

存车场火车轨道注浆效果综合物探应用研究

王朝霆, 曹 静*, 丁信然

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2023年12月8日; 录用日期: 2024年1月23日; 发布日期: 2024年1月31日

摘要

地下注浆法可以进一步加固高速铁路地下工程结构, 为初步探究济青高铁红岛站存贮车场的地下注浆系统情况, 本文采用了高密度电法, 电极的布设是一次进行的, 避免了因电极的设定所带来的影响以及因此可能带来的测量精度误差。用高密度电法和探测地雷达两种检测方法都进行了有效探测。实验数据均表明, 在距地下4 m深度左右时, 高密度测线L1、电极L2没有出现过相对的高风阻情况, 探地雷达出现了较明显减小的同相轴现象。通过与实际情况的比较, 发现高密度电法探测和探地雷达在注浆区域都非常一致。

关键词

地下注浆, 高密度电法, 探地雷达法

Study on Comprehensive Geophysical Application of Grouting Effect for Train Track in Storage Yard

Zhaoteng Wang, Jing Cao*, Xinran Ding

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: Dec. 8th, 2023; accepted: Jan. 23rd, 2024; published: Jan. 31st, 2024

Abstract

The underground grouting method can further strengthen the underground engineering structure

*通讯作者。

of the high-speed railway. In order to preliminarily explore the situation of the underground grouting system in the storage yard of Hongdao Station of Jiqing High-Speed Railway, the high-density electric method is adopted in this paper. The deployment of the electrode is carried out at one time, avoiding the impact caused by the setting of the electrode and the possible measurement accuracy error. Both high-density electric method and detection ground radar detection method have been effectively detected. The data in the experiment show that at a depth of about 4m from the ground, the high-density measuring line L1 and electrode L2 have not experienced relatively high wind resistance, and the geodetic radar has a significantly reduced coaxial phenomenon. Through comparison with the actual situation, it is found that high-density electrical detection and ground detection radar are very consistent in the grouting area.

Keywords

Underground Grouting, High-Density Electric Method, Ground Penetrating Radar

Copyright © 2024 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

铁轨下方注浆主要是通过将砂浆料灌入铁路轨道的缝隙中，使轨道与地基之间形成紧密的结合，增强轨道的稳定性。在保障铁路行车安全方面，它发挥着不可替代的作用。土壤是承载铁路道床和轨道的基础。土壤的侵蚀现象会导致道床松动、沉降，轨道变形，严重时甚至会引发铁路事故。当前有四种最为普遍的注浆效果检测技术：观测法、数据分析法(基于经验公式)、变位推测法和钻芯取样法。而物探技术因具备更低的成本、更快的速度、更加精细的结构，已普遍应用到各种工程勘查与测试中。目前，在城市地下空间的注浆效果的监控中，传统的技术手段已经不能满足需求，因此，开发出了一系列新型的技术手段，如：高密度电法、地质雷达、电测深、瞬变电磁、钻井电磁波 CT、钻孔地震波 CT 以及瑞雷面波[1]等，来更加准确、快速、精确地评估注浆的效率。本文采用高密度电法和地质雷达法对济青高铁红岛站存车场地下注浆效果进行检测。在地下 4 m 深度左右时，高密度测线 L1、L2 出现相对高阻情况，探地雷达出现较明显的同相轴现象。经与现场对比，高密度电法探测结果和探地雷达与注浆区域较吻合[2]。

2. 概况

2.1. 工作区地理位置

红岛站是中国青岛市轨道交通枢纽，三座主客站之一，建成后形成中国青岛市第一大总站，山东省第二大火车站，是融入高铁、城际铁路、轨道交通、都市公共巴士和公共租赁车交通枢纽等的众多重要功能元素的新一代特大型现代综合体交通枢纽。主要工作区域济青高铁红岛站存车场位于青岛市城阳区，新悦路以南，G22 青兰高速以北。交通位置图见图 1。

2.2. 本次物探工作完成情况

本次物探工作采用了高密度电法和探地雷达法，野外工作日期为 9 月 21 日、9 月 26~9 月 28 日。高密度电法数据采集采用温纳装置形式，完成测线 5 条；探地雷达完成测线 8 条，具体工作量情况见表 1。



Figure 1. Traffic location map
图 1. 交通位置图

Table 1. Summary of completion of geophysical workload
表 1. 物探工作量完成情况一览表

序号	工作方法	测线条数	测量长度(m)	电极个数	点距(m)
1	高密度电法	5	233	238	1
2	探地雷达法	8	约 380	/	/

3. 物探方法原理

物探技术是一种以测量仪器和云计算数据处理为基础，利用地下水岩土体本身的力学物理差异，以及其他相关因素，对地下水岩层介质结构进行精确的分析和反演，从而获取有关地下水分布特征的信息，具有高精度、无损、快速、便捷的特点。不同的岩土体具有独特的物理特征，如密度、电导率和磁场强度。通过使用专门的测量仪器和方法，我们能够准确地识别这些特性，并解决各种地质问题[3]。

3.1. 高密度电法基本原理

高密度测电法物探勘察技术中的具体应用需要以地表岩土电性差异研究为主要探测载体，借助系统采用的地下磁极转换仪等探测仪器，对基岩土层数据信息资源进行深度监测、收集、存储记载与数据分析处理，并能够根据地下有效观测数据信息的地下水客观环境实际地质状态，构造资料形成的地下视电阻率剖面图，进而可以对整个地下水客观环境区域的地表构造特点情况进行深入分析及研判，完成物探地质现场勘察分析的一整个复杂过程。通过高密度电阻率法，可以与传统的电阻率法进行比较，即通过A、B阴极将电流输送到指定的电阻点，然后利用 δ 值 U 计算电阻率[4]，从而获取所需的信息。图2描绘了这种方法的基本结构[4]。

$$\rho_s = K_{AB} \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (K \text{ 为装置系数})$$

3.2. 探地雷达法基本原理

探地雷达法是一种利用电磁波来进行地质勘探的技术，它通过一个领结状的偶极面天线将信号传播到地下[5]，其中每个周期(T)可以调节为20 μs，从而产生一个幅度高达100伏、宽度几乎可以忽略不计的电脉冲，从而形成天线波源。通过时变电磁场，天线可以将电磁波传播到地下深处[5]。对接收站收到

地面的雷达波要进行波形分析或处理，依据雷达波形、强度、几何形态特征等相关因素，来进一步确定地下雷达目标体波的几何性质形态和分布状态等特征(见图3)。

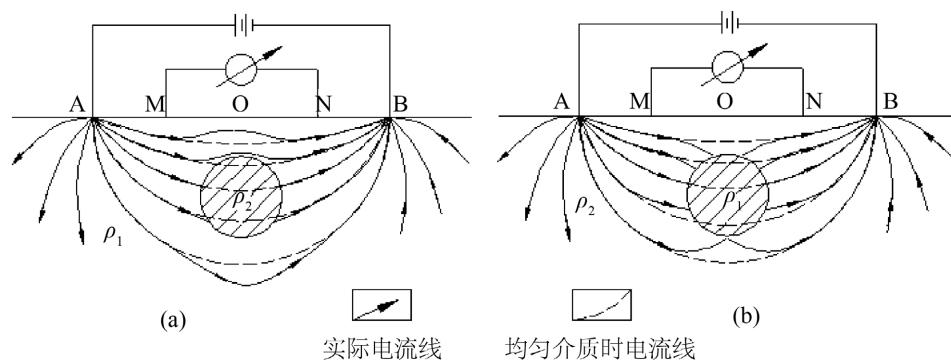


Figure 2. Schematic diagram of disturbance of normal electric field by local inhomogeneous body in half space and its apparent resistivity anomalies

图 2. 半空间局部不均匀体对正常地电场的扰动及其产生的视电阻率异常示意图

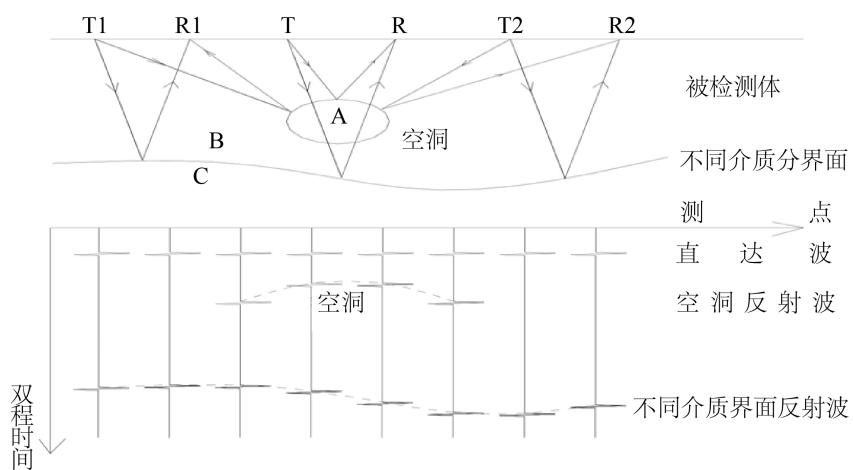


Figure 3. Schematic diagram of working principle of geological radar

图 3. 地质雷达工作原理示意图

4. 现场施工与数据处理

项目施工区域根据甲方要求，为一约 50*30 m 区域，从北至南 4 条轨道，东由指示灯向西约 50 m。经现场踏勘结合地面条件，共布设了 5 条高密度测线(L1~L5)和 8 条探地雷达测线(x1~x8)，5 条高密度测线分布在 4 条轨道下方，8 条探地雷达测线分别为沿着 4 条轨道的 2 个铁轨，测线布设如图 4 所示，其中黑色为高密度测线，蓝色为探地雷达测线，两种方法的线长大致相同。高密度电法数据采集采用温纳装置形式，点距 1 m，测量 15 层数据，测线 L1 布置 46 个电极，L2~L5 布置 48 个电极，靠近指示灯位置为测线相对值较大的点，如图 6 所示三角符号，在高密度反演结果中对应测线相对位置最大值点。

5. 探测结果分析

通过使用 Res2DINV 软件对高密度电法数据进行处理[6]，我们可以通过数据滤波和反演来获得视电阻率断面图。测线 L1~L5 高密度数据反演图如图 5~图 10。通过图 5 L1 测线高密度反演数据图所示，在

横坐标约 23~27 m、纵坐标约 0.25~3.5 m (A1 区), 横坐标约 28~31 m、纵坐标约 1~1.5 m (B1 区), 横坐标约 34~37 m、纵坐标约 1.2~3 m (C1 区)范围内出现相对低阻情况。推断为表层土壤含水量较周围土壤多造成的。特别是从地下深度 4 m 左右向下, 视电阻率值[7]相对较高, 推断该深度及以下受到注浆的影响, 出现了视电阻率值增大的情况。

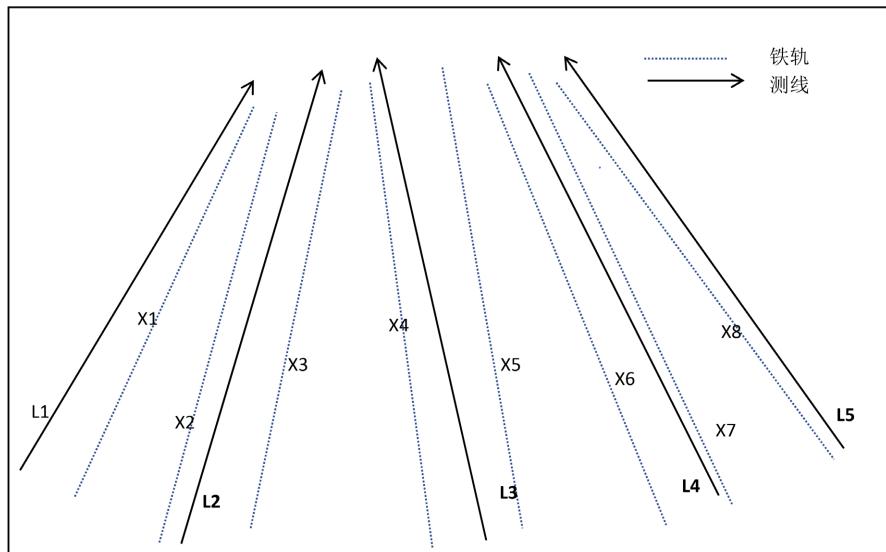


Figure 4. Layout of high-density electrical measurement lines

图 4. 高密度电法测线布置图

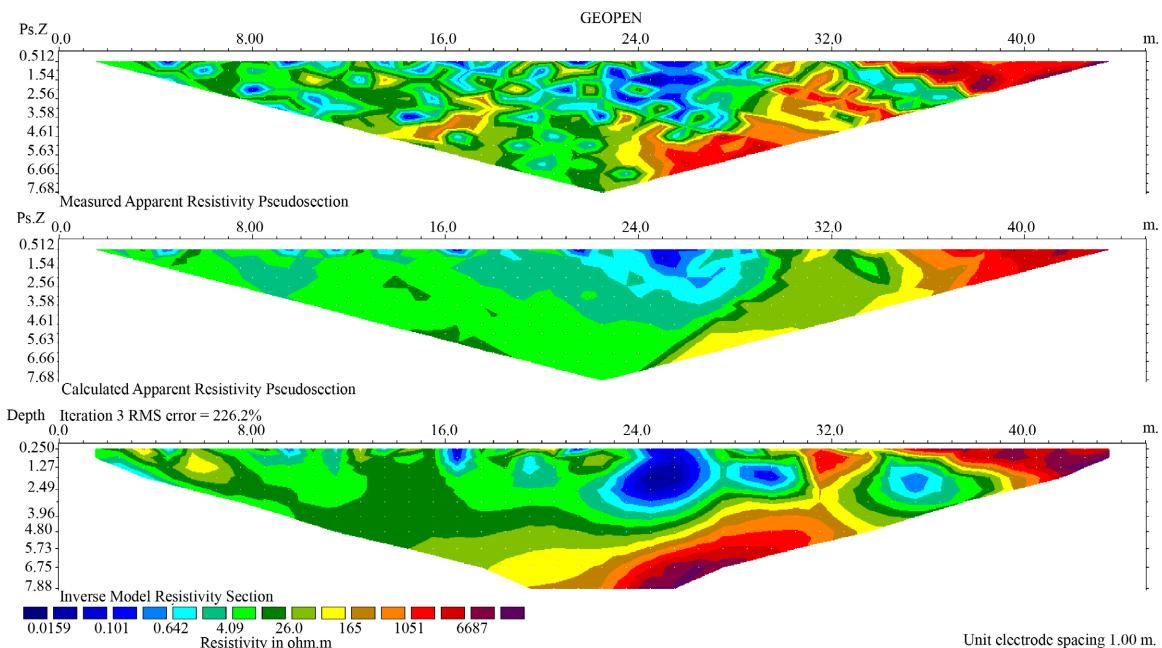


Figure 5. High-density inversion data map of L1 survey line

图 5. L1 测线高密度反演数据图

图 5 为 L2 测线的高密度电法反演数据图, 通过本图可以看到视电阻率分布情况基本呈现层状现象,

从地面往下视电阻率值越来越大。特别是从地下深度 4 m 左右向下，视电阻率值较地表值差异很大。推断从该层位向下，受到了注浆的影响。

图 6 为 L3 测线的高密度电法反演数据图，通过本图可以看到视电阻率分布情况基本与测线 L2 的相似呈现层状现象，从地面往下视电阻率值越来越大。特别是从地下深度 4 m 左右向下，视电阻率值较地表值差异很大。

图 7 为 L4 测线的高密度电法反演数据图，通过本图可以看到视电阻率分布情况出现了表层相对低阻，1~5 m 左右的深度出现相对高阻，5 m 以下的深度出现相对低阻的情况。且该测线下方虽然是相当高阻，但是阻值也是较小。

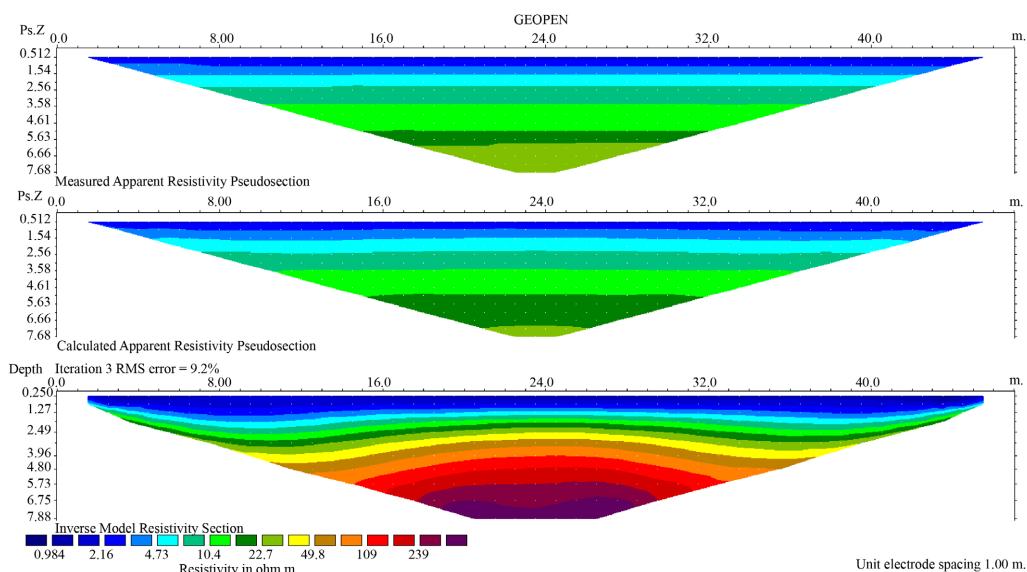


Figure 6. High-density inversion data map of L2 survey line

图 6. L2 测线高密度反演数据图

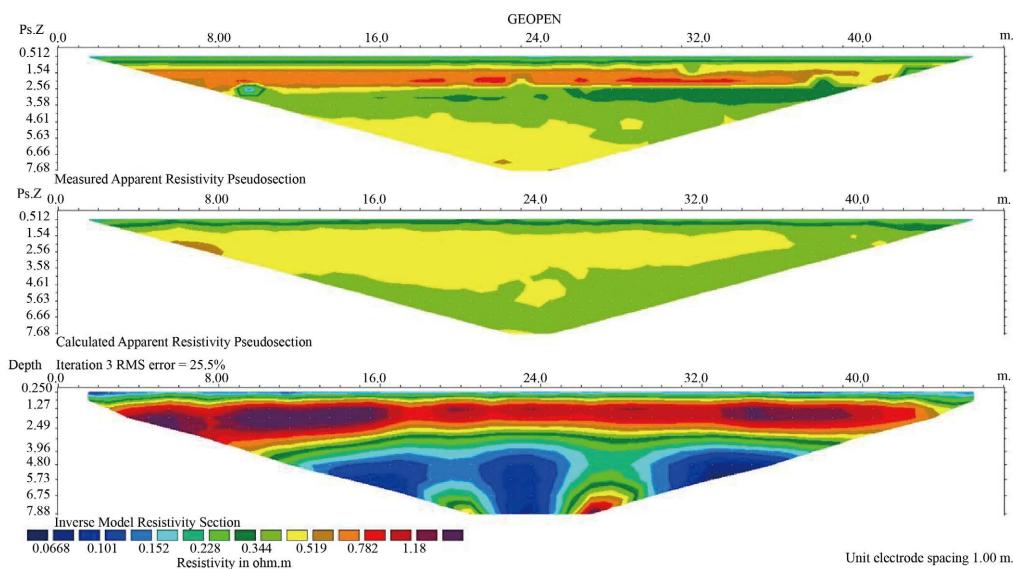


Figure 7. High-density inversion data map of L3 survey line

图 7. L3 测线高密度反演数据图

图 8 为 L5 测线的高密度电法反演数据图, 通过本图可以看到视电阻率分布情况出现了与测线 L4 相似的视电阻率分布情况, 但是深度 1~4 m 层的视电阻率值比测线 L4 的要大一些。

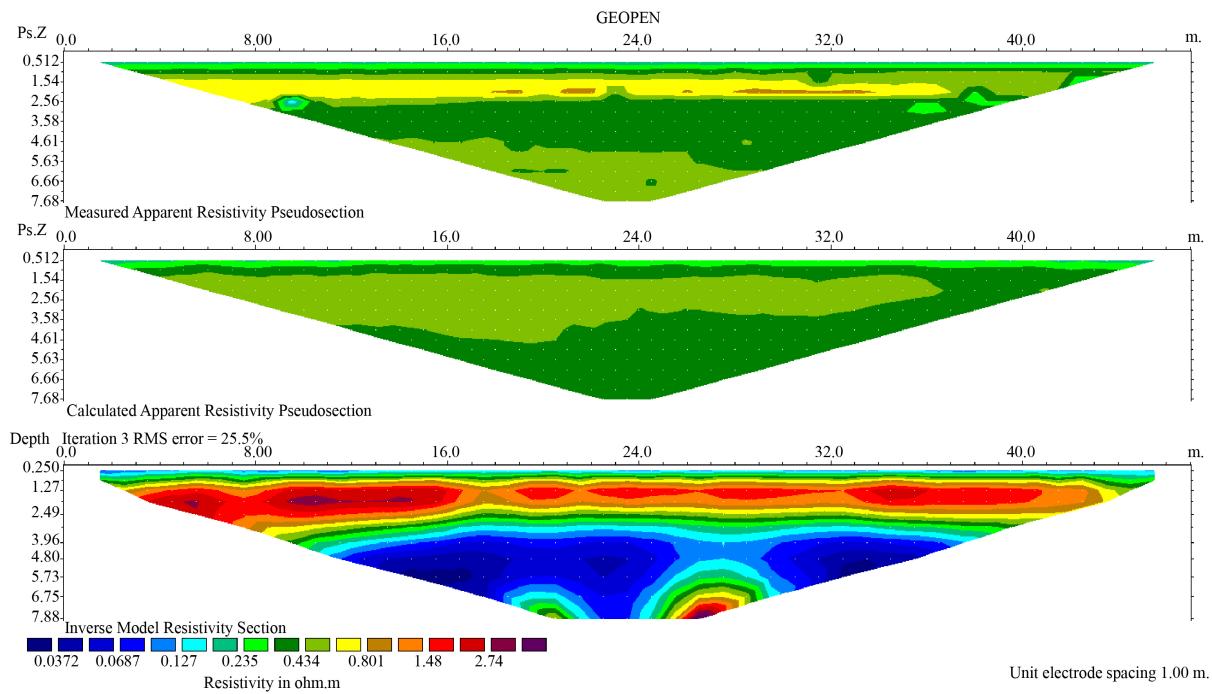


Figure 8. High-density inversion data map of L4 survey line

图 8. L4 测线高密度反演数据图

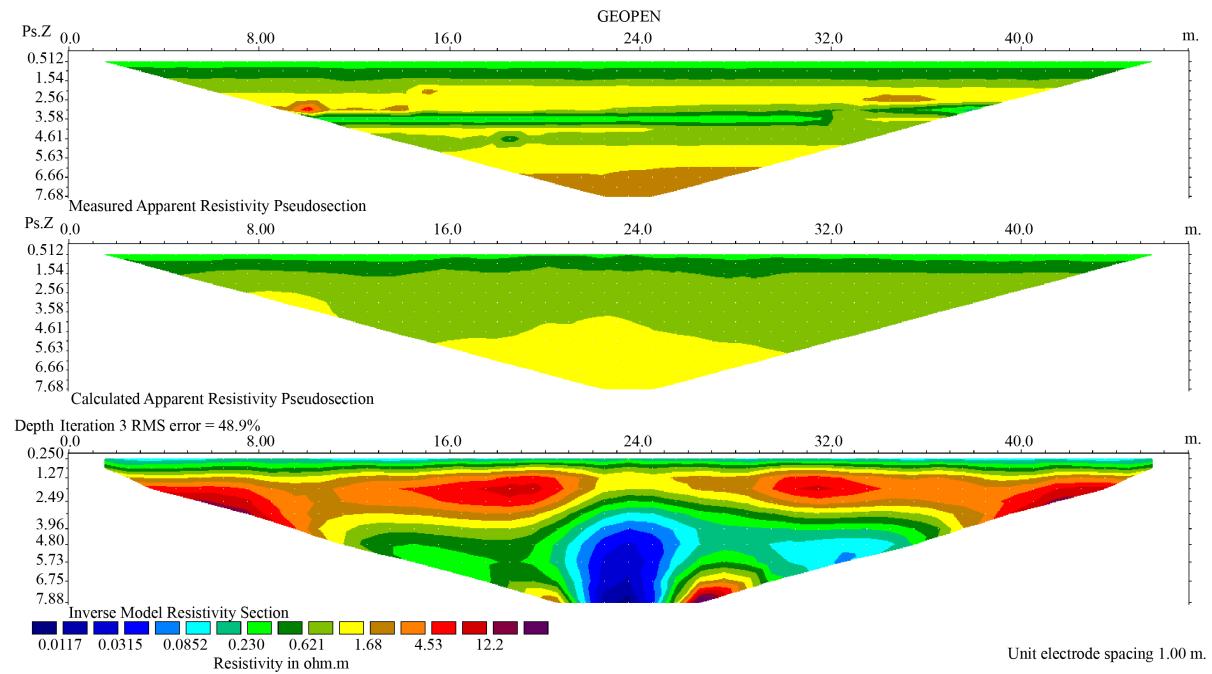
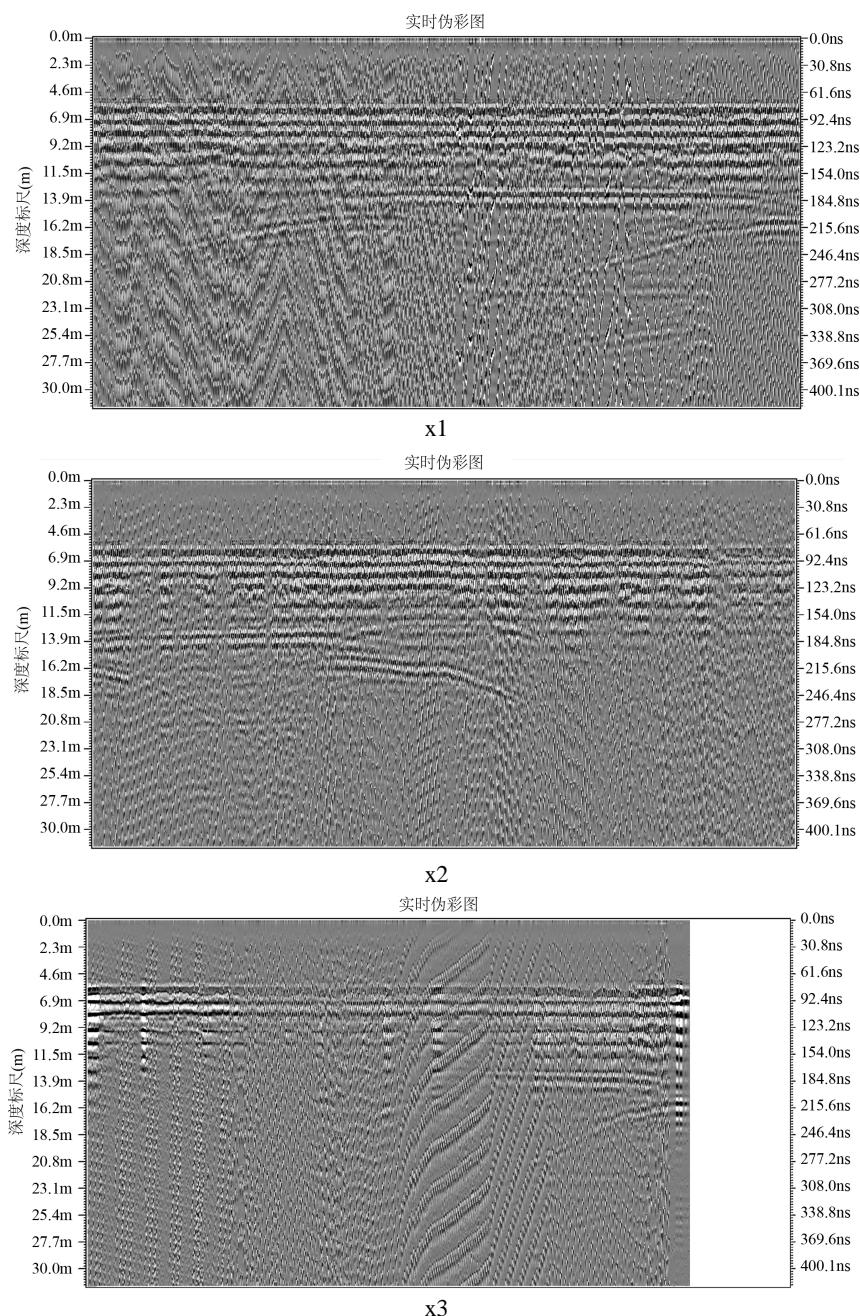


Figure 9. High-density inversion data map of L5 survey line

图 9. L5 测线高密度反演数据图

为了与高密度电法探测结果相验证，本项目又进行了探地雷达探测。根据现场条件，探地雷达选择 100 M 天线，相对介电常数选择石子。在进行地质雷达的数字处理之前[8]，通常需要进行多个步骤。第一步，需要进行数据的整合和删减，确保测量结果的一致性和准确性。第二步，则需要对数字信号进行滤波和振幅修正，使其具有更好的稳定性，同时还需要进行小波变换和时间变换[9]。

图 10 为探地雷达方法沿着轨道探测的 4 条反演数据图，测线 x1 和 x2 为第一条铁轨的两条轨道探地雷达数据，在深度约 5 m 位置出现了强反射层(图中红色虚线)，推断该层位的介质与上层介质的介电常数有明显的不同。x3 的反射层较前两个不太明显(图中 D 区)，且在中部位置(图中 E 区)出现同相轴不连续的情况。x4 的同相轴比较明显，但是出现了约 3 个扰动，扰动一般是由于地层中出现了不均匀体导致。



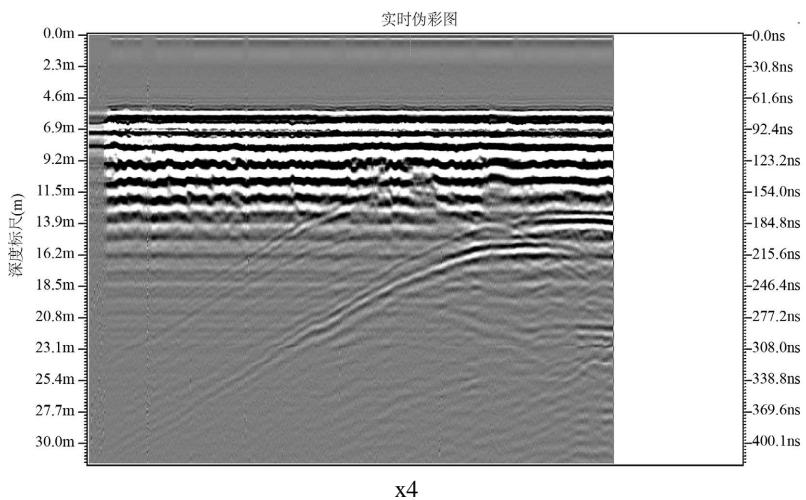
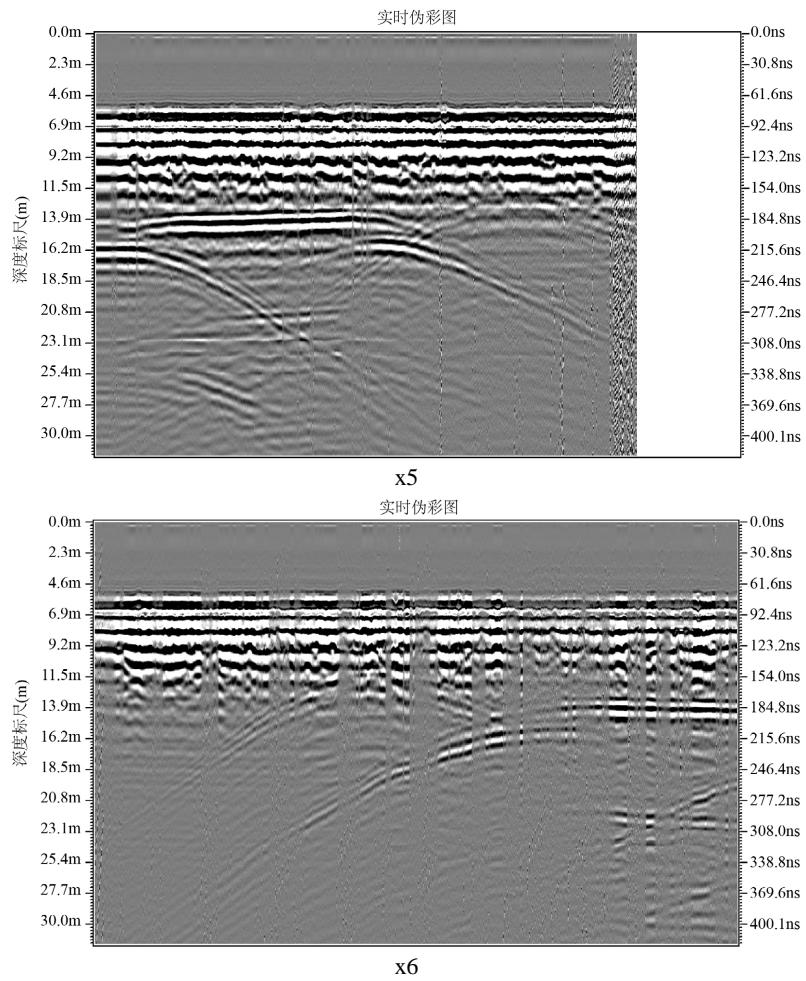


Figure 10. Ground penetrating radar inversion data maps of survey line x1~x4
图 10. 测线 x1~x4 探地雷达反演数据图

图 11 为探地雷达方法沿着后两个轨道探测的 4 条反演数据图, 测线 x5~x8 均出现了弧状的扰动, x5~x7 的同相轴出现较大长度的缺失现象[10] (如 F 区), x8 线虽然有扰动但是同相轴相对较完整。



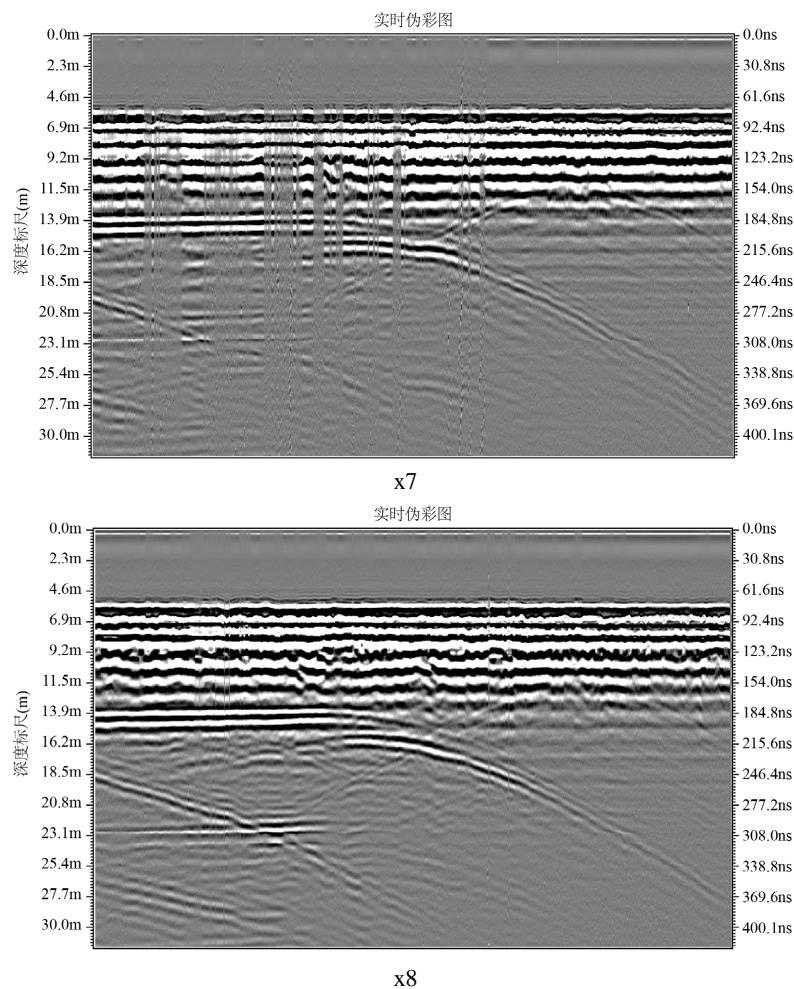


Figure 11. Ground penetrating radar inversion data maps of survey line x5~x6
图 11. 测线 x5~x8 探地雷达反演数据图

6. 结论

- 1) 高密度电阻率法通过 A 、 B 电极向地下供电流 I , 然后在 M 、 N 极间测量电位差 ΔU , 从而可求得该点(M 、 N 之间)的视电阻率值 $\rho_s = K\Delta U_{MN}/I$ 。根据实测的视电阻率剖面进行计算、分析, 便可获得地下地层中的电阻率分布情况, 根据注浆材料与土壤之间的导电性差异不同, 从而可以推断出地下注浆情况。
- 2) 地质雷达法通过天线定向往地下发射高频窄脉冲电磁波, 其传播速度和衰减率取决于岩石的介电性和导电性。对岩石类型变化格外敏感, 因此地质雷达法在注浆区域的反应较明显, 数据显示该区域出现同相轴不连续的情况。
- 3) 采用综合地球物理勘探, 有效降低了单一地球物理勘探方法在解释方面存在的多解性, 提高了项目结果的可靠性。

基金项目

国家级大学生创新创业项目, 项目名称: 煤矿区土壤污染的复电阻率特征研究、电性参数识别异常体效果对比的实验研究(202310379027, 202110379011); 校级创新创业训练项目, 项目名称: 皖北煤体复电阻率频谱特性研究(YBXM23-025); 省级大学生创新创业训练计划项目, 项目名称: 煤矿区土壤污染的

复电阻率特征研究(S202310379183)。

参考文献

- [1] 陈亚乾, 李天, 普新凯. 综合地球物理方法在隧道塌方处置中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(5): 670-677.
- [2] 杨小龙, 彭刚, 刘文华. 探地雷达在隧道富水区探水实例分析[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(11): 180-181+187.
- [3] 李远强. 物探方法在区域地质调查中的应用[J]. 城市地质, 2015, 10(1): 56-60.
- [4] 邹玉, 郭明珠. 不同时期止水帷幕渗漏检测方法探究[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2021, 21(1): 68-70.
- [5] 雷军军, 隆威. 探地雷达法在隧道地质预报中的应用研究[J]. 广东建材, 2010, 26(10): 24-26.
- [6] 黄启霖, 尹努寻, 杨武, 等. 一种改进的电法勘探技术在探测隐伏溶洞的应用[J]. 贵州地质, 2020, 37(2): 199-208.
- [7] 吴胜辉, 亚夏尔·亚力坤, 依力哈木江·吐尼亚孜, 等. 高密度电阻率法在煤矿采空区中的应用: 以鑫源煤矿为例[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(6): 741-748.
- [8] 王征, 解应军. 地质雷达在公路工程检测中的应用及管理研究[J]. 科学技术创新, 2023(27): 113-116.
- [9] 肖宏跃, 雷宛, 杨威. 地质雷达特征图像与典型地质现象的对应关系[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4): 57-61.
- [10] 海洋. 提高地质雷达在隧道衬砌检测中的准确性研究[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(4): 553-560.