

不同肥料种类及其施肥水平对1年生桢楠幼苗 光合生理及生长特性的影响*

罗杰¹ 陈洪² 申玲³ 胡庭兴¹ 彭勇¹ 喻秀艳¹ 陈玉凤¹ 杨珊珊¹ 胡红玲^{1**}

¹四川农业大学林学院 成都 611130

²泸州市林业科学研究所 泸州 646000

³重庆市南川区金佛山科研监测中心 重庆 408400

摘要 为了解1年生桢楠 (*Phoebe zhennan*) 幼苗的最佳施肥量以及施肥种类, 同时也为桢楠的养分管理提供技术参考及理论依据, 以1年生桢楠实生苗为材料, 采用盆栽试验, 选用复合肥 (Compound fertilizer, CF)、油枯 (Oil cake, OC) 和鸭粪 (Duck manure, DM) 3种肥料, 依据年施氮 (N) 量 (纯氮) 设置7个水平, 分别为0 (N0)、150 (N1)、300 (N2)、450 (N3)、600 (N4)、750 (N5)、900 (N6) mg/株, 于2014年6、8、10月分3次施入各处理营养袋中, 测定桢楠苗在一年中的速生期 (8月) 和生长滞缓期 (11月) 叶片的光合生理和养分指标, 探讨不同肥料种类及施氮水平对桢楠当年生幼苗生长及生理特性的影响。结果显示: (1) CF、OC及DM处理下的株高和地径总生长量分别在N3、N4、N5水平下达到最大值, 且分别较N0高66.4%、225.4%、247.4%和85.2%、95.6%、148.3%。3种肥料中, 施用DM对桢楠幼苗生长的促进作用最好, OC次之, CF最差; 在各个施N水平中, 450-750 mg/株对桢楠幼苗生长的促进效果较好; (2) 施肥可以促进桢楠幼苗叶片N含量增加, 其中CF与OC降低了其生长滞缓期叶片磷 (P) 含量, 而DM显著地增加了叶片P含量; (3) 施肥, 特别是DM和OC, 可以促进桢楠幼苗叶绿素合成, 提高光合速率, 有效地提高了幼苗在强光照、高CO₂浓度环境下的光合能力, 这与施肥后桢楠幼苗叶片内有着较好的N/P值有关; (4) 3种肥料均能不同程度地促进桢楠幼苗的苗高和地径, 结合年施N量与当年生长末期的苗高、地径的二次函数拟合结果得出, CF、OC、DM对桢楠幼苗的最佳施N量范围分别为405-446、478-652、607-883 mg/株。总的来说, 本研究中施N量607-883 mg/株的DM是最优施肥方案。(图4 表8 参49)

关键词 施肥; 桢楠; 幼苗; 光合生理; 生长特性

CLC S792.240.1

Effect of different fertilizers and N levels on the photosynthetic physiology and growth of one-year-old *Phoebe zhennan* S. Lee seedlings*

LUO Jie¹, CHEN Hong², SHEN Ling³, HU Tingxing¹, PENG Yong¹, YU Xiuyan¹, CHEN Yufeng¹, YANG Shanshan¹ & HU Hongling^{1**}

¹ College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

² Luzhou Forest Scientific Research Institute, Luzhou 646000, China

³ Jinfo Mountain Monitoring Center for Scientific Research in Nanchuan, Chongqing 408400, China

Abstract This study aimed to explore optimal fertilizer type and application amount for one-year-old *Phoebe zhennan* seedlings to provide a theoretical basis and reference for nutrient management. A pot experiment was conducted in a greenhouse, and one-year-old *P. zhennan* seedlings were grown in sandy loam soil treated with a compound fertilizer (CF), oil cakes (OC), or duck manure (DM) at addition levels of 0, 150, 300, 450, 600, 750, and 900 mg/plant per year (with pure nitrogen as the standard), denoted as N0, N1, N2, N3, N4, N5, and N6, respectively. One-third of the total application amount of each fertilizer was applied to the soil in mid-June, mid-August, and mid-October 2014. The results showed that (1) maximum total height and basal diameter occurred at the N3 level for CF, at N4 for OC, and at N5 for DM. Total height and basal diameter growth at the three levels for corresponding fertilizer were significantly increased by 66.4%, 225.4%, 247.4% and 85.2%, 95.6%, 148.3% respectively, as compared to N0. Application of DM had the greatest effect on the growth of *P. zhennan*

收稿日期 Received: 2016-10-10 接受日期 Accepted: 2016-11-24

*四川省“十二五”、“十三五”育种攻关项目 (2011NZ0010、2016NZ0010) 和四川省教育厅重点项目 (13ZA0248) 资助 Supported by the Crops Breeding Projects of the 12th & 13th “Five-year Plan” of Sichuan Province (2011NZ0010, 2016NZ0010), and the Project of Sichuan Provincial Education Department

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: 15039081@qq.com)

seedlings, and CF had the least. Application of 450–750 mg/plant stimulated *P. zhennan* seedling growth the most among the six N levels. (2) Fertilization increased leaf N content in all three fertilizer treatments, and application of CF and OC decreased leaf P content, whereas leaf P content in plants under the DM treatment significantly increased. (3) Fertilization promoted chlorophyll synthesis, which enhanced the net photosynthetic rate of *P. zhennan* seedlings, with DM and OC being more effective. It accompanied with better photosynthetic capacity of *P. zhennan* under an environment of strong light and high CO₂ concentration, which was possibly related to a better N/P ratio in the leaves. (4) Application of all three types of fertilizer could increase height and basal diameter in seedlings, with combination the fitting results of annual N rate-height growth and basal diameter during the last growth stage, and it was found that 405–446, 478–652, and 607–883 mg/plant were the optimal ranges for N application rates for CF, OC, and DM, respectively. In summary, application of 607–883 mg/plant DM was the optimal rate for the fertilization management of *P. zhennan* seedlings.

Keywords fertilization; *Phoebe zhennan*; seedling; photosynthetic physiology; growth trait

化肥在农林业中扮演着重要角色,但其利用率不高(30%左右)^[1],长期过量施用会对环境造成负担,同时也会对植物生长产生负面影响^[2]。有研究表明,我国化肥的平均施用量是发达国家上限的2倍^[3],这严重加剧了我国的环境风险。鉴于化肥施用对环境的潜在危害,施用有机肥成为化肥减施及减少面源污染的主要途径之一^[4]。随着种植业和养殖业的发展,农作物秸秆和畜禽粪便的数量增加,当前全国有机肥资源量约为 4.95×10^9 t,可提供氮(N)、磷(P)、钾(K)养分约 7.4×10^7 t^[5]。然而目前有机肥有效返还农田的比例仍然不高^[6-7],如何合理施肥、提高肥料利用率、促进植物生长是目前研究的关键。

N是植物所需的大量元素之一,参与形成植物体内的蛋白质、叶绿素等重要化学物质,是影响植物分布和生长发育的主要因子^[8-9]。大量研究表明,叶N含量与净光合速率有着极强的相关性^[10-12],因此,供N水平的改变可能会通过影响叶N含量来影响植物的光合能力。另外,叶片N含量的改变还能够影响植物光合作用过程中的碳氮代谢^[13-14]。为苗木提供不同的N源势必改变其生长的N环境,不过会通过调节自身的生理和形态特征,对N素供给的差异作出敏感的反应^[15-16]。井大伟等发现,与单施化肥相比,配施鸡粪在增加杨树苗木气孔导度、提高净光合速率上更有效^[17]。很多研究表明,在适宜的N量范围内,施肥能够促进苗木生物量的增加以及苗高、地径的生长^[18-19],但N含量过高时,则可能对植物的生长产生抑制作用。白尚斌等对1年生北美红杉(*Sequoia sempervirens*)幼苗进行了为期6个月的N素处理发现,将N浓度提高到对照的2倍,幼苗的生长明显减缓^[20]。因此,了解植物的最适施肥量是提高苗木生长量和N素利用率的前提。

桢楠(*Phoebe zhennan*)又称雅楠、紫楠,是樟科(Lauracea)楠属(*Phoebe*)常绿大乔木,为我国特有,是国家二级重点保护树种^[21]。其木材坚硬、致密、纹理美观、耐腐蚀,遇雨有阵阵幽香,被广泛用于高级家具、建筑、造船等方面,是一种经济价值极高的珍贵用材树种^[22]。由于长期以来的人为砍伐,桢楠自然资源极度匮乏,木材市场也出现供不应求的现象。目前的施肥研究主要集中于农作物和速生树种,对楠属植物的研究相对较少,仅见张群英^[23]和贺维等^[24]对桢楠幼苗进行了施肥研究,且研究中设置的施肥水平较少,较难确定桢楠幼苗的最佳施肥量。因此,本研究选择3个常用肥料种类,增加施肥处理水平,更深入细致地分析不同

肥料、不同施肥水平对桢楠幼苗的影响,以期更准确地了解不同肥料对桢楠幼苗生长的影响规律,明确桢楠幼苗的最佳施肥量,为桢楠幼苗科学的养分管理提供理论依据与参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在四川农业大学教学科研园区内,位于东经102°59'16",北纬29°58'52",海拔580 m。多年平均气温16.2℃,≥10℃的积温5 231℃,月平均最高温29.9℃(7月),月平均最低温3.7℃(1月),年均日照时数1 039.6 h,无霜期298 d,多年平均降雨量1 774.3 mm,空气平均湿度79%,属于亚热带湿润气候。

1.2 试验材料

1.2.1 栽植容器与土壤 采用规格一致的上口径25.20 cm、下口径23.60 cm、高24.20 cm的黑色塑料营养袋作为栽植容器,每袋所装土壤约10 kg。试验所用土壤为当地农田土,基本理化性质为全N 5.27 g/kg,有效磷16.17 mg/kg,速效钾46.30 mg/kg,铵态氮3.74 mg/kg,有机质17.38 g/kg, pH值4.83。

1.2.2 幼苗移栽及土壤水分管理 2013年10-11月于都江堰采集成熟的桢楠果实。将种子软化、去除果皮,洗净,并进行沙藏,于2014年3月点播于基质(蛭石+河沙)中,行间距为5 cm,然后在上面覆盖一层约2 cm厚的湿沙,浇透水一次。待桢楠幼苗第5片真叶长出后,选择长势相当、生长健康的幼苗带土移栽至营养袋中,每袋1株,并进行为期1个月的适应性生长。试验期间,采用HH2土壤水分测定仪(ML2x, GBR)监测土壤水分情况,保持土壤体积含水量在18%左右。

1.3 试验方案

1.3.1 试验设计 选用当地常用的复合肥和两种有机肥,采用3因素7水平的完全随机设计试验,肥料种类分别为史丹利复合肥(N 24%, P 10%, K 14%, 记作CF)、油枯(N 2.96%, P 0.80%, K 0.90%, 记作OC)以及鸭粪(N 0.67%, P 1.87%, K 1.61%, 记作DM)。每种肥料设置0(CK)、150、300、450、600、750、900 mg/株7个施肥水平,每个水平9次重复,因对照不施肥,为3种肥料处理共用,全部试验共计171盆。

设置施氮水平的依据为一般1年生苗木植苗全年适宜的施N量(按纯氮计算)为45-90 kg/hm²^[25]。根据该报道,本研究将90 kg/hm²作为1年生桢楠幼苗全年施N的基本量,供试

营养袋上口面积约为 0.05 m^2 , 换算为约为 450 mg/pot (记作N3), 作为基本量, 并在此基础上另设定1/3倍基本量 (150 mg/pot , 记作N1)、2/3倍基本量 (300 mg/pot , 记作N2)、4/3倍基本量 (600 mg/pot , 记作N4)、5/3倍基本量 (750 mg/pot , 记作N5)、2倍基本量 (900 mg/pot , 记作N6), 对照不施N记作N0, 全部试验N0-N6共7个施肥水平. 各肥料种类按纯N换算出的实际施肥量如表1所示, 各肥料P、K含量如表2所示. 将年施N量平均分为3份, 分别于2014年6、8、10月15日进行施肥.

表1 1年生桉楠幼苗3种肥料年施肥量

Table 1 Annual application rate of the three fertilizers to one-year-old *P. zhennan* seedlings in 2014

氮水平 Nitrogen level	复合肥 Compound fertilizer (CF)		油枯 Oil cake (OC)		鸭粪 Duck manure (DM)	
	CF (m/g)	N (m/mg)	OC (m/g)	N (m/mg)	DM (m/g)	N (m/mg)
N0	0	0	0	0	0	0
N1	0.63	150	5.10	150	22.40	150
N2	1.26	300	10.20	300	45.00	300
N3	1.89	450	15.30	450	67.50	450
N4	2.52	600	20.40	600	90.00	600
N5	3.15	750	25.50	750	112.50	750
N6	3.78	900	30.60	900	135.00	900

表2 3种肥料纯磷 (P)、钾 (K) 含量

Table 2 The contents of phosphorus and phosphorus of the three fertilizers

氮水平 Nitrogen level	复合肥 Compound fertilizer (CF, m/mg)		油枯 Oil cake (OC, m/mg)		鸭粪 Duck manure (DM, m/mg)	
	P	K	P	K	P	K
N0	0	0	0	0	0	0
N1	63	88	41	46	419	361
N2	126	176	82	92	841	724
N3	189	265	122	138	1262	1087
N4	252	353	163	184	1683	1449
N5	315	441	204	229	2104	1811
N6	378	529	245	275	2524	2173

1.3.2 施肥方法 考虑到将复合肥配制成溶液直接进行施肥可能会造成肥效释放太快并产生烧苗现象, 故采用松土+覆土的方法将颗粒状肥料均匀环施于植株周缘, 覆土厚度为 5 cm . 由于有机肥常带有病菌、虫卵和杂草种子, 未经腐熟施入对作物生长不利, 所以先进行7 d发酵腐熟处理, 然后加水稀释后均匀地浇在容器周缘.

1.3.3 取样方法 分别于2014年8月、11月在各个施肥处理中随机选取3个重复的植株, 取其自上而下的第一轮功能叶, 装入塑料袋, 标记好处理号后置于冰盒中, 立即带回实验室进行叶绿素的测定, 剩余部分放入烘箱中于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干, 粉碎后测定养分含量.

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长指标 株高、地径分别于2014年6月 (施肥前)、10月及11月进行测量. 株高采用卷尺测量 (精度: 0.1 cm); 地径采用电子游标卡尺测量 (精度: 0.01 mm).

1.4.2 光合色素含量 分光光度法^[26]: 80% 丙酮与无水乙醇1:1混合提取法.

1.4.3 光合生理特征参数 分别在2014年8月、11月中旬的晴朗天气下, 选取桉楠自上而下的第一轮功能叶, 采用Li-6400便携式光合测定仪 (Li-Cor Inc., USA), 人工控制 CO_2 浓

度为 $400\text{ }\mu\text{mol/mol}$ 、温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、光照强度为 $1\text{ }200\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, 测定净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i), 每次测定重复10次.

1.4.4 光合-光响应和光合- CO_2 响应曲线的测定 选取相同部位叶片, 采用Li-6400便携式光合作用仪 (Li-Cor Inc., USA) 测定各处理叶片光合-光响应曲线, 光合有效辐射 (PAR) 由高到低设定为 $2\text{ }000$ 、 $1\text{ }600$ 、 $1\text{ }200$ 、 $1\text{ }000$ 、 800 、 600 、 400 、 200 、 100 、 75 、 50 、 25 、 $0\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, 测定时叶室温度均设定为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 利用Li-6400-01液化 CO_2 钢瓶注入系统维持 CO_2 (400 mol/mol) 稳定. 测定各处理叶片光合- CO_2 响应曲线, 设定 CO_2 浓度为 0 、 50 、 75 、 100 、 150 、 200 、 400 、 600 、 800 、 $1\text{ }200$ 、 $1\text{ }600$ 、 $2\text{ }000\text{ mol/mol}$, 测定时光合有效辐射设定为 $1\text{ }000\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, 叶室温度设定为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.4.5 叶片养分含量测定 每个处理随机选取5株幼苗, 每株幼苗摘取2-3片相同部位的功能叶, 混合后, 用蒸馏水洗净、晾干, 分别装入信封中置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青 15 min , 随即降低烘箱温度至 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, 将叶片烘干至恒重. 粉碎后, 分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法测定叶片N、P含量 (LY/T 1269-1999和LY/T 1270-1999).

1.5 数据处理

采用非直角双曲线模型拟合光合-光响应曲线和直角双曲线模型拟合光合- CO_2 响应曲线, 并计算其相应的特征参数^[27]. 采用SPSS20.0统计分析软件 (SPSS Inc., USA) 对试验数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)、相关性分析及二次曲线拟合, 并用最小显著差数法 (LSD法) 进行多重比较, 并用Sigmaplot 12.5 (Systat Software Inc., USA) 作图.

2 结果与分析

2.1 施肥对桉楠幼苗生长的影响

由表3可以看出, 施肥前各组桉楠幼苗株高差异不显著 ($P > 0.05$). 在施用3种肥料后, 随着肥料量的增加, 幼苗速生期 (6-10月) 的株高生长量均呈现先增后降的趋势, 其中施用复合肥 (CF) 时, 除N3处理显著高于N0外, 其余均与N0差异不显著 ($P > 0.05$); 而在油枯 (OC) 和鸭粪 (DM) 处理下, 各N水平与N0差异均显著 ($P < 0.05$). 到当年生长后期 (10-11月), 3种肥料各N水平之间的差异变得不显著 ($P > 0.05$). 施肥5个月后, 桉楠幼苗总生长量对3种肥料的响应与速生期一致, CF、OC及DM分别在N3、N4、N5水平下达到最大值, 且分别较不施肥的N0高 66.4% 、 225.4% 和 247.4% ($P < 0.05$). 经对3种肥料中P、K含量与株高总生长量的相关分析发现, 不同水平CF、OC中的P、K含量与株高的相关性不显著, 而不同水平DM中P、K含量与株高呈显著正相关, 表明DM中3种元素综合作用使得供试植株获得了最大的生长量.

地径生长量对施肥的响应与株高生长量的响应相似, 但响应程度相对较小. 由表4可以看出, 施肥前桉楠幼苗地径差异不明显. 但3种肥料施用5个月后, 桉楠幼苗地径总生长量随N水平的提高而呈先增后降的趋势, CF、OC和DM分别在N3、N4、N5处理达到最大值, 分别较N0显著提高 85.2% 、 95.6% 和 148.3% ($P < 0.05$). 相关分析 (表5) 表明, 3种肥料中的P、K含量与地径的总生长量均不相关. 这可能是由于本研

表3 不同施肥处理对1年生桉楠幼苗株高生长的影响 ($N=9$)Table 3 The height growth increment of one-year-old *P. zhennan* seedlings treated by different fertilizers and application rates during the growth period ($N=9$)

施肥种类 Types of fertilizer	施肥水平 Fertilization level	施肥前 Before fertilization	试验期间净生长量 Net increment ($\Delta h/cm$)	生长量 Increment ($\Delta h/cm$)	
				速生期 (6-10月) June to October	缓生期 (10-11月) October to November
复合肥 Compound fertilizer (CF)	N0	8.09 ± 0.88 a	6.60 ± 1.09 b	6.13 ± 1.23 b	0.48 ± 0.31 bc
	N1	8.59 ± 1.10 a	9.53 ± 1.69 ab	8.53 ± 1.57 ab	1.00 ± 0.24 ab
	N2	8.74 ± 1.25 a	9.85 ± 3.41 ab	8.40 ± 3.75 ab	1.45 ± 1.01 a
	N3	8.66 ± 0.80 a	10.98 ± 3.23 a	10.30 ± 3.42 a	0.68 ± 0.32 bc
	N4	8.20 ± 1.11 a	7.55 ± 1.57 b	6.88 ± 1.54 b	0.67 ± 0.10 bc
	N5	8.31 ± 0.90 a	9.00 ± 2.22 ab	8.30 ± 2.21 ab	0.70 ± 0.14 bc
油枯 Oil cake (OC)	N6	7.94 ± 0.80 a	7.90 ± 0.87 ab	7.70 ± 1.00 ab	0.20 ± 0.14 c
	N0	8.09 ± 0.88 a	6.60 ± 1.09 c	6.13 ± 1.23 d	0.48 ± 0.31 b
	N1	8.64 ± 0.73 a	11.78 ± 1.41 cd	10.70 ± 1.21 c	1.08 ± 0.38 ab
	N2	8.71 ± 0.40 a	12.83 ± 3.05 cd	11.68 ± 2.73 c	1.20 ± 0.40 a
	N3	8.69 ± 0.90 a	15.68 ± 0.97 b	14.40 ± 1.45 b	1.28 ± 0.57 a
	N4	8.76 ± 0.99 a	21.48 ± 0.94 a	19.98 ± 0.63 a	1.50 ± 0.62 a
鸭粪 Duck manure (DM)	N5	8.64 ± 1.16 a	13.33 ± 0.62 bc	12.33 ± 0.51 bc	1.00 ± 0.14 ab
	N6	8.13 ± 1.22 a	11.28 ± 2.32 d	10.33 ± 2.00 c	0.95 ± 0.44 ab
	N0	8.09 ± 0.88 a	6.60 ± 1.09 d	6.13 ± 1.23 d	0.48 ± 0.31 c
	N1	8.97 ± 0.63 a	10.90 ± 1.54 cd	10.13 ± 1.49 cd	0.78 ± 0.34 bc
	N2	8.90 ± 0.91 a	14.93 ± 3.10 bc	13.35 ± 3.20 bc	1.58 ± 0.70 a
	N3	8.84 ± 1.30 a	15.58 ± 2.13 b	14.50 ± 2.29 bc	1.08 ± 0.41 abc
	N4	8.43 ± 0.61 a	17.05 ± 4.52 b	15.95 ± 4.42 b	1.10 ± 0.33 abc
	N5	8.96 ± 0.67 a	22.93 ± 3.98 a	21.55 ± 4.47 a	1.38 ± 0.59 ab
	N6	8.66 ± 1.11 a	18.70 ± 3.06 ab	17.88 ± 3.15 ab	0.83 ± 0.39 bc

同列不同小写字母代表各施肥处理相互间在0.05水平下差异显著。

The different lowercase letters in the same column represent significant difference among fertilization treatments at 0.05 level.

表4 不同施肥处理对桉楠幼苗地径生长的影响 ($N=9$)Table 4 The basal diameter growth increment of *P. zhennan* seedlings treated by different fertilizers and N rates during the growth period ($N=9$)

施肥种类 Types of fertilizer	施肥水平 Fertilization level	施肥前 Before fertilization	试验期间净生长量 Net increment ($\Delta d/mm$)	生长量 Increment ($\Delta h/cm$)	
				速生期 (6-10月) June to October	缓生期 (10-11月) October to November
复合肥 Compound fertilizer (CF)	N0	1.20 ± 0.04a	1.82 ± 0.20 d	1.49 ± 0.22c	0.33 ± 0.08bc
	N1	1.18 ± 0.01a	2.80 ± 0.30 abc	2.48 ± 0.15ab	0.32 ± 0.21bc
	N2	1.15 ± 0.02a	3.08 ± 0.30 ab	2.62 ± 0.49a	0.46 ± 0.05ab
	N3	1.21 ± 0.02a	3.37 ± 0.67 a	2.71 ± 0.56a	0.66 ± 0.14a
	N4	1.24 ± 0.01a	2.98 ± 0.39 ab	2.55 ± 0.64ab	0.42 ± 0.25b
	N5	1.21 ± 0.03a	2.49 ± 0.35 bc	2.28 ± 0.35ab	0.21 ± 0.04c
油枯 Oil cake (OC)	N6	1.20 ± 0.02a	2.30 ± 0.36 cd	1.97 ± 0.37bc	0.33 ± 0.11bc
	N0	1.20 ± 0.04a	1.82 ± 0.20 d	1.49 ± 0.22d	0.33 ± 0.08b
	N1	1.23 ± 0.02a	2.34 ± 0.27 c	2.04 ± 0.24c	0.30 ± 0.09b
	N2	1.19 ± 0.01a	2.47 ± 0.20 c	2.08 ± 0.14c	0.39 ± 0.12ab
	N3	1.28 ± 0.01a	3.42 ± 0.15 a	2.96 ± 0.13a	0.46 ± 0.05a
	N4	1.22 ± 0.16a	3.56 ± 0.28 a	3.17 ± 0.26a	0.40 ± 0.06ab
鸭粪 Duck manure (DM)	N5	1.20 ± 0.04a	3.30 ± 0.26 a	2.94 ± 0.21a	0.37 ± 0.11ab
	N6	1.24 ± 0.03a	2.92 ± 0.14 b	2.58 ± 0.08b	0.34 ± 0.07ab
	N0	1.20 ± 0.04a	1.82 ± 0.20 d	1.49 ± 0.22c	0.33 ± 0.08b
	N1	1.31 ± 0.02a	2.99 ± 0.27 c	2.65 ± 0.32b	0.34 ± 0.09b
	N2	1.18 ± 0.00a	3.26 ± 0.21 c	2.85 ± 0.15b	0.41 ± 0.16ab
	N3	1.22 ± 0.06a	3.94 ± 0.40 b	3.51 ± 0.39a	0.43 ± 0.09ab
	N4	1.22 ± 0.04a	4.31 ± 0.47 ab	3.84 ± 0.64a	0.48 ± 0.19ab
	N5	1.24 ± 0.04a	4.52 ± 0.43 a	3.95 ± 0.41a	0.57 ± 0.11a
	N6	1.23 ± 0.01a	2.94 ± 0.26 c	2.63 ± 0.18b	0.31 ± 0.10b

同列不同小写字母代表各施肥处理相互间在0.05水平下差异显著。

The different lowercase letters in the same column represent significant difference among fertilization treatments at 0.05 level.

表5 3种肥料中磷钾含量与株高、地径总生长量的相关分析 ($N=7$)Table 5 Pearson correlation analysis of P, K contents in three fertilizers and total height, basal diameter increments ($N=7$)

株高和地径生长 Height and basal diameter growth	CF磷含量 P content in CF	CF钾含量 K content in CF	OC磷含量 P content in OC	OC钾含量 K content in OC	DM磷含量 P content in OC	DM钾含量 K content in OC
株高总生长量 Height growth increment	-0.425	-0.425	0.356	0.360	0.971**	0.971**
地径总生长量 Basal diameter increment	-0.169	-0.168	0.685	0.687	0.715	0.715

** $P < 0.01$; * $P < 0.05$.

究为盆栽试验,盆口直径小致使密度较大,促使各植株的高生长较旺盛,而径生长受到了一定程度的抑制;此外,也说明在地径生长过程中,N仍然起着主导作用。

2.2 施肥对桉楠幼苗叶片氮磷含量的影响

由表6可见,在8月,CF处理的叶片N含量随施氮水平增加略呈上升趋势,但处理间差异不显著($P > 0.05$),其叶片P含量除在N3水平下显著高于N0外($P < 0.05$),其他水平效果不显著($P > 0.05$);OC、DM处理下的叶片N、P含量均表现为随着施肥水平的增加而呈先升后降的趋势,且高氮水平(N6)下的叶片N、P含量均显著高于N0($P < 0.05$);到11月,CF、OC以及DM均不同程度增加了叶片N含量,分别在N3、N4、N5水平处达到最大值,相比N0分别显著增加100.1%、124.5%和156.5%,且3种肥料在最高氮水平(N6)下仍然显著高于N0;另一方面,施用CF和OC降低了叶片P含量,在N6水平下,两种肥料分别比N0减少20.5%、14.4%,而施用DM能够显著增加叶片P含量。

2.3 施肥对桉楠幼苗光合色素的影响

在8月,施用CF的桉楠幼苗叶绿素总量Chl(a+b)总体呈下降趋势,而在缓生期(11月),除N4水平显著高于N0外,其余各处理与N0差异不显著($P > 0.05$);而施用OC和DM的桉楠幼苗,无论在速生期还是缓生期均随施氮量的增加表现出先升后降的趋势,且在高N处理(N6)下Chl(a+b)含量仍显著高于N0($P < 0.05$)(表6)。

2.4 施肥对桉楠幼苗光合参数的影响

由图1可以看出,在8月,3种肥料各施肥水平均显著提高桉楠幼苗的净光合速率(P_n)。但施用这些肥料并非越多越好,CF、OC、DM分别在N3、N4、N3水平植株的 P_n 最高;到了

11月,CF、OC高水平施用量植株的 P_n 已明显降低,其中在N6水平分别比N0显著降低13.8%、14.7%,而DM仍然显著增加 P_n ,在N5水平达到最大值,比N0显著增加34.1%,表明施用鸭粪对桉楠幼苗的促进作用持续时间更长。

施肥对桉楠幼苗的气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)的影响与对 P_n 的影响具有相似性。8月,3种肥料对 G_s 和 T_r 的影响均表现为随着施肥量的增加呈现出先升后降的趋势,且高量N处理下的 G_s 、 T_r 仍然显著高于N0;在11月, G_s 、 T_r 对施用CF和OC的响应与在8月一致,而在DM处理下, G_s 、 T_r 却随着施氮量的增加显著降低($P < 0.05$)。

由图1还可看出,在8月,施用3种肥料对叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)的影响没有呈现出明显的规律性;而在11月,3种肥料均显著增加 C_i ($P < 0.05$),其中DM处理下的 C_i 增幅最大。

2.5 施肥对桉楠幼苗光合-光响应及光合- CO_2 响应的影响

由图2可知,桉楠幼苗不同施肥处理中,均随施肥量的增加呈先上升后下降的趋势,在速生期,N0处理响应曲线均最低。在缓慢生长期,随着施肥水平的提高和肥效的累积,CF、OC处理下的N6水平的光响应曲线较N0处理低。

由表7可见,8月与11月随施肥量的增加,各个处理表现量子效率(AQY)与最大净光合速率(P_{nmax})呈先升高后降低的变化趋势,CF、OC、DM分别在N3、N4、N5水平达到最大值,3种肥料中,DM对AQY与 P_{nmax} 促进作用最大,OC次之,CF最小。8月份AQY与 P_{nmax} 数据均大于11月份,这可能是不同季节的原因导致的,桉楠在夏季生长较快,光合作用相比11月份较强。

由图2可以看出,各个处理的 CO_2 响应曲线也存在明显的

表6 不同施肥处理对桉楠幼苗叶片光合色素、氮、磷含量的影响($w/g\ kg^{-1}$, $N=9$)

Table 6 The chlorophyll, N and P contents in leaves of *P. zhennan* seedlings treated by different fertilizers and N rates during the growth period ($w/g\ kg^{-1}$, $N=9$)

处理 Treatment		8月 August			11月 November		
		叶片N Leaf N	叶片P Leaf P	叶绿素总量 Chl (a + b)	叶片N Leaf N	叶片P Leaf P	叶绿素总量 Chl (a + b)
复合肥 Compound fertilizer (CF)	N0	5.76 ± 0.44 a	0.78 ± 0.02 b	4.77 ± 0.26 b	11.30 ± 2.24 d	1.32 ± 0.03 a	1.24 ± 0.25 b
	N1	6.17 ± 0.91 a	0.75 ± 0.02 b	4.24 ± 0.18 bc	18.45 ± 1.68 b	1.17 ± 0.01 c	1.80 ± 0.04 ab
	N2	6.33 ± 0.35 a	0.83 ± 0.14 b	4.71 ± 0.28 b	19.94 ± 2.66 ab	1.01 ± 0.02 d	1.75 ± 0.21 ab
	N3	7.18 ± 0.43 a	1.05 ± 0.10 a	4.75 ± 0.44 b	22.61 ± 2.06 a	1.25 ± 0.02 b	1.93 ± 0.86 ab
	N4	6.60 ± 0.20 a	0.85 ± 0.01 b	4.02 ± 0.26 c	22.29 ± 0.46 a	0.95 ± 0.04 e	2.32 ± 0.09 a
	N5	6.51 ± 0.56 a	0.75 ± 0.02 b	5.39 ± 0.38 a	17.72 ± 2.42 bc	1.06 ± 0.05 d	2.01 ± 0.68 ab
	N6	6.83 ± 0.22 a	0.72 ± 0.06 b	3.91 ± 0.24 c	14.56 ± 0.73 cd	1.05 ± 0.02 d	1.51 ± 0.32 b
油枯 Oil cake (OC)	N0	5.76 ± 0.44 c	0.78 ± 0.02 c	4.77 ± 0.26 bc	11.30 ± 2.24 c	1.32 ± 0.03 a	1.24 ± 0.25 c
	N1	6.84 ± 0.12 b	0.71 ± 0.03 c	4.91 ± 0.40 b	16.75 ± 2.28 b	1.25 ± 0.02 ab	1.35 ± 0.39 c
	N2	6.53 ± 0.40 bc	0.74 ± 0.03 c	4.13 ± 0.09 c	23.73 ± 1.23 a	1.16 ± 0.02 bc	2.66 ± 0.49 ab
	N3	6.72 ± 0.17 b	1.10 ± 0.00 b	6.38 ± 0.32 a	24.49 ± 1.40 a	1.22 ± 0.08 abc	2.69 ± 0.78 ab
	N4	7.93 ± 0.10 a	1.10 ± 0.20 b	5.70 ± 0.13 a	25.59 ± 0.42 a	1.32 ± 0.10 a	2.96 ± 0.89 a
	N5	7.87 ± 0.06 a	1.41 ± 0.21 a	4.63 ± 0.32 bc	25.20 ± 3.21 a	1.13 ± 0.05 c	2.11 ± 0.28 abc
	N6	6.77 ± 0.72 b	0.69 ± 0.10 c	3.21 ± 0.78 d	25.58 ± 2.26 a	1.13 ± 0.07 c	1.80 ± 0.48 b
鸭粪 Duck manure (DM)	N0	5.76 ± 0.44 c	0.78 ± 0.02 e	4.77 ± 0.26 c	11.30 ± 2.24 d	1.32 ± 0.03 e	1.24 ± 0.25 c
	N1	8.11 ± 0.37 ab	0.86 ± 0.09de	4.57 ± 1.22 c	24.42 ± 0.78 bc	1.61 ± 0.04 c	2.34 ± 0.26 b
	N2	8.23 ± 0.48 ab	0.89 ± 0.03 d	4.73 ± 0.35 c	25.18 ± 0.29 b	1.46 ± 0.04 d	2.20 ± 0.26 b
	N3	8.31 ± 0.58 a	0.92 ± 0.01 d	6.31 ± 0.26 a	26.11 ± 0.90 b	1.50 ± 0.06 d	2.34 ± 0.77 b
	N4	8.33 ± 0.65 a	1.57 ± 0.00 b	5.40 ± 0.28 abc	25.95 ± 1.69 b	1.83 ± 0.02 a	2.61 ± 0.31 ab
	N5	9.27 ± 0.89 a	1.78 ± 0.00 a	6.02 ± 0.30 ab	28.98 ± 2.68 a	1.72 ± 0.04 b	3.33 ± 0.61 a
	N6	6.87 ± 0.70 bc	1.47 ± 0.03 c	5.05 ± 0.50 bc	21.88 ± 0.75 c	1.82 ± 0.05 a	2.91 ± 0.48 ab

同列不同小写字母代表各施肥处理相互间在0.05水平下差异显著。

The different lowercase letters in the same column represent significant difference among fertilization treatments at 0.05 level.

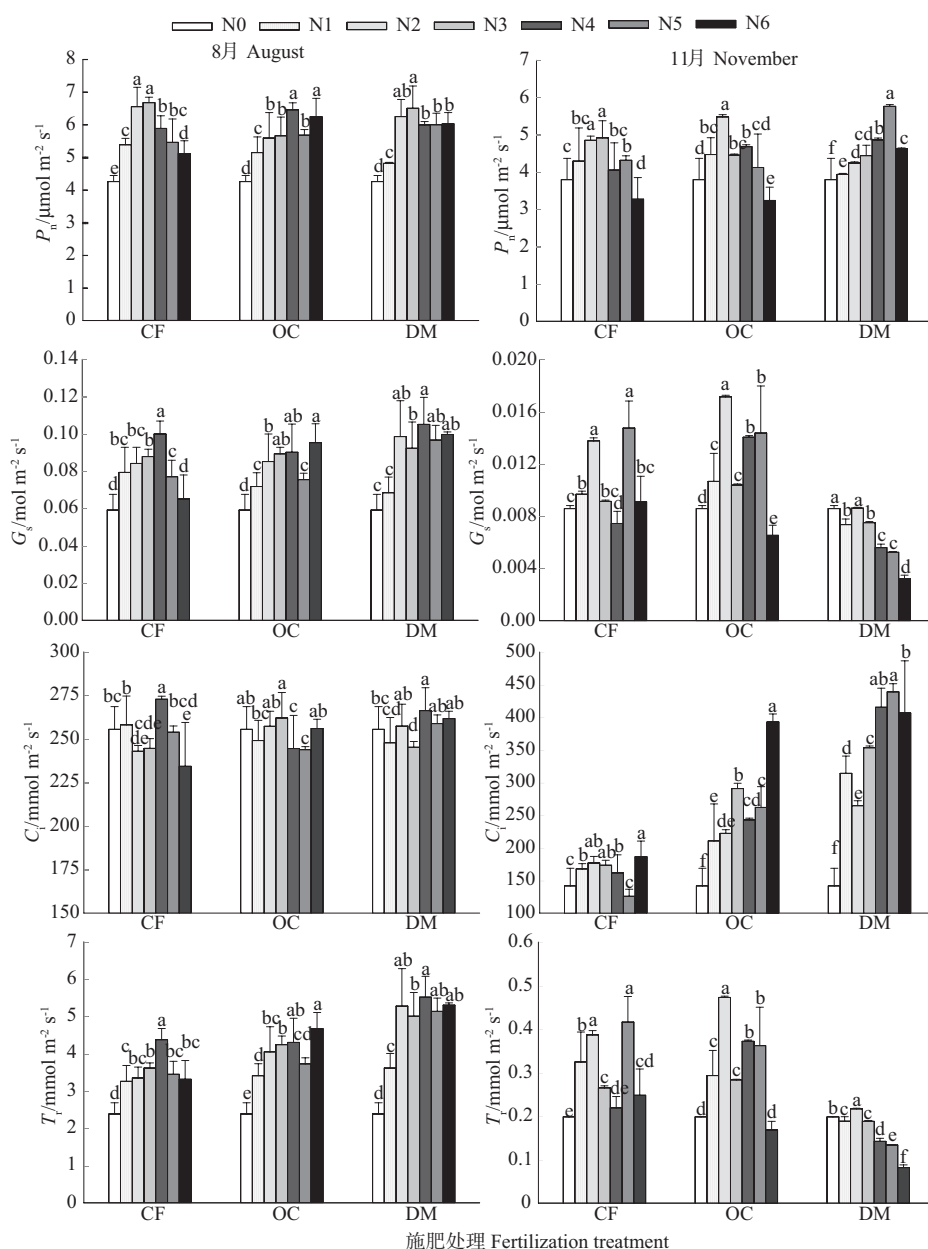


图1 不同施肥处理对桉楠幼苗叶片光合参数的影响 ($N=9$)。CF: 复合肥; OC: 油枯; DM: 鸭粪。 P_n : 净光合速率; G_s : 气孔导度; C_i : 胞间 CO_2 浓度; T_r : 蒸腾速率

Fig. 1 The photosynthetic parameters of *P. zhennan* seedlings treated by different fertilizers and N rates during the growth period ($N=9$). CF: Compound fertilizer; OC: Oil cake; DM: Duck manure. P_n : Net photosynthetic rate; G_s : Stomatal conductance; C_i : Intercellular CO_2 concentration; T_r : Transpiration rate.

随施肥水平的增加呈先上升后下降的趋势。3种肥料处理下, CE(羧化效率)与 $P_{n\max}$ 变化趋势同AQY与 $P_{n\max}$,其促进作用大小同AQY表现为 $\text{DM} > \text{OC} > \text{CF}$ 。

2.6 最佳施肥量分析

为了更好地了解1年生桉楠幼苗的最佳施氮量,本研究选择桉楠幼苗当年生长末期(11月)的苗高和地径分别与年施氮量进行了二次曲线的拟合,发现在CF处理下,年施氮量与株高呈显著线性相关($P=0.019$),而与地径不相关($P=0.083$);在OC处理下,年施氮量与株高、地径均呈显著线性相关($P=0.003$, $P=0.011$);而在DM中,年施氮量与株高、

地径均则呈极显著线性相关($P=0.001$, $P<0.001$);且桉楠幼苗的苗高和地径生长均随着3种肥料中施N量的增加呈先升后降的趋势,其对应的方程如图4所示。通过结合年施氮量与苗高、地径的关系,得出CF、OC、DM最佳施氮量范围分别为405-446、478-652、607-883 mg N,理论最佳苗高生长分别为19.64、24.98、25.10 cm,理论最佳地径生长分别为3.92、4.31、5.23 mm。

2.7 相关性分析

相关分析(表8)显示,桉楠幼苗的株高、地径生长受叶片净光合速率 P_n 的影响较大,相关系数 R 分别为0.655($P<$

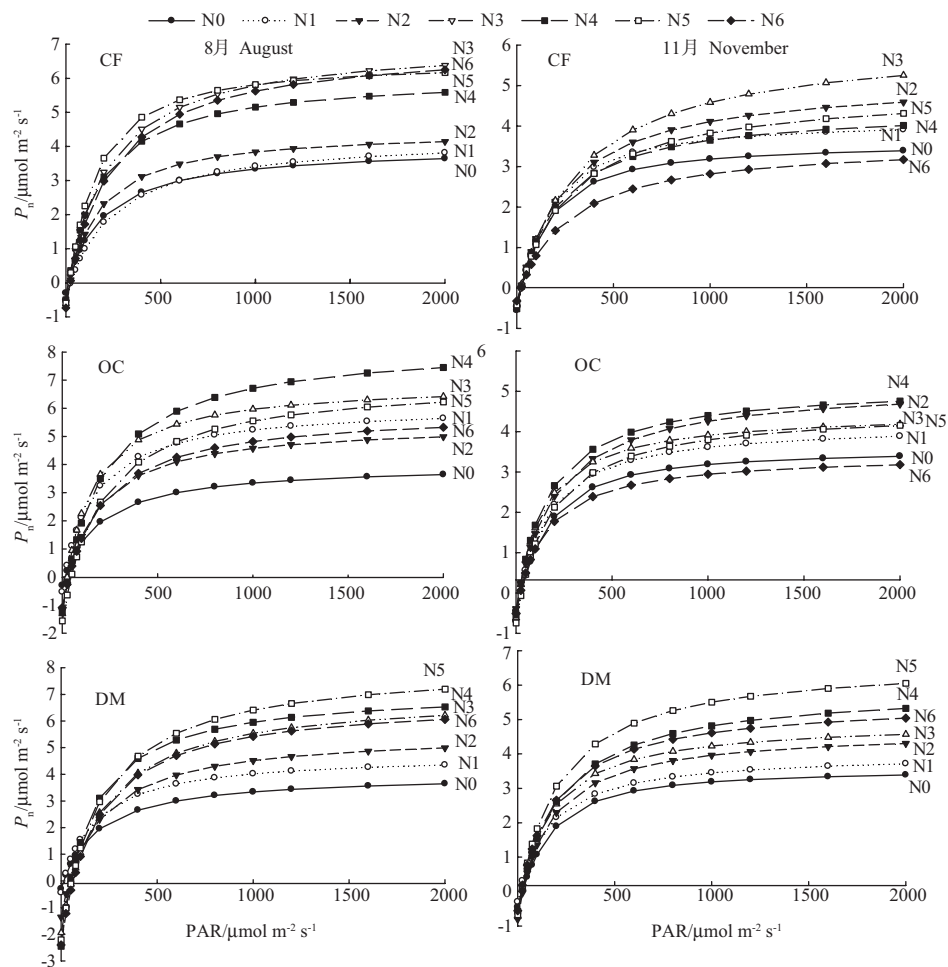


图2 不同施肥处理对桉楠幼苗光合-光响应曲线的影响。CF: 复合肥; OC: 油枯; DM: 鸭粪; P_n : 净光合速率。
Fig. 2 The photosynthetic light response curve of *P. zhennan* seedlings treated by different fertilizers and N rates during the growth period. CF: Compound fertilizer; OC: Oil cake; DM: Duck manure; P_n : Net photosynthetic rate.

表7 不同施肥处理桉楠幼苗光响应、 CO_2 响应特征参数 ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)
Table 7 P_n -light response and P_n - CO_2 response parameters of *P. zhennan* seedlings treated by different fertilizers and application rates during the growth period ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)

处理 Treatment		8月 August				11月 November			
		P_{nmax}	AQY	P_{nmax}^*	CE	P_{nmax}	AQY	P_{nmax}^*	CE
复合肥 Compound fertilizer (CF)	N0	4.3059	0.0108	16.1303	0.0203	4.05	0.0115	13.2625	0.0170
	N1	4.8010	0.0110	21.9129	0.0279	4.72	0.0131	15.2991	0.0205
	N2	5.2018	0.0143	27.1897	0.0283	5.68	0.0127	17.1431	0.0216
	N3	7.6464	0.0183	25.3355	0.0309	6.52	0.0134	20.7475	0.0248
	N4	6.5964	0.0172	20.7451	0.0217	4.95	0.0121	18.0915	0.0238
	N5	7.1296	0.0207	22.0050	0.0226	4.81	0.0113	19.7259	0.0258
	N6	6.9461	0.0179	17.8873	0.0210	3.93	0.0084	14.3948	0.0194
油枯Oil cake (OC)	N0	4.3059	0.0108	16.1303	0.0203	4.05	0.0115	13.2625	0.0170
	N1	7.0138	0.0179	22.0812	0.0180	4.90	0.0138	14.3948	0.0216
	N2	6.6490	0.0180	25.6503	0.0261	5.58	0.0135	16.0376	0.0195
	N3	8.6023	0.0174	28.1883	0.0300	5.12	0.0146	19.0584	0.0232
	N4	9.5848	0.0204	25.3899	0.0253	5.72	0.0152	23.9112	0.0228
	N5	8.2449	0.0233	22.4901	0.0227	5.32	0.0136	21.1696	0.0243
	N6	6.6588	0.0228	16.1103	0.0196	3.96	0.0108	18.0204	0.0151
DM	N0	5.1783	0.0108	16.1303	0.0203	4.05	0.0115	13.2625	0.017
	N1	6.9183	0.0137	24.0283	0.0227	4.32	0.0116	18.2630	0.0234
	N2	8.9704	0.0176	20.5740	0.0258	5.50	0.0147	22.8275	0.0200
	N3	9.7108	0.0215	24.3925	0.0233	5.69	0.0156	22.5948	0.0209
	N4	10.3471	0.0263	30.6601	0.0285	6.50	0.0153	25.4457	0.0257
	N5	11.2128	0.0248	33.2391	0.0303	7.38	0.0179	28.7143	0.0275
	N6	9.2128	0.0234	27.2928	0.0269	6.10	0.0153	27.1251	0.0212

P_{nmax}^* 表示光合- CO_2 响应拟合的最大净光合速率。
 P_{nmax}^* indicates maximum photosynthetic rate of CO_2 response curve.

0.01) 和 0.547 ($P < 0.05$); 而 P_n 又与其叶片 N 含量间存在极显著的相关关系。这表明, 施 N 很可能通过提升植株叶片 N 含量以增强其光合能力, 进而促进其物质积累。

表8 桢楠幼苗生长指标与叶片主要生理指标相关分析 (11月, $N=7$)
Table 8 Correlation analysis of *P. zhennan* seedling growth and main leaf physiology indices (November, $N=7$)

指标 Index	株高 Height growth	地径 Basal diameter	P_n	叶片N Leaf N
地径 Basal diameter	0.822**			
净光合速率 P_n	0.655**	0.547*		
叶片N Leaf N	0.710**	0.861**	0.407*	
叶片P Leaf P	0.594**	0.702**	0.344	0.423*

** $P < 0.01$; * $P < 0.05$.

3 讨论与结论

叶片特征是植物响应光环境能力的一个较好的表征, 同时叶片的光合作用与其养分含量密切相关^[28], 因此, 在低肥力的土壤中, 施肥能够明显地影响植物叶片的光合作用及相关生理过程。本研究发现, 桢楠幼苗叶 N 含量与其净光合速率 (P_n) 呈显著正相关关系, 这与多数研究结果^[11-12]一致。其原因为大部分叶 N 存在于叶绿体中, 而叶绿体中的 N 主要由

可溶性蛋白氮和类囊体蛋白氮组成, 这两种蛋白含量共同影响光合能力^[29]。本研究中, 3种肥料均有效地提高了叶片 N 浓度以及叶绿素含量, 因此随着叶片 N 浓度增加, 叶片总 N 向两大类型蛋白的分配量增加, 使叶片的光合速率增强, 从而有利于干物质累积。施用复合肥 (CF) 在整个生长期降低了叶片 P 含量, 同时, 随着养分的累积, 施用油枯 (OC) 最终降低了叶片 P 含量, 叶 P 含量的降低常被解释为由于叶片生物量增加而引起养分稀释^[30], 亦或是根对 P 的吸收能力被抑制^[31-33]。相比之下, 鸭粪 DM 增加了叶 P 含量, 这可能是由于鸭粪的含 P 量多, 同时有机粪肥随着时间的推移分解出大量的有机质, 促进了微生物的活动, 从而分解出能够促进根系生长的胡敏酸, 最终促进了根系对 P 的吸收^[34]。尽管施用 CF、OC 降低了桢楠幼苗叶 P 含量, 但其光合能力 (除 N6) 与施用 DM 的幼苗并没有太大差异, 这说明桢楠幼苗能够很好地调节自身的 N/P, 从而避免由于叶 N 大量增加引起的养分失衡^[35]。

桢楠幼苗在生长过程中的净光合速率 (P_n) 均随着肥料施用量的增加呈先升后降的趋势, 这可能是因为土壤肥力相对较低的情况下, 养分成为限制桢楠光合作用的关键因子; 但过量施肥则造成氮饱和, 对其处理植株光合能力的促进作用减小, 甚至产生危害, 这可能与过量 N 会引起叶绿素

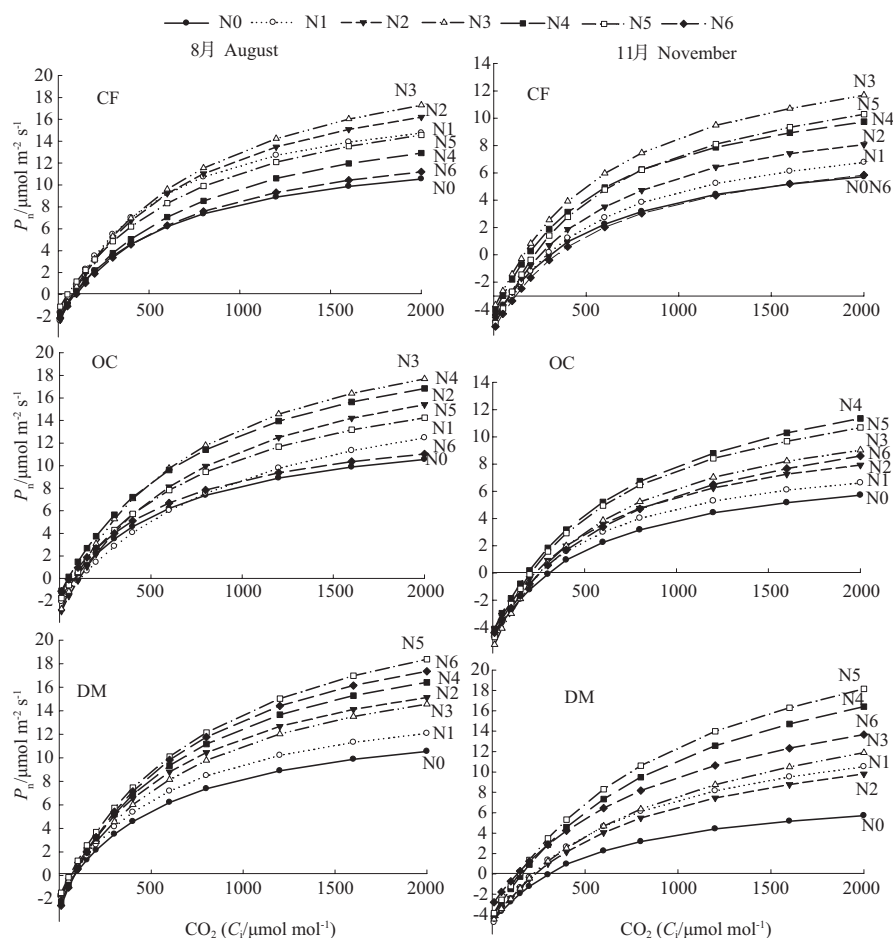


图3 不同施肥处理对桢楠幼苗光合- CO_2 应曲线的影响。CF: 复合肥; OC: 油枯; DM: 鸭粪。 P_n : 净光合速率; C_i : 胞间 CO_2 浓度
Fig. 3 The photosynthetic CO_2 response curve of *P. zhennan* seedlings treated by different fertilizers and N rates during the growth period. CF: Compound fertilizer; OC: Oil cake; DM: Duck manure; P_n : Net photosynthetic rate; C_i : Intercellular CO_2 concentration.

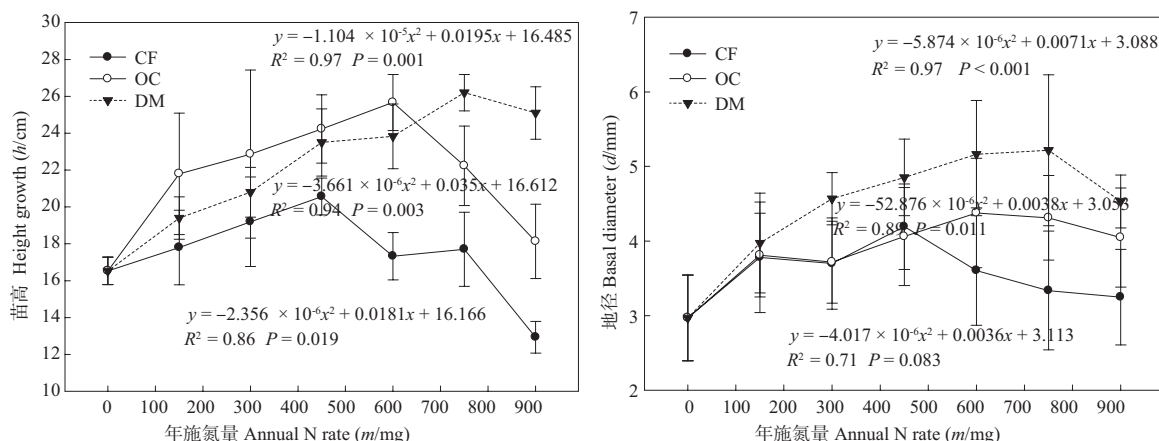


图4 年施氮量与桉楠生长末期(11月)苗高、地径的关系。CF: 复合肥; OC: 油枯; DM: 鸭粪。

Fig. 4 The relationships between annual N rates and height growth, basal diameter. CF: Compound fertilizer; OC: Oil cake; DM: Duck manure.

含量、同化力合成、酶含量和酶活性的下降有关^[36]。在桉楠幼苗生长期增施3种肥料能够显著提高幼苗的气孔导度、蒸腾速率,其中施用DM的优势较为突出,其原因可能在于有机粪肥能够更好地保持土壤水分,提高土壤肥力,促进植物根系生长,从而提高叶片水势,促进气孔导度的增加^[17]。

光响应曲线反映了植物叶片的光合速率随光合有效辐射强度改变的变化规律。有研究表明,最大净光合速率(P_{nmax})表征着植物光合潜力^[37],而养分的输入能够明显促进光合速率的增加^[38-39]。本研究中,施用3种肥料CF、OC、DM均不同程度增加了 P_{nmax} ,说明合理的施肥有助于提高桉楠幼苗的光合潜力,这与徐伟洲等对白茅草(*Bothriochloa ischaemum*)研究结果^[40]一致。植物叶片的表观量子效率(AQY)能够指示对弱光的利用能力,有助于了解光合机构的运转是否正常^[41]。而合适的养分供应能够增加其量子效率,进而保证植物维持较高的量子产额^[42]。本研究结果表明,随着施肥量的增加,AQY也逐渐增加,说明施肥能够促进桉楠体内吸收与转换光能的色素蛋白的合成,从而增加对弱光的利用能力^[43]。光合- CO_2 响应曲线反映了植物光合速率随 CO_2 浓度的变化而变化的规律。羧化效率(CE)是该曲线比例阶段的斜率,其值越大,叶片在较低的 CO_2 浓度下 P_n 越高^[44]。接玉玲等研究发现,CE升高是苹果叶片 P_n 升高的主要原因^[45]。本研究结果也表明施肥能够增加CE,而3种肥料的肥效表现为DM > OC > CF,说明有机粪肥的合理施用能够增强桉楠幼苗对低 CO_2 浓度的利用。

植物生长指标能够直观反映施肥的促进效果。本研究中,3种肥料对桉楠幼苗的生长均有一定的促进作用。二次函数的拟合结果得出,3种肥料的作用肥效表现为DM > OC > CF。这是因为在有机粪肥的处理下,较高的叶片N、P含量能够促进叶绿素的大量合成,从而提高幼苗的光合能力,有效地促进桉楠幼苗的生长发育;亦或是由于3种肥料形态不同,尤其是两种有机肥分解的程度不同,因而释放有效氮的速率不同,从而造成3种肥料肥效不一样。本研究结果与贺维等对1年生桉楠幼苗施肥的试验结果^[46]不一致,该研究得出N肥、复合肥、有机肥及混合肥均在中N水平(600 mg N)下桉楠幼苗生长最好,而本研究通过设置6个施N水平,并将当年

生长末期的株高、地径与年施N量进行二次曲线拟合表明,三种肥料CF、OC、DM分别在405-446、478-652、607-883 mg/株时使得桉楠幼苗能有最佳的生长,结果有一定差距可能与其试验设计的施肥水平数偏少有关,也可能与幼苗种源、肥料种类不同有关。本研究表明,在最佳施肥水平的范围之内,随着施肥量增加,桉楠幼苗长势越好,在最佳施肥水平之上继续增施3种肥料则出现对幼苗生长的抑制现象,这是因为土壤在最佳施氮量下已经达到氮饱和状态,继续增加施氮量则会增加土壤溶液N浓度,从而抑制根系对营养物质的吸收(即烧苗现象)^[47],进而抑制植物的生长发育。在本研究中,DM中的N:P:K为1:2.7:2.4,表明在施肥过程中并不是N越多越好,Graciano等对巨桉(*Eucalyptus grandis*)的施肥研究表明,在不提高施N量的情况下,向土壤中添加P能够促进巨桉各个组织(根、茎、枝、叶)对N的吸收,从而提高N的利用率^[48]。此外,禽畜粪便中的K具有很高的生物有效性,占全K的49.4%,施入土壤后能够在短时间内被释放成为土壤有效K^[49],供植株吸收利用,从而促进植株的生长。

因此,结合1年生桉楠幼苗光合作用与生长状况可得出,本研究中3种肥料CF、OC、DM对桉楠幼苗的最佳施N量范围分别为405-446(P 169-186, K 237-261 mg)、478-652(P 129-176, K 145-198 mg)、607-883(P 1 693-2 463, K 1 458-2 119) mg/株。而在3个最佳施N量范围下,施用DM对幼苗生长的促进作用最好,OC次之,CF最差。综上得知,本研究中607-883 mg/株的DM是最优施肥方案。

参考文献 [References]

- 1 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文齐,陈新平,江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, **45** (5): 915-924 [Zhang FS, Wang JQ, Zhang WF, Cui ZL, Ma WQ, Chen XP, Jiang RF. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedol Sin*, 2008, **45** (5): 915-924]
- 2 Galloway JN, Townsend AR, Jan Willem E, Erismann JN, Bekunda M, Cai ZC, Freney JR, Martinelli LA, Seitzinger SP, Sutton MA. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [J]. *Science*, 2008, **565** (9): 89-93
- 3 贾蕊,陆迁,何学松. 我国农业污染现状、原因及对策研究[J]. 中国

- 农业科技导报, 2006, **8** (1): 59-63 [Jia R, Lu Q, He XS. Present situation reasons and counter measures of the agriculture pollution of China [J]. *Rev China Agri Sci Technol*, 2006, **8** (1): 59-63]
- 4 李玲玲, 李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18** (3): 749-757 [Li LL, Li ST. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2012, **18** (3): 749-757]
- 5 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, **44** (20): 4207-4229 [Li ST, Jin JY. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. *Sci Agri Sin*, 2011, **44** (20): 4207-4229]
- 6 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 姚杰, 曹卫东, 王敏, 刘荣乐. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006 (1): 3-8 [Huang HX, Li ST, Li XL, Yao J, Cao WD, Wang M, Liu RL. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China [J]. *Soil Fertil*, 2006 (1): 3-8]
- 7 刘晓燕, 金继运, 任天志, 何萍. 中国有机肥料养分资源潜力和环境风险分析[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (8): 2092-2098 [Liu XY, Jin JY, Ren Z, He P. Potential organic manures nutrient resources and their environmental risk in China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (8): 2092-2098]
- 8 范阳阳. 土壤水分和氮素有效性对刺槐碳、氮代谢以及抗旱性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012 [Fan YY. Effects of water and nitrogen availability on carbon, nitrogen metabolism and drought resistance of *Robinia pseudoacacia* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012]
- 9 邢雪荣, 韩兴国, 陈灵芝. 植物养分利用效率研究综述[J]. 应用生态学报, 2001, **11** (5): 785-790 [Xing XR, Han XG, Chen LZ. A review on research of plant nutrient use efficiency [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **11** (5): 785-790]
- 10 郭盛磊, 阎秀峰, 白冰, 于爽. 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 SL, Yan XF, Bai B, Yu S. Effects of nitrogen supply on photosynthesis in larch seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (6): 1291-1298]
- 11 Parelle J, Roudaut JP, Ducrey M. Light acclimation and photosynthetic response of beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings under artificial shading or natural Mediterranean conditions [J]. *Ann For Sci*, 2006, **63** (3): 257-266
- 12 Salifu KF, Apostol KG, Jacobs DF, Islam MA. Growth, physiology, and nutrient retranslocation in nitrogen-15 fertilized *Quercus rubra* seedlings [J]. *Ann For Sci*, 2008, **65** (1): 101p1-101p8
- 13 杜永成, 王玉波, 范文婷, 盖志佳, 于敦爽, 谷维, 张俐俐, 马凤鸣. 不同氮素水平对甜菜硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18** (3): 717-723 [Du YC, Wang YB, Fan WT, Gai ZJ, Yu DS, Gu S, Zhang LL, Ma FM. Effect of nitrogen fertilization on nitrate reductase and nitrite reductase activities of sugar beet [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2012, **18** (3): 717-723]
- 14 许楠, 倪红伟, 钟海秀, 沙威, 伍一宁, 邢军会, 孙广玉. 不同供氮水平对饲料桑树幼苗生长以及光合特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, **31** (4): 865-870 [Xu N, Ni HW, Zhong HX, Sha W, Wu YN, Xing JH, Sun GY. Growth and photosynthetic characteristics of forage mulberry in response to different nitrogen application levels [J]. *J Jiansu Agric Sci*, 2015, **31** (4): 865-870]
- 15 Brian F, Helena L. The nutritional control of root development [J]. *Plant Soil Plant Soil*, 2001, **232** (1): 51-68
- 16 郝龙飞, 刘婷岩, 张连飞, 贾斌英, 李宁, 李开隆. 氮素指数施肥对白桦播种苗养分承载和光合作用的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, **36** (6): 17-23 [Hao LF, Liu TY, Zhang LF, Jia BY, Li N, Li KL. Effects of N exponential fertilization on nutrient loading and photosynthesis of *Betula platyphylla* seedlings [J]. *J Beijing For Univ*, 2014, **36** (6): 17-23]
- 17 井大炜. 配施鸡粪有机肥对杨树苗光合特性和养分吸收的影响[J]. 水土保持通报, 2013, **33** (5): 19-23 [Jing DW. Effect of chicken manure co-applied with inorganic fertilizer on photosynthesis characteristics and nutrient uptake in poplar seedlings [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2013, **33** (5): 19-23]
- 18 李天芳, 姜静, 王雷, 祝泽兵, 穆怀志, 杨传平, 刘桂丰. 配方施肥对白桦不同家系苗期生长的影响[J]. 林业科学, 2009, **45** (2): 60-64 [Li TF, Jiang J, Wang L, Zhu ZB, Mu HZ, Yang CP, Liu GF. Effects of prescription fertilization on the seedling growth of different families of *Betula platyphylla* [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (2): 60-64]
- 19 冯瑜, 张国防, 李左荣. 模拟不同施肥处理对芳樟树高和地径的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, **35** (6): 34-39 [Feng Y, Zhang GF, Li ZR. Effects of simulated different fertilization treatments on tree height and base diameter of *Cinnamomum camphora* var. *linaloolifera* Fujita [J]. *J Central South Univ For Technol*, 2015, **35** (6): 34-39]
- 20 白尚斌, 王懿祥, 左显东, 饶龙兵. 北美红杉幼苗对不同供N水平的生长反应[J]. 林业科学研究, 2005, **18**: 561-566 [Bai SB, Wang YX, Zuo XD, Rao LB. Growth response of *Sequoia sempervirens* seedlings to N nutrients [J]. *For Res*, 2005, **18**: 561-566]
- 21 Hu Y, Wang B, Hu TX, Chen H, Li H, Zhang W, Zhong Y, Hu HL. Combined action of an antioxidant defence system and osmolytes on drought tolerance and post-drought recovery of *Phoebe zhennan* S. Lee saplings [J]. *Acta Physiol Plant*, 2015, **37**: 84
- 22 Xie JL, Qi JQ, Huang XY, Zhou N, Hu Y. Comparative analysis of modern and ancient bured *Phoebe zhennan* wood: surface color, chemical components, infrared spectroscopy, and essential oil composition [J]. *J For Res*, 2015, **26** (2): 501-507
- 23 张群英. 密度和施肥对楠木播种苗生长的影响[J]. 福建林业科技, 2011, **38** (2): 81-83 [Zhang QY. Effects of density and fertilization on *Phoebe bournei* seedling growth [J]. *J Fujian For Sci Tech*, 2011, **38** (2): 81-83]
- 24 贺维, 张炜, 胡庭兴, 陈洪, 王茜, 罗杰. 施肥对1年生桢楠幼苗生长及主要土壤肥力指标的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21** (1): 129-138 [He W, Zhang W, Hu TX, Chen H, Wang Q, Luo J. Effects of fertilization on growth of 1-year-old *Phoebe zhennan* S. Lee and soil fertility [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (1): 129-138]
- 25 沈国舫. 森林培育[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001 [Shen GF. *Silviculture* [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2001]
- 26 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科技技术出版社, 2003 [Xiong QE. *Plant Physiology Experiment* [M]. Chengdu: Sichuan Technology Press, 2003]
- 27 叶子飘. 光合作用对光和CO₂响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (6): 727-740 [Ye ZP. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂ [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (6): 727-740]
- 28 张蕊, 王艺, 金国庆, 周志春, 陈爱明, 储德裕. 氮沉降模拟对不同种源木荷幼苗叶片生理及光合特性的影响[J]. 林业科学研究, 2013, **26** (2): 207-213 [Zhang R, Wang Y, Jin GQ, Zhou ZC, Chen AM, Chu DY. The effects of nitrogen deposition on leaf physiological and photosynthetic characters of *Schima superba* seedlings from three

- provenances [J]. *For Res*, 2013, **26** (2): 207-213]
- 29 Chapin FS, Maston PA, Mooney HA. 陆地生态系统生态学原理[M]. 李博, 赵斌, 彭容豪等译. 北京: 高等教育出版社, 2005 [Chapin FS, Maston PA, Mooney HA. Ecology Principle of Terrestrial Ecosystem [M]. Li B, Zhao B, Peng QH *et al.* translated. Beijing: Higher Education Press, 2005]
 - 30 Flückiger W, Braun S. Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leaf nutrient status, parasite attacks and soil acidification [J]. *Environ Pollut*, 1998, **102** (98): 69-76
 - 31 Wilson EJ, Skeffington RA. The effects of excess nitrogen deposition on young *Norway spruce* trees. Part I the soil [J]. *Environ Pollut*, 1994, **86** (2): 141-51
 - 32 Seith B, George E, Marschner H, Wallenda T, Schaeffer C, Einig W, Wingler A, Hampf R. Effects of varied soil nitrogen supply on Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) [J]. *Plant Soil*, 1996, **186** (2): 361-369
 - 33 Sogn TA, Abrahamsen G. Effects of N and S deposition on leaching from an acid forest soil and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) after 5 years of treatment [J]. *For Ecol Manage*, 1998, **103** (2): 177-190
 - 34 Baldi E, Toselli M, Eissenstat DM, Marangoni B, Millard P. Organic fertilization leads to increased peach root production and lifespan [J]. *Tree Physiol*, 2010, **30** (11): 1373-1382
 - 35 Elvir JA, Wiersma GB, Day ME, Greenwood MS, Fernandez IJ. Effects of enhanced nitrogen deposition on foliar chemistry and physiological processes of forest trees at the Bear Brook Watershed in Maine [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **221**: 207-214
 - 36 Furbank RT, Foyer CH, Walker DA. Regulation of photosynthesis in isolated spinach chloroplasts during orthophosphate limitation [J]. *Biochim Biophys Acta*, 1987, **894** (3): 552-561
 - 37 Farquhar GD, Caemmerer SV, Berry JA. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species [J]. *Planta*, 1980, **149** (1): 78-90
 - 38 Shangguan ZP, Shao MA, Dyckmans J. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat [J]. *Environ Exp Bot*, 2000, **44** (2): 141-149
 - 39 Loustau D, Brahim MB, Gaudillère JP, Dreyer E. Photosynthetic responses to phosphorus nutrition in two-year-old maritime pine seedlings [J]. *Tree Physiol*, 1999, **19** (11): 707-715
 - 40 徐伟洲, 徐炳成, 段东平, 牛富荣. 不同水肥条件下白羊草光合生理生态特征研究 II. 光响应曲线[J]. 草地学报, 2010, **18** (6): 773-779 [Xu WZ, Xu BC, Duan DP, Niu FR. Study on the photosynthetic characteristics of *Bothriochloa ischaemum* under different water and nutrient conditions II. Light-response curve [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2010, **18** (6): 773-779]
 - 41 Olsson T, Leverenz JW. Non-uniform stomatal closure and the apparent convexity of the photosynthetic photon flux density response curve [J]. *Plant Cell Environ*, 2006, **17** (6): 701-710
 - 42 Wu FZ, Bao WK, Li FL, Wu N. Effects of water stress and nitrogen supply on leaf gas exchange and fluorescence parameters of *Sophora davidii* seedlings [J]. *Photosynthetica*, 2008, **46** (1): 40-48
 - 43 Richardson AD, Berlyn GP. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield, Vermont, USA [J]. *Am J Bot*, 2002, **89**: 88-94
 - 44 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 [Jiao JY, Yin CY, Chen K. Effects of soil water and nitrogen supply on the photosynthetic characteristics of *Jatropha curcas* seedlings [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35** (1): 91-99]
 - 45 接玉玲, 杨洪强, 崔明刚, 罗新书. 土壤含水量与苹果叶片水分利用效率的关系[J]. 应用生态学报, 2001, **12** (3): 387-390 [Jie YL, Yang HQ, Cui MG, Luo XS. Relationship between soil water content and water use efficiency of apple leaves [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **12** (3): 387-390]
 - 46 贺维, 胡庭兴, 王锐, 钟宇, 周贤, 敬辽. 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 [He W, Hu TX, Wang R, Zhong Y, Zhou X, Jing L. Effect of fertilization on photosynthetic physiology and growth characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2014, **34** (6): 1187-1197]
 - 47 梁伟, 张纪伍, 顾建宁. 垃圾堆肥在花卉栽培中的应用研究[J]. 应用与环境生物学报, 1995, **1** (4): 387-397 [Liang W, Zhang JW, Gu JN. Effect of refuse compost on the growth of potted flowers [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 1995, **1** (4): 387-397]
 - 48 Gracian C, Goya JF, Frangi JL, Guamet JJ. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis* [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **236**: 202-210
 - 49 倪中应, 叶永青, 徐立军, 谢国雄, 许杰. 畜禽粪便中钾的有效性及其在土壤中的释放特点[J]. 农学学报, 2016, **6** (1): 88-91 [Ni ZY, Ye YQ, Xie GX, Xu J. Chemical forms and release characteristics of potassium in livestock and poultry manure [J]. *J Agric*, 2016, **6** (1): 88-91]