

不同施肥处理对木棉叶片光合特性和幼苗生长的影响

郑元¹, 唐军荣¹, 高柱^{1,2}, 高溪¹, 钱成梭¹, 马焕成^{1,①}

(1. 西南林业大学 西南地区生物多样性保育国家林业局重点实验室, 云南 昆明 650224;
2. 江西省科学院生物资源研究所 江西省重金属污染生态修复工程技术研究中心, 江西 南昌 330096)

摘要: 采用 $L_{25}(5^3)$ 正交实验设计设置不同氮、磷和钾肥施用量及配比[单株施用量分别为 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 2.0、4.0、6.0、8.0 和 10.0 g, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 4.0、6.0、8.0、10.0 和 12.0 g, KCl 0.6、1.2、1.8、2.4 和 3.0 g], 并设置不同复合肥施用量(单株施用量分别为 10、20、30、40 和 50 g), 比较了施肥后第 1 至第 3 个月木棉(*Bombax ceiba* Linn.) 幼苗叶片光合指标[包括净光合速率(Pn)、水分利用效率(WUE)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)和叶绿素相对含量(SPAD)]和幼苗生长指标(包括株高增长量、地径增长量和叶面积增长量)的变化。结果表明: 总体来看, 不同施肥处理组木棉幼苗叶片的 Pn 和 WUE 值升高, 幼苗的株高增长量、地径增长量和叶面积增长量增加, 但不同施肥处理对叶片 F_v/F_m 和 SPAD 值的影响较小; 复合肥对叶片光合生理特性和幼苗生长的影响也较小。在施肥后的第 1 至第 3 个月, 单株施用量氮肥 4.0 或 6.0 g, 磷肥 4.0 或 8.0 g, 钾肥 1.2、1.8 或 3.0 g 处理组幼苗叶片的 Pn 和 WUE 值显著高于对照(不施肥)和大多数处理组; 单株施用量氮肥 4.0 或 6.0 g、磷肥 4.0~12.0 g、钾肥 1.2~3.0 g 处理组幼苗的株高增长量、地径增长量和叶面积增长量也均较高。综合分析结果显示: 氮肥对木棉幼苗光合生理特性及生长的影响最大, 钾肥次之, 磷肥最小。综合考虑 Pn 值、WUE 值、株高增长量、地径增长量和叶面积增长量, 木棉苗期的适宜单株施肥量为 N 1.84 或 2.76 g、 P_2O_5 0.72~2.16 g 和 K_2O 0.72~1.80 g。

关键词: 木棉; 施肥水平; 肥料配比; 光合生理特性; 幼苗生长

中图分类号: Q945; S562.06.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2016)02-0055-10
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.02.07

Effects of different fertilization treatments on photosynthetic characteristics of leaf and seedling growth of *Bombax ceiba* ZHENG Yuan¹, TANG Junrong¹, GAO Zhu^{1,2}, GAO Xi¹, QIAN Chengsuo¹, MA Huancheng^{1,①} (1. Key Laboratory for Biodiversity Conservation in Southwest China of State Forestry Administration, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Jiangxi Engineering Research Center for Eco-remediation of Heavy Metal Pollution, Institute of Biological Resources, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2016, 25(2): 55-64

Abstract: Different applying amounts and proportions of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers [applying amount per plant of 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 and 10.0 g $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 and 12.0 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 and 3.0 g KCl , respectively] were set up by $L_{25}(5^3)$ orthogonal experimental design, and different applying amounts of compound fertilizer (applying amount per plant of 10, 20, 30, 40 and 50 g, respectively) were also set up, changes in photosynthetic characteristics indexes [including net photosynthetic rate (Pn), water use efficiency (WUE), the maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m) and chlorophyll relative content (SPAD)] of leaf and seedling growth indexes (including increments of height, ground diameter and leaf area) of *Bombax ceiba* Linn. seedling after fertilization from the first to the third month were compared. The results show

收稿日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31260175); 国家林业公益性行业科研专项(201104034); 云南省高校干热河谷植被恢复创新团队
作者简介: 郑元(1982—), 男, 天津人, 博士, 讲师, 主要从事植物生理生态方面的研究工作。

①通信作者 E-mail: mhckm@foxmail.com

that in general, Pn and WUE values of leaf of *B. ceiba* seedling in different fertilization treatments increase, and increments of seedling height, ground diameter and leaf area increase, but effects of different fertilization treatments on F_v/F_m and SPAD values of leaf are small. Effect of compound fertilizer on leaf photosynthetic characteristics and seedling growth is also small. After fertilization from the first to the third month, Pn and WUE values of leaf of seedling in treatment groups with applying amount per plant of 4.0 or 6.0 g nitrogen fertilizer, 4.0 or 8.0 g phosphorus fertilizer, 1.2, 1.8 or 3.0 g potassium fertilizer are significantly higher than those in the control (no fertilizer) and most treatment groups. Increments of height, ground diameter and leaf area of seedlings in treatment groups with applying amount per plant of 4.0 or 6.0 g nitrogen fertilizer, 4.0–12.0 g phosphorus fertilizer, 1.2–3.0 g potassium fertilizer are also high. The result of comprehensive analysis indicates that effect of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and growth of *B. ceiba* seedling is the largest, that of potassium fertilizer takes the second place, and that of phosphorus fertilizer is the smallest. Comprehensively considering on Pn value, WUE value and increments of height, ground diameter and leaf area, the suitable applying amount per plant at seedling stage of *B. ceiba* is 1.84 or 2.76 g N, 0.72–2.16 g P_2O_5 and 0.72–1.80 g K_2O .

Key words: *Bombax ceiba* Linn.; fertilization level; fertilizer proportion; photosynthetic and physiological characteristics; seedling growth

施肥是培养优质苗木与速生丰产林的关键技术环节之一,科学施肥能够有效改善土壤条件,提高苗木的质量、抗逆性和移植成活率^[1-2]。过量及盲目施肥不仅会导致肥料利用率降低、生产成本增加,还可能造成环境污染,加重温室效应^[3];而施肥不足则通常无法对农作物和经济林木产生增产作用。在苗木培育过程中,合理增施氮、磷、钾肥可使植物体内养分利用率最大化;采用合理的施肥配比和用量还可有效增强植物的抗逆性,提高农林产品的产量,并改善其品质^[4-5]。由于不同植物对氮、磷、钾肥的需求量及配施比例有差异,因而,针对不同植物合理施肥已成为国内外植物营养学研究的重点之一。

木棉 (*Bombax ceiba* Linn.) 为木棉属 (*Bombax* Linn.) 落叶大乔木,广泛分布在西南横断山脉峡谷中,是西南干热河谷稀树草坡和稀树灌丛的建群树种,对当地气候具有较强的适应性^[6]。同时,木棉是生产木本纤维的主要树种,其单株纤维产量极高,现已在干热河谷地区建立一定规模的种植基地,可满足木棉绒线生产需求,具有显著的经济价值和生态效益^[7]。然而,木棉的栽培技术研究明显滞后于其开发利用研究,严重制约了木棉产业的发展。因此,筛选有利于木棉生长的栽植技术,特别是适宜的施肥技术,已经成为木棉产业化栽培过程中亟待解决的关键问题。

为此,作者采用 $L_{25}(5^3)$ 正交实验设计设置不同氮、磷、钾肥施用量及配比,并设置不同复合肥施用量,比较施肥后不同时间段木棉幼苗叶片的净光合速率、水分利用效率、最大光化学效率、叶绿素相对含量

以及幼苗的株高增长量、地径增长量和叶面积增长量的变化,初步筛选出适合木棉幼苗生长的氮、磷、钾肥施用量及配比,以期为木棉的苗木培育、养分管理和合理施肥提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试木棉种子采自位于云南省红河州个旧市保和乡冷墩村内的云南攀大木棉科技应用有限公司的木棉种植基地;在西南林业大学塑料大棚内进行播种、育苗、移苗和培养,塑料大棚内为自然光照,日平均气温 18 ℃、空气相对湿度 48%。于 2011 年 7 月在营养袋中进行播种育苗,播种基质为木棉种植基地的燥红土表土, pH 7.03, 有机质含量 $14.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮和速效钾含量分别为 12.4 和 $51.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 无速效磷, 养分较匮乏^[8]。待幼苗长至具 4 或 5 枚真叶时,选择生长健康且长势一致的幼苗,带土移栽至上口径 25 cm、高 20 cm 的塑料盆中,每盆种植 1 株幼苗,缓苗 2 周后进行不同施肥处理;育苗期间进行常规的水分管理。

实验使用的氮肥为含质量分数 46% N 的尿素 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$], 磷肥为含质量分数 18% P_2O_5 的过磷酸钙 [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$], 钾肥为含质量分数 60% K_2O 的氯化钾 (KCl), 复合肥为总养分质量分数 25% 的“优胜达”牌通用复合肥,上述肥料均由邵阳市正盛农化科技有限公司生产。

1.2 方法

1.2.1 实验设计及施肥方法 采用3因素5水平 [$L_{25}(5^3)$] 正交实验设计,3因素分别指 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 单株施用量、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 单株施用量和 KCl 单株施用量; $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 单株施用量5个水平分别为2.0、4.0、6.0、8.0和10.0 g, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 单株施用量5个水平分别为4.0、6.0、8.0、10.0和12.0 g, KCl 单株施用量5个水平分别为0.6、1.2、1.8、2.4和3.0 g,共25个处理组,编号为T1至T25。另外,设置5个复合肥处理组,单株施用量分别为10、20、30、40和50 g,编号为T26至T30;以不施肥为对照T0(CK)。

按照上述实验设置的各处理组施肥量将肥料溶于一定体积清水中,并定容至500 mL,缓缓浇入幼苗根部周围土壤中,共施肥6次,对照组浇灌等量清水;施肥时间分别为2011年9月22日、10月8日、10月23日、11月7日、11月22日和12月7日的15:00至17:00。每处理组12盆,每盆视为1个重复;每隔2~3 d正常浇水1次,每10天随机调整1次塑料盆的位置,于第1次施肥后90 d结束实验。

1.2.2 叶片光合指标的测定 各处理组随机选取6株样株,分别在首次施肥后第1、第3、第7、第14、第21、第28、第45、第60和第90天进行叶片净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)和水分利用效率(WUE)的跟踪测定,共测定9次。在每个测定日的上午,选择待测植株由顶端向下的第3至第5枚健康叶片,用LI-6400便携式光合仪(美国LI-COR公司)测定Pn、Tr和WUE值。测定时,选择开放式气路,设定红蓝光源的光合有效辐射强度为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在每个测定日,选择各处理组剩余6株样株由顶端向下的第3至第5枚健康叶片测定PS II最大光合效率(F_v/F_m)及叶绿素相对含量(SPAD)。用CCM-200 Plus叶绿素测定仪(美国OPTI-SCIENCES公司)测定叶片的SPAD值;在每个测定日的黄昏,用PAM-2500叶绿素荧光仪(德国Walz公司)测定叶片的 F_v/F_m 值,测定前暗适应30 min。

施肥后第1个月的Pn、WUE、 F_v/F_m 和SPAD值为第1至第6次测定结果的平均值,施肥后第2个月的Pn、WUE、 F_v/F_m 和SPAD值为第7和第8次测定结果的平均值,施肥后第3个月的Pn、WUE、 F_v/F_m 和SPAD值为第9次的测定结果。

1.2.3 幼苗生长指标的测定 选择首次施肥后的第1、第28、第60和第90天,对各处理组所有植株进行

株高、地径和叶面积的跟踪测定,共测定4次。其中,株高用钢卷尺(精度0.1 cm)测定;地径用电子游标卡尺(精度0.01 cm)测定,从2个相互垂直的方向进行测量,结果取平均值;叶面积采用LI-3000A便携式叶面积仪(美国LI-COR公司)测定,分辨率 $1\ \text{mm}^2$,并计算待测植株全部叶片的总面积。根据4次测定结果分别计算施肥后第1、第2和第3个月幼苗的株高增长量、地径增长量和叶面积增长量。

1.3 数据处理和统计分析

采用EXCEL 2003和SPSS 13.0软件对数据进行统计分析;采用Duncan's新复极差法进行多重比较。

2 结果和分析

2.1 不同施肥处理对木棉幼苗叶片光合特性的影响

施用不同水平和配比的氮磷钾肥第1、第2和第3个月后,木棉幼苗叶片净光合速率(Pn)和水分利用效率(WUE)的变化见表1,叶片PS II最大光合效率(F_v/F_m)和叶绿素相对含量(SPAD)的变化见表2。

2.1.1 对叶片净光合速率(Pn)的影响 由表1结果可以看出:施肥后第1个月,T6处理组 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 KCl 的单株施用量分别为4.0、4.0和1.8 g]木棉幼苗叶片的Pn值最高,显著高于对照及大多数处理组($P<0.05$);而T30处理组(复合肥的单株施用量为50 g)木棉幼苗叶片的Pn值最低,显著低于对照及大多数处理组。施肥后第2和第3个月,T13 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 KCl 的单株施用量分别为6.0、8.0和1.2 g]、T14 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 KCl 的单株施用量分别为6.0、10.0和1.8 g]、T15 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 KCl 的单株施用量分别为6.0、12.0和2.4 g]处理组幼苗叶片的Pn值显著高于对照及大多数处理组;而T29(复合肥单株施用量为40 g)和T30处理组幼苗叶片的Pn值较低,显著低于对照及大多数处理组。总体上看,T6和T13处理组木棉幼苗叶片的Pn较高,而T29和T30处理组幼苗叶片的Pn值则较低。

由施肥后所有处理组不同月份叶片Pn值的平均值看,施肥后第1和第2个月叶片的Pn值显著高于施肥后第3个月,并呈现先上升后下降的变化趋势。

此外,在 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 施用量相同的条件下,配施不同水平的 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 KCl 对木棉幼苗叶片Pn值的影响效应无明显规律性,说明磷肥和钾肥互作对

木棉幼苗叶片光合作用的影响机制较为复杂。在 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 或 KCl 施用量相同的条件下, 配施中等水平的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (单株施用量为 4.0 或 6.0 g) 均能够显著提高木棉幼苗叶片的 Pn 值, 而配施低水平或高水平的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 则对叶片 Pn 值有抑制作用。

2.1.2 对叶片水分利用效率 (WUE) 的影响 由表 1 结果可以看出: 施肥后第 1 个月, T6、T7 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 KCl 的单株施用量分别为 4.0、6.0 和 2.4 g] 和 T8 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 KCl 的单株施用量分别为 4.0、8.0 和 3.0 g] 处理组叶片的 WUE

表 1 不同施肥处理对木棉幼苗叶片净光合速率 (Pn) 和水分利用效率 (WUE) 的影响 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 1 Effects of different fertilization treatments on net photosynthetic rate (Pn) and water use efficiency (WUE) of leaf of *Bombax ceiba* Linn. seedling ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	施肥后不同时间的 Pn 值/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Pn value at different times after fertilization				施肥后不同时间的 WUE 值/ $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ WUE value at different times after fertilization			
	第 1 个月 The first month	第 2 个月 The second month	第 3 个月 The third month	平均值 ³⁾ Average ³⁾	第 1 个月 The first month	第 2 个月 The second month	第 3 个月 The third month	平均值 ³⁾ Average ³⁾
T0 (CK)	2.52±0.21bc	3.07±0.23bc	1.29±0.04bc	2.51±0.48cde	2.22±0.14bc	2.67±0.15bc	1.81±0.07cde	2.28±0.28cd
T1 (A1B1C1)	2.26±0.15c	4.05±0.14ab	2.16±0.06ab	2.65±0.39cd	1.92±0.10c	3.71±0.10ab	3.71±0.15ab	2.52±0.35bcd
T2 (A1B2C2)	2.57±0.15bc	1.31±0.04cd	0.70±0.02cd	2.08±0.35de	2.49±0.15bc	1.03±0.03cd	1.03±0.04de	2.01±0.38cde
T3 (A1B3C3)	2.89±0.11b	2.29±0.08c	1.22±0.04bc	2.57±0.30cd	2.37±0.12bc	1.83±0.05c	1.83±0.07cde	2.19±0.22cd
T4 (A1B4C4)	2.70±0.12b	1.75±0.06cd	0.93±0.03c	2.29±0.29de	2.60±0.16b	2.69±0.08bc	2.69±0.11bcd	2.63±0.30bcd
T5 (A1B5C5)	2.88±0.23b	4.19±0.14ab	2.23±0.07ab	3.10±0.53bcd	2.55±0.16b	3.47±0.10b	3.47±0.14bc	2.86±0.35bcd
T6 (A2B1C3)	4.56±0.25a	4.15±0.14ab	2.21±0.07ab	4.21±0.57a	3.52±0.20a	3.67±0.10b	3.67±0.15ab	3.57±0.40ab
T7 (A2B2C4)	3.50±0.14ab	4.04±0.14ab	2.16±0.06ab	3.47±0.35bcd	3.65±0.15a	3.40±0.10b	3.40±0.14bc	3.56±0.29ab
T8 (A2B3C5)	3.99±0.28ab	4.38±0.15ab	2.34±0.07ab	3.89±0.62ab	3.80±0.29a	3.53±0.10b	3.53±0.14ab	3.71±0.59a
T9 (A2B4C1)	2.94±0.18b	2.39±0.08c	1.28±0.04bc	2.64±0.41cd	3.22±0.20ab	2.18±0.06c	2.18±0.09cd	2.87±0.42bcd
T10 (A2B5C2)	3.89±0.23ab	4.19±0.14ab	2.23±0.07ab	3.77±0.52bc	2.97±0.18b	3.94±0.11ab	3.94±0.16ab	3.29±0.39bc
T11 (A3B1C5)	3.99±0.26ab	3.94±0.13ab	2.10±0.06ab	3.77±0.57bc	2.83±0.19b	3.70±0.10ab	3.70±0.15ab	3.12±0.41bc
T12 (A3B2C1)	2.93±0.17b	2.81±0.09bc	1.50±0.04b	2.75±0.39cd	2.91±0.17b	2.64±0.07bc	2.64±0.11bcd	2.82±0.34bcd
T13 (A3B3C2)	3.83±0.19ab	5.18±0.17a	2.76±0.08a	4.01±0.46a	3.17±0.20ab	4.88±0.14a	4.88±0.20a	3.74±0.50a
T14 (A3B4C3)	3.66±0.18ab	4.79±0.16a	2.55±0.08a	3.79±0.43bc	2.85±0.13b	4.56±0.13a	4.56±0.19a	3.42±0.39ab
T15 (A3B5C4)	3.96±0.33ab	4.68±0.16a	2.50±0.07a	3.95±0.71ab	3.31±0.21ab	4.06±0.11ab	4.06±0.17ab	3.56±0.45ab
T16 (A4B1C2)	2.34±0.13c	3.47±0.12b	1.85±0.05b	2.54±0.33cde	2.58±0.15b	3.61±0.10b	3.61±0.15ab	2.92±0.35bcd
T17 (A4B2C3)	2.56±0.09bc	3.17±0.11b	1.69±0.05b	2.60±0.23cd	2.85±0.17b	3.14±0.09b	3.14±0.13bc	2.95±0.34bcd
T18 (A4B3C4)	2.58±0.10bc	2.40±0.08c	1.28±0.04bc	2.40±0.26cde	2.06±0.10c	2.23±0.06c	2.23±0.09cd	2.12±0.20cd
T19 (A4B4C5)	2.32±0.22c	2.60±0.09c	1.39±0.04bc	2.28±0.45de	1.41±0.10d	2.69±0.08bc	2.69±0.11bcd	1.84±0.30cde
T20 (A4B5C1)	2.05±0.16cd	3.26±0.11b	1.74±0.05b	2.28±0.38de	1.56±0.10cd	3.13±0.09b	3.13±0.13bc	2.08±0.32cd
T21 (A5B1C4)	2.29±0.19c	2.58±0.09c	1.38±0.04bc	2.25±0.42de	1.74±0.11cd	2.80±0.08bc	2.80±0.11bcd	2.10±0.28cd
T22 (A5B2C5)	2.49±0.15bc	2.51±0.08c	1.34±0.04bc	2.37±0.32cde	2.15±0.05bc	2.45±0.07bc	2.45±0.10cd	2.25±0.10cd
T23 (A5B3C1)	2.49±0.21bc	2.93±0.10bc	1.56±0.05b	2.48±0.46cde	1.96±0.06c	2.88±0.08bc	2.88±0.12bcd	2.27±0.18cd
T24 (A5B4C2)	2.13±0.15cd	2.55±0.09c	1.36±0.04bc	2.13±0.33de	1.91±0.10c	2.71±0.08bc	2.71±0.11bcd	2.18±0.24cd
T25 (A5B5C3)	1.72±0.13cd	2.21±0.07c	1.18±0.03c	1.77±0.28de	1.52±0.12cd	2.33±0.06c	2.33±0.09cd	1.79±0.29cde
T26 (D1)	2.10±0.18cd	1.28±0.04cd	0.68±0.02cd	1.76±0.40de	1.75±0.14cd	2.52±0.07bc	2.52±0.10bcd	2.01±0.32cde
T27 (D2)	1.83±0.12cd	1.68±0.06cd	0.90±0.03c	1.69±0.26de	1.63±0.12cd	1.13±0.03cd	1.13±0.05de	1.46±0.26de
T28 (D3)	2.56±0.17bc	2.06±0.07c	1.10±0.03c	2.28±0.38de	1.75±0.10cd	1.24±0.04cd	1.24±0.05de	1.58±0.21de
T29 (D4)	1.89±0.12cd	0.83±0.03d	0.44±0.01d	1.50±0.32e	1.61±0.09cd	0.70±0.02d	0.70±0.03e	1.31±0.24e
T30 (D5)	1.54±0.11d	0.30±0.01d	0.16±0.01d	1.11±0.30e	1.25±0.11d	0.39±0.01d	0.39±0.02e	0.96±0.26e
平均值 Average	2.77±0.14A	2.94±0.22A	1.56±0.12B		2.39±0.13B	2.77±0.20A	2.74±0.20A	

¹⁾ 同列中不同小写字母表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatment groups ($P < 0.05$); 同行中不同大写字母表示不同月份间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different months ($P < 0.05$).

²⁾ CK: 不施肥 No fertilizer; A1–A5: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 单株施用量分别为 2.0、4.0、6.0、8.0 和 10.0 g Applying amount per plant of 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 and 10.0 g $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, respectively; B1–B5: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 单株施用量分别为 4.0、6.0、8.0、10.0 和 12.0 g Applying amount per plant of 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 and 12.0 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, respectively; C1–C5: KCl 单株施用量分别为 0.6、1.2、1.8、2.4 和 3.0 g Applying amount per plant of 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 and 3.0 g KCl , respectively; D1–D5: 复合肥的单株施用量分别为 10、20、30、40 和 50 g Applying amount per plant of 10, 20, 30, 40 and 50 g compound fertilizer, respectively.

³⁾ 数值为 9 次测定结果的平均值 The values are averages of nine determination results.

表2 不同施肥处理对木棉幼苗叶片 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 和叶绿素相对含量 (SPAD) 的影响 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 2 Effects of different fertilization treatments on the maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m) and chlorophyll relative content (SPAD) in leaf of *Bombax ceiba* Linn. seedling ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	施肥后不同时间的 F_v/F_m 值 F_v/F_m value at different times after fertilization				施肥后不同时间的 SPAD 值 SPAD value at different times after fertilization			
	第1个月 The first month	第2个月 The second month	第3个月 The third month	平均值 ³⁾ Average ³⁾	第1个月 The first month	第2个月 The second month	第3个月 The third month	平均值 ³⁾ Average ³⁾
T0 (CK)	0.78±0.01a	0.77±0.01a	0.66±0.01a	0.76±0.02a	10.75±0.07a	10.24±0.12ab	8.80±0.14ab	10.42±0.25ab
T1 (A1B1C1)	0.66±0.01ab	0.68±0.01ab	0.58±0.01ab	0.66±0.02ab	10.31±0.13ab	9.51±0.11ab	8.23±0.13ab	9.90±0.29ab
T2 (A1B2C2)	0.67±0.01ab	0.65±0.01ab	0.55±0.01ab	0.65±0.02ab	10.42±0.14ab	9.94±0.11ab	8.60±0.13ab	10.11±0.23ab
T3 (A1B3C3)	0.76±0.01a	0.73±0.01ab	0.62±0.01ab	0.74±0.02ab	10.33±0.18ab	10.34±0.12ab	8.95±0.14a	10.18±0.20ab
T4 (A1B4C4)	0.72±0.01ab	0.75±0.01ab	0.62±0.01ab	0.72±0.02ab	10.29±0.16ab	9.50±0.11ab	8.22±0.13ab	9.88±0.29ab
T5 (A1B5C5)	0.75±0.01ab	0.76±0.01a	0.63±0.01ab	0.74±0.02ab	10.21±0.14ab	10.18±0.11ab	8.81±0.14ab	10.05±0.20ab
T6 (A2B1C3)	0.78±0.01a	0.77±0.01a	0.66±0.01a	0.76±0.02a	11.08±0.32a	10.28±0.12ab	8.90±0.14a	10.66±0.30a
T7 (A2B2C4)	0.79±0.01a	0.81±0.01a	0.68±0.01a	0.78±0.02a	10.84±0.17a	10.22±0.12ab	8.85±0.14a	10.48±0.33ab
T8 (A2B3C5)	0.78±0.01a	0.78±0.01a	0.66±0.01a	0.77±0.02a	10.93±0.13a	10.51±0.12a	9.10±0.14a	10.64±0.24a
T9 (A2B4C1)	0.65±0.01ab	0.70±0.01ab	0.59±0.01ab	0.66±0.03ab	10.04±0.11ab	9.59±0.11ab	8.30±0.13ab	9.75±0.22ab
T10 (A2B5C2)	0.78±0.01a	0.77±0.01a	0.67±0.01a	0.77±0.02a	11.01±0.23a	10.47±0.12a	9.07±0.14a	10.68±0.24a
T11 (A3B1C5)	0.78±0.01a	0.79±0.01a	0.68±0.01a	0.77±0.02a	11.10±0.15a	10.32±0.12ab	8.93±0.14a	10.68±0.34a
T12 (A3B2C1)	0.70±0.01ab	0.73±0.01ab	0.62±0.01ab	0.70±0.02ab	10.33±0.12ab	9.92±0.11ab	8.59±0.13ab	10.04±0.22ab
T13 (A3B3C2)	0.78±0.01a	0.76±0.01a	0.66±0.01a	0.77±0.02a	11.11±0.12a	10.54±0.12a	9.13±0.14a	10.76±0.27a
T14 (A3B4C3)	0.79±0.01a	0.77±0.01a	0.68±0.01a	0.77±0.01a	11.15±0.14a	10.33±0.12ab	8.94±0.14a	10.73±0.32a
T15 (A3B5C4)	0.78±0.01a	0.77±0.01a	0.66±0.01a	0.77±0.02a	11.06±0.14a	10.71±0.12a	9.27±0.14a	10.79±0.23a
T16 (A4B1C2)	0.65±0.01ab	0.72±0.01ab	0.61±0.01ab	0.65±0.03ab	10.22±0.16ab	9.48±0.11ab	8.20±0.13ab	9.83±0.27ab
T17 (A4B2C3)	0.65±0.01ab	0.74±0.01ab	0.63±0.01ab	0.67±0.03ab	10.33±0.09ab	10.11±0.11ab	8.75±0.14ab	10.11±0.20ab
T18 (A4B3C4)	0.67±0.01ab	0.70±0.01ab	0.59±0.01ab	0.67±0.02ab	10.49±0.14ab	9.94±0.11ab	8.60±0.13ab	10.16±0.23ab
T19 (A4B4C5)	0.67±0.01ab	0.68±0.01ab	0.57±0.01ab	0.66±0.03ab	10.30±0.12ab	9.63±0.11ab	8.33±0.13ab	9.93±0.26ab
T20 (A4B5C1)	0.67±0.01ab	0.66±0.01ab	0.56±0.01ab	0.65±0.02ab	10.48±0.16ab	10.04±0.11ab	8.69±0.14ab	10.18±0.23ab
T21 (A5B1C4)	0.62±0.01b	0.67±0.01ab	0.57±0.01ab	0.62±0.02b	10.45±0.09ab	10.29±0.12ab	8.91±0.14a	10.24±0.19ab
T22 (A5B2C5)	0.63±0.01b	0.65±0.01ab	0.55±0.01ab	0.62±0.03b	10.52±0.09ab	10.41±0.12a	9.01±0.14a	10.33±0.19ab
T23 (A5B3C1)	0.64±0.01b	0.69±0.01ab	0.59±0.01ab	0.64±0.02b	10.34±0.09ab	10.12±0.11ab	8.76±0.14ab	10.11±0.22ab
T24 (A5B4C2)	0.63±0.01b	0.67±0.01ab	0.57±0.01ab	0.64±0.02b	9.87±0.12ab	9.38±0.11ab	8.12±0.13ab	9.57±0.25ab
T25 (A5B5C3)	0.62±0.01b	0.65±0.01ab	0.55±0.01ab	0.63±0.02b	9.98±0.09ab	9.57±0.11ab	8.28±0.13ab	9.70±0.21ab
T26 (D1)	0.69±0.01ab	0.71±0.01ab	0.60±0.01ab	0.69±0.02ab	10.43±0.16ab	10.07±0.11ab	8.72±0.14ab	10.16±0.21ab
T27 (D2)	0.77±0.01a	0.72±0.01ab	0.62±0.01ab	0.74±0.02ab	10.74±0.17a	10.12±0.11ab	8.76±0.14ab	10.38±0.28ab
T28 (D3)	0.79±0.01a	0.76±0.01a	0.65±0.01a	0.77±0.02a	11.19±0.11a	10.30±0.12ab	8.92±0.14a	10.74±0.32a
T29 (D4)	0.66±0.01ab	0.71±0.01ab	0.60±0.01ab	0.66±0.02ab	10.38±0.19ab	9.74±0.11ab	8.43±0.13ab	10.02±0.27ab
T30 (D5)	0.69±0.01ab	0.73±0.01ab	0.61±0.01ab	0.69±0.02ab	10.42±0.12ab	10.13±0.11ab	8.77±0.14ab	10.17±0.20ab
平均值 Average	0.71±0.01A	0.72±0.01A	0.62±0.01AB		10.55±0.07A	10.06±0.06AB	8.71±0.06B	

¹⁾ 同列中不同小写字母表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatment groups ($P < 0.05$); 同行中不同大写字母表示不同月份间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different months ($P < 0.05$).

²⁾ CK: 不施肥 No fertilizer; A1-A5: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 单株施用量分别为 2.0、4.0、6.0、8.0 和 10.0 g Applying amount per plant of 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 and 10.0 g $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, respectively; B1-B5: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 单株施用量分别为 4.0、6.0、8.0、10.0 和 12.0 g Applying amount per plant of 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 and 12.0 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, respectively; C1-C5: KCl 单株施用量分别为 0.6、1.2、1.8、2.4 和 3.0 g Applying amount per plant of 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 and 3.0 g KCl, respectively; D1-D5: 复合肥的单株施用量分别为 10、20、30、40 和 50 g Applying amount per plant of 10, 20, 30, 40 and 50 g compound fertilizer, respectively.

³⁾ 数值为 9 次测定结果的平均值 The values are averages of nine determination results.

值均较高,显著高于对照及大多数处理组;而 T19 [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 和 KCl 的单株施用量分别为 8.0、10.0 和 3.0 g] 和 T30 处理组叶片的 WUE 值均较低,显著低于对照和大多数处理组。施肥后第 2 和第 3 个月, T13 和 T14 处理组叶片的 WUE 值显著

高于对照及大多数处理组;而 T29 和 T30 处理组叶片的 WUE 值均较低,明显低于对照及大多数处理组。总体上看, T8 和 T13 处理组叶片的 WUE 值较高,显著高于对照和大多数处理组;而 T29 和 T30 处理组叶片的 WUE 值则较低。

由施肥后所有处理组不同月份叶片 WUE 值的平均值看,施肥后第 1 个月木棉幼苗叶片的 WUE 值显著低于施肥后第 2 和第 3 个月,并且呈现先上升后略有下降的变化趋势。

2.1.3 对叶片 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)的影响 由表 2 可以看出:在实验期间,仅 T21[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 10.0、4.0 和 2.4 g]、T22[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 10.0、6.0 和 3.0 g]、T23[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 10.0、8.0 和 0.6 g]、T24[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 10.0、10.0 和 1.2 g]和 T25[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 10.0、12.0 和 1.8 g]处理组木棉幼苗叶片的 F_v/F_m 值在施肥后第 1 个月显著低于对照,而施肥后不同时间段其他处理组叶片的 F_v/F_m 值均与对照无显著差异($P>0.05$)。从各处理组叶片 F_v/F_m 值的平均值来看,T21、T22、T23、T24 和 T25 处理组叶片的 F_v/F_m 值均显著低于对照,而其他处理组叶片的 F_v/F_m 值均与对照无显著差异。

由施肥后所有处理组不同月份叶片 F_v/F_m 值的平均值看,施肥后第 1、第 2 和第 3 个月间木棉幼苗叶片的 F_v/F_m 值无显著差异,但施肥后第 1 和第 2 个月叶片的 F_v/F_m 值相近且略高于施肥后 3 个月。

2.1.4 对叶片叶绿素相对含量(SPAD)的影响 由表 2 可见:施肥后第 1 至第 3 个月,所有处理组叶片的 SPAD 值及其平均值均与对照无差异显著。

由施肥后所有处理组不同月份叶片 SPAD 值的平均值看,施肥后第 1 至第 3 个月木棉幼苗叶片的 SPAD 值呈逐渐降低的趋势,并且施肥后第 3 个月叶片的 SPAD 值显著低于施肥后第 1 个月,但施肥后第 2 个月叶片的 SPAD 值与其他时间段无显著差异。

2.2 不同施肥处理对木棉幼苗生长的影响

施用不同水平和配比的氮磷钾肥第 1、第 2 和第 3 个月后,木棉幼苗株高增长量和地径增长量的变化见表 3,幼苗叶面积增长量的变化见表 4。

2.2.1 对幼苗株高增长量的影响 由表 3 可以看出:施肥后第 1 个月,T11[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 6.0、4.0 和 3.0 g]、T13 和 T14 处理组幼苗的株高增长量显著高于对照和大多数处理组($P<0.05$);施肥后第 2 个月,T6、T7、T8、T10[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别

为 4.0、12.0 和 1.2 g]、T11、T13、T14 和 T15 处理组幼苗的株高增长量显著高于对照和大多数处理组;施肥后第 3 个月,T4[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 2.0、10.0 和 2.4 g]、T5[CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 2.0、12.0 和 3.0 g]、T7、T8 和 T13 处理组幼苗的株高增长量略高于对照并显著高于大多数处理组。从各处理组幼苗株高增长量的总和来看,T6、T7、T8、T11、T13 和 T14 处理组幼苗的株高增长量均较高,显著高于对照和大多数处理组。

由施肥后所有处理组不同月份幼苗株高增长量的平均值看,施肥后第 1 至第 3 个月木棉幼苗的株高增长量呈逐渐下降的趋势,并且施肥后第 1 和第 2 个月幼苗的株高增长量显著高于施肥后第 3 个月。

由表 3 还可以看出:在 KCl 施用量较充足(单株施用量为 1.2~3.0 g)的条件下,配施单株施用量 4.0 或 6.0 g 的 CO(NH₂)₂及单株施用量 4.0~12.0 g 的 Ca(H₂PO₄)₂均能显著提高木棉幼苗的株高增长量。

2.2.2 对幼苗地径增长量的影响 由表 3 可见:施肥后第 1 个月,T6、T7、T8、T11、T13 和 T14 处理组幼苗的地径增长量较高,均略高于对照并显著高于大多数处理组;施肥后第 2 个月,T6、T11、T13 和 T14 处理组以及 T27 和 T28 处理组(复合肥单株施用量分别为 20 和 30 g)幼苗的地径增长量也较高,也均略高于对照并显著高于大多数处理组;施肥后第 3 个月,T4、T6、T8、T10、T13、T14 和 T15 处理组幼苗的地径增长量较高,显著高于对照及大多数处理组。从各处理组幼苗地径增长量的总和看,T6、T11、T13 和 T14 处理组幼苗的地径增长量较高,均略高于对照并显著高于大多数处理组,但各处理组幼苗的地径增长量较对照的增幅明显小于株高增长量的增幅。

由施肥后所有处理组不同月份幼苗地径增长量的平均值看,施肥后第 1 至第 3 个月木棉幼苗的地径增长量呈急剧下降的趋势,且在施肥后第 1、第 2 和第 3 个月间差异显著。

由表 3 还可见:配施单株施用量 4.0 或 6.0 g 的 CO(NH₂)₂、单株施用量 1.2~3.0 g 的 KCl 以及单株施用量 4.0~12.0 g 的 Ca(H₂PO₄)₂均能够显著提高木棉幼苗的地径增长量。

2.2.3 对幼苗叶面积增长量的影响 由表 4 可见:施肥后第 1 个月,T8、T13 和 T14 处理组幼苗的叶面积增长量均较高,显著高于对照及大多数处理组;施

肥后第2个月的T8和T13处理组以及施肥后第3个月的T7和T14处理组幼苗的叶面积增长量也显著高于对照及大多数处理组。从各处理组幼苗叶面积增长量的总和看,T8、T13和T14处理组幼苗的叶面积增长量均较高,显著高于对照和大多数处理组;T6、T7、T10、T11和T15处理组幼苗的叶面积增长量也较

高,与对照均有显著差异。

由施肥后所有处理组不同月份幼苗的叶面积增长量平均值看,施肥后第1至第3个月木棉幼苗的叶面积增长量呈先略升高后显著降低的趋势,与木棉幼苗叶片净光合速率的变化趋势一致,且施肥后第3个月幼苗的叶面积增长量显著低于施肥后第1和第2个

表3 不同施肥处理对木棉幼苗株高和地径增长量的影响($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 3 Effects of different fertilization treatments on increments of height and ground diameter of *Bombax ceiba* Linn. seedling ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	施肥后不同时间株高的增长量/cm Increment of height at different times after fertilization				施肥后不同时间地径的增长量/cm Increment of ground diameter at different times after fertilization			
	第1个月 The first month	第2个月 The second month	第3个月 The third month	总和 Total	第1个月 The first month	第2个月 The second month	第3个月 The third month	总和 Total
T0 (CK)	0.75±0.02bc	0.62±0.02bc	0.44±0.01ab	1.81±0.05bc	1.56±0.05ab	0.78±0.02ab	0.29±0.01b	2.63±0.08ab
T1 (A1B1C1)	0.82±0.02bc	0.66±0.02bc	0.35±0.01b	1.83±0.04bc	1.33±0.04b	0.75±0.02ab	0.32±0.01ab	2.40±0.07b
T2 (A1B2C2)	0.83±0.02bc	0.73±0.02b	0.39±0.01ab	1.95±0.06bc	1.40±0.04b	0.62±0.02c	0.22±0.01c	2.24±0.07bc
T3 (A1B3C3)	0.98±0.03b	1.07±0.03ab	0.42±0.01ab	2.47±0.07b	1.12±0.03c	0.76±0.02ab	0.34±0.01ab	2.22±0.06bc
T4 (A1B4C4)	1.30±0.04b	1.04±0.03ab	0.48±0.01a	2.82±0.08ab	1.61±0.05ab	0.81±0.02ab	0.37±0.01a	2.79±0.08ab
T5 (A1B5C5)	0.86±0.03bc	1.13±0.03ab	0.46±0.01a	2.45±0.07b	1.47±0.04b	0.60±0.02c	0.32±0.01ab	2.39±0.07b
T6 (A2B1C3)	1.52±0.05ab	1.26±0.04a	0.41±0.01ab	3.19±0.09a	1.80±0.05a	0.83±0.02a	0.38±0.01a	3.01±0.09a
T7 (A2B2C4)	1.43±0.04ab	1.31±0.04a	0.48±0.01a	3.22±0.10a	1.71±0.05a	0.72±0.02b	0.33±0.01ab	2.76±0.08ab
T8 (A2B3C5)	1.42±0.04ab	1.28±0.04a	0.52±0.02a	3.22±0.10a	1.69±0.05a	0.68±0.02bc	0.38±0.01a	2.75±0.08ab
T9 (A2B4C1)	0.65±0.02c	0.58±0.02bc	0.25±0.01c	1.48±0.04c	1.10±0.03c	0.65±0.02bc	0.32±0.01ab	2.07±0.06c
T10 (A2B5C2)	1.47±0.04ab	1.30±0.04a	0.28±0.01bc	3.05±0.09ab	1.52±0.04ab	0.76±0.02ab	0.38±0.01a	2.66±0.08ab
T11 (A3B1C5)	1.73±0.05a	1.24±0.04a	0.26±0.01bc	3.23±0.10a	1.75±0.05a	0.82±0.02a	0.33±0.01ab	2.90±0.08a
T12 (A3B2C1)	0.67±0.02c	0.74±0.02b	0.37±0.01ab	1.78±0.05bc	1.21±0.04bc	0.80±0.02ab	0.26±0.01bc	2.27±0.07bc
T13 (A3B3C2)	1.75±0.05a	1.41±0.04a	0.49±0.01a	3.65±0.11a	1.70±0.05a	0.88±0.03a	0.36±0.01a	2.94±0.09a
T14 (A3B4C3)	1.82±0.05a	1.38±0.04a	0.37±0.01ab	3.57±0.10a	1.72±0.05a	0.84±0.02a	0.37±0.01a	2.93±0.09a
T15 (A3B5C4)	1.47±0.04ab	1.29±0.04a	0.24±0.01c	3.00±0.09ab	1.52±0.04ab	0.81±0.02ab	0.38±0.01a	2.71±0.08ab
T16 (A4B1C2)	0.53±0.02c	0.54±0.02bc	0.34±0.01b	1.41±0.04c	1.19±0.04bc	0.69±0.02bc	0.22±0.01c	2.10±0.06c
T17 (A4B2C3)	0.51±0.02c	0.48±0.01c	0.26±0.01bc	1.25±0.04cd	0.94±0.03cd	0.73±0.02b	0.27±0.01bc	1.94±0.06c
T18 (A4B3C4)	0.56±0.02c	0.43±0.01c	0.35±0.01b	1.34±0.04c	1.23±0.04bc	0.64±0.02c	0.25±0.01bc	2.12±0.06c
T19 (A4B4C5)	0.51±0.02c	0.42±0.01c	0.29±0.01bc	1.22±0.04cd	1.40±0.04b	0.72±0.02b	0.21±0.01c	2.33±0.07b
T20 (A4B5C1)	0.41±0.01cd	0.48±0.01c	0.11±0.01d	1.00±0.03d	1.16±0.03bc	0.59±0.02c	0.29±0.01b	2.04±0.06c
T21 (A5B1C4)	0.36±0.01cd	0.44±0.01c	0.13±0.01d	0.93±0.03d	1.04±0.03cd	0.65±0.02bc	0.20±0.01c	1.89±0.06c
T22 (A5B2C5)	0.59±0.02c	0.42±0.01c	0.22±0.01c	1.23±0.04cd	1.06±0.03c	0.67±0.02bc	0.26±0.01bc	1.99±0.06c
T23 (A5B3C1)	0.59±0.02c	0.33±0.01cd	0.15±0.01d	1.07±0.03cd	1.20±0.04bc	0.74±0.02b	0.24±0.01c	2.18±0.06bc
T24 (A5B4C2)	0.43±0.01cd	0.51±0.02bc	0.18±0.01cd	1.12±0.03cd	1.09±0.03c	0.63±0.02c	0.30±0.01b	2.02±0.06c
T25 (A5B5C3)	0.43±0.01cd	0.43±0.01c	0.09±0.01d	0.95±0.03d	1.12±0.03c	0.58±0.02c	0.21±0.01c	1.91±0.06c
T26 (D1)	0.83±0.03bc	0.78±0.02b	0.21±0.01c	1.82±0.05bc	1.23±0.04bc	0.74±0.02b	0.25±0.01bc	2.22±0.07bc
T27 (D2)	1.18±0.03b	0.96±0.03ab	0.36±0.01ab	2.50±0.07b	1.41±0.04b	0.83±0.02a	0.30±0.01b	2.54±0.08b
T28 (D3)	1.57±0.05ab	0.98±0.03ab	0.33±0.01b	2.88±0.08ab	1.51±0.04ab	0.89±0.02a	0.34±0.01ab	2.74±0.08ab
T29 (D4)	0.93±0.03bc	0.84±0.02b	0.28±0.01bc	2.05±0.06bc	1.10±0.03c	0.78±0.02ab	0.28±0.01b	2.16±0.06bc
T30 (D5)	1.03±0.03b	0.82±0.02b	0.14±0.01d	1.99±0.06bc	1.35±0.04b	0.77±0.02ab	0.23±0.01c	2.35±0.07b
平均值 Average	0.96±0.08A	0.83±0.06A	0.31±0.02B		1.36±0.05A	0.73±0.02B	0.30±0.01C	

¹⁾ 同列中不同小写字母表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatment groups ($P < 0.05$); 同行中不同大写字母表示不同月份间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different months ($P < 0.05$).

²⁾ CK: 不施肥 No fertilizer; A1-A5: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 单株施用量分别为 2.0、4.0、6.0、8.0 和 10.0 g Applying amount per plant of 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 and 10.0 g $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, respectively; B1-B5: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 单株施用量分别为 4.0、6.0、8.0、10.0 和 12.0 g Applying amount per plant of 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 and 12.0 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, respectively; C1-C5: KCl 单株施用量分别为 0.6、1.2、1.8、2.4 和 3.0 g Applying amount per plant of 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 and 3.0 g KCl, respectively; D1-D5: 复合肥的单株施用量分别为 10、20、30、40 和 50 g Applying amount per plant of 10, 20, 30, 40 and 50 g compound fertilizer, respectively.

表4 不同施肥处理对木棉幼苗叶面积增长量的影响 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾Table 4 Effects of different fertilization treatments on increments of leaf area of *Bombax ceiba* Linn. seedling ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	施肥后不同时间叶面积的增长量/mm ² Increment of leaf area at different times after fertilization			
	第1个月 The first month	第2个月 The second month	第3个月 The third month	总和 Total
T0(CK)	18.00±0.53c	29.00±0.85c	8.70±0.25c	55.70±1.63c
T1(A1B1C1)	3.80±0.11d	8.21±0.24d	0.62±0.02d	12.63±0.37d
T2(A1B2C2)	5.10±0.15d	5.75±0.17d	1.67±0.05d	12.52±0.37d
T3(A1B3C3)	12.40±0.36cd	17.36±0.51cd	6.08±0.18c	35.84±1.05cd
T4(A1B4C4)	9.88±0.29cd	17.22±0.50cd	7.43±0.22c	34.54±1.01cd
T5(A1B5C5)	5.94±0.17d	10.90±0.32cd	3.11±0.09cd	19.94±0.58d
T6(A2B1C3)	58.80±1.72ab	62.72±1.84b	26.34±0.77ab	147.86±4.34ab
T7(A2B2C4)	71.55±2.10ab	66.10±1.94b	46.35±1.36a	184.00±5.40ab
T8(A2B3C5)	90.00±2.64a	107.30±3.15a	19.87±0.58b	217.17±6.37a
T9(A2B4C1)	48.60±1.43b	44.23±1.30bc	15.29±0.45bc	108.12±3.17b
T10(A2B5C2)	50.40±1.48b	67.20±1.97b	20.16±0.59b	137.76±4.04ab
T11(A3B1C5)	59.00±1.73ab	70.80±2.08b	34.69±1.02ab	164.49±4.82ab
T12(A3B2C1)	21.16±0.62c	28.29±0.83c	14.15±0.41bc	63.60±1.86bc
T13(A3B3C2)	116.80±3.43a	120.89±3.55a	30.70±0.90ab	268.38±7.87a
T14(A3B4C3)	109.20±3.20a	85.93±2.52ab	54.47±1.60a	249.60±7.32a
T15(A3B5C4)	66.55±1.95ab	46.89±1.38bc	30.48±0.89ab	143.91±4.22ab
T16(A4B1C2)	35.70±1.05b	40.22±1.18bc	25.34±0.74ab	101.26±2.97b
T17(A4B2C3)	35.52±1.04b	22.36±0.66c	7.69±0.23c	65.57±1.92bc
T18(A4B3C4)	26.03±0.76bc	30.98±0.91c	11.64±0.34bc	68.65±2.01bc
T19(A4B4C5)	27.60±0.81bc	39.93±1.17bc	20.08±0.59b	87.61±2.57bc
T20(A4B5C1)	21.00±0.62c	26.25±0.77c	5.25±0.15c	52.50±1.54c
T21(A5B1C4)	28.08±0.82bc	12.25±0.36cd	2.97±0.09cd	43.29±1.27c
T22(A5B2C5)	30.08±0.88bc	35.98±1.06bc	12.81±0.38bc	78.87±2.31bc
T23(A5B3C1)	44.00±1.29b	24.64±0.72c	17.86±0.52b	86.50±2.54bc
T24(A5B4C2)	35.64±1.04b	37.70±1.11bc	12.06±0.35bc	85.40±2.50bc
T25(A5B5C3)	13.39±0.39cd	25.61±0.75c	4.26±0.13cd	43.26±1.27c
T26(D1)	11.48±0.34cd	11.55±0.34cd	2.56±0.08cd	25.59±0.75cd
T27(D2)	16.92±0.50c	25.57±0.75c	4.47±0.13cd	46.96±1.38c
T28(D3)	19.20±0.56c	26.88±0.79c	7.53±0.22c	53.61±1.57c
T29(D4)	10.50±0.31cd	13.13±0.39cd	3.94±0.12cd	27.56±0.81cd
T30(D5)	14.19±0.42cd	18.30±0.54cd	6.79±0.20c	39.28±1.15cd
平均值 Average	36.02±5.15A	38.07±5.03A	15.01±2.31B	

¹⁾ 同列中不同小写字母表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatment groups ($P < 0.05$); 同行中不同大写字母表示不同月份间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different months ($P < 0.05$).

²⁾ CK: 不施肥 No fertilizer; A1-A5: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 单株施用量分别为 2.0、4.0、6.0、8.0 和 10.0 g Applying amount per plant of 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 and 10.0 g $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, respectively; B1-B5: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 单株施用量分别为 4.0、6.0、8.0、10.0 和 12.0 g Applying amount per plant of 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 and 12.0 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, respectively; C1-C5: KCl 单株施用量分别为 0.6、1.2、1.8、2.4 和 3.0 g Applying amount per plant of 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 and 3.0 g KCl, respectively; D1-D5: 复合肥的单株施用量分别为 10、20、30、40 和 50 g Applying amount per plant of 10, 20, 30, 40 and 50 g compound fertilizer, respectively.

月,但后二者间无显著差异。

3 讨论和结论

氮、磷、钾是植物生长必需的营养元素,也是植物生理代谢的物质基础。大量研究表明,在贫养阶段时植物的生物量随养分供应量的提高而显著增加,

而当进入奢侈消耗阶段时植物的生物量则停止增长,过量的养分供给还可能抑制植物的生长^[9-15]。本研究表明,施用中等水平的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (单株施用量为 4.0 或 6.0 g) 能够提高木棉幼苗叶片的净光合速率、水分利用效率、株高增长量、地径增长量和叶面积增长量,而施用低或高水平的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 对上述指标则有不同程度的抑制作用。推测过量供氮对木棉

幼苗上述指标产生抑制作用的可能原因有以下 3 个方面:1)过量供氮导致木棉植株体内的营养失衡,抑制了 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(Rubisco)的合成^[16],从而使叶片的光合作用减弱、呼吸作用增强^[1];2)过量供氮导致其与碳同化对光合作用同化力(ATP和NADPH)的竞争加剧,从而导致叶片的光合同化速率降低^[17];3)过量供氮导致磷酸丙糖代谢通路受阻^[18]。此外,氮元素的丰缺与植物叶片中的叶绿素含量和Rubisco活性密切相关,增加施氮量通常能够显著提高植物叶片中的叶绿素含量^[19]。然而,本研究中,施用不同水平的氮肥[CO(NH₂)₂]对木棉幼苗叶片的叶绿素相对含量(SPAD)均无显著影响,但对其光合参数和生长指标具有明显的调控效应,说明氮元素在木棉苗期可能更多地参与Rubisco和光合电子传递载体的合成。

相关研究结果表明,合理配施氮、磷、钾肥能够促进植物更加均衡地吸收营养元素,并提高叶片的气孔导度和净光合速率^[20-22];而氮、磷、钾肥配施比例失调则可导致植物叶片的光合效率下降,不利于植物的生长发育^[23]。但氮、磷、钾肥配施比例对植物生长的影响效应因不同植物种类而异。刘水娥等^[24]的研究结果表明:磷对马占相思(*Acacia mangium* Willd.)苗期生长的影响效应最大,钾的影响效应次之,氮的影响效应最小,这可能是因为马占相思具有固氮根瘤菌,在实验期间其根系已形成根瘤,所以氮素对其幼苗生长的影响最弱。吴家胜等^[25]的研究结果表明:氮、磷、钾对银杏(*Ginkgo biloba* Linn.)幼苗生长和生理特性的影响效应不同,其中氮的影响效应最大,磷的影响效应次之,钾的影响效应最小。邱佳妹等^[26]的研究结果表明:氮肥是影响麦冬[*Ophiopogon japonicus* (Linn. f.) Ker-Gawl.]幼苗叶片光合特性、干物质分配指数及根冠比的主要因素,而磷肥和钾肥的影响效应较小。本研究结果也表明:氮、磷、钾肥对木棉幼苗营养生长和光合生理特性的影响效应不同,氮肥的影响效应最大,其次是钾肥,磷肥的影响效应最小,说明木棉幼苗对氮肥和钾肥的响应比磷肥更敏感,具体表现为:配施中等水平的氮肥(单株施用量 4.0 或 6.0 g)、较高水平的钾肥(单株施用量 1.2~3.0 g)及单株施用量 4.0~12.0 g 的磷肥,均能够显著提高木棉幼苗叶片的净光合速率、水分利用效率以及株高增长量、地径增长量和叶面积增长量,而氮、磷、钾肥的施用量和配施比例失衡则不利于木棉幼苗的生长和光合作

用,说明木棉苗期对氮、磷、钾肥的施用量和配比要求较严格。此外,本研究中木棉幼苗的栽植基质中未检出速效磷,这对研究结果可能也有一定的影响。在施用低水平(单株施用量 2.0 g)氮肥的条件下,配施较高水平的磷肥和钾肥并不能有效促进木棉幼苗叶面积增长量的提高,这可能与氮素的营养限制有关。木棉幼苗吸收的有限氮素可能更多地被直接用于株高生长,导致其体内氮、磷、钾元素比例严重失调,从而抑制了叶片的生长。此外,本研究中,施用复合肥对木棉幼苗生长及光合特性的影响效果并不明显,这可能是由于复合肥的养分比例与木棉幼苗的营养需求不适宜所致。

汪洋等^[27]和高柱等^[8]分别对 1 年生和 2 年生吉贝[*Ceiba pentandra* (Linn.) Gaertn.]的施肥效应进行了研究,前者认为在吉贝苗期进行施肥有利于其幼苗的生长,后者则筛选出能显著提高吉贝幼树树高、地径和冠幅生长量的施肥方案。本研究结果表明:在氮、磷、钾肥不同施用量和配比条件下,木棉幼苗的净光合速率、水分利用效率、苗高增长量、地径增长量和叶面积增长量具有显著差异,而 PS II 最大光化学效率和 SPAD 值则无显著差异,并且对其光合参数和生长指标具有显著提升效应的氮、磷、钾配比和施用量范围基本一致,说明木棉苗期的光合特性与生长表现相契合。但是,由于土壤水分和养分对植物光合特性和生长存在明显的耦合效应,因此,筛选出合适的水肥配比才是植物优质高产的必需条件^[28-29]。鉴于此,需要对木棉在干热河谷地区的水肥耦合效应机制进行深入研究。

综合考虑净光合速率、水分利用效率、苗高增长量、地径增长量和叶面积增长量(由于各施肥处理对木棉幼苗 PS II 最大光化学效率和 SPAD 值的影响较小,因此不予考虑),筛选出适宜木棉幼苗生长的施肥处理组为 T6 和 T13,CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 4.0、4.0 和 1.8 g,6.0、8.0 和 1.2 g。T7、T8、T10、T11、T14 和 T15 处理组的施肥效果也较好,各处理组的 CO(NH₂)₂、Ca(H₂PO₄)₂和 KCl 的单株施用量分别为 4.0、6.0 和 2.4 g,4.0、8.0 和 3.0 g,4.0、12.0 和 1.2 g,6.0、4.0 和 3.0 g,6.0、10.0 和 1.8 g 以及 6.0、12.0 和 2.4 g。经换算,木棉苗期适宜的单株施肥量为 1.84 或 2.76 g N、0.72~2.16 g P₂O₅、0.72~1.80 g K₂O。

参考文献:

- [1] 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: 1015–1021.
- [2] 李玲莉, 李吉跃, 张方秋, 等. 容器苗指数施肥研究综述[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(2): 22–27.
- [3] MANCUS P. Nitrogen fertilizer dependency and its contradictions: a theoretical exploration of social-ecological metabolism[J]. *Rural Sociology*, 2007, 72: 269–288.
- [4] DUMROESE R K, PAGE-DUMROESE D S, SALIFU K F, et al. Exponential fertilization of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency, leaching fractions, and early outplanting performance[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35: 2961–2967.
- [5] GOUGH C M, SEILER J R, MAIER C A. Short-term effects of fertilization on loblolly pine (*Pinus taeda* L.) physiology[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2004, 27: 876–886.
- [6] 赵高卷, 葛 雯, 马焕成, 等. 元江干热河谷木棉蒴果形成和纤维发育过程[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3443–3450.
- [7] 高 柱, 王小玲, 汪 洋, 等. 木棉栽培技术研究进展[J]. *江西科学*, 2009, 27(5): 761–766.
- [8] 高 柱, 伍建榕, 马焕成. 红河干热河谷2年生吉贝人工幼林施肥效应研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 95–100.
- [9] 曹兆阳, 舒洪岚, 俞立春. 氮、磷、钾对银杏幼苗养分吸收及生长的影响[J]. *林业科技开发*, 2009, 23(6): 108–110.
- [10] 杨自立, 马履一, 贾忠奎, 等. 不同供氮水平对栓皮栎播种苗光响应曲线的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(5): 56–60.
- [11] 张 辉, 朱德进, 黄 卉, 等. 不同施肥处理对油菜产量及品质的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(6): 966–971.
- [12] 王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7452–7462.
- [13] 贾瑞丰, 尹光天, 杨锦昌, 等. 不同氮素水平对红厚壳幼苗生长及光合特性的影响[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(1): 23–29.
- [14] 王东光, 尹光天, 邹文涛, 等. 氮素营养对闽楠幼苗生长及光合特性的影响[J]. *林业科学研究*, 2013, 26(1): 70–75.
- [15] 贺 维, 胡庭兴, 王 锐, 等. 施肥对桢楠幼苗光合生理及生长特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(6): 1187–1197.
- [16] NAKAJI T, TAKENAGA S, KUROHA M, et al. Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedlings to high nitrogen load[J]. *Environmental Sciences*, 2002, 9: 269–282.
- [17] 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.
- [18] CHENG L, FUCHIGAMI L H. Rubisco activation state decreases with increasing nitrogen content in apple leaves[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51: 1687–1694.
- [19] 焦娟玉, 尹春英, 陈 珂. 土壤水、氮供应对麻疯树幼苗光合特性的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(1): 91–99.
- [20] TIMMER V R, MILLER B D. Effects of contrasting fertilization and moisture regimes on biomass, nutrients, and water relations of container grown red pine seedlings[J]. *New Forests*, 1991, 5: 335–348.
- [21] 滕树川, 杨朝勇, 王再勇, 等. 氮磷钾配比及用量不同对小麦产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(5): 159–161.
- [22] 罗 凡, 龚雪蛟, 张 厅, 等. 氮磷钾对春茶光合生理及氨基酸组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 147–155.
- [23] 孙时轩, 张振江, 孙小丽, 等. 毛白杨在沙地造林的施肥量及其配比(II)[J]. *北京林业大学学报*, 1995, 17(1): 31–36.
- [24] 刘水娥, 张方秋, 陈祖旭, 等. N、P、K 营养元素不同配比对马占相思苗期生长的影响[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(2): 163–168.
- [25] 吴家胜, 张往祥, 曹福亮. 氮磷钾对银杏苗生长和生理特性的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(1): 63–66.
- [26] 邱佳妹, 王康才, 朱光明, 等. 不同施肥配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.
- [27] 汪 洋, 唐军荣, 高 柱, 等. 爪哇木棉苗木对不同配比肥料的生长响应[J]. *林业调查规划*, 2012, 37(1): 119–123.
- [28] KARAM F, KABALAN R, BREIDI J, et al. Yield and water-production functions of two durum wheat cultivars grown under different irrigation and nitrogen regimes[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96: 603–615.
- [29] SONG C J, MA K M, QU L Y, et al. Interactive effects of water, nitrogen and phosphorus on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Bauhinia faberi* seedlings[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74: 1003–1012.

(责任编辑: 佟金凤)