网络出版时间:2026-03-13 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.09.001

基于多频探地雷达瞬时振幅的树木根系定位及影响因素研究

樊国秋[1,2,3,4],李颖航[5],郑一力[1,2,3,4],韩巧玲[1,2,3,4],赵燕东[1,2,3,4],梁浩[1,2,3,4]

(1 北京林业大学 工学院,北京 100083;2 林木资源高效生产全国重点实验室,北京 100083;3 林业装备与自动化国家林业局重点实验室,北京 100083;4 北京林业大学 智慧林业研究中心,北京,100083;5 陕西省牛背梁国家级自然保护区,陕西 西安 710100)

[摘 要] 【目的】针对探地雷达(ground penetrating radar, GPR)在树木根系检测中多因素耦合作用机制不明确、定位精度受限等问题,提出一种基于多频GPR瞬时振幅的根系识别与定位方法,为实现复杂环境下树木根系的精准无损检测提供支持。【方法】以中国北方典型树种三倍体毛白杨为研究对象,设计了多频天线(400,900,1 600 MHz)网格化扫描方案,以获取9年生毛白杨根系的三维数据;将希尔伯特变换获取的高瞬时振幅与图像形态学运算相结合,通过高瞬时振幅连通区域加权质心精确定位根系;最后基于整根挖掘评估验证GPR识别定位根系的准确性,并在多频天线下统计分析根系直径、深度以及扫描角度3种影响因素对根系识别与定位的作用机制,揭示根系特征与检测效果的量化关系。【结果】①通过希尔伯特变换和图像分割识别地下根系是有效的,400,900,1 600 MHz天线频率时的根系识别准确率分别为53.2%,64.0%,72.7%;②通过高瞬时振幅连通区域加权质心定位根系是准确可行的,400,900,1 600 MHz天线在剖面长度方向上定位根系的均方根误差(RMSE)均小于0.12 m,在剖面深度方向上定位根系的RMSE均小于0.04 m;③当根系直径小于3 cm或扫描角度小于60°时,GPR识别准确率随根系参数的增大而显著提升,超过该值后检测效果趋于稳定。【结论】基于多频GPR瞬时振幅与形态学结合的根系识别定位方法,为浅层根系的无损探测与周期性监测提供了一种可行的技术途径。

[关键词] 树木根系检测;探地雷达;根系定位;瞬时振幅;多频天线

[中图分类号] S758.5;S712 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)09-0001-13

Tree root localization and influencing factors based on multi-frequency GPR instantaneous amplitude

FAN Guoqiu[1,2,3,4], LI Yinghang[5], ZHENG Yili[1,2,3,4], HAN Qiaoling[1,2,3,4], ZHAO Yandong[1,2,3,4], LIANG Hao[1,2,3,4]

(1 *School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2 *State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing* 100083, *China*; 3 *Key Lab of State Forestry Administration for Forestry Equipment and Automation, Beijing* 100083, *China*; 4 *Research Center for Intelligent Forestry, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 5 *Shaanxi Niubeiliang National Nature Reserve, Xi'an, Shaanxi* 710100, *China*)

Abstract: 【Objective】 To address the challenges in tree root detection using ground penetrating radar (GPR), such as the unclear mechanisms of multiple-factor coupling and limited localization accuracy, this study proposed a root identification and localization method based on multiple-frequency GPR instantaneous amplitude, enabling accurate and non-destructive detection of tree roots in complex environments. 【Method】 Taking

[收稿日期] 2025-06-13 [修回日期] 2025-11-26
[基金项目] 国家自然科学基金项目(42001298);国家重点研发计划项目(2023YFC3006804)
[作者简介] 樊国秋(1997—),男,云南昆明人,在读博士,主要从事树木根系无损检测研究。E-mail:fanguoqiu@bjfu.edu.cn
[通信作者] 梁浩(1989—),男,山西晋中人,副教授,博士,主要从事智慧林草感知技术与装备、人工智能与数据分析等研究。E-mail:lianghao@bjfu.edu.cn

triploid *Populus tomentosa*, a typical tree species in northern China, as the research subject, a grid scanning scheme employing multi-frequency antennas (400, 900, and 1 600 MHz) was designed to acquire three-dimensional (3D) data of the root systems of nine-year-old trees. The high instantaneous amplitude derived from the Hilbert transform was combined with image morphological operations to precisely locate roots by calculating the weighted centroid of connected high amplitude regions. The accuracy of GPR-based root identification and localization was then evaluated and validated through complete root excavation. Furthermore, under multi-frequency antenna configurations, the influencing mechanisms of root diameter, depth, and scanning angle on root identification and localization were statistically analyzed, and the quantitative relationships between root characteristics and detection performance were revealed.【Result】①Root identification using Hilbert transform and image segmentation was effective, with accuracy rates of 53.2%, 64.0%, and 72.7% for the 400, 900, and 1 600 MHz antennas, respectively. ② Root localization using the weighted centroid of connected high instantaneous amplitude regions was accurate and feasible, with root mean square error (RMSE) in the profile length direction less than 0.12 m and in the profile depth direction less than 0.04 m for all three antenna frequencies. ③ When the root diameter was less than 3 cm or the scanning angle was below 60°, the GPR identification accuracy improved significantly with increasing root parameters; beyond these thresholds, the detection performance stabilized.【Conclusion】The root identification and localization method integrating instantaneous amplitude and morphological analysis provides a feasible technical pathway for the non-destructive detection and periodic monitoring of shallow root systems.

Key words: tree root detection; ground penetrating radar; root localization; instantaneous amplitude; multi-frequency antenna

作为植物与土壤界面进行物质交换的关键通道[1],根系不仅具有锚固植株、涵养水土的重要功能,还在生态系统碳循环与碳分配中发挥着核心作用[2-3]。然而,根系生长于地下难以直接观测,加之树木根系在空间广度和深度上的拓展进一步加剧了研究的困难,使得树木根系的研究长期处于相对薄弱环节[4-5]。因此,开发并应用有效的根系原位无损检测方法,对于推动植物生理生态研究、林业生态监测与智慧林业的发展具有重要意义[6-7]。

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是一项以无损检测著称的地球物理技术,其凭借高效、便捷和可重复测量的独特优势,已成为植物粗根(直径>2 mm)原位无损检测的主流技术之一[8-9],并为实现大尺度根系动态监测提供了可能[10-11]。基于GPR的根系研究,如生物量估算[12-13]、三维构型重建[14-15]以及根土相互作用机制解析[16-17],其根本前提均在于实现对根系的精准识别与定位。由于GPR扫描根系会形成典型的反射双曲线成像,因此当前基于此特征的根系识别定位方法主要分为人工识别、双曲线拟合、偏移成像以及机器学习与深度学习等。人工识别直观便捷,但耗时费力且主观性强,识别率与定位精度有限[18-20]。双曲线拟合技术可实现根系自动识别,并能反演根系直径、雷达波速、土壤相对介电常数等参数[21-25],但其效果严重依赖于双曲线的完整性,在野外复杂环境中往往难以获取清晰完整的反射双曲线信号[26]。偏移成像技术可聚焦散射能量、校正目标至真实位置,但其精度取决于偏移速度模型的准确性[27]。以YOLOv5、Faster R-CNN为代表的深度学习方法,虽能大幅提升识别效率与精度[28-31],但其性能受限于训练样本的规模与质量。尽管方法各异,优劣并存,但实现根系高效、高精度的自动定位始终是该领域的研究热点与难点。

目前,基于GPR的根系研究在定位方法的实际应用中仍面临挑战。首先是复杂野外环境的挑战,GPR对根系的检测效果受到天线频率、测量方式、根系自身特性(如直径、深度、空间生长角度)及土壤环境(如含水率、质地)等多种因素的耦合影响[32-33]。当前,关于这些因素影响规律的认知多源于仿真或受控试验[34-35],而野外条件下根系识别定位效果的多因素系统性量化研究尚显不足。此外,尽管已有多种树木根系的识别方法,但这些识别方法仍存在局限性,尤其在多因素耦合作用的复杂环境下,实现根系高效、自动化的识别与定位仍存在精度和适应性问题。因此,开发能有效应对多因素影响的根系精准识别定位方法,并厘清各检测影响

因素的作用机制，成为当前亟待解决的关键问题。

基于以上原因，本研究以 9 年生三倍体毛白杨（triploid *Populus tomentosa*）为研究对象，首先设计并实施多频天线（400，900，1 600 MHz）的网格化扫描方案，以获取毛白杨根系的三维 GPR 数据；其次通过希尔伯特变换获取反射信号的瞬时振幅，进而利用特征提取识别根系，并利用图像形态学运算从 GPR 瞬时振幅剖面中实现根系的自动精准定位；最后在 3 种天线频率下，系统解析根系直径、根系深度、扫描角度等关键因素对 GPR 根系识别与定位效果的影响，旨在提出一种融合希尔伯特变换、特征提取与图像形态学运算的 GPR 根系自动定位方法，为在复杂多因素耦合条件下树木根系的精准识别与定位及根系无损检测提供方法与理论支撑。

1　研究区概况

研究区位于山东省聊城市高唐县清平林场（36°48′47″ N，116°05′25″ E），平均海拔 27 m，属温带季风气候区。该地区为半干旱大陆性气候，年平均降水量为 578.4 mm，降水量较少且时空分布不均，年平均蒸发量 1 882 mm。聊城市位于黄河下游冲积平原，土层深厚，土壤类型以潮土为主，土壤质地多为砂壤土和粉土，土壤颗粒均匀，不含粗大砂粒[36]。清平林场培育的杨树（*Populus* spp.）是华北平原地区的典型树种，其根系以水平侧根为主，主要分布在 1 m 以内的土层[37]，并且根系与周围土壤含水率差异明显，适合利用 GPR 开展探测研究。

2　研究方法

2.1　数据采集

选取清平林场内的三倍体毛白杨优良无性系 B301（（*P. tomentosa*×*P. bolleana*）×*P. tomentosa*）作为研究对象，其胸径 17.0 cm，树高 15.1 m，树龄 9 年，种植密度为 2 m×3 m。如图 1 所示，选定样树后，以其西南方向作坐标原点 O，东西方向为 X 轴，南北方向为 Y 轴，划定 3.6 m×3.6 m 的方形扫描区域（区域大小依据毛白杨的种植密度以及该树龄下根系生长的大致范围确定），使根颈位于扫描区域的中心。在清理扫描区域内地表杂草及枯落物后，沿 X 轴和 Y 轴方向分别布置长 3.6 m、间隔 0.15 m 的 GPR 测量线，并采用具有 3 种天线频率（400，900，1 600 MHz）的探地雷达 TRU^{TM}（Tree Radar，Inc，USA）依次沿布置好的测量线进行剖面扫描（GPR 的设备参数见表 1）。由于 GPR 在 1.5 m＜X＜2.1 m 以及 1.5 m＜Y＜2.1 m 区域内的扫描受到树木躯干的阻碍，因此舍弃该范围内的测量线。最终，每种天线频率下 GPR 各采集到 44 个剖面数据，其中沿 X 轴方向 22 个，沿 Y 轴方向 22 个。完成 3 种天线频率的根系扫描后，以沿 Y 轴方向的测量线为剖面线，采用人工挖掘的方式由东西两侧向根颈中心进行逐个剖面挖掘（间隔 0.15 m），每个剖面的深度（Z 轴）为 1 m。每掘出一个剖面，记录该剖面内直径大于 5 mm 的根系的三维坐标和直径，由此获取真实根系的空间分布以及特征参数。

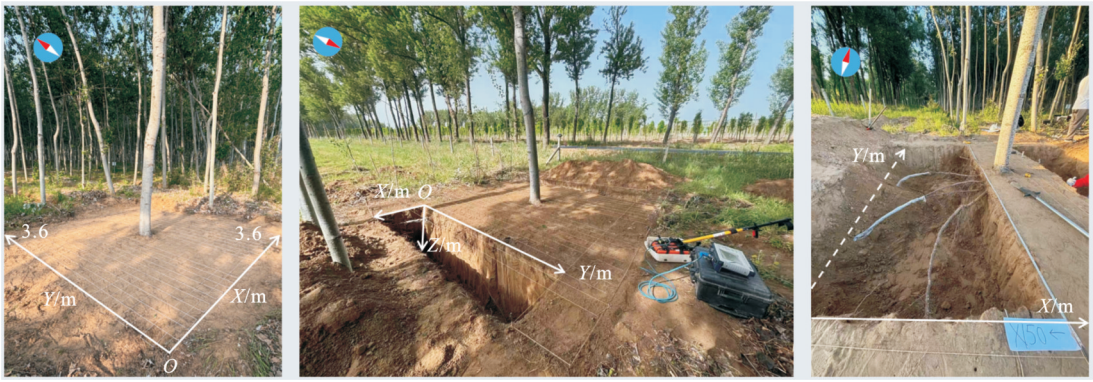


图 1　基于 GPR 与剖面挖掘两种方式的毛白杨根系数据的采集

Fig. 1　Data collection of *populus tomentosa* roots based on GPR and profile excavation methods

2.2　GPR 根系识别与定位方法

根系识别定位中数据的解析流程如图 2 所示，共包含图像预处理、希尔伯特变换、根系识别、根系特征图像去噪、根系定位 5 个环节，各数据解析环节的详细说明如下。

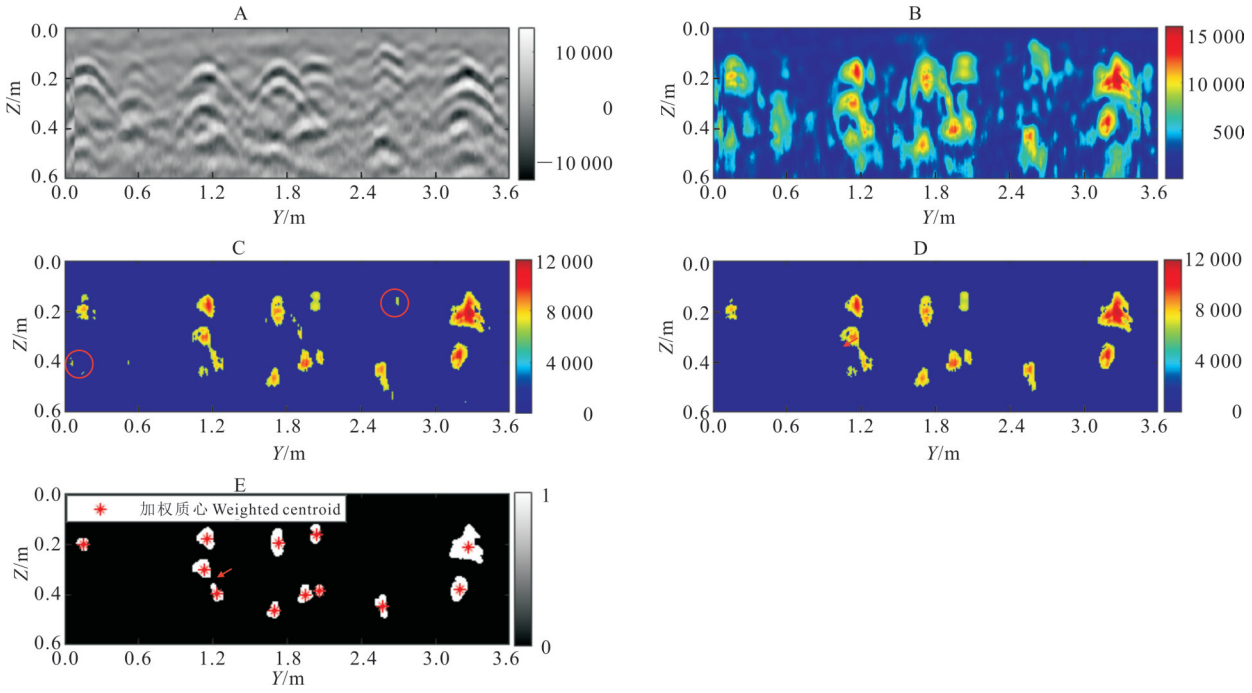
2.2.1　图像预处理　使用 matGPR（Foundation Inc，USA.）对 GPR 扫描得到的二维剖面图像进行预处理，以减少图像噪声，提高根系反射双曲线的成像效果。图像预处理操作包括：零时矫正、图像裁剪、去除直流分量、去除全局背景、中值滤波、时

间-深度转换等。此外,由于研究区地表平整,且GPR测量前清理了地表杂草及枯落物,故无需进行地形矫正处理[38]。经图像预处理后的GPR二维剖面图像大小为143像素×709像素(图2-A)。由于研究地土质均匀,且土壤中几乎不包含其他异质物(如石块、空洞等),因此将剖面图像中所有反射双曲线视为根系对于雷达波的反射结果。

表1　GPR设备参数

Table 1　GPR equipment parameters

天线频率/MHz Antenna frequency	探测深度/m Detection depth	分辨率/cm Resolution	迹线间距/cm Trace spacing	采样间隔/ns Sampling interval	时窗/ns Time window	土壤类型 Soil type	系统增益 System gain
400	4.0	2.50					
900	1.0	1.00	0.508	0.033 3	16	干土 Dry soil	自动 Auto
1 600	0.5	0.25					



A. 图像预处理;B. 希尔伯特变换;C. 根系识别;D. 根系特征图像去噪;E. 根系定位。图C中红色圆圈标记的噪声在通过DBSCAN去噪处理后被去除。图D中红色箭头标记的狭窄连接经图像开运算后被断开,形成2个独立的连通区域。图E中红色星号表示根系定位结果。右侧色带表示信号强度。图3同。

A. Image preprocessing; B. Hilbert transform; C. Root identification; D. Denoising of Root Feature Images; E. Root localization. The noise marked by the red circles in Figure C is removed via DBSCAN. The narrow connections indicated by the red arrows in Figure D are severed by morphological opening, yielding two distinct regions. In Figure E, localization results are marked by red asterisks. The color bar on the right indicates signal amplitude. The same as in Fig. 3.

图2　GPR根系识别与定位的数据解析流程

Fig. 2　Data parsing process of GPR root identification and localization

2.2.2　希尔伯特变换　由于GPR信号在介电特性不连续界面会发生反射[39],因此通过分析GPR信号在传输过程中能量强度的变化情况,可以解析地下介电特性不连续介质的分布情况。对预处理图像施加希尔伯特变换,以求取二维剖面的瞬时振幅(信号包络),即有:

$$A(z)=\sqrt{s^2(z)+\hat{s}^2(z)}。\tag{1}$$

式中:$A(z)$为GPR瞬时振幅,$s(z)$为雷达脉冲子波的深度函数,$\hat{s}(z)$为$s(z)$的希尔伯特变换。

2.2.3　根系识别　在图2-B所示的GPR瞬时振幅剖面图像中,颜色由蓝色到红色的渐变表示信号强度由弱到强,蓝色低振幅区域为土壤背景,而红色高振幅区域通常为地下探测目标。该研究通过将根系反射信号从土壤背景中分离开来,从而进行根系的识别。具体包含以下两个步骤:

首先,对GPR瞬时振幅进行标准化处理:

$$A_n=k\frac{A-A_{\min}}{A_{\max}-A_{\min}}。\tag{2}$$

式中：A_n为标准化后的瞬时振幅，A为原始瞬时振幅，A_{min}和A_{max}为二维剖面瞬时振幅的最小和最大值，k为比例因子。本研究中多数剖面瞬时振幅幅值集中分布在0～12 000（本研究中TRU™采集和存储的数据是经过模数转换后的数字信号强度，无量纲），因此设置k为12 000。

其次，通过阈值分割提取出高瞬时振幅区域以表征根系反射信号（图2-C），从而达到根系识别的目的。则有：

$$A_n=\begin{cases}A_n,\ A_n\geqslant A_t;\\0,\ A_n<A_t。\end{cases}\tag{3}$$

式中：A_t为瞬时振幅分割阈值。本研究依据分割效果经验性地设置A_t为6 000。

2.2.4　根系特征图像去噪　经阈值分割后的瞬时振幅剖面中存在一些密度较小的噪声信号（图2-C中红色圆标记），需要对其进行去除以确保根系定位的准确性，本研究采用DBSCAN（density-based spatial clustering of application with noise）聚类去噪算法将其去除。DBSCAN去噪算法中，核心参数邻域半径设为10，邻域中数据对象数目阈值设为250，根系特征图像去噪后的结果如图2-D所示。

2.2.5　根系定位　本研究用高瞬时振幅区域的加权质心定位根系。首先，对DBSCAN去噪后的剖面图像进行二值化处理，使背景反射信号强度为0，根系反射信号强度为1，并通过图像填充填补高瞬时振幅区域中的孔洞，使其形成连通的区域；其次，创建一个半径为5像素的圆盘形结构元素，通过执行先腐蚀后膨胀的开运算以平滑连通区域的轮廓，并断开狭窄连接（图2-E中红色箭头标记），从而形成两个独立的连通区域；最后，计算每个连通区域的加权质心$p_c(x_c,y_c,z_c)$以实现根系定位，其中：

$$\begin{cases}x_c=\sum_{i=1}^{n}a_i p_i(x)\Big/\sum_{i=1}^{n}A_i,\\y_c=\sum_{i=1}^{n}a_i p_i(y)\Big/\sum_{i=1}^{n}A_i,\\z_c=\sum_{i=1}^{n}a_i p_i(z)\Big/\sum_{i=1}^{n}A_i。\end{cases}\tag{4}$$

式中：n为像素个数，$p_i(x)$，$p_i(y)$，$p_i(z)$为连通区域内每个像素点所在的长度坐标，a_i为该点对应高瞬时振幅连通区域的像素值。当GPR沿X轴测量时，y_c为定值，即$y_c=\{0:0.15:1.5;2.1:0.15:3.6\}$；当GPR沿$Y$轴测量时，$x_c$为定值，有$x_c=\{0:0.15:1.5;2.1:0.15:3.6\}$。图2-E中的红色星号表示根系的定位结果。

2.3　GPR根系识别与定位效果评估

基于根系识别准确率$R_{accuracy}$来评估GPR对根系的识别效果。$R_{accuracy}$定义为高瞬时振幅连通区域的个数占挖掘所获取根样本总数的比例，即：

$$R_{accuracy}=\frac{m}{M}\times 100\%。\tag{5}$$

式中：m表示高瞬时振幅连通区域的个数，M表示通过剖面挖掘获取的根样本总数。

此外，为确保GPR识别出的根系与真实的根系相匹配，设定加权质心$p_c(x_c,y_c,z_c)$与真实根系位置$p_i(x,y,z)$之间的空间距离D不超过0.2 m，即：

$$D=\sqrt{(x_c-x)^2+(y_c-y)^2+(z_c-z)^2}\leqslant 0.2。\tag{6}$$

其中，当GPR沿Y轴正向扫描时，$x_c=x$；当GPR沿X轴正向扫描时，$y_c=y$。

采用相关系数R来表征GPR定位根系与挖掘定位根系的相关性，并采用均方根误差RMSE来量化两者之间的差异。相关系数R和均方根误差RMSE的定义式分别为：

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-X)(Y_i-Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}},\tag{7}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i-Y_i)^2}。\tag{8}$$

式中：X为GPR定位根系的估测值，Y为剖面挖掘定位根系的真实值，$\bar{X}$和$\bar{Y}$分别为X和Y的平均值，n为根系样本数量。

2.4　GPR根系检测的影响因素分析

树木根系检测的影响因素包含GPR天线频率、测量方式和根系特征。其中，天线频率包括400，900和1 600 MHz，测量方式为从相互垂直的两个方向进行剖面测量，根系特征包含根系直径d、根系埋深z和根系生长角度φ。根系生长角度φ和GPR测量方式共同影响了根系的扫描效果，因此采用扫描角度θ来综合评价两种影响因素的共同作用。根系生长角度φ定义为根系在XOY平面上的投影与X轴形成的逆时针角度，即：

$$\varphi=\arctan\left(\frac{y_{j+1}-y_j}{x_{j+1}-x_j}\right)。\tag{9}$$

式中：(x_j,y_j)表示GPR在某一剖面检测到某条根系的X轴和Y轴坐标，(x_{j+1},y_{j+1})表示GPR在下一平行剖面检测到同一条根系的X轴和Y轴坐标，

$\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$。

当GPR沿Y轴正向扫描时,GPR对根系的扫描角度θ为:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - |\varphi|。 \quad (10)$$

式中:$\theta \in [0, \pi/2]$。

当GPR沿X轴正向扫描时,GPR对根系的扫描角度θ为:

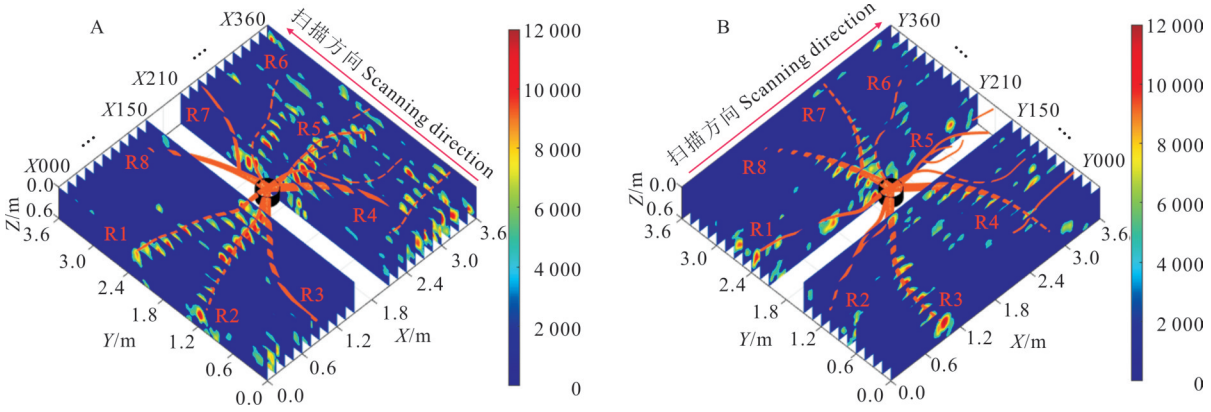
$$\theta = \varphi。 \quad (11)$$

本研究将每项根系特征划分为5个级别,其中根系直径(d)分为0~≤1 cm,1~≤2 cm,2~≤3 cm,3~≤4 cm,4~≤7 cm;根系深度(z)分为0~≤5 cm,5~≤10 cm,10~≤15 cm,15~≤20 cm,20~≤30 cm;根系扫描角度(θ)分为0~≤30°,30°~≤45°,45°~≤60°,60°~≤75°,75°~≤90°。每种分级下分别统计3种天线频率的根系识别与定位效果,从而解析各影响因素对根系检测的作用机制。

3 结果与分析

3.1 GPR根系识别效果

3.1.1 根系识别效果分析 通过剖面挖掘共计采集到139个毛白杨根系样本,均来自同一棵树,其根直径为0.45~6.14 cm,根系埋深在1.1~30.0 cm,根系的生长角度为0~80.0°。通过挖掘采样重建出的根系如图3中橙色柱体所示(共8条侧根,分别用R1,R2,R3,…,R8标记),重建的根系反映了真实根系的形态参数和空间分布情况,与真实根系对应的是GPR高瞬时振幅的空间分布。由图3可以看出,GPR沿Y轴和X轴两个方向获取的高瞬时振幅区域与真实根系生长的空间分布具有良好的匹配效果,这表明通过高瞬时振幅区域识别根系是可行的。然而,由图3也可以看出,不同根系与GPR高瞬时振幅区域的匹配效果存在一定差异,以图3-A为例,其中根系R1和R2与高瞬时振幅区域的匹配效果较好,而根系R3的匹配效果较差,这是由于根系R3的生长方向逐渐与GPR的扫描方向平行,使得根系扫描角度θ逐渐变小,最终导致GPR难以检测出根系。同一条根系的不同位置与GPR高瞬时振幅区域的匹配效果也存在差异,以图3-B为例,其中根系R8靠近根颈处根系与高瞬时振幅区域的匹配效果较好,而根系末端高瞬时振幅区域逐渐消失,相比于根系起点,根系末端的直径减小、埋深增加,使得GPR的根系检出效果随之下降。



A. 沿Y轴扫描的GPR根系识别效果;B. 沿X轴扫描的GPR根系识别效果。图中黑色柱体为根颈,橙色柱体为通过挖掘重建的三维根系构型,共包含8条侧根R1,R2,R3,…,R8。$X000$~$X360$和$Y000$~$Y360$分别表示GPR沿Y轴或沿X轴扫描得到的二维剖面的编号。红色箭头指示了GPR的扫描方向。

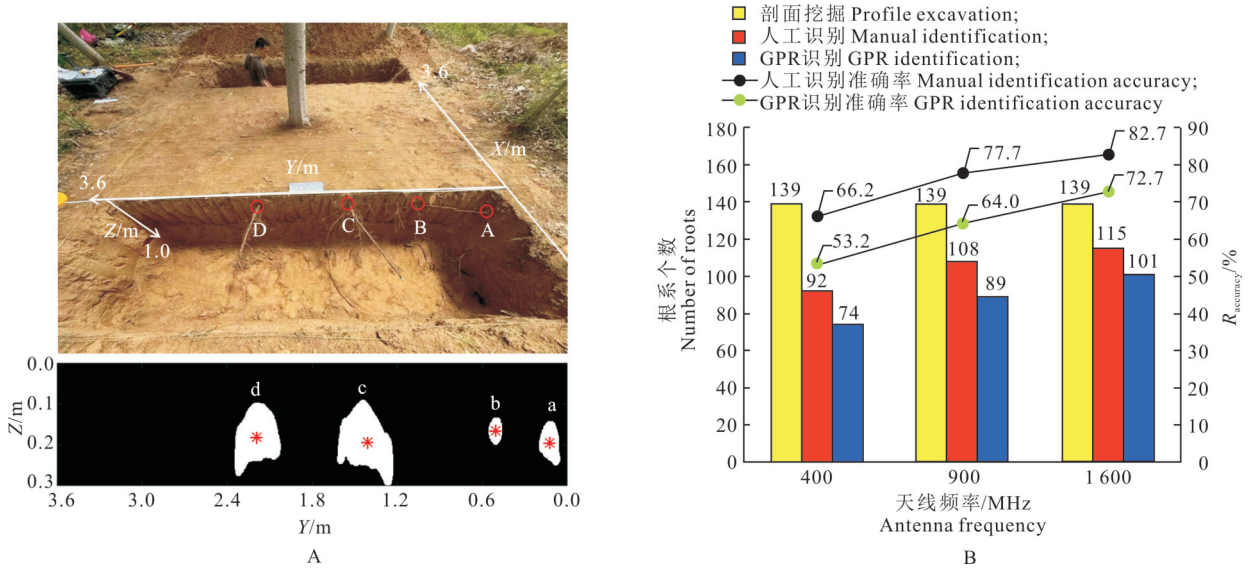
A. GPR root identification results of scanning along the Y-axis; B. GPR root identification results of scanning along the X-axis. The black column represents the root collar. Orange columns denote the reconstructed 3D root architecture obtained through excavation, which includes eight lateral roots (R1−R8). Profile codes $X000-X360$ and $Y000-Y360$ denote scans along the Y-axis and X-axis, respectively. The red arrows indicate the scanning direction of the GPR.

图3 通过GPR高瞬时振幅识别根系与真实根系的对比

Fig. 3 Comparison between roots identified using GPR high instantaneous amplitude and the actual root system

图4展示了GPR树木根系识别效果及识别准确率的统计结果。由图4-A可以看出,GPR高瞬时振幅形成的连通区域a、b、c、d与通过挖掘验证的真实根系A、B、C、D呈一一对应关系,表明GPR高瞬时振幅具备有效识别根系空间分布的能力。图4-B对比了3种天线频率下2种根系识别方法的准确率,可以看出,在传统人工识别方式下,400,900和1 600 MHz天线频率分别识别出92,108和115个根

系反射双曲线，对应的根系识别准确率分别为66.2%，77.7%和82.7%；而基于GPR高瞬时振幅的根系自动识别方法，与真实根系匹配的独立连通区域个数分别为74，89和101个，对应的根系识别准确率分别为53.2%，64.0%和72.7%。综合对比可以得出：(1) GPR用于野外根系探测具有可行性，传统人工识别方法可实现66.2%～82.7%的准确率，而本研究提出的自动识别方法在初步试验中已达到53.2%～72.7%的准确率，相当于人工识别准确率的80.4%～87.8%，显示出该方法具备良好的识别基础与优化潜力。(2)天线频率对根系识别效果具有显著影响，1 600 MHz天线的识别准确率较400 MHz提升约20%，说明提高天线频率有助于增强根系的识别效果。(3)本研究提出的根系识别方法虽然在准确率上暂未超越人工识别方式，但其实现了根系识别过程的标准化与自动化，为克服人工方法主观性强、效率低的固有局限提供了可行路径。



A. 根系识别效果；B. 识别准确率统计。

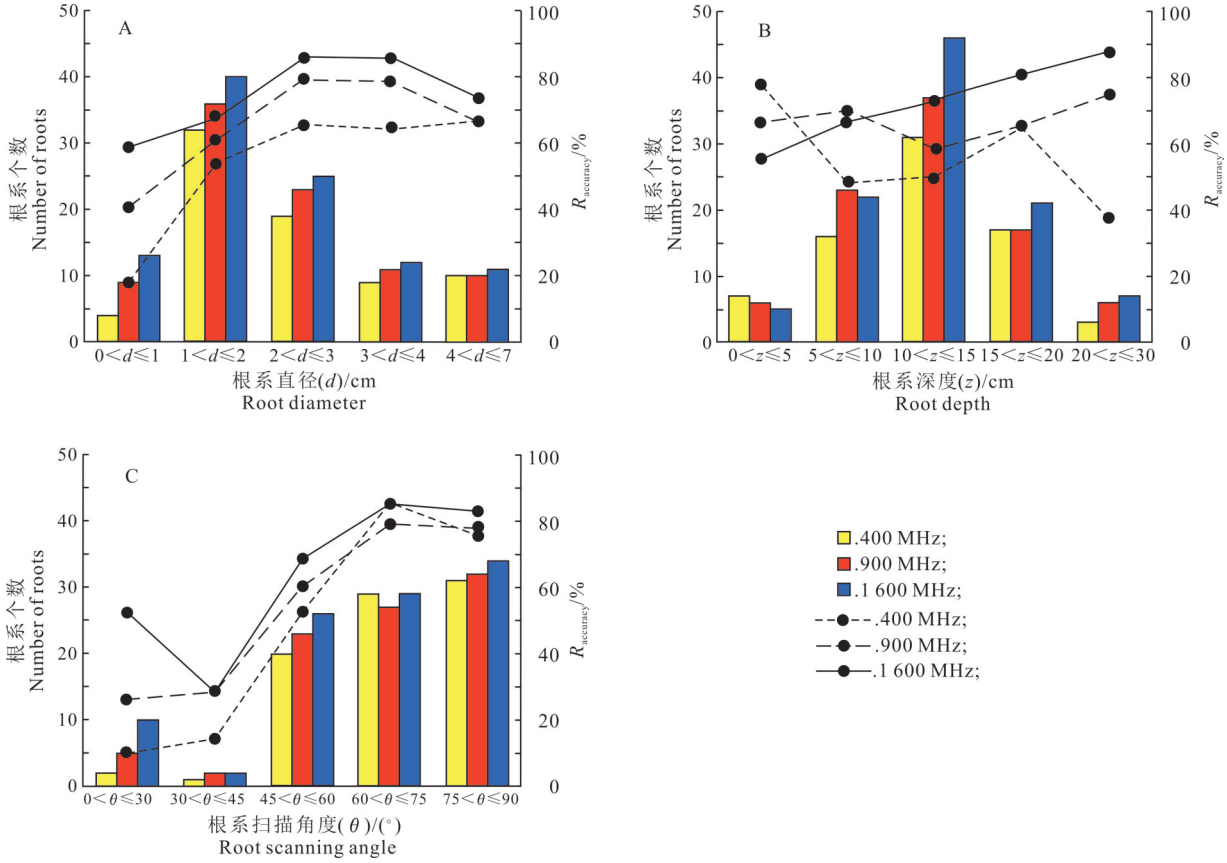
A. Root identification effectiveness; B. Accuracy statistics.

图 4　GPR根系识别效果及识别准确率统计

Fig. 4　GPR root identification results and accuracy statistics

3.1.2　根系识别的影响因素　图5展示了400，900和1 600 MHz 3种天线频率下根系直径、根系深度和扫描角度对根系识别效果的影响。图5-A显示，以根系直径(d)分级时，3种天线频率识别出的根系主要集中在$1<d\leqslant3$ cm，分别占各天线频率识别根系总量的67.6%，66.3%和64.4%。同一直径分级内，天线频率越高，识别出的根系数量越多，识别准确率也越高。其中，1 600 MHz对$2<d\leqslant3$ cm径级根系的识别准确率最高，为86.2%；400 MHz对$0<d\leqslant1$ cm径级根系的识别准确率最低，为18.2%。整体而言，3种天线频率的识别准确率随根系直径的增大($0<d\leqslant3$ cm)而逐渐上升；当直径超过3 cm后，识别准确率趋于稳定，各天线频率的识别准确率均保持在64.3%以上。图5-B表明，以根系深度(z)分级时，3种天线频率识别出的根系主要分布在$5<z\leqslant20$ cm土层，分别占各天线频率识别根系总量的86.5%，86.5%和88.1%。值得注意的是，1 600 MHz对浅层($0<z\leqslant10$ cm)根系的识别效果较差，其准确率低于900 MHz，在$0<z\leqslant5$ cm范围内甚至低于400 MHz。随着深度增加($10<z\leqslant30$ cm)，900和1 600 MHz的识别准确率逐渐上升并趋于稳定，其中1 600 MHz的识别准确率均高于73.0%，900 MHz均高于58.7%。400 MHz识别出的根系数量较少，准确率整体低于另外2种天线频率。结合本研究区三倍体毛白杨根系实际分布的特征(主要集中在$0<z\leqslant30$ cm浅层)，400 MHz天线频率在探测深度方面的优势未能充分发挥。此外，由于浅层($0<z\leqslant10$ cm)根系密集分布于根颈区域，根系反射双曲线信号相互干扰，导致识别准确率不稳定。随着深度($10<z\leqslant30$ cm)增加，根系逐渐远离根颈，分布趋于独立，因此900和1 600 MHz的识别准确率上升；而400 MHz因分辨率较低，其识别表现仍不稳定。由图5-C可知，以根系扫描角度(θ)分级时，3种天线频率识别出的根系主要集中

在45°<θ≤90°,分别占各天线频率识别根系总量的94.6%,92.1%和88.1%。在各扫描角度分级下,1 600 MHz识别出的根系数量最多,准确率最高可达85.3%(60°<θ≤75°)。400 MHz的识别准确率整体低于900 MHz,仅在60°<θ≤75°时略高。当扫描角度超过60°后,3种天线频率的识别准确率差异缩小。整体而言,根系识别准确率随扫描角度的增大(30°<θ≤75°)而逐步提升,当扫描角度超过75°后,各天线频率的识别准确率趋于稳定(均高于75.6%)。



A. 按直径分级;B. 按深度分级;C. 按扫描角度分级。

图中柱状图表示通过GPR高瞬时振幅识别出的根系个数,折线图表示根系识别准确率。

A. Stratified by diameter; B. Stratified by depth; C. Stratified by scanning angle. Bar charts represent the number of roots identified by GPR high instantaneous amplitude, and the line charts indicate the root identification accuracy rate.

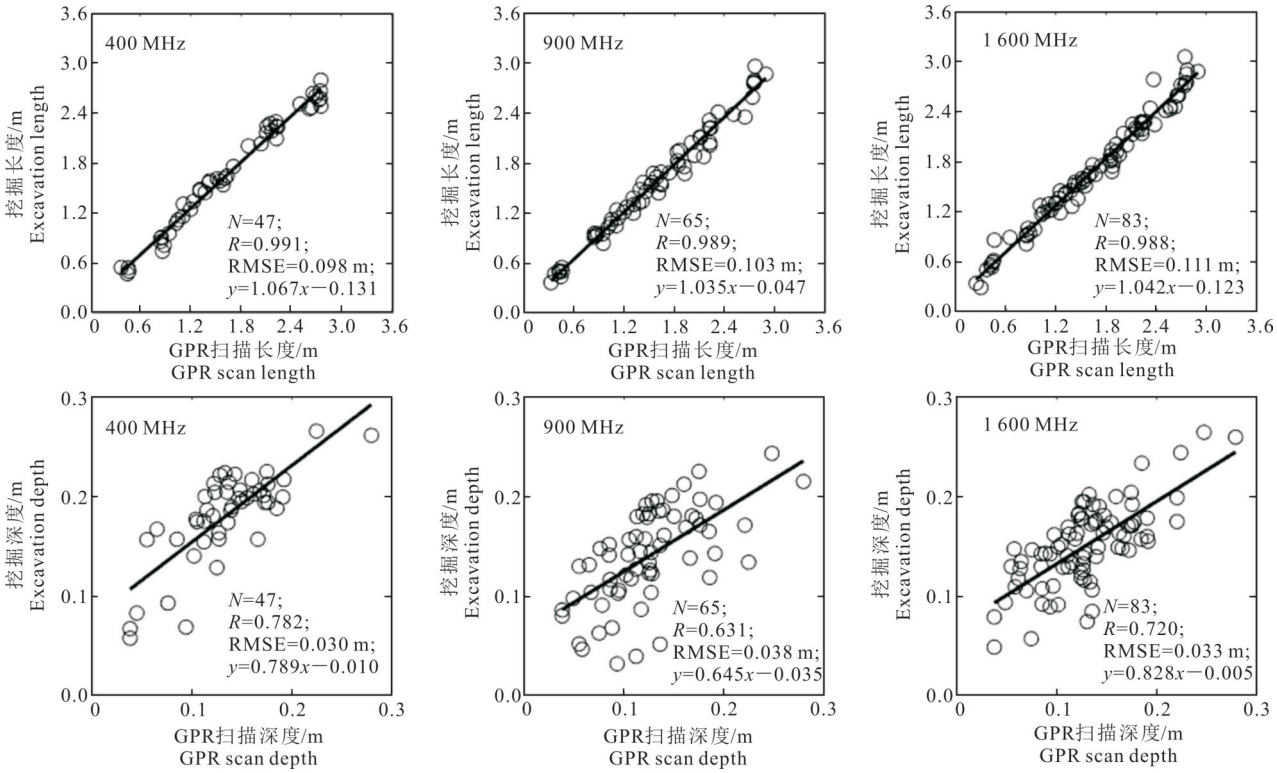
图 5 3种天线频率下不同因素对GPR根系识别效果的影响

Fig. 5 Influence of different factors on GPR root identification under three antenna frequencies

综上可知,在上述3种影响因素的作用下,1 600 MHz的识别准确率优于900和400 MHz,尤其是对细根(0<d≤1 cm)和小扫描角度(0°<θ≤30°)的根系。根系直径与扫描角度在特定范围内影响根系的识别效果,即当根系直径小于3 cm或扫描角度小于60°时,根系识别准确率随根系特征参数的增大而提升;当根系特征参数超出该范围后,根系识别准确率逐渐趋于稳定。

3.2 GPR根系定位效果

3.2.1 根系定位效果分析 在GPR 3种天线频率正确识别根系的基础上,采用高瞬时振幅连通区域的加权质心对根系进行定位,并以剖面挖掘获取的根系真实位置为基准进行线性回归验证。结果(图6)表明:在剖面长度方向,400,900和1 600 MHz 3种天线频率定位根系的相关系数R均较高(分别为0.991,0.989和0.988),回归斜率接近1;根系定位的RMSE较小(分别为0.098,0.103和0.111 m),即3种天线频率在剖面长度方向定位根系的效果相近且精度良好(RMSE均在0.1 m左右)。在剖面深度方向,3种天线频率定位根系的相关系数R有所降低(分别为0.782,0.631和0.720),但RMSE仍保持在较低水平(均不超过0.04 m)。总体而言,采用GPR高瞬时振幅连通区域的加权质心定位根系是可行和有效的,在正确识别的基础上,不同天线频率均实现了根系在剖面两个维度上的准确定位。



图中黑色圆圈表示GPR根系定位结果（x）与挖掘实测根系位置（y）的对比，N表示GPR正确识别根系的数量。

Black circles represent the comparison between the GPR root localization results (x) and the excavated measured root positions (y). N denotes the number of roots correctly identified by GPR.

图6　GPR与挖掘法在剖面长度和深度两个维度上定位根系的效果对比

Fig. 6　Comparison of root localization between GPR and excavation methods in both longitudinal and depth dimensions

3.2.2　根系定位的影响因素　图7展示了3种天线频率下根系直径、根系深度和扫描角度对根系定位效果的影响。由图7-A可见，以根系直径分级时，与实际相匹配的根系主要分布于1～≤4 cm范围内。在剖面长度方向上，3种天线频率定位根系的RMSE总体上随根系直径的增大而降低。不同直径分级下，400和900 MHz的RMSE较小，为0.05～0.12 m，而1 600 MHz的RMSE略大，为0.09～0.15 m。在剖面深度方向上，3种天线频率定位根系的RMSE也随根系直径的增加而降低，其中1 600 MHz的RMSE最小，为0.035～0.040 m，900 MHz次之，RMSE为0.035～0.050 m，400 MHz最大，RMSE为0.040～0.060 m。图7-B显示，以根系深度分级时，与实际相匹配的根系集中在5～≤20 cm深度内。在剖面长度方向上3种天线频率定位根系的效果相近，深度为5～≤15 cm时RMSE约为0.12 m，深度为15～≤20 cm时RMSE约为0.08 m，各深度分级下3种天线频率的RMSE差异小于0.03 m。在剖面深度方向上，3种天线频率的RMSE整体随深度的增加而减小，其中1 600 MHz的RMSE最小，为0.02～0.05 m，优于900和400 MHz。图7-C表明，以根系扫描角度分级时，与实际相匹配的根系集中在45°～≤90°的区间内。3种天线频率在剖面长度和剖面深度方向上定位根系的效果相当，长度方向上RMSE均在0.1 m左右，深度方向上RMSE均在0.05 m左右。

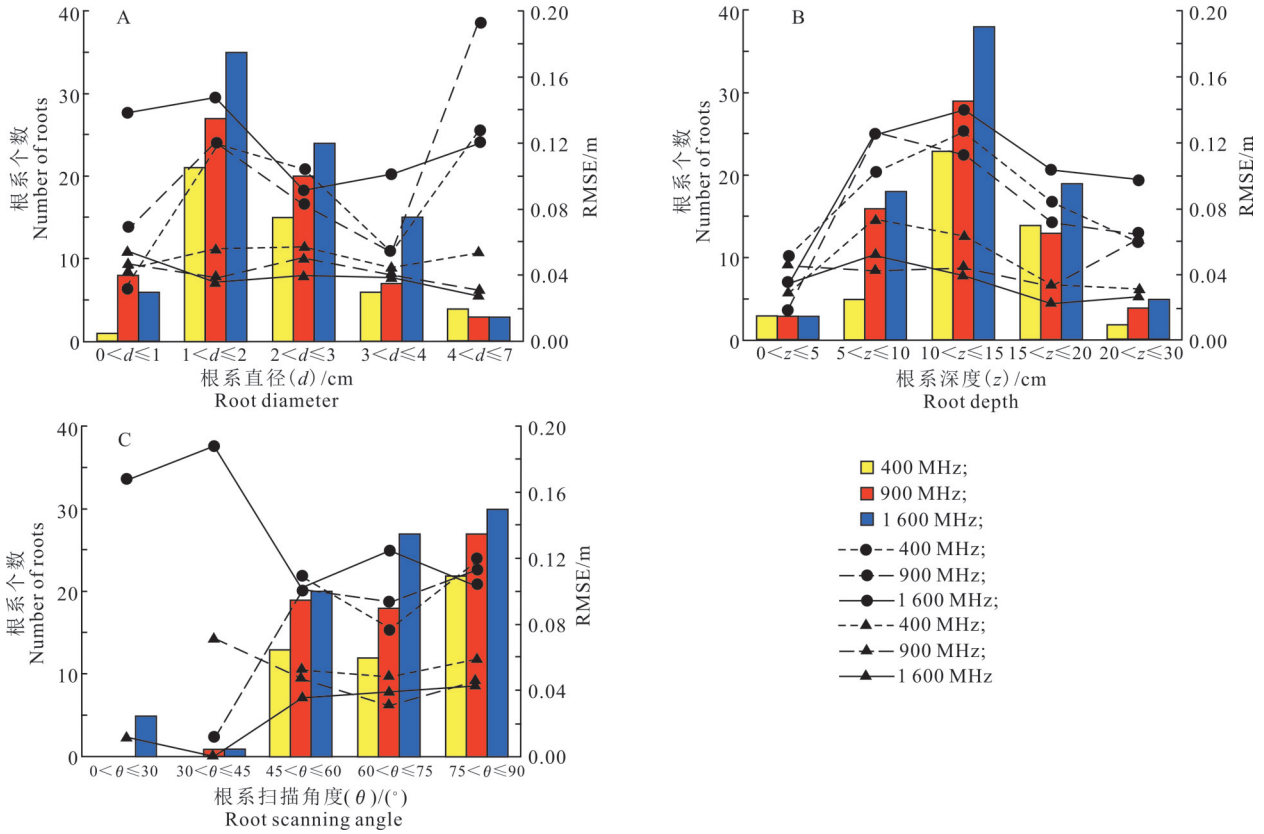
总体而言，在正确识别根系的前提下，利用高瞬时振幅连通区域加权质心定位根系的效果较为稳定，根系直径、根系深度和扫描角度对根系定位精度的影响，均小于其在根系识别阶段所产生的作用。

4　讨　论

4.1　基于GPR瞬时振幅的树木根系识别

本研究提出了一种基于GPR瞬时振幅的树木根系识别与定位方法，其通过分析雷达反射信号的能量分布实现了根系的自动识别与定位。研究结果显示，400，900和1 600 MHz 3种天线频率下，基于GPR高瞬时振幅的树木根系识别准确率分别为53.2%，64.0%和72.7%，识别精度能够达到人工识别的80.4%，82.4%和87.8%；采用高瞬时振幅连通区域加权质心定位根系时，剖面长度方向的

RMSE均小于0.12 m,剖面深度方向的RMSE均小于0.04 m。本研究提出的基于GPR瞬时振幅的根系识别与基于GPR瞬时振幅连通区域加权质心的根系定位方法具有以下优势:(1)与人工处理相比,可快速、自动地实现多个根系目标的准确检测;(2)相较于依赖反射双曲线拟合的根系定位方法,本方法对反射双曲线的成像质量要求较低,根系反射信号能量与土壤背景存在可区分的差异时即可提取根系特征;(3)作为一种简便的根系实时定位方法,无需依赖大量样本进行模型训练。



A. 按直径分级;B. 按深度分级;C. 按扫描角度分级。图中柱状图表示GPR根系定位与根系实际位置相匹配的个数,带圆点的折线表示GPR在剖面长度方向上定位根系的RMSE,带三角符号的折线表示GPR在剖面深度方向上定位根系的RMSE。

A. Stratified by diameter; B. Stratified by depth; C. Stratified by scanning angle. Bar charts show the number of matches between GPR root localization and the actual root positions; The dotted line with circles represents the RMSE of GPR in localizing roots along the profile length; The dotted line with triangles markers represents the RMSE of GPR in localizing roots along the profile depth.

图 7 3种天线频率下不同因素对GPR根系定位效果的影响

Fig. 7 Effects of different factors on GPR root localization under three antenna frequencies

本研究在均匀干燥的砂土环境中开展,且目标根系的深度分布主要集中在30 cm以内。在此条件下,3种天线频率识别出的最小根系直径分别为0.98,0.47和0.45 cm,对应的根系深度为15.5,5.8和10.2 cm,对应的扫描角度分别为86.3°,83.9°和79.1°。由于3种天线频率的有效探测深度均覆盖了根系的实际埋深,而1 600 MHz天线频率具备最高的分辨率,故其在各种影响因素下均表现出最优的识别效果。然而,若目标根系的埋深增大时,1 600 MHz未必仍为最佳选择[19]。因此,在采用单一天线频率的GPR检测树木根系时,结合目标根系的特征选择适合的天线频率至关重要。此外,瞬时振幅阈值的设置对于GPR根系识别也具有一定的影响作用:阈值过低易导致提取的根系特征包含土壤背景信息,阈值过高则可能损失有效根系信息,从而降低根系定位准确性。本研究测试发现,将瞬时振幅阈值A_t设置为6 000时,根系特征提取效果较为适中,因此经验性地将其作为合适的阈值进行根系特征分割,而最优的瞬时振幅阈值取值范围仍需进一步深入分析。最后,由于完整获取根系真实的空间分布较为困难,目前本方法仅在单株树木根系上完成了测试,后续研究将逐步扩展至不同树种及不同生长阶段的树木,以进一步增强方法的普适性。

4.2 GPR树木根系识别的影响因素

除本研究已分析的天线频率、根系直径、根系

深度、扫描角度外，尚有其他因素可能影响根系的识别效果，如根系与土壤的含水率差异、根分布密度、土壤质地以及气候条件等。已有野外研究揭示了部分影响机制，如在根土含水率方面，HIRANO等[40]指出，当根系的体积含水率低于20%时无法被GPR检测；CUI等[41]认为，5%～10%的土壤含水率为理想检测条件；BORDEN等[42]在野外检测根系时，根与土的体积含水率差异在6倍以上。在根分布密度方面，TANIKAWA等[43]指出，GPR对密集分布的根束仅会生成单一宽大的反射双曲线；HIRANO等[40]的研究表明，900 MHz天线频率难以区分间距小于20 cm的根系。在土壤质地方面，YAMASE等[44]报道，900 MHz天线频率在花岗岩土壤中的根系识别率仅为47.7%；而BORDEN等[42]表明，在砂壤土中根系的识别率可提高至58%。在气候条件方面，CUI等[45]发现，冬季冻土环境中雷达波能量衰减减弱，有助于提升根系检测效果。

只有系统分析并明确各影响因素对GPR根系检测的作用机制，才能持续优化测量方案与数据处理流程，从而更准确、可靠地实现根系的识别与定位，为后续根系参数估算、三维构型重建及根土相互作用分析研究奠定基础。然而，单一研究难以全面涵盖所有因素，因此本研究重点聚焦于天线频率、根系直径、根系深度以及根系扫描角度等核心因素的作用机制分析。此外，本研究基于整根挖掘数据全面评估了根系的识别与定位效果，丰富了相关案例积累，为GPR在野外环境中的成功应用提供了实践参考。

5　结　论

为实现树木根系的准确无损检测，本研究提出了一种基于GPR瞬时振幅的根系识别与定位方法，系统地比较了400，900和1 600 MHz 3种天线频率在根系识别与定位中的表现，并明确了根系直径、根系深度和扫描角度等因素对根系检测识别效果的作用机制。本研究以华北平原地区的典型树种三倍体毛白杨为研究对象，首先以15 cm的扫描间隔从垂直的2个方向采集GPR剖面数据，其次通过希尔伯特变换和阈值分割获取GPR高瞬时振幅区域以识别根系，并利用高瞬时振幅连通区域的加权质心定位根系，最后通过整根挖掘验证评估了根系识别定位方法的可行性，并解析了各因素的影响机制。

1）采用GPR高瞬时振幅识别根系具有较高可行性，400，900和1 600 MHz 3种天线频率的根系识别准确率分别为53.2%，64.0%和72.7%。其中1 600 MHz天线频率在识别细根（$0<d\leqslant1$ cm）及小扫描角度（$0°<\theta\leqslant30°$）根系方面表现最优，而400 MHz天线对浅层密集根系的识别能力较弱。

2）基于高瞬时振幅连通区域加权质心的根系定位方法效果良好，3种天线频率在剖面长度方向上定位根系的RMSE均小于0.12 m，在剖面深度方向上定位根系的RMSE均小于0.04 m。1 600 MHz在根系深度定位中整体精度最高，400 MHz则误差相对较大。

3）根系直径与扫描角度对根系识别效果具有明显影响。当根系直径$d\leqslant3$ cm或扫描角度$\theta\leqslant60°$时，根系识别准确率随根系直径或扫描角度的增大而提升；超出此范围后，根系识别效果趋于稳定。就天线频率而言，1 600 MHz在各参数范围内均保持了较高识别率。

4）在探测深度方面，由于目标根系的埋藏深度较浅（$z\leqslant30$ cm），使得400 MHz天线频率未能发挥出探测深度的优势。900和1 600 MHz对$10<z\leqslant30$ cm深度区间内的根系识别效果较为稳定，对于更深根系，建议结合目标根系实际深度与分辨率的需求进行天线频率的选择。

本研究为林区根系无损检测提供了有效工具，并厘清了多因素对GPR根系检测的作用机制，有助于优化探测方案的设计，提升根系生长监测与环境适应评估的可靠性。

[参考文献]

[1] LIU H，FU X. Phytohormonal networks facilitate plant root developmental adaptations to environmental changes[J]. Science Bulletin，2024，69(6)：709-713.

[2] TARIQ A，GRACIANO C，SARDANS J，et al. Plant root mechanisms and their effects on carbon and nutrient accumulation in desert ecosystems under changes in land use and climate[J]. New Phytologist，2024，242(3)：916-934.

[3] CABAL C，DEURWAERDER H，MATESANZ S. Field methods to study the spatial root density distribution of individual plants[J]. Plant and Soil，2021，462：25-43.

[4] ALANI A，LANTINI L. Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods：a focus on ground penetrating radar[J]. Surveys in Geophysics，2020，41(3)：605-646.

[5] 樊国秋，李颖航，李佳莹，等. 基于探地雷达的白蜡树根系形态

特征及生物量定量分析[J]. 农业工程学报,2025,41(9):237-244.
FAN G Q, LI Y H, LI J Y, et al. Quantitative analysis of root morphologies and biomass of ash tree using ground penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(9): 237-244.

[6] LOISEAU B, CARRIÈRE S, JOUGNOT D, et al. The geophysical toolbox applied to forest ecosystems: a review[J]. Science of The Total Environment, 2023, 899: 165503.

[7] MAJEWSKI R, VALENTA J, TÁBOŘÍK P, et al. Geophysical imaging of tree root absorption and conduction zones under field conditions: a comparison of common geoelectrical methods[J]. Plant and Soil, 2022, 481: 447-473.

[8] WANG X, WANG P, ZHANG X, et al. Target electromagnetic detection method in underground environment: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(4): 13835-13852.

[9] 刘秀位,谷慧杰,韩洁,等. 基于探地雷达和电容法的作物根系原位无损测量技术研究进展[J]. 农业工程学报,2020,36(20):226-237.
LIU X W, GU H J, HAN J, et al. Research progress of ground penetrating radar and electrical capacitance for in-situ non-destructive measurement of crop roots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 226-237.

[10] LIU X, CHEN J, BUTNOR J, et al. Noninvasive 2D and 3D mapping of root zone soil moisture through the detection of coarse roots with ground-penetrating radar[J]. Water Resources Research, 2020, 56(5): e2019WR026930.

[11] MOLON M, BOYCE J, ARAIN M. Quantitative, nondestructive estimates of coarse root biomass in a temperate pine forest using 3-D ground-penetrating radar (GPR)[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(1): 80-102.

[12] ZHANG L, ZHANG Z, GUO L, et al. A simple method for estimating the coarse lateral root biomass of shrubs using ground-penetrating radar: validation by *Caragana microphylla* Lam. in Inner Mongolia[J]. Science of the Total Environment, 2024, 919: 170897.

[13] 熊雨露,周宇峰,李平衡,等. 毛竹林竹鞭生长特征和空间结构的探地雷达无损探测[J]. 林业科学,2020,56(12):19-27.
XIONG Y L, ZHOU Y F, LI P H, et al. Non-destructive detection by ground penetrating radar of growth characteristics and spatial structure of rhizomes in moso bamboo forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(12): 19-27.

[14] FAN G, LIANG H, ZHAO Y, et al. Automatic reconstruction of three-dimensional root system architecture based on ground penetrating radar[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106969.

[15] XIAO L, LI C, CAI Y, et al. Interactions between soil properties and the rhizome-root distribution in a 12-year moso bamboo reforested region: combining ground-penetrating radar and soil coring in the field[J]. Science of the Total Environment, 2021, 800: 149467.

[16] HUGENSCHMIDT J, KAY S. Unmasking adaption of tree root structure in agroforestry systems in Switzerland using GPR[J]. Geoderma Regional, 2023, 34: e00659.

[17] YAMASE K, TANIKAWA T, DANNOURA M, et al. Estimating slope stability by lateral root reinforcement in thinned and unthinned stands of *Cryptomeria japonica* using ground-penetrating radar[J]. Catena, 2019, 183: 104227.

[18] NICHOLS P, MCCALLUM A, LUCKE T. Using ground penetrating radar to locate and categorise tree roots under urban pavements[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 27: 9-14.

[19] 张璐云,崔喜红,全振先,等. 野外自然条件下探地雷达识别植物根系的有效性研究[J]. 地球物理学进展,2021,36(6):2764-2774.
ZHANG L Y, CUI X H, QUAN Z X, et al. Availability of ground penetrating rdar in recognizing plant roots in field[J]. Progres in Geophysics, 2021, 36(6): 2764-2774.

[20] ZHANG X, DERIVAL M, ALBRECHT U, et al. Evaluation of a ground penetrating radar to map the root architecture of HLB-infected citrus trees[J]. Agronomy, 2019, 9: 354.

[21] LUO W, LEE Y, SUN H, et al. Tree roots reconstruction framework for accurate positioning in heterogeneous soil[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 1912-1925.

[22] 王泽鹏,张潇巍,薛芳秀,等. 探地雷达树木根系定位与直径估算[J]. 农业工程学报,2021,37(8):160-168.
WANG Z P, ZHANG X W, XUE F X, et al. Estimating the location and diameter of tree roots using ground penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 160-168.

[23] XIAO L, LI C, CAI Y, et al. Preliminary application of ground-penetrating radar for reconstruction of root system architecture in moso bamboo[J]. Remote Sensing, 2021, 13(14): 2816.

[24] RISTIC A, PETROVACKI D, GOVEDARICA M. A new method to simultaneously estimate the radius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(8): 1620-1630.

[25] HE W, LAIWW L. Angle-corrected GPR hyperbolic fitting models for improved parameter estimation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 147: 105741.

[26] ABOUDOURIB A, SERHIR M, LESSELIER D. A processing framework for tree-root reconstruction using ground-penetrating radar under heterogeneous soil conditions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(1): 208-219.

[27] 李光辉,徐汇,刘敏. 基于探地雷达杂波抑制与偏移成像的树木根系定位方法[J]. 农业机械学报,2022,53(3):206-214.
LI G H, XU H, LIU M. Tree-root localization method based on migration imaging with clutter suppressed in ground-penetrating radar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 206-214.

[28] LI W, CUI X, GUO L, et al. Tree root automatic recognition

in ground penetrating radar profiles based on randomized hough transform[J]. Remote Sensing，2016，8(5)：430.

[29] LIANG H，XING L，LIN J. Application and algorithm of ground-penetrating radar for plant root detection：a review[J]. Sensors，2020，20(10)：2836.

[30] SUN D，JIANG F，WU H，et al. Root location and root diameter estimation of trees based on deep learning and ground-penetrating radar[J]. Agronomy-Basel，2023，13(2)：344.

[31] ZHANG X，XUE F，WANG Z，et al. A novel method of hyperbola recognition in ground penetrating radar (GPR) B-Scan image for tree roots detection[J]. Forests，2021，12(8)：1019.

[32] 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(自然科学版)，2016，8(1)：46-55.
WANG D D，XU Y M，YUE S P，et al. Plant root detection based on ground penetrating radar：a review[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology：Natural Science Edition，2016，8(1)：46-55.

[33] LIU Q，CUI X，LIU X，et al. Detection of root orientation using ground-penetrating radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2018，56(1)：93-104.

[34] LIANG H，FAN G，LI Y，et al. Theoretical development of plant root diameter estimation based on GprMax data and neural network modelling[J]. Forests，2021，12(5)：615.

[35] BI L，XING L，LIANG H，et al. Estimation of coarse root system diameter based on ground-penetrating radar forward modeling[J]. Forests，2023，14(7)：1370.

[36] HE Y，XI B，LI G，et al. Influence of drip irrigation，nitrogen fertigation，and precipitation on soil water and nitrogen distribution，tree seasonal growth and nitrogen uptake in young triploid poplar (*Populus tomentosa*) plantations[J]. Agricultural Water Management，2021，243：106460.

[37] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性[J]. 北京林业大学学报，2019，41(12)：37-49.
XI B Y. Morphology，distribution，dynamic characteristics of poplar roots and its water uptake habits[J]. Journal of Beijing Forestry University，2019，41(12)：37-49.

[38] LUO W，LEE Y，OW L，et al. Accurate tree roots positioning and sizing over undulated ground surfaces by common offset GPR measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2022，71：5502011.

[39] SHEN H，LI X，DUAN R，et al. Quality evaluation of ground improvement by deep cement mixing piles via ground penetrating radar[J]. Nature Communications，2023，14：3448.

[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，2009，319：15-24.

[41] CUI X，QUAN Z，CHEN X，et al. GPR-based automatic identification of root zones of influence using HDBSCAN[J]. Remote Sensing，2021，13(6)：1227.

[42] BORDEN K，THOMAS S，ISAAC M. Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar[J]. Plant and Soil，2017，410：323-334.

[43] TANIKAWA T，IKENO H，YAMASE K，et al. Can ground-penetrating radar detect adjacent roots and rock fragments in forest soil?[J]. Plant and Soil，2021，468：239-257.

[44] YAMASE K，TANIKAWA T，DANNOURA M，et al. Ground-penetrating radar estimates of tree root diameter and distribution under field conditions[J]. Tree，2018，32(6)：1657-1667.

[45] CUI X，LIU X，CAO X，et al. Pairing dual-frequency GPR in summer and winter enhances the detection and mapping of coarse roots in the semi-arid shrubland in China[J]. European Journal of Soil Science，2020，71(2)：236-251.

（责任编辑：温晓平）