

雷州半岛短轮伐期桉树人工林施肥技术合理性分析*

梅嘉仪 莫晓勇

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要 根据短轮伐期桉树纸浆用材林不同林龄桉树 (*Eucalyptus*) 的树高、胸径、材积的生长特性, 以及不同林龄桉树纯林土壤化学性质的特点, 分析一个轮伐期内桉树纯林土壤养分变化, 结果表明中林集团雷州林业局有限公司现有的施肥技术不尽合理, 造林后第 2 年氮素缺乏, 第 4 年磷、钾素不足, 第 5 年氮、钾素含量偏低, 而第 3 年土壤基本元素含量相对偏高, 因此以维持林地当前土壤肥力水平为目的, 对林场现行的施肥方案提出了相应的调整建议, 可有针对性地补充该生长阶段所缺乏的元素。

关键词 桉树; 施肥; 合理性

中图分类号: S147.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2018) 05-0065-06

Rationality Analysis of Fertilization Techniques for Short-rotation *Eucalyptus* Plantation in Leizhou Peninsula

MEI Jiayi MO Xiaoyong

(College of Forestry and Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract According to the characteristics of the tree height, diameter at breast height and volume growth, as well as soil chemical properties of different age-old eucalyptus trees in short-rotation *Eucalyptus* pulp forest, it was found that existing fertilization technology of China Forestry Group Leizhou Forestry Bureau Co., Ltd. was not reasonable according to the changes of soil nutrients in the *Eucalyptus* forests during a rotation period, nitrogen deficiency in the second year, phosphorus and potassium deficiency in the fourth year, nitrogen and potassium content in the fifth year were low, and the basic elemental content of soil in the third year was relatively high. Therefore, in order to maintain the current soil fertility of the forest land, we put forward some suggestions for adjusting the current fertilization plan. Fertilization should be targeted to supplement the elements lacking in this stage of growth.

Key words *Eucalyptus*; fertilization; rationality

中林集团雷州林业局有限公司是我国最大的桉树用材林基地之一, 主要经营桉树工业用材林, 多为短轮伐期桉树纸浆用材林。自建场以来, 通过采取良种化、规模化、机械化、集约化等速生丰产措施, 桉树纸浆用材林的轮伐期已下降至 5 年。但由于雷州半岛土壤为贫瘠的砖红壤, 土壤

肥力低下, 土壤本身无法满足桉树所需的养分供应量, 因此提供科学的施肥管理是丰产的关键, 也是实现桉树人工林可持续经营的必要手段。近年来, 中林集团雷州林业局有限公司在广东省生态环境与土壤研究所、中国林业科学研究院热带林业研究所、华南农业大学等科研院所指导下,

* 基金项目: “十三五” 国家重点研发计划项目 (2016YFD0600500)。

第一作者: 梅嘉仪 (1993—), 女, 研究生, 主要从事森林经理学研究, E-mail: 464443588@qq.com。

通信作者: 莫晓勇 (1962—), 男, 教授, 主要从事森林经理学和森林培育学研究, E-mail: motree@163.com。

应用平衡施肥理论，研制出雷林复合肥 1 号、2 号专用肥，以及微量元素肥^[1]。同时，已有不少学者针对雷州半岛地区桉树工业用材林土壤类型、桉树品种以及施肥后的增益进行了系列研究，提出了科学的施肥建议，但未有针对桉树在不同林龄的养分需求进行的研究^[2-5]。目前，中林集团雷州林业局有限公司下属林场的施肥管理并未精细化，本研究在现行施肥措施下研究一个轮伐期内桉树林土壤养分变化，为不同林龄桉树林定向施肥提出合理的建议。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本试验地位于中林集团雷州林业局有限公司纪家林场（20°18′~21°30′N，109°39′~110°38′E），属热带湿润季风气候区。年平均气温 23.5℃，年降雨量为 1 855 mm，干湿季节明显，5—9 月份为雨季，11 月份至次年 4 月份为旱季。热带风暴频繁，6-10 月为台风季节。土壤类型为玄武岩发育而成的砖红壤，土层厚 60~80 cm，热带土壤特征明显，风化强烈。

1.2 经营措施

中林集团雷州林业局有限公司下属林场的短轮伐期桉树人工林经营均遵照经营技术规程进行，具体措施为：整地以深松开沟为主，沟深达 40 cm 以上；人工穴规格 50 cm×50 cm×40 cm，外沿

略高于内侧，防止水土流失。造林时施基肥，基肥用雷林 1 号复合肥，每公顷用量 750 kg，氮磷钾比：13-5-8；造林后连续 3 年每年（即树龄为 12 个月、24 个月和 36 个月时）抚育、追肥一次，抚育与整地相似，行间开沟，同时将土覆盖到树木基部；追肥用雷林 2 号复合肥，每公顷用量 750 kg，氮磷钾比：15-5-11。

1.3 样地设置

广东省生态环境与土壤研究所于 1999 年 11 月至 2000 年 1 月对中林集团雷州林业局有限公司桉树人工林土壤进行普查并对各林场的经营小班划分了土壤肥力等级，纪家林场各等级土壤养分含量范围及其面积占比见表 1。

本试验样地调查时间为 2017 年 3 月初，天气少雨干旱，桉树生长缓慢。在用于生产的尾巨桉（*Eucalyptus urophylla*×*E.grandis*）无性系 DH32-29 植苗林中，以相同土壤等级为基础选取面积 1 hm² 及以上，造林后近 1 至 5 年林分（造林时间为 4、5 月份）以及采伐迹地共 6 个小班，代表一个经营周期。在调查时由于采伐迹地只有一个小班，因此采伐迹地的土壤等级与其它样地不同，但采伐迹地无需施肥，故并不影响本文对施肥合理性的分析。在选定的小班内分别设置 3 个 20 m×20 m 的重复样地，各重复样地间距大于 20 m 且离林缘 10 m 以上，尽量对角线排布。样地基本信息见表 2。

表 1 各等级土壤养分含量范围及其面积占比
Tab.1 Soil nutrient content range and area ratio of each grade

指标 Index	1 级 Level 1	2 级 Level 2	3 级 Level 3	4 级 Level 4	5 级 Level 5
pH	4.08~7.28	3.86~5.43	3.88~5.57	3.79~5.42	3.69~6.27
SOM (g·kg ⁻¹)	15.57~46.12	12.50~35.00	8.60~27.80	7.80~18.24	1.44~9.98
TN (g·kg ⁻¹)	0.73~2.54	0.60~1.28	0.45~1.21	0.28~0.70	0.12~0.62
TP (g·kg ⁻¹)	0.11~0.91	0.08~0.76	0.04~0.79	0.03~0.46	0.02~0.45
TK (g·kg ⁻¹)	0.46~9.76	0.50~20.20	0.46~21.35	0.41~7.65	0.13~9.44
AN (mg·kg ⁻¹)	66.01~231.00	47.85~143.39	21.61~110.27	12.71~92.48	6.73~126.42
AP (mg·kg ⁻¹)	0.27~25.99	0.19~84.75	痕量 Trace~5.95	0.13~28.50	0.18~24.57
AK (mg·kg ⁻¹)	18.83~195.00	11.70~135.00	1.52~61.97	1.65~31.50	0.51~43.87
肥力水平 Fertility level	肥力较高 High fertility	肥力中等 Medium fertility	肥力较低 Low fertility	肥力缺乏 Lack of fertility	肥力极缺乏 Extremely lack of fertility
面积占比 /% Area ratio	1.75	2.10	<0.50	37.01	59.14

表 2 样地基本信息
Tab.2 Information of sample plots

样地编号 Sample	小班号 Sublot	林龄 / 年 Age/a	平均胸径 /cm Average DBH	平均树高 /m Average height	平均单株材积 /m ³ Average individual tree volume	坡度坡向 Slope and aspect	海拔 /m Altitude	土壤等级 Soil grade
E1	3002	1	4.0	4.4	0.003 279		25	5
E2	1010	2	7.0	8.8	0.016 013		30	5
E3	4004-1	3	8.0	11.3	0.028 782		34	5
E4	2024-1	4	11.7	13.1	0.066 339	无坡 No slope	33	5
E5	1035	5	13.5	15.0	0.100 630		19	5
CJ	2048	采伐 harvested					37	4

注：E1~E5 分别对应造林后 1 至 5 年桉树纯林样地，CJ 代表采伐迹地的方式，采伐前桉树林龄为 7 年，采伐后进行了伐根挖除。桉树单株材积使用公式 $V=0.0000628767H^{0.96436}D^{1.82162}$ 计算。

Note: E1~E5 correspond to the *Eucalyptus* pure forest plots 1 to 5 years after afforestation, and CJ represents the cutting plots. The age of the *Eucalyptus* forest was 7 years before harvesting, and the cutting roots were excavated after harvesting. *Eucalyptus* single volume is calculated using formula $V=0.0000628767H^{0.96436}D^{1.82162}$.

1.4 样地调查与样品采集

对样地内桉树进行每木调查，调查指标包括树高和胸径。在重复样地中按四角一心的方法设 5 个采样点（每个样地共 15 个采样点），采集土壤表层（深度为 0~20 cm）的土壤，混匀后用四分法保留 500 g 左右装入密封袋带回实验室风干待测。

1.5 内业处理

1.5.1 测定方法 土壤化学性质均按照国家标准测定^[7-14]，pH 值（水提）用电位法测定；有机质（SOM）采用重铬酸氧化—外加加热法测定；全氮（TN）采用半微量开氏法测定；全磷（TP）采用硫酸—高氯酸消煮，铝锑抗比色法测定；全钾（TK）采用氢氟酸—高氯酸消煮，火焰光度计法测定；碱解氮（AN）采用碱解扩散法测定；速效磷（AP）采用 HCl—Cl 浸提，钼锑抗比色法测定；速效钾（AK）采用乙酸铵浸提，火焰光度计法测定。

1.5.2 分析方法 使用 Excel 2010 对样地调查数据及单株材积、年生长量进行平均值计算并作折线图；使用 Excel 2010 对土壤化学性质数据作初步处理，并使用 SPSS 22.0 对初步处理数据进行单因素邓肯方差分析，数据的描述采用平均值 ± 标准误差，表格中同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 林分生长状况

根据样地调查所得胸径、树高数据以及计算

得到的单株材积数据绘图表示造林后 1~5 a 桉树生长过程（图 1）以及桉树连年生长量变化（图 2）。桉树的胸径和树高基本呈直线增长，平均单株材积的曲线类似 J 型。造林后第 1 年桉树胸径和树高年生长量均较大，第 2 年为树高生长速率的最高峰，胸径生长速率在第 2 年开始下降，在第 3 年出现最低值，第 4 年胸径年生长量明显增加，同时树高年生长量达到最低，第 5 年稍有升高，但基本趋于平缓。材积年生长量在后三年与胸径年生长量变化较一致，这是因为材积公式中胸径变量对材积的影响较大。

尾巨桉无性系 DH32-29 具有较强的早期速生性，已有研究表明尾巨桉树高和胸径生长最为迅速的时期在前 3 年，树高和胸径连年生长量最大值出现在 1.5 年或第 2 年左右^[15-16]。

2.2 土壤养分变化分析

对样地的土壤化学性质进行方差分析（表 3），结果表明不同样地间土壤 pH 值、全磷没有显著差异；有机质、全氮、碱解氮指标在不同样地间的差异十分相似，均以 E2 最低，且 CJ 显著高于其他样地 ($P<0.05$)；E3 的速效磷、全钾和速效钾指标显著高于其他年份样地。比较 E1~E5 样地，除全钾外，E3 的其余土壤养分均高于其他年份；与 E1~E5 均值比较，E1 各指标比较接近均值。从林龄来看，有机质和氮素含量变化随林龄呈现先降后升再降，低谷和高峰分别在造林后第 2 年和第 3 年；磷素含量变化随林龄呈先升后降再升，高峰

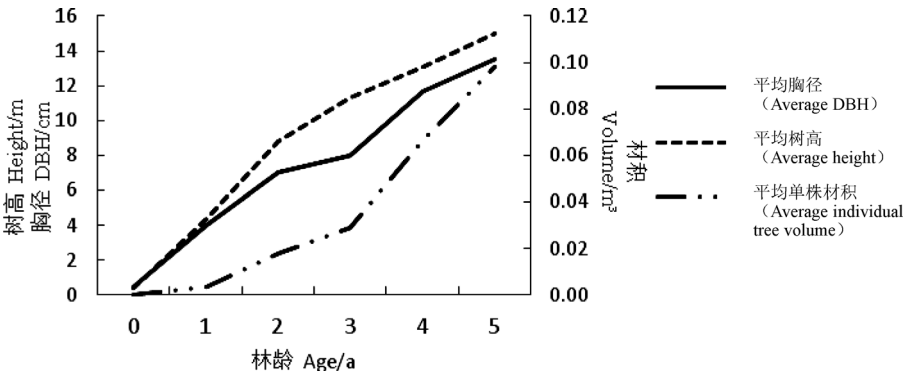


图 1 造林后第 1 至 5 年桉树生长过程
Fig.1 *Eucalyptus* growth process from 1 to 5 years after afforestation

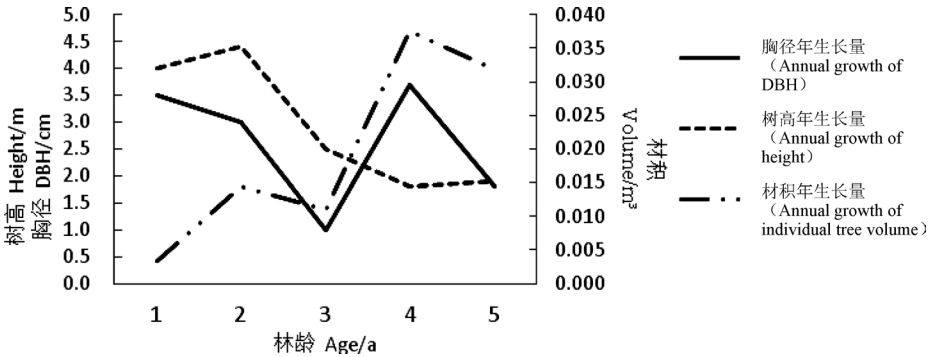


图 2 桉树连年生长量变化
Fig.2 *Eucalyptus* annual growth

和低谷分别位于造林后第 3 年和第 4 年；钾素含量变化随林龄呈先升后降，与磷素含量的变化相似，高峰仍出现在造林后第 3 年。

对照表 1，本研究所测大部分样地（除 E2）的有机质含量已超出纪家林场第 5 等级土壤养分含量范围，在第 4 等级范围内，说明样地有机质

含量较 1999 年有所提高；全氮、全磷以及速效氮磷钾的含量在 4、5 等级范围内，但全钾含量较低，除 E3 外其余样地含量均不及第 4 等级的范围，说明所测样地的全钾依然极为缺乏。对比廖观荣等^[17]1999 年雷州半岛土壤调查中 40 个玄武岩砖红壤土壤养分分析结果的平均值，本研究桉

表 3 样地土壤化学性质分析
Tab.3 Analysis of soil chemical properties

指标 Index	E1	E2	E3	E4	E5	CJ	E1~E5 均值 Mean
pH	4.58 ± 0.01 a	4.69 ± 0.05 a	4.57 ± 0.10 a	4.49 ± 0.05 a	4.70 ± 0.09 a	4.55 ± 0.09 a	4.61 ± 0.03
SOM (g · kg ⁻¹)	11.64 ± 0.64 ab	7.04 ± 0.62 c	13.91 ± 0.25 b	10.55 ± 1.77 a	9.60 ± 0.58 bc	17.50 ± 0.27 d	10.55 ± 0.70
TN (g · kg ⁻¹)	0.46 ± 0.03 ab	0.28 ± 0.03 c	0.52 ± 0.05 b	0.48 ± 0.05 ab	0.38 ± 0.03 ac	0.68 ± 0.04 d	0.42 ± 0.03
TP (g · kg ⁻¹)	0.11 ± 0.01 a	0.16 ± 0.04 a	0.19 ± 0.02 a	0.08 ± 0.01 a	0.21 ± 0.13 a	0.14 ± 0.01 a	0.15 ± 0.03
TK (g · kg ⁻¹)	0.20 ± 0.03 a	0.40 ± 0.10 a	0.68 ± 0.17 b	0.23 ± 0.04 a	0.22 ± 0.02 a	0.35 ± 0.04 a	0.35 ± 0.06
AN (mg · kg ⁻¹)	41.64 ± 0.94 abc	28.40 ± 4.64 a	57.18 ± 3.89 c	49.19 ± 4.55 bc	36.89 ± 1.49 ab	73.36 ± 9.93 d	46.93 ± 6.36
AP (mg · kg ⁻¹)	10.98 ± 0.44 ab	12.23 ± 0.44 ab	21.52 ± 2.45 c	8.28 ± 2.55 ab	14.21 ± 4.12 b	5.42 ± 0.38 a	13.48 ± 1.52
AK (mg · kg ⁻¹)	20.12 ± 2.36 ab	21.45 ± 3.93 ab	31.27 ± 7.43 b	17.54 ± 2.93 a	16.83 ± 2.66 a	20.22 ± 1.50 ab	21.44 ± 2.13

注：表中数据为平均值 ± 标准误差，同行不同字母表示差异显著 (P<0.05)
Note: The data in the table show as average ± standard error, different letters in the same row meant significant difference at 0.05 level.

树人工林土壤 pH 值较高，除速效磷含量外，其余养分指标值均有不同程度降低；40 个玄武岩砖红壤的土壤养分平均值显示有机质、全氮、碱解氮均高于土壤养分临界值，本研究仅有机质和速效磷指标高于临界值。以上对比说明近 20 年来该土属桉树人工林氮素含量呈下降趋势，存在氮肥施用不足或土壤氮素流失的情况。研究还发现速效磷含量相较 20 年前明显增加，而全磷含量并未一同增加，可能与土壤磷酸酶活性较高有关，具体原因有待深入研究。

2.3 现行施肥方案合理性分析

桉树年生长量曲线（图 2）显示桉树在造林后第 1、2 年树高快速生长，造林后第 3 年树高年生长量与 1、2 年相比有所下降；造林后第 1~3 年胸径生长速率呈下降趋势，第 4 年胸径年生长量最大。氮是影响桉树树高生长的主要因子，缺氮将制约桉树的高生长；磷和钾对桉树胸径生长影响较大，且磷比钾更能影响桉树的径生长^[18]。桉树造林后的第 1、2 年高生长最为迅速，E1 的土壤有机质和速效氮、磷、钾含量与 E1~E5 的平均值相近，说明在当前的施肥模式下基肥配比和分量比较合理，能够满足桉树第 1 年生长所需；造林后第 2 年桉树高生长速度最大，且干物质积累相较第 1 年成倍增加（材积年生长量是第一年的 5 倍），E2 的土壤有机质和氮素含量明显偏低，因此第一次追肥应增加其中氮肥的含量。桉树在造林后第 3 年时树高年生长速率开始变慢，胸径年

生长量也较低，但 E3 各养分指标含量均高于其他林龄桉树林分，尤其是速效磷含量，说明当前的施肥模式下第 2 次追肥完全能满足造林第 3 年桉树生长所需，为避免浪费，可适当减少肥料用量。造林后第 4 年桉树胸径生长速率最大，E4 磷素含量较低，钾含量也偏低，说明桉树第 4 年胸径生长迅速，对土壤中磷素和钾素需求较大，尤其是磷，造成土壤有效磷含量明显降低，因此，在第 3 次追肥时应增加磷肥和钾肥施用量。造林后第 5 年胸径年生长量较第 4 年明显下降，但树高年生长量稍有增加，E5 氮和速效钾含量偏低，但当前的经营措施并没有在造林第 5 年初进行追肥，根据上述研究结果，可以考虑在造林第 5 年初追施少量氮肥和钾肥，以满足林分生长所需。

现行的营林规程中，虽然使用了桉树专用肥，但桉树生长过程中不同年龄对各种营养元素的需求量是不同的，仅设置基肥（雷林 1 号复合肥）和追肥（雷林 2 号复合肥）两种肥料配比显然难以满足不同林龄桉树的生长需要。以维持桉树人工林当前土壤肥力水平为目的，本研究以 E1~E5 土壤化学指标平均值为标准，结合该桉树无性系在不同林龄的生长特点分析，认为该地区桉树经营肥料配比和用量应作出以下的调整（表 4）。

采伐迹地的土壤养分表现为有机质和氮素含量显著高于 E1~E5，有效磷含量显著较低，其余养分值与均值相当。采伐迹地土壤肥力较高，除了因为该小班本身土壤肥力等级高于其他样地，

表 4 桉树人工林施肥调整建议
Tab.4 Suggestion on fertilization adjustment of *Eucalyptus* plantation

树龄 Tree age	原施肥方案 Original fertilization program	调整建议 Suggestions for adjusting fertilization
0 个月 0 months	基肥：雷林 1 号肥 Base fertilizer: Leilin No. 1 compound fertilizer	不变 Maintain the same
12 个月 12 months	追肥：雷林 2 号肥 Top dressing: Lei Lin 2 compound fertilizer	雷林 2 号肥 + 额外补充氮肥 Leilin No. 2 fertilizer + additional nitrogen fertilizer
24 个月 24 months	追肥：雷林 2 号肥 Top dressing: Lei Lin 2 compound fertilizer	减少雷林 2 号肥用量 Reduce the amount of Lei lin 2 fertilizer
36 个月 36 months	追肥：雷林 2 号肥 Top dressing: Lei Lin 2 compound fertilizer	雷林 2 号肥 + 额外补充磷肥以及少量钾肥 Leilin No. 2 fertilizer + topdressing a small amount of phosphate fertilizer and potash fertilizer
48 个月 48 months	无 None	追施适量氮肥和钾肥 Apply appropriate amount of nitrogen fertilizer and potash fertilizer

也可能是由于地表只有少量草本植物,与栽有桉树的林地相比,地表植被对土壤养分的吸收大大减少,且采伐后留在林地内的枝、叶、伐桩等有机物腐烂分解使养分重新归还到土壤里。

3 结论与讨论

3.1 中林集团雷州林业局有限公司现行的营林规程中施肥配比和用量存在不合理性,本试验选取在纪家林场面积占比约60%的第5土壤肥力等级的小班进行研究,研究结果更具普遍性。同时,研究发现该地区桉树人工林土壤肥力低下,绝大多数养分指标均处于缺乏和极缺乏水平,除有机质和速效磷外,其余指标含量与1999年相比有不同程度的下降。

3.2 本文研究发现尾巨桉无性系在造林后第3年年生长量较低,通过分析,认为这可能与该小班造林和施肥月份比其他样地迟1个月有关,同时也解释了该样地肥力较好但连年生长量却较低的原因。雷州半岛每年4、5月份开始气候转暖,并由旱季转为雨季,桉树早期生长十分旺盛,仅仅1个月的时间差,桉树生长也会发生较明显的变化。本研究在选择研究材料时由于无法找到4月份造林的小班,故而选择了5月份造林的小班,对分析尾巨桉的生长特点有一定影响。

3.3 长期经营单一树种的人工纯林容易发生地力衰退的情况,在我国主要造林树种人工林经营中均有发生,其成因可能与林分结构、经营措施、气候条件等均有关联,因此本研究仅以维持现有土壤肥力水平为目的提出了施肥的调整建议^[19]。但调整后肥料的具体用量还需通过田间试验来确定,才能得到针对桉树在不同年龄的生长特点定向施肥的合理配方。

参考文献

- [1] 朱成庆. 雷州半岛桉树工业人工林培育模式评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [2] 林书蓉, 李淑仪, 廖观荣, 等. 短轮伐期桉树人工林科学施肥的研究[J]. 林业科学研究, 1999(3): 56-63.
- [3] 赵贵, 丁效东, 李淑仪, 等. 不同施肥对雷州半岛桉树林地土壤肥效应研究[J]. 桉树科技, 2012(2): 8-14.
- [4] 赵贵, 丁效东, 王荣萍, 等. 雷州半岛桉树不同品种和树龄对磷吸收的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2012(3): 407-411.
- [5] 肖路明. 尾叶桉MLA无性系林分不同施肥处理经济效益分析[J]. 广东林业科技, 2003, 19(2): 1-4.
- [6] 莫晓勇. 桉树人工林培育的理论与方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [7] LY/T 1228-1999森林土壤全氮的测定
- [8] LY/T 1229-1999森林土壤水解性氮的测定
- [9] LY/T 1232-1999森林土壤全磷的测定
- [10] LY/T 1232-1999森林土壤全磷的测定
- [11] LY/T 1234-1999森林土壤全钾的测定
- [12] LY/T 1236-1999森林土壤速效钾的测定
- [13] LY/T 1237-1999森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算
- [14] LY/T 1239-1999森林土壤pH值的测定
- [15] 蒋林, 樊吉尤, 何斌, 等. 尾巨桉人工林生长特性的研究[J]. 林业工程学报, 2011, 25(6): 68-70.
- [16] 杨卫星, 庞赞松, 银彬吾, 等. 桂西南2种更新方式尾巨桉人工林生长特性的比较[J]. 广西林业科学, 2018, 47(1): 47-51.
- [17] 廖观荣, 林书蓉, 李淑仪, 等. 雷州半岛桉树人工林地力退化的现状和特征[J]. 土壤与环境, 2002(1): 25-28.
- [18] 蒙世协, 杨锋, 闭革林, 等. 不同配比桉树专用肥的施用效果[J]. 广西林业科学, 2015(2): 191-193.
- [19] 蔡琼, 丁贵杰. 黔中地区一、二代马尾松人工林土壤微生物数量及生物活性研究[J]. 林业科学研究, 2013(2): 247-251.