

文章编号: 1001-1498(2001)05-0566-08

# 环境因子对树木细根生物量、 生产与周转的影响

张 小 全

(中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所 北京 100091)

**摘要:** 细根在森林生态系统 C 平衡和养分循环中的重要作用已为大量研究所证实。树木有赖于细根吸收水分和养分,而细根对环境胁迫比较敏感,因此细根动态可指示环境变化,还可反映树木的健康状态。影响树木细根生产和周转的因子很多,本文在收集大量研究文献基础上,讨论了土壤养分、水分、pH 值、温度等环境因子以及大气 CO<sub>2</sub> 增长对树木细根分布、生物量、生产和周转的影响,以期为我国开展细根生态学研究提供参考。

**关键词:** 细根; 生物量; 生产; 周转; 环境因子

**中图分类号:** S718.55<sup>+</sup>6      **文献标识码:** A

树木细根在森林生态系统能量和物质循环中发挥着十分重要的作用。研究表明,多数森林生态系统细根生物量占根系总生物量中的比例小于 30%<sup>[1]</sup>,但它具有巨大的吸收表面积、生理活性强,是树木水分和养分吸收的主要器官。细根生产占森林净初级生产的 3%~84%,大多数研究在 10%~60%<sup>[1]</sup>。树木细根寿命短至数天或几周,长至数月或 1 到几年。年周转率(细根年生产量/细根生物量)通常在 0.04~2.73,有些甚至高达 5~6<sup>[1]</sup>。在温带,通过细根周转进入土壤的有机物占总输入量的 14%~86.8%,大多数在 40%以上<sup>[2]</sup>。由于细根生产向林地输入的生物量占总输入的 6.2%~88.7%,平均 50%左右<sup>[1]</sup>,因此细根在森林生态系统 C 平衡和养分循环中起着十分重要的作用。如果忽略细根的生产、周转和分解,土壤有机物质和营养元素的周转将被低估 20%~80%<sup>[3]</sup>。细根生产和周转不但受许多环境因子的影响,对环境胁迫十分敏感<sup>[4]</sup>,而且细根动态对环境变化具有重要指示作用,可反应树木或生态系统水平的健康状况<sup>[5,6]</sup>。影响细根生长和周转的环境因子很多,如土壤物理性质、机械阻力、温度、湿度、光照、养分、pH 值、CO<sub>2</sub> 浓度等,研究它们与树木细根生产和周转的关系,可为土壤和树木特性改良以及林分管理提供科学依据。国外对树木细根生产和周转与环境因子的关系进行了大量的研究和探讨。国内有少量树木细根生产和周转的研究<sup>[7~10]</sup>,但对其与环境因子的关系尚未见报道。张小全等<sup>[1,11]</sup>介绍了目前国外普遍采用的树木细根生态学研究方法及其优缺点、适用性、不同方法的研究比较以及主要森林生态系统类型细根生物量、生产量和周转等。本文主要从土壤养分、水分、pH 值、温度以及 CO<sub>2</sub> 浓度方面综述树木细根生产与环境因子的关系。

## 1 土壤养分

土壤养分直接影响细根活力和碳水化合物的分配,从而影响树木细根生产和周转。对寒温

带针叶和阔叶林生态系统分析表明, 影响生态系统 N 循环的因子可解释 75% 的细根周转变化<sup>[12]</sup>。Vogt 等<sup>[2]</sup>通过收集的大量研究数据分析, 发现气候因子和养分状况是决定细根生物量的重要因素, 而细根生产则主要受养分条件的控制。一些研究表明, 在贫瘠立地上, 植物将分配更多的光合产物用于细根生产, 但细根周转加快, 寿命缩短; 而在肥沃立地或施肥处理中, 细根生产量低, 但周转率也低, 寿命延长<sup>[13-16]</sup>。Alexander 和 Fairley<sup>[13]</sup>认为施肥的一个重要结果是降低了细根(包括菌根)的周转率, 释放资源用于新根和其它组织的生长。但也有不同的观点, 认为低养分环境有利于延长细根寿命, 生产降低, 而高养分环境则会缩短细根寿命, 生产增加<sup>[12, 17-19]</sup>。Hendrick 和 Pregitzer<sup>[20]</sup>认为细根寿命与土壤养分有效性可能呈正相关, 也可能呈负相关, 取决于植物种类、器官或整个植物 C 平衡、有效养分在土壤中分布的空间异质性等。同时其它环境因子如气候、土壤水分、温度、菌根和其它微生物等与养分的交互作用也可能影响上述细根对土壤养分的不同响应。在施肥试验中, 施用的养分元素种类和土壤中该类元素的富缺状况也会影响试验结果。要弄清楚土壤肥力与细根生产、周转和生物量的关系, 还有许多工作要做。

林地表层土壤丰富的养分条件是细根多集中分布于表层的重要原因之一。在贫瘠土壤上生长的高生产力林分, 表层表现出细根集结的特征<sup>[21, 22]</sup>。随林分年龄增加, 细根垂直分布表层化<sup>[23, 24]</sup>, 也与养分条件有关。在良好立地上, 随年龄增加, 细根生物量迅速增加并在郁闭后调整到较低的水平上; 在贫瘠立地上, 细根生物量随年龄增长的增加要缓慢得多, 并在郁闭后维持较高的生物量<sup>[25]</sup>, 甚至由于养分的大量消耗引起生物量继续增加<sup>[24, 26]</sup>。

## 2 土壤水分

土壤水分是限制植物根系生长的最主要环境因素之一。植物根系对干旱的响应多种多样, 细根死亡对水分亏缺的响应很大程度上决定了植物对水分亏缺的适应能力<sup>[27]</sup>。不同植物细根对土壤水分亏缺的响应不同。一些树木细根较能耐旱, 如柑桔(*Citrus volkameriana* Tan. & Pasq.)<sup>[27]</sup>、火炬松(*Pinus taeda* Linn.)<sup>[28]</sup>。某些植物细根甚至可以在凋萎点(-1.5 MPa)以下存活和生长<sup>[29]</sup>。而有些植物细根对土壤干旱却非常敏感<sup>[30, 31]</sup>。

土壤水分状况直接影响树木细根生物量、生长和周转。灌溉处理 5 年生桉树(*Eucalyptus globulus* Labill.) 林分细根量在整个生长季均明显大于对照或施肥处理<sup>[32]</sup>。灌溉或施肥加灌溉明显增加根系生物量, 降低根茎比<sup>[33, 34]</sup>。

在热带和温带的许多研究均表明, 细根生长的季节动态与土壤水分动态一致, 生物量或生长高峰出现在雨季而低峰出现在旱季<sup>[29, 32, 35, 36]</sup>。土壤水分还影响细根垂直分布<sup>[32, 37, 38]</sup>。树木的耐旱性与细根的垂直分布有关, 而与细根总生物量无关, 干旱胁迫症状最明显的树种在深土层的细根生物量最小<sup>[37]</sup>。干旱处理使挪威云杉[*Picea abies* (L.) Karst.] 细根向深土层发展, 深土层细根比例增加<sup>[38]</sup>。由于水分状况的差异细根生长的垂直分布在不同季节也会发生变化, 如在雨水充足的春、夏季, 10 年生火炬松细根在土壤上层生长量大于下层, 但在干旱的夏末, 上层细根生长量小于下层, 主要与上层土壤含水量低有关<sup>[39]</sup>。

同种植物细根在不同的生长发育阶段对土壤水分亏缺的响应也不同。如干旱处理 5 周内, 柑桔苗木和成年树木细根死亡率相同, 但 8 周以后, 成年树木细根死亡率显著提高, 而苗木细根仍维持低死亡率<sup>[27]</sup>。

由于土壤养分有效性因土壤水分状况而异,特别是在旱季,因而无论在雨季细根生产、周转和生物量的变化,还是灌溉引起的变化,土壤水分的影响很难与养分的交互作用分开。根茎比的降低可能与灌溉增加土壤养分有效性有关,同时灌溉也使集中于表层的养分向下移动,使灌溉或灌溉加施肥处理细根垂直分布更均匀<sup>[33]</sup>。土壤水分也可通过影响控制物流的因素来影响植物营养状况。物流只有在土壤足够湿润以使植物能够吸收水分的条件下才能进行。植物通常通过物流来获取其需要的大部分Ca、Mg、S营养<sup>[40]</sup>。扩散提供了大部分植物所需的P和K,而在充满水分的孔隙中的扩散速率要快得多。植物通过扩散和物流两种形式吸收N<sup>[41]</sup>。此外土壤水分还通过影响通气、机械阻力和温度等因素间接地影响根系功能和生长,一定程度的土壤水分胁迫并不意味着同样程度的植物水分胁迫。土壤水分、排水状况、通气性、土壤肥力、温度和机械阻力之间的相互影响是根系生长的主要决定因素<sup>[41]</sup>。

### 3 土壤pH值

许多元素在土壤中的形态和溶解性取决于pH值,从而影响植物的营养关系。当pH值降低到3.8~4.2以下时,大量固定的铝被溶解释放以游离Al<sup>3+</sup>形态存在于土壤中,从而危害树木根系生长<sup>[42]</sup>。高浓度的Al一方面可导致细根死亡和生物量降低<sup>[43]</sup>,另一方面可限制根系对Ca、Mg和其它养分元素的吸收<sup>[44]</sup>,导致植物养分失衡。酸化土壤的典型特征是极低的(Ca+Mg+K)/Al比率,通常挪威云杉的临界(Ca+Mg+K)/Al为1<sup>[45]</sup>;当土壤pH值下降至3.0~3.8时,常导致极低的Ca/H比,挪威云杉的临界Ca/H也为1<sup>[46]</sup>。在许多地区酸雨是导致土壤pH下降的主要原因。酸雨危害引起的细根死亡被认为是导致北美和欧洲的挪威云杉林和其它树种林分退化的原因<sup>[47,48]</sup>。研究表明,衰退的糖槭(*Acer saccharum* Marsh.)林分细根生物量显著高于健康林分,活细根K、Ca浓度明显低于健康林分,说明衰退林分分配较多的光合产物用于细根生产,细根具有较高的生产量和周转率,林分生长受K和Ca的影响<sup>[49]</sup>。

pH影响营养关系的另一方面是固氮和菌根。最适宜于固氮的土壤酸度是pH值5.5~6.0左右;菌根的形成也要求较窄的土壤条件包括pH值,根际碱性条件会限制一些菌根真菌的生长<sup>[41]</sup>。

### 4 土壤温度

一般而言,细根生长随土壤温度的增加而增加,到达最大值后则随温度的继续升高而下降<sup>[50]</sup>。根系生长的温度范围一般在5~40<sup>[51]</sup>。不同植物根系生长的最适温度不同<sup>[50]</sup>。研究表明,提高土壤温度不但可增加总的细根量,而且使细根趋向于深土层分布<sup>[52]</sup>。对土壤温度较低的北方森林,细根生长与土壤温度呈指数正相关<sup>[53]</sup>,较高的土壤温度不但增加细根生产,促进细根周转,缩短细根寿命,而且细根生长的物候期与土壤温度有关<sup>[54]</sup>。用月最高气温可解释针叶林细根生物量变化的65%,年均温与降水的比率可反映阔叶林细根周转率变化的79%<sup>[3]</sup>。土壤温度从地表向下迅速下降被认为是细根集中于表层的重要原因之一<sup>[53,54]</sup>,同时表层较高的温度也促进了分解,增加了土壤养分,从而有利于细根生长。对许多北方森林土壤,低温是根系分布深度和生长的主要限制因素,低土壤温度不仅降低根量和生长速率,而且使细根分枝速率下降,根系趋向于水平伸展<sup>[4,41]</sup>。高温同样限制细根生长,如在德克萨斯东部无遮荫的、裸露的火炬松林地土壤表层5cm无根系存在,主要归于高土壤温度的影响,而在遮荫的裸

露林地土壤表层 2.5 cm 内有许多根系存在<sup>[41]</sup>。

## 5 CO<sub>2</sub> 浓度

由于根系和土壤生物的呼吸, 土壤空气和大气的最大差别是 CO<sub>2</sub> 浓度。通气良好的表土层中 CO<sub>2</sub> 浓度通常为 0.2% ~ 1.0%, 但也常达到正常大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的数十倍到上百倍<sup>[41]</sup>。土壤中 CO<sub>2</sub> 浓度通常不会明显影响根系生长, 因为 CO<sub>2</sub> 具有较高的水溶性。在饱和土壤中, CO<sub>2</sub> 浓度的增加仅使 O<sub>2</sub> 浓度降低 5%。在气态中, CO<sub>2</sub> 浓度的增加量约等于 O<sub>2</sub> 的降低量, 但由于在气态条件下浓度变化极小, 高浓度 CO<sub>2</sub> 是不会发生的。

大多数对木本植物的研究表明, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加, 细根根量增加<sup>[55-60]</sup>, 生产增加<sup>[19, 57, 60, 61]</sup>, 周转加快<sup>[19, 61, 62]</sup>。同时大气 CO<sub>2</sub> 增长对根系生产和周转的影响与其它环境因子有关。如在低 N 条件下, 大气 CO<sub>2</sub> 增加可提高杨树 [*Populus × euram ericana* (Dode) Guineir] 细根死亡率, 但在高 N 条件下则没有效应<sup>[19]</sup>。在一些生态系统中, CO<sub>2</sub> 促进细根生长和周转的效应可能会被其它因子掩盖, 因为 CO<sub>2</sub> 增加引起的气候变化同时带来温度和有效 N 变化, 从而影响细根生产和周转<sup>[63]</sup>。大气 CO<sub>2</sub> 浓度提高, 细根和菌根生物量、生产量和周转增加, 说明更多的光合产物分配到地下用于细根和菌根的生产, 以满足地上部分生长增加对水分和养分的需求。但这些结果多来自盆栽苗木, 且试验期短, 是否适于野外田间植物, 值得进一步研究。例如 Fitter 等<sup>[63]</sup>研究说明, 大气 CO<sub>2</sub> 增加, 生产和周转均增加, 但在适应阶段, 生产大于周转, 因而有净生物量积累, 当经过一定时期适应后, 生产和周转取得新的平衡, 根生物量不再增加, 说明在进行 CO<sub>2</sub> 对根系影响的研究时, 进行长期研究的必要性。

## 6 土壤容重、质地、孔隙度等土壤物理性质

土壤质地、容重和孔隙度等物理性质一方面决定了根系延伸和分枝的机械阻力, 另一方面通过影响土壤温度、湿度和通气状况来影响根系生长。土壤质地和结构是决定土壤容重的关键因素, 而容重则是考察土壤性质与根系生长关系的最重要土壤因子之一。Sutton<sup>[41]</sup>对土壤物理性质与细根生长的关系进行了综合评述。

在相似的土壤条件下, 容重越大, 土壤孔隙度越低, 通气状况越差, 渗透速率越慢, 对根系穿透的机械阻力越大, 根系穿透土壤的难易与容重呈负相关<sup>[41]</sup>。如当土壤容重从  $0.7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-2}$  增加至  $1.0 \text{ t} \cdot \text{m}^{-2}$  时桉树 (*Eucalyptus* sp.) 幼苗主根和侧根长度以及侧根数量分别下降 71%、31% 和 63%, 总根长降低 53% ~ 54%<sup>[64]</sup>。

土壤质地主要是通过改变其它土壤性质特别是土壤结构、应力 (soil strength) 和肥力等因素来对根系生长产生影响<sup>[41]</sup>。粗质地土壤中桉树 (*E. globulus* Labill) 人工林细根生物量明显高于细质地土壤<sup>[65]</sup>。

土壤孔隙很大程度上决定了根系可穿透的空间。土壤孔隙度从 30% 降低到 0 时, 根系穿透能力直线下降<sup>[66]</sup>, 在紧实的土壤中, 10% 的土壤孔隙也会限制根的伸长<sup>[4]</sup>。孔隙度通过两种物理途径影响根系生长, 若根系的直径小于孔隙直径, 根系就不可能延伸进入较坚固的孔隙; 一旦根系穿过孔隙, 根系直径可增长直到受到物理限制为止。若不存在上述限制, 根系可沿孔隙不断生长。除砂土外, 大多数土壤的孔隙主要由于直径小于 0.001 mm 的孔隙组成, 在壤土和粘质土壤中, 很少孔隙直径超过 0.05 mm, 针叶树的根系一般很难穿过团聚体, 根系仅限于

在团聚体之间的缝隙中生长<sup>[41]</sup>。

土壤压实(compaction)可改变土壤孔隙的大小和分布,根系穿透阻力、土壤水分含量和水分运动也被改变。土壤压实造成的影响可持续数十年,根系生长对土壤压实的典型反应是降低根长、根质量、根在土壤中的穿透以及根的分佈等<sup>[41]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 张小全,吴可红.森林细根生产和周转研究[J].林业科学,2001,37(3):126~138
- [2] Vogt K A, Vogt D J, Vogt P A, et al. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species [J]. Plant and Soil, 1996, 187: 159~ 219.
- [3] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover and nutrient dynamics of above and below ground detritus of world forests [J]. Adv Ecol Res, 1986, 15: 303~ 377.
- [4] Box J E. Modern methods for root investigations [A]. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U, eds. Plant Roots: The Hidden Half (second edition, revised and expanded) [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1996. 193~ 237.
- [5] Vogt K A, Publicover D A, Bloomfield J, et al. Belowground responses as indicators of environmental change [J]. Environ Exp Bot, 1993, 33: 189~ 205.
- [6] Bloomfield J, Vogt K A, Wargo P M. Tree root turnover and senescence [A]. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U, eds. Plant Roots: The Hidden Half (second edition, revised and expanded) [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1996. 363~ 381.
- [7] 廖利平,陈楚莹,张家武,等.杉木、火力楠纯林及混交林细根周转的研究[J].应用生态学报,1995,6(1):7~10
- [8] 单建平,陶大立,王淼,等.长白山阔叶红松林细根动态[J].应用生态学报,1993,4(3):241~245
- [9] 温志达,魏平,孔国辉,等.鼎湖山亚热带森林细根生产力与周转[J].植物生态学报,1999,23(4):361~369
- [10] 李凌浩,林鹏,邢雪荣.武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究[J].应用生态学报,1998,9(4):337~340
- [11] 张小全,吴可红, Murach D. 树木细根生产与周转研究方法评述[J].生态学报,2000,20(5):875~883
- [12] Nadelhoffer K J, Aber J D, Mellilo J M. Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis [J]. Ecology, 1985, 66: 1377~ 1390.
- [13] Alexander I J, Fairley R I. Effects of N fertilization on populations of fine roots and mycorrhizae in spruce humus [J]. Plant and Soil, 1983, 71: 49~ 53.
- [14] Gower S T, Vogt K A, Grier C C. Carbon dynamics of Rocky Mountain Douglas-fir: influence of water and nutrient availability [J]. Ecol Monogr, 1992, 62: 43~ 65.
- [15] Haynes B E, Gower S T. Below ground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin [J]. Tree Physiol, 1995, 15: 317~ 325.
- [16] Pregitzer K S, Hendrick R L, Fogel R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen [J]. New Phytol, 1993, 125: 575~ 580.
- [17] Aber J D, Mellilo J M, Nadelhoffer K J. Fine root turnover in forest ecosystems in relation to quantity and form of nitrogen availability: a comparison of two methods [J]. Oecologia, 1985, 66: 317~ 321.
- [18] Majdi H, Nylund J-E. Does liquid fertilization affect fine root dynamics and lifespan of mycorrhizal short roots [J]. Plant and Soil, 1996, 185: 305~ 309.
- [19] Pregitzer K S, Zak D R, Curtis P S. Atmospheric CO<sub>2</sub>, Soil nitrogen and turnover of fine roots [J]. New Phytol, 1995, 129: 579~ 585.
- [20] Hendrick R L, Pregitzer K S. Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems [J]. Plant and Soil, 1996, 185: 293~ 304.
- [21] Klinge H. Root mass estimation in low land tropical rainforest of Central Amazonia, I. Fine root masses of a pale yellow latosol and a giant humus podzol [J]. Trop Ecol, 1973, 14: 29~ 38.
- [22] Huttell C. Root distribution and biomass in three Ivory Coast rain forest plots [A]. In: Golley F B, Medina E, eds

- Tropical Ecological System, Ecological Studies II [M]: New York: Springer-Verlag, 1975, 23~ 130
- [23] Berish C W. Root biomass and surface area in three successional tropical forests [J]. Can J For Res, 1982, 12: 699 ~ 704
- [24] Grier C C, Vogt K A, Keyes M R. Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *A. bis amabilis* zone ecosystems of the Washington Cascades [J]. Can J For Res, 1981, 11: 155~ 167.
- [25] Vogt K A, Vogt D, Edmonds R L. Effect of stand development and site quality on the amount of fine root growth occurring in the forest floors of Douglas fir stand [A]. In: Root Ecology and its Practical Application [C]. Int Symp Gumpenstein, 1982, Bundesanstalt Gumpenstein, A-8952 Irnding, 1983. 585~ 594
- [26] Persson H. The distribution and production of fine roots in boreal forests [J]. Plant and Soil, 1983, 71: 87~ 101.
- [27] Espeleta J F, Eissenstat D M. Responses of citrus fine roots to localized soil drying: a comparison of seedlings with adult fruiting trees [J]. Tree Physiology, 1998, 18: 113~ 119.
- [28] Hallgren S W, Tauer G G, Lock J E. Fine root carbohydrate dynamics of loblolly pine seedlings grown under contrasting levels of soil moisture [J]. For Sci, 1991, 37: 766~ 780
- [29] Teskey R O, Hinkley T M. Influence of temperature and water potential on root growth of white oak [J]. Physiol Plant, 1981, 52: 363~ 369.
- [30] Huang B, Nobel P S. Hydraulic conductivity and anatomy for lateral roots of *Agave deserti* during root growth and drought induced abscission [J]. J Exp Bot, 1992, 43: 1441~ 1449.
- [31] Hayes D C, Seastedt T R. Root dynamics of tallgrass prairie in wet and dry years [J]. Can J Bot, 1987, 65: 787~ 791.
- [32] Kaetterer T, Fabiao A, Madeira M, et al. Fine-root dynamics, soil moisture and soil carbon content in *Eucalyptus globulus* plantation under different irrigation and fertilization regimes [J]. For Ecol Manage, 1995, 74: 1~ 12.
- [33] Fabiao A, Madeira M, Steen E, et al. Development of root biomass in an *Eucalyptus globulus* plantation under different water and nutrient regimes [J]. Plant and Soil, 1995, 168/169: 215~ 223.
- [34] Axelsson E, Axelsson B. Changes in carbon allocation patterns in spruce and pine trees following irrigation and fertilization [J]. Tree Physiology, 1986, 2: 189~ 204.
- [35] Kavenagh T, Kelman M. Seasonal pattern of fine root proliferation in a tropical dry forest [J]. Biotropica, 1992, 24: 157~ 165.
- [36] Khiewtam R S, Ramakrishnan P S. Litter and fine root dynamics of a relict sacred grove forest at Cherrapunji in north-eastern India [J]. Forest Ecol Manage, 1993, 60: 327~ 344.
- [37] Fischer S, Brienza S, Vielhauer K, et al. Root distribution in enriched fallow vegetations in NE Amazonia, Brazil [A]. Proceedings of the Third SHIFT-Workshop Manaus [C]. March 15~ 9, 1998, Hans-Hermann Wulff GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 1998. 181~ 184.
- [38] Persson H, Fircks Y V, Majidi H, et al. Root distribution in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand subjected to drought and ammonium-sulphate application [J]. Plant and Soil, 1995, 168/169: 161~ 165.
- [39] Sword M A, Gravatt D A, Faulkner P L, et al. Seasonal branch and fine root growth of juvenile loblolly pine five growing seasons after fertilization [J]. Tree Physiology, 1996, 16: 899~ 904.
- [40] Binkley D. Forest nutrition management [M]. New York: Wiley, 1986.
- [41] Sutton R. F. Soil properties and root development in forest trees: a review [M]. Information Report O-X-413, Ministry of Natural Resources, Ontario, Canada, 1991.
- [42] Nowotny I, Daehne J, Klingelhofer D, et al. Effect of artificial soil acidification and liming on growth and nutrient status of mycorrhizal roots of Norway spruce (*Picea abies* Karst.) [J]. Plant and Soil, 1998, 199: 29~ 40.
- [43] Raynal D J, Joslin J D, Thornton F C, et al. Sensitivity of tree seedlings to aluminum: III. Red spruce and loblolly pine [J]. J Environ Qual, 1990, 19: 180~ 187.
- [44] Shortle W C, Smith K T. Aluminum-induced calcium deficiency syndrome in declining red spruce [J]. Science, 1988, 240: 1017~ 1018.

- [45] Sverdrup H, Warfvinge P. The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the  $(Ca + Mg + K)/Al$  ratio [M]. Reports in ecology and environmental engineering, Report 2: 1993, KF-Sigma, Lund, Sweden, 1993.
- [46] Boudot J P, Becquer T, Merlet D, et al. Aluminium toxicity in declining forests: a general overview with a seasonal assessment in a silver fir forest in the Vosges mountains (France) [J]. Ann Sci For, 1994, 51: 27~ 51.
- [47] Hornbeck J W, Smith R B, Federer C A. Growth decline in red spruce and balsam fir relative to natural processes [J]. Water Air Soil Pollution, 1987, 31: 425~ 430.
- [48] Shriner D S, Heck W W, McLaughlin S B, et al. Response of Vegetation to Atmospheric Deposition and Air Pollution [M]. State of Science/Technology Report 18 National Acid Precipitation Assessment Program. ORNL/ESD Pub 3452 Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 1990.
- [49] Liu X, Tyree M T. Root carbohydrate reserves, mineral nutrient concentrations and biomass in a healthy and a declining sugar maple (*Acer saccharum*) stand [J]. Tree Physiology, 1997, 17: 179~ 185.
- [50] Michael B L, Burke J J. Temperature effect on root growth [A]. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U, eds Plant Roots: The Hidden Half (second edition, revised and expanded) [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1996. 383~ 396.
- [51] Bowen G D. Soil temperature, root growth, and plant function [A]. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U, eds Plant Roots: The Hidden Half [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1991. 309~ 330.
- [52] Ruijter F J, Veen B W, Van Oijen M. A comparison of soil core sampling and minirhizotrons to quantify root development of field-grown potatoes [J]. Plant and Soil, 1996, 182: 301~ 312.
- [53] Tryon P R, Chapin F S. Temperature control over root growth and root biomass in taiga forest trees [J]. Can J For Res, 1983, 13: 827~ 833.
- [54] 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: 577~ 587.
- [55] Johnson D, Geisinger D, Walker R, et al. Soil CO<sub>2</sub>, soil respiration, and root activity in CO<sub>2</sub>-fumigated and nitrogen-fertilized ponderosa pine [J]. Plant and Soil, 1994, 165: 129~ 138.
- [56] Norby R J. Issues and perspectives for investigating root responses to elevated atmospheric carbon dioxide [J]. Plant and Soil, 1994, 165: 9~ 20.
- [57] Curtis P S, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Above- and below ground response of *Populus grandidentata* to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and soil N availability [J]. Plant and Soil, 1994, 165: 45~ 51.
- [58] Idso S B, Kimball B A. Seasonal fine-root biomass development of sour orange trees grown in atmospheres of ambient and elevated CO<sub>2</sub> concentration [J]. Plant Cell Environ, 1992, 15: 337~ 341.
- [59] Koerner C, Arnone J A. Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems [J]. Science, 1992, 257: 1672~ 1675.
- [60] Zak D R, Pregitzer K S, Curtis P S, et al. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and feedback between carbon and nitrogen cycles in forested ecosystems [J]. Plant and Soil, 1993, 151: 105~ 117.
- [61] Bernston G M, Bazzaz F A. Elevated CO<sub>2</sub> and the magnitude and seasonal dynamics of root production and loss in *Betula papyrifera* [J]. Plant and Soil, 1997, 190: 211~ 216.
- [62] Canadell J G, Pitelka L F, Ingram J S I. The effects of elevated CO<sub>2</sub> on plant-soil carbon below-ground: a summary and synthesis [J]. Plant and Soil, 1996, 187: 391~ 400.
- [63] Fitter A H, Self G K, Wolfenden J, et al. Root production and mortality under elevated atmospheric carbon dioxide [J]. Plant and Soil, 1996, 187: 299~ 306.
- [64] Misra R K, Gibbons A K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction [J]. Plant and Soil, 1996, 182: 1~ 11.
- [65] Fabiao A, Madeira M, Steen E. Root mass in plantations of *Eucalyptus globulus* in Portugal in relation to soil characteristics [J]. Arid Soil Res Rehabilitation, 1987, 1: 185~ 194.

- [66] A sady G H, Smucker A J M, A dan s M W. Seedling test for the quantitative measurement of root tolerances to compacted soil [J]. *Crop Sci*, 1985, 25: 802~ 806

## Fine-root Biomass, Production and Turnover of Trees in Relations to Environmental Conditions

ZHAN G X iao-quan

(Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China)

**Abstract:** It is widely confirmed that fine-roots play significant roles in carbon budget and nutrient cycling of forest ecosystems. Trees are dependent on fine-roots for uptakes of nutrients and water, while fine-roots are sensitive to environmental stress. Therefore fine-root dynamics is one of important indicators for changing environment and tree health. Based on a huge literature, fine-root distribution, biomass, production and turnover of trees in relations to such environmental factors as soil nutrient, moisture, pH, temperature and atmospheric CO<sub>2</sub>, etc., were discussed in the paper, aiming to provide Chinese colleagues with references for fine-root ecological studies in China.

**Key words:** fine-root; biomass; production; turnover; environment factors

---

### 欢迎订阅 2002 年《林产化工通讯》

《林产化工通讯》(双月刊)是国家科委批准面向国内外公开发行的全国林产化工行业唯一的技术类刊物。于 1996 年 7 月入编《中国学术期刊(光盘版)》,荣获《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊网》全文收录证书[编号(Q)S207]、《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊证书[编号(Z)J207]。本刊一直坚持为经济建设服务、为基层服务的办刊宗旨。辟有研究报道、企业纵横、技改园地、开发探索、技术讲座、国外信息和国内简讯等固定栏目,以及专利快递、市场行情、开发指南等小栏目。适于松香、松节油、制浆造纸、木材热解、活性炭、木材水解、栲胶、紫胶、森林资源、香精香料、日用化工、环保、医药、土产、商业、外贸、商检等部门或从事科研、生产、教学和管理等相关人士阅读。

订阅办法: 邮局发行, 邮发代号 28-205, 单月 25 日出版, 每册定价 4.50 元, 全年 27.00 元。亦可直接向本刊编辑部订阅。地址: 210042 南京市锁金五村 16 号中国林科院林产化工研究所内, 电话: (025) 5412131—2205; 传真: (025) 5413445。