

网络出版时间:2023-06-30 16:13

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.01.008

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1390.S.20230629.1647.017.html

配比施肥对柚木早期生长及叶片养分含量的影响

赵威威^{1,2},周再知¹,张青青¹,黄桂华¹,韩强¹,王先棒¹

(1 中国林业科学研究院 热带林业研究所,广东 广州 510520;2 南京林业大学 林学院,江苏 南京 210037)

【摘要】【目的】探究不同肥料比对柚木幼树生长及叶片养分和叶绿素含量的影响,为确定适宜的柚木施肥方案提供参考。【方法】以柚木幼林为研究对象,采用随机区组试验设计,设置 5 种配比施肥处理(0.25 kg/株氮磷钾复合肥+0.25 kg/株钙镁磷肥(T1)、0.25 kg/株钙镁磷肥+2.50 kg/株有机肥(T2)、0.25 kg/株氮磷钾复合肥+0.25 kg/株氧化镁+10.00 g/株硼肥(T3)、0.25 kg/株氮磷钾复合肥(T4)、0.25 kg/株氮磷钾复合肥+1.50 kg/株钙镁磷肥(T5)),以不施肥处理为对照(CK),分析不同施肥处理柚木幼树生长量及叶片养分和叶绿素含量的变化,运用隶属函数法对不同处理的施肥效应进行综合评价。【结果】①与 CK 相比,不同配比施肥处理均可以提高柚木的树高、胸径和材积平均增量,其中均以 T5 处理柚木的树高、胸径和材积平均增量最高,较 CK 分别提高了 44.81%,82.02%和 108.72%。②与 CK 相比,不同配比施肥处理柚木叶片全 N、全 K、交换性 Ca 含量均无显著变化,但叶片全 P、交换性 Mg 含量显著提升,叶片 N/P 值显著降低。③与 CK 相比,不同配比施肥处理均可以提高柚木叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量,降低叶绿素 a/b 值,其中 T5 处理叶片叶绿素 a 和总叶绿素含量与 CK 差异达显著水平。④隶属函数法评价结果显示,5 种配比施肥处理的肥料效应由大到小排序为 T5>T3>T2>T1>T4。【结论】5 种配比施肥处理均可促进柚木叶片对钙、镁、磷营养元素的吸收与累积,加快叶绿素的合成,促进柚木幼树生长量的增加,其中 0.25 kg/株氮磷钾复合肥+1.5 kg/株钙镁磷肥为最佳肥料组合。

【关键词】 柚木;配比施肥;养分累积;叶绿素合成

【中图分类号】 S792.990.5

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2024)01-0071-08

Effects of proportioning fertilization on early growth and leaf nutrients of teak

ZHAO Weiwei^{1,2}, ZHOU Zaizhi¹, ZHANG Qingqing¹, HUANG Guihua¹,
HAN Qiang¹, WANG Xianbang¹

(1 Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China;

2 College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of different fertilizer ratios on growth, leaf nutrients and chlorophyll content of young teak trees to provide references for determining appropriate fertilization program. 【Method】 Five fertilizer treatments of 0.25 kg/plant NPK compound fertilizer+0.25 kg/plant calcium-magnesium phosphate (T1), 0.25 kg/plant calcium-magnesium phosphate+2.50 kg/plant organic fertilizer (T2), 0.25 kg/plant NPK compound fertilizer+0.25 kg/plant magnesium oxide+10.00 g/plant boron fertilizer (T3), 0.25 kg/plant NPK compound fertilizer (T4) and 0.25 kg/plant NPK compound fertilizer+1.50 kg/plant calcium-magnesium-phosphorus fertilizer (T5) were configured with no fertilizer treatment as control (CK). The changes of growth, leaf nutrients and chlorophyll content of

【收稿日期】 2022-09-23

【基金项目】 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0601100)

【作者简介】 赵威威(1996—),男,河南周口人,在读硕士,主要从事珍贵树种培育研究。E-mail:Zhao_vivi@163.com

【通信作者】 周再知(1963—),女,广东广州人,研究员,博士,主要从事资源树种培育研究。E-mail:zzzhcn@21cn.com

young teak trees in different treatments were analyzed, and the effects of different fertilization treatments were comprehensively evaluated by the affiliation function method. 【Result】 ① Compared with CK, different fertilization treatments increased the average increment of teak height, diameter at breast height and wood volume, among which T5 treatment was the best and increased average increment of teak height, diameter at breast height and wood volume by 44. 81%, 82. 02% and 108. 72%, respectively. ② Compared with CK, there was no significant change in total N, total K and exchangeable Ca content of teak leaves in different treatments, while total P and exchangeable Mg contents in leaves were significantly increased and leaf N/P was significantly decreased. ③ Compared with CK, different treatments increased chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll contents of teak leaves while decreased chlorophyll a/b value, among which chlorophyll a and total chlorophyll contents of T5 were significant different from CK. ④ The subordinate function method showed that the fertilizer effects of the five fertilizer ratios were in the descending order of T5 > T3 > T2 > T1 > T4. 【Conclusion】 All the test fertilization combinations could promote the growth and leaf nutrients of teak trees and the best was 0. 25 kg/plant NPK compound fertilizer + 1. 5 kg/plant calcium-magnesium-phosphorus fertilizer.

Key words: teak; proportional fertilization; nutrient accumulation; chlorophyll synthesis

施肥是改善林木营养状况、促进生长的重要营林措施,其根本目的在于改善林木外部营养环境、及时供给林木生长所需营养、促进营养元素的吸收利用、提高林木生物量的积累和缩短成材年限^[1-3]。目前,有关林木施肥的报道多集中于 N、P、K 配比施肥试验,在闽楠^[4]、薄壳山核桃^[5]和灰木莲^[6]配比施肥试验中发现,适量 N、P、K 配比处理可以提高林木叶片光合色素含量,增强光合性能,加快林木生长。叶片是林木营养的储存器官,可反映林木对营养元素的吸收利用状况,通过叶片养分吸收情况进行针对性合理配施,可有效解决林木营养供给并避免资源浪费。前人对紫椴^[7]、辣木^[8]、红锥^[9]和马尾松^[10]等的研究发现, N、P、K 配比施肥可明显提高林木叶片的养分含量,降低林木对土壤环境的依赖。由此可见,合理配比施肥可有效提高幼树早期生长速率及叶片叶绿素含量和养分含量,提高林木经济效益。

柚木(*Tectona grandis* L. f.)为世界知名的珍贵用材树种,原产印度、缅甸、泰国和老挝等国,19世纪初期引种于我国云南的中缅边境地区,现主要分布在我国热带、南亚热带地区及干热河谷热区的 80 多个县市^[11-12]。由于我国南方地区土壤主要呈酸性,限制了柚木的生长和适生范围,严重制约了柚木规模化种植与产业的发展。针对柚木适生区土壤酸化问题,中国林业科学研究院热带林业研究所对柚木在酸性土壤上的栽培开展了系列研究,对柚木苗期矿质营养、苗木施肥及大田平衡施肥等进行了探索,逐步建立了酸性土壤条件下的柚木栽培技术,

如周再知等^[13]报道了不同钙肥及用量对柚木生长的影响;梁卫芳等^[14]、陈天宇等^[15]研究了 N、P、K、Ca 不同配比施肥对柚木幼林早期生长的影响。目前,对于改良酸性土壤较为安全有效的肥料有钙镁磷肥、磷钾化肥和有机肥等^[16-17],周武先等^[18]研究表明,酸性土壤上配比施用钙镁磷肥不仅可有效改善土壤酸化,同时还能提供林木生长所需养分。本研究在前人的基础上,分析氮磷钾复合肥、钙镁磷肥、有机肥、氧化镁肥与硼肥配施对柚木幼树生长量、叶片养分含量及叶绿素含量的影响,以期筛选适宜的配比施肥组合,进而为柚木幼林的合理施肥提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地设在广西壮族自治区南宁市武鸣区锣圩镇(108°01'E, 23°15'N),属亚热带季风气候区,年积温 5 000~8 300 °C;年日照时数达 1 600~1 800 h,年均气温 21.7 °C,最高气温 36.5 °C,最低气温 1.3 °C,年均降水量 1 100~1 300 mm,主要集中在 6—9 月。试验地海拔 110 m,土壤类型为山地红壤,0~20 cm 土层土壤的主要理化性质为:pH 值 6.2,有效氮 16.88 mg/kg,有效磷 21.71 mg/kg,速效钾 10.54 mg/kg,交换性钙 11.60 mg/kg,交换性镁 3.23 mmol/kg,有效硼 7.5 mg/kg。2018 年 3 月营建试验林 1.3 hm²,株行距为 3 m×5 m。

1.2 材料与试验设计

试验所用肥料有,氮磷钾复合肥, $m(N)$:

$m(\text{P}_2\text{O}_5) : m(\text{K}_2\text{O}) = 15 : 15 : 15$; 钙镁磷肥,以 P_2O_5 为主,其质量分数为 18%;氧化镁肥,以 MgO 为主,其质量分数为 12%;有机肥,为糖蜜腐殖酸型,其总养分 $\geq 20\%$;硼肥,以 H_3BO_3 为主,其质量分数为 99%。所有柚木早期施用肥料均在市场购入。

试验采用完全随机区组设计,各处理的肥料用

量见表 1。共设置 5 种配比施肥处理和 1 个不施肥的对照处理(CK),每个处理 24 株,重复 3 次。分别于 2018 年 9 月和 2019 年 3 月根据表 1 中的肥料种类和施用量进行施肥,每次施肥时,将肥料施放在距树干基部 50 cm 处的环形沟内,土肥混合均匀后填土覆盖。施肥试验之前,各处理柚木生长情况无显著差异(表 2)。

表 1 不同配比施肥处理的肥料用量

Table 1 Fertilizer dosage for different treatments

处理 Treatment	氮磷钾复合肥/(kg·株 ⁻¹) Nitrogen, phosphorus and potassium compound fertilizer	钙镁磷肥/(kg·株 ⁻¹) Calcium magnesium phosphate fertilizer	有机肥/ (kg·株 ⁻¹) Organic fertilizer	氧化镁肥/(kg·株 ⁻¹) Magnesium oxide fertilizer	硼肥/(g·株 ⁻¹) Boric fertilizer
CK	0	0	0	0	0
T1	0.25	0.25	0	0	0
T2	0	0.25	2.50	0	0
T3	0.25	0	0	0.25	10.00
T4	0.25	0	0	0	0
T5	0.25	1.50	0	0	0

表 2 施肥前不同处理柚木样树的生长情况

Table 2 Growth of teak before different fertilization treatments

处理 Treatment	树高/m Heigh	胸径/cm Diameter at breast height	材积/($\times 10^{-3}$) m ³ Volume of timber	处理 Treatment	树高/m Heigh	胸径/cm Diameter at breast height	材积/($\times 10^{-3}$) m ³ Volume of timber
CK	3.00±0.12	3.87±0.11	2.24±0.38	T3	3.10±0.10	3.86±0.13	2.25±0.21
T1	3.10±0.12	3.89±0.19	2.29±0.29	T4	3.10±0.03	3.87±0.19	2.22±0.25
T2	3.20±0.18	3.92±0.33	2.49±0.55	T5	3.00±0.13	3.88±0.15	2.12±0.20

1.3 指标测定

施肥处理后每年测定 1 次柚木树高(H)和胸径(D),连续测定 2 年(2019 年 9 月和 2020 年 9 月),并计算单株材积($V = 0.4787 \times D_{\text{BH}}^2 \times H$,其中 D_{BH} 为柚木胸径, m; H 为树高, m)^[19]。

2020 年 9 月,从每个处理小区中随机选取 5 株林木,取树干上部成熟向阳的功能叶 5~8 片,干冰保存,一部分叶片样品用于叶绿素含量的测定(乙醇分光光度法)^[20];剩余样品置烘箱内于 90 °C 杀青 30 min,再 70 °C 烘干 48 h,用于营养元素含量的测定。其中叶片全氮(TN)含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法和凯氏定氮法测定,叶片全磷(TP)含量采用钼锑抗比色法测定,叶片全钾(TK)含量采用火焰光度法测定。将部分叶片样品于 550 °C 下灰化至灰白色,以 HCl 浸提、 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮,采用 1 mol/L 醋酸铵浸提法^[21]测定交换性钙(ECa)、镁(EMg)含量。

1.4 数据统计与分析

使用 Excel 对试验数据进行预处理及图表制作,运用 SPSS 22.0 统计软件对各测定指标进行单因素方差分析、Duncan's 法多重比较。采用隶属函

数法对不同处理柚木幼树的树高和胸径增量、叶片养分含量(全 N、全 P、全 K、交换性 Ca 和交换性 Mg)及总叶绿素含量共 8 个指标数据进行定量转换,计算 8 个指标的隶属函数值,最后取所有指标隶属函数平均值作为综合评价价值,进行施肥效应比较,综合评价价值越大肥效越好。隶属函数值的计算公式^[22]为: $U(X_i) = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}$,其中 $U(X_i)$ 为测定指标的隶属函数值, X_i 为某项指标的测定值, X_{\max} 和 X_{\min} 为某项指标的最大值和最小值。

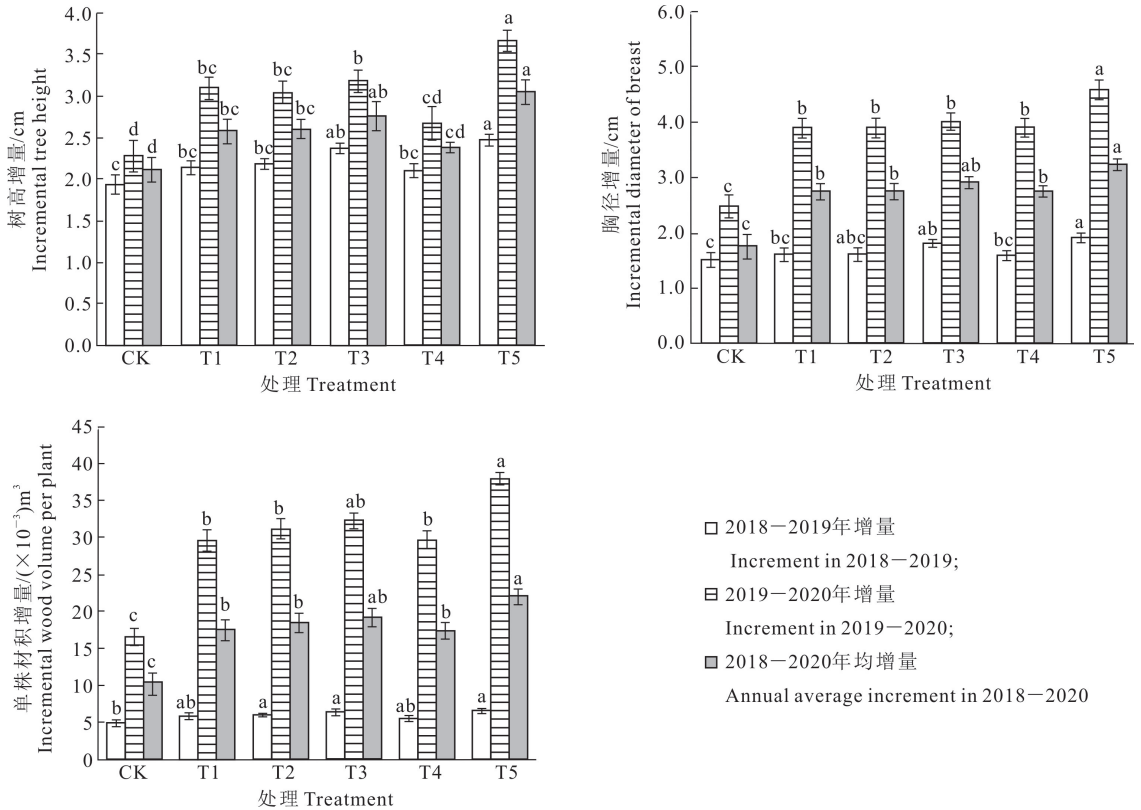
2 结果与分析

2.1 配比施肥对柚木生长的影响

由图 1 可见,与 CK 相比,配比施肥处理均可有效促进柚木幼树的生长,树高、胸径和材积均呈逐年增加趋势,但不同配比施肥处理对柚木生长的促进效果存在较大差异,其中以 T5 处理的促进效果最好, T3 处理次之, T4 处理最差。2018—2020 年, T5、T1、T4 处理柚木幼树树高平均增量较 CK 分别显著提升了 44.81%, 22.64%, 13.20%, 可见,在施用等量氮磷钾复合肥时,树高增量随钙镁磷肥施用

量的增加而增大。与 T4 处理相比, T1、T3 处理幼树胸径和材积平均增量均有不同程度的提高, 但三者之间差异不显著, 说明幼树胸径和材积的生长主要受到 N、P、K 营养元素供给的影响, 受 Ca、Mg、B

等元素影响不大。总体来看, 不同处理对柚木幼树生长量的促进作用由高到低依次为 T5>T3>T2>T1>T4>CK。



图柱上标不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下图同

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below

图 1 配比施肥对柚木幼树生长的影响

Fig. 1 Effects of proportional fertilization on growth of young teak trees

2.2 配比施肥对柚木叶片养分含量的影响

由图 2 可知, 配比施肥对柚木幼树叶片养分含量均有不同程度的影响, 其中叶片全氮、全磷、全钾、交换性钙和交换性镁含量分别为 23.68~25.41, 2.01~2.56, 11.71~12.98, 8.54~9.68 和 2.22~2.84 g/kg。方差分析结果显示: 叶片全氮(TN)含量仅 T5 与 T4 处理之间差异显著, T5 较 T4 处理提高 10.43%, 而其他处理间差异均不显著。各施肥处理柚木叶片全磷(TP)、交换性镁(EMg)含量均显著高于 CK, 其中 T5 处理叶片 TP、EMg 含量最高, 分别较 CK 提高了 69.5% 和 117.0%。各施肥处理柚木叶片全钾(TK)含量与 CK 之间差异均不显著。仅 T3 处理叶片交换性钙(ECa)含量较 CK 显著提高了 25.6%, 其他处理叶片 ECa 含量较 CK 虽有不同程度提高, 但差异均不显著。T1~T5 处理叶片 N/P 值较 CK 处理均显著下降, 其中 T5 处理降幅

最大, 达 56.2%。

2.3 配比施肥对柚木叶片叶绿素含量的影响

由表 3 可以看出, 与 CK 相比, 不同配比施肥处理均可使柚木叶片的光合色素含量有所提升。其中仅 T5 处理柚木叶片叶绿素 a 和总叶绿素含量与 CK 之间的差异达到了显著水平, 分别较 CK 处理提高了 16.46% 和 11.29%, 其余施肥处理与 CK 之间均无显著差异。不同配比施肥处理柚木叶片的叶绿素 b 含量较 CK 虽有所提升, 但差异均不显著。与 CK 相比, 不同施肥处理叶片叶绿素 a/b 均有不同程度的降低, 其中 T3 处理的降低幅度最大。

2.4 柚木幼树配比施肥效应的综合评价

选取配比施肥处理后的柚木幼树生长量(树高、胸径增量)以及叶片总叶绿素含量和养分(全 N、全 P、全 K、交换性 Ca 和交换性 Mg)含量等 8 个指标, 计算隶属函数值, 对不同施肥处理的影响效应进行

综合评价,结果见表 4。

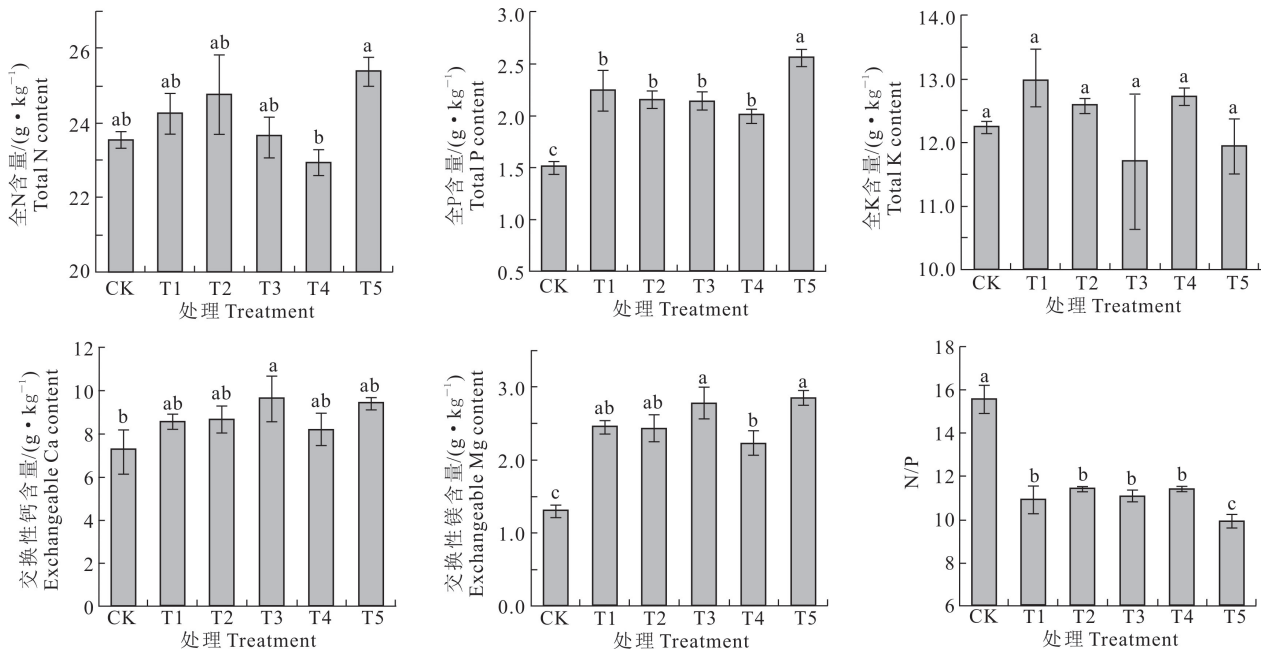


图 2 配比施肥对柚木叶片养分含量的影响

Fig. 2 Effect of proportional fertilization on nutrient contents of teak leaves

表 3 配比施肥对柚木叶片叶绿素含量的影响

Table 3 Changes in chlorophyll content of teak leaves by rationed fertilization

处理 Treatment	叶绿素 a 含量/(mg · g ⁻¹) Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量/(mg · g ⁻¹) Chlorophyll b content	总叶绿素含量/(mg · g ⁻¹) Total chlorophyll content	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
CK	2.36 ± 0.05 b	0.89 ± 0.07 a	3.28 ± 0.12 b	2.70 ± 0.20 a
T1	2.38 ± 0.11 b	1.11 ± 0.20 a	3.46 ± 0.30 ab	2.27 ± 0.24 bc
T2	2.37 ± 0.16 b	1.14 ± 0.24 a	3.51 ± 0.35 ab	2.15 ± 0.40 bc
T3	2.47 ± 0.13 ab	1.19 ± 0.09 a	3.66 ± 0.22 ab	2.08 ± 0.05 c
T4	2.37 ± 0.09 b	1.00 ± 0.17 a	3.37 ± 0.26 ab	2.53 ± 0.13 ab
T5	2.66 ± 0.10 a	1.17 ± 0.07 a	3.82 ± 0.14 a	2.33 ± 0.09 abc
F 检验 F text	*	ns	*	ns

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。* 表示有显著影响 ($P < 0.05$), ** 表示有极显著影响 ($P < 0.01$), ns 表示影响不显著 ($P > 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). * indicates significant effect ($P < 0.05$), ** indicates highly significant effect ($P < 0.01$), and ns indicates insignificant effect ($P > 0.05$).

表 4 不同配比施肥处理对柚木生长影响效应的综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation on effect of fertilizer application with different ratios

处理 Treatment	隶属函数值 Affiliation function value								综合评价值 Comprehensive evaluation values	排序 Rank
	树高增量 Tree high increments	胸径增量 Chest diameter increments	总叶绿素含量 Total chlorophyll content	全 N 含量 Total N content	全 P 含量 Total P content	全 K 含量 Total K content	交换性 Ca 含量 ECa content	交换性 Mg 含量 EMg content		
CK	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.43	0.09	6
T1	0.48	0.68	0.32	0.54	0.60	0.74	0.52	1.00	0.61	4
T2	0.60	0.69	0.43	0.74	0.62	0.72	0.57	0.70	0.63	3
T3	0.71	0.70	0.69	0.50	0.70	0.95	1.00	0.00	0.66	2
T4	0.56	0.62	0.17	0.00	0.47	0.59	0.38	0.80	0.45	5
T5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.19	0.89	1

由表 4 可以看出,5 种施肥处理影响效应的综合评价值为 0.45~0.89,且均大于 CK 处理,其中 T5 处理的综合评价价值最高,达 0.89;T4 处理的综合评价价值最低,为 0.45。说明配比施肥对柚木幼树生长的生理指标均具有促进作用。5 种配比施肥处理的肥效由大到小依次为 T5>T3>T2>T1>T4。

3 讨论

树高和胸径是衡量林木施肥效果的重要指标^[23]。本研究发现,不同配比施肥处理柚木幼树树高和胸径的平均增量整体均较 CK 显著提高,这与前人在不同树种上进行的 N、P、K 配比施肥的研究结论^[24]一致,说明合理的配比施肥对林木生长具有显著促进作用。5 种施肥处理中,T5 处理树高和胸径的平均增量最大,这可能是因为 T5 处理中除了施用氮磷钾肥外,还施用了钙镁磷肥。钙镁磷肥中富含的镁和磷元素可促进细胞分裂,进而加快根系和地上部分的生长^[25];此外,钙镁磷肥为碱性肥料,施入土壤后会提高土壤 pH,从而改善柚木生长的酸性土壤环境。5 种施肥处理中,T3 处理柚木的材积平均增量低于 T5,但高于 T1、T2 和 T4 处理,其主要原因可能与添加的镁肥(氧化镁肥)有关,镁肥可缓解柚木早期生长的缺镁症状,另外施用氧化镁肥可促进柚木根系物质分泌,提高土壤 pH,从而及时补充柚木对于营养元素的吸收与利用,促进光合作用的进行,进而加速地上部分的生长^[26]。

叶片养分含量反映林木的营养状态,是评价肥效和指导施肥的常用指标^[27]。本试验中,柚木幼树叶片营养元素含量表现为全 N>全 K>全 P,说明柚木幼树对 N、K 具有高富集特征,这与梁卫芳等^[14]、陈天宇等^[15]研究结果一致。本研究表明,T3 和 T5 处理柚木幼树叶片全 N、全 P 含量均高于 CK,而其全 K 含量均低于 CK,可能是肥料中富含的养分元素促进了柚木对 N、P 的吸收而抑制了 K 的吸收,也可能与季节、光照、温度和水分等的影响有关^[28],其原因还需进一步研究。T5 处理叶片的可交换性钙和镁含量均高于 T1 与 T4 处理,这与添加钙镁磷肥后土壤中的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量增加有关。T3 处理叶片交换性 Mg 含量较高,其主要原因可能与施用氧化镁肥和硼肥有关。硼和镁元素存在互作效应,硼肥可加快光合色素的合成,从而促进柚木对 Mg²⁺ 的吸收,进一步提高叶片 Mg 元素的积累^[29]。

叶绿素含量高低可以直接反映林木能量传递转

化和干物质积累能力^[30]。尤其是施用 N、Mg 肥后,除能补充林木生长发育所需的营养元素外,还能影响光合色素的合成^[31]。本研究中,与 CK 相比,5 种不同配比施肥处理柚木幼树叶片的的光合色素含量均有不同程度的增加,其中 T5 处理叶片光合色素含量高于 T1 和 T4 处理,说明较高的钙镁磷肥施用量可以促进柚木对镁的吸收。Mg²⁺ 对维持光合酶活性、叶绿体的结构和功能起着重要作用,从而可以进一步促进光合色素的合成^[32-33]。本研究基于柚木生长量和叶片养分、叶绿素含量的 8 个指标对不同配比施肥处理的肥效进行了综合评价,结果发现,T5 处理(0.25 kg 氮磷钾复合肥+1.50 kg 钙镁磷肥)的施肥效应最佳,其次为 T3 处理(0.25 kg 氮磷钾复合肥+0.25 kg 氧化镁肥+0.01 kg 硼肥),仅施用 NPK 复合肥的 T4 处理效果不甚理想。由此可见,氮磷钾复合肥与钙镁磷肥合理配施,更有利于促进柚木的早期生长及叶片营养成分的累积。

[参考文献]

- [1] Achat D L, Pousse N, Nicolas M, et al. Nutrient remobilization in tree foliage as affected by soil nutrients and leaf life span [J]. *Ecological Monographs*, 2018, 88(3): 408-428.
- [2] 周 樊, 陈文静, 曹 凡, 等. 配比施肥对薄壳山核桃幼苗生长和生理特性的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(9): 96-103.
Zhou F, Chen W J, Cao F, et al. Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of pecan seedlings [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(9): 96-103.
- [3] 覃 奎, 李承东, 马道承, 等. 氮磷钾配比施肥对中国无忧花幼苗生长及光合特性的影响 [J]. *江西农业学报*, 2022, 34(2): 115-121.
Qin K, Li C D, Ma D C, et al. Effects of N, P and K fertilization treatments on growth and photosynthetic characteristics of *Saraca dives* seedlings [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022, 34(2): 115-121.
- [4] Wang X, Wei X L, Wu G Y, et al. High nitrate or ammonium applications alleviated photosynthetic decline of *Phoebe bournei* seedlings under elevated carbon dioxide [J]. *Forests*, 2020, 11(3): 293.
- [5] 郑小琴, 陈文静, 曹 凡, 等. 配方施肥对薄壳山核桃苗期养分含量及光合作用的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(5): 169-174.
Zheng X Q, Chen W J, Cao F, et al. Effects of the proportional fertilization on the nutrient content and photosynthesis of young grafted pecan seedlings [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43(5): 169-174.

- [6] 陈琳,卢立华,蒙彩兰.氮、磷、钾对灰木莲幼苗生长和光合作用的影响[J].西北林学院学报,2017,32(2):16-21.
Chen L, Lu L H, Meng C L. Combined effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and photosynthesis of *Manglietia glauca* seedlings [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 16-21.
- [7] 杨阳,张德鹏,及利,等.配比施肥对紫椴播种苗生长、养分积累及根系形态的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(9):63-70.
Yang Y, Zhang D P, Ji L, et al. Effects of formula fertilization on growth, nutrient accumulation and root morphology of *Tilia amurensis* seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(9): 63-70.
- [8] 程世敏,黄丽娜,赵增贤,等.氮磷钾施用量对辣木生长及养分积累的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2021,36(1):147-154.
Cheng S M, Huang L N, Zhao Z X, et al. Effects of NPK fertilization dosages on the growth and nutrient accumulation of *Moringa oleifera* [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2021, 36(1): 147-154.
- [9] 魏国余,亢亚超,廖曦,等.配方施肥对红锥幼林生理及叶片养分含量的影响[J].西北林学院学报,2020,35(4):32-36,83.
Wei G Y, Kang Y C, Liao X, et al. Effects of formula fertilization on the physiology characteristics and leaf nutrition contents of young *Castanopsis hystrix* stands [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 32-36, 83.
- [10] 罗仙英,莫荣海,丁贵杰,等.不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响[J].广西植物,2022,42(4):608-616.
Luo X Y, Mo R H, Ding G J, et al. Effects of different fertilization ratios on growth characteristics of *Pinus massoniana* seedlings [J]. Guihaia, 2022, 42(4): 608-616.
- [11] 梁坤南,周再知,马华明,等.我国珍贵树种柚木人工林发展现状、对策与展望[J].福建林业科技,2011,38(4):173-178.
Liang K N, Zhou Z Z, Ma H M, et al. Development status, countermeasures and prospects of the rare tree species teak plantations in China [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2011, 38(4): 173-178.
- [12] 周强,黄桂华,张绍祥,等.肥料施肥对不同柚木无性系早期生长的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(7):6-10.
Zhou Q, Huang G H, Zhang S X, et al. Response of early growth of different *Tectona grandis* clones to different fertilizer application [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(7): 6-10.
- [13] 周再知,梁坤南,马华明,等.酸性土壤上不同钙肥及用量对柚木苗生长的影响[J].西部林业科学,2016,45(5):31-37.
Zhou Z Z, Liang K N, Ma H M, et al. Growth response of teak (*Tectona grandis*) seedling to different calcium fertilizer on acidic soils [J]. Journal of West China Forestry Science, 2016, 45(5): 31-37.
- [14] 梁卫芳,梁坤南,黄桂华,等.沸石与 N、P、K、Ca 不同配比对柚木幼林早期生长的影响[J].中南林业科技大学学报,2017,37(4):14-20.
Liang W F, Liang K N, Huang G H, et al. Effects of zeolite and the different proportion of N, P, K and Ca fertilized on the early growth of teak (*Tectona grandis* L. f.) young plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(4): 14-20.
- [15] 陈天宇,黄桂华,王西洋,等.配比施肥对柚木无性系幼林生长的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(4):66-75.
Chen T Y, Huang G H, Wang X Y, et al. Effects of proportioning fertilization on the growth of young teak clones [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(4): 66-75.
- [16] 吕永华,詹焯寿,马武军,等.石灰、钙镁磷肥对烤烟生产及土壤酸度调节的影响[J].生态环境,2004,13(3):379-381.
Lü Y H, Zhan B S, Ma W J, et al. Influence of lime and serpentine-fused phosphate on tobacco production and soil acidity regulation [J]. Ecology and Environment, 2004, 13(3): 379-381.
- [17] 梅旭阳,高菊生,杨学云,等.红壤酸化及石灰改良影响冬小麦根际土壤钾的有效性[J].植物营养与肥料学报,2016(6):1568-1577.
Mei X Y, Gao J S, Yang X Y, et al. The response of soil potassium availability in rhizospheric soil of winter wheat to acidified and limed red soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016(6): 1568-1577.
- [18] 周武先,何银生,朱盈徽,等.生石灰和钙镁磷肥对酸化川党参土壤的改良效果[J].应用生态学报,2019,30(9):3224-3232.
Zhou W X, He Y S, Zhu Y H, et al. Improvement effects of quicklime and calcium magnesium phosphate fertilizer on acidified soil cultivating *Codonopsis tangshen* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 3224-3232.
- [19] 邝炳朝.柚木良种选育及配套技术[R].广州:中国林业科学研究院热带林业研究所,1996.
Kuang B C. Breeding of improved teak varieties and supporting technologies [R]. Guangzhou: Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry Sciences, 1996.
- [20] 张青青,周再知,王西洋,等.施肥对柚木光合生理和叶绿素荧光特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2021(4):31-38.
Zhang Q Q, Zhou Z Z, Wang X Y, et al. Effects of fertilization on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *Tectona grandis* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021(4): 31-38.
- [21] 萧浪涛,王三根.植物生理学实验技术[M].北京:中国农业出版社,2005:110-113.
Xiao L T, Wang S G. Experimental techniques of plant physiology [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2005: 110-113.
- [22] 许业洲,侯义梅,袁慧,等.基于 Nemerow 法和隶属度函数的湖北杉木人工林土壤肥力评价[J].中南林业科技大学学报,2021(5):1-11,28.

- Xu Y Z, Hou Y M, Yuan H, et al. Soil fertility evaluation of Chinese fir planted forest based on Nemerow method and membership function in Hubei [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021(5):1-11, 28.
- [23] Xu Q C, Ling N, Chen H, et al. Long-term chemical-only fertilization induces a diversity decline and deep selection on the soil bacteria [J/OL]. *mSystems*, 2020, 5(4): e00337-20. (2020-01-14)[2022-09-21]. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00337-20>.
- [24] 胡劲鸿, 吕 寻, 吴春燕, 等. 日本落叶松无性系种子园球果产量对长期氮磷钾配方施肥的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(1):9-18.
- Hu M H, Lü X, Wu C Y, et al. Response of cone yield in clonal seed orchard of *Larix kaempferi* to long-term nitrogen, phosphorus and potassium formula fertilization [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(1):9-18.
- [25] 王 祥, 白晶晶, 何 茜, 等. 氮磷钾配方施肥对楸树苗期生长及养分利用的影响 [J]. *林业与环境科学*, 2021, 37(3):40-46.
- Wang X, Bai J J, He Q, et al. Effects of different formulated fertilization on the growth and physiological characteristics of *Catalpa bungei* seedling [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2021, 37(3):40-46.
- [26] 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.
- Wu X R, Zhou Y C, Yu X. Effect of magnesium fertilizer on growth and element accumulation of *Pinus massoniana* seedlings [J]. *Subtropical Plant Science*, 2019, 48(1):11-16.
- [27] Ugun K, Altindal M. Effects of increasing doses of nitrogen, phosphorus, and potassium on the uptake of other nutrients in sweet cherry trees [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(1):1-8.
- [28] 张 敏, 杨浩瑜, 包 立, 等. 氮、磷、钾配比施肥对辣木生长及叶片养分吸收的影响 [J]. *林业科学研究*, 2019, 32(5):114-120.
- Zhang M, Yang H Y, Bao L, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium ratio fertilization on growth and leaf nutrient absorption of *Moringa oleifera* [J]. *Forest Research*, 2019, 32(5):114-120.
- [29] 邱 超. 钙、镁、硼肥对常山胡柚产量、品质及果实养分累积的影响 [D]. 武汉:华中农业大学, 2015.
- Qiu C. Effects of Ca, Mg and B fertilizers on yield, quality and nutrient accumulation of Changshanhuyou fruit [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [30] 段文军, 沈雅飞, 曹志华, 等. 叶面肥对油茶容器苗叶片解剖结构和光合特性的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(1):92-97.
- Duan W J, Shen Y F, Cao Z H, et al. Effect of foliar fertilizer on leaf anatomy structure and photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera* container seedlings [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(1):92-97.
- [31] 王 帅, 杨靖民, 王呈玉, 等. 生物有机无机复混肥肥料效应 [J]. *吉林农业大学学报*, 2021, 43(4):447-455.
- Wang S, Yang J M, Wang C Y, et al. Fertilizer effect of bio-organic-inorganic compound fertilizer [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2021, 43(4):447-455.
- [32] 王好运, 吴 峰, 朱小坤, 等. 叶型对马尾松幼苗生长及叶绿素荧光特征的影响 [J]. *林业科学*, 2019, 55(3):183-192.
- Wang H Y, Wu F, Zhu X K, et al. Effects of leaf types on growth and chlorophyll fluorescence characteristics in *Pinus massoniana* seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(3):183-192.
- [33] 郑博文, 徐长山, 何惠敏, 等. MgO NPs 及其析出的 Mg^{2+} 对细叶蜈蚣草 (*Egeria najas*) 光合作用的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2020, 15(5):301-309.
- Zheng B W, Xu Z S, He H M, et al. Effects of MgO NPs and their released Mg^{2+} on the photosynthesis of *Egeria najas* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(5):301-309.