

张广涛,包厚天,黄卫和,等. 不同氮素施肥处理对乌柏容器苗和根系生长的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(9):135-142.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.09.022

不同氮素施肥处理对乌柏容器苗和根系生长的影响

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. 萍乡市林业科学研究所, 江西萍乡 337000)

摘要:为研究不同氮素施肥处理对乌柏容器苗生长和根系形态的影响,筛选出乌柏容器苗培育的最适施肥方法和施肥量,为乌柏容器苗的科学培育提供理论依据。以一年生乌柏容器苗为试验材料,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,分别测定不同氮素施肥处理下乌柏容器苗的苗高、地径、生物量、根冠比、苗木质量指数、总根长、根表面积和根体积。结果表明:(1)随着施氮量的增加,乌柏容器苗的苗高、地径、总干质量均呈现先增后减的趋势,且最大值均出现在指数施肥 Z600 处理处,分别为 107.31 cm、12.25 mm、40.01 g,分别是对照的 1.36、1.47、2.16 倍。苗木质量指数随着施氮量的增加呈现先增后减的趋势,最大值也出现在指数施肥 Z600 处理处,是对照的 2.25 倍。对照的根冠比显著大于各施肥处理,在各施肥处理中指数施肥 Z1000 处理的根冠比最大,处理 Z200 的最小,传统施肥 C600 处理的根冠比大于指数施肥 Z600 处理。(2)乌柏容器苗的总根长、根表面积、根体积均随着施氮量的增加呈现先增后减的趋势,最大值出现在指数施肥 Z600 处理处,分别为 535.05 cm、509.08 cm²、34.27 cm³,分别是对照的 1.62、1.63、2.53 倍。施氮肥对乌柏容器苗的生长和根系发育有显著影响,相同施肥量条件下,指数施肥 Z600 处理的苗高、地径和生物量都高于传统施肥 C600 处理,指数施肥苗木质量好于传统施肥。由处理 C600 与 Z600 的根冠比对比可知,同一施肥总量下,指数施肥的乌柏苗木地上部分生长优于传统施肥。相同施肥量条件下,指数施肥 Z600 处理的根系各项指标都大于传统施肥 C600 处理,说明指数施肥好于传统施肥。指数施肥各处理中,苗高、地径、生物量、苗木质量指数、总根长、根表面积和根体积均表现出先增后减的趋势,在处理 Z600 处达到最高,说明指数施肥的最适施肥量为 600 mg/株。

关键词:乌柏;指数施肥;生长指标;根系形态;施氮量;苗木质量指数

中图分类号:S723 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)09-0135-08

乌柏[*Sapium sebiferum* (L.) Roxb.]为大戟科(Euphorbiaceae)乌柏属(*Sapium*)落叶乔木,它具有材用、药用、经济和观赏等多种价值^[1-2]。乌柏材质优良,树干高大,可作木材;其全身是宝,根、皮、叶均可作药用;叶可作黑色染料,种子外被蜡质,可制高级香皂、蜡烛等,种仁可榨油,供油漆、油墨等用,也可作涂料,用作油纸、油伞等的制作^[3-4]。乌柏春秋季节叶色红艳亮丽,极为漂亮,在园林绿化中应用较广^[5]。目前林业上对乌柏的研究主要集中在品种选育和育苗技术上^[6],采用营养钵育苗^[7],可

大大提高造林成活率。在苗木生产中存在的主要问题是苗木生长速度慢、苗木质量参差不齐,难以满足造林要求。苗木施肥是培育优质苗木、提高苗木质量的有效措施^[8]。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^[9-11]。指数施肥基于稳态养分理论^[12],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符合,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^[13]。Ingestad 通过大量试验研究创立了养分指数承载理论(exponential nutrient loading theory)^[14]。国内最早对指数施肥理论开始研究的是贾慧君等学者^[15-16]。进入 21 世纪后,国内对指数施肥技术的研究先后涉及到了长白落叶松(*Larix olgensis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、马

收稿日期:2021-08-15

基金项目:江苏省林业科技项目(编号:LYKJ[2021]30);江苏高校优势学科建设工程项目(编号:PAPD)。

作者简介:张广涛(1998—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要从事林木种苗研究。E-mail:780875198@qq.com。

通信作者:喻方圆,博士,教授,主要从事林木种苗研究。E-mail:fyu@njfu.edu.cn。

尾松(*Pinus massoniana*)、西南桦(*Betula alnoides*)、沉香(*Aquilaria sinensis*)等^[17-21]。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还未见报道。由于近几年苗木需求旺盛,特别是乌桕大苗,因此如何加快其生长速率、缩短育苗周期、提高苗木质量、降低生产成本成为亟待解决的问题。本研究以一年生乌桕容器苗为试验材料,设置传统施肥和指数施肥等不同处理,分别测定不同氮素施肥处理下乌桕容器苗的苗高、地径、生物量、根冠比、苗木质量指数、总根长、根表面积和根体积等参数,研究不同施肥处理对乌桕容器苗生长和根系构型的影响,旨在筛选出乌桕容器苗培育的最适施肥方法和施肥量,为乌桕容器苗的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(119°14'E, 31°59'N)开展,该林场位于江苏省句容市境内,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,选取生长状态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,试验基质泥炭、珍珠岩、有机肥体积比为 7 : 2 : 1(均匀混合)。待缓苗至 6 月初移至室外,进行施肥试验。

1.3 试验设计

该试验采用完全随机区组设计,采用传统施肥和指数施肥 2 种施肥模式,共 6 组施肥处理,以不施肥为对照,共 7 组试验苗,每组试验设置 3 次重复,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:

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

式中: N_T 为施氮总量; N_t 为第 t 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:

$$N_T = N_s(e^n - 1); \quad (2)$$

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

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($T=15$); t 为施肥次数; r 为氮素相对增加率; N_t 为第 t 次施氮量; N_{t-1} 为 $t-1$ 次前施氮量总和。通过测定测得幼苗初始含氮量 $N_s = 17.81 \text{ mg/株}$ 。

传统施肥设置为 600 mg/株(总施氮量),该次试验用 C600 表示;指数施肥设置了 5 个施氮梯度,分别为 200、400、600、800、1 000 mg/株(总施氮量),该次试验分别用 Z200、Z400、Z600、Z800、Z1000 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,施肥间隔为 1 周,共施 15 次肥。施用的氮肥为尿素(N 含量 $\geq 46.4\%$),每周施肥量见表 1。为了维持养分平衡,在施氮的同时,试验中适当补充了磷、钾肥。其中磷肥为过磷酸钙(有效磷含量 $\geq 12\%$),钾肥为硫酸钾(氧化钾含量 $\geq 50\%$),各施 200 mg/株(总施用量)。试验期间共施磷、钾肥 5 次,施肥间隔周期为 3 周,每次施入 40 mg/株。9—10 月减少灌溉量以利于苗木木质化。

1.4 指标测定方法

1.4.1 苗高、地径测定 分别在施肥的第 0 周(6 月 21 日)、第 5 周(7 月 26 日)、第 10 周(9 月 3 日)、第 15 周(10 月 9 日)从每个处理每次重复中随机取 15 株,共 45 株,使用钢卷尺(精确到 0.1 cm)测定苗高,用游标卡尺(精确到 0.01 mm)测定地径。

1.4.2 根系指标测定 施肥试验结束后,11 月初从每个处理每次重复中随机选取 3 株容器苗带回实验室,用清水洗净,再用去离子水冲洗,用 ESPON 根系扫描仪扫描各处理根系,并使用 Win RHIZO 根系扫描仪对根系图像进行分析,得到总根长、根表面积、根体积。

1.4.3 生物量测定和苗木质量指数计算 在根系扫描完成后,用去离子水对幼苗进行冲洗,分成根、茎、叶分别装入信封,置于烘箱内,105 ℃ 杀青 30 min 后,85 ℃ 烘干至恒质量。再用电子天平(精确到 0.001 g)测定地上部分、地下部分的质量。苗木质量指数计算公式为质量指数(QI) = 苗木总干质量 / [(苗高/地径) + (茎干质量/根干质量)]。

1.5 数据处理

用 Excel 2013 对试验数据进行图表处理,用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析及 Duncan's 多重比较检验差异性,再绘制图表。

表 1 乌桕容器苗不同指数施肥水平每周施肥量

施肥周次	施肥量 (mg/株)						
	CK	C600	Z200	Z400	Z600	Z800	Z1000
第 1 周	0	40	3.24	4.16	4.74	5.17	5.51
第 2 周	0	40	3.82	5.34	6.12	6.68	7.24
第 3 周	0	40	4.52	6.53	7.72	8.71	9.48
第 4 周	0	40	5.35	8.01	9.73	11.22	12.40
第 5 周	0	40	6.31	9.84	12.28	14.35	16.16
第 6 周	0	40	7.46	12.01	15.63	18.61	21.20
第 7 周	0	40	8.82	14.87	19.73	23.99	27.79
第 8 周	0	40	10.42	18.30	24.94	30.83	36.44
第 9 周	0	40	12.31	22.53	31.51	39.68	47.77
第 10 周	0	40	14.55	27.75	39.85	51.34	62.61
第 11 周	0	40	17.20	34.19	50.41	66.36	82.04
第 12 周	0	40	20.32	42.12	63.87	85.59	106.61
第 13 周	0	40	24.01	51.93	80.89	110.43	139.95
第 14 周	0	40	28.38	64.01	102.42	142.78	183.65
第 15 周	0	40	33.54	78.93	129.55	184.23	240.89
总量	0	600	200.00	400.00	600.00	800.00	1 000.00

2 结果与分析

2.1 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗形态指标的影响

2.1.1 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗苗高的影响 由图 1 可以看出,乌桕一年生容器苗的苗高随着时间的推移逐渐增高。第 0 周至第 5 周,苗木生长缓慢,各组苗高均呈现增长态势,第 5 周时除 C600、Z800 和 Z100 处理外,其他处理之间差距均不明显,C600 处理平均苗高最大(33.18 cm),是对照(24.49 cm)的 1.35 倍,Z200 的平均苗高(26.06 cm)最小,是对照的 1.06 倍。第 5 周至第 10 周,苗木生长速度加快,苗高呈现明显提高,增长量达到最大,各处理组相比对照都有较大差距,此时平均苗高最大的仍然为 C600 处理(95.20 cm),是对照(71.98 cm)的 1.32 倍,此时指数施肥处理下的乌桕平均苗高根据施氮总量的大小从低往高排列,最小为 Z200 处理(85.41 cm),最大为 Z1000 处理(91.99 cm),是对照的 1.28 倍。第 10 周至第 15 周,苗高持续增加,但生长速度放缓,第 15 周时,各处理平均苗高由大到小排列为 Z600 处理(107.31 cm) > Z800 处理(105.90 cm) > Z1000 处理(105.29 cm) > Z400 处理(104.92 cm) > C600 处理(103.99 cm) > Z200 处理(100.29 cm) > CK(79.16 cm),分别较施肥前增加了 784%、713%、

731%、778%、740%、679%、573%。此时,Z600 处理 > C600 处理,说明同等施肥总量条件下,指数施肥处理下乌桕苗高生长量大于传统施肥,且指数施肥处理下的乌桕苗高随着施氮量的增加呈现先增后减的趋势,说明 Z800 和 Z1000 处理时施氮过多,抑制了乌桕苗的生长。多重比较结果表明,第 15 周时各施肥处理组与对照差异显著,Z200 和 Z1000 处理差异显著,说明不同施肥方法和施肥量均对乌桕容器苗增高有促进作用,且 Z600 处理的效果最好。

2.1.2 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗地径的影响 各施肥处理下的乌桕容器苗地径生长规律和苗高相似,均呈现增长趋势。由图 2 可以看出,第 0 周至第 5 周,乌桕苗生长较慢,各处理组的地径保持增加趋势。第 5 周至第 10 周,乌桕苗生长速度加快,地径增长幅度较大,由于施肥量和施肥处理的不同,第 5 周和第 10 周时,C600 处理地径都最大,分别为 5.43、8.70 mm,分别是 CK 的 1.24、1.29 倍。第 10 周至第 15 周,乌桕苗地径仍然在继续增加,但增加速度放缓。第 15 周时,指数施肥各处理的增长量均大于传统施肥和对照,不同处理的地径从大到小排列为 Z600 处理(12.25 mm) > Z800 处理(11.22 mm) > Z1000 处理(11.16 mm) > Z400 处理(11.06 mm) > C600 处理(10.64 mm) > Z200 处理(10.52 mm) > CK(8.33 mm),分别较施肥前增加了 417%、384%、400%、330%、364%、354%、301%。

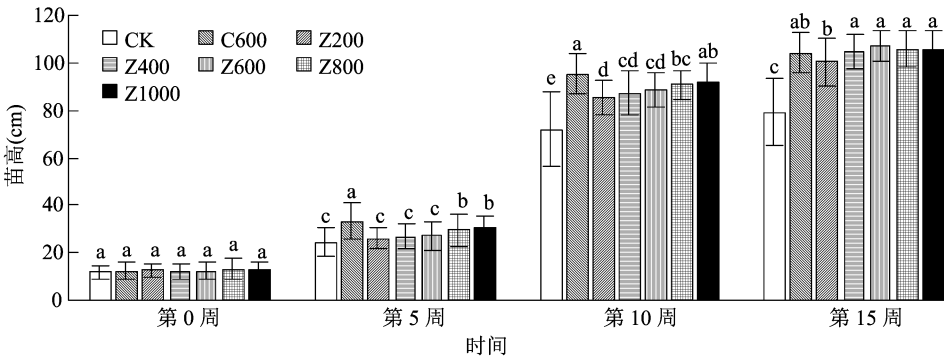


图1 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗苗高的影响

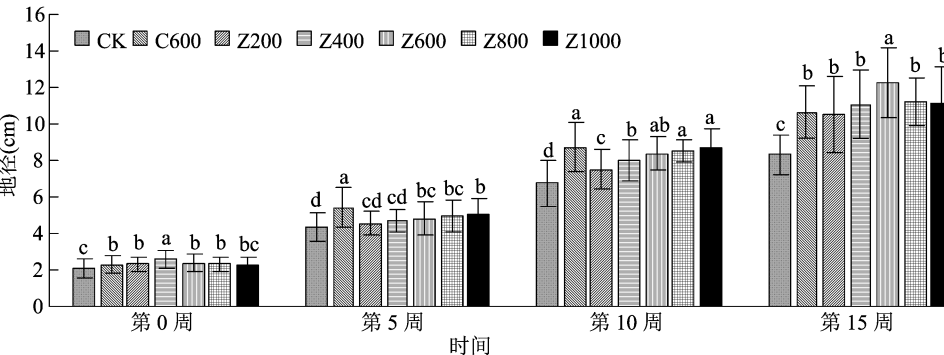


图2 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗地径的影响

此时,Z600 处理的平均地径和地径增长率均最大,高于相同施肥总量条件下的 C600 处理,且指数施肥各处理平均地径根据施氮量的增加出现了先增后减的趋势,说明 Z800 和 Z1000 处理时施氮过多,抑制了乌桕苗地径的生长。多重比较结果表明,第 15 周时,除了处理 Z600,其他各施肥处理差异均不显著,但都与对照和处理 Z600 之间存在显著差异,说明不同施肥方法和施肥量均对乌桕容器苗地径有促进作用,且 Z600 处理的效果最好。

2.1.3 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗生物量积累的影响 由表 2 可以看出,不同施肥处理对乌桕一年生容器苗生物量积累有重要作用,各施肥处理和对照之间差异明显,均显著大于对照。经指数施肥处理的乌桕容器苗地下部分、地上部分干质量及总干质量均随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,且峰值都出现在处理 Z600 处,地下部分、地上部分干质量及总干质量分别为 13.35、26.66、40.01 g,分别是对照的 1.94、2.29、2.16 倍。不同处理条件下总干质量由大到小排列为 Z600 处理(40.01 g) > Z400 处理(32.97 g) > C600 处理(30.73 g) > Z800 处理(29.42 g) > Z200 处理(28.28 g) > Z1000 处理(25.52 g) > CK(18.52 g),处理 Z800 和 Z1000 总

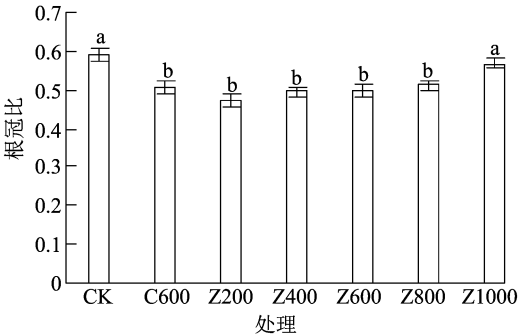
干质量都较处理 Z600 有所减少,说明这 2 个处理施氮量过高对乌桕容器苗生物量积累产生了抑制效果,甚至可能产生了毒害作用。同一施肥总量条件下,指数施肥处理 Z600 乌桕容器苗地下部分、地上部分干质量及总干质量均高于常规施肥处理 C600 的乌桕容器苗地下部分(10.32 g)、地上部分(20.41 g)干质量及总干质量(30.73 g),说明指数施肥效果优于传统施肥。不同施肥方法和施肥量均对乌桕容器苗生物量积累有促进作用,且处理 Z600 处理的效果最好。

表 2 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗生物量的影响

处理	地下部分干质量 (g)	地上部分干质量 (g)	总干质量 (g)
CK	6.87 ± 0.05e	11.64 ± 0.27f	18.52 ± 0.31g
C600	10.32 ± 0.52bc	20.41 ± 0.27c	30.73 ± 0.29c
Z200	9.09 ± 0.02d	19.19 ± 0.35d	28.28 ± 0.32e
Z400	10.90 ± 0.12b	22.07 ± 0.32b	32.97 ± 0.37b
Z600	13.35 ± 0.26a	26.66 ± 0.33a	40.01 ± 0.08a
Z800	9.94 ± 0.57c	19.48 ± 0.37d	29.42 ± 0.43d
Z1000	9.25 ± 0.29d	16.27 ± 0.33e	25.52 ± 0.15f

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P < 0.05)。下表同。

2.1.4 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗根冠比的影响 根冠比是苗木地下部分和地上部分鲜质量或干质量的比值,描述的是苗木生长过程中生物量在各器官的分配关系,是苗木生长过程中对环境适应的表现。由图 3 可知,各施肥处理中处理 Z200 的根冠比最小(0.47),比对照(0.59)下降了 20.3%,说明各施肥处理对乌桕容器苗地上部分生长有促进作用,从而使根冠比下降。不同施肥处理条件下根冠比大小排列为 CK(0.59) > Z1000 处理(0.57) > Z800 处理(0.51) > C600 处理(0.51) > Z600 处理(0.50) > Z400 处理(0.49) > Z200 处理(0.47)。指数施肥 Z1000 处理高于其他施肥处理组,说明过量施肥对乌桕地上部分生长造成抑制,其他各处理均相差不大,地上部分和地下部分生物量增加的趋势保持一致,说明指数施肥在正常施肥量下,对苗木根冠比影响不大。处理 C600 的根冠比大于处理 Z600,说明同一施肥总量条件下,指数施肥条件下乌桕容器苗的地上部分生长优于传统施肥条件下的乌桕容器苗。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下图同
图3 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗根冠比的影响

2.1.5 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗苗木质量指数的影响 苗木质量指数是评价苗木质量的一项综合性指标,用来评价苗木质量的优劣。从表 3 可以看出,乌桕容器苗苗木质量指数的变化规律和生物量变化趋势相符合,经指数施肥处理后的乌桕容器苗苗木质量指数出现先增后减的趋势,且在处理 Z600 处出现在最大值(3.72),是对照(1.65)的 2.25 倍。不同施肥处理条件下乌桕容器苗苗木质量指数从大到小排列为 Z600 处理(3.72) > Z400 处理(2.86) > C600 处理(2.61) > Z800 处理(2.58) > Z200 处理(2.43) > Z1000 处理(2.28) > CK(1.65),对照和各处理组之间差异明显,说明施肥能提高乌桕容器苗苗木质量指数,其中处理 Z600 最高,和其他组差异显著。而处理 Z800 和 Z1000 可能是施肥过多,对苗木生长产生了抑制作用。处理 Z600 的苗木质量

指数高于处理 C600,说明同一施肥总量条件下,指数施肥效果要好于传统施肥。

表 3 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗苗木质量指数的影响

处理	苗木质量指数
CK	1.65 ± 0.02f
C600	2.61 ± 0.05c
Z200	2.43 ± 0.02d
Z400	2.86 ± 0.03b
Z600	3.72 ± 0.02a
Z800	2.58 ± 0.06c
Z1000	2.28 ± 0.02e

2.2 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗根系形态的影响

2.2.1 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗总根长的影响 由图 4 可知,各施肥处理总根长与对照差异显著,说明施肥可以有效增加乌桕容器苗总根长。指数施肥处理下的乌桕容器苗总根长随着施氮量的增加出现了先增后减的趋势,说明适量施氮能促进乌桕容器苗根长生长,过量施氮会产生抑制作用。各处理总根长从大到小排列为 Z600 处理(535.05 cm) > Z800 处理(502.88 cm) > C600 处理(495.43 cm) > Z400 处理(483.91 cm) > Z200 处理(458.48 cm) > Z1000 处理(452.61 cm) > CK(330.55 cm),最大总根长出现在处理 Z600,与其他处理组差异显著,是对照的 1.62 倍,施氮总量相同条件下,处理 Z600 的总根长大于处理 C600 的总根长,说明指数施肥对一年生乌桕容器苗根系伸长的促进作用要优于传统施肥。

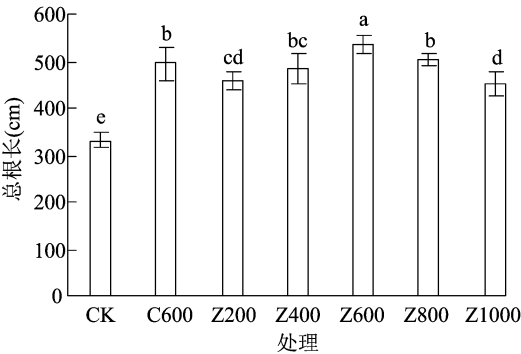


图4 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗根长的影响

2.2.2 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗根表面积的影响 由图 5 可以看出,各施肥处理的乌桕容器苗根表面积显著大于对照,说明施肥能有效促进乌

柏容器苗根表面积增大。指数施肥处理的乌柏容器苗根表面积随施氮量的增加出现先增后减的趋势,说明适量施氮能促进乌柏根表面积增大,施氮量过大会出现抑制作用。不同施肥处理下乌柏容器苗根表面积从大到小排列为 Z600 处理(509.08 cm^2) > Z800 处理(450.87 cm^2) > Z400 处理(447.16 cm^2) > C600 处理(443.59 cm^2) > Z1000 处理(415.38 cm^2) > Z200 处理(392.13 cm^2) > CK (313.05 cm^2)。同一施肥总量条件下,处理 Z600 的乌柏容器苗根表面积大于 C600 处理,说明指数施肥对乌柏容器苗根表面积增加的促进作用要优于传统施肥。多重比较结果表明,处理 Z600 与其他处理差异显著,且高于其他处理,是对照的 1.63 倍,说明指数施肥施氮量为 600 mg/株 对乌柏容器苗根表面积增大的促进效果最好。

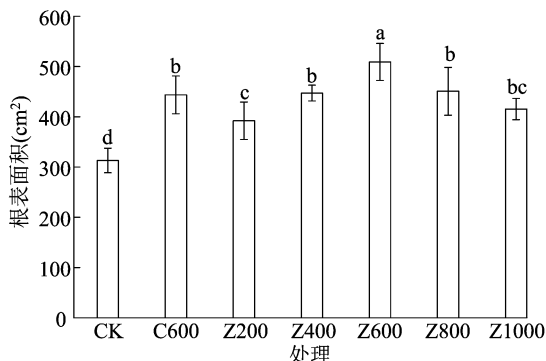


图5 不同氮素施肥处理对乌柏容器苗根表面积的影响

2.2.3 不同氮素施肥处理对乌柏容器苗根体积的影响 如图6所示,各施肥处理下乌柏容器苗根体积显著大于对照,说明施肥对乌柏容器苗根体积的增大有促进作用。指数施肥处理中,乌柏容器苗根体积随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,说明适量施氮对乌柏容器苗根体积的增加有促进作用,过量施氮会对其产生抑制作用。不同施肥处理下乌柏容器苗根体积的大小排列为 Z600 处理(34.27 cm^3) > Z400 处理(28.50 cm^3) > Z800 处理(25.43 cm^3) > C600 处理(22.04 cm^3) > Z200 处理(21.83 cm^3) > Z1000 处理(20.73 cm^3) > CK (13.56 cm^3)。同一施肥总量条件下,处理 Z600 的乌柏容器苗根体积大于处理 C600,说明指数施肥对乌柏容器苗根体积增加的促进作用优于传统施肥。处理 Z600 显著高于其他处理组,是对照的 2.53 倍,说明在本试验中,指数施肥施氮量为 600 mg/株 对乌柏容器苗根体积增加的促进作用最大,效果最好。

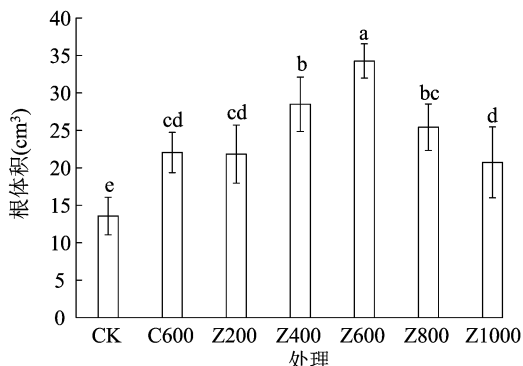


图6 不同氮素施肥处理对乌柏容器苗根体积的影响

3 讨论

3.1 不同氮素施肥处理对乌柏容器苗生长的影响

苗高和地径是衡量苗木质量的重要形态指标,施肥能促进苗高、地径的生长,能有效提高苗木质量,缩短育苗周期^[22]。本试验结果表明,施肥能显著提高乌柏容器苗的苗高、地径,在施肥第5周、第10周时,传统施肥的苗高都高于指数施肥,说明生长前期传统施肥的养分供给比指数施肥充足,能满足苗木快速生长的需要。第10周后,指数施肥后的乌柏苗高慢慢超过传统施肥,在第15周时,经指数施肥后的苗高超过了传统施肥,且峰值出现在处理 Z600 处,说明苗木生长后期,传统施肥的施肥量不能满足苗木的正常生长需求,指数施肥符合苗木生长规律,可以满足苗木后期的生长需要。但施肥量不能过多,过多会造成抑制作用,如处理 Z800 和 Z1000。试验结束后,各施肥处理的苗高和地径都显著高于未施肥的对照,各施肥处理较对照的苗高和地径分别提高了 26.69% ~ 35.56%、26.29% ~ 47.06%,这符合前人得出的指数施肥能显著提高沉香(*Aquilaria sinensis*)容器苗的苗高和地径^[23]这一结论。指数施肥条件下,随着施肥量的增加,乌柏容器苗的苗高和地径均呈现先增后减的趋势,这和张金浩等的研究结果^[24]相似。指数施肥处理 Z600 的苗高和地径都高于相同施肥量的传统施肥处理 C600,说明指数施肥效果好于传统施肥,这和刘欢等对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的研究结果^[11]相同。本试验中,指数施肥 600 mg/株 对乌柏容器苗苗高、地径的促进作用最好,适量施氮能促进苗高和地径的生长,过量则会抑制苗木生长。

生物量是衡量苗木生产力水平的重要参考指标,根据施氮量的变化,植物体内生物量的积累和分配也会受到影响。本试验中各施肥处理下地下

部分、地上部分干质量和总干质量都较对照有显著提高。指数施肥处理后的乌桕容器苗地下部分、地上部分干质量和总干质量均随着施氮量的增加呈现出先增后减的趋势,且在处理 Z600 处出现最大值,这和王力朋等对楸树(*Catalpa bungei*)无性系的研究结果^[25]相同,也符合吴家胜等的结论:适量的氮肥能促进苗木生物量增加,过多的氮肥会对其产生抑制作用^[26]。当然,这也可能与苗木本身的性质有关,当施肥量未超过植物最适需肥量时,苗木生物量随施肥量的增加而增加;当超过最适量时,会产生毒害作用,生物量由此下降^[12]。本试验结果与张华林对尾巨桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)的研究结果^[27]类似。通过比较发现指数施肥处理 Z600 各部分的生物量都高于传统施肥处理 C600,说明指数施肥效果好于传统施肥。本试验中,指数施肥处理 600 mg/株的效果最好。

根冠比是植物地上部分和地下部分平衡性的评价指标,反映的是乌桕容器苗生物量的分配关系。本试验中,指数施肥条件下,乌桕容器苗的根冠比随施氮量的增加而增加,符合施氮量过低时,施肥对苗木地上部分生长的促进效果大于地下部分^[28]。CK 因为缺少氮素,根系吸收的氮素养分较少,往地上部分输入的氮量少,茎叶生长受到抑制,造成根冠比较大。

苗木质量指数是对苗木质量进行的一项综合性的评价指标,本试验中,各施肥处理的苗木质量指数均高于对照;指数施肥处理中,随施氮量的增加,苗木质量指数呈现先增后减的趋势,这与各项因素变化趋势相符合。通过对比发现,指数施肥苗木质量指数好于传统施肥。

3.2 不同氮素施肥处理对乌桕容器苗根系形态的影响

根系是植物从土壤中汲取水分和营养物质的重要器官,在森林生态系统中起到了稳固土体、保持水土的作用。众多元素中对植物生长影响最大的元素是氮素,氮素的含量影响到植物的根系形态、解剖结构和空间分布等方面^[25]。施适量氮肥能促进植物进行光合作用,提高光合效率,增加根系吸收范围,从而使植物能在逆境中更好的生长^[29]。本试验中,乌桕容器苗各施肥处理较对照的总根长、根体积、根表面积都有显著提高;指数施肥处理下根系各项指标均随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,且最大值都出现在处理 Z600 处。指数施肥

施肥量未超过乌桕容器苗需求量时,乌桕容器苗总根长、根体积和根表面积有显著增长,这和王力朋等对楸树无性系的研究结果^[30]相似,说明适量施氮对苗木根系的生长发育有促进作用,过量则会抑制其生长,体现了适量施肥的重要性。指数施肥 Z800 和 Z1000 处理都是后期施肥量过多,提供的养分超过了苗木生长的需求量,对根系造成毒害,这和王益明等对美国山核桃(*Carya illinoensis*)的研究结果^[10]相一致。在苗木生长过程中,根系对养分的需求量是变化的,传统施肥前期对苗木供养过多,会造成肥料的浪费,后期供给不足,会影响苗木生长。指数施肥解决了这一问题,通过逐渐增加养分,前期不浪费,后期不缺少,促进了根系的生长,有利于提高苗木的抗逆性。

4 结论

施肥对乌桕容器苗苗高、地径、总干质量都有显著提高,且变化趋势相同,均随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,最大值出现在指数施肥 Z600 处理处,分别是 107.31 cm、12.25 mm、40.01 g,分别是对照的 1.36、1.47、2.16 倍。相同施肥量条件下,指数施肥 Z600 处理的苗高、地径和总干质量都高于传统施肥 C600 处理。指数施肥条件下根冠比随施氮量的增加逐渐上升,苗木质量指数随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,最大值也出现在指数施肥 Z600 处理处,是对照的 2.25 倍,相同施肥量条件下,指数施肥的苗木质量好于传统施肥。施肥对乌桕容器苗根系生长有显著的促进作用,乌桕容器苗的总根长、根表面积、根体积都随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,最大值出现在指数施肥 Z600 处理处,分别是 535.05 cm、509.08 cm²、34.27 cm³,分别为对照的 1.62、1.63、2.53 倍。相同施肥量条件下,指数施肥 Z600 处理根系各项指标都大于传统施肥 C600 处理,说明指数施肥好于传统施肥。本试验中指数施肥 600 mg/株最适合乌桕容器苗的生长。

参考文献:

- [1] 许中秋,隋德宗,谢寅峰,等. 两个乌桕新品种苗木光合特性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(1):93-100.
- [2] 金代钧,黄惠坤. 乌桕的地理分布和环境的关系[J]. 广西植物,1984,4(1):71-80.
- [3] 张运芳. 乌桕种植前景及育苗造林技术[J]. 现代农业科技,2020(12):172-173.

- [4]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,1997,17(4):345-362.
- [5]左云. 施肥和遮阴对乌桕叶色变化的影响[D]. 南京:南京林业大学,2017.
- [6]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.
- [7]蔡训标. 乌桕营养钵育苗造林技术[J]. 安徽农学通报,2009,15(1):184,120.
- [8]轩寒风. 指数施肥对不同世代杉木容器苗生长和 N、P、K 养分承载影响[D]. 福州:福建农林大学,2018.
- [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.
- [10]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.
- [11]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.
- [12]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.
- [13]Timmer V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J]. New Forests,1997,13(1/2/3):279-299.
- [14]Ingestad T. New concepts on soil fertility and plant nutrition as illustrated by research on forest trees and stands[J]. Geoderma,1987,40(3/4):237-252.
- [15]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):12-18.
- [16]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):65-74.
- [17]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.
- [18]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旱性的影响[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5/6):56-60.
- [19]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.
- [20]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.
- [21]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.
- [22]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.
- [23]王冉,李吉跃,张方秋,等. 不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响[J]. 生态学报,2011,31(1):98-106.
- [24]张金浩,周再知,杨晓清,等. 氮素营养对肯氏南洋杉幼苗生长、根系活力及氮含量的影响[J]. 林业科学,2014,50(2):31-36.
- [25]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.
- [26]吴家胜,张往祥,曹福亮. 银杏苗期施氮的研究[J]. 安徽农业大学学报,2003,30(2):173-177.
- [27]张华林. 尾巨桉苗期指数施肥及其生理效应研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2013.
- [28]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.
- [29]何茜,丁晓纲,王冉,等. 指数施肥下黑木相思根系特征值的动态变化[J]. 广东林业科技,2011,27(5):1-6.
- [30]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.