

黄河三角洲 5 个耐盐树种苗木根系形态结构特征

王月海¹, 许景伟¹, 韩友吉¹, 佘庆柱², 姜福成²

(1. 山东省林业科学研究院, 济南 250014; 2. 济南军区黄河三角洲生产基地, 山东 东营 257231)

摘 要:对黄河三角洲盐渍土上所育的 2 a 生白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb)、白榆(*Ulmus pumila* Linn.)、五角枫(*Acer truncatum* Bunge)、美国竹柳(*Salix americana* Linn.)和臭椿(*Ailanthus altissima* Swingle)5 个树种苗木根系的长度、连接数量、表面积、体积、分形维数及序级等根系形态特征进行了研究分析。结果表明,5 个树种苗木根系在其连接数量、长度、表面积和分形维数 4 个结构指标上均表现为白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿;在根系连接数量、长度两个结构指标上表现出良好的一致性,即细根($d \leq 5$ mm)数量、长度占据各自总根系的主体,细根是这 5 个树种吸收养分的主体;5 个树种苗木根系的第 1~3 序级根系长度之和与 1~4 序级根系的连接数之和均分别占据各序级根系总长度与总连接数的 70% 以上和 80% 以上。白蜡和白榆 0~4 序级、五角枫 0~3 序级、美国竹柳和臭椿 0~2 序级是根系的主体。臭椿、美国竹柳两个树种的根系粗壮,特别是大径级(> 5 mm)根系的表面积和体积占其本身的主体。综合根系的结构指标及序级分析结果,5 个树种的根系发达程度和分生能力由强到弱的排序为:白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿;白蜡和白榆两个树种的苗木根系数量多且有相对较高的根系序级,其侧根发达,表现出相对较强的根系分枝能力,能更好地吸收和利用土壤中的水分和养分。

关键词:黄河三角洲;耐盐树种;苗木;根系形态特征

中图分类号:S728.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)01-0261-06

Characteristics of Root Morphology of Five Salt Tolerance Species of Seedlings in Yellow River Delta Area

WANG Yue-hai¹, XU Jing-wei¹, HAN You-ji¹, SI Qing-zhu², JIANG Fu-cheng²

(1. Shandong Province Academy of Forestry Science, Ji'nan 250014, China;

2. Yellow River Delta Producing Base of Jinan Military Area Command, Dongying, Shandong 257231, China)

Abstract: Five species of tree seedling planted for 2 years including *Fraxinus chinensis* Roxb, *Ulmus pumila* Linn., *Acer truncatum* Bunge, *Salix americana* Linn., *Ailanthus altissima* Swingle root morphological characteristics for root length, root quantity, root surface area, root volume, root fractal dimension and root order were analyzed. The result showed that root joint number, root length, root surface area, root tip length and root fractal dimension all demonstrated the same comparative sequence: *Fraxinus chinensis* Roxb > *Ulmus pumila* Linn. > *Acer truncatum* Bunge > *Salix americana* Linn. > *Ailanthus altissima* Swingle. Root quantity and root length of five species of seedling were consistent with each other, slim root ($d \leq 5$ mm) quantity and slim root length were the largest proportion of the total root system, slim root carried on the main uptake function. Sum of root length of 1~3 root order for five species of seedlings accounted for more than 70 percent of each species total root length; sum of root joint number of 1~4 root order for five species of seedlings accounted for more than 80 percent of each species total root joint number. Roots of 1~4 root order of *Fraxinus chinensis* Roxb and *Ulmus pumila* Linn. were the main proportion of total root system of each species; roots of 0~2 root order of *Salix americana* Linn. and *Ailanthus altissima* Swingle were the main proportion of total root system of each species. Roots of *Salix americana* Linn. and *Ailanthus altissima* Swingle were strong, especially the wide root ($d > 5$ mm) surface and volume were the large proportion. According to the root system structure parameter and root order analysis result, five species of seedling roots

收稿日期:2013-004-16

修回日期:2013-05-13

资助项目:国家“十一五”科技支撑计划“盐碱地改良沿海防护林体系研究与示范”(2009BADB2B05);山东省引智项目“黄河三角洲重盐碱地植被恢复与生态改良示范与推广”(TG201237032);国家引智基地“盐碱地生态改良”

作者简介:王月海(1962—),男,本科,研究员,主要研究方向:生态、森林培育和林业工程等。E-mail:wyuehai@163.com

strong degree and generative ability sequences were in the sequence of *Fraxinus chinensis* Roxb>*Ulmus pumila* Linn.>*Acer truncatum* Bunge>*Salix americana* Linn.>*Ailanthus altissima* Swingle, *Fraxinus chinensis* Roxb and *Ulmus pumila* Linn. Seedling root quantities were large, their root orders were high, their lateral roots were prosperous and generative, uptaked and utilization for water and mineral elements from soil of the lateral root were more efficient.

Key words: Yellow River Delta; salt tolerance species; seedling; root morphological characteristics

黄河三角洲是目前世界上造陆最快的河口三角洲,其开发潜力巨大^[1]。由于黄河三角洲滨海盐碱的恶劣条件,使得造林难度加大,限制了许多树种的发展。次生天然林中仅有稀疏柳林(*Salix purpurea* var. *multinervis*)和怪柳林(*Tamarix chinensis* Lour.),人工林大都以白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等树种为主,在盐碱稍大一些的地方栽植的乔木树种仅有白蜡,而在一些中、重度盐碱地段仅有灌木怪柳和盐生植物生存。因此,筛选出适合滨海盐碱地的造林树种已成为黄河三角洲高效生态经济区建设的当务之急。

据研究报道,树木根系的体积占地上部分的1/10~1/4^[2],是连接土壤与植物地上部分之间物质交换的重要桥梁,是树木吸收、转化和储藏营养物质的重要器官,对地上部分的生长、形态建成起到至关重要的作用,其生长状况在很大程度上制约甚至决定着植物地上部分的生长,直接影响地上部分的产量和林木的抗逆性^[2-6]。根系结构特征是植物根系生长状况的反映,因此,研究植物的根系结构,能洞察植物的生长情况和其抗逆性^[7-9]。我国在植物根系的水平和垂直分布规律^[10-12]方面研究较多,对树木根系形态结构特征方面的研究也有报道^[3,13],但对盐渍土下苗木的根系形态结构特征方面的研究未见报道。随着立地条件的变化,同一树种的根系形态特征存在一定的变异^[3]。因此,在黄河三角洲滨海盐渍土地带研究耐盐树种的根系形态,可以更好地了解其在盐渍土条件下的适应能力,筛选出适合黄河三角洲盐渍地的造林树种。

本文对初步筛选的 5 个较耐盐树种苗木根系结构形态的根系结构特性进行分析、研究,探讨不同树种苗木在盐渍土下的差异,为进一步研究、解释各树种的抗逆能力尤其是耐盐能力提供理论依据。

1 试验地概况

试验地设在东营市孤岛镇济南军区黄河三角洲生产基地(37°49′36.4″N,118°46′37.1″E),系黄河历次淤积退海而成,为典型的黄河三角洲地貌。属暖温带半湿润性季风气候区,年均气温 11.4℃,平均无霜

期 202 d,年均降水量 548.2 mm,降雨多集中在夏季,年蒸降比 3.6:1。

苗圃地土壤为滨海盐化潮土,上层为现代河流沙、壤质沉积物,系现代新成土母质;下层为海相沉积盐渍母质。土壤 0—40 cm 层是轻壤质地,有机质含量为 0.965%,全氮为 0.053 4%,碱解氮为 48.178 mg/kg,速效磷为 3.325 mg/kg,速效钾为 83.6 mg/kg,氮素不足,严重缺磷;土壤 0—40 cm 层 pH 值平均为 8.2,平均含盐量 3.8‰,属中度盐渍土。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb)、白榆(*Ulmus pumila* Linn.)、五角枫(*Acer truncatum* Bunge)、美国竹柳(*Salix americana* Linn.)和臭椿(*Ailanthus altissima* Swingle)5 个树种的苗木根系。5 个树种苗木的栽植密度为 47 619 株/hm²,其苗龄、苗高和地径等苗木规格见表 1。

表 1 5 个树种的苗木规格

树种	苗龄/a	苗高/cm	地径/cm
白蜡	2	204±18.2	2.2±0.2
白榆	2	261±21.7	2.4±0.2
五角枫	2	107±8.5	1.5±0.3
美国竹柳	2	271±14.2	2.4±0.1
臭椿	2	273±27.5	2.5±0.2

2.2 试验方法

2.2.1 根系取样 根系取样时间为 2012 年 11 月 8 日。在对 5 个树种苗木调查的基础上,依据苗木的地径、苗高等因子选择每个树种的标准苗木 3 株,采用挖掘法取出完整的苗木根系,将所采根样放在大烧杯的蒸馏水中,用毛笔慢慢蹭掉土粒和杂质,然后用滤纸擦、吸干根表面的水分。

2.2.2 根系测定 根系的测定采用中晶公司生产的 Microtek ScanMaker i800 双光源彩色扫描仪获取形态结构图像,应用杭州万深检测科技有限公司的万深 LA-S 植物根系分析系统对根系结构及根系序级等指标进行分析测定。

2.2.3 根系形态的分级 对树木根系形态的分级到

目前为止,一直没有一个统一的标准。参照以往的研究^[10,14],结合 5 个树种苗木的实际,本研究中将 $d\leq 5$ mm 的根划分为小径级根(细根),其中 $d\leq 0.5$ mm 的根系为根毛; $5\sim 10$ mm 的根划分为中径级根(中根); >10 mm 的根划分为大径级根(粗根),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(主根)划为 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。

2.2.4 根系形态测定数据的分析 测定数据的相关分析采用 SPSS 19.0 统计软件进行。

3 结果与分析

3.1 根系结构指标的比较分析

5 个树种苗木的根系结构测定指标见表 2。根系

表 2 5 个树种的苗木根系结构指标

树种	平均直径/mm	连接数量	长度/cm	表面积/cm ²	体积/cm ³	分形维数
白蜡	2.4	1580.3	863.3	1368.2	151.0	1.9
白榆	2.9	1255.6	823.1	1061.3	153.6	1.8
五角枫	2.5	1140.2	654.5	986.3	259.2	1.6
美国竹柳	2.9	1054.3	542.3	833.4	321.2	1.5
臭椿	4.4	765.5	409.2	769.5	349.1	1.1

5 个树种苗木的根系体积大小则与上述 3 个指标相反,表现为臭椿根系体积最大,其次为美国竹柳,再次是五角枫,白榆和白蜡最小。苗木根系体积的大小除了与数量、长度两个指标有关外,与其根系直径的大小密切相关。其相关分析结果表明:5 个树种各自根系体积的大小与数量、长度两个指标的相关关系不显著,但与直径的线性相关系数在 0.885~0.978 之间,达到了显著的线性正相关关系。虽然臭椿的数量、长度两个指标在 5 个树种中最小,但其平均直径最大,达到 4.4 mm,而且其中、大径级(>5 mm)的根系体积占其本身总体积的比例为 94.9%(表 3),远远大于其它 4 个树种;美国竹柳的情况亦是如此,虽然其平均直径与白榆相同(2.9 mm),而且数量、长度两个指标都小于五角枫、白榆和白蜡 3 个树种,但因其中、大径级(>5 mm)的根系体积占其本身总体积的比例高达 95.9%,远大于其它 3 个树种占本身总体积的比例。臭椿、美国竹柳两个树种苗木大径级(>5 mm)的根系占本身总体积的主体,这反映出臭椿、美国竹柳这两个树种苗木较其它 3 个树种的根系要粗壮。

据卢焕达等^[17]的研究,根系在不同层次表现出一定的自相似性,是一个典型的分形结构,用根系分形维数能较好地表述根系结构和空间构型,它为根系的研究提供了一种新的方法与手段。根系分形维数

功能的实现主要取决于根表面积,表面积的大小反映了根系的吸收能力,可作为评价根系质量的重要标准^[15];根长也是衡量根系质量的重要指标。根系的总长度和总表面积也是根系吸收利用土壤水分和养分的重要决定因素^[3],表面积大、根系长的根系可以使植物吸收更多的水分和养分^[16]。根系连接数是根系分枝的连接点数,它体现了苗木根系的分枝能力和发达程度。由表 2 可以看出,白蜡、白榆、五角枫、美国竹柳和臭椿 5 个树种苗木根系在其长度、表面积、连接数 3 个指标上由大到小均表现为:白蜡 $>$ 白榆 $>$ 五角枫 $>$ 美国竹柳 $>$ 臭椿。对 5 个树种苗木根系的长度、表面积、连接数 3 个指标分别作 LSD 多重比较分析,结果表明,5 个树种苗木在 3 个根系指标上皆分别表现为两两树种苗木之间有显著差异。这也反映了 5 个树种遗传特性和适应环境的能力的不同。

的估计是基于图象处理方法,先用数字图像采集设备取得根系的图像,再用网格计数法对处理后的图像进行计盒维数估计,并用 Java 语言进行实现,测定结果见表 2。由表 2 可以看出,白蜡的分形维数(1.9)最高,与排在第 2 位的白榆分形维数(1.8)很接近,排在第 3 位的五角枫分形维数(1.6)与排在第 4 位的美国竹柳的分形维数(1.5)亦相近,分形维数最小的是臭椿,仅为 1.1。根系形态的分形维数反映了根系在时间、土壤层次和环境影响下发育程度的差异,能精确地反映在各种胁迫下根系结构的变化^[13]。分形维数越高,说明根系越发达;相对小的分形维数反映出根系的分生能力相对较弱^[17-18]。由此可以判断出 5 个树种的根系发达程度和分生能力由强到弱的排序为:白蜡 $>$ 白榆 $>$ 五角枫 $>$ 美国竹柳 $>$ 臭椿。

进一步对 5 个树种苗木的 4 个根系结构指标按径级进行分析。表 3 是 5 个树种苗木不同径级根系各结构指标占其总量的比例。

由表 3 可以看出,5 个树种苗木根系的细根($d\leq 5$ mm)数量占据各自总根系的主体(85.2%~97.8%),其中 $d\leq 2$ mm 的细根数量占各自总根系数量的范围也在 61.6%~77.2%之间,表明细根是这 5 个树种吸收养分的主体。比较 5 个树种 $d\leq 2$ mm 的细根数量,尤其是 $d\leq 0.5$ mm 的根毛占各自总根系

数量的比例表现为:白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿。5 个树种>5 mm 的中、粗根数量,尤其是>10 mm 的粗根数量占各自总根系数量的比例则与此相反,以臭椿最高(5%),美国竹柳和五角枫分别为 1.9%和 1.1%,而白榆和白蜡仅分别有 0.4%和

0.1%。植物根系中 $d\leq 2$ mm 的细根系能充分利用土壤中的养分和水分,它们是土壤中养分和水分的主要吸收者和利用者。因此,结合表 1 中 5 个树种的根系数量,可以认为,白榆和白蜡这两个树种的根系能较好地吸收土壤中的水分和养分。

表 3 不同径级根系各结构指标占总量的比例 %

根系结构指标	树种	根系径级/mm					
		≤ 0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	>10.0
长度	白蜡	1	16.9	34.4	35.8	10	1.9
	白榆	0.9	11.3	29.5	39.1	13.1	6.1
	五角枫	9.7	24.8	26.3	16.4	14.2	8.6
	美国竹柳	13.8	21.2	21.2	16.4	15.2	12.2
	臭椿	6.3	17.2	19.9	22.4	15.7	18.5
表面积	白蜡	0.2	5.2	19.5	42.7	24.4	8
	白榆	0.2	2.6	11.9	36.2	29.1	20
	五角枫	1.6	8.9	13.8	19.2	21.5	35
	美国竹柳	1.5	5.3	7.3	12.8	14.5	58.6
	臭椿	0.5	2.4	5.6	14.4	21.2	55.9
体积	白蜡	0	0.9	6.4	31	36.5	25.2
	白榆	0	0.3	3	20	32.9	43.8
	五角枫	0.1	0.9	2.6	8.2	19.7	68.5
	美国竹柳	0	0.3	0.8	3	7.4	88.5
	臭椿	0	0.2	0.7	4.2	12.8	82.1
根数量	白蜡	13.1	31.3	32.8	20.7	2	0.1
	白榆	11	26.2	34.2	25.6	2.6	0.4
	五角枫	8.9	25.1	33.9	28.2	2.8	1.1
	美国竹柳	7.9	24.8	31.8	30.1	3.5	1.9
	臭椿	5.2	23.9	32.5	23.6	9.8	5

5 个树种苗木的细根($d\leq 5$ mm)长度亦占据其根系总长度的主体(65.8%~88.1%),以白蜡最高(88.1%),白榆次之(80.8%),五角枫排第 3(77.4%),美国竹柳排第 4(72.6%),臭椿最低(65.8%)。5 个树种苗木的细根($d\leq 5$ mm)表面积占据其根系总表面积的比例,只有白蜡达到了 67.6%,白榆和五角枫只有其本身表面积的一半(分别为 50.9%和 56.5%),而美国竹柳和臭椿 3 个树种的中、粗根(>5 mm)占据其根系总表面积的主体(分别为 73.1%和 77.1%)。5 个树种苗木的中、粗根(>5 mm)体积占据其自身总体积的主体(61.7%~95.9%),尤其是美国竹柳和臭椿这两个树种苗木高达 90%以上(分别为 95.9%和 94.9%)。这与 5 个树种苗木根系本身的直径有关(表 2),大径级根系的中、粗根(>5 mm)占本身的比例越大,其表面积和体积就会越大。

3.2 根系序级与结构指标

对 5 个树种苗木根系的拓扑分析结果表明,白蜡、白榆、五角枫、美国竹柳和臭椿 5 个树种苗木根系的第 1~3 序级根系长度之和均占据根系总长度的

70%以上(图 1a),其中臭椿、美国竹柳和五角枫 3 个树种苗木第 1~3 序级的根系长度所占比例均超过了 80%(84.4%~89.7%)。而根系长度总量则以臭椿和美国竹柳最低(分别为 409.2 和 542.3 cm),五角枫居中(654.5 cm),白蜡和白榆相当,分别为 863.3 cm 和 823.1 cm。由图 1a 可以看出,白蜡和白榆的第 4~11 序级根系长度仍占其本身总长度的 1/3 以上,与其它 3 个树种相比,表现出相对较强的根系分枝能力。

5 个树种苗木的 1~4 级根系的连接数之和均占总连接数的 80%以上(图 1b),其中臭椿、美国竹柳和五角枫这 3 个树种苗木根系的连接数均占总连接数的 90%以上,表明这 3 个树种的侧根不及白蜡和白榆发达。从总数量上来看,白蜡和白榆 1~11 序级根系连接数分别为 1 580.3 和 1 255.6 个,五角枫 1~9 序级根系连接数为 1 140.2 个,美国竹柳和臭椿 1~8 序级根系连接数分别为 1 054.3 和 765.5 个,表明白蜡和白榆 2 个树种的苗木根系数量多且有相对较高的根系序级,其侧根发达。

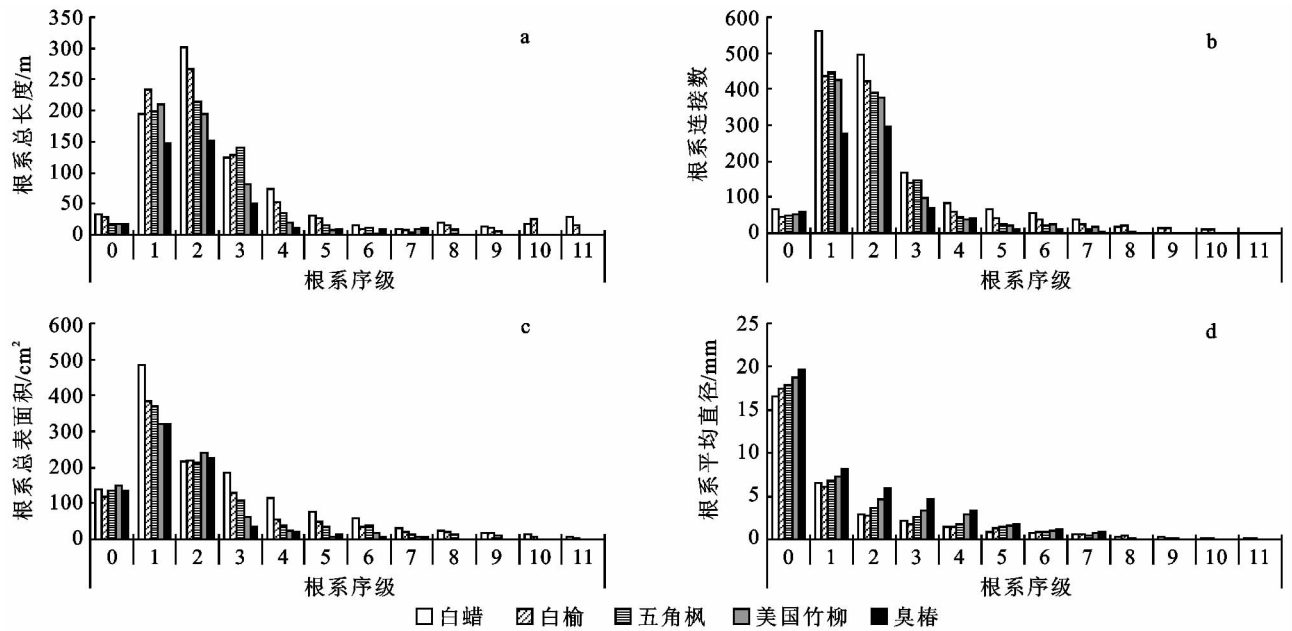


图1 5个树种的苗木根系序级与形态指标间的关系

5个树种苗木根系表面积最高的序级为1序级,其次是2序级,臭椿、美国竹柳和五角枫3个树种表面积排第3位的是0序级,而白蜡和白榆两个树种排第3位的是3序级的根系(图1c)。从图1c可以看出,白蜡、白榆、五角枫、美国竹柳和臭椿5个树种0序级根系表面积均占其总表面积的10%以上(分别为10.2%,11.3%,13.7%,18.0%和17.6%);5个树种各自序级的根系表面积占总面积的比例之和达到80%以上所需要的序级不同:白蜡、白榆0~4序级,五角枫0~3序级,美国竹柳和臭椿0~2序级。由此可见,白蜡、白榆0~4序级,五角枫0~3序级,美国竹柳和臭椿0~2序级是根系的主体。

5个树种苗木的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趋势,且5个树种苗木的高序级根系(7级以上)以细小的根系为主(图1d),这与刘丽娜等^[3]的研究相吻合。图1d显示,臭椿和美国竹柳高序级(3级以上)根系总量相对较少,五角枫居中,而白蜡和白榆则相对较多。这也从另一个侧面反映出5个树种根系分枝强度大小为:白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 白蜡、白榆、五角枫、美国竹柳和臭椿5个树种苗木根系的长度、表面积、连接数、分形维数4个结构指标由大到小的顺序是:白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿。4个指标的大小亦反映了5个树种苗木根系在其吸收水分和养分、分枝能力等方面的强弱程度。

(2) 对5个树种苗木的根系结构指标按径级进行分析,结果显示,5个树种苗木根系的细根($d \leq 5$ mm)数量、长度分别占据各自总根系的主体(分别为85.2%~97.8%和65.8%~88.1%),从数量与长度来看,细根是这5个树种吸收水分和养分的主体;5个树种 $d \leq 5$ mm的细根数量、长度分别占据各自总根系的比例从大到小的顺序是:白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿。5个树种苗木的细根($d \leq 5$ mm)表面积占据其根系总表面积的比例只有白蜡达到了67.6%,白榆和五角枫只有其本身表面积的一半(分别为50.9%和56.5%),而美国竹柳和臭椿3个树种的中、粗根(>5 mm)占据其根系总表面积的主体(分别为73.1%和77.1%)。5个树种苗木的中、粗根(>5 mm)体积占据其自身总体积的主体(61.7%~95.9%),尤其是美国竹柳和臭椿这两个树种苗木粗根(>10 mm)高达80%以上(分别为88.5%和82.1%),体现了臭椿、美国竹柳两个树种苗木根系粗根比例大的特点。这也是比较的5个树种苗木的体积指标从大到小依次为:臭椿>美国竹柳>五角枫>白榆>白蜡的主要原因。

(3) 按照不同序级统计分析根系长度、连接数量和根系表面积3个指标,结果表明,白蜡、白榆、五角枫、美国竹柳和臭椿5个树种苗木根系的第1~3序级根系长度均占据根系总长度的70%以上,反映出1~3序级根系是5个树种根系的主体,也是根系吸收养分、水分的主载体。5个树种苗木的1、2、3、4序级根系的连接数均占总连接数的80%以上,表明5个树种苗木的根系是以1~4级为主。5个树种苗木根系表面积最高的序级为1序级,其次是2序级;白蜡、

白榆 0~4 序级,五角枫 0~3 序级,美国竹柳和臭椿 0~2 序级是根系的主体。

(4) 白蜡和白榆的第 4~11 序级根系长度仍占总长度的 1/3 以上,与五角枫、美国竹柳和臭椿 3 个树种相比,表现出相对较强的根系分枝能力;比较分析 5 个树种根系连接的数量和序级,白蜡和白榆两个树种的苗木根系连接数量多且有相对较高的根系序级,其侧根发达。从 5 个树种苗木的高序级根系吸收面积的比较分析,亦反映出 5 个树种根系分枝强度由大到小为:白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿。

4.2 讨论

林木根系的形态与分布首先是由树木本身的遗传特性所决定的,同时受土壤生态环境条件的制约^[19]。本文所研究的 5 个树种苗木是在同样的土壤和经营管理条件下,所以其在根系结构间的差异,在很大程度上反映了树种的特点和对土壤环境的适应能力。依据不同树种所处的相同的立地条件和经营条件,根系结构差异可以理解为土壤资源利用能力上的差异^[3]的研究结果,综合前面对 5 个树种结构指标的比较分析,可以认为 5 个树种的苗木获得土壤资源的能力大小为:白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿。

苗木根系生长能力及发育程度是保证造林质量的关键^[20]。在土壤含盐量为 3.8‰ 中度盐渍土的立地条件下,依据 5 个树种苗木的根系发达程度和分生能力由强到弱的排序为:白蜡>白榆>五角枫>美国竹柳>臭椿的结论,从根系生长能力及发育程度来考虑,白蜡和白榆苗木其主、侧根皆粗壮发达,分枝能力强,与相同条件下生长的 3 个树种苗木相比较,在吸收土壤的水分和养分方面具有明显的优势,是中度盐渍土下造林的好树种。这一研究结果,与生产实际相吻合。

参考文献:

- [1] 宋玉民,张建锋,邢尚军,等. 黄河三角洲重盐碱地植被特征与植被恢复技术[J]. 东北林业大学学报,2003,31(6):87-89.
- [2] 嵇晓雷,杨平. 关于植物根系形态分布研究进展与新方法探讨[J]. 森林工程,2011,27(3):54-57.
- [3] 刘丽娜,徐程扬,段永宏,等. 北京市 3 种针叶绿化树种根系结构分析[J]. 北京林业大学学报,2008,30(1):34-39.
- [4] Cann dell 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.
- [5] Stone E L, Kalisz P J. On the maximum extent of tree roots[J]. *For Ecological Manage*,1991,46(1):59-102.
- [6] 王文全,王世绩,刘雅荣,等. 粉煤灰复田立地上杨、柳、榆、刺槐根系的分布和生长特点[J]. 林业科学,1994,30(1):25-33.
- [7] 洪伟,吴承祯. 马尾松人工林经营模式及其应用[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
- [8] 陆时万,徐祥生,沈敏健. 植物学[M]. 北京:高等教育出版社,1991:83-86.
- [9] 严小龙,廖红,年海. 根系生物学原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2007:1-22.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈吉虎,余新晓,有祥亮,等. 不同水分条件下银叶槭根系的分形特征[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):71-74.
- [14] Pergitzer K S, Jared L. Fine root architecture of nine North American trees [J]. *Ecological Monographs*, 2002,72(2):293-309.
- [15] Trubat R, Cortinal J, Vilagrosa A. Plant morphology and root hydraulics are altered by nutrient deficiency in *Pistacia lentiscus* (L.) [J]. *Trees-Structure and Function*,2006,20(3):334-339.
- [16] 李博,田晓莉,王刚卫,等. 苗期水分胁迫对玉米根系生长杂种优势的影响[J]. 作物学报,2008,34(4):662-668.
- [17] 卢焕达,周丽娟. 基于图像处理方法的根系分形维数估计[J]. 农机化研究,2006(12):80-82.
- [18] 廖成章,余翔华. 分形理论在植物根系结构研究中的应用[J]. 江西农业大学学报,2001,23(2):192-196.
- [19] 鲁少波,刘秀萍,鲁绍伟,等. 林木根系形态分布及其影响因素[J]. 林业调查规划,2006,31(3):105-108.
- [20] 李纪元,高传壁,郑芳桦,等. 不同育苗容器对黑荆树幼苗生长的影响[J]. 林业科学研究,1993,6(1):100-104.