江西农业大学学报　2025,47(5)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　https://doi.org/10.3724/aauj.2025109

洪腾辉,张薇,蒋诗音,等.指数施肥对南酸枣幼苗生长及养分承载的影响[J].江西农业大学学报,2025,47(5):1267-1277.
HONG T H,ZHANG W,JIANG S Y,et al.Effects of exponential fertilization on growth and nutrient allocation of *Choerospondias axillaris* seedlings[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(5):1267-1277.

江西农业大学百廿华诞专刊特约稿

指数施肥对南酸枣幼苗生长及养分承载的影响

洪腾辉,张　薇,蒋诗音,陈以东,彭惠萍,汪加魏,孙荣喜,吴南生,丁　菲*

(江西农业大学 林学院/亚热带森林资源培育江西省重点实验室/南酸枣研究所,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】探究指数施氮肥对南酸枣幼苗生长及养分承载的影响,确定适合南酸枣生长的最佳施氮水平,为南酸枣苗木的高效施氮肥提供理论依据。【方法】以南酸枣1年生幼苗为试验材料,设置3,7,11,15 g/株共4种不同施氮水平的指数施肥,以不施肥为对照处理(CK),来探究其对南酸枣幼苗苗高、地径、生物量、养分含量以及养分积累量等指标的影响。【结果】南酸枣幼苗的苗高、地径以及各生物量均随着施氮水平的增加而先递增再下降,且各施氮处理与CK处理之间均有显著差异($P<0.05$),在11 g/株时达到最大值,分别为183.80 cm、25.19 mm和329.52 g,比CK增加了45.47%、106.44%和227.36%。南酸枣幼苗在整个生长周期内,氮、磷、钾养分积累量变化规律对施氮的响应基本一致,均呈"快—慢—快"的增长趋势,施肥结束后各施氮处理的根、茎、叶养分积累量均显著高于CK处理($P<0.05$)。并且不同施氮水平处理均能显著影响南酸枣幼苗各器官氮、磷、钾的分配格局,且随施氮水平的提高,氮、磷、钾在茎和叶中的分配比率增加,在11 g/株时达到最佳,在根中的分配比率则与之相反。【结论】施氮能够有效促进南酸枣幼苗的生长和养分积累,本试验中以11 g/株为指数施氮的最佳方案。

关键词:南酸枣;指数施肥;氮肥;生长;养分承载
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:1000-2286(2025)05-1267-11
CSTR:32399.14.aauj.2025109

Effects of exponential fertilization on growth and nutrient allocation of *Choerospondias axillaris* seedlings

HONG Tenghui,ZHANG Wei,JIANG Shiying,CHEN Yidong,PENG Huiping,WANG Jiawei,SUN Rongxi,WU Nansheng,DING Fei*

收稿日期:2025-04-22　　**修回日期:**2025-06-29
基金项目:国家自然科学基金项目(32160387)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32160387)

作者简介:洪腾辉,硕士生,orcid.org/0009-0006-1465-8681,2962082982@qq.com;*通信作者:丁菲,教授,博士,1991年本科毕业于江西农业大学果树专业,2003年完成同等学力硕士课程学习,2009年博士毕业于江西农业大学森林培育专业;先后主持完成国家自然科学基金、江西省重点研发计划、江西省科技支撑计划等科研项目,制定省级地方标准2项,发表相关论文20余篇;主要从事经济林栽培研究,orcid.org/0000-0003-3429-2438,403491241@qq.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(Faculty of Forestry, Jiangxi Agricultural University/Jiangxi Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation/Insititute of Choerospondias axillaris, Nanchang 330045, China)

Abstract: [**Objective**] This study investigates the effects of exponential nitrogen (N) fertilization on the growth and nutrient allocation of *Choerospondias axillaris* seedlings to determine the optimal N application rate, thereby providing a scientific basis for efficient N management in *C. axillaris* cultivation. [**Method**] One-year-old *C. axillaris* seedlings were subjected to four exponential N fertilization treatments (3, 7, 11, and 15 g/plant), with an unfertilized control (CK). Growth parameters including height, ground diameter, biomass, nutrient content, and nutrient accumulation were analyzed. [**Result**] The seedling height, ground diameter, and biomass initially increased and then declined with increasing N levels, showing significant differences ($P<0.05$) between all N treatments and CK. The maximum values (183.80 cm, 25.19 mm, and 329.52 g, respectively) were observed at 11 g/plant, with an increase of 45.47%, 106.44%, and 227.36% compared to those of CK. Throughout the growth cycle, N, phosphorus (P), and potassium (K) accumulation followed a "rapid-slow-rapid" trend in response to fertilization. Post-fertilization, root, stem, and leaf nutrient accumulation in N-treated seedlings significantly exceeded CK ($P<0.05$). Moreover, different nitrogen application level treatments can significantly affect the distribution patterns of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) in various organs of Choerospondias axillaris seedlings. With the increase of nitrogen application level, the distribution ratios of N, P, and K in stems and leaves increase, reaching the optimum at 11 g per plant, while the distribution ratio in roots shows the opposite trend. [**Conclusion**] Exponential N fertilization can effectively enhance *C. axillaris* seedling growth and nutrient accumulation, with 11 g/plant identified as the optimal rate.

Keywords: *Choerospondias axillaris*; exponential fertilization; nitrogen fertilizer; growth; nutrient carrying capacity

【研究意义】南酸枣(*Choerospondias axillaris*)系漆树科(Anacardiaceae)南酸枣属(*Choerospondias*)落叶乔木,雌雄异株,别名鼻涕果、山枣子、五眼果等,是我国南方重要的经济林树种,国外主要分布于印度、中南半岛和日本等地。其利用价值极高,是一种集药用、材用、果用于一体的多功能经济林树种[1]。【前人研究进展】近年来,关于南酸枣苗木繁育[2]、花粉活力[3]、家系及生长节律[4-5]、营养和药用价值[6-7]等方面的研究较多,但鲜有南酸枣苗木施肥的相关研究。南方地区造林地多为山地,立地条件普遍比较差,极易出现苗木长势弱、生长小的现象,提高苗木质量就显得尤为重要[8]。

【本研究切入点】苗木质量是决定造林成效的关键因子之一,提高苗木质量不但可以提升造林成活率,而且使林木质量更高[9]。施肥是改善苗木质量的主要途径,氮素是植物生长最重要元素之一[10]。目前在林木苗木培育过程中,苗木对氮肥的利用低效的问题普遍存在,如何提高植物对养分的吸收和利用效率,受到国内外学者长期关注[11-13]。20世纪80年代,Timmer[14]提出指数施肥法,即施肥时按其生长速率相应的指数递增来增施养分,从而满足苗木不同时期的养分需求。同时指数施肥法通过分阶段增加其养分供应可刺激植物形成更发达的根系网络,增强养分吸收能力,从而使生物量积累最大化[10]。氮素指数施肥一直都是研究热点,在黑云杉(*Picea mariana*)[15]、白桦(*Betula alnoides*)[16]、楸树(*Catalpa bungei*)[17]和罗汉松(*Buddhist pine*)[18]等树种中获得了相应的研究成果。【拟解决的关键问题】本研究基于氮素指数施肥对苗木生长和养分承载的影响来探究最佳施肥方案,为南酸枣苗木培育提供理论依据,对提高其苗木质量具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

研究地点设在江西省南昌市江西农业大学南酸枣种质资源圃内(28°57′N,115°39′E),属于亚热带季风湿润气候,四季分明,年平均气温17.4 ℃,年平均降水量约1 600 mm。选取圃内生长势基本一致、健壮且无病虫害的1年生南酸枣幼苗,平均苗高(64.03±1.18)cm,平均地径(6.63±0.2)mm,分别移于规格

为 32 cm×21 cm×28 cm(口径×底径×高)的塑料花盆内,盆装基质干质量为 10 kg,每盆栽植幼苗 1 株,盆下垫塑料托盘以防止肥料淋溶流失。盆栽基质为酸性红壤土,pH 值为 5.21,土壤的基础肥力为全氮含量 0.41 g/kg,全磷 0.59 g/kg,全钾 8.29 g/kg,有机质含量 3.07 g/kg。2023 年 2 月进行移栽,缓苗于 4 月进行试验。

1.2　试验设计

采用氮素的指数添加方式进行施肥处理,其计算公式如下:

$$N_T=N_S(e^{rT}-1) \quad (1)$$

$$r=\ln(N_T/N_S+1)/T \quad (2)$$

$$N_t=N_S(e^{rt}-1)-N_{t-1} \quad (3)$$

式(1)、式(2)、式(3)中:N_T为施用氮肥的总量,N_S为苗木体内初始含氮量,T为施肥总次数,r是氮素的相对添加速率,e^T为经过T次指数施肥后苗木体内氮含量的增长率,N_{t-1}为当次施肥前积累的施氮总量[19]。试验设置 5 个处理,分别用 CK(0 g)、E1(3 g)、E2(7 g)、E3(11 g)、E4(15 g)表示,每个处理各栽植 30 盆,共 150 盆,各处理小区完全随机排列。于 2023 年 4 月 1 日开始第 1 次施肥,每 15 d 1 次,各处理分 12 次将尿素溶于水后等量施入,供试氮肥为江西心连心化学工业有限公司生产的尿素(含氮量 46%)。据上述公式计算每次氮肥施用量,具体施肥方案见表 1。

表 1　指数施肥各处理施肥方案

Tab.1　Fertilizer amount in different exponential fertilization treatments　　g/株

施肥次数 Fertilization Times	处理 Treatments				
	CK	E1	E2	E3	E4
1	0	0.047	0.063	0.072	0.078
2	0	0.061	0.085	0.102	0.114
3	0	0.077	0.117	0.144	0.165
4	0	0.098	0.159	0.203	0.239
5	0	0.125	0.217	0.287	0.347
6	0	0.160	0.296	0.426	0.504
7	0	0.203	0.424	0.575	0.732
8	0	0.260	0.550	0.823	1.062
9	0	0.330	0.750	1.157	1.544
10	0	0.421	1.022	1.648	2.242
11	0	0.535	1.394	2.304	3.252
12	0	0.682	1.913	3.259	4.721
总计 Total	0	3.000	7.000	11.000	15.000

1.3　指标测定及方法

施肥前测量各处理幼苗的苗高和地径,作为初始值。

生长指标测定:苗高用卷尺测量,数值精确到 0.1 cm,地径用游标卡尺测量,数值精确到 0.01 mm,生物量测定通过每个处理随机选取 3 株幼苗,将各个处理的幼苗按根、茎、叶分开,用去离子水冲洗干净,分别装入不同信封内,先将样品放入烘箱在 105 ℃下杀青 30 min,然后在 65 ℃下烘干至恒重,用电子天平测量各器官的干重,总生物量为各器官干重之和。

养分含量测定:将生物量测定处理后的各植物器官进行粉碎过筛,称取 0.1 g 样品,用浓 H_2SO_4-H_2O_2 消煮法进行氮磷钾联合消煮,用 SmartChem 200 全自动间断化学分析仪测定植物根茎叶中的全氮含量[20],用钼锑抗比色法测定全磷含量[21],用火焰光度计法测定全钾含量[22]。

根、茎、叶的养分积累量=根、茎、叶的养分含量×对应的生物量　(4)

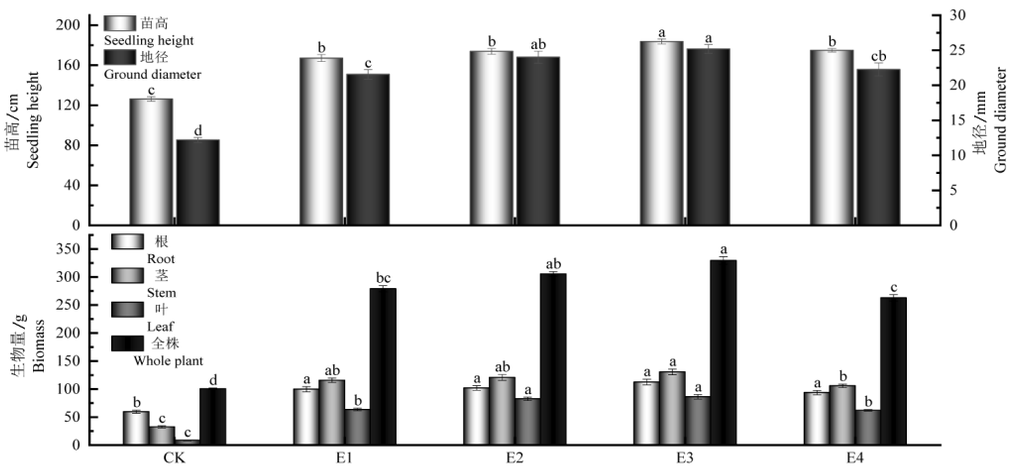
1.4　数据分析

采用 Excel 2010 进行数据统计整理,SPSS 21.0 进行单因素方差分析、Duncan's 多重比较(α=0.05)以及各指标主成分分析,Origin 2024 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对南酸枣幼苗生长指标的影响

由图1可以看出，4个不同施氮水平处理下的南酸枣幼苗的苗高、地径以及根、茎、叶、全株的生物量与CK均有显著差异（P<0.05），分别增加了32.35%~45.47%、76.62%~106.44%、57.46%~89.05%、226.01%~302.12%、618.89%~900.12%、161.10%~227.36%。不同施氮水平处理间南酸枣幼苗的各项生长指标均随着施氮水平的增加呈现先增加再降低的趋势，且在E3处理中达到最大值。CK处理下南酸枣各器官生物量的大小顺序为根>茎>叶，地上部分的生物量只占总生物量的40.85%，根冠比显著大于其他施氮处理（P<0.05），而施氮处理的大小顺序则为茎>根>叶，地上部分的生物量占总生物量的60%以上，各施氮处理间根冠比差异不显著（P>0.05）。



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

The different lowercase letter indicated significant difference（P<0.05）.

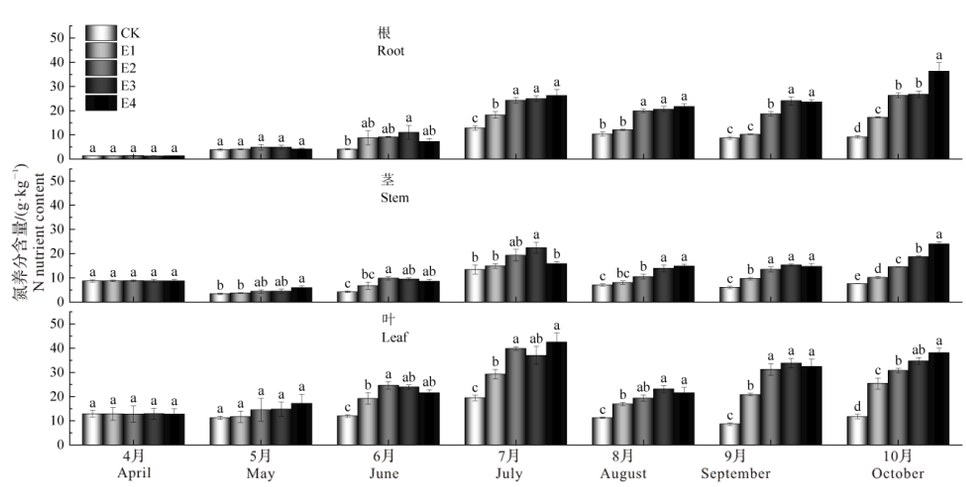
图1 不同施氮处理对南酸枣幼苗生长指标的影响

Fig.1 Effects of different nitrogen treatments on the growth indicators of *C. axillaris* seedlings

2.2 不同施肥处理对南酸枣幼苗养分承载的影响

2.2.1 不同施肥处理对南酸枣幼苗各器官养分含量的影响

由图2可知，南酸枣幼苗的氮养分含量总体上呈现“缓慢上升—快速上升—快速下降—缓慢上升”的趋势，且从6月开始各处理茎和叶的氮养分含量就显著高于CK处理（P<0.05）。在施肥结束后各处理根、



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

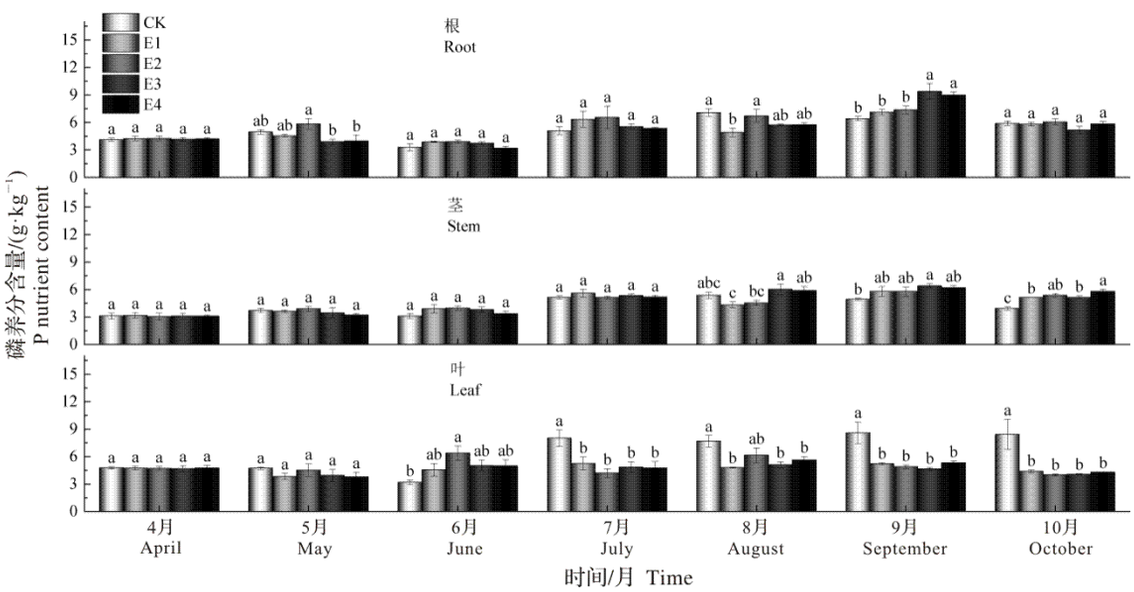
The different lowercase letter indicated significant difference（P<0.05）.

图2 不同施氮处理下南酸枣幼苗氮养分含量变化

Fig.2 Effects of nitrogen fertilization treatments on nitrogen concentration in *C. axillaris* seedlings

茎、叶的氮养分含量均显著高于CK处理(P<0.05),各处理根的氮养分含量大小依次为E4>E3>E2>E1>CK,比CK处理提高了87.91%~295.86%;各处理茎的氮养分含量大小依次为E4>E3>E2>E1>CK,比CK处理提高了33.11%~215.77%;各处理叶的氮含量大小依次为E4>E3>E2>E1>CK,比CK处理提高了117.16%~225.28%,均在E4处理中达到最大值。南酸枣幼苗各器官氮养分含量整体表现为叶>根>茎。

由图3可知,南酸枣幼苗根和茎的磷养分含量变化规律基本一致,呈现“上升—下降—上升—下降”的趋势;但叶的CK处理磷养分含量变化呈现“下降—快速上升—平稳”趋势,且在施肥结束后显著高于其他施氮处理(P<0.05)。施肥结束后各处理根的磷养分含量大小依次为E2>CK>E4>E1>E3,各处理之间差异不显著(P>0.05);各处理茎的磷养分含量大小依次为E4>E2>E3=E1>CK,各施氮处理与CK处理间均有显著差异(P<0.05),较CK处理提高了30.53%~47.07%;各处理叶的磷含量大小依次为CK>E1>E4>E3>E2,CK处理与各施氮处理间有显著差异(P<0.05)。南酸枣幼苗各器官磷养分含量整体表现为根>茎>叶。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

The different lowercase letter indicated significant difference(P<0.05).

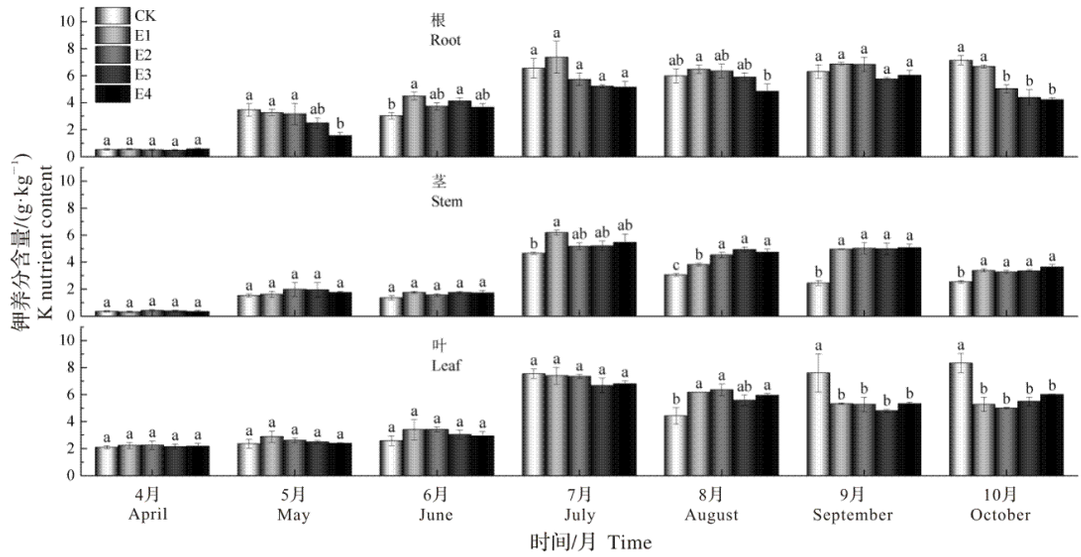
图3　不同施氮处理下南酸枣幼苗磷养分含量变化

Fig.3　Effects of nitrogen fertilization treatments on phosphorus concentration in *C. axillaris* seedlings

从图4可以看出,南酸枣幼苗的钾养分含量变化规律总体上呈现“上升—快速上升—平缓—下降”趋势,但叶的CK处理钾养分含量变化呈现“上升—快速上升—下降—快速上升”趋势。施肥结束后各处理根部的钾养分含量大小依次为CK>E1>E2>E3>E4,CK和E1处理显著高于其他处理(P<0.05);各处理茎部的钾养分含量大小依次为E4>E1>E3>E2>CK,各施氮处理与CK处理间存在显著差异(P<0.05),与CK处理相比增加了28.74%~43.31%;各处理叶部的钾养分含量大小依次为CK>E4>E3>E1>E2,其他施氮处理显著低于CK处理(P<0.05)。南酸枣幼苗各器官钾养分含量整体表现为根>叶>茎。

2.2.2　不同施肥处理对南酸枣幼苗各器官养分积累的影响

由图5可知,南酸枣幼苗的氮养分积累量变化规律大致相同,呈现“缓慢增长—快速增长”的趋势,且从7月开始各施氮处理的根、茎、叶氮养分积累量就均显著高于CK处理(P<0.05)。在施肥结束后各处理根部的氮养分积累量大小依次为E4>E3>E2>E1>CK,各施氮处理的根部的氮养分积累量比CK提高了214.33%~518.28%;各处理茎部的氮养分积累量大小依次为E4>E3>E2>E1>CK,各施氮处理的茎部的氮养分积累量比CK提高了374.25%~922.25%;各处理叶部的氮养分积累量大小依次为E3>E2>E4>E1>CK,各施氮处理的叶部的氮积累量比CK提高了1 464.14%~2 845.50%。南酸枣幼苗各器官的氮积累量整体表现为根>叶>茎,叶部的氮积累量随着施氮水平的增加呈现出先上升再下降的趋势,根茎的氮积累量随着施氮水平的增加一直增加,其中E3处理的南酸枣幼苗在整个生长季整体氮养分积累量最大。

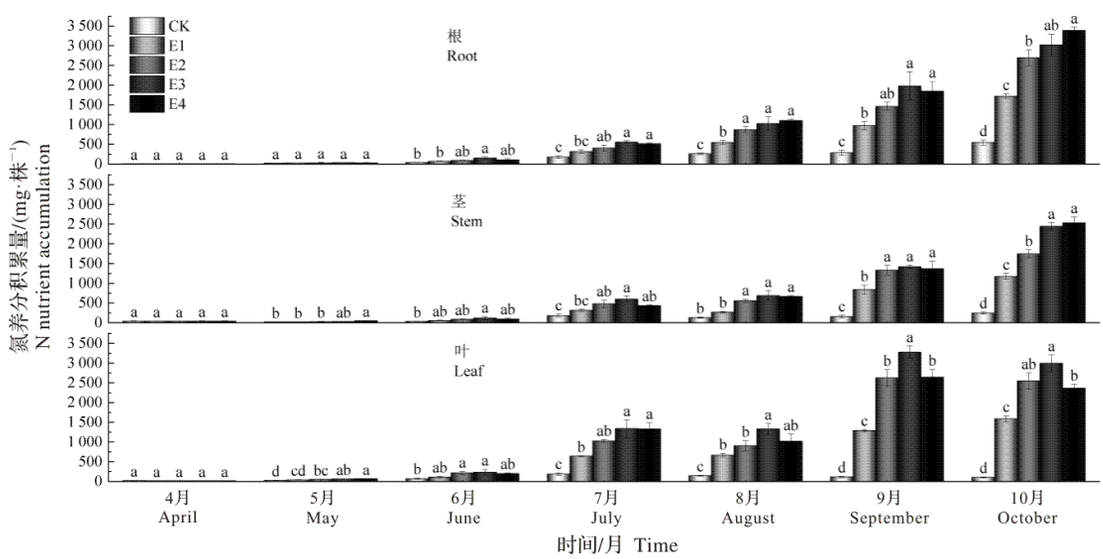


不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

The different lowercase letter indicated significant difference(P<0.05).

图4 不同施氮处理下南酸枣幼苗钾养分含量变化

Fig.4 Effects of nitrogen fertilization treatments on potassium concentration in *C. axillaris* seedlings



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

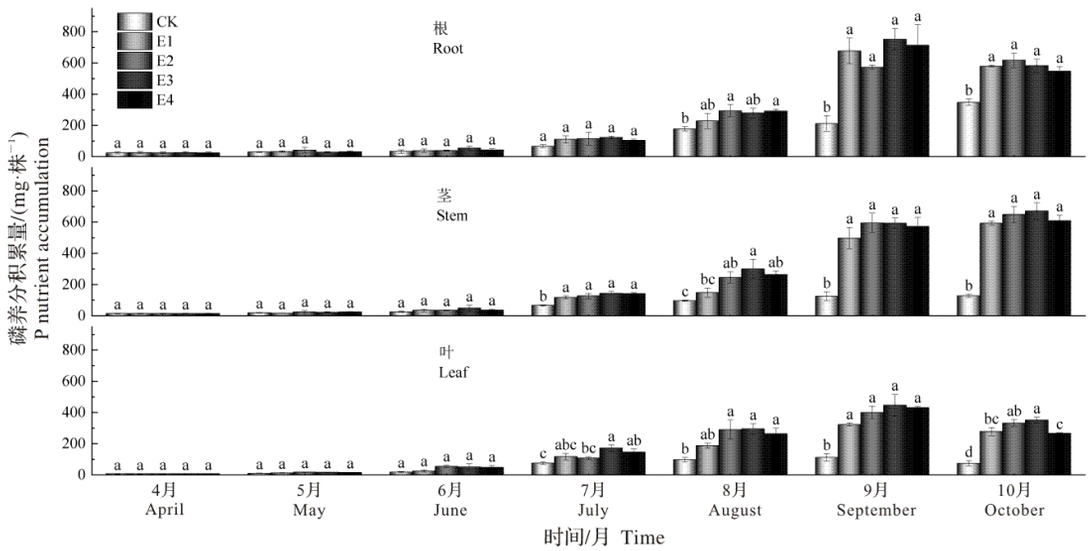
The different lowercase letter indicated significant difference(P<0.05).

图5 不同施氮处理下南酸枣幼苗氮养分积累量变化

Fig.5 Effects of nitrogen fertilization treatments on nitrogen accumulation in *C. axillaris* seedlings

从图6可以看出,南酸枣幼苗各器官的磷养分积累量变化规律总体上呈现“缓慢增长—快速增长—下降”的趋势,且从8月开始各施氮处理的根、茎、叶磷养分积累量就均显著高于CK处理(P<0.05)。施肥结束后各处理根部的磷养分积累量大小依次为E2>E3>E1>E4>CK,各施氮处理根部的磷养分积累量比CK处理增加了57.33%~77.49%;施肥结束后各处理茎部的磷养分积累量大小依次为E3>E2>E4>E1>CK,各施氮处理的茎部的磷养分积累量比CK增加了366.52%~427.97%;施肥结束后各处理叶部的磷积累量大小依次为E3>E2>E1>E4>CK,各施氮处理的叶磷积累量比CK增加了258.68%~374.59%。南酸枣各器官的磷积累量整体表现为根>茎>叶,E2、E3处理的南酸枣幼苗各器官磷养分积累量更高。

由图7可知,南酸枣幼苗根茎叶钾养分积累量变化规律基本一致,呈现“缓慢增长—快速增长—平缓”趋势。施肥结束后各处理根部的钾养分积累量大小依次为E1>E2>E3>CK>E4,E1~E3处理根部的钾养分积累量比CK提高了14.59%~56.31%;施肥结束后各处理茎部的钾养分积累量大小依次为E3>E2>



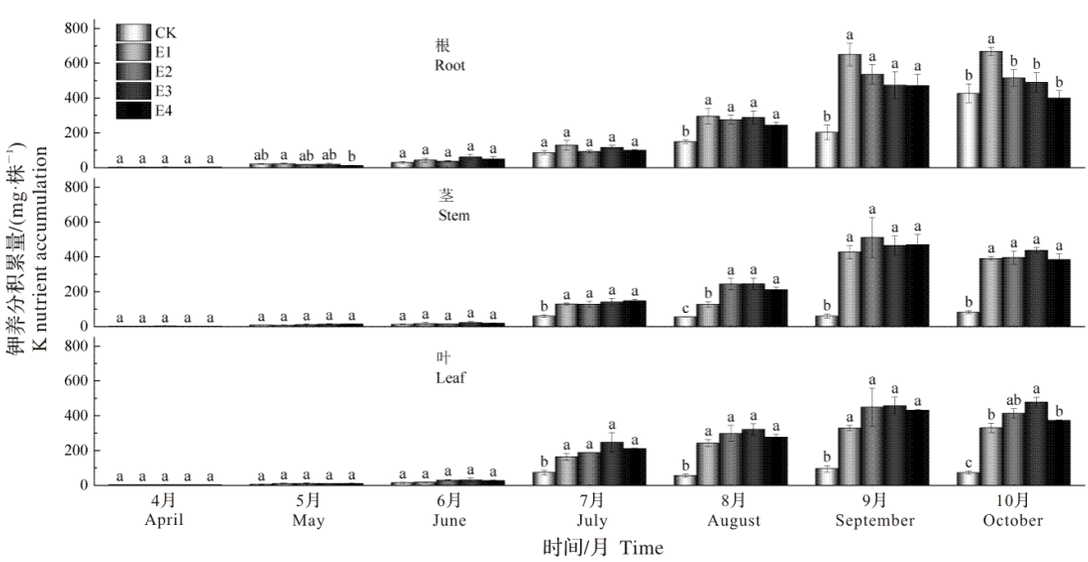
不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

The different lowercase letter indicated significant difference(P<0.05).

图6　不同施氮处理下南酸枣幼苗磷养分积累量变化

Fig.6　Effects of nitrogen fertilization treatments on phosphorus accumulation in *C. axillaris* seedlings

E1>E4>CK,各施氮处理茎部的钾养分积累量与 CK 处理间存在显著差异(P<0.05),比 CK 提高了 365.18%~428.43%;施肥结束后各处理叶部的钾养分积累量大小依次为 E3>E2>E4>E1>CK,各施氮处理叶部的钾养分积累量与 CK 处理间存在显著差异(P<0.05),比 CK 提高了 355.11%~559.89%。南酸枣各器官的钾积累量整体表现为根>叶>茎,且随着施氮水平的增加呈现出先上升再下降的趋势。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

The different lowercase letter indicated significant difference(P<0.05).

图7　不同施氮水平下南酸枣幼苗钾养分积累量变化

Fig.7　Effects of nitrogen fertilization treatments on potassium accumulation in *C. axillaris* seedlings

2.2.3　不同施肥处理对南酸枣幼苗各器官养分分配的影响

图8表明,在生长旺盛期9月,南酸枣幼苗各施氮处理地上部分的氮、磷、钾分配率都占60%左右,而CK处理与之相反,地下部分的氮、磷、钾分配率都占60%以上,其中钾的分配率甚至占到了73%。南酸枣幼苗CK处理根茎叶的氮、磷、钾分配率大小顺序均表现为根>茎>叶,而各施氮处理根茎叶的氮素分配率大小顺序总体表现为根>叶>茎,各施氮处理根茎叶的磷素分配率大小顺序总体表现为茎>根>叶,其中茎和根的磷分配率比较接近,各施氮处理根茎叶的钾素分配率大小顺序总体表现为根>茎>叶,且三者之间比较均衡。

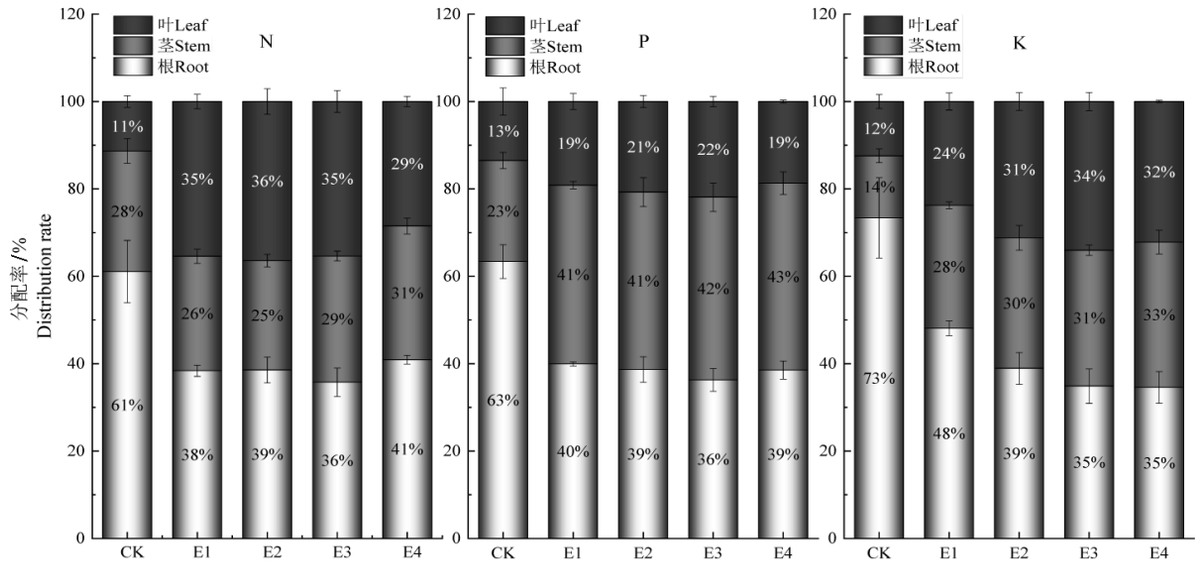


图8 氮、磷、钾在南酸枣幼苗各器官的分配情况

Fig.8 Distribution of N, P, K in different organs of *C. axillaris* seedlings

3 讨 论

3.1 指数施肥对南酸枣幼苗生长的影响

苗高、地径和生物量都是衡量苗木生长质量的重要指标。王益明等[23]指数施氮肥对美国山核桃(*Carya illinoinensis*)的研究表明,美国山核桃幼苗的苗高、地径和生物量均随着施氮量的增加而呈现先增后减的趋势,在施氮量为600 mg/株时达到最大值。刘欢等[24]试验表明适当施氮量可以促进杉木(*Cunninghamia lanceolata*)无性系幼苗的生长,过量则会抑制其生长。本试验中,不同施氮水平处理的南酸枣幼苗苗高、地径以及全株生物量都在E3(11 g/株)处理中达到最大值,分别为183.80 cm、25.192 mm和329.52 g,与CK相比提高了45.47%、106.44%和227.36%。当施氮量≤11 g/株时,南酸枣幼苗的苗高、地径和生物量随着施氮水平的增加呈递增的趋势,而当施氮量达到15 g/株时,南酸枣幼苗的苗高、地径和生物量出现下降的趋势。这表明适当的施氮可以促进南酸枣幼苗的生长,而过多则会抑制其生长。

根冠比也是衡量苗木生长的重要指标之一。丰伟等[25]对华山松(*Pinus armandii*)的研究结果表明,华山松幼苗的根冠比随着施肥量的增加而降低。本试验结果表明,苗木生物量的分配会受到施氮水平的影响,未施氮肥处理各器官的生物量分配大小表现为根>茎>叶,施氮处理表现为茎>根>叶;这表明植物缺乏氮素时通过增大根部的生物量分配来提高根系对氮素的吸收,适当的施氮促进了植物生物量的积累,且对地上部分的生物量积累的作用更大,从而降低了植物的根冠比,过量的施氮抑制了植物根茎叶的生物量积累,此时植物通过提高自身的根冠比来调节南酸枣幼苗氮素利用和养分平衡[26]。

3.2 指数施肥对南酸枣幼苗养分承载的影响

施氮能够显著提高苗木各器官的养分积累量,这有利于促进植物生长提高苗木的竞争力[27]。同时提高幼苗的光合能力,增加总生物量的积累。在养分供给过程中,随施氮水平的增加,幼苗与土壤养分的关系会依次处于养分亏缺、奢侈消耗和毒害3个阶段[28]。当幼苗处于养分亏缺阶段,幼苗的生物量、氮养分积累量和氮养分含量随施氮水平的增加而增长;当幼苗处于奢侈消耗阶段,幼苗的氮养分含量和氮养分积累量会随着施氮水平的增加而增长,但生物量会趋于稳定;当施氮水平超过幼苗的最大承受范围,过高的养分便会产生毒害作用,幼苗的生物量、氮养分积累量和氮养分含量逐渐下降[15]。本试验中,南酸枣幼苗各器官随施氮水平的增加,氮养分含量一直增加,而生物量和氮养分积累量却呈现先增加后降低的趋势,说明此时幼苗处于轻微毒害阶段。施氮前期南酸枣幼苗叶片磷养分含量与CK处理相比无显著差异($P>0.05$),后期CK处理显著大于施氮处理($P<0.05$),这可能是因为南酸枣幼苗对磷需求量较低,基质中的磷已经能够满足植物的生长需求[29]。或是氮和磷的吸收具有拮抗作用,氮素抑制了磷的吸收[30]。这与李毓琦等[31]对降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)和丰伟等[32]对华山松的研

究结果相似。本研究中,施氮前期南酸枣幼苗钾含量无显著变化(P>0.05),施氮后期高浓度氮素水平钾养分含量显著低于低浓度处理(P<0.05),这可能是由于土壤中大量的铵根离子与钾离子共存,发生“阳离子竞争”抑制钾离子吸收[33]。南酸枣幼苗各器官氮、磷、钾的养分积累量均随施氮水平的增加呈先上升后下降的趋势,这表明适宜的氮素水平可以促进植物对养分的吸收和积累,超过适宜浓度范围的氮素则会对植物产生毒害作用,抑制有机物的生成,减弱养分的吸收和积累,本试验与指数施肥对池杉(*Taxodium ascendens*)[34]、紫椴(*Tilia amurensis*)[27]和白桦[35]影响结果一致。本研究结果表明,不同施氮水平可以改变南酸枣幼苗各器官氮、磷、钾养分分配情况,随施氮水平的提高,氮、磷、钾在根部中的分配比率逐渐降低,在茎部和叶片中的分配比率逐渐升高,说明施氮可以促进植物地上部分的生长,增强光合作用,提高生物量积累。这与丰伟等[25]对华山松和范川等[36]对香樟(*Cinnamomum camphora*)的研究结果相似。本研究仅对指数施肥对南酸枣幼苗苗高、地径、生物量以及养分含量等指标进行了分析,之后还需进一步深入开展关于不同树种的氮素需求、基质的养分转化、同化等方面的研究,进而为南酸枣苗木的培育提供更加科学的方案。

4　结　论

指数施氮肥显著促进了南酸枣幼苗的生长以及养分承载,苗高、地径和总生物量等随着施氮量的增加呈现先增加后减少的趋势,均在E3(11 g/株)达到最大值。综合分析其对南酸枣幼苗生长和养分承载的影响,认为在指数施肥方式下,施氮量11 g/株为南酸枣苗木培育的最佳施氮量。试验中12次施肥是为准确控制氮素梯度,但实际生产中结合劳动成本和苗木生长简化为4次,第1次(试验设计1~2次)、第2次(试验设计3~6次)、第3次(试验设计7~10次)、第4次(试验设计11~12次)。

致谢:和江西省林业厅科技创新项目(创新专项[2021]04号)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

[1] 中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1980,45(1):66-86.
Editorial Committee of Flora of China.The flora of China[M].Beijing:Science Press,1980,45(1):66-86.

[2] 熊伟,汪加魏,孙荣喜,等.南酸枣苗木繁育技术研究进展[J].南方林业科学,2023,51(1):54-58.
XIONG W,WANG J W,SUN R X,et al.Research progress on seedling breeding technique of *Choerospondias axillaris*[J].South China forestry science,2023,51(1):54-58.

[3] 张薇,蒋诗音,王燕,等.南酸枣花粉离体萌发及活力快速测定[J].江西农业大学学报,2024,46(4):935-943.
ZHANG W,JIANG S Y,WANG Y,et al.*In vitro* germination and rapid detection of pollen viability for *Choerospondias axillaris*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(4):935-943.

[4] LI G Y,XU J M,LI J,et al.Growth rhythm analysis of young stand and selection of superior families in *Choerospondias axillaris*[J].Forests,2022,13(12):2145.

[5] 余孟杨.南酸枣人工林生长规律研究[J].福建林业科技,2018,45(2):98-102.
YU M Y.Study on growth regularity of *Choerospondias axillaris* plantation[J].Jour of Fujian forestry science and technology,2018,45(2):98-102.

[6] DOANH N D,HAM N N,TAM N T,et al.The use of a water extract from the bark of *Choerospondias axillaris* in the treatment of second decree burns[J].Scandinavian journal of plastic and reconstructive surgery and hand surgery,1996,30(2):139-144.

[7] 杨观兰,钟朝玲,张强,等.响应面优化南酸枣叶总黄酮的提取及其抗氧化活性研究[J].粮食与油脂,2022,35(9):133-137.
YANG G L,ZHONG C L,ZHANG Q,et al.Optimization of extraction of total flavonoids from *Choerospondias axillaris* leaves by response surface methodology and analysis of antioxidant activity[J].Cereal & oil,2022,35(9):133-137.

[8] 欧燮妮.提高南方山地造林成活率的措施浅析[J].南方农业,2017,11(15):54.
OU X N.Analysis on measures to improve the survival rate of afforestation in southern mountainous areas[J].South China agriculture,2017,11(15):54.

[9] 李国雷,刘勇,祝燕,等.国外苗木质量研究进展[J].世界林业研究,2011,24(2):27-35.

LI G L, LIU Y, ZHU Y, et al.A review of overseas studies of seedling quality[J].World forestry research, 2011, 24(2): 27-35.

[10] 刘雪梅, 金晓玲, 伍江波, 等. 苗木氮素指数施肥的研究现状及应用前景[J]. 中国土壤与肥料, 2014, (5): 1-4.
LIU X M, JIN X L, WU J B, et al.The research status and application prospect of nitrogen exponential fertilization on saplings[J].China soil and fertilizer, 2014, (5): 1-4.

[11] 魏红旭, 徐程扬, 马履一, 等. 不同指数施肥方法下长白落叶松播种苗的需肥规律[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 685-690.
WEI H X, XU C Y, MA L Y, et al.Nutrient uptake of *Larix olgensis* seedlings in response to different exponential regimes [J].Acta ecologica Sinica, 2010, 30(3): 685-690.

[12] SCHACHTMAN D P, SHIN R.Nutrient sensing and signaling: NPKS[J].Annual review of plant biology.2007, 58: 47-69.

[13] RICHARDSON A E, BAREA J, MCNEILL A M, et al.Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J].Plant & soil, 2009, 321: 305-339.

[14] TIMMER V R.Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J].New forests, 1997, 13: 279-299.

[15] SALIFU K F, TIMMER V R.Nitrogen retranslocation response of young *Picea mariana* to nitrogen-15 supply[J].Soil science society of America journal, 2003, 67(1): 309-317.

[16] 郝龙飞, 刘婷岩, 张连飞, 等. 氮素指数施肥对白桦播种苗养分承载和光合作用的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(6): 17-23.
HAO L F, LIU T Y, ZHANG L F, et al.Effects of exponential fertilization on nutrient loading and photosynthesis of *Betula platyphylla* seedlings[J].Journal of Beijing forestry university, 2014, 36(6): 17-23.

[17] 王力朋, 李吉跃, 王军辉, 等. 指数施肥对楸树无性系幼苗生长和氮素吸收利用效率的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(6): 55-62.
WANG L P, LI J Y, WANG J H, et al.Effects of exponential fertilization on seedling growth and nitrogen uptake and utilization efficiency of *Catalpa bungei* clones[J].Journal of Beijing forestry university, 2012, 34(6): 55-62.

[18] WEI H X, REN J, ZHOU J H.Effect of exponential fertilization on growth and nutritional status in *Buddhist pine*(Podocarpus macrophyllus[Thunb.] D.Don)seedlings cultured in natural and prolonged photoperiods[J].Soil science and plant nutrition, 2013, 59(6): 933-941.

[19] INGESTAD T, LUND A B.Theory and techniques for steady state mineral nutrition and growth of plants[J].Scandinavian journal of forest research, 1986, 1(1-4): 439-453.

[20] 邢永秀, 莫遥, 覃郁栋, 等. 凯氏定氮法与纳什比色法测定植物组织中总氮含量的比较[J]. 教育教学论坛, 2013(18): 143-145.
XING Y X, MO Y, QIN Y D, et al.Comparison of total nitrogen content in plant tissues determined by Kjeldahl method and Nash colorimetric method[J].Education and teaching forum, 2013(18): 143-145.

[21] 卢超. 两种测定湿地植物总磷方法的比较研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(8): 142-144.
LU C.Comparative study on two methods for determination of total phosphorus in wetland plants[J].Acta agriculturae Jiangxi, 2009, 21(8): 142-144.

[22] 何琳华, 王虎琴, 曹红娣. 植物中全钾含量测定方法改进初探[J]. 上海农业科技, 2014(4): 35.
HE L H, WANG H Q, CAO H D.Preliminary study on improvement of determination method for total potassium content in plants[J].Shanghai agricultural science and technology, 2014(4): 35.

[23] 王益明, 万福绪, 李瑞瑞, 等. 指数施肥对美国山核桃幼苗生长及养分积累的影响[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(9): 21-25.
WANG Y M, WAN F X, LI R R, et al.Effects of exponential fertilization on growth and nutrient accumulation of *Carya illinoensis* seedlings[J].Journal of northeast forestry university, 2018, 46(9): 21-25.

[24] 刘欢, 王超琦, 吴家森, 等. 氮素指数施肥对杉木无性系苗生长及养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3123-3128.
LIU H, WANG C Q, WU J S, et al.Effects of exponential N fertilization on the growth and nutrient content in clonal *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J].Chinese journal of applied ecology, 2016, 27(10): 3123-3128.

[25] 丰伟, 单昌丹, 刘家蔓, 等. 指数施肥对华山松容器苗生长及养分积累与分配的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(9): 62-69.

FENG W, SHAN C D, LIU J M, et al.Effects of exponential fertilization on the biomass and nutrient accumulation and allocation of *Pinus armandii* container seedlings[J].Journal of central south university of forestry and technology, 2023, 43(9): 62-69.

[26] HILBERT D W, ANNE L, REYNOLDS J F.The influence of carbon dioxide and daily photon-flux density on optimal leaf nitrogen concentration and root:shoot ratio[J].Annals of botany, 1991(4): 365-376.

[27] 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.Effect of exponential fertilization on growth and root morphology of *Tilia amurensis* seedlings [J].Journal of Nanjing forestry university(natural science edition), 2020, 44(2): 91-97.

[28] 王益明.基于指数施肥法的美国山核桃苗期需肥规律研究[D].南京:南京林业大学,2018.
WANG Y M.Study on fertilizer requirement regularity for seedlings of *Carya illinoinensis* in response to different exponential regimes[D].Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.

[29] 赵霞,徐大平,刘小金,等.磷素营养对降香黄檀幼苗生长及叶片养分状况的影响[J].植物研究,2018,38(2):218-224.
ZHAO X, XU D P, LIU X J, et al.Effects of phosphorus supply on growth and foliar nutrition of *Dalbergia odorifera* seedlings [J].Bulletin of botanical research, 2018, 38(2): 218-224.

[30] 杨腾.施氮对文冠果幼苗生长特性影响研究[D].北京:北京林业大学,2014.
YANG T.Effects of nitrogen supply on the growth characteristics of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings[D].Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[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].Chinese journal of tropical crops, 2021, 42(2): 481-487.

[32] 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 science edition), 2024, 48(3): 191-198.

[33] 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].Journal of plant growth regulation, 2021, 40: 1777-1786.

[34] 柳结苗,朱小楼,蔡广越,等.氮素指数施肥对池杉幼苗生长及养分积累的影响[J].东北林业大学学报,2018,46(10):1-4.
LIU J M, ZHU X L, CAI G Y, et al.Effects of N exponential fertilization on growth and nutrient accumulation of *Taxodium ascendens* seedlings[J].Journal of northeast forestry university, 2018, 46(10): 1-4.

[35] CHEN L, WANG C S, DELL B, et al.Growth and nutrient dynamics of *Betula alnoides* seedlings under exponential fertilization[J].Journal of forestry research, 2018, 29: 111-119.

[36] 范川,舒翔,李晓清,等.施肥对香樟幼苗生长及养分分配的影响[J].广西植物,2015,35(2):213-220.
FAN C, SHU X, LI X Q, et al.Effects of fertilization on *Cinnamomum camphora* seedlings growth and nutrient distribution [J].Guihaia, 2015, 35(2): 213-220.

(责任编辑:刘玉香)