

文章编号: 1001-1498(2006)06-0791-08

# 多代连栽人工林碳贮量的变化

罗云建, 张小全\*

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

**摘要:**通过收集多代连栽桉树、落叶松和杉木人工林生长和土壤方面的数据,分析了不同代数间林分生物量和土壤有机碳贮量的变化,并定量或定性分析了混交、施肥等地力维护措施对林分生物量和土壤有机碳贮量的影响。随着连栽代数的增加,生物量和土壤有机碳贮量均呈现明显的下降,2代杉木人工林生物量和土壤有机碳贮量分别比1代下降24%和10%,3代分别比2代下降39%和15%。地力维护措施可在很大程度上防治连栽人工林生物量和土壤有机碳贮量的下降,2代杉阔混交林生物量和土壤有机碳贮量分别比2代纯林提高69%和19%;2代桉树与相思属树种的混交林生物量比2代桉树纯林增加29%;施肥可使2代杉木人工林生物量提高22%。轮作和林下植被培育也能提高林分生物量,但对土壤有机碳贮量的影响尚需进一步研究。

**关键词:**人工林;连栽;生物量;土壤有机碳;地力维护

中图分类号: S714

文献标识码: A

## Carbon Stock Changes of Successive Rotations of Plantations

LUO Yun-jian, ZHANG Xiao-quan

(Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection; Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, CAF, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Growth and soil property data over successive rotations of *Larix* sp. and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook plantations were collected and archived from published literatures. The stock changes of biomass, soil organic carbon and the impact of fertility maintaining on carbon stocks were estimated and analyzed based on the dataset. Results showed that with the increase of the successive rotations stand biomass and soil organic carbon stock decreased apparently. The biomass and soil organic carbon stock reduced by 24% and 10% from the first to the second rotation of *Cunninghamia lanceolata* plantations, respectively, and by 39% and 15% respectively from the second to the third rotation. But fertility maintaining measures can prevent the growth decline and soil degradation in the successive rotation of plantation. The biomass and soil organic carbon stock of the second rotation of *Cunninghamia lanceolata* and broad-leaved trees mixed plantations were 69% and 19% higher than that of the pure *Cunninghamia lanceolata* plantation respectively. Mixed *Eucalyptus* sp. and *Acacia* sp. in the second rotation can increase the biomass by 29% compared to the *Eucalyptus* sp. pure stand. Fertilization on the second rotation of *Cunninghamia lanceolata* resulted in 22% increase in biomass.

**Key Words:** plantation; successive rotation; biomass; soil organic carbon; fertility maintaining

收稿日期: 2005-08-09

基金项目: 973项目“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制(2002CB412508)”,国家十五攻关专题“碳吸收汇的估算及经济性评价及影响研究(2001BA611B-04-05)”

作者简介: 罗云建(1981—),男,山东鱼台人,硕士研究生。

\*通讯作者: 张小全,研究员,博士生导师,主要从事土地利用变化与林业、森林碳平衡、林业温室气体清单、清洁发展机制(CDM)林业项目方法学等方面的研究。电话:(010)62889512,传真:(010)6288840, E-mail: xiaoquan@forestry.ac.cn

我国是世界上发展人工林最突出的国家,人工林面积居世界首位,达 0.53 亿  $\text{hm}^2$ ,蓄积量 15.05 亿  $\text{m}^3$ ,但我国人工林也面临着随之而来的地力衰退和生产下降等诸多问题,特别是多代连栽人工林表现得更为突出<sup>[1,21]</sup>。地力衰退最明显的表现在杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook) 人工林的生长上,几乎普遍存在一代不如一代<sup>[1]</sup>,而对多代连栽落叶松 (*Larix* sp.)、桉树 (*Eucalyptus* sp.) 等人工林的退化也有报道<sup>[3-10]</sup>。连栽人工林地力衰退和生产下降属森林退化的范畴,森林退化引起的碳储量下降已经引起国际社会的广泛关注。应《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)的要求,政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 编写了“直接人为活动引起的森林退化和其它植被破坏的定义和方法选择”<sup>[11]</sup>,给出了相关的定义和碳计量的原则性方法。目前有关多代连栽人工林的研究主要集中在林木胸径、树高、林分蓄积量及生物量的变化,土壤物理、化学、生物组成与生物化学性质的改变,林下植被的变化情况以及地力维护措施等方面。很多研究报道了多代连栽人工林土壤有机质的下降和土壤容重的增加<sup>[10,12-14]</sup>,这两方面的变化又与土壤有机碳储量有着密切的关系,但关于土壤有机碳储量变动的估计以及地力维护措施会对人工林的生物量和土壤有机碳储量的影响尚未见报道。本文通过收集已公开出版或发表的有关数据资料,进行综合分析,试图揭示我国桉树、落叶松和杉木多代连栽人工林碳储量变化的一般规律,以及地力维护措施对连栽人工林碳储量的影响。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据的收集

收集已发表或公开出版的有关多代连栽人工林的生长(树高、胸径)、林分密度、蓄积量、生物量、土壤有机质含量和土壤容重的数据,以及采取地力维护措施后这些指标的数据。对收集的数据资料进行精心筛选,本研究分析只采用来自对比样地(同林龄、同立地条件、同树种、不同代数)的测定数据,且只比较不同对比样地多代连栽人工林生物量和土壤有机碳储量的相对变化。包括不同代数杉木人工林对比研究文献 23 篇共 41 组数据<sup>[13,15-36]</sup>,落叶松研究文献 2 篇共 10 组数据<sup>[3,41]</sup>;混交、施肥、轮作与林下植被培育等地力维护措施相关文献 58 篇共 130 组数据<sup>[6,37-94]</sup>。

### 1.2 生物量的计算

由于许多文献只报道了生长数据(胸径和树高或蓄积量),而无生物量数据,因而需采用有关方法将生长数据转化为生物量数据。对只有林分蓄积量而没有生物量的情况,利用下式计算林分生物量  $B_s$  ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[95]</sup>:

$$\text{杉木: } B_s = 22.5 + 0.40V_s \quad (1)$$

$$\text{落叶松: } B_s = 33.8 + 0.61V_s \quad (2)$$

$$\text{桉树: } B_s = 4.55 + 0.89V_s \quad (3)$$

式中  $V_s$  为林分蓄积量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )。有关与上述三个树种混交的树种的生物量 ( $B$ ),由于缺乏类似的参数方程,故采用 IPCC<sup>[11]</sup>的一般方法计算:

$$B = V_s \times SVD \times BEF \quad (4)$$

式中:  $SVD$  为木材密度 ( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $BEF$  为树干到林分的生物量扩展系数。参数  $SVD$  和  $BEF$  的值均来自 1994 年中国土地利用变化和林业温室气体排放清单专题报告<sup>[96]</sup>。

部分研究只报道了林分密度 ( $\text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、平均树高及平均胸径,首先采用二元立木材积公式计算单株立木材积量  $V_i$  ( $\text{m}^3$ )<sup>[97]</sup>:

$$\text{杉木: } V_i = 0.0000581D^{1.96}H^{0.894} \quad (\text{适用于江西和福建}) \quad (5)$$

$$V_i = 0.0000588D^{1.97}H^{0.896} \quad (\text{适用于其它省份}) \quad (6)$$

$$\text{落叶松: } V_i = 0.0000502D^{1.76}H^{1.150} \quad (\text{适用于东北地区}) \quad (7)$$

$$\text{桉树: } V_i = 0.0000795D^{1.94}H^{0.740} \quad (8)$$

式中:  $D$  为平均胸径 ( $\text{cm}$ );  $H$  为平均树高 ( $\text{m}$ )。然后根据林分密度计算林分蓄积量 ( $V_s$ ),再根据式 (1)~(4) 计算单位面积生物量。

### 1.3 土壤有机碳储量

单位面积土壤有机碳储量通过有机质含量、采样深度和土壤容重计算<sup>[98]</sup>:

$$SOC = \frac{\sum_{i=1}^n SOM_i \cdot D_i \cdot BD_i}{17.24} \quad (9)$$

式中:  $SOC$  为土壤有机碳储量 ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $n$  为采样层数;  $i$  为第  $i$  采样层;  $SOM$  为土壤有机质含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $D_i$  为第  $i$  层的深度 ( $\text{cm}$ );  $BD_i$  为第  $i$  层的土壤容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); 17.24 为系数。

由于不同土壤的有机质含量存在着差异,采样深度与采样方法也不尽相同,所以很难比较根据不同文献研究数据计算出的碳储量的绝对变化。因

此,本文采用碳贮量的相对变化来分析土壤有机碳贮量的变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物量的变化

2代杉木人工林的生物量比 1代平均下降 23.8% ± 2.7% (n=41), 3代比 2代下降 39.1% ± 3.1% (n=23) (图 1), 不同年龄阶段的相对变化无明显规律。宋秀琴等<sup>[3]</sup>通过对 1、2代 1~9 生日本落叶松 (*Larix kaempferi*(Lamb.) Carr.) 树高及胸径的研究发现 1代均略高于 2代, 通过计算其生物量发现 2代林的生物量比 1代随林龄的增加差距日益明显, 平均下降 4.3% ± 1.6% (n=7)。据陈乃全等<sup>[4]</sup>的数据计算得 18 年生生长白落叶松 (*Larix olgensis* A. Henry var *changpaiensis* Yang et Y. L. Chou) 人工林的生物量 2代比 1代下降 27.3%, 19 年生 2代比 1代下降 32.6% ± 7.0% (n=2)。余雪标等<sup>[5]</sup>在广东雷州的研究发现, 不同连栽代数 4.5 年生刚果 12 号桉 (*Eucalyptus 12* ABL) 人工林的生物量, 以 1代林的最大, 达到 86.5 t · hm<sup>-2</sup>, 随连栽代数的增加生物量逐代下降, 2、3、4 代林分生物量分别为 69.3、62.1、46.6 t · hm<sup>-2</sup>, 与 1代林相比分别下降 19.9%、28.2% 和 46.1%。由此可以看出, 多代连栽人工林随着连栽代数的增加, 林分生物量出现明显的下降。这不仅表现在杉木人工林上, 而且在落叶松和桉树人工林上也很明显。

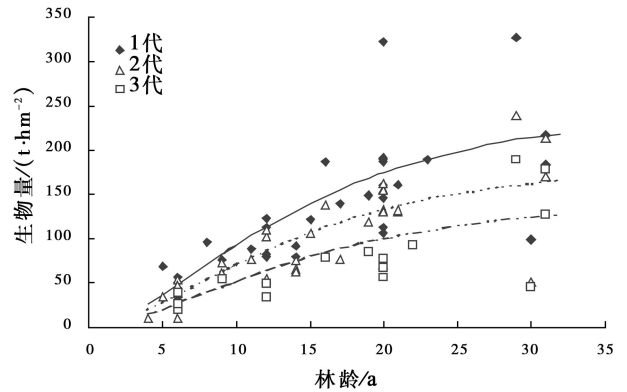


图 1 不同代数杉木人工林生物量的比较

$$(1 \text{ 代林: } B_s = 243(1 - \exp(-0.0904A))^{1.87} (R^2 = 0.63, n = 28); 2 \text{ 代林: } B_s = 183(1 - \exp(-0.0937A))^{1.91} (R^2 = 0.68, n = 28); 3 \text{ 代林: } B_s = 142(1 - \exp(-0.0892A))^{1.90} (R^2 = 0.67, n = 15))$$

### 2.2 土壤有机碳贮量的变化

图 2 表明, 随着连栽代数的增加, 杉木人工林土壤有机碳贮量都有不同程度的下降, 2代比 1代平均下降 9.5% ± 5.1% (n=9), 3代比 2代下降 15.3% ± 4.8% (n=8)。长白落叶松人工林的土壤有机质含量, 由 1代林的 53.8 g · kg<sup>-1</sup> 下降到 2代林的 43.3 g · kg<sup>-1</sup><sup>[4]</sup>。据余雪标等<sup>[10]</sup>在广东雷州的研究数据计算得到, 4.5 年生的 2代刚果 12 号桉人工林土壤有机碳贮量比 1代下降 26.2%, 3代比 1代下降 13.8%。

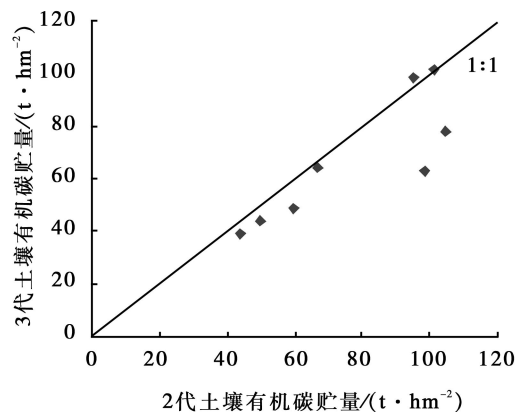
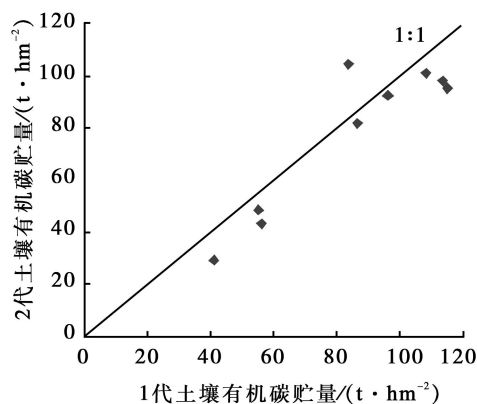


图 2 不同代数杉木人工林土壤有机碳贮量的比较

## 3 地力维护措施对连栽人工林碳贮量的影响

人工林地力衰退是个复杂的生态学过程, 但实质上是林地土壤养分吸收与供给之间的不平衡, 即养分吸收量 (存留于树木中的养分与凋落物现存量中养分

之和) 大于养分供给量 (凋落物矿化量与土壤矿化量之和), 主要表现在以下三个方面: (1) 人工林土壤退化, 土壤肥力下降; (2) 立地生产力下降 (即林分生产力下降); (3) 林地环境退化 (即林地小气候变化)<sup>[99]</sup>。引起这种不平衡出现的可能原因主要有: (1) 速生树

种连栽造成林地养分亏缺<sup>[2,100]</sup>; (2)土壤酸化<sup>[2,30]</sup>; (3)短轮伐期<sup>[101]</sup>; (4)林分结构单一<sup>[102]</sup>; (5)不合理林地清理、整地及抚育方式引起林地土壤侵蚀<sup>[103]</sup>; (6)树木的化感作用<sup>[104]</sup>,其中不合理的育林方式是导致地力衰退的最直接的原因<sup>[99,105]</sup>。

目前人工林地力维护的研究主要在两个方面:一是减少栽培过程中林地养分的流失;二是增加对林地的投入,并促进其生物循环<sup>[106]</sup>。现有的措施主要有营造混交林<sup>[6,74]</sup>、施肥<sup>[107]</sup>、改善人工林的群落结构<sup>[108]</sup>和推行不同人工林的轮作栽培<sup>[94]</sup>等。

### 3.1 营造混交林对碳贮量的影响

近年来,通过营造混交林来防治地力衰退逐渐受到重视并进行了大量相关研究。混交树种涉及杉木、落叶松、桉树、椴树 (*Sassafras tsumu* Hemsl)、火力楠 (*Michelia macclurei* Dandy)、木荷 (*Schima superba* Gardn et Champ)、楠木 (*Phoebe boumei* (Hemsl) Yang)、拟赤杨 (*Alniphyllum fortunei* (Hemsl) Makino)、南酸枣 (*Choerospondias axillaris* Burt et Hill) 等。

桉树与粗果相思 (*Acacia crassicarpa* A. Cunn ex Benth)、大叶相思 (*Acacia auriculiformis* A. Cunn ex Benth)、黑荆 (*Acacia measii* De wild) 等相思属树种混交, 1代混交林的生物量比 1代纯林提高 39.4% ±10.0% (n=10), 2代混交林比 2代纯林平均提高 28.9% ±5.3% (n=18) (图 3)。1代杉木混交林的生物量比 1代纯林平均提高 48.1% ±5.7% (n=32), 2代混交林比 2代纯林提高 68.7% ±7.3% (n=24) (图 4)。

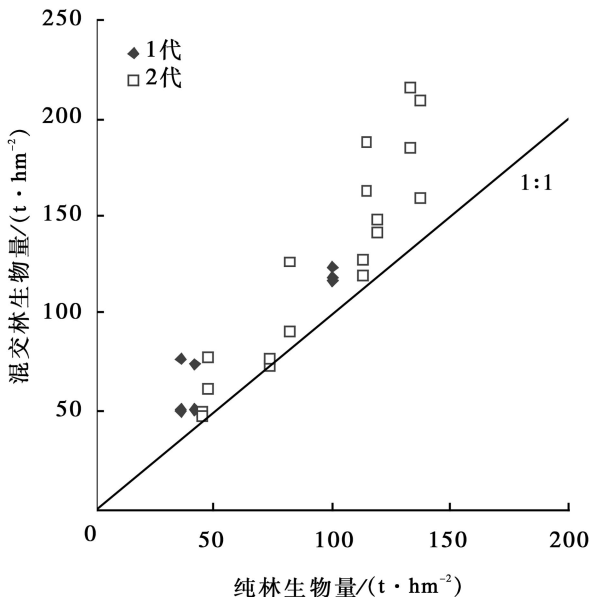


图 3 多代连栽桉树混交林和纯林生物量的比较

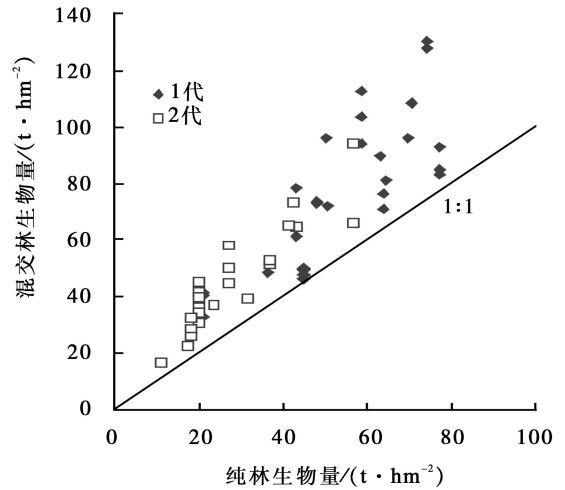


图 4 多代连栽杉木混交林和纯林生物量的比较

1代杉木混交林土壤有机碳贮量比 1代纯林平均提高 23.8 ±9.6% (n=17), 2代混交林比 2代纯林提高 19.4 ±8.3% (n=8), 不过个别地点的土壤有机碳贮量在下降,主要表现在 1代人工林上 (图 5)。

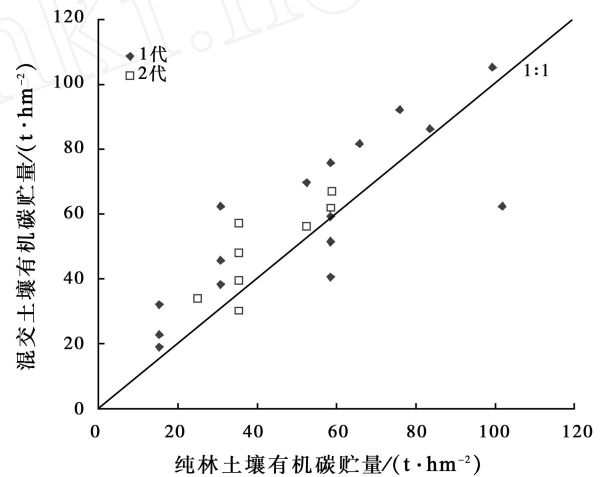


图 5 多代连栽杉木混交林和纯林土壤有机碳贮量的比较

与纯林相比,混交林在一定程度上提高了生物量和土壤有机碳贮量,但桉树、杉木与不同树种混交的生物量差异很明显,这可能主要与不同的混交模式和整地活动有关,也可能与不同树种间化感作用的强弱有关<sup>[104,109]</sup>,为此合理的混交模式、混交树种和整地活动能有效的提高林分生物量和土壤有机碳贮量。

### 3.2 林地施肥对碳贮量的影响

通过施肥来增加土壤养分的投入也可有效地维护地力。据伍春魁<sup>[40]</sup>测定的数据计算表明, 1代 4.5年生巨尾桉 (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake)人工林的生物量,施

肥的比不施肥的提高  $277.3\% \pm 42.8\%$  ( $n=4$ )。多代杉木人工林通过施肥可以补充养分的供给量,虽然肥料中元素的种类和含量存在着较大的差异,但却能不同程度地提高其生物量(图 6),1代人工林生物量施肥比不施肥提高  $19.9\% \pm 1.5\%$  ( $n=90$ ),2代人工林施肥比不施肥的提高  $21.9\% \pm 3.9\%$  ( $n=42$ )。

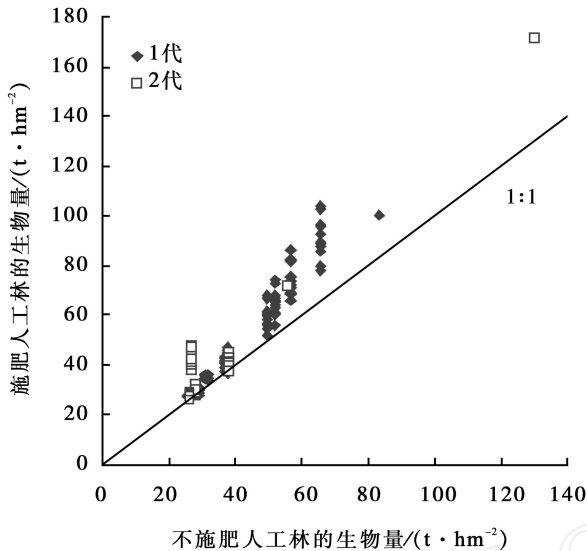


图 6 施肥对杉木人工林生物量的影响

### 3.3 轮作对碳贮量的影响

轮作主要是通过不同树种的轮栽来维持地力,但不同树种的栽培效果通常要到十几年甚至数十年之后才能显现,加之多变的林地环境,使得研究轮作对地力影响的难度加大,因此轮作对地力定量影响的报道很少见。

对杉木与马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 轮作的研究<sup>[94]</sup>表明,林分蓄积量和生物量均有明显提高,蓄积量增加  $34.6\%$ ,生物量增加  $15.9\%$ ,且地力比杉木连栽亦有明显提高,土壤有机质含量也有相应的增加。因此,选择合适的树种轮作可提高林分的生物量,有可能会提高土壤有机碳贮量。

### 3.4 林下植被培育对碳贮量的影响

林下植被是人工林生态系统的重要组成部分,在养分循环和地力维护中起不可忽视的作用<sup>[108]</sup>。对杉木人工林林下植被的研究发现,林下植被可有效提高土壤有机质含量,且对地力也有一定的改善<sup>[110]</sup>。虽然林下植被可以提高土壤有机质的含量,但其数值却与林下植被盖度密切相关,也主要对  $0 \sim 5$  cm 土层作用较明显,对  $5 \sim 15$  cm 土层则明显减弱<sup>[111]</sup>;同时林下植被的生长,尤其是灌木的生长,有

助于减小土壤容重,对降低  $0 \sim 10$  cm 土层容重的作用较为显著<sup>[112]</sup>;因此,地力的改善可更好的供给养分促进林木的生长进而提高林分生物量,但对土壤有机碳贮量的影响尚需进一步研究。

## 4 结论

(1)连栽导致林分生物量明显下降。2代杉木人工林的生物量比 1代平均下降  $23.8\% \pm 2.7\%$ ,3代比 2代下降  $39.1\% \pm 3.1\%$ ,且不同林龄的相对变化无明显规律。2代日本落叶松人工林的生物量与 1代在生长初期差别不大,随着林龄的增长差距日益明显。18年生白落叶松人工林的生物量,2代比 1代下降  $27.3\%$ ,19年生 2代比 1代下降  $32.6\% \pm 7.0\%$ 。连栽桉树人工林也出现了类似的情况,4.5年生人工林的生物量随着连栽代数的增加出现了明显下降。

(2)连栽还引起土壤有机碳贮量的减少。2代杉木人工林土壤有机碳贮量比 1代平均下降  $9.5\% \pm 5.1\%$ ,3代比 2代下降  $15.3\% \pm 4.8\%$ 。4.5年生的 2代桉树人工林土壤有机碳贮量比 1代下降  $26.2\%$ ,3代比 2代下降  $13.8\%$ 。

(3)营造混交林、施肥等措施可在一定程度上防治连栽人工林碳贮量的下降。(1)营造混交林:桉树与相思属树种混交,1代混交林生物量比 1代纯林平均提高  $39.4\% \pm 10.0\%$ ,2代混交林比 2代纯林平均提高  $28.9\% \pm 5.3\%$ 。1代杉阔混交林生物量和土壤有机碳贮量分别比 1代纯林提高  $48.1\% \pm 5.7\%$ 和  $23.8\% \pm 9.6\%$ ,2代混交林分别比 2代纯林提高  $68.7\% \pm 7.3\%$ 和  $19.4\% \pm 8.3\%$ 。(2)施肥:1代 4.5年生巨尾桉人工林的生物量,施肥的比不施肥的提高  $277.3\% \pm 42.8\%$ 。1代杉木人工林的生物量,施肥的比不施肥的提高  $19.9\% \pm 1.5\%$ ,2代林施肥的比不施肥的提高  $21.9\% \pm 3.9\%$ 。(3)轮作和林下植被培育也能提高林分生物量,但对土壤有机碳贮量的影响尚需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 盛炜彤. 杉木人工林的地力衰退及防治对策 [A]. 见:盛炜彤. 人工林地力衰退研究 [C]. 北京:中国科技出版社, 1992: 15 ~ 19
- [2] 徐化成. 森林地力的动态特性和人工林的地力下降问题 [A]. 见:盛炜彤. 人工林地力衰退研究 [C]. 北京:中国科技出版社, 1992: 3 ~ 10
- [3] 宋秀琴,王作梅,伊艳清. 日本落叶松皆伐迹地连茬更新的试验研究 [J]. 林业科技通讯, 1996(1): 18 ~ 19

- [4] 陈乃全,尹建道,王义延,等.落叶松人工林重茬更新效果的研究 [A].见:中国林学会造林学会第二届学术讨论会造林论文集 [C].北京:中国林业出版社,1990:105~113
- [5] 余雪标,白先权,徐大平,等.不同连栽代次桉树人工林的养分循环 [J].热带作物学报,1999,20(3):60~66
- [6] 余雪标,肖文光,余勇,等.桉树+粗果相思混交林模式及其效益 [J].海南大学学报(自然科学版),1999,17(4):331~342
- [7] 余雪标,徐大平,龙腾,等.连栽桉树人工林生物量及生产力结构的研究 [J].华南热带农业大学学报,1999,5(2):10~17
- [8] 余雪标,龙腾,莫晓勇,等.桉树连栽林地不同间(轮)作方式的效益研究 [A].见:余雪标.桉树人工林长期生产力管理研究 [C].北京:中国林业出版社,2000:116~124
- [9] 余雪标,徐大平,龙腾,等.连栽桉树人工林生长特性和树冠结构特征 [J].林业科学,2000,36(专刊1):137~142
- [10] 余雪标,杨国清,李尚昆,等.不同连栽代次桉树土壤性质的变化 [A].见:余雪标.桉树人工林长期生产力管理研究 [C].北京:中国林业出版社,2000:94~103
- [11] Penman J, Gytarsky M, Taka H, *et al* Definitions and methodological options to inventory emissions from direct human-induced degradation of forests and revegetation of other vegetation types [R]. Japan, Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, 2003
- [12] 方奇.杉木连栽对土壤肥力及其林木生长的影响 [J].林业科学,1987,23(4):389~397
- [13] 林协,洪利兴,杜国坚.杉木连栽林地质量评价的初步研究 [A].见:盛炜彤.人工林地力衰退研究 [C].北京:中国科技出版社,1992:267~275
- [14] 阎德仁,刘永军,刘永宏.落叶松人工林土壤肥力与防止地力衰退趋势的研究 [J].内蒙古林业科技,1996(3~4):93~98
- [15] 杜国坚,洪利兴,陈福祥,等.杉木连栽林地土壤特征和回心土造林更新技术研究 [J].浙江林业科技,1995,15(4):13~19
- [16] 杜国坚,洪利兴,陈福祥,等.杉木连栽地力衰退效应研究 [J].林业科技开发,2001,15(4):11~13
- [17] 方奇.湖南林区杉木连栽对土壤肥力及其林木生长的影响 [J].林业科学,1987,23(4):389~397
- [18] 何智英,俞新妥.杉木连栽林地地力衰退问题的研究 [A].见:盛炜彤.人工林地力衰退研究 [C].北京:中国科技出版社,1992:243~250
- [19] 胡风华,徐小牛.黄山丘陵地区杉木幼林生长分析 [J].安徽农业大学学报,1994(增刊):43~45
- [20] 马祥庆,范少辉,陈绍栓,等.杉木人工林连作生物生产力的研究 [J].林业科学,2003,39(2):78~83
- [21] 马祥庆,范少辉.不同栽植代数杉木人工林土壤肥力的比较研究 [J].林业科学研究,2000,13(6):557~582
- [22] 马祥庆,康述海,黄勇,等.花岗岩条件下杉木人工林的多代效应研究 [J].福建林学院学报,2002,22(4):289~294
- [23] 马祥庆,刘爱琴,马壮,等.不同代数杉木林养分积累和分布的比较研究 [J].应用生态学报,2000,11(4):501~506
- [24] 邵锦峰.福建林区杉木连栽对土壤肥力和林木生长的影响 [A].见:盛炜彤.人工林地力衰退研究 [C].北京:中国科技出版社,1992:87~92
- [25] 孙启武,杨承栋,焦如珍.江西大岗山连栽杉木人工林土壤性质的变化 [J].林业科学,2003,39(3):1~5
- [26] 田大伦,项文化,闫文德,等.速生阶段杉木人工林产量结构及生产力的代际效应 [J].林业科学,2002,38(4):14~18
- [27] 杨承栋,张小泉,焦如珍,等.杉木连栽土壤组成、结构、性质变化及其对林木生长的影响 [J].林业科学,1996,32(2):175~181
- [28] 杨玉盛,张任好,何宗明,等.不同栽植代数 29 年生林分生产力变化 [J].福建林学院学报,1998,18(3):202~206
- [29] 应金花.不同连栽代数杉木人工林生长及土壤性质比较研究 [J].江苏林业科技,1997,24(1):31~34
- [30] 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 [J].福建林学院学报,1989,9(3):263~271
- [31] 俞元春,邓西海,盛炜彤,等.杉木连栽对土壤物理性质的影响 [J].南京林业大学学报(自然科学版),2000,24(6):36~40
- [32] 张家城,盛炜彤,聂道平,等.江西分宜地区杉木人工林不同代数间生产力与生物量构成的比较研究 [J].林业科学研究,2001,14(2):160~167
- [33] 周学金,罗汝英,叶镜中.杉木连栽对土壤养分的影响及其反馈 [A].见:盛炜彤.人工林地力衰退研究 [C].北京:中国科技出版社,1992:100~105
- [34] 范少辉,盛炜彤,马祥庆,等.多代连栽对不同发育阶段杉木人工林生产力的影响 [J].林业科学研究,2003,16(5):560~567
- [35] 范少辉,马祥庆,陈绍栓,等.多代杉木人工林生长发育效应的研究 [J].林业科学,2000,36(4):9~15
- [36] 丁应祥,田野,戚玲.连栽杉木人工林生产力的模拟与预测 [J].南京林业大学学报,2000,24(3):21~25
- [37] 林清锦.黑荆树巨尾桉混交造林与效益分析 [J].福建林业科技,1999,26(2):44~48
- [38] 林清锦,张樟萍,林清顺,等.黑荆树巨尾桉混交造林的研究 [J].经济林研究,1996,14(增刊):27~29
- [39] 翁启杰,郑海水,黄世能,等.桉树薪炭林混交试验-尾叶桉和大叶相思或肯氏相思混交试验 [J].林业科技通讯,1994(12):13~15
- [40] 伍春魁.巨尾桉造林施肥试验初报 [J].广西林业科学,1995,24(2):30~32
- [41] 肖文光,王尚明.桉树与厚荚相思混交林的生物量及对土壤影响研究 [J].广东林业科技,1999,15(1):8~15
- [42] 杨曾奖,郑海水,翁启杰.桉树与固氮树种混交对地力及生物量的影响 [J].广东林业科技,1995,11(2):10~16
- [43] 陈爱玲,林德喜,张国防,等.杉木施肥 17 年后土壤养分的变化 [J].福建林学院学报,2000,20(3):265~268
- [44] 陈代喜.桂北杉木幼林施肥技术研究 [J].林业科技开发,1999(3):12~14
- [45] 陈德旺.杉木火力楠混交林生产力与改土效果研究 [J].北华大学学报(自然科学版),2004,5(2):151~154
- [46] 陈善治,周东雄.杉木乳源木莲混交对地力影响的初步研究 [J].福建林业科技,1995,22(2):44~47
- [47] 陈绍栓,陈淑容.杉木混交林营造技术研究 [J].福建林业科技,1994,21(增刊):83~87
- [48] 陈顺和.萌芽杉木酸枣混交林生长与生物量研究初报 [J].华东森林经理,2002,16(4):23~26
- [49] 迟殿选.杉木多代连栽地营造混交林土壤肥力变化 [J].吉林林

- 学院学报, 1999, 15(4): 196~198
- [50] 封磊, 洪伟, 吴承祯, 等. 杉木-观光木混交林不同经营模式土壤团粒结构的分形特征 [J]. 山地学报, 2004, 22(3): 315~320
- [51] 高培军, 郑郁善, 王妍, 等. 杉木拟赤杨混交林土壤肥力性状研究 [J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(4): 598~603
- [52] 郭友林. 杉木细柄阿丁枫混交对林分生长的影响 [J]. 林业科技开发, 2003, 17(增刊): 28~30
- [53] 何贵平, 陈益泰, 胡炳堂, 等. 杉木与马褂木、檫树混交林及其纯林生物量和土壤肥力研究 [J]. 林业科学研究, 2001, 14(5): 540~547
- [54] 何贵平, 陈益泰, 余元华, 等. 南酸枣人工林早期生长特性及其与杉木混交效应研究 [J]. 林业科学研究, 2004, 17(2): 206~212
- [55] 何贵平, 陈益泰, 余元华, 等. 杉木、山杜英混交林及其纯林生物量研究 [J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(6): 819~823
- [56] 黄勇来. 杉木拟赤杨混交林土壤肥力研究 [J]. 江苏林业科技, 1998, 25(3): 10~13
- [57] 纪建书, 巫流民. 杉木幼林施肥时间效应研究 [J]. 林业科技通讯, 1996(6): 32~33
- [58] 蒋家淡. 红锥杉木混交造林效果研究 [J]. 福建林学院学报, 2002, 22(4): 329~333
- [59] 康述海, 卿芳, 林先明, 等. 酸枣杉木混交林林分生长研究 [J]. 福建林业科技, 2004, 31(2): 20~22
- [60] 李大盆. 福建柏与杉木、湿地松混交林分结构和生物量的研究 [J]. 福建林业科技, 2004, 31(4): 51~53
- [61] 李江才. 杉木红锥混交林间伐试验研究 [J]. 江西农业大学学报, 2003(25): 119~123
- [62] 李丽红. 杉木观光木混交林生物产量结构特征 [J]. 福建林学院学报, 2003, 23(4): 297~300
- [63] 梁宏温. 广西林朵林场栽针(杉)保阔混交造林的效果研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 1996, 4(4): 34~41
- [64] 林剑青. 杉木木荷混交林生产力研究 [J]. 青海农林科技, 2004(4): 29~31
- [65] 林同龙. 杉木多代连栽林地营造杉阔混交林后的土壤肥力变化 [J]. 浙江林业科技, 2000, 20(2): 39~42
- [66] 林文龙. 杉木鄂西红豆树混交林分结构与生产力研究 [J]. 林业科技开发, 2002, 16(1): 21~23
- [67] 林照授. 杉木火力楠混交林生长过程及分布格局研究 [J]. 北华大学学报(自然科学版), 2004, 5(2): 155~158
- [68] 凌文昌, 黎佐洲, 陈礼地, 等. 杉木中龄林施肥效应研究 [J]. 广东林业科技, 1998, 14(4): 14~18
- [69] 刘春华. 杉木酸枣人工混交林生产力和林木生长规律的研究 [J]. 福建林业科技, 1998, 25(2): 33~37
- [70] 刘芳. 杉木光皮桦纯林及混交林生物量 [J]. 浙江林学院学报, 2002, 19(2): 143~147
- [71] 刘正忠. 杉木萌芽纯林与混交林生长量及经济效益的研究 [J]. 福建林业科技, 2003, 30(4): 49~51
- [72] 卢善土. 杉木山杜英混交林林分生产力及生态效益的研究 [J]. 福建林学院学报, 1998, 8(4): 348~351
- [73] 罗枝省. 杉桉混交林生长效果与林分小气候特征研究 [J]. 福建林业科技, 2000, 27(增刊): 32~34
- [74] 马祥庆, 庄孟能, 叶章善. 杉木拟赤杨混交林林分生产力及生态效应研究 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(2): 178~185
- [75] 刘文琳. 杉松人工林混生天然檫树生长状况的调查研究 [J]. 福建林业科技, 2000, 27(4): 64~66
- [76] 钱国钦. 枫香杉木混交林生产力及生态特性 [J]. 浙江林学院学报, 2000, 17(3): 289~293
- [77] 唐明荣, 陈小忠, 鄢振武, 等. 杉木幼林施肥效应研究 [J]. 浙江林业科技, 1998, 18(2): 38~43
- [78] 王光玉. 杉木混交林水源涵养和土壤性质研究 [J]. 林业科学, 2003, 39(专刊 1): 15~20
- [79] 王国熙. 不同模式杉木-火力楠混交林林分燃烧性的研究 [J]. 河北林果研究, 1998, 13(增刊): 143~146
- [80] 魏秀英. 拟赤杨杉木混交林生长与改良土壤效应研究 [J]. 引进与咨询, 2003(9): 33~35
- [81] 巫流民, 李贻铨, 胡炳堂, 等. 花岗岩黄红壤杉木幼林施肥连年生长效应 [J]. 林业科学研究, 1997, 10(3): 289~295
- [82] 吴家胜, 陈有全, 金远东, 等. 杉木与拟赤杨混交林的效益 [J]. 浙江林学院学报, 1994, 11(1): 69~74
- [83] 肖建宏, 陈爱明, 郑鹏. 杉木与枫香混交林营造技术研究 [J]. 浙江林业科技, 2000, 20(2): 26~30
- [84] 姚庆端. 不同杉木混交模式土壤肥力及其蓄水量研究 [J]. 福建林学院学报, 1996, 16(3): 282~286
- [85] 姚庆端. 杉木巨尾桉混交林林分生物量及土壤肥力研究 [J]. 林业科技开发, 2003, 17(6): 13~15
- [86] 张文桥, 陈代喜, 韦昌汉, 等. 花岗岩立地上杉木幼林施肥生长效应的初步研究 [J]. 广西林业科学, 1996, 25(3): 121~126
- [87] 张兴正. 福建含笑杉木混交林的效益及机理分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2001, 10(3): 25~29
- [88] 郑郁善, 丁应祥. 观光木杉木混交林土壤性状研究 [J]. 南京林业大学学报, 1997, 21(4): 31~36
- [89] 郑郁善. 福建含笑人工造林模式的评价 [J]. 福建林学院学报, 1996, 16(2): 143~147
- [90] 周东雄. 杉木深山含笑混交林土壤肥力的研究 [J]. 福建林学院学报, 1994, 14(3): 220~224
- [91] 周后盛. 杉木多代连栽地营造混交林生产力的初步研究 [J]. 福建林学院学报, 1999, 19(2): 146~148
- [92] 周树荣, 谭忠良. 融水杉木速生丰产综合技术研究 [J]. 广西林业科学, 1995, 24(2): 57~63
- [93] 庄孟能. 杉木拟赤杨混交林林分结构和生产力 [J]. 福建林学院学报, 1994, 14(4): 339~343
- [94] 张鼎华, 叶章发, 李宝福. 杉木马尾松轮作对林地土壤肥力和林木生长的影响 [J]. 林业科学, 2001, 37(5): 10~15
- [95] Fang Jingyun, Chen Anping, Peng Changhui, *et al* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292: 2320~2322
- [96] 中国林业科学研究院森林生态环境研究所. 1994年中国土地利用变化和林业温室气体排放清单 [M]. 北京: 中国林科院, 2004
- [97] 中华人民共和国农林部. 立木材积表 LY 208-77 [M]. 北京: 技术标准出版社, 1978: 57, 73~78, 121
- [98] 国家标准局. 中华人民共和国森林土壤分析方法 ( ) GB 7848~7858-87 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1987
- [99] 姚茂和. 人工林地力衰退问题 [A]. 见: 盛炜彤. 人工林地力衰

- 退研究 [C]. 北京: 中国科技出版社, 1992: 27 ~ 30
- [100] Kimmins J P. Forest ecology[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1987: 68 ~ 127
- [101] Raison R J, Crane W J B. Nutritional costs of shortened rotations in plantation forestry [A]. In: Gessel S P. Forest site and Productivity [C]. Netherlands: Martings Nijhoff Publishers 1986: 117 ~ 125
- [102] 姚茂和. 林下植被对杉木林地力的影响研究 [J]. 林业科学, 1991, 27 (6): 644 ~ 147
- [103] 杨玉盛, 何宗明, 马祥庆, 等. 论炼山对杉木人工林生态系统影响的利弊及对策 [J]. 自然资源学报, 1997, 12 (2): 154 ~ 159
- [104] 陈龙池, 汪思龙. 杉木根系分泌物化感作用研究 [J]. 生态学报, 2003, 23 (2): 393 ~ 398
- [105] 马祥庆. 杉木人工林连栽生产力下降研究进展 [J]. 福建林学院学报, 2001, 21 (4): 380 ~ 384
- [106] 马祥庆, 黄宝龙. 人工林地力衰退研究综述 [J]. 南京林业大学学报, 1997, 21 (2): 77 ~ 82
- [107] 李贻铨. 林木施肥是短轮伐期工业用材林的基础技术措施 [A]. 见: 盛炜彤. 人工林地力衰退研究 [C]. 北京: 中国科技出版社, 1992: 43 ~ 46
- [108] 姚茂和, 盛炜彤, 熊有强. 杉木林下植被及其生物量的研究 [A]. 见: 盛炜彤. 人工林地力衰退研究 [C]. 北京: 中国科技出版社, 1992: 157 ~ 160
- [109] 曾杰, 郑海水, 翁启杰, 等. 桉树人工林中的他感作用研究综述 [A]. 见: 沈国舫. 混交林研究 - 全国混交林与树种间关系学术讨论会文集 [C]. 北京: 中国林业出版社, 1997: 285 ~ 289
- [110] 姚茂和, 盛炜彤, 熊有强. 林下植被对杉木林地力影响的研究 [A]. 见: 盛炜彤. 人工林地力衰退研究 [C]. 北京: 中国科技出版社, 1992: 161 ~ 167
- [111] 盛炜彤, 杨承栋. 关于杉木林下植被对改良土壤性质效用的研究 [J]. 生态学报, 1997, 17 (4): 377 ~ 382
- [112] 陈建宇. 杉木林下植被生物量与土壤容重关系的研究 [J]. 福建林业科技, 2000, 27 (4): 56 ~ 60

www.cnki.net