

水施磷肥对长白落叶松苗木生长和磷吸收的影响

孙宇¹, 李国雷¹, 刘勇¹, 马履一¹, 祝燕¹, 姜长吉², 刘福森², 李学莲²

(1. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 吉林省吉林市龙潭区江密峰苗圃, 吉林 吉林 132206)

摘要: 以长白落叶松 *Larix olgensis* 2年生移栽苗为试验材料, 在底施磷肥的基础上, 进行生长期水施追肥。按照水施追肥占总磷肥量的多少设置不同水平, 即水施比例。试验采用裂区设计, 主区为磷肥量(163, 326, 489 kg·hm⁻²), 副区为水施比例(0, 25.0%, 33.3%, 50.0%, 100%)。结果表明: 苗木生长指标在各磷肥处理间差异不显著, 但苗高、地茎、I级侧根数($D > 1.0$ mm)和生物量随磷肥增大而增大。由于在163 kg·hm⁻²处理下, 苗高和地径就能达到国家标准, 因此最经济施肥量应为163 kg·hm⁻²; 茎磷质量分数, 根、茎、整株含磷量、磷肥利用率在各水施比例间差异显著, 并且在33.3%水施比例达到最大, 其中全磷量为0.405 g·株⁻¹, 磷肥利用率高达11.4%。所以, 33.3%为最佳水施比例, 即在163 kg·hm⁻²磷肥量下, 将磷肥总量的1/3用于水施追肥是长白落叶松移栽苗最佳施肥方式。图1表9参18

关键词: 森林培育学; 长白落叶松; 苗木; 底施; 水施; 追施; 磷肥

中图分类号: S723.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2011)02-0219-08

Growth and P-uptake for *Larix olgensis* seedlings with phosphorus top-dressed using fertigation

SUN Yu¹, LI Guo-lei¹, LIU Yong¹, MA Lü-yi¹, ZHU Yan¹, JIANG Chang-ji², LIU Fu-sen², LI Xue-lian²

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Jiangmifeng Nursery in Longtan District, Jilin 132206, Jilin, China)

Abstract: With the aim to improving the phosphorus efficiency and finding the best phosphorus applying method, two types of phosphorus (P) fertilizer application to *Larix olgensis* transplanted seedlings were undertaken: 1) into the soil as a basal fertilizer before transplanting and 2) by fertigation as a topdressing three times during the growing season. A split-plot experimental design with P (163, 326, and 489 kg·hm⁻²) as main treatments and fertigation ratios (0, 25.0%, 33.3%, 50.0%, and 100%) as sub treatments was established. There were three replications, and the rapidly-available phosphorus content in the soil is 37.11 mg·kg⁻¹. Results showed that P application did not significantly affect seedling growth or P content, however, seedling height, diameter, first-order lateral root in diameter at a junction ≥ 1 mm, and biomass increased with increasing P. With a top-dressing of 163 kg·hm⁻² P, seedling height and diameter reached the national seedling standard (the seedling height > 35 cm, the seedling diameter > 5 mm). Also, with the 33.3% fertigation ratio, P concentration in the stem; P content in the root, stem, as well as the entire seedling; and P use efficiency were maximum with the total P content of 0.405 g and P use efficiency of 11.4%. Therefore, 163 kg·hm⁻² P with 33.3% of it to be applied as a top-dressed fertigation during the growing season was the best P application for *L. olgensis* transplanted seedlings. [Ch, 1 fig. 9 tab. 18 ref.]

收稿日期: 2010-05-17; 修回日期: 2010-09-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(BLJD200905); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD24B01); 国家自然科学基金资助项目(30972353)

作者简介: 孙宇, 从事林木种苗培育研究。E-mail: sunyu3084250@126.com。通信作者: 刘勇, 教授, 博士生导师, 从事森林培育学研究。E-mail: lyong@bjfu.edu.cn

Key words: silviculture; *Larix olgensis*; seedlings; band-placed; fertigation; topdressing; phosphorus

磷肥对苗木生长发育起着非常关键的作用,但由于它在土壤中难溶解,难移动,施入土壤中的磷肥很大一部分不能被苗木吸收利用,因此,提高磷肥利用率是当前迫切要解决的问题^[1]。传统的磷肥施肥方式主要以底施为主。这种施肥方式不能满足植物后期生长对磷的需求,人们逐渐采用追施磷肥来弥补底肥的不足。对于氮肥、钾肥和其他肥料,追肥方式常采用条施,即在苗行旁边,开一条肥料沟,将肥料施入并覆土。但考虑到生产上长白落叶松 *Larix olgensis* 苗木密度很大,通常移栽 180 ~ 220 株·m⁻²,而且根系又很密,容易导致在挖沟覆土的过程中破坏苗木根系,因此,宜采用水施追施磷肥。实际生产中,随着喷灌和滴灌等水施设施不断改进,随水施肥技术已日趋成熟。目前,水施追肥的研究主要集中在氮钾肥上。大量研究结果表明:水施追肥能有效促进植物对氮钾肥的吸收并显著提高肥料利用率。但相比于氮、钾肥,水施磷肥的研究则相对较少。目前,所有水施磷肥的试验都以农作物为研究对象,结果表明:与传统底施磷肥相比,在苗木生长期分多次水施追施能有效促进作物对磷的吸收,提高作物产量。然而目前在苗木生产中,还未有水施磷肥的研究,水施追施磷肥能否促进苗木质量的提高尚未见报道。本试验将水施磷肥引用到苗木中,以长白落叶松 2 年生移栽苗为对象,通过磷肥量和水施比例对苗木各形态指标和生理指标的影响,揭示不同水施追肥比例对苗木生长和磷吸收的影响,以期为优质苗木的培育提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在吉林省吉林市龙潭区江密峰苗圃。该地区为长白山余脉向松嫩平原的过渡地带,海拔为 175 m,属于北温带大陆性季风气候,多年平均气温为 4.4 °C,1 月平均气温为 -20.0 ~ -14.0 °C,7 月平均温度为 20.0 ~ 23.0 °C,冬季寒冷期长,夏季凉爽。日温差变化较大,日平均气温在 10 °C 以上的年活动积温为 2 400 ~ 3 000 °C,无霜期 130 d。年平均降水量为 688.9 mm,降水集中于 6 - 8 月,其他月份相对干旱。多年平均蒸发量为 1 432.0 mm,夏季蒸发量最大,5 月份最多,平均为 281.0 mm,占全年蒸发量的 20%^[2]。苗圃土壤基本性质见表 1。

表 1 江密峰苗圃土壤性质

Table 1 Soil characteristics of Jiangmifeng Nursery

深度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	质地	pH 值	全碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)
0 ~ 15	71.1	6.6	22.3	中壤土	5.13	7.32	0.86	37.11
15 ~ 30	69.5	7.0	23.6	中壤土	5.21	7.27	0.86	27.20
30 ~ 45	67.9	7.2	24.9	中壤土	5.67	5.85	0.76	7.13

1.2 试验设计与处理

试验采用裂区设计,主区为磷肥量(五氧化二磷),设置 3 个水平,分别为 163, 326, 489 kg·hm⁻²;副区为水施追肥比例,设置 5 个水平,分别为 100%(完全水施),50.0%,33.3%,25.0%,0(完全条施),另外,设 1 个未施磷肥的对照处理,因此,共 16 个处理,3 次重复,共 48 个小区。4 月中旬起垄式构建宽度 1 m,长度 8 m 的苗床 12 列,隔 2 m 分割为 1 个小区。试验区 2 边各设保护行 1 列,各小区之间埋入 60 cm 深的双层塑料布防止肥料相互干扰^[3]。4 月中旬移栽前,将不同量的底肥(五氧化二磷)条施到对应的小区中,之后在各小区内按照每行 20 株,共 10 行移栽苗木。8 月初开始水施追肥。以 163 kg·hm⁻² 为例,按照 100%,50.0%,33.3%,25.0%,0 水施比例分别追施磷肥 163.00,81.50,54.33,40.75,0 kg·hm⁻²。追肥前,将 16 个处理所需磷肥量分别计算好(其中对照处理和 0 水施比例的处理不需要水施追肥),并在施肥前 1 d 将磷肥在水中完全溶解(各小区磷肥均用 2 L 水溶解),隔 10 d 水施追肥 1 次,共追肥 3 次。

1.3 苗木取样与指标测定

9月15日,长白落叶松针叶已开始变黄,苗木基本停止生长。此时,对所有小区的苗木进行形态指标测量。在每个苗床中央区域随机选择10株苗木,挖出的苗木用清水小心冲洗根系上面的泥土,洗净后用蒸馏水润洗,然后测量苗高、地径、I级侧根数($D>1\text{ mm}$)。用游标卡尺(精度为0.01 cm)测量地径,用卷尺测量苗高(地径至生长点)。测量结束后,将同一小区的苗木按根、茎、叶剪下,充分混合后作为该小区的样本分别装入信封中进行烘干,80℃条件下烘36 h后,分别称根、茎、叶生物量^[4]。

为测定植物营养元素,将烘干后的植物组织分别粉碎,过0.25 mm筛,充分混合后采用硝酸-高氯酸方法进行消煮,用钼锑抗法测定植物全磷质量分数^[5]。

1.4 数据分析

整株生物量 = 根生物量 + 茎生物量 + 叶生物量; 根磷 = 根磷质量分数 × 根生物量; 茎磷 = 茎磷质量分数 × 茎生物量; 叶磷 = 叶磷质量分数 × 叶生物量; 整株磷 = 根磷质量分数 + 茎磷质量分数 + 叶磷质量分数; 磷肥利用率 = (施肥区苗木体内磷质量分数 - 未施肥区苗木体内磷质量分数) / 单株苗木施磷量^[6]。数据处理采用SPSS Win 16.0 Program进行ANOVA分析,如果显著则用Tukeys Multiple Range Test在 $P<0.05$ 水平上作多重比较;磷肥和水施比例及两者交互效应用General linear model的Univariate分析。

2 结果与分析

2.1 磷肥量和水施比例对苗高、地径和I级侧根数($D>1\text{ mm}$)影响

试验结果表明:苗高、地径、I级侧根数($D>1\text{ mm}$)在未施磷肥的对照处理中,平均值分别为35.89 cm, 6.35 mm, 8.3条·株⁻¹。施磷肥后,各形态指标均有所增加,在489 kg·hm⁻²磷肥处理上最大,平均

表 2 不同磷肥量和水施比例下苗高、地径和侧根数

Table 2 Height, diameter and number of lateral root in different amounts of P and fertigation ratios

生长指标	施肥量/(kg·hm ⁻²)	163 kg·hm ⁻²	326 kg·hm ⁻²	489 kg·hm ⁻²	平均值	
苗高/cm	100	35.36 ± 8.26 a	41.95 ± 7.28 a	40.55 ± 2.32 a	39.29	
	水施比例	50.0	33.69 ± 3.22 a	39.90 ± 6.84 a	39.37 ± 7.80 a	37.65
		33.3	34.22 ± 5.13 a	38.70 ± 4.61 a	42.86 ± 3.17 a	38.59
		25.0	37.78 ± 3.77 a	31.67 ± 1.56 a	40.58 ± 6.63 a	36.68
		0	38.93 ± 3.77 a	39.38 ± 4.45 a	39.44 ± 2.14 a	39.25
	平均值	36.00 A	38.32 AB	40.56 B		
地径/mm	100	6.38 ± 0.71 a	6.74 ± 0.91 a	6.61 ± 0.42 a	6.58	
	水施比例	50.0	6.12 ± 0.35 a	6.51 ± 0.48 a	6.46 ± 0.70 a	6.36
		33.3	6.60 ± 0.66 a	6.87 ± 0.50 a	7.16 ± 0.62 a	6.88
		25.0	6.82 ± 0.30 a	5.68 ± 0.53 a	6.92 ± 0.75 a	6.47
		0	6.80 ± 0.58 a	6.52 ± 0.24 a	7.04 ± 0.42 a	6.79
	平均值	6.54 A	6.46 A	6.84 A		
侧根数/(条·株 ⁻¹)	100	9.0 ± 0.8 b	8.4 ± 0.8 b	8.9 ± 0.2 b	8.8	
	水施比例	50.0	7.8 ± 0.5 b	9.5 ± 1.6 b	8.7 ± 1.3 b	8.7
		33.3	9.2 ± 0.5 a	9.5 ± 0.3 a	10.7 ± 0.7 a	9.8
		25.0	9.1 ± 0.3 b	6.8 ± 0.8 b	9.0 ± 1.0 b	8.3
		0	8.9 ± 0.8a	9.3 ± 0.4 a	10.2 ± 0.6 a	9.5
	平均值	8.8 a	8.7 a	9.5 b		

说明:表中磷肥量多重比较用大写英文字母表示;水施比例多重比较用小写英文字母表示。

值分别为 40.56 cm, 6.84 mm, 9.5 条·株⁻¹; 在 163 kg·hm⁻² 磷肥处理时最小, 平均值分别为 36.00 cm, 6.54 mm, 8.8 条·株⁻¹(表 2)。经方差分析: 苗木各形态指标在 3 个磷肥处理间的差异未达到显著水平。多重比较结果表明: 489 kg·hm⁻² 磷肥处理时的苗高显著大于 163 kg·hm⁻² 磷肥处理, 平均高出 4.56 cm; 地径在 3 个磷肥处理间无显著差异; 侧根数在 489 kg·hm⁻² 磷肥处理下显著大于 163 和 326 kg·hm⁻² 磷肥处理, 分别高出约 0.7 和 0.8 条·株⁻¹。相比之下, I 级侧根数($D>1$ mm)在各水施比例处理间差异达到显著水平, 显著性(sig.)值为 0.002。并且经多重比较: 33.3%水施比例处理下的 I 级侧根数($D>1$ mm)最大, 均值为 9.8 条, 显著高于其他水施比例处理。

2.2 磷肥量和水施比例对生物量影响

试验结果表明: 163, 326, 489 kg·hm⁻² 3 个磷肥处理根生物量分别为 19.201, 19.608, 22.522 g·株⁻¹, 茎生物量分别为 28.305, 31.251, 35.269 g·株⁻¹, 叶生物量分别为 27.067, 30.822, 33.491 g·株⁻¹, 单株生物量分别为 74.573, 81.681, 91.282 g·株⁻¹。从表 3 易知, 与对照处理相比, 根、茎、叶、单株生物量在施磷肥后显著增加并且随磷肥增大而增大。经方差分析: 各组织生物量在 3 个磷肥处理间无显著差异。多重比较结果表明: 489 kg·hm⁻² 磷肥处理时各组织生物量显著大于 163 kg·hm⁻² 磷肥处理。在根中, 该值还显著大于 326 kg·hm⁻² 磷肥处理。

表 3 不同磷肥量下根、茎、叶及单株生物量

Table 3 Biomass of the root, shoot, foliar and the whole seedling in different amounts of P

磷肥量/(kg·hm ⁻²)	根生物量/(g·株 ⁻¹)	茎生物量/(g·株 ⁻¹)	叶生物量/(g·株 ⁻¹)	单株生物量/(g·株 ⁻¹)
对照(ck)	16.098 ± 0.425	25.667 ± 0.781	25.263 ± 0.827	67.028 ± 2.924
163	19.201 ± 0.936 a	28.305 ± 1.851 a	27.067 ± 1.525 a	74.573 ± 4.093 a
326	19.608 ± 0.961 a	31.251 ± 1.901 ab	30.822 ± 1.567 ab	81.681 ± 4.205 ab
489	22.522 ± 0.993 b	35.269 ± 1.851 b	33.491 ± 1.525 b	91.282 ± 4.093 b

试验结果表明: 0, 25%, 33.3%, 50%, 100% 5 个水施比例处理下根生物量分别为 21.066, 19.898, 23.234, 19.255, 18.766 g·株⁻¹; 茎生物量分别为 32.156, 30.149, 34.261, 30.379, 31.097 g·株⁻¹; 叶生物量分别为 31.624, 28.178, 34.522, 28.094, 29.851 g·株⁻¹; 单株生物量分别为 84.846, 78.225, 92.048, 77.728, 79.713 g·株⁻¹ (表 4)。经方差分析: 根、茎、叶和单株生物量在各水施比例间无显著差异, 但在 33.3%水施比例处理下达到最大, 平均值分别为 23.234, 34.261, 34.522, 92.048 g·株⁻¹。

表 4 不同水施比例下根、茎、叶及单株生物量

Table 4 Biomass of the root, shoot, foliar and the whole seedling as affected by fertigation ratios

水施比例/%	根生物量/(g·株 ⁻¹)	茎生物量/(g·株 ⁻¹)	叶生物量/(g·株 ⁻¹)	单株生物量/(g·株 ⁻¹)
对照(ck)	16.098 ± 0.425	25.667 ± 0.781	25.263 ± 0.827	67.028 ± 2.924
0	21.066 ± 1.208 a	32.156 ± 2.389 a	31.624 ± 1.969 a	84.846 ± 5.284 a
25.0	19.898 ± 1.326 a	30.149 ± 2.621 a	28.178 ± 2.161 a	78.225 ± 5.797 a
33.3	23.234 ± 1.208 a	34.261 ± 2.389 a	34.522 ± 1.969 a	92.048 ± 5.284 a
50.0	19.255 ± 1.163 ab	30.379 ± 2.299 a	28.094 ± 1.895 a	77.728 ± 5.084 a
100	18.766 ± 1.208 ab	31.097 ± 2.389 a	29.851 ± 1.969 a	79.713 ± 5.284 a

2.3 磷肥量和水施比例对苗木体内磷浓度影响

由表 5 可知: 在未施磷肥的对照处理中, 根、茎、叶磷质量分数分别为 41.0, 30.0, 38.0 g·kg⁻¹。在 163, 326, 489 kg·hm⁻² 磷肥处理下, 根磷质量分数分别为 52.0, 56.0, 51.0 g·kg⁻¹; 茎磷质量分数分别为 35.0, 34.0, 30.0 g·kg⁻¹; 叶片磷质量分数分别为 38.0, 40.0, 37.0 g·kg⁻¹。与对照处理相比, 在施磷肥 163 和 326 kg·hm⁻² 后, 各组织磷质量分数均有所提高, 根中表现尤为明显。但在高磷肥 489 kg·hm⁻² 处理下, 茎和叶磷质量分数几乎没有改变, 其中叶磷质量分数甚至低于对照处理。经方差分析, 各

组织磷质量分数在 3 个磷肥处理间差异不显著。同一磷肥水平下，根中磷质量分数最高，平均值为 $53.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，叶次之，茎中磷质量分数最小。

由表 6 易知：在 33.3% 水施比例处理下，根、茎、叶磷质量分数最大，平均值分别为 63.0、39.0、 $44.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，该值显著大于对照处理。经方差分析：茎磷质量分数在各水施比例间的差异达到极显著，显著性(sig.)值为 0.005。多重比较结果表明：茎磷质量分数在 25.0% 水施比例处理下最低，该值不仅显著低于其他水施比例处理，而且还低于对照处理。

2.4 磷肥量和水施比例对苗木体内含磷量影响

在 163、326 和 $489 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷肥处理上，根含磷量分别为 0.099、0.105、 $0.117 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ ；茎含磷量分别为 0.097、0.109、 $0.099 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ ；叶片含磷量分别为 0.101、0.120、 $0.124 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ ；单株含磷量分别为 0.297、0.334、 $0.343 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。与对照处理相比，各组织含磷量在施磷肥后均显著增加并随磷肥增大而增大。经方差分析：苗木体内含磷量在 3 个磷肥处理间差异不显著。同一磷肥处理下，叶片含磷量最多，根系和茎次之。

表 5 不同磷肥量下根、茎、叶磷质量分数

Table 5 P concentration in the root, shoot and foliar in different amounts of P fertigation

磷肥量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	根磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	茎磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	叶磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
对照(ck)	41.0	30.0	38.0
163	$52.0 \pm 6.0 \text{ a}$	$35.0 \pm 2.0 \text{ a}$	$38.0 \pm 3.0 \text{ a}$
326	$56.0 \pm 6.0 \text{ a}$	$34.0 \pm 2.0 \text{ a}$	$40.0 \pm 3.0 \text{ a}$
489	$51.0 \pm 6.0 \text{ a}$	$30.0 \pm 2.0 \text{ a}$	$37.0 \pm 3.0 \text{ a}$

表 6 不同水施比例下根、茎、叶磷质量分数

Table 6 P concentration in the root, shoot and foliar as affected by fertigation ratios

水施比例/%	根磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	茎磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	叶磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
对照(ck)	41.0	30.0	38.0
0	$54.0 \pm 8.0 \text{ ab}$	$32.0 \pm 2.9 \text{ a}$	$32.0 \pm 4.0 \text{ b}$
25.0	$49.0 \pm 8.0 \text{ ab}$	$23.0 \pm 2.9 \text{ b}$	$40.0 \pm 4.0 \text{ a}$
33.3	$63.0 \pm 8.0 \text{ a}$	$39.0 \pm 3.0 \text{ a}$	$44.0 \pm 4.0 \text{ a}$
50.0	$59.0 \pm 8.0 \text{ ab}$	$33.0 \pm 3.0 \text{ a}$	$37.0 \pm 4.0 \text{ ab}$
100	$41.0 \pm 8.0 \text{ b}$	$37.0 \pm 3.0 \text{ a}$	$43.0 \pm 3.9 \text{ a}$

表 7 不同磷肥量下根、茎、叶含磷量

Table 7 P content in the root, shoot and foliar as affected by different amounts of P fertigation

磷肥量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	根含磷量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	茎含磷量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	叶含磷量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	整株含磷量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)
对照(ck)	0.066	0.077	0.096	0.238
163	$0.099 \pm 0.011 \text{ a}$	$0.097 \pm 0.009 \text{ a}$	$0.101 \pm 0.007 \text{ a}$	$0.297 \pm 0.018 \text{ a}$
326	$0.105 \pm 0.012 \text{ ab}$	$0.109 \pm 0.011 \text{ a}$	$0.120 \pm 0.008 \text{ ab}$	$0.334 \pm 0.018 \text{ a}$
489	$0.117 \pm 0.011 \text{ b}$	$0.124 \pm 0.008 \text{ b}$	$0.124 \pm 0.008 \text{ b}$	$0.343 \pm 0.017 \text{ a}$

由表 8 可知：与对照处理相比，各组织含磷量在施磷肥后均显著提高。在 33.3% 水施比例处理下，根、茎、叶和单株含磷量最大，分别为 0.140、0.127、0.133、 $0.405 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ ，比对照处理高出约 0.074、0.023、0.032、 $0.091 \text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。经方差分析：根、茎、和单株含磷量在各水施比例间差异显著，sig.值分别为 0.037、0.045、0.012。多重比较结果表明：根含磷量在 33.3% 水施比例下显著大于 25.0% 和 100% 水施比例处理；茎含磷量在 33.3% 水施比例下显著大于 25.0% 和 50.0% 水施比例处理；单株含磷量在 33.3% 水施比例下显著大于其他处理。

每种水施比例下，根、茎、叶含磷量的变化趋势均有所不同(图 1)。完全底施处理下，根系中含磷

表 8 不同水施比例下根、茎、叶含磷量

Table 8 P content in the root, shoot and foliar as affected by fertigation ratios

水施比例/%	根含磷量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	茎含磷量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	叶含磷量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	单株含磷量/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)
对照(ck)	0.066	0.077	0.096	0.238
0	$0.117 \pm 0.014 \text{ ab}$	$0.104 \pm 0.013 \text{ abc}$	$0.101 \pm 0.010 \text{ a}$	$0.314 \pm 0.023 \text{ b}$
25.0	$0.092 \pm 0.016 \text{ b}$	$0.073 \pm 0.012 \text{ c}$	$0.115 \pm 0.011 \text{ a}$	$0.282 \pm 0.023 \text{ b}$
33.3	$0.140 \pm 0.015 \text{ a}$	$0.127 \pm 0.014 \text{ a}$	$0.133 \pm 0.012 \text{ a}$	$0.405 \pm 0.022 \text{ a}$
50.0	$0.107 \pm 0.014 \text{ ab}$	$0.090 \pm 0.013 \text{ bc}$	$0.100 \pm 0.011 \text{ a}$	$0.302 \pm 0.023 \text{ b}$
100	$0.078 \pm 0.013 \text{ b}$	$0.116 \pm 0.013 \text{ ab}$	$0.126 \pm 0.011 \text{ a}$	$0.320 \pm 0.021 \text{ b}$

量相对最高；25.0%水施比例下，叶片中含磷量相对最高；33.3%水施比例下，各组织含磷量达到最大并分布均匀；50.0%水施比例下，各组织含磷量整体上仍能平均分布但低于33.3%处理；完全水施处理下，根中含磷量最少，地上组织含磷量相对较多。每种水施处理下各组织含磷量分布的趋势体现了底施与水施追肥下，苗木吸收磷肥的变化趋势。在完全底施处理中，所有磷肥全部在移栽前底施于土壤中，由于磷在土壤中难溶解和移动，根系只能吸收一小部分磷肥，这些磷肥由于浓度较低又很难输送到地上组织从而导致根系中含磷量相对较高；而水施比例为25.0%处理中，叶片中含磷量逐渐升高，这是因为在水施追肥中，磷肥完全溶解于水中并随水直接追施到苗木叶面上从而让叶面吸收更多磷肥。在33.3%水施比例下，根、茎、叶含磷量达到最大，说明在该比例下，底肥与水施追肥达到最完美的结合，根系可以从底肥中吸收一些磷肥并输送到地上组织，苗木进入生长期后，茎和叶片又通过水施追肥吸收另一部分磷肥，从而导致苗木各组织磷含量都显著增加；随着水施比例继续增大，各组织含磷量开始下降，说明虽然水施追肥可以促进苗木对磷肥的吸收，但底肥对苗木生长的影响不容忽视，底肥量过小不利于苗木对磷肥的吸收，这一点从完全水施(100%水施比例)中可以更明显地看出来：该处理中，所有磷肥全部采用水施追肥，生长初期根系只能从土壤中吸收少量磷肥，由于缺少底肥，苗木吸收磷肥的效果并不乐观。

2.5 磷肥量和水施比例对磷肥利用率影响

为进一步证明水施磷肥的经济效益，将所有小区苗木体内含磷量与对照处理相比，得到每个小区的磷肥利用率^[7]。在163, 326, 489 kg·hm⁻²磷肥处理下，苗木磷肥利用率分别为8.1%，5.9%和4.3%，磷肥利用率随施磷增大而减小。在0, 25.0%, 33.3%, 50.0%, 100%水施比例处理下，苗木磷肥利用率分别为4.9%，2.9%，11.7%，4.0%，6.4% (表9)。经方差分析：磷肥利用率在3个磷肥处理间差异不显著；但在各水施比例间差异极显著，Sig.值为0.004。多重比较结果表明：33.3%水施比例处理下，磷肥利用率最高，平均值为11.7%，显著高于其他处理，这有力证明了33.3%为最佳水施比例，即从磷肥总量里拿出33.3%的磷肥在苗木生长期水施追肥可以有效促进根系对磷肥的吸收，从而大大提高磷肥利用率。

3 讨论

试验苗圃地土壤表层速效磷为37.11 mg·kg⁻¹ (评价标准：低<30 mg·kg⁻¹，中30~75 mg·kg⁻¹，高>75 mg·kg⁻¹)^[8-9]，属于中等水平，因此需要补充一定量的磷肥供苗木生长。与对照处理相比，苗木各形态指标和生理指标在施磷肥后均有所增加，并且随着磷肥的不断增大，苗高、地径、I级侧根数(D>1 mm)，生物量不断增大，但各指标在3个磷肥处理间的差异并不显著，说明磷肥量的增加并不能显著促进苗木生长和磷的吸收。在低磷肥量的163 kg·hm⁻²处理中，根、茎磷质量分数最大，这说明磷肥并非越大越好，如果磷肥大到一定程度反而不利于植物生长，因为磷影响氮的代谢，过量的磷会降低氮的同化^[10]。而且，磷肥投入过多还会使水体富营养化和土壤严重腐蚀^[11]。因此，在保证苗木各项指标达到国家标准的前提下，应采用最经济磷肥量。由于苗高、地径在163 kg·hm⁻²磷肥量下就达到了国家标准，而且在该处理中，根和茎磷质量分数最大，分别为52.0和35.0 g·kg⁻¹。综合考虑后，最佳磷肥量应为163 kg·hm⁻²。由于该试验设置的磷肥量普遍较大，长白落叶松所需经济磷肥量有待进一步探明。

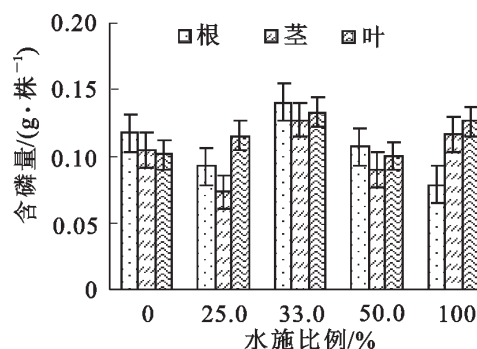


图1 同一水施比例下各组织含磷量比较

Figure 1 P content in different tissues as affected by the one fertigation ratios

表9 不同磷肥量和水施比例下磷肥利用率

Table 9 Phosphorus use efficiency as affected by the amounts of P and fertigation ratios

水施比例/%	磷肥利用率/%	磷肥量/(kg·hm ⁻²)	磷肥利用率/%
0	4.9 ± 1.49 b		
25.0	2.9 ± 1.48 b		
33.3	11.7 ± 1.48 a	163	8.1 ± 1.17 a
50.0	4.0 ± 1.46 b	326	5.9 ± 1.18 ab
100	6.4 ± 1.47 b	489	4.3 ± 1.16 b

以往人们过多地关注底肥, 忽略了磷肥追施对苗木生长的影响^[12], 而本试验则重点关注水施磷肥, 在每个磷肥处理下分别设置了 5 个不同的水施比例处理。相比于磷肥量, 水施比例的改变能显著促进苗木对磷肥的吸收。其中, I 级侧根数 ($D > 1 \text{ mm}$), 根、茎、叶磷质量分数和磷肥利用率在不同水施比例间的差异达到显著水平, 并且这些指标在 33.3% 水施比例处理下达到最大, 说明以 33.3% 水施比例追施磷肥可以让苗木根系更加发达, 从而吸收更多的磷并显著提高磷肥利用率。苗高、地径、生物量在各水施比例间的差异不显著, 但总体上都在 33.3% 水施比例下达到最大, 这意味着形态指标和干物质积累较生理指标需要更长的时间才能反映出水施磷肥的显著优势。因此, 从整体上看, 33.3% 为最佳水施比例, 即从磷肥总量里拿出 1/3 磷肥用于水施追肥有利于苗木生长和磷的吸收。相比于形态指标, 磷质量分数和含磷量等生理指标的提高更具有深远的意义。苗木体内含磷量对苗木后期生长尤为重要, 苗木会将吸收的磷在体内形成养分库, 造林后苗木会利用这些磷促进根系生长和顶芽发育^[13]。2009 年, Juan 等^[14]发现地中海红松 *Pinus halepensis* 苗木体内磷浓度和含量影响造林苗木成活率和生长, 可见, 苗木体内含磷量的增加最终将会提高造林效果。因此, 需要对长白落叶松苗木进行造林试验, 根据造林效果验证苗木施肥效应。2006 年, 李俊杰等^[15]在膜下滴灌棉田氮磷不同施肥方式的试验中发现 70.0% 为最佳水施比例, 即以 30.0% 的磷肥做基肥, 70.0% 左右的磷肥用于滴施为最佳施肥方式。在该水施比例下, 棉花 *Gossypium hirsutum* 的增产效果最好。这一结论与本试验结论截然相反, 说明农作物与苗木在水施追施磷肥中有很大差异。究其原因, 有可能是因为农作物生长周期短, 每年就完成一个完整的生长周期, 而苗木的生长周期很长。总之, 由于水施磷肥目前在苗木上还未有研究, 因此最佳水施比例有待进一步探明。

另外, 本试验完全水施的磷肥处理, 施肥时间在 8 月份, 分 3 次进行水施, 施肥相对集中; 而在苗木移栽后的 5, 6, 7 月份仅靠土壤给予的养分维持生长, 从外界得不到养分补充, 苗木生长受到影响, 使得完全水施的苗木根系磷质量分数仅为 $41.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 6), 低于其他处理的苗木。严格说来, 水施磷肥应根据苗木生长节律, 从苗木移植后即开始水施, 然后再与完全底施磷肥进行比较。在此基础上, 设计水施比例, 苗木移植后开始水施追施, 之后根据苗木生长和造林效果, 筛选出最佳的底施量和追施量, 确定最优水施比例, 这也是今后研究需要改进之处^[16]。

4 结论

肥料利用率是经济合理施肥的一个重要参数^[17]。在 3 个磷肥处理中, 磷肥利用率在 $163 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下最大, 平均值为 8.1%, 显著大于 $489 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷肥处理; 在 5 个水施比例处理中, 磷肥利用率在 33.3% 水施比例下最大, 平均值为 11.7%, 显著大于其他 4 个水施比例处理。磷肥利用率在 $163 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷肥处理和 33.3% 水施比例下的优势, 有力地证明了在 $163 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷肥量下, 以 2/3 磷肥做底肥, 1/3 磷肥水施追施是最佳磷肥施肥方式。该施肥方式不仅可以显著促进苗木吸收磷肥并提高磷肥利用率, 还可以保证苗木各形态指标和干物质积累达到最优。另外, 还能经济施肥, 保护环境, 减少磷肥对环境的污染。生产上, 多数苗圃都已具备滴灌和喷灌等水施设施。随水施肥技术已日趋成熟, 使得水施磷肥在苗木生产上得以广泛开展。这不仅节约肥料, 又不会因为生产强度的增加而另外增加投入, 对育苗生产具有很好的实践价值^[18]。

参考文献:

- [1] 王志军, 龙作义, 王喜君. 磷肥对黄菠萝育苗质量的影响[J]. 林业勘查设计, 2008 (2): 64 - 65.
WANG Zhijun, LONG Zuoyi, WANG Xijun. Effect phosphorlls on breeding quality of *Phellodendron amurense* [J]. *For Invest Des*, 2008 (2): 64 - 65.
- [2] 李国雷. 长白落叶松苗木水肥耦合与分级培育技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009: 9.
LI Guolei. *Studies on Techniques of Irrigating, Fertilizing and Grading for Larix olgensis Seedlings* [D]. Beijing: Beijing forestry university, 2009: 9.
- [3] 金铁山. 苗木培育技术[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1985.
- [4] DANIEL C D, WILLIAM C P. Morphological indicators of stock quality and field performance of red oak (*Quercus*

- rubra* L.) seedlings underplanted in a central Ontario shelterwood [J]. *New For*, 1997, **14** (2): 145 – 156.
- [5] ZASOSKI R J, BURAU R G. A rapid nitric-perchloric acid digestion method for multi-element tissue analysis [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1977, **8** (5): 425 – 436.
- [6] PANDEY R K, MARANVILLE J W, BAKO Y. Nitrogen fertilizer response and use efficiency for three cereal crops in Niger [J]. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 2001, **32** (9): 1465 – 1482.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [8] EDWARD R W, KRISTJAN C V, ANDREW P. Root characteristics and growth potential of container and bare-root seedlings of red oak (*Quercus rubra* L.) in Ontario, Canada [J]. *New For*, 2007, **34** (2): 163 – 174.
- [9] 孙慧敏, 于振文, 颜红, 等. 不同土壤肥力条件下施磷量对小麦产量、品质和磷肥利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2006 (3): 45 – 47.
- SUN Huimin, YU Zhenwen, YAN Hong, *et al.* Effect of phosphorus rate applied on yield, quality and phosphorus utilization ratio in winter wheat under different fertility soil [J]. *Shandong Agric Sci*, 2006 (3): 45 – 47.
- [10] 陈钢, 吴礼树, 李煜华, 等. 不同供磷水平对西瓜产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, **13** (6): 1189 – 1192.
- CHEN Gang, WU Lishu, LI Yuhua, *et al.* Effect of different phosphorous supply levels on yield and quality of watermelon [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2007, **13** (6): 1189 – 1192.
- [11] 慕琦, 王树荣. 施肥对环境影响的研究[J]. 现代农业科技, 2008 (20): 157 – 158.
- MU Qi, WANG Shurong. The effect of fertilizer on environment [J]. *J Mod Agric Sci Technol*, 2008 (20): 157 – 158.
- [12] 高美玲, 袁成志, 杨俊玲. 不同时期追施磷肥对番茄的影响[J]. 长江蔬菜, 2008 (8): 37 – 38.
- GAO Meiling, YUAN Chengzhi, YANG Junling. The effect on topdressing phosphorus for tomato in different period [J]. *Changjiang Veg*, 2008 (8): 37 – 38.
- [13] TIMMER V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites [J]. *New For*, 1997, **13** (1–3): 279 – 299.
- [14] JUAN A, OLIET R P, FRANCISCO A, *et al.* Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seedling morphology and mineral nutrition [J]. *New For*, 2009, **37** (3): 313 – 331.
- [15] 李俊杰, 吕锦萍, 张玉霞, 等. 膜下滴灌棉田氮磷不同施肥方式效果[J]. 中国棉花, 2007 (5): 39.
- LI Junjie, LÜ Jinping, ZHANG Yuxia, *et al.* The effects of N and P fertilizer application of cotton under drip irrigation [J]. *China Cotton*, 2007 (5): 39.
- [16] HUSSEIN A H A. Phosphorus use efficiency by two varieties of corn at different phosphorus fertilizer application rates [J]. *Res J Appl Sci*, 2009, **4** (2): 85 – 93.
- [17] 侯雪坤, 翟瑞常, 朱桂华, 等. 轮作、连作及不同耕法对氮、磷肥料利用率的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1995, **8** (2): 44 – 52.
- HOU Xuekun, ZHAI Ruichang, ZHU Guihua, *et al.* Effect of crop rotation continuous cropping and different cultivation methods on fertilizer utilization ratio of nitrogen and phosphorus [J]. *Heilongjiang Aug First Land Reclam Univ*, 1995, **8** (2): 44 – 52.
- [18] JUAN A O, ROSA P, FRANCISCO A, *et al.* Performance of fertigation technique for phosphorus application in cotton [J]. *Soil Sci Soc Pakistan*, 2009, **28** (1): 45 – 48.