

地透雷达技术概述及其在土壤学研究中应用的前景

程竹华 张佳宝 朱安宁

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 传统的土壤采样技术存在着诸多的不足,使得新技术的探索势在必行。地透雷达技术已成功应用在地质、地球物理、考古等领域中。本文在对地透雷达技术原理进行简要阐述的基础上,着重分析了地透雷达技术在土壤学研究中应用已取得的成果和其前景。认为地透雷达技术同传统的采样调查技术相比,具有快速、非破坏性等优点,同时也阐明进一步探索和改善该技术在土壤学中应用的必要性。

关键词 地透雷达;土壤学

中图分类号 S29

在传统的土壤学研究中,溶质在非饱和土壤中的运移被看作是通过整个的土壤基质进行,所有的土壤样品或土壤溶液样品的采集都以此为前提,利用现有的技术(环刀采样和吸力杯采样),采取随机采样。因此样品的代表性取决于样品的数量而不是样品采集的位置^[1]。

但众多的研究表明,土壤普遍存在着优势流(大孔隙流、指状流、管道流等)^[2~5],在优势流存在的情况下,样品的代表性不仅与样品的数量有关而且与样品采集的位置有关,随机采样将低估溶质和水分的运移程度。

另外传统的土壤采样调查技术具有破坏性、扰动性,很难做到适时、持续的监测。因此,近代的科研和实践对近地表地层快速、高精度、经济的探

测技术要求十分迫切,然而,迄今为止没有一种方法能满足这些要求。地透雷达是一种利用高频电磁波的反射探测目的体及地质结构的物探方法。近 20 年来,地透雷达在 10m 或 20m 内高精度探测中解决了许多实际问题。地透雷达技术最早应用在地理调查中,经过不断革新,目前已推出多种功能强大的商用地透雷达,如美国地球物理探测设备公司的 SIR 系列,加拿大探头及软件公司的 pulse EKKO 系列,日本应用株式会社的 GEORADAR 系列,瑞典地质公司的 RAMAC/GPR 钻孔雷达系统等^[6]。从 80 年代开始,地透雷达技术受到了广泛的重视,尤其在工程和考古领域,目前在冰河学研究中,地透雷达方法已趋成熟,表 1 列出了地透雷达技术已成功应用的各个学科领域^[7]。

表 1 地透雷达技术已成功应用的各个学科领域

Table 1 Scientific disciplines with successful application of the georadar technique

地质学领域	环境学	冰河学	工程和建筑	考古学	法医学
自然洞穴和裂隙的探测	点源污染物占据空间探测	冰层厚度绘图	建筑道路路况分析	埋藏结构的定位	埋藏目标体的定位(尸体和金银)
沉陷带绘图	地下水中污染物的监测	冰河内部结构的确定	孔穴探查	古道的探测和绘图	
沙体排列绘图	垃圾掩埋调查	冰层迁移的研究	混凝土加固部分的定位	挖掘前绘图	
表面沉积绘图	埋藏油罐的定位	隐藏表面和冰河基部裂隙的探测	公共设施的定位(管道电缆等)	空穴探测	
冰河地质调查	气体漏洞的探测	绘制冰河内部水道图	建筑材料的品质检验	墓穴定位	
矿物勘探和资源评价	地下水调查	确定海洋和湖泊冰层的厚度和类型			
泥炭厚度绘图和资源评价					
永冻层调查					
岩盐的裂隙绘图					
断层、岩脉、煤矿接合处等的定位					
地质结构绘图					
湖泊及河床沉积绘图					

1 地透雷达系统的工作原理

1.1 基本理论

地透雷达系统一般都由4个重要部分组成：发射装置、接收装置、控制装置和显示装置^[8]，其工作原理类似于地震波和声波反射技术，发射装置产生高频（10~1000 MHz）的电磁脉冲，传送到地层中，雷达信号在地层中的传输决定于地层的电学性质（公式1），当雷达脉冲到达介电性质显著不同的两层物质界面时，部分信号被反射，接收装置接收反射信号，并将其放大，由控制装置转化成可显示的格式^[9]。

$$V = c / \sqrt{\mathbf{m}_r \mathbf{e}_r} \quad (1)$$

其中 $c=0.3\text{m/ns}$ 为电磁波在真空中的传输速度； \mathbf{m}_r 为介质的相对磁穿透度（magnetic permeability），由于一般地层介质的相对磁穿透度都接近于1，雷达波速率主要受介电常数的控制。

反射信号的大小决定于两物质介电常数的差值大小和反射界面以下层次的厚度（公式2）。

$$k = \frac{(\sqrt{\mathbf{e}_{r2}} - \mathbf{e}_{r1})}{(\sqrt{\mathbf{e}_{r2}} + \mathbf{e}_{r1})} \quad (2)$$

其中 k 为反射系数， \mathbf{e}_{r2} 和 \mathbf{e}_{r1} 为界面两侧介质的相对介电常数。

而一个地透雷达系统所能够穿透的深度，也就是雷达波能覆盖的深度（skin depth）可以用以下公式计算：

$$d = (2/s) \sqrt{\mathbf{e}/\mathbf{m}} \quad (3)$$

其中 d 为电磁波的覆盖深度（m）； s 介质的电导率（S/m）。

由于大多地层物质的介电常数变化不大，一般在3~10之间，而电导率变化可达几个数量级，根据公式（3），电导率成为控制雷达脉冲穿透深度的最重要的因子，在理想的冻土和干岩石条件下，雷达可穿透到50m的深度，而在相当湿重的粘土条件下，穿透深度甚至可少于2m，一般条件下可达20m左右。

1.2 雷达数据的获得和处理

雷达系统的应用有3种模式^[7]：

1. 雷达反射纵剖面成图（reflection profiling）是指将一个或多个雷达天线同时在地表沿测线移动，以天线移动的距离为水平轴，测得的由发射天线到反射物的运行时间为垂直轴作图。这种测量可反映地下介质同一深度处的反射信号。如果雷达波的速度单独测得，或是与地层特征变化相关的反射另外通过打钻取土获得数据，那么就可以确定反射

物所在的深度。

2. 宽角反射和折射（WARR, wide-angle reflection and refraction）和共中点测量（CMP, common-midpoint sounding）这种模式是将发射天线固定在一中点上，而将接收天线沿测线不断拖离发射天线，其图像以天线间距为横坐标，双程运行时间为纵坐标。宽角法的测量结果，可用来确定反射物的速度以及反射面的深度。这种方法适用于主要的反射物是较为平坦的，或水平或倾斜度很小的情况。同时假设介质性质均一，但实际上这一假设并不是在所有情况下都正确，为避免作这一假设，人们更多地采用CMP方法。在CMP方法中，发射天线和接收天线同时从一中点开始，沿测线分别向两侧以固定间隔距离同步移动（如图1所示），以公式（4）计算雷达脉冲的运行速率。由于每个反射物的反射点用各自的偏移，因此并不要求在整个深度上的均一性。

$$v^2 = x^2(t^2(x) - t^2(0))^{-1} \quad (4)$$

3. 透射法（transillumination）或雷达断层摄影法（radar tomography），这种方法是将发射天线和接收天线分别置于待查物体的两侧，雷达信号从发射天线经过待测介质，到达接收天线。这种方法一般是用于地下矿井中，也常用于人造结构的非破坏性监测（non-destructive testing, NDT），特别是用高频的天线（例如900兆赫）探测如混凝土土柱、石柱等的监测。

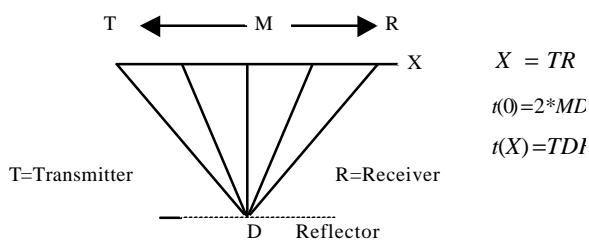


图1 CMP方法示意图

Fig. 1 Sketch map of the CMP method

1.3 数据的处理^[7]

1. WARR测量

如果用分离的天线，即收发分置，一个发射天线，另一个是接收天线，就可能确定无线电波速度的垂直变异，从而确定相对介电常数。如果只有一个天线（收发合置），就不可能采用WARR检测，这样确定速度只能和邻近的钻孔记录联系或已知深度下的目标物。在WARR和CMP中有3种类型的波能辨别出：空气波：以无线电波的速度（0.3m/ns）

从发射天线通过空气到达接收天线；直接波 (direct wave)：以无线电波在进地表面的速度从发射天线通过近表面地层直接到接收天线；回波 (reflection wave)：从发射天线到发射物，反射后到接收天线。空气波和直接波在 T-X 图上都呈直线，而回波呈曲线。

2. 数据处理：

第一步是滤波处理，消除背景噪声或高频杂波，消除由于地表类点状反射体和测量装置引起的斜反射等，突出目的体图像。在很多情况下，这已足以对亚表层特征进行定位。另外还有信号堆叠，信号放大等，处理后的数据可以显示为时间振幅的曲线，以灰度强度变化表示；也可以显示为面积变量图。

第二步是偏移处理 由于天线具有一定的辐射波束宽度，造成似点状反射体所出现的剖面上呈双曲线形态，并使斜界面失真，偏移可以把双曲线两叶上的能量回归到定点上，即可使绕射波收敛，反射波归位，这样不但提高了 GPR 剖面的分辨率，而且使处理以后的 GPR 深度剖面更加接近实际地质剖面。

2 地透雷达在土壤学研究中的应用实例

地透雷达在考古、工程、冰河学等领域的研究中都已有成功的应用，同时，研究者也尝试将这一新兴技术应用到土壤学以及与之相关的环境学研究中。地透雷达技术在土壤学领域的应用大致分为以下几个方向：

2.1 特殊层次的探测

例如 Shih 和 Doolittle^[10] 利用地透雷达 (中心频率 120MHz) 探测佛罗里达沼泽地地区有机质的厚度，结果表明，雷达图像显示的有机质厚度与打钻取土测定的有机质厚度相差在 8cm 以内的有 91%，全部在 12cm 以内。两者相关系数为 0.84。

Burgoa 等人^[11] 利用地透雷达探测 B 淀积层的深度和连续性。由雷达图像可以发现淀积层的倾斜方向与地面倾斜方向相似，但倾斜度略小；淀积层出现最深的排水良好的土壤正处于探测点中最高处，这与实际相符。作者由此推论：由于淀积层的导水率很低，雨水入渗到土壤中后，将沿淀积层表面侧向向坡度低的牧场周围的排水沟流去。由于 A 层和 E 层对磷的吸附量很小，因此磷素极易流失到牧场排水系统中，造成对地表水的污染。

Lapen 等人^[12] 利用地透雷达在沼泽地探测亚表层土壤形态 (subsurface feature)，测定了土壤剖

面介电常数以及用 CMP 方法确定雷达波传输速度。辨认出的主要反射物：有机土与矿质土壤接合带；薄层铁磐层 (饱和矿质土与非饱和矿质土接合带)；地下水位 (非饱和矿质土与饱和矿质土接合带)；矿质土壤与岩层接合处。根据雷达剖面图估计的这些反射物的厚度与打钻获得的数据对比，相关系数 $r=0.99$ 。

Tomer 等人^[13] 利用地透雷达探测细砂质土壤中的淀积层，利用中心频率 450MHz 的天线，在 15m × 18m 的小区上每 0.5m 设一测线，同时利用时域反射仪测定剖面水分含量，以提供迁移时间和深度转化标定，为比较土壤剖面实际情况和雷达图像的关系，共开挖了 11 条 2.5~3m 长的横断面，剖面上土壤含水量测定结果表明，每当出现淀积薄层时，土壤含水量就会发生急剧的变化。而这种对土壤水力学性质有影响的薄层与 GPR 图像显示一致，因为含水量的骤然变化会引起强烈的 GPR 反射。

在砂质土壤上若存在着粗沙夹层，污染物及水分的运移将十分复杂，水分将到达这种粗沙夹层的表面时，将首先水平运移，然后，当水势差增加到一定程度时，水分将沿集中的路径穿透粗沙夹层这也就是所谓的“指状流”或“管道流”，是优势流的一种，这一现象将缩短溶质迁移时间，减少有机化学物质的降解数量。Boll 等人^[14] 尝试利用地透雷达来探测砂质土壤中的这种粗沙夹层，结果表明，如果将反射数据和 CMP 方法相结合，在预测不同粗沙夹层界面的出现深度方面就可以得到令人满意的结果。

Doolittle 和 Collins^[15] 比较了电磁感应仪和地透雷达方法在喀斯特地形地区不同类型土壤上应用效果的差别。结果发现，虽然两种方法都已广泛用于探测喀斯特地区主要的结构和地下流体特征，但不同类型的土壤上两种方法适用的程度并不一致。地透雷达能有效地确定表面各层次的厚度和地下埋藏的流体，这种方法更适用于质地不粘重的土壤。

2.2 水分和溶质运移研究中的应用

Kung 和 Donohue^[16] 借助地透雷达来提高在砂质渗流区取样的准确度。他们认为，现有的采样技术在渗流区采集土壤溶液样品一般是随机采取，均匀布点，但在优势流存在的情况下，样品采集的位置和数量一起决定了采样的准确度。该研究旨在证明现有的采样技术在有优势流存在的土壤上将低估溶质和水分的运移程度；证明地透雷达在不破坏土壤的前提下探测质地非连续的土壤夹层方面具有很

大的潜力,而一旦质地非连续的土壤夹层定位后,就可以准确地布设吸力杯(suction cup),采集土壤溶液样品。在24m×24m的小区上,利用GPR对小区进行扫描,然后根据GPR图像的指示在1.85m的深度在质地突然变化的位置埋设4个吸力杯(均匀分布),在1.5m的深度上随机布设4个吸力杯,将含有溴离子的溶液以均匀脉冲的形式施加到小区上,穿透曲线结果表明,在地透雷达协助下布设的吸力杯中溶液的浓度要显著高于随机布设的吸力杯中溶液的浓度。因此,可以说地透雷达在土壤采样中的应用,使得样品的代表性较传统采样要好,这一点对污染物在土壤中运移的模拟研究尤其重要。

Chanzy 等人^[17]研究了利用地透雷达来确定土壤含水量的可行性。他们采用两种操作模式:地面探测和空中探测(天线离地面5~15m),实际上都属于CMP方法。将雷达图像获得的信息与土壤含水量联系起来,结果表明,在地面模式中,测定的含水量误差在 $0.03\text{m}^3/\text{m}^3$ 以内,而空中探测精确度较差($0.046\text{m}^3/\text{m}^3$)。由于电磁波的传播决定于介质的介电常数与其空间变异,而含水量是土壤中影响介电常数的主要因子。根据Topp 等人(1980)的经验公式:

$$e = 3.03 + 9.3q + 146q^2 - 76.7q^3 \quad (5)$$

其中 q 是体积含水量(m^3/m^3),而 e 实际上是相对介电常数的实部,该公式的标准差为0.01。CMP方法中,从雷达图像能够得到地波信号,而地波信号与近表面的介质性质(介电常数)有关,在地面探测中分析了从地波信号中提取的有效参数(ground wave amplitude)与土壤体积含水量(0~10cm)的关系,发现地波振幅的值与土壤体积含水量成负相关,相关系数是0.92,标准偏差为 $0.029\text{m}^3/\text{m}^3$ 。而在空中(10m)探测中,有效参数(反射系数)与土壤含水量的 r^2 为0.96,标准偏差为 $0.023\text{m}^3/\text{m}^3$ 。由此可见,不管是地面探测还是空中探测,所获得的雷达数据与土壤含水量都有显著的相关关系。

Weiler 等人^[18]比较了地透雷达与时域反射仪(TDR)在测定土壤含水量方面的差异,并推导出了利用GPR获得介电常数(CMP方法)来计算土壤含水量的公式。他们认为,GPR在大范围内土壤含水量的监测应用方面有很大的潜力,同时也指出这种方法的缺陷在于首次应用在某种类型的土壤上公式需要标定,另外,非常粘重的土壤和重盐碱土壤不适合GPR应用。

Parkin 等人^[19]利用地透雷达测定一条废水沟

下土壤含水量的分布。同时利用TDR测定不同深度的土壤含水量,并与雷达测定结果相比较,结果表明,两种方法得到的含水量精度相近($\pm 1\%$)。这一结论与Weiler 等人的研究结果基本一致。

2.3 土壤普查中的应用

在丘陵地人工利用常规工具如铁锹、土钻等进行开挖观察土壤剖面,确定岩层出现的深度是异常困难的。Doolittle 等人^[20]借助于地透雷达在丘陵地进行系统地采样,探测岩层的深度,进行土壤调查,从而改进了土壤-地形模型。

美国的佛罗里达州的自然资源保护组织(Natural Resources Conservation Service)1996年已开始将GPR与地理信息系统(GIS)相结合为用户提供服务^[21]。在GIS系统中包含有数字化的土壤普查资料,按其适合GPR应用的程度分级,设一专门层次存储这些分级信息,加到GIS系统中,根据实际情况应用GPR调查。另外,也有研究者尝试利用GPR探测结果来进行土壤分类,雷达结果与土钻取土结果相比吻合率达84%^[22]。从GPR探测速度和收集的数据量角度来说,这样的结果还是令人满意的。

3 结论和展望

综合以上研究实例可以得到以下结论:

1. GPR作为一种新兴的技术,其在土壤学中的应用有着良好的发展前景。该技术具有快速、无损、非扰动、适应性强等特点,适合大范围、适时、持续地监测。借助于GPR技术,土壤采样将更具代表性。

2. GPR技术在某些特定的条件下,应用受到限制。如非常粘重的土壤和重盐碱土壤对电磁波的高传导或高吸收使得雷达信号的穿透性变差。

GPR在地质、工程、考古调查等领域的研究中获得了成功,但GPR在土壤研究中的应用刚刚起步,还未达到成熟的地步。尤其是土壤作为一种特殊的复杂的介质,还有许多具体的问题需要解决,如具体有哪些土壤性质影响雷达信号,如何区分它们;如何抑制各种杂乱回波(噪音);利用GPR来监测土壤含水量动态变化时,是否有较Topp(1980)的公式更适合的计算方法等。在GPR的应用中,关键还是雷达图像的判读和诠释,不仅需要掌握一定的理论基础,而且需要不断积累经验。另外,目前对GPR数据的处理技术远未跟上计算机发展的步伐,充分利用和探索该技术还有很长的路要走。

参考文献

- 1 Kung K -J S, Donohue S V. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1543~1545
- 2 Germann P F, Beven K. J. *Soil Sci.*, 1981, 32:1~13
- 3 Beven K, Germann P F. *Water Resour. Res.*, 1982, 18: 1311~1325
- 4 Baker R S, Hillel D. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 20~30
- 5 Kung K -J S. *Geoderma*, 1990, 46: 51~58
- 6 周春林, 陈晔. 探地雷达研究进展. *南京师大学报 (自然科学版)*, 1998, 21 (1): 111~115
- 7 Reynolds John M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester: John Wiley & Sons, 1998, 679~747
- 8 Davis J L and Annan A P. *Geophysical Prospecting*, 1989, 37: 531~551
- 9 Sharma Prem V. *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University press, 1997, 308~329
- 10 Shih S F, Doolittle J A. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, 48:651~656
- 11 Burgoa B, Mansell R S, et al. *Soil and Crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, 1991, 50: 125~130
- 12 Lapen D R, Moorman B J, et al. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 923~931
- 13 Tomer M D, Boll J, et al. *Soil Sci.*, 1996, 161(2): 121~129
- 14 Boll J, van Rijn R P G, et al. *Geoderma*, 1996, 70: 117~132
- 15 Doolittle James A, Collins Mary E. *Geoderma*, 1998, 85: 83~102
- 16 Kung K -J S, Donohue S V. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55: 1543~1545
- 17 Chanzy A, Tarussov A, et al. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1318~1326
- 18 Weiler Kirk W, Steenhuis Tammo S, et al. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1237~1239
- 19 Parkin G, Redman D, et al. *Water Resource Research*, 2000, 36 (8): 2147~2154
- 20 Doolittle J A, Rebertus R A, et al. *Soil Surv. Horiz.*, 1988, 46~54
- 21 Williams Andrew. *Soil Surv. Horiz.*, 1996, 119~123
- 22 Modma D L, Doolittle J A. *Soil Surv. Horiz.*, 1993, 71~77

GEORADAR TECHNIQUE AND PROSPECTS OF ITS APPLICATION IN SOIL SCIENCE

Cheng Zhuhua Zhang Jiabao Zhu Anning

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008*)

Abstract Inherent limitation involved in the traditional soil sampling techniques makes it imperative to explore alternative new techniques. Georadar has already been successfully applied in research fields like geology, geophysics, archaeology, etc. Besides a brief introduction to the principle of the georadar technique, this paper emphasized achievements and prospects of its application in the study of soil science. It concluded that compared with the traditional ones, the georadar technique is faster and non-destructive. Meanwhile, the paper also reiterated the necessity to expand and improve application of the technique in soil science.

Key words Georadar, Soil science