Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

# 厚覆盖区找矿“循环渐近式勘查技术体系”与应用

汪青松[1,2,3],张金会[1,2,3],张顺林[1,2,3],张家嘉[1,2,3],产思维[1,2,3],
程培生[1,2,3],崔先文[1,2,3],张凯[1,2,3]

1)自然资源部覆盖区深部资源勘查工程创新中心,合肥,230031;
2)安徽省电法勘探重点实验室,合肥,230031;3)安徽省勘查技术院,合肥,230031

**内容提要**:覆盖区找矿难度不仅与覆盖层厚度有关,还与覆盖层物性、水文地质条件以及矿体特征关系密切。覆盖区找矿突破是一个系统过程,需要经历选区—圈靶—定位—验证评价4个阶段,存在勘查选区、地质信息探测和多学科有效融合难题。前人较少研究覆盖区找矿突破过程与勘查技术体系,笔者等基于“现有技术+结合实际创新”思路,总结提出了厚覆盖区找矿“循环渐近式勘查技术体系”,在实际应用中,能够提高找矿成功率,入选自然资源部《矿产资源节约和综合利用先进适用技术目录(2019年版)》。

**关键词**:覆盖区找矿;地质物探融合;循环渐近式勘查;杨桥孜铜金矿;五河金矿;庐枞盆地西湾铅锌矿

铁铜金等矿产资源国内供应长期紧缺(陈葆仁等,1985; 王东方等,2019),对外依存度高,现为地质勘查弱势阶段(张恒等,2020),储量增长慢,后疫情时代资源保障安全风险增高,需要重视战略性矿产资源勘查。覆盖区分布广、金属矿勘查程度低、将是地质找矿主战场,众多专家学者积极开展覆盖区找矿方法研究。

谢学锦等研究穿透性地球化学勘查技术,建立了完整的理论与技术系列(谢学锦等,2003; 鲁美等,2019),在半干旱荒漠草原覆盖区(郭祥义等,2019)、草原覆盖区(王葆华等,2011)、森林覆盖区(张宝林等,2015; 罗先熔等,2005)、戈壁覆盖区(叶荣等,2003)、黄土覆盖区(杨笑笑等,2019)、青藏高原干旱荒漠区和冻土覆盖区(邱炜等,2013)、南方红壤区(万卫等,2019)、玄武岩覆盖区(韦选建等,2017)、盆地区(张必敏等,2016)和冲积平原覆盖区(付亚龙等,2019)等进行了广泛的找矿试验研究。

地球物理勘查是覆盖区找矿主要方法,很多学者都在寻找有效穿透探测方法,开展了激发极化法(马一行等,2019),视电阻率联合剖面法(段世轻等,2019),EH4连续电导率测量法(樊战军等,2007)和双频激电法(武炜等,2009)等单方法应用与试验;也开展了综合方法在不同类型覆盖区找矿应用与试验,如综合物探法在浅覆盖区(毕炳坤等,2019)、物化探方法在厚层覆盖区和黄土覆盖区(胡云沪等,2002; 贾长顺等,2005)、地物化综合方法在草原覆盖区和火山岩覆盖区(马维等,2014; 张景等,2016)、综合找矿方法在覆盖区(郝兴中等,2020)等应用试验,孟贵祥等系统地总结了穿透性探测技术应用情况(孟贵祥等,2019),徐启东等构建了草原覆盖区综合地质找矿流程(徐启东等,2012),张宝林等提出了典型覆盖区“地物化三场异常耦合理论”(张宝林等,2018)。

近年来,基于覆盖区巨大的找矿潜力,国外相继开展有针对性的覆盖区找矿方法研究。例如,美国地质调查局在阿拉斯加Pepple大型斑岩铜矿外围冰碛物覆盖区开展了勘查地球化学探测和矿物指示标志的研究,澳大利亚则利用已获取的综合地球物理探测数据成果,“剥离”覆盖层,开展基岩地质填图(孟贵祥等,2019)。

注:本文为安徽省重点地勘基金项目“安徽省濉溪县前常覆盖区综合找矿方法研究”(编号2005-30)、安徽省国土资源科技项目“浅覆盖区找矿磁电勘探法新技术试验研究”(编号2014-K-08)、“安庆—池州—铜陵地区深部成矿背景及深部找矿预测研究”(编号2020-K-13)和“安徽省五河县荣渡-小溪集金及多金属矿整装勘查”(编号2010-34、2015-2-9)等项目的成果。

收稿日期:2020-12-20;改回日期:2021-05-14;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.05.145

作者简介:汪青松 男,1959年生,教授级高级工程师,主要从事固体矿产勘查、地球物理勘查和厚覆盖区综合找矿方法研究工作; Emai: wqs5936@163.com。

覆盖区找矿是指发现覆盖层下矿产资源的活动,有勘查选区、圈靶、定位和验证定性评价 4 个阶段(汪青松等,2018),涉及地质、物探、钻探、分析测试等多个学科,存在勘查选区、地质信息探测和多学科有效融合等难题。

前人研究成果主要是深穿透地球化学勘查方法和常用物探方法有效性试验和已知矿区的地质物化探异常特征总结,且集中在圈靶—定位阶段,又以浅覆盖区居多,缺乏覆盖区找矿突破整体解决思路,较少针对覆盖层地质特征开展穿透性地球物理精准探测方法技术研究,地质物探有效融合方法研究成果也不多,缺乏覆盖区金属矿勘查技术体系理论总结。

笔者等长期从事覆盖区金属矿勘查科研工作,不断创新覆盖区找矿方法,总结了“一选三定四阶段”覆盖区综合找矿模式(汪青松,2010a),提出了覆盖区找矿“循环渐近式勘查技术体系”(汪青松,2010b),能够提高找矿成功率,相关技术入选《矿产资源节约和综合利用先进适用技术目录(2019 年版)》。在笔者等负责和参加的 30 余个省部级金属矿勘查和科研项目中,共发现大中型矿床 7 处、小型矿床 6 处、矿点 15 处,提交找矿靶区 30 余个,既见证了找矿突破成果,也经历了找矿失败过程,积累了较多的找矿勘查经验和教训。文中系统地分析了厚覆盖区找矿难题,提出了整体解决思路,简要介绍了“循环渐近式勘查技术体系”和应用案例,意在抛砖引玉,供广大矿产勘查科研人员参考。

# 1 厚覆盖区找矿难题

## 1.1 勘查选区难题

地质找矿首要工作是选定勘查区,需要利用以往地质物化探资料,研究区域成矿规律、分析控矿条件、进行成矿(靶区)预测,提出勘查区建议。基岩出露区常用的地质填图、剖面测量、山地工程等方法不能查明覆盖层下地质结构和矿化蚀变情况,覆盖区找矿有效方法少,以往投入少,工作程度低,地质基础资料不足,难以采用出露区常用的地—物—化综合信息采集(邱辉等,2019)与多元信息集成预测方法技术(缪宇等,2019)等选择勘查区,存在着到哪里找矿的难题。

## 1.2 厚覆盖区地质信息探测难题

覆盖区矿床是指矿体被成矿作用无关地层覆盖的隐伏矿床(汪青松等,2018)。覆盖地层的厚度、物性、水文地质特征和隐伏矿体特征与找矿难度关系密切。

### 1.2.1 覆盖层厚度与找矿难度

覆盖层厚度越大找矿难度越大,据此将覆盖区划分 3 类:

(1)浅覆盖区:覆盖层≤30m,轻便机械可采集覆盖层下样品,物化探方法有效,找矿难度相对较小。

(2)厚覆盖区:覆盖层 30~500m,易充水形成低阻屏蔽层,轻便机械不能采样,物探效果降低,常规化探方法不可行,找矿难度大。

(3)超厚覆盖区:覆盖层≥500m,矿体埋藏深度大,物化探异常更弱、效果更低,钻探施工技术要求提高(郑文龙等,2019),找矿难度更大。

### 1.2.2 覆盖层类型与找矿难度

覆盖层物性和水文地质特征对找矿效果影响大,据此划分 4 种类型:

(1)富水低阻覆盖层:以第四系松散砂砾黏土层为代表,有地下水和低阻层(胡浩等,2020);部分中新生代沉积盆地也有含水层(刘元晴等,2019)和热储层(王贵玲等,2020; 谭肖波等,2019)存在。低阻层屏蔽电法勘探信号(李海等,2014),找矿效果差;地下水不仅电率阻低且具有流动性(陈葆仁等,1985),吸收来自深部矿化元素扩散消失,阻止化探元素穿透覆盖层到达地表,屏蔽化探信息。我国平原区和山间盆地广泛分布。

(2)贫水低阻覆盖层:以固结—半固结砂砾岩泥岩组成的中—新生界“红层”、黄土层为代表,电阻率低,常缺少含水层,电法勘探效果差,深穿透化探方法有一定性找矿效果(张必敏等,2016)。

(3)高阻覆盖层,以荒漠戈壁和火山喷发岩层(如玄武岩)为代表,主要分布在我国西北地区和火山岩分布区,地表岩性干燥或固结坚硬,导电性差,存在高阻屏蔽作用,电流难以穿透覆盖层,直流电法勘探效果差。深穿透化探方法有一定找矿效果(郭祥义等,2019; 叶荣等, 2003; 韦选建等,2017)。

(4)磁性覆盖层,以中基性火山岩为代表,具有强磁性,地面磁场复杂紊乱,隐盖了深部磁异常信息,磁法勘探资料处理和异常识别难度大,深穿透化探方法有一定找矿效果(韦选建等,2017)。

同一覆盖区常有多种类型覆盖层重叠存在。

### 1.2.3 矿体特征与找矿难度

大多数金属矿床(如铜、铅锌、金银等)地质结构复杂,金属矿物含量少品位低,矿体规模小,形态不规则,与围岩交织,识别难度大。矿体物性特征、规模、产状与覆盖区找矿难度有关,寻找磁性、水平

层状、规模大的矿体难度小,寻找无磁性、产状陡、规模小的矿体难度大,参见表 1。

### 1.3　多学科有效融合难题

覆盖区找矿需要地质、物探、化探、钻探、分析测试多方法综合勘查,地质理论指导,地球物理探测技术支撑,钻探取样分析测试,多学科有效融合才能提高找矿效果。地质物探紧密结合是行业难题,地质、物探“两张皮”现象较普遍,现阶段鲜见多方法融合特别是地质物探有效融合新方法研究成果,往往导致勘查项目实施前预研究和实施后综合研究效果差,实施过程中物探工作部署、靶区预测和物探异常推断解释不正确,钻探验证经常出现“这个异常怎么没有矿”现象!

## 2　科学技术问题与解决思路

### 2.1　穿透厚覆盖层探测科学技术问题

覆盖区找矿存在的地质信息探测难题,其根源是深地探测方面的科学技术问题。现有的探测仪器设备和物化探方法技术,不能完全满足精准快速探测厚覆盖层下地质结构和矿体信息要求,物探数据采集和异常识别还有难题存在,从而导致勘查选区、圈靶、定位和多学科融合等一系列难题出现。

### 2.2　覆盖区勘查理论技术体系问题

目前,我国主要物探异常多有验证结论,单一物探方法找矿难度越来越大。地质找矿特别是覆盖区找矿需要综合勘查理论指导,统筹安排各种方法,提供合理勘查流程,实施多方法有效融合才能取得更好的找矿效果。

《固体矿产地质勘查规范总则》(GB/T13903-2020)和《固体矿产地质调查技术要求》(1:50000)(DD2019-02)为地质找矿提供了勘查理论技术体系,但是在指导覆盖区找矿时还存在不足,覆盖层具有遮挡隔断和屏蔽地质物化探信息作用,其所提供的遥感地质调查、矿产地质专项填图、矿产综合检查等方法在覆盖区基本不能发挥作用,提供的物探和化探方法在覆盖区有局限性,暂时还没有提供适合覆盖找矿需要的勘查流程和多学科融合有效方法,覆盖区找矿缺乏特色勘查理论技术体系指导。

### 2.3　解决思路

穿透厚覆盖层探测科学技术问题短期内难以完全解决,拓展覆盖区找矿空间迫在眉睫,解决问题的基本思路是“基于现有技术+结合实际创新”,构建覆盖区找矿勘查理论技术体系,逐步解决勘查选区、地质信息探测和多学科有效融合难题。即基于现有方法技术,创新地质物探结合方法,研究综合找矿模式,研发穿透厚覆盖层探测技术,不断完善矿产勘查理论。为此笔者研究总结了一种覆盖区找矿“循环渐近式勘查技术体系”。

**表 1 厚覆盖区矿体特征与物探方法有效性分析一览表**

**Table 1 List of ore body characteristics and effectiveness analysis of geophysical prospecting methods in thick overburden area**

| 矿体特征 | 找矿方法有效性与难度分析 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 物性 | 磁性矿体 | | | 无磁性矿体 | | |
| 形状 | 等轴状、柱状 | 板状 | | 等轴状、柱状 | 板状 | |
| 产状 | 直立 | 平缓 | 陡倾斜 | 直立 | 平缓 | 陡倾斜 |
| 常见矿床类型 | 矽卡岩型铁矿.铁铜矿,火山热液型铁矿等 | 沉积变质型铁矿,火山沉积变质型铁矿 | 热液充填型铁矿 | 斑岩型铜钼矿、火山热液型铅锌矿、矽卡岩型铜金矿等 | 层控矽卡岩型铜金矿,层控中低温热液型铅锌矿、金银矿, 火山沉积型铁矿、铅锌矿等 | 构造蚀变岩型金矿,石英脉型金矿,热液充填型金铅锌多金属矿等 |
| 常见规模 | 大 | 大 | 较小 | 大 | 较大 | 小 |
| 物探方法有效性 | 重力.磁法直接找矿效果好 | 磁法直接找矿效果好 | 磁法直接找矿效果好 | 重力.磁法.电法直接找矿效果差,间接找矿有一定效果 | 重力、磁法、电法直接找矿效果差,间接找矿有一定效果 | 重力.磁法接找矿难有效果,电法直接找矿效果差 |
| 找矿难度 | 选区、圈靶.定位难度小 | 选区、圈靶、定位难度小 | 选区、圈靶、定位难度较小 | 矿化蚀变带规模大,定位要求较低。选区、圈靶难度大,定位难度较小 | 矿体水平投影范围大,验证定位要求低,选区、圈靶难度大,定位难度较小 | 矿体水平投影范围小,钻探验证定位精度要求高。选区.圈靶.定位难度均大 |

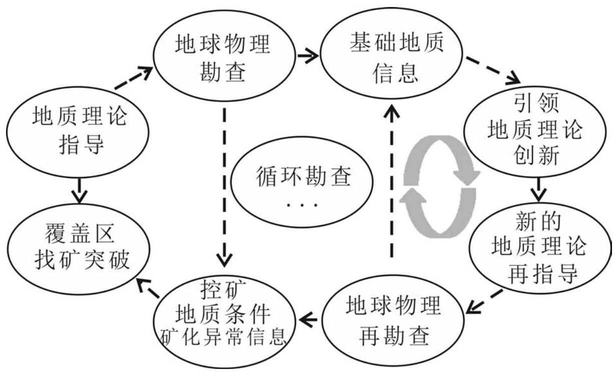


图 1 地质物探融合思维导图

Fig. 1 Mind map of geological and geophysical exploration integration

## 3 循环渐近式勘查技术体系组成

### 3.1 地质物探融合技术路线

如图 1,"地质理论循环指导,物探技术双重支撑",即地质理论指导物探工作部署,物探技术支撑矿化信息以及基础地质信息采集;物探成果引导地质理论创新,新的地质理论再次指导工作部署;循环勘查…。有别于传统的"地质出思路、物探出靶区,钻探来验证"技术路线。

### 3.2 "221"多学科勘查体系架构

如图 2,由地质、物探 2 类实物工作,多学科融合、地质信息探测 2 类创新方法,和 1 个勘查流程构成,明确了覆盖区找矿工作纲要和全程融合关键节

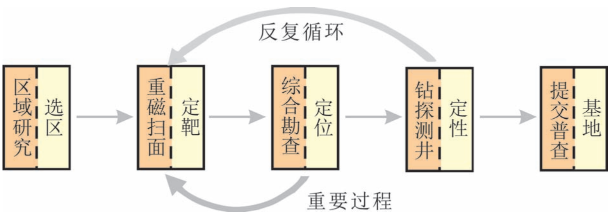


图 3 覆盖区找矿一选三定四阶段反复循环流程示意图

Fig. 3 Flow chart of repeated circulation in four stages of prospecting, separation, determination in covered area

点与创新要求。

### 3.3 "一选三定四阶段"勘查模式

如图 3,将覆盖区找矿目标分解为勘查选区、靶区圈定、勘查定位、验证定性 4 个阶段任务(汪青松等,2018),循序渐进,依次完成,缺一不可,只有上阶段任务完成后才能进入下阶段工作。靶区圈定评价是覆盖区找矿重要过程,往往需要循环勘查,靶区评价不能定位时需要重新圈靶再评价,钻探验证情况与推断成果不符时需要重新圈靶评价再定位,循环渐近式勘查,逐步逼近找矿目标,直至验证情况与预测成果一致,才能将靶区确定为普查基地提交。

### 3.4 "探测十法"方案

基于现有探测条件和创新成果,归纳梳理了 5 类地质信息采集和 5 类异常识别方法技术,作为厚覆盖区深部地质信息探测基本方案。

#### 3.4.1 信息采集方法

(1)避免屏蔽法:选择不受低阻屏蔽作用影响

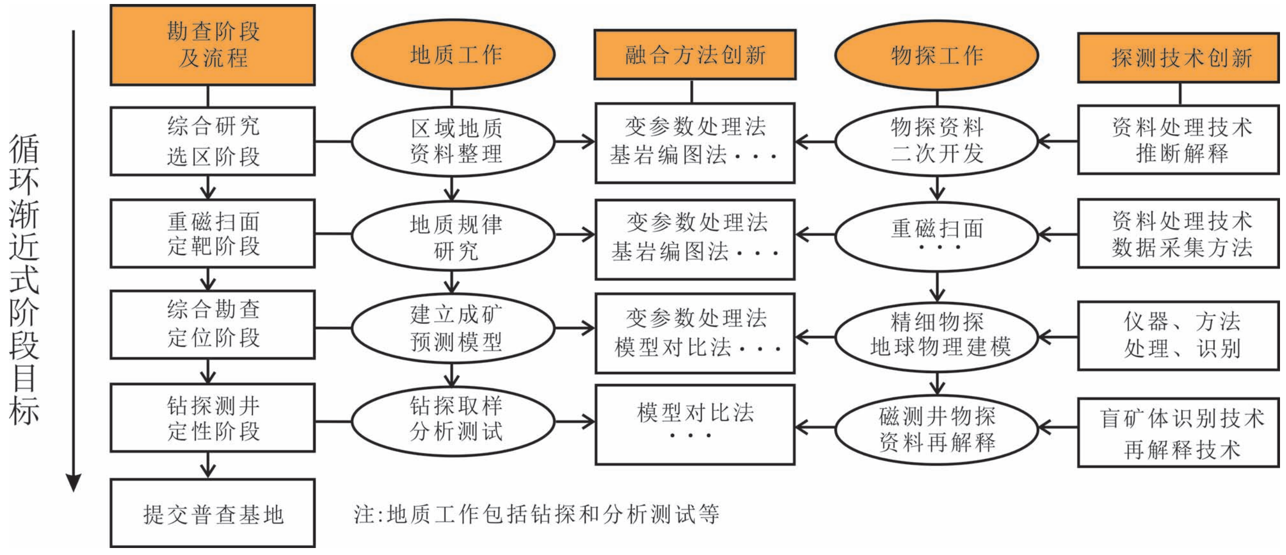


图 2 "221"多学科勘查体系架构运行示意图

Fig. 2 Operation diagram of "221" multidisciplinary exploration system architecture

的物探方法,如重磁测量、地震勘探、放射性测量(陈江源等,2020)等。

(2)增强信号法:增强发射信号或激发目标体产生特有信号,获得穿透厚覆盖层深部地质信息,如大功率电法、电流磁场法等。

(3)定向窗口法:预设目标体深度,设计电法勘探“偶极—偶极拟断面测深法”探测窗口,测量目标层位异常信息。

(4)测井法:通过钻孔直接穿过厚覆盖层近距离探测矿体异常信息。

(5)组合法:多种物探方法组合采集地质信息,优势互补克服物探方法局限性和多解性弱点。

#### 3.4.2　异常定性识别方法

(1)数据处理法:结合目标地质体规模选择处理参数,处理过程地质物探紧密结合,获得具有明确地质意义的物探异常。如庐枞火山岩覆盖区,地面磁异常跳跃复杂,存在矿致异常识别难题,寻找泥河铁矿时通过与地质模型相结合的数据处理,获得了重磁同高异常,为钻探验证孔位设计提供了依据,从而发现并快速探明了泥河大型铁矿(汪青松等,2012;吴明安等,2011)。

(2)模型对比法:对比物探异常解释模型和地质成矿模型或物性模型,定性解释物探异常,这是典型地质物探紧密相结合的物探异常解释方法。

(3)联合反演法:物探与地质相结合多参数约束联合反演,可排除物探异常多解性。

(4)模板解释法:在地质工作程度高的地区,建立各种物探异常地质解释模板,如 CSAMT 二维电阻率异常分类及其地质解释模板(汪青松,2011),据此对照定性解释工作程度低地区的物探异常。

(5)耦合递进识别法:勘查方法按先后顺序依次开展,后续勘查依据先期阶段探测成果部署,逐步验证物探异常识别矿体信息,循序渐进逼进勘查目标。同期勘查方法也可以多种组合。

### 3.5　勘查理论与找矿方法创新

#### 3.5.1　探测方法技术研究方向

基于“现有技术+结合实际创新”思路,研究探测新方法新技术,克服覆盖层遮挡和屏蔽作用,解决覆盖区特别是富水低阻厚覆盖区深部地质信息探测难题。如电流磁场法穿透低阻厚覆盖层探测试验,寻找陡倾斜脉状金矿体取得了较好的找矿效果(汪青松等,2021a),研发的一发四充电测井法解决了厚覆盖区井中薄层矿体产状探测难题(汪青松等,2021b)。

#### 3.5.2　地质物探融合方法研究方向

将地质理论与物探方法原理相结合,研究地质物探有效融合方法,解决勘查工作部署、方法设计、物探异常推断解释和综合研究等阶段地质、物探“两张皮”问题。如“地质理论循环指导,物探技术双重支撑”技术路线、“模型对比法”等物探异常定性识别的 5 类方法等;将地学成果与物探成果融合,提高勘查区地质理论认识,解决勘查区缺乏个性化勘查理论指导的难题。如在皖东北地区将区域地球物理场特征研究成果与郯庐断裂带三阶段演化基础研究成果、区域成矿规律研究成果相结合,创建的继承性断裂构造控矿模式,为五河金矿整装勘查提供了地质理论依据(汪青松等,2020a)。

#### 3.5.3　勘查技术体系研究

开展覆盖区找矿勘查理论研究,建立适合覆盖区找矿的勘查技术体系,如“循环渐近式勘查技术体系”等。

## 4　应用实例

### 4.1　杨桥孜铜金矿勘查,创新综合勘查定位技术

#### 4.1.1　基本情况

杨桥孜铜金矿位于华北地台南部的淮北平原,第四系覆盖层厚度 60~100 m。基岩如图 4a,地层以古生界寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系为主,主要岩性为碳酸盐岩和碎屑岩类;岩浆岩以燕山期花岗闪长岩体为主,在岩体接触带可形成矽卡岩型铁铜金矿。

该矿最早发现于 1978 年,前人根据航磁异常寻找铁矿,发现部分铁矿体共伴生铜金矿,同时也存在独立铜金矿体,曾投入了较大钻探工作量开展普查找矿工作,至 1995 年共探获金矿资源量 3.5t;铜 1.45 万吨;铁矿石 43 万吨。

笔者等负责“淮北市三铺岩体成矿区及其外围铁、铜、金多金属矿(整体)普查”项目,根据重磁扫面和综合研究成果,再次将杨桥孜地区作为铁铜金矿靶区,申报普查项目获得到批准。

#### 4.1.2　找矿难点与重、磁、CSAMT、CR 法耦合定位技术应用

杨桥孜地区第四系覆盖厚度大,常规电法效果差,以往找矿主要依据磁异常布钻,仅能发现与磁异常有关的含铜金磁铁矿体,难以发现没有磁异常的独立铜金矿体,存在圈定找矿靶区、矿化蚀变范围和矿体定位难题。

本次普查时创新应用重、磁、CSAMT、CR 法耦

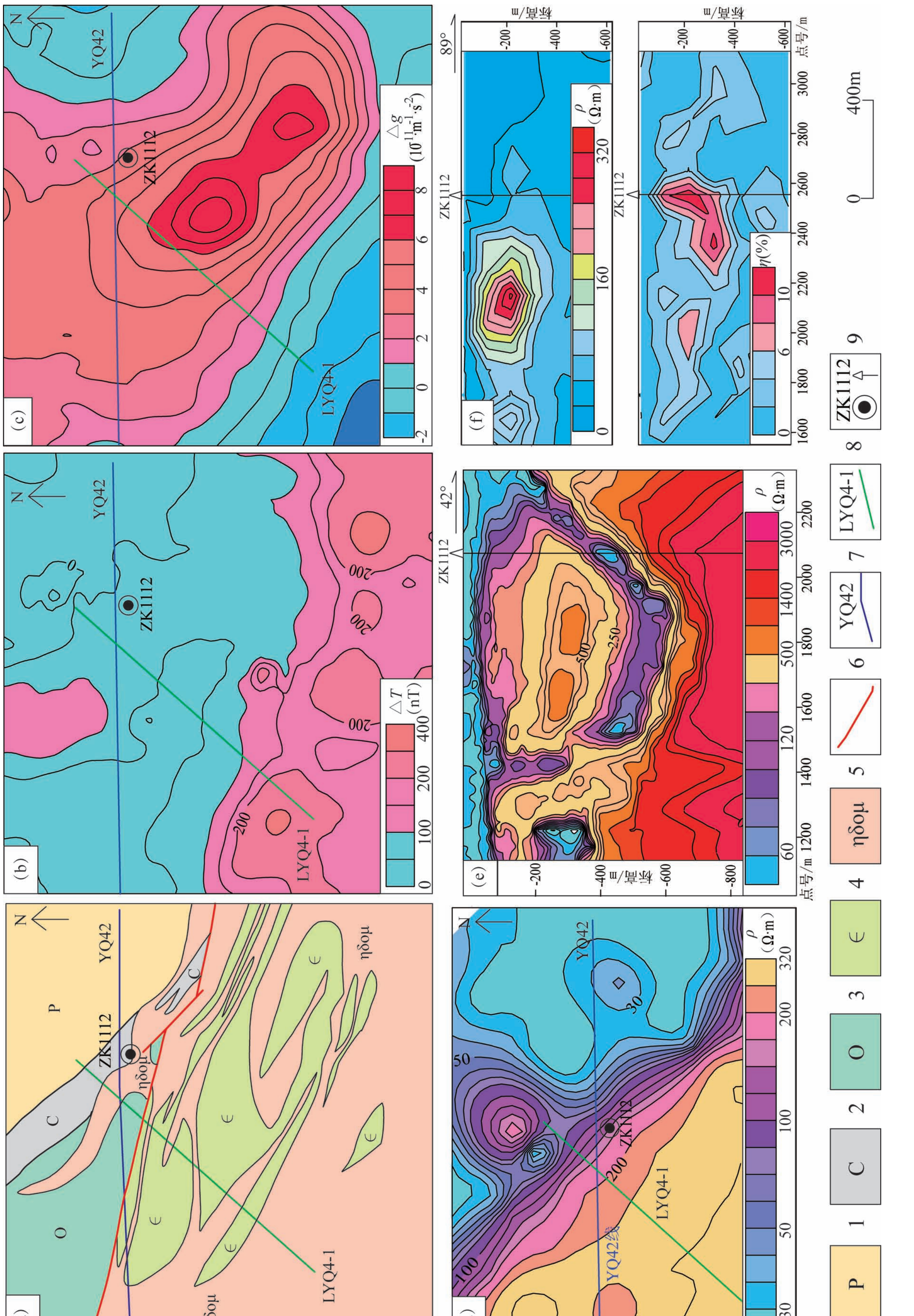
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
N
YQ42
ZK1112
LYQ4-1
P
C
O
∈
ηδομ
△T (nT)
△g ($10^{-11}$·$m^{-1}$·$s^{-2}$)
ρ (Ω·m)
η(%)
YQ42线
标高/m
点号/m
42°
89°
0 400m
1
2
3
4
5
6
7
8
9

图4 杨桥孜铜金矿ZK1112孔综合物探异常图: (a) 基岩地质图; (b)化极磁异常图; (c) 重力剩余异常图; (d) CSAMT法电阻率-200 m水平切片图; (e) CSAMT法剖面异常图; (f) CR法电阻率和充电率断面

Fig. 4 comprehensive geophysical anomaly map of zk1112 borehole in Yangqiaozi copper gold deposit: (a) bedrock geological map, (b) polarizing magnetic anomaly map, (c) gravity residual anomaly map, (d) CSAMT resistivity-200m horizontal section map, (e) csamt profile anomaly map, (f) CR resistivity and resistivity section map

1-二叠系; 2-石炭系; 3-奥陶系; 4-寒武系; 5-石英二长闪长玢岩; 6-实测断层; 7-CR法测线位置及编号; 8-CSAMT法测线位置及编号; 9-钻孔位置及编号

1- Permian; 2- Carboniferous; 3- Ordovician; 4- Cambrian; 5- quartz monzodiorite porphyrite; 6- measured fault; 7- location and number of Cr line; 8- location and number of CSAMT line; 9-drilling position and number

合定位技术发挥了作用。寒武系、奥陶系、石炭系以灰岩、白云岩、大理岩等碳酸盐岩类为主,密度较高,花岗闪长玢岩等中酸性岩密度相对较低,岩体接触带矽卡岩化岩石密度增高。据此,在普查区开展了大比例尺高精度重力测量,在弱磁异常区(图 4b)发现了重力高异常(图 4c),弱磁异常解释为碳酸盐岩引起,重力高异常解释为矽卡岩矿化带和大理岩捕虏体引起,剩余重力异常区即为铜金矿找矿靶区。因重力异常体积效应明显,不能准确确定岩体接触带位置,为此根据铜金矿化蚀变电阻率降低和岩体与围岩之间存在电性差异地球物理条件,选用 CSAMT 法探测岩体接触带和围岩捕虏体,获得了较好的电阻率异常(图 4d、e),铜金矿主要矿石矿物为黄铁矿和黄铜矿,具有强极化效应,再用 CR 法多参数(图 4f)评价找矿靶区及围岩接触带铜金化。耦合定位过程如图 4,ZK1112 在 CR 法极化率异常对应位置发现了含金磁黄铁矿化体,厚 3.67m,金 $4.03\times10^{-6}$,硫 13.07%,说明定位准确。

#### 4.1.3　找矿效果

重、磁、CSAMT、CR 法耦合定位技术可概述为:重磁扫面获取基岩基础地质信息,在岩体接触带圈定找矿靶区;大比例尺重力测量圈定围岩捕虏体和矽卡岩化蚀变范围;CSAMT 法探测岩体和围岩捕虏体边界;CR 法多参数评价金属硫化物矿化情况;依次勘查,循序渐近,不断缩小靶区范围,逐步逼近矿体目标,钻探验证见矿。该技术寻找覆盖区矽卡岩型弱磁性铜金矿体效果好,在杨桥孜地区探获了皖北地区第一个中型规模以上金矿,2013 年提交杨桥孜铜金矿普查报告,评审备案认定 333 类金资源量 8.7t(中型规模),品位 5.72g/t;铜 3.51 万吨(小型规模),品位 1.01%;铁矿石量 335.65 万吨(小型规模),品位 41.98%,伴生银 25.95 t(小型规模);还伴生有大量镓、硒、碲等“三稀矿产”资源(汪青松等,2015),取得了重要找矿成果,是华北地台南缘一种新的多矿种共伴生矽卡岩型矿床形式(汪青松,2010),具有寻找关键矿产(王登红,2019) 地质意义。

### 4.2　五河金矿整装勘查,循环勘查确定找矿靶区

#### 4.2.1　基本情况

五河金矿整装勘查区位于皖东北地区五河县境内,面积 400 $km^2$,横跨淮河两岸,仅在淮河南岸有零星基岩出露,其余皆为第四系松散层覆盖,厚度 60~150m,富含地下水。郯庐断裂带从整装勘查区中部通过,其西侧基岩为前寒武纪五河群变质岩系,东侧基岩为白垩系“红层”,区内主要矿床类型为石英脉—构造蚀变岩型金矿,共伴生铅锌铜矿。以往共发现规模较大矿床 3 处,金矿点 50 余处,共探明资源储量 6.7 t,找矿突破长期没有取得重要进展(汪青松等,2019)。

项目来源:综合研究选区。在初步研究皖东北地区和郯庐断裂带成矿地质背景基础上和分析了有利找矿条件后,选定五河地区建议设立省级金矿整装勘查区,2010 年获得了安徽省国土资源厅批准并开始实施。经过多次循环勘查和靶区圈定,初步实现了郯庐断裂带安徽境内寻找金矿的突破。

#### 4.2.2　找矿难点与多阶段循环勘查过程

五河地区基岩出露少,覆盖区面积大,基础地质工作程度低,控矿条件不清楚,且金矿体规模小、矿层薄、产状陡、无磁性,缺少有效找矿方法,存在找矿靶区圈定难题。整装勘查采用“物化探扫面先行,重点异常解剖,钻探验证”技术路线。到目前为此,勘查工作已经历了三个阶段。

第一阶段(2010~2011),物探扫面、靶区评价、钻探验证、综合评价。

物探扫面定靶。全区完成了 1/2.5 万重力、磁力、激电中梯、化探扫面(基岩出露及浅覆盖区),圈定找矿靶区 7 个,简称 1 期靶区(图 5a)。

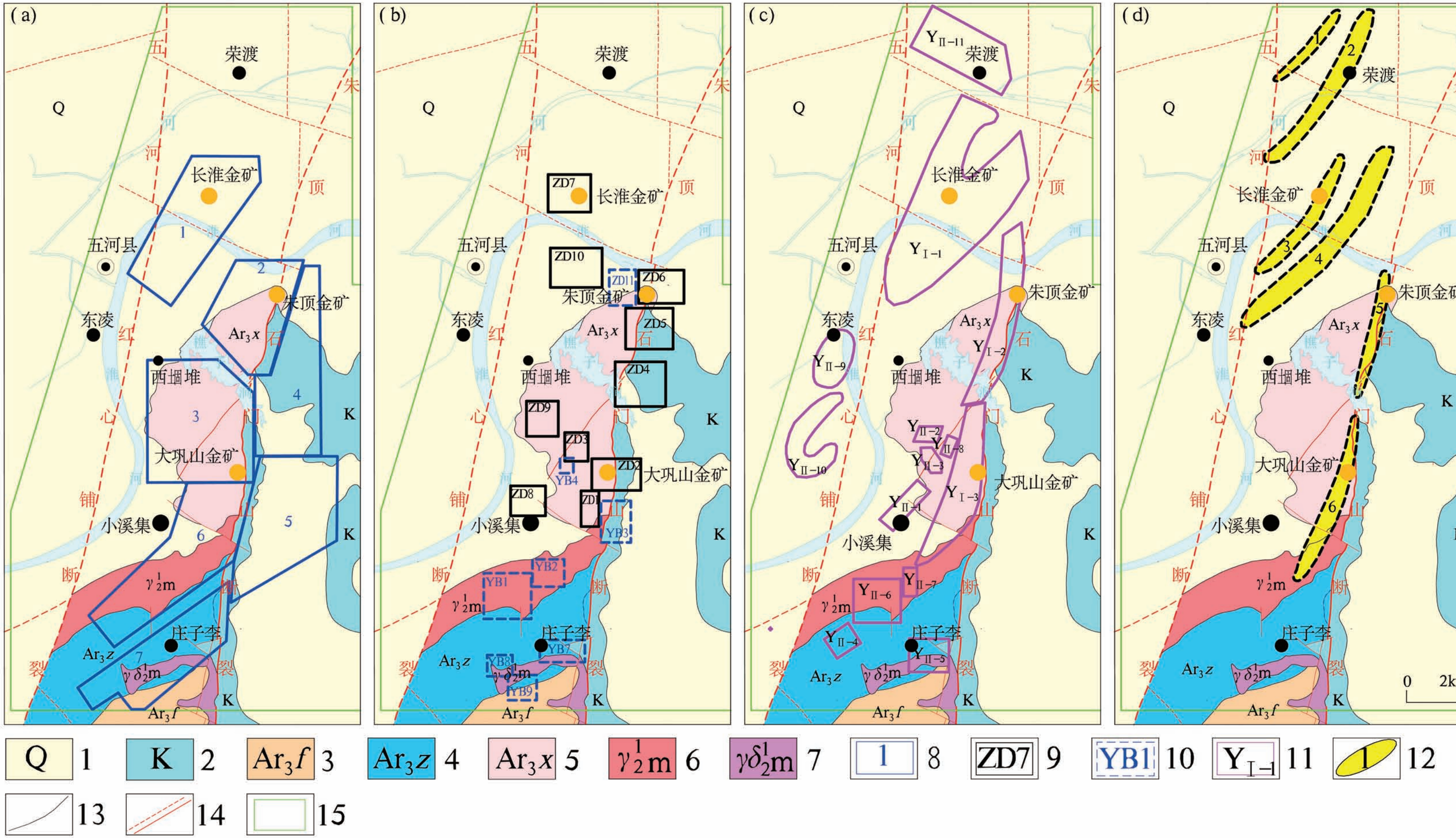


图 5 五河金矿整装勘查区地质略图及不同阶段预测找矿靶区分布图:（a）期预测靶区;（b）期钻探验证靶区;（c）二期预测靶区;（d）三期预测靶区

Fig. 5 Geological sketch of integrated exploration area of Wuhe gold deposit and distribution map of predicted prospecting targets at different stages:

（a）phase I prediction target, （b）phase I drilling verification target, （c）phase II prediction target, （d）phase III prediction target

1-全新统怀远组；2-白垩系；3-新太古界峰山李组；4-新太古界庄子李组；5-新太古界西堌堆组；6-混合花岗岩；7-混合花岗闪长岩；8-一期预测靶区及编号；9-首批钻探烟瘴靶区及编号；10-首批未验证靶区及编号；11-二期预测靶区及编号；12-三期预测靶区及编号；13-地质界线；14-实、推测断层；15-工区范围

1-Holocene Huaiyuan formation; 2-Cretaceous; 3-Fengshanli formation of Neoarchean; 4-Zhuangzili formation of Neoarchean; 5-Xiyudui formation of Neoarchean; 6-Mixed granite; 7-Mixed granodiorite; 8-The target area and number of the first phase prediction; 9-The first batch of drilling target areas and their numbers; 10-The first batch of unverified targets and their numbers; 11-Target area and number of the second phase prediction;12- The target area and number of the third phase prediction; 13-Geological boundary; 14-Solid and inferred faults; 15-Scope of work area

靶区评价定位。在找矿靶区内选择化探异常区、极化率异常区、重力低异常区(推断中酸性隐伏岩体引起,有利成矿)开展了 1/1 万~1/5 千磁测、激电中梯扫面+综合物探剖面测量,结合区内已知矿床地质特征,共圈定可供钻探验证的找矿靶区 18 个,每个靶区面积均较小,简称验证靶区(图 5b)。

钻探验证。在验证靶区中首批验证了 10 个靶区,共施工钻孔 14 个,7 孔见矿,分布在 7 个验证靶区,见矿情况如表 2,见矿率达到 50%,说明勘查流程和选用的物探方法有效。但是,在 7 个见矿钻孔中,仅有 ZK405、ZK201 和 ZK203 金达到了 2.5g/t 最低工业品位和最小 1m 可采厚度要求,其它 4 个钻孔见矿情况或厚度薄或品位低或与石英脉—构造蚀变岩型主攻矿种类型不符。

综合评价与原因分析。钻探验证没有取得重要找矿进展,主要原因是区内基础地质构造复杂,物探异常推断解释存在偏差,多数验证靶区没有找矿前景,不能提供金矿普查基地。

如朱顶验证靶区,基岩地质情况如图 6a,第四系覆盖层厚度 10~20m,区内有正在开采的朱顶金矿;存在重力低物探异常如图 6b,推断为隐伏岩体引起;位于激电中梯高阻异常区(图 6d),显示基岩为五河群控矿地层;有不规则激电中梯极化率异常(图 6e)和 CR 法深部极化率异常(图 6c),推断深部存在硫化物矿体。该区验证钻孔 ZK203 位于朱顶金矿东侧,追踪已知矿体和验证 CR 法深部异常;ZK204 位于重力低异常区北端中心,验证 CR 法深部异常和寻找隐伏岩体。钻探结果如图 6f,ZK203 在 227m 深度揭穿五河群变质岩系,进入意想不到的不含矿白垩系“红层”,黑色,以碳质泥岩为主,ZK203 上部虽然发现了金矿体,但是深部已没有找矿空间;ZK204 在 450m 深度揭穿五河群变质岩系,下伏地层同样是白垩系黑色“红层”,既没有发现岩体,也没有见金矿化。经测井和岩矿测试证实激电中梯极化率异常、CR 法异常和重力低异常皆由白垩系黑色碳质泥岩引起,物探异常推断解释多有不正确,地质构造复杂超出想象。

第二阶段(2012~2013),综合研究,再预测。

经过第一阶段工作后,还存在 2 个方面问题:①找矿突破方向还不明确,找矿靶区预测准确性差;②缺少穿透低阻覆盖层精准探测薄层矿体的有效方法技术。为此开展了以下 3 个方面的研究工作:

(1)结合钻探验证结果,分析勘查区地质特征,对物探异常重新推断解释,重新圈定了 14 个找矿靶区,简称 2 期靶区如图 5c。考虑到北部覆盖区矿体剥蚀深度要小于南部大巩山低山丘陵地区,找矿前景应更好。于是将北部地区 2 个找矿靶区作为重点勘查区,开展了 1/5 千地磁扫面和综合电法剖面测量对其评价定位,在荣渡金铅锌矿一级找矿靶区(YⅠ-1)施工钻孔 10 个,7 孔见矿,在天井湖金铅锌矿二级找矿靶区(YⅡ-11)施工钻孔 2 个,均见矿,显示出北部地区较好的找矿前景,也说明重新圈定找矿靶区取得了较好的找矿效果。

(2)研究覆盖区薄层矿体找矿方法。开展进行了“电流磁场法寻找覆盖层下陡倾斜金矿试验”和“一发四收井中充电测井法试验”等多项研究工作,均取得了较好的成果(汪青松等,2021a; 汪青松等,2021b)。

(3)开展了区域成矿规律综合研究(暨综合研究选区案例)。研究内容:①分析研究皖东北地区区域地球物理重力场和磁力场特征,总结区域内隐伏岩、重要地质构造重磁异常特征,进行皖东北地区

**表 2 五河金矿整装勘查首批验证钻孔见矿情况一览表**

**Table 2 List of the first batch of verification boreholes for integrated exploration in Wuhe gold deposit**

| 钻孔编号 | 验证靶区名称 | 品位/厚度(m),CuPbPb:%,AuAg:g/t | 矿化类型 |
|---|---|---|---|
| ZK405 | 峡石山金矿外围 | Au1.31/2.97;②Au0.25/3.74 | 石英脉-构造蚀变岩型 |
| ZK201 | 井头北 | Au2.62/1.90;②Pb1.07%Au0.81/0.65 | 石英脉-构造蚀变岩型 |
| ZK203 | 朱顶 | Au1.33/2.87;②Au1.04/0.90 | 石英脉-构造蚀变岩型 |
| ZK402 | 白石山 | Au1.23/1.17 | 石英脉-构造蚀变岩型 |
| ZK404 | 大巩山 | Au2.70/0.22 | 含金黄铁矿脉型 |
| ZK501 | 黑石嘴 | Au1.10/2.16;②Pb3.19Ag216.9/0.57;③Pb1.22Zn0.17Cu0.18Au0.27/2.30 | ①含金煌斑岩脉型,②③蚀变岩型多金属矿 |
| ZK701 | 朱顶南 | Au1.12/2.06;②Pb1.34Zn0.86/1.88;② 重晶石 BaO43.36%/25.89 | ①石英脉-构造蚀变岩型,②蚀变岩型多金属矿,③热液充填型 |

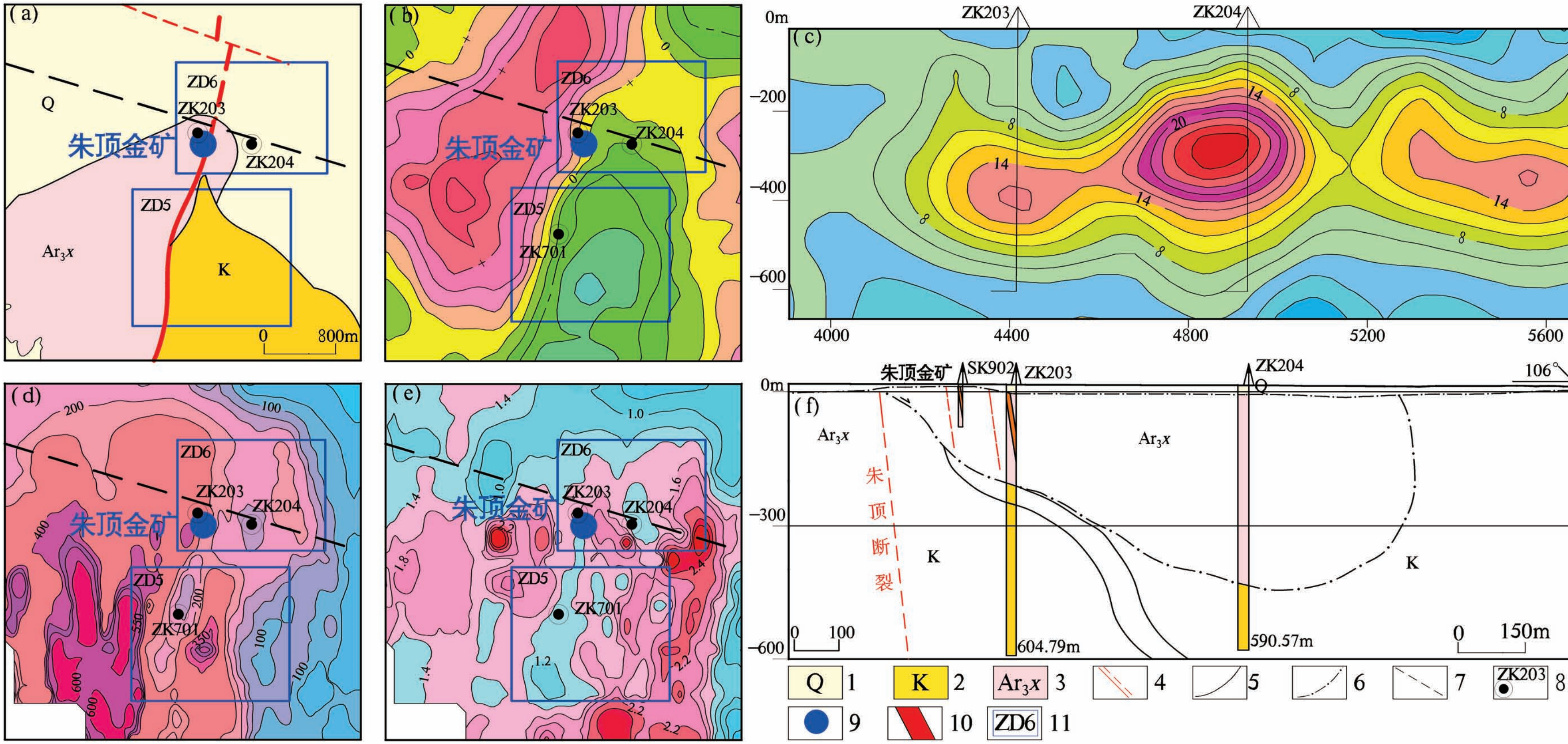


图 6 安徽五河金矿整装勘查区朱顶靶区物探异常与验证剖面图：（a）基岩地质图；（b）剩余重力异常图；（c）CR法电阻率异常（剖面）；（d）电阻率异常图；（e） 极化率异常图；（f） 地质剖面图

Fig. 6 Geophysical anomaly and verification profile of Zhuding target area in integrated exploration area of Wuhe gold orefield, Anhui: (a) bedrock geological map, (b) residual gravity anomaly map, (c) Cr resistivity anomaly (profile), (d) resistivity anomaly map, (e) polarizability anomaly map, (f) geological profile map

1-第四系；2-白垩系；3-新太古界西堌堆组；4-断层；5-地质界线；6-不整合线；7-物探剖面；8-钻孔及编号；9-矿床；10-蚀变岩性金矿体；11-靶区及编号

1-Quaternary; 2-Cretaceous; 3-Xiyudui Formation of Neoarchean; F4-faults; 5-geological boundary; 6-unconformity line; 7-geophysical section; 8-drilling hole and number; 9-ore deposits; 10-altered lithologic gold ore body; 11-target area and number

构造格架推断解释。发现皖东北地区重力异常以郯庐断裂带为界,两侧重力低异常都具有条带状弧形特征,且方向相反,大致具有旋转对称性,显示了郯庐断裂带印支期左行走滑运动形式;②根据前人研究郯庐断裂带成果,分析郯庐断裂带南段三阶段演化过程及其不同阶段构造痕迹的重磁异常特征,进一步进行郯庐断裂带时空演化重磁异常推断解释;③全面分析皖东北地区 6 个主要成矿区控矿地质条件,总结典型矿床地质物探异常特征,归纳了郯庐断裂构造、燕山期岩浆岩、前寒武纪变质岩和古生代及震旦系地层为皖东北地区主要控矿因素。研究成果:①皖东北地区主要矿床类型为中低温热液型金多金属矿床和矽卡岩型铁铜矿床,且受郯庐断裂带构造体系控制,提出了皖东北地区找矿方向和 7 个勘查区(张顺林等,2018);②根据郯庐断裂带演化特征、区域重磁物探异常特征和成矿规律,考虑到成矿作用具有时控性(杨晓勇等,2018),创建了郯庐断裂构造南段继承性断裂构造控矿模式(汪青松等,2020a);③根据继承性断裂构造控矿模式机理,结合整装勘查区地质构造和物探异常特征,提出了继承性断裂构造靶区预测方法。据此再次对找矿靶区进行预测圈定(3 期靶区)如图 5d。

第三阶段(2015—现在),根据靶区,部署普查工作,详见下文。

#### 4.2.3　找矿成果

2015 年起,在北部地区重新圈定的 4 个靶区内开展了普查工作,先后发现了河口中型金矿、天井湖中型金矿和方庵小型金矿(汪青松等,2020b)。

(1)河口金矿位于河口—荣渡靶区南段,普查钻孔基本网度为 100m×160m,施工钻孔 40 个,见矿钻孔 31 个,因其它原因,提前结束普查工作,矿体未圈闭,备案 333 类资源量金 5.9t(含伴生),铅 0.88 万吨(含伴生),为皖东地区第一个达中型规模的金矿。

(2)天井湖金矿位于天井湖靶区北段,钻孔基本网度为 100m×320m,施工钻孔 15 个,全部见矿,矿体未圈闭,提交 333+334 类资源量金 8.3t(含伴生),铅 1.97 万吨(含伴生),伴生银 2.95t。

(3)方庵小型金矿矿权范围跨河口—荣渡靶区和天井湖靶区,为某企业投资勘查,主要见矿钻孔多位于上述 2 个靶区内,已探明 332+332 类金资源量 2.06t,铅 1.12 万吨。

(4)北部地区另 2 个靶区因受项目工作量限制,只进行了极少量钻探验证,在西埫堆—东渡靶区,施工 6 个钻孔,4 见孔见金矿体,另外两个孔见金矿化;在小杨家靶区,施工钻孔 1 个,见黄铁矿化、方铅矿化石英脉型金矿化,验证效果也较好。

(5)其它矿山企业根据整装勘查技术成果,在朱顶靶区探明小型金矿和中型重晶石矿各一处,在大巩山靶区老矿山深边部找矿,新增金资源量达小型规模。

累计新增资源量已达大型规模,具有了寻找超大型金矿的潜力(汪青松等,2019)。

综上所述,五河金矿整装勘查区靶区预测,在经历了反复循环过程之后,从 1 期靶区到 3 期靶区面积逐渐缩小,靶区范围逐渐逼近矿体分布区,有效的提高了找矿成功率,提供了一种结合实际创新的厚覆盖区勘查找矿模式(汪青松等,2020b)。

### 4.3　西湾大型铅锌矿勘查,重磁扫面定靶

#### 4.3.1　基本情况

西湾铅锌矿位于庐枞火山岩盆地北部边缘,勘查区面种 37km$^2$,属于水系发育的第四系火山岩复合型覆盖区。第四系松散层厚 40~117m。基岩为白垩系龙门院组火山岩系,厚度约 200~300m,岩性为角砾凝灰岩、粗安岩夹凝灰质粉砂岩等,磁性强;其下为三叠系中统东马鞍山组和铜头尖组。

铅锌矿化主要发生在东马鞍山组角砾状灰岩中,上部次火山岩、龙门院组火山岩和下部东马鞍山组灰岩、白云质灰岩、膏溶角砾岩中也有少量脉状铅锌矿(化)体存在。

西湾铅锌矿勘查为安徽省地勘基金项目,项目名称为“无为县西湾铁多金属矿预查”,区内有一航磁异常,具备寻找铁矿立项条件,因其西南方向庐枞火山岩盆地内不仅有铁矿,还发现有斑岩型铅锌矿,故目标任务既寻找铁矿也兼顾铅锌多金属矿。在发现铅锌矿后,勘查工作由“预查”升级为“普查”,后续项目名称为“无为县西湾铁多金属矿普查”。

#### 4.3.2　找矿难点与重磁扫面

区内地表水系发育,物探电法施工难度大;第四系—火山岩覆盖层厚度 100~300m,基岩地质构造不清楚,找矿靶区和矿化蚀变区圈定难度大。勘查过程经历了预查和普查两个阶段,不同阶段应用了不同比例尺的重磁扫面资料。

预查阶段,重点评价验证磁异常。

在充分利用 1/20 万区域重力和 1/5 万航磁资料基本上,先后开展了航磁异常 1/2.5 万地磁查证和 1/1 万磁法精测扫面,1/1 万磁化极异常(图 7a)显示,查区东部为高背景磁异常区,叠加了局部磁异

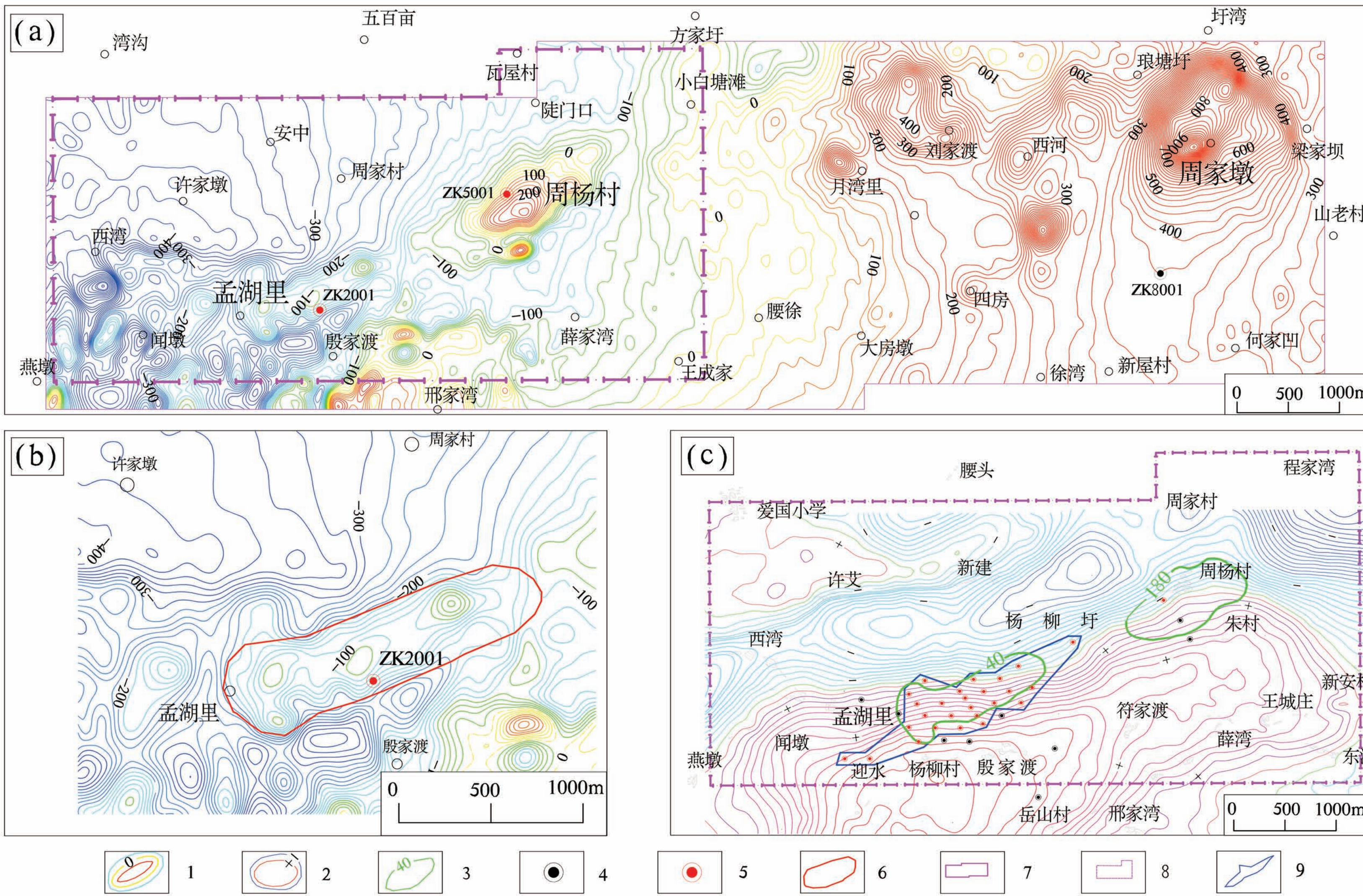


图 7 庐枞火山岩盆地北部边缘西湾大型铅锌矿勘查区重磁异常图：（a）全区化极磁异常图；（b）靶区化极磁异常图；（c）重力异常图

Fig. 7 Gravity and magnetic anomaly map of the Xiwan large lead zinc exploration area, northern margin of the Lujiang-Zongyang volcanic basin: （a）map of the whole area; （b）map of the target area;（c）map of the gravity anomaly

1-磁异常化极等值线及数值（nT）；2-布格重力正、负异常等值线；3-地磁异常；4-未见矿钻孔；5-见矿钻孔；6-靶区位置；7-预查区范围；8-普查区范围；9铅锌矿体平面投影图

1-The isoline and numerical value of magnetic anomaly polarization (NT); 2-the positive and negative isolines of Bouguer gravity anomaly; 3-geomagnetic anomaly; 4-drilling found no ore; 5-drilling for ore occurrence; 6- target location; 7-the scope of pre check area; 8-the scope of the census area; 9-plane projection of lead zinc ore body

常,推测深部有隐伏岩体浅部存在磁铁矿。查区西部磁异常跳跃杂乱无序,由岩性不均匀的龙门院组火山岩引起。

分别选取了周家墩强磁异常、周杨村中磁异常和孟湖里低缓磁异常进行了评价验证。钻探周家墩强磁异常全部由岩体引起,没有铁矿;周杨村中磁异常发现铁矿 2 层,累计厚度 1.93m,经测井和综合分析认为没有进一步工作价值。

孟湖里低缓磁异常 ZK2001 孔在 112.53m~284.43m 发现铅锌矿化 5 层,累计厚度 49.55m,铅+锌平均品位 0.7%~1.9%(程培生等,2013),具有寻找热液蚀变型铅锌矿远景,随后项目预查升级为普查。

普查阶段,利用重磁异常推断矿化蚀变带。

将查区西部跳跃杂乱无序磁异常区作为重点工作区,开展了 1/5 千高精度地磁测量和 1/2.5 万高精度重力测量。发现北东东向孟湖里条带状低缓磁异常区位于同方向的重力梯级带上。推断此种重梯磁高组合异常由深部地质构造引起,在跳跃杂乱无序的磁异常区出现了形态较规则边界光滑的条带状孟湖里低缓磁异常(图 7b),显示深部存在岩体或热液活动,热液活动导致龙门院组火山岩发生蚀变后,岩性趋向均匀,其跳跃杂乱无序的磁异常演变为平静的磁异常,孟湖里低缓磁异常则热液蚀变引起。

**4.3.3　找矿成果**

蚀变区即为找矿靶区,故将北西向重力梯级带上孟湖里低缓磁异常区作为普查阶段重点找矿靶区,开展了普查找矿工作,钻孔施工基本网度为 150m×200m,共施工 26 个钻孔,23 个钻孔见矿,已探获铅锌矿 333+334 类资源量达 97.4 万吨(李壮等,2020),矿体分布范围与低缓磁异常基本一致(图 7c),这是长江中下游庐枞盆地矿集区(周涛发等,2017; 毛景文等,2020)新发现的一种新型热液型铅锌矿床,已达大型规模。

## 7　讨论

上述 3 个案例分别从不同的找矿阶段说明“综合研究选区”、“重磁扫面定靶”、“综合勘查定位”“钻探验证定性”的“一选三定四阶段”勘查模式及其使用的方法技术”,共同说明应用“循环渐近式勘查技术体系”指导覆盖区找矿,能够提高成功率。

以杨桥孜铜金矿勘查 ZK1112 孔定位过程为线索,依次开展区域重磁扫面──→大比例尺重力测量──→CSAMT 法──→CR 法测量,逐步完成基岩基础地质信息探测──→圈定岩体接触带找矿靶区──→寻找围岩捕虏体和高密度矽卡岩化蚀变区──→确定岩体和围岩捕虏体边界──→评价金属硫化物矿化情况;勘查工作循序渐近,不断缩勘查目标范围,逐步逼近矿体,直至钻探见矿。该例详细说明了“重磁扫面定靶”后“综合勘查定位”时应用“重、磁、CSAMT、CR 法耦合定位技术”过程和效果。

五河金矿整装勘查经历了 3 个阶段找矿靶区预测过程,一期预测靶区,经钻探验证多有不正确;二期预测靶区面积大,且没有体现成矿规律,评价定位难度大;三期预测靶区体现了成矿规律,经验证与矿化带分布基本一致,找矿效果好。这里还用了一个经过“一选三定”圈靶定位“钻探验证”失败的案例,说明物探方法有效,找矿也未必能够取得成功。覆盖区找矿不可能一帆风顺,靶区圈定往往需要经历“反复循环”过程,才可以逐步实现找矿突破。

五河金矿整装勘查案例还说明了覆盖区找矿一定要结合实际创新,在勘查过程中不断分析找矿难题,结合实际创新解决靶区预测缺乏地质理念指导难题,解决了穿透厚覆盖层探测陡倾斜矿体和井中矿体产状探测等难题。将地质基础理论成果、区域成矿规律与区域物探异常特征融合,创新融合方法尤为重要,创建的继承性断裂构造控矿模式为“综合研究选区”和靶区优选提供地质理论依据(汪青松等,2020a)。

西湾大型铅锌矿勘查,重磁扫面发挥了重要作用。该区为第四系—火山岩复合覆盖区,磁异常复杂,重磁扫面不仅用于勘查选区,也能用于勘查区内圈定矿化蚀变带靶区。勘查早期圈定 3 找矿靶区,经评价和钻探验证后只保留了一个靶区,该区找矿也经历了多阶段过程,逐步实现突破。重磁扫面是覆盖区找矿不可缺少的物探方法,也成矿系统探测(吕庆田等,2020)中重要方法。

## 8　结论与建议

(1)厚覆盖区找矿突破是一项系统工程,需要经历勘查选区—圈靶—定位—验证评价 4 个阶段,涉及地质、物探、钻探、分析测试等多个学科,存在勘查选区、地质信息探测和多学科融合 3 大难题。

(2)厚覆盖层往往具有屏蔽深部矿化信息作用,覆盖区找矿难度不仅与覆盖层厚度有关,还与覆盖层的物性特征和水文地质条件关系密切,也与矿体物性特征和矿体形态产状有关,寻找富水低阻厚覆盖层下矿床难度大,其中寻找无磁性陡倾斜脉状

金属矿难度更大。

(3)循环渐近式勘查技术体系,分阶段循序渐进,定靶区循环评价。由地质物探融合技术路线、“221”多学科勘查体系架构、“一选三定四阶段”勘查模式、“探测十法”方案和方法创新等 5 个部分组成,为覆盖区找矿提供了一种勘查理论和研究方向。

(4)地质构造时空演化物探异常推断解释方法,可以将地学基础研究成果与物探成果融合转化为实用新成果,扩展了物探方法应用范围,也提供了地学基础研究成果转化新方法,潜在研究成果丰富,具有推广意义。

感谢主审专家和编辑部对本文修改提出了宝贵意见。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

毕炳坤, 常云真, 施强, 申随水. 2019. 综合物探在崤山东部浅覆盖区勘查银多金属矿床中的应用. 物探与化探, 43(5): 976~985.

陈葆仁, 沈照理, 刘光亚, 杨成田, 孙世雄. 1985. 水文地质学. 北京: 科学出版社.

陈江源, 牛家骥, 郭佳, 黄亮, 段晨宇, 卢亚运. 2020. 鄂尔多斯盆地南缘崇信—泾川地区航放异常特征及铀矿找矿前景分析. 地质与勘探, 56(3): 551~565.

程培生, 李文庆, 何柳昌, 李壮. 2013. 综合物探在西湾铁多金属矿预查中的应用效果. 物探与化探, 37(6): 1003~1007.

段世轻, 孙进, 李蒙, 聂艳敏. 2019. 视电阻率联合剖面在浅覆盖区找矿的应用. 长春工程学院学报(自然科学版), 20(3): 52~56.

樊战军, 于爱军, 陈孝强, 徐德利, 陈瑞林. 2007. EH4 连续电导率测量在森林覆盖区找矿中的应用效果——以黑龙江省嘉荫县张三沟金矿区为例. 黄金科学技术, 15(1): 48~53.

付亚龙, 常海钦, 林鑫, 孟刚刚, 张苗苗. 2019. 金属活动态测量在冲积平原覆盖区隐伏矿的试验研究 ——以安徽无为龙潭头硫铁矿为例. 物探化探计算技术, 41(3): 401~411.

郭祥义, 叶荣, 鲁美, 韩志轩, 王永康, 张文慧, 王可祥. 2019. 半干旱荒漠草原覆盖区地气测量方法研究——以内蒙古维拉斯托锌铜多金属矿床为例. 地质与勘探, 55(03): 789~800.

郝兴中, 郑金明, 刘伟, 王润生, 王巧云, 张贵丽. 2020. 山东省齐河—禹城地区矽卡岩型铁矿成矿预测. 地球学报, 41(2): 293~302.

胡浩, 张昆, 严加永, 邵陆森, 付光明. 2020. 山东胶东半岛焦家断裂带南缘电性结构研究. 地质学报, 94(2): 661~674.

胡云沪, 罗先熔, 王桂琴, 杜建波, 张小路. 2002. 厚层覆盖区综合物化探方法找金试验研究——以广西兴安金石金矿为例. 矿产与地质, 16(5): 302~305.

贾长顺, 曾庆栋, 徐九华, 于昌明. 2005. 综合物化探技术在黄土覆盖区隐伏金矿体预测中的应用. 黄金, 26(7): 8~11.

李海, 薛国强. 低阻屏蔽层情形下电性源瞬变电磁法的探测能力分析: 中国地球科学联合学术年会, 北京, 2014[C]. 中国地球物理学会;全国岩石学与地球动力学研讨会组委会;中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会;中国地质学会区域地质与成矿专业委员会;中国科学院地质与地球物理研究所.

李壮, 程培生, 张建明, 缪旭煌. 2020. 庐枞盆地北缘西湾大型铅锌矿的发现及其找矿标志. 矿产勘查, 11(10): 2163~2169.

刘元晴, 李伟, 周乐, 吕琳, 邓启军, 马雪梅. 2019. 鲁中山区新生代沉积盆地古近系含水层富水性分析. 地质论评, 65(S1): 7~8.

鲁美, 叶荣, 张必敏, 王永康. 2019. 覆盖区地球化学勘查进展. 矿床地质, 38(06): 1408~1411.

罗先熔, 周涛发. 2005. 大兴安岭森林覆盖区金矿土壤离子电导率异常特征离子成份的研究及找矿预测. 地质与勘探, 41(2): 46~50.

吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 张昆, 龚雪婧, 高凤霞. 2020. 长江中下游成矿带铁铜成矿系统结构的地球物理探测:综合分析. 地学前缘, 27(2): 232~253.

马维, 侯静, 胡卫星, 李开, 张呈彬, 杨超然. 2014. 地物化综合方法在草原覆盖区找矿中的应用——以内蒙古努如大坂钼铅锌银多金属矿勘查为例. 地质与资源, 23(z1): 113~121.

马一行, 颜廷杰, 何鹏, 刘祖鉴, 苏航, 郭硕. 2019. 激发极化法在覆盖区矿产勘查中的应用——以内蒙古昌图锡力锰银铅锌多金属矿勘查为例. 物探与化探, 43(4): 709~717.

毛景文, 周涛发, 谢桂青, 袁峰, 段超. 2020. 长江中下游地区成矿作用研究新进展和存在问题的思考. 矿床地质, 39(4): 547~558.

孟贵祥, 吕庆田, 严加永, 邓震, 祁光, 薛融晖. 2019. “穿透性”探测技术在覆盖区地质矿产调查中的应用研究. 地球学报, 40(5): 637~650.

缪宇, 宋文婷, 何茂源, 徐乐. 2019. 云南弥渡县云景地区多元地学信息集成及找矿模型. 地质与勘探, 55(6): 1367~1378.

邱辉, 谢浴根, 李朋, 李剑, 张轩国. 2019. 综合找矿方法在粤东单竹坑铅锌银矿勘查中的应用. 地质与勘探, 55(6): 1394~1403.

邱炜, 王富春, 罗先熔. 2013. 地电化学集成技术在青藏高原特殊景观区的找矿效果及其异常与矿体产状的关系. 物探与化探, 37(3): 377~381.

谭肖波, 薄本玉, 姜佃卿, 张辉泉, 郭峰, 吕明荟. 2019. 山东高青县沉积盆地型地热流体地球化学特征及成因探讨. 地质学报, 93(S1): 168~177.

万卫, 汪明启, 高玉岩, 秦欢欢, 赖冬蓉. 2019. 南方红壤区隐伏矿床地气试验研究——以广西德保铜锡矿区为例. 地质找矿论丛, 34(3): 438~444.

汪青松. 2010a. 安徽省淮北前常—徐楼覆盖区综合找矿方法研究. 安徽地质, 20(3): 206~212.

汪青松. 2010b. 淮北地区矽卡岩型铁铜矿床控矿条件分析与成矿模式. 资源调查与环境, 31(2): 103~111.

汪青松. 2011. CSAMT 法二维电阻率异常分类及其地质解释——以淮北前常—徐楼地区为侧. 安徽地质, 21(1): 44~47.

汪青松, 吴明安, 袁平, 何柳昌. 2012. 安徽省庐江县泥河铁矿重磁异常特征. 地质与勘探, 48(1): 148~154.

汪青松, 张顺林, 产思维. 2015. 皖北濉溪县杨桥孜铜金矿床的发现及其地质意义. 资源调查与环境, 36(4): 285~290.

汪青松, 崔先文, 张凯, 等. 2018. 厚覆盖区综合找矿模式研究与实践. 北京: 地质出版社.

汪青松, 张家嘉, 张顺林, 朱义坤, 张金会, 郝树曦. 2019. 安徽五河金矿整装勘查的重要发现及其地质意义. 中国地质调查, 6(02): 26~33.

汪青松, 张顺林, 张金会, 张家嘉, 尤森. 2020a. 皖东北厚覆盖区构造蚀变岩型金矿勘查模式与关键技术——以五河金矿整装勘

查区为例. 安徽地质, 30(4): 295~301.

汪青松, 张顺林, 张金会, 张家嘉, 尤森. 2020b. 郯庐断裂带南段继承性断裂构造控矿模式研究及其应用效果——以皖东北五河金矿整装勘查为例. 地质学报, 94(10): 2965~2977.

汪青松, 张金会, 尤森, 薛国强, 周舟, 张阳阳, 许传健. 2021a. 电流磁场法在厚覆盖区探测陡倾斜金矿的试验效果. 地球物理学进展, 36(1): 281~289.

汪青松, 张金会, 尤森, 毛思斌, 产思维. 2021b. 井中矿层多要素探测方法研究与厚覆盖区金矿勘查试验—以皖东北五河地区为例. 地质与勘探, 57(1): 136~145.

王葆华, 文美兰, 欧阳菲, 王保国, 贾建清. 2011. 草原覆盖区铅锌银矿床地电化学异常特征及找矿预测——以内蒙古哈达特陶勒盖矿区为例. 桂林理工大学学报, 31(02): 192~197.

王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向. 地质学报, 93(6): 1189~1209.

王东方, 王婉君, 陈伟强. 2019. 中国战略性金属矿产供应安全程度评价. 资源与产业, 21(3): 22~30.

王贵玲, 蔺文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式. 地质学报, 94(7): 1923~1937.

韦选建, 罗先熔, 杨龙坤, 刘攀峰, 王艳忠, 李海洋, 闫伟. 2017. 吉林长白山玄武岩覆盖区地电化学找矿研究. 矿产勘查, 8(3): 464~472.

吴明安, 汪青松, 郑光文, 蔡晓兵, 杨世学, 狄勤松. 2011. 安徽庐江泥河铁矿的发现及意义. 地质学报, 85(5): 802~809.

武炜, 张宝林, 梁光河, 李志远, 沈晓丽, 祁民. 2009. 双频激电法在我国西部两类典型覆盖区金属矿体预测中的应用. 地质与勘探, 45(6): 669~675.

谢学锦, 王学求. 2003. 深穿透地球化学新进展. 地学前缘, 10(01): 225~238.

徐启东, 张晓军, 尚恒胜, 杨振, 左仁广, 姚春亮, 刘锐. 2012. 构建覆盖区综合地质找矿思路和流程的探索:以内蒙古锡林郭勒西北部为例. 地球科学, 37(6): 1252~1258.

杨晓勇, 张连昌. 2018. 论地质历史时期成矿作用的时控性. 南京大学学报(自然科学版), 54(2): 259~277.

杨笑笑, 罗先熔, 文美兰, 欧阳菲, 吕星海, 尹高科, 郑广明. 2019. 地电化学法在豫西崤山黄土覆盖区找矿中的应用——以洛宁县石龙山预查区为例. 物探与化探, 43(2): 244~256.

叶荣, 王学求, 赵伦山, 陈德兴, 傅渊慧. 2003. 金窝子矿带戈壁覆盖区化探深穿透找矿方法研究. 地质与勘探, 39(6): 90~93.

张宝林, 梁光河, 蔡新平, 徐兴旺, 李会中. 2015. 森林植被覆盖区土壤化探异常检查方法研究——以黑龙江争光 Au—Zn 矿为例. 中国地质学会 2015 学术年会, 中国西安.

张宝林, 苗雅娜, 苏艳平, 李会中. 2018. “地物化三场异常耦合理论”及其在隐伏金多金属矿床定位预测中的应用. 黄金科学技术, 26(4): 431~442.

张必敏, 王学求, 徐善法, 姚文生, 叶荣. 2016. 盆地金属矿穿透性地球化学勘查模型与案例. 中国地质, 43(5): 1697~1709.

张恒, 王训练, 袁帅. 2020. 中国地质勘查周期及成因分析. 地质与勘探, 56(3): 644~656.

张景, 陈国光, 曾勇, 鲁胜梅, 湛龙, 王俊涛. 2016. 综合找矿方法在宁芜北火山岩覆盖区的应用——以南门头工区为例. 华东地质, 37(3): 221~228.

张顺林, 汪青松, 朱义坤. 2018. 皖东地区金矿控矿条件与找矿方向. 安徽地质, 28(1): 17~22.

郑文龙, 乌效鸣, 许洁, 朱旭明, 王稳石, 徐蓝波. 2019. 中国深部岩心钻探钻井液技术应用现状及研究方向探讨. 地质与勘探, 55(3): 826~832.

周涛发, 范裕, 王世伟, NoelCWHITE. 2017. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式. 岩石学报, 33(11): 3353~3372.

Bi Bingkun, Chang Yunzhen, Shi Qiang, Shen Suishui. 2019&. The application of geophysical exploration to prospecting for silver—lead—zinc deposits in shallow cover areas of eastern Xiaoshan. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(5): 976~985.

Chen Baoren, Shen Zhaoli, Liu Guangya, 1985#. Yang Chengtian, Sun Shixiong. Hydrogeology. Beijing: Science Press.

Chen Jiangyuan, Niu Jiaji, Guo Jia, Huang Liang, Dan Chenyu, Lu Yayun. 2020&. Characteristics of aerial radioactive anomalies and prospect of uranium exploration in the Chongxin—Jingchuan area, southern margin of Ordos Basin. Geology and Exploration, 56(3): 551~565.

Chen Weiqing, Wang Dongfang, Wang Wanjun. 2019&. Supply security of strategic metal ores in china. Resources & Inducetries, 21(3): 22~30.

Cheng Peisheng, Li Wenqing, He Liuchang, Li Zhuang. 2013&. The effect of applying integrated geophysical exploration to the pre-survey of the Xiwan iron polymetallic deposit. Geophysical and Geochemical Exploration, 37(6): 1003~1007.

Duan Shiqing, Sun Jin, Li Meng, Nie Yanmin. 2019&. Application of combined apparent resistivity profile in ore prospecting in shallow overburden area. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 20(3): 52~56.

Fan Zhanjun, Yu Aijun, Cheng Xiaoqiang, Xu Deli, Chen Ruilin. 2007&. Applicative effect of EH4 continual electric conductivity survey on gold deposit explorations in forest overburden areas——Taking Zhangsangou Gold Deposit, Jiayin County, Helongjiang Province as an example. Gold Science and Technology, 15(1): 48~53.

Fu Yalong, Chang Haiqin, Lin Xin, Meng Ganggang, Zhang Miaomiao. 2019&. Application of selective leaching of mobile metals in overburden to mineral exploration in alluvial plain: A case study from Longtantou pyrite deposit, Anhui Province. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 41(3): 401~411.

Guo Xiangyi, Ye Rong, Lu Mei, Han Zhixuan, Wang Yongkang, Zhang Wenhui, Wang Kexiang. 2019&. Geogas measurement experiments in the semi-arid desert steppe: An example of the Weilasituo Zn—Cu polymetallic deposit in Inner Mongolia. Geology and Exploration, 55(3): 789~800.

Hao Xingzhong, Zheng Jinming, Liu Wei, Wang Runsheng, Wang Qiaoyun, Zhang Guili. 2020&. Metallogenic prognosis of skarn-type iron ore deposits in Qihe—Yucheng area, Shandong Province. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 293~302.

Hu Hao, Zhang Kun, Yan Jiayong, Shao Lusen, Fu Guangming. 2020&. Electrical structures in the southern reach of the Jiaojia fault belt inferred from audio-frequency magnetotelluric sounding in the Jiaodong Peninsula, Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 94(2): 661~674.

Hu Yunhu, Luo Xianrong, Wang Guiqin, Du Jianbo, Zhang Xiaolu. 2002&. Research on prospecting Au deposit study with geophysical and geochemical method for deeply concealed deposit——Taking Jinshi Au deposit of Guangxi as an example. Mineral Resources and Geology, 16(5): 302~305.

Jia Changshun, Zeng Qingdong, Xu Jiuhua, Yu Changming. 2005&. Application of comprehensive geophysical and geochemical prospecting technology in forecasting concealed ore body overburden by loess. Gold, 26(7): 8~11.

Li Hai, Xue Guoqing. 2014 #. Analysis of detection capability of electromagnetic method of electromagnetic transient source under low resistance shield layer. Annual Meeting of China Earth Science Association, Beijing, 2014. Chinese Geophysical Society; Organizing Committee of National Symposium on Petrology and Geodynamics; Committee of Structural Geology and Geodynamics, Chinese; Regional Geology and Metallogeny Committee of Chinese Geological Society; Institute of geology and geophysics.

Li Zhuang, Cheng Peisheng, Zhang Jianming, Miao Xuhuang. 2020&. Discovery and its prospecting marks of Xiwan large-scale Pb—Zn deposit in the north Luzong Basin. Mineral Exploration, 11(10): 2163~2169.

Liu Yuanqing, Li Wei, Zhou Le, Lv Lin, Deng Qijun, Ma Xuemei. 2019&. Analysis on water yield of Paleogene aquifer in Cenozoic sedimentary basin of central Shandong. Geological Review, 65 (S1): 7~8.

Lu Mei, Ye Rong, Zhang Bimin, Wang Yongkang. 2019&. Progress in geochemical exploration of cover areas. Mineral Deposits, 38(06): 1408~1411.

Luo Xianrong, Zhou Taofa. 2005&. Ionic conductivity anomaly characteristics and ionic components of soil in gold deposits in the Daxin´anlin forest overburden region. Geology and Exploration, 41 (2): 46~50.

Lü Qingtian, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Zhang Kun, Gong Xuejing, Gao Fengxia. 2020&. The geophysical exploration of Mesozoic iron—copper mineral system in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt: a synthesis. Earth Science Frontiers, 27(2): 232~253.

Ma Wei, Hou Jing, Hu Weixing, Li Kai, Zhang Chengbin, Yang Chaoran. 2014&. Application of geological, geophysical and geochemical integrative methods in prospecting of grassland coverage areas: A case study of the Nurudaban Mo—Pb—Zn—Ag polymetallic deposit in Inner Mongolia. Geology and Resources, 23 (S1): 113~121.

Ma Yixing, Yan Tingjie, He Peng, Liu Zujian, Su Hang, Guo Shuo. 2019&. Exploration in coverage area: A case study of the Changtuxili Mn—Ag—Pb—Zn polymetallic ore deposit, Inner Mongolia. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(4): 709 ~717.

Mao Jingwen, Zhou Taofa, Xie Guiqing, Yuan Feng, Duan Chao. 2020&. Metallogeny in Middle—Lower Yangtze River Ore Belt: Advances and problems remained. Mineral Deposits, 39(4): 547~558.

Meng Guixiang, Lü Qintian, Yan Jiayong, Deng Zhen, Qi Guang, Xue Ronghui. 2019&. The Research and application of explorational technology of "penetrating" to geology and mineral investigation in overburden area. Acta Geoscientica Sinica, 40(5): 637~650.

Miao Yu, Song Wenting, He Maoyuan, Xu Le. 2019&. Multi-source geological information integration and ore-prospecting model in the Yunjing area, Midu County, Yunnan Province. Geology and Exploration, 55(6): 1367~1378.

Qiu Hui, Xie Yugen, Li Peng, Li Jian, Zhang Xuanguo. 2019&. Application of the integrated ore-prospecting method in the Danzhukeng Pb—Zn—Ag Deposit, eastern Guangdong. Geology and Exploration, 55(6): 1394~1403.

Qiu Wei, Wang Fuchun, Luo Xianrong. 2013&. The application of the geo-electrochemical integrated method to the ore-prospecting work in special landscape areas of the Tibetan Plateau and the relationship between anomaly and ore occurrence. Geophysical and Geochemical Exploration, 37(3): 377~381.

Tan Xiaobo, Bo Benyu, Jiang Dianqing, Zhang Huiquan, Guo Feng, Lü Minghui. 2019&. Geochemical characteristics and genesis of sedimengtary basin-type geothermal fluids in Gaoqing County, Shandong Province. Acta Geoscientica Sinica, 93(S1): 168~177.

Wan Wei, Wang Mingqi, Gao Yuyan, Qin Huanhuan, Lai Dongrong. 2019&. Experimental study of geogas method to prospecting for concealed deposit in red soil regions of the south China. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 34(3): 438~444.

Wang Baohua, Wen Meilan, Ouyang Fei, Wang Baoguo, Jia Jianqing. 2011&. Features of geo-electrochemical anomaly and Pb—Zn—Ag exploration forecast in plains——Taking Hardattolgoi Lead—Zinc—Silver Polymetallic Deposit of Inner Mongolia as an example. Journal of Guilin University of Technology, 31(2): 192~197.

Wang Denghong. 2019&. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1189~1209.

Wang Guiling, Lin Wenjing. 2020&. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China. Acta Geologica Sinica, 94(7): 1923~1937.

Wang Qingsong. 2010a&. Study on comprehensive ore-prospecting method applied in the Qianchang—Xulou covered area, Huaibei, Anhui Province. Geology of Anhui, 20(3): 206~212.

Wang Qingsong. 2010b&. Analysis on ore-controlling conditions and metallogenic model of skarn type Fe and Cu deposits in Huaibei area. Resources Survey & Environment, 31(2): 103~111.

Wang Qingsong. 2011&. CSAMT 2d resistivity anomaly classification and its geological interpretation——An example from the Qianchang—Xulou area in Huaibei. Geology of Anhui, 21(1): 44 ~47.

Wang Qingsong, Wu Mingan, Yuan Ping, He Liuchang. 2012&. Characteristics of gravity and magnetic anomalies in the Nihe Iron Deposit of Lujiang County, Anhui Province. Geology and Exploration, 48(1): 148~154.

Wang Qingsong, Zhang Shunlin, Chan Siwei. 2015&. Discovery and geological significance of the Yangqiaozi copper—gold deposit in Suixi County , northern Anhui Province. Resources Survey & Environment, 36(4): 285~290.

Wang Qingsong Cui Xianwen Zhang Kai, et al. 2018&. Research and practice of comprehensive prospecting model in thick overburden area. Beijing: Geological Publishing House.

Wang Qingsong, Zhang Jiajia, Zhang Shunlin, Zhu Yikun, Zhang Jinhui, Hao Shuxi. 2019&. Important discoveries in Wuhe integrated exploration gold mine area in Anhui Province and its geological significance. Geological Survey of China, 6(2): 26~33.

Wang Qingsong, Zhang Shunlin, Zhang Jinhui, Zhang Jiajia, You Miao. 2020a&. Exploration model for tectonically altered rock type gold deposit in thick overburden area of northeastern anhui province and the key technology (key breakthrough technology for integrated exploration of the Wuhe Gold Deposit). Geology of Anhui, 30(4): 295~301.

Wang Qingsong, Zhang Shunlin, Zhang Jinhui, Zhang Jiajia, You Miao. 2020b&. Research and application of gold exploration theory and technology in the thickly covered area of southern Tanlu fault zone:

Considering the overall exploration of the Wuhe Gold Mine in northeast Anhui Province as an example. Acta Geologica Sinica, 94 (10): 2965~2977.

Wang Qingsong, Zhang Jinhui, You Miao, Xue Guoqiang, Zhou Zhou, Zhang Yangyang, Xu Chuanjian. 2021a&. Detecting steeply inclined gold deposits in thick-covered areas by using current magneticfield method. Progress in Geophysics, 36(1): 281~289.

Wang Qingsong, Zhang Jinhui, You Miao, Mao Sibin, Chan Siwei. 2021b&. Study on the multiple-element exploration method of ore beds in wells and gold exploration experiment in the area with thick cover——Taken Wuhe area in northeast Anhui as an example. Geology and Exploration, 57(1): 136~145.

Wei Xuanjian, Luo Xianrong, Yang Longkun, Liu Panfeng, Wang Yanzhong, Li Haiyang, Yan Wei. 2017&. Application of geo-electrochemical method for prospecting in basalt coverage area, Changbai Mountain, Jilin. Mineral Exploration, 8(3): 464~472.

Wu Ming´an, Wang Qingsong, Zheng Guangwen, Cai Xiaobing, Yang Shixue, Di Qinsong. 2011&. Discovery of the Nihe Iron Deposit in Lujiang, Anhui, and its exploration significance. Acta Geologica Sinica, 85(5): 802~809.

Wu Wei, Zhang Baolin, Hang Guanghe, Li Zhiyuan, Shen Xiaoli, Qi Min. 2009&. Application of dual-frequency UP method in metal ore prediction in two types of typical overburden areas in western China. Geology and Exploration, 45(6): 669~675.

Xie Xuejin, Wang Xueqiu. 2003&. Recent developments on deep-penetrating geochemistry. Earth Science Frontiers, 10(1): 225~238.

Xu Qidong, Zhang Xiaojun, Shang Hengsheng, Yang Zhen, Zuo Renguang, Yao Chunliang, Liu Rui. 2012&. New approach of integrated geological prospection in covered areas: A case study from northwestern Xilinguole, Inner Mongolia. Journal of Earth Science, 37(6): 1252~1258.

Yang Xiaoxiao, Luo Xianrong, Wen Meilan, Ouyang Fei, Lv Xinghai, Yin Gaoke, Zheng Guangming. 2019&. The application of geo-electrochemical methods to prospecting in the loess-covered Xiaoshan Mountain, western Henan Province: A case study of the Shilongshan gold polymetallic ore prospecting area in Luoning County. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(2): 244~256.

Yang Xiaoyong, Zhang Lianchang. 2018&. On time-controlled metallogenesis in geological era. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 54(2): 259~277.

Ye Rong, Wang Xueqiu, Zhao Lunshan, Chen Dexing, Fu Yuanhui. 2003&. Structure and genesis of gobi-overburden and gold surface migration in the eastern Tianshan area. Geology and Prospecting, 39 (6): 90~93.

Zhang Baolin, Liang Guanghe, Cai Xinping, Xu Xingwang, Li Huizhong. 2015#. Study on soil geochemical anomaly detection method in forest vegetation coverage area——A case study of Zhengguang Au—Zn mine in Heilongjiang Province. 2015 Annual Meeting of Geological Society of China, Xi'an, 2015.

Zhang Baolin, Miao Yana, Su Yanping, Li Huizhong. 2018&. The geological—geophysical—geochemical three fields anomalies coupling theory and its application in the positioning prognosis of concealed gold—polymetallic deposits. Gold Science and Technology, 26(4): 431~442.

Zhang Bimin, Wang Xueqiu, Xu Shanfa, Yao Wensheng, Ye Rong. 2016&. Models and case history studies of deep-penetrating geochemical exploration for concealed deposits in basins. Geology in China, 43(5): 1697~1709.

Zhang Heng, Wang Xunlian, Yuan Shuai. 2020&. Geological exploration cycles in China and their causes. Geology and Exploration, 56(3): 644~656.

Zhang Jing, Chen Guoguang, Zeng Yong, Lu Shengmei, Zhan Long, Wang Juntao. 2016&. Application of the integrated ore-prospecting methods in the northern Ningwu volcanic covering areas: An example from the Nanmentou work area. East China Geology, 37(3): 221~228.

Zhang Shunlin, Wang Qingsong, Zhu Yikun. 2018&. Gold ore control conditions and prospecting target in the eastern Anhui area. Geology of Anhui, 28(1): 17~22.

Zheng Wenlong, Wu Xiaoming, Xu Jie, Zhu Xuming, Wang Wenshi, Xu Lanbo. 2019&. Application situation and focused research of drilling fluid technology in deep core drilling projects of China. Geology and Exploration, 55(3): 826~832.

Zhou Taofa, Fan Yu, Wang Shiwei, White N. 2017&. Metallogenic regularity and metallogenic model of the Middle—Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt. Acta Petrologica Sinica, 33(11): 3353~3372.

# "Cycle asymptotic exploration technology system" and its application in thick overburden area

WANG Qingsong[1),2),3)], ZHANG Jinhui[1),2),3)], ZHANG Shunlin[1),2),3)], ZHANG Jiajia[1),2),3)], CHAN Siwei[1),2),3)], CHENG Peisheng[1),2),3)], CUIXianwen[1),2),3)], ZHANG Kai[1),2),3)]

1) *The Coverage Area Deep Resource Exploration Engineering Technology Innovation Center of Ministry of Natural Resources*, *Hefei*, 230031

2) *Key Laboratory of Electrical Exploration of Anhui Province*, *Hefei*, 230031

3) *Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province*, *Hefei*, 230031

**Abstract**: The difficulty of prospecting in the overburden area is not only related to the thickness of the overburden, but also closely related to the physical properties, hydrogeological conditions and ore body characteristics. Prospecting breakthrough in covered area is a systematic process, which needs to go through four stages of selection, target setting, positioning, verification and evaluation. There are problems of exploration selection, geological information detection and multi-disciplinary effective fusion. There are few previous studies on the breakthrough process and exploration technology system in the covered area, In practical application, it can improve the success rate of prospecting, and is included in the catalogue of advanced and applicable technologies for mineral resources conservation and comprehensive utilization (2019 Edition) of the Ministry of naturalresources. Based on the idea of "existing technology + combined with practical innovation", the author summarizes and puts forward the "circular and asymptotic exploration technology system" for prospecting in thick coverage area.

**Keywords**: overburden area prospecting; convergence of geological and geophysical exploration; cyclic asymptotic exploration; Yangqiaozi copper - gold deposit; Wuhe gold mine; Xiwan lead - zinc ore, Luzong Basin**Acknowledgements**: Thanks to the chief reviewer and editorial department for their valuable opinions on the revision of this article

**First author**: WANG Qingsong, male, born in 1959, professor level senior engineer, mainly engaged in solid mineral exploration, geophysical exploration and comprehensive prospecting method research in thick coverage area; Email: wqs5936@ 163. com

**Manuscript** received on: 2020-12-20; Accepted on: 2021-05-14; Network published on: 2021-05-20

**Doi**: 10. 16509/j. georeview. 2021. 05. 145 **Edited by**: ZHANG Yuxu