

徐 汇,徐元元,李光辉. 基于探地雷达的果树根系检测试验与分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(2):170-177.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.02.029

# 基于探地雷达的果树根系检测试验与分析

徐 汇<sup>1</sup>, 徐元元<sup>2</sup>, 李光辉<sup>1</sup>

(1. 江南大学人工智能与计算机学院,江苏无锡 214122; 2. 江苏省苏州市吴中区林业技术推广站,江苏苏州 215104)

**摘要:**果树的根系健康与水果品质息息相关,如何检测根系的健康状况一直是果树养护管理领域的难题。探地雷达作为新兴的无损检测技术日益受到学术界和业界的重视。选择江南大学校内果园和江苏省苏州市吴中区东山镇双湾村果园内的枇杷和水蜜桃果树试样,利用探地雷达对试样进行根系检测试验,以评价探地雷达对果树根系检测的可行性。结果表明,通过分别设置 900 MHz 和 400 MHz 的天线频率,探地雷达能够获取果树试样的细根和粗根分布图,包括雷达信号波形图、三维总览图和分层密度图,根系图像准确地反映了果树地下根系分布状况,结果有助于果树健康风险评价和养护管理。

**关键词:**果树;探地雷达;无损检测;养护管理;根系图像;健康风险评价

**中图分类号:** S127      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2022)02-0170-08

果树的健康状况不仅关系到水果的品质,而且决定了果农的经济效益。经常性对果树进行健康检测和风险评估,有利于及时发现果树的病虫害,并采取科学合理的防治措施。长期以来,人们较重视果树冠层叶片及树干的病虫害防治,但对于肉眼难以发现的根系病害问题较少关注。然而,果树根系腐烂或其他病情,会严重影响水果的品质和产量,甚至导致果树死亡。准确检测果树根系不仅有助于分析评价果树的\*\*健康风险,也能帮助果农进行果树肥、水、药的合理管控。因此,如何在\*\*不伤害果树本身的前提下,利用信息技术手段进行果树健康检测,日益成为国内外关注的重要研究方向。

探地雷达(ground-penetrating radar, GPR)是一种新兴的无损检测技术,有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。近年来,发达国家逐渐将 GPR 技术引入到木材及古树名木无损检测领域。一些学者提出利用雷达波的介电常数变化评价木材物理力学性能的变化情况,并通过大量试验证实了其可行性。例如, Mai 等研

究表明,雷达波在木材中传播时对含水量高度敏感,而且其介电常数在雷达波平行于纤维方向时比垂直于纤维方向要高<sup>[2]</sup>。Martinez-Sala 等利用 1.6 GHz 频率的雷达波对不同密度的木材试件进行试验,分析了雷达波介电常数对于木材纹理的响应,他们发现包括传播速度、指导波和反射波的幅度等参数值随着传播方向与纹理方向之间的变化而有较大变化<sup>[3]</sup>。还有一些学者研究利用 GPR 检测古树的\*\*健康状况,通过雷达信号分析,获取树木断层图像及根系分布示意图<sup>[4-11]</sup>。如 Butnor 等使用 900 MHz 频率的 GPR 对 3 种松树进行树干横截面和空洞检测,他们发现近表面腐朽、空洞及干枯的树身具有唯一的电磁特征,能够与其他类型缺陷区分开来<sup>[5]</sup>,他们认为 GPR 对于古树的腐朽缺陷检测需要提高量化分析功能。肖夏阳等使用 GPR 对颐和园的部分古树进行了检测研究<sup>[6-7]</sup>,他们利用激光扫描获取树干外形轮廓,并利用信号处理与图像增强方法提高 GPR 断层图像的真实感。Mihai 等利用同轴探针获取新采伐树根的相对介电常数,采样频率范围从 50 MHz 到 3 GHz,并将介电常数结果输入探地雷达正演模型,结合不同的实际场景进行分析,结果表明该模型有助于更好地理解 GPR 检测树木根系的可行性及局限性<sup>[8]</sup>。Yamase 等建立二维网格模型,研究了在不同根直径和含水量情况下, GPR 对根系的\*\*可检测性<sup>[9]</sup>。针对城市异构多层土壤条件下的悬铃木和七叶树, Altdorff 等研究分析了在 250 MHz 频率下的 GPR 根系检测性能<sup>[10]</sup>。崔

收稿日期:2021-03-23

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(19)3087];江苏省重点研发计划(编号:BE2016627)。

作者简介:徐 汇(1995—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事探地雷达无损检测技术研究。E-mail:6191914063@stu.jiangnan.edu.cn。

通信作者:李光辉,博士,教授,博士生导师,主要从事物联网技术、林木无损检测技术、农业信息化等领域的研究。E-mail:ghli@jiangnan.edu.cn。

喜红等利用探地雷达 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<sup>[11]</sup>。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试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,结果证明了该方法的有效性和合理性。现有 GPR 技术的主要问题在于树木断层成像的精度不高,缺陷定位误差较大;根系检测分辨率不高,无法有效分辨出烂根或伪树根,没有定量分析功能,从而影响到树木健康状况的准确评价。

基于 GPR 的果树无损检测技术研究还鲜有报道。本研究以枇杷(*Eriobotrya japonica*)和水蜜桃(*Prunus persica*)树为试样,探索应用 GPR 对果树进行根系检测。提出了基于 GPR 的果树根系检测方法,并通过现场检测与结果分析证实了该检测方案的可行性,表明 GPR 的根系检测结果对于果树的康风险评价和养护管理具有重要参考价值。

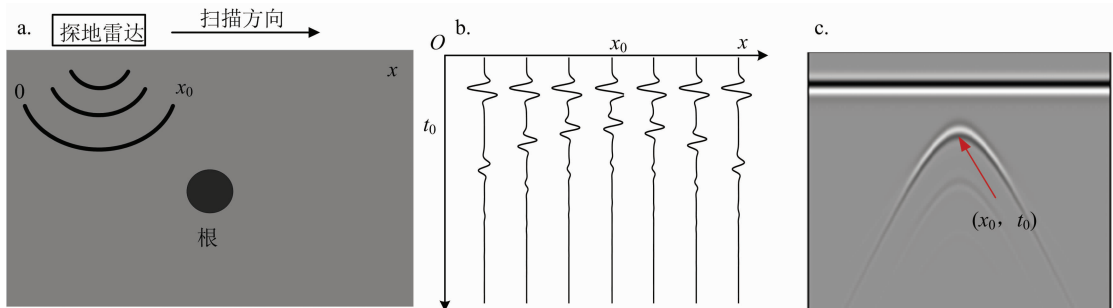


图1 探地雷达 B-scan 成像模型

当拖动雷达天线至树根正上方时,来自根的回波信号的传播时间减小到最小值,然后随着天线远离树根而增加,这就形成了雷达剖面中的特征双曲线。最清晰的双曲线是由天线扫描方向垂直于根系形成的,双曲线的参数方程<sup>[14]</sup>可以表示为

$$\frac{t^2}{t_0^2} - \frac{(x-x_0)^2}{\left(\frac{t_0 v_0}{2}\right)^2} = 1. \quad (1)$$

其中: $x$ 表示天线位置; $t$ 表示返回信号的双向传播时间; $(x_0, t_0)$ 表示双线的顶点; $v_0 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$ 表示电磁波

在土壤中的传播速度, $c$ 表示真空中光速, $\varepsilon_r$ 表示土壤的相对介电常数。在式(1)中,根系半径大小 $R$ 被忽略,考虑根系半径,式(1)可改写为

## 1 探地雷达根系检测原理

探地雷达产生一系列电磁脉冲,当脉冲穿过地面时它会被所穿过的物质(土壤、水、岩石、根)不同程度地反射、折射和吸收。导致反射的是目标介质和掩埋物体之间的介电常数的差异,介电常数的差异越大,反射系数就越大<sup>[1]</sup>。雷达天线中的接收器接收返回信号,雷达控制单元记录返回信号的双向传播时间、振幅和极性。这些信息通常以纵坐标表示时间,横坐标表示信号强度和极性,称为 A-scan。当天线工作时,它被沿着直线或圆弧在地面上拖动,并以固定的时间或位置间隔发射电磁脉冲。将多条 A-scan 迹线组合起来,形成典型的探地雷达剖面扫描(B-scan),使得地下目标在探地雷达图像中常以双曲线形态呈现,横坐标为距离,纵坐标为信号的双向传播时间,见图 1-a 和图 1-b。用灰色或假彩色表示回波信号的强度<sup>[12]</sup>,图 1-c 为开源软件 gprMax<sup>[13]</sup>仿真树根探测结果的示意图。

$$\frac{\left(t + \frac{2R}{v_0}\right)^2}{\left(t_0 + \frac{2R}{v_0}\right)^2} - \frac{(x-x_0)^2}{\left(\frac{t_0 v_0}{2} + R\right)^2} = 1. \quad (2)$$

雷达的覆盖区域被认为是一个椭圆锥,可以用公式近似为<sup>[1]</sup>

$$A = \lambda/4 + D/\sqrt{\varepsilon + 1}. \quad (3)$$

式中: $A$ 是深度 $D$ 处覆盖区域的半径; $\lambda$ 是天线的中心频率波长; $\varepsilon$ 是扫描媒质的介电常数。根据式(3),天线的中心频率会影响覆盖区域的大小,高频天线具有较短的波长,并将提供比低频天线更小或更集中的覆盖区域。天线中心频率还会影响穿透深度和分辨率。较高的频率会更快地衰减,因此 400 MHz 的天线将提供大约 2 m 深度的信息,而

900 MHz 的天线则不太可能提供超过 1 m 的有用信息。衰减还取决于媒质的磁导率和电导率。在土壤中,水分和矿物质影响很大,当水分、黏土和盐分含量高时,信号衰减较大。在潮湿、钙质或黏土丰富的土壤条件下,探地雷达的最大穿透深度显著小于理论深度<sup>[14]</sup>。具有较短波长的高频率天线具有较高的分辨率,能够检测小物体并且能区分间距小的物体<sup>[15]</sup>。因此,必须在穿透力和分辨率之间做出折衷,这是选择天线频率时的重要考虑因素。

## 2 材料与方法

### 2.1 样本选取

试验地点位于江南大学校内果园(以下简称江大果园)及江苏省苏州市吴中区东山镇双湾村枇杷果园(以下简称双湾果园),时间分别是 2019 年 11 月 1 日及 2019 年 11 月 21 日。江大果园为校内试验基地,占地面积约 1 334 m<sup>2</sup>,种植有枇杷、水蜜桃和梨等水果。因校园建设规划调整,该果园已疏于管理,果园土壤板结,果树营养不良,健康状况不佳。双湾果园面积大,种植有白玉枇杷、杨梅、桔子等水果和碧螺春茶叶,其中白玉枇杷的年产量超过 5 000 t。本试验分别选取江大果园 1 株枇杷树和 1 株水蜜桃树,以及双湾果园 1 株树龄超过 100 年的枇杷树,作为检测试验样本。其中,江大果园的 2 株样本经过目测,长势不佳,但还保持较旺盛的活力。双湾果园的古枇杷树已近枯死,检测目的在于分析该树的根系健康状况,确认其死亡原因。

### 2.2 检测方法

对每株被测样本,使用美国产 TRU 雷达根系检测仪,检测时雷达天线频率分别设置为 400 MHz 或者 900 MHz。不同频段的的天线根系检测深度也不同,400 MHz 适用于检测 0~3 m 深度范围的根系(最小可检测直径 2 cm),900 MHz 适用于检测 0~1 m 深度范围的根系(最小可检测直径 1 cm)。900 MHz 天线相比 400 MHz 天线的检测图像较清晰、灵敏,但是随着土壤深度的增加,雷达信号逐渐衰减,检测到的根系逐渐减少。根据生长环境和土质,选择合适的天线频率,以达到最佳检测效果。

在使用 TRU 检测仪检测果树根系过程中,需要根据果树生长环境如土壤类型、含水量等因素,对检测仪的参数(如系统增益、介电常数等)进行调节,提高根系图像的清晰度和根系检测的精度。

## 3 结果与分析

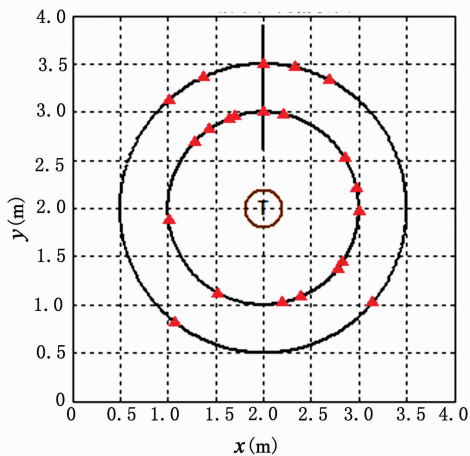
### 3.1 江大果园检测结果

图 2 是江大果园的枇杷试样检测现场,首先采用 900 MHz 频率检测细根分布,分别以距树干 1 m 和 1.5 m 为半径,利用探地雷达从正北方向按顺时针方向环绕树干依次扫描 1 周,图 3 是对应该频率的根系分布总览图,图 4 是对应的 B-scan 波形图。接着,采用 400 MHz 频率检测粗根分布,仍然分别以距树干 1 m 和 1.5 m 为半径,利用探地雷达从正北方向按顺时针方向环绕树干依次扫描 1 周,图 5 是对应该频率的根系分布总览图。图 3 的根系总览图包括 5 幅子图,左上角为根系分布俯视图,右上角为三维根系俯视图,下方的 3 幅子图依次为深度 0~10、10~20、20~25 cm 区域根系分布俯视图,其中,红色三角表示该位置存在根系。由图 3 可知,该果树试样的根系主要分布在 0~10 cm 深度,在 20 cm 以下存在少量根系。图中黑线为正北方向。结合图 4,可以发现该树根系稀疏,根基较浅,健康状况不良。图 5 同样包含 5 幅子图,其中左上角为根系分布俯视图,右上角为根系侧视平面图,下方的 3 幅子图依次为深度 0~20、20~40、40~50 cm 区域的根系分布俯视图,其中,红色三角表示该位置存在根系。从图 5 可见,该树的粗根同样稀少,主要分布在 20~40 cm 深度。经现场观察,被测试样的树干分支处存在虫蛀孔洞,有枯枝,树冠表面有少量枯叶,缺乏生机活力。根系检测结果与目视观察相符合。

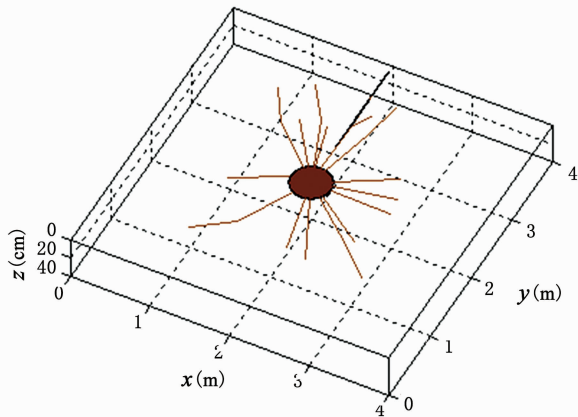


图2 江南大学果园枇杷试样检测现场

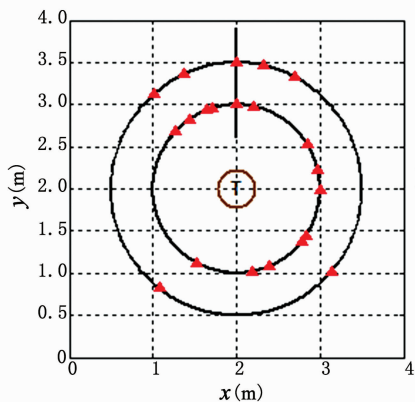
图 6 是江大果园水蜜桃树的根系检测现场。本次检测仪将雷达天线频率设置为 400 MHz,检测粗根分布情况。以树干为中心,分别以 1.0、1.5、1.8 m 为半径,从正北方位开始,依次按顺时针方向环绕树干扫描 1 周,获取检测区域内的根系扫描图像。所得根系分布总览图见图 7,图 8 为该试样果



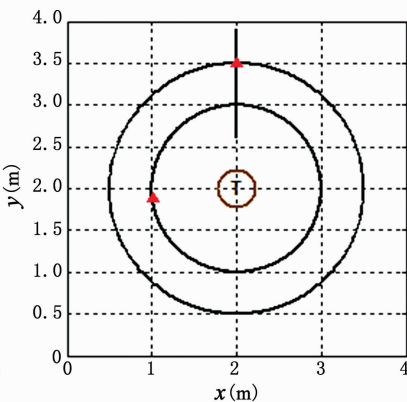
a. 根系检测俯视图



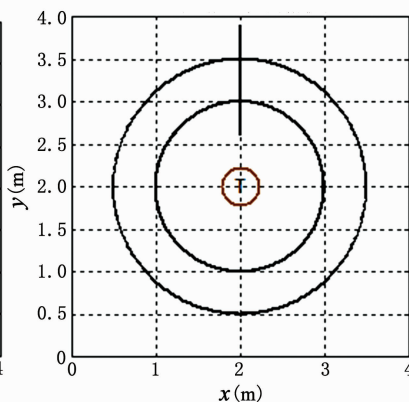
b. 根系形态图



c. 深度 0~10 cm 根系检测俯视图



d. 深度 10~20 cm 根系检测俯视图



e. 深度 20~25 cm 根系检测俯视图

图3 江南大学果园枇杷试样的根系分布总览图(900 MHz频率)

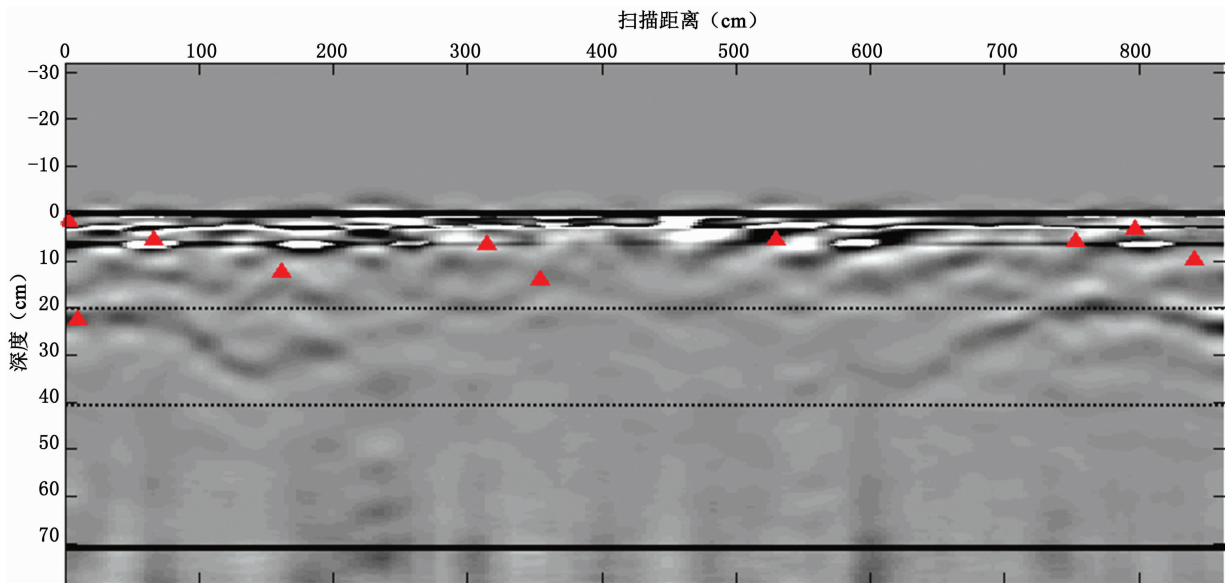


图4 江南大学果园枇杷试样 B-scan 波形(900 MHz 频率)

树沿最外圈的 B-scan 波形图。图 7 包含 5 幅子图，其中左上角为根系分布俯视图，右上角为根系侧视图，下方的 3 幅子图依次为深度 0~20、20~40、40~50 cm 区域的根系分布俯视图，其中，红色

三角表示该位置存在根系。从图 7 可见，该树的粗根数量稀少，40 cm 深度以上的位置几乎未见根系分布。结合图 8，粗根主要集中在 20~30 cm 深度。经现场观察，被测试样的树干存在虫蛀，枯叶较多，

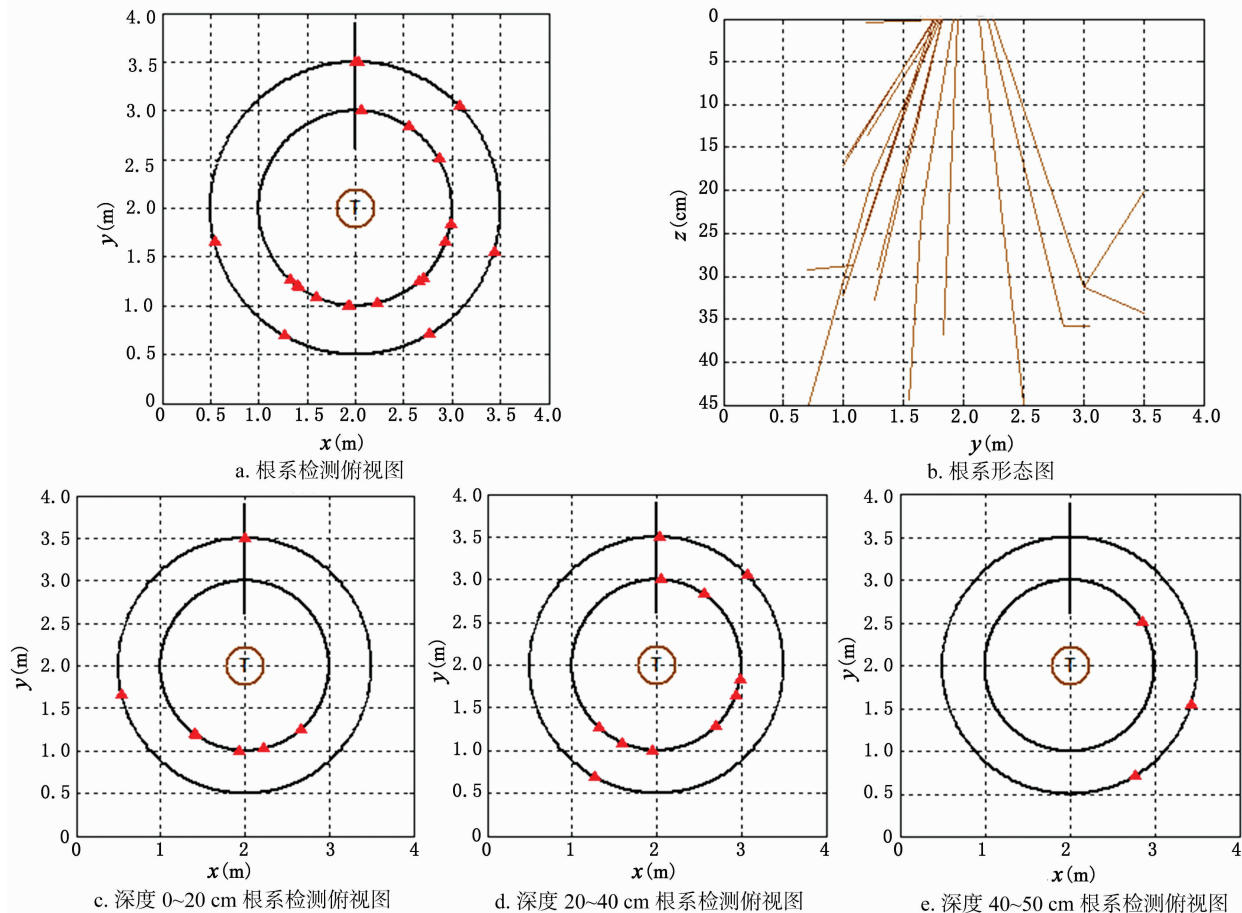


图5 江南大学果园枇杷试样根系分布总览(400 MHz 频率)



图6 江南大学果园水蜜桃试样

长势不良。检测结果证明了该果园缺乏有效管理, 果树营养不良, 病虫害防治不力。

### 3.2 双湾果园检测结果

图9是双湾果园枇杷树的根系检测现场, 据了解该树已超过100年的树龄。经目测发现该树树叶基本掉光, 接近死亡。为了分析其死亡原因, 本次检测将雷达天线频率设置为400 MHz, 重点检测粗根分布情况。受生长空间的影响, 以树干为中心, 分别以0.4 m和0.9 m为半径, 从正北方位开始, 依

次按顺时针方向环绕树干扫描1周, 获取检测区域内的根系扫描图像。所得根系分布总览图见图10, 图11和图12分别为该果树内外2圈的B-scan波形图。图10包含5幅子图, 其中左上角为根系分布俯视图, 右上角为根系侧视平面图, 下方的3幅子图依次为深度0~30、30~60、60~70 cm区域的根系分布俯视图, 其中, 红色三角表示该位置存在根系。从图10可见, 该树的粗根数量较少, 40 cm深度以下的区域根系更少。从图11和图12的B-scan波形图也可发现, 粗根主要集中在20~30 cm的深度。雷达检测结果与实际情况基本吻合。白蚁、蛴螬等地下害虫侵蚀加速了果树的死亡。

### 4 结论与讨论

果树根系的健康状况是影响水果品质和收成的极重要因素。为了提高果树养护管理的信息技术水平, 使用无损技术对果树根系进行健康检测具有重要意义。本研究选取江大果园和双湾果园的枇杷和水蜜桃试样开展试验, 利用美国产的探地雷

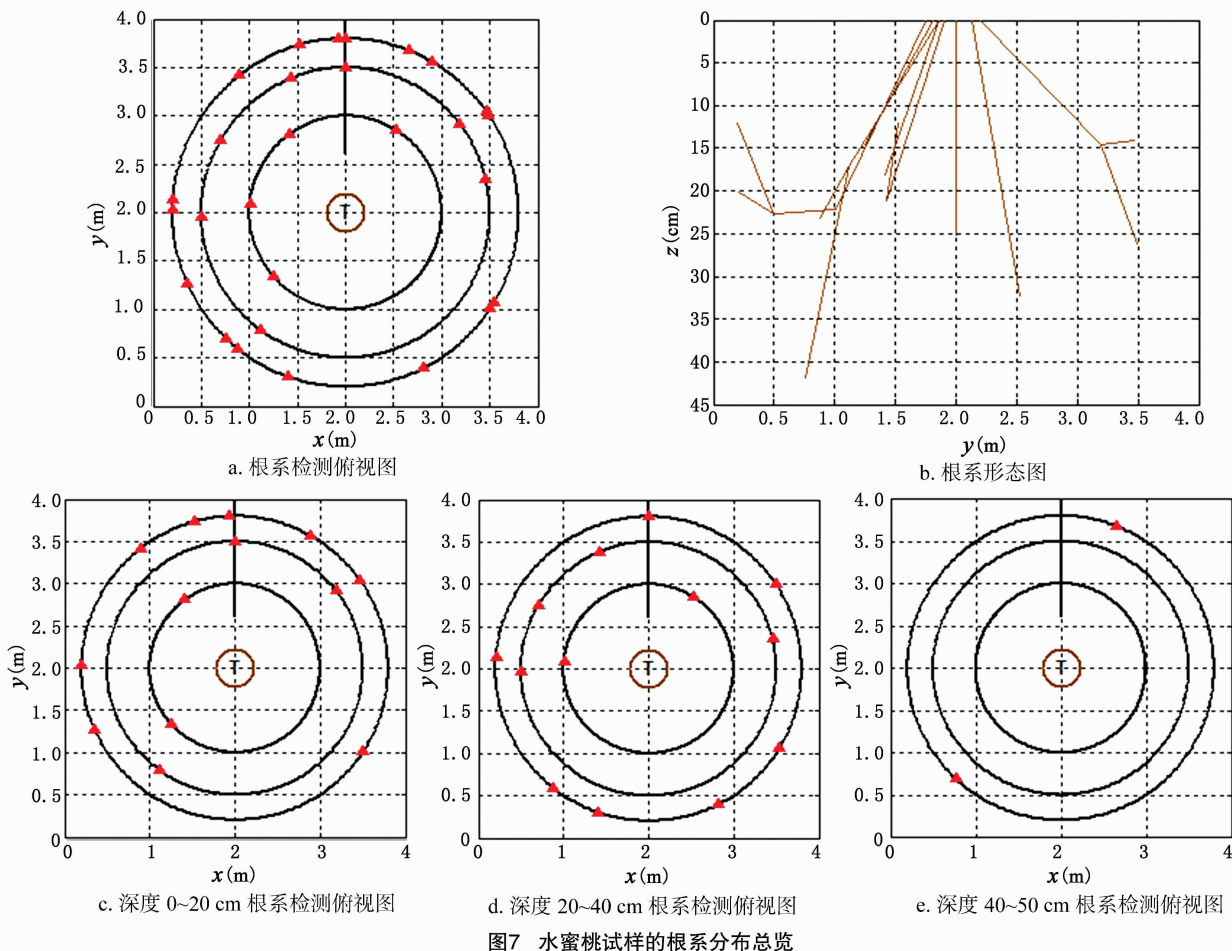


图7 水蜜桃试样的根系分布总览

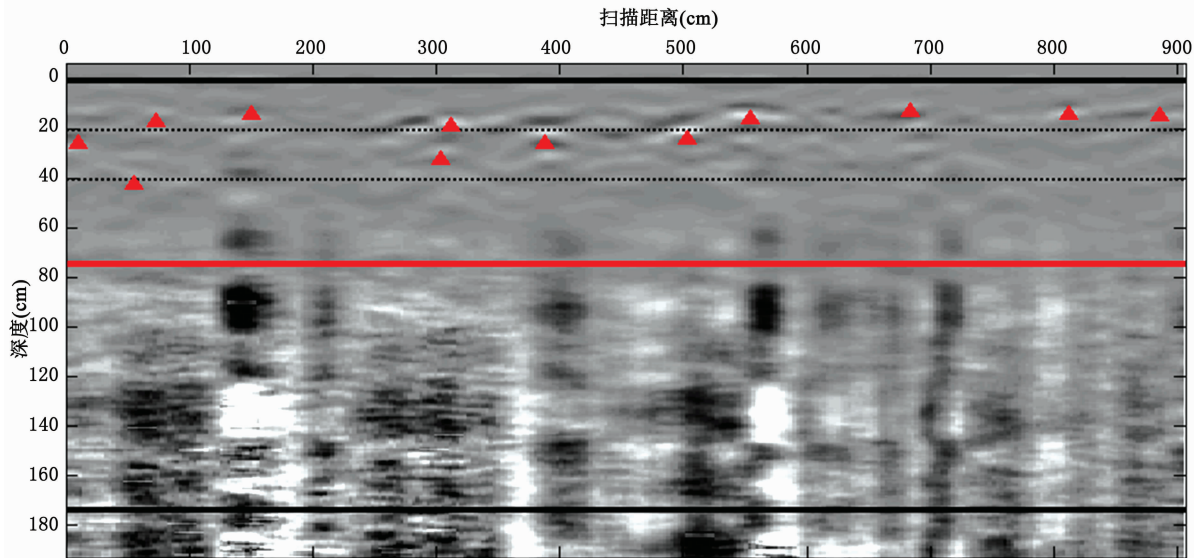


图8 江南大学果园水蜜桃试样的 B-scan 波形图

达检测仪 TRU 系统对果树根系分布情况进行检测。结果表明,TRU 系统可以准确地检测出果树根系的分布状况,并获取根系分布图,包括 3D 分布和不同深度的密度图,这对于果树根系的养护管理决策具有很好的参考作用。然而,本研究也发现,TRU 系统的检测

还存在局限性,值得在今后推广应用时注意和改进。

(1) 目前 TRU 检测结果仅能给出根系分布图,但还不能准确估算根系的直径大小,也不能确定根系的健康状况如根系死活、病害,不能识别相邻树木的根系混杂等。因此,还需要研发相关的数据处



图9 树干外观

理算法,解决上述问题,提高雷达检测的实用性。

(2) 雷达电磁波在土壤内部的传播规律还需要深入研究,例如电磁波在土壤内部的入射、折射、反射、衰减等规律。提高根系分布图像的准确性,使之与实际的果树根系分布更加相符。

(3) 将探地雷达与高光谱遥感、应力波、微钻阻力等技术相结合,实现从树冠、树干到根系三维立体的综合检测,能够更充分掌握树叶病害、树干内部缺陷和根系的健康状况,从而为果树的“对症下药、精准施肥、精确灌溉”服务。

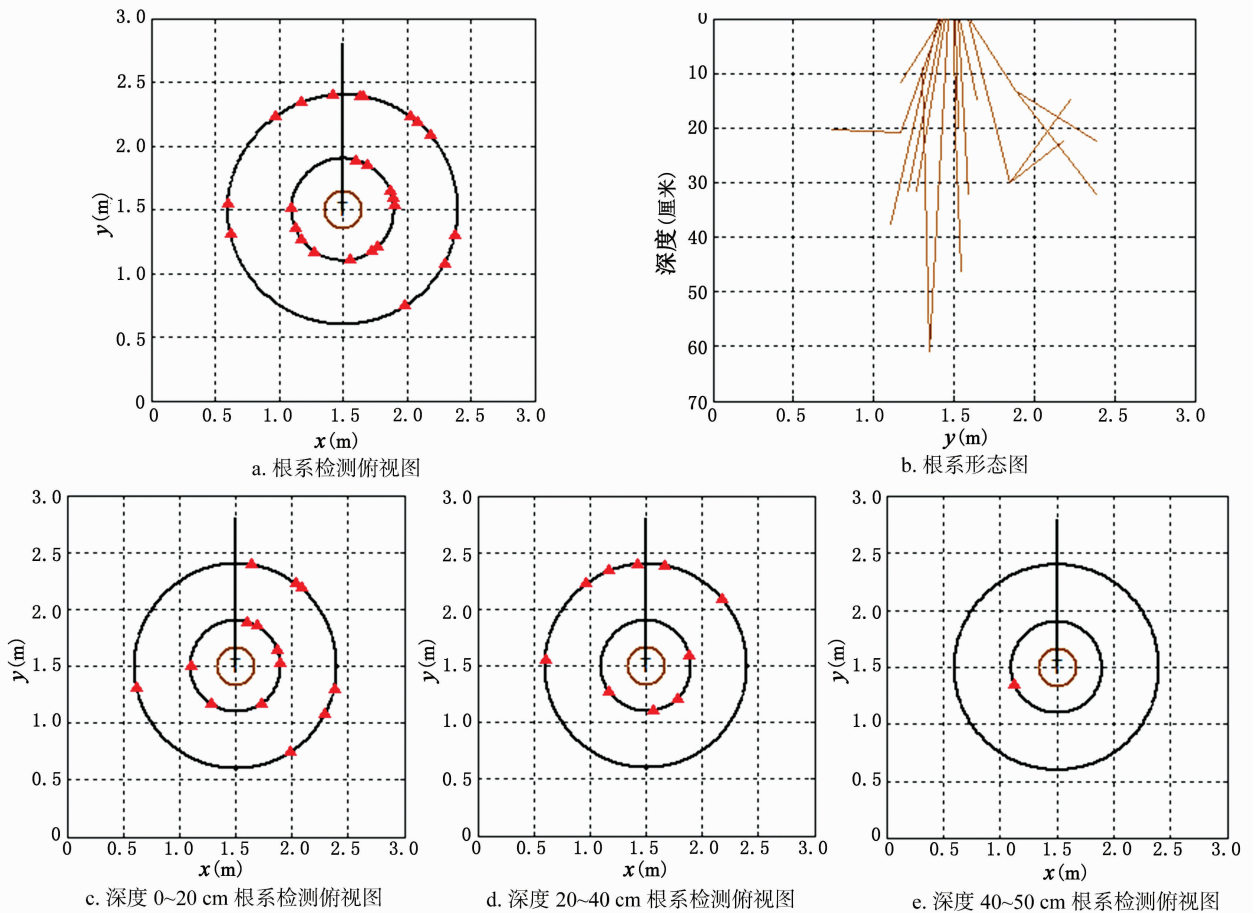


图10 双湾果园枇杷试样的根系分布总览

参考文献:

[1] de Vore S L. Ground - penetrating radar: an introduction for archaeologists[J]. *Geoarchaeology*, 1998, 13(5): 527 - 528.

[2] Mai T C, Razafindratsima S, Shartaï Z M, et al. Non - destructive evaluation of moisture content of wood material at GPR frequency [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 77: 213 - 217.

[3] Martínez - Sala R, Rodríguez - Abad I, Diez Barra R, et al. Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the

nondestructive GPR technique [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 903 - 911.

[4] Halabe U B, Agrawal S, Gopalakrishnan B. Nondestructive evaluation of wooden logs using ground penetrating radar[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2009, 24(4): 329 - 346.

[5] Butnor J R, Pruyn M L, Shaw D C, et al. Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges[J]. *Forest Pathology*, 2009, 39(5): 309 - 322.

[6] 肖夏阳, 文 剑, 肖中亮, 等. 基于雷达波的树木躯干内部缺陷探测识别[J]. *林业科学*, 2018, 54(5): 127 - 134.

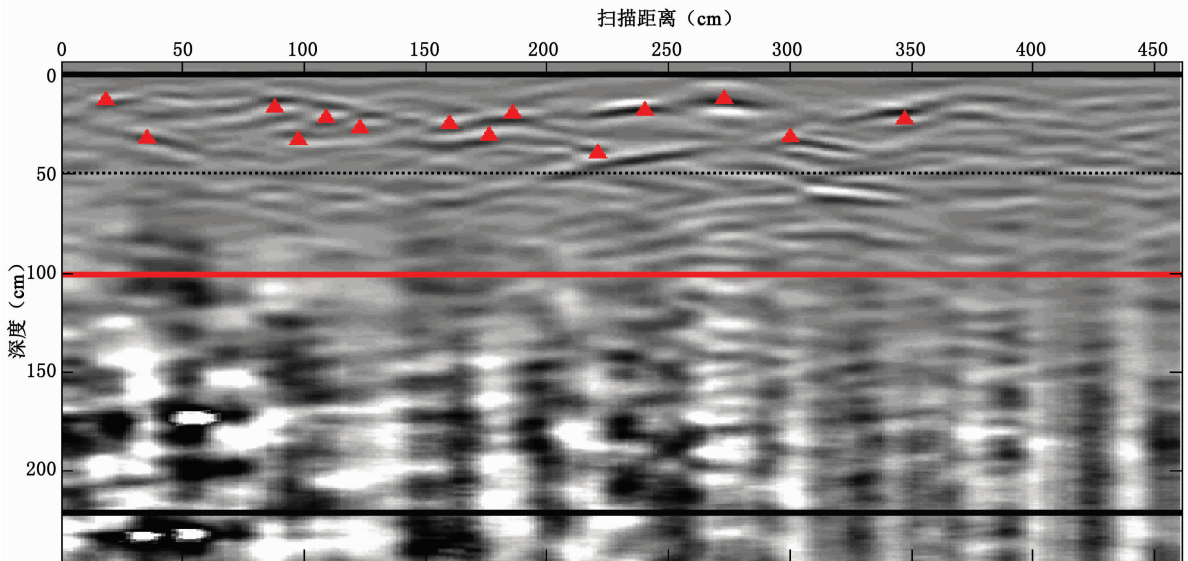


图11 双湾果园枇杷试样的内圈 B-scan 波形图

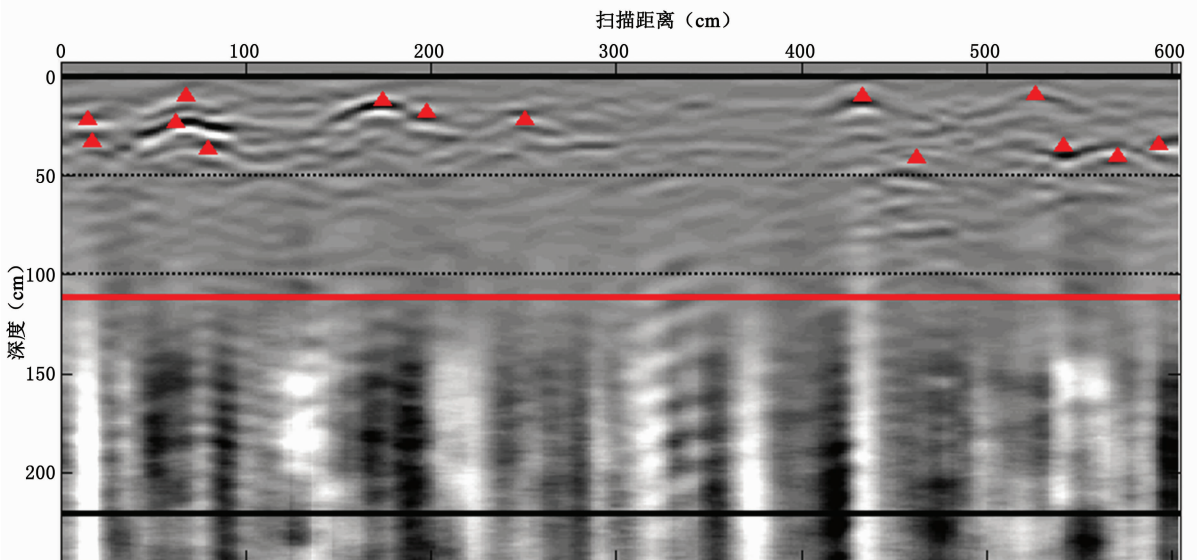


图12 双湾果园枇杷试样的外圈 B-scan 波形图

- [7] 文 剑,李伟林,肖中亮,等. 活立木内部缺陷雷达波检测研究[J]. 农业机械学报,2017,48(10):180-188.
- [8] Mihai A E, Gere A G, Curioni G, et al. Direct measurements of tree root relative permittivity for the aid of GPR forward models and site surveys[J]. Near Surface Geophysics, 2019, 17(3):299-310.
- [9] 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.
- [10] Altdorff D, Botschek J, Honds M, et al. In situ detection of tree root systems under heterogeneous anthropogenic soil conditions using ground penetrating radar[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2019, 25(3):05019008.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Warren C, Giannopoulos A, Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar[J]. Computer Physics Communications, 2016, 209:163-170.
- [14] 陈德莉, 黄春琳, 粟 毅. 用统计方法和 Hough 变换进行 GPR 目标检测与定位[J]. 电子学报, 2004, 32(9):1468-1471.
- [15] Daniels D J. Surface-penetrating radar[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1996, 8(4):165-182.