

# 不同水分条件下粗砂土剖面中目标物的 GPR 图像特征及其解译<sup>①</sup>

刘恒柏<sup>1,2</sup>, 朱安宁<sup>1</sup>, 张佳宝<sup>1\*</sup>, 刘建立<sup>1</sup>, 信秀丽<sup>1,2</sup>

(1 封丘农田生态系统国家试验站, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 通过粗砂土人工土槽试验, 研究了不同水分处理下土壤剖面中目标物探地雷达波形态特征的变化及其解译。结果表明, 采用 500 MHz 中心频率天线采集 GPR 数据, 可以获取不同水分条件下粗砂土 1 m 土体内介电性质异常的目标物较高分辨率的形态特征和位置信息数据; 土壤含水量的增加会导致土壤中目标物界面反射信号强度减弱、双程走时增加以及目标物 GPR 图像形态特征的变化; 在土壤性质、水分条件较均一的情况下, 利用 GPR 数据通过时间-深度转换可以准确地确定目标物的埋藏深度。

**关键词:** 探地雷达; 粗砂土; 土壤水分; 解译

**中图分类号:** S152

土壤剖面特征信息的认知是农学、土壤学等相关科学研究以及农田科学管理的重要基础, 特别是农田水分、污染物等溶质迁移精确模拟所必需的基础数据。机械开挖和钻孔取样是最直接和最原始的认知土壤剖面信息的方法, 但是耗时费力, 且明显存在空间尺度上的局限性。20 世纪人类在视觉以外的空间上的延伸主要得益于电磁波应用技术的发展<sup>[1]</sup>, 探地雷达 (ground penetrating radar, GPR) 技术就是一种利用电磁波原理解决各种地下目标探测问题的空间成像技术。

近 20 年来, 随着数字信号处理技术和电子器件水平的提高, 探地雷达在地质调查、冰河学领域、工程和建筑学领域、考古学领域等已得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>。20 世纪 90 年代中期以来, 外国学者利用 GPR 对土壤层次结构<sup>[5-7]</sup>、土壤水分含量<sup>[8-10]</sup>、地下水位<sup>[11-12]</sup>等的探测展开了诸多有意义的尝试; 我国在 20 世纪 70 年代就开始了探地雷达的研制工作, 但探地雷达技术在各领域的应用起步较晚, 当前的研究主要集中在雷达研制及相关的信息处理技术等方面<sup>[13-14]</sup>, 而在土壤学领域的研究还未展开。

土壤含水量是影响土体电性质及电磁波在土壤中传播的主要因素, 本研究通过人工土槽试验, 针对不

同水分条件下粗砂土剖面中目标物的 GPR 图像特征及其解译展开研究, 为实现农田土壤剖面特征信息的 GPR 探测提供理论和技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

**1.1.1 试验设置** 试验在中国科学院封丘农业生态试验站内进行。供试土壤为黄河沉积物粗砂土, 其粗砂、砂粒、粉粒、黏粒分布分别为 34.23%、58.35%、3.44%、1.90% (参照国际分类制)。土壤风干后按 1.3 mg/cm<sup>3</sup> 填入一人工水泥槽 (长×宽×深: 2 m × 1 m × 0.98 m)。在槽北端土壤剖面 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m 深度分别埋设美国 SEC 公司 6005CL2 型埋入式 TDR 波导探头, 在 0.2、0.5、0.8 m 深度分别埋设中国科学院南京土壤研究所研制的 TYC-2 型土壤盐分传感器 (图 1)。

在剖面不同深度分别埋设薄铁片和圆形铝盒作为目标物, 铁片大小规格分别为铁片 I: 0.58 m × 0.18 m × 0.0015 m, 铁片 II: 0.58 m × 0.19 m × 0.0015 m, 铁片 III: 0.9 m × 0.398 m × 0.0015 m, 埋深分别为 0.3、0.6 和 0.98 m; 铝盒直径 0.12 m, 高 0.055 m, 埋设深度分别为 0.7 和 0.3 m (图 1)。

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40571069)、国家高技术研究发展计划 (863) 课题项目 (2006AA10Z208) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2005CB121103) 资助。

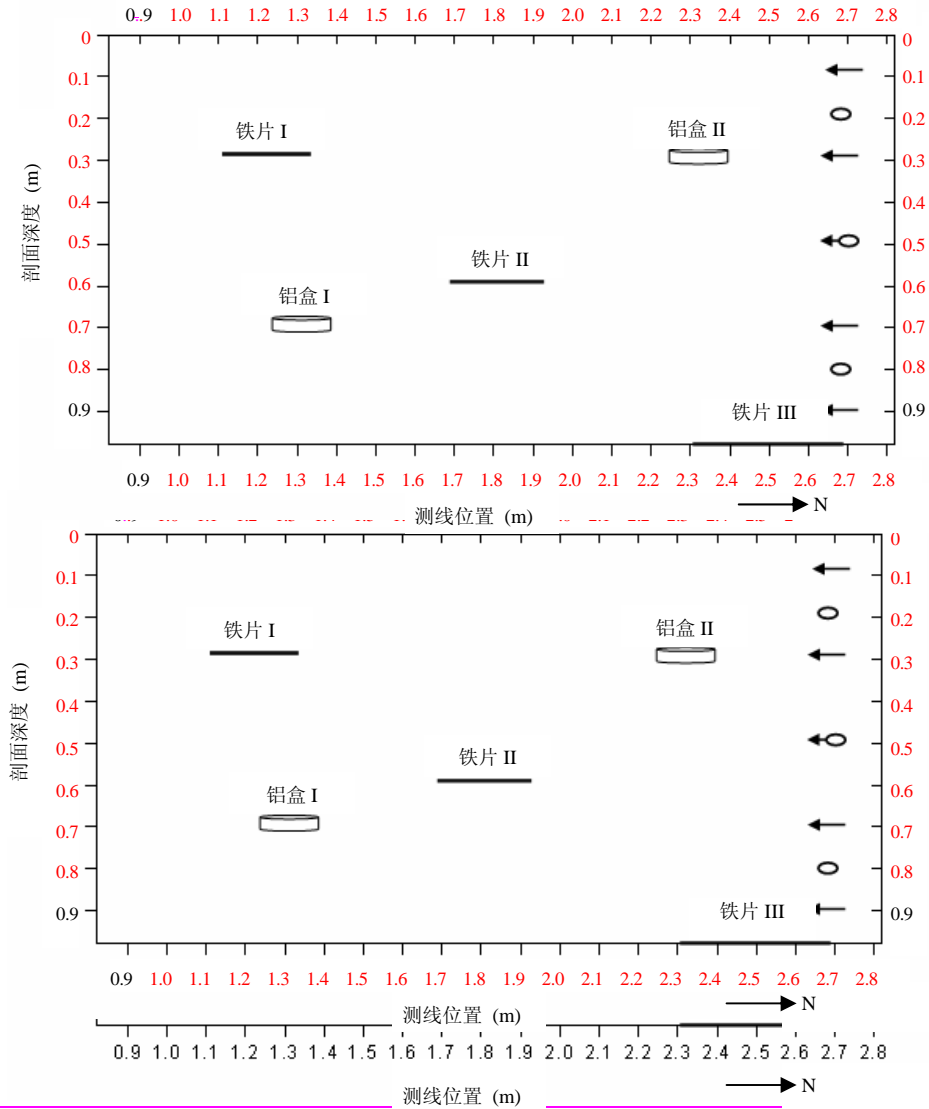
\* 通讯作者 (jbzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 刘恒柏 (1983—), 男, 湖北大冶人, 硕士研究生, 主要从事探地雷达方面的研究。E-mail: hbliu@mail.issas.ac.cn

收稿日期: 2008年12月11日

\* 通讯作者 (jbzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 刘恒柏 (1983—), 男, 湖北大冶人, 硕士研究生, 主要从事探地雷达方面的研究。E-mail: hbliu@mail.issas.ac.cn



(土槽南端内壁和北端内壁在测线位置上的坐标依次为 0.82 和 2.82 m；图中标注的箭头表示 TDR 探针，椭圆圈表示盐分传感器)

图 1 土槽试验埋设布置剖面图

Fig. 1 Layout of side elevation experiment

在剖面不同深度分别埋设薄铁片和圆形铝盒作为目标物，铁片大小规格分别为铁片 I： $0.58\text{ m} \times 0.18\text{ m} \times 0.0015\text{ m}$ 、铁片 II： $0.58\text{ m} \times 0.19\text{ m} \times 0.0015\text{ m}$ 、铁片 III： $0.9\text{ m} \times 0.398\text{ m} \times 0.0015\text{ m}$ ，埋深分别为 0.3、0.6 和 0.9 m；铝盒直径 0.12 m，高 0.055 m，埋设深度分别为 0.7 和 0.3 m (图 1)。

测线取槽面南北向中线，起点距槽南端内壁 0.82 m，终点距槽北端 0.18 m，测线全长 3 m。铁片的长轴与测线垂直，铁片 I、II、III，铝盒 I、II 几何中心的测线位置坐标依次为 1.22、1.82、2.26、1.32 和 2.32 m。

1.1.2 水分处理 试验设 3 个水分处理，试验前分别灌水 0 (风干)、100、250 mm；待水分再分布完成后开始进行探地雷达、含水量、介电常数及电导率数据采集。

### 1.2 数据采集

探地雷达剖面数据用固定天线间距法 (fixed offset method, FOM) 采集，所用仪器为瑞典 Malå GeoScience 公司生产的 X3M Corder 探地雷达主机及 500 MHz 屏蔽天线，采集软件为 RAMAC Groundvision。采集参数设置如下：采样间隔：0.05 m；采样频率：7360 MHz；

样点数: 480; 时窗: 65 ns; 叠加次数: 8。

土壤剖面含水量及介电常数数据采用美国 SEC 公司的 TRASE 6050X1 水分测量系统进行测定; 电导率由中国科学院南京土壤研究所研制的 TYC-2 型土壤盐分传感器及 SY-2 型袖珍数字电导仪测定。

### 1.3 GPR 数据处理

探地雷达采集的原始数据需经过处理才能进行图像的判读、解译。GPR 数据处理采用 Reflexw4.0 软件, 基本步骤为: 抽取平均道(subtract-mean)、移动开始时间(move starttime)、能量衰减(energy decay)、带通滤波(band-pass frequency)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水分含量对反射波信号强度的影响

从图 2 可以看到, 风干情况下, 目标物的雷达反射信号很强; 水分含量增加后, 信号明显减弱。因为水分含量的增加导致土壤介电常数增大(表 1), 土壤对雷达波能量的吸收增强, 雷达波能量衰减较快, 导致目标物的反射信号强度减弱; 100 mm 和 250 mm

灌水处理的信号强度差别不大, 这是由于表层以下 50 cm 土壤剖面平均含水量都在 20% 以上, 水分差异较小, 对反射波信号强度的影响差异不显著。图 2 的结果还表明, 高水分含量条件下, GPR 依然可以获取浅层粗砂土中介电性质异常的目标物的较高分辨率的形态和位置数据, 这是因为 500 MHz 屏蔽天线的分辨率较高, 而且在粗砂土中雷达波信号的衰减较在粘质地土壤中要小。这也证明了高频 GPR 天线在高含水量粗质土壤中应用的可行性。

### 2.2 水分含量对 GPR 图像形态特征的影响

经过处理后的 GPR 图像显示, 不同水分条件下粗砂土剖面中的预置目标物均能被 GPR 探测(图 2), 并有较高的分辨率。目标物的反射图像均由相邻近的平行多条双曲线组成, 最上面一条双曲线的顶点为目标物的实际位置, 回波的拖尾震荡造成了下覆平行双曲线的出现<sup>[1]</sup>。目标物尺寸较大时, 双曲线离心率很大, 即开口很大而近似成直线, 如风干粗砂土剖面中 0.9 m × 0.398 m 铁片 III 的反射图像。可以设想田间实际探

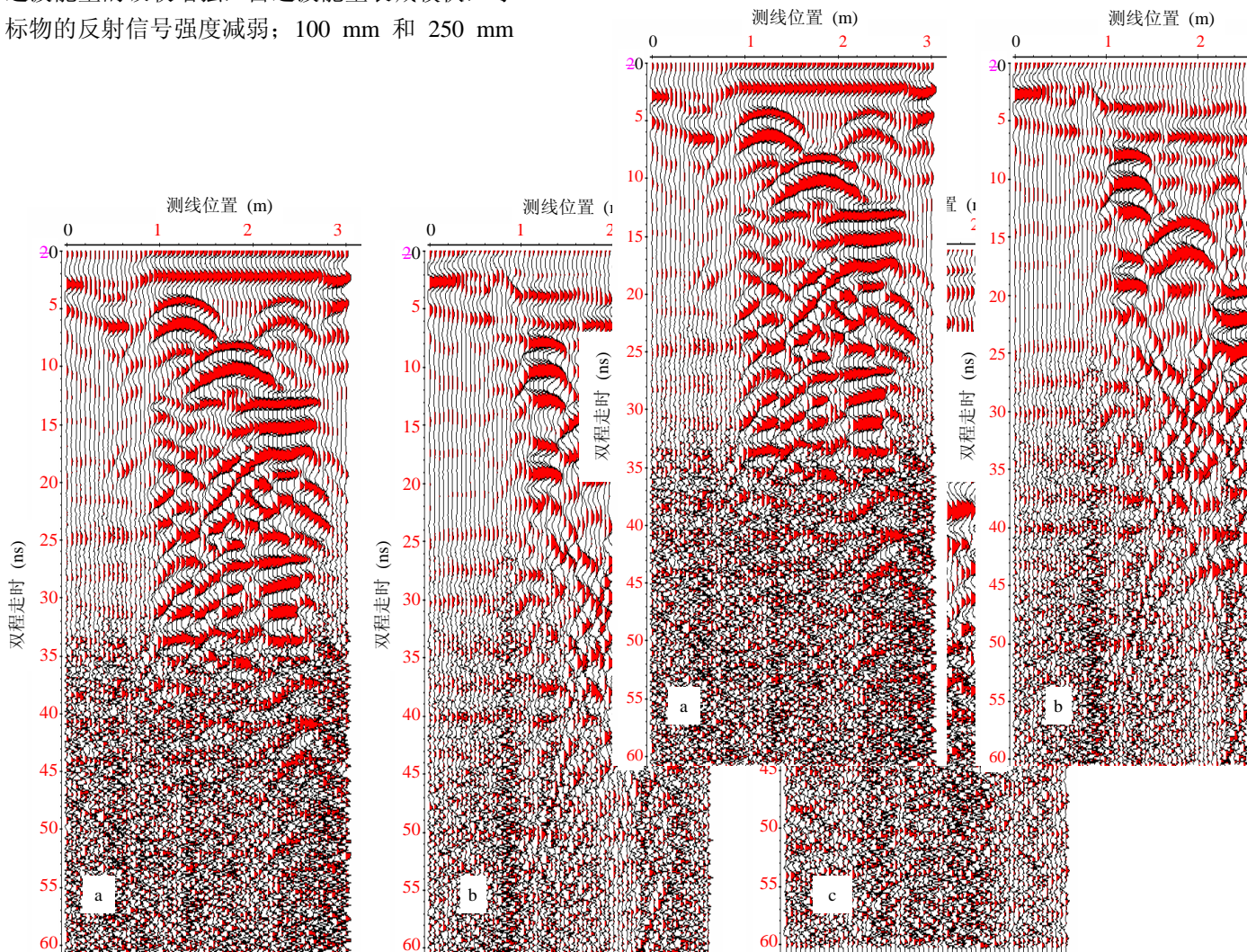


图 2 不同灌水处理的探地雷达处理图像 (a: 风干土; b: 灌水 100 mm; c: 灌水 250 mm)

Fig. 2 Ground penetrating radargram under different water treatments

表 1 剖面不同深度各灌水处理下介电常数和体积含水量 (%)

Table 1 Dielectric and volumetric water contents at different profile depths under different water treatments

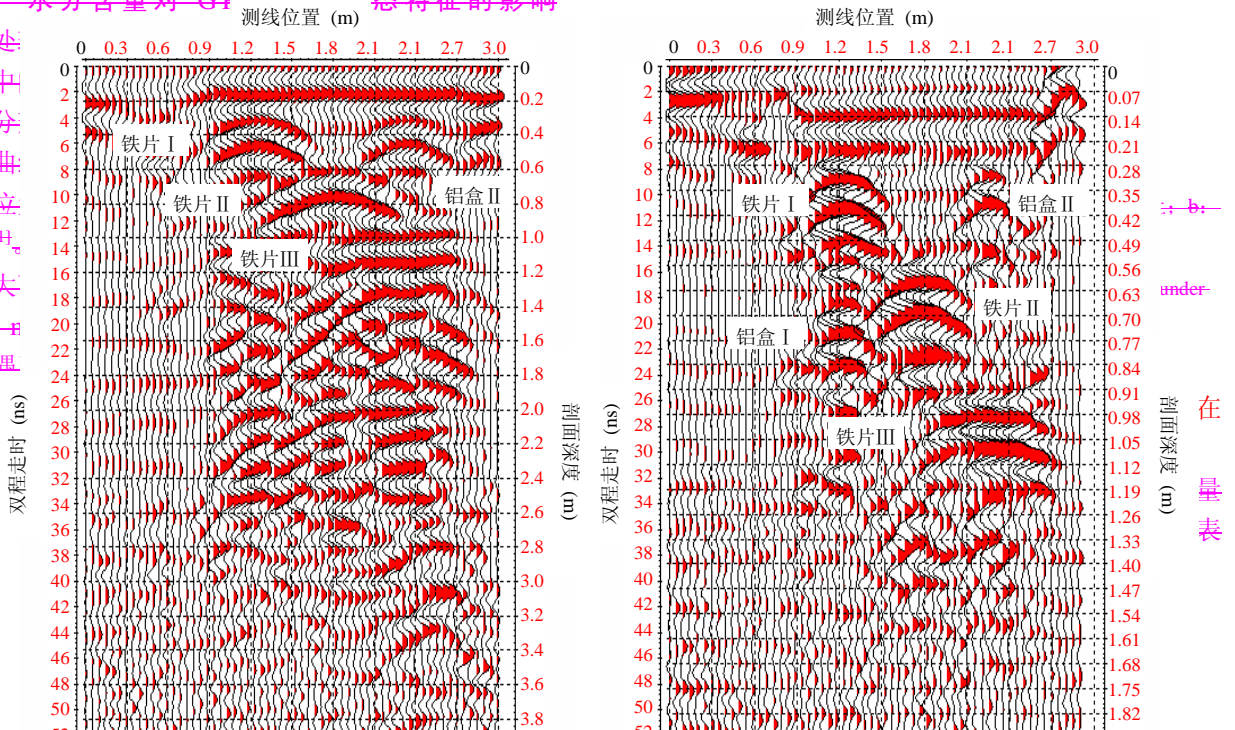
剖面深度 (cm)	0 mm-风干土		灌水 100 mm		灌水 250 mm	
	介电常数	含水量 (%)	介电常数	含水量 (%)	介电常数	含水量 (%)
10	4.3	6.1	9.4	18.5	13.7	26.0
30	4.1	5.6	11.1	22.9	16.4	28.9
50	4.0	5.5	10.1	20.2	17.1	29.7
70	3.9	5.3	3.9	5.3	20.9	34.6
90	3.7	4.8	3.8	4.9	17.6	30.2

测时, 遇到含水量上下差异较大的土层界面如砂壤层和黏土层的界面, 界面回波将表现为近似平行的直线。

对比经过处理的风干、100 mm、250 mm 灌水量下的 GPR 图像 (图 2) 发现, 随着含水量的增加 (表 1), 金属目标物的反射双曲线逐渐变尖, 即其离心率逐渐变小。将目标物看成一个点, 当雷达天线从其正上方经过时, 雷达波近似垂直向传播 (考虑雷达天线间距的影响), 图像中反射双曲线顶点纵坐标代表目标物上界面的深度, 横坐标表示目标物的测线位置坐标 (水平位置); 如果是一个水平放置的平面目标物, 那么顶点纵坐标代表目标物几何中心的深度位置, 横坐标代表几何中心的测线位置。随着含水量的增加, 土壤的介电常数增加, 雷达波速变慢, 雷达天线沿测线探测时, 雷达波从各测点传播至同一深度的目标物的传播时间延长, 且雷达波从不同测点到目标物的传播时间差增大, 在雷达图像上就表现为目标物反射双曲

### 2.2 水分含量对 GPR 图像形态特征的影响

经过处剖面中高的分条双曲实际位出现只很大时, 遇黏土



1), 金属目标物的反射双曲线逐渐变尖, 即其离心率逐渐变小。将目标物看成一个点, 当雷达天线从其正上方经过时, 雷达波近似垂直向传播 (考虑雷达天线间距的影响), 图像中反射双曲线顶点纵坐标代表目标物上界面的深度, 横坐标表示目标物的测线位置坐标 (水平位置); 如果是一个水平放置的平面目标物, 那么顶点纵坐标代表目标物几何中心的深度位置, 横坐标代表几何中心的测线位置。随着含水量的增加, 土壤的介电常数增加, 雷达波速变慢, 雷达天线沿测线探测时, 雷达波从各测点传播至同一深度的目标物的传播时间延长, 且雷达波从不同测点到目标物的传播时间差增大, 在雷达图像上就表现为目标物反射双曲线的离心率逐渐变小即双曲线逐渐变尖。这种现象在铁片 III 的反射双曲线形态变化上表现尤其明显。

### 2.3 水分含量对目标物反射波双程走时的影响

粗砂土各灌水处理下最大电导率为 0.905 mS/cm, <1 mS/cm<sup>[2215]</sup>, 故各灌水处理下的电损耗都很小, 其

理论波速  $v^v$  可采用下式计算:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \tag{1}$$

式中,  $c = 0.3 \text{ m/ns}$ , 为电磁波在空气中的传播速度<sup>[15]</sup>;  $\epsilon$  为介电常数。从式 (1) 可以看出介电常数增大, 波速会减小。

由于各测点到目标物的实际距离是固定的, 随着含水量的增加, 土壤介电常数增大, 雷达波传播速度降低, 其从测点到目标物的双程走时相应增大。从图 2 可见, 随含水量的增加, GPR 图像中目标物反射双曲线的位置逐渐向下平移, 250 mm 灌水量下的铁片 I、II、III 和铝盒 II 的双程走时与风干状况相比增加了一倍多 (表 2)。该研究结果表明, 对 GPR 探测目标的深度确认要充分考虑到土壤含水量的状况。

表 2 各灌水量下目标物反射双程走时 (ns)

Table 2 Two way travel time of the object's reflecting wave under different water treatments

灌水量	铁片 I	铁片 II	铁片 III	铝盒 I	铝盒 II
风干	4.212	8.016	13.179	不能识别	4.212
100 mm	7.880	13.722	19.836	16.847	7.744
250 mm	8.695	16.711	27.173	18.342	8.424

### 2.4 不同含水量条件下目标物埋深的确定

目标物的水平位置在探地雷达图像中由测线位置标出; 深度可通过时间-深度转换 (双程走时与深度的转换) 进行确定。由于 GPR 获取的原始数据是雷达波到反射界面的双程走时, 必须获悉雷达波在土壤剖面中的传播速度才能确认目标物的实际深度。时

深转换采用的波速只有十分接近雷达波在土壤剖面任何深度的传播速度才能确保转换的准确性。本研究中, 1 m 粗砂土剖面在风干和 250 mm 灌水处理下各深度的含水量和介电常数较一致, 根据波速公式 (1), 1 m 土体内其平均波速分别为 0.1500 m/ns、0.072463 m/ns (图 3)。

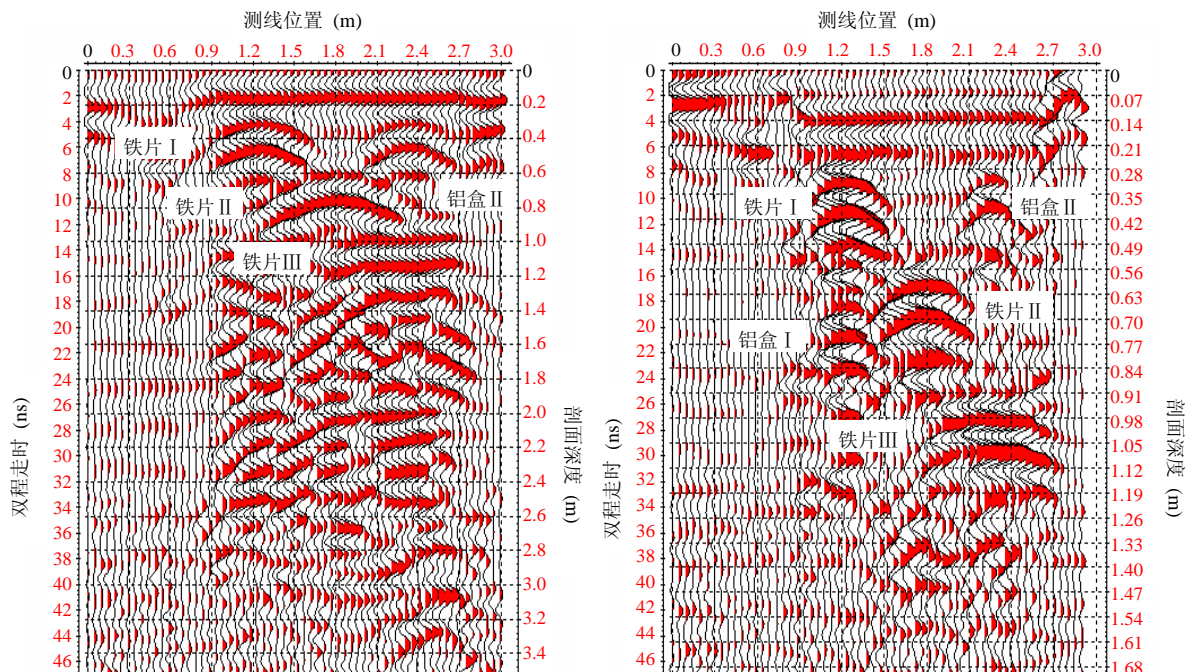


图 3 两种水分处理下 GPR 时间—深度转换图像 (a: 风干土; b: 灌水 250 mm)

Fig. 3 Ground penetrating radargram after time-depth conversion under different water treatments

表 3 为通过 GPR 数据进行时深转换确定的两种土壤含水量条件下各目标物的埋深。与已知的埋深比较结果表明, 在精确获取雷达波在土壤剖面中的传播速度的前提下, 能准确确定目标物的埋深, 两种水分处理下确定的目标物的埋深绝对误差很小, 相对误差均在 2% 以内。但在田间自然条件下, 由于土壤各层次中含水量的差异较大, 通过公

式 (1) 获取雷达波在土壤中的传播速度来确定目标物的埋深是很困难的, 在 GPR 的实际应用中也是不现实的。这就要求采用其他的探地雷达测定方法, 如宽角反射和折射 (wide-angle reflection and refraction, WARR) 和共中点法 (common-midpoint sounding, CMP) 来确定反射波的速度以及目标物的深度<sup>[16-17]</sup>。

表 3 两种水分处理下目标物探地雷达确定深度与实际深度比较

Table 3 Object's depths determined from GPR and its practical lain depth under different water treatments

目标物	实际埋深 (m)	0 mm 风干土		灌水 250 mm	
		拾取埋深 (m)	绝对误差	拾取埋深 (m)	绝对误差
铁片 I	0.300	0.306	0.006	0.315	0.015
铁片 II	0.600	0.601	0.001	0.605	0.005
铁片 III	0.980	0.988	0.008	0.984	0.004
铝盒 I	0.700	不能识别	—	0.660	-0.04
铝盒 II	0.300	0.306	0.006	0.305	0.005

### 3 结论

土壤是个复杂的三相混合物, 雷达天线中心频率、土壤质地、水分含量、含盐量对探地雷达信号的传播、雷达图象的分辨率都有重要的影响, 但土壤水分是最主要的控制因子。本文采用 500 MHz 中心频率屏蔽天线针对不同水分条件下粗砂土剖面中目标物的 GPR 图像特征及其解译展开了基础研究。结果表明:

(1) 土壤含水量的增加会导致土壤中目标物界面反射信号强度减弱, 但高水分含量条件下, GPR 依然可以获取浅层粗砂土中介电性质异常的目标物的较高分辨率的形态和位置数据。

(2) 随着土壤含水量的增加, 金属目标物 GPR 图像形态特征发生变化, 目标物的反射双曲线逐渐变尖, 离心率逐渐变小。

(3) 由于水分含量会影响雷达波的波速和双程走时, 在土壤性质、水分条件较均一的情况下, 通过准确拾取雷达波的双程走时并确定波速, 可以利用 500 MHz 中心频率屏蔽天线准确地确定浅层粗砂土中目标物的埋藏深度, 相对误差 < 2%。

### 参考文献:

- [1] 栗毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用. 北京: 科学出版社, 2006: 165-167
- [2] 邓居智, 方根显. 地质雷达在公路路面检测中的应用. 华东地质学院学报, 1999, 22(1): 40-44
- [3] 谭春, 万明浩, 赵永辉, 姜卫方. 高频探地雷达在工程建设及地学勘察中的应用. 物探与化探, 2000, 24(6): 455-458
- [4] 刘传孝, 杨永杰, 蒋金泉. 煤矿地质异常及采动效应雷达探测研究. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2000, 19(2): 109-112

- [5] Dora C, Mariano C, Martín HM. Correlation of near-surface stratigraphy and physical properties of clayey sediments from Chalco Basin, Mexico, using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 53: 121–136
- [6] Boll J, van Rijn RPG, Weiler KW, Ewen JA, Daliparthi J, Herbert SJ, Steenhuis TS. Using ground-penetrating radar to detect layers in a sandy field soil. *Geoderma*, 1996, 70(3): 117–132
- [7] Robert SF, Ronald EY, John TA. Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. *Journal of Applied Geophysics*, 1998, 40: 19–27
- [8] Grote K, Hubbard S, Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. *Water Resource Research*, 2003, 39(11): 1321
- [9] Galagedara LW, Parkin GW, Redman JD, Bertoldi PV, Endres AL. Field studies of the GPR wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage. *Journal of Hydrology*, 2005, 301: 182–197
- [10] Galagedara LW, Parkin GW, Redman JD. Measuring and modeling of direct ground wave depth penetrating under transient soil moisture conditions. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2005, 6(2): 193–205
- [11] Zaki H. Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of Applied Geophysics*, 1996, 36: 43–52
- [12] Yuichi N, Hui Z, Motoyuki S. Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections. *Journal of Applied Geophysics*, 2001, 47: 241–249
- [13] 赵永辉, 吴健生, 万明浩. 多次叠加技术在探地雷达资料处理中的应用. *物探与化探*, 2000, 24(3): 215–218
- [14] 赵云峰, 陈淑珍, 肖柏勋. 相控阵探地雷达数据的叠加速度分析. *武汉大学学报 (理学版)*, 2004, 50(1): 123–126
- [15] Davis JL, Annan SP. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 1989, 37(5): 531–551
- [16] Neal A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 2004, 66: 261–330
- [17] Huisman JA, Hubbard SS, Redman JD, Annan AP. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review. *Vadose Zone Journal*, 2003, 2: 476–491

## Ground Penetrating Radar Image Characteristics and Interpretation

### —of Gritty Soil—

#### Under Different Water Conditions

LIU Heng-bai<sup>1,2</sup>, ZHU An-ning<sup>1</sup>, ZHANG Jia-bao<sup>1</sup>, LIU Jian-li<sup>1</sup>, XIN Xiu-li<sup>1,2</sup>

(1 *State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*); (2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Based on ground penetrating radar practice on one gritty soil trough under different water disposals, the paper analyzed the variations of radar waveform characteristics. The results showed: using 500 MHz centre frequency antenna, we could get morphological characteristics and location of the dielectric anomaly object with well resolution in 1 m gritty soil pedon under different water treatments; the increase of soil moisture could decrease reflecting wave strength of the objects, lengthen two way travel time of the objects' reflecting wave, and accordingly influence ground penetrating radargram; ground penetrating radar could accurately detect the location and depth of uncharted object through time-depth conversion on the precondition of radar wave velocity accurately obtained under homogeneous soil texture and moisture.

**Key words:** Ground-penetrating radar, Gritty soil, Soil moisture, Radargram interpretation