

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6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.007

论文标题： 2种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性的影响

作　　者： 谢代玉，李　锐，向大燕，等

收稿日期： 2025-06-09

引文格式： 谢代玉,李锐,向大燕,等.2种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):70-79.

XIE D Y, LI R, XIANG D Y, et al. Effects of two types of microbial fertilizers on growth of *Camellia oleifera* seedlings and the influence of photosynthetic characteristics[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):70-79.

相关论文推荐

Recommended articles

我国油茶科技进展与未来核心技术

Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China

不同施肥模式对油茶春梢生长和叶片酶活性的影响研究

Effects of different fertilization modes on growth and leaves enzyme activity of *C.oleifera*

叶面肥对威宁短柱油茶春梢生长、叶片光合生理及结实的影响

Effects of foliar fertilizer on spring shoot growth, leaf photosynthetic physiology and fruit of *Camellia weiningensis*

油茶杂交子代叶片光合特性与形态结构

Photosynthetic characteristics and morphological structure of leaves in *Camellia oleifera* hybrid progeny

水肥综合措施对油茶经济性状与产量的影响

Effect on yield and economic characters of Camellia oleifera fruit by water and fertilizer comprehensive measures

干旱下施肥对油茶叶片关键代谢途径的影响

Transcriptome analysis of the effects of fertilization under drought on key metabolic pathways in *Camellia oleifera* leaves

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.007
http: //qks.csuft.edu.cn

2 种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性的影响

谢代玉，李　锐，向大燕，殷艾馨，舒　燕，陈　涛，冯士令，丁春邦，周莉君
（四川农业大学 生命科学学院，四川 雅安 625014）

摘　要：【目的】探究 2 种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性的影响，为油茶养分管理提供参考。【方法】以 1 年生‘长林 40 号’油茶幼苗为材料，通过测定施加 2 种微生物菌肥后油茶的生长指标、气体交换参数、叶绿素荧光参数及抗氧化酶活性等指标，结合主成分与隶属函数分析，综合评价不同处理效果并筛选最优菌肥及施用量。【结果】施用微生物菌肥显著促进了油茶的生长和光合特性，与对照组（CK）相比，A4 和 L2 处理组使株高分别提高 71.74% 和 67.94%；A2 和 L2 处理组使地径分别提高 60.00% 和 45.40%。叶绿素与类胡萝卜素含量在 A3 和 L3 处理下显著增加，其中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素增幅分别为 147.64%、90.62%、122.08%、213.43% 和 130.27%、121.03%、126.85%、280.07%。A2 处理的净光合速率（P_n）较对照组（CK）和氮肥处理（N）分别提高 93.03% 和 66.66%。A2 处理叶片的 qP、ETR 较 CK 分别高 31.03%、35.95%，较 N 处理组分别高 46.15%、33.75%。此外，A4 和 L2 处理组的超氧化物歧化酶（SOD）活性显著高于 CK 和 N 处理组，增幅分别为 24.69%、28.57% 和 51.82%、56.54%，同时增强了过氧化物酶（POD）和过氧化氢酶（CAT）活性。主成分分析与隶属函数综合评价结果表明，A2 处理下油茶的生长、光合特性及抗氧化酶活性表现最佳。【结论】微生物菌肥与兰迪多邦显著促进了油茶植株生长，通过提高叶片叶绿素含量、气体交换参数、叶绿素荧光参数增强抗氧化酶活性，有效增强了植株光合作用，可为油茶高效栽培提供有力支撑。

关键词：油茶幼苗；菌肥；生长发育；光合特性
中图分类号：S753.53^{+}2；S794.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0070-10

Effects of two types of microbial fertilizers on growth of *Camellia oleifera* seedlings and the influence of photosynthetic characteristics

XIE Daiyu, LI Rui, XIANG Dayan, YIN Aixin, SHU Yan, CHEN Tao, FENG Shiling, DING Chunbang, ZHOU Lijun

(College of Life Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

Abstract:【Objective】To investigate the effects of two microbial fertilizers on the growth and photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera* seedlings, and to provide some practical references and theoretical support for the nutrient management of *Camellia oleifera*.【Method】The growth indexes, gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant enzyme activities of *Camellia oleifera* seedlings were measured after applying two kinds of microbial fertilizers, and combined with the principal component and subordinate function analysis to comprehensively evaluate the effects of different treatments and screen the optimal fertilizers and application rates.【Result】The application of microbial fertilizer significantly promoted the growth and photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera*. Compared with the control group (CK), A4 and L2 treatments increased plant height by 71.74% and 67.94%, respectively; A2 and L2 treatments increased ground diameter by 60.00% and 45.40%, respectively. Chlorophyll and carotenoid contents were significantly increased by A3 and L3 treatments, where the increase in chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoids were 147.64%, 90.62%, 122.08%, 213.43% and 130.27%, 121.03%, 126.85% and 280.07%, respectively. The A2 treatment increased the net photosynthetic rate (P_n) compared to the 93.03% and 66.66% in the control (CK) and nitrogen fertilizer treatment (N), respectively. qP and ETR of A2-treated leaves were 31.03% and 35.95% higher than that of CK, and 46.15% and 33.75% higher than that of N group, respectively. In addition, superoxide dismutase (SOD) activities of A4 and L2 treatments were significantly higher than CK and N by 24.69%, 28.57% and 51.82%, 56.54%, respectively, while peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities were enhanced. The comprehensive evaluation of principal component analysis and affiliation function indicated that the growth, photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of *Camellia oleifera* performed best under A2 treatment.【Conclusion】The microbial

收稿日期（Received）：2025-06-09　　**修订日期**（Revised）：2025-09-17
基金项目：四川省科技计划项目（2024ZHCG0100）；四川省教育发展中心课题（CJF23012）；雅安市校合作项目（23CGZH0005）。
第一作者：谢代玉（1806797194@qq.com），硕士研究生。**通信作者：**周莉君（zhoulijun@sicau.edu.cn），讲师，博士，硕士研究生导师。
引文格式：谢代玉 , 李锐 , 向大燕 , 等 .2 种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):70-79.
XIE D Y, LI R, XIANG D Y, et al. Effects of two types of microbial fertilizers on growth of *Camellia oleifera* seedlings and the influence of photosynthetic characteristics[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):70-79.

fertilizer and Randidobond significantly promoted the growth of *Camellia oleifera* seedlings, and enhanced the antioxidant enzyme activities by increasing the chlorophyll content, gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence parameters of the leaves, effectively enhanced the photosynthesis of the plants, and provided a strong support for the high-efficiency cultivation of *Camellia oleifera*.
Keywords: *Camellia oleifera* seedlings; microbial fertilizer; growth and development; photosynthetic characteristics

油茶 *Camellia oleifera* Abel. 属山茶科山茶属，常绿灌木或小乔木，与油橄榄、油棕、椰子并称为世界四大木本食用油料树种 [1]。我国的油茶种植面积和产量都居于世界第一，主要分布在湖南、江西、广西、福建和浙江等省（区）[2]。油茶的种子不仅可以榨取高质量食用油，果壳还可以提取天然色素，提油后的饼粕还可以提取茶皂素等具有广泛应用价值的化合物 [3]。

油茶花果同期，土壤肥力较低时，落花落果严重，大小年明显，导致油茶的产量及品质下降 [4]。通过施肥可以有效提高油茶的营养物质含量，促进生长，增加产量 [5]。但是有研究表明，长期施用化肥会使土壤酸化板结、肥力下降，使土壤通气性和透水性变差，影响根系的正常生长和发育，进一步影响油茶产量和品质 [6]。而施用微生物菌肥能够有效规避传统肥料的劣势。研究表明，微生物菌肥通过固氮作用、磷酸盐以及钾的溶解与矿化、植物生长调节物质的释放、抗生素的合成以及土壤有机物的生物降解等机制，显著提高了土壤中微量与宏量营养元素的积累 [7]。Sato 等 [8] 对番茄分别施加微生物菌肥和化肥后发现，相比化肥，施用微生物菌肥使番茄的根重和径粗分别高 1.12 倍和 1.11 倍，增强了番茄对营养物质的吸收。林宇岚等 [9] 在土壤中接种丛枝菌根菌剂后发现，与空白组对比，接种丛枝菌根后可以显著提高油茶的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度，降低胞间 CO_2 浓度，促进油茶的生长。曹栋等 [10] 施用微生物菌肥对截干银杏林的研究表明，施用不同配比的微生物菌肥显著提高了其叶片的光化学效率（F_v/F_m）和光化学猝灭系数（NPQ），增强了截干银杏林的光合效能，促进截干银杏林的生长。微生物菌肥作为一种绿色、环保、安全且高效的新型肥料，在改善土壤理化性质、提升土壤肥力、促进作物生长、增强农作物产量及抗逆性等方面具有显著作用。

目前，微生物菌肥在粮食作物（如小麦、玉米）及蔬菜作物（如黄瓜、番茄）等农业生产中已表现出良好的应用效果。本试验以一年生‘长林 40 号’油茶幼苗为研究对象，通过施加不同浓度的微生物菌肥和兰迪多邦，测定油茶幼苗的生长指标、叶绿素含量、光合参数、叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性，探究微生物菌肥在油茶种植中的作用效果，筛选适宜菌肥种类与剂量。

1　材料和方法

1.1　试验材料

试验所用一年生‘长林 40 号’油茶苗购自雅安市名山区联香油茶种植农民专业合作社，于 2024 年 5 月定植于四川农业大学教学科研基地（29°59′19″N，102°59′23″E），缓苗 1 个月。试验采用 2 种微生物菌肥：微生物菌肥 A 为实验室自主研发产品，其配方为菌剂∶酵母浸膏∶蛋白胨 = 100∶7∶7，菌剂由不同配比的枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、放线菌和巨大芽孢杆菌等组成；兰迪多邦由沈阳市北新区绿色春天科技农资中心惠赠，主要含有枯草芽孢杆菌、拟康氏木霉菌、光合细菌等有益菌；氮肥购自当地农资市场。

1.2　试验设计

试验共设置 12 种处理（表 1），2 种菌肥分别设置 5 种浓度，微生物菌肥为 2.5（A1）、5（A2）、10（A3）、20（A4）、40（A5）g/ 株，兰迪多邦为 0.1（L1）、0.3（L2）、0.5（L3）、0.7（L4）、0.9（L5）mL/ 株，以不做处理（CK）和施加 2 g/ 株氮肥（N）为对照。微生物菌肥 A 采用穴施的施肥方式，兰迪多邦采用叶面喷施的方式。每个处理分别设置 3 个重复，每个重复设置 10 株，盆栽基质按珍珠岩、蛭石与营养土体积比 1∶1∶3 配制。施肥处理于 2024 年 6 月进行，同年 12 月测定油茶生长指标、叶绿素含量、气体交换参数、叶绿素荧光参数及酶活性，其余栽培管理与培养条件均保持一致。

1.3　测定指标及方法

1.3.1　生长指标测定

施肥前测量油茶幼苗株高和地径。株高采用米尺测量，记录从基质表面至幼苗最高点的自然高度；地径使用数码游标卡尺测量，测量位置为高于基质表面嫁接口处（3 cm）的茎粗。叶片长

度和宽度用刻度尺测量，并依据公式（叶面积 = 0.75× 叶长 × 叶宽）计算叶面积。分枝数采用直接计数法统计。根系表型参数采用根系扫描仪检测（GXY-A），测定指标包括总根长、根平均直径、根总面积及根尖数。

表 1 试验设计及各处理微生物菌肥施用量

Table 1 Experimental design and the amount of microbial fertilizer under different treatments

供试菌肥 Tested bacterial fertilizer	处理编号 Processing No.	施加浓度 Concentration applied
对照 Contrasting	CK	清水
微生物菌肥 A Microbial fertilizer A	A1	2.5 g/ 株
	A2	5 g/ 株
	A3	10 g/ 株
	A4	20 g/ 株
	A5	40 g/ 株
兰迪多邦 Land	L1	0.1 mL/ 株
	L2	0.3 mL/ 株
	L3	0.5 mL/ 株
	L4	0.7 mL/ 株
	L5	0.9 mL/ 株
氮肥 Nitrogen fertilizer	N	2 g/ 株

1.3.2 叶片叶绿素含量

叶绿素含量测定采用分光光度法[11]，称取新鲜叶片 0.1 g，放入离心管中加入 95% 乙醇制成提取液，振荡均匀后利用分光光度计测定叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量，每个处理重复 3 次。

1.3.3 光合参数及叶绿素荧光参数

采用荧光成像同步测量系统（GFS-3000）测定叶片的净光合速率（P_n）、蒸腾速率（T_r）、气孔导度（G_s）、胞间二氧化碳浓度（C_i）；使用叶绿素荧光仪（Dual-pam-100）暗处理 20 min 后，测定各项叶绿素荧光参数，计算 PS Ⅱ最大光化学效率（F_v/F_m）、光化学淬灭系数（qP）、非光化学淬灭系数（NPQ）和电子传递速率（ETR）。

1.3.4 抗氧化酶活性测定

超氧物歧化酶活性（SOD）采用氮蓝四唑（NBT）还原法测定[12]；过氧化物酶（POD）活性采用愈创木酚法测定[13]；过氧化氢酶活性（CAT）用南京建城生物工程研究所提供的 A007-1-1 试剂盒进行测定。

1.4 数据处理

采用 SPSS 26.0 软件对数据进行方差分析、多重比较和主成分分析，利用 Excel 2019 软件进行数据统计和隶属函数的计算，采用 Graphpad Prism 9.1 和 ChiPlot 进行绘图。运用主成分分析法和隶属函数法结合进行综合评价，计算公式如下：

$$u(X_i) = (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (i = 1,2,3\ldots,n) \tag{1}$$

式中：$u(X_i)$ 表示第 i 个综合指标的隶属函数值，X_i 表示第 i 个综合指标，$X_{i\min}$ 和 $X_{i\max}$ 分别表示第 i 个综合指标的最小值和最大值。

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^{n} P_i \tag{2}$$

式中：W_i 表示第 i 个综合指标在全部综合指标中的权重，P_i 表示主成分分析中得到的各评价指标第 i 个综合指标的贡献率。

$$D = \sum_{i=1}^{n} [u(X_i)(W_i)] \tag{3}$$

式中：D 值为油茶在不同施肥处理下的综合评价值。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对油茶生长的影响

由表 2 可以看出，施用微生物菌肥 A 和兰迪多邦显著促进油茶生长发育。A4 和 L2 处理的株高增长量最大，较 CK 分别提高 71.74% 和 67.94%，但略低于 N 处理；A2 和 L2 处理的地径增长量较 CK 分别提高 60.00% 和 45.40%，与 N 处理无显著差异；叶面积和分枝数在各施肥处理中普遍高于 CK，其中 A2、A3、A4、L3 处理的叶面积显著超过 N；A2 和 L1 处理的分枝数显著增加；微生物菌肥显著促进根系发育，A3 处理的根尖数、总根长、根表面积和根直径均显著高于 CK 和 N 处理，兰迪多邦处理无显著影响。

2.2 不同施肥处理对油茶叶片光合特性的影响

2.2.1 光合色素含量

如图 1 所示，微生物菌肥 A3 处理显著提高‘长林 40 号’油茶叶片光合色素含量，叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量较 CK 分别增加 147.64%、90.62%、122.08% 和 213.43%。在兰迪多邦处理下，叶片光合色素含量随浓度升高呈先增后减趋势，各处理组均显著高于 CK，但未超 N 处理。其中 L3 处理的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量较 CK 分别提升 130.27%、121.03%、126.85% 和 280.07%。可见，2 种微生物菌肥多个浓度处理均可有效促进油茶叶片光合色素合成与积累，提高光能捕获与转化效率，A3、L3 处理效果最为显著。

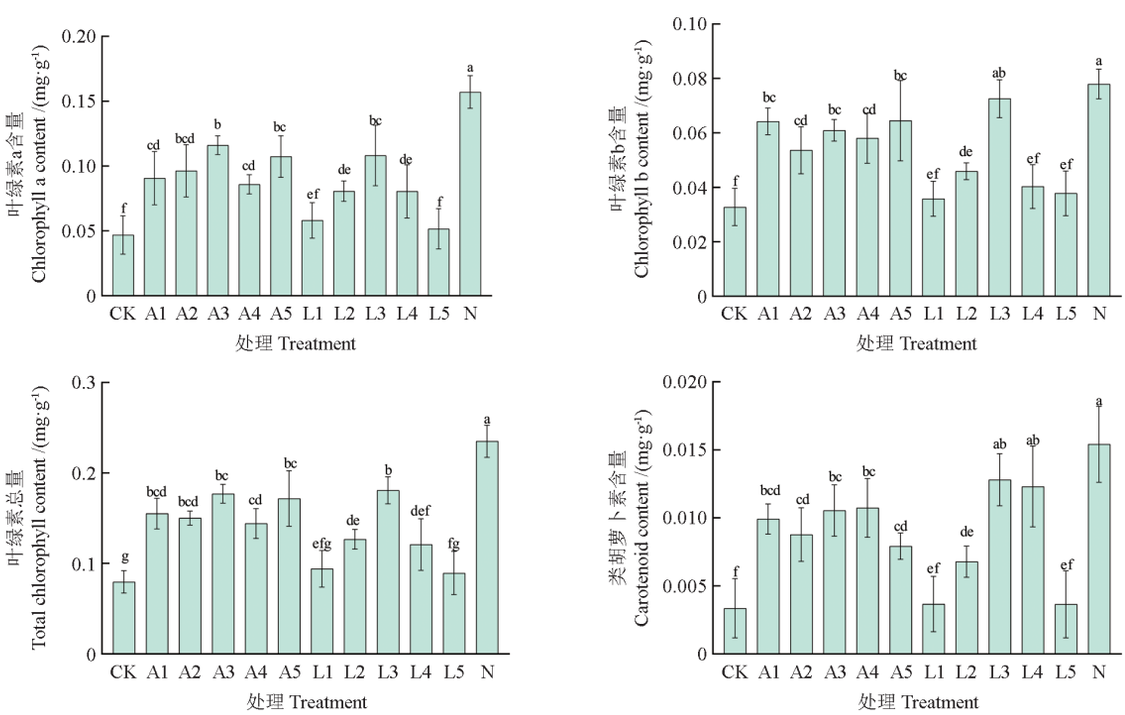
表 2　不同施肥处理下油茶生长指标 †

Table 2　Growth index of *Camellia oleifera* under different fertilization treatments

处理 Treatment	株高增长量 Plant height growth /cm	地径增长量 Ground diameter growth /mm	叶面积 Leaf area /cm^2	分枝数 Branching number
CK	14.97±1.68 g	1.85±0.05 g	16.51±0.97 cd	2.00±0.33 ef
A1	23.97±0.30 bcd	2.12±0.27 ef	16.67±1.42 cd	2.67±0.33 c
A2	25.22±2.55 bc	2.96±0.03 a	20.30±0.55 a	2.78±0.19 bc
A3	22.19±0.88 de	2.33±0.12 de	19.26±1.32 ab	1.67±0.33 f
A4	25.71±1.64 ab	2.50±0.22 bcd	20.95±0.55 a	2.78±0.19 bc
A5	23.09±1.32 cde	2.44±0.23 cd	17.72±1.81 bc	2.44±0.19 cd
L1	22.80±1.64 cde	2.63±0.25 bc	16.11±0.39 cd	3.33±0.00 a
L2	25.14±1.36 bc	2.69±0.16 b	16.69±1.05 cd	2.11±0.19 de
L3	19.48±0.82 f	2.47±0.08 bcd	19.99±0.90 a	1.89±0.19 ef
L4	21.98±2.65 de	2.17±0.03 ef	14.89±0.85 d	2.1±0.19 de
L5	21.13±1.50 ef	2.00±0.04 fg	16.02±1.20 cd	1.8±0.19 ef
N	27.87±0.85 a	2.69±0.10 bc	17.83±1.54 bc	3.11±0.19 ab
处理 Treatment	根尖数 Root tips number	总根长 Total root length /mm	根直径 Root diameter /mm	根表面积 Root surface area /mm^2
CK	259.33±44.81 bcd	5 470.73±627.07 cd	0.39±0.04 bc	6 180.83±236.85 de
A1	238.33±26.85 d	6 182.24±711.94 abc	0.42±0.01 abc	8 465.23±544.18 ab
A2	324.33±42.39 ab	4 867.50±594.96 de	0.46±0.04 ab	6 963.47±101.66 cd
A3	348.33±37.64 a	6 830.45±719.39 a	0.50±0.05 a	8 828.17±552.33 a
A4	313.33±38.99 abc	6 389.86±405.43 ab	0.45±0.04 abc	7 841.52±735.97 bc
A5	256.67±48.60 cd	3 547.17±708.50 g	0.37±0.04 abc	4 484.46±613.86 g
L1	237.67±20.81 d	3 930.65±42.23 fg	0.39±0.05 bc	4 776.93±535.90 fg
L2	298.67±42.25 abcd	4 738.65±420.93 de	0.43±0.05 abc	6 581.11±465.98 d
L3	255.33±25.92 cd	3 478.31±218.44 g	0.42±0.05 abc	4425.13±796.82 g
L4	232.67±24.13 d	4 439.34±518.16 ef	0.41±0.04 bc	5 654.84±362.70 ef
L5	239.67±47.05 d	3 868.55±276.77 fg	0.44±0.05 c	4 898.98±891.28 fg
N	309.00±18.02 abc	5 828.15±276.00 bc	0.43±0.03 abc	6 885.82±770.25 d

† 表中不同小写字母表示处理间差异显著（$P < 0.05$），下同。

Different lowercase letters in the table indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$), the same below.



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$), the same below.

图 1　不同施肥处理下油茶叶片叶绿体色素含量

Fig. 1　Chloroplast pigment content of *Camellia oleifera* leaves under different fertilization treatments

2.2.2 光合指标

由表 3 可知，A2 处理组油茶净光合速率（P_n）达最大值，显著高于其他处理组，较对照（CK）和氮肥（N）分别提高 93.03%、66.66%；蒸腾速率（T_r）整体与对照（CK）无显著差异；胞间 CO_2 浓度（C_i）在 A2、L5 处理组显著低于其他处理，分别较 CK 降低 60.15% 和 51.57%；气孔导度（G_s）在 A2 处理组与 CK 差异极显著，较 CK 高出 4.16 倍。结果表明，施用微生物菌肥与兰迪多邦可通过提升 P_n、T_r、G_s 并降低 C_i，增强油茶光合效能，为植株生长发育提供物质与能量基础。

表 3 不同施肥处理下油茶叶片的光合指标

Table 3 Photosynthetic indexes of *Camellia oleifera* leaves under different fertilization treatments

处理 Treatment	净光合速率 P_n /(mmol·m^{-2}·s^{-1})	蒸腾速率 T_r /(mmol·m^{-2}·s^{-1})	胞间 CO_2 浓度 C_i /(μmol·m^{-2}·s^{-1})	气孔导度 G_s /(μmol·m^{-2}·s^{-1})
CK	1.58±0.22 c	0.49±0.04 ab	290.67±8.29 a	4.43±0.66 d
A1	2.03±0.19 bc	0.61±0.09 ab	238.17±12.57 cde	8.97±0.48 bc
A2	3.05±0.28 a	0.63±0.08 ab	181.50±14.56 f	22.87±1.86 a
A3	0.76±0.10 d	0.44±0.17 ab	246.43±9.80 bcd	7.57±1.91 bcd
A4	2.23±0.31 b	0.60±0.05 ab	227.60±8.51 cde	9.63±2.79 bc
A5	1.68±0.16 bc	0.45±0.09 ab	186.27±6.93 de	7.53±0.90 bcd
L1	0.86±0.06 d	0.28±0.06 b	233.23±14.27 cde	6.33±0.85 cd
L2	0.89±0.02 d	0.42±0.10 ab	280.80±5.51 ab	9.70±1.45 bc
L3	1.60±0.01 c	0.75±0.07 a	245.50±14.03 abcd	6.33±1.08 bcd
L4	0.87±0.17 d	0.29±0.09 b	233.10±15.63 ef	10.67±0.67 b
L5	0.69±0.10 d	0.52±0.01 ab	191.77±5.22 f	6.80±1.00 bcd
N	1.83±0.36 bc	0.49±0.14 ab	261.67±9.46 abc	8.27±1.33 bcd

2.2.3 叶绿素荧光参数

如图 2 所示，不同浓度的微生物菌肥和兰迪多邦处理油茶叶片的 F_v/F_m、NPQ 与 CK 均无显著性差异，其中 A2、A3、A4、A5、L3 处理叶片的 F_v/F_m 和 NPQ 与 N 处理组也无显著性差异，A2 处理叶片的 qP、ETR 与 CK 和 N 处理差异显著，较 CK 分别高出 31.03%、35.95%，较 N 处理组分别高 46.15%、33.75%。A5、L3 和 L4 处理组的 qP 和 ETR 虽未达到显著水平，但数值高于 CK 和 N 组。可见，施加微生物菌肥后可以促进油茶植株对光能的吸收及转化效率，有效地利用光能进行光合作用，为植物的生长提供充足的能量和物质。

2.3 不同施肥处理对油茶叶片抗氧化活性的影响

如图 3 所示，油茶叶片 SOD 酶活性含量 A4 处理显著高于 CK 和 N 处理组，分别高 24.69% 和 28.57%；L2、L3、L4 处理的 SOD 酶活性也分别比 CK 高 51.82%、37.77%、29.70%，较 N 处理组分别高 56.54%、42.05%、33.73%。施加 2 种微生物菌肥后，油茶叶片 POD 酶活性整体呈现先上升后下降的趋势，其中 A2 和 L2 处理的 POD 酶活性最高，较 CK 分别高 158.10%、125.46%，且二者与氮肥处理无显著差异。对于 CAT 酶活性，微生物菌肥各处理均显著高于 CK 和 N。各处理较 CK 的增幅分别为 77.37%、70.73%、79.53%、81.41%、70.66%，较 N 的增幅分别为 32.57%、27.60%、34.18%、35.59%、27.55%。兰迪多邦处理中，仅 L3 处理的 CAT 酶活性显著高于 CK，较 CK 高 28.92%，与 N 处理组无显著差异。

2.4 2 种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性影响的综合评价

2.4.1 相关性分析

由图 4 可以看出，2 种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性的影响整体呈正相关关系，即微生物菌肥 A 和兰迪多邦均可促进‘长林 40 号’油茶幼苗生长，提升其光合效率。在生长指标与光合特性指标中，株高与地径呈极显著正相关，与分枝数和类胡萝卜素呈显著正相关；地径与 G_s 呈显著正相关；叶面积与根尖数、P_n 和 T_r 呈显著正相关；根尖数与根直径和 F_v/F_m 呈极显著正相关，与总根长、根表面积和 ETR 呈显著正相关，与 NPQ 呈显著负相关；总根长与根表面积呈极显著正相关；叶绿素含量和类胡萝卜素含量与 F_v/F_m 呈极显著正相关，与 NPQ 呈极显著负相关；G_s 与 qP 和 ETR 呈显著正相关。在酶活性中，POD 与类胡萝卜素含量和 F_v/F_m 呈显著正相关；CAT 与叶

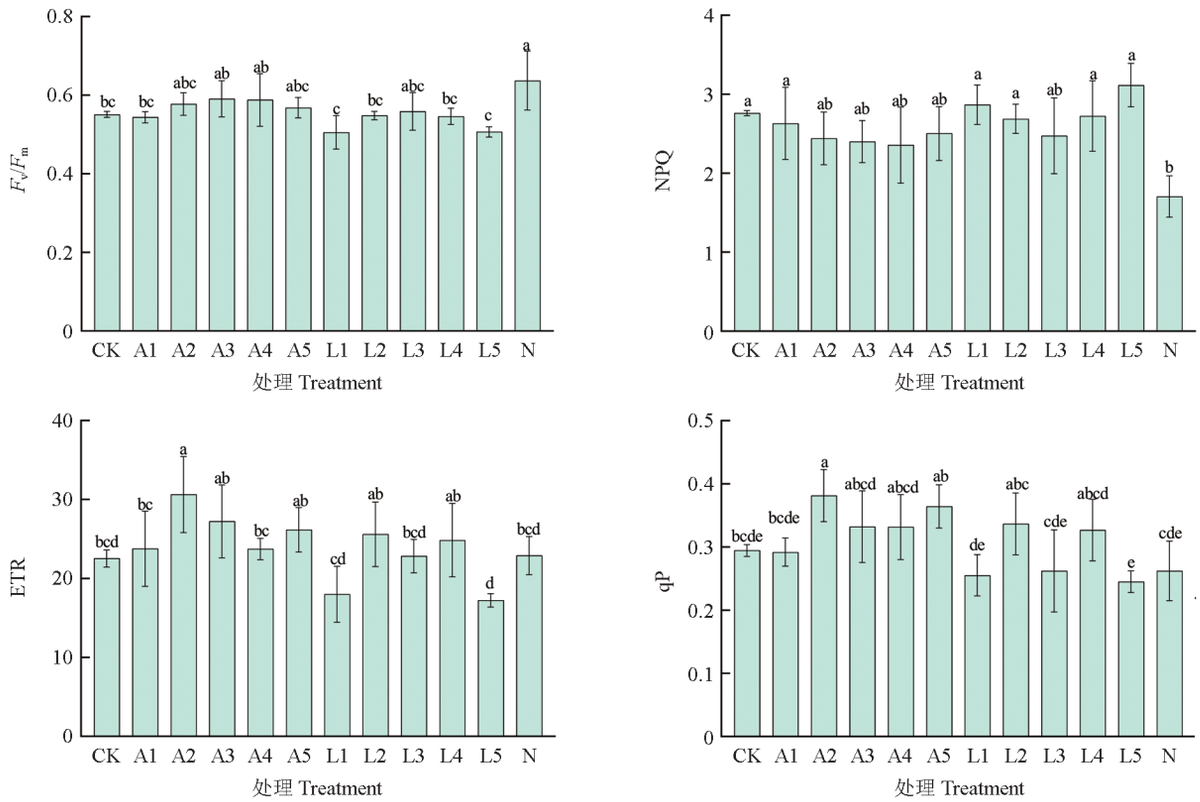


图 2　不同施肥处理下油茶叶片叶绿素荧光参数

Fig. 2　Chlorophyll fluorescence parameters of *Camellia oleifera* leaves under different fertilization treatments

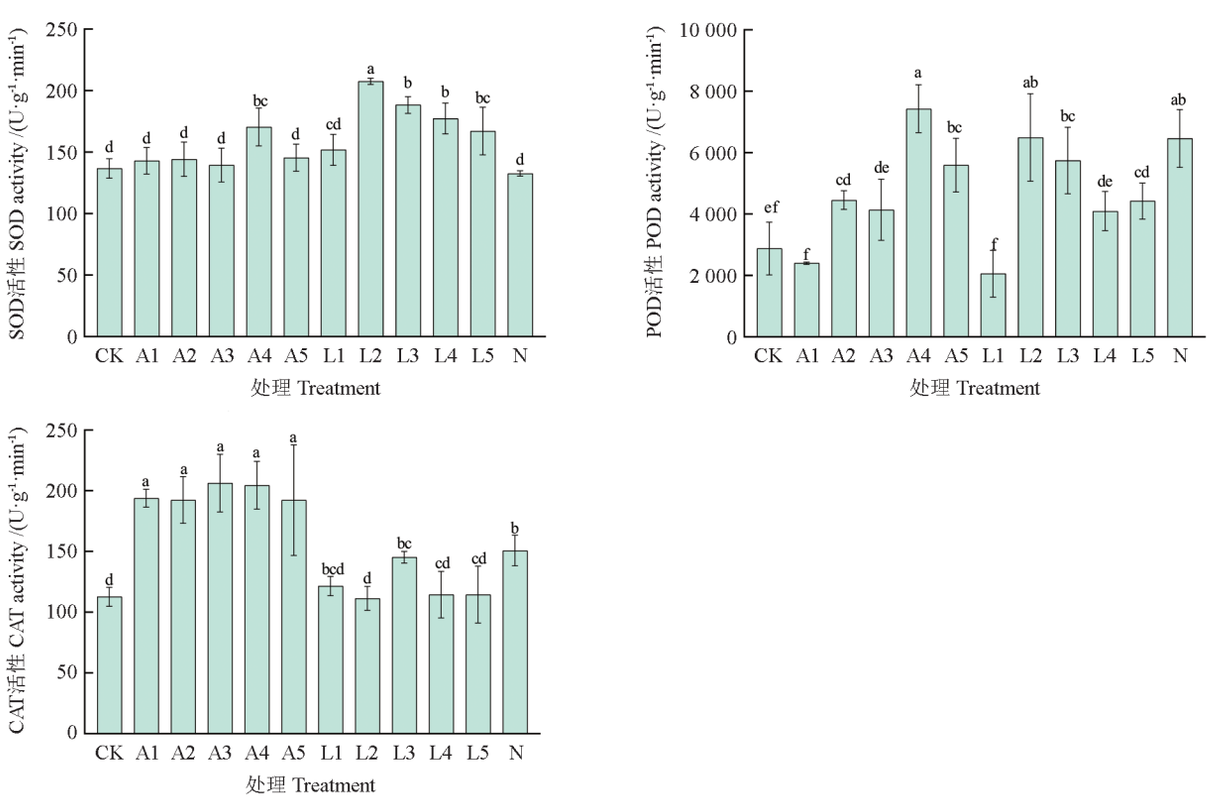


图 3　不同施肥处理对油茶叶片抗氧化酶活性的影响

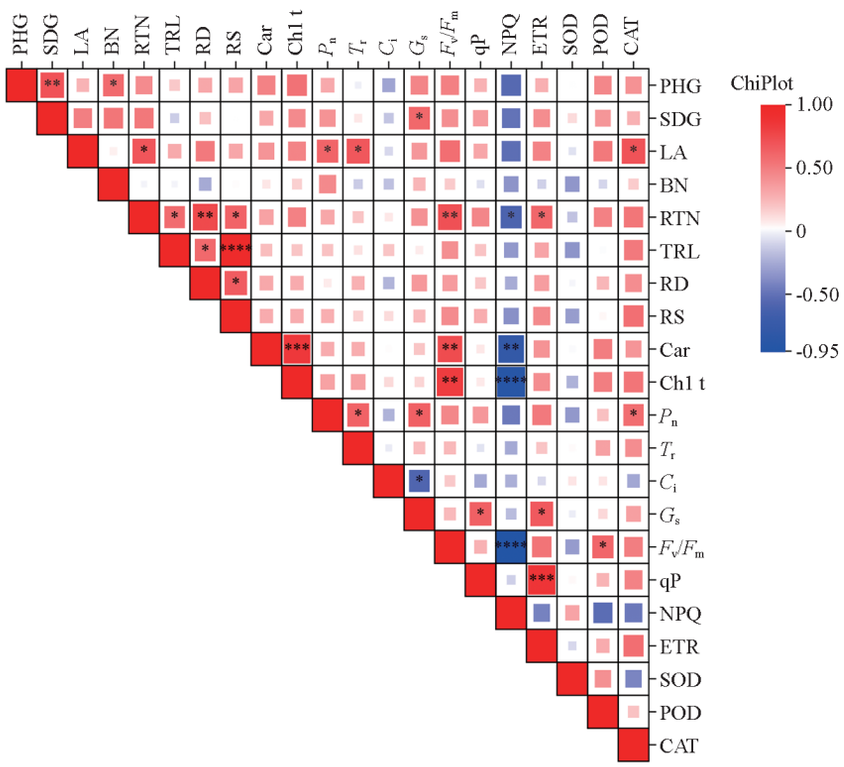
Fig. 3　Effects of different fertilization treatments on antioxidant enzyme activity in *Camellia oleifera* leaf slices

面积和 P_n 呈显著正相关。由此可见，不同微生物菌肥处理下油茶的生长指标、光合特性指标与抗氧化酶活性存在着相互关联，彼此之间相互影响。

2.4.2　主成分分析及综合评价

为综合评价各处理对油茶生长和光合特性的影响，对不同施肥处理下的油茶 21 个指标进行主

成分分析，从中提取了 6 个主成分，各个成分的特征值及方差贡献率见表 4，6 个主成分涵盖了总数据量 86.76% 的信息。再根据公式计算每个处理的综合得分，得分越高，综合评价结果越好，由此可以判断出最优的施肥浓度。结果显示（表 5），微生物菌肥 A2 处理的 *D* 值最高，为 0.84，各性状综合表现最好，A2、A4 处理各综合性状比 N 处理表现好，其次是 A3、L2、A5、L3、L4、A1、L5、L1 和 CK 处理。



PHG：株高增长量，SDG：地径增长量，LA：叶面积，BN：分枝数，RTN：根尖数，TRL：总根长，RD：根直径，RS：根表面积，Car：类胡萝卜素含量，Chl t：叶绿素总量，P_n：净光合速率，T_r：蒸腾速率，C_i：胞间二氧化碳浓度，G_s：气孔导度，F_v/F_m：PS Ⅱ最大光化学效率，qP：光化学淬灭系数，NPQ：非光化学淬灭系数，ETR：电子传递速率，SOD：超氧物歧化酶活性，POD：过氧化物酶活性，CAT：过氧化氢酶活性。图中不同方块颜色代表相关性，红色为正相关，蓝色为负相关，方块大小代表相关性的强弱，方块大的相关性强，方块小的相关性弱。

PHG: Plant height growth, SDG: Seedling diameter growth, LA: Leaf area, BN: Branching number, RTN: Root tips number, TRL: Total root length, RD: Root diameter, RS: Root surface, Car: Carotenoid content, Chl t: Total chlorophyll content, P_n: Net photosynthetic rate, T_r: Transpiration rate, C_i: CO_2 concentration, G_s:stomatal conductivity, F_v/F_m: maximum photochemical efficiency of PS Ⅱ, qP: photochemical quenching coefficient, NPQ: none photochemical quenching coefficient, ETR: electron transport rate, SOD: SOD activity, POD: POD activity, CAT: CAT activity. The color of different squares in the figure represents correlation, red is positive correlation, blue is negative correlation, the size of the squares represents the strength of correlation, the correlation of large squares is strong, and the correlation of small squares is weak.

图 4 2 种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性影响的相关性热图

Fig. 4 Correlation heat map of effects of two types of microbial fertilizers on growth of *Camellia oleifera* seedlings and the influence of photosynthetic characteristics

表 4 不同施肥处理各项指标主成分分析的特征值及累计贡献率

Table 4 Eigenvalue and cumulative contribution of principal component analysis on various indicators of different fertilization treatments

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate /%	累计贡献率 Cumulative contribution rate /%
1	8.14	38.77	38.77
2	2.64	12.58	51.35
3	2.52	11.99	63.34
4	2.03	9.69	73.03
5	1.64	7.78	80.81
6	1.23	5.95	86.76

3 讨 论

3.1 施用微生物菌肥对油茶幼苗生长性状的影响

微生物菌肥中有大量活动的微生物，通过微生物发育、繁殖及其新陈代谢产生的化学作用，固定土壤中的氮含量，从而加快植物中有机质的溶解，使凝结于土壤中的矿物质迅速转变为植株能够消化吸收的物质，提高土壤肥力，增加植株的营养供给，促进作物生长，提高农作物产量和抗性 [14]。本研究结果表明，施用微生物菌肥和兰迪多邦后可显著提高油茶的株高、地径和根尖数等性状，这与微生物菌肥和兰迪多邦分别施用在

表 5　不同施肥处理的综合性评价
Table 5　Comprehensive evaluation of different fertilization treatments

处理 Treatment	综合指标值（X） Value of composite indicator						隶属函数值（u） Value of the affiliation function						综合得分 D 值 Composite score D value	排序 Ranking
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	$\mu(X_5)$	$\mu(X_6)$		
CK	-1.07	-1.49	-0.08	-0.43	-0.92	-1.44	0.13	0.20	0.47	0.34	0.26	0.11	0.22	12
A1	0.08	-0.80	0.33	-1.32	-0.70	0.46	0.52	0.41	0.57	0.05	0.32	0.63	0.45	9
A2	1.46	0.91	2.18	-0.06	-0.48	-0.06	1.00	0.96	1.00	0.46	0.38	0.49	0.84	1
A3	0.90	-2.11	0.07	0.30	0.85	0.08	0.81	0.00	0.50	0.58	0.76	0.53	0.60	4
A4	1.11	-0.16	0.02	0.29	-0.21	0.94	0.88	0.62	0.49	0.57	0.46	0.76	0.71	2
A5	0.03	1.04	0.02	-0.17	-0.47	-1.82	0.51	1.00	0.49	0.42	0.38	0.00	0.52	6
L1	-1.32	0.98	0.18	-1.47	0.76	0.65	0.04	0.98	0.53	0.00	0.73	0.68	0.34	11
L2	-0.13	0.24	-0.14	1.59	1.72	-0.33	0.45	0.75	0.46	1.00	1.00	0.41	0.60	5
L3	-0.08	0.58	-1.20	1.52	-1.84	0.24	0.47	0.85	0.21	0.98	0.00	0.57	0.51	7
L4	-0.69	0.31	0.27	0.33	1.08	-0.79	0.26	0.77	0.55	0.59	0.82	0.29	0.46	8
L5	-1.44	-0.07	0.43	0.59	-0.31	1.80	0.00	0.65	0.59	0.67	0.43	1.00	0.36	10
N	1.17	0.58	-2.09	-1.18	0.53	0.27	0.90	0.85	0.00	0.09	0.67	0.58	0.64	3

辣椒和油茶上能够促进植株生长发育研究结果基本一致 [15-16]。对 2 种微生物菌肥的施用效果进行对比，结果发现微生物菌肥的促进效果要比兰迪多邦菌剂好。一方面可能是因为微生物菌肥含有的有效菌数比兰迪多邦菌剂多，土壤微生物活性越强，对植物的促进作用就越明显；另一方面，由于施肥方式不同，微生物菌肥是穴施，兰迪多邦为喷施，油茶植株吸收方式不一样。微生物菌肥通过根部吸收分解利用速度快，能快速为油茶生长提供养分，而叶面吸收较慢。本研究还表明，在不同施肥处理中，以微生物菌肥 5 g/ 株处理对改善油茶植株形态特征、促进根系生长的效果最好，这与桂莎等 [17] 的研究结果相近，其原因可能是菌肥中的有益微生物能活化土壤中的氮、磷、钾、硫等营养成分，提高肥料利用率，改良土壤结构，增加多种酶的活性，促进植株根系生长，增强根系对土壤养分的吸收利用，从而促进植物的生长发育，为植物的生长提供全面的养分 [18]。

3.2　施用 2 种微生物菌肥对油茶光合特性的影响

光合色素是光合作用中不可或缺的重要组成部分，叶绿素、类胡萝卜素是主要的光合色素，在光合作用中发挥着多种作用，包括光捕获以及作为减少光损伤和光抑制的重要抗氧化剂 [19]。施用菌肥能够影响油茶叶片的光合速率，并通过固氮和溶磷作用影响植物叶绿素合成，进而增强油茶的光合能力和有机物质积累，促进油茶生长 [20]。本研究结果显示，施加微生物菌肥和兰迪多邦后油茶叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和类胡萝卜素都有所提高。施加微生物菌肥后油茶的叶绿素含量随浓度的变化呈不同趋势的上升，与 CK 差异显著但都未超过 N 处理组，各处理之间无显著性差异，其中 A5 处理叶绿素含量增高可能是由于施加微生物菌肥过多，整个过程分解缓慢一直在给油茶生长提供营养，从而促进油茶叶绿素含量增高。施加兰迪多邦后叶绿素含量以及类胡萝卜素含量随着浓度的升高呈先上升后下降的趋势，其中 L3、L4 类胡萝卜素含量比微生物菌肥其他组高，这可能是由于菌肥施加方式不同，兰迪多邦叶面喷施使油茶叶片吸收更迅速更有效，从而使得类胡萝卜素含量相比于微生物菌肥其他浓度更高。

植物的光合作用能力代表的是植物的同化能力和形成碳水化合物的能力，其中净光合速率反映的是植株积累有机物的状况，是判断植株光合能力强弱的重要指标，气孔导度和蒸腾速率直观反映植被的水分利用效率、光合效率和对二氧化碳的吸收利用能力 [21]。本研究中，在油茶幼苗的生长过程中施用不同菌肥对植株叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率有一定的提升作用，对胞间 CO_2 浓度有降低作用，这与谭明曦等 [22] 和曾维军等 [23] 的研究结论一致。

3.3　施用 2 种微生物菌肥对油茶荧光参数及酶活性的影响

植物体内发出的荧光与光合作用的一系列生理生化过程紧密联系，其叶绿素荧光参数作为光合作用的探针，能够反映植株叶片进行光合作用过程中光系统 II 对光能的吸收、电子传递、耗能以及对光捕获的能力 [24]。本研究中，2 种微生物

菌肥处理与对照组相比光合色素含量显著增加，叶绿素荧光参数得到优化，且 A3 处理下叶片的 F_v/F_m、qP、ETR 均有所提高，NPQ 显著降低，表明适宜的肥料施用量使得植株叶片内电子传递和光合速率提高，光捕获及转运能力增强，激发了光系统Ⅱ反应中心的光化学活性，捕获的光能充分用于油茶叶片光合作用。这与宗建伟等 [25] 研究结论相同，施加 2 种微生物菌肥后微生物菌肥中的有益微生物能与油茶根系形成共生关系，扩大根系吸收面积，提高对土壤中水分和养分的吸收效率，促进作物生长发育，提升光合利用效率，增强光合作用。

菌肥中的微生物与植物根系相互作用，释放部分信号物质，能够刺激植物产生 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化物质，以清除植物体内活性氧自由基等有害物质，减少氧化损伤，提高植物的抗氧化能力，从而增强植物的抗逆能力 [26]。本研究中，施加微生物菌肥 A 和兰迪多邦后均在不同程度上增加了抗氧化酶活性，因此，微生物菌肥通过促进抗氧化物质的产生，可能提高油茶的抗逆能力，后续可以进一步研究。

4 结 论

研究中发现微生物菌肥 A 类比兰迪多邦的效果好，综合评价以施加 5 g/ 株的微生物菌肥 A 效果最佳，其次是微生物菌肥 20 g/ 株，这 2 个处理的效果优于氮肥。然后是微生物菌肥 10 g/ 株，兰迪多邦 0.3 mL/ 株、微生物菌肥 40 g/ 株，兰迪多邦 0.5、0.7 mL/ 株，微生物菌肥 2.5 g/ 株，兰迪多邦 0.9、0.1 mL/ 株。施加 2 种微生物菌肥均可促进油茶幼苗的生长发育、光合作用及抗逆能力，这可能是通过增加油茶叶片的叶绿素含量和叶绿素荧光等，促进光合作用来实现的。建议生产上采用穴施 5 g/ 株微生物菌肥 A 的方式，以改善油茶幼苗生长及光合特性。本试验主要对一年生油茶苗表型及光合特性研究，后续可深入分析土壤理化性质与微生物群落结构对油茶生长的影响，以精准筛选最优菌肥种类及剂量。

参考文献：

[1] 陈永忠 , 杨小胡 , 彭邵锋 , 等 . 我国油茶良种选育研究现状及发展策略 [J]. 林业科技开发 ,2005,19(4):1-4.
CHEN Y Z, YANG X H, PENG S F, et al. Research status and development strategy of *Camellia oleifera* breeding in China[J]. Journal of Forestry Engineering,2005,19(4):1-4.

[2] 吕欢欢 , 伍岳峰 , 李煜 , 等 . 普通油茶优良无性系果实性状变异分析及选择 [J]. 森林与环境学报 ,2021,41(5):519-526.
LYU H H, WU Y F, LI Y, et al. Variation and selection of excellent fruit traits in *Camellia oleifera* clones[J]. Journal of Forest and Environment,2021,41(5):519-526.

[3] 陈永忠 . 我国油茶科技进展与未来核心技术 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(7):1-22.
CHEN Y Z, Scientific and technological progress and future core technologies of oil tea *Camellia* in China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(7):1-22.

[4] 胡玉玲 , 潘忠飞 , 龙雪燕 , 等 . 不同有机肥和大量及微量元素配比对油茶生长及产量相关指标影响 [J]. 中国土壤与肥料 , 2022(4):148-160.
HU Y L, PAN Z F, LONG X Y, et al. Effects of different ratios of organic fertilizer, large and trace elements on growth and yield of oil-tea camellia[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2022(4): 148-160.

[5] 陈术南 , 杨枣童 , 龚嘉诚 , 等 . 干旱下施肥对油茶叶片关键代谢途径的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(1): 221-234.
CHEN S N, YANG Z T, GONG J C, et al. Transcriptome analysis of the effects of fertilization under drought on key metabolic pathways in *Camellia oleifera* leaves[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(1):221-234.

[6] KEESSTRA S, MOL G, DE LEEUW J, et al. Soil-related sustainable development goals: four concepts to make land degradation neutrality and restoration work[J]. Land,2018,7:133.

[7] BHARDWAJ D, ANSARI M W, SAHOO R K, et al. Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity[J]. Microbial Cell Factories,2014,13:66.

[8] SATO Y, MIWA T, INABA T, et al. Microbially produced fertilizer provides rhizobacteria to hydroponic tomato roots by forming beneficial biofilms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2023,107:7365-7374.

[9] 林宇岚 , 王琳 , 楼玫娟 , 等 .AM 真菌与有机磷配施对油茶光合特性的影响 [J]. 江西农业大学学报 ,2021,43(1):136-143.
LIN Y L, WANG L, LOU M J, et al. Effects of AM fungi combined with organic phosphorus on photosynthetic characteristics of *Camellia oleifera*[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021,43(1):136-143.

[10] 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.

[11] 徐敏 , 刘君 , 阿衣古力·阿布都瓦依提 . 植物生理实验教学中叶绿素提取方法比较 [J]. 实验科学与技术 ,2018,16(4):129-133.
XU M, LIU J, AYIGULI·ABUDUWAYITI, et al. Comparative methods on chlorophyll extraction in plant physiology experiment teaching[J]. Experimental Science and Technology,2018,16(4):129-133.

[12] 熊庆娥 . 植物生理学实验教程 [M]. 成都 : 四川科学技术出版社 ,2003:124-126.
XIONG Q E. Plant physiology experiment tutorial[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 2003:124-126.

[13] 吕春芳 , 李海霞 , 贾然然 , 等 . 植物过氧化物酶活性测定实验方法的改良 [J]. 轻工科技 ,2024,40(2):15-18.
LYU C F, LI H X, JIA R R, et al. Improvement of experimental method for determination of plant peroxidase activity[J]. Light Industry Science and Technology,2024,40(2):15-18.

[14] 何燕燕 . 微生物菌肥在农业生产中的价值和应用 [J]. 工业微生物 ,2023,53(2):8-10.
HE Y Y. Research on the value and application of microbial fertilizer in agricultural production[J]. Industrial Microbiology, 2023,53(2):8-10.

[15] 独瑜 , 王次燕 , 乔益 , 等 . 兰迪多邦微生物菌肥在辣椒上的肥效试验 [J]. 农业科技与信息 ,2023(4):65-68.
DU Y, WANG C Y, QIAO Y, et al. Fertilizer efficiency test of Landy Dobang microbial fertilizer on pepper[J]. Agricultural Science Technology and Information,2023(4):65-68.

[16] 彭江涛 , 周国英 , 蒋越西 , 等 . 生物复合肥对油茶苗木生长及土壤微生态的影响 [J]. 中国土壤与肥料 ,2021(6):137-142.
PENG J T, ZHOU G Y, JIANG Y X, et al. Effect of bio-compound fertilizer on the growth of *Camellia oleifera* and soil microecology[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2021(6):137-142.

[17] 桂莎 , 胡冬南 , 刘卉 , 等 . 不同肥料类型对幼龄油茶生长的影响 [J]. 经济林研究 ,2015,33(1):62-66.
GUI S, HU D N, LIU H, et al. Effects of different fertilizer types on growth of young *Camellia oleifera*[J]. Non-wood Forest Research,2015,33(1):62-66.

[18] 石丽红 , 李超 , 唐海明 , 等 . 长期施肥方式对双季稻根系生理特性与产量的影响 [J]. 中国农业大学学报 ,2021,26(9):18-29.
SHI L H, LI C, TANG H M, et al. Effects of different long-term fertilizer management on physiological characteristic of root and yield of rice in double-cropping rice paddy field[J]. Journal of China Agricultural University,2021,26(9):18-29.

[19] SIMKIN A J, KAPOOR L, DOSS C G P, et al. The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta[J]. Photosynthesis Research,2022,152:23-42.

[20] 舒惠琳 , 胡文涛 , 陈启洲 , 等 . 微生物菌肥对油茶生长、抗逆性和土壤环境的影响 [J]. 世界林业研究 ,2024,37(3):28-32.
SHU H L, HU W T, CHEN Q Z, et al. Effect of microbial fertilizer on growth, resistance and soil environment of *Camellia oleifera*[J]. World Forestry Research,2024,37(3):28-32.

[21] 杨皓 , 庄家尧 , 郑康 , 等 . 不同载体菌肥对刺槐光合特性及土壤养分、细菌群落的影响 [J]. 核农学报 ,2023,37(4):844-853.
YANG H, ZHUANG J Y, ZHENG K, et al. Effects of different carrier bacterial fertilizers on photosynthetic characteristics, soil nutrients and bacterial communities of *Robinia pseudoacacia* L.[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2023,37(4):844-853.

[22] 谭明曦 , 文旺先 , 林宇岚 , 等 .AM 真菌和无机磷处理对油茶幼苗生长和光合作用的影响 [J]. 经济林研究 ,2022,40(1):36-44.
TAN M X, WEN W X, LIN Y L, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi and inorganic phosphorus treatments on the growth and photosynthesis of *Camellia oleifera*[J]. Non-wood Forest Research,2022,40(1):36-44.

[23] 曾维军 , 刘燕 .AM 真菌和外源磷对铝胁迫下油茶幼苗光合生理的影响 [J]. 北方园艺 ,2024(14):34-43.
ZENG W J, LIU Y. Effects of AM fungi and exogenous phosphorus on photosynthetic physiology of *Camellia oleifera* seedlings under aluminum stress[J]. Northern Horticulture, 2024(14):34-43.

[24] 何海锋 , 闫承宏 , 吴娜 , 等 . 施氮量对柳枝稷叶片叶绿素荧光特性及干物质积累的影响 [J]. 草业学报 ,2020,29(11):141-150.
HE H F, YAN C H, WU N, et al. Effects of nitrogen application rate on chlorophyll fluorescence characteristics and dry matter accumulation in switchgrass (*Panicum virgatum*) leaves[J]. Acta Prataculturae Sinica,2020,29(11):141-150.

[25] 宗建伟 , 常雅雯 , 朱雅琦 , 等 .AM 真菌对干旱胁迫下文冠果生长和光合生理的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2025,53(7):1-11.
ZONG J W, CHANG Y W, ZHU Y Q, et al. Effects of AM fungi on *Xanthoceras sorbifolium* growth and photosynthetic physiology under drought stress[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2025,53(7):1-11.

[26] 王佳 , 李明聪 . 微生物菌肥在植物减肥增效中的应用研究进展 : 以果树为例 [J]. 微生物学通报 ,2024,51(11):4394-4415.
WANG J, LI M C. Research progress in the application of microbial fertilizers in chemical fertilizer reduction and efficiency increase in orcharding[J]. Microbiology China,2024,51(11):4394-4415.

[本文编校：吴　彬]