

杉木人工林衰退机理探讨*

陈龙池** 汪思龙 陈楚莹

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

【摘要】 杉木是我国特有的速生丰产树种,在商品木材的生产中占有重要的地位,而杉木连栽导致生产力下降和地力衰退一直是阻碍我国林业生产的重要问题,这引起了许多学者和林业工作者的兴趣和注意.本文对杉木人工林连栽后出现的生产力下降的现象进行了描述,并对导致杉木人工林连栽生产力下降的原因进行了总结和概括,对杉木人工林衰退机理做了分析.概括起来,杉木连栽导致生产力下降、地力衰退主要表现在:杉木人工林生产力下降和林地土壤物理和化学性质的恶化.而导致出现此现象的原因不外乎两个方面的原因,一是营林措施不合理,这是外因;其次是杉木自身的生物学特性,这是内因.内外因的结合导致杉木人工林连栽后出现生产力下降和地力衰退的现象.

关键词 杉木 生产力 化感作用 酚类物质 自毒作用

文章编号 1001-9332(2004)10-1953-05 **中图分类号** S791.27 **文献标识码** A

Degradation mechanism of Chinese fir plantation. CHEN Longchi, WANG Silong, CHEN Chuying (Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(10): 1953~1957.

Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) is a fast-growing species native to China, and has a very important status in production of commercial timber. In response to the growing need for timber, pure Chinese fir plantations have been extensively replanted on the same site in successive rotations, which has resulted in serious problems of soil fertility degradation and productivity decline, and these problems have caused considerable attention from foresters, microbiologists, soil scientists and ecologists. They have also done a lot of work on these problems and studied the mechanism of productivity decline of replanted Chinese fir plantation. In this article, the author described the characteristics of productivity decline and soil degradation, and summed up the factors caused lower productivity, and analyzed the degradation mechanism of replanted Chinese fir plantation. In sum, productivity decline and soil physical and chemical characteristics deterioration were the main properties of replanted Chinese fir plantation. The factors summarized primarily as two kinds of reasons. One was the unreasonable management that was the edogenic factor, and another was the biotic self-characteristics of Chinese fir that was the intrinsic factor of poor establishment of replanted Chinese fir plantation. The combination of the edogenic and intrinsic factors reduced the productivity decline and soil degradation of the replanted Chinese fir plantation.

Key words Chinese fir, Productivity, Allelopathy, Phenolics, Autotoxicity.

1 引言

杉木是我国南方主要的速生用材树种,因其材质优良、速生丰产等特点被广泛栽培,甚至在同一林地上连续多代栽培杉木纯林,然而随着杉木连栽代数的增加单位面积木材生产量则不断下降^[3],杉木人工林地力衰退在一定程度上已经成为制约这些地区林业生产发展的重要因素.杉木人工林衰退成为学术界和林业生产部门共同关注的生态学问题.从20世纪60年代开始,人们开始对杉木人工林衰退现象进行了研究和报道,随着科学的进步,杉木人工林衰退机理逐渐得到了深入的研究.

国内对杉木人工林衰退机理的综合报告比较多,但是大都集中在营林措施不合理、土壤养分过度消耗等方面,已经不能涵盖新的杉木人工林衰退机理的科学论点.同时,近几年来,杉木的化感作用研究较为深入,已经被广泛接受并承认杉木的化感作用是杉木人工林衰退的原因之一,但是这一

点在以往的研究综述总并没有很好地体现.为此,本文较为全面地归纳总结杉木人工林衰退机理,为林业生产部门提供参考资料.同时展望了今后杉木人工林衰退机理研究的重点和方向,提出了研究目标,为科技工作者进一步深入地研究杉木人工林衰退机理提供一些资料.

2 杉木人工林衰退状况

2.1 连栽杉木人工林生产力下降

生产力下降是杉木人工林衰退的主要表现形式之一.湖南、江西、福建、贵州、广西等地均有研究报告,连栽可导致杉木生产力下降^[2,3,11,12,14,24,27,30,37,39,46,49].研究发现,不论是树高或胸径生长量都明显地呈现出随连栽次数的增加而

*中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-418)、国家自然科学基金项目(30270268)和中国科学院沈阳应用生态研究所知识创新工程资助项目(C12SISL YQ Y0405506).

**通讯联系人.

2003-12-12收稿,2004-03-25接受.

递减的趋势^[14],15年生二、三耕土杉木林高生长与头耕土相比,分别下降7%与23%左右^[12],20年生三耕土杉木人工林较同年生头耕土杉木人工林的胸径、树高和立木蓄积分别低22%、30%和54%^[2]。杉木连栽不仅能够影响地上部分生物量和生产力,而且能够影响地下部分的生物量,连栽一代后细根生物量明显减少,第一代杉木活细根生物量的范围是646.4~799.7 g·m⁻²,而第二代则为284.4~536.9 g·m⁻²^[24]。

营养元素含量是生物生产力的重要指标之一。许多研究发现,连栽杉木各器官中营养元素含量都明显下降。一代杉木林乔木层营养元素年积累总量分别是二代和三代的1.58倍和2.01倍^[39]。随着连栽代数的增加,杉木林乔木层养分积累呈逐代递减趋势,二、三代杉木林乔木层养分积累分别比一代下降了17.62%和36.28%,三代比二代下降了22.65%^[27]。研究表明,连栽不但降低了杉木地上部分和地下部分的生物量,而且也减少了杉木各器官中营养元素的含量,从而影响了杉木人工林的经济效益。

2.2 连栽杉木人工林土壤理化状况的恶化

2.2.1 土壤物理性质的变化 杉木连栽不但能够降低杉木人工林的生产力,而且能够影响林地环境质量,造成林地土壤物理性质的恶化和衰退^[28,32,41,42]。杉木连栽能够影响杉木人工林地土壤的物理性质,如土壤团聚度、土壤容重、总空隙度、毛管空隙度、非毛管空隙度、最大持水量和最小持水量等。二代杉木林土壤团聚度和结构保持率比一代的分别下降了6.24%和6.06%,与一代杉木林相比,二代和三代杉木林表层土壤>25 mm水稳性团聚体含量分别下降了61.1和79.6 g·kg⁻¹^[32]。随着栽植代数的增加,土壤容重趋于增加,表土层土壤的总空隙度、毛管空隙度和非毛管空隙度都趋于下降,在16地位指数的中龄林下,二代林各层次(0~20、20~40、40~60 cm)土壤容重分别较一代林增加了0.40、0.25和0.06 g·cm⁻³;其中,二代林的0~20 cm土壤的最大持水量、毛管持水量和最小持水量分别比一代林降低了24.77%、23.33%和26.68%^[42]。同时,随杉木连栽代数增加,表层(0~20 cm)土壤粘粒(<0.001 mm)含量及团聚度呈减少趋势,而>0.01 mm物理性砂粒和结构体破坏率则有明显增加趋势,土壤变得较为紧实,通气和容蓄能力下降^[41]。土壤物理性质的恶化必然影响到杉木根系的生长和伸展、根系的呼吸和吸水能力,从而抑制了杉木的生长,降低了杉木的生产力。

2.2.2 土壤化学性质的变化 杉木连栽可导致林地土壤化学性质的恶化,这也是杉木人工林衰退的主要表现形式之一。许多研究都发现随着连栽代数的增加,土壤养分含量呈逐代下降趋势^[2,12,14,15,28,41]。不同连栽代数的杉木人工林土壤化学性质比较,以头耕土肥力最高,二耕土次之,三耕土肥力最低,二耕土和三耕土腐殖质含量分别为头耕土的83.8%和66.3%,二耕土中N、P、K全量比头耕土分别降低23.8%、33.3%和8.0%,三耕土分别下降28.6%、50.0%和19.4%^[2]。与一代杉木林地相比,二、三代杉木林地表层土壤水解性N分别下降10.76%和25.52%,有效P分别下降

28.76%和38.56%,有效K分别下降11.32%和23.69%^[28]。为杉木提供营养物质的土壤有效养分的下降必然影响了杉木对土壤养分的吸收,土壤有机质含量的下降也影响了土壤持续提供有效养分的能力,这必然使得杉木缺乏生长所必需的营养物质,从而影响了杉木的生产力。

2.3 连栽杉木人工林土壤微生物区系和生化活性的变化

另外,杉木连栽还能够影响土壤微生物的种类和数量以及土壤的生化活性。头耕土中微生物数量高于二耕土和三耕土,特别是杉木连栽后细菌的数量减少,其区系的组成也有改变,在细菌组成中,荧光杆菌、产色细菌和芽孢杆菌在二耕土和三耕土中都显著地减少,而无色无芽孢菌和分支杆菌增加^[14]。二、三耕土中微生物数量显著低于头耕土,尚不到头耕土的一半,随着微生物数量的减少,其氨化、固氮和纤维素分解等生化活性也大大被削弱^[2]。二代杉木人工林土壤中细菌、真菌、放线菌数量均低于一代杉木人工林土壤中的数量,同时还发现一代杉木林土壤酶活性均高于二代杉木林土壤酶活性,其中多酚氧化酶活性高13.98%,转化酶活性高82.05%,磷酸酶活性高33.34%,脲酶活性高112.06%,过氧化氢酶活性高13.30%^[37]。与一代杉木林相比,二、三代杉木林表层土壤微生物总数分别下降了14.68%和16.51%,纤维素分解菌分别下降了19.69%和24.41%,同时氨化作用、硝化作用、固氮作用和纤维素分解强度都明显下降^[40]。土壤微生物和土壤酶在土壤养分的转化过程中起着非常重要的作用,它们的降低必然影响了土壤中养分的转化和土壤有效养分的含量,从而使得杉木生产力下降。

3 杉木人工林衰退机理

3.1 营林措施不合理

3.1.1 没有做到“适地适树” 杉木对水肥条件要求较高,因此要培育速生高产的杉木人工林,就必须在水肥条件较好的山洼和山坡,而不是山脊^[14]。“适地适树”是营林措施中应遵循的最基本的原则之一。但由于林业生产经营单位受经营方便和经济利益驱动等因素的影响,造林缺乏科学指导,大面积营造杉木纯林,不“适地适树”现象普遍存在,出现大面积的“小老头林”和低产林,从而出现杉木人工林衰退现象。因此,营造杉木人工林,必须首先考虑造林地的水肥条件,尽量做到“适地适树”。

3.1.2 传统经营措施造成水土和养分的大量流失 传统的杉木造林技术的第一个环节就是林地植被和采伐剩余物的清理,而炼山是普遍采用的常规措施^[25]。炼山后短时间内土壤中微生物数量剧增,微生物总量比未炼山的土壤中微生物总量多10倍,其中主要是细菌,占微生物重量的96%~98%,但是随着时间的延长,到2个月后,土壤中细菌数量减少50%,而静止型芽孢杆菌数量增多,与营养型芽孢杆菌的比值(A/B)提高,土壤的生物活性开始下降^[48]。炼山后几个月内土壤中有效氮、有效磷和有效钾含量都有很大的增加,但是随着时间的延长,其含量逐渐降低^[3]。炼山虽具有短期的“激肥效应”,但炼山后第一年杉木林地水分物理性质急剧

恶化,土壤容重增大,非毛管孔隙度、总孔隙度变小,土壤分散系数比炼山前增加 33.2%,炼山后 4 年林地土壤侵蚀量达 $37.394 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,林地有机质及养分(N、P、K)流失量分别达到 1019.27 、 $508.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,同时林地表层土壤各项养分指标逐年下降,林地养分一直处于亏缺状态,大部分水解酶和氧化还原酶活性呈下降趋势^[26].土壤养分的匮乏必定影响了杉木对土壤养分的利用,进而影响了杉木的生长.造林过程中,加强杉木林地被物的管理和利用^[13],应尽量避免全面炼山,应采取撩壕或穴垦,地势较平坦地可采取水平带垦,以减少水土流失^[43].

3.1.3 林分结构单一,生物多样性低 受经济利益的驱动,林业生产部门大面积营造杉木纯林,目前杉木人工林的针叶化、纯林化现象十分普遍.与杉木纯林相比,针阔混交林地土壤总孔隙度增加 2%~19%,水分含量增加 6%~31%,枯枝落叶年凋落量增加 2%~200%,土壤全氮、交换性钙、镁和腐殖质含量分别增加 45%~75%、55%~85%、44%~84%和 37%~46%^[9].杉木火力楠混交林地土壤全氮、铵态氮和有效钾分别比杉木纯林提高 64.3%、82.3%和 63.1%^[34],而杉木火力楠混交还能够提高林分的光能利用率,改善林内小气候,增加林地有机质含量,促进土壤中有益微生物的繁衍和土壤理化性质的改良,提高土壤肥力和蓄水保水能力,进而提高林分的生产力^[17].与杉木纯林相比,杉木拟赤杨混交林土壤结构性能得到改善,供肥和保肥能力加强,各种土壤酶活性提高,土壤肥力较好^[11].这说明杉阔混交林比杉木纯林更具较高生产力和生态协调性^[22].采用杉阔混交是缓解杉木人工林衰退的有效途径之一.

3.1.4 抚育管理不及时,林分密度过大 由于抚育管理不及时,致使杉木人工林林分郁闭度过大,林下植物生长发育不良甚至严重缺失,生物多样性降低,林分结构简单.研究发现,通过间伐抚育林下植被,能够明显地影响到土壤的微生物区系组成,林下植被盖度与土壤的生物化学活性、土壤形成、无机养分和有机养分、胡敏酸和富里酸含量,在数值上密切相关^[36].在郁闭度 0.7 以下的林分中,林下植被发育迅速,间伐 4~5 年后,生物量可达到 $4 \sim 5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,有效地提高了土壤中营养元素含量,增加了土壤中三大类微生物数量,并使微生物类群也发生了明显的变化,有效地维护和恢复了土壤功能^[33].适时抚育间伐,增加林内光照强度,丰富林下植被种类,也是杉木人工林持续生产的有效措施之一.

3.2 杉木自身生物学特性

3.2.1 养分吸收量多而归还少 由于杉木自身速生丰产的特性,杉木每年从土壤中吸收大量的养分供应自身生长的需要,从而造成土壤养分的大量消耗.另一方面,杉木在自然整枝过程中其枯死的枝叶有在树上宿存多年、不易脱落的特点,造成凋落的枯死枝叶量比较少,营养归还速率较慢.成熟杉木纯林(21~23 年生)中营养元素归还量与吸收量之比分别为:N 0.45、P 0.49、K 0.29、Ca 0.35、Mg 0.39,这表明杉木纯林达到主伐年龄期,年吸收量仍大于年归还量,整个林分在生长过程中一直处于养分消耗阶段^[16].另外,杉木凋落

物分解速率和养分释放速率都较慢,这样影响了杉木林地养分的归还.C/N 比的大小直接关系着凋落物分解的速率,而杉木凋落物中 C/N 比含量高达 134.0,这必然影响了杉木凋落物的分解速率,降低了杉木养分归还的速率,同时还发现杉木与不同树种凋落物混合分解时所表现的作用有所不同^[23].当杉木凋落物和阔叶树种凋落物混合分解时,阔叶树种凋落物能够为杉木凋落物分解者提供 N 及其它养分源和能量,从而提高了杉木凋落物的分解速率和养分归还速率.因此,有选择性地营造杉木阔叶树混交,有利于林分的养分归还和地力的维持,这是杉木人工林衰退的主要防治措施之一.

3.2.2 杉木自毒作用 研究发现,杉木自毒作用是杉木人工林衰退的因素之一^[4~8,10,19,20,29,31,35,45,47].早在 20 世纪 60 年代,张宪武等^[44]就提出了杉木自毒作用,并认为土壤微生物抑制体是连栽杉木土壤中毒性物质的重要来源之一.张龙贵^[45]则认为,杉木人工林地中的菌根遗毒是连栽杉木生产力低下的重要原因,并提出了“菌根遗毒”假说.杉木人工林中的化感物质不仅来自于微生物抑制体和菌根,还有多个来源,如凋落物分解、雨水淋溶、根系分泌等.杉木人工林土壤浸提液能够显著抑制杉木幼苗生长、土壤呼吸活性和土壤净氮矿化速率^[10,47],杉木干、皮、枝、叶、根桩中含有多种酚类物质,如对羟基苯甲酸、阿魏酸、肉桂酸等,这些物质都能够影响杉木种子发芽和幼苗生长^[18~20].杉木根系分泌物能够明显地抑制杉木幼苗的生长,这表明根系分泌是杉木人工林化感物质的来源之一^[7].目前,普遍认为酚类物质是引起杉木自毒作用的化感物质之一^[18~20].香草酸等酚类物质不但能够明显地抑制杉木幼苗的生长和叶绿素含量^[5,31],而且影响林地土壤中有效氮和有效钾的含量,还降低土壤中有机质的含量^[4],造成土壤养分的亏缺.另外,香草醛等酚类物质不但能够显著抑制杉木的多种生理特性,如净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和根系活力等^[5],而且还能影响杉木幼苗对土壤中养分的吸收^[6,8].

4 展 望

对杉木人工林地力衰退问题的研究,在 20 世纪 90 年代最活跃,曾经得到国家攻关基金资助和支持,但是最近几年,这方面的研究趋于减少.一些学者认为,导致连栽杉木人工林生产力下降的原因有杉木人工林地土壤养分匮乏、微生物区系的变化和不合理的经营措施等几个方面,并在这几个方面作了大量深入、细致的工作,积累了大量的数据,涉及到了不同问题的多个层次和方面,可以说在这几个方面的研究是比较完善了.而近年来日渐热门的杉木自毒作用给连栽杉木生产力下降、地力衰退的问题又带来一线新的气息.虽然杉木人工林土壤中毒早在 60 年代就已提出,但是由于研究方法、技术手段、仪器设备等多种因素的限制而没有进行深入研究.随着科学技术的进一步发展,杉木人工林化感生态学也得到了前所未有的发展机遇.

目前普遍认为酚类物质是引起杉木人工林化感作用的

主要物质.但是另有研究表明,土壤中的水溶性酚类物质含量高时可通过吸附作用被土壤腐殖质和矿物胶体吸附成为复合态酚,同时土壤中的酚类物质很容易被土壤微生物分解,故而酚类物质不能在杉木林地土壤积累并引起毒害作用^[21].但是,用不同连栽代数的杉木人工林地土壤培养杉木幼苗的模拟试验表明,连栽可使杉木生物量减少 45%~50%,而且杉木连栽还造成土壤有效养分下降 23%~28%^[46],这说明土壤中的确含有抑制杉木幼苗生长的物质.既然土壤中酚类物质的浓度达不到使杉木产生毒害浓度,土壤中是否含有其它类化感物质?

因此,弄清杉木人工林地土壤中化感物质的种类及其在土壤中的含量,这成为目前研究工作的重心.土壤中化感物质的来源、化感物质的分泌机制及其在土壤中的运移、转化过程以及化感物质的作用机制也就随之成为以后的研究目标.弄清这些科学问题对研究连栽杉木人工林生产力下降、地力衰退有着非常重要的意义,对其他人工林连栽后生产力下降、地力衰退也有着极有价值的借鉴作用和指导意义.

参考文献

- Chen A-L (陈爱玲), Chen Q-S (陈青山), Cai L-P (蔡丽萍). 2000. Study on soil fertility under mixed forest of Chinese fir *Alniphyllum fortunei*. *Soil Environ Sci (土壤与环境)*, **9**(4): 284~286 (in Chinese)
- Chen C-Y (陈楚莹), Zhang J-W (张家武), Zhou C-L (周崇莲), et al. 1990. Researches on improving the quality of forest land and the productivity of artificial *Cunninghamia lanceolata* stands. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **1**(2): 97~106 (in Chinese)
- Chen C-Y (陈楚莹), Liao L-P (廖利平), Wang S-L (汪思龙). 2000. Ecology of Chinese fir Plantation. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Chen L-C (陈龙池), Liao L-P (廖利平), Wang S-L (汪思龙), et al. 2002a. Effect of exotic toxin on the nutrition of woodland soil. *Chin J Ecol (生态学杂志)*, **21**(1): 19~22 (in Chinese)
- Chen L-C (陈龙池), Liao L-P (廖利平), Wang S-L (汪思龙), et al. 2002b. Effect of vanillin and p-hydroxybenzoic acid on physiological characteristics of Chinese fir seedlings. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **13**(10): 1291~1294 (in Chinese)
- Chen L-C (陈龙池), Liao L-P (廖利平), Wang S-L (汪思龙), et al. 2002c. Effect of phenolics on ¹⁵N nutrient absorption and distribution of *Cunninghamia lanceolata*. *Acta Phytocool Sin (植物生态学报)*, **26**(5): 525~532 (in Chinese)
- Chen L-C (陈龙池) and Wang S-L (汪思龙). 2003a. Preliminary study of allelopathy of root exudates of Chinese fir. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **23**(2): 394~398 (in Chinese)
- Chen L-C (陈龙池), Liao L-P (廖利平), Wang S-L (汪思龙). 2003b. Effect of vanillin of nutrient absorbency of Chinese fir seedlings. *Acta Phytocool Sin (植物生态学报)*, **27**(1): 41~46 (in Chinese)
- Deng S-J (邓仕坚), Zhang J-W (张家武), Chen C-Y (陈楚莹), et al. 1994. Effect of pure and mixed stands on soil physical and chemical properties. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **5**(2): 126~132 (in Chinese)
- Du L (杜玲), Cao G-Q (曹光球), Lin S-Z (林思祖), et al. 2003. Allelopathic effect of extractor of Chinese fir rhizosphere soil on germination of Chinese fir seed. *Acta Bot Boreal-Occident Sin (西北植物学报)*, **23**(2): 323~327 (in Chinese)
- Fan S-H (范少辉), Ma X-Q (马祥庆), Chen S-S (陈绍栓), et al. 2000. Comparative study on growth and development of different generation plantations of Chinese fir. *Sci Silvae Sin (林业科学)*, **36**(4): 9~15 (in Chinese)
- Fang Q (方奇). 1987. Effects of continued planting of Chinese fir on the fertility of soil and the growth of stands. *Sci Silvae Sin (林业科学)*, **23**(4): 389~397 (in Chinese)
- Fang Q (方奇). 1990. Effects of strengthening soil and cover plants management on energy utilization and nutrient cycle of ecosystem biomass in *Cunninghamia lanceolata*. *Sci Silvae Sin (林业科学)*, **26**(3): 201~208 (in Chinese)
- Feng Z-W (冯宗伟), Chen C-Y (陈楚莹), Li C-H (李昌华), et al. 1980. Relations between the growth-development of the artificial *Cunninghamia lanceolata* forests and environment. In: Ecological Studies on the Artificial *Cunninghamia lanceolata* Forests. Shenyang: Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica. 1~29 (in Chinese)
- Feng Z-W (冯宗伟), Chen C-Y (陈楚莹), Li C-H (李昌华), et al. 1982. The relationship of environment and growth and development of Chinese fir plantation in Huitong in Hunan Province. *J Nanjing Tech Coll Product (南京林产工业学院学报)*, **3**: 19~36 (in Chinese)
- Feng Z-W (冯宗伟), Chen C-Y (陈楚莹), Wang K-P (王开平), et al. 1985. Accumulation, distribution and cycle of nutrient element of ecosystem of Chinese fir pure plantation in subtropics. *Acta Phytocool Geobot Sin (植物生态学与地植物学丛刊)*, **9**(4): 245~255 (in Chinese)
- Feng Z-W (冯宗伟), Chen C-Y (陈楚莹), Zhang J-W (张家武), et al. 1988. A coniferous broad-leaved mixed forest with higher productivity and ecological harmony in subtropics—Study on mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Michella macclurei*. *Acta Phytocool Geobot Sin (植物生态学与地植物学学报)*, **12**(3): 165~180 (in Chinese)
- Huang Z-Q (黄志群), Liao L-P (廖利平), Wang S-L (汪思龙), et al. 2000. Dynamics of phenolic content of Chinese fir stump-root and rhizosphere soil and its allelopathy. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **11**(2): 190~192 (in Chinese)
- Huang ZQ, Liao LP, Wang SL, et al. 2000. Allelopathy of phenolics from decomposing stump-roots in replant Chinese fir woodland. *J Chem Ecol*, **26**(9): 2211~2219
- Huang ZQ, Terry H, Wang SL, et al. 2002. Autotoxicity of Chinese fir on seed germination and seedling growth. *Allelopathy J*, **9**(2): 187~193
- Li C-H (李传涵), Li M-H (李明鹤), He S-J (何绍江), et al. 2002. Studies on phenolic content and variation in soils of Chinese-fir and broad-leaves stands. *Sci Silvae Sin (林业科学)*, **38**(2): 9~14 (in Chinese)
- Liao L-P (廖利平), Chen C-Y (陈楚莹), Zhang J-W (张家武), et al. 1995. Turnover of fine roots in pure and mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michella macclurei* forests. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **6**(1): 7~10 (in Chinese)
- Liao L-P (廖利平), Ma Y-Q (马越强), Wang S-L (汪思龙), et al. 2000. Decomposition on leaf litter of Chinese fir in mixture with major associated broad-leaved plantation species. *Acta Phytocool Sin (植物生态学报)*, **24**(1): 27~33 (in Chinese)
- Liao L-P (廖利平), Deng S-J (邓仕坚), Yu X-J (于小军), et al. 2001. Growth, distribution and exudation of fine roots of Chinese fir trees grown in continuously cropped plantations. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **21**(4): 569~573 (in Chinese)
- Lin S-Z (林思祖), Lin K-M (林开敏), Wu Z-X (吴濯溪). 1997. A quantitative study on the effects of controlled burying on the nutrient loss of the young Chinese fir plantation. *J Nat Resour (自然资源学报)*, **12**(3): 243~249 (in Chinese)
- Ma X-Q (马祥庆), He Z-Y (何智英), Yu X-T (俞新妥). 1995. The effects of different clearances on soil fertility of Chinese fir timber plantation. *Sci Silvae Sin (林业科学)*, **31**(6): 485~490 (in Chinese)
- Ma X-Q (马祥庆), Fan S-H (范少辉), Liu A-Q (刘爱琴), et al. 2000a. A comparative study on nutrient accumulation and distribution of different generations of Chinese fir plantations. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **11**(4): 501~506 (in Chinese)
- Ma X-Q (马祥庆), Fan S-H (范少辉), Liu A-Q (刘爱琴), et al. 2000b. A comparison on soil fertilities of Chinese fir plantations of different generations. *For Res (林业科学研究)*, **13**(6): 577~582

- (in Chinese)
- 29 Ma X-Q(马祥庆), Liu A-Q(刘爱琴), and Huang B-L(黄宝龙). 2000c. A study on self-poisoning effect of Chinese fir plantation. *J Nanjing For Univ*(南京林业大学学报), **24**(1): 12 ~ 16(in Chinese)
 - 30 Ma Y-Q(马越强), Liao L-P(廖利平), Yang Y-J(杨越军), et al. 1997. Effects of replant soil on the growth of *Cunninghamia lanceolata* seedlings. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **16**(6): 12 ~ 16(in Chinese)
 - 31 Ma Y-Q(马越强), Liao L-P(廖利平), Yang Y-J(杨越军), et al. 1998. Effect of vanillin on the growth of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **9**: 128 ~ 132(in Chinese)
 - 32 Qiu R-H(邱仁辉), Yang Y-S(杨玉盛), Yu X-Y(俞新妥). 1998. Soil structure characteristics in the plantations of *Cunninghamia lanceolata* on different rotations. *J Beijing For Univ*(北京林业大学学报), **20**(4): 6 ~ 11(in Chinese)
 - 33 Sheng W-T(盛伟彤) and Yang C-D(杨承栋). 1997. Research on effect of ameliorating soil properties by undergrowth vegetation of Chinese fir. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **17**(4): 377 ~ 385(in Chinese)
 - 34 Wang S-L(汪思龙), Liao L-P(廖利平), Ma Y-Q(马越强). 1997. Nutrient return and productivity of mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Michella macclurei* plantations. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **8**(4): 347 ~ 352(in Chinese)
 - 35 Wang S-L(汪思龙), Chen L-C(陈龙池), Liao L-P(廖利平), et al. 2002. Effects of three kinds of allelochemicals on growth of Chinese fir seedlings. *Chin J Appl Environ Biol*(应用环境生物学报), **8**(6): 588 ~ 591(in Chinese)
 - 36 Yang C-D(杨承栋), Jiao R-Z(焦如珍), Tu X-N(屠星南), et al. 1995. Developing undergrowth vegetation is an important way to recover soil fertility of Chinese fir plantation. *Sci Silvae Sin*(林业科学), **31**(3): 275 ~ 283(in Chinese)
 - 37 Yang C-D(杨承栋), Zhang X-Q(张小泉), Jiao R-Z(焦如珍), et al. 1996. Variations of chemical properties, biochemical, microorganism activities and function in soil of successive rotation of Chinese fir and their influences on growing. *Sci Silvae Sin*(林业科学), **32**(2): 175 ~ 181(in Chinese)
 - 38 Yang Y-S(杨玉盛), He Z-M(何宗明), Ma X-Q(马祥庆), et al. 1997. On the advantages and disadvantages of the effects of controlled burying on the ecological system of Chinese fir plantation and the countermeasures. *J Nat Resour*(自然资源学报), **12**(2): 153 ~ 159(in Chinese)
 - 39 Yang Y-S(杨玉盛), Qiu R-H(邱仁辉), He Z-M(何宗明), et al. 1998. Studies on the stand net productivity and biological cycle of nutrient elements in the 29-year-old plantations of Chinese fir on different rotations. *Sci Silvae Sin*(林业科学), **34**(6): 3 ~ 11(in Chinese)
 - 40 Yang Y-S(杨玉盛), Huang B-L(黄宝龙), Qiu R-H(邱仁辉), et al. 1999. Study on soil microbes and biochemical activity in continuous plantations of *Cunninghamia lanceolata*. *Chin Biodiver*(生物多样性), **7**(1): 1 ~ 7(in Chinese)
 - 41 Yang Y-S(杨玉盛), Heng Z-M(何宗明), Chen G-S(陈光水), et al. 2001. PCA of soil fertility under different gaps of continuously planting Chinese fir. *Soil Environ Sci*(土壤与环境), **10**(1): 33 ~ 38(in Chinese)
 - 42 Yu Y-C(俞元春), Deng X-H(邓西海), Sheng W-T(盛伟彤), et al. 2000. Effects of continuous plantation of Chinese fir on soil physical properties. *J Nanjing For Univ*(南京林业大学学报), **24**(6): 36 ~ 40(in Chinese)
 - 43 Zhang X-Y(张先仪). 1986. The effects of different types of site preparation on soil erosion and the growth of young stands of China fir. *Sci Silvae Sin*(林业科学), **22**(3): 225 ~ 232(in Chinese)
 - 44 Zhang X-W(张宪武), Xu G-H(许光辉), Zheng H-Y(郑洪元), et al. 1980. Replanted plantation of *Cunninghamia lanceolata* and toxicosis of soil. In: *Ecological Studies on the Artificial Cunninghamia lanceolata Forests*. Shenyang: Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica. 143 ~ 151(in Chinese)
 - 45 Zhang L-G(张龙贵). 1995. "Life and death restrain" principle and hypothesis of "fungus root evil legacy". *J Zhejiang For Sci Tech*(浙江林业科技), **15**(6): 37 ~ 41(in Chinese)
 - 46 Zhang J-W(张家武), Deng S-J(邓仕坚), Liao L-P(廖利平), et al. 1994. Influence of repeatedly planting soil on *Cunninghamia lanceolata* sapling growth. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **5**(3): 241 ~ 244(in Chinese)
 - 47 Zhang QS. 1997. Effects of soil extracts from repeated plantation woodland of Chinese-fir on microbial activities and soil nitrogen mineralization dynamics. *Plant Soil*, **191**: 205 ~ 212
 - 48 Zhou C-L(周崇莲), Xu G-H(许光辉), Zhang X-W(张宪武). 1980. Effects of burning plantation on the soil microorganisms. In: *Ecological Studies on the Artificial Cunninghamia lanceolata Forests*. Shenyang: Institute of Forestry and Pedology, Academia Sinica. 160 ~ 165(in Chinese)
 - 49 Zhu J-F(朱济凡), Feng Z-W(冯宗伟), Chen C-Y(陈楚莹). 1979. Researches on relations between the growth-development and environment of *Cunninghamia lanceolata* plantation. Thirty Years' Forest Science and Technology of China(中国林业科技三十年)(1949 ~ 1979). Beijing: China Forestry Press. 144 ~ 163(in Chinese)

作者简介 陈龙池,男,1976年生,主要从事人工林化学生态学、混交林生态学、根系生态学的研究,发表论文7篇。E-mail:lcchen@iae.ac.cn
