

配比施肥对槟榔幼苗肥料利用率及养分协同效应的影响

降佳君¹, 温欣宇¹, 辛晓栋¹, 王 玲¹, 杨国斌¹, 王朝弼², 杨福孙^{1*}

1. 海南大学热带作物学院, 海南海口 570228; 2. 海南省土壤肥料总站, 海南海口 570203

摘 要: 为了明确 N、P、K 肥对槟榔幼苗生长及营养吸收与利用的影响, 从而确定合理的槟榔幼苗施肥技术。以槟榔幼苗为对象, 采用“3414”肥料配比田间盆栽试验, 测定不同施肥处理对槟榔幼苗营养吸收与分布及肥料利用率的影响。结果表明: (1) 施肥提高了槟榔幼苗的生物量和肥料利用率; 在氮磷钾平衡施肥时, 氮肥和磷肥相对利用率达到最大; 在不施磷肥, 氮钾平衡施肥时, 钾肥相对利用率达到最大; (2) 槟榔幼苗地上部氮养分积累量是影响其生物量的主要因子, 地下部磷养分积累量是影响其生物量的主要因子; (3) 相关性分析与通径分析表明, 氮与磷可协同促进槟榔幼苗生物量的增长, 但会受到施钾量及钾肥相对利用率的制衡, 3 种元素协同促进植株生物量增长。因此氮肥和磷肥的相对利用率是槟榔幼苗施肥的关键指标。综上, 氮磷钾配比施肥有利于槟榔幼苗的营养吸收和利用, 以 N:P:K=2:2:2 (T₆) 配比施用效果较好。

关键词: 槟榔; 氮磷钾施肥; 肥料利用率; 生理特性

中图分类号: S792.91 文献标识码: A

Effects of Fertilization Ratio on Fertilizer Uptake and Nutrient Synergy of *Areca catechu* Seedlings

JIANG Jiajun¹, WEN Xinyu¹, XIN Xiaodong¹, WANG Ling¹, YANG Guobin¹, WANG Chaobi², YANG Fusun^{1*}

1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Soil and Fertilizer Station, Haikou, Hainan 570203, China

Abstract: In order to explore the effects of N, P and K fertilizers on the growth and nutrient uptake of areca nut seedlings and provide a scientific fertilizer application in field management, areca nut seedlings were used to conduct the “3414” fertilizer ratio in pots at the greenhouse. Fertilization significantly increased biomass and fertilizer utilization of areca nut seedlings. In balanced nitrogen, phosphorus and potassium fertilization, N and P fertilizers had the maximum utilization. Balanced nitrogen and potassium fertilization without phosphate fertilizer, K fertilizers had the maximum utilization. The N content was the main factor affecting the stem and leaf biomass, while the P content was the main factor affecting root biomass. Correlation and path analysis indicated that N and P could synergistically improve the growth of areca nut seedlings, but they were affected by the application of K fertilizer. However, N, P and K fertilizers could reach balance and synergy to improve the growth of seedlings. In conclusion, N, P and K fertilizers in a rational proportion was beneficial for the nutrient uptake and utilization of areca nut seedlings, and N:P:K=2:2:2 (T₆) was the most suitable fertilization ratio.

Keywords: *Areca catechu*; N, P and K fertilization; fertilizer utilization rate; physiological characteristics

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.02.011

施肥是调节植物生长发育的重要手段, 通过长发育, 提高植株的产量。营养元素中 N、P、K 施肥可以为植物提供必要的养分, 促进植物的生大量营养元素既是植株正常生长所必须的, 同时

收稿日期 2022-07-12; 修回日期 2022-12-12

基金项目 海南省教育厅高等学校科学研究项目 (No. Hnky2019ZD-7); 海南省槟榔现代农业产业技术体系项目; (No. HNARS2022-1-G3); 海南省土壤肥料总站项目 (No. zzzz002017038)。

作者简介 降佳君 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 作物栽培与耕作。*通信作者 (Corresponding author): 杨福孙 (YANG Fusun), E-mail: fsyang1590@163.com。

也是植物的关键性营养元素，主要参与植株体内的物质组成和新陈代谢过程^[1-2]，不同元素之间通过协同作用来实现作物不同营养的平衡。因此，人们尝试用多种施肥方式或者不同施肥配方，以期更大程度地提高植株对营养的吸收率，从而增加植株的光合速度，提高植株的生物量。已经有大量研究证实，科学合理的施肥配比可以有效改善植株的生长发育速率与光合速度，从而提高植物对营养物质的吸收和利用。而植物养分特性则是体现植株功能特征的关键指标，主要涉及营养元素吸收、利用与使用的效率等方面^[3-4]。据调查，发现我国氮肥利用率在 30%~35%之间，磷肥利用率为 10%~25%，钾肥利用率为 25%~40%，与发达国家还存在很大差距^[5]。在日常种植中，人们一味地追求增施化肥，却忽略了植株肥料利用率低的现象，不仅浪费了资源，还污染了环境。

槟榔 (*Areca catechu* L.) 是棕榈科热带作物，是我国“四大南药”之首^[6]。槟榔在我国的历史悠久，主要分布在海南省。目前，槟榔在海南省热带作物种植面积中位于第二，经统计，其种植面积已经高达 11.52 万 hm^2 ，是海南省最主要的经济作物之一^[7-8]。海南土壤为砖红壤，肥力低，传统粗放的栽培模式和盲目的施肥导致植物营养失衡^[9-10]，同时也是导致槟榔生理性黄化的关键因子。在作物幼苗的全生长周期中，由于施肥比例不当，极易导致缺肥或烧苗，不合理的施肥会大大降低植物的生长活力，影响植物的正常生长发育。为提高肥料利用率，响应国家推行的“化肥减量增效”政策，使氮磷钾配比达到最优化^[11-12]，因此，在苗期发育过程中，应采用科学合理的施肥配比及管理促进槟榔幼苗的生长，提高其生物积累量。目前，鲜有对槟榔幼苗氮磷钾肥配施方面的研究，仍主要靠农户种植经验培育，导致槟榔幼苗成株率不稳定。本研究通过分析不同施肥量对槟榔幼苗生长和肥料利用率的影响，找出最适合槟榔幼苗生长的施肥措施，为槟榔生产育苗和管理提供理论依据及技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2021 年 3—9 月在海南大学海甸校区农学基地进行。试验材料为槟榔热研一号品种，选取一年生健壮且生长一致的槟榔幼苗。盆栽容器规格为 26 cm×26 cm×35 cm，栽培基质为红壤：

沙子=7：3（V/V）混合。pH 5.9，有机质含量为 16.87 g/kg，碱解氮含量为 30mg/kg，有效磷含量为 20.7 mg/kg，速效钾含量为 93.5 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 参考何萍等^[13]的作物施肥理论和预试验结果确定施肥量，试验设计采用“3414”并增加单施 N、P、K 施肥试验方案（表 1），即 N、P、K 肥 3 个因素，4 个施肥水平（0, 1, 2, 3），0 水平为不施肥，1 水平为 2 水平的 1/2 倍，2 水平为常用施肥量，3 水平为 2 水平的 3/2 倍，共 17 个处理，其中 T₁ 为对照（CK），每个处理设 3 次重复，每处理 6 株，试验采用随机区组排列，进行盆栽试验。供试肥料为尿素（N, 46.65%）、过磷酸钙（P₂O₅, 12%）、氯化钾（KCl, 60%）。试验中肥料一次性施入，采取常规水分管理。

表 1 施肥试验设计							
Tab. 1 Fertilization test design						g/株	
编号 No.	处理 Treatment	施用量 Application					
		N	尿素 Urea	P	过磷酸钙 Superphosphate	K	KCl
T ₁ (CK)	N ₀ P ₀ K ₀	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T ₂	N ₀ P ₂ K ₂	0.0	0.0	0.7	4.3	0.8	1.4
T ₃	N ₁ P ₂ K ₂	1.1	2.3	0.7	4.3	0.8	1.4
T ₄	N ₂ P ₀ K ₂	2.1	4.6	0.0	0.0	0.8	1.4
T ₅	N ₂ P ₁ K ₂	2.1	4.6	0.3	2.1	0.8	1.4
T ₆	N ₂ P ₂ K ₂	2.1	4.6	0.7	4.3	0.8	1.4
T ₇	N ₂ P ₃ K ₂	2.1	4.6	1.0	6.4	0.8	1.4
T ₈	N ₂ P ₂ K ₀	2.1	4.6	0.7	4.3	0.0	0.0
T ₉	N ₂ P ₂ K ₁	2.1	4.6	0.7	4.3	0.4	0.7
T ₁₀	N ₂ P ₂ K ₃	2.1	4.6	0.7	4.3	1.3	2.1
T ₁₁	N ₃ P ₂ K ₂	3.2	7.0	0.7	4.3	0.8	1.4
T ₁₂	N ₁ P ₁ K ₂	1.1	2.3	0.3	2.1	0.8	1.4
T ₁₃	N ₁ P ₂ K ₁	1.1	2.3	0.7	4.3	0.4	0.7
T ₁₄	N ₂ P ₁ K ₁	2.1	4.6	0.3	2.1	0.4	0.7
T ₁₅	N	2.1	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0
T ₁₆	P	0.0	0.0	0.7	4.3	0.0	0.0
T ₁₇	K	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.4

1.2.2 测定指标与方法 （1）生物量及营养元素含量。在施肥前后进行取样，每个处理随机选取 3 株。将样品在 105 ℃条件下杀青 30 min，并于 75 ℃条件下烘干至恒重，称量各部位干重。分别用凯氏定氮法、钼锑抗比色法、原子吸收分光光度计法测定样品的全 N、全 P、全 K 含量^[14]。

（2）养分积累量与肥料利用率。植株整体养

分积累量：植株 N (P、K) 养分积累量=根中 N (P、K) 养分积累量+叶中 N (P、K) 养分积累量+茎中 N (P、K) 养分积累量；植株各部位养分积累量：根 (茎、叶) 中 N (P、K) 养分积累量=根 (茎、叶) 中 N (P、K) 含量×根 (茎、叶) 干重。

植株肥料相对利用率：N (P、K) 肥相对利用率=[(施肥后植株养分积累量-施肥前植株养分积累量)-(施肥后不施肥区植株养分积累量-施肥前不施肥区植株养分积累量)]/养分施入量×100%。

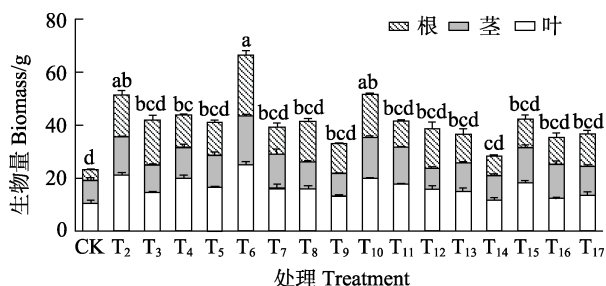
1.3 数据处理

采用 Excel 软件进行数据处理，数据均以平均值 (Mean)±标准差 (SD) 表示；采用 SPSS 16.0 软件进行因素方差分析、相关性分析 (Person 算法) 及通径分析，采用 GraphPad Prism 6 和 Cytoscape 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗生物量及其分配的影响

选取不同 N、P、K 配比施肥处理后的槟榔幼苗进行生物量测定，结果发现不同 N、P、K 配比施肥对槟榔幼苗生物量的影响程度不同。由图 1 可知，在所有施肥处理中，根生物量最佳为 T₆，T₃ 次之，CK 最小；茎生物量最佳为 T₆，T₁₀ 次之，T₁₂ 最小；叶生物量最佳为 T₆，T₂ 次之，CK 最小；总生物量最佳为 T₆，T₁₀ 次之，CK 最小。当 P、K 或 N、K 为 2 水平，增施 N 肥或 P 肥可以显著提高槟榔幼苗的生物量，但当施 N 水平或施 P 水平为 3 水平时，生物量又会呈一定程度的下降趋势，当 N、P 为 2 水平时，增施 K 肥会促进生物



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P < 0.05$).

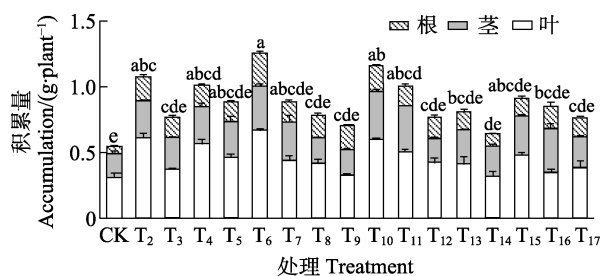
图 1 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗生物量及其分配的影响

Fig. 1 Effect of different N, P and K fertilization ratios on the biomass and distribution of areca nut seedlings

量的增加，在中等水平时达到最大值后呈下降趋势。可见与 CK 相比不同处理组的生物量均有所增加，对总生物量进行比较后发现 T₆ 为最佳施肥组合。

2.2 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗各器官 N 分配及肥料利用率的影响

对施肥处理后的槟榔幼苗进行 N 养分积累量测定，结果发现施肥处理能有效提高槟榔幼苗的 N 养分积累量。槟榔幼苗不同处理间的地上部与地下部的 N 养分积累均差异显著，且各处理的 N 养分积累量显著高于 CK。根、茎、叶 N 养分积累量最高的处理为 T₆，T₁₀ 次之，CK 最低，T₆ 是 CK 的 2.31 倍。T₄~T₁₀、T₁₄ 施 N 量相同处理间的 N 养分积累量也有显著差异，可见不同配方施肥对植株 N 养分积累量有较大影响 (图 2)。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

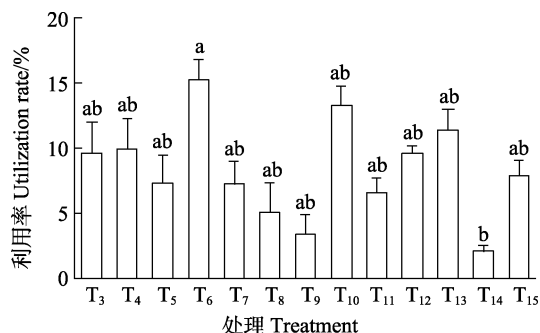
图 2 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗 N 养分积累的影响
Fig. 2 Effect of different N, P and K fertilization ratios on N nutrient accumulation of areca nut seedlings

对槟榔幼苗进行 N 肥相对利用率测定发现，不同 N、P、K 肥配施下槟榔幼苗 N 肥相对利用率存在显著差异 (图 3)，N 肥相对利用率在 2.07%~15.34% 之间，T₆ 处理最高，T₁₀ 处理次之，T₁₄ 处理最低，说明合理的 N、P、K 配比施肥有利于提高 N 肥的相对利用率。P、K 水平在 2 水平时，N 肥相对利用率随着施 N 量的提高而呈现先增后降的态势，在中等施肥水平下达到最高。

2.3 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗各器官 P 分配及肥料利用率的影响

对施肥处理后的槟榔幼苗进行 P 养分积累量测定，发现施肥处理能有效提高槟榔幼苗的 P 养分积累量 (图 4)。与 CK 相比，施肥能有效提高根、茎、叶的 P 养分积累，但不同配方施肥处理对根、茎、叶 P 养分积累提高率不同。根、茎、叶 P 养分积累最高的处理是 T₆，T₂ 次之，T₁₄ 最

低, T_6 是 T_{14} 的 2.6 倍。 T_2 、 T_3 、 T_6 、 $T_8 \sim T_{11}$ 、 T_{13} 施 P 量相同处理间的 P 养分积累量也有显著差异, P 肥固定在一定水平时, N、K 互作对 P 肥的吸收也有一定的影响。

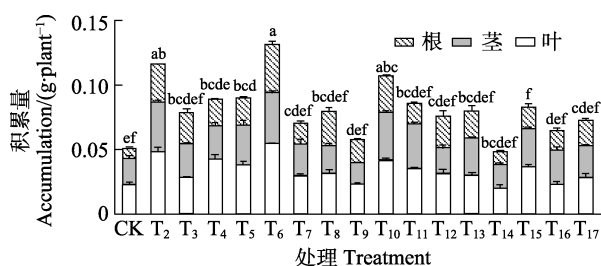


不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 3 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗 N 肥利用率的影响

Fig. 3 Effect of different N, P and K fertilization ratios on N fertilizer utilization rate of areca nut seedlings



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 4 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗 P 含量的影响

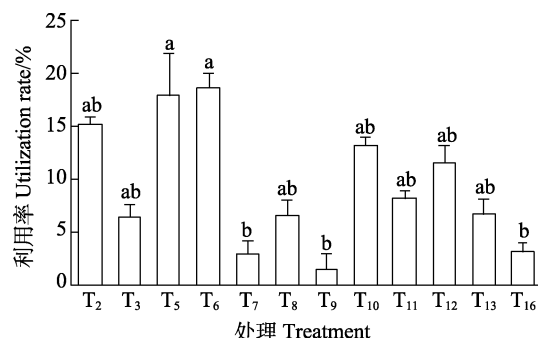
Fig. 4 Effect of different N, P and K fertilization ratios on P content in areca nut seedlings

对槟榔幼苗进行肥料利用率测定, 发现 P 肥相对利用率在 1.6%~18.7%之间 (图 5), T_6 处理最高, T_5 处理次之, T_9 处理最低, 说明合理的 N、P、K 配比有利于提高 P 肥相对利用率。N、K 水平在 2 水平时, P 肥相对利用率随施 P 量的提高呈先升高后降低的趋势, 在中等施肥量水平时达到最高。

2.4 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗各器官 K 分配及肥料利用率的影响

不同施肥处理下各处理的 K 养分积累量差异不显著 (图 6), 根、茎、叶 K 养分积累量最高的处理是 T_{10} , T_4 次之, CK 最低, T_{10} 是 CK 的 2 倍。 $T_2 \sim T_7$ 、 T_{11} 、 T_{12} 施 K 量相同处理间的 K 养分积累量也有显著差异, K 肥固定在一定水平时, N、P 互作对 K 肥的吸收也有一定的影响。N、P 为 2

水平时, 随着施 K 量的增加, 槟榔幼苗 K 养分积累量呈增加趋势。

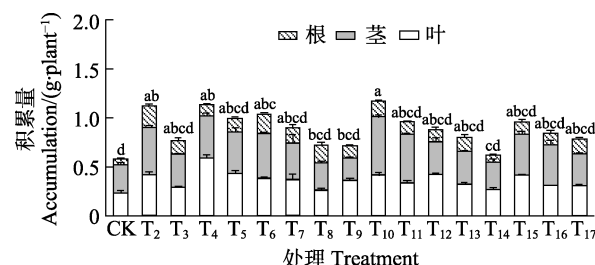


不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 5 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗 P 肥利用率的影响

Fig. 5 Effect of different N, P and K fertilization ratios on P fertilizer utilization rate of areca nut seedlings



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

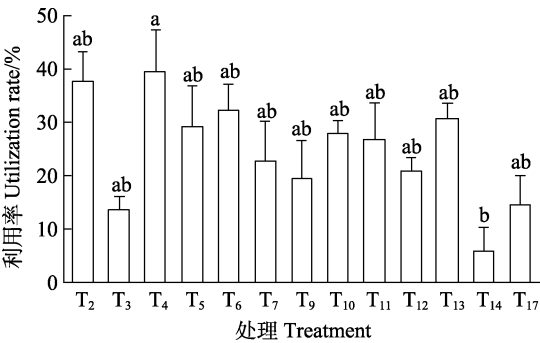
图 6 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗 K 含量的影响

Fig. 6 Effect of different N, P and K fertilization ratios on K content in areca nut seedlings

对槟榔幼苗进行肥料利用率测定, 发现 K 肥相对利用率在 5.75%~39.40%之间 (图 7), T_4 处理最高, T_2 次之, T_{14} 最低。N、P 在 2 水平时, K 肥相对利用率随施 K 量的增大呈先增后降的变化趋势, 在中等水平达到最高。

2.5 N、P、K 配施对各元素协同作用分析

以 2 水平施肥量为分界线, 施肥量低于 2 水平为低水平施肥, 高于 2 水平为高水平施肥, 对低水平施肥和高水平施肥下各部位生物量与施肥量、养分积累量、肥料相对利用率分别进行相关性分析, 发现在低水平施肥下, 随着施肥量的增加, 各元素施肥量与其对应的肥料相对利用率呈正相关, 且施 N 量与 P、K 肥相对利用率呈正相关, 施 P 量与 N、K 肥相对利用率呈正相关, 施 K 量与 N、P 肥相对利用率呈正相关 (图 8)。而在高水平施肥下, 随施肥量的增加, 各元素施肥量与对应肥料相对利用率呈负相关, 且施 N 量与



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$).

图 7 不同 N、P、K 配比对槟榔幼苗 K 肥利用率的影响
Fig. 7 Effect of different N, P and K fertilization ratios on K fertilizer utilization rate of areca nut seedlings

P、K 肥相对利用率呈负相关，施 P 量与 N、K 肥相对利用率呈负相关，施 K 量与 N、P 肥相对利用率呈负相关（图 9）。说明肥料之间能够相互影响利用效应及积累水平，这种影响作用既有正向作用也有负向作用，需合理施肥才能够最大提高槟榔幼苗的肥料相对利用率，相关性分析表明，各元素 2 水平下促进作用最大。同时，2 种施肥水平下根、茎、叶生物量均与各元素养分积累量、各元素相对利用率呈正相关，其中叶生物量与叶中 N 含量、P 含量的相关性大，说明地上部生长对 N、P 元素的需求量更大，根生物量与根中 P 含量相关性较大，说明地下部生长对 P 元素的需求量较大。

通过对槟榔幼苗元素养分积累量与肥料利用率对生物量的影响进行通径分析，探讨元素养分积累与肥料利用率对生物量的直接效应和间接效应。结果表明，槟榔幼苗各指标对生物量均有不同程度的贡献，有正向作用也有负向作用。6 个自变量对生物量的直接影响中，P 养分积累量对

生物量的直接作用最大，N 养分积累量次之，K 养分积累量为负向作用。另外，N 肥相对利用率对生物量的直接作用最大，P 肥次之，K 肥最小。通过对各间接通径系数进行分析，发现 N 养分积累量通过 P 养分积累量对生物量的间接作用最大，间接通径系数为 0.680；N 肥相对利用率通过 P 养分积累量对生物量的间接作用次之，间接通径系数为 0.639（表 2）。

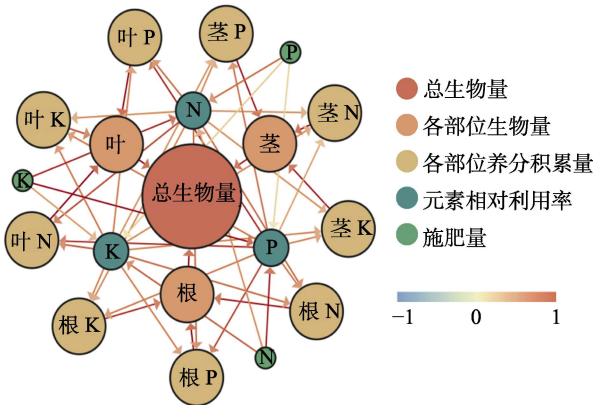


图 8 低水平施肥下各指标之间的相关性
Fig. 8 Correlation among indicators under low level fertilization

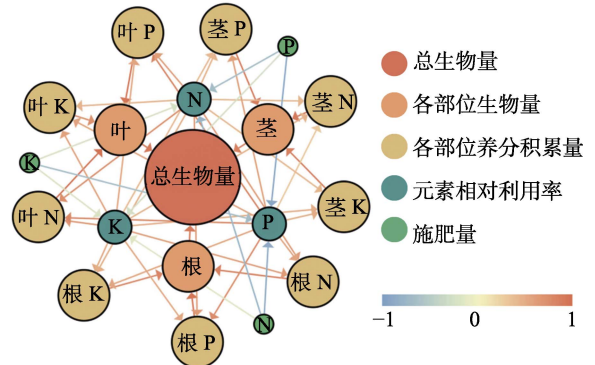


图 9 高水平施肥下各指标之间的相关性
Fig. 9 Correlation between different indexes under high level fertilization

表 2 槟榔幼苗生物量与 6 个因素的通径分析
Tab. 2 Path analysis of areca nut seedling biomass and six factors

指标 Index	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient						合计 Total
		N 积累 N accumu- lation	P 积累 P accumu- lation	K 积累 K accumula- tion	N 肥料利用率 N fertilizer utiliza- tion rate	P 肥料利用率 P fertilizer utiliza- tion rate	K 肥料利用率 K fertilizer utiliza- tion rate	
N 积累	0.493		0.680	-0.225	0.066	0.055	-0.146	0.431
P 积累	0.724	0.463		0.212	0.077	0.066	-0.151	0.666
K 积累	-0.252	0.439	0.609		0.061	0.061	-0.152	1.019
N 肥料利用率	0.087	0.376	0.639	-0.177		0.055	-0.136	0.757
P 肥料利用率	0.076	0.358	0.628	-0.202	0.063		-0.147	0.700
K 肥料利用率	-0.200	0.359	0.547	-0.191	0.059	0.056		0.830

3 讨论

3.1 N、P、K 配比对生物量的影响

配比施肥是可以满足植物营养需求的一种施肥方式,通过确定 N、P、K 肥的合理比例和合理用量,在实现植物生长状况良好的同时,可以节约资源,保护环境^[15]。大量研究表明,施肥对植株的生长有促进作用,能提高植物生长情况,但过量施肥会抑制幼苗的生长。2 种及 2 种以上营养元素以不同比例混合施肥时会产生不同的效应,即促进作用或拮抗作用。当出现 2 种及 2 种以上养分结合所产生的效应远远大于单一养分效应之和时,即为促进作用。而拮抗作用则是多种营养元素相互作用时反而发生抑制作用,使施肥的促进效应大打折扣,产生的作用会抑制植物的生长,使植物生长比例失调^[16]。合理的 N、P、K 配比对植株各器官生物量有较好的调节作用^[17],本研究发现,不同 N、P、K 配比施肥和单施肥对槟榔幼苗生物量均有促进作用。在 T₆ 处理时,槟榔幼苗的总生物量高于其他各处理,单施 N 肥有利于槟榔幼苗生物量的提高,但是 N、P、K 配比施肥更能显著提高槟榔幼苗的总生物量,这与白晶晶等^[18]在楸树幼苗上的研究结果相似。相关性分析结果显示 N 和 P 对地上部生物量影响较大, P 对地下部生物量影响较大,这与罗仙英等^[19]、邱佳妹等^[20]的研究结果相似。N、P、K 因素对槟榔幼苗各器官及全株生物量影响的主次顺序均表现为 N>P>K。

3.2 N、P、K 配比对养分积累量的影响

N 是影响槟榔幼苗叶片叶绿素合成的主要物质, P 能促使植物根部迅速发育,增强养分的吸收能力, K 在植物体内流动性强,主要负责参与并协调植株体内各种物质的新陈代谢过程^[21-22]。郑小琴等^[23]研究指出,合理施肥能促使植物体内的 N、P、K 保持在适当水平,从而达到维持植物正常生长发育的目的。叶片是植物养分的主要储存库,其 N、P、K 的含量直接关系到植物获得干物质积累能力^[24],但不同植物叶片对养分的积累量存在一定差异。在本研究中,当施肥处理为 N₂P₂K₂ (T₆) 时, 槟榔幼苗各部位的元素积累量最多,这也是其生物量最大的主要原因。陆秀君等^[25]研究表明,施肥特别是 N 肥对枝叶生长的促进作用明显高于根系,本研究发现 N 和 P 的叶片养分积累量明显高于根系,这与秦爱文等^[26]在桉楠幼苗上的

研究结果相似,造成这种现象的另一个原因可能是试验植株为盆栽,受生长环境限制不利于根系的生长,因而 P 在根系中的含量低于叶片。在配比施肥下, N、P、K 配施肥养分积累量>单施肥养分积累量>不施肥养分积累量,这与王祥等^[27]在楸树幼苗和陈祖静等^[28]在不同配方施肥处理下的辣木养分积累变化趋势一致。研究结果显示,在不同施肥处理下, 槟榔幼苗各部位的养分积累量也有一定差异,表现为 N、P 养分积累量叶>茎>根, K 养分积累量茎>叶>根,这可能是因为植株正处于生长发育期, K 以游离的形态存在于植物体内, K 正处于茎向叶片输送养分的过程中,因而茎中 K 养分积累量相对较高。杨阳等^[29]在紫椴幼苗中研究发现,在 P、K 一定的水平下,适度施 N 才能提高苗木全株 N 养分积累量。周维^[30]指出配比施肥对矿质元素有促进作用,因此,在养分的施用中应考虑 N、P、K 配比。

3.3 N、P、K 配比对肥料利用率的影响

合理的施肥比例可以提高植物的肥料利用率, AERTS 等^[31]在 3 种苔草属 (*Carex*) 植物研究中发现 N 肥利用率会随供 N 量的增加呈先升高后下降的趋势,养分供应量越高时,肥料利用率会相应下降并在一定量时趋于平稳,这与本研究结果相似, N、P、K 肥料利用率在施肥水平增加时,表现出先增后降的变化趋势,中等水平达到最大, N、P、K 三因素互作施肥对槟榔幼苗的元素吸收和利用效果最好。佟玉欣等^[32]指出养分积累量的高低与肥料利用率有密切关系,本研究发现,元素含量高的处理相应的肥料利用率高。如果少施任意 1 种元素,另外 2 种肥料配施也会大大降低肥料利用率。结合相关性分析和通径分析发现, 槟榔幼苗叶片的生长主要受 N 的影响较大, 根的生长受 P 的影响较大, K 对根、茎、叶均有影响,植株体内的 N、P、K 积累量具有极大的相关性。单因素施肥和双因素配施的肥料利用率低于配比施肥,可见各元素之间相互影响,相互制约。因此综合槟榔幼苗生长情况和施肥成本, T₆ (N₂P₂K₂) 处理即 N、P、K 平衡施肥为最优施肥配方。

参考文献

- [1] HERMANS C, HAMMOND J P, WHITE P J, VERBRUGGEN N. How do plants respond to nutrient

- shortage by biomass allocation?[J]. Trends in Plant Science, 2006, 11(12): 610-617.
- [2] 揭胜麟, 樊大勇, 谢宗强, 张想英, 熊高明. 三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1723-1733.
- JIE S L, FAN D Y, XIE Z Q, ZHANG X Y, XIONG G M. Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1723-1733. (in Chinese)
- [3] SANDRA L, KARL G, PÉNÉLOPE L, MARIE-PASCALE C, DENYS G, JACKY G, GILLES P, ROLLAND D. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services[J]. Journal of Ecology, 2010, 99(6): 135-147.
- [4] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2015, 45(4): 325-339.
- LIU X J, MA K P. Plant functional traits—concepts, applications and future directions[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2015, 45(4): 325-339. (in Chinese)
- [5] HUANG D. Soil testing and fertilizer recommendation in China during the past decade[J]. Plant Nutrition & Fertilizing Science, 2003, 9(4): 495-499.
- [6] YANG Y H, LIEN Y C, HO P S, CHEN C H, CHANG J, CHENG T C, SHIEH T Y. The effects of chewing areca/betel quid with and without cigarette smoking on oral submucous fibrosis and oral mucosal lesions[J]. Oral Diseases, 2005, 11(2): 88-94.
- [7] 林兆威, 唐庆华, 余凤玉, 黄山春, 宋薇薇, 覃伟权. 海南省槟榔生理性黄化及其相关栽培因子的发生情况调查[J]. 热带农业科学, 2021, 41(9): 69-73.
- LIN Z W, TANG Q H, YU F Y, HUANG S C, SONG W W, QIN W Q. Occurrence of arecanut physiological yellowing and its related cultivation factors in Hainan province[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(9): 69-73. (in Chinese)
- [8] 陈歆, 杨福孙, 周兆德, 符常明. 土壤水分胁迫对槟榔幼苗光合特性的影响[J]. 热带农业科学, 2010, 30(2): 8-12.
- CHEN X, YANG F S, ZHOU Z D, FU C M. Effect of different moisture treatments on photosynthetic characteristics of *Areca catechu* seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2010, 30(2): 8-12. (in Chinese)
- [9] 谭业华, 陈珍. 海南槟榔园土壤营养成分调查与评价[J]. 广东农业科学, 2011, 38(6): 74-77.
- TAN Y H, CHEN Z. Investigation and evaluation of soil nutrient of *Areca catechu* in Hainan[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(6): 74-77. (in Chinese)
- [10] 杨安富, 王汀忠, 王华, 阮云泽, 唐树梅. 海南槟榔园土壤养分状况研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1): 363-366.
- YANG A F, WANG T Z, WANG H, RUAN Y Z, TANG S M. Study on soil nutrient status of *Areca* plantation in Hainan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(1): 363-366. (in Chinese)
- [11] 张从德, 游秋香, 陈新平, 王开进, 翟中兵, 梅玉敏. 增施商品有机肥对酸化稻田土壤养分及水稻产量的影响[J]. 中国农技推广, 2019, 35(2): 55-56.
- ZHANG C D, YOU Q X, CHEN X P, WANG K J, ZHAI Z B, MEI Y M. Effect of increasing commercial organic fertilizer on soil nutrients and rice yield in acidified paddy field[J]. China Agricultural Technology Extension, 2019, 35(2): 55-56 (in Chinese)
- [12] 赵开平, 席春奕, 李丽平, 帅正彬. 四种生物有机肥在辣椒上的肥效试验[J]. 辣椒杂志, 2018, 16(2): 15-17.
- ZHAO K P, XI C Y, LI L P, SHUAI Z B. Effects of four bio-organic fertilizers on pepper[J]. Journal of China Capsicum, 2018, 16(2): 15-17. (in Chinese)
- [13] 何萍, 金继运, MIRASOL F P, ADRIAN M J. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499-505.
- HE P, JIN J Y, MIRASOL F P, ADRIAN M J. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 499-505. (in Chinese)
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 263-270.
- LU R K. Methods for agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 263-270. (in Chinese)
- [15] 陈琳, 曾杰, 贾宏炎, 徐大平, 蔡道雄. 林木苗期营养诊断与施肥研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(3): 26-31.
- CHEN L, ZENG J, JIA H Y, XU D P, CAI D X. Advances in nutrient diagnosis and fertilization study of seedlings[J]. World Forestry Research, 2012, 25(3): 26-31. (in Chinese)
- [16] 童琪. 南酸枣配方施肥技术及氮磷钾元素含量年动态规律研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- TONG Q. Research on formula fertilization and the annual dynamic change of nitrogen, phosphorous, potassium content for *Choerospondias axillaris*[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 周修任, 杨鹏鸣. 不同施肥对黄桷幼苗的影响[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(6): 99-101.
- ZHOU X R, YANG P M. Effects of different fertilization on seedlings of *Cotinus coggygria* var. *cinerea*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(6): 99-101. (in Chinese)
- [18] 白晶晶, 吴俊文, 何茜, 苏艳, 李吉跃, 王军辉, 董菊兰. 不同配方施肥对楸树幼苗生物量分配及养分利用的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(6): 91-97.
- BAI J J, WU J W, HE Q, SU Y, LI J Y, WANG J H, DONG J L. Effects of different fertilization formulas on *Catalpa bungei* seedling biomass allocation and nutrient use effi-

- ciency[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(6): 91-97. (in Chinese)
- [19] 罗仙英, 莫荣海, 丁贵杰, 陈龙. 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, CHEN L. Effects of different fertilization ratios on the growth characteristics of *Pinus massoniana* seedlings[J]. Guihaia, 2022, 42(4): 608-616. (in Chinese)
- [20] 邱佳妹, 王康才, 朱光明, 段云晶, 余史丹. 不同施肥对比对麦冬幼苗光合特性及干物质分配的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(2): 61-66, 111. QIU J M, WANG K C, ZHU G M, DUAN Y J, YU S D. Effects of different fertilizing proportion on photosynthetic characteristics and dry matter allocation of *Ophiopogon japonicus*[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2015, 24(2): 61-66, 111. (in Chinese)
- [21] 李静文, 刘晓颖, 李士坤, 荣俊冬, 郑郁善, 苏小青. 氮磷钾配比施肥对毛竹出笋及叶片生理特性的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(12): 2885-2890. LI J W, LIU X Y, LI S K, RONG J D, ZHENG Y S, SU X Q. Effects of N-P-K fertilization on physiological characteristics of bamboo shoots and leaves[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(12): 2885-2890. (in Chinese)
- [22] 杨志坚, 冯金玲, 吴小慧, 陈来贺, 余新晓, 陈丽华. 氮磷钾施肥对闽楠幼苗营养元素吸收与利用的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 998-1011. YANG Z J, FENG J L, WU X H, CHEN L H, YU X X, CHEN L H. Effects of N, P and K fertilization on nutrient uptakes and utilizations of *Phoebe bournei* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 998-1011. (in Chinese)
- [23] 郑小琴, 陈文静, 曹凡, 冯刚, 李永荣, 彭方仁. 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, FENG G, LI Y R, PENG F R. Effects of the proportional fertilization on the nutrient content and photosynthesis of young grafted pecan seedlings[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 43(5): 169-174. (in Chinese)
- [24] 郑炳松, 蒋德安, 翁晓燕, 陆庆, 奚海福. 钾营养对水稻剑叶光合作用关键酶活性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27(5): 20-25. ZHENG B S, JIANG D A, WENG X Y, LU Q, XI H F. Effects of potassium on the contents and activities of rubisco, rubisco activase and photosynthetic rate in rice leaf[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science), 2001, 27(5): 20-25. (in Chinese)
- [25] 陆秀君, 葛根塔娜, 梅梅, 洪晓松, 李克壮. N、P、K 配比施肥对美国红枫幼苗生长及叶色变化的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 5(5): 9-15. LU X J, GEGEN T N, MEI M, HONG X S, LI K Z. Effects of ratio fertilization of N, P, K on seedling growth and leaf color change of American maple[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2015, 35(5): 9-15. (in Chinese).
- [26] 秦爱文, 刘远生, 徐海宁, 江斌, 曾常金, 伍艳芳. 氮磷钾配比施肥对桢楠幼苗生长及生物量积累的影响[J]. 南方林业科学, 2021, 49(5): 21-24. QIN A W, LIU Y S, XU H N, JIANG B, ZENG C J, WU Y F. Effects of N, P, K formula fertilization on growth and biomass accumulation of *Phoebe zhennan* seedlings[J]. South China Forestry Science, 2021, 49(5): 21-24. (in Chinese)
- [27] 王祥, 白晶晶, 何茜, 邱权, 吴俊文, 王军辉, 李吉跃. 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, QIU Q, WU J W, WANG J H, LI J Y. 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. (in Chinese)
- [28] 陈祖静, 高晓翠, 周玮, 陈晓阳, 何茜. 不同施肥量对辣木幼苗生长、光合和养分特征的影响[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(2): 35-42. CHEN Z J, GAO X C, ZHOU W, CHEN X Y, HE Q. Effect of fertilization on photosynthetic and nutrient characteristics of *Moringa oleifera* seedlings[J]. Forestry and Environmental Sciences, 2019, 35(2): 35-42. (in Chinese)
- [29] 杨阳, 张德鹏, 及利, 张洁, 杨立学. 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, ZHANG J, YANG L X. Effects of formula fertilization on growth, nutrient accumulation and root morphology of *Tilia amurensis* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2021, 41(9): 63-70. (in Chinese)
- [30] 周维. 氮磷钾配比施肥对格木幼苗生长及光合特性影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016. ZHOU W. Research on growth and photosynthetic characteristics of *Erythrophloeum fordii* seedling under different NPK fertilization[D]. Nanning: Guangxi University, 2016. (in Chinese)
- [31] AERTS R, DE CALUWE H. Nitrogen use efficiency of *Carex* species in relation to nitrogen supply[J]. Ecology, 1994, 75(8): 2362-2372.
- [32] 佟玉欣, 李玉影, 刘双全, 姬景红. 平衡施肥对松嫩平原黑土玉米产量效益的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2010(9): 134-137. TONG Y X, LI Y Y, LIU S Q, JI J H. Effect of balanced fertilization on yield and benefit of maize in the blackland of Songnen Plain[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2010(9): 134-137. (in Chinese)