

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.2-3.018

纵横波法在华北平原区浅层精细结构探测中的应用

王小江^{1,2}, 王凯^{1,2}, 张凯^{1,2}, 岳航羽^{1,2}, 张保卫^{1,2}

WANG Xiaojiang^{1,2}, WANG Kai^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, YUE Hangyu^{1,2}, ZHANG Baowei^{1,2}

1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;

2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 河北 廊坊 065000

1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China;

2. The National Center for Geological Exploration Technology, Langfang 065000, Hebei, China

摘要: 鉴于城市规划等对城市地下空间探测精度要求越来越高的形势需求, 在华北平原雄安新区附近开展了针对浅层的纵横波勘探试验研究。从方法技术层面详细阐述了野外数据采集的相关参数、数据处理流程和关键技术及其试验效果。研究获得了试验区浅层精细地质结构和速度分布特征, 纵横波在深度域具有较好的对比性。纵波法在试验区最大有效探测深度达 700 m, 最浅探测深度为 24 m, 整体分辨率可达 4 m, 横波法最大探测深度约 220 m, 最浅探测深度为 9 m, 整体分辨率则高达 1 m 左右。横波弥补了浅表层纵波盲区 and 分辨率不足的问题, 提高了浅表结构划分和断层上断点定位的精度, 而纵波则弥补了横波探测深度小的缺陷。

关键词: 地下空间; 雄安新区; 纵横波; 精细地质结构; 地质调查工程

中图分类号: P315.3⁺1; P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)02/03-0407-09

Wang X J, Wang K, Zhang K, Yue H Y, Zhang B W. Application of P-S method in the shallow fine structure detection in North China Plain. Geological Bulletin of China, 2022, 41(2/3): 407-415

Abstract: In view of the situation that urban planning requires more and more precision of urban underground space detection, a pilot study of shallow P-S wave exploration was carried out near the Xiong' an New Area in North China Plain. The parameters of field data acquisition, data processing flow, key techniques and test results are described in detail from the aspect of method and technology. The study has resulted in fine geological structure and velocity distribution of the shallow layer in the test area, and P-wave and S-wave section have good contrast in the depth domain. In the study area, the detective depth of P-wave method is about 700 m, and the lowest detective depth is 24 m, the overall resolution is 4 m; the S-wave detective depth is about 220 m, the shallowest detective depth is 9 m, and the overall resolution is about 1 m. The S-wave makes up for the deficiency of the blind area and insufficient resolution of P-wave in the shallow layer, which improves the accuracy of the shallow structure division and fault location. The P-wave makes up for the defect of shallow detecting depth of S-wave.

Key words: underground space; Xiong' an New Area; P-S wave; fine geological structure; geological survey engineering

在土地资源约束的条件下, 越来越多的工程建筑转向地下发展。传统的地下空间利用主要在轨道交通等方面, 近年, 随着城市化进程的飞速发展, 出现了越来越多的大城市甚至是超级大城市, 对城

收稿日期: 2020-08-28; 修订日期: 2020-11-20

资助项目: 国家重点研发计划《高精度光纤深地地质结构成像探测仪示范应用》(编号: 2018YFF01013504)、国家自然科学基金项目《提高面波干涉法横向分辨率的关键技术研究》(批准号: 41704044)、中国地质科学院基本科研业务费课题《雄安新区浅层地下空间高精度地震探测技术研究》(编号: JYYWF20180302) 和中国地质调查局项目《永定河冲积平原区域地质调查》(编号: DD20160046)

作者简介: 王小江(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事复杂条件下地震探测技术研究。E-mail: wxiaojiang@mail.cgs.gov.cn

市空间的利用将向多样化、深层化、人性化发展^[1],利用形式已不再局限于地铁、隧道等轨道交通,而是更多地包括居住、工作、休闲等设施。地质调查工作是获取地下空间地质结构及资源环境属性的直接手段,查明浅层第四系、工程地质、水文地质结构等地质要素,可为地下空间资源综合利用评价和合理、有效、可持续地开发地下空间资源提供有力支撑^[2-3],同时对相应的探测方法也提出了更高的要求。

反射波地震勘探是一种利用机械或炸药震源激发一定频带的人工地震波,并通过分析被地质界面反射回地面的地震波运动学和动力学特征,获取地质体的埋深、形态、速度结构的地球物理方法^[4-5],其物理基础是岩、土具有波组抗差异。该方法分辨率较高,根据激发接收的地震波不同分为纵波法和横波法,其中,纵波法具有施工便捷、成本低廉、探测深度大和技术成熟的特点,在第四系覆盖区隐伏活动断裂、浅层地质结构等目标的探测中应用最广泛且效果突出^[6-14]。谢樊等^[6]运用初至波层析成像方法获得了中亚造山带东段地表以下约3 km厚的浅表速度结构精细模型,对地壳演化与深部过程提供浅部精准约束;徐明才等^[4,7]利用抗干扰高分辨率地震方法,成功解决了十余座城市地质调查中的隐伏断裂分布问题;李燕等^[8]利用反射纵波获得了银川盆地浅部构造形态,刻画了黄河断裂、贺兰山东麓断裂、银川断裂等的展布特征,为厘定断层的活动时限提供了重要的证据;周月玲等^[9]利用浅层纵波地震勘探揭示了廊坊市河西务断裂的空间展布与上断点埋深。但是由于部分地区特殊的浅表地震地质条件和近源干扰波的影响,纵波地震勘探在浅层探测中存在一定盲区^[14-15](华北部分地区盲区达50 m以上),导致极浅层探测效果不佳。由于横波传播不受液体的影响,尤其是在极松软的含水地层中传播速度极低,对于相同厚度的地层顶底反射时差远大于纵波,而且子波宽度也比纵波子波窄,此时,横波分辨率可达纵波分辨率的4~5倍^[4,16],在此情况下,横波法能很好地弥补纵波法在浅表层中探测效果差的缺陷,近年在工程勘探中应用也越来越多。如陈相府等^[17]利用横波对广州某浅层岩土进行分层,最浅探测深度达5 m;顾勤平等^[18]在苏北栟茶河断裂调查中,利用横波反射法清晰地查明了超浅层地层和构造空间特征;安好收

等^[15]利用纵横波联合勘探,精确定位了某浅覆盖区活动断裂在基岩和盖层中的错断情况。纵横波的探及深度和侧重面各有不同,联合勘探能优势互补,为城市地质调查提供多方面的重要信息。

华北平原区分布着中国北方重要的城市群,而新设立的雄安新区位于华北平原核心位置,其地理条件优越,起点和定位高,在建设规划上更是提出了要建设地下、地上2个雄安的宏伟设想。针对新区不同地下空间和资源利用目标层位,中国地质调查局在该区及外围投入了大量地质调查研究工作,笔者等在新区浅层精细地质结构探测中,开展了高分辨率纵横波联合勘探试验。本文主要从数据采集、处理解释等方面介绍如何提高浅层地质调查的精度,以期为雄安新区的工程地质条件、安全性和土体承载力评价提供技术支撑,同时为其他地区城市地下空间探测提供经验借鉴。

1 研究区概况

研究区位于雄安新区南部保定市高阳县境内(图1-B),处于白洋淀平原区,构造上位于高阳低凸起和蠡县斜坡结合部,属于太行山山前冲洪积扇,整体地势由西南向东北倾斜,但是坡度极不明显,区内有孝义河等水系由南向北汇入白洋淀。

研究区被第四系全覆盖,据以往勘探成果可知,该区第四系底界深度为348~437 m^[13],主要为河湖相沉积(图1-A),沉积物极松散,粒度细,未固结。随着白洋淀多次扩张和萎缩^[19],该区湖相和河流相交替出现,形成了粉砂、粘土质粉砂、粉砂质粘土和粘土互层,部分地层为砂砾石层。

2 地震数据采集与处理

2.1 数据采集

纵横波地震试验测线沿孝义河堤西侧布置(图1-B),测线桩号由南向北增加,河堤表面为夯实土层,宽6~7 m。采集仪器为Sercel-428XL地震仪,纵波采集使用100 Hz垂直检波器接收,震源为14 t重的BV260型宽频可控震源,横波采集则使用4 Hz水平检波器接收,铁锤敲击扣板激发,为提高浅层有效覆盖次数,均采用中间放炮的观测系统,野外现场如图2所示。

由于本次探测目标主要为第四系内部地层结构,涉及深度整体较浅,所以在观测系统和震源能

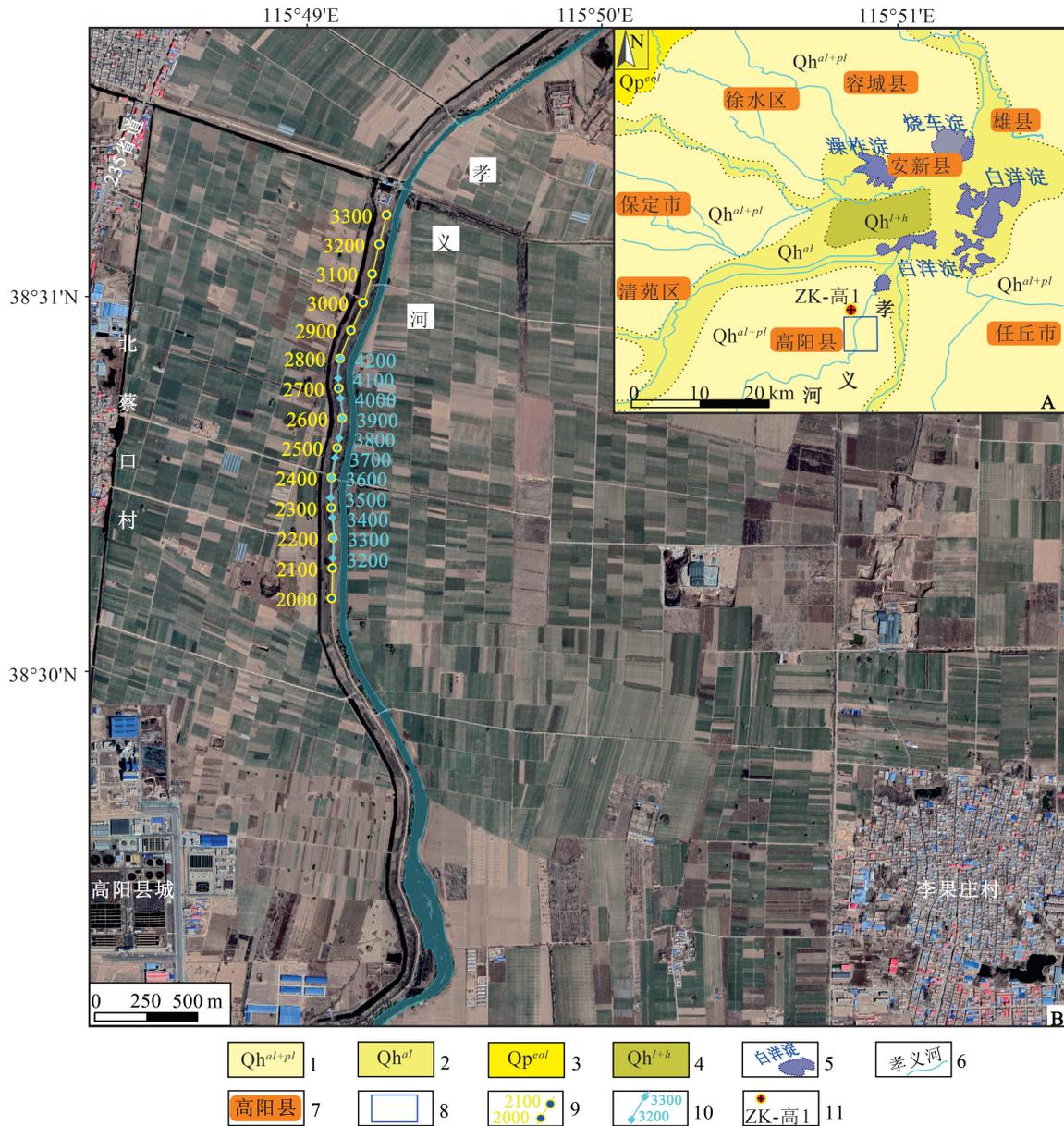


图 1 试验区地理、地质概况图 (A) 和测线布置图 (B)

Fig. 1 Geographical and geological map (A) and survey line layout (B) of the study area

1—全新统冲洪积沉积;2—全新统冲积沉积;3—更新统风成黄土;4—全新统沼湖相沉积;5—湖泊;
6—现代河流;7—地名;8—试验区位置;9—纵波测线及 CDP 编号;10—横波测线及 CDP 编号;11—钻孔及编号

量方面主要针对浅层设计,以小道距、小炮距、小排列、高覆盖次数的观测系统和中小能量、超宽频带激发为特点。

纵波采集参数为:3 m 道距,6 m 炮距,0 m 偏移距,120 道接收,最大炮检距为 180 m,覆盖次数为 30 次,采样率为 0.5 ms,采集时长为 2 s。为获得较高主频地震波,扫频为 10~300 Hz,线性升频方式,

并采用 20 s 的扫描长度以增加各个频段的下传能量,同时为了降低近道噪声水平、提高浅层信噪比,采用 50% 出力,垂直叠加次数为 2~3 次。

横波采集参数为:2 m 道距,4 m 炮距,0 m 偏移距,96 道接收,最大炮检距为 96 m,覆盖次数为 24 次,采样率为 0.5 ms,采集时长为 2 s。检波器灵敏轴垂直测线方向安插,震源为实木木桩,并将多根



图2 纵横波勘查现场作业图

Fig. 2 Field working diagram of P-S waves exploration

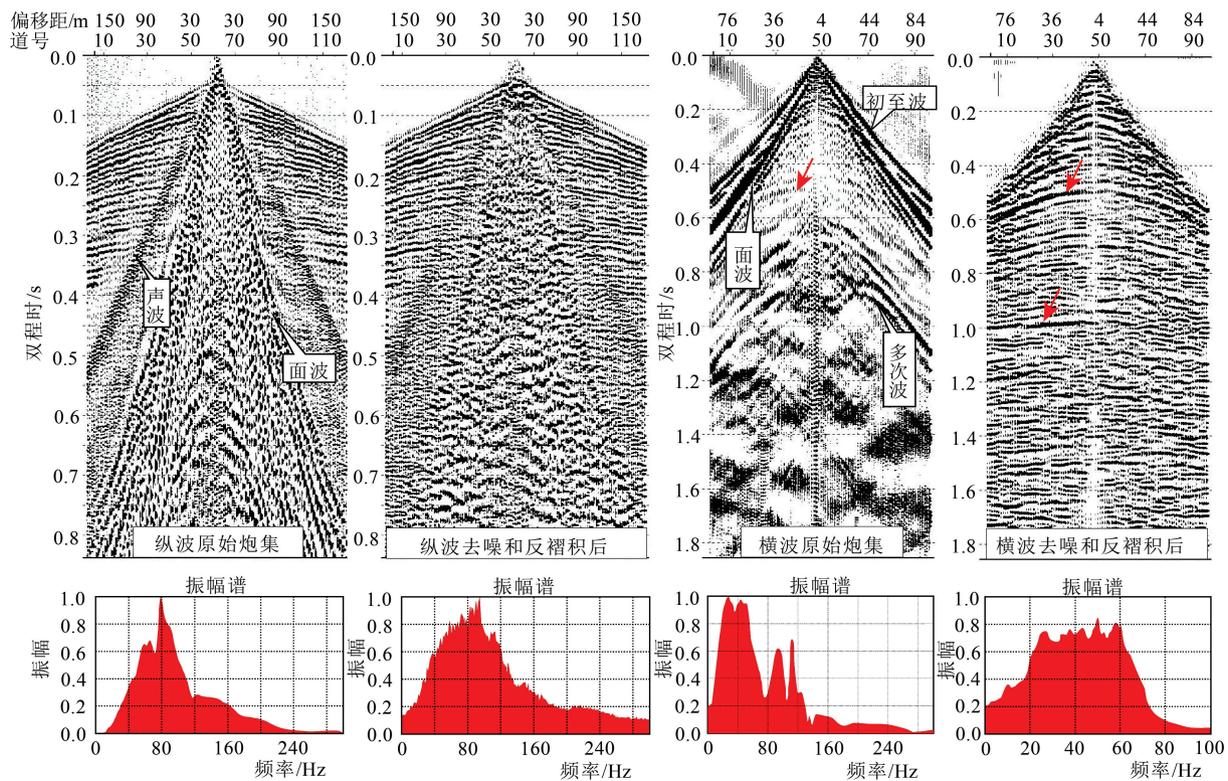


图3 纵横波炮集去噪效果及其频谱

Fig. 3 Denoising effect and spectrum of P-S waves shot gather

并排钢钎贯穿桩体并插入地下,激发时多人站在木桩上增加配重,提高摩擦力,增加激发效果,木桩长轴方向和锤击方向均与检波器方向一致(同垂直于测线方向),每个炮点同方向敲击5次。该方法从激发到接收均为SH波(水平偏振横波),有效波场

单一,后续资料处理方法较简单。

2.2 数据特征与资料处理

由于震源能量和地震波传播特性的差异,纵波原始数据信噪明显高于横波信噪比,肉眼可见0.4 s以浅发育多套反射波组。数据整体主频达80 Hz

(图 3),虽然震源最高扫频达 300 Hz,由于地层极为松散,高频段能量快速衰减,110 Hz 左右已降到最大振幅的一半。面波干扰从炮点出发呈扫帚状散开,由于频散作用,面波最大速度约为 225 m/s,又因为使用的检波器频率较高,面波的低频部分得到了一定程度的压制,近炮点有效波已完全淹没在面波和震源干扰及其相互干涉形成的干扰中;声波呈强能量恒速线性特征,频带宽,影响范围小;此外发育高频随机干扰,能量较小,但影响范围大。横波特征与纵波特征迥异,主频约 40 Hz,初至波为直达波和折射波,能量强,面波紧跟其后,影响范围较窄,有效反射波能量弱,隐约可见双曲线特征(图 3 红色箭头所示),其速度低,到时比面波晚,并夹持于面波之间,即使是零炮检距的道也未受面波影响,这是与纵波最大的区别。此外,不规则甚低频

和低频干扰极发育,中强能量的多次波以速度明显小于有效波的特征被识别。

数据处理采用 FOCUS 5.4 地震处理软件包,纵横波处理思路一致,以综合提高信噪比和分辨率为驱动,在波场特征分析的基础上,经测试调整,确定针对性的联合勘探技术方法(图 4)。处理过程中,结合相关地质资料并在初始深度域波场对比解释的基础上,不断调整叠前处理参数,尤其是滤波和速度拾取、切除等环节,避免出现构造假象,确保纵横波在深度域具有较高的可对比性。由于测线弯曲度较小,排列也较短,采用弯线方式抽选 CDP(共深度点),CDP 基本全部沿测线分布,测区地形平坦,未进行高程静校正。数据解编和坏道编辑后,采用带通滤波压制全区高低频等随机干扰;然后采用 FK、KL 等二维速度滤波模块分区分速压制具有

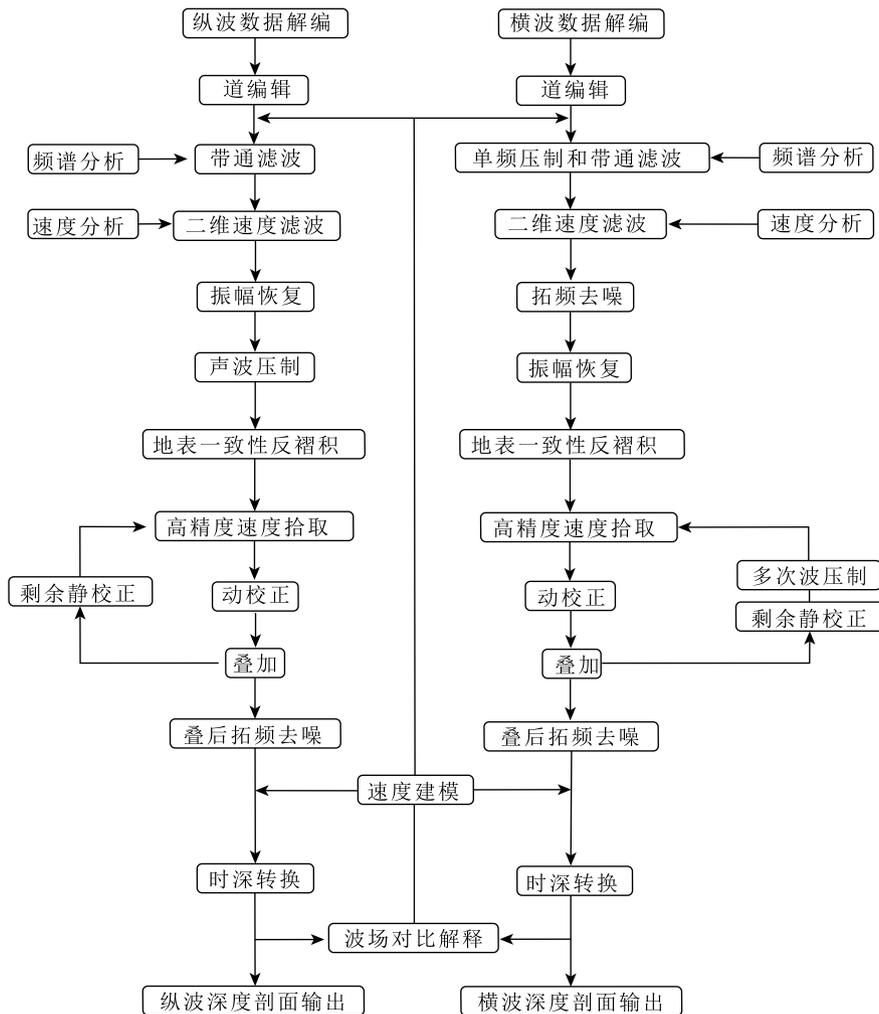


图 4 纵横波联合处理流程

Fig. 4 Combined processing of P-S waves

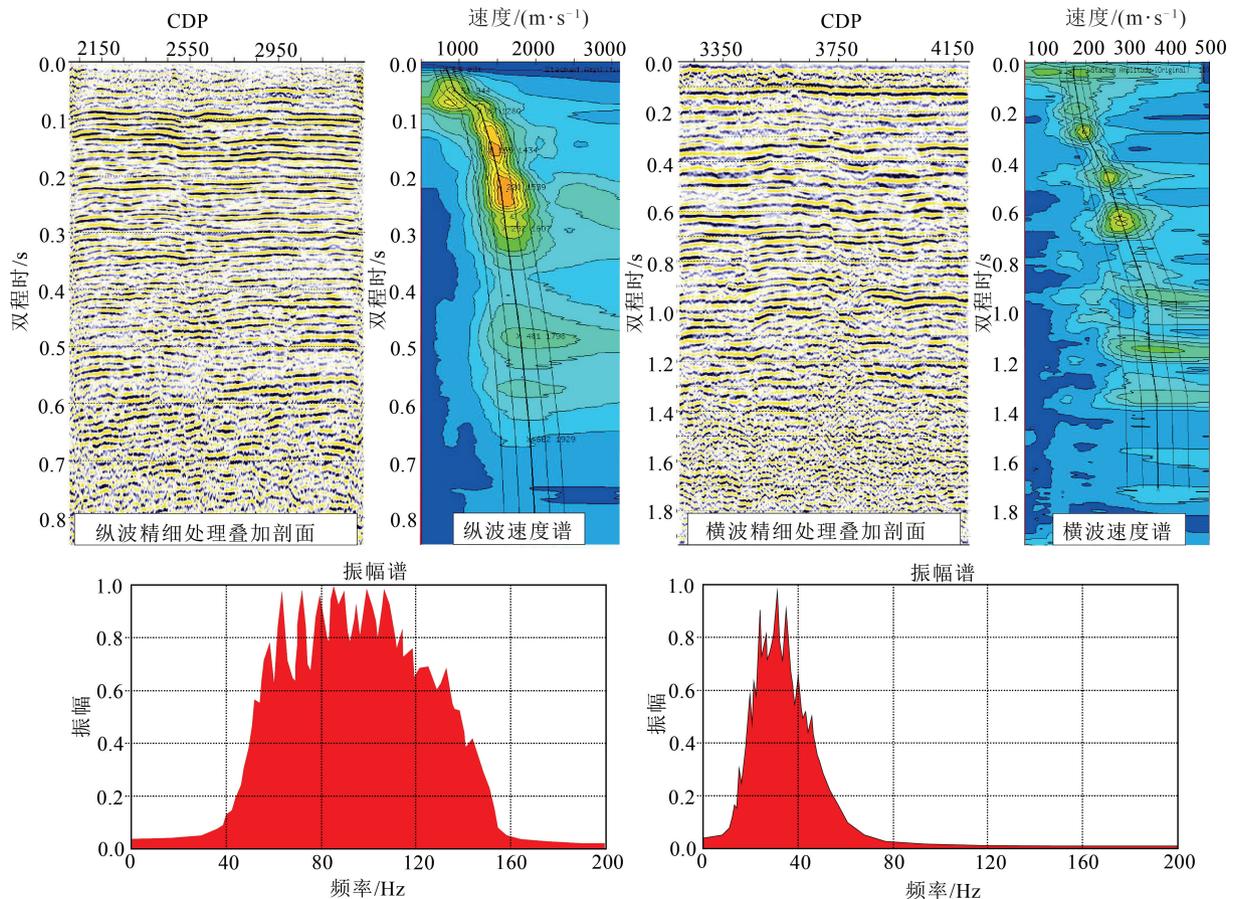


图5 叠加剖面及其频谱和速度拾取

Fig. 5 Stack section and its spectrum and velocity pick

线性特征的低速面波、震源干扰等,声波压制则在其影响的条带内滑动时窗并统计平均振幅,高于平均值的自动计算权重,使其振幅和背景值趋于一致,整个去噪过程均相对保幅,避免伤害有效波;采用球面扩散和地表一致性振幅恢复技术补偿地震波随深度和偏移距耗散的能量和振幅,保持地震波相对振幅关系,使纵横向能量均衡;地表一致性反褶积通过压缩子波达到压制续至波和短周期多次波的目的;在横波 CDP 域进行动校正后再作二维速度滤波进一步消除长周期横波多次波等残留低速干扰。经过综合去噪和反褶积后(图3),主要干扰得到有效消除,信噪比和分辨率均提高,波组特征层次分明。

速度拾取不仅关系剖面的成像质量,更关系到后续的对比解释,在结合剩余静校正基础上,综合对比速度谱和叠加段、动校正道集求取精确的叠加速度,从图5所示的某 CDP 点速度谱可知,横波速度谱能量团比纵波能量团更集中,速度拾取更准

确,0.8 s 内纵波叠加速度在 1000~2000 m/s 之间,而横波叠加速度从浅部的 155 m/s 渐增到 350 m/s 以上。纵波叠加剖面主频约 100 Hz,横波主频则在 35 Hz 左右,以分辨率为波长的 1/4 为标准,纵波按平均速度为 1600 m/s 计算,其总体分辨率约为 4 m,横波按平均速度 180 m/s 计算,其分辨率则高达 1 m 左右,不同深度对应的速度和频率不同,其分辨率也会不同,浅层分辨率比深层更高。

图5所示的叠加剖面中,纵波可识别较连续的反射波集中在 0.7 s 以浅,对应深度约 700 m;横波可识别有效反射波则集中在 1.2 s 以浅,对应深度约 220 m。叠加剖面波组整体连续性好,信噪比和分辨率高,完全满足地下空间精细结构探测的要求。

3 资料对比解释

在基岩区,纵横波速度比值较稳定,大部分为 1.7~2.2 倍的关系^[20],所以将横波时间剖面压缩一

半基本能保持与纵波剖面相近似的深度关系,在此基础上能够较好地识别对比同一反射界面的反射波。但是该方法在松散覆盖区不可行,首先,由于含水和压实程度的差异,纵横波速度比值较大,通常可达 6 倍以上(图 5),其次,速度比并不是一个恒定的比值,纵向变化较大,无法通过等比压缩进行对比,所以,需要在深度域开展相应的对比分析。本着处理解释一体化的思路,利用初始平均速度(根据 DIX 公式求得)进行时深转换,对比深度域波场形态特征,在浅层以横波深度为约束(横波速度小、拾取准确度高、深度误差小),在纵波剖面上解释对应层位,对横波不能探及的深层,则以纵波深度为标准,联合构建层速度模型并不断对比调整,使二者能在合理速度结构条件下的对应层位波组深度一致。

图 6 为深度域构造联合解释剖面,剖面显示第四系较平缓,构造较简单。纵波探测深度远大于横波,纵波展示深度为 600 m,横波展示深度为 220 m,在其重叠深度范围内,纵横波剖面总体形态相似。可以直观地看到横波同相轴明显比纵波同相轴细(分辨率高),同深度范围内的同相轴数也更多,但是连续性比纵波略差。

由于地震波频率限制,一个波组的波峰或波谷并不代表单一某地质界面的反射,而是多个薄层界面相互干涉的结果,在层位解释时通常把它认为是相当于一定深度内某一明显界面(波阻抗差较大、分布广、相态相对稳定)的反映,具有一定的等时意义。受纵横波速度影响因素(岩性、流体、孔隙度等)和二者频率差异影响,同一地质体的纵横波响应也会有所不同,尤其是细节方面,比如在横波剖面上可以区分出的几个不连续的地质体(图 6 红色箭头所指),在纵波剖面上则可能复合为一套连续波组,波峰和波谷的位置、深度在不同剖面上也可能不同。所以在进行对比解释时,需要把握整体格架。

钻孔 ZK-高 1 位于测线北西侧附近的南马村(位置见图 1-A),为河北省地矿局于 1981 年实施的水文钻,该井深 600 m,仅有岩性录井数据,其年代地层深度参考雄安新区附近最新实施的地质钻和区域地质资料^[13]进行推测,由于测区地层较平缓,该井离测线也较近,可用于本次的井震对比。结合钻孔岩性和地震波场特征,同时为了便于精细

速度建模,在纵波剖面上解释了 10 个主要层位(T03~T12),T05 及以下地层反射连续好、能量强,T05 以上的地层反射连续性较差,与纵波波阻抗差异小及近道干扰有关,横波则对应解释了 8 个层位(T01~T08),二者形态一致,每个层位均与明显的岩性分界面对应,T01 和 T02 在纵波剖面上未能识别。最浅层位 T01 深约 9 m,在横波剖面上呈连续强振幅特征(图 6 横波浅层放大图),对应为蓝灰色含钙质网纹的粘质砂土和下伏灰黄色并具有一定透水能力的粘质砂土分界面;T02 深约 20 m,对应粘质砂土、粘土与下伏粉砂之间的分界面,T03(深 24~28 m)对应粉砂和下伏粘质砂土的分界面,推测为全新统底;T09(深约 220 m)在纵波剖面上连续性好、振幅较强,对应砂质粘土和中砂的分界面,推测为上更新统底,上更新统岩性韵律性好、单层较薄、整体岩性较细,反射波整体为高频、中高连续和中强振幅特征,T04~T08 为其内部反射界面,主要为粉砂和粘土质砂、砂质粘土的分界面;T11(深约 330 m),呈中连续中振幅特征,对应粘质砂土和细砂分界面,推测为中更新统底,T10(深约 280 m)为中更新统上段(粘土为主)和下段(砂土为主)的分界面;T12(深 430~440 m)为中低连续中振幅特征,对应粘土、粘质砂和下伏粗砂的分界面,推测为下更新统底,下更新统起伏略大于上覆地层;T12 以深为新近系明化镇组,地层整体向南略有倾斜,首次出现了含砾粗砂,与上新世晚期的区域抬升作用有关。值得注意的是,在多数岩性相同的地层内出现了明显的地震波同相轴,该现象为岩土更细微变化(如孔隙度、含水饱和度、次级矿物等)的反映,也充分说明了本次地震探测的高分层能力。

纵波剖面 CDP 2500 位置(对应野外米桩为 3750)左右发育视倾向为北的正断层 F1,向下延伸错断了第四系底。可识别上断点终止于 60 m 深,向下终止于明化镇组(深约 570 m),由于断层的拖曳作用或断层陡坎地形影响,T05 层位波组已在断层位置出现了类似正牵引现象,说明该断层在 T05 上覆地层沉积后仍有可能在活动,但是由于分辨率限制,未发现该层位及以上地层有明显错断迹象,鉴于此,在更高分辨率的横波剖面上继续追踪该断层,发现 F1 断层在横波剖面上已错断 T04,可识别上断点深度约 30 m,未贯穿全新统底,推测该断层在全新世已停止活动。

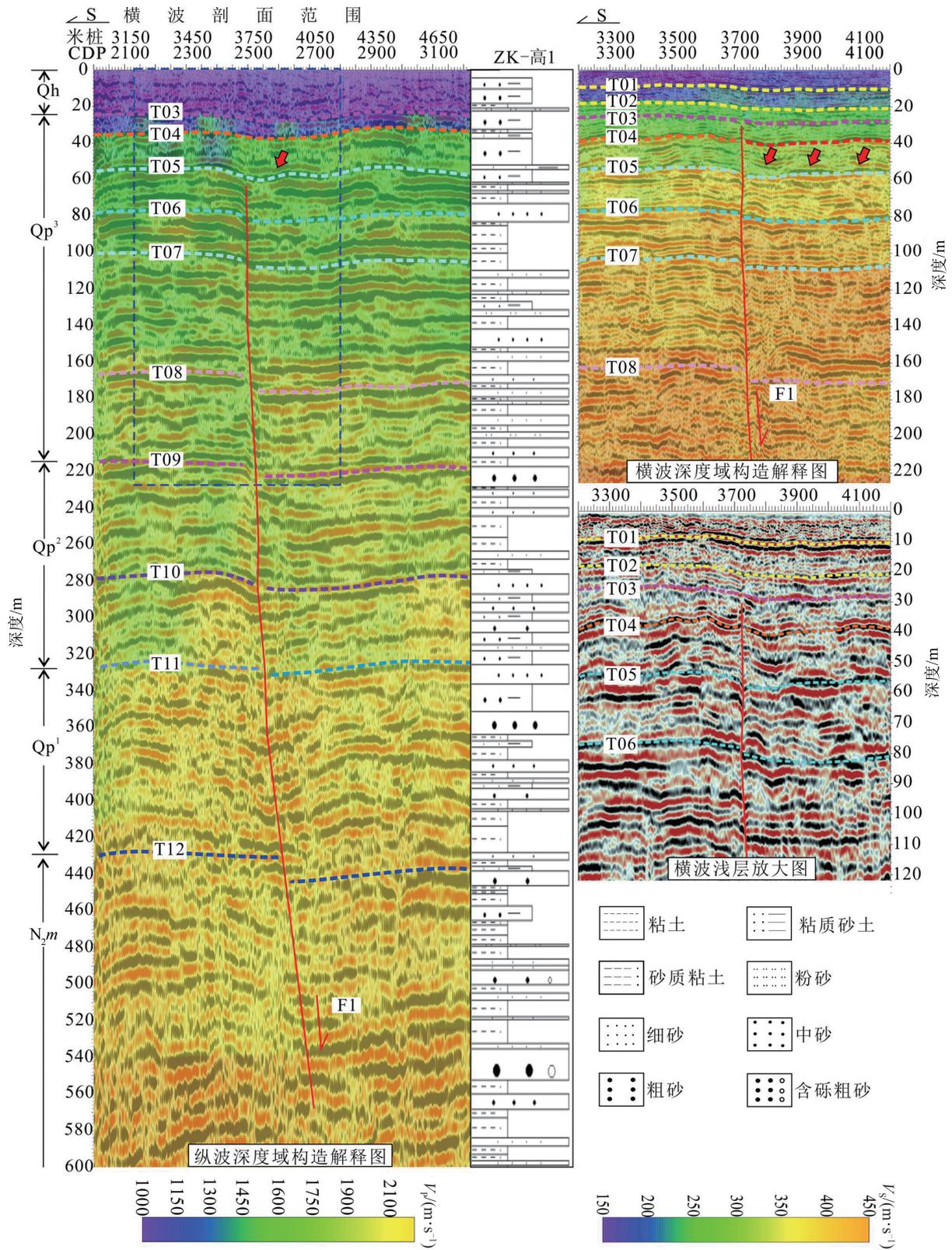


图6 纵横波深度域构造解释图(叠合层速度结构)

Fig. 6 Structure interpretation chart of P-S waves in depth domain

Qh—全新统; Qp¹—下更新统; Qp²—中更新统; Qp³—上更新统; N₂m—新近系明化镇组

此外,剖面揭示了层速度的变化,该速度是以解释的层位和断层构建的结构为框架,层位间的速度相当于该套地层的平均速度,层内具有横向变化的特征,该速度剖面也是用于最终时深转换的模型。剖面展示深度范围内,纵波层速度从 1000 m/s 随深度逐渐增加到 2150 m/s,0~220 m 深度范围内,横波层速度从 150 m/s 渐增到 450 m/s,40 m 深度范围内,纵横波速度增加均较快。浅表纵横波速度比值最大为 6.6,往深部随着压实程度的增加,逐渐减小到 4 左右。该区横波速度在 150~250 m/s 之间的覆盖层厚约 30 m,根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[21]对建筑场地要求划分为Ⅱ类,属于中软土,可能与该处一直长期处于白洋淀湖沼沉积环境有关^[19]。

4 结 论

(1)由于华北地区浅层地质结构的特殊性,以往纵波探测浅层盲区较大(通常大于 50 m),采用高精度纵横波联合探测技术,在保证较深地层成像效果的同时,将最浅可探测深度提高到 9 m 左右。

(2)在联合速度建模对比基础上,获得了试验区 0~600 m 第四系精细地层结构,反射波同相轴较好地反映了岩性的变化,与钻孔吻合度高,展现了良好的分层能力,揭示了活动断裂 F1 的空间展布特征,横波使该断裂可识别上断点从 60 m 深提高到了 30 m,其高达 1 m 的分辨率在浅表地质体识别中更具优势。

(3)根据横波速度结构划分建筑场地类型为Ⅱ类。该试验为雄安新区乃至其他覆盖区城市地下空间探测、安全评价等提供了重要的技术支撑和经验借鉴。

参 考 文 献

[1] 赵镡,姜杰,王秀荣.城市地下空间探测关键技术及发展趋势[J].中国煤炭地质,2017,29(9): 61-66.

- [2] 葛伟亚,王睿,张庆,等.城市地下空间资源综合利用评价工作构想[J].地质通报,2021,40(1): 1601-1608.
- [3] 刘婷,王寒梅,史玉金,等.特大型城市地下空间资源承载能力评价方法探索——以上海市为例[J].地质通报,2021,40(10): 1609-1616.
- [4] 徐明才,高景华,刘建勋,等.城市地震勘探[M].北京:地质出版社,2011.
- [5] 李华强,刘桂梅,王建新,等.高分辨率二维地震勘探在城市活动断层探测中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(2): 87-91.
- [6] 谢樊,王海燕,侯贺晟,等.中亚造山东带东段浅表构造速度结构:深地震反射剖面初至波层析成像的揭露[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(2): 584-596.
- [7] 徐明才,高景华,刘建勋,等.应用于城市活动断层调查的地震方法技术[J].中国地震,2005,21(1): 17-23.
- [8] 李燕,刘保金,鄯少英,等.利用地震折射和反射波资料研究银川盆地浅部结构和隐伏断裂[J].地球物理学报,2017,60(8): 3096-3109.
- [9] 周月玲,彭远黔,陈建强,等.河西务断裂活动性的综合探测研究[J].震灾防御技术,2018,13(3): 610-618.
- [10] 盯美青,胡泽安,李建宁,等.城市地下断裂构造可控震源地震勘探试验研究[J].物探化探计算技术,2017,39(4): 565-572.
- [11] 吴双红,白艳娟,夏媛媛,等.活动断层地质勘探中的浅层反射波方法与层析成像[J].能源与环保,2018,40(4): 73-82.
- [12] 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.
- [13] 商世杰,丰成君,谭成轩,等.雄安新区附近主要隐伏断裂第四纪活动性研究[J].地球学报,2019,40(6): 836-846.
- [14] 马岩,李洪强,张杰,等.雄安新区城市地下空间探测技术研究[J].地球学报,2020,41(4): 535-542.
- [15] 安好收,罗传根.浅层纵横波联合勘探在活动断层探测中的应用[J].物探与化探,2019,43(3): 543-550.
- [16] 王小江,张保卫,柴铭涛,等.纵横波联合勘探在浅层地震中的应用[J].物探与化探,2010,34(6): 824-835.
- [17] 陈相府,安西峰.地震横波勘探及其在浅层岩土分层中的应用[J].地球物理学进展,2007,22(5): 1655-1659.
- [18] 顾勤平,徐汉刚,赵启光,等.纵横波联合勘探应用于栉茶河断裂活动性的调查与研究[J].地震工程学报,2017,39(4): 774-780.
- [19] 易先进.河北白洋淀地区晚更新世以来环境演变研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2015.
- [20] 陈颢,黄庭芳,刘恩儒.岩石物理学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- [21] 吕国军,李红梅,康江,等.河北省地质钻孔资料分析[J].地震地磁观测与研究,2017,38(2): 125-131.