

文章编号:1001-1498(2014)06-0801-08

## 杉木林分蓄积生长的密度及立地效应

相聪伟, 张建国\*, 段爱国, 张雄清

(中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**摘要:**采用3参数Weibull生长方程,对15块杉木密度试验林26年连续观测数据进行分析,计算了林分材积年平均生长量(MAI,包括净材积年平均生长量(MAI<sub>net</sub>),总材积年平均生长量(MAI<sub>gross</sub>));利用相关分析及逐步回归分析,研究了林分净材积(V<sub>net</sub>)和总材积(V<sub>gross</sub>=V<sub>net</sub>+枯死木材积累积(∑V<sub>m</sub>))年平均生长量的峰值及峰值林龄与初植密度、立地质量的关系。结果表明:(1)MAI<sub>net</sub>峰值与立地指数呈显著正相关,而受林分密度影响很小,其在立地指数级22m的样地内平均值比立地指数级12m的样地增加了8.33 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;MAI<sub>gross</sub>峰值与立地质量及林分初植密度均呈正相关( $r=0.8135, p=0.0004; r=0.9261, p=0.0000$ );(2)MAI<sub>net</sub>峰值林龄主要受初植密度的影响,初植密度太大或太小对MAI<sub>net</sub>峰值林龄有显著影响,E密度(1m×1m)样地的MAI<sub>net</sub>峰值林龄平均值比A密度(2m×3m)样地的小3.88年,而中间密度的MAI<sub>net</sub>峰值林龄变化不明显。

**关键词:**年平均生长量;杉木;初植密度;立地质量

中图分类号:S757.9 S791.27

文献标识码:A

## Effects of Planting Density and Site Quality on Stand Volume of Chinese Fir Plantation

XIANG Cong-wei, ZHANG Jian-guo, DUAN Ai-guo, ZHANG Xiong-qing

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** In this study, 3-parameter Weibull growth equation was used for modeling the mean annual increment (MAI), including mean annual gross increment (MAI<sub>gross</sub>) and mean annual net increment (MAI<sub>net</sub>), of 26-year-old Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) experiment plantation. The relationship between the maximum value of MAI and the site index and planting density, and the relationship between the culmination age of MAI and these two factors were analyzed by the method of partial correlation and stepwise linear regression. The conclusions are as follows: (1) The MAI<sub>net</sub> was effected by site quality, there was a significant positive linear correlation between these two stand factors, the mean MAI<sub>net</sub> value was 8.33 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> bigger in stands with site index of 22 m than that with site index of 12 m. V<sub>gross</sub> compose of V<sub>net</sub> and ∑V<sub>m</sub>, which were effected by site quality and planting density, and MAI<sub>gross</sub> increased with the site index and planting density ( $r=0.8135, p=0.0004; r=0.9261, p=0.0000$ , respectively). (2) Because of the competition among trees and nutrition limitation after crown closed, there was a significant negative correlation between MAI<sub>net</sub> and planting density ( $r=-0.6669, p=0.0092$ ), the planting density was the reason slowing the tree's growth. The MAI<sub>net</sub> of the plots with density of 1 m×1 m was 3.88 years smaller than that with the density of 2 m×3 m. However, there was no significant difference in MAI<sub>net</sub> among the stands with medium planting density.

收稿日期:2013-03-18

基金项目:国家“十二·五”科技支撑专题“杉木三代育种技术研究示范”(2012BAD01B0201);林业行业标准制修订项目“杉木大径材培育”(2014-LY-055)

作者简介:相聪伟(1982-),男,河北石家庄人,博士,主要从事森林培育研究。E-mail:xiangcongwei@126.com

\* 通讯作者。

**Key words:** mean annual increment; *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; planting density; site quality

林分材积年平均生长量(MAI)是了解林分生长进程的重要因子,随着林龄的增加,林分材积年平均生长量呈先增加后减小的单峰状曲线,其峰值时的林龄是判断最优轮伐期的重要指标<sup>[1]</sup>。材积年平均生长量随林龄的变化及受林分初植密度和立地质量等林分因子怎样的影响,一直以来是林学家和森林经营者最关注的问题<sup>[2-5]</sup>。研究表明,材积年平均生长量峰值与立地质量呈显著的正相关<sup>[3,6-8]</sup>。关于立地质量对峰值林龄的影响,Nishizono<sup>[2]</sup>认为,立地质量好的林分由于林木早期生长较快,植株受到水压限制较早,导致林分生长下降,使林分材积年平均生长量峰值出现较早,此结果与火炬松<sup>[9]</sup>,日本柳杉<sup>[7]</sup>等的类似。林分材积年平均生长量不仅受立地质量的影响,同时还受林分密度的影响。Fownes等<sup>[10]</sup>对柳叶桉同龄林研究表明,高初植密度林分的材积年平均生长量达到峰值的时间较低初植密度林分的早。Marshall等<sup>[11]</sup>研究花旗松林发现,间伐推迟了林分材积年平均生长量峰值的出现,但这些研究只是简单列出结果,并没有深入分析其中的原因。

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)是我国亚热带地区特有的优良用材树种,也是我国南方主要的造林树种,全国杉木人工林面积为921.5万hm<sup>2</sup>,占全国造林面积的28.54%,在我国森林资源中占有重要的地位<sup>[12]</sup>。在杉木人工林研究中,关于林分因子对材积年平均生长量影响的研究较少,刘景芳等<sup>[8]</sup>收集了全国杉木人工林临时样地数据,编制了全国杉木人工林生长过程表,其结果表明,全国各区材积年平均生长量的峰值随立地质量的变化而变化,不同立地的材积年平均生长量峰值林龄几乎完全相同;邓伦秀<sup>[13]</sup>采用不同初植密度的杉木人工林固定样地的数据,分析了林分材积生长的变化,得到了同样的结果,材积年平均生长量峰值与立地质量成正相关。这两项研究中,前者是基于全国各地临时样地数据,不能完全反映某一区域内林分的生长变化;而后者虽用了固定样地数据,但其研究未具体分析林分密度对材积年平均生长量峰值林龄的影响。由上可见,立地质量对材积年平均生长量影响的结论较一致,而林分密度对材积年平均生长量的影响仍未形成一致的结论。本研究利用福建杉木密度试验林连续观测26年的数据,计算不同立地指数、不同初植密度林分材积年平均生长

量的变化,进一步分析初植密度对其的影响,为杉木人工林经营中的密度控制提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

密度试验林位于福建省邵武市卫闽国有林场。该试验林于1982年使用1年生苗造林,采用随机区组试验设计,5个密度梯度:A密度(2m×3m)、B密度(2m×1.5m)、C密度(2m×1m)、D密度(1m×1.5m)、E密度(1m×1m),每个密度梯度3次重复,共15个样地,每样地面积600m<sup>2</sup>。每株树挂牌标记,造林当年开始进行每木检尺。10年生前逐年调查,以后隔年调查,每次调查均在当年生长停止后或下一年开始生长前进行,连续观测26年,共取得17次调查数据。6年生前测量全部树高,7年生时开始每个样地抽测100株,12年生时开始每个样地抽测50株。树高和胸径分别采用测高杆、测树围尺测量。5年生时开始计算林分蓄积;20年生时,在每个样地内随机取5株最高木作为优势木,求算其树高的平均值作为立地指数(SI)。样地概况见表1。

### 1.2 林分材积的计算

本研究采用林业颁布的杉木二元材积经验式<sup>[8]</sup>计算材积。

单株材积:

$$V = 0.000\ 058\ 777\ 042D^{1.969\ 983\ 1} \cdot H^{0.896\ 461\ 57}$$

林分总材积( $V_{gross}$ )等于林分净材积( $V_{net}$ ,活立木材积)+累积的枯死木材积( $\sum V_m$ ),即:

$$V_{gross} = V_{net} + \sum V_m。$$

林分净材积分径阶计算,枯死木材积( $V_m$ )由每年的枯死株数统计计算。

林分净材积年平均生长量( $MAI_{net}$ ):

$$MAI_{net} = V_{net}/t$$

总材积的年平均生长量( $MAI_{gross}$ ):

$$MAI_{gross} = V_{gross}/t = (V_{net} + \sum V_m)/t \\ = MAI_{net} + MAI_m$$

式中: $t$ 为林龄, $MAI_m$ 为年平均枯死材积量。

### 1.3 Weibull 生长方程

植物在整个生命周期中可分为3个阶段:早期的加速生长阶段、中期的线性生长阶段、成熟期的缓慢生长阶段,即整个生长期可以描述为一条“S”形曲

表1 样地概况

样地编号	初植密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	林龄/a	立地指数/m	立地指数级/m	平均树高/m	平均胸径/cm
A1	1 667	26	15.84	16	3.59 ~ 14.41	5.31 ~ 15.51
A2	1 667	26	20.62	20	4.11 ~ 19.54	5.59 ~ 21.70
A3	1 667	26	21.46	22	3.97 ~ 21.67	5.95 ~ 22.72
B1	3 333	26	13.96	14	3.29 ~ 12.57	4.15 ~ 15.26
B2	3 333	26	20.80	20	4.11 ~ 18.32	5.39 ~ 17.54
B3	3 333	26	18.68	18	3.82 ~ 17.72	5.11 ~ 16.89
C1	5 000	26	15.74	16	3.23 ~ 13.73	3.94 ~ 13.82
C2	5 000	26	21.24	22	3.25 ~ 18.03	4.02 ~ 15.70
C3	5 000	26	18.90	18	3.74 ~ 17.40	5.01 ~ 16.41
D1	6 667	26	14.54	14	3.37 ~ 13.53	3.99 ~ 13.29
D2	6 667	26	20.90	20	3.17 ~ 17.68	3.75 ~ 14.99
D3	6 667	26	14.14	14	2.99 ~ 13.56	3.54 ~ 14.24
E1	10 000	26	13.58	14	3.18 ~ 12.39	3.43 ~ 11.99
E2	10 000	26	20.88	20	3.42 ~ 18.52	3.87 ~ 15.95
E3	10 000	26	12.16	12	2.96 ~ 11.24	3.33 ~ 12.19

线<sup>[14-16]</sup>,这一曲线可用不同的理论生长方程描述。本研究中,选择广泛应用于树木生长模拟的 Weibull 三参数理论生长方程分析林分材积生长变化<sup>[6, 17]</sup>,其 Weibull 方程表达式为:

$$V = a(1 - \exp(-bt^c)) \quad (1)$$

式(1)中:  $V$  为林分材积;  $t$  为林龄;  $a, b, c$  为模型参数。

材积年平均生长量为林分材积生长与林龄之比,即:

$$MAI = \frac{V}{t} = \frac{a}{t}(1 - \exp(-bt^c)) \quad (2)$$

对方程(2)进行微分得出以下方程:

$$\frac{\partial MAI}{\partial t} = \frac{a}{t^2}((bct^c + 1)\exp(-bt^c) - 1) \quad (3)$$

方程3等于0时,  $t$  为  $MAI$  峰值林龄,  $t$  时刻对应的  $MAI$  值为  $MAI$  的峰值<sup>[18]</sup>。

#### 1.4 方程的拟合方法

对同一样地进行重复测量会导致数据间自相关的出现,在林分材积与林龄的回归分析时,数据的自相关将导致误差项不独立,影响到参数的统计显著性,甚至参数估计为有偏。在研究中广泛应用自回归模型校正残差间的自相关<sup>[19-22]</sup>,其表达式如下:

$$e_i = \sum \varphi e_{i-p} + \varepsilon_i$$

式中:  $t$  为林龄;  $e_i$  为模型拟合误差;  $\varepsilon_i$  为校正

后随机误差;  $\varphi$  为自回归参数;  $p$  为时间间隔,  $p = 1, 2, 3 \dots$ 。

本研究采用 Eviews5 软件对数据进行回归分析及自相关校正<sup>[23]</sup>。

为检验立地指数和林分密度对峰值林龄的交互影响,本研究采用 SPSS16.0 软件,采用偏相关分析法分析峰值林龄与立地指数及林分密度的关系<sup>[24-25]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 初植密度及立地质量对年平均生长量的影响

在观测期内,林分净材积年平均生长量 ( $MAI_{net}$ ) 和总材积年平均生长量 ( $MAI_{gross}$ ) 呈较一致的变化趋势。在林分发展的前期,随着林龄的增加而增加,高初植密度的林分比低密度林分的高,这是由于在生长初期,林分材积主要取决于株数的多少。在观测期内,15个样地净材积年平均生长量及总材积年平均生长量均已达到峰值(图1),峰值的大小及峰值林龄随着立地指数及林分初植密度的变化而变化,其中,  $MAI_{net}$  峰值分布范围为 15.80 ~ 31.14  $m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ;  $MAI_{gross}$  峰值的分布范围为 15.80 ~ 32.71  $m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ;  $MAI_{net}$  峰值林龄的分布范围为: 16.05 ~ 22.70 a;  $MAI_{gross}$  峰值林龄的分布范围为: 18.30 ~ 22.90 a(表2)。

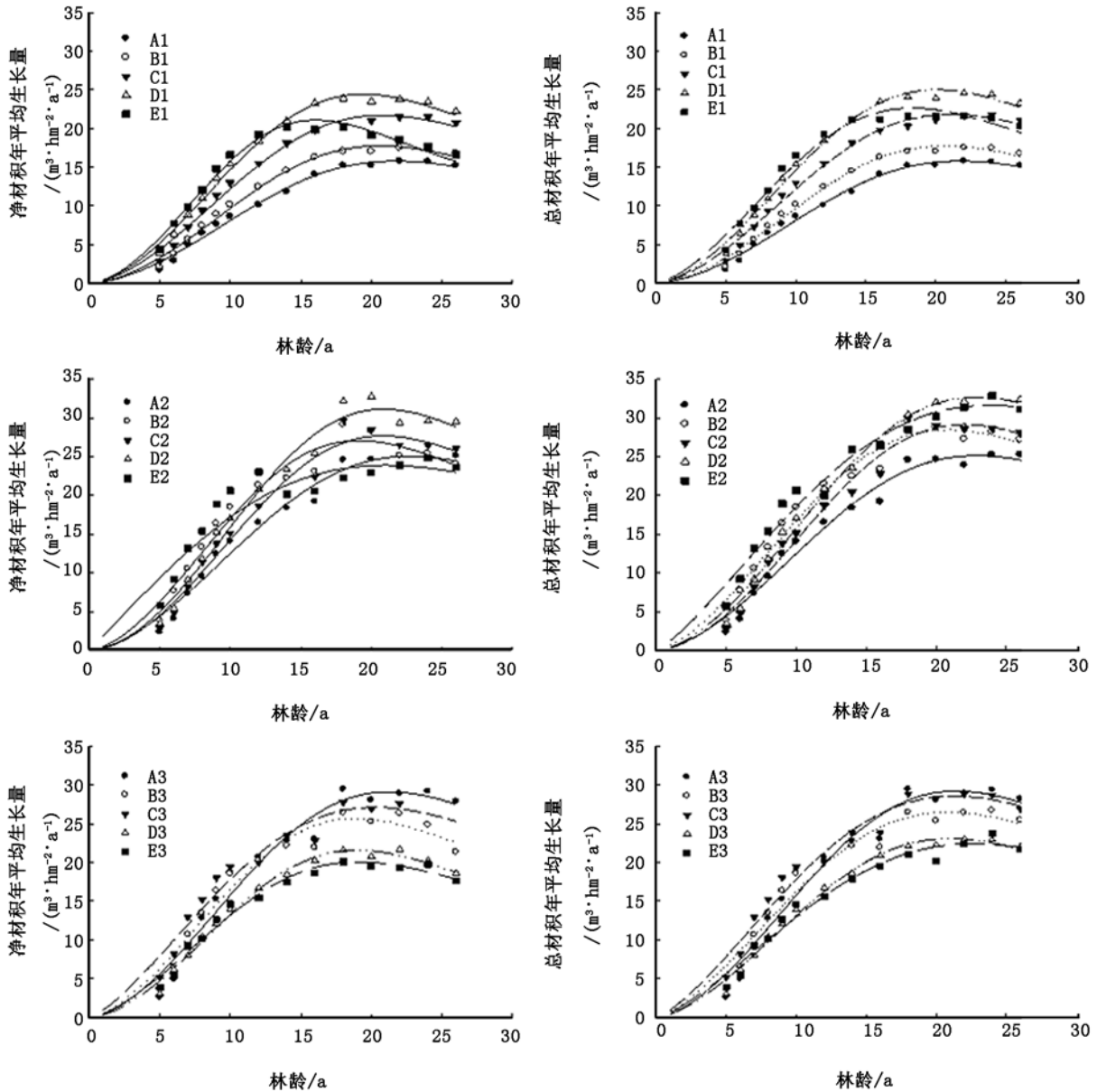


图1 不同样地的净材积、总材积年平均生长量实测值(图标)与 Weibull 方程的拟合曲线

$MAI_{net}$  峰值随立地指数的增加呈极显著的增加趋势(图2),其中,立地指数级为 22 m 样地的  $MAI_{net}$  峰值比 12 m 样地的平均值增加了  $8.33 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表2),但随着林分初植密度的增加, $MAI_{net}$  峰值并没有表现出明显的变化趋势(图2)。这表明, $MAI_{net}$  峰值主要受立地质量的影响,受林分初植密度的影响很小。

$MAI_{gross}$  峰值随立地指数及林分初植密度的增加均呈较明显的增加趋势(图3),逐步线性回归分

析得到线性方程为:  $MMAI_{gross} = -4.470 + 1.418 \times SI + 0.001 \times SD$  ( $SI$  为立地指数,  $SD$  为林分初植密度) ( $p = 0.0000$ )。立地指数级为 22 m 样地的  $MAI_{gross}$  峰值平均值比 12 m 样地的增加了  $6.8 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;与 A 密度样地相比, D 密度样地的  $MAI_{gross}$  值峰值平均值增加了  $3.53 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , E 密度样地的增加了  $2.17 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由此可见,林分的总材积生长量受林分立地质量和初植密度的共同影响。

表2 各样地材积的  $MAI_{net}$  和  $MAI_{gross}$  的峰值及峰值林龄

样地	$MAI_{net}$		$MAI_{gross}$	
	$CAMA_{net}/a$	$MMA_{net}/(m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	$CAMA_{gross}/a$	$MMA_{gross}/(m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$
A1	21.70	15.80	21.70	15.80
A2	22.70	25.07	22.90	25.14
A3	21.25	29.10	21.45	29.21
B1	20.60	17.76	20.60	17.76
B2	19.10	27.11	20.90	28.51
B3	18.90	25.71	20.85	26.52
C1	20.75	21.71	21.00	21.85
C2	20.85	27.72	22.00	29.17
C3	20.30	27.12	21.30	28.53
D1	19.45	24.43	20.10	24.98
D2	20.85	31.14	22.90	32.71
D3	18.95	21.57	21.00	23.05
E1	16.05	21.08	18.30	22.66
E2	18.90	22.90	20.80	31.65
E3	19.05	20.08	22.65	22.39

注:  $MAI_{net}$  为净材积年平均生长量;  $MAI_{gross}$  为总材积年平均生长量;  $MMA_{net}$  为净材积年平均生长量峰值;  $CAMA_{net}$  为净材积年平均生长量峰值时的林龄;  $MMA_{gross}$  为总材积年平均生长量峰值;  $CAMA_{gross}$  为总材积年平均生长量峰值时的林龄。

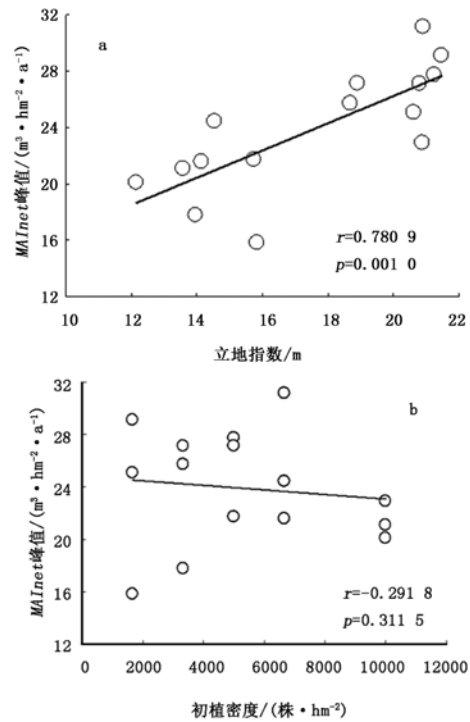


图2  $MAI_{net}$  峰值与立地指数(图 a)及林分初植密度(图 b)的相关关系

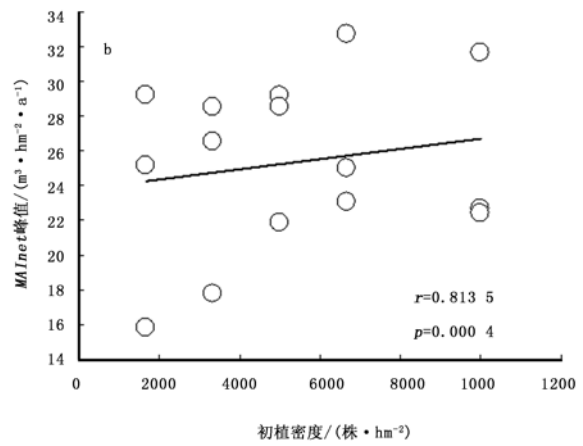
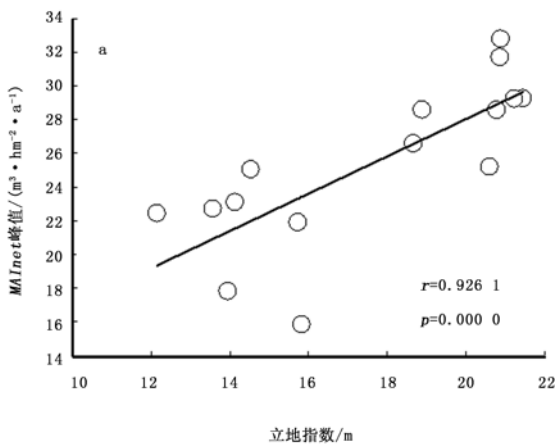


图3  $MAI_{gross}$  峰值与立地指数(图 a)及林分初植密度(图 b)的相关关系

2.2 初植密度及立地质量对峰值林龄的影响

与  $MAI_{net}$  峰值变化相反,  $MAI_{net}$  峰值林龄随林分初植密度的增加而减小, 即初植密度越大, 林分达到  $MAI_{net}$  峰值越早, E 密度样地的  $MAI_{net}$  峰值林龄比 A 密度样地的平均早了 3.88 年, 虽然二者的相关性达极显著(偏相关系数  $r = 0.6669, p = 0.0092$ ), 但 B、C、D 3 个密度样地的  $MAI_{net}$  峰值林龄变化并

不明显(表 2, 图 4)。立地质量对峰值林龄的影响较小, 没有表现出明显的增加或减小趋势(图 4)。 $MAI_{gross}$  峰值林龄随立地指数及林分初植密度的变化均没有较明显的变化趋势(图 5), 回归分析所得方程为:

$$CAMA_{net} = 22.016 - 0.0004 \times SD (SD \text{ 为林分初植密度}, p = 0.0024)。$$

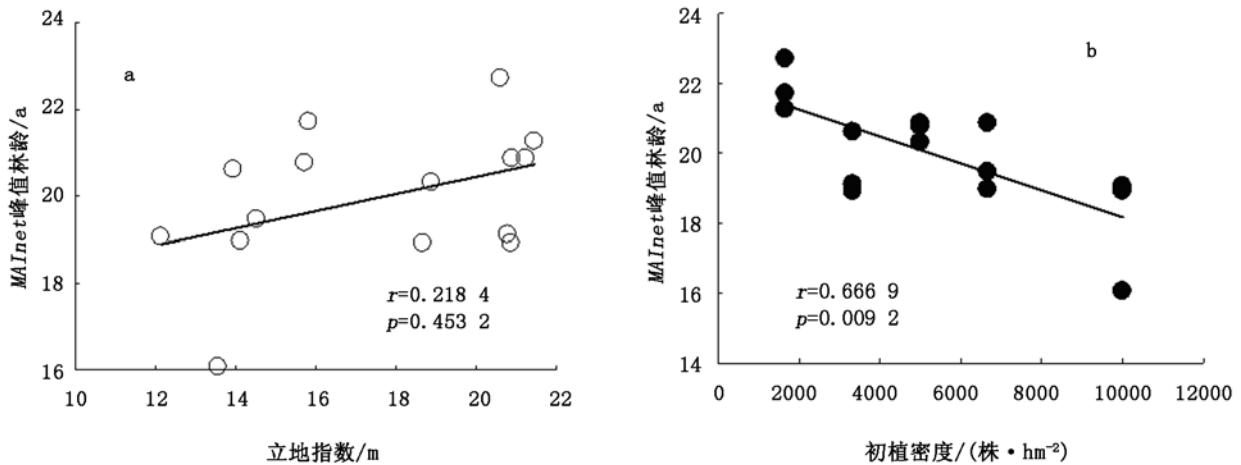


图4 *MAInet* 峰值林龄与立地指数(图 a)及林分初植密度(图 b)的相关关系

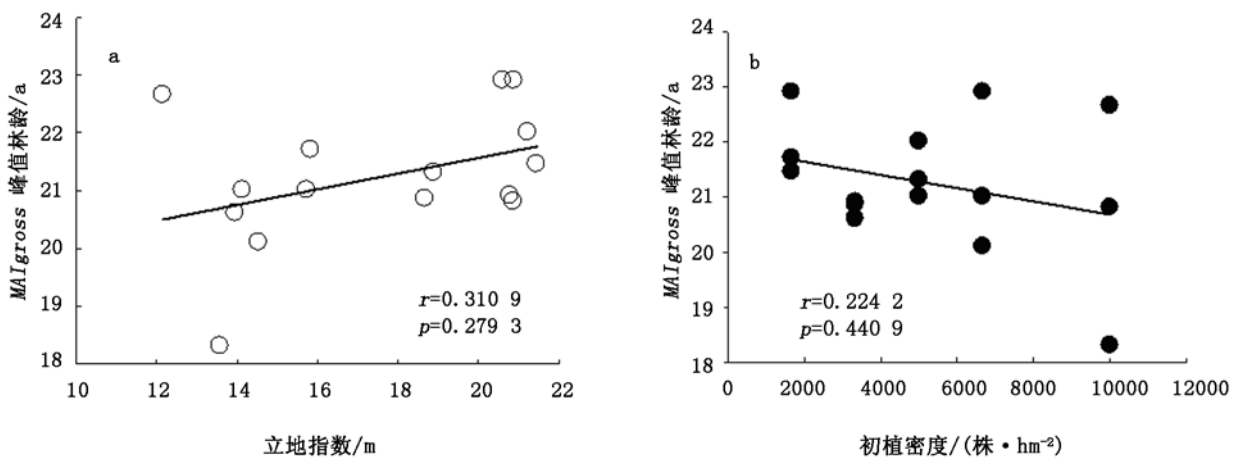


图5 *MAIgross* 峰值林龄与立地指数(图 a)及林分初植密度(图 b)的相关关系

### 3 结论与讨论

#### 3.1 *MAI* 峰值与立地质量及林分密度的关系

本研究中,杉木人工林林分的 *MAInet* 峰值与立地指数(*SI*, 20年生时优势木的树高平均值)呈极显著正相关,而与林分密度的相关性很弱(图2)。该结果与此前对杉木<sup>[8]</sup>、柳杉<sup>[7]</sup>、花旗松<sup>[26]</sup>等的研究结果一致。*MAIgross* 与立地质量和林分初植密度均存有一定的正相关关系, *MAIgross* 由净材积年平均生长量(*MAInet*)和年平均枯死材积量(*MAIm*)两部分组成,在一定程度上反映了地上部分生物量的大小。由上面的分析可知,第一部分 *MAInet* 的最大值主要受立地质量的影响,第二部分枯死木材积主要受林分初植密度的影响。在高初植密度的林分内,林分郁闭后植株间激烈竞争,少数较大的植株存活下来,产生大量的被压木枯死<sup>[27-28]</sup>, 枯死木的株数

随初植密度的增大而增大<sup>[29-30]</sup>, 这造成 *MAIm* 的最大值与林分初植密度的正相关关系。由此可见,立地质量及初植密度对 *MAIgross* 峰值均有影响,一定程度上说明了,立地质量和初植密度对地上部分生物量的生长有促进作用。

#### 3.2 *MAI* 峰值林龄与初植密度及立地质量的关系

大量研究发现,林分郁闭后地上部分的生长量随林龄的增加而逐渐下降<sup>[26, 31-32]</sup>, 这直接影响 *MAInet* 峰值林龄的变化。本研究中, *MAInet* 峰值林龄与林分初植密度存有明显的负相关, A 密度样地的 *MAInet* 峰值林龄明显大于 E 密度样地的, 这与 Fownes 等<sup>[10]</sup>及 Marshall 等<sup>[11]</sup>的研究结果一致; 而处于中间密度样地的 *MAInet* 峰值林龄受密度的影响并不明显(图4), 这在之前的研究中鲜见报道。

Martin 等<sup>[9]</sup>研究火炬松时认为, 林分郁闭后植株间相互竞争是林分生长减缓的主要原因。林分初

植密度的大小直接决定树木间资源竞争的开始及竞争的激烈程度<sup>[26]</sup>,一方面,高初植密度的林分植株间空间较小,林分首先进入郁闭,树冠下部枝条逐渐枯死使树冠生产力衰退。当树冠生产力下降到一定程度后林木便会枯死(自然稀疏),随之而来的便是整个林分生长量的下降<sup>[26]</sup>。初植密度越高,林木对资源的竞争越激烈,由此引发的自然稀疏越早出现<sup>[29-30]</sup>,*MAInet* 的峰值林龄也越早。另一方面,Jokela 等<sup>[33]</sup>对火炬松施肥试验的研究表明,在林分生长过程中的养分限制是林分生产力下降的主要原因,Martin 等<sup>[9]</sup>对火炬松林再施肥试验同样证明了这一点。林分发展过程中,土壤中的养分随植株的生长固定在树干等有机体内,随着植株的长大,土壤中的养分逐渐消耗,加之杉木人工林凋落物分解速率低,养分还原慢,在林分发展的中后期便会受到养分的限制<sup>[34]</sup>。初植密度越大,单位面积上植株数目越多,林分越早受到养分的限制,这造成了林分密度与 *MAInet* 峰值林龄的负相关关系。

本研究中,中间密度(B、C、D 密度)林分材积的 *MAInet* 峰值林龄差异并不明显。由此可见,*MAInet* 峰值林龄与林木竞争的激烈程度(密度大小)之间并不是简单的线性关系,而是随初植密度的增加而减小,而在一定范围内变化不明显,当密度增大到一定程度时再减小的趋势。笔者对这一趋势做了如下推断:随着密度的增加,林木之间的竞争从无到有,此过程中由于竞争的产生,林分 *MAInet* 峰值林龄随着林分密度的增加而呈明显下降趋势;但这种下降趋势并不一直持续,而是当密度增加到中等密度后,由于竞争的增加使单株材积的生长量减小,但并没有造成大量的植株枯死,使林分材积的生长量变化不大<sup>[35]</sup>,在一定的密度范围内,表现出 *MAInet* 峰值林龄变化不明显;当密度进一步增加,激烈的竞争导致大量的植株死亡,*MAInet* 峰值林龄随着林分密度的增加再次呈现下降的趋势。在很大的密度范围内,*MAInet* 峰值林龄随林分密度的增加总体上呈下降趋势。因此,在人工林经营过程中,应当根据林分材积的年平均生长量与林分密度及立地质量的关系,对林分结构进行调整。以小径材或以获得生物量为目的的人工林应以高初植密度造林,可以缩短数量成熟期,以获得更多的地上生物量;以大径材为培育目标的用材林应以相对较低的初植密度造林,或通过间伐保持相对低的保留密度,以延长数量成熟期获得更多大径材。

立地质量对 *MAInet* 峰值林龄的影响结果表明,*MAInet* 峰值林龄与立地指数的相关性很小,这与刘景芳等<sup>[8]</sup>对杉木人工林生长过程表的研究结果一致。其生长过程表中,本研究试验地所处的杉木中带区域不同立地指数林分的 *MAInet* 峰值林龄相同,均为 18 a;而 Nishizono 等<sup>[7]</sup>分析了日本柳杉林 28 a 观测树数据,结果表明,立地指数与 *MAInet* 的峰值林龄呈负相关,并推测如果继续观测下去立地指数与 *MAIgross* 的峰值也呈负相关,这与花旗松,火炬松等的研究结果一致<sup>[9,36]</sup>。Nishizono 等<sup>[7]</sup>认为,“水压限制假设”<sup>[37]</sup>是立地质量越好林分材积的生长率就越早达到顶峰并开始下降的原因,林分的生长减缓导致了立地质量与 *MAInet* 峰值林龄的负相关关系;但这一假说在 Ryan 等<sup>[32]</sup>的柳叶桉人工林研究中并没有得到证实。Ryan 等<sup>[32]</sup>认为,树高生长量的变化对植株或林分生物量生产的影响很小,且这种关系随植株大小及其它的一些林分因子(如林分密度、施肥等抚育措施)的变化而变化<sup>[38]</sup>。究其原因,可能是由于刘景芳等<sup>[8]</sup>、Nishizono 等<sup>[7]</sup>、Curtis<sup>[36]</sup>及 Martin 等<sup>[9]</sup>研究中的林分初植密度为相同或处于中间密度,在这种情况下,由于立地质量在林分发展的初期对单株的树高、树冠等生长有促进作用,高立地质量林分首先进入郁闭发生种间竞争<sup>[26]</sup>,导致立地质量与 *MAInet* 峰值林龄的负相关。

此外,本研究中,林分总材积的峰值林龄与立地质量及林分密度的相关性均很小,这与其它的研究结果一致,其受哪些林分因子的影响需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Curtis R O. A new look at an old question; Douglas fir culmination age[J]. Western journal of applied forestry, 1992, 7(4):97-99.
- [2] Nishizono T. Effects of thinning level and site productivity on age-related changes in stand volume growth can be explained by a single rescaled growth curve[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(12): 2276-2291.
- [3] Pretzsch H. Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [4] Zeide B. Thinning and growth: a full turnaround[J]. Journal of Forestry, 2001, 99(1): 20-25.
- [5] Von Gadow K, Hui G. Modelling forest development[M]. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [6] Vanclay J K. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests[D]. Copenhagen: Royal Veterinary and Agricultural University, 1994.
- [7] Nishizono T, Tanaka K, Hosoda K, et al. Effects of thinning and site productivity on culmination of stand growth; results from long-

- term monitoring experiments in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests in northeastern Japan[J]. *Journal of Forest Research*, 2008,13(5): 264–274.
- [8] 刘景芳, 童书振. 杉木林经营新技术[J]. *世界林业研究*, 1996, 9(专辑): 47–48.
- [9] Martin T A, Jokela E J. Stand development and production dynamics of loblolly pine under a range of cultural treatments in north-central Florida USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004,192(1): 39–58.
- [10] Fownes J H, Harrington R A. Modelling growth and optimal rotations of tropical multipurpose trees using unit leaf rate and leaf area index[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1990, 27: 886–896.
- [11] Marshall D D, Curtis R O, Service U S F. Levels-of-growing-stock cooperative study in Douglas-fir; report no. 15-Hoskins; 1963–1998[M]. Washington: Forestry Sciences Laboratory, 2002.
- [12] 贾治邦. 中国森林资源清查报告——第七次全国森林资源清查[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [13] 邓伦秀. 杉木人工林林分密度效应及材种结构规律研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [14] 张建国, 段爱国. 理论生长方程与直径结构模型的研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [15] Salas C, Stage A R, Robinson A P. Modeling effects of overstory density and competing vegetation on tree height growth[J]. *Forest Science*, 2008,54(1): 107–122.
- [16] Cieszewski C J, Strub M. Generalized algebraic difference approach derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from exponential and logarithmic functions[J]. *Forest Science*, 2008, 54(3): 303–315.
- [17] Yin X, Goudriaan J, Lantinga E A, *et al.* A flexible sigmoid function of determinate growth[J]. *Annals of Botany*, 2003,91(3): 361–371.
- [18] Lynch T B, Zhang D. On Relative Maxima of Diameter Growth, Basal Area Growth, Volume Growth, and Mean Annual Increment for Individual Trees[J]. *Forest Science*, 2011,57(4): 353–358.
- [19] Zimmerman D L, Núñez-Antón V, Gregoire T G, *et al.* Parametric modelling of growth curve data: An overview[J]. *Test*, 2001,10(1): 1–73.
- [20] Diéguez-Aranda U, Burkhart H, Rodríguez-Soalleiro R. Modeling dominant height growth of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in north-western Spain[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005,215(1–3): 271–284.
- [21] Monserud R. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type[J]. *Forest Science*, 1984,30(4): 943–965.
- [22] Bravo-Oviedo A, Tome M, Bravo F, *et al.* Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008,38(9): 2348–2358.
- [23] Hall R, Lilien D, Johnston J. *Eviews Users Guide*[M]. California: Quantitative Micro Software, Irvine, 1995.
- [24] Coulton C, Chow J. Interaction effects in multiple regression. *Journal of Social Service Research*, 1993,16(1–2): 179–199.
- [25] Norusis M. *SPSS 16.0 guide to data analysis*[M]. Pennsylvania: Prentice Hall Press, 2008.
- [26] Harrington T B, Harrington C A, DeBell D S. Effects of planting spacing and site quality on 25-year growth and mortality relationships of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009,258(1): 18–25.
- [27] Zeide B. Self-thinning and stand density[J]. *Forest Science*, 1991,37(2): 517–523.
- [28] Yoda K, Kira T, Ogawa H. Self-thinning in overcrowded pure stand under cultivated and natural conditions[J]. *J Biol Osaka City Univ*, 1963,14: 107–129.
- [29] Will R, Hennessey T, Lynch T, *et al.* Effects of Planting Density and Seed Source on Loblolly Pine Stands in Southeastern Oklahoma [J]. *Forest Science*, 2010,56(5): 437–443.
- [30] Moreno G, Cubera E. Impact of stand density on water status and leaf gas exchange in *Quercus ilex*[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008,254(1): 74–84.
- [31] Woodruff D R, Bond B J, Ritchie G A, *et al.* Effects of stand density on the growth of young Douglas-fir trees[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002,32(3): 420–427.
- [32] Ryan M G, Binkley D, Fownes J H, *et al.* An experimental test of the causes of forest growth decline with stand age[J]. *Ecological Monographs*, 2004,74(3): 393–414.
- [33] Jokela E J, Martin T A. Effects of ontogeny and soil nutrient supply on production, allocation, and leaf area efficiency in loblolly and slash pine stands[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(10): 1511–1524.
- [34] 盛炜彤, 范少辉. 杉木人工林长期生产力保持机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [35] Zhang J, Oliver W W, Ritchie M W. Effect of stand densities on stand dynamics in white fir (*Abies concolor*) forests in northeast California, USA[J]. *Forest ecology and management*, 2007,244(1–3): 50–59.
- [36] Curtis R O. Extended rotations and culmination age of coast Douglas-fir; old studies speak to current issues. Research Paper PNW-RP-485[M]. Olympia: Forestry Sciences Laboratory, 1995.
- [37] Ryan M G, Yoder B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth[J]. *Bioscience*, 1997,47(4): 235–242.
- [38] Ryan M G, Phillips N, Bond B J. The hydraulic limitation hypothesis revisited[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2006,29(3): 367–381.