

指数施肥对美国山核桃苗期光合生理特性的影响

王益明^{1,2}, 万福绪¹, 胡菲¹, 张慧², 鞠昌华², 李瑞瑞¹

(1. 南京林业大学 林学院 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:为探究施肥对美国山核桃幼苗光合生理特性的影响,以一年生美国山核桃实生苗为试验材料,共设置 0 (CK), 100, 200, 400, 600, 800 mg/株 6 个不同供氮水平的施肥处理,运用指数施肥法研究了 6 种氮素施肥处理下美国山核桃生长及光合生理特性的变化。结果表明:(1) 美国山核桃幼苗的苗高、地径、生物量随着施氮量的增加均呈现出先增后减的趋势,分别在 N600 处理(600 mg/株)取得最大值 33.4 cm, 5.08 mm 和 9.33 g;根冠比随着施氮量的增加而呈现递减趋势,在 N800 处理取得最小值 0.39。(2) 叶片叶绿素 a、b 与总量均随施氮量的增加而增加。(3) 光合气体交换参数净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)及蒸腾速率(Tr)随着施氮量的增加均呈现先增加后减小的趋势,且均在 N600 处理达到最大值,分别是 10.53 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 0.192 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 241.7 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 2.85 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。(4) 叶片 PSII 的最大量子产额(Fv/Fm)、实际最大量子产额(Yield)、光化学淬灭系数(Qp)和表观光合量子传递速率(ETR)均随着施氮量的增加呈现出先增后减的趋势,分别在 N600 处理(600 mg/株)达到最大值 0.795, 0.356, 0.379, 23。这些结果表明:施氮量为 600 mg/株时能够显著提高其光合速率和叶绿素荧光参数,促进幼苗的生长,故 600 mg/株左右为美国山核桃温室培育条件下的最佳施氮量。

关键词:美国山核桃; 指数施肥; 光合特性; 叶绿素荧光

中图分类号:S792.99

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0187-05

Effects of Exponential Fertilization on the Photosynthetic Physiology Characteristics of *Carya illinoensis* Seedlings

WANG Yiming^{1,2}, WAN Fuxu¹, HU Fei¹, ZHANG Hui², JU Changhua², LI Ruirui¹

(1. Co-Innovation Centre for Sustainable Forestry in Southern China, College of Forest, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: An exponential fertilization experiment was conducted with six dose levels (applying a total of 0, 100, 200, 400, 600, 800 mg/seedling in this experiment) of nitrogen to assess the effects on different nitrogen levels on the photosynthetic characteristics of pecan seedlings. The objective of this study was to reveal the nitrogen demand and determine the optimal nitrogen amount for pecan seedlings. The results indicated that: (1) the height, ground diameter and biomass of pecan seedlings increased as the nitrogen fertilization increased from 0 to 600 mg/seedling and then decreased with the nitrogen fertilization increased from 600 to 800 mg/seedling; the maximum values were 33.4 cm, 5.08 mm and 9.33 g/seedling, respectively; the root shoot ratio decreased with the nitrogen fertilizer increased; (2) chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll increased with the nitrogen fertilizer increased; (3) the net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration and transpiration rate of pecan seedlings increased as the nitrogen fertilizer increased from 0 to 600 mg/seedling and then decreased with the nitrogen fertilizer increased from 600 to 800 mg/seedling. The maximum values were 10.53 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 0.192 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 241.7 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ and 2.85 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively; (4) Fv/Fm, Yield, Qp, ETR increased until the nitrogen application rate of 600 mg/seedling, with the highest values of 0.795, 0.356, 0.379 and 23, respectively. Based on these data, it could be concluded that 600 mg/seedling would be the optimal nitrogen amount for *Carya illinoensis* seedlings in greenhouse.

Keywords: pecan; exponential fertilization; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence

美国山核桃又名薄壳山核桃、长山核桃,是胡桃科山核桃属的深根性树种,为世界四大干果树种之一,其生长迅速,树姿优美,也是很好的园林观赏树种和水土保持树种^[1]。近年来美国山核桃已经成为我国南方重要的经济树种。我国对美国山核桃的良种选育、扦插繁殖、嫁接技术等方面都开展了相应的研究^[2-5],但对于美国山核桃施肥的研究并不多。光合作用是植物生长和干物质形成的物质基础,植物叶片叶绿素含量的高低和叶片光合能力成显著相关^[6]。研究表明植物叶片约 75% 的氮素存在于叶绿体,叶片含氮量与光合能力呈现线性正相关^[7]。叶绿素荧光动力学检测技术是研究植物光合作用的快速、无损伤探针^[8],也是目前最先进的测定植物光合作用能量吸收、传递、耗散、分配等研究内容的重要手段^[9]。植物光合过程中的荧光特性可用于了解植物的生长、病害、胁迫等生理情况,目前已被广泛应用到植物生理生态影响的研究中^[10-12]。一些学者已经对美国山核桃的光合特性进行了相关的研究^[13-17],然而这些研究多是单纯比较美国山核桃不同品种或不同树龄之间的光合特性差异,而有关施肥对美国山核桃光合特性的影响目前尚未见报道。本研究运用指数施肥法研究不同施氮量对美国山核桃幼苗生长及光合生理特性的影响,旨在探求美国山核桃幼苗生长及光合特性对不同施氮水平的响应差异以确定最适施氮量,从而为美国山核桃精准施肥和培育高质量苗木提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地设在江苏省南京市南京林业大学园林温室内。试验材料来源于南京林业大学美国山核桃繁育基地,2017 年 4 月选取生长相对一致的美国山核桃一年生实生苗 300 株移栽于规格为 16.5 cm × 11.5 cm × 24 cm(上口径×下口径×高)的塑料花盆内用于试验。盆栽基质采用河沙(粒径 0.2~1.0 mm)。待缓苗至 5 月初开始施肥试验。为防止水肥流失,盆内均套有双层白色塑料袋。试验过程中以重力法判断土壤水分状况,每隔 2 周移动 1 次苗盆以减少边缘效应。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,共设置 5 个浓度指数施肥处理,以不施肥处理作为对照,设 3 个试验重复。试验采用指数施肥模型^[18]来计算相应施肥量,公式如下:

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

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

式中: N_T 为施氮总量; N_S 为幼苗在指数施肥处理前的初始氮含量; N_t 代表在相对增加率 r 下, t 次施肥时的施氮量; N_{t-1} 代表包含第 $(t-1)$ 次施肥的氮素施入总量; r 为氮素相对添加率; t 为指数施肥的次数。参考 Timmer 等^[18]设定 N_S :经指数施肥处理前幼苗样品的测定,算得 $N_S = 25.35$ mg/株。根据指数施肥方式;5 个不同的氮素指数施肥处理设置为 100;200;400;600,和 800 mg/株,试验用 N100;N200;N400;N600 和 N800 来表示;不施肥对照组用 CK 表示。施肥间隔为 1 周,共进行 12 次施肥处理。试验中采用水溶施用的方法,每株幼苗每次施用 20 ml。指数施肥的施氮量见表 1。该试验采用普罗丹水溶性复合肥,主要养分含量为 N20%; P_2O_5 20%; K_2O 20%,螯合铁(Fe)0.10%,螯合锰(Mn)0.05%,螯合锌(Zn)0.05%,螯合铜(Cu)0.05%,硼(B)0.02%,钼(Mo)0.0005%;EDTA 螯合体 1.00%。

1.3 指标测定

生长参数测定:苗高和地径分别用直尺及游标卡尺测定。生物量测定:每小区随机选取 5 株,幼苗用去离子水洗净,按根、茎、叶分别剪下,于烘箱中 105℃ 杀青 30 min,然后 85℃ 下烘干至恒重,用电子天平称质量测定根、茎、叶生物量。

叶绿素含量的测定:叶绿素浸提液采用 95% 无水乙醇溶液。每小区随机取鲜叶 0.2 g,将叶剪成 0.2 cm 左右的细丝或小块混合均匀后置于试管中,即刻注入 10 ml 95% 无水乙醇溶液,用塑料薄膜封口防止液体挥发,黑暗环境中浸提 48 h。以 95% 无水乙醇溶液为对照,测定各处理提取液在波长 665,649 nm 处的吸光值(A)。叶绿素浓度(C)及含量计算公式如下^[19]:

$$\text{叶绿素含量}(\text{mg/g}) = (C \times V \times n) / (W \times 1000)$$

式中: C 为叶绿素浓度(mg/L); V 为提取液体积(ml); n 为稀释倍数; W 为叶片鲜质量。

光合参数的测定:在第 12 周(晴朗天气)9:00—11:00,用 Li-6400XT 便携式光合作用分析系统测定光合指标,采用红蓝光源,光强 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,叶室温度约 25~30℃,湿度 60%,大气 CO_2 浓度约 400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。每个处理取 3 株,每株取其顶端一下第 3~5 片中完整的叶片测定光合参数。测定参数主要有净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、气孔导度等。

叶绿素荧光参数测定:在第 12 周(晴朗天气)9:00—11:00,采用便携式叶绿素荧光仪(PAM-2100,

Walz, Germany), 选择美国山核桃中上部成熟叶片 (每株 5 片), 处理随机 5 株, 暗适应 20 min 后进行叶

绿素荧光参数的测定, 各参数值均由选定模式下系统自动生成。

表 1 美国山核桃不同指数施肥处理的施氮量 mg/株

处理	1 周	2 周	3 周	4 周	5 周	6 周	7 周	8 周	9 周	10 周	11 周	12 周	总量
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N100	3.61	4.12	4.70	5.37	6.14	7.01	8.01	9.15	10.45	11.94	13.63	15.87	100
N200	5.06	6.07	7.28	8.74	10.48	12.57	15.08	18.09	21.70	26.04	31.23	37.66	200
N400	6.72	8.49	10.74	13.60	17.19	21.74	27.51	34.79	44.01	55.67	70.41	89.13	400
N600	7.76	10.13	13.23	17.29	22.57	29.48	38.50	50.29	65.68	85.77	112.03	147.27	600
N800	8.53	11.40	15.23	20.35	27.21	36.36	48.59	64.93	86.79	115.97	155.00	209.64	800

1.4 数据处理

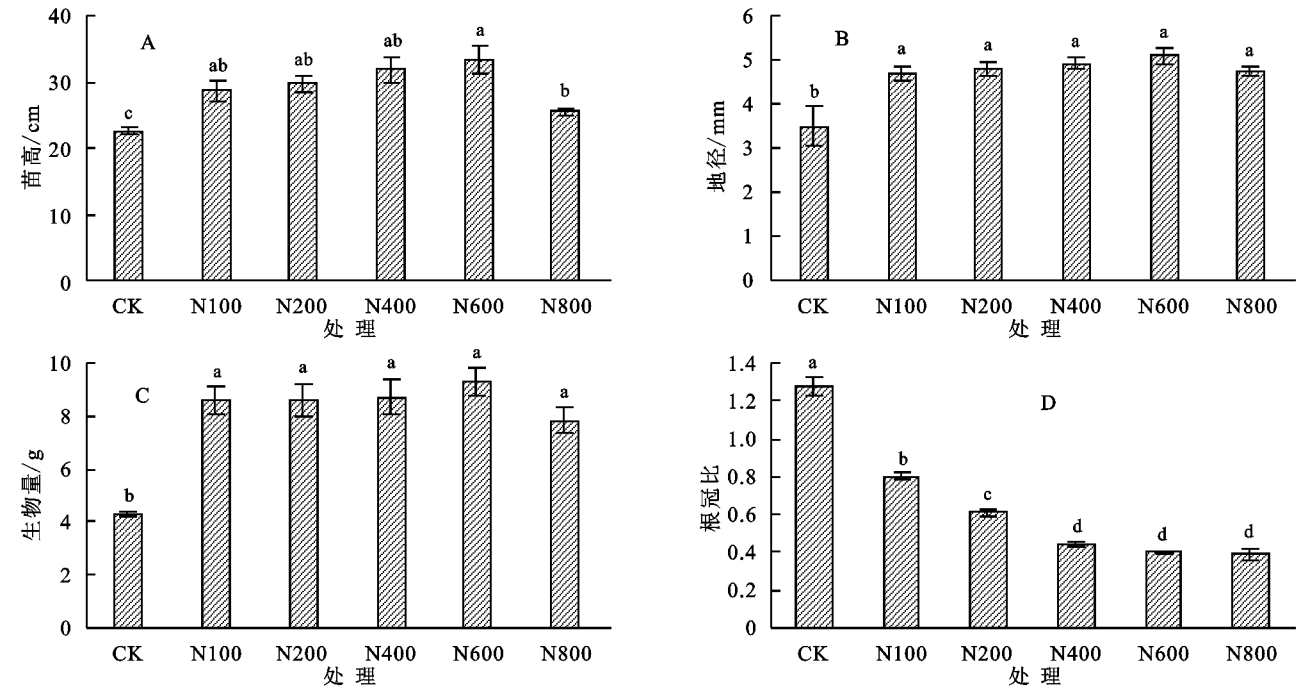
试验数据表示为平均值±标准误差, 用 Microsoft Excel 2013 对生长指标数据进行统计分析和绘图, 并用 SPSS 22.0 对光合生理指标数据进行了方差分析和 LSD 多重比较。

2 结果与分析

2.1 指数施肥对美国山核桃幼苗生长特性的影响

美国山核桃幼苗的生长特性如图 1 所示, 随着施氮量的增加, 苗高、地径、生物量均呈现出先增后减的趋势, 分别在 N600 处理取得最大值 33.4 cm, 5.08 mm 和 9.33 g, 是 CK 对照组的 1.48, 1.45, 2.17 倍;

根冠比随着施氮量的增加而呈现递减趋势, 在 N800 处理取得最小值 0.39。说明增加供氮量对美国山核桃幼苗生长有促进作用, 但对茎叶的生长的促进效果大于根系, 从而使得根冠比随着施氮量的增加而降低。方差分析结果表明: 不同浓度指数施肥处理间美国山核桃增加, 苗高、地径、生物量和根冠比均差异显著。多重比较结果表明: 苗高除 N600 和 N800 间差异显著外, 其他施肥处理间差异不显著; 但各施肥处理都与 CK 对照组差异显著。地径和生物量各施肥处理间无明显差异, 但各施肥处理均与 CK 对照组有显著性差异。根冠比除 N400, N600 和 N800 间差异不显著外, 其余各处理间均差异显著。



注: 数据为平均值±标准误差; 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

图 1 指数施肥对美国山核桃幼苗生长特性的影响

2.2 指数施肥对美国山核桃幼苗对叶绿素含量的影响

从表 2 可以看出: 美国山核桃幼苗叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 及总叶绿素含量均随施氮量的增加而增加。方差分析结果表明: 各施肥处理间美国山核桃幼苗叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素总量均差异显著 ($p < 0.05$)。进一步作多重比较发现, 除了 N400 和 N600

处理的叶绿素 a 含量差异不显著外, 其余处理均差异显著, 在 N800 处取得最大值 5.04 mg/g, 是 CK 对照组的 3.11 倍; 处理 N400, N600 和 N800 的叶绿素 b 含量较高且处理间差异不显著, 但与其他处理差异显著; N100 处理的叶绿素 a/b 值最大, 达 2.86; 总叶绿素含量在 N800 取得最大值 6.92 mg/g, 是 CK 对

照组的的 3.02 倍。说明指数施肥显著增加了美国山核桃幼苗叶片的叶绿素含量。

表 2 指数施肥对对美国山核桃幼苗叶绿素含量的影响

处理	叶绿素 a 含量/ (mg · g ⁻¹)	叶绿素 b 含量/ (mg · g ⁻¹)	叶绿素总量/ (mg · g ⁻¹)	叶绿素 a/b
CK	1.62±0.01e	0.67±0.02d	2.29±0.03e	2.41±0.06b
N100	4.13±0.01d	1.44±0.03c	5.57±0.03d	2.86±0.06a
N200	4.29±0.01c	1.65±0.03b	5.94±0.03c	2.60±0.05b
N400	4.79±0.09b	1.74±0.02a	6.53±0.08b	2.75±0.07ab
N600	4.90±0.05b	1.75±0.03a	6.65±0.08b	2.80±0.03ab
N800	5.04±0.03a	1.88±0.11a	6.92±0.14a	2.69±0.23ab

2.3 指数施肥对美国山核桃幼苗光合气体交换参数的影响

从表 3 可以看出:美国山核桃幼苗光合参数净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度及蒸腾速率随着施氮量的增加均呈现先增加后减小的趋势,且均在 N600 处理

达到最大值,分别是 10.53 μmol/(m² · s),0.192 mol/(m² · s),241.7 μmol/mol,2.85 mmol/(m² · s),分别是 CK 对照组的 1.93,3.49,1.35,2.24 倍,而当施氮量增加到 800 mg/株时各光合参数均有不同程度的下降,说明适量施氮可以促进美国山核桃幼苗的光合作用,而施氮过量则会对光合作用起到抑制作用。方差分析结果表明:不同指数施肥处理间美国山核桃幼苗光合参数均达显著差异(*p*<0.05)。多重比较结果表明:净光合速率除 N400 和 N600 处理差异不显著外,其他处理均差异显著,各施肥处理均显著高于 CK 对照组;N600 处理的气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率都显著高于其他处理,各施肥处理均显著高于 CK 对照组。说明各指数施肥处理均对美国山核桃幼苗的光合参数有明显的促进作用,其中以 N600 处理效果最佳。

表 3 指数施肥对美国山核桃幼苗光合参数的影响

处理	净光合速率(Pn)/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	气孔导度(Gs)/ (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	细胞间 CO ₂ 浓度(Ci)/ (μmol · mol ⁻¹)	蒸腾速率(Tr)/ (mmol · m ⁻² · s ⁻¹)
CK	5.46±0.26e	0.055±0.003d	179.6±4.97d	1.27±0.06d
N100	8.43±0.26d	0.131±0.006c	217.7±6.03c	2.11±0.12c
N200	9.49±0.34b	0.143±0.011bc	226.7±2.61bc	2.37±0.06bc
N400	10.19±0.28a	0.157±0.005b	232.0±4.97b	2.49±0.11b
N600	10.53±0.16a	0.192±0.006a	241.7±5.28a	2.85±0.15a
N800	9.25±0.14c	0.142±0.005bc	216.0±3.62c	2.51±0.10b

2.4 指数施肥对幼苗叶绿素荧光参数的影响

如表 4 所示,当施氮量≤600mg/株时美国山核桃幼苗叶片 PSⅡ 的最大量子产额(Fv/Fm)、实际最大量子产额(Yield)、光化学淬灭系数(Qp)和表观光合量子传递速率(ETR)均随着施氮量的增加而增加,分别在施氮量 600mg/株时达到最大值 0.795,0.356,0.379 和 23,较对照组 CK 分别提高了 7.3%,92.4%,9.2%,64.3%。当施氮量增加到 800mg/株时叶绿素荧光参数均有不同程度的下降,说明适量施氮可以促进美国山核桃幼苗叶片对光能的吸收与转化,而施氮过量则会抑制电子的传递能力。方差分析表明不同施氮处理间美国山核桃幼苗叶片 Fv/Fm, Yield, Qp, ETR 均差异显著(*p*<0.05)。

表 4 指数施肥对对美国山核桃幼苗叶绿素荧光参数的影响

处理	最大量子 产额 Fv/Fm	实际最大量子 产额 Yield	光化学淬灭 系数 Qp	表观光合量子 传递速率 ETR
CK	0.741±0.01b	0.185±0.01c	0.347±0.00c	14±0.9c
N100	0.757±0.01b	0.264±0.01b	0.361±0.01b	19±1.3b
N200	0.763±0.01b	0.286±0.02b	0.362±0.01b	20±0.9b
N400	0.776±0.01ab	0.305±0.01b	0.369±0.01ab	21±0.7ab
N600	0.795±0.01a	0.356±0.02a	0.379±0.01a	23±1.1a
N800	0.773±0.01ab	0.333±0.01a	0.367±0.01ab	21±1.0ab

3 讨论与结论

施肥对幼苗苗高、地径的生长与生理代谢和生物量积累均有促进作用,是提高苗木质量的关键技术之一^[20]。指数施肥因其对苗木生长发育的促进较传统施肥有明显的优势,逐渐成为国外许多苗木生产者的首选技术。本研究中,当施氮量≤600 mg/株时美国山核桃幼苗的苗高、地径和生物量随着施氮量的增加而增加,说明适量施氮可以有效促进美国山核桃幼苗的生长;当供氮量达到 800 mg/株时,苗高、地径和生物量较 600 mg/株时均有所降低,说明施氮过量对美国山核桃幼苗的生长产生了抑制。这与刘欢等^[21]对杉木无性系的指数施肥研究结论相似。

光合作用是植物生长和产量形成的物质基础。我国目前已经将指数施肥应用到多个树种,但对于指数施肥对幼苗光合特性的影响研究仍然较少。贾瑞丰等^[22]研究表明:红厚壳叶绿素 a, b 与总量随施氮量的增加而增加;净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率随施氮量的增加而先增加后减小,均在 200 mg/株达到最大值;不同氮素处理间红厚壳光合气体交换参数差异均显著。王冉等^[23]研究表明:

当施氮量为 3 000 mg/株时,马来沉香和土沉香的光合能力最强;当施氮量>3 000 mg/株时,光合能力和各项响应指标均不再增加。植物叶片叶绿素含量的高低和叶片光合能力成显著相关^[24]。本研究中,美国山核桃叶片叶绿素 a、叶绿素 b 与叶绿素总量均随施氮量的增加而增加;净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度和气孔导度均随施氮量的增加呈现“先升后降”的趋势,均在 N600(600 mg/株)处理达到最大值。说明氮素指数施肥对美国山核桃幼苗的光合作用具有明显的促进作用。当施氮量增加到 800 mg/株时各光合参数均有不同程度的下降。适量施氮可以使叶片合成较多的叶绿素,提高 RuBP 羧化酶的活性,进而提高美国山核桃幼苗的光合能力;而施氮过量则会引起氮代谢消耗过剩,致使 RuBP 羧化酶活性降低,最终导致美国山核桃幼苗光合能力减弱,呼吸作用增强^[25]。

光合作用是苗木生物量累积的基础,而叶绿素荧光参数是光合作用的探针^[26],其中 Fv/Fm 常用于度量 PSⅡ 的潜在活性;光化学淬灭系数 Qp 是 PSⅡ 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,反映 PSⅡ 反应中心的开放程度;ETR 是 PSⅡ 电子传递速率,表征光合机构吸收光能发生电荷分离产生电子并沿电子传递链向下传递的能力;Yield 是光化学的有效量子产量^[27]。本研究中不同浓度指数施肥处理美国山核桃幼苗叶片的 Fv/Fm, Qp, ETR 和 Yield 显著高于 CK 对照组,随施氮量增加而呈现先增后减的趋势,说明适量施氮提升了美国山核桃幼苗叶片的光合性能,提高了 PSⅡ 活性和 PSⅡ 光化学最大效率以及 PSⅡ 反应中心的开放程度,提高了表观光合作用电子传递速率和 PSⅡ 总的光化学量子产量,使叶片所吸收的光能更充分地用于光合作用^[28],但施氮过量抑制了电子传递的能力。光合能力的增强使得植株固定更多的碳水化合物,这也解释了当施氮量为 600 mg/株时美国山核桃幼苗生物量积累最大的内在原因。指数施肥有利于光合产物的形成,施肥量应控制在 600 mg/株左右。

综上所述,本研究中苗高、地径和生物量等生长指标,净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度和气孔导度等光合指标和 Fv/Fm, Qp, ETR 和 Yield 等叶绿素荧光参数均随施氮量的增加呈现“先升后降”的趋势,且均在 N600 处理取得最大值,呈现出相对一致性,说明施氮量为 600 mg/株左右为美国山核桃温室培育条件下的最佳施氮量。本文仅从光合生理指标上评价了不同指数施肥量对美国山核桃苗期生长的影响,今后还需进一步从养分承载等方面进行综合分析评价。

参考文献:

- [1] 赵靖明. 水土保持经济树种薄壳山核桃的耐盐性及耐水性评价研究[D]. 重庆:西南大学,2013.
- [2] 曹凡,谭鹏鹏,彭方仁. 美国山核桃无性繁殖技术研究进展[J]. 世界林业研究,2017,30(1):76-80.
- [3] 习学良,范志远,邹伟烈,等. 10 个美国山核桃品种的引种研究初报[J]. 浙江林学院学报,2006,23(4):382-387.
- [4] 傅松玲,吴照柏. 美国山核桃嫁接与栽培技术研究[J]. 经济林研究,2001,19(4):11-13.
- [5] 李晖,张瑞,彭方仁,等. 美国山核桃种质资源遗传多样性 ISSR 分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(4):7-12.
- [6] 唐洁,汤玉喜,苏晓华,等. 美洲黑杨无性系苗期光合生理特性研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(9):12-16.
- [7] Nicodemus M A, Salifu F K, Jacobs D F. Growth, nutrition and photosynthetic response of black walnut to varying nitrogen sources and rates[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008,31(11):1917-1936.
- [8] 付春霞,张元珍,王衍安,等. 缺锌胁迫对苹果叶片光合速率及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(18):3826-3833.
- [9] 尤鑫,龚吉蕊. 叶绿素荧光动力学参数的意义及实例辨析[J]. 西部林业科学,2012,41(5):90-94.
- [10] 郑顺林,杨世民,李世林,等. 氮肥水平对马铃薯光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版,2013,35(1):1-9.
- [11] 李旭新,刘炳响,郭智涛,等. NaCl 胁迫下黄连木叶片光合特性及快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的变化[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2479-2484.
- [12] 卢广超,许建新,薛立,等. 低温胁迫对 4 种幼苗的叶绿素荧光特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(2):44-49.
- [13] 黄菁,吕芳德,和晓. 美国山核桃光合作用初探[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(3):174-177.
- [14] 高云,傅松玲. 两个美国山核桃品种的光合生理特性比较[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(4):34-38.
- [15] 何海洋,彭方仁,张瑞,等. 不同品种美国山核桃嫁接苗光合特性比较[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(4):19-25.
- [16] 凌骅,黄坚钦,温国胜,等. 5 种美国山核桃苗叶片光合生理特性比较[J]. 林业科学,2014,50(8):174-178.
- [17] 李小飞,曹凡,彭方仁,等. 砧木年龄对美国山核桃嫁接苗光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(3):75-80.
- [18] 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.

- 境,2012,26(12):172-176.
- [19] 谢国勋,王增吉,王占军,等.宁夏干旱风沙区不同种植密度柠条林对土壤水分及植被生物量影响研究[J].宁夏农林科技,2014,55(11):12-14.
- [20] 张文文,郭忠升,宁婷,等.黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响[J].生态学报,2015,35(3):725-732.
- [21] 贾海坤,刘颖慧,徐霞,等.皇甫川流域柠条林地水分动态模拟:坡度,坡向,植被密度与土壤水分的关系[J].植物生态学报,2005,29(6):910-917.
- [22] 常兆丰,韩福贵,仲生年,等.民勤沙区人工梭梭林自然稀疏过程研究[J].西北植物学报,2008,28(1):147-154.
- [23] 朱雅娟,贾志清,刘丽颖,等.民勤绿洲外围不同林龄人工梭梭林的土壤水分特征[J].中国沙漠,2011,31(2):442-446.
- [24] 王兵,崔向慧,白秀兰,等.荒漠化地区土壤水分时空格局及其动态规律研究[J].林业科学研究,2002,15(2):143-149.
- [25] 常兆丰,汪杰,王耀琳,等.降水在沙丘中的运动特征研究:以甘肃民勤沙区为例[J].中国沙漠,2005,25(3):422-426.
- [26] 戴岳,郑新军,唐立松,等.古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J].植物生态学报,2014,38(11):1214-1225.
- [27] 刘发民,张应华,仵彦卿,等.黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2002,19(1):27-31.
- [28] 朱海,胡顺军,陈永宝.古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J].土壤学报,2016,53(1):117-126.
- [29] 何志斌,赵文智.荒漠绿洲区人工梭梭林土壤水分空间异质性的定量研究[J].冰川冻土,2004,26(2):207-211.
- [30] 格日乐,高润红.库布齐沙漠人工梭梭林地土壤储水量动态变化及其水分平衡分析[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2010,31(3):125-129.
- [31] 马全林,王继和,朱淑娟.降水、土壤水分和结皮对人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林的影响[J].生态学报,2007,27(12):5057-5067.
- [32] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等.黑土区土壤剖面水分动态变化研究[J].水土保持通报,2009,29(3):130-132.
- [33] 常学向,赵文智,张智慧.荒漠区固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)耗水特征[J].生态学报,2007,27(5):1826-1837.
- [34] 常兆丰,韩福贵,仲生年,等.民勤沙区人工梭梭林自然稀疏过程研究[J].西北植物学报,2008,28(1):147-154.
- [35] 格日乐,张力,刘军,等.库布齐沙漠人工梭梭林地土壤水分动态规律的研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(6):173-177.
- [36] 郭忠升,邵明安.土壤水分植被承载力数学模型的初步研究[J].水利学报,2004,35(10):95-99.
- [37] 李爱德,赵明,王耀琳,等.民勤地区不同林龄梭梭林地水分平衡研究[C]//王继和.甘肃治沙理论与实践.兰州:兰州大学出版社,1999.

~~~~~

(上接第191页)

- [19] 李合生.植物生理生化试验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 贾瑞丰,尹光天,杨锦昌,等.不同氮素水平对红厚壳幼苗生长及光合特性的影响[J].林业科学研究,2012,25(1):23-29.
- [23] 王冉,何茜,李吉跃,等. N 素指数施肥对沉香苗期光合生理特性的影响[J].北京林业大学学报,2011,33(6):58-64.
- [24] 王力朋,晏紫伊,李吉跃,等.氮素指数施肥对3个楸树无性系光合特性的影响[J].林业科学研究,2013,26(1):46-51.
- [25] 金继运,何萍.氮钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响[J].中国农业科学,1999,32(4):57-64.
- [26] 温国胜,田海涛,张明如,等.叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用[J].应用生态学报,2006,17(10):1973-1977.
- [27] 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.
- [28] 张旺锋,勾玲,王振林,等.氮肥对新疆高产棉花叶片叶绿素荧光动力学参数的影响[J].中国农业科学,2003,36(8):893-898.