

## ◆植物学◆

## 施肥对马尾松中龄林生长、产脂量和土壤养分的短期影响\*

李鹏<sup>1</sup>, 颜培栋<sup>1</sup>, 杨章旗<sup>1\*\*</sup>, 零天旺<sup>2</sup>, 陆绍浩<sup>2</sup>, 卢顺熙<sup>2</sup>

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院, 国家林业和草原局马尾松工程技术研究中心, 广西马尾松工程技术研究中心, 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西南宁 530002; 2. 广西横州市镇龙林场, 广西横州 530327)

**摘要:**为明确无机肥配施微量元素肥料和石灰对马尾松(*Pinus massoniana*)生长、松脂产量和土壤养分的综合影响, 探明最佳施肥处理, 以10年生马尾松材脂兼用林为研究对象, 设置无机肥+微肥+石灰配施(T1)、无机肥+微肥配施(T2)、单施无机肥(T3)、无机肥+石灰配施(T4)、钙镁磷肥+石灰配施(T5)和不施肥(CK)6个处理, 分析各处理马尾松生长、产脂量变化及其与土壤综合肥力的相关性, 并利用内梅罗公式综合评价最佳施肥处理。结果表明: 施肥能显著提高马尾松生长量和松脂产量( $P < 0.05$ ), 其中T1处理对马尾松树高、材积生长量及松脂产量促进效果最为显著, T5处理中胸径(DBH)生长量最大。撒施石灰能显著提高土壤pH值, 与无机肥+微肥配施(T1)能显著提高土壤有机质、全氮、全钾、碱解氮、速效钾的含量; 与钙镁磷肥配施(T5)能显著提高全磷、有效磷、速效钙、速效镁的含量; 土壤综合肥力表现为T1>T4>T5>T2>T3>CK。土壤pH值、有机质、有效磷、速效钾和速效镁是影响马尾松生长和产脂量的敏感性因子, 土壤肥力综合指数(SFI)与马尾松生长量、产脂量均呈现显著正相关。综上, 马尾松中龄林采脂过程中, 为减小采脂对马尾松生长的影响, 快速补充土壤养分, 提高马尾松生长量和松脂产量, 建议施用无机肥+微肥+石灰, 其效果最佳。

**关键词:**马尾松人工林; 施肥; 生长量; 松脂产量; 土壤肥力; 典型相关分析

中图分类号: S725.7 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2023)02-0239-12

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20230529.003

马尾松(*Pinus massoniana*)作为我国亚热带最主要的先锋造林树种, 具有分布广、速生、适生性强、用途广等优良特性, 兼具材用和脂用, 是主要的工业用材树种, 也是松脂和造纸等工业的主要原料<sup>[1]</sup>。马

尾松中龄林处于林木生长旺盛期, 对养分需求量大, 同时, 这一时期的采脂作业进一步加大了林木对养分的需求, 若不进行科学施肥, 将导致土壤肥力下降, 影响树木生长和松脂产量<sup>[2,3]</sup>。因此, 针对马尾松中龄

收稿日期: 2022-01-27

修回日期: 2022-04-14

\* 广西科技基地和人才专项(桂科AD19254004), 八桂学者和八桂青年学者专项(2019A026)资助。

【第一作者简介】

李鹏(1993-), 男, 助理工程师, 主要从事森林土壤研究。

【\*\*通信作者】

杨章旗(1964-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事林木遗传育种研究, E-mail: Yangzhangqi@163.com。

【引用本文】

李鹏, 颜培栋, 杨章旗, 等. 施肥对马尾松中龄林生长、产脂量和土壤养分的短期影响[J]. 广西科学, 2023, 30(2): 239-250.

LI P, YAN P D, YANG Z Q, et al. Short-Term Effects of Fertilization on the Growth, Resin Yield and Soil Nutrient Characteristics of Middle-Aged *Pinus massoniana* Plantation [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(2): 239-250.

采脂林科学施肥技术的研究,能够在维持和提高土壤肥力水平基础上,挖掘马尾松速生、高脂特性,最大限度提升木材和松脂产量,对促进大径材培育、提高经济效益具有重要意义。

土壤肥力是土壤的核心,为保证人工林生产力、维持土壤肥力,施肥已成为一种必要的经营技术并被广泛应用<sup>[4]</sup>。研究表明,氮磷钾无机肥能够快速补充土壤养分元素,提高土壤肥力<sup>[5]</sup>。马尾松中龄林氮(N)、磷(P)、钾(K)配比施肥优于单一施肥<sup>[6,7]</sup>。然而除了N、P、K以外,微量元素也是植物生长发育的重要物质,若仅施加N、P、K肥而不及及时补充林木生长所需的微量元素肥料(以下简称微肥),也会严重影响其生长。施用微肥不仅能增加土壤速效微量养分和促进植物对微量养分的吸收,补充土壤“短板效应”,还有利于调节生态系统的养分循环和生态稳定性<sup>[8,9]</sup>。如镁(Mg)作为叶绿素的分子中心,对植物的光合作用有着决定性的作用,同时镁肥对促进植物体内酶的催化活性具有重要作用<sup>[10]</sup>;锌肥不仅能够促进植物根系的发育和次生根的延展,还能调节氮代谢生理功能,有利于植物吸收土壤中的养分,以及提高土壤养分含量等<sup>[11]</sup>。石灰作为南方酸性红壤的一种良好的化学改良调理剂<sup>[12]</sup>,能够有效提高土壤pH值,提升土壤微量元素(P等)的有效性,改善土壤结构<sup>[13]</sup>。目前,关于马尾松人工林施肥的研究主要集中于配方施肥<sup>[14]</sup>对马尾松生长<sup>[15]</sup>和养分吸收<sup>[16]</sup>的影响等方面,而将无机肥、微肥和石灰同时应用于马尾松中龄采脂林的肥料效应研究较少。因此,本研究以桂中地区10年生马尾松材脂兼用林为研究对象,开展马尾松中龄林施肥采脂试验,研究无机肥配施微肥和石灰对马尾松生长、松脂产量和土壤养分特性的影响,为马尾松中龄采脂林合理施肥提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究区位于广西横州市镇龙林场(109°08′36″-109°19′15″E, 23°02′53″-23°08′24″N),属南亚热带季风气候,日照充足,气候温暖,雨量充沛,年平均降水量1477.8mm,年平均蒸发量1056.9mm,年平均气温21.4℃,最高气温39.2℃,最低气温-1℃,年平均日照时数1758.6h,无霜期312d。试验林位于那歪分场6林班19小班,坡度23°,海拔345m,坡向为东北向,坡位为中下坡,土壤为赤红壤,平均土层厚50cm,母岩板页岩。林下灌草类型:三桠苦

(*Melicope pteleifolia*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、酸藤子(*Embelia laeta*)、玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)、草珊瑚(*Sarcandra glabra*)、粗叶榕(*Ficus hirta*)、竹叶草(*Oplismenus compositus*)和铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris*)等。

### 1.2 试验材料与设计

试验林于2007年5月造林,苗木来源于广西壮族自治区林业科学研究院选育的马尾松优良家系,炼山后进行整地造林,株行距1.5m×3m,明坎、挖穴,穴规格为40cm×30cm×30cm,每穴施0.15kg复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15)作基肥。造林后前3年分别进行1次、2次和1次割草抚育,每年追肥1次(0.25kg复合肥/株)。第8年进行一次疏伐,保留密度为1000株/hm<sup>2</sup>,疏伐后采伐剩余物均匀平铺于样地内,林地管理措施保持一致。

2017年4月下旬,采用完全随机区组设计,设置3个随机区组,每区组设置6个处理:无机肥+微肥+石灰配施(T1)、无机肥+微肥配施(T2)、单施无机肥(T3)、无机肥+石灰配施(T4)、钙镁磷肥+石灰配施(T5)和不施肥对照(CK),具体施肥量和配比见表1。其中,无机肥中N、P、K配比是由当地马尾松林经验施肥获得,同时,针对南方酸性红壤存在普遍缺磷的状况设置T5处理,即用磷肥与石灰配施,以便与氮磷钾无机肥配施效果作对照。每个施肥处理间均设3m保护带,共18块标准样地(每块标准样地面积20m×20m),每块样地40株。根据舒文波等<sup>[17]</sup>研究结果,选择径级为18-20cm的10株干形通直的林木作为采脂木。同时对样地内所有树木逐一进行订牌、编号,测定树高(精确到0.01m)、胸径(DBH,精确到0.01cm)等生长量指标(表1),同时记录每块样地内的坡位、坡向、坡度、海拔、密度等立地因子。

施肥方法:采用水平沟施,在上坡位距树干80-100cm处沿等高线挖长×宽×深为40cm×20cm×30cm施肥沟,将肥料均匀放入沟内后及时覆土,覆土高出表面3-5cm,石灰粉均匀撒施于土壤表面并与表土混合。

### 1.3 采脂方法与产量测定

2018年5月,采用下降式单面采脂法,每1d割1次,每30d称量松脂产量1次,5-10月共进行6次松脂产量测定,测定样地内每株采脂木的单株产脂量。2018年10月底采脂结束后,同时进行胸径、树

表 1 试验各处理施肥量、配比及施肥前林分生长状况

Table 1 Each of fertilization treatment amount, proportioning and the stand growth before fertilization

处理 Treatment	N/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	P/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	K/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	微肥/ (kg · hm <sup>-2</sup> ) Trace element fertilizer/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	石灰/ (kg · hm <sup>-2</sup> ) Lime/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	胸径/(cm) Breast diameter/ (cm)	树高/(m) Tree height/(m)	单株材积/ (m <sup>3</sup> ) Individual volume/ (m <sup>3</sup> )
T1	102.4	72.03	64.00	25.51	833.75	17.05 ± 3.19	10.80 ± 1.38	0.126 7 ± 0.050 9
T2	102.4	72.03	64.00	25.51	0	16.75 ± 3.43	10.63 ± 1.24	0.122 9 ± 0.056 9
T3	102.4	72.03	64.00	0	0	16.11 ± 3.09	10.53 ± 1.32	0.113 0 ± 0.051 3
T4	102.4	72.03	64.00	0	833.75	16.22 ± 3.35	10.41 ± 1.13	0.113 2 ± 0.050 9
T5	0	144.06	0	0	833.75	17.01 ± 3.63	10.47 ± 1.16	0.124 6 ± 0.055 8
CK	0	0	0	0	0	16.67 ± 3.53	10.40 ± 1.16	0.119 1 ± 0.053 4

Note: nitrogen fertilizer, urea (N, 46%); phosphate fertilizer, calcium-magnesium phosphate fertilizer (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 12%); potash fertilizer, potassium chloride (K<sub>2</sub>O, 60%); micro-fertilizer is a water-soluble trace element fertilizer, and its effective ingredients are 37.34% boron, 7.47% calcium, 3.73% zinc, 1.87% copper, 0.19% molybdenum, 0.11% iron, 0.11% manganese, 0.19% magnesium and 0.19% sulfur.

高、枝下高等生长指标的测定。

#### 1.4 土壤采集与指标测定

采脂结束后,在每块标准样地内按“S”型布设 9 个采样点,用土钻法采集 0-20 cm 和 20-40 cm 的土壤样品,采集后的土样分层均匀混合,共收集 36 份混合样。采用四分法,取其中 1 份约 500 g 装入无菌样品袋带回实验室,并放入专用土样风干盘中,摊成 2-3 cm 薄层,室温下自然风干,避免阳光直射或暴晒。去除植物残体、土壤动物、根系、石块,碾碎,研磨过筛(2 mm),用于土壤化学性质的测定。

土壤 pH 值采用水土比 2.5:1 的酸度计法测定,土壤有机质采用高铬酸钾高温外加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷和全钾采用氢氧化钠熔融法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷、速效钾、速效钙和速效镁采用 Mehlich3 浸提-原子吸收分光光度计测定<sup>[18]</sup>。

#### 1.5 数据处理

单株材积采用二元材积公式  $V = 7.14265437 \times 10^{-4} \times D^{1.867008} H^{0.9014632}$ <sup>[19]</sup> 计算,其中:V 为单株材积(m<sup>3</sup>);D 为胸径(cm);H 为树高(m)。

利用隶属度函数和内梅罗公式<sup>[20]</sup>进行土壤肥力综合指数的计算。具体计算过程:首先运用隶属度函数对数据进行标准化(归一化)处理,隶属度公式为

$$N_i = \begin{cases} 1.0 & x \geq b \\ 0.1 + 0.9(x-a)/(b-a) & a < x < b, \\ 0.1 & x \leq a \end{cases} \quad (1)$$

式中,a 为函数的最小值,b 为函数的最大值,x 为指标的测量值。

然后利用内梅罗公式计算土壤肥力综合指数:

$$SFI = \sqrt{\frac{(N_{iave})^2 + (N_{imin})^2}{2}} \times \frac{n-1}{n}, \quad (2)$$

式中,SFI 为土壤肥力综合指数, $N_{iave}$  和  $N_{imin}$  为土壤养分特性指标归一化后的平均值和最小值,n 为指标个数。

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析。不同处理马尾松生长、产脂和土壤性质数据进行单、双因素方差分析,采用 Tukey's 检验进行显著性的多重比较( $\alpha = 0.05$ )。数据均以平均值 ± 标准差表示。利用典型相关分析(Canonical Correlation Analysis,CCA)探索土壤养分特性与马尾松生长量、产脂量间的相关关系(分析前采用 Bartlett 卡方检验确定具有统计学意义的典型变量个数),同时运用线性回归分析对土壤肥力综合指数与马尾松生长量、产脂量进行回归方程的构建。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥对生长量的影响

施肥显著提高了采脂和未采脂马尾松胸径、树高和单株材积生长量( $P < 0.05$ ,表 2),其中胸径生长量为 T5 处理最大,采脂和未采脂胸径生长量较 CK 处理分别提高 55.46% 和 64.06%,而 T5 与 T1、T4 处理间无显著差异;树高和单株材积生长量均为 T1 处理最大,采脂和未采脂马尾松树高生长量较 CK 处理分别提高 45.89% 和 27.75%,单株材积生长量分别提高 35.41% 和 52.84%,且树高生长量在 T1 处理中显著高于 T3 和 CK 处理,而与 T2、T4 和 T5 处理之间无显著差异;单株材积生长量在 T1 处理中显著

高于 T2、T3 和 CK 处理, 而与 T5 处理之间无显著差异。采脂和未采脂间树高、单株材积生长量仅在 T3 和 CK 处理中具有显著差异, 而其他均无显著差异, 说明施肥可以在一定程度上减少采脂对林木生长的影响。从整体来看, 相同处理下采脂马尾松胸径、树

高和单株材积生长量均小于未采脂马尾松, 与未采脂相比, 采脂后马尾松平均胸径、树高和单株材积生长量分别减少 9.79%、7.07% 和 21.15%, 采脂对马尾松的生长具有一定的抑制作用。

表 2 施肥和采脂对马尾松生长量的影响

Table 2 Effects of fertilization and resin harvest on the growth of *P. massoniana*

处理 Treatment	是否采脂 Whether resin harvest or not	胸径生长量/(cm) DBH growth/(cm)	树高生长量/(m) Tree height growth/(m)	单株材积生长量/(m <sup>3</sup> ) Volume per-tree growth/(m <sup>3</sup> )
T1	Y	1.76 ± 0.16Aa	2.13 ± 0.15Aa	0.0478 ± 0.0046Aa
	N	2.05 ± 0.18Aa	2.21 ± 0.25Aa	0.0645 ± 0.0098Aa
T2	Y	1.42 ± 0.23Ab	2.07 ± 0.17Aa	0.0402 ± 0.0041Abc
	N	1.52 ± 0.28Aab	2.12 ± 0.29Aab	0.0496 ± 0.0073Ab
T3	Y	1.28 ± 0.15Abc	1.48 ± 0.19Bb	0.0380 ± 0.0012Bbc
	N	1.43 ± 0.13Ab	1.79 ± 0.11Ab	0.0474 ± 0.0127Abc
T4	Y	1.44 ± 0.18Aab	1.90 ± 0.06Aab	0.0421 ± 0.0048Aab
	N	1.53 ± 0.21Aab	1.92 ± 0.21Aab	0.0508 ± 0.0102Ab
T5	Y	1.85 ± 0.13Aa	1.87 ± 0.17Aab	0.0434 ± 0.0023Aab
	N	2.10 ± 0.12Aa	1.97 ± 0.28Aab	0.0585 ± 0.0085Aa
CK	Y	1.19 ± 0.10Ac	1.46 ± 0.13Bb	0.0353 ± 0.0020Bc
	N	1.28 ± 0.18Ac	1.73 ± 0.08Ab	0.0422 ± 0.0037Ac

Note: different capital letters indicate significant difference between non-harvested and resin harvest tree of the same treatment ( $P < 0.05$ ), different lowercase letters indicate significant difference between different fertilization treatments of the same target tree ( $P < 0.05$ ). Y indicates yes, N indicates no.

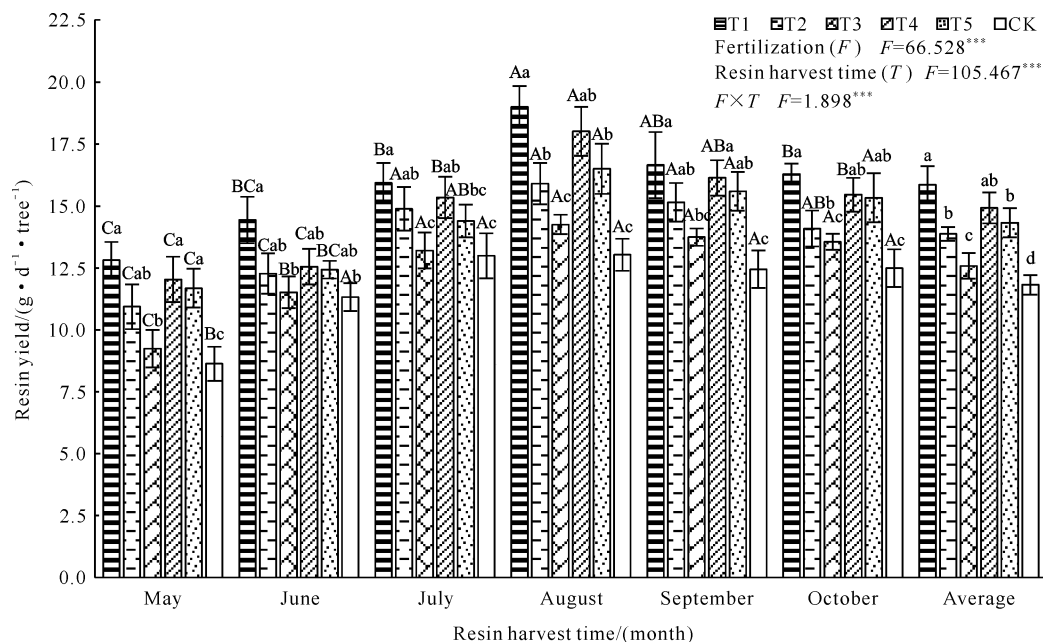
## 2.2 施肥对松脂产量的影响

双因素方差分析表明, 施肥、采脂时间及施肥与采脂时间的交互作用均对产脂量具有极显著性影响 ( $P < 0.001$ , 图 1)。施肥能显著提高马尾松平均单株产脂量 ( $P < 0.05$ ), 较 CK 提高 21.13%, 尤其是 T1 处理显著高于其他处理, 平均单株产脂量达  $15.86 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ , 较 CK 提高 34.18%, 各施肥处理平均单株产脂量大小顺序为 T1 ( $15.86 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > T4 ( $14.93 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > T5 ( $14.33 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > T2 ( $13.88 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > T3 ( $12.59 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > CK ( $11.82 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ )。此外, 不同采脂时间中均呈现 T1 处理显著高于 T3 和 CK 处理, 而与 T4 处理之间无显著差异。马尾松平均单株产脂量随采脂时间的增加呈先增加后减少的趋势, 其中 8 月份平均单株产脂

量最大, 其次是 9 月, 均显著高于 5 月, 5 月份平均单株产脂量最小为  $10.89 \text{ g/d}$ , 各采脂时间阶段平均单株产脂量大小顺序为 8 月 ( $16.13 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > 9 月 ( $14.96 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > 10 月 ( $14.54 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > 7 月 ( $14.47 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > 6 月 ( $12.43 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ) > 5 月 ( $10.89 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ )。

## 2.3 施肥对土壤化学性质的影响

双因素方差分析(表 3)表明, 除速效镁外, 施肥和土层深度均对土壤化学性质指标具有显著性影响 ( $P < 0.05$ ), 而施肥与土层深度的交互作用仅对土壤有机质、全磷、碱解氮、有效磷、速效钙和速效镁的含量有显著性影响 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ,  $P < 0.001$ ), 对土壤 pH 值和全氮、全钾、速效钾的含量无显著性影响。



Different capital letters indicate significant differences between different resin harvest time in the same treatment ( $P < 0.05$ ), different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments in the same resin harvest time ( $P < 0.05$ ). \*\*\*  $P < 0.001$ .

图1 不同施肥处理和采脂时间对马尾松松脂产量的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments and resin harvest time on resin yield of *P. massoniana*

表3 施肥和土层深度对土壤化学性质影响的线性模型分析

Table 3 Linear model analysis of the influence of fertilization and soil depth on soil chemical properties

自变量 Variable	因变量 Dependent variable	平方和 Sum of squares	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	统计量 <i>F</i> -test	显著性 <i>P</i> -value
Fertilization ( <i>F</i> )	pH value	0.763	5	0.153	57.257	***
	SOM	254.703	5	50.941	101.599	***
	TN	1.662	5	0.332	53.325	***
	TP	0.031	5	0.006	56.949	***
	TK	162.756	5	32.551	27.151	***
	AN	39 877.076	5	7 975.415	123.441	***
	AP	39.270	5	7.854	63.111	***
	AK	2 807.356	5	561.471	93.371	***
	ACa	151 562.952	5	30 312.590	99.524	***
	AMg	13 405.871	5	2 681.174	104.737	***
Soil depth ( <i>S</i> )	pH value	0.807	1	0.807	302.626	***
	SOM	1 108.890	1	1 108.890	2 211.637	***
	TN	4.210	1	4.210	675.338	***
	TP	0.012	1	0.012	115.103	***
	TK	16.538	1	16.538	13.794	**
	AN	8 299.210	1	8 299.210	128.453	***
	AP	39.250	1	39.250	315.397	***
	AK	4 190.404	1	4 190.404	696.852	***



续表

Continued table

自变量 Variable	因变量 Dependent variable	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	统计量 F-test	显著性 P-value
F × S	ACa	91 457.746	1	91 457.746	300.280	***
	AMg	38.403	1	38.403	1.500	ns
	pH value	0.031	5	0.006	2.299	ns
	SOM	8.483	5	1.697	3.384	*
	TN	0.015	5	0.003	0.475	ns
	TP	0.002	5	0.000	4.395	**
	TK	2.102	5	0.420	0.351	ns
	AN	6 585.653	5	1 317.131	20.386	***
	AP	26.844	5	5.369	43.141	***
	AK	43.686	5	8.737	1.453	ns
F × S	ACa	4 074.718	5	814.944	2.676	*
	AMg	2 804.857	5	560.971	21.914	***

Note: \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ , ns -  $P > 0.05$ ; SOM - soil organic matter, TN - total nitrogen, TP - total phosphorus, TK - total potassium, AN - available nitrogen, AP - available phosphorus, AK - available potassium, ACa - available calcium, AMg - available magnesium.

施肥显著提高了土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、速效钙、速效镁的含量 ( $P < 0.05$ , 图 2), 其中土壤有机质、全氮、全钾、碱解氮、速效钾的含量在 T1 处理中最高, 在 0 - 40 cm 土层中各含量平均值较 CK 分别提高了 65.41%、54.89%、53.29%、103.00%、125.39%; 土壤 pH 值和全磷、有效磷、速效钙、速效镁的含量在 T5 处理中最高, 在 0 - 40 cm 土层中各含量平均值较 CK 分别提高了 11.29%、56.18%、70.03%、94.12%、72.82%。同一处理不同土层土壤 pH 值和有机质、全氮、有效磷、速效钾和速效钙的含量均随土层深度增加而显著降低 ( $P < 0.05$ ), 全磷和速效镁的含量仅在施肥处理中随土层深度的增加显著降低, 碱解氮的含量仅在 T3、T5 和 CK 处理中随土层深度的增加显著降低, 而全钾含量在不同土层之间的差异性并不显著。

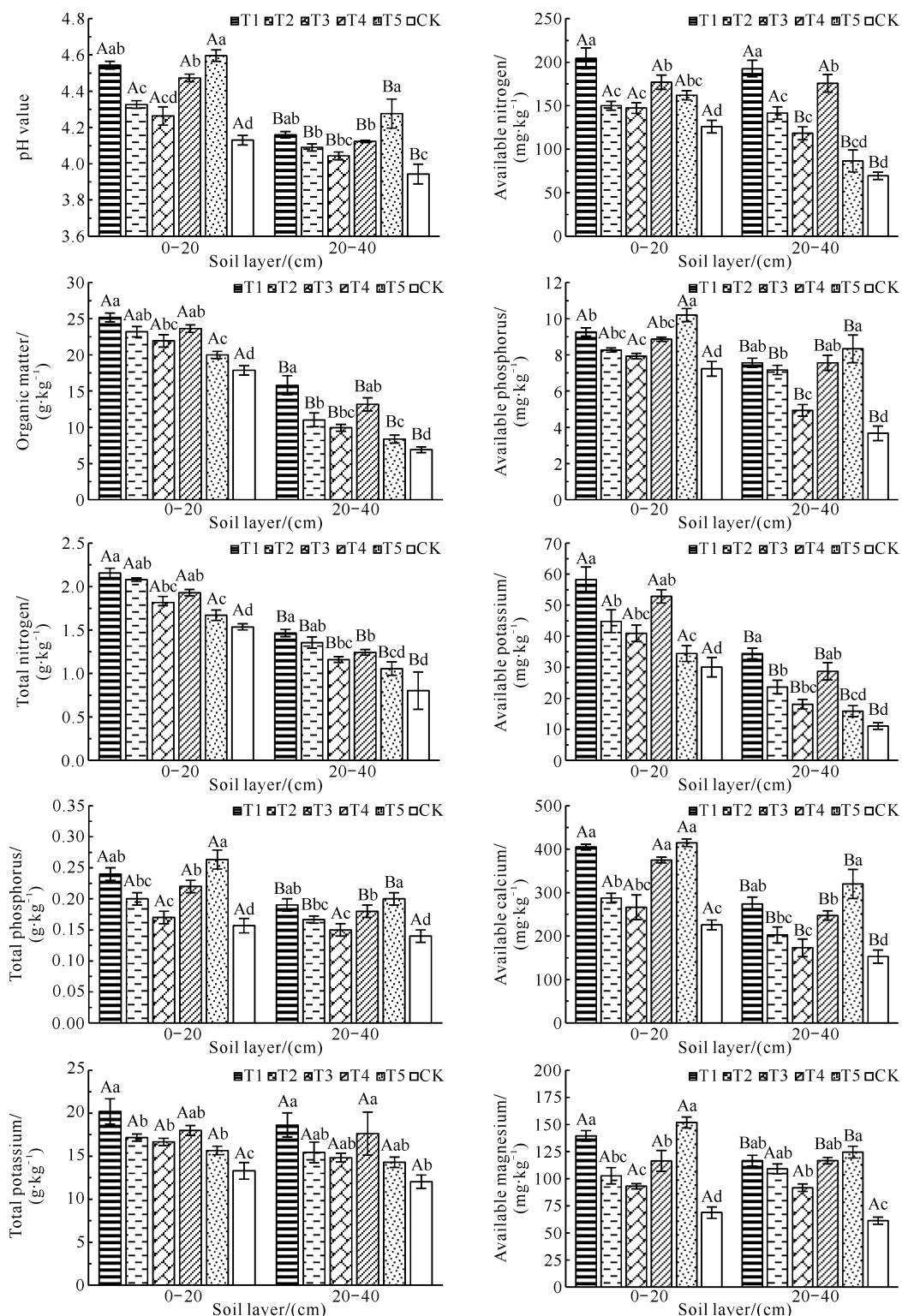
#### 2.4 施肥对土壤综合肥力的影响

利用隶属度函数和内梅罗公式计算各施肥处理下土壤肥力综合指数(图 3), 不同施肥处理间土壤肥力综合指数具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 尤其是 T1 处理下土壤肥力综合指数显著高于其他处理, 其次是

T4 处理, 而 T2 与 T5 处理之间无显著差异。不同施肥处理间土壤肥力综合指数的大小顺序为  $T1 > T4 > T5 > T2 > T3 > CK$ , 说明无机肥料 + 微肥 + 石灰的施肥模式更有利于提高土壤综合肥力。

#### 2.5 土壤养分特性与生长量、产脂量的相关性

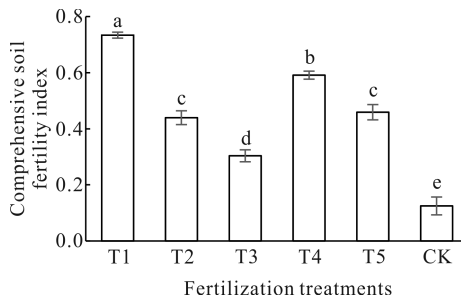
对土壤养分特性 ( $U$ ) 与生长量、产脂量 ( $W$ ) 进行典型相关分析, 并进行 Bartlett 卡方检验, 选择两对显著性  $P < 0.05$  的典型变量(表 4)。第 1 对典型相关系数为 0.996; 在典型变量中, 土壤养分特性  $U_1$  的线性组合中负荷量较大的是 pH 值 (-2.011)、有机质 (-2.052)、速效镁 (2.202), 生长量、产脂量  $W_1$  的线性组合中采脂木胸径生长量 (1.092) 和单株材积生长量 (-0.998) 负荷量较大。第 2 对典型相关系数为 0.995; 在典型变量中, 土壤养分特性  $U_2$  的线性组合中负荷量较大的是 pH 值 (-2.239)、有机质 (-1.513)、有效磷 (1.695)、速效钾 (-1.806), 生长量、产脂量  $W_2$  的线性组合中采脂木单株材积生长量 (-1.639)、产脂量 (1.407) 负荷量较大。表明土壤 pH 值、有机质、有效磷、速效钾和速效镁是影响马尾松生长和产脂量的敏感性因子。



Different capital letters indicate significant differences between different soil layers in the same treatment ( $P < 0.05$ ); different lower case letters indicate significant differences between different fertilization treatments in the same soil depth ( $P < 0.05$ ).

图2 不同施肥处理对土壤化学性质的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on soil chemical properties



Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments ( $P < 0.05$ ).

图3 不同施肥处理对马尾松林土壤肥力综合指数的影响

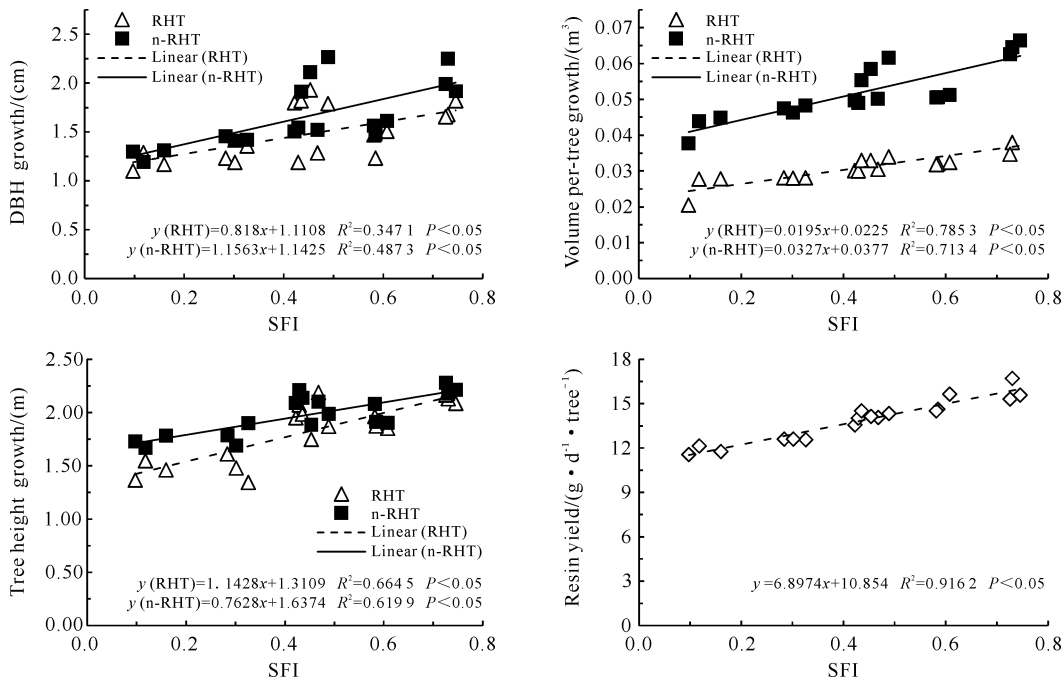
Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on soil fertility comprehensive index in *P. massoniana* plantation

表4 土壤养分特性与马尾松生长量、产脂量的典型相关分析

Table 4 Canonical correlation analysis between soil nutrient characteristics and the growth and resin yield of *P. massoniana*

项目 Item	统计量 Statistics
The first canonical correlated coefficient	0.996 ( $P = 0.000$ )
The first canonical variants	$U_1 = -2.011X_1 - 2.052X_2 + 0.362X_3 - 0.231X_4 + 0.922X_5 + 1.259X_6 + 1.032X_7 - 1.135X_8 - 0.968X_9 + 2.202X_{10}$ $W_1 = 1.092Y_1 + 0.22Y_2 - 0.998Y_3 + 0.436Y_4 - 0.063Y_5 - 0.323Y_6 - 0.473Y_7$
The second canonical correlated coefficient	0.995 ( $P = 0.007$ )
The second canonical variants	$U_2 = -2.239X_1 - 1.513X_2 + 0.579X_3 - 1.109X_4 + 0.937X_5 + 1.15X_6 + 1.695X_7 - 1.806X_8 + 1.111X_9 + 0.96X_{10}$ $W_2 = 0.633Y_1 - 0.198Y_2 - 1.639Y_3 - 0.32Y_4 + 0.358Y_5 + 0.809Y_6 + 1.407Y_7$

Note:  $X_1$  - pH value,  $X_2$  - SOM,  $X_3$  - TN,  $X_4$  - TP,  $X_5$  - TK,  $X_6$  - AN,  $X_7$  - AP,  $X_8$  - AK,  $X_9$  - ACa,  $X_{10}$  - AMg;  $Y_1$  - diameter growth of resin harvest tree,  $Y_2$  - height growth of resin harvest tree,  $Y_3$  - volume growth per plant of resin harvest tree,  $Y_4$  - diameter growth of non-resin harvest tree,  $Y_5$  - height growth of non-resin harvest tree,  $Y_6$  - volume growth per plant of non-resin harvest tree,  $Y_7$  - resin yield.



RHT: rise harvest tree; n-RHT: non-rise harvest tree.

图4 土壤肥力综合指数与生长量、产脂量的逐步回归分析

Fig. 4 Stepwise regression analysis between soil fertility comprehensive index and the growth and resin yield

土壤肥力综合指数与马尾松生长量、产脂量间均具有显著相关性 ( $P < 0.05$ ), 其中与产脂量和单株材积生长量拟合效果较好, 其回归系数  $R^2$  均在 0.7 以上, 属于强相关关系; 其次是树高生长量, 平均  $R^2 = 0.6422$ , 属中度相关关系; 与胸径生长量的平均  $R^2 = 0.4125$ , 属弱相关关系 (图 4)。表明土壤肥力的大小能够显著影响马尾松生长和松脂产量变化, 尤其与松脂产量和林分的蓄积量的相关关系最为明显。



### 3 讨论

#### 3.1 施肥对马尾松林生长和松脂产量的影响

施肥对采脂和未采脂马尾松生长量及松脂产量均具有一定影响,能显著增加马尾松的生长量和松脂产量,树高、单株材积生长量和松脂产量均在 T1 处理中最大,胸径生长量在 T5 处理中最大,表明施肥在短期内对马尾松生长和产脂量起到促进作用,尤其是 T1 处理可以迅速增加单位面积蓄积量,提高松脂产量,同时减少采脂对马尾松生长的抑制作用,合理施肥可以减小采脂对马尾松生长的影响,这与舒文波等<sup>[6]</sup>研究结果相一致。其一方面是由于南方土壤酸化严重( $\text{pH}$  值 =  $3.95 < 4.5$ , 属强酸性),撒施石灰后能快速提高土壤  $\text{pH}$  值,缓解铝(Al)毒害和其他重金属毒害,促进林木养分吸收<sup>[13,21]</sup>,如孙开照<sup>[22]</sup>和廖萍等<sup>[23]</sup>通过对水稻进行石灰施肥试验,发现施用石灰能显著提高水稻产量,这与本研究结果相似;另一方面,水溶性微肥的配施能够快速补充植物生长过程中的“短板效应”,短期内快速提高产量<sup>[24]</sup>。马尾松平均单株产脂量在 T1 处理中显著高于其他处理,表明氮磷钾无机肥与微肥配施,尤其是撒施石灰后,马尾松的单株产脂量提升效果最快。研究表明钙镁磷肥的施入可以迅速补充土壤中速效磷的含量,同时具有改善土壤酸度作用<sup>[25]</sup>,与石灰配施具有快速改善土壤环境的重要作用,这与本研究中 T5 处理可以更好地促进林木生长和松脂产量的结果相一致。而与其他施肥处理相比,T3 处理马尾松林木生长和松脂产量较差,可能是由于 T3 中仅施用氮磷钾无机肥,而本研究中试验地  $\text{pH}$  值为 3.95,属于强酸性环境,若没有调节土壤酸碱度,施肥后并不能促进土壤速效元素的释放,与其他处理相比,植物养分利用效率偏低。此外,马尾松产脂量随采脂时间的增加呈先增加后减少的趋势,8 月份最大,5 月份最小,这是由于马尾松松脂的代谢活动和产量受到光、热等环境因子的影响较大,大量研究表明林分松脂产量受温度影响最大,高温季节(一般认为 6-10 月)是采割松脂的最适时间,且松脂产量随时间呈先增加后减少的趋势<sup>[26]</sup>,这与本研究的结论相一致。

#### 3.2 施肥对马尾松林土壤化学性质的影响

无机肥料的施入在短期内能显著提高土壤有机质和养分指标(全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、速效钙、速效镁)的含量,且土壤养分含量的变化对不同肥料类型响应不同,这与余晓章等<sup>[27]</sup>研究结果相

似。土壤养分是森林生态系统中植物营养的主要来源,在植物演替过程中,群落结构和生产能力均受到土壤养分的影响<sup>[28]</sup>。土壤养分包括大量元素和微量元素,在植物生长和微生物活动过程中发挥着不可替代的作用。土壤有机质是土壤养分转化的核心,T1 处理中土壤有机质含量显著高于其他处理,而与 T4 处理无显著差异,表明氮磷钾无机肥与石灰的配施有利于土壤有机质含量提高,推测是由于无机肥料快速补充土壤养分,石灰改善土壤  $\text{pH}$  值,给微生物提供了营养来源和适宜环境,使微生物活动旺盛,加之卫生伐时大量枯落物造成有机质来源比较丰富,促进了有机质的快速积累<sup>[29]</sup>,具体原因还需进一步研究。T1 处理中土壤全氮、全钾、碱解氮、速效钾含量最大,表明氮磷钾无机肥的施入能够快速补充土壤中氮和钾的含量;而全磷、有效磷、速效钙和速效镁在 T5 处理中最大,表明钙镁磷肥的施入能够在短期内迅速增加土壤中磷、钙、镁和锰等微量营养元素<sup>[30]</sup>,微肥的施入也具有相同效果。通过有机、无机肥配施锌肥和石灰,有利于提高土壤  $\text{pH}$  值、碱解氮和有效磷含量,马国柱等<sup>[11]</sup>也有相似的研究结果。T1、T4 和 T5 处理中表层土壤  $\text{pH}$  值显著高于其他处理,表明撒施石灰能够快速提高表层土壤  $\text{pH}$  值,缓解土壤酸化,这与孙玉平等<sup>[31]</sup>研究结果相一致,尤其是钙镁磷肥(碱性肥料)配施石灰后土壤  $\text{pH}$  值的提升效果最佳。土壤肥力综合指数值越大,表示土壤肥力越好,T1 处理效果显著高于其他处理类型。

#### 3.3 土壤养分特性与生长量、松脂产量的相关性分析

大量研究表明,土壤酸碱度与凋落物的分解、养分释放、植物养分吸收具有显著相关性<sup>[32]</sup>;有机质具有改善土壤结构、提高土壤养分的重要作用;P 的有效性是南方红壤区植物生长的限制性因子<sup>[33]</sup>;Mg 能够改变给植物供应营养的土壤环境,从而改变植物对其他营养的吸收比例,进而影响植物的生长<sup>[34]</sup>。因此,土壤  $\text{pH}$  值、有机质、有效磷、速效镁是林木植物生长和代谢活动的重要因子,这与本研究结果相一致。余小兰等<sup>[30]</sup>研究表明钙镁磷肥施用量对土壤有效钾含量无显著影响,土壤有效钾处于一种稳定状态,这与本研究中速效钾作为敏感性因子的结果不一致,可能是由于马尾松在松脂采割过程中,其自身生理生化代谢活动较大,为维持自身渗透压的稳定性,需要大量的速效钾离子参与,速效钾作为代谢过程中渗透稳定性的重要物质<sup>[35]</sup>。此外,土壤肥力综合指

数与马尾松生长量和产脂量具有显著相关关系,土壤肥力综合指数与松脂产量的拟合系数最大,其次是单株材积生长量,说明土壤综合肥力能够显著影响马尾松生长和松脂产量。综上所述,氮磷钾无机肥配施微肥和石灰通过改善土壤 pH 值,快速补充土壤 N、P、K 和微量元素养分,从而达到提高马尾松生长量和松脂产量的目的,其中土壤 pH 值、有机质、有效磷、速效钾和速效镁作为影响采脂木生长和产脂量的敏感性因子,尤其要受到重视。本研究仅针对施肥对马尾松生长、松脂产量和土壤养分特征的短期影响进行研究,而未分析施肥对松脂成分的影响,以及未对松脂产量提高的机理进行探讨,接下来的研究可以进行肥料效应的长期观测,并与分子和生理生化调控相结合,探讨施肥的肥料效应及其高产适应性机理。

#### 4 结论

①施肥能显著提高采脂和未采脂马尾松胸径、树高、单株材积生长量和松脂产量( $P < 0.05$ ),其中 T1 处理对马尾松树高和材积生长量及松脂产量促进效果最为显著, T5 处理中胸径生长量最大。此外,采脂后马尾松平均胸径、树高和单株材积生长量均低于未采脂,而施肥处理下采脂与未采脂木生长量差值低于未施肥处理,表明采脂对马尾松的生长具有一定的抑制作用,施肥可以在一定程度上减少采脂对林木生长的影响。

②施肥显著提高了土壤 pH 值和有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、速效钙、速效镁的含量( $P < 0.05$ ),其中土壤有机质、全氮、全钾、碱解氮、速效钾的含量在 T1 处理中最高,土壤 pH、全磷、有效磷、速效钙、速效镁的含量在 T5 处理中最高。土壤综合肥力大小顺序表现为  $T1 > T4 > T5 > T2 > T3 > CK$ ,说明无机肥料+微肥+石灰的施肥模式更有利于提高土壤综合肥力。

③土壤 pH 值、有机质、有效磷、速效钾和速效镁是影响马尾松生长和产脂量的敏感性因子,土壤肥力综合指数与马尾松生长量、产脂量均具有显著的相关性( $P < 0.05$ ),能够显著影响马尾松生长和松脂产量变化,尤其与松脂产量、林分的蓄积量的相关关系最为明显。T1 处理中氮肥  $102.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钙镁磷肥  $72.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾肥  $64.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、微肥  $25.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和石灰  $833.75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  配方对马尾松中龄采脂林的生长、松脂产量和土壤肥力的效果最佳。

#### 参考文献

- [1] 杨章旗. 广西松脂原料林发展现状、存在问题与对策研究[J]. 广西林业科学, 2007, 36(3): 143-146.
- [2] 湛红辉, 温恒辉. 马尾松人工中龄林施肥肥效与增益持续性研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(5): 533-539.
- [3] 唐健. 广西松树人工林高效养分管理及配方施肥技术研究示范[Z/OL]. (2019-09-17)[2022-01-27]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=qUVwN-PMGfwqL216GWYhqsutB2RFzldkeCIMn9RfonelpsFWOt1MXE25ZZeJ9FdrgyGQaOcgCHcdcJBYw7zHXvm3EwAUVOXpEqOoFZRfFsJ0ZZQuYKonQ-Q=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>.
- [4] 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.
- [5] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 长期定位施肥对土壤效应的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(2): 188-196.
- [6] 舒文波, 杨章旗, 兰富. 施肥对马尾松中龄林生长量和产脂的影响[J]. 福建林学院学报, 2009, 29(2): 160-165.
- [7] 安宁, 丁贵杰, 湛红辉. 林分密度及施肥对马尾松林产脂量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(9): 46-50.
- [8] 闫孝贡, 刘剑钊, 郭金瑞, 等. 微量元素肥料在农业生产中的有效施用[J]. 农业与技术, 2010, 30(1): 69-71.
- [9] 李丽霞. 微肥对作物产量、品质的影响及其生态环境效应[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2005.
- [10] 姜亚男, 张亚东, 杨文浩, 等. 镁肥与添加剂施用后土壤镁迁移与淋洗特征研究[J]. 土壤, 2021, 53(1): 80-87.
- [11] 马国柱, 屠乃美, 方畅宇, 等. 有机无机肥配施锌肥和石灰对双季稻产量及土壤养分特性的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 171-177.
- [12] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 石灰对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(26): 109-112.
- [13] 闫志浩, 胡志华, 王士超, 等. 石灰用量对水稻油菜轮作区土壤酸度、土壤养分及作物生长的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4285-4295.
- [14] 唐健. 马尾松人工幼林配方施肥技术规程[Z/OL]. (2018-11-30)[2022-01-27]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=qUVwNPMGfwrYsI95Ynjr5CRgphZvxx7IvH8ZSyOt9s9dIDY2c6xztZtpLGORzfAT-zXjJulz9T852tzSBMg5fmSrlA8P-x42066rrZBSL739FJ\\_5gZGPeg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=qUVwNPMGfwrYsI95Ynjr5CRgphZvxx7IvH8ZSyOt9s9dIDY2c6xztZtpLGORzfAT-zXjJulz9T852tzSBMg5fmSrlA8P-x42066rrZBSL739FJ_5gZGPeg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [15] 张荣健. 不同坡位和施肥量对马尾松幼林生长的影响[J]. 亚热带水土保持, 2014, 26(3): 12-13, 18.
- [16] 黄冠. 施肥对幼龄马尾松人工林生长及养分循环的影响

- 响研究[D]. 武汉:华中农业大学,2020.
- [17] 舒文波,杨章旗. 马尾松不同采脂年龄和径级产脂量变化特点研究[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(11):39-43.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 广西林业勘测设计队,广西农学院林学系. 森林调查手册[M]. [出版地不详]:[出版者不详],1974.
- [20] 赵杰,秦明周,郑纯辉. 城乡结合部土壤质量及其动态研究:以开封为例[J]. 资源科学,2001,23(3):42-46.
- [21] 杨静,谭永锋,肖志强,等. 不同剂量石灰对酸化稻田土壤养分含量及水稻产量的影响[J]. 安徽农业科学,2015,43(36):175-176,179.
- [22] 孙开照. 水稻分蘖高峰期施石灰对酸性水稻土中籼稻产量的影响初探[J]. 中国稻米,2013,19(1):67-68.
- [23] 廖萍,汤军,曾勇军,等. 生物炭和石灰对酸性稻田水稻产量,土壤性状和经济效益的影响[J]. 中国稻米,2019,25(1):44-48.
- [24] 胡时友,刘凯,马朝红,等. 中微量元素肥料配合施用对水稻产量和品质的影响[J]. 农村经济与科技,2016,27(23):84-86.
- [25] 王一锟,蔡泽江,冯固. 不同磷肥调控措施下红壤磷素有效性和利用率的变化[J/OL]. 土壤学报,2021:1-14 (2021-10-25)[2022-01-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20211022.1726.004.html>.
- [26] 刘云. 气象因子对马尾松松脂产量影响的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(6):65-69.
- [27] 余晓章,杨正菊,李贤伟,等. 施肥对川中丘陵杨树人工林土壤生物活性的影响[J]. 土壤通报,2014,45(3):618-624.
- [28] 陈伟,薛立. 人工林施肥研究进展综述[J]. 广东林业科技,2004,20(1):61-66.
- [29] 周成河,覃大吉. 不同耕作方式对土壤理化性状及小麦产量的影响[J]. 湖北农业科学,2019,58(2):53-57.
- [30] 余小兰,杨福锁,周丹,等. 钙镁磷肥对水稻土和砖红壤土壤化学性状的动态影响[J]. 江苏农业学报,2018,34(5):1042-1047.
- [31] 孙玉平,谢小芳,李建华,等. 石灰用量对不同酸度等级稻田土壤理化性状及产量的影响[J]. 湖北农业科学,2019,58(2):50-53.
- [32] 于天一,孙秀山,石程仁,等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志,2014,33(11):3137-3143.
- [33] 龚霞. 亚热带退化丘陵红壤区人工林土壤磷素有效性及其影响因素[D]. 南昌:江西农业大学,2013.
- [34] 吴修蓉,周运超,余星. 镁肥对马尾松幼苗生长与叶片元素积累的影响[J]. 亚热带植物科学,2019,48(1):11-16.
- [35] 董琴,王昌全,李启权,等. 成都平原西部土壤速效钾含量剖面分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2019,33(2):176-182.

## Short-Term Effects of Fertilization on the Growth, Resin Yield and Soil Nutrient Characteristics of Middle-Aged *Pinus massoniana* Plantation

LI Peng<sup>1</sup>, YAN Peidong<sup>1</sup>, YANG Zhangqi<sup>1\*</sup>, LING Tianwang<sup>2</sup>, LU Shaohao<sup>2</sup>, LU Shunxi<sup>2</sup>

(1. National Forestry and Grass Administration, Masson Pine Engineering Technology Research Center, Guangxi Masson Pine Engineering Technology Research Center, Guangxi Key Laboratory of Fine Timber Forest Resources Cultivation, Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Nanning, Guangxi, 530002, China; 2. Zhenlong Forest Farm of Hengzhou County, Hengzhou, Guangxi, 530327, China)

**Abstract:** In order to explore the comprehensive effects of inorganic fertilizer combined with micro-fertilizer and lime on the growth, resin yield and soil nutrients of *Pinus massoniana*, and to find out the best fertilization treatment, a 10-year-old of *P. massoniana* concomitant timber and resin forest was used as the research object. Six treatments were set up, including inorganic fertilizer + micro fertilizer + lime (T1), the combined application of inorganic fertilizer + micro-fertilizer (T2), the single application of inorganic fertilizer (T3), the

inorganic fertilizer + lime combined application (T4), calcium magnesium phosphate fertilizer + lime combined application (T5) and no fertilizer application (CK). The changes of *P. massoniana* growth and resin yield and their correlation with soil comprehensive fertility were analyzed. The best fertilization treatment was comprehensively evaluated by Nemerow formula. The results showed that fertilization could significantly increase the growth and resin yield of *P. massoniana* ( $P < 0.05$ ). Among them, T1 treatment had the most significant effect on the height, volume growth and resin yield of *P. massoniana*, and the DBH growth in T5 treatment was the largest. The application of lime can significantly increase the soil pH value, and the combination of inorganic fertilizer + micro-fertilizer (T1) can significantly increase the content of soil organic matter, total nitrogen, total potassium, alkaline hydrolysis nitrogen and available potassium. Combined application with calcium magnesium phosphate fertilizer (T5) can significantly increase the content of total phosphorus, available phosphorus, available calcium and available magnesium. The comprehensive soil fertility performance was T1 > T4 > T5 > T2 > T3 > CK. Soil pH value, organic matter, available phosphorus, available potassium and available magnesium were sensitive factors affecting the growth and resin yield of *P. massoniana*. The Soil Fertility Index (SFI) was significantly positively correlated with the growth and resin yield of *P. massoniana*. In summary, in the process of resin harvest in the middle-aged *P. massoniana* forest, in order to reduce the impact of resin yield on *P. massoniana* growth, quickly supplement soil nutrients, and increase the growth and resin production of *P. massoniana*, it is recommended to apply inorganic fertilizer + micro-fertilizer + lime, which has the best effect.

**Key words:** *Pinus massoniana* plantation; fertilization; growth; resin yield; soil fertility; canonical correlation analysis

责任编辑: 梁 晓



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>