

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.06.06

引用格式: 贾煦, 孙建伟, 刘向东, 等. 微动勘探与高密度电法在小尺度老采空区探测中的应用[J]. 中国地质调查, 2022, 9(6): 42–50. (Jia X, Sun J W, Liu X D, et al. Application of microtremor survey and high density electrical method in exploration of small-scale old goaf[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(6): 42–50.)

# 微动勘探与高密度电法在小尺度老采空区探测中的应用

贾煦<sup>1,2</sup>, 孙建伟<sup>1</sup>, 刘向东<sup>1</sup>, 程贤达<sup>1</sup>, 黄虹霖<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100;

2. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 栾川县赵庄村一带的油页岩老采空区对当地人居环境产生了一定威胁,但其规模小、分布复杂,人员聚居干扰多,探测难度大。为了有效探测该采空区,提出了将微动勘探与高密度电法结合的综合探测方法。通过数据采集与处理获得二维视速度与电阻率剖面,结合实际地质情况,将电阻率剖面上近似层状分布的中等电阻率层推断为油页岩富含层位,将视S波速度剖面上对应该层位处的横向上的低速异常区解释为油页岩采空区。钻探验证结果表明物探解释结果与实际情况基本相符,证明该组合方法可有效探测小尺度老采空区,且抗干扰能力强,施工效率高。

**关键词:** 综合物探; 微动勘探; 高密度电法; 低速异常; 采空区

**中图分类号:** P631

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095–8706(2022)06–0042–09

## 0 引言

地下油页岩开采后会形成一定规模的采空区,采空区沉降或塌陷会对地面建筑和环境产生严重影响。目前,采空区探测主要采用钻探和物探方法<sup>[1]</sup>。钻探方法精度高,准确直观,但成本较高,对大范围的采空区探测或复杂采空区探测,尤其是缺乏历史资料的采空区探测可行性不高。物探方法经济快捷,不仅可以确定采空区的平面位置,还能直接显现采空区的空间形态特征,近年来得到了广泛应用<sup>[2–3]</sup>。但是每种方法都有其适用性和局限性,需要根据研究区的地质特征,选择合理的方法或方法组合来进行探测。

栾川县赵庄村一带曾于20世纪有过多期次油页岩开采活动,随着时间推移,采空区地面沉降问题逐渐凸显,多处房屋出现变形开裂现象,对人居安全产生威胁,急需查明采空区分布范围和空间形

态特征,以便有效预测地面沉降的发展趋势,控制和减轻地面沉降的危害。然而,由于该区采矿活动历史久远,采掘相关资料缺失,给采空区探测带来一定难度。

微动勘探具有简便、经济、不受电磁干扰影响、对环境及地形适应能力强等特点,对探测村庄覆盖区之下的速度异常区域具有一定的技术优势<sup>[4]</sup>。前人多是将其用于大规模采空区的探测<sup>[5–8]</sup>,对于小尺度老采空区的探测报道相对较少。本文针对赵庄村一带的采空区问题,尝试将微动与高密度电法组合进行探测实验,研究其用于小尺度油页岩老采空区探测的可行性。

## 1 采空区地质背景及物探方法选择

### 1.1 采空区地质背景

栾川县赵庄村一带属于潭头盆地油页岩分布区,位于秦岭地轴北侧的三级构造中。区内主要出

收稿日期: 2022–03–18; 修订日期: 2022–06–10。

基金项目: 中国地质调查局“熊耳山—伏牛山矿集区生态修复支撑调查(编号: DD20208079)”“西安城市群周边健康地质调查试点(编号: DD20211574)”和“南水北调汉江流域陕西段水生态修复支撑调查(编号: DD20208068)”项目联合资助。

第一作者简介: 贾煦(1989—),男,工程师,主要从事地球物理勘探和生态修复支撑调查研究工作。Email: 838983884@qq.com。

露古近系高峪沟组、潭头组以及第四系洪冲积层(图1)。高峪沟组为一套红色岩系,下部为砾岩与钙质长石粉砂岩不等厚互层,中部为砾岩、含砾砂岩夹粉砂质泥岩,上部为砾岩与钙质长石粉砂岩不等厚互层夹砂岩。潭头组主要为一套灰色岩系,下部以泥岩为主,夹细粒岩屑石英砂岩,中部和上部为薄-中层泥晶灰岩夹泥岩,部分区域夹油页岩及煤线,该套地层是本次勘探对比解释的主要目的层。第四系冲洪积层为含砾粉砂质黏土、含砾砂质黏土夹砾石层。

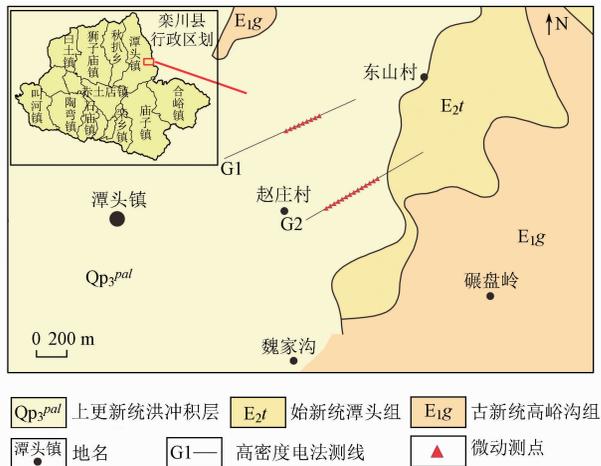


图1 研究区地质背景与工作部署

Fig. 1 Geological background and work deployment of the study area

研究区所属潭头盆地受扬子板块与华北板块碰撞挤压及西太平洋板块俯冲控制,南部以马超营大断裂为界,东侧受NE向断裂控制,总体呈现向SE倾斜的掀斜式单向断陷盆地,区内发育2组裂隙,分别为 $69^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 和 $340^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。

### 1.2 采空区特征

通过实地调查和走访群众,赵庄村一带采空区有以下4个特点:①规模较小,高度普遍在2 m左右,宽度约3 m;②埋深较浅,受限于民采的开采设备,埋深普遍在30 m以浅;③分布杂乱无序,因开采活动无统一规划,且从20世纪初至20世纪70年代有过不同期次的开采历史,致使采空区分布杂乱;④相关资料缺乏。

### 1.3 物探方法选择

目前,采空区探测常用的物探方法可分为3大类,即地震类方法、电磁类方法和放射性探测<sup>[9-17]</sup>。地震类方法主要根据采空区相对于围岩通常表现为低速异常来识别,电磁类方法主要根据采空区充

水与否,表现为高阻或低阻异常来识别,放射性探测则主要根据采空区通常为氡气汇集区,相对于周围表现为高氡气异常来识别。人工源地震因震源激发存在安全隐患和环境噪声污染,考虑到研究区人员聚集的实际情况,该方法不具备实施条件。电磁类方法因受人文电磁干扰影响,效果难以保障。微动勘探观测方法便捷,无需人工震源,不受电磁干扰影响,对环境噪声无特殊要求,因而对工作区的适用性较其他方法更强,本次研究将其作为主要探测方法。为了减少断裂构造或其他地质条件引起的低速异常对微动探测的干扰,同时开展了高密度电法勘探,以期与微动勘探相互验证,提升推断解释的准确性。

由于研究区资料缺乏,因此本区地层电性特征参考的是邻区的以往资料。由表1<sup>[18]</sup>可见,区内主要岩性层之间电阻率差异均大于 $20 \Omega \cdot m$ ,差异较为明显,因此可首先选择在地表变形区及其邻区部署高密度电法探测,利用该方法工作效率高、成本低的优点快速摸清地下地层结构情况,再结合地质资料,初步判断油页岩分布区域和深度,识别断层等可能对微动推测产生干扰的区域。此外,若采空区未充水则表现为高阻异常,若采空区充水则表现为低阻异常<sup>[19]</sup>,将其与微动结果相互验证,可降低单一物性参数产生的多解性。

针对采空区规模小、分布杂乱的特点,在由高密度电法圈定的油页岩分布区域开展了微动勘探工作。不论采空区是否充水,其相对围岩都表现为低速特征,再结合采空区埋深浅的特点,因此微动探测将重点关注浅部低速异常区,据此圈定采空区的分布位置和形态。

表1 潭头盆地主要岩性电阻率测试结果<sup>[18]</sup>

Tab. 1 Test results of common apparent resistivity in main rocks of Tantou Basin<sup>[18]</sup>

岩石类型	电阻率范围/ $(\Omega \cdot m)$
黄土	10 ~ 30
泥岩	50 ~ 100
砂岩	50 ~ 200
砾岩	80 ~ 300

## 2 物探工作方法与数据处理

### 2.1 高密度电法

高密度电法是直流电阻率法的一个分支,与常规电阻率法相同,通过发射电极A、B向地下

供入电流  $I$ ，测量  $M$ 、 $N$  极之间的电位差  $\Delta U$ ，从而求得一定深度范围内地层的视电阻率值。为了提升探测效率，高密度电法通过一次布设多个电极，利用仪器控制改变各电极在发射电极和测量电极间的“角色”转换与组合，完成电阻率剖面测量和测深工作，获得相对较多的地层信息，所测数据经过处理与反演获得电阻率断面图。

本次研究使用重庆奔腾 WDA - 1B (120 道) 高密度电法仪开展数据采集工作，一次布设电极 120 根，电极间距为 5 m，选用温纳装置，供电时间 200 ms，采用滚动测量的方式延长剖面长度，测量层数 33 层。在实地调查基础上，根据地面房屋变

形分布情况，结合地形条件，布设高密度电法剖面 2 条 (图 1)，点距均为 5 m，其中 G1 剖面长 940 m，测量点数 4 553 个，G2 剖面长 890 m，测量点数 4 224 个。

对实测数据进行畸变点剔除、地形校正，利用阻尼最小二乘反演算法进行反演计算，获得相应测线下方的电阻率断面。G1 剖面经过 4 次迭代，拟合误差 1.7%，G2 剖面经过 5 次迭代，拟合误差 6.45%。图 2 给出了 2 条剖面的原始视电阻率拟断面与由反演结果经正演计算得到的视电阻率拟断面的对比，可以看出二者相似性较好，说明反演电阻率模型可靠，可用于后续的地质解释。

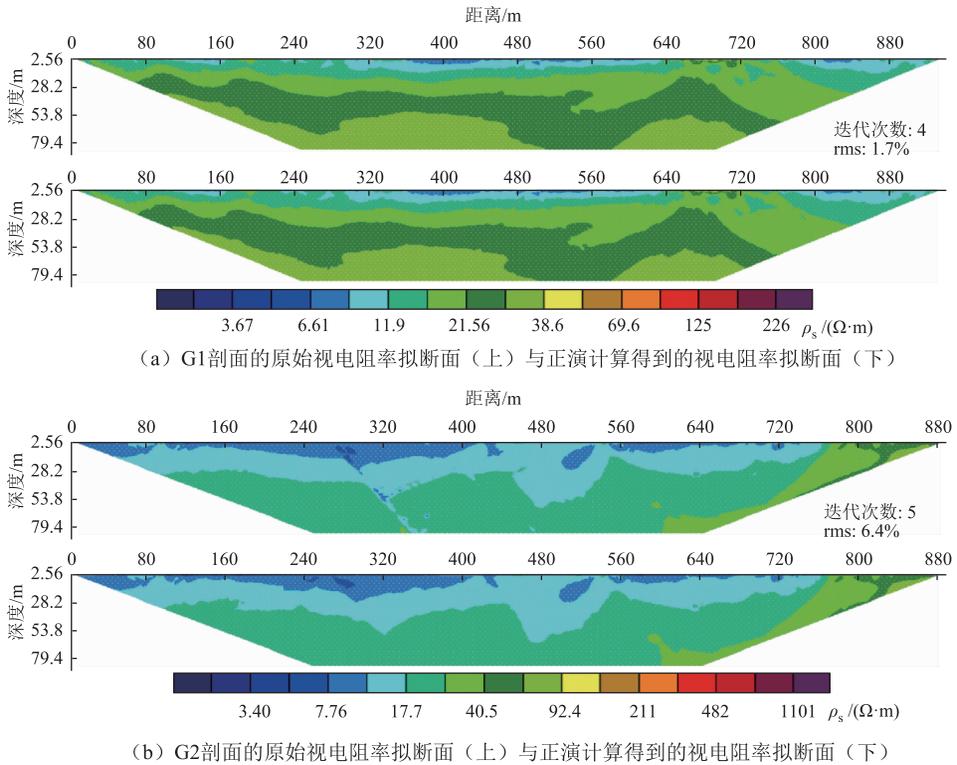


图 2 高密度电法视电阻率拟断面

Fig. 2 Apparent resistivity pseudo section of high - density electrical method

### 2.2 微动勘探

地球上人类活动和各种自然现象引发的微弱震动称为微动，它是一种由体波和面波组成的复杂震动，其中面波能量占微动总能量的 2/3 以上，信噪比高，在分层的地层介质会携带很多地层介质信息。因面波在一定时空范围内满足统计稳定性，可从观测到的微动信号中提取面波的频散曲线，通过对频散曲线的反演来推断地壳浅部的横波速度结构<sup>[20]</sup>。其理论基础由 Aki<sup>[21]</sup> 和 Capon<sup>[22-23]</sup> 于 20 世纪中叶提出<sup>[21-23]</sup>，Okada

等<sup>[24-25]</sup> 在此基础上于 20 世纪 90 年代将其系统化，20 世纪 80 年代，王振东<sup>[26-27]</sup> 将该方法引入我国。微动勘探通常是利用拾震器记录面波垂直分量信号 (面波质点位移的垂直分量约为水平分量的 1.5 倍)，再通过数据处理从记录的信号中提取面波频散曲线。

根据高密度电法反演结果和推断解释，在 G1 剖面选择泥岩、砂岩地层埋深较浅的 445 ~ 685 区段布设微动测线 W1，包含测点 9 个，点距 30 m，测线长度 240 m；在 G2 剖面选择 160 ~

550 区段布设微动测线 W2, 兼顾电性模型推断的采空区和泥岩、砂岩埋深较浅区, 包含测点 14 个, 点距同为 30 m, 测线长度 390 m。为了降低物探结果多解性, 微动剖面与高密度电法剖面相应区段重合。根据前人工作经验, 观测系统选用三层嵌套式等边三角形台阵(图 3), 结合实验结果, 确定最小边长 15 m, 最大边长 60 m, 每个测点共布设 10 个拾振器。

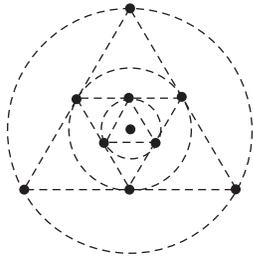


图 3 三层嵌套式等边三角形台阵

Fig. 3 Equilateral triangle array of three layer nested

使用北京水电物探研究所 WD-1(有线)型设备, 动态范围 120 dB, 2 Hz 拾振器进行数据采集。采样过程中, 采样率设置为 5 ms, 因所用仪器可在采集现场实时显示频散曲线, 采集过程中频散曲线形态稳定即可终止采集, 因此各点连续记录时长略有差异, 总体约 13 min。采集过程中实时关注现场频散曲线形态, 及时调整迭代频率范围, 直至频散曲线形态正常, 共获得高质量微动测点 23 个。

目前常用的频散曲线提取方法有频率-波数法(F-K法)、空间自相关法(SPAC法)和扩展的空间自相关法(ESPAC法)<sup>[28]</sup>。其中, 空间自相关法因其精度高、方法成熟, 在实践中应用更为普遍, 本次野外采集的地震记录即选用该方法获得面波频散相速度数据。图 4 给出了部分测点频散曲线, 图中横坐标  $v_c$  为相速度, 纵坐标  $L/2$  为半波长。

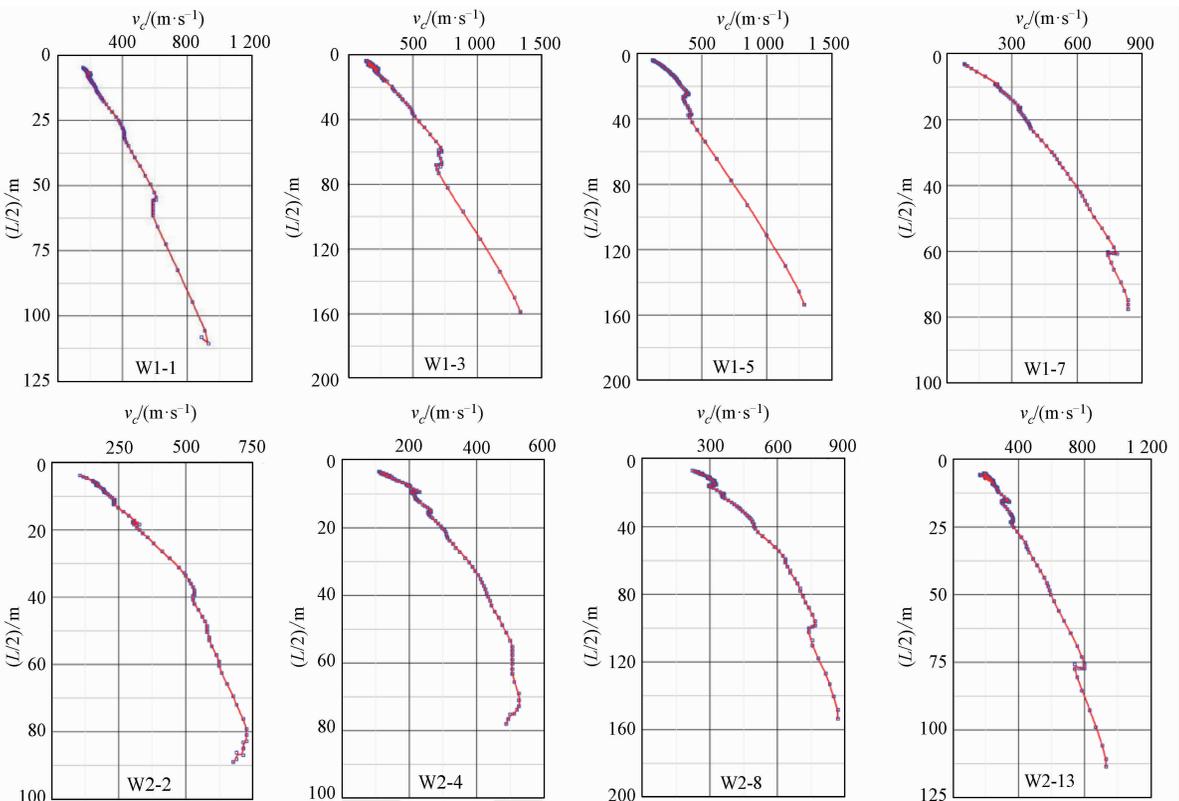


图 4 微动部分测点频散曲线

Fig. 4 Frequency dispersion curve of some microtremor measuring points

对于采空区探测而言, 只需了解剖面上横波速度的相对变化, 无需精确获得横波速度绝对值<sup>[29]</sup>, 故未进行反演工作, 仅对相速度按周期作提高峰值计算, 获得视速度

$$v_{x,i} = \frac{t_i v_{c,i}^4 - t_{i-1} v_{c,i-1}^4}{t_i - t_{i-1}}$$

式中:  $v_{x,i}$  为周期  $i$  的视速度, m/s;  $v_{c,i}$  为周期  $i$  的相速度, m/s;  $t_i$  为周期。再结合地形高程数据, 即可

得到二维视速度映像图。

### 3 物探成果解释与验证

#### 3.1 高密度电法成果解释

图5、图6分别为G1、G2测线反演电阻率断面和相应的地质解释。可以看出,该区域地下电性结构总体呈现出较好的层状特征,由浅至深电阻率逐渐升高,电阻率范围为3~500 Ω·m,这与该区地质情况相符。浅部电阻率小于

10 Ω·m的薄层推断为第四系冲洪积层,厚度约10 m,局部有增厚现象;浅覆盖层之下,电阻率10~100 Ω·m电性层推断为新生界古近系砂、泥岩互层,也是油页岩的可能分布层位;深部电阻率大于100 Ω·m的电性体推断为古近系砂岩层。

G1剖面中,440~520 m和640~720 m的砂泥岩层中出现电性梯度带,表现为相对低阻特征,且体现出一定的规模,结合民采活动采矿深度和规模有限(30 m以浅范围)的情况,推断为2条隐伏断

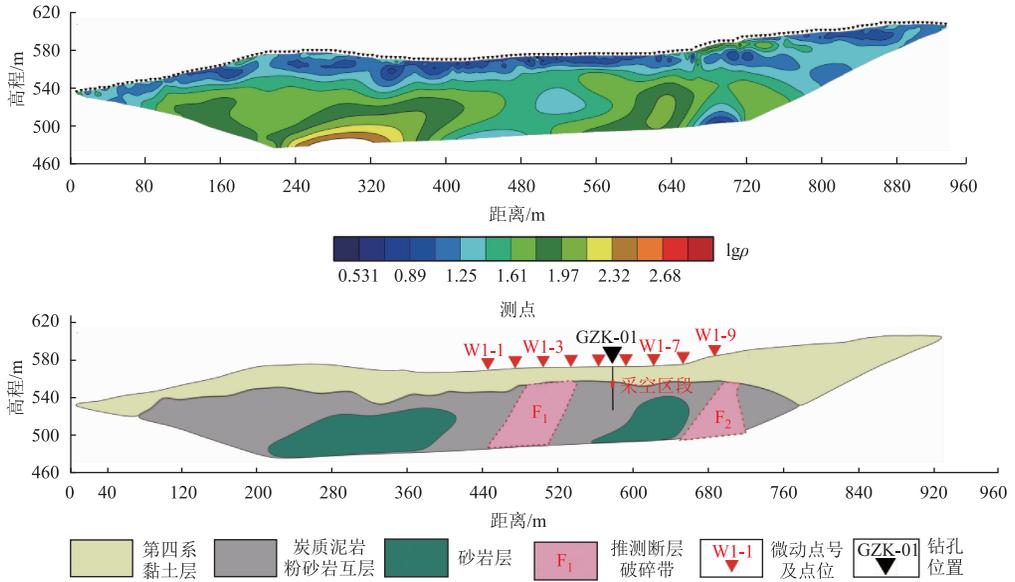


图5 G1剖面高密度电法反演结果(上)与地质解释(下)

Fig. 5 G1 profile of high – density electrical resistivity inversion (top) and geological interpretation (bottom)

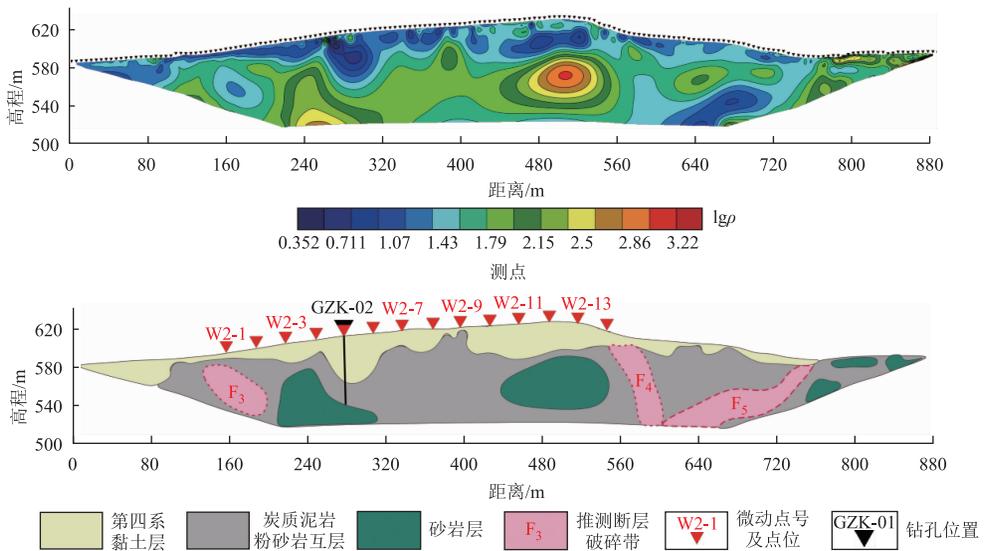


图6 G2剖面高密度电法反演结果(上)与地质解释(下)

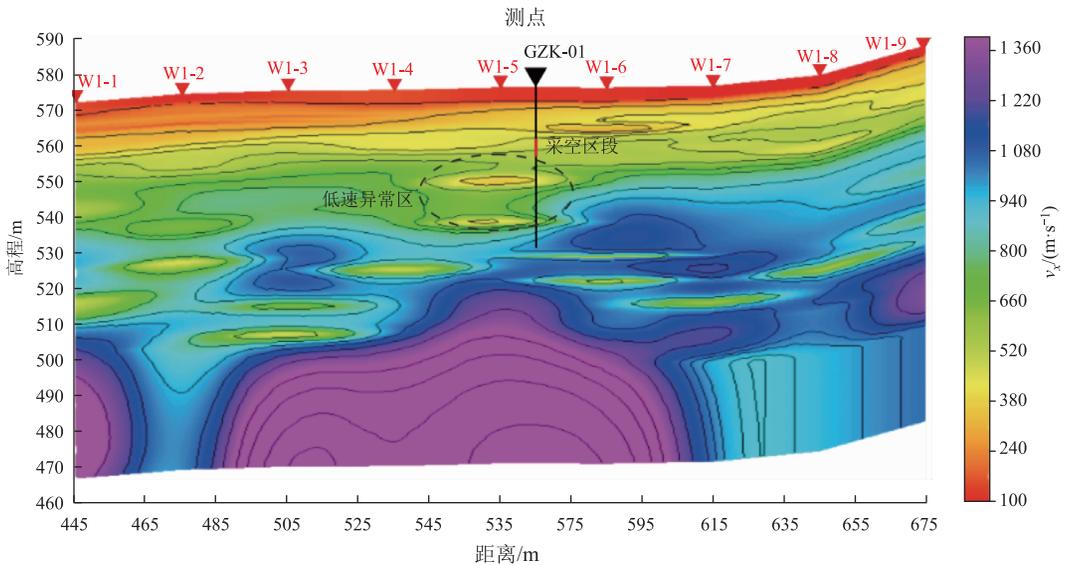
Fig. 6 G2 profile of high – density electrical resistivity inversion (top) and geological interpretation (bottom)

裂破碎带。G2 剖面 160 ~ 200、580 ~ 600、620 ~ 760 m 区段出现电性梯度带,表现为相对低阻特征,且体现出一定的规模,与 G1 剖面同理,推断其为 3 条规模、产状不同的隐伏断裂破碎带; G2 剖面 260 ~ 300 m 区段的低阻异常可能为采空区充水引起。2 条剖面的其他区段未见明显的电性异常,无法判断采空区的分布范围,推断可能与采空区规模小、塌落、碎石充填以及围岩电性差异不明

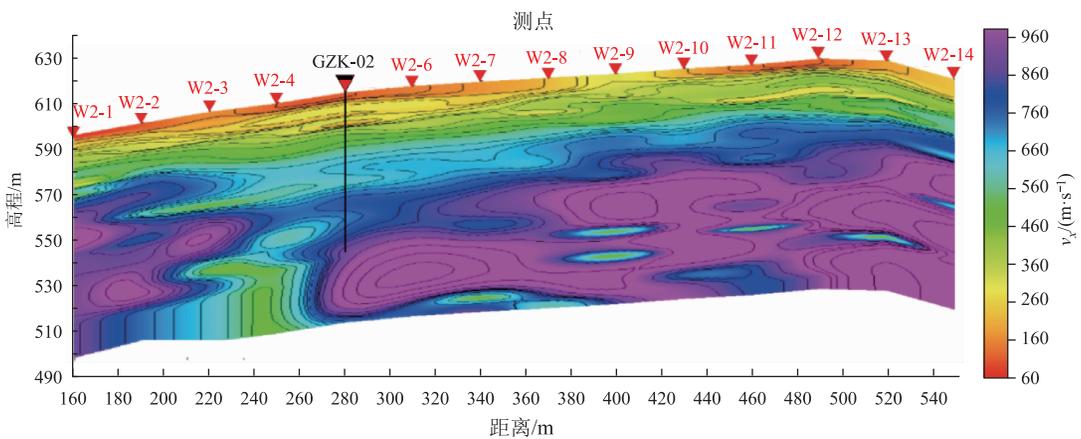
显有关。

### 3.2 微动勘探成果解释

图 7 为 W1、W2 剖面的二维视速度( $v_x$ )映像图。可以看出,探测区域地下结构总体呈现层状结构特点,垂向上随着深度增加,视速度逐渐增高,横向波速变化不明显,等值线的起伏基本反映沉积地层界面形态,这与高密度电法的探测结果有着较好的对应关系。



(a) W1剖面



(b) W2剖面

图 7 微动剖面二维视速度映像

Fig. 7 Two - dimensional apparent velocity images of micromotion profiles

W1 剖面二维视速度映像图中,445 ~ 545 区段,标高 550 m 下方出现一系列“串珠状”低速异常,这与根据电性特征推断的隐伏断层  $F_1$  的空间位置有较好的对应关系,推断低速异常带为断层破碎带的反映; 645 ~ 685 区段,标高 560 m 下方的“串珠状”低速异常带与推断的隐伏断层  $F_2$  的空间位

置有较好的对应关系,推断此低速异常带为断层破碎带的反映; 在 535 ~ 580 区段,标高 560 ~ 540 m 深度范围内横向上相对于周边区域出现明显的“圈闭状”低速异常,该低速异常位于根据电性结构推断的砂、泥岩互层(油页岩赋存地层)内,且该区段砂泥岩层埋深较浅(约 5 m),便于民采活动,结合

该段地面房屋变形严重的实际情况,该区为油页岩采空区的可能性较大。综合高密度电法和微动勘探结果,在 W1 剖面 535 ~ 580 区段,标高 540 ~ 560 m 深度范围内可能存在采空区。

W2 剖面上,根据低阻异常推断的采空区在视速度映像图上表现为横向延伸较大的宽缓低速异常,推断该低速异常可能为古近系泥岩、砂岩地层出现凹陷,使得第四系冲洪积层增厚所引起。在 220 ~ 270 m 区段,标高 560 m 下方出现近直立的低速异常,与根据电性特征推断的产状较陡的砂岩地层在空间位置上有较好的对应关系,分析认为出现该低速异常是因为该区域地下地层产状较陡,不足微动勘探适用于水平层状介质的理论假设,造成对相速度的低估而出现的低速假异常。综合高密度电法和微动勘探结果,W2 剖面覆盖区域存在采空区的可能性较小。

### 3.3 钻探验证

根据物探结果,推断 G1 剖面 535 ~ 580 区段,标高 540 ~ 560 m 深度范围内可能存在采空区。为了验证这一推断的可靠性,结合地面房屋分布的实际情况,在 G1 测线 575 m 处实施了 GZK - 01,终孔深度 51 m。孔内 0 ~ 6 m 为第四系粉质黏土,其下为泥岩、粉砂岩互层,局部深度见煤线及油页岩层(图 8)。钻孔施工至标高 561 m 时,出现钻进突然加速,钻井液大量漏失的现象,标高 558 ~ 561 m 段

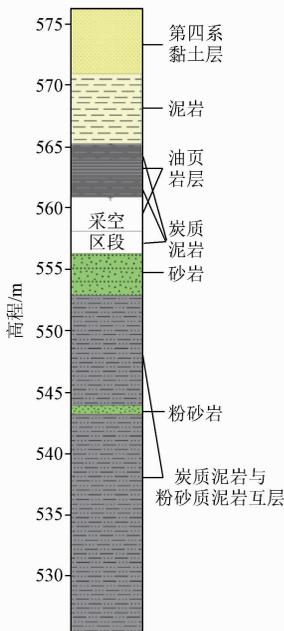


图 8 GZK - 01 钻孔柱状图

Fig. 8 Columnar section of Bore Hole GZK - 01

的岩心呈黑色碎块状,采取率不足。钻进情况和岩心特征证实该深度范围为油页岩采空区,且采空区出现塌落情况,被碎石充填,但未充水。推断结果得到验证,证明了该组合方法探测小尺度老采空区的有效性。

### 3.4 讨论

在利用组合方法对采空区进行探测的过程中,高密度电法和微动各自发挥着不同的作用。

高密度电法快速获得了较高精度的地下电性结构信息,为地层划分、地层产状判断和构造识别提供帮助。但同时也注意到,由于小尺度采空区规模较小,尤其是老采空区发生塌落充填后,与围岩电性差异降低,其在电性结构上难以引起可识别的异常,如 G1 剖面中的采空区段在电性结构上毫无反映。此外,仅仅依靠电性异常容易引起误判,例如 G2 剖面中局部地段中的低阻异常,后经钻孔揭露实为砂、泥岩层下凹,第四系盖层增厚的反映。

微动勘探较好地识别了小尺度采空区引起的低速异常,但其同时容易受构造和陡立地层引起的低速异常的干扰,如 W1 剖面 445 ~ 545 m 区段的隐伏断层产生一系列“串珠状”低速异常,W2 剖面 220 ~ 270 m 区段陡立地层引起的低速异常。

此外,还有一个问题需要注意,2 种方法综合应用虽然可有效识别出小规模老采空区,但在采空区底界面的推断上还不够准确。如 GZK - 01 揭露的采空区规模在纵向上小于 W1 剖面低速异常推断的采空区规模,存在“下拉”现象,无法准确圈定采空区规模,仍需借助钻探工作验证,这可能与“体积效应”有关。解决这一问题需开展进一步的探索研究工作。

## 4 结论

(1) 利用微动和高密度电法组合勘探,可有效探测小尺度油页岩老采空区的分布位置,采空区在面波二维视速度映像图上表现为低速异常。

(2) 高密度电法在组合方法中主要用于地层划分,缩小微动勘探的目标区域,排除构造和陡立地层引起的低速异常干扰。

(3) 该组合方法虽能推断油页岩采空区的分布位置,但在采空区底界面的判断上还不够准确,相较于实际情况,底界面下延,需借助钻探工作确定底界面深度,才能准确圈定采空区规模。

**致谢:** 本项目在微动数据采集和数据处理方面得到北京水电物探研究所刘云祯所长、金荣杰老师和该所技术人员的大力支持和无私帮助,此外,项目组成员崔鑫、王延州、李宏等同志在整个施工过程中付出了艰辛的努力,在此一并表示感谢!

## 参考文献 (References):

- [1] 李洪嘉, 闫绍波, 张超. 综合物探技术在煤矿采空区探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(5): 714 - 720.  
Li H J, Yan S B, Zhang C. The applied research of integrated geophysical techniques on the detection of colliery gob[J]. Chin J Eng Geophys, 2014, 11(5): 714 - 720.
- [2] 程久龙, 李飞, 彭苏萍, 等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1742 - 1750.  
Cheng J L, Li F, Peng S P, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. J China Coal Soc, 2014, 39(8): 1742 - 1750.
- [3] 李志华. 铁路煤矿采空区的综合物探研究[J]. 物探与化探, 2012, 36(S): 20 - 26.  
Li Z H. Research on integrated geophysical exploration for railway survey in coal mine goaf[J]. Geophys and Geochem Explorat, 2012, 36(S): 20 - 26.
- [4] 薛国强, 潘冬明, 于景邨. 煤矿采空区地球物理探测应用综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2187 - 2192.  
Xue G Q, Pan D M, Yu J C. Review the applications of geophysical methods for mapping coal - mine voids[J]. Progress in Geophys, 2018, 33(5): 2187 - 2192.
- [5] 徐佩芬, 李传金, 凌甦群, 等. 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1923 - 1930.  
Xu P F, Li C J, Ling S Q, et al. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing microtremor survey methods[J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(7): 1923 - 1930.
- [6] 马丽, 金溪, 贺正东. 微动物探方法探测采空区[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(5): 50 - 54.  
Ma L, Jin X, He Z D. Gob area detection through microtremor surveying[J]. Coal Geol China, 2013, 25(5): 50 - 54.
- [7] 于森, 林君. 天然源面波在采空区探测中的应用[J]. 煤炭技术, 2013, 32(12): 85 - 87.  
Yu M, Lin J. Application of natural source surface waves in goaf survey[J]. Coal Technol, 2013, 32(12): 85 - 87.
- [8] 黄光明, 徐佩芬, 李长安, 等. 覆盖区岩溶溶洞的微动探测试验研究——以福建永安大湖盆地为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 536 - 544.  
Huang G M, Xu P F, Li C A, et al. Application of 2D microtremor section survey method in covered karst area, taking Yonggan Dahu Basin, Fujian Province as example[J]. J China Coal Soc, 2019, 44(2): 536 - 544.
- [9] 彭超. 浅层地震反射波法和高密度电法在石膏矿采空区勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(4): 481 - 485.  
Peng C. The application of shallow seismic reflection method and high - density electrical method to survey of gypsum mine goaf[J]. Chin J Eng Geophys, 2019, 16(4): 481 - 485.
- [10] 刘国勇, 杨明瑞, 王永刚. 高密度电法在煤矿积水采空区探测中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(5): 90 - 94.  
Liu G Y, Yang M R, Wang Y G. Application of high density resistivity method for water accumulated goaf detection in coal mine[J]. Min Saf Environ Prot, 2019, 46(5): 90 - 94.
- [11] 杨兆林, 郭凯. 高密度电法在铁矿隐伏采空区探测中的应用[J]. 中国矿业, 2020, 29(8): 158 - 164.  
Yang Z L, Guo K. The application of high density electrical method in detection of concealed goaf in iron mine[J]. China Min Mag, 2020, 29(8): 158 - 164.
- [12] 陈玉玲, 韩凯, 陈贻祥, 等. 可控源音频大地电磁法在岩溶塌陷勘察中的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2616 - 2622.  
Chen Y L, Han K, Chen Y X, et al. The application of CSAMT in Karst collapse investigation[J]. Progress in Geophys, 2015, 30(6): 2616 - 2622.
- [13] 戴前伟, 侯智超, 柴新朝. 瞬变电磁法及EH-4在钼矿采空区探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1541 - 1546.  
Dai Q W, Hou Z C, Chai X C. Application of transient electromagnetic method and EH-4 to investigation of mined - out areas of molybdenum deposits[J]. Progress in Geophys, 2013, 28(3): 1541 - 1546.
- [14] 范涛, 王秀臣, 李貅, 等. 瞬变电磁方法在探测煤矿浅层高阻采空区中的应用[J]. 西北地质, 2010, 43(2): 156 - 162.  
Fan T, Wang X C, Li X, et al. Application of TEM in detecting goaf of coal Mine with high - resistivity and shallow - layer[J]. Northwestern Geol, 2010, 43(2): 156 - 162.
- [15] 陈江军, 刘波, 王鹏来, 等. 综合物探方法在石膏矿采空区探测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 783 - 789.  
Chen J J, Liu B, Wang P L, et al. Application research of integrated geophysical exploration techniques to gypsum mine gob[J]. Progress in Geophys, 2018, 33(2): 783 - 789.
- [16] 李文. 煤矿采空区地面综合物探方法优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 194 - 199.  
Li W. Optimization study of surface comprehensive geophysical detection methods of coal mine goafs[J]. Coal Sci Technol, 2017, 45(1): 194 - 199.
- [17] 严家斌, 李伟, 戴前伟, 等. 高频电磁测深法在钼矿采空区探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(1): 306 - 310.  
Yan J B, Li W, Dai Q W, et al. Application of the high - frequency magnetotelluric sounding to investigation of worked out areas of molybdenum deposits[J]. Progress in Geophys, 2011, 26(1): 306 - 310.
- [18] 河南永兴实业有限公司. 栾川县潭头镇供水水文地质调查报告[R]. 2018.  
Henan Yongxing Industrial Co., Ltd. Hydrogeological Survey Report of Water Supply in Tantou Town, Luanchuan County[R]. 2018.
- [19] 王亚辉, 张茂省, 师云超, 等. 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.

Wang Y H, Zhang M S, Shi Y C, et al. Precise detection and modeling of urban underground space based on integrated geophysical exploration [J]. *Northwestern Geol*, 2019, 52 (2): 83 - 94.

[20] 刘云楨, 梅汝吾, 叶佩, 等. WD 智能天然源面波数据采集处理系统及其应用试验[J]. *物探与化探*, 2016, 40(5): 1007 - 1015.

Liu Y Z, Mei R W, Ye P, et al. Data acquisition and processing system of WD intelligent natural source surface wave and its application test[J]. *Geophys and Geochem Explorat*, 2016, 40(5): 1007 - 1015.

[21] Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. *Bull Earthq Res Inst Univ Tokyo*, 1957, 35(3): 415 - 456.

[22] Capon J. High - resolution frequency - wavenumber spectrum analysis[J]. *Proc IEEE*, 1969, 57(8): 1408 - 1418.

[23] Capon J. Investigation of long - period noise at the large aperture seismic array[J]. *J Geophys Res*, 1969, 74(12): 3182 - 3194.

[24] Okada H, Matsushima T, Moriya T, et al. An exploration technique using long - period microtremors for determination of deep geological structures under urbanized areas [J]. *Geophys Explorat*, 1990, 43(6): 402 - 417.

[25] Okada H. Microtremors as an Exploration Method, *Geo - Exploration Handbook*[M]. Japan: Society of Exploration Geophysicists of Japan, 1998: 203 - 211.

[26] 王振东. 微动应用技术讲座(第一讲)[J]. *国外地质勘探技术*, 1990(4): 12 - 16.

Wang Z D. The lecture on microtremor application technology(chapter one)[J]. *Foreign Geoeplorat Technol*, 1990(4): 12 - 16.

[27] 王振东. 双源面波勘探构想[J]. *中国地质*, 1998(4): 47 - 48.

Wang Z D. Double source surface wave exploration [J]. *Geol China*, 1998(4): 47 - 48.

[28] 周杰, 李坤鹏, 张琦, 等. 天然场源面波与高密度电法在地面塌陷勘察中的应用 [J]. *工程地球物理学报*, 2018, 15(4): 530 - 537.

Zhou J, Li K P, Zhang Q, et al. The application of natural source surface wave and high density electric method to ground collapse exploration [J]. *Chin J Eng Geophys*, 2018, 15(4): 530 - 537.

[29] 孙勇军, 徐佩芬, 凌甦群, 等. 微动勘查方法及其研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(1): 326 - 334.

Sun Y J, Xu P F, Ling S Q, et al. Microtremor survey method and its progress[J]. *Progress in Geophys*, 2009, 24(1): 326 - 334.

## Application of microtremor survey and high density electrical method in exploration of small-scale old goaf

JIA Xu<sup>1,2</sup>, SUN Jianwei<sup>1</sup>, LIU Xiangdong<sup>1</sup>, CHENG Xianda<sup>1</sup>, HUANG Honglin<sup>1</sup>

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Shaanxi Xi'an 710100, China;

2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The oil shale old goaf in Zhaozhuang Village of Luanchuan County has posed a certain threat to the local living environment. However, this goaf has small scale, complex distribution, and interference from crowded people, which made it difficult for detection. In order to detect the goaf effectively, the authors in this paper proposed a combined detection method of microtremor survey and high - density electrical method. The two - dimensional apparent velocity and resistivity profiles were obtained through data acquisition and processing. Then, the oil shale rich layer was identified as medium resistivity layer with approximate layered distribution in the resistivity profile, and the oil shale goaf was identified as low velocity anomaly area in the horizontal direction of medium resistivity layer, according to the actual geological condition. The verified results from drilling indicate the inference results of the combination method are basically consistent with the reality, which prove the combination method is feasible for the exploration of small - scale ancient goaf of oil shale, with strong anti - interference features and high - efficiency construction.

**Keywords:** combination of geophysical methods; microtremor survey; high density electrical method; low-speed abnormal; goaf

(责任编辑: 沈效群)