DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2016.06.028

GPR 测量滨海盐渍土剖面分层的实验研究①

王 萍[1,2]，李新举[1*]，闵祥宇[1]，杨 东[1]，王 新[1]，李俊颖[1]，孙小银[2]

(1 山东农业大学农业资源利用博士后流动站，山东泰安 273100；2 曲阜师范大学地理与旅游学院，山东日照 276826)

摘 要：土壤剖面分层是 GPR 调查研究工作的主要内容，也是时域信息提取和定量反演的基础。使用 250 MHz 的 pulseEKKO PRO 探地雷达，探测不同植被覆盖或同一植被长势差异的地块，开挖剖面实测对比 GPR 的分层结果，剖析电磁波信号对土壤水分、盐分、粒径组成 3 个因子的响应特征。结果表明，从 GPR 波谱特征中可以区分表层盐渍化程度不同的地块，误差多小于 0.5 m；综合波谱影像和振幅变化数据，能够辨晰 0 ~ 1 m 的土层信息，分层误差可达 0.1 m；土壤盐分对电磁波信号的影响特征在该地区表现得十分显著。

关键词：GPR；土壤剖面；滨海盐渍土；土壤盐分

中图分类号：S152；S159

近年来，探地雷达(GPR)作为一种中小尺度无损探测技术越来越多地应用于土壤特性的调查中。目前，国内该方向研究常用的探地雷达设备有：美国 Pulse 雷达公司的 Radar 系列雷达、美国地球物理探测设备公司(GSSI)的 SIR 系列雷达、加拿大探测器与软件公司的 EKKO 系列雷达、瑞典的 MALA 雷达、中国电波传播研究所的 LTD 系列雷达以及中国矿业大学(北京)的 GR-Ⅲ 雷达。大多应用研究是关于土壤层次和厚度、水分的测定[1]。例如，于秀秀等[2]探测新疆伊犁新垦区山前洪积冲积平原的薄层土壤的厚度；赵艳玲等[3]通过模型试验证明了探测不同质地的复垦土层结构的可行性；李晓静等[4]结合电阻率层析成像仪探测山区因采矿造成稻田土壤裂缝、水分渗透的差异；王前锋等[5]找到确定探地雷达最佳天线间距来提高土壤表层含水量测定精度的方法；周立刚等[6]利用高频探地雷达测定粉砂质黏壤土表层(0 ~ 20 cm)土壤含水量，精度较高。

探地雷达技术是基于介质的电磁特性，通过介电常数和速度的变化来反映土壤特征因子。一般认为，水分是影响土壤介电特性和 GPR 信号传播能力的主导因子，而溶解在土壤毛管水中的盐分，由于其高电导性，能造成 GPR 信号高度衰减，限制穿透深度。有研究表明，盐渍土(饱和电导率≥4 mS/cm)和钠质土(钠吸收率≥13)都不适合 GPR 的应用[7]。国内已开启了应用 GPR 对内陆盐渍土的研究，分析土壤性质与地质雷达信号的关系[8]，评估盐渍化在深度方向上的变化[9]，估算土壤盐分含量[10–11]。并且发现介电常数实部对土壤体积含水量的响应十分显著，虚部对含盐量的响应十分显著，分别随着含水量和含盐量的增加而增长[12]。探地雷达在喀斯特地貌区和土壤污染区也有成功的应用研究[13–15]。若土壤黏土矿物含量高达 350 ~ 600 g/kg，或者是黏土矿物含量 180 ~ 350 g/kg 的石灰性/石膏性土壤，GPR 的应用潜力较低，探测深度受到很高限制[7]。综上分析，土壤水分、盐分、黏粒含量对 GPR 电磁波的影响密切，含量越高，电磁波信号衰减越强烈。

滨海盐渍土地区土壤中常年水盐含量较高，土壤盐分对作物生长胁迫作用强烈，土壤水盐运移特征因土体构型不同而差异显著。如果可以利用探地雷达快速检测剖面土壤分层特征，进而反演土壤水分与盐分的空间变异，具有重要的实践意义。同时，在该地区利用探地雷达进行土壤调查的适宜性和准确度也值得探讨。本文尝试在山东省黄河三角洲滨海盐渍土地区开展 GPR 土壤调查实验研究，阐明 GPR 探测剖面土壤特性变化的可行性，分析不同植被覆被条件下探地雷达波谱影像的差异，探讨土壤特征差异对电磁波

①基金项目：山东省自然科学基金项目(ZR2015PD001)资助。

* 通讯作者(lxj0911@126.com)

作者简介：王萍(1983—)，女，山东寿光人，博士，讲师，主要从事土地利用信息技术方面的研究工作。E-mail: wpqfnu@126.com

信号的影响机理。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点

本研究的两个试验地点均位于典型的黄河三角洲滨海盐渍土区域(经纬度坐标见图 1)：山东省滨州市的“渤海粮仓”试验田，距海直线距离约 24 km，种植小麦，同一条田内小麦长势差异显著；山东省东营市机场附近的荒草地，距海直线距离约 13 km，不同植被类型在实验片区内紧邻分布。

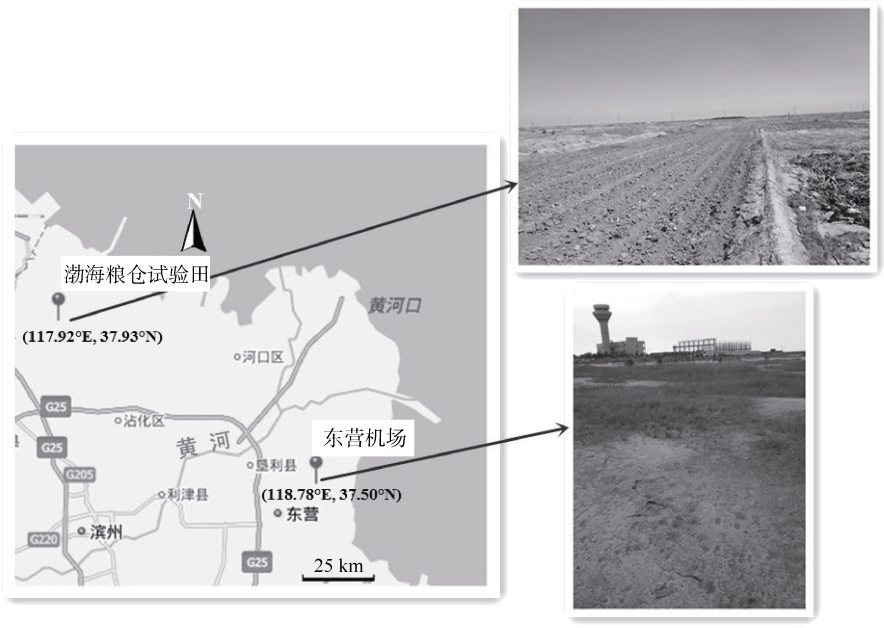

图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic locations of the study area

1.2 试验设计

本研究采用加拿大探测器与软件公司生产的 pulseEKKO PRO 系列探地雷达主机以及 250 MHz 屏蔽天线，数据采集软件为 DVL Firmware，GPR 数据利用自带的 LineView 软件进行解读。测量时窗设置为 76 ns，水平采样间隔 0.04 m。

测量步骤主要有 3 步：①沿样区长边方向剖面法测量，测线经过不同类型植被覆盖的或同一植被长势差异的地块；②现场观察控制面板中的波谱影像，找出 GPR 图像沿测线方向的变异点，并进行实地对照；③选取单一植被类型覆盖或者相同长势条件下的典型地块，垂直于样区长边方向剖面法测量。图 2 是以含有 3 个典型地块的样区为例绘制的 GPR 测量示意图。

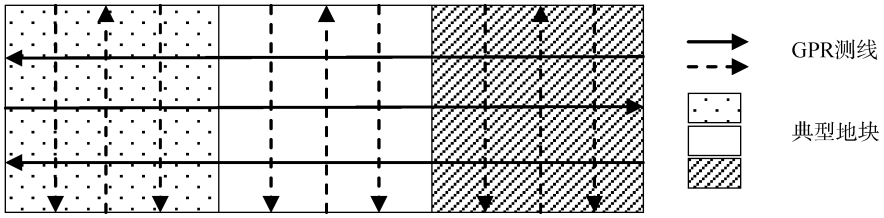

图 2 样区 **GPR** 测量示意图

Fig. 2 Sketch map of plot surveying with GPR

1.3 数据处理与分析技术

采集的雷达波谱图像处理中，秉持使用最少的图像处理技术和步骤，并获取高清晰度的上层土体剖面信息为原则，主要包括有 3 步：①基础滤波处理，旨在消除不必要的低频信号，保留高频信号；②空气波校正，旨在获取雷达图像准确的起点位置；③指数补偿增益，初始值设置为 10，最大增益设置为 1 000，衰减系数设置为 32，可比较上层土体中不同深度的雷达信号强度。

选取单一植被类型覆盖或者单一长势条件下的

测线，采集时间–振幅、频率–振幅图像并导出数据。时间–振幅图像横坐标为电磁波传播时间，纵坐标为某时间点下单一测道的平均振幅能值。频率–振幅图像横坐标为频率值，纵坐标为某频率下的平均振幅能值。

在典型地块中心点开挖土壤剖面，利用米尺在土壤剖面上定位判读每层土壤的深度和厚度，自下而上分层采集土壤样品。将采集的土壤样品带回实验室自然风干、磨碎，过 2 mm 孔径的筛子后，①烘干法测定土壤水分含量；②按水土比 5∶1 的比例提取浸提液，使用美国哈希公司 HQ30d 数字化分析仪测定土壤电导率；③使用马尔文仪器有限公司 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪进行土壤粒径测量。

2　结果与分析

2.1　土壤特性分析

观测滨州麦田土壤剖面，裸土地地块没有明显的分层现象；小麦长势一般的地块在 30 ~ 60 cm 深度内土壤颜色、质地变化不均匀，60 cm 深度以下土壤紧实、颜色变为青色；小麦长势好的地块主要特征为 60 cm 深度以下土壤紧实、颜色变为青色。东营荒草地中 4 种植被覆盖的地块在 30 ~ 40 cm 深度土壤特性发生第一次变异，但芦苇和茅草地块在 70 cm 以下土层受扰动显著。因此，本研究以 30 cm 为间隔采集土壤样品，东营荒草地试验区只分析 0 ~ 60 cm 的土层。分层土壤特性测定结果见表 1。

表 1　土壤特性测定结果统计表

Table 1　The statistic results of soil properties

试验点	样地	土层 (cm)	含水量 (g/kg)	电导率 (mS/cm)	粒径组成(g/kg)			质地 (国际制)
					<0.002 mm	0.02 ~ 0.002 mm	2 ~ 0.02 mm	
滨州	裸土地	0 ~ 30	131.7	7.110	59.2	510.8	430.1	粉砂质壤土
		30 ~ 60	172.1	2.355	61.7	608.7	329.7	粉砂质壤土
		60 ~ 90	255.9	3.075	81.9	596.2	322.0	粉砂质壤土
	小麦长势一般的地块	0 ~ 30	144.0	0.428	58.3	477.3	464.4	粉砂质壤土
		30 ~ 60	304.1	1.282	100.4	581.5	318.2	粉砂质壤土
		60 ~ 90	345.9	1.195	103.3	645.2	251.6	粉砂质壤土
	小麦长势好的地块	0 ~ 30	138.4	0.523	92.5	507.0	400.7	粉砂质壤土
		30 ~ 60	326.0	0.735	86.5	598.8	314.8	粉砂质壤土
		60 ~ 90	243.8	0.884	87.6	577.4	335.0	粉砂质壤土
东营	裸土地	0 ~ 30	136.5	12.610	37.9	298.1	664.1	砂质壤土
		30 ~ 60	137.3	5.040	43.1	331.4	625.7	砂质壤土
	芦苇	0 ~ 30	71.1	3.920	36.3	281.1	682.7	砂质壤土
		30 ~ 60	121.3	2.695	58.6	427.4	514.0	壤土
	黄须菜	0 ~ 30	129.0	4.995	45.1	351.9	603.1	砂质壤土
		30 ~ 60	132.9	2.565	51.1	367.8	581.3	砂质壤土
	茅草	0 ~ 30	93.6	0.813	61.4	372.9	565.9	砂质壤土
		30 ~ 60	171.7	0.834	29.8	193.0	777.2	砂质壤土

2.1.1　土壤水分　　滨州麦田表层土壤含水量基本一致，中下部土层含水量差异明显，小麦长势一般和长势好的地块中层土壤含水量接近并同时显著高于裸土地，小麦长势一般的地块下层土壤含水量显著高于裸土地和小麦长势好的地块。东营荒草地中，裸土地和黄须菜地块的土壤水分特性相似且上中层含量接近，芦苇和茅草地块的土壤水分特性相似且中层土壤含水量明显高于上层土壤。

2.1.2　土壤盐分　　本研究采用电导率来表征土壤盐分情况。盐分和电导率值换算公式参考公式 $y = 0.402x + 0.142$，y 为盐分，x 为电导率值[16]。我国滨海盐渍土土壤盐分分级[17–18]转换结果见表 2。总体来看，地表植被类型或长势的差异可表征土壤表层盐分含量的高低。滨州麦田内裸土地表层土壤属于中度盐渍化土，小麦长势一般和长势好的地块表层土壤均属于非盐渍化土；东营裸土地、黄须菜、芦苇、茅草 4 种植物生长的表层土壤分别属于重度盐渍化土、中度盐渍化土、轻盐渍化土和非盐渍化土。下部土层盐分的高低也能明显影响植被的长势，例如小麦长势一般的地块下部土壤盐分要高于小麦长势好的地块。

2.1.3　土壤粒径组成　　根据国际制土壤质地分级标准，滨州麦田土壤属于粉砂质壤土，东营荒草地土

表 2 盐渍化等级参照表
Table 2 Reference table of salinization grades

指标	非盐渍化	轻度盐渍化	中度盐渍化	重度盐渍化	盐渍化
盐分(g/kg)	<1	1 ~ 2	2 ~ 4	4 ~ 6	>6
电导率(mS/cm)	<2.13	2.13 ~ 4.62	4.62 ~ 9.60	9.60 ~ 14.57	>14.57

壤属于砂质壤土。挖掘的土壤剖面有明显的分层现象，比如在滨州小麦长势一般和长势好的地块、东营茅草覆盖的地块中，都分布有质地硬而黏的黏土层。对照土壤粒径的分析结果，应该是土壤层次中砂粒含量较低、黏粒或粉砂粒含量较高的原因。

2.2 波谱图像分析

2.2.1 滨州麦田探测分析 首先，沿测线走向横向观察，可从土壤剖面波谱影像差异中区分小麦长势不同的地块。因测线较长，这里分别截取了小麦长势不同的地块中典型测线的图像(图 3)。从土壤剖面的波谱影像中，可以看到反射面的数量、位置、形态以及间距的差异。现场对 GPR 波谱影像进行增益，从控制面板中读出地块的变异位置，然后与沿测线标记的米尺上的数据进行对比，发现 GPR 区分典型地块的误差可缩减在 0.5 m 之内(表 3)。在测线起点附近，偶有小撮麦苗零散分布的地块与裸土地地块之间、裸土地与麦苗长势一般的地块之间测量误差偏大，可能是由于测线选取不够典型、土壤特性有突变造成的。

表 3 地块变异位置对照表(m)
Table 3 The variation position of plots

地表覆被	起点	裸土地，偶有小撮麦苗零散分布	裸土地	麦苗长势一般的地块	裸土地，偶有小撮麦苗零散分布	裸土地	麦苗长势一般的地块	麦苗长势好的地块
米尺标记位置	0	25.6	44.8	76.8	83.2	108.8	118.4	166.0
GPR 读取位置	0	27.5	39.0	76.5	83.0	108.5	118.0	166.0
误差	–	1.9	5.8	0.3	0.2	0.3	0.4	–

然后，沿土壤剖面纵向观察，从图 3 中可看出，我们能够辨晰深度 1.5 m 以内的土层信息，0 ~ 1 m 的土层辨识度更高。与实地开挖的土壤剖面进行对照，可估计 GPR 识别土壤分层的误差在 0.1 m 左右。结合土壤特性测量结果，分析得到：①3 个地块在 0.4 m 深度处都具有平直强烈的反射波面。其原因是主要受农业耕作的影响，表层土壤水分与下层土壤差异显著，土壤介电特性在此发生明显变化，因此出现强烈的反射界面；②GPR 反射波在 3 个地块 0.4 ~ 1 m 深度范围的差异明显，这主要是剖面土壤特性变化造成的。裸土地的 3 层反射波分布均匀一致，代表了剖面土壤特性的综合作用未使电磁波发生显著变异，只是随探测深度匀速衰减。小麦长势一般的地块在 0.65 m 处有一个强烈的反射波，与 0.4 m 处的反射界面外型类似，可将 0.4 ~ 0.65 m 划定为一个土层，该层土壤水分、盐分、黏粉粒含量较上层土体变大，砂粒含量减少；0.9 m 处反射波界面较为模糊，说明电磁波在 0.4 ~ 0.65 m 土层中衰减剧烈，致使我们难以继续判读下层土体的波谱特性。小麦长势好的地块在 0.6 m 深度处有强烈的平直反射波面，应该主要是因为下层土壤含水量降低造成的。与小麦长势一般的地块对比，小麦长势好的地块在 0.9 m 处反射波界面更为清晰，应是因为 0.6 ~ 0.9 m 土层中水分、盐分以及黏粉粒含量的相对偏低，对电磁波信号的衰减作用相对较弱。

2.2.2 东营荒草地探测分析 首先，沿测线走向横向观察，通过分析剖面波谱影像中反射面的数量、位置和形态的差异，可以区分不同植被覆盖的地块(图 3)。裸土地、芦苇、黄须菜和茅草覆盖的地块变异分别在测线 5、14.8 和 23.6 m 左右的位置。现场对 GPR 波谱影像进行增益，从控制面板中读出地块的变异位置，然后与沿测线标记的米尺上的数据进行对比，发现 GPR 区分裸土地与芦苇地块、芦苇地块与黄须菜地块、黄须菜地块与茅草地块的误差分别为 0.5、0.2 和 0.6 m。

然后，沿土壤剖面纵向观察，我们能够辨晰深度 1.2 m 以内的土层信息，0 ~ 1 m 的土层辨识度更高。结合表 1 分析得到：①裸土地和黄须菜地块的波谱影像中，土壤剖面内反射层平直连续、间隔均匀且数量多，与剖面上分层土壤特性接近有关。②芦苇和茅草地块的剖面影像中在 0.5 m 左右出现第一个连续的反射界面，主要是因为土壤水分、黏粉粒含量变化引起的。茅草地块中上层土体电磁波信号的衰减更为显著，可能是由于该地块上层土体中含有较多的黏粉粒；尽管剖面中土壤盐分含量低，但电磁波的探测深度并未显著增加。这更说明了土壤特性对 GPR 电磁

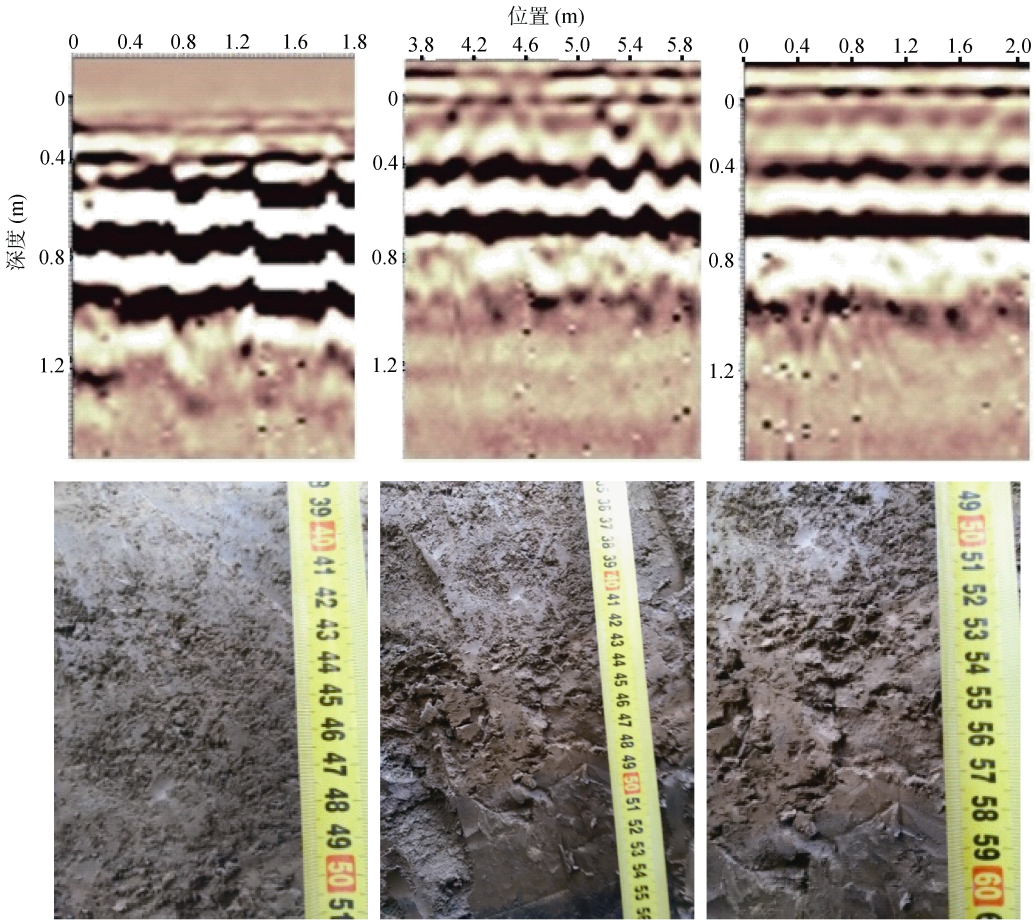

图 3　滨州麦田 GPR 波谱影像与剖面照片

Fig. 3　GPR spectra and profile photos of Binzhou wheat lands

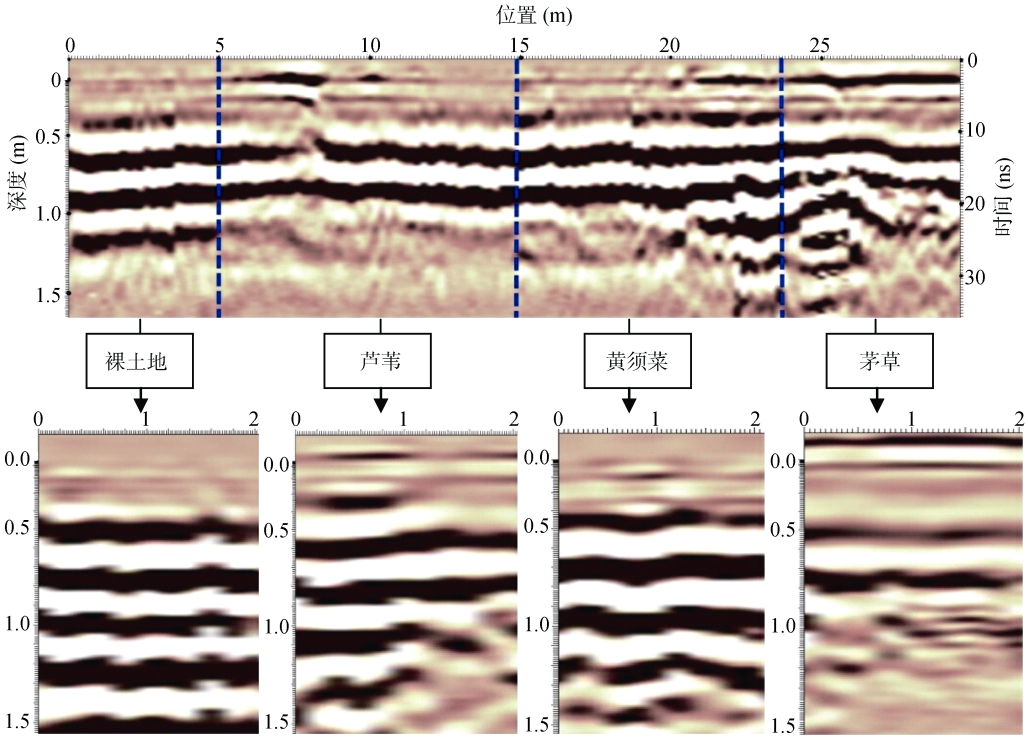

图 4　东营荒草地 GPR 波谱影像

Fig. 4　GPR spectra of Dongying desert grass lands

波信号的综合作用。③在测线 21 ~ 26 m 的范围内，也就是黄须菜和茅草地块的交界处，剖面 1.0 m 深度左右的土层可能发生过扰动，从图像的凸起状态判断可能是有管道埋设，因而造成两个地块分界处波谱信息变化不够显著。这两个地块的分辨主要依靠 0.6 m 以上土层的波谱信息。

2.2.3 时间–振幅数据分析　　为了进一步阐明剖面土壤特性差异分层与电磁波信号之间的相关性，选取随电磁波传播时间而变化的振幅数据进行分析(图 5)。振动幅度的大小和振动的强弱反映介质内振动的能量。在同种介质中，波的形态不变，振动的能量随着双程走时的增加而逐渐减小；在不同介质的交界面，波形图的形状和大小发生改变，变为另外一种形态。以滨州麦田内的裸土地和麦苗长势好的两个地块为例进行分析：①裸土地的振幅图中，0 ~ 8 ns 范围内振幅变化复杂，主要是因为地块表层有犁起的垄沟，缺少作物生长，土体十分松散；8 ~ 16 ns 范围内振幅波形基本一致，只是振幅能值随着双程走时的增加逐渐减小，这是因为剖面 0.4 ~ 0.7 m 左右深度范围内土壤特性相近。②麦苗长势好的地块其振幅波形变化分为 3 个阶段，0 ~ 8、8 ~ 14 和 14 ~ 20 ns，对应的土壤剖面变异深度为 0.4、0.6 m 左右。0 ~ 8 ns 的振幅波形与后两个阶段的振幅波形差异明显，后两个阶段的振幅波形差异较小，主要由土壤水分、盐分含量不同造成的。③将两地块的时间–振幅数据对比，麦苗长势好的地块的振幅能值高于裸土地。结合表 1，麦苗长势好的地块的土壤含水量、黏粒含量都高于裸土地地块；同时，我们都知道水分和黏粒都是造成 GPR 电磁波衰减的重要因素[19]，这样可以推论出，土壤可溶性盐分是造成裸土地振幅能值降低的主要原因。

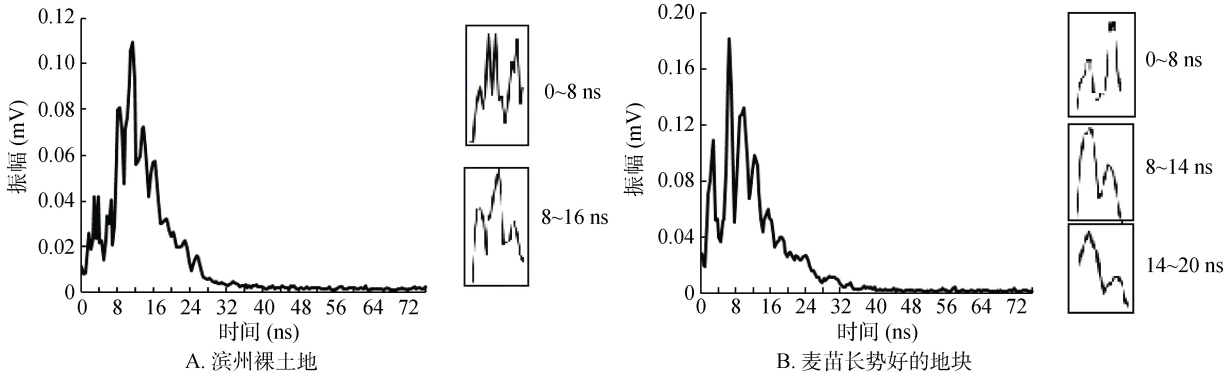

图 5　振幅–时间图

Fig. 5　The spectrum of amplitude-time

2.2.4 频谱数据分析　　进一步研究该地区土壤盐分对电磁波信号的影响，选取频谱数据分析分段频域上电磁波振幅能值的差异(图 6)，得出：①土壤盐分含量越高，电磁波振幅能值越低。一般来讲，土壤水分能够显著造成电磁波信号衰减和振幅能值降低[20]。在滨州小麦田中，裸土地中下层的土壤水分含量明显低于麦苗长势一般和麦苗长势好的地块，但同一频率下的振幅能值数据的规律是裸土地<麦苗长势一般的地块<麦苗长势好的地块；东营荒草地中，4 类地块的土壤水分含量接近，同一频率下的振幅能值数据的规律是裸土地<黄花菜地块<芦苇地块<茅草地块。这个规律与地块表层土壤电导率数值的高低规律恰好相反，土壤盐分对电磁波信号的影响特征在滨海盐渍土区表现得十分显著。②土壤盐分的高低直接影响振幅峰值出现的次数和相位。以往的研究中，多介绍介质盐分含量越来越高，频谱图像中会有多峰出现[21]。如图 6 所示，电磁波振幅有 3 个高峰值，分别出现在频率 200 MHz 左右、300 ~ 500 MHz 之间、690 MHz 左右。土壤盐分含量越高，高频域段的多峰现象越弱，如东营裸土地的频谱图像中只有 186 MHz 频率处的峰值最为突出，高频区振幅能值变化近乎平缓。同时，还发现土壤盐分越高，第一个峰值相位前移，后两个峰值尤其是第二个峰值相位后移。例如东营的裸土地和黄须菜两个地块，从表 1 中可以看出土壤理化因子差异主要体现为土壤盐分含量不同，裸土地土壤盐分含量高于黄须菜地块，而图 6 中裸土地 3 个峰值出现对应的频率分别是 186、454 和 698 MHz，黄须菜地块 3 个峰值出现对应的频率分别是 195、420 和 689 MHz。

3　讨论

3.1　GPR 测定结果是土壤特性差异分层

电磁波信号因土壤特性的差异而发生变化，当某一层次内土壤特性值接近均匀时，从 GPR 波谱影像中可观测到平滑的形态相似的反射波形；当层次间土

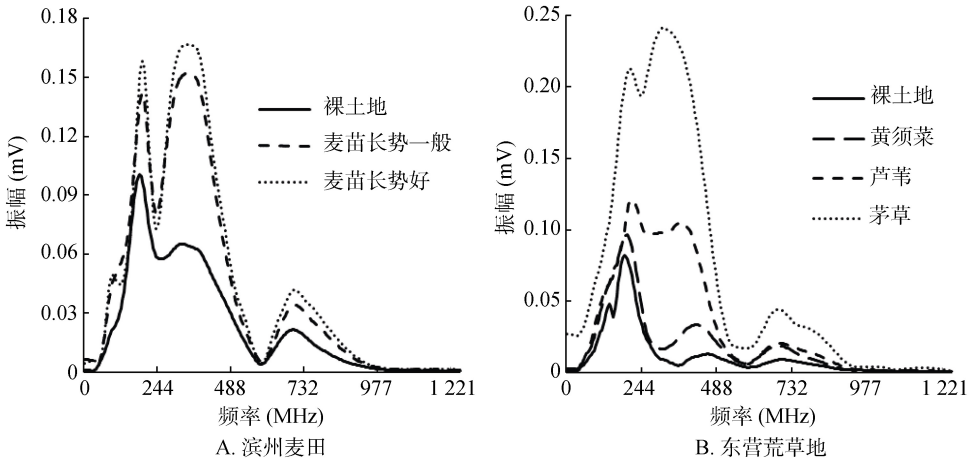

图 6　振幅–频率图

Fig. 6　The spectra of average amplitude-frequency

壤特性不一致，准确地说土层间土壤介电特性不同时，GPR 波谱中会在土层分界面处出现形态、密度、亮度有差异的反射波形。因此，GPR 探测的是土壤特性差异分层，与土壤发生分层结果不能完全吻合。今后应当尝试自动化识别土壤分层，提高 GPR 测量的专业化水平[14]。

与定位测量技术相比[22]，GPR 能够连续模拟测线方向上土壤剖面；与遥感光谱特征反演技术相比，测量深度大、精确度高[23–24]。EM38 大地电导仪是目前常用的土壤剖面电导率测量仪器，在盐渍土区域得到了成功的应用[25–26]，获取的直观数据是连续的线划数据，后期插值可生成区域土壤电导率分布图像；而 GPR 获取的直观数据是图谱影像，土壤结构分层信息较为明显。

3.2　滨海盐渍土中 GPR 信号衰减显著

GPR 信号衰减显著表现为探测深度降低、图像增益较大。

中心频率为 250 MHz 的 GPR 测量干燥沙层的最大深度可达 4 ~ 5 m，而在滨海盐渍土区域的探测深度明显受到限制。本研究试验中测量的土壤剖面深度较浅，仅 1 m 厚度内的土层信息较为清晰，1 m 的探测深度能满足对农作物耕层土壤观测的要求，但无法与地下水位变化相结合，分析土壤水盐的运移和变化。因此，要观测地下水位变化特征，应尝试降低 GPR 的中心频率。

该试验波谱影像处理时指数补偿增益数值偏高(1.3 章节)。以往进行土地整理项目区调查模拟试验中，土壤为非盐渍化土，人为添加盐分至轻度盐渍化土，浅层土体剖面波谱影像处理时大多未使用增益，土壤分层效果也十分显著[27]。

3.3　GPR 信号受到土壤因子的综合影响

一般来说土壤水分影响土壤介电常数的实部，对电磁波信号的影响最大；土壤水分中溶解的矿物质影响土壤介电常数的虚部，对电磁波信号有一定的衰减作用[12]。土壤黏粒能够定向和固定溶解的带电盐分离子，减少极化下的外部电磁场，从而造成 GPR 信号衰减[7]。本研究选取土壤水分、盐分和粒径组成 3 个主要的影响因子，发现 GPR 电磁波信号的传播受到土壤多因子的复合影响，试图从机理上阐释各个因子对电磁波信号的影响特征，重点剖析了土壤盐分与电磁波振幅变化的相关特征。

从章节 2.2 中我们发现，要想揭示单因子对电磁波信号的影响规律，必须剥离其他因子的影响，方法有二：①采用模型实验，控制影响因子的种类和变化趋势；②进行大量的野外调查，寻找其他因子相近的地块进行类比分析。

4　结论

1) 250 MHz 中心频率的 GPR 适宜于滨海盐渍土区浅层土壤特性的调查。通过探测不同植被覆盖或同一植被长势差异的土壤剖面，并实测分层土壤特性，证明从 GPR 波谱影像中可以区分表层盐渍化程度不同的地块，水平位移误差多小于 0.5 m；综合波谱影像和振幅变化数据，可以辨晰 0 ~ 1 m 的土层信息，垂直分层误差可达 0.1 m。这为今后利用 GPR 时域信号分地块、分层定量反演土壤因子奠定基础。

2) 滨海盐渍土区土壤盐分对电磁波信号的影响十分显著。土壤盐分含量越高，电磁波振幅能值越低，土壤可溶性盐分是造成裸土地振幅能值降低的主要原因；土壤盐分含量升高造成高频域段的振幅强烈衰减以及高峰数目的减少，振幅峰值对应的频域位置发生改变，表现为第一个峰值对应的频率降低，后两个峰值尤其是第二个峰值对应的频率升高。这为今后利

用 GPR 电磁波振幅和相位信息定量反演土壤因子奠定理论基础。

参考文献：

[1] Alfred E. Hartemink, budiman minasny. Towards digital soil morphometrics[J]. Geoderma, 2014, 230–231: 305–317

[2] 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

[3] 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]. 科学导报, 2009, 27(17): 35–37

[4] Li X J, Hu Z Q, Li S C, et al. Anomalies of mountainous mining paddy in western China[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 145: 10–19

[5] 王前锋, 周可法, 孙莉, 等. 基于探地雷达快速测定土壤含水量的试验研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 881–888

[6] 周立刚, 于东升, 王玺洋, 等. 基于高频探地雷达的土壤表层含水量测定[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 621–626

[7] Doolittle J A, Minzenmayer F E, Waltman S W, et al. Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States[J]. Geoderma, 2007, 141: 416–421

[8] 徐白山, 田钢, 曾昭发, 等. 白城地区盐碱地土壤性质与地质雷达信息应用研究[J]. 水土保持通报, 2004, 22(2): 9–12

[9] Peng L, Zhang L X, Deng Y S, et al. Study on salt migration in saline soil using GPR// Recent development of research on permafrost engineering and cold region environment-Proceedings of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering[C]. 1st Edition. Xi'an: The Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, 2009: 698–707

[10] 江洪南. 探地雷达在干旱区盐渍化土壤层定量探测中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 800–803

[11] 薛建, 曾昭发, 田刚, 等. 探地雷达在吉林西部地区探测土壤碱化层[J]. 物探与化探, 2005, 29(5): 421–424

[12] 雷磊, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 干旱区盐渍土介电常数特性研究与模型验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 125–133

[13] 夏银行, 黎蕾, 陈香碧, 等. 基于探地雷达技术估算喀斯特峰丛洼地不同坡位土壤有机碳密度的方法[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 920–927

[14] 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): 1 024–1 030

[15] 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

[16] 翁永玲, 宫鹏. 黄河三角洲盐渍土盐分特征研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2006, 42(6): 602–610

[17] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 130–211, 312–345

[18] 周颖, 张侠, 周峰. 江苏省耕地地力等级划分[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(4): 580–586

[19] Benedetto A. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain[J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 71: 26–35

[20] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines[J]. Water Resource Research, 1980, 3: 574–582

[21] Comite D, Galli A, Lauro S E, et al. Analysis of GPR early-time signal features for the evaluation of soil permittivity through numerical and experimental surveys[M]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015: 1–10

[22] 付腾飞. 滨海盐渍土水盐运移过程实时自动监测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 14–21

[23] 刘庆生, 刘高焕. 现代黄河三角洲潮土水盐与野外光谱特征浅析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(3): 253–257

[24] 刘娅, 潘贤章, 王昌昆, 等. 基于差异化光谱指数的盐渍土水分含量预测——以滨海盐土为例[J]. 土壤, 2016, 48(2): 381–388

[25] 陈玉娟. EM38 大地电导仪的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 146–148

[26] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. EM38 在黄河三角洲地区土壤盐渍化快速检测中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 68–73

[27] Wang P, Hu Z Q, Zhao Y L, et al. Experimental study of soil compaction effects on GPR signals[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 126: 128–137

Experimental Study on GPR Measurement of Coastal Saline Soil Profile

WANG Ping[1,2], LI Xinju[1*], MIN Xiangyu[1], YANG Dong[1], WANG Xin[1], LI Junying[1], SUN Xiaoyin[2]

(1 *Postdoctoral Research Station of Agricultural Resources and Environment*, *Shandong Agricultural University*, *Tai'an*, *Shandong* 273100, *China*; 2 *School of Geography and Tourism*, *Qufu Normal University*, *Rizhao*, *Shandong* 276826, *China*)

Abstract: The identification of soil profile layers is the main research content of GPR investigation and also the basis job of time-domain signals extraction and quantitative inversion. In this study, pulseEKKO PRO GPR of 250 MHz central frequency was used to detect the soil profile layers of plots covered by different vegetation coverages or plots covered by same vegetation but with different growing conditions, and the results were compared the soil profile layers obtained by the method of digging profiles, and the response characteristics of electromagnetic wave signals to soil water, salinity and grain size composition were also analysed. The results showed that: 1) By observing GPR spectral images, soil profile variation with different vegetation coverages and growing conditions can be distinguished with errors mostly are less than 0.5 m. 2) Soil layer information in the depth of 0–1 m can be clearly distinguished with comprehensive analyses of soil profile spectral images and amplitude-time data with 0.1 m discriminating error of soil layering. 3) The effects of soil salinity on electromagnetic wave signals are very significant in this region.

Key words: GPR; Soil profile; Coastal saline soil; Soil salinity