

崔 凡, 吴志远, 武彦斌. 探地雷达在西部煤矿砂壤地层含水率时空变化中的应用 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2437-2444. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0688
Cui Fan, Wu Zhiyuan, Wu Yanbin. Application of GPR in the spatio-temporal variation of moisture content of sandy loam layer in Western China [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2437-2444. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0688

探地雷达在西部煤矿砂壤地层含水率 时空变化中的应用

崔 凡¹ 吴志远² 武彦斌³

(1. 中国矿业大学(北京) 党政办公室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 河北经贸大学 管理科学与工程学院, 河北 石家庄 050061)

摘 要: 为研究西部地区采煤活动对地表砂壤地层含水率变化的影响, 对内蒙古西部大柳塔煤矿 52305 工作面上方在地下采煤的不同阶段(采前、采中和采后稳定沉降)使用探地雷达开展了 3 次探测, 利用滑动平均(ARMA)功率谱分析方法反演出 3 次探测时地表 0~10 m 的砂壤地层体积含水率值并进行分析研究。发现采煤影响下砂壤地层含水率整体呈“先减小, 后增大”的趋势。在垂向上, 含水率由小到大呈 3 个条带分布, 采煤过程会引起砂壤地层产生沉降, 垂向上各条带厚度发生改变从而影响含水率的变化。在砂壤含水率的平面分布中, 根据采煤沉陷盆地的划分, 研究区在采中时期整体含水率值较采前相对下降, 沉降稳定后位于研究区边界位置的“拉伸区”和“压缩区”恢复到接近采前水平; 位于研究区中心位置面积最大、结构最稳定的“盘底区”含水率值在采后恢复到比采前高的水平, 在该变形区内 0~10 m 砂壤地层含水率“自修复”效果最佳。

关键词: 探地雷达; 砂壤; 含水率; 时空变化; ARMA 功率谱

中图分类号: P631.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2015)10-2437-08

Application of GPR in the spatio-temporal variation of moisture content of sandy loam layer in Western China

CUI Fan¹, WU Zhi-yuan², WU Yan-bin³

(1. University Party and Government Office, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. College of Management Science and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: In order to study the impact of coal mining on the moisture content variation of sandy loam layer in Western China, three stages detection by ground-penetrating radar (GPR) at the different stages of underground coal mining (before mining, in the process of mining and after mining) on the surface of 52305 working face at Daliuta Coal Mine in Inner Mongolia, China are conducted. By using ARMA power spectrum analysis method, the volumetric moisture content of 0-10 m sandy loam layer was inverted. According to the profile of moisture content at each measuring line, the authors find that under the influence of coal mining, the moisture content of sandy loam in 0-10 m shows a trend of decrease initially and then increase as a whole. In the vertical direction, the moisture content distributes in three stripes in sequence. Coal mining damages the sandy loam layer, causes subsidence and results in the thickness change of each stripe in the vertical direction and further affects the moisture content variation. In the horizontal distribution of moisture content, according to the division of different coal mining subsidence basin, the overall moisture content in the process of mining period decreases comparing to that before mining stage; after sedimentation is stable, the moisture

收稿日期: 2015-05-14 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题基金资助项目(2013CRSMZZ03); 河北省高等学校科学技术研究基金资助项目(BJ2014021)

作者简介: 崔 凡(1984—), 男, 安徽淮南人, 讲师。Tel: 010-62331203, E-mail: cuifan@cumtb.edu.cn

content of the “stretch zone” and the “compression zone” restore to the value of before mining stage; the moisture content of the “bottom zone” which has the largest area and the most stable structure is 9% higher than that before mining stage and has the best “self-recovery” capacity in 0–10 m sandy loam layer.

Key words: ground penetrating radar; sandy loam; moisture content; spatio-temporal variation; ARMA power spectrum

含水率是土壤最重要的物性参数之一,决定着植被的生长分布情况^[1]。中国西部地区多为砂壤覆盖,生态较脆弱,但煤炭资源丰富。人们在该地区内开展的大规模地下采煤活动会导致地表塌陷、裂缝滋生,浅部层砂壤地层水分及其分布发生变化,造成生态环境进一步恶化^[2]。研究浅部层砂壤地层含水率在煤矿开采条件下的变化情况,可为采区环境问题的治理和采后生态恢复提供依据。

由于矿区土壤的异质性和环境的多样性使含水率探测工作变得较为复杂。取样烘干测量法、时域反射法、中子探测法和电容探测法都可以测量土壤的含水率值,一般将取样烘干法的测试结果认作土壤含水率的标准值^[3–6]。但是这些方法大多以单点测量的方式实施,无法满足对采煤工作面尺度土壤的快速、连续探测的需求。此外,这些方法大多会对被测介质产生破坏,难以保障有效的重复观测,无法准确比较介质含水率的变化情况。而且这些方法一般探测深度较浅(1~3 m),达不到对西部地区砂壤整体层位(一般为4~15 m)的综合研究。探地雷达与上述方法相比,具备无损、连续、可大面积探测等优点,目前已广泛应用于浅层地下结构探测和工程检测中^[7]。探地雷达通过使用固定偏移距天线采集数据,分析地表直达波的旅行时间估算介质波速,并利用 Topp 等经验公式反演被测介质的体积含水率,达到大面积探测含水率空间分布目的^[8–10]。但因为雷达信号易衰减,在地表条件较复杂的野外探测时,对直达波的识别困难,从而无法精确计算出波速,导致介质含水率探测产生误差^[11–12]。利用 ARMA 谱分析方法建立起功率谱能量分布和砂壤介质含水率的关系模型,可以克服上述缺点,获得地表整体砂壤层(0~10 m)准确的含水率分布^[13],并且可保障在同一地区探测的重复实施。

1 研究区概况

选择位于中国陕西省与内蒙古自治区交界处伊金霍洛旗乌兰木伦镇大柳塔矿区 52305 工作面正上方地表砂壤地层作为研究区,其范围是一个长 0.9 km、宽 0.3 km(和工作面宽度一致)近东西向分布的长方形区域(图 1)。

研究区为典型的风沙堆积地貌,上部由砂壤覆

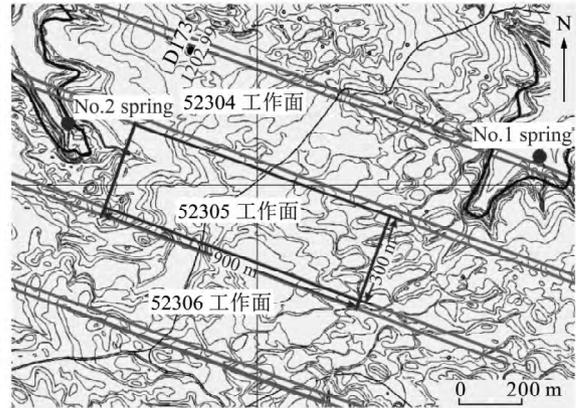


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of research area

盖,厚度 7~13 m,平均层厚约 10 m,区内高程差最大值为 15.2 m,由于区域内无地表水且潜水面平均深度为 37.6 m,故地下水对 10 m 范围内砂壤含水率的补给影响可以忽略。

研究区所在地太阳辐射强烈,年蒸发量为 2 000~2 800 mm,年降雨量仅为 131~571 mm,降雨主要集中在每年的 6—9 月(图 2),是典型的干旱气

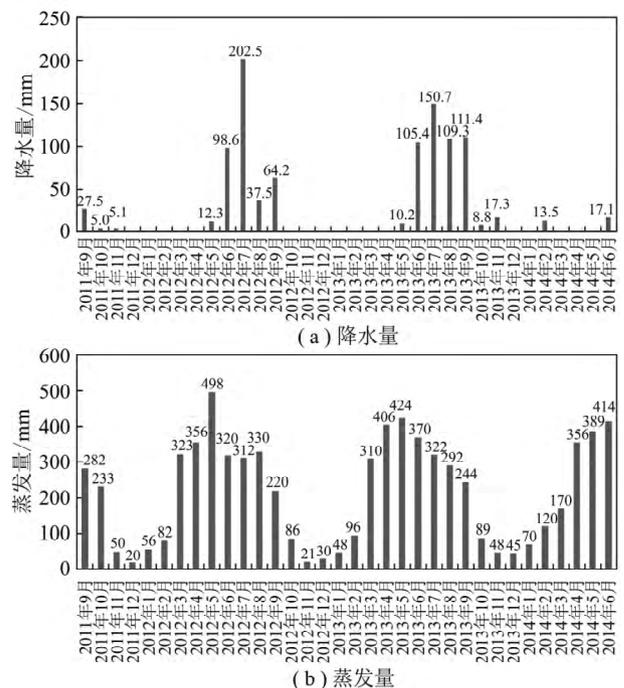


图 2 神东地区近 3 a 降雨、蒸发量分布

Fig. 2 Rainfall and water evaporation distribution of Shendong in recent three years

候。由于降雨量低且不连续,再加上砂壤储水能力差,区内地表砂壤在降雨后的 3~5 d 内受挥发作用即可恢复至降雨前的含水率值。此外,区内没有地表水亦不受浅层地下水影响。

根据实际调查,区内砂壤地层从地表起为细砂,中下部多为中砂和粗砂,粒径 0.3~3.0 mm,有机质含量分布在 1.3~8.1 g/kg,含水率在非降雨影响时间内分布在 3.3%~12.6%,密度分布在 1.2~1.9 g/cm³。

研究区内植被覆盖主要为杨树、沙柳、沙棘、小叶槐、紫穗槐等乔木和灌木,也有部分区域为草丛覆盖,无农作物及灌溉水源。研究区内地表起伏较连续,可使探地雷达的天线与地面较好耦合。

2 实际探测

研究区所在的 52305 工作面有 1 层可采煤层,煤层厚度 1.35~7.75 m,平均 5.60 m,使用高采臂一次采全高的开采方式,由于推进速度快,采煤对地表沉降影响的周期也较分层开采条件下的周期短。

52305 工作面于 2013-09-01 起从开切眼处开采(研究区 0 km 位置处),平均采煤进尺约 10 m/d,于 2013-11-30 开采出研究区范围(研究区 0.9 km 位置处)。笔者根据开采进度设计了 3 次探测(图 3):于 2013-08-24 开展第 1 次探测,此时研究区内的工作面尚未开采;于 2013-10-15 开展第 2 次探测,此时工作面正好推进到研究区位置的中间处;于 2014-03-05 开展第 3 次探测,此时工作面推进位置已离开研究区范围超过 120 d,地表已经历了沉降发育期(0~30 d)、活跃期(30~60 d)和衰减期(60~90 d),进入了稳定阶段。同时根据布设于 52304 工作面上方地表岩移观测数据的分析结果,在大柳塔煤矿的开

采条件下,90 d 后地表已经进入沉降稳定阶段。



(a) 雷达数据采集



(b) 现场钻探取样

图 3 现场探测照片

Fig. 3 Photos of GPR survey and boring with sampling

在研究区布设了 4 条长 0.9 km、间隔 0.1 km,平行于工作面开采方向的雷达测线以覆盖整个 52305 工作面。第 1 测线在工作面两侧外边缘处,第 2、3 测线分布在工作面中间。

探测时间、测线布置及工作面推进位置如图 4 所示。在 3 次探测的前 1 周时间内都没有降雨,根据之前的调查,所测得的砂壤含水率值均可以被认为是其在采煤和常规自然条件下的一般状态。本研究使用了中国矿业大学(北京)研发的 GR(geology radar)探地雷达系统和 200 MHz 固定偏移距天线,以连续探测的形式对研究区进行数据采集。

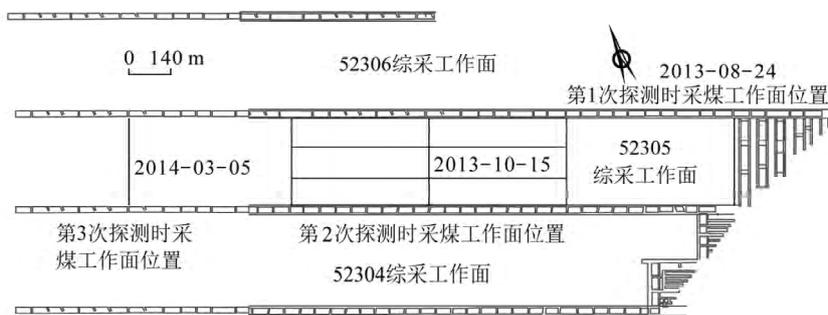


图 4 测线布设与 3 次探测时 52305 工作面推进位置示意

Fig. 4 Schematic diagram of survey lines layout and the tunneling positions of working face in 3 detections

3 次探测的采集参数一致: 1024 采样点、每道 3 次叠加、自动增益,根据目标深度与探测时窗的经验

公式:

$$w \approx 1.3 \times 2d_{\max} / (c / \sqrt{\epsilon}) \quad (1)$$

其中 d_{\max} 为最大目标探测深度; c 为电磁波在真空中的传播速度, 取 3.0×10^8 m/s; ε 为土壤介质的相对介电常数。在 $d_{\max} = 10$ m, $6 < \varepsilon < 8$ 的条件下, 将探测时间窗设为 250 ns。

3 ARMA 功率谱方法原理

本次研究引入了 ARMA 功率谱分析方法处理 3 次探测时采集的雷达数据, 该方法可以有效反演出 0~10 m 砂壤介质沿测线的含水率分布情况。

自回归移动平均(auto regressive and moving average, ARMA) 通过对平稳线性信号过程建立模型来估计功率谱密度函数^[14-15]。

若离散随机过程 $\{x(n)\}$ 满足差分方程:

$$x(n) + a_1 x(n-1) + \dots + a_p x(n-p) = e(n) + b_1 e(n-1) + \dots + b_q e(n-q) \quad (2)$$

则称 $\{x(n)\}$ 为一个平稳的 ARMA(p, q) 过程, 式(2)即表示 ARMA 模型, 其中 $\{e(n)\}$ 是一个均值为 0、方差为 σ_e^2 的离散白噪声; 系数 a_1, a_2, \dots, a_p 和 b_1, b_2, \dots, b_q 分别是自回归参数和滑动平均参数; p 和 q 分别为 AR 阶数和 MA 阶数。

其功率谱密度 $P_x(\omega)$ 为

$$P_x(\omega) = \frac{|B(z)|^2}{|A(z)|^2} \sigma_e^2 \Big|_{z=e^{j\omega}} = \frac{|B(e^{j\omega})|^2}{|A(e^{j\omega})|^2} \sigma_e^2 \quad (3)$$

其中 j 为虚数单位; ω 为角频率。由式(3)定义的谱密度为 2 个多项式之比, 称为有理式谱密度^[16-18]。

利用相关性分析的方法, 根据高低频能量包络的分布特征, 确定雷达功率谱数据中的高低频分割点, 再利用式(4)描述的功率谱能量与含水率的关系模型^[13]反演砂壤体积含水率。

$$\theta_v = k \frac{1}{F_a} \int_0^m P(f) df \times 100\% \quad (4)$$

其中, θ_v 为体积含水率, %; m 为高低频分割点, MHz; k 为含水率模型的线性修正参数。在本次探测中, 根据标定试验确定了 $m = 670$ MHz, k 的调整范围分布在 0.7~1.1。

4 结果与分析

4.1 采煤沉陷区地表划分

由于地下采煤过程打破了地层原有的应力平衡, 使地表塌陷, 形成沉陷盆地。根据对研究区相邻的 52304 工作面地表岩移观测数据的分析(图 5), 可以将 52304 工作面上方变形盆地的划分套用到开采条件及地表情况极为接近的 52305 工作面所在的研究区内。

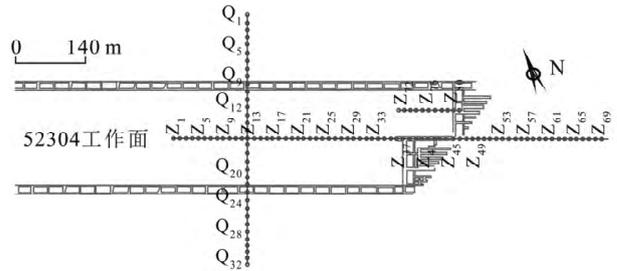


图 5 52304 工作面地表沉降观测点布置示意

Fig. 5 Schematic diagram of subsidence observation points on 52304 working face

通过对研究区地表的调查, 发现位于工作面边缘处的采煤沉陷盆地“拉伸区”和“压缩区”内有大量地裂缝发育, 长度分布在 0.3~14.2 m, 宽度分布在 0.5~50 cm, 且采后难以闭合。位于变形盆地轴中心位置且占研究区面积最大的“盘底区”在稳定沉降后, 地层受力较“拉伸区”和“压缩区”平衡, 地裂缝在采后也趋于闭合, 地表总体较平整。

4.2 ARMA 功率谱方法反演含水率精确性分析

实际探测前, 先在研究区内先开展了试验探测。通过对比 ARMA 反演平均体积含水率值与 0~10 m (1 m 间隔) 钻探取样烘干法 (110 °C, 8 h) 测量的平均体积含水率值, 用以分析雷达反演结果的准确性。试验安排在采前、采中和采后的每次实际探测之前, 每次针对平均覆盖各测线的共 40 个测点开展。

对试验点的取样工作是使用“洛阳铲”进行的, 并用环刀从每隔 1 m 提钻的铲头中取出砂壤土样。将烘干法测得的质量含水率乘以样本的干密度以计算出体积含水率, 再结合每孔不同深度样本求平均值, 以获取测点的平均体积含水率。

最后将 3 次试验探测的 40 个测点的雷达反演体积含水率值和实测值进行相关性分析。图 6 为雷达反演值与实测值的散点分布情况, 每次探测的 40 个样本点越接近 1:1 线 ($y=x$), 表示雷达反演值与实测值越接近。两种方法 3 次探测结果的相关系数 (r) 为 0.913 (试验 1), 0.885 (试验 2), 0.877 (试验 3); 平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE) 为 7.05% (试验 1), 10.52% (试验 2), 7.57% (试验 3)。

通过分析 3 次不同探测时间的试验结果, 发现探地雷达 ARMA 功率谱可准确反演出 0~10 m 的砂壤平均体积含水率, 该方法可适用于大面积砂壤地层的探测。

此外, ARMA 方法还可以通过设定不同的自回归时间窗对同一测点处的含水率进行由浅到深的一维反演。挑选了 6 个钻孔将反演含水率和取样烘干实

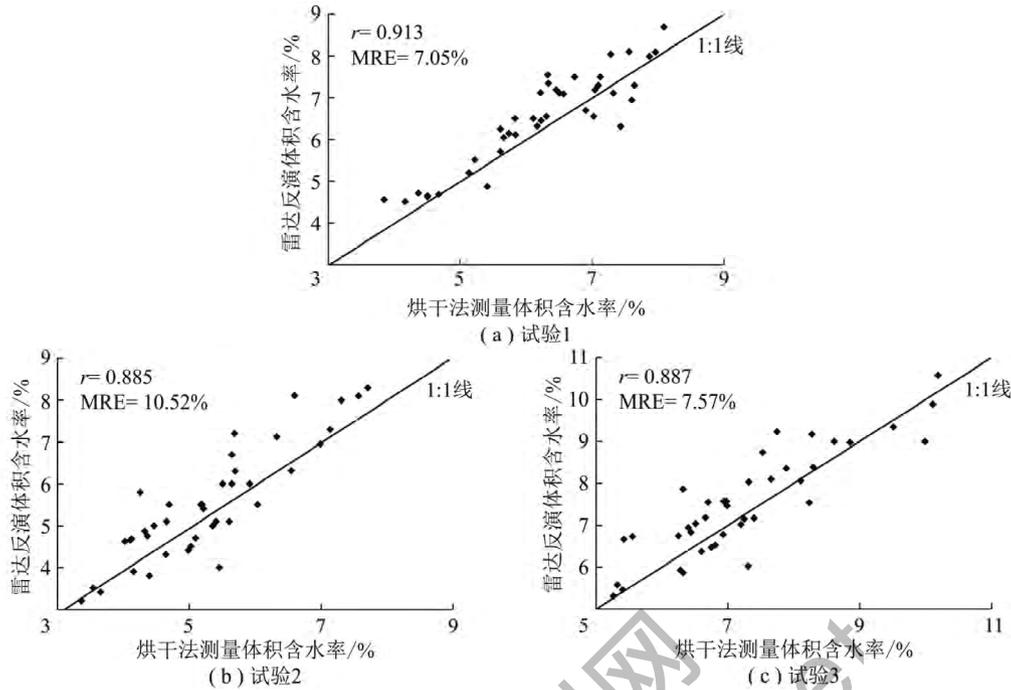


图 6 实测体积含水率值与雷达反演值对比

Fig. 6 Comparison of volumetric moisture content values by sampling method and GPR inversion method

测含水率在深度方向上以 1 m 为间隔进行对比分析,发现 ARMA 方法反演的砂壤介质体积含水率和实测含水率值相关系数 r 均大于 0.85。即 ARMA 谱分析可较为有效的反演出体积含水率随深度变化的值(表 1)。

表 1 6 钻孔 0~10 m 间隔深度含水率值对比相关系数
Table 1 Comparison of the correlation coefficients of moisture content value in 6 drill holes within 0~10 m depth interval

图片编号	探测时间	相关系数 r
钻孔 a	第 1 次探测	0.958 3
钻孔 b	第 1 次探测	0.935 9
钻孔 c	第 2 次探测	0.943 1
钻孔 d	第 2 次探测	0.856 7
钻孔 e	第 3 次探测	0.965 9
钻孔 f	第 3 次探测	0.866 9

4.3 研究区砂壤含水率变化分析

根据 4 条测线的雷达数据含水率反演结果,结合采煤沉陷盆地的划分(图 7)对研究区砂壤地层的含水率时空变化情况进行分析。利用 ARMA 功率谱分析方法可以获取 3 次探测时各测线 0~10 m 的含水率连续剖面图。

图 8 为第 2 测线 3 次探测时 0~10 m 的砂壤地层含水率随深度连续变化剖面分布情况。从图 8 可

以看出,3 次探测时,砂壤的体积含水率在垂向上可根据大小的不同,呈现较明显的条带分布特征,其分辨率在垂直方向上可达 1 m。

4.3.1 含水率垂向变化分析

对根据 ARMA 含水率关系模型反演得到的不同深度体积含水率数据进行分析,发现 0~10 m 内的砂壤地层含水率在垂向上主要呈现由浅到深逐渐增大的状态,测线所覆盖的大部分区域都存在 3 个含水率随深度变化条带。其中,最上层主要为细砂构成,含水率相对最低(分布于 4%~8%),中间层砂壤粒径较大含水率明显升高(分布于 7%~15%),而最下部的砂壤由于与该层下覆黏土层相邻,有护层交错现象,因此,其含水率较上 2 层有明显提高(分布于 12%~20%)。

通过与其他 3 条测线的含水率剖面数据相结合进行分析,发现 3 次探测时含水率沿垂向分布的 3 个条带相对位置和含水率由浅至深的相对大小并没有变化。只是伴随开采过程,各条带的厚度发生了改变。

地下煤炭开采过程中,上层条带的范围在开采后略有减小(从 1.45 m 降至 1.20 m)。这可能是由采煤活动影响造成地表形变,破坏了地表细砂层的整体性,使该层更易被风力搬运所致。中间条带的范围向上下方都产生了扩展,厚度从原平均 6.65 m 增加至平均 7.30 m。这可能是该区带在塌陷过程中产生的

拉伸现象。下层区带在开采过程中迅速减小,由采前的平均 1.90 m 下降至平均 1.50 m。这主要是因为

中间层增大,导致 10 m 范围内下层区带所占比例较小所致。



图7 52305工作面变形分区划分

Fig. 7 Division of deformation zones on 52305 working face

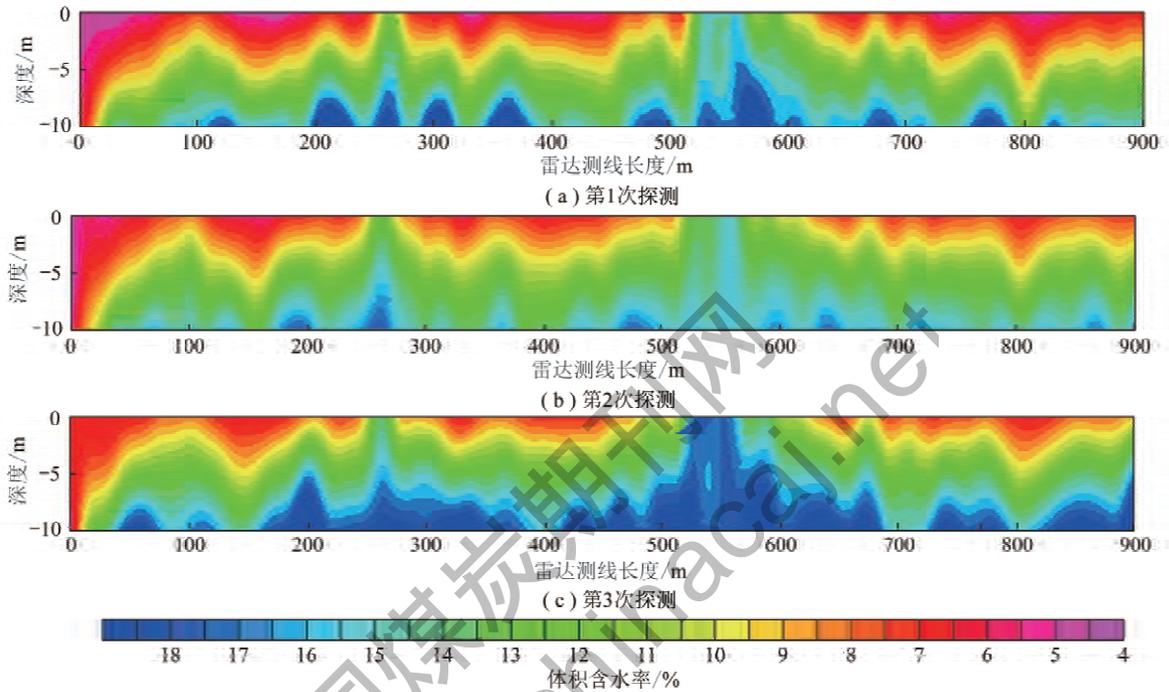


图8 第2测线3次探测含水率随深度分布剖面

Fig. 8. Moisture content profiles of survey line No. 2 in 3 detections

从采中至采后沉降稳定阶段,上层条带的厚度几乎没有改变(从 1.20 m 变至 1.15 m)。这也说明了地层在逐步沉降的过程中,表层细砂逐渐稳定,形成了新的整体性特征。而中间条带厚度在采后沉降阶段迅速减小(从 7.30 m 减至 6.35 m)。下层条带则扩大至 2.50 m,该部分条带的扩大,是导致 0~10 m 砂壤地层含水率在沉降稳定后整体提升的重要因素。

通过对 3 次探测的全部测线剖面调查发现,位于研究区起始位置(约 0~20 m)和中部位置(约 520~590 m 处),分别为 1 处 9 m 高的沙丘和 1 处地表出露含黏土砂的洼地,从而导致了起始位置垂向上整体低含水率分布和中部位置整体高含水率分布的特点。

对 3 次探测的 0~10 m 砂壤地层含水率剖面进行整体分析,发现含水率值在煤炭开采及采后的过程中,总体上呈现先减小后增大的趋势。

4.3.2 含水率平面分布时空变化分析

为研究 0~10 m 范围内砂壤地层整体含水率在采煤影响下的变化情况,依据雷达反演出的含水率剖

面,对 4 条测线所反映的体积含水率剖面在垂向上求取平均值并归一化,以研究其平面分布的时空变化情况(图 9)。

对比采前、采中和采后沉降稳定时间的含水率分布可发现:采前浅部砂壤地层含水率整体较小,尤其在工作面起始位置、中间位置和即将离开研究区的边界(800~900 m)位置十分明显。第 2 次探测时,砂壤层含水率整体降低,特别是工作面起始位置的低含水率(4.0%~4.8%)地区从原先的 0~180 m 扩大至 0~240 m(图 9 中红色部分)。

在第 2 次探测时,研究区中部位置的低含水率地区由采前平均 6.3%降低为 4.5%,其范围也从 360~580 m 扩大至 320~600 m。采后砂壤地层含水率值整体上升,分布于研究区起始位置的低含水率地区范围减小至 0~120 m,且该区域边缘含水率提高明显。在采煤过程中位于研究区中部与即将离开研究区位置的两块低含水率分布区域都有较大升高,在采后其影响范围已经消失。

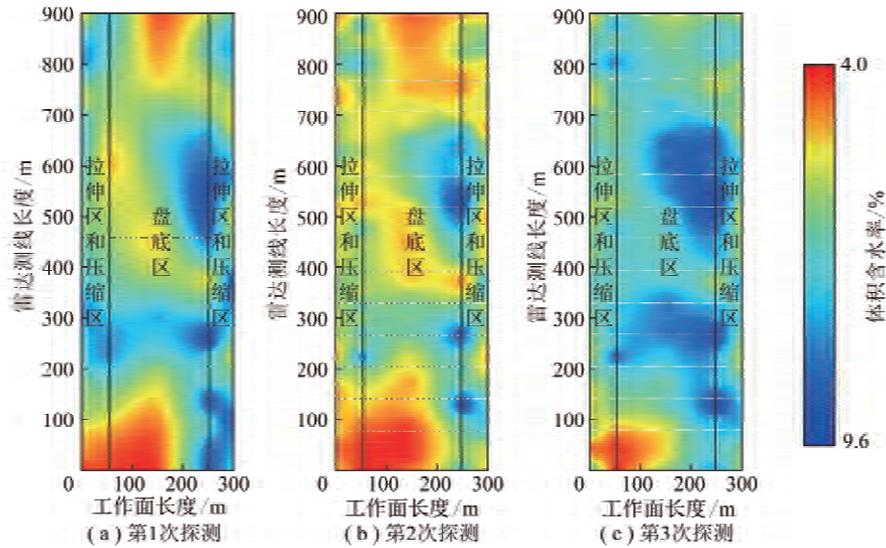


图 9 3 次探测浅层砂壤平均体积含水率平面分布

Fig. 9 Average volumetric moisture content of shallow sandy loam in 3 detections

根据采煤下沉盆地的划分,布设于“拉伸区”与“压缩区”的第 1 4 测线的含水率由于地表的稳定性差、不闭合地裂缝多等特点在开采过程中含水率减小明显,在采后该区域内仍有不连续的低含水率区域分布。根据对第 1 4 条测线在 3 次探测时所获得的整体平均体积含水率数据进行分析,发现第 2 次探测时,该区域的整体含水率均值为 5.3%,较第 1 次探测时的 6.8% 相对减少了 28%。第 3 次探测时,则恢复到 6.8% 和采前一致。

第 2 3 条测线所对应的“盘底区”在 3 次探测时其整体平均体积含水率分别为 6.7%、5.5% 和 7.3%,总体上也遵循先减小,后增大的趋势。最重要的是,在地下煤炭开采沉降稳定后,该区域内除了在研究区开始位置仍有减小的低含水率地区外,其他位置都较采前恢复到了较高含水率的水平。相比采前,含水率在第 3 次探测时整体恢复更好,超过采前更多(相对约 9%)。

5 结 论

(1) 通过对比分析发现,ARMA 功率谱分析方法能够得到与取样实测精度相近的土壤含水率。

(2) 研究结果表明,在垂向上(0~10 m),根据土壤性质、粒径的不同可将研究区内砂壤划分为 3 个区带,在区带内土壤含水率由浅到深逐渐增大。由于采煤会引起砂壤层产生破坏、沉降等变化,致使在垂向上各区带厚度发生改变,进而在垂向上对含水率的再分布产生影响。通过分析研究区内开采前、中、后 3 次含水率探测结果表明,在垂向上砂壤地层整体含水率在采煤影响条件下总体呈现先减小,后恢复的趋

势。表现出一定的“自修复”特性。

(3) 将 0~10 m 的含水率平均值进行平面分布,结果显示在煤矿开采前、中、后 3 个阶段,土壤含水率在平面上表现为先减小,后增大的特点。其中开采中土壤含水率最小,沉降稳定后土壤含水率较开采前有所增大。

(4) 根据采煤沉陷盆地分区,发现 0~10 m 砂壤层含水率受采煤影响在不同变形盆地中的变化情况不相同。其中,占工作面内面积最大、结构最稳定的“盘底区”采后较地表破坏严重的“拉伸区”和“压缩区”含水率“自恢复”效果最佳,相对采前含水率提升了约 9%,这将使该区域有利于采后植被的生长和生态恢复。

参考文献:

- [1] 王云强,张兴昌,丛伟,等.黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究[J].农业工程学报,2006,22(12):65-71.
Wang Yunqiang, Zhang Xingchang, Cong Wei, et al. Spatial variability of soil moisture on slope-land under different land uses on the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(12): 65-71.
- [2] 毕银丽,邹慧,彭超,等.采煤沉陷对沙地土壤水分运移的影响[J].煤炭学报,2014,39(2):490-495.
Bi Yinli, Zou Hui, Peng Chao, et al. Effect of mining subsidence on soil water movement in sandy area [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 490-495.
- [3] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:14-17.
- [4] 陈本华.中子仪室内外标定曲线误差成因略析[J].仪器仪表与分析监测,2000(3):56-60.

- Chen Benhua. Indoor and outdoor calibration curve of neutron causes error analysis [J]. *Instrumentation Analysis Monitoring*, 2000(3) : 56-60.
- [5] 王晓雷, 胡建东, 江敏, 等. 附加电阻法快速测定土壤含水率的试验 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10) : 76-77.
Wang Xiaolei, Hu Jiandong, Jiang Min, et al. Experiment on fast measurement of soil moisture based on additional resistance method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10) : 76-77.
- [6] 巨兆强. 中国几种典型土壤介电常数及其与含水量的关系 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Ju Zhaoqiang. Dielectric permittivity and its relationship with water content for several soils in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [7] 王玉珏, 吴有信. 地质雷达在工程勘探中的应用 [J]. *西部探矿工程*, 2005(11) : 107-108.
Wang Yujue, Wu Youxin. Application of GPR in engineering exploration [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2005(11) : 107-108.
- [8] 雷少刚, 卞正富. 探地雷达测定土壤含水率研究综述 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(5) : 1179-1181.
Lei Shaogang, Bian Zhengfu. Review on soil water content measurement with ground penetrating radar [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5) : 1179-1181.
- [9] Topp G C, Davis J L, Anna A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines [J]. *Water Resources*, 1980, 16(3) : 574-582.
- [10] I A Lunt S S Hubbard, Y Rubin. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data [J]. *Journal of Hydrology*, 2005(307) : 254-269.
- [12] Galagedara L W, Parkin G W, Redman J D. An analysis of the ground-penetrating radar direct ground wave method for soil water content measurement [J]. *Hydrol. Process*, 2003, 17: 3615-3628.
- [13] Tosti F, Patriarca C, Slob E C, et al. Clay content evaluation in soils through GPR signal processing [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 97: 69-80.
- [13] 崔凡, 刘杰, 吴志远, 等. 探地雷达功率谱模型在砂壤含水率和紧实度探测中的应用 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16) : 99-105.
Cui Fan, Liu Jie, Wu Zhiyuan, et al. Application of ground penetrating radar power spectrum model in detection of water content and degrees of compactness in sandy loam [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16) : 99-105.
- [14] 王凤瑛, 张丽丽. 功率谱估计及其 MATLAB 仿真 [J]. *仿真技术*, 2006, 22(11) : 287-289.
Wang Fengying, Zhang Lili. Power spectrum density estimation and the simulation in matlab [J]. *Microcomputer Information*, 2006, 22(11) : 287-289.
- [15] 王振华. 估计 ARMA 过程功率谱的一个方法 [J]. *数值计算与计算机用*, 1982, 4(3) : 176-179.
Wang Zhenhua. A method of power spectral estimation for ARMA process [J]. *Journal on Numerical Methods and Computer Applications*, 1982, 4(3) : 176-179.
- [16] 单东升, 张培强, 李超. 基于 AR 模型的功率谱估计 [J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(S2) : 518-521.
Shan Dongsheng, Zhang Peiqiang, Li Chao. Estimation of power spectrum based on AR model [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(S2) : 518-521.
- [17] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 62-65.
- [18] 李志华. ARMA 序列及其功率谱估计若干新的理论和方法 [J]. *大连海事大学学报*, 1997, 23(4) : 93-97.
Li Zihua. Some new theories and approaches of ARMA series and its spectral estimation [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 1997, 23(4) : 93-97.