

# 施肥方式和施肥量对华山松幼苗生长及 针叶营养状况的影响

丰伟<sup>1,2</sup>, 单昌丹<sup>1</sup>, 张慧<sup>1</sup>, 刘家蔓<sup>2</sup>, 柳国昂<sup>2</sup>, 姚增玉<sup>1\*</sup>

(1. 西南林业大学西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室, 云南 昆明 650224;  
2. 西南林业大学西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 云南 昆明 650224)

**摘要:**【目的】探究不同施肥方式和施肥量对华山松(*Pinus armandii*)幼苗生长及针叶矿质养分元素和非结构性碳水化合物(NSC)含量的影响,为培育具备大量营养储备的优质苗木提供参考。【方法】以华山松幼苗为研究对象,设置常规施肥和指数施肥两种方式,每种方式按总N量100、200、300和400 mg/株分12次施入复合肥(25% N、10% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、20% K<sub>2</sub>O),每2周施肥1次,以不施肥为对照。施肥结束2周后测定苗高、地径、生物量及针叶N、P、K、可溶性糖和淀粉含量。【结果】两种施肥方式下,华山松苗高、地径和生物量均随施肥量增加先增加后减小,指数施肥300 mg/株时苗高、地径和生物量最大,分别是对照的1.29、1.15和1.53倍;施肥处理对针叶P含量影响不显著,但提高了针叶N和K含量,针叶N含量随施肥量增加而升高,相同施肥量下指数施肥的N含量较常规施肥高;常规施肥的针叶K含量随施肥量增加而升高,而指数施肥则先升高后下降;施肥降低针叶可溶性糖含量,其随施肥量增加先下降后升高;合理施肥显著提高针叶淀粉和非结构性碳水化合物含量,且以指数施肥处理效果较好。【结论】与常规施肥相比,指数施肥显著促进了华山松幼苗生物量、N、淀粉和NSC积累,合理施肥处理为以指数施肥方式每株施用1.2 g复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O分别为300、120和240 mg)。

**关键词:**华山松;壮苗培育;指数施肥;养分积累;非结构性碳水化合物

中图分类号:S723.1

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2024)03-0191-08



## Effects of fertilization regime and rate on growth and needle nutrient level of *Pinus armandii* seedling

FENG Wei<sup>1,2</sup>, SHAN Changdan<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, LIU Jiaman<sup>2</sup>, LIU Guoang<sup>2</sup>, YAO Zengyu<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory for Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Biodiversity Conservation in Southwest China, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** 【Objective】The effects of different fertilization regimes and rates on the growth of *Pinus armandii* seedlings and the contents of mineral nutrient elements and non-structural carbohydrates in their needles were investigated to provide a scientific reference for the cultivation of high-quality seedlings with abundant nutrition reserves. 【Method】*P. armandii* seedlings were separately reared in the presence of four different doses of N (100, 200, 300 and 400 mg N per seedling) using a compound fertilizer (25% N, 10% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 20% K<sub>2</sub>O) under conventional and exponential fertilization regimes. The control setup was not treated with the fertilizer. The fertilizer was applied 12 times at 2-week intervals. The shoot height, root collar diameter, biomass and the contents of N, P, K, soluble sugar, starch and non-structural carbohydrates in the needles were measured after two weeks of the last application of the fertilizer. 【Result】The shoot height, root collar diameter and biomass increased at first but subsequently decreased as the rate of the fertilizer was increased, under both application regimes. The shoot height, root collar diameter and biomass were the

收稿日期 Received: 2022-03-14

修回日期 Accepted: 2023-05-21

基金项目: 云南省农业基础研究联合专项(2018FG001-008)。

第一作者: 丰伟(1610306025@qq.com)。\*通信作者: 姚增玉(z-yyao@hotmail.com), 研究员。

引文格式: 丰伟, 单昌丹, 张慧, 等. 施肥方式和施肥量对华山松幼苗生长及针叶营养状况的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(3): 191-198. FENG W, SHAN C D, ZHANG H, et al. Effects of fertilization regime and rate on growth and needle nutrient level of *Pinus armandii* seedling[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(3): 191-198. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202203029.

highest at the dose of 300 mg N per seedling under the exponential fertilization regime, being 1.29, 1.15 and 1.53 fold those of the control. Fertilization enhanced the content of N in the needles, and the N content increased as the rate of the fertilizer was increased. The N content in the needles was higher under the exponential fertilization regime than under the conventional fertilization regime for the same doses of the fertilizer. There were no significant differences in the P content of the needles. The K content in the needles increased at increasing rates of the fertilizer under the conventional fertilization regime. However, the K content increased at first but decreased subsequently at increasing rates of the fertilizer under the exponential fertilization regime. The content of soluble sugar decreased significantly following fertilization, and the contents decreased at first but increased subsequently at increasing rates of the fertilizer. The contents of starch and non-structural carbohydrates in the needles increased significantly under the rational fertilization regime, and exponential fertilization was more preferable. 【Conclusion】 The exponential application of 1.2 g of the fertilizer (300, 120 and 240 mg of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O, respectively) per seedling was found to be the optimal fertilization regimen for cultivating high-quality *P. armandii* seedlings.

**Keywords:** *Pinus armandii*; high-quality cultivation; exponential fertilization; nutrient accumulation; non-structural carbohydrates

滇中地区春夏干旱日趋“常态化”,干旱成为限制该区造林成活的主要因子,采用优质苗木造林是提高造林成活率的主要手段<sup>[1-2]</sup>。苗高、地径等生长参数是衡量苗木质量的可靠且最直观的指标,也是我国苗木质量评价的主要依据,但应对干旱导致的苗木成活问题不能简单地以生长参数作为评价优质苗木的指标。N、P 和 K 等矿质元素是植物生长所必须的养分元素,与植物的抗逆性息息相关。已有研究表明,丰富的养分储备能加快造林后苗木新根生长从而加强其对水分和养分的吸收,促进苗木生长并增强其耐旱能力<sup>[3-4]</sup>。因此,如何提高造林苗木的养分储备一直是研究的热点。施肥能促进苗木生长、增加其养分储备,是培育优质苗木的核心技术。Timmer<sup>[5]</sup>提出的“稳态营养”理论强调根据植物生长需要定量地供应肥料,施肥速率需与植物生长规律相匹配。然而,常规的施肥技术是在生长期以恒定的速率供给肥料,与幼苗需肥规律不符,不利于苗木生长和养分积累。Ingestad 等<sup>[6]</sup>基于“稳态营养”理论提出了指数施肥技术,倡导无肥料胁迫下施用最多的肥料以使苗木生长和养分储备最大化。目前,欧美国家已对美国短叶松(*Pinus banksiana*)<sup>[3]</sup>、美洲山杨(*Populus tremuloides*)<sup>[4]</sup>、蓝桉(*Eucalyptus globulus*)<sup>[7]</sup>和黑云杉(*Picea mariana*)<sup>[8]</sup>等常见造林树种开展了指数施肥的研究和应用;我国对薄壳山核桃(*Carya illinoensis*)<sup>[9]</sup>、西南桦(*Betula alnoides*)<sup>[10]</sup>、米老排(*Mytilaria laosensis*)<sup>[11]</sup>和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)<sup>[12]</sup>等树种也有大量指数施肥的研究报道。以上研究表明,与常规施肥相比,指数施肥能促进苗木在满足生长的同时增加矿质元素储备,从而增强其抗逆性,提高困难立地造林的成活率。除 N、P 和 K 等矿质元素外,以可溶

性糖和淀粉为主要组分的非结构性碳水化合物(non-structural carbohydrate, NSC)也与植物抗旱能力密切相关,充足的 NSC 储备可对于旱胁迫进行缓冲和调节<sup>[13-14]</sup>。但当前在施肥对苗木 NSC 的影响上尚无一致结论:有研究表明,施肥升高苗木叶片 NSC 含量<sup>[15-16]</sup>;但也有研究发现,施肥使幼苗叶片 NSC 含量降低<sup>[17-18]</sup>。

华山松(*P. armandii*)为松科(Pinaceae)松属常绿大乔木,是滇中地区重要的乡土造林树种之一。该树种苗期生长缓慢、造林保存率低是目前造林面临的主要问题之一<sup>[19-20]</sup>,加之近年来滇中地区干旱频发,对其林业生产带来了更大的挑战。以往对华山松苗木培育的研究多集中于基质配比<sup>[20]</sup>、肥料种类<sup>[20-21]</sup>和接种菌根真菌<sup>[22]</sup>对苗木生长和抗旱能力的影响等方面;张青青等<sup>[21]</sup>研究发现,华山松容器苗每个容器施 1.0 和 1.5 g 缓释肥(含氮量为 160 和 240 mg),生物量持续增加;西南桦<sup>[10]</sup>和交趾黄檀(*Dalbergia cochinchinensis*)<sup>[23]</sup>幼苗以指数施肥的方式,每株施 100、200、300、400 和 600 mg N,施肥量每株超过 300 mg N 时生物量下降,幼苗发生毒害。而关于其矿质养分和 NSC 积累对施肥的响应尚不清楚。本研究采用常规施肥和指数施肥两种施肥方式,分析华山松幼苗生长、针叶矿质养分及 NSC 含量对施肥方式及施肥量的响应,旨在为干旱立地造林中华山松苗木的定向培育提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于云南省昆明市西南林业大学实验基地(102°76'E, 25°06'N),海拔约 1 900 m,为亚热

带高原季风气候,雨热同期、干湿季分明,5—10月为雨季,11月至次年4月为旱季。4—10月开展施肥试验,此期间平均气温 20.6 ℃,平均相对湿度 76.8%。

## 1.2 试验材料

育苗基质为  $V_{\text{红心土}}:V_{\text{腐殖土}}$  为7:2的混合基质,基质 pH 5.2,有机碳含量 51.5 g/kg,铵态氮、有效磷和速效钾含量分别为 23.7、9.7 和 12.4 mg/kg。华山松种子于 2020 年 11 月采自云南会泽,种子百粒质量 32.4 g。挑选 3 300 颗粒大饱满的种子,用质量分数 0.5%的  $\text{KMnO}_4$  溶液浸泡 30 min 消毒,纯净水洗净,再用 500 mg/L  $\text{GA}_3$  溶液浸种 12 h,种子洗净晾干后用镊子整齐地摆放在发芽盒内,覆盖 3 cm 厚的湿润灭菌河沙进行催芽。12 月中旬,将芽苗移栽入装满 300 mL 基质的管状组合式育苗容器。次年 4 月初间苗至 1 株/容器,保留苗木的平均苗高、平均地径分别为 6.3 cm、1.76 mm。供试肥料为杜高大量元素水溶性肥料(广州杜高生物科技有限公司),主要养分含量(质量分数)为 N 25%、 $\text{P}_2\text{O}_5$  10%、 $\text{K}_2\text{O}$  20%、Mg 0.6%、B 0.1%、Zn 0.15%、Fe 0.05%等。

## 1.3 试验设计

在已有研究基础上,本研究设置常规施肥和指数施肥两种施肥方式,每种施肥方式设置 100、200、300 和 400 mg N 共 4 个施肥水平,以不施肥为对照(CK),共 9 个处理。采用随机区组设计,每个小区 25 株,4 次重复,每处理 100 株,共 900 株华山松幼苗。本研究中以总施氮量对施肥量进行表述。

常规施肥为相同间隔期内施入等量肥料,公式为:  $N_t = N/T$ 。式中,  $N_t$  为第  $t$  次施氮量,  $N$  为总施氮量,  $T$  为总施肥次数。4 个常规施肥处理依次编号为 C100、C200、C300 和 C400,对应的总施氮量依次为 100、200、300 和 400 mg/株,分 12 次施入,单次分别施 8.3、16.7、25.0、33.3 mg/株。指数施肥的施肥量指数递增,其模型为:  $N = N_s(e^r - 1)$ ;  $N_t = N_s(e^r - 1) - N_{t-1}$  [5]。式中:  $N_s$  为幼苗初始氮含量,测得为 2.88 mg/株;  $N_{t-1}$  为前  $t-1$  次施入的总氮量;  $r$  是氮素相对添加率。4 个指数施肥处理依次编号为 E100、E200、E300 和 E400,对应的总施氮量依次为 100、200、300 和 400 mg/株。

将肥料完全溶于纯水中,配制出不同浓度的水肥溶液,施肥时每株用注射器吸取 5 mL 水肥溶液施入基质中。试验期内采用喷雾器雾化浇水,以减少灌溉造成的养分流失,每月移动容器、随机改变处理的田间排布以削减边缘效应。2021 年 4

月 3 日开始施肥,每 2 周施 1 次,连续施肥 24 周(9 月 3 日最后一次施肥)于 9 月 17 日取样测定,具体编号及施肥安排见表 1。

表 1 指数施肥处理每次单株施氮量

Table 1 The amount of nitrogen applied per plant in each exponential fertilization treatment

施肥次数 fertilization time	施肥处理/(mg·株 <sup>-1</sup> ) exponential fertilization treatment			
	E100	E200	E300	E400
1	1.0	1.2	1.4	1.5
2	1.3	1.7	2.0	2.2
3	1.8	2.5	3.0	3.3
4	2.4	3.6	4.4	5.0
5	3.3	5.1	6.4	7.6
6	4.4	7.2	9.5	11.5
7	6.0	10.3	14.0	17.4
8	8.0	14.2	20.6	25.5
9	9.9	20.4	27.4	36.2
10	14.6	29.8	44.8	59.7
11	19.7	42.5	66.1	90.1
12	26.5	60.6	97.4	136.0
总计 total	100.0	200.0	300.0	400.0

## 1.4 指标测定

生长指标测定:从每个小区中随机取 4 株幼苗(每处理 16 株),用直尺和数显游标卡尺分别测量苗高和地径。将幼苗分解为根、茎和叶,105 ℃烘箱内杀青 30 min,70 ℃烘干 72 h,用分析天平分别测定各器官生物量,计算根冠比 [9] 和苗木质量指数 [24]。

针叶养分含量测定:将同一小区内的烘干针叶混合为一个样品(每处理 4 份),粉碎过 0.5 mm 筛,浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}_2$  消解后供 N、P 和 K 含量的测定。N 和 P 含量(mg/g)采用全自动间断化学元素分析仪(SmartChem200, AMS Alliance, 意大利)测定,K 含量采用火焰分光光度法测定。

可溶性糖和淀粉含量测定:取上述过筛样品,采用浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -苯酚比色法 [25], 向已提取过可溶性糖的样品残渣中加入高氯酸,将其中的淀粉水解为可溶性糖后用浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -苯酚比色法测定可溶性糖含量,通过水解系数换算(0.9)为淀粉含量 [25]; NSC 含量为可溶性糖含量与淀粉含量之和 [16]。

## 1.5 数据分析

采用 Excel 2019、SPSS 25.0 和 Origin 2021 进行数据整理、分析和绘图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(LSD,  $\alpha = 0.05$ )检验不同处理间差异,再用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验施肥方式(fertilization regimes, R)、施肥量(fertilization levels, L)及其二者间的交

互作用( $R \times L$ )对各指标的影响。图表中数据为平均值  $\pm$  标准误(mean  $\pm$  SE)。

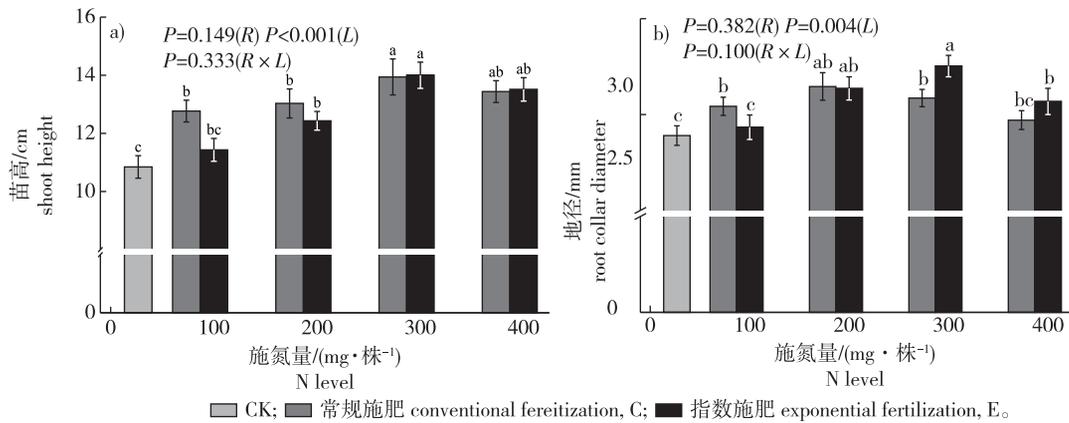
## 2 结果与分析

### 2.1 施肥方式和施肥量对华山松幼苗生长的影响

#### 2.1.1 对苗高和地径生长的影响

施肥对华山松幼苗苗高和地径影响显著( $P <$

0.05),两种施肥方式下,苗高和地径均随施肥量增加先增加后降低。除 E100 处理外的施肥处理苗高均显著高于 CK;除 E100 和 C400 处理外,其余施肥处理的地径均显著高于 CK。综合来看,以 E300 生长最优,其苗高和地径分别是 CK 的 1.29 和 1.15 倍。双因素方差分析表明,苗高和地径受施肥量影响极显著( $P < 0.01$ ) (图 1)。



图中不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。The different lowercase letters in the figure indicated a significant difference ( $P < 0.05$ ) between treatment. The same below.

图 1 施肥方式(L)和施肥量(R)对华山松幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of fertilization regimes and rates on the growth of *P. armandii* seedlings

#### 2.1.2 对生物量积累与分配的影响

施肥对华山松幼苗根生物量、茎生物量、叶生物量、单株生物量和苗木质量指数影响显著( $P < 0.05$ ),相同施肥方式下,以上指标均随施肥量增

加先升高后下降(表 2)。E300 和 C400 处理的根生物量与 CK 差异显著,施肥处理的茎生物量均显著高于 CK, C100、C200、C300、C400、E100、E200、E300 和 E400 处理的叶生物量显著高于 CK, C200、E200 和 E300 处理苗木质量指数显著高于 CK。

表 2 施肥方式和施肥量对华山松幼苗生物量积累、根冠比和苗木质量指数的影响

Table 2 Effects of fertilization regimes and rates on the biomass accumulation, R/S ratio, and SQI of *P. armandii* seedlings

处理 treatment	生物量/g biomass				根冠比 root-shoot ratio	苗木质量指数 SQI	
	根 root	茎 stem	针叶 needle	整株 seedling			
CK	0.22±0.02 b	0.18±0.01 d	0.46±0.04 c	0.86±0.05 c	0.34±0.02 a	0.16±0.01 b	
C100	0.27±0.02 ab	0.24±0.01 ab	0.64±0.03 ab	1.15±0.05 b	0.31±0.02 ab	0.20±0.01 ab	
C200	0.27±0.01 ab	0.28±0.02 a	0.66±0.04 a	1.21±0.06 ab	0.29±0.02 ab	0.21±0.02 a	
C300	0.22±0.01 b	0.26±0.02 ab	0.63±0.03 ab	1.11±0.04 bc	0.25±0.01 b	0.17±0.01 b	
C400	0.19±0.02 c	0.23±0.02 b	0.54±0.04 b	0.97±0.06 bc	0.25±0.02 b	0.15±0.01 b	
E100	0.26±0.02 ab	0.21±0.01 bc	0.62±0.03 ab	1.09±0.04 bc	0.31±0.02 ab	0.20±0.01 ab	
E200	0.28±0.02 ab	0.23±0.01 b	0.65±0.04 a	1.17±0.05 b	0.32±0.02 a	0.21±0.02 a	
E300	0.30±0.02 a	0.29±0.01 a	0.73±0.04 a	1.32±0.05 a	0.30±0.02 ab	0.22±0.01 a	
E400	0.24±0.02 b	0.25±0.01 ab	0.67±0.03 a	1.16±0.05 b	0.26±0.01 b	0.19±0.01 ab	
变异来源 source of variation	R	0.013	0.362	0.036	0.043	0.087	0.010
	L	0.005	0.014	0.167	0.013	0.019	0.008
	R×L	0.047	0.035	0.068	0.006	0.521	0.182

注:表中同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。The different lowercase letters in the table indicated a significant difference ( $P < 0.05$ ) in the same column. The same below.

施肥对根冠比影响显著,其随施肥量增加而降低,C300、C400 和 E400 处理的根冠比显著低于

CK。综合来看,以 E300 处理最优,其根生物量、茎生物量、叶生物量、单株生物量和苗木质量指数分

别比 CK 高 36.4%、61.1%、58.7%、53.5%和 37.5%。双因素方差分析表明,施肥方式、施肥量及交互作用对根和整株生物量影响显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ ),施肥量和交互作用对茎生物量影响显著,施肥方式对叶生物量影响显著,施肥方式和施肥量对苗木质量指数影响显著或极显著,施肥量对根冠比影响显著。

### 2.2 施肥方式和施肥量对华山松幼苗针叶养分含量的影响

施肥对华山松幼苗针叶 N 含量的影响达显著

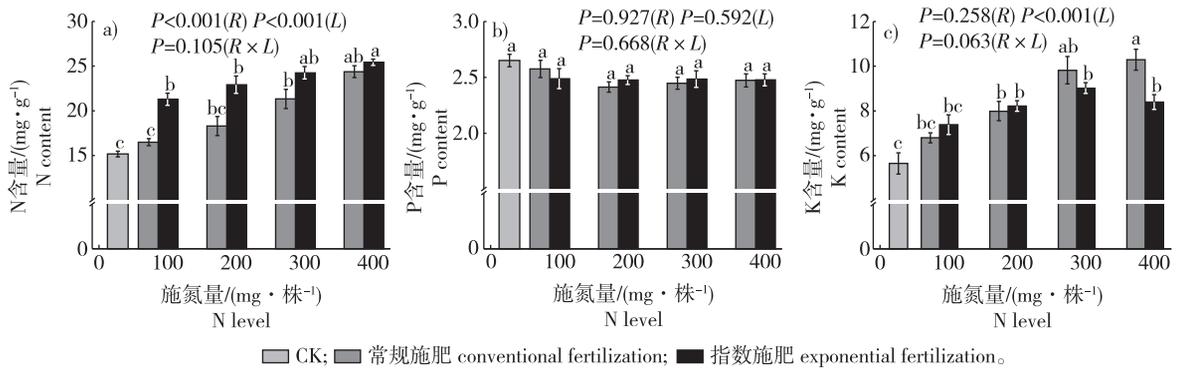


图 2 施肥方式和施肥量对华山松幼苗针叶养分含量的影响

Fig. 2 Effects of fertilization regimes and rates on the nutrient contents in needles of *P. armandii* seedlings

施肥对针叶 K 含量影响显著,常规施肥处理 K 含量随施肥量增加而增加,指数施肥则先增加后降低(图 2c);除 C100 和 E100 处理外的施肥处理 K 含量均显著高于 CK。双因素方差分析表明:施肥方式和施肥量均对针叶 N 含量有极显著影响,施肥量对针叶 K 含量影响极显著。

### 2.3 施肥方式和施肥量对华山松幼苗针叶 NSC 及其组分含量的影响

施肥对针叶可溶性糖、淀粉及 NSC 含量均影响显著( $P < 0.05$ )(图 3)。两种施肥方式下,可溶

性糖含量均随施肥量增加先降低后升高,所有施肥处理的可溶性糖含量均显著低于 CK;而淀粉变化趋势与可溶性糖的相反,施肥处理的淀粉含量均显著高于 CK,相同施肥量下指数施肥的较高;C200、E100、E200、E300 和 E400 处理的针叶 NSC 含量均显著高于 CK,同一施肥量下指数施肥的较高。总体上,E300 处理较优,其针叶淀粉和 NSC 含量最高,分别较 CK 提高 61.1%和 19.2%。双因素方差分析表明:施肥量对针叶可溶性糖含量影响极显著( $P < 0.01$ ),施肥方式和施肥量对淀粉含量影响极

性糖含量均随施肥量增加先降低后升高,所有施肥处理的可溶性糖含量均显著低于 CK;而淀粉变化趋势与可溶性糖的相反,施肥处理的淀粉含量均显著高于 CK,相同施肥量下指数施肥的较高;C200、E100、E200、E300 和 E400 处理的针叶 NSC 含量均显著高于 CK,同一施肥量下指数施肥的较高。总体上,E300 处理较优,其针叶淀粉和 NSC 含量最高,分别较 CK 提高 61.1%和 19.2%。双因素方差分析表明:施肥量对针叶可溶性糖含量影响极显著( $P < 0.01$ ),施肥方式和施肥量对淀粉含量影响极

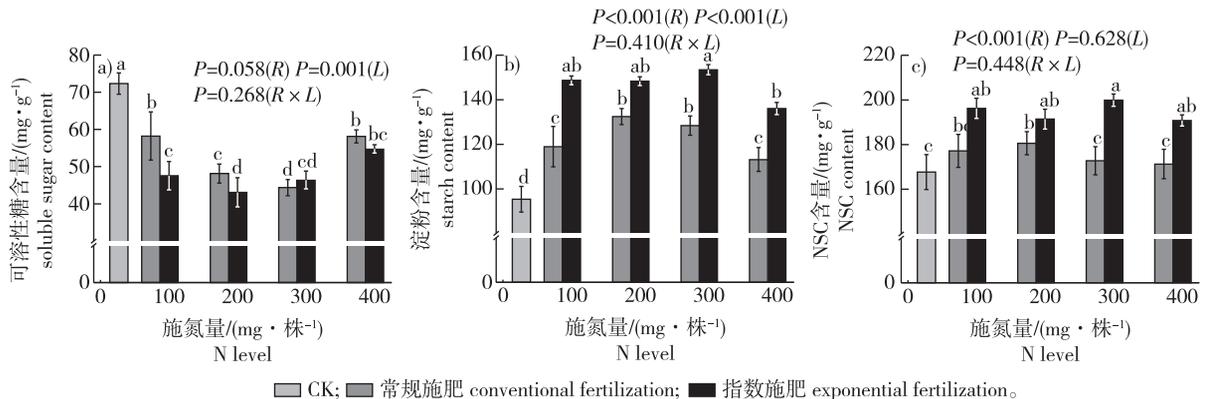


图 3 施肥方式和施肥量对华山松针叶可溶性糖、淀粉和 NSC 含量的影响

Fig. 3 Effects of fertilization regimes and rates on soluble sugar, starch, and NSC contents in needles of *P. armandii* seedlings

显著,施肥方式对针叶 NSC 含量影响极显著。

### 3 讨论

合理施肥可促进苗木生长,是培育优质苗木的关键技术之一<sup>[24, 26]</sup>。本研究中,施肥显著促进华山松幼苗生长,采用指数施肥每株施 300 mg 氮肥时华山松幼苗生长较好。施肥量对苗高和地径生长影响极显著,而施肥方式则无显著影响,说明施肥对华山松幼苗苗高和地径生长的影响主要源于施肥量。生物量是衡量苗木生产力的重要指标之一,苗木生物量越大,其利用资源和适应不利环境的能力越强。本研究发现,施肥方式和施肥量及二者的交互作用对华山松苗木生物量产生显著影响,与 Hu 等<sup>[27]</sup>和季艳红等<sup>[9]</sup>分别对杉木和薄壳山核桃容器苗的研究结果一致,说明施肥方式与施肥量合理搭配可有效提高生物量积累。华山松幼苗生物量随施肥量增加呈先增加后减小的趋势,合理施肥有效缓解幼苗养分缺乏状况,提高幼苗生产力,促进生物量积累,施肥过量则造成肥料浪费甚至不利于生长,降低施肥效果<sup>[5]</sup>。常规和指数施肥的施肥量分别超过 200 和 300 mg/株,华山松幼苗生物量降低,说明指数施肥的幼苗比常规施肥的能承受更多养分,其最终也能获得更多的生物量积累,增强对不利环境的适应能力。较大的根冠比长久以来被视为在干旱区造林苗木必须具备的基本属性,Rytter 等<sup>[28]</sup>提出,促使挪威云杉(*P. abies*)和白桦(*B. platyphylla*)将生物量分配到根上而不是枝叶上对造林存活和生长更为重要。华山松幼苗的根冠比受施肥量显著影响,其随施肥量增加而降低,与对西南桦<sup>[10]</sup>和交趾黄檀<sup>[23]</sup>研究结果一致。根据“资源优先分配”理论,养分缺乏时植物将更多的光合产物分配到根上加强对养分的吸收,施肥倾向于促进地上部分的生长,导致地上部分与地下部分的异速生长,降低根冠比,这种投入权衡对于壮苗培育来说可能是不利的。尽管指数施肥的幼苗根冠比较常规施肥的更高,但施肥方式对其影响不显著,说明指数施肥并不能有效改善华山松幼苗地上/地下的投资权衡。

施肥提供了额外的养分来源,促进幼苗生长的同时扩大其养分储备。N 是氨基酸、蛋白质、叶绿素和核酸等生命物质的主要组成元素之一,参与植物代谢的方方面面,是植物需求量最大的矿质元素。苗木大量的 N 储备可以增强抗逆性、提高苗木质量,促进造林后苗木存活和生长。本研究中,华山松幼苗针叶 N 含量随施肥增加而增加,与王

益民等<sup>[29]</sup>和李茂等<sup>[30]</sup>分别对美国山核桃和杉木的研究结果一致。施肥方式对 N 含量影响极显著,相同施肥量下,指数施肥的华山松针叶 N 含量均高于常规施肥的,说明指数施肥更有利于增加华山松幼苗 N 储备,提高苗木抗逆性。P 是细胞膜、植物激素等的组成元素之一,参与植物光合作用和对寒、旱等逆境胁迫的调节反应。然而,施肥对华山松针叶 P 含量无显著影响;李毓琦等<sup>[31]</sup>对降香黄檀(*D. odorifera*)的研究也发现,施肥对其叶片 P 含量影响不显著。根据全国第二次土壤普查分级标准,本研究的基质速效磷含量为Ⅲ级(中等)水平,可能华山松对 P 的需求量较少,基质所含的 P 或许已能满足其生长。K 是植物多种生化反应的催化剂,主要影响光合产物合成及运输,是植物体内 NSC 积累与转运不可或缺的营养元素,其作为细胞渗透调节的主要物质,也与植物抗逆性息息相关。本研究中,施肥量是华山松针叶 K 含量的影响因素,常规施肥 K 含量随施肥量增加而升高,说明华山松对 K 的需求量较大,指数施肥方式下, K 含量则先升高后下降,这可能是指数施肥后期集中施肥造成土壤溶液中大量  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{K}^+$  共存,发生“阳离子竞争”抑制  $\text{K}^+$  吸收<sup>[32]</sup>。

可溶性糖和淀粉等非结构性碳水化合物是植物体内重要的储能物质,具备丰富 NSC 储备的幼苗在干旱环境下有更强的存活能力。可溶性糖作为光合作用的直接产物、呼吸代谢底物、渗透调节物质、碳转运和储能物质等,与植物耐旱能力密切相关。倪铭等<sup>[26]</sup>指出,纳塔栎容器苗各器官的可溶性糖含量在施氮肥后显著提高;本研究发现,华山松针叶可溶性糖含量在施肥后显著降低,呈现随施肥量增加先降低后增加的趋势,与 Hong 等<sup>[23]</sup>和 Peng 等<sup>[32]</sup>分别对辣木(*Moringa oleifera*)和交趾黄檀的研究结果一致。养分吸收与同化代谢需消耗大量能量,施肥可能加大了可溶性糖消耗<sup>[16, 18]</sup>。淀粉是长期储能物质。本研究中,施肥方式和施肥量均对华山松针叶淀粉含量影响显著,相同施肥量下指数施肥的较高,说明指数施肥可显著提高幼苗淀粉储备,这与倪铭等<sup>[26]</sup>对纳塔栎的研究结果基本一致。淀粉含量的变化趋势与可溶性糖相反,可能与二者的相互转化有关,合理施肥促进可溶性糖转化为淀粉,施肥过量时维持较高的可溶性水平可缓解养分对幼苗的毒害。Peng 等<sup>[32]</sup>和王睿照等<sup>[17]</sup>指出,施氮肥降低辣木和蒙古栎(*Quercus mongolica*)叶片 NSC 含量;本研究则发现,合理施肥显著增加华山松针叶 NSC 含量,与以上研究的

不同可能是施肥时间或树种生物学特性尤其是年生长型的差异造成。前人研究仅在速生期内施肥,此时苗木生长迅速,施肥促使叶片 NSC 转化为结构性碳从而促进苗木生长,增大 NSC 输出的同时产生“稀释效应”;而本研究在整个生长季内进行施肥,且华山松作为前期生长型树种,其生长终止较早,施肥增强光合作用,而生长停止后幼苗得以将更多的光合产物以 NSC 的形式进行储存,这有利于应对不良环境。植物碳氮营养关系复杂,华山松这种“氮-可溶性糖-淀粉-NSC”驱动机制仍值得进一步深入探究。施肥方式极显著影响华山松幼苗针叶 NSC 含量,指数施肥的幼苗 NSC 含量较高,说明采用指数施肥可显著增加 NSC 储备,有助于增强苗木抗旱能力。

本研究通过分析不同施肥方式和施肥量对华山松幼苗生长、针叶养分元素和 NSC 含量的影响,发现指数施肥可显著促进华山松幼苗生物量积累,对提高幼苗针叶 N、淀粉和 NSC 含量的效果显著,具备保证干旱区造林成活的潜力。采用指数施肥方式、每株施 1.2 g 复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和 K<sub>2</sub>O 各 300、120 和 240 mg)的幼苗生长较好,针叶养分元素和 NSC 含量也较高,为本研究华山松幼苗合理施肥的最佳处理。本研究仅限于苗圃阶段对苗木质量进行了评估,在干旱区造林的实际效果仍需通过造林试验进行研究验证。

#### 参考文献(reference):

- [ 1 ] 付奔,胡关东,杨帆,等. 云南干旱“常态化”的分析[J]. 水文,2014, 34(4): 82-85. FU B, HU G D, YANG F, et al. Analysis of drought normalization in Yunnan[J]. J Chin Hydrol. 2014, 34(4): 82-85.
- [ 2 ] 施化云,王雁. 基于功能指数法的云南省不同区域造林成活率影响因子研究[J]. 林业调查规划, 2018, 43(3): 28-33. SHI H Y, WANG Y. Impact factor on survival rate of forestation in different regions of Yunnan Province based on function index method[J]. For Invent Plan, 2018, 43(3): 28-33. DOI:10.3969/j. issn.1671-3168.2018.03.006.
- [ 3 ] POKHAREL P, CHANG S X. Exponential fertilization promotes seedling growth by increasing nitrogen retranslocation in trembling aspen planted for oil sands reclamation[J]. Forest Ecol Manag, 2016, 372: 35-43. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.03.034.
- [ 4 ] POKHAREL P, KWAK J, CHANG S X. Growth and nitrogen uptake of jack pine seedlings in response to exponential fertilization and weed control in reclaimed soil[J]. Biol Fert Soil, 2017, 53(6): 701-713. DOI: 10.1007/s00374-017-1213-1.
- [ 5 ] TIMMER V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J]. New Forests, 1997, 13(3): 279-299. DOI: 10.1023/A:1006502830067.
- [ 6 ] INGESTAD T, LUND A B. Theory and techniques for steady state mineral nutrition and growth of plants[J]. Scand J Forest Res, 1986, 1(4): 439-453. DOI: 10.1080/02827588609382436.
- [ 7 ] CLOSE D C, BAIL I, HUNTER S, et al. Effects of exponential nutrient-loading on morphological and nitrogen characteristics and on after-planting performance of *Eucalyptus globulus* seedlings[J]. Forest Ecol Manag, 2005, 205(3): 397-403. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.10.041.
- [ 8 ] SALIFU K F, TIMMER V R. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture[J]. Can J Forest Res, 2003, 33(7): 1287-1294. DOI: 10.1139/x03-057.
- [ 9 ] 季艳红,汤文华,窦全琴,等. 施肥对薄壳山核桃容器苗生长及养分积累的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(6): 47-56. JI Y H, TANG W H, DOU Q Q, et al. Effects of fertilizer application on seedling growth and nutrient accumulation in *Carya illinoensis* container seedlings[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(6): 47-56. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202009051.
- [ 10 ] CHEN L, WANG C, DELL B, et al. Growth and nutrient dynamics of *Betula alnoides* seedlings under exponential fertilization[J]. J Forestry Res, 2018, 29(1): 111-119. DOI: 10.1080/00380768.2012.708879.
- [ 11 ] CHEN L, ZENG J, JIA H, et al. Growth and nutrient uptake dynamics of *Mytilaria laosensis* seedlings under exponential and conventional fertilizations[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2012, 58(5): 618-626. DOI: 10.1080/00380768.2012.708879.
- [ 12 ] WU J S, LIN H P, GUO L H, et al. Biomass and nutrients variation of Chinese fir rooted cuttings under conventional and exponential fertilization regimes of nitrogen[J]. Forests, 2019, 10(8): 615. DOI: 10.3390/f10080615.
- [ 13 ] GUO Q X, LI J Y, ZHANG Y X, et al. Species-specific competition and N fertilization regulate non-structural carbohydrate contents in two *Larix* species[J]. Forest Ecol Manag, 2016, 364: 60-69. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.01.007.
- [ 14 ] ADAMS H D, GERMINO M J, BRESHEARS D D, et al. Non-structural leaf carbohydrate dynamics of during drought-induced tree mortality reveal role for carbon metabolism in mortality mechanism[J]. New Phytol, 2013, 197(4): 1142-1151. DOI: 10.1111/nph.12102.
- [ 15 ] 张婉婷,单立山,李毅,等. 氮添加与降雨变化对红砂幼苗非结构性碳水化合物的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 803-811. ZHANG W T, SHAN L S, LI Y, et al. Effects of nitrogen addition and precipitation change on non-structural carbohydrates in *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. Chin J Ecol, 2020, 39(3): 803-811. DOI:10.13292/j.1000-4890.202003.017.
- [ 16 ] 王凯,雷虹,夏扬,等. 杨树幼苗非结构性碳水化合物对增加降水和氮添加的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 399-407. WANG K, LEI H, XIA Y, et al. Responses of non-structural carbohydrates of poplar seedlings to increased precipitation and nitrogen addition[J]. Chin J Appl Ecol, 2017, 28(2): 399-407. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201702.012.
- [ 17 ] 王睿照,毛沂新,云丽丽,等. 氮添加对蒙古栎叶片碳氮磷化学计量与非结构性碳水化合物的影响[J]. 生态学杂志, 2022,41(7): 1-10. WANG R Z, MAO Y X, YUN L L, et al. Effects of nitrogen addition on leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and nonstructural carbohydrates in Mongolian oak (*Quercus mongolica*) stands[J]. Chin J Ecol, 2022,41(7): 1-10. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202207.009.
- [ 18 ] 魏红旭,徐程扬,马履一,等. 苗木晚季施肥研究现状与展望

- [J]. 林业科学, 2011, 47(7): 172-180. WEI H X, XU C Y, MA L Y, et al. Current development and prospect on late-season fertilization to tree seedling [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, 47(7): 172-180.
- [19] 丰伟, 陈诗, 单昌丹, 等. 施肥对华山松容器苗根系形态及针叶生理特性的调控作用[J]. *植物科学学报*, 2023, 41(4): 521-530. FENG W, CHEN S, SHAN C D, et al. Regulatory effects of fertilization on root morphology and needle physiological characteristics of *Pinus armandii* Franch. container seedlings[J]. *Plant Sci J*, 2023, 41(4): 521-530. DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.22283.
- [20] 潘泰臣, 张胜利, 于金鑫, 等. 基于二次回归通用旋转组合设计的华山松容器育苗基质研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(5): 85-90. PAN T C, ZHANG S L, YU J X, et al. Substrate composition and fertilizer formulation for breeding container seedlings of *Pinus armandii* based on quadratic regression combination design[J]. *J Northwest For Univ*, 2020, 35(5): 85-90. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.05.13.
- [21] 张青青, 杨永洁, 王慷林, 等. 基质及施肥对华山松容器苗生长的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2019, 41(6): 1113-1119. ZHANG Q Q, YANG Y J, WANG K L, et al. Effects of substrate and fertilization on the growth of *Pinus armandii* container seedlings [J]. *J Jiangxi Agr Univ*, 2019, 41(6): 1113-1119. DOI: 10.13836/j.jjau.2019130.
- [22] 魏媛, 张金池, 尹晓阳, 等. 华山松菌根化幼苗的抗旱特性[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(4): 69-72. WEI Y, ZHANG J C, YIN X Y, et al. Characteristics of drought tolerance in mycorrhizal fungi seedlings of *Pinus armandii* Franch[J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2007, 31(4): 69-72.
- [23] HONG Z, GUO J Y, ZHANG N N, et al. Polysaccharide, proline, and anti-oxidation enzyme activities of Thailand rosewood (*Dalbergia cochinchinensis*) seedlings exposed to exponential fertilization[J]. *J Forestry Res*, 2022, 33(1): 75-87. DOI: 10.1007/s11676-021-01300-4.
- [24] 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.
- [25] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. LI H S. Principles and Techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [26] 倪铭, 高振洲, 吴文, 等. 不同氮素施肥方法对纳塔栎容器苗生长及非结构性碳水化合物积累的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(4): 107-113. NI M, GAO Z Z, WU W, et al. Effects of different nitrogen fertilization methods on growth and non-structure carbohydrate accumulation of *Quercus nuttallii* seedlings[J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 45(4): 107-113. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202005040.
- [27] HU Y L, FAN H H, XUAN H F, et al. Distinct growth and nutrient status responses to fertilization regimes in two generations of Chinese fir seedlings[J]. *Forests*, 2019, 10(9): 719. DOI: 10.3390/f10090719.
- [28] RYTTER L, ERICSSON T, RYTTE R. Effects of demand-driven fertilization on nutrient use, root: plant ratio and field performance of *Betula pendula* and *Picea abies*[J]. *Scand J Forest Res*, 2003, 18(5): 401-415. DOI: 10.1080/02827580310001931.
- [29] 王益明, 卢艺, 张慧, 等. 指数施肥对美国山核桃幼苗生长及叶片养分含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(6): 136-140. WANG Y M, LU Y, ZHANG H, et al. Effects of exponential fertilization on growth and nutrient content in leaf of *Carya illinoensis* seedlings[J]. *Chin Soil Fert*, 2018(6): 136-140. DOI: 10.13759/j.cnki.dlx.2018.09.005.
- [30] 李茂, 洪凯, 许珊珊, 等. 指数施肥对杉木优良无性系幼苗生长和养分含量的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(6): 1490-1497. LI M, HONG K, XU S S, et al. Effects of exponential fertilization on *Cunninghamia lanceolata* superior clone seedling growth and nutrient content [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2020, 26(6): 1490-1497. DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2019.11039.
- [31] 李毓琦, 刘小金, 徐大平, 等. 不同施肥量对降香黄檀苗木生长和叶片养分状况的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(2): 481-487. LI Y Q, LIU X J, XU D P, et al. Growth and foliar nutrition of *Dalbergia odorifera* seedlings under exponential fertilization [J]. *Chin J Trop Crop*, 2021, 42(2): 481-487. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2021.02.025.
- [32] PENG Z T, CHEN M X, HUANG Z J, et al. Non-Structural carbohydrates regulated by nitrogen and phosphorus fertilization varied with organs and fertilizer levels in *Moringa oleifera* seedlings[J]. *J Plant Growth Regul*, 2021, 40(4): 1777-1786. DOI: 10.1007/s00344-020-10228-8.

(责任编辑 孟苗婧 郑琰焱)