

不同连栽代数杉木人工林细根生长、分布与营养物质分泌特征

廖利平, 邓仕坚, 于小军, 韩士杰

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

摘要: 用土钻法研究了不同连栽代数杉木细根生长与分布, 结果表明, 杉木连栽 1 代后, 细根生物量明显减少, 第 1 代杉木活细根生物量的范围为 $646.4 \sim 799.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 而第 2 代则为 $284.4 \sim 536.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. 在一定距离范围内, 离树体的距离越远, 细根分布越少. 杉木连栽后, 主要减少了表层土壤 ($0 \sim 10 \text{ cm}$) 细根的生长. 根系分泌物的分析表明, 杉木连栽 1 代后, 根系阳离子 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的分泌量没有变化, 而阴离子 NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HPO_4^{2-} 的量都减少, 但只有 Cl^- 和 HPO_4^{2-} 差异显著 ($P < 0.05$). 第 2 代杉木根系分泌物中的 HPO_4^{2-} 量仅为第 1 代的 $1/65$. 根-土界面磷交换过程的阐明有利于说明第 2 代杉木根系 HPO_4^{2-} 分泌量减少的原因. 杉木连栽后, 表层土壤细根生长的减少和根系分泌行为的改变可能是生产力下降的重要原因.

关键词: 杉木人工林; 连栽; 细根; 分泌; 根-土界面

Growth, distribution and exudation of fine roots of Chinese fir trees grown in continuously cropped plantations

LIAO Li-Ping, Deng Shi-Jian, YU Xiao-Jun, HAN Shi-Jie (Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015, China)

Abstract: Fine root growth and distribution were investigated by the soil coring method respectively in Chinese fir plantations of first and second rotations. Biomass of live fine roots decreased markedly after Chinese fir plantation continuously cropping for one rotation, with biomass of live fine root of first rotation ranging from 646.4 to 799.7 g/m^2 , and second rotation falling into $284.4 \sim 536.9 \text{ g/m}^2$. The farther the sampling point from the tree *per se*, the less the biomass of live fine root to certain extent. Analysis of the root exudates showed that contents of cations NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} did not change after replanted with Chinese fir for one rotation, but contents of the anions NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HPO_4^{2-} decreased, and significant differences for Cl^- 、 HPO_4^{2-} were detected ($P < 0.05$). The contents of Cl^- 、 HPO_4^{2-} for the second rotation were only $1/4.7$ and $1/65$, respectively, of those in the first rotation. The decrease in growth of fine roots in $0 \sim 10 \text{ cm}$ soil and change of root exudations could suggest the decline in productivity of the continuously cropped Chinese fir plantations.

Key words: Chinese fir plantation; continuous cropping; fine-root; exudation, root-soil interface

文章编号: 1000-0933(2001)04-0569-05 中图分类号: S718.55 文献标识码: A

杉木人工林在我国中亚热带主要省份的林业经济中占有相当重要的地位, 而杉木人工林地力衰退在一定程度上已成为制约这些地区林业生产发展的重要因素. 杉木人工林地力衰退已成为学术界和林业生产部门共同关注的生态学问题. 在 80 年代末前后大多数研究仅对杉木人工林地力衰退这一现象进行了报

基金项目: 中国科学院重点项目 (KZ952-J1-202)、中国科学院“陆地生态系统痕量物质生态过程”开放实验室和中国科学院百人计划“森林界面生态学”资助项目

收稿日期: 2000-01-18, 修订日期: 2000-11-29

作者简介: 廖利平 (1965~), 男, 江西新余人, 博士, 研究员. 主要从事人工林生态研究.

道。进入 90 年代后,开始对地力衰退的机理进行探讨,并同时探索防止地力衰退的对策。

杉木人工林地力衰退、生产力下降的原因已从多方面进行过探讨。纯林连栽引起土壤养分偏耗,可能是主要原因^[1,2];不合理的经营制度,如不合理的采伐方式、炼山、全垦整地等,会破坏林地土壤物理结构,使土壤容重增大,养分流失,土壤有机质下降^[1,3~6];由于土壤理化环境的改变,微生物种群发生变化,扰乱了次生产物代谢与产生的平衡关系,导致土壤中毒物质积累^[7],也是不可忽视的原因。事实上,上述几类原因都是影响杉木根系生长,尤其是细根生长的重要因素^[8],或者说,细根的生长与分布可以从一定程度上反映林地土壤理化性质的状况^[9,10]。同时,根系生长环境的改变,也会影响根系次生代谢产物的种类和数量,但目前还未见有关杉木人工林连栽后细根生长、分布及分泌物产生变化的研究报道。本文将对第 1、第 2 代杉木人工林细根生长及分泌行为进行比较分析,旨在更全面地了解杉木人工林地力衰退的原因,为制定杉木人工林的可持续经营措施提供一定的理论依据。

1 研究地点与方法

1.1 自然概况

本项研究在中国科学院会同森林生态实验站(110°08'E, 27°09'N)进行。该地海拔 200~500m,为低山丘陵地貌类型,气候属亚热带湿润气候,年均温度 16.5℃,年均降雨量约 1200mm,年平均相对湿度 80%。土壤为山地红壤。受人为干扰和破坏,原始常绿阔叶林植被早已为次生林和人工林所取代,目前主要是马尾松林和杉木林。

本研究选择第 1 代、第 2 代杉木林各 1 个为研究对象。第 1 代杉木人工林为 1984 年砍伐掉以马尾松为主的杂灌林后,炼山、全垦整地,用杉木实生苗造林而形成的,株行距为 1.67m×2m;第 2 代杉木人工林,除前茬为杉木林外,林分的其它情况都和第 1 代基本一致。两个林分只相隔 20m。

1.2 研究方法

1.2.1 细根生物量调查 于 1998 年 8 月在第 1、第 2 代杉木人工林中各建立一块面积为 100m² 的临时样地,先在样地内进行每木检尺,以获得平均胸径和树高。以平均胸径为依据,在 2 块样地内各选择胸径与其平均胸径相差 10% 以内的单木 5 株作为细根调查的样木。以每株样木为中心,在东西南北 4 个方向上,距离 40、55、70cm 的样点处,用直径为 4cm 的土钻,按 0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~45cm 4 层钻取土柱,将土柱带回实验室,用自来水清洗,挑出直径≤2mm 的根系,即为细根,并根据硬度、颜色等性状区别活根和死根,在 70℃ 下烘干,称重。整个取样过程在 7d 内完成。

1.2.2 根系分泌物的收集 在进行细根调查结束后,仍以上述两个样地中的各 5 株样木为对象,挖出已木质化的侧根各 2 条,注意不对根系造成任何损伤,否则弃掉重挖。侧根不离开树体,剪掉上面所有的须根,然后将侧根插入已装好均匀土壤的尼龙网袋中,埋入土内;经过 6 周后,轻轻刨出侧根,注意不要伤害已长出的新根(属于细根),先用自来水清洗干净,之后用蒸馏水冲洗 3~5 遍,将新根套入盛有 100ml 蒸馏水的三角瓶内,瓶口用塑料袋封严,防止雨水和泥土及其它杂物进入,10d 后取回三角瓶,量取溶液体积,此即为分泌物溶液的体积,分析其中无机成分 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HPO_4^{2-} 的含量。剪下套入三角瓶中的新根,烘干,称重,用于浓度的计算。在整个过程中,注意尽量避免对三角瓶中溶液的污染,以减少微生物的侵染。

1.2.3 统计分析 全部数据用 SAS 统计软件进行方差分析和平均值的差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 生物量的比较

据报道,杉木人工林连栽后,土壤结构变坏,土壤容重增大,土壤 pH 值下降,土壤养分降低^[1~3, 5, 6]。这些理化环境因素发生改变后,是否影响杉木细根的生长,从图 1 可看出,当离树干的距离从 40cm 增加到 55cm 时,无论是第 1 代还是第 2 代杉木的活细根生物量都明显减少,这主要与杉木根系水平分布范围有关;而当距离增加到 70cm 时,活细根生物量又趋于增大,究其原因可能是因为此时可能有来自相邻树木的根系。死细根生物量也表现出十分相似的趋势(图 1B)。

如果在两代林分之间进行比较,第 1 代杉木无论是活细根还是死细根,其生物量都明显多于第 2 代

($P<0.05$)。第1代杉木活细根生物量的多少范围为 $646.4\sim799.7\text{ g/m}^2$,死细根为 $330.6\sim482.9\text{ g/m}^2$ (图 1A),而第2代杉木活细根生物量的范围为 $284.4\sim536.9\text{ g/m}^2$,死细根生物量范围为 $111.9\sim151.4\text{ g/m}^2$ (图 1B)。由此看来,杉木连栽后细根生物量明显减少。

2.2 细根垂直分布

图 2、3 反映的是各土壤层次活细根、死细根生物量整个土柱根量的百分比。从图 2 可看出,第1代杉木表层($0\sim10\text{cm}$)的活细根生物量所占比例大于第2代杉木,在3个样点中,最低的1个样点也约有40%,而第2代杉木最低的样点仅为23%,只有离树干70cm的样点表层细根占的比例达到40%;而较深的土壤层次两个林分之间的差异并不明显,反而有时出现第2代林分高于第1代的情况(图2)。死细根也表现出和活细根相似的趋势(图3)。因此杉木连栽后主要是表层的细根生长受到影响。

为了进一步说明杉木连栽主要影响表层细根生长这一现象,详细地比较分析了各层次的细根量在两个林分之间的差异,分析结果如表1所示。从表1可知,第1代杉木林表层($0\sim10\text{ cm}$)土壤中活细根的生物量明显高于第2代杉木人工林($p<0.05$),在离树干40cm、55cm、70cm 3个样点上都表现出相同的趋势(表1);而在同一层次中的死细根生物量,除离树干70cm的位置上没有差异外,其余样点都是第1代明显高于第2代($P>0.05$)。第2层($10\sim20\text{cm}$)中活细根除离树干40cm的样点没有差异外,其余样点都是第1代明显高于第2代,而死细根只有离40cm的样点第1代明显高于第2代,其余样点没有差异(表1);至于第3($20\sim30\text{cm}$)、4($30\sim45\text{cm}$)层,只有离树干70cm的样点第1代杉木林活细根明显高于第2代之外,其它样点活细根和死细根生物量在不同代数的杉木林间没有差异($P<0.05$)。因此可以说明,杉木人工林连栽后主要减少表层细根的生长。这可能是导致杉木连栽后生物生产力下降的重要原因之一,因为一般来说表层土壤养分较为丰富,理化性状较好,应是树木优先利用的生态位。

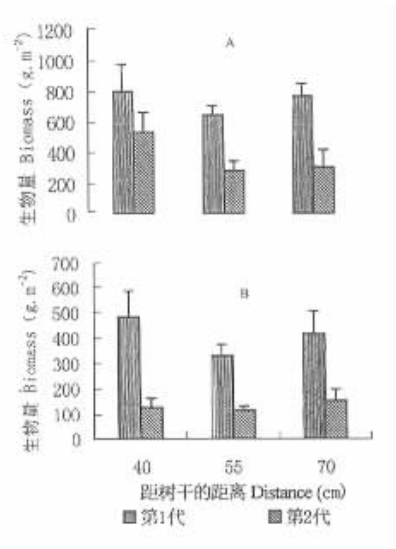


图1 第1、第2代杉木活细根和死细根生物量的比较
Fig. 1 Comparison of live and dead fine-root biomass of the first and second rotation of Chinese fir

除离树干40cm的样点没有差异外,其余样点都是第1代明显高于第2代,而死细根只有离40cm的样点第1代明显高于第2代,其余样点没有差异(表1);至于第3($20\sim30\text{cm}$)、4($30\sim45\text{cm}$)层,只有离树干70cm的样点第1代杉木林活细根明显高于第2代之外,其它样点活细根和死细根生物量在不同代数的杉木林间没有差异($P<0.05$)。因此可以说明,杉木人工林连栽后主要减少表层细根的生长。这可能是导致杉木连栽后生物生产力下降的重要原因之一,因为一般来说表层土壤养分较为丰富,理化性状较好,应是树木优先利用的生态位。

表1 不同土壤层次杉木活、死细根生物量在不同代数间的差异

Table 1 Comparison of biomass of live and dead fine-roots at different depths in the first and second rotations of Chinese fir

层次 Depth (cm)	细根类型 Fine-root type	离树干的距离 Distance from the sample tree (cm)		
		40	55	70
0~10	活细根 Live	*	*	*
	死细根 Dead	*	*	ns
10~20	活细根 Live	ns	*	*
	死细根 Dead	*	ns	ns
20~30	活细根 Live	ns	ns	*
	死细根 Dead	ns	ns	*
30~45	活细根 Live	ns	ns	*
	死细根 Dead	ns	ns	ns

*: 差异显著 Significant difference at $P<0.05$; ns: 差异不显著 No significance at $P>0.05$

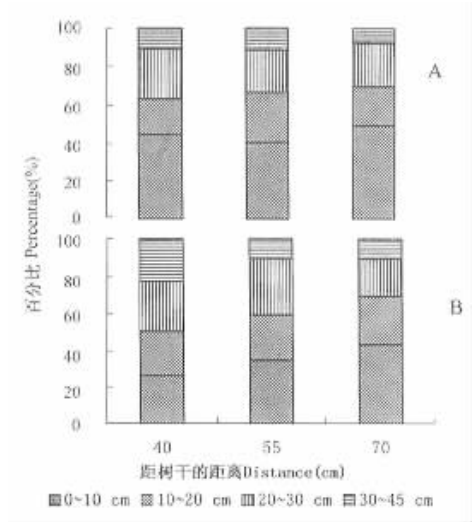


图 2 活细根的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of live fine-roots
A: 第 1 代 First rotation B: 第 2 代 Second rotation
(以下同, The below as the same)

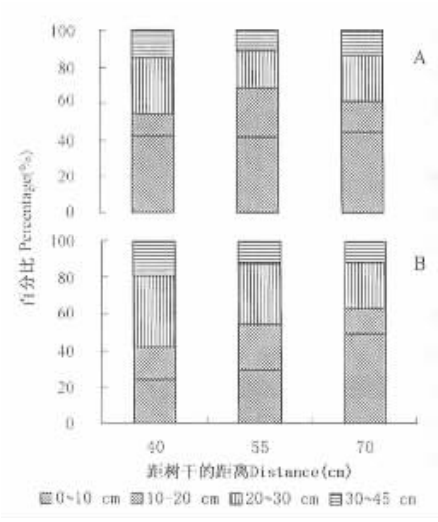


图 3 死细根的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of dead fine roots

2.3 细根分泌

杉木人工林连栽后,土壤容重增大,通气性变差;土壤 pH 下降,有机质含量降低。杉木连栽土壤的这些理化因素的变化势必影响杉木根系的生长环境,因此而改变根系的分泌行为。从表 2 可看出,第 1 代杉木根分泌物中阳离子组份 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的含量和第 2 代杉木没有差别,而阴离子 Cl^- 、 NO_3^- 、 HPO_4^{2-} 、 SO_4^{2-} 的含量都高于第 2 代杉木(表 2),而且 Cl^- 和 HPO_4^{2-} 含量在两代杉木之间差异显著($P < 0.05$),其中尤以 HPO_4^{2-} 含量的实际差异最大,第 1 代杉木根系分泌物的含量为第 2 代的 65 倍。从表 2 还可以看出,无论是第 1 代还是第 2 代杉木都以 SO_4^{2-} 的分泌量最多, Na^+ 的分泌量最少。第 1 代杉木根系分泌量各组份的多少排序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HPO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+$,而第 2 代杉木则为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{HPO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+$ (表 2)。Smith^[11]所研究的 3 个阔叶树种美洲桦(*Betula alleghaniensis*)、美洲山毛榉(*Fagus grandifolia*)和糖槭(*Acer saccharum*)根系分泌物中的 SO_4^{2-} 含量都是最高的,而且远高于其它阴离子。如此看来,根系大量分泌 SO_4^{2-} 似乎是树木的共性。根系分泌行为在不同连栽代数杉木人工林的差异将是导致根际土壤性质变化的重要原因^[12]。

头耕土上杉木根系 HPO_4^{2-} 分泌量的增多,意味着根区微生态系统磷的循环周转加快,有利于改善杉木根际磷的营养,尤其是对于南方红黄壤磷缺乏地区的磷利用率提高意义更为重要。从另一角度也说明,杉木连栽后土壤磷的循环利用降低,不利于杉木的生长,因而可能成为影响第二代杉木林生产力的重要因素。至于第二代杉木根系 Cl^- 离子分泌量的明显减少会产生什么后果,目前还难以确定,因为氯离子的生理功能还不十分清楚。

3 讨论

杉木纯林连栽的弊端是多方面的,不仅生物生产力下降,而且改变了土壤的理化环境及生物特性,因此其生态系统的可持续性差。土壤环境因素的变化会对林木生长产生多方面的影响^[8],但最为直接的是对根系的伤害,尤其是细根最为敏感,因为相对于其它根系部分而言,细根的生理活动最活跃,养分、水分的吸收功能主要由它们来完成^[13]。杉木纯林连栽后使表层细根的减少,会进一步影响树木从土壤中

吸收养分、水分的能力,从而导致林木生长量的降低。表层土壤细根生物量的减少主要是因为人类经营活动如采伐、炼山等首先引起表层土壤理化性能的降低而导致的。因此,改善土壤的理化性状,尤其是表层土壤的结构,将有利于细根发育,增强林木的生理功能。这一结论似乎与 Persson^[14]、Klinge^[15]等的研究结果不一致,他们发现在贫瘠立地上,表层土壤中细根分布增多。主要是因为研究对象不同,他们所研究的对象是天然林,尽管整体立地下降了,但表层土壤理化性质并不象本研究那样已发生明显改变,因而细根仍趋向于表层发展。

表 2 不同连栽代数的杉木根系分泌物中无机养分元素含量的比较 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 2 Contents of inorganic nutrient elements in exudates from Chinese fir trees of different rotation times									
代数 Rotation times	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	$\text{HPO}_4^{=}$	$\text{SO}_4^{=}$
第一代 1 st rotation	nd (0.06) [#]	0.06 (1.13)	1.08 (0.17)	0.26 (0.14)	0.20 (1.63)	2.06* (1.51)	2.62 (91.43)	100.75* (145.15)	166.84
第二代 2 nd rotation	nd (0.03)	0.03 (1.50)	2.25 (0.16)	0.27 (0.19)	0.26 (0.23)	0.44 (1.09)	2.31 (0.71)	1.55 (61.3)	127.60

$P < 0.05$ 差异显著 significantly different; nd: 未检出 not detected # 括号内数字为标准差 ($n=5$) Data in the parenthesis are standard deviations

另一方面,杉木纯林连栽也会影响林木根系的分泌行为,使 HPO_4^{2-} 分泌量明显减少。由于磷在土壤中的相对稳定性,根系 HPO_4^{2-} 分泌量的减少,改变了根系-土壤界面磷元素的微域循环平衡,实际上也减少了磷被根系再吸收利用的机会。弄清磷在根系-土壤界面的生态过程可能说明杉木连栽根系 HPO_4^{2-} 分泌量减少的原因^[16]。磷同位素示踪的运用是研究磷在根-土界面的迁移、交换过程的较好方法。杉木连栽后,根系分泌有机成分的变化及其与根部病害关系的研究,将更有利于阐明杉木纯林连栽障碍的机理。上述几个方面都还有待于今后进一步深入研究。

参考文献

[1] 陈楚莹, 张家武, 周崇莲, 等. 改善杉木人工林的林地质量和提高生产力的研究. 应用生态学报, 1990, 1(2): 97~106.

[2] 方 奇. 杉木连栽对土壤肥力及其林木生长的影响. 林业科学, 1987, 23(4): 389~397.

[3] 邱仁辉, 杨玉盛, 俞新妥. 不同栽植代数杉木林土壤结构特性. 北京林业大学学报, 1998, 20(4): 6~11.

[4] 杨玉盛, 何宗明, 马祥庆. 论炼山对杉木人工林生态系统影响的利弊及对策. 自然资源学报, 1997, 11(2): 153~159.

[5] 杨承栋, 张小金, 焦如珍, 等. 杉木连栽土壤组成、结构、性质变化及其对生长的影响. 林业科学, 1996, 32(2): 175~180.

[6] 俞新妥, 张其水. 杉木连栽林地土壤生化特性及土壤肥力的研究. 福建林学院学报, 1989, 9(3): 263~271.

[7] 冯宗炜, 陈楚莹, 李昌华, 等. 湖南会同杉木人工林生长发育与环境的相互关系. 南京林产工业学院学报, 1982, 3: 19~38.

[8] Persson H. The effect of fertilization and irrigation on the vegetation dynamics of pine-heath ecosystem. *Vegetatio*, 1981, 46(2): 181~192.

[9] Silver W L and Vogt K A. Fine root dynamics following single and multiple disturbances in a subtropical wet forest ecosystem. *J. Ecol.*, 1993, 81: 729~738.

[10] Tinus R W. Root growth potential as an indicator of drought stress history. *Tree Physiology*, 1996, 16: 795~799.

[11] Smith W H. Character and significance of forest tree root exudates. *Ecol.*, 1976, 57(3): 324~331.

[12] 杨承栋, 焦如珍. 杉木人工林根际土壤性质变化的研究. 林业科学, 1999, 35(6): 2~9.

[13] Nihlgard B and Lindgren L. Plant biomass, primary production and bioelements of three mature beech forests in South Sweden. *Oikos*, 1977, 28: 95~104.

[14] Persson H. The distribution and production of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil*, 1983, 71: 87~101.

[15] Klinge H. Root mass estimation in lowland tropical rain forest of central Amazonia. I Fine root masses of a pale yellow latosol and a giant humus podzol. *Trop. Ecol.*, 1973, 14: 29~38.

[16] 韩士杰, 廖利平, 姜凤岐. 关于森林界面生态学的思考. 应用生态学报, 1998, 9(5): 538~542.