



王志辉,吕庆田,严加永. 2016. 金矿地球物理勘查方法综述. 地球物理学进展,31(2):0805-0813, doi:10.6038/pg20160241.

WANG Zhi-hui, LÜ Qing-tian, YAN Jia-yong. 2016. Review of geophysics for gold deposit. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 31(2):0805-0813, doi:10.6038/pg20160241.

# 金矿地球物理勘查方法综述

## Review of geophysics for gold deposit

王志辉<sup>1,2</sup>, 吕庆田<sup>2,3</sup>, 严加永<sup>1,2\*</sup>

WANG Zhi-hui<sup>1,2</sup>, LÜ Qing-tian<sup>2,3</sup>, YAN Jia-yong<sup>1,2\*</sup>

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

2. 中国地质科学院地球深部探测中心,北京 100037

3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,廊坊 065000

1. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

2. *China Deep Exploration Center – SinoProbe Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

3. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Hebei Langfang 065000, China*

**摘要** 黄金兼具商品和货币双重属性,在全球能源市场占有重要的战略地位。过去几个世纪,人们一直在探索、发现和开采金矿。现如今在勘探目标区已由浅表转向深部、由老区专向新区、由出露区转向覆盖区背景下,传统的地质和矿产填图方法受到限制,地球物理方法在金矿资源勘查中发挥了重要的作用。本文通过归纳梳理近二十年来地球物理方法在金矿勘查中的研究和应用成果,分析、总结了重、磁、电、震和放射性方法在金矿勘查中的研究现状和应用进展,列举典型实例来说明不同类型金矿床的勘查技术方法,并对未来金矿地球物理勘查方法提出了展望。

**关键词** 金矿;地球物理方法;重力;磁法;电法;地震;放射性

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg20160241

**Abstract** Gold has an important strategic position in the global energy market because of its attributes of commodity and currency. Over the past few centuries, people has been exploring, discovering and exploiting gold deposits. Nowadays, the object to explore has changed from the sub-surface to the deep, from brownfield area to greenfield area and from the outcrop to the overlay field. As the traditional methods of geological and mineral mapping are limited, geophysics has played an important part in exploring gold mine. In this paper, we review the research and application of geophysical methods in gold deposits in the past twenty years, analyze and summarize the progress of gravity, magnetic survey, electrical method, seismic and radioactivity. Then several typical examples are given to illustrate the exploration technology of different types of gold deposits, and the prospect of gold deposit exploration methods in the future is put forward.

**Keywords** gold deposit; geophysics; gravity; magnetic survey; electrical method; seismic; radioactivity

## 0 引言

世界金矿主要分布在南非、澳大利亚、秘鲁、俄罗斯、美国、印度尼西亚、加拿大和中国等地,这些国家已探明金矿的储量占世界金矿总储量的58.33% (Zhang *et al.*, 2015)。2001年,世界金矿开采达到顶峰,大部分容易发现的矿床已经被开采,现如今面临的挑战是开采深部矿体,延长已开采矿山寿命和发现新矿床 (Harrison and Urosevic, 2012)。在当前找

矿对象由浅表转向深部、由老区转向新区、由出露区转向覆盖区的背景下,传统的地质和矿产填图方法受到限制,地球物理、地球化学和遥感等技术方法发挥的作用愈发明显。依据矿体、成矿空间和控矿要素与周围地质体产生的磁化率、密度、电阻(导)率、极化率、波阻抗等物性差异为基础的地球物理方法在金矿床勘查中发挥了重要的作用。利用地球物理方法不仅可以直接探测埋藏较浅的矿体,也可以通过探测与成矿作用密切相关的容矿岩体、构造、蚀变带和标志层等

收稿日期 2015-07-11; 修回日期 2015-12-20.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 地质调查项目(12120114053301)、自然科学基金项目(41574133和41104061)和中国地质科学院基本科研业务费专项经费(YYWF201526)联合资助。

作者简介 王志辉,男,1982年生,黑龙江宝清人,在读博士,工程师,主要从事矿产勘查地球物理和城市地球物理方法研究工作。(E-mail: wangzhihui1982@outlook.com)

\* 通讯作者 严加永,男,博士,副研究员,主要从事矿产资源勘查和深部结构探测研究。(E-mail: yanjy@163.com)

地质要素,进而达到找矿目的。

国内、外专家和学者曾针对金矿勘查过程中地球物理方法应用效果,以及不同类型金矿地球物理场特征和勘探方法组合做了很多研究工作。特别是 Seiglel (1984), Doyle (1990) 和 Guo 等 (1999) 人对金矿地球物理勘查方法进行过比较全面的综述。本文在前人的工作基础,通过分析和总结过去二十年金矿勘查地球物理技术方法,按照重、磁、电、震和放射性分类方法,总结不同方法在金矿勘查过程中的应用进展和研究现状,并通过典型实例来说明不同类型金矿地球物理勘查方法。希望能够为我国金矿资源勘查提供方法借鉴。

## 1 金矿床分类

过去二十年,金矿床学研究进展使得人们对于不同类型金矿的特征有了更深入的认识 (Robert *et al.*, 2007):

- (1) 深入理解一些矿床的成矿模式;
- (2) 定义一些新的矿床类型和子类型;
- (3) 引入一些新的术语。

金几乎能在所有地质年代、各类岩石、各种地质环境中富集成矿,也能参与各种地质作用,因此金矿床产出形态和类型具有多样化特点。总的来说,以往金矿类型分类方案主要基于以下考虑 (王成辉等, 2014):

- (1) 以成矿温度和深度作为划分依据,划分为深成高温、中温中深、浅成低温等;
- (2) 以矿体形态、矿化类型作为划分依据,如石英脉型、破碎带蚀变岩型、细脉浸染型等;
- (3) 以含金建造为划分依据;
- (4) 以成矿物质来源作为划分依据;
- (5) 以构造环境作为划分依据。

Robert 等 (2007) 总结全球 103 个主要金矿床类型,将金矿主要划分为 (图 1): 绿岩型金矿、浊积岩型金矿、条带状铁建造型金矿、中深成侵入型金矿、浅成侵入型金矿、沉积岩母岩侵入型金矿、斑岩型金矿、高(中)硫化型浅成低温热液金矿、低硫化型浅成低温热液碱性金矿、低硫化型浅成低温热液偏碱性金矿、卡林型金矿、块状硫化物金矿和砂金矿。

## 2 地球物理方法

### 2.1 磁法

磁法是矿产勘查中传统的地球物理方法,也是早期应用在金矿勘查中的技术方法。磁测填图能够快速、有效地查明金矿所在区域的岩性和构造特征,了解隐伏的控矿岩体、构造和含矿蚀变、破碎带的分布 (吴国学, 2007)。在一些露头较少区域和无人区,利用航空磁测技术获得区域地质-地球物理资料是最快捷、有效,也是成本最低的技术方法。磁法可以在弱磁岩性背景下探测与金矿成因相关的基性-超基性岩和火山岩,表现为强磁性。Park (2003) 利用航磁、地磁数据和钻孔磁化率联合解释澳大利亚西部 Wallaby 金矿区阳起石-磁铁矿岩蚀变筒的几何形态,后经打钻证实数个叠加在一起的含金矿化带。磁法也可以在强磁岩性背景下探测与金矿有关蚀变岩或石英脉,表现为弱磁性。刘善丽等 (2011) 在利用高精度磁法在内蒙古克力代金矿点测量时发现矿化蚀变岩和含金矿石,其磁化率和剩余磁化强度都具有显著的弱磁性

或非磁性特征;特别是叠加构造及矿化蚀变的强磁性原岩,会产生 1~2 个数量级的降磁。Hoschke 和 Sexton (2005) 利用高分辨率的磁测资料圈定澳大利亚 Pajingo 地区浅成热液型金矿控矿断裂构造和含金的石英脉。金矿化的蚀变带通常伴有磁铁矿化也表现为强磁性,磁化率测试结果对于帮助寻找金矿也有重要指示作用 (Richard, 1994)。航磁梯度测量技术与常规的航磁总场相比,在金矿地质填图中可以更加准确地划分地层、确定岩浆岩的分布范围以及断裂的平面位置等 (管志宁等, 1996)。位场 (重力和磁测) 数据处理和反演技术发展使得磁测技术更好地应用到金矿勘查领域 (Holden *et al.*, 2007), 特别是三维反演技术发展和计算机处理能力的提升已将三维磁测反演成功地用在与金矿有关的蚀变带填图中 (Coggon, 2003; Wallace, 2007)。

### 2.2 电法

电法勘探技术是金矿床勘查中最常用的一种方法,利用电法勘探技术可以追踪含硫化物的矿化带,圈定控矿构造和蚀变带填图。如果矿体与围岩存在明显的电阻率、极化率、磁导率和自然电位差异时,利用电法勘探技术可以直接寻找一些埋藏较浅的矿体,也可以通过探测一些与金矿化有关硫化物、石英脉和石墨,达到间接找矿目的。

#### 2.2.1 自然电位法

自然电位法作为一种传统的地球物理探测方法,在一些地区探测硫化物含量较高的低温热液型金矿具有很好的效果。Goldie (2002) 收集、整理秘鲁亚纳科查地区 1200 km 自然电位剖面数据,并研究发现负自然电位和高电阻率特征与含金的硅酸岩体具有很好的对应关系。在许多矿区和野外调查工作中,常常出现几伏特的负自然电位异常,最大值可达 -10.2 V。自然电位响应的强度与高硫化金矿体的规模和电阻率具有直接的关系,矿体的规模和电阻率越大,负自然电位效应越明显。

#### 2.2.2 直流电阻率法

直流电阻率法通常与激发极化法联合探测金矿矿化体和蚀变带。在北美地区,利用电阻率填图能够快速、准确发现与金矿有关的硅化蚀变,高电阻率异常区往往是钻探的目标区域。Spitzer and Chouteau 等 (2003) 利用井中电阻率和极化率测量探测研究魁北克 Casa Berardi 金矿含金石英脉型矿体的侵染带空间分布范围,井中测量极化率给出矿体形态的详细信息,电阻率特征划分断裂带中的正、副变质岩。高密度电阻率探测方法对于探测浅部含矿体、富矿层位、控矿和容矿构造也具有良好的效果 (汪振斌等, 2001; 孙中任和魏文博, 2004; 马德锡等, 2008)。

#### 2.2.3 激发极化法

激发极化法是一种探测金矿的有效方法,特别是对于那些与金属硫化物和石英脉密切相关的金矿。一般情况下,高极化率和低电阻率异常区往往是成矿有利区域 (Kazuya, 1995; Oldenburg *et al.*, 1997), 视幅频率能够区分石英脉型和蚀变带型金矿的黄铁矿矿化程度和类型 (陈绍求和陈明伟, 1999; 陈绍裘和陈灿华, 2003)。但是存在强烈硅化作用时,由于硅化物充填所有孔隙,会产生低极化率和高电阻率特征。关于极化效应产生机理仍然存在争议, Okada (1995) 通过井中极化率测量得出: 在强蚀变带、石英脉和地质体边界

处通常表现为高级化率,极化率与地温梯度存在明显的正相关。排列装置方面,无论时间域还是频率域,偶极-偶极,单极-偶极和梯度排列装置是野外探测金矿的主要排列装置。仪器采集方面,分布式采集系统(Goldie, 2007)与常规的采集系统相比,在不损失空间分辨率的前提下,数据信噪比更高、探测深度更大,更适合矿区勘探。

#### 2.2.4 电磁法

电磁法技术主要探测与金矿床有关的块状硫化物、传导断层或破碎带、高阻硅化岩石,以及深部构造和各向异性特征。大地电磁技术(MT)可以用来探测壳幔尺度的深度控矿、容矿构造和成矿流体的深部运移通道(Wannamaker, 2003)。航空电磁测量具有成本低、速度快特点,应用在一些无人区或植被发育的覆盖区寻找与成矿有关的构造、岩体和蚀变带。瞬变电磁测量(TEM)在探测由非均匀冲洪积物覆盖的含矿火山岩基底深度时,效果往往比磁法和地震折射更好(Akatarakçi *et al.*, 1997)。甚低频(VLF)电磁法在加纳Ashanti绿岩带金矿勘查中结合土壤地球化学方法有效圈定和识别与剪切作用相关的含金石英脉(Asiamah, 1994)。可控音频大地电磁测深(CASMT)具有观测效率高、分辨能力强、成本低,探测地下与金矿有关的低阻体和高阻蚀变带,以及控矿构造方面具有良好的效果(Okada, 1995; 于昌明, 1998),张量测量技术能够更加准确的反映地质体电性结构的形态特征。EH4连续电导率成像仪能够探测地下1 km范围的不同地质体的精细电阻率结构,清晰地判断矿化异常体在空间上的展布规律,并能直观地提供矿化异常在剖面上的形态、规模和矿化强度等重要信息(沈远超等, 2008)。航空音频磁测技术被广泛应用在矿产资源勘查中寻找高导目标体,它不仅能够探测不连续的导体,也能探测出电阻率和电导率梯度变化,这些变化经常发生在不同地质体的接触或构造部位(Witherly and Sattel, 2012)。音频磁测技术近些年在澳大利亚金矿勘查中获得许多成功实例,应用音频磁测技术能够准确的探测控矿构造和与金矿化有关的小规模构造(Cooper *et al.*, 2005; Meyers *et al.*, 2005)。数据处理和解释方面,计算机并行计算和GPU技术使得电磁法数据三维反演计算(Howe and Townsend, 2014)更加快捷,解释结果更加可靠。

#### 2.3 重力

重力勘探在金矿勘查领域中的应用虽然不如磁法勘探应用广泛,但是重磁联合勘探在南非威特沃特斯兰德平原许多新矿床发现过程中起到了重要的作用(Doyle, 1990)。应用重力勘探技术主要目的是划分区域地质构造和圈定控矿地质体(Okada, 1995; Hoschke and Sexton, 2005),研究深部构造、成矿规律和成矿环境的重力场特征,提取与成矿有关的重力异常信息。不论何种类型的金矿,矿体与围岩密度均具有明显的差异,且矿石品位越高、密度差异越大。因此,未来高精度、大比例尺的重力勘探,以及全张量重力梯度测量技术(Mataragio, 2011)可能直接用于寻找大规模、高品位的金矿。

#### 2.4 地震

在硬岩地区,由于不同类型的岩石、断层、破碎带,以及地质体不连续等使得地震波的传播路径变的复杂、多变,利

用反射地震方法探测硬岩特征和直接探测矿产资源仍然处在初级阶段。但是高分辨率反射地震在精细解释金属矿控矿构造、追踪含矿层位、甚至直接发现深部(大于1000 m)矿体方面逐渐显示出巨大的优势(吕庆田等, 2010a),加拿大、南非、瑞士、芬兰、美国、澳大利亚和中国等地相继开展了大量的金属矿地震勘探试验和研究工作,并取得一些成功的实例。近年来,金属矿地震勘探取得的进展主要体现在三个方面(吕庆田等, 2010b): (1)以块状硫化物矿床为代表的矿石物性(密度和速度)研究; (2)深部块状硫化物矿体的反射和散射理论模拟和应用; (3)区域控矿、容矿构造的反射地震探测成为深部成矿预测和矿山开发的重要手段。在南非Witwatersrand金矿, Pretorius等(2000)利用3D反射地震勘探技术揭示1000~3500 m深度的含金矿脉的空间结构;在西澳大利亚St Ives金矿区, Stolz等(2004)利用反射地震技术对太古代地层和构造成像,并直接发现新矿体;在中国黔西南中部卡林型金矿床,胡煜昭等(2012)利用反射地震资料圈定含金矿层位上二叠统龙潭组煤系地层、东吴不整合面和广西不整合面,揭示了断层控制型金矿和断层伴生型金矿空间分布特征。

研究以往的金矿区地震勘探成果资料表明:在金矿地震勘探过程中,获得和提取高信噪比的资料是最基础和最重要的环节;高精度的静校正和速度分析能够保证地质体准确成像;倾角时差校正(DMO)和偏移处理技术对于保留陡倾角同相轴具有很好的效果。基于地震波动力学特征反演、解释技术也在硬岩地区开始尝试应用。van den Berg等(1992)应用AVO技术判别火山岩和沉积岩; Stuart等(2000)通过分析地震属性,结合钻孔、野外地质观察和合成地震记录识别小尺度(断距10~20 m)断层,首次利用反射地震技术识别Witwatersrand平原含金砾岩岩性变化; Harrison和Urosevic等(2012)开展的金矿勘探地震处理、反演和AVO技术研究工作, AVO技术分析表明,含金构造可能与AVO效应和反射率有关,因此可以开展局部叠加分析,声波和弹性波阻抗反演研究工作,提出利用AVO技术圈定含矿储层是一种具有重要意义和潜力的方法。

#### 2.5 放射性

无论金矿床产出在沉积岩、岩浆岩还是变质岩中,大多数金矿床的形成常伴有强烈的热液蚀变现象,蚀变作用通常导致金和放射性核素活化转移。蚀变岩型金矿,其含矿岩石和近矿围岩中的放射性核素U、Th、K常常发生较大的变化,如硅化使U、Th、K析出(形成U、Th、K的相对亏损),钠化使U活化转移,形成U的相对亏损,钾化使K含量增高,形成钾异常。另外,金矿床的产出还十分明显地受构造控制,在构造成矿带、断层、裂隙等处,也是形成放射性异常的关键部位(吴国学等, 2005)。因此利用这些构造与围岩、蚀变带与矿化带之间的U、Th、K放射性元素丰度值的差异寻找与金矿有关构造和蚀变带是一种经济、有效和快速的方法。在澳大利亚西部, Perry和Wilson等(1994)利用伽马能谱仪测量与金矿化密切相关的钾化蚀变带。邱元德(1996)对金-轴型、脉型和非脉型金矿的U、Th、K放射性异常模型进行总结。马俊孝等(1999)对伊通新家地区含金破碎蚀变带放射性异常特征和组合型式进行概括。董纯茵等(1999)通过不同的金和金

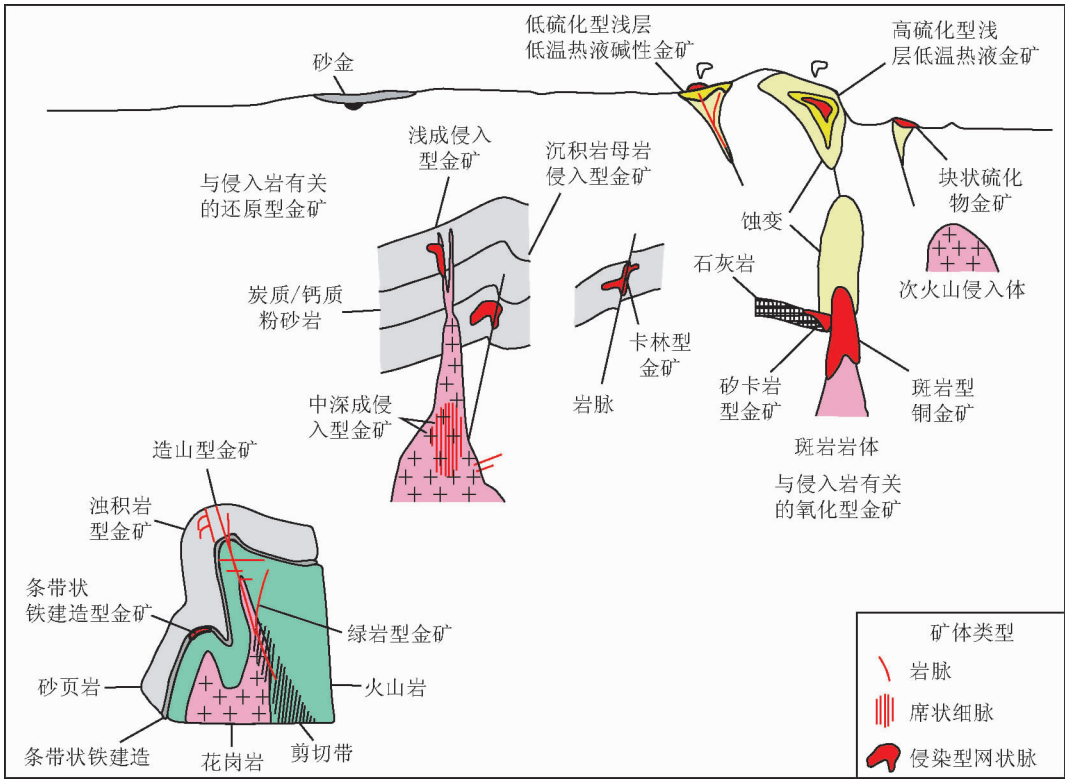


图1 主要金矿成矿系统关键地质要素示意图(据 Robert et al., 2007)

Fig.1 Schematic cross section showing the key geologic elements of the main gold systems(after Robert et al., 2007)

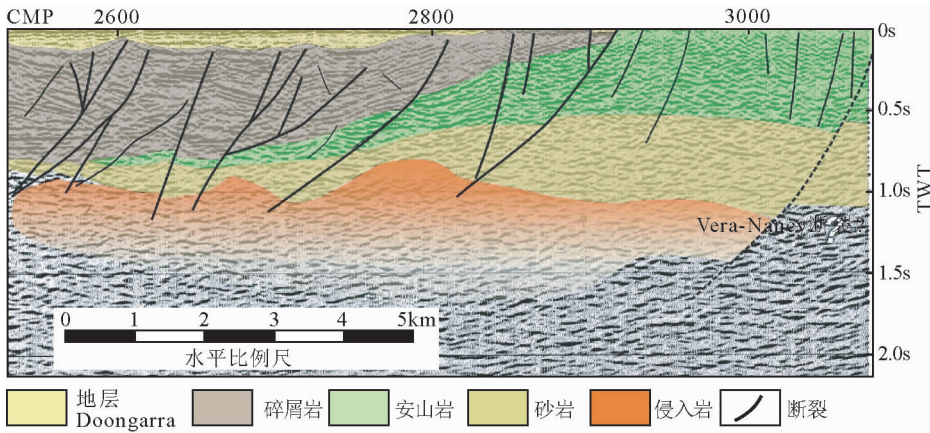


图2 地震-地质解释剖面图(据 Terry et al., 2005)

Fig.2 Geological interpretation of seismic profile(after Terry et al., 2005)

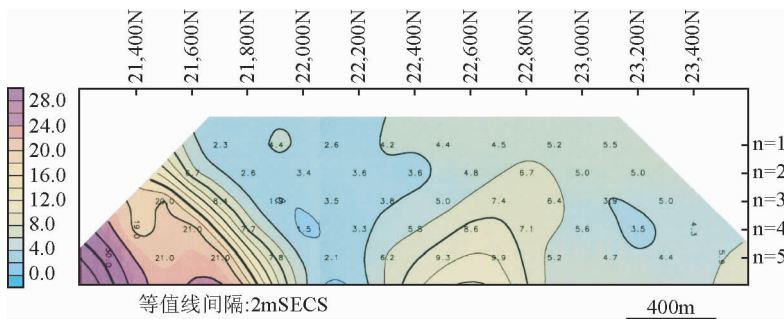


图4 里奇韦地区偶极-偶极视电阻率断面图(据 Mackey et al., 2001)

Fig.4 Ridgeway dipole-dipole apparent chargeability pseudosection(after Mackey et al., 2001)



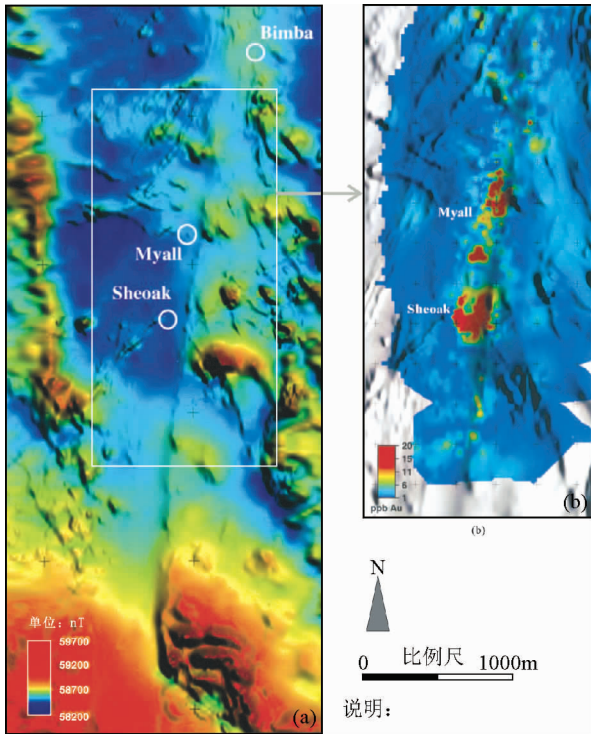


图3 航磁异常图(a)和金元素地球化学异常图(b)(据 Park,2003)

Fig.3 Aeromagnetic anomaly (a) and gold geochemistry anomaly (b) (after Park,2003)

多金属矿区地气研究、室内上升气流和纯扩散模拟模型试验以及地气采样片在高分辨率显微技术下观察的结果,讨论了地气测量的找矿机理,认为地壳内上升气流携带深部矿化元素的纳米级微粒垂直向上迁移至地表,形成地气异常.吴国学等(2005)通过测量地质体U、Th、K的含量及其比值的异常来指示含金蚀变带的存在,进而指示金矿体的赋存部位.

不同温度的成矿热液在围岩及构造条件不同的情况下所形成的金矿床围岩蚀变不同,U、K、Th的含量及比值也不同.王锐军等(2014)对金矿放射性伽马能谱特征及其应用进行研究,提出了常用的三种U、K、Th参数比,并在瓜州县老金厂金矿发现了金矿(化)体.此外,金矿往往受断裂、裂隙和破碎带控制,它们为氦气体的迁移提供运移通道,利用土壤氦气测量可以寻找控矿构造和含矿构造,达到间接找矿的目的.

### 3 应用实例

#### 3.1 浅成热液型金矿

澳大利亚Pajingo浅层低温热液型金矿区(Hoschke and Sexton,2005)位于昆兰士州东北,查特斯堡南部60 km,晚泥盆纪-石炭纪德拉蒙德盆地北缘,面积约150 km<sup>2</sup>,地表80%区域被第三系和早期的导电沉积物覆盖.金矿产于覆盖层下部火山熔岩和火山碎屑岩内部的细石英脉内,脉体宽度一般0.5~3 m,已发现的大部分的矿体沿着北西走向 Vera-Nancy构造分布.

地球物理方法在Pajingo地球金矿勘探过程中发挥着重要作用.早在二十世纪八十年代,该地区就开展了精细的航空磁测和梯度电阻率测量调查工作.并于1991年,根据低磁性、高电阻率异常发现第三系覆盖层下方5~15 m处隐伏的Cindy矿体.1995年,根据电阻率和航磁异常特征布设的钻孔发现Nancy和Vera北部金矿.在勘探过程中,不同的地球物理方法发挥着不同作用.高精度磁测结果圈定安山岩、次火山侵入体和火山熔岩的分布范围,清晰地勾画出Vera-Nancy断裂等主要构造.梯度电阻率测量圈定出含矿石英脉的硅化带.偶极-偶极和单极-偶极电阻率测量用来帮助解释梯度排列异常,跨越Vera-Nancy构造的偶极-偶极电阻率剖面结果揭示矿化石英脉的空间位置,大部分硅化发生在Vera-Nancy构造的上盘.重力和地震勘探(图2)则主要用于区域构造解释.

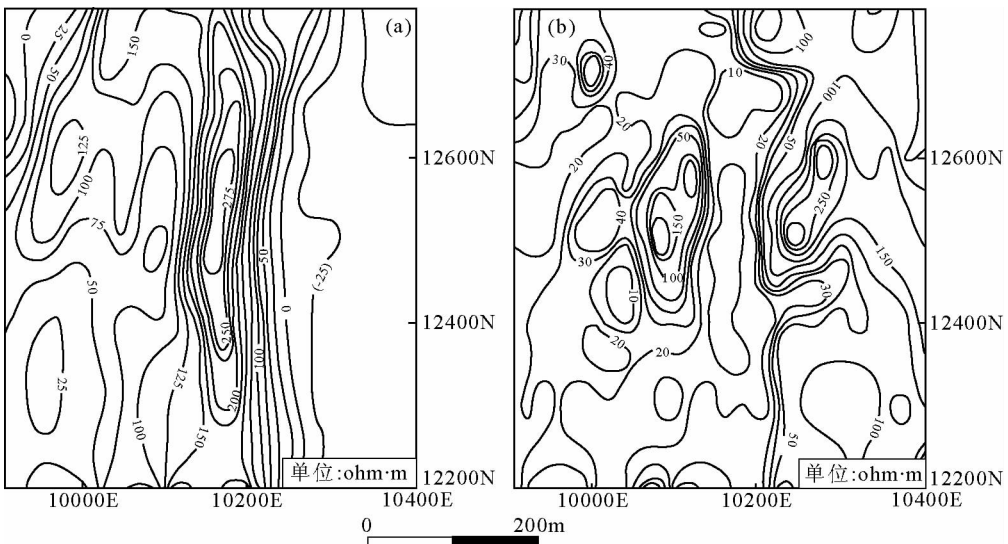


图6 磁测电阻率异常图(a)和甚低频视电阻率平面图(b)(据 Fallon and Back,1994)

Fig.6 MMR resistivity anomaly and VLF E-Field apparent resistivity(after Fallon and Back,1994)

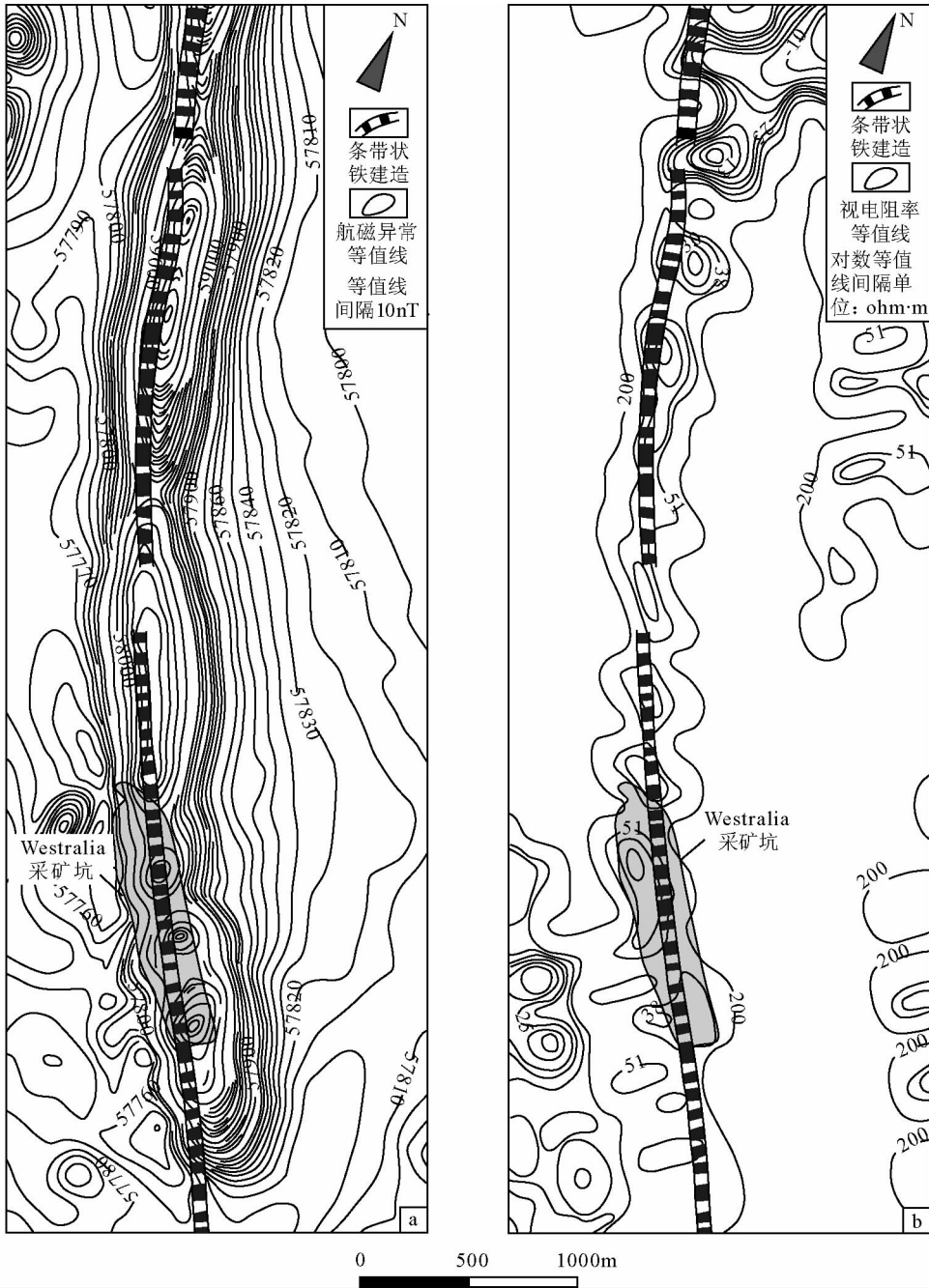


图5 航磁异常图(a)和AEM视电阻率平面图(b)(据 Fallon and Back,1994)

Fig.5 Aeromagnetic anomaly (a) and apparent resistivity from AEM data(b) (after Fallon and Back,1994)

Pajingo 金矿区实例表明在寻找浅成热液型金矿时,重力和地震资料能够解释区域控矿或容矿构造,磁测资料可以有有效的圈定容矿空间,电阻率异常特征能够揭示矿化石英脉的分布范围,利用磁化率和电阻率变化的组合特征可以寻找矿体在地下赋存位置.

### 3.2 韧性剪切带型金矿

Myall 和 Sheoak 金矿 (Park, 2003) 位于澳大利亚南部 Nuckulla 山区 Yarlbrinda 蚀变、剪切带内的角砾岩化和糜棱岩化的片麻岩中,是西部 Gawler 克拉通地区具有经济潜力的元古代剪切带勘探目标区之一,矿化区宽 1~2 km,长约

15 km,走向近南北,表现为弱磁异常特征.矿化发生在强蚀变、角砾岩化和糜棱岩化的片麻岩基底中,上方覆盖约 5~8 m 厚的白色-红棕色硅质砾岩和块状、坚硬的砾岩,地表为薄层砾质土.钻探样品测试分析显示金矿最高品位为 9 g/t,一般在 1~3 g/t.

区域航磁资料(1:10万和1:25万)揭示了与成矿密切相关的 Yarlbrinda 剪切带,根据航磁成果推断剪切带宽度可达 2.5 km,南北长度约 170 km. Myall 和 Sheoak 地区航磁成果(图3)揭示 Yarlbrinda 剪切带东部存在一个边界断层,该断层控制金地球化学异常分布.地磁资料为航磁异常解释

提供佐证,明确了剪切带东部界线.并在已知钻孔附近,发现一个低幅值的异常(约30~40 nT),该异常在航磁资料上并没有显示,但是与钻孔中的金矿化异常和高磁化率的蚀变带相对应,因此推断为金矿化异常.梯度排列装置电阻率法填图显示一个南北走向、线性低阻异常,异常西部为高阻异常.高、低电阻率异常边界揭示了金地球化学异常和剪切带的边界,以及风化壳的厚度,地下水运移和腐泥土的盐度等特征.

Myall 和 Sheoak 金矿区实例表明在寻找韧性剪切带型金矿时,航磁资料是寻找区域韧性剪切带的有效方法,大比例尺的地磁资料能够为航磁异常提供佐证,并提供与成矿密切相关、更加丰富的磁异常信息,电阻率方法和地球化学方法对于定位矿化体的空间位置具有重要的作用.

### 3.3 斑岩型金矿

澳大利亚西部新南威尔士州的卡迪亚金铜成矿系统(Mackey *et al.*, 2001)是世界级的斑岩型金铜矿产区,成矿时期在晚奥陶纪到早志留纪.已知的著名矿区包括卡迪亚山,卡迪亚-里奇韦,卡迪亚东,卡迪亚远东,卡迪亚采石场,和大、小卡迪亚矿区.卡迪亚成矿系统位于奥兰治以南,约20 km的莫朗火山岩带.母岩是中奥陶纪到早志留纪的钾玄武质火山岩,二长岩、二长闪长岩和沉积岩.矿化发生在北北西-南南东构造带内,侵入体内部和周围.晚期的南北向的逆断层和正断层破坏了矿体.覆盖层包括志留系沉积岩,第三系玄武岩和新近冲积物.金矿化与席状、网状脉,以及硫化铜矿物有关.主要的硫化物包括黄铜矿、黄铁矿和斑铜矿.黄铜矿主要集中在铜矿中.值得注意的磁铁矿蚀变也与成矿系统密切相关.应用地球物理方法在卡迪亚金铜矿系统发现和解释了一些矿产资源.

航空磁测和放射性测量覆盖整个卡迪亚成矿系统,提供区域岩性、构造和蚀变带信息.重力测量在卡迪亚山附近发现了一个北东走向的构造和由西向东的逆冲断层.地磁测量揭示了北北西走向的构造和蚀变带沿着少量出露的脉体向外延伸,指导早期勘查钻孔的布设.2D和2.5D反演模型发现了高磁异常体,钻探打穿了磁铁矿脉和二长岩岩墙,在志留系沉积岩覆盖层下发现卡迪亚东金矿化体.激发极化法偶极-偶极装置试验性测量应用在卡迪亚山和卡迪亚东地区,并取得了成功.卡迪亚山地区的硫化物在伪断面图上表现为中等充电率特征.卡迪亚东地区上层侵染带(硫化物脉)含有非常多黄铁矿成份,表现出充电率特征.里奇韦地区IP异常(图4)经钻探验证,在点号22700 N处,第三系覆盖层下方发现了含5%的黄铁矿和铜、金异常,继续钻探在500 m以下发现了里奇韦金-铜矿体.

卡迪亚金铜成矿系统实例表明在斑岩型金矿时,航空磁测和放射性测量可以提供成矿区域岩性、构造和蚀变信息,地磁数据能够圈定控矿、容矿构造和发现矿化高磁异常体,极化率特征通常能够反应出与金矿伴生的黄铁矿和其他硫化物.

### 3.4 BIF型金矿

摩根山金矿(Fallon and Backo, 1994)位于澳大利亚利奥诺拉-拉弗顿绿岩带内,绿岩带走向北北西,周围被一些花岗岩侵入体包围,岩基组成成份变化由花岗岩闪长岩到二长花岗岩.条带状含铁建造是太古界底部中间地层的一部分.岩石

已发生绿片岩相变质,局部有角闪岩和辉石角闪岩侵入接触.主要的金矿化一般限于条带状含铁建造范围内,与硫化物取代磁铁矿密切相关.硫化物主要有黄铁矿和雌黄铁矿,少见黄铜矿和闪锌矿.地球化学方法在露头矿勘探过程中发挥了重要的作用,地球物理技术应用解决了许多重要的地质问题,从矿体识别到地下填图,地球物理解释结果提高了勘探和开采效率.

有限的露头和普遍发育高磁地质体(超基性岩和条带状含铁建造)使得航磁技术应用到目标体的探测和构造解释中.航磁测量数据结果(图5a)揭示一个北北东走向条带状含铁建造高磁异常带.磁异常现象主要由磁铁矿存在引起,少数是由雌黄铁矿引起.钻孔中样品的磁化率测试结果显示含铁建造的平均磁化率为 $380 \times 10^{-3}$  SI.这个值是条带状含铁建造的特征值,大约是围岩磁化率的450倍.AEM测量的电导率异常(图5b)与条带状含铁建造相吻合,进一步解释含铁建造的形态.偶极-偶极的排列装置的激发极化法测量的视电阻率结果对导电覆盖层反应并不明显,但极化率的结果显示:垂直走向的区域极化率值高于背景值的400%,沿走向的极化率高于背景值的50%.这个结果具有重要的意义,突出来自磁铁矿的激发极化效应.磁电阻率测量异常(图6a)圈定了一个强导体,中心接近10170E,导体的轴向沿走向延伸约200 m,走向南北.异常与位于地表断裂的上盘摩根山北部矿化有关.甚低频数据结果(图6b)与磁电阻率具有较强的相似性,主要的不同之处是因为原始数据采集不同导致的.

摩根山金矿实例表明在斑岩型金矿时,磁测方法是寻找BIF型金矿最有效的地球物理方法,AEM测量通常能够为航磁异常解释提供辅助信息,极化率测量能够在突出矿化体所在位置,磁电阻率测量和甚低频结果可以解释与成矿作用密切相关的构造信息.

## 4 结论与展望

回顾、总结过去二十年金矿勘查地球物理方法研究和应用成果,不难发现地球物理技术发挥的作用日益凸现,从探测控矿构造、控矿岩体和蚀变带来间接找矿到在个别地区直接找矿,矿床学研究和方法技术发展使得地球物理技术更好的应用在金矿床资源勘查领域.未来,传统的技术方法将继续发挥不可替代的作用.航空地球物理方法有助于在无人区或露头较少的区域调查成矿地质背景和圈定成矿远景区.地震属性分析、反演和解释技术对圈定含矿储层具有重要意义,值得探索和研究.高精度、大比例尺重力勘探和全张量重力测量技术在探测大规模、高品位的矿床具有潜力.成矿带、矿集区和典型矿床等不同尺度的重、磁三维反演和岩性填图技术,能够帮助矿床专家理解成矿模型和发现新矿藏.随着研究者对不同类型金矿的深入认识并建立精准的地质-地球物理模型,我们相信地球物理方法和方法组合将更加有效的应用到金矿床勘查中.

致谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

## References

- Akatarakçi H K, Harthill N, Blohm M W. 1997. Time-domain electromagnetic survey for gold exploration, Nevada [J]. *Geophysics*, 62(5): 1409-1418.
- Asiamah G K. 1994. Exploration for gold within the Ashanti Greenstone Belt of Ghana using VLF-EM and magnetics: A case study[C].//1994 SEG Annual Meeting. Los Angeles, California; SEG, 520-523.
- Chen S Q, Chen C H. 2003. Application of induced polarization method to prospecting the fracture altered belts-type gold [J]. *J. Cent. South Univ. Technol.* (in Chinese), 34(6): 674-677.
- Chen S Q, Chen M W. 1999. Application of induced polarization method in prospecting for gold ore-deposit of quartz vein type[J]. *Mineral Resources and Geology* (in Chinese), 13: 245-248.
- Coggon J. 2003. Magnetism-key to the Wallaby gold deposit [J]. *Exploration Geophysics*, 34(2): 125-130.
- Cooper M, Meyers J, Ryan D, *et al.* 2005. High-resolution mapping using SAM surveys over the Bogada Bore gold prospect, Western Australia[J]. *Exploration Geophysics*, 36(2): 140-146.
- Doyle H A. 1990. Geophysical exploration for gold-A review [J]. *Geophysics*, 55(2): 134-146.
- Fallon G N, Backo J. 1994. GOLD: Archaean BIF-hosted gold, Mount Morgans, Western Australia: A geophysical case history [J]. *Exploration Geophysics*, 25(3): 166.
- Goldie M. 2002. Self-potentials associated with the Yanacocha high-sulfidation gold deposit in Peru[J]. *Geophysics*, 67(3): 684-689.
- Goldie M. 2007. A comparison between conventional and distributed acquisition induced polarization surveys for gold exploration in Nevada[J]. *The Leading Edge*, 26(2): 180-183.
- Guan Z N, Hou J S, Yao C L. 1996. Application of aeromagnetic gradient data in geological mapping and metallogenetic prognosis of gold deposit[J]. *Geoscience* (in Chinese), 10(2): 239-249.
- Guo W W, Dentith M C, Xu J L, *et al.* 1999. Geophysical exploration for gold in Gansu Province, China[J]. *Exploration Geophysics*, 30(2): 76-82.
- Harrison C B, Urosevic M. 2012. Seismic processing, inversion, and AVO for gold exploration-Case study from Western Australia[J]. *Geophysics*, 77(5): WC235-WC243.
- Holden E J, Dentith M, Kovesi P. 2007. Automatic analysis of aeromagnetic images for gold exploration [C].//ASEG Extended Abstract 2007. Extended Abstracts, 1-4.
- Hoschke T, Sexton M. 2005. Geophysical exploration for epithermal gold deposits at Pajingo, North Queensland, Australia[J]. *Exploration Geophysics*, 36(4): 401-406.
- Howe B D, Townsend J. 2014. Three-dimensional magnetotelluric inversion and petrophysical interpretation of the Turquoise Ridge Gold Deposit, Nevada, USA [C].//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014. Extended Abstracts, 1730-1735.
- Hu Y Z, Zhang G Q, Wang J J, *et al.* 2012. Seismic evidence of thrust-fold in Carlin-type gold deposit, central southwestern Guizhou and its significance[J], *Earth Science Frontiers* (in Chinese) 19(4): 63-71.
- Keele R A. 1994. Magnetic susceptibilities of rocks associated with some Archaean gold deposits in Western Australia [J]. *Exploration Geophysics*, 25(3): 168-169.
- Liu S L, Li W, Sun G S, *et al.* 2011. Application of high-precision magnetic measurement in checking Kelidai gold deposit, Inner Mongolia[J]. *Global Geology* (in Chinese), 30(4): 666-670.
- Lü Q T, Hang L G, Yan J Y, *et al.* 2010a Seismic imaging of volcanic hydrothermal iron-sulfur deposit and its hosting structure in Luzong ore district[J]. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 26(9): 2598-2612.
- Lü Q T, Lian Y G, Zhao J H. 2010b. Application of reflection seismic technology in Metallogenic Geological background and deep mineral exploration: status and prospects[J]. *Acta Geological Sinica* (in Chinese), 84(6): 771-787.
- Ma D X, Yu A J, Ge L S, *et al.* 2008. Application multi-electrode electrical method in gold ore prospecting [J]. *Geology and Prospecting* (in Chinese), 44(3): 65-69.
- Ma J X, Li Z T, Liu H S, *et al.* 1999. Characteristics of ground gamma-ray spectrum in gold-bearing cataclastic alteration zone—with an example of Xinjia deposit, Jilin province[J]. *Journal of Precious Metallic Geology* (in Chinese), 8(1): 45-48.
- Mackey C, Holliday J, Close D, *et al.* 2001. Geophysics and the discovery of the Cadia gold-copper system [C].//ASEG 15th Geophysical Conference and Exhibition. Extended Abstracts, 1-4.
- Mataragio J. 2011. Identifying prospective areas for sediment- and volcanic-hosted gold deposits using Full Tensor Gravity Gradiometry [C].//The 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF. Rio de Janeiro, Brazil; SEG, 129-133.
- Meyers J B, Cantwell N, Nguyen P, *et al.* 2005. Sub-Audio Magnetic survey experiments for high-resolution, subsurface mapping of regolith and mineralisation at the Songvang Gold Mine near Agnew, Western Australia[J]. *Exploration Geophysics*, 36(2): 125-132.
- Okada K. 1995. Geophysical exploration of epithermal gold deposits: Case studies from the Hishikari Gold Mine, Kagoshima, Japan[J]. *Exploration Geophysics*, 26(2-3): 78-83.
- Oldenburg D W, Li Y G, Ellis R G. 1997. Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history for Mt. Milligan [J]. *Geophysics*, 62(5): 1419-1431.
- Park A J. 2003. Geophysical characteristics of shear zone-hosted Proterozoic gold, Nuckulla Hill, South Australia [C].//ASEG Extended Abstracts. Extended Abstracts, 67-76.
- Perry A, Wilson V C. 1994. Detailed ground radiometric and magnetic surveys of the Leviathan and South Venus gold prospects, Western Australia[J]. *Exploration Geophysics*, 25(3): 168.
- Pretorius C C, Treweek W F, Fourie A, *et al.* 2000. Application of 3-D seismics to mine planning at Vaal Reefs gold mine, number 10 shaft, Republic of South Africa[J]. *Geophysics*, 65(6): 1862-1870.
- Qiu Y D. 1996. Favourable effectiveness of radiological prospecting for gold deposit [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 18: 82-85.
- Robert F, Brommecker R, Bourne B T, *et al.* 2007. Models and exploration methods for major gold deposit types[C].//Proceedings of Exploration 2007: 5th Decennial International Conference on Mineral Exploration. Toronto, Canada; DMCC, 691-711.
- Seigel H O, Johnson I, Hennessey J. 1984. Different methodology: Geophysical aids to gold exploration[J]. *The Leading Edge*, 3(6): 32-35.
- Shen Y C, Shen P, Liu T B, *et al.* 2008. Prediction of hidden gold orebodies in depleted mines by the Stratagem EH4 system [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(1): 559-567.
- Spitzer K, Chouteau M. 2003. A dc resistivity and IP borehole survey at the Casa Berardi gold mine in northwestern Quebec [J]. *Geophysics*, 68(2): 453-463.
- Stolz E, Urosevic M, Connors K. 2004. Reflection seismic surveys at St Ives gold mine, WA[C].//ASEG Extended Abstracts 2004, 1-4.
- Stuart G W, Jolley S, Polome L G B T, *et al.* 2000. Application of 3-D seismic attributes analysis to mine planning: Target gold deposit, South Africa[J]. *The Leading Edge*, 19(7): 736-742.
- Sun Z R, Wei W B. 2004. The application effectiveness of multi-electrode resistivity in gold ore exploration [J]. *Oil Geophysical prospecting* (in Chinese), 39: 118-122.
- Tong C H, Li J C. 1999. Geogas prospecting and its mechanism in the search for deep-seated or concealed gold deposits [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 42(1): 135-142.
- van den Berg C P, Gidlow P M, Duweke W A, *et al.* 1992. AVO analysis in gold exploration: A South African case study[C].//SEG Technical Program Expanded Abstracts. Expanded Abstracts, 856-859.
- Wallace Y. 2007. 3D Modelling of Banded Iron Formation incorporating demagnetisation—a case study at the Musselwhite Mine, Ontario, Canada[J]. *Exploration Geophysics*, 38(4): 254-259.
- Wang C H, Xu Y, Huang F, *et al.* 2014. Resources characteristics and



- outline of regional metallogeny of gold deposits in China[J]. *Acta Geological Sinica* (in Chinese), 88(12):2315-2325.
- Wang R J, Fu K Q, Yang B, *et al.* 2014. Application of gamma-ray spectrometry in gold deposit exploration [J]. *Gansu Geology* (in Chinese), 23(4):84-88.
- Wang Z B, Hu W H, Dai L J, *et al.* 2011. Application of high density resistivity method (RT) to deep Au ore body prediction [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research* (in Chinese), 16(1):58-61.
- Wannamaker P E, Doerner W M, Caldwell T G, *et al.* 2003. Crustal scale controls on gold ore fluid movement and deposition as revealed from electrical resistivity structure: Examples from compressional and extensional regimes [C].//ASEG Extended Abstract 2003. *Extended Abstracts*, 1-5.
- Witherly K, Sattel D. 2012. The application of ZTEM to porphyry copper-gold exploration [C].//ASEG Extended Abstracts 2012: 22nd Geophysical Conference. *Extended Abstracts*, 1-4.
- Wu G X. 2007. High accuracy magnetic prospecting on earth surface in gold mine exploration—Take the shisangongli exploring area out of Wulaga gold deposit in Heilongjiang province as an example[J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(5):1637-1641.
- Wu G X, Li S Y, Chen G H, *et al.* 2005. Gamma-ray spectrometry in exploration of gold deposit: a case study from Wulaga gold mine in Heilongjiang province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)* (in Chinese), 35(6):823-826.
- Yu C M. 1998. The application of CSAMT method in looking for hidden gold mine[J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 41(1):133-138.
- Zhang R, Pian H Y, Santosh M, *et al.* 2015. The history and economics of gold mining in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 718-727.
- 胡煜昭,张桂权,王津津,等. 2012. 黔西南中部卡林型金矿床冲断-褶皱构造的地震勘探证据及意义[J]. *地质前缘*,19(4):63-71.
- 吕庆田,韩立国,严加永,等. 2010a. 庐枞矿集区火山气液型铁、硫矿床及控矿构造的反射地震成像[J]. *岩石学报*,26(9):2598-2612.
- 吕庆田,廉玉广,赵金花. 2010b. 反射地震技术在成矿地质背景与深部矿产勘查中的应用现状与前景[J]. *地质学报*,84(6):771-787.
- 刘善丽,黎伟,孙国胜,等. 2011. 高精度磁法测量在内蒙古克力代金矿点查证中的应用[J]. *世界地质*,30(4):666-670.
- 马德锡,于爱军,葛良胜,等. 2008. 高密度电法在金矿勘查中的应用[J]. *地质与勘探*,44(3):65-69.
- 马俊孝,李之彤,刘海山,等. 1999. 含金破碎蚀变带地面伽玛能谱特征——以吉林伊通新家地区为例[J]. *贵金属地质*,8(1):45-48.
- 邱元德. 1996. 金矿床放射性勘查的良好效果[J]. *物探化探计算技术*,18:82-85.
- 沈远超,申萍,刘铁兵,等. 2008. EH4 在危机矿山隐伏金矿体定位预测中的应用研究[J]. *地球物理学进展*,23(1):559-567.
- 孙中任,魏文博. 2004. 高密度电阻率法在金矿勘查工作中的应用效果[J]. *石油地球物理勘探*,39:118-122.
- 王成辉,徐珏,黄凡,等. 2014. 中国金矿资源特征及成矿规律概要[J]. *地质学报*,88(12):2315-2325.
- 王锐军,付开泉,杨斌,等. 2014. 金矿放射性 $\gamma$ 能谱特征及其应用研究——以瓜州县老金厂金矿为例[J]. *甘肃地质*,23(4):84-88.
- 汪振斌,胡为华,戴立军,等. 2011. 高密度电阻率法(RT)在金矿深部成矿预测中的应用[J]. *地质找矿论丛*,16(1):58-61.
- 吴国学. 2007. 金矿勘查中的地面高精度磁法测量——以黑龙江乌拉嘎金矿外围十三公里勘查区为例[J]. *地球物理学进展*,22(5):1637-1641.
- 吴国学,李守义,陈国华,等. 2005. 金矿勘查中的伽玛能谱测量——以黑龙江乌拉嘎金矿外围柳树河区为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,35(6):823-826.
- 于昌明. 1998. CSAMT 方法在寻找隐伏金矿中的应用[J]. *地球物理学报*,41(1):133-138.

## 附中文参考文献

- 陈绍裘,陈灿华. 2003. 激发极化法探测断裂蚀变带型金矿[J]. *中南工业大学学报(自然科学版)*,34(6):674-677.
- 陈绍裘,陈明伟. 1999. 激发极化法在石英脉型金矿探测中的应用[J]. *矿产与地质*,13:245-248.
- 董纯菡,李巨初. 1999. 地气测量寻找深部隐伏金矿及其机理研究[J]. *地球物理学报*,42(1):135-142.
- 管志宁,侯俊胜,姚长利. 1996. 航磁梯度资料在金矿地质填图和成矿预测中的应用[J]. *现代地质*,10(2):239-249.