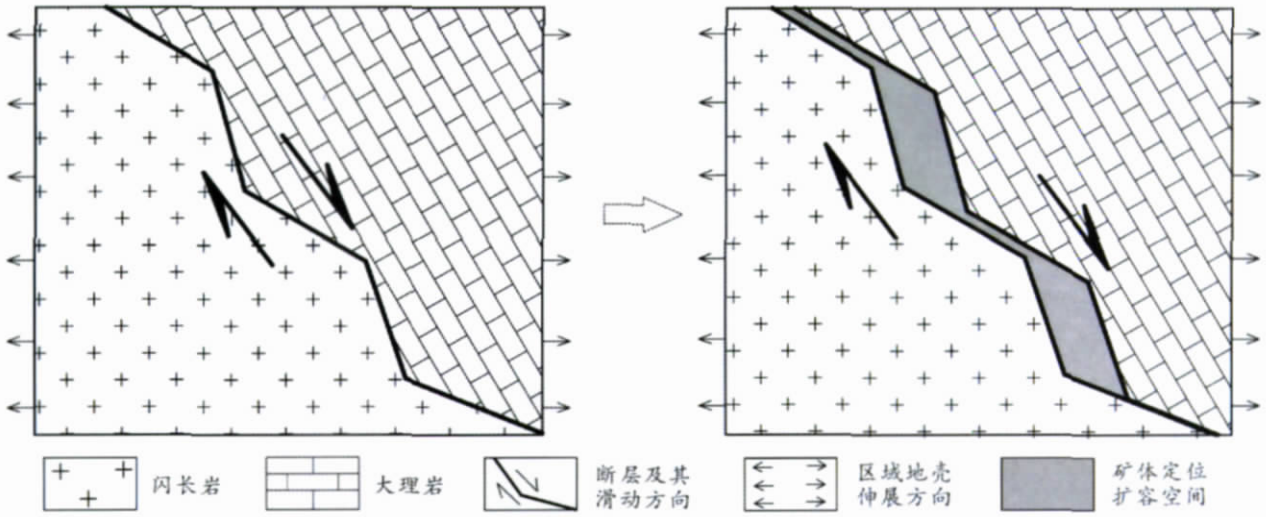


图 2　安徽铜山铜矿接触带波状断层的伸展剪切扩容构造控矿模式

Fig. 2　Ore-controlling structural-dilation formed by stretching-shear of wave-shaped fault along contact zone in the Tongshan copper deposit, Anhui

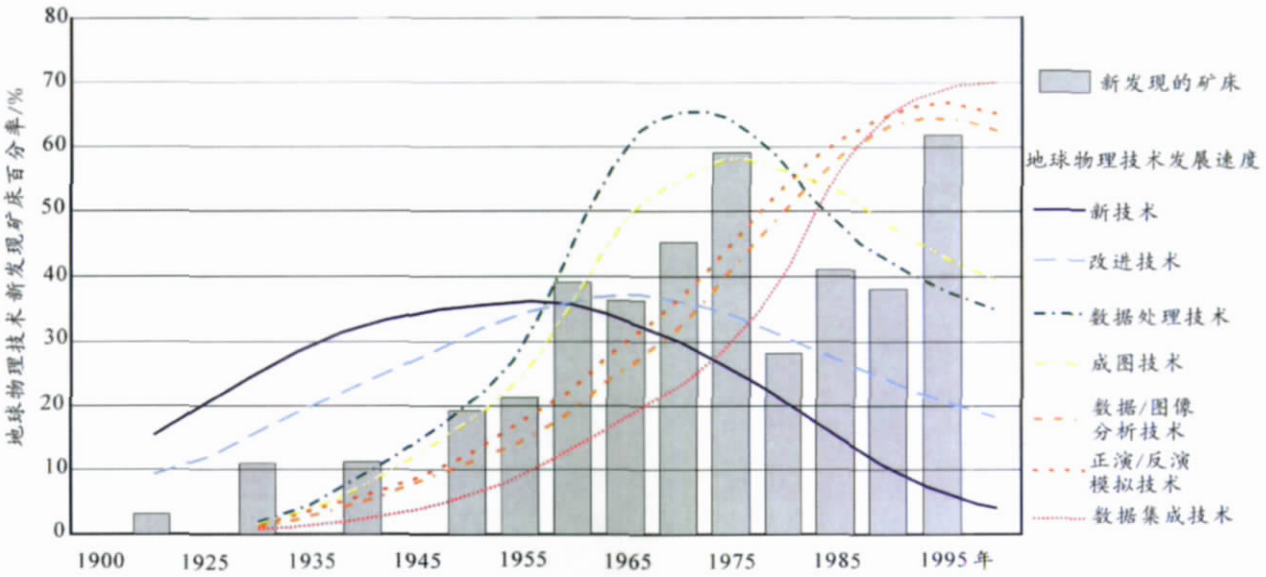


图 3　地球物理技术的发展与全球矿床发现的对应关系[31]

Fig. 3　Rate of development and discovery success for various geophysical methods

时(物探工作是在钻探见矿后才进行的),就直接设计了钻探工程进行验证和勘探。钻探工程的见矿效果非常好,基本与预测一致,初步控制的铜金属储量在 13.6×10^4t 以上,挽救了一个关闭的矿山[11]。

(2)发展信息探测技术的同时重视信息应用技术的创新

要克服当前地球信息探测技术在探测深部地质方面的不足,理论上可行的途径是发展地球信息探测技术,特别是地球物理信息探测技术。地球信息探测技术的发展应该包括 2 个方面:①从原理上创新,发展新的探测技术,包括改进和完善已有的技术;②从应用方法上创新,使根据已有技术探获的结果能得到更加可靠的解释和应用。长期以来,在矿产勘查界有比较强的迷信"高新技术"的倾向,希望能发明

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

“万灵药式”的技术“一劳永逸”地解决找矿勘查的所有难题。事实上,要创造一种实用的探测新技术并不容易,创造“万灵药式”的技术更不可能。所以从科学技术和矿产勘查的现状分析,要推动深部找矿的进展,更应该重视应用方法的创新,因为:①从地球物理技术的发展历史来看,新技术的创造要比应用方法的创新难得多,而且新技术不可能马上带来找矿发现,相反,应用方法的创新却能马上带来新的找矿发现(图 3);②地表遥测的深部信息与深部矿体之间的关系往往是非线性的,同样的信息,不同的应用方法会得到截然不同的结果,好的应用会带来找矿发现,应用得不当就会断送本应取得的发现。Century 铅锌的发现就很好地说明了这一点。Century 是澳大利亚的一个超大型铅锌银隐伏矿床(1380×10^{4}t 铅锌、4248 t 银)。CARE 公司进入 Century 地区时,由于目标选择正确,迅速发现了高强度的 Zn、Pb、Ag 土壤地球化学异常,但随后的电磁测量却未发现大的低阻异常存在,项目面临着下马的危险,只因地质学家坚持才使项目继续维持。1989 年,CARE 的地质师在其西南约8 km 的 Watsons 的古采空区上发现了类似的地球化学异常,并且在其延伸方向用浅钻打到了隐伏的铅锌矿体,这才下决心在地球化学异常上打钻,迅速打到埋深并不大的大规模隐伏矿体[18, 30]。可见高新勘查技术在使用不当时不仅不会促进找矿发现,还会起相反的作用。可见技术应用创新对深部找矿是多么的重要。

(3)充分利用好每一个深部钻孔

深部钻孔不仅是证实深部矿体必不可少的手段,也是探查深部地质情况的最佳工具。由于钻探是深部找矿中最主要的成本因素,为实现以尽可能低的成本查明深部矿产资源的目标,能采取的技术措施包括 2 个方面:①发展钻探技术,提高钻进的速度,降低钻探的成本;②充分利用好每一个钻孔,尽可能从单个钻孔中获取更多的信息,减少施工钻孔的总量。受材料技术、制造工艺和控制技术的制约,钻探技术本身的发展难以在短时间内取得重大进展。而从目前的勘查现状来分析,充分利用好每一个钻孔在中国还有相当大的潜力,主要表现在 2 个方面:①分枝定向钻探,可以减少钻探工作量,安徽冬瓜山铜矿(大于 100×10^{4}t 铜,埋深约 1000 m)的勘查过程中就充分采用了这种技术,但目前中国很多勘查公司缺乏实施这类技术的人才;②利用深部钻孔进行物化探测量,可以大大提高深部探测信息的精度,增加矿体预测的准确度,减少后续的无效钻探。加拿大 Sudbery 镍矿田近年在深部找矿中取得了重大突破,其中一个重要的技术手段就是利用深部钻进行孔中 TEM 测量[7]。

(4)建立基于长远规划的科学支持的投资决策机制

针对深部找矿勘查的高风险性,要最大限度地规避风险又不至于错失巨大发现,正确的对策应该是建立基于长远规划的科学支持的投资决策管理机制,这种投资决策管理机制应该具有如下 4 个方面的特征:①支持的项目应该是一个具有科学依据的长远的规划,Olympic Dam 项目的科学依据是元古宙基性和超基性火山岩变质能形成大规模的铜矿床。项目历时达 20 年[20],一般巨大的找矿发现不可能在短时间内取得。②支持的项目应该是以寻找大规模、高品质的矿床为目标,其前提是能在大范围区域内选择勘查目标区,并且具有强大的财力为后盾。③投资决策不能简单地由行政人员或资金运作人员来决定,要充分尊重一线技术人员的意见,Hemlo、Olympic Dam 和 Century 都是由于地质技术人员的坚持才没有夭折。④决策应建立在可靠的勘查模型和勘查数据的充分利用的基础上,由于深部找矿积累的勘查数据(资料)是庞杂的,决策不是由某一个人就能简单地确定的,在现代计算机技术和信息平台(GIS 等)的基础上建立高效的决策支持系统将会大大有助于正确决策的取得。

(5)真正重视人的作用

深部找矿勘查不像“种豆得豆、种瓜得瓜”那么简单,如何避免“种瓜得豆”这种得不偿失的结果,关键在于负责勘查的地质技术人员。因为不管拥有多么先进的技术和理论,也不管拥有了多么详细的地质资料,深部找矿勘查永远都需要在地质情况不明了的条件下进行各种推测,推测的正确与否将对项目的成功与否起决定性的作用。而这种推测的可靠性在很大程度上取决于推测者所具有的知识水平、思维能力和判断能力,因此具有创新能力的高素质的地质师对项目有着至关重要的影响,高水平的勘查队伍是找矿勘查项目成功的最重要保证[32]。

基本上所有著名深部找矿的发现背后都有杰出的地质技术人员的贡献,铜陵地区深部发现的冬瓜山铜矿,常印佛院士功不可没。锡铁山矿床深部的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

找矿成就凝聚了邓吉牛博士及其所带领团队的心血。作为深部找矿最成功的实例，即美国 San Manuel 矿田发现的 Kalamazoo 隐伏铜矿床（365×10^4t 铜储量）和智利北部发现的 Escondida 超大型隐伏铜矿床（2275×10^4t 铜储量）要归功于著名的地质学家 Lowell，他不仅发现了众多的矿床，还是斑岩铜矿成矿理论的创始人[33-34]。

事实上，制约中国深部找矿发现的主要瓶颈不是勘查技术和勘查资金，而是缺少像 Lowell 那样长期工作在找矿勘查第一线的高水平的地质学家。在中国，地质人才主要集中于政府部门、研究院所和大专院校，从事管理和研究工作，而不是在勘查一线从事实际的找矿勘查工作；而在一线工作的地质人员大多水平有待提高，更重要的是，他们缺乏经常性的培训机会，也很难参与国际性的学术交流，知识更新慢[35]。真正重视人的作用就要从机制上保证真正有水平、有责任心的地质学家能满怀热情、扎扎实实地工作在勘查一线，唯有这样才有可能使中国深部找矿达到世界先进水平。

5　结　论

深部找矿是现代找矿勘查的重要方向，由于勘查目标和勘查环境的特殊性，深部找矿对地质理论、勘查技术和投资决策有更高的要求，也面临着更大的困难。从中国的现状分析，制约深部找矿勘查的主要难题是：①成矿理论缺乏足够的预测能力；②地质构造理论推断深部地质构造格架及其演化历程带有比较大的不确定性；③传统地质思维难以适应复杂的非线性系统；④遥测信息的多解性制约了对深部地质的了解；⑤钻探仍是控制勘查成本的关键性因素；⑥避免投资决策管理的失误并不容易。面对这些难题，可以采取的对策有：①切实提高成矿理论的预测能力；②发展信息探测技术的同时重视信息应用的创新；③充分利用好每一个深部钻孔；④建立基于长远规划的科学支持的投资决策管理机制；⑤真正重视人的作用。

致谢：本文是笔者近 10 年来在安徽铜陵地区进行深部找矿研究中思考的有关问题的一个总结，部分内容在合肥全国深部找矿工作研讨会上报告过，也曾与常印佛院士进行过交流。感谢铜陵有色金属集团控股有限公司的一贯支持，感谢常印佛院士的宝贵意见，感谢澳大利亚 CSIRO、James Cook 大学的 Economic Research Unit 及 Nick Oliver 教授提供了非常有用的资料。

参考文献

[1]翟裕生,邓军,王建平,等. 深部找矿研究问题[J].矿床地质,2004,23:142-149.

[2]Liu Liangming, Peng Shenglin. Key strategies for predictive exploration in mature environment: model innovation, exploration technology optimization and information integration[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12 (2): 186-191.

[3]刘亮明,吕俊武,彭省临,等.成熟勘探区新一轮找矿:勘查战略创新及铜陵矿集区找矿实例[J].地质论评,2005,51(5):325-333.

[4]Williams N. Australian mineral exploration in the 21st century:are we up to the challenge?[R]. Presentation at AMEC National Mining Congress, Perth 2005.

[5]Prokin V A, Buslaev F P. Massive copper - zinc sulphide deposits in the Urals[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 14: 1-69.

[6]Barnett E S. Discovery, geology and metal zoning of Nickel Rim depth deposit, Sudbury, Canada[C]//Grimsey E J, Neuss I. Nickel′96—Mineral and Market, Melbourne: AusIMM, 1996: 131-138.

[7]King A. Deep drill hole electromagnetic surveys for nickel/copper sulphides at Sudbury, Canada[J]. Exploration Geophysics, 1996, 27: 105-118.

[8]Teal L, Jackson M. Geologic overview of the Carlin Trend gold deposits and descriptions of recent deep discoveries[J]. STG Newsletter, 1997,(31): 1-25.

[9]邓吉牛.锡铁山铅锌矿床深边部探矿的认识过程. [EB/OL](2009-01-20),2004,http://news.sohu.com/2004/06/17/34/news220583474.shtml.

[10]韩润生,陈进,李元,等.云南会泽麒麟厂铅锌矿床八号矿体的发现[J].地质地球化学,2001,21:191-195.

[11]刘亮明,王建青,詹德光.岩体接触带断裂扩容构造控矿模式及其在铜山铜矿深部找矿中的应用[J].矿物学报,2007,21(suppl): 515-517.

[12]刘亮明,疏志明,赵崇斌,等.矽卡岩矿床的汇流扩容空间探矿机制及其对深部找矿的意义:以铜陵—安庆地区为例[J].岩石学报,2008,24:1848-1856.

[13]李晓明.我国地质找矿战略向深部延伸[N].科学时报,2008-01-10(A01).

[14]赵鹏大.成矿定量预测与深部找矿[J].地学前缘,2007,14(5):1-10.

[15]王登红,许建祥,张家菁,等.华南深部找矿有关问题探讨[J].地质学报,2008,82(7):865-872.

[16]滕吉文,立强,姚敬全,等.金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程[J].地球物理学进展,2007,22(2):317-334.

[17]吕庆田,杨竹森,严加永,等.长江中下游成矿带深部成矿潜力、找矿思路与初步尝试——以铜陵矿集区为实例[J].地质学报,2007,81(7): 865-881.

[18]刘亮明,邓吉牛,彭省临,等.找矿勘查的风险性及降低风险的预测性勘查战略[J].地质通报,2005,24:1016-1021.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[19]Knoll K. The lesson of Hemlo: persistence pays off[J]. Canadian Mining Journal, 1984,105(4): 22-35.

[20]Woodall R. Empiricism and concept in successful mineral exploration[J]. Australian Journal of Earth Science, 1994, 41: 1-10.

[21]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):82-90.

[22]Etheridge M A, Henley R W. Making models matter[C]//Abstracts of Geodynamics and Ore Deposits Conference. Australian Geodynamics Cooperative Research Centre, Ballarat, Victoria, 1997: 4-5.

[23]Slichter L B. The need of new philosophy of prospecting[J]. Mining Engineering,1960,12: 570-575.

[24]Liu Liang-ming, Peng Sheng-lin. Prediction of hidden ore bodies by synthesis of geological, geochemical and geophysical information based on dynamic modeling in Fenghuangshan ore field, Tongling district, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2004, 81: 81-98.

[25]Liu Liang-ming, Yang Gou-yuan, Peng Sheng-lin. Numerical modelling of coupled geodynamical processes and its role in facilitating predictive ore discovery: an example from Tongling, China[J]. Resources Geology, 2005, 55(1):21-31.

[26]Hobbs B E, Ord A, Archibald N J, et al. Geodynamic modelling as an exploration tool[C]//After 2000—the future of mining special conference publication proceedings. Sydney: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2000: 34 - 49.

[27]Schaubs P, Ramling T, Dugdale J, et al. Using numerical deformation-fluid-flow simulation to understand and target gold mineralization around basalt domes in the Stawell Zone, Central Victoria, Australia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89: 351-354.

[28]D′ercole C, Groves D I, Knox-Robinson M. Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralization[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2000, 47: 913-927.

[29]Sprague K, de Kemp E, Wong W, et al. Spatial targeting using queries in a 3-D GIS environment with application to mineral exploration[J]. Computers and Geosciences, 2004, 32: 369-418.

[30]Broadbent G C, Andrews S J, Kelso I. A decade of new ideas: geology and exploration history of the Century Zn-Pb-Ag deposit, Northwestern Queensland, Australia[J]. Society of Economic Geologists Special Publication,2002, 9:119-140.

[31]Paterson N R. Geophysical developments and mine discoveries in the 20th century[J]. The Lead Edge,2003, 22(6): 558-561.

[32]Thompson J F H. The changing face of mineral exploration—a people story[C]//Andrew C J. Digging Deeper: Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting. Dublin: Irish Association for Economic Geology, 2007:51-54.

[33]Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. Economic Geology, 1970, 65:373-408.

[34]Lowell J D. Discovery of the La Escondida orebody[J]. Economic Geology Monograph,1991, (8): 300-313.

[35]White N C. Economic geology research and teaching in Asia — what is needed? what can we do?[C]//Andrew C J. Digging Deeper: Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting. Dublin: Irish Association for Economic Geology, 2007:75-78.

① 刘亮明.铜山矿田找矿前景分析及预测研究技术方案.铜陵有色金属(集团)公司委托项目研究报告,2001.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net