

## 基于探地雷达途径的小叶杨粗根空间分布特征研究

李 蒙<sup>1</sup>,徐金颢<sup>1</sup>,戴 刨<sup>1</sup>,董嘉明<sup>1</sup>,令狐高曼<sup>1</sup>,杨 洋<sup>2</sup>,康永祥<sup>1\*</sup>,  
张利利<sup>1</sup>,阮文贵<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2. 宝鸡市林业调查规划院,陕西 宝鸡 721000)

**摘要:**根系研究一直是生态学领域一项极具挑战性的工作,传统研究方法具有多种局限性,因此应用非侵入式方法开展根系研究具有重要实践意义。以黄河漫滩地生长的不同胸径大小(45~104.5 cm)小叶杨共40株为研究对象,应用探地雷达(GPR)技术测定粗根(粗度≥1 cm的根系)空间分布情况,并对1~2、2~3 cm和>3 cm 3个径级粗根进行分类统计,综合研究小叶杨粗根空间分布特征。结果表明,1)在垂直方向0~80 cm范围内,粗根密度以20~40 cm处最大,为8.17 roots/m,其中径级2~3 cm粗根密度占比由23.7%增加至47.2%。2)在水平方向5 m范围内,粗根密度逐渐下降,在1 m处密度值最大,为5.24 roots/m,其中径级1~2 cm粗根密度占比在2 m处最低,为49%,而径级2~3 cm和>3 cm在2 m处最高,分别为34%、17%。3)粗根密度随着胸径径级的增加由15.34 roots/m增加至28.16 roots/m,但不同胸径水平下各径级粗根密度特征存在明显差异,径级1~2 cm的粗根是差异存在的主要原因( $P=0.000$ )。4)粗根密度主要受到胸径和冠幅的影响,此外,在水平方向3~5 m范围和垂直方向20~40 cm处的粗根密度对胸径、冠幅和树高响应更敏感。研究结果表明,探地雷达可以有效实现对粗根空间分布及树体根径大小估算研究,并在以后的根系研究中有重要应用价值。

**关键词:**探地雷达(GPR);小叶杨;粗根密度;根系分布

中图分类号:S792.116

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0089-06

## Spatial Distribution Characteristics of the Coarse Roots of *Populus simonii* Based on Ground Penetrating Radar

LI Meng<sup>1</sup>,XU Jin-hao<sup>1</sup>,DAI Zhao<sup>1</sup>,DONG Jia-ming<sup>1</sup>,LINGHU Gao-man<sup>1</sup>,YANG Yang<sup>2</sup>,  
KANG Yong-xiang<sup>1\*</sup>,ZHANG Li-li<sup>1</sup>,RUAN Wen-gui<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Baoji Forestry Survey and Planning Institute, Baoji 721000, Shaanxi, China)

**Abstract:** Root research is a challenging endeavor in the field of ecology, traditional research methods have a variety of limitations. Therefore, the application of non-invasive method to carry out root research has important practical significance. In this study, 40 *Populus simonii* trees with different DBH (45—104.5 cm) growing on the floodplain of the Yellow River were selected as the research objects, and the ground penetrating radar (GPR) technology was applied to determine the spatial distribution of coarse roots (roots with thickness≥1 cm), and the three radial coarse roots of 1—2, 2—3 and >3 cm were classified to study the spatial distribution characteristics of coarse roots of *P. simonii* comprehensively. The results showed that 1) in the vertical range of 0—80 cm, the maximum density was 8.17 roots/m at 20—40 cm, among them, the proportion of coarse root density of diameter 2—3 cm increased from 23.7% to 47.2%. 2) The

收稿日期:2022-08-23 修回日期:2022-10-22

基金项目:国家林业公益性行业科研专项项目(201404302);西北农林科技大学重点科研专项(Z109021310)。

第一作者:李 蒙。研究方向:古树名木保护与复壮。E-mail:1376440262@qq.com

\*通信作者:康永祥,教授,博士生导师。研究方向:古树名木保护与复壮。E-mail:yxkang@nwsuaf.edu.cn

coarse root density decreased gradually within 5 m in the horizontal direction, and the maximum density was 5.24 roots/m at 1 m, among them, the proportion of coarse root density of diameter class 1–2 cm was the lowest at 2 m, which was 49%, while that of diameter class 2–3 and >3 cm was the highest at 2 m, which was 34% and 17%, respectively. 3) The density of coarse root increased from 15.34 roots/m to 28.16 roots/m with the increase of DBH class, but the characteristics of coarse root density of each diameter class were significantly different and the coarse root of diameter class 1–2 cm was the main reason for the difference ( $P=0.00$ ). 4) The coarse root density was mainly affected by DBH and crown width, in addition, the coarse root density in the horizontal range of 3–5 m and 20–40 cm in the vertical direction was more sensitive to DBH, crown width and tree height. The results indicate that GPR can effectively estimate the spatial distribution of coarse roots and root diameter of trees, and has important application value in root research in the future.

**Key words:** ground penetrating radar (GPR); *Populus simonii*; coarse root density; root distribution

粗根(直径>0.5 cm)是森林生态系统重要组成部分,在碳储存、物质循环及能量流动中发挥重要作用<sup>[1-2]</sup>。植物根系生长空间在地下深处,导致对根系观测十分不便<sup>[3]</sup>,传统根系研究方法包括挖掘、土钻、微根管技术等方法,这些方法不仅耗费人力、物力且具有破坏性,因此,亟需一种无损检测技术,而探地雷达(GPR)技术为研究林木地下根系分布特征提供了一种新可能<sup>[4]</sup>,GPR 通过向地下发射电磁波并接收反射信号来确定介质内部物质分布<sup>[5]</sup>:周广行等<sup>[6]</sup>借助探地雷达对陕北黄土区不同立地条件下河北杨粗根分布特征进行研究,蔡施泽等<sup>[7]</sup>在对上海市园林常用的 10 种乔木根系进行雷达波扫描基础上进一步研究了根系分布特征与土壤蓄渗关系,甘明旭等<sup>[8]</sup>运用探地雷达技术对黄帝陵内古柏粗根分布进行了探测。这些研究表明,探地雷达用于野外大面积粗根观测是可行的。

小叶杨(*Populus simonii*)又称明杨,杨柳科,杨属,青海地区广泛分布,一般生长于河流两畔、山谷等地带,因其抗性优良被广泛用于防治荒漠化、改善自然环境中<sup>[9-10]</sup>。目前针对其根系研究多集中在基于传统方法的细根方面:刘鑫等<sup>[11]</sup>采用根钻法对毛乌素沙地小叶杨人工林根系分布特征研究中发现0~40 cm 土层中根系最多,石坤等<sup>[9]</sup>采用挖掘法也得出了同样的结论。成向荣等<sup>[12]</sup>采用剖面法研究结果表明:浅层土壤中细根密度相对较大,且密度随水平距离增加逐渐降低。目前通过雷达波对其粗根分布特征的研究仍未见报道。本研究旨在无损探测小叶杨粗根空间分布,为小叶杨粗根研究提供实验依据,同时在 GPR 技术应用方面,探讨该技术在粗根检测中的应用方法,实现对粗根更准确、有效观测。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省同德县黄河漫滩地上,地理

坐标为 100°09'1.53"–100°10'1.33"E, 35°31'35.13"–35°32'33.23"N, 海拔 2 664~2 668 m, 属黄河谷地和河漫滩地貌, 地形为沙丘平地, 土壤类型主要为砾质冲积土和沙质冲积土。该地区属高原大陆性气候, 年日照时数 2 550~2 760 h, 年平均降水量 371.5 mm, 蒸发量 1 260.1~1 643.6 mm, 相对湿度 50%~61%, 属干旱半干旱地区。研究区内小叶杨分布分散, 距河道平均距离 171 m, 林分平均密度约 25 株/hm<sup>2</sup>。

### 1.2 研究对象

2022 年 6 月在研究区内选择试验样地并确定试验样木。共设置 10 个 30 m×30 m 调查样地, 为避免根系重叠, 选择距树干 5 m 内无其他小叶杨及大型灌、草干扰的单株作为试验样木, 并对其调查胸径、冠幅、树高, 共测定 40 株, 最小胸径 45 cm, 最大胸径 104.5 cm。最后按照胸径划分为 6 个等级, 基本信息调查结果见表 1。

表 1 小叶杨样本基本信息调查结果

Table 1 Investigation results of basic information of *P. simonii*

胸径 径级/cm	数量/ 株	胸径/ cm	冠幅/ m	树高/ m
45~54.9	9	49.83±2.48	8.2±1.52	10.59±2.5
55~64.9	8	59.83±3.49	10.75±1.27	14.58±3.11
65~74.9	6	70.0±2.53	11.18±1.92	14.88±2.82
75~84.9	7	79.5±2.66	10.78±1	14.83±2.69
85~94.9	5	88.83±2.64	12.08±1.49	16.17±1.89
95~104.9	5	99.67±4.12	12.54±1.18	17.77±3.59

### 1.3 研究方法

TerraSIRch™ 探地雷达系统(GSSI, USA)由 SIR-3000(Subsurface Interface Radar)计算机控制系统及 900Mhz(Model 3101D)天线组成, 该天线根系分辨率≥1 cm, 探深 1 m。采用同心圆扫描法, 以树干为中心, 从内到外依次为 1、2、3、4、5 m, 从正北方向开始, 顺时针扫描 1 圈, 回到正北方向结束(图 1)。

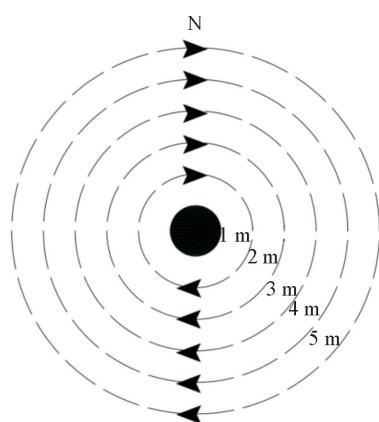


图1 根系探测示意图

Fig. 1 Root detection schematic diagram

#### 1.4 数据处理

1.4.1 根系数据处理 首先在探测前进行埋根试验,参考 Barton 等<sup>[4]</sup>埋根方法,在研究区内选择长度 1 m,粗细均匀的小叶杨根系,用游标卡尺每隔 10 cm 测量根系直径后取平均值,即该条根系的根径。同时在研究区内开挖一个 6 m×1.2 m×1.2 m 沙坑,将 8 条不同直径(1~4 cm)的根平行埋设在 30 cm 深度处,水平间隔为 70 cm,回填介质为沙土。建立 5 条间隔 20 cm、垂直于根长轴的测线,拖动雷达天线依次扫描,最后利用实际根径大小与雷达波参数反演,建立拟合方程,将雷达波参数转化成实际根径大小。其方程为

$$y = 1.44x - 1.087 \quad (R^2 = 0.862) \quad (1)$$

式中: $x$  为探地雷达电磁波穿透根系时间(ns); $y$  为根系直径(cm)。

通过 Reflexw 9.5 对每条扫描路线进行偏移处理,记录雷达波穿透根系时间(ns),据此计算每条对应根径值,同时将小叶杨粗根划分为 1~2、2~3、>3 cm 3 个径级<sup>[6]</sup>。

粗根密度统计利用 TreeWin 软件完成,垂直分布:0~20、20~40、40~60、60~80 cm,水平分布:1、2、3、4、5 m。逐个分析根系扫描文件,人为对根系判别后,由 TreeWin 软件计算每条测线垂直剖面上不同深度范围内根系点数,由此得到每条测线上根系密度值<sup>[8,13]</sup>,记为 roots/m。计算公式为

$$R_D = N_R / L \quad (2)$$

式中: $N_R$  为垂直剖面上不同深度范围内根系点数; $L$  为测线长度(m); $R_D$  为该深度范围内根系密度(roots/m)。

每棵树 5 圈测线根系点数量之和,除以总测线长度,作为总粗根密度。计算公式为

$$T_{RD} = (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5) / (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5) \quad (3)$$

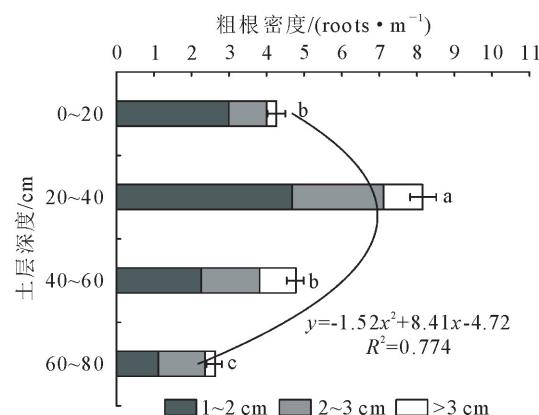
式中: $N_{1-5}$  为每圈测线根系点数; $L_{1-5}$  为每圈测线长度(m); $T_{RD}$  为总粗根密度(roots/m)。

1.4.2 统计分析 利用 Excel 进行数据统计整理,Spss19.0 软件进行数据处理,包括不同土层深度及水平距离上粗根密度多重比较、粗根密度与生长指标间相关性分析、方差分析等,图形绘制采用 Origin2021 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 小叶杨粗根密度垂直分布

在垂直分布上,随着土壤深度增加,胸径在 45~104.5 cm 的 40 株小叶杨样本木平均粗根密度先增加后减少。在 4 个深度处密度值分别为 4.26、8.17、4.73、2.61 roots/m,其中,20~40 cm 和 60~80 cm 土层处粗根密度与其他土层呈显著差异( $P < 0.05$ ),20~40 cm 处为最大值,60~80 cm 处密度值最小。 $0\sim20$  cm 与  $40\sim60$  cm 土层处粗根密度差异不显著( $P > 0.05$ ),但与其他土层呈显著差异( $P < 0.05$ )。与整体密度变化趋势相同,不同径级粗根密度也均先增加后减少,其中径级 1~2 cm 最低值位于 60~80 cm 处,为 1.12 roots/m;径级 2~3 cm 和 >3 cm 最低值均位于 0~20 cm 处,分别为 1.01、0.25 roots/m;3 个径级粗根密度最大值均位于 20~40 cm 处。



图柱上方不同小写字母表示不同土层内粗根密度差异的显著性, $P < 0.05$ 。

图 2 不同土层内小叶杨粗根密度分布情况

Fig. 2 Density distribution of coarse roots of *P. simonii* in different soil layers

不同土层中各径级粗根密度占比情况见图 3。在整个土层中,径级 1~2 cm 粗根占比最大,2~3 cm 次之,>3 cm 最少。随着土层深度增加,其中,径级 1~2 cm 粗根占比由 70.3%(0~20 cm)下降至 42.5%(60~80 cm);径级 2~3 cm 粗根占比由 23.7%(0~20 cm)增加至 47.2%(60~80 cm);径

级 $>3\text{ cm}$ 粗根占比最大值位于 $40\sim60\text{ cm}$ 土层内,占比为20%。

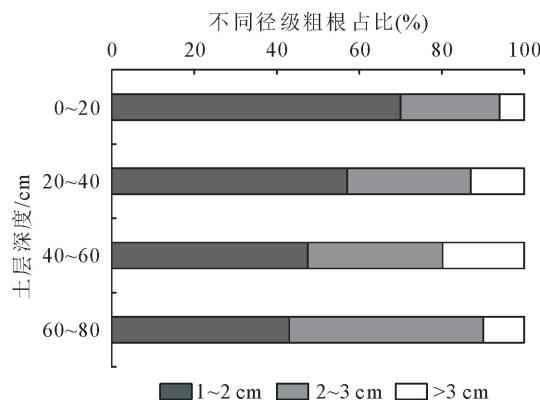
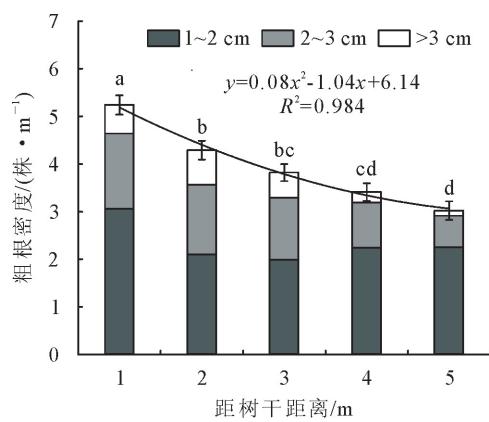


图3 不同土层内小叶杨不同径级粗根占比情况

Fig. 3 Proportion of coarse roots of different diameter classes of *P. simonii* in different soil layers

## 2.2 小叶杨粗根密度水平分布

在水平方向5 m范围内,40株小叶杨样本木平均粗根密度随着水平距离增加逐渐下降(图4),最大值位于1 m处,为5.24 roots/m,与其他4个距离相比呈显著差异( $P<0.05$ )。在5 m处密度值最低,为3.02 roots/m。不同径级粗根密度变化情况为:随着水平距离增加,径级1~2 cm粗根密度先降低后逐渐升高,在3 m处为最低值1.99 roots/m;径级2~3 cm粗根密度逐渐降低,在5 m处为最低值0.66 roots/m;而径级 $>3\text{ cm}$ 粗根密度呈先升高后降低的特点,在2 m处达最大值0.73 roots/m。



图柱上方不同小写字母表示距树干不同距离处粗根密度差异的显著性, $P<0.05$ 。

图4 距树干不同距离处小叶杨粗根密度分布情况

Fig. 4 Density distribution of coarse roots of *P. simonii* at different distances from the trunk

水平方向上不同径级粗根密度占比情况见图5。整体组成中:径级1~2 cm粗根占比最大,2~3 cm次之,>3 cm最小。随着水平距离增加,径级1~2 cm粗根占比先下降后增加,在2 m处占比最

低,为49%,而径级2~3 cm和 $>3\text{ cm}$ 粗根占比均先升高后降低,在2 m处,2个径级粗根密度占比达最大值,分别为34%、17%。

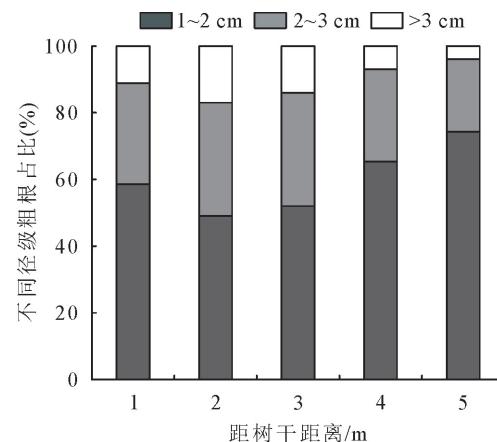


图5 距树干不同距离处小叶杨不同径级粗根占比

Fig. 5 Proportion of coarse roots of different diameter classes of *P. simonii* at different distances from the trunk

## 2.3 粗根密度与胸径径级的关系

6个胸径径级小叶杨粗根密度多重比较,结果见表2。随着胸径径级增加,总粗根密度和各径级粗根密度均逐渐增加。6个胸径径级中,3个不同径级粗根密度范围依次为7.91~18.67、4.78~7.03、1.76~2.46 roots/m。方差分析结果表明不同胸径径级小叶杨的不同径级粗根密度特征有明显差别,而1~2 cm粗根是差异存在的主要原因( $P=0.000$ )。

## 2.4 粗根密度与胸径、树高、冠幅的关系

将小叶杨粗根密度与胸径、树高、冠幅做相关性分析,结果表明,总粗根密度与树高、胸径、冠幅呈显著正相关关系(表3),排序为胸径( $r=0.827, P=0.000$ )>冠幅( $r=0.392, P=0.018$ )>树高( $r=0.384, P=0.021$ ),为探讨粗根密度受胸径、树高、冠幅的影响程度,将粗根密度与三者做逐步回归分析,得到小叶杨粗根密度与胸径、冠幅、树高最优回归模型: $T_{DR}=5.917+0.312D_{BH}-0.865W$ ( $R^2=0.736, P=0.000$ ),说明胸径、冠幅对粗根密度解释程度最高。

将小叶杨水平和垂直分布的粗根密度与胸径、树高、冠幅做进一步分析,结果表明(表4),所测5 m范围内的粗根密度均与胸径呈显著正相关关系( $P<0.01$ ),其中3~5 m范围内的粗根密度还与树高、冠幅呈显著正相关关系;垂直分布相关性结果表明,0~80 cm土层内的粗根密度均与胸径呈显著正相关,其中20~40 cm内的粗根密度还与树高、冠幅呈显著正相关关系。

表2 不同径级小叶杨粗根密度特征

Table 2 Characteristics of coarse root density of *P. simonii* with different DBH

胸径径级/cm	总密度/(roots·m <sup>-1</sup> )	粗根1~2 cm/(roots·m <sup>-1</sup> )	粗根2~3 cm/(roots·m <sup>-1</sup> )	粗根>3 cm/(roots·m <sup>-1</sup> )
45~54.9	15.34±1.45 c	8.29±0.96 c	5.3±0.89 c	1.76±0.43 a
55~64.9	14.47±2.84 c	7.91±1.66 c	4.78±1.2 c	1.78±0.35 a
65~74.9	16.67±3.59 c	9.72±2.2 c	5.14±1.56 c	1.81±0.39 a
75~84.9	20.45±2.72 b	12.72±2.07 b	5.82±0.96 ab	1.91±0.29 a
85~94.9	22.57±2.24 b	14.19±1.43 b	5.97±1.98 ab	2.41±0.84 a
95~104.9	28.16±3.78 a	18.67±2.68 a	7.03±1.04 a	2.46±0.7 a

注:不同小写字母表示不同径级小叶杨粗根密度差异的显著性( $P < 0.05$ )。

表3 总粗根密度与胸径、树高、冠幅相关性分析

Table 3 Analysis of correlation between coarse root density and DBH, tree height and crown width

TRD	DBH	H	W
r	0.827 **	0.384 *	0.392 *
P	0.000	0.021	0.018

注:TRD、DBH、H、W 分别为:总粗根密度,胸径,树高,冠幅,r 为 Pearson 相关系数,P 为显著性, \* \* 表示在 0.01 水平上显著相关,\* 表示在 0.05 水平上显著相关。下同。

表4 粗根水平和垂直分布与胸径、树高、冠幅相关性分析

Table 4 Correlation analysis of horizontal and vertical distribution of coarse roots with DBH, tree height and crown width

距离	DBH	H	W
1 m	0.704 **	0.264	0.382 *
2 m	0.758 **	0.312	0.316
3 m	0.827 **	0.365 *	0.411 *
4 m	0.837 **	0.443 **	0.415 *
5 m	0.803 **	0.444 **	0.339 *
0~20 cm	0.366 *	0.395 *	0.191
20~40 cm	0.763 **	0.380 *	0.495 **
40~60 cm	0.740 **	0.274	0.354 *
60~80 cm	0.670 **	0.281	0.299

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

基于探地雷达技术,对生长在黄河漫滩地不同胸径大小的小叶杨粗根(粗度 $\geq 1$  cm 的根系)进行无损探测。结果表明:1)在垂直方向 0~80 cm 范围内,平均粗根密度在 20~40 cm 处达最大值:8.17 roots/m,其中,径级 1~2 cm 粗根密度占比逐渐下降,径级 2~3 cm 和>3 cm 粗根密度占比有升高趋势。2)在水平方向 5 m 范围内,粗根密度随着水平距离增加逐渐减少,在 1 m 处密度值最大,为 5.24 roots/m,其中 1~2 cm 径级粗根密度占比先降低后升高,而 2~3 cm 和>3 cm 径级粗根密度占比均先升高后降低。3)粗根密度随着胸径径级增大而逐渐增加,但不同胸径水平下不同径级粗根密度特征有明显差别,而径级 1~2 cm 的粗根是差异存在的主要原因( $P = 0.000$ )。4)粗根密度主要受到胸径和

冠幅的影响,此外,在水平方向 3~5 m 范围内和垂直方向 20~40 cm 处的粗根密度对胸径、树高、冠幅的响应更敏感。

#### 3.2 讨论

3.2.1 粗根密度分布特征 根系在土壤中的空间分布决定了植物获取土壤资源的能力。本研究发现小叶杨粗根密度在 20~40 cm 处达最大值,而刘鑫<sup>[11]</sup>发现在 0~20 cm 土层处密度达最大值,考虑为不同时期河流冲击造成同一树种在不同立地条件下垂直分布特征的差异<sup>[14]</sup>。根系分布与土壤理化性质密切相关,王飞等<sup>[15]</sup>研究表明胡杨根区表层土壤的有机质、TN、电导率均高于其他土层,而该土层正是胡杨根系集中分布区,证明表层有利于根系生长。本研究发现随土壤深度增加,径级较粗的粗根密度有增加趋势,张良德等<sup>[16]</sup>在对刺槐粗根垂直分布研究中也发现其粗根密度呈“高—低—高”分布,证明粗根有垂直伸长的特性,在深层土壤中传导能力更强。在水平方向 5 m 范围内,在 1 m 处粗根密度值最大,这与成向荣等<sup>[12]</sup>研究结论一致,随着水平距离增加,径级 1~2 cm 的粗根密度占比先降低后增加,径级 2~3 cm 和>3 cm 的粗根密度占比先增加后减少,表明树干外围径级 1~2 cm 粗根密度的增加一定程度上是由于 2~3 cm 和>3 cm 的根系分生引起<sup>[6]</sup>,另外,不同径级的粗根分布可能受到河漫滩地土壤环境特殊性的影响。

3.2.2 粗根密度对胸径、树高、冠幅的响应 小叶杨粗根密度与自身生长特性密切相关,随着胸径径级增大,总粗根密度逐渐增大,而径级 1~2 cm 的粗根是造成不同胸径水平下不同径级粗根密度特征差异的主要原因,马理辉等<sup>[17]</sup>在对不同林龄枣林根系分布特征研究中也发现,粗根数量增长幅度要小于细根。此外,总粗根密度受胸径和冠幅的影响程度高于树高,这是由于胸径与树龄密切相关<sup>[18]</sup>,而在树木发育过程中,胸径对冠幅的正向作用在逐渐增强<sup>[19]</sup>。相关性分析结果表明水平方向 5 m 内和垂直方向 0~80 cm 处的粗根密度均与胸径呈正相关关系,吕亚亚<sup>[20]</sup>对兴安落叶松根系分布研究也发现,随着林龄

增加,树木水平方向上根系数量也呈增加趋势。

与传统根系研究方法相比,探地雷达具有方便、直观等特点,本研究基于探地雷达实现了对小叶杨根系无损探测并反演根径大小,可为其他树种无损检测提供参考。目前国内对于探地雷达在植物探测方面还处于发展阶段,仍面临诸多考验,随着系统改进、分析软件系统升级,探地雷达在植物探测领域将发挥更大效能。

### 参考文献:

- [1] 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]. *Journal of Soil Science Society of America*, 2003, 67(67): 1607-1615.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] BARTON C V, MONTAGU K D. Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions[J]. *Tree Physiol*, 2004, 24(12): 1323-1331.
- [5] 郭立,范碧航,吴渊,等. 探地雷达应用于植物粗根探测的研究进展[J]. 中国科技论文,2014,9(4):494-498.
- [6] 周广行,朱清科,任正龕,等. 基于 GPR 的陕北黄土区河北杨粗根分布特征研究[J]. 水土保持学报,2016,30(2):346-351.  
ZHOU G X, ZHU Q K, REN Z Y, et al. Research on the distribution characteristics of coarse roots of *Populus hopeiensis* in the Loess Area of Northern Shaanxi based on GPR[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 346-351. (in Chinese)
- [7] 蔡施泽,乐笑玮,谢长坤,等. 3 种上海市常见古树粗根系分布特征及保护对策[J]. 上海交通大学学报:农业科学版,2017,35(4):7-14.  
CAI S Z, YUE X W, XIE C K, et al. Roots distribution characteristic and protection strategies of 3 kinds of ancient trees in Shanghai[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2017, 35(4): 7-14. (in Chinese)
- [8] 甘明旭,孙涛,康永祥,等. 应用探地雷达对黄帝陵古柏树干和粗根的研究[J]. 西北林学院学报,2016,31(4):182-187.  
GAN M X, SUN T, KANG Y X, et al. Examination of the trunk cavity and thick root distribution of ancient *Platycladus orientalis* in the Tomb of Yellow Emperor by ground penetrating radar technology[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 182-187. (in Chinese)
- [9] 石坤,贾志清,张洪江,等. 青海共和盆地典型固沙植物根系分布特征[J]. 中国水土保持科学,2016,14(6):78-85.  
SHI K, JIA Z Q, ZHANG H J, et al. Root distribution characteristics of typical sand-fixing plants in Gonghe basin of Qinghai Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(6): 78-85. (in Chinese)
- [10] 拜永兰. 青海省小叶杨生长规律及病害防治研究[J]. 农家参谋,2021,(12):149-150.
- [11] 刘鑫,满秀玲. 毛乌素沙地梁地上小叶杨根系分布特征[J]. 中国水土保持科学,2008(4):48-53.  
LIU X, MAN X L. Distribution patterns of root systems of *Populus simonii* Carr. in highland of Mu Us sand land[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008(4): 48-53. (in Chinese)
- [12] 成向荣,黄明斌,邵明安. 沙地小叶杨和柠条细根分布与土壤水分消耗的关系[J]. 中国水土保持科学,2008,6(5):77-83.  
CHENG X R, HUANG M B, SHAO M A. Relationship between fine roots distribution and soil water consumption of *Populus simonii* and *Caragana korshinkii* plantation on sandy land[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(5): 77-83. (in Chinese)
- [13] 纪文文,王立海,时小龙,等. 基于树木雷达的小兴安岭典型树种粗根分布及其影响因素研究[J]. 北京林业大学学报,2020, 42(5):33-41.  
JI W W, WANG L H, SHI X L, et al. Coarse root distribution and its influencing factors of typical species in lesser Xing'an range based on tree radar unit[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(5): 33-41.
- [14] 杨喜田,杨小兵,曾玲玲,等. 林木根系的生态功能及其影响根系分布的因素[J]. 河南农业大学学报,2009,43(6):681-690.  
YANG X T, YANG X B, ZENG L L, et al. Ecological functions of tree root system and influencing factors on its distribution [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2009, 43(6): 681-690. (in Chinese)
- [15] 王飞,马剑平,马俊梅,等. 民勤不同林龄胡杨根区土壤理化性质及相关性分析[J]. 西北林学院学报,2020,35(3):23-28,54.  
WANG F, MA J P, MA J M, et al. Physicochemical properties and correlations of the soils in the *Populus euphratica* forests with different ages in Minqin[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(3): 23-28,54. (in Chinese)
- [16] 张良德,徐学选. 延安燕沟流域刺槐根系分布特征[J]. 西北林学院学报,2011,26(2):9-14.  
ZHANG L D, XU X X. Distribution characters of *Robinia pseudoacacia* root in Yangou watershed in Yan'an[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(2): 9-14. (in Chinese)
- [17] 马理辉,吴普特,汪有科. 黄土丘陵半干旱区密植枣林随树龄变化的根系空间分布特征[J]. 植物生态学报,2012,36(4): 292-301.  
MA L H, WU P T, WANG Y K. Spatial pattern of root systems of dense jujube plantation with jujube age in the semiarid loess hilly region of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(4): 292-301. (in Chinese)
- [18] 周凤艳. 沙地樟子松人工林林木胸径、冠幅等生长指标与林龄相关性研究[J]. 防护林科技,2017(2):19-21.
- [19] 卢妮妮,王新杰,张鹏,等. 不同林龄杉木胸径树高与冠幅的通径分析[J]. 东北林业大学学报,2015,43(4):12-16.  
LU N N, WANG X J, ZHANG P, et al. Path analysis between diameter at breast height, height and crown width of *Cunninghamia lanceolata* in different age[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(4): 12-16. (in Chinese)
- [20] 吕亚亚. 兴安落叶松根系结构及固土力学特性分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.