中国科学: 地球科学 2011 年 第 41 卷 第 2 期: 243 ~ 252
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

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

崔喜红[①], 陈晋[①*], 沈金松[②], 曹鑫[①], 陈学泓[①], 朱孝林[①]

① 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
② 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
* 联系人, E-mail: chenjin@ires.cn

收稿日期: 2010-03-22; 接受日期: 2010-06-07
国家自然科学基金(批准号: 41001239)、教育部新世纪人才计划资助

摘要 根系是植物的重要组成部分, 根系研究对于植物、土壤以及生态系统研究的重要意义不容忽视. 植物根系的传统探测方法不仅耗时费力而且会破坏根系原生环境. 因此寻求一种无损性的植物根系探测技术尤为重要. 探地雷达作为一种无损性探测方法, 在根系参数估算方面具有巨大潜力. 利用探地雷达 2 GHz 频率天线在根径估测方面的优势, 提出一个可实际应用的粗根生物量估算新方法, 即: 首先通过采集少量的根样本测得平均根密度; 通过探地雷达野外测量实验建立基于探地雷达波形信号的根径估测模型对根径进行估测; 基于根圆柱体(短根)或长锥体(长根)假设, 通过估测的根径计算出根体积; 最后利用根密度和根体积计算得到根生物量. 得到主要结论如下: (1) 直径大于 0.5 cm 的粗根密度相对稳定; (2) 从 2 GHz 频率天线的探测数据中提取出的波形参数ΔT 与根的深度无关, 据此可建立精度较高的根径估测模型; (3) 基于根密度和根体积可直接估算粗根生物量, 无论粗短根或粗长根, 新方法均能达到较高估算精度. 上述结果验证了所建立的 GPR 根径估测模型和根生物量估算方法的合理性和有效性.

关键词
探地雷达
树木根系
根生物量
根径

根系在植物生态系统中扮演着重要的角色, 它既可以帮助植物在生长发育过程中获取所需的水和营养物质, 也是支撑、固定植物体的重要器官[1]. 此外, 根系对于生态系统中碳循环的贡献也是不可或缺的, 大约占据森林总碳量的 20%~40%[2,3], 同时根系还是根围环境中土壤呼吸的主要推动力[1,4]. 近年来, 对植物根系在全球气候变化中的作用研究表明粗根的生物量会随着 CO_2 浓度的升高而增加, 也证明了粗根可以长期吸收和存储环境中过量的 CO_2[5]. 为了更好的理解根系生态功能, 迫切需要了解与根系相关的参数, 如根系大小、生物量、分布范围、结构和三维构造等[6,7].

在根系研究的过程中, 由于野外自然条件下对植物根的观察和取样较为困难, 导致根系研究在广度、深度上均落后于植物的地上部分. 对根系参数的定量估算存在探测方法上的不足与限制, 如传统挖掘法, 不仅耗时费力、破坏根系和土壤环境, 而且采样数量有限、很难掌握根系的实际大小及分布形态, 而高压气铲法、土钻法、土柱法、容器法、剖面法等也由于具有破坏性和观测局部性, 而无法对根系进

英文引用格式: Cui X H, Chen J, Shen J S, et al. Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4103-z

行长期、重复性地测量和研究[8~11]. 因此, 近年来发展起来了一系列无损性根系探测方法, 如: 微根窗管技术、高分辨率 X 射线断层扫描(CT)、核磁共振成像(NMR)、液流方法和电阻率成像技术(ERT)[12,13]. 尽管相比于传统的探测方法, 这些无损性探测技术已有明显的进步, 但是仍然面临着一些局限[14]: (1) 其测量范围仅限于浅层小范围区域; (2) 当测量根径较大的粗根或较多根样本数量时成本过高; (3) 测量方法不具备通用性, 实验室可行, 但野外实地测量较为困难.

探地雷达(Ground-Penetrating Radar, GPR)作为一种已被广泛应用于定位地下目标物的地球物理技术, 国际上已开始应用于根系的实地无损性探测. 探地雷达探测的物理基础是根的含水量高于土壤基质导致两者的介电常数产生较大差异. 目前利用探地雷达进行植物根系探测研究主要集中在根系形态绘图、根的直径测量和根生物量估计等方面. 国外的主要研究工作有: Hruska 等[15]用天线频率为 450 MHz 的 EKKO 1000 探地雷达系统, 研究绘制出了森林中 50 年生的、根径大于 3 cm 的橡树根系的三维图像, 并与实测结果相比较, 准确率可达到 80%. Stokes 等[16]的研究也表明, 利用探地雷达技术可以提供非常有价值的城市地区树木根系的结构特征. 同样的研究结论也被 Cermak 等[17]和 Wielopolski 等[18]的研究工作所证实. 利用探地雷达进行植物根径估测方面的相关研究包括: 利用雷达反射信号的强度估测野外条件下的根径大小[19]和利用雷达反射的波形参数估测植物根径大小[20]. 比较而言, 反射波形参数与根径具有较好的相关关系, 可以估计不同深度的根径[20]. 但是这一方法和结论是在理想的实验条件下得到的, 能否应用于野外实测条件下还需要进一步验证. 在利用探地雷达进行植物根系生物量估测方面, Butnor 等[19,21,22]利用 SIR-2000 的探地雷达系统, 选择 1.5 GHz 的天线频率进行了一系列的研究. 主要是利用根的反射能量信息, 并借助于先进的数字信号处理技术, 得到了较为满意的估测效果. Stover 等[23]在进一步扩展 Butnor 等的研究基础上, 通过探地雷达对橡树的粗根生物量进行重复性的定量估计, 表明粗根在橡树生态环境中的固碳方面起着非常重要的作用. 此外, Hirano 等[24]对探地雷达在植物根系探测方面的一些限制性因素(如根径大小、根的含水量及根与根之间的相对位置等)进行了实验分析. 总体而言, 现有的利用探地雷达进行根系的相关研究中还存在以下问题[25]: (1) 根径和生物量的估测模型大多是针对位于相同深度的根样本建立起来的, 未考虑因雷达波能量的衰减而带来的影响, 这与实际情况下根的分布状况差别较大, 限制了模型在不同根深分布情形下的应用; (2) 探地雷达数据的后期处理不充分, 导致建立的模型的估测能力相对较差.

根生物量作为最重要的根系参数, 是理解根和根蘖之间的碳分配乃至于生态系统碳循环的关键. 已成为目前探地雷达根系研究的重点. 但现有研究的估测精度较低, 这主要是因为已有研究中是利用根的反射能量信息来估测根的生物量, 而反射能量在土壤等有耗介质中会会随着探测深度的增加而发生衰减, 同时反射能量信息还容易受到土壤条件如水、黏土的含量等因素的影响. 与之相比较, 植物根径探测则可以充分利用雷达反射的波形参数, 而这些波形参数具有与深度无关、抗干扰强的优点. 以上结果启发我们: 能否充分利用探地雷达在根径探测上的优势, 建立雷达反射的波形参数与根径的关系模型, 再通过根径与根生物量的关系, 最终估算出根的生物量. 本研究的主要目的: (1) 通过野外试验检验高分辨率探地雷达(2 GHz 频率的天线系统)探测树木根径信息的能力; (2) 在利用先进的数字信号处理技术对 GPR 的探测数据进行处理的基础上, 寻找一个新的可用于根径估测的 GPR 波形参数, 建立基于 GPR 的根径估测模型; (3) 基于根径估算模型发展一种估算粗根生物量的新方法.

1 实验方法

实验地点位于中国内蒙古浑善达克沙地南部(116.18°E, 42.45°N)(图 1), 该地区属温带半干旱气候, 年平均气温为 1.7℃, 年降水量在 250~350 mm, 其中 80%~90%的降水量集中在 5~9 月之间. 研究区域的地表主要被固定沙丘所覆盖, 实验地点的土壤主要以细沙为主, 主要植被是小叶榆树、沙嵩、针茅和早熟禾等. 本次实验期间为 2008 年 6 月 20 日到 26 日, 此时正是植被生长最茂盛的时期, 且在实验期间没有观测到降雨过程, 距离地面 25 cm 深度处土壤湿度稳定在 7%~10%之间. 因此, 研究区域的环境为我们的研究创造了理想的实验条件. 我们选择自然沙地作为实验介质, 主要是因为沙与土壤的介电常数比

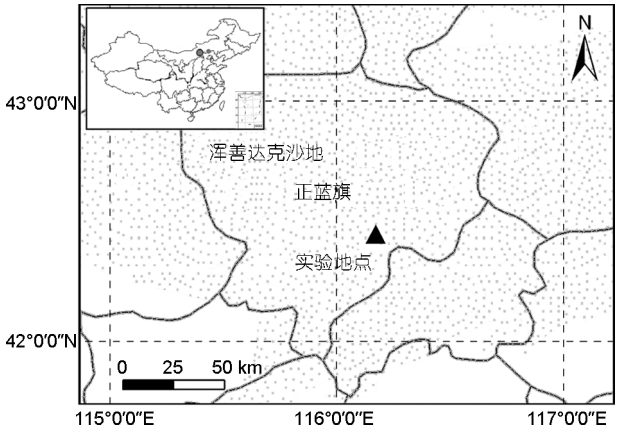

图 1　实验地点

较接近, 且沙的物理性质比较均一, 不存在能够引起雷达反射波形混乱的团块状或空洞结构[26].

(1) 根样本的选择. 选择当地常见的典型沙地植物小叶榆的根系作为实验研究对象. 首先, 现场从沙地中挖掘出小叶榆的根, 从中选择根的直径范围在 0.5~3.5 cm 之间、较直且粗细均匀的根作为试验样本. 截取每条根样本的长度为 70 cm(根样本的长度是根据实验第 2 部分钻孔的深度确定的), 并用熔蜡密封其首尾端以减少水分的流失. 沿着根长每 10 cm 间隔, 利用游标卡尺对根样本的直径进行精确测量(测量误差不超过 0.01 cm), 取测量结果平均值作为该样本实际根径. 此外, 还在现场用精度为 0.01 g 的天平测量每个根样本的鲜重(湿生物量). 然后根据测得的根直径大小将根样本划分为 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 和 3.5 cm 共 6 个等级, 每个等级选择 12 条根, 并分别编号为 01, 02, …, 12.

(2) 相同根径的根位于不同深度的测量. 选择试验区域较平坦的空沙地作为试验工作区, 挖一个长 4.2 m、宽 1.2 m、深 1 m 的沙沟, 在沟的两侧沟壁上距地面的垂直距离分别为 10, 20, 30, 40, 60 和 80 cm, 水平间隔 60 cm 处, 垂直沟壁钻孔, 孔的深度大约 65 cm(如图 2(a)所示). 选择相同根径级别的编号为 01~06 的根样本依次水平插入沙沟一侧沟壁的 6 个孔内(如图 2(b)所示), 选择相同根径级别的编号为 07~12 的根样本插入该沙沟另一侧沟壁的 6 个孔中作为模型验证样本. 通过上述处理可保证相同根径的根样本位于沙地中不同深度的位置, 且不会破坏原有的土壤结构. 最后, 填平沙沟并压实表面.

利用野外便携式探地雷达系统 Zond-12e(产于拉脱维亚)进行探测实验. 从理论上来说, 探地雷达能够识别的目标物大小的能力与探地雷达的分辨率有

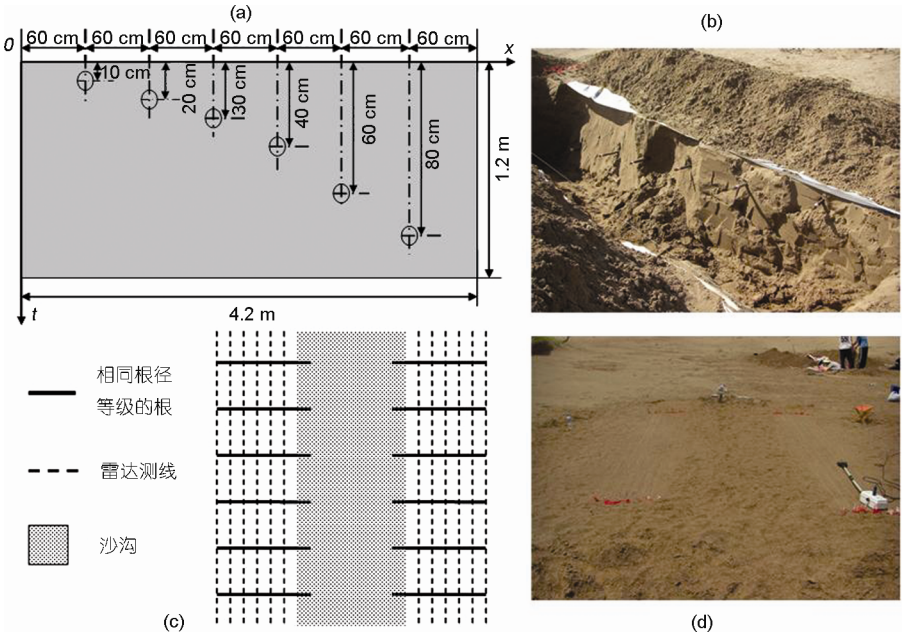

图 2　实验测量图

(a) 相同根径不同深度测量示意图; (b) (a)在野外实验条件下的实测照片; (c) 沙沟中根的位置以及位于沙沟两侧的 GPR 测线的位置示意图; (d) (c)在野外实验条件下的实测照片

关. 分辨率是衡量探地雷达探测效果的一个很重要的参数, 定义为分辨最小异常体的能力[26]. 探地雷达的分辨率与雷达天线的发射频率密切相关, 频率越高, 波长就越短, 分辨率就越强. 因此, 我们选择Zond-12e 配置中频率最高的天线系统(2 GHz)对根目标进行探测, 具体实验方法如下: 在沙沟两侧平行于沟壁且与根轴垂直的方向分别设置 6 条测线, 测线之间间隔 10 cm. 为了尽量减少沟壁对测量数据的影响, 离沟壁最近的测线距沟壁的距离不小于 15 cm(如图 2(c)所示). 雷达测量时, 沿着测线匀速拖动雷达天线, 从而沿每条测线测量可得到一个二维的雷达数据剖面(测线长度×测量深度). 这样, 每个根径等级的根在每个深度下都可得到 6 个雷达数据剖面, 测量出的每个剖面包含 505~514 道 A 扫描数据, 512 个垂直采样点. 沙沟两侧的两组数据都采集完成后, 再挖出沙沟中的沙子, 用另外根径等级的 12 条根替换原来的根, 填平沙沟并压实表面进行测量, 其探测程序与前面过程相同. 如此重复 6 次, 直到完成所有根径等级的样本测量. 为了保证根与孔之间的紧密结合无间隙, 探测顺序为先细根后粗根.

(3) 利用根径估计粗根生物量的模拟实验设计. 实际情况下粗根较长, 而且根径会从粗到细变化, 近似为一个长锥体. 用上述的实验方法对一个几米甚至十几米长的粗根直接利用探地雷达进行测量不太现实. 因此, 为了使估算结果能尽量接近实际情况, 利用上述实验数据, 我们对真实的长粗根进行模拟, 根据根径从粗到细渐变的性质, 把在相同深度测量的 6 个根径等级的根连接起来, 分别进行 2 个根、3 个根、4 个根、5 个根和 6 个根的组合(图 3). 具体步骤为: (1) 首先利用每个根径等级的编号 01~06 的根样本的雷达探测数据建立根径估测模型, 并利用该模型估测编号 07~12 的根的直径, 对模型进行检验; (2) 假设根为圆柱体, 利用对每个根径等级的编号 01~06 的根样本实际测量得到的根径, 根长和根生物量数据计算出每条根的湿密度, 求出平均值作为小叶榆树根的根密度值; (3) 利用第一步得出的编号 07~12 根样本的根径估测值和第二步得到的根密度值, 估算 07~12 号根的鲜生物量, 并与其实测的生物量值进行对比分析; (4) 估算组合出的模拟长根的生物量, 与对应单根的实测的生物量之和进行对比分析.

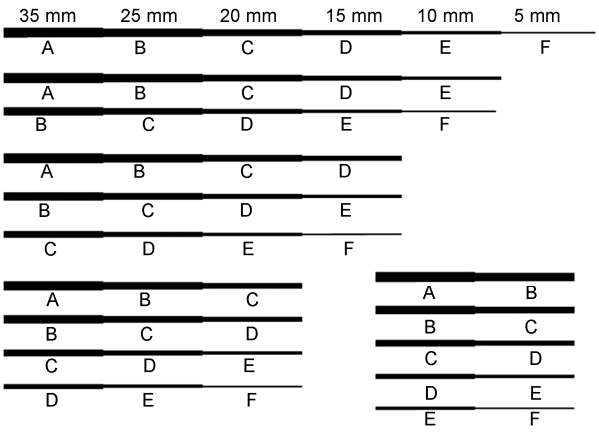

图 3 模拟长粗根示意图

2 探地雷达探测数据预处理

通常探地雷达采集的数据剖面中会包含异常的反射信号, 如无线电波或由其他反射源所引起的一些多次反射现象, 致使对雷达剖面的解译较为困难. 因此, 在对探地雷达数据剖面进行解释之前, 必须对原始的雷达采集数据进行杂波处理和调整. 针对本研究的数据特点, 对探地雷达采集到的实验数据的预处理主要包括每个数据剖面的初至时间拾取、系统温漂误差校正、背景杂波去除、波速分析和偏移归位处理五个过程, 这些数据处理算法均用 FORTRAN 语言编程实现.

(1) 初至时间拾取. 精确的估算探地雷达数据剖面中每道数据的初至时间对于数据的处理和解释非常重要[26]. 初至时间是指雷达天线发射出的电磁波到达地面的时间点, 这是一个非常特殊的点. 在该点之前的雷达有效信号应为零, 存在的只是噪声, 该点之后则是非常强的反射信号[27]. 因此, 初至时间点前后时窗内的能量特征会有很大的差异. 根据该特点, 本研究中通过提取每道数据后、前能量比的最大值—— 能量特征值来提取每道数据的初至时间点[28].

(2) 系统温漂误差校正. 探地雷达在测量过程中, 由于雷达天线中电、磁振子温度的升高或蓄电池的电量供应不足而初至时间提前, 引起初至时间点的漂移, 因此需要对实验得到的每幅雷达剖面图像进行温漂校正[29]. 温漂现象是由于系统原因造成的, 通常情况下这种偏移符合线性规律. 因此在提取每道数据初至时间的基础上, 可通过最小二乘回归法得到每幅雷达剖面图中温漂的规律并对其进行校正[30].

(3) 背景杂波去除. 雷达剖面图反映出的双曲线特征是根系最重要的反射特征, 因为这些双曲线代表的是地下埋藏的根或者其他的反射源. 但是由于背景杂波的存在, 使得双曲线特征在雷达剖面图中变的模糊不清(如图 4(a)所示). 由于本研究中的实验为理想状态下的沙地实验, 可以保证土壤介质的均一性, 并且不会受到其他散射体的影响, 因此可以认为实验数据中的杂波主要来自于雷达天线和地面的相互作用所产生的地表回波. 由于地表回波一般均是由低频能量引起的, 所以本研究中采用时域高通滤波的方法来去除地表杂波以改善信噪比. 背景杂波去除处理后的雷达剖面图的效果如图 4(b)所示.

(4) 波速分析. 探地雷达发射的电磁波在地下介质中的传播速度是雷达探测数据处理和解释中非常重要的参数. 速度参数不仅关系到数据处理诸多环节的质量, 其本身也提供了关于地下探测目标物的重要信息. 研究中采用地震信号处理中的速度谱分析来对探地雷达电磁波在地下介质的传播速度进行估计. 所谓的速度谱就是采用速度扫描技术,利用给定的判别准则来确定扫描速度是否为最佳速度[31]. 采用的判别准则为[32]: 当扫描速度为最佳时, 利用此速度值求出的雷达剖面中各道数据沿双曲线轨迹叠加的平均振幅能量最大. 因此, 通过比较计算平均振幅能量就可找出雷达剖面上的所有根目标位置处的波速分布, 由此得到的波速值对下一步的偏移处理具有非常重要的意义.

(5) 偏移归位处理. 探地雷达的原始数据剖面显示的是扭曲、失真的地下结构图像, 偏移处理则用于消除数据采集过程中引起的剖面图像失真现象. 这种现象是由于天线具有一定的辐射波束宽度, 造成点状反射体(如论文中要探测的根目标)出现在反射剖面上呈双曲线形态[33,34]. 偏移处理的作用是将双曲线两叶上的能量回归到顶点, 使畸变的倾斜界面的反射波归位, 从而获得反映地下探测目标的真实图像[35]. 本研究中利用基于波动方程的克希霍夫积分偏移法对探地雷达记录的实验数据进行处理. 克希霍夫积分偏移法是以惠更斯-费涅尔原理为基础, 利用 Kirchhoff 绕射积分公式把分布在雷达剖面中各道扫描记录中来自于同一个绕射点的能量聚集在一起, 使其归位到地下相应的物理绕射点上[26]. 该方法在使地下绕射点归位同时还可以保证反射信号的波的特征, 因此偏移精度较高[36]. 处理过程中, 偏移速度的取值至关重要, 对于所探测的根目标而言, 其决定了最终的处理结果中反射双曲线能量的聚焦程度. 因此, 本文中利用波速分析中得到的不同深度的雷达波的最佳速度, 对应不同埋深的根目标进行偏移处理, 得到根的真实图像及特征信息(如图 4(c)所示). 需要说明的是, 由于 2 GHz 频率天线系统探测深度较浅, 位于 80 cm 深度处的根的反射信号极其微弱, 从而无法识别出 80 cm 深度处的根样本, 因此研究中对该深度处的根样本数据不再做进一步分析.

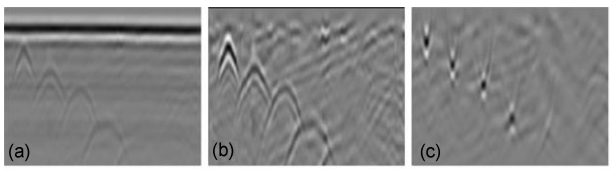

图 4 2 GHz 频率天线对 6 条根径等级相同(3.5 cm)、埋藏深度不同(10~80 cm)的根的探测剖面图

进行每步数字信号处理后的效果图: (a) 温漂校正处理后的剖面图; (b) 杂波去除处理后的剖面图; (c) 基尔霍夫偏移处理后的剖面图

3 GPR 根径估算模型及生物量估算方法

经过我们的实验数据分析, 相同长度的根生物量与根径的平方值之间具有非常明确的线性关系(图 5(a)), 决定系数 R^2 达到了 0.99 以上, 这是因为实验所用根样本粗细均匀所致. 而实际上根径粗细不等, 直接使用上述关系不现实. 因此, 我们进一步对实验中所有根样本的根密度进行分析, 发现: 对相同树种的根系中根径大于 0.5 cm 的粗根来说, 随着根径的增大, 根密度无趋势变化, 且变化值很小(图 5(b)). 虽然根径小于 0.5 cm 的根密度明显大于其他粗根, 但这种细根探地雷达不能有效识别, 故未包含在本研究范围内. 因此, 从这个角度出发, 利用粗根(根径大于 0.5 cm)体积信息和根密度的测量值来估算粗根的生物量是完全可行的. 基于此, 我们提出一个可实际应用的利用 GPR 进行粗根生物量估测的新方法: 首先, 通过采集少量的根样本测得平均根密度; 建立基于探地雷达波形信号的根径估测模型, 并估测根直径; 基于根圆柱体(粗短根)或长锥体(粗长根)假设, 通过估测的根径计算出根体积; 最后利用根密度和根体积计算得到根生物量.

(1) GPR 根径估算模型的建立及检验. 要用根的体积来估算根的生物量信息, 关键是要得到准确的

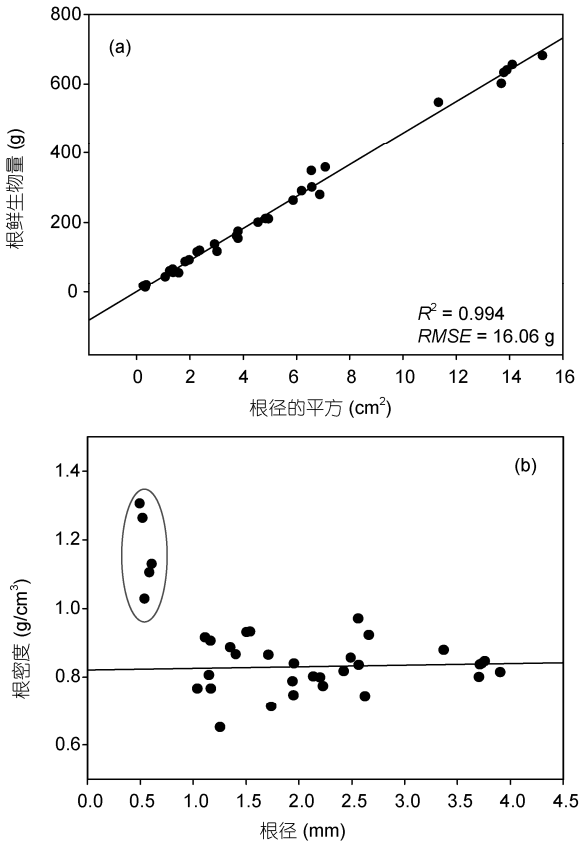

图 5　根径与根生物量及根密度的关系图

(a) 根径的平方值与根的鲜生物量之间的关系图; (b) 根密度与根径的关系图: 根径级别从 1.0 ~3.5 cm 的 5 个根径等级, 圈中标示出的数据表示根径级别为 0.5 cm 的根密度. 图中趋势线所表达的是根径级别 1.0~3.5 cm 的粗根的根密度与根径的关系

根径值. 因此, 首先要从探地雷达的探测信息中找到与根径相关性较强的信息参数, 以便对根径进行准确的估算. 为此, 使用地球物理数据分析工具 GaiaSpectrum(Reinaldo Alvarez-Cabrera Geoscanners AB, 瑞士)软件对经过处理的 2 GHz 频率天线测量剖面进行频谱分析, 选择经过各根样本中心位置的一道扫描数据, 从中提取相关特征信息. 如图 6 所示, 可以认为通过根的中心位置的扫描数据是测量时雷达信号经过根的正上方位置时采集到的. 根据电磁波传播速度在微小距离内变化不大的事实, 电磁波到达根底部延时点的时间和到达根顶部初至点时间之差(ΔT)可以直接反映根直径大小, 并且参数ΔT 在该道数据的反射波形中具有显著特征, 容易提取且与根样本所处的深度无关. 因此, 我们从通过根中心位置的扫描数据中提取ΔT 参数用于分析其与各根样本直径之间的关系.

参数 ΔT 与实际根径的相关分析结果如图 7(a)所示, ΔT 与实际根径之间存在着极为显著的相关性, 决定系数R^2的值达到了 0.882. 而参数ΔT与根的生物量的相关性则较差一些, 决定系数R^2的值小于0.8(参见图 7(b)). 说明与估测生物量相比较而言, 参数ΔT应该是一个比较适合估测根径的参数.

将编号 01~06 的根样本数据中提取出的参数ΔT作为独立变量, 利用线性回归分析建立基于探地雷达的植物根径最佳估算模型(图 8(a)). 该模型的 R^2 值为 0.868, 均方根误差(*RMSE*)为 3.816 mm. 利用沙沟另一侧编号 07~12 的根样本数据对该模型进行验证, R^2 值为 0.857, 根径估测误差 *RMSE* 为 3.527 mm(图 8(b)), 可以看出探地雷达(2 GHz 频率天线系统)的根径估测精度较高.

(2) GPR 根径估测结果用于粗根生物量的估算. 在利用根径估测模型对沙沟内的编号 07~12 根样本的根直径进行精确估测基础上, 可以进一步对编号 07~12 根样本的鲜生物量进行估算. 对于所采集根样本而言, 由于根较短且粗细均匀(实际测量的根径最粗位置和最细位置的差距只有 0.5 mm 左右), 因此可将每个根样本看做是圆柱体, 根据式(1)直接进行鲜生物量估算:

$$W_{\mathrm{m}} = \frac{1}{4}\pi D_{\mathrm{m}}{}^2 l d \ , \qquad (1)$$

式中 W_{m} 代表估算的生物量, D_{m} 是利用图 8(a)的根径估测模型估计出的根径值, d 为对所采集根样本的平均根密度, l 表示根的长度, 理论上可以根据雷达探测信号获得. 本研究中, 我们直接利用根的实测长度.

编号 07~12 根样本鲜生物量估算结果如图 9(a)所示. R^2 值达到了 0.84, 生物量估算值与实测值相比较, *RMSE* 仅为 66 g, 显然, 利用新方法对单根生物量的估算达到了很好的效果. 利用图 3 的粗长根的模拟实验, 进一步对新方法进行检验. 模拟长根样本共 75 个, 实验中所模拟的长根生物量定义为对应组合单根的实测生物量之和, 长根假设为长锥体. 所得到的模拟长粗根生物量的估算值与实际值之间的关系如图 9(b)所示, 从结果来看, 两者达到了很好的一致性, R^2 值大于 0.8. 从散点图的形状来看, 误差随着生物量的增加有增大的趋势, 这主要是由于单根的估测误差累积所致, 与图 9(a)单根的研究结果相比, 尽

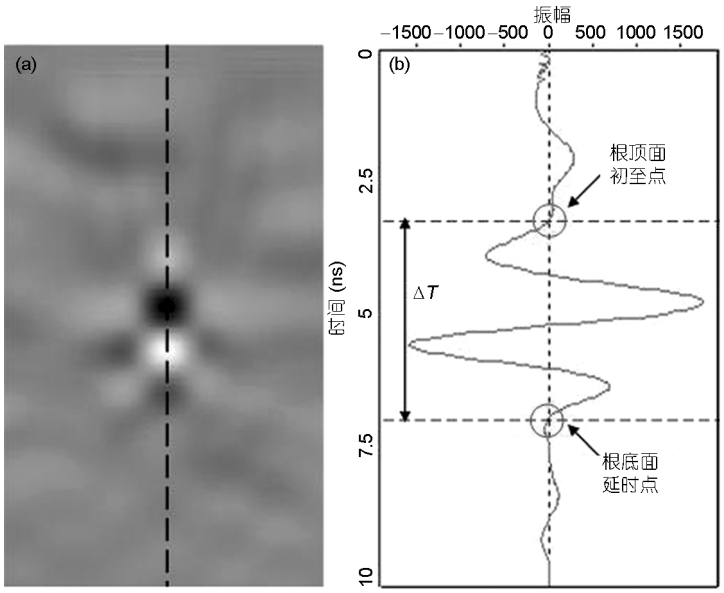

图 6　参数提取示意图

(a) 从处理后的 2 GHz 频率的剖面图中提取的、经过根位置中心处(垂直线的位置)的一道扫描数据; (b) 从该道数据的反射波形中提取的ΔT 参数

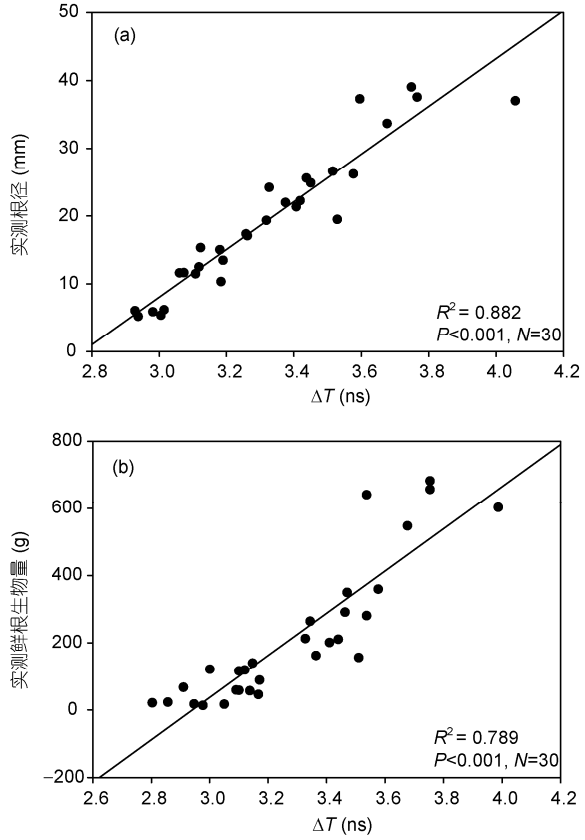

图 7　提取的参数与根属性之间关系图

(a) 参数ΔT 与不同深度处的根样本的实际根径之间的相关关系; (b) 参数ΔT 与实际根的鲜生物量之间的相关关系

管精度有所降低, 但是相对误差的变化不大, 这进一步验证了新方法在实际长粗根的生物量估算方面的有效性.

4　结论与讨论

利用根径信息来估算根生物量是本文研究的最主要的目的. 从分析结果来看, 对于同一树种类型、根径大于 0.5 cm 的粗根来说, 利用平均根密度和参数ΔT 估测出的根径值, 通过式(1)估算出的根生物量与实测值达到了较好的一致性, 模型估算精度令人满意. 验证了我们之前所提出的根密度近似相等条件下利用根径信息来估算根生物量的想法是可行的.

探地雷达对根径的准确估测是估算生物量的关键. 本文所提出的利用参数ΔT 的根径估算模型具有以下优势: 参数ΔT 只与反射体的几何尺寸有关, 而与反射的能量无关. 表现在雷达数据记录中, 则是只与反射波的形状有关, 而与振幅无关的物理量, 故不会受到在传播过程中雷达信号能量衰减的影响, 可直接估算不同埋深的根径, 由此而估算的生物量同样也不会受到埋深和能量衰减的影响, 估算值与实际值之间具有很好的一致性, R^2 值均大于 0.8. 在 Butnor 等[19,21,22]的研究中, 由于雷达信号能量衰减

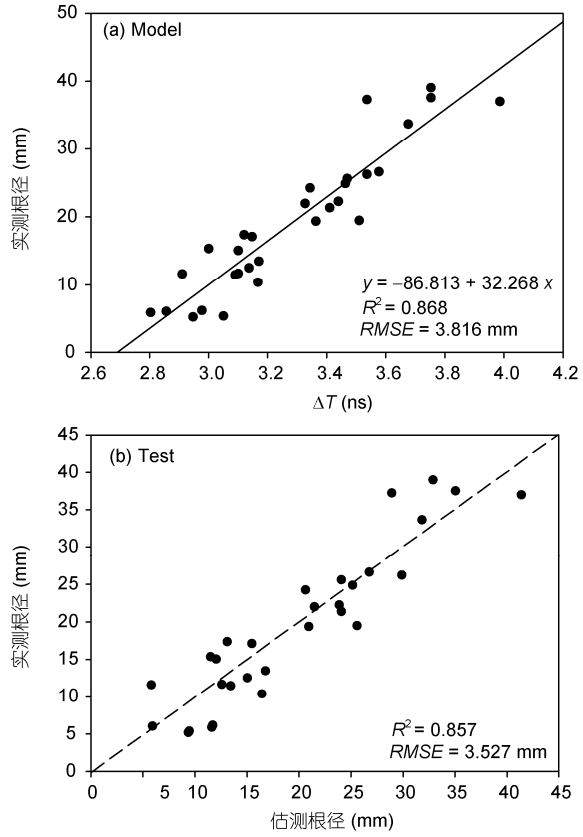

图 8　根径估测模型及检验

(a) 利用参数ΔT建立的根径估测模型(编号 01~ 06 的根样本数据); (b) 模型估测值与实测根径之间的关系(编号 07~12 的根样本数据). 图中虚线代表了 1∶1 的比例线

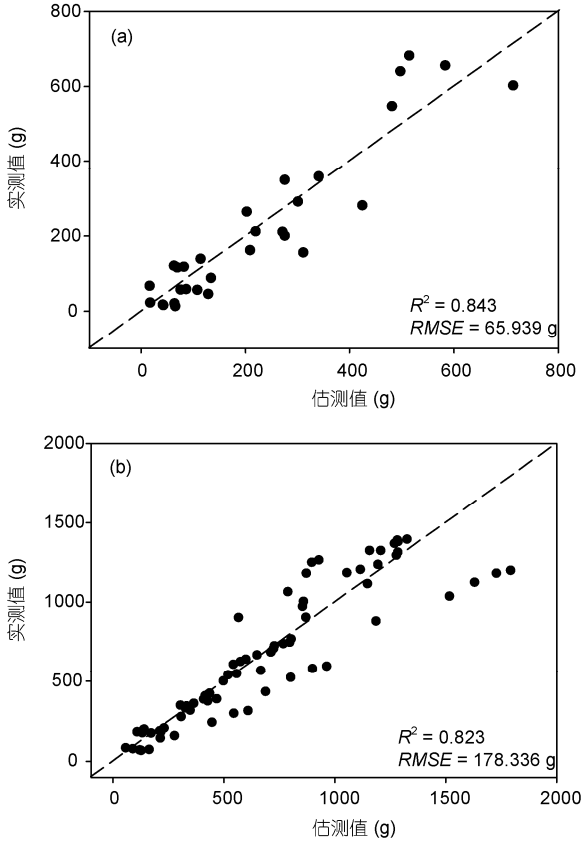

图 9　根生物量估算检验

(a) 单根的鲜生物量估算值与实测单根生物量之间的关系图((编号 07~12 的根样本数据); (b) 模拟组合长根的生物量估算值与实测生物量之间的关系图. 虚线代表了 1∶1 的比例线

效应的影响, 提取的信息参数与根径的相关性在根的埋深为 15 和 30 cm 时的相关系数 R 值分别为 0.81 和 0.55, 与根生物量的相关系数只有 0.55[20]. 尽管在后续的研究中通过雷达数据处理方法的改进, 使该参数与根生物量之间的相关系数明显提高, 建立的估测模型中 R^2 达到了 0.68, 但这也只是对相同深度的根生物量而言[22~24]. 由此可见, 本文提出的新方法比国际上现有研究中直接利用探地雷达反射能量信息建立根生物量估算模型更为稳健、估算精度更高.

本文在利用探地雷达对根径进行有效探测的基础上, 提出用根径信息来估算根的生物量的新方法. 从实验结果可得到以下结论: (1) 对于本实验区内的典型植物小叶榆来说, 通过对所采集到的根样本进行实际测量和分析, 发现直径大于 0.5 cm 的粗根密度相对稳定. (2) 从 2 GHz 频率天线的探测数据中提取出的波形参数ΔT 与根的深度无关, 据此可建立精度较高的根径估测模型. (3) 在利用少量根样本实测得到粗根平均根密度的情况下, 结合 GPR 估测得到的粗根根径值可直接估算根生物量, 无论粗短根或粗长根, 新方法均能达到较高估算精度. 此外, 新方法还具有野外工作量小、模型简单且稳健的优点. 但通过分析, 也不难发现新方法仍有需要提高的方面: (1) 研究中把粗根假设为柱状体或长锥体, 而实际根的形状可能更为复杂, 需要进一步发展探地雷达对根系形状制图的方法. (2) 2 GHz 频率天线具有高空间分辨率的优点, 但探测深度有限(小于 80 cm), 因此, 需要进一步研究如何将 2 GHz 频率天线的高分辨率和低频率天线的探测深度结合的数据融合方法. (3) 本文仅通过同一树种的根验证了新方法在较小地理空间范围内、对相同树种的根生物量估算是有效的, 对于不同树种或不同生境下的根系而言, 其根密度可能有所差异, 因此将现有模型应用到其他树种

或生境的根生物量估算中时, 还需要结合当地环境条件对模型进行校正. (4) 虽然细根的生态学意义更为重要[7], 但受硬件条件的限制, 目前国际上最先进的探地雷达对于直径 5 mm 以下细根还不能有效识别, 因此本文所提出的方法主要估计是直径大于 5 mm 的粗根生物量. 随着 GPR 硬件技术和信号处理方法的改进, 有可能会使 GPR 对植物细根的探测能力得到提高. (5) 本研究是在近于理想的实验条件下进行的: 实验地点的沙质土壤适合雷达探测的条件, 根的伸展不存在相互重叠或交错, 雷达测线方向与根样本的放置方向垂直. 但实际条件下, 土壤环境异质性更强, 同时根系延展可能呈不同角度、相互重叠或交错、成簇而生, 因此所得到的雷达图像将会更为复杂, 本研究所建立估测方法将会受到一定限制, 精度也会相应降低. 目前解决这些问题的方法尚不成熟, 但基于土壤背景独立测量的去噪技术、地面探地雷达和钻孔雷达集成技术的发展有可能解决上述问题. 因此, 考虑实际情况的复杂性并结合最新技术, 提高 GPR 估测植物根系特征参数能力将是下一步研究的重要内容.

致谢 感谢审稿人的修改意见.

参考文献

1 Weisel Y, Eshel A, Kafkafi U. Plant Roots: The Hidden Half. 3rd ed. New York: Marcel Dekker Press, 2002. 15—32
2 Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263: 185—190
3 Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomass. Oecologia, 1996, 108: 389—411
4 Gregory P J, Hutchison D J, Read D B, et al. Non-invasive imaging of roots with high-resolution X-ray micro-tomography. Plant Soil, 2003, 187: 221—228
5 Stover D B, Day F P, Butnor J R, et al. Effect of elevated Co_2 on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar. Ecology, 2007, 88: 1328—1334
6 Mulkey S S, Chazdon R L, Smith A P, et al. Tropical Forest Plant Ecophysiology. New York: Chapman and Hall Press, 1996. 268—300
7 Brunner I, Godbold D L. Tree roots in a changing world. J For Res, 2007, 12: 78—82
8 Persson H. Spatial distribution of fine root growth, mortality and decomposition in a young scots pine stand in central Sweden. Oikos, 1980, 34: 77—87
9 Norby R J, Jackson R B. Root dynamics and global change: Seeking an ecosystem perspective. New Phytol, 2000, 147: 3—12
10 Pierret A, Moran C J, Doussan C. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. New Phytol, 2005, 166: 967—980
11 Nadezhdina N, Cermak J. Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees. J Exp Bot, 2003, 54: 1511—1521
12 Sustek S, Hruska J, Druckmuller M, et al. Root surfaces in the large oak tree estimated by image analysis of the map obtained by the ground penetrating radar. J For Sci, 1999, 45: 139—143
13 Amato M, Basso B, Celano G, et al. *In situ* detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. Tree Physiol, 2008, 28: 1441—1448
14 Danjon F, Reubens B. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. Plant Soil, 2008, 303: 1—34
15 Hruska J, èermák J, Sustek S. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. Tree Physiol, 1999, 19: 125—130
16 Stokes A, Fourcaud T, Hruska J, et al. An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees *in situ*: 1. Ground penetrating radar. Arboriculture J, 2002, 28: 2—9
17 Cermak J, Hruska J, Martinkova M, et al. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. Plant Soil, 2000, 219: 103—116
18 Wielopolski L, Hendrey G, McGuigan M. Imaging tree root systems *in situ*. The 8th International Conference on Ground-Penetrating Radar, May 23 to 26, 2000, Gold Coast, Queensland, Australia. 642—646
19 Butnor J R, Doolittle J A, Kress L, et al. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. Tree Physiol, 2001, 21: 1269—1278

20 Barton C V M, Montagu K D. Detection and determination of root diameter by ground- penetrating radar under optimal conditions. Tree Physiol, 2004, 24: 1323—1331
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. Soil Sci Soc Am J, 2003, 67: 1607—1615
22 Butnor J R, Johnsen K. Feasibility of using ground-penetrating radar to quantify root mass in Florida's intensively managed pine plantations. Forest Biology Research Cooperative Report Number 38. Gainesville, Florida, USA, 2005
23 Stover D B, Day F P, Butnor J R, et al. Effect of elevated CO_2 on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar. Ecology, 2007, 88: 1328—1334
24 Hirano Y, Dannoura M, Aono K, et al. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. Plant Soil, 2009, 319: 15—24
25 崔喜红, 陈晋, 关琳琳. 探底雷达技术在植物根系探测研究中的应用. 地球科学进展, 2009, 24: 606—611
26 牟永光, 陈小宏, 刘洋, 等. 地震数据处理方法. 北京: 石油工业出版社, 2007. 130—135
27 Hampson D, Russell B. First-break interpretation using generalized linear inversion. J Can Soc Exp Geophys, 1984, 20: 40—50
28 Boschetti F, Dentith M D, List R D. A fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces. Geophysics, 1996, 61: 1095—1102
29 向敬成, 张明友, 等. 雷达系统. 成都: 电子科技大学出版社, 1997. 30—32
30 张贤达. 信号处理中的线性代数. 北京: 科学出版社, 1997. 56—60
31 Mulder W A, Kroode A P E. Automatic velocity analysis by differential semblance optimization. Geophysics, 2002, 67: 1184—1191
32 MacKay S, Abma R. Imaging and velocity analysis with depth-focusing analysis. Geophysics, 1992, 57: 1608—1622
33 Daniels D J. Surface-penetrating radar. London: The Institute of Electrical Engineers, 1996. 300
34 Daniels D J. Ground penetrating radar. 2nd ed. London: Institution of Electrical Engineers, 2004. 300
35 Gazdag J, Sguazzero P. Migration of seismic data. Proc IEEE, 1984, 72: 1302—1315
36 熊翥. 地震数据数字处理应用技术. 北京: 石油工业出版社, 1993. 45—50