

瞬变电磁法研究现状与分析

宋英豪¹, 谢 杨¹, 温来福¹, 秦壮杰², 谷 兴³, 徐博会^{1*}

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²五矿邯邢矿业有限公司北铭河铁矿, 河北 武安

³江苏盛世机电工程有限公司, 江苏 连云港

收稿日期: 2025年9月18日; 录用日期: 2025年10月20日; 发布日期: 2025年10月29日

摘 要

随着我国对矿产资源领域的关注度增加, 地球物理勘探作为矿产开发中必不可少的环节, 其逐渐成为了矿产资源领域的热点。其实, 瞬变电磁法作为一种重要的物探方法, 不仅在矿产资源开发领域有着无可取代的作用, 而且在工程地质、环境治理、水害防治等领域同样发挥着关键作用。本文全面阐述了瞬变电磁法的基本原理、优缺点、瞬变电磁正反演研究现状以及在不同领域的应用现状。通过目前各个领域对瞬变电磁法应用的研究, 旨在为后续的研究提供一个理论参考。

关键词

瞬变电磁法, 反演, 正演

Current Status and Analysis of Transient Electromagnetic Method Research

Yinghao Song¹, Yang Xie¹, Laifu Wen¹, Zhuangjie Qin², Xing Gu³, Bohui Xu^{1*}

¹School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Beiming River Iron Mine, Minmetals Hanxing Mining Co., Ltd., Wu'an Hebei

³Jiangsu Shengshi Electromechanical Engineering Co., Ltd., Lianyungang Jiangsu

Received: September 18, 2025; accepted: October 20, 2025; published: October 29, 2025

Abstract

With the increasing attention paid by China to the field of mineral resources, geophysical exploration, as an indispensable part of mineral development, has gradually become a hot topic in this field. In fact, transient electromagnetic method (TEM), as an important geophysical exploration method,

*通讯作者。

文章引用: 宋英豪, 谢杨, 温来福, 秦壮杰, 谷兴, 徐博会. 瞬变电磁法研究现状与分析[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(10): 1463-1470. DOI: 10.12677/ag.2025.1510136

not only plays an irreplaceable role in the field of mineral resource development, but also plays a key role in engineering geology, environmental governance, flood control, and other fields. This article comprehensively expounds the basic principles, advantages and disadvantages, current research status of transient electromagnetic forward and inverse modeling, as well as the application status in different fields of TEM. Through the current research on the application of TEM in various fields, this article aims to provide a theoretical reference for subsequent research.

Keywords

Transient Electromagnetic Method, Inversion, Forward Modeling

Copyright © 2025 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

从 20 世纪初物探方法广泛应用以来,物探技术的发展日新月异,各个物探方法都有其独特的优势与适用范围[1]。瞬变电磁法作为其中的典型代表,具有探测精度高,对低阻体敏感,探测深度大的优点,自诞生以来便得到了广泛的关注。在近些年,随着科技水平的不断进步,瞬变电磁法的探测深度与探测精度也得到了不断增强[2]。为了适用于不同的地质情况,瞬变电磁法分为地面瞬变电磁法,地空瞬变电磁法和矿井瞬变电磁法三种[3]-[5]。三种方法各有优劣,在合适的环境选择合适的方法才能得到更精确的结果。现如今,国内对瞬变电磁法的正反演模型以及应用现状总结较少,因此本文着重于介绍现阶段瞬变电磁法的优缺点、在各个工程中的应用以及正反演模型具体研究现状,希望可以为后续的研究和工程提供思路[6]。

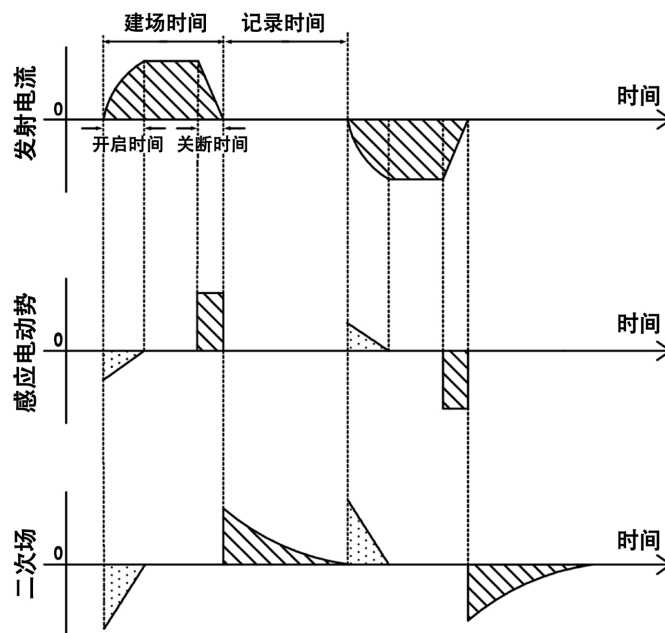


Figure 1. Transient electromagnetic method transient schematic diagram

图 1. 瞬变电磁法瞬态示意图

2. 瞬变电磁法基本原理

瞬变电磁基本原理是利用不接地回线向地下发射一次脉冲磁场，在电流关断瞬间，利用线圈检测二次涡流场的方法。该方法利用了电磁感应定律。该方法的具体操作是给不接地回线通电，该线圈产生的磁场会使地下导电岩体产生感应电流。在断电的瞬间，导电岩体会产生二次涡流场抵抗一次场的衰减。通过仪器检测二次场的衰减曲线，导入软件获得地下地质体的基本情况[7]。图 1 为瞬变电磁法瞬态示意图。图 2 为瞬变电磁信号向地下传播示意图。

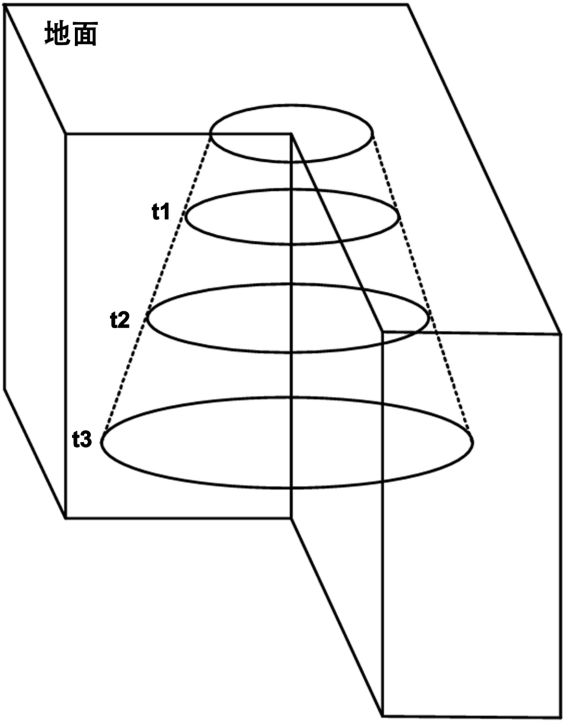


Figure 2. Schematic diagram of transient electromagnetic signal propagation underground
图 2. 瞬变电磁信号向地下传播示意图

3. 瞬变电磁法优点

3.1. 对低阻体敏感

由瞬变电磁法基本原理可知，瞬变电磁法主要靠地下导电岩体产生的二次场来探测地下岩体的分布，假若该导电岩体为低阻体，说明其导电性更强，其产生的二次涡流场对一次场的抵抗效果更强，从而更容易被观测到。因此瞬变电磁法对于探测地下含水层和金属矿藏有更好的效果。

3.2. 探测深度大

瞬变电磁法是通过向线圈发射电流产生磁场，假若向线圈通入更强的电流或增加线圈的匝数，线圈产生的磁场强度会增大，通过以上方法就可以增加瞬变电磁法的探测深度。相反，减少匝数或减小电流则可以降低探测深度。理论上来说，瞬变电磁法探测深度可以达到数百甚至数千米。

3.3. 受地形影响较小

与传统的物探方法相比，瞬变电磁法受地形影响较小。只要测线与线圈可以稳定的放在地面上，都

不影响瞬变电磁法的测量，甚至在矿井瞬变电磁中，线圈甚至不需要接触地面就可以获得地层数据。而其余的物探方法受地形影响较大，如地震勘探依靠地震波在地层中的反射与折射探测地下结构，地形的变化会使地震波产生绕射，从而影响探测精度。对于重力勘探，地形的变化会对地层的密度产生影响，从而影响重力勘探的测量。

3.4. 多参数测量

在实际工程中，除了可以测量二次涡流场的强度外，还可以测量二次涡流场的衰减特性、极化特性等多个参数，为地质解释提供更充足的证据。

4. 瞬变电磁法缺点

4.1. 探测高阻体难度较大

由前文可知，瞬变电磁法对导电性更强的低阻体反应更敏感。与之相反，由于高阻体导电性弱，很难产生二次场。因此，瞬变电磁法无法探测采空区、陷落柱之类的高阻体。事实上，对矿区工作面进行探查时，通常会采用瞬变电磁法和无线电波坑道透视法相结合的方式进行的探测。

4.2. 数据解释的多解性

瞬变电磁法探测出的数据只能看出相对电阻的高低，并不能准确的探测出异常体的电阻值。在实际的探测煤层含水工程区中，利用瞬变电磁法可以轻松探测出低阻异常区，但是该异常区是相对于周围煤层为高阻，并不能准确的探测出该区域为水，同样有可能为其他低阻体。因此在实际探测时要加以钻探进行验证。

4.3. 受人为干扰较大

由于瞬变电磁法基本原理利用了电磁感应定律，实际施工时要避免周围存在电线、基站、大型机械等设备。这些都会对瞬变电磁法造成较大干扰，导致实际结果不准确。例如在矿井掘进头进行瞬变电磁探测时，应使该条巷道全部断电，且掘进机后退几十米，保证瞬变电磁法受到的影响最小。

5. 瞬变电磁法正反演研究现状

5.1. 瞬变电磁法反演

瞬变电磁法反演主要分为一维反演和二维/三维反演两大类，其中一维反演是当前应用最广泛的反演类型。一维反演包括烟圈反演和最优化反演，兰占峰提出了一种融合二分搜索算法、烟圈法和 G-S 逆拉普拉斯正演的初始模型计算方法，并用某实际案例做出验证[8]。薛志强利用一维 Occam 反演对某煤层视电阻结果进行处理，证明了新型瞬变电磁法的有效性和可行性[9]。邢涛等基于 Occam 反演开发了回线源瞬变电磁法一维反演程序，并通过四层模型验证了其正确性[10]。孙兴昊等利用烟圈反演对瞬变电磁法探测结果进行分析，验证了瞬变电磁法对薄层充水采空区探测的可行性[11]。刘银波等以瞬变电磁法反演理论为基础，开展一维正则化反演优化实验，最终证明该实验结果能够精准探查小煤窑采空区分布[12]。燕帅等设计的卷积神经网络具有良好的抗噪能力，对野外数据可以进行实时成像，反演速度有很大的优势[13]。王鹤等提出了一种基于物理指导的神经网络深度学习方法，结果表明该方法精度较高、对地下解释更全面[14]。董毅等提出了一种经基因遗传优化的粒子群算法，该算法对等值反磁通瞬变电磁法的处理结果与实际模型更为接近，优化后的方法处理数据准确性更高[15]。周金等提出了隧道瞬变电磁粒子群非线性反演算法，相比常规烟圈反演，该方法异常轮廓更为清晰，能更好的探测含水水体位置[16]。谭丁瑞等构

建了 H、K 典型地电模型采用量子群算法实现了瞬变电磁法一维反演，验证了量子群算法对瞬变电磁法有更高的准确度[17]。饶丽婷等提出了将监督下降法应用于短偏移距瞬变电磁法中，结果表明反演精度大幅提高[18]。薛俊杰等提出了钻孔瞬变电磁虚拟波场全波形反演，并且用最小二乘法和伴随状态法求解全波形反演的目标函数，最后得出阻尼最小二乘法的全波形反演对异常体的反演结果有更好的分辨率[19]。程久龙提出了钻孔瞬变电磁法扫描探测 2.5D 反演的数据解译方法，是 2.5D 瞬变电磁法的首次探索[20]。刘蔚提出了萤火虫优化算法，通过层状介质和二维理论模型反演结果表明，萤火虫优化算法能较好的反映出层状和防空洞模型分布情况[21]。李瑞友等提出了一种基于小波包分解和遗传算法优化 back propagation 神经网络的方法，该方法相比其他算法具有更高的稳定性和正演数据拟合能力，可以有效应用于电磁探测反演解释中[22]。表 1 为瞬变电磁法各类反演算法的对比。

Table 1. Comparison of various inversion algorithms for transient electromagnetic method
表 1. 瞬变电磁法各类反演算法的对比

反演算法	收敛速度	内存需求	对初始模型依赖程度
阻尼最小二乘法	受模型数量的影响	低	强
一维 Occam 反演	快	低	弱
正则化反演	慢	高	中
神经网络成像	中	低	弱
OCTEM 反演	快	高	弱
粒子群算法	快	低	中
监督下降法反演	中	高	弱
伴随状态法反演	快	中	弱
2.5D 组合反演	快	高	中
FA 反演	中	高	弱
WPD-GA-BP 算法反演	快	高	弱

5.2. 瞬变电磁法正演

瞬变电磁法正演分为一维正演、二维正演和三维正演三类[23]。张盛行等采用有限元法正演模拟，结果表明，瞬变电磁法在坝体内呈椭球状分布，经现场试验和钻芯对比，瞬变电磁法可以有效探测坝体渗漏区[24]。张永超等提出了基于吸收边界的时间域矢量有限元法，并验证了该算法的正确性，最后通过实验表明，该方法可以提高三维正演的精度、加快计算速度[25]。张莹莹等基于一维正演理论，分析了半航空瞬变电磁法对薄层的探测能力[26]。辛会翠介绍了瞬变电磁法二维有限差分正演理论，对典型的二维模型进行分析，总结了瞬变电磁法的二维响应特征[27]。谭新平等提出 2-D 瞬变电磁法正演模拟，分析瞬变电磁法在探测岩溶及地层脱空等地质问题的应用效果[28]。李建慧等提出了频谱法和时步法三维正演，并通过均匀半空间模型验证了其正确性[29]。为验证地形对瞬变电磁法的影响，马炳镇等提出了时域有限差分法三维正演模拟，分析了回线源随地形起伏时的瞬变电磁响应特征[30]。张永超等为拓展瞬变电磁法在复杂地形的适用性，开展了时域矢量有限差分法三维正演研究，并通过均匀半空间模型的解析解和有限元解的对比，最终得到了解析解和有限元解吻合较好的结论[31]。李飞等在常规电磁三维有限差分正演算法的基础上，提出了双回线瞬变电磁三维正演，通过与数字滤波的对比，验证了算法的可靠性[32]。

6. 瞬变电磁法在不同领域的应用现状

6.1. 矿产资源勘探

在矿产资源开发领域，瞬变电磁法是一种非常重要的方法。在我国金属矿藏的开发中，大部分用的都是瞬变电磁法。由于大部分金属矿产导电性良好，通过探测地下地质体的电性差异，可以轻易圈定地下低阻异常区，为金属矿藏的挖掘提供地质依据。宿晓明提出了利用航空瞬变电磁法在小兴安岭地区圈定低阻区范围，实现快速找矿的目的，解决了小兴安岭地区由于地质条件复杂，导致地质工作难度大的问题[33]。王秋平以某以矿区为例，分析了瞬变电磁法在金属矿藏找矿中的可行性，通过与实际地质情况进行对比，验证了该方法的有效性[34]。

6.2. 工程地质情况调查

无论是地面工程还是地下工程，都需要对地下地质情况进行简要分析。在公路、铁路、桥梁等重大工程的前期勘查中，瞬变电磁法可以快速准确的探明地下地质结构，为工程的设计与施工提供参考依据。在隧道、地铁的挖掘过程中，需要着重防范水害事故的发生。瞬变电磁法对与寻找富水区具备天然的优势，能够帮助工程安全快速的进行。范子中以某段公路为例，利用瞬变电磁法对其进行探测，发现了两个采空积水区，为施工进度和人员安全问题提供了保障[35]。孙乃泉利用地空瞬变电磁法对复杂地形的隧道进行勘探，取得了良好的勘探效果，为之后的隧道设计提供了参考[36]。彭一哲用瞬变电磁法和其他物探方法相结合的方式对某隧道开展分析，提高了富水软弱岩隧道的安全性[37]。

6.3. 煤矿防治水

在煤矿安全生产中，水作为一个不容忽视的因素，对人员安全有着重要的影响。随着国家对煤矿安全的重视程度增加，矿井水防治也成为了煤矿安全的热点话题。瞬变电磁法因为其对低阻体敏感的特性成为了矿井水防治的重要方法。常伟分析了当前地下水防治的现状，介绍了包括瞬变电磁法在内的几种物探方法，提高了矿井水防治的精度，为之后的矿井排水提供了理论参考[38]。袁鹏用瞬变电磁法对煤层富水区进行探测，经过钻探验证之后，证明瞬变电磁法对于探查煤矿地层中的岩溶富水区是一个有效的方法[39]。胡跃凯在瞬变电磁法的基础上，提出了双层空区瞬变电磁法，解决了因采空区积水造成的探测结果不准确的问题[40]。

6.4. 环境保护

瞬变电磁法除了常用于以上三个方面之外，还可以检测地下水污染。被污染的地下水中，离子含量较高，增加了地下水的导电性。因此，瞬变电磁法可以有效地检测到被污染的地下水。职志攀就利用了瞬变电磁法对废物处置场地下水污染进行研究，通过电阻率的高低表明该地区地下水污染程度[41]。

7. 总结与展望

本文首先系统地介绍了瞬变电磁法的基本原理和优劣势。其次，对目前瞬变电磁法反演和正演的算法进行总结。最后，对各个行业对瞬变电磁法的应用现状进行分析。基于本文的分析可以发现，瞬变电磁法反演算法在一维反演中已经比较完善，但是在二维与三维中还存在大片的空白。相比于一维反演，二维和三维反演对复杂地形的探测更加精细，是未来瞬变电磁法反演研究的重点。在工程实践方面，通过本文的分析，希望无论是地面工程还是地下工程，都可以通过各种物探方法的合理应用，减少工程事故，提高工程质量。同时也为后续物探手段的发展提供一个理论参考。

基金项目

国家自然科学基金项目 42304151; 项目名称: 基于地震约束 CSAMT 反演的陷落柱精细探测研究。

参考文献

- [1] 袁桂琴, 熊盛青, 孟庆敏, 等. 地球物理勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1744-1805.
- [2] 赵文艳, 王涛, 王晓婧. 瞬变电磁法在金属矿产普查中的技术优化[J]. 世界有色金属, 2025(13): 70-72.
- [3] 王扬州, 邢涛, 于景邨, 等. 地面瞬变电磁法对覆盖层下低阻金属脉状矿体分辨能力探究[J]. 地球物理学进展, 2025, 40(4): 1473-1491.
- [4] 冒我冬, 白锦琳, 骆燕, 等. 浅析地空瞬变电磁在煤矿采空区的探测效果[J]. 矿产勘查, 2025, 16(S1): 181-188.
- [5] 王艳波. 矿井瞬变电磁法在采空区优化探测中的应用特点和效果[J]. 煤炭技术, 2025, 44(9): 120-123.
- [6] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法正反演问题研究进展[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1165-1172.
- [7] 静恩杰, 李志鹏. 瞬变电磁法基本原理[J]. 中国煤田地质, 1995(2): 83-87.
- [8] 占文锋. 瞬变电磁法大定源装置一维阻尼最小二乘法反演研究[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2025, 24(3): 1-5.
- [9] 薛智强. 新型瞬变电磁法超前探测富水采空区的应用与研究[J]. 自动化应用, 2023, 64(21): 166-168.
- [10] 邢涛, 袁伟, 李建慧. 回线源瞬变电磁法的一维 Occam 反演[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1320-1328.
- [11] 孙兴昊, 罗平凡, 姜巧巧, 等. 城市地区充水薄层煤炭采空区瞬变电磁法探测效能分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(11): 131-139.
- [12] 刘银波, 潘冀川. 基于瞬变电磁正反演试验的小煤窑采空区精准探查[J]. 工程地球物理学报, 2025, 22(3): 317-327.
- [13] 燕帅, 殷长春, 苏扬, 等. 基于卷积神经网络的瞬变电磁数据快速成像算法研究[J]. 地球物理学报, 2023, 66(10): 4290-4300.
- [14] 王鹤, 晏茂珊, 席振铎, 等. 基于物理指导的等值反磁通瞬变电磁深度学习反演[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(5): 1851-1860.
- [15] 董毅, 全景阳, 吴佩凝, 等. 薄煤层采空区等值反磁通瞬变电磁 GAPSO 反演研究[J]. 工程地球物理学报, 2025, 22(1): 50-55.
- [16] 周金, 高树全, 徐正宣, 等. 隧道超前预报瞬变电磁粒子群反演方法及应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(4): 795-803.
- [17] 谭丁瑞, 李宁. 基于量子粒子群算法的瞬变电磁反演研究[J]. 西部探矿工程, 2024, 36(11): 116-118.
- [18] 饶丽婷, 武欣, 郭睿, 等. 基于监督下降法的短偏移距瞬变电磁快速反演研究[J]. 物探与化探, 2024, 48(5): 1199-1207.
- [19] 薛俊杰, 程久龙, 韩杨春. 钻孔瞬变电磁法拟地震全波形反演[J]. 地球物理学报, 2024, 67(9): 3630-3639.
- [20] 程久龙, 焦俊俊, 陈志, 等. 钻孔瞬变电磁法扫描探测 RCQPSO-LMO 组合算法 2.5D 反演[J]. 地球物理学报, 2024, 67(2): 781-792.
- [21] 刘蔚, 徐正玉, 杨超, 等. 拖曳式瞬变电磁法在防空洞精细探测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(3): 1260-1274.
- [22] 李瑞友, 白细民, 张勇, 等. 基于小波包分解与 GA 优化 BP 神经网络的瞬变电磁反演[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3): 1003-1015.
- [23] 李建慧, 朱自强, 曾思红, 等. 瞬变电磁法正演计算进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1393-1400.
- [24] 张盛行, 汤雷, 朱春光, 等. 瞬变电磁探测土质堤坝渗漏病害的正演模拟与工程应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 392-397.
- [25] 张永超, 王光杰, 李宏杰, 等. 基于吸收边界条件的瞬变电磁法三维矢量有限元快速正演[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 1106-1118.
- [26] 张莹莹, 王玉, 马玉龙. 多辐射场源半航空瞬变电磁法薄层探测能力[J]. 地质与勘探, 2024, 60(4): 785-799.
- [27] 辛会翠. 瞬变电磁法二维有限差分正演模拟研究[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2020, 22(5): 64-69.
- [28] 谭新平, 徐志敏, 辛会翠, 等. 瞬变电磁法二维正演数值模拟及在工程勘察中的应用效果分析[J]. 工程勘察,

- 2016, 44(7): 68-75.
- [29] 李建慧, 易涓凯, 卢绪山, 等. 全波形发射电流激发下地面瞬变电磁法磁场特征[J]. 地球物理学报, 2024, 67(6): 2472-2486.
- [30] 马炳镇, 郭建磊. 地形对回线源瞬变电磁法探测影响的三维正演研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(6): 734-742.
- [31] 张永超, 李宏杰, 邱浩, 等. 矿井瞬变电磁法的时域矢量有限元三维正演[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2361-2368.
- [32] 李飞, 王圣龙, 郑贵强. 双回线瞬变电磁法全空间三维正演方法与响应特征[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1047-1059.
- [33] 宿晓明, 李世华. 黑龙江小兴安岭丽林——清水地区利用航空瞬变电磁法找矿前景分析[J]. 世界有色金属, 2021(21): 71-72.
- [34] 王秋平, 褚冬莉, 孙军胜, 等. 瞬变电磁法在金属矿勘查中的应用研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(11): 93-96, 102.
- [35] 范子中. 高密度电法和瞬变电磁法在高速公路路基采空区的应用[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(5): 153-155.
- [36] 孙乃泉, 李天祥, 戚志鹏, 等. 地空瞬变电磁法在复杂地形运营公路隧道岩溶勘查中的应用——以广西河池-百色高速公路为例[J]. 地球科学与环境学报, 2025, 47(1): 95-105.
- [37] 彭一哲. 超前地质预报在富水软弱围岩隧道中的应用[J]. 四川水泥, 2025(4): 240-242.
- [38] 常伟. 煤矿水文地质勘探现状与新工艺探析[J]. 能源与节能, 2025(5): 212-214+246.
- [39] 袁鹏. 瞬变电磁探测技术在煤矿岩溶富水区勘探中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2025(10): 18-21.
- [40] 胡越凯, 康向阳, 蒋亮, 等. 面向岩土工程勘查的金属矿探测与应用研究——基于瞬变电磁法[J]. 世界有色金属, 2025(7): 193-195.
- [41] 职志攀, 宋凯, 袁洪杰, 等. 瞬变电磁法下废物处置场地下水污染地质勘探研究[J]. 环境科学与管理, 2025, 50(4): 131-135.