

林木根系结构动态模型研究

刘凤芹¹, 吴伟², 刘秀萍³, 鲁绍伟³, 鲁少波⁴, 王玉华⁴

(1. 秦皇岛外国语职业学院, 秦皇岛 066311; 2. 北京市水务局潮白河水库管理处, 北京 101300;
3. 北京林业大学水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点开放实验室, 北京 100083;
4. 河北省林业局, 石家庄 050081)

摘要: 林木根系结构和发展的动态模型, 是综合根系各种发展过程, 模拟多种动态交互作用, 分析树种、土壤和环境条件对根系形态的影响, 研究土壤-植物-大气系统的重要工具。根据近年来国外林木根系模型研究现状综述了垂直根型, 水平根型, 复合根型和具有一般性的根系动态模型。
关键词: 林木; 根系; 动态模型; 结构
中图分类号: S718.3 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2006)03-0265-03

The Study on the Dynamic Model of Forest Root System Structure

LIU Feng-qin¹, WEI Wei², LIU Xiu-ping³, LU Shao-wei³, LU Shao-bo⁴, WANG Yu-hua⁴

(1. Qinhuangdao Foreign Languages Professional College, Qinhuangdao 066311;
2. Management Office of the Chaobai Reservoir of Beijing Water Affairs Bureau, Beijing 101300;
3. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating,
Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083;
4. Forestry Department of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: The dynamic model of forest root system structure and development concludes various process, simulating manifold interactions, analyzing tree, soil and environment's influence on root form, it is an important tool of studying the soil-plant-atmosphere system. The dynamic models of upright root, level root, compound root and general root are summarized according to foreign study actuality of forest root system model.
Key words: forest; root system; dynamic model; structure

根系结构的研究具有非常重要的意义。从根系与土壤有机质的交换作用及对土壤固定作用来看, 根系结构是机能的重要决定因素^[1, 2]; 从林木抗侵蚀角度看, 根系的几何形态决定其固土作用^[3]。传统根系研究单纯描述根系形态和绘制根系空间分布(根系长度或密度轮廓)图形。随着观察和分析技术的发展, 研究复杂根系和理解它们是如何作用成为可能^[4, 5]。由于根系嵌入土壤和根系系统的复杂性, 研究根系结构和发展非常困难。根系结构和发展的动态模型对描述根系结构非常有用。根系结构动态模型是一个可模拟多种动态交互作用, 并能结合多种生长过程的框架系统^[6-9]。本文根据国外林木根系结构模型研究现状综述了垂直根型、水平根型、复合根型和具有一般性根系结构动态模型。

1 垂直根型根系模型

Van Noordwijk M, Spek L Y et al. (1994)^[10] 的根系分枝模型用根茎直径估计根系总长。模型分为两种极端的分枝模式(如图 1): 叉状分枝和人字形分枝。叉状分枝每一分枝点的两个分枝具有相同角度、相同数量的二次分枝。在人字形分枝模型中, 主轴上的所有分枝都不再继续分枝。大多数现实根系存在于叉状分枝和人字形分枝之间。成比例分枝模型中两分枝根系的横截面积比例不是 1: 1, 而与分枝

前根系的横截面积成比例。叉状分枝可看作是成比例分枝模式的简单例子, 人字形模型只描述分枝的第一阶段, 是叉状分枝模型的简单例子。人字行分枝横截面积不受主根限制, 分枝直径为根系直径的最小值。

根系从树干的基部开始, 根系分枝由连续的连结组成, 连结分为内部连结和外部连结^[4]。一个根系至少有一个外部连结和零个或多个内部连结。由一个或多个分枝组成的根系连接成一个单独的植物。

1.1 连结点的数量

根系每一分枝点的连结数量相等, 且用一内部连结取代外部连结, 内部连结和外部连结数量相互独立。每一分枝点共生成 N_k 个内部连结。不分枝根系由一个外部连结组成, $N_{k=0}, N_{el}=1$ 。内部连结 N_{il} 和外部连结 N_{el} 之间存在一种简单关系。

外部连结 N_{el} 计算公式:

$$N_{el} = N_k^{N_p} = \frac{(D_0/D_m)^2}{\alpha^{N_p}}$$
$$N_p = \frac{2\log(D_0/D_m)}{\log(\alpha N_k)}, N_p \text{ 为整数, 由该方程的右面整数部分确定。}$$

y 收稿日期: 2005-10-25
作者简介: 刘凤芹(1972-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 应用数学与地理信息系统; 责任作者: 鲁绍伟(1972-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 研究方向: 森林生态与森林水文。

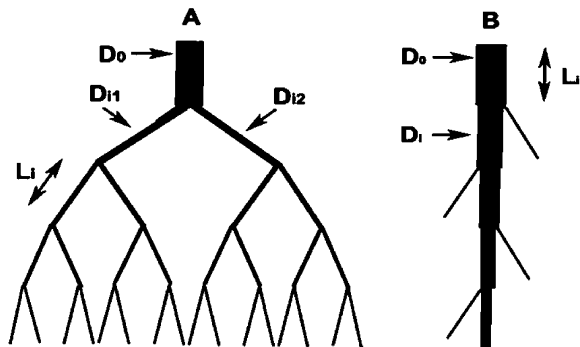
内部连结 N_{il} 计算公式:

$$N_d = N_b \frac{N_d - 1}{N_k - 1}$$

1.2 特定根系长度 L_{rw}

特定根系长度 L_{rw} 计算公式:

$$L_{rw} = \frac{4[r_1 + N_b f(1 + (N_k - 1)r_1)]}{\pi \delta [f(1 + N_b(N_k - 1)r_1 D_{el}^2 + \sum_{i=1}^{N_b} (L_i / \bar{L}_i) D_i^2)]}$$



A. 叉状分枝, 成比例分枝模式的最简单代表。
B. 人字形分枝, 确定性分枝模式的最简单代表。
 D_i 是 i 连结的直径, L_i 是 i 连结的长度。

图 1 两种极端分枝模式:

1.3 分枝点数量

人字形拓扑是分枝模式的最简单表达。在这种分枝模式中, 每一分枝点, 分离 N_{k-1} 个出个最小直径的分枝根系, 它们不再继续分枝。在这种情况下, 主轴的直径是逐渐减小的:

$$D_i^2 = \alpha [D_{i+1}^2 + (N_k - 1) D_m^2]$$

如果根系直径是减小的, α 的限制条件:

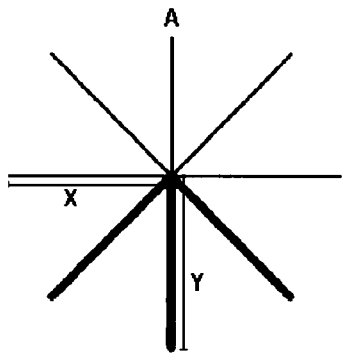


图 2 水平根系不规则分布的类型:

在根系锚固模型中, 下风向根系长度可以变化。其它不变, 下风向根系长度越长, 根系锚固作用越强, 从根基到根系最远点距离 xy 决定根系固土作用。根系直径不同, 因此根系固土性质与 d^4 有关。

$$xy \propto \sum_{i=1}^n d_i^4 \sin \theta_i$$

式中: xy —— 从根基到根系最远点的距离; d_i —— i 根系直径; θ_i —— 根系间方位角。

从根基到根系最远点的距离 xy 的值由根系类型决定, xy 最小值与根系长度有关, 为了求出的 xy 最小值, xy 直线以小间距在 360° 范围内旋转, 旋转至每一新位置重新计算。力从 xy 最小值点作用到根系, 减弱根土接触面及其与周围土壤的相互作用, 破坏根系。根系长度的增加将增强根系锚固作用。

3 复合根型根系模型

不同树种的根系形态和功能不同, 即不同根系的结构模型不同。Ozier- Lafontaine H, Lecompte F et al. (1999)^[13]

$$\alpha > \frac{D_i^2}{D_i^2 + (N_k - 1) D_m^2}$$

当 D_n 等于 D_m 时, 分枝结束, $n = N_b$ 。

$\alpha \neq 1$ 时, 分枝点数量:

$$N_b = \frac{\log[f(1 - \alpha)(D_0/D_m)^2 - \alpha(N_k - 1)] - \log(1 - \alpha N_k)}{\log \alpha}$$

$\alpha = 1$ 时, 分枝点数量:

$$N_b = \frac{(D_0/D_m)^2 - 1}{N_k - 1}$$

1.4 根系长度

根系总长度计算公式:

$$L_t = \frac{N_k^N (N_k r_1 + 1) - 1}{N_k - 1} L_d$$

表 1 模型中所需参数

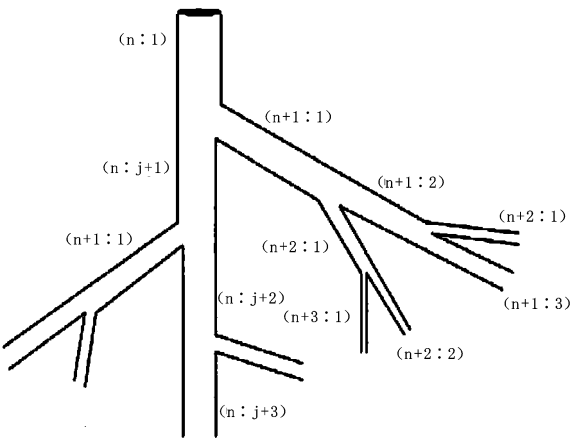
N_d —— 内部连结数量; N_{el} —— 外部连结数量; N_b —— 分根点数量
N_k —— 每次分根数量; L_{rw} —— 特定根长; δ —— 根系单位体积干重
D_i —— 内部连结直径; D_{el} —— 外部连结直径; L_t —— 根系总长
r_1 —— 外部连结与内部连结长度之比; D_m —— 根径最小值
N_b —— 分根点数量; α —— 分叉前后叉的数量之比; D_0 —— 根基直径

2 水平根型根系模型

根系在土壤中的分布具有一定的水平幅度, 一定程度上形成根系网, 增加了表土的抗蚀力。Coutts M P, Nielsen C C N et al(1999)^[11] 模型研究根系对称生长及根系固土作用, 比较根系结构和生长信息。根系径向结构不对称有多种类型。类型 A (如图 2), 排列规则, 根系直径变化。类型 B, 直径均匀, 根系排列不规则。在根系中两种类型同时存在。

A. 排列规则, 直径变化; B. 排列不规则, 直径均匀。

模型(如图 3)的提出在以下假设的基础上:



括号中第一个字母代表分根顺序, 第二个字母代表连结数

图 3 复合根型根系拓扑示意图

(1) 遵循 Fitter (1986)^[14] 和 Rose (1983)^[15] 提出的根系形态和发展方案, *G. sepium* 描述根系是由连接点组成的网: 在给定分枝中, 一段根系或连结(次序 n , 连结 j) 分成几个新的连结。最粗的新连结次序不变(次序 n , 连结 $j+1$); 其它连结都是新的侧部连结(次序 $n+1$, 连结 l)。

(2) 根系结构用回归法则设计, 它适用于根系的最后分枝, 即最小直径 D_{\min} 。根系长度, 直径和根系间角度作为参数输入。

(3) 任一分枝上新连结的分布遵循统一规则。

(4) 新连结直径的数量由它之前连结的直径估计, α 参数假定不变, 即:

$$\alpha = D^2 \text{ before branching} / D^2 \text{ after branching}$$

分配参数 q ,

$$q = \max(D^2 \text{ after branching}) / D^2 \text{ after branching}$$

在一给定结点产生 n 个新的连结, 新连结的最粗直径 (D_l) 计算如下:

$$D_l^2 = (q/\alpha) D^2 \text{ before branching}$$

假定新的侧部连结直径相等, 计算如下:

$$D_2^2 = D_3^2 = \dots = D_n^2 = [(1-q)/(N-1)\alpha] D^2 \text{ before branching}$$

新连结角度用它之前已知直径连结的角度来模拟, 产生分根时考虑放射状和插入型角度。分枝的放射状角度在以前连结的角度之上, 相反为插入角度。

(6) 新连结长度用它的直径和分枝次序计算。

(7) 模型随着 S-Plus 统计分析 (S-Plus, 1991)^[16] 发展。用来计算连结数量, 根系总长, 从根系干重和体积关系中计算根系总干重。

4 一般性根系模型

在根系模型的研究中, 有些模型试图考虑土壤环境对根系各种发展过程详细性和确定性的影响, 因为有些信息短缺不可能在同一置信水平上考虑所有重要的影响因素; 此外测试模型缺少独立和合适的数据库。为了改进这种方法, Pages L, Vercambre G, Drouet J L, Lecompte F et al (2004) 提出具有一般性的根系结构模型 (Root Typ), 用来描述不同土壤条件下各种根系的结构发展, 综合归纳前人研究的根系结构模型。Root Typ 的研究方向: (1) 综合分析大范围内具有同一置信水平的各种因素对根系结构发展过程的影响; (2) 归纳根系在分枝顺序上比较含蓄和容易混淆的概念; (3) 描述土参考文献:

壤对根系发展过程的影响。

Root Typ 采用前人根系结构模型的主要原理 (Clausnitzer and Hopman, 1994; Pages, 1989, 1995; Pages and Pdllein, 1996) 和改进 Vercambre (2002) 的桃树模型方法, 模拟全部根系结构的动力发展, 研究单一植物根系与水平土壤层的相互作用。根毛以各种形态生长和分枝, 与调控根系生长和分枝密度的土壤相互作用。Root Typ 认为根毛有各种状态, 轴生成垂直根系。为了限制和量化根系形态描述的过程, 每种根系采用特定参数。

在某时间段, 单一根系生长 (GR) 从特定潜在值 (GR_{pot}) 与土壤限制条件 (GR_{soil}) 相乘计算, 土壤限制条件依赖于土壤层。在时间段内的根系潜在生长速度 (GR_{pot}) 用一负指数方程计算:

$$GR_{pot} = GR_{init} \cdot \exp(-GR_{init}/L_{max} \cdot t) \cdot \Delta t$$

式中: t ——根系生长时间; L_{max} ——最长根系长度; GR_{init} ——根系初始生长速度。

GR_{init} 随根系类型变化, L_{max} 从平均值 $L_{max, av}$ 和标准偏差 $L_{max, sd}$ 正常分布密度中随机产生, 参数 $L_{max, av}$, $L_{max, sd}$ 随树种变化。

土壤限制条件 (GR_{soil}) 为每一土壤层 0 到 1 之间的系数, 它与影响根系生长的土壤性质 (如温度, 机械阻力, 氧有效性) 相结合。

根系生长方向受根系向性和土壤定向影响。在每一时间段, 新根生长方向是它之前根系生长方向, 根系向性, 土壤定向限制三种影响下的矢量和。Root Typ 描述根系各种定向。试验结果表明重力可能影响根系重新定向^[18-20]。根系类型表现为重力定向, 斜向性, 外向性。Root Typ 考虑两种方向引导情况: 均质约束, 垂直异质约束。均质约束通过在根系生长方向的半球多面角加入一任意矢量改变生长方向。异质约束在集中于垂直轴的多面角内任意加入向下定向的矢量改变生长方向。根系生长方向受土壤孔隙度影响, 根系趋于沿着大孔隙生长^[21, 22]。

5 结论

这些根系模型综合研究根系的不同发展过程, 提出根系生长的动态模型, 其本质定位于根系的结构方面, 研究根系主要结构特征。它们与其它根系结构模型相结合, 集中于模拟和量化根系潜在发展过程。有利于研究影响根系形态结构的因素, 分析树种或环境条件对根系形态的影响。

- [1] Coutts M P. Root architecture and tree stability[J]. Plant Soil, 1983, 71: 171-188.
- [2] Ennos A R, Crook M J and Grimshaw C. A comparative study of the anchorage systems of Himalayan balsam *Impatiens glandulifera* and mature sunflower *Helianthus annuus*[J]. J. Exp. Bot. 1993, 44: 133-146.
- [3] Coutts M P. Developmental processes in tree root systems[J]. Can. J. For. Res, 1987, 17: 761-767.
- [4] Fitter A H. The characteristics and functions of root systems[A]. In Plants Roots: The Hidden Half[M]. Eds. Y Waisel, U Kafkafi, A Eshel. New York: Marcel Dekker Inc, 1991. 3-25.
- [5] Pages L and Aries F. SARAH: model de simulation de la croissance, du developpement. et de l'architecture des systems racinaires[J]. Agronomie. 1988, 8: 62-68.
- [6] Pages L, Jordan M O, Picard D. A simulation model of the three-dimensional architecture of the maize root system[J]. Plant Soil, 1989, 119: 147-154.
- [7] Somma F, Hopmans J W, Clausnitzer V. Transient three dimensional modeling of soil water and solute transport with simultaneous root growth, root water and nutrient uptake[J]. plant Soil, 1998, 202: 281-293.
- [8] Clausnitzer V, Hopmans J W. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow[J]. Plant Soil 1994, 164: 299-314.
- [9] Thaler P, Pages L. Modeling the influence of assimilate availability on root growth and architecture[J]. Plant Soil, 1998, 201: 307-320.

- [4] 汪华源. 我国保水剂在农业上的应用专题文献研究[J]. 农业图书情报学刊, 2003, (4): 70– 73.
- [5] 杜太生, 康绍忠, 魏华. 保水剂在节水农业中的应用研究现状与展望[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(5): 317– 320.
- [6] 黄占斌, 辛小桂, 宁荣昌, 等. 保水剂在农业生产中的应用与发展趋势[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 11– 14.
- [7] 尹国平, 农韧刚, 刘革宁. 高吸水剂在我国林业上的应用研究进展[J]. 世界林业研究, 2001, 14(4): 50– 54.
- [8] 吴玉凯. 超强吸水剂的制备与应用综述[J]. 商业科技开发, 1997, (1): 39– 42.
- [9] 李成林. 超强吸水剂的应用及展望[J]. 化工时刊, 2003, (8): 9– 11.
- [10] 黄美玉. 超高吸水性聚丙烯酸钠的制备[J]. 高分子通讯, 1984, (2): 129– 134.
- [11] 王勇, 张玉英. 高吸水性树脂的研究进展[J]. 中国塑料, 2001, (10): 14– 16.
- [12] 初荣, 李华民, 黄占斌, 等. 风化褐煤在保水剂中的应用[J]. 煤炭工程, 2005, (1): 67– 68.
- [13] 林润雄, 王基伟. 高吸水性树脂的合成与应用[J]. 高分子通报, 2000, (2): 85– 92.
- [14] Engelhardt F, Ebert G, Reigel U, et al. Absorption agent for water and aqueous solutions[P]. EP: 0590395, 1994– 04– 06.
- [15] 吴德瑜. 保水剂与农业[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995.
- [16] Fujita F, Funayama I, Oohasi Y, et al. Geanular soil conditioner and its manufacture[P]. EP: 4142390, 1992– 05– 15.
- [17] Tripathi M L, Kurmvanshi S M, Namdeo K N. Acrylic acid grafted starch– technological innovation of high absorbent resin[J]. Indian J. Agron., 1995, 40: 525– 527.
- [18] Damrong Chaariyakul. Study of water absorbent polymer to maintain soil moisture for flue– cured tobacco grown in April[J]. Annual report 1993. Raingan pracham pi 2536. Chiang Mai. 1995– 68– 32.
- [19] Ohta M; Homma K. Ovipoosition pattern of Japanese quail following hypothalamic lesioning with super–absorbent polymer[J]. General and Comparative Endocrinology, 1988, 72: 424– 430.
- [20] 金群力, 孙培基. 高分子吸水材料对真姬菇发菌的影响[J]. 浙江农业科学, 2001(4): 161– 163.
- [21] Ingram–DL, Burbage W. Effects of irrigation regime, antitranspirants, and a water absorbing polymer on the survival and establishment of transplanted live oaks[J]. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 1986, 98: 85– 87.
- [22] Callaghan–TV, Abdelnour H, Lindley–DK. The environmental crisis in the Sudan: the effect of water–absorbing synthetic polymers on tree germination and early survival[J]. Journal of Arid Environments, 1988, 14: 301– 317.
- [23] Callaghan–TV, Lindley–DK, Ali–OM, et al. The effects of water–absorbing synthetic polymers on the stomatal conductance, growth and survival of transplanted Eucalyptus microtheca seedlings in the Sudan[J]. Journal of Applied Ecology, 1989, 26: 663– 672.
- [24] 王九龄, 孙健, 王志明. 吸水剂在北京低山阳坡造林中应用的系列研究 – [J]. 北京林业大学学报, 1991(增刊 2): 121– 162.

(下转第 273 页)

(上接第 267 页)

- [10] Van Noordwijk M, Spek L Y, De Willigen P. Proximal root diameters as predictors of total root system size for fractal branching models . I. Theory[J]. Plant Soil, 1994, 164: 107– 118.
- [11] Coutts M P, Nielsen C C N, Nicoll B C. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers[J]. Plant and Soil, 1999, 217: 1– 15.
- [12] Vercambre G, Pages L, Doussan C, Habib R. 2003 Architectural analysis and synthesis of the plum tree root system in an orchard using a quantitative modeling approach. Plant Soil 251, 1– 11. Shinosaki K, Yoda K, Hozumi K and Kira T. 1964 A quantitative analysis of plant form– the pipe model theory I. Basic analysis[J]. Jpn. J. Ecol. 2003, 14: 97– 105.
- [13] Ozier– Lafontaine H, Lecompte F, Sillon J F. Fractal analysis of the root architecture of Gliricidia of Gliricidia sepium for the spatial prediction of root branching, size, and mass. Model development and evaluation in agroforestry[J]. Plant Soil, 1999, 209: 167– 180.
- [14] Fitter A H. The topology and geometry of plant root systems: influence of watering rate on root system topology in Trifolium pretense[J]. Ann. Bot, 1986, 58: 91– 101.
- [15] Rose D A. The description of the growth of root systems[J]. Plant Soil, 1983, 75: 405– 415.
- [16] S– Plus. S– Plus User's Manual[M]. Seattle, WA: Statistical Sciences, Inc., 1991.
- [17] Pages L, Vercambre G, Drouet J L, Lecompte F et al. Root Type: a generic model to depict and analyse the root system architecture[J]. Plant and Soil, 2004, 258: 103– 119.
- [18] Coutts M P. Factors affecting growth direction of tree roots[J]. Ann. Sci. For. 1989, 46: 277– 287.
- [19] Le Roux Y, Pages L. Development et polymorphisme racinaire chez de jeunes semis d'hevea (Hevea brasiliensis) [J]. Can. J. Bot, 1994, 72: 924– 932.
- [20] Riedacker A, Dexheimer J, Takavol R, et al. Modifications experimentales de la morphogenese er des dans le systeme racinaire de jeunes chene[J]. Can. J. Bot, 1982, 60: 765– 778.
- [21] Logsdon S D, Linden D R. Interactions of earthworm with soil physical conditions influencing plant growth[J]. Soil Sci, 1992, 154: 330– 337.
- [22] Wang J, Hesketh J D, Wooley J T. Preexisting channels and soybean rooting patterns[J]. Soil Sci, 1986, 141: 432– 437.