

网络出版时间:2019-10-08 10:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.04.011
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20191008.1044.022.html

林隙大小对土沉香人工更新幼树生长发育的影响

庞圣江¹, 张培¹, 杨保国¹, 刘士玲¹, 邓硕坤¹, 冯昌林^{1,2}

(1 中国林业科学研究院 热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600;

2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西 凭祥 532600)

[摘要] 【目的】研究林隙大小对土沉香人工更新幼树生长发育的影响, 为我国南亚热带地区马尾松林下人工更新提供参考。【方法】以广西凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心人工马尾松大(83~109 m²)、中(52~76 m²)、小(18~43 m²) 林隙以及林冠下栽植的 4 年生和 12 年生土沉香幼树为研究对象, 采取典型抽样法, 对土沉香幼树生长、叶片形态和一级枝条特征进行系统调查, 并测定 2 种年龄幼树的生物量及其分配特征。【结果】随林隙面积的增大, 2 种年龄土沉香幼树的胸径、树高、冠幅和树冠长度均有一定程度的增长; 叶片长度、宽度、平均单叶面积和比叶面积随林隙增大而减小, 叶片长宽比则逐渐增加, 且均存在显著性差异($P < 0.05$); 一级分枝的枝条基径、枝条长度和枝条数量均随林隙面积的增大而增加, 分枝角度则逐渐减小; 叶片、枝条、根、树干以及全株生物量均随林隙面积增大而增加, 表明大林隙有利于促进幼树生长发育, 林冠下的光照严重不足, 抑制幼树生长而影响生物量积累。【结论】林隙对人工更新苗木的影响长期存在, 大林隙有利于土沉香幼树生长和生物量积累, 小林隙及林冠下其生长受到严重抑制。

[关键词] 林隙; 更新苗木; 土沉香; 生物量积累

[中图分类号] S718.5

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2020)04-0083-06

Effects of gap size on growth of transplanted saplings of *Aquilaria sinensis*

PANG Shengjiang¹, ZHANG Pei¹, YANG Baoguo¹,
LIU Shiling¹, DENG Shuokun¹, FENG Changlin^{1,2}

(1 Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry Sciences, Pingxiang, Guangxi 532600, China;

2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi 532600, China)

Abstract: 【Objective】This study investigated the long-term effects of gap size on growth of *Aquilaria sinensis* saplings to provide support for artificial regeneration of masson pine plantation in South Subtropical Area of China. 【Method】The random sampling method was used in forest region of the Experimental Center of Tropical in Guangxi to survey growth, leaf and first-order-branches morphological characteristics as well as biomass allocation in planted young trees at the ages of 4 years and 12 years with different gap sizes of large (83—109 m²), intermediate (52—76 m²), small gaps (18—43 m²) and closed canopy. 【Result】With the increase of gap area, the DBH, tree height, crown width and crown length of 4-year-old and 12-year-old sapling trees of *A. sinensis* increased, leaf length, width, average single leaf area and specific leaf area decreased, while ratio of length to breadth increased gradually with significant differences ($P < 0.05$). The basal diameter, length and branch number of first-order branches of both saplings were increased with

[收稿日期] 2019-04-09

[基金项目] 中国林业科学研究院基本业务费项目(CAFYBB2017MB020)

[作者简介] 庞圣江(1986—), 男, 广西桂平人, 工程师, 主要从事森林培育与生态研究。E-mail:rlzxpang@126.com

[通信作者] 冯昌林(1963—), 男, 广西贵港人, 高级工程师, 主要从事森林培育与生态研究。E-mail:1031677673@qq.com

increasing gap area, while the branching angles of first-order-branches were decreased. The biomasses of leaves, branches, trunks, root and whole-plant increased with the increase of gap area, indicating that large gaps were conducive to promote the growth and development of sapling trees. The insufficient light under canopy inhibited the growth of sapling trees and biomass accumulation. 【Conclusion】 The effects of gap size on planted saplings can last for a long period. Large gap size is beneficial to growth and biomass accumulation of *A. sinensis* saplings, while small gap size and under canopy inhibit growth.

Key words: gap; artificial regeneration; *Aquilaria sinensis*; biomass accumulation

林隙指森林中无树冠遮荫的部分,是幼树生长发育和生存的重要场所^[1]。林隙的形成造成林分内环境的异质性,进而使幼树的生长形态特征产生一定差异^[2-4]。国内外学者对林隙生境中幼树的生长形态适应性进行了大量研究^[5-9],如 Takahashi 等^[10]研究表明,林隙的存在可促进厚叶血桐(*Macaranga semiglobosa*)幼树叶片、侧枝生长并增加分枝率;Meer 等^[11]研究认为,林隙生境中王桉(*Eucalyptus regnans*)幼树更新数量以及生物量积累均明显增加;胡晓静等^[12]研究发现,林隙内栓皮栎(*Quercus variabilis*)更新幼树地径、树高生长量指标均高于林冠下。然而,现有林隙更新的研究大多集中于较短时间内的苗木更新^[13-14],而对林隙内人工更新苗木和幼树生长的长期作用效果研究尚未见报道。

土沉香(*Aquilaria sinensis*)别称白木香,是我国亚热带地区特有的珍贵木材和药材兼用树种^[15]。相关学者研究发现,土沉香有喜荫而不耐暴晒的生物学特性,在上层林分郁闭度为 0.4 时,有利于林下栽植的幼树生长^[16-17];也有研究表明,在马尾松林下栽植具有一定耐荫性的幼树,其生长效果更好^[18]。鉴于此,中国林业科学研究院热带林业实验中心(以下简称热林中心)陆续开展了马尾松林下土沉香栽植试验,但对于在长期林隙作用下,土沉香幼树的生长、形态和生物量积累及其分配特征的表现形式尚不清楚。为此,本试验以热林中心林区马尾松(*Pinus massoniana*)不同大小林隙内以及林冠下栽植的 4 年生和 12 年生土沉香幼树为研究对象,采取典型抽样法,对土沉香幼树生长、叶片形态和一级枝条特征以及生物量分配等进行了系统调查,探讨土沉香幼树对不同林隙生境的适应策略,为我国亚热带地区马尾松林下的人工更新提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西凭祥市(22°04′—22°16′N,106°

41′—106°48′E),为亚热带季风气候带,干湿季差别大,雨季主要集中于 4—10 月,年均降雨量 1 450 mm,年均气温 22 ℃。

研究样地在热林中心林区白云 24 林班 36 小班和哨平 10 林班 17 小班的人工马尾松纯林内,面积分别为 4.5 和 10.4 hm²。采用 1 年生马尾松苗造林,造林密度为 2 500 株/hm²,目前保留密度约为 600 株/hm²。前者造林时间为 1990 年,抚育间伐时间为 1998 年和 2005 年,平均胸径 34.3 cm,平均树高 18.3 m。后者造林时间为 2000 年,抚育间伐时间为 2007 年和 2013 年,平均胸径 25.8 cm,平均树高 15.6 m。二者分别于 2006 年和 2014 年在林下栽植 1 年生土沉香幼苗。林下灌木主要以银柴(*Aporosa dioica*)、华南毛柃(*Eurya ciliata*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)、九节(*Psychotria asiatica*)和三桠苦(*Melicope pteleifolia*)为主,草本植物以弓果黍(*Cyrtococcum patens*)为主。土壤类型为酸性红壤土,土层厚度 1 m 以上。

1.2 调查与取样

目前对林隙尺度的划分标准尚未统一。本研究参考 Zhu 等^[19]的方法,以林隙长轴长度与林隙边缘木的平均高度之比值 K 表示林隙大小,并按照朱凯月等^[20]的方法将 $K > 1.0$ 定为大林隙, $0.5 < K \leq 1.0$ 定为中林隙, $0.25 \leq K \leq 0.5$ 定为小林隙。调查不同大小林隙中土沉香幼苗生长状况时,以远离林缘和林隙中心的林冠下栽植的土沉香作为对照(CK),分析林隙大小对土沉香人工更新幼树生长及形态特征的影响。

本研究自 2018 年以来,采用样线调查方法在马尾松林中确定林隙大小,调查内容包括每一个林隙的长轴、短轴及其边缘木的胸径和树高等。本次调查大林隙 8 个、中林隙 13 个、小林隙 16 个,其面积分别为 83~109, 52~76 和 18~43 m²。为更好地区分不同林隙生境下土沉香幼树生长、叶片形态和一级枝条特征及生物量分配等的变化,采用典型抽样法^[3],在每一个林隙中分别选取生长发育正常的

土沉香幼树各 5~8 株,2 种年龄幼树在 4 种林隙中分别选出 32 株,共计 256 株。

调查包括每株土沉香幼树的胸径、树高、冠幅和树冠长度,并计算树冠比率(树冠长度/树高)。用半圆仪测量一级分枝与主干夹角(分枝角度),用卷尺和游标卡尺测定一级枝长、基径,调查一级分枝总数量。在各林隙及林冠下,根据树高和胸径分别选择 4 株幼树平均木,在每株幼树树冠中部东南西北 4 个方向,摘取生长正常且无损伤的叶片 40 枚装自封袋带回实验室,采用 Uniscan M2 扫描仪获取叶片的数值图像,利用 Photoshop 软件测量叶片长度、宽度和单叶面积。将叶片放入烘箱 80 ℃烘干称质量,计算比叶面积(specific leaf area,SLA)和叶面积指数(leaf area index,LAI),具体公式分别为:

$$SLA=A_L \times N/M;$$

$$LAI=A_L \times N/\pi R^2。$$

式中: A_L 为平均单叶面积, N 为叶片数量, M 为叶片质量, R 为幼树冠幅的半径。

根据不同大小林隙和林冠下幼树的生长状况,各选取 4 株幼树平均木,采用全株收获法,用电子秤称量叶片、枝条、主干和根系鲜质量,取各器官鲜样

0.5 kg,带回实验室 80 ℃烘干,分别测定各器官样品的烘干质量,计算全株生物量。

1.3 数据处理

用 Excel 2007 处理原始数据,利用 SPSS 20.0 软件中的单因素方差分析法(one-way ANOVA)对相关指标进行差异显著性检验,并用最小显著性差异(least-significant difference,LSD)法对不同处理相关指标进行多重比较($\alpha=0.05$)。图表中数据均以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 林隙大小对土沉香生长状况的影响

从表 1 可以看出,林隙大小对土沉香生长影响显著($P<0.05$)。随着林隙面积的增大,4 年生和 12 年生土沉香幼树的胸径、树高、冠幅和树冠长度均有一定程度的增长。4 年生土沉香幼树的树冠比率表现出随林隙增大而显著增加的趋势,而 12 年生土沉香幼树的树冠比率则随林隙增大而减小,但均无显著性差异。说明在不同林隙生境中,大林隙的马尾松林内较林冠下更有利于土沉香幼树生长。

表 1 马尾松人工林中林隙大小对土沉香幼树生长的影响

Table 1 Effects of gap size on growth of *Aquilaria sinensis* in masson pine plantation

年龄/a Age	林隙 Gap size	胸径/cm Diameter	树高/m Tree height	冠幅/m Mean crown	树冠长度/m Crown length	树冠比率 Crown ratio
4	大 Large	5.78±0.45 a	4.18±0.35 a	1.98±0.26 a	3.17±0.35 a	0.76±0.06 a
	中 Intermediate	4.54±0.26 b	3.24±0.13 b	1.65±0.17 b	2.55±0.22 b	0.79±0.08 a
	小 Small	3.25±0.24 bc	3.01±0.10 b	1.56±0.28 b	2.04±0.14 c	0.68±0.03 b
	CK	2.93±0.47 c	2.63±0.27 c	1.49±0.31 b	1.68±0.16 c	0.64±0.04 b
12	大 Large	15.87±0.38 a	13.73±0.32 a	4.15±0.26 a	9.73±0.47 a	0.71±0.03 a
	中 Intermediate	14.20±0.40 b	12.17±0.61 b	3.47±0.23 b	9.36±0.29 a	0.77±0.05 a
	小 Small	13.90±0.36 b	11.75±0.47 b	3.45±0.36 b	9.18±0.48 a	0.78±0.03 a
	CK	9.87±0.47 c	9.77±0.96 c	3.48±0.35 b	7.52±0.43 b	0.78±0.11 a

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note:Different lowercase letters indicates significant difference at $P<0.05$ level. The same below.

2.2 林隙大小对土沉香叶片形态的影响

影响结果见表 2。

马尾松人工林中林隙大小对土沉香叶片形态的

表 2 马尾松人工林中林隙大小对土沉香叶片形态的影响

Table 2 Effects of gap size on leaf characteristics of *Aquilaria sinensis* in masson pine plantation

年龄/a Age	林隙 Gap size	叶片长度/cm Length	叶片宽度/cm Width	叶片长宽比 Length-width ratio	平均单叶 面积/cm ² Average leaf area	比叶面积/ (cm·g ⁻¹) SLA	叶面积指数 LAI
4	大 Large	12.65±1.06 a	4.80±0.39 a	2.64±0.19 a	39.41±5.79 a	264.85±22.94 a	1.85±0.32 a
	中 Intermediate	13.60±0.93 b	6.59±0.39 b	2.22±0.07 b	68.37±7.71 b	320.60±27.76 b	1.92±0.15 a
	小 Small	15.31±0.54 c	8.15±0.09 c	2.01±0.21 bc	87.71±6.76 c	387.75±34.79 c	1.74±0.29 b
	CK	16.65±1.79 c	8.30±0.68 c	1.88±0.09 c	93.33±12.62 c	414.43±29.15 c	1.71±0.36 b
12	大 Large	12.98±0.90 a	4.91±0.37 a	2.65±0.18 a	41.39±4.82 a	250.24±26.53 a	1.91±0.35 a
	中 Intermediate	14.84±0.63 b	6.45±0.28 b	2.28±0.11 b	70.06±8.79 b	367.58±31.76 b	2.08±0.49 a
	小 Small	15.54±0.80 bc	7.91±0.69 c	2.20±0.10 b	88.20±5.72 bc	385.13±26.24 c	1.77±0.27 b
	CK	17.97±1.23 c	8.23±0.51 c	1.89±0.12 c	97.36±13.60 c	390.96±30.36 c	1.79±0.34 b

由表 2 可以看出,从大、中、小林隙至林冠下,2 种年龄土沉香叶片的长度、宽度、平均单叶面积和比叶面积均随林隙的增大而减小,叶片长宽比则逐渐增大,且均存在显著性差异。2 种年龄土沉香幼树叶面积指数的变化趋势基本一致,表现为大、中林隙的叶面积指数明显高于林冠下和小林隙。由此可见,在较好的光照条件下,土沉香幼树可通过增加叶片数量来提高叶面积指数,进而增加光合作用面积,以达到高效利用光资源的目的。小林隙和林冠下叶面积指数相对较小,表明土沉香幼树以叶面扩展、不重叠形式来增加光合面积,从而增大对光照的截获能力。

表 3 马尾松人工林中林隙大小对土沉香幼树一级分枝特征的影响

Table 3 Effects of gap size on first-order branch characteristics of <i>Aquilaria sinensis</i> in masson pine plantation					
年龄/a Age	林隙 Gap size	枝条基径/mm Branch diameter	枝条长度/cm Branch length	分枝角度/(°) Branch angle	枝条数量 Branch density
4	大 Large	13.59±5.62 a	97.10±28.53 a	43.03±7.87 a	18.00±3.37 a
	中 Intermediate	12.32±3.75 a	78.76±23.65 b	50.06±6.85 ab	17.00±2.83 a
	小 Small	9.51±2.39 b	65.46±12.19 c	54.00±8.01 b	15.00±2.97 b
	CK	9.19±6.16 b	61.25±28.40 c	65.81±9.78 c	13.00±3.31 b
12	大 Large	18.34±7.50 a	173.70±71.30 a	45.30±5.74 a	38.00±6.29 a
	中 Intermediate	16.15±5.75 b	156.74±43.41 b	52.90±6.76 b	32.00±5.89 b
	小 Small	14.68±4.76 c	133.10±60.87 bc	54.30±10.98 bc	29.00±4.40 b
	CK	14.39±6.17 c	123.25±69.33 c	59.42±9.18 c	24.00±5.10 c

2.4 林隙大小对土沉香生物量的影响

由表 4 可知,林隙大小对 2 种年龄土沉香幼树各器官和全株生物量的积累有显著影响。幼树叶片、枝条、根、树干以及全株生物量均随林隙面积的增大而增加,表明大林隙有利于促进土沉香幼树生长发育,而林冠下光照严重不足,则会抑制幼树生长

表 4 马尾松人工林中林隙大小对土沉香幼树生物量分配的影响

Table 4 Effects of gap size on biomass accumulation of <i>Aquilaria sinensis</i> in masson pine plantation							kg/株
年龄/a Age	林隙 Gap size	叶片 Leaf	枝条 Branch	树干 Trunk	根 Root	全株 Average	
4	大 Large	0.61±0.16 a	0.81±0.25 a	3.58±0.47 a	0.98±0.20 a	5.98±1.34 a	
	中 Intermediate	0.42±0.07 b	0.55±0.12 b	3.11±0.21 b	0.81±0.13 a	4.89±0.98 ab	
	小 Small	0.39±0.08 b	0.52±0.14 b	2.61±0.23 b	0.76±0.20 a	4.29±0.42 b	
	CK	0.28±0.07 c	0.38±0.03 c	2.25±0.34 c	0.46±0.10 b	3.47±0.40 c	
12	大 Large	2.92±0.72 a	6.67±0.90 a	19.65±2.98 a	10.54±1.35 a	39.81±5.51 a	
	中 Intermediate	2.37±0.31 a	5.49±0.71 ab	15.07±2.30 ab	8.22±1.82 ab	31.15±3.47 b	
	小 Small	1.86±0.18 b	5.15±0.18 b	14.83±2.09 b	8.37±1.07 b	30.21±3.30 b	
	CK	1.59±0.18 b	4.59±1.39 c	10.15±1.51 c	5.44±0.72 c	21.78±2.43 c	

3 结论与讨论

本研究结果表明,4 年生和 12 年生土沉香幼树生长、叶片形态以及生物量分配均与林隙大小有关。盆栽遮光试验发现,随着遮光强度增加,1 年生土沉香的地径、苗高均有所增长,生物量积累表现为先增加后下降^[21];林地试验发现,较低的林分郁闭度,更

2.3 林隙大小对土沉香一级分枝特征的影响

表 3 结果表明,2 种年龄土沉香幼树一级分枝的枝条基径、枝条长度、分枝角度、枝条数量在 3 个林隙生境和 CK 间差异显著($P<0.05$)。其中,土沉香幼树的枝条基径、枝长和枝条数量均随林隙面积的增大而增加,一级分枝角度则逐渐减小。由于大、中、小林隙至林冠下光照逐渐减弱,土沉香幼树一级枝条角度渐趋平展,可避免自我遮荫,从而使所附着的叶片更好地接受林内散射光。说明不同林隙生境中,土沉香需要通过分枝构型的可塑性调整对资源的获取对策,以适应环境的变化。

而影响其生物量积累。由此可见,2 种年龄土沉香幼树各器官和全株生物量的差异主要是由于长期生境条件不同所致。为了充分利用各生境内的资源,土沉香通过调整各器官的生长、形态以及生物量分配等以适应环境条件,形成对不同生境的适应策略。

有利于促进 8 年生土沉香幼树胸径、树高和冠幅的生长^[16]。说明土沉香幼树与幼苗对光照响应存在一定差异,随着人工更新苗木年龄的增加,幼树对光的需求逐渐增加。由此可见,用土沉香幼树生长形态指标评价林隙大小对幼树生长的影响是可靠的。

本研究中,大林隙下 2 种年龄土沉香幼树胸径、树高、冠幅和一级枝条的基径、长度、数量及各器官

生物量均最大,且大多显著高于其他处理,这与以往土沉香幼苗适当遮光^[22]以及较大林隙尺度下人工更新幼树生长试验^[23]的研究结果基本一致。说明土沉香幼树对光照需求存在一定阈值,适宜的林隙生境更有利于促进土沉香幼树生长。然而,在不同林隙生境的光照条件下,土沉香幼树是否存在光合生理特性方面的差异,还有待进一步研究。

本研究发现,与大林隙相比,林冠下和小林隙中土沉香幼树的一级分枝角度、叶片长度和宽度、平均单叶面积、比叶面积均较大。说明林隙大小对土沉香幼树的叶片形态影响各异,小林隙和林冠下幼树通过增加一级分枝角度、叶长宽和比叶面积来适应不利的生活环境。这与前人对栓皮栎^[24]、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)^[25]幼树形态的研究结果一致,即认为幼树需要通过增大分枝角度、叶面积才能获取更多光照,以保证幼树生存和生长发育。调查发现,长期处于小林隙和林冠下的土沉香幼树,大量叶片表现出黄化现象,说明幼树生长受到严重抑制。据此认为,在现有人工马尾松林地上进行人工更新时,土沉香幼树应选择相对较大的林隙。

本研究显示,2种年龄土沉香幼树的叶片、枝条、树干以及全株生物量均随林隙面积的增大而增加。说明4年生和12年生土沉香幼树对林隙大小的响应存在一定的相似性,大林隙有利于幼树生长及其生物量的积累。由此可见,2种年龄土沉香幼树生物量的差异主要是由于长期生境条件的不同所致。为了充分利用各生境内的有限资源,土沉香通过调整各器官的生长、形态以及生物量分配等以适应环境条件,形成对不同生境的适应策略。然而,究竟需要多大的林隙面积土沉香幼树的生长和生物量积累才能达到理想最大值,特别是马尾松林隙内多大的光照强度更适宜土沉香幼树的生长,均有待于进一步研究探讨。

[参考文献]

- [1] Watt A S. Pattern and process in the plant community [J]. Journal of Ecology, 1947, 35: 1-22.
- [2] Fownes J H, Harrington R A. Seedling response to gaps; separating effects of light and nitrogen [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 203(1/2/3): 297-310.
- [3] 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.
- [4] 郑德祥, 苏凌燕, 钟兆全, 等. 闽北闽粤栲天然林林隙物种多样

- 性变化分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 81-87.
- Zheng D X, Su L Y, Zhong Z Q, et al. Species diversity variations in gaps of *Castanopsis fissa* natural forest in Northern Fujian [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2016, 44(12): 81-87.
- [5] Myers G P, Newton A C, Melgarejo O. The influence of canopy gap size on natural regeneration of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in Bolivia [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 127(1): 119-128.
- [6] Kato K, Yamamoto S I. Branch growth and allocation patterns of saplings of two *Abies* species under different canopy conditions in a subalpine old-growth forest in central Japan [J]. Ecoscience, 2002, 9(11): 98-105.
- [7] 宋新章, 肖文发. 林隙微生境及更新研究进展 [J]. 林业科学, 2006, 42(5): 114-119.
- Song X Z, Xiao W F. Research advances of microsites and regeneration within canopy gap [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(5): 114-119.
- [8] 张象君, 王庆成, 郝飞龙, 等. 长白落叶松人工林林隙间伐对林下更新及植物多样性的影响 [J]. 林业科学, 2011, 47(8): 7-13.
- Zhang X J, Wang Q C, Hao L F, et al. Effect of gap thinning on the regeneration and plant species diversity in *Larix olgensis* plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(8): 7-13.
- [9] 李兵兵, 秦 琰, 刘亚茜, 等. 燕山山地油松人工林林隙大小对更新的影响 [J]. 林业科学, 2012, 48(6): 147-151.
- Li B B, Qin Y, Liu Y X, et al. Effects of gap size on regeneration of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Yanshan Mountain [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(6): 147-151.
- [10] Takahashi K, Mikami Y. Crown architecture and leaf traits of understory saplings of *Macaranga semiglobosa* in a tropical montane forest in Indonesia [J]. Plant Species Biology, 2008, 23(3): 202-211.
- [11] Meer P J V D, Dignan P, Savenah A G. Effect of gap size on seedling establishment, growth and survival at three years in mountain ash (*Eucalyptus regnans* F. Muell.) forest in Victoria, Australia [J]. Forest Ecology and Management, 1999, 117(1/2/3): 33-42.
- [12] 胡晓静, 张文辉, 何景峰. 秦岭南坡栓皮栎实生苗的构型分析 [J]. 林业科学, 2015, 51(9): 157-164.
- Hu X J, Zhang W H, He J F. Architectural analysis of *Quercus variabilis* seedlings in the south slopes of Qinling Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(9): 157-164.
- [13] Holladay C A, Kwit C, Collins B. Woody regeneration in and around aging southern bottomland hardwood forest gaps: effects of herbivory and gap size [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 223(1/2/3): 218-225.
- [14] 管云云, 费 菲, 关庆伟, 等. 林窗生态学研究进展 [J]. 林业科学, 2016, 52(4): 91-99.
- Guan Y Y, Fei F, Guan Q W, et al. Advances in studies of forest gap ecology [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(4): 91-

99.

[15] 庞圣江,张 培,马 跃,等. 白木香容器苗基质配比与缓释肥施用量的生长效应 [J]. 东北林业大学学报,2018,46(11):14-17.

Pang S J,Zhang P,Ma Y,et al. Effect of substrate ratio and slow-release fertilizer dose on the growth of containerized *Aquilaria sinensis* seedlings [J]. Journal of Northeast Forestry University,2018,46(11):14-17.

[16] 刘志贤,莫罗坚,欧 薇,等. 林下套种对土沉香生长及黄野螟危害的影响分析 [J]. 南方林业科学,2018,46(2):39-41.

Liu Z X,Mo L J,Ou W,et al. Effect of underforest intercropping on growth of *Aquilaria sinensis* and pest occurrence of *Heortia vitessoides* [J]. South China Forestry Science,2018,46(2):39-41.

[17] 田耀华,原慧芳,倪书邦,等. 沉香属植物研究进展 [J]. 热带亚热带植物学报,2009,17(1):98-104.

Tian Y H,Yuan H F,Ni S B,et al. Advances in studies on endangered *Aquilaria* plant [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2009,17(1):98-104.

[18] 张 浩,庄雪影,黄永芳,等. 华南乡土树种在松杉林下生长及林下植物多样性研究 [J]. 林业科学研究,2008,21(2):139-144.

Zhang H,Zhuang X Y,Huang Y F,et al. Growth of some native broad-leaved trees and plant diversity in the coniferous plantation of south China [J]. Forest Research,2008,21(2):139-144.

[19] Zhu J J,Matsuzaki T,Lee F,et al. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest [J]. Forest Ecology and Management,2003,182(1):339-354.

[20] 朱凯月,王庆成,吴文娟. 林隙大小对蒙古栎和水曲柳人工更新幼树生长和形态的影响 [J]. 林业科学,2017,53(4):150-157.

Zhu K Y,Wang Q C,Wu W J. Effect of gap size on growth and morphology of transplanted saplings of *Quercus mongolica* and *Fraxinus mandshurica* [J]. Scientia Silvae Sinicae,2017,53(4):150-157.

[21] 袁莲珍,史富强,侯云萍,等. 遮光度对白木香种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 福建林业科技,2015,42(3):110-112.

Yuan L Z,Shi F Q,Hou Y P,et al. Study on the effects of shading on seed germination and seedling growth of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Glg [J]. Journal of Fujian Forestry Sci and Tech,2015,42(3):110-112.

[22] 原慧芳,魏丽萍,田耀华,等. 遮阴处理对土沉香幼苗生长和叶片解剖特征的影响 [J]. 浙江农业学报,2013,25(4):747-752.

Yuan H F,Wei L P,Tian Y H,et al. Effects of shading on seedling growth and leaf anatomical characteristics of *Aquilaria sinensis* [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2013,25(4):747-752.

[23] Przemyslaw P,Pierre B R. Constraints of space in plant development [J]. Journal of Experimental Botany,2010,61(8):2117-2129.

[24] 余碧云,张文辉,何 婷,等. 秦岭南坡林窗大小对栓皮栎实生苗构型的影响 [J]. 应用生态学报,2014,25(12):3399-3406.

Yu B Y,Zhang W H,He T,et al. Effects of forest gap size on the architecture of *Quercus variabilis* seedlings on the south slope of Qinling Mountains, West China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(12):3399-3406.

[25] 李 罡,张文辉,于世川,等. 辽东栎林内不同小生境下幼树植冠构型分析 [J]. 西北植物学报,2016,6(3):588-595.

Li G,Zhang W H,Yu S C,et al. Architectural analysis of crown geometry of saplings of *Quercus liaotungensis* forest in different habitats [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2016,6(3):588-595.

(上接第 82 页)

[28] 苏芳莉,刘明国,谭学仁,等. 不同间伐强度天然次生林凋落物性质的研究 [J]. 辽宁林业科技,2007(2):1-3.

Su F L,Liu M G,Tan X R,et al. Study on litter properties of natural secondary forests with different thinning intensities [J]. Liaoning Forestry Science and Technology,2007(2):1-3.

[29] 来航线,程丽娟,王中科. 几种微生物对土壤腐殖质形成的作用 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),1997,25(6):79-82.

Lai H X,Cheng L J,Wang Z K. Effects of several microorganisms on soil humus formation [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),1997,25(6):79-82.