

## 三倍体毛白杨无性系 B301 幼树树冠结构特征研究

李广德<sup>1</sup>, 张亚雄<sup>2</sup>, 付海曼<sup>3</sup>, 李豆豆<sup>4</sup>, 岳宗伟<sup>4</sup>, 席本野<sup>4</sup>, 王 焯<sup>5\*</sup>

(1. 国家开放大学 农林医药教学部, 北京 100039; 2. 甘肃林业职业技术学院, 甘肃 天水 741020;  
3. 国家林业和草原局 林产工业规划设计院, 北京 100010; 4. 北京林业大学 森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;  
5. 北京市林业果树科学研究所, 北京 100093)

**摘要:**为探究以树冠结构为特点的毛白杨幼树生物学特征, 为人工幼林抚育管理提供参考, 以 3 年生三倍体毛白杨优良无性系 B301 人工林为对象, 从分枝数、基径、枝条长度、着枝高度、方位角、分枝角度、生物量等角度, 分析其树冠结构特征。结果表明, 三倍体毛白杨 B301 不同级别侧枝数量差异显著( $P < 0.05$ ), 二级枝条最多, 一级枝条和二级枝条占总侧枝数量的 94.7%; 不同方位分枝数量差异显著( $P < 0.05$ ), 东北方位最多, 为总分枝数的 39.3%, 但单枝及单叶生物量在方位上差异不显著( $P > 0.05$ ); 各级侧枝枝条基径、着枝处直径、着枝高度、枝条长度差异显著( $P < 0.05$ ), 但不同方位间无显著差异( $P > 0.05$ ); 树冠在垂直结构上分层明显, 其侧枝集中在树干中部树高 51.1% 的范围; 单株地上总生物量(干重)为 34 741.9 g, 枝条及叶片的生物量分别占地上部分总生物量的 33.8% 和 11.2%; 枝条及叶片生物量与所在枝条基径相关性最大, 通过幂函数构建枝条基径与枝、叶生物量回归方程, 回归关系显著( $P < 0.000 1$ )。因此, 三倍体毛白杨 B301 树冠水平空间大、垂直层次分明, 是比较理想的冠型, 研究结论可为其合理修枝方式和强度的确定提供依据。

**关键词:**三倍体毛白杨; 树冠结构; 分枝特点; 生物量

中图分类号: S792.117 文献标志码: A 文章编号: 1001-7461(2021)03-0094-08

Characteristics of Crown Architecture of Young Triploid *Populus tomentosa* B301 Clones

LI Guang-de<sup>1</sup>, ZHANG Ya-xiong<sup>2</sup>, FU Hai-man<sup>3</sup>, LI Dou-dou<sup>4</sup>, YUE Zong-wei<sup>4</sup>,  
XI Ben-ye<sup>4</sup>, WANG Ye<sup>5\*</sup>

(1. Faculty of Agriculture, Forestry and Medicine, The Open University of China, Beijing 100039, China;  
2. Gansu Forestry Polytechnic, Tianshui 741020, Gansu, China; 3. Planning and Design Institute of Forest Products Industry,  
NFG, Beijing 100010, China; 4. The Key Laboratory of Silviculture and Conservation of Ministry of Education,  
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 5. Beijing Academy of Forestry and Pomology Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract:** The objectives of this study were to explore the biological characteristics of young *Populus tomentosa* with crown structure as the characteristics, and to provide references for tending and management of young plantations. Taking three-year-old fast-growing triploid *P. tomentosa* B301 clones as the research objects, the characteristics of crown structure were analyzed from the aspects of lateral branch numbers, branch basal diameter, branch length, height to ground or branch bottom, orientation, branch inclination and biomass. The results showed that there were significant differences in the number of lateral branches among different orders of *P. tomentosa* B301 clones ( $P < 0.05$ ). The number of secondary branches was the most, and the first and second order branches accounted for 94.7% of the total. There were significant differences in the number of branches in different directions ( $P < 0.05$ ). The number of lateral branches in

收稿日期: 2020-09-25 修回日期: 2020-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(31800531); “十三五”国家科技计划课题(2016YFD0600403); “十二五”国家科技计划课题(2015BAD09B02); 国家开放大学优秀青年教师培养计划资助。

作者简介: 李广德, 博士, 副教授。研究方向: 森林培育、远程教育。E-mail: guangdeli123@163.com

\* 通信作者: 王 焯, 博士, 助理研究员。研究方向: 人工林经营管理。E-mail: 204737994@qq.com

the northeast was the largest, accounting for 39.3% of the total. However, there were no significant differences in biomasses of single branch and single leaf ( $P > 0.05$ ) in different direction. There were significant differences in basal diameter, diameter of branching site, height and length of branches among different levels of lateral branches ( $P < 0.05$ ), but there was no significant difference in different directions ( $P > 0.05$ ). The vertical structure of the crown was obviously layered, and its lateral branches were concentrated in the middle of the trunk, 51.1% of tree height. The total aboveground biomass (dry weight) of 3-year-old triploid *P. tomentosa* B301 clones was 34 741.9 g, and the biomass of branches and leaves occupied 33.8% and 11.2% of the total biomass of the upper part respectively. The regression equations of the branch basal diameter and branch and leaf biomass were constructed by power functions, and the regression relationships were significant ( $P < 0.000 1$ ). Therefore, the crown of triploid *P. tomentosa* B301 clones with large horizontal space and clear vertical layers is an ideal crown type. The research conclusion can provide the basis for determining the reasonable pruning methods and strength.

**Key words:** hybrid triploid *Populus tomentosa* clone; crown architecture; branching characteristics; biomass

树冠结构是树木重要的生物学特性之一,受树木的遗传特性、种植密度及配置方式、经营管理措施、立地条件、生长环境等因子的共同影响,不仅能影响树冠空间分布、树木光合作用面积、光能截获及利用转化效率,同时也影响干形、材质、生物量生产和分配,以及树木生长和林分生产力,是理想干形形成的重要影响因素,代表树木的生长“蓝图”<sup>[1-9]</sup>。

毛白杨 (*Populus tomentosa*) 是黄淮海地区进行国家储备林建设的主要培育树种之一。三倍体毛白杨 (triploid *P. tomentosa*) 既有天然的,也有人工选育的。三倍体毛白杨 B301 是朱之梯等<sup>[10]</sup>应用毛白杨花粉辐射和不减数  $2n$  花粉回交等技术选育出的优良无性系,由毛新杨 (*P. tomentosa* × *P. bolleana*) 作母本,与毛白杨回交得到,具有速生、丰产、优质、高效等特点,当年出圃,1 a 成树,3 a 成林,5 a 成材,至 5 a 轮伐时,每公顷年产木材超过 30 m<sup>3</sup>,相当于同龄老毛白杨生长量的 2~3 倍。以往对三倍体毛白杨的研究多集中在良种选育、繁殖育苗、造林技术、水分及养分管理、根系特征、生长和材性,及其遗传变异、基因工程、生理生态等方面,鲜见针对其生产力提高的生物学基础方面的研究。在树冠结构方面,尽管研究者已对 I-69 杨 (*P. deltoides* I-69/55)、I-72 杨 (*P. euramericana* ‘San Martion’ (I-72/58))、I-63 杨 (*P. deltoides* cv. ‘Harvard’ (I-63/51))、欧美杨 107 (*P. euramericana* clone ‘Neva’)、欧美杨 108 (*P. euramericana* ‘Guariento’)、美洲黑杨 (*P. deltoides*)、毛果杨 (*P. trichocarpa*)、美洲黑杨 × 欧美杨 F<sub>1</sub> 代 (*P. deltoides* (I-69/55) × *P. euramericana* (I-45/51) F<sub>1</sub> clones) 等不同杨树品种的枝条数量、枝条长度、分枝角度、生物量等进行了研究<sup>[3,11-15]</sup>,但具体对某一树种的

研究指标选取还比较单一,难以系统了解其冠层结构特点。针对三倍体毛白杨,富丰珍等<sup>[16]</sup>研究了树冠不同方位、垂直和水平层次叶片光合特性的空间差异;Y. Wang *et al.*<sup>[17]</sup>了解了冠层内叶片数量和叶面积指数的分布特征<sup>[17]</sup>。但是,关于形成三倍体毛白杨冠层结构骨架的枝条信息等更加详细的树冠结构特征还不清楚,这不仅限制了对其生物量 and 生产力形成的生物学特性的系统了解和树冠结构三维模型、冠层光能截获与分配模型等的构建,也影响了修枝等幼林抚育措施的形成和进一步优化。

鉴于此,本研究以造林后第 3 年的三倍体毛白杨 B301 为对象,测定其树冠结构因子及生物量,主要目的是:了解三倍体毛白杨幼树各级枝条特征及其分布规律,明确其树冠结构特点;揭示树冠不同方位枝条特征的差异;分析枝条及叶片生物量与主要测定参数的相关性,构建便捷、实用的枝叶生物量回归模型;基于树冠结构特征提出三倍体毛白杨幼林修枝抚育建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于山东省高唐县旧城林场 (36°48′47″N, 116°5′25″E), 海拔 30 m, 该区地势平坦, 属暖温带半湿润季风区域大陆性气候。气候温和, 光照充足, 雨水充沛。年日照时数 2 651.9 h, 年平均降水量 544.7 mm, 平均气温 13.2℃, 无霜期 204 d。试验地土壤为砂壤土, 土壤容重平均 1.41 g · cm<sup>-3</sup>, pH 平均 8.42, 其基本理化性质参见文献<sup>[18]</sup>。

三倍体毛白杨无性系 B301 [*P. tomentosa* × *P. bolleana*] × *P. tomentosa* 试验林于 2015 年春季营建, 植苗造林, 苗木平均胸径为 3.0 cm, 树高为 2.9 m, 株

距 2 m, 行距 3 m, 林分密度  $1\ 666\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

## 1.2 试验设计与方法

造林后第 3 年, 即 2017 年 9 月, 在试验林地中部选择生长旺盛、无病虫害和损伤的样树 5 株(表 1), 测量其胸径、树高、冠幅、枝下高等。参照文献<sup>[2,3,14]</sup>, 结合试验林分特点, 树冠结构指标的选择与测定方法如下。

对每株样树的所有枝条从树梢开始从上到下依次编号(主干上着生的枝条为一级枝条, 一级枝条上萌出的枝条为二级枝条, 依此类推), 并借助梯子测定枝条基径、长度、着枝处直径、着枝高度(枝条基部距地面距离或分枝处距着生枝条基部的距离)、方位角(北方向为  $0^\circ$ , 顺时针旋转测量)、分枝角度(一级枝条分枝角度是一级枝条与主干的夹角, 二级枝条的分枝角度是其与着生的一级枝条的夹角, 依此类推)等参数(以上数据能在树上测量的尽量原位测量, 不能在树上测量的伐倒后测定)。之后, 在树干

上标注东南西北后小心伐倒树木, 尽量减少对树冠的损害。伐倒后, 完成参数测定。剪取各级枝条和叶片, 分别称量其鲜重, 然后取其中一部分样品称量鲜重并带回实验室, 烘干, 测定生物量。同时测定树干鲜重, 分段截取部分主干称量鲜重并带回实验室烘干测定其生物量。其中, 针对 5 号样树测定了其所有枝条及叶片的鲜重, 其余 4 株只测定了一级枝条及其上的叶片鲜重。

## 1.3 数据分析

三倍体毛白杨不同级别及不同方位间测定参数及枝叶生物量差异通过 SPSS 20.0 进行单因素方差分析。如处理间差异显著, 则用 Duncan 法在 0.05 水平上进行多重比较。枝条及叶片生物量与测定参数的相关性通过 SPSS Statistics 软件中 Bivariate Correlation 实现, 生物量模型构建通过 SPSS Statistics 软件中 Curve Estimation 实现。图表采用 Origin(Version 9.0)和 Excel 2016 绘制。

表 1 测量样树基本特征因子

Table 1 Basic characteristics parameters of sample trees

序号	胸径/cm	树高/m	枝下高/m	冠幅/m			
				东	南	西	北
1	10.5	10.3	2.35	3.3	2.3	2.6	2.0
2	9.4	9.3	2.15	2.8	1.5	3.3	2.2
3	11.4	10.2	2.10	3.1	3.1	2.4	3.3
4	11.0	10.8	2.45	2.6	2.3	2.4	2.2
5	11.1	11.7	2.10	2.6	3.2	3.2	2.6
平均值	10.68	10.46	2.23	2.88	2.48	2.78	2.46

## 2 结果与分析

### 2.1 不同方位分枝特征

2.1.1 分枝数量 毛白杨不同级别侧枝数量差异显著( $P < 0.05$ )。3 年生时二级枝条数量最多(图 1), 分别为一级、三级和四级枝条的 1.8、13.1 倍和 92.0 倍, 一级和二级枝条分别占总侧枝数量的 33.3% 和 61.3%。一级枝条上着生二级枝条的比例平均为 47.46%, 着生二级枝条的一级枝条上着生 1~9 个二级枝条(平均 3.9 个)。

毛白杨在  $0^\circ \sim 90^\circ$ (东北)、 $91^\circ \sim 180^\circ$ (东南)、 $181^\circ \sim 270^\circ$ (西南)和  $271^\circ \sim 359^\circ$ (西北)方位上的枝条分布比例平均分别为 39%、26%、19% 和 16%。除西北方位外, 各方位内的二级枝条数量显著高于一级、三级及四级枝条(表 2)。

不同方位的一级和二级枝条数量差异显著( $P < 0.05$ ), 都是东北方位显著大于西北和西南, 东南与西北、西南无显著差异, 东北和东南亦无显著差异(表 2)。

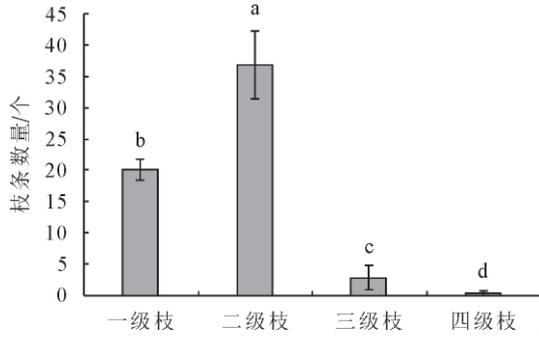
2.1.2 分枝角度 毛白杨枝条分枝角度在  $\leq 30^\circ$ 、 $31^\circ \sim 60^\circ$ 、 $61^\circ \sim 90^\circ$  和  $\geq 91^\circ$  的比例分别为 1%、25%、73% 和 1%。不同分枝角度枝条数量方位间差异显著( $P < 0.05$ )(表 3)。

### 2.2 不同方位各级侧枝的基径、着枝处直径、着枝高度及长度

2.2.1 基径 3 年生毛白杨各级侧枝的基径差异显著( $P < 0.05$ )(图 2), 一级枝条基径平均为 28.3 mm, 分别为二级、三级和四级枝条基径的 2.4、3.0 倍和 4.7 倍。

2.2.2 着枝处直径 3 年生毛白杨各级侧枝的着枝处直径差异显著( $P < 0.05$ )(图 3), 一级枝条着枝处直径平均达到 72.82 mm, 分别为二级、三级、四级枝条着枝处直径的 3.2、4.8 倍和 7.6 倍。

2.2.3 着枝高度 各级侧枝平均着枝高度差异显著( $P < 0.05$ )(图 4)。一级枝条的平均着枝高度最大, 为 4.67 m, 分别是二级、三级和四级枝条的 3.0、5.6 倍和 22.8 倍。树干顶部(平均 5.12 m 以上)的一级枝条无二级枝条着生。



注:不同小写字母表示不同处理间在  $P=0.05$  水平差异显著,下同。

图 1 3 年生三倍体毛白杨 B301 各级侧枝数量

Fig. 1 Lateral branch numbers of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones

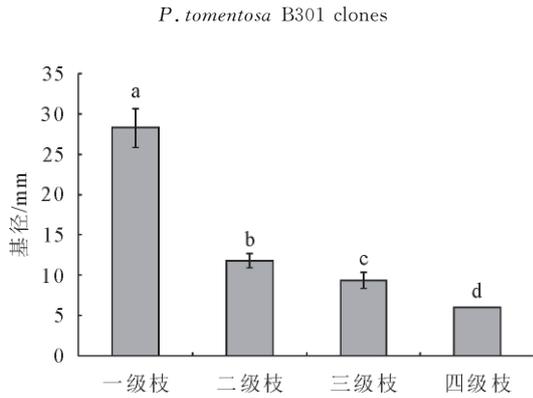


图 2 3 年生三倍体毛白杨 B301 各级侧枝基径

Fig. 2 Lateral branch basal diameter of 3-years-old triploid

*P. tomentosa* B301 clones

表 2 3 年生三倍体毛白杨 B301 不同方位各级侧枝的枝条数量(平均值±标准误)

Table 2 Branch numbers of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones in different orientations(Mean±SE)

侧枝级别	方位/(°)			
	0~90	91~180	181~270	271~359
一级枝	7.6±0.87a	5.4±0.81ab	3.8±0.97b	3.2±0.49b
二级枝	14.2±1.83a	9.4±0.93ab	7.2±1.91b	6.0±1.84b
三级枝	1.8±1.20	0.4±0.40	0.6±0.40	0
四级枝	0	0.2±0.20c	0	0.2±0.20b

注:不同小写字母表示同一级别枝条在不同方位间差异显著( $P=0.05$ )。

与美洲黑杨和毛果杨及其杂种一级枝条在树冠上均匀分布<sup>[3]</sup>显著不同,毛白杨 B301 树冠分层明显(图 5)。一级枝最高着枝高度分别为树高的 73%、69%、77%、71%和 71%;样树 1、2 和 3 明显只有上、下层 2 个层次,树干中部无侧枝;一级枝条集中分布在树干中部约树高 51%的范围内,从树干基部向上至约树高的 21%和从树梢向下至约树高的 27%范围内没有侧枝。造林后第 3 年,一级枝条着枝处距离地面最高处的平均高为 7.57 m,最高为 8.34 m。

表 3 3 年生三倍体毛白杨 B301 不同方位不同分枝角度的枝条数量(平均值±标准误)

Table 3 Lateral branch numbers with different branching inclination of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones in different orientations(Mean±SE)

分枝角度/(°)	方位/(°)			
	0~90	91~180	181~270	271~359
≤30	0.4±0.40 c	0.2±0.20 c	0	0.2±0.20 b
31~60	5.4±0.81b	4.8±1.11 b	2.8±0.92 b	2.0±0.45 b
61~90	17.6±3.03a	10.2±1.62 a	8.8±2.01 a	7.0±1.58 a
≥91	0.2±0.20 c	0.2±0.20 c	0	0.2±0.20 b

注:不同小写字母表示同一方位不同分枝角度枝条数量差异显著( $P=0.05$ )。

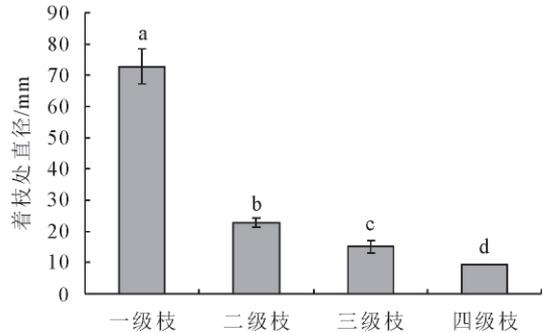


图 3 3 年生三倍体毛白杨 B301 各级侧枝着枝处直径

Fig. 3 Stem diameter of branch landing site of 3-years-old triploid

*P. tomentosa* B301 clones

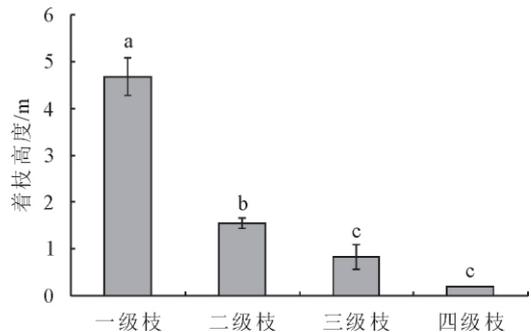


图 4 3 年生三倍体毛白杨 B301 各级侧枝着枝高度

Fig. 4 Height/length to ground/branch bottom of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones branch

2.2.4 枝条长度 3 年生毛白杨各级枝条长度差异显著( $P<0.05$ )(图 6),一级枝条的长度分别为二级、三级、四级枝条长度的 2.1、2.9 倍和 5.1 倍。

2.2.5 不同方位的差异 各方位枝条基径、着枝处直径、着枝高度、枝条长度的平均值无显著差异( $P>0.05$ )(表 4)。东北、东南、西南、西北各方位所有侧枝的平均基径分别为 17.2、18.6、16.4、18.2 mm;着枝处直径平均分别为 36.5、42.0、39.7、38.6 mm;着枝高度平均分别为 2.6、2.5、2.5、2.8 m;枝条长度平均分别为 1.9、1.9、2.0、1.8 m。

### 2.3 不同方位枝条及叶片生物量

3 年生三倍体毛白杨 B301 所有枝条及叶片总

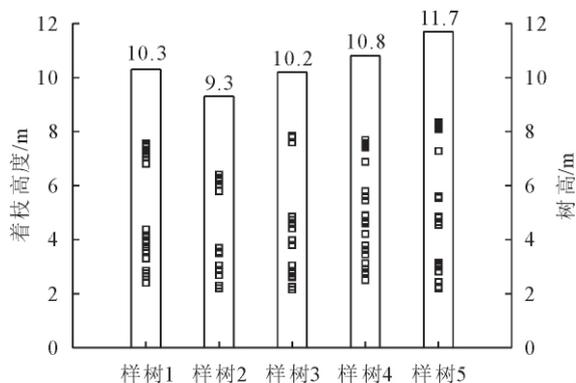


图 5 3 年生三倍体毛白杨 B301 测定样树树高及一级枝条着枝高度分布

Fig. 5 Height to ground of the first-order branch of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones

生物量分别为 11 748.4 g 和 3 873.1 g(干重), 树干生物量为 19.12 kg(干重)(5 号样树)。其枝条生物量较 4 年生 I-69 杨枝条生物量 13.47 kg(胸径平均 16.37 cm, 树高平均 15.37 m, 密度 3 m×6 m)略小<sup>[11]</sup>, 但其与树干生物量之比(61.45%)较 I-69 杨平均 31.77%大, 枝条生物量更大。所有枝条及叶片的生物量分别占地上部分总生物量的 33.8%和 11.2%, 枝条生物量与地上部分全部生物量之比较美洲黑杨、毛果杨及其杂交后代<sup>[3]</sup>, 以及合作杨(*P. simonii* × *P. pyramidalis* cv, ‘Chifengensis 36’)<sup>[19]</sup>大。地上部分生物量也较 5 年生杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的 4 594 g<sup>[20]</sup>大。东北、东南、西南、西北各方位枝条生物量分别为 6 129.2、1 323.7、3 275.9、974.5 g; 枝条上着生的叶片生物量分别为 1 819.8、544.5、804.7 和 362.1 g。可见,

表 4 3 年生三倍体毛白杨 B301 不同方位各级侧枝基径、着枝处直径、着枝高度及枝条长度(平均值±标准误)

Table 4 Branch basal diameter, stem diameter of landing site, height to ground or branch bottom, branch length of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones in different orientations (Mean±SE)

指标	侧枝级别	方位/(°)			
		0~90	91~180	181~270	271~359
基径/mm	一级枝	26.96±1.62a	29.36±2.53a	28.26±2.59a	28.56±2.86a
	二级枝	10.57±0.43b	13.01±1.10b	10.65±0.81b	13.04±1.23b
	三级枝	8.32±1.06b	10.13±0.60b	9.71±1.37b	—
	四级枝	—	5.19	—	6.82
着枝处直径/mm	一级枝	70.20±4.40a	75.56±7.96a	75.45±5.48a	70.07±7.45a
	二级枝	21.13±0.99b	24.59±1.62b	22.69±1.33b	22.80±1.66b
	三级枝	17.08±2.02b	12.63±2.21b	17.48±1.40b	—
	四级枝	—	9.13	—	10.00
着枝高度/m	一级枝	4.85±0.35a	4.48±0.36a	4.46±0.44a	4.90±0.47a
	二级枝	1.44±0.08b	1.48±0.11b	1.56±0.09b	1.72±0.18b
	三级枝	1.60±0.45b	0.32±0.12b	0.58±0.22b	—
	四级枝	—	0.25	—	0.16
枝条长度/m	一级枝	3.10±0.21a	2.87±0.26a	3.22±0.26a	2.65±0.32a
	二级枝	1.39±0.08b	1.45±0.14b	1.35±0.13b	1.45±0.15b
	三级枝	0.72±0.17c	1.36±0.50b	1.00±0.19b	—
	四级枝	—	0.49	—	0.68

从生物量来看,与分枝数量一致,东北方位最大,西南次之,西北最小。而不同方位单个枝条及叶片的平均生物量没有显著差异( $P>0.05$ )(图 7)。

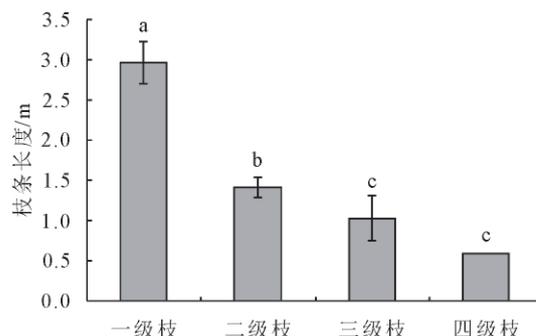


图 6 3 年生三倍体毛白杨 B301 各级侧枝枝条长度

Fig. 6 Lateral branch length of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones

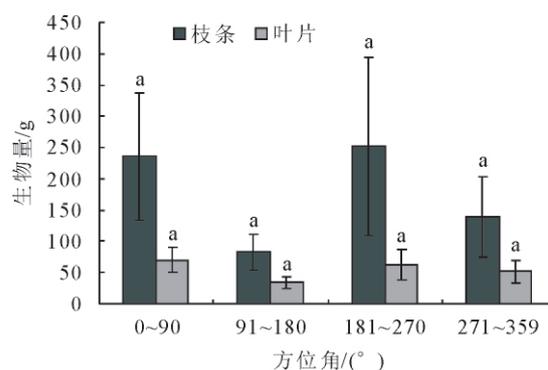


图 7 3 年生三倍体毛白杨 B301 不同方位单个枝条及叶片平均生物量

Fig. 7 Single branch and leaf biomass of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones in different orientations

2.4 枝、叶生物量与测定参数的相关性及其模型构建  
枝条及叶片生物量与其对应枝条基径的相关性最大,但在一级枝和二级枝的水平上存在一定差异(表 5)。

考虑模型的应用性,选择枝条基径 1 个变量,以枝条及叶片生物量为因变量,枝条基径为自变量,选择线性、二次项、对数、立方、S、指数、幂、Logistic 等

表 5 3 年生三倍体毛白杨 B301 枝条及叶片生物量与其基径、着枝高度、着枝处直径及枝条长度的相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients between the branch and leaf biomass with branch basal diameter,height to ground or branch bottom,stem diameter of landing site,branch length of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones

侧枝级别	生物量/g	基径/mm	着枝高度/m	着枝处直径/mm	枝条长度/m
一级枝	枝条	0.854**	-0.351**	0.370**	0.759**
	叶片	0.857**	-0.315**	0.338**	0.696**
二级枝	枝条	0.910**	0.260	0.671**	0.831**
	叶片	0.901**	0.212	0.638**	0.823**

注:\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

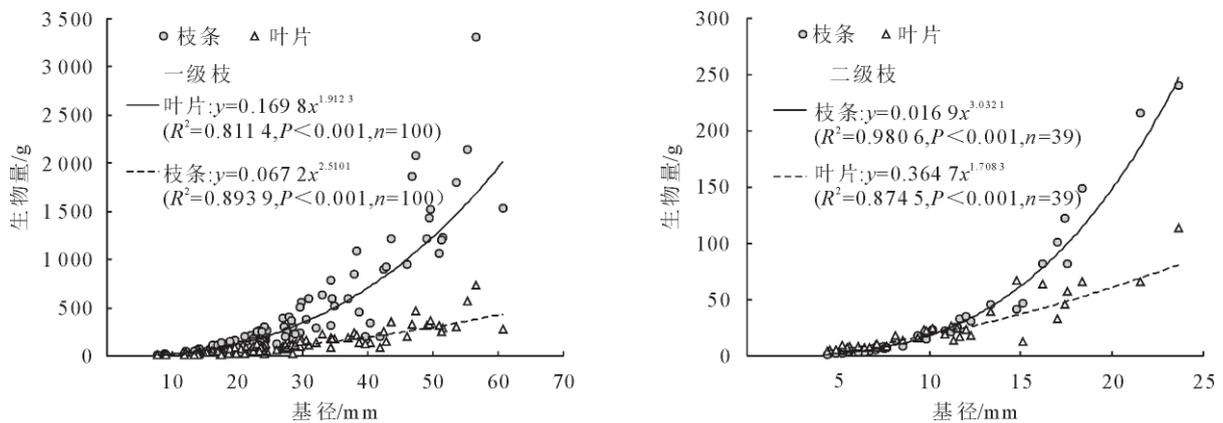


图 8 3 年生三倍体毛白杨 B301 一级和二级枝条的枝条及叶片生物量与相应枝条基径的回归关系

Fig. 8 Regression relationship between the first-order, second-order branches and leaf biomass and the basal diameter of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

三倍体毛白杨侧枝级别及数量整体较少、分枝角度大、水平空间大、垂直层次分明。一级枝条集中在树干中部约树高 51.1% 的范围内,从树梢向下至约树高的 1/3 处无侧枝着生。东北方位枝条数量及生物量最大。枝条基径是影响枝条及叶片生物量的主要因素,可通过幂函数关系分别建立枝条及叶片生物量与对应基径的回归方程。

修枝是人工林形成良好干形、提升木材品质、促进生产力提高常用的林木抚育措施,修枝强度一般根据树高确定。但在确定三倍体毛白杨修枝强度时,如果通过树高来确定修枝标准,修掉的枝条会比较多。鉴于三倍体毛白杨上述树冠结构特征,在确定其幼林修枝强度时,建议以从树梢向下出现第一个分枝为标准来确定,同时要注意保留主干上粗壮的骨干

模型进行拟合,建立回归方程。发现通过幂函数关系拟合枝条基径与其枝条及叶片生物量的决定系数最大,效果更好(图 8)。实践中只要分别测定一级枝条和二级枝条的基径(一级枝 7.71~60.72 mm,二级枝 4.43~23.67 mm),便可通过此回归方程来计算相应枝条及叶片的生物量,从而减少大量测定、取样、烘干、称重等工作。

枝以保留足够的分枝及叶片支撑其生产力。

#### 3.2 讨论

枝条是构成树冠结构的骨架,为光合作用的树叶提供了支撑,其生长、分布直接影响树冠的结构和大小,以及树木的同化作用<sup>[21,22]</sup>。3 年生三倍体毛白杨 B301 的侧枝共 4 级,平均每株树共有 60 枝侧枝,一级和二级枝条最多,分别为 20 和 37 个,占总枝条数量的 94.67%。一级枝条数量是 4 年生 I-69 杨平均 55 个的 36.36%<sup>[11]</sup>。也少于美洲黑杨×欧美杨 F<sub>1</sub> 代 13 个无性系平均 27.45 个一级枝条和 61.57 个的二、三级枝条<sup>[14]</sup>。三级和四级枝尤其是四级枝数量极少,只在 5 株样树中的 1 株中发现了 2 个四级枝条,2 株样树中有三级枝条共 14 个。可见,与美洲黑杨无性系不同,三倍体毛白杨分枝级别及数量都较少,但枝条生物量与树干生物量之比更大,其每个侧枝尤其是一级侧枝的生物量更大、也更粗壮。

树木一级侧枝对树冠结构的形成起着关键作用,它的长短及其空间排列对树冠的形状起支配作用<sup>[21]</sup>。3年生三倍体毛白杨 B301 一级枝条距离地面高度最低为 2.15 m,最高为 8.34 m,集中分布在树干中部约树高 51.1%的范围。也就是说,树干下部和上部将近 1/2 树高范围内无一级侧枝。这与其他杨树也有显著区别。从一级枝条长度随树高分布情况来看(图 9),不同于美洲黑杨×欧美杨 F<sub>1</sub> 代 13 个无性系由树冠至上而下逐渐增大<sup>[14]</sup>,其长度在树干上的分布有成层现象,最长的一级枝条普遍分布

在树冠中下部。一级枝条度平均为 2.99 m,长于 3 年生美洲黑杨×欧美杨 F<sub>1</sub> 代 13 个无性系的平均长度 1.99 m 和 4 年生 I-69 杨的 2.33 m<sup>[11,13]</sup>;一级枝条最长为 7.00 m,对应基径为 5.37 cm,出现在树冠中下部(树高 38.9%处),其长度是 8 年生合作杨 2.19 m 最长一级枝条的 3.65 倍,与其在树冠中部靠上位置的分布也不同<sup>[23]</sup>;最短的一级枝条长 0.47 m,对应基径为 4.36 cm,位于树干下部(树高 29.9%处),也较上述 8 年生杨树最短一级枝条的 0.12 m 长、分布在树冠顶端不同。

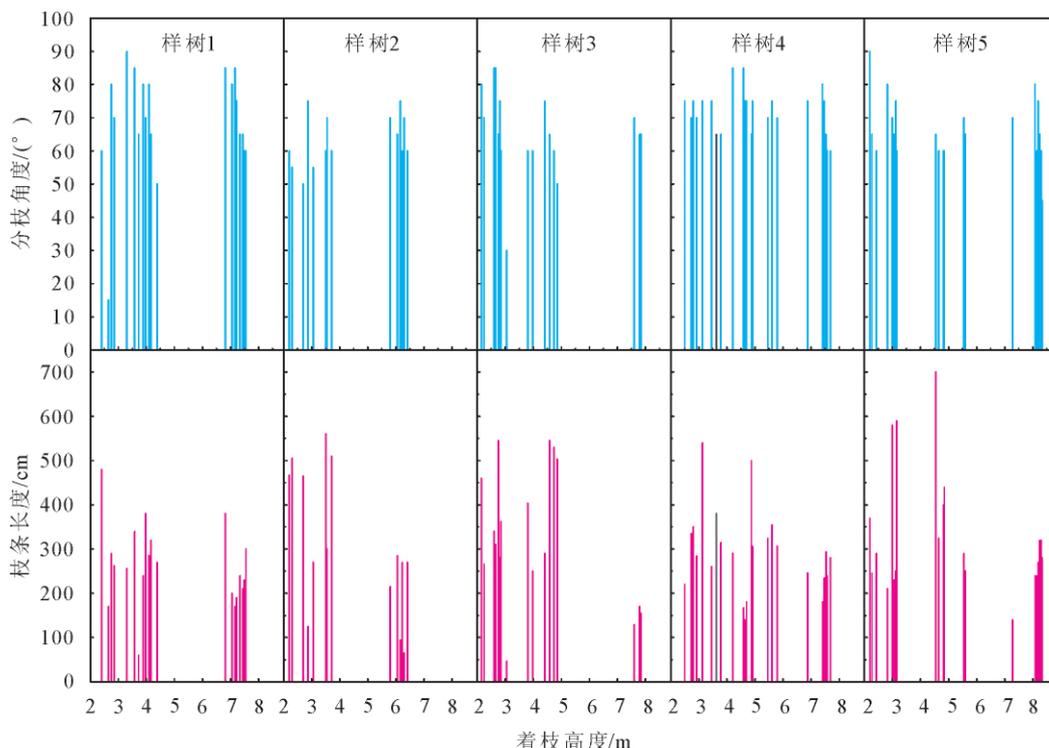


图 9 3 年生三倍体毛白杨测定样树一级枝条分枝角度及长度随树高分布

Fig. 9 Distribution for average length and inclination of first-order branch of 3-years-old triploid *P. tomentosa* B301 clones

树木分枝角度的大小主要影响树冠的几何形态、空间分布、叶容量以及林内的光照条件等,分枝角大的树木,树冠体积和树冠层中的有效叶面积大,冠层中光照条件也较好,个体生物生产力较高<sup>[24-25]</sup>。三倍体毛白杨 B301 枝条分枝角度大部分在 31°~90°,占比为 97.67%,其中 61°~90°枝条数量最多,占 72.67%,一级枝条平均分枝角度为 67.75°。与 I-69 杨分枝角度比较集中相比<sup>[12]</sup>,B301 分枝角度的变幅更大。其平均分枝角度较 I-72 杨(55.30°)、I-69 杨(52°~60.8°)、I-63 杨(50.50°)、欧美杨 107(54.8°)、欧美杨 108(54.1°)、美洲黑杨×欧美杨 F<sub>1</sub> 代 13 个无性系(平均 56.6°),以及 3 个美洲黑杨(30°~40°)(鲁林 2 号 *P. deltoides* cv. 'Lulin-2', 鲁林 3 号 *P. deltoides* cv. 'Lulin-3' 和中荷 1 号 *P. deltoides* cv. 'Zhonghe-1') 等更大<sup>[6,12-15]</sup>,也较针叶

树种水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)大(48°~60°)<sup>[24]</sup>,树冠更开阔。在树冠不同高度,一级枝条分枝角度在下层普遍较大,且随树冠高度变化差异较小(图 9)。这种大的侧枝倾角和开阔的树冠也为光能的充分利用奠定了基础。

树冠由一定数量的枝条和叶片按照一定的空间顺序排列而成<sup>[6]</sup>。不同杨树的理想冠型不同,有的通过分枝细小、枝叶密集的多层结构实现,有的强调叶面积大而树冠尽可能窄小,也有的是叶片密集、纵向分枝发达的多层次窄冠浓密型<sup>[1-2]</sup>。邬荣领等<sup>[2]</sup>认为,毛白杨通过尽可能地向更大的空间延伸(一级枝条平均长度比较长是其突出表现),并形成比较明显的多个垂直层次,具备理想冠型的条件。这与本研究得到的结果一致,三倍体毛白杨 B301 一级枝条更长、树冠分层更明显,同时其一级枝条分枝角度

更大(图5、图6、图9)。这就形成了大而稀的树冠,更有利于不同层次的叶片最大限度的吸收利用光能,生产更多生物量和提高生产力。

#### 参考文献:

- [1] 邬荣领,王明麻,黄敏仁,等.黑杨派新无性系研究——V.树冠结构与干形改良[J].南京林业大学学报:自然科学版,1988(3):1-14.  
WU R L, WANG M X, HUANG M R, *et al.* Studies of new clones of the aigeiros section——V. The relationship of tree crown structure with stem form improvement[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 1988(3):1-14. (in Chinese)
- [2] 邬荣领,王明麻,黄敏仁,等.黑杨派新无性系研究——IV.树冠结构与生长的关系[J].南京林业大学学报:自然科学版,1988(2):1-12.  
WU R L, WANG M X, HUANG M R, *et al.* Studies of new clones of the aigeiros section——the relationship of tree crown structure with growth[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 1988(2):1-12. (in Chinese)
- [3] REINHART C, STETTLER R F, HINCKLEY T M, *et al.* Crown architecture of *Populus* clones as determined by branch characteristics[J]. Tree Physiology, 1990, 7(1/2):157-167.
- [4] FANG S Z, XI Z X, LU S, *et al.* Growth dynamics and biomass production in short-rotation poplar plantations: 6-year results for three clones at four spacings[J]. Biomass and Bioenergy, 1999, 17(5):415-425.
- [5] 牛正田,张绮纹,彭镇华,等.国外杨树速生机制与理想株型研究进展[J].世界林业研究,2006,19(2):23-27.  
NIU Z T, ZHANG Q W, PENG Z H, *et al.* Advances in research on fast-growing mechanism and ideotypes of *Populus* [J]. World Forestry Research, 2006, 19(2):23-27. (in Chinese)
- [6] 黄逢龙,焦一杰,梁军,等.杨树无性系树冠性状间的相关性与遗传差异[J].西北林学院学报,2010,25(1):61-65.  
HUANG F L, JIAO Y J, LIANG J, *et al.* Correlation and genetic difference of crown traits of poplar clones[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1):61-65. (in Chinese)
- [7] TUN T N, GUO J, FANG S Z, *et al.* Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2018, 33(5):1-11.
- [8] TIMOTHY J A, CHRIS A M, OTÁVIO C C, *et al.* Crown architecture, crown leaf area distribution, and individual tree growth efficiency vary across site, genetic entry, and planting density[J]. Trees, 2020, 34(1):73-88.
- [9] 邬荣领,胡建军,韩一凡,等.表型可塑性对木本植物树冠结构与发育的影响[J].林业科学,2002,38(4):141-156.  
WU R L, HU J J, HAN Y F, *et al.* How phenotypic plasticity affects crown architecture and development in woody plants [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(4):141-156. (in Chinese)
- [10] 朱之梯,林惠斌,康向阳.毛白杨异源三倍体 B301 等无性系选育的研究[J].林业科学,1995,31(6):499-505.
- [11] 刘奉觉,郑世错,臧道群.田间供水与杨树生长关系的研究——I.供水处理对杨树生长、树体结构和叶量的影响[J].林业科学研究,1988,1(2):153-161.
- [12] 裴保华,蒋湘宁,郑均宝,等.林分密度对 I-69 杨树冠结构和光能分布的影响[J].林业科学研究,1990,3(3):201-206.  
PEI B H, JIANG X N, ZHENG J B, *et al.* Effects of stand density on crown architecture and distribution of light energy in *Populusdeltoides* cv. 'lux' I-69/55 plantation[J]. Forest Research, 1990, 3(3):201-206. (in Chinese)
- [13] 曹福亮,徐锡增,吕士行,等.黑杨派南方型杨树密度效应规律的研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,1991,15(3):12-19.  
CAO F L, XU X Z, LÜ S X, *et al.* A study on the density effect law of the southern type poplars[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 1991, 15(3):12-19. (in Chinese)
- [14] 李火根,黄敏仁,王明麻.美洲黑杨×欧美杨 F<sub>1</sub> 无性系一级分枝特性与生长及干形关系的研究[J].南京林业大学学报,1994,16(1):7-13.  
LI H G, HUANG M R, WANG M X. Study on relationship between first-order branch characteristics and growth traits, stem form for *Populusdaltoides* × *Populuseuramericana* F<sub>1</sub> clones[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1994, 16(1):7-13. (in Chinese)
- [15] 董玉峰,姜岳忠,张明哲,等.不同杨树品种的分枝及与生长和干形的关联[J].中南林业科技大学学报,2014,34(2):34-38.  
DONG Y F, JIANG Y Z, ZHANG M Z, *et al.* Correlation between branch characteristics and growth traits, stem form for varieties in poplar plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(2):34-38. (in Chinese)
- [16] 富丰珍,王宁,徐程扬,等.三倍体毛白杨叶片光合作用在冠层中的空间分异性[J].东北林业大学学报,2013,41(5):44-46, 80.  
FU F Z, WANG N, XU C Y, *et al.* Spatial variation of photosynthesis in canopy of triploid *Populus tomentosa* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(5):44-46, 80. (in Chinese)
- [17] WANG Y, LI G D, DI N, *et al.* Leaf phenology variation within the canopy and its relationship with the transpiration of *Populustomentosa* under plantation conditions [J]. Forests, 2018, 9, 603. doi:10.3390/f9100603.
- [18] 贺日林,王焯,张宏锦,等.地表滴灌水氮耦合对毛白杨幼林生长及土壤水氮分布的影响[J].农业工程学报,2018,34(20):90-98.  
HE Y L, WANG Y, ZHANG H J, *et al.* Coupling effects of water and nitrogen on tree growth and soil water-nitrogen distribution in young *Populustomentosa* plantations under surface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering: Transactions of the CSAE, 2018, 34(20):90-98. (in Chinese)
- [19] 朱春全,刘晓东,张启,等.集约与粗放经营杨树人工林生物量的研究[J].东北林业大学学报,1997,25(5):53-56.

(下转第 127 页)

- ble nutrients and long-term fertilization on yield of Fuji apple orchard of Weibei area in Shaanxi, China[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(4): 613-622. (in Chinese)
- [21] 宋莎, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析[J]. *土壤*, 2011, 43(1): 44-49.
- [22] 张亚鸽, 史彦江, 吴正保, 等. 基于主成分分析的枣园土壤肥力综合评价[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(5): 1156-1160.  
ZHANG Y G, SHI Y J, WU Z B, *et al.* Assessment on soil fertility status of jujube orchards based on principal component analysis[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(5): 1156-1160. (in Chinese)
- [23] 王康振, 胡明, 范逸飞, 等. 大荔县农业土壤养分丰缺评价与分析[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(29): 64-68.  
WANG K Z, HU M, FAN Y F, *et al.* Agricultural soil nutrients evaluation and analysis: Dali County[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(29): 64-68. (in Chinese)
- [24] 赵岳, 郭瑞, 郑险峰, 等. 大荔冬枣园土壤肥力检测与评价[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(4): 649-656.  
ZHAO Y, GUO R, ZHENG X F, *et al.* Soil fertility analysis and evaluation in *Ziziphus jujube* orchards in Dali[J]. *Acta*
- Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(4): 649-656. (in Chinese)
- [25] 曹尚银, 沈程清, 张玲, 等. 枣不同品种的耐盐性[J]. *经济林研究*, 2008(3): 29-33.
- [26] 刘永青, 李玉才, 李明军. 土壤局部施加不同种类有机肥对苹果园土壤理化性质和果树养分利用率的改善[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1): 112-117.  
LIU Y Q, LI Y C, LI M J. Improvement of soil physical and chemical properties and nutrient utilization rate of apple trees by localized application of different organic fertilizers[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 112-117. (in Chinese)
- [27] 木合塔尔·扎热, 哈地尔·依沙克, 赵蕾, 等. 有机肥与化肥配施对土壤微生物、土质及骏枣果实品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(5): 182-188.  
MUHTAR Z, ABDUKADIR I, ZHAO L. Effects of different application proportion of organic manure and chemical fertilizer on fruit quality of Jun jujube soil microorganism and properties[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(5): 182-188. (in Chinese)

## (上接第 87 页)

- [31] 王会霞, 石辉, 张雅静, 等. 大叶女贞叶面结构对滞留颗粒物粒径的影响[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(1): 258-262.  
WANG H X, SHI H, ZHANG Y J, *et al.* Influence of surface structure on the particle size distribution captured by *Ligustrum lucidum*[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(1): 258-262. (in Chinese)
- [32] 孙晓丹, 李海梅, 孙丽, 等. 8 种灌木滞尘能力及叶表面结构研究[J]. *环境化学*, 2016, 35(9): 1815-1822.  
SUN X D, LI H M, SUN L, *et al.* Study on the dust-retaining capability of eight shrubs and leaf surface structure[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(9): 1815-1822. (in Chinese)
- [33] 张桐, 洪秀玲, 孙立伟, 等. 6 种植物叶片的滞尘能力与其叶面结构的关系[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(6): 70-77.  
ZHANG T, HONG X L, SUN L W, *et al.* Particle-retaining characteristics of six tree species and their relations with micro-configurations of leaf epidermis. [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(6): 70-77. (in Chinese)
- [34] BURKHARDT J, PETERS K, CROSSLEY A. The presence of structural surface waxes on coniferous needles affects the pattern of dry deposition of fine particles [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1995, 46(7): 823-831.
- [35] 余曼, 汪正祥, 雷耘, 等. 武汉市主要绿化树种滞尘效应研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(7): 1333-1339.  
YU M, WANG Z X, LEI Y, *et al.* Study on dust detaining effect of major species of greening trees in Wuhan[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(7): 1333-1339. (in Chinese)

## (上接第 101 页)

- [20] 龚垒. 杉木幼树冠层结构与生物量关系的初步研究[J]. *生态学报*, 1984, 4(3): 248-258.  
GONG L. A preliminary study on the relationship between canopy structures and biomass of young Chinese firs[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(3): 248-258. (in Chinese)
- [21] 刘兆刚, 刘继明, 李凤日, 等. 樟子松人工林树冠结构的分形分析[J]. *植物研究*, 2005, 25(4): 465-470.  
LIU Z G, LIU J M, LI F R, *et al.* Fractal analysis of crown structure in *Pinussylvestrismongolica* plantation[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2005, 25(4): 465-470. (in Chinese)
- [22] 徐程扬. 不同光环境下紫椴幼树树冠结构的可塑性响应[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(3): 339-343.  
XU C Y. Response of structural plasticity of *Tilia amurensis* sapling crowns to different light conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3): 339-343. (in Chinese)
- [23] 朱春全, 雷静品, 刘晓东, 等. 集约与粗放经营杨树人工林树冠结构的研究[J]. *林业科学*, 2000, 36(2): 60-68.  
ZHU C Q, LEI J P, LIU X D, *et al.* Crown structure of poplar trees in intensive and extensive management plantations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(2): 60-68. (in Chinese)
- [24] 方升佐, 徐锡增, 唐罗忠. 水杉人工林树冠结构及生物生产力的研究[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(3): 225-230.  
FANG S Z, XU X Z, TANG L Z. Studies on the crown structure and biomass production of *Metasequoia glyptostroboides* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(3): 225-230. (in Chinese)
- [25] 郭彧, 汪季, 党晓宏, 等. 吉兰泰盐湖不同造林方式下梭梭枝系构型特征分析[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 36-42.  
GUO Y, WANG J, DAGN X H, *et al.* Branching architecture analysis of *Haloxydon ammodendron* under different afforestation methods in Jilantai salt lake[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(3): 36-42. (in Chinese)