基于树木雷达技术的行道树粗根分布特征研究
——以郑州市龙子湖高校园区为例

A Study of the Distribution Characteristics of Thick Roots of Street Trees Using Tree Radar Technology: A Case Study of Longzihu University Region in Zhengzhou City

夏　爽[1]　卢伟娜[2]　刘怡芸[1]　孙　悦[1]　各如灿[1]　李济菲[1]　王旭东[1*]
XIA Shuang[1]　LU Weina[2]　LIU Yiyun[1]　SUN Yue[1]　GE Rucan[1]　LI Jifei[1]　WANG Xudong[1*]

（1.华北水利水电大学建筑学院，郑州 450046；2.河南农业职业学院园艺园林学院，郑州 451450）
（1. School of Architecture, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan, China, 450046; 2. School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou, Henan, China, 451450）

文章编号：1000-0283(2025)03-0132-07
DOI：10.12193/j.laing.2025.03.0132.016
中图分类号：TU986
文献标志码：A
收稿日期：2024-08-16
修回日期：2024-11-29

摘　要

研究城市行道树地下根系的分布特征及其影响因素，为行道树的良好生长和养护管理提供科学依据和数据支撑。以郑州市龙子湖高校园区道路上的8种主要乔木行道树种为研究对象，利用树木雷达检测系统对行道树根系的分布特征进行分析与总结。同时，测定土壤的含水量、紧实度、土温三项物理指标，试图探究影响根系分布的土壤物理因素。研究结果表明，（1）在水平方向上，行道树根系密度在三条扫描半径上分布比较平均；在垂直方向上，行道树根系密度主要分布在20 ~ 40 cm处。（2）不同树种之间根系分布差异较大。（3）树木粗根密度与土壤含水量呈显著正相关关系，与土壤紧实度呈显著负相关关系。在城市道路条件下行道树的根系分布较浅，这不仅与城市的特殊环境有关，且与土壤的含水量和紧实度存在一定的关系。

关键词

树木雷达；粗根；空间分布；土壤物理性质

Abstract

The distribution characteristics and factors influencing the underground roots of urban street trees were studied to provide a scientific basis and data support for the healthy growth and maintenance management of these trees. Eight main tree species along the roads of Longzihu University Park in Zhengzhou were selected as the research subjects. The distribution characteristics of the root systems of the street trees were analyzed and summarized using a tree radar detection system. Additionally, three physical soil indexes, water content, compactness, and soil temperature, were measured to explore the physical soil factors affecting root distribution. The results indicate that: (1) In the horizontal direction, the root density of street trees is evenly distributed across the three scanning radii; in the vertical direction, the root density is primarily concentrated at depths of 20 ~ 40 cm. (2) There are significant differences in root distribution among various tree species. (3) The density of thick roots shows a significant positive correlation with soil water content and a significant negative correlation with soil compactness. In urban road environments, the root distribution of street trees is shallow, which is influenced not only by the unique urban environment but also by soil water content and compactness.

Keywords

tree radar; thick root; spatial distribution; soil physical property

行道树作为构成城市生态环境的重要组成部分[1]，除具备美化和装饰的作用外，还发挥着减少雨水径流、节约能量和改善空气质量等效益[2-3]。树木根系与地上部分是有机整体，根系的健康和树体的生长发育密切相关[4]，且对生态系统的稳定和功能发挥至关重要。根系在植物生态系统中具有吸收水分和养分、固定和稳定植物等重要功能[5]。具

夏　爽
1990年／女／河南南阳人／硕士／研究方向为风景园林

卢伟娜
1980年／女／陕西西安人／硕士／研究方向为风景园林规划设计

王旭东
1986年／男／河南开封人／博士／讲师／研究方向为园林植物群落及绿地生态

*通信作者（Author for correspondence）
E-mail: wang007xu007@163.com

有健康根系的行道树，能更好地吸收水分和养分，提高行道树的生长速度和品质[6-7]。然而，在城市特殊生境条件下，行道树的生长环境往往比较恶劣，土壤条件差，营养及水分均与自然土壤不同，对根系发育影响较大[8-9]，且植物根系深处地下，对其观察和取样比较困难。传统对于根系进行探测的方法都相当繁琐，不仅耗时费力而且会破坏土壤环境和植物根系，因此亟需一种新的无损的根系识别探测方法[10-14]。

探地雷达（Ground Penetrating Radar，GPR）作为一种较新的地球物理方法，广泛应用于农业、工业和环境等领域，近年来也有部分学者将其应用于根系探测方面，并取得较为理想的结果。Altdorff、Nichols等[15-16]分别使用探地雷达对城市环境下的树木根系进行探测，证实GPR可以检测到城市树木的根系大小及深度；邹世慧、崔嘉豪等[17-18]采用树木雷达探测系统对不同立地环境下的树木根系分布进行检测，结果表明不同的立地条件对根系分布影响较大；吴松成等[19]通过对不同铺装条件下悬铃木的根系进行检测，结果表明草地栽植条件下悬铃木的根系数量和分布范围均小于硬质铺装条件。以上研究成果一方面说明了树木雷达技术在城市环境条件下树木根系研究中的可行性，但不同气候条件、不同树种类型以及不同立地条件下的城市行道树根系生长发育及分布特征不尽相同，因此，有必要针对不同地域条件下的不同类型行道树的根系分布特征进行进一步的分析与总结。

本研究利用树木雷达技术，以郑州市龙子湖高校园区多种类型行道树为研究对象，分析了郑州市行道树地下粗根分布特征及其重要影响因素，以期为提升优化城市行道树生境条件提供科学依据和数据支撑，促进道路植物景观的长期健康稳定。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

郑州市龙子湖高校园区位于河南省郑州市郑东新区东部（34° 47′ 33.0004″ N，113° 48′ 21.9354″ E），东临京港澳高速，西接郑州市东三环，北至连霍高速，南到郑州市金水东路。气候属温带半湿润大陆性季风气候，四季分明，干湿集中，区域土壤类型为潮土类[20]。龙子湖高校园区整体地势相对平坦，起伏不大，主要由龙子湖景观工程和高校新校区两部分组成，占地面积约22 km^2。其中，龙子湖是郑东新区生态水系的重要组成部分，湖面面积较大，且通过运河与龙湖及其他河渠相连，共同形成生态水系，园区内共15所高等院校及公共设施沿龙子湖呈环状分布。

图1 研究区域行道树分布图
Fig. 1 Distribution map of street trees in the study area

1.2 研究方法

1.2.1 研究对象

龙子湖高校园区道路中共涉及8种主要乔木行道树种（表1），包括大叶女贞、银杏、法桐、七叶树、白蜡、楸树、重阳木、柳树。采用类型抽样法，在每条道路中段选取一个100 m×6 m的试验样方，每个样方内随机选取三棵树种相同且胸径和高度差异较小、植株长势良好的行道树。树干基部无灌木和大型杂草生长，适合进行树木雷达检测系统（Tree Radar Unit，TRU）进行根系扫描。

1.2.2 试验方法

（1）根系分布探测。树木根系检测采用美国的树木雷达探测系统，由操控电脑、雷达控制单元和400 MHz的雷达天线（探测最大深

度为4 m，根系分辨率最小为2 cm）组成[21]。其原理是由于土壤与根系之间的介电常数存在差异，雷达天线发射的高频脉冲电磁波会在土壤与根系交界面处发生反射，根据获得的反射波形便能识别根系的位置。基于树木雷达探测系统，以被测样木为中心，分别以1 m、2 m、3 m为半径对根系分布开展探测。

（2）土壤物理性质测定。利用美国Spectrum仪器对24棵行道树样木进行物理性质（含水量、紧实度、土温）的测定，分别在行道树树池4个角点位的0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、>40 cm三个不同土壤深度进行检测。

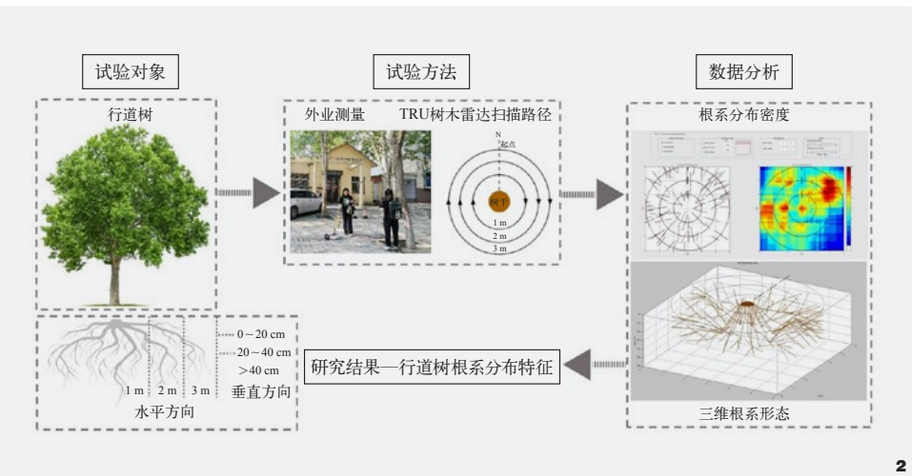


图2 根系研究流程图
Fig. 2 Flow chart of root system research

1.2.3 数据处理

通过树木雷达配套分析软件TreeWin对扫描图像进行处理，得到根系扫描时每条扫描路径的根系密度以及不同深度扫描到的粗根反射点的占比，进而获取并分析根系在水平方向和垂直方向的分布情况。

对获取数据进行处理分析，采用SPSS方差分析比较不同水平距离、土壤深度以及不同树种粗根密度的差异情况，并对土壤物理性质等数据与粗根分布密度进行相关性分析，利用Origin 2018软件完成绘图。

2 结果与分析

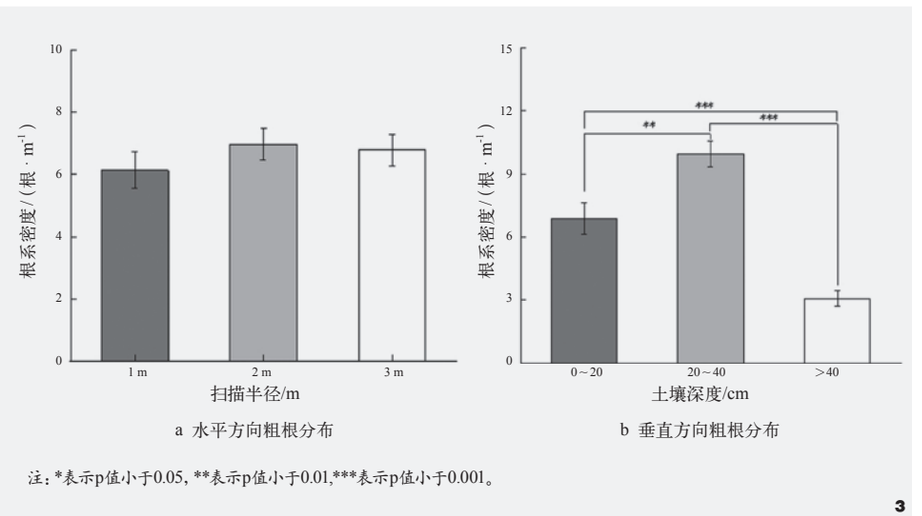
2.1 行道树根系分布

水平方向上，行道树的根系密度均值在三条扫描半径上分布比较平均。根系密度在1 m处为（6.14±0.60）根/m，在2 m处为（6.97±0.50）根/m，在3 m处为（6.79±0.51）根/m。研究结果表明研究区域行道树水平方向上的平均根系密度在1 m、2 m、3 m扫描半径处无显著性差异（图3-a）。

垂直方向上，行道树的平均根系密度在20~40 cm深处的根系密度最大，在>40 cm处的根系密度最小。0 ~ 20 cm处为（6.89±0.75）根/m，

表1 研究样木的基本属性描述
Tab. 1 The basic attribute description of research sample

样木名称 Sample name	科属 Family and genus	生态习性 Ecological habit
大叶女贞（*Ligustrum lucidum*）	木犀科女贞属	喜光，稍耐阴，喜温暖湿润气候，稍耐寒；对土壤要求不严格，但在水湿条件较好的地方长势更好
银杏（*Ginkgo biloba*）	银杏科银杏属	喜光、耐干旱、不耐水涝；在酸性、中性、碱性土壤中生长，但不耐盐碱土和过湿的土壤；最佳生长条件是土层深厚、肥沃湿润且排水良好的土壤
法桐（*Platanus × acerifolia*）	悬铃木科悬铃木属	阳性速生树种，喜光，喜湿润温暖气候，较耐寒；能适应多种土壤条件，包括透气性较差的城市街道土壤，根系分布较浅
七叶树（*Aesculus chinensis*）	七叶树科七叶树属	喜光，稍耐阴，喜温暖气候，耐寒，深根性；在酸性土壤中生长良好，在土层深厚肥沃、排水良好的沙壤土生长最佳
白蜡（*Fraxinus chinensis*）	木犀科梣属	喜温暖湿润气候，颇耐寒，喜湿耐涝，耐干旱；对土壤要求不严，碱性、中性、酸性土壤上均能生长；深根性，侧根和不定根在地面以下沿水平方向伸展
楸树（*Catalpa bungei*）	紫葳科梓树属	喜光耐寒，喜深厚、肥沃、湿润的中性土、微酸性土和钙质土，不耐干旱和积水
重阳木（*Bischofia polycarpa*）	大戟科秋枫属	喜温暖湿润气候和深厚肥沃的沙质土，对土壤的酸碱性要求不严，适应能力强，生长快速
柳树（*Salix babylonica*）	杨柳科柳属	喜温暖至高温、湿润、向阳之地，生性强健，耐寒也耐热、耐旱，极耐潮湿性



a 水平方向粗根分布　　b 垂直方向粗根分布

注：*表示p值小于0.05，**表示p值小于0.01，***表示p值小于0.001。

3

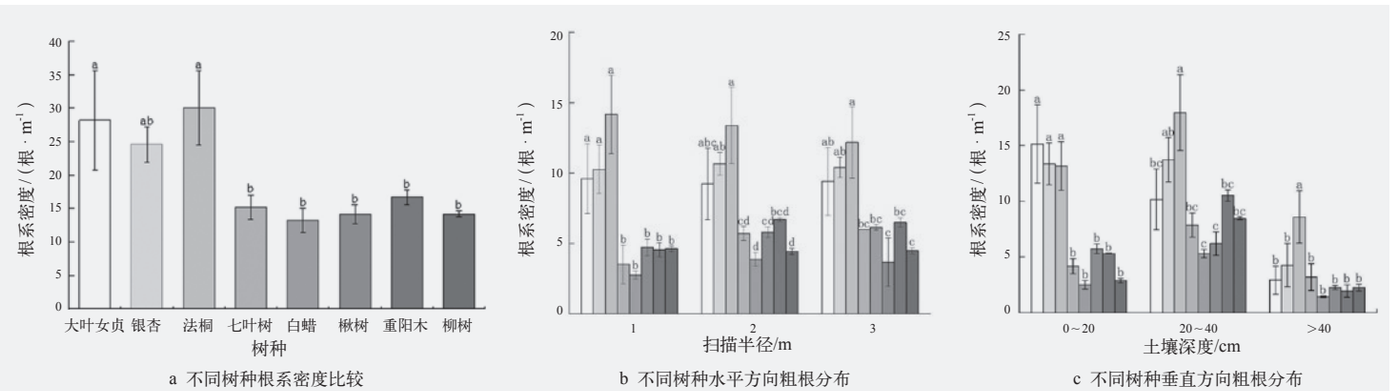
图3 行道树水平、垂直方向粗根分布特征
Fig. 3 Distribution characteristics of coarse roots in horizontal and vertical directions of roadside trees

在20 ~ 40 cm处为（9.95±0.62）根/m，在>40 cm处为（3.07±0.38）根/m。结果表明研究区域行道树垂直方向上的平均根系密度在不同土壤深度存在显著性差异（$p<0.001$）（图3-b）。

2.2 不同树种行道树的根系分布

由表2可知：在垂直方向上，大叶女贞、银杏、楸树的根系密度随着土壤深度的增加而呈现递减趋势，而法桐、七叶树、白蜡、重阳木、柳树的根系密度则随着土壤深度的增加而先增加后减少，其中，在土壤深度0 ~ 20 cm中根系密度占比最高的为大叶女贞（55.13%），20 ~ 40 cm中根系密度占比最高的为柳树（62.50%），>40 cm中根系密度占比最高的为法桐（20.72%）。在水平方向上，七叶树、白蜡、重阳木的根系密度占比随着与主干距离的增加而增加，楸树的根系密度占比随着与主干距离的增加而先增加后减少，法桐的根系密度占比随着与主干距离的增加而减少。而大叶女贞、银杏、柳树三个树种的根系密度在三条扫描线无明显变化，其中在距离主干1 m处根系密度占比最高的为法桐（35.76%），在距离主干2 m处根系密度占比最高的为楸树（41.37%），在距离主干3 m处根系密度占比最高的为七叶树（40.70%）。

行道树的根系密度由于树种类型的变化存在异同，结果表明8个树种根系密度差异显著（$p=0.003$）（图4-a）。根系密度最大的为法桐（30.05±5.6）根/m，其次为大叶女贞（28.22±7.42）根/m、银杏（24.58±2.63）根/m；重阳木、七叶树的根系密度相对较小，分别为（16.69±1.09）根/m、（15.21±1.85）根/m；柳树、楸树的根系密度较为接近，分别为（14.2±0.5）根/m、（14.17±1.41）根/m；白蜡的根系密度最小，为（13.22±1.84）根/m。水平方向上，方差分析表明：8个树种在扫描半径1 m处的根系密度差异显著（$p=0.001$）；在扫描半径2 m处的根系密度差异显著



a 不同树种根系密度比较　　b 不同树种水平方向粗根分布　　c 不同树种垂直方向粗根分布

注：不同小写字母表示大叶女贞、银杏、法桐、七叶树、白蜡、楸树、重阳木和柳树之间差异显著（$p<0.05$）。

4

图4 不同树种行道树粗根分布特征
Fig. 4 Distribution characteristics of coarse roots for different tree species

表2 行道树生长指标及不同土壤深度和扫描半径的根系密度占比
Tab. 2 Growth indicators of street trees and root density ratio of different soil depths and scanning radii

树种 Tree species	样木编号 Sample number	土壤深度 /cm Soil depth			扫描半径 /m Scan radius			胸径 /cm DBH	冠幅 /m Crown width	树高 /m Tree height
		0 ~ 20	20 ~ 40	>40	1	2	3			
大叶女贞	10	49.77	38.02	12.21	34.54	32.85	32.61	18.78	3.30	5.84
	13	55.12	33.79	11.09	33.13	33.12	33.76	14.64	1.97	4.45
	14	60.49	36.38	3.13	34.82	30.95	34.23	11.46	1.65	2.25
	平均	55.13	36.06	8.81	34.16	32.31	33.53	14.96	2.30	4.18
银杏	11	28.65	48.79	22.55	37.75	29.99	32.26	19.42	2.60	8.70
	17	52.87	39.82	7.31	29.40	37.74	32.86	20.37	3.10	9.00
	18	49.47	41.79	8.75	29.98	35.10	34.91	20.05	2.92	8.91
	平均	43.66	43.47	12.87	32.38	34.28	33.34	19.95	2.87	8.87
法桐	19	36.50	47.43	16.07	36.50	33.60	29.90	29.92	6.60	14.40
	20	31.40	46.69	21.92	36.96	34.78	28.26	28.97	6.13	10.00
	21	33.32	42.52	24.16	33.82	32.60	33.58	29.28	6.40	10.80
	平均	33.74	45.54	20.72	35.76	33.66	30.58	29.40	6.38	12.00
七叶树	25	41.68	50.42	7.89	8.57	40.32	51.10	22.60	4.63	7.80
	26	26.34	53.62	20.04	31.31	35.62	33.08	21.65	3.50	7.00
	27	17.92	50.25	31.83	24.59	37.48	37.93	20.69	3.37	7.16
	平均	28.65	51.43	19.92	21.49	37.81	40.70	21.65	3.83	7.32
白蜡	43	24.83	50.03	25.14	30.57	32.53	36.89	17.51	3.44	11.70
	44	27.89	50.64	21.48	31.25	35.28	33.46	17.06	3.04	8.20
	45	32.64	57.30	10.06	30.67	32.75	36.57	16.87	3.50	8.90
	平均	28.45	52.66	18.89	30.83	33.52	35.64	17.15	3.33	9.60
楸树	40	34.11	50.27	15.62	26.11	39.96	33.92	22.28	2.46	13.50
	41	44.99	39.35	15.66	27.13	37.29	35.58	21.65	2.00	12.00
	42	43.55	40.26	16.19	51.08	46.84	2.08	23.24	2.50	13.40
	平均	40.88	43.30	15.82	34.77	41.37	23.86	22.39	2.32	12.97
重阳木	50	31.38	61.94	6.67	21.02	39.99	38.99	39.47	3.00	9.00
	52	28.81	62.27	8.93	26.40	35.32	38.26	39.47	3.00	10.70
	54	29.59	53.49	16.92	29.20	38.19	32.61	35.01	3.50	11.00
	平均	29.93	59.23	10.84	25.54	37.83	36.63	36.50	3.17	10.23
柳树	28	24.45	62.26	13.28	37.06	32.15	30.79	31.83	4.83	11.52
	29	19.87	60.67	19.46	32.85	33.82	33.33	32.79	5.12	11.22
	30	19.05	64.58	16.37	32.36	32.13	35.50	32.40	4.00	9.00
	平均	21.13	62.50	16.37	34.09	32.70	33.21	32.34	4.65	10.58

(p=0.002)；在扫描半径3 m处的根系密度差异显著 (p=0.006) (图4-b)。在垂直方向上，方差分析表明：8个树种在扫描土壤深度为0 ~ 20 cm处的根系密度差异显著 (p＜0.001)；在土壤深度为20 ~ 40 cm处的根系密度差异显著 (p=0.003)；在土壤深度>40 cm处的根系密度差异显著 (p=0.023) (图4-c)。

2.3 树木粗根密度与土壤物理性质关系

2.3.1 土壤物理性质基本情况

通过对行道树土壤物理性质的测定，结果表明土壤含水量均值13.22% (表3)，低于国家住建部《绿化种植土壤》[22]标准规定的最低值17.32%，其中土壤深度>40 cm处含水量最低，仅有8.51%。土壤温度均值为27.05℃，不同土层温度无显著差异。土壤紧实度均值为6.65 MPa，其中在土层>40 cm处的土壤紧实度最高，达到8.94 MPa。

2.3.2 树木粗根密度与土壤物理性质关系

树木不同土层根系密度与土壤物理性质相关性分析结果表明（表4），树木根系密度与土壤含水量呈正相关关系，相关系数为0.595；与土壤紧实度呈显著负相关关系，相关系数为-0.634，与土壤温度之间不存在相关性。其中，0 ~ 20 cm和＞40 cm土层根系密度与土壤紧实度呈显著负相关关系；20 ~ 40 cm土层根系密度与土壤含水量呈显著正相关关系。

3 结论与讨论

3.1 行道树根系分布特征

水平方向上，不同种类行道树的根系分布比较平均。其中，随着与树干距离的增加，七叶树、白蜡和重阳木的根系密度呈增加趋势，楸树的根系密度呈现先增加后减少的趋势，而大叶女贞、银杏、法桐、柳树在三条扫描半径上的根系密度则分布比较平均。造成8个树种间水平方向根系分布差异的原因可能是树种的差异，以及三个水平距离的土壤环境有所不同导致。

垂直方向上，大叶女贞和银杏根系密度最大的是在0 ~ 20 cm土层深度；法桐、七叶树、白蜡、楸树、重阳木以及柳树根系密度最大的是在20 ~ 40 cm土层深度。不同种类行道树的根系分布主要集中在0 ~ 40 cm土层深度，其中，20 ~ 40 cm处的根系密度大于0 ~ 20 cm处的根系密度。陈文静等[23]对法桐行道树的根系分布特征研究中表明，在垂直方向上行道树根系密度随着土壤深度的增加呈现先增加后递减趋势，其根系主要集中在20 ~ 40 cm土层，与本研究结果基本一致。

总体上，研究区内不同种类行道树的根系分布特征主要是向四周延伸生长而不是向下生长。城市中常见的土壤多为基础设施下的填土或者高度压实的土壤，这种土壤通常排水性较差、氧气和水分供应不足，限制了树木根系向深处生长[24]，为了稳定和支撑树木，根系往往会向外扩展。其次，土壤含水量对土壤结构及根系生长具有重要的影响作用。Musa[25]研究发现土壤含水量决定了树木根系在土壤里的分布特征。城市地面的硬质铺装材料限制了地面水分下渗，大部分水分集中在路面下方浅层土壤，因此，根系倾向于向表层土壤生长，并通过根系的横向生长来扩大吸收面积，以满足生长所需的水分和养分。

3.2 行道树根系分布影响因素

行道树根系密度与土壤含水量呈显著正相关，主要在土壤20 ~ 40 cm处的根系密度受到土壤含水量的影响显著，说明土壤水分对根系的分布存在一定的影响，这与纪文文等[26]研究结果一致。本研究区域的行道树土壤含水量较低，当土壤干燥时，植物根系会缩小范围，无法深入土层吸取更多营养和水分，限制了根系的发展。

树木根系密度与土壤紧实度呈显著负相关关系，即土壤紧实度越小根系分布越多，土壤越紧实，其容重越大孔隙度越小。容重大紧实度高是城市行道树土壤的共性问题[27]，本研究区内行道树的土壤紧实度为6.42 MPa。Radford等[28]研究表明，当土壤紧实度在0.7 ~ 1.5 MPa时，根系向下伸长率降低50%，当紧实度大于4 MPa时，根系生长将完全受到限制。紧实度高的土壤会导致土壤孔隙被压缩，限制水分、养分和空气的渗透和传播，其容纳水分的能力会大大降低，压实土壤几乎无法有效地储存和调节水分，进而影响到植物水分养分的吸收[29-32]。同时，压实的土壤会增加根系穿孔和生长的阻力，限制根系的发育和分布。

在城市道路环境下，行道树的生长空间

表3 行道树不同土壤深度的物理性质分析

Tab. 3 Analysis of physical properties of roadside trees at different soil depths

土壤深度 /cm Soil depth	土壤含水率 /% Soil moisture content	土壤温度 /℃ Soil temperature	土壤紧实度 /MPa Soil compaction
0 ~ 20	15.70	26.94	4.67
20 ~ 40	15.45	27.50	6.33
>40	8.51	26.72	8.94
均值	13.22	27.05	6.65

表4 不同土层根系密度与土壤物理性质指标相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of coarse root density and soil physical property indexes in different soil layers

	土壤含水率 Soil moisture content	土壤温度 Soil temperature	土壤紧实度 Soil compaction
RD 0 ~ 20	-0.157	0.205	-0.787**
RD 20 ~ 40	0.893**	0.194	0.322
RD >40	0.366	0.235	-0.711**
TRD	0.595**	0.232	-0.634**

注：* 表示在0.05水平上显著相关，** 表示在0.01水平上显著相关，未标注表示相关性不显著。RD 0 ~ 20、RD 20 ~ 40、 RD >40、TRD分别表示树木0 ~ 20 cm土层根系密度值、20 ~ 40 cm土层根系密度值、>40 cm土层根系密度值和树木总根系密度。

常常受到限制，土壤质地较为紧实，尤其是深层土壤的通气性和透水性较差。这些因素限制了根系向下的生长，使得行道树的根系分布大多集中在浅层土壤中。在这种条件下，行道树的根型普遍呈现出浅层水平扩展的特征，这可能是行道树对城市环境的一种适应性表现。浅层土壤通常具有较好的通气性和养分供应，能够为行道树根系提供充足的资源和空间。基于以上分析，在后期的行道树管理过程中，要改善行道树根系的生长环境，可在物理空间层面减少对树木生长的抑制，对介质环境进行人为改造。如定期对树池内的土壤进行疏松处理，使用旋转式打孔机进行打孔，以增加土壤孔隙度和透气性，以及通过改进灌溉方式、采取保水措施等有机结合来缓解土壤深层缺水的问题，以此来引导城市行道树根系的生长发育，为促进地上部分的健康生长提供重要保障。

注：文中图表均由作者自绘/摄。

参考文献

[1] 孟涛, 宋蕾. 城市行道树合理栽植与养护管理[J]. 种子科技, 2019, 37(06): 74-75.

[2] 符冰芬. 广州市道路绿带植物配置对$PM_{2.5}$的滞尘效应及优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.

[3] 钟丽雯. 南京市主城区行道树结构分析、评价及其对微气候的影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.

[4] 舒健骅, 孙宏彦, 王茜, 等. 人行道垫层改良对行道树根系及地上生长指标的影响——以马连道行道树国槐为例[C]// 中国风景园林学会2021年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[5] 张开伟, 聂庆科, 吴园平, 等. 基于探地雷达技术的植物根系探测应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(01): 86-91.

[6] 王新亮, 李廷升, 刘凤华, 等. 滨州市城区行道树长势衰弱的原因及对策[J]. 滨州学院学报, 2019, 35(06): 66-70.

[7] 贾哲峰. 城市行道树银杏生长状况调查及复壮技术应用[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(20): 131-133.

[8] 叶德科. 城市人行道树池设计探讨——以宁德城区道路为例[J]. 工程建设与设计, 2020(22): 62-63.

[9] TAN X, SHIBATA S. Influence of Soil Properties on Street Tree Performance in Kyoto City, Japan[J]. Landscape and Ecologicsl Engineening, 2023, 19: 573-582.

[10] 宋恒川, 陈丽华, 吕春娟, 等. 华北土石山区四种常见乔木根系的形态研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 194-199.

[11] 王宝宁, 邹世慧, 李玲莉. 两种常绿绿化树种的根系生长规律研究[J]. 绿色科技, 2019(23): 164-166.

[12] LIU X W. Ground Penetrating Radar (GPR) Detects Fine Roots of Agricultural Crops in the Field[J]. Plant Soil, 2018, 423(1-2): 517-531.

[13] PIERRET A, MORAN C J, DOUSSAN C. Conventional Detection Methodology is Limiting our Ability to Understand the Roles and Functions of Fine Roots[J]. New Phytologist. 2005, 6, 166(3): 967-980.

[14] NADEZHDINA N. Instrumental Methods for Studies of Structure and Function of Root Systems of Large Trees[J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(387): 1511-1521.

[15] 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.

[16] NICHOLS P, MCCALLUM A, LUCKE T. Using Ground Penetrating Radar to Locate and Categorise TreeRoots Under Urban Pavements[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 27: 9-14.

[17] 邹世慧, 李玲莉, 田中, 等. 基于TRU系统对三种不同立地条件下川山茶根系空间分布的研究[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(15): 101-106.

[18] 崔嘉豪, 有祥亮, 张冬梅, 等. 上海市区主要行道树粗根的空间分布特征及其与立地环境的关系[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(02): 272-282.

[19] 吴松成, 李玲莉, 田中, 等. 铺装对悬铃木根系空间分布影响研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(15): 168-171.

[20] 高军侠, 姜灵彦, 党宏斌, 等. 郑东新区不同利用类型土壤重金属污染评价[J]. 河南农业科学, 2014, 43(5): 6.

[21] 甘明旭. 树木雷达(TRU)在黄帝陵古侧柏树干空腐和粗根分布检测中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿化种植土壤: CJ/T 340-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

[23] 陈文静, 圣倩倩, 张慧会, 等. 基于探地雷达的法桐行道树粗根分布特征研究[J]. 西部林业科学, 2023, 52(02): 26-32.

[24] 来雨晴, 蓝伟根, 张炎晶, 等. 城市绿地木本植物根系生长与土壤理化性质影响因素[J]. 绿色科技, 2024, 26(03): 14-20.

[25] MUSA Y L Y. Relationship Between Root Distribution Characteristics of Mongolian Pine and the Soil Water Content and Groundwater Table in Horqin Sandy Land, China[J]. Trees, 2019, 33(4): 1203–1211.

[26] 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(05): 33-41.

[27] 贺坤, 宋婷, 王本耀, 等. 上海市行道树土壤理化性质与树木健康的相关性研究[J]. 中国园林, 2022, 38(02): 66-70.

[28] RADFORD B J, YULE D F, MCGARRY D, et al. Amelioration of Soil Compaction can Take 5 Years on a Vertisol Under no till in the Semi-arid Subtropics[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(2): 249-255.

[29] 史学正, 梁音, 于东升. "土壤水库"的合理调用与防洪减灾[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999(03): 6-10.

[30] 张霞, 张媛. 浅析森林作业对林地土壤的影响[J]. 森林工程, 2001(03): 20-21.

[31] 卢伟, 高峰, 周泽民. 采伐方式对森林土壤理化性质的影响[J]. 森林工程, 2001(03): 17-18.

[32] 孙墨珑, 肖生灵, 杨学春, 等. 小兴安岭林区集材车辆通过林地次数对林地土壤物理性的影响[J]. 东北林业大学学报, 1999(01): 82-84.