

## N、P 配施对直干桉苗木生长和光合生理的影响

王晓丽<sup>1</sup>, 吴 波<sup>1</sup>, 杨 杰<sup>2</sup>, 邹广权<sup>1</sup>, 曹现富<sup>1</sup>, 李 艳<sup>1</sup>, 曹子林<sup>3\*</sup>

(1. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224; 2. 广西国有大桂山林场, 广西 贺州 542800;

3. 西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224)

**摘 要:**为指导直干桉壮苗培育中的养分管理调控,以 810 株 5 个月生直干桉实生苗为试验材料,采用 N、P 两因素三水平  $3 \times 3$  回归正交设计开展施肥试验,探究施肥对苗木生长和生物量累积的影响及其光合生理基础,筛选利于壮苗培育的最佳施肥量。结果表明,利于苗高和地径生长及生物量累积的优水平试验组合为处理组合 5(N 肥  $0.55 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $0.6 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  配施)。苗高和地径均随 N 肥施用量的增加,呈先增大后减小的趋势,随 P 肥施用量的增加,呈增大的趋势;苗木生长的理论最佳施肥量为 N 肥  $0.45 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $1.2 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  配施。施肥可促进苗木净光合速率和蒸腾速率的提高,同时可降低其胞间  $\text{CO}_2$  浓度;处理组合 5 的苗木净光合速率和蒸腾速率皆最大,且胞间  $\text{CO}_2$  浓度最小。综合考虑利于苗木生长和生物量累积以及光合能力增强的试验优水平组合与苗木生长随 N、P 施肥量的变化趋势,推荐理论最佳施肥量为直干桉壮苗培育的 N、P 配施用量。

**关键词:**直干桉;氮磷配施;肥料效应;生长效应;光合特性

**中图分类号:**S792.39

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2021)05-0057-06

## Effects of the Formulated Application of Nitrogen and Phosphorus on the Growth and Photosynthetic Physiology of *Eucalyptus maidenii* Seedlings

WANG Xiao-li<sup>1</sup>, WU Bo<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>2</sup>, ZOU Guang-quan<sup>1</sup>, CAO Xian-fu<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, CAO Zi-lin<sup>3\*</sup>

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. State-owned Daguishan Forest Farm, Hezhou 542800, Guangxi, China;

3. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** In order to guide the nutritional management and regulation during culturing the seedlings, 810 seedlings of 5-month-old *Eucalyptus maidenii* were used as materials to conduct a regression orthogonal design experiment with two factors (nitrogen and phosphorus) and three levels to examine the influences of fertilizer application on the growth and biomass accumulation, as well as photosynthetic physiology of the seedlings. The results showed that the optimal treatment for the growth of seedling height and ground diameter was formula No. 5 (N fertilizer  $0.55 \text{ g} \cdot \text{seedling}^{-1}$  and P fertilizer  $0.6 \text{ g} \cdot \text{seedling}^{-1}$ ). With the increase of applying N fertilizer, both the growth of seedling height and ground diameter first increased and then decreased with the increase of the application of nitrogen fertilizer. The growth of seedling height and ground diameter increased with the increase of the application of phosphorus fertilizer. The theoretical optimal amounts the formulated application of nitrogen and phosphorus were N fertilizer  $0.45 \text{ g} \cdot \text{seedling}^{-1}$  and P fertilizer  $1.2 \text{ g} \cdot \text{seedling}^{-1}$ . The combined optimal application of N and P fertilizers could improve the net photosynthetic rate and transpiration rate, and reduce the intercellular  $\text{CO}_2$  concentration. The formula No. 5 presented the highest net photosynthetic rate and transpiration rate and the lowest intercellular

收稿日期:2020-09-07 修回日期:2020-10-30

基金项目:国家重点研发计划课题项目(2016YFD0600501)。

作者简介:王晓丽,博士,副教授。研究方向:森林培育。E-mail:1144607944@qq.com

\* 通信作者:曹子林,博士,副教授。研究方向:森林培育和林木生理生态。E-mail:fjcaozilin@qq.com

CO<sub>2</sub> concentration among the nine formulas tested. In summary, the optimal theoretical amount mentioned above was recommended.

**Key words:** *Eucalyptus maidenii*; formulated nitrogen and phosphorus application; fertilizer effect; growth effect; photosynthetic characteristics

直干桉(*Eucalyptus maidenii*)生长迅速,经营周期短,是桉树中少有的油、材兼用树种,经济价值显著<sup>[1-3]</sup>,在云南省较早引种栽植和分布<sup>[3]</sup>。人工林定向培育中,无论是培育超短轮伐期的工业用材林,还是培育油用经济林,健壮的苗木皆是提高其造林成活率和造林后林木生长量的基础和关键,而水肥管理是培育健壮苗木的重要技术要素<sup>[4]</sup>。

N、P 是植物生长所必需的大量营养元素,且叶片中 N、P 含量直接影响叶绿素水平进而影响植物光合能力<sup>[5]</sup>,缺乏会制约植物的生长和生物产量。我国苗木培育中多采用自然土壤为基质,针对我国大部分地区土壤缺 P 少 N 的情况<sup>[6-8]</sup>,以往很多学者就桉树苗木培育中的施肥调控开展了大量研究。林国祚<sup>[9]</sup>在尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)苗木培育中提出,高浓度 N 和低浓度 P 利于苗高生长,低浓度 N 和低浓度 P 利于地径生长;叶片净光合速率随 N 水平的提高而增加,且随 P、K 水平的提高呈先增加后减小的趋势。高秀芬等<sup>[10]</sup>认为桉树苗木的苗高和地径随 N、P 施用水平的提高而增加,且施肥可以促进光合产物向茎部转移。陆梅等<sup>[11]</sup>在分析桉树专用肥对邓恩桉(*E. dunnii*)光合特性的影响时,发现施肥后邓恩桉幼林的叶面积指数和净光合速率均有显著提高。胡厚臻<sup>[12]</sup>认为 N 肥主要影响巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)的苗高和地径生长,P 肥主要影响苗木的生物量积累及其分配。

目前,直干桉苗木培育中的施肥调控研究尚未见报道。本研究采用两因素三水平 3×3 回归正交设计,通过随机排列结合拉丁方排列的田间布设,探讨 N、P 配施对直干桉苗木生长和光合生理的影响,为直干桉壮苗培育最佳施肥量的确定提供理论依据和技术指导,为云南直干桉产业的发展提供技术支撑和优质造林材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

以 810 株生长 5 个月的直干桉实生苗为试验材料。在西南林业大学苗圃中,于 2018 年 3 月利用容器(直径和高均为 20 cm)进行播种育苗,种子来自于云南昆明;每个容器装填 2 kg 的山地红壤(土壤中全 N 为 1.22 g · kg<sup>-1</sup>,全 P 为 0.10 g · kg<sup>-1</sup>,速

效 N 为 46.93 mg · kg<sup>-1</sup>,速效 P 为 4.36 mg · kg<sup>-1</sup>),而后利用 0.1%高锰酸钾溶液对土壤进行消毒;种子在播种前用始温 45℃的水浸种 24 h,然后用 0.1%高锰酸钾溶液消毒 30 min,再用蒸馏水冲洗 2~3 次<sup>[13]</sup>;播种时每个容器均匀点播 10 粒;待苗高 5 cm 时定植,每个容器定植 5 株。于 2018 年 8 月开展施肥试验。施肥前后所有苗木的水分管理一致。

### 1.2 研究方法

1.2.1 苗木施肥 试验采用 N、P 两因素三水平 3×3 回归正交设计<sup>[14]</sup>,N 和 P 分别设置 3 个浓度水平(N 肥:0、0.55 g · 株<sup>-1</sup>和 1.1 g · 株<sup>-1</sup>;P 肥:0、0.6 g · 株<sup>-1</sup>和 1.2 g · 株<sup>-1</sup>),施肥水平及试验方案分别见表 1、表 2。肥料施用尿素和过磷酸钙,尿素含氮量 46%,过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)含磷量 12%。试验设置 3 个重复(区组),每个重复 9 个处理组合,每个重复的每个处理组合 30 株苗木。试验采用随机排列和拉丁方排列相结合的方法进行田间布设<sup>[14]</sup>(表 3),相同的处理组合为 1 个小区,每个区组 9 个小区,3 个区组共计 27 个小区,这 27 个小区可以重组成 17 个不同的区组。于 2018 年 8 月,当苗龄 5 个月时,依据施肥试验方案对每个处理组合的苗木进行叶面喷施 N 肥和 P 肥。苗木施肥后按常规方式进行统一管理。

表 1 施肥试验水平及其编码值

Table 1 Levels and coding values of the experiment

(克 · 株 <sup>-1</sup> )					
N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
0	0.55	1.1	0	0.6	1.2
-1	0	1	-1	0	1

表 2 施肥试验方案

Table 2 Scheme of the experiment

处理组合	N	P	N <sup>2</sup>	P <sup>2</sup>	N×P
1(N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> )	-1(0)	-1(0)	1	1	1
2(N <sub>0</sub> P <sub>1</sub> )	-1(0)	0(0.6)	1	0	0
3(N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> )	-1(0)	1(1.2)	1	1	-1
4(N <sub>1</sub> P <sub>0</sub> )	0(0.55)	-1(0)	0	1	0
5(N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> )	0(0.55)	0(0.6)	0	0	0
6(N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> )	0(0.55)	1(1.2)	0	1	0
7(N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> )	1(1.1)	-1(0)	1	1	-1
8(N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> )	1(1.1)	0(0.6)	1	0	0
9(N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> )	1(1.1)	1(1.2)	1	1	1

注:括号中数据表示具体处理水平。

1.2.2 苗木生长形态指标和生物量测定 2018 年 8 月,当苗龄 5 个月时,于施肥前,对每个处理组合每个重复的 30 株苗木分别进行挂牌编号,而后分别测定其苗高(用直尺测量从苗木基部至最高处的距离)和地径(用游标卡尺测量苗木土痕处的直径)<sup>[15-17]</sup>,进行苗木生长的本底调查。

表 3 施肥试验田间布设

Table 3 Field arrangement of the experiment

重复	田间排布								
区组 I	1	2	3	4	5	6	7	8	9
区组 II	4	5	6	7	8	9	1	2	3
区组 III	7	8	9	1	2	3	4	5	6

施肥 2 个月后,对所有参试苗木的苗高和地径进行测量,计算其增幅,以苗高和地径增幅作为肥料效应分析的产量指标,增幅(%)的计算方法为:100×(最终产量指标-原始产量指标)/原始产量。待苗高和地径测定完成后,每个处理组合的每个重复随机选取 3 株苗木,将每株苗木都严格按照取样标准从其微环境中完整取出,用蒸馏水小心冲洗掉根系上的基质,保持根系完整,将苗木的根、茎、叶分开,105℃杀青 30 min 后,于 80℃下烘干至恒重<sup>[18]</sup>,分别称量其干重,得到苗木各器官生物量及总生物量。

1.2.3 苗木光合生理指标的测定 施肥 2 个月后,每个处理组合的每个重复随机取 3 株苗木,每株苗木选取上、中、下 3 个不同测定部位的叶片,每株苗木每个测定部位的叶片分别用光合仪(Li-6800 便携式光合测定仪)测定 3 次,取其平均值。测定时,选取天气晴朗的时间且利用红蓝光源进行补光。获取苗木的光响应曲线,得到其净光合速率(A)、蒸腾速率(E)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>i</sub>)等光合生理参数<sup>[9,11,19]</sup>。

1.2.4 数据分析 通过 Excel 2007 进行数据整理,利用 SPSS17.0 软件分别对施肥调控下直干桉苗木的生长和光合生理指标进行回归分析和方差分析,采用 SAS 9.4 软件进行曲面图绘制<sup>[14]</sup>。

2 结果与分析

2.1 N、P 配施对直干桉苗木生长的影响

试验的 9 个处理组合中,苗高、地径增幅均随施肥量的增加呈先增大后减小的趋势(表 4),处理组合 6(N 肥 0.55 g·株<sup>-1</sup>、P 肥 1.2 g·株<sup>-1</sup> 配合施用)的苗高增幅(32.19%)和地径增幅(46.36%)皆最大,处理组合 5(N 肥 0.55 g·株<sup>-1</sup>、P 肥 0.6 g·株<sup>-1</sup> 配合施用)的苗高增幅(30.79%)和地径增幅(38.68%)均位列第二,处理组合 7(N 肥 1.10 g·株<sup>-1</sup>、P 肥 0 g·株<sup>-1</sup> 配合施用)的苗高增幅(26.00%)和地径增幅(29.56%)均最小,说明适量

的肥料有利于苗高和地径生长量的积累。试验中,处理组合 6(N 肥 0.55 g·株<sup>-1</sup>、P 肥 1.2 g·株<sup>-1</sup> 配合施用)和处理组合 5(N 肥 0.55 g·株<sup>-1</sup>、P 肥 0.6 g·株<sup>-1</sup> 配合施用)皆为直干桉苗高和地径生长的优水平施肥量。

表 4 不同 N、P 配施处理组合的直干桉苗高、地径增幅

Table 4 The increments of the seedling height and ground diameter of *E. maideni* with the experimental treatments

处理	N	P	苗高增幅/%	地径增幅/%
1	0	0	26.24±3.07	32.24±5.23
2	0	0.6	27.08±1.99	36.28±1.86
3	0	1.2	28.23±1.30	33.33±1.69
4	0.55	0	28.86±3.28	34.68±4.36
5	0.55	0.6	30.79±3.71	38.68±1.22
6	0.55	1.2	32.19±1.64	46.36±3.74
7	1.10	0	26.00±2.83	29.56±1.69
8	1.10	0.6	29.41±3.05	36.32±3.41
9	1.10	1.2	27.13±1.13	36.01±2.85

分别对苗高、地径的增幅与 N、P 配施量做回归分析,2 个产量指标(苗高和地径的增幅)各得到 17 个肥料效应方程。通过比较这 17 个肥效方程的显著水平、是否典型以及是否在实际试验范围内,从而选出一个拟合度和显著水平较高的方程作为该产量指标的肥料效应方程(表 5),以此分析 N、P 配施对直干桉苗木的生长效应。从肥料效应方程来看,N、P 配施对直干桉苗高、地径生长皆具促进作用(表 5)。

根据苗高、地径增幅肥料效应方程(表 5),通过降维法,令其中 1 个肥料因子为 0,每个产量指标可获得 2 个一元肥料效应方程(表 6),然后对此肥料因子单独进行效应分析。结果表明:N 肥对苗高增幅的促进作用要好于 P 肥,P 肥对地径增幅的促进要好于 N 肥;单施 N 肥的苗高增幅最高量为 28.98%,单施 P 肥的苗高增幅最高量为 23.23%;单施 N 肥的地径增幅最高量为 29.34%,单施 P 肥的地径增幅最高量为 43.33%(表 6),因此,单施 N 肥和单施 P 肥对地径生长的促进作用大于其对苗高生长的促进作用。

肥料效应方程和肥料效应曲面(表 7,图 1)结果表明:直干桉苗木的生长量(苗高增幅和地径增幅)随着 N 肥施用量的增加,呈先增大后减小的趋势,随着 P 肥施用量的增加,呈增大的趋势;曲面的顶点所对应的 N、P 施肥量就是苗高、地径生长的最佳施肥量和最优施肥配比;苗高增幅的最佳配合施肥量为 N 肥 0.49 g·株<sup>-1</sup>、P 肥 1.2 g·株<sup>-1</sup>,最佳 N、P 配比为 1:2.45,最高理论产量为 34.94%;地径增幅的最佳配合施肥量为 N 肥 0.45 g·株<sup>-1</sup>、P 肥

1.2 g · 株<sup>-1</sup>,最佳 N、P 肥配比为 1 : 2. 67,最高理论产量为 47. 98%。从 2 个产量指标(苗高增幅和

地径增幅)的最高理论产量来看,N、P 配施的促进效果皆好于单施 N 肥及单施 P 肥(表 6,表 7)。

表 5 直干桉苗高、地径增幅 N、P 配施肥效方程

Table 5 Equations of fertilization effect of combining application of nitrogen and phosphorus on the increments of the seedling height and ground diameter of *E. maideni*

产量指标 Y	方程	F	P
苗高增幅	$Y=26.243+10.862N+1.141P-11.082N^2+3.062P^2+0.430NP$	12.470	0.000
地径增幅	$Y=32.236+11.298N+4.237P-12.479N^2+4.063P^2+4.172NP$	4.350	0.000

注:N 和 P 分别为试验中纯 N 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的用量。

表 6 直干桉苗高、地径增幅单因素肥料效应方程

Table 6 Equations of fertilization effect of single application of nitrogen and phosphorus on the increments of the seedling height and ground diameter of *E. maideni*

产量指标 Y	方程	最高产量	方程	最高产量
苗高增幅	$Y=26.243+10.862N-11.082N^2$	28.98	$Y=26.243+1.141P+0.430P^2$	23.23
地径增幅	$Y=32.236+11.298N-12.479N^2$	29.34	$Y=32.236+4.237P+4.063P^2$	43.33

表 7 直干桉苗高、地径增幅的 N、P 配施交互效应分析

Table 7 Interaction effect analysis of combining application of nitrogen and phosphorus on the increments of the seedling height and ground diameter of *E. maideni*

产量指标	最佳施肥量/g		最佳配比 N : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	最高理论 产量/%
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
苗高增幅(%)	0.49	1.2	1 : 2.45	34.94
地径增幅(%)	0.45	1.2	1 : 2.67	47.98

2.2 N、P 配施对直干桉苗木生物量的影响

N、P 配施对直干桉苗木各器官生物量的影响结果见表 8。直干桉苗木茎生物量和根生物量分别在试验的 9 个处理组间存在极显著差异(P = 0.005)和显著差异(P = 0.019),叶生物量则无显著差异(P = 0.509)。处理组合 9 的茎生物量最大,处理组合 9、6 和 5 的茎生物量皆极显著大于处理组合 1、3 和 4,处理组合 8、2 和 7 为过渡组;处理组合 9

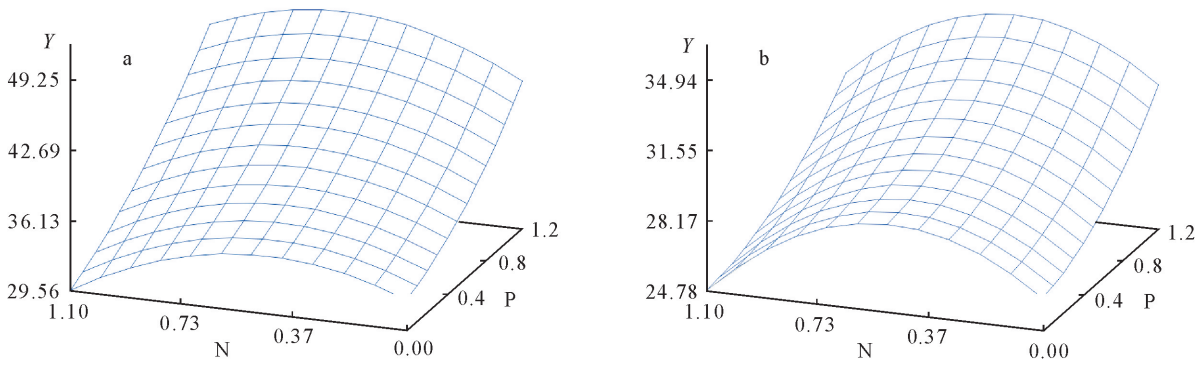


图 1 直干桉苗高、地径增幅对 N、P 配施的响应曲面(a:苗高增幅、b:地径增幅)

Fig. 1 Response surface plot of fertilization effect of the combined application of nitrogen and phosphorus on the increments of the seedling height and ground diameter of *E. maideni* (a;Seedling height increment,b;Ground diameter increment)

的根生物量最大,处理组合 9 和 5 的根生物量皆显著大于处理组合 1、8、4 和 3,处理组合 6、7 和 2 为过渡组;处理组合 9 的叶生物量最大。处理组合 9 的根生物量和叶生物量的变异系数均最小,茎生物量的变异系数较小;处理组合 5 的根生物量、茎生物量和叶生物量的变异系数均较小。综上,认为利于直干桉苗木根、茎、叶生物量累积的 N、P 配施试验处理为处理组合 9(N 肥 1.10 g · 株<sup>-1</sup>、P 肥 1.2 g · 株<sup>-1</sup>)和处理组合 5(N 肥 0.55 g · 株<sup>-1</sup>、P 肥 0.6 g · 株<sup>-1</sup>)。

N、P 配施对直干桉苗木生物量影响的试验因

素及水平分析结果见表 9。直干桉苗木的根生物量在 3 个因素 A(P = 0.012)、B(P = 0.044)和 A × B(P = 0.037)的水平间皆存在显著差异;因素 A 和 B 中,X<sub>2</sub> 均显著 > X<sub>1</sub>,且 X<sub>3</sub> 均为过渡组,因此理论优水平组合为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>;由极差值分析,可知因素间的主次关系为 A × B(R = 0.945) > A(R = 0.851) > B(R = 0.729)。苗木的茎生物量在因素 A(P = 0.025)和 B(P = 0.007)的水平间分别存在显著差异和极显著差异,交互因素 A × B(P = 0.083)的水平间无显著差异;因素 A 中,X<sub>2</sub> 显著 > X<sub>1</sub>,且 X<sub>3</sub> 为过渡组,因素 B 中,X<sub>2</sub> 极显著 > X<sub>1</sub>,且 X<sub>3</sub> 为过



过渡组,因此理论优水平组合为  $A_2B_2$ ;由极差值分析,可知因素间的主次关系为  $B(R=0.987)>A(R=0.930)>A\times B(R=0.884)$ 。苗木的叶生物量在因素  $A(P=0.177)$ 、 $B(P=0.952)$  和  $A\times B(P=0.541)$  的水平间均无显著差异,描述分析认为理论优水平组合为  $A_3B_2$ ;由极差值分析,可知因素间的主次关系为  $A(R=0.367)>A\times B(R=0.261)>B(R=0.093)$ 。综上,认为利于直干桉苗木根、茎、叶生物量累积的 N、P 配施的理论优水平组合为  $A_2B_2$  (N 肥  $0.55\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、P 肥  $0.6\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$  配合施用)。

表 8 N、P 配施对直干桉苗木不同器官生物量的影响

Table 8 Effects of combined application of N and P on the biomass of different organs of *E. maideni* seedling

处理	干重/(g·株 <sup>-1</sup> )								
	根均值±标准差	变异系数/%	P	茎均值±标准差	变异系数/%	P	叶均值±标准差	变异系数/%	P
1	0.719±0.376 <sup>b</sup>	52.33	0.019	1.044±0.475 <sup>B</sup>	45.52	0.005	0.203±1.579	57.88	0.509
2	0.892±0.433 <sup>ab</sup>	48.57		1.323±0.599 <sup>AB</sup>	45.32		0.309±1.518	42.99	
3	0.618±0.638 <sup>b</sup>	103.14		0.965±1.067 <sup>B</sup>	110.60		0.105±1.789	86.72	
4	0.689±0.866 <sup>b</sup>	125.68		0.796±0.405 <sup>B</sup>	50.85		0.093±2.685	96.80	
5	1.467±0.837 <sup>a</sup>	57.07		2.055±1.135 <sup>A</sup>	55.25		0.556±1.931	38.43	
6	1.102±0.585 <sup>ab</sup>	53.12		2.177±1.242 <sup>A</sup>	57.04		0.103±2.593	88.06	
7	1.059±0.893 <sup>ab</sup>	84.34		1.286±0.975 <sup>AB</sup>	75.85		0.403±2.744	69.14	
8	0.711±0.603 <sup>b</sup>	84.83		1.610±1.280 <sup>AB</sup>	79.49		0.156±2.638	100.00	
9	1.658±0.798 <sup>a</sup>	48.16		2.551±1.356 <sup>A</sup>	53.16		0.720±2.013	36.58	

注:小写字母表示 0.05 水平上的差异显著性;大写字母表示 0.01 水平上的差异显著性。下同。

表 9 N、P 配施对直干桉苗木生物量影响的试验因素及水平分析

Table 9 The analysis of experimental factors and levels for the effects of combined application of N and P on the biomass of *E. maideni* seedling

类目	因素								
	A(N)	B(P)	A×B(N×P)	A(N)	B(P)	A×B(N×P)	A(N)	B(P)	A×B(N×P)
生物量	根			茎			叶		
X1	0.743b	0.816b	1.237ab	1.111b	1.031B	1.475	0.857	1.022	0.965
X2	1.594a	1.545a	0.651b	2.041a	2.018A	1.294	1.052	1.101	0.952
X3	1.147ab	1.124ab	1.596a	1.795ab	1.898AB	2.178	1.222	1.008	1.213
P 值	0.012	0.044	0.037	0.025	0.007	0.083	0.177	0.952	0.541
R(极差)	0.851	0.729	0.945	0.930	0.987	0.884	0.367	0.093	0.261
优水平	A2	B2		A2	B2		A3	B2	
主次关系	A×B>A>B			B>A>A×B			A>A×B>B		
优水平组合	$A_2B_2$			$A_2B_2$			$A_3B_2$		

2.3 N、P 配施对直干桉苗木光合特性的影响

研究结果(表 10)表明,直干桉苗木的净光合速率( $P=0.035$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $P=0.041$ )和蒸腾速率( $P=0.018$ )皆在 N、P 配施试验的 9 个处理组合间存在显著差异。与对照相比,施肥(无论单施 N 肥,单施 P 肥,还是 N、P 配施)可促进直干桉苗木净光合速率和蒸腾速率的提高,同时可降低其胞间  $\text{CO}_2$  浓度;处理组合 5 的净光合速率显著大于处理组合 8、9、4、3、2 和 1,且处理组合 6 和 7 为过渡组,同时处理组合 1 的净光合速率显著小于处理组合 5、7、6、8、9 和 4,且处理组合 3 和 2 为过渡组;处理组合 5 的蒸腾速率显著大于其余 8 个处理组合,同时处理组合 1 和 2 的蒸腾速率显著小于处理组合 5、7、9、6 和 8,且处理组合 4 和 3 为过渡组;处理组合 1、2 和 3 的胞间  $\text{CO}_2$  浓度显著大于处理组合 6、7

表 10 N、P 配施对直干桉苗木光合特性的影响

Table 10 Effects of combined application of N and P on photosynthetic characteristics of *E. maideni* seedling

处理	净光合速率 /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 /( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	蒸腾速率 /( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	1.56 <sup>c</sup>	339.73 <sup>a</sup>	0.00026 <sup>c</sup>
2	1.73 <sup>bc</sup>	329.69 <sup>a</sup>	0.00040 <sup>c</sup>
3	1.92 <sup>bc</sup>	325.15 <sup>a</sup>	0.00065 <sup>bc</sup>
4	2.16 <sup>b</sup>	316.33 <sup>ab</sup>	0.00068 <sup>bc</sup>
5	3.11 <sup>a</sup>	277.36 <sup>b</sup>	0.00170 <sup>a</sup>
6	2.66 <sup>ab</sup>	298.52 <sup>b</sup>	0.00082 <sup>b</sup>
7	2.88 <sup>ab</sup>	287.31 <sup>b</sup>	0.00091 <sup>b</sup>
8	2.22 <sup>b</sup>	315.35 <sup>ab</sup>	0.00079 <sup>b</sup>
9	2.20 <sup>b</sup>	303.16 <sup>ab</sup>	0.00084 <sup>b</sup>
P 值	0.035	0.041	0.018

和 5,且处理组合 4、8 和 9 为过渡组。由此,N、P 配施对直干桉苗木光合特性的影响已明晰,即适合的养分条件,会使胞间  $\text{CO}_2$  浓度降低,蒸腾速率和净光合速率提高;处理组合 5(N 肥  $0.55 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $0.6 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ )的苗木净光合速率和蒸腾速率皆最大,且胞间  $\text{CO}_2$  浓度最小,从光合生理角度来说,处理组合 5 为 N、P 配施试验的优处理。

### 3 结论与讨论

胡厚臻<sup>[12]</sup>对巨尾桉苗木的施肥调控研究认为,N 主要影响巨尾桉的苗高和地径生长,P 主要影响苗木的生物量积累及其分配。这与本研究的单因素肥效方程分析结果有所不同,本研究认为 N 对苗高增幅的促进作用要好于 P,P 肥对地径增幅的促进作用要好于 N;N 和 P 对地径生长的促进作用均大于其对苗高生长的促进作用。造成此种差异的原因可能是巨尾桉的苗期生长速度远大于直干桉,N 对地径快速增长的促进作用更加凸显。因此,对于桉属中的不同树种,其壮苗培育中的施肥调控,需根据树种有针对性的开展工作。直干桉 N、P 配施试验中处理组合 6(N 肥  $0.55 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $1.2 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ )和处理组合 5(N 肥  $0.55 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $0.6 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ )皆为苗高和地径生长的优水平施肥量,处理组合 5 为根、茎和叶生物量累积的优水平施肥量。

林国祚<sup>[9]</sup>在尾巨桉苗木培育中提出 N、P 配施有利于苗高和地径生长。本研究发现直干桉苗木的苗高和地径生长均随着 N 施用量的增加,呈先增大后减小的趋势,随着 P 施用量的增加,呈增大的趋势,N、P 配施对苗高、地径生长的促进效果皆好于单施 N 肥及单施 P 肥,因此前人的研究与本研究的两因素肥效方程和肥效曲面分析结果一致。由两因素肥效方程和肥效曲面,可得到利于直干桉苗高和地径生长的理论最佳施肥量分别是 N 肥  $0.49 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $1.2 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  配施和 N 肥  $0.45 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $1.2 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  配施,由于 N 肥和 P 肥对直干桉地径生长的促进作用均大于其对苗高生长的促进作用,且依据苗木质量分级中以地径为主、苗高为辅的原则<sup>[20]</sup>,本研究认为利于直干桉苗木生长的理论最佳施肥量为 N 肥  $0.45 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $1.2 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  配合施用。

陆梅等<sup>[11]</sup>发现施肥后邓恩桉幼林的叶面积指数和净光合速率均有显著的提高,本研究表明施肥可促进直干桉苗木净光合速率和蒸腾速率的提高,同时可降低其胞间  $\text{CO}_2$  浓度,施肥对邓恩桉幼树和直干桉苗木净光合速率的作用效应是一致的,同时

从光合生理角度阐明施肥对桉树苗木生长的促进机理。处理组合 5 的直干桉苗木净光合速率和蒸腾速率皆最大,且胞间  $\text{CO}_2$  浓度最小,从光合生理角度来说,处理组合 5 为 N、P 配施试验的优处理。

综上所述,利于苗木生长和生物量累积以及光合能力增强的试验优水平组合为处理组合 5(N 肥  $0.55 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $0.6 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ),而其理论最佳施肥量为 N 肥  $0.45 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、P 肥  $1.2 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  配施,结合苗木生长随 N、P 施肥量的变化趋势(苗高和地径生长均随 N 肥施用量的增加,呈先增大后减小的趋势,随 P 肥施用量的增加,呈增大的趋势),本研究推荐理论最佳施肥量为指导直干桉壮苗培育的 N、P 配施用量。

### 参考文献:

- [1] 谢耀坚. 中国桉树人工林可持续经营战略初探[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5): 58-61.
- [2] 陈余美, 林彬远. 直干桉引种及培育技术研究[J]. 四川林业科技, 2006, 27(3): 10-14.
- [3] 张荣贵, 李思广, 蒋云东. 云南的桉树引种及其发展状况的剖析[J]. 西部林业科学, 2007, 36(3): 98-102.
- [4] 沈国舫. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [5] RUFTY T W, HUBER S C, VOLK R J. Alterations in leaf carbohydrate metabolism in response to nitrogen stress[J]. Plant Physiology, 1998, 88: 725-730.
- [6] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 1989: 263-308.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 682-688.
- [8] 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本状况[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 280-286.
- [9] LU R K. General status of nutrients (N, P, K) in soils of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(3): 280-286. (in Chinese)
- [10] 林国祚. 水肥调控对桉树苗木生长及生理特性的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [11] 高秀芬. 水肥调控对桉树苗木生长及生理特性的影响[J]. 中国园艺文摘, 2014, 2: 144-145.
- [12] 陆梅, 李宝福, 俞元春. 桉树施用腐植酸专用肥的营养效应及肥效的持续性分析[J]. 武夷科学, 2007, 23(1): 69-76.
- [13] 胡厚臻. 配方施肥下巨尾桉的生长生理及土壤肥力特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [14] 王晓丽, 曹子林, 朱霞. 旱冬瓜水提液对云南松种子萌发化感效应的生理机理研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5): 2739-2741.
- [15] WANG X L, CAO Z L, ZHU X. Physiological mechanism of *Alnus nepalensis* D. Don. water extract on seed germination of *Pinus yunnanensis* Faranch [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2012, 40(5): 2739-2741. (in Chinese)
- [16] 贺斌. 毛乌素沙地中国沙棘克隆生长对氮磷配施的响应[D]. 成都: 西南林业大学, 2007.

- the ascent of sap[M]. 2nd. Berlin:Springer Verlag, 2002.
- [26] LOEPFE L, MARTINEZ-VILALTA J, PINOL J, *et al.* The relevance of xylem network structure for plant hydraulic efficiency and safety [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2007, 247:788-803.
- [27] JACOBSEN A L, PRATT R B, EWERS F W, *et al.* Cavitation resistance among 26 chaparral species of southern California[J]. *Ecological Monographs*, 2007, 77(1):99-115.
- [28] JACOBSEN A L, PRATT R B. Going with the flow: structural determinants of vascular tissue transport efficiency and safety [J]. *Plant Cell Environment*, 2018, 41:2715-2717.
- [29] MARTINEZ-VILALTA J, MENCUCCINI M, ALVAREZ X, *et al.* Spatial distribution and packing of xylem conduits[J]. *American Journal of Botany*, 2012, 99(7):1189-1196.
- [30] HACKE U G, SPERRY J S, POCKMAN W T, *et al.* Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure[J]. *Oecologia*, 2001, 126:457-461.
- [31] LENS F, SPERRY J S, CHRISTMAN M A, *et al.* Testing hypotheses that link wood anatomy to cavitation resistance and hydraulic conductivity in the genus *acer*[J]. *New Phytologist*, 2011, 190:709-723.
- [32] FICHOT R, BARIGAH T S, CHAMAILLARD S, *et al.* Common trade-offs between xylem resistance to cavitation and other physiological traits do not hold among unrelated *Populus deltoides* × *Populus nigra* hybrids[J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 33(9):1553-1568.
- [33] CARLQUIST S. Vessel grouping in dicotyledonous wood: Significance and relationship to imperforate treachery elements [J]. *Aliso*, 1984, 10:505-525.
- [34] 刘彬, 麻文俊, 王军辉, 等. 基于叶片解剖结构的砂生槐群体抗旱性评价[J]. *植物研究*, 2017, 37(3):325-333.
- LIU B, MA W J, WANG J H, *et al.* Drought-resistance of *Sophora moorcroftiana* from different population from leaf anatomical structure[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2017, 37(3):325-333. (in Chinese)
- [35] CARLQUIST S. Non-random vessel distribution in woods: patterns, modes, diversity, correlations [J]. *Aliso*, 2009, 27:39-58.
- [36] HOLT T, COCHARD H, NIKINMAA E. Capacitive effect of cavitation in xylem conduits: results from a dynamic model [J]. *Plant, Cell Environment*, 2009, 32:10-21.
- [37] SCHOLZ A, RABAEY D, STEIN A, *et al.* The evolution and function of vessel and pit characters with respect to cavitation resistance across 10 *Prunus* species [J]. *Tree Physiology*, 2013, (7):684.
- [38] 张硕新, 申卫军, 张远迎, 等. 几个抗旱树种木质部栓塞脆弱性的研究[J]. *西北林学院学报*, 1997, 12(2):1-6.
- ZHANG S X, SHEN W J, ZHANG Y Y, *et al.* The vulnerability of xylem embolism in twigs of some drought-resistant tree species[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 1997, 12(2):1-6. (in Chinese)
- [39] 安锋, 张硕新. 7 种木本植物根和小枝木质部栓塞的脆弱性[J]. *生态学报*, 2005, 25(8):1928-1933.
- AN F, ZHANG S X. Studies of roots and shoots vulnerability to xylem embolism in seven woody plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8):1928-1933. (in Chinese)

(上接第 62 页)

- [15] 王晓丽, 杨再国, 曹梦涵, 等. 蓝桉及直干桉超级苗初步选择研究[J]. *西南林业大学学报*, 2018, 38, (4):89-93.
- WANG X L, YANG Z G, CAO M H, *et al.* The pilot research on the superior seedlings selection of *Eucalyptus globules* and *Eucalyptus maideni*[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2018, 38, (4):89-93. (in Chinese)
- [16] 及利, 卢艳, 杨雨春, 等. 施肥方式对核桃楸容器苗生长及根系养分累积的影响[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(4):76-83.
- JI L, LU Y, YANG Y C, *et al.* Effects of fertilization methods on the growth and root nutrient accumulation of *Juglans mandshurica* container seedlings[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4):76-83. (in Chinese)
- [17] 侯利涵, 黄孝风, 陈慧晶, 等. 水培条件下毛竹幼苗的氮响应研究[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(6):49-54.
- HOU L H, HANG X F, CHEN H J, *et al.* Growth response of *Phyllostachys edulis* seedlings to different nitrogen concentrations under hydroponic conditions[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(6):49-54. (in Chinese)
- [18] 周丽, 徐杨, 邓丽丽, 等. 云南松不同群体苗木生物量与生长分析[J]. *林业科技开发*, 2015(6):148-153.
- [19] 魏国余, 亢亚超, 廖曦, 等. 配方施肥对红锥幼林生理及叶片养分含量的影响[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(4):32-36.
- WEI G Y, KANG Y C, LIAO X, *et al.* Effects of formula fertilization on the physiology characteristics and leaf nutrition contents of young *Castanopsis hystrix* stands[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4):32-36. (in Chinese)
- [20] 国家质量技术监督局. GB6000-1999 主要造林树种苗木质量分级[S]. 北京:中国标准出版社, 1999.