

## 樟子松深根苗根系 Logistic 生长模型的构建与应用

刘春鹏<sup>1,2</sup>, 滑磊<sup>3</sup>, 李澍贵<sup>4</sup>, 王鑫<sup>1,2</sup>, 李向军<sup>1,2</sup>, 徐振华<sup>1,2</sup>, 高云昌<sup>1,2</sup>

(1. 河北省林业和草原科学研究院, 河北省林木良种技术创新中心, 河北 石家庄 050061; 2. 河北丰宁沙地生态系统国家定位观测研究站, 河北 承德 068357; 3. 河北省英烈纪念馆管理处, 河北 石家庄 050000; 4. 张家口市宣化林场, 河北 宣化 075100)

**摘要:** 林木超深栽植造林技术能够有效提高干旱沙地的造林成效, 其中, 深根苗快速培育技术是其核心和关键技术之一。了解深根苗根系生长规律, 是进一步利用有效栽培措施, 加快深根苗根系垂直生长速度, 缩短其育苗周期的前提。本研究以 3 年生樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 为研究对象, 利用 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm 5 种长度导根筒培育深根苗, 通过对其根系长出导根筒时间的调查, 构建 Logistic 生长模型, 分析总结其根系的垂直生长规律。结果显示: (1) 樟子松深根苗根系垂直生长符合“慢-快-慢”的特点, 其中, 根系从移栽至导根筒到生长至 20 cm, 生长速度最为缓慢, 仅为  $0.17 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 根系由 20 cm 生长到 40 cm, 生长速度最快, 达到  $3.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 之后生长速度逐渐降低; (2) 以根系垂直长度为因变量, 以生长天数为自变量, 构建了樟子松深根苗根系垂直生长 Logistic 生长模型, 其决定系数  $R^2=0.958 2$ , 说明模型拟合良好; (3) 利用构建的生长模型, 将其根系垂直生长划分为 4 个阶段——渐增期 (0~25 d)、速生期 (26~46 d)、缓增期 (47~67 d) 和渐停期 (68 d 之后)。

**关键词:** 深根苗; Logistic 生长模型; 根系垂直生长; 樟子松

**中图分类号:** S758      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3776 (2022) 05-0119-05

## Construction and Application of Logistic Model for Root Growth of Long-root Seedling of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

LIU Chun-peng<sup>1,2</sup>, HUA Lei<sup>3</sup>, LI Shu-gui<sup>4</sup>, WANG Xin<sup>1,2</sup>, LI Xiang-jun<sup>1,2</sup>, XU Zhen-hua<sup>1,2</sup>, GAO Yun-chang<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Academy of Forestry and Grassland Sciences, Hebei Technical Innovation Center for Forest Improved Variety, Shijiazhuang 050061, China; 2. Hebei Fengning Desert Ecosystem Research Station, Chengde 068357, China; 3. Hebei Martyrs Memorial Garden Administration, Shijiazhuang 050000, China; 4. Zhangjiakou Xuanhua Forest Farm of Hebei, Xuanhua 075100, China)

**Abstract:** In May 2017, 3-year container *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings were transplanted in root-guiding tubes with length of 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm and 100 cm, and observation and determination was made on root growth out of tube. The results showed that the vertical root growth of tested seedlings had characteristic of slow-fast-slow. The slowest was from transplantation to 20 cm, the fastest was from 20 cm to 40 cm, and then the growth rate gradually decreased. Taking root vertical length as the dependent variable and growth days as the variable, the Logistic model for root vertical growth of *P. sylvestris* var. *mongolica* was established, with the determinant coefficient was 0.958 2, indicating that the model fit well. Based on this model, the growth of vertical root was divided into four stages: the gradual growth period of 0-25 days, the rapid growth period of 26-46 days, the slow growth period of 47-67 days and the gradual stop period of 68 days later.

**Key words:** long root-seedling; Logistic growth model; vertical root growth; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2022-07-14

基金项目: 河北省人才工程培养资助项目 (A201901076); 河北省林业和草原科技推广示范资金项目 (冀 TG (2019) 002 号)

作者简介: 刘春鹏, 高级工程师, 从事林木遗传育种及森林培育方面的研究; E-mail: lcp-1984@163.com。通信作者: 徐振华, 正高级工程师, 从事林木遗传育种及森林培育研究; E-mail: hblky303@126.com。

河北省存在严重的土地沙化问题,干旱沙地的造林绿化一直是林业工作的重点和难点<sup>[1-2]</sup>。近年来,河北省林业科学研究院从日本引进并完善了“沙地林木超深栽节水造林综合配套技术”,该技术主要是将林木深根苗(根长 80 cm 以上)或长茎苗,栽植到水分较多的沙地深层,在干旱沙地造林中取得了良好的效果。其中,如何快速培育深根苗是其核心和关键<sup>[3-4]</sup>。采用自下而上的灌水方式能够显著促进根系的生长<sup>[5]</sup>,如果能够了解深根苗根系的垂直生长节律,就能够利用根系的向水性,采用精确控制灌水深度的方法,进一步加快深根苗根系垂直生长的速度,缩短育苗周期,进而大大提高深根苗的育苗成效。

樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, 常绿乔木,喜光照,树干通直,材质优良,生长快速,且具有较强的抗旱、抗寒和抗风沙特性;其根系发达,分布广且深,属于深根性树种,具有显著的防风固沙作用,是我国干旱、半干旱风沙区营造水土保持林、农田草场防护林、防风固沙林和用材林的主要树种<sup>[6]</sup>。目前,有关植物根系垂直生长规律的研究不少,如丁晓雪等<sup>[7]</sup>对胡杨 *Populus euphratic* 以及田起隆等<sup>[8]</sup>对梭梭 *Haloxylon ammodendron* 根系的垂直生长进行了研究。而以樟子松为研究对象的较少,张锦春等<sup>[9]</sup>对其根系分布特征进行了研究,董春胜等<sup>[10]</sup>构建了其根系维数测定模型,但并非针对其根系垂直生长规律进行的,有关其根系垂直长度生长模型的研究还未见报道。

本研究以樟子松为研究对象,观测其根系垂直生长状况,构建根系 Logistic 生长模型,明确樟子松深根苗根系的垂直生长规律,以期利用该模型设计有针对性的苗期管理措施,进一步加快深根苗根系的垂直生长速度,缩短育苗周期,为提高樟子松育苗成效提供理论依据和技术支持,进而为林木超深栽造林技术的应用推广奠定坚实的基础。

## 1 试验区概况

试验地位于河北省张家口市宣化林场,地理坐标为 115°2'34"~115°12'30" E, 40°25'12"~40°32'6" N。该地气候为温带大陆性季风气候,属于干旱与半干旱过渡区,四季分明、雨热同期。年均气温为 7.6℃,年日照时数为 2 808.8 h,年均光合有效辐射为 1 600 MJ·m<sup>-2</sup>;年降水量为 250~400 mm,且降水多集中在 7—8 月,年均蒸发量为 2 000 mm;年均风速为 2~4 m·s<sup>-1</sup>,且年大风天数平均为 37~50 d。土壤类型多为风积沙土,局部有黑垆土和淡栗钙土,其中试验区域土壤类型为风沙土。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

以樟子松为研究对象,选择规格基本一致的 3 年生樟子松实生容器苗,地径为 0.60±0.15 cm,苗高为 16.0±3.0 cm,营养杯为塑料材质,规格为 10 cm×15 cm(直径×高),苗木生长健壮、无病虫害,根系布满营养杯。樟子松容器苗由宣化林场苗圃培育,所有种子购于承德市围场县。

### 2.2 试验方法

试验于 2017 年 5 月 30 日—8 月 13 日进行。将上述苗木脱掉营养杯,由于其部分根系已长出土团,为了避免窝根,进而影响其垂直向下生长,将裸露在土团外部的根系剪掉,然后再分别移栽至长为 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm 且装有相同育苗基质(园土:草炭:珍珠岩:蛭石=7:1:1:1)的导根筒(直径 10 cm 的 PVC 管)中,每处理设置 3 次重复,每 5 根导根筒为一个重复。通过在育苗坑底部设置不同的土壤阶梯,保证各处理导根筒放入育苗坑后其上端处于同一水平面,采用由下而上的方式连续灌水 2 遍,此后依据导根筒内土壤墒情,对各处理苗木进行同步浇水,每次灌水均要浇灌至导根筒上端的位置。移栽后,每天对各处理深根苗底部是否长出根系进行观察,记录根系长出筒底的时间<sup>[4]</sup>。

### 2.3 数据处理

利用 Excel 软件计算各处理苗木根系长出导根筒底部的天数、生长速度等。利用 DPS 数据处理软件,以根

系垂直长度为因变量, 以生长天数为自变量, 对樟子松深根苗根系垂直生长过程进行 Logistic 曲线方程拟合, 拟合方法采用麦夸特法, 进而建立 Logistic 曲线生长模型; 利用建立的生长模型, 求其一阶导数和二阶导数, 分别令其为 0, 进而得到其根系垂直生长的关键时间点, 并以此划分深根苗根系垂直生长的阶段。

3 结果与分析

3.1 樟子松深根苗根系垂直生长规律

如表 1 和图 1 所示, 樟子松导根筒苗根系垂直根长达到 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm 所需时间分别为  $28.3 \pm 1.5$  d、 $34.3 \pm 2.5$  d、 $44.7 \pm 2.5$  d、 $59.0 \pm 4.0$  d、 $75.0 \pm 3.0$  d。其中, 根系由移栽至导根筒到生长至 20 cm, 生长最为缓慢, 生长速度仅为  $0.17 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 根系由 20 cm 长到 40 cm, 生长速度最快, 达到  $3.4 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 之后根系生长速度逐渐降低, 根系由 40~60 cm、60~80 cm 以及 80~100 cm 过程中的生长速度分别为  $1.94 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $1.41 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $1.25 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。由此可见, 樟子松导根筒苗根系生长符合“慢-快-慢”的特点, 即早期根系生长缓慢、中期生长快速, 后期生长速度逐步降低, 符合 Logistic 曲线方程的变化规律, 因此, 用 Logistic 曲线方程进行拟合是可行的。

3.2 樟子松深根苗根系垂直生长模型的建立

利用 Logistic 曲线方程对深根苗根系生长进行拟合, 其中 Logistic 曲线方程如下:

$$y = \frac{b}{1 + a_1 \cdot e^{-a_2 \cdot x}}$$

式中,  $y$  为深根苗根系垂直根长, 单位为 cm;  $x$  为移栽至导根筒后的天数, 单位为 d;  $e$  为自然常数;  $a_1$ 、 $a_2$  和  $b$  为待求系数。经过 Logistic 曲线方程拟合, 计算求得  $a_1=17.119\ 2$ ;  $a_2=0.0621\ 52$ ;  $b=115.919\ 4$ 。因此, 拟合所得 Logistic 曲线方程为:

$$y = \frac{115.919\ 4}{1 + 17.119\ 2 \cdot e^{-0.062\ 152 \cdot x}}$$

决定系数  $R^2=0.958\ 2$ ,  $F=171.984\ 7$ ,  $P=0.000\ 1$ , 说明方程拟合良好 (见图 2)。

3.3 樟子松深根苗根系生长过程分析

对拟合求得 Logistic 曲线方程求一阶导数和二阶导数, 分别令其为 0, 可计算出 3 个时间点, 这 3 个时间点分别为根系垂直生长的始盛期、高峰期及盛末期, 其求导公式如下:

$$y' = \frac{ba_1a_2e^{-a_2t}(a_1a_2e^{-a_2} - a_2)}{(1 + a_1e^{-a_2})^3}$$

令  $y'=0$ , 得到  $t=\frac{\ln a_1}{a_2}$ , 求得  $t$  值为 45.7。

表 1 樟子松苗根系长出不同长度导根筒的时间  
Table 1 Mean day for seedling root out of root-guiding tubes

导根筒长度/cm	20	40	60	80	100
平均时间/d	$28.3 \pm 1.5$	$34.3 \pm 2.5$	$44.7 \pm 2.5$	$59.0 \pm 4.0$	$75.0 \pm 3.0$

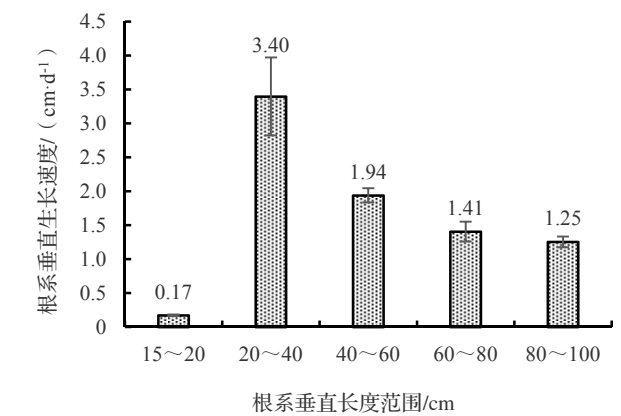


图 1 不同长度范围根系垂直生长速度

Figure 1 Vertical root increment

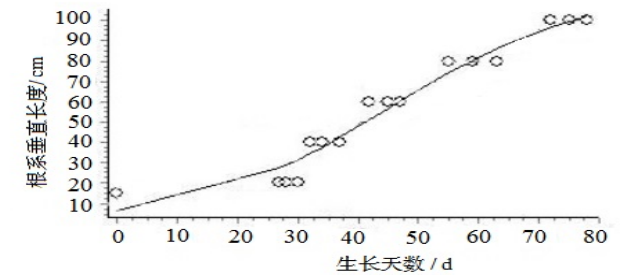


图 2 樟子松深根苗根系 Logistic 生长模型拟合效果

Figure 2 Fitting of logistic model for root growth of long-root seedling for *P. sylvestris* var. *mongolica*

$$y'' = \frac{ba_1a_2^3e^{-a_2t}(1 - 4a_1a_2e^{-a_2t} + a_1^2e^{2a_2t})}{(1 + a_1e^{-a_2t})^4}$$

令  $y'' = 0$ , 得到  $t = \frac{\ln a_1 \pm 1.317}{a_2}$ , 求得  $t$  值为 24.5 和 66.9。

因此, 樟子松深根苗根系垂直生长的始盛期、高峰期及盛末期分别为第 25 天、第 46 天和第 67 天, 进而可将樟子松深根苗根系垂直生长划分为 4 个阶段, 即渐增期 0~25 d, 速生期 26~46 d, 缓增期 47~67 d 和渐停期 68 d 之后。

## 4 讨论

在樟子松深根苗培育过程中, 根系垂直生长符合“慢-快-慢”的特点, 尤其是由移栽至导根筒到生长至 20 cm 根长的阶段, 生长极为缓慢。笔者认为, 这主要是由于植物移栽后普遍存在缓苗的过程, 导致植株移栽前期生长缓慢, 而根系生长缓慢是其中一个重要表现方面<sup>[11-13]</sup>。苗木度过缓苗期后, 进入七八月份, 光照强度和气温等气象因子发生变化, 且达到苗木生长最佳范围<sup>[14]</sup>, 加之在导根筒的作用<sup>[4,15]</sup>及水分充足<sup>[16]</sup>的条件下, 光合作用逐渐增强, 苗木根系垂直生长进入快速时期。随着苗木根系的不断伸长, 推测地上部光合作用产生的同化物运输到根系末端的距离也随之加长, 进而导致根系末端生长营养供应不足和根系垂直生长有所降低。这与梁晓婕等<sup>[17]</sup>对枸杞 *Lycium chinense* 根系第二次生长高峰期形成的推断理论一致。

本研究建立了樟子松深根苗根系垂直生长 Logistic 模型, 利用此模型, 可以在不挖根破坏的情况下, 对樟子松深根苗的根系垂直生长情况进行预测, 根据预测的根系生长进程, 实现精准灌溉, 进一步促进苗木根系的垂直生长, 达到缩短樟子松深根苗育苗周期的目的。深根苗的垂直生长还与树种特性<sup>[18]</sup>、育苗基质<sup>[19-20]</sup>、苗木初始情况<sup>[21]</sup>等因素有关, 本研究所采用树种为 3 年生樟子松容器苗, 根系初始垂直长度为 15 cm, 采用的育苗基质为园土:草炭:珍珠岩:蛭石=7:1:1:1, 因此, 在该条件下, 所得根系垂直生长模型才能适用。

根据拟合的 Logistic 曲线方程, 本研究求得三个关键时间点, 并将根系垂直生长划分为 4 个时期。在闫倩倩等<sup>[22]</sup>对领春木 *Euptelea pleiosperma*、廖海红等<sup>[23]</sup>对伞花木 *Eurycorymbus cavaleriei* 以及赵龙<sup>[24]</sup>对柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* 生长规律的研究结果中, 将其各自生长时期同样划分为 4 个时期, 但他们的研究是以苗木地上部生长为调查指标, 而本研究则以地下根系垂直生长为调查指标。

## 5 结论

根据以上分析, 本研究得到以下结论:

- (1) 樟子松深根苗根系垂直根生长速度符合慢-快-慢的特点;
- (2) 以根系垂直长度为因变量, 以生长天数为变量, 利用 Logistic 曲线方程对深根苗根系垂直生长进行拟

合, 得到 Logistic 生长模型为:  $y = \frac{115.9194}{1 + 17.1192 \cdot e^{-0.06252x}}$ , 决定系数  $R^2 = 0.9582$ ,  $F = 171.9847$ ,  $P = 0.0001$ , 说明方程拟合良好;

- (3) 樟子松深根苗根系垂直生长分为渐增期 (0~25 d)、速生期 (26~46 d)、缓增期 (47~67 d) 和渐停期 (68 d 之后) 四个阶段。

### 参考文献:

- [1] 冯长红, 贺康宁, 任宝俊, 等. 河北省京津风沙源区困难立地植被恢复主要模式与技术[J]. 辽宁林业科技, 2009 (1): 52-56.
- [2] 林琼. 关于做好“十二五”防沙治沙工作的思考[J]. 国家林业局管理干部学院学报, 2011, 3: 13-17.
- [3] Michael P R. Effect of nursery media particle size distribution on container-grown woody ornamental production[D]. Louisiana: Louisiana

State University, 2006.

- [4] 李向军, 刘春鹏, 支恩波, 等. 白榆深根苗低成本培育技术[J]. 林业科技开发, 2013, 27 (05): 117–119.
- [5] 刘春鹏, 李向军, 安萍, 等. 影响林木根系垂直生长因素探讨[J]. 福建林业科技, 2014, 41 (04): 40–44.
- [6] 孔涛, 吴丹, 沈海鸥, 等. 沙地樟子松人工林根系及土壤养分分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18 (04): 84–93.
- [7] 丁晓雪, 赵成义, 曾勇, 等. 地下水埋深和土壤质地对胡杨实生幼苗根系生长及构型的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (05): 235–241, 248.
- [8] 田起隆, 刘彤. 极端干旱环境下白梭梭细根分布与土壤水分关系[J]. 石河子大学学报 (自然科学版), 2020, 38 (01): 75–82.
- [9] 张锦春, 汪杰, 李爱德, 等. 樟子松根系分布特征及其生长适应性研究[J]. 防护林科技, 2000 (03): 46–49.
- [10] 董春胜, 朱晓东. 樟子松根系的分形维数测定模型[J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2014, 33 (04): 548–551.
- [11] 艾吉尔·阿不拉, 李丕军, 等. 4 个造林树种缓苗期生理生化特性分析[J]. 广东农业科学, 2017, 44 (3): 80–86.
- [12] 刘春洋, 史田, 史国安, 等. 不同移栽时期对‘凤丹’牡丹植株生长效应及其综合评价[J]. 林业科学, 2019, 55 (08): 54–62.
- [13] 夏明瑞, 王鑫, 田玉童, 等. 毛白杨缓苗期研究进展分析及展望[J]. 河北林业科技, 2020 (03): 27–29.
- [14] 李萍, 庄秋怡. 夏季全光照下 3 种大型卷瓣凤梨属植物光合日变化特征及与环境因子的关系[J]. 热带作物学报, 2021, 42 (09): 2579–2586.
- [15] 赵雅倩. 毛乌素沙地紫穗槐长根苗培育技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [16] 郑森, 郭毅, 王丽敏. 水分调亏对银杏幼苗根系生长发育和光合特性的影响[J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2021, 52 (03): 430–435.
- [17] 梁晓婕, 段淋渊, 安巍, 等. 宁夏枸杞根系生长发育特征研究[J]. 西北农业学报, 2020, 29 (04): 622–629.
- [18] 冯博, 徐程扬, 陈建军, 等. 光照对 3 种针叶树种幼苗生长与根系发育影响的研究[J]. 吉林林业科技, 2016, 45 (01): 28–32.
- [19] 刘幸红, 张文馨, 黄雯佳, 等. 容器育苗基质对蓉城竹 (*Phyllostachys bissetii*) 生长的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37 (25): 47–51.
- [20] 周新华, 武晓玉, 何平, 等. 3 种育苗因素对闽楠容器苗生长和根系发育的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41 (03): 45–53.
- [21] 许雪英. 苗木类型对造林早期枫香幼树生长的影响[J]. 亚热带农业研究, 2020, 16 (04): 242–246.
- [22] 闫倩倩, 郭星, 侯亚莉, 等. 领春木 1 年生播种苗木生长规律的研究[J]. 温带林业研究, 2020, 3 (03): 50–54.
- [23] 廖海红, 代丽华, 孔小丽, 等. 伞花木 1 年生播种苗木生长节律研究[J]. 南方林业科学, 2021, 49 (03): 11–14.
- [24] 赵龙. 黄土高原半干旱区柠条林生长的累积过程研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.