

桉树人工林施肥技术研究现状与发展方向

唐康尧^{1*}, 肖 啸², 崔俊峰³, 骆文玺^{4#}, 阳晶晶^{5#}, 庞正轰^{6#}

¹广西壮族自治区国有大桂山林场, 广西 贺州

²广西壮族自治区国有黄冕林场, 广西 柳州

³广西壮族自治区国有钦廉林场, 广西 钦州

⁴广西壮族自治区国有维都林场, 广西 来宾

⁵广西壮族自治区国有高峰林场, 广西 南宁

⁶广西人工林种植行业协会, 广西 南宁

收稿日期: 2026年5月21日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

为推动桉树施肥技术高质量发展, 本文对我国20世纪70年代以来桉树施肥技术研究进行系统总结, 包括桉树主要种植区林地土壤营养状况、桉树营养特性与营养诊断、不同肥料对桉树的生长效应、不同施肥量对桉树的生长效应、不同桉树品种施肥效应、不同施肥方式对桉树的生长效应、不同种类专用肥对桉树的生长效应、桉树配方施肥。针对存在的主要问题, 提出了今后一个时期的重点研究方向。

关键词

桉树人工林, 土壤养分, 营养需求与诊断, 施肥效应

Current Research Status and Development Trends of Fertilization Techniques in *Eucalyptus* Plantations

Kangyao Tang^{1*}, Xiao Xiao², Junfeng Cui³, Wenxi Luo^{4#}, Jingjing Yang^{5#}, Zhenghong Pang^{6#}

¹Guangxi Zhuang Autonomous Region State-Owned Daguishan Forest Farm, Hezhou Guangxi

²Guangxi Zhuang Autonomous Region State-Owned Huangmian Forest Farm, Liuzhou Guangxi

³Guangxi Zhuang Autonomous Region State-Owned Qinlian Forest Farm, Qinzhou Guangxi

⁴Guangxi Zhuang Autonomous Region State-Owned Weidu Forest Farm, Laibin Guangxi

⁵Guangxi Zhuang Autonomous Region State-Owned Gaofeng Forest Farm, Nanning Guangxi

⁶Guangxi Forest Grower Association, Nanning Guangxi

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 唐康尧, 肖啸, 崔俊峰, 骆文玺, 阳晶晶, 庞正轰. 桉树人工林施肥技术研究现状与发展方向[J]. 林业世界, 2026, 15(3): 606-632. DOI: 10.12677/wjf.2026.153072

Received: May 21, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

In order to promote the high-quality development of *Eucalyptus* fertilization technology, this paper systematically summarizes the research on *Eucalyptus* fertilization techniques in China since 1970s. These studies included the nutritional status of forest soil in the main *Eucalyptus* planting areas, *Eucalyptus* nutritional characteristics and nutritional diagnosis, the growth effects of different types of fertilizers on *Eucalyptus*, the growth effects of different fertilization application quantity on *Eucalyptus*, the fertilization effects on different *Eucalyptus* varieties, the growth effects of different fertilization methods on *Eucalyptus*, the growth effects of different types of specialized fertilizers on *Eucalyptus*, *Eucalyptus* soil testing and formulated fertilization. Regarding the main existing issues, future key research directions were proposed.

Keywords

Eucalyptus Plantations, Soil Nutrients, Nutritional Needs and Diagnosis, Fertilization Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桉树具有速生丰产、抗逆性强、经济效益显著等特点，而被世界各地广泛引种栽培。我国引种桉树始于 1890 年，20 世纪 50 年代开始规模种植桉树人工林，70~90 年代发展比较缓慢，进入 21 世纪发展迅速，至 2023 年我国桉树人工林面积已超过 600 万 hm^2 ，仅次于印度和巴西，居世界第 3 位。桉树丰产林一般都要施肥。施肥是促进桉树速生丰产的重要技术。20 世纪 50 年代，桉树种植面积不断扩大，我国开展桉树施肥试验，当时有机肥是主要肥料，林地土壤中磷、钾含量比较丰富，氮素缺乏；60 年代有机肥仍然是主要肥料，在应用氮肥的基础上，化学磷肥的应用范围不断扩大；70 年代，桉树施肥开展有机和无机肥施肥试验，由于经济和技术条件限制，进展十分缓慢；80 年代，桉树施肥技术进展较快，除了开展 NPK 等大量元素研究外，还开展微量元素应用研究，进行桉树营养诊断方法和标准的探讨；90 年代，桉树人工林多代连栽出现地力衰退现象，着手开展配方施肥技术研究以及平衡施肥技术试验。1998 年，任中秀等[1]-[6]重点对我国桉树人工林施肥效应进行概述。进入 21 世纪以来，桉树施肥技术研究进一步加快。为促进桉树施肥技术不断向前发展，本文对我国桉树施肥技术研究现状进行系统论述并提出未来主要发展方向，旨在为桉树施肥技术研究和经营管理提供参考。

2. 现状

2.1. 桉树种植区土壤肥力概况

2.1.1. 我国桉树种植区林地土壤养分状况及分级标准

林地土壤是桉树赖以生长的物质基础，林地养分是桉树丰产的重要保障。根据全国第二次土壤普查成果[7]，我国林地土壤养分分为五级，见表 1 和表 2。

Table 1. Classification standards for main nutrients in forest soil in China (unit: g/kg, mg/kg)
表 1. 我国林地土壤主要养分分级标准(单位: g/kg, mg/kg)

等级 grade	类别 category	有机质 organic matter	全氮 all-nitrogen	全磷 total P	全钾 total K	速效氮 available N	速效磷 available P	速效钾 available K
1	极富	>40	>2.0	>2.0	>30.0	>150	>40	>200
2	富	30~40	1.50~2.0	1.50~2.0	20~30	120~150	20~40	150~200
3	中	20~30	1.0~1.5	1.0~1.5	15~20	90~120	10~20	100~150
4	低	10~20	0.75~1.0	0.70~1.0	10~15	60~90	5~10	50~100
5	缺乏	6~10	0.5~0.75	0.4~0.70	5~10	30~60	3~5	30~50
6	极缺乏	<6	<0.5	<0.4	<5	<30	<3	<30

Table 2. Forestland soil trace element nutrient classification standard in China (unit: mg/kg)
表 2. 我国林地土壤微量元素养分分级标准(单位: mg/kg)

等级 grade	类别 category	铜 Cu	锌 Zn	铁 Fe	锰 Mn	硼 B	钼 Mo
1	极富	>1.8	>3.0	>20	>30	>2.0	>0.3
2	富	1.0~1.8	1.0~3.0	10~20	15~30	1.0~2.0	0.2~0.3
3	中	0.2~1.8	0.5~1.0	4.5~10	5.0~15	0.5~1.0	0.15~0.2
4	低	0.1~0.2	0.3~0.5	2.5~4.5	1.0~5.0	0.2~0.5	0.1~0.15
5	缺乏	<0.1	<0.3	<2.5	<1.0	<0.2	<0.1

我国桉树种植区主要集中在广西、广东、海南、云南、四川、重庆、福建、江西等省(市、自治区)。苏英吾[8] (1997)的研究表明, 华南地区土壤主要为砖红壤、赤红壤、红壤、燥红土等, 分属铁铝土纲和半淋溶土纲, 成土母质主要有玄武岩、变质岩、砂页岩、浅海沉积物等, 林地土壤养分比较贫瘠, 氮、磷、钾缺乏, 有效性较差, 具体表现为: pH 4~5, 土壤有机质含量普遍偏低, 有机质含量大多在 20 g/kg 以下; 土壤氮素水平低, 一般在 1.0 g/kg 以下, 有的甚至低于 0.5 g/kg; 土壤全磷含量 0.13~0.26 g/kg; 最低在 0.05 g/kg, 是我国含磷量最低的地区; 钾含量极低, 全钾含量 24.5~37.0 g/kg, 速效钾 53.0~69.0 mg/kg。铜、锌、硼等微量元素含量一般低于 0.2 mg/kg。

2.1.2. 广西桉树林地土壤养分状况

马涪[9]等 1998~2003 年对广西 30 多个县(市、区)桉树林地土壤养分状况的研究表明, 全氮、全钾、速效氮和有机质大部分处于中等; 全磷、速效磷和速效钾含量处于缺乏或极缺乏状况, 速效磷和速效钾含量极低。微量元素铜、锌、硼等普遍都处在低或缺乏水平, pH 4.69。从县域水平上看, 广西桉树林地土壤养分比较贫瘠, 严重缺乏磷、钾、硼等养分(见表 3)。

Table 3. *Eucalyptus* forest soil nutrient status in Guangxi
表 3. 广西桉树林地土壤养分状况

养分 nutrient	单位 unite	上层 topsoil	下层 subsoil	均值 mean	等级 grade	类别 category
pH		4.62	4.73	4.69		酸性
有机质	g/kg	29.13	13.24	21.19	3	中
全 N	g/kg	1.34	0.71	1.03	3	中

续表

全 P	g/kg	0.86	0.53	0.70	4	缺乏
全 K	g/kg	15.23	15.47	15.35	3	中
速效 N	mg/kg	120.91	50.20	85.56	2	富
速效 P	mg/kg	1.02	0.52	0.77	6	缺乏
速效 K	mg/kg	26.25	20.63	23.44	6	缺乏
有效 Cu	mg/kg	1.12	0.98	1.05	2	富
有效 Zn	mg/kg	1.05	1.00	1.03	2	富
有效 B	mg/kg	0.16	0.10	0.13	5	缺乏

根据王卡石[10]的报道,广西林业局直属 13 家国有林场桉树林地土壤有机质含量属于 3 级,处于中等水平状态;速效 N、速效钙、速效铁含量属于 1~2 级,处于丰富状态;速效 P、速效 K、速效 Mg、有效 B、有效 Cu 含量属于 5~6 级,处于缺乏状态。pH 4.4。从林场层面上看,广西国有林场林地土壤养分有机质含量中等,严重缺乏 P、K、Mg、Cu、B 等,不能完全满足桉树丰产林生长发育需求(见表 4)。

Table 4. *Eucalyptus* forest soil nutrient status in Guangxi Forestry Bureau Directly Affiliated State-Owned Forest Farms
表 4. 广西林业局直属国有林场林地土壤养分状况

序号 No.	养分 nutrient	单位 unite	平均值 mean	等级 grade	类别 category
1	pH		4.41		酸性
2	有机质	g/kg	31.24	3	中
3	速效 N	mg/kg	137.73	2	富
4	速效 P	mg/kg	1.89	6	极缺乏
5	速效 K	mg/kg	60.65	5	缺乏
6	速效钙	mg/kg	224.45	1	极富
7	速效镁	mg/kg	14.02	5	极缺乏
8	有效铜	mg/kg	0.63	4	低
9	有效锌	mg/kg	1.13	3	中
10	有效锰	mg/kg	7.29	3	中
11	有效铁	mg/kg	89.08	2	富
12	有效硼	mg/kg	0.31	4	低

2.1.3. 广东中部桉树林地土壤养分状况

陈少雄[11]的研究表明,广东省中部(东莞)桉树林地土壤养分比较贫瘠,全 N 含量为 0.83 g/kg,为中等;全 P 含量 0.31 g/kg,处于极缺乏状态;全 K 含量 15.70 g/kg,处于低等状态;速效 N 含量 60.31 mg/kg,处于低等状态;速效 P、速效 K、有效 B 均为极缺乏状态。pH 4.33。表明广东中部林地土壤严重缺乏 P、K、B 等营养元素(表 5)。

Table 5. *Eucalyptus* forest soil nutrient status in Guangdong
表 5. 广东桉树林地土壤养分状况

养分 nutrient	单位 unite	上层 topsoil	下层 subsoil	均值 mean	等级 grade	类别 category
pH		4.27	4.38	4.33		酸性
有机质	g/kg	24.52	11.97	18.25	3	中

续表

全 N	g/kg	1.04	0.61	0.83	3	中
全 P	g/kg	0.32	0.29	0.31	6	极缺乏
全 K	g/kg	13.72	17.67	15.70	4	低
速效 N	mg/kg	80.83	39.79	60.31	4	低
速效 P	mg/kg	0.57	0.31	0.44	6	极缺乏
速效 K	mg/kg	28.33	23.09	25.71	6	极缺乏
有效 Cu	mg/kg	--				--
有效 Zn	mg/kg	--				--
有效 B	mg/kg	0.22	0.13	0.18	4	缺乏

2.1.4. 广东雷州半岛桉树林地土壤养分状况

钟继洪[12]的研究表明, 雷州半岛桉树林地土壤有机质含量 12.44 g/kg, 为低等水平; 全 N、全 P、全 K 的含量分别为 0.51、0.17、2.06 g/kg, 处于缺乏至极缺乏状态。速效 N、速效 P、速效 K 的含量分别为 43.96、1.89、15.46 mg/kg, 处于缺乏至极缺乏状态。硼、铜、锌等微量元素含量处于中等到缺乏状态。pH 4.5。从总体上看, 雷州半岛桉树林地土壤有机质含量低, N、P、K 养分含量极低, 土壤十分贫瘠(表 6)。

Table 6. *Eucalyptus* forest soil nutrient status in Leizhou Peninsula of Guangdong
表 6. 广东省雷州半岛桉树林地土壤养分状况

养分 nutrient	单位 unite	平均值 mean	最大值 Max	最小值 Min	等级 grade	类别 category
pH		4.5				酸性
有机质	g/kg	12.44	46.12	1.44	4	低
全 N	g/kg	0.51	2.54	0.12	5	缺乏
全 P	g/kg	0.17	0.91	0.02	6	极缺乏
全 K	g/kg	2.06	21.35	0.13	6	极缺乏
速效 N	mg/kg	43.96	231.0	6.73	5	缺乏
速效 P	mg/kg	1.89	84.75	0.00	6	极缺乏
速效 K	mg/kg	15.46	195.0	0.51	6	极缺乏
有效 Cu	mg/kg	0.47	12.57	0.00	3	中
有效 Zn	mg/kg	0.77	17.06	0.12	3	中
有效 Mn	mg/kg	5.49	200.3	0.00	3	中
有效 B	mg/kg	0.12	0.7	0.00	3	中

2.1.5. 海南桉树人工林土壤养分状况

查正早[13]的研究表明, 在海南岛范围内采集 100 多个各类桉林土壤中, 土壤有机质含量 11.6 g/kg (4 级); 全氮含量 0.57 g/kg (5 级), 60%林地全氮低于 0.75 g/kg; 土壤全磷含量 1.02 g/kg (3 级), 多数土壤全磷不高于 0.70 g/kg; 全钾含量 11.95 g/kg (4 级); 速效磷 14.5 mg/kg (3 级); 速效钾 52.0 mg/kg (4 级); 微量元素 Mo、Cu、Zn、B 含量分别为 0.24 mg/kg (1 级)、0.69 mg/kg (3 级)、0.82 mg/kg (3 级)和 0.40 g/kg (4 级)。pH 4.9。可见, 海南桉树人工林土壤养分贫瘠, 有机质含量低, N、K、B 养分缺乏(表 7)。

Table 7. *Eucalyptus* forest soil nutrient status in Hainan
表 7. 海南桉树林地土壤养分状况

养分 nutrient	单位 unite	平均值 mean	最大值 Max	最小值 Min	等级 grade	类别 category
pH		4.9	5.4	4.4		酸性
有机质	g/kg	11.60	19.7	3.5	4	低
全 N	g/kg	0.57	0.96	0.18	5	缺乏
全 P	g/kg	1.02	1.57	0.46	3	中
全 K	g/kg	11.95	20.7	3.20	4	低
速效 N	mg/kg					
速效 P	mg/kg	14.5	19.0	10.0	3	中
速效 K	mg/kg	52.0	69.0	35.0	4	低
有效 Cu	mg/kg	0.69	0.99	0.39	3	中
有效 Zn	mg/kg	0.82	0.99	0.65	3	中
有效 B	mg/kg	0.40	0.46	0.34	4	缺乏
有效 Mo	mg/kg	0.24	0.37	0.10	2	富

2.1.6. 福建桉树人工林土壤养分状况

林清锦[14]的研究表明,九龙江流域桉树林地土壤有机质含量以及全钾、速效钾、速效氮和有效硼的含量处于中等至缺乏等级水平;全氮、全磷和速效磷较为缺乏,特别是磷素含量极低;部分区域如长泰县,有效锌含量极低;整个区域的桉树林地土壤交换性钙和交换性镁含量普遍处在缺乏或极缺乏水平。同时,桉树林地土壤均为酸性(表 8)。从县级区域上看,林地有机质含量中等,N、P、Zn、Mg 等缺乏,不能满足桉树速生丰产的生长需求[15]。

Table 8. *Eucalyptus* forest soil nutrient status in Fujian
表 8. 福建桉树林地土壤养分状况

养分 nutrient	单位 unite	长泰 Changtai	平和 Heping	龙海 Longhai	南靖 Nanjing	华安 Huaan
pH		4.3	4.6	4.6	4.7	4.5
有机质	g/kg	22.65	21.03	18.38	20.64	22.17
全 N	g/kg	1.02	0.77	0.71	0.99	0.98
全 P	g/kg	0.23	0.12	0.14	0.21	0.26
全 K	g/kg	26.44	12.85	20.46	12.05	21.67
速效 N	mg/kg	89.53	73.83	61.68	59.61	80.74
速效 P	mg/kg	3.82	1.01	1.54	1.36	2.53
速效 K	mg/kg	56.75	51.81	55.92	54.75	39.61
有效 Ca	mg/kg	57.9	96.3	13.7	37.3	116.3
有效 Zn	mg/kg	0.25	0.67	1.95	0.39	1.10
有效 B	mg/kg	0.19	0.66	0.16	0.23	0.71
有效 Mg	mg/kg	24.3	24.7	3.89	6.5	27.4

综上所述,我国广东、广西、海南、福建等省(区)桉树人工林主要种植区林地土壤酸性,贫瘠,有机

质含量低,林地土壤氮、磷、钾属于中等到极缺乏等级(3~6级);微量元素含量属于极缺乏等级(5级),在这些地区营造桉树丰产林应当人工施肥,否则生长量难以达到预期。云南、四川、重庆、江西、湖南等省(市)桉树人工林主要种植区林地土壤养分状况未见报道,根据第二次全国土壤普查数据估测,这些省(市)林地土壤 N、P、K 等养分含量也严重偏低。

2.2. 桉树营养特征及营养诊断

2.2.1. 桉树营养特征

桉树营养特征是营养诊断的基础,营养诊断是制订施肥方案的依据。20 世纪 90 年代以来,我国对桉树营养特征开展研究。

苏英吾等[8]的研究表明,桉树前期对 N 的需求较旺,全生育期 N 的吸收量高于 K,远高于 P;雷林 1 号全生育期对 N 的吸收比较旺盛;桉树生长中后期 P、K、Ca、Mg 的累积量增加,柠檬桉最为明显;P 需求量较少,但作用显著。在雷州地区,雷林 1 号桉生产 1.0 m³ 木材,需 N、P₂O₅、K₂O 分别为 4.02 kg、0.99 kg 和 2.53 kg。

茶正早等[13]的研究表明,土壤养分与桉树营养密切相关。土壤中的 N、P、K 与桉树叶片内的 N、P、K 的浓度密切相关,呈正比关系。表明土壤养分对桉树生长发育有直接影响,土壤养分丰富且配比合适,桉树生长就快,否则生长就慢。

余雪标等[16]的研究表明,桉树人工林第 1 代、第 4 代各器官养分含量依次为 Ca > N > K > Mg > P;第 2 代、第 3 代养分含量依次为 N > Ca > K > Mg > P。这充分表明桉树生长需要大量的 N、Ca、K、Mg、P 肥。桉树各器官养分总量依次为:干 > 皮 > 叶 > 根 > 枝。各代次林之间养分存留量、归还量和吸收量均为 1 代林最大,依次为 1 代林 > 2 代林 > 3 代林 > 4 代林。养分存留量 1 代林分别是 2、3、4 代林的 1.5、2.1 和 2.9 倍。表明第 1 代林生物量大,然后依次逐代减少。

华元刚[17]的研究表明,在桉树各器官中,叶片的养分含量最高,即营养元素在叶片中累积量最大,干材部分的养分含量最低。桉树各器官养分含量大小顺序是叶 > 皮 > 根 > 枝 > 干。在 N、P、K、Ca、Mg 等 5 种大量元素中,Ca 和 N 含量最高,然后依次是 K、Mg、P。这表明桉树对这 5 种营养元素要求较高。桉树不仅对各种营养元素的需要量和相关比例有其规律,而且在不同生长发育期对各种营养元素需求量也有差异。

黄益宗等[18]的研究表明,桉树生长需要 N、P、K、Ca、Mg、B 等营养元素,桉树叶片低于或高于某个浓度,其生长就受阻,生长量明显受影响。按照临界法提出了尾叶桉叶片的各个营养养分最佳浓度范围,为桉树营养诊断提供了科学依据。

总之,桉树对 N、P、K、Ca 等需求量大,对 Mg、Mn、Fe、B 等也有较大需求。桉树不同树种、不同生长发育期以及在不同环境条件下对营养需求是不同的。目前,对雷林 1 号桉、尾叶桉、刚果 12 号桉、柠檬桉等树种幼苗或幼龄林的营养特征开展了研究,但这些研究还不够深入,仅粗略知道雷林 1 号桉生产 1 立方米木材需要 N、P、K 养分数,对其它养分需求量并不清楚。对其它树种,如尾叶桉、巨桉以及其杂交种生产 1 立方米木材需要多少 N、P、K 养分及其它微量元素未见报道。对中龄林、近熟林的营养特征及其养分需求几乎没有研究。另外,对桉树营养利用率、光合速度、呼吸速度等研究未见公开报道。

2.2.2. 桉树营养诊断

20 世纪 70 年代以来,林木施肥与营养诊断在恢复提高人工林林地地力方面取得很大进展,合理施肥已经成为定向培育短轮伐期工业原料林重要技术措施,开展系统施肥与营养诊断研究是合理施肥提高

肥效的前提[19]。土壤分析、植物组织分析、田间试验是主要营养诊断手段。我国桉树营养诊断起步于 20 世纪 60 年代初,当时开展柠檬桉苗期矿质营养试验,20 世纪 80 年代澳大利亚西姆森在广西东门林场进行桉树施肥试验时,做过桉树叶片养分分析。桉树营养诊断主要采用临界值法和综合指数法。临界值法:某种矿物质元素浓度在最适范围内桉树生长最好,超出最适范围(临界值)桉树生长受阻。至目前为止,已研究赤桉、柠檬桉、窿缘桉、刚果 12 号桉、尾叶桉幼苗及幼林叶片营养诊断。

桉树苗期营养诊断。周文龙[20]研究结果表明,桉树苗期在缺乏某一营养元素或不足时,苗木生长受阻,表现出矿物元素缺乏的症状,以致植株死亡。赤桉、窿缘桉、刚果 12 号桉的缺素试验结果,在缺 N 条件下培养 5 天植株就会出现叶片由绿色变成淡绿色,10 天后全株叶片呈黄绿色,高、径生长停滞;在缺 P 条件下培养 10 天,苗木的高、径生长明显受阻,20~30 天老叶出现暗绿带紫铜色,叶片尖端干枯。这 3 种桉树苗木对缺 K 反应不甚敏感,缺 K 培养 20 天,老叶出现黄绿色,并有褐色斑点,高、径生长受阻。对缺 Mg 反应敏感,病状明显,缺 Mg 培养 10 天,叶片由绿色变成淡绿色,15 天叶片出现斑块状组织坏死灼烧状、叶片迅速脱落。缺 Ca 与缺 Mg 的植株症状极为相似。植株对缺 Fe 反应敏感,培养 5 天,叶色变黄,叶片小而薄,开始卷曲,叶片继而呈淡黄色,苗木高、径生长停滞。在缺微量元素 B、Mn、Zn、Cu、Mo 的条件下培养,植株表现出的症状为叶片小、卷曲,生势差。总之,桉树苗木对缺 N、P、Mg、B、Zn、Cu、Mn、Mo 等元素非常敏感,对缺 K 反应不敏感。

桉树幼龄期营养诊断。李淑仪等[21] [22] 1996 年在雷州林业局采用临界值法研究了雷林 1 号桉、尾叶桉、柠檬桉等 3 种桉树的营养状况,提出这 3 种桉树幼林期 N、P、K 的临界值作为营养诊断标准(表 9)。

Table 9. *Eucalyptus* leaf nutrient concentration standard (unit: mg/kg)
表 9. 桉树叶片养分浓度标准(unit: mg/kg)

养分 nutrient	树龄 age (月 month)	雷林 1 号 LLh-1		尾叶桉 <i>E. urophylla</i>		柠檬桉 <i>E. citriodora</i>	
		最适值	临界值	最适值	临界值	最适值	临界值
N	8	20.3~25.4	17.2	21.2~23.5	17.0		
	20	15.9~19.8	14.8	17.5~18.2	15.5		
P	8	1.7~2.1	1.3	1.5~1.6	1.3		
	20	1.2~1.6	1.0	1.3~1.6	1.2	1.2~1.3	1.1
	32	1.1~1.3					
K	8	7.0~10.0	4.9				
	20	5.3~7.3	4.7			10.8~11.8	9.6
	32	5.3~6.1	4.6				

李尚弟[23]等应用相关值法对桉树幼龄林进行营养诊断,需肥顺序是 P、N、K;施肥处理以施 N 肥 100 kg/hm²、P 肥 100 kg/hm²、K 肥 50 kg/hm² 为宜;4 年生林后需补充 K 肥。结果与李淑仪的基本一致,但在不同树龄对营养需求上有差异。

黄益宗等[18]利用临界值浓度法对桉树幼林叶片营养诊断,得出 N、P、K、Ca、Mg、B 等元素的临界浓度及最适浓度范围。

曹继钊等[24]采用临界值法对广西人工林尾叶桉幼林叶片养分浓度进行研究并提出营养诊断指标(表 10)。其诊断指标比黄宗益的多了 Cu、Zn、Fe、Mo,适用范围较大。

Table 10. Diagnostic indicators for leaf nutrient content of *E. urophylla* (unit: N, P, K, Ca, Mg: g/kg; others: mg/kg)
表 10. 尾叶桉叶片养分含量诊断指标(单位: N、P、K、Ca、Mg: g/kg; 其余: mg/kg)

叶养分含量 leaf nutrition	营养元素 nutrients									
	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Zn	Fe	Mo
均值	18.93	0.915	7.183	6.534	1.576	28.35	5.16	17.95	112.89	760.36
STD	4.05	0.257	2.794	2.772	0.468	13.16	2.59	6.67	71.30	619.03
上限	22.98	1.172	9.977	9.306	2.044	41.51	7.75	24.62	184.19	139.39
下限	14.88	0.658	4.389	3.762	1.108	15.19	2.57	11.28	41.59	141.33

植物营养诊断方法很多, 有比较曲线法、多角形图解法、临界值法、诊断施肥综合法(简称 DRIS 法)等。诊断施肥综合法的优点在于可以对作物营养元素的需求次序进行判定, 而且判定结果不受植株年龄、品种及采样部位的限制[25]。目前, 桉树营养诊断主要采用临界值法和综合法。临界值法与综合法配合使用诊断效果可能更佳。根据幼苗、幼树生长阶段的营养需求及其叶片营养养分含量诊断全树营养状况。对于中龄林或近熟林阶段营养需求和营养诊断未见研究报导。

2.2.3. 桉树施肥量确定

根据周文龙等[20]有关研究表明: 在海南儋州地区, 每生产 1 m³ 的雷林 1 号桉树材, 需 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别为 4.02 kg、0.99 kg 和 2.53 kg。玉米植株形成 100 kg 籽实, 需吸 N 2.57 kg, P₂O₅ 0.86 kg, K₂O 2.14 kg; 水稻植株形成 100 kg 籽实, 需吸 N 2.30 kg, P₂O₅ 1.25 kg, K₂O 3.30 kg [26]。桉树与玉米、水稻需肥量不同, 但需肥量计算方法可互相借鉴。

在桉树施肥实践中, 首先要掌握桉树营养特性(生长发育需肥量)以及林地土壤养分含量情况(土壤供肥能力), 然后根据目标产量需肥量计算出实际需肥量。因此, 桉树营养特征、林地土壤供肥能力、目标产量需肥量是确定施肥量、制订施肥方案的重要依据。桉树施肥量的确定常采用目标产量法。目标产量法是根据作物目标产量所需要养分总量与土壤供肥量的差数, 除以肥料养分含量和利用率, 估算出肥料用量。

肥料用量 = (目标产量需养分总量 - 土壤供肥量) / 肥料养分含量% × 肥料利用率%。

实例: 在广西林地土地力为中等条件下, 设年均生长量为 30 m³/hm², 轮伐期为 6 年, 主伐时单位面积目标木材产量为 180 m³/hm²。计算其单位面积施肥量或单株施肥量。

1. 计算目标产量养分需求总量:

N = 4.02 × 180 = 723.6 (kg/hm²);

P = 0.99 × 180 = 178.2 (kg/hm²);

K = 2.53 × 180 = 455.4 (kg/hm²)。

2. 计算土壤供肥量:

设桉树根系能够完全利用林地土壤 0~40 cm 土层的速效 N、P、K, 而不能利用非速效 NPK; 红壤容重为 1.2 g/cm³。平均每公顷林地 0~40 cm 土层重量:

W = 土层厚 × 土层面积 × 容重 = 0.4 × 10000 × 1.2 = 4800 t = 4,800,000 kg。

根据广西林科院提供数据: 在肥力水平中等的土区, 速效 N: 85.56 mg/kg = 0.08556 g/kg; 速效 P: 0.77 mg/kg = 0.00077 g/kg; 速效 K: 23.44 mg/kg = 0.02344 g/kg。每公顷林地 0~40 cm 土层含速效 N、P、K 重量(供肥量)如下:

速效 N = 4,800,000 kg × 0.08556 g/kg = 410.7 kg;

速效 P = 4,800,000 kg × 0.00077 g/kg = 3.7 kg;

速效 K = 4,800,000 kg × 0.02344 g/kg = 112.5 kg。
肥料养分含量：氮肥(尿素) 46.0%；磷肥(磷矿粉) 25.0%；钾肥(硫酸钾) 50.0%。
肥料利用率：尿素 55%；磷矿粉 35%；硫酸钾 65%。

3. 计算需肥量(6 年生林分目标产量为每公顷 180 m³)：

尿素 = (723.6 - 410.7)/46% × 55% = 312.9/0.46 × 0.55 = 374.12 (kg/hm²)；
磷矿粉 = (178.2 - 3.7)/25% × 35% = 174.5/0.25 × 0.35= 244.3 (kg/hm²)；
硫酸钾 = (455.4 - 112.5)/50% × 65% = 342.9/0.50 × 0.65 = 445.77 (kg/hm²)。

(1) 设初植密度为 1665 株/hm² (株 × 行：2 m × 3 m)，则单株需(尿素 + 磷矿粉 + 硫酸钾)肥量为：
(374.12 + 244.3 + 445.77)/1665 = 1064.19/1665 = 0.639 kg；其中尿素 0.225 kg，磷矿粉 0.147 kg，硫酸钾 0.267 kg。

(2) 设初植密度为 1250 株/hm² (株 × 行：2 m × 4 m)，则单株需(尿素 + 磷矿粉 + 硫酸钾)肥量为：
(374.12 + 244.3 + 445.77)/1250 = 1064.19/1250 = 0.851 (kg/株)，其中尿素 0.299 kg，磷矿粉 0.1966 kg，硫酸钾 0.356 kg。

目前，桉树施肥量主要采用目标产量需肥法进行确定。由于目标产量不仅受到土壤因子的影响，而且受到光、热、水、风、植被、微生物以及人类活动等因素的影响。因此，仅依据土壤养分量来确定施肥量是不全面的，在具体的生产实践中应当考虑更多影响因子。不同桉树品种生产等量木材的需肥量不同。目前，未见尾叶桉、巨桉、尾巨桉杂交种等品种生产 1 立方米木材需要多少 N、P、K 的公开报道。

2.3. 桉树施肥效应

桉树施肥效应研究比较多。桉树施肥效应因立地类型、树种(品种、无性系)、林龄阶段、肥料种类、肥料配比、肥料工艺、施肥时间、施肥方法等因素的变化而变化。

2.3.1. 肥料种类对桉树的生长效应

杨曾奖[27] 1987~1992 年在广东省电白县开展刚果 12 号桉的施肥试验，设计 8 个处理 3 个水平(50 g/株、100 g/株、150 g/株)，种植密度 1 m × 2 m，结果表明，N、P、K 肥单施对刚果 12 号桉的蓄积量比对照分别增加 5.30、5.25、4.80 m³/hm²；不同肥料配合的施肥试验发现，NPK、NP、NK 和 PK 配合施用能极显著地促进刚果 12 号桉的生长，5a 生时蓄积量比对照分别增加 19.40、18.45、16.40 和 15.05 m³/hm²。桉树施肥与不施肥相比，能够更有效地促进桉树生长；NPK 全肥与单肥相比，能够更有效地促进桉树生长(表 11)。

Table 11. The effect of fertilization on the height and diameter at breast height (DBH) growth of *Eucalyptus* plantation (5 ages)
表 11. 施肥对桉树树高及胸径生长量的影响(5 年生)

序号 No.	处理 treat	树高 height (m)	胸径 DBH (cm)	单株材积 volume (m³)	排序 range
1	CK 对照	4.33	2.95	0.0015	6
2	K	4.96	3.60	0.0025	5
3	N	5.03	3.59	0.0025	5
4	P	5.07	3.49	0.0027	4
5	PK	6.00	4.36	0.0045	3
6	NK	6.12	4.64	0.0051	1
7	NP	6.15	4.44	0.0048	2
8	NPK	6.22	4.58	0.0051	1

林书蓉等[28] 1993~1997 年在广东雷州半岛开展桉树施基肥试验结果表明, 基肥对雷林 1 号桉、尾叶桉和柠檬桉的幼林材积生长有明显的促进作用。施用全肥(N15-P15-K30)比单施一种肥或二种肥的效果好。在 8 个处理中, 基肥以有机、无机肥配合为宜, 每株可施有机肥(滤泥) 2.5 kg, 配施 N 15 g、P 30 g、K 30 g, 另加适量 B、Zn、Cu 等微量元素效果更好。其研究结果与杨曾奖的基本一致, 认为施全肥比施单肥效果好。

柏方敏等[29] 2001~2003 年在湖南省郴州市苏仙区卜里坪村林场对桉树幼林进行不同肥料品种试验, 对 N、P、K 三种肥料设计了 7 个处理, 5 个重复, 株行距 2 m × 2 m, 结果表明, 每株施用 65 g 尿素、430 g 过磷酸钙和 25 g 氯化钾混合肥效最佳, 平均树高达 4.73 m, 比对照增加 132%; 平均胸径 4.50 cm, 比对照增加 133%, 差异十分显著。每株施用 130 g 尿素和 25 g 氯化钾作基肥对桉树幼林成活和生长都不利, 产生负面作用。

李宝福[30]在闽南进行不同肥料等养分量施肥对桉树生长的影响的研究表明: 在 N、P、K 定量施肥的基础上, 磷肥以钙镁磷肥作基肥, 氮肥以尿素作追肥并分多次施用, 其肥料效应比采用过磷酸钙为磷肥、碳酸氢铵为氮肥的效果好。它不但能提高林木对养分的吸收积累和利用效率, 协调生态系统中营养元素的吸收平衡, 促进林木生长, 而且其肥料投资费用较少, 有利于降低营林成本, 投入产出比达 1:7.14。

王洪峰等[31]采用广东林科院研制桉树专用肥、肥I (荷兰进口)、肥II (来自广西)、肥III (来自广东) 3 种肥料进行对比试验。结果表明: 与肥II、肥III比, 专用肥用作基肥, 幼林生长量提高 24%以上; 用作追肥, 生长量提高 14%以上。桉树专用肥促生效果最好, 其后依次是肥II、肥III、肥I。表明肥料种类不同促生效果不同。

杨晓慧等[32] 2014 年在雷州林业局遂溪林场开展不同肥料种类对尾叶桉树幼林生长效应研究。结果表明: 处理 N:P:K 为 15:5:11 时对桉树的胸径或地径增长促进效果最好; 处理 N:P:K 为 9:11:10 时对桉树树高增长效果最好。

曹继钊等[33] 2008~2010 年在广西高峰林场开展 5 种新型肥料对桉树生长效应的研究, 设计 5 个处理 1 个水平。结果表明: 桉树施肥促生效果明显, 几种新型肥料对桉树生长量都有显著促进作用, 施用标准配方肥 1 效果最佳, 芬兰进口复合肥效果次之。不同肥料对桉树前期生长量的肥效差别主要受肥料总养分 N、P、K 含量以及养分合理配比影响(表 12、表 13)。

杨盛军等[34] 2011~2015 年在广西高峰林场开展氮、磷、钾不同含量的复混肥对广林巨尾桉 5 号生长影响试验, 设 6 个处理。结果表明, 肥料中 NPK 含量不同对桉树胸径、树高及单株材积影响有显著差异, 基肥氮含量 4%、磷 10%、钾 6%, 追肥氮含量 15%、磷 8%、钾 7%的效果最好。这表明不同肥料对桉树生长效应不同, 培育丰产林离不开合理施肥。

Table 12. Effects of different types of fertilizers on the growth of *Eucalyptus*
表 12. 不同肥料对桉树生长效应的影响

处理 treat	肥料种类 category	养分含量 nutrient content (%)	施肥量 amount (g/株)	树高 height (m)	胸径 DBH (cm)	单株材积 volume (m ³)	排序 range
1	缓控释肥	25	750	13.3	9.5	0.0482	5
2	复合肥	45	750	14.6	10.4	0.0620	2
3	标准配方肥 1	35	750	14.8	10.5	0.0639	1
4	有机无机肥 3	20 + 有机质 20%	750	13.7	9.9	0.0534	4
5	标准配方肥 2	30	750	14.5	10.1	0.0584	3
6	对照	0	0	12.1	7.7	0.0301	

Table 13. Content of nutrients in the test fertilizer
表 13. 供试肥料养分含量

处理 treat	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	有机质 organic matter (%)	有效 available Zn (mg/kg)	有效 available B (mg/kg)
1 号肥	11.7	8.6	4.9		71	218
2 号肥	14.9	15.8	15.1		484	30
3 号肥	15.4	9.0	10.6		426	1378
4 号肥	8.8	5.2	6.4	20	250	500
5 号肥	12.7	9.3	8.2		40	383

文亮等[35]在四川成都市会东县鲮鱼河镇开展沼肥和复合肥对桉树幼林生长试验。设 4 个处理：复合肥(A)、复合肥 + 沼肥(B)、沼肥(C)、对照不施肥(D)。每个处理的氮、磷、钾养分换算后均等量。追肥后连续测定 4 次，树高、胸径以及单株材积排列均为：B > C > A > D (对照)，表明不同肥料对桉树生长有不同影响，沼肥是桉树的优质肥料。

李宝福[36]研究鸡粪肥与钙镁磷肥对桉树人工林的生长效应。结果表明，每穴施 0.5 kg 鸡粪作基肥，2 年生林分平均树高、平均胸径均比施钙镁磷肥的高，表明在有效养分相同情况下鸡粪肥优于钙镁磷肥。

刘学锋等[37] 2017 年在广东省湛江市遂溪县岭北镇南方国家级林木种苗示范基地开展国产有机无机复合肥、进口复合肥、传统复混肥对尾巨桉树幼树树高、胸径生长效应的试验表明，国产有机无机复合肥 > 进口复合肥 > 传统复混肥 > CK。

姚姜铭等[38] 2014 年在南宁市良庆区那马镇共和村开展不同种类肥料对桉树生长的试验结果表明：在有效养分量相等的情况下，施用不同种类的肥料，对桉树生长影响较大。含微量元素、镧系元素(稀土)、植物酶活性剂等植物的活性肥与桉树专用肥同时施用，可提高桉树对肥料的利用率。不同种类肥料对桉树幼林生长影响：水蒸汽造粒肥 29% (14-6-9) > 硫酸造粒肥 29% (14-6-9) > 桉树肥 45% (16-7-22)。

谭长强[39] [40] 2013 年在广西大学苗圃开展不同种类肥料对盆栽桉树幼苗生长的试验结果表明，缓释无机肥、水蒸汽造粒无机肥、硫酸造粒无机肥、有机无机肥对桉树幼苗生长都有明显的促进作用，总生物量比 CK 增加 61.72%~81.17%。不同工艺及组分专用肥对桉树生长均有明显提高，其中施用桉树专用缓释肥效果最好。

廖胜彪[41]对巨桉无性系施用不同肥料组合的试验结果表明：以火烧垃圾土做基肥再配施适量的尿素做追肥，组成有机 - 无机复混肥体系，其施用效果明显优于纯化肥类肥料组合，不但明显提高林分生产力、维持地力，而且经济效益较好，充分显示出有机无机复合肥的施用优势。

何国华等[42]开展有机 - 无机复混肥 A (基肥、追肥)、有机 - 无机复混肥 B (基肥、追肥)、无机肥 C 等 3 种肥料处理对尾细桉生长的试验结果表明，施用有机 - 无机复混肥 A 的处理在苗木生长 17 个月的时候长势最好，与其他 2 种处理差异达到极显著水平。在生长 30 个月时，施用有机 - 无机复混肥 A 处理与 B 处理生长均较好，两者差异不显著，但是均与 C 处理差异显著。

综上所述，施肥种类有 3 大类：有机肥、无机肥、有机无机复合肥。基肥主要有人畜家禽粪便、火烧土、沼肥、滤泥、海泥、磷肥或复混肥；追肥主要种类有尿素、硫酸铵、碳酸铵、氯化铵、钙镁磷肥、过磷酸钙、白磷、氯化钾、硫酸钾等；复合肥种类多种多样，主要是 NPK 和微量元素含量不同。不同种类肥料对桉树的生长有不同影响。从总体上看，复合肥优于单肥；有机无机复合肥优于无机肥、有机肥；国产有机无机复合肥优于进口复合肥、传统复混肥。目前，这种研究大多集中在幼苗、幼龄林阶段，对中龄林、近熟林的生长效应极少有报道。

2.3.2. 施肥量对桉树的生长效应

桉树施肥量研究做得比较多。日本须藤胎 1982 年提出, 桉树施肥量为: N: 16~32 g/株、P₂O₅: 10~20 g/株、K₂O: 8~27 g/株[20]。澳大利亚 J.A.西姆森 1985 年在广西东门林场的桉树施肥试验结果表明, 最佳施肥量在幼林期为 N 100 kg/hm²、P₂O₅ 550 kg/hm²、K₂O 50 kg/hm² (2222 株/hm²); 在广东陆丰尾叶桉施肥试验结果: 最佳施肥量为 N 50 g/株、P₂O₅ 30 g/株、K₂O 30 g/株[20]。可见, 20 世纪 80 年代桉树施肥量很小。

柏方敏等[29] 2004 年对桉树幼林进行不同肥料组合施肥试验表明, P、K, N、P, P 肥对桉树生长有较好的肥效; N、P、K 混合施用肥效最佳, 肥料最佳配比为每株 520 g (尿素 65 g + 过磷酸钙 430 g + 氯化钾 25 g), 2 年生试验林平均树高、平均胸径分别比对照高 132%、133%。

吴建平[43] 2004 年在湖南蓝山县丘冈地红壤上的桉树施肥试验结果表明, 施用无机复混肥对桉树的生长有明显的促进作用。在土壤肥力中等偏低的丘冈红壤上, 追肥在桉树生长前期效果最好, 最佳施肥量为 300 g/株。

曹继钊等[44] 2006 年对广林 9 号无性系配方施肥试验表明, 基肥含 N 5%、P₂O₅ 15%、K₂O 5%及 2% 左右微量元素和有机质, 每株施肥量 500 g, 追肥含 N 16%、P₂O₅ 10%、K₂O 14%及 2%左右的微量元素铜、锌、硼。年施肥量为每株 500 g 的施肥处理经济效益最佳。

李娜[45]在广西田东县作登乡开展试验, 设 4 个施肥量处理, 0 g/株, 250 g/株, 500 g/株, 1000 g/株; 2007 年 5 月定植, 种植后连续施肥 3 年, 2009 年 3 月测定。21 月龄桉树平均树高、平均胸径、单株材积随着施肥量的增加而增大, 施肥量每株 250 g、500 g、1000 g 的单株材积分别比对照大 105.93%、146.67%、177.03% (表 14)。表明在一定施肥水平范围内施肥量越大, 生长量越大, 增产效果显著。

Table 14. The effect of different fertilizer application amount on the growth of young *Eucalyptus* plantations (2009)
表 14. 不同施肥量对桉树幼林生长量的影响(2009)

处理 treat	施肥量 amount (g/株)	树高 height (m)	胸径 DBH (cm)	单株材积 volume (m ³ /tree)	比对照增加 addition (%)
1	1000	10.74	9.18	0.0374	177.03
2	500	10.39	8.75	0.0333	146.67
3	250	9.39	8.32	0.0278	105.93
4	0	7.78	6.11	0.0135	

周巧清[46] 2016 年在广西国有黄冕林场开展桉树幼林施肥试验, 设置 3 个种植密度(1250 株/hm², 1667 株/hm², 2500 株/hm²)、3 个施肥水平(0 g/株, 500 g/株, 1000 g/株); 2016 年 6 月造林, 2020 年 12 月测定(4.5 年生)。在 3 个种植密度条件下, 施肥量由 0 g/株增长至 500 g/株时, 平均树高明显增加, 由 500 g/株增加至 1000 g/株时, 树高增长不明显; 在 3 个处理组中, 随着施肥量的增加, 平均胸径逐渐增大。处理组 1 平均胸径从 8.46 cm 增大到 11.58 cm; 处理组 2 平均胸径从 7.64 cm 增大到 9.17 cm; 处理组 3 平均胸径从 6.83 cm 增大到 8.89 cm。平均冠幅、单株生物量也是随着施肥量的增加而增大(表 15)。结果表明, 桉树施肥与不施肥是不同的, 在一定施肥水平条件下施肥量越大桉树生长量越大。

颜民辉等[47]分别设置 3 个施肥量处理: 600 g/株、1200 g/株、1400 g/株。结果表明, 在密度为 2 m × 3 m 条件下, 施肥量为 1200 g/株的桉树幼林长势较好, 效益较佳。

李宝福等[48]对 2.5 年生尾巨桉林分间伐后进行施肥, 设计 4 个处理(0, N45 + P113 + K50, N90 + P225 + K100, N135 + P338 + K150), 结果表明, 间伐后施用适量的 N、P、K 肥有明显的增产效果。每株施 N 135 g、P₂O₅ 338 g、K₂O 50~100 g、B 0~5 g 的增产效果最好。

Table 15. The effect of different fertilizer application rates on the growth of young *Eucalyptus* plantations
表 15. 不同施肥量对桉树幼林生长量的影响

试验 test	处理 treat	密度 density (株/hm ²)	施肥量 amount (g/tree)	树高 height (m)	胸径 DBH (cm)	冠幅 crow spread (m)	生物量 biomass (g/tree)
1	1	1250	0	7.03	8.46	3.14	31.70
	2	1250	500	7.75	10.34	3.32	51.64
	3	1250	1000	8.34	11.58	3.42	55.06
2	4	1667	0	7.72	7.64	2.98	25.03
	5	1667	500	8.29	8.56	3.64	33.95
	6	1667	1000	8.68	9.17	3.71	41.95
3	7	2500	0	8.03	6.83	3.02	18.73
	8	2500	500	9.07	8.02	3.24	24.41
	9	2500	1000	9.38	8.89	3.41	30.76

陈源等[49]开展钾肥追施对桉树生长及效益的影响研究。以 NP 肥作基肥，只有在造林时或当年施用钾肥才能发挥好的施肥效果。在 NP 作基肥的基础上添加氯化钾 50 g/株，一年生树高增长 24.6%，当年再追施氯化钾 50 g/株的处理，一年生树高增长 52.5%，二年生胸径的增长则分别为 22.1%、42.8%，而后钾肥的追施效果不明显。

梁坤南等[50]开展尾叶桉无性系幼林施肥试验，4.5a 试验结果表明，8 个不同施肥处理(肥料配方)间的生长差异极显著，尤以 N75-P200-K50 处理最好，其平均树高为 15.23 m，平均胸径为 11.07 cm，每公顷材积为 107.5 m³。8 个施肥处理均与不施肥处理有极显著的差异。最好施肥处理的平均树高、平均胸径和每公顷材积分别是对照的 1.3、1.65 和 3.1 倍。

总之，桉树在各个生长发育期需肥量存在差异，不同的施肥量对桉树生长的影响是不同的。在桉树营养需求范围内，施肥量越大生长量越大。但是，超出了桉树生长发育需求，施肥量过大则可能造成肥害，生长量不仅没有增加反而会下降，还可能造成林地土壤环境污染，产生负面影响。近 40 年来，桉树单株施肥量不断增大。从 1985 年每株 100 g 逐步增大到 2025 年每株 500 g，40 年间增长了 5 倍。目前，在生产上施肥量为每株 500~750 g，个别单位为每株 1000 g；施肥年限从 1 年增加到 3 年或 4 年；总施肥量增加了 20~30 倍。与此同时，桉树人工林单位面积年均生长量从 4.5 m³/hm² 上升到约 30.0 m³/hm²，增长了 5~6 倍。目前，不同施肥量对桉树生长量影响研究仅在幼龄林和中龄林阶段，对近熟林施肥效应研究很少，对中龄林和近熟林施肥量缺乏科学依据。

2.3.3. 林地土壤类型的桉树施肥效应

陈少雄等[51]在广西东门林场的砖红壤上开展尾叶桉施肥试验结果表明：施肥既可提高林分产量，又能缩短成材时间；一次性施足基肥的肥效可延续到轮伐期(5~6a)；施用 N、P、K 复合肥比单一肥或 2 种元素复合肥效果好；只施 N 肥效果差，和不施肥结果相近；在不同肥料中，P 肥效应突出；5 个施肥处理中最佳施肥量为 N100:P50:K50 (N 100 kg/hm² + P 50 kg/hm² + K 50 kg/hm²) 以及一些微量元素 Zn、Cu 等。表明在砖红壤地区应多施 N、P 肥。

林书蓉等[28] 1999 年在雷州半岛贫瘠的砖红壤上的施肥试验结果表明：在砖红壤林地上种植桉树，施肥应 N、P、K 配合施用；N、P、K 全肥施用，材积最大；施用量应在一定范围，过量施肥对材积的增产作用不大甚至产生副效应，施肥最佳配比是每株 N 15 g、P 30 g、K 30 g。

何蓉等[52]在云南省保山市石灰岩红壤地区进行蓝桉幼林(4 年生)施肥试验表明：施肥能明显促进蓝

桉幼林生长, N2:P3:K2 为蓝桉幼林的最佳施肥方案。表明在石灰岩红壤地区应多施 P 肥。

吴建平等[43]在湘南蓝山县丘冈地红壤上的桉树施肥试验表明: 2~3 年生的桉树, 在中等偏低肥力的林地中, 复合肥最佳施肥量为 300 g/株(NPK = 13:5:7), 1a 胸径可增粗 3.12 cm, 树高可增长 3.27 m。表明在红壤地区应多施 K 肥。

综上所述, 在红壤、砖红壤、石灰岩红壤等类型土壤上的桉树施肥效应不同。土壤类型不同其养分含量不同, 加上气候和生物因子等条件差异较大, 桉树能够直接利用的养分差别就更大。在桉树主要种植区改为土壤类型多样, 土壤养分含量千差万别, 目前对不同土壤类型的桉树施肥效应研究不够深入、不够系统。

2.3.4. 桉树品种的施肥效应

仲崇禄等[53]在广东省阳西县对赤桉、巨桉和细叶桉等 3 种桉树进行 10 个 P 处理水平的施肥试验, 结果表明: P 肥对促进 3 种桉树树高和胸径生长的肥效明显, 3 个参试树种对 P 肥的需求有明显差异, 表现为 6~24 个月期间观测的生长指标存在树种与 P 肥的交互效应, 各树种肥效高峰区域的开始和持续时间不同。赤桉树高的比值高峰区域出现在造林后 6~12 个月, 胸径的比值高峰区域出现在 9 个月; 巨桉树高的比值高峰区域出现在造林后 3~24 个月, 胸径的比值高峰区域出现在 9~24 个月; 细叶桉树高的比值高峰区域出现在造林后 6~24 个月, 差异极显著, 其中赤桉以 NPK、PK、NP、NK、P 处理高、径生长极显著地优于单施 N 和对照; 刚果 12 号桉则以 NPK、NP、PK、P 处理显著或极显著地优于 N、NK 和对照, 都以 NPK、PK 组合施肥效果最好; N1P1K2 组合肥对赤桉苗效应最好, 而 N1P2K0 组合肥对刚果 12 号桉苗效应最好。表明赤桉、巨桉、细叶桉对 P 肥比较敏感, 需求量较大。

林书蓉等[28]对雷林 1 号桉、柠檬桉、刚果 12 号桉等的施肥效应研究结果表明, 这些桉树对 N、P 肥比较敏感。廖胜彪等[40]研究巨桉的施肥效应结果表明, 巨桉对 P 肥比较敏感。

目前, 已对雷林 1 号桉、尾叶桉、巨桉、赤桉、细叶桉、柠檬桉、刚果 12 号桉等 7 种桉种幼林施肥效应进行了研究。桉树对施肥敏感, 只要对桉树适当施肥, 就能有效促进生长。这与桉树独特的生物学特性有关, 也与林地土壤养分有关。桉树种类及各个生长发育高峰期不同, 对 N、P、K 元素要求不同, 施肥量也不同。尾叶桉、巨桉等对 N、P 肥比较敏感, 需求量较大。幼龄林对肥料比较敏感, 中龄林和近熟林施肥效应研究较少。在林业生产上, 桉树人工林施肥既要考虑林地土壤条件, 还要考虑不同种类桉树对不同肥料的需求。

2.3.5. 基肥对桉树的生长效应

廖胜彪[41]对巨桉无性系施用不同基肥种类组合的试验结果表明: 采用火烧垃圾土 2000 g/株作基肥(再追尿素 200 g/株), 2 年生林分平均树高、平均胸径、单株材积分别为 9.41 m、9.51 cm、0.0335 m³, 单株材积比钙镁磷肥 500 g/株作基肥(再追尿素 200 g/株)的高 64.2%, 表明火烧土作基肥效果较好(表 16)。

Table 16. Effect of different types of base fertilizer on the growth of young *Eucalyptus* plantations
表 16. 不同基肥种类对桉树幼林生长量的影响

处理 treat	基肥 base		追肥 topdressing (g/tree)	保存率 survival rate (%)	树高 height (m)	胸径 DBH (cm)	材积 Volume (m ³ /tree)	增减 addition (%)
	种类 kind	数量(g/tree)						
1	钙镁磷肥	500	尿素 200	81.4	8.04	8.05	0.0204	--
2	火烧垃圾土	2000	尿素 200	88.5	9.41	9.51	0.0335	64.2
3	钙镁磷肥	600	尿素 150	84.7	8.12	8.58	0.0236	15.7
4	钙镁磷肥	600	复合肥 150	85.5	7.22	8.57	0.0198	-2.9

杨曾奖等[27] 1997 年用火烧土(0, 2.5, 5.0 kg/株)和化肥作基肥研究刚果 12 号桉树生长效应。表明种植桉树施基肥很重要, 有机基肥肥效可延续到 5~6 年。

林书蓉等[28] 1999 年用滤泥(含有机质 20.3%、N 1.004%、 P_2O_5 0.737%、 K_2O 0.519%)作基肥(0, 2.5, 5.0 kg/株)研究刚果 12 号桉树生长效应。有机基肥肥效可延续 1 个轮伐期 5~6 年。

李宝福[36] 2006 年用鸡粪作基肥研究桉树速丰林施肥效应。结果表明, 穴施 0.5 kg 近似绝干的鸡粪作基肥, 2 年生林分平均树高、平均胸径、单株材积和蓄积分别达 8.0~8.5 m、7.0~7.4 cm、0.0156~0.0186 m^3 和 21.5~26.3 m^3/hm^2 , 比穴施钙镁磷肥 0.5 kg 为基肥分别提高 9.5%~15.8%、9.6%~15.7%、31.1%~56.3% 和 32.8%~62.7%。表明鸡粪肥是优质基肥。

杨新国[54]以尾叶桉 U6 为试材, 开展桉树施用不同基肥试验。采用穴施 A (1 kg 菰料 + 0.1 kg 钙镁磷)、B (禽畜粪干 1 kg + 0.1 kg 钙镁磷)、C (钙镁磷 0.25 kg)、D (ck 不施基肥) 4 种处理。结果表明: 施用基肥对桉树生长具有显著的促进作用, 不同种类基肥对桉树的促生效果差异很大, 其中以穴施 1 kg 菰料 + 0.1 kg 钙镁磷肥做基肥的使用效果最好, 4 年生桉树投入产出高达 1:10.7。

谭长强等[39]对比几种复合肥(1 硫酸造粒肥、2 水蒸气造粒肥、3 有机 - 无机肥、4 有机 - 无机肥 + 微生物菌剂、5 红鹰肥)作基肥对桉树的生长影响。结果表明各施肥处理 1.5 年生树高比 CK 增加 9.3%~23.67%; 2.0 年生胸径比 CK 增加 13.2%~18.9%; 2 年生桉树单株材积比 CK 增加 38.8%~64.4%。各处理间桉树树高、胸径、材积影响大小顺序均为有机无机肥 + 微生物菌剂 > 水蒸气造粒肥 > 有机无机肥 > 硫酸造粒肥 > 红鹰肥 > CK。因此, 有机无机肥与微生物配合可有效提高肥料利用率, 促进桉树生长。

综上所述, 基肥对桉树幼林生长发育产生深远影响。桉树基肥主要种类有火烧土、滤泥、鸡粪、沼肥、复合肥等, 这些肥料对桉树生长都有促进作用而且比较经久, 作用大小与 N、P、K 及微量元素含量高低有关。在同等条件下, 有机肥做基肥比无机肥效果好。有机无机肥 + 微生物菌肥比单一的有机肥、无机肥好。2015 年以来, 很多造林单位采用 NPK 复合肥做基肥, 数量 500~750 g/株。目前, 未见施用基肥对中龄林和近熟林生长效应的公开报道。

2.3.6. 施肥方式对桉树的生长效应

桉树施肥方法主要有穴施、撒施、条施、沟施、灌溉施肥和根外追肥等。施肥方式不同产生的效果不同。

刘朝等[55]的研究表明, 基肥下放方法不同对雷林 1 号桉幼林期生长产生不同影响: 以基肥放于坑底效果最好, 其次是肥与土混合置于坑中, 再其次是施于树周围的土表, 最差是放于树周围刨开土的表层。4 个处理间的树高、胸径生长在 1 年生后虽未达到显著水平, 但其之间差值仍在拉大, 单株材积生长随着林龄的增大, 差值也扩大, 未发现处理间差值减小迹象或曲线相交走势, 说明基肥下放方法不同直接影响雷林 1 号桉生长。

韩锦光等[56]通过桉树不同施肥深度的效应试验发现: 基肥施放深度不同对杂种桉幼树生长的影响有显著差异, 与中层肥(21~40 cm)和下层肥(41~60 cm)相比, 上层肥(20 cm)对加速幼树生长起积极作用, 随着基肥深度的增加, 肥分对幼树生长的促进作用相应减缓。基肥施放的深浅不是引导主根深扎的主要因素, 肥料对幼树侧根和须根诱导作用明显。

吴庆全[57] 2010~2011 年在福建省平和国有林场采用穴施和撒施 2 种施肥方式对当年种植的尾巨桉无性系 DH32-29 进行施肥对比试验。结果表明: 采用适量的磷酸二铵加钾肥在造林初期进行撒施, 能更好地促进桉树幼林生长, 其树高、胸径、节间长分别比传统的穴施法提高 30.3%、34.8%、7.7%。

综上所述, 桉树基肥施放方式大多施于种植穴底部, 这种施肥方式的效果最好。追肥方式以人工开

沟埋肥为主，施肥沟一般开在树干的两侧，沟长 40~50 cm，效果较好。林间撒肥或无人机空中撒肥还在试验中。广西斯道拉恩索林业公司自 2005 年开展人工林地撒肥、拖拉机林间地面撒肥，2015 年以来实施无人机空中撒肥，但未见公开报导。广西国有高峰林场 2024 年开始无人机空中撒肥试验。一般认为空中撒施肥是有条件的，一年生幼林地，在地表干净、湿润、无枯枝落叶的条件下，空中撒肥肥粒可直达地面，容易融入土壤被桉树吸收，施肥效率高，施肥质量有保障。目前，一些地方和单位，把幼林叶面追肥与喷撒农药防治病结合起来，但施肥效果如何未见公开报道。

2.3.7. 施肥次数对桉树的生长效应

李娜等[45] 2007~2009 年在广西田东县开展桉树幼林集中和分散施肥试验，设计 5 个处理(处理 1 施肥 7 次，处理 2 施肥 6 次；处理 3 施肥 3 次；处理 4 施肥 4 次；处理 5 不施肥)，结果表明，在 3 年内施肥总量相同的情况下，每年施肥 1 次与每年施肥 2~3 次在平均树高、平均胸径、平均单株材积方面没有显著差别。认为集中施肥优于分散施肥，因为集中施肥作业次数少，成本低。结果表明，在追肥量相同的条件下，在华南地区对桉树 1~3 年生幼林，每年集中追肥 1 次与追肥 2~3 次相比，没有显著差异(表 17)。

Table 17. Effect of different fertilization frequencies on the growth of *Eucalyptus*
表 17. 不同施肥次数对桉树生长量的影响

处理 treat	施肥量 amount (g/tree)	施肥次数 Frequencies	树高 height (m)	胸径 DBH (cm)	材积 volume (m ³ /tree)	蓄积量 Stock Volume (m ³ /hm ²)	备注 notes
1	1500	7	10.18	8.66	0.0320	42.27	第 1 年 3 次；第 2 年 2 次；第 3 年 2 次
2	1500	6	10.32	8.70	0.0327	43.19	第 1 年 2 次；第 2 年 2 次；第 3 年 2 次
3	1500	3	10.11	8.74	0.0324	42.75	第 1 年 1 次；第 2 年 1 次；第 3 年 1 次
4	1500	4	10.36	8.74	0.0331	43.63	第 1 年 1 次；第 2 年 2 次；第 3 年 1 次
5 对照	0	0	7.78	6.11	0.0135	17.87	

林丰焕[58]在广东省汕尾市国有红岭林场的试验表明，施肥次数对巨尾桉生长的影响大小依次为：施二次肥 > 施一次肥 > 不施肥；在总施肥量一致的情况下，在下坡施二次肥时巨尾桉的生长量比中坡、上坡高。

在总施肥量相同情况下，究竟是施 1 次好，还是施 2 次或多次好，由于试验对象、试验地点、试验条件不同，重复数有限，目前没有定论。

2.3.8. 施肥时间对桉树的生长效应

施肥时期可分为两个具体概念，一个是根据季节不同提出的“施肥时间”概念，如“春季施肥”、“夏季施肥”、“秋季施肥”，这是一个微观概念。另一个是，根据林木生长发育阶段性可分为“施肥时期”概念，如幼苗期施肥、幼龄林施肥、中龄林施肥和近熟林施肥等，这是一个宏观概念，这样划分更有利于林木营养管理。

杨紫龙等[59] 2007~2012 年在广西桂平市不同季节施肥对桉树萌芽林生长效应研究，结果表明：5 月前施肥 > 1 月前施肥 > 不施肥。结果与李娜[45]的基本一致，有效的施肥季节为林木生长旺盛期，即春

季和初夏,此时最有利于根系吸收养分。在华南地区,春季和夏季追肥比秋冬季都要好。

李尚弟等[23]开展尾叶桉幼林和中龄林对比施肥试验表明,幼龄林施肥效果好于中龄林。1a、6a龄林需N多,应施适量N肥,1~4a龄林无需施K,6a龄林则表现出缺K应适当补充K肥;2a、6a龄林较缺Ca。从植物营养的角度看,在贫瘠立地上的林木生长发育的各个阶段,即整个轮伐期都需要施肥,以最大限度地提高木材的单位面积产量。

总之,桉树不同生长时期需要不同种类和数量的肥料。不同时期施肥效应是不同的。春季施肥比秋季、冬季施肥好,华南地区最好在2~3月施肥;幼龄林施肥比中龄林施肥好。

2.3.9. 专用肥对桉树的生长效应

零天旺等[60]在广西横州市镇龙林场开展桉树专用肥施肥效应研究,以桉树二代萌芽林为对象,设置5个处理(T1-桉宝、T2-南风、T3-七坡、T4-复混肥、CK-不追肥)。结果表明:桉树专用肥能显著提高桉树胸径、树高和单株材积生长量,其中T3效果最佳,分别比CK提高了45.99%、63.77%、56.31%,显著高于T4,而与T1、T2间无显著差异。以T3木材出材量最大($91.46 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),较CK增加了51.21%,其次是T2($91.13 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)。肥料贡献率在施肥后3个月以T2最大,而施肥1年后以T3最大。

谭长强等[61]采用单因素完全随机设计,对盆栽尾巨桉DH32-29施用2种常规桉树专用肥(水蒸汽造粒无机肥、硫酸造粒无机肥)、1种有机无机桉树专用肥和1种桉树专用缓释肥(NPK=14-6-9),对其地径、苗高及根、枝叶、茎生物量和总生物量进行测定。供试苗木5个月后,各处理盆栽桉树苗木地径比CK增加20.97%~34.76%;苗高比CK增加72.73%~80.16%;根生物量比CK增加85.57%~104.78%;枝叶生物量比CK增加34.24%~45.80%;茎生物量比CK增加69.28%~98.85%;总生物量比CK增加61.72%~81.17%。不同工艺及组分桉树专用肥对桉树生长均有较明显的提高,其中施用桉树专用缓释肥效果最好。

刘奎等[62]施用两种目前常用的桉树专用肥A(NPK=15-9-11),B(NPK=17.6-7.2-10.3)以及不施肥作对照,研究尾巨桉DH32-29组培苗植株各部分大量元素变化,结果表明:A肥料能够较好地促进桉树苗高、地径生长;A、B两种肥料显著提高桉树各器官对N、P、K的吸收;B肥料对根叶的N、根的P吸收的影响高于A肥料。A、B肥料对各器官中K含量的影响差异不显著;A处理下桉树根对N、P养分吸收未受限制,对照和B处理下桉树根对P的吸收受到限制;A肥料对桉树Ca的吸收效果显著,肥料N、P、K配比对桉树Mg的吸收影响不大。

陈家平等[63]以尾巨桉DH32-29为研究对象,采用华沃特(氮磷钾 $\geq 30\%$ (15-6-9)有机质+微量元素 $\geq 10\%$)、正桉(氮磷钾 $\geq 30\%$ (15-6-9),有机质(腐殖酸、氨基酸+Mg+Ca+Cu+B+Zn) $\geq 10\%$)、桉宝(氮磷钾 $\geq 30\%$ (15-5-10),含中氯,有机质+微量元素 $\geq 20\%$)、林化公司(氮磷钾 $\geq 40\%$ (18-9-13))、绿拓肥(壮打1号药肥,相当于桉树专用肥的40%,药剂为噻虫嗪的0.12%)、桉胜丰(氮磷钾 $\geq 30\%$ (17-5-8),15%有机质,20%中微量元素)6种不同桉树专用肥料对尾巨桉进行追肥对比试验,探讨不同桉树专用肥料追肥对桉树高生长的影响。在第一次追肥前树高基本一致,在树龄1.0a之前,施加正桉促进树高生长的效果最佳,施加桉宝的性价比最高;在树龄1.0~1.3a时,施加华沃特促进树高生长的效果最明显且性价比最高。可见,不同种类的桉树专用肥对促进桉树树高生长量的影响不同,不同生长时期的桉树施加同一种肥料其效果也不一样。

刘长峰等[64]研究螯合态微量元素桉树专用肥对桉树的促生效果,设4个处理,I中化螯合型桉树专用肥(含N10-P13-K7及硼与螯合态微量元素:锰、锌、铜、钼)、II爱高健桉树专用肥(含N12-P9-K9及硼与螯合态微量元素:锰、锌、铜、钼)、III钙美磷肥(12%)、空白(不施肥),结果表明,螯合态微量元素桉树专用肥对桉树有明显的促生作用,1.5年生林分的平均胸径,肥I、肥II、肥III分别比对照大43.7%、39.6%、1.2%。

邓彩珍等[65]对华沃特、力源宝和富利桉 3 种桉树专用肥的成分进行检测分析。结果表明, 在 3 种专用肥中, 氮、磷、钾、铜、锌、硼和总养分的含量以华沃特为佳, 其次是力源宝和富利桉。项学武等[66]、唐春红等[67]、廖敏佳[68]开展不同专用肥对桉树生长效应的研究, 结果表明幼林阶段需要含氮较高的专用肥, 中龄林需要含磷、钾较高的专用肥。

综上所述, 桉树专用肥因其养分种类不同、有效养分含量不同、配比不同、形态不同, 对桉树生长的影响也不同。总体来说, 各种桉树专用肥均含有 N、P、K 等大量元素和 Cu、Zn、B 等微量元素, 另加一定量的有机质。目前, 在市场上桉树专用肥种类繁多, 形态各异, 开展桉树专用肥应用对比试验较多, 效果各异。各种专用肥料各有特点, 适用不同地类和林木不同生长阶段。

2.3.10. 肥料形态对桉树的生长效应

肥料形态主要有固态和液态两种, 固态又可分为粉状、颗粒状。肥料形态不同, 施放后在林地土壤中的持续时间不同、被植物根系吸收难易程度不同, 将对桉树生长产生不同效应。

黄彩枝[69] 2018~2021 年在广西派阳山林场开展液态肥和固态肥施肥试验。以 8 月龄的尾巨桉萌芽林为研究对象, 分别施用液态肥(垂青护林液态复合肥)和固态肥(桉树复合肥), 调查并测定施肥后尾巨桉萌芽林生长量, 比较两种施肥方式下尾巨桉萌芽林主要生长指标(树高、胸径和蓄积量)的差异。两种肥对尾巨桉萌芽林均表现随林龄增加而快速生长的特性。施用液态肥的萌芽林平均树高、胸径和单株材积等生长量均高于固态肥, 其中林龄 28 月萌芽林平均树高、胸径和单株材积分别为 14.8 m、9.4 cm 和 0.0526 m³/株, 比施用固态肥(14.2 m、8.8 cm 和 0.0445 m³/株)提高 4.23%、6.82%和 18.20%。液态肥 3a 投入成本为 14017.5 元/hm², 比固态肥(18283.5 元/hm²)减少 4266.0 元/hm²。与固态肥相比, 施用液态肥投入成本更低, 且更能促进尾巨桉萌芽林的生长。

潘玉华[70]在广西七坡林场的试验表明, 新型有机水溶肥、华沃特桉树专用肥(颗粒)、袋控缓释肥等 3 种肥料的施用效果有明显差异。结果表明, 在等量有效成分条件下, 平均树高和平均胸径生长率均为新型有机水溶肥 > 华沃特桉树专用肥(颗粒) > 袋控缓释肥(表 18)。

Table 18. Effects of different fertilizer forms on the growth of *Eucalyptus* (2021)
表 18. 不同形态肥料对桉树生长量的影响(2021)

序号 No.	肥料 forms (形态)	类别 category	施肥前 Before fertilization (0.7a)	施肥前 Before fertilization (1.2a)	施肥后 after fertilization (1.7a)	增长值 Addition	增长率 addition rate (%)
1	新型有机水溶 肥	树高(m)	4.88	7.03	10.92	3.89	55.33
		胸径(cm)		5.85	7.93	2.08	35.56
2	华沃特桉树专 用肥(颗粒)	树高(m)	4.82	7.59	11.61	4.02	52.96
		胸径(cm)		5.9	7.73	1.83	31.02
3	袋控缓释肥 (颗粒)	树高(m)	4.76	7.65	11.69	4.04	52.81
		胸径(cm)		6.02	7.55	1.53	25.42

2.3.11. 新型肥料——腐植酸肥等对桉树的生长效应

莫钊志等[71] 2008 年开展活性肥(腐殖酸 ≥3%, 微量元素 Fe、B、Mn ≥6%、镧系元素、植物酶活性剂等)与桉树专用肥对比试验。结果表明, 活性肥可促进桉树幼林对营养元素的吸收利用, 提高施肥效果, 促进树高和材积生长。与单施 500 g 复混肥相比, 每株施放 30 g 活性肥 + 375 g 复混肥的单株材积比单施复混肥的提高 35.5%, 经济效益非常显著。

陆梅等[72][73]开展腐植酸专用肥施肥试验,结果表明:桉树腐植酸专用肥具有明显的促生效果并能促进林木对营养元素吸收,提高营养元素利用率,有效改善树体营养状况。与等价投入的常规化肥相比,施后 27 个月,林分地上生物量提高了 30.2%~81.1%,营养元素积累速率提高 4.2%~32.2%,营养元素利用效率提高 14%~27%。以 HA 专用肥每株 500 g + 微生物菌剂 10 g 做基肥,以 HA 专用肥 2 号每株 450 g 做追肥的效果最好。

赵毅辉[74]、钱国钦[75]等研究腐殖质酸肥对桉树生长效应,结果与莫钊志、陆梅的基本一致,表明腐殖酸肥不仅对桉树树高和胸径生长有明显的促进作用,而且对改良林地土壤有帮助。

宋贤冲等[76]以桉树新造林、一代萌芽更新林、二代萌芽更新林根际土壤微生物为研究对象,采用 Biolog 方法测定萌芽更新对桉树根际土壤微生物群落功能多样性的影响。结果表明:随着培养时间的延长,各样点土壤微生物利用碳源的能力呈上升趋势,土壤微生物碳源平均颜色变化率排序为一代萌芽林 > 二代萌芽林 > 新造林;一代、二代萌芽林和新造林根际土壤中微生物群落具有明显的分异,起分异作用的主要碳源分别为羧酸类物质、多聚物类和氨基酸类;不同萌芽代数根际土壤中被利用碳源的丰富度和多样性指数之间的差异不显著。

李超等[77]研究不同施肥措施对桉树人工林土壤细菌群落结构的影响,结果表明:高施肥量处理对土壤全氮、磷、钾含量未产生显著影响,但增加土壤速效氮、有效磷、速效钾含量;不同施肥处理间土壤细菌群落多样性及丰富度均产生显著差异,施肥处理显著增加土壤细菌丰富度而降低细菌多样性指数。

陈祖静等[78]研究施肥对桉树人工林土壤真菌群落的影响,结果表明,桉树土壤真菌群落主要由担子菌门和子囊菌门主导,短期施肥显著改变桉树人工林土壤真菌群落结构和功能类群,增加共生真菌比例,改善土壤质量。

综上所述,腐植酸肥、碳肥、微生物菌肥等新型肥料对桉树生长有明显的促进作用。这不仅直接给桉树供肥,而且有效改良土壤,促进桉树对土壤养分的利用。

2.3.12. 施肥对桉树材性的影响

罗建举等[79] 1998 年对 5 种施肥处理下 9 年生尾叶桉纸浆材主要化学成分含量进行测试结果表明:施肥处理对尾叶桉纤维素含量和木素含量没有显著影响,而对抽提物含量和戊聚糖含量有极显著影响;施肥处理会显著提高木材中冷水抽提物、热水抽提物、1% NaOH 抽提物和戊聚糖含量。施肥量愈大,木材中戊聚糖含量愈高。

张耀丽等[80] 2000 年对 5 种不同施肥试验林 6 年生尾叶桉纤维长度、宽度、长宽比、壁腔比及柔性系数的研究表明:施肥处理对尾叶桉木材纤维长度没有显著性影响;对纤维宽度的影响显著,有增大效应,但并非施肥量越多,纤维宽度越大。

潘彪等[81]对 5 种不同施肥处理 6.5 年生尾叶桉无性系单株材积、木片密度、纤维形态的研究结果表明:施肥处理显著加快尾叶桉生长速度;对木材密度影响甚微;对纤维长度没有显著的影响;使纤维宽度显著增加。并非施肥量越多,生长速度越快,纤维宽度越宽。

罗真付等[82]研究施肥处理对尾叶桉生长量和木材密度的影响。结果表明施肥对尾叶桉木材密度没有影响,与罗建举研究结果基本一致。

综上所述,施肥处理对尾叶桉纤维素含量、木素含量、木材纤维长度、木材密度没有明显的影响,对纤维宽度有影响。施肥量愈大,木材中戊聚糖含量愈高。

2.4. 配方施肥

2.4.1. 配方施肥对桉树生长的影响

配方施肥是根据作物需肥规律、土壤供肥能力和肥料效率提出的大量元素和微量元素的配比方案的

施肥技术。方法有：地力分级配比法、养分平衡定量法、地力差减法、养分丰缺指标法、田间试验比例法等。以土定产，以产定肥，因缺补肥。实施前，要有大量的关于作物需肥特性、土壤供肥能力、肥料效应等方面的信息数据；实施时要密切结合灌水、耕作、土壤改良及水土保持等高产优质的栽培技术措施。

曹继钊等[83] 2005 年在广西邕宁和田林开展桉树配方施肥试验。首先测定林地土壤供肥能力，然后根据桉树生长需肥规律，选择合适肥料种类，制订施肥方案并组织实验，检验配方施肥效果。结果表明，配方施肥单位面积蓄积量、年均生长量比对照高 2~3 倍多，效果十分显著(表 19、表 20、表 21)。

Table 19. Experimental site nutrient status
表 19. 试验地土壤养分状况

地点 sites	pH	有机质 organic matter (g/kg)	土壤养分含量 soil nutrient content (mg/kg)					
			碱解 N	速效 P	速效 K	有效铜	有效锌	有效硼
广西邕宁	4.15	3.51	18.9	0.2	14.4	0.35	0.70	0.02
广西田林	5.35	21.70	56.91	1.00	21.94	-	1.76	0.22

Table 20. Formula fertilization plan
表 20. 配方施肥方案

处理 treat	基肥 base (g)	追肥 topdressing (g)			
		第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年
1	600	500	500	750	-
2	500	500	500	500	-
3	对照	-	-	-	-

注：肥料来源：广西林科院桉树专用肥(含 NPK27-33%及 Cu、Zn、B 约 2%)。

Table 21. Growth performance of the experimental forest (4.5a)
表 21. 试验林生长表现(4.5a)

处理 treat	地点 sites	密度 density (株/hm ²)	树高 height (m)	胸径 DBH (cm)	材积 volume (m ³ /株)	蓄积 stock volume (m ³ /hm ²)	生长量 growth amount (m ³ /hm ² ·a)
I	广西邕宁	1395	21.8	15.1	0.1950	243.9	52.5
II	广西田林	1665	19.7	13.1	0.1326	182.25	39.6
III	对照	1395	11.9	10.7	0.0534	71.25	15.3

保存率：处理I：1250/1395 = 89.6%；处理II：1374/1665 = 82.5%；处理III：1334/1395 = 95.6%。

林清锦[14] 2016 年在福建九龙江流域漳州段采用尾巨桉 DH32-29 轻基质网袋苗开展配方施肥试验。结果表明，最优配方施肥方案：每穴施钙镁磷 500 g + 复合肥 250 g 作基肥，当年第 1 次追施尿素 25 g + 复合肥 25 g + ZnSO₄ 4 g + 硼砂 10 g，当年第 2 次追施尿素 120 g + NPK 复合肥 120 g，第 2 年追施复合肥 150 g + 尿素 150 g。该施肥模式下，桉树人工林生长最佳，2.5 年生林分树高、胸径、单株材积分别达 17.10 m、12.80 cm、0.138 m³。

王卡石[10] 2019~2021 年在广西派阳山林场开展桉树配方施肥试验。所得结果与曹继钊、林清锦的基本一致。

2.4.2. 施肥对土壤的影响

余雪标等[16]研究结果表明,在自然状态条件下,桉树第1代至第4代林生产力排序是:1代林 > 2代林 > 3代林 > 4代林,与1代林相比,2代林、3代林、4代林生产力水平分别下降20.0%、28.2%、46.1%。表明桉树多代连栽会引起地力下降。

查正早等[13]的研究结果表明在热带土壤种植桉树后,肥力呈下降趋势,植桉6~10年后,土壤有机质及全氮减少10%左右,全磷减少14.8%~20.9%、速效磷下降1/3;钾含量下降不明显,代换性Ca减少28.2%(表土层0~20 cm),桉树造林后引起土壤酸化。

邓富春等[84]对桉树人工林土壤肥力变化进行分析表明,造林4年后,林地土壤的有机质、全N、全P、全K、碱解N、有效P、速效K、交换性Ca、交换性Mg以及有效B、有效Cu、有效Zn等养分含量均比造林前有所下降,表明种植桉树对林地土壤有显著影响。为维持桉树产量需要对林地进行施肥。

徐凤翠等[85]研究表明,施用不同类型的肥料对桉树人工林地力有着极大的影响,与传统复合肥相比,增施有机复混肥和配方施肥能够降低土壤容重、提升土壤有机质含量,有利于维持地力。过量施用化肥会引起土壤板结,降低土壤肥力。

练金生等[86]测定广东肇庆1、3和5年生尾叶桉林地土壤理化性质的结果表明:随着林龄增长,土壤含水率下降,土壤容重增大,孔隙度减小;土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷和速效钾含量均表现为随林龄增加而下降。土壤综合肥力为:1a > 3a > 5a。

Hedwall等[87]指出,长时间大面积的人工林施氮会导致林地出现氮和磷共同限制,生产力降低;大量施氮会导致地表水富营养化和温室气体含量上升,污染环境。需要对施肥后林地土壤质量影响进行监测,控制施肥种类及施肥量。在监测土壤质量变化时,通常将土壤物理、化学及生物学性质指标结合起来进行分析,常用分析方法有可持续性指数法、灰色关联度法、TOPSIS分析法和主成分分析法等。目前,我国对桉树施肥后土壤变化情况研究较少。

张国彪等[88]研究桉树人工林施肥肥效影响因素,主要包括土壤、肥料、植物三大因子,肥料本身的释肥规律、桉树对养分的吸收规律以及林地土壤的保肥释肥能力都会直接影响到肥效高低。应当深入开展桉树林土壤、肥料和植物的养分释放及需求的相关协同机理研究,以此基础进一步开展桉树人工林配方施肥;同时加强长效缓释肥、桉树林专用多功能肥等新型肥料的研究、肥效试验等,进一步降低桉树施肥成本,提升肥效。

刘宏宇等[89]开展桉树测土配方施肥系统的设计,认为施肥对桉树和环境都有影响,应当按照系统设计原理,采用养分平衡法和平衡施肥法计算施肥量,做到诊断科学,精准施肥,减少施肥对环境的影响。

配方施肥是当前桉树施肥的主要做法。配方施肥既可提高施肥的针对性,又可维护或改良土壤环境,具有重要的现实意义。目前有许多单位声称正在实施配方施肥,从严格意义上讲,都不是真正的配方施肥。因为他们没有严格按照配方施肥的程序和要求开展林地土壤养分测定,没有充分考虑种植桉树品种的营养特性以及林分的培育目标,所确定的施肥量并没有经过科学论证,同时,没有考虑施肥对林地土壤以及环境的影响。因此,施肥前没有土壤因子及环境测定数据,施肥后也没有进行土壤及环境因子监测。这离真正的配方施肥还很远,更谈不上精准施肥。

3. 主要的存在问题

3.1. 施肥理念落后,施肥乱象严重

目前,我国桉树施肥理念仍然比较落后。只注重桉树种植,不重视经营管理;只重视桉树当前产量,不重视林地可持续经营,见肥就施、有肥乱施现象还比较严重;没有根据林地土壤养分情况以及桉树生长实际需要进行施肥,有些地方施肥量严重不足,有些地方施肥量严重过多;有些地方连续多年施用同

一种肥料。有些地方及经营户为了省钱,连年施用生产工艺粗糙、肥效持久性差、释放速度快的无机复合肥料,有机成分含量极低,结果造成林地土壤板结,地力下降,桉树产量一代不如一代,如要保持 20 多年前的单位面积生长量只能不断增加单位面积施肥量(单株施肥量)或增加施肥年限。例如,有些营林单位 1990 年代,单株施肥量为 30~50 g,只施 1~2 年施肥效果就十分明显,到了 2020 年单株施肥量已经上升到 750~1000 g,而且施肥年限上升到 4 年。过度施肥不仅没有达成预期的产量目标,造成投资浪费,而且还造成肥害,使土壤板结,降低土壤养分利用率,污染环境;同时,破坏土壤微生物生态平衡,给青枯病、枝枯病、根腐病等病菌大量繁殖创造了机会,从而引发桉树病害大流行。

3.2. 基础研究滞后,创新能力不足

林地土壤养分管理研究不够深入。养分管理单元区可划分为省、市、县、乡镇、村等 5 级,从林业经营管理精细化角度来考虑,可划分为林场、林站、林班、小班等 4 级。不同管理层面有不同要求,在生产上是越细越好。目前林地土壤养分管理单元区多以县级为基本单元,显得比较粗放。当前,桉树施肥已从传统的粗放施肥进入到配方施肥的精准阶段,精准施肥在施肥前需要测定林地土壤养分,但是,大多数营林单位及业主都没有做项工作,而是凭经验推断林地土壤养分及含量,并据此制订施肥方案。有些单位将 20 世纪 80~90 年代全国土壤普查数据代替实际造林地土壤养分数据。当时土壤普查是以县级行政区为单元进行区划的,由于县级行政区面积较大,林地类型多种多样,林地土壤养分及其含量千差万别,因此,现在用过去普查数据作为制订配方施肥方案的重要依据显然不妥,这不符合配方施肥的要求,没有达到精准施肥的标准。

桉树养分需求研究不够系统。桉树种类繁多,每种桉树都有独特的生长特性和养分需求特点。桉树种类不同对养分需求不同。桉树生长阶段不同对养分需求不同。目前,只研究了雷林 1 号桉、赤桉和尾叶桉三种桉树幼苗期和幼林期的生长特性及养分需求,对其它常栽桉树品种以及中龄林、近熟林的生长特性及养分需求几乎没有研究。例如,对常栽品种——尾叶桉、巨桉、尾巨桉等生产 1 立方米木材需要多少 N、P、K、Ca 以及 B、Zn、Cu 等是不清楚的。

桉树营养诊断技术创新不足,施肥方案缺乏理论依据。当前,桉树营养诊断一般是根据叶片颜色和养分含量进行判断,还受时间限定。生产上需要更加便捷的诊断技术。当前市场上桉树专用肥总养分多为 30%~35%,其中 N 15%~17%、 P_2O_5 6%~8%、 K_2O 8%~10%,施用量约为 500~600 g/株。这些配方多为经验配方,缺乏理论依据,平衡施肥和测土配方施肥体系尚未建立。在生产上没有按照配方施肥要求,开展林地土壤和树木营养养分测定就制订了施肥方案。施肥之后,也没有开展林地土壤养分变化监测与评价。

3.3. 肥料品种单一,施肥效益不高

目前生产上大规模使用的肥料以 NPK 30%~40%+ 微量元素 2%的无机肥为主,肥料形态多以固态颗粒肥为主,有机无机混合肥、碳素肥、微生物菌肥等其它肥料品种较少,很难满足多种土壤类型的需求。桉树种植区涉及到华南各省区以及云南、四川、福建、江西等省市。这些区域林地土壤养分及其含量千变万化,对肥料需求多种多样,目前仅有的几种肥料难以满足生产需要。当下桉树种植户施肥效益重点考虑如何获得最大的桉树生长量,即经济效益,对如何培肥林地实现可持续经营考虑甚少。

3.4. 施肥方式陈旧,施肥效率较低

当前施肥方式仍然以传统的人工开沟埋肥的方式为主,这种方式效率低,在人工成本不断推高的背景下,已经显得落后。人工撒肥、机械施肥、无人机施肥、直升机施肥等几乎空白或占比很少。肥药一起

施用的成功案例也比较少。

4. 发展方向

4.1. 科学施肥将成为桉树施肥的主流意识

随着林业高质量发展理念不断深入人心,人们将更新传统施肥观念,强化现代科学施肥意识。盲目施肥以及随意施肥将被完全抛弃,从而树立按需施肥、定产施肥、定效施肥的新意识。即根据桉树生长需要、预定目标产量、预计目标经济效益进行施肥,而不是拍脑袋随意想施什么就施什么,想施多少就施多少,想怎么施就怎么施,基本不考虑生态效益和可持续经营。随着林业可持续发展的不断推进,各地、各林业经营单位将按照精准施肥的要求,系统总结历年施肥成功经验和做法,采用大数据、人工智能等手段确定施肥种类、施肥量以及施肥方式,制订本区域或本单位桉树施肥技术规范(规程),逐步实现桉树施肥的科学化、规范化、标准化。

4.2. 精准施肥将成为桉树施肥的基本要求

精准施肥是桉树施肥的重要目标,配方施肥是精准施肥的重要手段。根据桉树造林地类型以及土壤养分状况、桉树不同生长阶段对养分需求状况,科学合理地制订精准施肥方案,做到桉树什么时间需肥就什么时间施肥,需要什么肥就施什么肥,需要多少就施多少。要做到这一点,需要科学合理地区划桉树种植区林地土壤养分基本单元并深入研究其土壤特性、测定其养分含量,以经营小班为基本单元测定林地土壤养分比较科学合理实用,并按照森林经营方案的要求建立林地主要养分动态变化数据库,全面掌握各林地土壤养分及其变化情况,为桉树人工林精准施肥奠定基础。同时,需要对各个常栽桉树品种及其无性系的生长特性以及营养需求进行全面深入的研究,为制订科学合理的经济实用的精准施肥方案提供依据。此外,桉树营养诊断技术将得到快速提升,取样将不受桉树年龄及生长季节的限制,诊断速度和准确率将进一步提升。配方施肥方案将进一步精准细化。

4.3. 人工智能化施肥将成为桉树施肥的主要方向

随着人工智能技术向林业的渗透,桉树施肥方式必将从传统的人工施肥向智能化施肥方向发展。当前,桉树施肥仍然以人工和半机械化方式为主。随着林业产业现代化建设进程不断加快,桉树种植业的机械化、信息化、智能化水平将不断提升。今后桉树施肥方式将广泛应用大数据、3S技术(GIS和GPS、RS)、无人机和直升机技术以及计算机模拟技术等,并将这些技术进行集成,形成人工智能施肥技术,精准施肥与精准防病治虫有机结合,实现桉树施肥从单一技术向综合技术的完全蜕变。这不仅极大提升施肥效率,而且将极大提升施肥的有效性、精准度,有效降低桉树资源培育的投资成本。

4.4. 林地可持续利用将是桉树施肥的鲜明底色

林地是桉树赖以生存和发展的物质基础,桉树可持续经营必须以林地可持续经营为依托。2020年以前,桉树施肥重点考虑对桉树生长的影响。今后,桉树施肥要考虑对桉树及林地土壤、生物等环境因子的影响,实现林地越种越肥,林地可持续经营。有机肥、无机肥、有机无机混合肥将得到广泛关注和应用,同时,生物菌肥、腐殖酸肥、碳素肥等将受到高度关注和应用。此外,其它有益于林地改良的肥料种类及类型将大受欢迎。桉树人工林地间种或套种经济作物、主伐后采伐剩余物回归林地等有助于维持地力的经营措施也将得到广泛应用。

致 谢

对广西生态工程职业技术学院冯立新教授和苏付保教授的帮助表示感谢!

基金项目

广西自筹经费林业科技项目, 合同编号分别为: 2023GXZCLK17, 2023GXZCLK39, 2024GXZLK53, 2023GXZCLK28, 桂林科研[2022ZC]第 32 号。

参考文献

- [1] 任中秀, 包雪梅, 于家宜, 等. 我国桉树人工林施肥现状、存在问题及对策[J]. 桉树科技, 2013, 30(4): 52-59.
- [2] 刘月秀, 陈水莲, 俞元春. 桉树人工林营养特性与施肥技术研究进展[J]. 林业科技开发, 2009, 23(4): 13-16.
- [3] 陈竣, 李贻铨, 杨承栋. 中国林木施肥与营养诊断研究现状[J]. 世界林业研究, 1998(3): 59-66.
- [4] 姚姜铭, 吴敏坤, 王凌晖. 林木施肥与桉树短轮伐期用材林施肥研究进展[J]. 广西林业科学, 2013, 42(3): 259-262.
- [5] 陈凯, 刘奎, 杨梅. 桉树人工林施肥技术研究进展[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(6): 26-28.
- [6] 胡建文, 王庆成, 马双娇. 人工林精准施肥研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(4): 37-42.
- [7] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [8] 苏英吾, 李向阳. 华南土壤肥力与桉树施肥[J]. 中南林业调查规划, 1997, 16(3): 35-38.
- [9] 马涪, 谷宜园, 奚国强, 等. 广西桉树林地土壤养分状况与施肥研究[J]. 土壤与肥料, 2005(2): 53-54.
- [10] 王卡石. 桉树人工林土壤养分与配方施肥效果研究[J]. 绿色科技, 2022, 24(11): 55-58.
- [11] 陈少雄. 桉树人工林土壤养分与施肥研究[J]. 桉树科技, 2009, 26(1): 52-63.
- [12] 钟继洪, 李淑仪, 蓝佩玲, 等. 雷州半岛桉树人工林土壤肥力特征及其成因[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 44-48.
- [13] 茶正早, 黎仕聪, 林钊沐, 等. 海南岛桉林土壤肥力的研究[J]. 热带作物学报, 1999, 20(2): 37-43.
- [14] 林清锦. 闽南桉树人工林土壤养分现状与配方施肥效果[J]. 福建林业科技, 2020, 47(1): 22-25, 30.
- [15] 李宝福, 苏金德, 黄瓶, 等. 影响闽南山地巨尾桉生长的土壤因子研究[J]. 福建林业科技, 1999, 26(4): 32-36.
- [16] 余雪标, 白先权, 徐大平, 等. 不同连栽代次桉树人工林的养分循环[J]. 热带作物学报, 1999, 20(3): 60-66.
- [17] 华元刚, 茶正早, 林钊沐, 等. 海南岛桉树人工林营养与施肥[J]. 热带林业, 2005, 33(1): 35-38.
- [18] 黄益宗, 冯宗炜, 李志先, 等. 尾叶桉叶片氮磷钾钙镁硼元素营养诊断指标[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1254-1259.
- [19] 李贻铨. 林木施肥与营养诊断[J]. 林业科学, 1991, 27(4): 435-442.
- [20] 周文龙, 杨曾奖. 桉树施肥及营养诊断中的几个问题[J]. 广东林业科技, 1994(4): 5-10.
- [21] 李淑仪, 林书蓉, 廖观荣, 等. 桉树营养状况与叶片营养诊断研究[J]. 林业科学, 1996, 32(6): 481-490.
- [22] 李淑仪, 林书蓉, 廖观荣, 等. 雷林 1 号桉叶片营养诊断研究[J]. 林业科学研究, 1997, 10(1): 13-18.
- [23] 李尚弟, 叶淡元, 吴泽鹏, 等. 林木相关值法营养诊断及施肥技术研究[J]. 广东林业科技, 1999, 15(3): 16-22.
- [24] 曹继钊, 李富符, 主编. 广西林木营养与施肥技术[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2009.
- [25] 黄宗玉. 诊断施肥综合法(DIRS)的原理和应用问题[J]. 土壤学进展, 1990, 18(1): 22-26.
- [26] 李金凤, 姜娟, 赵斌, 等. 关于平衡施肥中土壤供肥性能的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 351-355.
- [27] 杨曾奖, 郑海水, 翁启杰, 等. 刚果 12 号桉施肥效应研究[J]. 广东林业科技, 1997, 13(3): 14-18.
- [28] 林书蓉, 李淑仪, 廖观荣. 短轮伐桉树人工林科学施肥的研究[J]. 林业科学研究, 1999, 12(3): 56-63.
- [29] 柏方敏, 陈晓萍, 何友军, 等. 桉树幼林施肥肥效的研究[J]. 中南林业调查规划, 2004, 23(3): 55-56.
- [30] 李宝福. 不同肥料等养分量施肥对桉树生长的影响[J]. 河北林果研究, 2001, 16(3): 219-225.
- [31] 王洪峰, 曾令海, 祁述雄, 等. 桉树专用肥促生效果研究[J]. 广东林业科技, 2000, 16(2): 16-21.
- [32] 杨晓慧, 廖焕琴, 刘德浩, 等. 不同有机肥对尾叶桉生长的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(1): 21-25.
- [33] 曹继钊, 陈海军, 张家昌, 等. 桉树新型肥料品种肥效试验初探[J]. 广西林业科学, 2011, 40(1): 22-25.
- [34] 杨盛军, 李昌荣, 郭东强, 等. 广林巨尾桉 5 号无性系配方肥选择[J]. 广西林业科学, 2018, 47(1): 80-84.
- [35] 文亮, 阮荣富. 不同施肥处理对桉树生长的影响[J]. 四川林业科技, 2016, 37(6): 80-81, 85.

- [36] 李宝福. 桉树速丰林鸡粪施用效应分析[J]. 山地农业生物学报, 2006, 15(6): 484-488.
- [37] 刘学锋, 李慧, 朱林生, 等. 不同肥料类型对尾巨桉幼林生物量分配及养分利用率的影响[J]. 桉树科技, 2017, 34(4): 21-26.
- [38] 姚姜铭, 周建群, 刘新鸾, 等. 等养分量不同肥料施肥对桉树生长的影响[J]. 广西林业科学, 2014, 43(1): 80-83.
- [39] 谭长强, 周建群, 王凌晖, 等. 不同桉树复合肥基肥对比试验[J]. 林业科技开发, 2014, 28(1): 101-104.
- [40] 谭长强, 申文辉, 王凌晖, 等. 不同工艺桉树肥料基肥对一年生桉树生长的影响[J]. 北方园艺, 2015(16): 157-160.
- [41] 廖胜彪. 闽江下游山地巨桉无性系施肥试验研究[J]. 福建林业科技, 2005, 32(3): 100-104.
- [42] 何国华, 李慧, 彭仕尧, 等. 3 种肥料处理对尾细桉生长的影响研究[J]. 桉树科技, 2014, 31(1): 1-6.
- [43] 吴建平, 吴天乐, 姚敏. 幼林桉树施肥效应研究[J]. 湖南农业科学, 2006(2): 92-94.
- [44] 曹继钊, 韦颖文, 黄开勇, 等. “广林 9 号”无性系桉树速丰林配方施肥试验[J]. 西南林学院学报, 2006, 26(5): 53-56.
- [45] 李娜, 曹继钊, 唐黎明, 等. 不同施肥方式和施肥量对桉树生长量影响初探[J]. 广西林业科学, 2009, 38(2): 102-106.
- [46] 周巧青. 种植密度和施肥量对桉树幼苗生长的影响[J]. 现代园艺, 2023, 46(8): 16-18.
- [47] 颜民辉, 吴德提, 周全. 种植密度和施肥量对广西桉树幼苗生长的影响[J]. 南方农业, 2023, 17(5): 265-267.
- [48] 李宝福. 桉树人工林中期施肥试验研究[J]. 林业调查规划, 2010, 35(6): 124-129.
- [49] 陈源, 杨曾奖, 彭仕尧, 等. 钾肥追施对桉树生长及效益的影响[J]. 桉树科技, 2005, 22(2): 18-22.
- [50] 梁坤南, 周文龙. 尾叶桉无性系幼林施肥效应的研究[J]. 林业科学研究, 1999, 12(2): 20-24.
- [51] 陈少雄, 王观明, 项东云. 尾叶桉施肥效果研究[J]. 林业科学研究, 1996, 9(6): 16-21.
- [52] 何蓉, 曾芳群, 蒋云东, 等. 蓝桉幼林施肥效应研究[J]. 云南林业科技, 1997(3): 36-44.
- [53] 仲崇禄, 弓明钦, 陈羽, 等. 赤桉细叶桉和巨桉幼林施磷量的确定[J]. 林业科学研究, 2000, 13(4): 337-384.
- [54] 杨新国. 桉树短周期人工林施用基肥试验[J]. 林业科技开发, 2004, 18(6): 13-16.
- [55] 刘朝. 基肥的不同下放方法对雷林 1 号桉幼林期产生的效应[J]. 桉树科技, 1999(2): 43-46.
- [56] 韩锦光, 杨美云. 桉树不同施肥深度的效应试验[J]. 林业科技通讯, 1981(7): 15-16.
- [57] 吴庆全. 不同追肥方式对尾巨桉初期生长的影响[J]. 福建林业科技, 2013, 40(2): 86-88, 92.
- [58] 林丰焕. 不同施肥方式对速生巨尾桉生长效果的影响[J]. 防护林科技, 2022(1): 23-25.
- [59] 杨紫龙, 蒋军林, 陆湘云, 等. 不同施肥措施对桉树萌芽林生长的影响[J]. 林业实用技术, 2016(5): 18-21.
- [60] 零天旺, 颜培栋, 蒙成杰. 不同桉树专用肥对巨尾桉生长特性的影响及经济效益分析[J]. 桉树科技, 2023, 40(2): 73-79.
- [61] 谭长强, 覃世杰, 覃梅, 等. 不同桉树专用肥对尾巨桉 DH32-29 苗木生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 125-128.
- [62] 刘奎, 陆海燕, 赵毅辉, 等. 不同配比桉树专用肥对桉树生长及元素吸收的影响[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2018, 19(3): 389-394.
- [63] 陈家平, 杨福超, 揭育锋, 等. 不同桉树专用追肥对桉树树高生长量的影响探讨[J]. 绿色科技, 2021, 23(21): 99-101.
- [64] 刘长峰, 丁音琴. 螯合态微量元素桉树专用肥对桉树的促生效果[J]. 化学工程与装备, 2007(6): 51-54.
- [65] 邓彩珍, 安冰. 3 种桉树专用肥成分检测对比分析[J]. 现代农业科技, 2021(8): 165, 177.
- [66] 项学武, 吴柳月, 黄六帖. 不同桉树专用追肥对桉树生长的影响探讨[J]. 南方农业, 2017, 11(8): 48-49.
- [67] 唐春红, 吴朝学, 姚姜铭, 等. 不同桉树专用追肥对桉树生长的影响[J]. 南方农业学报, 2012, 43(8): 1154-1157.
- [68] 廖敏佳. 浅谈不同桉树专用追肥对桉树生长的影响[J]. 大科技, 2014(35): 216-217.
- [69] 黄彩枝, 万日崇, 李海星, 等. 两种施肥方式对尾巨桉萌芽林生长特性的影响[J]. 亚热带农业研究, 2021, 17(2): 98-102.
- [70] 潘玉华. 探索不同桉树专用追肥对桉树生长的影响[J]. 农业开发与装备, 2021(5): 231-232.
- [71] 莫钊志, 文彪, 周建群, 等. 活性肥促进桉树幼龄林肥效利用的研究[J]. 林业科技开发, 2008, 22(3): 51-53.

- [72] 陆梅. 邓恩桉林分施用腐植酸桉树专用肥的生产力研究[J]. 江苏林业科技, 2002, 33(6): 1-5.
- [73] 陆梅, 李宝福, 俞元春. 桉树施用腐植酸专用肥的营养效应及肥效的持续性分析[J]. 武夷科学, 2007, 23(1): 69-76.
- [74] 赵毅辉. 腐植酸肥料对尾巨桉苗木生长生理特性及养分含量的影响[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [75] 钱国钦. 桉树腐植酸(HA)专用肥区域试验与配方的优选[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(4): 15-23.
- [76] 宋贤冲, 杨中宁, 曹继钊, 等. 萌芽更新对桉树根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 桉树科技, 2014(3): 36-40.
- [77] 李超, 许宇星, 吴志华, 等. 不同施肥措施对桉树人工林土壤细菌群落结构及多样性的短期影响[J]. 桉树科技, 2020, 37(1): 10-17.
- [78] 陈祖静, 高尚坤, 陈园, 等. 短期施肥对桉树人工林土壤真菌群落结构及功能类群的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3813-3821.
- [79] 罗建举, 方文彬, 代秀珍, 等. 施肥处理对尾叶桉材性影响规律的研究[J]. 林业科学, 1998, 34(5): 96-102.
- [80] 张耀丽, 徐永吉, 徐柯, 等. 不同施肥处理对尾叶桉纤维形态的影响[J]. 南京林业大学学报, 2000, 24(1): 44-47.
- [81] 潘彪, 徐永吉, 李贻铨, 等. 施肥处理对尾叶桉无性系纸浆材生长和材性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(5): 11-14.
- [82] 罗真付, 徐永吉, 潘彪, 等. 施肥处理对尾叶桉生长量和木材密度的影响[J]. 南京林业大学学报, 1999, 23(5): 31-34.
- [83] 曹继钊, 农必昌, 唐黎明. 广西桉树人工林配方施肥技术应用示范效益研究与评价[J]. 广西林业科学, 2010, 39(3): 136-139.
- [84] 邓富春, 覃其云, 颜权, 等. 桉树人工林土壤肥力变化及其综合评价[J]. 广西林业科学, 2013, 42(2): 148-152.
- [85] 徐凤翠, 邓文相, 农建卫. 不同营林措施对广西红壤区桉树人工林地力维持的影响[J]. 绿色科技, 2020(19): 106-108.
- [86] 练金生, 高艳芳, 谢威, 等. 广东不同林龄桉树人工林土壤肥力比较研究[J]. 桉树科技, 2021, 38(1): 23-30.
- [87] Hedwall, P.O., Bergh, J. and Brunet, J. (2017) Phosphorus and Nitrogen Co-Limitation of Forest Ground Vegetation under Elevated Anthropogenic Nitrogen Deposition. *Oecologia*, **185**, 317-326.
<https://doi.org/10.1007/s00442-017-3945-x>
- [88] 张国彪, 梁文涛. 桉树人工林施肥肥效影响因素初探[J]. 广东化工, 2015, 42(3): 76, 80.
- [89] 刘宏宇, 龙永宁, 于新文, 等. 桉树测土配方施肥系统的设计与实现[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(S2): 47-50.