

新疆东天山白鑫滩铜镍矿区物探500米以浅三维找矿模型建立及预测

柳献军^{1*}, 张雅芳², 李鑫³, 王威¹, 杜晓飞¹, 邢春辉²

¹新疆自然资源与生态环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐

²新疆地质矿产科技开发有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐

³新疆维吾尔自治区第一区域地质调查大队, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年4月25日; 录用日期: 2022年5月20日; 发布日期: 2022年5月30日

摘要

新疆东天山白鑫滩铜镍矿的发现拓展了东天山寻找铜镍矿的空间, 但是由于地表覆盖厚, 白鑫滩铜镍矿深部矿体空间变异较大, 白鑫滩铜镍矿已查明深部矿体主要多分布在150米以浅, 以往物探工作表明, 地表盐碱壳对电法勘查屏蔽效应明显, 导致物探工作未能有效的刻画矿体的深部空间展布形态, 不利于深部找矿预测和进一步评级工作开展。本次研究通过物探方法试验, 选取常规直流电法中对称四极测深, 并进行井旁测深, 选取特征点法判断0~500米内铜镍矿体的分布形态, 并建立三维物探模型, 对未知及深部矿体进行预测, 可以有效的指导白鑫滩铜镍矿进一步找矿方向, 为白鑫滩一带分布的铜镍矿床勘查提供物探依据。

关键词

新疆东天山, 白鑫滩铜镍矿, 对称四极测深, 数据归一, 物探三维模型

Establishment and Prediction of Three-Dimensional Geophysical Prospecting Model with a Depth of 500 Meters in Baixintan Cu-Ni Deposit, East Tianshan, Xinjiang

Xianjun Liu^{1*}, Yafang Zhang², Xin Li³, Wei Wang¹, Xiaofei Du¹, Chunhui Xing²

¹Xinjiang Natural Resources and Ecological Environment Research Center, Urumqi Xinjiang

*第一作者。

文章引用: 柳献军, 张雅芳, 李鑫, 王威, 杜晓飞, 邢春辉. 新疆东天山白鑫滩铜镍矿区物探 500 米以浅三维找矿模型建立及预测[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(5): 641-653. DOI: 10.12677/ag.2022.125065

²Xinjiang Geological and Mineral Science and Technology Development Co., Ltd., Urumqi Xinjiang³The First Regional Geological Survey Brigade of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi XinjiangReceived: Apr. 25th, 2022; accepted: May 20th, 2022; published: May 30th, 2022

Abstract

The discovery of Baixintan copper nickel mine in East Tianshan, Xinjiang has expanded the space for searching for copper nickel mine in East Tianshan. However, due to the thick surface coverage, the spatial variation of the deep ore body of Baixintan copper nickel mine is large. It has been found that the deep ore body of Baixintan copper nickel mine is mainly distributed at a depth of less than 150 meters. Previous geophysical exploration work has shown that the shielding effect of surface saline alkali crust on electrical exploration is obvious. This leads to the failure of geophysical exploration to effectively describe the deep spatial distribution of ore bodies, which is not conducive to the development of deep prospecting prediction and further rating. Through the test of geophysical exploration method, this study selects the symmetrical quadrupole sounding in the conventional DC method, carries out the borehole sounding, selects the characteristic point method to judge the distribution form of copper nickel ore body within 0~500 m, and establishes a three-dimensional geophysical exploration model to predict the unknown and deep ore bodies, which can effectively guide the further prospecting direction of Baixintan copper nickel deposit and provide geophysical basis for the exploration of copper nickel deposits distributed in Baixintan area.

Keywords

East Tianshan Xinjiang, Baixintan Cu-Ni Deposit, Quadrupole Symmetric Sounding, Data Normalization, Geophysical 3D Model

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

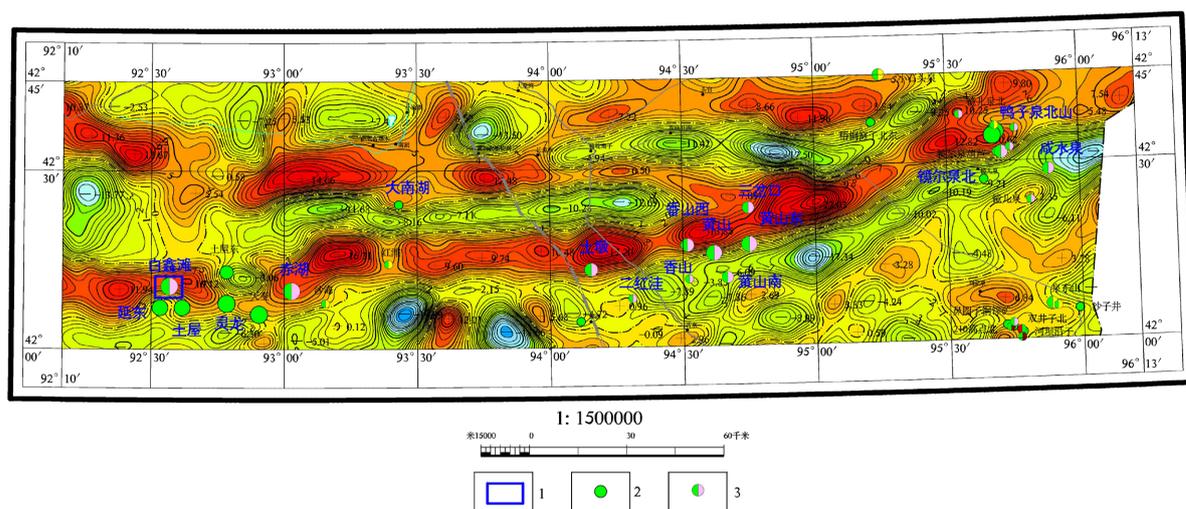
新疆东天山白鑫滩铜镍矿是新疆地矿局第一区调大队 2011~2012 年, 承担并实施《新疆 1:25 万五堡幅区域化探》过程中圈定了大量的综合异常中选取 1:25 万 HS-15 号铜镍综合异常开展异常查证工作, 发现在白鑫滩强蚀变超基性岩体中有 Cu、Ni 的高值, 使用野外 X 荧光仪分析 Cu 最高 6897×10^{-6} , Ni 最高 2235×10^{-6} , 基本确定了该超基性岩体为含铜镍的超基性岩体, 后经探槽工程揭露, 在该岩体西南部圈出厚大的铜镍矿体, 地表探槽控制矿体长 800 m、宽 60 m, Cu 品位 0.83%, 镍品位 0.56%。Cu 最高 2%, 镍最高 5%。截至 2020 年 11 月, 白鑫滩铜镍矿通过详查工作共估算铜资源量(控制资源量 + 推断资源量) 60936 吨, 平均品位 0.73%; 镍资源量(控制资源量 + 推断资源量) 47900 吨, 平均品位 0.57%, 同时查明伴生钴、银、硫等元素均具经济价值, 潜在经济价值百亿元[1] [2] [3]。但东天山白鑫滩铜镍矿地表第四纪覆盖严重, 基岩裸露较差, 极大的制约了后续的矿产评价工作, 同时, 由于地表盐碱壳的影响, 致使常规电法扫面工作效果较差, 磁法及重力勘探精度较差, 笔者前期在新疆沙漠腹地开展激电对称四极工作, 并进行了初步研究, 发现该方法可以有效的减弱沙层及地表盐碱壳的对激电数据影响, 因

此, 本次研究在前人工作基础上, 采用激电对称四极方法, 对东天山白鑫滩铜镍矿物探数据建模, 对白鑫滩铜镍矿深部矿(化)体进行精细刻画, 通过钻孔验证, 取得较好的效果, 表明该方法适用于新疆东天山铜镍矿深部评价工作。

2. 新疆东天山白鑫滩铜镍矿地质背景及存在的问题

2.1. 地质背景

新疆东天山是我国铜镍硫化物矿床的一个重要矿集区[4] [5]。白鑫滩铜镍矿区处于准噶尔板块南缘和塔里木板块北缘碰撞对接部位。板块缝合带是超基性岩发育的有利区域, 对于寻找基性 - 超基性岩类型的铜镍矿十分有利。白鑫滩铜镍矿区位于康古尔塔格大断裂以北[6], 为准噶尔南缘活动带, 觉罗塔格三级成矿带康古尔 - 土屋 - 黄山四级成矿带中[7] [8]。从剩余重力布格异常图看(图 1), 东起鸭子泉北山铜镍矿西至白鑫滩铜镍矿, 剩余重力布格异常呈北东 - 南西展布, 异常带的形态、走向及延伸基本与成矿带一致。该成矿带上铜矿和铜镍矿大多与剩余重力梯级带中的扭曲部位密切相关[9] [10] [11]。



1. Baixintan deposit; 2. Copper occurrence; 3. Copper-nickel occurrence
1、白鑫滩矿区; 2、铜矿点; 3、铜镍矿点

Figure 1. Residual gravity anomaly map in the zone of Yaziquan-Baixintan, Xinjiang

图 1. 新疆鸭子泉 - 白鑫滩一带剩余重力异常图

2.2. 白鑫滩铜镍矿发现的意义

在白鑫滩铜镍矿发现以前, 前人几十年来地质找矿工作认为黄山铜镍矿带未延伸到库姆塔格沙垄以西[12] [13] [14], 白鑫滩铜镍矿床的发现说明黄山成矿带已延伸到库姆塔格沙垄以西, 使黄山铜镍矿带向西延伸约 200 公里, 极大的拓展了新疆东天山寻找铜镍矿的空间。同时又在白鑫滩铜镍矿床以西新发现海豹滩、滩北两个铜镍矿点[15] [16], 通过资源量预测, 获得预测(334?)镍金属总资源量 6.48 万吨, 铜金属总资源量 8.42 万吨。这也说明白鑫滩铜镍矿床的发现对指导东天山铜镍矿的找矿工作具有重要意义。

2.3. 新疆东天山白鑫滩铜镍矿急需解决的地质物探找矿问题

通过近几年持续对白鑫滩铜镍矿一带的勘查工作深入, 发现白鑫滩已知铜镍矿体具有埋深浅、走向变异系数高、倾向变化大的几个特点, 目前, 在勘查过程中存在以下几个急需解决的地质找矿问题:

1) 目前已查明的铜镍矿体多分布在 150 米以浅, 矿体走向相对稳定, 但倾向延伸不稳定, 赋矿岩体

岩相变化大, 矿体多呈“鱼”状, 且产状相对平缓, 含矿岩体呈“岩镰”分布, 赋矿岩石多为中细粒超基性岩, 表明白鑫滩铜镍矿已知含矿岩体侵入就位高, 岩体分异迅速, 深部应该存在含矿岩浆房。目前含矿岩体侵入通道不明, 深部岩浆房存在位置不清, 岩浆房内部是否存在厚大矿体?

2) 白鑫滩铜镍矿地表基本为第四纪覆盖, 目前已查明的矿体基本为盲矿体, 矿体纵向变化较大, 在勘查阶段只能采取按勘探间距布设钻孔, 甚至孔与孔间隔 50 米矿体尖灭再现, 已做的物探工作未能有效的指导钻探工作, 如何选取合理有效的物探方法手段, 来指导进一步的攻深找盲工作是急需解决的难题之一。

3) 如何较为精准对白鑫滩铜镍矿建立物探三维找矿模型, 来进一步指导白鑫滩铜镍矿床及以西新发现海豹滩、滩北两个铜镍矿点找矿突破是本次研究需解决的问题。

3. 本次研究工作物探方法选择

物探方法在金属矿上的应用既取决于各种金属矿的地质和地球物理特征, 还取决于矿产勘查工作所处的阶段及其遇到的具体问题, 本次物探工作拟选用常规激电测深工作定量解释 0~500 米以浅的盲矿体分布规律, 综合解释并建立矿区 0~500 三维立体物探推测矿体分布形态模型, 指导进一步深边部找矿工作。这种物探方法的优点是采用常规激电测深并提高人工场的输出功率, 选取合理的布极方式并提高分辨率可以有效的解决 500 米以浅的极化体的分布范围, 反推基性超基性岩体的分布范围, 从而进一步缩小深部找矿范围, 解决 0~500 米的地质体分布形态, 通过常规激电测深的成果来标定矿体的深部赋存部位, 建立地质—地球物理找矿模型, 实现矿区三维可视化模型的建立。

在白鑫滩铜镍矿本次研究工作当中, 笔者也做了常规电法的野外实验工作, 以 1:1 万激电中梯装置为例, 发现在矿区南部岩(矿)石出露较好的地方, 视极化率普遍在 2~3%之间, 在北部盐碱壳分布较厚的区域, 视极化率反而要高, 视极化率普遍在主要在 3%~5%之间(图 2)。1:1 万激电中梯反映出矿区极化率特征比较凌乱, 规律性不强, 与地表已知矿体对应较差, 获得的视极化率反应近地表的电性特征较强, 不能有效的反映矿体电性特征。

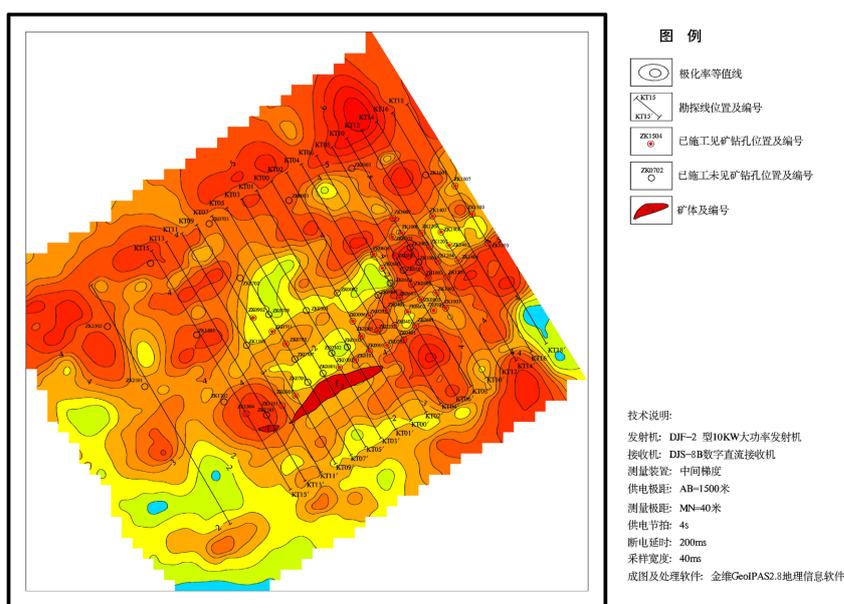


Figure 2. Polarizability anomaly map of 1:10000 induced polarization intermediate gradient in Baixintan copper-nickel deposit

图 2. 白鑫滩铜镍矿区 1:1 万激电中梯极化率异常图

笔者认为这是地表盐碱壳“薄膜”效应引起的，众所周知，在野外实际工作中所取得的极化率 η_S 是测点许多微小极化单元产生的极化效应的总和，称之为视极化率，只有在均匀介质中，岩(矿)石的极化率才是真极化率 η_O 。当然，这是在理想状态下，实际在自然界中地质条件是复杂的，影响视极化率的因素很多，除了充、放电时间外，还与岩、矿石的成分、及其矿物含量、结构、含水性等等因素有关。如图 3 所示，当激电中梯 A、B 两个点电源向地下供电，受盐碱壳的影响，当供电电极 A、B 向下供电时，人工电场强度 T 受盐碱壳屏蔽影响，分布在盐碱壳内分布电场强度 T_0 要远大于分布在基石及矿化体中的电流 T_1 。因为激电中梯测量主要测量的体极化效应，可以将盐碱壳覆盖下的基岩宏观上视为导电岩石颗粒，而盐碱壳起到“隔绝阻断”或者称“薄膜包裹”极化效应，导致目标地质体极化效应减弱，从而过多的反映地表盐碱壳的极化信息，压制了目标体的信息，这就是实际工作大家常说的接地阻抗较大供不下去电的原因。例如，图中所示，当测点 M1、N1 向 M3、N3 移动时，盐碱壳的厚度分布不均一及松散程度不同，影响视极化率采集的“薄膜”效应不同，同时对二次场的衰减程度影响也不相同，造成为激电中梯测量实测视极化率规律性不强，不能真实有效客观的反映矿(化)体平面形态。

笔者曾在准噶尔沙漠腹地开展了近 500 个的直流激发极化法对称四极测深点工作，发现该方法可有效的减小地表沙漠对数据采集的影响，如图 3 所示，开展测深工作中，以 MN 变化在 1/10~1/3 范围内，理论上该装置是以 O 点为中心点，垂向采集不同深度的视极化率 η_S ，地表覆盖层对物探数据二次场采集的影响可以大致看成一个稳定的值。采用直角坐标系将测深曲线绘制成图，当垂向测深点在极化体顶界面时，采用直角坐标系将测深曲线会产生转折点或拐点，通常根据 η_S 测深曲线开始明显上升的“转折点”的横坐标(AB/2)转折点，可以大致估算极化体的上顶埋深。

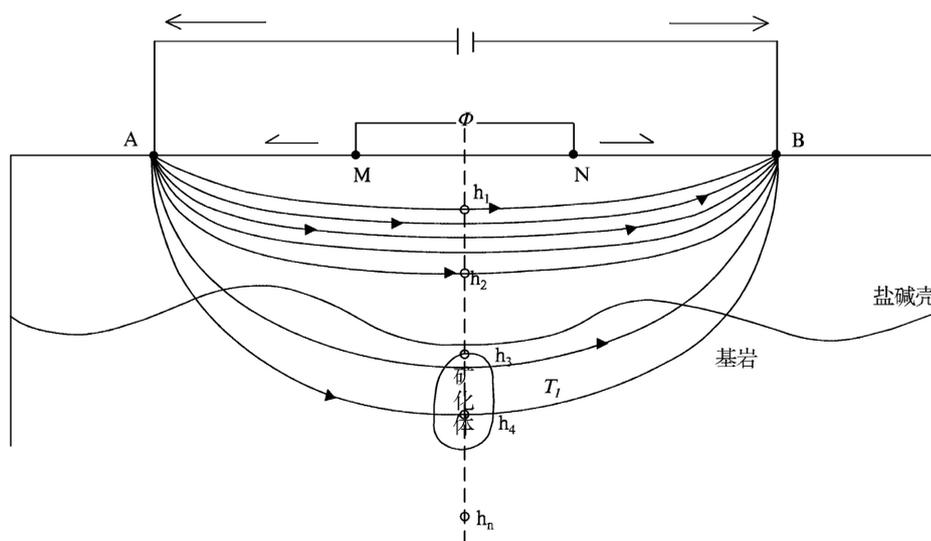


Figure 3. Current shielding effect scheme of saline alkali shell

图 3. 盐碱壳对电流屏蔽效应示意图

因此，笔者在白鑫滩铜镍矿区选取已知钻孔开展了直流激发极化法对称四极测深试验工作，为了保证能够采集有效的二次场数值，笔者采用供电时间 30 s，在一般情况下供电 30 s 后，二次场一般可以达到饱和值 80%左右(如图 4)。因为供电时间过短，地质极化体未被充分激发，二次场电位差太小，衰减快，供电时间太长，各种干扰因素也要加大，理论上要达到饱和，时间要无穷大，电源消耗也大，经过试验，笔者认为 30 s 供电在白鑫滩铜镍矿区较为适宜。

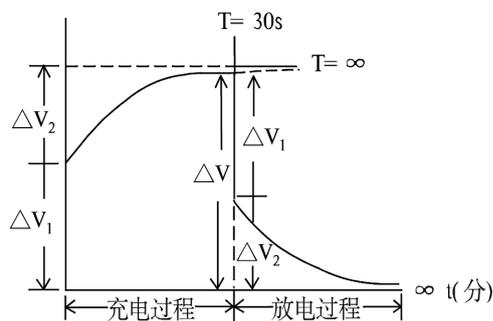


Figure 4. Scheme of charge and discharge by the direct-current induced polarization method

图 4. 直流激发计划法充放电示意图

4. 试验结果对比分析

地球物理勘探是地质找矿工作的眼睛，如何较为精准的解释物探资料是每个地质工作者都着力解决的问题。笔者选取的直流激发极化法对称四极测深装置中取得 ηS 测深曲线可以按照经验公式来确定极化体的埋藏顶界面， k_1 为经验系数(公式 1)。经验系数虽然与极化体的形状和导电性有关，但在实际工作中也可根据矿区已知钻孔资料，采用井旁测深进行标定后，通过数理统计后得出 k_1 。

公式 1: $h = k_1(AB/2)$ 转折点

笔者在白鑫滩铜镍矿区选取 12 号勘探线 ZK1204 钻孔、30 号勘探线 ZK3002、ZK3004 钻孔进行井旁测深工作，选取的目的是研究厚大矿体和较为薄的矿体在对垂向极化表现特征，用来标定测深数据。如图 5 所示，ZK1204 孔井旁测深曲线在 $AB/2$ 小于 50 米时，极化率数值上升较快但曲线拐点不明显；在 $AB/2$ 等于 50~66 米时(图 5 线所示)，开始出现拐点后曲线平缓，推测为岩性差异引起的；在 $AB/2$ 等于 96 米时，曲线出现明显的起跳第一拐点(图 5 中第一条蓝线所示)， ηS 数值明显抬升，反映出极化体的特征；在 $AB/2$ 等于 160 米时，曲线出现明显的第二拐点(图 5 中第二条蓝线所示)， ηS 数值明显平缓上升，反映出岩石界面的变化特征；在 $AB/2$ 等于 250 米时(图 5 中第三条蓝线所示)， ηS 数值明显上升，出现第三拐点，反映出深部有极高极化体存在的特征。结合钻孔实测资料来看，ZK1204 孔在 98 米左右见到厚大矿体，在 154 米处见到英安岩后终孔，这与井旁测深曲线反映的地质特征高度吻合。但测深曲线还反映出在深部 250 米附近任然存在一个极高极化体顶界面，根据已知推未知，笔者推断该极化体异常为矿致异常所致。曲线末端趋于圆滑，再无明显的拐点出现，是深部地质体均一化的表现。

如图 5 所示，ZK3002 孔在 $AB/2$ 等于 96 米时(图 6 中蓝线所示)，视极化率曲线出现明显的拐点，反映出存在极化体的特征，尾支曲线平缓上升，曲线趋于圆滑；K3004 孔在 $AB/2$ 等于 96 米~120 米时曲线变为平缓，120 米时视极化率曲线也出现明显的拐点(图 7)，尾支曲线同样平缓上升，曲线趋于圆滑。对应钻孔资料分析，这一特征反映是含矿岩石橄榄辉石岩和橄榄岩与围岩的顶界面，这类岩石虽然含矿矿物比例较少，仍然与围岩形成的电性差异明显，当这类岩石所含矿体较薄，激电特性就是反映的该类岩石特征。因此，通过方法试验对比，本次研究采用的激电测深方法是可以有效的反映出厚大矿体的顶界面和含矿岩体的顶界面。

通过对比研究发现，笔者选取的直流激发极化法对称四极测深装置可以精准刻画白鑫滩铜镍矿厚大矿体及赋矿岩橄榄辉石岩和橄榄岩与围岩的顶界面，视极化率 ηS 在这类岩石及厚大矿体中表现出极化效应较强的特征，并且，理论深度与实际深度吻合较好。笔者认为在白鑫滩铜镍矿区 k_1 值选取在 0.9~1.1 之间较为合适。

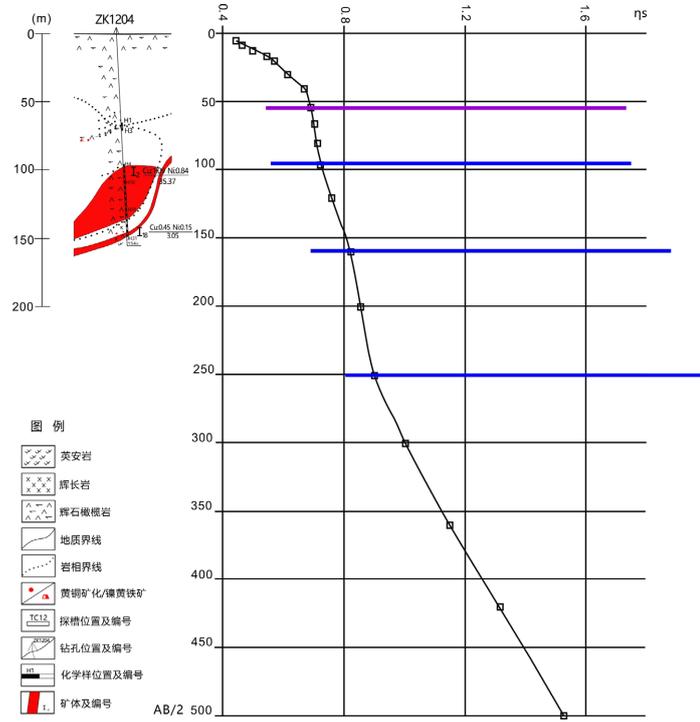


Figure 5. Near-well sounding curve of borehole ZK1204
 图 5. ZK1204 井旁测深曲线

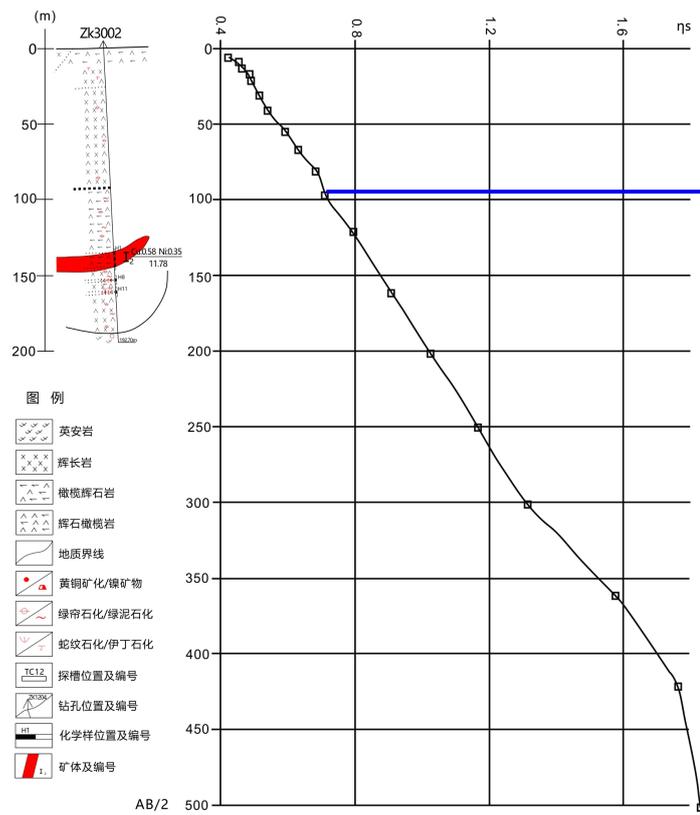


Figure 6. Near-well sounding curve of borehole ZK3002
 图 6. ZK3002 孔井旁测深曲线图

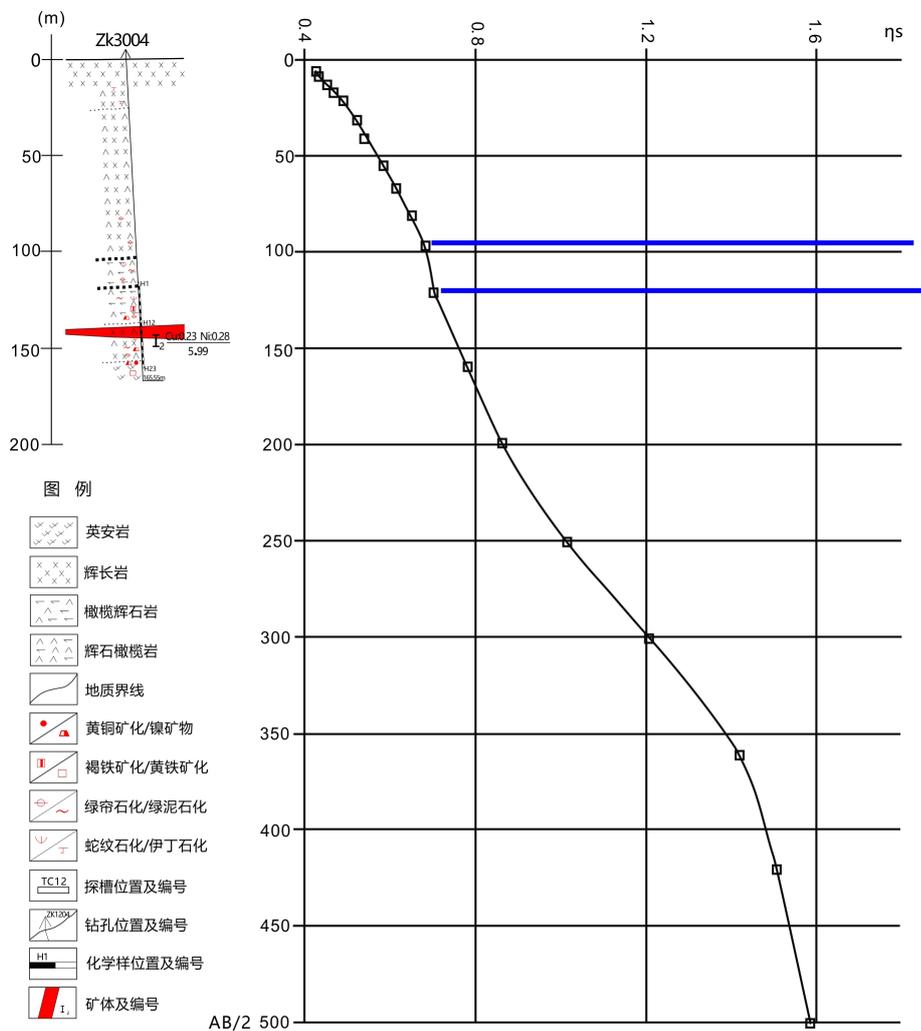


Figure 7. Near-well sounding curve of borehole ZK3004
图 7. ZK3004 孔井旁测深曲线

5. 激电物探成果三维模型建立及解释推断

1) 物探模型约束条件确定

本次研究工作在白鑫滩铜镍矿区选取 KT02、07、12、30 号勘探线作为物探三维模型建立基准(图 8)，实施直流激发极化法对称四极测深工作。为消除地表盐碱壳“薄膜”效应，对激电测深资料进行了初步预处理工作，需要说明的是，数据处理前必须用井旁测深曲线作为参考，对测深数据进行人机交互归一化处理 and 地表高程校正后才能进行拟断面图等成图工作。

数据归一后，参考已知钻孔资料，实测 η_s 归一数据建立垂向拟断面图，结合地质综合分析后，确定地质体极化效应的约束阈值。如图 9 所示，以 12 号勘探线为例，笔者综合分析认为在白鑫滩铜镍矿区视极化率 $\eta_s < 0.6$ 可以看做是地表盐碱壳的电性反映，以 η_s 上限 0.9 为上限，反映的地层围岩英安岩的电性特征值， $\eta_s 0.9 \sim 1.1$ 反映的是基性岩是的极化特征， $\eta_s > 1.1$ 左右反映是超基性岩石的极化特征，这也是矿区含矿层岩石， $\eta_s > 1.2$ ，基本是矿体的极化特征，也是建立三维模型的约束阈值。从视极化率拟断面图中可以看出，电性特征反映出基性—超基性岩体自 12 号勘探线西南部侵入就位，在不同深度岩浆发生分异作用，富集成矿。

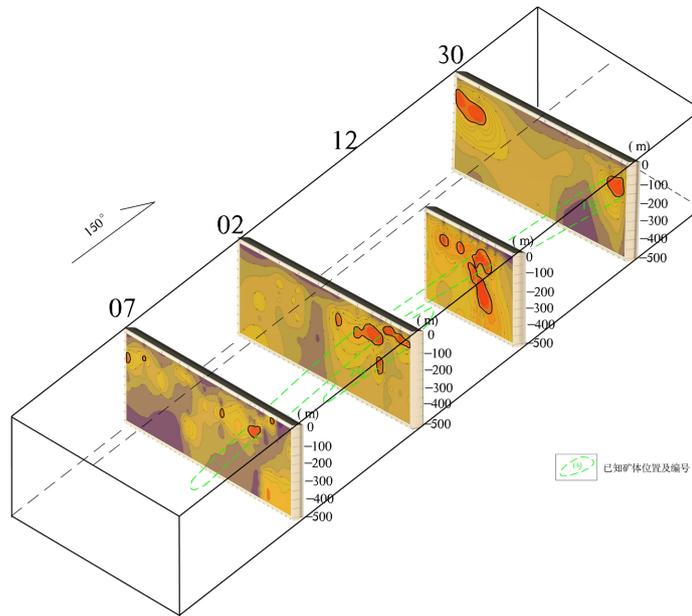


Figure 8. Three dimensional distribution map of measured symmetrical quadrupole sounding profile in Baixintan copper-nickel deposit
图 8. 白鑫滩铜镍矿实测对称四极测深剖面三维分布图

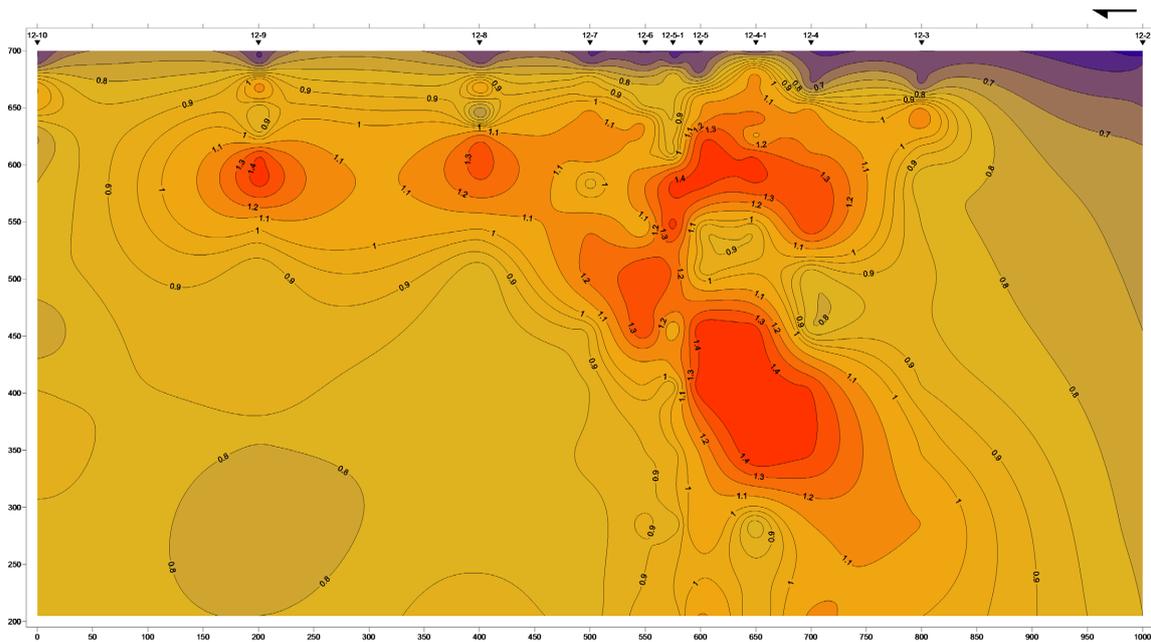


Figure 9. Apparent chargeability pseudosection map of prospecting line 12 in Baixintan copper-nickel deposit
图 9. 白鑫滩铜镍矿 12 号勘探线视极化率拟断面图

2) 三维模型的建立

根据约束阈值, 利用测深归一数据采用高斯克里格插值, 建立三维极化率空间模型(图 10), 并可视化, 判断不同极化率反映的不同地质体的空间分布特征, 也可进行不同角度、不同海拔高度切片来观察所需要垂向深度的极化体特征(图 11), 判断极化体空间展布特征。

根据不同地质体的二次场的物探特征,结合研究区的地质情况,运用地质学的基本原理将激电测量成果建立三个约束阈值开关,第一约束开关阈值 $0.9 < \eta_{\text{归-数据}}$,第二约束开关阈值 $0.9 < \eta_{\text{归-数据}} > 1.2$,第三约束开关阈值 $\eta_{\text{归-数据}} > 1.2$,建立三个物探模型:围岩、基性岩体、矿(化)体,对物探推测不同地质体进行精细刻画(图 12~14),确定不同地质体、矿体的空间分布规律,从空间和时间上进行物探解释和推断,有效区分出围岩、基性岩体、矿(化)体空间分布形态。通过模型建立并与已知钻孔和施工钻孔验证对比研究,极化率反映的地质体分布情况与已知基本一致。

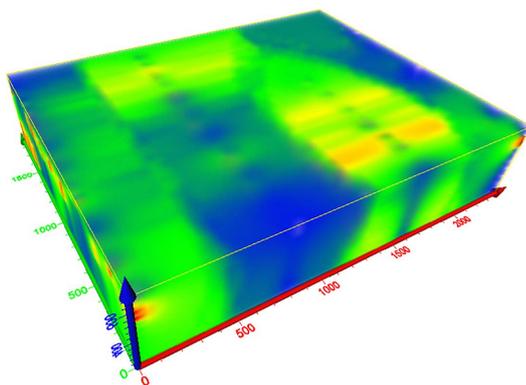


Figure 10. Three dimensional visualization map of polarizability in Baixintan copper-nickel deposit

图 10. 白鑫滩铜镍矿极化率三维可视化图

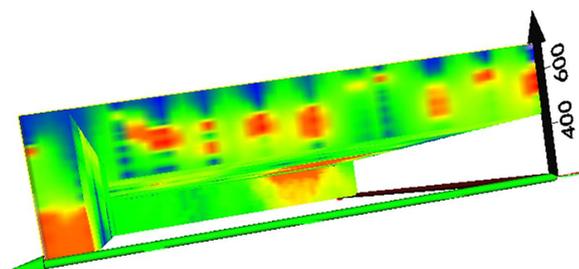


Figure 11. Three dimensional visualization slice image of polarizability at different depths in Baixintan copper-nickel deposit

图 11. 白鑫滩铜镍矿极化率不同深度三维可视化切片图

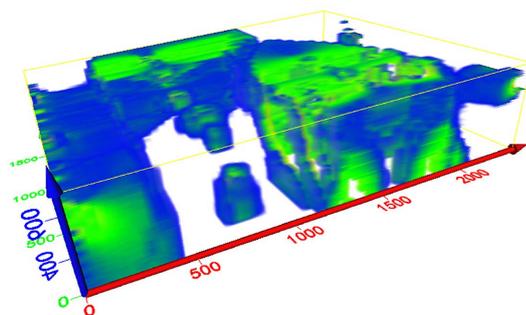


Figure 12. Three dimensional visualization map of surrounding rock inferred by ore polarizability

图 12. 极化率推测围岩三维可视化图

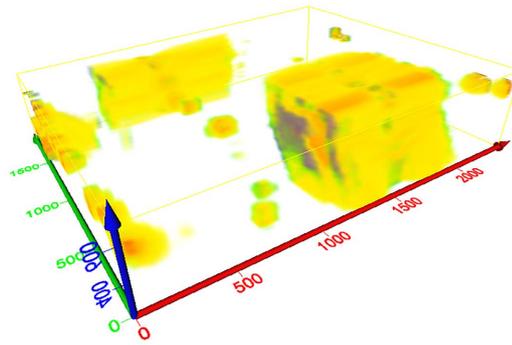


Figure 13. Three dimensional visualization map of basic rock inferred by polarizability

图 13. 极化率推测基性岩体三维可视化图

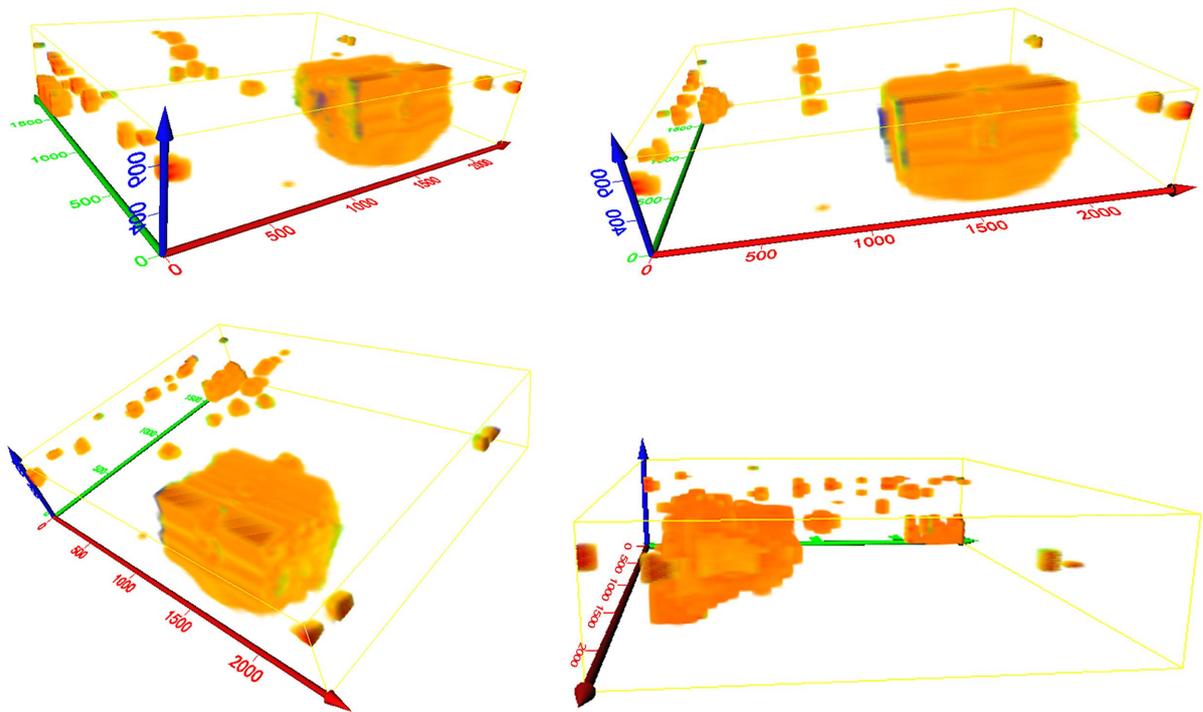


Figure 14. Three dimensional visualization map of ore (mineralized) body from different perspectives inferred by polarizability

图 14. 极化率推测矿(化)体三维不同视角可视化图

3) 物探综合分析

综上所述,从围岩、基性岩体、矿(化)体极化率三维空间图中也可清晰的反映出白鑫滩铜镍矿区基性岩体及矿化体分布规律为“水滴”状不连续分布,这与已知矿体和基性-超基性岩体空间分布特征高度吻合,从地质角度分析,造成这一特征的原因,是来自深部基性岩浆侵入就位机制是沿深大断裂裂隙贯入围岩[17],在空间裂隙大的部位侵入就位,容矿越大成矿越有利,而空间裂隙的不连续性造成矿(化)体不连续性分布特点。此外,基性岩体从物探角度分析,其分布范围比矿体分布范围大,是基性岩浆侵入就位后分异成基性岩和含矿超基性岩的反映,这一特征也符合地质规律。从基性岩体、矿(化)体极化率三维空间图中反映出在垂深 250 米以下仍然存在厚大矿体(如 12 线南部),并且矿区北部存在多个独立不同深

度的不连续矿致异常, 表明出白鑫滩铜镍矿深边部具有较大找矿的潜力。

6. 结论

1) 在白鑫滩一带寻找与岩浆熔离型铜镍矿矿床采用直流激电对称四极测深可以有效的反映出基性岩体、矿化体特征, 因此, 要加强物探工作, 为进一步深部找矿提供物探依据。

2) 白鑫滩铜镍矿三维物探数据建模可有效的精细刻画深边部盲矿体, 为进步矿产资源开发增储提供物探依据。

7. 建议

1) 激电成果显示, 在白鑫滩铜镍矿区 12 线南侧深部 250 米左右存在一个高极化异常, 推测为含铜镍硫化物引起矿致异常, 同时, 在矿区北部任然分布有多个独立的高极化体存在, 推测也是矿致异常, 建议施工验证。

2) 建议开展物探找矿工作前, 一定在已知矿体首先做方法试验及井旁测深工作, 确定物探方法及解释依据, 数据整理时要剔除或者减小“虚假”信息的干扰, 不能数据直接成图了事, 需要结合地质体物性特征, 合理推测物探异常, 为地质找矿提供依据。

项目资助

国家重点研发计划天山-阿尔泰增生造山带大宗矿产资源基地深部探测技术示范项目。

参考文献

- [1] 韩建华, 李鑫, 等. 新疆哈密市白鑫滩铜镍矿详查报告[R]. 新疆维吾尔自治区第一区域地质调查大队.
- [2] 秦克章. 新疆北部中亚造山与成矿作用[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2020.
- [3] 呼冬强, 王墩科, 李鑫, 李永峰, 林乐. 新疆哈密市白鑫滩铜镍矿地质特征及成矿模式初探[J]. 新疆有色金属, 2016, 39(4): 3-5.
- [4] 肖兵, 陈华勇, 王云峰, 杨俊毅. 东天山土屋-延东铜矿矿区晚志留世岩体的发现及构造意义[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 251-266.
- [5] 范亚洲, 王垚, 陈丹丽, 等. 新疆东天山黄山南基性-超基性岩体岩石学、矿物学研究[J]. 新疆地质, 2014, 32(3): 313-314.
- [6] 李鑫, 王敦科, 赵树铭. 新疆哈密地区白鑫滩岩浆型铜镍硫化物矿床的发现[J]. 新疆地质, 2014, 32(4): 466-469.
- [7] 毛亚晶. 东天山黄山铜镍矿田多期岩浆作用与成矿机理[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1575-1594.
- [8] 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅, 薛胜超, 冯宏业, 田野. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用-以黄山铜镍矿床为例[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 75-1594.
- [9] 陈正乐, 周永贵, 韩凤彬, 陈柏林, 郝瑞祥, 李松彬, 等. 天山山脉剥露程度与矿产保存关系初探[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2012, 37(5): 903-916.
- [10] 刘国兴. 电法勘探原理与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [11] 邓宇峰. 新疆北天山黄山东与黄山西镁铁-超镁铁岩体及 Cu-Ni 硫化物矿床成因[D]: [博士学位论文]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2011.
- [12] 邓宇峰, 宋谢炎, 颀伟, 松林, 李军. 新疆北天山黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体的岩石成因: 主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素证据[J]. 地质学报, 2011a, 85(9): 1435-1451.
- [13] 邓宇峰, 宋谢炎, 陈列锰, 程松林, 张新利, 李军. 东天山黄山西含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体岩浆地幔源区特征研究[J]. 岩石学报, 2011b, 27(12): 3640-3652.
- [14] 胡沛青, 任立业, 傅飘儿, 张铭杰, 李晓亚, 秦宏毅. 新疆哈密黄山东铜镍硫化物矿床成岩成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 158-168.
- [15] 张达玉, 周涛发, 袁峰, 范裕, 刘帅, 彭明兴. 新疆东天山地区延西铜矿床的地球化学、成矿年代学及其地质意

义[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3327-3338.

[16] 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 等. 中国天山矿产及成矿体系[M]. 北京: 地质出版社, 2008.

[17] 柴凤梅. 新疆北部三个与岩株型 Ni-Cu 硫化物矿床有关的镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征对比研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2006.