

doi: 10.12029/gc20160509

王登红. 对华南矿产资源深部探测若干问题的探讨——以若干超大型矿床深部找矿突破为例 [J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1585–1598.

Wang Denghong. A discussion on some problems concerning deep exploration of mineral resources in South China[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1585–1598(in Chinese with English abstract).

对华南矿产资源深部探测若干问题的探讨 ——以若干超大型矿床深部找矿突破为例

王登红

(国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:华南是中国近百年内矿产资源开发强度比较高的地区,形成了赣南钨矿、桂北锡矿、湘南铅锌矿等一大批老矿山。随着已探明资源的快速消耗,“深地”探测、深部找矿已是大势所趋。基于对华南不同地区、不同类型、不同企业矿山生产情况的了解,文章对矿产资源的深部探测问题,从探测的目标、理论、深度、程度、效益等诸方面加以探讨,认为:当前技术经济条件下,①坚持国家目标、科学目标和人才目标相结合的原则,宜灵活运用各种成矿理论,充分发挥“五层楼+地下室”等勘查模型的作用,把“层状含矿地质体”作为矿产资源深部探测的主要目标;②坚持从已知到未知和由浅入深的原则,重点在老矿区和浅部地质与矿产资源比较清楚的工作程度比较高的地区优先部署工作,既可以降低风险又可以满足现实需要;③宜坚持点面结合的原则,2000 m、3000 m 乃至 5000 m 深钻的部署,宜相应地部署在矿床、矿田和矿集区工作程度最高的地区,达到立体探测和“透明化”的目的;④坚持综合评价的原则,综合调查、综合评价、综合研究,学科也要综合,避免单打一,避免单学科冒进。以问题为导向,具体问题具体分析,注意合理的探测深度和工作程度,抓住关键,有针对性地布置工作量,才能取得成效。

关键词:深地探测;矿产资源;综合探测;深部找矿;华南

中图分类号:P634.1;P612 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)05-1585-14

A discussion on some problems concerning deep exploration of mineral resources in South China

WANG Deng-hong

(Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resources Assessment of Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on geological research on different regions of South China, different types of mineral deposits and different kinds

收稿日期:2016-04-12;改回日期:2016-06-22

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项计划“南岭东段九龙脑矿田成矿规律与深部找矿示范项目”(201411050)、中国地质调查局“中国矿产地质与区域成矿规律综合研究(中国矿产地质志)项目(1212011220369)”、“华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查项目”(DD20160056)联合资助。

作者简介:王登红,男,1967年生,研究员,博士生导师,主要从事矿产资源研究;E-mail:wangdenghong@sina.com。

of production mine enterprises from 1988 to 2016, the author tentatively discusses some key problems concerning deep exploration of mineral resources in such aspects as the target, the theory, the depth, the extent and the efficiency. Under the current technical and economic conditions, the author puts forward some suggestions: firstly, considering the national goal, scientific objectives and personnel, it is necessary to be flexible in the use of various metallogenic theories, to fully use the "Five levels + Basement" exploration model, and to take the potential bedded orebody and layered ore-bearing geological body as the main target in deep exploration of mineral resources. Secondly, according to the principle 'from the known to the unknown and from the shallow to the deep', it is necessary to work in the mining areas especially in the orefields and/or ore concentration areas with relatively high degree of shallow geological work and relatively clear understanding of metallogeny, which can reduce the risk and can meet the practical needs. Thirdly, it is necessary to adhere to the principle that the 2000 m, 3000 m 5000 m deep drilling should be deployed in ore deposits, orefields and ore-concentration areas which have the highest degree of favorable geology and prospect so as to achieve the purpose of exploration. Fourthly, it is necessary to adhere to the principle of comprehensive evaluation, comprehensive survey, comprehensive evaluation and comprehensive study, paying attention to the reasonable probing depth and seizing key problem of deep exploration, so as to avoid the rash advance based on single subject of rash. Only in this way can good results be achieved.

Key words: deep exploration; mineral resources; comprehensive exploration; deep prospecting; South China

About the author: WANG Deng-hong, born in 1967, senior researcher, supervisor of doctor candidates, mainly engages in research on mineral deposits; E-mail: wangdenghong@sina.com.

Fund support: Supported by Public Welfare Industry Scientific Research Projects of Ministry of Land and Resources "Metallogeny and Prospecting of Mineral Resources into Depth in the Jiulongnao Ore Field in Eastern Nanling" (No. 201411050), and China Geological Survey Program (No. 1212011220369, No. DD20160056).

随着人类社会的发展,地表的矿产资源被越来越多地开采,世界上的主要矿业大国纷纷瞄准了“深部”矿产资源,中国也在“十三五”期间启动了国家科技重点专项——“深地资源”探测计划。华南是我国矿产资源的“老基地”,同样面临着深部找矿和深部采矿的现实问题。在华南开展深部探测、寻找深部的矿产资源,不但有助于解决矿山资源的接替问题,也是科技创新的必然需要。但是,随着找矿难度的日益加大,如何从找矿历史中总结经验教训并运用现代成矿理论指导深部找矿,也是现实问题。同时,在深部探测的同时,如何寻找浅部矿床,也是不可避免、对立统一的辩证问题。对于这些问题的探讨,仁者见仁,智者见智。本文仅从个人经历和几个典型矿床勘探历史的角度,作一“举例说明”。笔者自1988年在湖南郴州的柿竹园—野鸡尾钨锡矿区参加野外生产实习(完成大学本科毕业生产设计)起,陆陆续续对华南的300多处典型矿床和非典型矿床开展了调查、研究,包括湖南的柿竹园钨锡钼铋多金属矿床、广西的大厂锡多金属矿床(完成笔者的硕士学位论文^[1])、江西的朱溪钨铜矿、广东的大宝山铁铜多金属矿和凡口铅锌矿、云南的个旧锡多金属矿以及赣南粤北的离子吸附型稀土矿等等,也出版、发表了一些成果^[2-27],但更多的是

遇到了许多未解之谜。比如,仅就一些笔者去过的世界著名的矿产地而言,既有“深部”的,如广西大厂的100号矿体和105号矿体、湖南的黄沙坪铅锌矿的开采深度已经距离地面1000 m以下;也有“浅部”的,如赣南新发现的葛藤嘴离子吸附型稀土矿、闽西新发现的大坪岩体型铌钽矿、粤北的禾尚田钨锡稀土多金属矿床。实际上,川西的甲基卡超大型锂辉石矿床也是草皮覆盖下的近“表露”矿。这就使得笔者不免设问,是不是非得“深部找矿”?哪些矿产应该到深部去找、哪些则未必?哪些地区必然要到深部去找、哪些则未必?本文从先后遇到的具体问题入手,结合典型矿床的研究,探讨与华南深部探测、深部找矿密切相关的一些问题,包括理论问题(从野鸡尾到柿竹园)、深度问题(从大厂到芙蓉)、程度问题(从淘锡坑到离子吸附型稀土矿)、目标问题(区域成矿规律)和效益问题(五层楼+地下室模型)。

1 深部探测的理论问题

根据什么样的理论(主要是成矿理论)来开展深部探测,一直是有争议的。笔者曾撰文认为,并不需要专门的、特定的成矿理论来指导深部找矿^[12],只要是切合实际的,不管是新理论还是“老理论”

(如地洼学说)^[28],不管是国内的理论(如“风化壳离子吸附型稀土矿成矿理论”、“三源成矿理论”)^[29]还是国外引进的理论(如板块构造成矿理论),也不管是针对内生矿床的还是针对外生矿床,都可以采用,但必须具体问题具体分析,不能生搬硬套。以湖南郴州的东坡矿田为例。东坡矿田的找矿工作起起伏伏,深部探测与成矿理论尤其是矽卡岩矿床成矿理论和成矿系列理论的运用是分不开的。笔者1988年7—9月在湖南郴州东坡矿田,在王润民教授等的带领下,完成了大学本科“找矿普查与勘探”专业的生产实习与毕业设计工作。东坡矿田举世闻名,以柿竹园钨锡钼铋超大型矿床名气最大,在2012年之前一直是世界上最大的钨矿床。实际上,除了柿竹园矿床之外,紧挨着的还有一个野鸡尾矿床,其锡的储量也达到大型规模,而且其埋藏深度总体上比柿竹园还浅,是一个露头矿。从矿床的勘查历史看,尽管1967年就提交了《湖南郴县柿竹园钨、锡、钼、铋矿区详细勘探报告》,但矿并没有找完,1985年又提交了《湖南省郴县柿竹园钨、锡、钼、铋矿最终地质勘探报告》。据1967年报告^①,正式批准的可供利用工业+远景储量是62.49万t三氧化钨;据1985年报告^②,批准可供利用的三氧化钨储量70.5万t,18年间只增加了8万t。与此同时,野鸡尾一带的找矿工作也在进行,据1965年《郴县柿竹园-野鸡尾矿区铅锌最终勘探报告》,探明的伴生锡只有2681t,但1986年《郴县野鸡尾矿区锡多金属矿初步勘探地质报告》则探明锡11.3万t,增加了几十倍^[30]。这说明,一方面,从野鸡尾的石英脉型到柿竹园的矽卡岩型再到深部可能存在复杂矽卡岩、甚至“矽卡岩+云英岩”理论的提出,对于柿竹园深部找矿突破具有理论上的决定性指导意义;另一方面,在完成深部勘探之后(或者同时),深入认识成矿规律,根据成矿系列理论,完善矿化分带,重新对浅部矿体进行评价,也是十分重要的。西藏甲玛超大型铜多金属矿床,也是在完成了对深部层状矽卡岩型矿体的勘探评价之后,再回头评价浅部角岩中的钼矿体的^[16,17]。

东坡矿田的勘查过程基本上是先野鸡尾后柿竹园再“野鸡尾+柿竹园”,西藏甲玛也是先深部层

状矽卡岩再浅部角岩。诸如此类的众多实例,说明矿产资源的深部探测,需要理论指导,而不是盲目的,但不同地区宜采用什么样的理论,需要具体问题具体分析。目前来说,矿床的成矿系列理论尤其是由成矿系列理论衍生出来的“全位成矿+缺位找矿”的理念是值得借鉴的,而“五层楼+地下室”模型乃至“反‘五层楼+地下室’模型”(即“地下室+五层楼”模型)也是众多找矿勘查模型中比较适合于华南的^[14,31]。这一理念于“十二五”期间在华南深部探测项目实施过程中,通过盘古山—黄沙2000m深钻(编号SP-NLSD-2,终孔深度2006m)和于都—赣县3000m深钻(编号SP-NLSD-1,终孔深度2967.83m)的成功实施也得到了验证^[32,33]。

2 深部探测的深度问题

赣南2000m和3000m两个深孔的成功,说明寻找深部矿产资源是有良好前景的;但广西大厂、湖南王家坊等地1700~2000m深度的若干个深孔却没有达到理想的效果,也说明深部探测是有风险的。以广西大厂超大型锡多金属矿田为例。1990年6—9月,笔者在导师陈毓川研究员的指导下,开展了对位于广西西北部丹池成矿带的大厂锡多金属矿床的研究工作,并于1992年提交硕士论文^[1]。期间最大的收获,即是从湖南柿竹园的地表露头矿、浅部矿转移到了距离地表700m以下的“深部”矿,对成矿机制和采矿方式有了新的认识,“五层楼+地下室”即是其中之一。目前所谓的“地下室”,即是当时通称的“层状”矿体,而“五层楼”即为“脉状”矿体。“五层楼”模式在赣南粤北的石英脉型钨矿区普遍适用,但很少有人应用到锡多金属矿区,而大厂的铜坑—长坡矿区,恰恰也是“五层楼+地下室”,长坡以线脉带、大脉带发育为特点而铜坑则是91号和92号层状、似层状矿体,二者具有一定的可比性,但围岩条件不同。深部探测的关键是“层状”矿体。层状矿体不但规模巨大,还便于大规模的机械化采矿,也便于利用人工地震等地球物理探测手段来发现它。基于此,在“十二五”期间,通过科技支撑、危机矿山和深部探测等项目的实践,把“层状矿体”作为深部探测的重点是符合实际

① 龚静夫,等. 湖南郴县柿竹园钨、锡、钼、铋矿区详细勘探报告[R]. 1967.

② 艾上铮,修道芳,刘盛镇,等. 湖南省郴县柿竹园钨、锡、钼、铋矿最终地质勘探报告[R]. 1985.

的。大厂深部95号和96号大型、超大型锌多金属矿体的发现即是如此。但是,对于矿山而言,并非勘探深度越大越好。2001年的南丹7·17矿难,就是因为非法采矿者自下而上先盗采深部的105号矿体,导致其上的100号矿体等浅部采矿坑道及岩溶坑道中的水下灌,多少人无法逃脱。近年来,广西华锡集团在大厂矿田施工了ZK39-1和ZK31-1等深度超过1500 m的深孔,但效果并不理想。2008年4月之前的华南最深固体矿产探测孔是位于湖南郴州坪宝矿区的王家坊ZK003钻孔,深度达1708.30 m,遗憾的是,地表“套合得很好”的化探异常并没有得到验证,深部也没有打到矿体。因此,采矿、探矿乃至深部探测均需要遵循“由浅入深”的基本原则,尽管局部或偶尔也可施行“超深钻”作为“战略侦察”。

勘探深度是一个重要概念,不但是矿床勘探过程中必须考虑的,也是深部探测所需要注意的;不但涉及到投入的成本问题,更关系到对深部资源的潜力评价。前苏联在穆龙套矿区部署了一个超深钻,为该矿区发展成为世界上最大的金矿之一发挥了重要作用。在中国,也有不少矿床在近年来取得了深部找矿的新进展、新突破,实际上也跟中国对于勘探深度的相关要求有关。一般来说,矿床的勘探深度取决于开采深度,而开采深度又决定于矿床的规模、埋藏深度、矿床地质构造和矿区水文地质与工程地质的复杂程度,以及一定社会经济条件下采矿技术的水平和经济的合理性,故应在矿床地质特点的基础上结合开采的技术经济条件等因素综合考虑。对于矿体延深不大的矿床,最好一次勘探完毕;对延深很大的矿床,其勘探深度一般在400~600 m,在此深度以下,只需打少量深钻,控制矿体远景,为矿山总体规划提供资料即可(侯德义主编,1984)^[36]。对于埋藏较深的盲矿体,其勘探深度可根据国家急需情况,由上级机关与工业部门具体研究确定。当然,有时候也跟一些特殊情况有关,比如,曾经是全国最大铅锌矿的青海大柴旦锡铁山铅锌矿1958年的勘探深度仅仅350 m,远没有圈闭矿体,只是因为祁连山发现大型铜矿,锡铁山地质队受命转战祁连山,致使矿区勘探工作停顿,并不是说350 m以下就没有矿了。

那么,当前经济技术条件下,什么样的勘探深度、探测深度是合理的呢?对探测的深度问题,学

术界和非学术界存在不同的看法。对于科学研究来说,探测深度越大,获取信息的可能性也越大;但对项目或工程的经济评价来说,则需要考虑成本问题。即,探测到多少米深度才是合适的呢?如何既要经得起经费、人员和技术的“折腾”,又能满足科学家和社会大众探索地壳深部奥秘的“好奇心”呢?这要具体问题具体分析,不能一概而论。不同的地质条件、不同的探测目的、不同的资助强度、不同的专家团队,都是影响探测深度的关键因素。鉴于需要深部探测的矿区很多,而深部探测的经费投入往往又比较大,华南地区的一般探测深度不宜超过现有最大探测深部的一倍。如果深度过大,无论是地球物理的方法还是地球化学的办法,不但得不到钻探、坑探工程的验证,还会因为“多解性”而起不到应有的作用,造成浪费。当然,不同矿区(或探测区)的具体地质情况是不同的,需要区别对待。比如,在赣南于都-赣县矿集区的银坑矿区之所以部署3000 m深钻(SP-NLSD-1孔)而在盘古山-黄沙矿田部署2000 m深钻(SP-NLSD-2孔),跟银坑矿区的特殊构造背景有关,尤其是在存在陡倾斜(高角度)逆冲断层的情况下,不妨加大探测深度,查明构造格局,回头再来探测浅部的矿化情况。2013年以来,银坑矿区通过整装勘查,查明的铅锌银金矿产资源达到了大型以上的规模,还发现了铀矿化,但没有揭露到隐伏岩体(说明隐伏岩体在孔址的埋深要大于3000 m),钨锡矿也有待于进一步探测。盘古山矿区如果直接设计3000 m超深钻的话,则可能一半以上的工作量要浪费在花岗岩岩体内部(SP-NLSD-2孔见到岩体的深度是1287.86 m)^[37]。因此,实践表明,探测的深度需要慎重对待,需要基于扎实而循序渐进的基础地质工作程度。实际上,深部矿产资源的密集程度和浅部总体上是一致的,地表的矿相当一部分是深部矿体剥蚀出来的,深部的矿床也可能是原先的地表沉积矿床被深埋了的,因此其找到矿的几率在理论上应该是没有太大的差别的,但找矿的成本是明显不同的。

3 深部探测的目标问题

深部探测是一项综合工程,不同的深部探测工作(项目)各有侧重,有的以获取地球不同层圈结构的信息为目标,有的以提升钻探技术能力和装备水

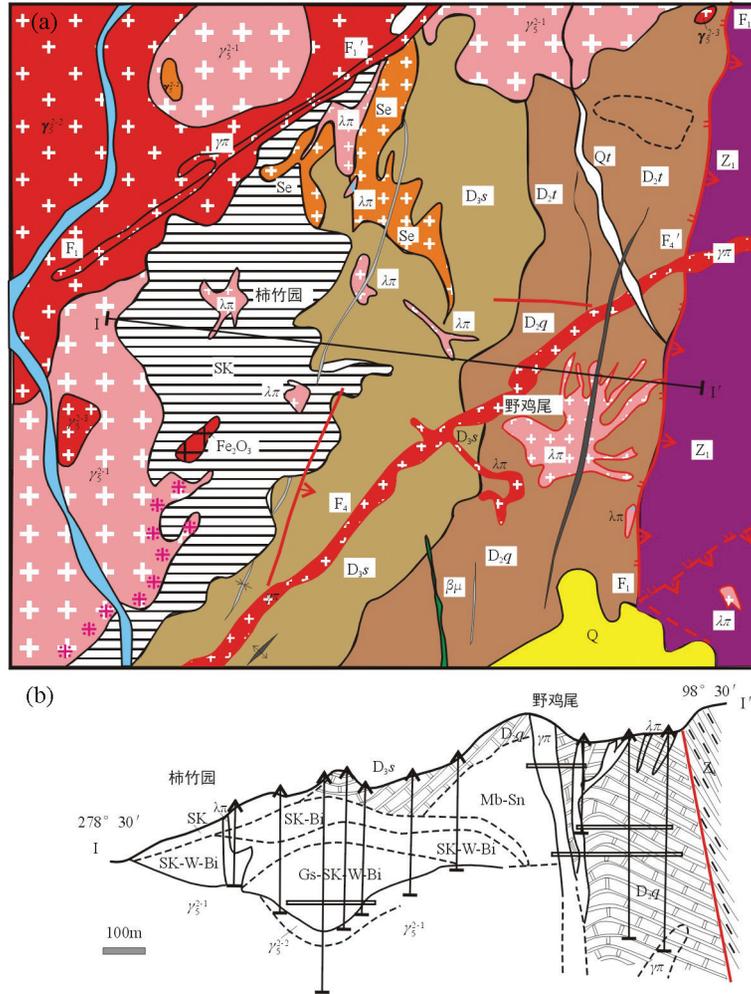


图1 湖南郴州柿竹园—野鸡尾矿区地质简图(据文献[34]修改)

Q—第四系; D_{3s} —余田桥组大理岩; D_{2q} —棋梓桥组白云质大理岩; D_{2t} —跳马涧组砂岩; Z_1 —震旦系石英砂岩及板岩; γ_5^{2-1} —细粒斑状黑云母花岗岩; γ_5^{2-2} —中粗粒黑云母花岗岩; γ_5^{2-3} —细粒(少斑)二云母花岗岩; $\lambda\pi$ —花岗斑岩; $\lambda\pi$ —石英斑岩(属 γ_5^{2-1} 浅成相); $\beta\mu$ —辉绿(玢)岩; Se —绢云母岩; SK —矽卡岩; $Mb-Sn$ —大理岩化锡矿带; $SK-Bi$ —矽卡岩铋矿带; $SK-W-Bi$ —矽卡岩钨铋矿带; $Gs-SK-W-Bi$ —网脉状云英岩穿插的矽卡岩钨铋矿带; *—云英岩化; Qt —石英脉; Mt —磁铁矿。虚线为隐伏地质体界线(由钻孔控制)

Fig. 1 Geological sketch map of the Shizhuyuan-Yejiwei ore district in Chenzhou, Hunan (after [34])

Q—Quaternary; D_{3s} —Marble of Shetianqiao Formation; D_{2q} —Dolomitic marble of Qiziqiao Formation; D_{2t} —Sandstone of Tiaomajian Formation; Z_1 —Sinian quartz sandstone and slate; γ_5^{2-1} —Fine grained porphyritic biotite granite; γ_5^{2-2} —Coarse grained biotite granite; γ_5^{2-3} —Fine (less spot) two mica granite granite porphyry; $\lambda\pi$ —Quartz porphyry (genus hypabyssal γ_5^{2-1}); $\beta\mu$ —Diabase (porphyry) rocks; Se —Sericite rock; SK —Skarn; $Mb-Sn$ —Marble of tin ore belt; $SK-Bi$ —Skarn bismuth ore belt; $SK-W-Bi$ —Skarn tungsten bismuth ore belt; $Gs-SK-W-Bi$ —Stockwork greisen with skarn tungsten bismuth ore belt; *—Greisenized; Qt —Quartz veins; Mt —Magnetite. The dotted line is the boundary of the hidden geological body (controlled by the borehole)

平为目标,有的以锻炼队伍培养人才为目标。对于矿产资源的深部探测来说,则以发现矿产资源为首要目标,即通过提高深部探测的技术能力、通过查明地壳一定深度的地质结构、通过查明一定区域内的成矿条件,来实现发现矿床、矿体的直接目的,进而为延长既有矿山的的服务年限和/或新矿山基地的

建立提供资源保障。那么,华南地区矿产资源的深部探测,当前的工作程度和技术经济条件下,宜围绕什么样的目标呢?是以发现矿体为主导还是以提供探测技术能力为主导?二者能否兼顾?如何兼顾?

根据2005—2015年,笔者承担危机矿山、科技

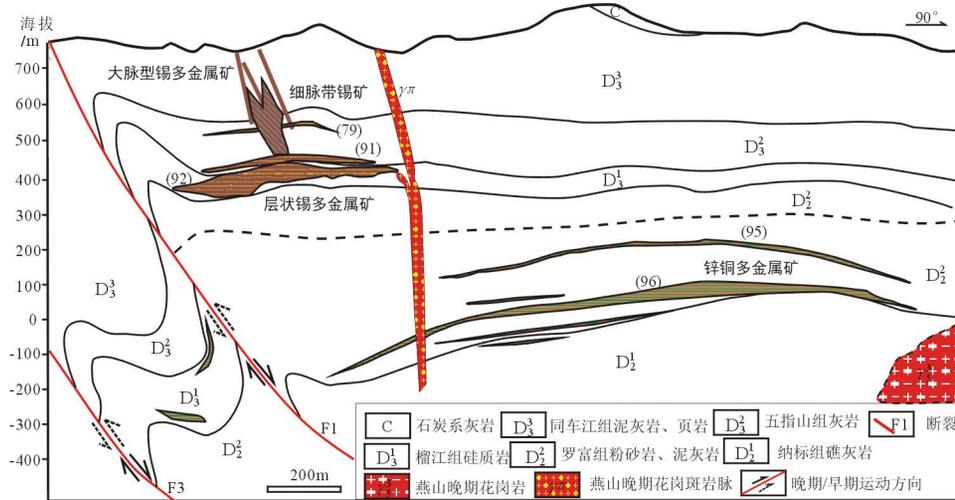


图2 广西大厂锡多金属矿床地质剖面简图(转引自文献[35])

Fig. 2 Geological profile of the Dachang tin-polymetallic ore deposit in Guangxi(after[35])

支撑和深部探测若干项目的经验,华南地区不但矿产资源丰富多采,地质作用也十分复杂,要想把华南(哪怕是华南的一个小区域)的地壳结构“透明化”,为时尚早,只能秉承从已知到未知、由浅入深的原则来有序推进,才能达到既发现矿体又提升能力等目标。实际上,矿体就是矿产资源方面深部探测的直接目标,但不同矿床类型、不同成矿条件、不同经济价值的矿体,是需要通过不同的方法手段和技术路线来“探测”的,并不存在一个模式就可包打天下的情况。比如,众所周知的“五层楼”模式,是华南个别钨矿采矿和勘探过程中总结出来的经验,后来经过普遍性检查,发现很多“石英脉型黑钨矿”矿床都有这种特点,因而上升为理论,并推广到华南其他地区深部找矿的工作中。这一模式的核心是指出了石英脉型黑钨矿的垂向分带性和工业价值的分带性,实际上也就是矿山、矿床尺度“深部探测”的理论依据。但是,越来越多的事实也表明,在脉状矿体出现垂向“五层楼”分带的同时,其深部也可能出现水平方向的层状矿体,而且规模更大、经济价值更高、规模化开采和可集约化利用程度更高,比如广西大厂锡多金属矿床深部的91号、92号、95号、96号层状矿体,江西茅坪钨矿深部的似层状云英岩型矿体、八仙脑钨矿产于层间破碎带中的似层状矿体,等等。那么,此类巨大的层状、似层状矿体是否属于“五层楼”呢?或者叫“六层楼”、“七层楼”?或者叫“第二找矿空间”?为了便于理解和深部探测工作

的展开,我们称之为“地下室”^[14,31]。尽管不太严谨,但“五层楼+地下室”的勘查模型已经得以推广。需要进一步指出的是,该模型当初也是为了“深部探测”而特意加以强调的。江西、湖南、广东等地的地质人员(包括矿山地质人员)认为,“五层楼”模式已经很好地总结了华南石英脉型钨矿的特点,地质队和矿山可以“顺藤摸瓜”地找矿,效果明显,无需专门提出一个“地下室”的说法。但是,无论是广西的大厂还是湖南的柿竹园,却与传统的“五层楼”概念差别较大。在柿竹园,在垂直方向上,由上而下从围岩往岩体依次出现网脉状大理岩型锡矿、矽卡岩型钨铋矿、云英岩网脉-矽卡岩型钨铋矿、云英岩型钨铋矿,分别称为I、II、III、IV矿带,总称“四层楼”^[34]。但这矽卡岩的“四层楼”分带与石英脉型的“五层楼”差别很大(相距不远的瑶岗仙钨矿则是典型的“五层楼”),总体上以透镜状、似层状的形态出现,实际相当于目前所称的“地下室”而不是石英脉的“五层楼”。为了便于区分脉状矿体和层状矿脉,有必要分别用形象的名词来表达,因此采用了“五层楼+地下室”的表述方式(图3)。除了地质上的区别,在深部探测的技术方法使用方面也是有必要把“五层楼”与“地下室”区分开的。因为,脉状的“五层楼”矿,由于“异常”范围窄小、产状直立,要想通过物探或者直接通过钻探的办法来直接控制(找到矿),很不容易;而层状矿体无论是钻探还是物探,相对容易发现,即便是埋藏深度大一些也影响不大。尤

编号	部位	带名	深度/m	工业价值	形态示意图	含脉密度(条/m)	含脉率%	脉带宽 度/m	单脉厚 (脉幅)/m	主要矿物组合
I	顶部	微脉(矿化标志带)	80~100	无		0.5~5	0.1~3	20~200	0.001~0.01	锡石-黑钨矿-白云母-电气石
II	上部	密集带	100~250	大		5~20	6~50	10~50	0.02~0.10	黑钨矿-锡石-绿柱石-黄铜矿-黄铁矿-白云母等
III	中部	密集带(细脉-大脉混合带)	40~500	巨大		1~8	10~70	5~30	0.05~0.5	黑钨矿-白钨矿-锡石-黄铜矿-黄铁矿-方铅矿-闪锌矿-白云母等。组分复杂,矿化重叠
IV	下部	大脉带	100~800	大		0.03~2	10~50		0.2~2	黑钨矿-黄铜矿-黄铁矿-方铅矿-辉钼矿等
	深部	地下室	不固定	大		钨锡和/或贵金属、贵金属沿断裂破碎带充填交代; 钨锡铋钼矿化聚集于岩体顶部云英岩中; 外接触带沿层交代; 多呈层状似层状				黑钨矿-白钨矿-黄铜矿-闪锌矿-方铅矿-辉钼矿-铋钼-金银等
V	根部	大脉-巨脉-尖灭带	50~800	小-无	0.05~0.1			2~0.05	黑钨矿-辉钼矿-黄铁矿-碳酸盐	

图3 “五层楼+地下室”勘查模型示意图
Fig.3 Sketch map of prospecting model of “Five levels + Basement”

其是人工地震等新方法在金属矿床勘查中的应用,需要有一个“水平”的反射界面才能达到较好的深部探测效果。也就是说,“地下室”的存在与否,与深部探测地球物理和深部钻探的工作部署,关系甚密。

总之,“五层楼+地下室”勘查模型的提出,既是历代地质工作者长期实践经验的概括和成矿规律的总结,也为华南地区矿产资源深部探测工作的部署提供了依据,兼顾了地质与物探、钻探。物探工作和钻探工作宜优先部署在深部存在“地下室”的地区,而“地下室”的表现形式也是多种多样的,既有沉积矿床,也有层间破碎带中的交代-充填矿床,还可以是隐伏花岗岩体顶部的透镜状、似层状的“云英岩”矿体。这些矿体的体积更大、产状相对稳定,比体积小、产状变化大的脉状矿体更容易被物探工作发现、被钻孔钻遇,工业价值也往往更大。因此,当前技术经济条件下,宜把“地下室”作为深部矿产资源探测的主要目标。

4 深部探测的程度问题

近年来,国际地球科学界迎来了深部探测的热潮,甚至要把地球“透明化”,在澳大利亚称为“玻璃地球”^[38]。在人们仰望遥远星空的同时,感叹上天容易入地难,脚下的地壳中究竟埋藏着什么样的“宝贝”的确令人心动。那么,是不是在近期内就要

实现3000 m深度的“透明化”,哪些地区需要透明化,透明化到什么程度?这是深部探测工作的程度问题。任何工作都有一个程度问题,地质工作的程度问题同样至关重要,不同的历史阶段、不同的工作目的、不同的经济技术条件,都是影响探测工作程度的重要因素。

对于矿产资源的深部探测工作来说,不妨参考矿床的勘探程度。在矿床勘探工作中,把矿床地质勘探的工作程度称为矿床勘探研究程度,简称勘探程度,是指经过地质勘探工作之后,对整个矿床的地质及技术经济特点研究的详细程度。其基本内容包括:对矿床地质条件、矿体赋存规律、矿体外部形态与内部结构、矿石物质成分和选冶性能、共生和伴生矿产的综合评价、矿床开采技术条件及矿区水文地质条件等方面的勘探和研究程度。“勘探施工”的体力劳动与“综合研究”的脑力劳动是同等重要的。那种只强调以储量级别高低和高级储量比例大小评定勘探程度的做法,不仅是概念上的混淆,而且会产生不良影响。合理的勘探程度取决于国家对矿产的急需程度、矿山建设的特点和建设设计的要求,矿床地质条件的复杂性以及矿区的自然经济地理条件等因素。在一般情况下,主要是根据矿山建设的基本需要,结合矿床地质实际、勘探技术与方法的可能性,在经济合理的前提下,综合研究确

定。当前还特别强调“绿色勘探”和资源开发的环境保护效应,为了探求资源而破坏环境的作法是得不偿失的。在华南地区,因为水文地质条件和工程地质条件复杂而停止勘探的矿床,不在少数,比如湘南的后江桥铅锌矿曾经因为地下涌水而停勘。

同样,对于“深地资源”的探测,也要注意“探测程度”。一方面,各种技术方法手段的使用、大量人财物的投入,可以获得海量的数据,但如果这些资料仅仅是学科孤立的,尽管可以发表海量的学术论文,培训一大批博士硕士,但仍然会盲人摸象,或者是公说公有理婆说婆有理,难以实现国家目标或者解决矿山实际问题;另一方面,在真正需要深部探测的地区,因为国家、企业财力有限,难以全面开展“深地探测”,对矿区深部地质情况了解不充分,常常导致矿山生产出现安全隐患,更谈不上查明深部资源,即便是采矿之后哪些地方会出现“塌方”、“地陷”也不清楚。因此,好钢用在刀刃上,深地资源探测更需要把好项目设立在关键性矿山和重要矿集区。

值得指出的是,并不是老矿山、老矿田、老成矿区带的工作程度就一定高。比如,中国目前最深的取样钻之一(CCSD-1)设立在江苏东海的榴辉岩矿区(地表有毛北金红石矿床),而不是在长江中下游地区。另一方面,位于南京市郊区的栖霞山铅锌矿,却没有得到深部探测的投入。在栖霞山矿区(图4),中生界与古生界之间的不整合面上赋存有硫铁矿,表明成矿作用发生在燕山期(甚至更新)。铅锌矿主要赋存在 F_2 及 F_2' 两条逆断层中,但 F_3 、尤其是 F_3 的深部也是不可忽视的。因此,本文认为,位于江苏南京市这样“大城市”的栖霞山铅锌矿也是值得开展深部探测的,一方面可以为矿山安全生产提供深部地质信息,另一方面也完全可以为增加资源储量提供科学依据。

5 深部探测的“技巧”问题

寻找深部的矿产资源,其难度无疑大于地表。因此,实际工作中,总是会面临“技巧”问题,即能不能既“稳准狠”又“短平快”,在最短的时间内、以最小的成本发现最大的矿体。这是理想主义的想法,但也是现实问题。笔者也始终在思考,有没有这样的可能:形成于深部的矿床,不需要通过人类的劳动而自己就跑到浅部,甚至地表了呢?肯定有!推覆

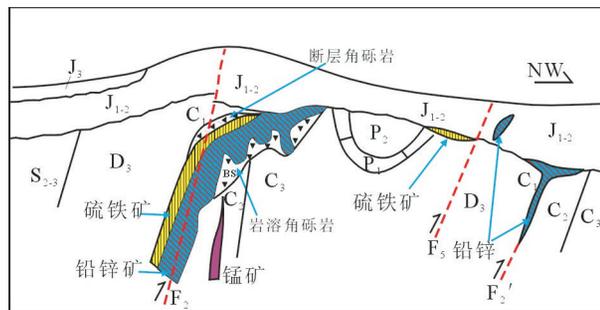


图4 江苏栖霞山铅锌矿地质略图及综合剖面示意图^[9]
(原图无比例尺)

Fig. 4 Generalized section of the Qixiashan Pb-Zn deposit in Jiangsu

构造就是地质神力之一。当然,其他形式的褶皱和断层、侵入和切割、风化和剥蚀等地质作用,也可以帮助人们发现、开采原本埋藏于深部的矿床。此处强调一下推覆构造对于深部探测的重要性。

无论是广西大厂还是湖南柿竹园,都存在推覆构造(图1、图2)。推覆构造对于成矿的意义是多方面的,但当寒武系、前寒武系的浅变质碎屑岩推覆到古生界的碳酸盐岩地层之上时,尤其值得注意。柿竹园矿区东部震旦系的石英砂岩及板岩大角度逆冲到泥盆系棋梓桥组白云质大理岩之上,因此,野鸡尾的深部仍然具有找矿潜力,可以布设深部钻探。但是, F_1 断层的深部倾角究竟多大?有没有变缓的可能性?在什么样的深部发生产状的变化?隐伏岩体的产状如何?这些就需要通过深部探测工作来解决。再比如,目前世界上最大的钨矿——江西景德镇朱溪钨铜矿的形成与被发现,也跟推覆构造密切相关。图5表明,朱溪矿区直接的容矿围岩是古生界的碳酸盐岩地层,其在整个矿区的出露宽度不超过2 km,但钻探结果表明其延深大于2 km。即,含矿地质体是夹持在元古界双桥山群(Pt₃Sh)之间的,东南侧的双桥山群作为矿床的底板,而西北侧的双桥山群则是盖层。西北侧的双桥山群推覆在古生界碳酸盐岩之上,起到了盖层、遮挡层的作用,对燕山晚期成矿阶段(据刘善宝面告,成矿岩体侵位于160~147 Ma,白钨矿形成于146 Ma,邻区钨钼矿中辉钼矿的Re-Os等时线年龄为(162±2) Ma)成矿流体的超大规模聚集成矿起到了“圈闭”作用。这也是朱溪这一矿床规模之所以巨大的关键性控矿因素之一。因此,推覆构造体现

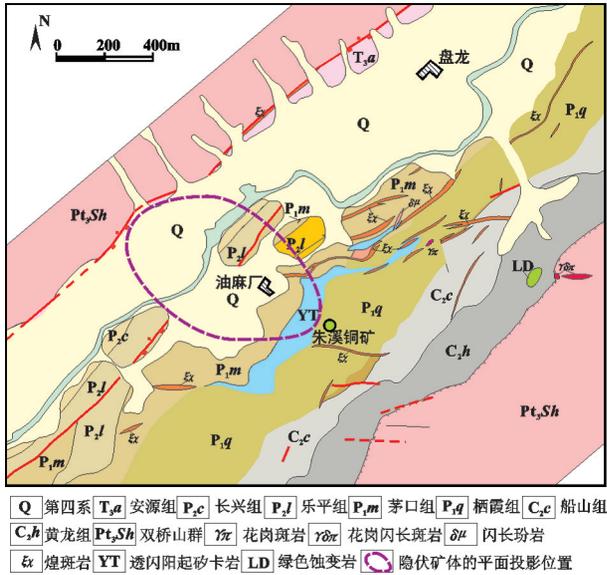


图5 江西景德镇朱溪铜钨矿地质图
(简化自文献[40])

Fig.5 Geological map of the Zhuxi copper-tungsten mine
(modified after references[40])

了“深与浅”的对立统一,可以作为寻找深部矿产资源的“窍门”之一。华南的推覆构造在众多矿区都有体现,此不赘述。

如果说对“推覆构造”的深入研究是理论上的“技巧”之外,在深部探测的方法应用上也有很多“技巧”。此处说的“技巧”也可以理解为“投机取巧”,投的是“地质之机”(作窍门、命门、要害、要点、关键解),取的“方法之巧”(作针对性、实用性、有效性解)。不是说每一个工作区都需要使用各种各样的物探、化探、钻探手段,而是要“方法针对问题”;不是工作量第一,而是问题第一;不是技术优先而是实际需要。比如说,在石英脉型黑钨矿发育地区,直接使用钻探,哪怕是2000 m、3000 m的深钻,工作量再大,漏掉矿的可能性仍然很大,因为钻孔是直立的、矿脉也是直立的,二者“擦肩而过”的可能性很大(也正因为如此,一般采用坑探)。因此,深钻要尽量部署在“地下室”发育的地方,也就是说前期的物探工作要尽可能地探测到“层状地质体”的存在,并判明其深度与产状;另一方面,一旦地质上发现了有利于成矿的层状地质体,无论是层间破碎带(包括推覆构造)还是岩体外接触带的沿层交代地质体(如广西大厂),都要尽可能地通过“物探定位、化探定性、钻探定量”的技术路线来达到深部

探测的目的。“物探定性”是通过物探手段初步查明异常的地质体是否存在、位于什么样的深度、具有什么样的形态;“化探定性”是通过“地气测量”、“汞气测量”、邻近钻孔的“原生晕测量”等手段,分析判断主矿种及其空间分带规律;“钻探定量”是通过实施钻探(包括坑内钻),控制异常地质体中元素或矿物的实际情况及其矿石量、品位、资源量等,以判断其经济价值,指导下一步工作。

6 深部探测的原则问题

2008—2013年,在由李廷栋和董树文负责的国家“深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)”中,设置了由常印佛和吕庆田负责的“深部矿产资源立体探测技术及试验研究(SinoProbe-03)”项目,矿产资源研究所等单位承担完成了“南岭成矿带地壳岩浆系统结构探测实验(SinoProbe-03-01)”课题的任务。笔者在主持横穿骑田岭岩体(南岭五岭之一,位于湖南南部的郴州市境内)的深部探测工作时,布设了从飞仙镇经黄沙坪穿骑田岭到白石渡的105 km长的综合探测剖面(简称为骑田岭剖面),开展了包括地质、地球物理、地球化学、放射性测量等不同学科18种手段的综合测量工作,其中实测地质剖面91 km(观测点178个,划分地质单元25个),高精度磁测105 km(10500个测点),人工地震49 km(数据采集点1012个),地气测量50 km(416个测点),分析测试了包括人工地震炮孔岩屑粉末在内的数千件样品的多元素含量,获得了一大批数据,发现了廖家湾等多处找到矿的可能性很大的异常,对于理解骑田岭岩体的成因,深化区域成矿规律,指导找矿工作部署都是十分有用的^[41]。期间也体会到,如果能遵循以下几条原则,对于矿产资源的深部探测是有好处的。

(1) 从已知到未知的原则

南岭是华南成矿省的主体,深部探测工作部署在什么地方、采用什么样的手段、达到什么样的目的,众说纷纭。经过专家们的认证,课题组确定以广西大厂矿田、湖南东坡一坪宝矿田、广东瑶岭矿田和赣南于都—赣县矿田为重点,分别代表桂北、湘南、粤北和赣南4个矿集区,可以总体上反映南岭的矿产资源总貌。限于经费,主要工作量投放在骑田岭剖面,但桂北大厂、粤北大宝山和赣南淘锡坑

等地均取得了不同程度的新进展,遵循的就是从已知到未知的原则。

(2)由浅入深的原则

由浅入深的原则实际上也是“从已知到未知”的原则,但也存在先发现深部矿体再回头勘查浅部矿体(补勘)的特殊情况,考虑到今后采矿工作“由浅入深”的大原则,专门强调“由浅入深”仍然是必要的。广西大厂是一个典型,该矿区已有千年以上的采矿历史。1955年1—3月,梁珍庭等地质前辈到矿区后,从地表出露的3条主要裂隙脉(即0、14、16号矿脉)入手,边勘探边总结成矿规律,“顺藤摸瓜”发现了91、92号层状、似层状矿体。切层的各类脉状矿体相当于“五层楼”,顺层的层状似层状矿体相当于“地下室”,后者的锡金属量超过前者的50倍。现在看来,如果当时直接打1500 m的深钻,也会打到浅部的矿体,但无疑要冒险,而冒险的结果很可能是“浅钻”的工作量也不给。另一方面,由浅入深的原则不但可降低风险,也有助于提高控制程度和质量。

(3)点面结合的原则

深部探测的最大意义就是以点带面,尤其是大型金属矿集区的深部。大型矿集区一般有100个以上的钻孔控制,钻探工作量在万米以上(如广西大厂1955—1959年的钻探工作是为31512 m,班加钻探21959 m;湖南柿竹园1963—1967年的钻探工作量15480 m,1980—1984年的钻探工作量是11452 m),但钻探深度一般不超过1000 m。因此,当一个矿区的探测程度达到“详查”、“勘探”的工作程度时,在数以百计的钻孔基础上,布设2000 m乃至3000 m深度的探测孔(或称之为“先导孔”、“探索孔”)是非常必要的,一方面直接探矿,再一方面是要了解该矿区的“立体成矿根据”,以便于分析该矿区的找矿前景,了解其资源潜力,甚至对产能规划都具有战略意义。因此,此处的以点带面实际上是以点带“体”,但深孔这个“点”具体部署在什么位置,则是“面中求点”。

(4)综合评价的原则

综合评价的原则至少包括两方面的含义,一是要加强对地质体的综合研究(尽可能查明各种物质组分及其含量,并运用大数据思维不漏掉任何有用信息^[26]),二是要加强对深部探测工作本身的经济评

价与技术效果评价。对资源的经济评价众所周知,但对于矿产资源调查项目或者工作本身也有个经济评价问题,对矿产资源深部探测工作自然也存在经济评价和综合效益问题。从找矿的角度,国家化了很多钱,投入大量的人财物,物探也好,化探也好,最终的结果可能只是一大堆文章报告,而不一定找得到矿,难以产生直接的社会经济效益。因此,找矿效果不佳的项目是没有“经济效益”的,投资人(无论是国家投资还是企业或者个人投资)都难以得到经济上的回报。如何两全其美?两全其美,即是在一定的历史时期,既能达到深部探测的科学目标,又能符合当时的社会经济和科学技术条件。具体来说,在给定了资金强度、设定了科学目标、既定了专家团队的情况下,如何通过科学部署,尽可能地实现多方目标的“共赢”,而这几个方面是否能够达到“共赢”则需要磨合。当经费总额和探测目标已经决定,选择工作团队至关重要;当工作团队和经费总额已经确定,选择合适的科学目标至关重要;当科学目标和专家团队已经明确,给予多大强度的资助也是一个关键问题。大科学家不一定化大钱才能出大成果,小科学家给大钱也不一定出成果。

笔者2009年11月4日,在湖南黄沙坪铅锌矿亲自参与了ZK12101的测井工作。该孔是坑内钻(20中段),距离地表约450 m,孔深800 m,相当于控制了距离地表1250 m的深度,因此,坑内钻测井也是深部探测的一种方式。测量的结果显示,矿体和磁、电异常对应得很好,地质编录与物探测井结果完全对应,更重要的是在终孔处出现了视极化率异常和磁异常(图6)。这说明,尽管钻孔本身在终孔处没有打到矿石,但其旁侧有可能存在矽卡岩型或热液沿花岗岩(底板)与灰岩接触带交代成因的热液矿石。2016年3月29日,笔者到武汉中心在宜昌秭归实施的页岩气项目“车页一井”钻探现场,听陈孝红研究员介绍的过程中,了解了该地区可能跟深部岩浆活动有关,因此建议采集气样,测定氦同位素组成,这对于分析气体的来源(壳源还是幔源、跟地幔柱有没有关系)具有十分重要的意义,对于分析构造演化、指出找矿方向也具有十分重要的参考价值。这是“综合评价”的典型实例,尽管页岩气属于“外生”矿产,但具有战略意义的³He却主要是内

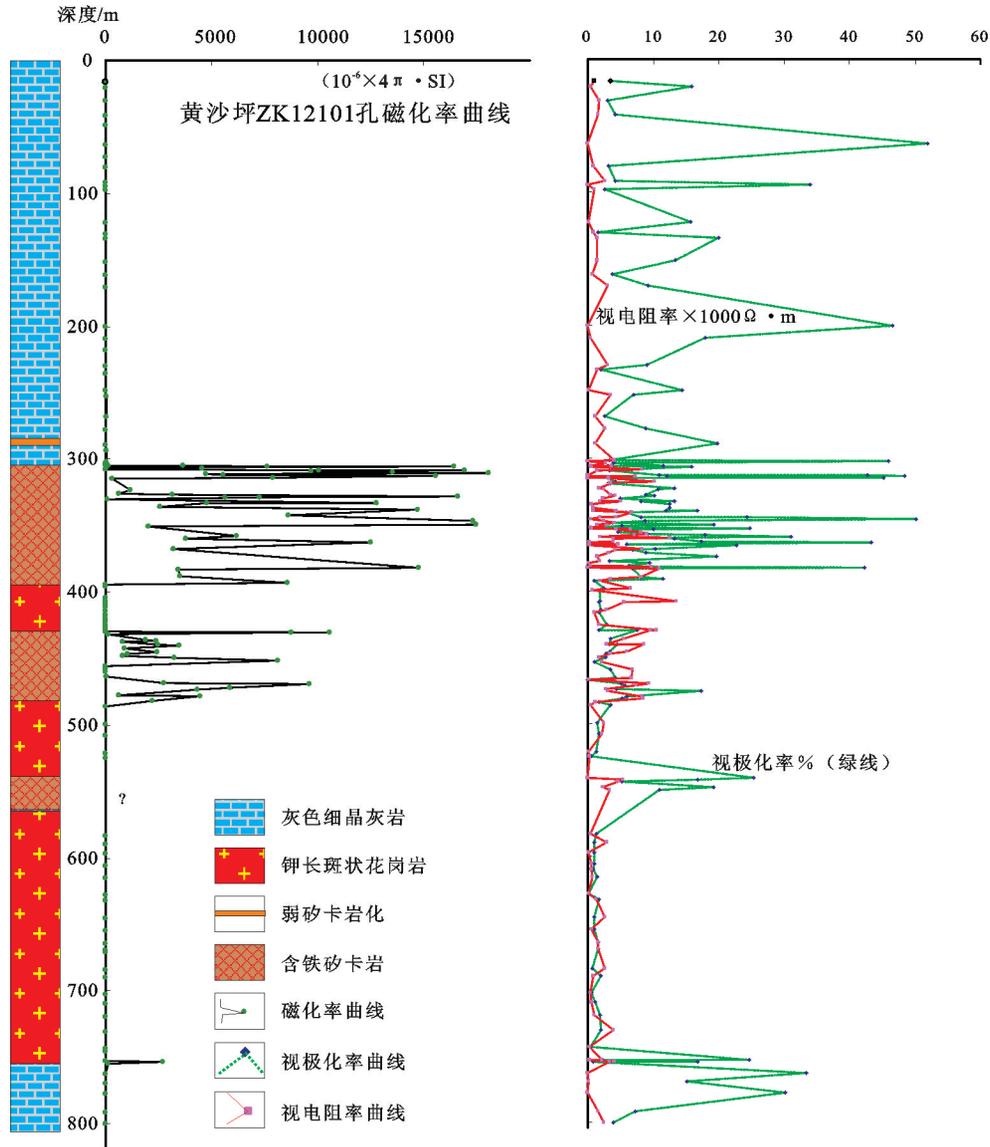


图6 湖南黄沙坪铅锌多金属矿区ZK12101孔的地质-磁性-电性联合探测成果图

Fig. 6 Geological-magnetic-electric profile of the deep exploration result of the ZK12101 hole in the Huangshaping mine

生的,在深孔中尤其需要注意探测其存在与否。页岩气中是否存在³He是值得综合评价的,因为³He常常富集在幔源气田中^[4,6,42],而其本身恰恰是第二代、第三代核聚变反应的原料!

7 结 语

矿产资源是具有社会、经济效益的资源,不是一般的“石头”,更不是一个冷面无情的数字。因此,并不需求刻意、特意去寻找埋藏于深部的矿床(即为了深部而深部),在寻找、开采浅部矿床的过程中,“顺手牵羊”、“顺藤摸瓜”、“顺理成章”地发

现、勘探与开采深部矿床,可能是地质、找矿与采矿工作的最佳途径之一。毫无疑问,同样质量、同样数量的矿石,埋藏于浅部比埋藏于深部者,具有更大的经济效益。在当前以矿产资源为主要目标的深地探测工作中,坚持国家目标与科学目标紧密结合、从已知到未知、由浅入深、点面结合和综合探测的原则,针对不同的地质条件和成矿规律,具体问题具体分析,既要采用有效的成矿理论也要考虑到深部探测的不确定性,既要考虑探测深度也要注意工作程度,既要遵从科学问题的导向也要注意社会效益。参考“五层楼+地下室”模型,以具有一

定规模的层状、似层状、透镜状矿体作为探测目标,是当前技术经济条件下、开展深部探测比较现实的选择。

致谢:本文虽是笔者在华南地质科研工作多年来的一点体会,也是集体工作的结果,并得到多方面的支持,不罗列而一并致谢。其中部分观点与看法可能存在争议,也请读者批评指正。

参考文献(References):

- [1] 王登红. 广西大厂层状超大型锡多金属矿床与层状花岗岩的特征、成因及成矿历史演化——兼论硅质页岩的成因 [D]. 中国地质科学院硕士研究生学位论文, 1992.
Wang Denghong. On the Characters, Genesis and Evolutions of the Bedded Superlarge Tin-Polymetallic Deposits and the Banded Granite, and on the Origin of Siliceous Shale in Dachang [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1992 (in Chinese).
- [2] 王登红. 广西大厂锡矿赋矿围岩硅—钙建造及其对矿体形态的控制 [C]//第五届全国矿床会议论文集. 北京:地质出版社, 1993: 357.
Wang Denghong. The Control of Si-Ca Formation to Orebody Shape in Dachang Tin Deposit, Guangxi [C]//Paper Volume of the Fifth Conference on National Deposits. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 357(in Chinese).
- [3] 王登红, 陈毓川. 广西大厂电气石的成分与成因初探 [J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(3): 280-287.
Wang Denghong, Chen Yuchuan. A preliminary study on the composition and origin of tourmalines in Dachang, Guangxi [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1996, 15(3): 280-287 (in Chinese with English Abstract).
- [4] 王登红, 毛景文. 氦同位素地质研究进展 [J]. 地质科技情报, 1996, 15(2): 51-56.
Wang Denghong, Mao Jingwen. Advances in the Study of Helium Isotopes Geology [J]. Geological Science and Technology Information, 1996, 15(2): 51-56(in Chinese with English abstract).
- [5] 王登红, 陈毓川, 徐珏, 等. 试论伴生矿床——以长坑金矿与富湾银矿为例 [J]. 地球学报, 1999, 20(增刊): 346-350.
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Jue, et al. Discussion in associated deposits—Examples from Changkeng Au deposit and Fuwan Ag deposit, Guangdong [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20(Supp.): 346-350 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王登红, 余金杰, 杨建民, 等. 中国新生代成矿作用的惰性气体同位素研究与动力学背景 [J]. 矿床地质, 2002, 21(2): 179-186.
Wang Denghong, Yu Jinjie, Yang Jianmin, et al. Inert gas isotopic studies and dynamic background of Cenozoic Ore-forming Process in China [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(2): 179-186 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王登红, 陈毓川, 李华芹, 等. 湖南芙蓉锡矿的地质地球化学特征及找矿意义 [J]. 地质通报, 2003, 22(1): 50-56.
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Li Huaqin, et al. Geological and geochemical features of the Furong tin deposit in Hunan and their significance for mineral prospecting [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(1): 50-56 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王登红, 陈毓川, 陈文, 等. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代 [J]. 地质学报, 2004, 78(1): 132-138.
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Chen Wen, et al. Dating the Dachang Giant Tin-Polymetallic Deposit in Nandan, Guangxi [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 132-138 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王登红, 李华芹, 陈毓川, 等. 桂西南南丹地区大厂超大型锡多金属矿床中发现高稀土元素方解石 [J]. 地质通报, 2005, 24(2): 176-180.
Wang Denghong, Li Huaqin, Chen Yuchuan, et al. Discovery of high-REE calcites in the Dachang superlarge tin-polymetallic ore deposit, Nandan, northwestern Guangxi [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(2): 176-180 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王登红, 陈毓川, 李杰维, 等. 广东三水盆地西缘横江铅锌矿的成矿时代及新生代找铜前景 [J]. 矿床地质, 2006, 25(1): 10-16.
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Li Jiewei, et al. Ore-forming epoch of Hengjiang Pb-Zn-Cu deposit on western margin of Sanshui basin, Guangdong Province, and its significance in prospecting for Cenozoic copper deposits [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(1): 10-16 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王登红, 陈毓川, 陈郑辉, 等. 南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究 [J]. 地质学报, 2007, 81(7): 882-890.
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, et al. Assessment on Mineral Resource in Nanling Region and Suggestion for Further Prospecting [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(7): 882-890 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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.
Wang Denghong, Xu Jianxiang, Zhang Jiajing, et al. Several Issues on the Deep Prospecting in South China [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(7): 865-872 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王登红, 李华芹, 秦燕, 等. 湖南瑶岗仙钨矿成岩成矿作用年代学研究 [J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 201-208.
Wang Denghong, Li Huaqin, Qin Yan, et al. Rock-forming and Ore-forming Ages of the Yaogangxian Tungsten Deposit of Hunan Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(3): 201-208 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 等. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010a, 40(4): 733-738.
Wang Denghong, Tang Juxing, Ying Lijuan, et al. Application of "Five levels + Basement" Model for Prospecting Deposits into

- Depth[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010a, 40(4): 733-738 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王登红, 陈富文, 张永忠, 等. 南岭有色-贵金属成矿潜力及综合探测技术研究[M]. 北京:地质出版社, 2010:1-472.
Wang Denghong, Chen Fuwen, Zhan Yongzhong, et al. Study of Metallogenic Potential and Comprehensive Detection Technology of Color - precious Metals in Nanling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:1-472 (in Chinese).
- [16] 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 等. 西藏甲玛矿区角岩特征及其对深部找矿的意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 2103-2111
Wang Denghong, Tang Juxing, Ying Lijuan, et al. Hornfels feature in the Jiama ore deposit, Tibet and its significance on deep prospecting [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7): 2103-2108 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王登红, 应立娟, 唐菊兴, 等. 与角岩有关矿床的主要类型及其对深部找矿的意义[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 221-230.
Wang Denghong, Ying Lijuan, Tang Juxing, et al. Major type of hornfels-related deposits and application for deep prospecting[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(3): 221-229 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 成矿体系的研究进展及其在成矿预测中的应用[J]. 地球学报, 2011, 32(4): 385-395.
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, et al. Advance in the study of mineralization system and its application to assessment of mineral resources [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(4): 385-395 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王登红, 陈郑辉, 黄国成, 等. 华南“南钨北扩”、“东钨西扩”及其找矿方向探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(3): 322-329.
Wang Denghong, Chen Zhenghui, Huang Guocheng, et al. Northwards and westwards prospecting for tungsten and its significance in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(3): 322-329 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王登红, 陈毓川, 王瑞江, 等. 对南岭与找矿有关问题的探讨[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 854-863.
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Wang Ruijiang, et al. Discussion on some problems related to prospecting breakthrough in Nanling region [J]. Mineral Deposits, 2013, 32(4): 854-863 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王登红, 张长青, 王永磊, 等. 泛北部湾桂、琼铁铜锡铅锌金矿典型矿床研究[M]. 北京:地质出版社, 2013:1-593.
Wang Denghong, Zhang Changqing, Wang Yonglei, et al. Study on Pan Beibuwan Fe- Cu- Pb- Zn- Au typical deposits in Guangxi and Hainan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013:1-593 (in Chinese).
- [22] 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 等. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43 (1): 44 - 51.
Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun, et al. Discovery and comprehensive assessment on W and Li of Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2013, 43 (1): 44 - 51 (in Chinese).
- [23] 王登红, 何哈哈, 黄凡, 等. 对华南小岩体找大矿问题的探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(1): 10-18.
Wang Denghong, He Hanhan, Huang Fan, et al. Discussion on the issues of exploration large deposits around small intrusions in South China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(1): 10-18 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王登红, 陈振宇, 陈郑辉, 等. 南岭东段北部岩浆岩同位素年代学填图的尝试及其新进展[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(2): 375-387
Wang Denghong, Chen Zhenyu, Chen Zhenghui, et al. Progress of the tentative geochronological mapping of the igneous rocks in the northeastern section of the Nanling region, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(2): 375-387 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王登红, 陈振宇, 黄凡, 等. 南岭岩浆岩成矿专属性及相关问题探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(2): 230-238.
Wang Denghong, Chen Zhenyu, Huang Fan, et al. Discussion on metallogenic specialization of the magmatic rocks and related issues in the Nanling region [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(2): 230-238 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王登红, 刘新星, 刘丽君. 地质大数据的特点及其在成矿规律、成矿系列研究中的应用[J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1143-1154
Wang Denghong, Liu Xinxing, Liu Lijun. Characteristics of Big Geodata and its application to study of minerogenetic regularity and minerogenetic series [J]. Mineral Deposits, 2015, 34(6): 1143-1154 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王登红, 赵汀, 何哈哈, 等. 中南地区三稀矿产资源调查研究及开发利用进展综述[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(1): 1-8
Wang Denghong, Zhao Ting, He Hanhan, et al. Review of three rare mineral resources investigation and progress in central-south China [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [28] 陈国达. 成矿构造研究法[M]. 北京:地质出版社, 1978:413.
Chen Guoda. Metallogenic Research Method [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978:413(in Chinese).
- [29] 季克俭, 吴学汉, 张国柄. 热液矿床的矿源、水源和热源及矿床的分布规律[M]. 北京:北京科学技术出版社, 1989.
Ji Kejian, Wu Xuehan, Zhang Guobing. Distribution Regularity of Source, Water, Heat and Deposits about Hydrothermal Deposits [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1989(in Chinese).
- [30] 《中国矿床发现史·湖南卷》编委会. 中国矿床发现史·湖南卷[M]. 北京:地质出版社, 1996:149-152.
Editorial board of the Discovery History of deposits in China · Hunan volume. Discovery History of Deposits in China · Hunan Volume[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:149-152 (in Chinese).

- [31] 许建祥, 曾载淋, 王登红, 等. 赣南钨矿新类型及“五层楼 + 地下室”找矿模型[J]. 地质学报, 2008, 82(7):880-887.
Xu Jianxiang, Zeng Zailin, Wang Denghong, et al. A new type of Tungsten deposit in southern Jiangxi and the new model of "Five Floors + Basement" for Prospecting[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(7): 880-887 (in Chinese with English abstract).
- [32] 陈毓川, 陈郑辉, 曾载淋, 等. 南岭科学钻探第一孔选址研究[J]. 中国地质, 2013, 40(3):659-671.
Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, Zeng Zailin, et al. Research on the site selection of Nanling Scientific Drilling-1[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 659-670 (in Chinese with English abstract).
- [33] 赵正, 陈毓川, 郭娜欣, 等. 南岭科学钻探0-2000 m地质信息及初步成果[J]. 岩石学报, 2014,30(4):1130-1144.
Zhao Zheng, Chen Yuchuan, Guo Naxin, et al. The geological information and investigation progresses of Nanling Scientific Drilling in the depth between 0 and 2000 m [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(4): 1130- 1144 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王昌烈, 罗仕徽, 胥友志, 等. 柿竹园钨多金属矿床地质[M]. 北京:地质出版社, 1987.
Wang Changlie, Luo Shihui, Xu Youzhi, et al. Geology of Shizhuyuan Tungsten- Polymetallic Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987 (in Chinese).
- [35] 梁婷, 陈毓川, 王登红, 等. 广西大厂锡多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2008:1-235.
Liang Ting, Chen Yuchuan, Wang Denghong, et al. Geology and Geochemistry of Dachang Tin- Polymetallic Deposit, Guangxi [M]. Beijing: Geological Publishing Houe, 2008: 1-235 (in Chinese).
- [36] 侯德义主编. 找矿勘探地质学[M]. 北京:地质出版社, 1984: 140-151.
Hou Deyi. Exploration Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 140-151 (in Chinese).
- [37] 方贵聪. 赣南盘古山钨矿床岩浆-热液-成矿作用研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2014.
Fang Guicong. Study on Magmatic and Hydrothermal Mineralization of Pangushan Tungsten Deposit, South Jiangxi [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2014.
- [38] 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等. 深部探测揭示中国地壳结构、深部过程与成矿作用背景[J]. 地学前缘, 2014,21(3):201-225.
Dong Shuwen, Li Tingdong, Chen Xuanhua, et al. SinoProbe revealed crustal structures, deep processes, and metallogenic background within China continent[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 201-225. (in Chinese with English abstract).
- [39] 郭晓山, 肖振明, 欧亦君, 等. 南京栖霞山铅锌矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 1985, 4(1):11-21.
Guo Xiaoshan, Xiao Zhenming, Ou Yijun, et al. On the genesis of the Qixiashan lead- zinc ore deposit in Nanjing [J]. Mineral Deposits, 1985, 4(1):11-21 (in Chinese with English abstract).
- [40] 刘战庆, 刘善宝, 陈毓川, 等. 江西朱溪铜钨矿区煌斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年及地质意义[J]. 岩矿测试, 2014, 33(5):758-767.
Liu Zhanqing, Liu Shanbao, Chen Yuchuan, et al. LA-ICP-MS zircon U- Pb isotopic dating of lamprophyre located Zhuxi copper- tungsten mine of Jiangxi Province and its geological significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(5): 758-766 (in Chinese with English abstract).
- [41] 王登红, 李建康, 赵斌, 等. 南岭成矿带地壳岩浆系统结构探测实验研究课题成果报告[R]. 2013.
Wang Denghong, Li Jiankang, Zhao Bin, et al. Report on Experimental Study about Detecting Earthcrust Magma System Structure of Nanling Metallogenic Belt [R]. 2013.
- [42] 王登红. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 1-160.
Wang Denghong. The Mantle Plume and Mineralization [M]. Beijing: Seismological Press, 1998: 1-60 (in Chinese).