

DOI: 10.5846/stxb201708111444

潘嘉雯, 林娜, 何茜, 苏艳, 李吉跃. 我国 3 个桉树人工林种植区生产力影响因素. 生态学报, 2018, 38(19): - .

Pan J W, Lin N, He Q, Su Y, Li J Y. Factors influencing the productivity of three *Eucalyptus* plantation areas in China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): - .

我国 3 个桉树人工林种植区生产力影响因素

潘嘉雯, 林娜, 何茜, 苏艳, 李吉跃*

华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

摘要: 研究影响桉树人工林生产力的主要因素, 对于提高桉树人工林生产力以及经营水平和合理利用树种都具有重要的意义。收集我国 3 个桉树人工林种植区(广东省、广西壮族自治区、云南省)关于生物量与生产力研究中的相关数据, 对海拔、林分密度、林龄、年均温和年降水量与乔木层生物量进行了主成分分析与混合模型分析, 探究各因素对我国桉树人工林生物量与生产力的影响。结果显示: 年均温、年降水量、林龄、海拔和林分密度均是影响广东、广西、云南这 3 个省(区)桉树人工林生物量的主要因素, 其中年降水量对这 3 个地区桉树人工林的生物量影响极其显著($P < 0.01$), 林龄和林分密度对桉树人工林的生物量影响显著($P < 0.05$)。这是因为这 3 个地区都位于亚热带, 温度都属于桉树生长的适宜温度, 而这 3 个地区存在明显的干湿季, 降水量在季节和地域上分布不均匀, 导致这 3 个地区年降水量存在较明显的差异。因此, 年降水量成为影响这 3 个地区桉树人工林生物量的关键因素。

关键词: 桉树人工林; 生产力; 生物量; 影响因素

Factors influencing the productivity of three *Eucalyptus* plantation areas in China

PAN Jiawen, LIN Na, HE Qian, SU Yan, LI Jiyue*

College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: Understanding the main factors that affect the productivity of *Eucalyptus* plantations is important for promoting productivity. To this end, we collected density, age, altitude, mean annual temperature mean annual precipitation, and tree biomass data from *Eucalyptus* plantations in the three *Eucalyptus* plantation areas in China, which are Guangdong Province, Guangxi Province, and Yunnan Province. Principal component analysis and mixed-effects modeling were then used to explore the influences of various factors on the productivity of the *Eucalyptus* plantations. Mean annual temperature, mean annual precipitation, age, altitude and density were the main factors that affected the biomass of *Eucalyptus* plantations in the three provinces which mean annual precipitation ($P < 0.01$), forest age, and density ($P < 0.05$) had significant effects, due to the three provinces were located in a subtropical region. The temperature of all three areas is suitable for *Eucalyptus* growth. However, the areas are also subject to distinct dry and wet seasons, which means that the distribution of precipitation is uneven, both spatially and temporally, which subsequently causes significant differences in the *Eucalyptus* biomass of the three provinces. Therefore, mean annual precipitation is a key factor in *Eucalyptus* biomass in China.

Key Words: *Eucalyptus* plantation; productivity; biomass; influential factors

桉树(*Eucalyptus* spp.)凭借着速生、适应性广、生产力高的优势而被世界各国广泛引种并大面积栽培, 现

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0600201)

收稿日期: 2017-08-11; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljyymy@vip.sina.com

已成为世界人工林最重要的造林树种和木制纸原料之一^[1-2]。2015年,全世界桉树人工林种植面积已经突破了2000万 hm^2 ,占世界人工林种植面积的15%^[3-4]。全世界每年由桉树人工林提供的18000万 m^3 木材(含锯木和纸浆材)^[5],大大缓解了全球木材供应的压力。截止2013年,我国桉树人工林面积约为450万 hm^2 ^[6],现已遍及17个省市地区,600多个县(市),主要集中于广东、广西、福建、云南、海南等地^[7]。桉树人工林的大规模种植,不仅满足了我国木材的需求量,促进木材的经济发展,提高了经济效应,还给我们带来了巨大的生态效益和社会效益^[8]。

近年来,我国大力发展桉树人工林,其种植面积已名列前茅,但与巴西等桉树人工林发展较好的国家相比,我国桉树人工林生产力却十分落后。据研究显示,林分密度在1200—1700株/ hm^2 时,巴西6.2 a生的桉树人工林乔木层生物量可达到142.60 t/hm^2 ^[9],大于广西6 a生尾巨桉人工林乔木层生物量136.05 t/hm^2 ^[10];巴西4.8 a生桉树人工林乔木层生物量为114.1 t/hm^2 ^[11],大于广东5 a生桉树人工林乔木层生物量88.67 t/hm^2 ^[12];坦桑尼亚8 a生桉树人工林乔木层生物量可达到153.04 t/hm^2 ^[13],而广西8 a生桉树人工林乔木层生物量却只有130.86 t/hm^2 ^[14]。因此,关于提高我国桉树人工林生产力的问题一直是林学家们探索的重点。要从理论和实践上真正提高桉树人工林生产力,实现其可持续发展,森林生物量的研究是十分必要的基础性工作。

森林生物量及其动态变化是森林生态系统的主要特征,是衡量和评价森林生产力高低的最好的指标,是森林生态系统结构优劣和功能高低的最直接的表现。森林生物量和生产力的动态变化对人们科学地进行森林培育与利用具有重要的参考价值,对提高营林水平和林产品利用效率都具有重要意义^[15-18]。影响森林生物量的因素有很多。连栽代数、间伐措施、混交种植、造林密度、施肥条件等都会影响森林生物量^[16]。除此之外,森林生物量和生产力也受温度和降水量等气象因子的影响,温度和降水量的大小及其区域的分布都会直接影响森林生物量,水热条件也会直接影响森林生产力的大小^[19-21]。目前,国内在研究桉树人工林生物量和生产力的影响因素时,主要集中在研究立地条件^[22]、土壤含水量^[23]、林分密度^[24-26]、施肥措施^[27-29]、更新方式^[30]、林地清理方式^[31]、混交模式^[32]、连栽代数^[33-35]、物种多样性^[36]对桉树人工林生物量和生产力的影响,但关于气候因子对桉树人工林生物量和生产力影响的研究较少。

因此,本文在充分总结我国3个桉树人工林种植区(广东、广西、云南省(区))研究现状的基础上,对桉树人工林乔木层生物量进行汇总、比较和分析,探究这3个桉树人工林种植区生产力的影响因素,以期揭示桉树人工林在生长过程中生物量和生产力的变化规律与趋势,为桉树人工林更好地应对气候变化提供重要的参考资料。这不仅有利于促进生物积累,维持和提高长期生产力,还为桉树人工林的科学经营与管理提供科学的理论依据,实现桉树人工林的可持续经营。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 研究地区概况

广东省位于109°39′—117°19′E、20°13′—25°31′N之间,光温水风等气候资源丰富,且雨热同季,属亚热带气候区。全省年平均气温21.8℃,年平均降水量1789.3 mm。年平均气温分布呈南高北低,年降水量分布不均,呈多中心分布。广东省全区雨量充沛,热量丰富,种植桉树得天独厚。目前,广东桉树人工林面积已达到136万 hm^2 ^[37],占全省森林面积的13.3%。

广西壮族自治区位于104°26′—112°04′E、20°54′—26°24′N之间,属中、亚热带季风气候。全区年平均气温20.7℃,年平均降水量1542.5 mm。年降水量分布不均,具有东部多,西部少的特点。广西地区日照充足,热量丰富,雨水充沛,适合桉树生长,是我国最适合培育桉树中大径材的区域^[38]。自进入21世纪以来,广西桉树每年以13.33万 hm^2 速度快速发展,已成为我国桉树人工林的重要栽培区。目前,广西桉树人工林种植面积已超过200万 hm^2 ,稳居全国第一位^[14,39]。

云南省位于97°31′—106°11′E、21°08′—29°15′N之间,属于亚热带、热带高原(山地)季风气候。全省年

平均气温 16.5℃,年平均降水量 1098.8 mm。云南地形地貌复杂,除了南北方向上水平气候带的差异外,又有垂直方向上不同垂直气候带的差异,且随着海拔高度的变化,气温和降水等要素变化也很大。云南自 1896 年开始引种蓝桉,是我国引种桉树最早的省份之一。目前,云南桉树面积为 23.6 万 hm^2 ^[40]。

1.2 数据资料收集

人工林的分布和生产力受人为控制影响较大,反映不出自然气候条件对森林作用的实际潜力,但人工林在其适宜的分布区内却可以充分表现受自然力作用的生产力水平^[41]。因此,根据我国桉树人工林种植区多分布在亚热带和热带的特点,本研究选择了有代表性的广东、广西、云南省(区)为主要研究区域,收集了已发表的相关桉树人工林研究文献中的有关数据,包括研究地点、海拔、土壤类型、桉树生长期内的年均温和年降水量、林龄、林分密度和林分乔木层地上部分生物量(所选的地上部分生物量均是由平均标准木法推算),并对其进行整理和分析。这 3 个省(区)桉树人工林种植区的基本情况如表 1 所示。

表 1 3 个省(区)桉树人工林种植区基本情况

Table 1 Basic situation of *Eucalyptus* plantations in three provinces (area)

地区 Area	海拔/m Altitude	土壤类型 Agrotype	年均温/℃ Mean annual temperature	年降水量/mm Mean annual precipitation	文献 Literature	
广东	湛江	80—220.8	黄红壤、砖红壤	23.1	1500—1567	[12,42-46]
	遂溪	—	砖红壤	23.5	1600—1900	[47-48]
	乐民	—	—	23.1	1567	[49-50]
	廉江	—	—	22.9	1600—1900	[51-52]
	肇庆	0—700	赤红壤	21.5	1502.4	[53]
	东莞	100—400	赤红壤	21.8	1790	[54]
	广州	—	—	21	1600	[55]
广西	怀利村	120—150	赤红壤	22.1	1200	[56-57]
	宁明	—	赤红壤	21.9	1500	[58]
	南宁	—	赤红壤	21.8—22.0	1200—1500	[10,59-60]
	广西东南部	30—150	赤红壤	21.5—22.0	1300—1800	[14]
	北海	—	红壤	22.9	1670	[61]
	南宁北郊	200	赤红壤	21.8	1200—1500	[62]
	东门林场	100—400	赤红壤	21.2—22.3	1100—1300	[32,63-66]
	钦州	200	砖红壤	22.0	2076	[67]
	柳州	—	红壤	20.8	1314	[68]
	牟定	1800—2382	黄棕壤、紫色土等	15.7	800—1000	[69]
云南	临沧、楚雄	1502—1773	—	15.7—17.3	836—1178	[70]
	普洱	1422—1700	赤红壤、红壤等	18.0—20.0	1597.80	[71]
	昆明	—	—	14.5	1035	[72]
	红河、文山	—	—	16.3—17.6	1100—2780	[73]

1.3 数据的选择与整理

根据本研究收集到的 3 个省(区)的数据资料,从中选择以人工林经营为主的桉树种植区的相关数据。由于影响生物量的因素有很多,比如树种、林龄、林分密度和气候等,而本文主要研究林龄、海拔、林分密度、年均温和年降水量对桉树人工林乔木层生物量的影响。因此,本文对已获得的数据资料进行初步筛选和提炼。从林龄来看,这 3 个省的桉树人工林种植区的轮伐期一般为 7—10 年,而本研究选择林龄在 1—7 年生范围内。从林分密度来看,本研究选择密度在 1200—2200 株/ hm^2 范围内的数据,对以培育桉树超高密度能源林为目的得到的数据进行舍弃。从土壤类型来看,本研究选择的土壤类型一般为赤红壤或砖红壤,土壤偏酸性,林地较为平整。此外,选择的桉树人工林均为第一代种植,均是定植前施基肥,造林 1—2 年后进行一次追肥,此

后没有特别的施肥措施。筛选出的部分数据如表 2、表 3 所示。

表 2 5 a 生桉树人工林生物量
Table 2 The biomass of *Eucalyptus* plantations at age 5-year

年均温/°C Mean annual temperature	年降水量/mm Mean annual precipitation	林分密度/(株/hm ²) Density	林龄/a Age	生物量/(t/hm ²) Biomass
21.8	1350	1332	5	125.33
23.1	1567	1333	5	66.52
23.1	1567	1333	5	72.55
23.1	1567	1333	5	88.67
23.1	1567	1389	5	121.72
23.1	1567	1444	5	89.51
23.1	1567	1500	5	81.72
23.1	1567	1556	5	95.50
23.1	1567	1611	5	122.50
23.1	1567	1611	5	56.47
21.8	1350	1450	5	120.10
21.8	1350	1455	5	132.75
15.7	900	2000	5	73.48
21.8	1600	1280	5	94.15
22.9	1750	2175	5	77.13
22.9	1750	2175	5	80.03

表 3 6 a 生桉树人工林生物量
Table 3 The biomass of *Eucalyptus* plantations at age 6-year

年均温/°C Mean annual temperature	年降水量/mm Mean annual precipitation	林分密度/(株/hm ²) Density	林龄/a Age	生物量/(t/hm ²) Biomass
23.1	1567	1706	6	149.34
23.1	1567	1743	6	144.30
15.7	900	1800	6	96.00
23.1	1567	1854	6	148.40
23.1	1567	1928	6	161.66
23.1	1567	1928	6	203.10
23.1	1567	1965	6	183.60
20.8	1314	1314	6	74.65
23.1	1567	2114	6	124.14
23.1	1567	2151	6	145.10
20.8	1314	1429	6	79.95
20.8	1314	1666	6	79.39
21.8	1350	1425	6	136.05
23.1	1567	1558	6	118.19
21.8	1790	1454	6	73.17
23.1	1567	2151	6	159.02
23.1	1567	2151	6	147.52

从表 2 和表 3 可以看出,当年均温为 23.1°C,年降水量为 1567 mm 时,林分密度为 1300—1500 株/hm²的 5 a 生桉树人工林生物量为 87.79 t/hm²,小于密度为 1500—1800 株/hm²的林分生物量 89.04 t/hm²;当年均温为 21.8°C,年降水量为 1350 mm 时,林分密度为 1300 株/hm²的 5 a 生桉树人工林生物量为 125.33 t/hm²,小于密度为 1400 株/hm²的林分生物量 126.43 t/hm²。因此可初步得出,当年均温、年降水量和林龄相等时,林分

密度在 1300—2200 株/hm²范围内,生物量随着林分密度的增加而增加。此外,当年均温、年降水量和林分密度相等时,林分生物量随着林龄的增加而增加。例如,当年均温为 23.1℃,年降水量为 1567 mm,林分密度为 1500—1800 株/hm²时,6 年生的桉树人工林生物量为 149.34 t/hm²,远远大于 5 a 生的桉树人工林生物量 122.50 t/hm²。这与杜虎^[74]等的研究得出的结论相同,即林分生物量会随着林龄的增大而增加。

1.4 数据分析方法

将筛选出的数据用 Excel 2010 对其进行整理、汇总,并用 R 3.3.3 软件进行生物量与各影响因素的主成分分析和混合模型分析。

2 结果与分析

2.1 我国 3 个桉树人工林种植区影响因素的主成分分析和混合模型分析

利用筛选出的海拔、林龄、林分密度、年均温和年降水量数据与桉树乔木层生物量数据作主成分分析,结果如表 4 和图 1 所示,林龄、海拔、年降水量、年均温和林分密度均是影响这 3 个省(区)桉树人工林生物量的主要因素,其中,海拔、年降水量、年均温和林分密度的主成分分析值分别为 0.98、0.99、-0.36 和 0.46。从表 5 可看出,通过对这 5 个因素的综合模型分析,结果显示年降水量、对桉树人工林的生物量影响极显著($P < 0.01$),林龄和林分密度对桉树人工林的生物量影响显著($P < 0.05$)。

表 4 我国 3 个桉树人工林种植区影响因素的主成分分析结果

Table 4 The principal component analysis of the influencing factors of three Eucalyptus Plantation areas in China

因子 Factors	主成分 1 Factor 1	主成分 2 Factor 2	因子 Factors	主成分 1 Factor 1	主成分 2 Factor 2
海拔 Altitude	0.98	—	林分密度 Density	0.46	—
年降水量 Mean annual precipitation	—	0.99	林龄 Age	—	—
年均温 Mean annual temperature	-0.36	—			

表 5 我国 3 个桉树人工林种植区影响因素混合模型分析

Table 5 The mix-effects models of the influence factors of the three Eucalyptus plantation China

因子 Factors	标准误 Standard error	自由度 Degree of freedom	<i>t</i>	<i>P</i>
年降水量 Mean annual precipitation	0.2186	98	-2.9323	0.0042 **
年均温 Mean annual temperature	17.598	98	-0.1028	0.9183
林龄 Age	15.2679	98	2.1420	0.0347 *
林分密度 Density	0.2588	98	2.5470	0.0124 *
海拔 Altitude	0.1437	98	0.2535	0.8004

* 表示显著性相关($P < 0.05$), ** 表示极显著性相关($P < 0.01$)

2.2 年均温和年降水量对桉树人工林生物量的影响

从中国气象局气象数据中心获取广东、广西和云南省(区)的气候数据,包括平均气温和平均降水量月值资料,资料时间跨度为 1981—2010 年。3 个地区月平均气温和月降水量年内分布图如图 2 所示。

从图 2 可看出,广东省的气候特征属典型的雨热同季,降水量主要集中在 3—9 月,10 月至 2 月降水量明显较少,冷、热月降水量分配差异较大。广西降水主要集中在 4—9 月,冬季降水量最少,季节分配不均。除此之外,广西降水具有较强的局地性^[75],东部降水比西部多。云南降水充沛,干湿分明,降水主要集中在 5—9 月。有研究表明,云南省夏、秋、冬 3 季降水均呈减少趋势,降水量年内分配不均,存在明显的干湿季^[76]。由于冬夏两季受不同大气环流的控制和影响,云南降水量在季节上和地域上的分配是极不均匀的,而且,由于海拔高度的变化,降水的分布也很不均匀。

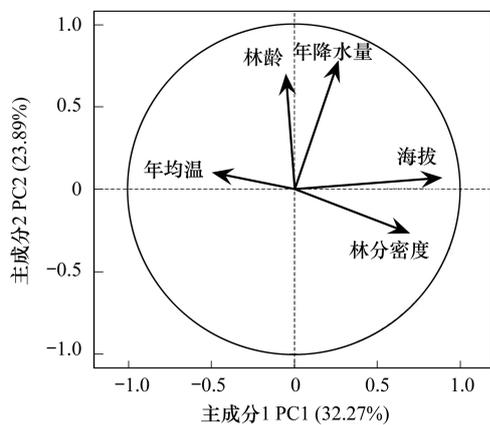


图1 各影响因素的主成分分析结果图

Fig.1 The result diagram of the principal component analysis of the influencing factors

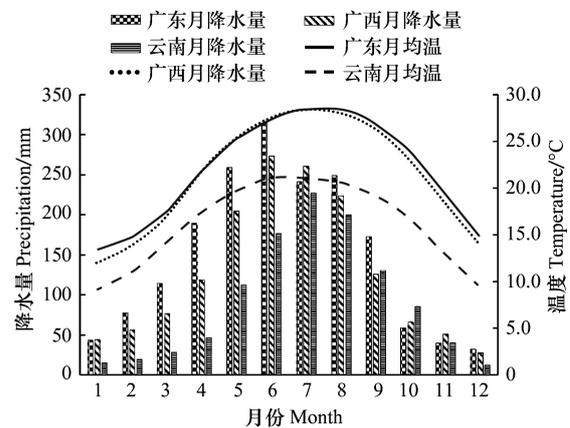


图2 1981—2010年广东、广西、云南省(区)月平均气温和月降水量年内分布

Fig.2 Monthly mean temperature and precipitation in Guangdong, Guangxi, Yunnan during 1981—2010 years

虽然广东、广西、云南省(区)都属于亚热带湿润地区,但这3个地区的年降水量却存在差异,一是因为广东、广西、云南降水量年内分布不均,有明显的干湿季;二是因为广西、云南降水量在地域上分布不均,特别是云南地区地形复杂,降水量分配极不均匀。这些都导致了广东、广西、云南省(区)的年降水量存在较大的差异。因此,年降水量对这3个地区桉树的生物量影响极显著。从年均温来看,广东和广西的年均温相差不大,云南的年均温较低,但这3个地区都是桉树适宜生长的地区,例如在云南低温环境下,史密斯桉就能够生长的很好,所以年均温对这3个地区的生物量虽有影响,但是影响并不显著。

3 结论与讨论

3.1 讨论

(1) 年均温和年降水量是影响广东、广西、云南这3个省(区)桉树人工林生物量的主要气候因素。有研究表明,中国森林生产力的分布格局主要取决于气候环境中的水热条件,而年均温和年降水量是影响森林生物量的主要因素,且不同海拔梯度对森林生物量也有着明显的影响^[19,21]。在本研究中,由于广东、广西、云南省(区)都位于亚热带,温度都属于桉树生长的适宜温度,但不同桉树品种对温度的要求不一样,例如,史密斯桉在云南这种低温环境中能生长的很好,因此温度对桉树人工林生物量的虽有影响,但影响并不显著。而这3个地区存在明显的干湿季,降水量在季节和地域上分布不均匀,导致这三个地区年降水量存在较明显的差异。因此,年降水量对这3个地区桉树的生物量影响极其显著($P < 0.01$),成为影响这3个地区桉树人工林生物量的关键因素。

(2) 海拔和林分密度也会影响广东、广西、云南这3个省(区)桉树人工林的生物量,其中林分密度对桉树的生物量影响显著($P < 0.05$)。Asner等^[77]认为随着海拔的升高,林分生物量积累受到影响。Alves^[78]等对不同海拔梯度的森林生物量进行了研究,结果发现海拔对于生物量的影响最为显著。不同海拔对桉树人工林生物量的影响主要是随着海拔高度的上升,水热条件也开始变化,影响了桉树人工林的生长发育,因此生物量随之改变。林分密度也会对林分生物量造成影响。叶绍明等^[69]对6年生尾叶桉人工林的生物量密度效应进行研究,结果表明随着密度增大,林分生物量呈先增加后降低的抛物线型变化,林分单株及其各组分的生物量均随林分密度的增加而降低。因此,在营造桉树人工林时,应选择合适的地形,根据营造目的选择合理的种植密度,以期发挥桉树人工林最大的生产潜力。

(3) 充足的水分条件能有效的提高桉树人工林的生产力^[79]。Stape^[9]等发现在施肥的桉树人工林中,水分是林分生产力的最主要限制因子,提高水分供给的同时也能提高光和氮的利用率。Hubbard^[3]等研究发现

在桉树人工林灌溉处理试验中,提高水分供给与叶面积的增加之间有密切的关系。赵从举^[80]等研究发现海南西部桉树人工林的土壤含水量随降水量的增加而增加,二者成极显著正相关,而土壤含水量是生产力主要的制约因素^[81]。因此,在种植桉树人工林时,应了解当地温度、降水等气候因子的动态变化,在旱季适当补水,有利于提高桉树人工林的生产力。

(4)本研究中,桉树人工林生物量对温度和降水量的变化响应的预测主要依据年平均气候因子的变化,但没有考虑气候因子的季节变异,以及月降水量、月均温、湿度、光照等其他气候因子的影响。例如,程瑞梅^[82]等研究了气候变化对北亚热带马尾松净生产力的影响,结果表明帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)可以更好地说明在生长季节水分的可用性是影响马尾松生产力的主要因子,这种关系比降水和温度的影响稳定。因此,这些气候因子对桉树人工林生物量和生产力的影响还有待进行更深入的研究。

(5)本文选择了适宜桉树人工林生长的广东、广西和云南 3 个省(区)的桉树人工林种植区,取样范围略小。因此,下一步研究的取样范围可扩大到适宜桉树人工林生长的福建、海南、湖南、贵州等地区,这样不同地区的温度与降水量差异大,与生物量与生产力作分析可能会得到不同的结果。

3.2 结论

年均温、年降水量、林龄、海拔和林分密度均是影响广东、广西、云南这 3 个省(区)桉树人工林生物量的主要因素,其中年降水量对这 3 个地区桉树的生物量影响极其显著,林龄和林分密度对桉树的生物量影响显著。因此,在营造桉树人工林时,应选择合适的地形,根据营造目的选择合理的种植密度,并了解当地温度、降水等气候因子的动态变化,在旱季适当补水,以期发挥桉树人工林最大的生产潜力。

参考文献(References):

- [1] 殷亚方,姜笑梅,吕建雄,赵杰. 国外桉树人工林资源和木材加工利用现状. 世界林业研究, 2001, 14(2): 35-41.
- [2] 周建辉,郑磊,张婧,杜阿朋. 不同林龄尾巨桉林木碳贮量研究. 桉树科技, 2013, 30(4): 11-14.
- [3] Hubbard R M, Stape J, Ryan M G, Almeida A C, Rojas J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(9): 1714-1721.
- [4] 王礼明. 桉树的生长特性与种植管理技术研究. 绿色科技, 2017, 55(1): 23-24.
- [5] 谢直兴,严代碧. 桉树人工林现状及其可持续发展. 四川林业科技, 2006, 27(1): 75-81.
- [6] 黎洁,温亚,何蓉,姚碧英,刘小梅,吕春燕. 桉树种植的现状、生态问题与可持续发展对策研究. 绿色科技, 2017, 55(2): 94-97.
- [7] 李志辉,杨民胜,陈少雄,王国祥,莫晓勇,姚东和. 桉树引种栽培区划研究. 中南林学院学报, 2000, 20(3): 1-9.
- [8] 徐大平,张宁南. 桉树人工林生态效应研究进展. 广西林业科学, 2006, 35(4): 179-187, 201-201.
- [9] Stape J L, Binkley D, Ryan M G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2004, 193(1/2): 17-31.
- [10] 何斌,廖倩苑,杨卫星,刘俊,滕秋梅,李远航,舒凡. 连续年龄序列尾巨桉人工林微量元素积累及其生物循环特征. 水土保持学报, 2016, 30(2): 200-207.
- [11] Stape J L, Binkley D, Ryan M G, Fonseca S, Loos R A, Takahashi E N, Silva C R, Silva S R, Hakamada R E, Ferreira J M D A, Lima A M N, Gava J L, Leite F P, Andrade H B, Alves J M, Silva G G C, Azevedo M R. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(9): 1684-1694.
- [12] 韩斐扬,周群英,陈少雄,任世奇,张华林. 5 年生 11 种桉树无性系生长量与生物量比较. 桉树科技, 2011, 28(2): 27-33.
- [13] Pima NE, Chamshama SAO, Iddi S, Maguzu J. Growth performance of eucalypt clones in Tanzania. *Environment and Ecology Research*, 2016, 4(3): 146-154.
- [14] 付威波,彭晚霞,宋同清,曾馥平,杜虎,温远光,徐慧芳. 不同林龄尾巨桉人工林的生物量及其分配特征. 生态学报, 2014, 34(18): 5234-5241.
- [15] Somogyi Z, Cienciala E, Mäkipää R, Muukkonen P, Lehtonen A, Weiss P. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research*, 2007, 126(2): 197-207.
- [16] 薛立,杨鹏. 森林生物量研究综述. 福建林学院学报, 2004, 24(3): 283-288.
- [17] 吴鹏,丁访军,陈骏. 中国西南地区森林生物量及生产力研究综述. 湖北农业科学, 2012, 51(8): 1513-1518, 1527-1527.

- [18] 周本智, 王小明, 曹永慧, 李正才, 邵文豪, 葛晓改. 北亚热带典型森林生态系统研究——以浙江庙山坞自然保护区为例. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [19] 刘世荣, 郭泉水, 王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. 生态学报, 1998, 18(5): 478-483.
- [20] 项文化, 田大伦, 闫文德. 森林生物量与生产力研究综述. 中南林业调查规划, 2003, 22(3): 57-60, 64-64.
- [21] 杨远盛, 张晓霞, 于海艳, 吕志远. 中国森林生物量的空间分布及其影响因素. 西南林业大学学报, 2015, 35(6): 45-52.
- [22] 凌子燕, 岑巨延, 韦金丽, 王国波. 森林生产力与立地条件的相关性分析——以宁明县的马尾松和桉树森林生产力为例. 广西林业科学, 2012, 41(2): 124-127.
- [23] 李林锋. 土壤含水量对桉树幼苗生长及生物量分配的影响. 湛江海洋大学学报, 2004, 24(1): 68-71, 84-84.
- [24] 温远光, 和太平, 李信贤, 梁宏温, 周君元, 苏允进. 广西合浦隆缘桉海防林生物量和生产力的研究. 广西农业生物科学, 2000, 19(1): 1-5.
- [25] 温远光, 梁宏温, 招礼军, 周敏毅, 何斌, 王凌晖, 韦善华, 郑白, 刘德杰, 唐再生. 尾叶桉人工林生物量和生产力的研究. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(2): 123-127.
- [26] 李志辉, 陈少雄, 谢耀坚, 张斌, 朱宾良. 林分密度对尾叶桉生物量及生产力的影响. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(4): 49-54.
- [27] 邓绍林, 张日华, 梁文汇, 王会利, 农必昌, 曹继钊. 稀土对尾叶桉幼林生长及土壤化学性质的影响. 林业科技开发, 2008, 22(4): 29-33.
- [28] 杜阿朋, 陈少雄, 张婧, 张洽军. 不同施肥水平下桉树林木碳贮量的研究. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(5): 97-101.
- [29] 谭长强, 覃世杰, 覃梅, 王凌晖, 方力, 方雪. 不同桉树专用肥对尾叶桉 DH32-29 苗木生长的影响. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 125-128.
- [30] 叶绍明, 谢伟东, 蓝金宣. 不同更新模式尾叶桉人工林碳贮量及其分配格局研究. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(6): 10-17.
- [31] 潘辉. 不同林地清理方式对尾叶桉林地生产力的影响. 福建林学院学报, 2003, 23(4): 312-316.
- [32] 叶绍明, 郑小贤, 杨梅, 谢伟东, 招礼军, 梁宏温. 尾叶桉与马占相思人工复层林生物量及生产力研究. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 37-43.
- [33] 余雪标, 徐大平, 龙腾, 莫晓勇. 连栽桉树人工林生物量及生产力结构的研究. 华南热带农业大学学报, 1999, 5(2): 10-17.
- [34] 陈婷, 温远光, 孙永萍, 梁宏温. 连栽桉树人工林生物量和生产力的初步研究. 广西林业科学, 2005, 34(1): 8-12.
- [35] 韩艺师, 魏彦昌, 欧阳志云, 曹云. 连栽措施对桉树人工林结构及持水性能的影响. 生态学报, 2008, 28(9): 4609-4617.
- [36] 温远光, 陈放, 刘世荣, 梁宏温, 元昌安, 朱宏光. 广西桉树人工林物种多样性与生物量关系. 林业科学, 2008, 44(4): 14-19.
- [37] 陈少雄, 陈小菲. 我国桉树经营的技术问题与思考. 桉树科技, 2013, 30(3): 52-59.
- [38] 叶绍明, 郑小贤, 金大刚. 广西桉树人工林经营现状分析及对策探讨. 林业资源管理, 2006, 55(6): 23-26.
- [39] 黄国勤, 赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略. 生态学报, 2014, 34(18): 5142-5152.
- [40] 张荣贵, 李思广, 蒋云东. 云南桉树引种历史、发展现状及展望. 桉树科技, 2007, 24(2): 18-23.
- [41] 刘世荣, 徐德应, 王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 II. 中国森林第一性生产力的模拟. 林业科学研究, 1994, 7(4): 425-430.
- [42] 韩斐扬, 陈少雄, 周群英, 梁金喜, 肖敏. 桉树幼龄能源林培育技术研究. 桉树科技, 2009, 26(2): 26-31.
- [43] 韩斐扬, 周群英, 陈少雄. 雷州半岛桉树生物质能源林生长的密度效应研究. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(4): 350-356.
- [44] 韩斐扬, 周群英, 陈少雄. 6年生 11 种桉树无性系生物量与炭化研究. 桉树科技, 2012, 29(3): 1-8.
- [45] 王志超, 杜阿朋, 吴志华, 陈少雄. 不同整地措施对 1 年生尾叶桉林分生物量分配和林下生物多样性的影响. 热带作物学报, 2014, 35(3): 493-497.
- [46] 许宇星, 陈少雄. 林分密度对桉树幼龄能源林的影响. 桉树科技, 2012, 29(1): 31-36.
- [47] 周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 陈文平, 吴志华. 不同林龄尾叶桉人工林的生物量和能量分配. 应用生态学报, 2010, 21(1): 16-22.
- [48] 周群英, 陈少雄, 韩斐扬, Arnold R. 短周期尾叶桉能源林生物量与能量特征研究. 热带亚热带植物学报, 2013, 21(1): 45-51.
- [49] 许宇星, 陈少雄. 一年生高密度初植桉树能源林生物量及热值研究. 热带作物学报, 2012, 33(11): 2079-2084.
- [50] 许宇星, 陈少雄. 不同密度桉树能源林数量成熟龄与经济效益的关系. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(2): 61-65.
- [51] 周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 陈文平, 李天会, 吴志华, 简明. 尾叶桉等 5 种桉树无性系生物量和能量的比较研究. 林业科学研究, 2010, 23(1): 18-24.
- [52] 韩斐扬, 周群英, 陈少雄, 陈文平, 李天会, 吴志华, 简明. 2 种桉树不同林龄生物量与能量的研究. 林业科学研究, 2010, 23(5): 690-696.
- [53] 郭乐东, 周毅, 钟锡均, 黎艳明, 甘先华, 张坤洪, 李召青, 梁远楠, 辛凤坪, 张卫强. 西江流域桉树生态系统碳贮量与碳汇功能经济价值评价. 广东林业科技, 2009, 25(6): 8-13.
- [54] 李忠伟, 陈少雄, 吴志华, 黄树才. 桉树人工林的固碳放氧功能和价值分析——以樟木头林场为例. 桉树科技, 2008, 25(1): 11-14.
- [55] Zhang H, Guan D S, Song M W. Biomass and carbon storage of *Eucalyptus* and *Acacia* plantations in the Pearl River Delta, South China. Forest

- Ecology and Management, 2012, 277(4): 90-97.
- [56] 杨卫星, 何斌, 卢开成, 李春宁, 廖倩苑, 刘俊, 滕秋梅. 桂西南连续年龄序列尾巨桉人工林的生物生产力. 农业研究与应用, 2016, 29(3): 6-11.
- [57] 卢开成, 张明慧, 李春宁, 何斌. 桂西南尾巨桉中龄林生态系统碳储量及其分布格局. 安徽农业科学, 2016, 44(12): 171-173.
- [58] 周弘愿, 何斌, 韦建宏, 李春宁, 廖倩苑, 舒凡, 李远航. 桂西南两种桉树人工幼林生物量、营养元素积累量及其分布特征. 桉树科技, 2015, 32(2): 29-33.
- [59] 廖源军, 黄平升, 廖克波, 卢乃敬, 秦武明. 尾巨桉(DH32-28)二代高产林分生物量研究. 林业科技通讯, 2015, 58(12): 11-14.
- [60] 吴华静, 田丰, 桂凌健, 田华丽, 梁士楚. 南宁七坡林场尾巨桉人工林生物量的初步研究. 广西科学院学报, 2014, 30(4): 233-237.
- [61] 韦宇静, 梁士楚, 黄雅丽, 李冰, 石贵玉. 巨尾桉与几种阔叶树和针叶树碳储量的比较研究. 广西科学院学报, 2014, 30(4): 229-232.
- [62] 朱宇林, 何斌, 杨钙仁, 罗柳娟, 刘红英, 刘莉, 覃祚玉. 尾巨桉人工林营养元素积累及其生物循环特征. 东北林业大学学报, 2012, 40(6): 8-11, 66-66.
- [63] 叶绍明, 郑小贤, 谢伟东, 招礼军. 萌芽更新与植苗更新对尾巨桉人工林收获的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, 31(3): 43-46.
- [64] 叶绍明, 温远光, 杨梅, 梁宏温, 蓝金宣. 连栽桉树人工林生产力和植物多样性及其相关性分析. 西北植物学报, 2010, 30(7): 1458-1467.
- [65] 梁宏温, 温远光, 吴国喜, 黄锡泽, 周国福, 陈东林. 连栽对尾巨桉短轮伐期人工林生长量和生产力动态的影响. 福建林业科技, 2008, 35(3): 14-18.
- [66] 梁宏温, 温远光, 温琳华, 殷庆仓, 黄锡泽, 周国福. 连栽对尾巨桉短周期人工林碳贮量的影响. 生态学报, 2009, 29(8): 4242-4250.
- [67] 梁宏温, 罗宏, 温远光, 杨瑶青, 杨健基. 桉树林取代马尾松林对森林生态系统碳贮量的影响. 江西农业大学学报, 2010, 32(6): 1168-1174.
- [68] 叶绍明, 覃连欢, 龙滔, 蓝金宣. 尾巨桉人工林生物量密度效应研究. 安徽农业科学, 2010, 38(21): 11594-11596, 11607-11607.
- [69] 韩斐扬, 周群英, 陈少雄, 肖敏, 梁金喜. 不同林龄史密斯桉树能源林现存量与能量研究. 热带作物学报, 2010, 31(2): 298-303.
- [70] 赵冠华. 云南中西部地区针叶林和人工林碳汇现状及潜力. 昆明: 云南大学, 2016:1-65.
- [71] 张胜伟. 巨尾桉工业原料林生物量研究. 昆明: 昆明理工大学, 2008:1-73.
- [72] 李宁. 滇中地区桉树群落结构特征研究. 昆明: 西南林学院, 2008.
- [73] 陈庆. 滇南地区桉树林和思茅松林生物量及碳储量研究. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [74] 杜虎, 曾馥平, 王克林, 宋同清, 温远光, 李春干, 彭晚霞, 梁宏温, 朱宏光, 曾昭霞. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化. 生态学报, 2014, 34(10): 2712-2724.
- [75] 黄嘉宏, 李江南, 李自安, 王安宇. 近 45 年广西降水和气温的气候特征//中国气象学会 2005 年年会论文集. 苏州: 中国气象学会, 2005:1-9.
- [76] 王理萍, 王树仿, 张刘东, 王福来, 龙晓敏. 1960~2013 年云南省降水时空变化特征分析. 水电能源科学, 2016, 34(12): 20-24.
- [77] Asner G P, Flint Hughes R, Varga T A, Knapp D E, Kennedy-Bowdoin T. Environmental and biotic controls over aboveground biomass throughout a tropical rain forest. Ecosystems, 2009, 12(2): 261-278.
- [78] Alves L F, Vieira S A, Scaranello M A, Camargo P B, Santos F A M, Joly C A, Martinelli L A. Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). Forest Ecology and Management, 2010, 260(5): 679-691.
- [79] Whitehead D, Beadle C L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. Forest Ecology and Management, 2004, 193(1/2): 113-140.
- [80] 赵从举. 海南西部桉树人工林土壤水分变化特征及其对林龄的响应//自然地理学与生态安全学术研讨会. 兰州: 中国地理学会自然地理专业委员会, 2012:1-109.
- [81] 蔡学彩, 李镇清, 陈佐忠, 王义凤, 汪诗平, 王艳芬. 内蒙古草原大针茅群落地上生物量与降水量的关系. 生态学报, 2005, 25(7): 1657-1662.
- [82] 程瑞梅, 封晓辉, 肖文发, 王瑞丽, 王晓荣, 杜化堂. 北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应. 生态学报, 2011, 31(8): 2086-2095.