

不同施氮处理对乌桕容器苗养分状况的影响

张广涛¹,包厚天¹,黄卫和²,彭辉武²,喻方圆^{1*}

(1. 南方现代林业协同创新中心,南京林业大学 林学院,江苏 南京 210037;2. 江西省萍乡市林业科学研究所,江西 萍乡 337000)

摘要:研究不同施N处理对乌桕容器苗营养元素和非结构性碳水化合物的影响,筛选出培育乌桕容器苗的最佳施肥方法和施氮量。以当年生乌桕容器苗为试验材料,设置传统施肥(C600)、指数施肥(Z200、Z400、Z600、Z800、Z1000)和不施肥(CK)共7个处理,分别测定不同N素施肥处理对乌桕容器苗N、P、K等营养元素浓度(质量分数,下同)、积累量和可溶性糖等非结构性碳水化合物含量的影响。结果表明,各施N处理对乌桕容器苗养分状况均有显著影响。随施N量的增加,乌桕容器苗各器官的N浓度都是先增后减,最大值出现在指数施肥Z600处,根、茎、叶的N浓度分别为101.80、91.50 mg·g⁻¹和121.33 mg·g⁻¹。乌桕容器苗各器官P浓度都较对照有所降低。指数施肥条件下,根和茎中的K浓度随施N量的增加逐渐降低,叶中的K浓度随施N量增加呈现先增后减趋势,在Z600处达到最大;乌桕容器苗地上部分、地下部分和全株的营养元素积累量都随施N量的增加出现先增后减趋势,最大值都出现在Z600处;在指数施肥的各处理中,乌桕容器苗根、茎、叶各器官中的可溶性糖含量随施N量增加均呈现先增后减趋势,在指数施肥Z600处达到最大,分别为63.73、55.55 mg·g⁻¹和134.70 mg·g⁻¹,指数施肥促进乌桕容器苗可溶性糖含量积累的作用要优于传统施肥;除C600和Z200外,其他各施肥处理组根淀粉含量均较对照有下降趋势,且在指数施肥条件下根淀粉含量随施N量的增加而减少。在茎和叶中,各施肥处理组和对照组淀粉含量无明显差异。指数施肥优于传统施肥,Z600处理下的乌桕容器苗的营养元素浓度、积累量和非结构性碳水化合物含量最高,为乌桕容器苗最佳施肥处理。

关键词:乌桕;指数施肥;营养元素积累;非结构性碳水化合物含量

中图分类号:S792.99

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)01-0080-08

Effects of Different Nitrogen Application Treatments on Nutrient Status of *Sapium sebiferum* Container Seedlings

ZHANG Guang-tao¹, BAO Hou-tian¹, HUANG Wei-he², PENG Hui-wu², YU Fang-yuan^{1*}

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Pingxiang Institute of Forestry, Pingxiang 337000, Jiangxi, China)

Abstract: The study aimed at determining the effects of different nitrogen applications on the nutrient elements and non-structure carbohydrate accumulation of *Sapium sebiferum* container seedlings, further exploring the most proper method of nitrogen application. The current year *S. sebiferum* container seedlings were used as experimental materials. Seven nitrogen-application treatments including traditional fertilization (C600), exponential fertilization (Z200, Z400, Z600, Z800, Z1000) and no fertilization (control) were set up. The parameters including the concentration and accumulation of nutrient elements (nitrogen, phosphorus and potassium) and the non-structural carbohydrate content (soluble sugar and starch) in different

收稿日期:2021-11-07 修回日期:2022-01-19

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2021]30);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)。

第一作者:张广涛。研究方向:林木种苗。E-mail:780875198@qq.com

*通信作者:喻方圆,教授。研究方向:林木种苗。E-mail:fyyu@njfu.com.cn

organs were measured. All nitrogen application treatments significantly affected the nutrient status of *S. sebiferum* container seedlings. With the increase of nitrogen application, the nitrogen concentration in all organs first increased and then decreased, and the maximum values appeared at the exponential fertilization of Z600. The nitrogen concentrations in roots, stems and leaves were 101.80, 91.50, and 121.33 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Nonetheless, the phosphorus concentrations in all organs were lower than that of the control. Under the condition of exponential fertilization, the potassium concentrations in roots and stems decreased gradually with the increase of nitrogen application, while the potassium concentration in the leaves had the uptrend first and the downtrend latter with the peak value in treatment Z600. The nutrient element accumulations of aboveground part, underground part and whole plant also appeared the highest values in Z600. As the nitrogen application amount increased, the soluble sugar content in roots, stems and leaves went up first and declined subsequently under exponential fertilization, reaching the maximum value in Z600, which were 63.73, 55.55 and 134.70 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. The promoting effect of exponential fertilization on the soluble sugar accumulation was more effective than that of traditional fertilization. Except for C600 and Z200, the starch contents in roots of other fertilization treatments decreased compared with the control, and the root starch content was negatively related to the nitrogen application under the exponential fertilization. In stems and leaves, there was no significant difference in starch content between each fertilization treatment and the control. Exponential fertilization was superior to traditional one. The nutrient element concentration, amount of element accumulation and non-structural carbohydrate content were the highest in the treatment Z600, which was proved to be the optimal treatment for *S. sebiferum* container seedlings.

Key words: *Sapium sebiferum*; exponential fertilization; nutrient element accumulation; non-structure carbohydrate content

乌桕(*Sapium sebiferum*)为大戟科(Euphorbiaceae)乌桕属(*Sapium*)落叶乔木,在我国已有1400多年的栽培历史^[1-2]。乌桕材质优良,树干高大,可作木材,其根、皮、叶均可作药用^[3];乌桕种子总出油率 $>40\%$,且种子油的运动黏度、十六烷值和废气排放物均符合生物柴油生产标准,是我国四大木本油料树种之一^[4-5]。乌桕外观季相变化丰富,秋叶由绿变黄、红或紫,观赏价值很高^[6]。目前关于乌桕的研究主要集中在秋叶变色、品种选育和育苗技术等方面^[6-8],在苗木生产中存在的主要问题是生长速度慢、苗木质量参差不齐、造林效果不好。而苗木施肥是培育优质苗木、提高苗木质量的有效措施^[9]。N素作为植物不可缺少的营养元素之一,缺少或过多都会造成养分胁迫,对植物的生长造成抑制,研究植物生长过程中的合理施N有重要的意义^[10]。

一般容器苗生长规律呈S形,生长前期慢,速生期速度加快,后期达到稳定生长状态,这与Logistic生长模型相适应^[11]。但目前传统等量施肥法很难满足苗木生长各阶段对养分的需求,通过大量试验研究,均发现指数施肥方法能明显促进苗木的生长、增加营养吸收利用效率^[12-13]。指数施肥基于稳态养分理论^[14],是根据植物生长过程中对养分需求量的变化,以指数增加的方式给苗木施肥,养分供给速率和苗木生长速率相吻合,使苗木体内养分含量达到

稳定状态、苗木养分消耗达到奢侈水平,最终形成养分高效荷载^[15]。国内最早对指数施肥理论进行研究的是贾慧君等^[16-17]。进入21世纪后,国内对指数施肥技术的研究先后涉及到了侧柏(*Platycladus orientalis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、西南桦(*Betula alnoides*)、沉香(*Aquilaria sinensis*)等^[18-22]。虽然国内对指数施肥研究报道逐渐增多,但对乌桕育苗的指数施肥研究尚未见报道。由于近几年乌桕苗木需求旺盛,故如何改进施肥技术,提高苗木养分利用效率,降低生产成本成为亟待解决的问题。本文以当年生乌桕容器苗为试验材料,设置传统施肥和指数施肥处理,分别测定了不同N素施肥处理对乌桕容器苗营养元素浓度(质量分数,下同)、积累量和非结构性碳水化合物含量的影响,旨在筛选出乌桕容器苗培育的最佳施肥方法和施氮量,为乌桕容器苗的合理施肥和科学培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在南京林业大学下蜀林场育苗基地进行,该林场位于江苏省句容市境内(119°14'E, 31°59'N),属于北亚热带季风气候,干湿寒暑四季分明,光照充足,水热资源丰富,具有发展林业生产的良好条件。

1.2 试验材料

2019 年 4 月将乌桕种子(上海林业总站提供)播种于 32 穴穴盘并置于温室苗床中,待其生长至 5 月中旬,选取生长状况相对一致的乌桕实生苗 630 株移栽于规格为 15 cm×20 cm(上口径×高)的无纺布袋中,试验基质为泥炭:珍珠岩:有机肥=7:2:1,按体积比充分均匀混合,以保证初始养分含量一致。待缓苗至 6 月初移至室外,进行施肥试验。

1.3 试验设计

采用传统施肥和指数施肥 2 种施肥模式,以不施肥为对照,共 7 组处理,每组试验设置 3 个重复,每个试验重复为 30 株乌桕苗。传统施肥采用等量施肥法,每周施 1 次,公式如下:

$$N_T = TN_i \quad (1)$$

式中: N_T 为施 N 总量, N_i 为第 i 次施肥量, T 为施肥周数($T=15$)。指数施肥每周施肥量采用以下公式计算

$$N_T = N_s(e^{rT} - 1) \quad (2)$$

式中: N_T 为总施氮量; N_s 为幼苗施肥前的初始含氮量; T 为总施肥次数($T=15$); r 是 N 素相对增加率。

$$N_i = N_s(e^{rT} - 1) - N_{i-1} \quad (3)$$

式中: N_i 为第 i 次施氮量, N_{i-1} 为($i-1$)次前施 N 量总和。通过测定测得幼苗初始含氮量 $N_s = 17.81 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

参考万志兵等^[23]对乌桕苗木进行 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的 N 肥施用得到的较好结果,经过计算和对指数施肥梯度设置的考虑,设定传统施肥设置为 $600 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (总施氮量),用 C600 表示;指数施肥设置了 5

个氮素梯度,分别为 200、400、600、800、1 000 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (总施氮量),该次试验用 Z200、Z400、Z600、Z800、Z1 000 表示;不施肥的处理为对照,用 CK 表示。本试验采用水溶施肥法,每次用注射器施入 20 mL 溶液,每周施肥量见表 1,施肥间隔为 1 周,共施 15 次肥。施用的 N 肥为尿素($N \geq 46.4\%$)。为了维持养分平衡,在施 N 的同时,模拟常规施肥,试验中适当补充了 P、K 肥。其中 P 肥为过磷酸钙($P_2O_5 \geq 12\%$),K 肥为硫酸钾(氧化钾 $\geq 50\%$),各施 $200 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$ (总施用量)。试验期间共施 P、K 肥 5 次,施肥间隔周期为 3 周,每次施入 $40 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$,所有处理保证一致。9—10 月减少灌溉量以利于苗木木质化。11 月初,对苗木进行破坏取样。每处理每个重复随机选取 9 株苗木,用水小心冲洗掉根系周围的基质,并用蒸馏水润洗 2 次,然后将苗木的根、茎、叶剪开,把不同植株的根、茎、叶分别装入自封袋形成混合样品,带回实验室。

1.4 指标测定方法

将烘干的根、茎、叶分别均匀放入粉碎机打碎成粉末,过 0.25 mm 网筛后,置于干燥器中。采用凯式法测定全 N 含量,钼锑抗比色法测定全 P 含量,火焰分光光度计法测定全 K 含量(LY/T 1269—1999 和 LY/T 1270—1999)。可溶性糖含量和淀粉含量的测定采用蒽酮比色法^[24]。其中,各指标每个处理测定 3 次,取平均值。

1.5 数据处理

用 Excel 2013 对试验数据进行处理,用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析及 Duncan 多重比较检验差异性。

表 1 乌桕容器苗不同指数施肥水平每周施氮量

Table 1 Weekly amount of nitrogen application (mg/seedling) for *S. sebiferum* container seedlings ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)

处理	施肥量															总量
	1 周	2 周	3 周	4 周	5 周	6 周	7 周	8 周	9 周	10 周	11 周	12 周	13 周	14 周	15 周	
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C600	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	600
Z200	3.24	3.82	4.52	5.35	6.31	7.46	8.82	10.42	12.31	14.55	17.20	20.32	24.01	28.38	33.54	200
Z400	4.16	5.34	6.53	8.01	9.84	12.01	14.87	18.30	22.53	27.75	34.19	42.12	51.93	64.01	78.93	400
Z600	4.74	6.12	7.72	9.73	12.28	15.63	19.73	24.94	31.51	39.85	50.41	63.87	80.89	102.42	129.55	600
Z800	5.17	6.68	8.71	11.22	14.35	18.61	23.99	30.83	39.68	51.34	66.36	85.59	110.43	142.78	184.23	800
Z1 000	5.51	7.24	9.48	12.40	16.16	21.20	27.79	36.44	47.77	62.61	82.04	106.61	139.95	183.65	240.89	1 000

2 结果与分析

2.1 不同施 N 处理对乌桕容器苗营养元素浓度的影响

2.1.1 对乌桕容器苗全 N 浓度的影响 由表 2 可知,不同施肥均显著地增加了乌桕容器苗根、茎和叶中的 N 素浓度,其中根、茎和叶中的 N 浓度,相比对

照组分别提高了 55.7%~93.5%、50.6%~83.1% 和 26.9%~70.2%。且指数施肥处理下,乌桕容器苗根、茎、叶各器官中 N 浓度随施 N 量的增加均呈现先增后减的趋势。在 Z600 处理下,根、茎、叶中的氮浓度均显著高于其他处理,且依次是 C600 的 1.16、1.13 倍和 1.28 倍。由此可见,施 N 能促进乌桕容器苗根、茎、叶中 N 浓度的提升,指数施肥 600

mg · 株⁻¹ 是促进乌桕容器苗根、茎、叶氮浓度提高的最佳施氮量。

表 2 不同施 N 处理对乌桕容器苗不同器官 N 浓度的影响
Table 2 Effects of different nitrogen application treatments on the concentrations of nitrogen in different organs of *S. sebiferum* container seedlings (mg · g⁻¹)

处理	氮素浓度		
	根	茎	叶
CK	52.61±3.46e	49.96±1.96e	71.28±0.55f
C600	87.62±0.42c	85.24±0.71bc	94.91±1.51d
Z200	81.90±0.83d	75.25±1.91d	90.44±0.76e
Z400	91.84±1.84b	82.53±0.70c	105.26±1.21c
Z600	101.80±3.12a	91.50±2.20a	121.33±0.48a
Z800	93.14±0.53b	86.70±0.98b	109.58±0.80b
Z1000	86.64±1.68c	82.45±1.55c	95.12±1.19d

注:数据形式为均值±标准差,同列相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

2.1.2 对乌桕容器苗全 P 浓度的影响 由表 3 可知,各施肥处理下的乌桕容器苗根、茎、叶中的 P 浓度均显著低于对照,各施肥处理下的根、茎和叶中 P 浓度比对照分别降低了 13.9%~27.4%、4.1%~20.6%和 7.1%~22.4%,说明施 N 对乌桕容器苗各器官中 P 浓度的增加有抑制作用。且指数施肥处理下乌桕容器苗根和叶中的 P 浓度随施 N 量的增加而减少,茎中 P 浓度随施 N 量的增加出现了先增后减的趋势。

表 3 不同施 N 处理对乌桕容器苗不同器官 P 浓度的影响
Table 3 Effects of different nitrogen application treatments on the concentrations of phosphorus in different organs of *S. sebiferum* container seedlings (mg · g⁻¹)

处理	P 素浓度		
	根	茎	叶
CK	2.15±0.09a	1.70±0.05a	1.83±0.02a
C600	1.75±0.01c	1.51±0.16cd	1.70±0.15b
Z200	1.85±0.04b	1.50±0.25d	1.71±0.06b
Z400	1.74±0.15c	1.53±0.19c	1.65±0.17c
Z600	1.70±0.23c	1.63±0.06b	1.60±0.21d
Z800	1.61±0.12d	1.47±0.11e	1.52±0.11e
Z1 000	1.56±0.16d	1.35±0.15f	1.42±0.09f

2.1.3 对乌桕容器苗全 K 浓度的影响 由表 4 可知,各施肥处理下的乌桕容器苗根中的 K 浓度显著低于对照($P<0.05$),降低了 10.5%~38.3%,说明施 N 对其造成抑制作用;不同施肥处理乌桕容器苗地上部分、地下部分以及植株总体的 N 积累量有明显差异,其中 Z600 处理的乌桕容器苗各部分的 N 积累量显著地大于其他处理($P<0.05$)。

2.2 不同施 N 处理对乌桕容器苗营养元素积累量的影响

营养元素积累量是各器官的营养元素含量和其

生物量的乘积。由表 5 可知,乌桕容器苗 N 积累量总体表现为:地上部分>地下部分。不同施肥处理乌桕容器苗地上部分、地下部分以及植株总体的 N 积累量有明显差异,其中 Z600 处理的乌桕容器苗各部分的 N 积累量显著地大于其他处理($P<0.05$)。指数施肥条件下,不管是地上部分、地下部分还是植株总体的氮积累量都随施 N 量的增加呈现先增后减的趋势,且均在 Z600 处理下达到最大值,分别是 2 438.93、1 358.74 mg · 株⁻¹ 和 3 797.67 mg · 株⁻¹,分别是对照的 4.36、3.76 倍和 4.13 倍。说明适量施 N 能有效提高氮素积累量,过量施 N 则会产生抑制作用。相同施肥量条件下,处理 Z600 氮积累量大于 C600,地上部分、地下部分和植株总体分别是 C600 的 1.40、1.50 倍和 1.43 倍。多重比较结果表明,无论地上部分、地下部分还是植株总体,各施肥处理的 N 积累量都明显高于对照,说明施肥对乌桕容器苗 N 素的积累有促进作用,且指数施肥的 N 素积累量要高于传统施肥。

表 4 不同施 N 处理对乌桕容器苗不同器官 K 浓度的影响
Table 4 Effects of different nitrogen application treatments on the concentrations of potassium in different organs of *S. sebiferum* container seedlings (mg · g⁻¹)

处理	K 素浓度		
	根	茎	叶
CK	10.62±0.56a	3.68±0.02f	6.67±0.05f
C600	9.00±0.23c	4.42±0.07d	7.05±0.13c
Z200	9.50±0.25b	5.72±0.15a	6.82±0.26e
Z400	8.76±0.22cd	5.26±0.11b	7.67±0.16b
Z600	8.31±0.17d	4.85±0.14c	8.05±0.08a
Z800	7.67±0.08e	4.30±0.13de	7.66±0.22b
Z1 000	6.55±0.18f	4.21±0.04e	6.94±0.11d

乌桕容器苗 P 积累量总体表现为:地上部分>地下部分。不同施肥处理乌桕容器苗地上部分、地下部分以及植株总体的磷积累量有明显差异,其中 Z600 处理的乌桕容器苗各部分 P 积累量显著地大于其他处理。指数施肥条件下,无论是地上部分、地下部分还是植株总体的 P 积累量都是随施 N 量的增加出现先增后减的趋势,且最大值都出现在 Z600 处,分别是 43.45、22.69 mg · 株⁻¹ 和 66.14 mg · 株⁻¹,是对照的 2.19、1.53 倍和 1.91 倍,说明适量施 N 能有效提高 P 积累量。相同施肥量条件下,处理 Z600 磷积累量大于 C600,地上部分、地下部分和植株总体分别是 C600 的 1.41、1.25 倍和 1.35 倍。多重比较结果表明,无论地上部分、地下部分还是植株总体,各施肥处理组的 P 积累量都高于对照,说明施肥对乌桕容器苗 P 素的积累有促进作用。

乌桕容器苗 K 积累量总体表现为:地上部分>

地下部分。不同施肥处理乌桕容器苗地上部分、地下部分以及植株总体的钾积累量有明显差异,Z600处理下的乌桕容器苗各部分的K积累量显著地大于其他处理。指数施肥条件下,无论地上部分、地下部分还是植株总体的K积累量都是随施N量的增加出现先增后减的趋势,且最大值都出现在Z600处,分别是129.28、111.05 mg·株⁻¹和240.32 mg·株⁻¹,是对照的3.01、1.52倍和2.07倍,说明适量施N能有效提高K积累量,过多则会产生抑制作用。相同施肥量条件下,处理Z600钾积累量大于C600,地上部分、地下部分和植株总体分别是C600的1.43、1.52倍和2.07倍。多重比较结果表明,施N肥对乌桕容器苗K含量积累有促进作用,且指数施肥效果好于传统施肥。

表5 不同施N处理对乌桕容器苗营养元素积累量的影响

Table 5 Effect of different nitrogen application treatments on nutrient element accumulation of *S. sebiferum*

元素	处理	营养元素积累量 (mg·株 ⁻¹)		
		地上部分	地下部分	全株
N	CK	558.62±25.42g	361.61±2.67f	920.22±25.55e
	C600	1 739.51±23.35c	904.28±45.91c	2 643.79±26.16c
	Z200	1 443.98±26.03e	744.51±1.81e	2 188.49±24.33d
	Z400	1 821.60±26.36b	1 001.01±11.24b	2 822.61±31.44b
	Z600	2 438.93±30.01a	1 358.74±27.11a	3 797.67±6.42a
	Z800	1 688.98±32.48d	925.84±53.38c	2 614.82±40.52c
	Z1 000	1 341.49±27.09f	801.52±24.92d	2 143.01±12.72d
P	CK	19.80±0.45f	14.78±1.11d	34.58±0.54g
	C600	30.81±0.41c	18.06±0.92b	48.87±0.56c
	Z200	28.78±1.52d	16.82±1.41c	45.60±1.48d
	Z400	33.77±2.49b	18.96±1.21b	52.73±2.58b
	Z600	43.45±3.53a	22.69±2.45a	66.14±1.23a
	Z800	28.64±0.55d	16.00±0.92c	44.64±0.70e
	Z1 000	21.96±0.44e	14.43±0.45d	36.39±0.21f
K	CK	42.87±0.98g	72.99±0.54d	115.86±1.45g
	C600	90.20±1.21d	92.88±4.71b	183.08±3.63d
	Z200	109.76±1.98c	86.36±0.21c	196.12±1.78c
	Z400	116.10±1.68b	95.48±1.07b	211.58±2.23b
	Z600	129.28±1.59a	111.05±2.21a	240.32±0.73a
	Z800	83.78±1.61e	76.14±4.39d	159.92±3.55e
	Z1 000	68.50±1.38f	60.59±1.88e	129.09±0.92f

2.3 不同施氮处理对乌桕容器苗非结构性碳水化合物含量的影响

2.3.1 对乌桕容器苗可溶性糖含量的影响 由表6可见,不同施N处理乌桕容器苗各器官可溶性糖含量总体趋势为:叶>根>茎,且在指数施肥条件下的乌桕容器苗各器官可溶性糖含量都随施N量的增加出现先增后减的趋势。Z600处理下根中可溶性糖含量显著地高于其他处理($P<0.05$),是对照

的2.01倍,是C600的1.25倍。Z200处理下根中可溶性糖含量虽在各施肥处理中最低,却是对照的1.49倍;除Z400和Z800外,不同施肥处理乌桕容器苗茎中可溶性糖含量有明显差异,且Z600处理下的茎中可溶性糖含量显著高于其他处理,是对照的1.71倍,是C600的1.24倍,含量最低的是Z200,是对照的1.21倍;Z600处理下叶中可溶性糖含量仍是最高,与对照、C600 2组处理差异显著,分别是它们的1.41倍和1.40倍,在C600处理下,叶中可溶性糖含量在各施肥组中最低,是对照的1.01倍,无显著差异。多重比较结果表明:在根部和茎部,各施肥处理可溶性糖含量与对照差异显著,在叶部,除C600、Z200和Z1 000外,其他施肥处理组可溶性糖含量与对照存在显著差异,说明施肥促进乌桕容器苗各器官可溶性糖含量积累。在指数施肥的各处理中,根、茎、叶各器官中的可溶性糖含量均呈现先增后减趋势,在指数施肥Z600处达到最大,分别为63.73、55.55 mg·g⁻¹和134.70 mg·g⁻¹。处理Z600在根、茎、叶各器官中可溶性糖含量均高于C600,说明相同施肥总量条件下,指数施肥促进乌桕容器苗可溶性糖含量的积累优于传统施肥。

表6 不同施N处理对乌桕容器苗可溶性糖含量的影响

Table 6 Effect of different nitrogen application treatments on soluble sugar content of *S. sebiferum*

处理	可溶性糖含量 (mg·g ⁻¹)		
	根	茎	叶
CK	31.62±0.28e	32.56±1.05f	95.38±6.45d
C600	50.85±0.37c	44.71±2.69d	95.96±1.38d
Z200	47.20±0.42d	39.32±0.88e	100.33±2.74cd
Z400	58.88±1.18b	49.28±4.36b	117.63±7.59b
Z600	63.73±0.49a	55.55±1.22a	134.70±1.27a
Z800	57.20±1.68b	49.04±1.65b	110.29±3.61bc
Z1 000	49.80±1.76c	47.34±0.55c	106.63±1.17bcd

2.3.2 不同施氮处理对乌桕容器苗淀粉含量的影响

由表7可知,不同施N处理乌桕容器苗各器官淀粉含量总体趋势为:叶>根>茎,这与乌桕容器苗可溶性糖含量总体趋势相同。C600处理下的乌桕容器苗根中淀粉含量显著大于其他处理($P<0.05$),是对照的1.30倍,是Z600的1.83倍,Z1000根中淀粉含量最低,比对照减少了48.8%,存在显著差异;不同施肥处理乌桕容器苗茎中淀粉含量无明显差异。茎淀粉含量最大为Z600,是对照的1.15倍,是C600的1.03倍,最小为Z1 000,比对照降低了5%;不同施肥处理乌桕容器苗叶中淀粉含量无明显差异。处理C600叶淀粉含量最大,是对照的1.13倍,是Z600的1.14倍,Z800叶淀粉含量最

低,比对照减少了 8.6%。多重比较结果表明:除 C600 和 Z200 外,其他各施肥处理间根淀粉含量均较对照有下降趋势,且在指数施肥条件下根部淀粉含量随施氮量的增加而减少。在茎和叶中,各施肥处理和对照的淀粉含量无明显差异。说明施 N 肥对乌柏容器苗根部淀粉含量积累有一定抑制作用,且同等施肥量条件下,指数施肥抑制作用更强,施氮肥对乌柏容器苗茎和叶淀粉积累量无明显影响。

表 7 不同施 N 处理对乌柏容器苗淀粉含量的影响

Table 7 Effect of different nitrogen application treatments on starch content of *S. sebiferum* container seedlings (mg · g⁻¹)

处理	淀粉含量		
	根	茎	叶
CK	24.58±1.81c	12.17±0.36a	108.57±0.42ab
C600	31.99±0.31a	13.65±2.74a	122.23±14.24a
Z200	28.79±0.83b	13.01±0.48a	101.78±3.23b
Z400	23.18±2.75c	13.15±0.53a	111.50±12.68ab
Z600	17.47±0.40d	14.08±2.81a	107.14±1.09ab
Z800	15.31±1.38d	12.83±1.25a	99.21±6.83b
Z1 000	12.58±0.37e	11.53±0.99a	101.88±6.46b

3 结论与讨论

施 N 对乌柏容器苗营养元素含量、营养元素积累和非结构性碳水化合物含量增加有促进作用,且指数施肥在整体上优于传统施肥。指数施肥 600 mg · 株⁻¹ 为乌柏容器苗最佳施肥处理。

3.1 施 N 处理对乌柏容器苗营养元素浓度和积累量的影响

N、P、K 对植物生长发育起关键作用^[25-26]。外源施 N 能够刺激土壤 N 向幼苗转运,提高苗木根、茎、叶的氮浓度以及 N、P、K 的总积累量,促进苗木生长发育,提高造林成活率^[27-29]。在养分供给过程中,随施 N 量的增加,苗木会出现养分亏缺、奢侈阶段和养分毒害 3 个阶段^[30]。在养分亏缺阶段时,苗木的养分浓度和积累量都会随施 N 量的增加而快速增加;在奢侈阶段时,苗木养分浓度和积累量随施 N 量增加继续增加,但增加速度变慢;当养分供给量超过苗木所需量时,便进入了毒害阶段,随施 N 量的增加苗木养分浓度和积累量都开始逐渐减少^[31-33]。过量的 N 可能会导致叶面大量元素和微量元素的不平衡,从而对树木生长产生毒害效应^[34]。指数施肥的一个重要目的就是通过使苗木生长时处于养分奢侈阶段,从而增加苗木中的养分储备,提高苗木在大田中的早期形态建成^[35]。本试验中,指数施肥 0~600 mg · 株⁻¹ 时各器官中 N 的浓度和养分积累量不断增加,且最大值都出现在

Z600 处,施 N 量大于 600 mg · 株⁻¹ 时,N 的浓度和养分积累量逐渐下降,由此可知,乌柏容器苗在指数施肥施 N 量大于 600 mg · 株⁻¹ 后处于毒害阶段,这和唐桂兰等^[36]对夏腊梅(*Calycanthus chinensis*)的研究结果相似。本研究中 Z600 与传统施肥总施 N 量均为 600 mg · 株⁻¹,然而与传统施肥相比,Z600 处理显著提高了乌柏容器苗中 N 素的积累量,这可能是因为指数施肥是一种基于增长率的养分供应模型,更能适应幼苗生长和需肥规律^[37],也有可能是因为指数施肥可以减少土壤 N 淋失,从而提高了苗木的 N 利用效率(NUE)^[38]。以上结果表明,指数施肥 Z600 处理更有利于乌柏苗对 N、P、K 各元素的吸收和积累,这对提高乌柏容器苗抗性,促进乌柏容器苗来年的生长发育都有着重要作用。

3.2 施 N 处理对乌柏容器苗非结构性碳水化合物含量的影响

非结构性碳水化合物——可溶性糖和淀粉是参与生命代谢的重要物质,是苗木生长代谢过程中重要的能量来源,和苗木的抗性也有着密切的关系^[39-40]。本研究中,各施肥处理组乌柏容器苗中的可溶性糖含量都高于对照,且指数施肥条件下随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,这和廖曦等^[41]对格木(*Erythrophloeum fordii*)的研究结论相同。适量施 N 会促进植株的生长发育和光合作用,促进可溶性糖的积累,提高苗木可溶性糖含量,施 N 过量则会造成抑制作用^[42-43],原因可能是过量施 N 干扰了叶的生理活动^[34]。Pokharel 等^[35,44]的研究发现,指数施肥可以调控苗木生物量和氮的分配,增加叶和茎中的生物量和 N 含量,并且降低分配给根的比例,这可能会有利于增强植物的光合作用和竞争能力^[45]。本研究中,不同施肥处理后的乌柏容器苗根淀粉含量较对照都有所降低,茎部和叶部没有显著变化,说明施 N 会抑制乌柏容器苗根部淀粉含量增加,对茎和叶部无明显影响。根部淀粉含量降低的原因可能是施氮使得根部生长旺盛,促进了根系的生命活动,加速了对营养物质的消耗,也有可能是因为指数施肥会促进淀粉更多地分配到苗木其他器官中,这一现象值得进一步研究。

参考文献:

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社,1997.

[2] ZHOU B,FEI W,YANG S,et al. Alteration of the fatty acid composition of *Brassica napus* L. via overexpression of phospholipid:Diacylglycerol acyltransferase 1 from *Sapium sebiferum* (L.) Roxb[J]. Plant Science,2020,298:110562.

- [3] 金代钧, 黄惠坤, 唐润琴, 等. 中国乌桕品种资源的调查研究[J]. 广西植物, 1997(4): 345-362.
JIN D Y, HUANG H K, TANG R Q, *et al.* The investigation on the variety resources of *Sapium sebiferum* in China[J]. Guihaia, 1997(4): 345-362. (in Chinese)
- [4] 董峰平, 李海波, 柳新红, 等. 基于转录组序列的乌桕 SSR 分子标记开发[J]. 分子植物育种, 2020, 18(19): 6449-6455.
DONG F P, LI H B, LIU X H, *et al.* Development of SSR markers based on transcriptome sequences of *Triadica sebifera* [J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(19): 6449-6455. (in Chinese)
- [5] DIVI U K, ZHOU X R, WANG P, *et al.* Deep sequencing of the fruit transcriptome and lipid accumulation in a non-seed tissue of chinese tallow, a potential biofuel crop[J]. Plant and Cell Physiology, 2016, 57(1): 125-137.
- [6] 张敏, 钱猛, 倪竞德, 等. 乌桕秋叶转色前后生理特性及超微结构的变化[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(1): 20-24.
ZHANG M, QIAN M, NI J D, *et al.* Changes in physiological index and chloroplast ultrastructure in fall foliage of *Sapium sebiferum* before and after leaf color change[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(1): 20-24. (in Chinese)
- [7] 肖爱文, 王松, 程明伟, 等. 乌桕种子园营建技术[J]. 安徽林业科技, 2020, 46(4): 33-36.
XIAO A W, WANG S, CHENG M W, *et al.* Techniques for establishing the seed orchard of *Sapium sebiferum* [J]. Anhui Forestry Science and Technology, 2020, 46(4): 33-36. (in Chinese)
- [8] CHEN X, LI M, NI J, *et al.* The R2R3-MYB transcription factor SsMYB1 positively regulates anthocyanin biosynthesis and determines leaf color in Chinese tallow (*Sapium sebiferum* Roxb.) [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 164: 113335.
- [9] 郝龙飞, 李星月, 武晓倩, 等. 施肥方式及接种菌根真菌对 1 年生油松苗木根系构型的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 168-174.
HAO L F, LI X Y, WU X Q, *et al.* Responses of the root system architecture of one-year-old *Pinus tabulaeformis* seedlings to fertilization and ectomycorrhizal fungus inoculation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3): 168-174. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 潘汉周. 乌桕不同播种方式及苗木生长规律研究[J]. 林业勘察设计, 2015(2): 135-137.
- [12] 及利, 卢艳, 杨雨春, 等. 施肥方式对核桃楸容器苗生长及根系养分累积的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 76-83.
JI L, LU Y, YANG Y C, *et al.* Effects of fertilization methods on the growth and root nutrient accumulation of *Juglans mandshurica* container seedlings [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 76-83. (in Chinese)
- [13] 刘欢, 王超琦, 吴家森, 等. 氮素指数施肥对 1 年生杉木苗生长及氮素积累的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(3): 459-464.
LIU H, WANG C Q, WU J S, *et al.* Growth and N accumulation in seedlings of *Cunninghamia lanceolata* clones with N exponential fertilization[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34(3): 459-464. (in Chinese)
- [14] 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: 309-318.
- [15] 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.
- [16] 贾慧君, 郑槐明. 兰考泡桐幼苗稳态矿质营养比较研究[J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(3): 12-19.
JIA H J, ZHENG H M. Comparative study on the steady state mineral nutrition of *Paulownia elongata* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1993, 15(3): 12-19. (in Chinese)
- [17] 贾慧君, 郑槐明, 李江南, 等. 稳态营养原则在杉木、湿地松苗木施肥中的应用[J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(4): 65-75.
JIA H J, ZHENG H M, LI J N, *et al.* Application of steady state mineral nutrition principle to fertilization of potted conifer seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1994, 16(4): 65-75. (in Chinese)
- [18] 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): 685-90. (in Chinese)
- [19] 刘洲鸿, 刘勇, 段树生. 不同水分条件下施肥对侧柏苗木生长及抗性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 56-61.
LIU Z H, LIU Y, DUAN S S. Effects of fertilization methods on seedling growth and drought tolerance of *Platycladus orientalis* under different water conditions[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6): 56-61. (in Chinese)
- [20] 滕汉书. 马尾松容器育苗轻型基质筛选及指数施肥研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2004.
- [21] 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)
- [22] 何茜, 王冉, 李吉跃, 等. 不同浓度指数施肥方法下马来沉香与土沉香苗期需肥规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1193-1203.
HE Q, WANG R, LI J Y, *et al.* Nutrient uptake of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different exponential regimes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5): 1193-1203. (in Chinese)
- [23] 万志兵, 何结良. 乌桕育苗及幼苗生长节律研究[J]. 湖南农业科学, 2010(23): 132-134.
WAN Z B, HE J L. Seedling raise method and seedling growth rhythm of *Sapium sebiferum* [J]. Hunan Agricultural Sci-

- ence, 2010(23):132-134. (in Chinese)
- [24] 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, 2007.
- [25] 焦可君. 氮磷钾施肥水平对番茄养分积累及品质的影响[D]. 合肥:安徽农业大学, 2020.
- [26] WANG H D, WU L F, WANG X K, *et al.* Optimization of water and fertilizer management improves yield, water, nitrogen, phosphorus and potassium uptake and use efficiency of cotton under drip fertigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245:106662.
- [27] 祝燕, 刘勇, 李国雷, 等. 氮素营养对长白落叶松移植苗生长及养分状况的影响[J]. *林业科学*, 2011, 47(9):168-172.
ZHU Y, LIU Y, LI G L, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on the growth and nutrient status in *Larix olgensis* seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(9):168-172. (in Chinese)
- [28] 苏妮尔. 施肥对红皮云杉幼龄林木生长及土壤真菌群落的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2020.
- [29] SARKER J R, SINGH B P, HE X H, *et al.* Tillage and nitrogen fertilization enhanced belowground carbon allocation and plant nitrogen uptake in a semi-arid canola crop-soil system[J]. *Scientific reports*, 2017, 7:10726.
- [30] 李毓琦, 刘小金, 徐大平, 等. 不同施氮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.
LIU 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. (in Chinese)
- [31] 农寿千, 韦建查, 郑伟. 不同肥料及施氮量对降香黄檀生长的影响[J]. *热带林业*, 2020, 48(4):25-29.
NONG S Q, WEI J X, ZHENG W. Effects of different fertilizers and application rates on the growth of *Dalbergia odorifera*[J]. *Tropical Forestry*, 2020, 48(4):25-29. (in Chinese)
- [32] 杨佳璇. 氮、磷添加对蒙古栎苗木生长的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2020.
- [33] 马兴东. 不同施氮量对黑果枸杞光合特性、品质与产量的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2020.
- [34] AMICHEV B Y, REES K C J V. Early nitrogen fertilization effects on 13 years of growth of 4 hybrid poplars in Saskatchewan, Canada[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 419-420:110-122.
- [35] POKHAREL P, CHANG S X. Exponential fertilization promotes seedling growth by increasing nitrogen retranslocation in trembling aspen planted for oil sands reclamation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 372:35-43.
- [36] 唐桂兰, 刘小星, 卢建国. 氮素指数施肥对夏腊梅幼苗生长、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]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences*, 2017, 41(6):134-140. (in Chinese)
- [37] 李双喜, 杨曾奖, 徐大平, 等. 施氮量对檀香幼苗生长及养分积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3):807-814.
LI S X, YANG Z J, XU D P, *et al.* Effects of nitrogen application rate on growth and nutrient accumulation of *Santalum album* L. seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(3):807-814. (in Chinese)
- [38] HU Y, LI C, JIANG L, *et al.* Growth performance and nitrogen allocation within leaves of two poplar clones after exponential and conventional nitrogen applications[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 154:530-537.
- [39] 潘庆民, 韩兴国, 白永飞, 等. 植物非结构性贮藏碳水化合物生理生态学研究进展[J]. *植物学通报*, 2002, 19(1):30-38.
PAN Q M, HAN X G, BAI Y F, *et al.* Advances in physiology and ecology studies on stored non-structure carbohydrates in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2002, 19(1):30-38. (in Chinese)
- [40] 郑云普, 王贺新, 娄鑫, 等. 木本植物非结构性碳水化合物变化及其影响因素研究进展[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4):1188-1196.
ZHENG Y P, WANG H X, LOU X, *et al.* Changes of non-structural carbohydrates and its impact factors in trees: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4):1188-1196. (in Chinese)
- [41] 廖曦, 周维, 王艺锦, 等. 氮磷钾施肥对格木可溶性糖、可溶性蛋白的影响[J]. *广西林业科学*, 2018, 47(1):102-104.
LIAO X, ZHOU W, WANG Y J, *et al.* Effects of combined of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on soluble sugar and soluble protein of *Erythrophloeum fordii*[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2018, 47(1):102-104. (in Chinese)
- [42] 鱼欢, 王灿, 李志刚, 等. 不同施氮量对幼龄胡椒叶片碳代谢的影响[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(10):1784-1789.
YU H, WANG C, LI Z G, *et al.* Nitrogen rate on young pepper metabolism of carbon[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(10):1784-1789. (in Chinese)
- [43] 冯海华. 不同施氮量对元宝枫叶片营养成分含量的影响[J]. *陕西林业科技*, 2020, 48(2):1-5.
FENG H H. Effect of different nitrogen proportion on the content of nutrients in the leaves of *Acer truncatum* [J]. *Shaanxi Forestry Science and technology*, 2020, 48(2):1-5. (in Chinese)
- [44] POKHAREL P, KWAK J, CHANG S X, *et al.* Growth and nitrogen uptake of jack pine seedlings in response to exponential fertilization and weed control in reclaimed soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53:701-713.
- [45] CUESTA B, SALVADOR P V, Puértolas J, *et al.* Why do large, nitrogen rich seedlings better resist stressful transplanting conditions. A physiological analysis in two functionally contrasting mediterranean forest species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260:71-78.