

## 宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨吸水根系 的空间分布与模拟

席本野, 贾黎明, 刘寅, 王烨

(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)

**摘要:** 研究三倍体毛白杨 *Populus tomentosa* 吸水根系空间分布特征是建立三倍体毛白杨根系吸水模型的基础。采用根钻法对宽窄行栽植模式下毛白杨吸水根系的空间分布特征进行了研究。结果表明: 垂直方向上, 宽、窄行内的吸水根系均在 0~60 cm 递减, 但在 60~80 cm 又有小幅度增加; 且根系主要分布区域都在 0~20 cm 土层内, 根长密度分别达到  $0.080 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.074 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 约占各自系统总根量的 44.14% 和 48.71%; 相同水平方向 0~100 cm 范围内宽行各土层的根长密度较窄行相应土层均有大幅度增加, 增加量分别为 35.45%, 36.76%, 71.67% 和 72.27%。水平方向上, 宽行 20~200 cm 内毛白杨根长密度呈指数递减分布; 吸水根系主要集中分布在 20~80 cm 内, 该区域总根长密度为  $0.250 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 约占系统总根量的 49.20%; 窄行内吸水根系的水平分布不规律, 各土层不同带距间根长密度差异不显著。对窄行拟合了一维根长密度分布函数, 决定系数为 0.288; 对宽行拟合了二维根长密度分布函数, 复相关系数达到 0.538。研究结果将为进一步探索毛白杨速生丰产林根区的土壤水分动态以及土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统中的水分传输机制提供基础资料和理论支持。图 5 表 2 参 12

**关键词:** 森林培育学; 细根; 空间分布; 三倍体毛白杨; 宽窄行

中图分类号: S792.11 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)02-0259-07

## Spatial distribution and simulation for fine roots of triploid *Populus tomentosa* with wide and narrow row spacing

XI Ben-ye, JIA Li-ming, LIU Yin, WANG Ye

(The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To form a basis for constructing a root-water-uptake model of triploid *Populus tomentosa*, spatial distribution characteristics of fine roots were studied through wide (6 m) and narrow (2 m) row spacing planting schemes, and soil coring method using correlation, regression and variance analyses. Results showed that vertically, in both wide and narrow spaced rows, the fine roots were mainly concentrated within the 0~20 cm soil layer where their amount were  $0.080 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  and  $0.074 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  accounting for 44.1% and 48.7% of the total, respectively. For a radial distance of 100 cm from the stem, the fine root length density of 0~20, 20~40, 40~60 and 60~80 cm soil layer in a wide row increased by 35.45%, 36.76%, 71.67% and 72.27% as compared with that of the corresponding soil layer in a narrow row. Horizontally, in the wide row fine root length density from 20~200 cm showed an exponentially declining distribution. The fine roots were mainly concentrated within the 20~80 cm soil zone, and within the 0~200 cm range these roots were  $0.250 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  occupying 49.20% of the area. The fine roots in the narrow-spaced row were distributed irregularly with no significant differences among the fine root length densities for differ-

---

收稿日期: 2009-04-23; 修回日期: 2009-06-02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD32B02-02)

作者简介: 席本野, 从事林地地下滴灌土壤水分运动研究。E-mail: xibenye521@yahoo.com.cn。通信作者: 贾黎明, 教授, 博士, 从事森林培育和城市林业等研究。E-mail: jlm@bjfu.edu.cn

ent radial distances. In addition, a one-dimensional ( $R^2 = 0.228$ ) root length density function was fitted to narrow spaced rows, while the two-dimensional ( $R = 0.538$ ) was fitted to the wide row. [Ch, 5 fig. 2 tab. 12 ref.]

**Key words:** silviculture; fine roots; spatial distribution; triploid *Populus tomentosa*; wide and narrow row spacing

根系是树木吸收水分和养分的重要器官，在有树木根系生长的土层中，根系吸水能对土壤水分动态产生重大影响。定量研究树木吸水根系的生长发育和时空分布是建立根系吸水模型、计算根系吸水强度必不可少的环节，并且对于进一步研究林地土壤-植物-大气连续体(SPAC)的水分转移和能量传输机制、改进林地水分管理措施以及发展节水林业具有重要的意义。目前，国内外学者就大田作物在这方面已经做了大量研究，对于树木根系的研究则起步相对较晚，但发展迅速，如 Green 等<sup>[1-2]</sup>研究了苹果 *Malus pumila* 树根系的空间分布和根系吸水动态；Vrugt 等<sup>[3-4]</sup>对杏树 *Armeniaca vulgaris* 吸水根系进行了全面研究，并且建立了杏树二维和三维根系吸水模型，张劲松等<sup>[5]</sup>研究了石榴 *Punica granatum* 吸水根系的空间分布特征；李建林等<sup>[6]</sup>对极端干旱区胡杨 *Populus euphratica* 吸水根系的分布和模拟做了研究。然而，这些研究都是针对树木均匀配置或单株孤立木的情况，对于宽窄行这种特殊栽植模式下树木根系空间分布特征的详细研究还鲜有报道。三倍体毛白杨 *Populus tomentosa* 作为中国北方主要速生用材树种，在山东、江苏等地栽植时大多采用宽窄行栽植模式，研究这种特殊栽植模式下毛白杨吸水根系的空间分布特征，不仅有助于深入探讨毛白杨根系吸水机制，了解毛白杨体内的水分状况，而且对于制定三倍体毛白杨速生丰产林的合理灌溉制度，实现水分最优调控具有重要意义。单位土体中的根系长度即根长密度常被看作是树木间竞争的指标，假如土体中具有相同量的生长资源，则根长密度越大生长资源被吸收的就越多。因此，可以认为根长密度是影响树木根系吸水的主要因素。本研究对宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨吸水根根长密度的空间分布特征进行了研究，并在此基础上拟合了吸水根根长密度分布函数，以期为进一步开展毛白杨根系吸水过程的研究和毛白杨速生丰产林内土壤水分动态的模拟提供一定的科学依据和理论支持。

## 1 试验区概况

试验区位于山东省高唐县， $36^{\circ}58'N$ ,  $116^{\circ}14'E$ ，平均海拔为 27 m。高唐县属暖温带半干旱季风区域大陆性气候，大陆度为 65.7%，具有显著的季节变化和季风气候特性，光照充足，热量丰富，降水量较少，春旱多风，夏热多雨，秋爽易旱，冬寒少雪。年平均降水量为 550 ~ 950 mm，降水期一般集中在 7 ~ 8 月，年平均蒸发量 1 880 mm，年平均气温为 12.0 ~ 14.1 °C，极端最高气温达 41.2 °C，极端最低气温达 -20.8 °C。年日照总时数为 2 651.9 h，无霜期 204 d。土壤有潮土、风沙土和盐土等 3 类，含盐量一般为 1.0 ~ 2.5 g·kg<sup>-1</sup>。地下水埋深为 3.0 m。试验地土壤物理特性见表 1。

## 2 研究方法

### 2.1 研究对象

研究对象为栽植于平原条件下的三倍体毛白杨速生纸浆林。林木采取宽窄行配置，南北向为行方向，宽行距为 6 m，窄行距 2 m，株距 1 m，栽植于 2005 年春季。林分平均胸径为  $(7.1 \pm 0.9)$  cm，平

表 1 试验地土壤物理特性

Table 1 Physical properties of experiment soil

土层/cm	砂砾比例/%	粉粒比例/%	黏粒比例/%	质地	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和含水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	田间持水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )
0~30	69.65	25.90	4.45	砂壤土	1.55	0.39	0.28
30~60	50.30	40.20	9.50	壤土	1.49	0.41	0.30
60~100	58.65	37.35	4.00	砂壤土	1.44	0.44	0.33

均树高( $8.2 \pm 0.7$ ) m, 试验地总面积为  $0.8 \text{ hm}^2$ 。

## 2.2 根系取样方法

试验于 2008 年 11 月上旬进行。在试验地中心选取 2 株树干圆满、树冠四周均匀无缺的平均标准木作为样株, 以树干为中心, 在宽行和窄行内分别布设取样网格(图 1), 采用根钻法分层取样(根钻内径为  $4.378 \text{ cm}$ , 长  $20.000 \text{ cm}$ , 容积  $300.92 \text{ cm}^3$ ): 水平方向上, 隔  $20 \text{ cm}$  取样, 窄行内取样至行距中央即距离行带(以下简称“带距”)  $1 \text{ m}$  处, 宽行内根据树冠延伸情况取样至带距  $2 \text{ m}$  处; 垂直方向上, 以  $20 \text{ cm}$  为一层取样, 取样深度至地表以下  $80 \text{ cm}$  处, 共计 816 个根样。然后用清水冲洗去除土壤和杂质后, 将根装入含少量水的透明塑料袋中保存, 并依次编号标记, 带回实验室; 然后用 Epson Twain Pro 根系扫描仪进行根系扫描分析, 获取直径  $\leq 2 \text{ mm}$  的吸水根根长数据。本研究采用传统的细根分类标准<sup>[7]</sup>, 认为直径  $\leq 2 \text{ mm}$  的细根为三倍体毛白杨的吸水根系。将获得的各测点吸水根长度除以取样土体体积即可得到各测点的吸水根根长密度。

由于试验林中毛白杨采用  $1 \text{ m} \times 2 \text{ m} + 6 \text{ m}$  的宽窄行栽植模式, 林木株距远小于行距, 可以假设在毛白杨行种植方向上根系呈均匀分布, 因此, 本研究采用在样树周围以网格形式(图 1)挖取根样相当于在宽、窄行内各做了 12 个平行重复。

## 2.3 土壤水分测点布置及测定方法

试验地土壤体积含水率采用时域反射法(TDR)体积含水率测定系统(TRIME-FM, IMKO Micromodultechnik GmbH, Germany) 进行测定。在试验地内选取 8 个距离树木行带  $60 \text{ cm}$  且具有代表性的地点, 分别在其垂向  $10, 30, 50, 70 \text{ cm}$  处埋设水分探头; 另外, 再选取 3 个代表性的地点, 只在其垂向  $30 \text{ cm}$  处埋设水分探头。数据采集间隔设为  $30 \text{ min}$ 。

## 2.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件对试验数据进行分析处理。

## 3 结果与分析

### 3.1 一维根长密度分布特征

3.1.1 垂直方向一维根长密度分布特征 将实验测得的 2 株毛白杨的细根根长密度数据在水平方向上进行平均, 得到宽、窄行内毛白杨根长密度一维垂直分布(图 2)。由图 2 可知, 在垂直方向  $0 \sim 60 \text{ cm}$  土层, 宽、窄行内毛白杨吸水根根长密度均呈递减趋势, 其中以  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土层根系最多, 根长密度分别达到  $0.080 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.074 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 约占宽、窄行系统总根长密度的 44.14% 和 48.71%。毛白

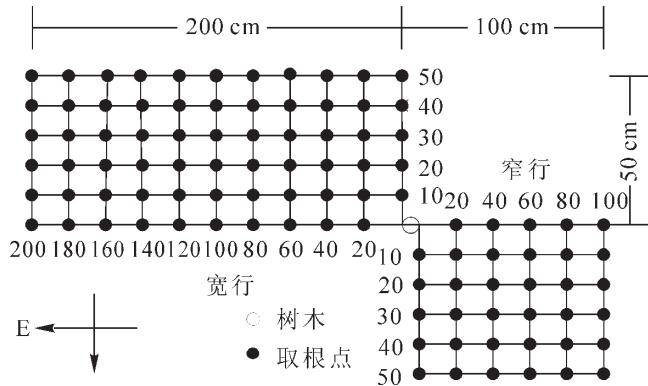


图 1 田间取根示意图

Figure 1 Schematic diagram of soil sample position

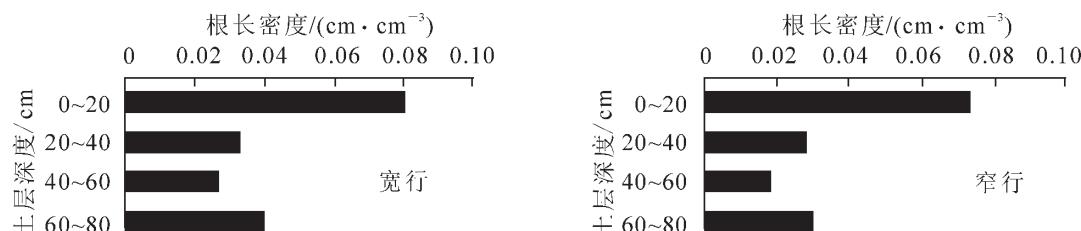


图 2 三倍体毛白杨根长密度垂直分布

Figure 2 Vertical distribution of triploid *Populus tomentosa* fine roots length density

杨是强耗水树种，根系为维持其日常巨大的蒸腾耗水量必须不断从土壤中吸取水分。由图3可以看出2008年整个秋季，60~80 cm土层的水分含量几乎没有变化；20~60 cm内土壤含水率的下降趋势比较平缓；只有林地0~20 cm土层的含水率受降水的影响较大，且总体呈显著下降趋势，除去株间蒸发对该层土壤水分消耗的影响外，这种变化趋势也间接反映了0~20 cm土层内毛白杨根系吸水活动强烈即该层为吸水根系的主要分布区域。

此外，由表1可知，林地0~30 cm土层中砂砾的含量较30~60 cm土层要多，即0~30 cm土层中的大孔隙相对多一些，这意味着根系生长时在上层土壤中受到的机械阻力会更小，而且上层土壤也兼有壤土较强的保水保肥特性，因此，从生态学的角度来看，0~30 cm也较30~60 cm土层更适于林木根系的生长。毛白杨是浅根系树种，但从图2可以发现，宽、窄行60~80 cm土层的根系与40~60 cm土层相比均有显著增加，增加幅度分别达到了47.61%和61.23%，另外，从图3中可以看出林地60~80 cm土层的水分条件明显优于40~60 cm土层，这也进一步说明了毛白杨根系的分布特征不仅受遗传特性的制约，而且也受环境条件的影响，根系随着环境的改变而不断调节自身的生长趋势，即趋于向含水量高且水分更利于吸收利用的土层中生长。将宽、窄行相同水平范围内各土层的根长密度横向对比发现，宽行0~100 cm范围内0~20, 20~40, 40~60和60~80 cm各层的根长密度分别达到0.097, 0.040, 0.034和0.053 cm·cm<sup>-3</sup>，较窄行0~100 cm范围内各相应土层的根长密度分别增加35.45%, 36.76%, 71.67%和72.27%。由此可以推断窄行内各树木根系之间对生长资源的竞争远较宽行内激烈，因此，根系趋于在宽行内生长以获取更多的水分和养分。

**3.1.2 水平方向一维根长密度分布特征** 将试验测得的2株毛白杨的根长密度在垂直方向上进行平均，得到宽、窄行内毛白杨根长密度水平方向一维分布(图4)。由图4可知，宽行水平方向0~20 cm范围内毛白杨根长密度呈递增趋势，而20~200 cm范围内根长密度又逐渐递减，对20~200 cm内根长密度与水平方向距离的关系进行曲线拟合发现，指数递减函数与该范围内细根的一维水平方向分布特征(拟合曲线的决定系数为0.931)的吻合关系较好，因此，可以认为，宽行水平方向上毛白杨吸水根系总体上呈指数递减分布。如果以不同带距处土体中根长密度占系统总根长密度的10%以上作为吸水根系的集中分布区，则宽行中毛白杨吸水根系主要集中分布在20~80 cm，约占0~200 cm总根长密度的49.20%，其中20, 40, 60和80 cm各带距处的根长密度为0.069, 0.059, 0.069和0.056 cm·cm<sup>-3</sup>，分别占宽行系统总根量的13.62%, 11.55%, 13.00%和11.03%。窄行水平方向0~100 cm范围内，没有出现明显的根系集中分布区域，只是带距40和80 cm处的根长密度略高，分别

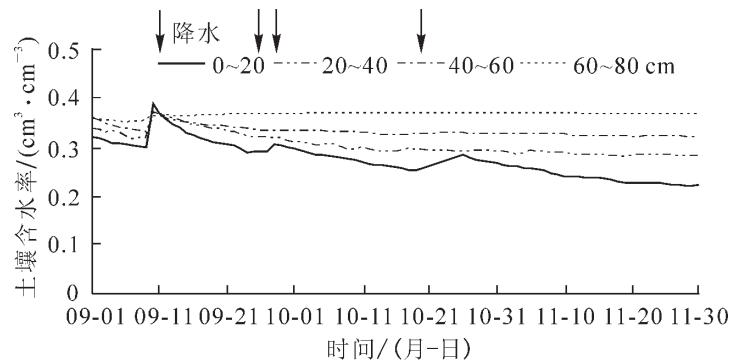


图3 2008年9~11月各层土壤含水率动态

Figure 3 Soil water content dynamics in every soil layer between September and November in 2008

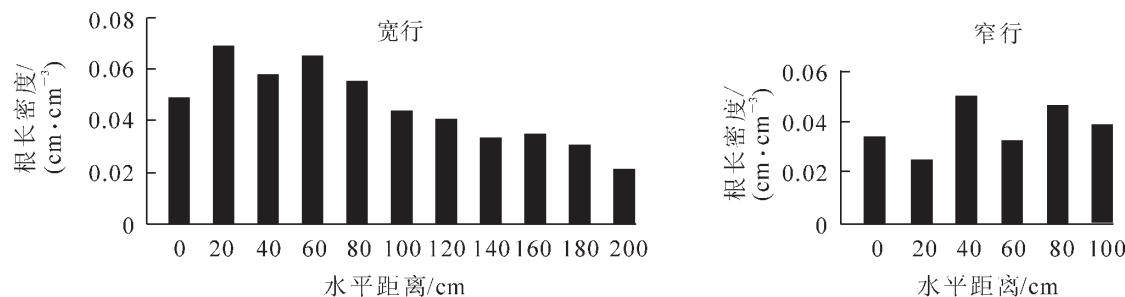


图4 三倍体毛白杨根长密度水平向分布

Figure 4 Horizontal distribution of triploid *Populus tomentosa* fine roots length density

为  $0.050$  和  $0.046 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 各占系统总根量的  $22.09\%$  和  $20.33\%$ , 而其他用各带距处根长密度所占的比列也均在  $10\%$  以上。以带距作为可控因子, 对不同土层的根长密度进行单因素方差分析(表2), 发现各土层不同带距处的根长密度均无显著差异, 也就是说, 可以近似地认为, 根系在窄行内的各个土层呈均匀分布。此外, 从图 4 中可以直观看出, 窄行内毛白杨根系的水平方向分布极不具规律性, 这与事先预料的情况相吻合, 因为窄行距只有  $1 \text{ m}$ , 而树木的根系分布又较广, 所以在窄行中根系生长不能完全伸展开, 各树根系相互交错, 从理论上来说也不可能出现规律性的分布格局。

### 3.2 二维根长密度分布特征

将试验测得的 2 株毛白杨的根长密度在不同土层深度和不同水平距离上进行平均, 得到宽、窄行内毛白杨吸水根系的二维根长密度分布(图 5)。由图 5 可见, 宽行水平方向  $0 \sim 80 \text{ cm}$ , 垂向  $0 \sim 80 \text{ cm}$  为吸水根系的分布区域, 经计算, 该区域内吸水根系总根长密度为  $1.153 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 占系统总根量的  $58.08\%$ 。对于窄行, 在垂向  $0 \sim 20 \text{ cm}$  和  $60 \sim 80 \text{ cm}$  内, 根长密度总体上是随水平距离的增加显著增多, 但  $20 \sim 40 \text{ cm}$  和  $40 \sim 60 \text{ cm}$  的根长密度确显著减少, 可见窄行内根系的分布确是毫无规律; 不过从图 5 中可以看出, 水平方向  $0 \sim 100 \text{ cm}$ , 垂向  $0 \sim 40 \text{ cm}$  范围内根系分布最为密集。计算结果表明, 该区域内吸水根系的总根长密度为  $0.607 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 约为窄行系统总根量的  $66.86\%$ 。

另外, 从图 5 中可以看出宽、窄行  $60 \sim 80 \text{ cm}$  土层内的根系均较  $40 \sim 60 \text{ cm}$  土层要多, 这可能与土壤质地有关, 因为  $60 \sim 80 \text{ cm}$  土层为砂壤土, 其较  $40 \sim 60 \text{ cm}$  土层的壤土更适于根系生长。此外, 三倍体毛白杨根系的生长趋势也可能与此相关。王文全等<sup>[8]</sup>曾研究发现毛白杨的根系为水平斜生长, 在带距较远处根系会主要集中在土壤下层从而增加下层的根量。

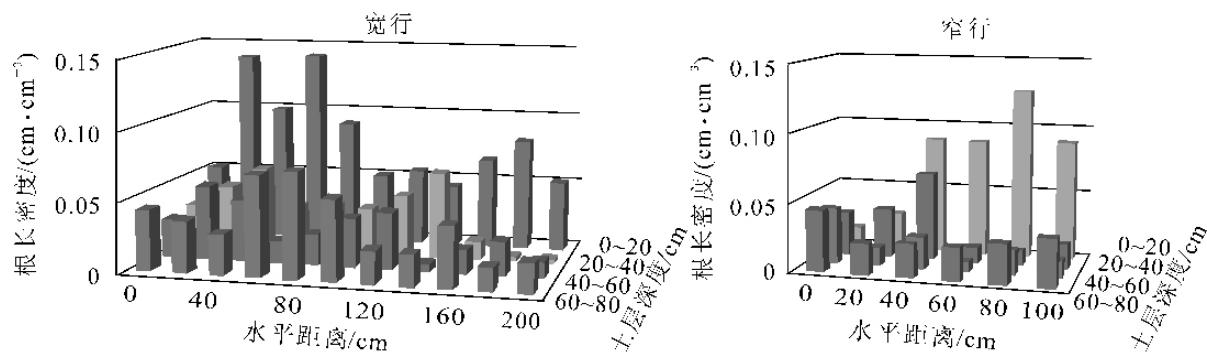


图 5 三倍体毛白杨二维根长密度分布

Figure 5 Two-dimentional distribution of triploid *Populus tomentosa* fine roots length density

### 3.3 根长密度分布函数

严格地讲, 林木的根系密度应该是呈三维分布, 即由垂向、水平方向和方位 3 个维度共同确定, 但由于林地土壤空间变异和树木个体发育等因素的影响, 使得毛白杨的三维根系密度分布随植株个体不同而各不相同, 且差别很大。因此, 由单株毛白杨得来的三维根系密度分布函数若应用于其他毛白杨, 其适用性很差。而一维和二维根系密度分布函数由于进行了一定程度的空间平均, 因此具有较好的适用性<sup>[9]</sup>, 而且应用简便, 比较适合均匀栽植、行栽植的作物和树木<sup>[3]</sup>。

**3.3.1 窄行根长密度分布函数** 由以上分析可知, 窄行内的吸水根系在同一土层内分布均匀, 而在垂直方向上有变化, 因此, 窄行内适合拟合一维根长密度函数。对  $0 \sim 80 \text{ cm}$  垂直方向上根长密度与土

表 2 窄行各土层根长密度方差分析

Table 2 Variance analysis of roots length density of different soil layers

土层/cm	F 值	显著度
0 ~ 80	1.137	0.350
0 ~ 20	1.441	0.223
20 ~ 40	2.331	0.053
40 ~ 60	1.739	0.139
60 ~ 80	0.514	0.765

壤深度进行回归分析, 回归方程为  $\rho_{\text{根长}}(z) = 0.093e^{-0.023z}$ 。决定系数  $R^2 = 0.288$ ,  $F = 12.967 > F_{0.05} = 4.15$ ,  $F$  检验水平显著。其中:  $\rho_{\text{根长}}$  为根长密度( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $z$  为土壤深度(cm)。由此可见, 窄行的根长密度分布总体上可用一维指数递减函数来描述。

**3.3.2 宽行根长密度分布函数** 由图 2 和图 4 可知, 宽行内三倍体毛白杨的吸水根系在水平方向和垂直方向上都有显著变化, 因此, 宽行内适合拟合二维根长密度分布函数。对宽行水平方向 0~200 cm, 垂直方向 0~80 cm 范围内的根长密度与水平距离、土壤深度的关系进行多元非线性回归分析, 回归方程为  $\rho_{\text{根长}}(r, z) = 0.096e^{-0.006r - 0.011z}$ 。复相关系数  $R = 0.538$ ,  $F = 8.369 > F_{0.05} = 3.225$ ,  $F$  检验水平显著。其中,  $\rho_{\text{根长}}$  为根长密度( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $z$  为土壤深度(cm),  $r$  为水平距离(cm)。由此可见, 宽行的根长密度分布总体上可用二维指数递减函数来描述。

## 4 结论与讨论

垂直方向上, 宽、窄行内毛白杨吸水根系在 0~60 cm 土层内均呈递减趋势, 其中 0~20 cm 为根系的主要分布区域, 根长密度分别为  $0.080 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.074 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 约占各自系统总根量的 44.14% 和 48.71%; 在 60~80 cm 土层内宽、窄行的吸水根系都较 40~60 cm 土层有所增加, 增加幅度分别为 47.61% 和 61.23%, 由此可验证, 毛白杨的根系为水平斜生复合根型; 宽行水平方向 0~100 cm 内各土壤深度的根长密度与窄行相应区域相比均有大幅度增加, 增加量分别为 35.45%, 36.76%, 71.67% 和 72.27%。水平方向上, 宽行内 20~80 cm 为细根主要集中分布区, 其总根长密度为  $0.250 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 约占系统总根量的 49.20%; 20~200 cm 范围内毛白杨吸水根系总体上呈指数递减分布。窄行中根系水平分布不具规律性, 不同带距处的根长密度均占系统总根量的 10% 以上, 方差分析表明, 各带距间根长密度差异不显著, 因此可以认为, 窄行内同一土层中根系呈均匀分布。二维尺度上, 毛白杨吸水根系主要分布在宽行水平方向 0~80 cm, 垂向 0~80 cm, 窄行水平方向 0~100 cm, 垂向 0~40 cm 的土体中, 总根长密度分别为  $1.153 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.607 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 约占各自系统总根量的 58.08% 和 66.86%。因此, 若要对试验林地运用地下滴灌系统灌溉时, 毛管的埋设方式应为“两行三带”式, 滴灌管应埋设在窄行中央 20 cm 深处和宽行水平方向 40 cm, 垂向 20 cm 处, 这样可以保证毛白杨根区吸水根系密集区域有充足的水分供应, 从而提高水分利用效率。

以毛白杨根系在行种植方向上呈均匀分布的假设为前提, 结合宽、窄行各自根系分布的特点, 作者对窄行拟合了一维根长密度分布函数  $\rho_{\text{根长}}(z) = 0.093e^{-0.023z}$ , 决定系数为 0.288; 对宽行拟合了二维根长密度分布函数  $\rho_{\text{根长}}(r, z) = 0.096e^{-0.006r - 0.011z}$ , 复相关系数达到 0.538。

Adiku 等<sup>[10]</sup>认为, 为便于植物在各种土壤水分条件下的生存, 根系吸水支出的能量将最小。也就是说当土壤中某个区域出现水分胁迫时, 该区域内根系吸水量的下降会被无水分胁迫区域内的根系吸水所补偿, 即根系吸水的补偿效应。从图 2 可以看出, 整个秋季毛白杨林地 0~60 cm 各土层的含水量均有不同程度的下降, 只有 60~80 cm 土层的水分状况比较稳定且含水量较高。因此, 当土壤上层出现水分胁迫的时候, 毛白杨为了维持自身的高蒸腾速率, 会选择在水分条件优越、未出现水分胁迫的土壤下层增加根系吸水以补偿上层根系吸水的减少量。这也就导致了试验地内 60~80 cm 土层中的吸水根系显著高于 40~60 cm 土层。然而, 毛白杨根系吸水的补偿效应是否真实存在, 还需要在下一步的研究中利用稳定同位素法或根系液流监测法来进行验证。

研究毛白杨根系空间分布, 建立根长密度分布函数的目的是为了建立毛白杨根系吸水模型。但由于野外自然立地条件的空间变异性较大, 植株个体之间的差异必然存在, 将基于几株毛白杨建立的根长密度函数以及根系吸水模型应用于其他毛白杨时就不可避免地会造成误差。因此, 需要对毛白杨根系分布规律做更加细致的研究, 以建立普遍适用的毛白杨根系吸水模型。此外, 由于树木的根系是处在不断的生长变化之中, 若将基于某一时期建立的根系吸水模型应用于其他时期, 则也会必然造成误差, 因此, 今后应采用微根管法对毛白杨全生育期内的根系生长动态进行监测, 以建立动态根长密度分布函数和动态根系吸水模型。

有学者曾对毛白杨细根的分布特征做过研究, 并得到了一些有价值的理论, 如: 王文全等<sup>[8]</sup>曾对

沙质潮土条件下毛白杨根系长度的垂直分布特征进行研究,发现7年生、9年生和14年生3个年龄林分的根系都集中分布于0~80 cm土层,达到78%以上;李贤伟等<sup>[11]</sup>对三倍体毛白杨-黑麦草 *Secale cereale* 复合模式细根与草根分布的研究发现,0~40 cm土层内毛白杨直径≤2 mm细根的总生物量占系统细根总生物量的75%;马秀玲等<sup>[12]</sup>研究发现10年生毛白杨直径≤1 mm细根的90%以上集中于0~100 cm土层。根据这些前人的研究成果,本研究将4年生毛白杨根系的取样深度经验地定为80 cm,但由试验结果(图2)来看,大于80 cm的土层内仍可能有一定量的吸水根系存在。因此,在下一步研究中应加大取样深度,并进一步细化取样层次,从而更加精确地描述宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨吸水根系的垂直分布特征。

研究结果基本上反映了宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨吸水根系的空间分布特征。在此基础上建立的根长密度分布函数,为毛白杨根系吸水模型的建立、毛白杨根区的土壤水分动态模拟,以及毛白杨纸浆林土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统的进一步研究提供了试验依据和理论支持,最终也将对制定科学合理的灌溉制度,提高水分利用效率,实现林木的速生、丰产和水资源可持续利用产生重大意义。

#### 参考文献:

- [1] GREEN S R, CLOTHIER B E. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree [J]. *Plant Soil*, 1999, **206**: 61~77.
- [2] GREEN S R, KIRKHAM M B, CLOTHIER B E. Root uptake and transpiration: from measurements and models to sustainable irrigation [J]. *Agric Water Manage*, 2006, **86**: 165~176.
- [3] VRUGT J A, HOPMANS J W, SIMUNEK J. Calibration of a two-dimensional root water uptake model [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2001, **65** (4): 1027~1037.
- [4] VRUGT J A, Van WIJK M T. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling [J]. *Water Resour Res*, 2001, **37** (10): 2457~2470.
- [5] 张劲松, 孟平. 石榴树吸水根系空间分布特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2004, **28** (4): 89~91.  
ZHANG Jinsong, MENG Ping. Spatial distribution characteristics of fine roots of pomegranate tree [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2004, **28** (4): 89~91.
- [6] 李建林, 冯起, 司建华. 极端干旱地区胡杨吸水根系的分布与模拟研究[J]. 干旱区地理, 2008, **31** (1): 97~101.  
LI Jianlin, FENG Qi, SI Jianhua. Distribution of uptake roots of *Populus euphratica* Oliv. in extreme arid region, China [J]. *Arid Land Geogr*, 2008, **31** (1): 97~101.
- [7] BLOCK R M A, Van REES K C J, KNIGHT J D. A review of fine roots dynamics in *Populus* plantations [J]. *Agrofor Syst*, 2006, **67**: 73~84.
- [8] 王文全, 贾渝彬, 胥丽敏, 等. 毛白杨根系分布的研究[J]. 河北农业大学学报, 1997, **20** (1): 24~29.  
WANG Wenquan, JIA Yubin, XU Limin, et al. Study on the root distribution of *Populus tomentosa* [J]. *J Agric Univ Hebei*, 1997, **20** (1): 24~29.
- [9] 姚立民, 康绍忠, 龚道枝. 苹果树根系吸水研究方法的讨论[J]. 水资源与水工程学报, 2004, **15** (1): 13~18.  
YAO Limin, KANG Shaozhong, GONG Daozhi. Discussion about research methods of apple tree root water uptake [J]. *J Water Resour & Water Eng*, 2004, **15** (1): 13~18.
- [10] ADIKU S G K, ROSE C W, BRADDOCK R D, et al. On the simulation of root water extraction: examination of a minimum energy hypothesis [J]. *Soil Sci*, 2000, **165** (3): 226~236.
- [11] 李贤伟, 张健, 陈文德, 等. 三倍体毛白杨——黑麦草复合模式细根和草根分布与生长特征[J]. 草业学报, 2005, **14** (6): 73~78.  
LI Xianwei, ZHANG Jian, CHEN Wende, et al. Study on the distribution and growth characteristics of the fine root of triploid *Populus tomentosa* and root of *Lolium multiflorum* under compound pattern in both cultivating land and forest [J]. *Acta Prat Turae Sin*, 2005, **14** (6): 73~78.
- [12] 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 Xiuling, LU Guangming, XU Zhuling, et al. Distribution characteristic of the root system of forest belt and crop within the composite system of agriculture and forestry [J]. *J China Agric Univ*, 1997, **2** (1): 109~116.