

缓释肥对马尾松苗木生长和根系形态建成的影响*

陈一群¹ 何波祥¹ 黄建雄² 张谦¹
梁东成¹ 詹金婵¹ 潘庆优² 蔡燕灵¹

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 2 信宜市林业科学研究所, 广东 信宜 525300)

摘要 缓释肥的应用是提高苗木质量和生产效率的有效途径。研究以马尾松 *Pinus massoniana* 轻基质容器苗为培育目标, 以材用和脂用马尾松家系为材料, 采用三因素随机区组试验设计, 开展缓释肥养分配比和施用量的育苗试验, 筛选适宜的缓释肥养分配比和施用量。缓释肥 N-P-K 配比的试验梯度分别为 18-5-12、20.5-4.5-10 和 23-4-8, 施用量试验梯度为 1.5、2.0 和 2.5 kg·m⁻³。结果表明: 缓释肥的 NPK 配比、施用量及其交互作用对苗木的生长量、生物量和根系形态指标的影响显著。适当降低缓释肥中氮的占比, 提高磷和钾的占比, 显著提高了苗木的苗高、地径生长量以及茎叶和根的生物量, 苗木根系的主根长、平均直径和总体积也显著增加。1 a 生苗高、地径和根系的质量、根冠比随着缓释肥施用量的增加而增大, 其根系的主根长、总根长、表面积和总体积也随着显著提高。说明适量添加缓释肥进行平衡施肥, 能够促进株高和地径的生长以及根系的形态建成, 有利于苗木的生长和物质的累积。适宜马尾松轻基质育苗的缓释肥 N-P-K 配比为 20.5-4.5-10, 施用量以 2.5 kg·m⁻³ 为宜, 苗木的生长量、生物量和根系总体积与试验群体均值相比整体提高 15% 以上。

关键词 马尾松; 缓释肥; 育苗; 根系形态

中图分类号: S722.8 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 04-0016-08

Effects on the Growth and Root Morphogenesis of *Pinus massoniana* Seedlings under Different Slow-released Fertilizer Application

CHEN Yiqun¹ HE Boxiang¹ HUANG Jianxiong² ZHANG Qian¹
LIANG Dongcheng¹ ZHAN Jinchan¹ PAN Qingyou² CAI Yanling¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Forestry Research Institute of Xinyi City, Xinyi, Guangdong 525300, China)

Abstract The application of slow-release fertilizer is an effective way to improve seedling quality and production efficiency. In order to determine the proper nutrient proportion and application rate of slow-release fertilizer for *Pinus massoniana* seedling cultivation with light substrate, a randomized block experiment with three random factors was conducted using timber- and resin-yielding masson pine families. Seedlings were treated with 1.5, 2.0, and 2.5 kg·m⁻³ slow-release fertilizers of 18-5-12, 20.5-4.5-10, and 23-4-8 of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K), respectively. The nutrient proportion and application rate of slow-release fertilizer and their interaction exerted significant effect on the seedling growth and root morphogenesis by reducing the

* 基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0600301)。

第一作者: 陈一群 (1980 —), 女, 助理工程师, 主要从事森林培育等方面的工作, E-mail: 58997909@qq.com。

通信作者: 蔡燕灵 (1979 —), 女, 研究员, 主要从事林木育种与森林培育等方面的工作, E-mail: caiyl@sinogaf.cn。

proportion of nitrogen and increasing the proportion of phosphorus and potassium in slow-release fertilizer properly, the seedling height, ground diameter growth, and biomass of stem, leaf, and root were significantly increased. The total length, average diameter, surface area, volume of seedling roots, and number of lateral roots also increased significantly. Greater application rate of slow-release fertilizer significantly increased the plant height, stem diameter, root weight, root to shoot ratio, the total length, surface area and volume of the seedling roots. The results indicated that balanced fertilization with slow-release fertilizer of suitable nutrient proportion could promote the growth of plant height, diameter of ground, and its morphogenesis of root system, which was beneficial to the seedling growth and dry material accumulation. The suitable proportion of N, P, K in slow-release fertilizer for *P. massoniana* seedling cultivation with light substrate was 20.5-4.5-10, and the corresponding application rate of the slow-release fertilizer was $2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Under this treatment, the growth and the biomass of seedlings increased by more than 15% compared with the average value of the experimental population.

Key words *Pinus massoniana*; slow-release fertilizer; seedling cultivation; root morphogenesis

马尾松 *Pinus massoniana* 属松科松属, 是我国亚热带森林分布最广、资源最丰富的针叶树种之一。它适应性、抗逆性强、容易栽培、生长迅速, 具有耐干旱、耐瘠薄等特点, 是我国南方特有的用材和产脂的重要树种。其木材主要用于建筑、矿柱、制板、枕木、包装箱、胶合板等。木材纤维素含量高, 在脱脂处理后可为造纸和人造纤维工业提供重要的原料。松脂经过加工处理制成松香产品, 主要用于油墨、涂料、食品、电器等领域, 松香改性产品更是广泛应用于生物医药、生物农药和生物质材料等产业^[1]。马尾松材脂应用广泛, 经营马尾松林可为山区带来一定的经济效益和生态效益, 也带动了松树产业的发展^[2-4]。

优质种苗是营造林成功的物质基础。苗木健康生长以及平衡根系的形成, 离不开合理的养分供给。传统育苗多采用速溶性复合肥, 通过少量多次施肥来满足苗木生长的需求。缓释肥是一种新型的长效肥料, 多以包膜包裹肥料使其中的养分元素缓慢释放, 释放速率与植物养分吸收相对同步^[5-6]。近年来, 施用缓释肥成为种植业, 特别是水稻、小麦、油菜和棉花等作物栽培中提高肥料利用效率, 降低施肥人工成本的有效技术措施之一^[7-11]。

在林木中, 已有研究分析了缓释肥的养分元素比例及其施用量对南方红豆杉 *Taxus wallichiana*、木荷 *Schima superba* 和赤皮青冈 *Cyclobalanopsis gilva* 等树种苗木生长和养分吸收的影响^[12-14], 但在马尾松育苗上的应用多凭生产经验, 较少开展有针对性的研究^[15]。为了进一步提高马尾松轻

基质容器苗的苗木质量和育苗效率, 本研究以材用和脂用两个系列马尾松优良品系为试验材料, 开展缓释肥养分配比和施用水平的试验研究, 为马尾松轻基质苗木生产提供配套的缓释肥施肥技术措施。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验苗圃位于广东省信宜市林业科学研究所, 地处东经 $110^{\circ}57'24''$, 北纬 $22^{\circ}20'58''$, 海拔 100~200 m, 属南亚热带季风气候。温暖多雨、光热充足, 无霜期 347~355 d, 夏季平均气温 22.4°C , 最冷为 1 月, 平均气温 14.7°C , 最热为 7 月, 平均气温 28.2°C 。年均相对湿度 77%, 年降雨量为 1 800 mm, 年平均日照时数为 1 939 h。

1.2 试验设计

2018 年 3 月, 采用广东省信宜市林业科学研究所马尾松种子园培育的材用系列家系 W66 和脂用系列家系 G31 的种子, 在沙床上播种催芽, 当芽苗出土高度达到 4~5 cm 时, 移植到育苗容器中开展试验。育苗容器采用 15 孔的泡沫育苗架, 育苗孔直径 8.2 cm, 高 11.0 cm, 用泥炭土和珍珠岩按 9 : 1 的比例, 并添加缓释肥混合均匀后填装在育苗孔中作为育苗基质。采用以色列化工集团 (ICL) 生产的耐施利包膜型缓释肥开展施肥试验, 包括不同的氮、磷、钾配比和施用量, 各 3 个水平梯度, 采用材用家系 W66 和脂用家系 G31, 进行三因素随机区组试验 (表 1), 共 9 个缓释肥施用处理, 每个处理设置 3 重复, 每重复中每个家

表 1 各因素的试验梯度水平设置

Table 1 Test gradient level setting of three factors

因素 Factor	处理 Treatment	试验梯度 Test gradient level
缓释肥 Slow-release fertilizers	R1	N-P-K 配比 18-5-12
	R2	N-P-K 配比 20.5-4.5-10
	R3	N-P-K 配比 23-4-8
施用量 Application rate	Q1	施用量 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	Q2	施用量 $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	Q3	施用量 $2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

表 2 不同因素处理下马尾松苗木生长量方差分析

Table 2 ANOVA of seedling growth of masson pine under different treatments of factors

变异来源 Variable	自由度 Degree of freedom	半年生苗高 Semi-annual seedling height		半年生地径 Semi-annual seedling ground diameter		一年生苗高 Annual seedling height		一年生地径 Annual seedling ground diameter	
		F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value
		缓释肥 Slow-release fertilizers	2	459.85	<0.000 1	221.09	<0.000 1	479.39	<0.000 1
施用量 Application rate	2	18.32	<0.000 1	0.37	0.689	27.43	<0.000 1	14.08	<0.000 1
家系 Family	1	1 327.31	<0.000 1	84.05	<0.000 1	1 875.95	<0.000 1	20.95	<0.000 1
缓释肥 × 施用量 Slow-release fertilizers × Application rate	4	130.38	<0.000 1	66.43	<0.000 1	187.43	<0.000 1	53.54	<0.000 1
缓释肥 × 家系 Slow-release fertilizers × Family	2	132.09	<0.000 1	52.76	<0.000 1	97.11	<0.000 1	18.52	<0.000 1
施用量 × 家系 Application rate × Family	2	14.5	<0.000 1	0.72	0.489	8.41	0.000 2	4.38	0.012 6
缓释肥 × 施用量 × 家系 Slow-release fertilizers × Application rate × Family	4	42.11	<0.000 1	15.59	<0.000 1	39.28	<0.000 1	9.5	<0.000 1
重复 Repeat	2	8.51	0.000 2	4.7	0.009 2	7.75	0.000 4	5.06	0.006 4
误差 Error	3 312								

系各育苗 90 株。与试验群体平均值为对照，比较分析各处理的施肥效果。

1.3 项目测定

每个处理调查 3 个重复，每个重复每个家系随机抽取 30 株苗木，调查半年生和一年生时的苗高、地径生长量。在一年生时通过破坏性取样测定苗木叶、茎、主根和侧根的干质量，每个处理调查 3 个重复，每个重复每个家系 5 株，并采用

爱普生 Epson Expression 11000XL 根系扫描仪测量苗木根系的总长度、总表面积、平均直径和根总体积等指标。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 软件整理数据，采用 SAS 9.4 统计软件的 GLM 等模块进行方差分析和多重比较^[16]。

2 结果与分析

2.1 缓释肥对马尾松苗木生长量的影响

2.1.1 苗木生长量的差异分析 由表 2 可知, 缓释肥、施用量、家系在不同处理间, 苗木的半年生和一年生苗高生长量均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 这三个因素之间的两两交互作用以及缓释肥 \times 施肥量 \times 家系的交互作用对苗高的影响也都达到极显著水平。在地径方面, 不同施用量处理间半年生地径生长量差异不显著, 施用量与家系之间的交互作用对半年生和一年生地径的生长量影响不显著, 其余试验因素及因素之间的交互作用对半年生和一年生地径生长量的影响都达到极显著水平。

从表 3 可以看出, 不同缓释肥处理间, 处理 R2 的半年生和一年生苗高、地径生长量都显著高于其它 2 个处理, 处理 R3 的苗高和地径生长量最小。从苗木的高生长情况来看, 不同缓释肥施用量中, 无论是半年生还是一年生, 处理 Q3 的苗高显著高于其它 2 个处理, 处理 Q1 的苗高生长量最小。地径生长方面, 3 个处理的半年生地径生长量比较接近, 到一年生时, 处理 Q3 的地径显著大于其它 2 个处理。不用家系的苗木生长量也有不同, 材用系列家系的苗高和地径显著大于脂用系列。

2.1.2 马尾松苗木生长量对缓释肥的响应 从表 3 可以看出, 在试验范围内, 处理 R2 的半年生和一年生苗高分别达到 27.22 和 53.05 cm, 比处理 R3 分别提高了 31.84% 和 38.93%, 比群体均

值分别提高了 9.09% 和 10.17%。在缓释肥施用量方面, 半年生苗高随着缓释肥施用量的增加而增大, 与处理 Q1 相比, 处理 Q2 和 Q3 的苗高分别提高了 5.25% 和 10.32%, 至一年生时, 苗高保持了原有的增长趋势, 处理 Q3 的苗高分别比处理 Q1 和 Q2 提高了 3.28% 和 8.35%, 同时, 不同处理间地径的差异开始增大, 处理 Q3 的苗木地径比处理 Q1 和 Q2 分别提高了 4.72% 和 4.88%。在 R2 和 Q3 的组合处理下, 一年生苗高和地径分别为 58.69 cm 和 0.79 cm, 分别比群体均值提高了 18.35% 和 16.18%。家系 W66 的生长优势主要体现在苗高上, 半年生和一年生时的苗高分别达到 27.51 和 54.53 cm, 比 G31 提高了 33.93% 和 49.81%。

2.2 缓释肥对马尾松苗木生物量的影响

2.2.1 苗木生物量累积的差异分析 从表 4 可以看出, 不同 NPK 配比的缓释肥处理间的叶、茎、主根和侧根的质量以及根冠比均存在极显著差异 ($P < 0.01$); 不同施用量处理间的主根、侧根等地下部分的重量以及根冠比差异也极显著, 而叶、茎等地上部分的质量差异不显著; 不同系列的家系, 其苗木各部位的质量在家系间均存在极显著差异。缓释肥 \times 施用量、缓释肥 \times 家系间的交互作用对地上部分和地下部分的质量均存在极显著影响; 施用量 \times 家系的交互作用对茎和侧根的质量影响极显著, 对根冠比的影响显著; 缓释肥 \times 施肥量 \times 家系的交互作用对茎的质量产生极显

表 3 不同因素处理马尾松苗木生长量多重比较

Table 3 Multiple comparisons of the seedling growth of masson pine with different treatments of factors

因素 Factor	处理 Treatment	半年生苗高/cm Semi-annual seedling height	半年生地径/cm Semi-annual seedling ground diameter	一年生苗高/cm Annual seedling height	一年生地径/cm Annual seedling ground diameter
缓释肥 Slow-release fertilizers	R1	26.09 \pm 5.87 b	0.59 \pm 0.11 b	50.56 \pm 13.46 b	0.68 \pm 0.16 b
	R2	27.22 \pm 8.30 a	0.60 \pm 0.14 a	53.05 \pm 18.48 a	0.75 \pm 0.18 a
	R3	20.65 \pm 6.76 c	0.51 \pm 0.14 c	38.19 \pm 15.59 c	0.60 \pm 0.20 c
施用量 Application rate	Q1	23.81 \pm 5.97 c	0.56 \pm 0.12 b	46.05 \pm 14.25 c	0.67 \pm 0.17 b
	Q2	25.06 \pm 8.63 b	0.58 \pm 0.14 b	48.31 \pm 19.58 b	0.67 \pm 0.21 b
	Q3	26.27 \pm 7.80 a	0.57 \pm 0.15 a	49.89 \pm 17.20 a	0.70 \pm 0.17 a
家系 Family	F1	27.51 \pm 7.15 a	0.58 \pm 0.12 a	54.53 \pm 16.07 a	0.69 \pm 0.18 a
	F2	20.54 \pm 5.90 b	0.55 \pm 0.16 b	36.40 \pm 11.69 b	0.66 \pm 0.20 b
群体均值 Group mean		24.95 \pm 5.36	0.57 \pm 0.12	47.92 \pm 11.74	0.68 \pm 0.17

注: 结果表示为平均值 \pm 标准差; 不相同的英文字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。

Note: mean \pm SD, different letters indicate significant differences between treatments.

表 4 不同缓释肥处理马尾松苗木质量的方差分析
Table 4 ANOVA of seedling weight of masson pine treated with different slow-release fertilizers

变异来源 Variable	自由度 Degree of freedom	叶 Leaf		茎 Stem		地上部分 Above-ground		主根 Main root		侧根 Branch root		地下部分 Below-ground		根冠比 Root to shoot ratio	
		F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value
		缓释肥 Slow-release fertilizers	2	14.01	<0.000 1	99.91	<0.000 1	37.8	<0.000 1	33.93	<0.000 1	9.9	<0.000 1	25.69	<0.000 1
施用量 Application rate	2	2.81	0.062 2	1.86	0.157 8	2.04	0.131 7	9.21	0.000 1	18.16	<0.000 1	14.73	<0.000 1	12	<0.000 1
家系 Family	1	8.01	0.005	58.8	<0.000 1	22.12	<0.000 1	7.91	0.005 3	90.49	<0.000 1	22.95	<0.000 1	0.02	0.886 3
缓释肥 × 施用量 Slow-release fertilizers × Application rate	4	9.17	<0.000 1	32.39	<0.000 1	16.84	<0.000 1	10.72	<0.000 1	11.55	<0.000 1	8.25	<0.000 1	2.08	0.083 4
缓释肥 × 家系 Slow-release fertilizers × Family	2	3.2	0.042 4	27.47	<0.000 1	9.49	0.000 1	7.35	0.000 8	6.69	0.001 5	7.93	0.000 5	2.24	0.108 3
施用量 × 家系 Application rate × Family	2	1.42	0.243 4	4.87	0.008 4	2.45	0.088 7	2.85	0.059 9	4.75	0.009 5	3.74	0.025	3.71	0.025 9
缓释肥 × 施用量 × 家系 Slow-release fertilizers × Application rate × Family	4	0.76	0.554 3	6.25	<0.000 1	2.04	0.089 9	0.85	0.495 9	1.37	0.245 9	0.99	0.412 6	1.66	0.161
重复 Repeat	4	1.22	0.301 4	1.06	0.378 4	1.53	0.194 1	1.01	0.405 2	0.27	0.899 9	1.05	0.383 1	0.24	0.914 1
误差 Error	246														

著影响，对其它指标影响不显著。

从表 5 可以看出，处理 R1 和 R2 的地上部分质量大于处理 R3，其中处理 R2 的叶和茎干质量最大，R1 次之，R3 最小；处理 R2 的地下部分质量显著大于处理 R1 和 R3，这主要表现在主根上，处理 R2 的主根质量最大，R1 次之，R3 最小，而处理 R3 的侧根质量要略高于处理 R1 和 R2。不同缓释肥施用量处理的叶、茎等地上部分的质量大小都比较相近，处理 Q3 的主根、侧根等地下部分的质量大于处理 Q1 和 Q2。材用系列的苗木各部分质量均显著高于脂用系列。在根冠比方面，处理 R2 和 R3 的根冠比显著大于 R1，处理 Q3 的根冠比显著大于处理 Q1 和 Q2，不用系列家系的根冠比非常相近。

2.2.2 马尾松苗木生物量对缓释肥的响应 从表 5 可以看出，在试验范围内，处理 R2 一年生苗木的地上部分和地下部分的质量最大，分别为 13.25 和 2.97 g，比生物量最低的处理 R3 分别提高了 49.55% 和 43.04%，比试验群体均值分别提高了 16.03% 和 17.93%，尤其茎和主根的质量增长幅度分别达到 18.58% 和 22.74%。在缓释肥施

用量方面，从植株的生物量变化来看，虽然一年生时，苗木叶、茎的生物量并没有随着施肥量的增加而有大幅度的提高，但根系的生物量却显著提高了，增加缓释肥用量对苗木根系生长的促进效果明显表现出来，处理 Q3 的主根和侧根质量分别比群体均值提高了 13.85% 和 21.60%，苗木的根冠比提高 3 个百分点以上。在 R2 和 Q3 的组合处理下，苗木的地上部分和地下部分质量分别为 15.23 和 3.60 g，比群体均值分别提高了 33.36% 和 42.86%。家系 W66 苗木的地上部分和地下部分质量分别比 G31 提高了 19.38% 和 21.44%。

2.3 缓释肥对马尾松苗木根系形态建成的影响

2.3.1 苗木根系形态指标的差异分析 在不同 NPK 配比的缓释肥处理间，主根长和根系总体积存在极显著差异（表 6），而其它 5 项指标在处理间的差异均不显著；在不同的施用量处理间，总根长、根表面积和总体积存在极显著差异，主根长在处理间存在显著差异，其余两项指标在处理间的差异均不显著；在不同家系间，除了主根长以外，其它 5 项根系形态指标均存在极显著差异。缓释肥 × 施用量间的交互作用对 6 项观测指标的

表 5 不同因素处理马尾松苗木生物量多重比较

Table 5 Multiple comparisons of the seedling biomass of masson pine with different treatments of factors

因素 Factor	处理 Treatment	叶 /g Leaf	茎 /g Stem	地上部分 /g Above-ground	主根 /g Main root	侧根 /g Branch root	地下部分 /g Below-ground	根冠比 /% Root to shoot ratio
缓释肥 Slow-release fertilizers	R1	6.32 ± 2.05 b	5.81 ± 1.49 a	12.15 ± 3.22 b	2.13 ± 0.84 b	0.38 ± 0.20 b	2.51 ± 0.84 b	20.83 ± 5.33 b
	R2	7.22 ± 3.27 a	6.10 ± 2.38 a	13.25 ± 5.40 a	2.57 ± 1.09 a	0.40 ± 0.20 b	2.97 ± 1.18 a	23.01 ± 6.40 a
	R3	5.38 ± 2.09 c	3.52 ± 1.74 b	8.86 ± 3.68 c	1.59 ± 0.77 c	0.50 ± 0.28 a	2.08 ± 0.87 c	24.49 ± 7.59 a
施用量 Application rate	Q1	6.10 ± 1.97 b	5.01 ± 1.41 a	11.11 ± 3.19 a	2.00 ± 0.84 b	0.39 ± 0.21 b	2.38 ± 0.94 b	21.61 ± 6.44 b
	Q2	6.03 ± 2.93 b	5.06 ± 2.64 a	11.11 ± 5.21 a	1.90 ± 1.01 b	0.37 ± 0.17 b	2.27 ± 1.04 b	21.38 ± 5.52 b
	Q3	6.79 ± 2.86 a	5.36 ± 2.43 a	12.03 ± 5.06 a	2.39 ± 1.05 a	0.52 ± 0.29 a	2.90 ± 1.04 a	25.34 ± 7.20 a
家系 Family	W66	6.71 ± 2.61 a	5.76 ± 2.33 a	12.43 ± 4.70 a	2.23 ± 1.02 a	0.53 ± 0.24 a	2.76 ± 1.06 a	22.81 ± 6.49 a
	G31	5.90 ± 2.61 b	4.53 ± 1.93 b	10.41 ± 4.25 b	1.96 ± 0.95 b	0.32 ± 0.18 b	2.27 ± 0.96 b	22.74 ± 6.84 a
群体均值 Group mean		6.31 ± 2.33	5.14 ± 1.40	11.42 ± 3.57	2.10 ± 0.80	0.42 ± 0.18	2.52 ± 0.84	22.78 ± 6.15

注：结果表示为平均值 ± 标准差；不相同的英文字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。

Note: mean ± SD, different letters indicate significant differences between treatments.

表 6 不同缓释肥处理马尾松根系生长指标方差分析结果

Table 6 ANOVA results of root indices of masson pine seedlings treated with different slow-release fertilizers

变异来源 Variable	自由度 Degree of freedom	主根长 Main root length		总根长 Total root length		主根占比 Main root ratio		表面积 Surface area		平均直径 Mean diameter		总体积 Total volume	
		F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
		F value	P value	F value	P value	F value	P value	F value	P value	F value	P value	F value	P value
缓释肥 Slow-release fertilizers	2	10.1	<0.000 1	1.09	0.336 7	0.16	0.855 7	1.29	0.278 2	2.44	0.089 3	9.54	0.000 1
施用量 Application rate	2	4.64	0.010 5	15.79	<0.000 1	2.25	0.107 2	19.32	<0.000 1	1.52	0.220 5	18.33	<0.000 1
家系 Family	1	0.76	0.384 3	87.89	<0.000 1	54.59	<0.000 1	92.63	<0.000 1	27.26	<0.000 1	63.21	<0.000 1
缓释肥 × 施用量 Slow-release fertilizers × Application rate	4	5.7	0.000 2	7.06	<0.000 1	7.11	<0.000 1	7.55	<0.000 1	5.15	0.000 5	7.07	<0.000 1
缓释肥 × 家系 Slow-release fertilizers × Family	2	9.14	0.000 1	6.36	0.002	1.4	0.249 7	7.18	0.000 9	3.14	0.045 1	6.81	0.001 3
施用量 × 家系 Application rate × Family	2	1.88	0.155 3	3.04	0.049 5	5.06	0.007	2.49	0.085 1	4.73	0.009 7	3.98	0.02
缓释肥 × 施用量 × 家系 Slow-release fertilizers × Application rate × Family	4	10.23	<0.000 1	3.08	0.016 9	2.2	0.069 4	2.52	0.041 6	2.29	0.06	1.04	0.385 7
重复 Repeat	4	0.08	0.924 1	0.58	0.559 6	0.07	0.929 7	0.56	0.574 7	1.12	0.328 9	0.78	0.458 7
误差 Error	250												

影响都达到极显著水平；缓释肥 × 家系间的交互作用对主根长、总根长、根表面积和总体积影响极显著，对平均直径的影响显著，而对主根占比影响不显著；施用量 × 家系间的交互作用对主根占比和平均直径的影响极显著，对总根长和总体积影响显著，而对其它 2 项指标均不产生显著影响；缓释肥 × 施用量 × 家系的交互作用对主根长影响极显著，对总根长和表面积影响显著。

从表 7 可以看出，不同缓释肥 NPK 配比之间，处理 R1 和 R2 的主根长显著大于 R3；处理

R2 的根平均直径显著大于处理 R1，处理 R3 平均直径的大小在两者之间；处理 R2 的根总体积显著大于 R1 和 R3。在不同缓释肥施用量之间，处理 Q3 的主根长、总根长、表面积和总体积都显著大于 Q1 和 Q2；处理 Q1 的根总体积显著大于 Q2。在不同系列的家系间，材用系列的根系总根长、表面积和总体积均显著大于脂用系列，而主根比例和平均直径显著小于脂用家系。

2.3.2 苗木根系形态建成对缓释肥的响应 由表 7 可知，不同养分配比的缓释肥处理下，马

表7 不同因素处理马尾松根系生长指标多重比较结果

Table 7 Multiple comparisons of root indices of masson pine seedlings with different treatments of factors

因素 Factor	处理 Treatment	主根长/cm Main root length	总根长/cm Total root length	主根比例/% Main root ratio	表面积/cm ² Surface area	平均直径/mm Mean diameter	总体积/cm ³ Total volume
缓释肥 Slow-release fertilizers	R1	236.35 ± 92.92 a	1 387.29 ± 628.35 a	19.84 ± 9.71 a	236.18 ± 82.39 a	0.57 ± 0.09 b	3.99 ± 1.12 b
	R2	229.06 ± 82.89 a	1 307.74 ± 601.51 a	20.37 ± 9.38 a	232.33 ± 87.56 a	0.60 ± 0.10 a	4.32 ± 1.52 a
	R3	191.66 ± 66.41 b	1 279.92 ± 691.56 a	19.52 ± 15.61 a	220.09 ± 100.38 a	0.58 ± 0.11 ab	3.61 ± 1.40 c
施用量 Application rate	Q1	213.63 ± 79.40 b	1 283.44 ± 657.42 b	21.04 ± 14.96 a	221.42 ± 90.09 b	0.59 ± 0.11 a	3.88 ± 1.26 b
	Q2	206.16 ± 88.02 b	1 137.09 ± 524.91 b	20.40 ± 9.87 a	201.80 ± 79.71 b	0.59 ± 0.09 a	3.53 ± 1.27 c
	Q3	237.28 ± 80.56 a	1 554.42 ± 665.41 a	18.29 ± 10.04 a	265.39 ± 89.77 a	0.57 ± 0.09 a	4.51 ± 1.45 a
家系 Family	W66	215.23 ± 91.49 a	1 613.43 ± 481.87 a	15.33 ± 8.10 b	270.70 ± 68.73 a	0.55 ± 0.11 b	4.51 ± 1.10 a
	G31	222.82 ± 74.83 a	1 036.54 ± 651.55 b	24.49 ± 13.24 a	188.37 ± 90.83 b	0.61 ± 0.07 a	3.44 ± 1.44 b
群体均值 Group mean		219.02 ± 76.33	1 324.98 ± 512.90	19.91 ± 10.38	229.53 ± 70.99	0.58 ± 0.09	3.97 ± 1.10

注: 结果表示为平均值 ± 标准差; 不相同的英文字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著。

Note: mean ± SD, different letters indicate significant differences between treatments.

尾松苗木的根系形态建成产生了变化。处理 R2 一年生苗木的主根长平均值达到 229.06 cm, 根系总体积平均值为 4.32 cm³, 比处理 R3 分别提高了 19.51% 和 19.67%, 比群体均值分别提高了 4.58% 和 8.82%; 其根系的平均直径达 0.60 mm, 比处理 R1 提高了 5.26%, 比群体均值提高了 3.45%, 根系比较发达, 这能够有效地提高苗木吸收水肥的能力。不同缓释肥用量作用不同, 处理 Q3 的主根长、总根长、表面积和总体积的平均值分别为 237.28 cm、1 554.42 cm、265.39 mm 和 4.51 cm³, 与处理 Q1 和 Q2 相比, 分别提高了 11.07%~15.10%、21.11%~36.70%、19.86%~31.51% 和 16.24%~27.78%, 比群体平均值分别提高了 8.34%、17.32%、15.62% 和 13.60%, 根系的总量随着缓释肥施用量的增加而增长。在 R2 和 Q3 的组合处理下, 苗木的主根长、总根长、表面积和总体积分别达到 249.23 cm, 1 414.86 cm、255.64 cm² 和 4.95 cm³, 比群体均值分别提高了 13.79%、6.78%、11.38% 和 24.69%。与脂用家系 G31 相比, 材用家系 W66 的根系总根长、表面积和总体积分别提高了 55.66%、43.71% 和 31.10%, 平均直径减少了 10.91%, 主根比例降低了 9 个百分点。

3 讨论与结论

在容器苗的培育过程中, 肥料为苗木生长提供了主要养分, 施肥能够影响植物叶片和根系的形态建成, 进而促进植株的生长^[17-18]。肥料中氮、磷和钾等主要元素的比例和施用量影响着苗木的

养分吸收和利用效率^[15,19-20]。氮素是苗木生长的主要养分元素, 增施氮肥能促进茎叶的生长发育。研究表明马尾松苗木对氮需求较高, 追施氮肥可显著提高茎、叶和根的干物质累积^[21-22]。另一方面, 也有研究发现过量的 N 肥会抑制马尾松幼苗生长, 对根系发育不利, 从而影响了苗木对水分的吸收能力^[23]。本试验中, 合适的缓释肥 NPK 配比和施用量显著提高了马尾松苗木的生长量和生物量, 也促进了苗木根系的生长发育和形态建成, 体现在苗木根系的长度、平均直径、表面积和总体积等方面, 这与黑木相思 *Acacia melanoxylon* 苗木根系特征变化对施肥响应的研究结果相似^[24]。

苗木不同生长阶段的养分需求是一个动态变化的过程。有研究应用指数施肥的方法, 将植物的指数生长与其营养需求相结合, 提高了肥料的利用效率^[25-26]。本研究的分析结果表明, 在一年生马尾松轻基质容器苗的培育过程中, 适当降低缓释肥中氮的占比, 提高磷和钾的占比, 能够促进苗木根系的形态建成, 提高根冠比, 有利于苗木的生长和物质的累积。同时在苗木培育的中后期, 根系生长日趋旺盛, 需要适当增加缓释肥用量, 来满足苗木生长, 特别是根系生长的养分需求。随着缓释肥用量的增加, 苗木根系的体量增长了, 进而促进了苗木的生长。与传统施肥和指数施肥相比, 采用缓释肥既能与苗木生长同步提供养分供应, 避免了过量施肥造成养分流失和环境污染, 同时大大减少了施肥频率, 节省了人工成本。

研究表明, 采用的 NPK 配比为 20.5-4.5-

10 的缓释肥, 施用量以 2.5 kg/m^3 为宜, 与试验的群体平均值相比, 马尾松一年生苗木的生长量提高了 15% 以上, 生物量提高 30% 以上, 根系的总体积提高了 20% 以上。在本研究中, 缓释肥的 NPK 配比和家系间的交互作用对大部分观测指标的影响都达到极显著水平, 材用系列家系在苗期就表现出比脂用系列较快的生长速度, 说明不同种质来源的苗木对养分的需求和利用效率存在差异^[15,27], 有必要进一步研究不同系列家系对养分需求的异同, 研发品系专一化的施肥配方, 以提高马尾松精细化育苗技术水平。

参考文献

- [1] 刘莉, 饶小平, 宋湛谦, 等. 我国松香改性产品及其应用的专利研究新进展[J]. 生物质化学工程, 2015, 49(2): 53-58.
- [2] ZENG L H, ZHANG Q, HE B X, et al. Wang Y S, Luo M. Age trends in genetic parameters for growth and resin-yielding capacity in masson pine[J]. *Silvae Genetica*, 2013, 62(1-2): 7-18.
- [3] 曾令海, 连辉明, 何波祥, 等. 马尾松杂交组合生长及产脂力早期评价[J]. 广东林业科技, 2006, 22(4): 1-4.
- [4] 连辉明, 何波祥, 曾令海, 等. 马尾松速生、优质及高产脂半同胞家系综合选择的研究[J]. 广东林业科技, 2002, 18(2): 1-6.
- [5] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004(5): 536-545.
- [6] 奚振邦. 缓释化肥再认识[J]. 植物营养与肥料学报, 2006(4): 578-583.
- [7] 李玥, 李应洪, 赵建红, 等. 缓控释氮肥对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(6): 673-684.
- [8] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(5): 730-740.
- [9] 张务帅, 陈宝成, 李成亮, 等. 控释氮肥控释钾肥不同配比对小麦生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 178-183; 189.
- [10] 吕伟生, 肖小军, 肖国滨, 等. 缓释肥侧位深施及用量对油菜产量和肥料利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 19-29.
- [11] 贵会平, 宋美珍, 李健, 等. 缓/控释肥发展现状及在棉花上的应用前景[J]. 中国棉花, 2016, 43(8): 16-20.
- [12] 李峰卿, 王秀花, 楚秀丽, 等. 缓释肥N/P养分配比及加载量对3种珍贵树种大规格容器苗生长的影响[J]. 林业科学研究, 2017, 30(5): 743-750.
- [13] 肖遥, 楚秀丽, 王秀花, 等. 缓释肥加载对3种珍贵树种大规格容器苗生长和N、P库构建的影响[J]. 林业科学研究, 2015, 28(6): 781-787.
- [14] 吴小林, 张东北, 楚秀丽, 等. 赤皮青冈容器苗不同基质配比和缓释肥施用量的生长效应[J]. 林业科学研究, 2014, 27(6): 794-800.
- [15] 张东北, 王秀华, 周生财, 等. 不同家系马尾松容器苗对基质配比及控释肥的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 1044-1050.
- [16] 黄少伟, 谢维辉. 实用SAS编程与林业试验数据分析[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001: 36-63.
- [17] 黄义林, 张中瑞, 丁晓纲, 等. 施肥对红锥幼苗叶功能性状的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(4): 115-118.
- [18] 楚秀丽, 王秀花, 张东北, 等. 基质配比和缓释肥添加量对浙江楠大规格容器苗质量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 67-73.
- [19] TIMMER V R, TENG Y. Pretransplant fertilization of containerized *Picea mariana* seedlings: calibration and bioassay growth response [J]. *Can J For Res*, 2004, 34(10): 2089-2099.
- [20] JACKSON D P, KASTEN DUMROESE R K, BARNETT J P. Nursery response of container *Pinus palustris* seedlings to nitrogen supply and subsequent effects on outplanting performance [J]. *For Ecol Manage*, 2012, 265: 1-12.
- [21] 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.
- [22] 钟安良, 俞新安, 何智英. 氮、磷、钾肥对马尾松苗木生长和生理特性的影响[J]. 福建林业科技, 1990(1): 1-10.
- [23] 周玮, 周运超. 马尾松幼苗生理特性对施肥的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(4): 37-41.
- [24] 何茜, 丁晓纲, 王冉, 等. 指数施肥下黑木相思根系特征值的动态变化[J]. 广东林业科技, 2011, 27(5): 1-6.
- [25] 李玲莉, 李吉跃, 张方秋, 等. 容器苗指数施肥研究综述[J]. 世界林业研究, 2010, 23(2): 22-27.
- [26] 孟庆银. 指数施肥对杉木第3代种子园实生容器苗生长影响[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(5): 62-67.
- [27] 周志春, 谢钰容, 金国庆, 等. 马尾松种源磷效率研究[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 25-30.