

基于探地雷达的水库坝前淤积土沉积规律研究

王 韵¹, 王红雨¹, 常留成¹, 张志龙¹, 白晓飞²

(1.宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.宁夏水利水电工程局有限公司, 银川 750004)

摘要: 宁夏南部黄土丘陵山区水库除险加固工程中普遍采用“坝前淤积面加坝”工法进行施工, 而淤积层的分布规律对评价坝基稳定性至关重要。为勘察淤积土剖面分层情况和空间分布特征, 利用探地雷达(GPR)对固原市西吉县大沙河水库坝前淤积土进行探测试验。在选定的坝前淤积土探测区域内, 布设了 10 条测线, 首先确定了雷达探测最佳图像效果的叠加次数, 然后在所有测线上每隔 0.5 m (共计 794 个测点) 进行了探测。同时开挖深度为 1.5 m 的探槽观察淤积层剖面状况, 并在不同深度剖面上取土样进行室内基本物理性质试验。结果表明: 雷达探测的最佳叠加次数为 512 次; 雷达波谱图显示在深度为 0~2.5 m 范围内, 坝前淤积土有 6 层明显的沉积层理; 在深度为 4~9 m 范围内, 有清晰连续的河道河床轮廓, 各测线上淤泥的沉积厚度范围为 3.7~8.2 m; 在探槽深度约 50 cm 处可以观察到明显的砂质粉土—黏质粉土的层理, 与探地雷达在该位置的图像解析一致。探测试验为坝前淤积层沉降计算及工程处理措施提供了基础数据。

关键词: 探地雷达; 坝前淤积土; 沉积规律; 探槽观察与取样

中图分类号: TV93

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0152-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.021

Study on Sedimentation Regulation of Silted Soil in the Front of Reservoir Dam Based on GPR

WANG Yun¹, WANG Hongyu¹, CHANG Liucheng¹, ZHANG Zhilong¹, BAI Xiaofei²

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021;

2.Ningxia Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau Co. Ltd., Yinchuan 750004)

Abstract: In the reservoirs eliminating danger and reinforcement engineering in severe soil erosion area of the Loess Plateau in southern Ningxia of China, the construction technique of “raising earth dam from upstream deposited mud” is generally adopted. And the distribution rule of deposit layers is very important to evaluate the stability of the dam foundation. In order to investigate the profile stratification and spatial distribution characteristics of the upstream silted soil, the ground penetrating radar (GPR) was used to detect the silted soil in front of Dashuhe reservoir in Xiji County, Guyuan City. In the selected detection area of the silted soil in front of the dam, 10 survey lines were laid. First, the number of superimpositions for the best image effect of radar detection was determined, and then detection was carried out at 0.5 m intervals (a total of 794 detection points) on all test lines. At the same time, a 1.5 m deep trench was excavated to observe the profile of the silting layer. And soil samples were taken from different depth profiles for laboratory experiments of basic physical-mechanical properties. The results showed that the optimal number of superimpositions of radar detection was 512. Radar spectrum showed that there were six obvious sedimentary bedding layers in the range of 0 to 2.5 m. In the depth range of 4 m to 9 m, there was a clear and continuous outline of the river-bed profile, and the sedimentary thickness of the silt on each survey line ranged from 3.7 m to 8.2 m. Obvious sandy silt-clay silt bedding could be observed at the depth of about 50 cm in the trench, which was consistent with the image analysis of GPR at this position. These findings could provide a basis for the settlement calculation and engineering treatment measures of the silting layer in front of the earth-filled dam.

收稿日期: 2021-01-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41962016); 宁夏回族自治区重点研发项目(2018BFH03010)

第一作者: 王韵(1996—), 女, 重庆人, 主要从事水工结构研究。E-mail: wy-slime@foxmail.com

通信作者: 王红雨(1961—), 男, 宁夏银川人, 教授, 主要从事水工及岩土工程研究。E-mail: why.nxnts@163.com

Keywords: Ground Penetrating Radar; soil deposited upstream of the dam; sedimentary rule; observation and sampling of profile

由水库泥沙淤积问题导致的宁夏南部黄土丘陵区病险水库所占比例较高,而“坝前淤积面加坝”工法具有筑坝土方量少、对土坝原有建筑物影响小、工程造价低等优点,在西北地区病险水库的除险加固工程中得到广泛应用。因此,研究坝前淤积土的沉积规律和分布特征对于“坝前淤积面加坝”施工有十分重要的指导作用。传统的泥沙沉积规律研究主要借助于水文观测资料或人工剖面调查,如汪亚峰等^[1]采用坝地打竖井、泥沙层次分析及降雨匹配等方法研究了延安羊圈沟流域坝地沉积泥沙的颗粒特性及剖面分布规律;蒋凯鑫等^[2]以砭砂岩区皇甫川流域园子沟淤地坝为研究对象,采集坝地淤积剖面及沟间地、沟谷地表层样品,计算分析并反演其淤积过程,研究该坝对侵蚀泥沙的拦蓄作用;岳大鹏等^[3]、刘鹏等^[4]对黄土洼淤地坝进行坑采取样测定泥沙淤积样品的全量元素和¹³⁷Cs含量,研究沉积物元素分布特征及其反映的沉积环境信息,以及粗颗粒沉积与暴雨的关系;杨吉山等^[5]在对清水河流域淤地坝拦沙量实测资料进行统计分析的基础上,计算了淤地坝逐年拦沙量,并对淤地坝拦沙情况进行初步分析。上述水文观测资料或人工剖面的研究方法,受制于观测周期长、勘探深度浅、可视范围小以及扰动性强等不利因素的影响。

探地雷达是用高频电磁波来确定介质内部物质分布规律的一种地球物理探测方法,它利用宽带电磁波以脉冲形式来探测地表之下隐蔽物体或结构^[6-7],在地质、工程、水文、农业等诸多领域得到广泛应用^[8-11],其中也包括对土壤沉积规律的研究^[12-13]。于秀秀等^[14]对利用探地雷达探测新垦区土层厚度的方法、精度进行了试验研究;王升等^[15]采用不同频率天线的探地雷达进行喀斯特坡地土层厚度的探测,同时调查了影响探地雷达结果的因素,并建立不同自变量下的线性回归模型和GEP模型来提高土层厚度的预测精度;Botha等^[16]为了研究马普塔兰地区不同沙丘形态的内部结构,识别埋藏的沉积单元之间的地层关系,对沙丘和典型风积砂地层单元进行探地雷达调查;Dara等^[17]利用探地雷达绘制出英格兰塞文河一条支流的河床沉积物结构;Sambuelli等^[18]在意大利都灵北部通过水上探地雷达测试结果,研究探地雷达在估计水深、水量和沉积物情况等方面的性能;Siston^[19]利用探地雷达研究马里卡海岸中部的沉积层序。基于物探方法的探地雷达应用领域较广,可探测土层厚度、土壤分层、沉积物分布等情况,尤其是能

有效快捷进行水下沉积物的探测。

探地雷达方法属于无损探测技术,具有探测分辨率高、抗干扰性强、快捷方便等优点,可以用来调查坝前淤积土的特性。目前尚无在宁南山区水库坝前淤积土探测的应用案例。本文以宁夏固原市西吉县大沙河水库坝前淤积土为研究对象,采用探地雷达进行试验,并开挖探槽实地观察后,取土样进行室内物理试验。在分析地质雷达探测结果的基础上,结合淤积土物理参数和现场实际情况,阐明该水库坝前淤积土的沉积规律及空间分布特征,以期“坝前淤积面加坝”工法中淤泥层的沉降计算等方面提供准确的参考资料。

1 研究区概况与试验方案

1.1 研究区概况

试验地设在宁南山区固原市西吉县新营乡大沙河水库(105.57°E,36.18°N),距县城西北约31.5 km,属祖厉河流域支沟,坝址以上流域面积5.1 km²,是一座以农田灌溉、兼顾交通与防洪的小(二)型水库。水库流域属温带半干旱地区,大陆性季风气候,多年平均气温4.5℃,多年平均降水量400 mm,降水主要集中在7—9月;多年平均水面蒸发量(E601型)980 mm,干旱指数2.5。流域多年平均径流深18 mm,多年平均径流量9.2万m³,50%,75%,90%,95%年径流量分别为8.1万,5.0万,3.0万,2.2万m³。水库以上流域输沙模数4800 t/km²,多年平均输沙总量2.45万t。设计洪水(P=5%)洪峰流量及洪水总量分别为19.9 m³/s,9.4万m³;校核洪水(P=0.5%)洪峰流量和洪水总量分别为44.1 m³/s和20.8万m³。

水库经多年运行,淤积非常严重,输水建筑物老化失修,2011年实测水库淤泥面到坝顶约为2.0 m,防洪标准不能满足200年一遇校核标准。因此,在2015年对该坝采用坝前淤泥面上加坝的施工方案,进行除险加固。新加坝坝轴线距原坝轴线45 m左右,设计新加坝体8.3 m,加坝后最大坝高20.6 m,加坝后总库容83万m³。加坝后坝顶宽5.0 m,上游坝坡坡比为1:3.0,下游坡比为1:2.5。

1.2 试验设计

课题组于2020年10月22—24日前往大沙河水库现场踏勘,选定坝前淤积层探测试验范围,利用探地雷达进行探测试验。

1.2.1 地质雷达探测方案 采用加拿大生产的pulse EKKO PRO探地雷达,天线频率为100 MHz,

数据采集软件为 Data Acquisition Programme。探地雷达主要测量参数设置为:雷达波速 0.1 m/ns,时间窗口 500 ns,天线间距 1 m,采样点距 0.5 m。

在大沙河水库坝前淤积面,距坝踵 100 m,河流沟谷处,选择地势相对平坦,植被较少,对探测影响较小,且淤积情况明显的区域进行探测试验。现场利用皮尺和长绳布置 10 条测线,其中测线 1 到测线 9,每条测线长度 32 m,测线间距 2 m,形成 32 m×16 m 的平面;测线 10 是沿沟谷中线,垂直坝轴线的 1 条长度 109 m 的测线,便于了解更多顺沟道水流方向淤积情况(图 1)。



图 1 测线布置示意

探测步骤为:(1)将地质雷达系统中调查类型设置为反射,对测线 1 分别进行 4 次不同叠加次数的探

测,叠加次数为 64,128,512,1 024;(2)现场观察控制面板中的波谱影像,确定可达到探测要求的叠加次数,后面的探测均用该叠加次数;(3)对测线 2~测线 10 依次进行探测,共得到 13 个探地雷达剖面,其中剖面 1~剖面 4 均为测线 1 的剖面。

1.2.2 探槽开挖与取样 在测线 10 靠近坝踵端开挖深度为 1.5 m 的探槽,观察剖面显示砂质粉土—黏质粉土互层沉积,其中砂质粉土层的厚度普遍大于黏质粉土层的厚度。利用米尺在该探槽深度 0—60 cm 剖面上定位判读每层淤积土的深度和厚度,自上而下分层采集原状土样,共取 8 层土样,用环刀和铝盒在每层土各采集 3 个样,共 48 个样。

1.2.3 土样室内试验 通过室内试验得到该坝前淤积土探槽剖面不同深度的土壤性质参数。按照 GBT 50123—2019《土工试验方法》试验操作规范,采用环刀法、烘干法、标准固结试验法分别测定土样的密度、含水率和压缩系数。然后利用 BT-2003 型激光粒度分布仪测量土壤粒径的体积百分比,每个样品测定时间为 6 min,相对误差<1%。每个试验均设 3 组平行试验,最终结果取平均值(表 1)。

表 1 坝前淤积土不同深度剖面的土壤性质参数

剖面 深度/cm	土层	厚度/ cm	黏粒平均含量 (<0.002 mm)/%	粉粒平均含量 ($0.002\sim0.05$ mm)/%	砂粒平均含量 (>0.05 mm)/%	干密度/ ($g\cdot cm^{-3}$)	含水率/%	初始 孔隙比	压缩系数/ MPa^{-1}
0—5	砂层	5	8.94	69.50	21.56	1.518	31.2	0.784	0.455
5—8	黏层	3	13.69	68.78	17.53	1.420	34.1	0.908	0.488
8—10	砂层	2	7.42	72.86	19.72	1.448	33.6	0.871	0.452
10—15	黏层	5	15.59	60.03	24.38	1.410	33.9	0.921	0.490
15—31	砂层	16	4.01	64.56	31.43	1.461	29.2	0.853	0.349
31—38	黏层	7	10.38	72.40	17.22	1.386	35.4	0.955	0.948
38—50	砂层	12	7.24	63.48	29.28	1.533	29.5	0.766	0.468
50—60	黏层	10	10.41	70.98	18.61	1.331	42.6	1.037	1.075

1.3 雷达探测数据处理

采用探地雷达数据处理软件 EKKO project 对采集的数据进行处理来获得探地雷达波谱图像。在进行实地探测时,受探地雷达发射机和接收机之间空间邻近性以及地面电性质的影响,发射信号可能会引发缓慢衰减的低频波,叠加于高频反射波之上,对图像分析造成干扰,需对图像进行滤波处理。同时为了反映出清晰准确的信息,通过增益调适的处理方式,来选择最佳的探地雷达图像。

2 结果与分析

2.1 淤积土基本物理特性

由室内试验得到的 0—60 cm 土样基本物理力学参数见表 1。土壤粒径组成中粉粒含量超过全重 50%、黏粒含量不超过全重 10%的称为砂质粉土;粉

粒含量超过全重 50%、黏粒含量超过全重 10%的称为黏质粉土。各土壤剖面不同沉积层粒径组成均以粉粒(0.002~0.05 mm)为主,砂粒(>0.05 mm)次之,黏粒(<0.002 mm)最少。其中粉粒百分含量均超过 60%,其变动范围为 60.03%~72.86%,均值为 67.82%。除粉粒在剖面分布较均衡外,黏粒和砂粒在剖面各深度处均呈锯齿状变化,这与张玮等^[20]研究坝地沉积泥沙剖面的粒径变化规律得出的结论一致。从表 2 可以看出,各粒径在整个剖面的变异系数大小依次为黏粒>砂粒>粉粒,黏粒和砂粒变异系数较大,说明其在搬运或沉积过程中分选性较差,这也与粉粒含量所占比例大、黏粒含量所占比例小有关。

研究区域的砂质粉土层和黏质粉土层平均含水率差异明显,黏质粉土层平均含水率大于砂质粉土层

平均含水率。随着土壤剖面深度的增加,黏质粉土层平均含水率增大,砂质粉土层平均含水率无明显变化。剖面深度 38—50 cm 砂质粉土层平均含水率为 29.5%,剖面深度 50—60 cm 黏质粉土层平均含水率为 42.6%,2 个土层平均含水率变化幅度大,剖面深度 50 cm 处是该 2 个土层的分界线,其分层明显。随土壤剖面深度的增加,黏质粉土层的压缩系数增大,这与其平均含水率逐渐增大有关。剖面深度 31—38,50—60 cm 黏质粉土层的压缩系数均大于 0.5 MPa^{-1} ,属于高压缩性土,这与其高孔隙比、高含水量等特点有关。

表 2 坝前淤积土剖面土壤各粒径含量的描述统计

颗粒组成	土层数	平均值/%	标准差	变异系数
黏粒(<0.002 mm)	8	9.71	3.70	0.38
粉粒(0.002~0.05 mm)	8	67.82	4.33	0.07
砂粒(>0.05 mm)	8	22.47	5.42	0.24

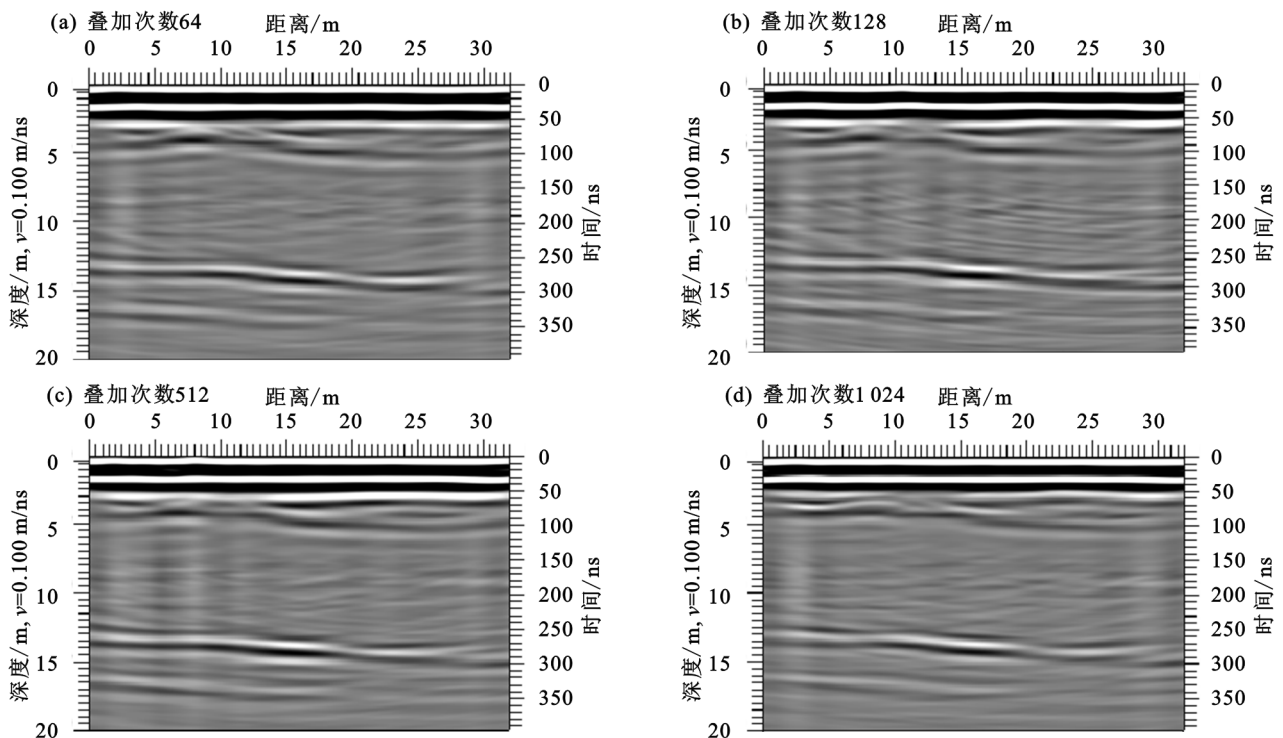


图 2 测线 1 不同叠加次数的地质雷达波谱图

2.2.2 坝前淤积土沉积空间分布特征

(1)剖面分层情况。对探测结果进行高通处理,使浅层土壤波谱图像更清晰,其中指数补偿增益起始值设为 10,最终增益设置为 10 000,衰减率为 6.5。沿土壤剖面纵向观察,能够辨析深度 10 m 以内的土层信息,与实地开挖的探槽剖面进行对比,结合土壤物理特性结果对淤积土分层情况进行分析。实地开挖的探槽在深度 0—60 cm 范围内,共有 8 层厚度不同的砂质粉土—黏质粉土的层理,从图 3a 可以清晰地观察到在土层深度为 50 cm 时存在明显的分层界线。同时,测线 10 的波谱图像中在深度 0—60 cm 范

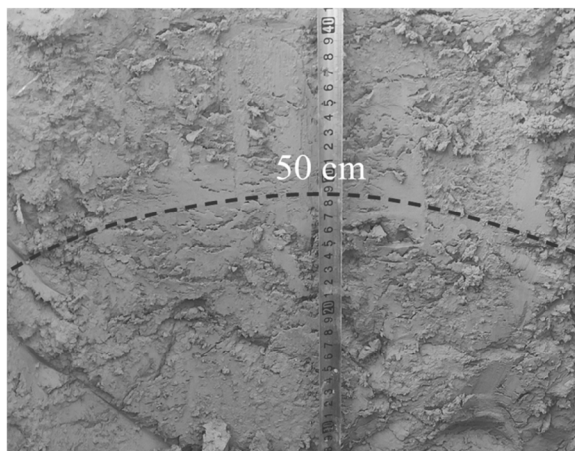
2.2 探地雷达探测结果

2.2.1 确定最佳叠加次数 在探测现场,通过系统设置改变雷达探测的叠加次数,叠加次数越多探测效果越好,但是探测速度越慢。由于探测数量和系统计算量较大,过高的叠加次数会造成系统反应缓慢和不必要的消耗,因此选择正确的叠加次数非常重要。为研究该坝前淤积土最合适的探测叠加次数,对测线 1 进行叠加次数分别为 64,128,512,1 024 的探测。对探测结果进行图像处理,其中指数补偿增益起始值设为 4,最终增益设置为 1 500,衰减率为 2。从图 2 可以看出,波谱图像的左侧是深度坐标,单位为 m,右侧坐标为电磁波的双程走时,单位 ns,横坐标为测点距离。叠加次数为 64,128 的图像不够清晰,毛躁较多。叠加次数为 512,1 024 的图像清晰,波形质量较好。为达到探测效果佳且效率高的目的,本次系统设置叠加次数选择 512 次进行探测。

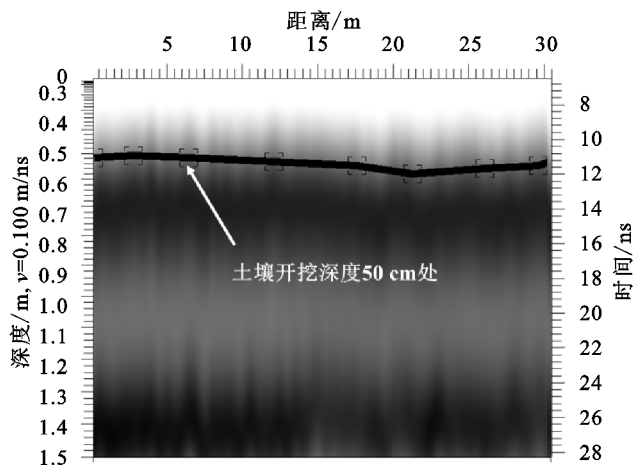
围内,只在 50 cm 处出现平直的反射波面(图 3b),这归因于该处土层平均含水率变化幅度较大,土壤介电特性发生明显变化^[21]。说明探地雷达图像结果能较好地反映淤积土的分层特征。由图 4 可知,测线 2~测线 9 在深度 1.6 m 处均有强烈的平直反射波面,这可能是由于该处土层含水率和黏粉粒含量相对偏低,对电磁波信号的衰减作用相对较弱^[22-23]。总体而言,高通处理下土层深度 0—2.5 m 的辨识度高,共有 6 层分界明显的土层。土层深度 2.5—4 m 左右反射界面较为模糊,说明电磁波在该深度以上的土层中衰减剧烈,致使难以判断该处的波谱特性。4—10 m 反射

波和浅层波形不同,且反射程度强,推测该区域是与浅层不同的物质。沿测线走向横向观察,可从测线 2~测线 10 土壤剖面波谱影像看出,在 0—2.5 m 浅

层的土层分布较均匀,说明后期沉积泥沙的淤积面有趋平的倾向,这与李勉等^[24]研究淤地坝泥沙沉积规律得出的结论一致。



(a) 土壤开挖剖面



(b) 测线10波谱

图 3 土层深度 50 cm 处探槽剖面和波谱

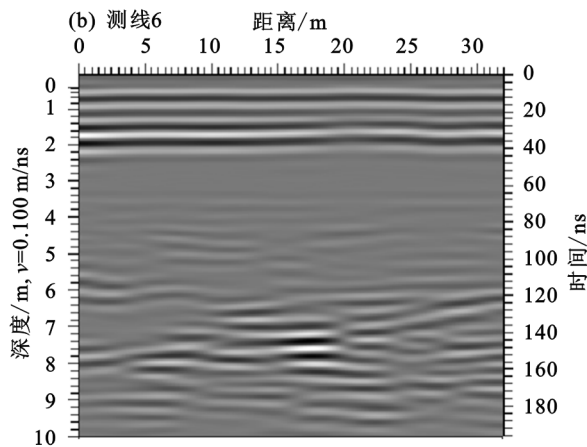
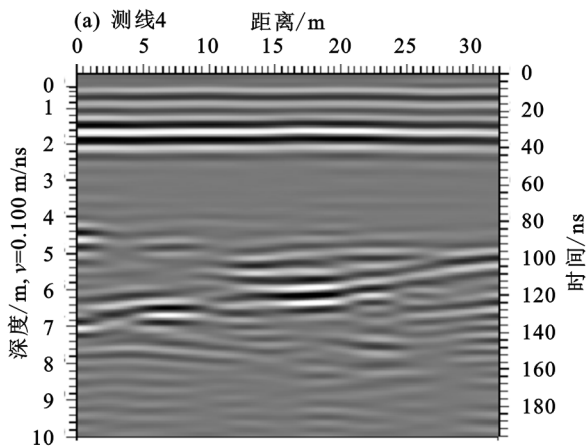


图 4 高通处理的典型测线波谱

(2) 淤积土厚度情况。通过低通图像处理方法,得到更清晰的深层土层波谱图像来研究 4—10 m 淤积土层的情况。其中指数补偿增益起始值设为 10,最终增益设置为 2 000,衰减率为 2。从图 5 可以看出,在土层剖面深度 4—10 m 范围内有明显的反射波影像,说明该界面上下介质的介电常数差异较大。查阅《西吉大沙河水库除险加固改造工程初步设计报告》可知,土坝上游库区河床中分布着含有砂及少量壤土充填的未完全胶结的角砾岩,厚度约 1.7 m,砾石成分为泥岩和泥灰岩,砾石呈亚棱角形和片状。由于淤积土和岩石的介电常数不同,岩石的电磁波速比淤积土大,电性差异大,因此波谱图中该处有强烈的反射波面^[25-26],故推测该处是修建水库前的河道河床。在该反射波面以上土壤即为因河流冲刷等形成的坝前淤积土。根据测线 2~测线 10 剖面波谱图可得到研究区域淤积土的具体厚度。

测线 2~测线 9 的典型波谱图见图 5。淤积土厚度与不同位置的关系见图 6。各剖面淤积土厚度变化不

同,其原因主要是受河床影响和淤积土沉积过程中的复杂性和不均匀性。从图 6a 可以看出,测线 2~测线 7 在沿测线方向淤积土厚度呈明显的下降趋势,且下降趋势相似,即越靠近坝体的沉积厚度越大,这说明泥沙沉积过程中,各个阶段沉积的效果较一致。测线 7 在距原点 0 m 处,淤积土沉积厚度最大,达到 8.2 m;测线 2 在距原点 30 m 处淤积土沉积厚度最小,仅 3.7 m。测线 8 和测线 9 在距原点 0 m 处的沉积厚度最小,距原点 25 m 处为最大,说明淤积土沉积虽然有一定的规律,但因为受多种因素的影响,表现出非均一性。由图 6b 可知,在垂直测线方向各剖面,淤积土厚度的起伏趋势相似,主要趋势在距原点 2 m 处淤积土沉积厚度最小,沉积厚度随距离的增大而增厚,即靠库区左岸的淤积土较靠右岸的淤积土薄。

测线 10 的探地雷达波谱图像显示,在距离 0—30 m 处,无明显的反射波影像,应该是该位置的含水率较高,影响了探测;在距离 30—109 m 处,有明显的强反射波影像,该影像连续且完整,起伏程度不一

致,符合河床特性,推测是修建水库前河道河床轮廓(图 7)。据此可了解坝前淤积土顺沟道水流方向淤积情况。在测线距离 60 m 处淤积土层最薄为 6 m,在 77 m 处淤积土层最厚达到 7.9 m,即测线距离 30—109 m 内淤积土厚度范围为 6.0~7.9 m。根据

勘探资料显示,该地区属丘陵地貌,沟谷呈不对称的“U”形,两侧沟壁较陡,沟底平坦。沟谷较长,河曲发育,沟底两侧洪水冲刷的痕迹明显。分析认为,淤积土厚度明显的变化特点除与原河床本身形态有关,还与沟谷两侧地形的差异有关。

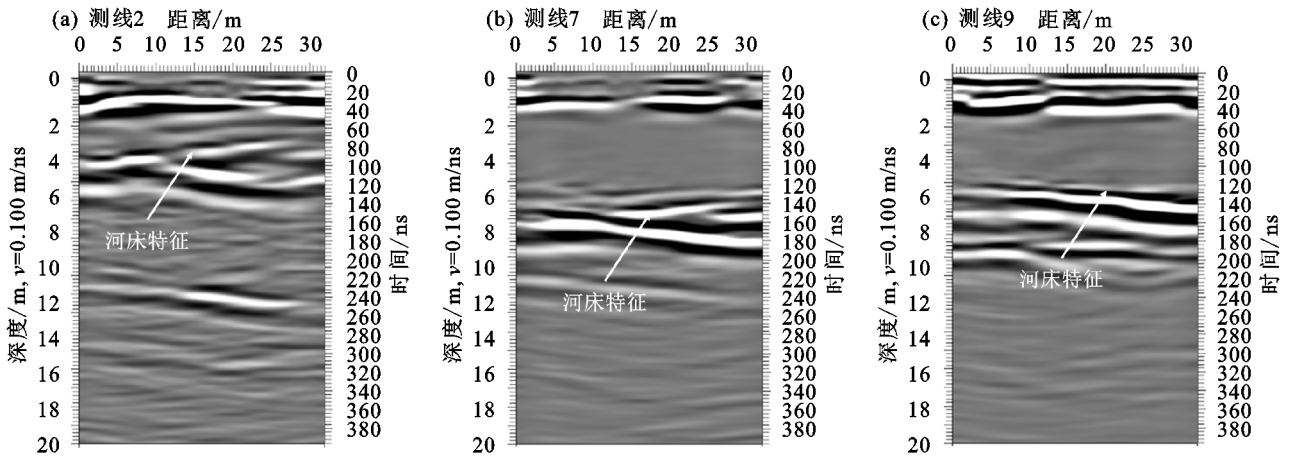


图 5 低通处理的典型测线波谱

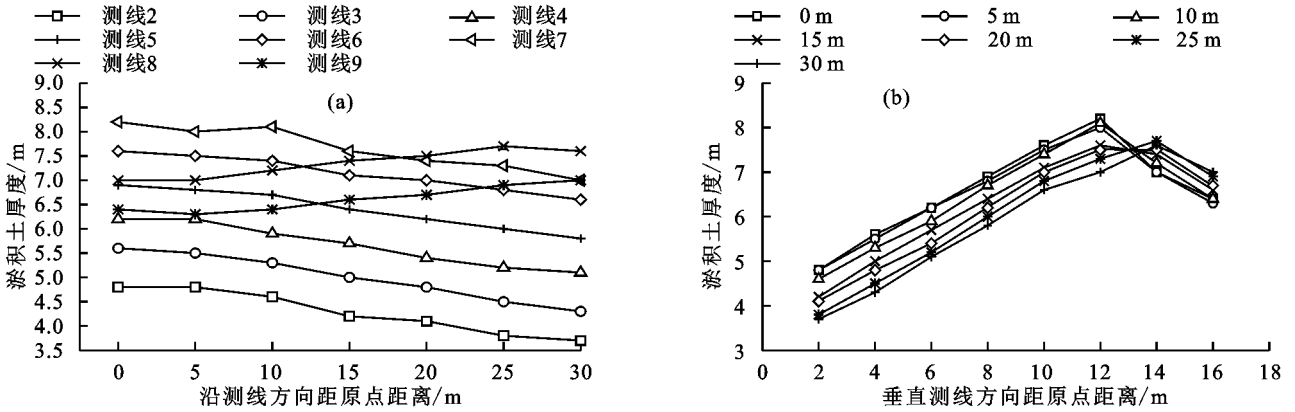


图 6 不同位置的淤积土厚度

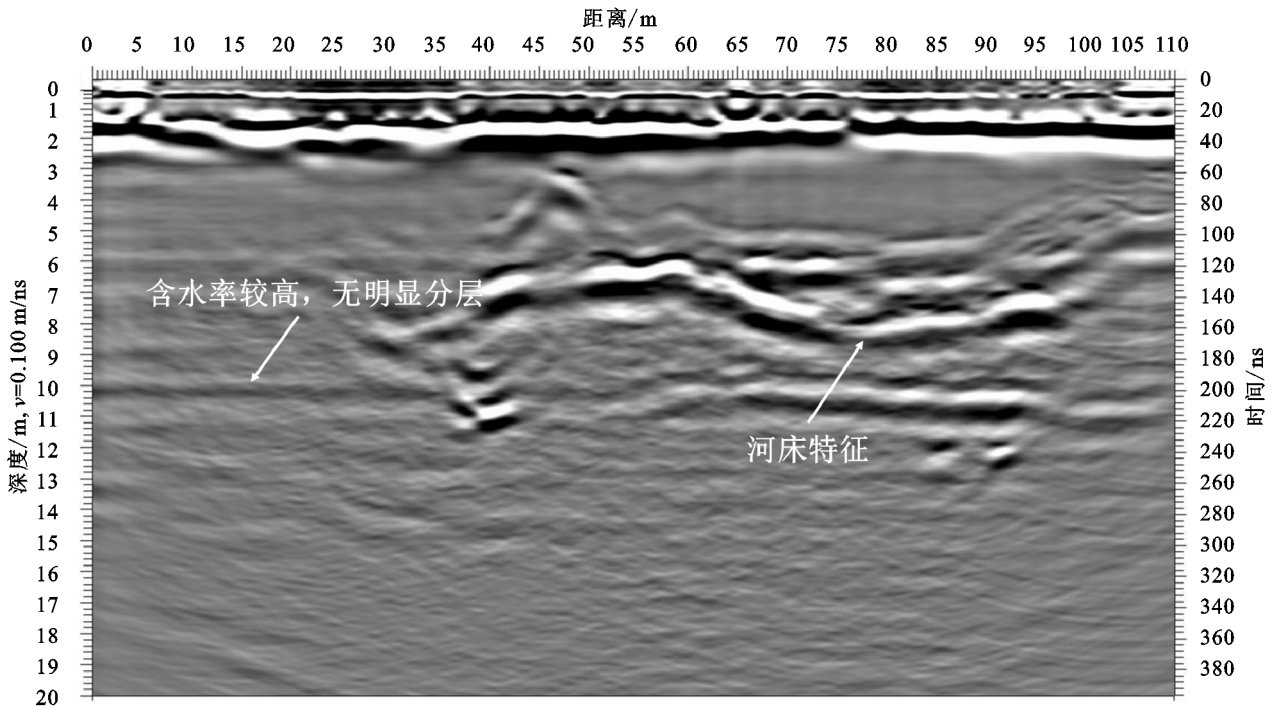


图 7 测线 10 波谱

3 结论

(1)100 MHz 频率探地雷达适宜于坝前淤积土沉积规律的调查研究,系统设置叠加次数选择 512 可达到探测坝前淤积土的最佳效果,在保证图像波形质量的同时探测效率较高。

(2)土层深度为 0—2.5 m 范围内,共有 6 层分界明显的土层;土层深度 4—10 m 范围内有强烈的反射界面,在该界面上下介质的介电常数差异较大,推测该处是修建水库前的河道河床轮廓,河床上方为多年沉积的淤积土。

(3)研究区坝前淤积土厚度范围为 3.7~8.2 m。沿测线方向淤积土厚度主要呈下降趋势,且下降趋势相似,即越靠近坝体的沉积厚度越大;沿测线垂直方向淤积土厚度呈先上升后下降趋势,即靠库区左岸的淤积土较靠右岸的淤积土薄。

(4)实地开挖 1.5 m 深的探槽,在剖面深度 0—60 cm 范围内共发现有 8 层明显的砂质粉土—黏质粉土的沉积层理,剖面深度 50 cm 处分界明显,界线上下土层厚度相对较厚。同时在波谱图中,土层深度 50 cm 处有明显的反射界面,即探地雷达图像结果能较好地反映淤积土的分层特征。

参考文献:

- [1] 汪亚峰,傅伯杰,陈利顶,等.黄土高原小流域淤地坝泥沙粒度的剖面分布[J].应用生态学报,2009,20(10):2461-2467.
- [2] 蒋凯鑫,于坤霞,李鹏,等.砒砂岩区典型淤地坝沉积泥沙特征及来源分析[J].水土保持学报,2020,34(1):47-53.
- [3] 岳大鹏,袁晓宁,李奎,等.陕北子洲黄土洼淤地淤积剖面元素分布特征分析[J].干旱区地理,2014,37(5):875-882.
- [4] 刘鹏,岳大鹏,李奎.陕北黄土洼淤地坝粗颗粒沉积与暴雨关系探究[J].水土保持学报,2014,28(1):79-83.
- [5] 杨吉山,张晓华,宋天华,等.宁夏清水河流域淤地坝拦沙量分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):122-127.
- [6] 邓涛,李志忠,靳建辉,等.探地雷达在福建漳浦海岸抛物线沙丘沉积构造探测中的应用[J].中国沙漠,2015,35(4):882-889.
- [7] Bennett M R, Cassidy N J, Pile J. Internal structure of a barrier beach as revealed by ground penetrating radar (GPR): Chesil beach, UK[J].Geomorphology,2009,104(3/4):218-229.
- [8] 白旸,王乃昂,何瑞霞,等.巴丹吉林沙漠湖相沉积的探地雷达图像及光释光年代学证据[J].中国沙漠,2011,31(4):842-847.
- [9] Zhang J, Lin H, Doolittle J. Soil layering and preferential flow impacts on seasonal changes of GPR signals in two contrasting soils[J].Geoderma,2014,213:560-569.
- [10] 周广行,朱清科,任正龔,等.基于 GPR 的陕北黄土区

河北杨粗根分布特征研究[J].水土保持学报,2016,30(2):346-351.

- [11] Al-Qadi I L, Lahouar S. Measuring layer thicknesses with GPR-Theory to practice [J]. Construction and Building Materials,2005,19(10):763-772.
- [12] Xu X, Wang F, Xin K, et al. Soil layer thickness detection in land rearrangement project by using GPR data[C]// International Conference on Ground Penetrating Radar. IEEE, 2012.
- [13] Lindhorst S, Betzler C, Hass H C. The sedimentary architecture of a Holocene barrier spit (Sylt, German Bight): Swash-bar accretion and storm erosion[J].Sedimentary Geology,2008,206(1):1-16.
- [14] 于秀秀,马兴旺,迪力夏提,等.探地雷达在土层厚度调查中的试验研究[J].土壤学报,2011,48(4):874-878.
- [15] 王升,陈洪松,付智勇,等.基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测[J].土壤学报,2015,52(5):1024-1030.
- [16] Botha G A, Bristow C S, Porat N, et al. Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa[J].Geological Society London Special Publications,2003,211(1):29-46.
- [17] Dara R, Kettridge N, Rivett M O, et al. Identification of floodplain and riverbed sediment heterogeneity in a meandering UK lowland stream by ground penetrating radar[J]. Journal of Applied Geophysics,2019,171:e103863.
- [18] Sambuelli L, Bava S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization [J]. Journal of Applied Geophysics,2012,81:48-56.
- [19] Siston P. Depositional sequences in the central coast of Maricá (Rj) identified through ground penetrating radar (Gpr) investigation [J]. Journal of Bacteriology, 2010,170(10):4739-4747.
- [20] 张玮,杨明义,张凤宝,等.黄丘区小流域坝地沉积泥沙粒径剖面分布特征[J].水土保持研究,2015,22(2):17-21.
- [21] Miller T W, Borchers B, Hendrickx J M H, et al. Effects of soil physical properties on GPR for landmine detection [C]// Fifth International Symposium on Technology and the Mine Problem, 2002:1-10.
- [22] 王萍,李新举,闵祥宇,等.GPR 测量滨海盐渍土剖面分层的实验研究[J].土壤,2016,48(6):1261-1269.
- [23] Tosti F, Patriarca C, Slob E, et al. Clay content evaluation in soils through GPR signal processing[J].Journal of Applied Geophysics,2013,97:69-80.
- [24] 李勉,杨二,李平,等.黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积特征[J].农业工程学报,2017,33(3):161-167.
- [25] 李豪,文安邦,张信宝,等.地质雷达技术及其在侵蚀产沙中的应用初探[J].水土保持研究,2006,13(5):272-275.
- [26] 蔡少峰.探地雷达在河流水下地形及基岩探测中的试验研究[J].工程地球物理学报,2019,16(5):680-685.