

海南油茶主产区土壤特征与元素迁移性研究

王鑫^{1,2}, 符惠娴^{1,2}, 赵欣¹, 卢国鹏¹, 郑宏斌^{1,2}, 苟志辉^{1,2}, 农寿千^{1,2}, 陈国德^{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: 海南油茶品质独特, 随着大众对生活品质与营养健康的日益重视, 以及市场对食品安全监管力度的持续加大, 深入分析海南油茶主产区林地土壤特征及其对油茶籽元素组成的影响, 可充分揭示海南油茶籽的安全性。本研究在海南油茶主产区共选取 11 个样地, 测定土壤 pH、养分含量 (包括有机碳、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) 及重金属元素 (铜、锌、铅), 并同步测定油茶籽中氮、磷、钾、全钙、全镁、全铜、全锌、铅等元素的含量。采用 Duncan 多重比较法分析各指标和富集系数的差异, 通过 Pearson 相关分析与 Mantel 检验, 分析土壤对油茶籽元素的影响。结果表明, 海南油茶主产区土壤呈强酸性至弱酸性 (pH 3.83~6.90), 养分空间异质性显著。DA-1 样地的有机质、BT-1 样地的氮、HK-1 样地的全磷与速效钾、QH-2 样地的有效磷含量最高; HK-1 样地的 Cu、Zn 及 DA-2 样地的 Pb 含量较高。油茶籽中 7 种营养元素含量差异极显著 ($P<0.01$), 其中全钙的变异系数最大 (41.2%), HK-1 (大量元素富集型)、QH-2 (微量元素优势型)、QH-1 (综合均衡型) 及 DA-1 (高蛋白-微量元素协同型) 为优质资源类型。元素富集系数呈现明显样地特异性, WZS-1 (磷)、QH-2 (钾)、DZ-1 (铜) 及 CM-1 (氮、锌) 表现突出。相关性分析证实: 土壤 pH 与油茶籽镁、钾积累呈极显著正相关, 有机质与籽粒铜含量强关联, 有效磷与钙、锌含量呈显著正相关。表明维持土壤微酸至中性、增施有机肥并平衡磷肥是提升海南油茶籽营养品质的关键措施。本研究为优质油茶籽资源筛选、定向栽培及加工产品品质优化提供理论依据。

关键词: 海南; 油茶; 土壤; 油茶籽; 元素

中图分类号: S794.4 文献标志码: A

Soil Characteristics and Element Migration in *Camellia oleifera* Planting Areas of Hainan

WANG Xin^{1,2}, FU Huixian^{1,2}, ZHAO Xin¹, LU Guopeng¹, ZHENG Hongbin^{1,2}, GOU Zhihui^{1,2}, NONG Shouqian^{1,2}, CHEN Guode^{1,2*}

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

Abstract: *Camellia oleifera* from Hainan possesses unique quality traits. Public attention to both quality of life and nutritional health is increasing, while market oversight of food safety is being continuously strengthened. An in-depth analysis of the soil characteristics in the forestlands of Hainan's main *C. oleifera* planting regions and the impact on the elemental composition of the seeds can fully reveal the safety attributes of Hainan *C. oleifera* seeds. In this study, a total of 11 sample plots were selected from the main *C. oleifera* planting areas of Hainan. Soil pH, nutrient contents (including organic carbon, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, rapidly available potassium, and slowly available potassium),

收稿日期 2025-11-17; 接受日期 2025-12-23

基金项目 海南省省属科研院所技术创新项目 (No. KYYSLK2023-004); 海南省院士创新平台科研专项 (No. YSPTZX202001)。

作者简介 王鑫 (1994—), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 资源利用与植物保护。*通信作者 (Corresponding author): 陈国德 (CHEN Guode), E-mail: 544262097@qq.com。

and heavy metal elements (copper, zinc, and lead) were measured. Simultaneously, elemental indicators in *C. oleifera* seeds, including nitrogen, phosphorus, potassium, total calcium, total magnesium, total copper, total zinc, and lead, were determined. Duncan's multiple range test was employed to analyze the differences among various indicators and translocation factors. Pearson correlation analysis was used to examine the influence of soil properties on seed elements. The results indicated that the soils in the main *C. oleifera* planting areas of Hainan Island ranged from strongly acidic to weakly acidic (pH 3.83–6.90), with significant spatial variation in nutrient content. The DA-1 plot had the highest organic matter content; BT-1 had the highest total nitrogen; HK-1 had the highest total phosphorus and available potassium; and QH-2 had the highest available phosphorus. Notably high levels of copper and zinc were found in the HK-1 plot, while the DA-2 plot exhibited elevated lead content. The contents of the seven nutrient elements in *C. oleifera* seeds differed extremely significantly ($P < 0.01$), with total calcium showing the largest coefficient of variation (41.2%). Four sample plots, HK-1 (enriched in macronutrients), QH-2 (advantageous in micronutrients), QH-1 (comprehensively balanced), and DA-1 (exhibiting high protein-micronutrient synergy), were identified as high quality resources. The elemental enrichment factors exhibited pronounced plot-specific characteristics, with WZS-1 (for phosphorus), QH-2 (for potassium), DZ-1 (for copper), and CM-1 (for nitrogen and zinc) showing outstanding performance. Correlation analysis confirmed that soil pH was highly significantly positively correlated with the accumulation of magnesium and potassium in *C. oleifera* seeds, organic matter was strongly associated with seed copper content, and available phosphorus showed significant positive correlations with calcium and zinc contents. This study reveals that maintaining slightly acidic to neutral soil, increasing organic fertilizer application, and balancing phosphorus fertilization are key measures for enhancing the nutritional quality of *C. oleifera* seeds in Hainan. It would provide a theoretical basis for the selection of high-quality seed resources, targeted cultivation practices, and the optimization of processed product quality.

Keywords: Hainan; *Camellia oleifera*; soil; *Camellia oleifera* seeds; elements

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.022

油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 是山茶科 (Theaceae) 山茶属 (*Camellia* L.) 多年生常绿小乔木, 为世界四大木本油料植物之一^[1]。早期的研究主要是关于油茶树的育种、栽培繁殖和油茶籽的增产方法等, 后来油茶籽中的各种成分及其相关活性的研究正日益受到重视^[2], 现扩展到油茶种质资源^[3]、组织培养^[4]、油茶籽油^[5]等方向的研究, 近年对油茶果的矿质研究逐渐增多, 但多集中在胁迫和积累特征方向^[6]。油茶籽的品质不仅取决于油脂、蛋白质等主要营养成分, 矿质元素也发挥着关键作用: 氮是蛋白质、核酸的核心组成元素, 直接影响油茶籽的蛋白质合成与营养价值; 磷参与能量代谢与磷脂合成, 对油脂积累具有调控作用; 钾可促进光合产物运输, 提升籽实养分积累效率; 钙、镁作为细胞壁结构成分及酶活性辅助因子, 影响油茶籽的发育与耐储存性; 铜、锌等微量元素则参与多种酶促反应, 调控油脂、蛋白质的合成过程^[7-8]。目前, 关于土壤环境对油茶生长及品质影响的研究, 多集中于我国亚热带核心产区, 普遍认为土壤 pH、有机质及氮磷钾含量是主导因子^[9]。然而, 海南岛土壤多属砖红壤, 呈强酸性, 其成土母质、风化程度及元素地球化学背景与大陆产区存在显著差异^[10]。这种

独特的土壤环境如何影响油茶对营养元素的吸收与转运, 并最终塑造海南油茶籽独特的元素指纹特征, 目前尚缺乏系统性的研究与明确结论。

海南省因其独特的热带季风气候条件, 已成为我国油茶种植的南缘产区。然而, 与湖南、江西等油茶传统优势区相比, 海南油茶在果实产量与品质形成方面展现出明显的区域特异性。已有研究表明, 植物产品的品质与产量在很大程度上受其生长立地环境, 尤其是土壤环境因子的制约^[11]。土壤是植物所需矿质营养元素的主要来源, 土壤中大量、中量及微量元素的有效含量及其比例, 直接参与并调控植物的生理代谢过程, 进而影响其生殖生长及果实的内在化学组成^[12]。例如, 土壤中的氮、磷、钾是影响油茶果实产量和含油率的关键因素^[13]; 而钙、镁、锌、硒等元素则与油脂的合成、转化以及油茶籽中功能性成分的积累密切相关^[14-15]。

因此, 本研究通过了解海南油茶主产区林地土壤特征和油茶籽果实的氮、磷、钾等元素, 旨在为明确海南油茶不同区域油茶籽的矿质营养差异, 不仅可揭示其营养特性, 还能的优质油茶籽资源筛选、定向栽培及加工产品品质优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

海南油茶主产区林地土壤和完全成熟油茶籽。

1.2 方法

土壤采集参照 LY/T 1210—1999 森林土壤样品的采集与制备、GB/T 36197—2018 土壤质量土壤采样技术指南和 GB/T 36199—2018 土壤质量土壤采样程序设计指南。2024 年 10 月，于海南油茶主产市县区选取 1~2 块油茶种植地进行采样，每块采集 3 个点，每点采用蛇形取样法，采集土壤 0~20 cm 部分，进行混合并制成混合土壤

样品。将其带回到室内，置于阴凉干燥处，自然风干后过 2 mm（10 目）筛，测 pH；过 0.25 mm（60 目）筛，测有机碳、有机质、全氮、全磷、全钾、硝态氮、铵态氮、碱解氮、有效磷、速效钾、缓效钾含量；过 0.149 mm（100 目）筛，测铜、锌、铅等元素含量。同时，油菜籽与土壤采样点相同，每点采集 5 株油茶，在树冠顶部、内膛和树冠周围采集成熟果实，组成 1 个混合样品，去皮去壳，研碎用于油茶籽中的氮、磷、钾、全钙、全镁、全铜、全锌、全铅等元素测定。采样地信息如表 1 所示。

表 1 采样地信息
Tab. 1 Information sheet of sampling site

样地编号 Lot No.	地址 Location	北纬 North latitude (N)	东经 East longitude (E)	海拔 Height/m	主要栽培品种 Main cultivated varieties	树龄 Tree-age/a	备注 Remark
BT-1	保亭黎族苗族自治县什岭镇八村村委会毛辉村	18°44′57.7921″	109°44′59.1946″	203	琼海种源	8~10	无水肥管理
CM-1	澄迈县金江镇后岭村	19°41′41.2699″	109°54′36.7698″	69	海科大 1、2、3	8~10	无水肥管理
DA-1	定安县富文镇坡寨墟	19°35′05.7819″	110°16′32.5234″	129	海科大 1	8~10	无水肥管理
DA-2	定安县富文镇	19°28′39.4358″	110°14′00.1381″	71	本地种	8~10	无水肥管理
DZ-1	儋州市南丰镇水尾村	19°24′57.3919″	109°29′16.5747″	339	本地种	8~10	无水肥管理
HK-1	海口市三门坡镇青草村	19°44′42.9543″	110°29′58.3367″	46	琼东 3、8	8~10	无水肥管理
QH-1	琼海市中原镇排沟村	19°05′13.7613″	110°30′23.2659″	21	琼海本地种	8~10	无水肥管理
QH-2	琼海市阳江镇卢村	19°04′31.4607″	110°21′16.1258″	29	琼东 3、8、9	8~10	无水肥管理
QZ-1	琼中黎族苗族自治县营根镇新伟分场十七队	19°00′07.5729″	109°44′17.1773″	588	万海 1、3、4	8~10	无水肥管理
TC-1	屯昌县西昌镇南遍水库	19°24′36.0399″	110°02′18.3014″	140	海科大 1、2、3	8~10	无水肥管理
WZS-1	五指山市南圣镇同甲村委会番道村	18°45′18.0780″	109°40′32.0618″	540	本地种	8~10	无水肥管理

土壤 pH 测定采用电位法；土壤有机碳、有机质含量测定采用重铬酸钾氧化外加热法；土壤全氮和油茶籽氮含量测定采用全自动凯氏定氮法；土壤全磷和油茶籽磷含量测定采用酸溶-分光光度法；土壤全钾和油茶籽钾含量测定采用酸溶-火焰光度计法；土壤有效磷含量测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法；土壤速效钾、缓效钾含量测定采用乙酸铵浸提-火焰光度计法；土壤硝态氮含量测定采用紫外分光光度法；土壤铵态氮含量测定采用分光光度法；土壤碱解氮含量测定采用碱解扩散法；土壤铜、锌、铅含量测定采用火焰原子吸收分光光度法；油茶籽全钙、全镁含量测定采用火焰原子吸收光谱法；油茶籽铅含量测定采用石墨炉原子吸收光谱法；土壤-油茶籽元

素迁移聚集特征采用生物富集系数法^[16-17]，富集系数（TF）=C_m/C_p，式中，C_m为油茶籽的元素含量；C_p为土壤的元素含量^[18-19]。

1.3 数据处理

采用 WPS Excel 2023 软件进行数据整理，采用 SPSS 26.0 软件对土壤和油茶籽元素进行方差分析(One-way ANOVA Duncan),采用 SPSS 26.0、R 4.2.0、Origin 2024 软件统计作图，分析油茶土壤与油茶籽元素的相关性。

2 结果与分析

2.1 海南油茶主产区林地土壤基本特性

由表 2 可知，土壤 pH 是反映土壤酸碱性的核心指标，直接影响土壤养分有效性及微生物

活性，11 个样地土壤 pH 范围为 3.83~6.90，整体呈强酸性至弱酸性，以定安土壤偏中性，五指山土壤呈强酸性为主，且样地间差异极显著 ($P<0.01$)。

土壤有机碳 (SOC)、有机质 (SOM) 及氮素 (全氮、碱解氮、硝态氮、铵态氮) 是衡量土壤肥力的关键指标，直接影响土壤保肥能力及作物养分供应，有机碳与有机质含量变化趋势完全一致。WZS-1 样地有机碳、有机质含量最低，DA-1 样地最高，是 WZS-1 样地的 6.17 倍，低含量可能与土壤侵蚀、人为干扰 (如耕作、施肥不足) 有关。全氮、碱解氮、铵态氮与有机碳含量低的趋势一致，符合“碳氮比相对稳定”的土壤特性，

样地氮素有效性高，碳氮循环耦合性强，均以 BT-1 样地最高，全氮含量是 WZS-1 样地的 4.82 倍，碱解氮含量是 WZS-1 样地的 4.085 倍，铵态氮含量是 DZ-1 样地的 3.05 倍。硝态氮含量差异最大，DA-1 样地最高，是 DA-2 样地的 446.13 倍，而 DA-2 的硝态氮含量极低，仅为 (0.08 ± 0.03) mg/kg，这种差异可能是不同质地土壤的水分特征参数变异很大，影响水分在土壤剖面中的运动，从而影响硝态氮的运移和淋洗，也有可能前期底肥所施入氮量不能满足油茶对氮素的需求、土壤及微生物对氮素的固定，土壤氮库被大量消耗，导致土壤中硝态氮含量很低^[20]。

表 2 海南油茶主产区林地土壤酸碱度、有机质、有机碳及氮形态差异性
Tab. 2 Analysis on differences of soil pH, organic matter, organic carbon and nitrogen forms in forest land of main *C. oleifera* planting areas in Hainan

样地编号 Lot No.	pH	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitric nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen/(mg·kg ⁻¹)
BT-1	5.89±0.05 ^E	14.94±0.24 ^D	25.74±0.41 ^D	1.83±0.18 ^A	2.60±0.10 ^D	66.69±10.98 ^A	124.20±11.90 ^A
CM-1	4.18±0.03 ^H	6.74±0.44 ^F	11.62±0.75 ^F	0.53±0.21 ^{CD}	0.70±0.25 ^{EF}	46.81±1.98 ^{BC}	36.20±14.39 ^{CD}
DA-1	6.58±0.03 ^B	23.45±0.55 ^A	40.43±0.94 ^A	0.76±0.00 ^C	35.69±0.69 ^A	54.37±3.59 ^B	51.70±0.00 ^C
DA-2	6.90±0.03 ^A	17.12±0.75 ^C	29.51±1.29 ^C	1.14±0.01 ^B	0.08±0.03 ^F	48.52±1.92 ^{BC}	77.27±0.81 ^B
DZ-1	5.94±0.02 ^E	15.26±0.85 ^D	26.31±1.46 ^D	1.15±0.04 ^B	4.21±0.15 ^C	21.83±2.70 ^E	78.23±2.75 ^B
HK-1	6.16±0.03 ^D	14.05±0.54 ^D	24.21±0.92 ^D	1.14±0.22 ^B	6.77±0.92 ^B	42.59±4.13 ^C	77.30±15.16 ^B
QH-1	5.71±0.03 ^F	7.94±0.34 ^{EF}	13.69±0.58 ^{EF}	0.56±0.01 ^{CD}	2.84±0.07 ^D	31.82±3.20 ^D	38.17±0.71 ^{CD}
QH-2	6.36±0.03 ^C	8.48±0.47 ^E	14.61±0.81 ^E	0.68±0.03 ^C	0.85±0.14 ^{EF}	23.12±2.99 ^{DE}	46.00±1.71 ^C
QZ-1	5.35±0.03 ^G	8.63±0.52 ^E	14.88±0.89 ^E	0.60±0.03 ^{CD}	0.59±0.16 ^F	45.61±0.59 ^{BC}	40.57±2.04 ^{CD}
TC-1	4.22±0.03 ^H	21.75±0.94 ^B	37.49±1.62 ^B	1.07±0.09 ^B	1.55±0.28 ^E	42.07±0.89 ^C	72.77±5.78 ^B
WZS-1	3.83±0.03 ^I	3.80±1.00 ^G	6.55±1.71 ^G	0.38±0.03 ^D	0.36±0.02 ^F	35.90±2.59 ^{CD}	25.60±2.19 ^D

注：同列数据后不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)。
Note: Different capital letters after the same column of data indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

由表 3 可知，油茶林地土壤全磷样地间表现出极显著差异 ($P<0.01$)，HK-1 样地全磷含量最高，显著高于其他样地；WZS-1 样地全磷最低，磷素储备不足。有效磷含量范围为 0.33~4.66 mg/kg，QH-2 样地有效磷最高，但全磷含量仅为 (94.22 ± 13.67) mg/kg，说明该样地土壤磷素有效性高，可能与 pH 适中有关，弱酸性条件下磷不易被固定；DA-2 样地有效磷最低，虽全磷含量为 (165.61 ± 14.35) mg/kg，但 pH 较高，可能导致磷与钙结合形成难溶性磷酸盐，降低有效性。

全钾含量范围为 0.04~1.33 g/kg，BT-1 样地全钾最高，钾素储备充足；QH-2 样地全钾最低，可能因土壤质地为砂质，钾素淋溶流失严重。速效

钾含量范围为 3.91~210.80 mg/kg，HK-1 样地速效钾最高，QH-2 样地速效钾最低，与全钾含量低的趋势一致，钾素供应能力极弱。缓效钾含量范围为 23.28~628.37 mg/kg，BT-1 样地缓效钾最高，与全钾含量趋势一致，说明该样地钾素可持续供应能力强，QH-2、CM-1 样地缓效钾低于 40 mg/kg，钾素储备不足，长期种植易导致钾素缺乏。

2.2 海南油茶主产区林地土壤重金属差异性

由表 4 可知，11 个样地土壤中铜、锌、铅含量均存在极显著差异 ($P<0.01$)。铜含量范围为 0.46~82.98 mg/kg。HK-1 样地含量最高，显著高于其他样地，次高为 TC-1 样地，DZ-1 与 QH-1 含量

表 3 海南油茶主产区林地土壤磷、钾元素形态差异性
Tab. 3 Morphological differences of soil phosphorus and potassium in forest land of main *C. oleifera* planting areas in Hainan

样地编号 Lot No.	全磷 Total phosphorus (mg·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Effective phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Quick-acting potassium/ (mg·kg ⁻¹)	缓效钾 Slowly available potassium/(mg·kg ⁻¹)
BT-1	214.15±34.39 ^B	1.33±0.03 ^A	1.47±0.26 ^{CD}	60.78±1.09 ^D	628.37±13.91 ^A
CM-1	72.84±7.04 ^C	0.13±0.01 ^I	0.63±0.16 ^{DE}	47.42±1.75 ^{EF}	36.03±0.61 ^H
DA-1	174.78±17.53 ^{BC}	0.46±0.01 ^E	3.85±0.09 ^B	149.62±5.80 ^B	155.77±1.63 ^D
DA-2	165.61±14.35 ^{BC}	0.50±0.02 ^D	0.33±0.05 ^E	95.66±1.13 ^C	235.43±15.06 ^C
DZ-1	59.15±17.32 ^C	0.16±0.01 ^H	1.73±0.08 ^C	42.37±2.08 ^F	63.99±3.09 ^G
HK-1	1222.66±113.41 ^A	0.55±0.01 ^C	3.78±0.68 ^B	210.80±1.61 ^A	154.11±10.21 ^D
QH-1	122.54±17.79 ^C	0.19±0.01 ^{GH}	1.82±0.16 ^C	64.81±5.49 ^D	59.79±2.91 ^G
QH-2	94.22±13.67 ^C	0.04±0.00 ^J	4.66±0.07 ^A	3.91±1.47 ^H	23.28±1.07 ^H
QZ-1	81.16±12.28 ^C	0.64±0.01 ^B	1.09±0.05 ^D	68.21±1.52 ^D	354.74±1.32 ^B
TC-1	128.09±30.28 ^{BC}	0.28±0.02 ^F	1.31±0.11 ^{CD}	52.38±6.45 ^E	134.15±2.05 ^E
WZS-1	33.24±16.22 ^C	0.20±0.01 ^G	1.04±0.07 ^D	16.55±1.02 ^G	113.56±3.59 ^F

注：同列数据后不同大写字母表示处理间差异极显著（ $P<0.01$ ）。

Note: Different capital letters after the same column of data indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

表 4 海南油茶主产区林地土壤重金属差异性
Tab. 4 Differential analysis of heavy metals in woodland soil in main *C. oleifera* planting areas of Hainan mg/kg

样地编号 Lot No.	铜 Copper	锌 Zinc	铅 Lead
BT-1	17.64±0.31 ^C	28.13±0.11 ^E	1.59±0.12 ^I
CM-1	2.17±0.04 ^{FG}	11.64±0.23 ^G	13.63±0.27 ^F
DA-1	3.03±0.08 ^F	28.27±0.85 ^E	42.21±1.44 ^D
DA-2	3.76±0.11 ^{EF}	81.66±3.28 ^B	69.52±2.38 ^A
DZ-1	0.46±0.02 ^G	43.39±1.67 ^D	46.53±1.73 ^C
HK-1	82.98±2.88 ^A	124.02±3.36 ^A	20.61±0.62 ^E
QH-1	0.69±0.02 ^G	16.36±0.39 ^F	9.82±0.30 ^G
QH-2	5.20±0.16 ^E	20.29±0.51 ^F	5.25±0.17 ^H
QZ-1	8.97±0.30 ^D	80.44±2.03 ^B	44.70±1.74 ^{CD}
TC-1	21.15±0.42 ^B	52.15±1.61 ^C	21.85±0.64 ^E
WZS-1	7.61±0.23 ^D	56.10±1.78 ^C	56.27±1.84 ^B

注：同列数据后不同大写字母表示处理间差异极显著（ $P<0.01$ ）。

Note: Different capital letters after the same column of data indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

最低，无显著差异，接近自然背景水平。锌含量范围为 11.64~124.02 mg/kg。HK-1 样地含量最高，DA-2 与 QZ-1 为中高值，无显著差异；CM-1 样地含量最低。铅含量范围为 1.59~69.52 mg/kg，是重金属中跨度最大的元素。DA-2 样地含量最高，WZS-1、DZ-1、QZ-1 为中值区，无显著差异；BT-1 样地含量最低。

2.3 海南油茶主产区油茶籽元素分析

由表 5 可知，11 个油茶籽样品的各元素指标存在极显著差异（ $P<0.01$ ）。其中，QH-1 的氮含量最高，与 HK-1 无显著差异，但显著高于其他样品；DA-1 次之；DZ-1 和 QZ-1 的氮含量最低，二者无显著差异。这一结果表明，QH-1 和 HK-1 油茶籽的蛋白质合成能力可能更强，或其生长环境中氮素供应更充足。

磷参与油茶籽的能量代谢及磷脂合成，对油脂积累具有重要意义，HK-1 的磷含量最高，显著高于其他所有样地，该样地可能对磷素的吸收与积累能力较强，或生长环境中磷素供应充足，这可能为其油脂合成提供了良好的物质基础，其磷含量是最低样地 QH-2 的 2.34 倍，WZS-1、BT-1、DA-1 次之，三者间无显著差异。

钾可促进油茶的光合作用及光合产物向籽实运输，是籽实养分积累的重要调控元素，HK-1 的钾含量最高，显著高于其他样地；DA-1 次之，QZ-1 的钾含量最低，与 DZ-1、TC-1 无显著差异。

钙是油茶籽细胞壁的重要组成成分，同时参与细胞信号传导，影响籽实发育与耐储存性，QH-2 的全钙含量最高，显著高于其他样地，可能使其细胞壁结构更稳定，籽实耐储存性更强，适合长期加工利用，CM-1 次之，DZ-1 的全钙含量最低，与 BT-1、QZ-1、DA-2 差异显著。

表 5 海南油茶主产区油茶籽元素差异性
Tab. 5 Analysis results of element differences in *Camellia* seeds from major *C. oleifera* planting areas in Hainan

样地编号 Lot No.	氮 Nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	磷 Phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	钾 Potassium/ (g·kg ⁻¹)	全钙 Total calcium/ (mg·kg ⁻¹)	全镁 Total magnesium/ (g·kg ⁻¹)	全铜 Full copper/ (mg·kg ⁻¹)	全锌 Full zinc/ (mg·kg ⁻¹)	铅 Lead/ (mg·kg ⁻¹)
BT-1	13.44±0.43 ^C	9.95±0.35 ^B	8.72±0.28 ^{BC}	87.88±2.70 ^E	8.49±0.29 ^{CD}	11.10±0.34 ^C	32.01±1.21 ^C	0.037±0.005 ^B
CM-1	13.03±0.41 ^{CD}	8.82±0.33 ^C	8.50±0.27 ^C	118.94±3.41 ^B	7.37±0.26 ^E	8.63±0.30 ^F	30.06±1.06 ^C	0.033±0.003 ^{BC}
DA-1	14.39±0.41 ^B	9.77±0.31 ^B	9.24±0.28 ^B	106.79±3.21 ^C	8.80±0.29 ^C	13.93±0.38 ^A	36.95±1.30 ^{AB}	0.053±0.003 ^A
DA-2	11.32±0.35 ^E	8.59±0.28 ^{CD}	8.39±0.27 ^C	82.27±2.55 ^E	8.25±0.27 ^{CD}	10.82±0.32 ^{CD}	32.29±1.22 ^C	0.054±0.002 ^A
DZ-1	10.49±0.31 ^E	8.12±0.27 ^{CD}	7.95±0.26 ^{CD}	69.98±2.10 ^F	7.60±0.24 ^{DE}	10.86±0.31 ^{CD}	32.48±1.13 ^{BC}	0.031±0.002 ^{BC}
HK-1	15.07±0.46 ^{AB}	18.25±0.60 ^A	10.49±0.33 ^A	99.46±2.78 ^D	10.53±0.34 ^A	10.52±0.31 ^{CD}	34.42±1.23 ^{BC}	0.038±0.003 ^B
QH-1	15.31±0.41 ^A	8.10±0.25 ^{CD}	8.35±0.22 ^{CD}	111.28±3.07 ^C	9.57±0.28 ^B	9.43±0.26 ^E	36.68±1.28 ^{AB}	0.010±0.001 ^D
QH-2	12.27±0.35 ^D	7.80±0.24 ^D	8.41±0.23 ^C	145.58±3.80 ^A	8.10±0.25 ^D	12.58±0.35 ^B	38.71±1.27 ^A	0.024±0.010 ^C
QZ-1	10.56±0.30 ^E	8.39±0.26 ^{CD}	7.79±0.21 ^D	87.77±2.20 ^E	8.24±0.26 ^{CD}	10.44±0.30 ^{CD}	34.11±1.12 ^{BC}	0.013±0.001 ^D
TC-1	12.43±0.32 ^D	7.91±0.24 ^D	7.92±0.20 ^{CD}	94.73±2.61 ^D	6.44±0.19 ^F	12.19±0.31 ^B	33.76±1.10 ^{BC}	0.014±0.002 ^D
WZS-1	11.97±0.31 ^{DE}	10.43±0.30 ^B	8.14±0.21 ^{CD}	97.97±2.40 ^D	6.73±0.19 ^F	10.35±0.28 ^D	35.12±1.11 ^B	0.048±0.001 ^A

注：同列数据后不同大写字母表示处理间差异极显著（ $P<0.01$ ）。
Note: Different capital letters after the same column of data indicate extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

镁是叶绿素的核心组成元素，直接影响油茶的光合效率，同时也是多种酶的激活剂，HK-1 的全镁含量最高，显著高于其他样地；QH-1 次之，TC-1 和 WZS-1 的全镁含量最低，二者无显著差异。

铜是油茶籽中多酚氧化酶、超氧化物歧化酶等酶的组成成分，参与抗氧化反应及物质代谢，DA-1 的全铜含量最高，显著高于其他样地，可能使其抗氧化能力更强，籽实中活性物质的稳定性更高，QH-2、TC-1 次之，二者无显著差异，CM-1 的全铜含量最低，显著低于其他样地。

锌参与油茶籽中脱氢酶、蛋白酶等酶的活性调控，对油脂和蛋白质合成具有重要作用，QH-2 的全锌含量最高，显著高于其他样地；DA-1、QH-1 次之，二者与 QH-2 无显著差异，但显著高于其他样地，CM-1 的全锌含量最低。

DA-2 的铅含量最高，与 DA-1、WZS-1 样品差异不显著，BT-1、CM-1、DZ-1、HK-1 样品差异极显著。CM-1、DZ-1 的铅含量与 QH-2 样品差异不显著，表现出过渡性特征，QH-1、QZ-1、TC-1 样品铅含量最低，与其他样品差异极显著。

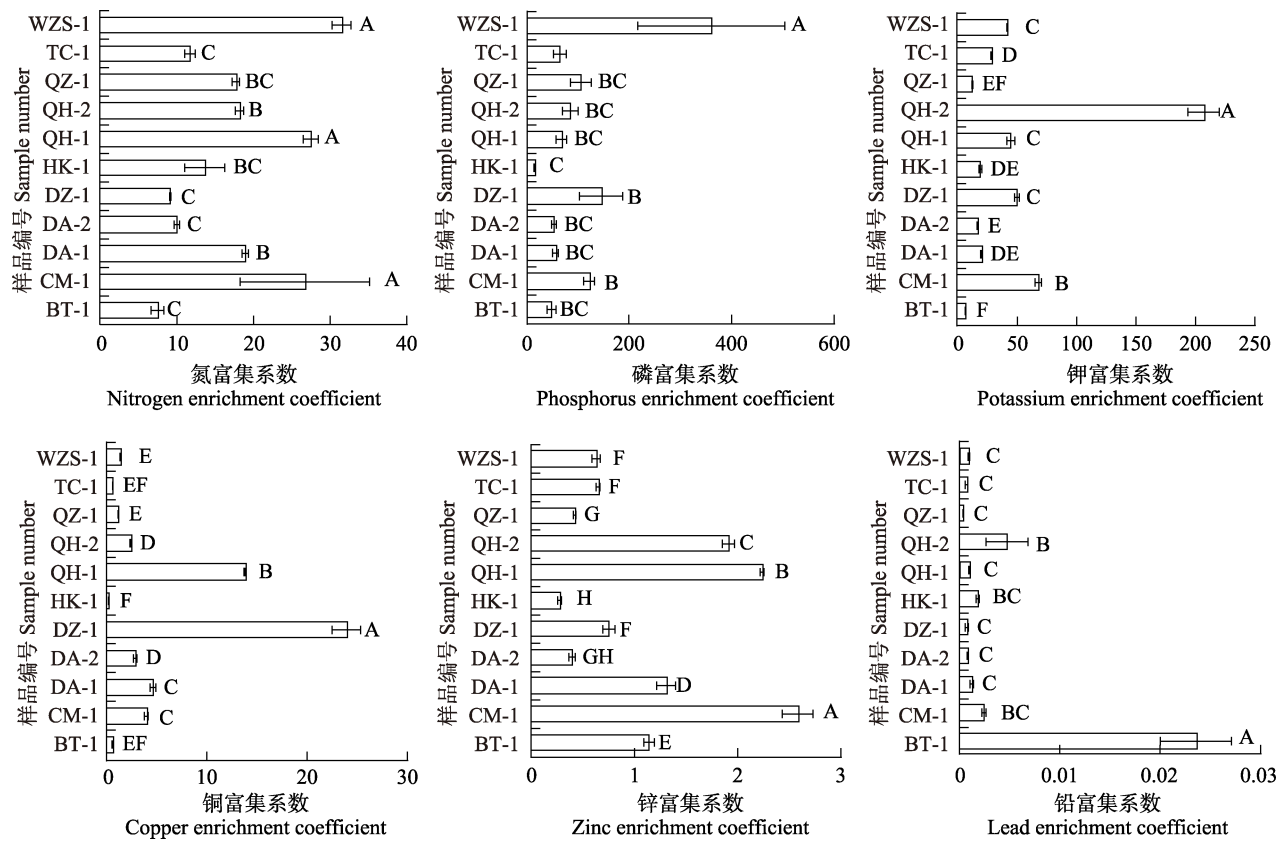
2.4 海南油茶主产区油茶籽元素富集性评价

由图 1 可知，不同样地间氮富集系数差异极显著，变幅在 7.41~31.51 之间，其中，WZS-1、CM-1 和 QH-1 样地的氮富集系数极显著高于其他样地（ $P<0.01$ ），而 BT-1、DA-2 和 DZ-1 样地的氮富集系数相对较低。磷富集系数变幅为 15.01~360.28，WZS-1 样地的磷富集系数（360.28）极

显著高于其他所有样地（ $P<0.01$ ），HK-1 样地的磷富集系数（15.01）最低。钾富集系数在元素中变幅最大（6.58~207.08），QH-2 样地的钾富集系数（207.08）极显著高于其他样地（ $P<0.01$ ），而 BT-1 样地的钾富集系数（6.58）最低。不同样地铜富集系数差异极显著，变幅为 0.13~23.89。DZ-1 样地的铜富集系数（23.89）最高，其次是 QH-1 样地（13.77），而 HK-1 样地的铜富集系数（0.13）最低。锌富集系数变幅在 0.28~2.58 之间，CM-1 样地的锌富集系数（2.58）最高，QH-1 样地（2.24）次之，而 HK-1 样地（0.28）的锌富集系数最低。不同样品的铅富集系数差异极显著（ $P<0.01$ ）。BT-1 样品的铅富集系数最高，极显著高于其他所有样品，QH-2 样品的铅富集系数极显著低于 BT-1，属于中等富集水平。CM-1、HK-1 二者的铅富集系数无显著差异，富集水平介于 QH-2 与低富集样品之间。DA-1、QH-1、WZS-1、DA-2、DZ-1、TC-1、QZ-1 共 7 份样品的铅富集系数均低于 0.0012，其中 QZ-1 样品的铅富集系数最低。

2.5 海南油茶主产区林地土壤对油茶籽元素的相关性分析

通过 Pearson 相关性分析，由图 2 可知，土壤有机碳与有机质呈极显著正相关（ $r=1$ ），因土壤有机质含量通过有机碳换算（有机质=有机碳×1.724），二者为同一物质的不同量化表达；土壤全氮与碱解氮（ $r=1$ ），碱解氮是全氮中易被油茶吸收的活性部分，直接依赖全氮的转化效率。土



不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。
Different capital letters indicate extremely significant difference among treatments ($P < 0.01$).
图 1 海南油茶主产区油茶籽不同元素富集系数分析
Fig. 1 Analysis results of *C. oleifera* seed element transport coefficients in major *C. oleifera* planting areas of Hainan

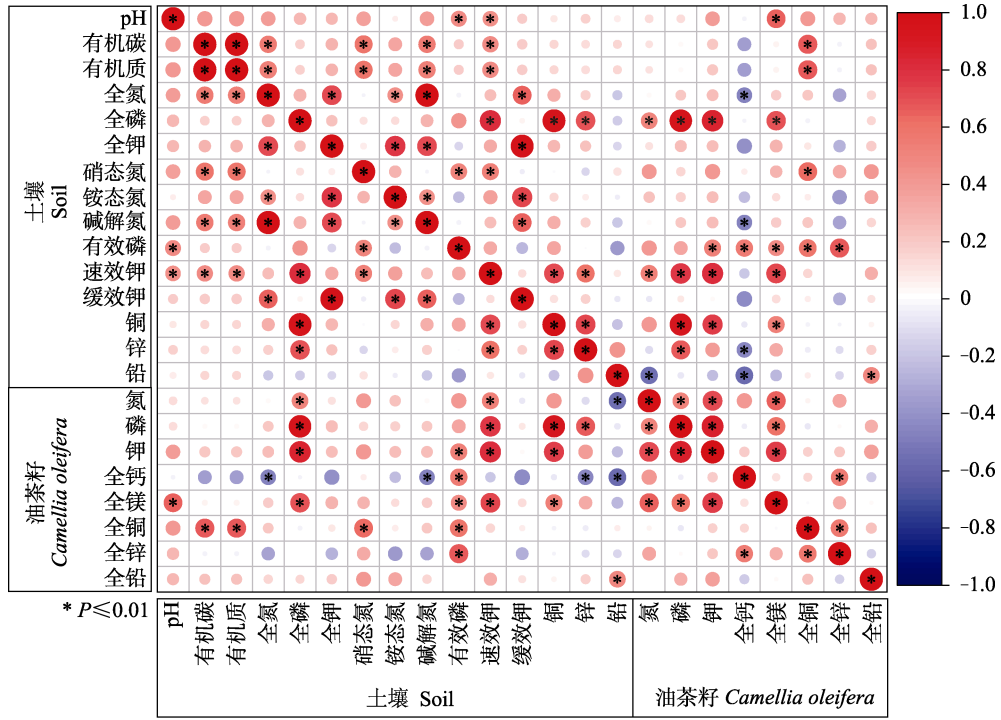


图 2 海南油茶主产区林地土壤对油茶籽元素的 Pearson 相关性分析
Fig. 2 Pearson correlation analysis of soil elements in major *C. oleifera* planting areas of Hainan

壤全磷与土壤铜($r=0.957$)、土壤速效钾($r=0.812$)呈极显著正相关;土壤全钾与土壤缓效钾呈极显著正相关($r=0.971$),缓效钾是全钾的储备形态,可缓慢转化为速效钾供油茶吸收,二者强相关体现土壤中钾素在系统中的动态平衡。油茶籽中全磷与土壤中的全磷($r=0.943$)和铜($r=0.920$)呈极显著正相关,油茶籽中全钾与土壤中的全磷($r=0.851$)和速效钾($r=0.816$)呈极显著正相关。油茶籽中钾元素和磷元素呈极显著正相关($r=0.873$),表明油茶对土壤速效钾吸收存在同步性,反映大量元素的协同需求。油茶籽养分指标间协同效应显著,氮与钾、全镁分别呈强正相关($r=0.744$ 、 0.618),钾与全镁呈强正相关($r=0.685$),重金属指标中,全铜与全锌呈中等正相关($r=0.427$),全铅与磷呈强正相关($r=0.618$);全钙与锌呈强负相关($r=-0.595$),与氮、钾呈中等正相关($r=0.599$ 、 0.405),结果

表明钙元素对不同元素积累的双重影响。

通过 Mantel 检验结果显示(图 3),土壤养分与油茶籽氮、磷、钾的整体关联极显著($r>0.5$, $P<0.001$),表明大量元素的土壤供应直接影响籽实积累;土壤养分与钙、镁的关联显著($0.25<r<0.5$, $0.001\leq P<0.01$);土壤养分与铜、锌、铅的关联较弱($r<0.25$, $0.01\leq P<0.05$),说明微量元素及重金属的籽实积累受土壤以外因素(如品种、环境)影响更大。从图 3 可知,土壤全氮、碱解氮与油茶籽氮呈强正相关($r>0.8$);土壤全磷、有效磷与油茶籽磷呈显著正相关($r>0.7$);土壤全钾、速效钾与油茶籽钾呈中等正相关($r\approx 0.6$)。土壤交换性钙、镁与油茶籽钙、镁呈弱正相关($r\approx 0.3$);土壤有效铜、锌与油茶籽铜、锌无显著关联($r<0.2$)。土壤铅与油茶籽铅呈极弱正相关,且无显著性,说明油茶籽铅积累对土壤铅的响应不敏感。

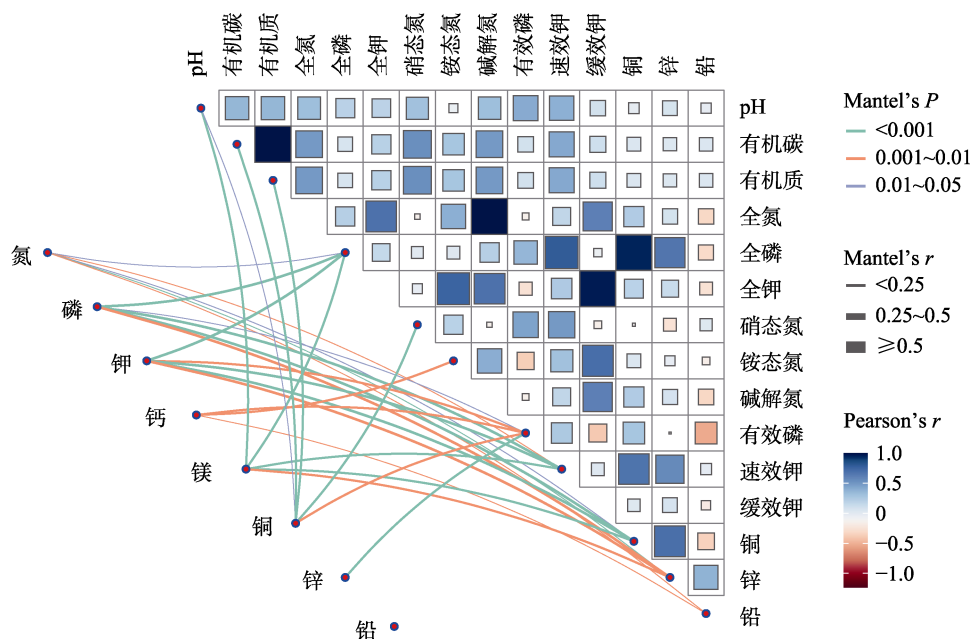


图 3 海南油茶主产区林地土壤对油茶籽元素的 Mantel test 热图相关性

Fig. 3 Correlation of Mantel test heat map of soil elements in main *C. oleifera* planting areas of Hainan

3 讨论

海南油茶主产区土壤强酸性至弱酸性的特征,与砖红壤的成土过程密切相关^[21]。强酸性土壤($\text{pH}<4.5$)氢离子浓度过高会抑制微生物活性,减缓有机碳和氮素分解,导致养分有效性降低^[22];而微酸至中性土壤($\text{pH } 5.5\sim 6.5$)既有利于磷素的释放,避免与钙、铝等结合形成难溶性化合物,又能维持土壤微生物活性,提升养分循环效率,

这也是部分样地有效磷含量较高的重要原因^[23]。

海南油茶林地土壤养分的空间异质性显著,这种异质性是地形、植被覆盖与人为活动共同作用的结果^[24]。定安样地高有机质含量可能与其所处区域油茶种植密度高、凋落物归还量大有关,凋落物分解后持续补充土壤有机碳库,形成良性养分循环^[25];海口样地全磷和速效钾含量异常偏高,结合其地理位置临近农业种植区,推测可能

受到周边农业活动中磷肥、钾肥施用的间接影响,土壤养分库得到外源补充^[26];保亭样地氮钾储备充足,反映出该区域砖红壤在未受强烈人为干扰下的天然肥力优势,可能与成土母质中钾素含量较高及生物固氮作用较强相关^[27-28]。

矿物质元素分布方面,不同样地间差异明显,部分样地铜锌含量较高,部分样地铅含量突出,而部分山区样地重金属含量接近自然背景值。这种差异与样地距离交通污染源的远近及土壤类型密切相关,中部山区样地因远离城市、交通干线等人为干扰源,且高温高湿环境下微生物降解能力强,矿物质元素易通过生物循环被转化或固定,故含量维持在较低水平,这一现象符合热带地区土壤矿物质元素迁移转化的共性规律——自然条件下微生物主导的净化作用显著,而人为干扰是打破这种平衡的关键因子^[29]。

油茶籽矿质元素含量的极显著差异,既源于土壤养分供应的异质性,也与品种遗传特性密切相关,二者共同决定了油茶籽的元素组成特征^[30]。海口样地油茶籽氮、磷、钾、镁含量均居前列,表现出对大量元素的高效积累能力,这与其生长土壤中全磷、速效钾含量高直接相关,大量元素的协同积累为油茶籽油脂和蛋白质合成提供了物质基础,印证了“土壤养分供应水平与植物养分积累呈正相关”的普遍规律^[31];琼海样地油茶籽钙、锌含量最高,铜含量也较高,微量元素的富集使其在抗氧化、酶活性调控等方面具有优势,这一特异性积累可能与该样地油茶品种对微量元素的吸收偏好相关^[32-33];琼海和定安部分样地油茶籽元素组成均衡,其中高铜含量可增强油茶籽抗氧化能力,提升产品储存稳定性,高氮含量则有利于蛋白质积累,这些特征为油茶资源分类利用提供了依据——元素均衡型适合作为通用型优质种质,特色元素富集型可定向开发功能性产品^[34-35]。

元素富集系数的显著差异,揭示了油茶对不同元素的吸收策略多样性,这种多样性是植物适应土壤环境的重要表现^[30]。五指山样地磷富集系数极高,可能是由于该样地土壤磷素有效性低,长期磷胁迫诱导油茶根系产生了高效的磷吸收与富集机制,通过主动运输方式提升磷素吸收效率,这是植物应对养分匮乏环境的典型适应性策略^[36];琼海部分样地钾富集系数突出,与其土壤钾素含量低形成鲜明对比,体现了油茶在低钾胁迫

下的适应性调节能力^[37];儋州样地对铜的高富集能力与对锌的低富集能力并存,表明微量元素的富集机制可能存在特异性或拮抗作用^[38];海口部分样地所有元素富集系数均较低,可能因其土壤养分本底值高,油茶无需投入过多能量进行主动转运即可满足需求,属于“奢侈吸收”后的低富集策略^[39]。

土壤因子对元素迁移的调控作用显著,不同因子通过特定机制影响油茶籽元素积累:pH 通过影响根系细胞膜透性和养分形态,调控镁、钾的吸收积累,酸性条件下根系细胞膜透性降低,镁、钾离子跨膜运输受阻,而微酸至中性环境下膜透性适宜,离子转运效率提升^[40];有机质通过改善土壤结构、提升保肥能力,促进铜等微量元素的有效性,有机质分解产生的有机酸可与铜离子形成络合物,减少铜的固定,同时改善土壤孔隙结构,促进根系生长,扩大吸收面积^[41];有效磷不仅直接影响油茶籽磷含量,还通过改变根际环境促进钙、锌的吸收,这与磷肥施用后根际 pH 变化及元素协同作用有关^[42]。此外,油茶籽钾与磷的显著正相关,反映了大量元素吸收的协同需求,钾促进光合产物向籽实运输,磷为油脂合成提供能量,二者的协同积累是油茶籽高品质形成的重要保障,这一协同关系为平衡施肥提供理论依据^[43]。

研究发现部分土壤因子间存在独特关联,这可能是海南热带气候与砖红壤特性共同作用的结果。热带地区高温高湿的环境加速了土壤矿物质的风化,磷素易与铁、铝结合形成固定态,而部分微量元素的存在可能通过促进磷酸酶活性,缓解磷的固定,使土壤中有效磷含量维持在一定水平,同时磷与钾在土壤胶体上的吸附位点存在协同作用,导致二者含量呈现同步变化^[44]。这一现象揭示了热带砖红壤中元素循环的特殊性,与亚热带红壤中磷素易被单独固定的特征形成鲜明对比。

土壤 pH 与油茶籽中镁、钾含量呈现强相关性,揭示了酸性土壤改良是提升油茶籽中矿质营养含量的关键。与温带地区相比,海南砖红壤氢离子浓度更高,对镁、钾吸收的抑制作用更显著,因此 pH 调节的增产提质效果可能更突出,通过施用石灰、有机肥等改良剂可有效缓解酸胁迫,提升养分有效性^[45];土壤有机质与油茶籽铜的强相关性,证实了有机肥在提升油茶籽中微量元素

有效性方面的重要性,有机肥分解产生的有机酸可活化土壤中固定态铜,使其更易被油茶根系吸收,为有机肥施用提供精准依据^[46]。

油茶籽钾与磷的极显著正相关,反映了二者在能量代谢和物质转运中的协同作用,钾促进光合产物向籽实运输,磷为油脂合成提供能量,二者的协同积累是油茶籽高品质形成的重要保障^[47];铜与锌的显著正相关,则体现了微量元素在抗氧化系统中的协同效应,铜是超氧化物歧化酶的组分,锌参与脱氢酶活性调控,二者共同提升油茶籽的抗逆性和储存稳定性,这一相关性为油茶籽功能性成分的调控提供了理论依据^[48]。

基于研究结果,海南油茶优质栽培应聚焦3个核心:一是土壤酸度调控,通过施用石灰、有机肥等改良剂,将土壤pH维持在微酸至中性,提升镁、钾等元素的有效性^[49];二是有机肥增施,提高土壤有机质含量,强化铜等微量元素的供应,同时改善土壤结构,增强保肥保水能力^[50];三是平衡施用磷肥,在补充磷素的同时,促进钙、锌等元素的协同积累,避免氮素过量导致的钙吸收抑制^[51]。此外,应根据资源特征进行定向栽培,如大量元素富集型品种可用于优质油料生产,微量元素优势型品种可开发功能性食品。

本研究存在一定局限性:一是样地数量有限,且主要集中在油茶种植相对集中的市县,未能完全覆盖海南所有油茶产区,部分偏远山区或新种植区未纳入研究,可能导致样本代表性少,难以全面反映海南油茶林地土壤与油茶籽元素特征的整体格局;二是未严格控制品种纯度,部分样地为多品种混栽,且未排除树龄差异、种植密度等环境因子的干扰,难以精准区分遗传因素与环境因素对油茶籽元素积累的贡献率;三是未结合油脂、脂肪酸组成等核心品质指标,无法全面揭示矿质元素与油茶籽品质的内在联系。

针对上述局限性,后续研究应扩大样地范围,涵盖海南岛东、西、南、北、中不同区域的油茶产区,增加样本数量与代表性;严格筛选单一品种种植样地,控制树龄、种植密度等干扰因子,通过多元回归分析量化遗传与环境因素的影响权重;增加油脂含量、脂肪酸组分、蛋白质含量等品质指标测定,深入探究矿质元素对品质的调控机制;开展长期定位试验,研究土壤改良和施肥措施对油茶生长及品质的持续影响,为产业高质量发展提供更全面的技术支撑。

4 结论

海南油茶主产区土壤呈强酸性至弱酸性(pH 3.83~6.90),养分空间差异显著:DA-1有机质最高,BT-1氮素含量最丰富,HK-1全磷和速效钾最高,QH-2有效磷最高。土壤Cu、Zn、Pb含量异质性强,HK-1的Cu、Zn和DA-2的Pb含量突出。油茶籽中氮、磷、钾、全钙、全镁、全铜、全锌含量差异极显著,全钙变异最大。HK-1(大量元素)、QH-2(微量元素)、QH-1(综合优质)和DA-1(高蛋白与微量元素协同)被认定为优质油茶籽资源。不同样地油茶对元素的富集能力差异明显:WZS-1对磷、QH-2对钾、DZ-1对铜、CM-1对氮和锌富集能力强,HK-1则普遍较低。

关键环境因子表明:热带砖红壤强酸性至弱酸性特征是油茶养分吸收的核心调控因子;土壤有机质、有效磷含量与油茶籽元素积累呈显著正相关;维持土壤微酸至中性、增施有机肥、平衡磷肥是提升油茶籽营养品质的通用技术路径,为热带木本油料植物定向培育提供参考。

参考文献

- [1] 姜毅,陈洁宇,龚涵,李楠昕,郭鑫森,袁迎春,胡观兴,龚文芳.油茶种间杂交F₁代枝叶性状及花期分析[J].林业科学研究,2025,38(2):127-136.
JIANG Y, CHEN J Y, GONG H, LI N X, GUO X M, YUAN Y C, HU G X, GONG W F. Analysis of foliar-branch traits and flowering phenology in F₁ progeny of interspecific hybridization in *Camellia oleifera*[J]. Forest Research, 2025, 38(2): 127-136. (in Chinese)
- [2] 徐雪峰,闫浩,张玉,杜金凤,卢利方.油茶籽中三个主要成分的提取及其活性研究进展[J].包装与食品机械,2018,36(4):44-48.
XU X F, YAN H, ZHANG Y, DU J F, LU L F. Research progress on extraction and activity of the three main components of *Camellia Oleifera* seeds[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(4): 44-48. (in Chinese)
- [3] 艾家萱,郑道君,吴霞.油茶种质资源及化学成分和药理活性研究进展[J].食品与药品,2025,27(2):209-218.
AI J X, ZHENG D J, WU X. Progress in germplasm resources, chemical composition and pharmacological activities of *Camellia Oleifera*[J]. Food and Drug, 2025, 27(2): 209-218. (in Chinese)
- [4] 刘进平,胡海燕,吴文婧,黄小龙,黄东益,王健,赖杭桂.油茶组织培养研究进展[J].经济林研究,2024,42(4):14-33.

- LIU J P, HU H Y, WU W Q, HUANG X L, HUANG D Y, WANG J, LAI H G. Research progress of oil-tea *Camellia* culture *in vitro*[J]. Non-wood Forest Research, 2024, 42(4): 14-33. (in Chinese)
- [5] 杨海余, 龚文芳, 崔坤鹏, 旷敏, 赵小英, 朱咏华, 袁德义, 刘选明. 油茶籽油品质量性状研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(8): 210-223.
- YANG H Y, GONG W F, CUI K P, KUANG M, ZHAO X Y, ZHU Y H, YUAN D Y, LIU X M. Progress of research on quality characteristics of *Camellia oleifera* seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(8): 210-223. (in Chinese)
- [6] 喻苏琴, 李凤娇, 胡冬南, 郭晓敏, 李科, 裘利洪. 不同氮水平条件下油茶苗养分积累及化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(4): 1-9.
- YU S Q, LI F J, HU D N, GUO X M, LI K, QIU L H. Nutrient accumulation and stoichiometric characteristics of *Camellia oleifera* seedlings under different nitrogen levels[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(4): 1-9. (in Chinese)
- [7] 寻成峰, 沈建才, 何之龙, 张英, 许彦明, 王瑞. 油茶诱变育种研究进展与展望[J]. 核农学报, 2025, 39(5): 944-952.
- XUN C F, SHEN J C, HE Z L, ZHANG Y, XU Y M, WANG R. Advancements and prospects in mutational breeding of oil-tea *Camellia*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(5): 944-952. (in Chinese)
- [8] LUO J, ZHOU X L, TIAN Y X, CHEN Y Z, CHEN L S. Distribution of nutrients in *Camellia oleifera* Abel. and their correlation with soil nutrients over the period of fruit maturation[J]. Bangladesh Journal of Botany, 2020, 49(3): 499-505.
- [9] 仇杰. 贵州省油茶主产区土壤与树体养分状况研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- QIU J. Study on Nutrient status of soil and tree in main planting areas of *Camellia oleifera* in Guizhou province[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023. (in Chinese)
- [10] 龚子同, 张甘霖, 赵文君, 陈志诚, 欧阳洮, 赵玉国. 海南岛土壤中铝钙的地球化学特征及其对生态环境的影响[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 200-207.
- GONG Z T, ZHANG G L, ZHAO W J, CHEN Z C, OUYANG T, ZHAO Y G. Geochemical characteristics of aluminum and calcium of soils and their impact on ecological environment in Hainan Island[J]. Geographical Science, 2003, 23(2): 200-207. (in Chinese)
- [11] 王宝山. 植物生理学[M]. 第 4 版, 北京: 科学出版社, 2023: 56.
- WANG B S. Plant physiology[M]. 4th ed., Beijing: Science Press, 2023: 56. (in Chinese)
- [12] WHITE P J, BROWN P H. Plant nutrition for sustainable development and global health[J]. Annals of Botany, 2010, 105(7): 1073-1080.
- [13] 罗志林. 有机肥和保水剂配施对油茶林地土壤肥力及果实产量的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.
- LUO Z L. Effects of combined application of water-retaining agent and organic fertilizer on soil fertility and yield in *Camellia oleifera* plantations[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2025. (in Chinese)
- [14] 郭春喜, 杨小菊, 胡玉玲, 杨胜优, 潘忠飞, 龙雪燕. 氨基酸与不同营养元素配施对油茶生长及经济性性状影响[J/OL]. 分子植物育种, (2024-12-02)[2025-10-17]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HHZEz91P5iJ7AOLsKkhX13bcijekAxSbXqEYiYSyK43VD5gkIVR3lRyCHUKSFgwQWpcbzRnGd2FYJZbkpWnwTb6Yv7hdRiEp9pFVtepZpr06KJ-eBZaZnxTefZmp4JfLp-zw92k8oSj0mmMa-cGRrehnseMAF4dLxaLrUevhf0PoQHFL56GpKg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>.
- GUO C X, YANG X J, HU Y L, YANG S Y, PAN Z F, LONG X Y. Effects of amino acids and different nutrient elements on the growth and economic characters of *Camellia oleifera* [J/OL]. Molecular Plant Breeding, (2024-12-02)[2025-10-17]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HHZEz91P5iJ7AOLsKkhX13bcijekAxSbXqEYiYSyK43VD5gkIVR3lRyCHUKSFgwQWpcbzRnGd2FYJZbkpWnwTb6Yv7hdRiEp9pFVtepZpr06KJ-eBZaZnxTefZmp4JfLp-zw92k8oSj0mmMa-cGRrehnseMAF4dLxaLrUevhf0PoQHFL56GpKg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>. (in Chinese)
- [15] 舒敏. 影响茶油品质的因素及茶饼粕蛋白的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- SHU M. Study on factors of affecting the quality of edible *Camellia* oil and *Camellia* seed cake protein[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008. (in Chinese)
- [16] ZHAO X N, ZANG F, LI N, HUANG F Y, CHANG Y P, ZHAO C Y. Dynamics of trace elements during litter decomposition in a temperate forest as a function of elevation and canopy coverage[J]. Biogeochemistry, 2023, 167(1): 39-57.
- [17] 邱喜阳, 许中坚, 史红文, 张华. 重金属在土壤-空心菜系统中的迁移分配[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 187-192.
- QIU X Y, XU Z J, SHI H W, ZHANG H. The transfer and distribution of heavy metals in soil-swamp cabbage systems[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(6): 187-192. (in Chinese)
- [18] MA J F, YAMAJI N. Functions and transport of silicon in plants[J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2008, 65(19): 3049-3057.
- [19] 周启星, 孙铁珩. 土壤-植物系统污染生态学研究与发展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1698-1702.
- ZHOU Q X, SUN T H. Progress in pollution ecology of soil-plant systems and its expectation[J]. Chinese Journal of Ap-

- plied Ecology, 2004, 15(10): 1698-1702. (in Chinese)
- [20] 王大鹏, 郑亮, 吴小平, 罗雪华, 王文斌, 张永发, 薛欣欣. 旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1731-1741.
- WANG D P, ZHENG L, WU X P, LUO X H, WANG W B, ZHANG Y F, XUE X X. Review of soil nitrate formation, leaching transport and their control measures in upland farming systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1731-1741. (in Chinese)
- [21] 赵其国. 我国红壤现代成土过程和发育年龄的初步研究[J]. 第四纪研究, 1992(4): 341-351.
- ZHAO Q G. A study on recent pedogenic process and its developing age of red soils in China[J]. Quaternary Sciences, 1992(4): 341-351. (in Chinese)
- [22] WANG C Q, KUZUYAKOV Y. Soil organic matter priming: the pH effects[J]. Global Change Biology, 2024, 30(6): 17349.
- [23] 刘英杰, 张丽红, 张宏, 兰波, 吕江涛, 陈光, 王禄山, 刘正学. 溶磷微生物在土壤磷循环中的作用研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(8): 3671-3687.
- LIU Y J, ZHANG L H, ZHANG H, LAN B, LYU J T, CHEN G, WANG L S, LIU Z X. Role of phosphate solubilizing microorganisms in soil phosphorus cycle: a review[J]. Microbiology China, 2023, 50(8): 3671-3687. (in Chinese)
- [24] 梁晓玉, 古元阳, 刘昌, 邢韶华. 空间尺度对地形异质性-物种多样性关系的影响: 粒度和幅度[J]. 生态学杂志, 2021, 40(2): 577-585.
- LIANG X Y, GU Y Y, LIU C, XING S H. Effects of spatial scales on topographic heterogeneity—species richness relationships: grain and extent[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(2): 577-585. (in Chinese)
- [25] 康定旭, 陈诗, 欧阳利勋, 饶万邦, 蔺应礼, 伍建榕, 马焕成. 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, RAO W B, LIN Y L, WU J R, MA H C. 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. (in Chinese)
- [26] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 余海英, 吴德勇. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 114-120.
- PANG S, LI T X, WANG Y D, YU H Y, WU D Y. Spatial variability of soil available N, P and K and influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009, 15(1): 114-120. (in Chinese)
- [27] 王永强. 广州山地森林土壤微生物多样性对不同干扰梯度的响应[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- WANG Y Q. Responses of soil microbial diversity to different disturbance gradients in mountain forests in Guangzhou[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [28] 胡鹏杰, 詹娟, 刘娟, 李欣阳, 杜彦镔, 吴龙华, 骆永明. 土壤重金属地质高背景成因、风险与管控研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1363-1377.
- HU P J, ZHAN J, LIU J, LI X Y, DU Y P, WU L H, LUO Y M. Research progress on the causes, risks, and control of high geological background of heavy metals in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1363-1377. (in Chinese)
- [29] BALLAND-BOLOU-BI C, BOLOU-BI E B, ALPHONSE V, GIUSTI-MILLER S, JUSSELMÉ M D, LIVET A, GRIMALDI M, BOUSSERHINE N. Impact of microbial activity on the mobility of metallic elements (Fe, Al and Hg) in tropical soils[J]. Geoderma, 2019, 334: 146-154.
- [30] 严江勤, 姚小华, 曹永庆, 任华东, 束庆龙. 不同品种和林分油茶树体矿质元素含量差异分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(10): 51-56.
- YAN J Q, YAO X H, CAO Y Q, REN H D, SHU Q L. Analysis of mineral elements in the plants of different oil-tea *Camellia* cultivars and stands[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2015, 37(10): 51-56. (in Chinese)
- [31] 胡玉玲, 潘忠飞, 龙雪燕, 杨小菊, 杨胜优, 杨红. 不同有机肥和大量及微量元素配比对油茶生长及产量相关指标影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 148-160.
- HU Y L, PAN Z F, LONG X Y, YANG X J, YANG S Y, YANG H. Effects of different ratios of organic fertilizer, large and trace elements on growth and yield of oil-tea *Camellia*[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(4): 148-160. (in Chinese)
- [32] 刘海, 王进, 许杰, 陈瑶, 缪明胜, 郭少海. 产地、物种及加工工艺对油茶籽油中的微量元素及重金属含量的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(4): 24-28.
- LIU H, WANG J, XU J, CHEN Y, MIAO M S, GUO S H. Effects of origins, species and processing technology on contents of trace elements and heavy metals in oil-tea *Camellia* seed oil[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(4): 24-28. (in Chinese)
- [33] CHEN H, REED SC, LYU X T, XIAO K C, WANG K L, LI D J. Global resorption efficiencies of trace elements in leaves of terrestrial plants[J]. Wiley, 2021, 35(7): 1596-1602.
- [34] ZHOU L Y, SHE J R, LI Q Y, ZHENG Q, YANG J, CUI M K, CHEN T T, SUN S M, TANG F B, LIU Y H. Integrated multi-omics and network pharmacology reveals antioxidant-active metabolites and health benefits of *Camellia oleifera* seed oil[J]. Food Chemistry, 2025, 496(3): 146913.
- [35] 蒋志敏, 王威, 储成才. 植物氮高效利用研究进展和展

- 望[J]. 生命科学, 2018, 30(10): 1060-1071.
- JIANG Z M, WANG W, CHU C C. Towards understanding of nitrogen use efficiency in plants[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2018, 30(10): 1060-1071. (in Chinese)
- [36] 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明. 近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3741-3751.
- CHEN Z X, QIU L X, CHEN H Y, FAN X Y, WU T, SHEN J Q, XING S H, ZHANG L M. Enrichment and ecological risk assessment of available phosphorus in paddy soil of Fujian province over past 40 years[J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3741-3751. (in Chinese)
- [37] LI D X, LI T, GU J, WANG Y L, CHEN X Q, LU D J, TAO Y Y, CUI Z L, CHEN X P, LU J W, NIE J, WANG H Y, ZHOU J M. Potassium resources management systems in Chinese agriculture: yield gaps and environmental costs[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2024, 202: 107397.
- [38] LIŠČÁKOVÁ P, NAWAZ A, MOLNÁROVÁ M. Reciprocal effects of copper and zinc in plants[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(9): 9297-9312.
- [39] KANG W Q, FAN M S, MA Z, SHI X H, ZHENG H L. Luxury absorption of potassium by potato plants[J]. American Journal of Potato Research, 2014, 91(5): 573-578.
- [40] HINSINGER P, PLASSARD C, TANG C X, JAILLARD B. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review[J]. Plant and Soil, 2003, 248(1/2): 43-59.
- [41] 李平, 聂浩, 郎漫, 施明杨, 杨彬妍, 罗小三. 几种土壤结构改良剂对重金属污染土壤养分有效性与酶活性的影响[J]. 环境科学研究, 2025, 38(3): 599-609.
- LI P, NIE H, LANG M, SHI M Y, YANG B Y, LUO X S. Effects of several soil conditioners on nutrient availability and enzyme activity in heavy metal contaminated soil[J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(3): 599-609. (in Chinese)
- [42] 王舒. 油茶根际土壤高效溶磷细菌的筛选、鉴定及其促生效应[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- WANG S. Screening, identification and enhancement to the growth of phosphate solubilizing bacteria in rhizosphere of *Camellia oleifera* abel[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [43] BROWN R W, CHADWICK D, BENDING G, COLLINS C, WHELTON H, DAULTON E, COVINGTON J, BULL I, JONES D L. Nutrient (C, N and P) enrichment induces significant changes in the soil metabolite profile and microbial carbon partitioning[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 172: 108779.
- [44] CUI J Y, WANG Y D, JIANG L, GUO L C, XIONG S F, BENJAMIN J W M, TERRY L, YANG S L, XU Z F, CAI C F, DENG Y N, WEI G Y, ZHAO M Y. Acceleration of phosphorus weathering under warm climates[J]. American Association for the Advancement of Science, 2024, 10(28): 7773.
- [45] 文正高. 油茶种植土壤酸化问题及改良技术研究[J]. 农业科技与发展, 2025, 4(6): 70-72.
- WEN Z G. Study on soil acidification and improvement technology of *Camellia oleifera* planting[J]. Agricultural Technology and Development, 2025, 4(6): 70-72. (in Chinese)
- [46] 张坤昌, 涂攀峰, 黄润生, 廖柏勇, 吕宇宙, 李永泉. 不同施肥组合对油茶生长和营养的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(2): 340-350.
- ZHANG K C, TU P F, HUANG R S, LIAO B Y, LYU Y Z, LI Y Q. Effects of different fertilizer combinations on growth and nutrition of *Camellia oleifera*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(2): 340-350. (in Chinese)
- [47] WANG Y, CHEN Y F, WU W H. Potassium and phosphorus transport and signaling in plants[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2020, 63(1): 34-52.
- [48] JIN H, ZHU X Q, ZHANG M S, ZHENG H, CHEN Y, YAO D, LIU S W, ZHANG H. Cu/Zn/histidine supramolecular assemblies with optimized Cu catalytic sites as an alternative of superoxide dismutase[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 10075-10075.
- [49] 明润廷, 万方, 那立苹, 吴海程, 王薇, 谭文峰, 伍玉鹏. 改良剂施用下的土壤降酸培肥效果: 基于中国酸性土壤改良研究的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 400-410.
- MING R T, WAN F, NA L P, WU H C, WANG W, TAN W F, WU Y P. Effect of soil acid reduction and fertilizer cultivation under conditioner application: meta-analysis based on acid soil improvement studies in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 400-410. (in Chinese)
- [50] 马丹妮, 盛建东, 张坤, 毛洁菲, 常松, 王耀锋. 生物炭和有机肥配施对土壤养分影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(2): 42-51.
- MA D N, SHENG J D, ZHANG K, MAO J F, CHANG S, WANG Y F. Effect of biochar combined with organic fertilizer on soil nutrients: a review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(2): 42-51. (in Chinese)
- [51] 戈应同, 王宇蕴, 徐翔, 李兰, 高江飞, 徐智. 有机肥增强植物磷素吸收利用机制研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2024(7): 228-235.
- GE Y T, WANG Y Y, XU X, LI L, GAO J F, XU Z. Research progress on the mechanism of phosphorus absorption and utilization enhanced by organic fertilizer[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(7): 228-235. (in Chinese)