网络出版时间:2026-01-09 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.07.007

树番茄苗木生长生理及光合参数对叶面施肥的响应

李兴则[1,2],韦兴兰[1,2],曾惠平[1,2],董琼[1,2]

(1 西南林业大学 林学院,云南 昆明 650224;
2 西南林业大学 林学院 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点试验室,云南 昆明 650224)

[摘 要] 【目的】研究树番茄苗木生理特性与光合参数对不同浓度叶面配比施肥的响应,为树番茄苗木养分管理提供理论依据。【方法】以1年生树番茄苗木为研究对象,采用3因素(N、P、K)3水平(10,20,30 g/L)进行$L_9(3^4)$正交试验设计,以不施肥处理(CK)为对照,探究树番茄苗木生长生理及光合参数对叶面施肥的响应。【结果】与CK相比,叶面施肥能有效促进树番茄苗木生物量积累和叶片形态发育,并促进叶绿素积累,其中苗木生物量、苗高、地径和叶绿素含量对N敏感,而叶片形态主要受到P调控。与CK相比,叶面施肥处理可不同程度提高叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率,降低胞间CO_2浓度,同时对树番茄苗木叶片最大荧光、可变荧光、PSⅡ潜在光化学活性和最大光化学效率有明显影响。与CK相比,各叶面施肥处理能明显提高超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性和脯氨酸、可溶性蛋白含量。【结论】叶面喷施氮磷钾肥能明显促进树番茄苗木的光合效能和生长发育,其中T5处理(N2P2K3)表现最优。

[关键词] 叶面施肥;树番茄;生长生理特性;光合特性
[中图分类号] S641.9 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)07-0056-10

Response of *Cyphomandra betacea* seedling growth physiology and photosynthetic fluorescence to foliar fertilization

LI Xingze[1,2], WEI Xinglan[1,2], ZENG Huiping[1,2], DONG Qiong[1,2]

(1 *College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650224, *China*; 2 *Southwest Region Biodiversity Conservation Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650224, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to study the response of physiological characteristics and photosynthetic parameters of *Cyphomandra betacea* seedling to different concentrations of foliar fertilization, to provide a theoretical basis for nutrient management of *C. betacea* seedlings. 【Method】 One-year-old *C. betacea* seedlings were taken as the research object, and $L_9(3^4)$ orthogonal design was conducted with three factors (N, P, K) and three level(10, 20, 30 g/L). With no fertilizer treatment as the control (CK), the response of physiological characteristics and photosynthetic fluorescence of *C. betacea* seedlings to the foliar spraying of nitrogen, phosphorus and potassium was explored. 【Result】 Compared with CK, foliar fertilization can effectively promote

[收稿日期] 2025-05-25 [修回日期] 2025-07-25
[基金项目] 国家自然科学基金项目(31960360);云南省重大科技专项(202102AE090132);云南省教育厅科学研究基金资助项目(2024Y576)
[作者简介] 李兴则(2001—),男,云南东川人,在读博士,主要从事经济林栽培与利用研究。E-mail:xingzeli@swfu.edu.cn
[通信作者] 董琼(1973—),男,湖北云梦人,教授,博士,主要从事植被恢复和生物多样性研究。E-mail:dqyeam@swfu.edu.cn

the biomass accumulation and leaf morphological development of *C. betacea* seedlings, and promote chlorophyll accumulation and photosynthesis. Notably, the biomass, height, and chlorophyll content of seedlings were mostly affected by N, while leaf morphology was mainly regulated by P. Compared with the CK, foliar fertilization treatments increased the net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and water use efficiency of the leaves to varying degrees, reduced the intercellular CO_2 concentration, and significantly affected the maximum fluorescence, variable fluorescence, potential activity of PSⅡ, and maximum photochemical efficiency of *C. betacea* seedlings' leaves. Compared with the CK, each foliar fertilization treatment significantly increased the activities of superoxide dismutase, peroxidase, catalase, as well as the contents of proline and soluble protein.【Conclusion】Foliar application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers can significantly promote the photosynthetic efficiency and growth of *C. betacea* seedlings, with the T5 treatment (N2P2K3) showing the best result.

Key words: foliar application; *Cyphomandra betacea*; growth and physiological characteristics; photosynthetic characteristics

树番茄(*Cyphomandra betacea*)是茄科(Solanaceae)树番茄属(*Cyphomandra*)小乔木或灌木，原产于南美洲，在世界热带和亚热带地区有引种，在中国云南和西藏南部有栽培[1]。树番茄具有较高的实用和经济价值，其果实风味独特，维生素C含量高于普通番茄，且富含花青素及酚类活性成分，在抗氧化、抗癌等方面有一定促进作用[2]。树番茄是一种典型的林下经济作物，但由于引入中国时间较短，关于树番茄施肥研究仍处于起步阶段。前人对树番茄的研究多集中在果实成分分析[3]、芸苔素内酯对树番茄苗木生长的影响[4]、氮磷钾配比施肥[5]及复合肥添加[6]等方面，关于叶面施肥处理的研究尚鲜有报道。每年的4—5月是树番茄苗木生长旺盛时期[7]，为保证树番茄的养分供给充足，需要根据生长状况进行科学精准施肥。

施肥作为提升苗木质量的关键措施，可分为土壤施肥与叶面施肥2种方式，其中土壤施肥是常规方法，但苗木幼龄期对养分敏感度较高，过量施肥易引发根系灼伤[8]，长期施用更会导致土壤板结及硝酸盐污染等现象产生。叶面施肥是在未进行土壤施肥的基础上，仅依靠作物的叶和茎吸收所需营养元素[9]，该方式不仅增大了作物与肥料的接触面积，还能弥补土壤肥料利用率的不足，针对性地快速缓解缺肥现象以提升苗木质量，并降低对环境的危害[10]。因此，将叶面施肥利用到树番茄的施肥研究中对于提高树番茄的产量和品质具有重要意义。

氮、磷、钾是参与植物生长发育的大量元素，在植物生长、光合作用、光合色素等化合物的合成过程中都发挥着重要的作用，适宜的肥料配比能充分发挥不同肥料的协同耦合作用，能相互促进肥效的发挥[11]。在对树番茄[5]、无花果(*Ficus carica*)[12]以及辣椒(*Capsicum annuum*)[13]的施肥研究中均发现氮磷钾肥可显著促进植物的生长发育。而关于叶面喷施不同氮磷钾配比肥对树番茄苗木光合性能与生长影响的研究还较少，故本研究以1年生树番茄苗木为供试材料，基于3因素3水平正交试验设计，探究不同叶面施肥处理对树番茄苗木生长生理及光合参数的影响，为树番茄壮苗培育的养分调控提供理论指导。

1　材料与方法

1.1　试验地概况与材料

试验地位于云南昆明西南林业大学树木园格林温室内(25°04′00″N、102°45′41″E)，海拔1 964 m，气候温和，年平均温度16.5 ℃，年平均降水量约为1 035 mm。采用红壤土、腐殖土和珍珠岩体积比为5∶2∶1的混合土样作为供试土壤，土壤理化性质为：田间持水量28.43%，有机碳32.23 g/kg，全氮0.39 g/kg，全磷0.31 g/kg，全钾11.8 g/kg，水解性氮44 mg/kg，速效磷11.0 mg/kg，速效钾61 mg/kg。选取长势一致的1年生树番茄实生苗为研究对象，使用上口径20 cm、下口径14 cm、高18 cm的花盆进行盆栽试验，每盆装填土壤至盆体容积的4/5处，基质用量约为2 kg/盆。

1.2　试验设计

在文献[6]的基础上，基于$L_9(3^4)$正交矩阵，设置3因素(N、P、K)3水平(10，20，30 g/L)进行盆栽试验，共9个施肥处理(表1)，以不施肥处理为对照(CK)，每个处理10株，重复3次，共300株。供试氮肥为尿素($CO(NH_2)_2$)，N≥46.0%；磷肥为过磷酸钙($Ca(H_2PO_4)_2\cdot H_2O$)，P_2O_5≥12.0%；钾肥为硫酸钾(K_2SO_4)，K_2O≥52.0%。

表1 树番茄叶面施肥正交试验方案

Table 1 Orthogonal test scheme for foliar fertilization of *C. betacea*

处理 Treatments	N/(g·L^{-1})	P/(g·L^{-1})	K/(g·L^{-1})	组合 Combination
T1	10	10	10	N1P1K1
T2	10	20	20	N1P2K2
T3	10	30	30	N1P3K3
T4	20	10	20	N2P1K2
T5	20	20	30	N2P2K3
T6	20	30	10	N2P3K1
T7	30	10	30	N3P1K3
T8	30	20	10	N3P2K1
T9	30	30	20	N3P3K2
CK	0	0	0	N0P0K0

1.3 施肥方法

将各施肥处理组的氮磷钾肥溶解后定容至1 000 mL,其中添加1.5 mL 0.1 g/L农用有机硅渗剂(乙氧基改性聚三硅氧烷),对1年生树番茄实生苗叶面正反两面匀速喷施,将大小一致的圆形防草膜覆盖在花盆上,防止喷施的肥料落入土壤中;CK组喷施等体积的清水。试验于2024年3月21日开始,至2024年5月20日结束,共计60 d,每隔10 d喷1次,共喷施6次,5月20日取样测定树番茄苗木生长生理指标及光合参数。

1.4 测定指标及其方法

1.4.1 生长指标 采用米尺测量树番茄苗高,采用游标卡尺测量其主茎土痕处地径。将苗木根、茎、叶分离,使用电子天平(精度0.01 g)测定其鲜质量,分别记为根生物量、茎生物量和叶生物量,总生物量为三者之和。使用CI-203手持式激光叶面积仪测定整株叶片的叶面积、叶周长、叶长、叶宽。

1.4.2 光合荧光指标 采用乙醇浸提法测定叶绿素a、b和类胡萝卜素含量,计算叶绿素a+b;使用红蓝光源的便携式光合作用系统(型号LI-6800,LI-COR Inc,Linkon,NE)测定净光合速率(net photosynthetic rate,P_n)、蒸腾速率(transpiration rate,T_r)、气孔导度(stomatal conductance,G_s)、胞间二氧化碳浓度(intercellular CO_2 concentration,C_i),水分利用效率(WUE)=净光合速率(P_n)/蒸腾速率(T_r)。采用PEA-plus高速连续激发式荧光仪(Hansatech公司,英国)测定初始荧光(initial fluorescence,F_o)、最大荧光(maximum fluorescence,F_m)和可变荧光(variable fluorescence,F_v)等,并计算PSⅡ潜在光化学活性(F_v/F_o)和最大光化学效率(F_v/F_m)。

1.4.3 生理指标 过氧化物酶(peroxidase,POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)、过氧化氢酶(catalase,CAT)活性和可溶性蛋白(soluble protein,SP)、丙二醛(malondialdehyde,MDA)、脯氨酸(proline,PRO)含量采用苏州科铭生物技术有限公司的试剂盒进行测定。

1.5 数据处理与分析

数据以"平均值±标准误差(Mean±SE)"表示,采用Microsoft Excel 2021进行数据整理,SPSS 26.0软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和极差分析(range analysis),计算各指标的N、P、K极差值(R)并筛选最优组合。用Origin 2021软件中的Correlation Plot插件进行相关性分析,并绘制热图。

2 结果与分析

2.1 叶面施肥对树番茄苗木生长及生物量的影响

不同叶面施肥处理对树番茄苗木生长及生物量的影响如表2所示。

表2 不同叶面施肥处理对树番茄苗木生长及生物量的影响

Table 2 Effects of different foliar fertilization treatments on growth and biomass of *C. betacea* seedlings

处理 Treatments	根生物量/(g·株$^{-1}$) Root biomass	茎生物量/(g·株$^{-1}$) Stem biomass	叶生物量/(g·株$^{-1}$) Leaf biomass	总生物量/(g·株$^{-1}$) Total biomass	苗高/cm Seedling height	地径/mm Ground diameter
T1	2.19±0.36 bc	2.54±0.29 ab	3.94±0.92 ab	8.67±1.15 ab	39.71±6.69 c	10.22±1.21 ab
T2	2.42±0.53 ab	2.65±0.52 ab	4.12±0.76 ab	9.19±1.70 ab	46.90±8.03 ab	10.21±1.01 ab
T3	2.20±0.37 bc	2.48±0.48 ab	3.96±0.51 ab	8.64±0.98 ab	46.93±6.36 ab	10.07±0.99 ab
T4	2.52±0.40 ab	2.53±0.52 ab	3.73±0.49 ab	8.79±0.98 ab	48.34±5.87 a	10.14±0.61 ab
T5	2.74±0.28 a	2.96±0.68 a	4.22±0.71 a	9.93±1.43 a	48.41±7.34 a	10.48±0.92 a
T6	2.27±0.34 bc	2.43±0.38 b	3.40±0.64 bc	8.10±0.77 ab	43.88±6.93 b	10.08±1.15 ab
T7	2.34±0.57 abc	2.97±0.71 a	4.49±0.98 a	9.79±2.12 a	44.29±5.97 b	10.02±0.97 ab
T8	2.42±0.38 ab	2.78±0.26 ab	4.37±1.06 a	9.57±1.26 a	44.26±6.11 b	10.39±1.13 a
T9	2.45±0.36 ab	2.79±0.43 ab	4.09±0.49 ab	9.33±0.93 ab	44.77±6.31 ab	10.37±0.83 a
CK	1.92±0.31 c	1.97±0.34 c	2.90±0.65 c	6.79±1.07 c	37.21±7.55 c	9.79±0.55 b

注:同列数据后标不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data in the same column followed by different letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

表2显示，与CK相比，不同叶面施肥处理下树番茄苗木的根、茎、叶生物量及苗高、地径均有所增加。其中苗高、地径以及根生物量均在T5处理下达到最大值，分别较CK显著增加23.13%，6.50%和42.70%；茎、叶生物量在T7处理下最高，分别较CK显著增加52.36%和54.83%。各叶面施肥处理的总生物量均较CK显著增加（$P<0.05$），其中以T5处理最大。

2.2　叶面施肥对树番茄苗木叶片形态特征的影响

不同叶面施肥处理对树番茄苗木叶片形态的影响如表3所示。表3显示，叶面积、叶周长、叶长、叶宽均在T5处理下达到最大值，分别为263.77 cm^2、656.38 mm、200.65 mm、168.23 mm，分别较CK显著提高了110.71%，46.69%，34.98%，51.34%。

2.3　叶面施肥对树番茄苗木光合指标的影响

由表4可知，不同叶面施肥处理下树番茄苗木叶片光合指标存在显著差异（$P<0.05$）。其中蒸腾速率（T_r）在T3处理下达到最大值，较CK提高300.00%；净光合速率（P_n）在T5处理下达到最大值，其次是T3处理，以上二者分别比CK提高了994.73%，739.47%；胞间CO_2浓度（C_i）在CK下达到最大值；气孔导度（G_s）在T5处理下最大，较CK提高600.00%；水分利用效率（WUE）在不同叶面施肥处理下均高于CK，其中T4处理的WUE最大，较CK提高了667.65%。

表3　不同叶面施肥处理对树番茄苗木叶片形态特征的影响

Table 3　Effects of different foliar fertilization treatments on leaf morphological characteristics of *C. betacea* seedlings

处理 Treatments	叶面积/cm^2 Leaf area	叶周长/mm Leaf perimeter	叶长/mm Leaf length	叶宽/mm Leaf width
T1	151.35±12.13 def	480.88±14.62 cd	152.07±5.33 cde	122.39±9.33 de
T2	230.67±11.51 ab	610.68±13.52 ab	186.51±3.76 ab	156.50±3.24 ab
T3	204.01±37.25 bcd	565.22±50.83 bc	171.39±17.03 bc	142.04±9.75 bc
T4	209.10±41.52 bc	573.69±59.68 abc	167.83±8.15 bcd	144.29±10.93 bc
T5	263.77±36.47 a	656.38±59.13 a	200.65±14.45 a	168.23±12.12 a
T6	186.26±38.83 bcde	502.18±94.63 cd	157.79±10.79 cde	128.38±14.62 cde
T7	148.49±22.25 ef	525.36±35.30 bcd	142.52±4.84 e	117.99±4.15 de
T8	167.16±24.87 cdef	559.04±36.65 bc	156.29±13.47 cde	130.94±9.59 cd
T9	169.21±28.78 cdef	541.04±51.39 bc	160.27±14.41 cde	127.53±10.32 cde
CK	125.18±9.64 f	447.47±10.58 d	148.65±2.94 de	111.16±3.90 e

表4　不同叶面施肥处理对树番茄苗木光合指标的影响

Table 4　Effects of different foliar fertilization treatments on photosynthesis indices of *C. betacea* seedlings

处理 Treatments	蒸腾速率（T_r）/（$mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$） Transpiration rate	净光合速率（P_n）/（$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$） Net photosynthetic rate	胞间CO_2浓度（C_i）/（$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$） Intercellular CO_2 concentration	气孔导度（G_s）/（$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$） Stomatal conductance	水分利用效率（WUE）/（$\mu mol \cdot mmol^{-1}$） Water use efficiency
T1	1.25±0.41 a	2.37±0.27 bcd	166.09±32.54 e	0.02±0.01 bc	2.08±0.81 cd
T2	0.40±0.15 b	2.65±0.18 bcd	250.73±18.70 bcd	0.01±0.00 c	7.13±1.89 ab
T3	1.32±0.15 a	3.19±0.81 b	253.68±5.18 bcd	0.04±0.02 b	2.40±0.43 cd
T4	0.41±0.13 b	2.95±0.73 bc	219.26±34.08 d	0.02±0.01 bc	7.83±3.47 a
T5	0.68±0.22 b	4.16±0.26 a	218.28±7.34 d	0.07±0.02 a	6.53±1.88 ab
T6	0.45±0.12 b	2.09±1.17 cde	220.95±21.14 d	0.02±0.02 bc	4.64±2.23 bc
T7	0.45±0.15 b	1.15±0.23 efg	266.80±13.76 bc	0.01±0.00 c	2.68±0.53 cd
T8	0.60±0.17 b	1.64±0.09 def	279.84±14.56 b	0.02±0.01 bc	2.89±0.82 cd
T9	0.31±0.08 b	0.76±0.22 fg	238.57±22.12 cd	0.01±0.00 c	2.43±0.35 cd
CK	0.33±0.06 b	0.38±0.51 g	361.49±14.82 a	0.01±0.00 c	1.02±1.22 d

2.4　叶面施肥对树番茄苗木叶绿素荧光参数的影响

表5显示，不同叶面施肥处理对树番茄苗木初始荧光（F_o）、最大荧光（F_m）、可变荧光（F_v）和PSⅡ潜在光化学活性（F_v/F_o）均有显著影响，其中T5处理的最大荧光（F_m）、可变荧光（F_v）和PSⅡ潜在光化学活性（F_v/F_o）均显著高于其他处理，分别较CK提高了31.67%，39.44%和34.25%。不同施肥处理间的PSⅡ最大光化学效率（F_v/F_m）无显著差异，其中CK的F_v/F_m最大，说明PSⅡ光能转化效率可能主要受遗传调控主导，对施肥响应相对稳定。

表5 不同叶面施肥处理对树番茄苗木叶绿素荧光参数的影响

Table 5 Effects of different foliar fertilization treatments on chlorophyll fluorescence parameters of *C. betacea* seedlings

处理 Treatments	初始荧光(F_o) Initial fluorescence	最大荧光(F_m) Maximum fluorescence	可变荧光(F_v) Variable fluorescence	PSⅡ潜在光化学活性(F_v/F_o) Potential photochemical activity of PSⅡ	PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m) Maximum quantum yield of PSⅡ photochemistry
T1	479.22±89.75 c	2 824.67±151.09 ab	2 345.44±171.24 ab	5.06±1.05 a	0.83±0.03 a
T2	553.00±64.66 abc	2 453.33±224.42 bc	1 900.33±243.50 bc	3.51±0.87 b	0.77±0.03 a
T3	614.11±214.24 ab	2 608.78±286.49 abc	1 994.67±470.51 abc	3.61±1.21 b	0.75±0.13 a
T4	590.89±155.88 abc	2 218.11±282.72 c	1 590.89±569.64 c	2.85±1.28 b	0.72±0.26 a
T5	488.11±41.20 bc	2 872.67±157.53 a	2 384.56±124.70 a	4.90±0.27 a	0.83±0.01 a
T6	575.44±54.77 abc	2 187.89±649.83 c	1 612.44±682.22 c	2.89±1.35 b	0.68±0.24 a
T7	539.78±71.74 abc	2 270.22±172.26 c	1 730.44±197.48 c	3.28±0.69 b	0.76±0.04 a
T8	622.56±150.18 a	2 441.33±391.29 bc	1 818.78±465.31 c	3.15±1.26 b	0.74±0.09 a
T9	558.56±65.24 abc	2 529.00±639.33 abc	1 970.44±694.45 abc	3.67±1.55 b	0.76±0.11 a
CK	508.00±154.58 abc	2 181.78±574.71 c	1 710.11±344.33 c	3.65±1.27 b	0.90±0.56 a

2.5 叶面施肥对树番茄苗木叶片叶绿素含量的影响

表6显示,与CK相比,不同叶面施肥处理下树番茄苗木叶片叶绿素a、叶绿素b及叶绿素a+b均有所增加。其叶绿素a和叶绿素a+b含量均在T5处理下达到最大值,分别为3.31和3.99 mg/g,分别比CK显著增加了200.03%和188.78%。与CK相比,不同叶面施肥处理对叶绿素b和类胡萝卜素含量有不同程度促进作用,但未见显著差异。

表6 不同叶面施肥处理对树番茄苗木叶片叶绿素含量的影响

Table 6 Effects of different foliar fertilization treatments on chlorophyll content in leaves of *C. betacea* seedlings mg/g

处理 Treatments	叶绿素a Chlorophyll a	叶绿素b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	叶绿素a+b Chlorophyll a+b
T1	1.35±0.10 ef	0.53±0.30 a	0.37±0.11 a	1.89±0.01 c
T2	2.01±0.14 bc	0.41±0.06 a	0.29±0.06 a	2.42±0.01 ab
T3	2.32±0.21 b	0.60±0.17 a	0.39±0.11 a	2.92±0.01 b
T4	2.06±0.19 bc	0.48±0.13 a	0.31±0.03 a	2.54±0.01 ab
T5	3.31±0.31 a	0.68±0.35 a	0.40±0.18 a	3.99±0.01 a
T6	1.47±0.28 def	0.40±0.10 a	0.29±0.02 a	1.86±0.01 c
T7	2.32±0.17 b	0.48±0.25 a	0.29±0.06 a	2.80±0.01 b
T8	1.62±0.31 de	0.58±0.24 a	0.38±0.16 a	2.20±0.01 ab
T9	1.77±0.04 cd	0.32±0.01 a	0.36±0.12 a	2.09±0.01 c
CK	1.09±0.22 f	0.29±0.11 a	0.22±0.07 a	1.38±0.01 d

2.6 叶面施肥对树番茄苗木叶片抗逆生理特性的影响

表7显示,不同叶面施肥处理树番茄苗木SP和PRO均明显高于CK,其中以T5处理最高,分别为1.43 mg/g、55.19 μg/g。各施肥处理的POD和CAT活性均高于CK,但各处理间无显著差异。各施肥处理SOD活性均高于CK,并以T9处理最高,是CK的2.88倍。各施肥处理的MDA含量均低于CK,其中T1处理的MDA含量最低,为8.94 nmol/g,仅为CK的57.12%。

2.7 叶面施肥处理下树番茄苗木不同指标的相关性分析

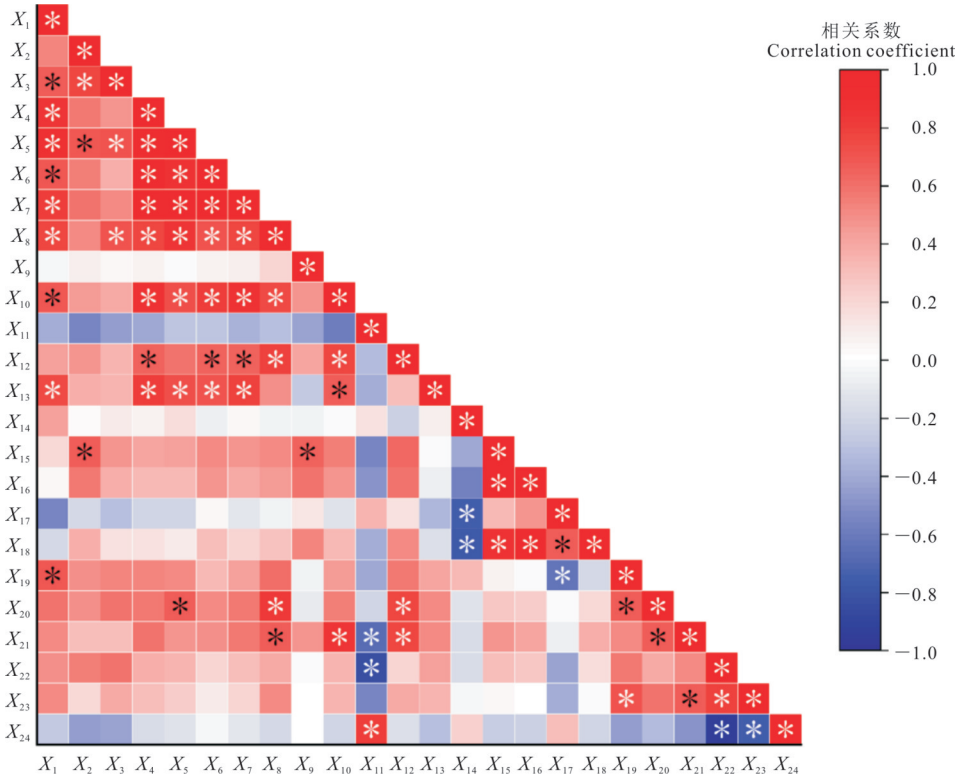
图1显示,树番茄生长指标与叶片形态指标间呈显著正相关,证实苗木生长与叶片发育协同进行;丙二醛含量与生长指标(如苗高、地径、生物量)及抗氧化酶(POD、SOD、CAT)活性呈负相关关系,说明适宜浓度施肥可激活抗氧化防御系统,有效抑制膜脂过氧化,维持细胞稳态,从而协同促进生长。此外,胞间CO_2浓度(C_i)与生长指标及净光合速率呈负相关,但与丙二醛含量呈正相关,表明气孔或

非气孔因素限制导致碳同化受阻，加剧了氧化损伤，从而抑制树番茄生长。

表 7　不同叶面施肥处理对树番茄苗木叶片抗逆生理指标的影响

Table 7　Effects of different foliar fertilization treatments on stress physiological indices in leaves of *C. betacea* seedlings

处理 Treatments	可溶性蛋白含量/(mg·g^{-1}) Soluble protein content	脯氨酸含量/(μg·g^{-1}) Proline content	POD 活性/(U·g^{-1}) POD activity	SOD 活性/(U·g^{-1}) SOD activity	CAT 活性/(nmol·g^{-1}·min^{-1}) CAT activity	丙二醛含量/(nmol·g^{-1}) Malondialdehyde content
T1	1.21±0.02 bc	14.74±1.56 b	6 806.67±948.75 a	94.75±26.83 ab	133.34±41.43 a	8.94±1.56 b
T2	1.21±0.01 bc	14.74±1.56 b	5 240.00±844.11 a	76.03±14.56 ab	106.22±51.78 a	13.33±1.51 ab
T3	1.33±0.05 ab	19.60±15.77 b	6 580.00±901.09 a	63.99±35.01 abc	137.86±34.79 a	14.10±2.55 ab
T4	1.36±0.04 ab	36.76±29.44 ab	7 406.67±817.26 a	96.50±23.47 ab	169.50±79.94 a	8.98±0.86 b
T5	1.43±0.07 a	55.19±9.73 a	7 766.67±978.11 a	96.23±13.94 ab	158.20±47.62 a	10.49±3.27 ab
T6	1.42±0.03 a	18.13±7.59 b	6 026.67±1 050.40 a	91.13±20.07 ab	149.16±52.95 a	10.75±1.68 ab
T7	1.34±0.03 ab	32.15±23.27 ab	5 753.33±1 060.13 a	91.09±11.55 ab	160.46±110.23 a	10.92±2.64 ab
T8	1.33±0.06 ab	26.96±3.41 b	5 306.67±1 426.59 a	61.63±18.60 bc	106.22±3.91 a	13.50±0.98 ab
T9	1.33±0.06 ab	19.67±8.69 b	4 906.67±1 299.47 a	101.97±11.47 a	146.90±107.70 a	9.12±5.74 b
CK	1.15±0.22 c	14.26±2.70 b	4 693.33±1 344.13 a	35.36±6.24 c	101.70±6.78 a	15.65±4.44 a



X_1～X_{24}分别表示苗高、地径、总生物量、叶面积、叶周长、叶长、叶宽、叶绿素 a+b、蒸腾速率、净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、水分利用效率、初始荧光、最大荧光、可变荧光、PSⅡ最大光化学效率、PSⅡ潜在光化学活性、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性、过氧化氢酶活性、丙二醛含量。红色表示正相关，蓝色表示负相关。*表示在 $P<0.05$ 水平呈显著相关。

X_1－X_{24} represent seedling height, ground diameter, total biomass, leaf area, leaf perimeter, leaf length, leaf width, chlorophyll a+b, transpiration rate, net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration, stomatal conductance, water use efficiency, initial fluorescence, maximum fluorescence, variable fluorescence, maximum quantum yield of PSⅡ, potential photochemical activity of PSⅡ, soluble protein content, proline content, peroxidase activity, superoxide dismutase activity, catalase activity, and malondialdehyde content, respectively. Red indicates positive correlation, and blue indicates negative correlation. * indicates significant correlation at the $P<0.05$ level.

图 1　不同叶面施肥处理树番茄苗木各指标的相关性分析

Fig. 1　Correlation analysis of various indicators of *C. betacea* seedlings under different foliar fertilization treatments

2.8　叶面施肥处理下树番茄苗木各指标的极差分析

比较不同因素的极差值（R），结果（表 8）发现，影响树番茄苗木苗高、地径、总生物量、光合气体参数、叶绿素 a+b 含量及抗氧化酶活性的主要是 N 元素，叶周长、叶长和叶宽等指标则主要受 P 调控，对

树番茄苗木生长及叶片形态特性影响主要的是N和P元素。综合极差分析得出本试验的最优水平组合为N2P2K3。

表8 不同叶面施肥处理下树番茄苗木各指标的极差分析

Table 8 Range analysis of various indices of *C. betacea* seedlings under different foliar fertilization treatments

指标 Index	极差值(R) Range value			影响排名 Impact ranking	理论最优组合 Theoretical optimal combination
	N	P	K		
苗高 Seedling height	4.08	2.36	2.44	N>K>P	N2P2K3
地径 Ground diameter	0.23	0.09	0.05	N>P>K	N2P2K3
总生物量 Total biomass	0.87	0.73	0.67	N>P>K	N3P2K3
叶面积 Leaf area	58.09	50.89	37.17	N>P>K	N2P2K3
叶周长 Leaf perimeter	35.60	82.06	68.29	P>K>N	N2P2K3
叶长 Leaf length	22.39	27.01	16.15	P>N>K	N2P2K2
叶宽 Leaf width	21.48	23.67	15.54	P>N>K	N2P2K2
叶绿素a+b Chl a+b	1.25	0.58	0.44	N>P>K	N2P2K3
蒸腾速率 Transpiration rate	0.53	0.14	0.44	N>K>P	N1P1K3
净光合速率 Net photosynthetic rate	1.88	0.80	0.80	N>P>K	N2P2K3
胞间CO_2浓度 Intercellular CO_2 concentration	42.23	32.23	23.96	N>P>K	N3P2K3
气孔导度 Stomatal conductance	0.02	0.01	0.02	K>N>P	N2P2K3
水分利用效率 Water use efficiency	3.66	2.35	2.59	N>K>P	N2P2K2
初始荧光 Initial fluorescence	46.07	24.85	20.15	N>P>K	N3P3K2
最大荧光 Maximal fluorescence	215.41	151.44	183.74	N>K>P	N1P2K3
可变荧光 Variable fluorescence	240.26	175.37	216.00	N>K>P	N1P2K3
PSⅡ最大光化学效率 Maximum quantum yield of PSⅡ photochemistry	0.04	0.05	0.03	P>N>K	N1P2K3
PSⅡ潜在光化学活性 Potential photochemical activity of PSⅡ	0.69	0.47	0.58	N>K>P	N1P2K3
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0.16	0.06	0.07	N>K>P	N2P3K3
脯氨酸含量 Proline content	20.33	13.16	15.70	N>K>P	N2P2K3
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	1 744.44	817.78	848.89	N>K>P	N2P1K3
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	16.36	16.15	9.00	N>P>K	N2P1K2
过氧化氢酶活性 Catalase activity	33.15	30.89	22.60	N>P>K	N1P1K3
丙二醛含量 Malondialdehyde content	2.05	2.83	22.60	K>P>N	N1P2K3

3 讨 论

3.1 叶面施肥对树番茄苗木生长和叶片形态的影响

叶面施肥通过科学配比实现植物营养元素的精准供给,是促进作物生长发育的有效手段[14]。本研究的极差分析表明,叶长、叶宽及叶周长对P敏感度最高,而叶面积则主要受N调控,这种差异与N、P的生理功能有关:N通过促进细胞扩张直接增加叶面积;而P则通过调控ATP酶活性影响细胞分裂速率,从而决定叶片三维构型[11]。树番茄苗木的苗高、地径、总生物量、叶绿素a+b含量及抗氧化酶活性等指标主要受N控制,这与氮素作为蛋白质合成、叶绿体发育及抗氧化酶辅因子的作用一致[15]。前人对美国山核桃(*Carya illinoensis*)[15]和流苏(*Chionanthus virginicus*)[16]的研究均表明,植株对N的敏感性高于P、K。本研究中,不同叶面施肥处理均促进了树番茄苗木的生长及叶片形态发育,其中T5(N2P2K3)处理苗木的苗高地径、生物量均达到最高。极差分析进一步表明,树番茄苗木生长指标对N的响应强度明显高于P和K,其中苗高与总生物量对N的敏感度指数极差值分别为4.08和0.87,而对K敏感度指数极差值仅为2.44和0.67。说明在T5处理下,中等浓度N、P与高浓度K的协同作用最适应苗木需求,这可能是因为N作为结构组分直接参与了叶绿素的合成,对光合作用的提升和干物质的积累至关重要;而K主要参与气孔开闭、酶的活化及水分调节,并非直接参与植株结构构建[13]。根系作为植物水分和养分吸收的关键器官,其发育状态直接影响树番茄苗木的代谢效能[17]。本研究结果表明,不同叶面施肥处理树番茄苗木各器官生物量积累仍遵循叶>茎>根的分配模式,表明外源

营养输入并未改变其原有的生物量分配特征。

3.2　叶面施肥对树番茄苗木光合荧光特性的影响

叶片N主要富集于叶绿体，是合成叶绿素和叶绿体蛋白的关键原料[18]。本研究中，叶面施肥处理树番茄苗木的叶绿素a、b含量均高于CK，结合极差分析发现，叶绿素含量对N最为敏感，且叶绿素含量在一定范围内随N的增加而增加，而在高氮肥处理下则呈下降趋势，说明氮肥在一定范围内可以促进树番茄叶片叶绿素合成，从而进一步提高其光合作用；过量施用氮肥则会产生抑制作用。有研究指出叶绿素含量与植物光合作用原初反应密切相关[19]，较高的叶绿素含量可直接提升PSⅡ反应中心的光能捕获效率，从而促进叶绿体更快更高效地将光能转化为化学能[20]，这与相关性分析中叶绿素含量与净光合速率（P_n）呈正相关的结论一致。

本研究中，与CK相比，各施肥处理均明显提高了树番茄苗木的净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、蒸腾速率（T_r）及水分利用效率（WUE），但对胞间CO_2浓度（C_i）有抑制作用。这一现象可能归因于气孔调节机制：即施肥处理通过提高G_s促进CO_2向叶肉组织的扩散，同时增强碳同化能力，导致CO_2消耗速率超过吸收速率，从而降低C_i。在此过程中，P_n因光合效率提升而显著增长；相关性分析中，C_i与P_n呈显著负相关关系（$P<0.05$）也进一步证实了这一猜想，这与胡厚臻等[21]对刨花润楠（*Machilus pauhoi*）和刘福妹等[22]对白桦（*Betula platyphlla*）的研究结果相似。

在本研究的10个处理中，最大荧光（F_m）、可变荧光（F_v）和PSⅡ潜在光化学活性（F_v/F_o）均在T5（N2P2K3）处理下达到最大值，且显著高于CK。极差分析表明初始荧光（F_o）对N较为敏感，低氮处理T1（N1P1K1）的F_o最低，而高氮处理T8（N3P2K1）的F_o最高。在相关性分析中F_o与F_v/F_m呈显著负相关，该现象可能归因于氮素对光合机构的双相调控机制：在低氮处理（T1）下，氮会限制光捕获并降低初始荧光值，同时维持F_v/F_m稳定；高氮处理（T8）下则因叶片薄化与色素堆积导致光能吸收-利用失衡，最终抑制F_v/F_m升高[23]。

3.3　叶面施肥对树番茄苗木生理特性的影响

SOD、POD和CAT是植物在生长代谢及受到环境胁迫时消除游离氧的关键酶，MDA是膜脂过氧化过程中主要产物之一，合理施肥对提高植物叶片抗氧化酶活性及降低MDA含量有显著作用[24]。SP和PRO是重要的有机渗透调节物质[25]。研究表明，叶面喷施N、P、K可以提高SOD、POD和CAT活性，并减少MDA含量，增强植株的抗逆性[26]。本研究中，在适宜范围内增施氮肥可明显提高SOD、POD、CAT活性及SP、PRO含量，但高氮处理（T7、T8和T9）下SOD、POD、CAT活性较T5处理会有所下降，说明适量氮肥可提高保护酶活性和细胞渗透调节能力，但施氮量过高对抗氧化酶活性反而会起到抑制作用。与N相比，P和K对树番茄叶片抗氧化性及渗透调节能力影响较小，可能原因是P和K主要作用于植物的生长和光合作用[27]，对抗氧化系统并不敏感。

4　结　论

与CK相比，叶面喷施氮磷钾明显提高了树番茄苗木生长生理及光合特性，且树番茄苗木对N的敏感性及需求大于P和K。改善树番茄生长和光合的最佳处理为T5（N2P2K3），该处理通过促进树番茄苗木叶片发育，增加叶片光合色素含量，提高了其对光能的吸收和转换能力，最终改善树番茄苗木的生长及发育。

[参考文献]

[1] KAHIA J，SALLAH P K，DIBY L，et al. A novel regeneration system for tamarillo（*Cyphomandra* betacea）via organogenesis from hypocotyl，leaf，and root explants[J]. HortScience，2015，50(9)：1375-1378.

[2] LIU L，LI X F，HUANG K W，et al. Salicylic acid promotes growth and affects cadmium accumulation of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy，2022，41(3)：e13787.

[3] 董琼，李世民，高尚杰，等. 不同种源树番茄果实品质比较及综合分析[J]. 食品与发酵工业，2022，48(4)：266-273.
DONG Q，LI S M，GAO S J，et al. Comparison and comprehensive analysis the quality of *Cyphomandra betacea* from different provenance[J]. Food and Fermentation Industries，2022，48(4)：266-273.

[4] 崔桐灏，周辉轩，鲍荣粉，等. 芸苔素内酯对树番茄幼苗生长及养分吸收的影响[J]. 四川农业大学学报，2022，40(6)：853-861.
CUI T H，ZHOU H X，BAO R F，et al. Effects of brassinolide on the growth and nutrient absorption of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Journal of Sichuan Agricultural University，2022，40(6)：853-861.

[5] 郑绍傑，金友帆，董琼，等. 氮磷钾不同配比施肥对树番茄幼苗生长及叶片养分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料，2024(7)：108-122.
ZHENG S J，JIN Y F，DONG Q，et al. Effects of different ra-

tios of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on the growth and leaf nutrient content of *Cypomandra betacea* seedlings[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2024(7):108-122.

[6] 李树萍,董琼,李世民,等. 树番茄幼苗生长及氮积累与分配对光照和氮素添加的响应[J]. 江西农业大学学报,2023,45(1):156-168.
LI S P, DONG Q, LI S M, et al. Responses of *Cyphomandra betacea* Sendt. seedling growth and nitrogen accumulation and allocation to light and nitrogen addition[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2023,45(1):156-168.

[7] 郑在声. 树番茄(*Cyphomandra befacea* Sende)[J]. 中国蔬菜,1989(6):48.
ZHENG Z S. *Cyphomandra befacea* Sende[J]. China Vegetables,1989(6):48.

[8] 沈云鹏,张水勤,许猛,等. 叶面喷施低共熔溶剂对冬小麦产量和基施肥料氮去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(9):1654-1663.
SHEN Y P, ZHANG S Q, XU M, et al. Effects of foliar spraying of deep eutectic solvent on winter wheat yield and fertilizer nitrogen fate in soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2023,29(9):1654-1663.

[9] GAO D P, RAN C, ZHANG Y H, et al. Effect of different concentrations of foliar iron fertilizer on chlorophyll fluorescence characteristics of iron-deficient rice seedlings under saline sodic conditions[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 185:112-122.

[10] 李兴则,韦兴兰,曾惠平,等. 叶面配比施肥对树番茄苗木生长及非结构性碳水化合物的影响[J]. 西南农业学报,2024,37(12):2765-2774.
LI X Z, WEI X L, ZENG H P, et al. Effect of foliar fertilization with variable ration on seedling growth and non-structural carbohydrates of *Cyphomandra betacea*[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2024,37(12):2765-2774.

[11] ZHANG X Y, LI S S, AN X L, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium formula fertilization on the yield and berry quality of blueberry[J]. PLoS One,2023,18(3):e0283137.

[12] 田钰君,许云飞,郭延平. 叶面喷施钾肥对无花果光合生理和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(7):126-132.
TIAN Y J, XU Y F, GUO Y P. Effects of foliar potassium application on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence characteristics of *Ficus carica* L.[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2023,51(7):126-132.

[13] 陈芬,余高,陈容,等. 减磷配施有机肥对辣椒生长及光合荧光特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(7):114-125.
CHEN F, YU G, CHEN R, et al. Effects of reduced application of chemical phosphorus combined with organic fertilizer on growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *Capsicums annuum* L.[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2021,49(7):114-125.

[14] KENTELKY E, SZEKELY-VARGA Z. Impact of foliar fertilization on growth, flowering, and corms production of five *Gladiolus* varieties[J]. Plants,2021,10(9):1963.

[15] LIU J P, CHEN W J, WANG H K, et al. Effects of NPK fertilization on photosynthetic characteristics and nutrients of pecan at the seedling stage[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2021,21(3):2425-2435.

[16] 曹钰,胡涛,张鸽香. 氮磷钾配比施肥对美国流苏容器苗生长的影响[J]. 东北林业大学学报,2018,46(12):25-28,34.
CAO Y, HU T, ZHANG G X. Effects of fertilization on growth of *Chionanthus virginicus* container seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University,2018,46(12):25-28,34.

[17] 孔迪,许玉兰. 叶面施氮磷肥对云南松生长与生物量分配的影响[J/OL]. 中南林业科技大学学报,2025:1-11.(2025-04-16). https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1470.s.20250416.0921.002.html.
KONG D, XU Y L. Effects of foliar nitrogen and phosphorus fertilization on growth, biomass distribution of *Pinus yunnanensis*[J/OL]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025:1-11.(2025-04-16). https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1470.s.20250416.0921.002.html.

[18] SAAVEDRA T, GAMA F, RODRIGUES M A, et al. Effects of foliar application of organic acids on strawberry plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2022,188:12-20.

[19] QUAN X Q, WANG R Y, LI X Y, et al. Effects of nitrogen addition and ammonium-nitrate-nitrogen ration on photosynthe-tic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J]. Acta Phytopathologica Sinica,2024,48(8):1050-1064.

[20] 张志录,刘中华,彭舜磊,等. 氮磷添加对考来木光合特性和叶绿素荧光的影响[J]. 浙江农林大学学报,2019,36(3):459-467.
ZHANG Z L, LIU Z H, PENG S L, et al. Photosynthetic traits and chlorophyll fluorescence of *Correa carmen* leaves with N and P additions[J]. Journal of Zhejiang A&F University,2019,36(3):459-467.

[21] 胡厚臻,侯文娟,潘启龙,等. 配方施肥对刨花润楠幼苗生长和光合生理的影响[J]. 西北林学院学报,2015,30(6):39-45.
HU H Z, HOU W J, PAN Q L, et al. Effects of formulated fertilization on the growth and photosynthetic physiological properties of *Machilus pauhoi* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(6):39-45.

[22] 刘福妹,姜静,刘桂丰. 施肥对白桦树生长及开花结实的影响[J]. 西北林学院学报,2015,30(2):116-120,195.
LIU F M, JIANG J, LIU G F. Effects of fertilization on the growth and flowering of *Betula platyphylla*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(2):116-120,195.

[23] 冯蕾,童成立,石辉,等. 不同氮磷钾施肥方式对水稻碳、氮累积与分配的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(10):2615-2621.
FENG L, TONG C L, SHI H, et al. Effects of different nitro-

gen，phosphorous，and potassium fertilization modes on carbon- and nitrogen accumulation and allocation in rice plant[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2011，22(10)：2615-2621.

[24] 曹栋，冯凯，陈颖，等. 微生物菌肥配施对截干银杏林有效成分积累及叶绿素荧光特性的影响[J]. 经济林研究，2023，41(2)：129-136.
CAO D，FENG K，CHEN Y，et al. Effects of combined application of microbial fertilizer on effective constituent and chlorophyll fluorescence of *Ginkgo biloba* trunk-cutting seedlings[J]. Non-wood Forest Research，2023，41(2)：129-136.

[25] 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.

[26] 康娟. 叶面施肥对闽楠幼苗生长与生理特性的影响[D]. 长沙：中南林业科技大学，2020.
KANG J. The effect of foliar fertilization on the growth and physiological characteristics of *Phoebe bournei* seedlings[D]. Changsha：Central South University of Forestry & Technology，2020.

[27] 李玲燕，唐银，钟明慧，等. 缓释肥对杉木容器苗生长、光合生理和养分积累的影响[J]. 广西植物，2023，43(6)：1059-1069.
LI L Y，TANG Y，ZHONG M H，et al. Effects of slow-release fertilizer on growth，photosynthetic physiology and nutrient accumulation of container seedlings of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Guihaia，2023，43(6)：1059-1069.

（责任编辑：李小平）

(上接第 26 页)

[22] 黄思琪，曲红焱，黄大鹏，等. L-精氨酸对冷应激仔猪生长性能、免疫功能及肝脏、肾脏中肿瘤坏死因子-α、干扰素-γ基因表达量的影响[J]. 动物营养学报，2019，31(1)：131-139.
HUANG S Q，QU H Y，HUANG D P，et al. Effects of L-arginine on growth performance，immune function and genes expression levels of tumor necrosis factor-α and interferon-γ in liver and kidney of cold-stressed piglets[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition，2019，31(1)：131-139.

[23] 叶繁翔，谭佳丽，何锦艳，等. 畜禽干扰素-γ研究进展[J]. 湖北农业科学，2017，56(16)：3001-3004.
YE F X，TAN J L，HE J Y，et al. Research progress of interferon-γ in livestock and poultry[J]. Hubei Agricultural Sciences，2017，56(16)：3001-3004.

[24] DONG L，ZHONG X，AHMAD H，et al. Intrauterine growth restriction impairs small intestinal mucosalImmunity in neonatal piglets[J]. Journal of Histochemistry & Cytochemistry，2014，62(7)：510-518.

[25] LE MARĒCHAL C，PETON V，PLĒC，et al. Surface proteins of *Propionibacterium freudenreichii* are involved in its anti-inflammatory properties[J]. Journal of Proteomics，2015，113：447-461.

[26] DEUTSCH S M，MARDASSOU M，NICOLAS P，et al. Identification of proteins involved in the anti-inflammatory properties of *Pronibacterium freudenreichii* by means of a multi-strain study[J]. Scientific Reports，2017，7：46409.

[27] DAVID L A，MAURICE C F，CARMODY R N，et al. Diet rapidly and reproducibly alters the human gut microbiome[J]. Nature，2014，505(7484)：559-563.

[28] MANAF M，HEDAYATI M，YARI M. Aflatoxicosis and herbal detoxification：the effectiveness of thymeessence on performance parameters and antibody titers of commercial broilers fed aflatoxin B_1[J]. Research in Zoology，2014，4(2)：43-50.

[29] LEE N Y，YOON S J，HAN D H，et al. *Lactobacillus* and *Pediococcus* ameliorate progression of non-alcoholic fatty liver disease through modulation of the gut microbiome[J]. Gut Microbes，2020，11(4)：882-899.

[30] LIU Y，FENG Y，YANG X，et al. Mining chicken ileal microbiota for immunomodulatory microorganisms[J]. The ISME Journal，2023，17(5)：758-774.

[31] ZENG H，ZHENG Y，LIN Y，et al. Effect of fractionated *Lotus* seed resistant starch on proliferation of *Bifidobacterium longum* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. bulgaricus and its structural changes following fermentation[J]. Food Chemistry，2018，268：134-142.

[32] XIONG Y M，MIYAMOTO N，SHIBATA K J，et al. Short-chain fatty acids stimulate leptin production in adipocytes through the G protein-coupled receptor GPR41[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2004，101(4)：1045-1050.

[33] 胡竑，邓志颖，周锡红，等. 饲粮纤维与肠道菌群调控脂肪代谢的研究进展[J]. 动物营养学报，2024，36(6)：3507-3513.
HU H，DENG Z Y，ZHOU X H，et al. Research progress of dietary fiber and intestinal flora regulating fat metabolism[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition，2024，36(6)：3507-3513.

（责任编辑：屈李纯）