

# 施肥对白桦树生长及开花结实的影响

刘福妹<sup>1,2</sup>, 姜 静<sup>1</sup>, 刘桂丰<sup>1\*</sup>

(1. 林木遗传育种国家重点实验室 东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 中国林科院 热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600)

**摘 要:**合理施肥是促进林木生长发育的有效措施。研究是在前期获得显著促进白桦开花结实的配方肥基础上, 进一步研究配方肥和单施氮、磷、钾肥元素对白桦生长、开花结实及荧光参数的影响。结果表明, 施氮肥与施配方肥的效果一致, 均能显著促进白桦的株高和地径生长, 使白桦株高和地径分别较对照提高 32% 和 36%; 施配方肥和氮肥能使 70% 以上的白桦开花, 而施用磷、钾肥的白桦开花率仅为 3% 和 1%, 对照没有开花; 与对照相比, 虽然施肥均明显地提高了白桦叶片  $Fv/Fm$ 、 $\Phi_{PSII}$  和  $qP$  等荧光参数, 降低  $NPQ$ , 但施氮肥效果和配方肥的效果更加明显, 并且二者还能显著提高白桦叶片叶绿素含量。说明配方肥中的氮是促进白桦生长和开花结实的关键元素, 在以生产木材为经营目的的丰产林中可以施加氮肥为主的肥料, 在以生产良种为目的的白桦种子园中应该选用配方肥。

**关键词:**白桦; 施肥; 生长; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S792.153

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2015)02-0116-05

## Effects of Fertilization on the Growth and Flowering of *Betula platyphylla*

LIU Fu-mei<sup>1,2</sup>, JIANG Jing<sup>1</sup>, LIU Gui-feng<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Forest Genetics and Tree Breeding, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China;

2. The Experimental Centre of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi 532600, China)

**Abstract:** Rational fertilization is an effective measure to promote the development of fast-growing forest. Based on the selected optimum formula fertilizer (T3) which had the best effect of accelerating the white birch (*Betula platyphylla*) flowering, the effects of T3 and its elements (N, P, K) on the growth, flowering and chlorophyll fluorescence characteristics of white birch was studied. The results showed that: the nitrogen that had the much similar effects as T3, and they both could significantly promote the vegetative growth of white birch by making the 4-year-old trees reach 1.32 times in height and 1.36 times in ground diameter compared to the control. Applying the T3 and nitrogen fertilizer could make more than 70% white birch flower, compared with only 3%, 1% and 0 by applying only phosphorus, potassium fertilizers or without fertilizer, respectively. Compared with the control, fertilizations could significantly increase the level of  $Fv/Fm$ ,  $\Phi_{PSII}$  and  $qP$ , decrease the level of  $NPQ$ , however, applying the nitrogen and T3 had the best effects which significantly increasing the level of SPAD. The above results indicated that the nitrogen was a key element of T3 in promoting the growth and flowering of white birch. Therefore, the nitrogen fertilizer should be used in the high-yield plantation of wood production and the T3 should be used in the orchard which improved white birch seed.

**Key words:** *Betula platyphylla*; fertilization; growth; chlorophyll fluorescence

收稿日期: 2014-06-20 修回日期: 2014-07-28

基金项目: 国家科技支撑课题(2012BAD21B02)。

作者简介: 刘福妹, 女, 助理工程师, 研究方向: 林木遗传育种。E-mail: liufumei1115@163.com

\* 通信作者: 刘桂丰, 男, 教授, 研究方向: 林木遗传育种。E-mail: liuguifeng@126.com

林木施肥是集约经营人工丰产林提高森林生产力的重要技术措施,在林业生产中的应用愈来愈普遍<sup>[1]</sup>。大量研究表明,根据林地土壤肥力状况合理施肥是促进林木速生丰产的有效途径<sup>[2-4]</sup>。白桦(*Betula platyphylla*)是落叶乔木,属于桦木科桦木属。它在我国 14 个省区有分布<sup>[5]</sup>,其用途多,并且是培育单板类人造板材速生丰产林的首选树种之一<sup>[6-7]</sup>,因此,研究白桦合理施肥有非常现实的意义。笔者所在实验室从 2007 年在前人研究的基础上,并考虑到林业上的施肥与农业的不同之处<sup>[8-9]</sup>,将 N、P、K 按照不同比例设置了 3 套配方施肥方案,开展了白桦不同家系的最佳配方筛选研究<sup>[10]</sup>,选出了适于各种基因型的最佳施肥配方。本研究是在此基础上,将最佳配方中的各个元素按照原来设置的浓度单独处理白桦,通过测定白桦株高、地径、开花结实及叶绿素荧光参数( $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  和  $NPQ$ ),研究施肥对白桦生长发育的影响,为今后根据白桦不同培育目的施用不同肥料及配方提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设计

选择 500 株来自同一家系的 1 年生白桦盆栽实生苗分成 5 组(每组 100 株),1 组施用最佳配方肥(T3),1 组施用等量的水(C),其他 3 组分别施用氮

肥(N)、磷肥(P)、钾肥(K);其中 T3 是通过前期实验获得的能促进白桦提早开花结实的最佳施肥配方肥<sup>[12]</sup>,而单独施用的氮磷钾肥的浓度则是按照 T3 中含有相应元素的质量设定的,具体用量见表 1。

1.2 处理方法

试验中的所有白桦苗木均定植在上口直径为 40 cm、下底直径为 30 cm、高度为 40 cm 的圆锥体型容器中,并且在容器底部垫 1 个直径为 40 cm 的托盘,防止营养液的渗漏和苗木根系生长到外界土壤里。苗木培育基质均为草炭土:河沙:黑土(体积比)=4:2:2,其 pH 为 6.25,速效氮、磷、钾的质量比分别为 193.60、37.92 mg/kg 和 164.97 mg/kg。

施肥方法<sup>[11]</sup>:施肥时用水稀释配制成 1/1 000 质量浓度的混合营养液,每年自 4 月下旬苗木发芽后开始施用至 9 月中旬结束,2 年生的白桦每次每株施肥量均为 0.5 L,3、4 年生的白桦每次每株施肥量均为 1 L,施肥间隔期为 15 d。

1.3 试验数据的调查

1.3.1 生长及开花结实的测定 2011 年 9 月末,当白桦停止生长后,分别测定各施肥处理条件下白桦的株高和地径。统计每株白桦雄花序数量,2012 年 6 月初统计结实数。

表 1 不同生长发育时期白桦施肥配方

Table 1 Rates of N, P and K of the fertilizer formulae applied during different growth periods (g/株)

处理	树龄/a (年份)	5 月 1 日—6 月 30 日			7 月 1 日—8 月 14 日			8 月 15 日—9 月 14 日	
		氮肥	磷肥	钾肥	氮肥	磷肥	钾肥	磷肥	钾肥
T3	2(2009)	0.70	0.55	0.43	0.47	0.88	0.72	0.35	0.29
	3(2010)	2.35	1.42	1.15	1.40	1.40	1.15	1.05	0.86
	4(2011)	2.63	1.42	1.15	1.58	1.75	1.43	1.40	1.15
N	2(2009)	0.70			0.47				
	3(2010)	2.35			1.40				
	4(2011)	2.63			1.58				
P	2(2009)		0.55			0.88		0.35	
	3(2010)		1.42			1.40		1.05	
	4(2011)		1.42			1.75		1.40	
K	2(2009)			0.43			0.72		0.29
	3(2010)			1.15			1.15		0.86
	4(2011)			1.15			1.43		1.15

注:氮肥是硝铵,磷肥是过磷酸钙,钾肥是硫酸钾。

1.3.2 叶绿素整体含量的测定 2011 年 8 月末,利用 SPAD502 型叶绿素仪测定白桦在各施肥处理条件下的叶绿素含量。每个处理随机抽选 60 株白桦,在每株树冠相同位置选择 3 片功能叶,每个叶片测定 3 个点的叶绿素含量,然后求平均值。

1.3.3 叶绿素荧光参数的测定 2011 年 8 月末,在每个处理中选择 3 株白桦苗木,每株选取 3 片成熟叶,利用 PAM-2500(Walz, German<sup>®</sup>)测定其叶绿

素荧光参数:PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、PS II 实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )、光化学猝灭系数( $qP$ )和非光化学猝灭系数( $NPQ$ )。此外,测定前叶片均暗适应 30 min。

1.4 统计分析方法

利用 Excel 2010 整理数据,其中求算开花率、结实率和每株平均果序数量时用到的公式如下:

平均果序数(个/株)=形成果序个数/参试株数

开花率/%=(形成雌或雄花序的株数/参试株数)×100

结实率/%=(形成果序的株数/参试株数)×100

利用 SPSS16.0 软件对获得的数据进行方差分析和多重比较(Duncan)。多重比较均在  $p<0.01$  水平上进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对白桦生长的影响

2011 年,在苗木 4 年生时,分别对不同处理白桦苗木的株高和地径的数据进行方差分析(表 2),发现各性状的差异均达到极显著水平( $p<0.01$ ),说明连续 3 a 不同施肥处理对白桦的生长产生显著影响,株高和地径的变异系数分别为 14.0 %和16.1 %。

表 2 不同处理条件下 4 年生白桦株高、地径的方差分析和主要变异参数  
Table 2 Analysis of variance and main variation parameters on height and ground diameter of 4-year-old *B. platyphylla* among fertilizer treatments

性状	均值及变异参数			F 值
	均值	变幅	变异系数/%	
株高/m	3.65	3.24~4.27	14.0	91.81**
地径/mm	31.74	27.23~37.68	16.1	145.81**

注:“\*\*”标记的为差异达到极显著水平。

为进一步比较最佳配方施肥及该配方中各营养元素的处理效果,对各种处理后的白桦各个性状进行了多重比较分析(表 3)。结果表明,单施氮肥与施配方肥处理的白桦株高及地径差异不显著,但与其他 3 个处理间的差异达到极显著水平,施氮肥和配方肥 2 处理的株高和地径分别达到了 4.15、4.27 m 和 37.68、36.91 mm,分别是对照的1.28、1.32倍和 1.38、1.36 倍,说明施氮肥与施配方肥的作用相当,均显著促进白桦株高和地径生长,并且与磷肥、钾肥及不施肥对照处理的差异达到了极显著水平。

表 3 不同处理条件下 4 年生白桦各性状的多重比较分析  
Table 3 Multiple comparison on height and ground diameter of 4-year-old *B. platyphylla* among fertilizer treatments

处理	株高/m		地径/mm	
T3	4.15±0.37	B	37.68±3.22	B
N	4.27±0.52	B	36.91±4.49	B
P	3.28±0.43	A	28.23±2.43	A
K	3.32±0.38	A	28.67±2.35	A
C	3.24±0.56	A	27.23±5.17	A

注:不同字母的处理之间差异达到极显著( $p<0.01$ ),相同字母的处理之间差异不显著。表 5、表 7 同。

### 2.2 不同施肥处理对白桦开花结实的影响

调查参试白桦通过连续 3 a 的单独施加氮、磷、钾肥及最佳配方肥处理后的结实情况发现,除未进

行施肥处理的白桦尚未开花外,其他处理均已经进入开花结实期。其中,施用配方肥和氮肥的处理开花率分别达到了 100 % 和 70 %,并且二者的结实率也均在 60 %以上;而单施磷肥和钾肥的处理开花率和结实率却处在一个较低的水平,仅为 1 %~3 % (表 4),说明单独施用磷肥和钾肥对白桦提早开花结实的影响很小。

表 4 不同处理条件下 3 年生白桦开花结实情况  
Table 4 The flowering and fruiting situation of 3-year-old *B. platyphylla* among three fertilizer treatments

处理	开花率/%	结实率/%	平均果序数/(个·株 <sup>-1</sup> )
T3	100	92	88.31
N	70	62	41.3
P	3	2	3.13
K	1	0	0
C	0	0	0

注:统计的开花率和结实率均只计算正常生长的苗木,不计已经死亡和遭受虫害的苗木。

### 2.3 不同施肥处理对白桦叶片叶绿素含量的影响

植物的生长发育与植物的光合作用有着必然的联系,而叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素,其含量的变化会对植物叶片光合能力产生影响<sup>[12]</sup>。因此,用叶绿素仪测定了白桦叶片中能够有效反映叶绿素相对含量的 SPAD 值。通过方差分析可知,连续 3 a 的不同施肥处理对白桦叶片中叶绿素含量均表现出极显著差异( $p<0.01$ , $F=1.055E3$ )。

进一步进行多重比较分析(表 5)发现,只有 T3 处理和 N 处理的白桦叶片叶绿素含量与对照的差异达到了极显著水平,其 SPAD 相对含量分别为 47.09 和 47.68,是对照的 1.88 倍和 1.90 倍,说明施配方肥和氮肥能显著提高白桦叶片叶绿素的相对含量。

表 5 不同施肥处理下白桦叶片叶绿素相对含量(SPAD)多重比较  
Table 5 Multiple comparison on chlorophyll content(SPAD) of *B. platyphylla* among fertilizer treatments

处理	叶绿素相对含量	
T3	47.09±3.76	B
N	47.68±5.05	B
P	26.41±3.42	A
K	26.0±3.47 4	A
C	25.04±4.00	A

### 2.4 不同施肥处理对白桦叶片叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光是光合作用的有效探针<sup>[13]</sup>,可反映光合机制内一系列重要的调节过程。通过对各种荧光参数的分析,可以得到有关光能利用途径的信息<sup>[14]</sup>。因此,研究测定了不同处理白桦的叶绿素荧光参数,通过分析施肥对白桦光合作用的影响来说明光能利用与生长的关系。对各处理白桦  $F_v/F_m$ 、

$\Phi_{PSII}$ 、 $qP$  和  $NPQ$  测定结果进行方差分析,发现各处理白桦叶片叶绿素荧光参数差异均达极显著水平(表 6)。

$Fv/Fm$  是 PS II 的最大量子产量,它直观反映了植物潜在的最大光合能力。经过多重比较分析发现(表 7),4 个施肥处理的  $Fv/Fm$  值均显著高于非施肥对照,说明在同等环境下,合理的施肥能使白桦叶片保持良好的生长潜能,这就为白桦的快速生长提供了条件。其中,T3 处理和 N 处理的  $Fv/Fm$  值最高,分别是对照的 1.15 倍和 1.18 倍,说明施用配

方肥和氮肥的效果较优。

表 6 不同施肥处理下白桦叶片叶绿素荧光参数方差分析  
Table 6 Analysis of variance on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *B. platyphylla* among fertilizer treatments

性状	自由度	平方和	均方	F
$Fv/Fm$	4	0.292	0.073	45.458**
$\Phi_{PSII}$	4	1.511	0.378	76.445**
$qP$	4	29.192	7.298	46.711**
$NPQ$	4	0.566	0.142	22.402**

表 7 不同施肥处理下白桦叶片叶绿素荧光参数多重比较

Table 7 Multiple comparison on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *B. platyphylla* among fertilizer treatments

处理	$Fv/Fm$		$\Phi_{PSII}$		$qP$		$NPQ$	
T3	0.76±0.03	C	0.59±0.02	C	0.83±0.05	B	0.32±0.04	A
N	0.78±0.03	C	0.59±0.03	C	0.80±0.05	B	0.27±0.05	A
P	0.73±0.03	B	0.52±0.07	B	0.80±0.05	B	0.47±0.09	A
K	0.70±0.04	B	0.54±0.03	B	0.86±0.05	C	0.43±0.09	A
C	0.66±0.06	A	0.32±0.06	A	0.68±0.09	A	1.42±0.24	B

$\Phi_{PSII}$  是光适应下 PS II 的实际光化学效率<sup>[15]</sup>,直接反映了植物叶片在光下用于电子传递的能量占吸收光能的比例。从表 7 可以看出,各施肥处理的  $\Phi_{PSII}$  的结果与  $Fv/Fm$  的类似,非施肥对照的值仍然是最小的,仅 0.32;T3 处理和 N 处理白桦的值最大,均为 0.59,较对照的提高了 84%,说明施肥配方肥和氮肥能够明显提高白桦叶片对光能的实际利用率。

光化学淬灭系数  $qP$  反映 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的比例,不仅在一定程度上反映了 PS II 反应中心的开放程度,而且也能够反映植物光合效率和对光能的利用<sup>[16]</sup>。如多重比较分析表 7 所示,各施肥处理白桦的  $qP$  值仍均显著高于对照的,说明施肥可以显著提高 PS II 反应中心的开放程度,提高白桦苗木光能利用的效率,加快 PS II 的电子传递,其中,施用钾肥的效果是最显著的,其  $qP$  值达到了 0.86。非光化学淬灭  $NPQ$  反映了 PS II 反应中心对天线色素吸收过量光能后的热耗散能力<sup>[17]</sup>,即植物无害化热耗散过刺激发能的能力<sup>[18]</sup>。从荧光参数的多重比较表中可以看出,对照的  $NPQ$  值最大,达到了 1.42;与对照相比,各施肥处理白桦叶片的  $NPQ$  值均有显著的降低,即施肥后的热耗散仅为对照的 29%~33.1%。这也说明施肥增加了叶片对光能的利用。

3 结论与讨论

研究表明,将氮、磷、钾等按照适宜比例科学配方,合理施用,能够使林木在短期内有效而迅速地生

长发育<sup>[3]</sup>。本研究是在已获得能显著促进白桦开花结实配方肥的基础上,进一步研究了最佳配方和单施氮、磷、钾肥元素的作用。结果表明,最佳配方肥中的氮元素是促进白桦营养生长和生殖生长的主要因素。它不但显著促进白桦的高生长和地径生长,施氮肥的白桦的株高和地径分别达到了 4.27 m 和 36.91 mm,分别是对照的 1.32 倍和 1.36 倍;而且显著提高了白桦的开花率和结实率,分别达到了 70%和 62%。虽然氮能促进白桦的提早开花结实,但是其效果仍然比不上最佳配方(其开花率和结实率分别为 100%和 92%),这说明氮肥是促进白桦营养生长和生殖生长的关键因素,但必须与磷、钾肥合理搭配,才会有更好的效果。

在测定各处理白桦的叶绿素荧光参数之前,哈尔滨出现了持续 5 d 的低温天气,自然低温能使杨树和桉树的  $Fv/Fm$  不同程度的下降<sup>[19]</sup>,而本研究中测定的  $Fv/Fm$ (范围 0.66~0.78)均明显低于过去研究中提到的 0.80~0.83<sup>[20]</sup>,说明低温天气也对白桦的  $Fv/Fm$  产生了一定的影响;施肥处理的白桦  $Fv/Fm$  均显著高于非施肥处理的,而  $Fv/Fm$  能作为光抑制和 PS II 复合体受伤的指标<sup>[21]</sup>,说明合理施肥能够让叶片保持良好的生活状态,在应对突发的低温时,也表现出更好的抗性。大量研究表明,合理的施肥可以改善叶片光合特性<sup>[22-23]</sup>,这也与本研究的结果一致——施肥后白桦叶片的叶绿素荧光参数均优于非施肥处理的白桦的。与对照相比, $\Phi_{PSII}$  较对照提高了 62.5%~84.4%; $qP$  提高了 17.6%~26.5%; $NPQ$  较对照降低了 66.9%~

81.0%;并且综合发现,施配方肥和氮肥的白桦叶片叶绿素荧光参数的作用最佳。此外,施配方肥和氮肥均能显著提高白桦叶片叶绿素含量。综合白桦叶片叶绿素含量和叶绿素荧光结果可以发现二者与白桦地径和株高的生长情况是一致的,说明施配方肥和氮肥可以让白桦叶片保持良好的状态,并激发白桦叶片的最大光合潜能,显著提高叶片的实际光合能力,最终促进白桦的生长和发育。因此,在以生产木材为经营目的的丰产林中可以施加氮肥为主的肥料,在以生产良种为目的的白桦种子园中应该施用筛选出的配方肥。

参考文献:

[1] 李花兰. 施肥对林木生长效应的理论研究 [J]. 山西林业科技, 2012(1):50-52.

[2] 金国庆, 余启国, 焦月玲, 等. 配比施肥对南方红豆杉幼林生长的影响 [J]. 林业科学研究, 2007(2):251-256.

[3] 肖良俊, 宁德鲁, 李勇杰. 配方施肥对八角幼林生长结实的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3):87-90.

XIAO L J, NING D L, LI Y J, *et al.* Influences of formulated fertilization on growth and fruiting of young *Illicium verum* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3):87-90. (in Chinese)

[4] JEYANNY V, AB RASIP A G, WAN RASIDAH K, *et al.* Effects of macronutrient deficiencies on the growth and vigour of *Khaya lvorensis* seedlings [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2009, 21(2):73-80.

[5] 郑万钧. 中国树木志 [M], 北京:中国林业出版社, 1985, 2143.

[6] 郁书君, 汪天, 金宗郁, 等. 白桦容器栽培试验(I) [J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(1):24-28.

YU S J, WANG T, JIN Z Y, *et al.* Container culture experiments of *Betula platyphylla* ( I ) Screening of the optimum formula for substrate [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(1):24-28. (in Chinese)

[7] 俞天珍. 白桦在青海省育苗成功的技术措施 [J]. 甘肃科技纵横, 2005, 34(4):59.

[8] JONSSON A, ERICSSON T, ERIKSSON G, *et al.* Interfamily variation in nitrogen productivity of *Pinus sylvestris* seedlings [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1997, 12(1):1-10.

[9] LI B, MCKEAND S E, ALLEN H L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings [J]. Forest Science, 1991, 37(2):613 -626.

[10] 李天芳, 姜静, 王雷, 等. 配方施肥对白桦不同家系苗期生长的影响 [J]. 林业科学, 2009, 45(2):60-64.

LI T F, JIANG J, WANG L, *et al.* Effects of prscription fertilization on the seedling growth of different families of *Betula platyphylla* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(2):60-64. (in Chinese)

[11] 刘福妹, 李天芳, 姜静, 等. 白桦最佳施肥配方的筛选及其各元素的作用分析[J]. 北京林业大学学报, 2012(2):57-60.

LIU F M, LI T F, JIANG J, *et al.* Selection of the optimum fertilizer formula and the effects of nutrient elements on growth and flowering performance of *Betula platyphylla* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012(2):57-60. (in Chinese)

[12] 赵鸿彬, 张正斌, 徐萍, 等. HgCl<sub>2</sub> 胁迫对小麦幼苗水分利用效率和叶绿素含量的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(12):2478-2483.

ZHAO H B, ZHANG Z B, XU P, *et al.* Water use efficiency and Chlorophyll content of wheat seedling under the inhibition of HgCl<sub>2</sub> [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(12):2478-2483. (in Chinese)

[13] BAKER N R. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis [J]. Physiol Plant, 1991, 81:563-570.

[14] 罗青红, 李志军, 伍维模, 等. 胡杨、灰叶胡杨光合及叶绿素荧光特性的比较研究 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(5):983-988.

LUO Q H, LI Z J, WU W M, *et al.* Comparative study of photosynthetic and Chlorophyll fluorescence characteristics of *Populus euphratica* and *P. pruinosa* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(5):983-988. (in Chinese)

[15] GENTY B, BRIANTAIS J M, BAKER N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence [J]. Biochim Biophys Acta, 1989, 990:87-92.

[16] 汪月霞, 孙国荣, 王建波, 等. NaCl 胁迫下星星草幼苗 MDA 含量与膜透性及叶绿素荧光参数之间的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(1):122-129.

WANG Y X, SUN G R, WANG J B, *et al.* Relationships among MDA content, plasma membrane permeability and the Chlorophyll fluorescence parameters of *Puccinellia tenuiflora* seedlings under NaCl stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1):122-129. (in Chinese)

[17] BADGER M R, VON CAEMMERER S, RUUSKA S, *et al.* Electron flow to oxygen in higher plants and algae: rates and control of direct photoreduction (Mehler reaction) and rubisco oxygenase [J]. Biological Science, 2000, 1402: 1433-1455.

[18] MULLER P, LI X P, NIYOGI K K. Non-photochemical quenching-a response to excess light energy [J]. Plant Physiol, 2001, 125:1558-1566.

[19] 李春明, 于文喜. 秋季低温胁迫对杨树叶绿素荧光的影响 [J]. 林业科技, 2011(2):5-6, 22.

[20] BUTLER W, KITAJIMA M. Fluorescence quenching in photosystem II of chloroplasts [J]. Biochim Biophys Acta, 1975, 376:116-125.

[21] 梁文斌, 薛生国, 沈吉红, 等. 锰胁迫对垂序商陆光合特性及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 生态学报, 2010(3):619-625.

LIANG W B, XUE S G, SHEN J H, *et al.* Effects of manganese stress on photosynthesis and Chlorophyll fluorescence parameters of *Phytolacca americana* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010(3):619-625. (in Chinese)

and structure of *Fokienia hodginsi* community in Xishui Nature Reserve in Guizhou[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(1):46-50. (in Chinese)

[10] 徐敏,骆争荣,于明坚,等. 百山祖北坡中山常绿阔叶林的物种组成和群落结构[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2007,33(4):450-457.

XU M, LUO Z R, YU M J, *et al.* Floristic composition and community structure of mid-montane evergreen broad-leaved forest in north slope of Baishanzu Mountain[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2007, 33 (4): 450-457. (in Chinese)

[11] 曹旭平,王梅,周建云,等. 陕北黄土高原油松人工林林分结构及个体生长[J]. 西北林学院学报,2011,26(2):155-159.

CAO X P, WANG M, ZHOU J Y, Individual growth and stand structure of *Pinus tabulaeormis* plantation in loess plateau of Northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011,26(2):155-159. (in Chinese)

[12] 周永奇,李际平,曹小玉. 福寿林场杉木人工林不同林龄直径结构研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(7):61-66.

ZHOU Y Q, LI J P, CAO X Y. Study of diameter distribution of *Cunninghamia lanceolata* artificial forests with different stand age in Fushou Forest Farm[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2014,34(7):61-66. (in Chinese)

[13] 刘永刚,童清,刘云彩,等. 同龄纯林下层抚育间伐后林分直径分布数字特征值的预估研究[J]. 西部林业科学,2013,42(1):58-63.

LIU Y G, TONG Q, LIU Y C, *et al.* Predication of numerical characteristic value of diameter distribution after lower story intermediate cutting on even-aged pure plantation[J]. Journal of West China Forestry Science,2013,42(1):58-63. (in Chinese)

nese)

[14] 欧光龙,王俊峰,胥辉,等. 思茅松天然林胸径与树高结构的变化[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(1):37-41.

OU G L, WANG J F, XU H, *et al.* Changes of DBH and tree height structure of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* natural forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2014,34(1):37-41. (in Chinese)

[15] 北京林业大学. 测树学[M]. 2 版. 北京:中国林业出版社,1988:100-103,112-114.

[16] 姜慧泉,张会儒,徐海生,等. 一种新的估计林分算术平均高抽样方法的验证与应用[J]. 林业科学研究,2010,23(5):703-707.

JIANG H Q, ZHANG H R, XU H S, *et al.* Study on the application of a new sampling technique for estimating the arithmetic mean height of stand[J]. Forest Research, 2010, 23 (5):703-707. (in Chinese)

[17] 韩明跃,李莲芳,段辉,等. 禄丰村林场云南松天然次生林的林分特征及质效研究[J]. 西部林业科学,2009,38(1):28-35.

HAN M Y, LI L F, DUAN H, *et al.* Characteristics and quality of secondary natural *Pinus yunnanensis* forests in Lufencun Forest Farm[J]. Journal of West China Forestry Science, 2009,38(1):28-35. (in Chinese)

[18] 吕勇,刘辉,王才喜. 杉木林分蓄积量不同测定方法的比较[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(4):50-53.

LU Y, LIU H, WANG C X. Comparison of the different measurement methods of stand volume[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2011,31(4):50-53. (in Chinese)

[19] 中国农业百科全书编辑委员会林业卷编辑委员会. 中国农业百科全书林业卷(上)[M]//刘本元. 标准木. 北京:农业出版社,1989:27.

(上接第 120 页)

[22] 霍常富,孙海龙,王政权,等. 光照和氮营养对水曲柳苗木光合特性的影响 [J]. 生态学杂志,2008(8):1255-1261.

HUO C F, SUN H L, WANG Z Q, *et al.* Effects of light intensity and nitrogen supply on photosynthetic characters of *Fraxinus mandshurica* seedlings [J]. Chinese Journal of ecology, 2008(8):1255-1261. (in Chinese)

[23] 王奇峰,徐程扬. 氮、磷对 107 杨叶片光合作用的影响[J]. 西北林学院学报,2007,22(4):9-12.

WANG Q F, XU C Y. Effects of nitrogen and phosyphorus on photosynthesis of *Populus* × *euramericana* cv. ‘74/76’ [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007,22(4):9-12. (in Chinese)

(上接第 165 页)

[16] 王红林,孙彩云. 青海省三江源灾害性天气预警应急系统设计[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版,2013(2):143-146.

[17] 邱儒琼,王波. 基于预生成技术的 WebGIS 数据处理系统设计与实现[J]. 测绘科学,2008(2):138-139.

[18] 霍亮,杨耀东,刘小勇,等. 瓦片金字塔模型技术的研究与实践[J]. 测绘科学,2012(6):144-146.

[19] 国家林业局科技司. 沙尘暴灾害应急管理的基础——沙尘暴灾害风险评估[EB/OL]. 2013. <http://www.forestry.gov.cn/portal/lykj/s/1712/content-633717.html>.

[20] 郭明强,黄颖,谢忠. 分布式环境下海量瓦片数据实时组织与调度策略研究[J]. 测绘通报,2013(4):25-28.