

滴灌栽培杨树人工林细根空间分布特征

秘洪雷¹, 兰再平^{1*}, 孙尚伟¹, 傅建平², 彭晶晶¹, 马鑫

(1. 中国林业科学研究院世界银行项目办公室, 北京 100091; 2. 大兴区林场, 北京 102602)

摘要: [目的] 为探究滴灌条件下杨树人工林细根的空间分布特征, 对大兴区林场滴灌栽培的 5 年生欧美 107 杨的细根分布进行研究。 [方法] 采用根钻法分别在株间、对角和行间方向距树干 0.2、0.5、1.0、1.5 m 处取样, 取样深度为 60 cm, 每 10 cm 为 1 个土层。 [结果] 滴灌条件下, 在不同方向的不同树干距离和土层深度, 杨树人工林的细根生物量和根长表现出相似分布特征, 其分布受树干距离、土层及其交互作用的影响显著 ($P < 0.05$)。滴灌条件下, 株间方向的细根总长为 12.7 cm, 分别是对角和行间方向细根长的 1.82 倍和 2.32 倍, 上述 3 个方向取样位点细根总长为 25.2 cm, 其中的 86.4% 在滴灌形成的湿润带范围内; 0~40 cm 土层的细根长占 0~60 cm 土层细根总长的 84.5%。各方向的细根水平分布特征不同, 株间方向细根长在距树干 0.5 m 处最大, 为 4.2 cm, 占该方向细根总长的 33.1%, 且与其他树干距离处差异显著 ($P < 0.05$); 对角和行间方向细根长在距树干 0.2 m 处最大, 分别为 2.7、2.3 cm, 占各自方向细根总长的 38.1% 和 41.8%。各方向的细根垂直分布特征不同, 株间方向细根长在 0~10 cm 土层最大, 为 3.7 cm, 占该方向细根总长的 29.1%, 且与其他土层差异显著 ($P < 0.05$); 对角和行间方向细根长均在 10~20 cm 土层最大, 分别为 2.0、1.7 cm, 占各自方向细根总长的 27.9% 和 31.0%, 与其他土层细根长差异显著 ($P < 0.05$)。 [结论] 滴灌条件下, 杨树人工林细根的空间分布特征可以采用细根生物量或细根长任一指标来表述。滴灌后形成的连续湿润带导致土壤水分条件的差异使细根在不同方向的水平分布和垂直分布特征不同, 细根分布表现为株间 > 对角 > 行间, 细根主要分布在湿润带范围内且在 0~40 cm 土层相对集中分布。依据滴灌栽培杨树人工林细根的水平 and 垂直分布规律, 每次滴灌后应保证水分侧渗到距离树干至少 50 cm 的范围, 下渗的深度至少达到 40 cm 深, 以满足杨树人工林正常生长对水分的需求。本研究结果和结论为确定精准的单次有效灌溉量提供理论依据, 从而实现既节水又确保林木正常生长的双重目标。

关键词: 地面滴灌; 杨树人工林; 细根; 空间分布

中图分类号: S792.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)06-0946-08

Spatial Distribution of Fine Root in the Poplar Plantation under Drip Irrigation

BI Hong-lei¹, LAN Zai-ping¹, SUN Shang-wei¹, FU Jian-ping², PENG Jing-jing¹, MA Xin¹

(1. World Bank Loan Project Office, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Forest Farm of Daxing District, Beijing 102602, China)

Abstract: [Objective] Aiming at studying the spatial distribution of fine root under surface drip irrigation, 5-year-old 107 poplar clone (*Populus × euramericana* cv. '74/76') plantation cultivated with surface drip irrigation in the forest farm of Daxing district was taken as the research object. [Method] By drilling sampling, the samples from different directions at different horizontal distances (0.2, 0.5, 1.0 and 1.5 m) from the trunk were collected. The depths of soil cores were 60 cm, 10 cm each as a soil layer. [Result] The distribution characteristics of fine root were analyzed under the condition of drip irrigation. Under different trunk distance and soil layer, the fine root bio-

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家重点研发计划课题“欧美杨工业资源材高效培育技术研究”(2016YFD0600401)

作者简介: 秘洪雷(1990—)男,在读硕士. 主要研究方向: 森林培育. E-mail: bihonglei1990@126.com

* 通讯作者: 兰再平,男,研究员,硕士生导师,主要从事森林培育与森林生态学研究. E-mail: zplan@139.com

mass and root length showed similar distribution characteristics and its distribution was significantly affected by the trunk distance, soil layer and their interaction ($P < 0.05$). The total length of fine roots in the strains direction was 12.7 cm, which was 1.82 times and 2.32 times that of the diagonal direction and row direction. The total root length of the three sampling points was 25.2 cm, of which 86.4% were in the range of wetted belt formed by drip irrigation. In the soil depth of 0—60 cm, 84.5% of the total root length was in the 0—40 cm soil layer. The horizontal distribution of fine root in different directions was different. In the strains direction, the maximum root length was at the trunk distance of 0.5 m, which was 4.2 cm and showed significant difference with other trunk distances ($P < 0.05$). In the diagonal and row direction, the maximum root length, 0.2 m from the trunk, were 2.7 cm and 2.3 cm respectively and accounting for 38.1% and 41.8% of the total length in their respective directions. The vertical distribution of fine root in different directions was different. At different soil layers, the fine root length in the strains direction showed that the fine root length of 0—10 cm soil layer was larger than others, and accounting for 29.1% of the total length, the difference with other soil layers was significant ($P < 0.05$). In the diagonal and row direction, the maximum root length were at 10—20 cm soil layer, 2.0 cm and 1.7 cm respectively, and accounting for 27.9% and 31.0% of the total length in their respective directions, the differences with other soil layers were also significant ($P < 0.05$). [**Conclusion**] The spatial distribution characteristics of fine root in poplar plantations under drip irrigation can be expressed by either fine root biomass or fine root length. The difference of soil moisture condition caused by continuous wet belt range after drip irrigation makes the difference of horizontal and vertical distributions of fine root in different directions, the fine root length is expressed as strains direction > diagonal direction > row direction. Fine roots are mainly distributed in the range of wet belt and relatively concentrated in the 0—40 cm soil layer. According to the horizontal and vertical distribution of fine root of poplar plantation, the water should penetrate to at least 50 cm away from the trunk after each drip irrigation, and the depth of infiltration should reach at least 40 cm to meet the water demand of normal growth of poplar plantation. The results and conclusions of this study provide a theoretical basis for determining the precise single effective irrigation amount, so as to achieve the dual goal of saving water and ensuring the normal growth of trees.

Keywords: surface drip irrigation; poplar plantation; fine root; spatial distribution

细根通常指直径 ≤ 2 mm的根,有巨大的吸收表面积,具有吸收水分和养分的功能。细根生物量仅占根系总生物量的3%~30%,但细根迅速的生长和周转却要消耗掉50%~80%的初级净光合产物(NPP),显著影响了光合产物的分配^[1-3]。林木的根系分布影响林木地下营养空间的大小和土壤水分及养分的吸收利用,决定着林木从土壤中吸收并用于蒸发的水量,直接影响到地上部分产量的高低,因此,细根的空间分布格局显著影响植物的生长发育和植物生产力^[4]。细根在林木资源利用和物质、养分循环中也起着重要作用,林木细根空间结构是反应植物间地下竞争、评价林木对地下资源利用程度的重要内容^[5-7]。目前,常采用距树干特定距离或随机取样的方法来研究垂直方向上细根的和季节动态以及细根周转等^[8-9]。

杨树生长快、适应性广、用途广泛,是我国长江流域及黄淮海地区最重要的速生丰产林造林树种,

但在广大的分布区内,受立地条件不同的影响,林分生产力和生态经济效益存在巨大差异。滴灌技术作为一种水分高效利用的灌溉技术已经广泛应用于农业领域^[10-12],在林业方面,国内外一些学者已将滴灌技术应用到杨树人工林的栽培并进行了相关研究^[13-16],有关林木栽培的根系研究也是一个重要内容。以往关于杨树人工林根系的研究多集中于细根的垂直分布及与土壤养分、水分的关系等方面^[17-20],而在滴灌条件下有关林木的根系研究,闫小莉等^[21-22]对滴灌施肥条件下欧美108杨细根形态及垂直分布特征以及表土层细根形态和分布的变化进行了研究;刘晓丽等^[23]对滴灌密植枣林细根特征的研究表明,滴灌对枣林根系分布有显著影响,可缩短枣林细根最大分布深度;傅建平^[24]研究了地面滴灌条件下107杨人工林根系的分布,发现滴灌栽培对杨树人工林根系分布影响显著,且根系主要分布在0~40 cm土层。本试验以地面滴灌栽培的

5年生欧美107杨为研究对象,通过对不同方向、不同树干距离和不同土壤深度细根分布情况的研究,探究细根的空间分布特征,对制定滴灌栽培杨树人工林的科学灌溉制度有重要的指导意义。

1 试验区概况

试验地位于北京市大兴区林场,属暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春秋短促。年均气温 11.6°C ,1月平均气温 -2.3°C ,7月平均气温 25.1°C ,年平均无霜期 $180\sim 200\text{d}$,年平均降水量 $520\sim 560\text{mm}$,且主要集中在6—9月,地下水水位深 36m ,田间持水量为 10% ,土壤为永定河故道冲击沙土,有机质含量低,土壤蓄水能力差。

2 试验材料与方法

试验以滴灌栽培的5年生欧美杨107无性系(*Populus × euramericana* cv. '74/76')人工林为研究对象,该林分于2011年春季采用 30cm 长插条扦插造林,株行距 $3\text{m}\times 5\text{m}$,滴灌管沿树行铺设,滴头间距为 60cm ,滴头流量 $4\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。根据杨树速生丰产林的蒸散量确定生长季内不同时期需要的灌溉量,于每年5—9月采用少量多次的方式灌溉,每次灌溉时间为 9h ,停灌后能在树行方向形成宽度 $1.0\sim 1.2\text{m}$ 、深度 $60\sim 70\text{cm}$ 的连续湿润带^[13]。试验当年滴灌栽培条件下的林木平均胸径 15.7cm ,平均树高 17.28m ;常规灌溉条件下的林木平均胸径 13.4cm ,平均树高 15.53m ,滴灌栽培的蓄积量比常规灌溉高 $28.5\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3 试验方法

3.1 取样

于2015年11月上旬在林分内设置3个面积为 $30\text{m}\times 20\text{m}$ 标准地,每个标准地内有样木40株,在标准地内进行每木检尺,然后各选取1株树高、胸径、冠幅接近平均值的标准木作为研究对象。采用根钻(根钻内径 10cm ,高 10cm)法取样,根据 $1/4$ 样圆法^[25](图1),即在每株样木的不同方位划分出 $1/4$ 营养区作为取样区,结合滴灌条件下根系分布^[24],以样木树干为中心,分别选取株间、行间和对角3个方向作为取样区,然后在距树干 $0.2、0.5、1.0、1.5\text{m}$ 处钻取土芯,取样深度为 60cm ,每 10cm 为1个土层。把取出的每个土样分别装入标号的塑封袋内,共计216个土样带回实验室分析。

3.2 测定

土样在清水中浸泡后用流水冲洗,过孔径为 0.8mm 筛,使根系与土样中绝大部分的土壤及其他杂质分离,然后在清水中用镊子小心捡取所有活根系。本研究按照传统的根系分类标准^[20],以直径 $\leq 2\text{mm}$ 作为划分细根和粗根的阈值。应用Epson Twain Pro根系扫描系统和WinRhizo根系图像分析系统对根系进行细根根长测定。待全部根样扫描完成后,将细根在 80°C 烘箱中烘干至恒质量(24h),用电子天平称质量(精确到 0.001g),测定各根样的生物量。

表1 标准木基本特征

Table 1 Basic characteristics of standard wood

样木编号 Sample number	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	冠幅 Crown/(m×m)
1	15.6	17.26	3.63×3.42
2	15.8	16.87	3.13×3.50
3	15.8	17.63	3.35×3.17

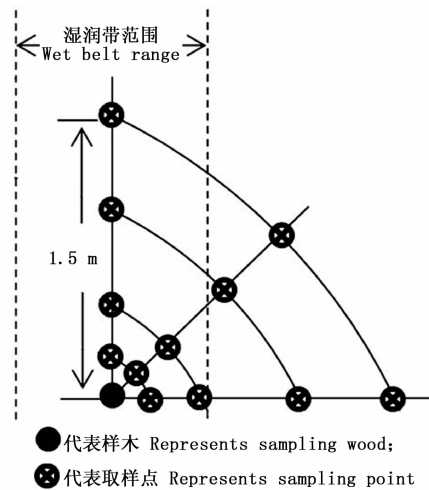


图1 根系取样示意图

Fig. 1 Root sampling diagram

3.3 数据统计分析

利用Excel软件对试验数据进行整理和统计,以Origin Pro 8.0软件作图,采用SPSS19.0软件进行树干距离和土层深度的双因素方差分析,研究各因素及其交互作用对细根分布的影响,然后对数据进行单因素方差分析以探究细根的水平 and 垂直分布特征。

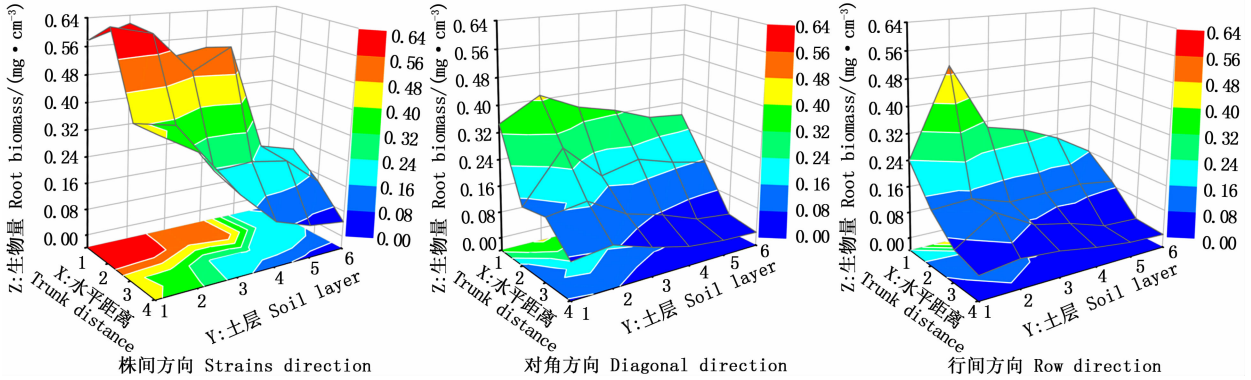
4 结果与分析

4.1 细根生物量和根长的总体分布规律

为探究滴灌条件下细根的总体分布规律,分别以同一方向所有取样点及同一土层或树干距离所有

取样点的单位土体内细根生物量和根长的和来表征细根的总体分布特征。图2、3直观反映了细根生物量和根长的空间分布格局,不同方向的细根生物量和根长都表现出相似分布趋势。株间方向不同土层细根的水平分布表现为先增加后减小的分布特征,细根生物量和根长均在距树干0.5 m处最大;垂直方向不同树干距离处的细根在0~10 cm土层分布最多,然后随土层加深细根不断减少。对角方向

不同土层细根的水平分布均在距树干0.2 m处最大,然后随距离变远不断减小;不同树干距离处细根的垂直分布也均表现为先增加后减小的分布规律,细根在10~20 cm土层分布最多。行间方向细根分布与对角方向类似,水平方向距树干0.2 m处细根分布最多,垂直方向细根在10~20 cm土层最多,然后随树干距离变远和土壤深度加深,细根分布不断减少。

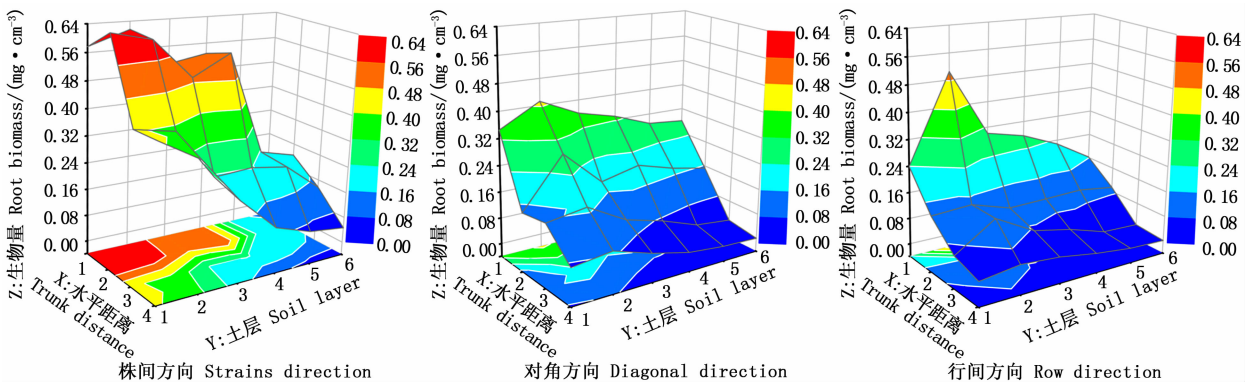


X轴1,2,3,4分别表示距树干0.2、0.5、1.0、1.5 m的水平距离(下同),Y轴1,2,3,4,5,6分别表示0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm土层(下同),Z轴表示单位土体内的细根生物量($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

X-axis 1, 2, 3, 4 represents the horizontal distance of 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 m from the trunk respectively (same as follows), Y-axis 1, 2, 3, 4, 5, 6 represents the soil layer of 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60 cm (same as follows), The Z axis represents the fine root biomass ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$) in the unit soil.

图2 细根生物量的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of fine root biomass



Z轴表示单位土体内的细根长($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$)。The Z axis represents the fine root length ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$) in the unit soil.

图3 细根长的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of fine root length

通过树干距离、土层2个因素对滴灌条件下杨树人工林细根指标参数进行方差分析,结果(表2)表明:树干距离、土层深度及其交互作用均对细根生物量和根长分布影响显著($P < 0.05$),说明滴灌条件下细根有明显的空间分布格局。由表2可知:对角和行间方向细根生物量受树干距离的影响大于株

间方向,而株间方向受土层的影响较大;行间方向细根长受树干距离、土层及其交互作用的影响较株间和对角方向更大,说明行间方向的细根分布有更明显的空间异质性,这可能是受滴灌后形成的湿润带造成不同树干距离及土层土壤水分条件不同的影响。

表2 树干距离、土层及其交互作用对细根生物量和根长的影响

Table 2 Effects of trunk distance, soil layer and their interactions on fine root biomass and root length

变异来源 Source of variation	自由度 df	细根生物量 Fine root biomass					
		株间方向 Strains direction		对角方向 Diagonal direction		行间方向 Row direction	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
树干距离 Trunk distance	3	82.213	<0.001 *	262.537	<0.001 *	353.017	<0.001 *
土层 Soil layer	5	86.081	<0.001 *	20.89	<0.001 *	42.207	<0.001 *
树干距离 × 土层 Trunk distance × soil layer	15	4.933	<0.001 *	2.002	0.035 *	10.583	<0.001 *

变异来源 Source of variation	自由度 df	细根长 Fine root length					
		株间方向 Strains direction		对角方向 Diagonal direction		行间方向 Row direction	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
树干距离 Trunk distance	3	40.085	<0.001 *	171.453	<0.001 *	476.685	<0.001 *
土层 Soil layer	5	146.1	<0.001 *	69.579	<0.001 *	243.467	<0.001 *
树干距离 × 土层 Trunk distance × soil layer	15	4.557	<0.001 *	4.116	<0.001 *	18.321	<0.001 *

注：“*”表示影响显著 ($P < 0.05$)。Note: “*” indicate significant differences ($P < 0.05$).

表3 不同方向细根生物量和根长的分布特征

Table 3 Distribution characteristics of fine root biomass and root length in different directions

方向 Direction	细根生物量 Fine root biomass/mg	细根长 Fine root length/cm
株间 Strains direction	8.06 ± 0.23 a	12.72 ± 0.86 a
对角 Diagonal direction	3.91 ± 0.14 b	6.97 ± 0.19 b
行间 Row direction	2.89 ± 0.06 c	5.48 ± 0.18 c

注:表中不同小写字母表示影响显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

由表3可知:不同方向细根生物量差异显著($P < 0.05$),不同取样点细根生物量总和为14.86 mg,其中,株间方向占细根总生物量的54.2%,分别是对角和行间方向生物量的2.06倍和2.79倍。不同方向的细根长差异显著($P < 0.05$),株间方向占细根总长的50.5%,分别是对角和行间方向的1.82倍和2.32倍。滴灌条件下,细根主要分布在株间方向,不同方向细根的分布表现为株间 > 对角 > 行间,这是由于细根生长具有向水性,而滴灌管沿树行铺设,滴灌后能在株间方向形成连续的湿润带,利于细根生长;对角和行间方向受湿润带影响有限,细根分布减少,但对角方向受湿润带影响范围大于行间方向(图1),湿润带内土壤水分的增加有利于根系的生长,所以对角方向比行间方向有更多的细根。

由细根生物量和根长的垂直分布特征(表4)可知:不同土层细根生物量差异显著($P < 0.05$),其中,10~20 cm 土层细根生物量最大,为3.75mg,是0~10 cm 土层细根生物量的1.19倍;随土层的加深,细根生物量不断减少,其中,0~40 cm 土层细根生物量占细根总生物量的81.2%。由表4可知:细

表4 不同土层细根生物量和根长的分布特征

Table 4 Distribution characteristics of fine root biomass and root length in different soil layers

土层 Soil layer/cm	细根生物量 Fine root biomass/mg	细根长 Fine root length/cm
0~10	3.16 ± 0.25 b	5.97 ± 0.50 b
10~20	3.75 ± 0.08 a	6.75 ± 0.25 a
20~30	2.66 ± 0.18 c	4.76 ± 0.23 c
30~40	2.50 ± 0.06 c	3.79 ± 0.22 d
40~50	1.57 ± 0.12 d	2.28 ± 0.03 e
50~60	1.23 ± 0.03 e	1.61 ± 0.06 f

注:表中不同小写字母表示影响显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

根长的垂直分布与生物量相似,不同土层的细根长差异显著($P < 0.05$),10~20 cm 土层的细根最长,为6.75 cm,是0~10 cm 土层细根长的1.13倍,然后随土层的加深细根长不断减小。0~40 cm 土层的细根长占细根总长的84.5%,说明滴灌条件下细根主要分布在0~40 cm 土层,40~60 cm 土层的细根分布减少显著。

滴灌后水分能在0~40 cm 土层形成连续的湿润带,提高0~40 cm 土层的土壤水分含量,显著改善土壤条件,利于细根生长和积累,而下渗到40~60 cm 土层的水分相对较少并迅速向周围扩散,其水分条件明显比0~40 cm 土层的差,细根分布明显减少。

4.2 细根长的水平分布特征

由不同方向细根长的水平分布情况(图4)可知:滴灌条件下,杨树人工林细根的水平分布在不同方向差异显著。株间方向细根长的水平分布表现为

先增加后减小的分布规律,根长在距树干0.5 m处最大,为4.2 cm,占该方向细根总长的33.1%,与距树干0.2、1.0、1.5 m处的根长均差异显著($P < 0.05$)。由于滴灌后在株间方向形成连续湿润带,水分条件充足,细根生长不受水分条件制约,细根先增加后减小的水平分布特征应该是树木细根自身生长调控的结果。

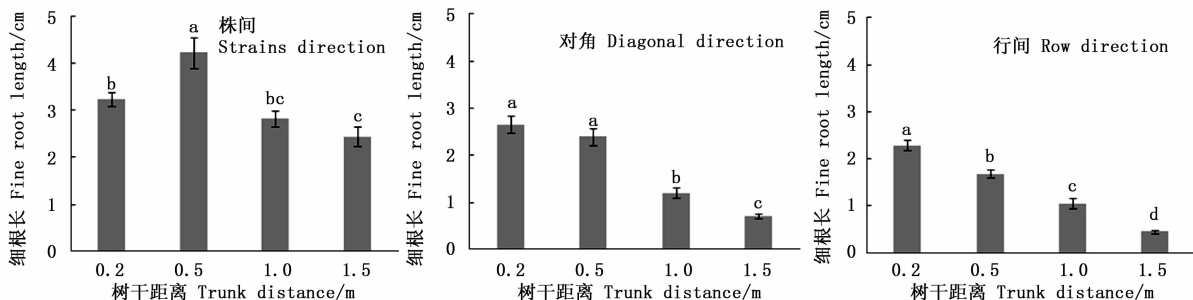
对角方向的细根长表现出随树干距离变远不断减小的分布特征,根长在距树干0.2 m处最大,为2.7 cm,占该方向细根总长的38.1%,与距树干0.5 m处的根长差异不显著($P > 0.05$);距树干0.2、0.5 m处的细根长与距树干1.0、1.5 m处均差异显著($P < 0.05$)。

行间方向细根长的水平分布与对角方向类似,其水平分布表现为随距树干距离的增加而减小,距树干0.2、0.5、1.0、1.5 m处的细根长差异显著($P < 0.05$),其中,距树干0.2 m处的根长为2.3 cm,占该

方向细根总长的41.8%。由于对角方向距树干0.5 m处仍在滴灌形成的湿润带范围内,土壤水分条件较好,其细根长与距树干0.2 m处相近;行间方向距树干0.5 m处已处于湿润带边缘,水分条件较差,影响了细根的生长和积累,显著小于距树干0.2 m处的细根长(图1)。通过以上分析可知,株间方向距树干0.2、0.5、1.0、1.5 m处以及对角和行间方向距树干0.2、0.5 m处均在湿润带内,其细根长的和占所有位点细根总长的86.4%。

4.3 细根长的垂直分布特征

不同方向细根长有明显的垂直分布特征(图5)。株间方向根长在0~10 cm土层最大,为3.7 cm,占株间细根总长的29.1%,与其他土层的根长均差异显著($P < 0.05$),然后随土层加深根长不断减小。这是由于滴灌改变了表层土壤的水分、温度等条件,利于根系生长,同时适宜的土温和水分条件也有助

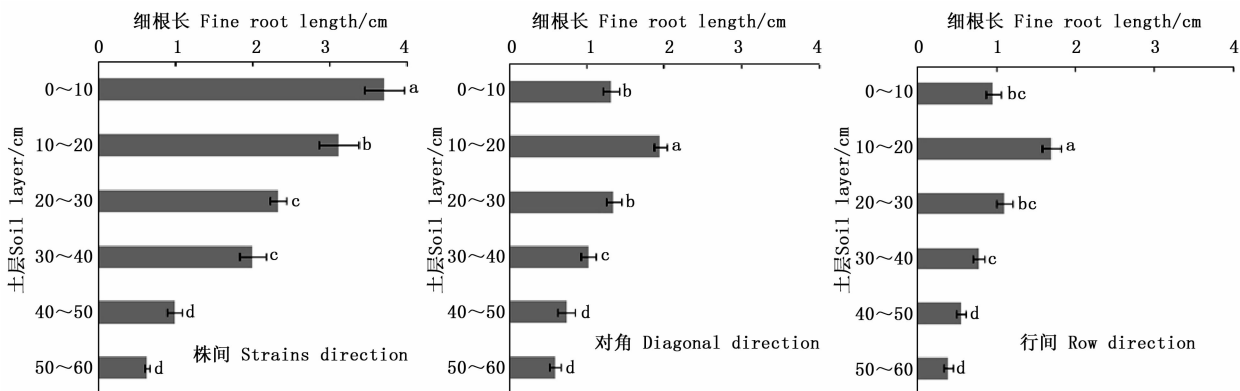


图中不同小写字母表示在同一方向的不同树干距离处的差异显著($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences at different trunk distances in the same direction ($P < 0.05$).

图4 不同方向细根长水平分布特征

Fig. 4 Horizontal distribution of fine root length in different directions



图中不同小写字母表示在同一方向的不同土壤深度显著差异($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences at different soil layers in the same direction ($P < 0.05$).

图5 不同方向细根长垂直分布特征

Fig. 5 Vertical distribution of fine root length in different directions

于林地内枯枝落叶的分解,从而改善表土层的土壤条件,进一步促进细根的生长和积累。0~40 cm 土层细根长的和占该方向细根总长的 87.4%,细根主要分布在 0~40 cm 土层。

对角方向细根长的垂直分布特征与株间方向不同,细根长在 10~20 cm 土层最大,为 2.0 cm,占该方向细根总长的 27.9%,是 0~10 cm 土层根长的 1.48 倍,差异显著($P < 0.05$),这是由于沙土的蓄水能力较差,而 0~10 cm 土层温度高,蒸发量大,表土层的土壤水分减少,细根分布较少。0~40 cm 土层细根长的和占该方向细根总长的 80.7%,细根仍主要分布在 0~40 cm 土层。

行间方向细根长的垂直分布特征与对角方向类似,细根长的垂直分布表现为先增加后减小的分布特征,细根长在 10~20 cm 土层最大,为 1.7 cm,占该方向细根总长的 31.0%,与其他土层差异显著($P < 0.05$)。0~40 cm 土层细根长的和占该方向细根总长的 82.7%,该方向细根仍主要分布在 0~40 cm 土层。

5 讨论

杨树人工林细根生物量和根长是评价根系吸收养分和水分能力的重要指标。本研究表明,在不同方向的不同水平距离和土壤深度,细根生物量和根长表现出相似的分布特征,这与李盼盼等^[26]有关细根生物量和根长密度等分布特征的研究结果一致。为了简化分析且完整揭示细根的空间分布规律,在以后的研究中可任选其中之一作为研究细根空间分布规律的指标。

土壤水分、养分等资源的差异是影响细根分布的重要原因,闫小莉等^[22]关于水肥耦合条件下细根形态及分布特征的研究表明,细根生长具有一定的向水性和趋肥性。由于本研究试验地为沙地,土壤贫瘠,N、P、K 元素含量极低^[27],土壤条件的差异主要受滴灌后形成的湿润带在不同方向和不同土壤深度导致的水分条件不同所影响。滴灌条件下,细根长的分布受树干距离、土层及其交互作用的显著影响,这是由于滴灌后形成的湿润带在不同方向和不同土壤深度导致的水分条件不同所致(图 1)。

距树干不同距离处的土壤条件等因素显著影响细根分布^[28-29]。滴灌条件下,杨树人工林细根的水平分布在距树干不同距离处表现为,株间方向细根长在距树干 0.5 m 处最大,而对角和行间方向细根

长在距树干 0.2 m 处最大,这是由于株间方向水分充足,细根的分布主要受树木细根自身生长调控的影响^[30],而对角和行间方向随树干距离变远,受湿润带影响不断减少,土壤水分条件不断变差。距树干由远到近细根长的变化幅度为株间方向 < 对角方向 < 行间方向,这与土壤水分条件在株间方向、对角方向及行间方向的分布格局一致。

杨树人工林在每次滴灌后,导致土壤不同深度水分条件的差异且显著影响细根的垂直分布,不同土层的细根长,株间方向表现为 0~10 cm 土层最大且与其他土层差异显著,这和张龙宁等^[17],闫小莉等^[22]在滴灌条件下细根形态指标随土壤深度增加而显著减小的研究结果一致。滴灌条件下,杨树人工林不同方向的细根均主要分布在 0~40 cm 土层,这也与以往林木细根主要分布在林地浅土层的研究结果一致^[31-32]。

滴灌栽培杨树人工林的灌溉量根据不同年份杨树速生丰产林的蒸散量确定,本研究对象为北京河流故道沙地上滴灌栽培的 5 年生杨树人工林,其年灌溉量仅为 $2\ 422\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,比常规灌溉减少 50% 以上,但其蓄积量却是常规灌溉人工林的 1.5 倍,这说明滴灌条件下杨树人工林形成的上述空间分布格局和数量为杨树人工林的生长发育奠定了基础,使其达到了速生丰产的目标。

由于本试验仅研究了滴灌栽培条件下杨树人工林细根的空间分布,在常规灌溉条件下细根的空间分布情况未做说明,今后尚需对常规灌溉条件下细根的空间分布进行对比研究,从而全面揭示滴灌栽培条件下林分的速生丰产机制。另外,根系对水分的响应是一个复杂的生理生态过程,本研究仅从细根的形态和生物量指标来探究滴灌栽培条件下细根的分布特征,在今后研究中应该对细根生长发育机制及动态变化进行深入研究,以全面揭示滴灌栽培杨树人工林细根的生理生态特性。

6 结论

滴灌条件下,杨树人工林细根的空间分布特征可以采用细根生物量或细根长任一指标来表述。滴灌后形成的连续湿润带导致土壤水分条件的差异使细根在不同方向的水平分布和垂直分布特征不同,在株间、对角和行间方向细根长的分布表现为株间 > 对角 > 行间。细根在对角和行间方向的水平分布受湿润带范围影响表现为距树干由近变远不断减少

的分布特征;细根在垂直方向主要分布在形成连续湿润带的0~40 cm土层,整体表现为随土层由浅变深不断减少的分布特征。由于滴灌后能沿株间方向形成连续的湿润带,依据滴灌栽培杨树人工林细根的水平分布规律,每次滴灌后应保证水分侧渗到距离树干至少50 cm的范围,以满足86.4%的细根吸收到足够的水分;依据滴灌栽培杨树人工林细根的垂直分布规律,每次滴灌后应保证水分下渗的深度至少达到40 cm深,以满足84.5%的细根吸收到足够的水分。本研究结果和结论为确定精准的单次有效灌溉量提供理论依据,从而实现既节水又确保林木正常生长的双重目标。

参考文献:

[1] 张小全,吴可红. 森林细根生产和周转研究[J]. 林业科学,2001,37(3):126-138.

[2] Vogt K A, Vogt D, Palkiotto P A *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species [J]. *Plant Soil*,1996,187:159-219.

[3] Hendrick R L, Pregitzer K S. Spatial variation in root distribution and growth associated with minirhizotrons[J]. *Plant and Soil*,1992,143:283-288.

[4] Gale M R, Grigal D F, Harding R B. Soil productivity index: predictions of site quality for white spruce plantations[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1991,55(6):1701-1708.

[5] 袁渭阳,李贤伟,张健,等. 不同年龄巨桉人工林枯落物和细根碳储量研究[J]. 林业科学研究,2009,22(3):385-389.

[6] 李凌浩,林鹏,邢雪荣. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究[J]. 应用生态学报,1998,9(4):337-340.

[7] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover and nutrient dynamics of above and belowground detritus of world forests[J]. *Advances in Ecological Research*,1986,15:303-378.

[8] 杨秀云,韩有志,张芸香. 距树干不同距离处华北落叶松人工林细根生物量分布特征及季节变化[J]. 植物生态学报,2008,32(6):1277-1284.

[9] 张彝,金光泽. 择伐对阔叶红松林细根生物量及其时空分布的影响[J]. 林业科学研究,2014,27(2):240-245.

[10] Thind H S, Buttar G S, Aujla M S, *et al.* Yield and water use efficiency of hybrid Bt cotton as affected by methods of sowing and rates of nitrogen under surface drip irrigation [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*,2012,58(2):199-211.

[11] Ramazan T, Sinan S, Bilal A. Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield, quality and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey [J]. *Irrig Sci*,2011,29:79-89.

[12] 孙丹丹,张忠学. 滴灌大豆不同灌水量的产量与水分效应分析[J]. 东北农业大学学报,2012,43(5):100-104.

[13] 傅建平,兰再平,孙尚伟,等. 滴灌条件下杨树人工林土壤水分运移[J]. 林业科学,2013,49(6):25-29.

[14] 傅建平,兰再平,孙尚伟,等. 滴灌条件下杨树人工林土壤水分变化规律研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(6):61-66.

[15] 韦艳葵. 地下滴灌下沙地杨树速生丰产机制与灌溉制度研究[D]. 北京:北京林业大学,2003.

[16] O'Neill M K, Shock C C, Lombard K A, *et al.* Hybrid poplar (*Populus* spp.) selections for arid and semi-arid intermountain regions of the western united states [J]. *Agroforestry System*,2010,79(3):409-418.

[17] 张龙宁,向地奎,席本野,等. 三倍体毛白杨人工林浅层土壤细根对地下滴灌不同水分处理的响应[J]. 东北林业大学学报,2013,41(7):40-44.

[18] 燕辉,刘广全,李红生. 青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度变化[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2763-2768.

[19] 张小全. 环境因子对树木细根生物量、生产与周转的影响[J]. 林业科学研究,2001,14(5):566-573.

[20] Block R M A, Van Rees K C J, Knight J D. A review of fine root dynamics in *Populus* plantations [J]. *Agroforestry Systems*,2006,67(1):73-84.

[21] 闫小莉,戴腾飞,贾黎明,等. 欧美108杨细根形态及垂直分布对水氮耦合措施响应[J]. 植物生态学报,2015,39(8):825-837.

[22] 闫小莉,戴腾飞,邢长山,等. 水肥耦合对欧美108杨幼林表层细根形态及分布的影响[J]. 生态学报,2015,35(11):3692-3701.

[23] 刘晓丽,马理辉,汪有科. 滴灌密植枣林细根及土壤水分分布特征[J]. 农业工程学报,2013,29(17):63-71.

[24] 傅建平,兰再平,孙尚伟,等. 地面滴灌对107杨人工林根系分布的影响[J]. 林业科学研究,2013,26(6):766-772.

[25] 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.

[26] 李盼盼,王延平,王华田,等. 黄河冲积平原杨树人工林细根空间分布特征[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2013,44(1):61-65.

[27] 贺勇,兰再平,孙尚伟,等. 滴灌施肥条件下107杨幼林N、P、K养分吸收量与施肥量研究[J]. 林业科学研究,2015,28(3):426-430.

[28] Jackson R B, Canadell J R, Mooney H A, *et al.* A global analysis of root distribution for terrestrial biomass [J]. *Oecologia*,1996,108(3):389-411.

[29] 程云环,韩有志,王庆成,等. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性的研究[J]. 植物生态学报,2005,29(3):403-410.

[30] 朱秋美,马长明,翟明普,等. 河北石质山区花椒细根分布特征[J]. 林业科学,2009,45(2):131-135.

[31] 仲启铖,杜钦,张超,等. 滨岸不同植物配置模式的根系空间分布特征[J]. 生态学报,2010,30(22):6135-6145.

[32] 闫美芳,张新时,周广胜,等. 不同树龄杨树人工林的根系呼吸季节动态[J]. 生态学报,2010,30(13):3449-3456.

(责任编辑:徐玉秀)