

DOI: 10.5846/stxb201308032013

闫小莉, 戴腾飞, 邢长山, 贾黎明, 张龙宁. 水肥耦合对欧美 108 杨幼林表土层细根形态及分布的影响. 生态学报, 2015, 35(11): 3692-3701.

Yan X L, Dai T F, Xing C S, Jia L M, Zhang L N. Coupling effect of water and nitrogen on the morphology and distribution of fine root in surface soil layer of young *Populus×euramericana* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3692-3701.

水肥耦合对欧美 108 杨幼林表土层细根形态及分布的影响

闫小莉¹, 戴腾飞¹, 邢长山², 贾黎明^{1,*}, 张龙宁¹

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, 北京 100083

2 北京市共青团林场, 北京 101300

摘要:采用根钻法对水肥耦合条件下(地表滴灌和随水施肥)欧美 108 杨幼林(*Populus×euramericana* cv. 'Guariento')林地 0—30 cm 表土层细根形态及分布进行了系统研究。田间试验设计 3 个灌溉水平(灌溉土壤水势起始阈值为-75、-50、-25 kPa)和 3 个养分水平(施 N150、300、450 g 株⁻¹ a⁻¹),组合成 9 个水肥耦合处理,另设 1 个对照处理(CK)。研究表明:(1)垂直方向上,10 个处理下欧美 108 杨幼林细根生物量、表面积、体积和根长密度均随着土壤深度的增加而递减(且多数处理达到显著水平),而比根长则在低水和中水处理下表现出 0—10 cm 土层显著小于 10—20 cm 和 20—30 cm 土层,在高水和 CK 处理下各土层之间差异不显著($P < 0.05$)。从表征细根分布特征的多数指标来看,水肥耦合没有改变欧美 108 杨幼林细根的垂直分布格局,其细根主要分布在 0—10 cm 土层,该层生物量和根长密度分别是 10—20 cm 土层的 1.25—5.05 倍和 1.05—2.05 倍、分别是 20—30 cm 土层的 2.8—13.06 倍和 1.99—4.99 倍。(2)欧美 108 杨幼林细根生物量、根长密度、表面积和体积均表现出:低肥量下的 3 个滴灌水平处理均与 CK 无显著差异,中肥和高肥量下的 6 个处理均显著大于 CK,尤其高水高肥处理促进细根生长的效果最显著,其 3 个土层细根生物量较 CK 分别显著提高了 316%、386%和 442%,根长密度较 CK 分别显著提高了 345%、176%、132% ($P < 0.05$);各处理比根长均随着滴灌和施肥量的增加而减小。(3)同一滴灌水平下各土层细根生物量随施肥量变化的回归方程拟合具有较高 R^2 (0.702—0.891), $P < 0.0001$,而同一施肥水平下各土层细根生物量随滴灌量变化的回归方程拟合度较低,说明欧美 108 杨幼林细根的趋肥性强于向水性,故在对其水肥经营管理中应该将施肥措施放在首位。

关键词:细根; 形态与分布; 地表滴灌; 杨树人工林

Coupling effect of water and nitrogen on the morphology and distribution of fine root in surface soil layer of young *Populus×euramericana* plantation

YAN Xiaoli¹, DAI Tengfei¹, XING Changshan², JIA Liming^{1,*}, ZHANG Longning¹

1 The Key Laboratory of Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Gongqing Forest Farm of Beijing, Beijing 101300, China

Abstract: Root system plays an important role in uptake of water and nutrients by Poplar trees. Understanding the coupling effect of water and nitrogen on the morphology and distribution of fine roots will assist in making efficient water and nutrient management strategies for fast-growing and high-yield *Populus×euramericana* cv. 'Guariento' plantations. In this study, drilling method is used to investigate the morphology and distribution of fine roots in 0—30 cm soil layers in a young poplar plantation under the surface drip irrigation and fertilization technology. The trial includes nine treatments, which were different combinations among three irrigation treatments (drip irrigation was initiated when soil water potential (ψ_{soil}))

基金项目:国家林业公益性行业科研专项经费重大项目(201004004)

收稿日期:2013-08-03; 网络出版日期:2014-06-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jlm@bjfu.edu.cn

reaches -75 , -50 , or -25 kPa) and three fertilization treatments (nitrogen application rates are respectively 150, 300, or 450 g tree⁻¹ a⁻¹). A control non-irrigation and non-fertilization treatment (CK) is also included. Results showed that, for the vertical direction, the biomass, surface area, the volume and length density of fine roots were significantly decreased with increased soil depth in all treatments. In -50 and -75 kPa treatments, specific root length in 0—10 cm soil layer is significantly lower than those in 0—10 and 20—30 cm soil layers. Whereas, in -25 kPa and CK treatments, no significant differences in root length density are detected among various soil layers. According to the distribution of most fine root parameters, the vertical distribution pattern of fines is not affected by the interaction between water and fertilizer. Fine roots were mainly distributed in 0—10cm, where the biomass and root length density was 1.25—5.05 and 1.05—2.05 times as high as that in 10—20 cm, and 2.80—13.06 and 1.99—4.99 times as high as that in 20—30 cm. The biomass, root length density, surface area and volume of fine roots in the three irrigation treatments were significantly larger than CK under middle and high fertilizer level, but this was not found under low fertilizer level. Especially, fine roots biomass under both high water and fertilizer level, which significantly promoted the growth of fine roots best. Compared with CK, the fine roots biomass of three soil layers were significantly improved 326%, 386% and 442%, respectively, and the root length density was significantly increased by 345%, 176% and 176%, respectively. Each water and fertilizer treatments showed that the amount of specific root length decreased as the amount of drip irrigation and fertilization increased. Fine root biomass changed with the fertilization varied by a regression equation which was fitted with high a value of R^2 (0.702—0.891), under the same fertilization level in each soil layer but was fitted with low relationship under the same drip irrigation in each soil layer. It illustrates that the response to the coupling effect of water and fertilizer of fine root growth and distribution has a stronger trend to fertilitertaxis than hydrotropism of poplar plantation.

Key Words: fine root; morphology and distribution; surface drip irrigation; poplar plantation

随着社会的发展,人们对木材的需求越来越大,目前我国木材对外依存度已高达 50%左右,营造速生丰产林成为解决我国木材安全问题的重要途径之一。杨树是我国最主要的速生丰产林树种,占全国乔木人工林中的 15.9%^[1]。欧美 108 杨(*Populus×euramericana* cv. 'Guariento')具有树形美、干形直、尖削度小、树冠窄、材质优、生长快等优点^[2],以其优良的生长特性成为许多地区的主栽杨树品种之一。目前,关于该系列树种的研究集中在优良遗传品种的选育和引种^[3]、立地条件、密度和修枝对其生产力和生理特性的影响^[4-5]、不同冠层光合特性研究^[6]和苗木水肥耦合效应对地上生物量的影响^[7]等方面,其 6 年生林地生产力达到了 103.5 m³/hm²^[4],可提升的空间还很大,集约经营的水肥管理措施则是有效提高林地生产力的重要手段之一。另外,目前对欧美 108 杨根系方面的研究较少,且水肥管理措施下细根形态及分布的研究尚未见报道。因此,本研究对欧美 108 杨速生丰产林在以地表滴灌和随水施肥为特征的水肥耦合集约经营措施下的表层根系形态及分布特征进行了系统研究,旨在为优化水肥管理技术提供理论支撑,从而实现速生丰产林水氮高效利用的经济效益和节水节肥的环保效益。

细根(直径≤2mm)系统具有巨大的吸收表面积,是植物吸收水养和维持生长的主要器官^[8],细根通过物理作用和分泌的有机物在土体中进行穿插和缠绕,以此来分散、串联、固结土壤颗粒,有利于土壤有机物积累和丰富土壤生物多样性^[9]。同时,细根通过吸收作用可以反映出土壤中水养的分配格局^[10],并且自身的生长和延伸也会对土壤养分、水分、温湿度及其它特征做出响应^[11-12]。近年来,植物细根作为森林生态系统中土壤碳的主要来源,并在生态系统的养分循环、碳分配、能量流动和物质循环过程中具有十分重要的作用,其研究也受到了广泛的关注^[13-15]。树木细根的生长和垂直分布与树种特性、树龄、土壤水分、养分及地下水位等有关,土壤资源有效性在空间分布上的特异性及其它外界环境条件深刻影响着细根的生长与分布^[16-19]。关于细根的研究,在垂直分布上多数是集中在土壤浅层 0—30 cm^[19]或者 0—40 cm,因林地浅土层的水养资源对林木生长贡献很大,且浅土层为林木细根集中分布层^[20-22]。所以,我们研究浅土层中的细根形态和分布将

有助于解释后期林木生长差异。

因此,本研究采用田间试验,对水肥耦合技术措施下的欧美杨幼林细根形态及分布进行了系统研究。本研究目标是:通过0—30 cm 土层内细根生物量、根长密度、表面积、体积和比根长等指标的研究,(1)明确水肥耦合技术措施是否对欧美 108 杨幼林表土层细根分布格局产生了影响;(2)揭示欧美 108 杨幼林细根形态及分布对水肥耦合效应的响应。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况与研究对象

试验地位于北京市顺义区杨镇高各庄村(东经 116°49'35.6",北纬 40°05'48.7"),海拔 28 m。试验区面积为 4 hm²,属暖温带大陆性气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,年均气温 11.5℃,年均降水量 625 mm,主要集中在 7、8 月份,无霜期 195 d 左右。试验地土壤物理性质见表 1。

表 1 试验地土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil at the experiment site

| 深度/cm Depth | 砂粒/% Sand | 粉粒/% Silt | 粘粒/% Clay | 容重/(g/cm ³) Bulk density | 田间持水量/% Field capacity | 全氮/% Toal N | 土壤质地 Soil texture |
|----------------|--------------|--------------|--------------|---|---------------------------|----------------|----------------------|
| 0—20 | 79.96 | 29.52 | 0.52 | 1.68 | 12.72 | 0.058 | 砂土 |
| 20—40 | 67.19 | 32.28 | 0.53 | 1.64 | 14.56 | 0.049 | 砂质壤土 |
| 40—60 | 63.52 | 35.92 | 0.56 | 1.62 | 15.91 | 0.044 | 砂质壤土 |
| 60—120 | 46.57 | 52.81 | 0.62 | 1.60 | 16.70 | 0.041 | 壤土 |

试验区采取宽窄行模式栽植欧美 108 杨 (*Populus×euramericana* cv. 'Guariento'),株距 4m,窄行距 6m,宽行距 12 m,将宽行作为各试验处理区的隔离带,每公顷 400 株。于 2011 年春季以 3 年生实生苗造林,2011 和 2012 年分别间作玉米和豌豆。于 2012 年初铺设滴灌管,采用 1 行 1 带铺设方式,滴灌管管径 16mm,滴头间距 100cm,流量约为 2L/h。

1.2 试验设计

试验设置 3 个灌溉水平和 3 个养分水平组合成 9 个水肥耦合处理,另设一个对照处理 CK(按照当地生产上的水肥管理技术:春季展叶前沟灌 1 次,每次约 640L/株,不施肥),每个处理设计 3 个重复,各小区随机分布,各处理具体设计见表 2。

表 2 试验设计及具体实施概况

Table 2 The experiment design and implementation overview in trial sites

| 处理编号 Treatment | 土壤水势 Soil water potential/kPa | 施 N 量 Fertilize amount/(g 株 ⁻¹ a ⁻¹) | 总灌溉次数 Irrigation times/times | 总施肥次数 Fertilize times/times |
|-------------------|----------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|
| D1F1 | -75 | 150 | 7 | 6 |
| D1F2 | -75 | 300 | 7 | 6 |
| D1F3 | -75 | 450 | 7 | 6 |
| D2F1 | -50 | 150 | 12 | 6 |
| D2F2 | -50 | 300 | 12 | 6 |
| D2F3 | -50 | 450 | 12 | 6 |
| D3F1 | -25 | 150 | 19 | 6 |
| D3F2 | -25 | 300 | 19 | 6 |
| D3F3 | -25 | 450 | 19 | 6 |
| DOF0 | 春季沟灌 640L/株 | 0 | 2 | 0 |

自 2012 年 4—10 月开展滴灌,当滴头正下方土壤 20cm 处的土壤水势分别达到-75、-50 和-25 kPa 时进

行灌溉。灌溉量可由灌溉时间表示,灌溉时间计算公式为: $h = [V \times (SWC_{后} - SWC_{前})] / V_{滴头}$, $V = 1/3 \times 3.14 \times R^2 \times H$ ($SWC_{后}$ 为设计灌溉后土壤含水量为田间持水量的 75%, $SWC_{前}$ 为灌溉前土壤含水量,烘干称重法; $V_{滴头}$ 为每小时滴头流量 2L/h, V 为计划湿润体体积, R 为湿润峰半径 50cm, H 为计划湿润体高 50cm。自 2012 年 5—9 月开展随水施肥,施 N 量为 150、300 和 450 g 株⁻¹ a⁻¹,各处理分 6 次完成施肥,每次均在同一天内完成。

1.3 根系取样、测定项目及方法

采用根钻法于 2012 年 10 月底欧美杨生长季末进行根系取样。在各处理的第二重复小区,沿滴灌管在各样地对角线上选取 6 个取样点,以 10 cm 为一层进行取样,取样深度至地表下 30 cm。根样在清水中浸泡后用流水冲洗过孔径为 0.8 mm 筛,使根系与绝大部分的土壤、有机质残渣及其他杂质分离,在清水中使用镊子和网勺小心捡取所有活根系。

按照传统的根系分类标准^[23],本研究中以直径 ≤ 2 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各项指标的测定。待全部根样扫描完成之后,进行各根样生物量的计算。

1.4 数据处理

利用 Excel 软件对所得试验数据进行计算、整理和图表绘制。采用 SPSS 20.0 软件对各项形态指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 细根生物量对水肥耦合效应的响应

2.1.1 同一水肥条件下不同土层间细根生物量的比较

10 个处理下细根生物量随着土壤深度的增加均表现为递减规律(图 1),且除 D1F1 和 D2F1 处理外,其余 8 个处理均达到显著性($P < 0.05$)。如 D3F3 处理下,3 个土层细根生物量分别为 0.349、0.248 和 0.124 mg/cm³,分别占 3 层总量的 48%、34% 和 17%。总体上欧美 108 杨幼林细根主要分布在 0—10 cm 土层,该层细根生物量是 10—20 cm 土层的 1.25—5.05 倍、是 20—30 cm 土层的 2.80—13.06 倍。

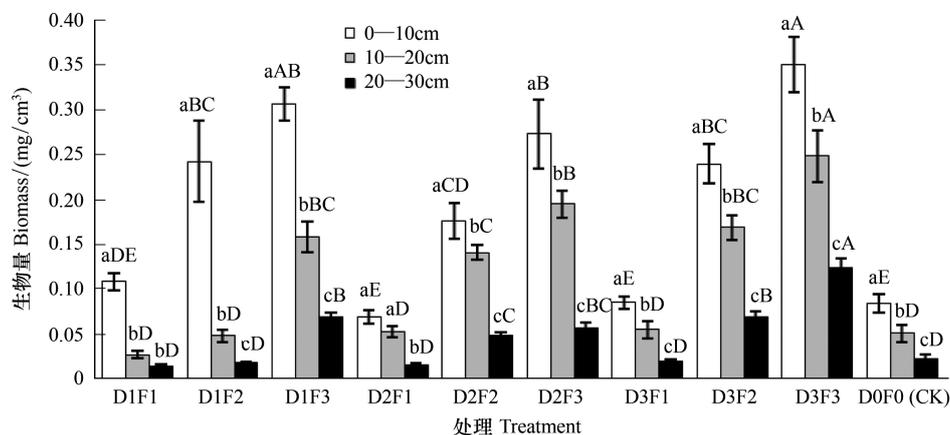


图 1 水肥耦合效应对细根生物量的影响

Fig.1 Coupling effect of water and nitrogen on fine root biomass

相同小写字母表示同一处理不同土层间差异不显著,相同大写字母表示同一土层不同处理间差异不显著,在 $P < 0.05$ 水平

2.1.2 同一土层不同水肥条件下细根生物量的比较

同一滴灌水平下各土层细根生物量均随施肥量的提高而增加(图 1)。0—10cm 土层的 F1、F2 和 F3 处理,10—20 cm 土层的 F1 和 F2 处理和 20—30 cm 土层的 F1 处理均表现出:细根生物量随滴灌量的增加均无显著变化,而在 10—20 cm 土层的 F3 处理和 20—30 cm 土层的 F2 和 F3 处理下随滴灌量的增加显著增加。低肥下的 3 个滴灌处理各土层细根生物量均与 CK 无显著差异,而中肥和高肥下的各处理均显著大于 CK,其

中 D3F3 处理 3 个土层生物量较 CK 分别显著提高了 316%、386% 和 442% ($P < 0.05$)。

2.2 细根根长密度对水肥耦合效应的响应

2.2.1 同一水肥条件下不同土层间根长密度的比较

垂直方向上,各处理根长密度均呈现出逐层递减的趋势(图 2)。10 个处理中 D2F3、D3F2 和 D3F3 的根长密度在各土层间均存在显著性差异,如高水高肥处理的 3 个土层根长密度分别为 0.888、0.526 和 0.290 cm/cm^3 ,第 2 层比第 3 层显著高出 81%,第 1 层比第 2 层显著高出 68% ($P < 0.05$)。0—10 cm 土层根长密度是 10—20 cm 土层的 1.05—2.05 倍、是 20—30 cm 土层的 1.99—4.99 倍。

2.2.2 同一土层不同水肥条件下根长密度的比较

各土层根长密度在同一滴灌水平下均随施肥量的提高而增加(图 2),其中 0—10 cm 和 10—20 cm 土层达到显著水平,而 20—30 cm 土层的各处理间差异不显著。低肥下 3 个灌溉处理的各土层根长密度均表现出随滴灌水平的提高无显著差异,且均与 CK 间无显著差异。而中肥和高肥下的 D2F2、D2F3、D3F2 和 D3F3 这 4 个处理各土层根长密度均显著大于 CK,其中 D3F3 处理下 3 个土层根长密度较 CK 分别显著提高了 345%、176%、132% ($P < 0.05$)。

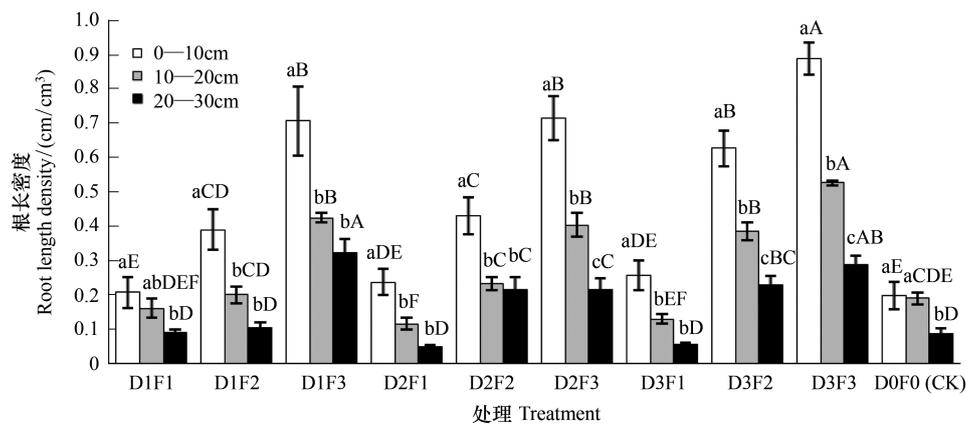


图 2 水肥耦合效应对细根根长密度的影响

Fig. 2 Coupling effect of water and nitrogen on fine root length density

相同小写字母表示同一处理不同土层间差异不显著,相同大写字母表示同一土层不同处理间差异不显著,在 $P < 0.05$ 水平

2.3 细根表面积对水肥耦合效应的响应

2.3.1 同一水肥条件下不同土层间细根表面积的比较

各处理细根表面积均随着土壤深度的加深而显著减小(图 3),CK 的 3 个土层细根表面积分别为 0.024、0.019 和 0.009 cm^2/cm^3 ,分别占 3 层总量的 45%、36% 和 17%,第 1 层和第 2 层分别比第 3 层显著高出 155% 和 107% ($P < 0.05$)。欧美杨幼林 0—10 cm 土层细根表面积是 10—20 cm 土层的 1.23—2.15 倍、是 20—30 cm 土层的 1.27—2.40 倍。

2.3.2 同一土层不同水肥条件下细根表面积的比较

同一滴灌水平下各土层细根表面积均随施肥量的增加而增大(图 3),其中 0—10 cm 土层的 D1、D2 和 D3 处理、10—20 cm 和 20—30 cm 土层的 D3 处理达到显著水平。低肥下细根表面积随滴灌量的变化规律同根长密度一致。中肥和高肥下 0—10 cm 土层是 D3 处理显著大于 D1 和 D2,10—20 cm 和 20—30 cm 土层是 D2 和 D3 处理显著大于 D1。9 个水肥处理中仍以 D3F3 处理效果最显著,其 3 个土层的细根表面积较 CK 分别显著增加 268%、212% 和 267% ($P < 0.05$)。

2.4 细根体积对水肥耦合效应的响应

2.4.1 同一水肥条件下不同土层间细根体积的比较

与细根生物量和表面积的垂直分布情况相似,均随土层加深而减小,且 3 个土层间均达到显著水平

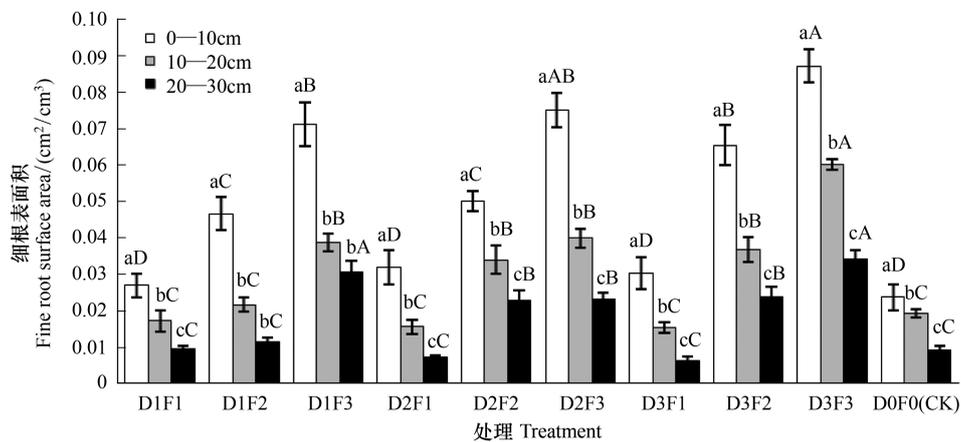


图 3 水肥耦合效应对细根表面积的影响

Fig.3 Coupling effect of water and nitrogen on fine root surface area

相同小写字母表示同一处理不同土层间差异不显著,相同大写字母表示同一土层不同处理间差异不显著,在 $P < 0.05$ 水平

(图 4)。例如, D2F2 处理 3 个土层细根体积分别为 0.481 、 0.443 和 $0.196 \text{ mm}^3/\text{cm}^3$, 分别占 3 层总量的 42%、39% 和 17%, 前两层分别比第 3 层显著高出 145% 和 125%, CK 的 3 个土层的细根体积分别为 0.228 、 0.159 和 $0.080 \text{ mm}^3/\text{cm}^3$, 第 2 层比第 3 层显著高出 100%, 第 1 层又比第 2 层显著高出 43% ($P < 0.05$)。

2.4.2 同一土层不同水肥条件下细根体积的比较

3 个滴灌水平下各土层细根体积均随施肥量的增加而增大(图 4), 其中 0—10cm 土层的各处理间达到显著水平; 10—20 cm 和 20—30 cm 土层在低水和高水下的相近施肥量水平之间差异不显著, 而在高水下均随施肥量的增加而显著提高, 如在高水下, 3 个施肥量处理 10—20 cm 土层细根体积依次为 0.145 、 0.366 和 $0.533 \text{ mm}^3/\text{cm}^3$, 中肥比低肥显著增大 151%, 高肥比中肥显著增大 114%。除低肥下的 3 个滴灌处理外其余各处理 3 个土层的细根体积均显著大于 CK, 如 D3F3 3 个土层细根体积分别较 CK 显著增大 217%、234% 和 274% ($P > 0.05$)。

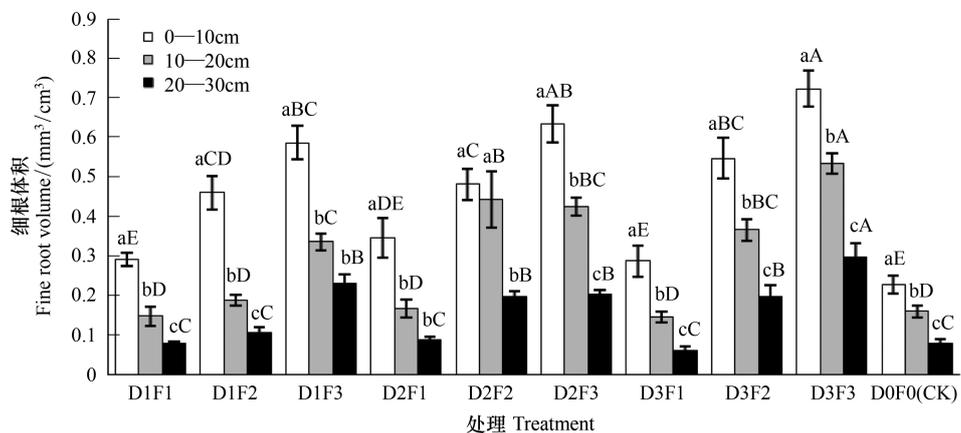


图 4 水肥耦合效应对细根体积的影响

Fig.4 Coupling effect of water and nitrogen on fine root volume

相同小写字母表示同一处理不同土层间差异不显著,相同大写字母表示同一土层不同处理间差异不显著,在 $P < 0.05$ 水平

2.5 细根比根长对水肥耦合效应的响应

2.5.1 同一水肥条件下不同土层间细根比根长的比较

欧美 108 杨细根比根长在高水下的 3 个施肥处理和 CK 下均是各土层之间无显著差异(图 5), 但是在低和中水的 3 个施肥处理下 0—10 cm 土层比根长显著小于 10—20 cm 和 20—30 cm 土层。如在 D2F1 处理, 3

个土层比根长依次为 2463.4、2175.8 和 3570.1 cm/g,第 3 层相比前两层分别显著高出 44%和 64%($P<0.05$)。

2.5.2 同一土层在不同水肥条件下细根比根长的比较

水肥耦合对 0—10 cm 土层的细根比根长无显著影响(图 5),而其它 2 个土层在低水下的低肥处理显著大于中肥和高肥处理。如低水下的 3 个施肥处理在 10—20cm 土层的比根长依次为 5881.4、4553.5 和 3818.6 cm/g,F3 较 F1 显著减小 35%。同一施肥量下 10—20 cm 土层 D1 处理的比根长显著大于 D2 和 D3 处理,如在 F3 的 3 个滴灌处理下比根长依次为 3818.6、2121.7 和 2280.9 cm/g,D1 比 D2 和 D3 分别显著增大 67%和 79%($P<0.05$)。

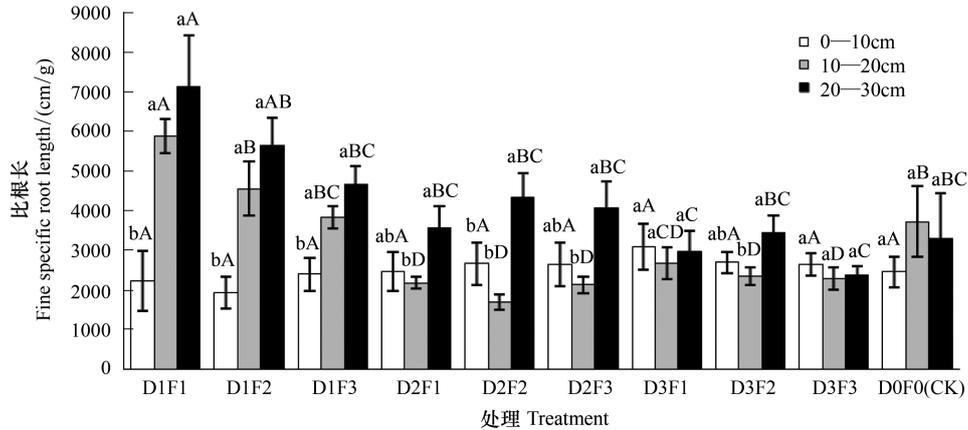


图 5 水肥耦合效应对细根比根长的影响

Fig.5 Coupling effect of water and nitrogen on fine specific root length

相同小写字母表示同一处理不同土层间差异不显著,相同大写字母表示同一土层不同处理间差异不显著,在 $P<0.05$ 水平

2.6 欧美 108 杨幼林各土层细根生物量与水肥耦合效应的模型拟合

各土层在同一滴灌水平下细根生物量与施肥量之间的回归关系见表 3,所有关系式均在 $P<0.0001$ 的水平上极显著,相关系数在 0.702—0.891 之间,表明同一滴灌水平下欧美 108 杨各土层的细根生物量与施肥量之间具有较强的相关性。

表 3 各土层在同一滴灌水平下细根生物量与施肥量之间的关系式

Table 3 The models of fine roots biomass and fertilize amount in different soil depth of same irrigation level

| 水分处理/kPa Treatment of water | 土层/cm Soil depth | 回归模型 Regression model | R^2 | P |
|--------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------|---------|
| -75 | 0—10 | $Y = 0.0008x^{0.9711}$ | 0.702 | <0.0001 |
| | 10—20 | $Y = 0.00002x^2 - 0.0008 + 0.0958$ | 0.855 | <0.0001 |
| | 20—30 | $Y = 0.0048e^{0.0056x}$ | 0.818 | <0.0001 |
| -50 | 0—10 | $Y = 0.0001x^{1.2483}$ | 0.821 | <0.0001 |
| | 10—20 | $Y = 0.0001x^{1.2398}$ | 0.866 | <0.0001 |
| | 20—30 | $Y = 0.00003x^{1.2787}$ | 0.805 | <0.0001 |
| -25 | 0—10 | $Y = 0.0001x^{1.3013}$ | 0.891 | <0.0001 |
| | 10—20 | $Y = 0.266e^{0.0052x}$ | 0.803 | <0.0001 |
| | 20—30 | $Y = 0.0003x - 0.0334$ | 0.884 | <0.0001 |

各土层在同一施肥水平下细根生物量与滴灌量之间的回归关系见表 4,除了中肥条件下的 10—20 cm 和 20—30 cm 及高肥下的 20—30 cm 土层细根生物量与灌溉量之间的关系式在 $P<0.0001$ 水平上极显著外(相关系数在 0.714—0.912 之间)外,其余各处理细根生物量与灌溉量之间相关性较低。

3 结论与讨论

3.1 细根生物量、根长密度、表面积和体积对水肥耦合效应的响应

随着土壤深度的加深,10 种处理下欧美 108 杨幼林细根生物量、根长密度、表面积和体积在 0—30 cm 土层范围内均逐层减小,这与以往关于细根垂直分布的诸多研究结果一致^[12,20,24-27],表明水肥耦合没有改变欧美杨幼林细根在 0—30 cm 土层范围内的垂直分布格局。其原因可能是 10 个处理的土壤资源有效性在垂直方向上均随土层深度的增加而降低。林地内的枯枝落叶经土壤微生物和原生动物的分解和矿化作用使得表土层养分丰富^[28],再加上适宜的土壤质地和容重^[29]、温度^[30]和水分等条件。因此林地表土层自然成为林木细根的集中分布层,且随土壤深度加深和较表层相对少的水养资源致使细根分布逐层减少^[31]。所以推断土壤资源有效性的垂直分布差异是造成欧美 108 杨幼林表土层细根垂直分布差异的重要原因之一。

表 4 各土层在同一施 N 量下细根生物量与滴灌量之间的关系式

Table 4 The models of fine root biomass and irrigation amount in different soil depth of same fertilize level

| 施肥处理/(g/株) Treatment of N | 土层/cm Soil depth | 回归模型 Regression model | R^2 | P |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------|-------|---------|
| 150 | 0—10 | $Y=0.0005x^2-0.005x+0.2042$ | 0.443 | 0.0125 |
| | 10—20 | $Y=0.9864x^{-0.7138}$ | 0.461 | 0.0006 |
| | 20—30 | $Y=0.0104e^{0.0078x}$ | 0.233 | 0.1452 |
| 300 | 0—10 | $Y=0.0001x^2-0.0105x+0.4386$ | 0.161 | 0.2671 |
| | 10—20 | $Y=-0.00005x^2+0.0076x-0.11$ | 0.845 | <0.0001 |
| | 20—30 | $Y=0.0004x^{1.2118}$ | 0.912 | <0.0001 |
| 450 | 0—10 | $Y=0.0009x+0.2659$ | 0.056 | 0.2348 |
| | 10—20 | $Y=0.1236e^{0.0088x}$ | 0.389 | 0.0291 |
| | 20—30 | $Y=-0.00006x^2-0.0054x+0.1634$ | 0.764 | <0.0001 |

相同滴灌水平下,欧美 108 杨各土层细根生物量、根长密度、表面积和体积均随施肥量的提高而增加。本研究与李洪量等^[32]和顾东祥等^[33]研究具有相似结果。表明欧美 108 杨该树种在水肥耦合效应下均具有跟大多数植物相似的细根生长和分布特征。根系各项指标随施肥量增加而增加是因为林木根系具有很强的趋肥性,根系分布与土壤养分有着密切的关系,其中尤以氮素对根系形态和分布的影响最大且成正相关^[34-36]。因此,这种由施肥导致的土壤中养分有效性的提高定会影响细根的生产与生物量的累积,从而进一步增强其吸水摄养的能力。

在中肥和高肥水平下,欧美 108 杨幼林细根生物量、根长密度、表面积和体积均随滴灌量的增加而增大,说明当施肥量相对较大时增加灌水可以有效促进欧美杨细根的生长,其主要原因可能是滴灌处理很大程度地提升了土壤水分的有效性^[37],并改善了土壤结构等条件,这也印证了林木根系的向水性。而在低肥水平下,各土层细根参数均随滴灌量的变化无显著差异,这说明在影响欧美 108 杨细根最为重要的两个环境因素当中,土壤氮有效性的作用要明显超过土壤水分的有效性,即欧美 108 杨细根趋肥性强于向水性。

在本试验中除低肥下的 3 个水分处理外,其余水肥处理各土层细根生物量、根长密度、表面积和体积均显著大于 CK,其中尤以高水高肥处理为最显著。这是因为高水分条件下增加施氮量以及高氮水平下增加供水,均可使氮肥随水运移至根系存在的更广区域,从而更高效地促进林木根系生长^[38]。植物细根对土壤养分和水分的吸收是同步的,二者相互作用,共同影响着植物各部分的生长,本研究中低肥处理即使配予高的滴灌量也没能显著促进细根的生长和积累,说明较低的肥量因为不能有效地增强土壤肥力,所以在此低肥基础上增大滴灌量也不能达到显著提高细根生长的效果。另外,在同一滴灌水平下欧美 108 杨细根生物量随施肥量变化具有较强的相关性,进一步印证了在影响细根生长层面,土壤有效氮相比土壤有效水具有更大的意义。

3.2 细根比根长对水肥耦合效应的响应

比根长决定了根系吸收水分和养分的能力,也反映了投入到细根生物量中用于吸收水养的效率。本研究

中欧美杨幼林细根比根长在高滴灌水平的 3 个施肥处理下各土层之间均无显著性差异,究其原因可能是较高滴灌量和较多灌溉次数使各土层水分资源充足,故 3 个土层细根吸收效率没有形成显著差异。低和中 2 个滴灌水平下各处理在垂直方向上比根长表现出:深层土壤显著大于浅层土壤,且随滴灌量和施肥量的减小而增大,这是因为深层土壤和相对较低的滴灌量及施肥量处理下土壤资源有效性差,在较差的土壤水养环境中,植物细根不得不以低生物量的投入去构建更大的根系长度,以提高细根吸收水分和养分的效率。因此,在土壤资源有效性低的状况下欧美 108 杨通过增大细根比根长来更有效的吸收水养资源,即在深层土壤和低土壤资源有效性下投入高比根长的水养吸收策略。

根系对水分和养分的响应是一个复杂的生理生态过程,可在形态、解剖结构和生理等方面均有变化。本研究仅仅从欧美 108 杨幼林细根形态指标来进行分析可能的原因,而对分级根系中粗细根,粗根的形态指标及细根的其他指标对水肥耦合效应的响应没有进行相关研究,另外,0—30 cm 的土层取样深度对于细根比根长的研究来说尚过浅,因此,在下一步研究中应该对各分级根系和表征细根特征的其他指标做更全面的了解,并加大取样深度。

综上,水肥耦合管理措施通过改变林地土壤资源的有效性,从而影响林木细根的增生,进而改变林木细根对土壤水养的吸收能力,这是细根形态响应水肥耦合的重要机制,也是水肥管理措施提高林地生产力的主要机制。本研究针对北京沙地欧美 108 杨所设定的水肥耦合管理措施有效的促进林木细根的生长,并得出欧美 108 杨幼林细根生长和分布的趋肥性强于向水性,因此,在对其水肥经营管理中应该将施肥措施放在首位,其次是灌溉措施。

参考文献 (References):

- [1] 贾黎明,刘诗琦,祝令辉,胡建军,王小平.我国杨树林的碳储量和碳密度.南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(2):1-7.
- [2] 张百俊,董胜林,贾卫禧,刘天成.新品种欧美杨 107 和 108 引种特性研究.河南科技学院学报:自然科学版,2008,36(4):24-26.
- [3] 席忠诚,何天龙,乔小花.欧美杨 107 号和 108 号引种育苗实验研究.甘肃农业大学学报,2008,43(3):111-116.
- [4] 田新辉,孙荣喜,李军,赵长海,杨敏生.107 杨人工林密度对林木生长的影响.林业科学,2011,47(3):184-188.
- [5] 亓玉飞,尹伟伦,夏新莉,孙尚伟.修枝对欧美杨 107 杨水分生理的影响.林业科学,2011,47(3):33-38.
- [6] 马永春,方升佐.欧美杨 107 不同冠层光合特性的研究.南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(4):39-42.
- [7] 王梓,马履一,贾忠奎,林平,杨自立,高卫东,左海军,秦超.1 年生欧美 107 杨地上生物量水肥耦合效应.东北林业大学学报,2011,39(3):49-51.
- [8] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. Ecology, 2000, 81(1): 275-280.
- [9] Kuchenbuch R O, Ingram K T, Buczko U. Effects of decreasing soil water content on seminal lateral roots of young maize plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, 169(6): 841-848.
- [10] 张宇清,朱清科,齐实,张岩,王冬梅.梯田埂坎立地植物根系分布特征及其对土壤水分的影响.生态学报,2005,25(3):500-506.
- [11] Schenk H J. Vertical vegetation structure below ground: scaling from root to globe. Progress in Botany, 2005, 66(4): 341-373.
- [12] 黄林,王峰,周立江,黄茹,齐代华,魏刚.不同森林类型根系分布与土壤性质的关系.生态学报,2012,32(19):6110-6119.
- [13] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils. Science, 1999, 284(5423): 2095-2112.
- [14] Morgan J A. Looking Beneath the surface. Science, 2002, 298(5600): 1903-1904.
- [15] Santantnio D, Grace J C. Estimating fine-root production turnover from biomass and decomposition data: a compartment-flow model. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17(8): 900-908.
- [16] 薛建辉,王智,吕祥生.林木根系与土壤环境相互作用机制研究进展综述.南京林业大学学报:自然科学版,2002,26(3):79-84.
- [17] 孙志虎,王庆成.采用地统计学方法对水曲柳人工纯林表层根量的估计.生态学报,2005,25(4):923-930.
- [18] 程云环,韩有志,王庆成,王政权.落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究.植物生态学报,2005,29(3):403-410.
- [19] 杨秀云,韩有志,张芸香,武小钢.采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响.生态学报,2012,32(1):64-73.
- [20] 仲启铨,杜钦,张超,王开运.滨岸不同植物配置模式的根系空间分布特征.生态学报,2010,30(22):6135-6145.
- [21] 闫美芳,张新时,周广胜,江源.不同树龄杨树人工林的根系呼吸季节动态.生态学报,2010,30(13):3449-3456.
- [22] 郑金兴,黄锦学,王珍珍,熊德成,杨智杰,陈光水.闽楠人工林细根寿命及其影响因素.生态学报,2012,32(23):7532-7539.
- [23] Block R M A, Van Rees K C J, Knight J D. A review of fine root dynamics in *Populus* plantations. Agroforestry Systems, 2006, 67(1): 73-84.

- [24] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [25] Douglas G B, McIvor I R, Potter J F, Foote L G. Root distribution of poplar at varying densities on pastoral hill country. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 147-161.
- [26] 苏纪帅, 程积民, 高阳, 仇智虎, 曹怀清. 宁夏大罗山 4 种主要植被类型的细根生物量. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 626-632.
- [27] 程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 封晓辉, 刘泽彬, 葛晓改, 王晓荣, 张炜银. 三峡库区马尾松根系生物量的空间分布. *生态学报*, 2012, 32(3): 823-832.
- [28] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 上官周平. 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. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 611-619.
- [29] Burke M K, Raynal D J, Mrrchell M J. Soil nitrogen availability influences seasonal carbon allocation patterns in sugar maple (*Acer saccharum*). *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, 22(4): 447-456.
- [30] Pregitzer K S, Zak D R, Curtis P S, Kubiske M E, Teeri J A, Vogel C S. Atmospheric CO₂, soil nitrogen and turnover of fine roots. *New Phytologist*, 1995, 129(4): 579-585.
- [31] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389-399.
- [32] 李洪亮, 孙玉友, 曲金玲, 魏才强, 孙国宏, 赵云彤, 柴永山. 施氮量对东北粳稻根系形态生理特征的影响. *中国水稻科学* 2012, 26(6): 723-730.
- [33] 顾东祥, 汤亮, 徐其军, 雷晓俊, 曹卫星, 朱艳. 水氮处理下不同品种水稻根系生长分布特征. *植物生态学报*, 2011, 35(5): 558-566.
- [34] 魏国良, 王得祥, 汪有科, 蔺雨阳, 杨涛. 黄土丘陵区梨枣人工林细根分布与土壤养分的关系研究. *北方园艺*, 2012, (23): 185-188.
- [35] 张雷, 项文化, 田大伦, 赵仲辉, 陈瑞. 第 2 代杉木林土壤有机碳、全氮对细根分布及形态特征的影响. *中南林业科技大学学报*, 2009, 29(3): 11-15.
- [36] 梅莉, 王政权, 程云环, 韩有志, 张卓文. 水曲柳和落叶松细根分布与土壤有效氮的关系. *华中农业大学学报*, 2008, 27(1): 117-121.
- [37] 席本野, 王焯, 邸楠, 贾黎明, 李广德, 黄祥丰, 高园园. 地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响. *生态学报*, 2012, 32(17): 5318-5329.
- [38] 华元刚, 罗微, 林钊沐, 茶正早, 林清火, 陈秋波. 水肥耦合对橡胶树根系垂直分布的影响. *热带作物学报*, 2012, 33(8): 1342-1347.