

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.005

论文标题： 氮磷钾配比施肥对滇皂荚幼苗生长和生理的影响

作　　者： 罗 婷，付玉嫔，孟 梦

收稿日期： 2025-05-12

引文格式： 罗婷,付玉嫔,孟梦.氮磷钾配比施肥对滇皂荚幼苗生长和生理的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):39-47.

LUO T, FU Y P, MENG M. Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium ratio fertilization on the growth and physiology of *Gleditsia japonica* var. *delavayi* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):39-47.

相关论文推荐

Recommended articles

遮阴对皂荚幼苗生长和生化特性的影响

Effects of shading on growth and biochemical characteristics of *Gleditsia sinensis* seedlings

配比施肥对不同川黄柏种源幼苗生长及生理特性的影响

Effects of formula fertilization on the growth and physiological characteristics of seedlings from different provenances of *Phellodendron chinense* Schneid

配比施肥对紫椴生长及生理特性的影响

Effects of formula fertilization on the growth and physiological characteristics of *Tilia amurensis*

配方施肥对黄栀子幼苗生长和生理特性的影响

Effects of formula fertilization on the growth and physiological characteristics of *Gardenia jasminoides* seedlings

氮磷钾施肥对赤皮青冈容器苗生长及生理的影响

Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on the growth and physiology of container seedlings of *Quercus gilva*

不同配方施肥对福建青冈幼苗生长及生理特性的影响

Effects of different formula fertilization on the growth and physiological characteristics of *Quercus chungii* seedlings

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.005 http: //qks.csuft.edu.cn

氮磷钾配比施肥对滇皂荚幼苗生长和生理的影响

罗 婷，付玉嫔，孟 梦

（云南省林业和草原科学院，云南 昆明 650201）

摘 要：【目的】为了探究不同配比氮磷钾施肥条件下滇皂荚幼苗的生长和生理响应机制，建立滇皂荚幼苗最佳施肥技术方案，为其育苗提供理论依据。【方法】以 2 月龄滇皂荚幼苗为研究对象，根据“3414”配方施肥方案，设计氮磷钾 3 因素 4 水平试验，氮施肥量分别为 0 g/ 株（N_0）、2.8 g/ 株（N_1）、5.6 g/ 株（N_2）、8.4 g/ 株（N_3），磷施肥量分别为 0 g/ 株（P_0）、0.7 g/ 株（P_1）、1.4 g/ 株（P_2）、2.1 g/ 株（P_3），钾施肥量分别为 0 g/ 株（K_0）、1.4 g/ 株（K_1）、2.8 g/ 株（K_2）、4.2 g/ 株（K_3），研究不同氮磷钾配比施肥对滇皂荚幼苗超氧化物歧化酶（SOD）活性、过氧化氢酶（CAT）活性、丙二醛（MDA）含量、脯氨酸（Pro）含量、可溶性蛋白质（SP）含量、可溶性糖（SS）含量 6 个生理指标和株高、地径、干质量 3 个生长指标的影响。【结果】与对照组（不施肥）相比，合理的氮磷钾配比施肥可显著促进滇皂荚幼苗的生长发育及生理活性。从单因素效应来看，配比施肥条件下滇皂荚幼苗整体表现出对 P 肥的依赖性最强；互作效应中，P 肥与 K 肥的交互作用进一步证实适量施用 N 肥可有效促进幼苗的生长，而 N 肥与 P 肥的交互作用可能影响根系发育。P 肥对滇皂荚幼苗地径和干质量分配的调控作用较为明显。在生理胁迫条件下，MDA、SS 含量显著升高，SOD、CAT 活性及 Pro、SP 含量则下降。N_2K_1（中氮低钾）施肥组合在多个生理指标上表现出较好的效果；N 肥能提高滇皂荚幼苗的抗氧化能力及渗透调节物质含量，P 肥则对 SP 含量的影响较大。除 MDA、SS 含量随着 N、P、K 施肥量的增加呈先下降后上升的趋势外，其余各项指标均随着 N、P、K 施肥量的增加呈先上升后下降的趋势。过量施肥（$N_3P_2K_2$、$N_2P_3K_2$、$N_2P_2K_3$）均明显抑制滇皂荚幼苗的生长。【结论】合理的氮磷钾配比施肥可有效促进滇皂荚幼苗的生长及生理生化过程，$N_1P_2K_2$ 处理是其幼苗的最佳施肥方案。根据拟合的一元二次方程，理论上滇皂荚幼苗的最佳氮、磷、钾施肥量分别为 3.2、1.6 和 2.2 g/ 株。

关键词：滇皂荚；生长指标；生理指标；氮磷钾配比施肥

中图分类号：S792 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)05-0039-09

Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium ratio fertilization on the growth and physiology of *Gleditsia japonica* var. *delavayi* seedlings

LUO Ting, FU Yupin, MENG Meng

(Yunnan Academy of Forestry and Grassland Sciences, Kunming 650201, Yunnan, China)

Abstract:【Objective】In order to explore the growth and physiological response mechanism of *Gleditsia japonica* var *delavayi* seedlings under different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization, and to establish the best fertilization technology scheme for *Gleditsia japonica* var *delavayi* seedlings, so as to provide theoretical basis for its seedling raising.【Method】In this study, 2-month-old *Gleditsia japonica* var *delavayi* seedlings were used as the research object, The application rates for N_0, N_1, N_2, and N_3 are 0 g/plant, 2.8 g/plant, 5.6 g/plant, and 8.4 g/plant, respectively; for P_0, P_1, P_2, and P_3 are 0 g/plant, 0.7 g/plant, 1.4 g/plant, and 2.1 g/plant, respectively; and for K_0, K_1, K_2, and K_3 are 0 g/plant, 1.4 g/plant, 2.8 g/plant, and 4.2 g/plant, respectively.The effects of different nitrogen, phosphorus and potassium ratio fertilization on six physiological indexes of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), malondialdehyde (MDA), proline (Pro), soluble protein (SP) and soluble sugar (SS) and three growth indexes of plant height, ground diameter and dry weight of *Gleditsia japonica* var *delavayi* seedlings were studied.【Result】Compared with the control group, reasonable fertilization could significantly promote the growth and physiological activity of *G. yunnanensis* seedlings. Under the ratio of fertilization, the overall performance is the strongest dependence on P fertilizer; in the interaction effect, the PK interaction further

收稿日期（Received）：2025-05-12 **修订日期**（Revised）：2025-06-30

基金项目：中央财政林草科技推广项目（〔2024〕TG26）。

第一作者：罗婷（369225700@ qq.com），助理研究员，硕士。 **通信作者：**孟梦（ynkmmeng@ 126.com），副研究员，硕士。

引文格式：罗婷 , 付玉嫔 , 孟梦 . 氮磷钾配比施肥对滇皂荚幼苗生长和生理的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):39-47.

LUO T, FU Y P, MENG M. Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium ratio fertilization on the growth and physiology of *Gleditsia japonica* var. *delavayi* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):39-47.

confirmed the promotion effect of appropriate nitrogen fertilizer on seedling growth, the NP interaction may affect root development, and P fertilizer has a significant effect on ground diameter and dry weight distribution. Under physiological stress, the contents of MDA and SS increased significantly, while the contents of SOD, CAT, Pro and SP decreased. N_2K_1 (Medium nitrogen and low potassium) fertilization combination showed good results in many physiological indexes.N fertilizer can improve the antioxidant capacity and osmotic adjustment substance content of plants, and P fertilizer has a greater impact on SP. Except MDA and SS decreased first and then increased with the increase of N, P and K fertilization, the other indexes increased first and then decreased with the increase of N, P and K fertilization. Excessive fertilization ($N_3P_2K_2$, $N_2P_3K_2$, $N_2P_2K_3$) significantly inhibited seedling growth.【Conclusion】Reasonable fertilization can enhance the growth and physiological and biochemical processes of *Gleditsia japonica* var *delavayi* seedlings, and low nitrogen, medium phosphorus and low potassium ($N_1P_2K_2$) treatment is the best fertilization scheme for its seedlings. According to the fitted quadratic equation, the optimum nitrogen, phosphorus and potassium application rates of *Gleditsia japonica* var *delavayi* seedlings were 3.2 g/plant, 1.6 g/plant and 2.2 g/plant, respectively.

Keywords: *Gleditsia japonica* var. *delavayi*; growth indicators; physiological indicators; N, P, K ratio fertilization

合理施肥是改善作物品质和提高作物产量的有效举措，尤其是苗期合理的肥料管理，对促进后期苗木生长能发挥重要作用[1]，且显著提高幼苗的干物质累积、叶片光合能力、酶活等[2-3]。氮、磷、钾是应用最广泛的肥料类型，也是日常生产中补充植物营养的核心元素，其供给水平直接影响植物的生长发育与代谢过程[4]。氮素是植物体内蛋白质、核酸、多种酶的重要组成成分，能有效增加植物叶面积，优化光合结构，促进植物生长[5]。磷素是植物细胞内能量储存与传递的关键元素，与多种代谢相关，且是细胞核和磷酸的主要组成成分[6]。钾素主要是以离子形式被植物从根部吸收进入体内，不参与合成有机质，是多种酶的活化剂，参与调节植物生理代谢进程[7]。氮、磷、钾 3 种肥料在植物体内的作用并非孤立存在，而是相互协作、相互制约，只有科学配比施肥，方可实现肥料高效利用，降低养分失衡带来的负面影响，最大限度地发挥养分的协同效应，促进苗木优质高效生长。

云南省地处云贵高原，独特显著的“立体气候”孕育了丰富的生物资源，其中，森林蔬菜以其种类繁多、无污染、无公害、风味独特、营养丰富而广受关注[8]。滇皂荚 *Gleditsia japonica* var. *delavayi* 是苏木科 Caesalpiniaceae 皂荚属 *Gleditsia* 落叶大乔木，为云南特有的经济树种，具有极高的综合利用价值。其皂荚、皂刺、皂根、皂叶均可入药[9]；种子外胚乳可食用，俗称皂角米、皂仁，富含多种维生素和氨基酸，是一种高蛋白、低糖的营养保健食品[10-11]。作为一种营养价值高、口感好的木本森林蔬菜，它经常用来制作甜品[10]。目前，关于滇皂荚的研究报道较少，现有研究主要集中在生物学特性[12]、光合特性[13]、化学成分[14-15]、营养成分[11]、种子发芽率[16]等方面，而针对其苗木培育关键技术之一的施肥技术，公开研究报道不足，难以满足滇皂荚规模化、集约化培育的生产需求。为探究滇皂荚幼苗的最佳施肥技术方案，本研究根据农业农村部《测土配方施肥项目的技术规范》相关要求，采用“3414”施肥试验设计，研究滇皂荚幼苗对氮磷钾肥的响应机制，探明其幼苗生长过程中适宜的施肥量，为滇皂荚的推广种植和集约化培育等提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用苗为无病虫害、长势一致的滇皂荚 2 月龄幼苗，栽培基质为 *m*（红土）∶*m*（珍珠岩）= 4∶1，将滇皂荚幼苗栽种于 20 cm×20 cm 的塑料花盆中。2024 年 2 月中旬移栽滇皂荚幼苗于云南省林业和草原科学院玻璃温室并进行正常水肥管理。试验用肥料规格为氮肥（含纯氮 46% 的尿素）、磷肥（含 15%P_2O_5）和钾肥（含 52%K_2O）。

1.2 试验方法

开展“3414”最优回归试验设计，设置氮磷钾 3 因素 4 水平试验，共 14 个处理，每个处理 9 个重复。处理 1（$N_0P_0K_0$）作为对照，“0”水平表示不施肥，“1”水平表示当地推荐施肥量的一半，“2”水平表示当地推荐最佳施肥水平，“3”水平表示当地推荐最佳施肥量的 1.5 倍（即过量施肥）。采用浇灌施肥方式，试验前将肥料充分溶解，随后缓慢浇入盆中，尽可能减少肥料流失。施肥时间为 5 月 1 日、5 月 21 日、6 月 11 日，施肥期间统一抚育管理。具体施肥试验因素水平见表 1。

1.3 指标测定及数据分析

7 月 1 日结束试验，随即进行取样及各项指标测定。

生长指标包括株高、地径、干质量。株高为植物地径到顶芽的直线距离，地径为主茎在土痕处的粗度。株高、地径共测量 2 次，分别是施肥前和 7 月 1 日。试验结束后，每个处理随机选取 3 株长势中等的植株，将根系洗净后于土痕处剪断，分别称地上部分和地下部分鲜质量，然后置于烘箱中，在 80 ℃条件下烘干 72 h 至恒质量，再次称量地上部分和地下部分干质量。

表 1　滇皂荚幼苗施肥试验因素水平
Table 1　Factor and level of the fertilization experiment for *Gleditsia japonica* var. *delavayi* seedlings

水平 Level	因素 Factor		
	氮肥（尿素）Nitrogenous fertilizer /(g·株 $^{-1}$)	磷肥（P_2O_5）Phosphate fertilizer /(g·株 $^{-1}$)	钾肥（K_2O）Potassium fertilizer /(g·株 $^{-1}$)
0	0	0	0
1	2.8	0.7	1.4
2	5.6	1.4	2.8
3	8.4	2.1	4.2

生理指标主要测定超氧化物歧化酶（SOD）活性、过氧化氢酶（CAT）活性、丙二醛（MDA）含量、脯氨酸（Pro）含量、可溶性蛋白质（SP）含量和可溶性糖（SS）含量 6 个指标。采用混合取样法，在每个处理中选取 3 株长势中等的滇皂荚幼苗，取顶芽开始往下数的第二轮成熟功能叶。生理指标均用试剂盒（微板法）进行测定。

用 Excel 软件进行数据分析和绘图，并用 SPSS 19.0 软件对数据进行方差分析。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理对滇皂荚幼苗生长指标的影响

2.1.1　氮磷钾配比施肥对滇皂荚幼苗生长指标的影响

从表 2 可以看出，与不施肥（$N_0P_0K_0$）相比，合理施肥总体促进了滇皂荚幼苗的生长，但过量的 N、P、K 肥处理（$N_3P_2K_2$、$N_2P_3K_2$、$N_2P_2K_3$）则显著抑制植物生长，其生长指标均低于对照组。在 $N_1P_2K_2$ 处理下幼苗株高达到最大值，显著高于其他组，比对照组（$N_0P_0K_0$）提高了 85.78%。地径以 $N_2P_2K_2$ 处理最大，$N_2P_3K_2$ 处理最低，较 $N_2P_2K_2$ 处理降低了 46.81%，说明高 P 供应明显抑制幼苗地径生长。地上部分干质量以 $N_1P_2K_2$ 处理最大，其次是 $N_1P_1K_2$ 处理，$N_2P_3K_2$ 处理最低；地下部分干质量以 $N_2P_1K_2$ 处理最高，且显著高于其他处理，而 $N_2P_3K_2$ 处理最低，比 $N_2P_1K_2$ 处理减少了 67.91%。地上部分干质量占比最大的是 $N_1P_2K_2$ 处理，其次为 $N_2P_2K_2$、$N_1P_1K_2$，处理 $N_2P_1K_2$ 最小；$N_2P_1K_2$ 处理地下部分干质量占比最大，且 $N_2P_1K_2$ 的地上、地下部分干质量比例均衡，各占 50%。处理 $N_2P_2K_2$ 的地上干质量与处理 $N_2P_1K_2$ 相比上升 11.75%，说明适量 P 促进植株地上部分生长。对缺 N（$N_0P_2K_2$）、缺 P（$N_2P_0K_2$）、缺 K（$N_2P_2K_0$）处理进行比较，株高表现为缺 P ＜不施肥＜缺 N ＜缺 K，地径表现为缺 P ＜缺 K ＜不施肥＜缺 N，地上部分干质量表现为缺 N ＜缺 P ＜

表 2　不同施肥处理对滇皂荚幼苗生长指标的影响 †
Table 2　Effects of different fertilization treatments on p growth indexes of *Gleditsia japonica* var. *delavay* seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	地径 Ground diameter /cm	地上部分 Aboveground		地下部分 Underground	
			干质量 Dry weight /g	占比 Proportion	干质量 Dry weight /g	占比 Proportion
$N_0P_0K_0$	27.67±2.31 d	0.29±0.05 f	3.82±0.14 h	0.52±0 cd	3.56±0.12 e	0.48±0.02 ab
$N_0P_2K_2$	28.29±0.92 d	0.35±0.03 de	3.00±0.13 j	0.52±0.01 cd	2.76±0.17 g	0.48±0 ab
$N_1P_2K_2$	51.41±1.80 a	0.39±0.04 c	9.42±0.07 a	0.63±0.01 a	5.50±0.26 b	0.37±0.05 d
$N_2P_0K_2$	26.95±1.17 de	0.26±0.05 fg	3.40±0.25 i	0.55±0.02 bcd	2.74±0.16 g	0.45±0.02 abc
$N_2P_1K_2$	44.81±2.49 b	0.40±0.01 c	6.30±0.05 c	0.50±0.03 d	6.42±0.03 a	0.50±0.01 a
$N_2P_2K_2$	40.22±5.10 c	0.47±0.05 a	7.04±0.11 b	0.60±0.06 ab	4.78±0.11 c	0.40±0.02 cd
$N_2P_3K_2$	20.16±1.71 f	0.25±0.03 g	2.76±0.26 j	0.57±0.04 abc	2.06±0.10 h	0.43±0.07 bcd
$N_2P_2K_0$	29.16±0.19 d	0.27±0.04 fg	3.86±0.41 gh	0.59±0.02 ab	2.70±0.13 g	0.41±0.04 cd
$N_2P_2K_1$	29.34±2.94 d	0.32±0.02 e	4.78±0.20 e	0.57±0 abc	3.66±0.41 e	0.43±0.02 bc
$N_2P_2K_3$	23.83±0.97 ef	0.34±0.01 de	4.40±0.04 f	0.51±0.01 cd	4.22±0.10 d	0.49±0 ab
$N_3P_2K_2$	23.54±0.81 ef	0.27±0.02 fg	4.20±0.15 fg	0.57±0.05 abc	3.20±0.25 f	0.43±0.01 bc
$N_1P_1K_2$	49.52±2.84 a	0.43±0.07 b	7.38±0.19 b	0.60±0.06 ab	4.94±0.27 c	0.40±0.04 cd
$N_1P_2K_1$	38.18±0.20 c	0.37±0.05 cd	5.94±0.27 d	0.59±0.05 ab	4.12±0.14 d	0.41±0.02 cd
$N_2P_1K_1$	39.91±1.41 c	0.33±0.04 e	5.76±0.23 d	0.59±0.02 ab	4.06±0.10 d	0.41±0.05 cd

† 表中同列的不同小写字母代表显著性差异（$P < 0.05$）。下同。
Different lowercase letters in the same column in the table represent significant differences ($P < 0.05$). The same below.

不施肥＜缺 K，地下部分干质量表现为缺 K ＜缺 P ＜缺 N ＜不施肥。

2.1.2 氮磷钾肥互作效应对滇皂荚幼苗生长指标的影响

由表 3 可以看出，在所有 P、K 交互组合中，N_1 水平的株高均高于 N_2 水平。在 N_1 水平下，P_2K_2 组合的株高高于 P_1K_2 组合，但在 N_2 水平下，P_2K_2 组合的株高则低于 P_1K_2 组合。在 N_1 水平下，P_1K_2 组合的地径较 P_2K_2 组合提高了 10.26%，而在 N_2 水平下，P_2K_2 组合的地径较 P_1K_2 组合提高了 17.50%。在 N_1 水平下，各处理地上干质量均高于 N_2 水平，其中 P_2K_2 组合的差值最大，N_2 水平较 N_1 水平下降了 25.27%；P_1K_2 组合变化最小，N_2 水平较 N_1 水平下降了 14.63%。地下部分干质量 N_1 水平以 P_2K_2 组合最高，N_2 水平以 P_1K_2 组合最高。P_2K_1 组合的各项生长指标均最低，且显著低于其他处理组。

表 3 P、K 肥对 N 肥施用效果的作用

Table 3 Effect of phosphorus and potassium fertilizer on nitrogen efficiency

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	地径 Ground diameter /cm	地上部分干质量 Aboveground dry weight /g	地下部分干质量 Underground dry weight /g
$N_1P_1K_2$	49.52	0.43	7.38	4.94
$N_2P_1K_2$	44.81	0.40	6.30	6.42
$N_1P_2K_2$	51.41	0.39	9.42	5.50
$N_2P_2K_2$	40.22	0.47	7.04	4.78
$N_1P_2K_1$	38.18	0.37	5.94	4.12
$N_2P_2K_1$	29.34	0.32	4.78	3.66

由表 4 可知，在 N_1K_2 组合下，P_1、P_2 水平的株高均为最高，与 P_1 水平相比，P_2 水平下 N_2K_2、N_2K_1 组合的株高显著降低，分别降低了 10.24% 和 26.48%。在 P_2 水平下，N_2K_2 组合的地径达到最大值，在 N_2K_1 组合时最小，相比 N_2K_2 组合降低了 31.91%。在 P_2 水平下，N_1K_2 组合的地上部分干质量达到最大值，较 P_1 水平提高了 27.64%；P_2 水平 N_2K_1 组合地上部分干质量最小，较 N_1K_2 组合降低了 49.26%。在 P_1 水平下，N_2K_2 组合地下部分干质量达到最大值。与 P_1 水平相比，N_1K_2 组合在 P_2 水平下有所增加。N_2K_1 组合的各项指标均最低。

由表 5 可知，株高在 N_2P_2 组合下 K_2 水平较 K_1 水平增加了 37.08%，而 N_1P_2 组合下 K_1 水平较 K_2 水平增加了 30.13%；地径的变化趋势与株高基本一致。在 K_2 水平下，N_2P_2 组合地上部分干质量累积最高，较 K_1 水平增加了 47.28%，且显著高于其他组合。从地下部分干质量可以看出，N_2P_1 组合在 K_2 水平较 K_1 水平增幅达 58.13%，而在 K_2 水平下，N_1P_2 组合各项指标均为最低。

表 4 N、K 肥对 P 肥施用效果的作用

Table 4 Effect of nitrogen and potassium fertilizer on phosphorus efficiency

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	地径 Ground diameter /cm	地上部分干质量 Aboveground dry weight /g	地下部分干质量 Underground dry weight /g
$N_1P_1K_2$	49.52	0.43	7.38	4.94
$N_1P_2K_2$	51.41	0.39	9.42	5.50
$N_2P_1K_2$	44.81	0.40	6.30	6.42
$N_2P_2K_2$	40.22	0.47	7.04	4.78
$N_2P_1K_1$	39.91	0.33	5.76	4.06
$N_2P_2K_1$	29.34	0.32	4.78	3.66

表 5 N、P 肥对 K 肥施用效果的作用

Table 5 Effect of nitrogen and phosphorus fertilizer on potassium efficiency

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	地径 Ground diameter /cm	地上部分干质量 Aboveground dry weight /g	地下部分干质量 Underground dry weight /g
$N_1P_2K_1$	38.18	0.37	5.94	4.12
$N_1P_2K_2$	29.34	0.32	4.78	3.66
$N_2P_2K_1$	29.34	0.32	4.78	3.66
$N_2P_2K_2$	40.22	0.47	7.04	4.78
$N_2P_1K_1$	39.91	0.33	5.76	4.06
$N_2P_1K_2$	44.81	0.40	6.30	6.42

2.2 不同施肥处理对滇皂荚幼苗生理指标的影响

2.2.1 氮磷钾配比施肥对滇皂荚幼苗生理指标的影响

由表 6 可以看出，SOD 活性、CAT 活性、Pro 含量及 Sp 含量均在 $N_1P_2K_2$ 处理下达到最大值，且显著高于其他处理。MDA、SS 含量分别在 $N_3P_2K_2$、$N_2P_3K_2$ 处理达到最大，在 $N_1P_2K_2$ 处理中含量最低。$N_0P_2K_2$ 处理与对照（$N_0P_0K_0$）的各项指标差异不显著。过量施肥处理（$N_3P_2K_2$、$N_2P_3K_2$、$N_2P_2K_3$）下，SOD 活性、CAT 活性、MDA 含量、Pro 含量、SS 含量表现均不如对照处理（$N_0P_0K_0$），说明过量施肥对滇皂荚幼苗的抑制作用会显著增强。对比缺 N（$N_0P_2K_2$）、缺 P（$N_2P_0K_2$）、缺 K（$N_2P_2K_0$）处理，SOD 活性表现为缺 P ＜不施肥＜缺 N ＜缺 K，CAT 活性表现为不施肥＜缺 P ＜缺 N ＜缺 K，Pro 含量表现为缺 P ＜不施肥＜缺 N ＜缺 K，MDA 含量表现为缺 K ＜不施肥＜缺 N ＜缺 P，SS 含量表现为不施肥＜缺 N ＜缺 K ＜缺 P，Sp 含量表现为缺 K ＜缺 P ＜缺 N ＜不施肥，说明滇皂荚幼苗对 P 肥的依赖性最强，其次是 N 肥和 K 肥。

表 6　不同施肥处理对滇皂荚幼苗生理指标的影响

Table 6　Effects of different fertilization treatments on physiological indicators of *Gleditsia japonica* var. *delavay* seedlings

处理 Treatment	SOD 活性 Superoxide dismutase activity /(U·g^{-1})	CAT 活性 Catalase activity /(μmoL·min^{-1}·g^{-1})	MDA 含量 Malondialdehyde content /(nmol·g^{-1})	Pro 含量 Proline content /(μg·g^{-1})	SS 含量 Soluble sugar content /(μg·g^{-1})	SP 含量 Soluble protein content /(mg·g^{-1})
$N_0P_0K_0$	1 531.44±69.2 e	37.23±0.74 g	76.53±1.98 b	293.71±2.41 j	26.56±0.86 cd	38.15±0.87 bcd
$N_0P_2K_2$	1 585.36±78.37 e	40.87±1.55 g	76.82±2.73 b	341.22±3.31 i	26.91±0.69 bcd	38.14±3.59 cde
$N_1P_2K_2$	4 143.99±244.02 a	89.24±0.61 a	39.05±0.49 g	877.64±8.99 a	20.36±1.28 g	43.15±2.13 a
$N_2P_0K_2$	974.90±16.25 f	39.64±1.66 g	77.44±1.40 b	191.69±1.52 k	27.95±1.87 bc	36.22±0.46 cde
$N_2P_1K_2$	2 791.80±378.41 bc	67.20±3.30 c	51.84±4.14 f	707.77±2.95 c	22.32±1.37 fg	41.20±1.79 ab
$N_2P_2K_2$	2 569.12±323.14 c	58.07±4.63 d	57.63±2.33 de	696.57±12.37 d	23.84±0.92 ef	42.66±1.83 a
$N_2P_3K_2$	703.05±34.56 f	28.11±0.98 h	85.25±0.31 a	41.27±1.45 n	31.72±0.59 a	34.89±0.57 f
$N_2P_2K_0$	1 687.81±116.90 de	41.94±1.83 g	73.92±2.82 b	379.50±2.16 h	26.99±0.69 bcd	35.42±1.70 def
$N_2P_2K_1$	1 790.01±53.20 de	48.62±2.48 f	63.90±0.98 c	449.43±5.34 g	26.02±0.80 cd	39.67±0.62 abc
$N_2P_2K_3$	1 081.81±88.02 f	37.23±0.74 g	84.94±2.11 a	159.67±0.75 l	27.23±0.81 cd	35.86±0.70 def
$N_3P_2K_2$	812.68±26.53 f	29.11±1.01 h	85.95±2.09 a	54.07±1.01 m	28.97±0.74 b	35.12±0.02 ef
$N_1P_1K_2$	3 179.23±474.30 b	83.73±6.26 b	54.37±3.82 ef	859.53±3.39 b	21.98±0.31 fg	41.44±1.79 ab
$N_1P_2K_1$	2056.93±161.04 d	52.94±1.84 ef	59.79±2.77 d	564.04±2.16 e	25.69±1.58 cde	38.69±1.51 bc
$N_2P_1K_1$	2 691.80±378.41 bc	56.11±0.68 de	59.07±2.03 d	531.11±2.80 f	25.10±1.67 de	40.27±0.74 abc

2.2.2　氮磷钾肥互作效应对滇皂荚幼苗生理指标的影响

由表 7 可知，SOD、CAT 活性和 Pro 含量在 N_1 水平下的数值均高于 N_2 水平，SP 与 SS 含量在 N 水平下整体差异不显著，且所有指标均在 P_2K_1 组合处理下表现最差，表明低 K（K_1）水平可能抑制滇皂荚幼苗各项生理指标的活性。SOD 活性在 P_2K_2 组合 N_1 水平下最高，N_2 水平时显著降低了 38.01%；CAT 活性与 Pro 含量变化趋势与 SOD 活性基本一致，N_1 水平 P_2K_2 组合含量最高。各组合在 N_1、N_2 水平下 MDA 含量的变化趋势不一致，其中，N_1 水平下 P_2K_2 组合的 MDA 含量最低，且显著低于其他组合；其次为 N_2 水平下的 P_1K_2 组合；MDA 含量最高的是 N_2 水平 P_2K_1 组合，可能与低 K 抑制氧化酶活性有关，导致 MDA 大量积累。此外，SS 与 SP 含量差异不显著。

表 7　P、K 肥对 N 肥施用效果的作用

Table 7　Effect of phosphorus and potassium fertilizer on nitrogen efficiency

处理 Treatment	SOD 活性 Superoxide dismutase activity /(U·g^{-1})	CAT 活性 Catalase activity /(μmoL·min^{-1}·g^{-1})	MDA 含量 Malondialdehyde content /(nmol·g^{-1})	Pro 含量 Proline content /(μg·g^{-1})	SS 含量 Soluble sugar content /(μg·g^{-1})	SP 含量 Soluble protein content /(mg·g^{-1})
$N_1P_1K_2$	3 179.23	83.73	54.37	859.53	21.98	41.44
$N_2P_1K_2$	2 791.80	67.20	51.84	707.77	22.32	41.2
$N_1P_2K_2$	4 143.99	89.24	39.05	877.64	20.36	43.15
$N_2P_2K_2$	2 569.12	58.07	57.63	696.57	23.84	42.66
$N_1P_2K_1$	2 056.93	52.94	59.79	564.04	25.69	38.69
$N_2P_2K_1$	1 790.01	48.62	63.90	449.43	26.02	39.67

由表 8 可知，SOD、CAT 活性及 Pro 含量在 P_1、P_2 水平下均随着 N 含量的增加而降低，整体来看，N_1K_2 组合的各项指标表现最好。N_1K_2 组合的 CAT 活性在 P_1、P_2 水平间差异不显著，整体变化趋势与 Pro 含量基本一致。在 P_1 水平下，各组合 MDA 含量差异不显著；在 P_2 水平下，N_2K_1 组合 MDA 含量显著高于其他组合，较 N_1K_2 组合升高了 63.64%。在 P_2 水平下，SS 含量在 N_1K_2 组合中最低。在 P_1 水平下，各组合 SP 含量差异不显著，整体相对稳定；在 P_2 水平下，N_2K_1 组合 SP 含量较 N_1K_2 组合降低了 8.06%。

由表 9 可以看出，K_2 处理下各组合的各项生理指标均优于 K_1 处理。其中，在 K_2 水平下，SOD 活性在 N_1P_2 组合中最高，而 N_2P_1 组合的各项指标在 K_1、K_2 水平下差异不显著。CAT 活性变化与 SOD 活性变化趋于一致。Pro 含量在 K_1 水平 N_2P_2 组合中最低，较 K_2 水平 N_1P_2 组合显著降低了 48.79%。MDA 含量在 K_1 水平下变化不显著，K_2 水平下 N_1P_2 组合 MDA 含量最低，相较于 K_1 水平降低了 34.69%。SS 含量在不同 N、P 交互组合中变化较小。SP 含量在 K_1 和 K_2 水平下变化规律相反，K_1 水平下随着施 N 量的增加而升高，在 K_2 水平下随着施 N 量的增加而降低。

2.3 滇皂荚幼苗氮、磷、钾最佳施肥量的确定

分别以滇皂荚幼苗生长指标和生理指标作为因变量（y），以氮、磷、钾肥施用量作为自变量，构建一元二次回归模型进行拟合分析，结果如表 10 所示。根据数据的四分位数分布特征，综合分

表 8 N、K 肥对 P 肥施用效果的作用

Table 8 Effect of nitrogen and potassium fertilizer on phosphorus efficiency

处理 Treatment	SOD 活性 Superoxide dismutase activity /(U·g^{-1})	CAT 活性 Catalase activity /(μmoL·min^{-1}·g^{-1})	MDA 含量 Malondialdehyde content /(nmol·g^{-1})	Pro 含量 Proline content /(μg·g^{-1})	SS 含量 Soluble sugar content /(μg·g^{-1})	SP 含量 Soluble protein content /(mg·g^{-1})
$N_1P_1K_2$	3 179.23	83.73	54.37	859.53	21.98	41.44
$N_1P_2K_2$	4 143.99	89.24	39.05	877.64	20.36	43.15
$N_2P_1K_2$	2 791.80	67.20	51.84	707.77	22.32	41.20
$N_2P_2K_2$	2 569.12	58.07	57.63	696.57	23.84	42.66
$N_2P_1K_1$	2 691.80	56.11	59.07	531.11	25.10	40.27
$N_2P_2K_1$	1 790.01	48.62	63.90	449.43	26.02	39.67

表 9 N、P 肥对 K 肥施用效果的作用

Table 9 Effect of nitrogen and phosphorus fertilizer on potassium efficiency

处理 Treatment	SOD 活性 Superoxide dismutase activity /(U·g^{-1})	CAT 活性 Catalase activity /(μmoL·min^{-1}·g^{-1})	MDA 含量 Malondialdehyde content /(nmol·g^{-1})	Pro 含量 Proline content /(μg·g^{-1})	SS 含量 Soluble sugar content /(μg·g^{-1})	SP 含量 Soluble protein content /(mg·g^{-1})
$N_1P_2K_1$	2 056.93	52.94	59.79	564.04	25.69	38.69
$N_1P_2K_2$	4 143.99	89.24	39.05	877.64	20.36	43.15
$N_2P_2K_1$	1 790.01	48.62	63.90	449.43	26.02	39.67
$N_2P_2K_2$	2 569.12	58.07	57.63	696.57	23.84	42.66
$N_2P_1K_1$	2 691.80	56.11	59.07	531.11	25.10	40.27
$N_2P_1K_2$	2 791.80	67.20	51.84	707.77	22.32	41.2

表 10 氮、磷、钾肥料效应的回归关系

Table 10 Regression relationship of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer effect

肥料种类 Type of fertilizer	指标 Indicator	拟合方程 Fitting equation	R^2	最佳施肥量 Optimal fertilizer /(g·株$^{-1}$)
氮肥（x_1） Nitrogenous fertilizer	株高	$y=-2.10x_1^2+12.45x_1+27.98$	0.93	2.96
	地径	$y=-0.01x_1^2+0.05x_1+0.32$	0.99	2.85
	SOD	$y=-96.79x_1^2+640.52x_1+1\,558.40$	0.89	3.31
	CAT	$y=-2.33x_1^2+15.43x_1+39.05$	0.91	3.31
	MDA	$y=1.23x_1^2-10.47x_1+76.67$	0.99	3.26
	Pro	$y=-23.60x_1^2+156.06x_1+317.47$	0.86	3.31
	SS	$y=0.30x_1^2-1.86x_1+26.77$	0.91	3.10
	SP	$y=-0.21x_1^2+1.48x_1+38.14$	0.88	3.52
磷肥（x_2） Phosphate fertilizer	株高	$y=-14.59x_2^2+32.03x_2+27.31$	0.88	1.10
	地径	$y=-0.07x_2^2+0.18x_2+0.28$	0.98	1.24
	SOD	$y=-752.86x_2^2+2\,248.10x_2+1\,253.17$	0.99	1.49
	CAT	$y=-12.60x_2^2+43.21x_2+38.44$	0.99	1.71
	MDA	$y=6.29x_2^2-24.27x_2+76.99$	0.99	1.93
	Pro	$y=-236.71x_2^2+693.33x_2+242.70$	0.99	1.46
	SS	$y=1.71x_2^2-5.49x_2+27.25$	0.99	1.61
	SP	$y=-1.08x_2^2+3.63x_2+37.18$	0.99	1.68
钾肥（x_3） Potassium fertilizer	株高	$y=-1.94x_3^2+7.99x_3+28.41$	0.75	2.06
	地径	$y=-0.01x_3^2+0.06x_3+0.28$	0.67	2.51
	SOD	$y=-142.86x_3^2+591.43x_3+1\,609.63$	0.99	2.07
	CAT	$y=-3.57x_3^2+15.71x_3+39.59$	0.99	2.20
	MDA	$y=4.02x_3^2-17.67x_3+75.23$	0.99	2.20
	Pro	$y=-53.21x_3^2+180.68x_3+336.60$	0.99	1.70
	SS	$y=0.21x_3^2-1.02x_3+26.77$	0.97	2.43
	SP	$y=-0.58x_3^2+2.45x_3+36.78$	0.99	2.11

析确定，氮、磷、钾肥施用量分别为3.0～3.3、1.4～1.7和2.1～2.2 g/株时，可以保证滇皂荚幼苗处于最佳生长状态。

3 讨 论

氮、磷、钾是植物生长发育必不可少的营养元素，合理施肥能够显著提高苗木质量，促进植株生长[17]，株高、地径、干质量作为评价植物生长的主要指标具有重要的研究意义。本研究发现，合理的氮、磷、钾配比施肥能显著促进滇皂荚幼苗的生长，随着施肥量的增加，株高、地径、地上干质量、地下干质量均呈先上升后下降的趋势，在福建青冈 *Quercus chungii* 幼苗[18]、杉木 *Cunninghamia lanceolate* 幼苗[19]的研究中也得到相同的结论，说明肥料不足时对植物的生长促进效果不明显，而过量施肥则会对植物生长产生抑制作用。株高和地上干质量在处理 $N_1P_2K_2$ 达到最大，$N_2P_2K_2$ 处理的地径显著高于其他处理，地下干质量则在处理 $N_2P_1K_2$ 下达到最大。综合分析株高、地径及干质量对N、P、K肥的依赖性，株高表现为P＞N＞K，地径表现为P＞K＞N，地上干质量表现为N＞P＞K，地下干质量表现为K＞P＞N，表明滇皂荚幼苗生长对P肥的依赖性较强，这可能与P促进细胞分裂和N促进蛋白质合成有关。N肥对地上干质量影响较大，是因为N作为叶绿素和可溶性蛋白质的主要组成成分，对植物细胞分裂和光合作用有重要作用，能促进植物株高、地径的生长和生物量的积累，夏雨[20]在对国槐 *Sophora japonica* 幼苗的研究中得到了相同的结论。互作效应中，P、K交互进一步证实适量N肥对幼苗生长具有促进作用；N、P交互作用可能影响根系发育；N、K交互作用则进一步表明，P肥对地径和干物质分配的影响较为明显，这与杨海东等[21]研究发现P肥对湿加松 *Pinus elliottii*×*P. caribaea* 地径有良好促进作用、刘士玲等[22]对西南桦 *Betula alnoides* 施肥试验得到适宜P肥可以促进幼苗生物量的结果一致。不同植物的生长营养需求存在差异，根据其生长需求合理地配施氮、磷、钾肥，充分发挥肥料间的协同作用，是提升施肥效果、促进植物生长的关键。

SOD活性、CAT活性、MDA含量、Pro含量、SP含量、SS含量是与植物保护酶系统、膜质过氧化系统、渗透调节机制相关的主要生理指标，通常用来研究植物体内物质和能量的代谢过程[23]。本研究表明，合理施肥能够显著增强滇皂荚幼苗体内的生理活性，但生理胁迫时，MDA含量、SS含量显著升高，SOD活性、CAT活性、Pro含量、SP含量则下降。综合各处理结果看，SOD活性、CAT活性、Pro含量、SP含量均在处理 $N_1P_2K_2$ 时达到最大值，MDA含量、SS含量分别在 $N_3P_2K_2$、$N_2P_3K_2$ 处理时达到最大值；对肥料的依赖性，SOD活性、CAT活性、Pro含量、MDA含量表现为P＞N＞K，SS含量表现为P＞K＞N，SP含量表现为K＞P＞N。低N（N_1）处理显著提高了抗氧化酶活性，说明适量N肥能提高植物抗氧化能力及渗透调节物质含量，并减少氧化损伤；高N（N_3）处理导致SOD活性、CAT活性、Pro含量、SP含量显著下降，MDA含量、SS含量升高，表明过量N肥可能引发氧化胁迫，抑制根系发育，这与李佳秋等[24]关于N肥对皂荚幼苗生长的研究结果一致。N_2K_1 施肥组合在多个生理指标上表现出较好的效果，如提高抗氧化酶活性、增加Pro和SP含量、降低MDA含量等，有助于增强植物的抗逆性和维持植物正常生理功能。P肥可促进植物生长，推动蛋白质、糖分等物质合成。N、K交互作用对植物体内SS、SP含量的影响较小。结果显示，P肥对SP含量的影响较大，可促进SP含量的积累，这与观赏桃‘元春’*Prunus persica* ‘Yuanchun’的响应机制一致[25]。SS含量在滇皂荚幼苗生长中表现出不一样的变化规律，随着胁迫程度的增加而升高，这与黄栀子 *Gardenia jasminoides* 幼苗[26]、望天树 *Parashorea chinensis* 幼苗[27]的SS响应机制相反，可能是因为不同植物体内的代谢机制存在差异，且胁迫导致糖积累，而正常生长条件下糖被高效利用，无需大量积累。MDA是膜脂过氧化的产物，N、P、K肥合理配施时MDA含量逐渐减少，而当植物受到胁迫时MDA含量会显著升高；高P处理（P_3）导致滇皂荚幼苗MDA含量剧增，说明滇皂荚幼苗对P胁迫更为敏感，也进一步证实了滇皂荚幼苗对P肥依赖性更强。综合各项指标来看，在肥料交互作用中，随着K肥施用量的增加，除MDA、SS含量逐渐下降外，其余各指标均呈上升趋势，说明K肥有助于植物生长，通过积累更多的抗氧化酶和渗透调节物质，以应对可能的环境压力；且 K_2 水平的SOD、CAT活性整体高于 K_1 水平，说明K肥可减轻植物细胞膜的脂质过氧化程度，对植物细胞具有一定的保护作用，这与钱晨诚等[28]研究得到的K在蛋白质合成中至关重要，对提高植物抗逆性、增强细胞的调控能力起中介作用的结论吻合。

氮、磷、钾肥互作效应因各肥料的施用量存

在显著差异，且在不同生长、生理指标上存在不同的交互作用。合理的氮、磷、钾肥配施能提高肥料的使用效率，促进植物生长；反之，不合理配施比例或过量施用可能会起到互相抵消的作用，甚至抑制植物生长。因此，在实际生产中，需要根据植物生长的需求和土壤条件，合理搭配氮、磷、钾肥的施用量，以达到最佳的施用效果。

4 结 论

综合各项指标分析结果显示，地径在 $N_2P_2K_2$ 处理下达到最大值，地下部分干质量在处理 $N_2P_1K_2$ 下达到最大值，其他指标均以 $N_1P_2K_2$ 处理表现最佳。该施肥配比可显著促进植物生长，提高抗氧化能力和渗透调节物质含量，并减轻氧化损伤；而 $N_2P_0K_2$、$N_2P_3K_2$、$N_2P_2K_3$、$N_3P_2K_2$ 处理组的生理指标及株高表现均低于对照（$N_0P_0K_0$）。地径在 $N_3P_2K_2$、$N_2P_0K_2$、$N_2P_3K_2$、$N_2P_2K_0$ 处理下亦小于对照组。过量施肥（$N_3P_2K_2$、$N_2P_3K_2$、$N_2P_2K_3$）均明显抑制幼苗生长，表明合理配施氮、磷、钾肥是促进幼苗生长的关键。建议苗期以低氮、中磷、中钾（$N_1P_2K_2$）配比施肥为主，以促进地上部分快速生长；后期可适当提高氮肥用量，采用 $N_2P_2K_2$ 施肥模式，以维持植物持续生长。本研究通过拟合一元二次方程，得出 N、P、K 肥施用量分别为 3.2、1.6 和 2.2 g/ 株时，可以保障滇皂荚幼苗达到最佳生长状态，该研究结果为滇皂荚苗木培育提供了理论依据。未来研究可进一步优化施肥方案，结合土壤养分状况，制定更精准、高效的施肥策略，为滇皂荚苗木规范化培育提供更有力的技术支撑。

参考文献：

[1] ACHAT D L, POUSSE N, NICOLAS M, et al. Nutrient remobilization in tree foliage as affected by soil nutrients and leaf life span[J]. Ecological Monographs,2018,88(3):408-428.

[2] 亢亚超 . 氮磷钾配比施肥对观光木幼苗生长生理及光合特性的影响 [D]. 南宁 : 广西大学 ,2020.
KANG Y C. Effects of different NPK ratio fertilization on growth, physiology and photosynthetic characteristics of *Tsoongiodendron odorum* seedlings[D]. Nanning: Guangxi University,2020.

[3] WANG X, WEI X L, WU G Y, et al. High nitrate or ammonium applications alleviated photosynthetic decline of *Phoebe bournei* seedlings under elevated carbon dioxide[J]. Forests,2020,11:293.

[4] 杨艳 , 陈韵竹 , 李培旺 , 等 . 氮磷钾配施对栀子幼苗生长的影响 [J]. 湖南林业科技 ,2024,51(3):78-85.
YANG Y, CHEN Y Z, LI P W, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium combined application on the seedling growth of *Gardenia jasminoides*[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2024,51(3):78-85.

[5] 王宁 , 师赵康 , 徐世英 , 等 . 低氮诱导玉米幼苗叶片衰老过程中碳氮平衡的动态变化 [J]. 应用生态学报 ,2022,33(4):1045-1054.
WANG N, SHI Z K, XU S Y, et al. Dynamics of carbon and nitrogen balance during leaf senescence of maize seedlings induced by low nitrogen stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2022,33(4):1045-1054.

[6] 罗汉东 , 朱丛飞 , 张令 , 等 . 磷施肥水平对油茶植株营养生长的影响 [J]. 经济林研究 ,2016,34(4):52-56.
LUO H D, ZHU C F, ZHANG L, et al. Effects of phosphorus fertilization levels on vegetative growth in *Camellia oleifera*[J]. Non-wood Forest Research,2016,34(4):52-56.

[7] 徐新翔 , 侯昕 , 贾志航 , 等 . 供钾水平对苹果砧木 M9T337 幼苗生长、光合特性与 ^{15}N、^{13}C 吸收利用的影响 [J]. 应用生态学报 ,2019,30(6):1861-1868.
XU X X, HOU X, JIA Z H, et al. Effects of potassium supply on the growth, photosynthesis and ^{15}N and ^{13}C absorption and utilization of M9T337 seedling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(6):1861-1868.

[8] 李莲芳 , 孟梦 , 温琼文 , 等 . 云南热区的 5 种木本森林蔬菜及其培育技术 [J]. 西部林业科学 ,2005,34(1):9-14.
LI L F, MENG M, WEN Q W, et al. Cultivation technology of five woody vegetables in hot areas of Yunnan Province[J]. Journal of West China Forestry Science,2005,34(1):9-14.

[9] 邵则夏 . 多功能优良树种滇皂荚 [J]. 云南农业 ,2001(12):14.
SHAO Z X. *Gleditsia sinensis*, a multifunctional and excellent tree species[J]. Yunnan Agriculture,2001(12):14.

[10] 范崇 , 王媛媛 , 董文明 . 滇皂荚开发现状与前景 [J]. 中国食物与营养 ,2011,17(4):30-33.
FAN C, WANG Y Y, DONG W M. Exploitation status and prospect of *Gleditsia japonica* var. *delavayi*[J]. Food and Nutrition in China,2011,17(4):30-33.

[11] 曾为林 , 尹加笔 , 高苹 , 等 . 梁河县滇皂荚的皂角米营养成分分析 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学),2017,37(5):203-207.
ZENG W L, YIN J B, GAO P, et al. Analysis of nutritional compositions of the perisperms from *Gleditsia japonica* var. *delavayi* in Lianghe County[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2017,37(5):203-207.

[12] 郜锐 , 陆斌 , 宁德鲁 , 等 . 滇皂荚部分生物学特性的初步研究 [J]. 西部林业科学 ,2008,37(1):95-99.
GAO R, LU B, NING D L, et al. Biological characteristics of *Gleditsia japonica* var. *delavayi*[J]. Journal of West China Forestry Science,2008,37(1):95-99.

[13] 陈芳 , 陆斌 , 宁德鲁 , 等 . 滇皂荚光合特性及其影响因子的研究 [J]. 西北林学院学报 ,2005,20(2):44-45,50.
CHEN F, LU B, NING D L, et al. A study on photosynthetic of

Gleditsia japonica var. *delavayi*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2005,20(2):44-45,50.

[14] 冯武 , 刘嘉宝 , 武力 , 等 . 滇皂荚果壳化学成分的研究 [J]. 云南林业科技 ,2003(2):69-71.
FENG W, LIU J B, WU L, et al. A study on chemical composition of proper exciple of *Gleditsia japonica* var. *delavayi*[J]. Yunnan Forestry Science and Technology,2003(2):69-71.

[15] 曾为林 , 尹加笔 , 高苹 , 等 . 不同单株滇皂荚皂角仁的皂苷含量 [J]. 贵州农业科学 ,2017,45(3):41-43.
ZENG W L, YIN J B, GAO P, et al. Saponin content in perisperm of different high-quality *Gleditsia japonica* individual trees[J]. Guizhou Agricultural Sciences,2017,45(3):41-43.

[16] 潘正伟 , 和贵祥 , 罗红伟 , 等 . 不同环境对滇皂荚种子发芽率及幼苗长势的影响 [J]. 乡村科技 ,2022,13(18):105-107.
PAN Z W, HE G X, LUO H W, et al. Effects of different environments on seed germination rate and seedling growth of *Gleditsia sinensis*[J]. Rural Science and Technology, 2022,13(18):105-107.

[17] 宋思梦 , 林冬梅 , 张健 , 等 . 不同水肥处理对巨菌草 (*Cenchrus fungigraminus*) 形态特征及生物量的影响 [J]. 应用与环境生物学报 ,2024,30(2):324-334.
SONG S M, LIN D M, ZHANG J, et al. Effects of different water and fertilizer treatments on morphological characteristics and biomass of *Cenchrus fungigraminus*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2024,30(2):324-334.

[18] 潘艳菲 , 杨模华 , 刘卫东 , 等 . 不同配方施肥对福建青冈幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2024,44(6):69-80.
PAN Y F, YANG M H, LIU W D, et al. Effects of different formula fertilization on the growth and physiological characteristics of *Quercus chungii* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(6):69-80.

[19] 杨捷 , 朱宁华 , 杨海洋 , 等 . 配方施肥对铁心杉幼苗生长和生理生化指标的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2024,53(1):48-55.
YANG J, ZHU N H, YANG H Y, et al. Effect of formula fertilization on growth and physiological-biochemical characteristics of red-heart *Cunninghamia lanceolate* seedlings[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2024,53(1):48-55.

[20] 夏雨 . 不同浓度氮、磷、钾肥对国槐幼苗生长和生理的影响 [D]. 泰安 : 山东农业大学 ,2024.
XIA Y. The effects of different concentrations of nitrogen, phosphorus, and potassium on the growth and physiology of *Sophora japonica* seedlings[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2024.

[21] 杨海东 , 郑道序 . N、P 肥对湿加松幼苗生长效应的研究 [J]. 广东林业科技 ,2014,30(4):28-32.
YANG H D, ZHENG D X. Studies on effects of nitrogen and phosphorus fertilizer on *Pinus elliottii* × *P. caribaea* seedlings[J]. Guangdong Forestry Science and Technology,2014,30(4):28-32.

[22] 刘士玲 , 陈琳 , 庞圣江 , 等 . 施 N、P 肥对西南桦无性系幼苗生长及叶片 N、P 含量的影响 [J]. 华南农业大学学报 , 2020,41(2):111-116.
LIU S L, CHEN L, PANG S J, et al. Effects of N and P fertilization on growth and leaf N and P contents of *Betula alnoides* clone seedlings[J]. Journal of South China Agricultural University,2020,41(2):111-116.

[23] 刘强 , 马晖玲 , 张锁科 . 营养调控对草地早熟禾部分生理生化指标及地上生物量的影响 [J]. 草原与草坪 ,2015,35(2):47-53.
LIU Q, MA H L, ZHANG S K. Effect of nutrients control on some physiological and biochemical parameters and aboveground biomass of kentucky bluegrass[J]. Grassland and Turf, 2015,35(2):47-53.

[24] 李佳秋 , 田佳赫 , 于丽娜 , 等 . 不同施氮量对皂荚幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 林业与生态科学 ,2024,39(1):28-33.
LI J Q, TIAN J H, YU L N, et al. Effects of fertilization on seedling growth and photosynthetic characteristics of *Gleditsia sinensis*[J]. Forestry and Ecological Sciences,2024,39(1):28-33.

[25] 闫杰伟 . 施肥对观赏桃 ' 元春 ' 生长及生理特性的影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2019.
YAN J W. Effects of fertilization on growth and physiological characteristics of ornamental peach *Prunus persica* 'Yunchun'[J]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2019.

[26] 尹梦雅 , 杨艳 , 汤玉喜 , 等 . 配方施肥对黄栀子幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2022,42(5): 83-90,100.
YIN M Y, YANG Y, TANG Y X, et al. Effects of formula fertilization on the growth and physiological characteristics of *Gardenia jasminoides* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2022,42(5):83-90,100.

[27] 李婷 , 刘莉 , 武志伟 , 等 . 氮磷钾钙配施对望天树幼苗生长及生理特性的影响 [J]. 西北林学院学报 ,2020,35(6):110-115,175.
LI T, LIU L, WU Z W, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium on the growth and physiological characteristics of *Parashorea chinensis* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2020, 35(6):110-115,175.

[28] 钱晨诚 , 陈立 , 马泉 , 等 . 磷钾肥施用量和方法对弱筋小麦籽粒产量和蛋白质含量及养分吸收利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报 ,2023,29(2):287-299.
QIAN C C, CHEN L, MA Q, et al. Effects of phosphorus and potassium fertilizer on grain yield, nutrient uptake and utilization in low-gluten wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023,29(2):287-299.

[本文编校：谢荣秀]