

应用探地雷达对黄帝陵古柏树干和粗根的研究

甘明旭¹, 孙 涛², 康永祥^{1*}, 刘星旦¹, 李小军³

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100; 2. 陕西南宫山旅游发展有限责任公司, 陕西 岚皋 725400; 3. 黄帝陵管理局, 陕西 黄陵 727300)

摘 要:运用探地雷达技术对黄帝陵轩辕庙内 19 棵古柏的树干空洞和粗根分布规律进行了检测。轩辕庙 19 棵古柏均有不同程度的空洞情况, 其中 1、4、12、16、17 号相对空洞程度较高, 有向重度空洞方向发展的趋势; 3、5、8、18 号属轻度空洞。粗根在垂直方向上主要分布在 0~60 cm 土层, 水平方向上粗根主要分布在 4 m 范围内。经过对比粗根分布规律发现, 古柏生长健康状况与粗根分布的健康状况相关: 在水平方向上健康和亚健康古柏分布范围>不健康古柏, 并且在垂直层次中粗根密度由大到小依次是健康>亚健康>不健康; 人为踩踏区域与未踩踏区域相比, 粗根密度低于未踩踏区域; 经过根系复壮的古柏较未经过根系复壮的古柏粗根密度更大, 并且水平分布范围相对较广。

关键词:探地雷达; 黄帝陵; 古树名木; 树干空洞; 粗根

中图分类号:S758.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)04-0182-06

Examination of the Trunk Cvity and Thick Root Distribution of Acienc *Platycladus orientalis* in the Tomb of Yellow Emperor By Ground Penetrating Radar Technology

GAN Ming-xu¹, SUN Tao², KANG Yong-xiang^{1*}, LIU Xing-dan¹, LI Xiao-jun³

(1. Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Shaanxi Nangongshan Mountain Tourism Development Company, Langao, Shaanxi 725400, China;

3. Administration of the Yellow Emperor Tomb, Huangling, Shaanxi 727300, China)

Abstract:Ground penetrating radar technology was applied to examine the trunk decay situations and the thick root distribution characteristics of the ancient *Platycladus orientalis* trees occurring in Xuanyuan Temple of the Tomb of Yellow Emperor. Cavities were observed in 19 ancient *P. orientalis* trees with different degrees, among which trees of No. 1, 4, 12, 16, and 17 were more serious, and had a tendency to develop more severe holes. No. 3, 5, 8, and 18 trees presented less serious degrees of trunk cavity. The thick roots mainly distributed vertically in 0—60 cm soil layer and horizontally 4 m around the trunk. After comparing the distribution patterns of the thick roots, it was found that the health status of the trees and roots were closely correlated: in the horizontal direction, the distributions of health and sub-health thick roots were greater than unhealthy roots, and in the vertical hierarchy thick root density decreased in the order of healthy> sub-health> unhealthy. The thick roots density of the area without trampling was greater than the area with human trampling. After the treatments of root rejuvenation, the thick roots density and horizontal distribution area increased.

Key words:ground penetrating radar; the tomb of Yellow Emperor; ancient and famous tree; the hollow of trunk; thick root

收稿日期:2015-09-30 修回日期:2015-11-29

基金项目:国家林业公益性行业科研专项项目“黄河中游 I 级古树名木保护关键技术研究”(201404302);西北农林科技大学校重点科研专项(Z109021310)。

作者简介:甘明旭,男,硕士研究生,研究方向:古树名木的保护与复壮研究。E-mail:ganmingxu123@126.com

*通信作者:康永祥,男,教授,研究方向:古树名木的保护与复壮。E-mail:yxkang@nwsuaf.edu.cn

古树名木是历史遗存的活化石,具有文化历史和科学研究等多方面的价值,保护古树名木使其能够永续繁荣地生长具有重要意义。黄帝陵古柏群是黄帝陵最有价值的历史,也是中华民族五千年悠久历史的见证。近年来,由于古柏自身生理机能下降、人为干扰增加等因素,导致古柏生境受损、土壤板结等,使得古柏群日趋衰弱,部分古柏已经濒临死亡^[1]。

树干空腐和根系衰退威胁着古树的生长,是古树保护的关键问题。关于树干空腐的检测方法,杨慧敏^[2](2010)对常用的超声波断层成像法、应力波检测法、电阻断层成像检测法、红外检测法、射线检测法、探地雷达法(ground penetrating radar 简称 GPR)进行了对比,发现这 6 种立木腐朽二维成像检测方法既有各自的优点,也有各自的局限性。关于粗根分布的研究,J. Hruska^[3](1999)、J. R. Butnor^[4-5](2001)运用 GPR 技术对根系研究认为,与挖掘法相比不仅省时省力,而且测量结果较准确($R^2=0.81, p=0.0004$)。常规的检测方法都对古树有损害,GPR 技术以其无损、快速、准确的优点,广泛地应用于古树名木树干空腐和地下粗根分布的检测。崔喜红^[6](2009)对探地雷达探测原理及其在植物根系形态绘图、根径大小和生物量测量等几个方面中的应用研究进行了综述,认为基于无损性探测的特点,探地雷达已被证明是一种能够应用于根系探测的潜在工具。因此,目前的 GPR 技术是合适的研究根系分布的工具。

黄帝陵管理局 2011 年对黄帝陵轩辕庙内 5 棵古柏进行过根系复壮施工,复壮效果从古柏外观表现良好,然而从未对根系生长情况进行过全面的检测,这是首次对古柏使用 GPR 进行无损检测。笔者主要运用 GPR 技术,对轩辕庙内 19 棵古柏的树干和树根进行检测调查,旨在无损树木的条件下,对古柏的健康状况进行准确的测定,探究古树根系分布的规律性,提出相应的保护措施,并且为后续古树保护、灌水施肥、复壮施工提供科学可靠的数据依据。

1 研究区概况

研究区域位于陕西省黄陵县黄帝陵景区轩辕庙内,地理坐标 $109^{\circ}15'E, 35^{\circ}34'N$ 。属于陕北黄土高原丘陵沟壑区的低山丘陵地貌。局部地形起伏较大,最高点海拔 1 762.2 m,最低海拔 740.0 m,平均海拔 1 200 m。该地区气候较温和,属于中温带大陆性季风气候。年平均气温 $9.4^{\circ}C$,极端最高气温 $36.5^{\circ}C$ (8 月),极端最低气温 $-21.4^{\circ}C$ (1 月上旬),年降水量 568.8 mm,全年无霜期 172 d。土壤以黄

土为主,土层较厚,乔木以侧柏为主,间杂少量刺槐、油松混交,灌木有少量的酸枣,草本主要有禾本科、菊科蒿类等。

2 材料与方法

2.1 研究对象

位于轩辕庙内的 1~19 号古柏(1~19 的树号是按照轩辕庙内古柏已编的实际编号),平均树龄在 3 000 a 以上,最大胸径(1 号手植柏)达到 2.67 m,最小胸径(6 号)为 1.11 m。整个黄帝陵古柏群有侧柏 8 万余株,树龄千年以上的达 3 万余株,这 19 棵古柏是黄帝陵古柏群中树龄最大、生长状况最令人堪忧、保护价值最大的古柏,一直以来管理局做了大量保护工作。2011 年对生长状况最弱的 15~19 号古柏,采取了大规模的根系复壮试验,复壮效果良好。

2.2 试验原理

探地雷达探测的工作原理是通过特定仪器向地下发送脉冲形式的高频电磁波。电磁波在介质中传播,当遇到存在介电常数差异的地下目标体,如空洞、分界面等时,电磁波便发生反射,返回到地面时由接收天线所接收。在对接收天线接收到的雷达波进行处理和分析的基础上,根据接收到的雷达波形、强度、双程时间等参数便可推断地下目标体的空间位置、结构、电性及几何形态,从而达到对地下隐蔽目标物的探测^[7]。本研究采用美国 Tree radar 公司生产的 TRU 雷达测树系统,天线采用 400 MHz 和 900 MHz 2 种规格^[6]。

2.2.1 树干扫描 对树干腐朽程度的扫描,采用 900 MHz 天线对多重高度测量,即每棵树测量 5 个不同高度,从上到下高度依次是:1.8、1.5、1.2、0.9、0.6 m(图 1),从正北方向开始,顺时针扫描一圈到正北方向结束。在扫描前,提前用细绳标记每层高度的位置,保证扫面在同一高度,并且测量各层高度对应的树干周长,在扫描过程中速度适度,紧贴树皮顺时针旋转,起始位置保证在正北方向,方便以后分析腐朽空洞的方位。如遇到表皮凹坑或者空洞,快速通过,允许数据偶尔少量的缺失,但是需要记录并且在雷达野外电脑标记。为保证结果可靠,减少人为误差,同一高度重复 2 次,取平均值。

2.2.2 根系扫描 对古柏根系的扫描采用 400 MHz 和 900 MHz 天线 2 种规格分别测量,2 次测量路线保持一致。400 MHz 天线主要探测 1 m 以下的深根,理论最小根系分辨直径为 2 cm,探深达 3 m;900 MHz 天线用于探测 1 m 以上的表层根,理论最小分辨直径为 1 cm,探深 1 m。对根系分布特

征的扫描采用的是同心圆法,以树干为中心,从里到外依次是 1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 m(图 2),从正北方向开始,顺时针扫描一圈到正北方向结束。在扫描前,提前准备好 1 根测绳,测量好各圈的扫描线路,然后从正北方向开始顺时针旋转扫描,做好数据的清晰记录,每圈重复扫描 2 次。

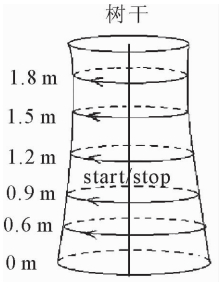


图 1 树干扫描示意(正视图)

Fig. 1 Trunk scanning diagram (front view)

2.3 数据处理

2.3.1 雷达图像处理 探地雷达数据处理的目的

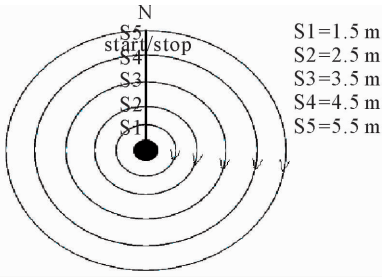
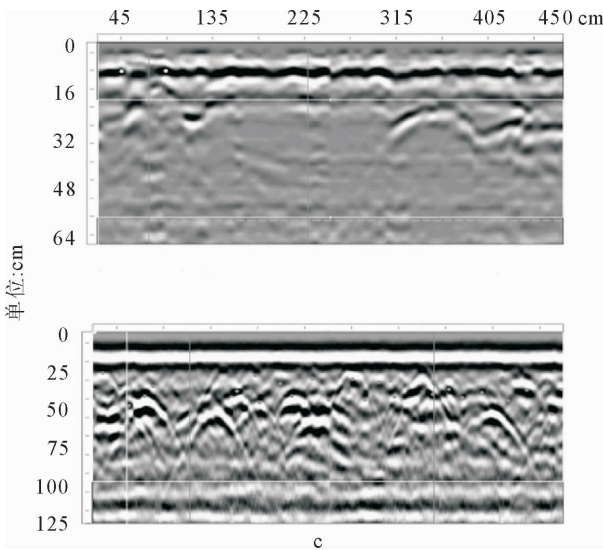
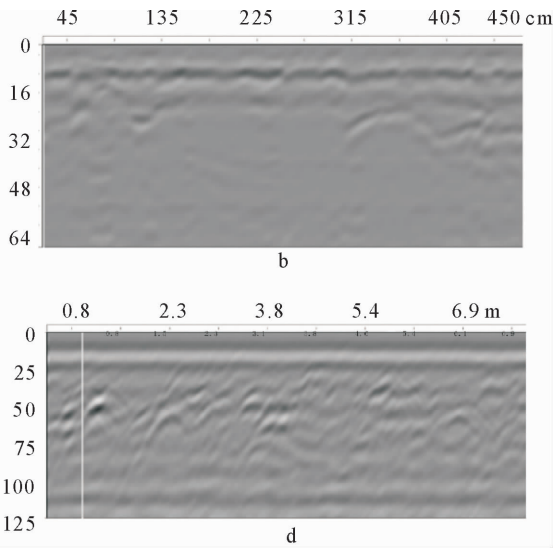


图 2 根系扫描示意(俯视图)

Fig. 2 Root scanning diagram (top view)



注:a 和 b 是树干空洞扫描,a 为处理后图像,b 为原始图像。c 和 d 是根系扫描图像,c 为处理后图像,d 为原始图像。

图 3 雷达扫描 B-Scan 图像处理效果对比

Fig. 3 The comparison of B-scan image after treatment

2.3.2 图像判读

2.3.2.1 树干空洞的判读 常见 GPR 的数据记录一般都是一维(A-Scan)、二维(B-Scan)或三维(C-Scan)数据图,本研究采用美国 Tree radar 公司的 Tree Win 树木雷达图像处理软件进行图像处理,把接收信号的幅度通过灰度级描述时,可以产生一个二维的 B-Scan 图像,图像描述了土壤的一个垂直切面,相应的深度轴指向下方^[8]。雷达图像经过滤波处理后,通过 B-Scan 图像与波形图交互判读的方法,对树干已空腐、早期腐烂、边材空腐、良性部分的 4 种类型进行判读,判读完成后,各类型区域产生不

主要是压制各种噪声,增强有效信号,提高图像信噪比,帮助解释人员对资料进行有效的地质解释。探地雷达的数据处理流程一般分 2 部分:第 1 部分为数据编辑,包括数据合并、测线方向一致化、漂移处理;第 2 部分是探地雷达图像增强处理,包括数字滤波、振幅恢复、均衡、归一化、小波变换、时深转换等^[8]。本研究采用美国 Tree radar 公司的 Tree Win 植物专用雷达图像处理软件进行图像处理(图 3)。

同颜色的示意图(图 4)。树干截面面积计为 S ,空洞面积计为 S' ,空洞率 $P = S'/S \times 100\%$ 。 $P=0$ 为无空洞, $P \leq 25\%$ 为轻度空洞, $25\% \leq P \leq 50\%$ 为中度空洞, $P \geq 50\%$ 为重度空洞^[9]。

2.3.2.2 树根分布的判读 雷达图像经过滤波处理后,通过 B-Scan 图像与波形图交互判读的方法,分别对 400、900 MHz 天线分层寻找探测到的树根。综合 2 天线分层 0~30、31~60、61~90、91~120、121~150 cm 计算根系密度。Tree Win 软件可以自动按照用户意愿分层计算粗根密度。每条雷达天线扫描线的长度(l),某层探测根系的数量为 n ,则

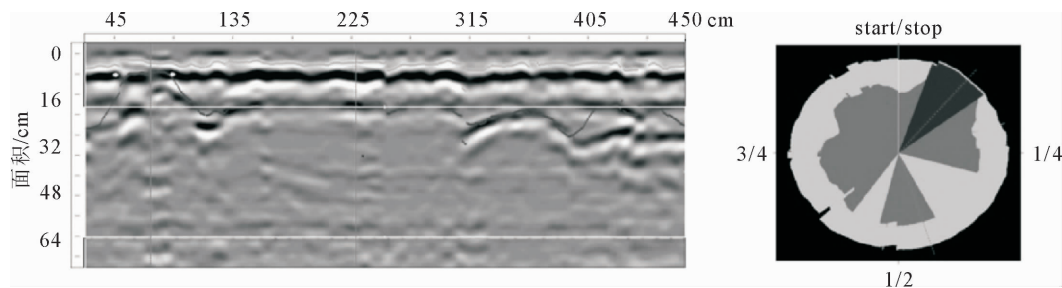


图 4 树干空腐面积示意

Fig. 4 Trunk cavity area

该层的根系密度(ρ ,单位:条 \cdot m $^{-1}$)为:

$$\rho=n/l \tag{1}$$

对采集的数据按照分类对比的方法,重复多次分析判读,取平均值,按照古柏的立地条件分为健康状况不同、人为踩踏程度不同、经过复壮与否比较其粗根分布的差异性,用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 做统计分析制图处理。

3 结果与分析

3.1 树干空洞的结果与分析

对 19 棵古柏树干扫描,经过数据分析后,按照良性部分从低到高排列(表 1)。结果显示轩辕庙内 19 棵古柏全部都有不同程度的腐朽,良性部分剩余量 3 号树最高 84.92%,17 号树最低 54.93%,平均

良性部分剩余量 67.67%,平均非良性部分高达 32.33%。在 19 棵古柏中中度空洞有 15 棵,占比 78.95%,轻度空洞有 4 棵,占比 21.05%。中度空洞古柏占比较高,其中 17、12、4、1、16 号相对空洞程度较高,有向重度空洞方向发展的趋势。

树干腐朽的主要原因是树龄^[10],树龄越高,古树自身的生理功能越弱,造成内部空洞。此外,病虫害也是树干腐朽的重要因素,如天牛等蛀干类害虫及干腐菌等病害。天牛主要从主干和枝干直接危害古柏,干腐菌则从伤口侵入,首先引起树干表皮溃疡腐烂,然后向木质部发展,最终形成开放式的空洞。经调查发现本研究中古柏空洞多发生于主干处,古柏千年的树龄,是不可避免的首要因素;其次,黄帝陵古柏存在蛀干害虫天牛的危害也不容忽视。

表 1 古柏树干空洞各部分占比

Table 1 Trunk cavity portions

树号	胸高 断面积/m ²	已空腐		早期腐烂		边材空腐		良性部分		空洞程度
		面积/m ²	百分比/%	面积/m ²	百分比/%	面积/m ²	百分比/%	面积/m ²	百分比/%	
17	2.27	0.56	24.46	0.47	20.61	0.00	0.00	1.25	54.93	中度空洞
12	2.01	0.62	30.72	0.19	9.42	0.09	4.59	1.11	55.27	中度空洞
4	2.01	0.86	42.76	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	57.24	中度空洞
1	5.31	1.48	27.95	0.65	12.18	0.09	1.77	3.08	58.09	中度空洞
16	1.33	0.32	24.49	0.22	16.68	0.00	0.00	0.78	58.83	中度空洞
11	2.01	0.69	34.26	0.05	2.51	0.00	0.00	1.27	63.22	中度空洞
15	2.01	0.60	29.79	0.12	5.75	0.00	0.00	1.30	64.46	中度空洞
2	1.54	0.48	31.46	0.04	2.75	0.02	1.24	0.99	64.54	中度空洞
10	2.54	0.64	25.15	0.26	10.19	0.00	0.00	1.64	64.66	中度空洞
14	1.54	0.53	34.44	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	65.56	中度空洞
9	2.01	0.59	29.12	0.06	3.00	0.00	0.00	1.36	67.87	中度空洞
7	1.77	0.29	16.37	0.17	9.89	0.04	2.22	1.26	71.51	中度空洞
13	1.54	0.21	13.86	0.20	12.68	0.02	1.51	1.11	71.94	中度空洞
6	0.95	0.25	26.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	73.19	中度空洞
19	1.13	0.27	23.71	0.02	1.96	0.00	0.00	0.84	74.33	中度空洞
18	2.27	0.23	10.07	0.28	12.34	0.00	0.00	1.76	77.59	轻度空洞
8	1.13	0.16	14.44	0.09	7.78	0.00	0.00	0.88	77.78	轻度空洞
5	1.77	0.30	17.09	0.05	3.09	0.00	0.00	1.41	79.82	轻度空洞
3	0.79	0.00	0.53	0.11	14.55	0.00	0.00	0.67	84.92	轻度空洞
平均	—		24.08		7.65		0.60		67.67	中度空洞

3.2 粗根的水平与垂直分布规律

对古柏的粗根按垂直分层、水平距离分别求算粗根密度,然后求平均值,得到总体根系分布趋势(表 2、表 3)。

表 2 根系垂直分布各层的比例

Table 2 Root vertical distribution

垂直深度/cm	0~30	31~60	61~90	91~120	121~150
权重/%	45.84	35.85	4.82	5.88	7.61

表 3 根系水平分布各层的比例

Table 3 Root horizontal distribution

水平距离/m	1	2	3	4	5	6
权重/%	37.29	30.12	18.96	10.00	3.23	0.40

在垂直分布中,粗根主要分布在 0~60 cm 层中,占总根量的权重高达 80%,并且粗根密度(0~30)cm>(31~60)cm 层,与侧柏的浅根性相符合。黄帝陵古柏的粗根分布较深,在 1 m 以下也有粗根分布,但是相对粗根密度较低,在 1.5 m 以下由于地下杂波的干扰,无法准确判断粗根分布。经过数据分析粗根分布规律为随着深度的增加,粗根密度逐渐减少(图 5)。

在水平分布中,粗根主要分布在 4 m 的范围内,占总根量的权重高达 90%以上,粗根分布范围较广,轩辕庙古柏根系水平分布平均能达到 5 m 左右。经过数据分析,粗根分布规律为随着距离树干水平距离的增加,粗根密度逐渐减少(图 5)。

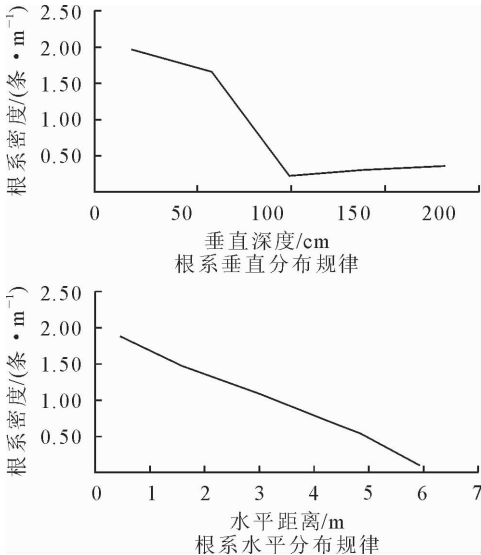


图 5 粗根垂直分布与水平分布的趋势

Fig. 5 Trends of thick root vertical distribution and horizontal distribution

根系的分布规律能够更科学地指导古柏根系的复壮^[11],由于根系主要分布在 4 m 范围内的 0~60 cm 层,在施肥灌溉的时候应该“浅施肥,广灌

溉”,提高水肥利用率。在对树基做树池时应该留足够宽的距离,不做硬化或者运用木栈道架空技术保证土壤有根分布区域内的透气性。另外,在复壮施工时,开挖土壤时尽量距离树干 4 m 之外,以减少对根系的伤害。

3.3 粗根分布规律与生长健康状况的差异

古树的生长健康状况与根系健康状况密切相关,根系为树木的生长提供必要的水分和矿物质营养元素等^[12]。按照杨玲^[1](2014)古柏健康评价的方法对轩辕庙内古柏进行评价,将 19 棵古柏分成健康、亚健康、不健康 3 类,比较这 3 类粗根分布的差异性发现:在水平分布上粗根密度呈现的规律从大到小依次是健康>亚健康>不健康,水平分布范围也是健康和亚健康相对于不健康古柏相对水平范围越广;在垂直分布中粗根主要分布在 0~60 cm,不健康古柏粗根密度明显低于亚健康和健康的古柏(图 6)。研究结果表明,根系的健康程度与古柏生长状况密切相关,粗根密度越大,分布相对越均衡,古柏抗风性越强,生长状况越佳。

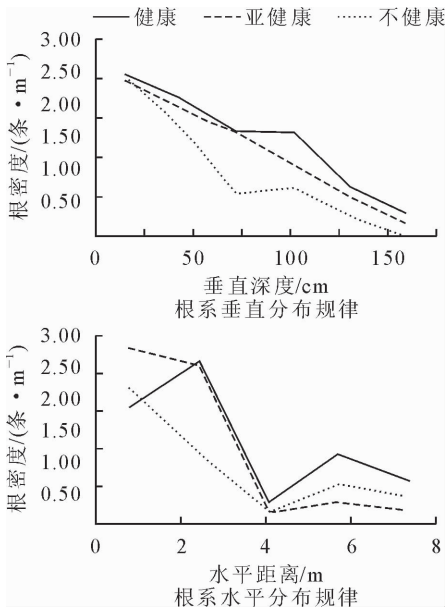


图 6 健康、亚健康、不健康粗根分布规律的差异性比较

Fig. 6 The difference of health, sub-health, and unhealthy thick roots

3.4 粗根分布规律与人为踩踏的差异

人为踩踏是威胁古柏健康生长的重要因素之一,踩踏会使得土壤板结、透气性减弱,进而影响根系的生理活性。经过对人为踩踏严重区域和相对未踩踏区域对比,表明在垂直分布中各层粗根密度均为未踩踏>踩踏,而且在 61~90 cm 层踩踏区域没有粗根分布(图 7)。人为踩踏会严重地影响根系的生长,应该加强对古柏的拦护保护,避免游客对根基土壤的踩踏板结。

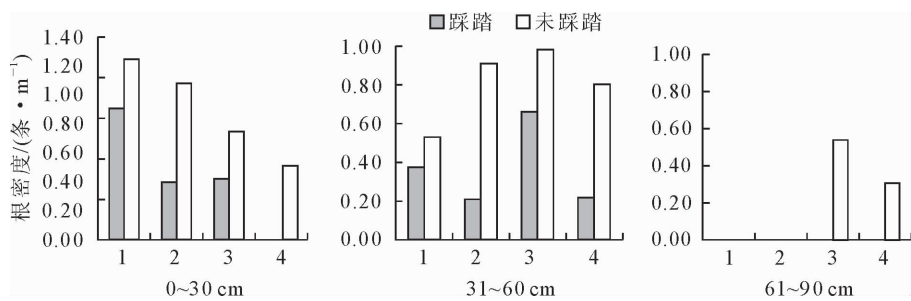


图 7 踩踏与未踩踏根系垂直分布的差异性比较

Fig. 7 The difference of the roots in trampled and not trampled soil area in vertical distribution

3.5 粗根分布规律与根系复壮后的差异

根系复壮是对古树最有效的复壮技术，黄帝陵管理局 2011 年对轩辕庙内 15—19 号实施了复壮一期工程^[13]。探地雷达技术探测结果显示，经过复壮的 5 棵树与其他未经过复壮的古柏相比，粗根的平均密度较高(图 8)，表明复壮工作取得了预期的效果，改善了古柏的土壤条件。本次研究是首次运用 GPR 技术，粗根密度的增加是复壮成果的技术指标，更是对复壮工作的肯定，因此，可以对其余生长不良的古柏陆续开展复壮换土工作。

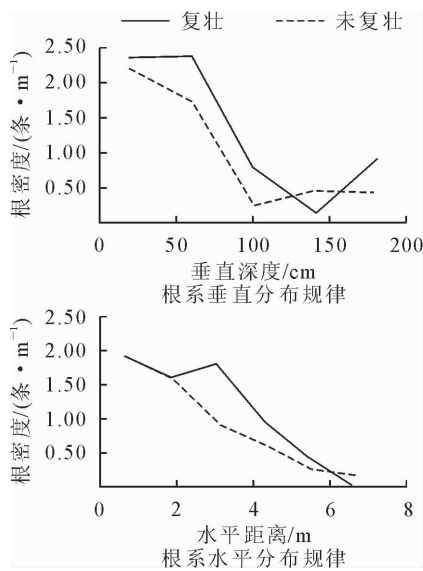


图 8 古柏复壮与未复壮的根系分布规律差异性比较

Fig. 8 The difference of rejuvenation and not rejuvenation root distribution

4 结论与讨论

通过探地雷达技术对黄帝陵轩辕庙古柏的探测表明，轩辕庙的 19 棵古柏全部都有不同程度的空洞，应该加强天牛及干腐菌等病虫害的日常监测。对于轻度空洞的古柏加强古柏树干基部的卫生治理，疏导排水，避免树干基部雨水积聚；对于中度和重度空洞的古柏需更加格外保护，在加强养护管理基础上，根据立地条件、树干倾斜程度等因素，对枯

枝、病枝进行修剪，以减轻树木自身的重量及受风面积，对腐烂部位、主干及时采取防腐、补洞、支撑等措施，防止空洞面积扩大或突然风折。

古柏的粗根分布规律，在垂直方向上粗根主要分布在 0~60 cm，在该层根系的比例高达 80% 以上，并且粗根随着土层深度的增加，粗根密度逐渐减少；在水平方向上粗根主要分布在 4 m 范围内，在该范围内根系比例高达 90% 以上，并且粗根随着距树干水平距离的增加，粗根密度逐渐减少。

古柏的粗根密度与古柏的生长健康状况相关，水平分布范围粗根密度健康>亚健康>不健康，水平分布范围越广，古柏生理机能越强，吸收养分能力越强；垂直方向上主要分布在 0~60 cm，粗根密度健康>亚健康>不健康。

人为踩踏和未踩踏区域相比，未踩踏区域粗根密度>踩踏区域粗根密度，人为踩踏区域土壤板结，透水透气性不良，使得根系生理活性减弱，严重影响古柏生长，应该扩大树池保护范围，设置高围栏，防止游客将根基土壤踩踏板结。

根系复壮与未复壮相比，复壮的古柏粗根密度>未复壮的古柏粗根密度，对根系经过换土，明显改善了古柏的立地状况，对古树保护产生了积极的作用，因此，可以对其余生长不良的古柏陆续开展复壮换土工作。

运用探地雷达技术对古树名木的空洞和粗根检测，是一项无损、快速的检测手段，该技术值得更多的深入研究与应用。由于受 GPR 技术分辨率的制约，只能研究根径至少>1 cm 以上的粗根，而对根系中占比最大、功能最重要的细根无法识别，随着雷达技术和图像处理技术的发展，未来高分辨率、高精度的探地雷达有望运用于古树名木的研究^[14]。运用 GPR 技术研究粗根生物量是目前快速、有效的新方法^[15]，本研究只对根系分布做了定性的研究，而对于根径与雷达波形的估算模型以及粗根生物量的定量研究未能深入探讨。

[23] TEDERSOO L,JAIRUS T,HORTON B M,*et al.* Strong host preference of ectomycorrhizal fungi in a Tasmanian wet sclerophyll forest as revealed by DNA barcoding and taxon-specific primers [J]. New Phytologist,2008,180(2):479-490.

[24] PEAY K G,GARBELOTTO M,BRUNS T D. Spore heat resistance plays an important role in 1disturbance-mediated assemblage shift of ectomycorrhizal fungi colonizing *Pinus muricata* seedlings [J]. Journal of Ecology,2009,97(3) :537-547.

[25] NIETO M P, CARBONE S S. Characterization of juvenile maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) ectomycorrhizal fungal community using morphotyping, direct sequencing and fruit bodies sampling[J]. Mycorrhiza,2009,19(2):91-98.

[26] BAUMAN J M,KEIFFER C H,HIREMATH S,*et al.* Soil preparation methods promoting ectomycorrhizal colonization and American chestnut *Castanea dentate* establishment in coal mine restoration [J]. Journal of Applied Ecology, 2013, 50 (3):721-729.

[27] 王琴. 蒙古栎外生菌根真菌多样性研究[J]. 辽宁林业科技, 2013(3):6-9.

[28] 阎秀峰,王琴. 两种外生菌根真菌在辽东栎幼苗上的混合接种效应[J]. 植物生态学报, 2004,28(1):17-23.

YAN X F,WANG Q. Effects of co-inoculation with two ectomycorrhizal fungi on *Quercus liaotungensis* seedlings[J]. Acta Phytocologica Sinica,2004,28(1):17-23. (in Chinese)

[29] 耿荣,耿增超,黄建,等. 秦岭辛家山林区云杉外生菌根真菌多

样性[J]. 微生物学报,2015,55(7):905-915.

GENG R,GENG Z C,HUANG J,*et al.* Diversity of ectomycorrhizal fungi associated with *Picea asperata* in Xinjiashan forest of Qinling Mountains[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2015,55(7):905-915. (in Chinese)

[30] BLOM J M,VANNINI A,VETTRAINO A M,*et al.* Ectomycorrhizal community structure in a healthy and a Phytophthora-infected chestnut (*Castanea sativa* Mill.) stand in central Italy[J]. Mycorrhiza,2009,20(1):25-38.

[31] 秦岭,王有智. 板栗菌根真菌及其分离培养[C]. 中国科协第3届青年学术年会园艺学卫星会议暨中国园艺学会第2届青年学术讨论会论文集,1998.

[32] 蒲训. 甘肃陇南地区的外生菌根菌[J]. 甘肃林业科技,2000, 25 (2):1-5.

[33] 毕国昌,臧穆,郭秀珍. 滇西北高山针叶林区主要林型下外生菌根真菌的分布[J]. 林业科学,25(1):33-39.

BI G C,ZANG M,GUO X Z. Distribution of ectomycorrhizal fungi under several chief forest types in alpine coniferou region of northwestern Yunnan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1989,25(1):33-39. (in Chinese)

[34] BAUM C,WEIH M,VERWIJSTB T,*et al.* The effects of nitrogen fertilization and soil properties on mycorrhizal formation of *Salix viminalis* [J]. Forest Ecology & Management, 2002,160(1):35-43.

(上接第 187 页)

参考文献：

[1] 杨玲. 黄帝陵古柏健康评价与保护技术研究[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2014.

[2] 杨慧敏,王立海. 立木与原木内部腐朽二维成像检测技术研究进展[J]. 林业科学,2010,46(7):170-175.

YANG H M ,WANG L H. Research and development on 2D imaging technology of the decay in trees and logs[J]. Scientia Silvae Sinicae,2010,46(7):170-175. (in Chinese)

[3] HRUSKA J,CERMÁK J,SUSTEK S. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar[J]. Tree Physiology,1999 (19),125-130.

[4] BUTNOR J R,DOOLITTLE J A. Use of ground- penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States[J]. Tree Physiology,2001(21):1269-1278.

[5] BUTNOR J R,DOOLITTLE J A. Utility of ground- penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems[J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67:1607-1615.

[6] 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):606-610.

CUI X H,CHEN J, GUAN L L. The application of ground penetrating radar to plant root system detection[J]. Advances in Earth Science,2009,24(6):606-610. (in Chinese)

[7] 舒洪岚. 探地雷达在植物根系研究中的应用[J]. 江西林业科技,2007(5):32-33.

[8] 闫永斌. 探地雷达图像识别与处理[D]. 北京:北京化工大学,2008.

[9] 于炜,余金良,钱江波. 杭州古树树干腐烂空洞状况检测研究[J]. 园林科技,2013(3):40-42.

[10] 于炜,余金良,钱江波. 杭州古树树干空洞状况调查研究[J].

西北林学院学报,2014,29(2):178-183.

YU W,YU J L,QIAN J B. Health status of old trees in Hangzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29 (2):178-183. (in Chinese)

[11] 赖娜娜,袁承江,唐硕. 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 N N,YUAN C J,TANG S. 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. (in Chinese)

[12] 刘建军. 林木根系生态研究综述[J]. 西北林学院学报,1998, 13(3):74-78.

LIU J J. A review on rootecology of forest trees [J]. Journal of Northwest Forestry University,1998,13(3):74-78. (in Chinese)

[13] 杨玲,康永祥,李小军. 黄帝陵古侧柏保护与复壮技术研究 [J]. 林业实用技术,2014(3):64-66.

[14] 闫慧,董心亮,张守仁. 古田山亚热带常绿阔叶林粗根空间分布特征及影响因子分析——探地雷达途径[J]. 中国科学:生命科学,2013,43(9):788-798.

YAN H,DONG X L,ZHANG S R. Coarse root spatial distribution determined using a ground-penetrating radar technique in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. Scientia Sinica: Vitae,2013,43(9):788-798.

[15] 崔喜红,陈晋,沈金松. 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 X H,CHEN J,SHEN J S. Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar[J]. Scientia Sinica: Terrae,2011,41(2):243-252. (in Chinese)