

高密度电法常用装置与融合装置对比

——以梨树地区黑土地地表基质调查为例

代 铮*, 郭皓雨#, 张 月, 田 超, 山显磊

中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊

收稿日期: 2024年3月14日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月27日

摘 要

黑土地被公认为稀有资源, 也是不可再生资源, 正面临着“变薄、变瘦、变硬”的变化趋势。因此, 查明黑土资源地表分布、空间结构和本底属性特征非常迫切, 近两年来黑土地地表基质调查工作也因此逐步展开。黑土地地表基质调查工作手段多种多样, 其中地球物理方法扮演着非常重要的角色, 而高密度电法又是其中较为常用的。本文通过分析温纳、微分两种装置的优缺点, 尝试将两种装置的数据进行改进融合, 探索适于黑土地地表基质调查工作的高密度电法测量装置, 取得了一定的效果。

关键词

黑土地地表基质, 高密度电法, 温纳装置, 微分装置, 融合

Comparison between Common Devices and Fusion Devices of High-Density Electrical Method

—Taking the Investigation of Surface Matrix of Black Soil in Lishu Area as an Example

Zheng Dai*, Haoyu Guo#, Yue Zhang, Chao Tian, Xianlei Shan

Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Langfang Hebei

Received: Mar. 14th, 2024; accepted: May. 20th, 2024; published: May. 27th, 2024

Abstract

Black land is recognized as a rare resource and a non-renewable resource, facing the trend of

*第一作者。

#通讯作者。

thinning, thinning and hardening. Therefore, it is very important to find out the surface distribution, spatial structure and background attributes of black soil resources. In the past two years, the investigation of black soil surface matrix has been gradually carried out. There are various methods to investigate the surface matrix of black soil, among which geophysical methods play a very important role, and high-density electrical methods are one of the more commonly used. By analyzing the advantages and disadvantages of Wenner and Differential devices, Try to correct and fuse the data of the two devices, Explore the high-density electrical measuring device suitable for the investigation of black soil surface matrix, Some results have been achieved.

Keywords

Black Land Ground Substrate Survey, High Density Electrical Method, Wenner Device, Differential Device, Fusion

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

黑土地是世界公认的最肥沃的土壤，是十分稀缺、极其珍贵的土地资源，也是不可再生的自然资源[1]。地表基质调查(Ground Substrate Survey)是针对地表基质层开展的综合性调查工作，指运用地球系统科学理论和现代技术方法手段，全面、系统、准确地查明工作区内地表基质类型、空间结构、物质组成、理化性质、地表景观及生态属性，掌握地表基质层的时空分布、数量质量、利用状况和动态变化；建设数据库，构建科学评价模型；研究地表基质与其他自然资源相互关系和支撑孕育机理，评价地表基质基本状态、预测变化发展趋势、评估支撑孕育潜力和碳储碳汇能力[2]。为此，在项目工作中用到物探高密度电法对地表以下的分层与物性参数界定进行研究。

高密度电阻率法是由上世纪七十年代末期的阵列电法探测思想提出的[3]。八十年代由日本与美国发展起来的一种电阻率方法[4]。这期间，美国西南研究院研制了一套快速高分辨地电阻率数据采集系统，并将其应用于重叠单极-偶极高分辨地电阻率数据的采集[5]。高密度电阻率法由于其特有的优点，已被广泛应用于堤坝勘察、水文地质勘探、考古等领域[6]。在野外实际探测过程中，电极排列方式也有从最初的几种逐渐发展到现在的十几种[7]。郑冰、柳建新、马志飞和程庆[8]等就不同地质体及工作目的方面，对两种或者几种装置的探测效果进行了不同程度的探讨，在确定电法勘探深度以及灵敏性方面，阮百尧、吕玉增[9]等做出了一定的研究。郑智杰[10]研究不同装置类型中电极距对岩溶管路的响应特性；肖宏跃[11]等主要利用高密度电阻率测试仪研究了中板状和高阻球状中装置的选择问题。这些研究不仅进一步丰富了高密度电阻率法的理论体系，也为实际应用中的技术优化和问题解决提供了有力支撑。随着技术的不断进步和应用领域的拓展，高密度电阻率法在未来仍有巨大的发展潜力。

高密度电法采集系统可选取直流电法中的任意装置进行数据采集，而对于不同的地质背景，不同的勘探目标，不同装置的应用效果将会存在差异。因此，如何根据不同的工区条件及勘探目标选择最合适的测量装置显得尤为重要[12]。本文主要针对高密度电法在黑土地表基质上工作中装置运用选取，从分辨率和日常施工实际两个为目标任务进行求证。选用常用装置中的温纳装置和微分装置实测数据，对同一地电断面分别进行测量，在保证供电及测量参数一致的情况，用相同的数据处理方法进行数据处理并反演，并最终将两个装置的实测数据融合一起，通过分别对比这三种方法的反演效果，从测量分辨率和日

常工作实际角度来探索适合黑土地地表基质调查的高密度电法测量装置。

2. 研究区概况

2.1. 地理概况

本文将以辽河平原梨树地区黑土地地表基质层调查作为研究试点。工作区位于松辽平原腹地，辽吉蒙三省区交界处(图 1)。四平是吉林、黑龙江及内蒙古东部通向长三角和京津冀必经之地，是东北地区重要的交通枢纽和物流节点城市，幅员面积 28,100 km²。本次工作包含梨树县、双辽市、公主岭市、伊通满族自治县、东丰县、磐石市、辉南县、梅河口市、柳河县等地区，其中梨树县已于 2021 年度完成，2022 年度主要完成双辽市、公主岭市、伊通满族自治县及东丰县黑土地地表基质层调查，面积约 12,228 km²。



Figure 1. Geographic location map of working area
图 1. 工作区地理位置图

2.2. 地形地貌

工作区位于哈达岭和大黑山山脉之间，北部为松辽分水岭台地。西部和中部属于辽河平原，地势东南高，西北低(图 2)。根据地貌特征可分为东南部低山丘陵区、中部东辽河冲积平原区和北部风沙平原区。东南部低山丘陵区植被覆盖较好，山间沟川平地土质较好。中部冲积平原主要有东辽河及昭苏台河贯穿，一二级阶地均已开垦成为农田，土质肥沃，是商品粮基地。西部为风沙平原区，包括双辽市全部及梨树县和公主岭市西部部分乡镇，地表有沙坨和沙垄呈固定或半固定状态，沙坨和沙垄间已开垦为农田。

2.3. 物性参数统计

通过高密度电法对照剖面钻孔编录，将区内钻孔揭露的地表基质土质二级分类做物性参数(电性参数与速度参数)的划分统计表(表 1)。结合工区 50 米以内地层岩土性质实际，在地表基质二级分类标准的基础上，根据横波速传播特点对砂土、黏土、壤土分别做了固结与未固结的区分，在电性变化上在砂土层是否富水做了区分。由于不同岩性在不同深度受压实等因素影响，不能对不同深度上不同岩性的速度参数一概而论，这里选取 10~20 m 区间及 40~50 m 区间范围内的不同岩性速度做了统计，这是由于在 10~20 m 范围内，钻孔揭露的岩性种类较为丰富，方便做横向上的对比，而 40~50 m 范围内有较为明显的固结与未固结地层的区分。

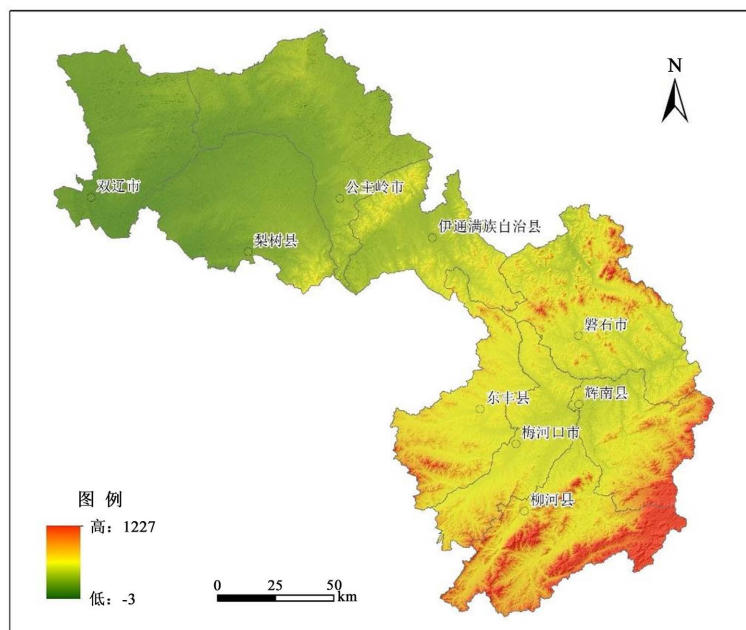


Figure 2. Topographic map of working area
图 2. 工作区地形地貌图

Table 1. Statistical table of physical parameters of working area
表 1. 工作区物性参数统计表

二级分类 统计类别	电阻率测井 统计值($\Omega\cdot m$)	高密度电法 反演统计值($\Omega\cdot m$)	微动反演统计值(m/s)	
			约 10~20 m	约 40~50 m
砂土(富水)	5~20	15~35	—	—
砂土(固结)	10~35	18~28	—	450~700
砂土	30~85	30~180	200~380	400~600
黏土(固结)	3~8	15~30	—	400~540
黏土	5~12	5~25	260~320	380~500
壤土(固结)	—	—	—	—
壤土	10~45	15~120	200~290	440~540
花岗岩	—	>500	—	500~900

从物性统计结果来看，电性上，黏土的电阻率最低，壤土稍高，砂土的电阻率是最高的，如果砂土层富水则电阻率有很大的降低；横波速度上，紧实砂土的横波速一般大于同深度的壤土、黏土，而后面二者的差异并不明显，固结地层的横波速度要大于同深度压实的土层，在工作区二级土质分类下，固结的砂土层速度是最高的，松散且不被水填充的砂层速度则很低。总的来看，不同岩性地层电性差异明显，具有开展电法工作的前提。

3. 工作方法

本次高密度电法测量仪器采用重庆地质仪器厂 DUK-4 分布式高密度电法仪，测线主要布设在测区 9 个汽车钻钻孔上，由于测区内地下电性特征并不复杂，以水平层状沉积地层为主，且根据装置实验，本

次高密度电阻率法测量以采用温纳、微分装置为主[13](图3、图4)。

为研究高密度电法不同装置与融合装置有效性,本次物探组由9人组成,其中8人为物探专业人员,负责高密度电阻率法测量、微动和测井工作的实施;1人为测量人员,主要负责物探点位的布设。采用温纳、微分两种装置采集,对同一条剖面进行探测,电极系统布设与供电条件都是相同,点距5m,电极数100,层数30,电极排列为分布式。



Figure 3. Distributed high-density resistivity instrument

图3. DUK-4 分布式高密度电法仪

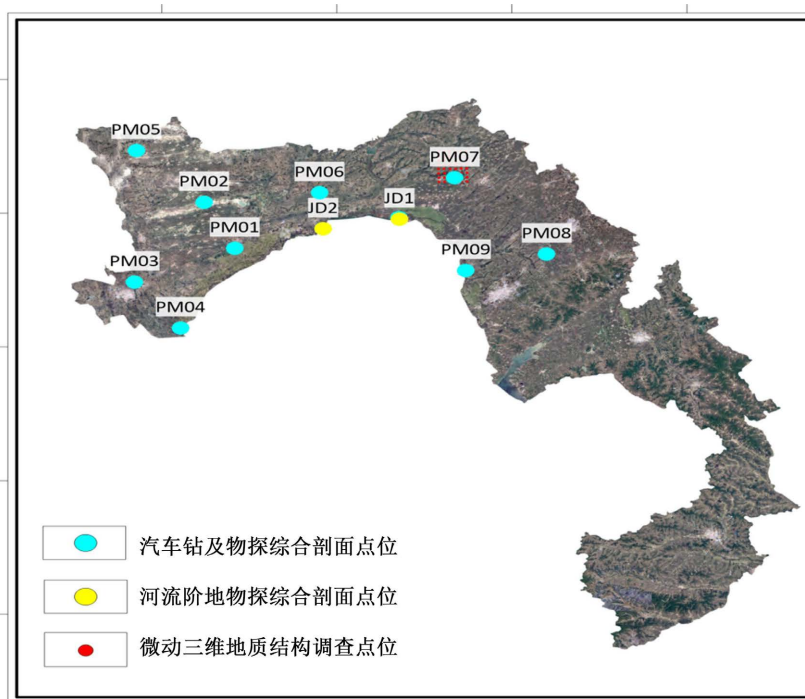


Figure 4. Work area deployment map

图4. 工作部署图

温纳装置(ω)测量时, $AM = MN = NB = na$ (n 为层, a 为电极间距), AM 、 MN 、 NB 逐点增大一个电极间距, 得到第一条斜测深曲线, 接着 A 、 B 、 M 、 N 同时向右移动一个电极, 得到另一条测深线; 这样不断扫描测量下去, 得到倒梯形断面。

温纳装置电极排列如下(图5)。

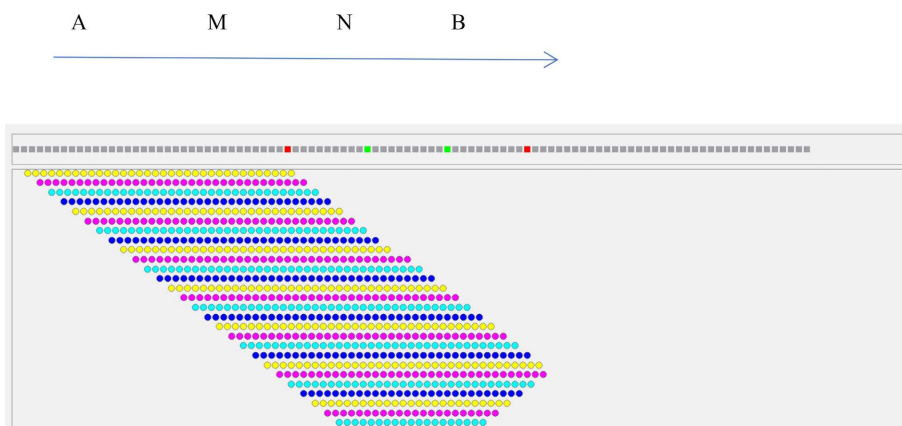


Figure 5. Wenner device measurement

图 5. 温纳装置测量示意图

微分装置(γ)测量时, $AM = MB = BN = na$ (n 为层, a 为电极间距), AM 、 MB 、 BN 逐渐增大一个电极间距, 得到第一条斜测深曲线, 接着 A 、 M 、 B 、 N 同时向右移动一个电极, 得到另一条测深线; 这样子不断扫描测量下去得到梯形断面。

微分装置电极排列如下(图 6)。

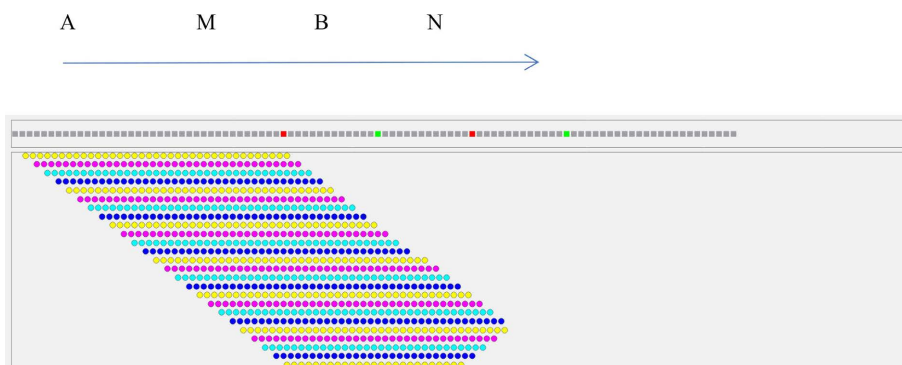


Figure 6. Differential device measurement

图 6. 微分装置测量示意图

4. 数据处理与效果分析

为更全面地研究温纳装置、微分装置和多装置融合的应用效果, 本文以辽河平原梨树地区黑土地地表基质调查项目一条剖面(PM04)做研究对比。工作区测线布置时, 尽可能避免或减小地形和其他干扰因素的影响, 并尽量远离输电线、变压器、交通繁忙的道路等等。收放线过程中, 随时注意检查电缆线有无破损和扭结, 破损处应包扎绝缘, 扭结处应放松理顺。电极布设时位置准确, 接触密实, 各电极应保持竖直状态。在每次开始测量之前, 先对所有电极进行接地电阻测量, 接地电阻一般控制在 $2\text{ K}\Omega$ 以下, 对于大于 $2\text{ K}\Omega$ 的电极通过浇水、深挖坑等方式进行处理, 遇到基岩裸露地区且无法通过浇水改善接地条件的, 工作中确保接地电阻小于 $3\text{ K}\Omega$ 。为保证观测数据的可靠性, 一般要求信噪比应大于 3。高密度电法的每个排列的坏点总数不超过测量总数的 3%, 意外中断后的复测, 不少于 2 个深度层的重测值。

然后按照项目工作要求设置探测深度, 仪器设置测量参数, 同时采用温纳(α 装置)、微分(γ 装置)两种装置方法分别采集数据, 采集过程中可以随时看着仪器参数变化, 如果正常的话继续测量, 如果中间

有不合适的要进行暂停整改, 当存在异常点、畸变点以及明显干扰或其他读数困难时, 进行重复观测。

收集野外完整数据后, 将存储在仪器内的数据通过转换软件传输到计算机上, 运用仪器自带软件转换成想要的格式, 然后再用 Res2dInv 软件将实际测量时地表干扰和数据畸变异常点进行剔除, 重新建立正演模型, 这里主要设置纵向起始网格长度及增长因子, 网格数量及给定初始视电阻率, 正演模型建立后我们要进行反演, 首先要选择反演方法以及反演参数设定, 并且也要设置迭代次数与停止反演的误差条件。然后有效数据进行预处理, 以保证采集数据反演质量, 得到可行性结果后, 获得理想的反演数据后, 两个装置数据反演完接着对两个装置基础数据进行融合, 为了更统一的成果表达方式, 将其导出成 XYZ 数据, 导入 Surfer 中对其进行白化处理, 再利用其他绘图软件进行成图。为了说明多装置融合效果, 我们把两种装置数据融合, 然后对数据进行二维反演解释。

以下是 PM04 线两种装置类型与融合后的反演断面图(图 7~10)。

根据图 7、图 8 可以看出, 微分装置反演图有个明显的趋势, 就是这两个高阻是连接在一起的, 可以解释成一个连续的高阻体是合适的。温纳装置反演图中间的高阻和右边的高阻看着是断开的, 因为温纳的横向分辨率相对来说比较弱。究竟这两个高阻是连在一起的, 还是两个独立存在的就不太好去区分。

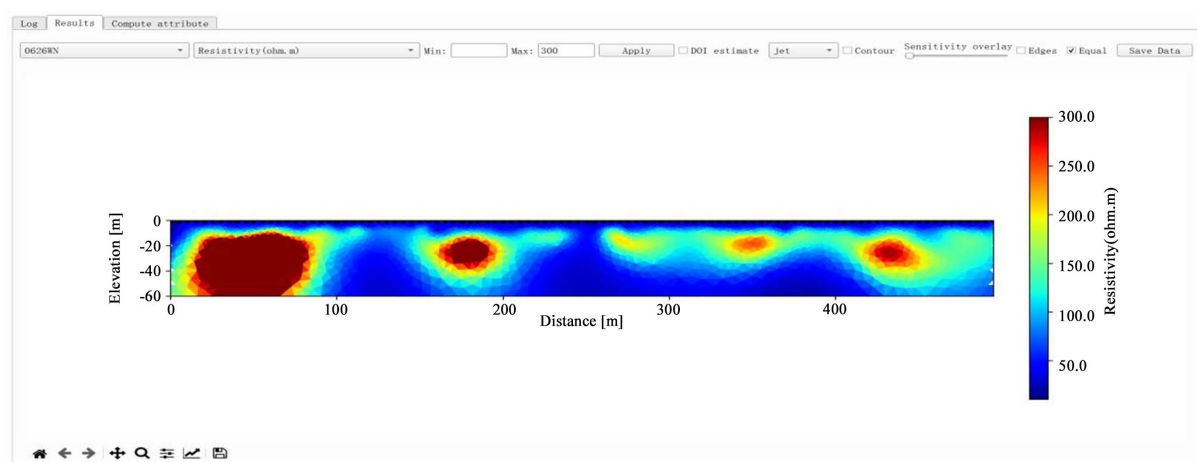


Figure 7. Inversion profile of Wenner device

图 7. 温纳装置反演断面图

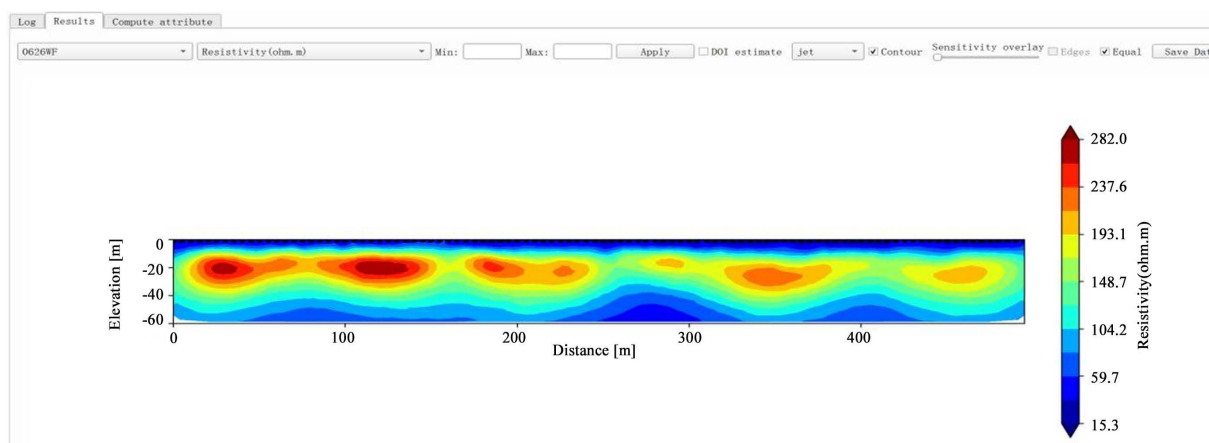


Figure 8. Inversion profile of differential device

图 8. 微分装置反演断面图

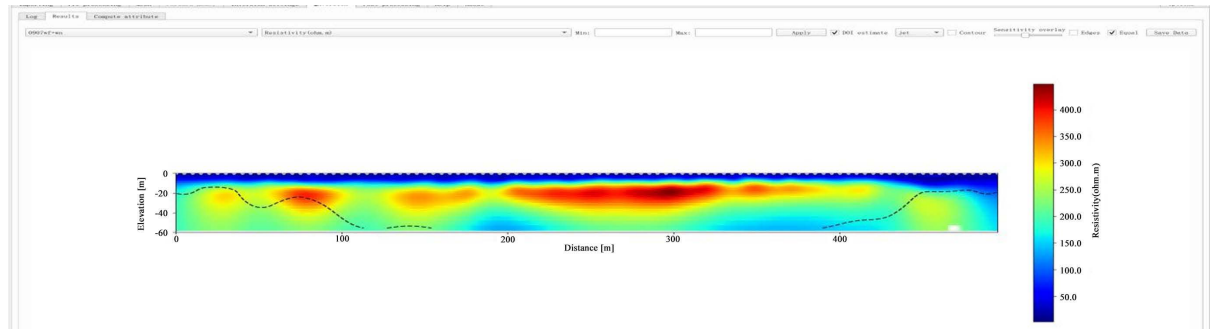


Figure 9. Inversion profile after fusion of Wenner and differential devices
图 9. 温纳、微分装置融合后反演断面图

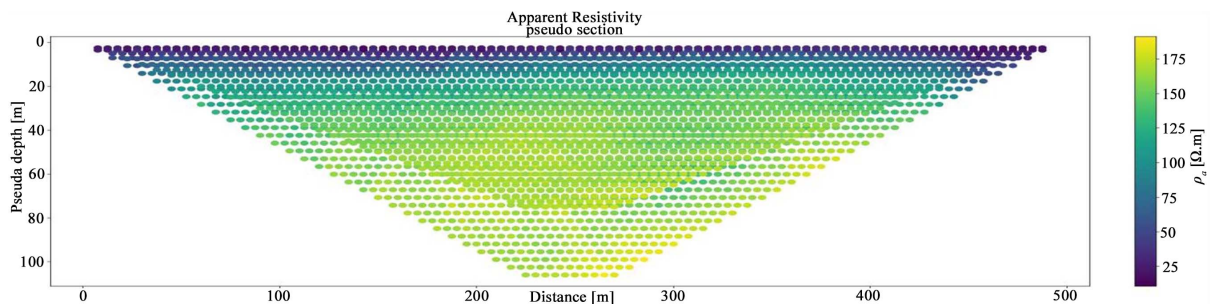


Figure 10. Data fusion of Wenner and differential device
图 10. 温纳、微分装置数据融合示意图

结合两个反演图可以看出温纳因为分辨率相对弱，到深部时候较为平缓，然而微分装置可以看出深部还有一个分层。这个原因可能就是温纳的勘探深度在同电极数量下最浅，导致对深部的分辨效果会差，虽然从这个剖面上看，温纳有这些缺点，但是温纳的垂向分辨率是全部装置里面最好的，所以温纳用的多也肯定是要用，在大多数情况下也效果好。

然后结合上面独立装置反演与融合装置反演可以看出，同一个测线两个装置分别独立反演，等于是没有约束的，形态趋势不一致，可能里面会有多解性的原因。另外，因为这个剖面在平原区相对是结构比较简单的，不同装置对应的会好一点，如果在山区地形复杂的地方，可能不同装置反演完的形态都不一致，针对同剖面多装置分别反演的这些问题，就自然引出来把多个装置的数据糅合起来反演(图 9、图 10)，多装置融合和单一装置对比，等于增加采集点的密度，并且垂向分辨率增加，解译起来更加合理。

5. 钻探验证

为进一步验证以上推断的准确性，在分析收集工作区地质资料和物探工作成果后，于 PM04 线 268 m 处布置 SLZK04 钻孔。该工区覆盖层为第四系松散堆积物，布线区地势平坦，地形起伏微弱，数据处理时无需进行地形校正。在同日期同剖面同电极距同供电条件下，同样观测 30 层，在各个装置探测深度范围内，反演结果均能有较为全面的反映，强度、形态特征清晰，异常位置、规模、厚度、空间展布形态基本相似，视电阻率异常变化比较一致，均能详细揭露地下土体的垂向分层规律，呈现垂向典型结构特征，最后在通过钻孔土芯编录结果显示，分层界面与融合后的反演结果相接近，钻孔验证结果与物探推断基本吻合。

6. 结论

- 1) 本研究通过对比实际测量数据与理论数据，发现温纳装置在探测深部横向分辨率时存在不均匀分

层现象。基于这一现象，对目标的大致位置和走向进行初步的分析与判断。通过钻探验证证实钻探结果与物探推断基本一致。这一发现对于提高温纳装置在深部横向分辨率探测中的准确性和可靠性具有重要意义。

2) 微分装置虽然深部有部分分层可见，但是整体分辨率较低，在通过两种装置融合后可以看出有很大的变化，灵敏度和分辨率有很大提高，特别是对工作中一条剖面多次测量得到的数据，能进行有效的利用。

3) 工作中应根据实地地电条件和环境干扰情况进行工前试验，并融合后对比分析，确定是否适合本工作区，以便最终确定测量装置。

参考文献

- [1] 李丹丹, 陈明. “耕地中的大熊猫”: 寒地黑土[N]. 中国矿业报, 2021-05-28(004).
- [2] 侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 地表基质在中国黑土地资源调查评价中的应用探讨——基于黑龙江宝清地区地表基质调查[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2264-2276.
- [3] 李金铭, 罗延钟. 电法勘探新进展[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [4] Pelton, W.H., Ijo, L. and Wift, C.M. (1978) Inversion of Two Dimensional Resistivity and Induced Polarization Data. *Geophysics*, **43**, 788-803. <https://doi.org/10.1190/1.1440854>
- [5] 底青云, 王妙月. 高密度电阻率法在珠海某防波堤工程中的应用[J]. 地球物理学进展, 1997, 12(2): 79-88.
- [6] 张寅生. 电阻率法在考古工作中的应用初探[J]. 物探与化探, 1987, 11(6): 462-464.
- [7] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 科学前缘, 2003, 10(1): 171-176.
- [8] 郑冰, 李柳德. 高密度电法不同装置的探测效果对比[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(1): 33-39.
- [9] 阮百尧, 吕玉增, 强建科, 黄俊革. 直流电阻率测深勘测灵敏度及其应用[J]. 物探与化探, 2002(5): 392-394.
- [10] 郑智杰, 曾洁, 甘伏平. 装置和电极距对岩溶管道高密度电法响应特征的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 161-165+172.
- [11] 肖宏跃, 武骄阳, 雷宛, 等. 实验室高密度电法微测系统的模型研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(4): 1464-1472.
- [12] 马志飞, 刘鸿福, 叶章, 等. 高密度电法不同跑极方式的对比及效果分析[J]. 工程地质计算机应用, 2008(3): 11-15.
- [13] 丁廉超, 龚文强, 李新斌, 等. 高密度电法不同装置在第四系沉积盆地找水有效性对比研究[J]. 地下水, 2022, 44(1): 144-146+199.