网络出版时间:2025-09-10 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.03.009

不同水肥处理对刺槐苗期生长和营养积累的影响

王鑫喆,彭祚登,朱坤,李泽涛
(北京林业大学 林木资源高效生产全国重点实验室,北京 100083)

[摘 要] 【目的】探究不同水肥管理措施对刺槐苗期生长和营养积累的影响,为筛选对刺槐幼苗生长促进效果最佳的水肥管理策略提供依据。【方法】以当年生刺槐实生苗为试验对象,采用以施肥量和水分处理为变量的双因素随机区组设计,在刺槐出苗期、幼苗期和速生期分别采用氮、磷、钾质量比为 1.2∶0.7∶2,1∶0.9∶2 以及 0.9∶2.2∶1 的施肥配比,设置极低肥(F1)、低肥(F2)、中肥(F3)和高肥(F4)4 个施肥量梯度;水分按田间持水量(field capacity,FC)来控制,设置 80%FC(轻度干旱,W1)和 100%FC (正常水分,W2) 2 个梯度。在出苗期末期(2024 年 4 月 16 日)、幼苗期末期(2024 年 5 月 25 日)和速生期末期(2024 年 8 月 8 日)采样,分析不同处理刺槐幼苗在各生长阶段生长指标、光合色素含量和叶片营养元素含量的变化。【结果】速生期末期,刺槐幼苗地径在 W2F3 处理下表现最优并与其他处理差异显著,且随施肥量的增加,2 个水分处理下的幼苗地径、苗高均呈现出明显的先上升后下降的变化趋势;单株幼苗的最大鲜、干质量均以 W1F3 处理最高;高/径比、冠/根比和迪克森质量指数分别在 W2F1、W1F2、W2F2 处理下达到最佳水平;叶绿素 a、b 含量在 W2F1 处理下最高,类胡萝卜素含量则以 W2F3 处理最高;刺槐幼苗叶片氮、磷元素含量及氮元素含量增加率均在 W2F3 处理下达到最大值,钾元素含量及其增长率则以 W2F1 处理最高。灰色关联分析结果表明,W1F3、W2F3 处理的关联度分别为 0.86 和 0.84,可以认为是综合表现较优的 2 个处理。【结论】合理的水肥管理措施可以促进苗期刺槐的生长及营养积累,最终确定刺槐苗期水肥管理的最优方案为 W2F3 处理,即在刺槐苗期给予充足的水分,同时在出苗期分别施加尿素、磷酸二铵、硫酸钾 0.014,0.005 和 0.012 g/株,在幼苗期分别施加 0.180,0.090 和 0.198 g/株,在速生期分别施加 0.226,0.552 和 0.251 g/株。

[关键词] 刺槐幼苗;连续施肥;水分管理;苗期管理
[中图分类号] S792.270.05 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)03-0081-11

Effects of different water and fertilizer treatments on the growth and nutrient accumulation of *Robinia pseudoacacia* seedlings

WANG Xinzhe, PENG Zuodeng, ZHU Kun, LI Zetao
(*State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study explores the effects of different water and fertilizer management measures on the growth and nutrient accumulation of *Robinia pseudoacacia* seedlings, to provide a basis for the selection of the best water and fertilizer management strategies for promoting the growth of *R. pseudoacacia* seedlings. 【Method】 In this study, first-year *R. pseudoacacia* seedlings were used as the experimental subjects, and a two-factor randomized block design was adopted, with fertilization levels and water levels as variables. Fertilization ratios of nitrogen, phosphorus, and potassium (N∶P∶K) were set at 1.2∶0.7∶2 for the emergence stage, 1∶0.9∶2 for the seedling stage, and 0.9∶2.2∶1 for the rapid growth stage. Four fertilization gradients were established: extremely low fertilization (F1), low fertiliza-

[收稿日期] 2024-11-19 [修回日期] 2024-12-26
[基金项目] 国家重点研发计划项目(2024YFD2200205)
[作者简介] 王鑫喆(2000—),男,山东东营人,在读硕士,主要从事林木种苗培育理论与技术研究。E-mail:wangxz@bjfu.edu.cn
[通信作者] 彭祚登(1964—),男,重庆开县人,教授,博士,博士生导师,主要从事城市森林培育、林木种苗培育理论与技术研究。E-mail:zuodengpeng@sina.com

tion (F2), medium fertilization (F3), and high fertilization (F4). Water availability was controlled based on field capacity (FC) with two gradients: 80% FC (mild drought, W1) and 100% FC (normal moisture, W2). Samples were collected at the end of the emergence stage (April 16, 2024), the seedling stage (May 25, 2024), and the rapid growth stage (August 8, 2024). Growth indices, photosynthetic pigment content, and leaf nutrient element content of *R. pseudoacacia* seedlings under different treatments at each growth stage were analyzed. 【Result】 At the end of the rapid growth stage, *R. pseudoacacia* seedlings exhibited the optimal ground diameter under the W2F3 treatment, with significant differences compared to other treatments. As fertilization levels increased, seedlings under W1 and W2 both showed a clear changing trend in seedling ground diameter and height: an initial increase followed by a decline. The highest fresh and dry biomass per seedling were observed under the W1F3 treatment. The height/diameter ratio, shoot/root ratio, and Dickson quality index reached their optimal levels under the W2F1, W1F2, and W2F2 treatments, respectively. The highest chlorophyll a and b contents were observed under the W2F1 treatment, while carotenoid content peaked under the W2F3 treatment. The leaf nitrogen (N) and phosphorus (P) contents, as well as the nitrogen accumulation rate, reached their maximum values under the W2F3 treatment, whereas the highest potassium (K) content and its accumulation rate were observed under the W2F1 treatment. Grey relational analysis indicated that the correlation coefficients for W1F3 and W2F3 treatments were 0.86 and 0.84, respectively, suggesting that these two treatments had the highest efficiency. 【Conclusion】 Rational water and fertilizer management practices can significantly promote the growth and nutrient accumulation of *R. pseudoacacia* seedlings. The optimal water and fertilizer management scheme for the seedling stage is determined to be the W2F3 treatment, which involves providing sufficient water and applying specific amounts of fertilizers at different growth stages. During the emergence stage, 0.014 g of urea, 0.005 g of diammonium phosphate, and 0.012 g of potassium sulfate should be applied per seedling. In the seedling stage, the application rates should be increased to 0.180 g, 0.090 g, and 0.198 g per seedling, respectively. During the rapid growth stage, the application rates further increase to 0.226 g, 0.552 g, and 0.251 g per seedling, respectively.

Key words: *Robinia pseudoacacia* seedlings; continuous fertilization; water management; seedling stage management

刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)为豆科刺槐属多年生落叶阔叶乔木,原产于北美东南部,可提高土壤氮含量[1-2]和氮有效性、提高土壤有机质含量、固存有机碳、改善土壤结构等,能极大地改善土壤性质[3]。此外,即使在贫瘠的土壤条件下,刺槐也能以较快的速度生长,自引入我国后,表现出极强的生命力,因其具有生长迅速、适应性强、耐贫瘠、抗旱等特点而被广泛栽培,现已成为我国落叶阔叶林中栽植面积较大的人工林之一[4-5]。但是由于刺槐林地立地条件差、土壤养分供应不足以及区域干旱因素的影响,导致各地刺槐人工林退化严重[6],因此持续提高刺槐人工林生产力等,已成为各地刺槐人工林培育的关键问题。

苗期是林木生长发育的关键阶段,苗木质量在一定程度上决定了后期造林的成效,因此提高刺槐苗木质量成为提升刺槐人工林生产力的重要措施之一。已有研究表明,施肥能够有效提高刺槐苗木质量,有关刺槐养分特性和精准施肥技术的研究也一直是刺槐栽培研究的热点。目前有关刺槐施肥量的研究较多,其中以氮(N)、磷(P)、钾(K)肥及其复合肥较为常见。有研究认为,增施适量N肥能够增加刺槐苗的矿物质和叶绿素含量、提高水分利用效率、改善气孔调节能力、增强幼苗渗透调节能力[7],施加P肥可以促进刺槐体内低分子蛋白质向复合蛋白质转化[8]。于振旭等[9]通过施肥试验得到1~3年刺槐人工林的最佳N、P、K施肥配比(质量比)为5∶26∶13;薛保健[10]通过施肥试验得到刺槐幼龄林最佳N、P、K施肥配比(质量比)为1∶(0.6~0.8)∶2。

水对于树木的生长、发育和繁殖也起着至关重要的作用,水分严重短缺会导致树木大面积死亡。对刺槐而言,有研究表明,随着水分胁迫程度的增

强，刺槐株高和地径的增加量逐渐减少，根、茎、叶质量显著下降[11]。此外，杨斌等[12]的研究显示，刺槐叶中可溶性糖含量随着干旱胁迫的加重呈现先增加后下降的趋势，在轻度胁迫时大量积累，中度胁迫时达到最大值，重度胁迫后大幅度下降；高宗渊[13]通过对刺槐进行水分胁迫试验得出，轻度干旱对幼苗影响较小，甚至会促进幼苗的生长；金思雨等[14]对刺槐干旱及复水的研究结果则表明，刺槐会依据不同的干旱程度采取不同的气体交换应对策略；而干旱胁迫加重可能导致碳水化合物净损失[15]。因此，轻度干旱对于苗期刺槐的生长是否有促进作用，同样也需要进一步验证。

目前有关刺槐水肥管理的研究主要针对刺槐人工林，且以施肥量的作用效应为主，而对于刺槐苗期在水肥耦合管理下进行定向育苗的研究较少。为此，本试验以刺槐实生幼苗为研究对象，采用苗期连续施肥＋水分耦合处理，通过持续观测苗期形态和生理指标的变化，探究刺槐育苗最优的水肥管理策略。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验在北京大兴区黄垡基地（东经 116°19′43″，北纬 39°34′28″）进行，该地属暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明。夏季最热月平均气温 25.9 ℃，最高气温 40.6 ℃；冬季最冷月平均气温－5 ℃，最低气温－27.4 ℃；全年大于 0 ℃的活动积温平均为 4 580 ℃，大于 10 ℃的生长积温 4 168 ℃；年平均无霜期 181 d，年平均降水量 569.4 mm，年平均日照时数 2 764 h。

1.2　试验材料

刺槐种子购自江苏宿迁沭夕种业，2023 年秋季采集；N、P、K 营养元素分别通过施用尿素（含 N 46%）、磷酸二铵（含 N 18%、P_2O_5 46%）和硫酸钾（含 K_2O 52%）提供，尿素、磷酸二铵及硫酸钾均购自中原农贸营销中心。

1.3　试验设计

试验采用双因素随机区组设计，因素分别为施肥量及水分。施肥量是在刺槐出苗期、幼苗期和速生期分别采用 N、P、K 质量比为 1.2∶0.7∶2，1∶0.9∶2 以及 0.9∶2.2∶1 的施肥配比，对应的尿素、磷酸二铵和硫酸钾的质量比约为 1.2∶0.4∶1，2∶1∶2.2 和 0.9∶2.2∶1；分别在刺槐出苗期、幼苗期、速生期设置 4 个施肥量梯度（g/株），即极低肥（F1）、低肥（F2）、中肥（F3）和高肥（F4），每个梯度的具体施肥量详见表 1。水分按田间持水量（field capacity，FC）来控制，设置 80%FC（轻度干旱，W1）和 100% FC（充足水分，W2）2 个梯度，上下限允许浮动 5%。使用土壤水分速测仪测定土壤含水量后，采用喷灌方式对 2 个处理浇水至预设好的土壤含水量，每 5 天浇水 1 次。完成浇水后每 3 天对土壤含水量进行测定并依据实际情况进行补水。试验共设置 8 个处理和 1 个对照，每个处理 3 个重复；对照在刺槐幼苗苗期的各生长阶段均不施肥，土壤含水量控制在 90%FC，每 5 天浇水 1 次并依据实际情况适时补水。每个试验小区之间设置 1 m 宽保护行，以减少环境扰动带来的影响。

表 1　刺槐幼苗各生长阶段的施肥量

Table 1　Fertilizer application for different growth stages of *Robinia pseudoacacia* seedlings　　g/株

生长阶段 Growth stage	施肥处理代号 Fertilization treatment number	尿素施用量 Urea application rate	磷酸二铵施用量 Diammonium phosphate application rate	硫酸钾施用量 Potassium sulfate application rate
出苗期 Emergence period	F1	0.008	0.003	0.007
	F2	0.011	0.004	0.010
	F3	0.014	0.005	0.012
	F4	0.017	0.006	0.014
幼苗期 Seedling period	F1	0.108	0.054	0.112
	F2	0.144	0.072	0.158
	F3	0.180	0.090	0.198
	F4	0.216	0.108	0.238
速生期 Fast growing period	F1	0.136	0.331	0.151
	F2	0.181	0.442	0.201
	F3	0.226	0.552	0.251
	F4	0.271	0.662	0.301

于 2024 年 3 月 13 日播种，播种前将去除破损种子和杂质后的刺槐种子放入 100 ℃水中浸泡 5 min，然后转移至常温水中继续浸泡 24 h。在种子充分吸水膨胀后擦干表面水分并均匀排列在湿纱布上，置于温暖避光处催芽，待种子露白后便可播种。播种方式采用条播，行距 25～30 cm，开沟撒播，覆

土厚度 1～2 cm。每个处理播种 2 行,共约 150 粒种子,播后轻轻压实并及时浇水。后期如果有未出苗的种子则及时补种。播种完成后,使用塑料膜覆盖播种区域,塑料膜的边缘压土固定。在刺槐幼苗基本出齐后进行间苗,每个处理小区中保留约 80 株幼苗用于后续试验。施肥方式为撒施,在预定的施肥时期将按比例混合好的肥料均匀撒施在小区中;水分处理通过浇水频率进行控制。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 *采样时间和方法* 参考夏尚斌[16]对刺槐苗期生长阶段的划分,并依据预试验结果适当调整后确定刺槐苗期各生长阶段的持续时间。于 2024 年 4 月 16 日(出苗期末期)、5 月 25 日(幼苗期末期)和 8 月 8 日(速生期末期)对试验样地内不同水肥处理的刺槐幼苗进行 3 次采样。在每个水肥处理下的 3 个重复中选择长势较为一致的 5 株刺槐幼苗进行采挖,各重复采挖位置相同,将同一处理的幼苗混合以减少区域效应,幼苗全株取出后清洗根系和叶片杂质,随后用吸水纸擦干后分别放入塑封袋并标记,装入冰盒带回实验室置于－80 ℃超低温冰箱中待测。

1.4.2 *指标测定方法* 生长指标包括苗高、地径和平均单株鲜、干质量,分别采用卷尺、游标卡尺和天平测定。

种苗质量指数包括高/径比(Seedling height/ground diameter ratio,SI)、冠/根比(Shoot/root ratio,SR)和迪克森质量指数(Dickson quality index,DQI),计算公式如下:

$$\text{高/径比}=\text{苗高}/\text{地径}; \quad (1)$$

$$\text{冠/根比}=\text{地上部干质量}/\text{地下部干质量}; \quad (2)$$

$$\text{迪克森质量指数}=\text{幼苗总干质量}/(\text{高/径比}+\text{冠/根比}). \quad (3)$$

光合色素包括叶绿素 a、b 和类胡萝卜素,使用紫外-可见分光光度计进行测定。养分指标包括全氮(total nitrogen,TN)、全磷(total phosphorus,TP)和全钾(total potassium,TK)含量,测定前先将叶片样品于 105 ℃杀青 30 min 后再于 90 ℃烘干至恒质量,用研磨仪(MM400,德国莱驰)研磨后过孔径 0.147 mm(100 目)筛,然后采用 H_2O_2-H_2SO_4 消煮,用全自动间断化学分析仪测定全氮和全磷含量,用原子吸收光谱仪测定全钾含量。

上述指标增长率均为速生期末期测定值相较于出苗期末期测定值的增长比例(%)。

1.5 灰色关联分析

在上述指标测定完成后,运用灰色关联分析法对数据进行分析处理,具体参照刘湘等[17]的方法,先对原始数据进行初值化,然后选择每个指标初值化后的最大值作为参考序列,依据参考序列得到求差序列,并进一步求得关联系数,最后计算得到关联度,通过对不同处理关联度的比较,综合得出最优的水肥管理策略。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2022 和 Python 软件进行数据处理和制图,采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析及 Duncan 多重比较[18]。图表中所有测定数据均以"平均值±标准差"表示。

2 结果与分析

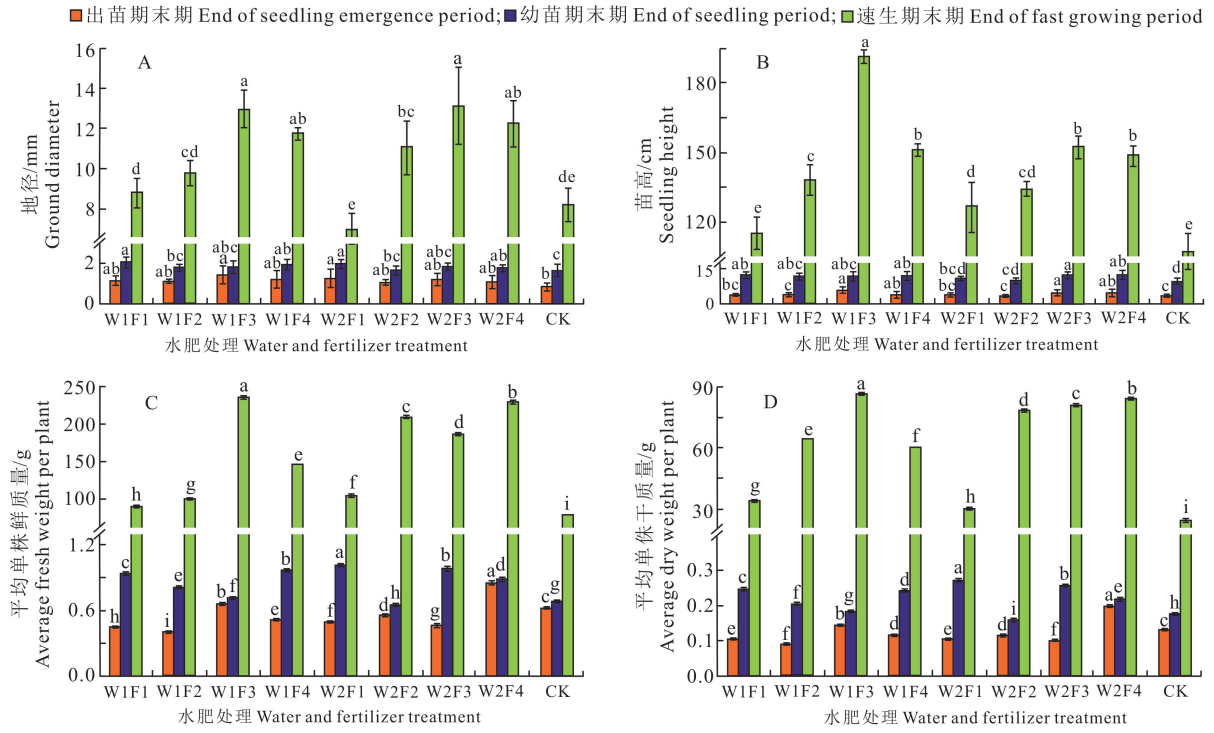
2.1 不同水肥处理对刺槐苗期生长的影响

2.1.1 *地径和苗高* 如图 1-A 所示,苗期不同阶段各水肥处理刺槐幼苗地径平均为 0.84～13.11 mm。方差分析结果表明,速生期末期测得的刺槐幼苗地径显著受到施肥量和水分这 2 个因素交互作用的影响($P<0.05$)。不同水肥处理刺槐幼苗地径在出苗期末期和幼苗期末期的变化均较为平缓,但在速生期末期,随施肥量的增加,2 个水分处理下的幼苗地径均呈现出明显的先上升后下降的趋势,最大值出现在 W2F3 处理,其值为 13.11 mm,最小值则出现在 W2F1 处理,为 6.98 mm,且是唯一低于 CK 的处理。地径最大增长率也出现在 W2F3 处理,为 980.9%。

在苗期不同阶段,各水肥处理刺槐幼苗苗高平均为 3.32～191.32 cm(图 1-B)。方差分析结果表明,苗期 3 个生长阶段的苗高均显著受到施肥量和水分这 2 个因素交互作用的影响($P<0.05$)。与地径相似,在速生期末期,随施肥量的增加,2 个水分处理下的苗高也呈现出先上升后下降的趋势,苗高最大值(191.32 cm)出现在 W1F3 处理,但苗高增长率最大值出现在 W2F2 处理,CK 处理苗高最小(107.22 cm)。

2.1.2 *单株幼苗鲜质量和干质量* 各水肥处理刺槐幼苗在速生期末期的单株鲜、干质量较出苗期和幼苗期末期显著增加,苗期鲜、干质量分别在 0.41～237.00 g 和 0.09～86.76 g 变化(图 1-C,D),说明刺槐幼苗生物量会在速生期时进入一个快速增长时期。苗期每个阶段单株幼苗的鲜、干质量显著受到施肥量和水分这 2 个因素交互作用的影响($P<0.05$)。在速生期末期,所有水肥处理下的单株幼苗鲜、干质量均显著大于对照,且单株幼苗鲜、

干质量最大值均出现在 W1F3 处理下，分别为 237.00 和 86.76 g。



图柱上标不同小写字母表示同一生长阶段刺槐幼苗在不同水肥处理之间差异显著（$P<0.05$），下图同。

Different lowercase letters marked on the column indicate significant differences ($P<0.05$) between different water and fertilizer treatments for *Robinia pseudoacacia* seedlings at the same growth stage. The same below.

图 1　不同水肥处理对刺槐苗期生长的影响

Fig. 1　Effects of different water and fertilizer treatments on the growth of *Robinia pseudoacacia* seedlings

2.1.3　种苗质量指数　选取高/径比（SI）、冠/根比（SR）和迪克森质量指数（DQI）3 个种苗质量指数来观察刺槐幼苗对水肥管理措施的响应，可知施肥量和水分的交互作用对刺槐幼苗苗期 3 个阶段的 SI、SR 和 DQI 均有显著（$P<0.05$）影响（表 2）。伴随着时间的推移，大部分处理的数据反映了刺槐幼苗质量和生长的改善，速生期末期 DQI 相对于出苗期末期和幼苗期末期显著增长，反映出刺槐幼苗在速生期生长旺盛；同时在速生期末期，除 W1 水分处理的 SR 指标和 W2 水分处理的 SI、SR 指标外，不同水分处理下的其余指标均随着施肥量的增加呈现先上升后下降的趋势。对照的种苗质量指数表现稳定，除幼苗期末期的 DQI 与出苗期末期相比变化较小外，其余指标随生长时期的变化均有一定程度的提升。

表 2　不同水肥处理对刺槐幼苗苗期各阶段种苗质量指数的影响

Table 2　Effects of different water and fertilizer treatments on the quality index of *Robinia pseudoacacia* seedlings at different stages

处理代号 Treatment	出苗期末期 End of seedling emergence period			幼苗期末期 End of seedling period			速生期末期 End of fast growing period		
	SI	SR	DQI	SI	SR	DQI	SI	SR	DQI
W1F1	3.31±0.60 b	4.69±0.51 ab	0.01±0.01 b	6.01±0.98 ab	6.17±0.02 d	0.02±0.00 ab	13.19±1.43 abc	11.46±0.93 cd	1.40±0.08 d
W1F2	3.48±0.55 ab	5.00±1.52 ab	0.01±0.00 b	6.36±0.83 ab	6.52±0.02 c	0.02±0.00 ab	14.20±1.43 ab	18.36±1.88 a	1.99±0.08 c
W1F3	4.14±1.01 ab	5.30±1.61 ab	0.02±0.01 a	6.48±1.44 ab	6.37±0.01 c	0.01±0.00 b	14.84±1.25 ab	11.53±0.62 cd	3.32±0.15 b
W1F4	3.50±0.93 ab	5.22±0.94 ab	0.01±0.01 b	6.33±1.04 ab	5.42±0.16 f	0.02±0.00 ab	12.85±0.36 abc	15.37±1.04 b	2.14±0.03 c
W2F1	3.19±0.74 b	6.04±2.44 ab	0.01±0.01 b	5.49±0.76 b	5.96±0.01 e	0.02±0.00 ab	18.39±2.01 a	9.58±0.66 cd	1.09±0.08 e
W2F2	3.21±0.58 b	8.14±0.83 a	0.01±0.01 b	6.09±0.77 ab	7.39±0.02 a	0.01±0.00 b	12.25±1.35 cd	9.12±0.22 d	3.69±0.23 a
W2F3	3.61±0.80 ab	6.63±1.28 ab	0.01±0.01 b	6.94±0.87 a	5.49±0.01 f	0.03±0.00 a	11.90±2.09 d	11.76±0.34 cd	3.46±0.28 b
W2F4	4.37±1.27 a	4.27±0.28 b	0.02±0.01 a	7.04±1.20 a	7.07±0.01 b	0.02±0.00 ab	12.16±1.02 cd	12.30±0.45 c	3.44±0.14 b
CK	4.07±0.83 ab	3.17±0.17 b	0.01±0.01 b	5.95±1.71 ab	5.95±0.01 e	0.02±0.00 ab	13.17±1.51 abc	10.31±1.47 cd	1.05±0.07 e

注：同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

2.2 不同水肥处理对刺槐苗期叶片光合色素含量的影响

2.2.1 叶绿素 a 随时间推进,除 W2F4 处理外,其他水肥处理刺槐幼苗叶片叶绿素 a 含量均随发育进程呈现上升趋势,最大值和最大增长率均出现在 W2F1 处理,分别为 2.14 mg/g 和 273.6%(图 2-A)。方差分析结果表明,施肥量和水分处理的交互作用在苗期每个阶段都对刺槐幼苗叶绿素 a 含量有显著影响($P<0.05$)。出苗期末期 2 个水分处理及速生期末期 W1 水分处理的刺槐幼苗叶绿素 a 含量均随着施肥量的增加先上升后下降,其余阶段相同水分处理的叶绿素 a 含量则随着施肥量的增加先下降后上升再下降。

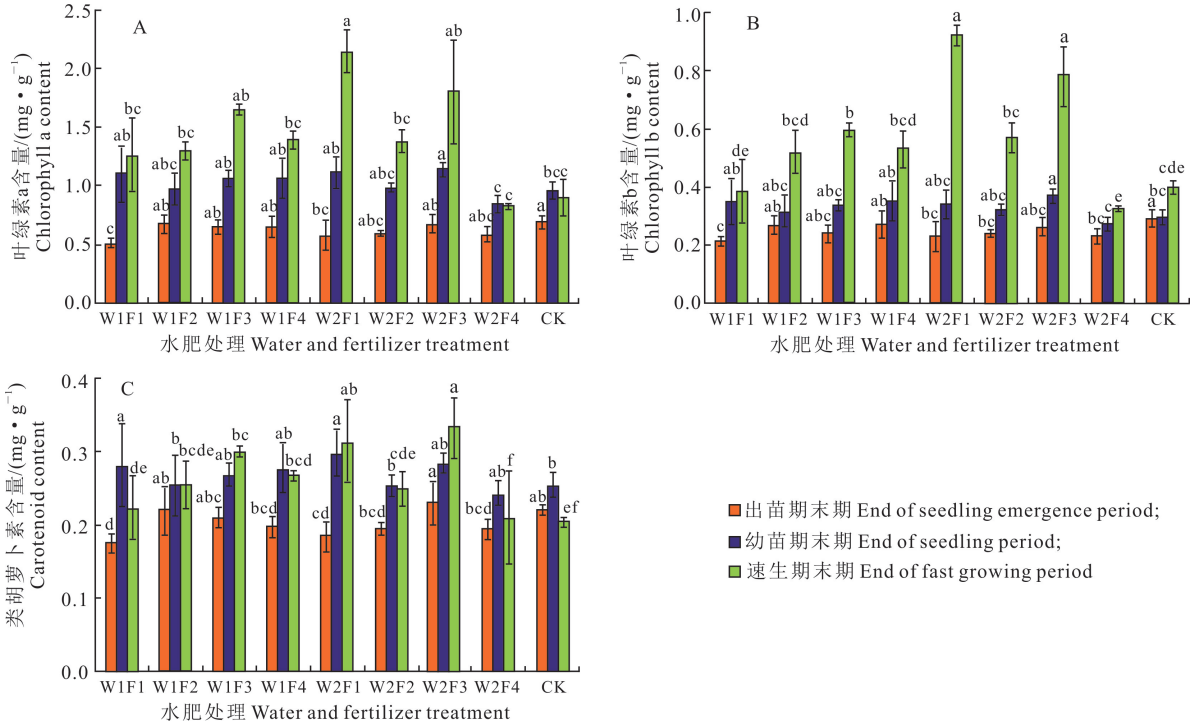


图 2 不同水肥处理对刺槐苗期叶片光合色素含量的影响

Fig. 2 Effects of different water and fertilizer treatments on the photosynthetic pigment content of *Robinia pseudoacacia* seedling leaves

2.2.2 叶绿素 b 无论是各处理还是对照,刺槐幼苗叶片叶绿素 b 含量均随时间不断升高。与叶绿素 a 含量相似,W2F1 处理的叶绿素 b 含量最高、增长率最大,其值分别为 0.92 mg/g 和 295.8%(图 2-B)。方差分析结果表明,刺槐幼苗叶绿素 b 含量显著受到施肥量和水分处理交互作用的影响($P<0.05$)。与叶绿素 a 含量的变化相似,刺槐苗期同一阶段相同水分处理下叶绿素 b 含量随施肥量增加呈先上升后下降或先下降后上升再下降的变化趋势。

2.2.3 类胡萝卜素 刺槐苗期叶片类胡萝卜素含量较叶绿素 a 和叶绿素 b 含量少,随时间的整体变化趋势不明显(图 2-C)。刺槐幼苗类胡萝卜素含量最大值及其增长率最大值均出现在 W2F3 处理;但在对照中,随着苗期发育阶段的推进,类胡萝卜素含量下降,其降幅为-7.1%。方差分析结果表明,在出苗期和速生期末期测定的类胡萝卜素含量显著受到施肥量和水分处理交互作用的影响($P<0.05$)。刺槐苗期同一阶段相同水分处理下,类胡萝卜素含量大多表现为随施肥量的增加先升高后下降。

2.3 不同水肥处理对刺槐苗期叶片营养元素含量的影响

2.3.1 N 元素 除 W2F1、W2F2 和 W2F3 处理外,其余各处理刺槐幼苗叶片 N 元素含量随时间推进先上升后下降;N 含量最大值和最大增长率均出现在 W2F3 处理,W1F4、W2F2 处理 N 元素含量增长率较低,分别为 0.7%和 1.9%,W1F2 处理下 N 含量甚至出现负增长(图 3-A)。刺槐幼苗叶片 N 元素含量在幼苗期末期和速生期末期显著受到施肥量和水分处理交互作用的影响($P<0.05$)。刺槐幼苗叶片 N 元素含量在出苗期末期 2 个水分处理和幼苗期末期 W1 水分处理下随施肥量的增加先上升后下降,其余处理 N 元素含量在苗期同一阶段相同水

分处理下随施肥量的增加先下降后升高再下降。

2.3.2　P 元素　在速生期末期，W2F4 处理刺槐幼苗叶片 P 元素含量最高，为 2.29 mg/g；对照 P 元素含量最低，为 1.81 mg/g（图 3-B）。除 W1F1 处理下刺槐幼苗叶片 P 元素含量随时间持续降低外，其余水肥处理 P 元素含量均随时间先上升后下降，且到速生期末期时均为负增长状态。方差分析结果表明，刺槐苗期各阶段测定的 P 元素含量显著受到施肥量和水分处理交互作用的影响（$P<0.05$）。不同于 N 元素含量的变化，刺槐幼苗叶片 P 元素含量并没有随着施肥量的增加呈现出较为统一的变化趋势。

2.3.3　K 元素　与 P 元素类似，各水肥处理刺槐幼苗叶片 K 元素含量均随时间推进呈先上升后下降的变化趋势，且到速生期末期 K 元素含量也为负增长，其中 W2F1 处理最大（21.87 mg/g），对照最小（11.69 mg/g）。出苗期和速生期末期刺槐幼苗叶片 K 元素含量显著受到施肥量和水分处理交互作用的影响（$P<0.05$），幼苗期末期 K 元素含量在各水肥处理间没有显著差异（$P>0.05$）。K 元素含量同样没有随着施肥量的增加呈现出较为统一的变化趋势。

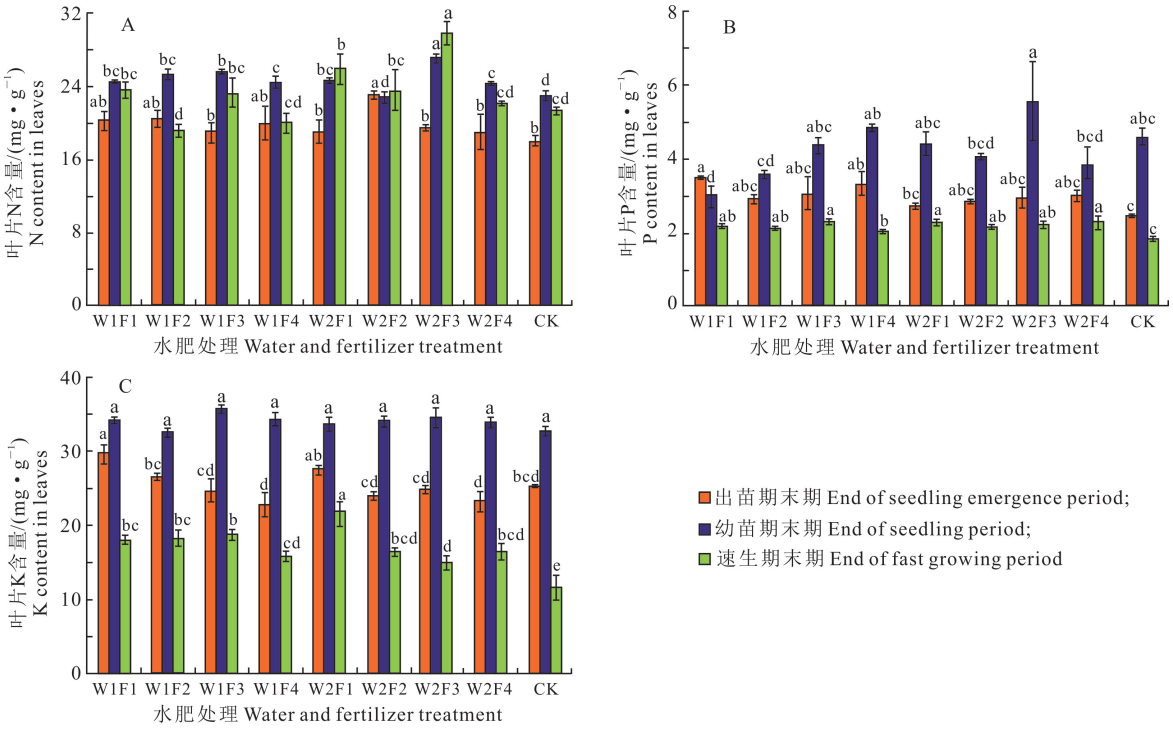


图 3　不同水肥处理对刺槐苗期叶片营养元素含量的影响

Fig. 3　Effects of different water and fertilizer treatments on the nutrient element content of *Robinia pseudoacacia* seedling leaves

2.4　不同水肥处理刺槐幼苗质量的灰色关联分析

不同水肥处理刺槐幼苗各指标的关联系数及最终的关联度计算结果见表 3。由表 3 关联度数据可知，所有处理的关联度值均大于对照，说明连续施肥和控水处理对刺槐幼苗在苗期的生长有积极作用；其中 W1F3 和 W2F3 处理的关联度分别为 0.86 及 0.84，较对照分别提高 43% 和 40%，因此可以认为是较优的 2 个处理。

3　讨　论

3.1　水肥处理对苗期刺槐生长的影响

刺槐幼苗的生长状况通常使用地径、苗高、生物量来反映。地径变化是反映幼苗生长变化最直观的指标，对评价幼苗的生长状况具有重要意义。刺槐幼苗在速生期苗高增长速度快，对水肥管理措施响应明显，因此速生期苗高常被作为衡量刺槐水肥管理措施效果的重要依据。生物量是反应施肥效果的重要指标，更高的生物量有利于刺槐培育目标的实现。于振旭等[9]的研究表明，连续施肥 2 年可显著提高刺槐胸径，2 年的胸径增长率分别为 186.67% 和 47.30%，刺槐胸径从 1.82 cm 显著增加至 7.63 cm。杨芳绒[19]的研究则发现，施氮、磷、钾肥可显著提高 5 年生刺槐矮林的生物量。OLIET 等[20]认为，施氮、磷、钾肥的效果优于单施任何一种肥料。

在土壤肥力一般的立地,施复合肥能有效提高树木胸径和树高生长量[21]。上述研究结果与本研究结果一致,在本研究中除 W2F1 处理刺槐幼苗地径小于对照外,其他生长指标均优于对照,地径、苗高、平均单株鲜质量和干质量最大分别提升 87.9%,78.4%,191.8%和 256.2%,这说明施肥显著促进了刺槐幼苗的生长。此外,高宗渊[13]的水分胁迫试验表明,刺槐可通过自身调节以适应干旱环境,刺槐在轻度干旱条件下生长较好。这也与本试验得到的结果基本一致,本研究发现 W1F3 处理可显著促进苗高及单株鲜、干质量的增加,尽管地径在充足水分处理下最大,但与轻度干旱处理下的地径相差不大。

表 3 不同水肥处理刺槐幼苗各指标的关联系数及关联度

Table 3 Correlation coefficients and degrees of various indicators in *Robinia pseudoacacia* seedlings under different water and fertilizer treatments

处理代号 Treatment number	关联系数 Correlation coefficients						
	苗高 Seedling height	地径 Ground diameter	高/径比 SI	冠/根比 SR	迪克森质量指数 DQI	平均单株鲜质量 Average fresh weight per plant	平均单株干质量 Average dry weight per plant
W1F1	0.71	0.53	0.39	0.67	2.18	1.85	2.15
W1F2	0.49	0.40	0.32	0.00	1.61	1.73	0.91
W1F3	0.00	0.02	0.27	0.66	0.35	0.00	0.00
W1F4	0.37	0.16	0.42	0.29	1.47	1.14	1.07
W2F1	0.60	0.75	0.00	0.85	2.47	1.65	2.32
W2F2	0.53	0.25	0.47	0.90	0.00	0.34	0.34
W2F3	0.36	0.00	0.49	0.64	0.22	0.63	0.23
W2F4	0.40	0.10	0.47	0.59	0.23	0.07	0.10
CK	0.78	0.60	0.40	0.78	2.51	1.99	2.56

处理代号 Treatment number	关联系数 Correlation coefficients						关联度 Correlation degree
	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	类胡萝卜素含量 Carotenoid content	叶片 N 含量 N content in leaves	叶片 P 含量 P content in leaves	叶片 K 含量 K content in leaves	
W1F1	0.98	1.34	0.55	0.29	0.07	0.33	0.65
W1F2	0.93	1.00	0.38	0.50	0.10	0.31	0.71
W1F3	0.54	0.81	0.17	0.31	0.00	0.26	0.86
W1F4	0.82	0.96	0.32	0.46	0.15	0.51	0.71
W2F1	0.00	0.00	0.33	0.18	0.02	0.00	0.75
W2F2	0.84	0.87	0.41	0.30	0.09	0.46	0.77
W2F3	0.36	0.33	0.00	0.00	0.04	0.59	0.84
W2F4	1.45	1.48	0.61	0.36	0.00	0.47	0.78
CK	1.37	1.29	0.63	0.39	0.27	0.87	0.60

种苗质量指数高/径比、冠/根比、DQI 能够全面反映苗木的生长状况和未来生长潜力。目前针对根冠比的研究较多,如楚秀丽等[22]研究表明,不同施肥处理日本落叶松容器苗根冠比差异不显著;而陈琳等[23]则发现,最优施肥方案下灰木莲幼苗根冠比较对照减小 70%。DQI 是综合评价苗木质量的重要指标,通过苗高、地径、地上部干质量和根系干质量计算得到,较高的 DQI 值意味着苗木生长良好。本研究发现,刺槐幼苗的 DQI 受施肥与水分处理交互作用的影响显著,但在相同水分处理下,刺槐幼苗的 DQI 随着施肥量的增加没有表现出较为一致的变化趋势;速生期末期刺槐幼苗 DQI 显著提升,表明速生期是刺槐幼苗质量提升的关键时期。

3.2 水肥处理对苗期刺槐叶片光合色素含量的影响

光合色素作为植物进行光合作用的载体,对植物的生长和生存至关重要。本研究中,叶绿素 a、b 含量随生长时间基本上呈现出逐渐升高的趋势,而类胡萝卜素含量大多处理则表现为先上升后下降。在 3 个生长时期,水肥处理的交互作用对叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均产生了显著影响,但在测定时间和水分处理相同的前提下,随着施肥量的增加,刺槐幼苗的光合色素含量并没有表现出较为一致的变化趋势。试验结果表明,叶绿素 a、b 含量普遍在速生期末期最高;对类胡萝卜素含量而言,除了 W1F3、W2F1 和 W2F3 处理是在速生期末期最高,W1F2 处理在后两个时期基本持平以外,其余处理均是在幼苗期末期类胡萝卜素含量最高。轻度干旱处理组中类胡萝卜素含量在速生期末期普遍低于幼苗期末期,这一结果与 KOC 等[24]对弗雷泽冷杉的水肥试验结果相同。在水分胁迫条件下,植物的光合色素含量会降低,可能导致细胞分解增加[25],同时由于氧化胁迫导致类胡萝卜素含量减少[9],进而

可能会减缓或抑制树木的生长及光合作用速率。本研究中,W2F4 处理下刺槐幼苗在速生期末期的光合色素含量均低于对照,光合色素含量随着施肥量的增加最终减少的现象与胡留杰等[26]的研究结果一致,其原因可能是过高的施肥量对刺槐幼苗光合色素合成产生了副作用。

3.3　水肥处理对苗期刺槐叶片营养元素含量的影响

植物体内的氮(N)、磷(P)、钾(K) 3 种主要营养元素对植物幼苗的生长影响显著,是植物生长和生理代谢的物质基础[27],植物能主动调整体内养分元素的含量及其相对丰度来应对环境的改变[28]。适当的 N、P、K 供应是幼苗快速生长、增强抗逆性以及为后期生长打下坚实基础的关键[29]。

N 是植物体内蛋白质、核酸(DNA 和 RNA)、叶绿素和植物激素的主要组成部分,能够促进叶片生长,提高光合作用效率,缺 N 会导致幼苗生长缓慢并影响光合作用。本研究发现,大多处理刺槐幼苗叶片 N 含量随生长时间先增后降,但在 W2F1、W2F2 和 W2F3 处理中,N 含量持续上升,这与张娜娜[30]对紫穗槐的水肥试验结果一致,表明适当施肥和充足的水分供应能使刺槐幼苗叶片的 N 元素在速生期向根、茎部位转移之后仍能保持在一个较高的水平,但是当施肥量过高时也会对其产生抑制作用。P 是三磷酸腺苷的重要组成部分,缺 P 会导致根系发育不良、幼苗生长缓慢。在本研究中,刺槐幼苗叶片 P 含量随着生长时间先增后降,且施肥与水分处理的交互作用对其影响显著,除 W1F1 处理外,其他处理刺槐幼苗叶片 P 元素含量最大值均出现在幼苗期末期,可能是因为 P 元素随着刺槐幼苗生长在其体内重新分配所致。本研究中,随着施肥量的增加,刺槐幼苗叶片中 P 元素含量基本呈先上升后下降或者总体上升的趋势,且在速生期末期均显著高于对照,这与杨志坚等[31]对闽楠幼苗的水肥试验结果相似;也与张明锦等[32]研究得出的施肥能促进植物积累 N、P 的结果相同,但该结果同时认为施肥并不会影响 N、P 的资源分配。K 在植物体内具有调节多种酶活性的作用,支持蛋白质合成、光合作用、呼吸作用,并维持水分平衡,有助于增强植物对病虫害和环境胁迫的抵抗能力,使幼苗在恶劣环境下仍能保持健康生长;K 缺乏会导致幼苗生长停滞,同时也会使植物对逆境的耐受性降低[29]。在本研究中,刺槐幼苗叶片 K 含量随生长时间先增后降,在出苗期末期相同水分处理下,叶片 K 元素含量随施肥量的增加基本持续下降,且大部分处理低于对照,说明在刺槐出苗期施 K 量不宜过高,否则会抑制幼苗对 K 元素的积累。总体而言,适当的施肥及水分管理有助于刺槐幼苗对 N、P、K 的有效吸收。

4　结　论

本研究主要探究了施肥和水分管理对苗期刺槐生长和营养积累的影响,结果表明,不同的施肥处理和水分管理方式均会促进刺槐幼苗生长及对养分的积累。从刺槐幼苗的生长、光合色素含量、叶片营养元素含量以及灰色关联分析结果综合考虑得出,W2F3 处理是刺槐苗期水肥管理的最优方案,即在刺槐苗期给予充足的水分,同时在出苗期分别施加尿素、磷酸二铵、硫酸钾 0.014,0.005 和 0.012 g/株,在幼苗期分别施加 0.180,0.090 和 0.198 g/株,在速生期分别施加 0.226,0.552 和 0.251 g/株。

[参考文献]

[1] KESKIN T, MAKINECI E. Some soil properties on coal mine spoils reclaimed with black locust (*Robinia pceudoacacia* L.) and umbrella pine (*Pinus pinea* L.) in Agacli-Istanbul[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 159(1): 407-414.

[2] MALCOLM G M, BUSH D S, RICE S K. Soil nitrogen conditions approach preinvasion levels following restoration of nitrogen-fixing black locust (*Robinia pseudoacacia*) stands in a pine-oak ecosystem[J]. Restoration Ecology, 2008, 16(1): 70-78.

[3] YÜKSEK T. The restoration effects of black locust (*Robinia pseudoacacia* L) plantation on surface soil properties and carbon sequestration on lower hillslopes in the semi-humid region of Coruh Drainage Basin in Turkey[J]. CATENA, 2012, 90: 18-25.

[4] 金思雨,彭祚登. 刺槐和油松干旱胁迫响应研究进展[J]. 西北林学院学报,2022,37(4):79-91.
JIN S Y, PENG Z D. Research progress on drought stress on *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4): 79-91.

[5] 张长庆. 黄土高原丘陵沟壑区刺槐人工林和狼牙刺天然林生殖与更新研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
ZHANG C Q. Study on reproduction and regeneration of *Robinia pseudoacacia* plantation and *Spica langbianensis* natural forest in Hilly and Gully Region of Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.

[6] ZHANG Z D, HUANG M B, ZHAO X F, et al. Adjustments of leaf traits and whole plant leaf area for balancing water supply and demand in *Robinia pseudoacacia* under different precipitation conditions on the Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 279: 107733.

[7] 杨喜田,杨臻,董惠英. 植物幼苗生长对缓释肥种类和施肥水平

的反应[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):122-126.
YANG X T, YANG Z, DONG H Y. Responses of seedling growth on the type and amount of slow release fertilizer[J]. Science of Soil and Water Conservation,2008,6(1):122-126.

[8] 郑辉,刘彦慈,李帅英,等. 氮磷对刺槐生长和蛋白质组分的影响[J]. 河北农业大学学报,2006,29(5):44-46.
ZHENG H, LIU Y C, LI S Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on growth and protein component of *Robinia pseudoacacia*[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2006,29(5):44-46.

[9] 于振旭,李逸凡,秦光华,等. 刺槐无性系速生丰产林施肥方案优化研究[J]. 中国农学通报,2021,37(25):35-40.
YU Z X, LI Y F, QIN G H, et al. Optimization of fertilizing scheme for fast-growing plantation of black locust clones[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2021,37(25):35-40.

[10] 薛保健. 豫中黄河故道刺槐幼龄林施肥效应研究[D]. 山东泰安:山东农业大学,2013.
XUE B J. Study on fertilization effect of young *Robinia pseudoacacia* forest in the old course of the Yellow River in central Henan Province[D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University,2013.

[11] 唐洋. 黄土丘陵区刺槐关键功能性状与生长对环境变化及胁迫的响应[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
TANG Y. Response of key functional traits and growth of *Robinia pseudoacacia* to environmental change and stress in Loess Hilly Region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2019.

[12] 杨斌,彭长辉,张贤,等. 干旱胁迫对刺槐幼苗叶片氮含量、光合速率及非结构性碳水化合物的影响[J]. 应用与环境生物学报,2019,25(6):1261-1269.
YANG B, PENG C H, ZHANG X, et al. Effects of drought stress on leaf nitrogen content, rate of photosynthesis, and non-structural carbohydrates in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2019,25(6):1261-1269.

[13] 高宗渊. 水分胁迫对刺槐生理特性的影响[J]. 特种经济动植物,2023,26(6):70-72.
GAO Z Y. Effects of water stress on physiological characteristics of *Robinia pseudoacacia*[J]. Special Economic Animals and Plants,2023,26(6):70-72.

[14] 金思雨,彭祚登,张舒乐. 不同程度干旱胁迫和复水处理对刺槐苗木生理指标的影响[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(10):27-39.
JIN S Y, PENG Z D, ZHANG S L. The impact of varying degrees of drought stress and rehydration treatment on the physiological indicators of *Robinia pseudoacacia* seedlings [J]. Journal of Northeast Forestry University,2024,52(10): 27-39.

[15] 金思雨,彭祚登. 刺槐苗木碳水生理参数对长期干旱及复水的响应变化[J]. 北京林业大学学报,2023,45(8):43-56.
JIN S Y, PENG Z D. Changes in response of carbon and water physiological parameters of *Robinia pseudoacacia* seedlings to long-term drought and rehydration[J]. Journal of Beijing Forestry University,2023,45(8):43-56.

[16] 夏尚斌. 良种刺槐"皖槐1号"扦插育苗技术及苗期生长规律[J]. 安徽农学通报,2021,27(23):65-66.
XIA S B. Cutting seedling raising technology and seedling growth law of improved *Robinia pseudoacacia* "Wanhuai No. 1"[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2021,27(23):65-66.

[17] 刘湘,林雨珊,陈成. 基于灰色关联分析的珠海市渔业产业结构研究[J]. 山西农经,2024(19):183-186.
LIU X, LIN Y S, CHEN C. Study on fishery industrial structure of Zhuhai City based on grey relational analysis[J]. Shanxi Agricultural Economy,2024(19):183-186.

[18] 薛薇. 统计分析与SPSS的应用[M]. 3版. 北京:中国人民大学出版社,2011:126-142.
XUE W. Statistical analysis and SPSS application[M]. 3rd ed. Beijing: China Renmin University Press,2011:126-142.

[19] 杨芳绒. 河南洛宁浅山区刺槐能源林生物量与热值研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
YANG F R. Study on biomass and calorific value of *Robinia pseudoacacia* energy forest in Luoning shallow mountain area of Henan Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.

[20] OLIET J A, PLANELLES R, ARTERO F, et al. Nursery fertilization and tree shelters affect long-term field response of *Acacia salicina* Lindl. planted in Mediterranean semiarid conditions[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 215(1/2/3):339-351.

[21] BATTERMAN S A. Symbiotic N2 fixation in tropical forests: scaling from individuals to ecosystems[J]. Dissertations & Theses-Gradworks,2013.

[22] 楚秀丽,孙晓梅,张守攻,等. 日本落叶松容器苗不同控释肥生长效应[J]. 林业科学研究,2012,25(6):697-702.
CHU X L, SUN X M, ZHANG S G, et al. Effect of controlled release fertilizers on net container seedlings growth of *Larix kaempferi*[J]. Forest Research,2012,25(6):697-702.

[23] 陈琳,卢立华,蒙彩兰. 氮、磷、钾对灰木莲幼苗生长和光合作用的影响[J]. 西北林学院学报,2017,32(2):16-21.
CHEN L, LU L H, MENG C L. Combined effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and photosynthesis of *Manglietia glauca* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(2):16-21.

[24] KOÇ I, NZOKOU P. Combined effects of water stress and fertilization on the morphology and gas exchange parameters of 3-year-old *Abies fraseri* (Pursh) Poir[J]. Acta Physiologiae Plantarum,2023,45(3):49.

[25] SELEIMAN M F, AL-SUHAIBANI N, ALI N, et al. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects[J]. Plants,2021,10(2):259.

[26] 胡留杰,杭晓宁,马连杰,等. 菌渣栽培基质下不同施肥水平对羽衣甘蓝观赏性状及光合色素的影响[J]. 南方农业,2022,16(23):15-18.

HU L J，HANG X N，MA L J，et al. Effects of different fertilization levels on ornamental traits and photosynthetic pigments of *Brassica oleracea* under mushroom residue cultivation substrate[J]. South China Agriculture，2022，16(23)：15-18.

[27] 熊靓，龚伟，王景燕，等. 配方施肥对汉源葡萄青椒叶片光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2019，47(1)：79-89.
XIONG L，GONG W，WANG J Y，et al. Effects of formulated fertilization on photosynthetic characteristics of ‘Hanyuan Putao Qingjiao’[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)，2019，47(1)：79-89.

[28] 李亚麒，陈林，唐军荣，等. 施肥对云南松苗木-土壤氮、磷、钾化学计量比的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2024，52(3)：40-50.
LI Y Q，CHEN L，TANG J R，et al. Effect of fertilization on stoichiometric ratio of nitrogen，phosphorus and potassium in *Pinus yunnanensis* seedling and soil[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)，2024，52(3)：40-50.

[29] 赵嫦妮，徐德禄，李志辉. 配方施肥对赤皮青冈容器苗生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报，2013，33(5)：22-25.
ZHAO C N，XU D L，LI Z H. Effects of formulated fertilization on growth *Cyclobalanopsis gilva* container seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2013，33(5)：22-25.

[30] 张娜娜. 施肥对紫穗槐幼苗生长、生理及营养元素的影响[D]. 黑龙江牡丹江：牡丹江师范学院，2022.
ZHANG N N. Effects of fertilization on growth，physiology and nutrient elements of *Amorpha fruticosa* seedlings[D]. Mudanjiang，Heilongjiang：Mudanjiang Normal University，2022.

[31] 杨志坚，冯金玲，吴小慧，等. 氮磷钾施肥对闽楠幼苗营养元素吸收与利用的影响[J]. 生态学杂志，2021，40(4)：998-1011.
YANG Z J，FENG J L，WU X H，et al. Effects of N，P，and K fertilization on nutrient uptakes and utilizations of *Phoebe bournei* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology，2021，40(4)：998-1011.

[32] 张明锦，陈良华，张健，等. 干旱胁迫和施肥对巨能草生物量及C、N、P积累与分配的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2016，44(9)：105-112.
ZHANG M J，CHEN L H，ZHANG J，et al. Effect of drought stress and fertilization on accumulation and partitioning of biomass，C，N and P of *Puelia sinese* Roxb[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)，2016，44(9)：105-112.

（责任编辑：窦春蕊）

（上接第 71 页）

[14] 贺普超. 葡萄学[M]. 北京：中国农业出版社，1999.
HE P C. Grape science[M]. Beijing：China Agricultural Publisher，1999.

[15] MANSOUR G，GHANEM C，MERCENARO L，et al. Effects of altitude on the chemical composition of grapes and wine：a review[J]. OENO One，2022，56(1)：227-239.

[16] 项艳艳，黄伟杰，赖江龙，等. 西番莲种质资源花粉活力鉴定方法探究[J]. 福建农业学报，2024，39(3)：302-309.
XIANG Y Y，HUANG W J，LAI J L，et al. Determination of viability of passion fruit pollens[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences，2024，39(3)：302-309.

[17] 张晓莹，傅巧娟，赵福康，等. 大花蕙兰花粉贮藏与离体萌发研究[J]. 浙江农业学报，2019，31(9)：1502-1508.
ZHANG X Y，FU Q J，ZHAO F K，et al. Study on preservation and germination of *Cymbidium hybridum* pollen[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis，2019，31(9)：1502-1508.

[18] 曾丽霞，艾应伟. 硼对花粉生物化学功能影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料，2008(3)：9-11.
ZENG L X，AI Y W. Effect of boron on the biochemical function of pollen[J]. China Soil and Fertilizer，2008(3)：9-11.

[19] FRAGALLAH S A D A，LIN S，LI N，et al. Effects of sucrose，boric acid，pH，and incubation time on in vitro germination of pollen and tube growth of Chinese fir (*Cunnighamial lanceolata* L.)[J]. Forests，2019，10(2)：102.

[20] 常海龙，张伟，陈俊吕，等. 甘蔗花粉离体萌发研究[J]. 热带作物学报，2019，40(10)：2068-2075.
CHANG H L，ZHANG W，CHEN J L，et al. Sugarcane pollen germination *in vitro*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops，2019，40(10)：2068-2075.

[21] 李桂荣，朱自果，鲁晓晓，等. 葡萄花粉不同贮藏条件下生活力的鉴定[J]. 吉林农业科学，2015，40(2)：92-96.
LI G R，ZHU Z G，LU X X，et al. Determination of grape pollen viability under different storage conditions[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences，2015，40(2)：92-96.

[22] 李玉玲，王勇，苏来曼·艾则孜，等. 不同葡萄品种花粉活力测定及适宜贮藏温度筛选[J]. 江西农业学报，2022，34(8)：13-16.
LI Y L，WANG Y，SULEYMAN A Z Z，et al. Pollen viability of different grape varieties and suitable storage temperature screening[J]. Acta Agriculturae Jiangxi，2022，34(8)：13-16.

[23] 王玖瑞，刘孟军，梁海永. 枣树单花不同开放阶段花粉萌发率和内源激素的变化[J]. 园艺学报，2005(4)：677-679.
WANG J R，LIU M J，LIANG H Y. Changes of pollen germination rate and endogenous hormones during single flower opening of Chinese jujube[J]. Acta Horticulturae Sinica，2005(4)：677-679.

（责任编辑：温晓平）