

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.2026.09.004

论文标题： 海南岛油茶主产区林地土壤特征及肥力评价

作　　者： 王 鑫，曾亚红，符惠娴，等

收稿日期： 2025-08-29

引文格式： 王鑫,曾亚红,符惠娴,等.海南岛油茶主产区林地土壤特征及肥力评价[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):36-50.

Wang X, Zeng Y H, Fu H X, et al. Evaluation of soil characteristics and fertility in forest land of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):36-50.

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

施肥方式对油茶树体养分及果实经济性状的影响

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

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*

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

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.004 http: //qks.csuft.edu.cn

海南岛油茶主产区林地土壤特征及肥力评价

王 鑫[1, 2]，曾亚红[1, 2]，符惠娴[1, 2]，郑宏斌[1, 2]，陈国德[1, 2]，苟志辉[1, 2]，
孙秀东[1, 2]，农寿千[1, 2]，田 蜜[1, 2]

[1. 海南省林业科学研究院（海南省红树林研究院），海南 海口 571100；
2. 海南文昌森林生态系统定位观测研究站（文昌森林生态系统海南省野外科学观测研究站），海南 文昌 571300]

摘 要：【目的】通过对海南岛油茶主产区林地土壤特征状况的系统分析，揭示海南岛主要油茶林地土壤养分的地理分布特征，并综合评估海南岛油茶林地的土壤特性及肥力水平。【方法】测定海南岛油茶主产区 15 个样地的土壤物理指标，包括容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、含水率（质量 / 体积）、毛管最大持水量、田间持水量、饱和含水量及土壤固液气三相比例、pH 值、有机碳、有机质、全氮、全磷、全钾、硝态氮、铵态氮、碱解氮、有效磷、速效钾、缓效钾、阳离子交换量、微生物量氮、微生物量碳。采用 Duncan 多重比较法分析各指标间差异显著性，通过相关性热图进行可视化分析，运用主成分分析（PCA）提取主成分，计算综合得分并进行排序。【结果】HK-1、CM-2 的相对含水量最高，为 62.54% ～ 67.15%。在土壤固液气三相中，HK 系列（HK-1、HK-2）固体物质占比最低（39.21% ～ 43.05%），空气含量较高（26.48% ～ 30.23%）；HK-2 总孔隙度（60.79%±4.48%）、含水率（32.35%±0.65%）、全磷含量（1 222.66±113.41 mg·kg^{-1}）和速效钾含量（210.80±1.61 mg·kg^{-1}）最高，QH-3 容重（1.69±0.13 g·cm^{-3}）最高，CM-2 的有机碳含量（24.13±0.45 g·kg^{-1}）、有机质含量（41.60±0.76 g·kg^{-1}）、阳离子交换量（8.89±0.35 cmol^{+}·kg^{-1}）及微生物量碳含量（544.35±2.60 mg·kg^{-1}）均为最高，DA-2 的 pH 值（6.88±0.05）最高，BT-2 的全氮含量（1.83±0.18 g·kg^{-1}）和微生物量氮含量（54.40±3.31 mg·kg^{-1}）最高，QH-1 的硝态氮含量（53.34±1.12 mg·kg^{-1}）最高。不同样地土壤质量差异显著，综合得分与排名可有效区分质量等级，HK-2 的土壤肥力最优。【结论】海南岛油茶主产区不同样地间的土壤物理性质与营养指标存在显著差异。其中，样地 HK-2 和 HK-1 的综合土壤功能表现最优，而 CM-2、BT-2、HK-2 在关键养分指标方面尤为突出。相比之下，样地 WZS-1、CM-1、QH-3 则存在土壤紧实、养分匮乏或强酸化等问题。研究结果为土壤资源的精准管理、分类修复及可持续利用提供数据支撑。

关键词：海南岛；油茶林地土壤；土壤特征；评价

中图分类号：S794.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)09-0036-15

Evaluation of soil characteristics and fertility in forest land of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

Wang Xin[1,2], Zeng Yahong[1,2], Fu Huixian[1,2], Zheng Hongbin[1,2], Chen Guode[1,2], Gou Zhihui[1,2], Sun Xiudong[1,2],
Nong Shouqian[1,2], Tian Mi[1,2]

[1. Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou 571100, Hainan, China;
2. Hainan Wenchang Forest Ecosystem Observation and Research Station, Wenchang 571300, Hainan, China]

Abstract:【Objective】Through the analysis of soil characteristics in main Camellia oil producing areas in Hainan Island, this paper aims to reveal the geographical distribution characteristics of nutrients in Camellia oil forest soil in Hainan Island, and comprehensively evaluates the soil characteristics and fertility in Camellia oil forest land in Hainan Island.【Method】The study measured 15 sample plots from the main Camellia oil production areas in Hainan Island, evaluating key parameters including bulk density, total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity, moisture content (weight/volume), maximum capillary water retention, field water retention, saturated moisture content, soil solid-liquid-gas ratio, pH, organic carbon, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, alkaline-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, fast-acting potassium, slow-

收稿日期（Received）：2025-08-29 **修订日期**（Revised）：2025-10-09
基金项目：海南省省属科研院所技术创新项目（KYYSLK2023-004）；海南省院士创新平台科研专项（YSPTZX202001）。
第一作者：王鑫（1079987249@qq.com），工程师，硕士。 **通信作者：**田蜜（mitian@hnaf.ac.cn），高级工程师，硕士。
引文格式：王鑫 , 曾亚红 , 符惠娴 , 等 . 海南岛油茶主产区林地土壤特征及肥力评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):36-50.
Wang X, Zeng Y H, Fu H X, et al. Evaluation of soil characteristics and fertility in forest land of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):36-50.

release potassium, cation exchange capacity, microbial nitrogen biomass, and microbial carbon biomass. Significant differences were analyzed using Duncan's multiple comparisons, visualized through correlation heat maps, and principal component analysis (PCA) was conducted to extract principal components. Comprehensive scores were calculated for ranking purposes.【Result】The soil samples showed significant variations in moisture content: HK-1 and CM-2 had the highest relative moisture levels (62.54%-67.15%). Among the three phases (solid, liquid, and gas), the HK series (HK-1 and HK-2) contained the lowest proportion of solid matter (39.21%-43.05%) but higher air content (26.48%-30.23%). HK-2 demonstrated the highest total porosity [(60.79±4.48)%], weight moisture content [(32.35±0.65)%], total phosphorus (TP) (1 222.66±113.41 $mg·kg^{-1}$), and available potassium (AK) (210.80±1.61 $mg·kg^{-1}$). QH-3 recorded the highest bulk density (1.69±0.13 $g·cm^{-3}$), while CM-2 showed the highest organic carbon (OC) (24.13±0.45 $g·kg^{-1}$), organic matter (OM) (41.60±0.76 $g·kg^{-1}$), cation exchange capacity (CEC) (8.89±0.35 $cmol^{+}·kg^{-1}$), and maximum specific binding capacity (MBC) (544.35±2.60 $mg·kg^{-1}$). DA-2 had the highest pH value (6.88±0.05), BT-2 exhibited the highest total nitrogen (TN) (1.83±0.18 $g·kg^{-1}$) and maximum binding capacity (MBN) (54.40±3.31 $mg·kg^{-1}$), while QH-1 showed the highest nitrate nitrogen (NO_3-N) (53.34±1.12 $mg·kg^{-1}$). Significant differences in soil quality were observed across different sample plots, with comprehensive scoring and ranking effectively distinguishing quality grades, confirming HK-2 as the most fertile.【Conclusion】Significant discrepancies in soil physical properties and nutrient profiles were identified across the principal oil-tea camellia cultivation areas of Hainan Island. Among the sampled plots, HK-2 and HK-1 exhibited the most favorable integrated soil functionality, whereas CM-2, BT-2, and HK-2 demonstrated particularly superior performance in key nutrient indicators. In contrast, plots WZS-1, CM-1, and QH-3 were characterized by pronounced soil compaction, nutrient deficiency, or strong acidification. These findings provide a critical scientific foundation for the precision management, targeted amelioration, and sustainable utilization of soil resources in oil-tea camellia production systems..

Keywords: Hainan island; *Camellia* forest soil; soil characteristics; evaluation

油茶 *Camellia oleifera* 又名普通油茶、茶籽树、白花茶、茶油树、中果油茶、野油茶、山油茶、单籽油茶，是山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia* 多年生常绿小乔木，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植物，素有“东方橄榄油”之美誉，是我国南方丘陵地区特有的木本油料资源树种，也是国家大力倡导发展的经济林木，对提升国内食用油供给、保障国家粮油安全具有长远的战略意义 [1-3]。油茶有 2 300 余年的栽培历史，广泛种植于我国的 16 个省（区）1 100 多个市（县），因其经济价值高、用途广、适应性强、综合开发潜力大，被称为“铁杆庄稼”“绿色油库”，在我国国民经济和环境建设中起着重要的作用 [4-6]。然而，土壤养分状况显著影响油茶林生产力和可持续经营水平 [7-9]。因此，深入了解油茶林地的土壤养分特性，可以为油茶的科学管理和产业的可持续发展提供科学依据。

土壤养分是作物生长发育的基础，土壤类型、养分水平以及养分循环状况会直接影响油茶林的生理特性和生产力水平。在不同地区的油茶林地中，土壤养分的含量和比例存在显著差异 [10]。以湖南油茶主产区为例，土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量表现出较大的地域差异，这些差异可能与当地的气候条件、土壤类型及人类活动等多种因素有关 [11]。此外，土壤全氮、全磷、全钾含量差异可直观反映土壤肥力水平，进而影响油茶光合效率与养分吸收利用 [12]。土壤肥力的高低直接影响植物生长，开展土壤肥力质量评价可以预测林地的生产潜力，为林地抚育管理提供数据支撑。目前，土壤肥力质量评价方法较多，其中应用最多的是综合指数法和内梅罗指数法，评价结果能够直观反映林木的生长发育状况 [13]。本研究通过对海南岛主要油茶林地土壤养分状况的调查和分析，揭示海南岛主要油茶林地土壤养分的空间分布特征，综合评估海南岛油茶林地的土壤养分状况及肥力质量，为油茶产业的可持续发展提供科学依据和技术支持。研究结果有助于优化油茶林的管理策略、提高单位面积产量，对保障国家粮油安全、促进农村经济发展和环境保护均具有重要现实意义。

1 研究区概况

海南岛位于中国的最南部（108°38′～111°05′ E，18°10′～20°10′ N），属热带海洋性季风气候，全岛年均气温为 22～27 ℃，雨水充沛，年均降水量在 1 600 mm 以上，干湿季明显，台风活动频繁。全岛土壤类型以砖红壤、水稻土、赤红壤等为主 [14-15]。海南岛整体地形呈“中心凸出、四周平坦”的穹隆状格局，地形以山地和丘陵为主，山地多位于岛屿中心偏南，大部分海拔为 500～800 m。海南岛有独特的热带山地雨林和季雨林生态系统，植被资源丰富，生态系统复杂多样 [16]。

2 研究方法

2.1 样品采集

土壤取样参照《森林土壤样品的采集与制备》

（LY/T 1210—1999）[17]、《土壤质量 土壤采样技术指南》（GB/ T 36197—2018）[18] 和《土壤质量 土壤采样程序设计指南》（GB/T 36199—2018）[19]。2024 年 10 月，每个市（县）选取 1 ～ 3 块油茶种植地进行采样，采用蛇形取样法，采集 0 ～ 20 cm 土壤样品。其中，采用环刀法测定土壤容重等指标，同时采集该层混合土样，将各采样点的土壤充分混合，制备代表性混合土壤样品，用于土壤营养元素含量测定 [17]。同时将土壤样品带回实验室，置于阴凉干燥处，自然风干后过 2.000 mm（10 目）和 0.149 mm（100 目）筛，备用。采样地信息如表 1 所示。

表 1 采样地基本信息
Table 1 Information sheet of sampling site

序号 No.	样品编号 Sample No.	地址 Address	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude / m	备注 Remarks
1	BT-1	保亭黎族苗族自治县什玲镇八村	109°43′49.7457″	18°44′58.8527″	200	2019 年种植，3 m×4 m，3.3 hm^2，槟榔混交，嫁接苗
2	BT-2	保亭黎族苗族自治县什岭镇八村村委会毛辉村	109°44′59.1946″	18°44′57.7921″	203	2019 年种植，3 m×4 m，2.1 hm^2，琼海种源，实生苗
3	CM-1	澄迈县金江镇后岭村	109°54′36.7698″	19°41′41.2699″	69	2019 年种植，4 m×4 m，20 hm^2，候臣系列，嫁接苗
4	CM-2	澄迈县文儒镇	110°04′51.1112″	19°35′06.3764″	98	2019 年种植，4 m×4 m，3.3 hm^2，候臣系列，嫁接苗
5	DA-1	定安县富文镇坡寨墟	110°16′32.5234″	19°35′05.7819″	129	2021 年种植，4 m×5 m，8 hm^2，海大 1 号，嫁接苗
6	DA-2	定安县富文镇	110°14′00.1381″	19°28′39.4358″	71	2019 年种植，4 m×4 m，20 hm^2，本地种，嫁接苗
7	DZ-1	儋州市南丰镇水尾村	109°29′16.5747″	19°24′57.3919″	339	2019 年种植，4 m×4 m，4 hm^2，本地种，嫁接苗
8	HK-1	海口市红旗镇桃林村	110°30′59.7370″	19°51′03.5326″	29	2016 年种植，4 m×4 m，2.7 hm^2，嫁接苗
9	HK-2	海口市三门坡镇青草村	110°29′58.3367″	19°44′42.9543″	46	2014 年种植，4 m×4 m，4 hm^2，嫁接苗
10	QH-1	琼海市嘉积镇长口尾村	110°31′57.4613″	19°13′08.9911″	36	2019 年种植，3 m×4 m，4 hm^2，琼东 9 号，嫁接苗
11	QH-2	琼海市中原镇排沟村	110°30′23.2659″	19°05′13.7613″	21	2013 年种植，4 m×5 m 或 4 m×4 m，12 hm^2，本地农家种，实生苗
12	QH-3	琼海市阳江镇卢村	110°21′16.1258″	19°04′31.4607″	29	2016 年种植，4 m×4 m，33.3 hm^2，嫁接苗
13	QZ-1	琼中黎族苗族自治县营根镇新伟分场十七队	109°44′17.1773″	19°00′07.5729″	588	2017 年种植，4 m×4 m，666.7 hm^2，嫁接苗
14	TC-1	屯昌县西昌镇南遍水库	110°02′18.3014″	19°24′36.0399″	140	2014 年种植，4 m×4 m，33.3 hm^2，嫁接苗
15	WZS-1	五指山市南圣镇同甲村委会番道村	109°40′32.0618″	18°45′18.0780″	540	2016 年种植，3 m×4 m，14.5 hm^2，万宁、万全、热研等 12 个品种，嫁接苗

2.2 测定方法

土壤含水率（质量）、土壤含水量（体积）、土壤容重、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度、土壤饱和含水量、非毛管孔隙度、土壤固体物质、土壤空气含量、田间持水量、土壤相对含水量的测定采用环刀法 [20]；pH 值的测定采用电位法 [21]；有机碳、有机质含量的测定采用重铬酸钾氧化外加热法 [22]；全氮含量的测定采用全自动凯氏定氮法 [23]；全磷含量的测定采用酸溶 - 分光光度法 [24]；全钾含量的测定采用酸溶 - 火焰光度计法 [25]；有效磷含量的测定采用碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗分光光度法 [24]；速效钾、缓效钾含量的测定采用乙酸铵浸提 - 火焰光度计法 [25]；阳离子交换量的测定采用三氯化六氨合钴浸提 - 分光光度法 [26]；硝态氮含量的测定采用紫外分光光度法 [23]；铵态氮含量的测定采用分光光度法 [23]；碱解氮含量的测定采用碱解扩散法 [23]；微生物量氮、微生物量碳的测定采用熏蒸提取法 [27]。

2.3 数据分析

试验数据经 WPS 2023 软件整理后，采用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析，同时采用 Excel 2024 和 Origin 2024 软件绘制图表，开展土壤养分特性比较及 Pearson 相关性分析。采用主成分分析法对土壤基本性质进行降维计算，综合各项分析结果开展土壤综合评价。

3　结果与分析

3.1　海南岛油茶主产区林地土壤基本性质分析

土壤容重是反映土壤紧实度的核心指标，直接影响土壤通气、透水及根系伸展能力[28]。由表 2 可知，供试土壤容重范围为 0.98 ～ 1.69 g·cm^{-3}，其中 QH-3 的土壤容重（1.69±0.13 g·cm^{-3}）最高，显著高于除 CM-1（1.45±0.06 g·cm^{-3}）、QH-2（1.53±0.04 g·cm^{-3}）外的所有样品，表明该样地土壤紧实度极高，可能会限制植物根系向下延伸生长。HK-1、DZ-2、HK-2 样地的土壤容重差异不显著（$P > 0.05$），且显著低于其他组样品（$P < 0.05$），说明土壤质地疏松，通气透水性较好。

孔隙度是衡量土壤通气与保水能力的关键指标，其中毛管孔隙度决定土壤保水能力，非毛管

表 2　海南岛油茶主产区林地土壤基本性质事后多重比较分析 †

Table 2　Post-hoc multiple comparison analysis of basic properties of woodland soil in main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

样品编号 Sample number	土壤含水率（质量） Soil water content (weight) /%	土壤含水量（体积） Soil water content (volume) /%	土壤容重 Soil bulk density / (g·cm^{-3})	毛管孔隙度 Capillary porosity /%	毛管最大持水量 Hairy tube holding water /%	总孔隙度 Total porosity /%
BT-1	19.95±2.09 BCc	24.74±2.61 Bbc	1.24±0.03 BCc	35.77±2.56 BCc	28.87±2.49 BCbc	46.02±1.55 BCbc
BT-2	17.05±1.71 CDcd	22.33±2.06 Bbc	1.32±0.06 BCbc	34.85±2.67 BCc	26.61±2.44 BCc	43.35±1.79 BCc
CM-1	6.68±1.37 De	9.70±1.86 Cd	1.45±0.06 ABb	27.30±3.12 Cd	18.76±1.85 Cd	40.79±1.04 Cc
CM-2	24.62±3.94 BCb	30.58±3.95 ABab	1.25±0.07 BCc	41.28±3.29 Bbc	33.26±4.22 Bbc	50.59±3.11 Bb
DA-1	14.00±2.05 CDd	19.25±0.32 Bc	1.40±0.21 Bbc	30.46±2.67 Ccd	22.08±3.10 Ccd	43.00±2.78 BCc
DA-2	13.67±4.14 CDd	18.37±6.34 Bc	1.35±0.21 BCbc	34.79±5.97 BCc	26.11±5.41 BCc	43.99±5.62 BCc
DZ-1	19.23±0.96 Cc	21.27±1.59 Bbc	1.11±0.05 Ccd	34.11±0.09 BCc	30.88±1.22 BCbc	47.87±2.50 BCbc
HK-1	27.47±1.20 ABb	26.72±3.12 ABb	0.98±0.14 Cd	48.42±3.68 ABab	50.37±8.37 Aa	56.95±4.42 ABa
HK-2	32.35±0.65 Aa	34.31±4.22 Aa	1.06±0.15 Ccd	52.44±2.02 Aa	50.00±6.94 Aa	60.79±4.48 Aa
QH-1	16.76±0.31 CDcd	23.40±0.93 Bbc	1.40±0.08 Bbc	35.98±4.72 BCc	25.69±2.03 BCcd	46.20±4.42 BCbc
QH-2	11.25±3.29 Dd	17.19±5.01 BCc	1.53±0.04 ABab	34.30±5.41 BCc	22.48±3.67 Ccd	40.98±0.55 Cc
QH-3	16.08±4.98 CDcd	26.79±6.45 ABb	1.69±0.13 Aa	35.49±5.51 BCc	21.24±4.78 Ccd	41.93±4.78 Cc
QZ-1	25.39±0.20 Bb	30.82±1.39 ABab	1.22±0.05 BCc	42.28±1.41 Bb	34.84±0.15 Bb	49.15±1.72 BCbc
TC-1	12.29±1.40 Dd	17.10±2.30 BCc	1.39±0.06 Bbc	35.74±4.24 BCc	25.75±3.34 BCcd	42.88±6.52 BCc
WZS-1	25.22±4.20 Bb	30.66±3.52 ABab	1.22±0.11 BCc	40.37±3.81 Bbc	33.26±5.54 Bbc	44.33±4.87 BCbc

样品编号 Sample number	土壤饱和含水量 Saturated moisture /%	非毛管孔隙度 Non-fiber pore volume /%	土壤固体物质 Soil solids /%	土壤空气含量 Soil air /%	田间持水量 Field moisture capacity /(g·kg^{-1})	土壤相对含水量 Relative soil water content /%
BT-1	37.13±1.79 BCbc	10.25±3.61 ABab	53.98±1.55 ABab	21.28±4.09 Bbc	42.98±5.74 ABb	46.63±3.10 BCbc
BT-2	33.09±1.96 BCc	8.50±0.94 ABb	56.65±1.79 ABab	21.02±0.28 Bbc	42.97±4.86 ABb	39.72±0.92 BCc
CM-1	28.06±0.74 Cc	13.49±2.25 ABa	59.21±1.04 Aa	31.09±1.84 Aa	41.82±2.86 Bb	16.11±3.92 De
CM-2	40.75±4.58 BCbc	9.31±1.23 ABab	49.41±3.11 Bb	20.02±3.58 Bbc	39.51±5.03 Bb	62.54±8.11 Aa
DA-1	31.29±5.02 BCc	12.55±1.31 ABab	57.00±2.78 ABab	23.75±2.47 ABb	43.64±1.66 ABb	32.02±3.94 Ccd
DA-2	33.34±8.46 BCc	9.20±3.56 ABab	56.01±5.62 ABab	25.62±4.49 ABab	47.57±2.33 ABab	28.67±8.51 Cd
DZ-1	43.37±3.43 Bb	13.76±2.59 Aa	52.13±2.50 ABb	26.60±2.66 ABab	39.45±1.71 Bb	48.76±2.07 Bb
HK-1	59.43±11.46 Aa	8.53±2.23 ABb	43.05±4.42 BCc	30.23±7.36 ABab	40.96±1.42 Bb	67.15±4.59 Aa
HK-2	58.32±11.65 Aa	8.35±5.38 ABb	39.21±4.48 Cc	26.48±8.63 ABab	51.84±5.38 Aa	62.79±5.63 Aa
QH-1	33.03±1.59 BCc	10.22±1.02 ABab	53.80±4.42 ABab	22.80±3.49 ABb	43.89±3.88 ABb	38.43±4.24 BCc
QH-2	26.85±0.73 Cc	6.68±5.95 Bb	59.02±0.55 Aa	23.79±5.57 ABb	43.84±8.80 ABb	25.37±3.32 CDd
QH-3	25.07±4.72 Cc	6.44±1.21 Bb	58.07±4.78 Aab	15.14±2.20 Bc	45.45±1.01 ABab	35.42±11.07 Ccd
QZ-1	40.56±2.79 BCbc	6.86±2.97 Bb	50.85±1.72 ABb	18.33±2.95 Bbc	50.43±0.96 ABab	50.35±1.01 Bb
TC-1	30.91±5.16 BCc	7.14±2.36 Bb	57.12±6.52 ABab	25.78±5.19 ABab	45.43±3.91 ABab	27.24±4.37 CDd
WZS-1	36.53±6.56 BCbc	3.95±1.09 Bb	55.67±4.87 ABab	13.67±2.05 Bc	42.57±4.42 ABb	59.03±4.34 ABab

† 数据为平均值 ± 标准偏差，不同大写字母表示差异极显著（$P < 0.01$），不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。下同。
The data are mean ± standard deviation. Different capital letters indicate that the difference is extremely significant ($P < 0.01$), and different lowercase letters indicate that the difference is significant ($P < 0.05$). The same below.

孔隙度决定土壤排水与通气能力[29]。由表 2 可知，供试土壤总孔隙度变化范围为 40.79% ～ 60.79%，其中 HK-2 的总孔隙度（60.79%±4.48%）最高，CM-1（40.79%±1.04%）最低，且各组间呈显著差异（$P < 0.05$）；毛管孔隙度变化范围为 27.30% ～ 52.44%，HK-2 的毛管孔隙度（52.44%±2.02%）最高，CM-1（27.30%±3.12%）最低，各组间呈极显著差异（$P < 0.01$），表明 HK-2 土壤保水能力最强，CM-1 土壤保水能力最弱；非毛管孔隙度变化范围为 3.95% ～ 13.76%，DZ-1 的非毛管孔隙度（13.76%±2.59%）最高，WZS-1 的非毛管孔隙度（3.95%±1.09%）最低，说明 DZ-1 土壤的排水与通气能力更强，而 WZS-1 由于非毛管孔隙度偏低，可能存在积水风险。

含水率直接反映土壤当前水分状况，其中质量含水率体现土壤实际水分含量，体积含水率反映水分在土壤孔隙中的填充比例[30]。由表 2 可知，供试土壤质量含水率变化范围为 6.68% ～ 32.35%，HK-2、HK-1 的质量含水率极显著高于 CM-1（$P < 0.01$），且 HK 系列与 CM-1 之间呈极显著差异（$P < 0.01$）；体积含水率变化趋势与质量含水率一致，HK-2 极显著高于 CM-1（$P < 0.01$），表明 HK-2 土壤孔隙中的水分填充比例最高，土壤水分供应能力最强，更能满足植物生长对水分的需求。

持水量反映土壤保水潜力，相对含水量反映土壤水分满足植物需求的程度[31]。由表 2 可知，供试土壤中 HK-1 毛管最大持水量最高，为（50.37%±8.37%），而 CM-1 最低（18.76%±1.85%），说明 HK 系列土壤依靠毛管力保水的能力最强。田间持水量变化范围为 39.45% ～ 51.84%，其中 HK-2 的田间持水量极显著高于 DZ-1（$P < 0.01$），表明 HK-2 土壤在田间条件下的最大保水量最高，保水性能最优。HK-1、CM-2、HK-2 的相对含水量较高，处于适宜植物生长的水分范围；CM-1 的相对含水量最低，土壤处于严重缺水状态，可能会影响植物的正常生长。

饱和含水量是土壤孔隙完全被水分填充时的含水量，与总孔隙度直接相关[32]。由表 2 可知，供试土壤饱和含水量变化范围为 25.07% ～ 59.43%，HK-1 的饱和含水量（59.43%±11.46%）最高，而 QH-3 的饱和含水量（25.07%±4.72%）最低，各组间饱和含水量差异显著，这与总孔隙度的分布特征基本一致，印证了饱和含水量与总孔隙度呈正相关。

土壤固液气三相比例是衡量土壤结构优劣的重要指标，理想的土壤三相比例约为固体 45%、液体 25%、空气 30%[33]。由表 2 可知，CM-1 的固体物质占比（59.21%±1.04%）最高，HK-2 的固体物质占比（39.21%±4.48%）最低，其中 QH-2、CM-1 的固体物质占比显著高于理想值，表明 2 组土壤紧实度较高；HK-2 的液体占比（体积含水率）（34.31%±4.22%）最高，CM-1 液体占比（体积含水率）（9.70%±1.86%）最低，与体积含水率分析结果完全一致；CM-1 的空气含量（31.09%±1.84%）最高，WZS-1 的空气含量（13.67%±2.05%）最低。综合来看，CM-1 的空气含量高，但液体占比极低，属于“通气过剩、保水不足”土壤，不利于植物对水分的吸收利用；而 HK 系列样品的空气含量（26.48% ～ 30.23%）与液体占比（26.72% ～ 34.31%）协调，三相结构更接近理想状态，土壤肥力潜力更高。

由表 3 和图 1 可知，前 3 个主成分（PC1、PC2、PC3）的特征值均大于 1，且累计贡献率达 92.59%，可有效替代 12 个原始变量，实现高效降维与高信息保留的平衡。其中，PC1 是核心主成分，与土壤体积含水率、质量含水率、毛管孔隙度等呈强正相关，反映土壤水分存储及持水孔隙功能，单独解释 61.82% 的信息，对数据变异起主导作用；PC2、PC3 为次要主成分，PC2 与非毛管孔隙度、

表 3 海南岛油茶主产区林地土壤基本性质方差解释
Table 3 Variance interpretation of basic properties of woodland soil in main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

主要成分编号 Principal component No.	特征值 Eigenvalue	方差百分比 Percentage of variance /%	累计贡献率 Cumulative contribution rate /%
1	7.42	61.82	61.82
2	2.59	21.59	83.41
3	1.10	9.18	92.59
4	0.44	3.68	96.27
5	0.40	3.37	99.64
6	0.03	0.28	99.92
7	0.01	0.05	99.97
8	0	0.03	100.00
9	0	0	100.00
10	0	0	100.00
11	0	0	100.00
12	0	0	100.00

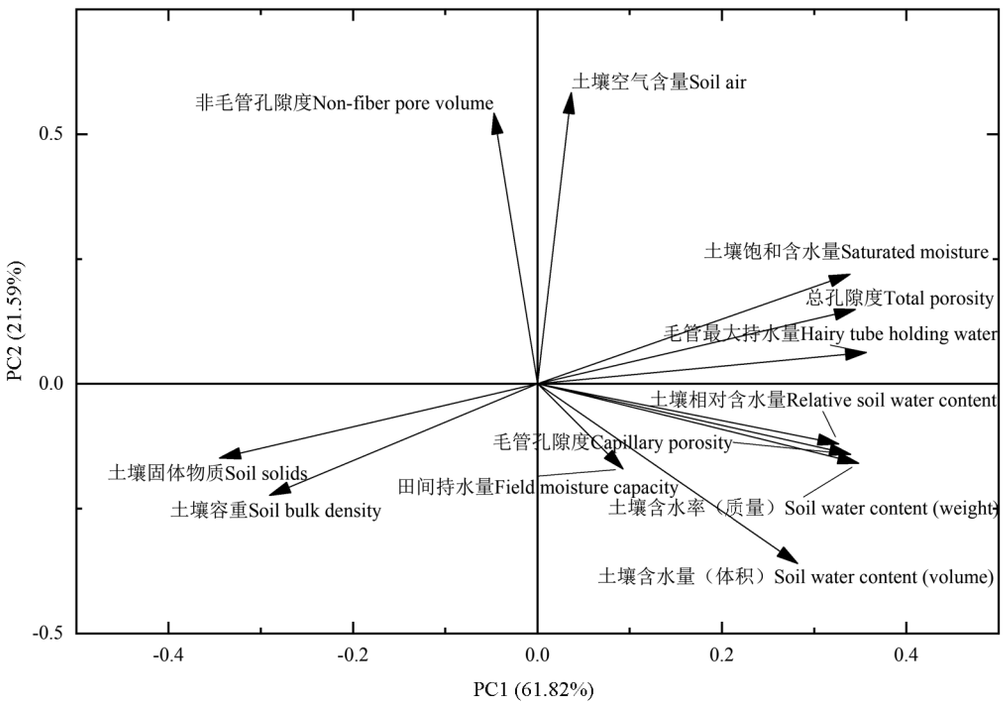


图 1　海南岛油茶主产区林地土壤基本性质指标主成分分析

Fig. 1　Graphic analysis of main components of basic soil properties in forest land of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

土壤空气含量呈正相关，与土壤容重、固体物质占比呈负相关，体现土壤通气属性与固相特征的协同作用，单独解释 21.59% 的信息；PC3 主要关联相对含水量、田间持水量等指标的细微差异，单独解释 9.18% 的信息，二者协同补充，完善对土壤各项特征的全面覆盖。

综合得分排序（表 4）显示，HK-2（1.719）、HK-1（1.417）得分显著高于其他样点，QZ-1（0.365）、CM-2（0.277）等样点得分居中，QH-3（−0.856）综合得分最低，表明不同样点间土壤功能存在显著差异。HK-2 的 PC1 得分最高（2.158），表明其具备较强的水分存储与持水能力，具体表现为毛管孔隙发达，土壤含水率、持水量均处于较高水平；PC2 得分（0.175）适中，说明土壤通气性未受抑制，形成了土壤保水与通气功能协调的优良土壤状态。HK-1 的 PC1（1.721）、PC2（1.269）得分均处于较高水平，说明其土壤结构整体均衡，可能因植被覆盖较高（如林地），有机质持续输入，有利于团粒结构形成，进而优化孔隙分布，提升土壤持水性能。QH-3 的 PC1（−0.724）、PC2（−1.727）得分均较低，表明其保水性与通气性能均偏弱，这与土壤容重高、固体物质占比大、孔隙发育不良的特征一致，土壤水分与空气的存储空间严重不足，土壤整体功能较差。

表 4　海南岛油茶主产区林地土壤基本性质指标综合得分

Table 4　Comprehensive score of basic soil properties in forest land of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

样品编号 Sample No.	综合得分 Overall score	各主成分的载荷值 Loading for each principal component		
		PC1	PC2	PC3
HK-2	1.719	2.158	0.175	1.875
HK-1	1.417	1.721	1.269	−0.437
QZ-1	0.365	0.716	−1.076	0.925
CM-2	0.277	0.672	−0.149	−1.635
DZ-1	0.262	0.110	1.486	−1.260
BT-1	−0.046	0.008	0.060	−0.653
WZS-1	−0.187	0.428	−1.701	−1.347
QH-1	−0.195	−0.290	0.038	−0.006
DA-2	−0.214	−0.532	0.184	1.210
BT-2	−0.347	−0.360	−0.258	−0.447
TC-1	−0.379	−0.666	−0.028	0.918
DA-1	−0.447	−0.785	0.525	−0.104
CM-1	−0.655	−1.475	1.598	0.401
QH-2	−0.715	−0.982	−0.396	0.505
QH-3	−0.856	−0.724	−1.727	0.056

3.2　海南岛油茶主产区林地土壤营养元素分析

土壤 pH 值是调控养分有效性和微生物活性的关键因子。由表 5 可知，土壤 pH 值范围为 3.79 ～ 6.88，各样地间存在极显著差异（$P < 0.01$）。其中，中性偏碱土壤包括 DA-2（6.88±0.05）、

表 5 海南岛油茶主产区林地土壤营养元素多重比较分析结果

Table 5 Multiple comparison analysis results of soil nutrient elements in forest land of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

样品编号 Sample No.	pH 值 pH value	有机碳 Organic carbon /(g·kg^{-1})	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	全氮 Total nitrogen /(g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus /(mg·kg^{-1})	全钾 Total potassium /(g·kg^{-1})	碳氮比 Carbon-nitrogen ratio	硝态氮 Nitrate nitrogen /(mg·kg^{-1})
BT-1	5.94±0.06 Dd	16.41±1.22 Dde	28.29±2.11 Dde	1.56±0.08 Bb	198.66±30.23 CDd	1.28±0.03 Bb	10.49±0.23 De	8.37±0.17 Cc
BT-2	5.90±0.06 Dd	14.94±0.24 DEef	25.74±0.41 DEef	1.83±0.18 Aa	214.15±34.39 CDcd	1.33±0.03 Aa	8.23±0.69 De	2.60±0.10 Fg
CM-1	4.16±0.04 Gh	6.74±0.44 Gh	11.62±0.75 Gh	0.53±0.21 Ffg	72.84±7.04 Eef	0.13±0.01 Kk	13.78±4.44 CDd	0.70±0.25 GHi
CM-2	5.24±0.06 Ef	24.13±0.45 Aa	41.60±0.76 Aa	1.20±0.11 CDcd	71.70±5.37 Eef	0.17±0.01 IJj	20.22±1.92 Bbc	2.97±0.16 Fg
DA-1	6.54±0.06 Bb	23.45±0.55 ABab	40.43±0.94 ABab	0.76±0.00 Ee	174.78±17.53 Dde	0.46±0.01 Gg	30.80±0.69 Aa	35.69±0.69 Bb
DA-2	6.88±0.05 Aa	17.12±0.75 CDd	29.51±1.29 CDd	1.14±0.01 CDcd	165.61±14.35 Dde	0.50±0.02 Ff	15.05±0.81 Ccd	0.08±0.03 Hi
DZ-1	5.94±0.05 Dd	15.26±0.85 DEe	26.31±1.46 DEe	1.15±0.04 CDcd	59.15±17.32 Ef	0.16±0.01 Jj	13.24±1.01 CDde	4.21±0.15 Ef
HK-1	5.86±0.05 Dde	18.37±0.48 Cc	31.90±0.72 Cc	1.62±0.01 ABb	598.61±38.40 Bb	0.68±0.01 Cc	11.32±0.38 CDde	4.97±0.47 Ee
HK-2	6.16±0.12 Cc	14.05±0.54 Ef	24.21±0.92 Ef	1.14±0.22 CDcd	1 222.66±113.41 Aa	0.55±0.01 Ee	12.80±3.33 CDde	6.77±0.92 Dd
QH-1	4.77±0.08 Fg	22.44±1.09 Bb	38.69±1.87 Bb	1.30±0.04 Cc	262.36±19.41 Cc	0.10±0 Kl	17.26±1.33 BCc	53.34±1.12 Aa
QH-2	5.74±0.07 De	7.94±0.34 FGg	13.69±0.58 FGg	0.56±0.01 EFf	122.54±17.79 DEe	0.19±0.01 IJij	14.22±0.84 CDcd	2.84±0.07 Fg
QH-3	6.42±0.14 Bb	8.48±0.47 Fg	14.61±0.81 Fg	0.68±0.03 EFef	94.22±13.67 DEef	0.04±0 Lm	12.54±0.60 CDde	0.85±0.14 GHhi
QZ-1	5.35±0.12 Ef	8.63±0.52 Fg	14.88±0.89 Fg	0.60±0.03 EFef	81.16±12.28 Eef	0.64±0.01 Dd	14.43±0.32 CDcd	0.59±0.16 GHi
TC-1	4.26±0.16 Gh	21.75±0.94 Bb	37.49±1.62 Bb	1.07±0.09 Dd	128.09±30.28 DEe	0.28±0.02 Hh	20.40±1.47 Bb	1.55±0.28 Gh
WZS-1	3.79±0.16 Hi	3.80±1.00 Hi	6.55±1.71 Hi	0.38±0.03 Fg	33.24±16.22 Ef	0.20±0.01 Ii	10.09±3.10 De	0.36±0.02 Hi

样品编号 Sample number	铵态氮 Ammonium nitrogen /(mg·kg^{-1})	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen /(mg·kg^{-1})	有效磷 Effective phosphorus /(mg·kg^{-1})	速效钾 Potassium sulfate /(mg·kg^{-1})	缓效钾 Slowly available potassium /(mg·kg^{-1})	阳离子交换量 Cation exchange capacity /(cmol^{+}·kg^{-1})	微生物量氮 Microbial biomass nitrogen /(mg·kg^{-1})	微生物量碳 Microbial biomass carbon /(mg·kg^{-1})
BT-1	64.87±8.71 Aa	106.36±5.42 ABab	1.54±0.24 CDcd	64.93±0.31 EFef	589.54±20.78 Bb	2.06±0.68 BCc	47.65±1.51 Bb	383.45±3.31 Ef
BT-2	66.69±10.98 Aa	124.38±12.09 Aa	1.47±0.26 CDcd	60.78±1.09 Ff	628.37±13.91 Aa	4.01±1.77 BCbc	54.40±3.31 Aa	457.75±1.39 Cd
CM-1	46.81±1.98 BCc	29.59±2.90 Ccd	0.63±0.16 DEe	47.42±1.75 GHg	36.03±0.61 Jk	2.64±1.04 BCbc	11.39±0.93 Ij	288.35±5.24 Hi
CM-2	49.43±2.00 BCbc	81.68±7.19 BCb	1.53±0.29 CDcd	41.66±2.80 Hh	67.63±2.03 Ii	8.89±0.35 Aa	22.01±1.56 Gh	544.35±2.60 Aa
DA-1	54.37±3.59 Bb	53.25±1.29 Cc	3.85±0.09 Bb	149.62±5.80 Cc	155.77±1.63 Ff	1.43±1.44 Cc	18.28±1.07 Hi	402.23±4.48 De
DA-2	48.52±1.92 BCbc	76.46±1.98 BCbc	0.33±0.05 Ee	95.66±1.13 Dd	235.43±15.06 Ee	0.47±0.57 Cc	43.45±1.57 Cc	377.90±5.46 Ef
DZ-1	21.83±2.70 Ee	78.33±2.79 BCb	1.73±0.08 Cc	42.37±2.08 Hh	63.99±3.09 Iij	1.37±0.46 Cc	19.36±0.75 GHi	480.88±5.44 Bb
HK-1	65.96±3.00 Aa	79.26±53.70 BCb	1.44±0.05 CDcd	171.51±1.73 Bb	279.51±10.74 Dd	1.21±0.81 Cc	23.18±1.09 FGh	343.00±11.85 Gh
HK-2	42.59±4.13 Ccd	84.04±3.63 BCb	3.78±0.68 Bb	210.80±1.61 Aa	154.11±10.21 Ff	2.30±1.81 BCc	25.91±1.60 Fg	396.41±4.29 De
QH-1	36.99±0.72 CDd	88.66±2.76 Bb	3.94±0.38 Bb	13.85±0.78 Ii	50.54±1.15 IJj	5.05±3.42 Bb	18.26±1.10 Hi	464.78±2.95 Ccd
QH-2	31.82±3.20 Dd	38.55±1.00 Ccd	1.82±0.16 Cc	64.81±5.49 EFef	59.79±2.91 Iij	2.25±1.15 BCc	52.04±1.35 Aa	250.01±8.88 Ij
QH-3	23.12±2.99 DEe	46.08±1.70 Ccd	4.66±0.07 Aa	3.91±1.47 Jj	23.28±1.07 Jk	0.45±0.33 Cc	28.51±0.57 EFf	364.37±4.40 Fg
QZ-1	45.61±0.59 BCc	40.64±2.04 Ccd	1.09±0.05 Dd	68.21±1.52 Ee	354.74±1.32 Cc	0.72±0.34 Cc	37.69±0.84 Dd	182.90±5.55 Kl
TC-1	42.07±0.89 Ccd	72.84±5.78 BCbc	1.31±0.11 CDd	52.39±6.47 Gg	134.15±2.05 Gg	2.20±0.57 BCc	28.58±1.04 EFf	467.81±5.73 Cc
WZS-1	35.90±2.59 CDd	25.66±2.18 Cd	1.04±0.07 Dd	16.55±1.02 Ii	113.56±3.59 Hh	3.67±3.10 BCbc	31.61±1.22 Ee	195.68±3.85 Jk

DA-1（6.54±0.06），占总样地的13.3%；适宜pH值土壤（5.0～6.5）包括BT-1（5.94±0.06）、BT-2（5.90±0.06）、DZ-1（5.94±0.05）等9个样地，占总样地的60.0%；酸性/强酸性土壤（pH值小于5.0）包括WZS-1（3.79±0.16）、CM-1（4.16±0.04）等4个样地，占总样地的26.7%，该类土壤环境易降低磷、钙等养分的有效性。

土壤有机碳（OC）、有机质（OM）、全氮（TN）及碳氮比（C/N）是反映土壤碳库储备和氮素供应能力的核心指标。表5显示，OC与OM含量范围分别为3.80～24.13 g·kg^{-1}和6.55～41.60 g·kg^{-1}。其中，除DA-1外CM-2样地的OC和OM含量均显著高于其他样地（P＜0.05），可能与该样地频繁施用有机肥有关；而WZS-1样地的OC和OM含量仅为CM-2的15.7%。TN含量范围为0.38～1.83 g·kg^{-1}，其中BT-2、BT-1、HK-1的TN含量显著偏高，表明土壤氮素供应能力强；WZS-1的TN含量（0.38±0.03 g·kg^{-1}）最低，可能限制油茶枝叶生长。C/N范围为8.23～30.80，其中DA-1的C/N最高，表明其有机碳相对氮素更丰富，有机质分解速率较慢，氮素释放量少；BT-2的C/N最低，说明有机质分解快，氮素矿化能力强，可快速为油茶提供氮素。

全磷（TP）和全钾（TK）是土壤养分的“储备库”，其含量直接反映土壤长期供磷、供钾潜力。表5显示，各样地间TP含量存在极显著差异（P＜0.01），含量为33.24～1 222.66 mg·kg^{-1}。HK-2的TP含量远高于其他样地，可能与该样地历史上长期施用磷肥或土壤母质含磷量高有关；CM-1（72.84±7.04 mg·kg^{-1}）、CM-2（71.70±5.37 mg·kg^{-1}）的TP含量较低，需长期补充磷肥以避免磷限制；WZS-1的TP含量最低。TK含量范围为0.04～1.33 g·kg^{-1}，其中BT-2、BT-1的TK含量较高，钾储备充足；QH-3、CM-1和QH-1的TK含量极低，可以通过合理施用钾肥来提升土壤钾储备水平。

速效养分是油茶可直接吸收的养分形态，其含量决定短期养分供应能力。表5显示，硝态氮（NO_3^--N）含量范围为0.08～53.34 mg·kg^{-1}，其中QH-1样地的NO_3^--N含量显著高于其他样地，可能与该样地硝化作用强或近期施用硝态氮肥有关；DA-2样地的NO_3^--N含量几乎为0，可能与反硝化作用强或氮素淋失有关。铵态氮（NH_4^+-N）范围为21.83～66.69 mg·kg^{-1}，其中BT-1、BT-2和HK-1的NH_4^+-N含量较高，表明NH_4^+-N供应充足；DZ-1、QH-3的NH_4^+-N含量较低，需补充铵态氮肥以满足油茶生长需求。碱解氮（AN）含量范围为25.66～124.38 mg·kg^{-1}，BT-2样地的AN含量（124.38±12.09 mg·kg^{-1}）最高，土壤氮素有效性强，可充分满足油茶短期氮素需求；WZS-1、CM-1的AN含量较低，氮素供应不足。有效磷（AP）含量范围为0.33～4.66 mg·kg^{-1}，QH-3、QH-1、HK-2和DA-1的AP含量较高，磷素有效性强；DA-2、CM-1的AP含量较低。值得注意的是，部分样地虽TP含量高（如HK-1），但AP含量低，土壤pH值不适宜易诱发磷素固定，无法被油茶有效吸收利用。速效钾（AK）含量范围为3.91～210.80 mg·kg^{-1}，HK-2样地的AK含量（210.80±1.61 mg·kg^{-1}）最高，短期钾素供应充足；QH-3（3.91±1.47 mg·kg^{-1}）、WZS-1（16.55±1.02 mg·kg^{-1}）的AK含量偏低，需紧急补充钾肥。缓效钾（SAK）含量范围为23.28～628.37 mg·kg^{-1}，BT-2样地的SAK含量（628.37±13.91 mg·kg^{-1}）最高，钾储备转化能力强；CM-1、QH-3的SAK含量偏低，土壤长期钾素供应潜力弱。

土壤阳离子交换量（CEC）是反映土壤吸附和保蓄阳离子养分（如K^+、NH_4^+）的能力指标，其含量越高，土壤保肥能力越强。结果（表5）显示，CEC范围为0.45～8.89 cmol$^+$·kg^{-1}，样地间存在极显著差异（P＜0.01）。其中CM-2的CEC最高，保肥能力最强，这与其高OC含量密切相关，因有机胶体可有效吸附阳离子；DA-2、QH-3的CEC较低，土壤保肥能力弱，养分易淋失，可通过增施有机肥提升CEC，改善土壤保肥性能。

微生物量氮（MBN）和微生物量碳（MBC）是反映土壤微生物活性的核心指标，直接参与土壤养分的转化过程。结果（表5）显示，MBN范围为11.39～54.40 mg·kg^{-1}，其中BT-2、QH-2的MBN含量较高，表明微生物固氮能力强；CM-1、DA-1和QH-1的MBN含量较低，对应微生物活性弱。MBC范围为182.90～544.35 mg·kg^{-1}，CM-2样地的MBC含量最高，这与其高OC含量（微生物碳源充足）一致，促进了微生物的生长繁殖；QZ-1、WZS-1的MBC含量较低，说明土壤微生物碳源供应不足，需补充有机碳来提升土壤微生物活性。

由表6和图2可知，基于Kaiser准则（特征值大于1）与累计贡献率准则（≥85%），确定前5个主成分（PC1～PC5）为核心主成分，其累计贡献率达85.12%，可充分保留原始数据的核心信息，同时将16个变量压缩至5个，降维效率显著。

土壤营养元素的变异呈“多因子协同驱动”特点，PC1和PC2为核心变异因子。PC1（32.34%）

表 6 海南岛油茶主产区林地土壤营养元素方差解释
Table 6 Variance interpretation of soil nutrient elements in woodland of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

主要成分编号 Principal component No.	特征值 Eigenvalue	方差百分比 Percentage of variance /%	累计贡献率 Cumulative contribution rate /%
1	5.17	32.34	32.34
2	3.95	24.70	57.04
3	2.11	13.20	70.25
4	1.22	7.65	77.90
5	1.16	7.22	85.12
6	0.89	5.54	90.66
7	0.62	3.87	94.53
8	0.30	1.86	96.39
9	0.22	1.39	97.78
10	0.14	0.87	98.65
11	0.12	0.72	99.37
12	0.06	0.36	99.73
13	0.03	0.20	99.93
14	0.01	0.05	99.99
15	0.00	0.01	100.00
16	0.00	0.00	100.00

与有机碳、有机质、全氮、碱解氮、微生物量碳和微生物量氮等指标呈强正相关，反映土壤“有机质—氮素供应—微生物活性”核心功能维度，有机碳与有机质是氮素储备的载体，其含量越高，全氮、碱解氮的供应越充足，同时为微生物提供充足碳源，激活微生物量碳氮的周转过程。PC2（24.70%）与 pH 值呈负相关，与阳离子交换量呈正相关，体现“酸碱环境 - 离子交换吸附”属性维度，pH 值通过影响土壤胶体带电性，进而调控阳离子交换量，最终影响养分吸附与释放。PC3 ～ PC5 为次要变异因子，反映了土壤系统的复杂性与营养指标的多维度特征，共同构建土壤功能评价体系。

样地综合得分排序结果（表 7）显示，DA-1、QH-1 的综合得分显著领先，这类样点的土壤有机碳含量大于 22.0 $g·kg^{-1}$，全氮含量大于 1.3 $g·kg^{-1}$，且微生物量碳氮协同性较高，说明土壤有机质积累、养分供应及微生物活性协同性较优，形成“高储备 - 高转化”的肥力循环体系；WZS-1 样地综合得分最低（−1.059），有机碳含量小于 4.0 $g·kg^{-1}$，微生物量碳含量小于 200.0 $mg·kg^{-1}$，极显著低于其他样点，土壤贫瘠化特征明显，可能因长期缺乏有机质输入、植被覆盖度低，进而导致养分库与微生物群落退化。

3.3 海南岛油茶主产区林地肥力综合分析

由图 3 可知，土壤含水率（质量 / 体积）、毛管孔隙度、毛管最大持水量、总孔隙度、饱和含水量间呈极显著正相关（$r > 0.7$，$P < 0.001$），且均与土壤容重呈极显著负相关（$r < -0.7$，$P < 0.001$）。土壤容重与全氮（r=−0.376）、速效钾

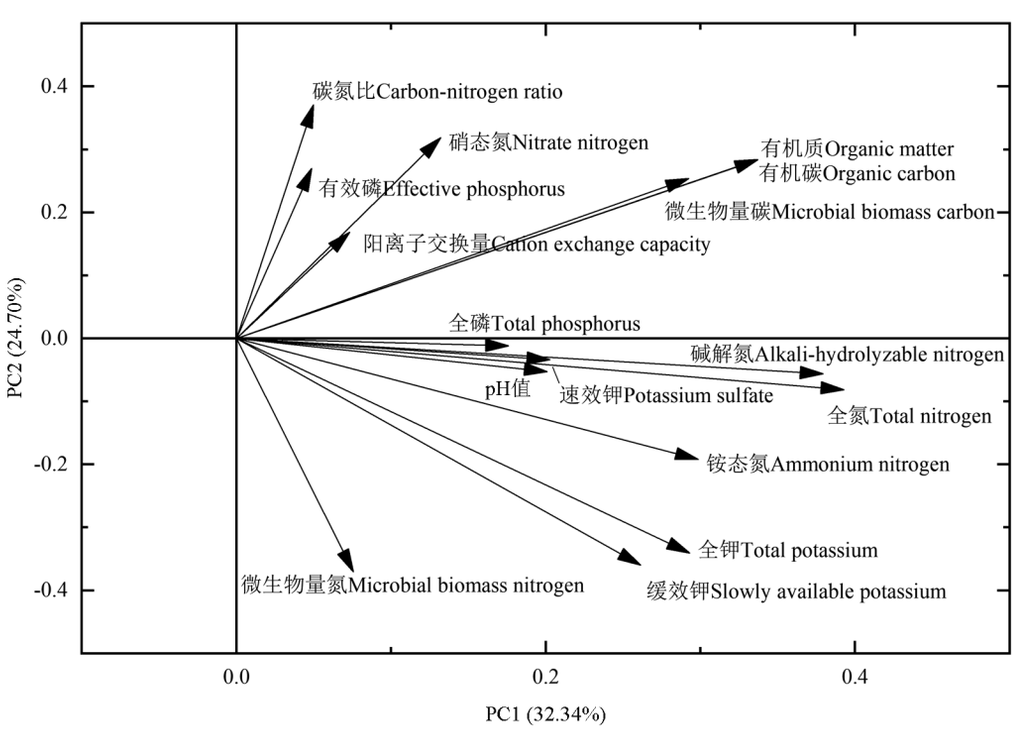
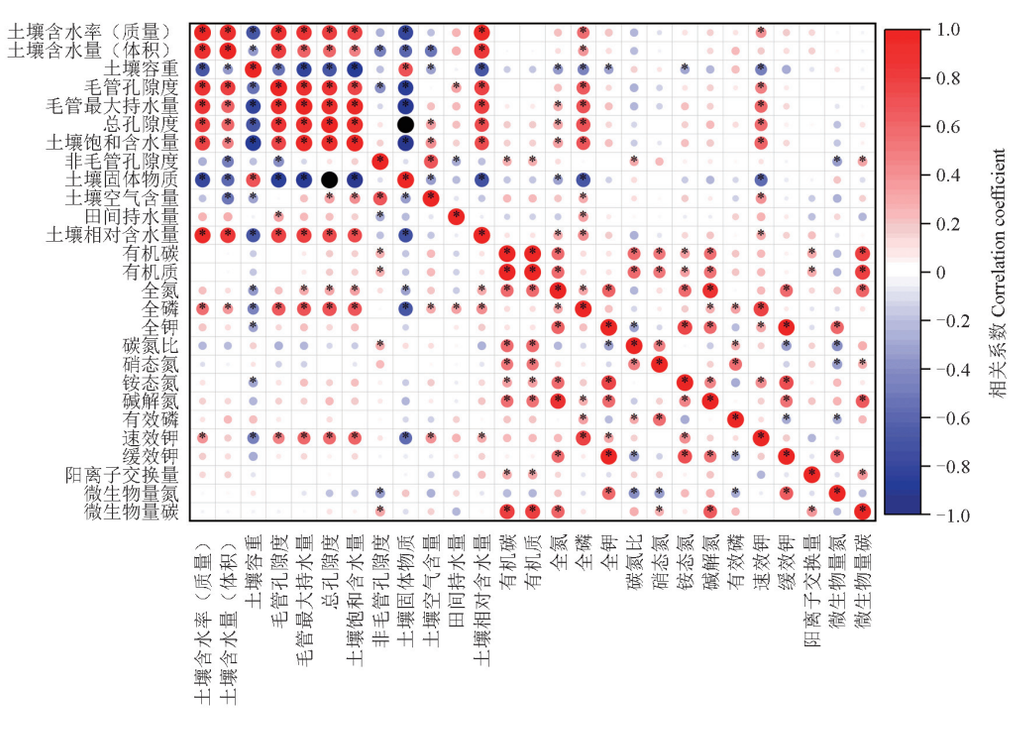


图 2 海南岛油茶主产区林地土壤营养元素指标主成分分析
Fig. 2 Principal component analysis of nutrient elements in woodland soil in main *Camellia oleifera* producing areas of Hainan Island

表 7　海南岛油茶主产区林地土壤营养元素指标综合得分

Table 7　Comprehensive score of soil nutrient elements in forest land of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

排名 Ranking	样品编号 Sample No.	综合得分 Overall score	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	主成分 4 Principal component 4	主成分 5 Principal component 5
1	DA-1	0.881	0.594	1.488	1.286	−1.469	1.827
2	QH-1	0.641	0.452	1.782	−0.620	0.928	−0.337
3	HK-2	0.449	0.592	0.043	2.221	0.448	−2.093
4	CM-2	0.234	0.591	1.259	−1.691	−0.356	−0.677
5	HK-1	0.176	0.909	−0.467	0.864	−0.978	−1.024
6	DZ-1	0.138	−0.258	0.506	−0.195	1.277	0.107
7	DA-2	0.095	0.345	−0.552	0.259	−0.146	1.107
8	BT-1	0.081	1.216	−1.309	−0.468	0.171	0.580
9	TC-1	0.058	0.134	0.655	−0.833	−0.639	0.073
10	BT-2	0.051	1.516	−1.546	−0.997	0.772	0.016
11	QH-3	0.033	−1.088	0.282	0.755	2.116	0.748
12	QH-2	−0.419	−1.094	−0.473	0.304	0.381	0.645
13	QZ-1	−0.571	−0.795	−1.022	0.250	−0.867	0.764
14	CM-1	−0.789	−1.367	−0.044	−0.420	−1.202	−0.951
15	WZS-1	−1.059	−1.747	−0.602	−0.714	−0.437	−0.785



*, $P < 0.05$.

图 3　海南岛油茶主产区林地土壤指标相关性分析

Fig. 3　Thermal map of correlation analysis of soil indexes in woodland of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

（r=−0.488）呈极显著负相关，与微生物量氮（r=0.106，P=0.487）呈弱正相关；毛管孔隙度与全磷（r=0.669）、速效钾（r=0.488）呈极显著正相关，与微生物量氮（r=−0.011，P=0.945）无显著关联。有机碳与有机质呈极显著正相关（r=1.000），二者与全氮亦呈极显著正相关（$r > 0.59$）。碳氮比与硝态氮（r=0.492）、微生物量碳（r=0.294）显著正相关，与铵态氮（r=−0.026，P=0.864）无显著关联。全磷与速效磷呈极显著正相关（r=0.346），且全磷与毛管孔隙度（r=0.669）、毛管最大持水量（r=0.711）亦呈极显著正相关。全钾与缓效钾呈极显著正相关（r=0.982），速效钾与全磷（r=0.346）、毛管孔隙度（r=0.488）呈极显著正相关。

根据土壤基本性质得分与土壤营养元素得分汇总结果（表 8）可知，HK-1、HK-2 和 CM-2 这

3 个样地的土壤基本性质得分与营养元素得分均为正值，二者协同提升土壤综合质量，属于土壤质量较优的类型。DA-1 和 QH-1 这 2 个样地土壤基本性质得分为负值（基础理化特征较差），但营养元素得分为正值且贡献较高，最终拉动综合得分正向或接近正向。BT-1、DA-2、BT-2 和 TC-1 这 4 个样地土壤基本性质与营养元素得分均接近零值（−0.4 ～ 0.1），无明显优势或限制因子，综合得分处于中等水平。QZ-1 和 QH-3 的土壤中一个因子得分正常（接近零），但另一个因子得分显著为负（＜ −0.5），成为土壤质量的主要限制因子。CM-1、QH-2 和 WZS-1 的土壤基本性质与营养元素得分均为负值，双因子共同制约土壤质量，属于最差的土壤类型。

表 8 海南岛油茶主产区林地土壤肥力综合得分

Table 8 Comprehensive score of soil fertility in forest land of main *Camellia oleifera* producing areas in Hainan Island

样品编号 Sample No.	土壤基本性质得分 Score for basic soil properties	土壤营养元素得分 Score of soil nutrient elements	综合得分 Overall score	排名 Ranking
BT-1	−0.046	0.081	0.035	7
BT-2	−0.347	0.051	−0.296	10
CM-1	−0.655	−0.789	−1.444	15
CM-2	0.277	0.234	0.511	3
DA-1	−0.447	0.881	0.434	5
DA-2	−0.214	0.095	−0.119	8
DZ-1	0.262	0.138	0.400	6
HK-1	1.417	0.176	1.593	2
HK-2	1.719	0.449	2.168	1
QH-1	−0.195	0.641	0.446	4
QH-2	−0.715	−0.419	−1.134	13
QH-3	−0.856	0.033	−0.823	12
QZ-1	0.365	−0.571	−0.206	9
TC-1	−0.379	0.058	−0.321	11
WZS-1	−0.187	−1.059	−1.246	14

4 讨论与结论

4.1 讨 论

4.1.1 海南岛油茶主产区林地土壤基本性质

不同采样点土壤容重与孔隙度存在显著差异，可能与土地利用类型、植被覆盖度及人为干扰密切相关 [34]。本研究发现容重低、孔隙度高的样品（如 HK 系列），其毛管孔隙与总孔隙度大，保水能力（毛管最大持水量、田间持水量）与实际含水率均较高；而容重高、孔隙度低的样品（如 CM-1、QH-3），其孔隙发育较差，保水能力弱，实际含水率与相对含水量低；非毛管孔隙度高的样品（如 DZ-1），通气能力强，但未显著降低保水能力，处于中等水平，说明其土壤结构兼顾通气与保水，验证了土壤物理性质影响水分特征的内在关系 [35]。

土壤理化指标的相关性本质是土壤结构与功能的映射：毛管系统主导水分存储，非毛管系统调控通气，容重与孔隙度共同塑造土壤“骨架”[36]。本研究中，质量与体积含水率的强关联、孔隙度与持水量的对应关系，与已有关于土壤水分物理性质的研究结论一致，如邵明安等 [37] 在《土壤物理学》中系统阐述了土壤水分含量与孔隙特性的内在联系，明确毛管孔隙对水分吸附、保持的关键作用；张瑞平等 [38] 也指出，土壤含水率与孔隙度协同影响土壤保水、通气功能。不同土壤类型（如砂质土、黏质土）颗粒组成存在差异，可能造成各指标间相关性强弱发生变化，如宁一泓等 [39] 研究发现，黏粒含量较高的土壤，毛管孔隙度与持水量相关性更显著。本研究中土壤空气含量与非毛管孔隙度呈正相关，与固体物质呈负相关，体现土壤固 - 液 - 气三相在孔隙空间中的动态分配关系，固体占比高则孔隙、水分及空气占比受挤压，反映土壤结构对三相平衡的调控作用。后续需拓展研究对象，深化土壤质地对指标关联的影响研究。

4.1.2 海南岛油茶主产区林地土壤营养元素

不同油茶林地土壤营养元素指标存在极显著差异，这种差异可能源于样地的立地条件（如母质、海拔）、管理措施（如施肥、凋落物管理）及生物过程（如微生物分解）[40]。

从肥力综合表现来看，CM-2、BT-2、HK-2 是肥力较优的样地：CM-2 的 OC、OM、CEC 及 MBC 含量较高，土壤结构和保肥能力强，微生物活性高，为油茶生长提供良好的土壤环境；BT-2 的 TN、NH_4^+-N、AN 及 SAK 含量最高，氮钾养分供应充足，且 C/N 低，氮素矿化快，可满足油茶短期养分需求；HK-2 的 TP、AK 含量最高，磷钾速效养分充足，有利于油茶开花结果和抗逆性提升。而 WZS-1、CM-1、QH-3 是肥力较差的样地：WZS-1 的 OC、OM、TN、TP 及 MBC 含量均最低，且土壤呈强酸性，不仅养分储备不足，还因 pH 值不适抑制养分有效性和微生物活性，需通过施用石灰调节 pH 值（提升至 5.0 ～ 6.5），并增施有机肥和氮磷钾肥；CM-1 的 TP、AN、SAK 及 MBN 含量最低，需补充磷肥和氮肥；QH-3 的 TK、AK、SAK 及 CEC 含量最低，需重点补充钾

肥，并增施有机肥，提升土壤保肥能力。此外，部分样地存在“全量养分高但速效养分低”的现象，如 HK-1 的 TP 含量较高，但 AP 含量较低，可能因土壤 pH 值不适或养分转化受阻 [41]。

OC 与 OM 之间近乎 1 的极显著正相关关系验证“有机碳是有机质主体构成”的理论 [42]。OM 是土壤肥力的重要物质基础，它不仅为植物生长提供持续的养分来源，还能改善土壤物理结构，增强土壤保水保肥能力。OC 含量的高低直接影响了 OM 的数量和质量，丰富的 OC 为土壤微生物提供充足的能量和碳源，维持微生物群落的活跃与稳定，促进土壤中各种生物化学过程的进行，如养分转化、腐殖质合成等 [43]。

TN 与 AN、MBN 呈显著正相关，揭示了土壤氮素循环的内在机制。TN 代表土壤中氮素的总储备，而 AN 是植物能够直接吸收利用的有效氮形态，MBN 则反映了土壤微生物对氮素的暂时固定与转化能力 [44]。当土壤 TN 储量充足时，微生物在适宜的环境条件下将有机氮逐步矿化为无机氮，增加 AN 含量，满足植物生长需求。同时，微生物自身生长繁殖过程中也会吸收和固定一部分氮素，形成 MBN，这部分氮素在微生物死亡后又会重新释放到土壤中，参与氮素循环 [43]。这种“储备 - 有效化 - 微生物固持与再释放”的协同循环，对于维持土壤氮素平衡、保障植物氮素供应具有关键作用。

土壤 pH 值与 OC、MBN、MBC 之间的负相关关系，凸显了土壤酸碱环境对土壤生态系统的重要调控作用。在酸性较强的土壤（如 CM-1、WZS-1）中，较低的 pH 值会抑制微生物的生长和代谢活动。一方面，酸性环境改变了微生物细胞膜的通透性和酶活性，使微生物对 OC 等底物的分解利用效率降低，从而减缓了 OM 的分解转化速率，导致 OC 难以有效矿化并释放养分，进而影响土壤养分循环和供应 [43]。另一方面，酸性土壤中铝、铁等金属离子的溶解度增加，过量的金属离子可能对微生物产生毒害作用，干扰微生物群落结构和功能，进一步削弱土壤微生物对碳氮等元素的转化能力 [45]。因此，维持适宜的土壤 pH 值对于促进土壤微生物活动、保障土壤养分循环和植物生长至关重要。

4.1.3　海南岛油茶主产区林地肥力综合分析

从自然成土角度看，成土母质决定土壤初始理化性质与元素本底。如 HK 区域采样点可能受富含有机质、养分的母质影响，土壤基础条件优良；而 CM、WZS 等地母质或许先天“贫瘠”，导致土壤基本性质与养分储备不足。地形因素中，坡地采样点易因水土流失，造成养分流失、结构破坏，而平原区采样点利于养分积累，促进土壤质量提升。

人为活动的干扰强度与方式可显著放大质量差异。如 HK-2 等优质点，合理措施维持了土壤结构稳定，促进养分循环且减少外源污染输入；DA-1 高营养元素得分，或与长期投入有机物料相关，验证了培肥措施对土壤养分的积极作用。反观 CM-1、WZS-1，过度垦殖会破坏土壤团聚体结构，降低土壤保水、保肥能力；污灌等违规行为，抑制微生物活性，阻碍养分转化，加剧土壤质量退化。后续可结合同位素示踪、高通量测序等技术，量化自然与人为因素贡献，揭示土壤性质 - 功能协同演变机制。

当前采用的土壤基本性质及营养元素指标框架，虽覆盖土壤质量核心维度，但仍有拓展空间。生物指标（如微生物量碳氮、酶活性）对土壤扰动更敏感，可后续补充，完善土壤质量“生物 - 非生物”协同评价，同时增加生态系统服务功能指标（如碳汇潜力、保肥能力），强化评价的生态价值导向。

现有研究采用等权或经验赋权，易忽略指标间的交互作用。可引入结构方程模型（SEM）、层次分析法（AHP），结合专家经验与统计数据，动态调整权重，提升评价结果的科学性。同时，应针对不同土地利用类型（耕地、林地、园地），可细化指标阈值与评价标准，增强体系的场景适配性。

4.2　结　论

不同采样点土壤物理性质及营养指标差异显著。其中 60.0% 的样地 pH 值处于油茶适宜范围（5.0～6.5），26.7% 的样地呈强酸性（pH 值小于 4.5）；QH-3 容重最高（1.69±0.13 $g·cm^{-3}$），HK-1 容重最低（0.98±0.14 $g·cm^{-3}$），HK-2 总孔隙度（60.79%±4.48%）最高，CM-1 总孔隙度最低（40.79%±1.04%），容重与孔隙度呈显著负相关。土壤水分特征中，HK 系列含水率（质量 / 体积）、持水量（毛管最大持水量、田间持水量）及相对含水量均最高，CM-1 各项水分指标最低，且相对含水量仅为（16.11±3.92）%，处于严重缺水状态，水分含量指标（质量 / 体积含水率）协同性强，孔隙度指标（毛管 / 非毛管 / 总孔隙度）相互支撑，持水量与固液气三相指标动态平衡。CM-2 在有机碳、有机质、阳离子交换量及微生物量碳上表现最优，BT-2 在全氮、铵态氮及缓效钾上表现最优，HK-2

在全磷及速效钾上最优，三者为肥力优势样地，而 WZS-1 多项指标（有机碳、全氮、全磷、微生物量）均为最低且土壤呈强酸性。通过主成分分析与综合得分排序，明确 HK-2、HK-1 土壤功能最优。

研究结果为土壤资源精准管理、分类修复及可持续利用提供数据支撑，后续需深入探究质量差异驱动机制，完善评价体系。

参考文献：

[1] 曹永庆 , 姚小华 , 张平安 , 等 . 山稻间作对油茶林地土壤理化性质的影响 [J]. 西南大学学报 (自然科学版),2017,39(11):23-28.
Cao Y Q, Yao X H, Zhang P A, et al. Effects of upland rice intercropping on soil physical and chemical properties in oil-tea *Camellia* gardens[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2017,39(11):23-28.

[2] 房华 , 石卓功 . 基于 CiteSpace 的油茶研究现状与热点分析 [J]. 经济林研究 ,2025,43(4):264-275.
Fang H, Shi Z G. Current status and hotspot analysis of *Camellia oleifera* research based on CiteSpace[J]. Non-wood Forest Research,2025,43(4):264-275.

[3] 邓三龙 , 陈永忠 . 中国油茶 [M]. 长沙 : 湖南科学技术出版社 , 2019:36-39.
Deng S L, Chen Y Z. China *Camellia oleifera*[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press,2019:36-39.

[4] 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.

[5] 王玉娟 , 陈永忠 , 王瑞 , 等 . 稻草覆盖对油茶幼林土壤理化性质及油茶生长的影响 [J]. 浙江农林大学学报 ,2012,29(6):811-816.
Wang Y J, Chen Y Z, Wang R, et al. Soil physical and chemical properties and growth of a young *Camellia oleifera* forest with straw mulching[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2012,29(6):811-816.

[6] Ouyang X L, Yuan Z L, Chen X B, et al. Can aged *Camellia oleifera* Abel oil truly be used to treat atopic dermatitis?[J]. Frontiers in Pharmacology,2024,15:1449994.

[7] 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.

[8] 康定旭 , 陈诗 , 欧阳利勋 , 等 . 云南德宏州油茶土壤和叶片养分含量及生态化学计量特征 [J]. 华南农业大学学报 ,2023,44(4):523-530.
Kang D X, Chen S, Ouyang L X, et al. Nutrient contents and ecological stoichiometric characteristics of soil and leaf of *Camellia oleifera* in Dehong Prefecture, Yunnan Province[J]. Journal of South China Agricultural University,2023,44(4):523-530.

[9] Zhang M Y, Wang W J, Bai S H, et al. Intensive management of phosphorus fertilization in *Camellia oleifera* Abel. to minimize phosphorus losses to the environment[J]. Industrial Crops and Products,2021,170:113824.

[10] 罗汉东 , 胡冬南 , 朱丛飞 , 等 . 不同施肥模式对油茶植株营养生长和土壤养分的影响 [J]. 江苏农业科学 ,2016,44(8):272-275.
Luo H D, Hu D N, Zhu C F, et al. Effects of different fertilization patterns on vegetative growth of *Camellia oleifera* and soil nutrients[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2016,44(8):272-275.

[11] 孙祺 . 湖南省不同产量油茶林土壤肥力特征与微生物学性质研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2024:2-3.
Sun Q. Study on the soil fertility characteristics and microbiological properties of *Camellia oleifera* forests with different yields in Hunan Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2024:2-3.

[12] 朱丛飞 , 华思德 , 冯杰 , 等 . 不同氮磷钾配方施肥对油茶幼苗生长及土壤养分含量的影响 [J]. 福建农业学报 ,2017,32(6):613-618.
Zhu C F, Hua S D, Feng J, et al. Effects of NPK fertilization on seedling growth of *Camellia oleifera* and nutrient content of plantation soil[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2017,32(6):613-618.

[13] 田慎重 , 郭洪海 , 姚利 , 等 . 中国种养业废弃物肥料化利用发展分析 [J]. 农业工程学报 ,2018,34(增刊 1): 123-131.
Tian S Z, Guo H M, Yao L, et al. Development analysis for fertilizer utilization of agricultural planting and animal wastes in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(S1):123-131.

[14] 栾永飞 , 黄国和 , 郑光辉 . 海南岛土地利用变化对生态环境质量的影响 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版),2023,38(2):101-108.
Luan Y F, Huang G H, Zheng G H. The influence of land use change on ecological environmental quality in Hainan Island[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition),2023,38(2):101-108.

[15] 郭建超 , 张林 , 齐实 , 等 . 基于 GEE 平台的海南岛植被覆盖度时空变化和影响因子探测 [J]. 热带亚热带植物学报 , 2025,33(5):503-512.
Guo J C, Zhang L, Qi S, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of fractional vegetation cover in Hainan Island based on Google Earth Engine platform[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2025,33(5):503-512.

[16] 陈家东 , 张鹏 , 郭建超 , 等 . 海南岛生态清洁小流域功能分区与治理措施功能匹配性研究 [J]. 生态环境学报 ,2025,34(5):743-753.
Chen J D, Zhang P, Guo J C, et al. Study on the function zoning and function matching level with control measures of eco-environment friendly small watersheds in Hainan Island[J]. Ecology and Environmental Sciences,2025,34(5):743-753.

[17] LY/T 1210—1999 森林土壤样品的采集与制备 [S].
LY/T 1210-1999 Field sampling and preparation of forest soil sample[S].

[18] GB/T 36197—2018 土壤质量 土壤采样技术指南 [S].
GB/T 36197-2018 Soil quality-guidance on sampling techniques[S].

[19] GB/T 36199—2018 土壤质量 土壤采样程序设计指南 [S].
GB/T 36199-2018 Soil quality-guidance on the design of sampling programmes[S].

[20] 张博岩 , 窦森 , 张笑唯 . 不同种植年限榛地土壤基本理化性质及腐殖物质组成 [J]. 吉林农业大学学报 ,2022,44(3):345-351.
Zhang B Y, Dou S, Zhang X W. Basic physicochemical properties and humus composition of soil in hazelnut fields with different planting years[J]. Journal of Jilin Agricultural University,2022,44(3):345-351.

[21] HJ 962—2018 土壤 pH 值的测定 电位法 [S].
HJ 962-2018 Soil — Determination of pH — Potentiometry[S].

[22] LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算 [S].
LY/T 1237-1999 Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio[S].

[23] LY/T 1228—2015 森林土壤氮的测定 [S].
LY/T 1228-2015 Nitrogen determination methods of forest soils[S].

[24] LY/T 1232—2015 森林土壤磷的测定 [S].
LY/T 1232-2015 Determination of total phosphorus in forest soil[S].

[25] LY/T 1234—2015 森林土壤钾的测定 [S].
LY/T 1234-2015 Potassium determination methods of forest soils[S].

[26] NY/T 295—1995 中性土壤阳离子交换量和交换性盐基的测定 [S].
NY/T 295-1995 Determination of cation exchange capacity and exchangeable base of neutral soil[S].

[27] 刘政 , 索沛蘅 , 轩寒风 , 等 . 南方红壤侵蚀区马尾松林植被恢复对土壤氮有效性和微生物量碳、氮季节动态的影响 [J]. 生态学报 ,2025,45(5):2094-2103.
Liu Z, Suo P H, Xuan H F, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen availability and microbial biomass carbon, nitrogen along restoration ages of *Pinus massoniana* plantations in red soils erosion region at southern China[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(5):2094-2103.

[28] 邹文秀 , 韩晓增 , 陆欣春 , 等 . 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响 [J]. 水土保持学报 ,2015,29(5):187-193,199.
Zou W X, Han X Z, Lu X C, et al. Effect of land use types on physical properties of black soil profiles[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(5):187-193,199.

[29] 陈夙怡 , 黄艳萍 , 戴矜君 , 等 . 香樟等 10 种校园植物枯落物层及其土壤层水文效应 [J]. 生态科学 ,2024,43(6):110-120.
Chen S Y, Huang Y P, Dai J J, et al. Hydrological effects of litters and soil of ten campus plants including *Cinnamomum camphora*[J]. Ecological Science,2024,43(6):110-120.

[30] 宋洁 , 李晓宁 , 赵丽 , 等 . 川西北高寒区冻融交替作用后土壤水热运移模拟研究 [J]. 水土保持研究 ,2023,30(1):274-281.
Song J, Li X N, Zhao L, et al. Simulation study on movement mechanisms of water and heat after freeze-thaw cycles in northwest Sichuan plateau based on hydrus model[J]. Research of Soil and Water Conservation,2023,30(1):274-281.

[31] 黄羽翔 , 刘炜 , 石浩 , 等 . 机耕年限对潮土性水稻土土壤物理特性的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文),2024,32(11):1903-1913.
Huang Y X, Liu W, Shi H, et al. Effects of mechanical tillage years on the soil physical properties of fluvo-aquic paddy soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(11):1903-1913.

[32] 武永智 . 盐碱土在不同改良措施下土壤物理化学性质变化的研究 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2009:5-7.
Wu Y Z. The research on the physical and chemical characteristic of saline-alkali soil in the different improvement measures[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2009:5-7.

[33] 康定宇 , 林海 , 牛东坡 , 等 . 含油污泥特性及处理技术研究进展 [J]. 中国环境科学 ,2023,43(8):4106-4120.
Kang D Y, Lin H, Niu D P, et al. Research progress of processing technology and characteristics of oily sludge[J]. China Environmental Science,2023,43(8):4106-4120.

[34] 沈爱红 . 贺兰山东麓洪积扇区荒漠草原植被分异特征及其驱动机制研究 [D]. 银川 : 宁夏大学 ,2024:84-86.
Shen A H. Study on the vegetation differentiation characteristics and driving mechanisms in the desert steppe of the alluvial fan area at the eastern foot of Helan mountain[D]. Yinchuan: Ningxia University,2024:84-86.

[35] 张玉锴 , 阎凯 , 李博 , 等 . 中国土壤重构及其土水特性研究进展 [J]. 农业资源与环境学报 ,2023,40(3):511-524.

Zhang Y K, Yan K, Li B, et al. Research progress on soil reconstruction and soil-water characteristics in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2023,40(3):511-524.

[36] 柯建国 , 王泰伦 , 章熙谷 , 等 . 江苏海安县轻壤土稻麦免耕土壤肥力消长模型初探 [J]. 南京农业大学学报 ,1992,15(2):1-9.
Ke J G, Wang T L, Zhang X G, et al. Model of fertility variance of no-tillage soil under wheat-rice cropping system and light loamy in Haian County, Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,1992,15(2):1-9.

[37] 邵明安 , 王全九 , 黄明斌 . 土壤物理学 [M]. 北京 : 高等教育出版社 ,2006:56.
Shao M A, Wang Q J, Huang M B. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press,2006:56.

[38] 张瑞平 , 郭伟 , 李玉娥 , 等 . 生物炭和保水剂用量对土壤状况及烟草品质的影响 [J]. 江苏农业科学 ,2023,51(10):72-77.
Zhang R P, Guo W, Li Y E, et al. Impacts of biochar and water retention agent dosage on soil condition and tobacco quality[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2023,51(10):72-77.

[39] 宁一泓 , 王海燕 , 孟海 , 等 . 笋溪河河岸带土壤与水体质量变化及土壤侵蚀特征 [J]. 水生态学杂志 ,2025,46(1):70-80.
Ning Y H, Wang H Y, Meng H, et al. Changes in soil and water quality and soil erosion in the riparian zone of Sunxi river[J]. Journal of Hydroecology,2025,46(1):70-80.

[40] 蒋齐 , 王占军 , 何建龙 . 压砂地衰退机制及生态系统综合评价 [M]. 银川 : 阳光出版社 ,2013:349.
Jiang Q, Wang Z J, He J L. Decline mechanism of sand-pressing land and comprehensive evaluation of ecosystem[M]. Yinchuan: Sunshine Publishing House,2013:349.

[41] 郑成卓 , 李玉强 , 王旭洋 , 等 . 土地荒漠化及其恢复过程土壤动物生态学研究进展 [J]. 生态学报 ,2025,45(3):1059-1069.
Zheng C Z, Li Y Q, Wang X Y, et al. Advances in soil fauna ecology in the process of land desertification and its restoration[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(3):1059-1069.

[42] 鲍士旦 . 土壤农化分析 [M].3 版 . 北京 : 中国农业出版社 , 2000:25.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press,2000:25.

[43] 袁浩亮 , 聂军 , 黎鹏 , 等 . 石灰与有机物料联用对双季稻产量和土壤团聚体碳氮分布的影响 [J]. 植物营养与肥料学报 ,2025, 31(1):89-99.
Yuan H L, Nie J, Li P, et al. Effects of combined application of lime and organic materials on rice grain yield and soil aggregate carbon and nitrogen distribution in double-rice cropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2025,31(1): 89-99.

[44] 孙思邈 . 七对入侵与本地植物对硝氮和铵氮偏好吸收的差异 [D]. 沈阳 : 沈阳农业大学 ,2020:4-9.
Sun S M. Differences in preferential uptake of nitrate and ammonium nitrogen between seven pairs of invasive and native plants[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2020:4-9.

[45] 王贺新 , 盛曼曼 , 杨向德 , 等 . 茶园土壤酸化国际研究概况和趋势 [J]. 中国生态农业学报 (中英文),2024,32(12):2107-2116.
Wang H X, Sheng M M, Yang X D, et al. Overview and trends of international research on soil acidification in tea plantations[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2024,32(12): 2107-2116.

[本文编校：谢荣秀]