

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9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.006

论文标题： 宜机化施肥对4个主推油茶品种光合效率、产量及油脂品质的影响

作　　者： 王浩宇，罗静扬，谢俊成，等

收稿日期： 2025-08-18

引文格式： 王浩宇,罗静扬,谢俊成,等.宜机化施肥对4个主推油茶品种光合效率、产量及油脂品质的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):62-72.

Wang H Y, Luo J Y, Xie J C, et al. Effects of autumn fertilization on photosynthetic efficiency, oil quality and yield of four main *Camellia oleifera* cultivars[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):62-72.

相关论文推荐

Recommended articles

油茶分子育种研究进展

Advances in the molecular breeding of *Camellia oleifera*

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

2种微生物菌肥对油茶幼苗生长及光合特性的影响

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

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

高州油茶果实膨大期光合产物的运输和分配特征

Characteristics of the transport and distribution of photosynthetic products during fruit expansion of *Camellia gauchowensis*

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*

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.006
http: //qks.csuft.edu.cn

宜机化施肥对 4 个主推油茶品种光合效率、产量及油脂品质的影响

王浩宇[1]，罗静扬[1]，谢俊成[1]，刘　佳[1]，陈隆升[2]，曹中宇[1]，彭仁荣[1]，刘彩霞[2]，
卢世魁[3]，廖　凯[1]，李　泽[1]

（1. 中南林业科技大学 a. 木本油料资源利用全国重点实验室；b. 长沙市木本油料提质增效技术创新中心；c. 岳麓山实验室经济林品种创制中心；d. 经济林培育与保护教育部重点实验室；e. 湖南省“一带一路”热带干旱经济林国际联合研究中心；f. 湖南省南方丘陵山地生态经济林产业工程技术研究中心；g. 湖南芦头森林生态系统国家定位观测研究站，湖南 长沙 410004；2. 湖南省林业科学院 a. 木本油料资源利用全国重点实验室；b. 国家油茶工程技术研究中心，湖南 长沙 410004；3. 湖南大果油茶研究院有限公司，湖南 长沙 410203）

摘　要：【目的】针对油茶林经营存在低产低效、人工成本高等产业问题，研究秋季宜机化施肥对湖南省 4 个主推油茶品种的光合碳同化能力、油脂合成及产量的调控效应，为提高油茶产量、品质及精准施肥提供参考依据。【方法】以‘华硕’‘华金’‘华鑫’和‘湘林 210’14 年生油茶林为试验材料，于 2024 年 9 月下旬开展宜机化施肥试验，设置复合肥（CF）、磷钾肥（PP）及不施肥（CK）3 种处理，10 月下旬采摘前及 12 月上旬测定光合气体交换参数（净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、水分利用效率等）、叶绿素含量、单位面积产量、果实含油率及脂肪酸组成。【结果】与 CK 相比，10 月下旬 CF 处理的各品种油茶叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、水分利用效率、种仁含油率、油酸比例、亚油酸比例及总多酚含量均提高，尤其是‘华鑫’和‘华金’2 个品种的叶绿素含量显著提升（$P < 0.05$），‘华鑫’‘华硕’‘湘林 210’的净光合速率和水分利用效率也显著提高（$P < 0.05$）；PP 处理可极显著提升‘华硕’和‘湘林 210’2 个晚熟品种的叶绿素含量（$P < 0.05$），可促进‘华鑫’‘华金’‘湘林 210’亚油酸的合成，并对‘湘林 210’油茶产量提升显著。12 月上旬，与 CK 相比，CF 处理持续显著提升‘华金’‘华硕’‘湘林 210’叶绿素含量，各品种油茶均维持较高净光合速率和水分利用效率；PP 处理对‘华硕’和‘湘林 210’2 个晚熟品种的叶绿素含量提升显著（$P < 0.05$）。【结论】秋季施复合肥（CF）可显著提升油茶光合效率、叶绿素含量及油脂品质，为最优施肥方案；磷钾肥（PP）显著影响‘华鑫’‘华金’‘湘林 210’亚油酸合成、产量及种仁含油率。综上所述，优先施用复合肥，依据品种特性可在采果前加施磷钾肥。

关键词：油茶；施肥；光合效率；脂肪酸组成；产量
中图分类号：S718.43；S794.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0062-11

Effects of autumn fertilization on photosynthetic efficiency, oil quality and yield of four main *Camellia oleifera* cultivars

Wang Haoyu[1], Luo Jingyang[1], Xie Juncheng[1], Liu Jia[1], Chen Longsheng[2], Cao Zhongyu[1], Peng Renrong[1], Liu Caixia[2], Lu Shikui[3], Liao Kai[1], Li Ze[1]

(1. a. State Key Laboratory of Woody Oil Resources Utilization; b. Changsha Technical Innovation Center for Quality and Efficiency Improvement of Woody Oil Crops; c. Economic Forest Variety Creation Center of Yuelu Mountain Laboratory; d. Key Laboratory of Economic Forest Cultivation and Protection, Ministry of Education; e. Hunan International Joint Research Center for Tropical and Arid Economic Forests Under the Belt and Road Initiative; f. Hunan Engineering Technology Research Center for Ecological Economic Forest Industry in Southern Hilly and Mountainous Areas; g. Luto National Fixed Observation and Research Station for Forest Ecosystem, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. a. State Key Laboratory of Woody Oil Resources Utilization; b. National Engineering Research Center for *Camellia oleifera*, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, Hunan, China; 3. Hunan Daguo *Camellia* Research Institute Co., Ltd., Changsha 410203, Hunan, China)

Abstract:【Objective】Aiming at the industrial problems of low yield, low efficiency and high labor cost in the management of

收稿日期（Received）：2025-08-18　　**修订日期**（Revised）：2025-11-10
基金项目：湖南省 2024 年度十大技术攻关项目（2024NK1020）；湖南省林业局油茶产业科研示范项目（2024LYCY0003）。
第一作者：王浩宇（1036061394@qq.com），硕士研究生。**通信作者：**李泽（lize1853@163.com），教授，博士，硕士研究生导师。
引文格式：王浩宇 , 罗静扬 , 谢俊成 , 等 . 宜机化施肥对 4 个主推油茶品种光合效率、产量及油脂品质的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):62-72.
Wang H Y, Luo J Y, Xie J C, et al. Effects of autumn fertilization on photosynthetic efficiency, oil quality and yield of four main *Camellia oleifera* cultivars[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):62-72.
* 本文为第二十八届中国科协年会学术论文成果。
Academic Papers of the 28th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology.

Camellia oleifera forests, this study explored the regulatory effects of mechanized fertilization in autumn on photosynthetic carbon assimilation capacity, oil synthesis and yield of four major promoted *C. oleifera* cultivars in Hunan Province, so as to provide a theoretical and technical basis for yield and quality improvement as well as precision fertilization of *C. oleifera*.【Method】Fourteen-year-old *C. oleifera* forests of four cultivars, namely 'Huashuo', 'Huajin', 'Huaxin' and 'Xianglin 210', were selected as test materials. The mechanized fertilization experiment was conducted in late September 2024. Three treatments were set up, including compound fertilizer (CF), phosphorus-potassium fertilizer (PP) and no-fertilizer control (CK). Photosynthetic gas exchange parameters (net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, water use efficiency, etc.), chlorophyll content, yield per unit area, fruit oil content and fatty acid composition were determined in late October before fruit harvesting and early December.【Result】Compared with CK, CF treatment increases the chlorophyll content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, water use efficiency, kernel oil content, oleic acid proportion, linoleic acid proportion and total polyphenol content of all *C. oleifera* cultivars in late October. In particular, the chlorophyll content of 'Huaxin' and 'Huajin' is significantly improved ($P < 0.05$), and the net photosynthetic rate and water use efficiency values of 'Huaxin', 'Huashuo' and 'Xianglin 210' also rise significantly ($P < 0.05$). PP treatment extremely and significantly enhances the chlorophyll content of two late-maturing cultivars ('Huashuo' and 'Xianglin 210') ($P < 0.05$), promotes linoleic acid synthesis in 'Huaxin', 'Huajin' and 'Xianglin 210', and markedly improves the yield of 'Xianglin 210'. In early December, compared with CK, CF treatment continuously and significantly increases the chlorophyll content of 'Huajin', 'Huashuo' and 'Xianglin 210', and all cultivars maintain high levels of net photosynthetic rate and water use efficiency. PP treatment sustainably elevates the chlorophyll content of the two late-maturing cultivars 'Huashuo' and 'Xianglin 210' with significant differences ($P < 0.05$).【Conclusion】Autumn application of compound fertilizer (CF) significantly improves the photosynthetic efficiency, chlorophyll content and oil quality of *C. oleifera*, which is regarded as the optimal fertilization scheme. Phosphorus-potassium fertilizer (PP) exerts remarkable effects on linoleic acid synthesis, yield and kernel oil content of 'Huaxin', 'Huajin' and 'Xianglin 210'. In summary, compound fertilizer is recommended as the first choice for field application, and phosphorus-potassium fertilizer can be additionally applied before fruit harvesting according to the botanical characteristics of specific cultivars.

Keywords: *Camellia oleifera*; fertilization; photosynthetic efficiency; fatty acid composition; yield

油茶 *Camellia oleifera* 是山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia* 常绿小乔木或灌木，是我国重要的木本油料树种之一，与油橄榄 *Olea europaea*、油棕 *Elaeis guineensis*、椰子 *Cocos nucifera* 并称为世界四大木本油料树种 [1-2]。2016 年，国家发展和改革委员会将油茶列为四大大宗油料作物予以重点扶持，助力筑牢国家粮油安全屏障 [3-6]。油茶在我国已有 2 300 多年的栽培与利用历史，被广泛种植于我国南方亚热带地区的丘陵地带 [7]。茶油因其优异的脂肪酸组分和活性成分成为联合国粮农组织首推的卫生保健植物食用油，也是世界上最好的食用植物油 [8-10]。目前，湖南省油茶种植面积约 130 万 hm^2，但省内油茶产业仍存在盲目施肥、管理粗放、林分低产低效等突出问题，严重制约了油茶产业的高质量发展。养分供给是树体生长发育的物质基础，树体营养元素含量与营养生长量和果实产量显著相关 [11]。施肥可改善土壤物理结构、化学性质和生物活性，维系土壤长效肥力 [12]，进而为树体营养生长和生殖生长持续提供养分。张文元等 [13] 研究发现，基于平衡施肥的水肥耦合技术能显著提高油茶根际养分利用效率，通过优化光合碳同化途径增加干物质积累。李帆等 [14] 研究发现，磷元素和钾元素直接参与油茶果实油脂合成中的能量转移，增施磷钾肥可提升种仁含油率及不饱和脂肪酸比例；氮素作为叶绿素和 Rubisco 酶的关键组分，对维持气孔导度和碳同化效率至关重要。以上研究表明，施肥对于油茶生长及油脂合成均产生显著影响。秋季是油茶果实油脂转化高峰期与花芽分化初期，此时施肥可改善土壤肥力，减轻水土流失的危害，同步促进油脂合成与花芽持续分化。秋季施肥理论在国外应用较为广泛，已在黑云杉 *Picea mariana*[15]、冬青栎 *Quercus ilex*[16]、地中海松 *Pinus halepensis*[17] 等多个常绿树种中得到应用。近年来，国内也逐步开展了秋季施肥相关试验与研究。李国雷等 [11] 研究发现，秋季施肥能有效提高养分贮存，是一种理想的稳态养分加载方式 [18]；曹春芮等 [19] 研究发现，秋季对油茶适当施用磷钾肥可显著提高其保果率、果实经济性状和花芽饱满度。

尽管施肥对油茶生长及油脂合成具有明显影响，但目前针对秋季施肥对油茶光合碳同化和油脂转化协同调控机制的研究仍存在不足，主要体现在两方面：其一，缺乏对油脂合成关键期与花芽分化初期养分持续效应的解析；其二，施肥措施与不同品种的适应性尚未得到充分探讨。因此，为解析油茶秋季施肥的生理调控机制，本研究以湖南省主推油茶品种‘华鑫’‘华金’‘华硕’及‘湘林 210’为试验材料，设置复合肥（CF）、磷钾肥（PP）及不施肥（CK）3 种处理，通过测定叶片叶绿素含量、气体交换参数、产量及油脂品质等指标，系统研究不同肥料类型对秋季油茶

碳同化和油脂转化过程的调控效应，为油茶精准施肥与高产优质栽培提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于湖南省望城区大果油茶集成示范园（112°50′14″E，28°30′17″N），海拔 48 m，土壤为微酸性红壤土，厚度 200 cm 以上。该区属中亚热带季风湿润气候，气候温和，热量丰富，年平均气温 17 ℃，无霜期 270 ～ 300 d，年均降水量为 1 370.1 mm，年日照时数 1 610 h。2010 年本试验林实施大树高接换冠，近 10 年茶果产量为 12 000 ～ 18 000 kg/(hm^2·a)，林木长势良好。

1.2 试验材料与试验设计

本试验选择高接换冠嫁接培育 14 a 的‘华硕’‘华鑫’‘华金’和‘湘林 210’健康无病虫害大树油茶林作为试验材料，平均冠幅为 3.5 m×3.5 m，定植密度为 3 m×4 m。试验开展前修剪侧枝，并使用粉碎机粉碎还田，为后续机械化作业保留通行空间；肥料选择江西开门子肥业股份有限公司生产的白俄罗斯复合肥和湖南省现代惠农农业有限公司生产的湘惠农磷钾肥，采用河南豪丰农业装备有限公司生产的HF-880履带式旋耕机，辅以人工进行施肥，以不施肥为对照。设置 3 种处理：1）复合肥组（CF）：旋耕机深翻栽植行间土壤 20 cm 后距基部 50 cm 处人工挖穴施复合肥；2）磷钾肥组（PP）：旋耕机深翻栽植行间土壤 20 cm 后距基部 50 cm 处人工挖穴施磷钾肥；3）对照组（CK）：不施肥。以上施肥处理每株施肥量均为 0.5 kg，每个处理小区面积为 300 m^2，于 2024 年 9 月下旬完成施肥操作。

1.3 研究方法

1.3.1 叶绿素含量的测定

分别于 2024 年 10 月下旬（油茶果实成熟期）、12 月下旬（花芽分化关键期）开展 2 次指标测定。每个处理选择长势一致的大树，选取中部枝条自上而下第 4 ～ 8 枚成熟叶片进行测定。采用混合液浸提法测定叶绿素含量。每次选取 3 片功能叶，洗净，去主脉，剪成 4 ～ 8 mm^2 细条，混匀。称取 0.1 g 样品，置于试管中，加入 10 mL 浸提液（丙酮、乙醇、水的体积比为 4.5∶4.5∶1.0）浸提 24 h，用 UV7504 C 型紫外可见分光光度计测定其在 645、663 nm 波长下的吸光度。根据 Arnon 公式 [20] 计算叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量。每组 3 次重复，取平均值。

1.3.2 光合速率的测定

于 2024 年 10 月下旬油茶果实成熟期和 12 月下旬花芽分化关键期，选择阳光充足且无风的天气，使用 LI-6400XT 便携式光合仪于 8:00、10:00、12:00、14:00 和 16:00 测定油茶叶片的净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度及气孔导度，计算叶片水分利用效率。选择每个处理中长势一致的 3 棵大树，选取中部枝条自上而下第 4 ～ 8 枚成熟叶片进行测定，测定 3 片功能叶，取平均值。

1.3.3 产果量的测定

于 2024 年 10 月 26 日对不同施肥处理下 4 个品种的产果量进行测定并记录，每组测定 12 株。

1.3.4 含油率和脂肪酸含量的测定

采用索氏抽提法 [21] 对 3 种施肥方式的油茶种仁含油率进行测定。每组重复 3 次，计算公式为：

$R=m_1/m_0\times100\%$。

式中：R 为种仁含油率；m_1 表示提取油脂的质量；m_0 表示干种仁的质量。采用气相色谱法（GC）对脂肪酸进行检测，采用高效液相色谱法（HPLC）对甾醇类、多酚、α- 生育酚和角鲨烯进行检测。

1.3.5 数据统计与分析方法

采用 Excel 2021 软件对原始数据进行处理，采用 Origin 2024 软件绘图，采用 SPSS 27.0 软件进行差异显著性分析。各指标数据采用单因素方差分析（ANOVA），并通过 Duncan 新复极差法进行多重比较，显著性水平设定为 $P < 0.05$；脂肪酸含量数据采用双因素方差分析，检验水准 $P < 0.05$。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对油茶叶片叶绿素含量的影响

由表 1 可知，施肥处理显著影响油茶叶绿素含量，油茶叶绿素含量存在品种差异与施肥特异性。与对照（CK）相比，CF 处理显著提升‘华鑫’和‘华硕’叶绿素 a（Chl a）和叶绿素 b（Chl b）含量，10 月下旬‘华鑫’Chl (a+b) 含量较 CK 提升了 5.9%（$P < 0.05$），‘华硕’Chl (a+b) 含量较 CK 提升了 6.6%（$P < 0.05$）；PP 处理‘华鑫’和‘华金’叶绿素含量显著高于 CF 和 CK，‘华鑫’Chl (a+b) 含量较 CK 提升了 18.6%（$P < 0.05$），‘华金’Chl (a+b) 含量较 CK 提升了 26.6%（$P < 0.05$）。12 月‘华硕’和‘湘林 210’2 个晚熟品种 CF 和 PP 处理叶绿素含量较 10 月持续提升。

表 1　10 月和 12 月不同施肥处理下不同油茶品种的叶绿素含量 †

Table 1　Chlorophyll content of different *Camellia oleifera* cultivars under different fertilization methods in October and December

月份 Month	品种 Cultivars	处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chla content /(mg·g^{-1})	叶绿素 b 含量 Chlb content /(mg·g^{-1})	叶绿素 a 和叶绿素 b 含量 Chl(a+b) content /(mg·g^{-1})	叶绿素 a/ 叶绿素 b Chla/Chlb
10	华鑫	CF	3.07±0.09 Ab	1.91±0.06 Ab	4.83±0.22 Ab	1.607±0.069 Aa
		PP	3.34±0.14 Aa	2.07±0.09 Aa	5.41±0.23 Aa	1.614±0.097 Aa
		CK	2.82±0.11 Ac	1.74±0.07 Ac	4.56±0.18 Ac	1.621±0.091 Aa
	华金	CF	1.96±0.15 Bb	1.22±0.09 Bb	3.18±0.24 Bb	1.607±0.171 Aa
		PP	2.41±0.12 Ca	1.49±0.07 Ca	3.90±0.19 Ca	1.617±0.111 Aa
		CK	1.90±0.12 Bb	1.18±0.08 Bb	3.08±0.20 Bb	1.610±0.149 Aa
	华硕	CF	2.98±0.13 Aa	1.85±0.08 Aa	4.83±0.20 Aa	1.611±0.099 Aa
		PP	2.76±0.03 Bb	1.71±0.02 Bb	4.46±0.05 Bb	1.614±0.026 Aa
		CK	2.80±0.02 Ab	1.73±0.02 Ab	4.53±0.03 Ab	1.618±0.022 Aa
	湘林 210	CF	2.02±0.03 Bb	1.25±0.02 Bb	3.28±0.06 Bb	1.616±0.035 Aa
		PP	1.90±0.05 Dc	1.18±0.03 Dc	3.08±0.08 Dc	1.610±0.059 Aa
		CK	2.94±0.06 Aa	1.82±0.04 Aa	4.75±0.09 Aa	1.615±0.048 Aa
12	华鑫	CF	3.24±0.07 Ba	2.01±0.04 Ba	5.25±0.11 Ba	1.612±0.047 Aa
		PP	3.04±0.05 Ab	1.88±0.03 Ab	4.92±0.08 Ab	1.617±0.037 Aa
		CK	3.29±0.05 Aa	2.04±0.03 Aa	5.33±0.08 Aa	1.613±0.034 Aa
	华金	CF	1.85±0.14 Cc	1.15±0.09 Cc	2.99±0.22 Cc	1.609±0.175 Aa
		PP	3.15±0.04 Aa	1.96±0.02 Aa	5.11±0.06 Aa	1.607±0.026 Aa
		CK	2.29±0.01 Cb	1.42±0.01 Cb	3.71±0.02 Cb	1.613±0.013 Aa
	华硕	CF	3.73±0.14 Aa	2.31±0.08 Aa	6.05±0.22 Aa	1.615±0.082 Aa
		PP	2.72±0.05 Bb	1.69±0.03 Bb	4.41±0.09 Bb	1.609±0.041 Aa
		CK	2.54±0.07 Bb	1.58±0.04 Bb	4.12±0.12 Bb	1.608±0.060 Aa
	湘林 210	CF	3.90±0.05 Aa	2.42±0.03 Aa	6.33±0.08 Aa	1.612±0.029 Aa
		PP	2.47±0.10 Cb	1.54±0.06 Cb	4.01±0.16 Cb	1.604±0.090 Aa
		CK	2.19±0.09 Cc	1.36±0.06 Cc	3.56±0.15 Cc	1.610±0.097 Aa

† 表中数据代表平均值 ± 标准差，大（小）写字母分别代表同一处理不同品种（同一品种不同处理）在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。
The data in the table represent the mean ± standard deviation, and the upper and lower case letters represent different cultivars of the same treatment/different treatments of the same cultivar, and different letters indicate significant differences at the $P < 0.05$ level.

2.2　不同施肥处理对油茶叶片光合气体交换参数的影响

2.2.1　净光合速率

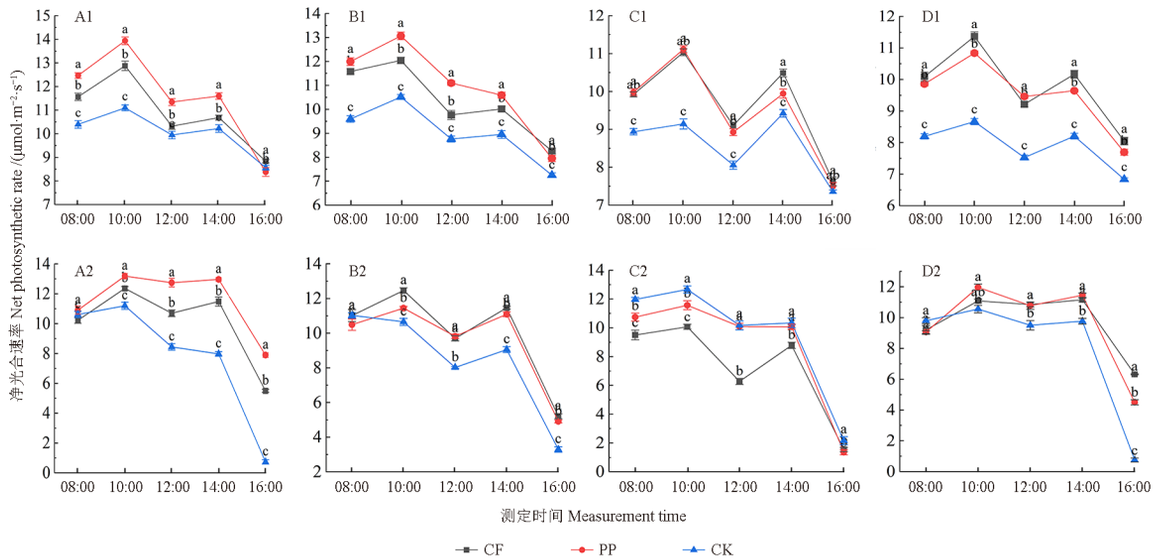
由图 1 可知，不同施肥处理显著影响净光合速率（P_n）日变化（$P < 0.05$）。供试 4 个品种油茶的 P_n 值日变化趋势均呈“双峰”形，表现出明显的光合午休现象。与对照（CK）相比，CF 处理显著提升了各品种 P_n 峰值，10 月下旬‘华硕’‘华鑫’‘华金’和‘湘林 210’P_n 峰值较 CK 分别提升了 27.0%、15.9%、23.4% 和 31.5%；同时 CF 处理维持‘华金’‘湘林 210’午后相对较高的光合速率，缓解了光合午休程度。PP 处理显著提升‘华硕’和‘华鑫’各个时段的 P_n 值，‘华硕’和‘华鑫’P_n 日均值较 CK 分别提升了 13.6% 和 48.1%。CK 处理组 P_n 峰值更低，下降更早，下降幅度更大，P_n 日均值较低，可能是因为该组缺乏外源养分调控，更易受环境胁迫的抑制与负面影响。12 月上旬各处理组光合午休现象整体有所缓解。

2.2.2　蒸腾速率

由图 2 可知，供试 4 个油茶品种的蒸腾速率（T_r）日变化呈“单峰”形，峰值主要出现在 10:00—12:00，不同施肥处理显著影响油茶叶片蒸腾速率日变化（$P < 0.05$）。与对照（CK）相比，CF 处理‘华硕’‘华金’‘湘林 210’T_r 日均值较 CK 分别降低了 25%、36.8% 和 5.2%，但‘华鑫’全天 T_r 值显著高于 CK，但低于同时期的 PP 处理。PP 处理显著降低‘华硕’全天 T_r 值。12 月上旬不同处理的各品种 T_r 值日变化与 10 月下旬基本一致。

2.2.3　气孔导度

由图 3 可知，不同施肥处理显著影响油茶叶片气孔导度（G_s）日变化（$P < 0.05$）。10 月和 12 月供试 4 个油茶品种的 G_s 值均呈“清晨高启—午间持续下降—傍晚趋于稳定”的日变化模式，这一趋势可能与植物光合碳同化和水分蒸发有关。与对照（CK）相比，10 月下旬 8:00‘华鑫’‘华金’和‘湘林 210’CF 和 PP 处理 G_s 峰值均显著高于 CK，‘华鑫’和‘华金’CF 处理较 CK 分别提升



字母 A-D 分别表示‘华硕’‘华鑫’‘华金’‘湘林 210’油茶品种。数字 1、2 分别表示 10 月和 12 月，不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著，下同。
The letters A-D represent the cultivars, which is ‘Huashuo’ ‘Huaxin’ ‘Huajin’ ‘Xianglin 210’, respectively. Numbers 1 and 2 indicate October and December, respectively. The lower case letters indicate significant differences at the $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 不同施肥处理对油茶叶片净光合速率日变化的影响

Fig.1 Effects of different fertilization methods on the diurnal change of the net photosynthetic rate of *Camellia oleifera* leaves

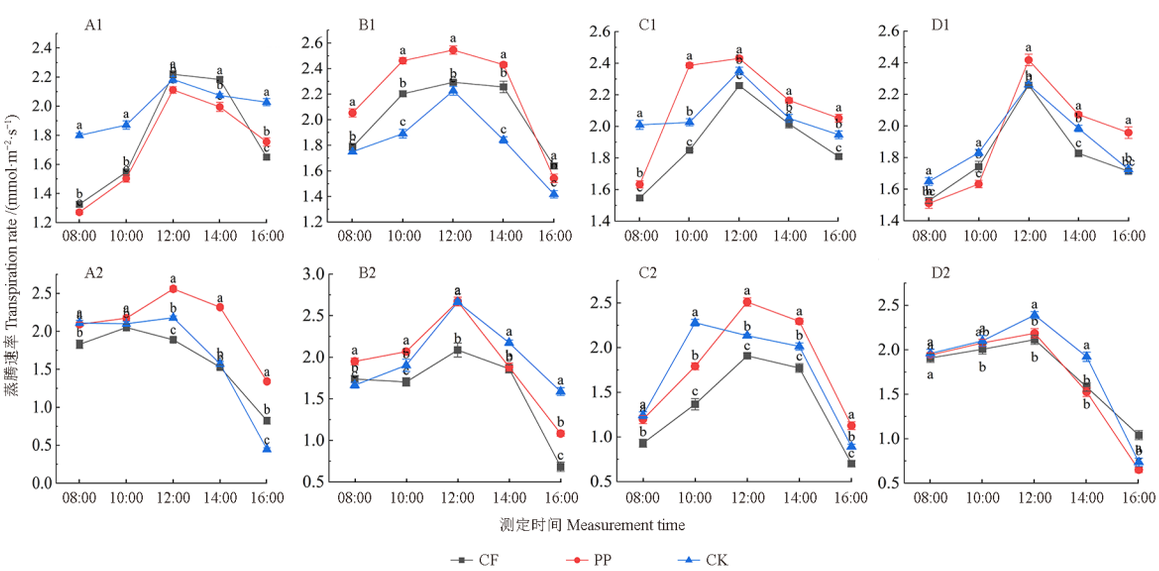


图 2 不同施肥处理对油茶叶片蒸腾速率日变化的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization methods on the diurnal change of transpiration rate of *Camellia oleifera* leaves

了 56.3% 和 12.9%，‘湘林 210’PP 处理较 CK 提升了 13.8%，但 10:00—16:00 各处理 G_s 波动下降，差异不显著。12 月上旬 CF 处理‘华金’G_s 日均值较 PP 处理和 CK 分别下降了 33.3% 和 20.0%，其他品种 G_s 值变化趋势与 10 月下旬基本一致。

2.2.4 胞间 CO_2 浓度

由图 4 可知，不同施肥处理显著影响油茶叶片胞间 CO_2 浓度（C_i）日变化（$P < 0.05$）。供试 4 个油茶品种 C_i 值均呈“清晨积累—午间消耗—傍晚积累”的变化趋势。与对照（CK）相比，10 月上旬 CF 处理‘华鑫’和‘湘林 210’全天 C_i 值通常维持在相对较低水平且显著低于 CK，‘华鑫’和‘湘林 210’C_i 日均值较 CK 分别低了 12.81% 和 10.90%。PP 处理各品种 C_i 值日变化趋势与 CF 处理较为相似，整体水平略高于 CF 处理。CK 处理各品种在 14:00 后出现 C_i 值异常升高的现象。12 月下旬‘华鑫’‘华金’和‘湘林 210’CF 与 PP 处理 C_i 值均维持在相对较低水平且显著低于 CK，CF 和 PP 处理 C_i 值日变化波动幅度较 10 月有所减小。

2.2.5 水分利用效率

由图 5 可知，供试 4 个油茶品种的水分利用效率（WUE）日变化整体呈先下降后上升的趋势，可能与光合午休现象有关，不同施肥处理显著影

响油茶叶片水分利用效率日变化（$P < 0.05$）。10 月下旬测定结果显示，与对照相比，CF 处理可使各油茶品种 WUE 维持在较高水平，其中‘华硕’‘华鑫’‘华金’和‘湘林 210’的 WUE 日均值较 CK 分别提升了 40.36%、4.81%、49.65% 和 50.36%；‘华金’在全天各时段的 WUE 均显著高于 PP 处理和 CK。PP 处理下，‘华硕’‘华金’‘湘林 210’的 WUE 均高于 CK，但日变化波动性较大。12 月上旬各处理组的 WUE 整体高于 10 月下旬，2 个时期 WUE 的日变化规律基本一致。值得注意的是，12 月上旬 14:00 后，CF 和 PP 处理下各品种 WUE 的下降幅度显著低于 CK。

2.3　不同施肥处理对油茶果实脂肪酸含量的影响

由表 2 双因素方差分析结果可知，施肥处理与品种类型对油茶各油脂品质指标均具有显著影响。油酸作为核心不饱和脂肪酸，与 CK 相比，CF 处理可显著提升各供试品种的油酸含量。其中‘华鑫’油酸含量较 CK 提升了 5.33%，差异达显著水平（$P < 0.05$）。CF 处理下‘华硕’中角鲨烯含量显著高于其他处理，较 CK 显著提升了 35.69%（$P < 0.05$），而‘华金’和‘湘林 210’角鲨烯含量则低于 CK。PP 处理对亚油酸等不饱和脂肪酸的合成及部分功能活性成分具有特异性促进效果，‘华鑫’和‘湘林 210’的亚油酸含量显著高于 CF 处理和 CK，较 CK 分别显著提升了 28.83% 和 9.00%（$P < 0.05$）。各供试品种经 PP 处理后的 α- 生育酚、总多酚等功能活性成分均显著高于 CK。综合分析表明，施肥处理对饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸及功能活性成分具有显著影响。

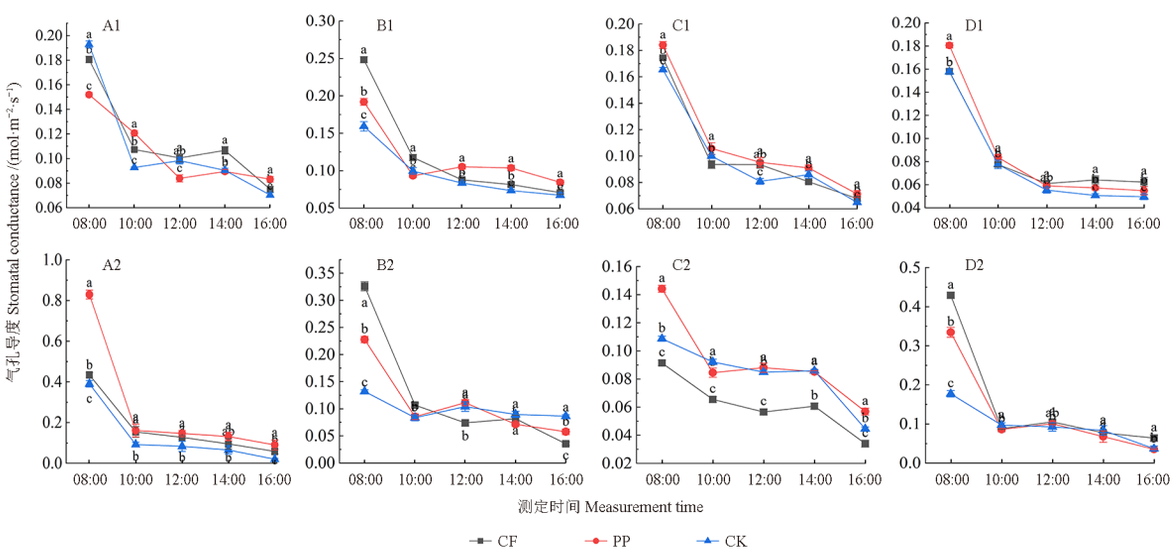


图 3　不同施肥处理对油茶叶片气孔导度日变化的影响

Fig. 3　Effects of different fertilization methods on the diurnal change of stomatal conductance of *Camellia oleifera* leaves

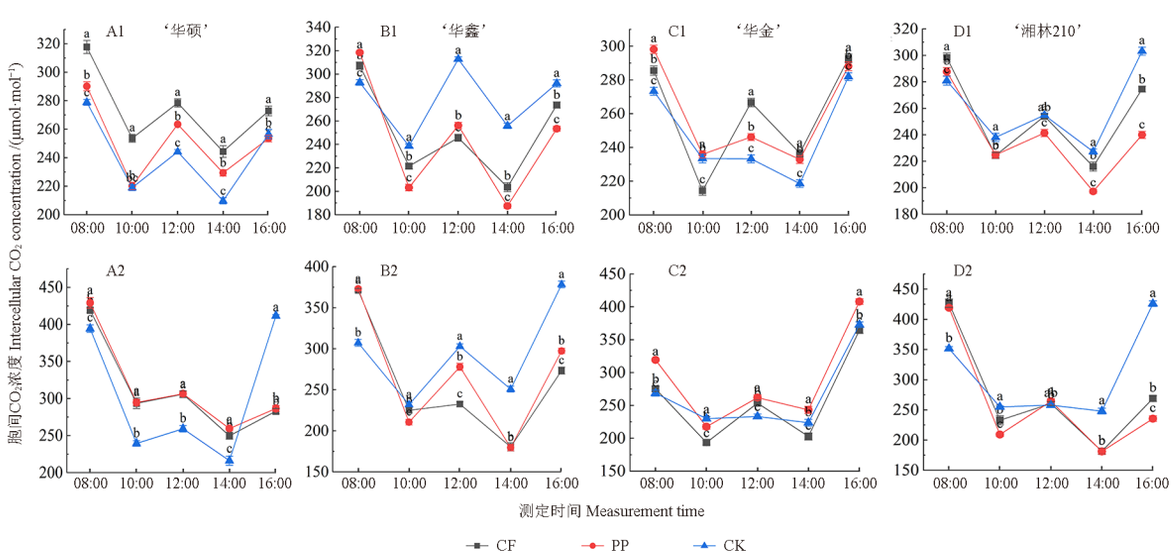


图 4　不同施肥处理对油茶叶片胞间 CO_2 浓度日变化的影响

Fig. 4　Effects of different fertilization methods on the diurnal change of intercellular CO_2 concentration of *Camellia oleifera* leaves

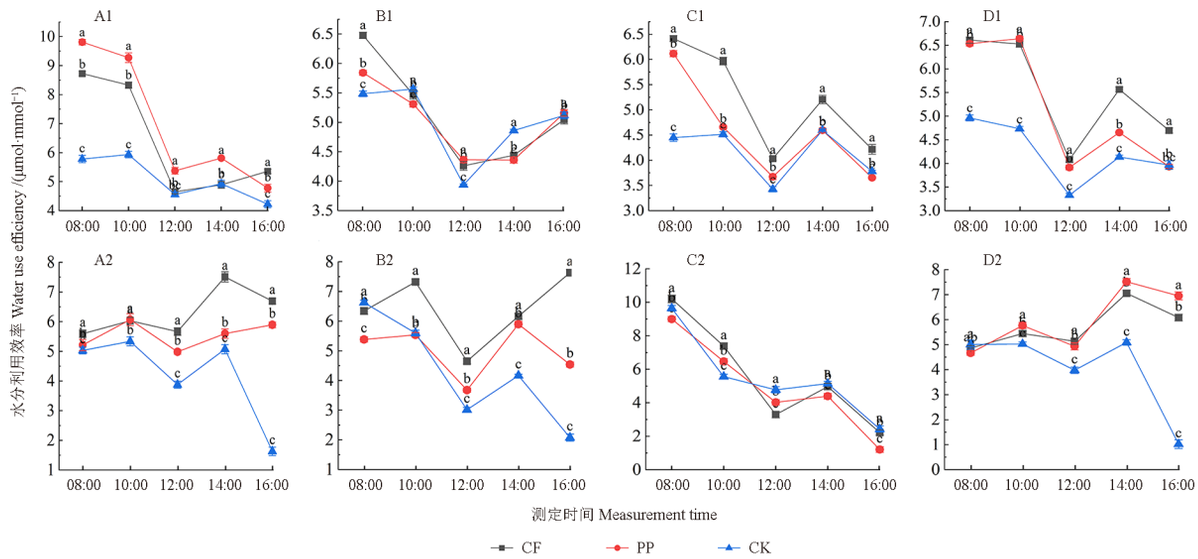


图 5 不同施肥处理对油茶叶片水分利用效率日变化的影响

Fig. 5 Effects of different fertilization methods on the diurnal change of water use efficiency of *Camellia oleifera* leaves

2.4 不同施肥方式对油茶产量的影响

由图 6 可知，CF 处理下‘华金’‘华硕’‘湘林 210’产果量和产油量均高于 CK，但差异不显著。PP 处理可显著提升‘华鑫’‘华金’和‘湘林 210’的产果量和产油量，其中‘湘林 210’每公顷产果量较 CK 显著提升了 8.0%（$P < 0.05$），这可能与较强的库源特性和磷钾养分协同效应有关。CK 处理组因无外源养分输入，植株养分供应不足，产果量与产油量普遍较低。

3 讨 论

3.1 油茶生物学特性与施肥需求的关联

油茶具有独特的“抱子怀胎”生物学特性，即果实发育与花芽分化同步进行，秋季果实膨大期同时孕育当年花芽 [22]，这一特性导致其对养分的需求显著高于普通林木。

胡冬南等 [23] 研究发现，3 月单施复合肥后，3—5 月连续测定的坐果率降幅最小，表明施肥在短期内可有效缓解油茶落花落果问题；结合油茶独特的“抱子怀胎”生物学特性，秋季合理的养分供给不仅有助于当年果实发育与油脂合成，也为翌年产量提高奠定基础。本研究证实，秋季是油茶油脂转化的高峰期与花芽分化的初期，此时施肥能同步满足两大生理过程的营养需求。果实油脂合成需要大量磷、钾元素参与 ATP 合成与脂肪酸去饱和过程 [24]，而花芽分化依赖氮素及微量元素完成蛋白质合成 [25]。因此，秋季科学施肥能够有效缓解油茶花果同期生长造成的养分竞争矛盾。

3.2 不同施肥处理对光合碳同化的调控机制

本研究表明，在 10 月油茶油脂转化关键期与 12 月花芽分化阶段，复合肥（CF）与磷钾肥（PP）通过差异化生理途径影响油茶光合碳同化效率。CF 处理的增效作用源于其均衡的氮磷钾配比，氮素作为叶绿素与 Rubisco 关键组成成分，可显著提升叶绿素含量，如 12 月‘华硕’‘湘林 210’的 Chl (a+b) 含量较 CK 分别提高了 25.2% 和 93.0%；持续的气孔导度优化是 CF 缓解光合午休的核心机制，通过维持午后较高的气孔导度水平，延缓胞间 CO_2 浓度下降。适量磷、钾含量可提高 CO_2 利用效率，从而有效缓解‘华金’‘湘林 210’的光合午休现象 [26]，同时提升水分利用效率。这与氮素促进气孔调节蛋白表达及 Rubisco 活性密切相关 [27]。PP 处理磷、钾元素加速 ATP 合成，促进晨间气孔开放，‘华鑫’‘华硕’上午净光合速率显著高于 CF 处理与 CK。但由于 PP 处理缺乏氮素供应，导致光保护机制不足，午间气孔导度降低，同时伴随胞间 CO_2 浓度异常积累，加剧‘华鑫’‘华硕’的光合午休现象。

综上所述，油茶光合碳同化调控存在气孔与非气孔限制转换，CF 处理通过氮素维持光合酶活性，适当的磷、钾元素提高植株 CO_2 利用效率，从而提高净光合速率；而 PP 处理在晨间提高气孔导度，使胞间 CO_2 浓度升高，但午后该促进效应则受限于光抑制及代谢失衡。其深层机制仍需进一步研究，施肥如何通过激素信号如 ABA、细胞分裂素等调控保卫细胞开闭的基因表达网络，并结合转录组学解析品种间光合午休敏感性差异的

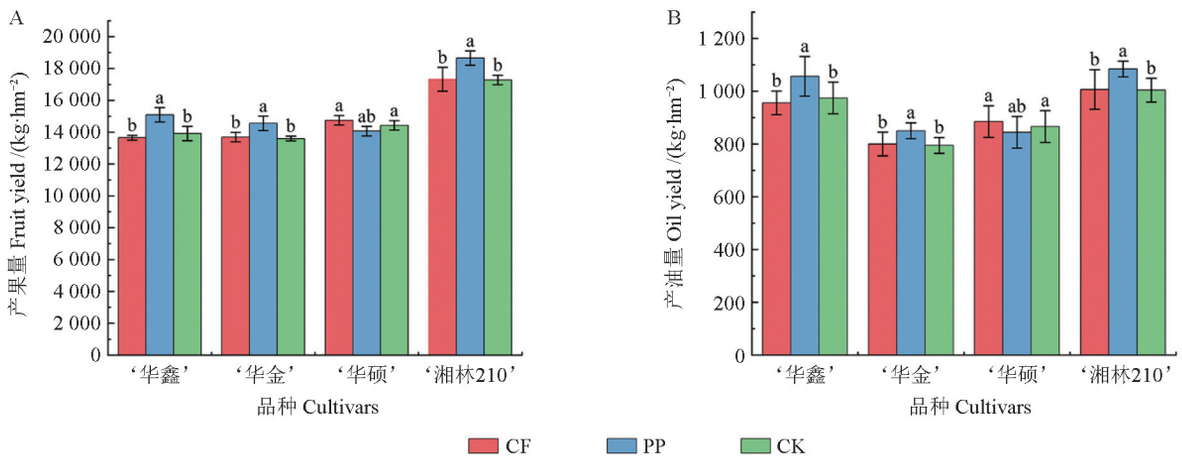
表 2　不同施肥处理对 4 个油茶品种油脂品质的影响 †

Table 2　Test results of oil quality of different *Camellia oleifera* cultivars under different fertilization treatments

品种 Cultivars	处理 Treatment	β- 谷甾醇 β-sitosterol / (mg·kg^{-1})	菜油甾醇 Campesterol / (mg·kg^{-1})	角鲨烯 Squalene / (mg·kg^{-1})	总多酚 Total polyphenols / (mg·kg^{-1})	棕榈酸 C16:0 Palmitic acidC16:0 /%	棕榈烯酸 C16:1 Palmitic acid C16:1 /%	硬脂酸 C18:0 Stearic acid C18:0 /%	油酸 C18:1 Oleic acid C18:1 /%	亚油酸 C18:2n6c Linoleic acidC18:2n6c /%	α- 亚麻酸 C18:3n3 α-linolenic acidC18:3n3 /%	顺 -11- 二十碳烯酸 C20:1 Cis-11-eicosenoic acid C20:1 /%	α- 生育酚 α-tocopherol / [mg·(100g)$^{-1}$]
华鑫 Huaxin	CF	606.1±25.8 c	54.0±2.3 c	744.3±89.3 a	7 695±614 c	8.00±0.24 c	0.120±0.017 c	2.25±0.32 a	81.0±2.0 a	7.71±0.43 c	0.348±0.042 c	0.563±0.034 c	18.9±0.9 b
	PP	655.7±26.2 a	56.8±2.3 a	641.7±77.0 c	9 005±630 a	8.18±0.20 a	0.146±0.008 a	1.54±0.19 c	78.6±2.1 b	10.50±0.32 a	0.420±0.033 a	0.613±0.029 a	19.8±0.9 a
	CK	637.2±25.5 b	55.1±2.2 b	701.5±84.2 b	8 065±565 b	8.05±0.21 b	0.129±0.012 b	1.66±0.21 b	76.9±2.0 c	8.15±0.33 b	0.382±0.029 b	0.588±0.030 b	18.8±0.7 b
华金 Huajin	CF	380.6±15.2 a	49.1±2.0 b	196.6±23.6 c	10 717±750 a	9.17±0.23 a	0.120±0.014 a	2.10±0.17 a	78.9±1.9 b	8.94±0.27 a	0.261±0.025 b	0.479±0.032 c	10.5±0.5 c
	PP	297.4±11.9 c	50.1±1.7 a	245.8±29.5 a	9 243±647 c	8.96±0.22 c	0.108±0.011 b	2.09±0.21 b	79.6±1.9 a	8.45±0.25 c	0.272±0.029 a	0.518±0.030 a	11.9±0.6 a
	CK	315.5±12.6 b	49.3±2.0 b	200.2±24.0 b	9 796±686 b	9.00±0.23 b	0.112±0.008 b	2.02±0.15 c	78.8±1.8 b	8.66±0.26 b	0.268±0.031 a	0.497±0.027 b	11.5±0.6 b
华硕 Huashuo	CF	405.2±16.2 a	45.4±1.8 a	1 423.5±170.8 a	11 525±807 a	7.38±0.18 a	0.091±0.010 a	2.38±0.14 a	83.5±2.1 b	5.72±0.17 a	0.350±0.020 a	0.610±0.021 b	16.4±0.8 a
	PP	376.9±15.1 b	36.5±1.5 c	958.3±115.0 c	10 293±721 b	7.25±0.18 c	0.084±0.009 b	2.22±0.18 b	84.4±2.0 a	5.04±0.15 c	0.324±0.027 c	0.634±0.029 a	15.4±0.8 b
	CK	375.9±15.0 b	37.8±1.5 b	1 049.1±125.9 b	10 027±702 b	7.30±0.21 b	0.084±0.012 b	2.19±0.20 c	81.2±1.9 c	5.50±0.22 b	0.337±0.019 b	0.629±0.024 a	15.5±0.7 b
湘林 210 Xianglin210	CF	620.9±24.8 a	49.9±2.0 c	451.2±54.1 c	8 383±587 b	8.48±0.21 a	0.135±0.013 a	2.02±0.21 a	78.9±2.0 a	9.57±0.29 c	0.336±0.021 a	0.520±0.023 b	19.9±1.0 b
	PP	538.6±21.5 c	58.4±2.3 a	527.9±63.3 a	8 693±608 a	8.35±0.19 b	0.134±0.005 a	1.85±0.17 c	77.9±1.9 b	10.90±0.33 a	0.328±0.017 b	0.548±0.030 a	20.2±1.0 a
	CK	545.8±21.8 b	52.4±2.1 b	477.7±57.3 b	8 005±560 c	8.25±0.21 c	0.131±0.007 b	1.97±0.16 b	78.5±2.0 a	10.00±0.30 b	0.326±0.019 b	0.517±0.025 b	18.9±0.9 c
品种 Cultivars		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
处理 Treatment		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
品种 × 处理 Cultivars×Treatment		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

† 表中数据代表平均值 ± 标准差，不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著，** 表示主效应或交互效应极显著（$P < 0.01$）。

The data in the table represent the mean±standard deviation, and the lower case letters represent indicate significant differences at $P < 0.05$ level. ** indicated that the main effect or interaction effect was extremely significant ($P < 0.01$).



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。The lower case letters represent indicate significant differences at the $P < 0.05$ level.

图 6 不同施肥处理对油茶每公顷产果量和产油量的影响

Fig. 6 Effects of different fertilization treatments on fruit yield and oil yield per hectare of *Camellia oleifera*

分子基础，同时开展 Rubisco 活性与氮磷钾吸收的时序关联研究，以揭示光合酶活性变化的驱动机制。

3.3 不同施肥处理对油茶产量的调控

PP 处理能够激活 *SWEET* 家族生殖发育基因 [28]，有效提高‘华鑫’‘华金’‘湘林 210’产果量，特别是‘湘林 210’显著增产 8%。但单季施肥难以突破遗传产量阈值，如‘华金’增产仅 0.88%，反映其内源激素平衡对磷、钾元素响应的钝化 [29]。

CF 处理虽通过促进氮素吸收支撑碳同化，但增产效果弱于 PP 处理，表明氮素向营养生长的优先分配削弱了向生殖生长分配。所有施肥处理的平均增产率仅 5.3%，印证短期施肥难以提升油茶果实产量，这可能是因为遗传因素对养分利用效率的约束，也可能是因为单季施肥无法逆转土壤基础肥力的退化，以及秋冬低温导致“千花一果”[30]。综上所述，油茶产量的提升还需结合长期土壤改良如有机质提升、根际微生态调控，协同优化增产潜力，未来需通过测定内源激素解析磷钾肥调控花芽分化的信号通路，以揭示土壤与肥料互作效应对产量的促进机制。

3.4 油脂品质与施肥策略

施肥措施通过调控碳同化和油脂转化路径，显著影响油茶油脂品质。双因素方差分析表明，品种和施肥措施对各油脂品质指标均存在显著影响。CF 处理通过均衡营养供应，全面优化了油脂合成关键指标：1）CF 处理各品种油酸比例均高于 CK，这与净光合速率的持续增强相关；总多酚在 CF 处理下如‘华硕’的显著积累，可能与氮素促进苯丙烷代谢通路相关 [10]。2）PP 处理显著促进亚油酸合成，如‘华鑫’达 10.5%，较 CK 高出 28.83%。磷作为 ATP 及 NADPH 合成的关键元素，可通过激活去饱和酶 FAD2 推动亚油酸积累 [10]。3）品种间油脂合成差异显著。‘华金’对施肥响应较弱，其油脂转化可能受遗传因素主导；而‘华鑫’在 PP 处理下亚油酸增幅显著，表明磷钾肥可作为其品质定向调控的短期策略，但长期单施磷钾肥可能加剧养分失衡，导致总多酚含量波动 [31]。

优化施肥策略可遵循品种适配原则，如‘华鑫’PP 处理显著促进亚油酸合成，但易加剧光合午休现象；CF 处理可稳定提升水分利用效率和油酸含量，宜以 CF 为基础，花期前增施磷钾肥，定向提升亚油酸。‘华金’对施肥响应较弱，施用复合肥维持基础光合效率即可，避免过量施肥。‘华硕’以复合肥处理综合效益最优，角鲨烯含量提升了 35.69%，油酸提升了 2.83%，且缓解光合午休现象，施用磷钾肥导致角鲨烯含量下降，应慎用磷钾肥。‘湘林 210’CF 处理可优化油酸含量并提高水分利用效率，PP 增产达 8.0%，且提升亚油酸含量，所以复合肥和磷钾肥组合施用，可兼顾产量与油脂品质。为实现品质精准调控，未来仍需探索施肥时序定向调控脂肪酸的可行性，探究功能成分与产量的协同阈值。

4 结 论

复合肥通过均衡氮磷钾供应，能够全面提升供试品种叶绿素含量、油脂品质，维持高净光合速率与水分利用效率，协同光合碳同化与油脂转化；磷钾肥具有短期特异性增益，对提高‘华鑫’

‘湘林 210’亚油酸合成及‘华鑫’‘华金’和‘湘林 210’产量效果显著，但整体品质增益弱于复合肥，且加剧‘华鑫’等品种光合午休现象。

综上所述，秋季宜机化施肥‘华鑫’以复合肥为基肥，每株 0.5 kg 旋耕深施，花期前增施磷钾肥 0.5 kg，可定向提升亚油酸含量；‘华金’仅单施复合肥，每株 0.5 kg 旋耕深施，避免生殖生长受养分竞争抑制；‘华硕’单施复合肥，每株 0.5 kg 旋耕深施，能够最大化积累角鲨烯与油酸含量；‘湘林 210’适宜复合肥与磷钾肥配施，可同步优化产量提升与亚油酸含量。本研究深入探究了油茶秋季宜机化施肥方案优选的关键问题，为油茶高产优质栽培提供理论依据和技术参考。

参考文献：

[1] 张婷 , 李建安 , 杨昕悦 , 等 . 插皮接改良技术在油茶高接换种中的应用 [J]. 经济林研究 ,2022,40(4):239-245.
Zhang T, Li J A, Yang X Y, et al. Application of improved technology of bark grafting in the cultivars improvement by high grafting of *Camellia oleifera*[J]. Non-wood Forest Research,2022,40(4):239-245.

[2] 谭晓风 . 油茶分子育种研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(1):1-24.
Tan X F. Advances in the molecular breeding of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(1):1-24.

[3] 胡芳名 , 李建安 , 吕芳德 , 等 . 湖南省油茶产业化现状及发展战略 [J]. 经济林研究 ,2009,27(4):121-125.
Hu F M, Li J A, Lü F D, et al. Current situation and development strategies of *Camellia oleifera* industrialization in Hunan Province[J]. Non-wood Forest Research,2009,27(4):121-125.

[4] Luan F, Zeng J S, Yang Y, et al. Recent advances in *Camellia oleifera* Abel.: a review of nutritional constituents, biofunctional properties, and potential industrial applications[J]. Journal of Functional Foods,2020,75:104242.

[5] Wu B, Ruan C J, Shah A H, et al. Identification of miRNA–mRNA regulatory modules involved in lipid metabolism and seed development in a woody oil tree (*Camellia oleifera*)[J]. Cells,2022,11:71.

[6] Zhang F, Zhu F, Chen B L, et al. Composition, bioactive substances, extraction technologies and the influences on characteristics of *Camellia oleifera* oil: a review[J]. Food Research International,2022,156:111159.

[7] 马晓玲 , 袁德义 , 王玮琦 , 等 . 油茶种间杂交 F_1 代优株花果性状的比较 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):1-11,58.
Ma X L, Yuan D Y, Wang W Q, et al. Comparative analysis of flower and fruit traits in F_1 generation of interspecific hybridization of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):1-11,58.

[8] Yu Z L, Wu X H, He J H. Study on the antifungal activity and mechanism of tea saponin from *Camellia oleifera* cake[J]. European Food Research and Technology,2022,248:783-795.

[9] Gao Y, Wang B H, Luo L C, et al. Effects of hydroxyapatite and modified biochar derived from *Camellia oleifera* fruit shell on soil Cd contamination and N_2O emissions[J]. Industrial Crops and Products,2022,177:114476.

[10] Long L, Gao C, Qiu J, et al. Fatty acids and nutritional components of the seed oil from Wangmo red ball *Camellia oleifera* grown in the low-heat valley of Guizhou, China[J]. Scientific Reports,2022,12:16554.

[11] 李国雷 , 刘勇 , 祝燕 . 秋季施肥调控苗木质量研究评述 [J]. 林业科学 ,2011,47(11):166-171.
Li G L, Liu Y, Zhu Y. Review on advance in study of fall fertilization regulating seedling quality[J]. Scientia Silvae Sinicae,2011,47(11):166-171.

[12] 史学文 . 土壤肥料在农业可持续发展中的地位和作用 [J]. 农业与技术 ,2018,38(6):42.
Shi X W. The position and function of soil fertilizer in the sustainable development of agriculture[J]. Agriculture and Technology,2018,38(6):42.

[13] 张文元 , 郭晓敏 , 涂淑萍 , 等 . 水肥对高产无性系油茶果实产量的影响 [J]. 土壤学报 ,2015,52(4):768-775.
Zhang W Y, Guo X M, Tu S P, et al. Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel[J]. Acta Pedologica Sinica,2015,52(4):768-775.

[14] 李帆 , 蒋光月 , 万水霞 , 等 . 配方施肥对油茶果林生长和产量的影响 [J]. 河南农业科学 ,2014,43(12):73-76.
Li F, Jiang G Y, Wan S X, et al. Effect of formula fertilization on growth and yield of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2014,43(12):73-76.

[15] Boivin J R, Miller B D, Timmer V R. Late-season fertilization of *Picea mariana* seedlings under greenhouse culture: biomass and nutrient dynamics[J]. Annals of Forest Science,2002,59:255-264.

[16] Andivia E, Márquez-García B, Vázquez-Piqué J, et al. Autumn fertilization with nitrogen improves nutritional status, cold hardiness and the oxidative stress response of Holm oak (*Quercus ilex* ssp. *ballota* [Desf.] Samp) nursery seedlings[J]. Trees,2012,26(2):311-320.

[17] Puértolas J, Gil L, Pardos J A. Effects of nitrogen fertilization and temperature on frost hardiness of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) seedlings assessed by chlorophyll fluorescence[J]. Forestry,2005,78(5):501-511.

[18] Villar-Salvador P, Puértolas J, Cuesta B, et al. Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations: insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival[J]. New Forests,2012,43:755-770.

[19] 曹春芮 , 韩海琦 , 钟德松 , 等 . 膨果期施用磷钾肥对油茶果实和花芽生长发育的影响 [J]. 农业研究与应用 ,2025,38(3):254-262.
Cao C R, Han H Q, Zhong D S, et al. Effects of phosphorous and potasium fertilization at fruit expanding stage on growth and development of fruits and flower buds of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Agricultural Research and Application,2025,38(3):254-262.

[20] 程贵文 , 龚洪恩 , 颜送宝 , 等 . 油茶叶绿素提取方法的比较研究 [J]. 湖北林业科技 ,2017,46(6):11-13,58.
Cheng G W, Gong H E, Yan S B, et al. Comparison of chlorophyll extraction methods in *Camellia oleifera*[J]. Hubei Forestry Science and Technology,2017,46(6):11-13,58.

[21] 姚小华 , 王亚萍 , 王开良 , 等 . 地理经纬度对油茶籽中脂肪及脂肪酸组成的影响 [J]. 中国油脂 ,2011,36(4):31-34.
Yao X H, Wang Y P, Wang K L, et al. Effects of geographic latitude and longitude on fat and its fatty acid composition of oil-tea *Camellia* seeds[J]. China Oils and Fats,2011,36(4):31-34.

[22] 刘洁 . 不同立地油茶林土壤肥力质量评价与茶油品质特性研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2018:10-14.
Liu J. The research on soil fertility quality assessment of *Camellia oleifera* in different site type and quality of tea oil[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2018:10-14.

[23] 胡冬南 , 廖康平 , 王毓曼 , 等 . 施肥模式对环割油茶果实品质、产量及养分分配的影响 [J]. 江西农业大学学报 ,2025,47(2):438-450.
Hu D N, Liao K P, Wang Y M, et al. Effects of fertilization mode on fruit quality, yield and nutrient distribution of girded *Camellia oleifera*[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2025,47(2):438-450.

[24] 邹锋 , 张旭辉 , 袁德义 , 等 . 自动化学间断分析仪和原子吸收光谱法测定锥栗不同授粉组合果实的元素含量 [J]. 光谱学与光谱分析 ,2019, 39(1):286-291.
Zou F, Zhang X H, Yuan D Y, et al. The different pollination combinations in *Castean henryi* determined by auto discrete analyzers and atomic absorption spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2019,39(1):286-291.

[25] 马月萍 , 戴思兰 . 植物花芽分化机理研究进展 [J]. 分子植物育种 ,2003,1(4):539-545.
Ma Y P, Dai S L. Flower bud differentiation mechanism of anthophyta[J]. Molecular Plant Breeding,2003,1(4):539-545.

[26] 李泽 , 谭晓风 , 卢锟 , 等 . 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 生态学报 ,2017,37(5):1515-1524.
Li Z, Tan X F, Lu K, et al. Influence of drought stress on the growth, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1515-1524.

[27] 尹昊 , 孙伟博 , 周燕 , 等 . 毛果杨 Rubisco 活化酶基因的克隆与功能分析 [J]. 林业科学 ,2017,53(4):83-95.
Yin W, Sun W B, Zhou Y, et al. Cloning and functional analysis of rubisco activase gene from *Populus trichocarpa*[J]. Scientia Silvae Sinicae,2017,53(4):83-95.

[28] 杜兵帅 , 邹昕蕙 , 王子豪 , 等 . 油茶 *SWEET* 基因家族的全基因组鉴定及表达分析 [J]. 生物技术通报 ,2024,40(5):179-190.
Du B S, Zou X H, Wang Z H, et al. Genome-wide identification and expression analysis of the *SWEET* gene family in *Camellia oleifera*[J]. Biotechnology Bulletin,2024,40(5):179-190.

[29] 占志勇 . 油桐种仁不同发育时期表达蛋白质组学研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2013:6-7.
Zhan Z Y. Expression proteomics analysis of tung tree seeds in the different developmental stages[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2013:6-7.

[30] Wu L L, Wang Y J, Guo P R, et al. Metabonomic and transcriptomic analyses of *Camellia oleifera* flower buds treated with low-temperature stress during the flowering stage[J]. Industrial Crops and Products,2022,189:115874.

[31] 姜孝曾 . 干旱和氮添加对油茶根系形态与碳氮积累的影响 [D]. 合肥 : 安徽农业大学 ,2023:10-22.
Jiang X C. Effects of drought and nitrogen addition on root morphology and carbon and nitrogen accumulation in *Camellia oleifera*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2023:10-22.

[本文编校：谢荣秀]