

油松容器苗和裸根苗生长与造林效果 对秋季施肥的响应

叶可可¹, 李庆梅¹, 祝燕^{1*}, 闫晶晶¹, 张子晗¹, 冯赛¹, 杨晓辉²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091; 2. 河北省平泉市黄土梁子镇人民政府, 河北 承德 067506)

摘要:【目的】探究不同秋季施肥处理条件下油松容器苗和裸根苗苗期生长、养分积累和造林效果的差异, 为生产上培育油松良种壮苗提供理论基础和技术支持。【方法】以大田培育的当年生油松播种容器苗和裸根苗为研究对象, 设置 0(对照)、12、24、36 mg/株 4 种秋季施肥水平, 于 90% 以上苗木形成顶芽后进行施肥处理, 并于翌年进行雨季造林试验。测定造林前的苗高、地径、生物量、根冠比、养分含量及造林后苗木成活率和苗高、地径相对生长量等指标, 分析出圃苗木性状与造林效果之间的相关性。【结果】秋季施肥 24 mg/株处理下的油松容器苗苗高、地径、生物量、氮、磷、钾含量均表现最佳, 该处理下容器苗整株生物量、氮、磷、钾含量较对照分别增加了 41.8%、31.4%、65.6% 和 48.8%; 油松裸根苗受秋季施肥影响较小。容器苗氮含量在各器官中的分布从大到小表现为根>叶>茎, 裸根苗氮含量在各器官中的分布从大到小表现为叶>根>茎; 磷、钾含量在容器苗和裸根苗各器官中的分布从大到小均表现为叶>根>茎。雨季造林试验结果显示, 油松造林效果受苗木类型影响显著, 容器苗造林当年和第 2 年春季的苗高、地径相对生长量均显著高于裸根苗, 且容器苗造林第 2 年春季成活率显著高于裸根苗。油松造林第 2 年春季苗高相对生长量受秋季施肥影响显著, 在 24 mg/株秋季施肥处理下最高。油松造林成活率及苗高、地径相对生长量与造林初期的苗木根生物量、根冠比、根氮、根磷、根钾、茎磷含量显著相关。【结论】秋季施肥 24 mg/株有利于提高油松容器苗形态生长和养分积累, 1 年生油松容器苗造林成活率和后期生长状况明显优于裸根苗。

关键词: 秋季施肥; 油松; 苗木类型; 养分贮藏; 造林效果

中图分类号: S723

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2023)01-0136-09



Responses of growth and afforestation performance of *Pinus tabulaeformis* container and bareroot seedlings to fall fertilization

YE Keke¹, LI Qingmei¹, ZHU Yan^{1*}, YAN Jingjing¹, ZHANG Zihan¹, FENG Sai¹, YANG Xiaohui²

(1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. People's Government of Huangtuliangzi Town, Pingquan City, Hebei Province, Chengde 067506, China)

Abstract: 【Objective】The aims of this research were to examine the responses of container and bareroot *Pinus tabulaeformis* seedlings to nursery fall fertilization supplements and assess their subsequent two-year field performance. This study was conducted to provide a theoretical basis and technical support for the cultivation of high-quality *P. tabulaeformis* seedlings. 【Method】Fall fertilization was applied when the terminal bud ratio reached 90% of the total seedlings. *P. tabulaeformis* container seedlings and bareroot seedlings were supplied with fertigation (i.e., irrigation with

收稿日期 Received: 2021-05-10

修回日期 Accepted: 2021-12-17

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2014QA002, CAFYBB2020SY003); 中国林业科学研究院林业研究所林木培育重点实验室专项资金项目(ZDRIF201701)。

第一作者: 叶可可(2276350394@qq.com)。* 通信作者: 祝燕(zhuyan522@163.com), 助理研究员。

引文格式: 叶可可, 李庆梅, 祝燕, 等. 油松容器苗和裸根苗生长与造林效果对秋季施肥的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 136-144. YE K K, LI Q M, ZHU Y, et al. Responses of growth and afforestation performance of *Pinus tabulaeformis* container and bareroot seedlings to fall fertilization[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 136-144. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202105015.

soluble fertilizer) at 0 (control), 12, 24, and 36 mg/plant. The effects of fall fertilization on growth and afforestation performance were then tracked and analyzed over two-year using the following criteria seedling height, root-collar diameter(RCD) and nutrient content, etc. 【Result】 The height, RCD, biomass, N content, P content and K content of container seedlings with 24 mg/plant were higher than those of the other doses. In addition, the total biomass, N content, P content and K content were significantly increased by 41.8%, 31.4%, 65.6% and 48.8%, respectively, compared to those of the control seedlings, whereas the bareroot seedlings were less affected by fall fertilization. The distribution of N content in the organs of container seedlings was root > needle > stem, whereas that in the bareroot seedlings was needle>root>stem. The distribution of P and K contents in the organs of container and bareroot seedlings exhibited the same order; needle>root>stem. The results of the rainy season afforestation test showed that the rate of afforestation was significantly affected by the seedling type. Compared with the bareroot seedlings, the relative growth in the height and RCD of container seedlings were significantly higher in the first year of outplanting and the following spring, and the survival rate of container seedlings in the following spring was similar to the pattern observed for the relative RCD. The relative growth in height in the second year spring was significantly affected by fall fertilization, and fall fertilization at 24 mg/plant yielded the highest value. The afforestation survival rate, relative growth of height, and RCD of seedlings were closely related to seedling root biomass, root shoot ratio, root N content, root P content, root K content and stem P content in the initial stage of afforestation. 【Conclusion】 Fall fertilization at 24 mg/plant was best for optimizing the morphological growth and nutrient accumulation of *P. tabuliformis* container seedlings. The survival rate and growth of 1-year-old *P. tabuliformis* container seedlings were significantly greater than those of the bareroot seedlings.

Keywords: fall fertilization; *Pinus tabuliformis*; stock type; nutrient storage; afforestation performance

苗圃施肥是一项公认的提升苗木品质的培育措施。现有苗圃施肥多在苗木生长旺盛的春夏两季进行,在木质化阶段通常减少或停止水肥供应以促进苗木木质化发育。处于木质化阶段的苗木,虽高生长基本停止,但根系仍继续生长,地径和根系生物量不断增加,此阶段施肥的减少可能造成苗木体内养分浓度的降低^[1-2]。为避免木质化阶段苗木养分浓度的稀释,人们开始尝试在苗木顶芽形成后继续施肥以补充养分,即秋季施肥。秋季施肥理论在国外应用较为广泛,已在黑云杉(*Picea mariana*)^[3]、冬青栎(*Quercus ilex*)^[4]、脂松(*Pinus resinosa*)^[5]和地中海松(*Pinus halepensis*)^[6]等多个常绿树种中应用。近年来,国内也进行了秋季施肥的研究,如刘勇等^[7]研究发现秋季施肥可显著提高毛白杨(*Populus tomentosa*)的抗寒性;Li等^[8]研究发现秋季施氮肥可促进长白落叶松(*Larix olgensis*)根氮含量积累;杨阳等^[9]研究发现秋季施肥后的紫椴(*Tilia amurensis*)苗木造林成活率和生长表现更好。

油松(*Pinus tabuliformis*)为松科松属常绿针叶树种,分布范围广,在松属植物中,其分布范围仅次于马尾松(*P. massoniana*)^[10],是我国北方针叶林中主要建群种^[11]。油松根系发达、耐贫瘠、适应性强,具有水土保持、水源涵养、防风固沙等重要生态功能^[12-13],是我国北方地区人工造林的主要树种之一。近年来,针对1年生油松温室容器育苗进行的秋季施肥研究显示,秋季施肥能够提高油松容器

苗养分积累、造林效果和抗寒性等^[14-16]。我国北方地区油松以露天大田育苗为主,且多采用2年生移植容器苗进行雨季造林,1年生苗木因体型较小、造林效果不佳等原因应用较少。因此秋季施肥对温室环境下1年生油松容器苗苗木质量及造林效果的促进效应是否同样适用于大田苗,其能否提高大田环境下1年生油松苗木质量及造林效果,进而促进1年生苗木的提早出圃造林值得探索。

本试验以油松大田播种容器苗和裸根苗为对象,研究秋季施肥对这两种类型油松苗木形态生长、养分积累及造林效果的影响,为生产上培育油松良种壮苗提供理论基础和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料及处理

1.1.1 试验地概况

试验地位于河北省平泉市七沟林场国家油松良种基地苗圃(118°45'E,40°99'N),属温带大陆性季风气候,冬、春两季干燥少雨,海拔550 m左右。该地区年平均气温为7.7℃,最冷月1月平均气温-10.3℃,最热月7月平均气温23.0℃,年降水量515.4 mm,主要集中在7—8月,全年无霜期115~150 d。

1.1.2 试验材料

供试油松种子于2018年10月采自河北省平泉市七沟林场种子园,种子千粒质量为42.20 g,放置在0~5℃低温库保存。2019年5月上旬进行播

种,种子播前用质量分数 0.5% KMnO_4 溶液浸泡 2 h,捞出后用清水冲洗干净,再用敌克松粉末拌种备用。露天条件下培育两种试验苗木类型:①容器苗。容器育苗选用上口径 10 cm×高 12 cm 的黑色塑料容器,供试土壤为苗圃表层土,每容器播种 3~5 粒。2019 年 6 月底出苗稳定后,容器苗间苗至每容器保留健壮苗 1 株,共育苗 360 株。②裸根苗。

采用低床育苗,苗床长 7 m、宽 1.2 m。均匀撒播种子,播种完成后覆土 1 cm 左右。裸根苗随机挑选 3 个苗床,每苗床上随机划分 4 块试验小区,每小区定株数量为 100 株,面积约为 0.24 m^2 ,试验小区间隔 1 m。裸根苗育苗试验地 0~45 cm 土壤和容器苗育苗土壤理化性质见表 1。

表 1 裸根苗和容器苗土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of bare root seedlings and container seedlings

土层深度/cm soil layer depth	颗粒物组成/% soil particle composition			含量 content					pH
	砂粒 sand	粉粒 powder	黏粒 clay	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) organic matter	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) total N	碱解氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) alkali- hydrolyzable N	有效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) available P	速效钾/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) available K	
0~15	79.04	10.67	10.29	12.44	1.09	15.16	4.13	71.88	8.11
≥15~30	80.38	9.00	10.62	9.97	0.93	11.20	2.06	48.73	8.28
≥30~45	81.71	8.67	9.62	9.05	0.91	11.02	5.97	49.74	8.31
容器苗土壤 container seedling soil	76.71	11.67	11.63	10.02	1.09	20.42	5.23	73.89	8.03

1.1.3 常规施肥

2019 年 7 月进行速生期常规施肥,肥料为 20-20-20 复合肥,其中元素质量分数配比为 20% N [$3.2\% \text{NH}_4^+$ 、 $5.3\% \text{NO}_3^-$ 、 11.5% 脲态氮(urea)]、20% P (P_2O_5)、20% K (K_2O)、 $0.05\% \text{Mg}$ 、 $0.0125\% \text{B}$ 、 $0.0125\% \text{Cu}$ 、 $0.05\% \text{Fe}$ 、 $0.025\% \text{Mn}$ 、 $0.005\% \text{Mo}$ 、 $0.025\% \text{Zn}$,以施入 N 80 mg/株计算,分 4 次等量施入,每两次间隔期为 7 d,水溶施用。其他浇水、除草等措施保持一致。

1.2 试验设计

1.2.1 苗圃施肥试验

苗圃施肥试验采用双因素随机区组设计。因素 1 为苗木类型,设置容器苗、裸根苗 2 种苗木类型;因素 2 为秋季施肥,设置 4 个水平,分别为 0 (对照)、12、24、36 mg/株(以施 N 量计算)。试验共 8 个处理,每处理设置 3 个重复,容器苗每重复 30 株,共计 360 株,裸根苗每重复 100 株,共计 1 200 株。于 2019 年 10 月底(90%以上苗木已形成顶芽)进行秋季施肥,分 3 次等量施入,每两次间隔期为 7 d,分别于 2019 年 10 月 30 日、11 月 6 日、11 月 13 日进行。使用肥料及施用方法与前期常规施肥一致。秋季施肥后至翌年雨季造林前不进行额外的施肥管理,根据天气状况及土壤干湿程度进行人工浇水。

1.2.2 模拟造林试验

2020 年 7 月底,将容器苗和裸根苗不同秋季

施肥水平的苗木进行雨季模拟造林试验,容器苗带土坨造林,裸根苗起苗用泥浆浆根后造林,每处理每重复造林苗木 10 株,3 次重复。株行距 40 cm×40 cm。造林定植后立即浇透水。后期根据墒情浇水,并及时进行人工除草。造林地为苗圃附近荒地,0~45 cm 土壤中有机质含量为 11.24 g/kg,碱解氮含量为 12.55 mg/kg,有效磷含量为 4.97 mg/kg,速效钾含量为 48.93 mg/kg,pH 为 8.11。

1.3 取样与指标测定

1.3.1 苗期指标

1)苗高、地径。2020 年 7 月底,起苗造林前进行苗高、地径的测量。每处理每重复随机选取 15 株苗木,用钢卷尺测量苗高(精度 0.1 cm),用电子游标卡尺测量地径(精度 0.01 mm)。

2)生物量。2020 年 7 月底,起苗造林时进行生物量的测定。每处理每重复选取 3 株具代表性苗木进行整株收获,带回实验室,用清水洗涤干净后,分别剪下根、茎、叶,装入信封,于 68 ℃ 的烘箱内烘 72 h 至质量恒定后,取出称质量(精度 0.001 g),得到根、茎、叶各器官生物量。根冠比由式(1)计算得到。

根冠比=根生物量/(茎生物量+叶生物量)。(1)

3)养分含量。将称取质量后的植物烘干样粉碎,过孔径 0.25 mm 筛,采用硫酸-过氧化氢法消煮,得到的消煮液用于测定植物氮、磷、钾浓度。采用凯氏定氮法测定氮元素浓度,钼锑抗比色法测定

磷元素浓度,火焰光度法测定钾元素浓度。养分浓度乘以相应生物量得各部分养分含量。

1.3.2 模拟造林试验指标

1)造林成活率。2020 年 11 月初(T1)和 2021 年 5 月初(T2),分别调查造林苗成活株数,造林成活率由式(2)计算得到。

成活率=成活株数/造林总株数×100%。(2)

2)苗高、地径相对生长量。2020 年 7 月底造林完成后测得初始苗高(H_0)、地径(D_0),2020 年 11 月初测得造林当年苗高(H_1)、地径(D_1),2021 年 5 月初测得造林等 2 年春季苗高(H_2)、地径(D_2)。造林当年和造林第 2 年春季苗高、地径相对生长量由式(3)—(6)计算得到。

造林当年苗高相对生长量= $(H_1-H_0)/H_0\times 100\%$;(3)

造林当年地径相对生长量= $(D_1-D_0)/D_0\times 100\%$;(4)

造林第 2 年春季苗高相对生长量= $(H_2-H_0)/H_0\times 100\%$;(5)

造林第 2 年春季地径相对生长量= $(D_2-D_0)/D_0\times 100\%$ 。(6)

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 对数据进行记录和整理,采用 SSPS 22.0 对数据进行方差分析和 Duncan 多重比较,并进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 秋季施肥对不同苗型油松苗高和地径的影响

考察秋季施肥对不同苗型油松苗高和地径的影响,结果见表 2。

表 2 秋季施肥对油松容器苗和裸根苗苗高、地径的影响

Table 2 Effects of fall fertilization on height and root-collar diameter of <i>P. tabuliformis</i> container seedlings and bareroot seedlings				
施肥量/ (mg·株 ⁻¹) fertilizer addition	苗高/cm height		地径/mm root-collar diameter	
	R	L	R	L
0	8.63±0.64 a	9.50±1.01 a	3.13±0.08 a	3.34±0.28 a
12	8.90±0.81 a	9.20±1.00 a	3.09±0.11 a	3.32±0.17 a
24	9.87±0.43 a	10.03±0.72 a	3.24±0.07 a	3.45±0.21 a
36	6.73±0.27 b	10.57±1.73 a	3.06±0.15 a	3.22±0.08 a

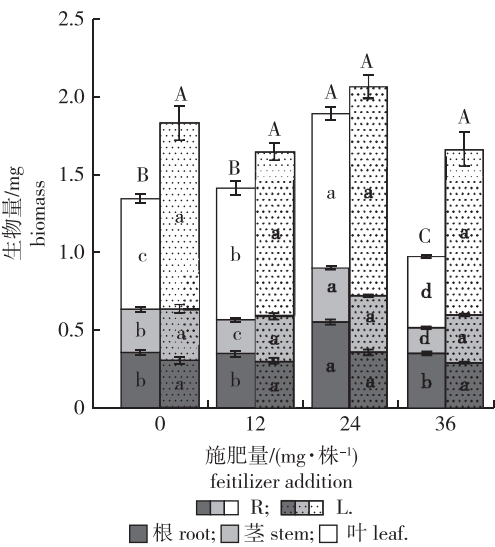
注:R 为油松容器苗;L 为油松裸根苗。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。The R is *P. tabuliformis* container seedlings and the L is *P. tabuliformis* bareroot seedlings. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

由表 2 可知,油松容器苗苗高受秋季施肥影响

差异显著。随秋季施肥量的增加,容器苗苗高呈先增后减趋势,在 24 mg/株施肥处理下达最大值,36 mg/株施肥处理对容器苗苗高有显著抑制作用,其苗高比对照、12、24 mg/株施肥处理分别降低了 22.0%、24.4%和 31.8%。油松裸根苗苗高受秋季施肥影响不显著,整体上随施肥量增加而增加。容器苗和裸根苗的地径受秋季施肥影响不显著,但均在 24 mg/株施肥处理下最大。

2.2 秋季施肥对不同苗型油松生物量积累及分配的影响

考察秋季施肥对不同苗型油松生物量积累的影响,结果见图 1。由图 1 可知,油松容器苗根、茎、叶及整株生物量在 24 mg/株施肥处理下最大,分别为 0.55、0.35、1.00 和 1.90 g,比对照分别提高了 52.8%、29.6%、40.8%和 41.8%,与对照差异显著;而 36 mg/株施肥处理对容器苗生物量积累有抑制作用,茎、叶及整株生物量均显著低于对照。油松裸根苗根、茎、叶及整株生物量受秋季施肥影响差异不显著,但在 24 mg/株施肥处理下较高。



不同小写字母表示相同器官不同处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示整株不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same organ ($P<0.05$), and different capital letters indicate significant differences of the entire plant among different treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 秋季施肥对油松容器苗(R)和裸根苗(L)生物量的影响

Fig.1 Effects of fall fertilization on biomass of *P. tabuliformis* container seedlings (R) and bareroot seedlings (L)

考察秋季施肥对不同苗型油松根冠比的影响,结果见图 2。由图 2 可知,油松容器苗根冠比随施

肥量增加而增加,在 36 mg/株施肥处理下最大,显著高于对照、12、24 mg/株施肥处理,分别高出 55.6%、69.7%和 36.6%,说明高剂量的秋季施肥下,容器苗可将更多光合产物分配给根系,导致根冠比增大。油松裸根苗根冠比受施肥影响差异不显著。

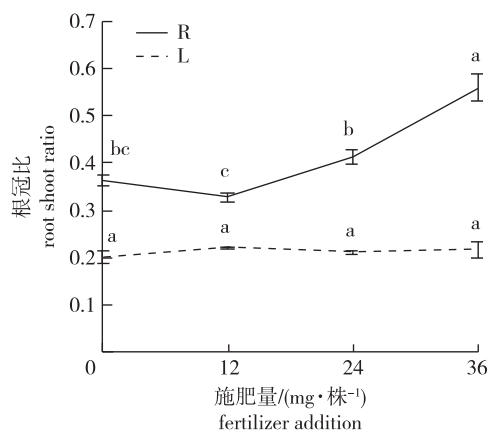


图2 秋季施肥对油松容器苗(R)和裸根苗(L)根冠比的影响

Fig.2 Effects of fall fertilization on root shoot ratio of *P. tabuliformis* container seedlings (R) and bareroot seedlings (L)

2.3 秋季施肥对不同苗型油松养分含量的影响

考察秋季施肥对不同苗型油松养分含量的影响,结果见图3。由图3可知,随着秋季施肥量的增加,油松容器苗各器官及整株氮、磷、钾含量呈先上升后下降趋势,在 24 mg/株施肥处理下达最大值。与对照相比,24 mg/株施肥处理显著提高了容器苗整株氮、磷、钾含量,分别提高了 31.4%、65.6%和 48.8%,容器苗各器官氮、磷、钾含量,除茎氮、叶氮、茎钾含量外,均与对照差异显著。

36 mg/株施肥处理下的容器苗整株氮、磷含量显著低于对照,较对照分别降低了 23.9%和 26.8%,茎、叶器官中的氮、磷、钾含量均显著低于对照。油松裸根苗体内氮、钾含量受秋季施肥影响不显著,根磷、茎磷含量在 24 mg/株施肥处理下最大,与对照差异不显著,但根磷含量显著高于 36 mg/株施肥处理,提高了 48.8%,茎磷含量显著高于 12 mg/株施肥处理,提高了 83.3%。油松容器苗各器官的氮含量从大到小排序为根、叶、茎,裸根苗各器官的氮含量从大到小排序为叶、根、茎。磷、钾含量在容器苗和裸根苗各器官从大到小排序均为叶、根、茎。

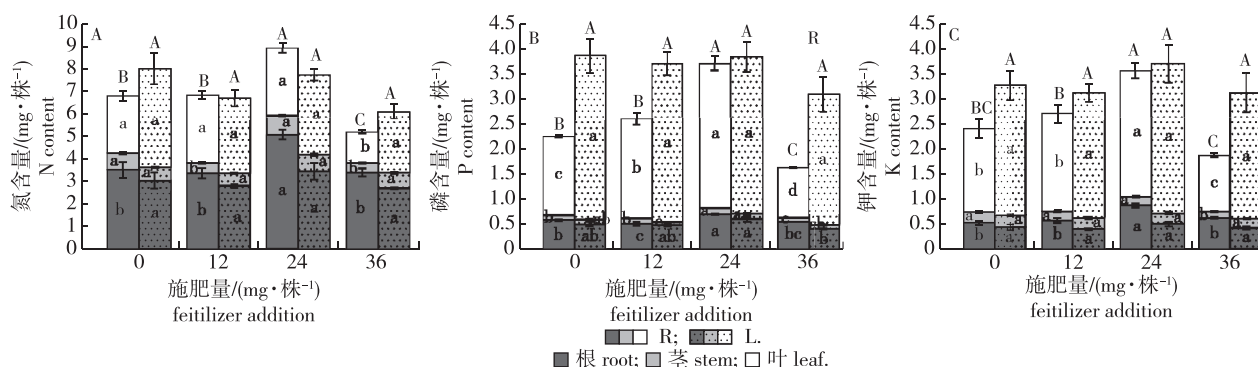


图3 秋季施肥对油松容器苗(R)和裸根苗(L)养分含量的影响

Fig.3 Effects of fall fertilization on nutrient content of *P. tabuliformis* container seedlings (R) and bareroot seedlings (L)

2.4 秋季施肥对不同苗型油松造林效果的影响

考察秋季施肥对不同苗型油松造林效果的影响,结果见表3。由表3可知,造林当年成活率受苗木类型影响不显著,经过1个冬季和春季的生长,油松容器苗和裸根苗造林成活率均有不同程度的下降,但容器苗下降幅度(6.3%)小于裸根苗(20.8%),故造林第2年春季容器苗造林成活率较裸根苗显著提高了24.91%。整体来看,油松造林成活率随秋季施肥量增加呈先上升后下降趋势,在

24 mg/株施肥处理下最高。容器苗造林当年和第2年春季的苗高、地径相对生长量均显著高于裸根苗,分别高出117.3%、140.3%和49.1%、34.7%。油松造林第2年春季苗高相对生长量受秋季施肥影响显著,随施肥量的增加,苗高相对生长量呈先上升后下降趋势,在12、24 mg/株施肥处理下较高,显著高于36 mg/株施肥处理,分别提高了63.6%和62.1%。

表 3 苗木类型、秋季施肥及其交互效应对油松造林效果的影响

Table 3 The impact of seedling types, fall fertilization and their interaction on the afforestation performance of *P. tabulaeformis*

差异来源 sources of variation	水平 level	成活率/% survival rate		苗高相对生长量/% relative growth of height		地径相对生长量/% relative growth of root-collar diameter	
		T1	T2	T1	T2	T1	T2
苗木类型 seedling type	R	96.18±2.13 a	89.91±2.41 a	10.32±1.48 a	40.04±3.20 a	24.18±1.51 a	39.55±2.85 a
	L	85.83±4.68 a	65.00±7.33 b	4.75±0.85 b	16.66±1.91 b	16.22±1.41 b	29.36±2.63 b
	<i>P</i>	0.051	0.005	0.002	<0.001	0.003	0.026
施肥量 fertilizer addition	0	84.82±6.68 a	65.88±10.59 a	8.45±1.93 a	27.97±6.05 ab	20.45±2.78 a	33.10±4.37 a
	12	87.96±6.64 a	77.55±9.70 a	8.79±2.65 a	32.84±7.76 a	20.90±2.17 a	37.32±4.15 a
	24	100.00±0 a	88.33±9.80 a	7.81±2.29 a	32.54±6.11 a	21.46±3.04 a	37.49±5.44 a
	36	91.25±4.82 a	78.06±5.78 a	5.09±1.17 a	20.07±3.87 b	17.98±2.89 a	29.91±3.60 a
	<i>P</i>	0.192	0.259	0.314	0.049	0.728	0.527
苗木类型 × 施肥量 seedling type × fertilizer addition	<i>P</i>	0.450	0.485	0.055	0.523	0.971	0.834

注:T1 表示造林当年,T2 表示造林第 2 年春季。下同。T1 indicate the first year after afforestation, and T2 indicate the spring of the second year after afforestation. The same below.

2.5 造林效果与苗木性状的相关性

对造林效果与苗木性状的相关性进行分析,结果见表 4。由表 4 可知,根生物量与造林当年成活率、造林第 2 年春季成活率、苗高相对生长量、地径相对生长量呈显著正相关,可见根生物量与造林效果的关系较茎叶生物量更为密切。根冠比与造林第 2 年春季造林成活率和苗高相对生长量呈显著

正相关。根氮、根磷含量与造林成活率和造林第 2 年春季苗高相对生长量呈显著正相关。茎磷含量与造林当年成活率和造林苗高相对生长量呈显著正相关。根钾含量与造林成活率、地径相对生长量和第 2 年春季苗高相对生长量呈显著正相关。总体来看,油松造林效果与造林苗木初始根生物量、根冠比、根氮、根磷、根钾、茎磷含量间相关性显著。

表 4 造林效果与苗木性状的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between afforestation effect and seedling character

相关性状 correlation factor	造林效果 afforestation performance					
	成活率 survival rate		苗高相对生长量 relative growth of height		地径相对生长量 relative growth of root-collar diameter	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
苗高 height	0.171	0.015	-0.004	-0.176	-0.174	-0.094
地径 root-collar diameter	0.147	0.157	-0.367	-0.252	-0.460 *	-0.142
根生物量 root biomass	0.469 *	0.566 **	0.341	0.548 **	0.323	0.459 *
茎生物量 stem biomass	0.015	-0.108	-0.140	-0.244	-0.294	-0.035
叶生物量 needle biomass	-0.042	-0.268	-0.235	-0.399	-0.397	-0.175
根冠比 root shoot ratio	0.345	0.489 *	0.187	0.474 *	0.396	0.271
根氮含量 root N content	0.447 *	0.497 *	0.246	0.528 **	0.246	0.385
茎氮含量 stem N content	0.257	0.285	0.197	0.188	0.096	0.236
叶氮含量 needle N content	-0.103	-0.305	-0.160	-0.262	-0.335	-0.082
根磷含量 root P content	0.460 *	0.500 *	0.111	0.416 *	0.234	0.293
茎磷含量 stem P content	0.435 *	0.344	0.410 *	0.517 **	0.342	0.392
叶磷含量 needle P content	-0.127	-0.253	-0.202	-0.379	-0.421 *	-0.147
根钾含量 root K content	0.511 *	0.586 **	0.325	0.577 **	0.405 *	0.470 *
茎钾含量 stem K content	-0.150	-0.210	-0.221	-0.232	-0.330	-0.124
叶钾含量 needle K content	0.048	-0.134	-0.166	-0.310	-0.363	-0.124

注: ** .*P*<0.01, * .*P*<0.05。

3 讨论

3.1 秋季施肥促进了油松容器苗生物量和养分积累

秋季施肥是在苗木顶芽形成后进行的,对苗高、地径的调控效果呈现多样化。本研究中,油松容器苗和裸根苗苗高、地径在中低剂量秋季施肥处理下与对照差异不显著。这与对冬青栎^[17]、华北落叶松(*L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)^[18]、火炬松(*P. taeda*)^[19]等的研究结果一致。而Li等^[8]对长白落叶松进行秋季施肥试验发现其苗高、地径均显著增加。Islam等^[5]发现脂松苗高受秋季施肥影响显著而地径影响不显著。秋季施肥对苗木苗高、地径影响的差异表现可能与树种有关,也可能与秋季施肥次数、时间有关^[20]。

植物生物量及其分配比例可以反映植物对环境的适应策略,在外界环境发生变化时,植物通过改变自身的生长方式和体内资源分配比例来适应环境,以维持生命的延续^[21]。Liao等^[22]研究发现,适量施肥能够促进幼苗生物量累积,而过量施肥对幼苗生物量积累有抑制作用。本研究中,随着秋季施肥量的增加,油松容器苗生物量积累呈先上升后下降趋势,24 mg/株施肥处理显著提高了容器苗生物量的积累;而36 mg/株施肥处理下容器苗茎、叶及整株生物量有明显下降,但在该处理下观察到最大的根冠比,说明高剂量的秋季施肥虽然会降低容器苗生物量积累,但会提高光合产物向根系分配的比例,可能是因为过量施肥导致容器中土壤溶液营养元素质量分数过高,产生胁迫效应,损害了苗高生长、生物量积累^[23],同时苗木为吸收更多水分,优先将光合产物分配给根系,促进了根的生长,导致根冠比提高。

植苗造林初期,苗木体内养分含量对造林成活以及后期生长意义重大,新造林苗木的新根生长缓慢,很难从土壤环境中迅速获取养分,初期存活生长主要依赖于体内贮存养分的再利用,因此,通过苗圃施肥提高出圃苗木养分积累,对苗木造林表现具有积极作用。本研究中,油松容器苗根、茎、叶及整株养分含量随秋季施肥量增加呈先上升后下降趋势,24 mg/株秋季施肥处理的容器苗器官及整株氮、磷、钾含量均较高,36 mg/株秋季施肥处理的各器官及整株氮、磷、钾含量出现不同程度的下降。这说明适量秋季施肥促进了油松容器苗养分积累,当施肥量超过适宜范围后,会对苗木养分积累产生不利影响,这在闽楠(*Phoebe bournei*)^[24]、夏腊梅

(*Calycanthus chinensis*)^[25]等树种上也得到类似结论。Li等^[14]研究发现,温室培育的油松1年生容器苗在80 mg/株指数施肥条件下,氮含量随秋季施肥量增加呈先上升后下降趋势,在12 mg/株秋季施肥处理下最高。而本研究中容器苗养分积累在24 mg/株秋季施肥处理下表现最优,可能是由速生期施肥方式不同引起的,在速生期常规施肥和指数施肥两种方式下,油松容器苗对秋季施肥的吸收利用不同;也可能是试验条件不同引起的,露天条件下肥料更易挥发、淋溶损失^[26]。本研究中,油松裸根苗养分积累状况受秋季施肥影响不显著。研究发现,脂松裸根苗体内养分含量在11、22、44 kg/hm²秋季施氮水平下与对照差异不显著,继续增加施肥量到89 kg/hm²,其养分含量显著高于对照^[5]。油松裸根苗是否表现出同样效应,需要在后续研究中通过提高秋季施肥水平进行进一步探究。

3.2 油松各器官氮、磷、钾分布规律

本研究中,氮含量在容器苗各器官中的分布从大到小表现为根、叶、茎,在裸根苗中从大到小表现为叶、根、茎,磷、钾含量在容器苗和裸根苗各器官中的分布从大到小表现均为叶、根、茎。付妍琳^[27]研究发现,施肥当年生长季末油松容器苗体内氮、磷、钾含量在各器官中从大到小表现均为叶、根、茎。魏宁^[28]研究发现,经中高剂量指数施肥处理的1年生油松容器苗,在翌年春季测得体内氮与钾含量从大到小表现为叶、根、茎,磷含量从大到小表现为根、叶、茎。上述差异产生的原因可能与肥料种类、施肥方式、取样时间有关。

3.3 油松容器苗造林效果明显优于裸根苗

造林成活率与造林苗木初期生长状况是评价造林表现的重要指标^[29]。本研究中油松容器苗造林成活率和初期苗高、地径相对生长量均显著高于裸根苗。同样地,楚秀丽等^[30]观察到马尾松、木荷(*Schima superba*)容器苗造林后生长状况明显优于裸根苗。这主要是由于容器苗在移栽造林过程中根系损伤小,且容器苗是带基质造林,基质中贮存一定量的水分和养分,为容器苗迅速生长提供营养基础,容器苗造林后无缓苗期^[31];裸根苗移栽造林过程中,根系极易受损而活力下降,造林成活率低,且造林后与土壤的联结性较差,具有明显缓苗期,生长速度较慢^[32]。

造林苗木初始指标在一定程度上能够预测造林效果。本研究观察到油松初始根生物量、根冠比、根氮、根磷、茎磷、根钾含量与油松造林效果显

著正相关,主要是因为根生物量大和养分含量高的苗木造林后新根生长速度更快,有利于提高根系吸收水分和养分的能力,对造林表现有积极作用^[33]。这与李国雷^[34]、孙巧玉等^[35]关于红松(*P. koraiensis*)、栓皮栎(*Q. variabilis*)的研究结果一致。

本研究中,油松容器苗苗高、生物量、根冠比和养分含量受秋季施肥量影响差异显著,24 mg/株处理下,油松容器苗苗高、地径、各器官生物量和养分积累均表现最优,而36 mg/株施肥处理对油松容器苗有抑制作用。油松裸根苗生长受秋季施肥影响较小。雨季造林前油松容器苗各器官氮含量从大到小表现为根、叶、茎,裸根苗从大到小表现为叶、根、茎;磷、钾含量从大到小均表现为叶、根、茎。采用容器苗造林能够显著提高油松造林成活率和初期苗高、地径相对生长量。1年生油松苗造林效果与其初始根生物量、根冠比、根氮、根磷、根钾、茎磷含量显著相关。

参考文献(reference):

- [1] RITCHIE G, DUNLAP J R. Root growth potential; its development and expression in forest tree seedlings[J]. N Z J For Sci, 1980, 10: 218-248.
- [2] BOIVIN J R, SALIFU K F, TIMMER V R. Late-season fertilization of *Picea mariana* seedlings: intensive loading and outplanting response on greenhouse bioassays[J]. Ann For Sci, 2004, 61(8): 737-745. DOI: 10.1051/forest/2004073.
- [3] BOIVIN J R, MILLER B D, TIMMER V R. Late-season fertilization of *Picea mariana* seedlings under greenhouse culture: biomass and nutrient dynamics[J]. Ann For Sci, 2002, 59(3): 255-264. DOI: 10.1051/forest/2002021.
- [4] ANDIVIA E, MÁRQUEZ-GARCÍA B, VÁZQUEZ-PIQUÉ J, et al. Autumn fertilization with nitrogen improves nutritional status, cold hardiness and the oxidative stress response of Holm oak (*Quercus ilex* ssp. *ballota* [Desf.] Samp) nursery seedlings[J]. Trees, 2012, 26(2): 311-320. DOI: 10.1007/s00468-011-0593-3.
- [5] ISLAM M A, APOSTOL K G, JACOBS D F, et al. Fall fertilization of *Pinus resinosa* seedlings: nutrient uptake, cold hardiness, and morphological development[J]. Ann For Sci, 2009, 66(7): 704. DOI: 10.1051/forest/2009061.
- [6] PUÉRTOLAS J, GIL L, PARDOS J A. Effects of nitrogen fertilization and temperature on frost hardiness of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) seedlings assessed by chlorophyll fluorescence[J]. Forestry, 2005, 78(5): 501-511. DOI: 10.1093/forestry/cpi055.
- [7] 刘勇, 陈艳, 张志毅, 等. 不同施肥处理对三倍体毛白杨苗木生长及抗寒性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(1): 38-44. LIU Y, CHEN Y, ZHANG Z Y, et al. Effects of fertilizer treatments on seedling growth and cold resistance of triploid *Populus tomentosa*[J]. J Beijing For Univ, 2000, 22(1): 38-44. DOI: 10.13332/j.1000-1522.2000.01.010.
- [8] LI G L, LIU Y, ZHU Y, et al. Effect of fall-applied nitrogen on growth, nitrogen storage and frost hardiness of bareroot *Larix olgensis* seedlings[J]. Silva Fenn, 2012, 46(3): 345-354. DOI: 10.14214/sf.45.
- [9] 杨阳, 施皓然, 及利, 等. 指数施肥对紫椴实生苗生长和根系形态的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(2): 91-97. YANG Y, SHI H R, JI L, et al. Effects of exponential fertilization on growth and root morphology of *Tilia amurensis* seedlings[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(2): 91-97. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201811061.
- [10] 徐化成. 油松[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [11] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 96-100. MA Q Y, CHEN X L, WANG J, et al. Carbon content rate in constructive species of main forest types in Northern China[J]. J Beijing For Univ, 2002, 24(5/6): 96-100. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1522.2002.05.019.
- [12] 包维楷, 乔永康, 陈庆恒. 岷江上游典型油松人工幼林的生态环境效应[J]. 山地学报, 2003, 21(6): 662-668. BAO W K, QIAO Y K, CHEN Q H. Eco-environment effects of the typical young *Pinus tabulaeformis* plantation rehabilitation in the upper reaches of Minjiang River[J]. J Mt Sci, 2003, 21(6): 662-668. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2003.06.004.
- [13] 郭华, 张桂萍, 铁军, 等. 太行山南段油松群落物种多样性研究[J]. 植物科学学报, 2015, 33(2): 151-157. GUO H, ZHANG G P, TIE J, et al. Analysis on species diversity of *Pinus tabulaeformis* forest communities in the southern Taihang Mountains[J]. Plant Sci J, 2015, 33(2): 151-157. DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2015.20151.
- [14] LI G, WANG J, OLIET J A, et al. Combined pre-hardening and fall fertilization facilitates N storage and field performance of *Pinus tabulaeformis* seedlings[J]. IForest, 2016, 9(3): 483-489. DOI: 10.3832/for1708-008.
- [15] PAN J, JACOBS D F, LI G. Combined effects of short-day treatment and fall fertilization on growth, nutrient status, and spring bud break of *Pinus tabulaeformis* seedlings[J]. IForest, 2017, 10(1): 242-249. DOI: 10.3832/for1718-009.
- [16] 邹尚庆, 李国雷, 刘勇, 等. 秋季施肥对油松容器苗生长·氮吸收和抗寒性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(23): 11710-11714, 11740. ZOU S Q, LI G L, LIU Y, et al. The effect of fall fertilization on *Pinus tabulaeformis* container seedlings growth, nitrogen uptake and cold tolerance[J]. J Anhui Agric Sci, 2012, 40(23): 11710-11714, 11740. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2012.23.130.
- [17] OLIET J A, SALAZAR J M, VILLAR R, et al. Fall fertilization of Holm oak affects N and P dynamics, root growth potential, and post-planting phenology and growth[J]. Ann For Sci, 2011, 68(3): 647-656. DOI: 10.1007/s13595-011-0060-8.
- [18] ZHU Y, LI S, WANG C Y, et al. The effects of fall fertilization on the growth of Chinese pine and Prince Rupprecht's larch seedlings[J]. J For Res, 2020, 31(6): 2163-2169. DOI: 10.1007/s11676-019-01054-0.
- [19] VANDERSCHAAF C, MCNABB K. Winter nitrogen fertilization of loblolly pine seedlings[J]. Plant Soil, 2004, 265(1/2): 295-299. DOI: 10.1007/s11104-005-0510-x.
- [20] 李国雷, 刘勇, 祝燕. 秋季施肥调控苗木质量研究评述[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 166-171. LI G L, LIU Y, ZHU Y. Review on advance in study of fall fertilization regulating seedling quality[J]. Sci Silvae Sin, 2011, 47(11): 166-171.
- [21] 段娜, 汪季, 李清河, 等. 施氮对白刺灌木幼苗生长的影响[J].

- 西北林学院学报, 2019, 34(5): 57-61. DUAN N, WANG J, LI Q H, et al. Effects of nitrogen addition on the growth characteristics of *Nitraria tangutorum* [J]. J Northwest For Univ, 2019, 34(5): 57-61. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2019.05.09.
- [22] LIAO Y C, FAN H B, LI Y Y, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthesis of 1-year-old Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings [J]. Acta Ecol Sin, 2010, 30(3): 150-154. DOI: 10.1016/j.chnaes.2010.04.005.
- [23] 汪力, 郭素娟, 刘正民. 基于指数施肥法的一年生油松菌根化容器苗的供 N 研究 [J]. 生物学杂志, 2013, 30(5): 27-32. WANG L, GUO S J, LIU Z M. The reasonable N supply for 1a *Pinus tabulaeformis* container seedlings with the mycorrhizal in response to different exponential regimes [J]. J Biology, 2013, 30(5): 27-32. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1736.2013.05.027.
- [24] 王艺, 王秀花, 吴小林, 等. 缓释肥加载对浙江楠和闽楠容器苗生长和养分库构建的影响 [J]. 林业科学, 2013, 49(12): 57-63. WANG Y, WANG X H, WU X L, et al. Effects of slow-release fertilizer loading on growth and construction of nutrients reserves of *Phoebe chekiangensis* and *Phoebe bournei* container seedlings [J]. Sci Silvae Sin, 2013, 49(12): 57-63. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20131209.
- [25] 唐桂兰, 刘小星, 芦建国. 氮素指数施肥对夏蜡梅幼苗生长、养分分配的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(6): 134-140. TANG G L, LIU X X, LU J G. Effects of nitrogen exponential fertilization on growth and nutrient distribution of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2017, 41(6): 134-140. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201604043.
- [26] ZENG S C, SU Z Y, CHEN B G, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from orchard soils in south China as affected by fertilization depths and rates [J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 45-53. DOI: 10.1016/S1002-0160(07)60101-5.
- [27] 付妍琳. 控释肥释放模式和施用量对不同苗龄油松苗木质量的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016. FU Y L. Combined effects of controlled-release pattern and fertilization rate on seedling quality of two ages of Chinese pine [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [28] 魏宁. 油松与蒙古栎苗木质量及造林表现对苗圃施肥的响应差异研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020. WEI N. How seedling quality and field performance of *Pinus tabulaeformis*, *Quercus mongolica* respond to fertilizer treatments [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [29] 孙慧彦, 刘勇, 马履一, 等. 长白落叶松苗木质量与造林效果关系的比较 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 176-180. SUN H Y, LIU Y, MA L Y. Relationship between seedling quality and outplanting performance of *Larix olgensis* [J]. J Beijing For Univ, 2009, 31(6): 176-180.
- [30] 楚秀丽, 吴利荣, 汪和木, 等. 马尾松和木荷不同类型苗木造林后幼林生长建成差异 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(6): 25-29. CHU X L, WU L R, WANG H M, et al. Difference of growth and morphogenesis establishment of saplings afforested with different seedling types of *Pinus massoniana* and *Schima superba* [J]. J Northeast For Univ, 2015, 43(6): 25-29. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.20150522.061.
- [31] 梁机, 杜加加, 罗桂强, 等. 不同育苗方式及种粒大小对擎天树苗木生长的影响 [J]. 南方农业学报, 2012, 43(12): 2025-2029. LIANG J, DU J J, LUO G Q, et al. Effects of different seedling-raising methods and seed sizes on the nursery stock growth of *Parashorea chinensis* [J]. J Southern Agric, 2012, 43(12): 2025-2029. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2012.12.2025.
- [32] 周善森, 刘伟, 袁位高, 等. 不同立地条件下红豆树容器苗与裸根苗造林对比试验 [J]. 浙江林业科技, 2012, 32(1): 34-38. ZHOU S S, LIU W, YUAN W G, et al. Comparison test on afforestation by container and bare-rooted seedlings of *Ormosia hosiei* under different site conditions [J]. J Zhejiang For Sci Technol, 2012, 32(1): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3776.2012.01.008.
- [33] 孙巧玉, 刘勇. 控释肥和灌溉方式对栓皮栎容器苗苗木质量及造林效果的影响 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(5): 137-144. SUN Q Y, LIU Y. Effect of controlled-release fertilizer and irrigation method on seedling quality and outplanting performance of *Quercus variabilis* [J]. For Res, 2018, 31(5): 137-144. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.05.019.
- [34] 李国雷, 祝燕, 李庆梅, 等. 红松苗龄型对苗木质量和造林效果的影响 [J]. 林业科学, 2012, 48(1): 35-41. LI G L, ZHU Y, LI Q M, et al. Effect of seedling age on the seedling quality and field performance of *Pinus koraiensis* [J]. Sci Silvae Sin, 2012, 48(1): 35-41.
- [35] 孙巧玉, 刘勇, 陈闯, 等. 栓皮栎容器育苗方式对其造林效果的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 188-192. SUN Q Y, LIU Y, CHEN C, et al. Effects of container seedling quality on outplanting performance of *Quercus variabilis* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2018, 42(1): 188-192. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201702024.

(责任编辑 吴祝华)