doi: 10.11720/wtyht.2026.1405
李志军. 黄土速度非均质性的微测井调查——以孝义地区为例[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 815-822. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1405
Li Z J. Microlog survey of velocity heterogeneity in loess: A case study of the Xiaoyi area, Shanxi Province, China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 815-822. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1405

黄土速度非均质性的微测井调查——以孝义地区为例

李 志 军
(山西省地质调查院有限公司, 山西 太原 030024)

摘 要: 以山西孝义地区一个典型黄土地表结构为研究对象, 详细介绍了井中激发、地面接收微测井方法的观测系统选取以及资料处理和解释过程, 得到了如下认识: 井中激发微测井的震源耦合效果良好, 初至波起跳清晰, 观测记录信噪比较高; 微测井资料由于井源距的原因, 需把激发点到接收点的倾斜路径校正成垂直方向的射线路径, 由校正公式可见井源距应适当小, 应用中以<10 m 为宜; 研究区内黄土结构具有明显的分层特征, 在断崖处邻近崩塌断面一侧的速度明显小于远离断面侧的速度, 且层内分布有垂向裂隙; 在横向上由于局部压实作用不同, 表现为纵波速度值随观测方位角的变化而变化, 整体分布呈类椭圆结构。研究结果表明, 利用井中激发、地面接收的微测井圆形排列观测系统, 不但可以调查黄土地层的低降速带速度与厚度, 还可以刻画各黄土层的速度非均质性特征。

关键词: 黄土地层; 微测井; 圆形观测系统; 低降速带; 纵波速度; 非均质性
中图分类号: P631.4; P631.8; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0815-08

0 引言

山西孝义黄土区地表地形起伏、沟壑纵横, 主要为松散的第四纪黄土, 受人工耕种影响, 具有表层结构松散、垂直节理发育、固结作用差等特点, 导致地震波吸收、衰减严重, 且不同方向上近地表的介质属性存在各向异性, 直接影响着地震资料的高精度成像和保幅处理[1-2]。因此, 准确调查该区及类似地区的近地表结构, 对于地震波的激发、接收以及资料处理都有重要的意义, 也能为该地区的黄土边坡灾害治理提供一些理论基础, 如根据速度的展布可以判断滑断面的位置。

目前常用的地表结构调查方法主要有浅层折射波法、层析反演法、瑞利面波探测法、微测井法。浅层折射波法是勘探中应用比较广泛的地表调查方法之一[3], 主要是利用高速顶界面的折射波信息来计算低速区域的速度和厚度分布, 缺点是排列长且对地形要求较高, 适用于地形平坦、均匀层状介质区域, 对于低速带厚度较大和速度反转区域应用效果不理想。层析反演法是通过拾取生产炮的初至进行层析反演的近地表调查方法[4], 适用于地表起伏及速度纵横向变化区域, 但初始模型的准确性直接影响着反演结果精度。瑞利面波法利用面波频散特征曲线, 通过定量解释得到地层的厚度及速度[5], 但由于地表干扰源较多, 不易提取准确的频散曲线。微测井法由于观测系统的独特性, 不受地表条件变化的制约, 垂向分辨率高达厘米级, 可以准确地调查表层结构[6]。微测井技术的发展主要体现在两个方面: ①施工方法及设备更新: 从常规微测井、双井微测井, 向横波、多波微测井发展[7-13]; ②应用范围拓展: 从单纯调查地表结构, 向地表衰减调查、各向异性分析、裂缝发育情况预测以及工程勘查(如基桩检测)等方面发展[14-16]。

为准确调查黄土地层的垂向及横向速度变化情况, 本文选择山西孝义地区一个典型崩塌断面作研究对象, 设计了 2 组井源距不同的微测井, 采用井中激发、地面圆形全方位观测系统接收, 经高程及初至

收稿日期: 2025-11-17; **修回日期**: 2026-02-05
基金项目: 国家自然科学基金项目 (41374131); 山西省煤基重点科技攻关项目 (MQ2014-01)
作者简介: 李志军(1990-), 男, 硕士学位, 工程师, 从事遥感及地震勘探理论及应用研究工作。Email: lzj900112@163.com

几何校正后，获得了该位置上速度在垂向及平面上的分布情况，并利用纵波方位属性技术分析了该位置的速度不均质分布特征及裂隙发育方位。

1　微测井观测系统及布置

1.1　研究区概况

研究区位于山西孝义，为典型的黄土覆盖区，其颜色呈黄色、浅红，岩性以粉土、黏土为主，具有明显层理结构，可分为上、下两部：下部为黄色—浅红亚黏土，层内孔隙较大，不具有明显层理结构，层中含多条棕红色埋藏土壤层，有钙质结核发育，整合于午城黄土剥蚀面上；上部为浅黄—黄色黄土，土质较松软，纵向节理发育。

图 1 为研究区内一个典型的黄土剖面，顶部平台大小约 300 m^2，灌木植被比较发育，断面高度 15 m 左右，由于崩塌原因，断面上可见有垂向裂隙发育，断面左侧是一条 V 型冲沟，右侧为黄土台阶，由断面岩性可见，大致分为 3 层：第一层土质为浅白色粉土，植物根系发育，为耕植土层；第二层为淡红色亚黏土，整体呈已楔形结构，层内裂隙较发育；第三层为褐色黏土层，土质比较密实，呈块状。

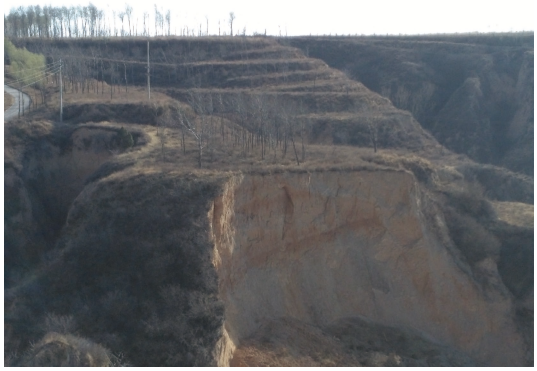


图 1　研究区地貌

Fig. 1　Geomorphology of the research area

为查明该断崖处速度变化趋势，设计了 2 组微测井和 2 条地震测线，施工范围位于图 1 中的顶部平台。

1.2　观测系统布置及采集方法

由于研究区地表松软，激发耦合效果差，施工选取井中雷管激发、地面检波器挖坑埋置接收的微测井方法，保证检波器与地面的耦合，尽量减少高频信号的衰减。地面检波器常见的安置方式有“十字形”“圆形”“扇形”3 种方式。

本次采用圆形观测系统，该观测系统的优点在于：①检波器在地面的安置方式更加灵活，可以根据实际施工中的需求增加或减少；②井中激发的方式，激发层位良好，面波压制效果较好；③相比于井下检波器接收施工方式，不会有因卡井而造成损失的情况，操作比较简便。

为了调查纵波在该黄土区的横向分布情况，采用的地面检波器圆形安置方式如图 2 所示。在圆周上均匀安置 16 个检波器，相邻检波点与圆心之间的夹角为 22.5°。地面圆形测线分两组，第一组采集半径为 5.7 m，第二组采集半径为 11.7 m，每个圆周上安置 16 个检波器，总计 32 道接收。检波器挖坑埋置，坑深 0.5 m。仪器记录因素为：采样率为 0.5 ms，记录长度 1 s，记录格式采用 SEG-D 数据格式，前方增益 12 dB，尽量保证深层弱信号。设计激发孔深穿透崩塌堆积层至以下 5 m，保证每个地质层位内有 2~3 个激发点。本次激发孔的深度为 22.5 m，按照 0.5 m 的炮间距进行激发，单次激发 2 个圆周上所有检波器全部接收。

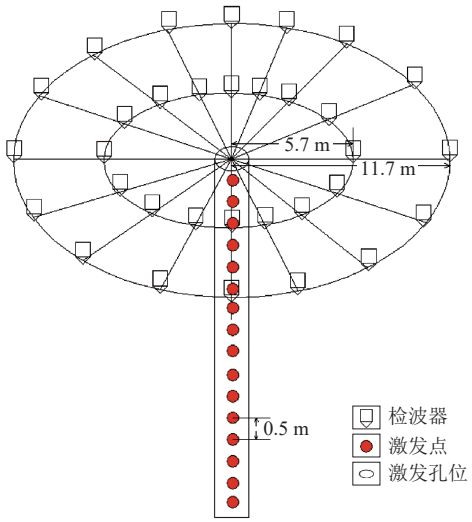


图 2　微测井施工布置示意

Fig. 2　Construction layout of micro-logging

激发位置遵循由下向上、均匀激发的原则，雷管依次从深到浅激发，深度在 0~2 m 范围内雷管数量为 2 发，2.5~9.5 m 内雷管为 3 发，10~19.5 m 内雷管为 4 发，20~22.5 m 内雷管为 5 发。

观测系统平面与地形关系如图 3 所示，小圆微测井的井源距为 5.7 m，大圆微测井的井源距为 11.7 m，孔口及检波点均在斜坡上，大圆微测井检波点 1-1 号距断崖面 0.5 m。

2　微测井数据分析

微测井资料处理的主要步骤为：①道集分选；②初至拾取；③高程及初至时间校正；④速度和厚度

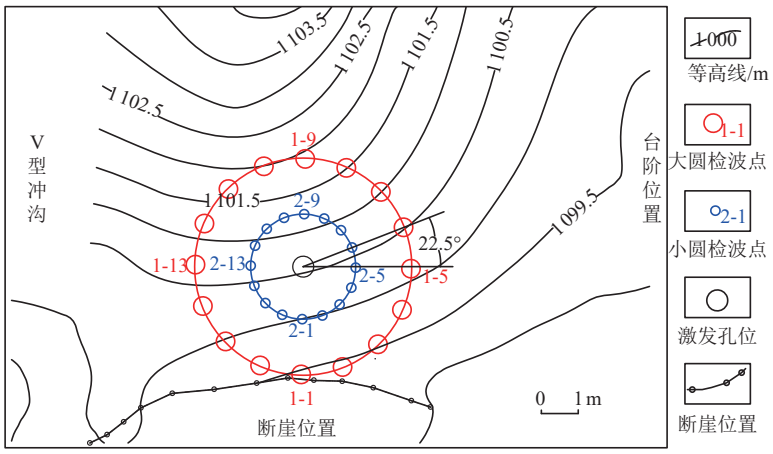


图 3　观测系统施工平面示意

Fig. 3　Construction plan of observation system

解释, 绘制 *t*-*h* 图或 *v*-*h* 图。

2.1　道集分选及定性分析

微测井数据的共炮点道集及共检波点道集见图 4。图 4a 为大圆上激发深度为 22.5 m 的共炮点道集, 图 4b 为大圆上邻近断崖的 1-1 号检波点处的共检波点道集。共炮点道集反映了井中激发点与地面圆形检波线接收的圆锥面上的地震波场信息, 而共检波点道集主要反映激发点、圆心、检波点所组成的三角形区域内的地震波场信息。

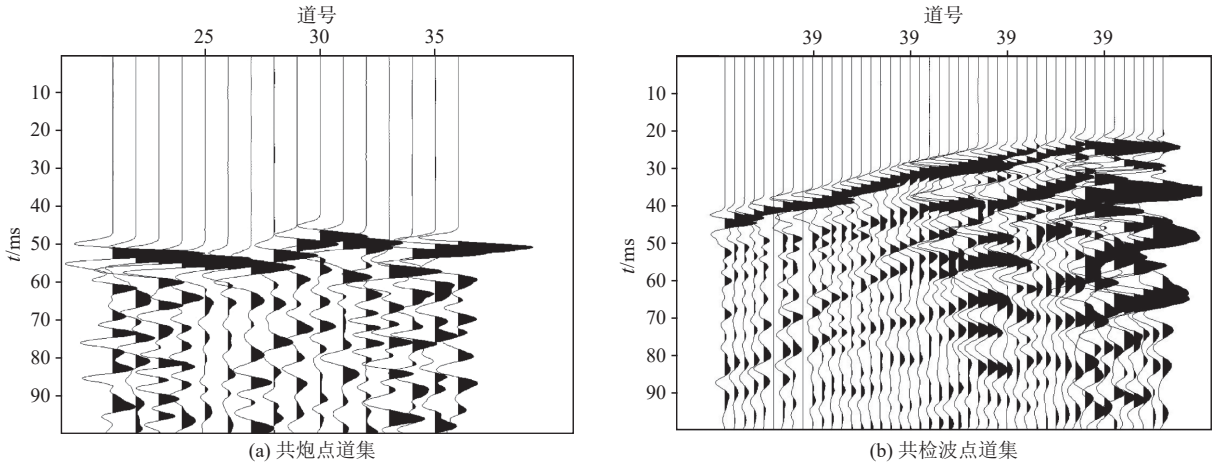


图 4　道集记录

Fig. 4　Gather records

图 4a 上 16 道记录的初至时间明显不同, 反映出圆锥平面上不同方向由于黄土层分布厚度和压实不同, 初至到达时间不一, 说明黄土层存在明显的速度非均质特征。图 4b 中, 井中等距的各激发点所形成的初至并非一直线形状, 而是呈现出分段特征, 说明射线穿过各个黄土分层的速度发生变化, 黄土层在垂向上表现出分层特征。

2.2　初至拾取

初至拾取是微测井处理中最基本和最重要的环节, 是计算速度的基础。在处理中采用软件自动拾取与人工微调相结合的方法, 因为浅层激发点的记录上干扰波较多, 自动拾取误差较大, 人工微调可以有效避免因软件误拾造成的误差; 同时, 剔除记录中的废道以及初至起跳不清晰的记录道。图 4 的道集记录初至波能量强、振幅大, 起跳点干脆、清晰, 保证了初至时间拾取的准确性。

2.3　初至时间及高程的几何校正

微测井记录由于存在井源距的原因, 从激发点到接收点的射线路径是一条斜线, 因此, 需利用简单的几何校正将倾斜的射线路径校正成垂直的射线路径。图 5 为本次微测井观测系统模型示意, 激发井及检波点都处在斜坡上, 所有的深度、时间等参照垂直于地面的参考系统。将井口高程作为参考系统高程, 则几何校正公式为:

$$T = t\frac{z_1 - z_2}{\left[(z_1 - z_2 + \Delta E)^2 + x^2\right]^{1/2}}。\qquad (1)$$

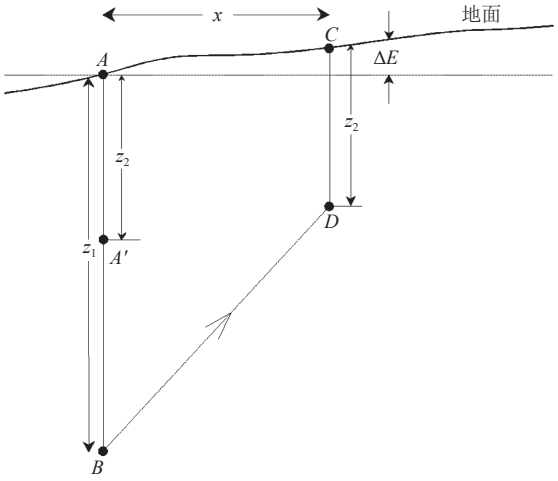


图 5　几何校正示意

Fig. 5　Schematic diagram of geometric correction

式中: T 是垂直旅行时间, 即从 B 到 A'的走时; t 是地震记录的初至时间, 需要校正成铅垂向的时间; x 为井源距; z_1 为炮点相对于参考地面的深度; z_2 为检波器相对于参考地面的埋置深度; ΔE 为检波器高程与井口的高程之差。

对图 5 所示的观测系统进行简化, 如 A 和 C 在地面上处于同一个高程, 点 C、D 重合作为检波点置于地面上, 即 ΔE=0, z_2=0, 即检波点在参考地面接收, 则微测井的垂直时间和实测微测井时间之间的关系可由式(1)简化为:

$$T = t\frac{z_1}{\left[z_1^2 + x^2\right]^{1/2}}。\qquad (2)$$

式(1)和(2)是近似几何校正公式, 其基本假设是在地层各速度界面上射线没有发生折射和多次反射, 同时也要求地层界面倾角较小。由式(2)可见, 在 $x \to 0$时, $T \approx t$, 在保证接收点不受激发干扰的前提下井源距应适当小, 一般小于 10 m 为宜。如:假设 z_1=30 m、x=10 m 时, 井源距和激发井深之比误差 $\delta \leqslant 5.1\%$, 因此该比值以不超过 3 为宜。本次施工检波器到井口的距离较小, 无强反射、折射界面, 地形相对高差不大, 检波器埋深较浅, 基本符合上述假设。

在实践中, 由于速度呈不均质性, 射线路径并非直线, 但本次施工激发点和接收点距离较近, 因此可以使用式(1)进行近似校正, 也可以使用式(2)进行较为粗略的校正; 如何选择应根据实际施工方式来确定。

2.4　速度计算

鉴于研究区处检波点布置平面高程不同, 高差约 2 m, 故将高于井口标高的检波点统一校正到井口标高, 而对于低于井口标高的检波点, 校正激发点深度到检波点高程。表 1 给出了 1-1 号检波点部分初至时间校正数值。

表 1　1-1 号点检波点初至时间校正(部分)

Table 1　First arrival time correction of detection points at No. 1-1

炮点真实深度/m	炮点校正深度/m	斜距/m	校正因子	纵波观测的旅行时t_h/ms	纵波垂直旅行时t_h/ms
0	−0.86			11.19	
0.5	−0.36			11.05	
1.0	0.14	6.00	0.02	11.12	0.26
3.0	2.14	6.37	0.34	12.52	4.20
5.0	4.14	7.29	0.57	14.27	8.10
7.0	6.14	8.58	0.72	17.69	12.65
9.0	8.14	10.11	0.80	20.42	16.44
11.0	10.14	11.78	0.86	23.15	19.92
13.0	12.14	13.54	0.90	25.59	22.94
15.0	14.14	15.36	0.92	29.09	26.78
17.0	16.14	17.22	0.94	31.68	29.69
19.0	18.14	19.11	0.95	34.41	32.67
21.0	20.14	21.01	0.96	37.34	35.79
22.5	21.64	22.46	0.96	39.44	38.01

初至经过校正后, 将其投影在时间—深度坐标系中, 得到透射波垂直时距曲线图。然后, 根据曲线斜率的不同分别识别出不同的速度分层, 拟合后的分段直线的斜率的倒数即为各对应地层的速度, 各分段直线的交点所对应深度轴的值即为该解释层厚度。

在进行线性拟合时, 根据两点确定一条直线的原理, 原则上参与拟合的点不少于 2 个, 但在实际中参与拟合的点越多, 拟合精度越高。图 6 为本次微测井内圆测线一检波点的垂直时距曲线。图 6a 为速度解释结果, 图 6b 为检波点接收的不同深度激发的校正后初至时间, 其拟合直线斜率的倒数即为该分层速度。由图可见, 在 22.5 m 黄土厚度范围内, 可划分为 4 个速度层, 第一层厚度约 4 m, 速度 354 m/s; 第二层厚度约 8.6 m, 速度 614 m/s; 第三层厚度约 5 m, 速度 714 m/s; 第四层厚度约 4.5 m, 速度 876 m/s。

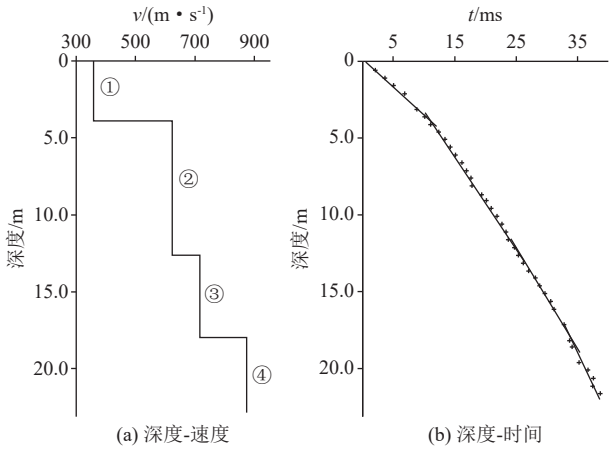


图 6　解释结果

Fig. 6　Schematic of interpretation results

3　黄土速度特征

3.1　垂向速度特征

根据内外圆形上各检波点的解释结果, 结合钻孔岩心(图 7)及断崖照片(图 1), 本研究区内黄土结构具有明显的分层特征。

第一层, 深度约 0~4 m, 纵波速度约 330~380 m/s。土质为浅白色粉土, 疏松, 未固结, 植物根系发育, 为耕植土层。

第二层, 深度 4~12 m, 速度约 400~560 m/s, 淡红色亚黏土层。浅部土质疏松, 速度偏低; 深部的淡红色亚黏土呈块状, 质地较硬, 速度偏高, 为马兰黄土。



图 7　激发井孔岩心照片

Fig. 7　Photo of excited wellbore core

第三层, 深度 12~18 m, 速度约 500~730 m/s, 红褐色黏土层。在约 12~13 m 的深度速度突变增大, 约 900 m/s, 岩性剖面可见钙质结核, 较硬且致密。各检波点处对该层的解释厚度不一, 可能与结核层平面及深度分布不均有关。

第四层, 18 m 以下至井底, 纵波速度约 700~930 m/s, 浅红色黏土, 呈块状, 较致密, 质地均匀, 结构比较稳定。该层为离石黄土的另一个亚层。

3.2　平面速度特征

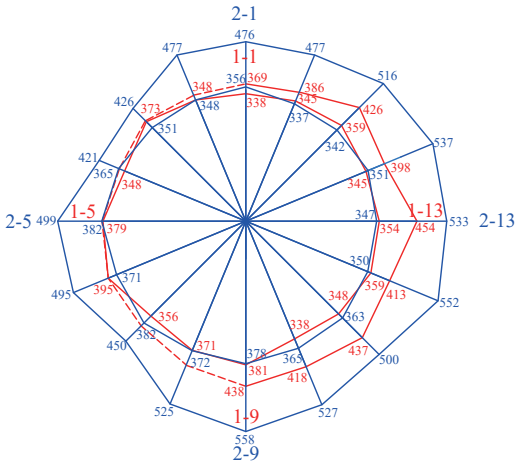
为更加直观地反映该黄土区横向分层内速度的不均质性变化趋势, 将各位置的速度解释结果拓展到同一平面内, 如图 8 所示。

图 8a 中红色虚线表示大圆在该区域未解释出速度分层。此图中大、小圆速度解释没有明显的特征, 究其原因: 第一解释分层深度约 4 m, 地表受人为耕种的影响, 破坏了黄土层原有的稳定结构, 非均质差异明显。

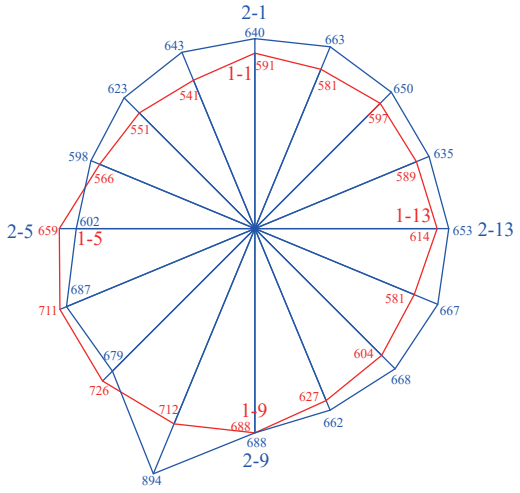
图 8b 中, 速度平面形状为一椭圆状, 长轴方向指向 1-7 至 1-15 方向, 大、小圆指示方向基本一致, 可认为是由于黄土层分布的厚度及压实程度不同所致。第二解释分层深度约 4~18 m, 由于崩塌地质作用的影响, 层内裂隙比较发育, 且邻断面一侧黄土结构比较疏松; 另外, 高速位置主要出现在断崖面内侧, 说明内侧局部压实、黄土体结构完整, 因而出现高速。

图 8c 的大、小圆解释基本一致, 这是因为第三解释分层深度在 18 m 以下, 黄土层受地表地质作用影响较小, 分布厚度及结构都比较稳定, 非均质差异较小。

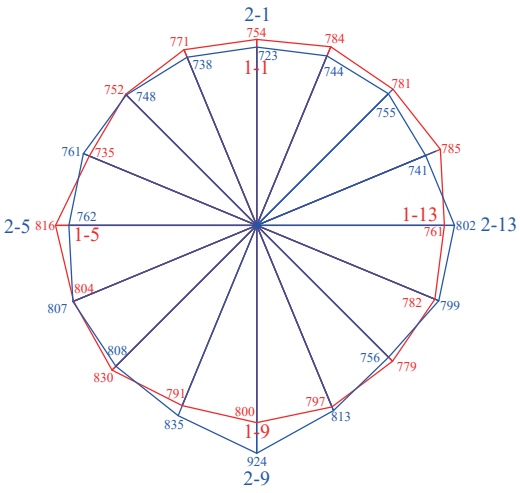
图 9 为 3 个解释分层的纵波速度等值线平面, 其相同点是在靠近断崖面位置(检波点 1-1)的速度明显小于远离断崖面的速度, 这是由于邻断面崩塌原因, 黄土层内垂向裂隙发育、结构疏松、速度低。3 个分层中, 第一分层等速度线方向与第二、三层明显不同, 第二分层与第三分层略有差异, 反映出垂向上各地层受断崖影响程度不同以及各层结构的差异性。另外, 断崖面左侧(检波点 1-13)的速度小于断崖面右侧(检波点 1-5)的速度, 这是因为断崖面右侧是黄土台阶, 左侧是黄土冲沟(距最近检波点约 5 m), 雨水冲蚀作用破坏了原有的沉积体系, 使边坡失稳, 形成湿陷、洞穴等构造体, 导致该位置速度变低。



(a) 第一解释分层



(b) 第二解释分层

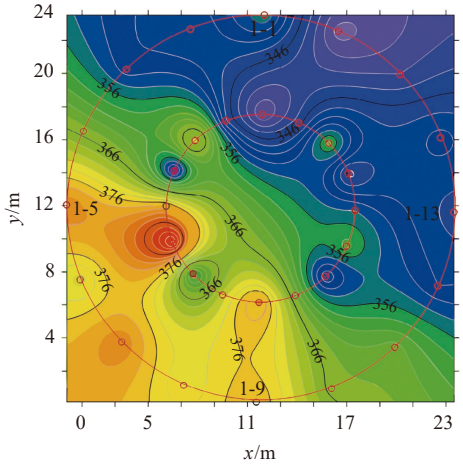


(c) 第三解释分层

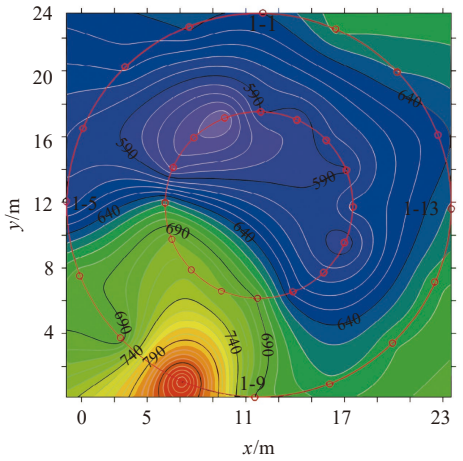
大圆解释分层　　小圆解释分层

图 8　大、小圆 3 个解释分层纵波速度对比

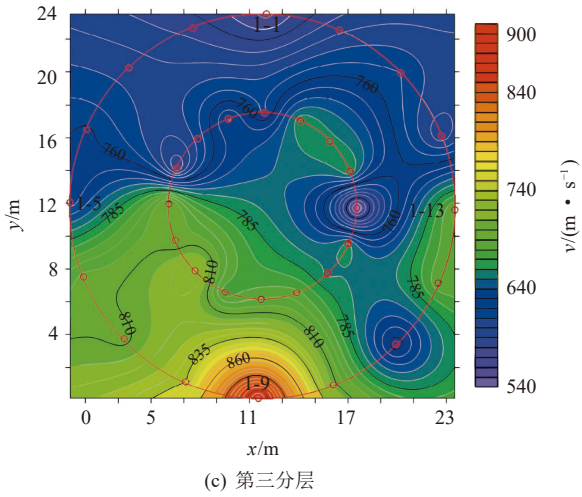
Fig. 8　Comparison of compressional wave velocities in three interpretation layer of large and small circles



(a) 第一分层



(b) 第二分层



(c) 第三分层

图 9　3 个解释分层的纵波速度等值线

Fig. 9　P-wave velocity contour map with three interpretation layers

4　结论

1)利用井中激发、地面接收的微测井圆形全方位观测系统，在地面同一圆周上，布置多道采集点，能够探测黄土层近地表速度的非均质性分布。

2)研究区黄土速度存在明显的垂向分层特征，纵波速度在垂向上分为 3 个部分：第一层厚度约 6~10 m，纵波速度约为 330~560 m/s；第二层厚度约

8~10 m, 速度约 500~730 m/s; 第三层深度在 18 m 以下, 速度达 700~930 m/s。

3)研究区黄土内部分布纵向裂隙, 由解释结果可见: 靠近断崖面的速度小于远离断崖面的速度, 断崖面左侧的速度小于断崖面右侧的速度。究其原因, 是邻断面由于崩塌作用, 裂隙裂缝比较发育, 结构较远离断面区域疏松。

由于常规微测井只能获取纵波速度, 所以不能对该研究区域中断裂、裂隙的分布做定量分析。后续可以开展三分量微测井工作, 进一步了解该区域黄土的物性参数及结构特征。

参考文献(References):

[1] 宋桂桥. 准噶尔盆地巨厚沙漠区地震勘探关键技术及其应用效果 [J]. 石油物探, 2019, 58(4): 600−612.
Song G Q. Key techniques of seismic exploration in the desert area with very thick low-velocity layer of Junggar Basin, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 600−612.

[2] 黄鹏, 殷厚成, 薛维忠, 等. 山前带复杂浅表层建模研究 [J]. 石油物探, 2019, 58(6): 837−845.
Huang P, Yin H C, Xue W Z, et al. Modeling of complex near-surface in piedmont zone[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 837−845.

[3] 秦晶晶, 刘保金, 许汉刚, 等. 地震折射和反射方法研究郯庐断裂带宿迁段的浅部构造特征 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(2): 505−516.
Qin J J, Liu B J, Xu H G, et al. Exploration of shallow structural characteristics in the Suqian segment of the TanLu fault zone based on seismic refraction and reflection method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(2): 505−516.

[4] 蔡杰雄, 王静波. 一种基于改进快速扫描法的多尺度近地表层析方法 [J]. 石油物探, 2019, 58(6): 819−827, 863.
Cai J X, Wang J B. A multi-scale near-surface tomography method based on an improved FSM[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 819−827, 863.

[5] 姜福豪, 李培明, 张翊孟, 等. 多道面波频散分析在实际大炮数据中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 17−24, 46.
Jiang F H, Li P M, Zhang Y M, et al. Frequency dispersion analysis of MASW in real seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(1): 17−24, 46.

[6] 金昌昆, 王延光, 尚新民, 等. 微测井与方位加权插值精细近地表速度建模技术 [J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(2): 257−265.
Jin C K, Wang Y G, Shang X M, et al. Near-surface velocity modeling based on micro-log and azimuth-weighted interpolation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2): 257−265.

[7] 沈鸿雁, 王鑫, 李欣欣. 近地表结构调查及参数反演综述 [J]. 石油物探, 2019, 58(4): 471−485, 540.
Shen H Y, Wang X, Li X X. Near-surface structure survey and parameter inversion review[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 471−485, 540.

[8] 戴海涛, 成剑冰, 王红博, 等. 复杂地表浅层速度建模技术研究及应用 [J]. 石油物探, 2020, 59(3): 336−343, 365.
Dai H T, Cheng J B, Wang H B, et al. A shallow velocity modeling technique for complex surfaces[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(3): 336−343, 365.

[9] 姚晓龙, 张永升, 齐鹏, 等. 面向复杂山前带的平滑地表 TTI 各向异性速度建模 [J]. 石油物探, 2020, 59(4): 539−550.
Yao X L, Zhang Y S, Qi P, et al. TTI anisotropic velocity modeling based on a smoothed surface for a piedmont zone[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(4): 539−550.

[10] 李志军. 三分量微测井技术应用研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
Li Z J. Research on application of three component micro-logging technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

[11] 王增玉, 李志军, 任华育. 基于三分量微测井技术的地表岩性调查研究 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(6): 121−123.
Wang Z Y, Li Z J, Ren H Y. Investigation and research on surface lithology based on three-component micro-logging technology[J]. Coal Technology, 2018, 37(6): 121−123.

[12] 李桂花, 朱光明. 利用三分量微测井技术调查表层纵、横波速度 [J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(2): 160−165.
Li G H, Zhu G M. Using 3-C uphole survey technique for surveying P-wave and S-wave velocity on surface[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(2): 160−165.

[13] 杨海申, 何庆华, 梁秀文, 等. VSP 三分量微测井技术在表层调查中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(1): 97−102.
Yang H S, He Q H, Liang X W, et al. Application of 3C VSP uphole survey technique in near-surface survey[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(1): 97−102.

[14] 蒋立, 刘宜文, 范旭, 等. 面向近地表品质调查的微测井采集及应用效果分析 [J]. 石油物探, 2020, 59(1): 23−30.
Jiang L, Liu Y W, Fan X, et al. Uphole survey for near-surface formation quality factor and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(1): 23−30.

[15] 孔凡勇, 谢安, 夏建军, 等. 山前砾石区表层 HTI 介质速度各向异性建模方法 [J]. 新疆石油地质, 2024(5): 604−610.
Kong F Y, Xie A, Xia J J, et al. A method of anisotropic velocity modeling for HTI medium in the surface of piedmont gravel zone[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024(5): 604−610.

[16] 夏常亮, 戴海涛, 李国强, 等. 黄土塬地区双井微测井近地表 Q 模型的求取及应用 [J]. 物探与化探, 2024, 48(3): 698−704.
Xia C L, Dai H T, Li G Q, et al. The calculation and application of a near-surface Q-value model based on dual-well micrologs for a loess tableland area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(3): 698−704.

Microlog survey of velocity heterogeneity in loess: A case study of the Xiaoyi area, Shanxi Province, China

LI Zhi-Jun

(*Shanxi Institute of Geological Survey Co., Ltd., Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: Focusing on the typical loess surface structure in the Xiaoyi area, Shanxi Province, China, this study elaborates on the geometry selection, data processing, and data interpretation of the microlog survey method with sources in the borehole and receivers at the surface, and achieve several findings. The microlog survey via in-borehole seismic wave excitation exhibits encouraging source-media coupling effects, clear first-break onset, and seismic records with high signal-to-noise ratios (SNRs). Given the presence of source-receiver offset in microlog survey data, the inclined ray path from the shot point to that the receiver point should be corrected to a vertical path. Based on the correction equation, the source-receiver offset should be less than 10 m in practical applications. The loess structure in the study area shows significant vertical stratification. At the cliff, the seismic velocity on the side near the collapse section is significantly lower than that on the side far away from the section, with vertical fractures distributed within the loess layers. Literally, the P-wave velocity varies with the observation azimuth due to heterogeneous local compaction, presenting a quasi-elliptical distribution pattern overall. Therefore, the circular-array geometry can enable the microlog survey to investigate the velocities and thicknesses of low-velocity zones in loess and to characterize the velocity heterogeneity across various loess layers.

Key words: loess layer; microlog; geometry; low-velocity zone; P-wave velocity; heterogeneity

(本文编辑: 叶佩, 沈效群)