

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200420

宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨-小麦复合系统的细根分布及形态特征

邹松言^{1,2} 付婧懿² 邸楠³ 王 烨¹ 席本野²

(1. 北京市林业果树科学研究所, 北京 100093; 2. 北京林业大学林学院, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要:【目的】探讨宽窄行栽植模式下毛白杨-小麦复合系统中的细根根长密度 (FRLD) 分布及形态特征, 为优化该系统的集约栽培措施提供了理论依据。【方法】在宽窄行栽植模式下的4年生三倍体毛白杨-小麦复合系统中, 于小麦收获后, 采取根钻法在3株平均标准木周围进行根系取样, 取样位点为窄行距树75 cm、树行距树75 cm、宽行距树100、200、300、400 cm, 取样深度为80 cm, 共取得根样288个。对所有样品进行形态扫描和烘干称质量, 得到不同深度、位点处的毛白杨和小麦细根的分布及形态数据。【结果】垂直方向上, 毛白杨和小麦的细根均主要聚集在0~20 cm的浅土层, 其中FRLD分别占总根长密度的68%和45%。毛白杨($R^2 = 0.679\ 3$, $P < 0.05$)和小麦($R^2 = 0.922\ 9$, $P < 0.05$)细根均随土层指数递减; 两个物种的FRLD在浅土层没有显著差异($P > 0.05$), 在深土层中则表现出小麦的FRLD显著高于毛白杨的特征($P < 0.05$)。水平方向上, 毛白杨细根主要聚集在窄行的浅土层中, 而小麦细根则在宽行中大量分布。二维根系分布结果显示, 毛白杨和小麦有各自的细根密集分布区域且总体上互不干涉。毛白杨的平均细根直径显著高于小麦($P < 0.05$), 其比根长则显著低于小麦($P < 0.05$)。【结论】在宽窄行栽植模式下的三倍体毛白杨-小麦复合系统中, 毛白杨和小麦的细根分布产生了空间分离, 密集分布区域重叠较少; 此外, 为了更有效地吸收土壤资源以占据竞争优势, 小麦会生产更多吸收效率更高的细根。以上结果可为优化该栽植模式下农林复合系统的集约经营技术提供理论支撑。

关键词: 毛白杨; 细根; 根系空间分布; 根系竞争

中图分类号: S792.117 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2021)10-0073-08

引文格式: 邹松言, 付婧懿, 邸楠, 等. 宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨-小麦复合系统的细根分布及形态特征[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(10): 73-80. Zou Songyan, Fu Jingyi, Di Nan, et al. Fine root spatial distribution and morphology of triploid *Populus tomentosa*-wheat agroforestry system under wide- and narrow-row spacing planting schemes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(10): 73-80.

Fine root spatial distribution and morphology of triploid *Populus tomentosa*-wheat agroforestry system under wide- and narrow-row spacing planting schemes

Zou Songyan^{1,2} Fu Jingyi² Di Nan³ Wang Ye¹ Xi Benye²

(1. Beijing Academy of Forestry and Pomology Sciences, Beijing Academy of Forestry and Pomology, Beijing 100093, China;
2. School of Forestry, Key Laboratory of Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] To provide a theoretical basis for optimizing the intensive management technology in *Populus tomentosa*-wheat agroforestry system under wide- and narrow-row spacing planting schemes, the

收稿日期: 2020-12-30 修回日期: 2021-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31872702), 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20200602、KJCX20200207), 林果院青年基金项目(LGYJJ202009)。

第一作者: 邹松言。主要研究方向: 人工林水分关系和根系生态学。Email: songyanzou@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区北京林业大学林学院。

责任作者: 王烨, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 园林植物栽培生理。Email: 240737994@qq.com 地址: 100093 北京市农林科学院林业果树研究所。

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

distribution and morphological characteristics of fine root length density (FRLD) in this system were studied. [Method] In a four-year-old triploid *P. tomentosa*-wheat agroforestry system under wide- and narrow-row spacing planting schemes, a soil coring method was adopted for root sampling around three average standard trees after wheat harvest. The sampling locations were 75 cm away from tree lines for narrow row and 75 cm away from trees for tree row, while 100, 200, 300, and 400 cm away from tree lines for the wide row, sampling depth was 80 cm. A total of 288 root samples were obtained. All fine root samples were scanned, dried and weighed to obtain the distribution and morphological data in different depths and horizontal distances. [Result] Vertically, the fine roots of *P. tomentosa* and wheat were mainly concentrated in the shallow soil layer. The FRLD in 0–20 cm soil layer accounted for 68% and 45% of the total FRLD, respectively. The FRLD decreased exponentially with depth for both *P. tomentosa* ($R^2 = 0.679\ 3$, $P < 0.05$) and wheat ($R^2 = 0.922\ 9$, $P < 0.05$). There was no significant difference in FRLD between the two species in the shallow soil layer ($P > 0.05$). However, in the deep soil layer, the FRLD of wheat was significantly higher than that of *P. tomentosa* ($P < 0.05$). Horizontally, fine roots of *P. tomentosa* were mainly concentrated in narrow row and tree row, while fine roots of wheat were widely distributed in wide row. On a two-dimensional scale, two species had their own dense distribution zones of fine roots and did not interfere with each other. The fine root diameter of *P. tomentosa* was significantly higher than that of wheat, while its specific root length was significantly lower than that of wheat ($P < 0.05$). [Conclusion] In *P. tomentosa*-wheat agroforestry system under wide- and narrow-row spacing planting schemes, the spatial distribution of the fine roots of *P. tomentosa* and wheat was separated, and the dense distribution area overlapped less. Also, in order to absorb soil resources more effectively and occupy a competitive advantage, wheat would produce more fine roots with higher absorption efficiency. The results can provide a theoretical basis for optimizing the intensive management technology in agroforestry system under this planting schemes.

Key words: *Populus tomentosa*; fine root; root spatial distribution; root competition

农林复合系统(agroforestry system), 不仅是一种传统土地利用和经营方式, 而且是提高林地利用效率的重要途径之一, 是解决当前资源枯竭、农林用地矛盾等问题的可持续土地管理模式^[1-2]。农林复合在提高自然资源利用率、促进生态和经济协调发展等方面具有重要的作用与意义^[3], 而农林间作作为农林复合的重要组成部分在很多国家, 特别在发展中国家得到广泛的推广和应用^[4]。

根系是连接植物与土壤的纽带^[5-8], 其拥有巨大的吸收表面积和较强的生理活性, 是植物吸收水分和养分的主要途径和重要功能器官。根系在土壤中的分布受到土壤中水肥状况的影响, 同时, 其数量与分布特征也影响着土壤中水分和养分的分布、运移与消耗^[9], 以及植物对土壤资源的吸收能力和效率^[10-12], 进而决定了间作系统中不同植物对水分和养分的利用主要是竞争还是互利关系^[13]。因此, 研究农林间作条件下作物与林木的根系分布特征, 解决农林种群间对水分、养分资源的竞争与吸收利用关系问题有助于实现农林复合系统的高效可持续经营。基于林木根系对整个农林复合系统总体功能的重要影响, Schroth 等^[14]著名农林复合系统专家也提出将林

木根系特征作为农林复合经营树种选择的标准之一。

目前已有不少关于杨农复合系统的研究。这些研究发现, 杨农复合系统中, 小麦(*Triticum aestivum*)被杨树(*Populus spp.*)围绕生长时, 会因为对资源的竞争导致小麦的生长减弱^[15-16]。马秀玲等^[17]对我国北方的杨-农复合系统的研究中则发现了小麦为了避免资源竞争而做作出根系构型调整, 将其密集分布区域与杨树错开。同时, 王长伟等^[18]也发现间作花生(*Arachis hypogaea*)和菠菜(*Spinacia spp.*)会促使毛白杨(*Populus tomentosa*)细根水平分布向树体方向转移。Mulia 等^[19]还发现间作小麦会促使杨树的根系分布加深。以上结果说明, 杨树和农作物间作时存在竞争的情况, 并且会为了适应竞争而对根系系统做出适量调整^[20]。然而, 以上关于杨农复合系统的根系研究都是基于均匀栽植、单行带状栽植等栽植模式。在宽窄行栽植模式且没有间作物的情况下, 毛白杨细根的分布模式已得到初步了解。研究发现, 宽行内细根生物量在 0~30 cm 土层中随深度增加而递减, 在 30 cm 以下土层呈均匀分布; 窄行内则呈“双峰”分布, 土壤表层分布着密集细根, 28% 的细根分布在 100 cm 以下的土层中^[21-22]。但

是, 该栽植模式下的农林复合系统中, 根系分布和形态会如何做出调整, 目前还不清楚。

毛白杨作为我国木材战略储备林建设的重要树种, 在华北很多地区采用宽窄行模式栽植, 主要间作物为小麦、大豆和棉花等。研究间作模式下毛白杨和间作物的根系形态及空间分布特征, 有助于深入了解不同种植模式下毛白杨和作物根系采取的根系生长及形态调节策略, 而且对于制定毛白杨农林复合系统的高效集约栽培技术, 摸清毛白杨间作林地土壤水养循环规律具有重要意义。综上, 本文的研究目标是: 针对宽窄行栽植模式下的杨农复合系统, 摸清毛白杨与农作物的细根空间分布特征和形态的差异, 以期优化该种植模式下的集约栽培措施提供理论支持。

1 研究地概况与研究方法

1.1 试验地概况与试验对象

试验地位于山东省高唐县(36°58'N, 116°14'E), 平均海拔 27 m。该地区气候为暖温带半湿润季风区域大陆性气候, 春旱多风, 夏热多雨, 秋爽易旱, 冬寒少雪。多年平均降水量 544.7 mm, 降水主要集中在 7—8 月, 年均蒸发量 1880 mm, 年均气温 13.2 °C, 无霜期 204 d。试验地土壤为粉土, 0~30 cm、30~70 cm、70~90 cm 土层的土壤密度分别为 1.627、1.633、1.521 g/cm³。

研究对象为三倍体毛白杨-小麦间作林, 田间试验地总面积为 5.92 hm², 2008 年春季造林, 苗木采用 1 年生三倍体毛白杨无性系 B301(*P. tomentosa* × *P. bolleana*) × *P. tomentosa* 根萌苗, 平均地径 2 cm, 平均苗高 2.5 m。整地方式为机械穴状, 穴直径为 1.2 m, 深 1 m, 南北为行方向, 林带内植株间距为 1.5 m, 窄行距 1.5 m, 宽行距 8 m(图 1)。林下有稀疏草本植物, 间作冬小麦, 小麦种植边缘距树行约 1 m。2010 年底林分平均胸径 7.07 cm, 平均树高 8.74 m, 宽行内平均冠幅 2.65 m, 窄行东西方向平均冠幅 1.27 m。

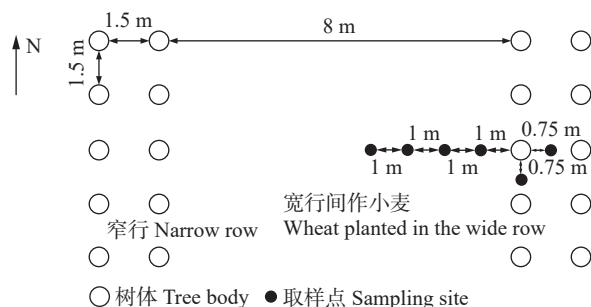


图 1 根系取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of root sampling

1.2 根系采集与处理

试验于 2011 年 7 月开展(小麦收获后, 根系尚未死亡时), 为避免临近试验地林分管理措施和试验处理的干扰, 在试验地中心选取 3 株平均标准木作为样株, 以树干为中心, 在宽行中距离树 1、2、3、4 m 处, 窄行内距树 0.75 m 处, 树行内距树 0.75 m 处分别采用根钻法分层取样(根钻内径为 10 cm, 长 10 cm, 容积为 785 cm³), 垂直方向以 10 cm 为一层取样, 取样深度至地下 80 cm, 共计 288 个根样。根样取回后先在水中浸泡, 用水冲洗使根系与大部分土壤、杂质分离, 然后在清水中利用网勺和镊子捡取所有活根(活根与死根相比具有更强的弹性), 将获取的根样装入自封袋中后, 依次编号标记带回实验室放入冰箱冷冻(约-18 °C)保存, 随后, 在培养皿中根据颜色(杨树根系为深褐色, 小麦根系为灰白色)把将每个根样中的小麦根系与毛白杨根系进行分离, 分别用 Epson Twain Pro 根系扫描仪进行扫描获取根系图像。扫描前用镊子将直径 > 2 mm 的根系挑出单独保存, 仅对直径 ≤ 2 mm 的细根进行扫描。然后用 WinRhizo 根系图像分析系统(Regent Instruments Inc., uebec, Canada)获取根系平均直径(mm)、长度(cm)等细根形态数据。生物量测定前, 将根系样品置入 75 °C 烘箱中烘干至恒质量, 冷却后, 用精度为 0.000 1 g 的电子天平称其干质量, 得到生物量数据。

1.3 数据处理与分析

本研究中主要选取细根根长密度(FRLD, cm/cm³)、直径(MRD, mm)、比根长(SRL, m/g)等根系性状指标来探讨毛白杨-小麦复合系统中的细根分布和形态特征。各指标计算方法为: 细根根长除以取样土体体积即为 FRLD; 细根长度除以细根干质量即为 SRL。

为定量比较不同物种和取样位点间的细根垂直分布深度, 对各土壤剖面(各取样位点)和整个根区范围(宽行中心至窄行)内 FRLD 累计比例(FRLD 从表土层累加到某一土层时占整个剖面 FRLD 总量的比例)数据, 用 MLDR 模型^[23]进行拟合, 得到 FRLD 累积比例(Y_r)随深度(D)变化的函数, 并计算得到 FRLD 累积比例达到 50% 时的深度(D_{50})和累积比例达到 95% 时的深度(D_{95}), 公式如下:

$$Y_r = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{\max} - D}{d \cdot D} \right)^c} \quad (1)$$

$$D_{50} = \frac{D_{\max}}{d + 1} \quad (2)$$

$$D_{95} = \frac{D_{\max}}{1 + d \cdot \left(\frac{1}{19} \right)^{\frac{1}{c}}} \quad (3)$$

式中: c 、 d 为拟合参数, $D_{\max}$ 为最大取样深度(80 cm)。

利用 Excel 2016 对数据进行整理计算, 对每一株取样树, 分别计算毛白杨和小麦细根的直径和比根长在根区内的变异系数, 计算方法为根区内细根或比根长的标准偏差除以其平均值。运用 SPSS 20.0 软件(SPSS Inc., Chicago IL, USA)进行毛白杨和小麦在不同土层、不同位点及整个根区内细根 FRLD 和形态指标以及变异系数的配对样本 T 检验(paired-samples T test), 检验水平为 0.05。分析前, 数据用 Kolmogorov-Smirnov test 和 Levene test 分别进行检验, 因部分 FRLD 数据不满足正态分布和方差齐性的前提条件, 所以对其进行对数转换使其满足条件后再进行后续分析。在 R Studio 软件中运用混合效应模型分析不同土层和水平距离间 FRLD 和形态指标的差异时, 土层深度或水平距离作为固定效应因子, 取样重复作为随机因子, 采用一阶自相关解释土层深度和水平距离间的相关关系, 并用 Tukey 法在 $P = 0.05$ 水平上对 FRLD 和形态指标进行差异显著性检验。本研究中的图表绘制分别在 Origin 9.0 和 Surfer 8.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 毛白杨-小麦复合系统根长密度一维分布

2.1.1 垂直分布

在整个根区范围内(宽行中心至窄行中心), 毛白杨和小麦的 FRLD 垂直变化趋势大致相同, 即表土层(0 ~ 20 cm)细根分布最多, 分别为 1.98 和 2.05 cm/cm^3 , 占总根长的 68% 和 45%, 且随土层加深而明显降低(图 2)。同时, 毛白杨($R^2 = 0.6793$,

$P < 0.05$)与小麦($R^2 = 0.9229$, $P < 0.05$)细根均呈现出随土层指数递减的趋势。此外, 表土层中两个物种的 FRLD 并无显著差异($P > 0.05$), 但在 20 cm 以下的土层中, 小麦 FRLD 比毛白杨显著高出 49% ~ 366%($P < 0.05$)。

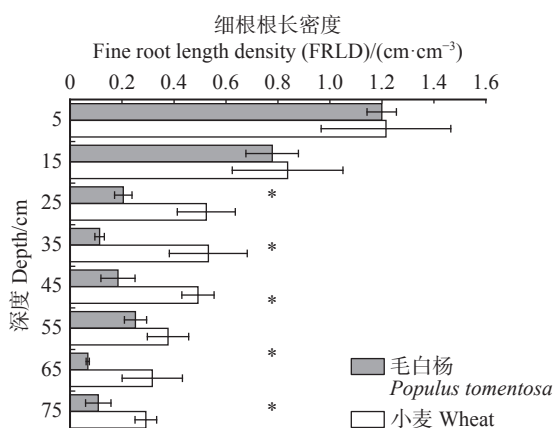
对于两个物种, 不同取样位点间的 D_{50} 和 D_{95} 均无显著差异($P > 0.05$)。同时, 在任何位点, 毛白杨与小麦的 D_{50} 和 D_{95} 也均无显著差异($P > 0.05$)。但对于整个根区范围(窄行中心至宽行中心)而言, 小麦的 D_{50} 和 D_{95} 均显著高于毛白杨($P < 0.05$) (图 3)。

2.1.2 水平分布

由图 4 可知, 毛白杨和小麦的细根水平分布模式具有明显差异。毛白杨细根在树行 0.75 m 和窄行 0.75 m 处大量分布, 其对应的 FRLD 分别为 0.79 和 0.51 cm/cm^3 , 合计占细根总量的 59.8%。同时, 这两个位点上毛白杨的 FRLD 与宽行各处相比均显著高出 100% 以上($P < 0.05$)。小麦细根则在宽行大量聚集, 其宽行范围内的 FRLD 合计占细根总量的 94.8%, 显著高于树行和窄行两个位点($P < 0.05$)。由于细根水平分布模式的不同, 两个物种的 FRLD 在各个位点均有显著差异, 在宽行各处, 小麦 FRLD 显著高于毛白杨($P < 0.05$), 而在树行和窄行中, 则情况相反($P < 0.05$)。

2.2 毛白杨-小麦复合系统根长密度二维分布特征

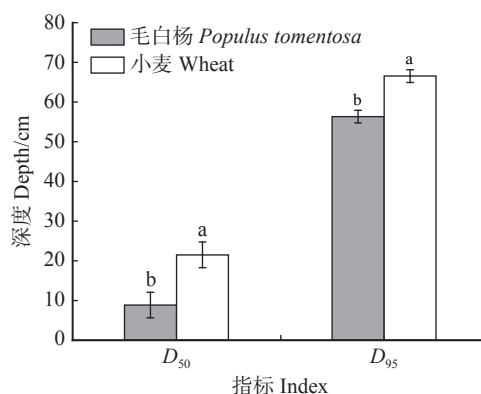
细根二维分布图像显示, 毛白杨与小麦有各自的根系分布密集区且总体上各自分离, 仅在宽行距树 50 ~ 150 cm 范围和 250 ~ 350 cm 范围内的 0 ~ 20 cm 土层中有少量重叠(图 5)。除此之外, 毛白杨细根主要分布在窄行距树 75 cm 至宽行距树 100 cm



*表示同一土层内物种间差异显著 ($P < 0.05$), 检验方法为 T 检验。
* indicates significant difference between species ($P < 0.05$), according to the T test.

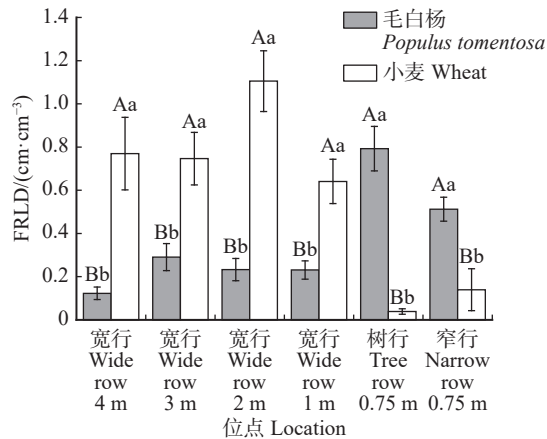
图2 整个根区范围内毛白杨-小麦复合系统
细根根长密度的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of FRLD of *P. tomentosa*-wheat agroforestry system in the whole root zone



不同的小写字母表示物种间差异显著 ($P < 0.05$), 检验方法为 T 检验。Different lowercase letters indicate significant difference between species ($P < 0.05$), according to the T test.

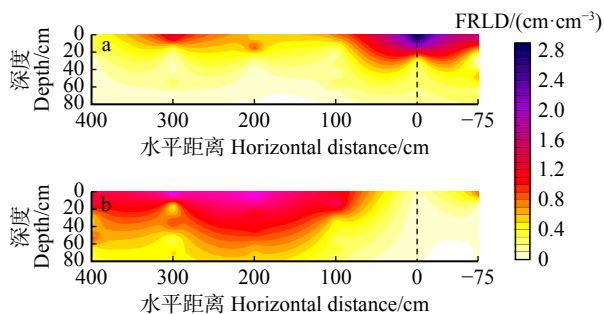
图3 整个根区范围内毛白杨-小麦复合系统的 D_{50} 和 D_{95}
 D_{50} and D_{95} of *P. tomentosa*-wheat agroforestry system in the whole root zone



不同位点上的不同小写字母表示位点间差异显著 ($P < 0.05$), 同一位点的不同大写字母表示物种间差异显著 ($P < 0.05$), 检验方法为分别 Tukey 检验和 T 检验。Different lowercase letters in varied locations indicate significant difference between locations ($P < 0.05$), different capital letters in the same location indicate significant difference between species ($P < 0.05$), according to the Tukey test and T test, respectively.

图 4 毛白杨-小麦复合系统细根根长密度的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of FRLD of *P. tomentosa*-wheat agroforestry system



虚线为宽窄行分界, 即树体位置。Dotted lines indicate the boundary of wide- and narrow-row, i. e. the tree position.

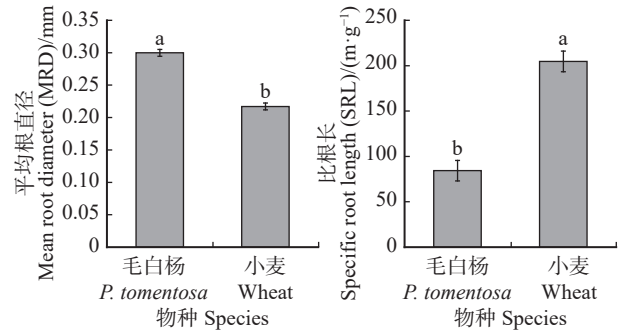
图 5 毛白杨细根根长密度二维分布 (a) 和小麦细根根长密度二维分布 (b)

Fig. 5 Two-dimensional distribution of FRLD of *P. tomentosa* (a) and wheat (b)

范围内的 0~40 cm 土层中。同时, 毛白杨细根呈现出距树越远, 土层越深则根系分布越少的趋势。小麦细根在窄行中分布极少, 仅在距树 75 cm 的表土层中有少量聚集, 其根系主要分布于宽行距树 50~400 cm 范围内的 0~60 cm 土层中。此外, 小麦根系还表现出距树越近分布越少的特征。

2.3 毛白杨-小麦复合系统根系形态特征

水平距离、垂直深度及其各自与物种的交互作用均未对细根直径和比根长造成显著影响 ($P > 0.05$)。但两个物种间的细根形态存在显著差异 (图 6)。毛白杨的平均细根直径为 0.30 mm, 显著高于小麦 (0.22 mm) ($P < 0.05$), 其平均比根长则显著低于小麦 ($P < 0.05$)。



不同小写字母表示物种间差异显著 ($P < 0.05$), 检验方法为 T 检验。Different lowercase letters indicate significant difference between species ($P < 0.05$), according to the T test.

图 6 毛白杨和小麦细根的直径和比根长

Fig. 6 MRD and SRL of *P. tomentosa* and wheat

总体而言, 两个物种细根的比根长均与其直径呈显著负相关 ($P < 0.05$) (图 7)。配对样本 T 检验结果显示, 毛白杨细根直径的变异系数为 0.47, 显著小于其比根长的变异系数 (0.89) ($P < 0.05$), 而小麦细根直径变异系数 (0.41) 与比根长变异系数 (0.52) 之间并无显著差异 ($P > 0.05$)。此外, 两个物种间细根直径的变异系数无显著差异, 但毛白杨比根长的变异性显著高于小麦 ($P < 0.05$)。

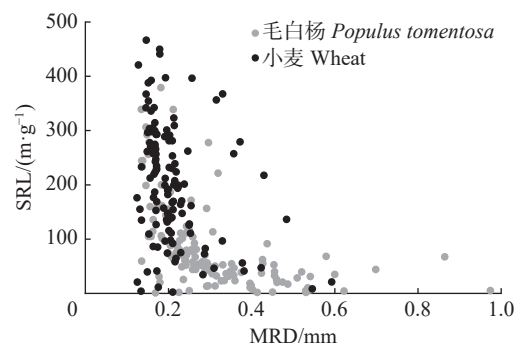


图 7 毛白杨和小麦细根比根长与直径的关系

Fig. 7 Relationship between SRL and MRD of *P. tomentosa* and wheat

3 讨论与结论

细根的空间分布直接控制着植物吸收土壤资源的能力和效率, 此前已有很多相关研究^[21,24-26]。已有的研究表明, 树种特性、土壤水分及地下水位等因素均能影响植物细根的分布^[25,27]。本研究中, 毛白杨与小麦的细根均主要聚集在浅土层且随土层的加深明显减少, 与前人研究结果一致^[5,28-29]。这主要是因为浅土层中的养分条件较深土层更为优越^[30-31], 且通气性更好, 温度更高^[32-33]。此外, 为了降低构建根系系统的能量消耗和减少水养资源从土壤到地上部分的运输距离, 植物会优先选择在浅土层生产更多的根系^[34-35]。此前研究中, 杨树人工林中细根通常随土层指数递减^[36-37]。本研究也观测到了同样的现

象。然而,马秀玲等^[17]的研究结果显示,在林麦共生期间,杨树根系的垂直分布随土层加深呈现出先增后减的趋势,其主要目的是避免与小麦根系的激烈竞争。但本试验地中 30~70 cm 土层的土壤密度与表土层相比较,随之增大的机械阻力限制了根系的向下生长,这可能是本研究中毛白杨细根垂直分布格局未受到间作影响的主要原因。与毛白杨相同,小麦细根也随土层指数递减。此前在杨树-小麦农林复合系统中的相关研究也显示了相似的结果^[17]。两个物种的细根量在浅土层并无差异,但在较深的土层中,小麦的细根根长密度显著高于毛白杨(图 2)。D₅₀ 和 D₉₅ 的结果也表明,在 0~80 cm 范围内,相比于毛白杨,小麦会选择将更多的细根分布在较深土层。前人研究发现,在农林复合系统的竞争中,各组分的根系分布往往会产生空间分离^[38-39]。例如,在核桃(*Juglans regia*)-小麦复合系统中,核桃和小麦的细根分布中心分别出现了下移和上移的现象^[40]。这与本研究结果正好相反,主要原因可能是树种和土壤性质的不同。此外,在播种小麦时的土地翻耕可能会对毛白杨的根系造成一定的干扰和损伤,从而降低了其对于 20~80 cm 范围内土壤资源的竞争力。但需要注意的是,本研究仅探讨了 0~80 cm 土层中的细根分布。毛白杨作为深根系树种,其扎根深度通常会达到 1.5 m 以下^[21-22,26],因此,想要了解更深土层中毛白杨与小麦的细根分布情况,还需要进一步的研究。

席本野等^[21]对毛白杨人工林根系分布特征的系统研究表明,5年生毛白杨人工林根系在水平方向上大体呈均匀分布,在宽窄行内无显著差异。而本研究中毛白杨细根主要聚集在靠近树体的位置,在宽行中分布极少(图 4)。造成该现象的主要原因可能有以下两点:第一,本研究中毛白杨林龄较小,其细根还未在宽行种大量扩张;第二,小麦占据了宽行中的土壤资源,阻碍了毛白杨细根在该区域内的增殖,进而改变了其水平分布格局,王长伟等^[18]也发现间作花生和菠菜会促使毛白杨细根水平分布向树体方向转移。此外,两个物种细根的二维分布特征存在明显差异(图 5),毛白杨和小麦均有各自的细根密集分布区域。以上结果表明,在农林复合系统中,为避免激烈竞争和实现对林地土壤资源的最大化利用,植物会调整自身的细根分布模式,以减少物种间细根密集分布区域的重叠。值得注意的是,在接近宽行中心的浅土层中,毛白杨和小麦的细根均有较多聚集,这可能是因为该区域接近树冠边缘,所以树冠对降雨截留较少^[21,41],土壤水分受到了更多的降雨补给。此外,该区域光照条件相对更好,所以土温更高^[42-43],

进而促进了细根生产。

细根形态指标可以直接或间接地表征根系系统的吸水效率和生态策略,一般认为拥有更小直径、更大比根长的细根具有更高的吸水效率^[44-46]。本研究发现,相比于毛白杨,小麦细根的直径更小、比根长更大。这与人研究结果类似,例如,王来等^[40]在核桃-小麦复合系统中研究发现小麦的细根直径显著小于核桃。速生植物的细根一般拥有更高的吸水效率^[47],小麦作为一年生植物,为满足其快速的生长过程,可能会采取调整其细根形态以获得更快吸收效率的策略。此外,由于毛白杨细根直径更大,所以周转过程中留下的土壤孔隙可能会成为小麦细根的生长通道,帮助小麦根系系统更便捷地扩张和勘探土壤资源。本研究中,小麦细根比根长的变异性显著弱于毛白杨。Ma 等^[48]研究发现,与木本植物相比,草本植物的根系在进化上更年轻,缺乏次生长,因此其细根形态可能较为单一,所以其变异性可能较弱。此外,本研究还发现毛白杨细根比根长的变异性显著强于其直径变异性。因此,相对于细根直径,比根长可能是对于环境变化更为敏感的根系功能性状,在此后的研究中,可将其视为主要的环境因子响应指标。

综上所述,在宽窄行栽植模式下的三倍体毛白杨-小麦复合系统中,毛白杨细根主要分布在窄行的浅土层中,而小麦细根则主要聚集在宽行。同时,两个物种的细根垂直分布发生了分离,在 0~80 cm 土层内,小麦细根垂直分布显著深于毛白杨。此外,相比于毛白杨,小麦细根的直径更小,比根长更大,拥有更高的吸水效率。本研究的结果揭示了 4 年生毛白杨-小麦复合系统中细根的分布和形态特征,但随着林龄增长,林木根系系统的生长及分布模式可能会产生变化。因此,想要了解农林复合系统的发育是否会对细根分布及形态造成影响,还需要进一步研究。以上发现可为优化该栽植模式下农林复合系统的集约栽培措施提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Izac A M N, Sanchez P A. Towards a natural resource management paradigm for international agriculture: the example of agroforestry research[J]. *Agricultural Systems*, 2001, 69(1): 5-25.
- [2] Pandey D N. Carbon sequestration in agroforestry systems[J]. *Climate Policy*, 2002, 2(4): 367-377.
- [3] 邹鑫,朱习爱,陈春峰,等. 农林复合系统的水土保持效益[J]. *云南大学学报*, 2020, 42(2): 382-392.
Zou X, Zhu X A, Chen C F, et al. Soil and water conservation benefits of agroforestry systems[J]. *Journal of Yunnan University*, 2020, 42(2): 382-392.

- [4] 云雷, 毕华兴, 马雯静, 等. 晋西黄土区林草复合界面雨后土壤水分空间变异规律研究[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(7): 938–944.
- Yun L, Bi H X, Ma W J, et al. Spatial distribution characteristics of root system of walnut trees in the walnut peanut intercropping system in the loess region of western Shanxi[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(7): 938–944.
- [5] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents[J]. *Ecology*, 1997, 94(14): 7362–7366.
- [6] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots[J]. *Ecology*, 2000, 81(1): 275–280.
- [7] Guo D L, Xia M X, Wei X, et al. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species[J]. *New Phytologist*, 2008, 180(3): 673–683.
- [8] McCormack M L, Dickie L A, Eissenstat D M, et al. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes[J]. *New Phytologist*, 2015, 207(3): 505–518.
- [9] 云雷, 毕华兴, 任怡, 等. 黄土区果农复合系统种间水分关系研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(6): 110–114.
- Yun L, Bi H X, Ren Y, et al. Research on soil moisture relations among types of agroforestry system in the loess region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(6): 110–114.
- [10] Fitter A H. Characteristics and functions of root systems[M]//Eshel A, Beekman T. *Plant roots*. Boca Raton: CRC Press, 2002: 49–78.
- [11] Liu L P, Gan Y T, Bueckerta R, et al. Rooting systems of oilseed and pulse crops (II): vertical distribution patterns across the soil profile[J]. *Field Crops Research*, 2011, 122(3): 248–255.
- [12] 马理辉, 吴普特, 汪有科. 黄土丘陵半干旱区密植枣林随树龄变化的根系空间分布特征[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(4): 292–301.
- Ma L H, Wu P T, Wang Y K. Spatial pattern of root systems of dense jujube plantation with jujube age in the semiarid loess hilly region of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(4): 292–301.
- [13] Huxley P A, Pinney A, Akunda E, et al. A tree/crop interface orientation experiment with a *Grevillea robusta* hedgerow and maize[J]. *Agroforestry Systems*, 1994, 26(1): 23–45.
- [14] Schroth G, Lehmann J. Contrasting effects of roots and mulch from three agroforestry tree species on yields of alley cropped maize[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1995, 54(1–2): 89–101.
- [15] Burgess P J, Stephens W, Anderson G, et al. Water use by a poplar-wheat agroforestry system[J]. *Aspects of Applied Biology*, 1996, 44: 129–136.
- [16] Swamy S L, Mishra A, Puri S. Comparison of growth, biomass and nutrient distribution in five promising clones of *Populus deltoides* under an agrisilviculture system[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(1): 57–68.
- [17] 马秀玲, 陆光明, 徐祝龄, 等. 农林复合系统中林带和作物的根系分布特征[J]. *中国农业大学学报*, 1997, 2(1): 109–116.
- Ma X L, Lu G M, Xu Z L, et al. Distribution characteristic of the root system of forest belt and crop within the composite system of agriculture and forestry[J]. *Journal of China Agriculture University*, 1997, 2(1): 109–116.
- [18] 王长伟, 刘勇, 李国雷, 等. 不同林农复合模式对造林 1 年后毛白杨幼林根系的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(1): 32–41.
- Wang C W, Liu Y, Li G L, et al. Effects of different agro-forestry models on seedling root system of *Populus tomentosa* after one year of afforestation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(1): 32–41.
- [19] Mulia R, Dupraz C. Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern france: what consequences for modelling of tree root dynamics?[J]. *Plant & Soil*, 2006, 281(1–2): 71–85.
- [20] Upson M A, Burgess P J. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system[J]. *Plant & Soil*, 2013, 373(1): 43–58.
- [21] 邸楠, 席本野, 王烨, 等. 宽窄行栽植下三倍体毛白杨根系生物量分布及其对土壤养分因子的响应[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(10): 961–971.
- Di N, Xi B Y, Wang Y, et al. Root biomass distribution of triploid *Populus tomentosa* under wide- and narrow-row spacing planting schemes and its responses to soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(10): 961–971.
- [22] Xi B Y, Wang Y, Jia L M, et al. Characteristics of fine root system and water uptake in a triploid *Populus tomentosa* plantation in the North China Plain: implications for irrigation water management[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 83–92.
- [23] Silva J S, Rego F C. Root distribution of a Mediterranean shrub land in Portugal[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255(2): 529–540.
- [24] Coleman M. Spatial and temporal patterns of root distribution in developing stands of four woody crop species grown with drip irrigation and fertilization[J]. *Plant and Soil*, 2007, 299(1–2): 195–213.
- [25] Ma L H, Liu X L, Wang Y K, et al. Effects of drip irrigation on deep root distribution, rooting depth, and soil water profile of jujube in a semiarid region[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1): 995–1006.
- [26] 邹松言, 李豆豆, 汪金松, 等. 毛白杨幼林根系对梯度土壤水分的响应[J]. *林业科学*, 2019, 55(10): 125–138.
- Zou S Y, Li D D, Wang J S, et al. Response of fine root to soil moisture of different gradients in young *Populus tomentosa* plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(10): 125–138.
- [27] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(12): 37–49.
- Xi B Y. Morphology, distribution, dynamic characteristics of poplar roots and its water uptake habits[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(12): 37–49.

- [28] 白永飞. 降水量季节分配对克氏针茅草原群落初级生产力的影响[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(2): 155–160.
- Bai Y F. Influence of seasonal distribution of precipitation on primary productivity of *Stipa krylovii* community[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1999, 23(2): 155–160.
- [29] Adriano E, Laclau J P, Rodrigues J D. Deep rooting of rainfed and irrigated orange trees in Brazil[J]. *Trees*, 2017, 31(1): 285–297.
- [30] Bakker M R, Augusto L, Achat D L. Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites[J]. *Plant & Soil*, 2006, 286(1–2): 37–51.
- [31] 李盼盼. 杨树人工林细根的空间分布特征及其季节动态[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- Li P P. Fine root distribution patterns and seasonal dynamics of poplar plantation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012.
- [32] Steele S J, Gower S T, Vogel J G, et al. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada[J]. *Tree Physiology*, 1997, 17(8–9): 577–587.
- [33] Barber K R, Leeds-Harrison P B, Lawson C S, et al. Soil aeration status in a lowland wet grassland[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(2): 329–341.
- [34] Schenk H J. The shallowest possible water extraction profile: a null model for global root distributions[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(3): 1119–1124.
- [35] 席本野, 邸楠, 刘金强, 等. 树木吸收利用深层土壤水的特征与机制: 对人工林培育的启示[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(9): 885–905.
- Xi B Y, Di N, Liu J Q, et al. Characteristics and underlying mechanisms of plant deep soil water uptake and utilization: Implication for the cultivation of plantation trees[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(9): 885–905.
- [36] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes[J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389–411.
- [37] Douglas G B, McIvor I R, Potter J F, et al. Root distribution of poplar at varying densities on pastoral hill country[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1–2): 147–161.
- [38] 马长明, 翟明普, 刘春鹏. 单作与间作条件下核桃根系分布特征研究[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(6): 181–186.
- Ma C M, Zhai M P, Liu C P. Root distribution characteristics of *Juglans regia* in monoculture and intercropping[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(6): 181–186.
- [39] Lubo G, Huasen X, Huaxing B, et al. Intercropping competition between apple trees and crops in agroforestry systems on the Loess Plateau of China[J/OL]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e70739[2020–11–12]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0070739>.
- [40] 王来, 高鹏翔, 仲崇高, 等. 核桃-小麦复合系统中细根生长动态及竞争策略[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7762–7771.
- Wang L, Gao P X, Zhong C G, et al. Growth dynamics and competitive strategies of fine roots in a walnut-wheat agroforestry system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7762–7771.
- [41] Hendrick R L, Pregitzer K S. The relationship between fine root demography and the soil environment in northern hardwood forests[J]. *Ecoscience*, 1997, 4(1): 99–105.
- [42] 耿玉清, 单宏臣, 谭笑, 等. 人工针叶林林冠空隙土壤的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(4): 16–19.
- Geng Y Q, Shan H C, Tan X, et al. Soils in forest gaps in artificial coniferous forests[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(4): 16–19.
- [43] 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.
- Yang X Y, Han Y Z, Zhang Y X. Effects of horizontal distance on fine root biomass and seasonal dynamic in *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1277–1284.
- [44] Fransen B, Berendse K F. Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different nutrient availability[J]. *Oecologia*, 1998, 115(3): 351–358.
- [45] Dhiman I, Bilheux H, de Carlo K, et al. Quantifying root water extraction after drought recovery using sub-mm in situ empirical data[J]. *Plant and Soil*, 2017, 424(1–2): 73–89.
- [46] Grégoire T, Fresche C. Sampling roots to capture plant and soil functions[J]. *Functional Ecology*, 2017, 31(8): 1506–1518.
- [47] Reich P B. The world-wide ‘fast-slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(2): 275–301.
- [48] Ma Z Q, Guo D L, Xu X L, et al. Evolutionary history resolves global organization of root functional roots[J]. *Nature*, 2018, 555: 94–97.

(责任编辑 范娟
责任编辑 赵秀海)