

配方施肥对刨花润楠幼苗生长和光合生理的影响

胡厚臻¹, 侯文娟¹, 潘启龙^{1,2}, 周袁慧子¹, 王艺锦¹, 王凌晖¹, 滕维超¹

(1. 广西大学 林学院, 广西 南宁 530005; 2. 中国林科院 热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600)

摘 要:采用正交试验设计, 研究不同配比施肥对刨花润楠幼苗生长和光合生理的影响。对生长及光合生理指标测定表明, 不同处理的刨花润楠的地径生长量比对照(CK)提高 9.14%~123.60%; 株高生长量比 CK 提高 10.14%~86.12%; 生物量比 CK 提高 0.85%~74.87%。对刨花润楠光合指标影响是叶绿素总含量比 CK 增加 12.58%~67.65%; 净光合速率(P_n)值比 CK 提高 6.0%~294.33%; 蒸腾速率(T_r)值比 CK 提高 27.80%~280.51%; 气孔导度(G_s)值比 CK 提高 0~300.00%; 施肥对胞间 CO_2 浓度(C_i)值的影响呈现一定的波动, CK 的胞间 CO_2 浓度(C_i)值最高。氮肥是影响株高、生物量生长、总叶绿素含量以及光合生理指标的重要因子, 钾肥是影响地径生长的重要因子。综合评价表明, 施肥量为 N:240 mg·株⁻¹、P:36 mg·株⁻¹、K:162 mg·株⁻¹ (按纯 N、P、K 含量计算)对刨花润楠的生长和生理指标的促进作用最显著。

关键词:刨花润楠; 氮磷钾配比; 光合生理; 施肥

中图分类号: S725.5 文献标志码: A 文章编号: 1001-7461(2015)06-0039-07

Effects of Formulated Fertilization on the Growth and Photosynthetic Physiological Properties of *Machilus pauhoi* Seedlings

HU Hou-zhen¹, HOU Wen-juan¹, PAN Qi-long^{1,2}, ZHOU Yuan-huizi¹,
WANG Yi-jin¹, WANG Ling-hui¹, TENG Wei-chao^{1*}

(1. Forestry College, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530005, China;

2. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi 532600, China)

Abstract: The fertilization experiment was carried out by using an $L_9(3^4)$ orthogonal design and regression analysis to examine the effects of different combined fertilization of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) on the growth and physiological of the *Machilus pauhoi* seedlings. The results showed that the ground diameter, height growth, biomass of the potted seedlings increased by 9.14%—123.60%, 10.14%—86.12%, and 0.85%—74.87%, respectively than those of the control. The total chlorophyll content, net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), and stomatal conductance (G_s) increased by 12.58%—67.65%, 6.00%—294.33%, 27.80%—280.51% and 0—300.00% than the control. Inter-cellular CO_2 concentration (C_i) presented some fluctuation. Maximum value of C_i was found in the control seedlings. Analysis showed that the growth indices of height, biomass, total chlorophyll content and the photosynthetic physiological indices were decided by the content of nitrogen, and the ground diameter was decided by the content of potassium. The comprehensive evaluation showed that the fertilization treatment No. 2 ($N_1P_2K_2$) could significantly promote the growth and photosynthetic physiological indices of *M. pauhoi*, and recommended application rates of N, P and K were 240, 36 mg·plant⁻¹ and 162 mg·plant⁻¹, respectively.

收稿日期: 2014-10-31 修回日期: 2015-01-28

基金项目: 广西林业科技“十二五”项目(桂林科学[2012]第 27 号)。

作者简介: 胡厚臻, 男, 在读硕士, 研究方向: 森林培育。E-mail: hhz494@qq.com

* 通信作者: 滕维超, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 森林培育及土壤生态学。E-mail: vincentt@yeah.net

Key words: *Machilus pauhoi*; NPK formula; photosynthetic physiology character; fertilization

植物的光合作用是植物将太阳辐射能转化为存储的化学能,是植物体内重要的光化学反应,也是植物有机物质的主要来源^[1]。植物的光合生理与生长密切相关,施肥是调节作物生长发育的一项基本措施,提高光合速率是取得作物高产的主要途径^[2]。植物可以通过施肥来促进自身养分的吸收,提高植物的光合效率,增加苗木的产量^[3]。

刨花润楠(*Machilus pauhoi*)又名刨花楠、香粉树、粘柴,是我国特有的Ⅱ级重点保护珍稀名贵树种,广西、广东、福建、浙江、湖南、江西等地均有分布。因其具有重要生态价值和经济用途,在广西林业发展“十二五”规划中,刨花润楠被广西林业厅列入广西重点发展的珍贵树种。虽然关于刨花润楠栽培技术已有报道,但目前良种选育、立地选配、配方

施肥等方面的系统研究仍然欠缺^[4-7]。本研究针对刨花润楠幼苗施肥试验,采用 L₉(3⁴)正交试验设计,研究氮磷钾不同配比施肥对刨花润楠生长和光合生理特性的影响,筛选有效提高刨花润楠幼苗质量的施肥方案,以指导刨花润楠的种植^[8]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在广西大学林学院教学科研实习基地(22°51′N,108°17′E),于2010年4月—2011年4月进行,试验用土为1:3混合的腐殖质土与苗圃熟土,土壤为偏酸性赤红壤,质地为粘壤土,有机质15.2 g·kg⁻¹,经消毒、打碎、过筛后作为栽培基质(表1)。

表 1 土壤主要理化性质

Table 1 The main physicochemical properties of soils

项目	全氮 /(g·kg ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	全钾 /(g·kg ⁻¹)	水解性氮 /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)	pH
测定结果	0.67	0.55	0.59	40.45	37.82	121.27	6.0

1.2 试验方法

试验用苗为半年生实生苗,广西南宁市良凤江国家森林公园提供,2010年4月4日,选取生长良好、长势均匀的刨花润楠幼苗栽植于15 cm(径)×20 cm(高)的塑料盆中,每盆装土约2.5 kg栽植1株。经过缓苗后,施用氮磷钾不同配比进行追肥试验,以不施肥作为对照CK,共10个处理,每个处理6次重复,于2010年7月15、8月6日、8月27日、9月24日共4次进行施肥处理。试验所用氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素(N46%)、过磷酸钙(P12%)、硫酸钾(K 44.8%),采用氮磷钾不同配比3因素3水平 L₉(3⁴)正交试验设计^[9-10](表2和表3)。

1.3 指标测定

试验开始前(2010年7月14日)对刨花润楠幼苗生长指标进行测定,试验结束后(2010年10月19日)对幼苗生长和生理指标进行测定。测定方法:分别用直尺和游标卡尺测量株高、地径,从土壤痕迹处剪断,贴好标签,用布袋装好,于烘箱105℃杀青0.5 h后,在85℃烘干至恒重,测定其根/枝叶/茎生物量(干重)及总生物量(干重)^[11];叶绿素采用丙酮-乙醇混合法提取测定^[12];光合指标使用 Li-6400XT 便携式光合作用测定仪测定,设定适宜的光照强度对各处理组的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(C_i)进行测定^[13]。每个处理选取3株植株测定,每个植株测定3片长势均

匀、良好的功能叶,测定植株上数第5片功能叶的净光合速率等指标^[14]。

表 2 施肥试验因素水平表

Table 2 L₉(3⁴) factor level table of fertilization test

水平	因素		
	氮 /(mg·株 ⁻¹)	磷 /(mg·株 ⁻¹)	钾 /(mg·株 ⁻¹)
1	240	18	81
2	480	36	162
3	720	54	243

注:按纯 N、P、K 含量计算。

表 3 施肥试验 L₉(3⁴)设计

Table 3 L₉(3⁴) orthogonal design of fertilization test mg

处理号	处理	尿素	过磷酸钙	硫酸钾
T1	N ₁ P ₁ K ₁	1(522)	1(150)	1(181)
T2	N ₁ P ₂ K ₂	1	2(300)	2(362)
T3	N ₁ P ₃ K ₃	1	3(450)	3(543)
T4	N ₂ P ₁ K ₂	2(1 043)	1	2
T5	N ₂ P ₂ K ₃	2	2	3
T6	N ₂ P ₃ K ₁	2	3	1
T7	N ₃ P ₁ K ₃	3(1 565)	1	3
T8	N ₃ P ₂ K ₁	3	2	1
T9	N ₃ P ₃ K ₂	3	3	2
T10	CK	0	0	0

注:括号内数值为肥料的实际施肥量。

1.4 数据分析

植物株高、地径、生物量等指标可直观反映植株的生长情况。植物在一定时间内所积累生物量的多

少,直接反映植物的生产力大小。苗木生产力水平的大小,在林业上常用植物的生物量反映^[15]。试验数据采用 Excel、DPS、SPSS19.0 分析^[16]。利用模糊数学中的模糊隶属函数法对各施肥处理下的生长生理指标进行模糊综合评价,筛选对刨花润楠生长最有利的施肥配方。隶属函数的计算公式为:

$$U(x_i) = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (1)$$

$$U(x_i) = 1 - (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (2)$$

$$U = 1/n \sum U(x_i) \quad (3)$$

式中: X_{ij} 表示第 i 个处理的第 j 项测定指标, X_{jmax} 、 X_{jmin} 分别表示所有施肥处理的第 j 项指标内的最大值和最小值; n 为测定指标总数; U 为每个施肥处理 n 项指标测定的隶属度平均值^[17]。与苗木质量呈正相关的指标采用隶属函数公式(1)计算;与苗木质量呈负相关的指标采用反隶属函数公式(2)计算;每个施肥处理的隶属度平均值用公式(3)计算。隶属度平均值越大,表示该施肥方案效果越好。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷钾配比施肥对刨花润楠株高、地径生长量及生物量的影响

各处理刨花润楠幼苗株高、地径生长量及生物量的变化情况见图 1。施肥处理明显提高了刨花润楠幼苗株高、地径的生长量和生物量的积累,各处理

刨花润楠幼苗株高总生长量在 4.92~8.31 cm,比未施肥(CK)提高 10.14%~86.12%,平均增量 42.27%;地径生长量在 1.23~2.52 mm,比 CK 提高 9.14%~123.60%,平均增量 63.62%。生物量在 5.78~10.01 g·株⁻¹,比 CK 提高 0.85%~74.87%,平均增量 29.37%。处理 T2 (N₁P₂K₂)刨花润楠幼苗株高、生物量均达到最大,地径也达较大,相比较而言,处理 CK 的 3 个生长指标均为最小(图 1)。

不同处理株高生长量 N2(6.85 cm)>N1(6.32 cm)>N3(5.90 cm),P2(6.58 cm)>P1(6.32 cm)>P3(6.16 cm),K2(7.34 cm)>K1(6.05 cm)>K3(5.67 cm);地径生长量 N1(2.16 mm)>N2(1.82 mm)>N3(1.56 mm),P2(1.90 mm)>P1(1.84 mm)>P3(1.75 mm),K3(2.30 mm)>K2(1.69 mm)>K1(1.56 mm);生物量 N1(8.99 g·株⁻¹)>N2(6.74 g·株⁻¹)>N3(6.47 g·株⁻¹),P3(7.58 g·株⁻¹)>P2(7.49 g·株⁻¹)>P1(7.12 g·株⁻¹),K3(7.93 g·株⁻¹)>K2(7.35 g·株⁻¹)>K1(6.92 g·株⁻¹)。

方差分析显示,N 素对刨花润楠幼苗株高、地径及生物量生长均有极显著影响($p<0.01$),P 素对刨花润楠幼苗地径及生物量生长均有极显著影响,K 素对刨花润楠幼苗株高、地径及生物量生长均有极显著影响。株高影响效应为 N>K>P,地径为 K>N>P,生物量影响效应为 N>K>P。

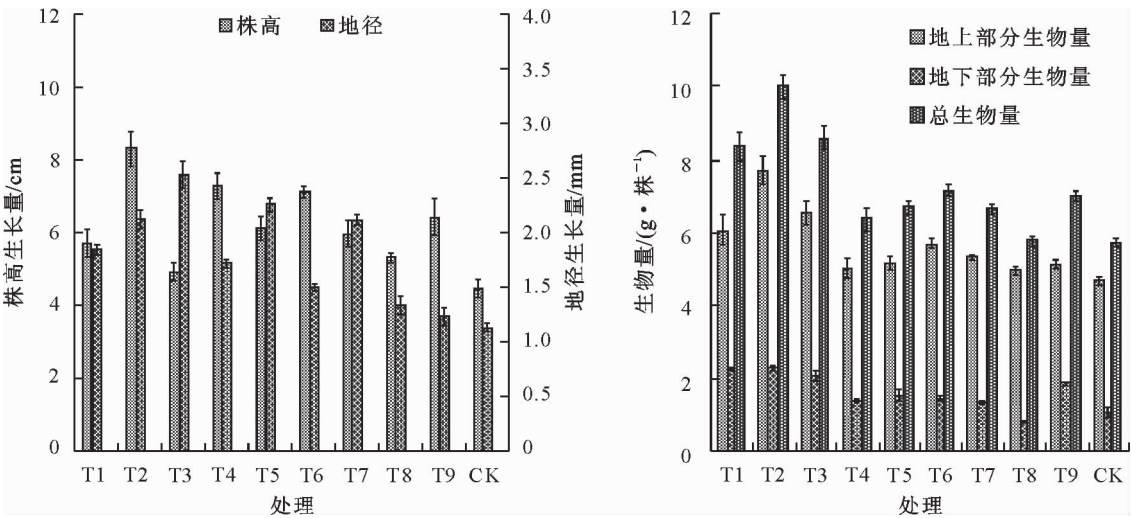


图 1 不同 N、P、K 配方施肥对刨花润楠幼苗株高、地径及生物量生长的影响

Fig. 1 The height, ground diameter, and biomass of *Machilus pauhoi* at three levels of N, P and K

2.2 不同氮磷钾配比施肥对刨花润楠苗期叶片光合色素的影响

施肥处理明显提高了刨花润楠幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量,各施肥处理刨花润楠

幼苗叶片叶绿素 a 含量在 0.88~1.09 mg·g⁻¹,比未施肥 CK 提高 21.18%~49.11%;叶绿素 b 含量在 0.27~0.52 mg·g⁻¹,比 CK 提高 3.05%~98.35%;总叶绿素含量在 1.01~1.50 mg·g⁻¹,比

CK 提高12.58%~67.65%。处理 T4(N₂P₁K₂) 刨花润楠幼苗叶片叶绿素 b 含量、总叶绿素含量均达到最大,叶绿素 a 含量也达较大,相比较而言,处理 CK 的叶绿素含量为最小(图 2)。

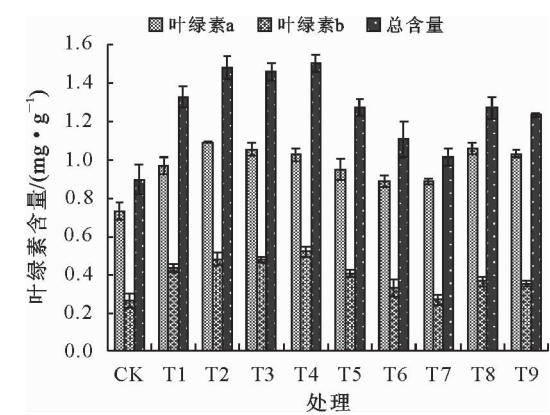


图 2 不同 N、P、K 配比施肥对刨花润楠幼苗叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的影响

Fig. 2 The concentration of chlorophyll a/b, and total chlorophyll content of *M. pauhoi* at three levels of N, P and K (Mean±Se)

不同处理叶绿素 a 含量 N1(1.04 mg·g⁻¹,下同)>N3(0.99)>N2(0.95),P2(1.03)>P1(0.99)>P3(0.96),K2(1.05)>K1(0.97)>K3(0.96);叶绿素 b 含量 N1(0.46>N2(0.42)>N3(0.33),P2(0.42)>P1(0.41)>P3(0.39),K2(0.45)>K3(0.39)>K1(0.38);总叶绿素含量 N1(1.42)>N2(1.29)>N3(1.17),P2(1.34)>P1(1.28)>P3(1.27),K2(1.41)>K3(1.25)>K1(1.23)。方差分析显示,N 素对刨花润楠幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量均有极显著影响($p<0.01$),P 素对刨花润楠幼苗叶片叶绿素 a 及总叶绿素含量均有极显著影响,K 素对刨花润楠叶片叶绿素 a 及总叶绿素含量生长均有极显著影响,对叶绿素 b 含量生长有显著影响($p<0.05$)。由此可见, N、P、K 3 种元素均是影响刨花润楠幼苗叶片光合色素的重要因子,其中,叶绿素 a 影响效应为 K>N>P,叶绿素 b 为 N>K>P,总叶绿素影响效应为 N>K>P。

2.3 不同氮磷钾配比施肥对刨花润楠苗期净光合速率的影响

施肥处理明显提高了刨花润楠幼苗净光合速率、蒸腾速率及气孔导度,各施肥处理刨花润楠幼苗叶片净光合速率在 1.49~5.55 μmol·m⁻²·s⁻¹,比未施肥 CK 提高 6.00%~294.33%;气孔导度在 0.02~0.08 mol·m⁻²·s⁻¹,比 CK 提高 0~300.00%;蒸腾速率在 0.29~1.24 mol·m⁻²·s⁻¹,比 CK 提高 27.80%~280.51%。处理 T1(N₁P₁K₁)刨花润楠幼苗叶片蒸腾速率及气孔导度

均达到最大,净光合速率也达较大,相比较而言,处理 CK 的净光合速率最低、气孔导度最小,蒸腾速率也较低。施肥处理对胞间 CO₂ 含量的影响呈现一定的波动,各处理在 217.14~262.11 μmol·mol⁻¹,CK 处理的胞间 CO₂ 含量最高,为 275.85 μmol·mol⁻¹(图 3)。

不同处理净光合速率 N1(5.08 μmol·m⁻²·s⁻¹,下同)>N2(3.40)>N3(2.02),P1(4.20)>P2(3.52)>P3(2.78),K2(4.05)>K1(3.56)>K3(2.90);气孔导度由大到小依次排列为:N1(0.07 mol·m⁻²·s⁻¹,下同)>N2(0.04)>N3(0.02),P1(0.06)>P2(0.04)>P3(0.03),K2(0.05)>K1(0.05)>K3(0.03);蒸腾速率由大到小依次排列为:N1(1.07 mol·m⁻²·s⁻¹,下同)>N2(0.64)>N3(0.38),P1(0.85)>P2(0.701)>P3(0.55),K2(0.81)>K1(0.76)>K3(0.52)。

方差分析显示,N 素对刨花润楠幼苗叶片净光合速率、蒸腾速率及气孔导度均有极显著影响($p<0.01$),P 素对刨花润楠幼苗叶片净光合速率、气孔导度均有极显著影响,对蒸腾速率有显著影响($p<0.05$),K 素对刨花润楠叶片净光合速率有极显著影响,对蒸腾速率、气孔导度均有显著影响。由此可见, N、P、K 3 种元素均显著影响刨花润楠幼苗叶片净光合速率、蒸腾速率及气孔导度等 3 个指标,对胞间 CO₂ 浓度均无显著影响($p>0.05$)。净光合速率影响效应为 N>P>K,气孔导度影响效应为 N>P>K,蒸腾速率影响效应为 N>P>K,胞间 CO₂ 浓度影响效应 K>N>P。

2.4 相关分析

N 元素与株高正相关,与株高外的生长指标以及光合生理指标均呈负相关,其中与 C_i 呈显著负相关($p<0.05$);P 元素 3 个生长指标以及总叶绿素含量均呈正相关关系,与光合作用的 4 个指标均呈负相关,相关性均不显著($p>0.05$);K 元素与 T_r、C_i 呈负相关,其中与 C_i 关系极显著($p<0.01$),K 元素与其他指标均呈正相关,其中与地径关系极显著;总叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率 4 个指标相互关系为显著或极显著正相关(表 4)。

2.5 不同施肥处理对刨花润楠苗木生长的综合评价

模糊隶属函数法对各施肥处理下的生长生理指标综合评价(表 5)可以看出,各处理平均隶属值排序为 N₁P₂K₂>N₂P₁K₂>N₁P₃K₃>N₁P₁K₁>N₂P₂K₃>N₂P₃K₁>N₃P₁K₃>N₃P₃K₂>N₃P₂K₁>CK。

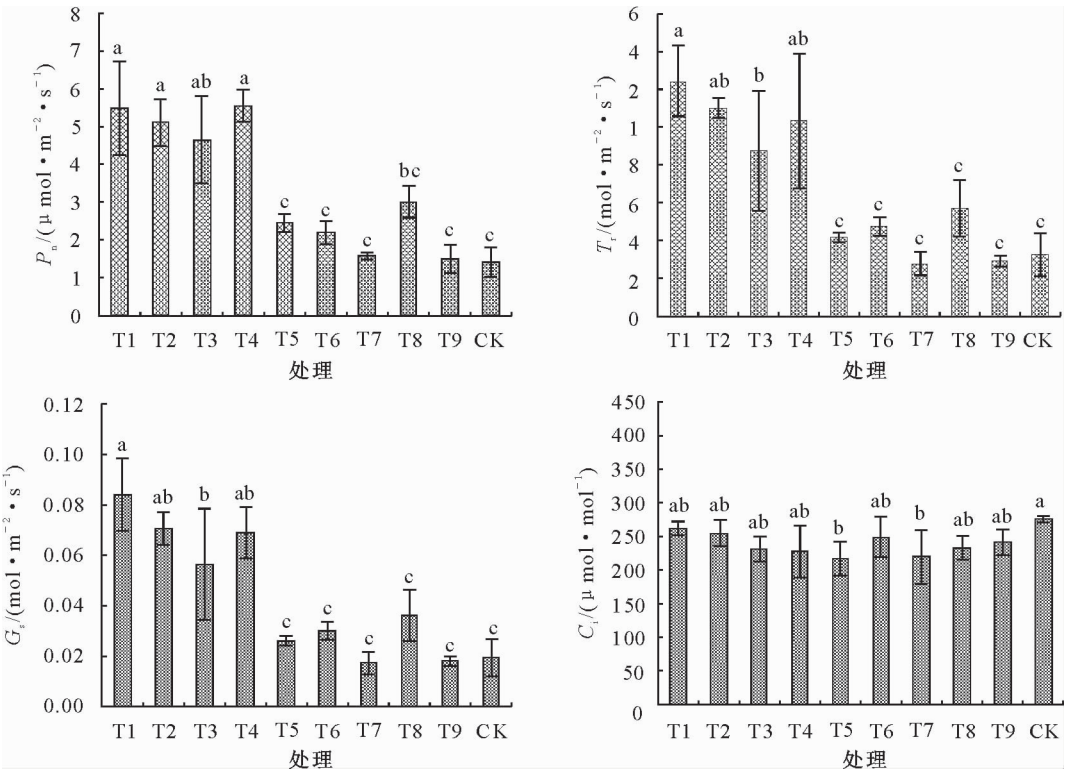


图 3 不同 N、P、K 配方施肥对刨花润楠幼苗光合生理指标的影响 (平均数±Se)

Fig. 3 The effect of leaf photosynthesis of *M. pauhoi* at three levels of N, P and K (Mean±Se)

表 4 不同氮磷钾配比施肥对刨花润楠生长指标及光合生理指标之间的相关性影响

Table 4 Effects of fertilization on correlation between 11 indicators of *M. pauhoi* growth indices and leaf photosynthesis

指标	N	P	K	株高	地径	生物量	总叶绿素含量	P_n	G_s	T_r	C_i
N	1										
P	0.375	1									
K	0.375	0.375	1								
株高	0.199	0.269	0.209	1							
地径	−0.116	0.198	0.800**	0.137	1						
生物量	−0.358	0.348	0.294	0.460	0.589	1					
总叶绿素含量	−0.021	0.363	0.401	0.456	0.489	0.584	1				
P_n	−0.337	−0.031	0.110	0.332	0.447	0.600	0.851**	1			
G_s	−0.373	−0.055	0.036	0.314	0.405	0.631	0.807**	0.992**	1		
T_r	−0.415	−0.072	−0.013	0.332	0.376	0.653*	0.775**	0.982**	0.997**	1	
C_i	−0.697*	−0.322	−0.818**	−0.106	−0.497	0.188	−0.274	0.041	0.134	0.202	1

注：* * 表示在 0.01 水平上极显著相关，* 表示在 0.05 水平上显著相关。

表 5 不同施肥处理对刨花润楠苗木质量影响的综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of the quality for *M. pauhoi* seedling with different nutrient treatments

施肥处理	株高生长量	地径生长量	总生物量	叶绿素含量	净光合速率	隶属度平均值	综合排序
N ₁ P ₁ K ₁	0.325	0.508	0.614	0.705	0.983	0.651	4
N ₁ P ₂ K ₂	1.000	0.709	1.000	0.964	0.894	0.986	1
N ₁ P ₃ K ₃	0.118	1.000	0.675	0.921	0.783	0.708	3
N ₂ P ₁ K ₂	0.734	0.420	0.153	1.000	1.000	0.715	2
N ₂ P ₂ K ₃	0.434	0.809	0.230	0.617	0.253	0.500	5
N ₂ P ₃ K ₁	0.692	0.263	0.332	0.350	0.190	0.415	6
N ₃ P ₁ K ₃	0.390	0.706	0.215	0.186	0.040	0.336	7
N ₃ P ₂ K ₁	0.219	0.143	0.011	0.613	0.386	0.290	9
N ₃ P ₃ K ₂	0.513	0.074	0.300	0.552	0.020	0.329	8
CK	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10

3 结论与讨论

N 素是影响刨花润楠幼苗株高和生物量生长的重要因子,但 P 和 K 肥的作用也不可忽视,K 素是影响刨花润楠幼苗地径生长的重要因子,肥料效益的发挥依赖于 N、P、K 合理的施肥比例。随着 N、P、K 施用量的提高,株高、地径以及生物量均得到不同程度的促进作用,进一步提高施用量,生长量有所下降。有研究认为 N 肥施用过量会造成植物组织徒长、枝条硬度下降、抗逆性下降^[18],而本试验发现,适宜多量施入 N 肥会对苗木生长起抑制作用,相比之下,适宜多施氮素引起的负面影响要小于 N 素缺乏,因此,针对刨花润楠可以适当多施 N 肥,以满足植株对氮的需求,这与张守润、何友军、段云佳^[19-21]等的研究结果相似。

叶片叶绿素含量的高低是苗木施肥生长健壮的重要标志,叶绿素含量越高,其潜在的光合作用越强,苗木生长越健壮。试验表明,叶绿素 a 影响效应为 $K>N>P$,叶绿素 b 为 $N>K>P$,总叶绿素影响效应为 $N>K>P$,可见 N 素是影响刨花润楠幼苗叶绿素的最主要因子。有研究表明,植物体供氮水平会对叶片叶绿素含量起到影响作用,而植物体氮来源与外界环境中供氮水平有很强的相关性^[22]。总叶绿素含量依次排列为 $CK>N1>N2>N3$,即随着 N 元素施用量的增加,刨花润楠幼苗叶片叶绿素含量呈现先升后降的趋势,这与李林峰^[20]等研究结果相似,说明随着 N 素对叶绿素合成具有促进作用;但是,过高的 N 素施用量对叶绿素的合成产生抑制作用^[23-24]。光合作用是作物产量形成的主要机制,本研究施肥处理明显提高了刨花润楠幼苗净光合速率、蒸腾速率及气孔导度,但是随着 N 素施用量的提高,刨花润楠净光合速率经历先升后降的趋势。光照充分的情况下,叶片氮素含量与光合能力呈正相关^[25],最直接的原因是卡尔文循环和类囊体所含蛋白质占据叶蛋白质的绝大部分,叶片的 N 比例增加会相应增加 Rubisco 的含量,氮含量较高的叶片具有较高的光饱和净光合速率^[26-27]。光合速率随氮含量的增加先呈现上升趋势,但氮素过高,光合速率则有降低趋势^[28]。本试验中,刨花润楠幼苗叶片净光合速率与气孔导度的变化趋势相一致,两者呈现极显著正相关关系,说明光合速率降低的原因主要由于是气孔导度降低引起的 CO_2 供应不足,也有可能是水分供应不足情况下施氮抑制光合作用的气孔因素和非气孔因素,导致光合速率下降^[29]。

钾元素与刨花润楠幼苗地径生长量呈极显著正相关关系,氮磷钾元素与刨花润楠幼苗的生长其他

生理指标间相关关系均不显著,氮元素与地径、生物量、光合作用等生长生理指标呈不显著负相关关系,磷钾元素也与部分光合作用指标呈不显著负相关关系,这可能是因为本试验中部分组合的氮磷钾的施用量普遍偏高,导致随着施肥量进一步提高,生长生理指标逐渐降低。光合作用 P_n 、 G_s 、 T_r 间两两呈极显著正相关关系,但是与 C_i 的关系不明确。关于净光合速率和胞间 CO_2 浓度关系,文献报道有正相关和负相关,分别是由叶肉细胞的光活性和 C_i 产生变化所引起的^[30-32]。本试验 C_i 与净光合速率间关系并不显著,可能因为在测试的一天内,各时段天气情况不同,决定叶片光合作用强弱的主要因子也各有不同,且因子间相互关系复杂,导致了整个测试的相互关系有可能互相抵消,表现为不显著^[33]。综合评价表明,对刨花润楠的生长和生理指标的促进作用最显著的施肥量为 $N:240\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $P:36\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $K:162\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ (按纯 N、P、K 含量计算)。

参考文献:

[1] 沈允钢,施教耐. 动态光合作用[M]. 北京:科学出版社:1998:154-174.

[2] 郭盛磊,阎秀峰,白冰,等. 供氮水平对落叶松幼苗光合作用的影响[J]. 生态学报, 2005,25(6):1291-1298.

GUO S L, YAN X F, BAI B, *et al.* Effects of nitrogen supply on photosynthesis in larch seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(6):1291-1298. (in Chinese)

[3] 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):21-29.

JIA R F, YIN G T, YANG J C, *et al.* Effects of nitrogen application on the growth and photosynthetic characteristics of *Calophyllum inophyllum* seedlings[J]. Forestry Research, 2012,25(1):21-29. (in Chinese)

[4] 蓝肖,梁瑞龙,周全连. 刨花润楠栽培技术初探[J]. 广西林业科学, 2008,37(4):203-205.

[5] 梁瑞龙,黄松殿. 广西珍贵树种名录(连载)[J]. 广西林业科学, 2011(12):40-41.

[6] 吴松成. 刨花润楠丰产技术[J]. 林业实用技术, 2005(10):10-12.

[7] 吴振伙,吴兆平,全尚龙. 刨花润楠综合利用价值及其育苗技术[J]. 现代农业科技, 2008(20):55-56.

[8] 王冉,何茜,丁晓刚,等. 氮磷钾配比施肥对珍贵树种马来沉香苗期光合生理特性的影响[C]. 中国西部生态林业和民生林业与科技创新学术研讨会论文集, 2013,29(3):1-7.

[9] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京:科学出版社,2006:64-75.

[10] 朱丹婷,李铭红,乔宁宁. 正交试验法分析环境因子对苦草生长的影响[J]. 生态学报, 2010,30(23):6451-6459.

ZHU D T, LI M H, QIAO N N. Effects of environmental factors and their interaction on *Vallisneria natans* by orthogonal test[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (23): 6451-6459. (in Chinese)

[11] 谭长强,覃世杰,覃梅,等. 不同桉树专用肥对尾巨桉 DH32-

29 苗木生长的影响[J]. 西北林学院学报,2014,29(2):125-128.

TAN C Q, QIN S J, QIN M, *et al.* Effect of special fertilizer for *E. urophylla* × *E. grandis* DH32-29 seedling growth [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014,29(2): 125-128. (in Chinese)

[12] 孟庆延. 叶绿素提取方法及稳定性研究进展[J]. 河北化工, 2009,32(3):2-3.

[13] 潘启龙. 肥料与生长调节剂对油楠和刨花润楠幼苗生长的影响[D]. 南宁:广西大学,2012:28-60.

[14] 廖克波, 潘启龙, 黄松殿, 等. 氮磷钾配比对油楠幼苗光合生理特性的影响[J]. 南方农业学报,2013,44(4):611-615.

LIAO K B, PAN Q L, HUANG S D, *et al.* Effects of N,P and K formula on photosynthetic-physiological properties of *Sindora glabra* seedling [J]. Journal of Southern Agriculture, 2013,44(4):611-615. (in Chinese)

[15] 周庆, 杨沅志, 陈北光. 营养条件对印度紫檀幼苗生物量结构的影响[J]. 华南农业大学学报,2006,27(4):69-72.

ZHOU Q, YANGY Z, CHEN B G. Effects of the different fertilization on the biomass pattern of *Pterocarpus indicus* seedlings [J]. Journal of South China Agricultural University, 2006,27(4):69-72. (in Chinese)

[16] KUSTER A, SCHAIBLE R, SCHUBERT H. Light acclimation of photosynthesis in three Charophyte species[J]. Aquatic Botany, 2004, 79(2):111-123.

[17] 何雪银, 文仁来, 吴翠荣, 等. 模糊隶属函数法对玉米苗期抗旱的分析[J]. 西南农业学报, 2008,21(1):52-55.

HE X Y, WEN R L, WU C R, *et al.* Analysis of maize drought resistance at seeding stage by fuzzy subordination method [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008,21(1):52-55. (in Chinese)

[18] 沙海宁, 孙权, 李建设, 等. 不同施氮量对设施番茄生长与产量的影响及最佳用量[J]. 西北农业学报, 2010,19(3):104-108.

SHA H N, SUN Q, LI J S, *et al.* Effect of N fertilizer on growth, yield, quality of tomato and optimum application rate of N in greenhouse[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010,19(3):104-108. (in Chinese)

[19] 张守润. 氮磷配比施对生长 1 年苦参的影响[J]. 草业科学, 2010,27(1):125-129.

[20] 何友军, 刘友全, 李少锋, 等. 配方施肥对椿叶花椒苗木生长和生理指标的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2008,28(5):42-46.

HE Y J, LIU Y Q, LI S F, *et al.* Effects of formulated fertilization on the growth and physiological indexes of *Zanthoxylum ailanthoides* Sieb. et Zucc. seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology. 2008, 28(5):42-46. (in Chinese)

[21] 段云佳, 谭玲, 张巨松, 等. 施氮量对枣棉间作系统棉花干物质和氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(6): 1441~1448.

DUAN Y J, TAN L, ZHANG J S, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizer levels on dry matter and N accumulation of cotton under jujube and cotton intercropping[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012,18(6): 1441-1448. (in Chinese)

[22] 李林锋. 氮磷钾配方施肥对鸭胆子幼苗光合特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2010,32(6):1136-1141.

LI L F. Effects of formulated fertilizer on photosynthetic characteristics of *Brucea javanica* seedlings[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2010,32(6):1136-1141. (in Chinese)

[23] 宋丽华, 谢飞. 不同配方施肥对 4 种园林植物幼树生长的影响[J]. 西北林学院学报,2013,28(2):26-31.

SONG L H, XIE F. Effects of different formulated fertilizations on the growth of landscape trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013,28(2):26-31. (in Chinese)

[24] 高俊飞. 不同施肥配方对榉树幼苗生长和生理的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2013:11-56.

[25] BRIX H. Effects of nitrogen fertilizer source and application rates on foliar nitrogen concentration, photosynthesis, and growth of Douglas-fir [J]. Can. J. For. Res., 1981,11(4): 775-780.

[26] EVANS J R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants[J]. Oecologia, 1989,78(1):9-19.

[27] REICH P B, GRIGAL D F, ABER J D, *et al.* Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils[J]. Ecology,1997,78:335-347.

[28] 周国兴, 张悦, 徐海军. 氮素对五味子幼苗光合作用的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2010(5):83-85.

ZHOU GX, ZHANG Y, XU H J. Effects of nitrogen on photosynthesis of *Schisandra chinensis* seedlings[J]. Territory & Natural Resources Study, 2010(5):83-85. (in Chinese)

[29] 宋海星, 李生秀. 限根条件下供氮对玉米光合作用有关生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004,22(4):28-32.

[30] 任士福, 王梅, 高志奎, 等. 温度对银杏光系统 II 光抑制的影响[J]. 林业科学, 2008,44(12):28-33.

REN S F, WANG M, GAO Z K, *et al.* Effects of temperature on photosystem II photoinhibition in ginkgo[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008,44(12):28-33. (in Chinese)

[31] SALVUCCI M E, CRAFTS-BRANDNER S J. Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of rubisco as a limiting factor in photosynthesis [J]. Physiologia Plantarum, 2004,120(2):179-186.

[32] 靳甜甜, 傅伯杰, 刘国华, 等. 不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子[J]. 生态学报,2011,31(7):1783-1793.

JIN T T, FU B J, LIU G H, *et al.* Diurnal changes of photosynthetic characteristics of *Hippophae rhamnoides* and the relevant environment factors at different slope locations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(7):1783-1793. (in Chinese)

[33] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯, 2010,46(1):64-66.

CHEN G Y, CHEN J, XU D Q. Thinking about the relationship between net photosynthetic rate and intercellular CO₂ concentration [J]. Plant Physiology Communications, 2010,46(1):64-66. (in Chinese)