

罗古拜,曹银贵,况欣宇,等. 基于探地雷达的典型土壤物理性质探测研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(14):40-44.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.14.009

基于探地雷达的典型土壤物理性质探测研究进展

罗古拜¹, 曹银贵^{1,2}, 况欣宇¹, 张 庆¹

[1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083; 2. 自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035]

摘要:探地雷达(GPR)作为一种新型的无损探测工具,具有探测速度快、探测过程连续、操作简单、探测费用低等优点。探地雷达在工程勘探方面应用广泛,但在探测典型土壤物理性质,尤其是在探测矿区典型土壤物理性质方面的应用研究较少。本文在介绍 GPR 基本工作原理、发展历程及其图像处理研究进展的基础上,对基于 GPR 的典型土壤物理性质探测研究进展作详尽文献分析,最后阐述基于 GPR 的矿区复垦土壤典型物理性质的研究进展,并对探地雷达探测典型土壤物理性质进行了展望,指出基于 GPR 对典型土壤物理性质的研究应主要集中于 GPR 图像处理技术、GPR 的分辨率及探测效果评价等方面。

关键词:探地雷达;土壤含水量;土壤容重;土层厚度;土壤质地;土壤砾石含量;土地复垦

中图分类号:S152

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2019)14-0040-05

采用无损探测技术获取地下目标物的信息是当前探测研究的热点^[1]。探地雷达(GPR)在水文、工程、环境等领域已经得到了广泛的应用,它可以高效、准确地探测地下空洞^[2-3],可用于评价地基稳定性和探测地基中的各种潜在危害^[4],同时可准确探测水位埋深和估算地下水表面^[5],对地下污染物位置、类型等的探测有较高的精度^[6]。国内外关于探地雷达在土壤探测方面的应用研究逐渐展开^[7-11],尤其是在土壤含水量、土壤不同颗粒大小、土壤质地、土层厚度、土壤容重等的探测方面^[12-16]。而在矿区重构土壤物理性质探测方面的应用较少。在矿区土壤重构过程中,由于土石混排及造地复垦工艺影响,导致复垦地土壤剖面出现土层厚度差异明显、土壤质地不均一、土壤砾石含量高、土壤容重增大、土壤含水量差异等现象,这些成为重构土壤典型物理性质,并且其深层次分异特征成为研究的焦点,对明晰土壤重构原理具有重要的支撑作用^[17-19]。通过探地雷达开展重构土壤典型物理性质的无损探测,可以充分降低传统方法获取土壤物理性质的成本和时间。因此,基于探地雷达探测土壤的物理性质具有一定的实际意义。

各种复垦土壤的介电常数与水分含量间存在明显的函数相关性,应用探地雷达测定复垦土壤的水分含量在方法是可行的^[8]。采用探地雷达技术进行地层划分是可行的,在物性条件比较好的情况下可以获得良好的探测效果,为工程建设、规划提供可靠的资料^[20]。土壤砾石含量和粒径的变化可通过 GPR 图像进行定性分析。砾石含量的检测需要考虑雷达的分辨率。因此,利用探地雷达探测矿区土壤的物理性质,进而评估植被生长情况更加方便快捷。

收稿日期:2018-08-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:41701607)。

作者简介:罗古拜(1992—),男,宁夏固原人,硕士研究生,主要从事矿区土地复垦方面的研究工作。E-mail:1091915713@qq.com。

通信作者:曹银贵,博士,副教授,主要从事土地复垦与土地利用方面的教学与科研工作。E-mail:caoyingui1982@126.com。

1 探地雷达的工作原理和组成

1.1 探地雷达的工作原理

探地雷达方法是利用电磁波的反射来区分地下介质的一种无损探测技术,具有高分辨率、高准确率、快速、方便、高效等优点,能达到区分介质的目的^[21-23]。探地雷达的探测系统主要包含发射天线和接收天线、雷达主机^[22],发射天线发射高频电磁波,接收天线接收介质分界面处的反射波,主机负责控制信号,且对反射回来的信号进行预处理^[23]。不同介质介电常数存在差异,电磁波在介电常数改变的界面传播时,传播特性会发生变化,根据电磁波双程走时、振幅与波形产生的改变,可反演目标体的结构^[24],其工作原理如图1所示。

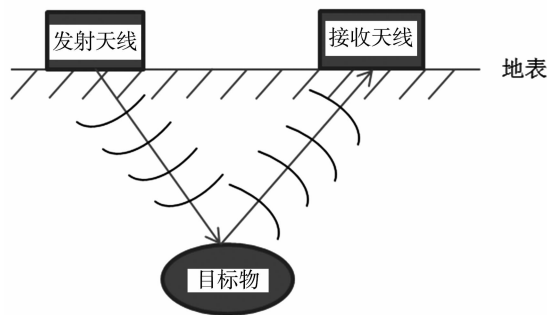


图1 探地雷达工作原理^[25]

1.2 探地雷达技术的形成与发展

20 世纪初,Hülsmeier 首先将电磁信号用于金属探测^[26]。雷达技术从 20 世纪 20 年代发展到 21 世纪初,已经成功地应用于工业和民用事业^[27]。1926 年,Hülsenbeck 第 1 次提出用脉冲电磁波技术探测地下目标体结构^[28-30]。Lowy 首先以专利的形式提出了探地雷达探测原理^[26]。20 世纪 60 年代,世界上最早的探地雷达设备诞生于美国,被用于公路路基下的溶洞探测及采矿试验^[31]。1983 年,探地雷达 SIR-10H 实现了对地下目标体的三维层析成像^[30]。国外推出了一系列如美国 SIR 系列、加拿大 EKKO 系列和日本 GEORADAR 系列

的商业雷达^[31]。20 世纪 90 年代前期,国内雷达研究基本处于空白状态,随着国外仪器的引入,探地雷达技术在我国得到了一定的发展,如国内 LT-1、CBS-9000 系列探地雷达的制造^[29]。随着科学技术的发展,数据处理技术日益成熟,探地雷达应用范围涉及各行各业。探地雷达在探测矿井和冰层厚度、黏土物理性质、地下水水位埋深、工程地质勘察、泥炭调查、放射性废弃物处理调查以及地质构造填图、水文地质调查、地基和道路下空洞及裂缝调查、埋设物探测、水坝的缺陷检测、隧道及堤岸探测的等方面得到了一定的应用^[32-36]。

1.3 探地雷达数据处理

GPR 不同于对空雷达,由于地下介质的多样性,使得其发射的电磁波传播过程很复杂。振幅减小、波形变异外加噪音和干扰波的影响,严重扭曲了真实数据^[31]。而数据处理可以在一定程度上剔除干扰波,凸显目标介质的反射波。探地雷达数据处理技术大多是从地震处理方法中移植过来的,其研究还处于初级阶段。静态模拟分解(EMD)对低信噪比数据除噪有较强的适应性^[37]。希尔伯特(Hilbert)变换作为一种信号处理的手段,能消除背景干扰,增强目标识别的准确性^[32-33]。运用偏移的数据处理方法可以提高剖面的分辨率,使得处理后的土壤剖面更加接近真实剖面^[34]。

数据处理主要包括滤波、高差处理和震荡处理。滤波的好坏直接影响到结果的可靠性与准确性^[38],目前使用的方式主要包括偏移、反褶积、有限或无线脉冲滤波、振型迭加和小波变换等。小波变换是线性变换,具有易去噪和精细化分析等特点,以最大分辨率在探地雷达剖面上显示目标体反射波,便于提取反射波参数(振幅、相位、频率等)来解释介质的特性^[14]。偏移主要是为了解决点状体绕射和频率界面造成的图像失真问题^[38],目前常用的偏移方法有有限差分偏移、有限元偏移和频率-波数(F-K)偏移法等^[39]。利用反褶积方法可以压制子波的干扰,提高图像的分辨率^[40]。

2 探地雷达对土壤物理性质的探测

由于重构土壤典型物理性质空间分异特征明显及形成条件复杂^[41-42],传统的土壤采样方法由于复垦地障碍会限制采样深度和采样质量,给科学合理地揭示重物土壤物理性质空间分异特征与形成机制带来了一定的困难^[43-44]。国内外探地雷达在土壤探测方面的应用逐渐展开。利用探地雷达可以准确地测定土壤含水量,并能反馈出含水量时空变化的差异^[45]。在合理选择探地雷达频率的情况下可以探测出土壤不同颗粒的大小,确定土壤质地^[46]。在土壤厚度及分层探测方面,探地雷达表现出了一定的优势^[38],可以在土地复垦工程中对土层厚度进行验收^[46]。探地雷达可以探测土壤容重,其准确度可达 70% 以上,并且还有很大的提升空间^[47-48]。探地雷达在土壤砾石含量探测方面应用较少,只从试验分析的角度开展过评价预测,但已经证明其应用的可能性^[49]。可见,探地雷达在相关土壤物理性质探测方面的研究已经取得了一定成果。

2.1 土壤含水率

土壤含水率是土壤中所含水分量。探地雷达技术作为一种无破坏性的探测含水层异质性工具,其应用范围较广。探地雷达是目前最有效的大面积测定土壤含水量的方法之

一^[49]。有研究成功地将探地雷达技术用于路基含水率和复垦土壤含水率的探测^[50]。探地雷达具有检测高效的特点,能够获得连续的坝体剖面且对坝体结构无破坏作用,能够应用于水利工程行业^[51]。探地雷达在遥感反演土壤水模型与精度验证方面比时域反射技术(TDR)、烘干法更有优势,其在遥感产品验证、土壤水分时间稳定性分析等其他水文相关应用中更有潜力^[52]。目前,常借助探地雷达求土壤含水率的方法有发射波法、反射系数法、地波法和钻孔雷达法,每种方法都有其适用的介质和不足^[53]。探地雷达探测土壤水含量有一定的可行性,但在探测精度和含水量的确定方面仍需加强研究^[54]。可见,探地雷达在探测土壤水含量方面的应用有很多,且技术日趋成熟,但要准确定量探测土壤含水率尚待研究。

2.2 土壤分层

土壤是地球上能够生长绿色植物的疏松物质,不同的土壤类型,分层不同,不同类型土壤及分层厚度对植被的生长状况影响不同。在 GPR 探测土壤分层方面有大量研究。范洪利等将探地雷达技术用于探测矿区土壤地层,且探测成功率很高^[55]。孙坚等通过试验证明,用探地雷达可用于土壤分层的探测^[56]。有研究表明,岩石中的层面和断裂带以及厚度为 0.1 m 的土壤层均可通过探地雷达轻易地测出^[57]。虽然探地雷达在土壤分层探测方面有一定的优势,但当地下介质比较复杂,岩层中存在较多介电常数较大的土壤水、淤泥、黏土等时,探测的分辨率会减小。对探地雷达探测数据采用适当的数据处理技术可以有效探测土壤中的分层变化^[58]。国内外各种室内试验表明,可用于土壤层次探测,但在实际工程中想得到预期结果还有许多工作要做^[21,37]。对点坝浅部探地雷达的探测数据进行处理之后,GPR 图像中分层信息清晰,与测区地层剖面基本吻合^[54]。综上,探地雷达技术可用于土壤分层探测的实际工程中,但在遇到复杂地质条件时对数据处理技术要求较高。

2.3 土壤砾石含量和粒径

土壤中砾石的粒径和含量对土壤肥力有重要的影响,进而影响植被的生长状况,甚至一个地区的生态,可见,对土壤中砾石含量进行探测有一定的积极意义。基于探地雷达技术可以绘制出植物根径大于 3 cm 粗根的粒径分布图,这为粒径大于 3 cm 砾石含量及大小的探测提供了依据^[59]。使用商用软件可以获得高精度的 GPR 扫描图像,但其精度是否能有效区分砾石和细土仍需进一步研究^[60]。对砾石大小的探测主要取决于探地雷达的频率及数据处理技术,频率越大,探测深度越浅,分辨率越大,分辨出砾石颗粒大小的可能性就越大。有研究用探地雷达探测河流沉积物,在雷达剖面层呈现了从细沙和淤泥到粗沙和砾石的粒径垂直变化^[61]。通过小波变换法将雷达信号中的低频成分滤掉,可有效保护高频成分,而实现对薄层的识别^[62-63]。通过分形技术滤掉低频信号,不仅能清晰地呈现出墙体及其保护层分界面处的反射信息,而且可得到混凝土墙体的保护层厚度^[64]。可见,特定频率的探地雷达能够探测分辨出一定大小的砾石。

2.4 土壤容重

土壤容重表征土壤的密实程度,密实程度过高会严重降低作物的生产力,探地雷达目前被用于测定土壤、路基和地基

等压实度,因此利用探地雷达对土壤容重的进行探测有一定的实际意义^[51,63]。常通过电磁波波速、土壤介电常数、GPR 探测信号图振幅、土壤物理性质孔隙度、含水率等与容重的关系定量分析土壤容重。另外,可通过孔隙度、密度与实测雷达数据频率、振幅的关系反演土壤容重,但效果相对较差^[39]。土壤压实程度可以表现在介电常数的变化上^[36]。借助电磁波波速与土壤容重的关系可获取土壤容重,借助介电常数与压实度的关系可以定量分析土壤容重^[65-66]。目前基于 GPR 定量分析土壤容重的方法较多,但关于其准确性及误差修正方法的研究较少。

2.5 土壤质地

土壤质地指土壤中不同大小矿物颗粒的组合状况^[1]。土壤质地与土壤通气、保肥、保水状况及耕作的难易密切相关,因此土壤质地对植被的生长具有一定影响。如果能实现探地雷达对质地的探测,将能更方便准确地确定植被与土壤的耦合关系。目前,基于探地雷达对土壤质地的探测研究较少,且地下介质本身的复杂性,给这项研究带来了一定的困难。有研究者通过室内模拟试验得出,受试验精度的影响,探地雷达技术不能很好地用于土壤砾石相对容积的探测^[67]。因某些系统误差不可避免,用探地雷达探测砾石含量达不到预期效果。

3 GPR 矿区复垦地探测特点及进展

3.1 GPR 矿区复垦地探测的特点

矿区复垦土壤是一种典型的新生土壤,其母质来源于不同地质年代形成的岩石,在土体再造过程中有一定的随意性^[68]。与原地貌相比,重构土壤土层厚度差异明显、质地不均一,复垦地近地表土层黏粒含量一般高于未损毁地^[69]、砾石含量高,且一般复垦地 0~10 cm 土壤中砾石含量相比未损毁地变化不大,但 10~20 cm 土壤中砾石含量减少,土壤容重随土壤深度的增大而增大,含水量的差异导致矿区植被恢复效果欠佳,甚至出现局部退化现象^[68-72]。

矿区重构土壤与原地貌相比具有典型的物理性质,探地雷达对二者的探测结果不同^[73]。与未扰动的土壤相比,复垦后 1 年的土壤紧实度最大,复垦区土壤板结情况严重,不宜耕作;复垦后 10 年的土壤紧实度与未扰动的土壤相比差异不大^[70]。受造土工艺的影响,重构土壤典型土壤物理性质沿土壤剖面垂直方向上的分异特征显著^[43,72,74]。通过适当的数据处理可以有效探测土壤土层分层情况^[8]。矿区复垦土地边坡存在水土流失现象,说明重构土壤比较密实,与原地貌相比其储水能力和入渗能力都较小。胡振琪等通过室内试验验证了土壤介质中介电常数与土壤含水量存在线性关系,证明采用探地雷达探测重构土壤含水量的方法可行^[8]。

3.2 GPR 矿区复垦地探测进展

我国露天煤矿在开采过程中,原地貌土地在剧烈的扰动下彻底损毁,生态环境遭到严重破坏,当地居民生产生活因此受到威胁。目前我国矿区废弃地复垦率不足 25%,不到美国、澳大利亚等国家的 1/3^[75]。土壤重构是矿区土壤复垦的核心^[76]。在土壤重构过程中,受复垦工艺的影响,复垦土壤剖面会出现土壤厚度差异明显、土壤质地不均、土壤砾石含量高、土壤容重增大、土壤含水率差异大等现象,这种差异对植

被生长状况有一定的影响。排土场复垦后出现了局部退化的现象^[77]。因此,加强矿区,排土场等废弃地复垦工艺的研究有非常积极意义。

探地雷达技术在水文、工程、环境等领域已得到广泛的应用^[29],其在土壤复垦方面的研究也在逐渐开展。

只要采用适当的数据处理方法进行分层,探地雷达就可以有效地检测到复垦土壤的分层结构状况。探地雷达能够有效探测土层结构,可以用于土地复垦工程土层厚度的验收工作^[8,78]。杜翠等用层析成像的方法探测土壤分层,并认为该方法用于大范围土壤分层探测具有一定的可行性和有效性^[79]。频率为 400 MHz 的探地雷达可实现气煤-砂岩界面的探测,且误差较小^[80]。

复垦土壤的介电常数与水分含量间存在明显的函数相关性,应用 GPR 测定复垦土壤的含水量,在方法是可行。陈星彤等通过试验手段得到了基于 GPR 的复垦田块有效灌溉管理关键技术^[81]。探地雷达可用于探测开采后矿区地表土壤水分再分布情况,这为塌陷区复垦提供了科学依据^[82]。

使用探地雷达检测土壤紧实性的研究具有较高的创新性、可行性和准确性^[83]。土壤介电常数与土壤压实指标具有较好的相关性,可以表征土壤压实状况^[78]。探地雷达探测土壤容重的准确度可达到 70% 以上,在土壤非饱和水分情况下,探地雷达电磁波的传播速度与土壤容重存在明显的正相关关系,偏相关系数达到 0.933^[84]。

探地雷达探测可用于评价砾石层的非均质性^[57],如卵砾石层具有一定规模,可将探地雷达技术用在卵砾石层地基勘察中^[85]。由于地下介质的复杂性,即使经商业软件处理过的高精度 GPR 图像,在细粒土和砾石区分上仍有一定的难度^[60]。将探地雷达用于矿区重构土壤砾石含量和质地探测方面的研究甚少。

4 结论与展望

4.1 结论

探地雷达是一种基于电磁波反射技术确定地下介质分布的技术,随着 GPR 数据处理技术的提升,逐渐被广泛用于工程勘探领域,胡振琪等 2005 年最早将探地雷达用于矿区重构土壤物理性质的探测^[8]。

因水的介电常数远大于其他介质,易区别于其他介质,因此探地雷达被广泛用于土壤含水量检测、水泥混凝土路面改造和各种水工结构工程中。探地雷达方法已被证明可用于矿区重构土壤含水率的探测。探地雷达对容重或压实度的探测在公路路基压实、隧道衬砌和桥梁密实方面已经被广泛应用,在复垦土壤容重方面也取得了一定进展,可用电磁波波速和土壤容重的关系定量确定土壤容重。在确定土壤分层方面当频率适当时,基本能清晰得到土层厚度。由于不同类型土壤的介电常数相近且土壤颗粒细小,加上地下介质复杂,因此目前只能从信号图中分析出不同类型土壤的分层。在探地雷达频率恰当的情况下,基本能探测出地下粒径为 10 cm 的砾石。

4.2 展望

随着探地雷达数据处理技术的发展,探地雷达探测土壤典型物理性质的精度将会进一步提升。探地雷达技术准确探测典型土壤物理性质将成为可能。

(1)土壤水等介电常数较大的介质对探测效果影响较大,数据处理技术需在处理高介电常数对低介电常数影响方面有所提升。

(2)探地雷达技术可用于土壤含水率的定量探测,探测精度主要取决于标定的深度,需要进一步提高。

(3)通过文献分析可得,探地雷达虽然可用于土壤容重的探测,但其定量分析误差大小及修正方法的相关研究较少。

(4)对土壤砾石含量和土壤质地的探测目前研究较少,其原因是探地雷达的分辨率无法辨别砾石及粒径大小。若要将该技术用于探测细粒土,其分辨率的提高是一个大的挑战。

综上,因地下介质的复杂性,探地雷达对土壤含水率、分层和容重探测的准确性取决于数据处理技术。虽然目前关于探地雷达对土壤质地和土壤砾石含量探测方面的研究很少,但只要能提高探地雷达的分辨率就有可能将其用于区分细土与砾石,进而用于土壤质地的探测。目前对 GPR 探测效果、准确度及误差修正的研究较少,且没有一个统一规范,期望今后在这方面有所突破。

参考文献:

- [1] 许献磊,赵艳玲,王 方,等. GPR 探测埋管管径研究综述[J]. 地球物理学进展,2012,27(5):2206-2215.
- [2] 刘传孝. 探地雷达空洞探测机理研究及应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):238-241.
- [3] 程久龙,胡克峰,王玉和,等. 探地雷达探测地下采空区的研究[J]. 岩土力学,2004,25(增刊1):79-82.
- [4] 杨天春,吕绍林,王齐仁. 探地雷达检测道路厚度结构的应用现状及进展[J]. 物探与化探,2003,27(1):79-82.
- [5] Doolittle J A, Jenkinson B, Hopkins D, et al. Hydropedological investigations with ground penetrating radar (GPR): estimating water-table depths and local ground-water flow pattern in areas of coarse-textured soils[J]. Geoderma,2006,131(3/4):317-329.
- [6] 侯 征,杨 进,宋 静. 探地雷达在地下污染检测中的应用研究[C]//中国地球物理学会第二十八届年会论文集,2012.
- [7] Hubbard S S, Grote K R. Mapping the volumetric soil water content of a California vineyard using high-frequency GPR ground wave data[J]. Leading Edge,2002,21(6):552-559.
- [8] 胡振琪,陈宝政,王树东,等. 应用探地雷达测定复垦土壤的水分含量[J]. 河北建筑科技学院学报,2005,22(1):1-3.
- [9] 何瑞珍,胡振琪,王 金,等. 利用探地雷达检测土壤质量的研究进展[J]. 地球物理学进展,2009,24(4):1483-1492.
- [10] 王前锋,周可法,孙 莉,等. 基于探地雷达快速测定土壤含水量试验研究[J]. 自然资源学报,2013,28(5):881-887.
- [11] Ratto C R, Morton K D, Collins LM, et al. Analysis of linear prediction for soil characterization in GPR data for countermining applications[J]. 2014,15(1):86-105.
- [12] 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):1179-1183.
- [13] 冉 弥,邓世坤,陆礼训. 探地雷达测量土壤含水量综述[J]. 工程地球物理学报,2010,7(4):480-486.
- [14] Tosti F, Patriarca C, Slob E, et al. Clay content evaluation in soils through GPR signal processing[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013,97:69-80.
- [15] 杨 峰,杜 翠,梁胤程,等. 基于探地雷达波速层析的金属矿

- 区勘探仿真[J]. 地球物理学进展,2014,29(3):1332-1336.
- [16] 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.
- [17] 胡振琪. 露天煤矿复垦土壤物理特性的空间变异性[J]. 中国矿业大学学报,1992,21(4):34-40.
- [18] 白中科,王文英,李晋川,等. 黄土区大型露天煤矿剧烈扰动土地生态重建研究[J]. 应用生态学报,1998,9(6):63-68.
- [19] 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.
- [20] 何瑞珍. 探地雷达检测土壤物化质量的关键技术研究[D]. 北京:中国矿业大学,2011.
- [21] 曾昭发. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [22] 张玉海. 探地雷达的工作原理和检测应用[J]. 铁道建筑技术, 2003(4):70-72.
- [23] 许团江,姬文瑞,范 飞. 探地雷达工作原理及其在隧道质量检测中的应用[J]. 公路隧道,2012,26(2):214-216.
- [24] 杨 可,赵新生,赵 钦. 探地雷达方法的原理及工作方法技术简介[J]. 西部探矿工程,2011,23(6):151-152.
- [25] 彭苏萍,杨 峰,许献磊. GPR 城市道路病害检测应用技术研究综述[J]. 办公自动化,2014(增刊1):134-139.
- [26] 陈义群,肖柏勋. 论探地雷达现状与发展[J]. 工程地球物理学报,2005,2(2):149-155.
- [27] 石 宁,陈佩茹. 探地雷达的基本原理及其在沥青路面中的应用[J]. 中外公路,2004,24(1):75-78.
- [28] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [29] 白 冰,周 健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报,2001(4):527-531.
- [30] 周 杨,冷元宝,赵圣立. 路用探地雷达的应用技术研究进展[J]. 地球物理学进展,2003,18(3):481-486.
- [31] 周春林,陈 晔. 探地雷达研究进展[J]. 南京师大学报(自然科学版),1998,21(1):111-115.
- [32] 冯德山,戴前伟,余 凯. 基于经验模态分解的低信噪比探地雷达数据处理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(2):596-604.
- [33] 周奇才,陈秋锋,冯双昌. 探地雷达图像数据处理及应用研究[J]. 物探化探计算技术,2010,32(6):665-668,570.
- [34] 王 磊,彭 涛,孙浩伟,等. 偏移技术在探地雷达数据处理中的应用[J]. 自动化技术与应用,2007,26(6):100-101.
- [35] 曹震峰,杨世福,宋世荣,等. 探地雷达数据处理方法及其应用[J]. 地质与勘探,1996(1):34-42.
- [36] 杨秋芬. 基于 EMD 分解的探地雷达信号瞬时频率分析[J]. 煤田地质与勘探,2009,37(4):64-67.
- [37] 杜修力,何立志,侯 伟. 基于经验模态分解(EMD)的小波阈值降噪方法[J]. 北京工业大学学报,2007,33(3):265-272.
- [38] 邹海林,宁书年,林 捷. 小波理论在探地雷达信号处理中的应用[J]. 地球物理学进展,2004,19(2):268-275.
- [39] 李成方. 偏移技术在探地雷达数据处理中的研究[D]. 成都理工大学,2002.
- [40] 张 博,刘斯坦. 基于偏移和反褶积的探地雷达图像处理正演模拟[J]. 河南建材,2017(6):61-62.
- [41] Cao Y G, Zhou W, Bai Z K, et al. Differentiations in nutrients of reconstructed soils on open-cast mine dump of loess area[J]. Fresenius Environmental Bulletin,2016,25(7):2331-2342.

- [42]曹银贵,白中科,周伟,等. 山西平朔露天矿区复垦农用地表层土壤质量差异对比[J]. 农业环境科学学报,2013,32(12): 1540–1538.
- [43]Wang J M, Wang H D, Cao Y G, et al. Effects of soil and topographic factors on vegetation restoration in opencast coal mine dumps located in a loess area [J]. Scientific Reports, 2016(6):22058.
- [44]Cao Y, Wang J M, Bai Z K, et al. Differentiation and mechanisms on physical properties of reconstructed soils on open – cast mine dump of loess area [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(8): 6367–6380.
- [45]Andrea B. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain [J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 71(1): 26–35.
- [46]夏银行,黎蕾,邓少虹,等. 基于探地雷达的喀斯特峰丛洼地土壤深度和分布探测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 129–135.
- [47]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.
- [48]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.
- [49]何亮,王旭东,杨放,等. 探地雷达测定土壤含水量的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1673–1679.
- [50]蔡佳琪,刘四新,傅磊,等. 探地雷达探测路基含水量[C]//中国地球科学联合学术年会论文集, 2015: 1589–1591.
- [51]蔡毅. 探地雷达检测的原理方法及在水利工程中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2010(8): 72–73.
- [52]卢奕竹,宋文龙,路京选,等. 探地雷达测量土壤水方法及其尺度特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 37–44.
- [53]朱安宁,吉丽青,张佳宝,等. 基于探地雷达的土壤水分测定方法研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 1039–1044.
- [54]张昊,杨进,李胜利,等. 基于探地雷达技术的点坝浅部地层分布分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 638–647.
- [55]范洪利,张生善,张平. 探地雷达在地下管道地层探测中的应用[J]. 露天采煤技术, 1996(4): 36–38, 29.
- [56]孙坚,白明洲,王连俊. 探地雷达在地层划分中应用的研究[J]. 岩土工程技术, 2004(4): 168–171.
- [57]Davis J L, Annan A P. 用探地雷达高分辨率圈定土层和岩层[J]. 国外煤田地质, 1990(2): 41–47.
- [58]卞正富,雷少刚,金丹,等. 矿区土地修复的几个基本问题[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 190–197.
- [59]王丹丹,徐永明,岳书平,等. 基于探地雷达的植物根系探测研究进展[J]. 南京信息工程大学学报, 2016, 8(1): 46–55.
- [60]解迎革,李霞. 土壤中砾石含量的测定方法研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(1): 17–22.
- [61]Lejzerowicz A, Czurylowicz K, Kowalczyk S, et al. Ground Penetrating Radar and sedimentological investigations of quartz – glauconite sands in the Lubartow area (south – east Poland) [C]// Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2014: 239–244.
- [62]廖立坚,杨新安,叶培旭,等. 基于时空域的探地雷达杂波的去除[J]. 勘察科学技术, 2008(3): 59–61.
- [63]廖立坚,杨新安. 提高探地雷达剖面分辨率的方法[J]. 物探化探计算技术, 2008(1): 63–65, 92.
- [64]赵永辉,吴健生,万明浩. 应用分形技术提取探地雷达高分辨率信息[J]. 物探与化探, 2001(1): 40–44.
- [65]吴丰收,曾昭发,王德库,等. 沥青心墙压实度的探地雷达探测研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 742–749.
- [66]郭淑丽. 基于GPR的复垦土壤压实探测模型研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [67]Eriksson C P, Holmgren P. Estimating stone and boulder content in forest soils: evaluating the potential of surface penetration methods [J]. Catena, 1996, 28(28): 121–134.
- [68]秦俊梅,白中科,李俊杰,等. 矿区复垦土壤环境质量剖面变化特征研究——以平朔露天矿区为例[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2006, 26(1): 101–105.
- [69]陈龙乾,邓喀中,唐宏,等. 矿区泥浆泵复垦土壤物理特性的时空演化规律[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 277–283.
- [70]Bowen C K, Schuman G E, Olson R A, et al. Influence of topsoil depth on plant and soil attributes of 24 – year old reclaimed mined lands[J]. Arid Soil Research & Rehabilitation, 2005, 19(3): 267–284.
- [71]叶宝莹,白中科,孔登魁,等. 安太堡露天煤矿土地破坏与土地复垦动态变化的遥感调查[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(9): 972–976.
- [72]de Barros D A, Pereira J A A, Ferreira M M, et al. Soil physical properties of high mountain fields under bauxite mining [J]. Ciência e Agrotecnologia, 2013, 37(5): 419–426.
- [73]刘宁. 基于探地雷达的复垦土壤压实与工程质量评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [74]李华,李永青,等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1752–1756.
- [75]匿名. 露天煤矿复垦中需要注意哪些问题 [EB/OL]. (2016–06–24) [2018–01–01]. <http://www.cwestc.com/newshtml/2016-6-24/416388.shtml>.
- [76]倪含斌,张丽萍,吴希媛,等. 矿区废弃地土壤重构与性能恢复研究进展[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 000399–403.
- [77]樊文华,李慧峰,白中科,等. 黄土区大型露天煤矿煤矸石自燃对复垦土壤质量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 319–324.
- [78]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.
- [79]杜翠,杨峰,彭猛,等. 雷达层析成像对复垦土壤分层结构的探测[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 217–220 + 273.
- [80]李亮,王昕,胡克想,等. 探地雷达探测煤岩界面的方法与试验[J]. 工矿自动化, 2015, 41(9): 8–11.
- [81]陈星彤,吴长悦,王健,等. 多约束条件下复垦土壤水分的微波探测及标定[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 100–103.
- [82]吴志远,尹尚先,马丽红. 基于探地雷达的煤矿开采区地表土壤含水率变化研究[J]. 华北科技学院学报, 2017, 14(6): 17–23.
- [83]王萍,李新举,孙小银,等. 基于探地雷达的滨海盐渍表层含水量测定研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1329–1337.
- [84]Hugge P, 唐文敏. 应用探地雷达评价砾石层非均匀性: 在数据处理和岩相分析方面的发展[J]. 国外煤田地质, 1994(4): 34–40.
- [85]何平毅,张健. 综合物探方法在卵砾石层地基勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2008(增刊1): 276–278.