

北京市3种针叶绿化树种根系结构分析

刘丽娜¹ 徐程扬¹ 段永宏¹ 周睿智¹ 代向阳²

(1 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 2 浙江林学院环境科技学院)

摘要:该文从根系长度、表面积、体积、根系序级、根系数量等方面对北京市油松、侧柏、白皮松3种针叶绿化树种的根系形态特征进行了对比分析。结果表明:3个树种在根系结构上有良好的一致性,即直径 <1 mm的根系连接数量、根系累计长度以及表面积占据总量的多数;直径 <2 mm的根系数量、根系长度和根系表面积是根系总量的主体;0~3序级根系连接数和根系表面积占所有序级根系连接数和表面积的70%以上。根系形态分析结果显示,白皮松根系分枝能力弱于侧柏和油松,并以油松根系分枝强度为最大。

关键词:侧柏;油松;白皮松;根系结构

中图分类号:S718.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2008)01-0034-06

LIU Li-na¹; XU Cheng-yang¹; DUAN Yong-hong¹; ZHOU Rui-zhi¹; DAI Xiang-yang². **Root morphology of three greening conifer species in Beijing.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(1) 34-39 [Ch, 27 ref.]

¹ Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

² School of Environment and Technology Science, Zhejiang Forestry University, Lin'an City, 311300, P. R. China.

Root morphological characteristics, such as length, surface area, volume, orders and number of root system of three greening conifer species—*Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis* and *Pinus bungeana*, were analyzed in the paper. The results showed that root morphology of the three species was consistent well, in which the root link, accumulative length and surface area of roots in $d < 1$ mm accounted for the majority of total roots, while roots in $d < 2$ mm were the principal part in root system. And link, surface area of roots in order of 0-3 accounted for 70% of total roots. Branching capability of the root system of *Pinus bungeana* was weaker than that of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis*, and that of *Pinus tabulaeformis* root was the most intensive.

Key words *Platycladus orientalis*; *Pinus tabulaeformis*; *Pinus bungeana*; root morphology

侧柏 (*Platycladus orientalis*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、白皮松 (*Pinus bungeana*) 为我国华北、西北、东北西部荒山造林的主要树种,也是园林绿化的常用树种,同时也是较抗旱、耐瘠薄的树种。关于这3个树种的抗旱机理有许多报道^[1-2]。但是,在其抗旱、耐瘠薄特性与根系关系方面缺乏研究。根系是植物的重要组成部分,是植物生长发育、新陈代谢的重要营养器官,对林木生长起着决定性作用^[3-5],并对森林碳平^[6]、森林水文过程起着重要作用^[7]。树木根系的体积虽然只有地上部分的1/10~1/4,但根系与土壤接触面积广,且随着立地条件的变化,根系形态特征存在着一定的变异,这些都给树木根系的

研究工作带来困难,而目前对树木根系的科学认识已难以适应林业生产的发展需要^[8]。我国在植物根系的水平和垂直分布规律^[8-10]方面研究较多,但对树木根系形态结构特征方面的研究报道很少。本文从3种树种根系结构特性入手,分析不同径级、不同序级根系的组成特性,探讨不同径级、序级根系的功能差异,为合理的根系分级奠定基础,并从根系形态上进一步解释各树种的抗旱能力。

1 试验地概况

试验地设在北京林业大学妙峰山教学实习林场苗圃(普照寺作业区)。其地理位置39°54'N, 116°28'

收稿日期:2006-10-23

http://www.bjfujournal.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:教育部博士学科点专项基金项目(20050022007)、国家自然科学基金项目(30571483)。

第一作者:刘丽娜,主要研究方向:林木根系呼吸。电话:010-62390651, Email: dahlaxiaoyuer@163.com 地址:100083 北京林业大学 965 信箱。

E, 属太行山北端支脉西山山地, 大陆性季风气候, 春季干旱多风, 夏季炎热多雨, 冬季干燥寒冷。年均气温 12.2℃, 年均降水量近 700 mm, 降水多集中在 7—8 月。植物生长期为 220 d, 无霜期 180 d。

苗圃地土壤为淋溶褐土, 淤积母质, 质地中壤, 耕作层土壤以团粒状为主, 通透性良好。土壤有机质含量 1.66%~1.96%, 全氮含量 0.077%~0.085%, 速效磷约为 5.4~6.2 μg/kg, 速效钾含量为 180 μg/kg, pH 值 7.6。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验根系主要取自妙峰山试验林场普昭院苗圃中栽培的白皮松、侧柏和油松。年龄为 15~17 年, 栽植密度为 2 m×3 m。白皮松树高为(2.60±0.30) m, 直径为(8.3±0.5) cm, 冠幅为(1.85±0.40) m; 油松树高为(3.20±0.60) m, 直径为(10.6±0.7) cm, 冠幅为(2.45±0.35) m; 侧柏树高为(2.30±0.25) m, 直径为(7.6±0.4) cm, 冠幅为(2.35±0.30) m。

2.2 试验方法

2.2.1 根系取样方法

在苗圃中选择生长年龄相近的白皮松、油松和侧柏个体作为取样对象, 统一在树木东南方向设定取样点, 取样点在距树干 1/2 冠幅半径处。为了统一土壤体积, 取样的面积定为 30 cm×30 cm, 深度为 30 cm。为了避免多个根系片断造成扫描结果的偏差, 在取样时, 尽可能取完整的根段。采用挖掘法, 将所采根样用蒸馏水清洗干净后, 采用加拿大 Epson Twain Pro 扫描仪获取形态结构图像, 采用专业的根系形态学和结构分析应用系统 WINRhizo 对根系长度、根系表面积、根系体积、根系连接数等指标进行测定分析。

2.2.2 根系形态分析方法

根系形态中的分级确定为直径 $d < 0.1$ mm、0.1~1 mm、1~2 mm、2~5 mm、 > 5 mm, 各级别按照下限排除。根系序级以扫描根系中径级最大的根系为 0 级根, 在 0 级根系上着生的根系为 1 级根, 在 1 级根系上着生的根系为 2 级根, 以此类推。根系连接数是根系分枝的连接点数。

3 结果与分析

3.1 不同径级和序级根系与根系结构指标的关系

3.1.1 根系径级与结构指标

侧柏、油松、白皮松的根系连接数量随着根系直径的增加大幅度降低, 但 < 0.1 mm 的细根连接数量相对较少(图 1a), 占总根系连接数量的比例仅为 16.2%~22.3%; 0.1~1 mm 的细根连接数量占据根

系总连接数量的最大比例, 比例范围为 58.5%~64.9%; 1~2 mm 根系连接数量占总数量的 11.7%~15.3%; > 2 mm 的根系仅占总数量的 6%左右。

从不同径级累计根系连接数量变化过程可以看出, 在直径达到 1.0~1.5 mm 时, 侧柏和白皮松根系连接数量基本趋于稳定(图 1a), 而油松则在 2 mm 以上逐渐趋于稳定(图 1a)。也就是说, 与油松相比, 侧柏和白皮松的根系分枝强度要小, 白皮松的根系分枝强度最小。侧柏、油松、白皮松根系总数量分别为 21 726、20 817 和 13 462 条, 其中, < 1 mm 的细根数量分别占总数量的 98.4%、98.8%和 98.1%; 1~2 mm 的根系分别只占 0.9%、1.2%和 1.5%(表 1)。

根系的累计长度和累计表面积是根系吸收范围的重要决定因素, 通常细根($d < 2$ mm)占的比例越大, 根系的累计长度和累计表面积越大。3 个树种细根的根系长度和表面积占据其根系总长度和总表面积的主体(图 1b), 其中, 直径为 0.1~1 mm 的根系长度占总长度的 62%~69%, 直径 1~2 mm 的根系长度占总长度的 15.4%~22.7%, 而直径 < 0.1 mm 根系长度只占总长度的 5.3%~8.7%(表 1)。也就是说, 数量最大的根系($d < 1$ mm)主要是根毛或极短的小根。然而, 直径较大的根系的表面积却占较大的份额, 在根系表面积与直径关系变化图上表现为累计根系表面积达到平稳所对应的直径较大(图 1c)。3 个树种的 < 1 mm 根系的表面积均不及总表面积的 40%, 其中, < 0.1 mm 的根系表面积所占比例尚不到总表面积的 1%, > 1 mm 的根系表面积所占比例在树种间变动较大(表 1)。总体上, 白皮松大径级根系($d > 5$ mm)表面积所占比例较低, 而油松和侧柏大径级根系表面积所占比例较高, 仍以 0.1~1 mm 根系表面积比例最高。

白皮松根系直径为 1~2 mm 和 2~5 mm 的根系体积占根系总体积的主体(80.1%), 油松和侧柏直径 > 5 mm 根系体积占根系总体积的主体, 分别为 73.7%和 63.8%(表 1)。

在小径级($d < 2$ mm)范围内, 3 个树种累计根系体积随根系直径增大的提高幅度远小于其他 3 个指标(图 1d), 表明大径级根系体积在根系总体积中所占的比重较大, 尤其是侧柏和油松, > 5 mm 的根系的体积分别占总体积的 64%和 74%; < 2 mm 的根系的体积则分别占总体积的 22%和 9%; 与此相反, 白皮松 < 2 mm 根系的体积占总根系体积的 53%。

不同生态组植物的根系结构变化较大^[11], 这种变化与植物的适应性相联系^[12]或水分胁迫^[12]、养分供给^[13-14]的反映相联系, 并且与根系生长对环境异质性^[15]和机械胁迫^[16]的反映等密切相关。在同样土壤条件和经营管理条件下, 3 个树种的根系结

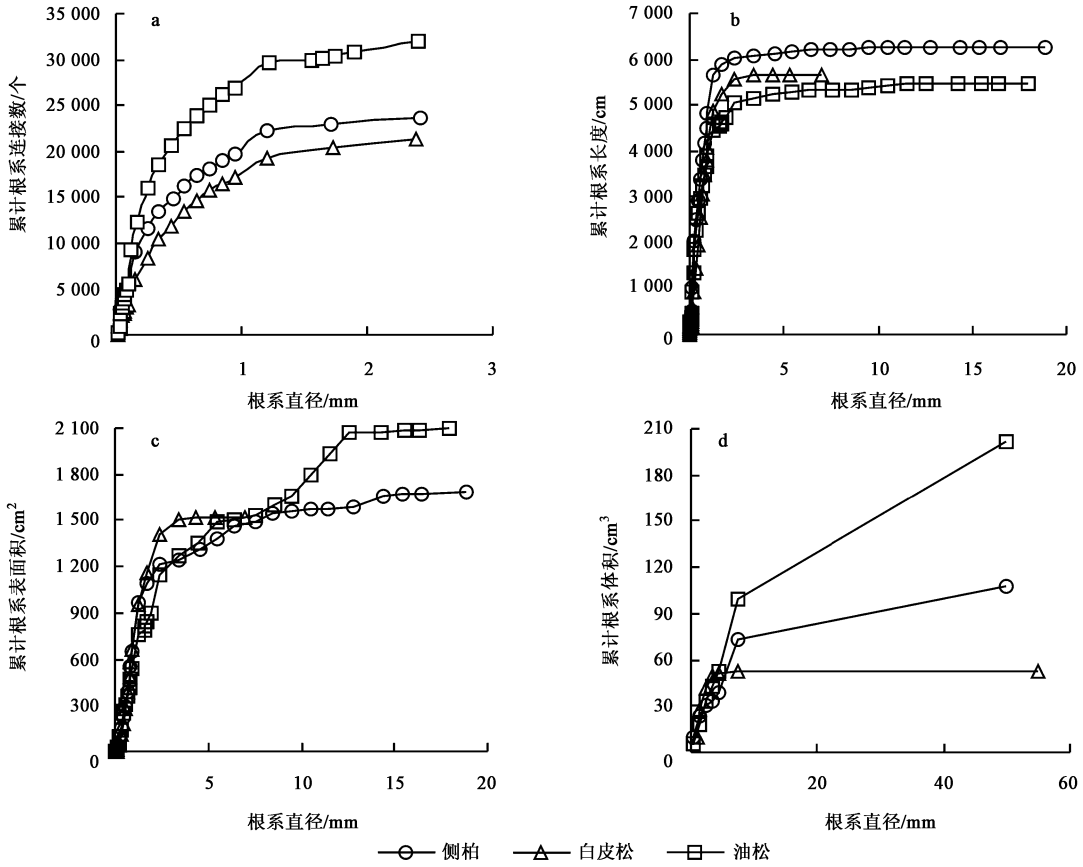


图1 根系径级与根系结构指标之间的关系

FIGURE 1 Relationship between diameter and morphological parameters to *Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis* and *Pinus bungeana*

表1 不同径级根系各结构指标占总量的比例

%

TABLE 1 Proportions of root number, root length and root surface area in different diameter classes to total roots

根系指标	树种	根系径级/mm					
		<0.1	0.1~1	1~2	2~5	5~10	>10
根系数量	白皮松	16.2	62.4	15.3	6.0	0.1	0.0
	油松	17.1	64.9	11.7	4.7	0.9	0.7
	侧柏	22.3	58.4	13.2	4.0	1.7	0.4
根系长度	白皮松	5.3	63.9	22.7	8.2	0.04	0.0
	油松	8.7	62.0	15.4	9.2	2.6	2.1
	侧柏	7.8	68.8	17.1	3.9	1.9	0.5
根系表面积	白皮松	0.4	40.2	34.8	24.4	0.2	0.0
	油松	0.4	25.0	17.5	22.0	14.6	20.5
	侧柏	0.5	37.9	26.0	13.4	14.6	7.6
根系体积	白皮松	—	19.0*	33.8	46.3	0.9	0.0
	油松	—	2.9*	6.2	17.2	22.8	50.9
	侧柏	—	8.4*	13.5	14.3	31.5	32.3

注: * 为 $d < 1$ mm 根系体积之和。

构间的差异,在很大程度上反映了树种的特点。从总体上,侧柏和白皮松根系分枝强度显著低于油松。从根系各指标之间的关联度上可以看出,根系长度、根系表面积、根系体积之间总体上均不存在显著的相关关系。按照根系直径的径级分组后,根系长度和根系表面积、根系长度和根系体积、根系表面积和根系体积间均有显著的线性关系,但是,不同径级间线性关系的斜率变化极大(图2),这表明,在分析不同树种间根系特征时,每一级根系径级的直径范围

越大,结果的可靠性越低。对于研究的3个树种来说,直径<5 mm根系分级范围宜小,对直径>5 mm根系可以放宽根系分级的直径范围,如将油松直径<0.2 mm根系划为一组,线性关系的确定系数 R^2 只有0.77,比更细级别(如 $d < 0.05$ mm, $R^2 = 0.97$; 0.05 mm < $d < 0.1$ mm, $R^2 = 0.95$)确定的相关系数小得多。但是,0.1~1 mm、1~2 mm、2~5 mm以及5~10 mm等级别根系长度与表面积的关系较为密切,尽管这种关系不及更细级别根系。

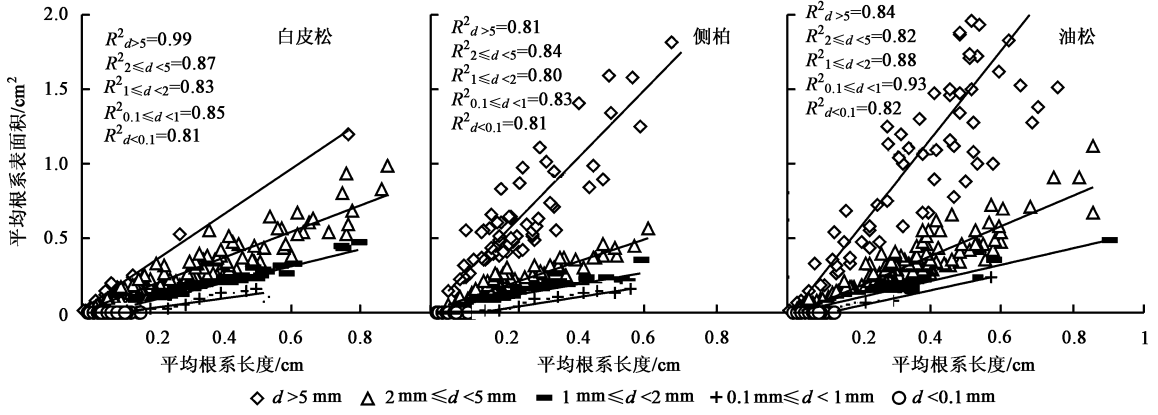


图2 油松、白皮松、侧柏根系结构参数间的关系

FIGURE 2 Relationship among the parameters of root architecture to *Pinus tabulaeformis*, *Pinus bungeana* and *Platycladus orientalis*

3.1.2 根系序级与结构指标

按照不同序级统计,白皮松、侧柏和油松的第1序级、第2序级根系长度均占据各序级根系总长度的50%以上(图3a)。其中,侧柏第1序级、第2序级的根系长度所占比例最高,达70.9%;油松第1序级、第2序级的根系长度所占比例最低,为58.4%;而根系长度总量则以白皮松最低(715 cm),侧柏和油松相当,分别为1 179和1 180 cm。油松的第3序级根系长度仍占总长度的1/4,在3个树种中表现出相对较强的根系分枝能力。

3个树种的1、2、3级根系的连接数均占总连接数的80%以上(图3b),这表明3个树种根系的侧根

并不十分发达。从总数量上看,白皮松1、2、3级根系连接数为3 680个,仅为侧柏的57.5%、油松的36.6%。白皮松各序级根系平均长度的连接数为3.8个/cm,侧柏为4.4个/cm,油松为6.2个/cm,所以,3个树种相对而言,白皮松根系分枝强度最低。

3个树种表面积最高的根系序级为1序级,其次是2序级(图3c)。虽然3个树种0序级根系的连接数较少、总长度较短,但其表面积却相对较高,白皮松、侧柏、油松0序级根系表面积分别占其总表面积的22.1%、12.8%和12.5%;1序级根系表面积所占比例分别为37.3%、45.0%和36.5%;2和3序级根系表面积总和所占比例分别为35.8%、38.6%和

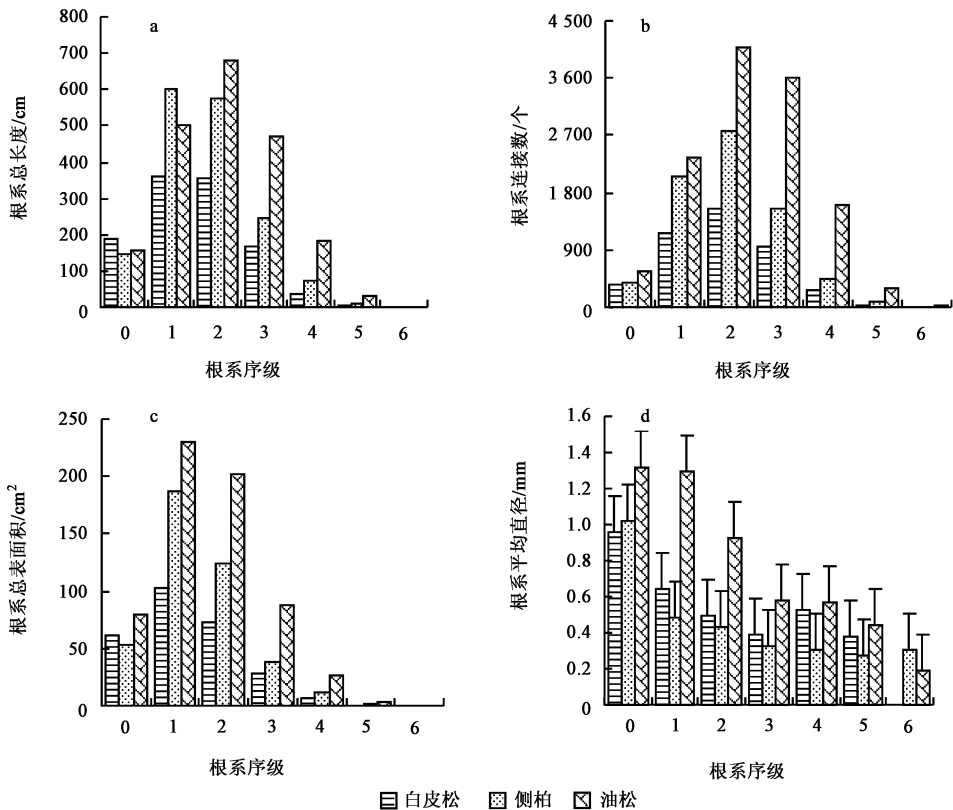


图3 油松、白皮松、侧柏序级根系与形态指标间的关系

FIGURE 3 Relationship between root order and morphological parameters to *Pinus tabulaeformis*, *Pinus bungeana* and *Platycladus orientalis*
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

44.7%。由此可见,1~3 序级根系是白皮松、侧柏和油松根系养分与水分吸收的主体。

各序级根系平均直径变幅较大,但总体上仍随序级的增加呈显著降低势态(图 3d)。这表明,高序级根系(3 级以上)以细小的根系(甚至根毛, $d < 0.5 \text{ mm}$)为主,但是高序级根系也有相对较粗的侧根($d > 0.5 \text{ mm}$)。

从吸收利用角度出发,根毛和较细的根系是土壤养分、水分的主要吸收者和利用者,较粗的根系的养分和水分吸收利用能力相对较弱,其物质合成、运输和贮藏能力则逐渐加强。所以,根系吸收面积角度出发,白皮松高序级(3 级以上)根系总量相对较少,而侧柏和油松则相对较多。也就是说,白皮松高序级根系吸收面积要低于侧柏和油松。这从另一个侧面反映出白皮松根系分枝强度要低于侧柏和油松。

4 结论与讨论

4.1 根系径级与结构指标

白皮松、侧柏、油松细根数量多、表面积大,直径 0.1~1 mm 的细根连接数量占据根系总连接数量的比例最大,范围为 58.5%~64.9%,根系长度占总长度的 62.0%~68.8%;直径 < 1 mm 根系表面积占总表面积的 25.4%~40.6%;直径 < 2 mm 根系表面积占总表面积的 42.9%~75.4%(表 1)。由于直径 < 0.5 mm 根系每年的周转速率为 30%~90%^[17-19],所以,细根是 3 个树种吸收养分的主体。

4.2 根系序级与结构指标

白皮松,侧柏,油松 3 个树种中 1~2 序级根系连接数量、累计长度、表面积可占各个序级根系总量的 35.5%~62.4%、41.9%~63.2%、33.1%~68.7%;1~3 序级根系相应占 42.9%~84.9%、41.9%~81.6%、43.7%~82.7%。所以 1~3 序级根系是 3 个树种根系的主要群体,也是养分吸收的主要功能实现者。其中,白皮松 1~3 序级根系的连接数量、累计长度和表面积值分别占总量的 42.9%、41.9%和 43.7%,是 3 个树种根系分枝强度最弱的。

综上所述,3 个树种在根系结构上有良好的一致性,即直径 < 1 mm 根系连接数量和根系累计长度以及表面积占据总量的多数;直径 < 2 mm 根系数量、根系长度和根系表面积是根系总量的主体;0~3 序级根系连接数和根系表面积占有序级根系连接数和表面积的 70%以上。但是,小径级($d < 2 \text{ mm}$)根系体积占总体积比例较低。其中白皮松 2~5 mm 根系数量、表面积、体积占其总的根系数量、表面积、体积的百分比都要大于油松和侧柏,根系形态分析

结果认为,白皮松根系分枝能力弱于侧柏和油松。

Bide 等^[20]的研究结果表明,根系呼吸随着根系直径的增加指数下降。由此推断,白皮松、侧柏和油松分别占总数量的 78.6%、80.7%和 82%,总表面积的 40.6%、38.4%和 25.4%,总体积的 19.0%、8.4%和 2.9%的直径 < 1 mm 的根系周转对能量的消耗可能会相当高,即白皮松、侧柏和油松将在维持 1~3 序级根系所有活动上付出较高的能量代价。由于 3 个树种树木的立地条件和经营条件相同,这种根系结构差异可以理解为土壤资源利用能力上的差异,即该种立地地下油松和侧柏对土壤资源获得能力要强于白皮松。

综上所述,对于这 3 个树种来说,细根,尤其是直径在 0.1~1 mm 的细根,可能在吸收养分和水分中起到关键的作用。在同样土壤条件和经营管理条件下,3 个树种的根系结构间的差异,在很大程度上反映了树种的特点。从根系各指标之间的关联度上可以看出,根系长度、根系表面积、根系体积之间总体上均不存在显著的相关关系。由于种种限制没有根据直径对根系进一步细分,当把不同级别根系的径级范围进一步缩小(如 0.1 或 0.2 mm)时,这种关系极为密切(数据未发表)。因此,在研究中对根系进行分级时,为了更好地体现根系的功能,细根的径级范围宜小,如银槭(*Acer saccharinum*)、香脂杨(*Populus balsamifera*)、白云杉(*Picea glauca*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、脂松(*Pinus resinosa*)、白栎(*Quercus* spp.)等树种,最合理的细根径级是直径 < 0.5 mm 的细根,或者更小径级^[21]。

林木根系形态与抗旱性的研究较少,但是在农作物方面研究较多。在大田和水培条件下对水稻的研究表明,根系长度与田间抗旱性相关^[22]。O'Toole 等^[23]发现从稻田里拔出秧苗用的力与秧苗的抗旱性及其根的重量、分枝和数目有相关性。在苗期筛选耐旱性的形态指标时发现,根系的长度作为耐旱性的形态指标最为合适^[24];Nazirov 等^[25]比较了两个棉花品种 AN402 和 Tashkent 1 的根系形态,发现需水较少的 AN402 发根快,主根和侧根的膨压较高且最终根长较长。对于本文所研究的 3 个树种而言,白皮松根系总长度(715 cm)较侧柏(1 180 cm)和油松(1 179 cm)低,侧柏和油松根系序级(0~6 序级)比白皮松(0~5 序级)更高,因此,从根系形态上判断,侧柏和油松的抗旱性要高于白皮松。

根系分级一直没有统一的标准,按照约定俗成的分级方法,多数学者都采用直径 < 2 mm、2~5 mm、> 5 mm^[8,26]分级方法,在存在更大径级级别的根系时,将直径 > 5 mm 根系又划分成 5~10 mm、> 10 mm 等。典型的细根径级划分(如所有直径小于

0~1或0~2 mm的根系)对于大多数树种来说范围过大,其中包括了很多平均寿命相对较长的根系^[27]。通常,径级较大的根系的功能主要是运输、贮藏等,具有吸收功能的根系主要以径级较小的根系为主。仅从研究的3个针叶树中根系形态分析结果看,细根的径级级别宜划分为0~1 mm、1~2 mm、2~5 mm。这种级别划分方法是否适宜于更多的树种,还有待于进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 李吉跃. 油松侧柏苗木抗旱特性初探[J]. 北京林业大学学报, 1988, 10(2): 23-30.
LI J Y. A preliminary study on drought resistance of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* seedling [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1988, 10(2): 23-30.
- [2] 李吉跃, 翟洪波. 木本植物水力结构与抗旱性[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 301-305.
LI J Y, ZHAI H B. Hydraulic architecture and drought resistance of woody plants [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 301-305.
- [3] CANDELLE J, JACKSON R B, EHLERINGER J R, et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale [J]. *Oecologia*, 1996, 10(8): 583-595.
- [4] STONE E L, KALISZ P J. On the maximum extent of tree roots [J]. *For Ecological Manage*, 1991, 46(1): 59-102.
- [5] 王文全, 王世绩, 刘雅荣, 等. 粉煤灰复田土地上杨、柳、榆、刺槐根系的分布和生长特点[J]. 林业科学, 1994, 30(1): 25-33.
WANG W Q, WANG S J, LIU Y R, et al. Distribution and growth characteristics of the root systems of poplar, willow, elm and locust on site of renewed land by fine ash of coal [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1994, 30(1): 25-33.
- [6] MAIER C A, KRESS L W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11-year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(4): 347-359.
- [7] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘向东, 等. 人工油松林根系层的水文作用 [J]. 中国水土保持, 1994(6): 21-25.
ZHAO H Y, WU Q X, LIU X D, et al. Hydrological effects of the root zone of artificial Chinese pine [J]. *Chinese Journal of Soil and Water Conservation*, 1994(6): 21-25.
- [8] 季永华, 张纪林, 卢义山, 等. 河堤防护林带树木根系形态特征的研究 [J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(3): 31-34.
JI Y H, ZHANG J L, LU Y S, et al. A study on root morphological character of shelter belt on the river embankment [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1998, 22(3): 31-34.
- [9] 李鹏, 李占斌, 赵忠, 等. 渭北黄土高原不同立地上刺槐根系分布特征研究 [J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 15-19.
LI P, LI Z B, ZHAO Z, et al. Researches on root distribution characters of *Robinia pseudoacacia* on different sites in WeiBei Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(5): 15-19.
- [10] HE Y, LIAO H, YAN X L. Localized supply of phosphorus induces

- root morphological and architectural changes of rice in split and stratified soil cultures [J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(3): 247-256.
- [11] NIELSON K L. *Root architecture and phosphorus acquisition efficiency in common bean (Phaseolus vulgaris L.)* [D]. Harrisburg: Pennsylvania State University, 1997: 1-6.
- [12] STEUDLE E. Water uptake by plant roots: An integration of views [J]. *Plant and Soil*, 2000, 226(1): 45-56.
- [13] RUNDEL P W, NOBEL P S. Structure and function in desert root systems [M]// ATKINSON D. *Plant root growth: An ecological perspective*. USA: Blackwell Scientific Publications, 1991: 349-378.
- [14] JACOBS D F, ROSE R, HAASE D L. Development of Douglas-fir seedling root architecture in response to localized nutrient supply [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(1): 1-8.
- [15] ROBINSON D. Tansley review number 73: The responses of plants to non-uniform supplies of nutrient [J]. *New Phytologist*, 1994, 127(10): 635-674.
- [16] BENGOUGH A G, CROSER C, PRITCHARD J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress [J]. *Plant and Soil*, 1997, 189(2): 155-164.
- [17] VOGT K A, GRIEC C C, VOGET D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above and belowground detritus of word forest [J]. *Advance in Ecology Research*, 1986, 15(4): 303-377.
- [18] BURTON A J, PREGITZER K S, HENDERICK R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forest [J]. *Oecologia*, 2000, 125(4): 389-399.
- [19] TIERNRY G L, FAHEY T J. Evaluating minirhizotron estimates of fine root longevity and production in the forest floor of a temperate broadleaf forest [J]. *Plant and Soil*, 2001, 229(2): 167-176.
- [20] BIDE L P R, RENAULT P, PAGES L, et al. Mapping meristem respiration of *Pinus persica* L. batsch seedlings: Potential respiration of meristems, O₂ diffusional constraints and combined effects on root growth [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(3): 755-768.
- [21] PREGITZER K S, KING J S, BURTON A J, et al. Responses of tree fine roots to temperature [J]. *New Phytologist*, 2000, 147(2): 105-115.
- [22] EKANAYAKE I J, O'TOOLE J C, GRITTY D P, et al. Inheritance of root characters and their relations to drought resistance in rice [J]. *Crop Sci*, 1985, 25(4): 927-933.
- [23] O'TOOLE J C, SOEMARTONO B D. Evaluation of a simple technique for characterizing rice root systems in relation to draught resistance [J]. *Euphytica*, 1981, 30(3): 283-290.
- [24] GEORGE K, NORBY R J, HAMILTON J G, et al. Fine-root respiration in a loblolly pine and sweetgum forest growing in elevated CO₂ [J]. *New Phytologist*, 2003, 160(5): 511-522.
- [25] NAZIROV N N, SATIPOV G S. Root system and yield in the cotton varieties AN402 and Tashkent 1 [J]. *Euphytica*, 1980, 11(1): 5-7.
- [26] PERGITZER K S, JARED L. Fine root architecture of nine North American trees [J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.
- [27] 吴楚, 王政权, 范志强. 树木根系衰老研究的意义与现状 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1 276-1 280.
WU C, WANG Z Q, FAN Z Q. Significance of senescence study on tree roots and its advances [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1 276-1 280.

(责任编辑 冯秀兰)