

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202103052

罗仙英, 莫荣海, 丁贵杰, 等. 不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响 [J]. 广西植物, 2022, 42(4): 608–616.

LUO XY, MO RH, DING GJ, et al. Effects of different fertilization ratios on growth characteristics of *Pinus massoniana* seedlings [J]. *Guihaia*, 2022, 42(4): 608–616.

# 不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响

罗仙英<sup>1</sup>, 莫荣海<sup>1</sup>, 丁贵杰<sup>1,2\*</sup>, 陈 龙<sup>1</sup>

(1. 贵州大学贵州省森林资源与环境研究中心/贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省高原山地林木培育重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 为获得马尾松幼苗最佳施肥配方, 该文以 1 年生马尾松幼苗为试验材料, 采用  $L_{16}(4^3)$  正交设计, 并通过测定幼苗苗高、地径、生物量、叶绿素含量、叶片 N、P、K 含量, 探讨不同 N、P、K 配比施肥对马尾松幼苗生长特征影响。结果表明: (1) 不同配比施肥处理间马尾松幼苗苗高、地径、生物量、质量指数、叶绿素和养分含量存在显著差异, 其中, 处理 12 生物量、质量指数、叶绿素 a 和总叶绿素含量、隶属值最高。(2) 施 N 对幼苗生长及生理指标均有极显著影响; 施 K 对苗高、地径、地上生物量、总生物量有显著影响, 对叶绿素和针叶养分有极显著影响; 施 P 对叶绿素 a、叶绿素 b、针叶 N 和 P 含量有极显著影响, 对苗高、地下生物量、总叶绿素含量有显著影响。(3) 施 N 对苗高、地径、地上生物量、总生物量、质量指数、叶绿素 a 含量、总叶绿素含量和针叶 N 含量的影响最大, K 次之, P 最小。各因素对地下生物量和针叶 P 含量的影响均表现为  $N > P > K$ 。(4)  $N_3$  水平利于幼苗苗高地径的生长及生物量的积累,  $N_4$  水平利于叶绿素 a 和总叶绿素含量及针叶 N、P 含量的积累,  $P_4$  水平利于生物量、叶绿素含量和养分 P 含量的积累。综合分析可知, 马尾松幼苗前期应以施 N 为主, 配施 P 和 K 相辅, 配施  $N_3P_4K_2$  营养液利于提升幼苗综合质量, 即 N、P、K 浓度分别  $8.25$ 、 $1.00$ 、 $1.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

**关键词:** 马尾松, 幼苗, 配比施肥, 生长, 苗木质量

中图分类号: Q945; S72 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2022)04-0608-09

## Effects of different fertilization ratios on growth characteristics of *Pinus massoniana* seedlings

LUO Xianying<sup>1</sup>, MO Ronghai<sup>1</sup>, DING Guijie<sup>1,2\*</sup>, CHEN Long<sup>1</sup>

(1. Institute for Forest Resources and Environment of Guizhou/College of Forest, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Forest Cultivation in Plateau Mountain of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimal fertilization formula for *Pinus massoniana* seedlings, one-year-old seedlings were selected and grown in a  $L_{16}(4^3)$  orthogonal design. Traits, such as seedling height, ground diameter, biomass, leaf chlorophyll contents and N, P, K contents, were measured to explore the effects of different N, P, K fertilization ratios on growth characteristics. The results were as follows: (1) There were significant differences in seedling height, ground diameter, biomass, quality index, chlorophyll and nutrient contents among different fertilization ratios treatments. Among

收稿日期: 2021-08-02

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(2017YFD0600302); 贵州省国家后补助课题(黔科合平台人才[2018]5261) [Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFD0600302); Science and Technology Planning Project of Guizhou Province, China([2018]5261)]。

第一作者: 罗仙英(1995-), 硕士研究生, 研究方向为林木栽培生理生态与分子生物学, (E-mail) 1570880469@qq.com。

\*通信作者: 丁贵杰, 教授, 博士研究生导师, 从事森林培育及人工林稳定性研究, (E-mail) gjdinggz@126.com。

them, treatment 12 had the highest biomass, quality index, chlorophyll a and total chlorophyll contents, and membership value. (2) N application had extremely significant effects on growth and physiology; K application had significant effects on seedling height, ground diameter, above-ground biomass, total biomass, and had extremely significant effects on chlorophyll and needle nutrients; Besides, P application had extremely significant effects on chlorophyll a, chlorophyll b, N and P contents in needles, and had significant effects on seedling height, under-ground biomass and total chlorophyll content. (3) N application had greater effect on seedling height, ground diameter, above-ground biomass, total biomass, quality index, chlorophyll a, total chlorophyll and N contents in needles than K and P applications. The effects on under-ground biomass and P contents of needles were as  $N > P > K$ . (4) N3 level was beneficial to seedling height, diameter and biomass accumulation. N4 level was beneficial to the accumulation of chlorophyll a and total chlorophyll contents, N and P contents in needles, while P4 level was beneficial to biomass accumulation, chlorophyll and P contents accumulation. Comprehensive analysis showed that N should be applied mainly in the early stage of *P. massoniana* seedlings, supplemented by P and K. N3P4K2 nutrient solution can improve the overall quality of seedlings, with N, P and K concentrations as 8.25, 1.00 and 1.50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively.

**Key words:** *Pinus massoniana*, seedling, fertilization ratios, growth, seedling quality

施肥是改善土壤养分并提高苗木质量的重要措施之一,在苗木管理中常选用氮(N)、磷(P)、钾(K)作为施肥源料,常被植物以吸收运输及同化方式将其运用到生理代谢活动中,其含量的高低对苗木质量的好坏有直接影响(杨阳等,2021)。三者合理协调供应有利于植物各器官 N、P、K 含量维持相对平衡状态,在满足生长所需养分的同时促进干物质积累和提升综合质量,达到节本增效、用养结合、增强抗逆性的目的(Schoenbeck et al., 2020; Peng et al., 2020)。近年来,苗木配比施肥的研究已见大量报道,常见于薄壳山核桃(*Carya illinoensis*) (郑小琴等, 2019)、辣木(*Moringa oleifera*) (张敏等, 2019)、紫椴(*Tilia amurensis*) (杨阳等, 2021)、楸树(*Catalpa bungei*) (王祥等, 2021)等树种中。研究表明,根据苗木的需肥特性进行配比施肥研究是提高肥效的关键所在,施肥过多或过少会造成资源浪费或养分不足(张敏等, 2019; 杨阳等, 2021)。在闽楠(*Phoebe bournei*)、灰木莲(*Manglietia glauca*)、薄壳山核桃等配方施肥研究中发现,合理 N、P、K 配施后,苗木通过提高光合色素含量,增强叶片捕光能力,加速光合产物合成,促进苗木苗高地径生长及生物量积累(陈琳等, 2017; 郑小琴等, 2019; Wang et al., 2020)。已有相关研究通过了解薄壳山核桃、紫椴幼苗施肥后叶片 N、P、K 含量,掌握幼苗的养分分布及植株营养状况(郑小琴等, 2019; 杨阳等, 2021)。但由于树种的遗传性状存在差异,不同配比施肥条件下,苗木对肥效的响应不同,例如,灰木莲光合受 P 的影响较大,而薄壳山核桃主要受 N 的

影响(陈琳等, 2017; 郑小琴等, 2019; 杨阳等, 2021)。另外,不同树种的最佳施肥量不同,不同树种的最佳施肥配方尚不完善(Jose et al., 2011; 张敏等, 2019)。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方特有的乡土造林树种,具有较好的发展前景。近年研究发现,马尾松人工林土壤供 N、P 能力逐渐下降,马尾松生长由 P 限制转变为 N、P 限制的风险增强(盘金文等, 2020; Hou et al., 2020)。目前,马尾松幼苗施肥研究也取得较大进展,特别是在肥种效应(Ge et al., 2019)、单一肥种施肥量(吴修蓉等, 2019)、不同氮形态(王胤和姚瑞玲, 2021)方面取得丰厚成果。适宜的施肥对马尾松叶绿素含量和生物量积累存在一定影响,应用配比施肥方法揭示不同 N、P、K 水平对马尾松幼苗生长、光合色素含量及叶片养分的影响,从而提出马尾松幼苗施肥管理的最佳配方,此类研究较少。为此,本研究以 1 年生马尾松幼苗为试验材料,采用  $L_{16}(4^3)$  正交设计,设置不同 N、P、K 水平的配比组合,探讨不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响,以期寻找马尾松幼苗的最佳施肥组合,为优质马尾松幼苗的培育与施肥管理提供科学依据和实践指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验于贵阳市花溪区贵州大学林学院实验苗圃( $104^{\circ}39' - 104^{\circ}40' \text{ E}$ ,  $26^{\circ}26' - 26^{\circ}27' \text{ N}$ )内进行。

该区气候属于亚热带湿润温和气候,平均海拔 920 m,年平均温度 15.6 ℃,年降水量 1 229 mm。

### 1.2 试验材料

2017年4月,于都匀市马尾松国家良种基地 1.5代种子种园内的同一半同胞家系中,选取长势均一的 112株幼苗,移栽至贵州大学南校区苗圃进行施肥试验,缓苗3个月,7月上旬开始施肥试验。试验前测得苗木苗高为(20.06 ± 2) cm,地径为(3.67 ± 0.4) mm。实验选用 20~40目含硅量大于 98%的石英砂作为盆栽基质,石英砂经 0.3%盐酸浸泡一周后并清洗干净,装于 19 cm(径) × 22 cm(高)的塑料盆中,每盆约 4.5 kg 待用。营养液选用 Hoagland 和 Arnon 配方进行配置,且试验期间选用 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>、KNO<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>提供 N、P、K 元素进行施肥试验。

### 1.3 试验设计

参照周玮和周运超(2011)和简才源(2015)研究结果,采用 3 因素 4 水平 L<sub>16</sub>(4<sup>3</sup>) 正交试验设计,其中, N 因素 4 个水平分别为 0.75、3.75、8.25、15.00 mmol · L<sup>-1</sup>, P 因素 4 个水平分别为 0.05、0.25、0.55、1.00 mmol · L<sup>-1</sup>, K 因素 4 个水平分别为 0.30、1.50、3.00、6.00 mmol · L<sup>-1</sup>,各因素水平从低浓度到高浓度用 1、2、3、4 表示。共计 16 个(表 1)处理,每个处理 7 株幼苗。2017 年 7 月初进行施肥试验,每 5 d 浇灌 1 次营养液,每次 100 mL,期间酌情补水,培养 3 个月。

### 1.4 指标测定

苗高和地径测定:2017 年 7 月初测定苗高和地径初始值,之后每隔 15 d 用卷尺测定苗高(精确到 0.1 cm),用游标卡尺测定地径(精确到 0.01 mm),为期 3 个月。

生物量测定:每个处理组合挖取 5 株幼苗,充分洗净植株上附着物,用吸水纸吸干水分,从土痕处用枝剪剪开,分地上与地下部分装入信封袋,在烤箱内经 105 ℃杀青 30 min 后 70 ℃烘干至恒重,待冷却后用电子天平测定其干重(精确到 0.001 g)。

苗木质量指数 = 苗木总生物量 / (苗高 / 地径 + 地上干质量 / 地下干质量)。

叶片养分测定:采用浓硫酸-高氯酸消煮法进行消煮后,采用靛酚蓝比色法测定全氮,采用钼锑抗比色法测定全磷,采用火焰光度法测定全钾(LY-T 1270-1999 和 LY-T 1269-1999),每个指标测定 5 个重复。

表 1 施肥配方

Table 1 Fertilization formula

处理 Treatment	施肥组合 Fertilizer combination	处理 Treatment	施肥组合 Fertilizer combination
1	N1P1K1	9	N3P1K3
2	N1P2K2	10	N3P2K4
3	N1P3K3	11	N3P3K1
4	N1P4K4	12	N3P4K2
5	N2P1K2	13	N4P1K4
6	N2P2K1	14	N4P2K3
7	N2P3K4	15	N4P3K2
8	N2P4K3	16	N4P4K1

叶绿素含量测定:针叶剪短后采用 80%的丙酮浸泡,叶片变褪色变白后利用分光光度计测定吸光值,每个处理 4 个重复。

### 1.5 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件和 Microsoft Excel 软件进行数据整理及作图,采用多因素方差分析及 Duncan 进行多重比较,并利用隶属函数模糊分析法对各指标进行综合评价,通过计算出各指标的隶属值,进而评定施肥对马尾松幼苗苗木质量的影响。公式如下:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

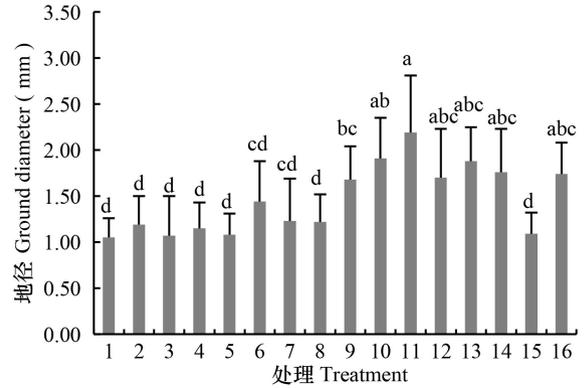
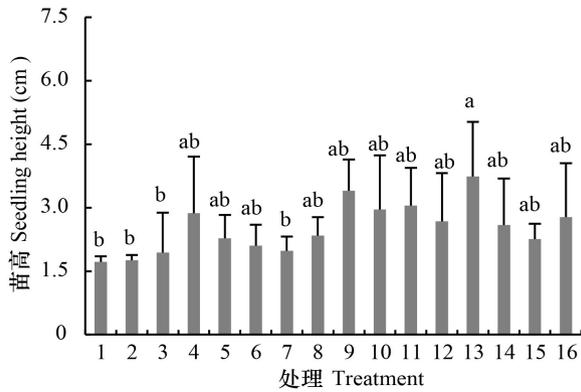
式中:  $U(X_i)$  为隶属函数值;  $X_i$  为马尾松幼苗的某个测定指标;  $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$  分别为该指标内的最大值和最小值。公式(1)表示指标与苗木质量呈正相关,公式(2)则相反。

## 2 结果与分析

### 2.1 配比施肥对幼苗苗高和地径生长量的影响

由图 1 可知,苗高生长量在处理 13 最大,为 3.74 cm,变异系数范围为 6.82%~43.24%;地径生长量在处理 11 最高,为 2.19 mm,比处理 1 高 108.57%,变异系数范围为 19.54%~40.19%。

N、P、K 对苗高和地径影响的主效应中,施 N 对苗高地径生长有极显著影响( $P < 0.01$ ),施 P 仅对苗高生长有显著影响( $P < 0.05$ ),施 K 对苗高地径生长有显著影响( $P < 0.05$ ),且 N 对苗高和地径的影响最大,K 次之,P 最小,说明苗高地径生长需大量 N 和 K(表 2)。施肥水平上,配施 N3P1K4 营



不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图 1 不同施肥处理后幼苗苗高与地径的生长量

Fig. 1 Growth of seedling height and ground diameter after different fertilization treatments

养液可促进幼苗苗高生长;配施 N3P2K1 营养液可促进地径生长(图 2)。

## 2.2 配比施肥对幼苗生物量的影响

由图 3 可知,不同配比施肥处理间生物量存在显著差异。其中,地上生物量、地下生物量、总生物量均在处理 12 最大,其变异系数范围分别为 8.80%~33.95%、9.52%~27.68%、5.01%~16.80%。由表 2 可知,N、P、K 对生物量影响的主效应中,施 N 对幼苗生物量积累有极显著影响( $P<0.01$ ),施 P 对地下生物量的积累有显著影响( $P<0.05$ ),施 K 对地下生物量及总生物量有显著影响( $P<0.05$ )。各因素对地上生物量和总生物量的影响为  $N>K>P$ ,对地下生物量的影响是  $N>P>K$ ,说明幼苗生物量以施 N 为主,施 P 促进地下生长,地上生长对 K 的需求高于 P。由图 4 可知,配施 N3P4K3 营养液利于促进幼苗地上生物量、地下生物量和总生物量的积累。

## 2.3 配比施肥对幼苗苗木质量指数的影响

由表 3 可知,质量指数最高的是处理 12,较高的还有处理 9 和处理 11,组内的变异系数范围为 8.11%~24.05%。N、P、K 对幼苗质量指数影响的主效应中,N 达到极显著水平( $P<0.01$ ),P 和 K 未达到显著水平( $P>0.05$ ),各因素对幼苗质量指数的影响大小为  $N>K>P$ ,表明幼苗期施 N 利于提高幼苗质量指数。从施肥水平上发现配施 N3P4K3 营养液利于提高幼苗质量指数(图 4)。

## 2.4 配比施肥对幼苗叶绿素含量的影响

由图 5 可知,叶绿素 a 含量在处理 12 最高,变

异系数范围为 2.02%~12.97%;叶绿素 b 含量在处理 5 最高,变异系数范围为 3.03%~15.71%;总叶绿素含量在处理 12 最高,变异系数范围为 2.35%~9.42%。

由表 2 可知,施 N 和 K 对叶绿素含量的影响均达到极显著水平( $P<0.01$ );施 P 对叶绿素 a 和叶绿素 b 有极显著影响( $P<0.01$ ),对总叶绿素有显著影响( $P<0.05$ )。各因素对叶绿素 a 和总叶绿素的影响为  $N>K>P$ ;施 K 对叶绿素 b 的影响最高,N 次之,P 最小。可见,不同光合色素对肥种的响应存在差异,N 是影响叶绿素合成的主要因子。从施肥水平上看,配施 N2P4K2 可促进叶绿素 b 含量积累,配施 N4P4K2 浓度水平的营养液可促进幼苗叶绿素 a 及总叶绿素含量的积累(图 6)。

## 2.5 配比施肥对幼苗针叶养分含量的影响

由图 7 可知,叶片 N 含量处理 11 最高,变异系数范围为 0.15%~4.31%;P 含量处理 15 最高,变异系数范围为 1.90%~4.76%;K 含量处理 10 最高,变异系数范围为 0.24%~1.60%。表明随施肥量的增加,可促进幼苗叶片养分的积累,且幼苗叶片对 N 的积累高于 K,更高于 P。

施肥因素对养分含量的影响中,施 N 和 K 对幼苗针叶 N、P、K 含量的影响达到极显著水平( $P<0.01$ );施 P 对针叶 N 和 P 含量的影响达到极显著水平( $P<0.01$ ),但对针叶 K 含量没有显著影响( $P>0.05$ )(表 2)。N、P、K 对针叶 N 含量的影响大小排序为  $N>K>P$ ,对针叶 P 含量的影响排序为  $N>P>K$ ,对 K 含量的影响排序为  $K>N>P$ ,表明幼

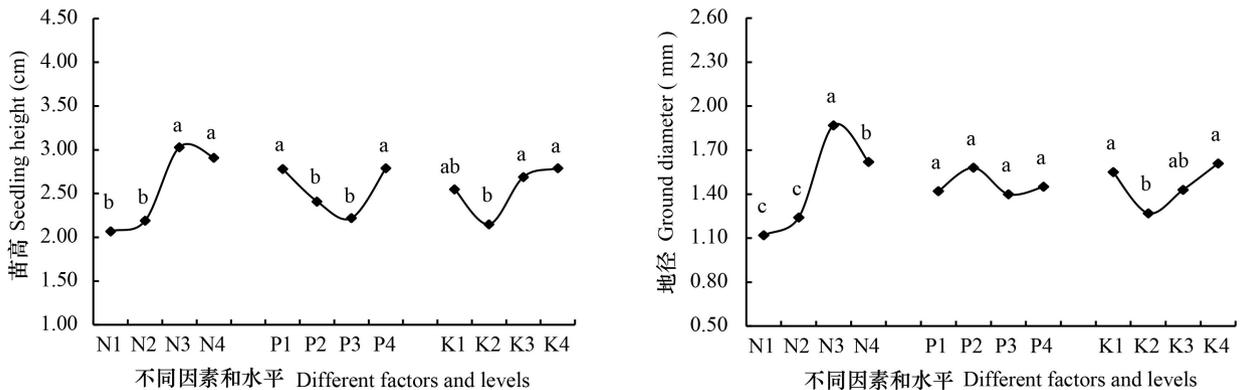
表 2 N、P、K 配比施肥对幼苗生长生理指标的方差分析和直观分析

Table 2 Variance analysis and visual analysis of N, P and K fertilization ratios on seedling growth physiological indexes

指标 Index	因素 Factor	F 值 F value	极差 Range	指标 Index	因素 Factor	F 值 F value	极差 Range
苗高生长量 Growth of seedling height	N	9.13 **	0.96	叶绿素 b Chlorophyll b	N	7.10 **	0.13
	P	3.07 *	0.57		P	6.37 **	0.11
	K	3.53 *	0.74		K	13.05 **	0.16
地径生长量 Growth of ground diameter	N	21.01 **	0.75	总叶绿素 Total chlorophyll	N	19.11 **	0.63
	P	1.11	0.18		P	3.15 *	0.27
	K	3.95 *	0.34		K	6.27 **	0.34
地上生物量 Above-ground biomass	N	37.47 **	2.79	N 含量 N content	N	136.47 **	12.78
	P	0.75	0.4		P	8.44 **	3.37
	K	2.52	0.67		K	12.24 **	4.04
地下生物量 Under-ground biomass	N	30.46 **	0.89	P 含量 P content	N	134.29 **	0.46
	P	3.33 *	0.3		P	41.35 **	0.26
	K	3.07 *	0.29		K	8.00 **	0.11
总生物量 Total biomass	N	47.95 **	3.53	K 含量 K content	N	21.77 **	0.57
	P	1.66	0.6		P	0.56	0.09
	K	3.97 *	0.96		K	148.62 **	1.53
叶绿素 a Chlorophyll a	N	29.64 **	0.59	隶属值 Membership value	N	—	5.42
	P	7.25 **	0.33		P	—	1.65
	K	14.05 **	0.46		K	—	0.65

注: \* 和 \*\* 分别表示施肥因素对相应指标存在显著 ( $P<0.05$ ) 和极显著影响 ( $P<0.01$ )。

Note: Fertilization factors with \* and \*\* have significant ( $P<0.05$ ) and extremely significant ( $P<0.01$ ) influences on the corresponding indexes.



不同小写字母表示相同因素下施肥水平差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences of fertilization levels under the same factor ( $P<0.05$ ). The same below.

图 2 幼苗苗高与地径在不同施肥水平的生长量

Fig. 2 Growth of seedling height and ground diameter at different fertilization levels

苗期施 N 有利于促进针叶对 N 和 P 吸收。施肥水平上, 施以 N4P3K1 营养液利于促进针叶 N 的积累, 配施 N4P4K2 营养液利于针叶 P 含量的积累, 配施 N3P3K4 营养液有利于 K 含量的积累 (图 6)。

## 2.6 隶属函数模糊综合评价

为获得马尾松幼苗的最佳施肥配方, 选用隶

属函数对苗高、地径、生物量、叶绿素含量、叶片养分含量相关指标进行分析, 综合评判不同配比施肥条件下幼苗苗木质量。由表 4 可知, 处理 12 苗木综合质量最高。为获得正交试验的最佳施肥组合, 对生长生理指标的隶属值进行极差分析 (表 2), 施 N 对幼苗苗高地径生长、生物量积累、叶绿

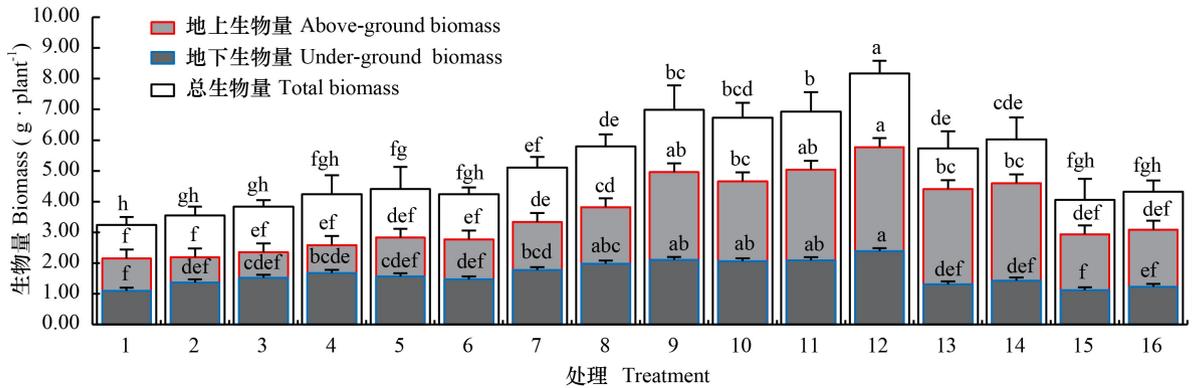


图 3 不同施肥处理对马尾松幼苗生物量的影响

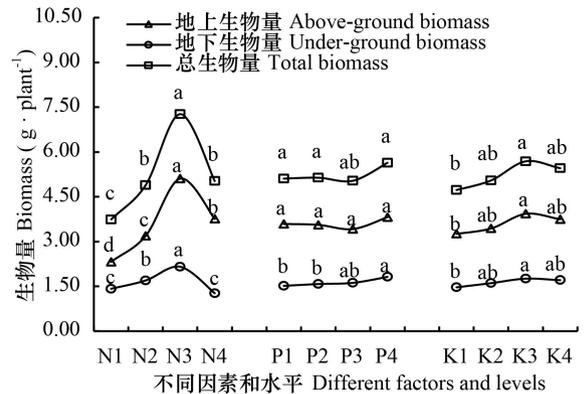
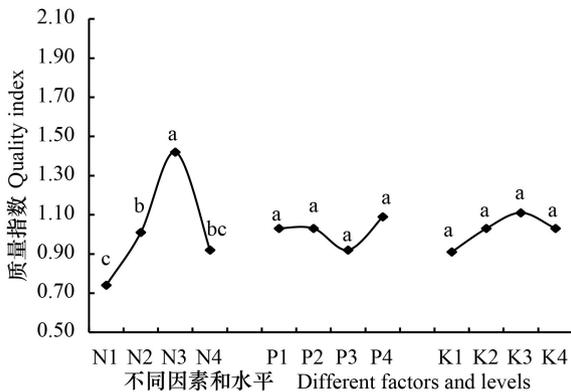
Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on biomasses of *Pinus massoniana* seedlings

图 4 不同施肥水平下幼苗质量指数和生物量

Fig. 4 Seedling quality indexes and biomasses under different fertilization levels

表 3 不同施肥处理下幼苗苗木质量指数

Table 3 Seedling quality indexes under different fertilization treatments

处理 Treatment	质量指数 Quality index	排序 Rank	处理 Treatment	质量指数 Quality index	排序 Rank
1	0.60±0.07h	16	9	1.36±0.2abc	3
2	0.77±0.17gh	13	10	1.32±0.18abc	4
3	0.74±0.06gh	14	11	1.41±0.21ab	2
4	0.83±0.17fgh	11	12	1.60±0.15a	1
5	1.11±0.22bcdef	7	13	1.06±0.17cdefg	8
6	0.85±0.14efgh	10	14	1.19±0.22bcd	5
7	0.90±0.15defgh	9	15	0.62±0.11h	15
8	1.16±0.24bcde	6	16	0.79±0.19fgh	12

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ( $P < 0.05$ ).

素和针叶养分含量积累的影响最大, P 次之, K 最小, 且最佳理论施肥组合是 N3P4K2, 即对应正交方案中处理 12, 综合表明马尾松幼苗配施 N、P、K 浓度分别为 8.25、1.00、1.50 mmol · L<sup>-1</sup> 的营养液有利于提高马尾松幼苗综合质量。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 施肥对马尾松幼苗生长的影响

施肥是育苗生产实践中保障苗木质量的重要措施, 合理的施肥可提升苗木质量 (王祥等, 2021)。本研究表明, N、P、K 配比施肥对马尾松幼苗生长有促进作用, 显著影响苗高、地径和生物量, 对苗高、地径、地上生物量及总生物量的影响效应为 N>K>P, 这与周樊等 (2020) 研究薄壳山核桃 N、P、K 配比施肥结果一致。张敏等 (2019) 认

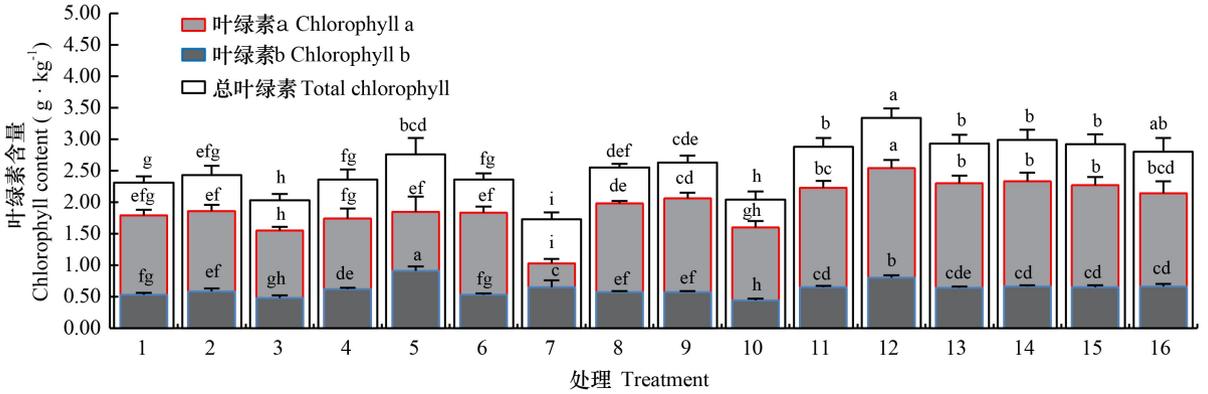


图5 不同施肥处理下幼苗叶绿素含量

Fig. 5 Chlorophyll contents of seedlings under different fertilization treatments

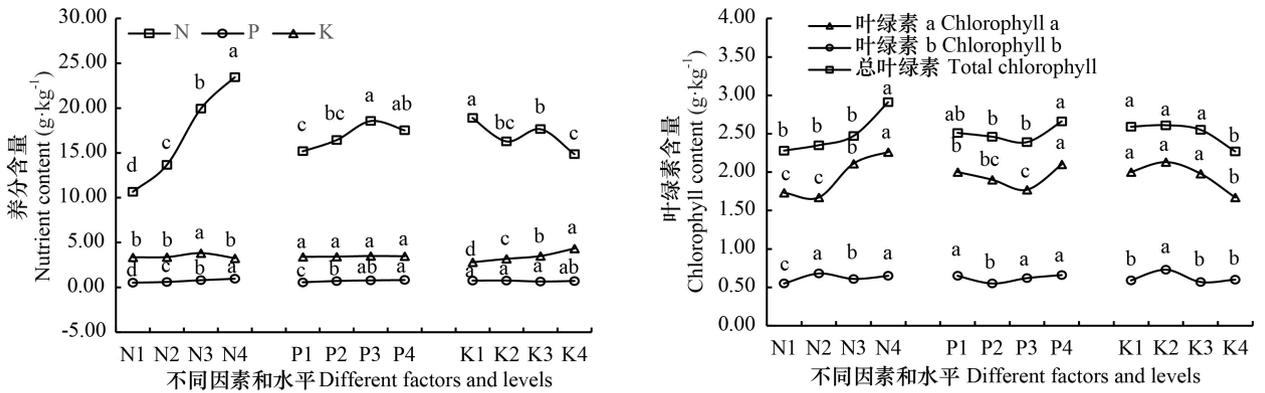


图6 不同施肥水平下幼苗叶绿素含量和针叶养分含量

Fig. 6 Chlorophyll contents of seedlings and nutrient contents of needles under different fertilization levels

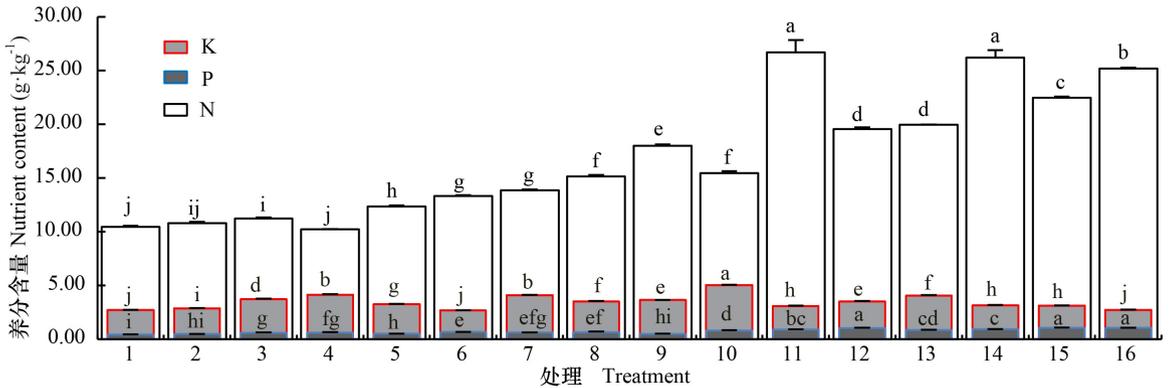


图7 不同施肥处理后幼苗针叶养分含量

Fig. 7 Nutrient contents of seedling needles after different fertilization treatments

为,植物地上部分生长受N素调控,合适的范围内增加N素含量可促进地上部分生长,本研究结果与之类似。周玮和周运超(2012)研究N、P、K肥种对马尾松幼苗生长结果显示,P对幼苗苗高地径的影响最大,与本研究结果存在差异。可能是周

玮等以马尾松林下土壤为基质,所含养分能满足幼苗对N的需求,但基质中欠缺P,增添P会导致响应较大。而本研究盆栽基质为石英砂,基础养分低于土壤,N浓度较低,导致在N浓度较低的环境中,马尾松幼苗根系周围固氮菌丰度和群落多

**表 4** 不同施肥处理下幼苗综合苗木质量评价  
Table 4 Comprehensive seedling quality evaluation of seedlings under different fertilization treatments

处理 Treatment	隶属值 Membership value	排序 Rank	处理 Treatment	隶属值 Membership value	排序 Rank
1	0.70	16	9	5.86	7
2	1.65	15	10	4.88	6
3	1.39	14	11	8.18	2
4	3.06	12	12	9.54	1
5	3.73	13	13	6.82	5
6	3.11	11	14	7.19	3
7	3.00	10	15	5.45	8
8	4.33	9	16	6.50	4

样性降低,添加 N 后苗木为提高菌落丰度加速吸收养分,导致 N 的影响效应最大(赵辉和周运超, 2020)。因此,在 N 和 P 限制风险逐渐增强的生长环境中,马尾松应以施 N 为主,辅以 P 和 K 进行混合施肥。随着施肥量的增高,地上生物量及地下生物量呈先升后降趋势,当施肥量超过养分吸收临界点时,继续添加养分会对幼苗地下部分的生长造成毒害作用,抑制幼苗的生长(周樊等, 2020)。本研究发现,处理 15 生物量显著低于其他处理,处理 12 生物量最高,可能是在 P 和 K 充足的环境下,过量的施 N 对幼苗造成养分毒害,可见施肥量上也遵循适需原则。

### 3.2 施肥对马尾松幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,利用叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素对红光、蓝光和蓝紫光进行吸收,并将能量传递到反应中心产生化学能,增强植物光合作用,提高植株生物量的积累(Li et al., 2019; Vytaitas et al., 2020)。在对薄壳山核桃和闽楠的研究中发现,N、P、K 配方施肥可显著提高幼苗光合色素含量,增强光合速率(郑小琴等,2019;Wang et al., 2020)。本研究中,叶绿素 a 和总叶绿素在处理 12(N3P4K2)含量最高,叶绿素 b 在处理 5 含量最高,说明合理施肥能显著提高马尾松幼苗光合色素含量,促进光合色素分子传递的效率更高,将化学能转化为碳水化合物的能力更强。但促进叶绿素含量积累的最佳施肥组合 N4P4K2 并未出现在处理中,主要因正交施肥试验设计是不完全设计,可通过现有施肥

处理推测最佳施肥处理,其结果与王祥等(2021)和张敏等(2019)的结果类似。有研究表明,N、P、K 配方施肥中 N 是影响叶绿素含量的主要因子,但过高 N 摄入会抑制光合色素合成,降低 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(Rubisco)活性,造成捕光能力下降,光合速率受损(郑小琴等,2019;Wang et al., 2020)。与前人研究不同的是,本研究叶绿素含量随施 N 水平的增加而呈上升趋势。可能是本研究所配施水平低于抑制光合酶活性的临界值,并未对光合系统造成损害,后期可进一步开展高 N 含量的试验进行验证。

### 3.3 施肥对马尾松幼苗针叶养分含量的影响

合理施肥能促使植物体内的 N、P、K 保持在适当水平,从而达到维持植物正常生长发育的目的(郑小琴等,2019)。叶片作为养分的主要储存库,其 N、P、K 的含量关系到植物光合作用强弱及干物质积累能力(杨阳等,2021),但不同树种叶片对养分的积累存在差异。试验发现,马尾松幼苗针叶养分的积累呈现 N>K>P 的现象,与辣木类似(张敏等,2019),说明马尾松幼苗针叶对 N 和 K 的需求量更大。但与辣木和薄壳山核桃不同(张敏等,2019;郑小琴等,2019),一方面可能是不同树种需肥特性存在差异,马尾松是喜光树种,需要大量的 N 素提供能量增加叶绿素,同时促进苗木加速对 K 的吸收以增强 Rubisco 酶活性,达到提升光合作用的效果(Xu et al., 2019)。另一方面可能是基质中含有大量络合有效 P 的金属离子,导致幼苗通过消耗体内 P 含量达到维持内稳态平衡目的,最终造成幼苗叶片 P 含量最低的现象(Duncan et al., 2012)。有研究发现,苗木体内 N 含量较高时,参与植物呼吸作用、光合作用及生理代谢的 P 和 K 含量也较高,说明配比施肥对矿质营养的吸收是相互作用的(杨阳等,2021)。本研究结果与之类似,即 N3 和 N4 水平有利于针叶 N、P、K 的积累。

综上所述,在本试验环境下,处理 12 可显著提高马尾松幼苗生物量、质量指数、叶绿素 a 和总叶绿素含量;针叶对养分的积累呈现 N>K>P 的现象,且马尾松幼苗生长受 N 的影响最大,在施肥时应以施 N 为主,施以 P 和 K 相辅。运用隶属函数及极差法综合分析发现,马尾松幼苗最佳施肥组合是 N3P4K2,对应施肥处理 12,即 N、P、K 最佳施肥浓度分别为 8.25、1.00、1.50 mmol · L<sup>-1</sup>。

## 参考文献:

- CHEN L, LU LH, MENG CL, 2017. Combined effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and photosynthesis of *Manglietia glauca* seedlings [J]. *J NW For Univ*, 32(2): 16–21. [陈琳, 卢立华, 蒙彩兰, 2017. 氮、磷、钾对灰木莲幼苗生长和光合作用的影响 [J]. 西北林学院学报, 32(2): 16–21.]
- DUNCAN NLM, LARS OH, STEPHEN WP, 2012. Nitrogen and phosphorus limitation over long-term ecosystem development in terrestrial ecosystems [J]. *PLoS ONE*, 7(8): e42045.
- GE XG, YANG ZY, ZHOU BZ, et al., 2019. Biochar fertilization significantly increases nutrient levels in plants and soil but has no effect on biomass of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* hook saplings during the first growing season [J]. *Forests*, 10(8): 612.
- HOU EQ, LUO YQ, KUANG YW, et al., 2020. Global meta-analysis shows pervasive phosphorus limitation of aboveground plant production in natural terrestrial ecosystems [J]. *Nat Comm*, 11(1): 1135–1142.
- JIANG CY, 2015. Study on demand law of water and nutrient and quantitative regulation project of *Pinus massoniana* seedlings [D]. Guiyang: Guizhou University. [简才源, 2015. 马尾松幼苗水肥需求规律与定量调控方案研究 [D]. 贵阳: 贵州大学.]
- JOSE PCN, ENILSON BS, REYNALDO CS, et al., 2011. Effect of NPK fertilization on production and leaf nutrient content of eucalyptus minicuttings in nutrient solution [J]. *Rev Bras Cienc Sol*, 35(1): 249–254.
- PAN JW, GUO QQ, SUN XG, et al., 2020. Contents and stoichiometric characteristics of C, N, P and K under different stand ages of *Pinus massoniana* plantations [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 26(4): 746–756. [盘金文, 郭其强, 孙学广, 等, 2020. 不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 26(4): 746–756.]
- PENG ZT, CHEN MX, HUANG ZJ, et al., 2020. Non-structural carbohydrates regulated by nitrogen and phosphorus fertilization varied with organs and fertilizer levels in *Moringa oleifera* seedlings [J]. *J Plant Growth Regul*, 40(4): 1777–1786.
- SCHOENBECK L, GESSLER A, SCHAUB M, et al., 2020. Soil nutrients and lowered source: sink ratio mitigate effects of mild but not of extreme drought in trees [J]. *Environ Exp Bot*, 169: 103905.
- VYTAUTAS B, DUFTY C, 2020. Excitation quenching in chlorophyll-carotenoid antenna system: ‘coherent’ or ‘incoherent’ [J]. *Photosynth Res*, 144(3): 301–315.
- WANG X, BAI JJ, HE Q, et al., 2021. Effects of different formulated fertilization on the growth and physiological characteristics of *Catalpa bungei* seedling [J]. *For Environ Sci*, 37(3): 40–46. [王祥, 白晶晶, 何茜, 等, 2021. 氮磷钾配方施肥对楸树苗期生长及养分利用的影响 [J]. 林业与环境科学, 37(3): 40–46.]
- WANG X, WEI XL, WU GY, et al., 2020. High nitrate or ammonium applications alleviated photosynthetic decline of *Phoebe bournei* seedlings under elevated carbon dioxide [J]. *Forests*, 11(3): 293.
- WANG Y, YAO RL, 2021. Effects of different nitrogen forms and ratios on growth of tissue cultured seedlings in *Pinus massoniana* [J]. *J Cent S Univ For Technol*, 41(3): 18–24. [王胤, 姚瑞玲, 2021. 不同形态氮素配比对马尾松组培苗生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 41(3): 18–24.]
- WU XR, ZHOU YC, YU X, 2019. Effect of magnesium fertilizer on growth and accumulation of *Pinus massoniana* seedlings [J]. *Subtrop Plant Sci*, 48(1): 11–16. [吴修蓉, 周运超, 余星, 2019. 镁肥对马尾松幼苗生长与叶片元素积累的影响 [J]. 亚热带植物科学, 48(1): 11–16.]
- XU XX, HOU X, JIA ZH, et al., 2019. Effects of potassium supply on the growth, photosynthesis and <sup>15</sup>N and <sup>13</sup>C absorption and utilization of M9T337 seedling [J]. *J Appl Ecol*, 30(6): 1186–1186.
- YANG Y, ZHANG DP, JI L, et al., 2021. Effects of formula fertilization on growth, nutrient accumulation and morphology of *Tilia amurensis* seedlings [J]. *J Cent S Univ For Technol*, 41(9): 63–70. [杨阳, 张德鹏, 及利, 等, 2021. 配比施肥对紫椴播种苗生长、养分积累及根系形态的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 41(9): 63–70.]
- ZHANG M, YANG HY, BAO L, et al., 2019. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium ratio fertilization on growth and leaf nutrient absorption of *Moringa oleifera* [J]. *For Res*, 32(5): 114–120. [张敏, 杨浩瑜, 包立, 等, 2019. 氮、磷、钾配比施肥对辣木生长及叶片养分吸收的影响 [J]. 林业科学研究, 32(5): 114–120.]
- ZHAO H, ZHOU YC, 2020. Characteristics of structure and abundance of nitrogen-fixing bacterial community in *Pinus massoniana* soil developed from different parent rocks [J]. *Acta Ecol Sin*, 40(17): 689–6201. [赵辉, 周运超, 2020. 不同母岩发育马尾松土壤固氮菌群落结构和丰度特征 [J]. 生态学报, 40(17): 6189–6201.]
- ZHENG XQ, CHEN WJ, CAO F, et al., 2019. Effects of the proportional fertilization on the nutrient content and photosynthesis of young grafted pecan seedlings [J]. *J Nanjing For Univ*, 43(5): 169–174. [郑小琴, 陈文静, 曹凡, 等, 2019. 配方施肥对薄壳山核桃苗期养分含量及光合作用的影响 [J]. 南京林业大学学报, 43(5): 169–174.]
- ZHOU F, CHEN WJ, CAO F, et al., 2020. Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of pecan seedlings [J]. *J Cent S Univ For Technol*, 40(9): 96–103. [周樊, 陈文静, 曹凡, 等, 2019. 配比施肥对薄壳山核桃幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 40(9): 96–103.]
- ZHOU W, ZHOU YC, 2012. Effects of different fertilizer treatment on *Pinus massoniana* seedlings and root environment [J]. *J Cent S Univ For Technol*, 32(7): 9–23. [周玮, 周运超, 2012. 不同施肥处理对马尾松幼苗及根际环境的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 32(7): 19–23.]
- ZHOU W, ZHOU YC, 2011. Effects on the growth of *Pinus massoniana* seedlings and root under different fertilizer treatments [J]. *J Nanjing For Univ*, 35(3): 70–74. [周玮, 周运超, 2011. 施肥对马尾松幼苗及根系生长的影响 [J]. 南京林业大学学报, 35(3): 70–74.]