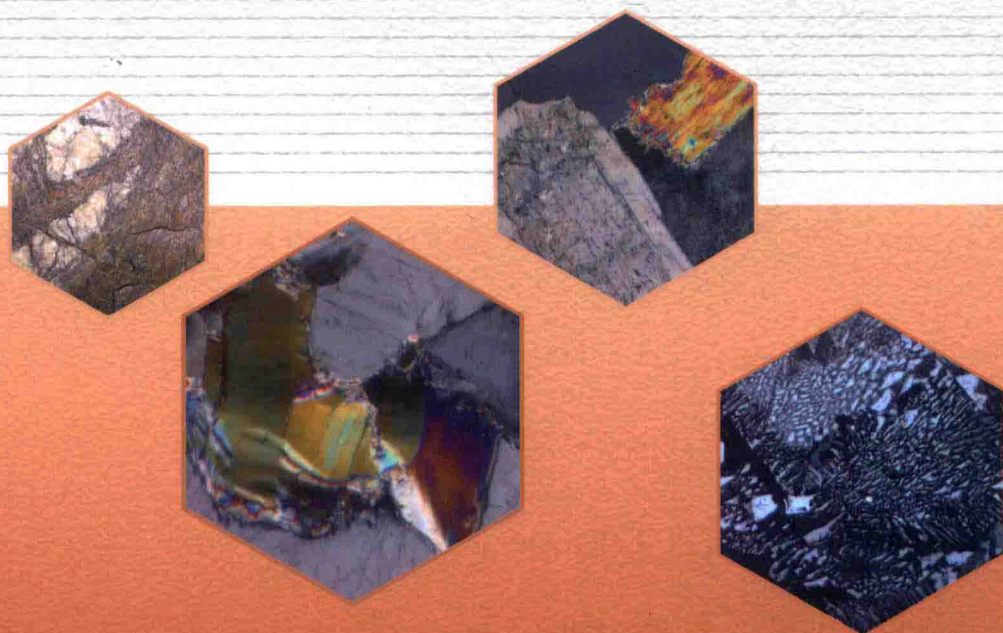


湘南柿竹园矿集区 超大型钨多金属矿床成矿规律与深部找矿

成永生 著



地质出版社

学基金 (2016JJ1022)

湖湘青年创新人才基金 (湘科人字 [2014] 76 号)

湖南有色研究基金项目 (Y201201013)

中南大学创新驱动计划 (2015CX008)

湘南柿竹园矿集区超大型钨多金属矿床 成矿规律与深部找矿

成永生 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

湘南柿竹园超大型钨-锡-钼-铋多金属矿床勘探与开采历史悠久,在全球独具一格,享有“世界有色金属博物馆”之美誉。本书紧紧围绕制约柿竹园矿集区深部金属矿产资源增储的关键地质问题,以矿床学、矿床地球化学、成矿预测学等多学科理论为指导,开展了深部成矿地质条件、成岩成矿构造背景、成矿规律与成矿机制、关键控矿地质因素、隐伏矿体定位预测等研究,明确提出了柿竹园矿集区深部“第二找矿空间”隐伏矿产资源的找矿思路与勘探方向,为有效扩大接替资源储量、保障矿山企业可持续健康发展提供了重要支撑,更有利于促进柿竹园超大型钨多金属矿床深部成矿理论的丰富与发展。

本书可供从事基础地质学、矿床学、地球化学、勘查地质学、成矿预测学等专业的生产、科研和教学人员以及高等地质院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

湘南柿竹园矿集区超大型钨多金属矿床成矿规律与深部找矿 / 成永生著. —北京:地质出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-116-10038-1

I. ①湘… II. ①成… III. ①钨矿床-多金属矿床-成矿规律-研究-湖南②钨矿床-多金属矿床-找矿-研究-湖南 IV. ①P618.67

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 253417 号

Xiangnan Shizhuyuan Kuangjiqu Chaodaxing Wu - Duo jinshu
Kuangchuang Chengkuang Guilü yu Shenbu Zhaokuang

责任编辑:徐 洋

责任校对:白秀君

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010)66554579 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554582

印 刷:北京长宁印刷有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm 1/16

印 张:8 插页:3 页

字 数:206 千字

版 次:2016 年 10 月北京第 1 版

印 次:2016 年 10 月北京第 1 次印刷

定 价:40.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-10038-1

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

湘南柿竹园钨锡多金属矿床为我国南岭中段稀有、稀土、有色金属成矿省中一颗璀璨的明珠，是一个超大型矽卡岩型钨-锡-钼-铋多金属矿床，已有 60 余年的勘探与开采历史。该矿床具有矿种多样、规模巨大、矿体集中、形态简单、共生组分丰富、可利用组分多、成矿条件复杂等特征，在中国乃至整个全球都独具一格，被誉为“世界有色金属博物馆”。

湘南柿竹园地区的矿业开发历史悠久，据有关资料记载，最早可追溯至明清时期，长达 400 多年，但真正专业性的研究工作主要始于 20 世纪 30 年代，我国老一辈的地质学家为柿竹园矿集区的矿业开发做出了卓越贡献，如王晓青、王昌烈、涂光炽、尹汉辉、陈仕谋、毛景文、杨超群、刘英俊、罗仕微、刘杭娟、孙一虹、陈图华、谭延松、郭吉保、陈骏、周珣若、赵永鑫、张理刚、金荣龙、龚茂杨、韩工亮、裴荣富、肖孟华、王书凤、季克俭、胥友志、芮柏、宋学信、刘义茂、梁祥济、王增润、杨昌明、江鹏程、匡耀求、李炳韬等，将该矿床推向了矿床地质学研究的国际舞台，吸引了国内外地学界众多顶尖的研究力量，对于提升该矿床的理论认识与找矿实践均发挥了极其重要的作用。近十年来关于柿竹园矿集区的地质研究依然十分活跃，包括於崇文、卢焕章、赵振华、胡瑞忠、许德如、毕献武、徐文忻、龚庆杰、蔡新华、祝新友、武丽艳、程细音、王谦等学者，为进一步丰富与发展柿竹园钨-锡-钼-铋多金属矿床的矿床成因及其成矿机制提供了新的数据与资料，且有效指导了该矿集区钨-锡-钼-铋多金属矿产资源的可持续健康发展，更为我国国民经济建设以及社会经济稳步发展提供了重要的资源保障。

尽管如此，柿竹园矿集区发展至今依然面临着资源短缺以及探明储量不足等问题，特别是由于长年的开采加之地质勘探投入的严重不足，使柿竹园也迈入了铅锌储量危机矿山行列，危机矿山问题依然是柿竹园矿集区今后相当长一段时间内需要面对的重要问题，非常紧迫。为此，2007 年 12 月国家危机矿山项目“湖南省郴州市东坡铅锌矿接替资源勘查（项目编码：200743054）”启动，开展了 1:10000、1:5000 地质测量及 1:10000 地面高精度磁测、激电测深等，通过研究基本查明了区内地层、岩浆岩、构造、围岩蚀变的分布及与成矿的关系，为进一步圈定和缩小找矿靶区提供了重要的理论依据，为柿竹园矿集区找矿新突破发挥了重要作用。

总体来看，围绕柿竹园矿集区的理论研究工作已非常丰富，主要包括矿物学、岩石学、矿床学、矿相学、构造地质学、岩石地球化学、同位素地球化学、流体包裹体、成矿预测学等方面，特别是随着新技术、新方法的开发与运用，以往许多存在争议的问题也逐渐得到科学解释。近年来，随着柿竹园矿集区“第二找矿空间”的开辟，深部地质研究备受关注，尤其是如何运用理论研究成果指导深部地质勘探以及生产实践，成为亟待解决的关键问题。因此，立足工作区已有的丰富理论研究成果，开展矿床成矿规律的深度总结与科学解析，是实现理论指导实践的重要途径。显而易见，矿业开发过程中不断揭露新的地质现象、积累新

的地质数据,这是丰富与完善矿床成因理论的重要原始资料,从而产生新的科学认识与科学规律,特别是新的地质现象及其所蕴含的科学内涵,是成矿作用理论进一步发展完善的重要支撑。

为此,通过破解制约深部地质找矿的关键地质问题,全面提升深部地质认识水平,全面深化深部成矿地质理论,用科学的地质理论来武装深部地质勘探,从而实现真正意义上的理论找矿,这不仅是中国未来深部地质资源勘探的必经之路,对于世界而言也同样如此。不可否认,向深部要资源是未来世界的一个重要命题,更是世界的一次重要革命,如何引领与发展深部资源开发的未来,理论认识的发展与提升至关重要。从一定意义上讲,理论研究的程度可能决定着深部地质资源勘探的水平。毋庸置疑,更需要将基础理论与勘探实践有机结合,从而形成理论指导实践、实践丰富理论、理论再指导实践的良性循环趋势。湘南柿竹园钨多金属矿床作为世界级超大型矿床的范例,当前所面临的深部地质找矿问题具有典型意义。然而,完全有理由相信,通过理论研究的不断深化以及理论与实践的深度融合,深部地质的完全“透明化”也并不是不可追逐的遥远梦想,关键在于坚持科学、锲而不舍,“第二找矿空间”乃至“第 n 找矿空间”,隐伏矿体发现与勘探的目标是完全可以实现的,以湘南柿竹园矿集区为代表的深部地质找矿也定会取得令人难以置信的重要进展与重大突破。

研究过程中实施开展了大量的野外地质工作,包括地表地质调研、坑道地质调研、岩心地质观察,得到了湖南柿竹园有色金属有限责任公司多个部门的协调与支持,包括公司办公室、生产部、安全环保部、技术发展中心、机动能源部等,李晓东副总经理、杨金生副总经理、谭若发部长、王周元副部长、王勇工程师、张宗生工程师等为野外地质工作的顺利开展提供了大量帮助以及最大便利,公司技术人员积极配合且参与课题组野外地质研究,是保障野外地质调研工作高效、安全、科学开展的重要条件。

研究工作的顺利圆满完成,需要特别感谢湖南有色金属控股集团有限公司办公室、安全环保部、科技管理部等部门各位领导、专家以及相关工作人员的鼎力支持。另外,研究具体实施过程中,包括矿区资料收集、野外地质调研、地质样品采集等,湖南柿竹园有色金属有限责任公司的领导以及相关科室技术人员给予了大力支持,亲自陪同考察与调研,共同探讨柿竹园矿集区深部地质奥秘,共同谋划柿竹园矿集区矿产资源发展大计,也提供了很多的便利条件,更为现场地质研究提供了良好的技术支持,在此一并表示最衷心的感谢!

围绕所确立的研究任务与研究目标,根据研究的技术方法与技术路线,为了更好地体现理论研究指导勘探实践的目的,项目组成员多次赴柿竹园矿集区开展实地地质调研,收集了大量的第一手资料,为全面掌握柿竹园矿集区深部矿床地质特征及其勘探与开发现状付出了不懈努力,克服了很多不可预知的困难,尤其是对于矿床的深部地质调研,在保障安全的前提条件下,对柿竹园共10个主要中段平面开展了系统、全面、细致的地质观察与地质采样,是客观、系统、全面总结柿竹园矿集区深部矿床成矿特征及其成矿规律的关键。总之,为了项目研究的顺利实施,项目组各位成员克服了很大的困难,付出了大量的心血和汗水,更发扬了勇往直前、开拓创新的精神,用各自的聪明才智和满腔热情书写了新时代的地质画卷。

由于水平和能力有限,书中难免存在错误与不足之处,恳请专家、读者批评指正。

成永生

2016年6月于中南大学

目 录

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 隐伏矿体及其定位预测	(1)
1.1.1 关于深部地质资源增储战略	(1)
1.1.2 深部找矿的概念与内涵	(3)
1.1.3 隐伏矿体预测研究进展	(4)
1.1.4 矿体定位预测发展趋势	(6)
1.2 研究区研究历史与现状	(8)
1.3 亟待解决的关键问题	(11)
1.4 研究内容和工作方法	(11)
1.4.1 研究内容	(11)
1.4.2 工作方法	(13)
1.5 主要目标与技术路线	(14)
1.5.1 主要目标	(14)
1.5.2 技术路线	(14)
1.6 工作进度及阶段任务	(15)
第 2 章 区域地质背景与成矿地质条件	(17)
2.1 区域成矿地质背景	(17)
2.1.1 区域构造体系与格局	(17)
2.1.2 区域地层岩石学及其展布	(19)
2.1.3 区域岩浆岩与矿产分布	(19)
2.2 柿竹园矿集区成矿地质条件	(20)
2.2.1 控矿构造体系	(21)
2.2.2 矿区地层与赋矿围岩	(23)
2.2.3 岩浆岩侵入及其演化	(24)
第 3 章 泥盆系赋矿地层特征及其控矿模式	(27)
3.1 地层产状及其空间展布	(27)
3.1.1 中泥盆统棋梓桥组	(27)
3.1.2 上泥盆统余田桥组	(28)
3.2 沉积相古地理	(28)
3.2.1 中泥盆世棋梓桥期	(28)

3.2.2 晚泥盆世余田桥期	(30)
3.3 灰岩地球化学特征	(30)
3.3.1 主量元素组成特征	(30)
3.3.2 微量元素组成特征	(32)
3.3.3 稀土元素组成特征	(34)
3.4 成矿意义及控矿模式	(36)
第4章 控矿构造与矿化富集	(41)
4.1 接触带构造与矿化富集	(41)
4.1.1 接触带与接触带构造	(41)
4.1.2 接触带构造控矿规律	(41)
4.1.3 接触带构造变形及其特征	(42)
4.1.4 接触带构造成矿机制探讨	(46)
4.2 裂隙发育特点及其矿化	(48)
4.2.1 裂隙产状及类型划分	(48)
4.2.2 裂隙发育与矿化的关系	(51)
4.3 挤压褶皱对成矿的影响	(52)
4.4 制约深部成矿的构造因素探讨	(52)
第5章 岩浆岩活动与深部成矿动力学	(55)
5.1 花岗岩体产出特征及其与矿化关系	(55)
5.2 花岗岩岩石学特征	(56)
5.3 花岗岩地球化学特征	(58)
5.3.1 主量元素组成特征	(58)
5.3.2 微量元素组成特征	(63)
5.3.3 稀土元素组成特征	(63)
5.3.4 全岩同位素地球化学特征	(64)
5.4 岩浆岩成因及其演化	(68)
5.5 成岩成矿构造环境	(72)
第6章 矽卡岩岩石成因及其成矿作用	(73)
6.1 地质采样与分析方法	(73)
6.2 矽卡岩岩石学特征	(73)
6.3 矽卡岩矿物学特征	(74)
6.4 矽卡岩地球化学特征	(76)
6.4.1 主量元素组成特征	(76)
6.4.2 微量元素组成特征	(77)
6.4.3 稀土元素组成特征	(79)
6.5 矽卡岩成因分析及其成矿意义	(80)
6.5.1 原岩恢复及形成机制	(80)
6.5.2 对成矿环境的指示作用	(83)

6.5.3 矽卡岩化与成矿关系及其控矿机理	(84)
第7章 云英岩化变质作用及其成矿机制	(87)
7.1 云英岩岩石学特征及其产状	(87)
7.2 云英岩地球化学特征	(88)
7.2.1 主量元素组成特征	(89)
7.2.2 微量元素组成特征	(89)
7.2.3 稀土元素组成特征	(91)
7.3 云英岩成矿元素富集特征	(94)
7.4 云英岩化蚀变类型及其矿化	(95)
7.5 云英岩化变质作用过程	(97)
7.6 控矿作用及找矿指示	(98)
第8章 隐伏矿体定位预测模式和找矿方向	(99)
8.1 制约深部成矿的关键地质要素	(99)
8.2 深部隐伏矿体的定位预测模式	(101)
8.3 隐伏盲矿体重点找矿预测方向	(103)
第9章 问题与建议	(111)
9.1 主要问题	(111)
9.2 工作建议	(111)
结束语	(114)
主要参考文献	(116)

第 1 章 绪 论

1.1 隐伏矿体及其定位预测

1.1.1 关于深部地质资源增储战略

人类生存繁衍的自然界充斥着神奇与奥妙,许多自然现象至今仍是“谜”,从而吸引着人类的探索永无止境。特别有趣的是,地球在漫长的演化过程中,为人类提供了丰富的资源,供人类生存使用。

矿产资源是重要的自然资源,是人类社会生存和发展的基本条件,更是经济社会发展的重要物质基础,是不可再生的一次资源。矿产资源的稀缺性、耗竭性、隐蔽性、不可再生性、分布不均衡性及其多用途性决定了矿产资源具有特殊的战略价值,对于保障国家经济安全和国防安全具有重要意义。特别是进入 21 世纪以来,一方面是人类对矿产资源的需求(包括资源储量和资源种类)不断扩大,另一方面则是已知矿产资源的短缺以及找矿难度的不断加大。我国现阶段经济的高速发展带动了金属资源消费量的持续增长,致使国内资源不能满足需求,进口量和对外依存度逐年增大。近年来“铁矿石谈判”屡屡失败的事实证明,没有资源优势就不能控制和调节国际市场。目前普遍认为,要改变资源供需的被动局面,大力推进我国现有金属矿山的可持续发展已刻不容缓。

据报道,中国现已探明的 45 种主要矿产资源的保有储量中,一些关系到国民经济命脉的支柱性矿产资源,除煤以外,大部分都出现不同程度的供应紧张。面对新的发展形势,诸多专家建议应科学制定中国全球矿产资源战略,要实现由支撑经济发展的单一目标,向确保国家经济安全、环境安全、国防安全和可持续发展的多目标转变。特别值得重视的是,中国经济发展进入“新常态”,GDP 进入中高速增长阶段,对大宗矿产保持较高的需求,与高新技术产业相关的矿产资源需求快速增长(中华人民共和国国土资源部,2015)。因此,从我国经济长期发展趋势来看,在未来一段时期内需求是刚性的,旺盛势头还将持续。大规模基础设施建设的展开,必然保持对矿物原材料的旺盛需求。

依据 2015 年中华人民共和国国土资源部《中国矿产资源报告》所提供的数据,2014 年,我国生产铁矿石 15.1×10^8 t,同比增长 3.9%;粗钢 8.2×10^8 t,增长 1.2%;钢材 11.3×10^8 t,增长 4.0%。10 种有色金属 4380.1×10^4 t,增长 7.4%,其中精炼铜 764.4×10^4 t,增长 15.0%;电解铝产量 2751.7×10^4 t,增长 8.2%。黄金产量 458.1 t,增长 5.5%;消费量 886.09 t,下降 24.7%。粗钢、10 种有色金属、黄金产量均位居全球首位。2015 年上半年,生产铁矿石 6.3×10^8 t,同比下降 10.7%;10 种有色金属 2526.3×10^4 t,增长 9.3%;黄金 228.7 t,增长 8.4%。因此,从中长期需求来看,影响中国矿产



资源需求的基本面貌并未改变,对矿产资源供需矛盾必须保持清醒认识。

目前,我国大部分金属矿山位于地形条件相对较好的地区,勘探和开采深度均在 500 m 以上范围。对于 500 m 深度以下,不仅复杂的深部地质环境加大了找矿难度,而且当前有限的深部探测能力更是严重影响了深部资源的勘查与开发。最新的成矿理论研究以及深部找矿新进展均有力证明,我国大陆深部蕴藏着潜力巨大的矿产资源。围绕深部成矿与找矿的理论依据,学者们普遍认为地面浅表处所见的金属矿产资源,如大型、超大型矿床和多金属矿集区的形成,均是处于地球内部在地史期间深部物质与能量的交换所致,而不是近地表处形成与堆积的。因为矿物元素的分异、调整、运移和聚集,即大型、超大型矿床和矿集区的形成与分布是受着深部物质与能量的交换和其物理-力学-化学过程的制约,即热物质在运移和上涌过程中受到壳、幔介质和围岩的交代、变质作用后而逐渐聚积的。为此就必须涉及地球深处壳、幔介质与构造格局、物质状态、运移行为、物质属性和其空间展布的深层动力过程研究。这便表明,当今第一深度空间找矿、勘探和开发空间的已有矿产资源,它们并非是我国地下矿产资源的整体或全部,而在第二深度空间必定存在矿体的继续伸展和聚集(滕吉文等,2007a)。根据 2015 年中华人民共和国国土资源部的《中国矿产资源报告》,我国重要矿产资源查明程度平均为 30.3%,找矿潜力巨大,其中,2000 m 以浅,煤炭预测资源量 3.88×10^{12} t,资源查明率为 29.6%;铁矿预测资源量 1960×10^8 t,资源查明率为 33.1%;铜矿预测资源量 3.04×10^8 t,资源查明率为 29.5%;铝土矿预测资源量 179.7×10^8 t,资源查明率为 20.3%。因此,面对新的发展形势,如何进一步大力推进未来的资源查明率,如何有效提升资源潜力的评价水平,尤其是如何能够实现准确、高效、经济地开展深部隐伏资源的定位预测,已成为亟待解决的重大研究课题。

早在 2006 年 1 月 28 日,新华社播发了《国务院关于加强地质工作的决定》,提出以国内急缺的重要矿产资源为主攻矿种,兼顾部分优势矿产资源,按照东部攻深找盲、中部发挥特色、西部重点突破、境外优先周边的方针,实施矿产资源保障工程。之后,2011 年 10 月 19 日国务院总理温家宝主持召开国务院常务会议,会议讨论通过了《找矿突破战略行动纲要(2011~2020 年)》,纲要明确指出要加强重要矿产勘查,开展老矿山深部和外围接替资源勘查,延长矿山服务年限。为此,开展对老矿山深部矿体的勘探与研究已成为我国今后矿产资源可持续发展的重要战略任务,对提升我国的资源竞争力、保证国家安全具有重大意义。另外,国内外找矿实践也一再证明,现有矿区深部找矿潜力巨大,是实现老矿山(尤其是危机矿山)可持续发展的有效途径。根据 2015 年中华人民共和国国土资源部的《中国矿产资源报告》,2014 年新发现大中型矿产地 249 处,其中,铁矿增长 5.6%,铜矿增长 6.3%,铝土矿增长 3.2%,金矿增长 9.4%。同时,2014 年度老矿山深部和外围找矿经济效益明显,江苏栖霞山铅锌矿、四川拉拉铜矿、河南老湾金矿等 14 个矿区取得重大找矿突破,估算新增资源储量达到大型矿床规模;39 个矿区取得重要进展;平均延长矿山服务年限 10 年,稳定了 12 万职工就业。

围绕《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》提出的资源勘探增储要求以及《找矿突破战略行动纲要(2011~2020 年)》等相关部署,将力图大幅度提高深部成矿成藏与深地资源评价预测基础理论水平、攻克深地资源勘查的重大关键技术,提高深部地质矿产资源与能源勘查、开采能力。特别是《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》明确指出:“矿产资源高效开发利用”“资源勘探增储”为国



家重点领域优先资助主题,并明确提出其主要发展思路为:“突破复杂地质条件限制,扩大现有资源储量。重点研究地质成矿规律,发展矿山深边部评价与高效勘探技术,努力发现一批大型后备资源基地,增加资源供给量”。然而,对于“突破复杂地质条件限制,扩大现有资源储量”的关键,在于对控矿因素、成矿规律、矿床成因、矿体定位等问题的创新与发展,尤其是需要清醒认识深部隐伏矿体的复杂成矿条件,创新隐伏矿体的空间定位预测机制,突破已有的经验性模式和传统理论的桎梏,通过理论与方法的创新来实现资源勘探增储。

从2014年全国地质找矿工作来看,我国政府正在继续实施找矿突破战略行动,地质找矿成果显著,主要矿产查明资源储量增长明显,矿产资源基础进一步夯实;主要矿产品生产与进口持续增长,供应能力得到进一步加强;加快推进地质矿产调查评价工作,地质工作对经济社会的服务水平得到进一步提高。然而,自2014年以来,全球矿业伴随世界经济调整而持续低迷,全球矿产品需求疲软;与此同时,中国矿业发展进入调整期,为了促进矿业发展,中国政府通过加强矿产资源勘查、提升矿产资源节约与综合利用水平、加大简政放权力度、提高社会服务水平等措施激发矿业市场活力,促进矿业转型升级(中华人民共和国国土资源部,2015)。

1.1.2 深部找矿的概念与内涵

随着全球矿产资源的不断消耗以及新的矿业格局的形成,当今世界各国已将深部矿床、隐伏矿床、难识别矿床以及已知矿床的超度延深部分作为矿产资源勘查的重点。近年来,国内为适应找矿方向大调整的发展要求,先后提出了“推进深部找矿、缓解储量危机”(涂光炽,2001)、“深部找矿”及“深部第二富集带”(翟裕生等,2004;翟裕生,2006;施俊法等,2009;申维,2010;吕志成等,2013)、“攻深找盲”及“第二成矿找矿空间”(赵鹏大,2007)、“第二深度空间金属矿产探查”或“第二成矿空间”(滕吉文等,2007a,2007b)、“深部找矿成矿构造”(叶天竺,2007a,2007b)、“第二矿化富集带”(吕古贤等,2006;曹新志等,2009)等观点与思想。同时,针对我国深部地质找矿的发展现状以及我国深部地质结构以及地质演化历史,对深部地质找矿的内涵进行了诠释,为国内深部地质找矿指明了方向。

隐伏矿床根据形成机制和埋藏情况可划分为5种类型:①准隐伏矿床;②半隐伏矿床;③覆盖矿床;④隐蔽矿床;⑤盲矿床(梅燕雄,1993)。翟裕生等(2004)指出,深部矿床指现阶段产在深部的矿床,而不一定就是指在深部形成的矿床。矿床形成深度和矿床产出深度是两个概念,不能混淆。深部产出矿床可包括:①原来形成在深部或很深部,现仍在深部保存的矿床(如多数岩浆矿床和高温热液矿床);②原生成在浅表,现埋藏于深部的矿床,如沉积变质矿床。明确区别矿床形成深度和矿床产出深度,有利于查明控矿条件和矿床形成后的变化历史,这对找矿和评价是很重要的。

据不完全统计,国外金属矿资源(大型)开采超过1000 m的矿山约有80多座,包括南非的Western Deep Level金矿,加拿大萨德贝里(Sudbury)铜镍矿床以及加拿大诺兰达(Noranda)矿田的米伦贝齐、科伯特、安西尔等矿床,澳大利亚奥林匹克坝铜-金-铀矿床。

目前,针对深部地质找矿的必然发展趋势,学术界更是积极开展相关研究与探索,



以期提供更多的科学理论基础。围绕“第二找矿空间”的相关论述最为丰富。翟裕生等(2004)指出,考虑到中国的矿产勘查和矿山开采技术水平,对中国大部分地区的深部找矿似可定为500 m以下的深度。对老矿业基地,此深度可考虑延伸到800~1000 m。总的认为,深部找矿是一个相对概念,要考虑其深部是否有成矿的可能和经济、技术等多方面的因素。赵鹏大(2007)认为,“第二成矿找矿空间”是在已知矿床的深部或外围,寻找类似的或不同的有利成矿环境和发现同类或不同类型的矿床。已知矿床是第一成矿空间,深部和外围的隐伏矿床就是第二成矿空间,是矿下找矿或矿外找矿,其深度可深可浅。滕吉文等(2007a)认为,第一找矿、勘探与开发深度空间,系指由地表到深度500 m处;第二找矿、勘探与开发深度空间,系指500~2000 m的深度范围;第三找矿、勘探与开发深度空间,系指2000 m以下或更深处空间。当前必须将第二深度空间金属矿产资源的地球物理找矿、勘探与开发提上日程,并迅速付诸实施。叶天竺等(2007b)认为,深部找矿指的是深度1500~2000 m以浅的找矿,多数矿床类型成矿作用研究空间为5~10 km以浅。曹新志等(2009)认为,所谓的“第二矿化富集带”应是指在已知矿集区的深部或已知矿区深部的新的矿化富集空间,其与上部矿化富集带,即第一矿化富集带之间由所谓的无矿(或贫矿)带所分隔。“第二矿化富集带”的提出对区域及矿区深部找矿前景的评价以及具体勘查工程的实施都可以起到较好的指导作用,它为开拓第二找矿空间或“矿下找矿”或“矿外找矿”提供了重要的理论依据。

显然,深部找矿是相对于浅部找矿而言的,是一个相对且动态的概念。深部矿与浅部矿在产出深度、矿化特征、成矿特征与规律、勘查找矿技术与要求等方面具有明显不同(陈喜峰,2011)。为此,赵鹏大(2007)特别强调指出,深部找矿涉及多种类型,一种类型是在已知矿床或生产矿山深部找矿,这类找矿目标是寻找已知矿体的延深部分,或寻找深部的未知矿体,目前开展的危机矿山接替资源的找矿工作大都属于此类。由于上部已知矿体可作为相似类比的参照物,这类深部找矿工作难度一般较小,找矿效率较高,但由于深部的成矿环境可能变化,可能出现与上部不同的矿化类型,甚至不同的矿种,因此也必须重视求异准则的应用,发现可能的致矿地质异常。另一种类型是在无已知矿床的新区深部找矿,这类未出露地表的矿体可能是被后来的松散沉积物或沉积盖层所掩埋,可能是根本未曾被剥蚀出露地表的盲矿,还有可能是被掩埋的盲矿体。

1.1.3 隐伏矿体预测研究进展

国际上围绕隐伏矿产的预测问题进行了较长时间的研究与探索,早在1958年就于苏联召开了隐伏矿床找矿问题的学术研讨会,该次会议对深部找矿及其理论问题进行了全面探讨,更是对多年寻找隐伏矿床的经验总结;1975年美国地质调查局开展了“隐伏矿及低品位矿等找矿预测评价方法和勘查技术方法研究”;澳大利亚奥林匹克坝铜-金-铀巨型矿床的发现,标志着开启了隐伏矿床勘探的新时代。据不完全统计,国外金属矿产资源(大型)开采深度超过1000 m的矿山有近百座,例如,澳大利亚奥林匹克坝铜-金-铀矿床便是在深度1000 m处发现了隐伏的近于直立的铜-金-铀矿体,加拿大萨德贝里(Sudbury)铜镍矿的勘探深度已经达到2430 m,南非卡勒顿维累(Carltonville)金矿田的Western Deep Level金矿勘探深度超过了4000 m。

当前,深部地质找矿作为我国矿产资源发展的重大战略以及今后危机矿山可持续发展



的必然趋势,学术界关注的焦点与核心理所当然是如何开展深部隐伏盲矿体的预测问题。对此,不同的学科领域具有不同的审视角度,所专注的问题也会各异,但问题的焦点却是高度一致,即如何提高深部矿产预测的精准度、如何为隐伏矿体的定位提供有效的科学依据。

翟裕生院士多年来一直关注深部地质找矿问题,为新形势下的深部资源勘探提出了前瞻性的思想与观点。翟裕生(2003)指出,深部找矿既要有系统观和整体观,又要精细观测,见微知著。既要通过类比从已知到未知,寻找与已知矿床类型类似和同类的矿床,又要善于求异创新,注意那些与已知矿床类型不同的新矿床类型和新矿种,以及相应的新的成矿环境。翟裕生等(2004)研究发现,进行深部找矿的关键是要深入研究区域和矿区的成矿规律,重点是成矿环境、成矿系统和成矿演化,主要包括成矿系统发育的完整程度、成矿系统发育的深度、成矿系统网络的三维结构与矿床分带以及深部矿床的示踪标志等,以便全面认识矿床之所以产在某一深度空间的原因及其制约因素,运用适当手段,发现深部矿床。对深部第二矿化富集带的研究应结合第一矿化富集带的已知成矿特征进行,在具体的地质研究中应从深部的围岩、构造情况是否与浅部一致?矿床(矿体)类型是否与浅部一致?是否出现新的矿种和矿床类型?成矿时代是否与浅部一致?浅部带与深部带的划分标志等方面入手。

另外,也有专家学者提出深部地质找矿的综合性与实践性问题,建议深部找矿过程中不仅要重视多学科交叉与融合,从多重视角来研究与认识深部矿床的成矿机制及矿床成因;还要注重实践经验与勘探工程的总结与提升,将理论与实践互相结合、相互促进,以理论指导实践,以实践深化理论。例如,叶天竺等(2007b)认为,深部找矿问题是探索性很强的实践问题,不是纯理论问题,必须紧密结合找矿实践,边施工、边研究,不断修正对成矿特征的认识,才可能获得实质性的找矿成果。具体矿区的深部找矿问题是战术性问题,不是战略,属于找矿勘查学中的微观问题,因此带有很强的实例性、个案性,很难在理论上总结出有规律性的东西,因此很少看到深部找矿的理论性概括。另外,深部找矿问题具有高度的综合性,从理论应用而言,是多学科的高度综合,基本上包括了地质、矿产、勘查技术等相关学科的全部内容;从方法技术而言,必须实现多专业的有机结合,包括地质研究,物探、化探技术应用,探矿工程验证。常印佛等(2007)提出了深部地质找矿的立体填图法,指出该方法是一项综合性调查研究工作,它建立在深部探测的基础上,是认识地下物质和结构的途径和过程,也是探索 and 发现深部矿产资源的途径和过程。

大量研究表明,深部与浅部地质矿产勘查类似,也同样面临着工作或研究的规模与尺度问题。对于不同的尺度而言,所运用的工作方法和研究手段乃至工作的思路与流程可能会迥异。为此,根据深部地质找矿的尺度差异而选择适宜的工作方法与工作手段是十分必要的,也是有效开展隐伏矿产定位预测的首要关键。对此,曹新志等(2009)认为,深部矿勘查中的综合地质研究要点应根据区域性深部找矿和矿区深部找矿的不同而不同。对于区域性深部找矿工作,综合地质研究首先要判定与深部成矿有关的地质背景,进而确定主要的控矿因素组合种类及其控矿作用的相互关系,在此基础上结合区域内已知矿床的成矿作用和成矿特征,总结区域成矿规律,最终建立矿床成因模型,从而指导区域内具体的深部矿勘查工作,在整个勘查系统中起到地质研究的先行、指导作用。对于矿区深部找矿工作,综合地质研究则应首先侧重于查明主要控矿地质条件的局部变化特征,特别是查明



直接的赋矿地质部位,进而总结矿体(床)空间定位的规律,最终建立矿体(床)产状定位模型,以指导矿区深部矿勘查工程的具体实施。

总之,当前国内外针对深部隐伏矿体定位与预测的难题,一方面注重矿床的理论问题研究,首先回答深部地质勘探的矿床类型问题,以确立与之有关的成矿条件、控矿因素、矿化特征和成矿规律等,从而为选择具有针对性且切实可行的深部找矿技术、方法和手段提供直接依据;另一方面,更加关注深部探测技术手段的更新与发展。众所周知,深部地质找矿的难点在于对深部的情况了解甚少,所能掌握的资料十分有限,加之深部地质更加复杂、干扰因素众多,因此进一步发展大深度、高精度、高灵敏度的深部探测技术成为揭开深部地质面纱的重要途径。

近年来,世界各国在深部探测方面给予了高度重视,投入了大量的人力、物力与财力,进一步加速推动人类揭开地球深部谜底的进程。欧美等国均早已开展了“入地”计划,20世纪80年代,美国、欧洲、加拿大先后发起了地壳探测计划(COCORP)、欧洲探测计划(EUROPROBE)和岩石圈探测计划(LITHOPROBE)。例如,加拿大的Lithos-probe、澳大利亚的4D地球动力学计划以及玻璃地球计划等。近年来,我国启动的“深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)”(2008~2012),作为“地壳探测工程”的培育性科学计划,由中国国土资源部组织实施,旨在揭示地球深部结构与组成,减轻资源、灾害和环境多重压力,响应国际地球科学发展趋势,参与全球地学竞争,为“地壳探测工程”研发关键技术、建立深部数据管理系统、培养优秀人才和形成研究团队奠定坚实的基础。

1.1.4 矿体定位预测发展趋势

隐伏矿床预测和深部找矿是目前找矿勘查学科发展的两大方向之一(叶天竺等,2007b),然而,深部找矿问题既是一个科学问题,也是一个技术问题,同时也是一个历史问题(王登红等,2008)。近年来,我国在深部地质找矿的过程中更加注重发展和创新国内外具有影响力的基础理论,如相似类比理论、矿床模式和模型理论、地质异常致矿理论、地质力学理论、成矿系列理论、成矿系统理论、地质异常理论、地球化学块体理论等,为指导新形势下的深部地质找矿取得新进展发挥了十分重要的作用。同时,近年来,各种地质、地球化学、地球物理、GIS三维建模等技术的迅猛发展,为深部隐伏矿体的定位与预测注入了新的活力,促使大量与成矿有关的信息不断被挖掘,极大地推动了深部隐伏矿体定位预测的飞速发展,为深部矿产资源勘探增储发挥了极其重要的作用。总体来看,深部矿床与浅部矿床并没有本质区别,所不同的是埋深不同,很多矿床是深浅部相连或断续相连。因此,现有成矿理论可以覆盖深部和浅部矿床。目前全球流行的仍然是以矿床模型作为理论指导,以不同技术方法作为辅助,以工程验证为准绳(毛景文等,2007)。

1) 及时总结与深化浅部矿床的成矿作用理论,不断发展、夯实与创新深部隐伏矿床的理论基础,为深部地质找矿提供理论指导。

叶天竺等(2007b)认为,成矿地质研究基础工作在深部找矿中主要突出与成矿地质作用、矿田构造、成矿作用标志三方面的研究。成矿地质作用研究建立深部找矿思路,矿田构造研究是推断深部找矿赋存空间位置,成矿作用标志研究是判断深部是否存在规模型



矿体的主要标志。这些都是深部找矿地质基础的研究工作。

王登红等(2008)认为,涉及深部找矿的成矿理论问题很多,虽然也无外乎矿床类型、成矿区带、矿化分带、成矿时代、成矿物质来源、控矿构造、含矿层位等基本问题,但考虑到深部找矿的需要,对于成矿理论的研究也需要创新。要科学地评价矿产资源的“有无”与“好坏”,并预测可开发利用矿体的空间定位,需要把握“物质不灭”“能量守恒”和“时空无限但有序”三个基本原则。关于矿产资源潜力评价的原则性问题目前仍然处于探索阶段,不仅需要从理论上加以总结和研究,更需要在实践中不断修正,使“原则”变成可操作性的“细则”。尤其是要在大比例尺成矿预测中贯彻“三原则”,解决目前危机矿山的资源潜力问题。

吕志成等(2011)提出,矿区深部和外围发现新的矿床类型或矿种,加深了对深部矿床系统结构和分带性的认识,拓宽了找矿思路,提出了新的找矿方向。从矿床的角度走向矿田,从单个的矿床成矿模式发展为典型矿床成矿模式之间的组合模式,从构造体系控矿发展为构造成矿系列的阶段,这对于认识成矿系列控矿的规律,深入总结和认识矿床的成矿规律,提高对深部矿床成矿理论的认识和指导矿产资源勘查实现重大的突破,解决矿产资源可持续供应等问题具有重要的理论和实践意义。

2) 不断加大投入,开发出能够适应大深度矿产资源勘查的新技术、新方法及新手段。

当前,快速发展的新型技术方法手段为深部找矿提供了高效途径,包括地球化学勘查技术方法、地球物理深部探测方法、高分辨率遥感技术探测以及解译方法、三维地质建模技术方法等。例如,原生叠加晕理论、构造叠加晕找盲矿方法,主要研究构造-蚀变带中原生叠加晕特征,并用于找寻盲矿,是构造地球化学用于找盲矿的方法之一。常印佛等(2007)指出,深部找矿技术的发展趋势在向大深度、高精度、高分辨率和可视化方向发展,不断为深部找矿提供新的技术和方法手段,提高深部找矿的成功率。

谢学锦(1997)提出了一系列勘查地球化学新概念,例如,套合的地球化学模式谱系;地球化学块体;巨型矿床形成的首要条件是巨大的成矿物质供应量;呈各种活动态的成矿可利用金属量是最好的估计成矿物质供应量的指标;在全球范围内有地球气上升,并从地球化学块体中带出各种活动态金属。根据这些新发现与新理念发展了战略性与战术性地球气与金属活动态测量技术,并由此制定了新的矿产勘查战略,极大地推动了深部隐伏矿体找矿勘查进展。

20世纪90年代后,非线性理论与方法在资源预测与评价中的应用使定量预测研究进入一个新领域,成矿预测成果得到进一步完善与改进。美国地质调查局认为,矿产定量评价进一步改善的方向是“用新的、更精确的方法减少估算的重大不确定性”。多年来,我国著名学者赵鹏大院士针对矿床预测先后提出了相似类比、求异、定量组合控矿、综合地质异常致矿、三联式等成矿定量预测理论。除此之外,“矿床的分形模拟”“多重分形与空间统计”“基于GIS的矿化与矿床预测的多重分形异常分析”以及“奇异性”等的研究成果不断被成矿预测以及深部地质找矿所吸收与应用。申维(2010)指出,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,必须采取切实可行的措施,例如:①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;②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。

3) 主动联合多种找矿方法与勘查手段, 开展全方位的深度交叉与融合, 提高深部隐伏矿产预测的精准度。

叶天竺等 (2007b) 认为, 深部找矿方法理论研究突出的一点在于特别强调三维空间信息的综合研究, 以及成矿作用的垂向变化特征的研究。深部找矿包括三要素, 地质研究是基础, 物探技术是主要技术支撑, 钻掘工程是实现条件。通过地质研究工作建立明确的深部找矿思路, 通过物探、化探推断深部矿体位置, 施工钻掘工程, 实现找矿突破, 这是深部找矿的基本技术路线。

赵鹏大 (2007) 提出全方位的交叉与结合方法, 包括相似类比与求异理论相结合、成矿多样性与成矿专属性相结合、传统矿产资源与非传统矿产资源相结合、成矿理论与找矿理论相结合、矿床模型与勘查模型相结合、成矿谱系与成矿系统相结合、宏观规律与微观规律相结合、定性与定量结合、线性与非线性结合。

施俊法等 (2009) 指出, 随着露头矿寻找殆尽、找矿难度不断加大, 寻找地球深部的矿产已成为国内外矿产勘查界的共识。深部找矿有着巨大的风险和不确定性, 也有着巨大的商业利润。要有效地减少这种风险与不确定性, 不仅有赖于新战略、新概念、新理论, 而且有赖于新技术的发展与应用。

尽管深部隐伏矿床的定位预测充满着巨大的困难和挑战, 但这并不能成为停滞不前的理由, 相信随着找矿理论的不断深化以及找矿方法的不断进步, 隐伏矿床的预测定会取得重大进展。对此, 刘亮明等 (2009) 明确指出, 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。

根据国外深部找矿工作中取得的重要成果和成功经验, 必须充分重视成矿理论对深部找矿工作的指导作用, 必须重视勘查新技术在深部找矿工作中发挥的关键作用, 同时还要注重现代电子和计算机信息技术的引进与吸收。为此, 关于深部找矿不仅存在理论和技术上的问题, 还存在机制和制度上的问题, 当然, 更离不开优秀的创新性地质科技人才。从而通过地质理论的突破、方法手段的创新来推动新时期的深部矿产预测, 这是一个长期而艰辛的过程, 不可急功近利, 更要容忍失败, 因为人类在认识地球的过程中, 许多问题都显得那么力不从心, 需要坚持不懈的研究与探索。

1.2 研究区研究历史与现状

湘南柿竹园钨-锡-钼-铋多金属矿集区位于湖南郴县东南 16 km, 该矿集区在长约



10 km、宽约7 km的范围内产出有东坡、柿竹园、野鸡尾、金船塘、横山岭、水湖里、红旗岭、枞树板等十余个矿床，蕴藏的矿产资源包括钨、锡、铋、钼、铜、铅、锌、铁、锰、金、银等数十种，形成一个以千里山岩体为中心向外依次为铁矿床→铁-钨-锡矿床→钨-锡-铋-钼矿床→铅锌矿床→铁-锰-铅-锌矿床→铋-汞矿床的矿化分带。柿竹园钨-锡-钼-铋多金属矿因矿床规模大、矿种多、矿床成因复杂而被誉为“世界矿物博物馆”，更是我国著名的南岭成矿带中的稀有、稀土、有色金属矿产资源的聚集地，其中柿竹园式钨多金属矿床是我国重要的钨矿床类型。为了满足国民经济建设的需要，柿竹园钨-锡-钼-铋多金属矿在开采钨、锡、钼、铋的同时，把铅锌矿也作为重要的开采对象。

该矿集区早先由原湖南省地矿局408队于20世纪50年代末发现，至60年代中期被确定为特大型矿床，70年代末开始矿山坑道工程建设，该矿床具有规模大、矿体集中、形态简单、物质组分复杂的特点。长期以来，柿竹园的矿产资源供给为经济建设做出了重大贡献，为社会发展提供了重要的物质保障。然而，由于长时间的开采，钨-锡-钼-铋多金属矿产资源形势已出现了紧张局势，保有储量服务年限日趋缩短，而矿产资源的勘探与发现具有一定的周期性，给该区的资源形势带来了很大的压力，尤其是随着深部找矿难度的不断加大，对于矿产资源的储备显得尤为紧迫。为此，深部成矿理论以及深部地质过程研究成为解决当今危机矿山问题的焦点之一，且已有效解释并回答了地球深部的一些地质问题，为深部资源勘查提供了重要理论依据。

湘南柿竹园钨-锡-钼-铋多金属矿床的普查及其相关研究已进行了几十年，获得了大量资料，对成矿作用已有基本了解。1954年，原地质矿产部中南地质局425队曾在东坡、柴山、柿竹园、金船塘、玛瑙山等地区开展过踏勘性的地质调查，编写了《湖南省郴县、资兴地区地质普查报告》。另外，冶金部206队也在该区带开展过部分地质找矿工作以及1:50000地质调查。本区全面深入的地质普查勘探工作主要始于1956年，由原湖南省地矿局408队（包括其前身424队等、郴县队、郴州专署地质局等）承担。自1964年以来，国内外地质科研单位和院校的地学工作者纷至沓来，对东坡矿田的岩浆岩、矿床成矿作用、矿床地球化学等方面进行了较为深入的研究，先后完成了《柿竹园钨多金属矿床地质》《湖南省郴县东坡铅锌矿勘探地质报告》《柿竹园-野鸡尾铅锌矿勘探地质报告》《湖南郴县柿竹园矽卡岩型钨钼铋矿床石榴石的初步研究》等一系列生产和科研报告，对于揭示柿竹园和整个东坡矿田的矿床成因、成矿机制、成矿规律等发挥了十分重要的作用，尤其是对于柿竹园矿集区的深部及外围资源勘探提供了关键理论依据。

1987年4月由湖南省地质矿产局湘南地质队牵头负责组织协调，包括地质矿产部矿床地质研究所、地质矿产部宜昌地质矿产研究所、湖南地质科学研究所等单位参与的科研课题“东坡矿田及其外围锡、铅锌隐伏矿床预测”启动实施，该课题系“七五”国家科技攻关项目第55项“中国东部隐伏矿床的预测理论和技术方法”研究项目所属二级专题之一（编号：75-55-01-03-04），1989年7月课题完成且提交验收。1987年王昌烈等编写出版了专著《柿竹园钨锡钼铋多金属矿床地质》。另外，20世纪90年代，以地质行业基金委为依托，毛景文等（1995a, 1995b, 1997, 1998）与国外学者通过开展国际合作研究，进一步深化与探讨了柿竹园超大型矿床的成矿环境、成矿特征及其成矿作用机制，出版了专著《湖南柿竹园钨锡钼铋多金属矿床地质与地球化学》。以裴荣富为首席科