

# 中短轮伐期杨树纸浆林 LAI 及生物生产力的研究\*

方升佐 徐锡增 吕士行 唐罗忠 曹福亮

(南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

【摘要】 研究了中短轮伐期杨树纸浆林 LAI 的动态变化, LAI 与透光率的关系, 林分的生物生产力及林分的经济生物量生产。结果表明, LAI 随林龄和密度的增大而递增, 3 个杨树无性系间是 NL-80351 > F-69 > F-72; LAI 与透光率的关系可用 M. Monsi 和 T. Saeki 修正的消光方程来描述, 消光系数为 0.818; 林分地上部分年净生物生产力与 LAI 密切相关, 其关系可用指数函数来表达; 4 年生时, 不同密度及不同无性系间林分的生物生产力、生物量分配模式存在较大差异, 以 1111 株 $\cdot$ hm $^{-2}$ 林分的生产力最高, 约为 500 株 $\cdot$ hm $^{-2}$ 林分的 1.4 倍。3 个无性系中以 NL-80351 最高, F-72 杨最低; 林分地上部分干木质部、枝木质部及皮的干物质累积趋势可用 Richards 方程描述。4 年生时, 作为化学浆材的林分经济生物量是 1111 > 833 > 625 > 500 株 $\cdot$ hm $^{-2}$ , 作为磨木浆材的林分经济生物量是 500 > 625 > 833 > 1111 株 $\cdot$ hm $^{-2}$ 。无性系间均以 NL-80351 的林分经济生物量最高, F-72 杨最低。

关键词 杨树无性系 纸浆材 LAI 净生物生产力 经济生物量

**Leaf area index and biomass productivity of mid and short rotation poplar plantations for pulp timber.** Fang Shengzou, Xu Xizeng, Lu Shixing, Tang Luozhong and Cao Fuliang (*College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 1998, 9(3): 225~ 230.

The study shows that the leaf area index (LAI) of mid and short rotation poplar plantations for pulp timber was increased with increasing planting density and stand age. Among the 3 poplar clones tested, NL-80351 had the highest LAI, F-72 had the lowest one and F-69 was the intermediate. The relationship between LAI and sunlight penetration rate could be described by extinction equation modified by M. Monsi and T. Saeki, and the extinction coefficient was 0.818. LAI had a close relationship with aboveground annual net biomass production, which could be expressed by exponential function. There existed a great difference of biomass productivity and distribution pattern among stands with different clones and planting densities at 4 years old. The biomass productivity of the stand with 1111 stems $\cdot$ hm $^{-2}$  was the highest, as 1.4 times as that with 500 stems $\cdot$ hm $^{-2}$ . NL-80351 had the highest productivity, and F-72 was the lowest. The biomass accumulation trend of stem xylem, branch xylem and bark could be described by Richards model. In different planting densities, the economic biomass for chemical pulp timber was in order of 1111 > 833 > 625 > 500 stem $\cdot$ hm $^{-2}$  at 4 years old. However, for groundwood pulp timber, it was in order of 500 > 625 > 833 > 1111 stems $\cdot$ hm $^{-2}$ . Clone NL-80351 had the highest stand economic biomass for both chemical and groundwood pulp timbers, F-72 had the lowest, and F-69 was the intermediate.

**Key words** Poplar clones, Pulp timber, LAI, Net biomass productivity, Economic biomass.

## 1 引言

我国自 70 年代初引入美洲黑杨、欧美杨等无性系以来, 80 年代在黄淮海地区、

江汉平原及江、浙沿海等广大地区得到了

\* 国家“八五”重点科技攻关项目 (85-18-02-07)。

1996-02-15 收稿, 1996-07-20 接受。

大面积推广. 但由于当时栽培目的不明确, 经济效益未能充分发挥. 美国、加拿大、澳大利亚、巴西、芬兰、南朝鲜等国家和地区在工业用材林短轮伐期定向经营方面已取得了一些成效<sup>[1, 4, 9]</sup>, 按经营目的不同, 国外(特别是北美)把杨树短轮伐期经营分为 3 种模式, 即超短轮伐期(1~3a), 中短轮伐期(4~8a)和短轮伐期(10a 左右)<sup>[1]</sup>. 我国在此方面的研究工作起步较晚, 缺乏系统深入的研究. 为了优化杨树人工林定向培育的经营模式, 本文重点研究了杨树中短轮伐期经营中, 不同栽培模式叶面积指数、透光率、生物生产力及经济生物量生产的动态变化, 以期对杨树纸浆材的定向培育提供理论依据.

## 2 试验地概况与研究方法

### 2.1 试验地概况

试验地设在江苏宝应县航运林场, 119°09' E, 33°08' N, 属季风半湿润气候. 年均气温 14.3℃, 1 月平均气温 0.4℃, 7 月平均气温 27.6℃, 极端最低气温 -22.9℃, 极端最高气温 40.3℃, 无霜期 229d, 年均降雨量约 964.1mm, 年平均相对湿度 75%, 年日照时数 2390.3h,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温 4569.6℃. 地貌为古泻湖相堆积的浅洼平原, 土壤上层为黑褐色的粘土, 下层为浅黄色的沙土, 均为湖水退后堆积而成. 土壤 pH 值为 7.8, 有机质、全 N、速效 K 及速效 P 的含量分别为 0.84%、0.064%、 $10.85 \times 10^{-5}$  和  $4.3 \times 10^{-5}$ , 肥力中等偏下, 地下水位 0.8~1.0m.

### 2.2 试验材料及设计

试验材料为 F69 杨(*Populus deltoides*)、F72 杨(*P. \times euramericana*)和 NL-80351 无性系. NL-80351 杨是从 F69 杨  $\times$  F63 杨(*P. deltoides*)的杂交 F<sub>1</sub> 中选育出来的新无性系. 其中 F69 杨和 NL-80351 杨为美洲黑杨, F72 杨为欧美杨, 都具有生长快、抗性强等优点.

试验地面积 27.0hm<sup>2</sup>, 于 1992 年春植苗造林. 苗龄为 1a, 穴规格 0.8m  $\times$  0.8m  $\times$  0.8m, 每穴施磷肥 0.5kg. 采用完全随机区组设计, 共 3 个因

素, 它们是 3 个无性系, 4 种密度(1111、833、625 和 500 株  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>)和 3 种轮伐期(4、5、和 6a). 重复 3 次, 共 108 小区, 每小区面积约 2500m<sup>2</sup>, 伐后采用萌芽更新.

### 2.3 生长量测定

按试验设计, 每年冬末春初实测林分的胸径、树高和枝下高, 并将胸径按径阶归类, 径阶距为 2cm.

### 2.4 生物量测定

按试验设计, 每年冬末春初实测林分的干枝生物量. 同时在每年 6 月上旬、8 月上旬和落叶前 15~20d 按径阶标准木法测定单株生物量, 以了解生物量的生长动态和分配在干、枝、叶及干皮中的比率. 单株生物量采用分层切割法测定, 并分别取样, 在 80℃ 恒温下烘至恒重, 求出各器官的含水率.

### 2.5 林分叶面积指数及透光率测定

用美国 LFCOR 公司生产的 LAF 2000 树冠分析仪测定林分叶面积指数(LAI)和透光率. LAF 2000 树冠分析仪在 5 个角度同时测定光阻作用, 根据数学原理对测得的间隙率进行转换, 采用树冠辐射转换模型计算 LAI、平均斜角和透光率<sup>[10]</sup>. 它包括 2 个“鱼眼式”传感器和 1 个控制装置. 为了获得 LAI 的准确值, 本文还用方格纸法对所测得的林分 LAI 进行了验证和校正.

## 3 结果与分析

### 3.1 林分叶面积指数的动态变化

叶面积指数是林分冠层结构的重要组成部分. 冠层结构不仅影响太阳能的截获量, 而且可通过影响林内水、热、气等微环境来调节植物与环境的相互作用, 最后影响整个林分光合效率. 3 个无性系林分叶面积指数随林龄及密度的动态变化情况见图 1. 由图 1 可以看出, 林龄相同时, LAI 随密度的增大而增大. 林龄为 1 年时, 1111 株  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> 林分的 LAI 约为 500 株  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> 林分的 2 倍. 随着林龄增大, 这种差距逐渐缩小, 4 年生时, 1111 株  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> 林分的 LAI 仅为 500 株  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> 林分的 1.24 倍左右; 同

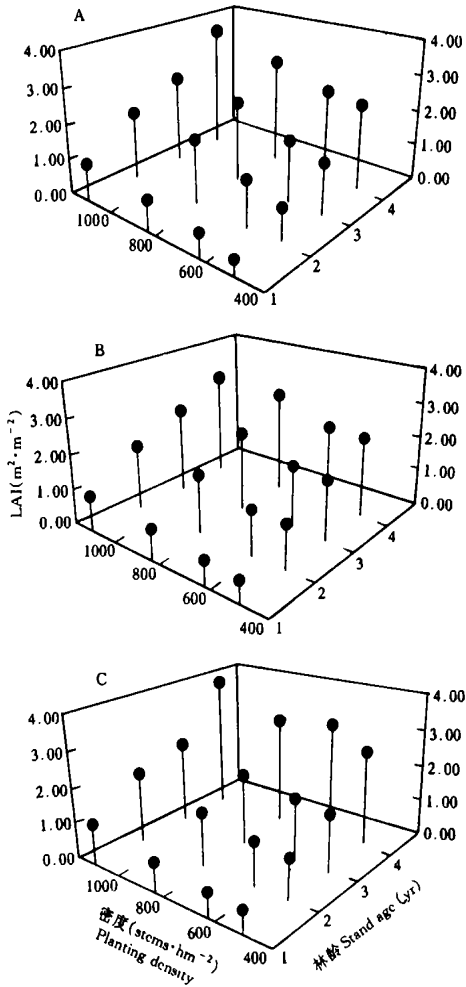


图 1 不同无性系叶面积指数随林龄及密度的动态变化 (图中的 LAI 均为每年 8 月份测定的数据)

Fig. 1 Dynamic change of LAI in various stand age and planting densities for poplar clones (LAI was measured in Aug. each year).

A. F 69 杨, B. F 72 杨, C. NL-80351.

一密度的林分, LAI 随林龄的增大而增加, 但增加的幅度不同. 4 年生林分的 LAI 约为 3 年生林分的 1.5 倍, 2 年生的 1.7 倍和 1 年生的 3.2 倍; 就 3 个无性系而言, 以 NL-80351 林分的 LAI 最高, F69 杨次之, F72 杨最低. 在 4 年生 1111 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 的林分中, 3 个无性系的 LAI 分别为 3.86、3.61 和 3.09 $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ .

### 3.2 叶面积指数与透光率的关系

树冠形状和叶子密度是决定辐射剖面特征的主要因素. 在一棵树的树冠内, 各个叶片接收的辐射量不同. 这取决于入射光的方向以及叶在树冠中的位置. 在一个叶子互相重叠的多层植物群落内, 对入射光线的利用非常充分, 辐射在通过连续的叶层时总是随着盖度的增加, 光强度几乎呈指数降低. 这与 Lambert-Beer 消光定律一致. 如果把叶层看做均匀的, 则辐射的削减可以按 M. Monsi 和 T. Saeki 修正的消光方程  $I = I_0 \cdot e^{-K \cdot LAI}$  计算. 这里,  $I$  为距树冠顶端一定距离上的辐射强度;  $I_0$  为树冠顶端的入射辐射;  $K$  为特定群落的消光系数; LAI 为  $I$  水平之上的叶面积指数.

本文用透光率( $P$ )代替  $I$ , 经计算得, 透光率与 LAI 的关系可用下式表示:

$$P = 1.002e^{-0.818 LAI} \quad (1)$$

相关系数为 -0.99. 由式 (1) 可以看出, 当 LAI = 0 时,  $P = 1.002$ , 接近 1.0 与实际情况基本相符, 故可将  $P = 1.002e^{-0.818 LAI}$  简单表述成  $P = e^{-0.818 LAI}$ ; 消光系数  $K$  说明在给定的叶面积指数下, 光在植冠内削减的程度. 在本研究的杨树纯林内  $K = 0.818$  明显高于禾谷类农田、草甸和芦苇丛中的消光系数 ( $K \leq 0.5$ ), 与 Donald (1961) 在阔叶植物群落中, 消光系数大于 0.7 的研究结果相一致<sup>[7]</sup>. 这说明在所研究的杨树林分内, 其中层 (1/2 树高处) 约 3/4 以上的入射光已被吸收, 可为林分修枝或间伐提供依据.

### 3.3 林分的生物生产力

3.3.1 LAI 与林分生物生产力的关系 组成群落植物的同化速度越高, 可利用光被同化面积 (LAI) 捕获越完全以及植物生产时期的期限越长, 则植物群落的生产量也越大. 就同一树种在同一地区而言, 群落生物生产力的高低主要取决于 LAI 的大小. 本文将 3 个无性系, 4 年在 7~8 月间测得的平均 LAI 与地上部分年生物生产力

(W) 进行了相关分析(图 2), 结果表明, 以指数函数拟合效果最优, 相关系数达 0.91.

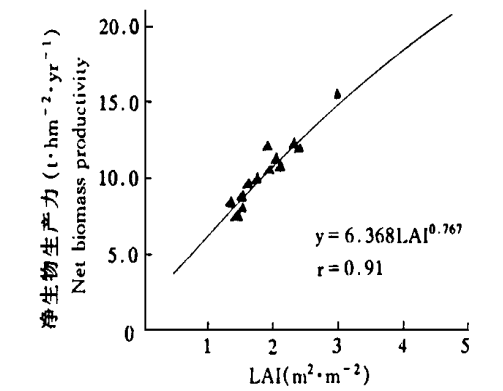


图 2 LAI 与地上部分净生物生产力的关系  
Fig. 2 Relationship between LAI and net above ground biomass productivity.

由图 2 可知, 当  $LAI=0.5$  时, 每年每公顷的净生产量为 3.741t;  $LAI=1$  时, 为 6.3676t;  $LAI=2$  时, 为 10.839t;  $LAI=3$  时, 为 14.795t;  $LAI=4$  时, 达 18.450t, 与徐宏远等对 6 年生 F72 杨的研究结果基本一致<sup>[5]</sup>. 据报道, 在栽培植物群体中, 最适的  $LAI$  值是 4 左右<sup>[7]</sup>, 而本文测得的  $LAI$  均低于 4, 说明均未达最适状态. 若定轮伐期为 4 年, 仍需加大造林密度, 否则就应延长轮伐期, 以提高生物生产力.

3.3.2 林分地上部分生物量生产  $LAI$  与林分地上部分的生物量生产密切相关. 栽植密度不同, 林分的  $LAI$  也不一样, 则对太阳能的吸收利用也有差别<sup>[8]</sup>. 不同无性系及不同造林密度在 4 年生时的地上部分生物量和生物量分配模式情况见表 1. 由表 1 可以看出, 在 500~1111 株· $hm^{-2}$  的密度范围内, 4 年生时仍以株数起主导作用, 即 1111 株· $hm^{-2}$  林分的地上部分生物量最高, 在 42.0~49.0t· $hm^{-2}$  之间; 500 株· $hm^{-2}$  林分最低, 为 28.0~35.5t· $hm^{-2}$  之间. 3 个无性系间以 NL-80351 的林分生产力最高, F69 杨次之, F72 杨最低. 从不同器官生物量的分配比例看, 密度大的林分, 干材生物量相对大一些, 而枝、叶相对小一些, 分别为树干 56~71%, 树枝 23~31%, 树叶 6~12%. 这与徐宏远等对 F72 杨<sup>[5]</sup>, 方升佐等对水杉人工林<sup>[2]</sup> 的研究结果一致. 其中 3 个无性系间分配到树干的比例是 F72>F69>NL-80351, 分配到树枝的是 F69>NL-80351>F72, 而分配到树叶的则是 NL-80351>F69>F72. 分配到叶中的比例大,  $LAI$  也相对增加, 解释了 NL-80351 的生产力较高, 而 F72 杨较低之原因.

3.4 林分的经济生物量生产

表 1 4 年生杨树林分的生产力  
Table 1 Stand productivity for poplar clone at 4 years

无性系 Clone	密度 Planting density (stems· $hm^{-2}$ )	分配模式 Distribution pattern (%)			林分生产力 Stand productivity	
		干 Stem	枝 Branch	叶 Leaf	地上部分生物量 Above ground biomass( $t\cdot hm^{-2}$ )	净生产量 Net productivity ( $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ )
F69	1111	66.8	25.2	8.0	47.473	11.868
	833	67.2	24.7	8.1	45.287	11.322
	625	65.7	25.1	9.2	39.149	9.787
	500	56.3	31.3	12.4	33.794	8.449
F72	1111	70.6	23.3	6.1	42.421	10.605
	833	69.5	24.2	6.3	40.940	10.235
	625	67.5	26.1	6.4	31.288	7.822
	500	65.4	27.7	6.9	28.649	7.162
NL-80351	1111	66.3	24.6	9.1	48.531	12.133
	833	62.5	28.9	8.6	47.570	11.893
	625	63.8	25.6	10.6	39.961	9.990
	500	60.4	28.4	11.2	35.287	8.822

3.4.1 林分干物质累积模型 单位面积地上部分生物量主要受单株地上部分生物量和单位面积上株数的制约.就同一无性系在同一立地上,即受林分年龄( $A$ )和造林密度( $N$ )的影响.用4年的调查材料,经多种模型拟合后表明,杨树中短轮伐期经营的人工林,其干木质部( $W_1$ )、枝木质部( $W_2$ )、皮( $W_3$ )及地上部分木质部( $W_4$ )的干物质累积趋势以 Richards 模型  $W = A \cdot [\exp(-Kx)]^B$  拟合效果最好,相关系数均在0.97以上(表2).其中 $K$ 值用迭代法求出,迭代相对误差为0.001,  $x = A \cdot \ln N$ .拟合结果说明,在一定密度范围内,林分干物质累积量在林分生长初期以单位面积上的株数起主导作用;随着林龄递增,密度作用逐渐减弱,最终林龄和密度达到动态平衡.这个结果与收获密度效果理论一致<sup>[3]</sup>.利用本文拟合的 Richards 方程可预估3个无性系在不同林分中的地上部分木质部和韧皮部的干物质累积量.

表2 杨树中短轮伐期人工林各组分干物质累积模型( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>\*</sup>

Table 2 Models of dry matter accumulation of poplar plantations for xylem and bark

无性系 Clone	项目 Item	参数值 Parameter value			相关系数 Correlation coefficient
		A	B	K	
F 69	W <sub>1</sub>	122.590	3.052	0.035	0.976
	W <sub>2</sub>	15.623	6.030	0.100	0.996
	W <sub>3</sub>	11.234	5.007	0.090	0.992
	W <sub>4</sub>	110.390	3.551	0.050	0.986
F 72	W <sub>1</sub>	97.454	2.958	0.035	0.972
	W <sub>2</sub>	11.673	5.608	0.100	0.994
	W <sub>3</sub>	21.354	3.818	0.050	0.984
	W <sub>4</sub>	118.141	3.171	0.040	0.982
NL-80351	W <sub>1</sub>	96.824	2.653	0.035	0.975
	W <sub>2</sub>	13.447	5.732	0.108	0.993
	W <sub>3</sub>	11.799	5.315	0.094	0.994
	W <sub>4</sub>	148.919	2.794	0.035	0.982

<sup>\*</sup>  $W = A \cdot [1 - \exp(-Kx)]^B$ , 式中,  $x = A \cdot \ln N$  A: Stand age; N: Planting density.

3.4.2 不同林分纸浆材的生物量生产 生物量大并不意味着经济生物量高.不同的利用方式,对原材料的要求存在差异,即使都是培育纸浆材,化学浆和磨木浆对原材料的规格要求也不同.化学浆主要用的是

木质部,故干、枝木质部就是其经济生物量;而磨木浆用的主要是树干生物量,且要求小头直径要 $\geq 16\text{cm}$ ,势必造成在原材料经营模式上与化学浆材存在较大差异.3个无性系的不同密度林分,其平均胸径、经阶分布及化学浆、磨木浆的经济生物量生产情况见表3.磨木浆的经济生物量是按单位面积上小头直径 $\geq 16\text{cm}$ 的出材量 $\times$ 木材密度推算.其中,磨木浆材出材量根据梁军等建立的杨树商品材林分材积公式计算<sup>[6]</sup>.虽然不同无性系、不同密度及不同林龄的林分,木材密度存在细微差别,为计算方便,木材密度均取 $0.39\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

由表3不难看出:1)随着密度增大,林分平均胸径递减,500、625株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 两种密度林分的胸径主要分布在15和17径阶,而密度为833、1111株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的林分,其胸径主要分布在13和15径阶;同一密度不同无性系间的胸径生长是NL-80351 $>$ F69 $>$ F72.2)化学浆材的经济生物量随密度增大而增大.4年生时,3个无性系在1111株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 林分中的经济生物量约为500株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 林分的1.5倍,分别为F69, 36.739t $\cdot \text{hm}^{-2}$ ,NL-80351, 36.819t $\cdot \text{hm}^{-2}$ 和F72, 33.923t $\cdot \text{hm}^{-2}$ ,与833株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 林分生产量接近;磨木浆材的经济生物量则是随密度增大而减少,3个无性系均以500株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 林分的产量最高,为1111株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 林分的2.5倍以上.3)3个无性系不论是化学浆材的经济生物量还是磨木浆材的经济生物量均是NL-80351最高,F69杨居中,F72杨最低.

上述结果说明,不同经营目标应采用不同的经营模式.特别是要对轮伐期和造林密度进行优化组合.从4年的材料看,培育化学浆材,如轮伐期定为4~5年则造林密度以1111或833株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜.缩短或延长轮伐期均应对造林密度作相应调整,

表 3 4 年生时杨树人工林的经济生物量生产  
Table 3 Economic biomass production of poplar plantations at 4 years

无性系 Clone	密度 Planting density (stems•hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 Average DBH( cm)	径阶分布 Diameter grade distribution( % )					经济生物量 Economic biomass( t•hm <sup>-2</sup> )	
			11 13 15 17 19					化学浆材	磨木浆材
								Chemical pulp timber	Groundwood pulp timber
F69	500	15. 7		8. 2	48. 2	37. 7	5. 9	24. 991	4. 739
	625	15. 2	1. 0	18. 0	50. 0	31. 0		30. 027	4. 319
	833	14. 4	3. 8	24. 0	70. 2	2. 0		35. 281	2. 057
	1111	13. 4	8. 3	53. 2	38. 5			36. 739	1. 840
NL-80351	500	16. 3	2. 2	6. 5	30. 4	32. 6	28. 3	26. 010	6. 550
	625	15. 7	1. 1	14. 8	38. 6	34. 1	11. 4	29. 971	5. 656
	833	14. 6	4. 3	17. 2	67. 7	11. 8		36. 200	3. 098
	1111	13. 6	6. 5	66. 4	26. 1	1. 0		36. 819	1. 982
F72	500	15. 8		6. 9	51. 7	34. 5	6. 9	21. 787	4. 633
	625	14. 8		30. 2	59. 3	10. 5		23. 293	2. 695
	833	14. 1	3. 6	25. 0	69. 0	2. 4		31. 404	2. 099
	1111	13. 0	11. 3	73. 4	13. 3			33. 923	1. 810

以保证单位面积上的产量; 培育磨木浆材, 造林密度以 500 和 625 株•hm<sup>-2</sup>为宜, 轮伐期 6~ 8a. > 625 株•hm<sup>-2</sup>的密度, 磨木浆材的经济生物量较低, 在实践中不宜采用; 如密度< 500 株•hm<sup>-2</sup>, 则应延长轮伐期.

4 结 论

4. 1 LAI 是随林龄及造林密度的变化而变化, 林龄及造林密度增大, 则 LAI 亦随之增加. 3 个无性系间以 NL-80351 的 LAI 最大, F69 杨次之, F72 杨最小.

4. 2 LAI 与透光率(P) 之间的关系可以用  $P = 1. 002e^{-0. 818LAI}$  来描述, 相关系数为- 0. 99, 消光系数为 0. 818.

4. 3 地上部分年均净生产量与 LAI 之间的关系可用指数函数来表达. 4 年生时, 以 1111 株•hm<sup>-2</sup>林分的地上部分生物生产量最高, 约为 500 株•hm<sup>-2</sup>林分的 1. 4 倍; 3 个无性系间以 NL-80351 最高, F72 杨最低, F69 杨居中.

4. 4 林分地上部分树干木质部、树枝木质部及皮的干物质累积趋势可用 Richards 方

程描述. 4 年生时, 作为化学浆材的林分经济生物量生产是 1111> 833> 625> 500 株•hm<sup>-2</sup>; 作为磨木浆材的林分生物量则是 500> 625> 833> 1111 株•hm<sup>-2</sup>. 3 个无性系中, 均以 NL-80351 的林分经济生物量最高, F72 杨最低.

参考文献

1 方升佐、曹福亮等. 1993. 杨树短轮伐期经营的现状和前景. 南京林业大学学报, 17( 增刊): 50~ 55.  
2 方升佐、徐锡增等. 1995. 水杉人工林树冠结构及生物生产力的研究. 应用生态学报, 6( 3): 225~ 230.  
3 北京林学院主编. 1991. 造林学. 北京: 中国林业出版社, 165~ 174.  
4 郭祥胜. 1988. 国内外短轮伐期栽培方式研究的现状和趋势. 林业科技通讯, ( 6): 1~ 3.  
5 徐宏远、郑世锴等. 1990. F72 杨人工林生物量的研究. 林业科学, 26( 1): 22~ 29.  
6 梁军、方升佐等. 1995. F69 杨胶合板用材林优化栽培模式. 南京林业大学学报, 19( 4): 45~ 50.  
7 W. 拉夏埃尔著( 李博等译). 1985. 植物生理生态学. 北京: 科学出版社, 12~ 110.  
8 Cannell, M. G. R. 1989. Light interception, light use efficiency and assimilate partitioning in poplar and willow stands. In: Biomass Production By Fast Growing Tree( eds J. S. Pereira and J. J. Landsberg). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/ Boston/ London. pp. 1~ 12.  
9 Geyer, W. A. 1986. Short rotation forestry research in the United States. Biomass, ( 9): 125~ 133.  
10 Welles, J. M. and Norman, J. M. 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. Agronomy Journal, 83( 5): 818~ 825.