网络出版时间:2026-02-04 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.08.005

外源铵态氮对马尾松无性系苗期生长的影响

王胤,姚瑞玲
(广西壮族自治区林业科学研究院 广西林业实验室,广西 南宁 530002)

[摘 要] 【目的】探究铵态氮添加对马尾松苗期主要生长性状的影响,解析基因型、铵态氮及二者交互作用对马尾松苗木地径和苗高增长量的影响,为马尾松无性系差异化精准施肥和人工林培育提供理论依据。【方法】以3个马尾松无性系C1、C2和C3为试验材料,设置对照(0.0 g/株,CK)、低氮(0.4 g/株,LN)、中氮(1.2 g/株,MN)和高氮(2.4 g/株,HN)4个处理,通过定期测量不同处理马尾松的地径和苗高,分析铵态氮不同添加水平对马尾松无性系苗木地径和苗高生长的影响。【结果】3个马尾松无性系苗木地径和苗高在2—8月生长迅速,在8—12月生长速度逐渐减缓,整体生长过程呈现先快后慢的“S”型增长。合理添加铵态氮促进了马尾松无性系苗木的生长,其中以中氮添加促进作用最为显著。在整个观测期内(2—12月),与CK相比,中氮处理3个马尾松无性系苗木地径和苗高生长量分别提高了36.3%~54.7%和72.6%~104.4%;添加高氮抑制了马尾松苗木的生长,其3个马尾松无性系苗木地径和苗高生长量分别降低了1.3%~13.3%和11.4%~24.0%。无性系C1在各铵态氮处理下均表现最优,其地径生长量较C2、C3分别提高了27.8%~57.6%和42.9%~58.4%,苗高生长量较C2、C3分别提高了31.7%~79.1%和15.2%~72.5%。基因型(无性系)、铵态氮及二者交互作用对马尾松苗木生长有显著影响,其中地径生长主要受基因型主导(相对贡献率75.3%),苗高生长更多受基因型与铵态氮交互作用调控(相对贡献率67.6%),铵态氮添加对苗高的相对贡献率(19.5%)高于地径(8.3%)。【结论】中、低水平铵态氮添加促进了马尾松无性系苗木地径和苗高的生长,高水平铵态氮添加则抑制了马尾松无性系苗木地径和苗高的生长。马尾松无性系苗木生长性状对铵态氮的响应存在基因型显著差异,其中地径生长可能更大程度受到遗传背景主导,苗高生长更多依赖于基因型与铵态氮互作。

[关键词] 马尾松无性系;铵态氮;生长响应;森林培育
[中图分类号] S723.7 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)08-0038-09

Effects of exogenous ammonium nitrogen on the growth of *Pinus massoniana* clones during seedling stage

WANG Yin, YAO Ruiling
(*Guangxi Laboratory of Forestry, Guangxi Forestry Research Institute, Nanning, Guangxi* 530002, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aims to investigate the effects of ammonium nitrogen addition on the main growth traits of *Pinus massoniana* seedlings, and to analyze the effects of genotype, ammonium nitrogen, and their interaction on the growth of ground diameter and seedling height, providing theoretical basis for differential precision fertilization and plantation cultivation of *P. massoniana* clones. 【Method】 Three *P. massoniana* clones C1, C2 and C3 were used as experimental materials. Four treatments were set up: control (0.0 g/plant, CK), low nitrogen (0.4 g/plant, LN), medium nitrogen (1.2 g/plant, MN) and high nitrogen (2.4 g/plant,

[收稿日期] 2025-05-23 [修回日期] 2025-07-30
[基金项目] 国家自然科学基金项目(32460382,32260381,31960311);广西科技计划项目(桂科 AB24010290,2024GXNSFDA010063,2023GXNSFAA026449,2018GXNSFDA281020,2017GXNSFAA198037,桂科 AD17195078);广西林业科技推广项目(桂林科研[2025KX]第17号,桂林科研[2021]3号)
[作者简介] 王胤(1978—),男,贵州黔西人,正高级工程师,硕士,主要从事森林培育研究。E-mail:yinvvang@163.com
[通信作者] 姚瑞玲(1979—),女,贵州施秉人,研究员,博士,主要从事林木生理代谢调控和组培快繁技术研究。E-mail:jullyudi@163.com

HN). The effects of different ammonium nitrogen levels on the growth of ground diameter and seedling height of *P. massoniana* clones were analyzed by regularly measuring these growth parameters under different treatments.【Result】The ground diameter and height of all three *P. massoniana* clones exhibited a S-shaped growth pattern, characterized by rapid growth from February to August, followed by a gradual slowdown from August to December. The reasonable ammonium nitrogen addition promoted the growth of the clones, with the MN treatment having the most significant effect. During the whole observation period (February to December), compared with CK, the ground diameter and seedling height growth of the three clones under MN treatment increased by 36.3%－54.7% and 72.6%－104.4%, respectively. In contrast, HN addition inhibited the growth of *P. massoniana* seedlings, reducing ground diameter and seedling height growth by 1.3%－13.3% and 11.4%－24.0%, respectively. Clone C1 showed the best performance under all ammonium nitrogen treatments. Compared with C2 and C3, its ground diameter growth increased by 27.8%－57.6% and 42.9%－58.4%, respectively, while seedling height growth increased by 31.7%－79.1% and 15.2%－72.5%, respectively. Genotype (clone), ammonium nitrogen, and their interaction significantly influenced the growth of *P. massoniana* seedlings. Among them, the growth of ground diameter was mainly dominated by genotype (relative contribution rate 75.3%), and the growth of seedling height was more regulated by genotype and nitrogen interaction (relative contribution rate 67.6%). The relative contribution rate of ammonium nitrogen addition to seedling height (19.5%) was higher than that to ground diameter (8.3%).【Conclusion】Medium and low levels of ammonium nitrogen addition promoted the growth of ground diameter and seedling height of *P. massoniana* clones, whereas high nitrogen addition inhibited their growth. Significant genotypic differences existed in the response of growth traits to ammonium nitrogen. Specifically, ground diameter growth was likely more determined by genetic background, while seedling height growth was more influenced by the interaction between genotype and nitrogen.

Key words: *Pinus massoniana* clones; ammonium nitrogen; growth response; silviculture

氮素是植物吸收量最多、不可或缺的矿质元素之一，其在植物体内的代谢活动和生理功能中发挥着不可替代的作用。作为植物体内蛋白质、核酸、磷脂和某些生长激素的核心组成部分，氮素不仅参与植物的光合作用、呼吸作用等基本代谢过程，还对植物的生长速率、器官发育、产量形成以及抗逆性等具有决定性影响[1-5]。研究表明，氮素缺乏会显著限制植物生长，而过量施用氮素可能会阻碍植物生长并引发一系列环境问题，如土壤酸化、水体富营养化等[2,5]。因此，科学合理地利用氮素资源对于林业可持续发展具有重要意义。自然界中氮素形态通常分为有机氮和无机氮，能被大多数植物根系直接吸收的主要是无机氮中的铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)[6]。不同形态氮在土壤中的动态转化过程显著影响着植物的吸收效率，例如硝态氮易随水分下渗流失，而铵态氮则易被土壤胶体吸附固定[3]。在长期的演化过程中，植物形成了对不同形态氮素吸收利用的偏好性[7]，喜铵态氮(硝态氮)的植物在供应铵态氮(硝态氮)时的生长明显优于供应硝态氮(铵态氮)[4]。还有研究表明，同一物种不同基因型对氮素的利用效率也不尽相同，相同氮素环境下不同基因型植株在生长、产量等方面会表现出显著差异[8-10]。揭示植物不同基因型对氮素添加的生长反应差异，协同施肥和遗传因素以发挥品种的最大生产潜力，对科学经营管理、优异品种选择和速生丰产等都具有重要意义[11-13]。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国亚热带地区常用先锋造林树种，具有耐瘠薄、适应性强、生长迅速等特点，其木材和松脂皆可利用，在生态环境建设、木材战略储备和林业经济建设中具有不可替代的作用[14]。马尾松生长周期较长，对氮素的需求量较大，其生长发育过程中氮素供应一直是关注的重点。但传统施肥技术研究大多局限于氮、磷、钾配比优化及施肥量梯度试验[15-17]，而对氮素形态对马尾松生长发育影响的研究相对滞后。本团队前期研究发现，马尾松多基因型混系组培苗在铵态氮供应处理下的地径、苗高生长及生物量和根系形态等指标均显著优于硝态氮供应处理，表明马尾松可能具有对铵态氮的偏好性吸收利用特征[18-19]。但由于前期研究使用的是混合基因型材料，掩盖了种内遗

传变异,不同马尾松基因型在铵态氮处理下的生长差异尚未明晰,在很大程度上限制了马尾松无性系的精准化管理和规模化推广利用。鉴于此,本研究以3个马尾松无性系苗木为研究对象,系统分析铵态氮添加对其地径、苗高等主要生长性状的影响,深入探讨不同无性系马尾松苗木对铵态氮的需求差异,旨在为马尾松无性系的精准施肥和高效培育提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验在广西壮族自治区林业科学研究院苗圃进行。试验地位于广西南宁市,平均海拔76.5 m,平均气温21.8 ℃,年均降水量1 286 mm,属亚热带季风气候。

供试3个马尾松无性系C1、C2、C3,原株均为广西桐棉种源优良林分内的优良单株,经采穗繁育组培苗后再通过扦插扩繁获得无性系苗木[20-21]。2024年1月,分别在3个无性系中选择地径3.5 mm以上,苗高15.0 cm以上,生长良好且无病虫害的苗木移栽到20 cm×20 cm育苗袋中进行试验,试验期间控制浇水量。基质主要成分为黄心土、珍珠岩和蛭石,按体积比4∶1∶1配制,经风干后装入育苗袋,并在育苗袋下放置接水托盘,若有水渗出再将其倒回育苗袋。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计。选择氮含量为21.2%的$(NH_4)_2SO_4$为N源,设置4个氮添加水平,分别为对照(0.0 g/株,CK)、低氮(0.4 g/株,LN)、中氮(1.2 g/株,MN)和高氮(2.4 g/株,HN)。每处理每个无性系5株苗木,重复3次,3个无性系共计180株苗木。根据N含量计算每株苗木所需的$(NH_4)_2SO_4$用量,与基质混匀作为基肥一次性施入。对试验苗木定期进行病虫害防治和除草管理。

1.3 测定指标及方法

分别于2024年2,4,6,8,10和12月的月初,测量不同处理马尾松苗木的地径和苗高,其中地径使用电子游标卡尺(0.01 mm)测定,苗高采用钢卷尺(0.01 m)测定,每处理重复测定3次,结果取平均值。

1.4 数据处理

采用RStudio进行方差分析和多重比较(Duncan's,$P<0.05$),使用WPS Office进行试验数据整理和绘图,参考张希等[22]的方法计算各因素的相对贡献率。

2 结果与分析

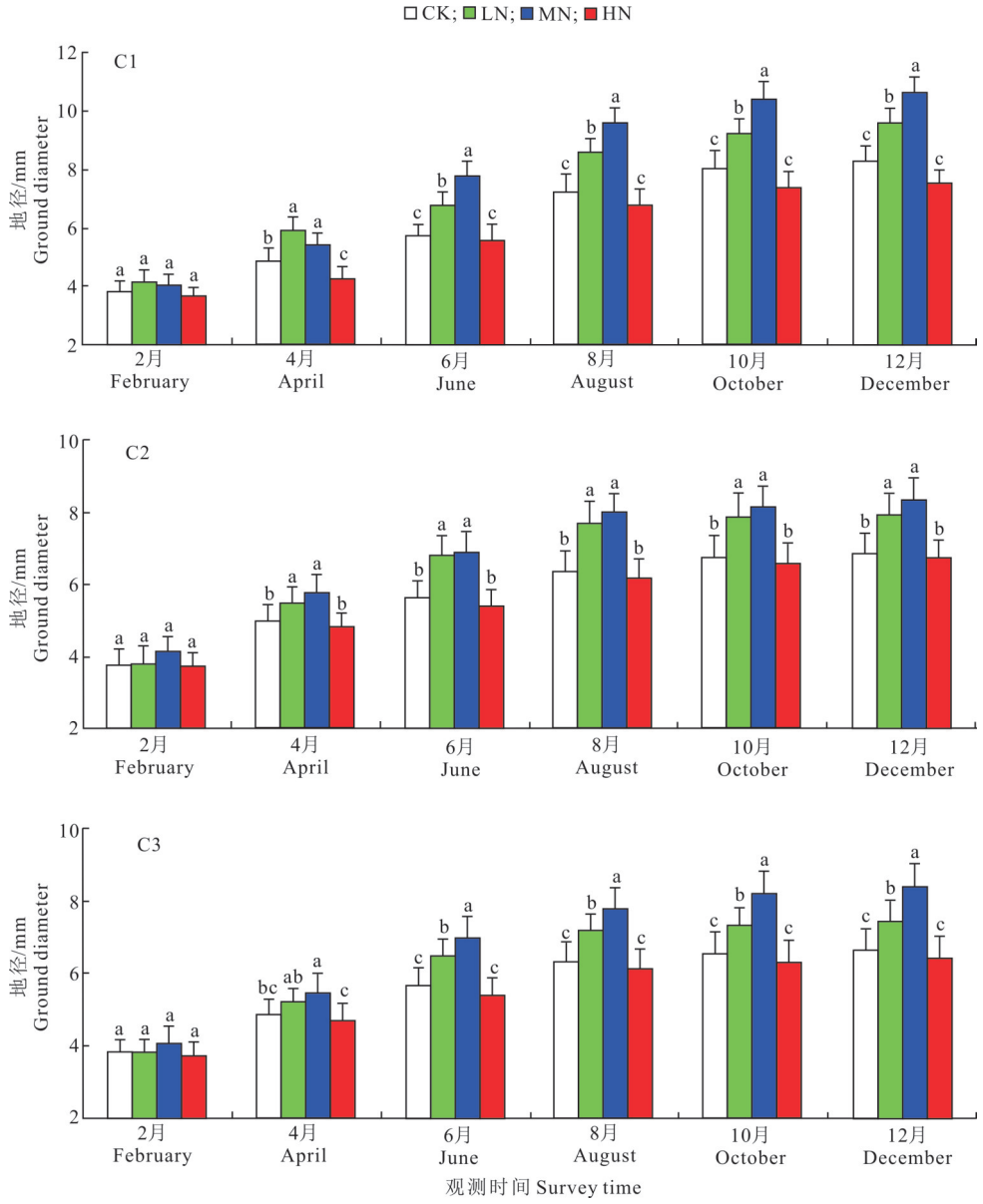
2.1 铵态氮添加对马尾松无性系地径生长的影响

由图1可知,在2—8月份,马尾松无性系C1、C2和C3地径生长迅速,而在8—12月份其地径生长速率逐渐减缓;2月份,同一观测时间同一无性系不同处理间地径差异不显著;4—12月份,同一观测时间同一无性系不同处理间地径差异显著($P<0.05$)。与CK相比,4—12月份,无性系C1的地径在LN和MN处理下分别提高了14.8%~22.0%和10.5%~35.7%,而在HN处理下则降低了2.7%~12.5%;无性系C2的地径在LN和MN处理下分别提高了10.4%~20.7%和16.6%~25.5%,而在HN处理下则降低了1.3%~4.6%;无性系C3的地径在LN和MN处理下分别提高了7.2%~14.8%和12.0%~26.8%,而在HN处理下则降低了3.3%~5.1%。表明LN和MN处理对马尾松无性系苗木地径的生长具有明显促进作用。整体来看,随铵态氮添加水平的增加,马尾松无性系苗木地径生长均呈先增大后减小趋势,大致为MN>LN>CK>HN,说明添加铵态氮可以促进马尾松地径的生长,但添加量较大时可能会对马尾松无性系苗木地径生长产生一定程度的抑制作用。

2.2 铵态氮添加对马尾松无性系苗高生长的影响

铵态氮添加对3个马尾松无性系苗高生长过程的影响如图2所示。由图2可知,与地径的生长过程相似,不同处理下马尾松无性系C1、C2和C3的苗高生长均表现为2—8月份明显增大、8—12月份逐渐平稳的趋势,生长过程呈现"S"型。2月份,同一无性系不同处理间苗高差异不显著;4月份以后,同一无性系不同处理间苗高差异渐趋显著($P<0.05$)。4—12月份,与CK相比,无性系C1的苗高在LN和MN处理下分别提高了8.2%~43.9%和2.4%~49.0%,而HN处理则降低了0.4%~9.0%;无性系C2的苗高在LN和MN处理下分别提高了2.1%~38.1%和2.7%~60.3%,而HN处理则降低了2.8%~8.5%;无性系C3的苗高在LN和MN处理下分别提高了2.9%~38.1%和6.6%~59.4%,而HN处理则降低了1.7%~8.5%。表明LN和MN处理对马尾松无性系苗高生长具有明显的促进作用。整体来看,随铵态氮添加水平的增加,

3个马尾松无性系苗高的生长均呈先增大后减小趋势，表现为MN＞LN＞CK＞HN，说明添加铵态氮可促进马尾松苗高的生长，但铵态氮过量可能会对马尾松无性系苗高的生长产生抑制作用。



图柱上不同小写字母表示同一观测时间不同处理间差异显著（$P<0.05$）。图2同。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments in the same month ($P<0.05$). The same as in Fig. 2.

图1　铵态氮添加对马尾松无性系地径生长的影响

Fig. 1　Effects of ammonium nitrogen addition on ground diameter growth of *Pinus massoniana* clones

2.3　铵态氮添加对马尾松无性系地径和苗高增长量的影响

将不同铵态氮添加水平下各处理马尾松12月份时的生长性状数据与2月份时的相应性状数据相减，得出各无性系在不同铵态氮添加水平下地径和苗高的增长量。由图3可知，随着铵态氮添加水平的增加，无性系C1、C2和C3地径的增长量均呈先增加后减小的趋势。其中以MN处理的地径增长量（4.2～6.9 mm）最大，LN处理（3.6～5.4 mm）次之，HN处理（2.7～3.9 mm）最小，不同处理间地径增长量差异显著（$P<0.05$）。与CK相比，无性系C1、C2、C3的地径增长量在LN处理下分别提高了22.2%，35.0%和27.8%，在MN处理下分别提高了47.9%，36.3%和54.2%，但在HN处理下分别降低了13.3%，1.3%和3.9%。

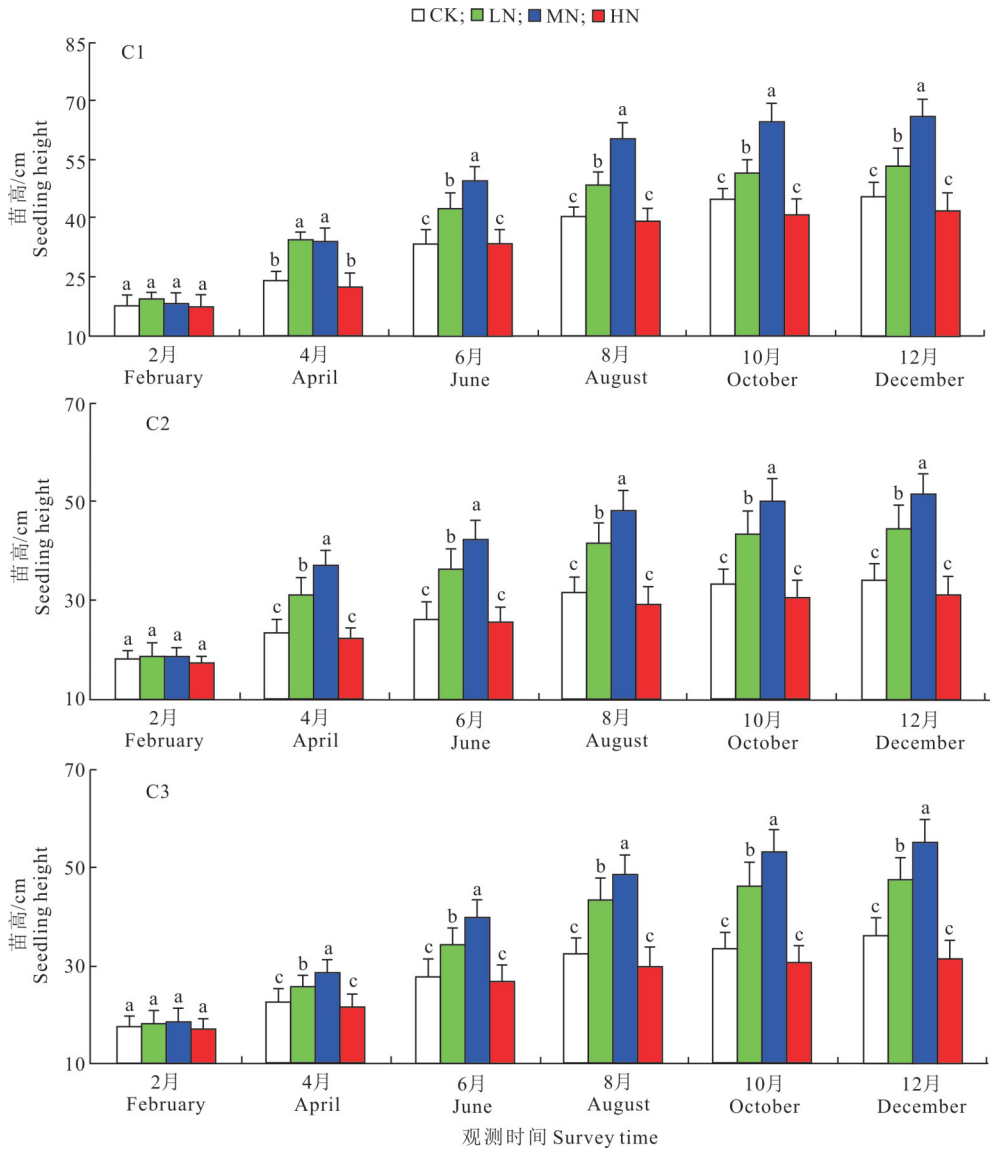
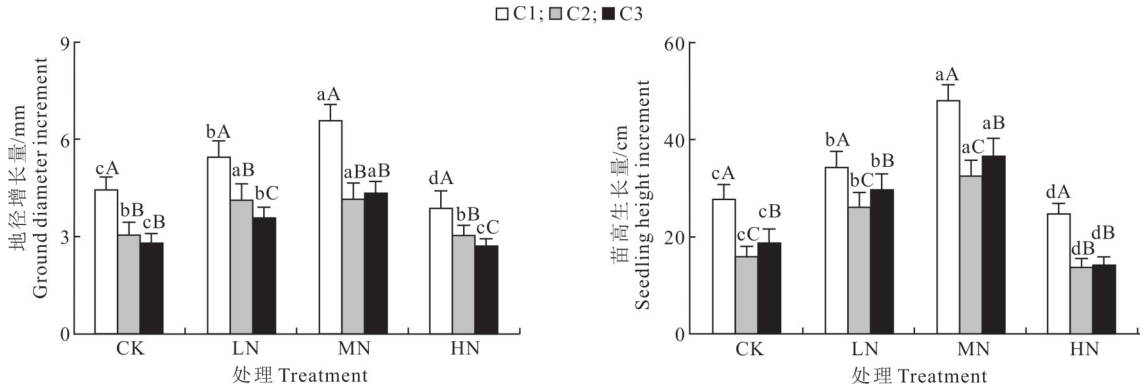


图 2 铵态氮添加对马尾松无性系苗高生长的影响

Fig. 2 Effects of ammonium nitrogen addition on seedling height growth of *Pinus massoniana* clones



图柱上标不同小写字母表示同一无性系不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一处理下不同无性系间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments for the same clone ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences among clones under the same treatment ($P<0.05$).

图 3 铵态氮添加对马尾松无性系地径增长量和苗高增长量的影响

Fig. 3 Effects of ammonium nitrogen addition on ground diameter and seedling height increment of *Pinus massoniana* clones

由图3还可知，在相同铵态氮添加水平下，马尾松无性系间地径增长量存在显著差异（$P<0.05$）。其中无性系C1在各处理下的地径增长量均最大，分别比无性系C2和C3提高了27.8%～57.6%和42.9%～58.4%；无性系C2地径增长量除在MN处理下略低于无性系C3外，在其余处理下均较无性系C3提高了8.9%～15.2%。

由图3还可知，随着铵态氮添加水平的增加，3个无性系的苗高增长量亦呈现先增大后减小趋势。其中以MN处理苗高增长量最大，为32.6～48.0 cm；LN处理次之，为25.9～34.2 cm；HN处理最小，仅为13.8～24.7 cm；不同处理间苗高增长量差异显著（$P<0.05$）。与CK相比，无性系C1、C2、C3苗高增长量在LN处理下分别提高了22.8%，62.7%和57.8%，在MN处理下分别提高了72.6%，104.4%和94.7%，但在HN处理下分别降低了11.4%，13.6%和24.0%。相同铵态氮添加水平下，马尾松不同无性系间苗高增长量差异显著（$P<0.05$）。其中以无性系C1苗高增长量最大，在各处理下比无性系C2、C3分别提高了31.7%～79.1%和15.2%～72.5%；无性系C3次之，在各处理下比无性系C2提高了3.8%～17.9%。

2.4　基因型、铵态氮及二者交互作用对马尾松苗木生长的影响

以不同铵态氮添加水平下马尾松无性系苗木单株地径增长量和苗高增长量为统计单元进行方差分析，发现基因型（无性系）、铵态氮及二者交互作用对马尾松地径增长量和苗高增长量的影响均达到显著（$P<0.05$）或极显著（$P<0.01$）水平（表1）。

表1　基因型、铵态氮及二者交互作用对马尾松苗木地径增长量和苗高增长量的影响

Table 1　Effects of genotype, ammonium nitrogen, and their interaction on ground diameter and seedling height increments of *Pinus massoniana* seedlings

变异来源 Variation source	性状 Trait	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value	相对贡献率/% Relative contribution rate
基因型（无性系）Genotype(clone)	地径增长量 Ground diameter increment	145.3	72.7	44.5	<0.01	75.3
	苗高增长量 Seedling height increment	1 033.9	517.0	4.5	<0.05	12.9
铵态氮 Ammonium nitrogen	地径增长量 Ground diameter increment	16.1	5.4	3.3	<0.05	8.3
	苗高增长量 Seedling height increment	1 559.0	520.0	4.5	<0.05	19.5
基因型（无性系）×铵态氮 Genotype(clone)×Ammonium nitrogen	地径增长量 Ground diameter increment	31.6	5.3	3.2	<0.05	16.4
	苗高增长量 Seedling height increment	5 398.8	899.80	7.9	<0.01	67.6

为进一步揭示和量化基因型（无性系）、铵态氮及二者交互作用对马尾松苗木地径增长量和苗高增长量影响的大小程度，分别计算了三者的相对贡献率。由表1可知，在地径增长量方面，以基因型（无性系）的相对贡献率最大，达到75.3%；基因型（无性系）与铵态氮交互作用的相对贡献率次之，为16.4%；铵态氮的相对贡献率最小，仅为8.3%。在苗高增长量方面，以基因型（无性系）与铵态氮交互作用的相对贡献率最大，为67.6%，铵态氮的相对贡献率次之，为19.5%；基因型（无性系）的相对贡献率最小，仅为12.9%。从变异因素看，基因型（无性系）对马尾松地径增长量的相对贡献率较苗高增加了62.4个百分点，铵态氮、基因型（无性系）与铵态氮互作对苗高增长量的相对贡献率分别比对地径的增加了11.2和51.2个百分点。表明马尾松无性系苗木地径增长量可能更多受到遗传因素的影响，而苗高增长量则与铵态氮（环境养分变化）的关系更为紧密。

3　讨　论

施肥是人为改变植物生长的营养环境，以期实现优质壮苗繁育和速生高产的重要技术举措，多年来一直是人们研究的重点和热点[8,10-13]。本研究针对马尾松喜铵态氮的特性[18-19]，探讨了铵态氮添加对马尾松无性系苗木地径和苗高生长过程、增长量的影响，并分析了无性系品种、铵态氮及二者交互作用对苗木地径和苗高增长量的相对贡献率。结果表明，在试验初期（2－8月），各处理下马尾松无性系苗木地径和苗高均表现为快速增长，而在后期（8－12月）地径和苗高的生长速率逐渐减缓，整个生长过程呈现“S型”。这一类型的生长曲线符合植物生长的一般规律，与大多数研究结果[23-25]类似。添加铵态氮显著影响了参试马尾松无性系苗木地径和苗高的生长，在低水平铵态氮添加处理（如

LN,0.4 g/株)下,马尾松各无性系苗木地径和苗高均有不同程度的提高,这可能是因为添加适量铵态氮为苗木提供了必要的氮素营养,促进了细胞的伸长、分裂,增强了光合作用,从而有利于植株生长[26-27]。随着铵态氮添加水平的提高,参试马尾松无性系苗木地径和苗高生长进一步增加,在MN处理下达到最大值;但随后增长幅度有所减缓,在HN处理下表现出对苗木生长的抑制作用。这说明本研究中马尾松无性系苗木使用铵态氮的合理添加范围为0.4~1.2 g/株,而添加阈值可能为1.2~2.4 g/株;当铵态氮添加量超过这一阈值,过多的铵态氮可能会对马尾松无性系苗木正常的生理代谢、土壤环境等产生不利影响[28-30],从而导致植株生长下降。

万延慧等[12]研究发现,不同基因型青菜在相同氮素处理下的地上部分质量存在明显差异。赵燕等[31]研究表明,不同无性系毛白杨苗木的生长和生理指标对相同施肥处理的响应不一致。本研究中,不同马尾松无性系(C1~C3)对铵态氮添加的响应存在显著差异($P<0.05$),在相同铵态氮添加水平下,各马尾松无性系的地径和苗高增长量差异显著($P<0.05$)。在LN处理下,无性系C1的地径增长量分别比无性系C2和C3提高了31.7%和51.7%,苗高增长量分别提高了31.7%和15.2%。这可能是不同马尾松无性系的不同基因型遗传特性差异导致其对铵态氮的利用能力不同。已有研究显示,植物对养分的吸收和利用能力与其遗传背景密切相关,某些基因型(无性系)可能具有更强的氮素吸收能力和更高的氮素利用效率[32-33]。在本研究中,无性系C1在地径和苗高生长方面均表现最佳,这可能与其对铵态氮的高效利用能力有关,而无性系C3在高氮(HN,2.4 g/株)下表现相对较差,则可能与其对高氮环境的适应能力较弱有关。因此,在马尾松无性系苗木繁育实践中,可针对不同无性系对铵态氮的响应特性研制差异化精准施肥方案[31]。在实际造林中,选择氮素利用效率较高的马尾松无性系(如C1)可能更有助于提高造林效果。

杨延兵等[8]研究发现,施氮量、品种及其交互作用等显著影响小麦的产量和蛋白质含量,但各因素的相对贡献率不尽相同。张希等[22]研究表明,烤烟基因型对多酚类物质的相对贡献率为2.5%~16.0%,施氮量对多酚类物质的相对贡献率为38.3%~67.8%,基因型与施氮量互作效应对多酚类物质的相对贡献率为15.0%~51.5%。本研究结果表明,马尾松基因型(无性系)对其地径增长量的相对贡献率为75.3%,远高于铵态氮(相对贡献率8.3%)和二者交互作用(相对贡献率16.4%)。而在苗高增长量方面,二者交互作用的相对贡献率最大(67.56%),铵态氮相对贡献率(19.5%)比基因型(无性系)(12.9%)提高了6.6个百分点。周明慧等[34]、赵桂仿等[35]和WEI等[36]的研究结果显示,地径生长属于由形成层活动产生各种次生组织使植物体变粗的次生生长,作为机械支撑和结构稳定性指标,其更多受发育程序的遗传调控;苗高生长则是植物顶端分生组织分化引起的植物器官的初生生长,作为形态功能和资源竞争相关性状,其可塑性更易受环境因子(如立地条件)和基因型与环境互作效应的影响。这说明本研究中马尾松无性系苗木的地径生长可能受遗传因素的影响程度较大,而苗高生长对基因型与养分互作效应和养分变化更为敏感,这在一定程度上揭示了马尾松无性系差异化精准施肥、无性系多点试验综合评价选育的重要性,同时也为"基因型-施肥量-立地条件"三位一体高效栽培调控模型的建立提供了启示。

本研究揭示了不同基因型马尾松无性系在不同铵态氮添加水平下苗期主要生长性状的差异,但由于观测周期较短,加之观测指标较少,未能评估铵态氮添加对马尾松各无性系苗木生长的长期影响,以及进一步解析铵态氮吸收利用的内在机制和分子机制。此外,本研究仅测试了3个马尾松无性系,未来将扩大试验材料的遗传多样性,更为全面地评估马尾松不同基因型的铵态氮利用潜力,挖掘更多高氮效率优异无性系,为马尾松遗传育种和高效栽培提供新的材料支持。

4 结 论

本研究探讨了铵态氮添加对马尾松无性系苗木地径、苗高生长过程及增长量的影响,揭示了氮素调控与遗传背景对马尾松苗木生长的交互作用。结果表明,铵态氮添加对马尾松无性系地径和苗高生长均具有显著影响,且生长过程呈"S"型增长规律。中等施氮量(MN,1.2 g/株)能够显著促进苗木生长,而过量施氮(HN,2.4 g/株)则可能对其生长产生抑制作用。马尾松不同无性系对铵态氮添加的响应存在显著差异,可能与其氮素利用效率和遗传背景有关。基因型(无性系)、铵态氮及二者交互

作用对马尾松苗木生长具有显著影响，其中地径生长可能主要受遗传因素控制，而基因型与铵态氮交互作用在苗高生长中的作用更为突出。

[参考文献]

[1] 邢瑶，马兴华．氮素形态对植物生长影响的研究进展[J]．中国农业科技导报，2015，17(2)：109-117.
XING Y，MA X H. Research progress on effect of nitrogen form on plant growth[J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2015，17(2)：109-117.

[2] 李珊，黄允智，刘学英，等．作物氮肥利用效率遗传改良研究进展[J]．遗传，2021，43(7)：629-640.
LI S，HUANG Y Z，LIU X Y，et al. Genetic improvement of nitrogen use efficiency in crops[J]. Hereditas，2021，43(7)：629-640.

[3] 毛晋花，邢亚娟，马宏宇，等．氮沉降对植物生长的影响研究进展[J]．中国农学通报，2017，33(29)：42-48.
MAO J H，XING Y J，MA H Y，et al. Research progress of nitrogen deposition effect on plant growth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2017，33(29)：42-48.

[4] HU M J，WAN S Q. Effects of fire and nitrogen addition on photosynthesis and growth of three dominant understory plant species in a temperate forest[J]. Journal of Plant Ecology，2019，12：759-768.

[5] 张丹丹，李婧，郭琪，等．氮添加对杉木人工林土壤氮有效性、溶解性有机氮和酸化的影响[J]．西北农林科技大学学报(自然科学版)，2019，47(12)：77-85，114.
ZHANG D D，LI J，GUO Q，et al. Effects of nitrogen addition on soil nitrogen availability，dissolved organic nitrogen and acidification in a Chinese fir plantation[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2019，47(12)：77-85，114.

[6] 宋可欣，王丽霞，刘永霞，等．根际微生态环境中氮源转化及循环研究进展[J]．中国农学通报，2024，40(21)：91-98.
SONG K X，WANG L X，LIU Y X，et al. Progress in research on nitrogen source transformation and cycle with in the rhizosphere micro-ecological environment[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2024，40(21)：91-98.

[7] 张彦东，白尚斌．氮素形态对树木养分吸收和生长的影响[J]．应用生态学报，2003，14(11)：2044-2048.
ZHANG Y D，BAI S B. Effects of nitrogen forms on nutrient uptake and growth of trees[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2003，14(11)：2044-2048.

[8] 杨延兵，高荣岐，尹燕枰，等．氮素与品种对小麦产量和品质性状的效应[J]．麦类作物学报，2005，25(6)：78-81.
YANG Y B，GAO R Q，YIN Y P，et al. Effects of nitrogen and variety on yield and quality traits of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops，2005，25(6)：78-81.

[9] INTHAPANYA P，SIPASEUT H，SIHAVONG P，et al. Genotype differences in nutrient uptake and utilisation for grain yield production of rainfed lowland rice under fertilised and non-fertilised conditions[J]. Field Crops Research，2000，65(1)：57-68.

[10] 郭亚芬，米国华，陈范骏，等．硝酸盐供应对玉米侧根生长的影响[J]．植物生理与分子生物学学报，2005，31(1)：90-96.
GUO Y F，MI G H，CHEN F J，et al. Effect of NO_3^- supply on lateral root growth in maize plants[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology，2005，31(1)：90-96.

[11] 李天芳，姜静，王雷，等．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 T F，JIANG J，WANG L，et al. Effects of prescription fertilization on the seedling growth of different families of *Betula platyphylla*[J]. Scientia Silvae Sinicae，2009，45(2)：60-64.

[12] 万延慧，宋云鹏，田守波，等．硝态氮对不同基因型青菜生长和硝酸盐含量及酶活性的影响[J/OL]．分子植物育种，2022(2022-10-17)[2025-05-20]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221017.1113.006.html.
WAN Y H，SONG Y P，TIAN S B，et al. Effects of NO_3^--N supply on the growth and the nitrate contents，NR activity of different genotypic pakchoi[J/OL]. Molecular Plant Breeding，2022(2022-10-17)[2025-05-20]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221017.1113.006.html.

[13] 张磊，董孔军，何继红，等．不同基因型糜子品种氮磷养分吸收差异研究[J]．作物杂志，2024(2)：228-233.
ZHANG L，DONG K J，HE J H，et al. Study on the difference of nitrogen and phosphorus uptake of different genotypes of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) varieties[J]. Crops，2024(2)：228-233.

[14] 周政贤．中国马尾地松[M]．北京：中国林业出版社，2000：1-10.
ZHOU Z X. Masson pine in China[M]. Beijing：China Forestry Publishing House，2001：1-10.

[15] 曾嫣冰，周运超，张伟，等．马尾松优良种源对N肥的响应[J]．贵州林业科技，2016，44(1)：1-8，20.
ZENG Y B，ZHOU Y C，ZHANG W，et al. Rosponse of superior provenance of *Pinus massoniana* to N fertilizer[J]. Guizhou Forestry Science and Technology，2016，44(1)：1-8，20.

[16] 钟安良，俞新妥，何智英．氮、磷、钾肥对马尾松苗生长和生理特性的影响[J]．福建林业科技，1990，17(1)：1-10.
ZHONG A L，YU X T，HE Z Y. Effects of nitrogen，phosphorus and potassium fertilizer on growth and physiological characteristics of *Pinus massoniana* seedlings[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology，1990，17(1)：1-10.

[17] 杨石清，张余炳，周华光，等．马尾松苗木施肥效果研究[J]．福建林学院学报，1996，16(3)：224-228.
YANG S Q，ZHANG Y B，ZHOU H G，et al. A study on the effects of masson pine seedlings fertilization[J]. Journal of Fujian College of Forestry，1996，16(3)：224-228.

[18] 王胤，姚瑞玲．马尾松组培苗对氮素形态的生长响应[J]．广西植物，2021，41(6)：922-929.
WANG Y，YAO R L. Growth responses of tissue cultured seedlings in *Pinus massoniana* to nitrogen forms[J]. Guihaia，2021，41(6)：922-929.

[19] 王胤，姚瑞玲．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,2021,41(3):18-24,71.
WANG Y,YAO R L. Effects of different nitrogen forms and ratios on growth of tissue cultured seedlings in *Pinus massoniana*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(3):18-24,71.

[20] 蔡磊,王胤,周家春,等. 桐棉马尾松无性系在贵州南部的生长表现及初步选择[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(9):54-62.
CAI L,WANG Y,ZHOU J C,et al. Growth performance and preliminary selection of Tongmian *Pinus massoniana* clones in southern Guizhou[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2025,53(9):54-62.

[21] WANG Y,YAO R L. Plantlet regeneration of adult *Pinus massoniana* Lamb. trees using explants collected in March and thidiazuron in culture medium[J]. Journal of Forestry Research,2017,28(6):1169-1175.

[22] 张希,王慧芳,代卓毅,等. 基因型、施氮量及其互作对烤烟多酚类物质的影响[J]. 作物杂志,2021(3):84-90.
ZHANG X,WANG H F,DAI Z Y,et al. Effects of genotype,nitrogen application rate and their interactions on polyphenols in flue-cured tobacco[J]. Crops,2021(3):84-90.

[23] 赵瑞,安钊仪,李春旭,等. 不同倍性白桦无性系苗期最佳施肥量的确定[J]. 东北林业大学学报,2017,45(7):1-6.
ZHAO R,AN Z Y,LI C X,et al. Best fertilizer rate of different ploidies birch clonal seedling[J]. Journal of Northeast Forestry University,2017,45(7):1-6.

[24] 杨彦伶,郑京津,张亚东,等. 10个美国紫薇家系苗期生长规律分析[J]. 林业科技开发,2008,22(6):70-73.
YANG Y L,ZHENG J J,ZHANG Y D,et al. Study on annual growth dynamics of ten *Lagerstroemia indica* families at seedling stage[J]. China Forestry Science and Technology,2008,22(6):70-73.

[25] 刘福妹,韦菊玲,庞圣江,等. 不同氮素水平对米老排苗期生长节律的影响[J]. 西部林业科学,2018,47(6):90-94.
LIU F M,WEI J L,PANG S J,et al. Effects of nitrogen fertilization on growth rhythm of *Mytilaria laosensis* seedlings[J]. Journal of West China Forestry Science,2018,47(6):90-94.

[26] 闫小莉,刘贵梅,李小玉,等. 不同水平氮添加和铵硝态氮比环境下木荷幼苗光合及叶绿素荧光特性[J/OL]. 植物生态学报,2025,(2025-02-12)[2025-05-20],https://link.cnki.net/urlid/11.3397.q.20250212.1257.006.html.
YAN X L,LIU G M,LI X Y,et al. Photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in *Schima superba* seedlings under different level of nitrogen addition and NH_4^+-N to NO_3^--N ratio[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2025,(2025-02-12)[2025-05-20],https://link.cnki.net/urlid/11.3397.q.20250212.1257.006.html.

[27] 陆华业,莫艺莛,郑绍鑫,等. 光氮互作对八角幼苗生长和生理特性的影响[J]. 广西林业科学,2024,53(2):152-159.
LU H Y,MO Y T,ZHENG S X,et al. Effects of light and nitrogen interactions on growths and physiological characteristics of *Illicium verum* seedlings[J]. Guangxi Forestry Science,2024,53(2):152-159.

[28] 李德军,莫江明,方运霆,等. 模拟氮沉降对三种南亚热带树苗生长和光合作用的影响[J]. 生态学报,2004,24(5):876-882.
LI D J,MO J M,FANG Y T,et al. Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthesis of *Schima superba*, *Castanopsis chinensis* and *Cryptocarya concinna* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(5):876-882.

[29] 刘双娥,李义勇,方熊,等. 不同氮添加量和添加方式对南亚热带4个主要树种幼苗生长的影响[J]. 植物生态学报,2015,39(10):950-961.
LIU S E,LI Y Y,FANG X,et al. Effects of the level and regime of nitrogen addition on seedling growth of four major tree species in subtropical China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2015,39(10):950-961.

[30] ESTEBAN R,ARIZ I,CRUZ C,et al. Review:mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance[J]. Plant Science,2016,248:92-101.

[31] 赵燕,董雯怡,张志毅,等. 施肥对毛白杨杂种无性系幼苗生长和光合的影响[J]. 林业科学,2010,46(4):70-77.
ZHAO Y,DONG W Y,ZHANG Z Y,et al. Effects of fertilization on seedling growth and photosynthesis of hybrid clone seedlings of *Populus tomentosa*[J]. Scientia Silvae Sinicae,2010,46(4):70-77.

[32] 江立庚,戴廷波,韦善清,等. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价[J]. 植物生态学报,2003,27(4):466-471.
JIANG L G,DAI T B,WEI S Q,et al. Genotypic differences and valuation in nitrogen uptake and utilization efficiency in rice[J]. Acta Phytoecologica Sinica,2003,27(4):466-471.

[33] 刘希华,丁昌俊,张伟溪,等. 不同基因型欧洲黑杨幼苗氮素利用效率差异及其机理初探[J]. 林业科学研究,2010,23(3):368-374.
LIU X H,DING C J,ZHANG W X,et al. Study on difference and primarily mechanism of nitrogen uses efficiency (NUE) in *Populus nigra* seedlings genotypes[J]. Forest Research,2010,23(3):368-374.

[34] 周明慧,张婷,李荣平,等. 光温水对树木初生生长和次生生长影响的研究进展[J]. 应用生态学报,2024,35(9):2455-2462.
ZHOU M H,ZHANG T,LI R P,et al. Research progresses on the effects of light,temperature and water conditions on primary and secondary growth of trees[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(9):2455-2462.

[35] 赵桂仿. 植物学[M]. 2版北京:科学出版社,2022:96-113.
ZHAO G F. Botany[M]. 2nd ed. Beijing:Science Press,2022:96-113.

[36] WEI J L,GUO T T,MU Q,et al. Genetic and environmental patterns underlying phenotypic plasticity in flowering time and plant height in sorghum[J]. Plant,Cell & Environment,2025,48(4):2727-2738.

(责任编辑:陈丽)