

配方施肥对无患子幼树光合特性和生长的影响

刘俊涛^{1,2}, 贾黎明^{1*}, 闫小莉³, 张卫华², 蔡婉婷¹, 仲 静¹, 王立宪¹,
曹秋丽¹, 赵鹏丽¹, 陈义勇¹, 余佳欣¹, 陈 娜¹, 翁学煌⁴

(1.北京林业大学林学院, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100083;
2.广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 3.福建农林大学林学院, 福建 福州 350002;
4.福建源华林业生物科技有限公司, 福建 建宁 354500)

摘要:【目的】探究氮磷钾配施对无患子(*Sapindus saponaria*)‘媛华’和‘粤硕菩提’生长和光合特性的影响, 为无患子优良品种科学施肥提供理论依据。【方法】以无患子品种‘媛华’和‘粤硕菩提’为试验材料, 采用“3414”大田试验方法, 研究不同 N、P 和 K 配方施肥处理(0.N、P、K 均不施肥; 1.N 肥 75 kg/hm², P 肥 45 kg/hm², K 肥 20 kg/hm²; 2.N 肥 150 kg/hm², P 肥 90 kg/hm², K 肥 40 kg/hm²; 3.N 肥 225 kg/hm², P 肥 135 kg/hm², K 肥 60 kg/hm²)对无患子优良品种生长和光合特性的影响。【结果】无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’的树高以 N₂P₁K₂和 N₂P₂K₃处理效果最好, 分别比对照提高 28.42%和 39.14%, 且差异显著(P<0.05); 其 N₁P₂K₁和 N₂P₃K₂处理的无患子地径最大, 比对照组(N₀P₀K₀)提高了 16.11%和 32.93%。不同施肥影响无患子‘媛华’树高和地径顺序为磷>氮>钾, 而影响‘粤硕菩提’的树高和地径顺序为氮>钾>磷。不同施肥处理无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’均以 N₂P₂K₂处理的净光合速率最高, 较对照组显著提高了 42.19%和 53.01%, 各处理组能提高叶片净光合速率、胞间 CO₂浓度和蒸腾速率、水分利用效率, 但‘媛华’气孔导度变化不明显。氮肥施用量与‘媛华’和‘粤硕菩提’树高和地径均呈极显著正相关。采用熵权 TOPSIS 法对不同施肥处理下无患子品种‘媛华’和‘粤硕菩提’的生长和光合指标进行综合评价, ‘媛华’的施肥处理以 N₂P₁K₂和 N₁P₂K₂的综合评价较好, ‘粤硕菩提’的施肥处理以 N₁P₁K₂和 N₂P₂K₂较好。【结论】适当氮磷钾配施能有效促进无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’的生长和光合特性, ‘媛华’的最佳的氮磷钾配施方案 N、P、K 的施肥量分别为 115.26、64.14、44.37 kg/hm², ‘粤硕菩提’的 N、P、K 的施肥量分别为 117.90、87.65、36.11 kg/hm²。

关键词: 无患子; 氮磷钾配方施肥; 光合作用; 熵权 TOPSIS 法

中图分类号: S718; Q89

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)06-0023-11



Effect of variations in fertilization formula on the photosynthetic characteristics and growth of young *Sapindus saponaria*

LIU Juntao^{1,2}, JIA Liming^{1*}, YAN Xiaoli³, ZHANG Weihua², CAI Wanting¹, ZHONG Jing¹, WANG Lixian¹,
CAO Qiuli¹, ZHAO Pengli¹, CHEN Yiyong¹, YU Jiabin¹, CHEN Na¹, WENG Xuehuang⁴

(1. National Energy R & D Center for Non-Food Biomass, Key Laboratory of Silviculture and Conservation of the Ministry of Education, School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 3. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 4. Fujian Yuanhua Forestry Biotechnology Co., Ltd., Jianning 354500, China)

Abstract: [Objective] The study aimed to explore the effects of the combined application of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) fertilizers on the growth and photosynthetic characteristics of the ‘Yuanhua’ and ‘Yueshuo Bodhi’ of *Sapindus saponaria*, and to provide a theoretical basis for the scientific fertilization of disease-free clones.

收稿日期 Received: 2023-03-10

修回日期 Accepted: 2024-08-10

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2019FY100803); 建宁县人民政府与福建农林大学共建农业科技现代化先行县重点项目(KH230122A)。

第一作者: 刘俊涛(1010350582@qq.com), 博士。* 通信作者: 贾黎明(jlm@bjfu.edu.cn), 教授。

引文格式: 刘俊涛, 贾黎明, 闫小莉, 等. 配方施肥对无患子幼树光合特性和生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(6): 23-33. LIU J T, JIA L M, YAN X L, et al. Effect of variations in fertilization formula on the photosynthetic characteristics and growth of young *Sapindus saponaria*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(6): 23-33. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202303013.

【Method】 Using the *S. saponaria* ‘Yuanhua’ and ‘Yueshuo Bodhi’ as the experimental materials, the “3414” field experimental method was used to study the effects of different N, P, and K fertilization regimes on the growth and photosynthetic characteristics of the *S. saponaria*. 【Result】 The tree heights of the offspring of *S. saponaria* were greatest following treatment with $N_2P_1K_2$ and $N_2P_2K_3$, being 28.42% and 39.14% higher, respectively, than that of the control, and the differences were found to be significant ($P < 0.05$). The ground diameter was largest following treatment with $N_1P_2K_1$ and $N_2P_3K_2$, and increased by 16.11% and 32.93%, respectively, compared to that of the control ($N_0P_0K_0$). The tree heights and ground diameters of the ‘Yuanhua’ were in the following order: $P > N > K$, under different fertilization treatments, while those of the ‘Yueshuo Bodhi’ were in the order: $N > K > P$. The net photosynthetic rate of the ‘Yuanhua’ and ‘Yueshuo Bodhi’ was highest following treatment with $N_2P_2K_2$ under different fertilization regimes, and increased significantly by 42.19% and 53.01%, respectively, compared to that of the control. The net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration, rate of transpiration, and foliar water use efficiency of the treatment groups improved significantly; however, the stomatal conductance of the ‘Yuanhua’ did not alter significantly, and the stomatal conductance of the ‘Yueshuo Bodhi’ differed significantly. The quantity of N fertilizer applied exhibited a significant positive correlation with the tree heights and ground diameters of ‘Yuanhua’ and ‘Yueshuo Bodhi’ trees. The growth and photosynthetic indicators of the ‘Yuanhua’ and ‘Yueshuo Bodhi’ under different fertilization regimes were comprehensively evaluated using the entropy weighted TOPSIS method. The findings revealed that $N_2P_1K_2$ and $N_1P_2K_2$ were superior for the fertilization of ‘Yuanhua’ trees, while $N_1P_1K_2$ and $N_2P_2K_2$ were superior for the fertilization of the ‘Yueshuo Bodhi’. 【Conclusion】 The application of N, P and K at an appropriate ratio can effectively promote the growth and photosynthetic characteristics of ‘Yuanhua’ and ‘Yueshuo Bodhi’ trees. The optimal strategy for the application of N, P, and K fertilizers is that the quantities of N, P and K should be 115.26, 64.14 and 44.37 kg/hm^2 , respectively, for the ‘Yuanhua’, and 117.90, 87.65 and 36.11 kg/hm^2 , respectively, for ‘Yueshuo Bodhi’ trees.

Keywords: *Sapindus saponaria*; N, P and K formula fertilization; photosynthesis; entropy weight-TOPSIS method

近年来,我国无患子(*Sapindus saponaria*)的种植模式大多是广种薄收、粗放管理的生产方式,多数原料林为实生栽培模式,缺乏高产新品种标准化培育模式,导致无患子生长差、产量低、成本高,严重制约无患子产业的发展,而相关研究团队选育出的无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’正在成为福建主推新品种^[1-3]。施肥是培育苗木的关键技术环节,可以提高林木的苗高和地径以及光合作用^[4-9],进而增加林木的质量和产量^[10-14]。氮(N)、磷(P)、钾(K)是苗木生长发育必需的大量元素,也是光合作用中的关键元素^[9]。相关研究表明,无患子对于土壤的环境条件要求较高,在pH低于5.5的紫色土种植时,其生长发育不良^[15],科学施肥能够有效改善土壤条件,增加土壤肥力,促进树木生长。乐佳兴^[16]认为P肥对无患子的生长有明显的促进作用,影响无患子生长最大的是P元素,其次是N元素;连人豪^[17]进行无患子苗木试验研究得出理想的N、P、K施肥配比分别为6.0、4.5、3.0 g/株。丁帆^[18]研究发现在无患子苗木配方施肥中,3种肥料对树高和冠幅影响作用由大到小依次为 $N > K > P$;刘俊涛等^[19]研究无患子人工林初果期土壤养分主要受P的限制,苗木定植后,可适当增加P肥的投入;王福根等^[20]认为在8年生无患子实生林中适宜施肥量为施N肥693 kg/hm^2 、P肥321

kg/hm^2 、K肥432 kg/hm^2 。因此,不同比例的N、K、P肥会导致无患子生长的差异。也有研究发现,在相同环境下不同品种(林木基因型)的生长对施肥存在很大的响应差异,应根据不同的品种(基因型)配置不同的施肥配方^[21-22]。

“3414”测土配方施肥作为优化施肥配比的主要手段^[23],自提出以来被应用于闽楠(*Phoebe bournei*)、降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、海棠(*Malus spectabilis*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)、赤苍藤(*Erythralium scandens*)、假苹婆(*Sterculia lanceolata*)、紫薇(*Lagerstroemia indica*)、红椿(*Toona ciliata*)、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)、凹叶厚朴(*Houpoa officinalis*)等树种^[24-33],并已取得了显著的效果。近年来,目前常用于施肥评价的方法有隶属函数值法、主成分分析法等^[34-35]。TOPSIS法是一种理想目标相似性、逼近理想解排序法的多属性决策方法,而熵权-TOPSIS模型是熵权法与TOPSIS模型结合在一起的改进模型^[36],已被应用于月季(*Rosa chinensis*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等不同植物的施肥评价^[37-39],但尚未见到利用熵权-TOPSIS法对无患子评价的报道。本研究以无患子品种‘媛华’和‘粤硕菩提’为试验材料,利用“3414”配方施肥方法,研究N、P、K配施对无患子优良品种生长

和光合特性的影响,探索最佳的 N、P、K 肥配施方案,为无患子优良无性系科学施肥提供理论参考。

1 材料与方

1.1 试验地及材料

研究地点设在福建省三明市建宁县(116°47'20"E, 26°40'3"N),属中亚热带海洋性季风气候,又兼有大陆性山地气候特点,年均气温 17.64 °C,年均降水量 1 950 mm,多集中在春夏两季,年均相对湿度 81.81%。试验地土壤为山地黄红壤土,pH 约 5.02,坡度为 24°,海拔 455 m,土壤养分有机碳含量 4.878 g/kg,全 N 含量 0.55 g/kg,全 P 含量 0.322 g/kg,全 K 含量 23.493 g/kg。

供试材料为两个无患子品种‘媛华’和‘粤硕菩提’,两个品种都由嫁接繁育而来,接穗来源于不同株高产、稳产、抗病虫等性状优良的单株,共嫁接 2 000 株。‘媛华’和‘粤硕菩提’于 2021 年 3 月移植造林。‘媛华’株行距为 4 m×4 m,栽植密度为 635 株/hm²,造林之后的后续管理措施为每年除草 2 次(6 月和 8 月各 1 次)。每个树穴施有机肥 2 kg 平铺穴底并覆土,稳苗 1 a。2022 年 3 月测得平均树高 55.089 cm,平均地径 19.21 mm;‘粤硕菩提’株行距为 5 m×6 m,栽植密度为 330~350 株/hm²,平均树高 67.18 cm,平均地径 20.8 mm。供试肥料 N 肥用尿素(含 N 46.0%),P 肥用过磷酸钙(含 P₂O₅ 12.0%),K 肥为硫酸钾(含 K₂O 60.0%)。

1.2 试验设计及指标测定

采用“3414”肥料试验设计,设定 N、P、K 3 个因素、4 个施肥水平(0、1、2、3):0 水平指不施肥,2 水平(中等肥料)为当地经验最佳施肥量,1 水平(低肥料)为 2 水平的一半,3 水平(高肥料)为 2 水平的 1.5 倍。试验中大田实生林常见的 N、P、K 肥有效成分 N、P₂O₅ 和 K₂O 施肥量分别为 240、275 和 366 g/株^[18],盆栽中常见的 N、P₂O₅ 施肥量为 10.05、2.66 g/盆^[16],根据团队前期试验数据,具体施肥量见表 1。

根据随机区组试验设置(表 2),供试幼苗 630 株,每处理重复 3 次,每处理 15 株,处理小区间设立隔离行。该试验在大田环境条件下进行,从 2021 年 11 月到 2022 年 11 月持续 12 个月。全年分 2 次进行(4 月和 7 月)施肥,以有机肥为底肥(每株树等量),氮磷钾配方施肥比例随时间变化,其中 4 月施总量的 60%,7 月施总量的 40%,采用沟施法进行施肥,按肥料用量混合施入后立即覆

土,田间肥料试验采样随机区组设计,以尽量减少任何环境影响,其他养护管理措施同一般栽培。

表 1 施肥因素设计

Table 1 Fertilization design 单位:kg/hm²

施肥水平 fertilization level	N 肥 nitrogenous fertilizer	P 肥 phosphate fertilizer	K 肥 potash fertilizer
0	0	0	0
1	75	45	20
2	150	90	40
3	225	135	60

注:4 个水平的施肥剂量标准为:0 为不施肥,2 为当地经验最佳施肥量;1 即施肥不足,为 2 水平的一半;3 即过量施肥,为 2 水平的 1.5 倍。The fertilization dose standards for four levels are: 0 level refers to no fertilization, 2 level is the best fertilization amount based on local experience, and 1 level (insufficient fertilization) is half of 2 level; 3 levels (excessive fertilization) is 1.5 times of 2 levels.

表 2 试验处理

Table 2 Test treatment

处理编号 treatment code	施肥量/(kg·hm ⁻²) fertilization level		
	N	P	K
N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
N ₀ P ₂ K ₂	0	90	40
N ₁ P ₂ K ₂	75	90	40
N ₂ P ₀ K ₂	150	0	40
N ₂ P ₁ K ₂	150	45	40
N ₂ P ₂ K ₂	150	90	40
N ₂ P ₃ K ₂	150	135	40
N ₂ P ₂ K ₁	150	90	20
N ₂ P ₂ K ₀	150	90	0
N ₂ P ₂ K ₃	150	90	60
N ₃ P ₂ K ₂	225	90	40
N ₁ P ₁ K ₂	75	45	40
N ₁ P ₂ K ₁	75	90	20
N ₂ P ₁ K ₁	150	45	20

于 2022 年 11 月底,无患子树苗停止生长后,测量幼苗的高度和地径。2022 年 8 月 10 日 9:00—11:00 进行光合参数测定,每个试验处理随机挑选 3 株标准苗,每个施肥处理选取当年生枝条方向相同、叶片完整、没有病虫害的植株,使用 Li-6400X 便携式光合作用测量仪(美国 LI-COR 公司)对植株进行光合参数测定,包括:净光合速率 [Pn, μmol/(m²·s)]、气孔导度 [Gs, mol/(m²·s)]、胞间二氧化碳浓度 (Ci, μmol/mol) 和蒸腾速率 [Tr, mmol/(m²·s)],并以净光合速率/蒸腾速率计算水分利用效率 (WUE, mmol/mol)。每个指标测 3 次。测定时饱和光合有效辐射设为 1 000 μmol/(m²·s),空气流速为 500 μmol/s,温度控制在 (25±1) °C,CO₂ 含量为 400 μmol/mol^[24]。

1.3 基于熵权-TOPSIS方法的多目标决策与评价

通过与最优解的相似性进行排序偏好的技术(TOPSIS)方法被用来确定一个可行的解决方案集,通过定义问题的最优解和最劣解,并选择距离最劣解最远的最优解^[37-39],分析过程如下。

1) 建立不同施肥处理下林木生长属性的评价指标矩阵(X)如下:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1j} & \cdots & X_{1m} \\ \cdots & & \cdots & & \cdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} & \cdots & X_{im} \\ \cdots & & \cdots & & \cdots \\ X_{n1} & \cdots & X_{nj} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: X_{ij} 为原始数据第*i*个处理的第*j*个评价指标($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$); n 为处理数($n=14$); m 为评价指标数($m=7$)。

2) 评价指标标准化以统一各指标的类型和维度。

对于正指标,使用以下公式:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})} + 1 \quad (2)$$

对于负指标,采用以下公式:

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}) - X_{ij}}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})} + 1 \quad (3)$$

式中: X_{ij} 为第*i*个处理的第*j*个指标值($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$); X'_{ij} 为标准化 X_{ij} 。

3) 第*i*个处理所代表的第*j*个指标的比例(P_{ij})计算如下:

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (4)$$

4) 第*j*个指标的熵值 e_j 计算如下:

$$e_j = -\frac{\sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij})}{\ln n} \quad (5)$$

5) 第*j*个指标的差值系数 g_j 计算如下:

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

6) 第*j*个指标的权重 W_j 计算如下:

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^m g_i} \quad (7)$$

7) 由归一化决策矩阵 $X = (X'_{ij})_{14 \times 7}$,权向量 $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_{14})$ 形成加权归一化决策矩阵 R :

$$R = (R_{ij})_{m \times n} = (W_j X'_{ij})_{m \times n} \quad (8)$$

8) 确定最优解 Z_{ij}^+ 和最劣解 Z_{ij}^- 分别形成最优

向量 Z^+ 和最劣向量 Z^- :

$$Z_{ij}^+ = (\max R_{i1}^+, \max R_{i2}^+, \max R_{i3}^+, \dots, \max R_{i7}^+), \quad (9)$$

$$Z_{ij}^- = (\max R_{i1}^-, \max R_{i2}^-, \max R_{i3}^-, \dots, \max R_{i7}^-) \quad (10)$$

9) 确定14种处理和最劣解之间的欧氏空间距离 D^+ 和 D^- :

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m [w_j \times (r_{ij} - Z_{ij}^+)]^2}, \quad (11)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [w_j \times (r_{ij} - Z_{ij}^-)]^2} \quad (12)$$

10) 计算各处理的绩效评价 C_i ,用来评价对象与最优方案的贴近度:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (13)$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 21.0 进行数据统计分析,采用 Origin 2018 作图。使用 SPSS 21.0 进行单向分组资料的方差分析(One-way ANOVA)和新复极差法(Duncan)多重比较,使用 Pearson 相关性分析一元线性相关性。显著性概率水平设置为 $\alpha=0.05$,测定数据表示为平均值 \pm 标准偏差。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾配施对无患子生长的影响

经测定可知(表3),不同施肥处理下无患子品种‘媛华’和‘粤硕菩提’的树高均高于对照组,其中处理 $N_2P_1K_2$ 和 $N_2P_2K_3$ 施肥效果最好,与对照组相比,显著提高了28.42%、39.14%。而无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’的地径以处理 $N_1P_2K_1$ 和 $N_2P_3K_2$ 的最大,比对照组显著提高了16.11%和32.93%。

在 P_2K_2 水平上,无患子‘媛华’的树高和地径产生了相同的影响($N_3 > N_2 > N_1 > N_0$),且‘媛华’树高和地径随着氮施用量的增加也逐渐升高,而‘粤硕菩提’的树高和地径产生了不同的响应(树高 $N_2 > N_1 > N_3 > N_0$,地径 $N_2 > N_3 > N_0 > N_1$),且‘粤硕菩提’树高和地径随着氮施用量的增加而逐渐降低(表3);在 N_2K_2 水平上,‘媛华’的树高和地径产生了不同的响应(树高 $P_1 > P_2 > P_3 > P_0$,地径 $P_1 > P_3 > P_2 > P_0$),‘媛华’树高随着磷施用量的增加而先升高后降低,‘粤硕菩提’也有不同的响应(树高 $P_2 > P_0 > P_3 > P_1$,地径 $P_3 > P_2 > P_1 > P_0$);在 P_2K_2 水平上,随钾施用量‘媛华’(树高 $K_2 > K_0 > K_1 > K_3$,地径 $K_0 > K_1 > K_2 > K_3$)和‘粤硕菩提’(树高 $K_3 > K_1 > K_2 > K_0$,地径 $K_2 > K_3 > K_1 > K_0$)产生了不同响应。因此,研究表明无患子‘媛华’的 $N \times P$ 组合和‘粤硕菩提’的 $N \times K$ 组合可以提高幼树的地上部属性,不同施肥处理

影响无患子‘媛华’树高和地径顺序为 P>N>K,影响‘粤硕菩提’树高和地径顺序为 N>K>P。

表 3 不同氮磷钾配施处理对无患子幼树生长的影响

Table 3 Effects of different N, P and K fertilization treatments on the growth of *Sapindus saponaria* cultivar young seeding

处理编号 treatment code	树高/cm tree height		地径/mm ground diameter	
	‘媛华’ ‘Yuanhua’	‘粤硕菩提’ ‘Yueshuo Bodhi’	‘媛华’ ‘Yuanhua’	‘粤硕菩提’ ‘Yueshuo Bodhi’
N ₀ P ₀ K ₀	98.40±0.60 c	116.67±2.52 g	30.92±0.90 g	32.07±1.40 e
N ₀ P ₂ K ₂	107.61±5.05 bc	123.33±4.51 fg	31.37±0.36f g	33.94±1.07 de
N ₁ P ₂ K ₂	116.24±7.14 ab	137.00±5.00 de	32.87±0.90 de	33.29±3.10 de
N ₂ P ₀ K ₂	101.28±11.22 c	149.00±8.19 bcd	30.65±0.72 g	34.49±2.20 de
N ₂ P ₁ K ₂	126.37±11.14 a	141.67±4.16 cde	35.34±1.06 ab	38.10±2.16 abcd
N ₂ P ₂ K ₂	122.35±10.05 ab	150.67±6.51 abc	33.05±0.77 de	41.49±2.72 ab
N ₂ P ₃ K ₂	112.18±2.56 abc	143.67±5.86 cde	35.22±0.42 ab	42.63±4.37 a
N ₂ P ₂ K ₁	115.73±9.70 ab	154.00±9.54 abc	33.55±0.41 cde	39.98±2.15 abc
N ₂ P ₂ K ₀	121.18±7.72 ab	148.33±7.09 bcd	34.35±1.07 bcd	35.66±4.36 cde
N ₂ P ₂ K ₃	110.20±5.26 bc	162.33±4.04 a	32.71±1.01 ef	40.64±0.53 abc
N ₃ P ₂ K ₂	125.93±11.23 a	134.00±9.17 ef	34.04±0.48 bcde	36.36±1.24 bcde
N ₁ P ₁ K ₂	119.07±6.59 ab	159.00±7.00 ab	33.14±1.10 de	41.94±1.35 a
N ₁ P ₂ K ₁	117.07±5.72 ab	152.67±9.07 abc	35.90±0.74 a	38.16±3.64 abcd
N ₂ P ₁ K ₁	121.84±1.36 ab	160.67±8.50 ab	34.70±0.80 abc	42.13±4.00 a

注:同列数据后不同小写字母表示不同施肥处理间的差异显著(P<0.05)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences between different fertilization treatments(P<0.05). The same below.

2.2 氮磷钾配施对无患子叶片光合作用的影响

不同氮磷钾施肥处理对无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’叶片光合作用的影响见表 4、5。与对照组(CK)相比,不同氮磷钾施肥处理对无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’叶片的净光合速率均有所提高,且均以处理 N₂P₂K₂效果最佳,较对照组显著提高了 42.19%和 53.01%(P<0.05)。无患子‘媛华’各处理组间的气孔导度差异不显著,‘媛华’和‘粤硕菩提’的胞间二氧化碳浓度以处理 N₂P₂K₁和 N₂P₀K₂效果最好,较对照显著提高 8.59%和 11.40%;各

处理组的‘媛华’水分利用效率均高于‘粤硕菩提’的,‘媛华’和‘粤硕菩提’的水分利用效率分别在处理 N₂P₂K₃、N₂P₀K₂达到最大值。总之,无患子‘媛华’N₂P₂K₂处理的净光合速率最高,N₂P₀K₂处理的气孔导度最低,而 N₂P₂K₃蒸腾速率较低,水分利用效率最高。无患子‘粤硕菩提’的 N₂P₂K₂处理的净光合速率和气孔导度最高,胞间二氧化碳浓度较低,N₂P₀K₂处理的蒸腾速率较低,水分利用效率和胞间二氧化碳浓度最高,以 N₂P₂K₃处理蒸腾速率最高。

表 4 不同氮磷钾配施处理对无患子‘媛华’叶片光合作用的影响

Table 4 Effects of different N, P and K fertilization treatments on leaf photosynthesis of *S. saponaria* ‘Yuanhua’

处理编号 treatment code	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Pn	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Gs	胞间二氧化碳浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) Ci	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Tr	水分利用效率/ ($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$) WUE
N ₀ P ₀ K ₀	12.56±0.65 f	0.28±0.01 a	323.37±8.75 bc	5.57±0.38 f	2.26±0.04 cde
N ₀ P ₂ K ₂	16.7±0.33 bcd	0.30±0.04 a	341.79±6.47 ab	5.96±0.74 def	2.83±0.33 ab
N ₁ P ₂ K ₂	17.55±0.32 ab	0.29±0.04 a	335.76±12.71 ab	6.37±0.58 cdef	2.77±0.20 abc
N ₂ P ₀ K ₂	14.90±0.80 e	0.25±0.04 a	330.82±17.44 ab	6.44±0.41 cdef	2.32±0.19 bcd
N ₂ P ₁ K ₂	16.86±0.34 abcd	0.30±0.02 a	341.77±17.33 ab	7.43±1.41 abcd	2.33±0.47 bcd
N ₂ P ₂ K ₂	17.86±0.75 a	0.30±0.03 a	330.19±15.71 abc	7.98±0.45 ab	2.25±0.21 cde
N ₂ P ₃ K ₂	16.44±0.50 bcd	0.32±0.02 a	338.83±13.57 ab	7.23±0.53 bcde	2.28±0.11 cde
N ₂ P ₂ K ₁	13.20±0.63 f	0.26±0.02 a	351.17±4.26 a	7.41±0.05 abcd	1.78±0.09 de
N ₂ P ₂ K ₀	12.94±0.65 f	0.28±0.03 a	336.15±26.12 ab	6.80±1.34 bcdef	1.95±0.34 de
N ₂ P ₂ K ₃	15.86±0.36 de	0.26±0.05 a	325.30±13.08 abc	5.76±1.40 ef	2.88±0.78 a
N ₃ P ₂ K ₂	14.83±0.81 e	0.30±0.03 a	318.04±4.58 bc	7.09±0.57 bcdee	2.09±0.06 de
N ₁ P ₁ K ₂	14.94±0.63 e	0.30±0.07 a	322.30±10.02 bc	8.80±0.60 a	1.70±0.17 e
N ₁ P ₂ K ₁	15.91±0.69 cde	0.27±0.05 a	314.69±20.63 bc	7.69±0.46 abc	2.07±0.07 de
N ₂ P ₁ K ₁	17.07±0.91 abc	0.33±0.05 a	303.37±8.84 c	8.31±0.59 ab	2.06±0.10 de

表5 不同氮磷钾配施处理对无患子‘粤硕菩提’叶片光合作用的影响
Table 5 Effects of different N, P and K fertilization treatments on leaf photosynthesis of *S. saponaria* ‘Yueshuo Bodhi’

处理编号 treatment code	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Pn	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Gs	胞间二氧化碳浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) Ci	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Tr	水分利用效率/ ($\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$) WUE
N ₀ P ₀ K ₀	10.28±1.07 g	0.27±0.02 d	275.74±6.41 c	6.29±0.29 e	1.63±0.12 abc
N ₀ P ₂ K ₂	11.65±1.14 efg	0.30±0.03 abcd	306.80±4.84 a	7.79±0.63 d	1.51±0.24 cd
N ₁ P ₂ K ₂	14.59±0.50 abc	0.29±0.01 bed	286.12±3.16 bc	8.66±0.65 bed	1.69±0.07 abc
N ₂ P ₀ K ₂	12.29±0.11 def	0.31±0.03 abcd	307.19±7.23 a	6.45±0.27 e	1.91±0.06 a
N ₂ P ₁ K ₂	14.63±0.32 abc	0.29±0.02 bed	289.14±5.25 bc	8.93±0.74 abc	1.64±0.10 abc
N ₂ P ₂ K ₂	15.73±1.06 a	0.35±0.04 a	283.33±5.50 bc	9.14±0.64 ab	1.72±0.11 abc
N ₂ P ₃ K ₂	12.71±1.23 de	0.32±0.02 abcd	294.46±10.44 ab	8.00±0.87 cd	1.60±0.26 bc
N ₂ P ₂ K ₁	11.92±1.08 def	0.29±0.03 bed	283.96±14.70 bc	7.95±0.62 cd	1.51±0.21 cd
N ₂ P ₂ K ₀	11.18±0.59 fg	0.28±0.01 cd	295.64±11.66 ab	8.50±0.04 bed	1.31±0.06 d
N ₂ P ₂ K ₃	14.64±0.76abc	0.30±0.02 abcd	293.22±1.29 ab	9.79±0.16 a	1.50±0.10 cd
N ₃ P ₂ K ₂	13.31±0.76 bcd	0.34±0.02 ab	298.58±10.49 ab	8.36±0.29 bed	1.59±0.10 bc
N ₁ P ₁ K ₂	14.82±0.24 ab	0.34±0.04 abc	296.17±5.27 ab	8.08±0.43 cd	1.84±0.11 ab
N ₁ P ₂ K ₁	15.33±0.21 a	0.34±0.06 ab	285.63±1.41 bc	8.67±0.85 bed	1.78±0.15 abc
N ₂ P ₁ K ₁	13.22±1.11 cd	0.35±0.02 a	292.97±10.92 ab	7.74±0.13 d	1.71±0.17 abc

2.3 氮磷钾肥与无患子各指标的相关性

不同施肥处理下无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’的各指标与氮磷钾施肥量的相关关系分析见表6,氮肥施用量与‘媛华’和‘粤硕菩提’树高和地径呈极显著正相关,而与‘媛华’的胞间CO₂浓度和水分利用效率呈负相关,与‘粤硕菩提’的水分利用效率呈负相关;磷肥施用量与‘媛华’的树高和地

径呈极显著正相关,与‘粤硕菩提’蒸腾速率呈极显著正相关,与地径呈显著正相关,与水分利用效率呈显著负相关;钾肥施用量与‘媛华’的净光合速率和水分利用效率呈极显著正相关,与地径和蒸腾速率呈负相关,而与‘粤硕菩提’净光合速率和蒸腾速率呈极显著正相关,与胞间CO₂浓度呈显著相关。

表6 氮磷钾肥与无患子各指标的相关性

Table 6 Correlation between N, P and K fertilization and various indexes of *S. saponaria* cultivars

指标 index	N		P		K	
	‘媛华’ ‘Yuanhua’	‘粤硕菩提’ ‘Yueshuo Bodhi’	‘媛华’ ‘Yuanhua’	‘粤硕菩提’ ‘Yueshuo Bodhi’	‘媛华’ ‘Yuanhua’	‘粤硕菩提’ ‘Yueshuo Bodhi’
树高 tree height	0.45 **	0.46 **	0.31 **	0.13	0.07	0.22
地径 ground diameter	0.40 **	0.38 **	0.47 **	0.31 *	-0.07	0.26
净光合速率 Pn	0.06	0.22	0.29	0.23	0.60 **	0.54 **
气孔导度 Gs	0.03	0.24	0.13	0.13	0.02	0.21
胞间二氧化碳浓度 Ci	-0.04	0.14	0.20	0.02	0.07	0.32 *
蒸腾速率 Tr	0.21	0.32 *	0.08	0.58 **	-0.01	0.41 **
水分利用效率 WUE	-0.22	-0.07	0.11	-0.38 *	0.42 **	0.20

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

2.4 基于熵权-TOPSIS方法的多目标决策与评价

利用熵权-TOPSIS模型对不同施肥处理下无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’各个指标进行了综合评价,结果见表7。通过TOPSIS计算得到无患子‘媛华’各处理优劣前三顺序为N₂P₁K₂ > N₁P₂K₂ >

N₂P₃K₂,其中N₂P₁K₂和N₁P₂K₂处理无患子‘媛华’综合评价最好,且远大于不施肥处理。无患子‘粤硕菩提’各处理优劣前三顺序为N₁P₁K₂ > N₂P₂K₂ > N₂P₁K₁,其中处理N₁P₁K₂和N₂P₂K₂处理的无患子‘粤硕菩提’综合评价最好,能有效提升无患子无

性系的综合指标。

表7 不同施肥处理下无患子无性系综合评价结果

Table 7 Comprehensive evaluation results of *S. saponaria* clones under different fertilization treatments

处理编号 treatment code	‘媛华’ ‘Yuanhua’				处理编号 treatment code	‘粤硕菩提’ ‘Yueshuo Bodhi’			
	D^+	D^-	C_i	排名 ranking		D^+	D^-	C_i	排名 ranking
$N_0P_0K_0$	0.29	0.11	0.27	14	$N_0P_0K_0$	0.31	0.10	0.24	14
$N_0P_2K_2$	0.19	0.22	0.52	5	$N_0P_2K_2$	0.25	0.17	0.39	13
$N_1P_2K_2$	0.17	0.24	0.58	2	$N_1P_2K_2$	0.22	0.18	0.45	11
$N_2P_0K_2$	0.26	0.15	0.36	13	$N_2P_0K_2$	0.21	0.22	0.51	8
$N_2P_1K_2$	0.17	0.26	0.60	1	$N_2P_1K_2$	0.20	0.20	0.50	9
$N_2P_2K_2$	0.19	0.24	0.55	4	$N_2P_2K_2$	0.14	0.26	0.64	2
$N_2P_3K_2$	0.17	0.23	0.57	3	$N_2P_3K_2$	0.18	0.22	0.54	6
$N_2P_2K_1$	0.26	0.18	0.40	12	$N_2P_2K_1$	0.22	0.19	0.46	10
$N_2P_2K_0$	0.26	0.18	0.41	11	$N_2P_2K_0$	0.25	0.17	0.39	12
$N_2P_2K_3$	0.21	0.20	0.48	8	$N_2P_2K_3$	0.17	0.25	0.58	5
$N_3P_2K_2$	0.22	0.18	0.45	9	$N_3P_2K_2$	0.19	0.20	0.51	7
$N_1P_1K_2$	0.25	0.18	0.42	10	$N_1P_1K_2$	0.13	0.26	0.66	1
$N_1P_2K_1$	0.22	0.22	0.50	7	$N_1P_2K_1$	0.16	0.25	0.60	4
$N_2P_1K_1$	0.21	0.23	0.52	6	$N_2P_1K_1$	0.15	0.25	0.62	3

2.5 基于施肥量与综合得分指标建立的回归方程

以熵权-TOPSIS模型的总得分为综合得分指标,建立施肥量(式中, N 、 P 、 K 分别为 N 、 P 、 K 元素施用量)与无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’综合得分指标(Y)的回归方程,以熵权TOPSIS模型的结果对施肥回归模型进行了验证。

建立不同施肥处理下无患子‘媛华’各指标综合得分与施肥量之间的二次多项式回归模型: $Y = 2.797 \times 10^{-1} + 4.560 \times 10^{-3} \times N + 1.248 \times 10^{-3} \times P - 4.160 \times 10^{-3} \times K - 3.114 \times 10^{-5} \times N \times P - 1.446 \times 10^{-5} \times N \times K + 1.633 \times 10^{-4} \times P \times K - 6.738 \times 10^{-6} \times N^2 - 1.508 \times 10^{-5} \times P^2 - 1.010 \times 10^{-4} \times K^2$ 。回归方程决定系数 $R^2 = 0.61$,达到极显著水平,说明拟合效果较好,可以用来分析 N 、 P 、 K 的施肥量。因此,分别对综合得分(Y)的二次多项式中 N 、 P 、 K 施肥量求偏导,并令 $\partial Y / \partial N = \partial Y / \partial P = \partial Y / \partial K = 0$,无患子‘媛华’的 N 、 P 、 K 施肥量为115.26、64.14、44.37 kg/hm²,最佳配方施肥量 $N(0.13 \text{ kg/株}) + P_2O_5(0.07 \text{ kg/株}) + K_2O(0.05 \text{ kg/株})$ 。

建立不同施肥下无患子‘粤硕菩提’各指标综合得分与施肥量之间的二次多项式回归模型: $Y = 2.402 \times 10^{-1} - 7.767 \times 10^{-3} \times N + 8.255 \times 10^{-3} \times P + 2.197 \times 10^{-2} \times K + 5.464 \times 10^{-5} \times N \times P + 1.217 \times 10^{-4} \times N \times K - 3.900 \times 10^{-4} \times P \times K - 6.013 \times 10^{-6} \times N^2 - 3.493 \times 10^{-6} \times P^2 - 2.951 \times 10^{-5} \times K^2$ 。回归方程决定系数 $R^2 =$

0.83,达到极显著水平,说明拟合效果较好,可以用来分析 N 、 P 、 K 的施肥量,因此,分别对综合得分(Y)的二次多项式中 N 、 P 、 K 施肥量求偏导,并令 $\partial Y / \partial N = \partial Y / \partial P = \partial Y / \partial K = 0$,无患子‘粤硕菩提’的 N 、 P 、 K 施肥量为117.90、87.65、36.11 kg/hm²,最佳配方施肥量 $N(0.35 \text{ kg/株}) + P_2O_5(0.26 \text{ kg/株}) + K_2O(0.11 \text{ kg/株})$ 。

3 讨论

研究表明, $N_2P_1K_2$ 处理对‘媛华’的生长有显著促进作用,而 $N_2P_2K_2$ 处理对‘粤硕菩提’生长也起到显著的促进作用,表明施肥对不同品种基因型林木生长存在较大的差异,因此需要根据不同品种对施肥的响应差异进行科学施肥,实现最适元素配比与不同品种(基因型)的优化配置。这与对白桦(*Betula platyphylla*)等^[21-22]树种的研究结果基本相似。本研究结果显示,不同施肥影响无患子‘媛华’幼树的树高和地径顺序 $P > N > K$,与乐佳兴^[16]、刘水娥等^[40]的研究结果一致,影响‘粤硕菩提’幼树的树高和地径顺序为 $N > K > P$,这与秦爱文等^[41]、周磊等^[42]、胡厚臻^[43]、黎少玮等^[44]、丁帆^[18]的研究结果相似。由于施肥过低或过高对林木生长的效果都不佳,施肥量太少不能满足植物生长的需求,施肥过多则会对林木产生毒害^[45-47]。

N 、 P 、 K 元素对植物生理生化(光合作用)具有

重要的影响,与相关生物营养转化相似^[48-49],影响植物叶片的叶绿素和蛋白质组成的主要因素是 N、P 和 K^[50]。气孔对环境因素(如施肥、温度等)和生理因素响应敏感^[51],它通过调节气孔导度控制植物叶片与大气之间的气体交换^[52-53],气孔调节影响着植物适应外界环境的能力,是植物不断适应外部环境变化的重要机制之一。本研究发现,不同施肥处理下无患子‘媛华’的气孔导度变化不明显,各处理组间差异不显著,而‘粤硕菩提’各处理组间差异显著,表明在不同施肥处理下无患子‘媛华’叶片的气孔调节能力低于‘粤硕菩提’。相关性分析进一步表明,K 肥与‘媛华’的净光合速率和水分利用效率呈极显著正相关,与蒸腾速率呈负相关,而与‘粤硕菩提’净光合速率和蒸腾速率呈极显著正相关。这可能因为 K⁺促使无患子‘粤硕菩提’叶片气孔开放,提高 CO₂的吸收和蒸腾作用,从而提高光合作用^[54]。一般认为叶片水分利用效率与光合速率成正比关系,与蒸腾速率成反比,而光合速率与光合有效辐射量密切相关,蒸腾速率受气孔导度的影响^[55-56],这与本研究的结果一致。立地质量和经营水平反映林木的生长状况,土壤质量是影响林木生长的重要因素之一,而施肥可以提高土壤质量,进而影响林木的生长^[57]。施肥对无患子生长还可能与施肥年限和环境因子(降水量、气温)等因素有关。但由于试验周期相对较短,下一步有待对‘媛华’和‘粤硕菩提’种植区域进行长期监测,对肥料效应开展综合研究,优化‘媛华’和‘粤硕菩提’高产栽培的施肥方案。

TOPSIS 方法已广泛应用于各领域进行多目标优化^[58-59]。本研究首次提出了基于不同施肥处理对无患子无性系优化的多目标综合评价方法。熵权 TOPSIS 结果表明,无患子‘媛华’以 N₂P₁K₂和 N₁P₂K₂处理的综合评价最好,无患子‘粤硕菩提’以 N₁P₁K₂和 N₂P₂K₂处理的综合评价最好,其施肥配比范围(即施 N 75~150 kg/hm²、P 45~90 kg/hm²、K 40 kg/hm²)。以熵权 TOPSIS 模型的总得分分为综合得分指标,建立施肥量与无患子‘媛华’和‘粤硕菩提’综合得分指标的回归方程,进而根据所建回归函数模型的优化施肥量,得出无患子‘媛华’N、P、K 的最佳施肥量分别为 115.26、64.14、44.37 kg/hm²,无患子‘粤硕菩提’N、P、K 的最佳施肥量分别为 117.90、87.65、36.11 kg/hm²。

参考文献(reference):

[1] 高媛,贾黎明,高世轮,等.无患子树体合理光环境及高光效调

- 控[J].2016,52(11):29-38.GAO Y, JIA L M, GAO S L, et al. Reasonable canopy light intensity and high light efficiency regulation of *Sapindus mukorossi*[J].Sci Silvae Sin,2016,52(11):29-38.DOI:10.11707/j.1001-7488.20161104.
- [2] 刘济铭,孙操稳,何秋阳,等.国内外无患子属种质资源研究进展[J].世界林业研究,2017,30(6):12-18.LIU J M, SUN C W, HE Q Y, et al.Research progress in *Sapindus L. germplasm resources*[J]. World For Res, 2017, 30(6):12-18. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2017.0071.y.
- [3] 孙操稳,贾黎明,叶红莲,等.无患子果实经济性状地理变异评价及与脂肪酸成分相关性[J].北京林业大学学报,2016,38(12):73-83.SUN C W, JIA L M, YE H L, et al.Geographic variation evaluating and correlation with fatty acid composition of economic characters of *Sapindus L. fruits*[J].J Beijing For Univ, 2016,38(12):73-83.DOI:10.13332/j.1000-1522.20160143.
- [4] 左海军,马履一,王梓,等.苗木施肥技术及其发展趋势[J].世界林业研究,2010,23(3):39-43.ZUO H J, MA L Y, WANG Z, et al.Research on fertilizer application technology for seedlings and its development trends[J].World For Res,2010,23(3):39-43.DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2010.03.005.
- [5] 史文辉,李国雷,苏淑钗,等.子叶切除与苗圃施肥对栓皮栎容器苗造林效果的影响[J].林业科学,2018,54(1):64-73.SHI W H, LI G L, SU S C, et al.Combined effects of *Cotyledon excision* and nursery fertilization on field performance of *Quercus variabilis* container seedlings[J].Sci Silvae Sin,2018,54(1):64-73.DOI:10.11707/j.1001-7488.20180107.
- [6] 楚秀丽,刘青华,范辉华,等.不同生境、造林模式闽楠人工林生长及林分分化[J].林业科学研究,2014,27(4):445-453.CHU X L, LIU Q H, FAN H H, et al.Growth and structure differentiation of *Phoebe bournei* plantation with different sites and modes of afforestation[J].For Res,2014,27(4):445-453.DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2014.04.001.
- [7] 王力朋,晏紫伊,李吉跃,等.指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响[J].生态学报,2012,32(23):7452-7462.WANG L P, YAN Z Y, LI J Y, et al.Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones[J].Acta Ecol Sin,2012,32(23):7452-7462. DOI:10.5846/stxb201203040288.
- [8] 罗仙英,莫荣海,丁贵杰,等.不同配比施肥对马尾松幼苗生长特征的影响[J].广西植物,2022,42(4):608-616.LUO X Y, MO R H, DING G J, et al.Effects of different fertilization ratios on growth characteristics of *Pinus massoniana* seedlings[J].Guihaia, 2022,42(4):608-616. DOI:10.11931/guihaia.gxzw202103052.
- [9] 施福军,粟春青,韦艺,等.光氮互作对闽楠幼苗叶片光合生理特性的影响[J].西北植物学报,2020,40(4):667-675.SHI F J, SU C Q, WEI Y, et al.Effect of light and nitrogen interaction on photosynthetic physiological characteristics in leaves of *Phoebe bournei* seedlings[J].Acta Bot Boreali Occidentalia Sin,2020,40(4):667-675. DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.2020.04.0667.
- [10] 罗欢,司建华,赵春彦,等.荒漠河岸林胡杨光合参数变化特征及影响因素研究[J].高原气象,2020,39(2):393-401.LUO H, SI J H, ZHAO C Y, et al.Study on the variation characteristics of photosynthetic parameters and environmental influencing factors of *Populus euphratica* in desert riparian forest[J].Plateau Meteorol,2020,39(2):393-401. DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00037.
- [11] 罗杰,陈洪,申玲,等.不同肥料种类及其施肥水平对1年生桉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.
- [12] 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]. J Northwest For Univ, 2017, 32(2): 16-21. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.02.03.
- [13] REN T, ZOU J, LU J W, et al. On-farm trials of optimal fertilizer recommendations for the maintenance of high seed yields in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) production[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2015, 61(3): 528-540. DOI: 10.1080/00380768.2014.1003964.
- [14] SHI B K, WANG Y B, MENG B, et al. Effects of nitrogen addition on the drought susceptibility of the *Leymus chinensis* meadow ecosystem vary with drought duration[J]. Front Plant Sci, 2018, 9: 254. DOI: 10.3389/fpls.2018.00254.
- [15] 田秋玲,乐佳兴,吴焦焦,等.西南丘陵地区紫色土酸性对无患子幼树生长和光合特性的影响[J].生态学报,2020,40(11):3756-3763. TIAN Q L, YUE J X, WU J J, et al. Effects of southwest hilly areas's purple soil acidity on the growth and photosynthetic characteristics of *Sapindus mukorossi* Gaertn saplings[J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(11): 3756-3763. DOI: 10.5846/stxb201905281099.
- [16] 乐佳兴.氮磷配施对无患子幼苗生长生理特性和土壤化学性质的影响[D].重庆:西南大学,2019. LE J X. Effects of nitrogen and phosphorus on the growth physiological characteristics and soil chemical properties of *Sapindus mukorossi* seedlings[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [17] 连人豪.不同施肥比例对无患子生长和养分分配的影响[J].江苏农业科学,2020,48(13):144-150. LIAN R H. Impacts of different proportions of fertilization on growth and nutrient distribution of *Sapindus mukorossi* seedlings[J]. Jiangsu Agric Sci, 2020, 48(13): 144-150. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2020.13.029.
- [18] 丁帆.无患子幼林配方施肥试验研究[D].南京:南京林业大学,2014. DING F. Studies on fertilizer formula for young *Sapindus* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [19] 刘俊涛,仲静,刘济铭,等.无患子初果期人工林土壤和叶片C、N、P化学计量特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(4):67-75. LIU J T, ZHONG J, LIU J M, et al. Stoichiometric characteristics of soil and leaves in *Sapindus mukorossi* plantation at an early fruiting stage[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(4): 67-75. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202104011.
- [20] 王福根,卫星杓,赵国春,等.无患子细根形态及垂直分布特征对配方施肥措施的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(4):58-66. WANG F G, WEI X B, ZHAO G C, et al. Responses of morphology and vertical distribution of fine roots in *Sapindus mukorossi* to formula fertilization[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(4): 58-66. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.201910007.
- [21] 赵燕,董雯怡,张志毅,等.施肥对毛白杨杂种无性系幼苗生长和光合的影响[J].林业科学,2010,46(4):70-77. ZHAO Y, DONG W Y, ZHANG Z Y, et al. Effects of fertilization on seedling growth and photosynthesis of hybrid clone seedlings of *Populus tomentosa* [J]. Sci Silvae Sin, 2010, 46(4): 70-77.
- [22] 李天芳,姜静,王雷,等.配方施肥对白桦不同家系苗期生长的影响[J].林业科学,2009,45(2):60-64. LI T F, JIANG J, WANG L, et al. Effects of prescription fertilization on the seedling growth of different families of *Betula platyphylla* [J]. Sci Silvae Sin, 2009, 45(2): 60-64. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2009.02.011.
- [23] 王圣瑞,陈新平,高祥照,等.3414肥料试验模型拟合的探讨[J].植物营养与肥料学报,2002,8(4):409-413. WANG S R, CHEN X P, GAO X Z, et al. Study on simulation of "3414" fertilizer experiments[J]. Plant Nutr Fertil Sci, 2002, 8(4): 409-413. DOI: 10.3321/j.issn:1008-505X.2002.04.006.
- [24] 王妍,冯金玲,吴小慧,等.施肥对闽楠幼苗光合碳固定的影响[J].林业科学,2022,58(5):40-52. WANG Y, FENG J L, WU X H, et al. Effects of fertilization on photosynthetic carbon fixation of *Phoebe bournei* seedlings[J]. Sci Silvae Sin, 2022, 58(5): 40-52. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20220505.
- [25] 王楠,王宏信,李向林,等.施肥对降香黄檀幼苗生长和光合的影响[J].东北林业大学学报,2017,45(1):25-29. WANG N, WANG H X, LI X L, et al. Effect of fertilization on growth and photosynthesis of *Dalbergia odorifera* seedlings[J]. J Northeast For Univ, 2017, 45(1): 25-29. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2017.01.006.
- [26] 杨阳,张德鹏,及利,等.配比施肥对紫椴播种苗生长、养分积累及根系形态的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(9):63-70. YANG Y, ZHANG D P, JI L, et al. Effects of formula fertilization on growth, nutrient accumulation and root morphology of *Tilia amurensis* seedlings[J]. J Cent South Univ For Technol, 2021, 41(9): 63-70. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.09.007.
- [27] 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. Effect of fertilization on leaf growth and photosynthetic characteristics of *Chaenomeles speciosa* 'Changshouguan' after processing of warming in the post floral stage[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2023, 47(5): 114-120. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202202016.
- [28] 马道承,余注光,王凌晖,等.氮磷钾配比施肥对赤苍藤生理及生物量积累的影响[J].植物科学学报,2022,40(6):839-852. MA D C, YU Z G, WANG L H, et al. Effects of nitrogen-phosphorus-potassium ratio fertilization on physiology and biomass accumulation of *Erythralum scandens* BI [J]. Plant Sci J, 2022, 40(6): 839-852. DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2022.60839.
- [29] 黄景贵,粟春青,王凌晖,等.氮磷钾指数配方施肥对假苹婆幼苗生长和光合特性的影响[J].西南农业学报,2021,34(12):2691-2699. HUANG J G, SU C Q, WANG L H, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium index formula fertilization on growth and photosynthetic characteristics of *Sterculia lanceolata* seedlings[J]. Southwest China J Agric Sci, 2021, 34(12): 2691-2699. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2021.12.020.
- [30] 黄兰清,吴丽君,王晓明,等.配方施肥对‘紫精灵’紫薇容器苗生长、开花及生理的影响[J].植物生理学报,2022,58(9):1735-1746. HUANG L Q, WU L J, WANG X M, et al. Effects of formula fertilization on growth, flowering and physiology of container seedlings of *Lagerstroemia indica* 'Zi Jing Ling' [J]. Plant Physiol J, 2022, 58(9): 1735-1746. DOI: 10.13592/j.

- cnki.ppj.100131.
- [31] 李堃,肖兴翠,李邦华,等.氮磷钾配施对红椿生长的影响[J].中南林业科技大学学报,2023,43(1):50-56,65.LI K,XIAO X C,LI B H,et al.Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on the growth of *Toona ciliata* Roem[J].J Cent South Univ For Technol,2023,43(1):50-56,65.DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.01.005.
- [32] 魏典典,张刚,刘淑明.配方施肥对文冠果光合作用的影响[J].西北林学院学报,2014,29(3):27-31.WEI D D,ZHANG G,LIU S M.Effect of fertilization with formula on photosynthesis of *Xanthoceras sorbifolia*[J].J Northwest For Univ,2014,29(3):27-31.DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2014.03.05.
- [33] 王湘莹,王晓明,乔中全,等.氮磷钾配方施肥对凹叶厚朴低肥力区幼树生长及药用成分含量的影响[J].湖南生态科学学报,2021,8(2):1-9.WANG X Y,WANG X M,QIAO Z Q,et al.Effects of N,P and K formula fertilization on growth and medicinal component content of young trees in low fertility area of *Magnolia officinalis*[J].J Hunan Ecol Sci,2021,8(2):1-9.DOI: 10.3969/j.issn.2095-7300.2021.02.001.
- [34] 孙晋鑫,黄高鉴,郭军玲,等.氮磷钾不同配比对知母产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2022(11):33-39.SUN J X,HUANG G J,GUO J L,et al.Effects of different NPK ratios on yield and quality of *Anemarrhena asphodeloides*[J].Soils Fert Sci China,2022(11):33-39.DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.21569.
- [35] 赵树琪,张华崇,闫振华,等.不同施肥配比对冈杂棉0623产量影响的主成分分析[J].棉花科学,2019,41(6):15-22.ZHAO S Q,ZHANG H C,YAN Z H,et al.The principal component analysis of the effect of different fertilization ratio on the yield of Gangzhamian 0623[J].Cotton Sci,2019,41(6):15-22.DOI: 10.3969/j.issn.2095-3143.2019.06.003.
- [36] 王历,周忠发,牛颖超,等.基于熵权TOPSIS模型和GIS的黔北农产品区土壤养分空间分析及综合评价[J].水土保持研究,2018,25(4):274-282.WANG L,ZHOU Z F,NIU Y C,et al.Spatial analysis and comprehensive evaluation on soil nutrients in northern Guizhou agricultural product area based on entropy weight-TOPSIS and GIS[J].Res Soil Water Conserv,2018,25(4):274-282.DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.04.041.
- [37] 刘智媛,秦俊,曾丽.不同施肥处理对月季‘安吉拉’观赏品质的影响[J].经济林研究,2022,40(1):228-240.LIU Z Y,QIN J,ZENG L.Effects of ornamental quality on *Rosa ‘Angela’* under different fertilization treatments[J].Non Wood For Res,2022,40(1):228-240.DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2022.01.025.
- [38] 孙鑫,张富仓,杨玲,等.基于熵权法和TOPSIS法优化马铃薯钾肥种类和滴灌量组合[J].植物营养与肥料学报,2022,28(2):279-290.SUN X,ZHANG F C,YANG L,et al.Optimal combination of potassium fertilizer and drip irrigation for potato production based on entropy weight method and TOPSIS analysis[J].Plant Nutr Fert Sci,2022,28(2):279-290.DOI: 10.11674/zwf.2021356.
- [39] 李泽东,曹振,张如明,等.熵权-TOPSIS法在华北石质山区常用造林树种抗旱性评价中的应用[J].山东大学学报(理学版),2020,55(1):117-126.LI Z D,CAO Z,ZHANG R M,et al.Application of entropy weight-TOPSIS method to drought resistance evaluation of common afforestation tree species in the lithoid hilly area of north China[J].J Shandong Univ (Nat Sci),2020,55(1):117-126.DOI: 10.6040/j.issn.1671-9352.2019.362.
- [40] 刘水娥,张方秋,陈祖旭,等.N、P、K营养元素不同配比对马占相思苗期生长的影响[J].林业科学研究,2002,15(2):163-168.LIU S E,ZHANG F Q,CHEN Z X,et al.Effects of varied fertilization strategy with N,P,K nutrients on the growth of *Acacia mangium* saplings[J].For Res,2002,15(2):163-168.DOI: 10.3321/j.issn:1001-1498.2002.02.007.
- [41] 秦爱文,刘远生,徐海宁,等.氮磷钾配施对桢楠幼苗生长及生物量积累的影响[J].南方林业科学,2021,49(5):21-24.QIN A W,LIU Y S,XU H N,et al.Effects of N,P,K formula fertilization on growth and biomass accumulation of *Phoebe zhennan* seedlings[J].South China For Sci,2021,49(5):21-24.DOI: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2021.05.005.
- [42] 周磊,刘美玲,李铁华,等.施肥对细叶桢楠容器苗生长与光合的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(7):80-87.ZHOU L,LIU M L,LI T H,et al.Effects of fertilization on growth and photosynthesis of *Phoebe hui* seedlings[J].J Cent South Univ For Technol,2021,41(7):80-87.DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.07.010.
- [43] 胡厚臻.配方施肥下巨尾桉的生长生理及土壤肥力特征研究[D].南宁:广西大学,2016.HU H Z.Studies on the growth physiology and the soil fertility character of *Eucalyptus grandis* × *E.urophylla* under the formulated fertilizer application[D].Nanning:Guangxi University,2016.
- [44] 黎少玮,尹光天,杨锦昌,等.配方施肥改善米老排容器苗生长指标[J].热带作物学报,2020,41(2):230-236.LI S W,YIN G T,YANG J C,et al.Growth traits of *Mytilaria laosensis* container seedlings improved by formula fertilization[J].Chin J Trop Crops,2020,41(2):230-236.DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2020.02.004.
- [45] 刘欢,王超琦,吴家森,等.氮素指数施肥对杉木无性系苗生长及养分含量的影响[J].应用生态学报,2016,27(10):3123-3128.LIU H,WANG C Q,WU J S,et al.Effects of exponential N fertilization on the growth and nutrient content in clonal *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J].Chin J Appl Ecol,2016,27(10):3123-3128.DOI: 10.13287/j.1001-9332.201610.027.
- [46] 黄桂丹,黄万和,李学强,等.施肥对交趾黄檀幼龄林生长和养分分配的影响[J].林业与环境科学,2022,38(2):112-119.HUANG G D,HUANG W H,LI X Q,et al.Effects of fertilization on growth and nutrient allocation of young forest for *Dalbergia cochinchinensis*[J].For Environ Sci,2022,38(2):112-119.DOI: 10.3969/j.issn.1006-4427.2022.02.015.
- [47] 唐桂兰,刘小屋,芦建国.氮素指数施肥对夏蜡梅幼苗生长、养分分配的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(6):134-140.TANG G L,LIU X X,LU J G.Effects of nitrogen exponential fertilization on growth and nutrient distribution of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings[J].J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed),2017,41(6):134-140.DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201604043.
- [48] 邢鸿林,刘天义,扎史都吉,等.光照与氮添加对红皮云杉幼树生长与叶形态功能的影响[J].森林工程,2022,38(4):1-9.XING H L,LIU T Y,Zhashiduji,et al.Effects of light and nitrogen addition on the tree growth, needle morphological and functions of *Picea koraiensis* saplings[J].For Eng,2022,38(4):1-9.
- [49] 武耀运,陈城虎,宋伟,等.生物催化氨基酸C—N裂解反应的研究进展[J].生物加工过程,2022,20(2):137-147.WU Y Y,CHEN C H,SONG W,et al.Advances in biocatalytic C-N cleavage of amino acids[J].Chi J Bio Eng,2022,20(2):137-

147. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3678.2022.02.003.
- [50] 汪顺义,刘庆,史衍玺,等.施钾对甘薯氮素转移分配及氮代谢酶活性的影响[J].应用生态学报,2016,27(11):3569-3576. WANG S Y, LIU Q, SHI Y X, et al. Effects of potassium on nitrogen translocation and distribution and nitrogen metabolism enzyme activities of sweet potato[J]. Chin J Appl Ecol, 2016, 27(11): 3569-3576. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201611.021.
- [51] 袁婷婷,路远峰,谢寅峰,等.硼钼铜微肥配施对太子参光合特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(4):130-136. YUAN T T, LU Y F, XIE Y F, et al. Effects of combined application of boron-molybdenum-copper microfertilizers on photosynthetic characteristics of *Pseudostellaria heterophylla* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(4): 130-136. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202003024.
- [52] 宋述锐,于华,黄椰,等.不同钾肥对渍水胁迫下紫花苜蓿叶绿素荧光特性的影响[J].草业科学,2021,38(4):693-702. SONG S R, YU H, HUANG Y, et al. Effects of different potassium fertilizers on chlorophyll fluorescence parameters of *alfalfa* under waterlogging conditions[J]. Pratacultural Sci, 2021, 38(4): 693-702. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0468.
- [53] 何相玉,周冠军,张新洁,等.氮磷添加对水曲柳人工林叶片、细根和土壤生态化学计量特征的影响[J].森林工程,2023,39(1):73-81. HE X Y, ZHOU G J, ZHANG X J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on stoichiometry characteristics of leaf, fine root and soil of *Fraxinus mandshurica* plantation[J]. For Eng, 2023, 39(1): 73-81.
- [54] 王建林,于贵瑞,房全孝,等.不同植物叶片水分利用效率对光和CO₂的响应与模拟[J].生态学报,2008,28(2):525-533. WANG J L, YU G R, FANG Q X, et al. Responses of water use efficiency of nine plant species to light and CO₂ and it's modeling [J]. Acta Ecol Sin, 2008, 28(2): 525-533. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.02.010.
- [55] 王东光,杨锦昌,李荣生,等.不同磷素供给闽楠苗木对自然低温的生理响应[J].华南农业大学学报,2016,37(2):101-106. WANG D G, YANG J C, LI R S, et al. Physiological response of *Phoebe bournei* seedlings with different phosphorus supply levels to natural low temperature[J]. J South China Agric Univ, 2016, 37(2): 101-106. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.2016.02.016.
- [56] 罗凡,张厅,龚雪蛟,等.不同施肥方式对茶树新梢氮磷钾含量及光合生理的影响[J].应用生态学报,2014,25(12):3499-3506. LUO F, ZHANG T, GONG X J, et al. Effects of different fertilization ways on the contents of N, P, K in new shoots and photosynthetic characters of tea tree [J]. Chin J Appl Ecol, 2014, 25(12): 3499-3506. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20141010.007.
- [57] 魏琛琛,廖人宽,王瑜,等.保水剂与氮磷肥配施对玉米生长及养分吸收的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):236-242. WEI C C, LIAO R K, WANG Y, et al. Effects of SAP combined application of nitrogen and phosphorus fertilizers on maize growth and the nutrient uptake[J]. J Soil Water Conserv, 2018, 32(6): 236-242. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.06.034.
- [58] 王安,吴薇,焦庆清,等.基于芋头地膜覆盖条件下土壤温度的综合评价[J].江苏农业学报,2015,31(4):798-805. WANG A, WU W, JIAO Q Q, et al. Comprehensive assessment of soil temperature in a plastic film mulched taro planting system [J]. Jiangsu J Agri Sci, 2015, 31(4): 798-805. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2015.04.014.
- [59] 刘欢平,郑彩霞,刘涛,等.基于产量、品质和水氮利用效率的油橄榄水氮耦合方案优选[J].江苏农业学报,2023,39(9):1843-1853. LIU H P, ZHENG C X, LIU T, et al. Priority of water-nitrogen coupling scheme for olive based on yield, quality, and water-nitrogen use efficiency [J]. Jiangsu J Agri Sci, 2023, 39(9): 1843-1853. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.09.006.

(责任编辑 王国栋)