

阿尔金北缘多元信息找矿 与矿产保存探讨

◎ 孙岳 陈正乐 陈柏林 等著



科学出版社

阿尔金北缘多元信息找矿 与矿产保存探讨

孙 岳 陈正乐 陈柏林 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要通过对阿尔金北缘地区大平沟金矿、喀腊大湾铁矿、喀腊达坂铅锌矿和阿北银铅矿 4 个典型矿床地质特征进行剖析, 确定已知金矿、铁矿和铅锌铜多金属矿的地层、构造、岩体、矿化蚀变等找矿标志, 结合 Landsat 7 ETM+ 影像不同波段组合解译的线性构造及铁染、羟基、褐铁矿化和黄钾铁矾矿化蚀变信息, 建立矿产预测数据库, 并运用证据权重法圈定了 4 个金矿、2 个铁矿和 7 个铅锌铜多金属矿找矿远景区, 最后对部分远景区进行野外验证工作。在此基础上, 采集研究区 22 个岩体样品, 利用磷灰石裂变径迹技术探讨阿尔金北缘山脉隆升剥露过程, 用以指示矿产的揭顶和保存状况。

本书可供地质类专业研究生、地质生产者 and 科研人员参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

阿尔金北缘多元信息找矿与矿产保存探讨 / 孙岳等著. —北京: 科学出版社, 2019.10

ISBN 978-7-03-062461-1

I. ①阿… II. ①孙… III. ①成矿带—金属矿—成矿条件—西北地区 ②成矿带—金属矿—成矿预测—西北地区 IV. ①P618.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 209913 号

责任编辑: 周 丹 石宏杰 / 责任校对: 杨聪敏

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 许 瑞

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 10 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 10 月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 206 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者名单

孙 岳 陈正乐 陈柏林

张 青 韩凤彬 王 永

王晓虎

前 言

随着浅部矿产资源的逐渐减少，找矿难度的逐渐加大，单独地应用某一技术或理论难以实现找矿的重要突破，因此开展多角度、多学科、多方法的综合研究，以及多元信息的集成分析对找矿预测显得尤为重要。近年来，运用地质、地球物理、地球化学、遥感多元信息和计算机技术提取与成矿相关的地质异常信息进行找矿远景区或靶区的圈定已经取得了十分显著的应用效果。基于地理信息系统（geological information system, GIS）技术和多元信息集成方法能够有效地将找矿预测所涉及的多学科信息融合到一起，为找矿预测与矿产资源定量评价提供基础支撑，是近年来矿产资源勘查领域的主要研究方向之一，也是理论-信息找矿的重要手段之一。目前，矿产资源评价已步入数字化、量化、信息化的研究阶段，运用 GIS 技术和地物化遥多元信息进行找矿远景区或靶区的圈定，将成矿规律与多元信息综合分析方法有机地结合起来已成为矿产资源评价的重要途径，技术方法比较成熟，应用成果丰硕。

阿尔金 NEE 向断裂带位于青藏高原北缘，是陆内巨型左行走滑断裂带。阿尔金北缘地区在阿尔金 NEE 向构造带的东段。阿尔金地区的区域构造演化、断裂走滑时间、走滑位移量、走滑机制等已经成为 20 世纪八九十年代以来的研究热点，并取得了重要的研究成果。阿尔金北缘地广人稀，交通不便，地形起伏大，不利于野外工作和工程探矿。相对于整个阿尔金构造带的研究，阿尔金北缘在 21 世纪初才开始有详细研究和报道，主要是围绕金、铅锌、铁等矿床成因、控矿构造、地球化学及年代学等方面的研究，目前涉及地物化遥多元信息找矿预测的研究相对薄弱，成为区域找矿工作亟须解决的关键问题之一。

近十年的找矿成果显示，阿尔金北缘是一条重要的铁、铜、金、铅锌多金属成矿带，其矿床成因类型、不同矿种组合关系及其反映的成矿作用条件与北祁连山西段成矿带非常相似。阿尔金北缘很有可能是北祁连山西段成矿带的西延部分，因新生代阿尔金 NEE 向断裂左行走滑作用而与北祁连山西段有所错断。该区中生代以前区域构造的演化特点与北祁连山西段基本一致，经历了太古宙—古元古代陆核和结晶基底的形成、中元古代稳定大陆边缘沉积、新元古代末期—早古生代板块扩张、加里东期板块俯冲-碰撞、晚古生代裂谷扩张及闭合造山作用和岩浆活

动、印支期伸展作用和碱性岩侵位。而中生代末以来，由于印度板块与欧亚板块俯冲、碰撞造山及其远程效应的影响，阿尔金断裂带发生了大规模的左行走滑，阿尔金北缘地区则更多地表现出挤压体制的偏脆性变形特点。因此，阿尔金北缘应该具有非常好的成矿地质条件和找矿远景。可见，建立阿尔金北缘地区的多元信息数据库及找矿预测模型对科研和实际找矿都具有重要的意义。

矿床的形成是一个“源、运、储、变、保”的过程，早期形成的矿床，后期由于地质环境的改变，先成矿体可能会被揭露或破坏，在诸多因素中，区域隆升剥露起关键作用。利用裂变径迹技术计算山体剥蚀深度，恢复山体剥露过程，结合矿体的成矿深度，对探讨矿床的保存状况和深部的找矿潜力意义重大。

本书以阿尔金北缘成矿特征和地质异常理论为指导，在充分借鉴和吸收前人研究成果的基础上，围绕多元信息找矿预测与矿产保存这一主题，分析和运用阿尔金北缘的地质、地球物理、地球化学和遥感信息，将各种有利于矿床形成的变量进行成矿有利度的定量分析。同时，结合研究区区域地质背景，以及已知矿床的成矿规律、控矿条件和找矿标志，运用矿产资源评价系统（MRAS）建立找矿模型，圈定找矿远景区，并对圈定的金、铁、铅锌远景区进行野外验证和评价。在此基础上，系统采集了中酸性侵入岩样品进行磷灰石裂变径迹测年分析，探讨了新生代以来阿尔金北缘 EW 向山脉隆升剥露的时空差异特征。其中最重要的发现是阿尔金山脉在古近纪山脉隆升剥露具有普遍性，而中新世至今的隆升和剥露仅仅存在于 NEE 走向的阿尔金断裂带旁侧的山体和 NE 向的山体，进而推测中新世以来阿尔金断裂带的快速走滑并没有影响阿尔金北缘 EW 向山体的隆升剥露。该结果对探讨新生代以来阿尔金及其邻区的区域地质演化过程具有重要理论意义，对探讨区内金属矿产揭顶过程和保存条件进而指示区域找矿方向具有实用价值。

本书共分七章，主要内容如下。

(1) GIS 多元信息找矿评述。介绍多元信息找矿的研究现状；阐述地物化遥数据特点和基于 GIS 技术进行多元信息找矿的思路流程；指出 GIS 作为多元信息管理和分析的现代化工具，结合成矿理论进行三维可视化、量化找矿预测和矿产资源评价是今后主要的研究方向。

(2) 阿尔金北缘区域地质背景。主要从地层、构造和岩浆岩等方面阐述，研究区地层从新太古界至新生界均有发育，构造表现为古生代以前基底构造、早古生代变形构造和中-新生代脆性断裂构造，岩浆岩出露广泛，侵入岩和火山岩从基性到酸性均有发育，时代以早古生代为主，少量元古宙和晚古生代侵入岩。

(3) 阿尔金北缘区域矿产。阿尔金北缘区内矿产资源丰富，以金、铜、铁、

铅、锌等矿种为主，目前已发现的大、中、小型矿床（点）数达几十处。根据矿床地质特征，以成矿过程的地质作用为依据可将研究区内的矿床划分为与大规模韧性-韧脆性变形作用有关的、与海相火山沉积作用有关的及与岩浆侵入活动有关的矿床三大类。分析大平沟金矿、喀腊大湾铁矿带和喀腊达坂铅锌矿，以及阿北银铅矿三种不同类型矿床的主要控矿因素、地球化学异常特征、矿床原生晕剖面特征及地表矿化蚀变特征等，在此基础上归纳区域成矿规律，确定不同类型矿床的地质找矿标志。

(4) 区域地球化学及矿床原生晕。分析 Au、Cu 及其他金属元素地球化学异常分布特征；对贝克滩南金矿、喀腊大湾铁矿带和喀腊达坂铅锌矿进行矿床原生晕的测试，并对不同矿床测试的成矿元素进行因子分析、相关分析和聚类分析。结果表明贝克滩南金矿中 As-Sb、Bi-Pb-Sn、Cu-Zn 元素相关性高；喀腊大湾 7918 铁矿中 Co-Ni-V-Zn-Fe、Mn-Sn、Cu-Ni-V 元素相关性高；喀腊达坂铅锌矿中 Sb-Pb-Ag-Hg、Cd-Zn、W-Mo-Bi 元素相关性高。说明各矿床外围或深部具有相关矿体成矿的可能性。

(5) 遥感影像信息提取。介绍本书研究所用遥感数据的类型、获取途径及影像的辐射校正等相关预处理；基于已知矿点和线性构造空间关系进行最佳缓冲区分析，作为找矿预测的有利条件；采集地表褐铁矿化和黄钾铁矾样品获取矿化波谱曲线，运用光谱角制图法、主成分分析方法提取了研究区褐铁矿化、黄钾铁矾矿化及铁染和羟基蚀变信息。

(6) 多元信息找矿预测。建立阿尔金北缘多元信息数据库，包括地层、构造、岩体等地质体的地理空间位置；Au、Cu、Pb、Zn 不同元素的异常；褐铁矿化、黄钾铁矾、铁染蚀变、羟基蚀变信息；已知矿点的坐标位置等。在 MRAS 软件中将研究区分为若干大小相等的单元格，单元格大小 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 。运用证据权重法 (weights of evidence, WofE) 对研究区不同类型矿床进行多元信息找矿预测，共圈定 13 个预测远景区，其中金矿远景区 4 个，铁矿远景区 2 个，铅锌铜多金属矿远景区 7 个。在此基础上，对贝克滩、恰什坎萨依、喀腊大湾、芦草沟等地区进行野外验证，验证结果表明预测的远景区具有较好的找矿前景。

(7) 山体剥露与矿产保存。系统采集阿尔金北缘卓阿布拉克、大平沟和喀腊大湾地区 3 条剖面 22 个中酸性侵入岩样品，进行磷灰石裂变径迹数据分析和热史模拟，确定阿尔金北缘山脉在新生代的隆升剥露过程，探讨阿尔金地区山体（包括阿尔金断裂两侧山体和阿尔金 NE 向山体）在新生代隆升剥露的差异特征。矿床的保存与山体的隆升剥露关系密切，本次恢复阿尔金北缘隆升剥露历史，以期

为该区深部找矿和区域找矿潜力评价提供科学依据。

本书基于作者团队多年的野外和室内工作，为“十二五”国家科技支撑计划项目中“阿尔金成矿带多元信息成矿预测与找矿示范”专题和中国地质调查项目“阿尔金北缘构造变形与金多金属矿床找矿预测”的成果。野外工作过程中，中国地质科学院地质力学研究所吴玉、张文高、孟令通、何江涛、王斌、韩梅梅及新疆地质矿产勘查局第一区域地质调查大队祁万修等给予了很大帮助。本书的出版得到了东华理工大学核资源与环境国家重点实验室和东华理工大学地球科学学院的大力支持和帮助。在此致以诚挚的感谢。

由于作者水平有限，不足之处恳请批评指正！

孙 岳

2019年5月

目 录

前言

1 GIS 多元信息找矿评述	1
1.1 研究现状	1
1.1.1 国外研究进展	1
1.1.2 国内研究进展	2
1.2 地物化遥多元信息	3
1.2.1 地质资料	3
1.2.2 地球物理数据	4
1.2.3 地球化学数据	4
1.2.4 遥感数据	5
1.3 基于 GIS 找矿预测	6
1.3.1 预测思路	6
1.3.2 预测方法	7
1.3.3 预测内容	8
1.3.4 结果评价	9
1.4 找矿预测发展趋势	10
1.5 本章小结	10
2 阿尔金北缘区域地质背景	12
2.1 地层	15
2.1.1 太古宇	15
2.1.2 元古宇	17
2.1.3 古生界	17
2.1.4 中生界	19
2.1.5 新生界	19
2.2 构造	19
2.2.1 褶皱	21
2.2.2 断裂	21

2.2.3	韧性剪切带	23
2.3	岩浆岩	24
2.3.1	基性-超基性侵入岩	25
2.3.2	中酸性侵入岩	25
2.3.3	火山岩	27
2.4	变质作用	29
2.4.1	动力变质作用	29
2.4.2	区域变质作用	30
2.4.3	接触变质作用	30
2.5	本章小结	31
3	阿尔金北缘区域矿产	32
3.1	区域矿产概述	32
3.2	典型矿床特征	34
3.2.1	大平沟金矿	34
3.2.2	喀腊大湾铁矿带	36
3.2.3	喀腊达坂铅锌矿	39
3.2.4	阿北银铅矿	42
3.3	地质找矿信息提取	46
3.3.1	控矿构造	46
3.3.2	赋矿地层	47
3.3.3	岩浆岩	47
3.3.4	矿化蚀变	48
3.4	本章小结	48
4	区域地球化学及矿床原生晕	49
4.1	区域地球化学特征	49
4.1.1	元素地球化学异常	49
4.1.2	异常分带特征	51
4.2	矿床原生晕采样及分析方法	54
4.2.1	矿床原生晕采样	54
4.2.2	元素组合分析	55
4.3	矿床原生晕分析	55
4.3.1	贝克滩南金矿	55

4.3.2	喀腊大湾铁矿带	58
4.3.3	喀腊达坂铅锌矿	61
4.4	本章小结	63
5	遥感影像信息提取	64
5.1	数据来源	65
5.2	影像预处理	66
5.2.1	辐射校正	66
5.2.2	影像镶嵌裁剪	68
5.2.3	影像融合	69
5.3	构造信息提取	69
5.3.1	线性构造	71
5.3.2	环形构造	72
5.3.3	韧性剪切带	72
5.3.4	线性构造与矿产空间关系	74
5.4	岩石光谱特征分析	75
5.4.1	岩石光谱测试	76
5.4.2	光谱曲线分析	76
5.5	遥感蚀变信息提取	78
5.5.1	信息提取方法	78
5.5.2	褐铁矿化	79
5.5.3	黄钾铁矾	80
5.5.4	铁染蚀变	82
5.5.5	羟基蚀变	85
5.6	本章小结	85
6	多元信息找矿预测	88
6.1	基于 GIS 多元信息找矿	89
6.1.1	多元数据库建立	89
6.1.2	多元信息提取	89
6.1.3	多元信息找矿模型	94
6.1.4	远景区圈定	97
6.2	远景区评价及验证	102
6.2.1	远景区评价	102

6.2.2 野外调查验证	103
6.3 本章小结	105
7 山体剥露与矿产保存	106
7.1 裂变径迹定年原理	108
7.2 采样位置及实验方法	109
7.2.1 采样位置	109
7.2.2 实验方法	109
7.3 径迹数据处理	111
7.3.1 数据分析	111
7.3.2 热史模拟	114
7.4 山体隆升剥露过程	125
7.4.1 新生代构造热事件	125
7.4.2 山体剥露时空特征	126
7.5 矿产保存探讨	127
7.5.1 矿产分布与山体剥露关系	127
7.5.2 区域及深部找矿启示	129
7.6 本章小结	130
结束语	131
参考文献	133
附录 矿床原生晕数据表	150

1 GIS 多元信息找矿评述

随着浅部矿产资源的逐渐减少及找矿难度的加大,单一找矿信息对隐伏矿床的找寻效果可能不明显,单一的理论方法难以取得找矿的突破和对矿产资源进行正确评价,面对这一状况,采用新技术方法进行找矿预测和矿产资源评价已迫在眉睫(陈炳贵,2015;黄诚等,2018)。基于地理信息系统多元信息找矿预测是一种高效的找矿勘查方法,是以成矿理论和地质异常理论为指导,以地质、地球物理、地球化学、遥感(以下简称地物化遥)异常信息为基础,借助计算机技术和资源评价系统对地物化遥信息中的各种与矿床有关的信息进行量化分析,建立找矿模式,从而进行找矿预测的一种找矿勘查技术方法,该方法是当前找矿预测工作中的主要发展方向和主要技术手段之一(肖克炎等,2000,2015;Carranza,2008;陈建平等,2008a;向中林等,2009;杨斌等,2014;Zhang et al.,2017a;崔宁等,2018)。

1.1 研究现状

1.1.1 国外研究进展

找矿预测是矿产资源评价的重要内容,在过去几十年受到全球地质学家的关注和研究(潘国成,2010)。矿产资源评价是利用现代地质成矿理论和评价技术对地质调查得到的各种资料(地质资料、地球物理数据、地球化学数据和遥感数据等)进行全面的综合分析,提取各种与成矿有关的信息,总结成矿规律、控矿因素及找矿标志,建立综合信息找矿模型,科学地评价矿产潜在的位置、数量、质量等(Agterberg et al.,1993;Singer,1993,2008;Carranza and Sadeghi,2010;Partington,2010)。

国外一些数学地质学家早在20世纪60年代就开始基于GIS矿产资源评价方法的研究,如Harris(1965)、Sinclair和Woodsworth(1970)、Agterberg(1971)、Singer和Mosier(1981)等。早期的方法主要采用数据驱动模型,即利用已知矿床地质背景和勘探工程完善的区域建立模型,应用到相似地质背景但相对缺少勘

探工程的区域寻找类似矿床 (Carranza, 2009), 然后又发展了知识驱动模型进行找矿预测 (Campbell et al., 1982)。90 年代之后, 随着计算机硬件和软件的发展, GIS 软件的完善, Singer (1993) 提出“三部曲”资源评价法, 即确定地质可行地段, 估计可能发现矿床的矿石数量和质量, 最后确定矿床个数。Bonham-Carter (1994) 介绍了利用 GIS 进行空间分析和建模, 尤其针对矿床位置等感兴趣的地质体和相关空间属性 (如地球化学异常) 来建立预测模型。同时, Agterberg 和 Bonham-Carter 提出了证据权重法寻找目标矿床 (Agterberg, 1989; Agterberg et al., 1990; Bonham-Carter, 1994), 该方法至今仍是矿产勘查领域广泛应用的数学模型之一 (Carranza, 2008; Porwal and Carranza, 2015)。随后, 又出现了诸如逻辑回归 (Reddy et al., 1991)、分形 (Carlson, 1991)、神经网络 (Brown et al., 2000) 及模糊逻辑 (Porwal et al., 2003; Xiong and Zuo, 2018) 等方法, 现今 GIS 技术已广泛应用于找矿预测或矿产资源评价领域 (Harris et al., 2001; Porwal and Kreuzer, 2010; Yousefi and Carranza, 2015; Yousefi and Nykanen, 2016)。

1.1.2 国内研究进展

在国内, 应用 GIS 进行找矿预测开始于 20 世纪 80 年代中期, 起步较晚, 但发展较为快速。经过几十多年的发展, 在矿产资源评价中取得了丰硕的成果。

一方面是逐渐形成了相对完善的理论体系并研发了矿产资源综合定量评价的相关软件。代表性的有中国地质大学基于 MapGIS 平台研发的 MORPAS 金属矿产资源评价系统 (胡光道和陈建国, 1998; 陈永清等, 2008); 吉林大学王世称等提出的综合信息矿产定量预测方法和综合信息找矿模型 (王世称和王於天, 1989; 王世称等, 2000, 2001); 中国地质大学赵鹏大等提出的以地质异常、成矿多样性和矿床谱系三方面为主的“三联式”成矿预测及资源评价 (赵鹏大, 2002; 赵鹏大等, 2003); 中国地质科学院肖克炎等在 MapGIS 基础上研发的 MRAS 矿产资源评价系统 (肖克炎等, 1999, 2000; 宋国耀等, 1999), 以及基于矿床模型及多元地学信息的综合信息预测方法 (叶天竺等, 2007) 和基于“奇异性-多重分形”的非线性找矿评价 (Cheng, 2000, 2008; 成秋明, 2006; 成秋明等, 2009a, 2009b) 等。

另一方面是利用 GIS 技术, 集成了地物化遥多元信息进行成矿规律研究和矿产资源的定性或定量预测评价。例如, 张晓华等 (2000) 综合地层、构造、化探异常、重力场等利用 GIS 技术对我国内生金矿进行了定量预测评价。唐永成等 (2000) 论述了利用 GIS 建立安徽东部地区的地学信息空间数据库, 运用证据权

重法、多元信息统计回归方法对区内金矿床进行了矿床定位预测与资源量计算。陈永清等(2007)探讨了国内自主研发的GIS系统下矿产资源综合定量评价的思路和方法。陈建平等(2008b)以GIS技术为平台,集成地物化遥等资料,对西南三江中段进行了成矿规律的研究和矿产资源定量预测。He等(2010)在GIS环境中集成地物化遥资料,运用证据权重法对东昆仑金资源量进行了潜力评价。Wang等(2011a, 2014)基于GIS技术利用重力、航磁及地化数据和空间分析方法对云南东南部矿集区进行了Sn-Cu资源和远景区预测研究。黄文斌等(2011)利用GIS技术建立了东天山地区斑岩型铜矿综合信息预测模型,进行了靶区圈定和资源量估算。截至2013年,我国已完成小比例尺全国重要矿产资源潜力评价数据的建设,并在此基础上进行了铁、金、铜等25个矿种的潜力评价工作(宋相龙等,2018)。大量研究和实践证明,采用地物化遥多元信息和GIS技术评价矿产资源是有效的,充分体现了GIS技术在矿产资源评价中的作用。

3S(GIS、GPS、RS)技术在地质领域的应用和发展,以及新的找矿预测理论的探索,为实现找矿的新技术、新理论、新方法奠定了良好的基础。基于GIS技术和多元信息集成方法有效地将矿产资源评价涉及的多学科信息融合到一起,为矿产资源定量评价与找矿预测提供技术支撑,是近年来矿产资源勘查领域的发展方向之一,也是理论-信息找矿的重要手段之一(成秋明等,2007,2009a)。截至2013年,基于GIS技术,中国地质调查局已建立了全国相关地质、矿产、地球物理、地球化学、遥感等数据库,并在不同矿产资源预测和评价中取得了良好的应用效果(左超群等,2013;宋相龙等,2018)。因此,基于GIS技术方法,充分利用地物化遥多元信息圈定找矿远景区是寻找未知矿体的有效途径。

1.2 地物化遥多元信息

多元信息找矿预测中的多元信息主要指地质资料、地球物理数据、地球化学数据和遥感数据,对这些数据的收集、整理和开发利用是找矿预测的基础和前提。

1.2.1 地质资料

地质资料主要来源于野外细致的地质调查,以及各种地质图件(地质图、矿产图、地形图、剖面图等)、表格和调查文字报告等。地质资料是对区域地质状况的基本认识,是区域地质概况最基本、最直接的信息,是矿产资源评价的基础。

当然,野外地质调查是获取地质资源最原始、最直接、最有效的方法,重点关注与矿产密切相关的地层、岩体、断裂等要素,尤其对正确认识和判别构造具有重要意义,因为构造裂隙是成矿动力、通道和富集场所,不仅控制矿床(矿体)的空间产状和分布规律,而且控制矿床(矿体)在时间上的演化特征(吴淦国,1998)。

区域地质资料可通过全国地质资料馆获取,目前资料的储存主要有纸质和数字化两种形式。获取的地质资料如一般图件和文字报告等,它们的存储都是相互独立的,即图件中的地质要素缺少岩性、年代等相关属性,不利于深层次地研究分析成矿规律,因此,需将地质图件和表格、文字报告有机地结合在一起,并管理起来形成一个数据库,通过属性调取与矿产相关的地质体,有利于总结研究区的成矿地质背景,对找矿预测具有很好的促进作用。

1.2.2 地球物理数据

矿产资源多是埋藏在地表以下,特别是内生金属矿床,难以直接寻找、观察及研究,而地球物理学方法可以定性或定量反映地下地质结构情况。应用(勘探)地球物理所包含的电法、磁法、重力和地震等方法能够解释和推测地下结构构造和矿产分布。20世纪50年代人们应用地球物理方法对地球的分层和物质组成有了初步认识,随后又为地幔对流、海底扩张、全球板块等学说提供了佐证和依据(刘光鼎,2002;刘光鼎等,1997)。地球物理数据的主要作用在于提供了深部地质体的三维结构和物性参数,这在隐伏矿床预测中是独一无二的(杨晓坤,2010;袁桂琴等,2011;戚志鹏等,2012)。

伴随电子科技的发展,地球物理方法对地质体的解译有了更高的精度和灵敏度,在矿产资源勘查中有着广泛的应用,并取得了很好的成果。收集和整理地球物理数据,特别是能反映与成矿有关的地质体和构造信息,对这些异常信息采用特征点法、正反演等方法进行解释,编制与成矿密切相关的地球物理异常图件,为找矿预测提供深部数据。

1.2.3 地球化学数据

地球化学信息是最直接的找矿信息,诞生于20世纪30年代,继承了人们用肉眼观察矿化露头或矿化引起的蚀变标志来直接找矿的传统,并提高了发现难识别矿及盲矿的能力,是矿产资源评价的重要手段之一(王学求,2003;李宝强等,2010)。

截至 2000 年底, 中国 1:20 万区域地球化学已完成 600 多万平方千米的可扫面积, 这些海量高质量数据在找矿工作中发挥了巨大的作用 (王瑞廷等, 2005; 史长义等, 2014)。前人以地球化学原生晕理论为指导建立了不同矿种 (如 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、W、Mo、Sn 等) 的原生晕找矿模型, 用于外围和深部隐伏矿的预测 (邹光华等, 1996; 吴承烈等, 1998; 李惠等, 1998, 2011; 刘崇民, 2006)。

随着矿产普查的深入, 浅部和地表矿产逐步减少, 弱小的地球化学异常信息难以有效识别矿体, 结合其他致矿异常信息找矿显得尤为重要。收集区域化探的各种原始数据和图件, 分析元素组合规律和变化趋势, 利用混合总体筛分法、分形滤波法、趋势面法、等值线法、梯度法等编制成矿元素及元素组合异常专题图层。这些不同元素异常或组合异常将为多元信息找矿预测提供基础。

1.2.4 遥感数据

遥感作为地质工作的一种现代化方法技术, 在区域地质调查、矿产勘查及预测和生态环境调查中发挥着重要作用 (Goetz et al., 1983; 薛重生, 1997; Sabins, 1999; 金庆花等, 2009)。随着科学技术的不断进步, 遥感数据的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率都有了极大的提高。同时遥感数据有着其他技术无法比拟的特点: 第一, 同步观测面积大, 拓展人们的视觉空间和对区域的整体认识; 第二, 时效性强, 获取信息速度快, 周期短, 能够动态监测地球任意地区的自然或人文现象和变化; 第三, 信息获取限制少, 我国西部大部分地区自然条件恶劣, 难以进行详细的野外调查, 但基岩出露非常好, 利用遥感卫星可方便及时地获取这类地区的影像资料。

遥感影像提取的信息主要包括矿化蚀变、构造信息和岩性等。对于遥感矿化蚀变信息的提取, 主要采用主成分分析、彩色合成、比值分析、神经网络分析、小波分析等方法; 对构造的提取主要是利用最佳的波段组合和野外地质资料, 进行人机交互解译, 从而获取线性、环形及带状构造。

综上所述, 地质学、地球物理学、地球化学和遥感学作为地球科学的基本学科, 其研究对象都是地球, 只是研究角度不同, 采取的方法和技术不同, 因此在研究过程中应相互补充, 综合分析, 得出相对正确的结论。地质资料主要是通过地质图件及野外露头 and 剖面的观测记录, 认识各种地质体的几何形态, 包括地层、构造、岩浆岩、矿体的空间产状及产出位置等, 结合地质年代学确定地质体形成年代及其构造演化历史; 地球物理数据是采用重力、磁力、电法和地震等方法获