

# 不同施肥量对辣木幼苗生长、光合和养分特征的影响\*

陈祖静 高晓翠 周玮 陈晓阳 何茜

(华南农业大学 林学与风景园林学院 / 广东省森林植物种质创新与利用重点实验室 / 广东省普通高校木本饲料工程技术研究中心, 广东广州 510642)

**摘要** 以辣木 (*Moringa oleifera*) 品种云南极品 27 号为材料, 采用盆栽试验研究不同施肥量处理对辣木幼苗生长指标、光合参数和养分吸收利用的影响。结果表明: 随施肥量增多, 辣木幼苗的株高、地径、生物量、根长、根直径、根体积、根表面积等生长指标基本表现为先升高后降低的趋势, 施肥量为 N9P4.5K4.5 g·株<sup>-1</sup> 时达到最高, 单株生物量和壮苗指数分别为对照的 3.99 和 1.53 倍; 适量施肥能显著提高辣木幼苗的光合能力, 有利于生物量的积累。随着施肥量的增加, 辣木幼苗叶片的叶绿素含量、净光合速率、水分利用效率先升高后降低, 而蒸腾速率、气孔导度则随施肥量的增加而加大; 辣木幼苗根、茎、叶组织中 N、P、K 含量随施肥量的增加先增多后减少, 表观吸收率和施肥效率随施肥量增加显著降低, 施肥量增加对根系的影响最大; 施肥量为 N12P6K6 g·株<sup>-1</sup> 时辣木幼苗各生长、光合、养分含量指标均有所降低, 根冠比最低, 壮苗指数显著低于对照水平, 明显抑制辣木幼苗的生长。总之, 辣木幼苗最适施肥量为 N9P4.5K4.5 g·株<sup>-1</sup>, 施肥量为 N12P6K6 g·株<sup>-1</sup> 时抑制辣木幼苗的生长。

**关键词** 辣木; 施肥量; 光合作用; 养分特征

中图分类号: S723.7 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2019) 02-0035-08

## Effect of Fertilization on Photosynthetic and Nutrient Characteristics of *Moringa oleifera* Seedlings

CHEN Zujing GAO Xiaocui ZHOU Wei CHEN Xiaoyang HE Qian

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University / Guangdong Key Laboratory for Innovative Development and Utilization of Forest Plant Germplasm / Woody Feed Engineering Technology Research Center Affiliated to Universities, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

**Abstract** In order to provide theoretical basis for precise fertilization of *Moringa oleifera* seedling, different amounts of fertilization were treated on *M. oleifera* No.27 Yunnan Jipin of seedlings, and the growth index, photosynthetic parameters and nutrient characteristics were studied. The results showed that the growth indexes such as plant height, ground diameter, biomass, root length, root diameter, root volume and root surface area of *M. oleifera* seedlings increased and then decreased with the increasing of fertilization. These indexes reached the highest level in the treatment (N9P4.5K4.5 g), as it's biomass and seedling index were 3.99 time and 1.53 time higher than the control respectively. Moderate fertilization significantly increased photosynthetic capacity and biomass accumulation of *M. oleifera* seedlings. With the increasing of fertilization, the leaves chlorophyll content, net photosynthetic rate and water using efficiency of *M. oleifera* seedlings were increased, which following by decreased. Meanwhile, the leaves transpiration rate and stomatal conductance were increased with the increasing

\* 基金项目: 广东省地方标准制(修)订林业项目(4400-F16256), 广州市科技计划项目(2015KJCX009), 广东省林业科技创新项目(2018KJCX001)。

第一作者: 陈祖静(1985—), 女, 讲师, 主要从事森林培育方面的研究工作, E-mail: zujingchen@scau.edu.cn。

通信作者: 何茜(1981—), 女, 副教授, 主要从事森林培育方面的研究工作, E-mail: heqian69@126.com。

of fertilization. The contents of N, P and K in roots, stems and leaves of *M. oleifera* seedlings were increased at first and then decreased with the increasing of fertilization. The apparent absorption rate and fertilization efficiency decreased significantly with the increase of fertilization, and the greatest effect of fertilization was on the roots. The growth, photosynthesis and nutrient content of *M. oleifera* seedlings were all decreased in the treatment (N12P6K6 g), for the root-shoot ratio was the lowest and the strong seedling index was significantly lower than the control level. Apparently, the treatment (N12P6K6 g) inhibited the growth of *M. oleifera* seedlings. In conclusion, the optimum fertilization rate of *M. oleifera* seedlings was N9P4.5K4.5 g for each plant. Moreover, the growth of *M. oleifera* seedlings was inhibited with the fertilization of N12P6K6 g for each plant.

**Key words** *Moringa oleifera*; fertilization; photosynthetic; nutrient characteristics

辣木 (*Moringa oleifera*) 属辣木科 (Moringaceae) 辣木属 (*Moringa*), 富含多种营养物质<sup>[1]</sup>, 具有极高的药用、生态和经济价值<sup>[2-3]</sup>。辣木原产于印度北部喜马拉雅区域及非洲地区<sup>[1]</sup>, 近年来, 辣木产业在我国热带及亚热带省区急速扩展, 已在海南、福建、广东、广西、四川、湖南等省形成多个辣木种植基地或种植点<sup>[4]</sup>, 但不同种植地的辣木产量、营养成分、抗逆性等存在显著差异, 质量明显低于原产地<sup>[5-6]</sup>。

不同植物的光合特性及其对肥料的需求量和反应差异非常大, 辣木作为速生树种对养分需求较高, 而其需肥特性仍不够清楚。前期研究表明, N 离子是限制辣木伸长和茎粗增加最主要的因子<sup>[7]</sup>。多施 P 肥能有效促进辣木生物量提高 13.8 倍<sup>[8]</sup>。钾肥影响辣木的冠幅冠高等影响显著<sup>[9]</sup>。生产上辣木整个生长期都需要进行施肥, 然而过高的肥料投入不仅增加生产成本, 还导致肥料利用率下降, 甚至引起作物减产, 环境污染等问题<sup>[10]</sup>。因此, 在辣木的培育施肥过程中, 如何精确合理的施肥尤为重要。目前, 很多学者对辣木的栽培管理、营养价值等做了大量研究<sup>[11-13]</sup>, 而关于辣木施肥技术的研究较为薄弱, 还没有精准合理的施肥方案。研究表明, 施肥量关系植株养分的吸收、同化和转运、光合特性、根系发育等过程而直接影响产量<sup>[14-16]</sup>。因此, 本研究以辣木盆栽幼苗为对象, 研究不同施肥量对辣木幼苗叶片的光合响应特征和养分利用的影响, 筛选出辣木苗期适宜的施肥量, 为辣木壮苗培育的精准施肥和速生丰产提供理论依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在华南农业大学教学科研基地跃进北苗

圃 (113° 21' N, 23° 9' E) 的塑料大棚内进行。该区属于亚热带季风气候, 年平均气温 21.9℃, 年平均降水量 1 696.5 mm, 平均相对湿度为 77%。最热月 (7 月) 平均气温 28.7℃, 绝对最高气温 38.7℃; 最冷月 (1 月) 平均气温 13℃, 绝对最低气温 -2.6℃。

### 1.2 试验材料

供试辣木品种为云南极品 27 号 (购于金福实业投资有限公司, 产地: 肯尼亚)。辣木种子用 50% 多菌灵杀菌 30 min, 萌发出芽后播种, 缓苗 2~3 周, 选择平均苗高为 33.92 cm、地径为 3.07 mm, 生长一致的健康辣木幼苗进行试验。2016 年 5 月种植于花盆, 基质土为黄心土和泥炭土按体积 3:1 比例混合, 土粒径为 0.28 mm, 容重为  $1.066 \pm 0.06$ , 土壤总孔隙度为  $60.2 \pm 2.8$ , pH 为 7.34, 其他主要理化性质如表 1 所示。

### 1.3 试验设计

供试 N 肥为尿素 (含  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  46.0%)、P 肥为过磷酸钙 (含  $\text{P}_2\text{O}_5$  12.0%)、K 肥为氧化钾 ( $\text{K}_2\text{O}$  50.0%)。主要参考许冰等<sup>[9]</sup> 研究结果, N:P:K 按 2:1:1 配施, N 肥于 2016 年 6 月 4 日、7 月 4 日、8 月 4 日共分 3 次施入, 每次施入 1/3。P 肥和 K 肥于 2016 年 6 月一次性施入。共设 4 个处理 (T1、T2、T3 和 T4) 和 1 个对照 (CK), 单株施肥量见表 2, 每个处理 3 个重复, 每个重复 8 株, 每处理共 24 株。

### 1.4 指标测定

1.4.1 生长指标 2016 年 10 月 24 日分别测定各处理辣木幼苗的株高、地径、单株叶面积和根系生长指标。其中, 株高、地径分别用卷尺和游标卡尺测定; 单株叶面积采用 LI-3100 便携式激光叶面积仪 (LI-COR, USA) 进行测定。各处理随机选择 3 株植株, 测定根、茎、叶鲜重, 105℃ 杀青

表 1 盆栽土壤性质  
Tab. 1 Soil characteristics of the plot

土壤性质 Soil characteristic	含量 / (g · kg <sup>-1</sup> ) Content	土壤性质 Soil characteristic	含量 / (mg · kg <sup>-1</sup> ) Content	土壤性质 Soil characteristic	含量 / (mg · kg <sup>-1</sup> ) Content
有机质	46.13	碱解氮	67.28	交换性镁	138.86
全氮	0.69	有效磷	4.10	有效铜	0.07
全磷	0.22	速效钾	45.35	有效锌	0.70
全钾	6.75	交换性钙	1 997.40	有效锰	2.61

表 2 辣木幼苗施肥处理  
Tab. 2 Fertilization treatments on *M. oleifera* seedling

g · 株<sup>-1</sup>

处理 Treatment	6月4日 Jun. 4th			7月4日 Jul. 4th			8月4日 Aug. 4th.		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	1	1.5	1.5	1	0	0	1	0	0
T2	2	3.0	3.0	2	0	0	2	0	0
T3	3	4.5	4.5	3	0	0	3	0	0
T4	4	6.0	6.0	4	0	0	4	0	0

5 min, 65℃烘干至恒重后, 电子天平称重测定根、茎、叶的生物量; 分别计算植株的根冠比、比叶重和和壮苗指数<sup>[17]</sup>。根系形态指标采用万深 LA-S 植物根系分析系统 (杭州万深检测科技有限公司) 扫描, 并用 WinRHIZO 软件分析根系根长、根平均直径、根表面积和根体积。

1.4.2 光合参数 叶绿素含量采用分光光度法, 每个处理随机选择 3 株植株, 每个植株上分别取南向中上部健康、成熟的一个枝条进行离体测定; 采用 Li-6400 便携式光合仪 (LI-COR, USA) 于上午 9:00—11:00 测定瞬时光合指标, 每个处理随机选择 3 株, 每株测定 3 片长势均匀、良好的功能叶, 使用红蓝光源, 光强设置为 1 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 叶温为 28~35℃, 环境相对湿度约为 60%,  $\text{CO}_2$  浓度约为 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 测定参数包括净光合效率、蒸腾速率、气孔导度, 并计算水分利用效率 (Water use efficiency, WUE)。

1.4.3 养分特征 样品干燥、粉碎过 0.5 mm 筛后进行养分测定, 氮、磷、钾含量分别采用半微量凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度计法进行

测定, 每个随机选择 3 株, 重复 3 次。表观吸收效率 = (施肥处理的 N (或 P、K) 增量 - CK 的 N (或 P、K) 增量) / 施 N (或 P、K) 总量  $\times 100\%$ 。施肥效率 = (施肥处理的总生物量 - 施肥处理前的总生物量) / 施 N (或 P、K) 总量。

### 1.5 数据处理

试验数据表示为平均值  $\pm$  标准差, 采用 Excel 2010 对试验数据进行统计及绘图, 利用 SPSS 16.0 软件进行方差分析和 Duncan's 多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥量对辣木幼苗生长的影响

不同施肥处理对辣木幼苗地上部分生长的影响如表 3 所示, 与对照相比, 施肥显著促进了辣木幼苗的生长。随着施肥量的增加, 辣木幼苗的株高、地径、生物量和壮苗指数呈现先升高后降低的趋势, 其中株高、单株生物量、茎生物量、叶生物量和壮苗指数均在 T3 处理中最高, 分别为 (282.91  $\pm$  6.17) cm、(43.32  $\pm$  0.56) g、(32.94  $\pm$  1.74) g、(4.58  $\pm$  0.37) g 和 (8.7  $\pm$  0.55), 分别是对应对照 (CK) 处理的 1.59、3.99、1.65、4.78、

表3 不同施肥量处理下辣木幼苗生长性状  
Tab.3 Growth characteristics of *M. oleifera* seedling under different fertilization amount

处理 Treatment	株高/cm Plant height	地径/mm Ground diameter	单株生物量/g Single plant biomass	茎生物量/g Stem biomass	叶生物量/g Leaf biomass	壮苗指数 Seedling index
CK	178.42 ± 3.89 a	7.61 ± 0.66 a	10.87 ± 0.85 a	6.89 ± 0.24 a	0.47 ± 0.04 a	5.67 ± 0.48 a
T1	262.13 ± 7.97 b	12.96 ± 1.12 c	30.56 ± 2.39 b	23.05 ± 1.00 b	2.85 ± 0.15 b	7.00 ± 0.30 b
T2	274.21 ± 7.25 b	14.18 ± 1.42 c	38.10 ± 2.02 c	29.10 ± 1.27 d	4.05 ± 0.18 c	7.66 ± 0.83 bc
T3	282.91 ± 6.17 c	13.05 ± 1.31 c	43.32 ± 0.56 d	32.94 ± 1.74 e	4.58 ± 0.37 d	8.70 ± 0.55 c
T4	246.83 ± 5.38 b	11.07 ± 0.96 b	32.32 ± 2.12 b	26.05 ± 1.38 c	2.51 ± 0.20 b	5.18 ± 0.97 a

注: 表内数据为平均值 ± 标准差, 同一列数据后不同字母表示处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ , Duncan's 法)  
Note: Values in the table are given as mean ± SD. Different letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level using Duncan's method

表4 不同施肥量处理下辣木幼苗根系的生长  
Tab. 4 The root system development of *M. oleifera* seedling under different fertilization amount

处理 Treatment	根生物量/g Root biomass	总根长/cm Total root length	根直径/mm Root average diameter	根表面积/cm <sup>2</sup> Root surface area	根体积/cm <sup>3</sup> Root volume	根冠比/% Root-shoot ratio
CK	3.52 ± 0.27 a	830.83 ± 64.89 a	2.18 ± 0.03 a	1 315.29 ± 17.10 a	249.86 ± 13.22 a	0.48 ± 0.25 c
T1	4.65 ± 0.06 b	953.32 ± 50.44 a	2.63 ± 0.17 ab	1 393.37 ± 84.76 a	413.48 ± 32.29 ab	0.18 ± 0.01 b
T2	4.95 ± 0.39 b	1 151.07 ± 70.02 b	2.88 ± 0.19 b	1 744.12 ± 92.29 a	632.97 ± 8.23 bc	0.15 ± 0.02 ab
T3	5.80 ± 0.35 c	1 448.25 ± 63.13 c	2.96 ± 0.18 b	1 812.37 ± 23.56 a	753.09 ± 6.43 c	0.15 ± 0.04 ab
T4	3.76 ± 0.29 a	1 123.24 ± 87.73 b	2.74 ± 0.14 b	1 466.78 ± 63.94 a	587.63 ± 25.61 ab	0.13 ± 0.05 a

注: 表内数据为平均值 ± 标准差, 同一列数据后不同字母表示处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ , Duncan's 法)  
Note: Values in the table are given as mean ± SD. Different letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level using Duncan's method

9.75 和 1.53 倍。T4 处理的壮苗指数低于对照, 说明 T4 处理的施肥量有冗余反而不利于辣木幼苗的生长。辣木幼苗地径在 T2 处理中达到最高值 14.18 mm, 是对照的 1.86 倍, 但与 T3 和 T2 处理间差异不显著。因此, 适宜施肥量显著促进辣木幼苗地上部分生长, 而施肥量过多反而限制地上部分生长的速度。

不同施肥量处理显著促进辣木根系生长, 与对照相比, 除根表面积差异不显著外, 其余根系指标差异显著 (表 4)。随施肥量增加, 辣木幼苗根生物量、总根长、根直径、根表面积、根体积均先升高后降低, 在 T3 处理时达到最高, 分别为 (5.80 ± 0.35) g、(1448.25 ± 63.13) cm、(2.96 ±

0.18) mm、(1812.37 ± 23.56) cm<sup>2</sup>、(753.09 ± 6.43) cm<sup>3</sup>, 且 T3 处理单株生物量、根总长与其他施肥处理间差异显著。本试验中, 辣木幼苗根冠比则随施肥量的增加显著下降, 在 T4 处理中最低, 说明施肥量增加可能对地上部分生长的影响大于地下部分, 也可能改变辣木幼苗营养物质的分配, 使更多营养物质分配到地上部分。

## 2.2 不同施肥量对辣木幼苗叶片光合特性的影响

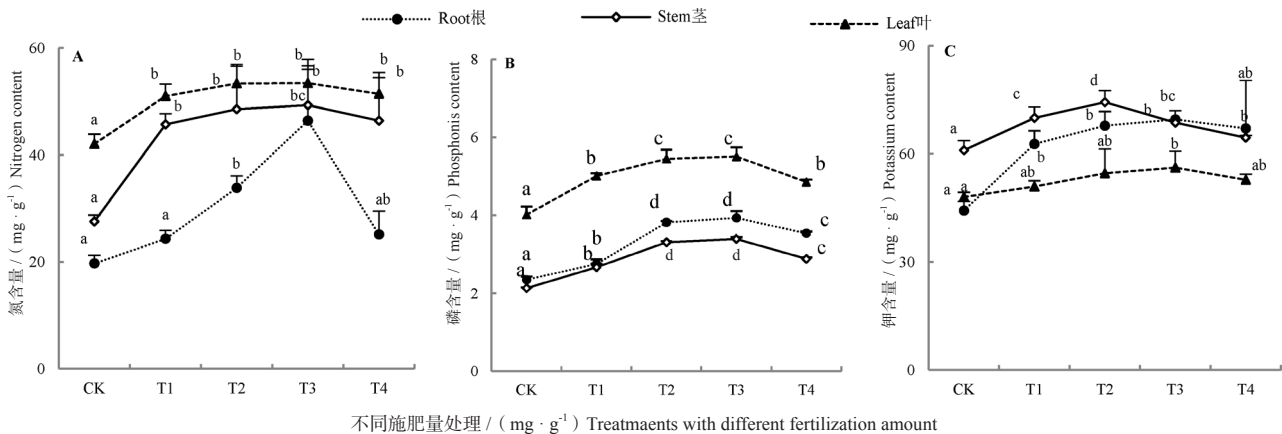
由表 5 可见, 施肥处理后辣木幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量明显增多, 基本表现为 T3>T4>T2>T1>CK, 总叶绿素含量和叶绿素 b 含量在 T3 处理与其他处理间差异显著。随着施肥量增加, 辣木幼苗叶片的蒸腾速率、气孔导



度和比叶重不断增加，在 T4 处理中达到最高。净光合效率和水分利用效率则先升高后降低，在 T3 处理中分别达到最高值  $9.56$  和  $2.52 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ，在 T4 处理有所降低。与对照相比，除叶绿素 a 含量和水分利用效率外，T3 处理光合参数与其他施肥处理间差异显著。由此可见，合理施肥能显著提高辣木幼苗叶片的光合能力，其中 T3 施肥处理促进光合能力的效果最显著，过量施肥 (T4) 反而会降低辣木幼苗叶片的光合效率，加大其蒸腾速率，不利于地上部分同化产物的积累。

### 2.3 不同施肥量对辣木幼苗养分特征的影响

如图 1 所示，施肥显著增加辣木幼苗根、茎、叶组织中的 N、P、K 含量，随施肥量增加，辣木幼苗不同组织中 N、P、K 含量基本表现为先增加后降低，在 T3 处理中增加幅度最高。辣木幼苗不同组织中 N 含量基本表现为叶片 > 茎 > 根，P 含量在叶片中最高，说明叶片是 N、P 分配和积累的中心。施肥后 N、P 含量在根、茎中显著增加，其中，T3 处理根和茎中 N、P 含量分别为  $46.40$  和  $49.29 \text{ mg/g}$ 、 $3.93$  和  $3.39 \text{ mg/g}$ ，为对应



注：同一曲线上不同字母表示处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ , Duncan's 法); A. 不同施肥量处理时辣木幼苗根、茎、叶中的 N 含量; B. 不同施肥量处理时辣木幼苗根、茎、叶中的 P 含量; C. 不同施肥量处理时辣木幼苗根、茎、叶中的 K 含量

Note: Different letters in the same curve indicate significant difference among treatments at 0.05 level using Duncan's method; A. The content of nitrogen in root, stem and leaf of *M. oleifera* seedlings with different fertilization amount treatment; B. The content of phosphorus in root, stem and leaf of *M. oleifera* seedlings with different fertilization amount treatment; C. The content of potassium in root, stem and leaf of *M. oleifera* seedlings with different fertilization amount treatment

图 1 不同施肥量处理时辣木幼苗根、茎、叶内 N、P、K 含量的比较

Fig.1 Comparison on content of nitrogen, phosphorus, potassium in root, stem and leaf of *M. oleifera* seedlings with different fertilization amount treatment

表 5 不同施肥量处理辣木叶幼苗叶片的叶绿素含量和光合参数

Tab.5 The leaf chlorophyll content and photosynthetic parameters of *M. oleifera* seedling under different fertilization amount

处理 Treatment	总叶绿素含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Content of total chlorophyll	叶绿素 a 含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Content of chlorophyll a	叶绿素 b 含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Content of chlorophyll b	净光合效率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Net photosynthetic rate Pn	蒸腾速率/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Transpiration rate	气孔导度/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Stomatal conductance	水分利用效率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) Water use efficiency	比叶重/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) Specific leaf weight
CK	$2.87 \pm 0.35$ a	$1.60 \pm 0.20$ a	$1.27 \pm 0.22$ a	$7.52 \pm 0.07$ a	$3.30 \pm 0.17$ a	$0.38 \pm 0.12$ a	$2.29 \pm 0.11$ b	$1.02 \pm 0.07$ ab
T1	$3.05 \pm 0.19$ a	$1.66 \pm 0.27$ a	$1.39 \pm 0.33$ a	$8.12 \pm 0.24$ b	$3.46 \pm 0.32$ ab	$0.41 \pm 0.08$ ab	$2.36 \pm 0.22$ b	$1.17 \pm 0.12$ ab
T2	$3.42 \pm 0.29$ a	$1.71 \pm 0.34$ a	$1.71 \pm 0.32$ a	$8.39 \pm 0.17$ b	$3.55 \pm 0.51$ b	$0.44 \pm 0.05$ b	$2.40 \pm 0.40$ b	$0.88 \pm 0.03$ a
T3	$4.56 \pm 0.11$ b	$2.16 \pm 0.14$ a	$2.40 \pm 0.17$ b	$9.56 \pm 0.19$ c	$3.82 \pm 0.32$ c	$0.46 \pm 0.11$ b	$2.52 \pm 0.24$ b	$1.56 \pm 0.33$ bc
T4	$3.54 \pm 0.37$ a	$1.89 \pm 0.10$ a	$1.65 \pm 0.27$ a	$9.35 \pm 0.09$ c	$5.04 \pm 0.10$ b	$0.49 \pm 0.06$ b	$1.86 \pm 0.02$ a	$2.00 \pm 0.52$ c

注：表内数据为平均值  $\pm$  标准差，同一列数据后不同字母表示处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ , Duncan's 法)

Note: Values in the table are given as mean  $\pm$  SD. Different letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level using Duncan's method

表 6 施肥量对辣木幼苗 N、P、K 表观养分吸收效率和施肥效率的影响

Tab. 6 Effects of fertilization on apparent nutrient uptake efficiency and fertilization efficiency of N, P, K in *M. oleifera* seedling

处理 Treatment	表观吸收效率 / % Apparent uptake efficiency			施肥效率 / (g · g <sup>-1</sup> ) Fertilization efficiency		
	N	P	K	N	P	K
T1	0.35 ± 0.02 c	31.18 ± 0.74 d	0.97 ± 0.05 d	9.96 ± 0.39 d	19.92 ± 0.78 d	19.92 ± 0.78 d
T2	0.25 ± 0.02 b	27.16 ± 0.79 c	0.71 ± 0.03 c	6.24 ± 0.16 c	12.47 ± 0.38 c	12.47 ± 0.38 c
T3	0.21 ± 0.02 b	21.55 ± 0.68 b	0.52 ± 0.01 b	4.74 ± 0.03 b	9.48 ± 0.07 b	9.48 ± 0.07 b
T4	0.10 ± 0.01 a	10.05 ± 0.35 a	0.24 ± 0.01 a	2.64 ± 0.09 a	5.27 ± 0.17 a	5.27 ± 0.17 a

注：表内数据为平均值 ± 标准差，同一列数据后不同字母表示处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ , Duncan's 法)

Note: Values in the table are given as mean ± SD. Different letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level using Duncan's method

对照的 2.35 倍和 1.79 倍、1.68 倍和 1.59 倍。除对照外，不同施肥量处理间辣木幼叶片和茎中的差异不显著，说明随施肥量增加，N 素对叶片和茎组织 N 含量的影响效应呈现减弱趋势（图 1A、B）。而 K 含量则在茎中最高，施肥对根系 K 影响最大，T3、T4 处理的根系组织中的 K 含量分别为 69.47 和 66.99 mg/g，分别达到对应茎中水平（分别为 68.59 和 64.42 mg/g）（图 1C）。此外，辣木幼苗 N、P、K 表观吸收率和施肥效率随施肥量的增加而显著减小，在 T1 处理时最高，T4 处理中最低，不同处理间差异显著（表 6）。说明增加施肥虽然可增加辣木幼苗各组织中 N、P、K 含量，但每单位施肥量对辣木幼苗组织积累养分的能力降低。总体来看，施肥处理对辣木幼苗根系 N、P、K 养分的影响最大，其次是茎和叶片，T3 处理最有利于辣木幼苗养分的积累。

### 3 讨论与结论

随施肥量增多，植株体内养分呈现贫养、奢养和迫害 3 个状态<sup>[18]</sup>。本研究结果显示，施肥使辣木幼苗根系环境中的养分增多，促进植株的生长。不同施肥处理的辣木幼苗株高、地径、生物量、根体积、根表面积、根总长、根直径等生长指标表现为 T3>T2>T1>T4>CK。其中，T4 处理的壮苗指数低于对照，且其表观吸收率和施肥效率显著低于 T3 处理，说明 T4 处理的施肥量已过量，此时辣木幼苗可能处于养分迫害阶段而表现为生

长受抑制（表 3-4）。过量的肥料可能会引起土壤微环境的改变，造成辣木幼苗对养分的吸收性降低，使其生物量积累反而减少<sup>[19]</sup>。此外，根冠比随着施肥量的增加而降低，说明施肥量对辣木幼苗地上部分的影响比地下部分更大，施肥增多促进了光合产物更多向茎叶分配，以实现其光合效率更大化，这与程小燕和谭裕模<sup>[20]</sup>、尹丽等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。

植物光合作用受叶片自身特性（养分含量、叶绿素等）<sup>[12]</sup> 和外因（光、温、湿等）影响<sup>[22]</sup>。叶绿素含量与施肥量密切相关，植物叶片大约 75% 的 N 素存在于叶绿体中，叶绿素含量多少直接影响叶片光合作用的强弱<sup>[21,23]</sup>。本研究中，施肥量（T1、T2、T3 处理）适量增加显著提高辣木叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量、净光合速率光合产物积累增多，更多的光合产物运送到植物根系，同时水分利用效率、气孔导度和蒸腾速率增加，加快地上部分光合产物和地下部分矿物质的运输速度，促使植物根系伸长，表面积扩大，有利于根系从环境中吸取更多的养分，因此，辣木各组织中的养分不断积累，促进其更健壮生长。不同施肥量以 T3 处理时光合能力最佳（表 5），施肥量增加使叶绿体的光合速率和效率提高，同时也可能增加叶片碳同化所需的 CO<sub>2</sub>，提高辣木幼苗的光合能力，最终表现在辣木幼苗根、茎、叶组分养分和干物质的积累和生长指标的增长（表 3、5）。这与施肥加快植物叶片叶

绿素合成, 增强植物光合能力以提高生产力的结果一致<sup>[22, 24-25]</sup>。然而, 施肥量达到 T4 处理时, 辣木幼苗叶片的叶绿素含量反而有所减少, 除蒸腾速率、气孔导度最高外, 其余光合参数降低, 这与过量施肥引起气孔受限从而抑制植物生长的报道不同<sup>[21]</sup>, 可能对辣木幼苗而言, T4 处理引起叶绿素含量降低、根冠比显著降低导致辣木植株自身 N、P、K 养分分配平衡受到破坏, 抑制 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶 (Rubisco) 合成或导致磷酸丙糖代谢受阻, 呼吸作用增强才是导致辣木幼苗光合能力和碳同化速率降低的主导因子<sup>[26]</sup>。此外, 过量施肥可能引起辣木幼苗碳同化对光合作用的同化力 (ATP 和 NADPH) 的竞争加剧, 导致叶片光合同化速率下降, 反而降低同化物的积累<sup>[21, 27]</sup>。

养分含量增加会影响苗木各器官的养分分配, 增加植物叶片及根系的养分含量, 促进植株的生长代谢进程, 而土壤养分过高, 植物组织养分含量则不随土壤养分含量的升高而增加<sup>[24]</sup>。与对照相比, 不同施肥量处理均显著增加辣木幼苗根、茎、叶的氮、磷、钾含量。目前, 施肥量对苗木生物量和养分积累的报道主要有 2 类, 一方面, 苗木的生物量和养分积累随着施肥量的增加而增加, 叶片氮含量与光合能力成线性正相关<sup>[25]</sup>; 另一方面, 一定程度增加施肥量会增加植株养分含量和生物量, 而施肥量超过了苗木的最适需求量, 则生物量不再增加甚至会下降, 反而不利于植物的生长发育<sup>[28]</sup>。本研究结果与后者一致, 随施肥量增多, 辣木幼苗根、茎、叶的 N、P、钾含量总体上呈“先升后降”趋势, 且施肥量增加对根系养分的影响最大, 其次是茎和叶片, 且表观吸收效率和施肥效率显著降低<sup>[18]</sup>。说明 T3 处理最有利于辣木幼苗养分的积累。

综上所述, 作为速生丰产树种, 辣木幼苗期增施适量的肥料能显著提高其光合能力, 增加根、茎、叶中的养分含量, 有效促进其生长发育, 且以施肥量  $N9P4.5K4.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  时效果最佳。此次研究主要依据前期研究所摸索的较合理 N、P、K 配比, 研究施肥量对辣木幼苗生长的影响, 作为辣木壮苗培育制定施肥计划的依据。还需对不同施肥配比、有机肥与化肥混施、大田长期施肥对辣木生长及其品质的影响等进行研究, 以便科学合理指导辣木苗期的施肥管理。

## 参考文献

- [1] LEONE A, SPADA A, BATTEZZATI A, et al. Cultivation, genetic, ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of *Moringa oleifera* leaves: an overview [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16: 12791-12835.
- [2] ATAWODI S E, ATAWODI J C, IDAKWO G A, et al. Evaluation of the polyphenol content and antioxidant properties of methanol extracts of the leaves, stem, and root barks of *Moringa oleifera* Lam.[J]. Journal of Medicinal Food, 2010, 13(3): 710-716.
- [3] ABDULL A F, IBRAHIM M D, KNTAYYA S B. Health benefits of *Moringa oleifera*[J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2014, 15(20): 8571-8576.
- [4] 袁媛, 张影波, 庞玉新, 等. 辣木规范化栽培技术标准操作规程[J]. 热带农业科学, 2017(11): 27-31.
- [5] 初雅洁, 符史关, 龚加顺. 云南不同产地辣木叶成分的分析比较[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 160-164.
- [6] 矫健, 陈伟忠, 穆钰, 等. 国内外辣木产业发展现状及思考[J]. 世界农业, 2015(5): 126-128.
- [7] 李玲, 殷振华, 亚华金, 等. N、P、K、Ca 微量元素培养对辣木幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(16): 52-56.
- [8] 程世敏, 杨振荣, 王家妹, 等. 施磷水平对辣木长势及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(7): 64-69.
- [9] 许冰, 任开磊, 吴疆翀, 等. 辣木幼林对氮、磷、钾肥响应及叶片的生理反应[J]. 林业科学研究, 2016, 29(3): 418-423.
- [10] 吴春红, 刘庆, 孔凡美, 等. 氮肥施用量对不同紫甘薯品种产量和氮素效率的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 113-122.
- [11] ANWAR F, LATIF S, ASHRAF M, et al. *Moringa oleifera*: a food plant with multiple medicinal uses[J]. Phytotherapy Research, 2007, 21(1): 17-25.
- [12] NOUMAN W, ANWAR F, GULL T, et al. Profiling of polyphenolics, nutrients and antioxidant potential of germplasm's leaves from seven cultivars of *Moringa oleifera* Lam.[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 83: 166-176.
- [13] ATAWODI S E, ATAWODI J C, IDAKWO G A, et al.. Evaluation of the polyphenol content and antioxidant properties of methanol extracts of the leaves, stem, and root barks of *Moringa oleifera* Lam.[J]. Journal of medicinal food, 2010, 13(3): 710-716.
- [14] 祝燕, 刘勇, 李国雷, 等. 氮素营养对长白落叶松移植苗生长及养分状况的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 168-172.

- [15] 康瑶瑶, 刘勇, 马履一, 等. 施肥对长白落叶松苗木养分库氮磷吸收及利用的影响[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(2): 31-36.
- [16] 李双喜, 杨曾奖, 徐大平, 等. 水分、养分和寄主对檀香幼苗根系生长及营养吸收的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2015(1): 61-68.
- [17] 韩素芹, 王秀峰, 魏珉, 等. 甜椒穴盘苗壮苗指数及其与苗期性状的相关性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2004, 35(2): 187-190.
- [18] SALIFU K F, JACOBS D F. Characterizing fertility targets and multi-element interactions in nursery culture of *Quercus rubra* seedlings[J]. Annals of Forest Science, 2006, 63(3): 231-237.
- [19] 李泽, 谭晓风, 卢锟, 等. 根外追肥对油桐幼苗生长、光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(2): 40-44.
- [20] 程小燕, 谭裕模. 3种施肥模式对氮利用率及在茎叶分配的研究[J]. 甘蔗糖业, 2013(2): 11-14.
- [21] 尹丽, 胡庭兴, 刘永安, 等. 施氮量对麻疯树幼苗生长及叶片光合特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4977-4984.
- [22] 谭飞, 胡红玲, 胡庭兴, 等. 不同施肥水平对桢楠多胚苗生长及光合生理的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(6): 1172-1181.
- [23] 胡厚臻, 侯文娟, 潘启龙, 等. 配方施肥对刨花润楠幼苗生长和光合生理的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 39-45.
- [24] 杨会肖, 廖焕琴, 杨晓慧, 等. 土壤水肥胁迫对尾叶桉叶绿素荧光参数的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(3):1-5.
- [25] 李双喜, 杨曾奖, 徐大平, 等. 施氮量对檀香幼苗生长及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 807-814.
- [26] CHENG L, FUCHIGAMI L H. Rubisco activation state decreases with increasing nitrogen content in apple leaves[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(351): 1687-1694.
- [27] MANTER D K, KAVANAGH K L, ROSE C L. Growth response of Douglas-fir seedlings to nitrogen fertilization: importance of Rubisco activation state and respiration rates[J]. Tree Physiology, 2005, 25(8): 1015-1021.
- [28] 温小莹, 黄芳芳, 甘先华, 等. N素指数施肥对格木、降香黄檀苗期生长的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(6): 1-7.