

林分密度对小桐子生物量及其产量的影响

莫丽芬^{1,2}, 唐建维¹, 刀祥生¹, 唐寿贤¹, 王涛¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 勐腊 666303; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用14株样木建立了以基径(D_{BD})和树高(H)为变量的小桐子(*Jatropha curcas* L.)相对生长模型 $W = a(BD^2H)^b$, 根据样地调查数据对不同密度小桐子人工林的生物量进行估算, 并分析了其组成和分配特征。结果表明, 林分密度从低到高6块样地的总生物量分别为18 333、22 391、35 887、36 360、29 604、34 458 $t \cdot hm^{-2}$ 。其中, 活体植物的贡献率为92.91%~97.60%, 而地上凋落物仅为2.40%~7.09%。其器官分配以枝所占比例最高, 茎次之, 果最小。林分生物量的器官分配呈如下趋势: $W_{枝} > W_{茎} > W_{根} > W_{叶} > W_{果}$ 。小桐子产量随林分密度增加先增加再减少, 分别为: 1.246、2.002、1.449、1.153、0.711、0.647 $t \cdot hm^{-2}$ 。叶面积指数分别为: 1.14、1.15、2.41、2.32、1.21、1.39, 与地上生物量成正相关关系。西双版纳小桐子产量高于印度奥里萨邦。研究结果表明, 西双版纳区采用1 600株 $\cdot hm^{-2}$ 的栽种密度可以获得较高的产量。

关键词: 小桐子; 生物量; 产量; 生物量分配; 回归模型

中图分类号: Q949.753.5; S718.55+6 文献标志码: A 文章编号: 1673-923X(2010)04-0061-08

Influence of stand densities on the biomass and seed yield of *Jatropha curcas* plantations

MO Li-fen^{1,2}, TANG Jian-wei¹, DAO Xiang-sheng¹, TANG Shou-xian¹, WANG Tao¹

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Science, Mengla 666303, Yunnan, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the effects of planting densities on the biomass and seed yield of *J. curcas* L. plantations, six stands of different densities were chosen. Regression models relating tree biomass to D_{BD} (basal diameter) and H (tree height) were built based on 14 sample trees data of *J. curcas* L. and a power-law allometric relationship $W = a(BD^2H)^b$ was used to estimate the tree biomass and its allocation. The results show that total biomass for six stands from low to high density were 18 333, 22 391, 35 887, 36 233, 29 604 and 34 458 $t \cdot hm^{-2}$, respectively. Living biomass occupied a proportion of 92.91% ~ 97.60% of the total biomass, while litterfall accounted for the rest (2.40% ~ 7.09%). Among the organs, branches accounted for the largest proportion of total biomass, followed by stems, fruits were the least. The allocation of biomass for different organs was ranked in the decreasing order: $W_{branch} > W_{stem} > W_{root} > W_{leaf} > W_{fruit}$. The seed yield of six different stands were 1.246, 2.002, 1.449, 1.153, 0.711 and 0.647 $t \cdot hm^{-2}$, respectively. Leaf area index (I_{LA}) of six stands were 1.14, 1.15, 2.41, 2.32, 1.21 and 1.39, respectively, which was positively related with aboveground biomass. The seed yield of *J. curcas* in this study was higher than that in Orissa (India). We suggest that stand density of 1 600 trees $\cdot hm^{-2}$ was feasible planting density for *J. curcas* to get higher seed yield.

Key words: *Jatropha curcas* L.; biomass; seed yield; biomass allocation; regression model

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-G-027)

作者简介: 莫丽芬(1984-), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究; E-mail: molifen119@163.com

通讯作者: 唐建维, 副研究员; E-mail: tangjw@xtbg.org.cn; 电话: 0691-8715080

人类大量使用矿物燃料带来了日益严重的环境问题,同时也造成了化石能源的日趋减少,特别是近几年来石油和煤炭价格的直线上升,使得生物能源的开发和利用逐渐成为了人类关注的焦点。同时从减少温室气体排放角度考虑,从植物油中提取液体生物燃料是一个不错的途径^[1]。小桐子(*Jatropha curcas* L.)是大戟科麻风树属植物,原产热带美洲,现广泛分布于世界热带地区。在我国主要分布在福建、广东、广西、海南、四川、贵州、云南和台湾等省区,现有资源以云贵川地区为多^[2]。作为能源物种,小桐子对环境适应能力强,特别是其具有极强的抗干旱、易成活和可制备生物柴油等方面的特性,种植小桐子不挤占良好的耕地资源,其种植与发展无疑具有极为广阔的前景^[3-4]。

造林密度是形成人工林群落结构的数量指标,林分的结构影响环境资源(如光、生长空间、营养元素等)的利用,从而影响林分生长、死亡和林分产量^[5-6]。林分密度与林木生长关系密切相关,国内外许多学者通过人工林密度效应的研究,确定林分生物量积累和林分密度间的关系,从而更好地指导人工林的经营管理,提高林业生产的经营水平^[7-10]。此外,种植密度是影响产量的关键因子,合理的栽种密度可以获得理想的株型,提高产量^[11-12]。

目前在小桐子的培育和栽种方面已有一些研究报道^[13-18]。在适宜密度栽种方面, Heller^[16]、Stienswat 等^[17]、Kaushik 和 Kumar^[18]提出了因地制宜的高产栽种密度。而国内在小桐子适宜栽培密度方面的研究较少,更未见有关种植密度对小桐子生物量及其产量影响的相关报道。为掌握不同种植密度下小桐子人工林的生物量积累及其分配格局以及产量的状况,我们于2008年12月选择了6种不同种植密度的小桐子人工林进行了相关的研究,以期了解在相同的管理措施下不同种植密度对小桐子人工林的生长及其产量的影响;同时为筛选较佳的小桐子林种植密度,探索影响小桐子生长和产量的因素,推广其种植提供科学依据。

1 研究地区的自然概况

实验样地设在中国科学院西双版纳热带植物园内(21°41'N, 101°25'E, 海拔 580 m)。该地区主要受西南季风气候的控制,属于西部型热带季风气候。年平均温度为 21℃,最热月平均温度为 25.6℃,最冷

月平均温度为 13.1℃ $\geq$ 10℃,积温为 7 630℃,年日照时数约 1 850 h;年均降雨量为 1 550 mm,蒸发量为 1 665 mm,年均相对湿度为 86%,水热系数为 2.2;干湿季交替明显,一年中有明显的雾凉季(11月~翌年2月)、干热季(3~4月)和雨季(5~10月)之分。其中雨季降雨占全年降水量的 80%以上,干季降雨量不到全年降水量的 13%,但旱季浓雾弥漫,尤以 11 月至次年 3 月为甚,年均雾日数达 192.5 d,日雾露水量达 1 mm,对减少植物蒸腾和弥补旱季水分不足起到一定的作用^[19]。

2 材料与方法

2.1 样地设置

为进行不同密度的小桐子生物量和产量的研究,于 2008 年 12 月选取了 2005 年种植在同一平整地段上的 6 块不同栽种规格的小桐子样地(分别记为样地 I、II、III、IV、V 和 VI),样地 I 到 VI 其株行距分别是: 3.0 m $\times$ 3.0 m、2.5 m $\times$ 2.5 m、2 m $\times$ 2 m、1.5 m $\times$ 2 m、1 m $\times$ 2 m、0.5 m $\times$ 2 m,即栽种密度分别为: 1 111、1 600、2 500、3 333、5 000、10 000 株 $\cdot$ hm⁻²,每块样地的面积为 200 m² (10 m $\times$ 20 m)。土壤为砖红壤,土层深厚,有机质含量 9.23 g/kg, pH 值为 5.6。

2.2 调查方法

为排除边缘效应,所建立的样地排除了边缘植株及样方间的过渡植株。对样方内植株进行每木调查,测量记录植株以及植株各茎干的名称、基径、胸径(1.3 m 处)、高度等,并挂牌标号。

2.3 样木的选取与取样

根据不同的径级大小选取样木 14 株。由于小桐子的萌生茎干较多,在测定每株样木的基径、高度后,又分别测量了样木各萌生茎干的基径和高度,并称取各茎干及枝、叶等的鲜质量;地下部分根系采用挖掘法,将根分根茎、粗根和细根(< 2 mm)称质量,获取其鲜质量。对各组分分别取样,根、茎、枝样品在 105℃,叶片在 75℃烘干至恒质量,求得其含水率后,再换算出各组分的总干质量。

2.4 果

在果成熟期间,收集样地中每株树上的果实。

根据平均单株种子产量来计算单位面积上的林分产量。

2 5 地上凋落物现存量

在样方内梅花型布点设置 0.5 m² 的小样方共 5 个, 收集其内所有的地上凋落物, 包括枯落叶、枯枝、花果、树皮等。在实验室中将各组分进行分捡, 在 80 ℃下烘干至恒质量后称质量, 得到每一样方内的凋落物量, 以 5 个样方的平均值推算样地内的地上凋落物的生物量。

2 6 叶面积指数(I_{LA})

使用便携式叶面积仪(LI-3000A)测定样地内随机采集的不同高度的树叶叶面积, 烘干后称取其干质量, 采用叶面积比重法计算叶面积指数。

3 结果与分析

3 1 生物量模型的建立

对生物量的估测, 一般采用生物量与易测指标的拟合方程进行估计^[20]。根据样木资料, 利用基径(D_B)平方乘以树高(H)为自变量, 采用多种常见的线性和非线性回归模型对整个林分各器官的生物量加以拟合, 从中选出了相关系数最高的作为优化回归模型, 以此估算小桐子各器官(树干、枝、叶、根)的生物量和总生物量(见表 1)。拟合结果显示, 以幂函数建立的林分及各器官生物量回归模型的相关系数最高。经统计学检验, 茎、枝、叶、根和总生物量回归模型的相关系数均达到极显著水平($p < 0.01$)。

表 1 小桐子生物量回归模型

Table 1 Regression models for biomass of <i>Jatropha curcas</i> L. plantation			
器官	回归模型		相关系数(r)
茎	$W_s = 0.0135(BD^2H)0.8399$	(3.8 cm < D_B < 17.0 cm; 1.6 m < H < 3.8 m; $N = 14$)	0.8942**
枝	$W_b = 0.0065(BD^2H)0.9926$		0.7964**
叶	$W_l = 0.0005(BD^2H)0.9861$		0.6809**
根	$W_r = 0.0164(BD^2H)0.7544$		0.8626**
总	$W_t = 0.0349(BD^2H)0.8738$		0.9110**

- “**”表示 $p < 0.01$, F 检验达到了极显著水平。

3 2 单株产量、生物量及其分配

小桐子为多分枝树种, 为了准确测定小桐子的生物量, 根据 6 块样地的调查数据, 由表 1 所列的小桐子各器官生物量的回归模型, 直接推算出 6 块样地的小桐子单株各器官的生物量(见表 2)。6 种林分密度的人工林单株生物量分别为 15.665 ± 1.025、13.002 ± 0.820、13.498 ± 0.381、10.505 ± 0.507、5.669 ± 0.461、3.363 ± 0.183 kg · 株⁻¹, 并随林分密度的增加而减少。其中, 密度最小的样地 I 其单株生物量最大, 分别为样地 II、III、IV、V、VI 单株生物量的 1.20、1.16、1.49、2.76 和 4.66 倍。各器官的生物量也以样地 I 最大, 茎、枝、叶、根的生物量分别达到了 4.925 ± 0.321、5.574 ± 0.403、0.413 ± 0.030、3.631 ± 0.225 kg · 株⁻¹, 样地 VI 最少, 分别只有样地 I 的 23.03%、22.33%、22.35% 和 22.79%。各器官的生物量均呈现随林分密度的增

加而减少的趋势。

在单株生物量的器官分配上, 以枝和茎占优势, 在 6 块样地中, 二者分别占单株总生物量的 35.58%、36.85%、39.40%、38.93%、38.03%、37.01%, 和 31.44%、30.87%、32.33%、33.01%、32.72%、33.72%, 根次之, 所占比例为 23.18%、19.93%、21.07%、22.00%、23.92% 和 24.60%, 叶和果最少。不同密度的林分各器官生物量的分配体现出 $W_{枝} > W_{茎} > W_{根} > W_{叶}$ 的规律。但随着林分密度的增加, 各器官所占的比例呈现不同的变化趋势: 根和茎所占的比例呈波浪式地递增, 而枝、叶则先增加后下降。这表明随着林分密度增加, 植株对资源竞争特别是土壤水分和养分的进一步加强, 导致了各器官在生长上的差异。

6 块样地的单株产量分别为 1.122、1.251、0.580、0.346、0.142、0.065 kg · 株⁻¹(见表 2)。可见, 单株产量以样地 II(1.600 株 · hm⁻²) 最大, 样地 I(1.111 株 · hm⁻²) 次之; 此后, 随着林分密度的增

加单株产量持续地下降。当林分密度达到 10 000 株·hm⁻²时,单株产量仅为 0.065 kg。同时,其占单株总生物量的比例也随着密度的增加先增加再减少。

表 2 西双版纳小桐子单株生物量及其分配
Table 2 The biomass (kg·individual⁻¹) and its allocation of *Jatropha curcas* L. individuals (mean±SE) in Xishuangbanna

样地	茎	枝	叶	根	产量	总和
I	4.925±0.321 (31.44) ⁻	5.574±0.403 (35.58)	0.413±0.030 (2.64)	3.631±0.225 (23.18)	1.122 (7.16)	15.665±1.025 (100)
II	4.014±0.254 (30.87)	4.791±0.341 (36.85)	0.354±0.025 (2.73)	2.592±0.176 (19.93)	1.251 (9.62)	13.002±0.820 (100)
III	4.364±0.120 (32.33)	5.318±0.160 (39.40)	0.393±0.012 (2.91)	2.844±0.088 (21.07)	0.580 (4.29)	13.498±0.381 (100)
IV	3.456±0.160 (32.89)	4.090±0.197 (38.93)	0.303±0.015 (2.88)	2.311±0.115 (22.00)	0.346 (3.29)	10.505±0.507 (100)
V	1.855±0.135 (32.72)	2.156±0.228 (38.03)	0.160±0.017 (2.82)	1.356±0.080 (23.92)	0.142 (2.51)	5.669±0.461 (100)
VI	1.134±0.057 (33.72)	1.245±0.072 (37.01)	0.092±0.005 (2.75)	0.827±0.040 (24.60)	0.065 (1.92)	3.363±0.183 (100)

- 括号内的数值为占总和的百分比。

3.3 林分的活生物量及其产量

6 种不同密度的小桐子人工林的生物量及其分配见表 3。林分生物量最大的为样地 IV,达 35.105 t·hm⁻²,其次为样地 III、VI,分别为 33.745、33.631 t·hm⁻²,最小的为样地 I,仅 17.403 t·hm⁻²。在林分生物量的器官分配方面,以枝的

生物量最大,其次为茎,叶和果的生物量较少。随着林分密度的增加,各器官的生物量(除果外)均呈波浪式递增趋势。6 个林分的产量随林分密度的增加先增加再减少,以样地 II 最大,达 2.002 t·hm⁻²,分别为样地 I、III、IV、V、VI 的 1.61、1.38、1.74、2.81、3.09 倍。而种植密度最大的样地 VI 最小,仅为 0.647 t·hm⁻²。

表 3 西双版纳小桐子林分生物量及其分配
Table 3 The biomass(t·hm²) and its allocation of *Jatropha curcas* L. plantations in Xishuangbanna

样地	茎	枝	叶	根	产量	总和
I	5.471	6.192	0.459	4.034	1.246	17.403
II	6.423	7.666	0.567	4.147	2.002	20.803
III	10.909	13.295	0.983	7.109	1.449	33.745
IV	11.517	13.632	1.009	7.703	1.153	35.105
V	9.275	10.781	0.798	6.779	0.711	28.344
VI	11.340	12.446	0.924	8.274	0.647	33.631

3.4 林分地上凋落物量

6 个林分的地上凋落物现存量分别为 0.929、1.588、2.142、1.346、1.260、0.828 t·hm⁻²(见表 4),随林分密度的增加呈现先增加再减少的趋势。6 个林分的枝、果、树皮的凋落量随林分密度的增加而减少,叶、杂屑的生物量则随林分密度的增加呈

波浪式地递减。
在凋落物的各组分中,枯落叶占绝对优势,分别占凋落物现存量的 31.66、73.55、48.13、64.18、79.95、83.00%,随林分密度的增加呈波浪式增加;枯落枝次之,占凋落物现存量的比例随林分密度的增加先增加后减少,与样地 III+IV 相比,样地 I、V 和 VI 所占比例显著减少。果和杂屑相当;树皮最

少, 不足总量的 3. 50%。

表 4 西双版纳小桐子人工林地上凋落物生物量

Table 4 Biomass of litterfall in *Jatropha curcas* L plantations in Xishuangbanna

t • hm⁻²

样地	枝	叶	果	树皮	杂屑	总和
I	0 000 (0 00)-	0 294 (31 66)	0 606 (65 20)	0 000 (0 00)	0 030 (3 19)	0 929 (100)
II	0 254 (16 00)	1 169 (73 55)	0 111 (7 01)	0 000 (0 00)	0 052 (3 30)	1 588 (100)
III	0 749 (34 98)	1 030 (48 13)	0 182 (8 50)	0 075 (3 48)	0 107 (5 00)	2 142 (100)
IV	0 293 (21 80)	0 863 (64 18)	0 108 (8 04)	0 002 (0 18)	0 079 (5 84)	1 346 (100)
V	0 050 (3 95)	1 007 (79 95)	0 055 (4 37)	0 027 (2 12)	0 121 (9 62)	1 260 (100)
VI	0 027 (3 31)	0 689 (83 00)	0 035 (4 19)	0 024 (2 93)	0 053 (6 35)	0 828 (100)

- 括号内数值为中总和的百分比。

3 5 林分的总生物量

群落的总生物量包括了活体植物地上和地下以及地上凋落物量。因果实活体生物量是种子的重量, 凋落物收集的是整个果实的重量, 故林分总生物量比真实值略低。6 块样地, 林分密度从低到高, 其总生物量分别为 18 333、22 391、35. 887、36 360、29 604、34. 458 t • hm⁻² (见表 5), 与林分的活生物量变化趋势相同。其中, 活体植物的贡献率分别为 94. 93、92 91、94 03、96 30、95. 74、97. 60%, 而地上凋落物仅为 5. 07、7. 09、5. 97、

3 70、4 26、2 40%。

6 个林分总生物量的器官分配以枝为最高, 分别为 33 78、35 37、39. 12、38 31、36. 59、36 19%, 随林分密度的增加先增加再减少; 茎次之, 为 29 84、28. 67、30 40、31. 68、31 35、32. 91%, 随林分密度的增加而增加。果所占比例最小, 不足 10 5%, 并随林分密度的增加而减少。总生物量器官分配与活体生物量器官分配相比, 茎、枝和根所占比例略有下降。在器官分配方面, 各器官总生物量分配呈如下趋势:

$W_{枝} > W_{茎} > W_{根} > W_{叶} > W_{果}$ 。

表 5 西双版纳小桐子人工林总生物量组成

Table 5 Total biomass of *Jatropha curcas* L plantations in Xishuangbanna

t • hm⁻²

样地	生物量组分	茎	枝	叶	根	果	总和
I	B_{LB}	5 471 (31 44)	6 192 (35 58)	0 459 (2 64)	4 034 (23 18)	1 246 a (7 16)	17 403 (100)
	L	—	—	0 294 (31 66)	—	0 606 b (65 20)	0 929* (100)
	总计	5 471 (29 84)	6 192 (33 78)	0 753 (4 11)	4 034 (22 00)	1 852 (10 01)	18 333 (100)
II	B_{LB}	6 423 (30 87)	7 666 (36 85)	0 567 (2 73)	4 147 (19 93)	2 002 a (9 62)	20 803 (100)
	L	—	0 254 (16 00)	1 169 (73 55)	—	0 111 b (7 01)	1 588 * (100)
	总计	6 423 (28 67)	7 920 (35 37)	1 736 (7 77)	4 147 (18 54)	2 113 (9 42)	22 391 (100)
III	B_{LB}	10 909 (32 33)	13 295 (39 40)	0 983 (2 91)	7 109 (21 07)	1 449 a (4 29)	33 745 (100)

续表 5
The continued table 5

样地	生物量组分	茎	枝	叶	根	果	总和
IV	<i>L</i>	—	0 749 (34 98)	1 030 (48 13)	—	0 182 b (8 50)	2. 142 * (100)
	总计	10 909 (30 40)	14 044 (39 12)	2 013 (5 60)	7 109 (19 81)	1 631 (4 54)	35 887 (100)
	<i>B_{LB}</i>	11 517 (32 89)	13 632(38 93)	1 009 (2 88)	7 703 (22 00)	1 153 a (3 29)	35 015 (100)
	<i>L</i>	—	0 293 (21 80)	0 863 (64 18)	—	0 108 b (8 04)	1. 346 * (100)
	总计	11 517 (31 68)	13 925 (38 31)	1 872 (5 14)	7 703 (21 19)	1 261 (3 47)	36 360 (100)
	<i>B_{LB}</i>	9 275 (32 72)	10 781 (38 03)	0 798 (2 82)	6 779 (23 92)	0 711 a (2 51)	28 344 (100)
V	<i>L</i>	—	0 050 (3 95)	1 007 (79 95)	—	0 055 b (4 37)	1. 260 * (100)
	总计	9 275 (31 35)	10 831 (36 59)	1 806 (6 11)	6 779 (22 91)	0 766 (2 60)	29 604 (100)
	<i>B_{LB}</i>	11 340 (33 72)	12 446 (37 01)	0 924 (2 75)	8 274 (24 60)	0 647 a (1 92)	33 631 (100)
VI	<i>L</i>	—	0 027 (3 31)	0 689 (83 00)	—	0 035 b (4 19)	0. 828 * (100)
	总计	11 340 (32 91)	12 473 (36 19)	1 613 (4 67)	8 274 (24 00)	0 682 (1 97)	34 458 (100)

- 括号内数值为占总和的百分比; a 为种子产量, b 为果实的产量; *B_{LB}* 活体生物量, *L* 凋落物; * 包括枯落杂质和树皮。

3.6 叶面积指数(*I_{LA}*)

叶片是树种的重要光合器官, 光合叶面积的建成直接影响着小桐子的生物量和产量。6 个不同林分密度小桐子人工林的叶面积指数分别为: 1. 14、1. 15、2. 41、2. 32、1. 21、1. 39, 随林分密度的增加呈现波浪式递增的趋势。6 个不同密度的林分叶面积指数与产量、地上生物量的关系如图 1 所示。Spearman 相关分析显示: *I_{LA}* 与地上生物量呈正相关关系($p < 0. 05$), 与产量无显著相关性。林分密度为 1 111 株·hm⁻² 的地上生物量最小, *I_{LA}* 最小; 而林分密度 3 333 株·hm⁻² 的地上生物量最高, *I_{LA}* 也较大。林分密度从 3333 到 5 000 株·hm⁻², *I_{LA}* 减少了约 1 倍, 其地上生物量也急剧地减少(见图 1)。林分密度从 5 000 到 10 000 株·hm⁻², *I_{LA}* 有了少量增加, 说明植株个体数的增多促进了叶面积的增加, 但远不及低林分密度下的叶面积。

4 讨论

4.1 密度对生物量和产量的影响

生物量分配(Allocation)是现代生态学中重要

研究内容之一, 为解释植物不同的生长策略提供了基础。Harper 和 Ogden^[21] 引用了一种计算能量分配的方法, 即按功能的不同将植株分割成不同组织, 各组织生物量与总生物量的比值。一些研究表明, 植株在竞争的环境下会改变他们的繁殖分配^[22]。在竞争激烈的环境条件下, 植株将更多的能量分配给竞争结构, 产量减少。相比之下, 如果植株减少竞争结构和功能的能量投入, 产量将会提高^[23]。本研究中, 6 个林分果的生物量随林分密度的增加先增加再减少, 其占总生物量的比例(分别是 7. 16%、9. 62%、4. 29%、3. 29%、2. 51%、1. 92%) 也随林分密度的增加先增加再减少; 而 6 个林分根的生物量比例随着林分密度的增加则先减少再增加。这表明随林分密度的增加, 植株个体对光、水分、养分的竞争进一步增强, 为了竞争有限的资源, 植株将能量过多的投入到根部, 减少了对繁殖的输出, 造成产量的降低; 而较低的林分密度, 植株营养生长过旺, 碳水化合物积累少, 花芽分化少, 产量也会降低。

植物群落个体生物量和群落密度存在 - 4/3 指数关系^[24-25], 即 $M \propto N^{-4/3}$ 。而植株的产量又与植株的大小存在显著正相关关系, 植株对繁殖的分

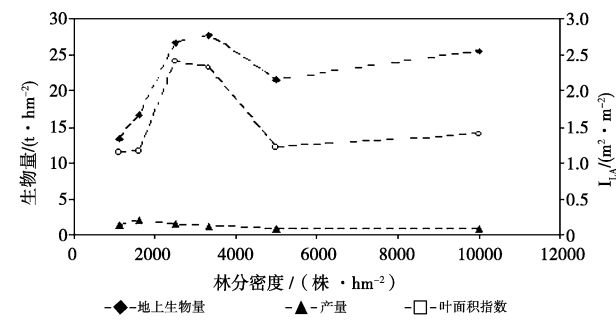


图 1 地上生物量、产量与比叶面积的关系
Fig 1 The relationships among aboveground biomass, yield and I_{LA}

配会随着植株个体的增大而增加^[26]。在本研究中,单株生物量随林分密度的增加而减少,而各植株个体中果的生物量随密度的变化呈现先增加再减少的趋势(分别为 1.122、1.251、0.580、0.346、0.142、0.065 kg · 株⁻¹),与单株生物量的变化趋势不一致。此外,产量随时间的变化而变化,多年生植物的繁殖力(reproductive capacity)由植株过去或者当前的生长状况决定^[27]。限于目前 6 个不同密度小桐子林分的种植时间,就现在的单株产量而言,以林分密度为 1 600 株 · hm⁻² 的营养条件最好,用于营养和繁殖生长的年度代谢产物之间存在很好的权衡(trade-off)关系。

在整个林分尺度上,样地 I(1 111 株 · hm⁻²)的个体生物量最大,但林分生物量最小。林分密度最大的样地 VI(10 000 株 · hm⁻²)虽然在单株上占劣势,但其林分的生物量却高于林分密度为 5 000 株 · hm⁻² (样地 V) 的生物量。这说明个体数量优势可以弥补单株生物量的不足,这一研究结果与 Weiner^[23] 的结论相符,当种群密度过大,植株个体将变小,但林分生物量可以随林分密度的增加及个体数量的增多而并未减少。

4 2 西双版纳小桐子人工林产量与其它地区的比较

已有的研究表明,在不同的气候土壤条件下,小桐子产量差异较大,每年每株小桐子的产量较低的情况下仅为 0.2 kg,而高产情况下甚至可超过 2 kg^[28]。在降雨量和林龄相似的条件,就不同种植密度的产量而言,印度的奥里萨邦地区的产量(林分密度 833、166 7 株 · hm⁻² 的产量分别为: 690、450 g · 株⁻¹)随着林分密度的增加而减少^[29],表明

产量与林分密度密切相关,但该地区的产量要低于西双版纳地区。为获得较高的产量, Heller^[16] 建议采用株行距为 2 m × 2 m、2.5 m × 2.5 m 和 3 m × 3 m (即林分密度分别为: 2 500、1 600 和 1 111 株 · hm⁻²) 的栽种规格。Stienswat 等^[17] 调查了泰国不同种植密度对小桐子营养繁殖生长的影响,发现株行距最宽(2 m × 2 m)的营养生长最好,种子产量最高。而本研究中林分密度为 1 600 株 · hm⁻² 的林分产量最高,但生物量相对较低。塞内加尔地区(3.48 g · 株⁻¹)和印度吉拉特邦地区(49.5 g · 株⁻¹)小桐子的单株产量远低于西双版纳地区^[16,30],这可能是受该地区年降雨量较少的影响,因两地年降雨量(分别为 700、882 mm)约为西双版纳地区的一半。

4 3 叶面积指数(I_{LA})与地上生物量及产量的关系

叶面积指数(I_{LA})是指单位面积上植物叶片的垂直投影面积的总和,是进行生物量估算的一个重要参数,在农业产量模型预算中重要的变量,用于大规模农作物产量的估算^[31]。作物叶面积指数是反映作物生长状况的重要指标,与作物群体的光能利用、产量和地上生物量密切相关, I_{LA} 越大,通常作物产量和地上生物量也越大^[32]。在本研究中, I_{LA} 与地上生物量呈正相关关系,而产量可能不仅仅受光合面积的影响,而是受环境因子的综合影响。

产量是种植小桐子经济价值的直接反映。在本研究中,当林分密度从 1 111 株 · hm⁻² 增加到 1 600 株 · hm⁻² 后,单株产量以及整个林分产量均随着林分的密度增加而急剧减少。表明在西双版纳地区小桐子采取 2.5 m × 2.5 m 的种植规格(即 1 600 株 · hm⁻²)是较佳的种植方式。

参考文献:

- [1] Achten W M J, Verchot L, Franken Y J, *et al.* Jatropha biodiesel production and use[J]. Biomass & Bioenergy, 2008, 32 (12): 1063-1084
- [2] 吴琼. 我国小桐子能源利用的现状与潜力评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2009
- [3] FAO. Can biotechnology meet the needs of the poor? [R]. Roman, Italy: Food and Agriculture organization of the United nations, 2004
- [4] FAO. The State of Food and Agriculture, Bio-fuels: Pros-

- pects, Risks and Opportunities [R]. Roman, Italy: Food and Agriculture organization of the United nations, 2008
- [5] Assman E. The principles of yield study. [M]. Oxford: Oxford Pergamon Press, 1970
- [6] 童书振, 盛伟彤, 张建国. 林分生长与产量模型系统研究综述[J]. 林业科学, 2002, 18(1): 66–75
- [7] Bergqvist G. Wood volume yield and stand structure in Norway spruce understorey depending on birch shelter-wood density[J]. Forest ecology and management, 1999, 122(3): 221–229
- [8] Drew T J, Flewelling J W. Some Recent Japanese Theories of Yield-Density Relationships and their Application to Monterey Pine Plantations[J]. Forest Science, 1977, 23(4): 517–534
- [9] 唐建维, 邹寿青. 望天树人工林林分生长与林分密度的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(4): 83–86
- [10] 林建华. 马尾松造林密度与林分生长效应试验[J]. 福建林业科技, 2005, 13(32): 137–139
- [11] 吴素琴. 苜蓿种子丰产关键因子及产量构成因素的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2003
- [12] 杨世民, 廖尔华, 袁继超, 等. 玉米密度与产量及产量构成因素关系的研究[J]. 四川农业大学学报, 2000, 18(4): 322–324
- [13] 毛俊娟, 倪婷, 王胜华, 等. 干旱胁迫下外源钙对麻疯树相关生理指标的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45: 669–673
- [14] 漆小雪, 兰生葵, 梁干君. 麻疯树及其栽培技术[J]. 林业科技开发, 2008, 4: 106–108
- [15] 王朝文, 郭承刚, 李建富, 等. 不同试剂对小桐子扦插生根的影响[J]. 现代农业科技, 2007, 1: 5–6
- [16] Heller J. Physic Nut *Jatropha curcas* L. Promoting the Conservation and use of Underutilized and Neglected Crops [R]. Roman, Italy: International Plant Genetic Resources Institute, 1996
- [17] Stienswat W, Rattanaserikiat S, Nimunchat S. Research reports on growing of physic nut (*Jatropha curcas*) for diesel fuel substitute: The studies on growing of physic nut (*Jatropha curcas*) in the large test plot [R]. Bangkok, Thailand: Kasetsart University, 1986
- [18] Kaushik N, Kumar S. *Jatropha curcas* L. silviculture and uses [R]. Agrobios, Jodhpur (India), 2006.
- [19] 唐建维, 施济普, 张光明, 等. 西双版纳不同斑块望天树种群的密度、结构和生物量[J]. 植物生态学报, 2008, 32: 40–54
- [20] Frank R C, Peter D G, Sarah L H, et al. The Biomass Assessment Handbook-Bio-energy for a Sustainable Environment [M]. London: Earthscan, London, 2007: 78
- [21] Harper J L, Ogden J. The reproductive strategy of higher plants: I. The concept of strategy with special reference to *Senecio vulgaris* [J]. Journal of Ecology, 1970, 8: 681–698
- [22] Waite S, Hutchings M J. Plastic energy allocation patterns in *Plantago coronopus* [J]. Oikos, 1982, 38: 333–342
- [23] Weiner J. Allocation, plasticity and allometry in plants [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2004, 6(4): 207–215
- [24] Enquist B J, Niklas K J. Invariant scaling relations across tree-dominated communities [J]. Nature, 2001, 410: 655–660
- [25] Niklas K J, Midgley J J, Enquist B J. A general model for mass-growth-density relations across tree-dominated communities [J]. Evolutionary Ecology Research, 2003, 5: 459–468
- [26] Samson D A, Werk K S. Size-dependent effects in the analysis of reproductive effort in plants [J]. The American Naturalist, 1986, 127: 667–680
- [27] Niklas K J, Enquist B J. An allometric model for seed plant reproduction [J]. Evolutionary Ecology Research, 2003, 5: 79–88
- [28] Francis G, Edinger R, Becker K. A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socioeconomic development in degraded areas in India: need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations [J]. Natural Resources Forum, 2005, 29: 12–24
- [29] Ghosh A, Patolia J S, Chaudhary, D R, et al. Response of *Jatropha curcas* under different spacing to *Jatropha* de-oiled cake [C]// In: FACT seminar on *Jatropha curcas* L. agronomy and genetics, Wageningen, The Netherlands, March 26–28. Wageningen: FACT Foundation, 2007, Article no. 8
- [30] Ghosh A, Chikara J, Chaudhary D R, et al. Paclotrazol arrests vegetative growth and unveils unexpressed yield potential of *Jatropha curcas* [J]. Journal of Plant Growth Regulation, <http://springer-lib.tsinghua.edu.cn/content/3255682436424013/fulltext.html> 2010
- [31] Baez-Gonzalez A D, Kiniry J R, Maas S J, et al. Large area maize yield forecasting using leaf area index based yield model [J]. Agronomy Journal, 2005, 97: 418–425
- [32] Gholz H L. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific North-west [J]. Ecology, 1982, 63(2): 469–481

[本文编校: 邱德勇]