

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170399

北京山区不同林分林下植被根系分布特征及其影响因素

张 晓¹ 黄晓强² 信忠保¹ 孔庆仙¹ 夏晓平¹ 蒋秋玲¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 绍兴市水利水电勘测设计院, 浙江 绍兴 312000)

摘要:【目的】通过野外调查和室内试验分析林下植被生物量以及根系特征,为北京土石山区人工造林树种的选择和植被恢复提供科学依据。【方法】在北京土石山区典型代表红门川流域,以油松和侧柏林下植被为研究对象,采用样方法进行植被调查,测定林下植被生物量和根系,草本和灌木生物量采用全刈法,根系调查采用连续钻取土芯法。【结果】结果表明:不同树种林地根系生物量差异显著($P<0.05$),灌丛林地根系生物量最高($(6.84 \pm 1.35) \text{ t/hm}^2$),其次为侧柏($(4.65 \pm 0.90) \text{ t/hm}^2$),油松林地土壤根系生物量最低($(3.33 \pm 0.93) \text{ t/hm}^2$),且同一林地根系生物量在不同土层均基本接近;不同树种林地根长密度和根表面积密度均随径级的增大而减小, $0 \sim 0.1 \text{ mm}$ 径级根系是林地根系分布最广的,其次为 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 径级的根系;随林龄增大,侧柏、油松林不同径级根长密度、根表面积密度和根系生物量均呈递减趋势,且均明显低于灌丛林地;坡向显著影响林地根系生物量,半阴坡根系生物量明显大于阳坡和阴坡根系生物量($P<0.05$),林地根长密度和根表面积密度与砂粒含量显著性负相关($P<0.05$),其中径级 $0 \sim 0.1 \text{ mm}$ 和 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ 根系尤为明显,根系生物量与土壤密度间显著负相关($P<0.05$),尤其是径级 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ 根系。【结论】研究结果表明对土石山区造林树种的选取不仅要参考当地环境条件和土壤特征,还要充分考虑造林树种的生长特性。

关键词:土石山区;油松;侧柏;根系;林龄

中图分类号:S791.254;S791.38 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2018)04-0051-07

引文格式:张晓,黄晓强,信忠保,等.北京山区不同林分林下植被根系分布特征及其影响因素[J].北京林业大学学报,2018,40(4):51-57. Zhang Xiao, Huang Xiaoqiang, Xin Zhongbao, et al. Distribution characteristics and its influencing factors of understory vegetation roots under the typical plantations in mountainous area of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(4): 51-57.

Distribution characteristics and its influencing factors of understory vegetation roots under the typical plantations in mountainous area of Beijing

Zhang Xiao¹ Huang Xiaoqiang² Xin Zhongbao¹ Kong Qingxian¹ Xia Xiaoping¹ Jiang Qiuling¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Shaoxing Water Conservancy and Hydropower Exploration and Design Institute, Shaoxing 312000, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] By studying the vegetation biomass and root characteristics through the field investigation and laboratory tests, the study can provide scientific basis for the selection of afforestation tree species and the restoration of vegetation in Beijing soil stone mountain area. [Method] Regarding the chronosequence of *Pinus tabulaeformis* plantation (35, 40 and 57 years old) and *Platycladus orientalis* plantation (20, 40, 57 and 100 years old), which located at the Hongmengchuan Catchment in the northeast of Miyun County of Beijing, using full mow and drying method hold the undergrowth plant biomass, using the root auger drilling core, which will be back to the indoor soil core samples, the water

收稿日期:2017-11-07 修回日期:2017-12-21

基金项目:国家科技支撑计划子课题(2015BAD07B030201),中央高校基本科研业务费专项(2017ZY02),林果业生态环境功能提升协同创新中心(PXM2018_014207_000024)。

第一作者:张晓。主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持。Email:zhangxiao3e@bjfu.edu.cn 地址:100083 北京市海淀区北京林业大学水土保持学院。

责任作者:信忠保,博士,副教授。主要研究方向:生态恢复与治理。Email:xinzhongbao@126.com 地址:同上。

本刊网址:http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

immersion, rinse clean, using a magnifying glass, scissors, tweezers and other tools manual pick out root system, analyzing the characteristic of the root system, this study researched the distribution characteristics and influencing factors of roots under different plantations. [Result] The results showed that: the mean root biomass differed significantly among the natural shrub, *Pinus tabuliformis* and *Platycladus orientalis* plantation, the highest ($(6.84 \pm 1.35) \text{ t/ha}$) root biomass was found in natural shrub land, followed by *Platycladus orientalis* plantation ($(4.65 \pm 0.90) \text{ t/ha}$), and *Pinus tabuliformis* plantation ($(3.33 \pm 0.93) \text{ t/ha}$), the root biomass showed the same regularity in different soil layers in varied forestlands. Root length density, root surface area density decreased gradually with diameter increased, 0–0.1 mm diameter root was most widely distributed in forestland, followed by 0.1–0.2 mm diameter root. Different diameter root length density, root surface area density and root biomass decreased with the increasing stand age in *Platycladus orientalis* and *Pinus tabuliformis* forest, but they were significantly lower than nature shrub. The aspect had an important impact on root biomass, root biomass of half shady slope was significantly higher than that of sunny slope and shady slope ($P < 0.05$). Root length density and root surface area density had a significant negative correlation with sand content ($P < 0.05$), 0–0.1 mm and 0.2–0.5 mm diameter root were particularly evident; root biomass also had a significant negative correlation with soil bulk density ($P < 0.05$), especially 0.2–0.5 mm diameter root. [Conclusion] The study revealed the root characteristics and their influencing factors and the results indicate that the selection of afforestation tree in soil and stone mountain should not only refer to local environmental conditions and soil characteristics, but also consider the growth characteristics of afforestation tree.

Key words: soil-stone mountainous area; *Pinus tabuliformis*; *Platycladus orientalis*; root; stand age

水土保持中最有效和最根本的方法就是植被固土,植被根系作为森林生态系统中一个重要组成部分,在碳分配、养分循环、地力维持及土壤抗冲性等方面发挥着重要作用^[1-3]。林木根系(通常指直径小于2 mm的根)是林木水分和养分吸收的主要器官,而林木根系深度分布会影响到林木拥有地下营养空间的大小和对土壤养分及水分的利用,进而影响林木的生长发育^[4]。目前,学者已针对林木根系分布特征开展了大量研究^[3,5],如 Jackson 等研究发现,温带落叶阔叶林80%的根系分布在土壤表层(0~20 cm)^[6];安慧等对黄土高原子午岭林区不同林木细根垂直分布特征研究发现:油松(*Pinus tabuliformis*)细根生物量随土壤深度增加呈单峰曲线,而白桦(*Betula platyphylla*)林细根生物量随土壤深度增加呈减少趋势,油松和白桦林表层土壤(0~20 cm)的比根长、根长密度和细根表面积显著高于底层(40~60 cm)^[7];黄林等对红壤丘陵区8种典型森林类型的不同径级的根长密度分布特征以及根系与土壤容重和有机碳等的关系进行了研究^[8]。这些研究对深入探讨根系吸收水分和养分时空的分布规律具有十分重要的指导意义。

华北土石山区一直是我国林业生态工程的重点研究区域,建国以来,在京津风沙源治理、三北防护林、太行山绿化等重点林业工程建设推动下,华北土

石山区生态恢复成效显著。根系不仅能表征林木生长的活力和健康状况,而且在森林生态系统养分循环、碳平衡中发挥重要作用。这些作用的发挥与根系数量、分布和形态等密切相关,而这往往受植物自身特性、植被类型及立地条件等的影响。北京土石山区红门川流域是华北土石山区典型代表,因此,对北京土石山区常见造林树种林下植被的根系空间分布特征及其影响因素研究,不仅有助于探讨林地中的细根动态变化和在碳平衡中的作用,而且通过对比研究可为北京土石山区及华北土石山区造林树种的选择与植被恢复提供科学依据。

1 研究区概况

红门川流域是典型的北京土石山区^[9],位于北京市密云县东部山区,行政隶属北京市密云县,流域涉及巨各庄、穆家峪、大城子3个乡镇的25个行政村,地理坐标为:117°02′~117°15′ E、40°21′~40°27′ N。流域内有红门川河,全长20.5 km,流域面积128 km²。流域地貌类型复杂,海拔100~1 200 m之间。红门川流域属暖温带半湿润季风型大陆性气候^[10]。该区域土层较薄,一般为10~30 cm,土壤多属褐土和棕色森林土类,粗骨性比较突出^[11]。

在京津风沙源治理、三北防护林、太行山绿化等重点生态工程建设推动下,红门川流域生态环境得

到了明显的改善。林地是红门川流域主要土地利用类型,乔木种类油松、侧柏 (*Platycladus orientalis*),灌木荆条 (*Vitex negundo*)、扁担杆 (*Grewia biloba*) 是主要树种。

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

2.1.1 样地选择

20 世纪 50 年代、70 年代和 90 年代是北京市密云县红门川流域大规模人工造林时期。根据林龄和样地立地条件的代表性,于 2014 年 6 月在研究区域进行野外采样,共调查 39 个森林样地,选取不同林龄油松林(35 年生林地 4 个;40 年生林地 10 个;57 年生林地 4 个)、不同林龄侧柏林(20 年生林地 2 个;40 年生林地 6 个;57 年生林地 3 个;天然次生侧柏林 5 个)以及天然灌丛(5 个,作为对照组)为研究对象,且造林前均为天然灌丛地。以 15 m × 15 m 作为标准样地,在每个森林样地上、中、下坡位布设调查样地。

2.1.2 植被调查

采用样方法进行植被调查,调查内容包括:林下植被生物量以及根系。草本和灌木生物量采用全刈法。在每个标准样地中,草本和灌木的生物量调查按对角线法各设 3 个小样方,尺寸规格分别为 1 m × 1 m 和 2 m × 2 m。野外称量灌、草湿质量并记录,采集部分样品带回实验室在 80℃ 条件下烘干至恒定质量,计算其生物量。

根系调查采用连续钻取土芯法,在油松、侧柏和天然灌丛林地进行根系采集。在每块标准样地中沿“S”形等距离选取样点 8 个,用内径 9 cm 的根钻在各样点分 2 层(0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm)钻取土芯。将带回室内土芯样品,经自来水浸泡,漂洗干净后,采用放大镜、剪刀、镊子等工具手工拣出根系。

郁闭度调查采用百步抬头法,在每个标准样地,沿对角线,每一步抬头观测有无树冠覆盖,如有树冠覆盖记为郁闭,如果没有树冠覆盖,记为无覆盖。统计调查林地内有树冠覆盖的点数,据此计算郁闭度。

$$\text{郁闭度} = (\text{有林冠覆盖点数} / \text{总点数}) \times 100\%$$

2.2 测定方法

用根系扫描仪 WinRHIZO2005 对不同径级根系分别进行根长、根表面积指标测定分析,并根据根长、根表面积和土芯体积计算根长密度 (cm/cm^3) 和根表面积密度 (cm^2/cm^3);扫描后的根系样品用滤纸包好,置入 65 ℃ (48 h) 烘箱中烘干至恒定质量,称量并记录根生物量。

2.3 数据分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS19.0

软件进行分析。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同数据组间的差异 ($P < 0.05$);用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 不同树种林地根系生物量、表面积和根长密度及其分布特征

不同树种林地根系生物量差异显著 ($P < 0.05$),灌丛林地根系生物量最高,为 $(6.84 \pm 1.35) \text{ t}/\text{hm}^2$,其次为侧柏林地,为 $(4.65 \pm 0.90) \text{ t}/\text{hm}^2$,油松林地根系生物量最低,为 $(3.33 \pm 0.93) \text{ t}/\text{hm}^2$,且同一林地根系生物量在不同土层均基本接近(表 1)。同一土层不同树种林地根系表面积密度也存在显著差异,分布规律表现为油松和侧柏林地根表面积密度相近,分别为 $(0.57 \pm 0.23) \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 、 $(0.52 \pm 0.14) \text{ cm}^2/\text{cm}^3$,均显著小于灌丛林地根表面积密度 ($(0.88 \pm 0.23) \text{ cm}^2/\text{cm}^3$)。根长密度反映某一土壤层根系伸展量,方差检验表明,同土层不同树种根长密度差异不显著 ($P > 0.05$)。

3.2 不同林龄林地根长密度、根表面积密度和根系生物量分布特征

3.2.1 不同林龄林地根长密度分布特征

侧柏林和油松林不同径级根长密度分布特征表明(表 2),0 ~ 0.1 mm 径级根系是林地根系分布最广的,分别占总根长密度的 $(69.95 \pm 1.75)\%$ 和 $(68.05 \pm 2.76)\%$,其次为 0.1 ~ 0.2 mm 径级根系,占总根长密度的 $(14.81 \pm 1.50)\%$ 和 $(14.82 \pm 0.46)\%$,两种林地极为接近。随林龄增大,不同土层侧柏林和油松林不同径级根长密度均呈递减趋势,且明显低于同一土层灌丛林相应径级的根长密度。

3.2.2 不同林龄林地根表面积密度分布特征

相同树种,0 ~ 10 cm 与 10 ~ 20 cm 土层均以 0 ~ 0.1 mm 径级的根表面积密度最大,其次为 0.1 ~ 0.2 mm 和 0.2 ~ 0.5 mm 径级,0.5 ~ 2 mm 径级的根表面积密度最低,根表面积密度表现为随根系径级的增加而减小(图 1),灌丛也表现出相似的规律。

同一径级,随着林龄的增大,侧柏林与油松林的根表面积密度均呈递减趋势。在 0 ~ 10 cm 土层,20 年生和 40 年生侧柏 0 ~ 0.1 mm 根表面积密度和总根表面积密度相近,而 57 年生侧柏林地的 0 ~ 0.1 mm 径级根表面积密度和总根表面积密度分别为 $(0.067 \pm 0.038) \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 和 $(0.214 \pm 0.103) \text{ cm}^2/\text{cm}^3$,较 20 年生和 40 年生侧柏明显降低(图 1a)。在 10 ~ 20 cm 土层,侧柏林地 0 ~ 0.1 mm 径级和总根表面积密度也呈相似的变化规律(图 1b)。

表 1 3 种林地根系生物量、根表面积和根长密度指标

Tab. 1 Root biomass, root length density and root surface area density in three forest types

树种 Species	土层 Soil layer/cm	生物量/(t·hm ⁻²)			表面积密度			根长密度		
		Biomass/(t·ha ⁻¹)			Superficial area density/(cm ² ·cm ⁻³)			Root length density/(cm·cm ⁻³)		
		均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Variable coefficient/%	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Variable coefficient/%	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Variable coefficient/%
灌丛 Shrub	0 ~ 10	3.43Aa	0.64	18.75	0.46Aa	0.11	24.52	1.03Aa	0.10	9.74
	10 ~ 20	3.41Aa	0.70	20.54	0.42Aa	0.15	34.92	1.02Aa	0.17	16.58
	0 ~ 20	6.84	1.35	19.75	0.88	0.23	25.97	2.05	0.27	13.17
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0 ~ 10	2.57Ab	0.31	11.88	0.31Ab	0.13	40.82	0.73Aa	0.15	20.26
	10 ~ 20	2.08Ab	0.61	29.52	0.26Ab	0.10	39.80	0.66Aa	0.13	19.84
	0 ~ 20	4.65	0.90	19.35	0.57	0.23	40.35	1.39	0.28	19.89
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	0 ~ 10	1.81Ac	0.57	31.56	0.27Ab	0.09	34.24	0.73Aa	0.11	14.71
	10 ~ 20	1.52Ac	0.37	24.48	0.25Ab	0.05	19.09	0.65Aa	0.14	21.15
	0 ~ 20	3.33	0.93	27.97	0.52	0.14	29.79	1.38	0.25	17.73

注:不同小写字母表示同土层不同树种根系生物量、表面积和根长密度差异显著 ($P < 0.05$);不同大写字母表示同树种不同土层根系生物量、表面积和根长密度差异显著 ($P < 0.05$)。Notes: different lowercase letters indicate significant differences in root biomass, surface area and root length density of different tree species ($P < 0.05$); different capital letters indicate significant differences in root biomass, surface area and root length density of different tree species($P < 0.05$).

表 2 3 种森林类型不同径级根长密度

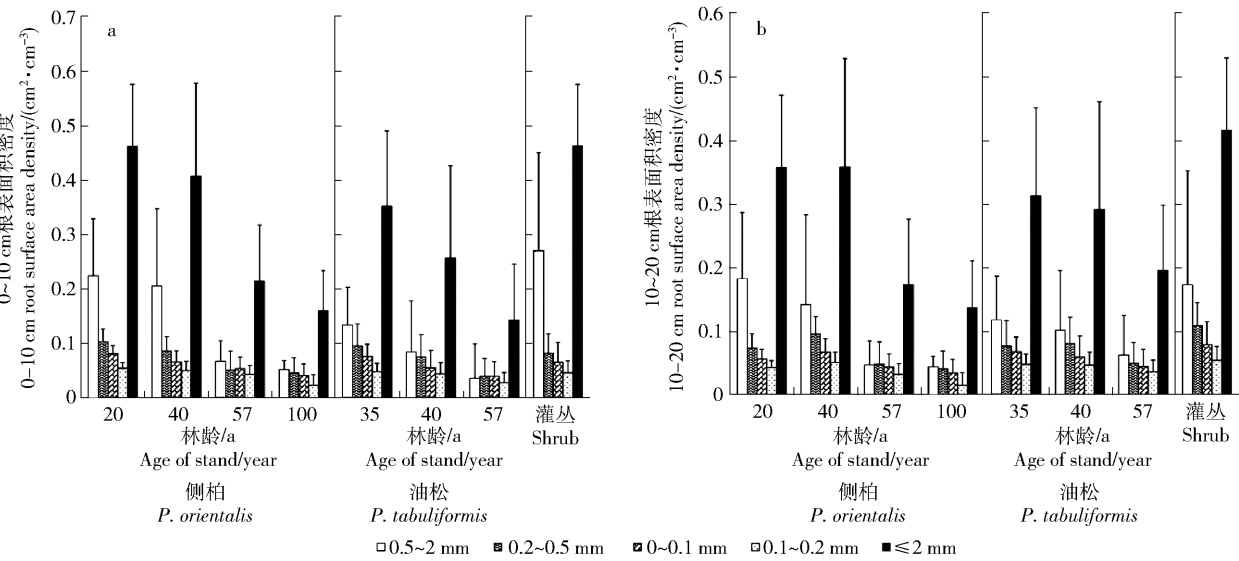
Tab. 2 Root length density of different diameter classes in three forest types

树种 Species	林龄/a Age of stand/year	土层 Soil layer/cm	根长密度 Root length density/(cm·cm ⁻³)				
			0.0 ~ 0.1 mm	0.1 ~ 0.2 mm	0.2 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 2 mm	≤ 2 mm
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	20	0 ~ 10	0.659 ± 0.102	0.114 ± 0.018	0.104 ± 0.022	0.055 ± 0.014	0.932 ± 0.140
		10 ~ 20	0.589 ± 0.126	0.117 ± 0.015	0.087 ± 0.010	0.041 ± 0.017	0.835 ± 0.166
	40	0 ~ 10	0.545 ± 0.154	0.110 ± 0.027	0.093 ± 0.019	0.044 ± 0.008	0.791 ± 0.208
		10 ~ 20	0.497 ± 0.113	0.106 ± 0.006	0.081 ± 0.012	0.058 ± 0.013	0.742 ± 0.140
	57	0 ~ 10	0.432 ± 0.090	0.103 ± 0.020	0.075 ± 0.019	0.024 ± 0.009	0.635 ± 0.127
		10 ~ 20	0.377 ± 0.103	0.079 ± 0.016	0.056 ± 0.016	0.018 ± 0.009	0.530 ± 0.133
	100	0 ~ 10	0.399 ± 0.104	0.096 ± 0.023	0.061 ± 0.016	0.011 ± 0.004	0.548 ± 0.131
		10 ~ 20	0.380 ± 0.115	0.083 ± 0.016	0.049 ± 0.015	0.008 ± 0.002	0.539 ± 0.135
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	35	0 ~ 10	0.563 ± 0.135	0.124 ± 0.019	0.107 ± 0.024	0.052 ± 0.021	0.846 ± 0.195
		10 ~ 20	0.536 ± 0.093	0.120 ± 0.020	0.095 ± 0.015	0.065 ± 0.018	0.816 ± 0.128
	40	0 ~ 10	0.512 ± 0.170	0.113 ± 0.029	0.091 ± 0.028	0.038 ± 0.019	0.755 ± 0.239
		10 ~ 20	0.448 ± 0.142	0.104 ± 0.025	0.083 ± 0.023	0.033 ± 0.015	0.668 ± 0.195
	57	0 ~ 10	0.394 ± 0.108	0.088 ± 0.028	0.071 ± 0.030	0.034 ± 0.029	0.587 ± 0.182
		10 ~ 20	0.354 ± 0.129	0.067 ± 0.022	0.045 ± 0.018	0.012 ± 0.007	0.478 ± 0.158
灌丛 Shrub		0 ~ 10	0.710 ± 0.074	0.128 ± 0.012	0.114 ± 0.012	0.075 ± 0.015	1.027 ± 0.100
		10 ~ 20	0.684 ± 0.122	0.131 ± 0.015	0.121 ± 0.013	0.083 ± 0.02	1.019 ± 0.169

3.2.3 不同林龄林地根系生物量分布特征

同一土层,侧柏林和油松林地根系生物量随林龄增加呈下降趋势,随土层加深,侧柏林和油松林根系生物量减少(图2)。0 ~ 10 cm 土层,随林龄增大,40 年生和 57 年生侧柏林地根系生物量较 20 年生

侧柏林下降分别下降了 14.09% 和 16.46%,57 年生油松林地根系生物量较 35 年生和 40 年生油松林地显著下降 54.62% 和 33.03%。10 ~ 20 cm 土层,57 年生侧柏林地根系生物量较 40 年生侧柏林地略有增加,但侧柏林根系生物量在该层总体呈随林龄



a、b 分别表示 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层 3 种森林类型不同径级根表面积。a and b show the root surface area of three forest types with different diameters in 0 – 10 cm and 10 – 20 cm soil layers.

图 1 3 种森林类型不同径级根表面积

Fig. 1 Root surface area density of different diameter classes in three forest types

增大而减小趋势。57 年生油松林地根系生物量较 35 年生和 40 年生油松林降低了 46.63% 和 37.80%。随土层加深,侧柏和油松林地根系生物量呈现递减趋势,且随林龄的增大,油松林两土层间根系生物量差值表现出减小趋势。

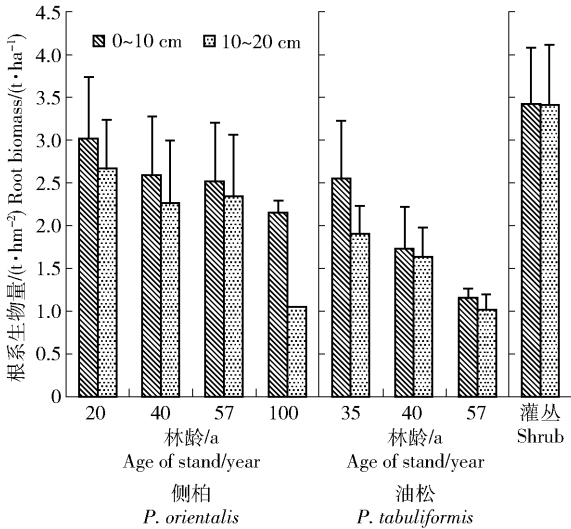


图 2 3 种森林类型根系生物量

Fig. 2 Root biomass in three forest types

3.3 林地根系生物量、根长密度和根表面积的
影响因素分析

研究区根系生物量与灌、草生物量呈极显著正相关(表 3, $P < 0.01$),这是由于灌木和草本生物量的快速增长,使得根系生物量相应增多。这与闫文德等^[12]和 Gonzalez 等^[13]研究结果一致。灌、草生物量与根长密度和根表面积密度之间显著正相关(表 3, $P < 0.05$),尤其与 0 ~ 0.1 mm 径级根系的关

系更为密切。

植被郁闭度是影响根系分布的重要因子之一。研究表明:根系生物量、根长密度及根表面积密度均与林分郁闭度关系密切,均呈极显著负相关($P < 0.05$)。

坡度、坡向等地形条件对地表光、热、水资源具有再分配作用,进而影响林地根系的生长和分布^[14]。本研究表明不同坡向土壤根系生物量之间差异显著($P < 0.05$),半阴坡的根系生物量明显大于阳坡和阴坡根系生物量,与半阳坡根系生物量差异显著($P < 0.05$)(表 4),这是因为半阴坡水分条件和光照条件适宜,有利于林下植被的生长。野外实地调查也发现,半阴坡林下灌木多,植物覆盖度大。

土壤质地是土壤重要的物理性状指标之一,对植被根系生长分布和活力有重要影响^[15]。研究区植被总根长密度和总根表面积密度与黏粒含量之间存在显著正相关($P < 0.05$),与砂粒含量呈显著负相关($P < 0.05$),其中径级 0 ~ 0.1 mm 和 0.2 ~ 0.5 mm 根系长度受土壤黏粒和砂粒的影响显著,表明土壤质地越细,越有利于根长和根表面积增大(表 3)。前人大量的研究已证实根系与土壤黏粒含量关系密切,且一般认为土壤黏粒含量高的土壤透性差,不利于根系深扎,导致根系较短及根系量减少^[15-16]。本研究呈现相反的结果,这是由于研究区土壤为砂壤土,黏粒含量本身较低,适当的增加黏粒含量反而会促进根系对营养物质的吸收,从而增大根长密度和根表面积密度。

表 3 根系生物量、根长密度和根表面积指标与其影响因子的相关系数

Tab.3 Correlation analysis with environmental elements of root biomass, root length density and root superficial area density

根系分布特征指标 Root distribution characteristics index	灌木 生物量 Shrub biomass	草本 生物量 Grass biomass	郁闭度 Canopy density	坡度 Gradient	黏粒 Clay	粉粒 Slit	砂粒 Sand	土壤密度 Bulk density
总根生物量 Total root biomass	0.302 **	0.338 **	-0.486 **	0.010	0.010	-0.010	0.011	-0.300 **
总根长密度 Total root length density	0.358 **	0.381 **	-0.358 **	0.226 *	0.287 *	0.200	-0.300 **	0.140
0.0~0.1 mm 径级根长密度 Root length density of 0.0~0.1 mm diameter root	0.327 **	0.314 **	-0.349 **	0.210	0.290 *	0.200	-0.298 **	0.100
0.1~0.2 mm 径级根长密度 Root length density of 0.1~0.2 mm diameter root	0.250 *	0.244 *	-0.372 **	0.190	0.180	0.090	-0.210	0.140
0.2~0.5 mm 径级根长密度 Root length density of 0.2~0.5 mm diameter root	0.242 *	0.235 *	-0.334 **	0.228 *	0.220	0.150	-0.243 *	0.229 *
0.5~2.0 mm 径级根长密度 Root length density of 0.5~2.0 mm diameter root	0.161	0.132	-0.200	0.180	0.236 *	0.200	-0.236 *	0.170
总根表面积密度 Total root superficial area density	0.362 **	0.349 **	-0.416 **	0.257 *	0.281 *	0.170	-0.238 *	0.120
0.0~0.1 mm 径级根表面积密度 Root superficial area density of 0.0~0.1 mm diameter root	0.310 **	0.326 **	-0.357 **	0.225 *	0.279 *	0.190	-0.295 **	0.130
0.1~0.2 mm 径级根表面积密度 Root superficial area density of 0.1~0.2 mm diameter root	0.254 *	0.240 *	-0.370 **	0.190	0.180	0.090	-0.210	0.140
0.2~0.5 mm 径级根表面积密度 Root superficial area density of 0.2~0.5 mm diameter root	0.280 *	0.273 *	-0.347 **	0.229 *	0.235 *	0.160	-0.251 *	0.233 *
0.5~2.0 mm 径级根表面积密度 Root superficial area density of 0.5~2.0 mm diameter root	0.120	0.110	-0.206	0.210	0.120	0.140	-0.160	0.040

注: **表示极显著性水平 0.01, * 表示显著性水平 0.05, 样本数为 117 个。Notes: ** refers to the significance level of 0.01, * refers to the significance level of 0.05, with a sample size of 117.

表 4 不同坡向森林根系生物量、根长密度和根表面积指标

Tab.4 Root biomass, root length density and root surface area density in different slope aspect

坡位 Slope position	0~10 cm 土层 根生物量/ (t·hm ⁻²) Root biomass of 0~10 cm soil layer/(t·ha ⁻¹)	10~20 cm 土层 根生物量/ (t·hm ⁻²) Root biomass of 10~20 cm soil layer/(t·ha ⁻¹)	0~10 cm 土层 根长密度 Root length density of 0~10 cm soil layer/(cm·cm ⁻³)	10~20 cm 土层 根长密度 Root length density of 10~20 cm soil layer/(cm·cm ⁻³)	0~10 cm 土层根 表面积密度 Root surface area density of 0~10 cm soil layer/ (cm ² ·cm ⁻³)	10~20 cm 土层根 表面积密度 Root surface area density of 10~ 20 cm soil layer/ (cm ² ·cm ⁻³)
阴坡 Shady slope	1.879 ± 1.326C	1.809 ± 1.216C	0.688 ± 0.388	0.783 ± 0.481	0.258 ± 0.162	0.311 ± 0.221
半阴坡 Half-shady slope	2.556 ± 1.426A	2.958 ± 1.658A	0.684 ± 0.302	0.696 ± 0.396	0.306 ± 0.192	0.31 ± 0.242
半阳坡 Half-sunny slope	2.521 ± 0.93AB	2.854 ± 1.846AB	0.698 ± 0.131	0.671 ± 0.194	0.22 ± 0.078	0.212 ± 0.075
阳坡 Sunny slope	2.202 ± 1.135BC	1.839 ± 1.093BC	0.596 ± 0.396	0.62 ± 0.397	0.237 ± 0.184	0.218 ± 0.18

注: 不同大写字母表示差异显著性水平 0.01。Note: varied capital letters indicate significant difference at P<0.01 level.

土壤密度是综合反映土壤结构、松紧状况、孔隙状况和土内生物的活动的指标之一^[17]。研究区根系生物量与土壤之间存在显著负相关(P<0.05),表明根系的增多,根对土壤的穿插作用越强,有利于土壤的疏松,尤其是径级 0.2~0.5 mm 根系对土壤密度的影响最为明显。

4 结 论

研究以北京土石山区密云县红门川流域典型造林树种根系为研究对象,通过野外调查实验和室内

测量,分析林下植被特征及其影响因素。研究发现,不同树种林地根系生物量存在差异显著(P<0.05),主要表现为灌丛林地>侧柏林地>油松林地,同一林地在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层根系生物量基本接近。不同树种林地根长密度和根表面积密度均随径级的增大而减小。随林龄增大,侧柏、油松林不同径级根长密度、根表面积密度和根系生物量均呈递减趋势,且普遍低于灌丛林地。
林地根系生物量、根长密度和根表面积密度与灌、草生物量之间显著正相关性(P<0.05)。坡向

对林地根系生物量产生重要影响,半阴坡的根系生物量明显大于阳坡和阴坡根系生物量。林地根长密度和根表面积密度与砂粒含量显著负相关($P < 0.05$),其中径级 0 ~ 0.1 mm 和 0.2 ~ 0.5 mm 根系尤为明显。根系生物量与土壤密度之间显著负相关($P < 0.05$),尤其是径级 0.2 ~ 0.5 mm 根系。

由此可见,为加强对北京土石山区的保护,对土石山区造林树种的选取不仅要参考当地环境条件和土壤特征,还要充分考虑造林树种的生长特性。

参 考 文 献

[1] 于水强,王政权,史建伟,等. 树木根系碳分配格局及其影响因素 [J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2663-2669.
Yu S Q, Wang Z Q, Shi J W, et al. Research review on the pattern of carbon allocation to roots and environmental factors in forest ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2663-2669.

[2] 周云艳,陈建平,杨倩,等. 植物根系固土护坡效应的原位测定 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 66-70.
Zhou Y Y, Chen J P, Yang Q, et al. In situ measurement of mechanical effect of plant root systems on soil reinforcement and slope protection[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 66-70.

[3] 李谦,周本智,安艳飞,等. 绿竹根系分布及生物力学性质 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1319-1326.
Li Q, Zhou B Z, An Y F, et al. Root system distribution and biomechanical characteristics of *Bambusa oldhami* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(5): 1319-1326.

[4] 赵忠,李鹏,王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 37-39.
Zhao Z, Li P, Wang N J. Distribution patterns of root systems of main planting tree species in Weibei Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(1): 37-39.

[5] 梅莉,王政权,韩有志,等. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局 [J]. 应用生态学报, 2006, 7(1): 1-4.
Mei L, Wang Z Q, Han Y Z, et al. Distribution patterns of *Fraxinus mandshurica* root biomass, specific root length and root length density [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 7(1): 1-4.

[6] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 1997, 94(14): 7362-7366.

[7] 安慧,韦兰英,刘勇,等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 611-619.
An H, Wei L Y, Liu Y, et al. Distribution characters of fine root of artificial *Pinus tabulaeformis* and natural *Betula platyphylla* forests and their relation to soil nutrients in hilly loess regions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 611-619.

[8] 黄林,王峰,周立江,等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6110-6119.
Huang L, Wang F, Zhou L J, et al. Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties[J].

Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6110-6119.

[9] 赵阳,余新晓,贾剑波,等. 红门川流域土地利用景观动态演变及驱动力分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 239-248.
Zhao Y, Yu X X, Jia J B, et al. Analysis on dynamic evolution and driving force of land-use landscape in Hongmenchuan Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(9): 239-248.

[10] 朱丽,秦富仓,姚云峰. 北京市红门川流域径流对防护林结构变化的响应 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 63-67.
Zhu L, Qin F C, Yao Y F. Response of runoff to changes of shelter forest structure in Hongmenchuan Basin of Beijing City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 63-67.

[11] 曾宪勤,刘宝元,刘瑛娜,等. 北方石质山区坡面土壤厚度分布特征:以北京市密云县为例 [J]. 地理研究, 2008, 27(6): 1281-1288.
Zeng X Q, Liu B Y, Liu Y N, et al. Soil depth distribution characteristics on the lithoidal mountainous slope of northern China: a case study of Miyun County, Beijing[J]. Geographical Research, 2008, 27(6): 1281-1288.

[12] 闫文德,田大伦,焦秀梅. 会同第二代杉木人工林林下植被生物量分布及动态 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(3): 323-327.
Yan W D, Tian D L, Jiao X M. A study on biomass dynamics and distribution of undervegetation in the secondary generation of Chinese fir plantation in Hui Tong[J]. Forest Research, 2003, 16(3): 323-327.

[13] Gonzalez M, Augusto L, Gallet-Budynnek A. Contribution of understory species to total ecosystem aboveground and belowground biomass in temperate *Pinus pinaster* Ait. forests [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 289: 38-47.

[14] 王淑芳,王效科,欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素 [J]. 土壤, 2011, 43(4): 515-524.
Wang S F, Wang X K, Ouyang Z Y. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in upstream watershed of Miyun Reservoir in North China[J]. Soils, 2011, 43(4): 515-524.

[15] 贾立华,赵长星,王月福,等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 684-690.
Jia L H, Zhao C X, Wang Y F, et al. Effects of different soil textures on the growth and distribution of root system and yield in peanut [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(7): 684-690.

[16] 李潮海,李胜利,王群,等. 不同质地土壤对玉米根系生长动态的影响 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(9): 1334-1340.
Li C H, Li S L, Wang Q, et al. Effect of different textural soils on root dynamic growth in corn [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(9): 1334-1340.

[17] Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. Taking China temperature daily range warming trends and regional variations[J]. Journal of Climate, 2004, 17: 4453-4462.

(责任编辑 范 娟
 编委 杨晓晖)