

油松根系形态分布的分形分析研究

刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰, 吴彦霖

(北京林业大学 水土保持学院 北京林业大学教育部水土保持重点实验室, 北京 100083)

摘要: 基于分形理论和管状模型理论建立了油松根系的三维静态模型。根系模型主要建立在根系拓扑、分枝规律、连结长度、连结直径和根系分枝角度基础上。检测模型主要考虑参数 α 和 q 。参数 α 为根系分枝前后的横截面积之比, q 定义分枝后新连结的生物量。虽然参数 α 和 q 相对于根系直径独立, 但是它们的变化可能影响预测的正确性。在植物水平上, 模型提供适当的根系干重, 根系全长和根系直径的预测。这一静态模型较适合研究成熟根系, 与其它模型相比, 该模型的主要优点是它的可塑性和易于应用。

关键词: 油松; 自相似理论; 管状模型; 根系结构模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)01-0047-04

中图分类号: S711

Fractal Analysis on Morphology Distribution of the *Pinus Tabulaeformis* Carr. Root System

LIU Xiu-ping, CHEN Li-hua, SONG Wei-feng, WU Yan-lin

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, and Key Laboratory of

Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: A static three-dimensional model of the *Pinus tabulaeformis* Carr. root system was developed by the fractal and pipe model assumptions. The model was constructed from the observations for topology, branching rules, link length and diameter and root orientation. Evaluation tests were carried out at the plant level. The test principally concerned the coefficients of α and q , where factor α is a ratio of the total cross-sectional area of a root before branching to that after branching, and the allocation parameter q defines the new link biomass after branching. Although they are independent of root diameter, the coefficients show some variability that may affect the precision of prediction. The model provides adequate predictions for dry root matter, total root length and root diameter at the plant level. The static model appears to be suitable for the root system of adult trees. Compared with other models, the main advantages of the fractal model are its plasticity and ease of use.

Keywords: *Pinus tabulaeformis* Carr.; self similarity; pipe model theory; root architecture mode

在农林系统中, 研究植物根系的分布对提高根系利用土壤水分和养分有重要意义。根系模型研究为分析植物根系开拓新的领域^[1-2]。1968 年 Lindenmayer 提出了模拟简单树木的 L 系统, 随之出现了根系的三维结构模拟, 如 Rootmap^[3-4], Sim-root^[5], Clausnitzer and Hopmans 等^[6]。

20 世纪 70 年代中期法国数学家 B. B. Mandelbrot 先生提出分形的概念和定义^[7], 至 20 世纪 80 年代后期, 分形理论开始应用于植物学研究。最近出现了根系的分形分析^[8-9], 并将根系分形研究分为 3 类: (1) 分析实际根系相对于土壤养分或者土壤强度的分形几何, 探索分形维数的变化。(2) 基于拓扑缩放比例, 探索根系生长过程的变化, 即根系内的模

块反复。(3) 基于自相似理论, 试图克服测量参数如根基直径的分枝模式和直径的限制, 预测根系的整个结构。

Spek and Van Noorwijk 认为, 已知根系的最小直径, 连结长度, 比例参数和分配参数 q , 运用管状模型和回归分析能预测根系干重、根系直径和根系全长。Van Noordwijk and Purnomosidhi 证实, 虽然参数 α 和 q 相对于根系直径独立, 但是对连结长度, 连结数量和连结生物量影响比较大。

本项研究的目的是: (1) 应用自相似理论和管状模型预测油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.) 的根系全长, 连结直径和根系生物量; (2) 建立油松根系的三维结构模型。

收稿日期: 2005-09-23

修稿日期: 2006-07-11

基金项目: “973” 国家重大基础研究项目(2002CB111502); 国家自然科学基金项目(30571531)

作者简介: 刘秀萍(1980-), 女(汉族), 山东菏泽人, 博士, 主要研究方向为流域管理与生态环境工程。E-mail: xiupingliu@126.com。

通讯作者: 陈丽华, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为流域治理、城镇规划、森林水文等。E-mail: lhchen2004@163.com。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

甘肃省天水市地处东经 $104^{\circ}35'$ — $106^{\circ}44'$, 北纬 $34^{\circ}05'$ — $35^{\circ}10'$ 之间, 境内山脉纵横, 地势西北高, 东南低, 海拔在 1000~2100 m 之间。地貌区域分异明显。东部和南部因古老地层褶皱而隆起, 形成山地地貌; 北部因受地质沉陷和红、黄土层沉积, 形成黄土丘陵地貌; 中部小部分地区因受纬向构造带的断裂, 形成渭河地堑, 经第四纪河流发育和侵蚀堆积, 形成渭河河谷地貌。天水处华北、华中、蒙新和喜马拉雅植被交汇处, 树种成份复杂, 森林资源丰富。天水市现有森林总面积 $3.93 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 森林覆盖率为 26.5%。天然林地主要分布在东部、东南部的陇山、西秦岭和关山林区, 有木本植物 87 科 224 属 804 种, 其中乔木 312 种, 灌木 437 种, 藤本 55 种, 常绿植物 122 种。木本植物以壳斗科 (*Fagaceae*)、桦木科 (*Betulaceae*)、松科 (*Pinaceae*)、杨柳科 (*Salicaceae*)、榆科 (*Ulmaceae*)、槭科 (*Aceraceae*)、蔷薇科 (*Rosaceae*)、椴科 (*Tiliaceae*) 等为主。草本植物 158 科 726 属, 以禾本科 (*Gramineae*)、菊科 (*Compositae*)、豆科 (*Leguminosae*)、毛茛科 (*Ranunculaceae*) 为主。

1.2 调查方法

黄土坡面是一种不对称立地, 导致根系分布不平衡和不对称。为了全面而准确地研究根系各方面特点, 根系挖掘采用水平挖掘法。在 13a 生, 坡度为 20° 的油松林内划分标准地, 选择具有代表性的 8 棵油松, 其中 7 棵用于建立模型, 1 棵用于模型验证。去掉地上部分, 沿根径周围逐层挖掘, 测量根系连结长度, 连结直径, 连结顺序和数量。连结顺序测到 4。为保证获得原位根系, 特别是根系之间的半径角和插入角的准确信息, 边挖掘边测量。由于根系结构木质化, 挖掘前后测量对根系参数的获得影响不大。

1.3 模型描述

林木根系结构模型建立在以下假设的基础上:

(1) 如图 1, 模型遵循 Fitter (1986) 和 Rose (1983) 的根系形态和发展规则, 油松根系由连结组成, 连结的长度和直径由根系分枝顺序决定: 在一分枝点, 一段根或连结 (n, j) 分成几个新的连结。最粗的新连结定义为连续连结, 顺序不变 ($n, j+1$), 其它连结定义为分枝连结, 看作侧枝 ($n+l, l$)。

(2) 根系结构利用回归法则设计, 直到细根的最小直径 D_{\min} 。根基部性质如根系长度, 直径和根系间的角度作为参数输入。

(3) 任意分枝上的新连结分布遵循同一规则。

(4) 参数为根系分枝前后的横截面积之比, α 值不变, 参数 q 定义每一分支点根系的生物量。新连结直径由它之前连结直径估计, 在一给定结点产生 n 个新的连结, 最粗新连结的直径 D_l 由公式 3 计算。其它新连结直径相等, 依据下列公式计算参数 α, q 和其它新连结直径。

$$\alpha = D_0^2 / \sum D^2 \quad (1)$$

$$q = D_{\max}^2 / \sum D^2 \quad (2)$$

$$D_l^2 = (q/\alpha) D_0^2 \quad (3)$$

$$D_2^2 = D_3^2 = K = D_n^2$$

$$D_n^2 = [(1-q)/(N-1)\alpha] D_0^2 \quad (4)$$

式中: D_0 ——分枝前根系的直径; D ——分枝后各根系的直径; D_l ——最粗新连结的直径; D_2, D_3, D_n ——其它新连结直径。

新连结的定位依赖以前的已知连结, 考虑半径角和插入角。半径角为一给定方向与分枝方向之间的夹角, 在平面上垂直于母根。插入角为母根与分根之间的角度。新连结长度利用其直径和分枝顺序计算。

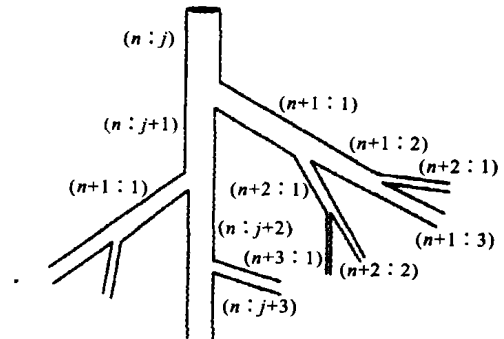


图 1 根系拓扑示意图

括号中第一个字母代表分根顺序, 第二个字母代表连结数

1.4 方法评价

在这一研究中, 分形理论和管状模型的检验严格限制在油松根系的静态结构。根系特性和结构的模拟检验通过与一个参考根系相比较进行。首先分析和确定参数 α 和 q , 由于根系挖掘过程中部分根系损坏, 可以限制有关连结的扩展来保持比较的一致性。模型的灵敏度在参数 α 和 q 可变范围内检验。在根系整体水平上, 通过根系顺序、直径等级寻找参数和 q 值, 使模拟直径和实测直径的偏离值最小。

2 结果分析

2.1 根系分枝模式

13a 生油松根系具有明显垂直主根和副主根, 且粗壮发达, 垂直主根深入土层基本都在 1 m 以上, 有

的几乎达到母质层。心根数量较少, 水平根系极为发达, 以 2~3 条为主, 水平根主要分布在 30 cm 左右深的土层中, 其中最长的—条水平根长度达 3 m, 可见油松根系的骨架结构主要是由主根和水平根组合构成, 属于具有发达水平根的垂直根型树种。

油松的根系在每一个分枝点分枝的数量很少超过 3 个, 一般具有连续连结和 1 个或 2 个分枝连结。任意分枝点具有 2 个和 3 个分枝的概率分别为 90% 和 10%。

2.2 比例系数 α 和 q 与根系直径的关系

比例系数和根系直径的关系如图 2。虽然比例系数 α 和 q 相对于根系直径独立, 但是其值变化较

大。参数 α 的平均值为 1.49, 相对标准差为 0.26, 参数 q 的平均值为 0.75, 相对标准差为 0.13。

2.3 管状模型关系

连结与连续连结和分枝连结横截面积之间的关系如图 3。连续连结与连结的横截面积之间呈现明显的线性关系, 而分枝连结与连结的横截面积之间的关系则不太明显。

2.4 连结长度与连结直径之间的关系

如图 4—5(每一个点代表一个根系顺序) 所示, 很明显, 根系直径与连结长度之间没有明显关系。但是考虑根系顺序, 根系直径与连结长度之间关系很显著, 因此平均连结长度就可以很好地预测出来。

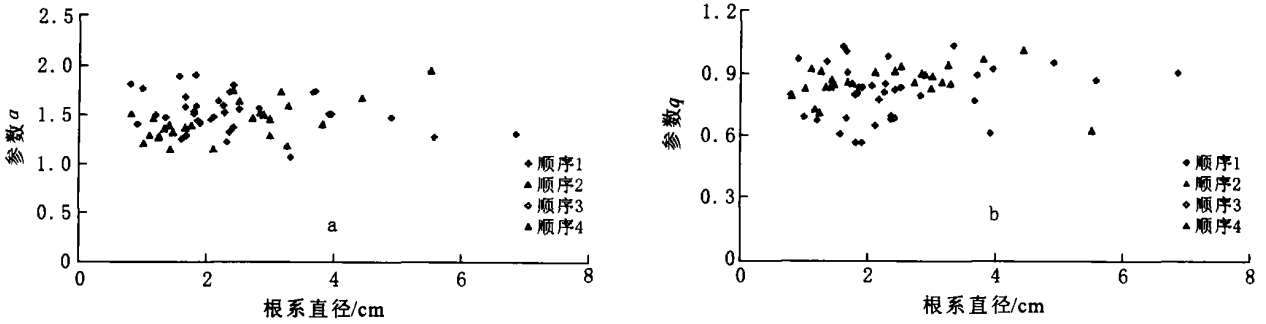


图 2 根系直径与参数 α, q 之间的关系

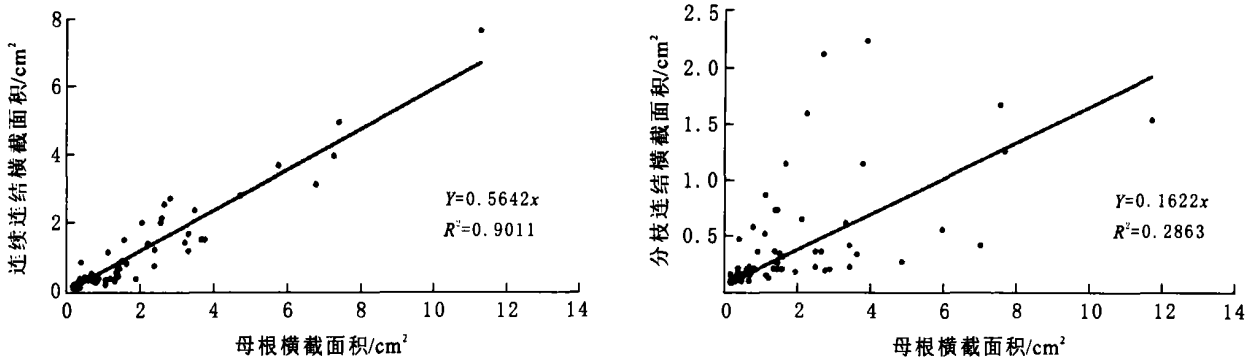


图 3 管状模型关系

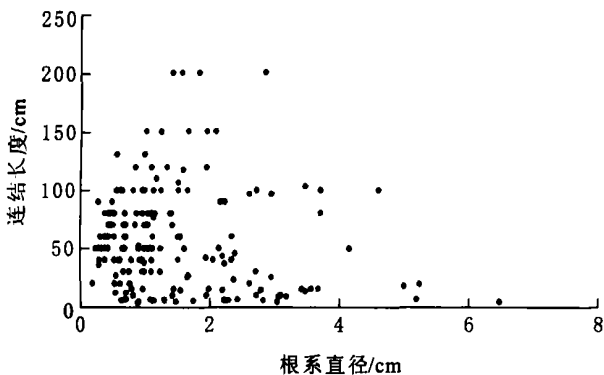


图 4 根系直径与连结长度之间的关系

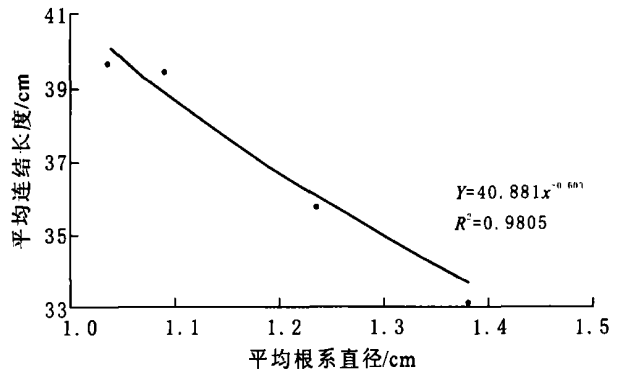


图 5 平均根系直径与平均连结长度之间的关系

2.5 根系干重与根系体积

油松根系干重与根系体积之间的关系如图 6 所示,二者呈现明显的线性关系。5 a 生油松根系干重在雨季大约为鲜重的 40%。

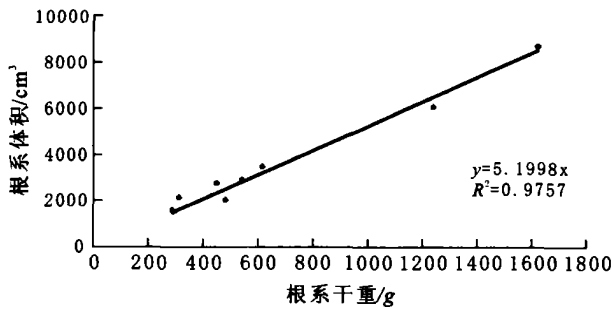


图 6 根系干重与根系体积之间的关系

2.6 角度分布

对油松根系的半径角和插入角度调查发现,同一根系顺序的 2 个连结,60% 的连续连结半径角和插入角度不变。由于调查在 20° 的斜坡上进行,同一连结点上的分枝连结与连续连结组成的平面基本与斜坡面平行,分枝连结与连续连结之间的角度大多在 20° ~ 60° 之间。油松分枝连结中的细根与连续连结之间的半径角没有一定规律,可以看出连结与连续连结的周围都有细根生长,细根与连续分枝之间的插入角度大多在 10° 左右。

2.7 参数 α 和 q 的模型灵敏度

参数 α 和 q 的模型灵敏度的一些性质如表 1 所示。用参数 α 和 q 的平均值和各自的边界值估计根系干重,全长和连结直径。经过大量试算,具有代表性的试算结果列表如下。从表 1 可以看出,参数 α 和 q 的最优化值为 $\alpha = 1.47$, $q = 0.74$ 。

2.8 三维根系结构模拟

在参数 $\alpha = 1.47$, $q = 0.74$ 的情况下,油松根系的三维根系结构模拟如下图 7。



图 7 油松根系的三维结构模拟

表 1 参数 α 和 q 的变化对根系干重,根系全长和根系直径预测的灵敏度

项目	参数	根系全 部干重/g	根系全 长/cm	模拟与观测 直径之比
观测值 平均值	$\alpha = 1.49, q = 0.75$	1626	3604	—
		1569	2894	1.050
模拟 优化值	$\alpha = 1.47, q = 0.74$	1674	2989	0.994
	$\alpha = 1.76, q = 0.75$	1605	2904	1.013
	$\alpha = 1.44, q = 0.75$	1721	2932	0.975
	$\alpha = 1.47, q = 0.75$	1569	2894	0.952
	$\alpha = 1.42, q = 0.75$	1774	2971	0.893
	$\alpha = 1.49, q = 0.75$	1446	2554	0.994
	$\alpha = 1.47, q = 0.65$	1622	2942	0.994
	$\alpha = 1.47, q = 0.85$	1505	2251	0.994
	$\alpha = 1.47, q = 0.72$	1523	2294	0.946
	$\alpha = 1.47, q = 0.73$	1672	2988	1.006
	$\alpha = 1.47, q = 0.76$	1674	2989	1.019

3 讨论

基于分形理论和管状模型假设建立了油松根系的三维静态模型。虽然参数 α 和 q 相对于根系直径独立,但是参数的变化在一定程度上影响根系性质预测的可靠性。使用参数 α 和 q 的平均值预测的根系干重,根系全长和连结直径近似正确。灵敏度分析揭示参数 α 的变化对预测影响较大。对于参数,自相似理论的假设仅建立在直径大于 1.8 cm 的根系上。对于细根,参数 α 随根系直径降低而增大。参数 α 和 q 的变化可以解释如下:

(1) 同一根系的细根可能生长在不同土壤层,那里土壤强度、pH 值、水分和养分有效性不同,根系生长受环境条件影响较大。

(2) 联合方程 1 和 2,可以得到

$$1/\alpha = (D_1^2/D_0^2) + (D_2^2/D_0^2)$$

式中: D_0 —— 分枝前根系直径; D_1 —— 连续连结根系直径; D_2 —— 分枝连结根系直径。

管状模型揭示,上述方程的第二部分即 D_2^2/D_0^2 对参数 α 影响较大。所以不同直径的根系产生的分枝,即使在相同的环境条件下,也可能具有不同的生长潜力。

(3) 由于根系能自我适应当地环境条件,根系顺序和根系直径都不能充分解释参数 α 和 q 的变化。根系顺序在受损根系上使用有一定难度。

总之,根系形态分类应在多标准的基础上,结合根系顺序,直径和连结长度进行。管状模型理论应用到根系形态将使分形理论得到较大进展。

(下转第 54 页)

表 6 区域气候环境指数(K_3)

年降水量/mm	> 1 300	1 300	1 250	1 200	1 150	1 100	1 050	1 000	< 1 000
区域气候环境指数	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0

表 7 北碚区坡面泥石流形成的综合指数

年份	1962	1972	1978	1987	1989	1993	2003
具体时间	0705	0625	0529	0720	0710	0801	0709
综合指数	749.5	718.7	757.7	700.7	698.7	747.8	670.8

由(3)式可计算出北碚区历年坡面泥石流形成的综合指数(表7)。

从表7中可以看出,当综合指数大于650时,就可能形成坡面泥石流。这一指数可以作为北碚区坡面泥石流的预警指数。

通过对北碚地区坡面泥石流形成的降水条件的分析,可知,在该区域中,暴雨是激发该区域坡面泥石流的决定性因素,且坡面泥石流的发生与前期雨量和短历时雨强密切相关。当1h降雨量达到40mm,降雨指数达到160,综合指数达到650时,就可能发生坡面泥石流。

当然,这里所提出的各项预警指标都是初步的方案,下一步还应该通过试验和机理分析,以提高预警指标的精度。

(上接第50页)

对根系直径的模型校准表明,假定参数 α 和 q 的优化在一棵油松根系上进行,能得到较好的根系干重,根系全长和根系直径预测,但连结长度的预测满意度不高,因此连结直径对干重的预测比连结长度重要。连结长度的观测值和预测值之间联系的可靠度没有连结直径高。根系的平均连结长度能被较好地预测。作为植物分析的结果,假定这一模型能得到改进,它可以作为预测根系的连结长度,连结直径和根系干重的工具。分形模型与现代高科技技术结合将便利参数 α 和 q 的非破坏校准。对根系的预测将有利于农林调查。

[参 考 文 献]

- [1] Box J E Jr. Modern methods for root investigations[M]. in: Plant Roots. The Hidden Half. Eds. Y Waisel, A Eshel and U Kafkafi, 2nd ed., rev. and expanded. MDI Dekker, New York. 1996. 193—237.
- [2] Van Noordwijk M, Van de Geijn S C. Root, shoot and soil parameters required for process-oriented models of crop growth limited by water or nutrients[J]. Plant Soil, 1996 (183): 1—25.

[参 考 文 献]

- [1] 唐文光,王力之,等.北碚自然地理[M].重庆:西南师范大学出版社,1986.1—3.
- [2] 曾凡伟.泥石流形成机制[M].重庆:西南师范大学出版社,2005.1—5.
- [3] 国家防汛抗旱总指挥部办公室,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所.山洪泥石流滑坡灾害与防治[M].北京:科学出版社,1998.92—97.
- [4] 韦京莲,赵波,董桂芝.北京山区泥石流降雨特征分析及降雨预报初探[J].北京地质,1995(1):12—16.
- [5] 崔鹏,杨坤.前期降雨对泥石流形成的贡献[J].中国水土保持科学,2003,3(1):12—14.
- [6] 吴正华.北京泥石流灾害及其降水触发条件[J].水土保持研究,2001,3(1):68—72.
- [7] 程尊兰,朱平一,刘雷激.泥石流活动与雨强的关系[J].自然灾害学报,1998,2(1):118—120.

- [3] Diggle A J. ROOTMAP—a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems[J]. Plant Soil, 1988(105):169—178.
- [4] Pagès 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.
- [5] Nielsen K L, Lynch J P, Jablókow A G, et al. Carbon cost of root systems: an architectural approach[J]. Plant Soil, 1994(165):161—169.
- [6] Clausnitzer V, Hopmans J W. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow[J]. Plant Soil, 1994(164):299—314.
- [7] Mandelbrot B. The fractal geometry of nature[M]. New York. W. H Freeman and company, Freeman, 1982.
- [8] Berntson G M. Fractal geometry, scaling, and the description of plant root architecture[M]. in: Waisel. Y. Eshel A, Kafkafi u(eds), plant Roots the hidden half, 2d. ed, chapt. 13 marcel dekker, New York, 1996:259—272.
- [9] Fitter A H, Stickland T R. Fractal characterization of root architecture[J]. Funct Ecol, 1992(6):632—635.

(部分参考文献略)