

王丹丹¹ 徐永明¹ 岳书平¹ 闫业超¹ 史学正² 于东升²

基于探地雷达的植物根系探测研究进展

摘要

植物根系在植物的生长发育、生态系统功能以及碳循环过程中具有重要作用,需要了解根系的直径大小、生物量、空间分布和三维构造等参数.传统的植物根系的探测方法具有破坏性,费时费力,而探地雷达(Ground Penetrating Radar,GPR)作为一种较新的地球物理方法,以其特有优势广泛应用于植物根系的探测.首先介绍了利用探地雷达探测植物根系的基本原理,然后对植物根系的制图、植物根径大小的估算、根系生物量的估算等几个方面的应用进展进行了综述,并从探地雷达系统、根系性质和土壤性质等不同角度探讨了影响探地雷达在植物根系探测中的主要因素,同时指出目前研究中的不足之处,今后的研究工作应侧重于探地雷达探测植物根系的作用机理及提高其在野外真实条件下的探测能力,以期对探地雷达在植物根系探测中应用的深入和推广提供思路.

关键词

探地雷达;植物根系;探测;根系制图;根径;生物量;估算

中图分类号 S127;TP79

文献标志码 A

收稿日期 2015-01-15

资助项目 国家自然科学基金(41201369)

作者简介

王丹丹,女,博士,讲师,研究方向为遥感与GIS应用、土壤资源数字化管理.

wdd_0813@126.com

0 引言

根系在植物生态系统中扮演着重要的角色,它既可帮助植物在生长发育过程中获取所需要的水分和营养物质,也是支撑、固定植物体的重要器官.虽然根系在一系列生态过程和反馈中发挥关键作用,但是与地上结构和功能相比,仍缺乏定量化的研究^[1].根据形态和功能不同,根系研究常被划分为细根和粗根^[2].通常粗根是指直径在2 mm以上的根^[3-4].细根获取营养物质、氧气和水,而粗根承接细根,将营养物质和水分运输到茎和枝,并支撑植物的结构^[5].对粗根功能的理解需要明确其直径大小和结构^[6-7],这使得粗根空间结构探测成为粗根研究的一个重要目标^[8].此外,在城市中树的根系通常被认为是城市环境中某种结构的主要威胁,尤其当树木长在建筑物根基附近或地下管道(如天然气或污水管道)旁,需要了解树根系的分布^[9],或在城市建设中,城市中古树是宝贵的自然文化遗产,在古树复壮的施工过程中,为避免对根系的损害也需要对古树地下根系分布有所了解^[10].

根系对生态系统中碳循环的贡献也具有重要意义.森林根系系统是主要的碳存储区域,大约占森林总碳量的20%~40%^[11-13].《京都议定书》通过签署国际公约减少温室气体排放应对全球变暖,需要精确评估森林碳储量,不仅包括森林地上部分,也包括地下根系部分的碳储量^[14-15],尤其粗根,是生态系统中碳收支的重要因素,占总根系碳储量的大部分^[16-18],所以根系生物量信息对于确定碳库大小和通量十分重要.而且粗根能深入土层,并固定浅层土壤,从而实现坡面稳定性^[19].正是由于森林生态系统中根系在维持碳储量和坡面稳定性方面的重要贡献,亟需估算根系的生物量及探测其结构,同时为能将根系生物量进行尺度上推,评价森林生态系统对气候和景观变化的敏感性,根系的分布信息也至关重要^[1,20].

传统的植物根系探测方法,如挖根法、土钻法、土壤剖面法等,虽然能提供合理且精确的信息,但它们不仅费时费力,受限于土样体积和表层状态,还会破坏土壤环境和植物根系,从而造成研究结果的不确定性^[21-22],无法对根系进行长期、重复性地观测和研究^[23].近年来,虽然国内外学者发展了一系列的无损根系探测方法,如微根窗管法,但该方法仅能描述细根,而人们对粗根和其他大的地下结构等根系系统的理解仍然是空白^[24],放射性示踪法和液流法则无法或很少能

1 南京信息工程大学 地理与遥感学院,南京,210044

2 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

获取根系结构的信息^[25-26]. 相比而言, 探地雷达 (GPR) 是一个非破坏性的地球物理技术, 能够探测到根系及其分布. 它利用电磁波在媒质电磁特性不连续处产生的反射和散射实现浅层 (一般小于 50 m) 成像、定位进而定性或定量地辨识地表中的电磁特性变化, 实现对表层下目标的探测^[27]. GPR 目前主要应用于森林和城市环境中树木根系形态制图、根径和生物量估算等方面的探测中^[1, 23, 28-29]. 作为一个根系无损探测的新方法, 虽然探地雷达在植物根系探测中表现出巨大潜力, 但仍处于发展的初期^[8]. 本文拟通过对目前利用 GPR 技术在植物根系, 尤其是树木根系直径大小、生物量等估算中的研究现状总结, 为探地雷达在植物根系探测中应用的深入和推广提供思路.

1 利用探地雷达方法探测植物根系的基本原理

GPR 是一种用于浅层地表探测的脉冲雷达系统, 从雷达天线发射短波电磁能量脉冲到达地表, 当遇到具有不同电磁特性的物质时, 部分电磁波会被反射回天线, 之后被转换成波形的数字图像^[25]. 随着天线在地表运行, 从植物根系返回的信号运行时间逐渐减少, 当天线正好运行到埋藏物体正上方时达到最少, 然后随天线运行远离埋藏物体, 时间再次增加, 从而导致在雷达剖面上产生一个双曲线特征 (图 1). 当植物根系主轴与天线运行方向垂直时, 形成最清晰的双曲线, 植物根系与天线运行方向相同时, 在雷达剖面上产生线状特征, 不会产生双曲线, 其他相交的角度会产生扭曲的双曲线^[30], 这些特征反射的强度和性质可用来识别植物根系的特征^[31]. 由于植物根系的含水量高于土壤基质, 致使二者介电常数产生较大差异, 使得利用 GPR 进行无损性探测成为可能.

2 探地雷达在植物根系探测中的应用

探地雷达是一种基于低频雷达波段 (25 MHz ~ 2.5 GHz)、短时段电磁脉冲 (0 ~ 20 ns)、无创的遥感和地球物理探测方法, 至今已有 30 多年的应用历史. 最早应用在矿业和地质方面^[32], 现已广泛应用于考古、市政工程 and 地下管线的检测、军事等诸多领域^[27]. 前人在利用 GPR 研究土壤剖面时, 通常会观测到植物根系, 认为根系是不需要的噪音的来源, 使 GPR 图像解译变得复杂^[31]. 此外一些考古学家也称

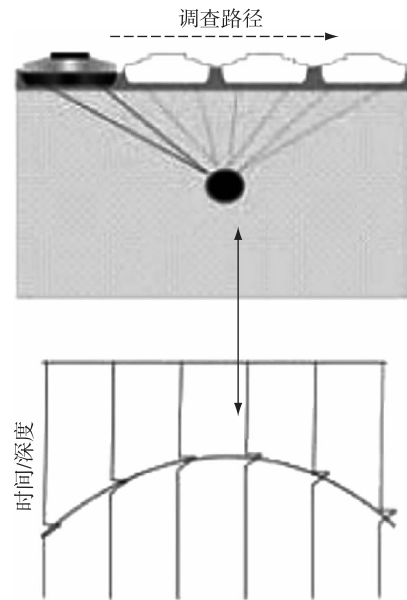


图 1 GPR 系统经过埋藏根系地表及产生双曲线示意^[2]
Fig. 1 Schematic representation of a GPR passing along the ground surface above a buried object (upper pane) and producing a hyperbola with the vertex above the position where the approach to the object is shortest^[2]

他们研究的 GPR 图像中能识别出根系^[9]. 而真正应用 GPR 探测植物根系的研究 (主要是指树木) 始于 1999 年^[26]. 由于探地雷达在树木根系探测上有其自身优势: 1) 野外条件下, 可在相对较短的时间获取大树根系信息; 2) 完全无创监测, 不会扰动土壤或者破坏所探测树木; 3) 可重复观测, 揭示长期根系生长; 4) 可观测硬质表面下 (如道路、混凝土等) 根系分布; 5) 根系探测精度满足要求^[26, 29], 因此, 经过十几年的发展, 在植物根系的制图、根径大小、根系生物量的估算等方面均取得了一定的研究成果.

2.1 植物根系制图研究

植物根系形态制图有助于理解根系的结构和功能. 运用 GPR 技术研究根系初期, 主要是测试 GPR 在根系 3D 制图中的适用性, 如 Hruska 等^[26] 采用天线频率为 450 MHz 的 EKKO 1000 探地雷达系统绘制出了森林中 50 年生, 根径大于 3 cm 的橡树根系的三维图像, 经 Šustek 等^[33] 验证准确性可达 80%; Čermák 等^[34] 对 GPR 探测数据经处理后进行手工绘图, 得到城市中沥青路面下枫树根系的分布情况, 但并没有对结果进行验证; Stokes 等^[9] 对城区的松树根系进行探测, 根据雷达图像, 手工绘制粗根图, 并与挖掘后拍摄的田间观测结果进行对比, 发现在水

平方向上相对一致,但在垂直方向上,根系结构没有相似性,这主要是因为雷达信号不能识别与电磁波传输方向平行的目标,也无法区分竖根以及根与根间的交叉或重叠部分.上述研究中并没有提及如何从雷达图像重新绘制根系图的明确信息,似乎根系的位置和直径首先在雷达图像上估算,然后主观地将相邻雷达图像连接并创造根系的3D图像.此外,根据GPR数据手工绘制根系图在根系直径和结构的推测上不可避免会引入人为误差^[8].而Zenone等^[35]采用1.5 GHz天线探测杨树根系,将获取数据以时间切片的形式整合,形成3D透视图,并使用风铲挖出全部根系,运用激光雷达扫描,重建3D根系结构,二者对比却发现没有太多相符之处,这可能是由于在挖掘过程中改变了根系的结构.崔喜红等^[36]提出了一种利用GPR数据构建树木根系三维图像的方法,该方法能够减少或避免出现根系图像的不连续现象,明确根系的分布,并已获得中国专利,但在实际应用中的效果还有待检验.目前利用探地雷达进行根系分布或结构制图在很大程度上还局限于定性制图,根系3D结构重建的量化仍需进一步研究^[8,37].植物根系制图的关键问题是制图的精度,而制图精度的提高离不开各项软硬件条件的发展,如GPR硬件系统、可视化软件以及数据处理方法等.利用GPR进行植物根系制图研究的同时也促进了对植物根径大小的探测.

2.2 植物根径大小的估算

植物根径大小的估算是根系制图和根系生物量估算的基础,利用GPR探测植物根系的研究几乎均需要对根径大小进行探测,能探测到的最小根径大小却千差万别.最早利用GPR探测根径大小的是Hruska等^[26]利用450 MHz频率天线探测到种植园中干燥的砂质土壤中的橡树根系最小达3~4 cm;同样使用450 MHz频率天线,Čermák等^[34]和Stokes等^[9]利用GPR分别用于城市环境中枫树和花园内松树与桉树的根系研究,表明最小可探测到的根径大小约为2 cm.从现有文献来看,Wielopolski等^[38]采用1.5 GHz频率天线,可探测到的根系直径最小为0.25 cm,但该研究测的是在实验室埋藏于沙箱内25 cm深度的嫩枝,不能算是对真正根径的探测.

Butnor等^[31]尝试利用不同频率天线(400 MHz和1.5 GHz)的探地雷达系统,基于不同土壤条件(排水和质地),通过挖沟埋根的方法对火炬松和杨树根系进行探测,结果表明在排水良好的30 cm深

砂质土壤中1.5 GHz天线可探测到火炬松0.5 cm大小的根系,且高振幅反射波面积与根径大小关系密切,尤其是在15 cm深度内.类似的,Barton等^[30]采用500 MHz、800 MHz和1 GHz频率天线,将桉树根埋藏于湿沙的沙坑中,垂直于根的长轴方向进行GPR扫描,结果表明500 MHz天线可探测到根径的大小为1 cm,并建立了基于波形指数(时间间隔)的根径估算多元回归模型($R^2 = 0.89$),均方根误差为0.56 cm.

诸多学者均采用900 MHz频率天线对根径进行探测,但可探测到的最小根径大小亦有所差异.如Cox等^[25]分别在商业桃园和可控埋根实验两种条件下,可探测到1.2和2.5 cm大小的桃树根系,并发现在实验条件下,信号强度与根径大小($r = -0.517$)或根径大小和埋藏深度的乘积($r = -0.630$)呈显著负相关;与之类似,Dannoura等^[39]将日本柳杉的根系埋藏于30 cm深度的砂质土壤中,可探测到的最小根径大小为1.1 cm,并发现根径大小与波形指数之间具有较好的相关性;Hirano等^[40]在研究GPR探测根系限制因子时,在实验区域内填满砂子,探测埋藏的日本柳杉的根系,最小可探测的根径大小为1.9 cm,根径与反射波振幅、振幅面积以及阈值范围内像素数之间均具有显著相关性.

Stover等^[24]在干燥砂质土壤条件下,利用1.5 GHz频率天线的GPR探测栎树根系,能探测的最小根径大小为0.5 cm.崔喜红等^[28]将小叶榆的根系埋藏在已知不同深度的干燥砂质土壤中,利用探地雷达2 GHz频率天线可识别0.5 cm以上的粗根,建立了基于探地雷达波形指数的根径估算模型,并对模型进行检验,估测根径和实测根径之间的回归判定系数在0.85以上,均方根误差不足4 mm,该方法已获得中国国家专利^[41].

目前利用GPR技术可识别的最小树木根径大小在0.5~4 cm不等,对根径大小的估算主要是基于GPR数据提取的相关指数与实测根径大小建立经验统计关系来实现的.由于诸多学者的研究条件不一,在使用GPR技术探测植物根径大小时,受天线频率、植物种类、土壤含水量、数据处理方法等多种因素错综复杂交织在一起的影响^[8,15,39-40,42],使所取得的研究结果有所差异.

2.3 植物根系生物量的估算

正由于树木根系在生态系统碳储量及碳循环中的重要作用以及GPR技术在树木根系探测中的特

有优势,利用 GPR 估算树木根系生物量已成为目前该领域研究的重要方向和热点。Butnor 及其团队在植物根系生物量的 GPR 估算方面做了很多研究工作^[21,23-24,31,43-44],他们主要是利用 GPR 提取的相关指数与实测根系生物量之间的关系,建立经验统计模型,从而实现植物根系生物量的估算。2001 年,Butnor 等^[31]首次利用 GPR 在田间条件下尝试进行高振幅面积和反射体计数与火炬松根系生物量的关系,发现与高振幅面积相关性显著,但相关系数仅 0.55($p < 0.05$);2003 年研究利用 GPR 调查根系生物量时发现阈值范围内的像素数与火炬松根系生物量之间的相关系数为 0.86($p < 0.0001$),较之前有很大提高^[21];2005 年 Butnor 等^[43]首次基于 GPR 采用非线性模型量化 GPR 指数与松树根系生物量的关系,判定系数 R^2 为 0.6;Stover 等^[24]通过对阈值范围内的像素数与根系生物量进行回归($R^2 = 0.68$),表明二者关系显著,并通过对比常态和 CO_2 浓度升高环境下根系生物量的大小,发现粗根系在固碳方面有很大作用;采用同样的方法,Butnor 等^[44]对比研究利用 GPR 在相似土壤、不同植被类型下的根系生物量估算,相关系数均可达 0.8 以上。

上述研究都是基于某一深度,采用雷达反射信号强度指数对树木根系的干生物量进行的估算研究,该方法的局限是雷达反射信号强度指数受根系含水量影响^[39-40],导致估算精度有限。与其不同,崔喜红等^[28]采用 2 GHz 频率天线的 GPR,对埋藏在已知不同深度的干燥砂质土壤中的小叶榆根系,建立了基于根密度和根体积直接进行根系鲜生物量的估算模型,结果与实测值的相关性较高, R^2 为 0.84,均方根误差仅为 66 g,并分析了实测鲜根生物量与时间间隔指数的关系, $R^2 = 0.79$ ($p < 0.001$),估算精度有较大提高,这可能是因为该指数可以避免受根系探测深度和含水量的影响。该方法通过利用 GPR 提取的时间间隔指数估算根径大小,然后获得根密度和体积,并直接估算根系生物量,目前已获得中国国家专利^[41]。此外,Raz-Yaseef 等^[1]为了量化碳储量并理解根系系统的生态功能,采用 1 GHz 频率天线 GPR 探测橡树根系,建立了基于探地雷达信号强度的根系干生物量预测模型,判定系数高达 0.9($p < 0.05$),并在此基础上将 GPR 数据转换成根系生物量,首次将根系生物量从栅格尺度上推到 600 m × 600 m 林分水平。Guo 等^[45]采用 0.5、0.9 和 2 GHz 频率天线探测埋藏于土壤中的小叶榆根系,发现利用

GPR 指数估算根系生物量的精度较高。

由上可见,Raz-Yaseef 等^[1]虽然是在田间条件下并没有采用预埋根系的方法,进行 GPR 探测研究,但其精度较高,这可能是由于其在建立模型前,去掉了低根系生物量的样本。而崔喜红等^[28]和 Guo 等^[45]的根系生物量估算精度较高,一个原因是与 Butnor 等^[21]使用的方法不同,采用时间间隔指数进行估算,另外可能是因为它们均是在近于理想的实验条件下进行的,根系分布格局比田间实际情况简单得多,致使估测精度偏高。因此,需要找到在野外真实自然条件下,应用 GPR 植物根系生物量估算的最佳方法是研究的关键。

3 利用探地雷达探测植物根系的影响因素

虽然 GPR 技术在植物根系探测上有其独特的优势并已广泛应用于树木根径大小及根系生物量的定量估算研究,但其成功应用不仅依赖于特定的研究区域^[31],也是有条件的^[8],这主要是因为有许多因素会影响利用 GPR 方法在野外真实条件下探测植物根系的精度。因此,要实现 GPR 方法在野外真实条件下根径大小和生物量估算的精确估算、根系结构三维制图的直接应用,需要理解各种基于 GPR 方法进行根系调查的影响因素^[46]。目前利用 GPR 方法探测植物根系的影响因素可以概括为探地雷达系统、根系性质、土壤性质以及其他因素等。

3.1 探地雷达系统

探地雷达系统的影响主要是指采用的雷达天线的中心频率对根系探测产生的影响。天线中心频率主要是影响 GPR 探测的分辨率和穿透深度^[26,30-31]。按照一般规律,低频(<200 MHz)天线穿透较深,能探测到较大的物体或特征,中频(200~1 000 MHz)和高频(>1 000 MHz)天线无法深入穿透,但是能探测到小的物体^[21,23]。因此选择使用的天线频率时必须对探测分辨率和穿透深度做出权衡^[1,24,44]。探测根系的分辨率包括根径大小和根与根的间隔^[31]。目前用于根系探测的天线频率主要在 400~2 000 MHz 之间。不考虑其他因素,可识别的最小根径 450 MHz 约为 2~4 cm^[9,26,34],900 MHz 或 1 GHz 约为 1~2 cm^[39-40],1.5 或 2 GHz 约为 0.5 cm^[31]。900 MHz 频率天线能识别在水平和垂直方向大于 20 cm 的根系,小于 20 cm 时则看作是单根^[40],其他频率天线可识别的根与根的间隔则未见报道。关于天线频率对能探测到的根与根间隔大小的影响较少。此外,随

着天线频率的增加,根系生物量估算精度发生有规律的变化,如使用阈值范围内像素数进行估算时精度递减,而时间间隔则精度递增^[45].因此,有学者认为要精确估算粗根生物量不能仅使用单一频率天线,应综合使用2~3个频率天线的探地雷达系统^[40].

3.2 根系性质

利用GPR方法探测根系的另一个主要影响因素是根系性质,包括根系来源的植物种类、存在状态(活根与死根)、根系含水量、深度、根间距、方向等.不同树种的根系性质不同,使得GPR根系的探测能力不同.如Butnor等^[31]研究表明根径大小与高振幅面积的相关性随树种发生明显变化,可用来估算火炬松的根径,但无法用于杨树的根径估算;Zenone等^[35]也认为不同GPR指数与根径大小的相关性不同,可能是受树种的影响.

由于死根的含水量较低,利用GPR无法识别^[31,40,43].如Butnor等^[31]的研究表明探测不到小于5 cm的死根或正在腐朽的根,也无法使用GPR区分活根和死根^[31,44];但是Dannoura等^[39]的研究认为,能否识别死根取决于土壤条件,土壤较干无法识别,土壤较湿则能够识别,这是由于土壤和根系间含水量的差异是影响GPR探测根系的一个关键因子^[44].死根无法探测会导致森林土壤中碳储量被低估^[40],所以通常结合活根和死根的生物量,建立与GPR指数的关系^[24,43],且有研究表明与仅用活根生物量与GPR指数之间建立的估算模型相比精度较高^[44].因此,根系含水量是影响GPR探测根系的关键因素之一^[40].根系反射的信号强度与根系含水量密切联系.如Hirano等^[40]报道高含水量的小根得到的信号强度比低含水量的大根要强,当根系含水量低于20%时,根系无法探测,达50%时则可清晰辨认;Guo等^[45]专门研究了根系含水量对根系的雷达反射信号及利用GPR估算根系生物量的影响,结果表明根系生物量与GPR指数间(振幅面积、阈值范围内像素数和时间间隔)的关系随根系含水量发生变化,其中时间间隔指数与根系生物量的关系随根系含水量增加的变化最小,表明该指数对根系含水量的变化不敏感,对生物量的估算精度高于其他指数,并首次发现与干生物量估算相比($R^2 = 0.73 \sim 0.91, p < 0.001$),鲜生物量的估算精度更高($R^2 = 0.81 \sim 0.93, p < 0.001$),且随着根系含水量范围的扩大,使用鲜生物量估算的精度明显提高.正由于根系含水

量对根系探测有较大影响,因此Guo等^[46]建议在利用GPR探测根系前先对其含水量进行调查,但并未提及如何调查,是否会对根系造成破坏,进行大面积调查的可行性也未知.

根系的埋藏深度也会影响GPR技术对根系的探测.地下根系埋藏越深,能量衰减越大,从而影响根径大小的估算.Butnor等^[31]研究表明高振幅反射面积与根径大小密切相关,但其相关性随深度增加而减弱.此外,根系由于分支众多,互相联结交叉,在三维方向生长而十分复杂,导致GPR图像结果十分复杂^[23].因此,根间隔与根系方向对利用GPR探测根系影响较大,亦是在野外条件下影响根系探测精度的主要原因之一.Tanikawa等^[42]首次对根系方向与GPR指数之间的关系进行研究,结果表明,当GPR与根系以90°相交时,GPR图像上根系最清晰,当交角小于45°或者大于135°时,则很难识别,且发现振幅面积随根系方向变化呈现正弦曲线的形态,而时间间隔不受根系方向控制.关于根与根间隔对根径大小探测的影响仅有Hirano等^[40]进行了相关报道.

3.3 土壤条件

植物根系生存于土壤之中,因此,土壤条件会对GPR探测植物根系产生较大的影响.土壤条件包括土壤含水量、土壤质地、土壤表面状况等.通常土壤含水量、粘粒和盐容量高,对雷达信号的衰减较强,从而影响雷达波传播速度和雷达回波的强度^[30].Butnor等^[31]研究了三种不同土壤条件下利用GPR对根系探测,发现基于1.5 GHz天线砂质的排水良好的30 cm深土壤下的分辨率最高,说明它是进行GPR探测根径大小的理想土壤环境,但是在粘质的、排水不良的土壤中则无法识别根系.除此之外,土壤的表面状况对GPR探测根系也有影响,如地表平坦程度不一,会使得GPR在探测根系时与土壤无法保持接触,探测天线和土壤之间存在空气,阻碍信号传播,尤其对高频天线而言,因此,保持与地表接触并以均匀速度移动天线是获得可靠测量数据的关键^[23,31].再比如地表落叶层,Butnor等^[43]研究表明地表落叶层降低了GPR探测根系的能力,如果落叶层深度一致,影响相对较小,否则无法评价根系生物量的差异.土壤中的其他埋藏物也会限制GPR的根系探测能力,虽然Hruska等^[26]和Stokes等^[9]的研究认为石头、水管和电线等对GPR探测根系的影响不大,但是有些埋藏物如空的PVC管、砾石和卵石等

和根系之间在 GPR 图像上并没有明显区别^[25,35], 这些埋藏物的存在会干扰 GPR 系统对根径的识别。

3.4 其他因素

除了上述因素之外, 还有其他因素同样会影响 GPR 技术对根系的探测。如雷达数据的采集方式, 目前主要采用网格扫描, 虽然扫描线间隔越小, GPR 的探测精度越高^[31,38], 但很少有报道不同网格大小对 GPR 根系探测精度影响的研究。由于树木根系由主根向四周呈放射状生长, 因此有学者提出采用同心圆或半同心圆式的扫描, 这主要是针对城市中相对无阻挡区域的树木根系^[8,23], 但此种扫描方式多是基于理论上的描述, 而缺乏实际的研究案例。此外, 雷达数据的处理水平对 GPR 探测根系的影响很大, 如 Butnor 等^[21]发现克希霍夫(Kirchoff)偏移技术能提高实测与估算根系生物量之间的关系, 表明先进的数字信号处理技术可提高 GPR 根系生物量的估算精度。虽然不同学者采用的雷达数据处理流程有所差异, 但在诸多学者的努力下构建了 GPR 数据后处理的流程, 包括雷达图像的标准化、噪声去除、信号放大、偏移和希尔伯特(Hilbert)变换等^[8]。

利用 GPR 技术进行植物根径大小和生物量的估算方法, 均是通过建立不同 GPR 指数与实测根径大小或生物量之间的经验预测模型实现的。目前主要利用的指数有两类: 雷达反射信号强度指数^[31]和雷达反射波形指数^[30]。雷达反射信号强度指数有阈值范围内面积、阈值范围内像素数、像素平均强度和反射体计数, 而雷达反射波形参数有反射波振幅、高振幅面积和时间间隔^[8]。从对利用 GPR 进行植物根径大小和根系生物量估算的研究进展可知: 从 GPR 数据获取的不同指数与根径大小或根系生物量的相关性有所不同, 即使相同指数, 在不同研究中的结果也不一样, 直接影响对根系的探测精度。相比较而言, 在根径估算方面, 雷达反射波形指数的效果更好, 因为雷达反射信号强度指数受根径大小和深度的影响较大^[25]。而雷达反射波形指数, 如时间间隔, 仅依赖于根径大小, 与深度无关, 不受根系方向、土壤含水量的影响, 对粗根根径大小的估算十分精确^[28,30,42]。虽然 Barton 等^[30]的研究认为波形指数中的各个时间间隔均与根径大小显著正相关, 但 Dannonoura 等^[39]和 Hirano 等^[40]的研究则表明时间间隔指数无法用于根径的精确估算。由于阈值范围内像素数和高振幅面积两个参数与根径显著相关^[21,31,39,43], 因此有学者认为这两个参数在预测根

径大小时比时间间隔更可靠^[39]。然而阈值范围被随意确定导致不同研究结果有差异, 阈值选择过低, 会将其他非根系误判为根系, 相反阈值选择过高, 一些根系将被忽视。阈值范围变化对根径大小估算的影响并不清楚, 但阈值能否正确选择直接影响根径大小的估算精度, 因此, 很难决定哪一个 GPR 指数更适合进行树木根径探测^[8]。

考虑到利用探地雷达进行植物根系探测受到多种因素影响, 使得其在野外自然条件下的应用受到一定的限制, 为此有学者利用 GprMax 模拟探地雷达基于不同频率的天线, 探测不同空间结构和含水量的植物根系的有效性, 该模拟结果有助于探地雷达野外根系探测图谱的解译, 为探地雷达在植物根系探测中的应用积累经验^[22,46]。

4 不足与展望

4.1 不足

通过对前人研究工作的总结, 可知目前研究工作的不足之处主要体现在如下几个方面:

4.1.1 研究对象及应用领域有限

不难看出, 目前研究中利用 GPR 探测的对象有限, 主要是一些乔木(如橡树、松树、杨树、桉树等)和灌木(如小叶榆)的根系, 且以乔木为主, 而对于其他种类的树木, 例如果树等则少有涉及。由于 GPR 探测的主要是植物的粗根, 而农作物的根系大小普遍较小, 因此, 对农作物的研究尚未见报道。另外, 研究的应用领域较为狭窄, 大多是单纯的侧重于根系定位、根系结构、根径大小和根系生物量估算等方面的研究, 虽然有的研究关注于树木对城市环境中某种结构的威胁, 亦有研究应用于森林碳储量的评价中, 但较少与根系的生态功能之间有明确的联系, 应用领域的深度及广度都有待拓展。

4.1.2 利用 GPR 根系探测的影响因素错综复杂, 仍有很多问题亟待解决

目前, 在诸学者的不懈努力下, 虽然只有十几年, 业已基本了解利用 GPR 技术对根系探测过程中的影响因素, 并且有学者对植物根系方向^[42]、根系的间隔和深度^[46]、根系含水量^[40,45]、根系探测频率^[15]等方面进行了专门研究, 但是由于根系在土壤中的分布格局未知, 再加上各因素本身就比较复杂, 针对单一因素尚且无法完全掌握, 且各因素间存在错综复杂的交互作用, 此方面研究仍处于探索阶段, 许多问题没有解决或有待澄清。

影响因素的研究主要侧重于植物根系的状态,却忽视了探地雷达系统及土壤条件等因素对于植物根系探测的影响.土壤含水量和土壤质地等的影响研究也主要是定性的说明,没有定量的探讨.实践研究中选择使用的天线频率时,需要对探测分辨率和穿透深度做出权衡,正确的权衡需要掌握天线频率对探测分辨率和穿透深度的定量影响,这又涉及到土壤含水量的影响.根系能否被 GPR 探测到取决于根系和土壤间的含水量之差.虽已有学者意识到其重要性^[44],却没有进一步的研究.

4.1.3 在接近理想条件下所获取的研究成果仍有待验证

利用 GPR 方法进行植物根系的探测研究绝大多数是在可控条件下进行的^[9],如 Hirano 等^[40]在研究 GPR 方法探测根系限制因子时,建立实验小区,将其中的土壤移除,填满砂子,并将植物的根系埋藏于内;或者选择适宜的天然土壤(干燥砂质),埋根的方式^[31,39],GPR 扫描方向与根系延伸方向垂直,埋藏根径的大小、深度、方向及间隔等都是人为可控制的,在诸多研究中均是整齐排列于土壤中,虽然有利于 GPR 探测,但是完全不同于田间的真实情况. Hirano 等^[15]在真实的野外条件下对植物根系进行探测,研究表明相同大小的根径并不是均能被探测到的,如用探测频率来表示,根径在 0.5~1.0 cm 的根系探测频率仅有 6.6%,根径大于 1 cm 根系的平均探测频率也只是接近 54.4%.由此说明,目前主要的研究成果,包括根径大小和根系生物量的估算,均是在接近理想的实验条件下获取的,因此,其在野外真实条件下的有效应用仍有待验证,需进一步研究^[1,9,28,30,37].

4.1.4 探地雷达技术、数据处理与挖掘方法有待提高

自从 2001 年,Butnor 等^[31]研究表明在最佳条件下可探测到 0.5 cm 的植物根径,至今在根径大小的探测^[28]上并没有取得实质性突破.可能是由于这期间探地雷达技术本身发展缓慢,硬件支持不够;再者对于根径大小和根系生物量的估算均是基于统计的经验模型,且以线性模型为主,是否能正确揭示 GPR 指数与根径大小或根系生物量的内在关系仍存有疑问.虽已构建了一套 GPR 数据的预处理流程^[8],但雷达数据处理难度高,而 GPR 数据预处理直接影响 GPR 指数的准确提取,并最终影响对根系的探测,因此还需发展更好的雷达数据处理与挖掘方法,为

GPR 对根系的探测提供软件支持.

4.2 展望

4.2.1 拓展研究对象及应用领域

人们利用 GPR 方法估算树木根系生物量的主要原因是由于树木根系在生态系统碳储量及碳循环中具有重要作用,而探地雷达作为无损探测的新方法在森林根系碳储量的深入应用及其在大范围的推广需不断尝试新的研究对象,如其他树种、经济林或者一些经济作物及农作物等.在应用领域上,不仅仅用于评价生态系统的碳循环,有学者认为 GPR 可能是进行树木根系健康诊断的有效工具^[9,40].此外,如果能够利用 GPR 探测经济林或经济作物的根系生长状况,并间接进行产量估算等,可为提高当地农民经济效益提供指导.

4.2.2 加强利用探地雷达探测植物根系的作用机理研究

研究对象与应用领域的成功拓展依赖于利用 GPR 探测植物根系的能力,这取决于人们对利用 GPR 探测植物根系的作用机理的理解.探地雷达对根系的探测首先要经过土壤,到达根系,再由根系经土壤回到雷达系统中,因此需弄清每个环节的作用机制,不仅是定性,更要定量化,不同天线频率的穿透深度受土壤含水量影响,如已知含水量,便可获取相应的穿透深度,当然还有其他土壤性质的综合影响.再比如土壤条件确定,可通过雷达反射信号强度来推断某一深度根径大小、根系间隔和方向等.但现阶段仍有很多内在的作用机理没有弄清,笔者建议如下:通过制定详细完善的研究方案,模拟仿真,逐一各个影响因素进行研究;发展并建立根径大小和根系生物量的物理模型,而非仅使用经验模型;综合运用钻孔雷达或其他非破坏性的根系探测方法,充分利用每种方法的优点;提高探地雷达的数据处理及数据挖掘技术;尝试增加野外真实条件下的研究案例.随着探地雷达技术的发展与完善,将最终使 GPR 成功探测野外真实条件下的植物根系成为可能.

4.2.3 进一步扩展研究的时间尺度和空间尺度

探地雷达技术区别于传统根系探测方法的主要优势在于它的快速、无损、可重复探测.虽从发展之初 Hruska 等^[26]就已经提到利用 GPR 可对根系进行重复探测,揭示根系长期发展,研究根系动态变化,但是从现有文献来看鲜有报道.虽有学者曾尝试^[43],但并没有评价其动态变化.而森林根系生物量的动

态变化监测对生态系统碳循环乃至全球碳循环研究均至关重要,需加强不同时间尺度的研究.此外,现有研究关注的空间尺度较小,均为单棵植物的根系,或埋于实验小区内的植物根系,而宏观空间尺度的研究更适合探地雷达技术的特点,对植物根系生物量在大尺度上的信息理解更具有生态意义^[37],但仅有 Raz-Yaseef 等^[1]尝试并成功将根系生物量的估算结果进行尺度上推,因此,今后需侧重于宏观尺度上的研究.

5 结语

虽然经过十几年的发展,探地雷达以其特有的优势在植物根系探测中的研究成果显著,但仍处于发展初期.目前探地雷达主要是侧重应用于树木根系的探测,最佳条件下能探测到的最小根径约为 0.5 cm 的粗根.在根径大小及根系生物量的估算上,利用雷达反射波形指数建模要优于雷达反射信号强度指数.利用探地雷达探测植物根系受诸多因素影响,包括探地雷达系统(如天线频率)、土壤条件(土壤质地、含水量和土壤的表面状况等)、根系性质(根系含水量、深度、间隔和方向等)及数据采集方式、数据处理与分析方法等其他因素.因此,相同根径的根系不一定均能被探测到,根系 3D 制图难以定量,绝大多数研究只能在可控的实验条件或野外理想条件下通过埋根进行,同时由于假设条件存在,如根系呈圆柱状等,从而影响自然状态下根径的大小和根系生物量的估算精度,野外工作困难重重,再加上探地雷达数据处理较为复杂,仅有少数学者致力于此方面研究,仍有许多问题亟待解决,但不可否认探地雷达在植物根系探测中具有广阔的应用前景.

参考文献

References

- [1] Raz-Yaseef N, Koteen L, Baldocchi D D. Coarse root distribution of a semi-arid oak savanna estimated with ground penetrating radar [J]. *Journal of Geophysical Research (Biogeosciences)*, 2013, 118(1): 135-147
- [2] Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. *Plant roots: The hidden half* [M]. 3rd ed. New York: Marcel Dekker Press, 2002
- [3] Millikin C S, Bledsoe C S. Biomass and distribution of fine and coarse roots from blue oak (*Quercus douglasii*) trees in the northern Sierra Nevada foothills of California [J]. *Plant and Soil*, 1999, 214(1/2): 27-38
- [4] Resh S C, Battaglia M, Worledge D, et al. Coarse root biomass for eucalypt plantations in Tasmania, Australia: Sources of variation and methods for assessment [J]. *Trees*, 2003, 17(5): 389-399
- [5] Fogel R. Root turnover and productivity of coniferous forests [J]. *Plant and Soil*, 1983, 71(1/2/3): 75-85
- [6] Persson H A. Root systems of arboreal plants [M] // Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. *Plant roots: The hidden half*. 3rd ed. New York: Marcel Dekker Press, 2002: 187-204
- [7] Kalliokoski T, Nygren P, Sievanen R. Coarse root architecture of three boreal tree species growing in mixed stands [J]. *Silva Fennica*, 2008, 42(2): 189-210
- [8] Guo L, Chen J, Cui X H, et al. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review [J]. *Plant and Soil*, 2013, 362(1/2): 1-23
- [9] Stokes A, Fourcaud T, Hruska J, et al. An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ. I : Ground-penetrating radar [J]. *Journal of Arboriculture*, 2002, 28(1): 2-10
- [10] 赖娜娜,袁承江,唐硕,等.应用探地雷达探测古树根系分布 [J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(11): 124-126
LAI Nana, YUAN Chengjiang, TANG Shuo, et al. Application of ground-penetrating radar to detection of root system distribution of a veteran tree [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(11): 124-126
- [11] Dixon R K, Solomon A M, Brown S R, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190
- [12] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomass [J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411
- [13] Paul K I, Jacobsen K, Koul V, et al. Predicting growth and sequestration of carbon by plantations growing in regions of low-rainfall in southern Australia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(2): 205-216
- [14] Government of Japan. Report on Japan's supplementary information on LULUCF activities under article 3, paragraphs 3 and 4 of the Kyoto Protocol [R]. 2008
- [15] Hirano Y, Yamamoto R, Dannoura M, et al. Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass [J]. *Plant and Soil*, 2012, 360(1/2): 363-373
- [16] Misra R K, Turnbull C R A, Cromer R N, et al. Below-and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation. I : Biomass [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 106(2/3): 283-293
- [17] Miller A T, Allen H L, Maier C A. Quantifying the coarse root biomass of intensively managed loblolly pine plantations [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(1): 12-22
- [18] Brunner I, Godbold D L. Tree roots in a changing world [J]. *Journal of Forest Research*, 2007, 12(2): 72-82
- [19] Reubens B, Poesen J, Danjon F, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review [J]. *Trees*, 2007, 21(4): 385-402
- [20] Tobin B, Čermák J, Chiatante D, et al. Towards developmental modelling of tree root systems [J]. *Plant Biosystems*, 2007, 141(3): 481-501

- [21] Butnor J R, Doolittle J A, Johnsen K H, et al. Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2003, 67(5): 1607-1615
- [22] 郭立, 崔喜红, 陈晋. 基于 GprMax 正演模拟的探地雷达根系探测敏感因素分析 [J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1754-1763
GUO Li, CUI Xihong, CHEN Jin. Sensitive factors analysis in using GPR for detecting plant roots based on forward modeling [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(4): 1754-1763
- [23] Butnor J R, Barton C, Day F P, et al. Using ground-penetrating radar to detect tree roots and estimate biomass [M] // Mancuso S. *Measuring roots*. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 213-245
- [24] Stover D B, Day F P, Butnor J R, et al. Effect of elevated CO₂ on coarse root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar [J]. *Ecology*, 2007, 88(5): 1328-1334
- [25] Cox K D, Scherm H, Serman N. Ground-penetrating radar to detect and quantify residual root fragments following peach orchard clearing [J]. *Horttechnology*, 2005, 15(3): 600-607
- [26] Hruska J, Cermák J, Sustek S. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar [J]. *Tree Physiology*, 1999, 19(2): 125-130
- [27] 粟毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006
SU Yi, HUANG Chunlin, LEI Wentai. *Theory and application of ground penetrating radar* [M]. Beijing: Sciences Press, 2006
- [28] 崔喜红, 陈晋, 沈金松, 等. 基于探地雷达的树木根径估算模型及根生物量估算新方法 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(2): 243-252
CUI Xihong, CHEN Jin, SHEN Jinsong, et al. Modeling tree root diameter and biomass by ground penetrating radar [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2011, 41(2): 243-252
- [29] Bassuk N, Grabosky J, Mucciardi A, et al. Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement [J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2011, 37(4): 160-166
- [30] Barton C V M, Montagu K D. Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(12): 1323-1331
- [31] Butnor J R, Doolittle J A, Kress L, et al. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States [J]. *Tree Physiology*, 2001, 21(17): 1269-1278
- [32] Lorenzo H, Pérez-Gracia V, Novo A, et al. Forestry applications of ground-penetrating radar [J]. *Forest Systems*, 2010, 19(1): 5-17
- [33] Šustek S, Hruška J, Druckmüller M, et al. Root surfaces in the large oak tree estimated by image analysis of the map obtained by the ground penetrating radar [J]. *Journal of Forest Science*, 1999, 45(3): 139-143
- [34] Čermák J, Hruška J, Martinková M, et al. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques [J]. *Plant and Soil*, 2000, 219(1/2): 103-116
- [35] Zenone T, Morelli G, Teobaldelli M, et al. Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations [J]. *Functional Plant Biology*, 2008, 35(9/10): 1047-1058
- [36] 崔喜红, 陈晋, 吴渊, 等. 一种利用探地雷达数据构建树木根系三维图像的方法: 中国, CN201310038486. 3 [P]. 2013-05-15
CUI Xihong, CHEN Jin, WU Yuan, et al. An approach of building 3D image of tree roots by ground penetrating radar: China, CN201310038486. 3 [P]. 2013-05-15
- [37] 崔喜红, 陈晋, 关琳琳. 探地雷达技术在植物根系探测研究中的应用 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 606-611
CUI Xihong, CHEN Jin, GUAN Linlin. The application of ground penetrating radar to plant root system detection [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 606-611
- [38] Wielopolski L, Hendrey G, Daniels J J, et al. Imaging tree root systems in situ [C] // *Proceedings of the SPIE*, 2000, 4084: 642-646
- [39] Dannoura M, Hirano Y, Igarashi T, et al. Detection of *Cryptomeria japonica* roots with ground penetrating radar [J]. *Plant Biosystems*, 2008, 142(2): 375-380
- [40] Hirano Y, Dannoura M, Aono K, et al. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar [J]. *Plant and Soil*, 2009, 319(1/2): 15-24
- [41] 陈晋, 崔喜红, 沈金松. 一种利用探地雷达测量植物地下根的直径以及生物量的方法: 中国, CN201010151217. 4 [P]. 2010-08-25
CHEN Jin, CUI Xihong, SHEN Jinsong. A new method of estimating tree root diameter and biomass using ground penetrating radar: China, CN201010151217. 4 [P]. 2010-08-25
- [42] Tanikawa T, Hirano Y, Dannoura M, et al. Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar [J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 317-327
- [43] Butnor J, Roth B, Johnsen K. Feasibility of using ground-penetrating radar to quantify root mass in Florida's intensively managed pine plantations [R]. Gainesville, Florida, USA: Forest Biology Research Cooperative Report # 38.9p, 2005
- [44] Butnor J R, Stover D B, Roth B E, et al. Using ground penetrating radar to estimate tree root mass: Comparing results from two Florida surveys [M] // Allred B J, Daniels J J, Ehsani M R. *Handbook of Agricultural Geophysics*. Boca Raton: CRC Press, 2008: 352-359
- [45] Guo L, Lin H, Fan B H, et al. Impact of root water content on root biomass estimation using ground penetrating radar: Evidence from forward simulations and field controlled experiments [J]. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 503-520
- [46] Guo L, Lin H, Fan B H, et al. Forward simulation of root's ground penetrating radar signal: Simulator development and validation [J]. *Plant and Soil*, 2013, 372(1/2): 487-505

Plant root detection based on ground penetrating radar: A review

WANG Dandan¹ XU Yongming¹ YUE Shuping¹ YAN Yechao¹ SHI Xuezheng² YU Dongsheng²

1 School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 State key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

Abstract Roots play an important role in the growth and development of plants, as well as ecosystem functioning and carbon cycle processes. Contemporary methods for evaluating root parameters such as diameter, biomass, spatial distribution and three dimensional architecture are time-consuming, labor intensive, and destructive to the roots. The Ground Penetrating Radar (GPR) is a relatively new geophysical method with applicability to plant root studies with unique advantages over traditional approaches. This article first introduces the principles of GPR as related to plant roots detection, and then reviews existing researches concerning the application of GPR to plant root mapping, root diameter and biomass estimation. The main factors affecting GPR efficacy for plant root detection are discussed from different aspects including the GPR system, plant root characteristics, soil physicochemical properties, and so on. Future research should focus on studying into the mechanisms of detecting plant roots using GPR and improving the ability of GPR to detect plant roots under field conditions, with purpose to fully explore the potential of GPR in plant root detection.

Key words ground penetrating radar; plant roots; detection; root mapping; root diameter; biomass; estimation