

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.2026.06.006

论文标题： 施肥方式对油茶树体养分及果实经济性状的影响

作　　者： 廖康平，邹中华，王毓曼，等

收稿日期： 2025-06-16

引文格式： 廖康平,邹中华,王毓曼,等.施肥方式对油茶树体养分及果实经济性状的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):56-69.

LIAO K P, ZOU Z H, WANG Y M, et al. Effect of fertilization methods on nutrients and fruit economic characteristics of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):56-69.

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*

不同浓度磷肥对2年生油茶苗生长和养分含量的影响

Effects of different concentrations of phosphorus fertilizer on growth and nutrient contents of 2-year-old *Camellia oleifera* seedlings

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.2026.06.006
http: //qks.csuft.edu.cn

施肥方式对油茶树体养分及果实经济性状的影响

廖康平[1, 2]，邹中华[3]，王毓曼[4]，张运煜[5]，廖志鹏[1]，谢　琳[1]，何姝瑾[1]，胡冬南[1]

（1. 江西农业大学 亚热带森林资源培育江西省重点实验室 / 林学院，江西 南昌 330045；2. 中国林业科学研究院林业研究所 林木遗传育种国家重点实验室，北京 100091；3. 江西省新余市林业局，江西 新余 336500；4. 广西壮族自治区柳州生态环境监测中心，广西 柳州 545000；5. 新余市林业发展服务中心，江西 新余 338000）

摘　要：【目的】明确施肥方式对油茶树体养分及果实经济性状的影响，探明树体养分与果实经济性状之间的关系，找出适合油茶林地的施肥方式。【方法】以‘赣兴 48’油茶为试验材料，设置穴施（D）、沟施（G）2 种施肥处理，以不施肥为对照（CK），调查油茶叶、果、根、花芽养分含量及果实经济性状，构建偏最小二乘路径模型（PLS-PM），分析树体养分与果实经济性状的关系，以及施肥方式对树体养分和果实经济性状的影响。【结果】与 CK 相比，穴施处理果形指数更趋近于 1，穴施、沟施鲜果质量分别提高了 21.51%、9.00%，鲜果出油率分别提高了 22.21%、24.67%，单株产油量分别提高了 33.12%、41.23%；随生长时间的延长，氮、钾养分逐渐积累；磷由叶、果、根逐渐转移至花芽；根和花芽可溶性糖转移逐渐至果实；可溶性淀粉含量整体呈先下降后上升的趋势。施肥可促进各器官氮、钾及可溶性淀粉的积累，提高春梢生长期根、叶、果磷含量，促进叶、果可溶性糖积累，缓解根和花芽可溶性糖消耗；偏最小二乘路径模型结果显示，沟施主要在油脂转化期提高果实养分、降低叶片养分，穴施主要在春梢快速生长期降低叶片养分，在果实生长高峰期提高根部养分进而改善果实经济性状。主成分分析结果显示，5 个果实质量指标、2 个含水率指标、果形指数、鲜果含油率、干籽含油率和产油量是评价施肥效果的主要指标，累计贡献率为 88.79%，综合得分由高到低为穴施＞沟施＞对照。【结论】穴施通过影响不同时期油茶树体养分从而改善果实经济性状，是更适合油茶林地的施肥方式。

关键词：施肥方式；油茶；树体养分；果实；偏最小二乘路径模型；主成分分析

中图分类号：S723.9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0056-14

Effect of fertilization methods on nutrients and fruit economic characteristics of *Camellia oleifera*

LIAO Kangping[1,2], ZOU Zhonghua[3], WANG Yuman[4], ZHANG Yunyu[5], LIAO Zhipeng[1], XIE Lin[1], HE Shujin[1], HU Dongnan[1]

(1.a.College of Forestry; b.Jiangxi Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China; 3. Xinyu City Forestry Bureau, Xinyu 336500, Jiangxi, China; 4. China Liuzhou Ecological Environment Monitoring Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Liuzhou 545000, Guangxi, China; 5. Xinyu Forestry Development Service Center, Xinyu 338000, Jiangxi, China)

Abstract:【Objective】To clarify the impact of fertilization methods on the nutrients and economic characteristics of *Camellia oleifera*, explore the relationship between nutrients and fruit economic characteristics, and to identify suitable fertilization methods for *Camellia oleifera* forests.【Method】Using ‘Ganxing 48’ *Camellia oleifera* as the material, three fertilization treatments were set up: hole fertilization (D), furrow fertilization (G), and no fertilization (CK). The nutrient content and fruit economic characteristics of *Camellia oleifera* leaves, fruits, roots, and flower buds were investigated, and a partial least squares path model was constructed to analyze the relationship between tree nutrients and fruit economic characteristics as well as the influence of fertilization methods on tree nutrients and fruit economic characteristics.【Result】Compared with CK, the fruit shape index of the hole application treatment is closer to 1, and the quality of fresh fruits increased by 21.51% and 9.00%, respectively. The oil yield of fresh fruits increased by 22.21% and 24.67% respectively, and the oil production per plant increased by 33.12% and 41.23% respectively; With the extension of growth time, N and

收稿日期（Received）：2025-06-16　　**修订日期**（Revised）：2025-10-15

基金项目：国家自然科学基金项目（32060362）；中央财政林业科技推广示范项目（JXTG〔2023〕12 号）；江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目（20223BBF61012）。

第一作者：廖康平（kpl15259551385@icloud.com），硕士研究生。

通信作者：胡冬南（dnhu98@163.com），教授，博士，博士研究生导师。

引文格式：廖康平 , 邹中华 , 王毓曼 , 等 . 施肥方式对油茶树体养分及果实经济性状的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):56-69.

LIAO K P, ZOU Z H, WANG Y M, et al. Effect of fertilization methods on nutrients and fruit economic characteristics of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):56-69.

K nutrients gradually accumulate as a whole; P nutrients gradually transfer from leaves, fruits, and roots to flower buds. The soluble sugars in roots and flower buds gradually transfer to the fruit; The overall trend of soluble starch content is decreasing and increasing. Fertilization can promote the accumulation of N, K and soluble starch in various organs, increase P content in roots, leaves, and fruits during the growth period of spring shoots, promote the accumulation of soluble sugars in leaves and fruits, and alleviate the consumption of soluble sugars in roots and flower buds. The results of the PLS-PM show that G mainly increases fruit nutrients and reduces leaf nutrients during the oil conversion period, while D mainly reduces leaf nutrients during the rapid growth period of spring shoots and increases root nutrients during the peak fruit growth period, thereby improving fruit economic traits. The results of PCA showed that 5 fruit quality indicators, 2 moisture content indicators, fruit shape index, fresh fruit oil content, dry seed oil content, and oil production were the main indicators for evaluating the fertilization effect, with a cumulative contribution rate of 88.79%. The comprehensive score from high to low was D ＞ G ＞ CK.【Conclusion】Hole fertilization is a more suitable fertilization method for *Camellia oleifera* forests, as it improves fruit economic characteristics by affecting the nutrients of *Camellia oleifera* at different stages.

Keywords: fertilization methods; *Camellia oleifera*; tree nutrients; fruit; PLS-PM; PCA

油茶 *Camellia oleifera* Abel. 是山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia* 的常绿灌木或乔木 [1]，是我国主要的木本油料树种，与油棕、油橄榄及椰子并称为世界四大木本油料树种 [2]。有研究报告显示，截至 2020 年，江西省油茶资源占林业用地面积 2.78% ～ 32.12%，但存在资源发展不平衡、低产林普遍和年龄结构衰退等严重问题 [3]。施肥在油茶种植当中起到相当关键的作用，科学合理的施肥方式能够为油茶植株输送适宜且充足的养分，改善果实经济性状，从而达到增产提效的效果 [4]。因此，寻求适合的施肥方式具有重要意义。

沟施是在靠近植物根系的土壤上进行开沟的施肥方式，在我国农林业中应用广泛，它便于机械化操作，目前针对开沟施肥机器的研究多有报道 [5-6]。穴施是将肥料精准施入土壤特定深度的施肥方式，相较于撒施、条施等常规地表施肥方式，穴施降低了地表径流和肥料挥发带来的损失，从而提高肥料利用率 [7-8]。油茶以收获果实为目的，其果实经济性状主要包含果实大小、质量和产油量等性状指标 [9]。前人研究表明，合理的施肥方式能够有效改善果实经济性状。在陡坡上打 2 ～ 3 孔进行施肥能够显著提升伦晚脐橙果实的单果质量和可食率 [10]；李昌禹等 [11] 对猕猴桃的研究发现，沟施硅肥能够提高果实硬度，延长其贮藏时间。植物的发育受到土壤养分的限制，以土壤 N 和 P 为主要限制元素。沟施和穴施均能改善土壤条件，提高土壤养分利用效率，从而促进植物生长和提高产量 [12-13]。对于我国东北黑土区的土壤，采用免耕加沟施有机肥能有效提高各层次土壤养分供应能力，从而显著提高大豆的鲜质量和干质量 [14]；而与旋耕穴施相比，免耕条带沟施的 2 年平均氮肥利用率和偏生产力均有所提高，条带沟施和穴施油菜 2 年平均产量高于地表撒施 [15]；艾晨曦等 [16] 的研究表明，与 CK 相比，双条带沟施和四孔穴施均能提高土壤有机质含量，并提高 10 年生‘烟富 6 号’苹果的叶片质量和果实产量。氮磷钾是植物生长发育所必需的营养元素，其含量的高低代表着植物生长状况好坏。在雷竹的相关研究中发现，缓释肥穴施促进雷竹地上部分的氮磷钾吸收，沟施促进其地下部氮磷钾吸收 [17]。可溶性糖（SS）和可溶性淀粉（ST）是植物光合作用的重要产物，是植物生长的能源物质 [18]。薛磊等 [19] 的研究表明，采用 N∶P∶K=2∶1∶1，培土 20 cm 及中间穴施的施肥模式下鼓节竹可溶性糖、蛋白质含量相对最高；此外，白红 [20] 对‘阿部白’桃的研究证明，沟施 0.70 kg 的钾肥，其果实中可溶性糖、淀粉的含量较不施肥显著提高。

目前，针对油茶林地的施肥研究多集中在肥料种类及用量对油茶的影响，对施肥方式的研究鲜见报道。此外，在年周期变化过程中，不同时期油茶树体养分与果实经济性状的关系尚不明确。基于此，本研究以‘赣兴 48’油茶品种为试验对象，结合偏最小二乘路径模型，探究施肥方式对油茶氮磷钾、可溶性糖、可溶性淀粉及果实经济性状的影响，找出不同时期影响果实经济性状的主要养分指标，以期减少因施肥方式不当而导致的养分浪费，实现精准施肥，为油茶林地管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验在江西省新余市渝水区九龙山乡（27°40′30″N，114°50′34″E）进行。研究区位于赣西地区，属亚热带季风性气候，湿润温和，光照充足，降水充沛。年平均气温 15 ℃，年均降水量 1 680 mm，红壤，适合油茶生长。

1.2 试验材料

试验选用平均株高 2.70 m、地径 76.83 mm、东西冠幅 2.55 m、南北冠幅 2.62 m 的 10 年生盛果期油茶，品种为‘赣兴 48’。该品种为江西省主推品种，生长状态良好，能正常结果，无病虫害。

1.3 试验方法

试验采用单因素随机区组试验设计，设沟施（G）和穴施（D）2 个施肥处理，并以不施肥（CK）为对照，设 3 个区组，每小区重复 10 株，每个处理共 30 株。试验于 2023 年 2 月中旬开始，选取花苞数、幼果数及长势、冠幅、树形相对一致的油茶树进行施肥处理。并于东、南、西、北四个方向各选一标准枝挂牌，用于跟踪调查。沟施处理于树两边的树冠滴水线位置开挖深 35 cm、长 40 cm 的施肥沟，肥料均匀撒入沟内，覆土；穴施处理用铁钎于树两边树冠滴水线位置打 6 个深 40 cm 的施肥穴，将肥料平均施入洞中，覆土；CK 不作处理。肥料种类为复合肥（N∶P∶K=17∶17∶17），每棵树施 0.5 kg。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 养分含量测定

于春梢快速生长期（4 月 16 日）、平缓生长期（5 月 14 日）、生长完成期（5 月 23 日）、果实膨大期（7 月 15 日）、油脂转化前期（8 月 15 日）及果实成熟期（10 月 15 日）6 个时期 [21] 对根及当年生营养枝中部叶片进行跟踪调查并取样。油茶上一年的花自盛花期受精后，子房从 3 月开始膨大至 4 月 16 日仅初具雏形；当年花芽在春梢上分化，4 月 16 日—5 月 23 日无明显花芽，故果实于 5 月 14 日开始取样调查，花芽 7 月 15 日开始取样调查。每一株树四个方向各取一份样品，取样后带回实验室处理（杀青、烘干、粉碎、过筛），并测定其全氮、全磷、全钾、可溶性糖和淀粉含量。通过硫酸 - 过氧化氢法进行消煮，对消煮液进行碱化，采用蒸馏定氮法测定全氮含量；用磷钼蓝比色法测定全磷含量；用火焰分光光度法测全钾含量；可溶性糖及淀粉含量采用蒽酮比色法测定。所有样品做 3 次重复，取平均值作为样品的最终测定数据。

1.4.2 果实经济性状测定

于 10 月采收油茶果实，采收后 2 d 内完成果实各性状指标的测定。统计果实数量并称质量，每株取 30 个果实，装入封口袋密封，带回室内测定果实各部分质量及种仁含油率，并计算果实含水率、干籽含油率、鲜果含油率和单株产油量。种仁含油率采用索氏萃取法测定。各指标计算方式如下：

$$y=(g/G)\times 100\% \quad (1)$$

$$Y_1=(g_1/g_2)\times M\times 100\% \quad (2)$$

$$Y_2=(g_1/G_1)\times M\times 100\% \quad (3)$$

$$Y=Y_2\times N \quad (4)$$

式中：y 为含水率，g 为干质量，G 为鲜质量；Y_1 为干籽含油率，g_1 为种仁干质量，g_2 为种籽干质量，M 为种仁含油率；Y_2 为鲜果含油率，G_1 为果实鲜质量；Y 为单株产油量，N 为单株果实产量。

参照李晓钟等 [22] 的方法进行果实经济性状的主成分分析。

1.5 数据处理和统计分析

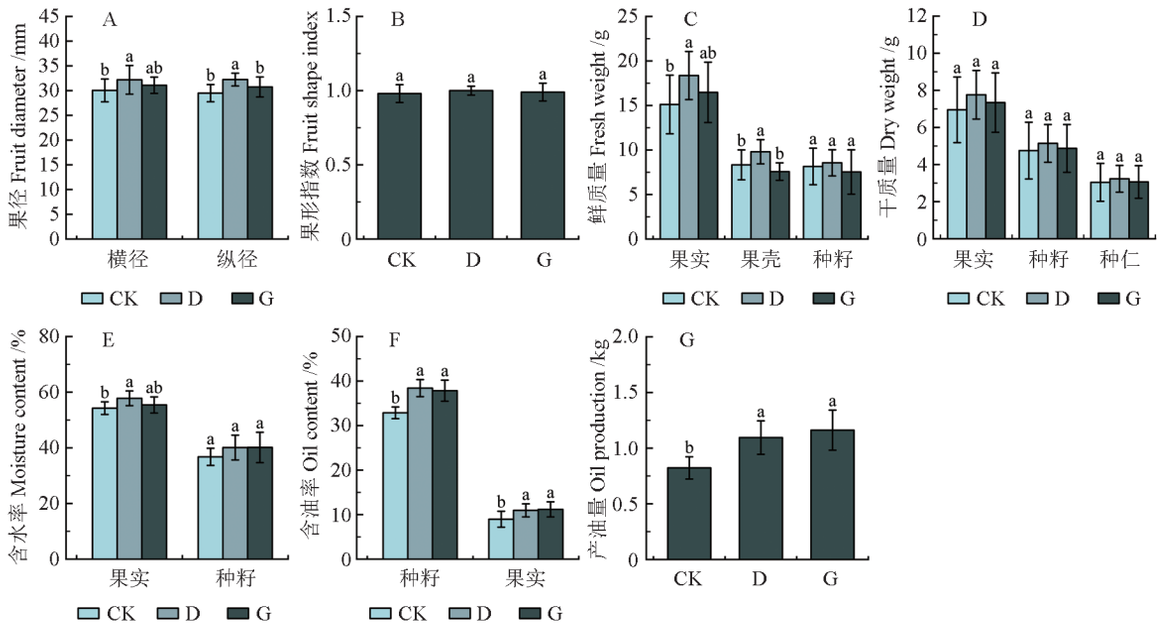
利用 SPSS 29.0、Origin 2024b 软件进行数据分析和图表制作；利用 R 语言 pls-pm 包进行模型构建。

2 结果与分析

2.1 施肥方式对油茶果实经济性状的影响

施肥处理下油茶果实经济性状方差分析结果如图 1 所示。由图 1A、B 可以看出，果径在不同施肥方式间存在显著差异（$P < 0.05$）。穴施下果实横径较沟施和 CK 分别提高 3.54% 和 7.12%，纵径则提高 4.85% 和 9.29%。表明穴施对果实膨大的促进效果更好。不同施肥方式下果形指数差异不显著，穴施、沟施及 CK 的果形指数值分别为 1.00、0.99 和 0.98，表明施肥能够在一定程度上促进油茶果实由椭圆形转向圆球形，以穴施的效果更好。由图 1C、D 可以看出，果实和果壳鲜质量在不同施肥方式间存在显著差异（$P < 0.05$），穴施下果实鲜质量较沟施和 CK 分别提高了 11.48% 和 21.51%，果壳鲜质量则提高了 17.65% 和 29.46%。不同施肥方式下种籽鲜质量及果实干质量均无显著差异，但由大到小均为穴施＞沟施＞ CK。表明施肥能够促进果实生长，提高果实质量，且在一定程度上穴施效果更好。由图 1E ～ G 可以看出，果实含水率、种籽含油率及果实含油率在不同施肥方式间存在显著差异（$P < 0.05$），穴施果实含水率较沟施和 CK 分别提高了 4.30% 和 6.53%，干籽出油率提高了 1.53% 和 6.89%。施肥处理下鲜果出油率和单株产油量显著高于 CK，沟施与穴施较 CK 分别高出 24.67%、22.21% 和 41.23%、33.12%。表明施肥能够促进果实油脂的积累，穴施对干籽含油率的促进

效果更好，沟施对鲜果含油率及单株产油量的促进效果更好。综合果实形态、质量及含水率、含油率和产油量各项指标来看，穴施在一定程度上对果实经济性状的提高效果更好。



同一指标不同施肥方式无相同小写字母表示存在显著差异 ($P < 0.05$)。下同。
There are significant differences ($P < 0.05$) in the same indicator among different fertilization methods without the same lowercase letter. The same below.

图 1　施肥方式对油茶果实经济性状的影响
Fig. 1　Effect of fertilization methods on fruit Economic characteristics in *C.oleifera*

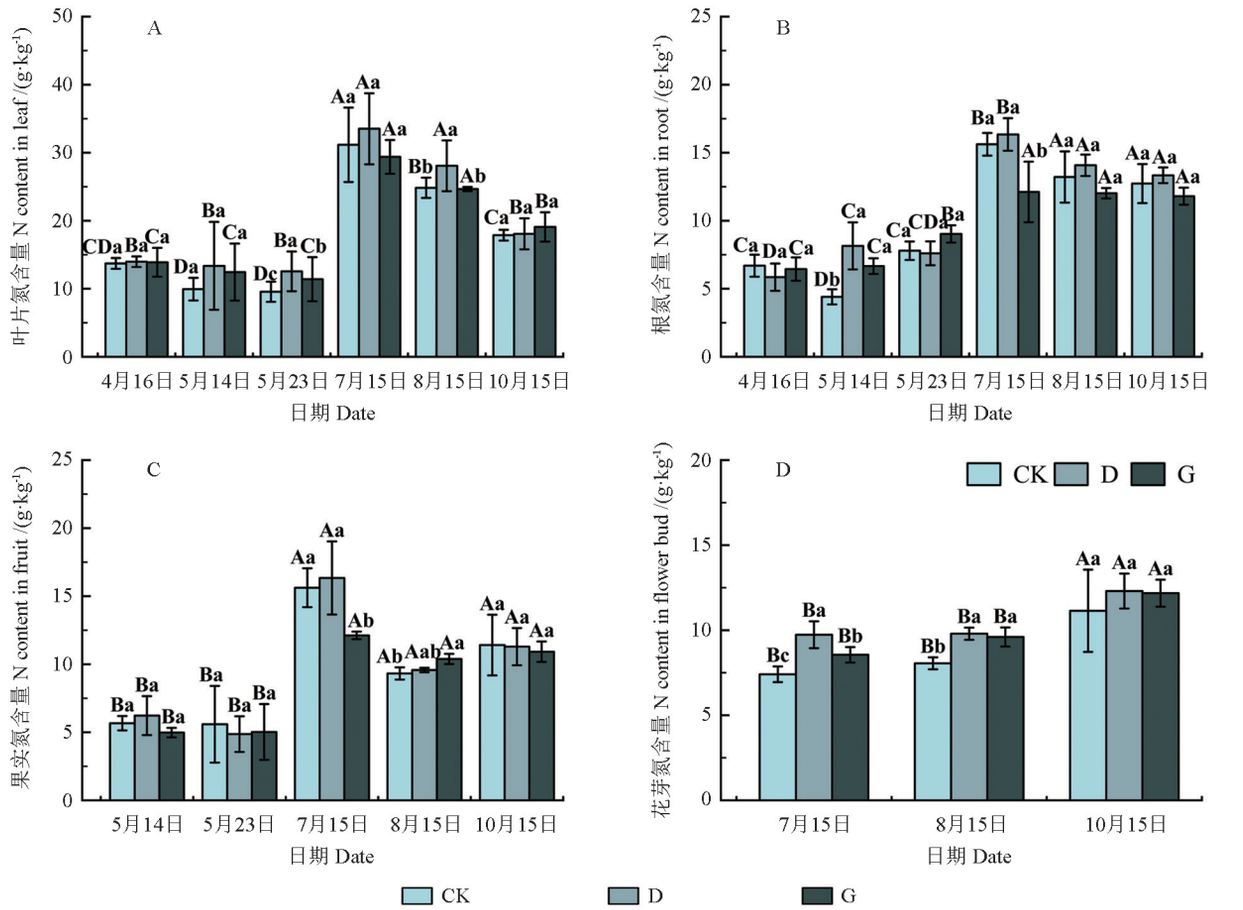
2.2　施肥方式对油茶树体养分的影响

2.2.1　施肥方式对油茶氮含量的影响

施肥处理下油茶各器官氮含量随时间的变化如图 2 所示。叶、根、果及花芽氮含量在不同施肥方式间存在显著差异（$P < 0.05$），但各器官随时间的变化规律有所不同。从叶片来看（图 2A），随着生长时间的延长，各处理氮含量的变化趋势大致相同，4—7 月，氮养分逐渐积累，之后含量下降；穴施方式的含量整体更高；5 月和 8 月穴施较沟施和 CK 更高，说明穴施可使春梢生长后期和油脂转化期叶片维持更多的氮养分。由图 2B 可以看出，根系氮养分对施肥方式的响应差异主要体现 4—5 月，与 4 月中旬相比，5 月中旬 CK 根氮含量下降了 33.45%。沟施基本持平，穴施则有所提高，说明施肥有利于春梢快速生长期根系对氮的积累，8 月 15 日后根氮含量逐渐趋于一致。从果实来看（图 2C），各处理动态变化趋势大致相同，整体呈上升趋势；7 月 15 日氮含量达到最高，此时沟施较 CK 下降了 22.43%，穴施提高了 4.60%。从花芽来看（图 2D），氮含量不断上升，施肥处理较 CK 均有所提高，7 月和 8 月达到显著水平。从整体来看，各器官氮含量随生长时期的推进，均有所提高，施肥处理促进了各器官对氮的积累，各施肥方式下不同时期叶氮和根氮均存在显著差异，且以穴施的效果更好。

2.2.2　施肥方式对油茶磷含量的影响

施肥处理下油茶各器官磷含量随时间的变化如图 3 所示。叶、根、果以及花芽磷含量在不同施肥方式间存在显著差异（$P < 0.05$）。从叶片来看（图 3A），随着生长时间的延长，各处理磷含量的变化趋势大致相同，4—10 月，磷含量不断下降，沟施的含量整体更高。4 月中旬，沟施较穴施和 CK 更高，说明沟施可使春梢快速生长期叶片维持更多的磷养分。根磷在 5 月下旬至 7 月中旬明显下降，CK、G、D 根磷含量降幅分别为 57.44%、27.73% 和 31.70%，穴施、沟施分别较 CK 高出 64.44% 和 56.28%（图 3B）。说明施肥有利于果实膨大期根系对磷的积累，减缓根系磷的消耗。从果实来看（图 3C），5 月磷含量有所上升，5 月 23 日穴施和沟施较 CK 分别上升 0.92% 和 4.58%，但差异并没有达到显著水平。从花芽来看（图 3D），7—10 月，磷含量在 8 月中旬达到最高，此阶段穴施、沟施较 CK 分别下降了 7.08% 和 2.54%，说明施肥促进花芽磷养分向其他器官转移，穴施的促进效果更好。从整体来看，根、叶、果的磷含量随着生长时期的推进均有所下降；施肥处理增加了各器官磷养分的含量，不同时期各器官对施肥方式的响应存在差异，叶片和花芽以沟施效果更好，根部和果实以穴施效果更好。



图中同一处理不同时期无相同大写字母表示显著，同一时期不同处理间无相同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$），下同。
The uppercase letters in the figure represent the differences between different periods of the same treatment,while the lowercase letters represent the differences between different treatments during the same period ($P < 0.05$). The same below.

图 2 施肥方式对油茶氮含量的影响
Fig. 2 Effect of fertilization methods on N content in *C.oleifera*

2.2.3 施肥方式对油茶钾含量的影响

施肥处理下油茶各器官钾含量随时间的变化如图 4 所示。叶、根、果以及花芽钾含量在不同施肥方式间存在显著差异（$P < 0.05$），各器官随时间的变化规律与氮养分变化规律类似。从叶片来看（图 4A），随着生长时间的延长，沟施钾含量在 4—5 月整体更高。5 月下旬至 7 月中旬钾含量明显上升，7 月与 8 月为钾含量积累高峰。在 7 月中旬，穴施较沟施和 CK 分别上升 14.71% 和 8.71%，在 8 月中旬，则分别上升 14.89% 和 16.64%，说明穴施可使果实膨大和油脂转化期的叶片积累更多的钾养分。5 月下旬至 7 月中旬为根钾明显上升期，CK、穴施、沟施根钾含量增幅分别为 148.30%、99.99% 和 193.59%（图 4B）；说明施肥均有利于春梢生长完成期至果实膨大期根系钾养分的积累，穴施的促进效果稍差。从果实来看（图 4C），钾含量出现两个明显上升阶段，5—7 月，穴施、沟施和 CK 的增幅分别为 87.46%、101.87% 和 92.65%，8—10 月分别为 51.67%、64.49% 和 65.89%；说明穴施有利于春梢生长完成期至果实膨大期钾养分的积累，沟施则有利于油脂转化至果实成熟期间钾养分的积累。从花芽来看（图 4D），钾含量不断上升，8 月沟施高于穴施，10 月则相反。穴施和沟施均高于 CK，说明施肥能促进果实油脂转化和成熟期花芽钾养分的积累。从整体来看，各器官钾含量随生长时期的推进均有所上升，施肥促进了钾养分积累，不同时期各器官钾含量对施肥方式的响应存在差异。叶片钾养分积累在春梢生长阶段以沟施促进效果更好，在果实生长阶段以穴施促进效果更好，根、果和花芽整体以沟施效果更好。

2.2.4 施肥方式对油茶可溶性糖含量的影响

施肥处理下油茶各器官可溶性糖含量随时间的变化如图 5 所示。叶、根、果及花芽可溶性糖含量在不同施肥方式间存在显著差异（$P < 0.05$），但各器官随时间的变化规律有所不同。从叶片来看（图 5A），随着生长时间的延长，可溶性糖逐渐积累，5 月和 10 月穴施较沟施和 CK 显

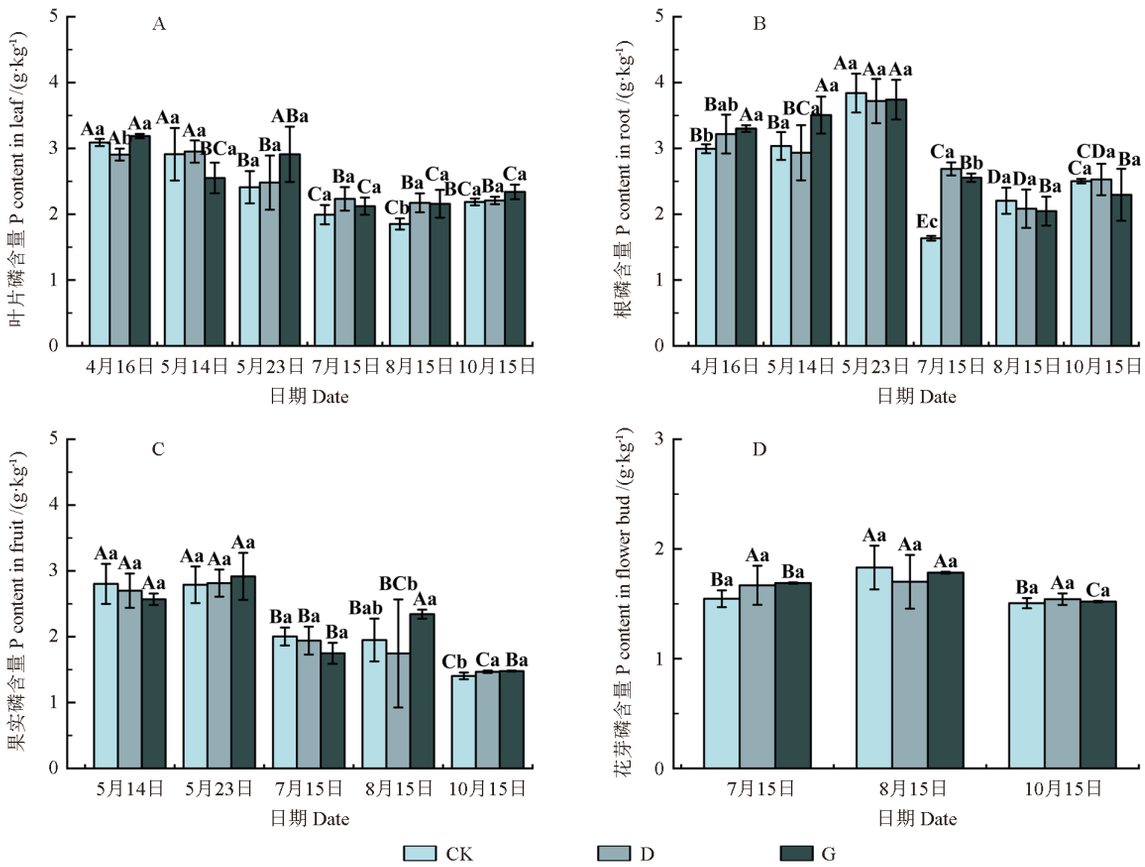


图 3　施肥方式对油茶磷含量的影响

Fig. 3　Effect of fertilization methods on P content in *C.oleifera*

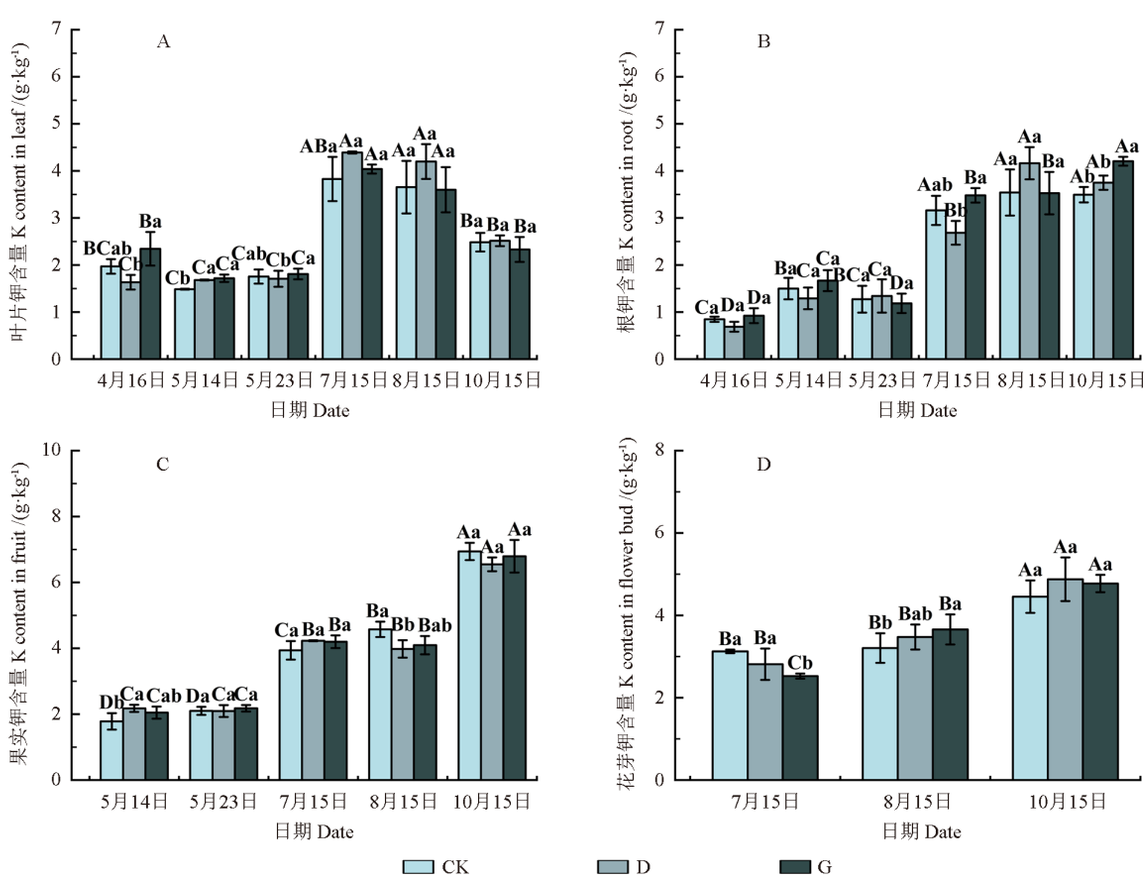


图 4　施肥方式对油茶钾含量的影响

Fig. 4　Effect of fertilization methods on K content in *C.oleifera*

著更高，说明穴施可使春梢生长后期和果实生长期叶片维持更多的可溶性糖。4—8 月，根系可溶性糖不断消耗，之后含量上升，但未超过 4 月；5 月中旬至下旬，CK、沟施和穴施根可溶性糖含量的降幅分别为 23.58%、24.32% 和 26.74%，穴施、沟施分别较 CK 下降 5.25% 和 7.17%（图 5B）；说明施肥有利于春梢生长完成期根系可溶性糖的转移。从果实来看（图 5C），各处理动态变化趋势大致相同，整体呈上升趋势；8 月 15 日可溶性糖含量达到最高，此时沟施、穴施分别较 CK 显著下降了 8.44% 和 2.80%。从花芽来看（图 5D），7—10 月穴施可溶性糖含量下降，CK 和沟施可溶性糖含量先下降后上升；在 8 月 15 日，穴施较 CK 和沟施分别显著上升了 8.87% 和 51.11%。从整体来看，根和果实可溶性糖含量在不同时期对施肥方式的响应均存在显著差异；叶可溶性糖含量整体以穴施效果更好，根、果实以沟施效果更好；沟施缓解了花芽可溶性糖含量的下降。

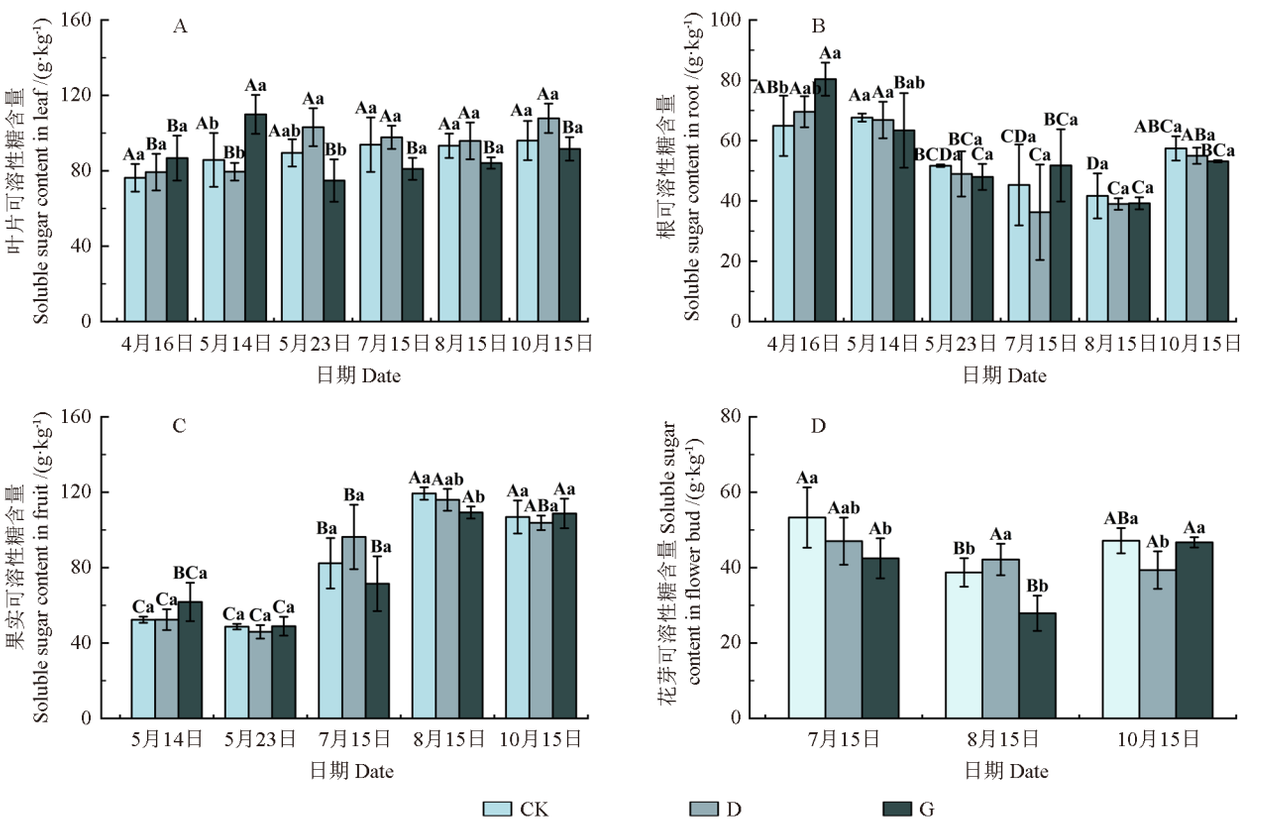


图 5 施肥方式对油茶可溶性糖含量的影响

Fig. 5 Effect of fertilization methods on soluble sugar content in *C.oleifera*

2.2.5 施肥方式对油茶可溶性淀粉含量的影响

施肥处理下油茶各器官可溶性淀粉含量随时间的变化如图 6 所示。叶、根、果以及花芽可溶性淀粉含量在不同施肥方式间存在显著差异（$P < 0.05$），各器官随时间的变化规律有所不同。从叶片来看（图 6A），5—7 月 CK、穴施和沟施的降幅分别为 64.81%、42.65% 和 27.09%，7 月穴施和沟施较 CK 上升 35.68% 和 87.76%，说明施肥能够减缓果实膨大期叶可溶性淀粉的消耗，且以沟施效果较好。4—8 月根系可溶性淀粉不断消耗；8—10 月 CK、穴施和沟施根可溶性淀粉含量的增幅分别为 148.56%、94.48% 和 248.17%，穴施、沟施分别较 CK 上升 1.89% 和 4.06%（图 6B）；说明施肥有利于果实成熟期根部可溶性淀粉的积累，且以沟施效果更好。从果实来看（图 6C），各处理动态变化趋势大致相同，整体趋势相对稳定；8 月 15 日可溶性淀粉含量最低，此时沟施、穴施分别较 CK 显著上升 22.56% 和 4.04%。从花芽来看（图 6D），可溶性淀粉含量于 7—8 月明显下降，8 月 15 日，穴施较 CK、沟施分别上升 118.05% 和 14.97%。从整体来看，叶、根可溶性淀粉含量对施肥方式的响应存在差异，果实可溶性淀粉上升幅度较小，整体以沟施的促进效果更好；花芽可溶性糖含量先下降后上升。叶、根和花芽整体以穴施的促进效果更好。

2.3 树体养分与果实经济性状的关系

为研究各时期油茶养分与果实经济性状的关

系，以叶、果、根和花芽的 N、P、K、可溶性糖、可溶性淀粉及果实经济性状指标为观测变量，构建叶、果、根、花芽养分及果实经济性状的潜在变量，利用 R 语言中的 pls-pm 包构建偏最小二乘路径模型，结果如表 1、表 2 和图 7 所示。在构建模型前，以载荷大于 0.7 为标准进行观测指标的筛选。从表 1 可以看出，果实经济性状这一潜在变量中载荷大于 0.7 的观测指标有 7 个，各时期的指标存在差异，但均涵盖了果实大小、质量及含油率相关指标，证明果实经济性状这一潜在变量的构建具有较高的可信度。由图 7 可以看出，油茶养分指标经过筛选后，在各时期下存在差异，表明在油茶生长阶段中，N、P、K、可溶性糖和淀粉在油茶不同器官中起主要作用的时期有所不同。

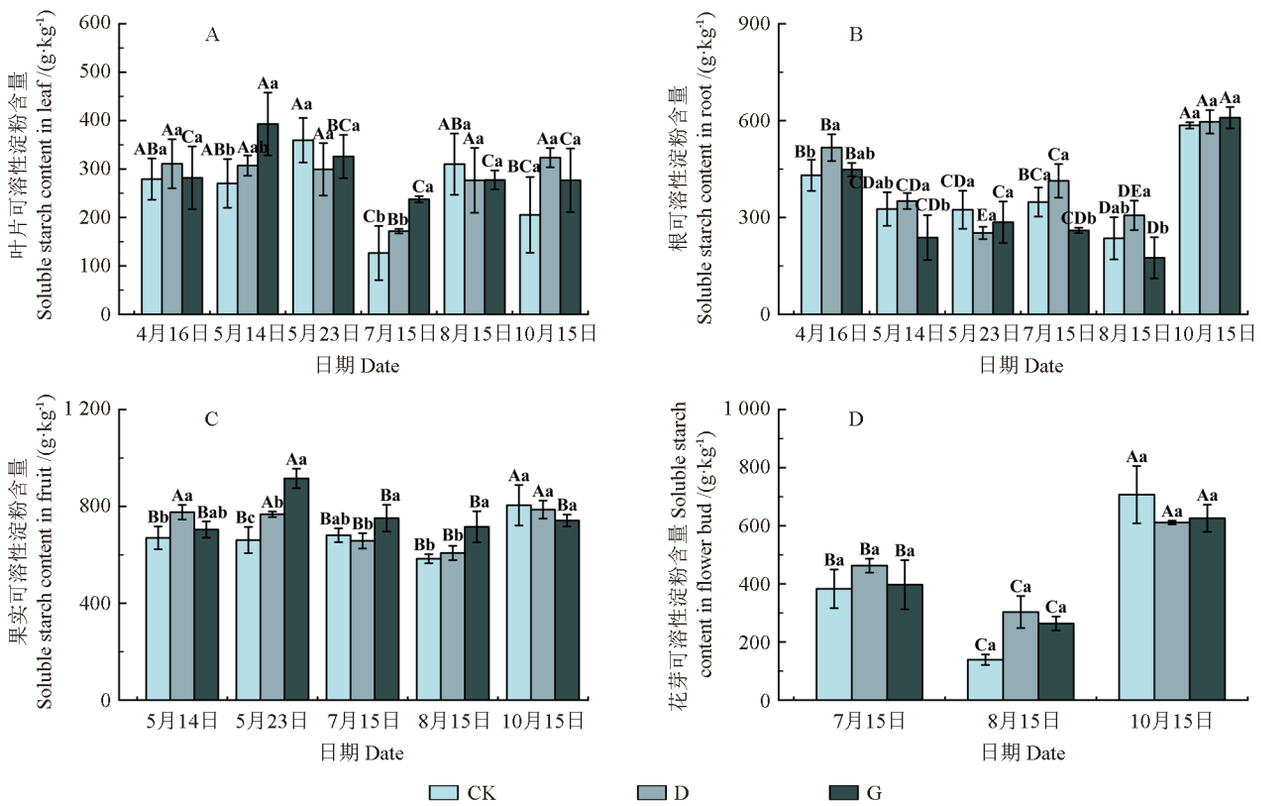


图 6　施肥方式对油茶可溶性淀粉含量的影响

Fig. 6　Effect of fertilization methods on soluble starch content in *C.oleifera*

表 1　果实经济性状在各时期的载荷

Table 1　Loading of fruit economic characteristics in different periods

经济性状 Economic characteristics	4 月 16 日	5 月 14 日	5 月 23 日	7 月 15 日	8 月 15 日	10 月 15 日
横径 Transverse diameter /mm	0.911	0.953	0.957	0.946	0.954	0.954
纵径 Longitudinal diameter /mm	0.924	0.943	0.948	0.937	0.948	0.942
果实鲜质量 Fruit fresh weight /g	0.913	0.972	0.986	0.963	0.985	0.976
种籽鲜质量 Seed fresh weight /g		0.897	0.940	0.885	0.941	0.915
果实干质量 Fruit dry weight /g		0.893	0.942	0.878	0.942	0.911
干籽含油率 Dry seed oil content /%	0.887	0.782		0.804		0.754
鲜果含油率 Fresh fruit oil content /%	0.809	0.888	0.843	0.901	0.845	0.882

根据 Gaston Sanchez[23] 研究，拟合优度（gof）＞ 0.7、R^2 ＞ 0.6 意味着路径模型拟合效果良好；高冗余意味着高预测能力。表 2 结果显示，6 个时期的拟合优度均大于 0.7，R^2 均大于 0.6，表示模型拟合结果良好。冗余指数为 0.51 ～ 0.83，表示模型能够预测 51% ～ 83% 的结果，具有很高的预测能力。

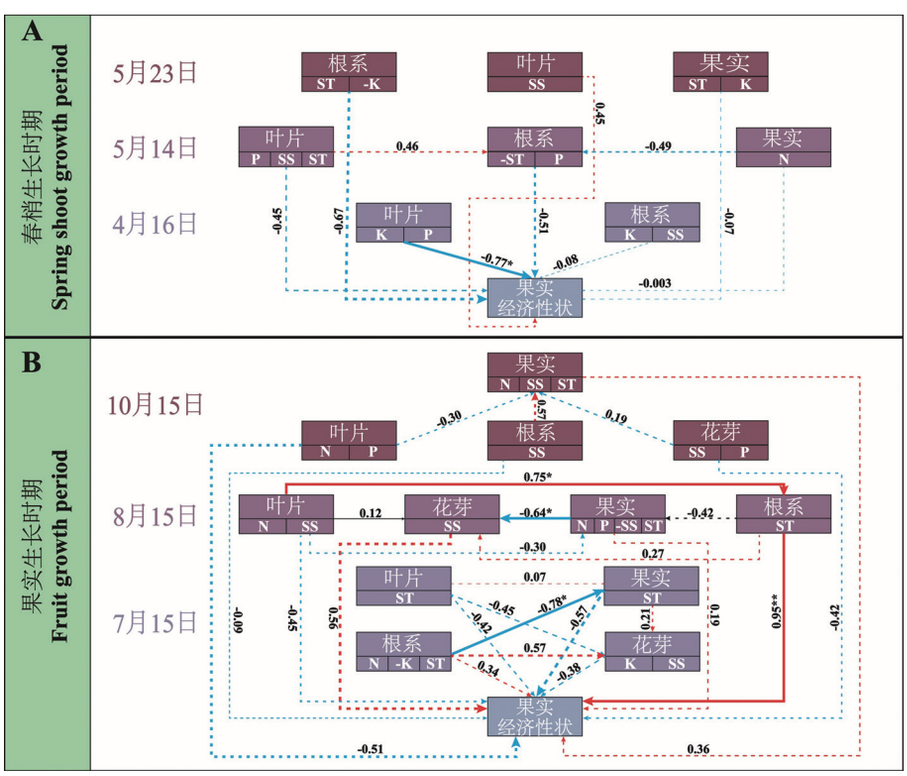
从图 7 可以看出，各器官养分对果实经济性状共有 5 条显著路径（P ＜ 0.05）。5 条显著路径分别为：在 4 月 16 日，叶片养分直接对果实经济性状产生显著负效应（-0.77），起主要作用的养分为钾、磷；在 7 月 15 日，根部养分通过显

著影响果实养分间接对果实经济性状产生正效应（0.34），起主要作用的养分为氮、钾（负值）、可溶性淀粉；在 8 月 15 日，根部养分直接对果实经济性状产生显著正效应（0.95），起主要作用的养分为可溶性淀粉；此外，叶片养分通过显著影响根部养分间接对果实经济性状产生负效应（-0.45），起主要作用的养分为氮和可溶性糖；同时，果实养分通过显著影响花芽养分间接对果实经济性状产生正效应（0.19）。4 月 16 日—5 月 14 日，叶、果、根养分均对其产生负效应，此时，叶养分对果实经济性状的影响逐渐减弱，而根养分则相反，这可能与 5 月 14 日叶、果实养分对根养分分别产生了正效应和负效应有关；叶养分在 5 月 23 日对果实经济性状产生正效应（0.45），此时根养分的负效应进一步增强；7 月 15 日—8 月 15 日根养分始终对其产生正效应（0.34、0.95）；花芽和果实养分则由负效应（-0.38、-0.57）转为正效应（0.56、0.19）；10 月 15 日果实养分对果实经济性状的正效应进一步增强，此时根养分对果实养分有较高的正效应（0.57），表明根部养分通过促进果实养分从而间接改善果实经济性状。

表 2 模型拟合结果

Table 2 Model fitting results

评价指标 Evaluation index	4 月 16 日	5 月 14 日	5 月 23 日	7 月 15 日	8 月 15 日	10 月 15 日
拟合优度 gof	0.732	0.737	0.742	0.745	0.766	0.706
相关系数 R^2	0.680	0.746	0.671	0.878	0.949	0.662
冗余指数 Redundancy index	0.510	0.612	0.589	0.717	0.833	0.545



实线表示显著路径，虚线表示不显著路径；红色箭头表示正效应路径，蓝色箭头表示负效应路径；路径宽度表示路径系数大小，路径系数为标准化路径系数。* 表示 0.05 水平下显著，即 $P < 0.05$；** 表示 0.01 水平下显著，即 $P < 0.01$。

The solid line represents a significant path, while the dashed line represents an insignificant path; The red arrow represents the positive effect path, and the blue arrow represents the negative effect path; The path width represents the size of the path coefficient, which is a standardized path coefficient. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

图 7 偏最小二乘路径模型结果

Fig. 7 Partial least squares path model results

2.4 油茶果实经济性状主成分分析

为探究施肥方式对果实经济性状的综合影响，对果实经济性状的 14 个指标进行主成分分析，结果如表 3 和表 4 所示。由表 3 可以看出，将 14 个指标转化为 3 个主成分，特征值分别为 7.682、3.200 和 1.449，累计贡献率达到 88.079%，因此，这 3 个主成分可以作为施肥方式对油茶果实经济性状影响的重要主成分。第 1 主成分主要包括 5 个果实质量指标，第 2 主成分主要包括 2 个含水率指

表 3　单项指标在主成分中的特征向量
Table 3　Eigenvectors of individual indicators in principal components

指标 Index	主成分 Principal component		
	F_1	F_2	F_3
横径 Transverse diameter /mm	0.888	0.36	-0.178
纵径 Longitudinal diameter /mm	0.631	0.543	0.494
果形指数 Fruit shape index	-0.399	0.179	0.823
果实鲜质量 Fresh fruit weight /g	0.915	0.392	-0.003
果壳鲜质量 Fresh shell weight /g	0.703	0.551	0.245
种籽鲜质量 Fresh seed weight /g	0.935	0.198	-0.204
果实干质量 Dry fruit weight /g	0.976	0.121	-0.042
种籽干质量 Dry seed weight /g	0.979	-0.006	-0.119
种仁干质量 Dry kernel weight /g	0.974	-0.117	-0.068
果实含水率 Fruit moisture content /%	-0.321	0.819	0.102
种籽含水率 Seed moisture content /%	-0.241	0.678	-0.27
干籽含油率 Dry seed oil content /%	0.446	-0.362	0.514
鲜果含油率 Fresh fruit oil content /%	0.674	-0.692	0.117
产油量 Oil production /g	0.674	-0.692	0.117
初始特征值 Initial eigenvalue	7.682	3.200	1.449
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	54.873	77.730	88.079

标以及鲜果含油率和产油量，第 3 主成分主要包括果形指数及干籽含油率。这 3 类综合指标代替了原来 12 个单项指标 88.079% 的信息。

根据主成分值及贡献率大小计算出综合得分。由表 4 可以看出，施肥方式对果实经济性状的影响由大到小分别为穴施＞沟施＞ CK，即穴施对油茶果实经济性状的改善效果最好，其次为沟施。

表 4　施肥方式综合评价
Table 4　Comprehensive evaluation of fertilization methods

处理 Treatment	F_1	F_2	F_3	综合得分 Comprehensive	排名 Rank
穴施 D	1.05	0.77	0.63	0.91	1
沟施 G	0.03	-0.09	0.06	0.02	2
对照 CK	-0.99	-0.73	-0.76	-0.90	3

3　讨　论

3.1　施肥方式对果实经济性状的影响

油茶林施肥后能够显著改善林地土壤肥力状况，促进油茶树体对养分的吸收，从而有效提高油茶果实经济性状 [24]。本研究结果显示，施肥使果实大小、生物量及产油率得到了显著提高，说明施肥能改善果实经济性状，这与黄安香等 [25] 的研究结果一致。穴施和沟施对油茶经济性状的影响存在差异，本研究结果显示，穴施显著提高果实的大小、质量及含水率；沟施下单株产油量高于穴施，但两者无显著差异。油茶果实分为果壳和种籽两部分，果壳质量与木质素的积累密切相关。晏巢等 [26] 研究发现，油茶果壳木质素积累过程在果实发育早期完成，而种籽的发育明显晚于该时期。果实发育过程中需要大量吸收土壤中的无机养分，肥料中养分的持续时间越长，果实发育越充分。本研究发现，在果实的质量组成中，穴施下果实和果壳鲜质量显著高于沟施；穴施种仁和种籽质量高于沟施，但无显著差异。说明在果实发育过程中，穴施延长肥料中养分的持续时间更长，使果实发育更加充分。这一点与彭柱青 [10] 在伦晚脐橙的研究结果一致。

3.2　施肥方式对油茶树体养分的影响

沟施和穴施对油茶树体养分的影响在油茶树体年发育周期内存在时空差异。Kulmann 等 [27] 对巨桉无性系（gpc23）的研究发现，在施肥后 90 ～ 180 d 内巨桉叶片氮含量以穴施为最高，而到 270 d 时低于对照。本研究发现，穴施能显著提高油茶春梢生长至果实油脂转化期的叶片氮含量，而在果实成熟期穴施下叶片氮含量低于沟施，这一结果与 Kulmann 的研究结果相似。同时，本研究发现，与 CK 相比，沟施在油脂转化期能显著提高果实氮含量，降低叶片氮含量，而穴施则提高果实膨大期根部氮含量。说明在果实不断成熟的过程中，适度深度的沟施能够使营养器官的氮养分转移到贮藏器官中，与丁宁等 [28] 对 5 年生‘烟富 3 /M26 / 平邑甜茶’苹果的研究结果一致。

沟施油茶叶、根磷含量整体较穴施更高，这一结果与田楠等 [17] 对雷竹的研究结果一致。此外，果实磷含量对施肥方式的响应程度不大，仅在油脂转化期时存在差异，此时沟施显著高于穴施。在果实膨大期至成熟期，穴施叶片钾含量显著高于沟施，这一结果与付倩雯等 [29] 对 5 年生骏枣的研究结果一致。在春梢快速生长期至生长完成期，沟施叶片钾含量显著高于穴施。在果实成熟期，沟施果可溶性糖含量显著高于穴施，这一结果与张誉 [30] 对冬枣的研究结果一致，而在果实膨大期和油脂转化期时沟施可溶性糖含量明显低于穴施和 CK。

3.3 油茶氮磷钾、可溶性糖、可溶性淀粉年变化规律

本研究发现，叶片氮含量年变化规律为先下降后上升再下降，果实氮含量在果实油脂转化期明显下降，花芽氮含量则逐渐上升，这一结果与王楚天 [31] 的研究结果一致。同时，本研究发现，氮自春梢生长到果实成熟不断积累，钾和氮的年变化规律相对一致，磷则有所下降。在春梢生长时期（4 月 16 日、5 月 14 日、5 月 23 日），叶磷含量逐渐下降，根磷含量则不断上升，说明在春梢生长时期，油茶自土壤吸收以及叶片当中的无机磷不断转移到根部。这一结果与曹永庆等 [32] 的结果相反，而与王楚天 [31] 的结果一致，这可能与试验林的林地土壤条件有关。磷是能量转换分子（ATP）的关键组成部分，在物质运输中发挥着重要作用 [33]。春梢生长过程中，大量的矿质营养和水分通过根系从土壤中输送至地上部用于生长发育 [34]。胡冬南等 [35] 研究发现，磷为赣西地区林地土壤首要的养分限制因子，其次为镁。在土壤有效磷不足的情况下，根系从土壤中吸收的磷含量减少，地上部的磷转移至地下部，用于根系吸收矿质营养和水分，从而导致根磷含量上升。此外，施肥后根系磷含量明显增加，说明在春梢生长时期，施肥能够缓解根部对磷的需求压力，进而缓解地上部磷供应压力，且以穴施效果更好。

叶片作为光合作用的重要器官，是可溶性糖和淀粉的“源”，将可溶性糖和淀粉通过韧皮部转运到“库”单位 [36]。本研究发现，在年生长过程中，叶片可溶性糖含量逐渐上升。油茶春梢生长完成后，果实开始进入膨大期和油脂转化期，并且伴随着花芽的分化发育，“库”的增加导致“库”对可溶性糖的需求总量逐渐增大，叶片可溶性糖含量也因此上升。此外，本研究发现，在春梢生长完成至果实生长发育阶段，果实可溶性糖含量呈先上升后下降的趋势，年生长总体含量显著上升；可溶性淀粉随生长时间的延长呈先上升后下降再上升的趋势。这一结果与向晓峰等 [37] 对‘华金’‘华硕’‘湘林 210’3 个品种的观测结果一致。花芽可溶性糖和淀粉含量整体趋势为先下降后上升，这一结果与温玥等 [38] 的研究结果一致。

3.4 油茶养分与果实经济性状的关系

油茶树体对果实经济性状产生效应的主要养分在不同时期和不同器官上存在差异。油茶“抱子怀胎”这一独特的生育特点，使得其果实发育和成熟时对矿质养分和有机养分的需求在年周期变化存在时空差异，这也导致在油茶生产实践中需要更加精准地进行养分分配和调控 [39]。本研究发现，在春梢生长阶段，除春梢生长完成期叶片养分外，其余各器官养分均对果实经济性状产生负效应，其中春梢快速生长期叶片养分对果实经济性状产生显著的负效应（-0.77*），主要养分为 K、P。这说明在春梢生长阶段，树体吸收的矿质元素及自身光合作用合成的有机营养主要作用于春梢生长而并非果实生长，与谢双岭等 [40]、曹永庆等 [32] 的研究结果一致。此外，本研究结果表明，在春梢快速生长期，穴施降低了叶和根的 P、K 含量，增加了果实中的 P、K 含量。说明在此阶段，穴施通过促进叶片和根部 P、K 含量转移至幼果当中，从而改善果实的经济性状。

本研究结果发现，在果实生长阶段，油茶树体养分对果实经济性状的效应主要集中在果实膨大期和油脂转化期。究其原因，民间常有“7 月干油、8 月干球”的俗语，且大量研究表明，在油茶果实膨大期和油脂转化期，油茶树体养分的吸收积累以及养分分配对油茶当年果实的经济性状具有显著影响 [41]。同时，本研究发现，在果实油脂转化期，果实养分对花芽养分产生显著的负效应（-0.64*），说明果实与花芽之间存在明显的养分竞争关系，此阶段花芽的主要养分为可溶性糖。究其原因，在果实油脂转化期时，花芽正处于雌雄蕊成熟期。温玥等 [38] 对‘湘林 27’和‘湘林 14’花芽分化的研究表明，在此阶段，可溶性糖是花芽分化的重要影响因子，高水平的可溶性糖有助于花芽分化。也就说明在果实油脂转化需要大量养分的同时，花芽同样需要较多的养分，且以可溶性糖为主，促使果实和花芽对养分产生明显的竞争关系。此外，结合沟施和穴施对油茶树体养分的影响以

及在此阶段树体养分对果实经济性状的显著路径结果可以发现，穴施主要提高根部养分，沟施主要提高油脂转化期果实养分，降低叶片养分。说明在此阶段，沟施主要通过促进叶片养分转移至果实当中，供给果实油脂转化进而改善果实的经济性状。

4　结　论

油茶各器官养分年变化规律有所不同，不同施肥方式通过影响不同时期油茶养分进而影响果实的经济性状。随着生长时间的延长，油茶各器官氮养分和钾养分变化规律类似，整体不断积累；根、叶、果磷养分不断消耗，花的磷含量增加；叶片可溶性糖保持相对稳定，根部和花芽不断下降，果实不断积累；叶、果、根、花芽可溶性淀粉含量呈先下降后上升的趋势。施肥可促进各器官氮、钾及可溶性淀粉的积累，提高春梢生长期根、叶、果磷含量，促进叶、果可溶性糖积累，缓解根和花芽的可溶性糖消耗。结合路径模型结果发现，沟施主要通过在油脂转化期提高果实养分和降低叶片养分进而改善果实经济性状，穴施主要通过在春梢快速生长期降低叶片养分和在果实膨大期及油脂转化期提高根部养分，进而改善果实的经济性状。通过主成分分析方法，得出穴施更有利于改善果实的经济性状，提高果实产油量，是更适合油茶林地的施肥方式。

参考文献：

[1] 庄瑞林 . 中国油茶 [M].2 版 . 北京 : 中国林业出版社 ,2008.
ZHUANG R L. Chinese *Camellia oleifera*[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House,2008.

[2] 肖凯英 , 刘娟 . 普通油茶育种研究进展 [J]. 生物灾害科学 ,2021,44(2):114-118.
XIAO K Y, LIU J. Advances in the breeding of *Camellia oleifera*[J]. Biological Disaster Science,2021,44(2):114-118.

[3] 刘健 , 龙蔚 , 陈苏徽 , 等 . 江西省油茶林资源现状与规模经营占比关系 [J]. 福建林业科技 ,2022,49(4):113-119.
LIU J, LONG W, CHEN S H, et al. Study on relationship between the present situation of *Camellia oleifera* forest resources and the proportion of scale management in Jiangxi Province[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology,2022,49(4):113-119.

[4] 朱丛飞 , 罗汉东 , 胡冬南 , 等 . 不同施肥模式对油茶春梢生长和叶片酶活性的影响研究 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2017,37(6):39-44.
ZHU C F, LUO H D, HU D N, et al. Effects of different fertilization modes on growth and leaves enzyme activity of *C. oleifera*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017,37(6):39-44.

[5] 谭好超 , 马帅 , 沈聪聪 , 等 . 葡萄园有机肥链式反转开沟施肥机研制与试验 [J]. 农业工程学报 ,2024,40(16):12-23.
TAN H C, MA S, SHEN C C, et al. Design and experimentation of a chain reversal trenching and fertilization device for vineyard organic fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2024,40(16):12-23.

[6] 陈平录 , 苏江红 , 许静 , 等 . 丘陵果园立式螺旋开沟施肥机设计与试验 [J]. 农业机械学报 ,2024,55(10):223-233,274.
CHEN P L, SU J H, XU J, et al. Design and experiment of hilly orchard vertical spiral ditching fertilizing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(10):223-233,274.

[7] 周文琪 , 刘存良 , 安天昊 , 等 . 强排式精量穴施肥装置设计与试验 [J]. 东北农业大学学报 ,2025,56(1):112-123.
ZHOU W Q, LIU C L, AN T H, et al. Design and experiment of forced discharge type precision hole fertilization device[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2025,56(1):112-123.

[8] 古冬冬 , 张征 , 杨杰 , 等 . 扎穴施肥单体仿真分析与试验 [J]. 中国农机化学报 ,2024,45(2):55-61.
GU D D, ZHANG Z, YANG J, et al. Simulation analysis and test of piercing fertilization monomer[J].Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(2):55-61.

[9] 郑师衡 , 孔庆博 , 李容子 , 等 . 四川雅安 36 份野生油茶资源性状的综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(1): 90-101.
ZHENG S H, KONG Q B, LI R Z, et al. Comprehensive evaluation of 36 wild *Camellia oleifera* resources traits in Ya'an, Sichuan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(1):90-101.

[10] 彭柱青 . 打孔施肥对柑橘果实产量、品质及养分利用的影响 [D]. 武汉 : 华中农业大学 ,2022.
PENG Z Q. Effects of drilling fertilization on fruit yield, quality and nutrient utilization in citrus[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2022.

[11] 李昌禹 , 秦红艳 , 何艳丽 , 等 . 沟施硅肥对佳绿软枣猕猴桃果实品质及耐贮性的影响 [J]. 中国果树 ,2024(12):69-73.
LI C Y, QIN H Y, HE Y L, et al. Effects of application of silicon fertilizer by trenching on fruit quality and storability of 'Jialü' *Actinidia arguta*[J]. China Fruits,2024(12):69-73.

[12] 孙奔 , 周运超 , 邓梅 , 等 . 不同林龄油茶林土壤酶化学计量特征及微生物养分限制因素 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(5): 1233-1241.
SUN B, ZHOU Y C, DENG M, et al. Variations in soil enzyme stoichiometry and microbial nutrient limitations in *Camellia*

oleifera plantations with different ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(5):1233-1241.

[13] 彭璞 , 贾剑波 , 陆佳 , 等 . 生草栽培对油茶林土壤肥力及活性碳组分的影响 [J]. 应用生态学报 ,2025,36(2):504-512.
PENG P, JIA J B, LU J, et al. Effects of grass cultivation on soil fertility and labile carbon fractions in *Camellia oleifera* forests[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2025,36(2):504-512.

[14] 孙卓 . 不同有机肥施用模式提升退化黑土生态生产功能的机制 [D]. 武汉 : 华中农业大学 ,2024.
SUN Z. Effects of different manure application strategies on the ecological and production functions of degraded black soils[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2024.

[15] 黑儿平 . 耕作与施肥方式对稻茬冬油菜产量和土壤特性的影响 [D]. 雅安 : 四川农业大学 ,2024.
HEI E P. Effects of tillage and fertilization method on yield and soil characteristics of winter rapeseed in the paddy fields[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University,2024.

[16] 艾晨曦 , 刘萍 , 邹养军 . 土壤局部改良对陕北山地果园苹果生长发育及果实品质的影响 [J]. 陕西农业科学 ,2023,69(10):70-75,94.
AI C X, LIU P, ZUO Y J, et al. Effects of local soil improvement on growth and fruit quality of mountainous apple orchards of in northern Shaanxi[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2023,69(10):70-75,94.

[17] 田楠 , 胡俊靖 , 华锦欣 , 等 . 缓释肥及其施用方式对雷竹林肥料吸收利用的影响 [J]. 浙江林业科技 ,2024,44(1):42-47.
TIAN N, HU J J, HUA J X, et al. Effect of slow release fertilizer and application method on the absorption and utilization of *Phyllostachys praecox* 'Prevernalis'[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology,2024,44(1):42-47.

[18] 植可翔 , 关欣 , 黄苛 , 等 . 杉木不同组织 / 器官非结构性碳水化合物季节变化特征及其对修枝的响应 [J]. 林业科学研究 , 2025,38(1):150-159.
ZHI K X, GUAN X, HUANG K, et al. Seasonal variation of non-structural carbohydrate in different tissues/organs of Chinese fir and its response to pruning[J]. Forest Research,2025,38(1):150-159.

[19] 薛磊 , 凡莉莉 , 赖金莉 , 等 . 不同施肥模式对沿海沙地鼓节竹发笋期生长和生理特性的影响 [J]. 江苏农业科学 ,2019,47(1):97-100.
XUE L, FAN L L, LAI J L, et al. Effects of different modes of fertilization on growth and physiological characteristics of Bambusa tuldoides at shooting period in coastal sandy land[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2019,47(1):97-100.

[20] 白红 . 钾肥和注射施肥对桃园土壤环境及果实产量品质的影响 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2016.
BAI H. Effects of potassium and injection fertilizing on soil environment, fruit yield and quality of peach orchard[D]. Yangling: Northwest A & F University,2016.

[21] 郭红艳 , 谭新建 , 田丰 , 等 . 油茶成花启动与春梢生长的关系 [J]. 林业科学研究 ,2022,35(3):123-130.
GUO H Y, TAN X J, TIAN F, et al. The Relationship between floral initiation and spring-shoot growth in *Camellia oleifera*[J]. Forest Research,2022,35(3):123-130.

[22] 李晓钟 , 王欢 . 互联网对我国经济发展影响的区域差异比较研究 [J]. 中国软科学 ,2020(12):22-32.
LI X Z, WANG H. A comparative study on the regional differences of the effect of internet on China's economic development[J]. China Soft Science,2020(12):22-32.

[23] SANCHEZ G. PLS path modeling with R[M/OL]. Trowchez Editions. Berkeley,2013,http://www.gastonsanchez.com/PLS Path Modeling with R.pdf.

[24] 周裕新 . 油茶营养诊断及平衡施肥效应研究 [D]. 南昌 : 江西农业大学 ,2013.
ZHOU Y X. Study of nutrition diagnosis and balanced fertilization of *Camellia oleifera*[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2013.

[25] 黄安香 , 卢香 , 王忠伟 , 等 . 施肥对油茶养分利用和经济性状的影响 [J]. 森林与环境学报 ,2023,43(6):642-650.
HUANG A X, LU X, WANG Z W, et al. Effects of fertilizer application on nutrient utilization and economic traits of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Forest and Environment,2023,43(6):642-650.

[26] 晏巢 , 姚小华 , 殷恒福 , 等 . 油茶果实生长发育动态和木质素积累规律 [J]. 江西农业大学学报 ,2020,42(4):788-801.
YAN C, YAO X H, YIN H F, et al. Fruit development dynamics and lignin accumulation law of oil tea[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2020,42(4):788-801.

[27] DE SOUZA KULMANN M S, STEFANELLO L O, ARRUDA W S, et al. Nitrogen supply methods affect the root growth dynamics in *Eucalyptus grandis*[J]. Forest Ecology and Management, 2020,473:118320.

[28] 丁宁 , 陈倩 , 许海港 , 等 . 施肥深度对矮化苹果 ^{15}N- 尿素吸收、利用及损失的影响 [J]. 应用生态学报 ,2015,26(3):755-760.
DING N, CHEN Q, XU H G, et al. Effect of fertilization depth on ^{15}N-urea absorption, utilization and loss in dwarf apple trees[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(3):755-760.

[29] 付倩雯 , 宋锋惠 , 史彦江 , 等 . 不同施肥方式对枣园土壤及叶片养分含量的影响 [J]. 新疆农业科学 ,2018,55(3):448-456.
FU Q W, SONG F H, SHI Y J, et al. Effects of different fertilization on soil nutrient content and leaves in jujube orchard[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2018,55(3):448-456.

[30] 张誉 . 不同施肥方式对冬枣生长及果实品质的影响 [D]. 晋中 : 山西农业大学 ,2016.
ZHANG Y. Study on influence of different fertilizer-applying technologies on growing of winter-jujubes and quality of its fruit[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University,2016.

[31] 王楚天 .8 个油茶品种形态和氮磷钾营养特征差异及其相关性研究 [D]. 南昌 : 江西农业大学 ,2017.
WANG C T. Variation and correlation of morphology and nutrient characteristic of nitrogen, phosphorus and potassium in eight *Camellia oleifera* Abel strains[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2017.

[32] 曹永庆 , 任华东 , 林萍 , 等 . 油茶树体对氮磷钾元素年吸收和积累规律的研究 [J]. 林业科学研究 ,2012,25(4):442-448.
CAO Y Q, REN H D, LIN P, et al. Research on annual changes of nitrogen, phosphorous, potassium absorption and accumulation in oil-tea camellia tree[J]. Forest Research,2012,25(4):442-448.

[33] 施晓云 . 不同品种油茶林氮磷钾养分分配规律的研究 [D]. 南昌 : 江西农业大学 ,2013.
SHI X Y. Study on the nitrogen, phosphorus and potassium distributions in different varieties of *Camellia oleifera* forests[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University,2013.

[34] 李琳 . 中国天然林与人工林总磷的分布格局及其影响因素 [D]. 南京 : 南京信息工程大学 ,2023.
LI L. Distribution pattern and influencing factors of total phosphorus in natural forests and plantation forests in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023.

[35] 胡冬南 , 刘亮英 , 张文元 , 等 . 江西油茶林地土壤养分限制因子分析 [J]. 经济林研究 ,2013,31(1):1-6.
HU D N, LIU L Y, ZHANG W Y, et al. Analysis on limiting factors of soil nutrient of *Camellia oleifera* forest in Jiangxi[J]. Non-wood Forest Research,2013,31(1):1-6.

[36] HOCH G, POPP M, KRNER C. Altitudinal increase of mobile carbon pools in *Pinus cembra* suggest sink limitation of growth at the Swiss treeline[J]. Oikos,2002,98(3):361-374.

[37] 向晓峰 , 陈洁宇 , 姜毅 , 等 . 油茶果实发育成熟过程中果皮黄酮物质含量的变化规律 [J]. 经济林研究 ,2023,41(2):83-90.
XIANG X F, CHEN J Y, JIANG Y, et al. Changes of flavonoids during the development and maturation of *Camellia oleifera* peel[J]. Non-wood Forest Research,2023,41(2):83-90.

[38] 温玥 , 郝志超 , 孙天雨 , 等 . 油茶花芽分化过程中营养物质和内源激素的变化规律 [J]. 经济林研究 ,2023,41(4):31-39.
WEN Y, HAO Z C, SUN T Y, et al. Changes of nutrients and endogenous hormones during the flower bud differentiation of *Camellia oleifera*[J]. Non-wood Forest Research,2023,41(4): 31-39.

[39] 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.

[40] 谢双岭 , 江春艳 , 刘洲莹 , 等 . 环割油茶树春梢性状与根叶养分相关性分析 [J]. 安徽农业大学学报 ,2024,51(2):183-190.
XIE S L, JIANG C Y, LIU Z Y, et al. Correlation analysis between spring shoot characters and root leaf nutrients of *Camellia lieifera* Abel. by girdling treatments[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2024,51(2):183-190.

[41] 王毓曼 , 吴怀远 , 谢双岭 , 等 . 环割时间和环割量对油茶果实养分及经济特性的影响 [J]. 江西农业大学学报 ,2023,45(6): 1443-1453.
WANG Y M, WU H Y, XIE S L, et al. Effects of girdling time and amount on fruit nutrient and economic characteristics of *Camellia oleifera*[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023,45(6):1443-1453.

[本文编校：吴　彬]