

施肥方式对核桃楸容器苗生长及根系养分累积的影响

及 利^{1,2}, 卢 艳², 杨雨春^{1*}, 王 君¹, 杨 阳², 陆志民¹

(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:建立合理的施肥制度是培育优质苗木、提高造林表现的重要措施之一。以当年生核桃楸幼苗为研究对象,分别设置对照(CK)、平均施肥(AF)、直线施肥(LF)、指数施肥(100E)、0.5 倍指数施肥(50E)、2 倍指数施肥(200E)、4 倍指数施肥(400E)等处理,探究幼苗根系形态和养分累积对不同施肥处理的响应。在生长结束时,100E 处理下的苗高和地径表现较好,增长量分别为 21.35 cm 和 3.66 mm。在施肥初期(5 周后),LF 处理下的幼苗比根长(SRL)、比根表面积(SRA)、平均直径(AD)、组织密度(RTD)和生物量达到最高,在施肥 9 周后,各处理中 100E 处理下幼苗根系的 SRL、SRA 和 AD 达到最高,分别比 CK 高 77.93%、50.59% 和 54.84% ($P<0.05$)。随着幼苗生长节律的变化,不同收获时间对核桃楸幼苗根系形态存在显著影响,施肥显著降低了核桃楸根系的 SRL、SRA 和 AD,增加了 RTD 和生物量 ($P<0.05$)。100E 处理和 200E 处理下的幼苗根系分别有较高的 K 和 N 浓度,总体上,根系养分浓度随着时间的变化而降低。各施肥处理显著提高了幼苗根系养分含量,生长结束时,100E 处理下的幼苗根系 N、P 和 K 含量分别为 106.41、11.00 mg·株⁻¹ 和 14.43 mg·株⁻¹。指数施肥方式下 100 mg·株⁻¹ 的施肥量更有利于核桃楸幼苗的根系发育。

关键词:施肥制度;指数施肥;核桃楸;根系形态;养分

中图分类号:S723.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)04-0076-08

Effects of Fertilization Methods on the Growth and Root Nutrient Accumulation of *Juglans mandshurica* Container Seedlings

JI Li^{1,2}, LU Yan², YANG Yu-chun^{1*}, WANG Jun¹, YANG Yang², LU Zhi-min¹

(1. Forestry Academy of Jilin Province, Changchun 130033, Jilin, China;

2. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Establishing a reasonable fertilization regime is one of the important management measures for breeding high-quality seedlings and improving afforestation performance. The annual seedlings of *Juglans mandshurica* were used as research objects, and an experiment was conducted to set control (CK), average fertilization (AF), linear fertilization (LF), exponential fertilization (100E), 0.5-fold exponential fertilization (50E), 2-fold exponential fertilization (200E), and 4-fold exponential fertilization (400E), respectively. The object of this study was to explore the response of root morphology and nutrient accumulation of the seedlings in different fertilization treatments. At the end of growth, seedling height and ground diameter in 100E were better than others, and the increment of them were 21.35 cm and 3.66 mm, respectively. At the early stage of fertilization (after 5 weeks), the seedlings in LF treatment had the highest root length (SRL), specific root surface area (SRA), average diameter (AD), root tissue density (RTD) and biomass. After 9 weeks of fertilization, the SRL, SRA and AD of the seedlings in 100E reached the highest values a-

收稿日期:2019-10-13 修回日期:2019-12-04

基金项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0600605);吉林省科技厅项目(20160203010NY);吉林省林业科技项目(2014-006);吉林省人才开发资金项目。

作者简介:及 利。研究方向:苗木培育。E-mail:jlnefu@qq.com

*通信作者:杨雨春,研究员。研究方向:苗木培育。E-mail:yang-yu-chun@163.com。

mong fertilization treatments, which were 77.93%, 50.59% and 54.84% higher than the control, respectively ($P < 0.05$). With the change of seedling growth dynamic, different harvest time had significant effects on the root morphology. The fertilization treatment significantly reduced the SRL, SRA and AD, and increased RTD and biomass ($P < 0.05$). The roots in 100E and 200E had higher K and N contents, respectively. In general, the root nutrient contents decreased with fertilization time. The fertilization treatment significantly increased the nutrient contents of the roots. At the end of the growth, the N, P and K contents of the roots in 100E were 106.41, 11.00, and 14.43 $\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$, respectively. The application amount of 100 $\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ by exponential fertilization method was more beneficial for the root development of *J. mandshurica* seedlings.

Key words: fertilization regime; exponential fertilization; *Juglans mandshurica*; root morphology; nutrient

培育优质苗木、提高造林成活率是林业生产中急待解决的主要问题之一^[1]。合理的施肥制度可以提高苗木质量,这对于通过提高造林成活率、促进苗木生长和抵抗水分亏缺、低温和疾病等多种威胁来培育健壮的幼苗尤为重要^[2-4]。V. R. Timmer 等^[5]和 K. F. Salifu 等^[6]指出,基于稳态养分理论的指数施肥方式更能满足植物生长期内的养分需求,这种施肥方式下植物相对生长速率稳定,且与养分相对添加速率几乎相等。相比于传统施肥,指数施肥既满足了苗木生长所需要的营养,又能够避免肥料浪费以及肥料过多对土壤环境带来的污染等问题^[7]。

N 素是植物生长所需的重要元素之一,对苗木生长和生理代谢过程具有重要的影响^[8-9]。施肥方式的不同会导致苗木对 N 素利用效率的差异,未能及时利用的肥料流失会造成土壤酸化和毒害作用等问题^[10]。指数施肥通过养分加载的方式,诱导植物吸收超过正常需求的养分并储存在体内,以促进移植后的养分再分配,提高苗木生产力^[4]。近年来,指数施肥研究已广泛应用于油松(*Pinus tabulaeformis*)^[11]、长白落叶松(*Larix olgensis*)^[12]、脂松(*Pinus resinosa*)^[13]、山桃稠李(*Padus maackii*)^[14]、美国山核桃(*Carya illinoensis*)^[15]和紫椴(*Tilia amurensis*)^[16]等树种,但以往的研究多集中在比较不同施肥制度下,苗木生长、生物量分配和全株养分含量对施肥措施的响应,而对苗木根系发育的研究较少。根系是苗木吸收营养元素的主要器官,其形态指标与地上部分生长发育及产量形成有着密切的联系。王力朋等^[17]研究表明,指数施肥前期对楸树(*Catalpa bungei*)根系的根长和根表面积有明显的促进作用,施肥后期显著提高了根系直径和根体积。

核桃楸(*Juglans mandshurica*)是我国东北地区珍贵阔叶树种之一,其材质优良,用途广泛,具有较高的经济和生态价值。现阶段对核桃楸容器苗的施肥制度研究还不健全,对于实际中开展林业育苗工作缺乏一定的理论基础,本研究以当年生核桃楸

幼苗为研究对象,比较不同施肥制度(施肥方式和施肥量)对核桃楸幼苗根系形态和养分累积的影响,探究核桃楸幼苗的最适施肥措施,以期为该树种培育优质苗木提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省农垦总局建三江管理局二道河农场(47°35′—47°50′N, 134°00′—134°25′E),该地区气候属温带湿润性季风气候,年平均温度为 2.1℃,无霜期 115~135 d,年平均降水量为 497~616 mm。

1.2 试验材料

以黑龙江省绿洲苗木有限公司的当年生核桃楸幼苗为试验材料,于 2018 年 5 月中下旬移栽到砖红色塑料盆中(17 cm×12 cm),分别向盆中装入等体积的基质(经过了发酵和消毒等),育苗基质为泥炭:珍珠岩:蘑菇菌棒=3:3:4,基质容重为 0.51 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,总孔隙度 62.47%。平均苗高为 7.17 cm,地径为 2.08 mm,共计 1 000 株幼苗。

1.3 试验设计

采用随机区组试验设计,随机抽取 420 株幼苗,设置施肥处理分别为对照(CK)、平均施肥(AF)、直线施肥(LF)、指数施肥(100E)、0.5 倍指数施肥(50E)、2 倍指数施肥(200E)、4 倍指数施肥(400E),每个处理设置 3 个小区,每个小区 20 株苗。根据 2017 年生长季结束时当年生核桃楸苗木养分测定数据,确定施肥量。指数施肥方法根据的 R. K. Dumroese 等^[18]指数施肥模型确定每次指数施肥量。待核桃楸幼苗进入缓苗期后,于 2018 年 6 月根据计算的各处理施肥量进行施肥处理,每周施肥 1 次,共计 12 周(表 1)。施肥过程中每隔 2 周移动 1 次育苗盆以减小边缘效应,幼苗需浇水和杀虫,浇水量视天气和苗木生长状况进行调整。试验采用适合植物生长需要的通用型肥料普罗丹水溶性复合肥

(其主要养分含量 N : P : K = 20 : 20 : 20, Plant Products Co. Ltd., Brampton, Ontario, Canada), 指数施肥方程具体如下:

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

式中, N_T 为需施 N 肥总量; N_S 为处理前苗木体内 N 素含量; T 为总施肥次数; r 为相对添加速率。

$$N_t = N_S(e^{rt} - 1) - N_{(t-1)} \tag{2}$$

式中, N_S 、 r 同式(1), N_t 为在 r 下的第 t 次施肥时的施 N 量, $N_{(t-1)}$ 为前 $t-1$ 次施入的 N 肥总量。

r 的计算公式为:

表 1 核桃楸幼苗不同施肥处理的施肥量

Table 1 The physicochemical properties of three soil substrates (mg · 株⁻¹)

施肥次数	施肥时间	不施肥 (CK)	平均施肥 (AF)	直线施肥 (LF)	0.5 倍指数施肥 (50E)	1 倍指数施肥 (100E)	2 倍指数施肥 (200E)	4 倍指数施肥 (400E)
1	6 月 15 日	0	8.333	1.282	0.528	0.650	0.780	0.918
2	6 月 22 日	0	8.333	2.564	0.707	0.920	1.169	1.458
3	6 月 29 日	0	8.333	3.846	0.946	1.303	1.753	2.316
4	7 月 6 日	0	8.333	5.128	1.267	1.846	2.629	3.677
5	7 月 13 日	0	8.333	6.410	1.695	2.613	3.941	5.840
6	7 月 20 日	0	8.333	7.692	2.269	3.701	5.909	9.273
7	7 月 27 日	0	8.333	8.974	3.036	5.241	8.860	14.725
8	8 月 3 日	0	8.333	10.256	4.063	7.421	13.284	23.383
9	8 月 10 日	0	8.333	11.538	5.438	10.509	19.916	37.132
10	8 月 17 日	0	8.333	12.821	7.277	14.881	29.861	58.963
11	8 月 24 日	0	8.333	14.103	9.739	21.073	44.771	93.631
12	8 月 31 日	0	8.333	15.385	13.034	29.841	67.126	148.683
合计		0	100.000	100.000	50.000	100.000	200.000	400.000

1.4.2 幼苗根系养分浓度测定 烘干的样品经高速粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司,FW100)研磨后过 0.149 mm 孔筛,采用国家农业行业标准(NY/T 2421-2013)硫酸-过氧化氢法消煮提取制备提取液,采用凯氏定氮法测定全 N,钼锑抗-比色法测定全 P,火焰光度计法测定全 K(上海艾牧生物科技有限公司,FP640)。

1.4.3 根系形态测定 将整株苗木进行破坏性取样,根系用枝剪从根颈处剪下,放在尼龙网筛上用水冲去表明粘附物,获得整株根系,冲洗时在根系下面放置 100 目筛网以防止脱落的根系被水冲走,并迅速将洗净的根系冷冻保存,置于便携式保温箱运回实验室。用 EPSON 根系扫描仪(Epson Telford Ltd,Telford,UK)扫描各处理的根系,并用根系扫描分析系统 WinRHIZO(Regent Instruments,Inc., Québec,Canada)对不同处理的根系图像进行分析,获得根形态指标(根长、根表面积、根体积)。扫描后的根系放置在 70℃ 烘箱中烘干至恒重获得根系生物量。计算根系比根长(SRL)、比根表面积(SRA)、平均直径(AD)和组织密度(RTD)。

$$r = \ln(N_T/N_S + 1)/T \tag{3}$$

1.4 测定方法

1.4.1 幼苗生长和生物量测定 在施肥处理期间,每隔 2 周测定核桃楸幼苗的苗高和地径(6 月 15 日第 1 次施肥,分别在第 3、5、7、9、11、13 周施肥前测定生长),每隔 4 周进行破坏性取样(在第 5、9、13 周施肥前收获样品),分解植物器官,收获根系样品洗净表面土壤粘附物,并立即置于 105℃ 条件下杀青 30 min,70℃ 烘 48 h 至恒重,用于测定养分含量。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 整理数据;利用 SPSS19.0 进行单因素方差(One-way ANOVA)分析检验不同处理间各指标的差异(LSD, $\alpha = 0.05$);用 Sigmaplot 12.5 作图(SYSTAT 公司)。所有数据为平均值±标准误(Mean±SE)。

2 结果与分析

2.1 施肥对核桃楸容器苗生长的影响

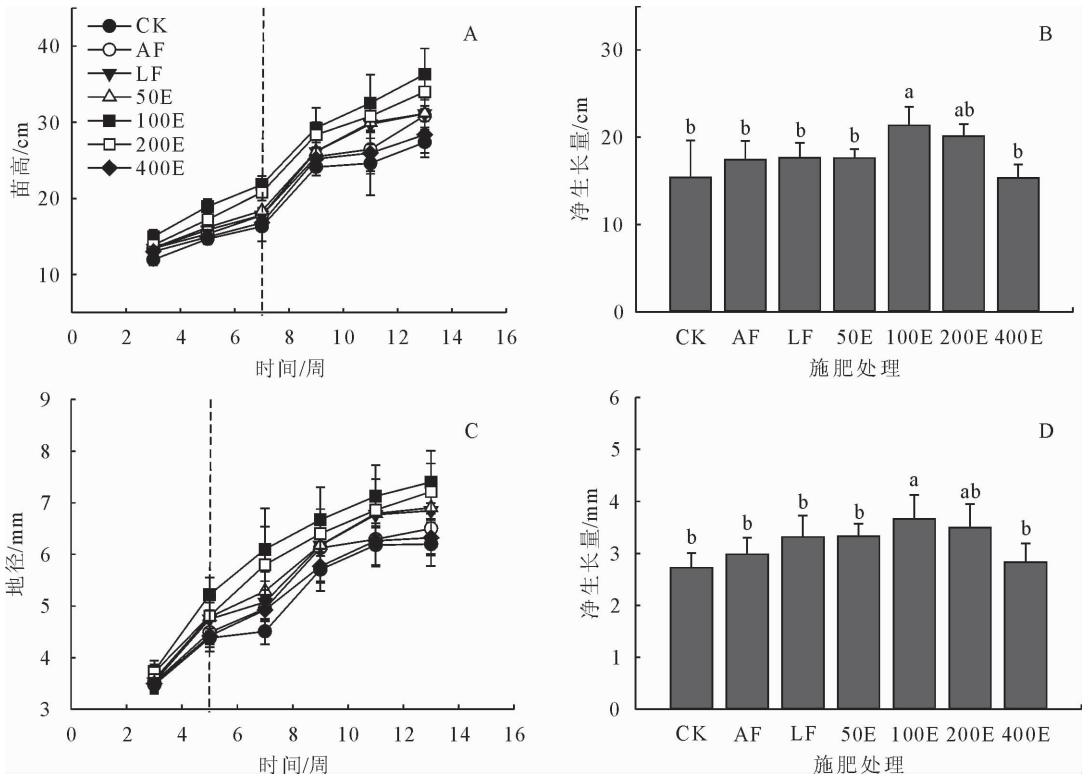
不同施肥方式和施肥强度对核桃楸幼苗的苗高和地径存在显著影响($P < 0.05$,图 1)。在第 5 周和第 7 周时,不同施肥处理间的地径和苗高表现出较高的变异,100E 和 200E 处理下的苗高和地径在生长中后期有较好的生长表现,而 400E 处理则抑制了幼苗的生长。经过 12 周的施肥处理后,在生长结束时,100E 处理下的苗高和地径增长量分别为 21.35 cm 和 3.66 mm,比 CK 分别高 38.52%和 34.32%(图 1B 和图 1D)。总体上,幼苗的苗高和地径对施肥的响应表现为指数施肥>直线施肥>平均施肥>未施肥,而指数施肥中,100E 条件下的施肥

强度对幼苗生长最为有利,200E 条件次之。

2.2 施肥对核桃楸容器苗根系形态的影响

不同施肥方式和施肥强度对核桃楸幼苗根系的 SRL、SRA、AD 和 RTD 存在显著影响($P<0.05$,图 2)。在施肥 5 周后,LF 处理下幼苗根系的形态特征显著高于 CK 处理,而 AF 和 LF 处理间差异不显著;施肥 9 周后,100E 处理下幼苗根系的 SRL、SRA

和 AD 达到最高,分别比 CK 高 77.93%、50.59%和 54.84% ($P<0.05$,图 2A、2B 和 2C),但与 LF、200E 和 400E 处理相比未达到显著水平,但 100E 处理下的 RTD 显著高于其他指数施肥处理。施肥 13 周后,100E 处理下幼苗根系形态表现最好,200E 次之,LF 处理下幼苗根系形态学参数低于 200E 处理的,但未达到显著水平。



注:不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同施肥处理下核桃楸幼苗苗高和地径动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of seedling height and ground diameter of *Juglans mandshurica* seedlings in different fertilization treatments

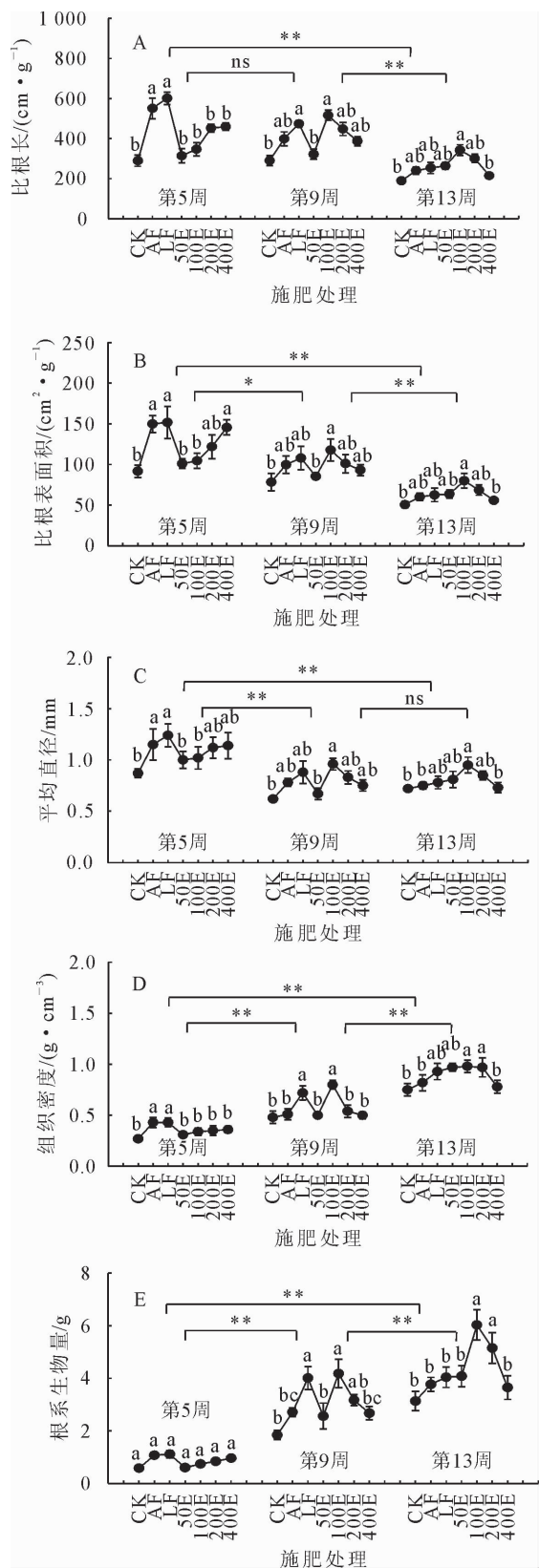
施肥 9 周后,根系生物量在各施肥处理间存在显著变异($P<0.05$,图 2E),LF 和 100E 处理下根系生物量分别比 CK 高 117.93%和 127.17%;在施肥 13 周后,100E 和 200E 处理的核桃楸根系生物量显著高于其他施肥处理($P<0.05$)。随着幼苗生长节律的变化,不同取样时间对核桃楸幼苗根系形态存在显著影响,施肥显著降低了核桃楸根系的 SRL、SRA 和 AD,增加了 RTD 和生物量($P<0.05$)。

2.3 施肥对核桃楸容器苗根系养分浓度和含量的影响

施肥处理对核桃楸幼苗根系 N、P 和 K 浓度存在显著影响($P<0.05$,图 3)。在施肥 5 周后,幼苗根系在 LF 处理下有较高的 N 和 P 浓度,分别为 $28.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.94\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 100E 处理下有较高 K 浓度,为 $5.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;在施肥 9 周后,各施

肥处理下的养分浓度显著降低,100E 和 200E 处理下幼苗根系保持较高的水平;在施肥 13 周后,幼苗根系的 N 和 K 浓度明显降低,100E 处理和 200E 处理下的根系分别有较高的 K 和 N 浓度。施肥 5 周后的幼苗根系各养分浓度显著高于施肥 9 周和 13 周的,根系养分浓度随着时间的变化而降低($P<0.05$)。

施肥对幼苗根系养分含量存在显著影响($P<0.05$,表 2)。在施肥 5 周后,AF 和 LF 处理显著增加了根系的 N、P 和 K 含量;在施肥 9 周后,LF 处理下幼苗根系的 N 和 P 含量最高,100E 处理下幼苗根系的 K 含量达到较高水平;在施肥 13 周后,100E 处理下的根系 N、P 和 K 含量显著高于其余施肥处理。幼苗根系养分含量在不同处理时间之间存在较大的变异。



注:不同字母表示同一收获时间内不同处理间差异显著($P<0.05$).星号表示不同收获时间的组间差异,* $P<0.05$; ** $P<0.01$; ns不显著。图3同。

图2 不同施肥处理下核桃楸幼苗的根系形态和生物量

Fig.2 Root morphology and biomass of *J. mandshurica* seedlings in different fertilization treatments

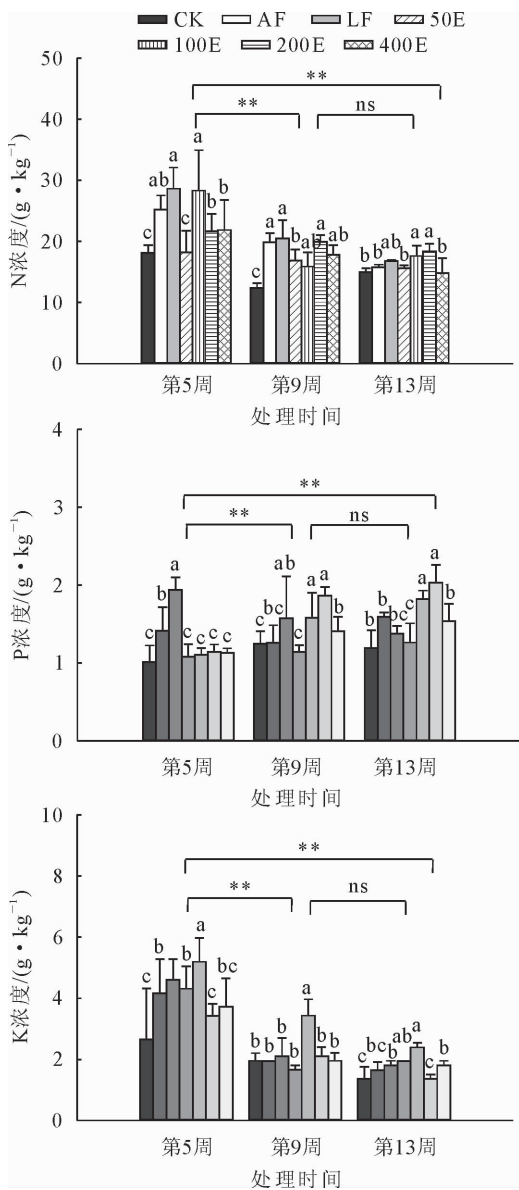


图3 不同施肥处理下核桃楸幼苗根系的 N、P、K 浓度

Fig.3 Nitrogen,phosphorus and potassium contents in roots of *J. mandshurica* in different fertilization treatments

3 结论与讨论

合理的施肥措施能够促进苗木生长和生理代谢,增加苗木产量,是培育优质苗木的关键技术之一^[19]。本研究中,经过 12 周的施肥处理后,100E 处理下的核桃楸幼苗的苗高和地径分别比 CK 高 38.52%和 34.32%,相比与平均施肥和直线施肥,指数施肥方式对于幼苗生长有明显的促进作用,这是由于指数施肥更能满足植物在不同生长时期对于养分的需求,提高施肥的有效性^[20-22]。通过比较不同指数施肥量对幼苗生长的影响,发现 100E 处理(1 倍指数施肥)对核桃楸幼苗的苗高和地径生长的效果最好(图 1),较高的指数施肥量(400E 处理)对幼苗的生长产生了一定的抑制作用。这可能是由于

过多的 N 素导致参与碳同化的关键酶-RuBP 羧化酶活性降低,在抑制植物光合作用的同时造成自身呼吸作用的增加,进而导致了植株生长速率的降低^[23-24]。

表 2 不同施肥处理下核桃楸幼苗根系的 N、P、K 含量

Table 2 Nitrogen,phosphorus and potassium contents in roots of *J. mandshurica* in different fertilization treatments

处理时间/周	处理	N/(mg·株 ⁻¹)	P/(mg·株 ⁻¹)	K/(mg·株 ⁻¹)
5	CK	10.51±0.05c	0.59±0.01d	1.54±0.07c
	AF	27.02±0.24a	1.52±0.03ab	4.46±0.12ab
	LF	31.82±0.47a	2.15±0.02a	5.11±0.09a
	50E	10.93±0.21c	0.65±0.01cd	2.59±0.04c
	100E	20.97±0.45b	0.82±0.01c	3.85±0.05b
	200E	18.20±0.23b	0.96±0.01bc	2.88±0.03bc
	400E	21.01±0.49b	1.09±0.01b	3.58±0.09b
9	CK	22.71±0.15d	2.30±0.03c	3.59±0.05d
	AF	53.85±0.25bc	3.41±0.04b	5.26±0.51c
	LF	82.29±1.30a	6.32±0.23a	8.41±0.26b
	50E	43.19±0.90c	2.93±0.04bc	4.24±0.07cd
	100E	66.41±1.26ab	6.62±0.17a	14.35±0.29a
	200E	63.27±0.22b	5.92±0.02a	6.67±0.06bc
	400E	47.57±0.40c	3.77±0.05b	5.21±0.06c
13	CK	46.89±0.24c	3.73±0.09c	4.25±0.15c
	AF	59.54±0.11b	6.01±0.01b	6.23±0.07b
	LF	67.88±0.08b	5.57±0.04b	7.28±0.06b
	50E	63.79±0.18b	5.16±0.10b	7.95±0.50b
	100E	106.41±0.95a	11.00±0.06a	14.43±0.08a
	200E	94.90±0.71a	10.47±0.13a	6.99±0.09b
	400E	54.24±1.08c	5.62±0.10b	6.57±0.07b

注:同一列不同字母表示不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$)。

根系是植物吸收水分和养分的重要器官,对土壤养分有效性的变化十分敏感^[25-26]。魏丹等^[27]发现,随着指数施肥量的增加,各施肥处理间的羊蹄甲(*Bauhinia purpurea*)幼苗的根系长度、体积和表面积存在显著差异,在 4 000 mg·株⁻¹处理下幼苗对生长的效果最好。比根长(SRL)决定着根系吸收养分和水分的能力,是反映根系生理功能的重要指标^[17,28]。在施肥 5 周后,LF 处理下幼苗根系的比根长、比根表面积和平均直径最大(图 2A、图 2B 和图 2C),表明直线施肥方式诱导植物根系发育,有较强的吸收能力。在施肥 9 周后,则是 EF 施肥处理下幼苗根系形态有较好的表现(图 2),说明指数施肥措施符合了幼苗自身生长过程中的需肥规律,有利于提高植物对养分和水分的吸收能力,这与王燕^[26]、郝龙飞等^[29]的研究结果相一致。A. Hodge 等^[30]发现,施用低浓度的 N 素更利于增加幼苗根系长度,扩大根系表面积。在施肥 9 周后,高倍指数施肥量的 400E 处理抑制了核桃楸幼苗根系的发育,导致了植物超过奢养水平,产生毒害作用^[7]。

由于生长初期苗木的根系发育不健全,对养分的吸收存在着滞后期,常规的施肥方式会造成养分的浪费,同时,在生长后期苗木的生物量累积速率高

于养分吸收或添加速率,导致了苗木内部的养分稀释,造成了养分供给量不足的现象^[31]。本研究中,幼苗根系的 N、P 和 K 浓度随施肥时间的增加呈逐渐降低的趋势,在施肥 13 周后,指数施肥方式的根系 N、P 和 K 浓度在各施肥方式处理中处于较高的水平,分别比 CK 高 76.21%、17.78%和 52.98%(图 3),说明一方面具有稳态增加养分特点的指数施肥方式避免了大量养分造成的毒害作用;另一方面诱导植物吸收更多的养分,完成了生长结束时的养分加载。由于根系生物量随着施肥时间增加呈显著提高的趋势,与生长初期相比,尽管核桃楸幼苗根系的 N、P 和 K 浓度普遍降低,但 N、P 和 K 含量显著增加,施肥至生长结束时,100E 处理的幼苗根系 N、P 和 K 含量分别达到最高,为 106.41 mg·株⁻¹、11.00 mg·株⁻¹和 14.43 mg·株⁻¹(表 2)。K. F. Salifu 等^[32]通过比较不同施肥方式对苗木养分加载的研究发现,指数施肥制度下苗木的 N 含量为 22 mg·株⁻¹,远大于传统施肥的 8 mg·株⁻¹。

综上所述,指数施肥方式有利于当年生核桃楸幼苗的生长,尤其是对根系器官的发育表现出明显的促进作用。在 100 mg·株⁻¹的指数施肥供给量下,核桃楸幼苗的根系形态和 N、P 和 K 养分累积

达到最优状态。未来还需结合苗木叶片生理学变化(如叶绿素含量、光合作用等)、地上和地下的物质分配等多方面综合评价核桃楸容器苗的最适施肥方式和施肥量,以期为培育核桃楸优质苗木、制定和完善核桃楸苗期施肥制度提供技术支撑。

参考文献:

[1] OLIET J A, JACOBS D F. Restoring forests: advances in techniques and theory [J]. *New Forests*, 2012, 43(5-6): 535-541.

[2] WANG J X, LI G L, PINTO J R, *et al.* Both nursery and field performance determine suitable nitrogen supply of nursery-grown, exponentially fertilized Chinese pine [J]. *Silva Fennica*, 2015, 49 (3): Article 1295.

[3] DUAN J, XU C Y, JACOBS D F, *et al.* Exponential nutrient loading shortens the cultural period of *Larix olgensis* seedlings [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, 28 (5): 409-418.

[4] 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(1): 111-119.

[5] TIMMER V R, ARMSTRONG G, MILLER B D. Steady-state nutrient preconditioning and early outplanting performance of containerized black spruce seedlings [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(5): 585-594.

[6] SALIFU K F, TIMMER V R. Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(3): 905-913.

[7] 魏红旭, 徐程扬, 马履一, 等. 苗木指数施肥技术研究进展 [J]. *林业科学*, 2010, 46(7): 140-146.

WEI H X, XU C Y, MA L Y, *et al.* Advances in study on seedling exponential fertilization regime [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(7): 140-146. (in Chinese)

[8] HEISKANEN J, LAHTI M, LUORANEN J, *et al.* Nutrient loading has a transitory effect on the nitrogen status and growth of outplanted *Norway spruce* seedlings [J]. *Silva Fennica*, 2009, 43(2): 249-260.

[9] 张华林, 彭彦, 谢耀坚, 等. 两种氮肥施用法对尾巨桉轻基质容器苗生长的影响 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2014, 38(1): 53-58.

ZHANG H L, PENG Y, XIE Y J, *et al.* Effects of two nitrogen application methods on growth of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* container seedlings cultivated with light media [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2014, 38(1): 53-58. (in Chinese)

[10] JUNTUNEN M L, HAMMAR T, RIKALA R. Nitrogen and phosphorus leaching and uptake by container birch seedlings (*Betula pendula* Roth.) grown in three different fertilizations [J]. *New Forests*, 2003, 25(2): 133-147.

[11] 林平, 邹尚庆, 李国雷, 等. 油松容器苗生长和氮吸收对指数施肥的响应 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(3): 23-28.

LIN P, ZOU S Q, LI G L, *et al.* Response of growth and N uptake of *Pinus tabulaeformis* container seedlings to expo-

ponential fertilization [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2013, 37(3): 23-28. (in Chinese)

[12] 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. (in Chinese)

[13] 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]. *Annals of Forest Science*, 2009, 66(7): 1-9.

[14] 郝龙飞, 王庆成, 张彦东, 等. 指数施肥对山桃稠李播种苗生物量及养分动态的影响 [J]. *林业科学*, 2012, 48(6): 33-39.

HAO L F, WANG Q C, ZHANG Y D, *et al.* Effect of exponential fertilization on biomass and nutrient dynamics of *Padus maackii* seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48 (6): 33-39. (in Chinese)

[15] 王益明, 万福绪, 胡菲, 等. 指数施肥对美国山核桃幼苗根系形态的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(3): 29-32.

WANG Y M, WAN F X, HU F, *et al.* Effects of exponential fertilization on root morphology of *Pecan* seedlings [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(3): 29-32. (in Chinese)

[16] 杨阳, 施皓然, 及利, 等. 指数施肥对紫椴播种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]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2020, 44(2): 91-97. (in Chinese)

[17] 王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7452-7462.

WANG L P, YAN Z Y, LI J Y, *et al.* Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7452-7462. (in Chinese)

[18] DUMROESE R K, PAGE D S, SALIFU K F, *et al.* Exponential fertilization of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency, leaching fractions, and early outplanting performance [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(12): 2961-2967.

[19] JEYANNY V, RASIP A G A, RASIDAH K W, *et al.* Effects of macronutrient deficiencies on the growth and vigour of *Khaya ivorensis* seedlings [J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2009, 21(2): 73-80.

[20] 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.

[21] TIMMER V R, ARMSTRONG G. Growth and nutrition of containerized *Pinus resinosa* at exponentially increasing nutrient additions [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(7): 644-647.

[22] TIMMER V R, MILLER B D. Effects of contrasting fertilization and moisture regimes on biomass, nutrients, and water

relations of container grown red pine seedlings [J]. New Forests, 1991, 5(4): 335-348.

[23] 陈琳, 曾杰, 徐大平, 等. 氮素营养对西南桦幼苗生长及叶片养分状况的影响 [J]. 林业科学, 2010, 46(5): 35-40.
CHEN L, ZENG J, XU D P, *et al.* Effects of exponential nitrogen loading on growth and foliar nutrient status of *Betula alnoides* seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(5): 35-40. (in Chinese)

[24] MANTER D K, KAVANAGH K L, ROSE C L. Growth response of *Douglas-fir* seedlings to nitrogen fertilization: importance of rubisco activation state and respiration rates [J]. Tree Physiology, 2005, 25(8): 1015-1021.

[25] KING J S, THOMAS R B, STRAIN B R. Morphology and tissue quality of seedling root systems of *Pinus taeda* and *Pinus ponderosa* as affected by varying CO₂, temperature, and nitrogen [J]. Plant and Soil, 1997, 195(1): 107-119.

[26] 王燕, 晏紫依, 苏艳, 等. 不同施肥方法对欧洲云杉生长生理和根系形态的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 15-21.
WANG Y, YAN Z Y, SU Y, *et al.* Effects of different fertilizing methods on growth, physiological characteristics and root morphological traits of *Picea abies* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(6): 15-21. (in Chinese)

[27] 魏丹, 胡柔璇, 赵庆, 等. 指数施肥下不同氮素浓度对羊蹄甲 2 个家系幼苗的生长影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 116-122.

WEI D, HU R X, ZHAO Q, *et al.* Effects of different concentration nitrogen treatments on the growth of two families of *Bauhinia purpurea* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 116-122. (in Chinese)

[28] OSTONEN I, PÜTtsepp Ü, BIEL C, *et al.* Specific root length as an indicator of environmental change[J]. Giornale Botanico Italiano, 2007, 141(3): 426-442.

[29] 郝龙飞, 王庆成, 刘婷岩, 等. 指数施肥对斑叶稠李苗木生物量分配, 光合作用及根系形态的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(11): 175-181.
HAO L F, WANG Q C, LIU T Y, *et al.* Effect of exponential fertilization on biomass allocation, photosynthesis and root morphology of *Padus maackii* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(11): 175-181. (in Chinese)

[30] HODGE A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. New Phytologist, 2004, 162(1): 9-24.

[31] TIMMER V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J]. New Forests, 1997, 13(1-3): 279-299.

[32] 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.

(上接第 36 页)

[25] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 施氮量对棉花功能叶片生理特性、氮素利用效率及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 81-91.
LI P C, DONG H L, LIU A Z, *et al.* Effects of nitrogen application rates on physiological characteristics of functional leaves, nitrogen use efficiency and yield of cotton [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 81-91. (in Chinese)

[26] 蔡柏岩, 葛菁萍, 金惠玉, 等. 磷素水平对不同大豆品种钾素吸收效率的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(1): 44-49.

[27] DICKSON A, LEAF A L, HOSNER J F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. Forestry Chronicle, 1960, 36: 10-13.

[28] SCALON S P, JEROMINI T S, MUSSURY R M, *et al.* Photosynthetic metabolism and quality of *Eugenia pyriiformis* Cambess. seedlings on substrate function and water levels [J]. Anais Da Academia Brasileira De Ciencias, 2014, 86: 2039-2048.

[29] SHIN E C, CRAFT B D, PEGG R B, *et al.* Chemometric approach to fatty acid profiles in runner-type peanut cultivars by principal component analysis (PCA) [J]. Food Chemistry, 2010, 119: 1262-1270.

[30] 刘明磊. 正交试验设计中的方差分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.