

土地复垦工程中覆土、衬砌及路面厚度的无损检测

王新静, 胡振琪^{*}, 李恩来, 杨耀淇, 曾纪勇, 蒋知栋

(中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京, 100083)

摘要: 针对目前土地复垦工程质量验收与评定工作中的不足, 利用 GR-III高频探地雷达系统, 对重庆市赶水镇部分已完成的土地复垦工程中的覆土工程厚度、农渠衬砌厚度以及生产路路面厚度等进行了无损探测, 揭示了它们在雷达信号方面的响应特征; 并设计了雷达剖面层位识别算法, 实现分层界面特征点的重采样, 利用不同的电磁波估算方法, 实现了覆土、沟渠衬砌以及生产道路水泥路面等厚度信息的获取; 并基于此, 构建了复垦工程质量评价模型, 对已探测的3个单项工程进行了科学整体的评价。探测结果表明, 对于土地复垦工程, 探地雷达可以实现工程质量的无损检测, 获取更加全面的数据, 且750 MHz特高频天线系统探测效果更佳。评价结果表明, 覆土工程、生产道路工程质量评价等级分别为II、I, 而农渠防渗工程的质量评价等级为III, 后期需要加厚处理。该研究可为土地复垦工程质量的验收提供一个新的途径和科学依据。

关键词: 土地复垦, 工程管理, 雷达测量, 无损检测, 层位识别

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.09.030

中图分类号: TD88; F301.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-09-0231-08

王新静, 胡振琪, 李恩来, 等. 土地复垦工程中覆土、衬砌及路面厚度的无损检测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 231-238.

Wang Xinjing, Hu Zhenqi, Li Enlai, et al. Nondestructive measurement of depths of earthing, canal lining and roadbed of reclamation projects[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(9): 231-238. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近20 a来, 中国煤炭工业得到了快速发展, 采煤塌陷区也成为矿区综合环境治理的主要问题^[1], 以西南山地的重庆市主采矿区为例, 沉陷区面积由2004年的2 746.96 hm², 扩大为2009年的5 087.50 hm², 年平均增长率约为14%, 采煤扰动的影响范围逐年扩展, 而在中国, 煤炭保有资源与耕地复合面积超过了耕地总面积的10%^[2], 矿产资源开发和土地资源保护二者间的矛盾长期存在, 互相博弈。2011年公布的《土地复垦条例》中规定: “土地复垦应当坚持科学规划、因地制宜……, 复垦的土地应该优先用于农业”^[3], 土地复垦工作业已成为保障土地资源的有效措施。

通常情况下, 受损土地复垦为农业用地, 需要恢复其自有的生产能力, 其中, 覆土工程中的有效

覆土厚度、农田水利设施的防渗措施以及田间道路路面厚度等均视为各单项工程的基础保障, 各单项复垦工程质量的检测是确定整体复垦工程成败的关键^[4], 传统验收工作通常采用钻孔取土、开挖剖面、工程断面实测等方法, 这种作业方式精度虽高, 但工作效率很低, 且存在较大的破坏性。更为重要的是, 以点带面, 其典型样点测定结果难以表述各单项复垦工程的整体质量, 给验收工作中的最终评定带来很多障碍。因此, 复垦工程质量的多覆盖、精细、无损检测势在必行。

探地雷达(GPR, ground penetrating radar)是一种高效的浅层地球物理的探测技术, 以微波信号的载体, 具有穿透能力, 能够探测地下目标体等隐蔽工程的空间位置, 已应用于水分^[5]、盐分^[6]、土壤剖面^[7-10]刻画、道路^[11-12]等多个研究领域, 取得诸多研究成果, 利用GPR进行复垦工程质量检测也逐渐开始成为近年来的研究新领域。以上研究多基于室内理想试验模型, 对于获取的雷达图像, 例如土壤剖面的精细刻画, 其分层界面的提取多通过人工识别的方式; 对于各分层的层位深度信息提取方面, 通常选择雷达图像上某些典型的采样道的回波信号的层位信息代表整体信息。而复垦工程, 诸如覆土工程、农田水利设施工程等却存在如下问题: 覆土工程采用分层回填、压实的工艺, 人为造成的

收稿日期: 2012-09-27 修订日期: 2013-03-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAB38B03-02); 国土资源部公益性行业科研专项经费课题(200911015-04)

作者简介: 王新静(1984—), 男, 河南焦作人, 博士生, 研究方向为土地复垦与生态重建、环境与形变监测。北京 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 100083。Email:wangxinjing888@163.com
通信作者: 胡振琪(1963—), 男, 安徽五河人, 教授, 博士生导师。主要从事土地复垦与生态重建的研究。北京 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 100083。Email:huzq@cumt.edu.cn

施工误差必然导致各层位不完全水平,部分区域覆土厚度起伏很大,空间差异性较大,而其他各单项工程亦存在上述问题,以往的一些研究片面的针对某些数据的分析,难以对整个工程质量做出正确的评定,而关于雷达图像中各层位全剖面信息的统计分析及评价研究也鲜有报道。

本研究通过对重庆市綦江区赶水镇已完成的某土地复垦工程中覆土工程、田间农渠以及生产道路工程进行 GPR 无损探测。分别以覆土层、防渗衬砌以及道路路面的厚度作为检测因子,揭示其在雷达图像上的响应特征;并通过相关算法,提取各检测因子在雷达图像全剖面的层位信息;在此基础上,将其作为评价对象,结合以往的相关研究,利用科学的评价模型,对各被检测的单项工程进行了最终的评价分析,以期对土地复垦工程质量检测提供一个全新、有效的途径。

1 研究区概况与探测方法

研究区位于重庆市綦江区赶水镇境内,地处贵州高原与四川盆地的过渡地带,隶属松藻矿区开采影响范畴之内,地貌类型以丘陵、山地为主,属热带湿润气候,地下多煤层的持续开采,导致潜水位下降,地下水大量流失。农用地复垦采用覆土以及平整土地工程,田块周围配以农田水利设施以及田间道路工程,以保证和提高复垦土地的生产能力。复垦区域中心地理坐标为 $106^{\circ}48'59''E$, $28^{\circ}40'34''N$,计划实施规模约 4 hm^2 ,该区块计划投资金额约计 70 万元。2012 年年初,研究区已完成覆土工程的面积约为 $4\ 000\text{ m}^2$,形成 2 个规则的田块,呈梯田状分布;新修农渠 2 条,总长度 24.3 m,沟渠断面净宽为 0.5 m、净深为 0.8 m,防渗衬砌水泥现场浇筑厚度约为 10 cm;新修生产道 1 条,碎石基底,混凝土(无钢筋)现浇路面,长 17 m 左右,宽 0.6 m,水泥路面厚度为 8~10 cm。

采用中国矿业大学(北京)研究生院自主研发的 GR-III 型探地雷达系统,该系统由雷达主机以及收发一体的天线组成。根据雷达电磁波的波动方程以及覆土、衬砌及道路路面工程的有效探测深度($<1\text{ m}$),在兼顾分辨率的前提下,分别采用中心频率为 400 和 750 MHz 天线进行数据采集,工作方式采用剖面法^[13],该方法适用于连续、大数量的数据采集,可以反映雷达侧线正下方各个反射层面的起伏变化。其中,雷达图像由若干个采样道的回波信号所包含的信息组成,采样道在雷达图像上的顺序编号称之为采样道次,与之相对应的为雷达图像的横坐标,用来记录天线在地表的位置,进而可以确定被探测介质的水平位置,纵坐标记录介质的回波信号的双程走时或者采样深度。

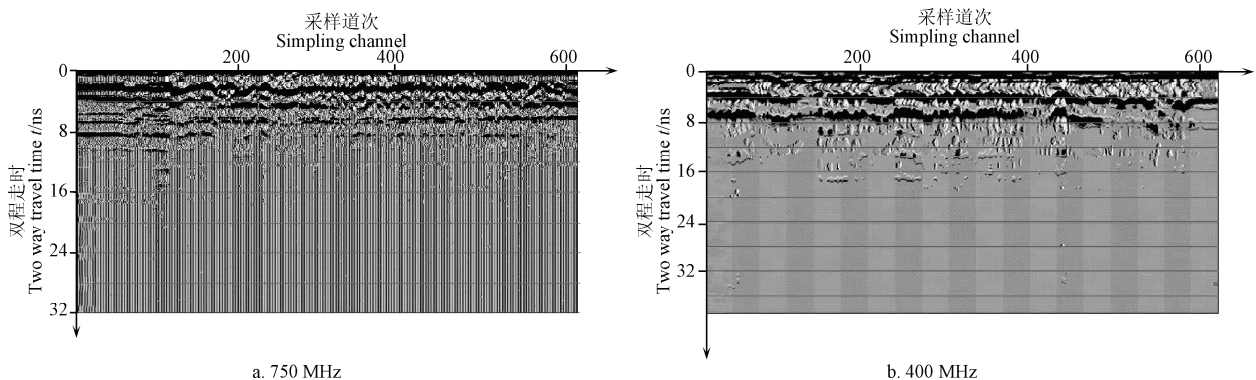
2 各单项复垦工程质量的无损检测

根据研究区各单项工程的完成现状,分别对这 3 个单项工程的覆土厚度、沟渠防渗衬砌以及生产道路路面厚度进行了 GPR 无损检测。

2.1 覆土工程中覆土厚度的无损检测

2.1.1 雷达图像的初步解译

本研究选取相对规则、面积较大的田块作为研究对象,采用网格法布设 GPR 测线,测线间距为 3~5 m,数据采集过程中,利用雷达主机操作系统,在测线交叉部分以及测线的首末端进行打标注记,用以标定这些点位在雷达图像剖面的位置,并将其作为验证点。在采集过程中,对雷达主机的采集参数进行不同处理,以便得到最佳的原始图像。其中,采样时窗分别为 30 和 40 ns 不等,采样叠加次数为 3~5,单道采样点数 1 024 个。原始图像需经过背景去噪、漂移去除、一维滤波、时窗增益以及拼接融合等多项预处理,用以抑制图像的噪声,提高图像的信噪比,更加有利于被探测介质的识别,处理结果如图 1 所示。



注: 0 线为空气与土壤的分层界面;黑色的连续部分为同相轴,即复垦土壤存在较为明显的分层。

Note: Zero line(0 ns) is the interface for air and soil; continuous black parts are events which represent the stratifications of reclamation soil.

图 1 不同中心频率天线采集的复垦土壤雷达剖面图

Fig.1 Radar profile of reclamation soil by different frequency antennas

从图1可以看出, 电磁波在遇到介电性质差异较大的相邻介质的分界面时, 雷达信号出现明显的“跳跃”现象, 表现出较强的反射能力, 从理论上讲, 介质厚度大于波长速度的 $1/4$, 即可以进行厚度分析。图1a所示, 在 $0 \sim 9$ ns 的时窗范围内, 雷达剖面出现了5个相对明显的同相轴(图中黑色的连续部分), 即土壤存在较为明显的分层, 应该这是由于土壤重构过程中的分层压实导致的, 而在9 ns 以下的时窗范围内, 雷达剖面连续分布, 没有出现能量突变现象, 由此初步判断9 ns 以下的为覆土前的基底, 以土壤的平均介电常数为9进行估算^[14], 则电磁波在该介质的传播速度为 10 cm/ns, 由此可得, 基底埋深约为 45 cm, 后期的取样工作也基本验证了这一点。而在图1b中, 雷达图像在 $0 \sim 8$ ns 时窗内出现了3个明显的同相轴, 探测效果较 750 MHz 略差, 土壤分层效果不明显, 这主要是由于雷达天线的空间分辨率与天线频率成正相关, 频率越大, 分辨率越高, 反之亦然。

从工程施工的角度来看, 各个土壤分层界面亦不可能完全水平, 图1中的各同相轴分布特征表明, 其垂直方向上的分布较为紊乱, 同相轴上对应的各采样道次的双程走时不同, 由此反演出来的每个采样道次的层位深度亦不同, 导致各分层在雷达图像全剖面的层位深度存在一定的波动性, 单一数据难以真实反映工程实施的效果, 需要将每个层位的所有采样道次以及对应的双程走时的相关信息提取出来并作为统计分析数据。因此, 必须利用合适、简便的算法对雷达图像的层位进行重采样, 在此基础上, 确定电磁波在各分层土壤中的传播速度, 最终计算出上覆土层全剖面的厚度, 才能对工程质量做出科学的评价结果。

2.1.2 雷达剖面层位信息提取

探地雷达目标的检测常用的方法为目标回波主峰跟踪法^[15]、回波信息最小相位向量自相关法等, 本文在借鉴前人研究的基础上, 将雷达回波的光信号通过 A/D 转化为电信号, 则回波信号的能量表示形式转变为电势, 按采样道进行能量数据离散化, 结合目视解译, 初步判定各层位在时间轴上的大致位置, 按此将雷达图像按时间轴上进行分区, 计算各分区内的每个采样道次能量变化, 记录最大值, 标记能量梯度对应采样点, 对这些采样点的位置进行重采样, 最终实现层位的识别。

为便于统计, 实现层位检测, 将雷达剖面的回波信号的能量用矩阵 X 表示, 其形式为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, m 代表 A-SCAN 上的采样点号; n 代表采样道次, 由于采样道的测点距服从 Nyquist 采样定律, 各采样道雷达信号彼此独立, 互不干扰。

结合电磁波在分层介质的传播和反射特性, 将雷达剖面按时间轴方向划分为 i 个分区, 则 $X=[X_1, X_2, \cdots, X_i]$, 第 i 个能量分区的矩阵表达式为

$$X_i = \begin{bmatrix} x_{j1} & x_{j2} & \cdots & x_{jn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix},$$

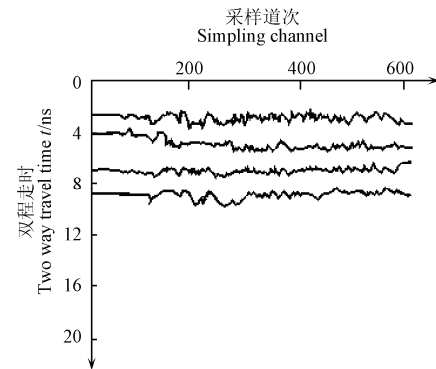
式中, j, k 分别代表该分区内采样点号的起始、结束点号。分别计算各分区内每个采样道内相邻2个采样点能量的变化值(dA_n , mA/ns), 计算方法如下

$$dA_n = \left| \frac{dx}{dt} \right| = \left| \frac{x_{(j+1)n} - x_{jn}}{dt} \right|, \quad (1 \leq j \leq k-1) \quad (2)$$

式中, dt 为平均采样间隔。则每个分区在水平方向上能量变化最大值的数据集为

$$\nabla = (\max(dA_1), \max(dA_2), \dots, \max(dA_n))$$

对数据集中包含的数据点进行重采样, 采样结果如图2所示。



注: 蓝色曲线为土壤层位分界线。
Note: Blue curves is boundary of stratification of reclamation soil.

图2 750 MHz 下雷达剖面层位识别图
Fig.2 Layer identification of radar profile at 750 MHz

2.1.3 各覆土层厚度的计算

图2所示, 人工覆土的形成的土壤共呈现出4个分层界面, 大约在3, 5, 7以及9 ns 附近, 以电磁波在该介质中的大致的平均传播速度 10 cm/ns 粗略计算, 大约 10 cm 出现一个土壤分层。在没有已知目标体作为参照的前提下, 通常采用介电常数法估算电磁波的分层传播速度。由于土壤是复杂的三相体, 在 1 MHz 和 1 GHz 频段范围内, 介电常数很大程度上取决于土壤的体积含水量, 而土壤结构、密度以及含盐量对它影响很小, 目前 Topp 公式是经验公式中反演效果最好的, 部分学者验证, 其计算误差为 $0.013 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[16]。为了较为准确的确定电磁波的分层传播速度, 对测线交叉位置处的 $0 \sim$

50 cm 以上的土壤进行了环刀采样, 每隔 10 cm 采集 5 个样品, 烘干 105℃测定各土壤样品的体积含水量, 按采样深度取平均值, 并利用 Topp 公式计算出各层次土壤的相对介电常数, 如式 (3)。基于此, 根据公式 (4) 计算出电磁波的分层传播速度。

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.0\theta_v^3 \quad (3)$$

式中, θ_v 为介质体积含水量, %; ϵ_r 为相对介电常数。

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (4)$$

式中, v 为电磁波在介质中的传播速度, cm/ns; c 为空气中的电磁波速, 取值 30 cm/ns。

计算结果如表 1 所示。

表 1 各采样层次土壤参数表

Table 1 Soil parameters of each sampling level

土壤厚度 Depth/cm	体积含水量 Volumetric water content/%	介电常数 Permittivity	电磁波速 Electromagnetic wave speed/(cm·ns ⁻¹)
0~10	15.600	7.745	10.779
>10~20	18.300	9.155	9.915
>20~30	24.100	12.687	8.423
>30~40	26.200	14.122	7.984

注: 体积含水量为各土层的平均值; 电磁波速为电磁波穿越各土层的平均速度。

Note: Volumetric water content is average value of each soil layer; speed is average value of electromagnetic wave through each soil layer

根据层位识别提取出来的 4 个层位的特征点的双程走时信息以及表 1 获得的电磁波分层传播速度, 利用下式计算出各层位的深度信息。

$$h=1/2(v \times t) \quad (5)$$

式中, h 为层位深度, cm; t 为双程走时, ns。共输出 596 个采样道次的数据, 计算结果如图 3 所示。

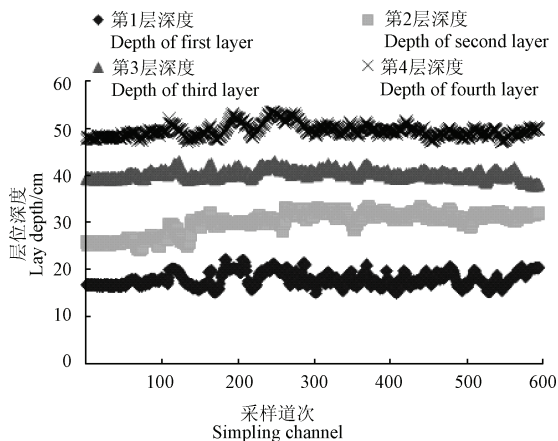


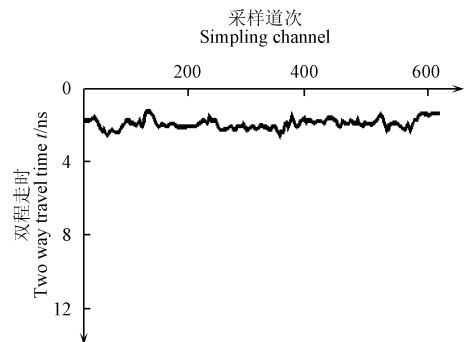
图 3 雷达剖面中覆土层各层位的深度

Fig.3 Depths of reclamation soil layer in whole radar profile

对各层位的深度信息进行统计分析, 分析结果显示, 4 个分层的厚度值的方差取值范围为 1~2, 均存在小幅度的波动变化, 变异系数均小于 8%, 差异性不明显, 说明, 覆土过程中分层回填、压实的效果比较好, 从第 4 土层的层位信息来看, 覆土工程的总厚度值基本上在 50 cm 上下浮动。

2.2 农渠混凝土衬砌厚度的无损检测

选取已修建的 2 条农渠中较长的 1 条作为研究对象, 长度约为 14 m, 衬砌设计厚度大于 10 cm, 考虑天线尺寸以及探测精度, 利用中心频率为 750 MHz 的天线进行数据采集。该沟渠于 2 d 前浇筑完成, 结构略显潮湿, 电磁波在该介质中会有较明显的能量衰减, 采用同样的数据处理方式和层位信息提取方法, 农渠衬砌处理结果如图 4 所示。



注: 蓝线为衬砌与土壤的分层界面。

Note: Blue curve is interface for canal lining and soil.

图 4 750 MHz 下农渠混凝土衬砌层位识别图

Fig.4 Layer identification of field canal lining at 750 MHz

根据打标注记点处的衬砌与土壤分界面采样点的双程走时以及现场实测的标点处衬砌的实际厚度, 利用已知埋深, 反算得到电磁波在该介质中的传播速度 $v=10.117$ cm/ns, 根据层位信息提取的结果, 计算得到衬砌层在雷达图像全剖面的厚度, 如图 5 所示。

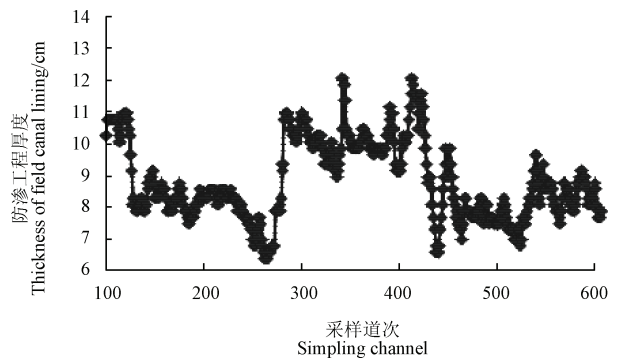


图 5 雷达剖面中农渠衬砌的厚度

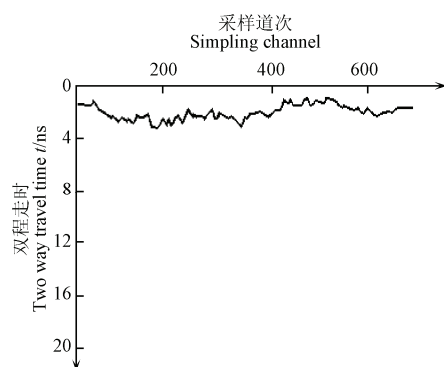
Fig.5 Field canal lining thickness in whole radar profile

对计算结果进行统计分析, 沟渠衬砌厚度的

508 个采样道的数据在 8 cm 线上下振荡, 变化范围为 6.5~12.2 cm, 其中, 均值 $E=8.85$ cm, 标准差 $\sigma=1.25$, 变异系数 $CV=14\%$, 分析结果表明, 衬砌厚度整体起伏较大, 造成这种不均匀的现象的主要原因是: 沟渠沿梯田坡面分布, 地基的标高差异较大且分段坡度不一致, 给施工过程中带来较大的人为误差而形成的。

2.3 生产道路路面厚度的无损检测

采用中心频率为 750 MHz 雷达天线, 对该复垦工程中已完成的生产道路路面厚度进行无损检测, 雷达图像经多项预处理后, 水泥路面层位识别效果如图 6 所示。



注: 蓝色曲线为水泥面与路基的分界面。
Note: Blue curve is interface for top cement and roadbed.

图 6 750 MHz 下生产道路路面层位识别图

Fig.6 Layer identification of production roadbed of radar profile at 750 MHz

从图 6 中可以看出, 在道路的起始端, 尤其是在道路的转弯处, 水泥面厚度起伏现象更加明显, 该现象主要是由于路基水平处理效果较差而形成。通过层位识别算法, 共获取 707 个采样道次的数据, 根据打标注点处水泥路面的厚度以及其对应的双层走时, 反演出电磁波在该介质中的传播速度为 10.940 cm/ns, 并依此可计算出道路水泥路面的全剖面的深度信息, 结果如图 7 所示。

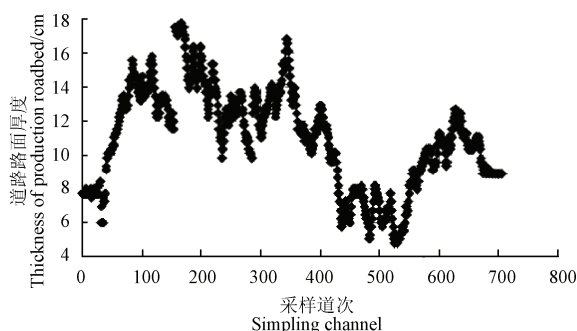


图 7 雷达剖面中生产道路路面厚度

Fig.7 Production roadbed thickness in whole radar profile

统计分析结果显示, 生产路水泥面厚度 $E=10.97$ cm, 标准差 $\sigma=2.98$, 变异系数 $CV=27\%$, 离散程度较大, 直接判定该工程是否满足工程建设标准比较困难, 对这些工程质量进行科学界定, 也是复垦工程质量检测中的一个关键环节。

3 复垦工程质量的综合评价

研究区已实施的覆土厚度、农渠防渗厚度以及生产路路面厚度的无损检测试验表明, 各工程的厚度均存在一定的波动性, 工程建设情况是否满足农用地生产建设的要求, 需要对各单项工程进行整体的科学评价。

对于复垦工程质量的分级评价研究, 前人做了一定的相应研究。例如覆土厚度, 国家计委、国家土地局及中国土地学会土地分会编写的《土地复垦》一书中, 煤矿矸石充填复垦覆土厚度的推荐值为 50 cm 以上; 李新举^[17]也指出复垦土地用于农用地时, 覆土厚度应在 50 cm 左右; 李树志^[18]、郭友红^[19]在覆土厚度对农作物的影响研究中表明: 覆土 30 cm 明显影响作物生长, 50 cm 能够基本维持作物的生长, 覆土 70 cm 与对照田块之间无差异, 可作为土壤重构中较为经济合理的覆土厚度; 刘会平^[20]针对淮南矿区不同覆土厚度土壤生产力状况研究结果指出, 覆土 75 cm 以上的生产力水平接近与对照地块, 20 cm 以下的对生产力影响显著。结合《重庆市土地开发整理建设施工标准》的研究成果, 该标准中要求“旱地...田块有效土层厚度不低于 20 cm, 沟渠(农渠、混凝土)防渗工程适宜厚度为 10~20 cm, 生产道路路面厚度宜为 5~10 cm”。综合上述研究成果, 并参照在当地建设部门实地调研结果, 将已探测的各工程的厚度作为评价因子, 并对其进行等级划分。为方便计算, 各等级的分值采用 0~100 的封闭区间系, 等级划分与赋值如下:

1) 等级划分: 对于覆土工程, 覆土厚度以 70 cm (包含) 为上界, 20 cm 为下界进行划分; 对于农渠防渗工程, 混凝土衬砌厚度以 20 cm (包含) 为上界, 10 cm 为下界进行划分; 生产道工程, 混凝土路面厚度则以 10 cm (包含) 为上界, 5 cm 为下界划分, 等级与分值大小如表 2 所示。

2) 评价因子权重: 根据各单项工程无损探测的结果, 分别确定各个评价因子中各等级所包含的采样道数 S_i , 并计算它与评价对象的整个雷达剖面全采样道数 ($\text{sum}(S_i)$) 的比例, 其比值的大小作为指标权重 P_i , 计算公式如下:

$$P_i = S_i / \text{sum}(S_i) \quad (5)$$

评价等级指标权重如表 3 所示。

表 2 复垦工程质量评价等级与赋分标准

Table 2 Grade and rating scores of quality evaluation of reclamation project

评价因子 Evaluation index	等级 Grade	分值 Value	工程厚度 <i>d</i> Thickness of projects/cm	备注（满足农业生产建设的程度） Remarks(Degree of satisfactions of agricultural production)
覆土厚度 Earthing thickness	I	100	≥70	土壤生产能力与正常农田一致(Fully satisfy)
	II	90	≥50~70	基本满足农作物生长的需求(Basically satisfy)
	III	75	≥30~50	对农作物生长影响较弱(Weakly affect)
	IV	55	≥20~30	对农作物生长影响明显(Obvious negatively affect)
	V	20	<20	无法满足农作物生长需求(Totally unable satisfy)
农渠衬砌厚度 Field canal lining thickness	I	100	≥20	完全满足防渗的需求(Fully satisfy)
	II	90	≥10~20	基本满足防渗的需求(Basically satisfy)
	III	70	<10	对防渗有较明显的影响(Obvious negatively affect)
生产道厚度 Production road thickness	I	100	≥10	完全满足生产建设的需求(Fully satisfy)
	II	90	≥5~10	基本满足生产建设的需求(Basically satisfy)
	III	70	<5	对生产建设有较明显的影响(Obvious negatively affect)

表 3 评价因子权重计算表

Table 3 Calculation table of evaluation indexes weight

评价对象 Evaluation indexes	等级 Grade	采样道统计量 Amounts of sampling channels	评价因子权重 Indexes weight
覆土工程 Earthing thickness	I	0	0
	II	435	0.730
	III	161	0.270
	IV	0	0
	V	0	0
农渠衬砌厚度 Field canal lining thickness	I	0	0
	II	116	0.228
	III	392	0.772
生产道厚度 Production road thickness	I	455	0.643
	II	250	0.354
	III	2	0.003

3) 计算综合得分：采用综合指数法^[21]计算评价因子的综合得分 F ，即评价因子的综合指数，其值为指标权重 P_i 和等级分值 R 的乘积，计算模型为

$$F=P_i\times R^T \tag{6}$$

通过计算，覆土工程、农渠衬砌工程以及生产道路（水泥）工程的综合得分分别为 85.942、74.567 以及 96.379，根据分值的贴近度，覆土工程的等级为 II，覆土厚度基本满足农作物的生产的需求；沟渠衬砌工程的分值更贴近于 70，评价等级为 III，该单体项目无法满足工程建设和安全使用的标准，需要后期进行加厚处理；而道路工程的得分 96.379>90，最终评价等级为 I，该工程质量完全满足生产建设的要求。

总体而言，在后期工作中，需加大农田水利设施，特别是沟渠防渗工程的投资与建设力度，确保土地复垦整体工程的顺利竣工与验收。

4 结 论

1) 针对土地复垦工程质量检测与验收工作中存在的不足，本研究利用中心频率为 400 和 750 MHz 的 GR-III 探地雷达系统对重庆市綦江区赶水镇的土地复垦工程中覆土工程、沟渠防渗以及生产道工程进行了系统的无损检测，分别获得相应的雷达图像剖面，揭示了各单项复垦工程在雷达图像上的响应特征，进一步验证了探地雷达在复垦工程质量检测工作中可行性，研究还表明，中心频率为 750 MHz 雷达天线系统探测效果优于 400 MHz，对于浅地表的复垦工程的无损检测，在满足探测深度的前提下，应尽量使用频率高的天线。

2) 对雷达剖面进行深度分析，构建了层位信息提取方法：该方法首先将雷达图像按时间轴上进行分区，计算各分区内的每个采样道次能量变化，记录最大值，标记能量梯度对应采样点，然后对这些采样点的位置进行重采样，最终实现层位的识别。在此基础上，实现了各单项复垦工程的分层层位的标定与提取，并结合不同的电磁波估算方法，最终分别获得了各单项复垦工程的覆土、沟渠防渗工程以及道路路面的厚度，为质量评价体系的提供基础数据。

3) 基于探地雷达数据，结合模糊综合评价方法，对土地复垦各单项工程质量进行整体评价分析：将反映覆土工程、沟渠工程以及道路质量的覆土厚度、衬砌厚度以及水泥面厚度作为评价对象，依据相关文献以及《施工标准》的部分研究成果，进行评价对象的等级梯度的划分，将各等级中评价对象在雷达全剖面的采样道数所占的比例作为权重，利用综合指数法计算评价对象的综合得分。评价结果显示，覆土工程、生产道路工程质量的评价等级分别为 II、I，基本满足生产建设的需求，而

农渠防渗工程质量评价等级为Ⅲ, 后期需要加厚处理。

探地雷达进行复垦工程质量的无损检测是其应用的新领域, 可以快速、有效、全覆盖的对复垦工程进行有效探测, 具有无可比拟的优势, 随着应用程度不断深入, 诸如地下暗管等隐蔽工程的无损检测, 势必将推进土地复垦事业的新阶段的形成。

[参 考 文 献]

- [1] 彭苏萍, 王磊, 孟召平, 等. 遥感技术在煤矿区积水塌陷动态监测中的应用: 以淮南矿区为例[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 374—378.
Peng Suping, Wang Lei, Meng Zhaoping, et al. Monitoring the seepersubside in coal district by the remote sensing: Examples from Huainan coal district[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 374—378. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡振琪, 李晶, 赵艳玲. 矿产与粮食复合主产区环境质量与粮食安全的问题、成因与对策[J]. 科技导报, 2006, 24(15): 28—31.
Hu Zhenqi, Li Jing, Zhao Yanling. Problems, reasons and countermeasures for environment quality and food safety in the overlapped areas of crop and mineral production [J]. Science and Technology Review, 2006, 24(15): 28—31. (in Chinese with English abstract)
- [3] 《土地复垦条例》. 北京: 中国法制出版社, 2011.
- [4] 胡振琪. 中国土地复垦与生态重建 20 年: 回顾与展望 [J]. 科技导报, 2009, 27(15): 25—29.
Hu Zhenqi. Review and prospect of land reclamation and ecological restoration in China[J]. Science and Technology Review, 2009, 27(15): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [5] Huisman J A , Snepvangers J J J C, Bouten W , et al. Mapping spatial variation in surface soil water content: Comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(3/4): 194—207.
- [6] 胡振琪, 陈星彤, 卢霞, 等. 复垦土壤盐分污染的微波频谱分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 56—60.
Hu Zhenqi, Chen Xiongtong, Lu Xia, et al. Microwave spectrum analysis of salinity pollution about reclamation soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(6): 56—60. (in Chinese with English abstract)
- [7] Boll J, van Rijn R P G, Weiler K W, et al. Using ground penetrating radar to detect layers in a sandy field soil[J]. Geoderma, 1996, 70(3): 117—132.
- [8] 刘恒柏, 张佳宝, 朱安宁. 砂壤土中目标体的 GPR 图像解译与土壤含水量反演[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 55—57.
Liu Hengbai, Zhang Jiabao, Zhu Anning. Ground penetrating radar imagery interpretation of target in sand loamy soil and soil water content inversion[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 55—57. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赵艳玲, 王金, 贡晓光, 等. 基于探地雷达的复垦土壤层次无损探测研究[J]. 科技导报, 2009, 27(17): 35—37.
Zhao Yanling, Wang Jin, Gong Xiaoguang, et al. Nondestructive detection of soil layer based on GPR[J]. Science and Technology Review, 2009, 27(17): 35—37. (in Chinese with English abstract)
- [10] 彭亮, 徐清, 朱忠礼, 等. 应用低频微波波段 GPR 测量土壤结构[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 324—329.
Peng Liang, Xu Qing, Zhu Zhongli, et al. Mapping the soil layers and texture with ground penetrating radar[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2007, 43(3): 324—329. (in Chinese with English abstract)
- [11] Fauchard C, De'robert X, Cariou J, et al. GPR performances for thickness calibration on road test sites[J]. NDT&E International, 2003, 36(2): 67—75.
- [12] 黄玲, 曾昭发, 姚健, 等. 钢筋混凝土 GPR 检测图像的目标体快速识别技术[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(增刊 2): 174—178.
Huang ling, Zeng Zhaofa, Yao Jian, et al. Study on target recognition technology of GPR testing pattern of reinforced concrete[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(Supp.2): 174—178. (in Chinese with English abstract)
- [13] 邓小燕, 王通. 探地雷达探测中对媒质相对介电常数的测定[J]. 物探与化探, 2009, 33(1): 43—46.
Deng Xiaoyan, Wang Tong. The measurement of the relative dielectric constant of media in GPR exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(1): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [14] 曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 探地雷达方法原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 42—43.
- [15] 李廷军, 周正欧. 探地雷达中双曲线的提取及在波速估计中的应用[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 124—128.
Li Tingjun, Zhou Zheng'ou. Extraction of hyperbolic signatures and application for propagation velocity estimation in GPR[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(1): 124—128. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王春晖. 探地雷达方法测量近地表含水量及污染物探测[D]. 吉林: 吉林大学, 2007: 20—21.
Wang Chunhui. Near Surface Water Content Measurement and Contamination Detection Using Ground Penetrating Radar[D]. Jilin: Jilin University, 2007: 20—21. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276—280.

- Li Xinju, Hu Zhenqi, Li Jing, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(6): 276-280. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李树志. 采煤塌陷区土地复垦技术与应用[C]//2008 年全国“三下”采煤学术会议论文集, 2008, 98—104.
- Li Shuzhi. Land reclamation and application in coal mining subsidence[C]//The 2008 national “coal mining under buildings, railways and water bodies” conference proceedings, 2008, 98—104. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郭友红, 李树志, 鲁叶江. 塌陷区矸石充填复垦耕地覆土厚度的研究[J]. 矿山测量, 2008, 133(2): 59—62.
- Guo Youhong, Li Shuzhi, Lu Yejiang. Research on depth of the covering layer on reclaimed cultivated land backfilled with coal refuse in subsidence area[J]. Mine Surveying, 2008, 133(2): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘会平, 严家平, 樊雯. 不同覆土厚度的煤矸石充填复垦区土壤生产力评价[J]. 能源环境保护, 2010, 24(1): 52—56.
- Liu HuiPing, Yan JiaPing, Fan Wen. The evaluation of soil productivity in reclamation district filling by coal gangue with different thickness of covering soil [J]. Energy Environment Protection, 2010, 24(1): 52—56. (in Chinese with English abstract)
- [21] 肖武, 胡振琪, 许献磊, 等. 煤矿区土地复垦成本确定方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(增刊 1): 175—179.
- Xiao Wu, Hu Zhenqi, Xu Xianlei, et al. Cost definite method of land reclamation in coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(Supp.1): 175—179. (in Chinese with English abstract)

Nondestructive measurement of depths of earthing, canal lining and roadbed of reclamation projects

Wang Xinjing, Hu Zhenqi^{*}, Li Enlai, Yang Yaoqi, Zeng Jiyong, Jiang Zhidong

(Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The scope of damaged land caused by coal mining is increasing every year. For the sake of relieving the conflict between population growth and land availability, lots of land reclamation projects have been imposed in many provinces of China. However, the quality examination of those projects, which is considered as a key basic safeguard, always uses traditional methods. Few studies have reported on quick, non-destructive, and comprehensive engineering quality-testing methods. In order to overcome the deficiencies of quality inspection and evaluation in land reclamation projects, a variety of high frequency ground-penetrating radar GR-III systems has been used to detect the projects of covering, field canal and production road of the land reclamation in Ganshui town, Chongqing city, all the response characteristics of radar signal had been revealed. Using the energy changes of each sampling channel in different regions of radar image, the horizon identification algorithm was represented, which was used to resample the feature points of each horizon in different projects. On this basis, key factors of project quality, such as the depths of covering, field canal lining, and concrete pavement of production roads were calculated by different estimation methods using electromagnetic wave velocity, which were also considered as the indexes of the new evaluation model of reclamation project quality. The results show that GPR can realize nondestructive testing of land reclamation project quality and obtain comprehensive data. The detection effectiveness is positively correlated with the antenna's center frequency. The final evaluation result shows that qualities of the covering project and production road are class II and I, respectively. They meet the needs of farmland production, but the quality of field canal lining is class III, which must be thicker in later work. This study could provide a new way and a scientific basis for the evaluation of land reclamation project quality.

Key words: land reclamation, project management, radar measurement, nondestructive measurement, layer identification