

元宝枫幼苗生长及光合特性对水肥耦合的响应

李潘亭, 杜满义, 王 玥, 裴顺祥, 辛学兵*

(中国林业科学研究院华北林业实验中心, 北京 102300)

摘要:【目的】探究元宝枫(*Acer truncatum*)幼苗生长及光合生理特性对水肥耦合的响应,分析比较元宝枫幼苗生长最佳水肥组合。【方法】以 1 年生元宝枫幼苗为研究对象,采用土壤含水率及氮、磷、钾施肥量 4 因素 4 水平正交试验设计,共计 16 个处理,水肥耦合试验后测定元宝枫幼苗生长指标、叶片相对叶绿素含量 SPAD 值、光合特性及光响应曲线。【结果】随施肥量的增加,各指标大致呈现先上升后下降的趋势。当土壤含水率为 75%,施 N、P、K 量为 1.2、1.8、0 g/株时,元宝枫幼苗地径、总生物量显著高于其他处理。合理的水肥耦合可以显著提高元宝枫幼苗苗高、地径及总生物量。此外,各水肥耦合处理对弱光的利用能力差异不大,氮肥对元宝枫幼苗的最大净光合速率和光饱和点影响显著。各处理间水分利用效率(WUE)无显著性差异,表明元宝枫幼苗在较低土壤含水率下也能正常生长,抗旱能力强。水肥对元宝枫幼苗生长影响由高到低排序为氮肥>土壤含水率>钾肥>磷肥,基于综合评分法可知最佳的水肥组合为 T14,即土壤含水率 75%、氮肥 1.2 g/株、磷肥 1.8 g/株和钾肥 0 g/株。【结论】水肥耦合效应对地径和生物量影响显著,对苗高影响不显著,土壤含水率、氮肥对各生长指标影响显著,研究结果可为元宝枫水肥合理利用提供理论依据。

关键词:元宝枫;水肥耦合;光合特性;生长指标

中图分类号:S723

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2024)05-0113-10



The growth and photosynthetic characteristics of *Acer truncatum* seedlings in response to soil water and fertilizer coupling

LI Panting, DU Manyi, WANG Yue, PEI Shunxiang, XIN Xuebing*

(Experimental Centre of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China)

Abstract: 【Objective】 This research aims to investigate the growth and photosynthetic physiological characteristics of *Acer truncatum* seedlings in response to water-fertilizer coupling, and to analyze the optimal water-fertilizer combination for the growth of *A. truncatum* seedlings. 【Method】 One-year-old *A. truncatum* seedlings were subjected to varying water and fertilizer couplings in an orthogonal test design involving four factors and four levels of soil water content, nitrogen, phosphorus and potassium, resulting in 16 treatments. Growth indexes, relative chlorophyll content of the leaves SPAD values, photosynthetic characteristics, and light response curves were measured after the treatments. 【Result】 The growth indices generally increased firstly and then decreased with increasing fertilization amount. At a soil water content of 75%, 1.2, 1.8 and 0 g/plant of N, P, K, respectively, the diameter and total biomass of the plant were significantly higher than those of other treatments. Suitable soil water and fertilizer coupling could significantly improve the height, ground diameter, and total biomass of *A. truncatum* seedlings. Moreover, there was no significant difference in the utilization ability of low light among different soil water and fertilizer coupling treatments, and nitrogen fertilizer had significant effects on the maximum net photosynthetic rate and light saturation point of *A. truncatum* seedlings. In addition, there was no significant difference in water use efficiency (WUE) between the different treatments for *A. truncatum* seedlings. The seedlings grew normally even under lower water conditions, such as 45% soil water content, and exhibited strong drought resistance. The effects of soil water and fertilizer on the growth of *A. truncatum* seedlings were

收稿日期 Received: 2023-02-07

修回日期 Accepted: 2023-04-06

基金项目: 中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(CAFYBB2020ZB005)。

第一作者: 李潘亭(pantin09@163.com)。*通信作者: 辛学兵(xinxb01@163.com), 研究员。

引文格式: 李潘亭, 杜满义, 王玥, 等. 元宝枫幼苗生长及光合特性对水肥耦合的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(5): 113-122. LI P T, DU M Y, WANG Y, et al. The growth and photosynthetic characteristics of *Acer truncatum* seedlings in response to soil water and fertilizer coupling[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(5): 113-122. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202302008.

ranked from high to low as nitrogen fertilizer > soil water content > potash fertilizer > phosphate fertilizer, based on a comprehensive scoring method. The optimal combination of water and fertilizer was 75% soil water content, with fertilizer comprising 1.2 g of nitrogen, 1.8 g of phosphorous, and 0 g of potassium per plant. 【Conclusion】 Water-fertilizer coupling had a significant effect on ground diameter and biomass of *A. truncatum* seedlings, but an insignificant effect on seedling height, while soil water content and nitrogen fertilizer also had a significant effect on the growth indexes of the seedlings. These findings provide a theoretical basis for the appropriate use of soil water and fertilizer in *A. truncatum*.

Keywords: *Acer truncatum*; water and fertilizer coupling; photosynthetic characteristics; growth index

土壤水分和养分是影响植物生长的两大主导因子,水肥管理是农林生产中的核心问题^[1-2]。据统计,农林业用水在全球用水中占比超过 70%,然而,当前气候极端造成降雨变化区域的差异,导致用水问题的供需矛盾愈加突出^[3-4]。在施肥方面,自 2015 年农业农村部提出化肥零增长行动,我国化肥利用率明显提升,肥料用量持续下降^[5]。如何高效用水、科学精准施肥以及提高水肥利用率已然成为广大农林工作者的研究热点^[6-9]。

元宝枫 (*Acer truncatum*) 为无患子科 (Sapindaceae) 槭树属 (*Acer*) 落叶乔木树种,是我国特有的木本油料树种。截至 2018 年,我国元宝枫种植面积已突破了 9×10^6 hm^2 , 每年采收种子 300 t 左右^[10]。元宝枫籽油是优质食用油,所含神经酸在抗肿瘤、消炎灭菌、防治神经系统重大疾病等医药方面具有深度开发价值^[11-12]。近年来,随着我国对油脂的需求与产量间的不充分不平衡发展的矛盾加剧,木本油料树种受到广泛关注,元宝枫有望成为缓解我国耕地与能源短缺问题的最具开发潜力的生物能源树种之一^[13]。目前,对于干旱胁迫下元宝枫的抗旱性及光合生理研究较多,在施肥条件下元宝枫生长、分枝格局与叶片养分积累等方面也有一些研究^[14-17]。黄菊莹等^[18]对元宝枫进行了不同水分与 N 肥处理,结果表明,干旱胁迫下 N 肥可减少苗木木质部栓塞程度,可能是因为 N 肥在干旱胁迫下增强了植物抗旱性^[19]。而有关水肥耦合对元宝枫幼苗生长和光合生理方面的影响鲜见报道,因此本研究以提高元宝枫的抗性、光合能力及苗木质量为目标,通过盆栽试验探究 1 年生元宝枫幼苗生长及光合特性对水肥耦合的响应,运用综合评分法寻找元宝枫幼苗质量最佳的水肥组合,以期元宝枫壮苗培育、节约水肥资源和实现可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 5—10 月进行,采用可移动式防雨棚遮雨,试验区为中国林业科学研究院华北林

业实验中心 (116°04'E, 39°57'N)。海拔 100 ~ 997 m,属于暖温带大陆半湿润季风气候,年均气温 11.8 ℃,无霜期 216 d,年均降水量 623 mm,年均蒸发量 1 870 mm。盆栽试验培育基质为珍珠岩、黄土(体积比为 2:8),基质容重为 1.13 g/cm³,田间持水量 35.2%(体积分数),每盆土壤风干土质量均为 1 150 g(相当于 1 100 g 烘干土)。

1.2 试验设计及试验材料

元宝枫种子采自内蒙古松树山自治区级自然保护区 (119°14'~119°32'E, 42°50'~43°15'N),该地存在近百年树龄的元宝枫天然林。2021 年 4 月于室内进行种子萌发试验,随后挑选已发芽元宝枫种子播种到温室花盆(底径 10.5 cm,上口径 14 cm,高 12 cm)中,正常水管理,定期除草及病虫害防治(喷洒质量分数为 50%的多菌灵可湿性粉剂)。2022 年 5 月将试验苗移至可移动式简易防雨棚内,缓苗 1 个月后正式开始试验。氮肥选用尿素(N 的质量分数为 46.4%),磷肥选用过磷酸钙(P 的质量分数为 12%),钾肥选用硫酸钾(K 的质量分数为 50%)。

试验因素及正交试验设计见表 1。

表 1 试验因素及正交设计

Table 1 Experimental factors and orthogonal design				
处理号 treatment No.	土壤含水率/% soil water content	施肥量/(g·株 ⁻¹) fertilizer amount		
		N	P	K
T1	45	0.0	0.0	0.0
T2	45	1.2	0.9	0.6
T3	45	2.4	1.8	1.2
T4	45	3.6	2.7	1.8
T5	55	0.0	0.9	1.2
T6	55	1.2	0.0	1.8
T7	55	2.4	2.7	0.0
T8	55	3.6	1.8	0.6
T9	65	0.0	1.8	1.8
T10	65	1.2	2.7	1.2
T11	65	2.4	0.0	0.6
T12	65	3.6	0.9	0.0
T13	75	0.0	2.7	0.6
T14	75	1.2	1.8	0.0
T15	75	2.4	0.9	1.8
T16	75	3.6	0.0	1.2

设氮肥(0、1.2、2.4、3.6 g/株)、磷肥(0、0.9、1.8、2.7 g/株)、钾肥(0、0.6、1.2、1.8 g/株)和土壤含水率为45%、55%、65%、75%,4因素及4水平进行正交试验(表1)。共计16个处理,每处理20株,重复4次,共计1280株。以氮肥的1/3、全部磷肥和全部钾肥做基肥于6月一次性施入,7月将剩余氮肥分批随水施入。土壤水分含量控制在占田间持水量的比例 $\pm 5\%$ 范围内,每隔1~2 d于16:00对盆土进行称质量,对水分含量不足试验设计的处理进行补水,同时使用TZS-2X-G土壤水分记录仪(浙江托普云农科技股份有限公司)进行校正。试验期间定期除草、防治病虫害(喷洒质量分数为50%的多菌灵可湿性粉剂)。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长指标及相对叶绿素含量的测定

对所有处理元宝枫幼苗进行苗高、地径调查,处理前平均苗高和地径分别为 (25.57 ± 0.65) cm、 (2.34 ± 0.25) mm。根据苗高、地径测定结果,从每个处理中选取接近其平均值的16株元宝枫幼苗进行标记(每个重复4株)。苗高和地径分别用钢尺(0.01 cm)和游标卡尺(0.01 mm)进行测定。9月底进行苗高、地径的测量,随后各处理选取16株带回实验室洗净擦干,电子天平称取根、茎、叶的鲜质量,后105℃杀青15 min,于75℃烘干至质量恒定,称取各部分的生物量。

相对叶绿素含量SPAD值采用SPAD-502叶绿素测定仪(日本Konica公司)进行测定,各处理随机选择20株元宝枫幼苗(每个重复5株),测量自顶芽向下第4~6片健康的完全功能小叶,每叶片测量10次,取算术平均值。

1.3.2 光合指标及光合-光响应曲线的测定

以标记的幼苗作为光合指标测定对象,于8月晴朗天气8:00—11:00用Li-6400便携式光合仪(LI-COR, USA)的透明叶室进行测定,流速设定为500 $\mu\text{mol/s}$,测量自顶芽向下第4~6片健康的完全功能小叶,标记测量叶片。每处理测定4株长势基本一致的幼苗,3次重复。可以得出净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)。利用 P_n/T_r 比值求得水分利用效率(WUE)。

以光合指标的标记叶片作为光合-光响应曲线测定对象,于8月晴朗天气上午8:00—11:00用Li-6400便携式光合仪(LI-COR, USA)的LED红蓝光源叶室进行测定,光合有效辐射(PAR)梯度分别设定为2000、1800、1500、1200、1000、800、

500、200、100、50、0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,流速为500 $\mu\text{mol/s}$,恒定的 CO_2 浓度由小钢瓶提供,浓度设定为400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。根据叶子飘^[20]的直角双曲线修正模型进行拟合计算,可以得出,表观量子效率(AQY)、最大净光合速率($P_{n,\max}$)、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)和暗呼吸速率(R_d)。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2010软件对数据进行计算,Origin 2018进行绘图,用SPSS Statistics 26.0在 $\alpha=0.05$ 水平对试验结果进行方差分析和Duncan多重比较。

以根冠比、高径比、总生物量、SPAD值、 P_n 、WUE、 $P_{n,\max}$ 和LSP为指标,运用综合评分法寻找最优试验处理组合。

2 结果与分析

2.1 水肥耦合对元宝枫幼苗生长的影响

经4因素方差分析(表2)可知,土壤含水率(W)、氮肥(N)、磷肥(P)及钾肥(K)的交互作用对1年生元宝枫幼苗苗高和地上干质量的影响均不显著($P>0.05$),对地径、根系干质量和总生物量的影响显著($P<0.05$)。氮肥对苗高、地径、地上和根系干质量及总生物量均有显著影响($P<0.05$),其中对地径、地上和根系干质量及总生物量有极显著影响($P<0.001$);土壤含水率和钾肥对地径、根系干质量和总生物量均具有显著影响($P<0.05$)。45%田间持水量水平下,随着施肥量的增加,地径、地上干质量、根系干质量及总生物量均呈先上升后下降的趋势。地径和总生物量最大的处理均为T14,最小为T4。与T1相比,T14处理地径、地上干质量、根系干质量和总生物量均值分别显著增加11.90%、52.27%、49.70%和50.75%;而T4处理的分别减少3.06%、24.24%、20.12%和21.11%。通过以上数据分析表明,适宜的水肥配比能增加1年生元宝枫幼苗的地径与生物量的积累,而过量施肥会抑制其生长。

对1年生元宝枫各处理生长数据进行极差分析可知(表2),影响地径的4因素主次顺序为 $W>N>P>K$;影响根系干质量和总生物量的4因素主次顺序均为 $W>N>K>P$,最优组合为T14,即土壤含水率75%、施N、P、K量分别为1.2、1.8、0 g/株。影响苗高的4因素主次顺序为 $N>W>P>K$,根据表2中方差分析结果可知各处理间对苗高影响不显著($P>0.05$),因此考虑节本增效最佳组合确定为T14,与总生物量保持一致。

表 2 水肥耦合对元宝枫幼苗生长的影响

Table 2 Coupling effect of soil water and fertilizer on growth of *Acer truncatum* at seeding stage

处理号 treatment No.	苗高/cm seedling height	地径/mm ground diameter	地上干质量/g dry weight of shoots	根系干质量/g dry weight of roots	总生物量/g total biomass
T1	28.26±0.49 a	2.94±0.08 bc	1.32±0.39 bc	3.38±0.26 bc	4.69±0.61 abc
T2	28.78±0.38 a	3.01±0.04 b	1.54±0.03 abc	3.43±0.37 bc	4.96±0.37 bc
T3	28.66±0.73 a	3.01±0.04 b	1.18±0.13 bc	3.40±0.57 bc	4.58±0.64 abc
T4	27.43±0.16 a	2.85±0.03 c	1.00±0.15 c	2.70±0.22 c	3.70±0.35 d
T5	28.70±0.91 a	2.98±0.10 bc	1.90±0.32 a	3.61±0.59 b	5.51±0.70 b
T6	28.68±1.17 a	2.92±0.08 bc	1.26±0.45 bc	3.07±0.20 bc	4.33±0.63 cd
T7	28.20±0.48 a	2.90±0.03 bc	1.26±0.43 bc	2.96±0.80 bc	4.22±1.17 cd
T8	27.68±1.18 a	2.87±0.01 c	1.19±0.22 bc	2.71±0.37 c	3.90±0.59 cd
T9	28.41±0.77 a	2.92±0.08 bc	1.70±0.18 ab	3.01±0.55 bc	4.71±0.67 abc
T10	28.48±1.07 a	2.87±0.07 c	1.36±0.54 bc	3.03±0.24 bc	4.38±0.46 cd
T11	28.29±0.88 a	2.95±0.12 bc	1.38±0.18 bc	2.95±0.24 bc	4.33±0.36 cd
T12	28.07±1.42 a	2.87±0.07 c	1.21±0.06 bc	3.09±0.53 bc	4.30±0.57 cd
T13	28.49±1.38 a	2.95±0.09 bc	1.92±0.30 a	4.75±0.41 a	6.67±0.63 a
T14	28.74±1.27 a	3.29±0.11 a	2.01±0.64 a	5.06±0.17 a	7.07±0.81 a
T15	27.72±0.72 a	2.94±0.08 bc	1.17±0.14 bc	3.57±0.65 b	4.74±0.65 abc
T16	27.23±0.14 a	2.95±0.06 bc	1.04±0.06 c	3.33±0.66 bc	4.36±0.64 cd
W	0.32	9.80***	2.05	21.25***	14.93***
N	4.09*	9.29***	11.72***	9.00***	14.78***
P	0.30	8.15***	2.16	1.67	2.76
K	0.28	4.23*	1.55	3.67*	3.77*
W×N×P×K	0.68	6.69**	2.67	3.94*	4.42**

注:同列不同字母表示 0.05 水平下差异显著;W、N、P、K 分别代表土壤含水率、氮肥、磷肥和钾肥;*、**和*** 分别表示 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 。下同。Different letters represented significant differences at $\alpha=0.05$ level. W, N, P and K represent soil water content, nitrogen, phosphorus and potassium respectively; *, ** and *** indicate $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$ respectively. The same below.

2.2 水肥耦合对元宝枫幼苗叶绿素 SPAD 值的影响

水肥耦合对元宝枫幼苗叶绿素 SPAD 值的影响见图 1。经 4 因素方差分析(图 1)可知,土壤含水率(W)、氮肥(N)、磷肥(P)及钾肥(K)的交互

作用对 1 年生元宝枫幼苗 SPAD 值的影响均不显著($P>0.05$),土壤含水率和氮肥对元宝枫幼苗 SPAD 值均有极显著主效应($P<0.001$)。相同土壤含水率下,SPAD 值均随着施氮量的增加呈先上升后下降的趋势,忽略其他因素,可以看出 SPAD 值

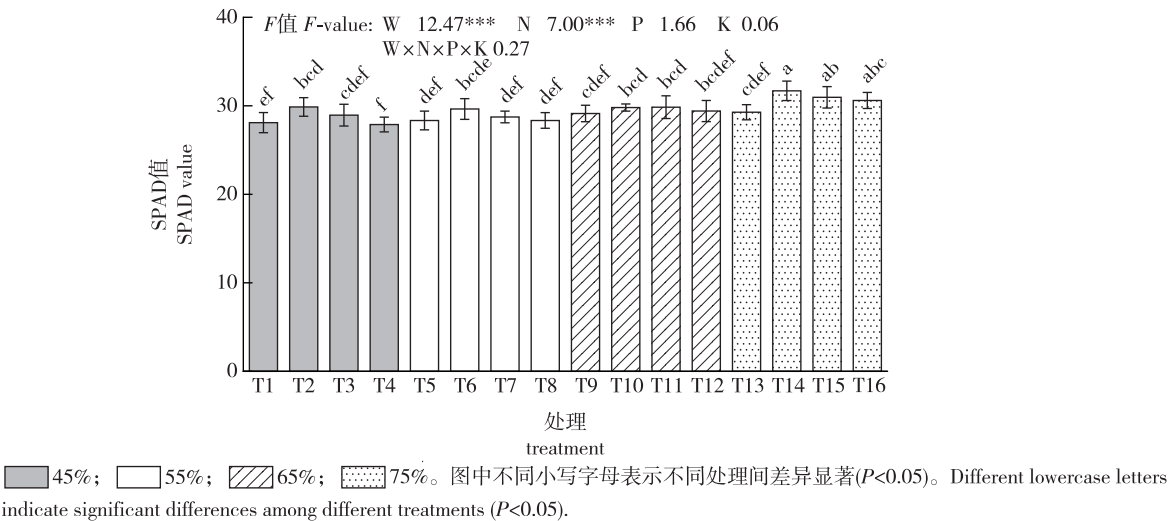


图 1 水肥耦合对元宝枫幼苗叶绿素 SPAD 值的影响

Fig. 1 Coupling effect of soil water and fertilizer on chlorophyll SPAD of *Acer truncatum* at seeding stage

随着土壤含水率的增加而增加。不同水肥处理下的 SPAD 均值为 27.85~30.59,其中最大 SPAD 值的处理为 T14,最小为 T4。与 T1 处理相比,T14 处理 SPAD 值显著增加 12.78%。由上述可得,土壤水分显著正向作用于元宝枫叶片 SPAD 值,过量施肥会抑制 1 年生元宝枫叶片叶绿素的合成。

对 1 年生元宝枫幼苗各处理的 SPAD 值进行极差分析可知,影响 SPAD 值的 4 因素主次顺序均为 W>N>P>K,最优组合为 T14。

2.3 水肥耦合对元宝枫幼苗叶片光合参数的影响

经 4 因素方差分析(表 3)可知,土壤含水率(W)、氮肥(N)、磷肥(P)及钾肥(K)的交互作用对 1 年生元宝枫幼苗净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和水分利用效率(WUE)的影响均不显著($P>0.05$),氮肥对 P_n 、 T_r 、 G_s 存在极显著影响($P<0.001$)。随施氮量的增加, P_n 呈现先上升后下降的趋势,除了 T6、T10 处理外, T_r 随施氮量的变化趋势大致与 P_n 相同。水肥耦合处理下,T2 处理的 P_n 最大,T14 和 T13 处理的次之。T14 处理 T_r 最大,T13 和 T2 次之。与

T1 相比,T2 和 T14 处理的 P_n 分别显著增加 33.54%和 28.35%。从整体上看,除 T15 处理外,土壤含水率为 45%、55%和 65%的 WUE 均高于 75%时的 WUE,这表明适度亏水能提高水分利用效率。

水肥耦合下元宝枫幼苗叶片光合参数间相关分析见表 4。由表 4 可知,水肥耦合下 1 年生元宝枫幼苗叶片的 P_n 与 T_r 、 G_s 呈极显著正相关关系($P<0.01$); T_r 与 G_s 呈极显著正相关关系($P<0.01$);WUE 与 T_r 、 G_s 及 C_i 呈显著负相关关系($P<0.05$), C_i 与 P_n 、 T_r 及 G_s 呈正相关关系,但并不显著($P>0.05$)。

对 1 年生元宝枫各处理光合数据进行极差分析可知,影响 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 的 4 因素主次顺序均为 N>W>K>P, P_n 最优组合为 T2, T_r 最优组合为 T14, G_s 最优组合为 T13;影响 WUE 的 4 因素主次顺序为 K>W>P>N,方差分析结果表明水肥 4 因素对 C_i 、WUE 影响不显著($P>0.05$),考虑节本增效最优组合确定为 T14 处理,与总生物量保持一致。

表 3 水肥耦合对元宝枫幼苗叶片光合参数的影响

Table 3 Coupling effect of soil water and fertilizer on photosynthetic parameters under leaves of *A. truncatum* at seeding stage

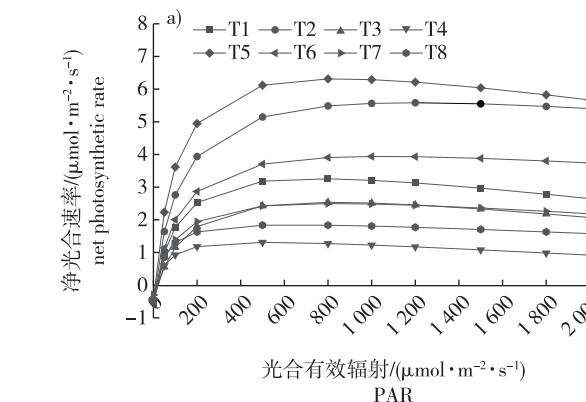
处理号 treatment No.	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) P_n	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) T_r	气孔导度/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) G_s	胞间 CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) C_i	水分利用效率/ ($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$) WUE	
T1	3.28±1.22 abc	1.44±0.70 abcd	0.04±0.01 abcd	238.01±32.63 ab	2.49±1.01 a	
T2	4.38±1.26 a	1.71±1.00 ab	0.04±0.01 abc	213.56±16.77 ab	2.95±0.92 a	
T3	1.43±1.13 bc	0.57±0.15 efg	0.02±0.01 cd	258.72±48.53 a	2.39±1.45 a	
T4	1.40±0.37 bc	0.54±0.15 fg	0.01±0.00 d	192.46±43.00 ab	2.59±0.36 a	
T5	3.31±1.97 abc	1.58±0.87 abc	0.04±0.03 ab	260.98±37.95 a	2.16±0.48 a	
T6	3.42±1.26 ab	1.39±0.38 abcdef	0.04±0.02 abcd	236.93±46.62 ab	2.46±0.73 a	
T7	2.53±1.67 abc	0.99±0.53 bcdefg	0.02±0.01 bed	245.01±47.38 ab	2.49±1.52 a	
T8	1.32±0.33 c	0.58±0.27 efg	0.01±0.01 cd	210.20±79.43 ab	2.89±2.07 a	
T9	3.67±1.22 a	1.57±0.44 abc	0.04±0.02 abc	244.07±32.70 ab	2.40±0.73 a	
T10	3.30±0.82 abc	1.41±0.64 abcde	0.03±0.01 abcd	223.88±14.89 ab	2.69±1.36 a	
T11	2.38±0.74 abc	0.76±0.40 cdefg	0.02±0.01 bed	161.51±71.96 b	3.54±1.07 a	
T12	1.35±0.79 c	0.52±0.21 g	0.01±0.00 d	174.82±91.66 ab	3.19±2.36 a	
T13	4.19±1.46 a	2.05±0.44 a	0.05±0.03 a	248.49±59.26 ab	2.12±0.83 a	
T14	4.21±1.22 a	2.18±0.63 a	0.04±0.01 ab	226.02±30.43 ab	2.02±0.66 a	
T15	3.50±1.88 a	1.08±0.35 bcdef	0.03±0.02 abcd	193.19±93.94 ab	3.30±1.36 a	
T16	1.42±0.97 bc	0.66±0.25 defg	0.01±0.00 cd	236.89±67.40 ab	2.46±1.82 a	
F 值 F-value	W	1.23	0.67	1.46	1.24	0.70
	N	13.62 ***	5.07 ***	12.01 ***	1.81	0.53
	P	0.57	0.12	0.32	0.56	0.70
	K	1.06	0.19	0.33	1.26	0.79
	W×N×P×K	0.29	0.08	0.04	0.67	0.90

表 4 水肥耦合下元宝枫幼苗叶片光合参数间相关性分析

Table 4 Correlation analysis of photosynthetic parameters under soil water and fertilizer coupling in leaves of *A. truncatum* at seeding stage

指标	P_n	T_r	G_s	C_i	WUE
P_n	1				
T_r	0.943 **	1			
G_s	0.946 **	0.965 **	1		
C_i	0.283	0.432	0.492	1	
WUE	-0.289	-0.535 *	-0.507 *	-0.853 **	1

注: * 表示在 0.01 水平下显著相关; * 表示在 0.05 水平下显著相关。 ** indicates a significant correlation at the 0.01 level; * indicates significant correlation at 0.05 level.



2.4 水肥耦合对元宝枫幼苗光合-光响应曲线的影响

不同水肥处理元宝枫幼苗净光合速率对光合有效辐射的响应见图 2。由图 2 可知,各水肥耦合处理下 1 年生元宝枫幼苗的光响应曲线 (P_n -PAR) 变化趋势相似,但光响应值存在明显差异。当光合有效辐射 (PAR) $\leq 200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,净光合速率 (P_n) 随着 PAR 线性增加,增长幅度最大的处理为 T5。当 PAR 继续增加 [$200 < PAR \leq 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],各处理间 P_n 增加变缓,增长幅度均减小;当 $PAR > 800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, P_n 值趋于平缓,后基本稳定,达到光饱和点 (LSP)。

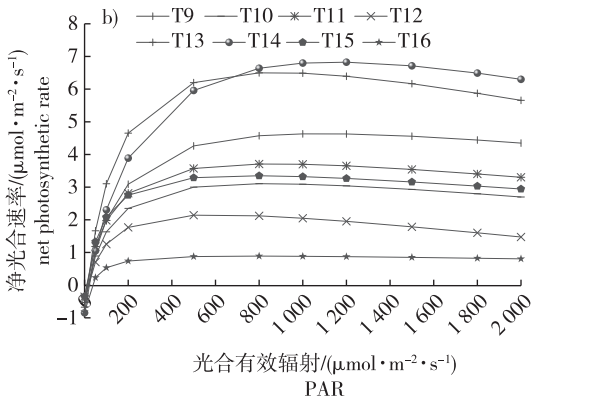


图 2 不同水肥耦合处理下的元宝枫幼苗净光合速率对光合有效辐射的响应

Fig. 2 Responses of net photosynthetic rate (P_n) to photosynthetic active radiation (PAR) of *A. truncatum* at seeding stage under different coupling effect of soil water and fertilizer

通过双曲线模型拟合得到各水肥处理下 1 年生元宝枫幼苗的特征参数值见表 5。

表 5 不同水肥耦合处理下的元宝枫幼苗叶片净光合速率对光合有效辐射响应的特征参数

Table 5 Characteristic parameters of responses of net photosynthetic rate to photosynthetic active radiation of *A. truncatum* at seeding stage under different coupling effects of soil water and fertilizer

处理号 treatment No.	表观量子效率 AQY	$P_{n,max}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) LSP	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) LCP	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) dark respiration
T1	0.05±0.02 abc	3.27±0.57 bcde	769.41±198.55 de	14.58±1.30 b	0.62±0.12 a
T2	0.07±0.02 ab	5.58±1.36 abc	1 164.69±71.57 a	9.43±5.42 b	0.56±0.36 a
T3	0.03±0.01 c	2.54±1.72 cde	845.71±69.39 bcde	24.02±20.86 ab	0.39±0.20 a
T4	0.04±0.03 bc	1.31±1.08 e	566.13±116.64 e	20.56±15.28 ab	0.48±0.54 a
T5	0.08±0.00 a	6.32±0.45 ab	841.71±33.94 bcde	6.13±1.34 b	0.46±0.08 a
T6	0.05±0.02 abc	3.97±0.97 abcde	1 096.23±287.48 abc	11.35±6.80 b	0.52±0.29 a
T7	0.04±0.02 bc	2.53±1.14 cde	861.27±292.45 bcde	11.44±5.47 b	0.31±0.12 a
T8	0.06±0.01 abc	1.86±0.74 de	683.31±198.36 de	10.94±5.22 b	0.51±0.25 a
T9	0.04±0.01 bc	4.64±2.48 abcd	1 114.50±203.82 ab	15.72±8.99 b	0.59±0.25 a
T10	0.04±0.02 bc	3.11±1.34 cde	821.61±104.72 bcde	18.00±9.86 ab	0.55±0.08 a
T11	0.04±0.03 bc	3.71±2.50 abcde	864.43±59.74 bcde	12.97±9.63 b	0.36±0.25 a
T12	0.04±0.01 bc	2.16±1.32 de	602.82±48.22 de	15.39±5.10 b	0.43±0.06 a
T13	0.06±0.03 ab	6.52±2.89 a	888.43±92.48 abcd	14.49±10.01 b	0.73±0.25 a
T14	0.05±0.01 abc	6.83±3.09 a	1 165.89±47.41 a	20.48±11.50 ab	0.88±0.42 a
T15	0.06±0.02 abc	3.36±0.61 bcde	751.90±98.55 de	7.87±4.04 b	0.38±0.17 a
T16	0.05±0.01 abc	0.89±0.47 e	816.97±155.94 cde	39.01±29.47 a	0.85±0.56 a

表 5(续)

	处理 treatment	表观量子效率	$P_{n,max}/$	光饱和点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光补偿点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
		AQY	($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	LSP	LCP	dark respiration
F 值 F-value	W	2.00	1.23	0.46	1.66	1.91
	N	2.54	12.64***	13.76***	1.32	2.07
	P	1.64	1.68	2.60	1.58	0.57
	K	1.69	1.30	0.49	1.57	0.16
	W×N×P×K	0.77	2.10	4.66***	0.55	0.12

经 4 因素方差分析可知,土壤含水率(W)、氮肥(N)、磷肥(P)及钾肥(K)的交互作用对 1 年生元宝枫幼苗表观量子效率(AQY)、最大净光合速率($P_{n,max}$)、光补偿点(LCP)和暗呼吸速率的影响均不显著($P>0.05$),对光饱和点(LSP)的影响极显著($P<0.001$)。氮肥对 $P_{n,max}$ 和 LSP 存在极显著影响($P<0.001$)。AQY 在 T5 处理下最大,约为 T1 的 1.6 倍,在 T3 处理下最小,T2、T5、T13 显著高于 T3。LCP 在 T16 处理下最大,T5 最小。 $P_{n,max}$ 和 LSP 随着施肥量的增加先增加后减少,在 T14 处理下最大,与 T1 相比,分别增加了 108.69% 和 51.53%。暗呼吸速率在各处理间无显著性差异($P>0.05$)。极差分析结果可知,影响 $P_{n,max}$ 和 LSP 的 4 因素主次顺序均为 $N>P>K>W$,影响 AQY 的 4 因素主次顺序均为 $N>W>K>P$,影响 LCP 的 4 因素主次顺序均为 $W>P>K>N$,影响暗呼吸速率的 4 因

素主次顺序均为 $N>W>P>K$ 。
2.5 水肥耦合处理下元宝枫幼苗苗木质量、光合生理的综合评价
以根冠比、高径比、总生物量、SPAD 值、 P_n 、WUE、 $P_{n,max}$ 和 LSP 为指标,运用综合评分法比较分析最佳试验处理组合(表 6)。采用客观赋权的变异系数法计算各评价指标的权重,分别为 0.156、0.029、0.192、0.036、0.400、0.165、0.507 和 0.214。
由表 6 可得,依照综合评分法将不同评价对象综合得分排名,由高到低依次为 $T14>T2>T13>T5>T15>T9>T6>T10>T1>T11>T7>T3>T16>T12>T8>T4$ 。4 因素中,土壤含水率、氮肥、磷肥和钾肥的极差值分别为 0.77、1.85、0.44 和 0.56。因此 4 因素的主次顺序为 $N>W>K>P$ 。由综合评分法分析得 T14 为最优处理组合。

表 6 综合评分法分析正交试验结果

Table 6 Analysis of orthogonal test results by comprehensive scoring method

处理号 treatment No.	根冠比 root-shoot ratio	高径比 height- diameter ratio	总生物量 total biomass	SPAD 值 SPAD value	P_n	水分利用效率 WUE	$P_{n,max}$	光饱和点 LSP	综合得分 comprehensive score
T1	0.68	0.27	0.29	0.06	0.64	0.31	0.40	0.34	0.45
T2	0.31	0.31	0.38	0.52	1.00	0.61	0.79	1.00	0.74
T3	0.77	0.33	0.26	0.28	0.04	0.24	0.28	0.47	0.29
T4	0.66	0.26	0.00	0.00	0.03	0.38	0.07	0.00	0.13
T5	0.12	0.23	0.54	0.12	0.65	0.10	0.91	0.46	0.57
T6	0.63	0.07	0.19	0.46	0.69	0.29	0.52	0.88	0.55
T7	0.44	0.17	0.15	0.22	0.40	0.31	0.28	0.49	0.33
T8	0.36	0.23	0.06	0.12	0.00	0.57	0.16	0.20	0.18
T9	0.00	0.15	0.30	0.33	0.77	0.25	0.63	0.91	0.55
T10	0.68	0.00	0.20	0.50	0.65	0.44	0.37	0.43	0.46
T11	0.26	0.29	0.19	0.51	0.35	1.00	0.48	0.50	0.44
T12	0.53	0.11	0.18	0.40	0.01	0.77	0.21	0.06	0.23
T13	0.50	0.22	0.88	0.36	0.94	0.07	0.95	0.54	0.74
T14	0.66	1.00	1.00	1.00	0.94	0.00	1.00	1.00	0.86
T15	0.91	0.42	0.31	0.81	0.71	0.84	0.42	0.31	0.55
T16	1.00	0.58	0.20	0.71	0.03	0.29	0.00	0.42	0.23

3 讨论

树木的苗高、地径和各器官生物量是评价苗木质量的重要指标,其中苗高和地径直接反映了苗木的生长状况,而各器官生物量说明了苗木对有机质的转化与积累^[21-22]。本研究结果发现,在45%土壤含水率水平下,元宝枫幼苗苗高、地上干质量、根系干质量和总生物量随着施肥量的增加先升后降,这与句娇等^[23]研究结果类似,即各指标总体呈“抛物线”的变化趋势。而王景燕等^[24]对汉源花椒(*Zanthoxylum bungeum*)的研究发现,苗高、地径和生物量与施肥量呈正相关关系,这是因为该研究设定的施肥量尚未达到最适施肥量。罗杰等^[25]的研究发现最佳施肥水平的范围内,随着施肥量增加,可促进楠木(*Phoebe zhennan*)幼苗长势,在此基础上继续增施肥料则会抑制幼苗生长,原因在于施肥过量导致植物营养过剩从而产生对植物的毒害作用^[6,26]。本研究中T4处理的生长指标显著低于T1处理也正说明了施肥过量会抑制植物生长。周樊等^[27]发现氮磷钾配比施肥对薄壳山核桃(*Carya illinoensis*)幼苗生长有促进作用,其中对苗高、地径及生物量的显著影响效应大小均为N>K>P。本研究还发现水肥耦合效应对地径和生物量的影响显著,对苗高影响不显著,土壤含水率、氮肥的主因素效应对各生长指标影响显著,且具有主要的促进作用(苗高除外)。收获生物量时发现元宝枫幼苗出现盘根现象,据此推测对苗高无显著性影响可能是育苗容器较小,产生了根域限制,抑制了地上部分的营养生长^[28]。

SPAD值与叶绿素含量具有高度相关性,且能反映叶绿素含量的相对高低,因此也是表征植物光合能力的重要指标^[21-22,29]。吴宗钊等^[30]研究发现不同灌溉处理下,增加氮肥施用量,能显著增加水稻叶片SPAD值。邱权等^[31]研究也发现随着土壤水分和施氮量的增加,楸树(*Catalpa bungei*)苗木叶片SPAD值呈现出先增加后减小的变化趋势,这均与本研究结果相同。本研究结果显示水氮显著正向作用于叶片SPAD值,但是当氮肥超过3.6 g/株会导致SPAD值的下降,原因在于增加土壤含水量可以促进植物对养分的吸收和利用,形成正向循环,当施肥超过一定量时,会打破这种循环,影响叶绿素合成,进而对植物造成不良影响。研究结果显示施磷量和施钾量对叶片SPAD值无显著影响,一方面与元宝枫苗期自身的需肥特性有关;另一方面各磷钾肥的梯度设置差异较小,具体原因

尚待进一步的研究。

Ewida等^[32]的研究表明,合理灌溉能提高芒果(*Mangifera indica*)净光合速率和蒸腾速率,增加光合产物积累量。气孔导度是反映植物适应外部环境能力的重要叶片指标,而胞间CO₂浓度可以判断光合速率变化是由气孔因素还是非气孔因素引起的重要依据^[33]。本研究发现 P_n 、 T_r 与 G_s 三者互为显著正相关关系,说明元宝枫幼苗是通过调节气孔大小来适应环境的。同时, P_n 与 C_i 间关系呈正相关但并不显著,说明元宝枫叶片光合速率的上升不只是由气孔作用,还由非气孔因素引起的。不显著原因可能是测定时各时段天气状况不同,决定叶片光合作用强弱的主要因子也各有不同,且因子间相互关系复杂,导致了测定的相互关系有可能互相抵消,最终表现为不显著^[34]。WUE是指植物利用单位质量的水分所能同化的CO₂的量,直接反映了植物对环境的适应能力^[35]。本研究发现,各处理间WUE并无显著差异,说明了元宝枫在水分较低环境下也能有较好的适应性。

光合-光响应曲线反映了植物光合速率随光合有效辐射变化的规律,最大净光合速率($P_{n,max}$)表征了植物的光合潜力^[36]。表观量子效率(AQY)是光响应曲线初始阶段的斜率,它反映了对弱光的利用能力^[37]。光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP)反映了植物对强光和弱光的利用能力的大小,研究认为高LSP、低LCP的植物对光的适应能力较强^[38-39]。本研究结果发现 $P_{n,max}$ 和LSP随着施肥量的增加先增加后减少,在T14处理下最大,且T14处理各参数值也显著高于T3,这与罗杰等^[25]在楠木(*Phoebe zhennan*)上的研究结果相似。T2、T5、T13处理AQY显著高于T1,这说明了合理灌溉和施肥可以提高元宝枫幼苗对光能的利用范围,提高光能利用率。本研究还发现氮肥对 $P_{n,max}$ 和LSP存在极显著影响,4因素中氮肥的影响作用最大,这可能是因为氮肥提高了元宝枫叶片中Rubisco酶的含量与活性,进而增强了元宝枫幼苗的光合潜力,这与前人的研究结果^[40-41]相似。

综合分析可以得出4因素的主次顺序为N>W>K>P,1年生元宝枫幼苗的最适处理组合为T14,即土壤含水率75%、氮肥1.2 g/株、磷肥1.8 g/株和钾肥0 g/株。

参考文献(reference):

- [1] ZAHOOR R, DONG H R, ABID M, et al. Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing

- photosynthesis and carbohydrate metabolism [J]. Environ Exp Bot, 2017, 137: 73–83. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2017.02.002.
- [2] 王景燕, 龚伟, 包秀兰, 等. 水肥耦合对汉源花椒幼苗叶片光合作用的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1321–1330. WANG J Y, GONG W, BAO X L, et al. Coupling effects of water and fertilizer on diurnal variation of photosynthesis of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim ‘Hanyuan’ seedling leaf [J]. Acta Ecol Sin, 2016, 36(5): 1321–1330. DOI: 10.5846/stxb201407051382.
- [3] 杨鑫, 穆月英. 经济学视角下农业水资源生产率研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(4): 144–153. YANG X, MU Y Y. Research progress on agricultural water resource productivity under the perspective of economy [J]. J China Agric Univ, 2020, 25(4): 144–153. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2020.04.15.
- [4] 宋晗. 基于 Zigbee 的土壤墒情自动监测系统 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016. SONG H. Design of soil moisture automatic monitoring system based on Zigbee [D]. Shijiazhuang: Hebei Univ Sci & Tech, 2016.
- [5] 金书秦, 张惠, 付饶, 等. 化肥零增长行动实施状况中期评估[J]. 环境保护, 2019, 47(2): 39–43. JIN S Q, ZHANG H, FU R, et al. Mid-term evaluation on the implementation of zero growth action of chemical fertilizers [J]. Environ Prot, 2019, 47(2): 39–43. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2019.02.010.
- [6] 董雯怡, 赵燕, 张志毅, 等. 水肥耦合效应对毛白杨苗木生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2194–2200. DONG W Y, ZHAO Y, ZHANG Z Y, et al. Coupling effects of water and fertilizer on the biomass of *Populus tomentosa* seedlings [J]. Chin J Appl Ecol, 2010, 21(9): 2194–2200. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2010.0346.
- [7] GUO X L, LI S S, WANG D L, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the physiological characteristics and growth of rabbiteye blueberry [J]. Plos One, 2021, 16(7): e0254013. DOI: 10.1371/journal.pone.0254013.
- [8] 刘小刚, 孙光照, 彭有亮, 等. 水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 125–133. LIU X G, SUN G Z, PENG Y L, et al. Effect of water-fertilizer coupling on photosynthetic characteristics, fruit yield, water and fertilizer use of mango [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2019, 35(16): 125–133. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.16.014.
- [9] LI Y, LIU X, FANG H, et al. Exploring the coupling mode of irrigation method and fertilization rate for improving growth and water-fertilizer use efficiency of young mango tree [J]. Sci Hortic, 2021, 286: 110211. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110211.
- [10] 鲁海龙, 张飞, 袁榕. 我国小品种油料发展现状的研究[J]. 粮食与食品工业, 2018, 25(5): 1–4. LU H L, ZHANG F, YUAN R. Development status of China’s small varieties of oil [J]. Cereal Food Ind, 2018, 25(5): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5026.2018.05.001.
- [11] 李家希, 徐学兵, 毕艳兰, 等. 超长碳链脂肪酸在专用油脂中应用的研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(7): 114–120, 137. LI J X, XU X B, BI Y L, et al. Advance in application of very long chain fatty acids in specialty oils and fats [J]. China Oils Fats, 2021, 46(7): 114–120, 137. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.2021.07.020.
- [12] 王性炎, 谢胜菊, 王高红. 中国富含神经酸的元宝枫籽油应用研究现状及前景[J]. 中国油脂, 2018, 43(12): 93–95, 104. WANG X Y, XIE S J, WANG G H. Application research status and prospect of *Acer truncatum* Bunge seed oil rich in nervonic acid in China [J]. China Oils Fats, 2018, 43(12): 93–95, 104. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7969.2018.12.021.
- [13] 廖阳, 李昌珠, 于凌一丹, 等. 我国主要木本油料油脂资源研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 151–160. LIAO Y, LI C Z, YU L Y D, et al. Research progress on woody oil resources in China [J]. J Chin Cereals Oils Assoc, 2021, 36(8): 151–160. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0174.2021.08.025.
- [14] 文建雷, 刘志龙, 王姝清. 水分胁迫条件下元宝枫的光合特征及水分利用效率[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(2): 1–3. WEN J L, LIU Z L, WANG S Q. Photosynthetic characters and water utilization efficiency in *Acer truncatum* under water stress [J]. J Northwest For Coll, 2003, 18(2): 1–3. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2003.02.001.
- [15] 孔艳菊, 孙明高, 苗海霞, 等. 干旱胁迫下元宝枫生长性状及生理特性研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 26–31. KONG Y J, SUN M G, MIAO H X, et al. Growth properties and physiological characteristics of *Acer truncatum* under drought stress [J]. J Northwest For Univ, 2006, 21(5): 26–31. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2006.05.007.
- [16] 苏建荣, 邓疆, 罗香, 等. 元宝槭幼树施肥研究 II: 对叶内黄酮、绿原酸及养分的影响[J]. 林业科学研究, 2005, 18(3): 255–259. SU J R, DENG J, LUO X, et al. Studies on fertilization of young *Acer truncatum* Bunge II: effect on flavonoid, chlorogenic acid and nutrition elements in leaves [J]. For Res, 2005, 18(3): 255–259. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1498.2005.03.006.
- [17] 苏建荣, 邓疆, 罗香, 等. 元宝槭幼树施肥研究 I: 不同施肥处理对生长与构型的影响[J]. 林业科学研究, 2005, 18(2): 147–152. SU J R, DENG J, LUO X, et al. Studies on fertilization of young *Acer truncatum* Bunge I: effect of various nutrition supply conditions on growth and morphology of *Acer truncatum* bunge [J]. For Res, 2005, 18(2): 147–152. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1498.2005.02.008.
- [18] 黄菊莹, 张硕新, 冯慧娟. 4个树种木质部栓塞与N营养关系的研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 36–39. HUANG J Y, ZHANG S X, FENG H J. Relationships between xylem embolism and nitrogen fertilization in four woody plants [J]. J Northwest For Univ, 2005, 20(3): 36–39. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2005.03.009.
- [19] 黄菊莹, 余海龙, 张硕新. 施水和钾素添加对元宝枫和女贞木质部栓塞的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1199–1207. HUANG J Y, YU H L, ZHANG S X. Effects of potassium addition and water supply on xylem embolism in *Acer truncatum* and *Ligustrum lucidum* [J]. Chin J Plant Ecol, 2009, 33(6): 1199–1207. DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.06.021.
- [20] 叶子飘. 光合作用对光和CO₂响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727–740. YE Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂ [J]. Chin J Plant Ecol, 2010, 34(6): 727–740. DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.06.012.
- [21] SANTIAGO L S, WRIGHT S J, HARMS K E, et al. Tropical tree seedling growth responses to nitrogen, phosphorus and potassium addition [J]. J Ecol, 2012, 100(2): 309–316. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01904.x.
- [22] CHEN L, WANG C S, DELL B, et al. Growth and nutrient dynamics of *Betula alnoides* seedlings under exponential fertilization [J]. J For Res, 2018, 29(1): 111–119. DOI: 10.1007/s11676-017-0427-2.
- [23] 句娇, 李迎超, 王利兵, 等. 水肥耦合效应对栓皮栎苗木生长的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(4): 673–682. GOU J, LI Y C, WANG L B, et al. Coupling effects of soil water and fertilizer

- application on the growth of *Quercus variabilis* seedlings [J]. J Zhejiang A F Univ, 2020, 37(4): 673–682. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20190456.
- [24] 王景燕,唐海龙,龚伟,等.水肥耦合对汉源花椒幼苗生长、养分吸收和肥料利用的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(3):33–40. WANG J Y, TANG H L, GONG W, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth, nutrients absorption and fertilizer use of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim ‘Hanyuan’ seedling [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2016, 40(3):33–40. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.03.006.
- [25] 罗杰,陈洪,申玲,等.不同肥料种类及其施肥水平对1年生桢楠幼苗光合生理及生长特性的影响[J].应用与环境生物学报,2017,23(5):826–836. LUO J, CHEN H, SHEN L, et al. Effect of different fertilizers and N levels on the photosynthetic physiology and growth of one-year-old *Phoebe zhennan* S. Lee seedlings [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2017, 23(5):826–836. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2016.10007.
- [26] 季艳红,汤文华,窦全琴,等.施肥对薄壳山核桃容器苗生长及养分积累的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(6):47–56. JI Y H, TANG W H, DOU Q Q, et al. Effects of fertilizer application on seedling growth and nutrient accumulation in *Carya illinoensis* container seedlings [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(6):47–56. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202009051.
- [27] 周樊,陈文静,曹凡,等.配比施肥对薄壳山核桃幼苗生长和生理特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2020,40(9):96–103. ZHOU F, CHEN W J, CAO F, et al. Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of pecan seedlings [J]. J Cent South Univ For Technol, 2020, 40(9):96–103. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.09.011.
- [28] 玉米提·玉素甫,程云霞,吴慧.不同规格栽培盆对观赏辣椒生长、产量及品质的影响[J].新疆农业大学学报,2021,44(3):204–212. YUMITI Y S F, CHENG Y X, WU H. Effects of different specifications of cultivation pots on the growth, yield and quality of ornamental pepper [J]. J Xinjiang Agric Univ, 2021, 44(3):204–212. DOI: 10.3969/j.issn.1007-8614.2021.03.007.
- [29] 王佳慧,唐雪东,王明月,等.贮藏营养对越橘翌年生长及氮素吸收利用的影响[J].东北农业大学学报,2022,53(11):29–36. WANG J H, TANG X D, WANG M Y, et al. Effects of storage nutrition on next year growth and nitrogen absorption and utilization in blueberry [J]. J Northeast Agric Univ, 2022, 53(11):29–36. DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2022.11.004.
- [30] 吴宗钊,原保忠.水肥耦合对水稻生长、产量及氮素利用效率的影响[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):199–207,215. WU Z Z, YUAN B Z. Effect of water and fertilizer coupling on growth, yield and nitrogen use efficiency of rice [J]. J Water Resour Water Eng, 2020, 31(4):199–207,215. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.29.
- [31] 邱权,李吉跃,王军辉,等.水肥耦合效应对楸树苗期叶片净光合速率和SPAD值的影响[J].生态学报,2016,36(11):3459–3468. QIU Q, LI J Y, WANG J H, et al. Interactive effects of soil water and fertilizer application on leaf net photosynthetic rate and SPAD readings of *Catalpa bungei* seedlings [J]. Acta Ecol Sin, 2016, 36(11):3459–3468. DOI: 10.5846/stxb201504100733.
- [32] EWIDA S E, ELKASHIF M, ELAMIN O. Effects of irrigation, type of fertilizer and nitrogen rate on yield components and total yield of mango (*Mangifera indica* L.) in Abu Karshoula, South Kordofan State, Sudan [J]. Gezira J of Agric Sci, 2013, 11(1):78–89.
- [33] 梁文超,步行,罗思谦,等.施肥对增温促花后‘长寿冠’海棠叶片生长及光合特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(5):114–120. LIANG W C, BU X, LUO S Q, et al. Effects of fertilization on the leaf growth and photosynthetic characteristics of *Chaenomeles speciose* ‘Changshouguan’ after processing of warming in the post floral stage [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2023, 47(5):114–120. DOI: 10.1202/j.issn.1000-2003.202202016.
- [34] 胡厚臻,侯文娟,潘启龙,等.配方施肥对刨花润楠幼苗生长和光合生理的影响[J].西北林学院学报,2015,30(6):39–45. HU H Z, HOU W J, PAN Q L, et al. Effects of formulated fertilization on the growth and photosynthetic physiological properties of *Machilus pauhoi* seedlings [J]. J Northwest For Univ, 2015, 30(6):39–45. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2015.06.07.
- [35] 孙哲,史春余,刘桂玲,等.干旱胁迫与正常供水钾肥影响甘薯光合特性及块根产量的差异[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):1071–1078. SUN Z, SHI C Y, LIU G L, et al. Effect difference of potassium fertilizer on leaf photosynthetic characteristics and storage root yield of sweet potato under drought stress and normal water condition [J]. J Plant Nutr Fertil, 2016, 22(4):1071–1078. DOI: 10.11674/zwf.15307.
- [36] FARQUHAR G D, VON CAEMMERER S, BERRY J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species [J]. Planta, 1980, 149(1):78–90. DOI: 10.1007/BF00386231.
- [37] 包颖,王嘉欣,陈超,等.NaCl和NaHCO₃胁迫对萱草金娃娃光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J].江苏农业科学,2020,48(3):133–140. BAO Y, WANG J X, CHEN C, et al. Effects of NaCl and NaHCO₃ stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of hemerocallis Golden Baby [J]. Jiangsu Agric Sci, 2020, 48(3):133–140. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2020.03.023.
- [38] 田梦阳,窦全琴,谢寅峰,等.4个薄壳山核桃品种的光合特性研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(5):67–74. TIAN M Y, DOU Q Q, XIE Y F, et al. Study on photosynthetic characteristics of four pecan cultivars [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2022, 46(5):67–74. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202104040.
- [39] XIA J B. Critical responses of photosynthetic efficiency in *Campsis radicans* (L.) Seem to soil water and light intensities [J]. Afr J Biotechnol, 2011, 10(77):17748–17754. DOI: 10.5897/ajb11.2208.
- [40] 杨腾,马履一,段劼,等.氮处理对文冠果幼苗光合、干物质积累和根系生长的影响[J].林业科学,2014,50(6):82–89. YANG T, MA L Y, DUAN J, et al. Effect of N application on photosynthesis, dry matter accumulation and root growth of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings [J]. Sci Silvae Sin, 2014, 50(6):82–89. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20140611.
- [41] 尹梦雅,李志辉,杨艳,等.施肥对黄栀子幼苗生长与光合特性的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(5):32–36. YIN M Y, LI Z H, YANG Y, et al. Effects of fertilization on growth and photosynthetic characteristics of *Gardenia jasminoides* seedlings [J]. J Northeast For Univ, 2022, 50(5):32–36. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2022.05.005.

(责任编辑 李燕文)