Open Journal of Natural Science 自然科学, 2021, 9(4), 414-425
Published Online July 2021 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ojns
https://doi.org/10.12677/ojns.2021.94047

综合物探方法在河北保定地区地表基质层试点调查中的应用

白超琨，侯红星*，付宪军，孙　肖，刘　欢，乔衍溢，王　强

中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心，河北 廊坊
Email: *wjhjhhx@163.com

收稿日期：2021年6月1日；录用日期：2021年7月5日；发布日期：2021年7月12日

摘　要

垂向结构特征调查是自然资源地表基质层调查的一项重要内容，也是工作中的难点问题。本文通过微动勘探、高密度电法、等值反磁通瞬变电磁法等综合物探方法在河北省保定地区地表基质层试点调查中的应用研究实例，并结合钻探、测井等数据进行验证，系统介绍了如何利用微动勘探、高密度电法、等值反磁通瞬变电磁法等综合物探手段研究地表基质分层特征，提出微动勘探在抗干扰强、分辨率好、对环境无破坏性方面有着综合全面的优势，反磁通瞬变电磁法无浅层勘探“盲区”，高密度电法效率高，后两者可以作为辅助手段。

关键词

综合物探方法，河北保定，地表基质层

Application of Comprehensive Geophysical Method to Ground Substrate Layer Pilot Survey in the Area of Hebei Baoding

Chaokun Bai, Hongxing Hou*, Xianjun Fu, Xiao Sun, Huan Liu, Yanyi Qiao, Qiang Wang

China Geological Survey Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, Langfang Hebei
Email: *wjhjhhx@163.com

Received: Jun. 1st, 2021; accepted: Jul. 5th, 2021; published: Jul. 12th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 白超琨, 侯红星, 付宪军, 孙肖, 刘欢, 乔衍溢, 王强. 综合物探方法在河北保定地区地表基质层试点调查中的应用[J]. 自然科学, 2021, 9(4): 414-425. DOI: 10.12677/ojns.2021.94047

Abstract

The survey of vertical structural characteristics is an important part of the survey of the ground substrate layer of natural resources, and it is also a difficult problem in the work. In this paper, the application of comprehensive geophysical prospecting methods such as micro tremor exploration, high-density electrical method, and opposing coils transient electromagnetic method in the pilot survey of the ground substrate layer in the Baoding area of Hebei Province is used for verification, and combined with drilling and logging data, systematically introduces how to use microtremor exploration, high-density electrical method, opposing coils transient electromagnetic method and other comprehensive geophysical methods to study the characteristics of ground substrate layer, and proposes that microtremor exploration has comprehensive advantages in terms of strong anti-interference, good resolution, and non-destructiveness to the environment. Opposing coils transient electromagnetic method has no shallow exploration "blind areas", and the high-density electrical method has high efficiency, and the latter two can be used as auxiliary means.

Keywords

Comprehensive Geophysical Method, Hebei Baoding, Ground Substrate Layer

Copyright © 2021 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

2020 年 1 月自然资源部印发《自然资源调查监测体系构建总体方案》，构建了自然资源分层分类模型，提出了地表基质层的概念。2020 年 12 月 22 日，自然资源部办公厅发布了《地表基质分类方案(试行)》，将地表基质概念定义为“当前出露于地球陆域地表浅部或水域水体底部，主要由天然物质经自然作用形成，正在或可以孕育和支撑森林、草原、水等各类自然资源的基础物质”，由 4 类 3 级分级体系构成，4 类即岩石、砾石、土质、泥质。殷志强等(2020)根据第四纪地质学特征，将地表基质一级分类划分为基岩和第四纪松散堆积物，二、三级分类按成因类型和地貌形态进一步详细划分。在自然资源部印发的分类命名方案基础上，侯红星等(2020)、鲁敏等(2020)提出自然资源地表基质“五类三级”分类建议方案，五类即“岩石、砂砾、土质、泥质、特殊基质”。

葛良胜等(2020)根据《总体方案》就自然资源调查监测体系中地表基质调查若干问题进行了探析，认为地表基质层调查是带有强烈调查色彩的专项调查工作，具有基础性、公益性和战略性地位。查明五类基质层的种类、分布、理化特性以及景观、地质属性等，全面了解掌握人类活动影响、开发利用和破坏情况，是整体规划生态环境保护和国土空间生态修复、国土空间用途管制的关键环节[1]。

地表基质层主要由岩石和第四纪沉积物构成，岩石包括沉积岩、火成岩、变质岩，第四纪沉积物则包括风成的沙漠和黄土、水成的河湖海洋沉积、山区的坡积物、冰碛物和基岩表面风化残积物构成的风化壳[2]。因此将地表或水底向下 50 m (特殊情况下可以更深或更浅)的空间作为地表基质层调查的基本范围[3]。

考虑到保定易县工区 50 m 深度大都为第四系覆盖，且要求对 50 m 以浅划分层位，2020 年对保定市易县进行了地球物理勘探，采用了微动勘探、高密度电法、反磁通瞬变电磁法，结合测井及钻探数据，

各物探方法相互对比，加以验证，排除了单一物探方法存在多解性的缺点，综合物探方法有助于反演解释地表基质层分层，准确可靠，为下步地表基质层调查提供了依据。

2. 工区地质及地球物理特征

2.1. 工区地质特征

位于保定市易县，北起高村镇北高村，南至东固村附近，西部以韩家庄为界，东部以东庄村为界。地形地貌主要以丘陵、盆地为主，仅在部分测线位置有山地地貌。海拔高度在 30 m~200 m 之间，地势相对平缓。工区内发育一北东向逆冲推覆构造，即北百虹逆冲推覆构造，因地形切割关系，断层线走向弯曲，总体走向 20˚左右，倾角缓，13˚~32˚。断面呈舒缓波状，东侧寒武系中统鲕状灰岩向西逆冲于奥陶系马家沟组之上，两侧地层受力挤压产生次一级拖曳褶皱。

工区内地层主要为寒武系徐庄组、奥陶系中统下马家沟组、奥陶系中统上马家沟组及第四系，由于只研究第四系覆盖分层、划分第四系与基岩(马家沟组)分界面，深层地层不作赘述：

奥陶系中统马家沟组:从下至上划分为下马家沟组、上马家沟组。

上马家沟组可分为三段。一段：上部主要为深灰色灰岩，厚度 6~18 m，深灰色、灰黑色，微晶、隐晶质结构，致密块状构造。下部主要为白云质灰岩，呈浅灰色、青灰色，微晶、隐晶质结构，块状构造，厚度约 0~12 m。二段：上部主要为灰岩，厚度约 0~8 m，深灰色、灰黑色，微晶、隐晶质结构，致密块状构造，偶含燧石，呈疙瘩状。下部为白云质灰岩、灰质白云岩互层，都呈浅灰色、青灰色，微晶、隐晶质结构，块状构造，厚度约 0~22 m。该层产直角石、菊石化石。三段：上部主要为灰岩，厚约 0~30 m，深灰色、灰黑色，微晶、隐晶结构，致密块状构造，偶含燧石，呈柳叶状。下部为白云质灰岩，呈浅灰黑色、青灰色，微晶、隐晶质结构，块状构造，厚度约 8~10 m。

第四系：主要为红色亚粘土、黄色粘土、砂砾石及残坡积物，分布于山前丘陵地带和沟谷中。勘查区内地层总体呈一向斜产出，轴向南西－北东，西翼地层南东倾，东翼地层北西倾，倾角较为平缓，向斜核部出露奥陶系中统上马家沟组，两翼为奥陶系下马家沟组。

2.2. 地球物理特征

地层(岩石)物性差异是物探资料解释的重要参数。保定易县工区地表基质主要有红色亚粘土、黄色粘土、砂砾石及残坡积物，不同基质层，面波的波速不同，电阻率也有差异，这就形成了微动勘探、高密度电法、反磁通瞬变电磁工作的前提。

根据钻孔资料及测井资料(如图 1)可知，地层孔隙度与电阻率具有相关关系，孔隙度越大，电阻率则相对较高。在砂砾层中，其电性特征表现为高阻，在细砂层表现为中阻，在壤土层表现为低阻。在地表松散覆盖层时，面波速度一般低于 200 m/s；随着深度增加到达砂层、砾石层时，速度增大；深度进一步加大，壤土细砂的压实作用增强，速度增大；当到达基岩时，速度增大。

3. 方法与原理

3.1. 微动(面波)勘探

面波是能量主要集中于距离自由地表的约一个波长范围内传播的弹性波。跟体波相比，面波能量主要集中在自由地表附近，且以柱面波扩散的形式传播，其传播距离远、衰减慢、能量大，易于被表面接收。根据震源类型不同，可分为主动源和被动源方法。主动源采用人工方法激发面波信号，手段有锤击、落重、炸药及各种气枪、电火花等，根据探测目的和施工环境来选择不同的激发源。在主动源方法中通常采用线性排列接收面波信号，这种排列简单易行，施工效率高，在复杂山区或繁华市区无法提供较大

面积的平整施工场地时，可采用被动源。被动源勘探是从微动(或背景噪声)信号中提取面波信号的勘探方法。各种振动通过地球介质散射而到达接收点，携带了丰富的介质信息，高于 1 Hz 的微动主要来源于人类的活动，低于 1 Hz 的微动来源于各种自然现象。对于浅层勘探一般要利用较高频率的微动信息。而主动源与被动源面波联合应用，有助于提高勘探深度，并保持浅层的精度[4] [5] [6] [7]。

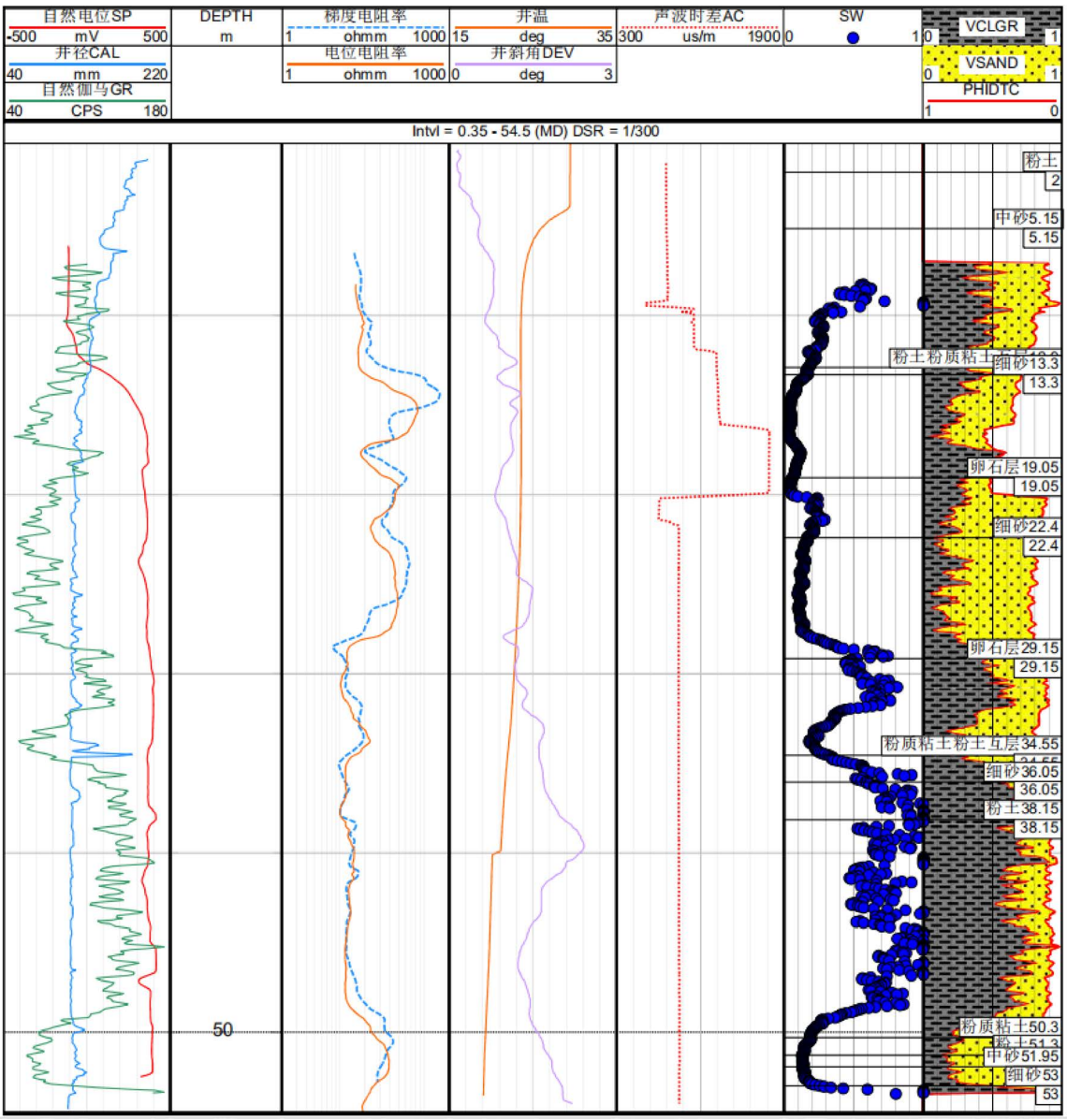


Figure 1. Comparison of the lithology of the borehole ZK303 and logging curve
图 1. 钻孔 ZK303 岩性与测井曲线对比图

3.2. 高密度电法

高密度电法施基于直流电法的基本原理，集电剖面法和电测深法于一体，采用一次性列阵方式布极，利用多道或分布式形式布置，可实现各类装置、不同排列极距的视电阻率观测，从而实现剖面上一次性布极获得多种装置类型的地电断面分布信息。常用的高密度电阻率法数据采集方式有温纳装置、施伦贝

尔装置、偶极装置等，温纳装置纵横向分辨率均较高，施伦贝尔装置在横向不均匀体上反映灵敏，偶极装置纵向分辨率优于温纳装置[8]。

3.3. 反磁通瞬变电磁法

瞬变电磁法(TEM)是进行地球物理研究的重要手段之一，根据地壳中岩石或者矿体的导电性及介电性等电学性质的差异，研究电磁场的空间或时间分布规律，从而解决各种地质问题。它利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲电磁场，在一次电磁场的激励下，地下导体内部受感应产生涡旋电流：在一次脉冲磁场的间隙期间，利用线圈或接地电极观测二次磁场，研究其与时间的变化关系，从而确定地下导体的电性分布结构及空间形态。

相比于传统的瞬变电磁法[9]，等值反磁通瞬变电磁法接收线圈处于一次场零磁通平面上，当发送电流关断时，接收面的一次场磁通为零，接收线圈中不存在电磁互感振荡，接收信号是地质体纯二次场响应；因此该方法在信号早期(时间上)大大削弱了一次场的混叠，浅层分辨率得到了有效提高。HPTEM-18 天线采用固定收发一体线圈技术，实现了瞬变电磁法统一标准的二次场测量，因此等值反磁通瞬变电磁法无浅层勘探“盲区”，抗电磁干扰能力强[10] [11]。

4. 工作方法及参数设置

4.1. 微动勘探

易县工区选定线性阵列方式布设，其优点在于一次布设可同时采集人工源及天然源信息，完成联合勘探。天然源及人工源面波联合勘探指将人工源和天然源面波勘探有机结合起来共同探测地下介质的横波速度结构。在联合勘探过程中，人工源面波勘探采用多道瞬态面波分析(MASW)法，其面波信号由落锤激发；而天然源法的面波信号是来自地表的随机噪声，天然源及人工源具有优势互补的特点，可以获取到更宽的频率范围内的频散曲线，同时保证浅部速度结构的精度与深部的勘探深度。资料处理时，天然源及人工源所采集数据分别处理后，再进行综合平均，MASW 法采用 f-k 法提取面波频散曲线，天然源使用 ESPAC 法分析频散信息。天然源和人工源联合勘探适用于人类活动少、无工业活动、相对安静的地带，在繁华地区则只采用天然源。

4.2. 高密度电法

高密度电法仪 AGI SuperSting R8。偶极装置，点距 10/15 m。应当尽量避免居民用电线，尤其是超高压线；避开或远离地下管线网络，尽可能减少测线与管线的接触面积[12]。理论上偶极装置纵向分辨率最好，有利于划分地表基质层。

4.3. 反磁通瞬变电磁法

本次 HPTEM-18 反磁通瞬变系统采用 2.5 Hz 发射频率，发射天线等效面积 200 m × 200 m，发射电流 10 安培，叠加次数 200~500 次，结合数据质量确定重复次数，点距 50/100 m。理论上适用于近地表地下空间、地下水等地质资源勘查，也可应用于近地表地面道路沉降、岩溶塌陷、活动断裂等城市地质灾害的勘探，抗干扰能力强，但从实际效果来看，在经过村庄或者高压线时，衰减曲线不够平滑，跳动较大。

5. 资料解释

根据侯红星等(2020)、鲁敏等(2020)提出自然资源地表基质“五类三级”分类建议方案，将钻孔编录

中各岩性层位与基质层对应如下：粉土－壤土，粉质粘土－黏土，卵石－砾石，中砂－含砾砂，细砂－砂。

5.1. 微动勘探与高密度电法反演对比

在微动测线 WD05P9 号点(39.174641666N, 115.514302778E)附近，布设钻孔 ZK303 (39.175736112N, 115.514300000E)，终孔深度为 54.7 m。依据微动反演的结果模型，由图 2 可以看出，该点下方地层在 100 m 范围内可以大致划分为九层。自上而下，第一层深度大致在 2.2 m 左右；第二层厚度为 6 m，深度大致在 8.2 m 左右；第三层厚度为 7.2 m，深度在 13.4 m 附近；第四层厚度为 8.64 m，深度在 22 m 左右；第五层厚度为 10.37 m，深度在 32.5 m 左右；第六层厚度为 12.44 m，深度在 44.94 m 附近；第七层厚度为 14.93 m，深度在 59.87 m 附近；第八层厚度为 17.92 m，深度在 77.79 m 附近；第九层厚度为 21.5 m，深度在 99.29 m 附近，再往深部分界面速度由 652.91 m/s 急剧跳动至 1062 m/s。

对比 WD5P9 点微动反演结果及钻探 ZK303 编录结果(见表 1)，发现钻孔编录结果中，蓝红相间的层位，如深度 2 m 左右的壤土－含砂砾层、8 m 左右的黏土－壤土层、13.3 m 左右的细砂－砾石层、22 m 左右的细砂－砾石层，在微动反演结果中均有较为明显的显示。而微动反演结果中，深度 34.43 m 至 61.8 m 区间内，波速在约 27 m 的深度范围内，由 680.41 m/s 变动至 690.65 m/s，波速变化较小，与其余层位的波速差异明显不在一个量级，因此在不考虑钻孔编录结果的情况下，更倾向于认为此处的波速变化反映的是地下介质随深度加深，压实程度变得致密，波速增大的结果，不作为地质界面划分的依据。考虑钻孔编录结果在该波速变化点结果显示为壤土、黏土交替出现，而在浅部的微动结果中壤土、黏土未表现出明显物性差异，该区间内浅部有明显物性差异的成分如含砂砾、细砂层厚且相对较浅，可能是导致微动结果模型深度-速度曲线无法区分的主要原因。微动结果深度 61.8 m 以下，有 736.99 m/s、957.61 m/s、1062.1 m/s 三个较为明显的波速分界，虽然钻孔已经封孔，但综合考虑区域地层，结合浅部钻孔信息，推断解释为基岩不同风化程度的反映。

在钻孔编录范围内，微动反演结果的层位均有地质界面与之对应。0~20 m 深度范围存在误差，可能原因是数据采集过程中存在一定高频干扰，从而影响反演结果中浅层 S 波速度变化；微动反演结果无法与地质界面一一对应，这可能既与地层组成成分未有明显物性差异有关，也可能与地层厚度有关。从现有两个钻孔资料来看，微动能够反映出的地层大都在三米以上。地层厚度过小，组分接近无明显物性差异，可能是 WD5P9 点反演结果对地质层位壤土－黏土识别不敏感的原因。

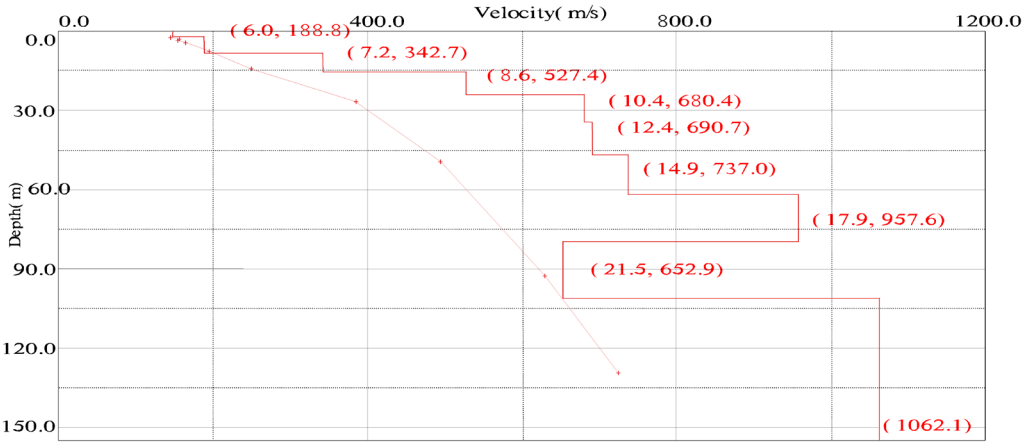


Figure 2. The point WD5P9 of inversion result model depth-velocity curve
图 2. WD5P9 点反演结果模型深度－速度曲线

以 WD5P9 点及其附近钻孔 ZK303 对应结果为依据，归纳工区分层规律：最浅部层位大致组成成分为壤土、黏土(包括耕植土、人工填土等)，其视横波速度大部分在 200 m/s 以下，深度范围大致为 10 m 以浅；其下部第二层层位组成成分大致为壤土、黏土、细砂及含砂砾等，其视速度大部分在 200~350 m/s，深部范围大致到 15~20 m 左右；其下部第三层位组成部分，视速度大致在 350~500 m/s 以上，组成成分可能为黏土、砾石等；其下部层位视速度大致在 500 m/s 以上，组成成分可能为粘土、风化砾石灰岩等。

工程剪切波速度经验认为 500 m/s 以上时，地层已经成岩，以此为参照标准，综合考虑钻孔编录及微动结果，选取 750 m/s 作为划分土－岩即第四系与下覆地层分界面的标准。按照视横波速度 500~750 m/s 为第四层位，组成成分可能为粘土、风化砾石等。

工区大部分基岩岩性为灰岩，以 750~950 m/s、950~1050 m/s、1050~1600 m/s 作为划分风化程度的标准，将其区分为强风化、中风化及微风化三种类型，作为第五、六、七层位。依据常见岩土介质的密度和波速经验，未风化灰岩的横波速度大致在 1200~2400 m/s 区间内，结合微动分层结果，认为工区未风化灰岩波速在 1600 m/s 以上，即为最底部层位。综上，按照反演视横波速度，将微动测线下方地层剖分为八个层位，剖分标准分别为 200 m/s、350 m/s、500 m/s、750 m/s、950 m/s、1050 m/s、1600 m/s 的视速度界面。

Table 1. Comparison of the borehole ZK303 and the point WD5P9 of microtremor exploration
表 1. 钻孔 ZK303 与微动 WD5P9 点对比

分层号	编录分层深度/m	岩性描述	微动界面深度/m	微动界面波速/m/s
1	0.1	壤土		
2	0.5	黏土		
3	2	壤土	2.22	147.83
4	5.15	含砂砾		
5	7.6	壤土		
6	7.95	黏土	8.22	188.75
7	10.75	壤土		
8	11.70	黏土		
9	12.90	壤土		
10	13.30	细砂	15.42	342.66
11	19.05	砾石层		
12	22.40	细砂	24.06	527.44
13	29.15	砾石层		
14	30.25	黏土		
15	31	壤土		
16	31.65	黏土		
17	34.55	壤土	34.43	680.41
18	36.05	细砂		
19	38.15	壤土		
20	50.3	黏土	46.87	690.65
21	51.3	壤土		

Continued

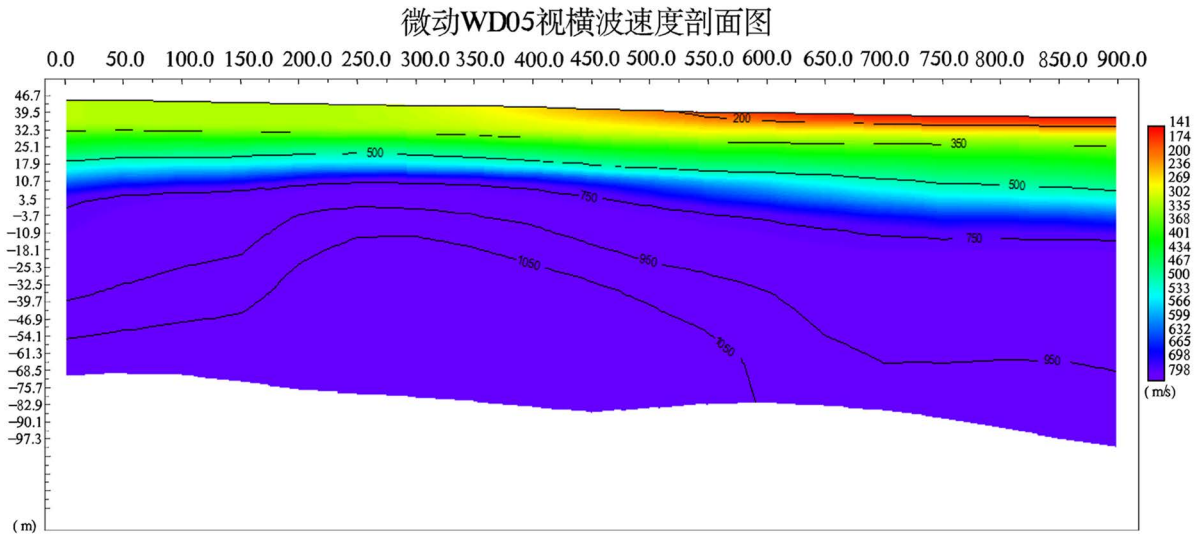
22	51.95	含砂砾		
23	53	细砂		
24	54.7	黏土、风化砾石		
25	-	强风化岩石(灰岩)	61.8	736.99
26		中风化岩石(灰岩)	79.72	957.608
27			101.22	652.92
28		弱风化岩石(灰岩)	150	1062.1

以上述层位划分标准为依据，微动 WD05 剖面与高密度 L9 剖面对比分析如图所示。

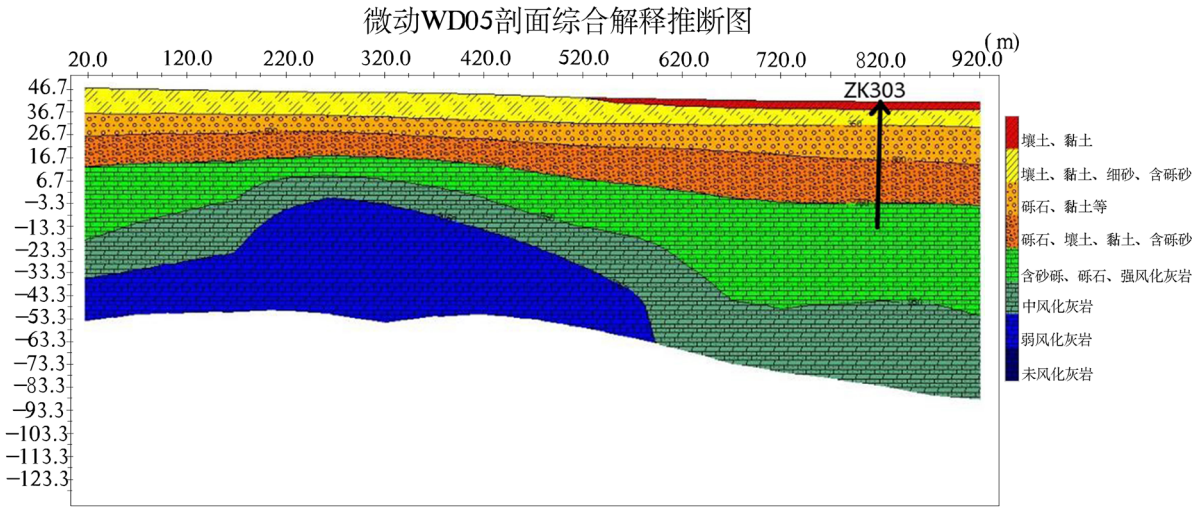
微动 05 测线角度为 135°，全长 900 m，点距 50 m，由视横波速度剖面图(图 3(a))可知，地下层位浅部成层性较好，各层位相对分布较全，基质层厚度大约在 30 m~40 m，小号点相对较薄，大号点相对较厚。剖面图横坐标 220~320 m 区间，即 3 号点 4 号点下方，灰岩界面向上隆起，表现为背形特征。根据钻孔 ZK303 资料，各基质层划分如图 3(b)所示。

同一测线上布设有高密度电法 L9 剖面(图 3(c))，全长 1000 m，点距 10 m，测线方位角 135°。从电阻率反演剖面图(图 3(c))上可见，0~15 m 为第四系低阻层，电阻率基本在 200 Ω·m 以内。之下有一高阻层，层厚约为 20 m，大号点端层厚更大。50 m 以下，电性分布并不均匀，存在一些电性不均匀体，总体电阻率值不高，在 500 Ω·m 以内，并且小号点一端电阻率明显高于大号点端。在图 3(c)剖面 450~500 m 处出现视电阻率异常，推测应该是断裂破碎带含水所致；在 800 m 钻孔 303 来看，深度 18~30 m 处有高阻异常带，对比钻孔数据(图 1、表 1)该处为卵石层，孔隙度较大，因此电阻率较高。与微动 05 剖面结合来看，层位划分形态一致，划分覆盖层分辨率不如微动勘探，但是相对于高密度电法来看，微动勘探横向分辨率有限，缺失细节，仅凭图 3(a)来看无法得到 450~500 m 处断裂破碎带的位置。

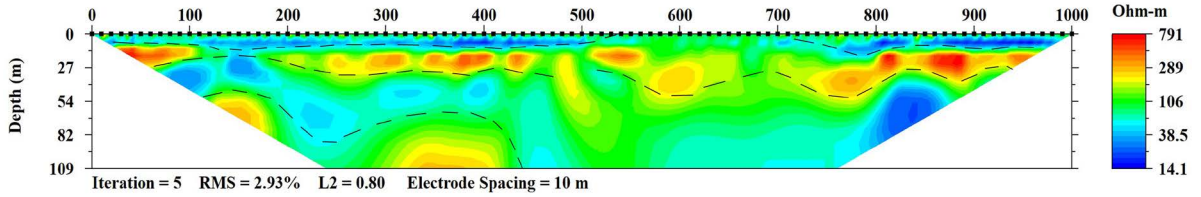
综上所述，可划分以下 4 个层位(图 3(c)所示)，从上之下共可以划分四层，第一层为壤土、黏土等基质构成的低阻层，第二层为壤土、黏土、砂砾等基质构成的高阻层，第三层电阻率呈现低阻，可能为强风化灰岩含水所致，第四层灰岩受风化程度较小，含水量越来越低，因而电阻率较第三层更高。



(a)



(b)



(c)

Figure 3. Comparison of inversion profile of microtremor exploration and high-density electrical method. (a) Profile of the line of microtremor exploration WD05 apparent shear wave velocity; (b) Comprehensive interpretation map of microtremor exploration WD05 section; (c) Apparent resistivity inversion profile of high-density electrical method line L9

图 3. 微动勘探与高密度电法反演剖面对比图。(a) 微动 WD05 线视横波速度剖面图；(b)微动 WD05 剖面综合解释图；(c) 高密度电法 L9 线视电阻率反演剖面图

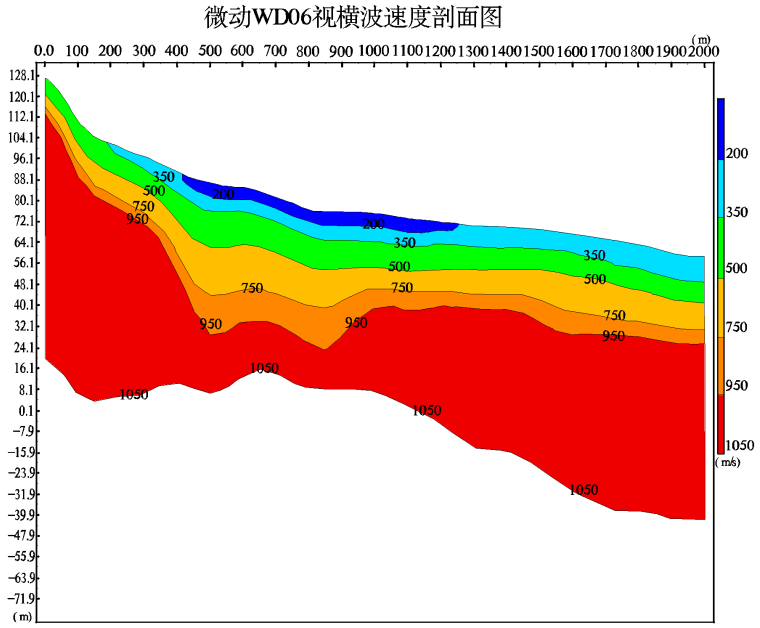
5.2. 微动勘探与反磁通瞬变电磁法反演对比

微动勘探与反磁通瞬变电磁反演对比图如图 4 所示。

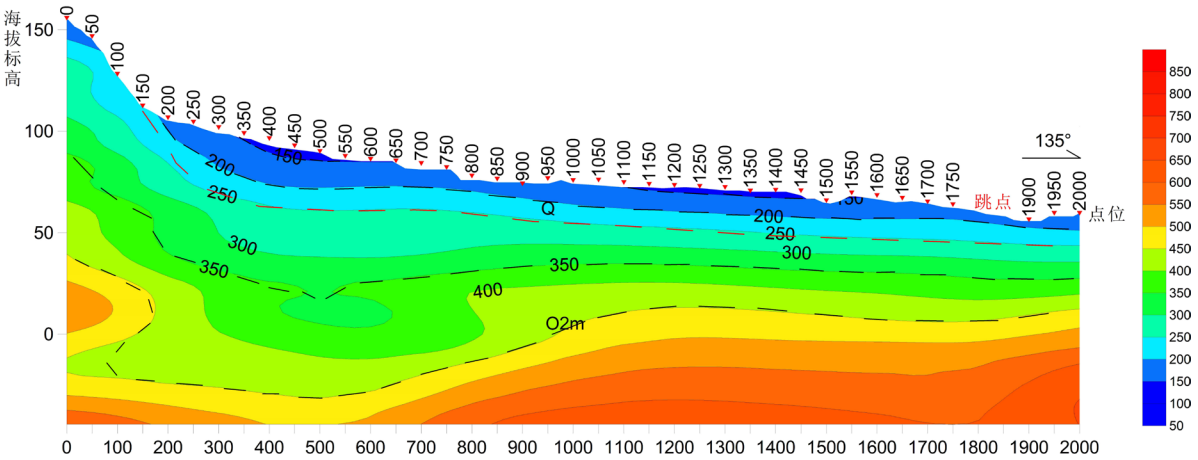
微动 06 线北西端起于隆起山体上，基岩出露，岩性为石灰岩夹泥质白云岩，第四系覆盖较浅，200 点附近进入山前盆地，全长 2 km，点距 100 米，测线方位角 135°。依据波速 200 m/s、350 m/s、500 m/s、750 m/s、950 m/s、1050 m/s、1600 m/s 视速度划分界面，如图 4(a)所示。微动 06 线自山前向下倾至平原区，依旧表现出较好的成层性，自上而下前三层(波速 500 m/s 以内)为砂砾、土质、泥质等基质层覆盖，后三层为岩石基质层。在测点 400~900 点区间范围内，反演电阻率等值线出现异常梯级带，呈现下凹特征，推断为山前断裂所致行成的破碎带。

同一测线布设有反磁通瞬变电磁 L1 剖面(图 4(b))，全长 2000 m，点距 50 m，测线东南端穿越南水北调沟渠，因周围围栏阻挡舍弃两个物理测点，为 1800 点和 1850 点。经查阅该地区物性参数资料，反演电阻率以 250 Ω·m 为界进行了第四系覆盖和基岩界面的划分，小于 250 Ω·m 的地层为第四系(Q)，其中包含黏土、壤土及砂砾层，埋藏厚度最深处位于 400 点附近，埋藏厚度约为 30 m，全剖面第四系覆盖埋深平均厚度在 18 m 左右；大于 250 Ω·m 的地层为奥陶系中统马家沟组地层，岩性为灰岩。反演剖面形态与微动剖面图一致，呈现下凹型，微动 06 剖面 750 m/s 以内的低速带与瞬变 250 Ω·m 以内的低阻带范围划定一致，均划定了第四系与基岩的分界面。在低速带内微动可以划分出 3 个层位，瞬变电磁剖面上也有 3 层的显示，但是该 3 层基质(黏土、壤土及砂砾层)的电性参数差异不太大，无法根据搜集资料电性参

数进行分层，仅依据电阻率划分不够充分，结合微动的视横波速度剖面的深度及范围，则可以为反磁通瞬变电磁剖面划分第四系覆盖层位。



(a)



(b)

Figure 4. Comparison of inversion profile of microtremor exploration and opposing coils transient electromagnetic method. (a) Profile of the line of microtremor exploration WD06 apparent shear wave velocity; (b) Apparent resistivity inversion profile of opposing coils transient electromagnetic method line L1

图 4. 微动勘探与反磁通瞬变电磁法反演剖面对比图。(a) 微动 WD06 线视横波速度剖面图；(b) 反磁通瞬变电磁 L1 线视电阻率反演剖面图

6. 结论及建议

6.1. 结论

1) 采用微动勘探、高密度电法、等值反磁通瞬变电磁法，结合钻探、测井资料，能够准确探测垂向结构特征，微动勘探在抗干扰强、分辨率好、对环境无破坏性方面有着综合全面的优势，反磁通瞬变电

磁法无浅层勘探“盲区”，高密度电法效率高，后两者可以作为辅助手段，对下一步自然资源地表基质层调查工作提供了思路，也可供其他类似地区借鉴。

2) 从数据处理角度来看，高密度电法无法在有限测线长度的情况下得到测线两端深部的地电信息，而微动勘探、反磁通瞬变电磁法可以弥补这一缺点。

3) 从探测效果来看，三种方法对 50 m 深度范围内地表基质层划分、查明第四系覆盖厚度均有效果。针对地表基质层层位划分问题，微动勘探分辨率最好，反磁通瞬变电磁次之，高密度点距大(10/15 m)导致分辨率较差。

6.2. 建议

1) 高密度电法受地形影响较大；反磁通瞬变电磁法易受高压线、居民用电干扰；微动勘探测线布置方便灵活，不受城市干扰影响，且对环境友好，无破坏性和侵入性[13] [14]，且不受高、低速夹层和低阻高导层屏蔽作用影响[15]，在地表基质层试点调查中为最优选择。

2) 结合下步保定地表基质层工区范围，主要集中在保定平原区，第四系覆盖较厚，建议仍采用微动勘探，100 m 点距即可；也可采用频率-贝塞尔变换方法，联合基阶和高阶模态频散曲线反演，获取更加准确的浅地表速度结构[16]。如果需要对比验证，可以考虑反磁通瞬变电磁，增大发射频率或减小点距，提高分辨率；如果需要提高效率，进行全区控制，可以考虑高密度电法，以 5 m 为点距，效率较微动勘探可提高 0.5 倍左右。

3) 单一物探方法反演具有多解性，综合物探方法有助于提高解释的真实性、可靠性。应用不同的物探方法，充分的物性参数资料是反演解释的前提与依据。

参考文献

[1] 侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 自然资源地表基质层调查技术方法新经验——以保定地区地表基质层调查为例[J]. 西北地质(待刊).

[2] 殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 卫晓锋, 侯红星, 何泽新, 等. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 8-14.

[3] 葛良胜, 杨贵才. 自然资源调查监测工作新领域: 地表基质调查[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(9): 4-11, 67.

[4] 刘庆华, 鲁来玉, 王凯明. 主动源和被动源面波浅勘方法综述[J]. 地球物理学进展. 2015, 30(6): 2906-2922.

[5] 李耐宾, 裴世建. 微动技术在大连地铁岩溶勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(5): 580-585.

[6] 陈实, 金荣杰, 李延清. 胡尊平, 张静. 天然源面波勘探采集参数对比试验及工程应用[J]. 新疆地质, 2017, 35(4): 483-488

[7] 丁立峰, 徐佩芬, 凌苏群, 赵春景, 李传金. 微动勘探方法探测林南仓煤矿岩浆岩侵入体[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(7): 100-103.

[8] 柳建新, 曹创华, 郭荣文, 谢国峰, 刘颖. 不同装置下的高密度电法测深试验研究[J]. 工程勘察, 2013(4): 85-89.

[9] 牛之琏, 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.

[10] 席振铢, 龙霞, 周胜, 黄龙, 宋刚, 侯海涛, 等. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3428-3435.

[11] 高远. 等值反磁通瞬变电磁法在城镇地质灾害调查中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 152-156.

[12] 王亚辉, 张茂省, 师云超. 董英, 王锋, 于峰丹. 基于综合物探的城市地下空间探测与建模[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 83-94.

[13] 贾慧涛, 廖圣柱, 盛勇, 徐子桥. 微动勘探技术在城市地质工作中的应用[J]. 安徽地质, 2020, 30(1): 35-38, 80.

[14] 盛勇, 贾慧涛, 刘杨. 微动勘探方法技术研究及其应用[J]. 安徽地质, 2019, 29(1): 34-39.

[15] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国. 凌苏群, 郭慧丽, 田宝卿. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. 岩

石学报, 2013(5): 1841-1845.

[16] 李雪燕, 陈晓非, 杨振涛. 王冰, 杨博. 城市微动高阶面波在浅层勘探中的应用: 以苏州河地区为例[J]. 地球物理学报, 63(1): 247-255. https://doi.org/10.6038/cjg2020N0202