

生物有机肥对热带地区油茶叶片营养和土壤性状的影响

蒙青长^{1,2}, 宋灏明^{1,2}, 杨玉靖^{1,2}, 胡海燕^{1,2}, 吴文婧^{2,3}, 黄小龙^{2,3}, 丁元昊^{1,2},
黄东益², 王 健^{1,2}, 赖杭桂², 练冬娣⁴, 王日钲⁵, 刘进平^{1,2*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南儋州 571737; 2. 海南大学南繁学院(三亚南繁研究院)/热带油茶海南省工程研究中心, 海南三亚 572024; 3. 海南大学生命健康学院, 海南海口 570228; 4. 福建以诺生物科技有限公司, 福建武平 364300; 5. 海南澄迈原真生态休闲农业开发有限公司, 海南澄迈 571921

摘 要: 合理施肥对于油茶增产意义重大, 而施用生物有机肥在多方面优于目前以农家肥为主的油茶施肥实践。为研制适合热区油茶林土壤状况的专用生物有机肥, 本研究对油茶叶片养分含量、油茶林地土壤的理化性质和土壤酶活性等指标进行测定, 探讨不同生物有机肥对海南油茶林的影响。结果表明: 施用生物有机肥及常规复合肥均可显著提高油茶叶片的含水量、叶绿素相对含量(SPAD值)和营养元素含量。不同施肥处理的土壤含水量和田间持水量均高于不施肥的对照组, 但土壤容重和孔隙度在各处理和对照组之间差异不显著。4种生物有机肥均能提高土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量及不同土层的土壤酶活性。在改善油茶林土壤的化学性质方面, 以处理T₁和T₄的综合表现较好, 这对于针对性地提高海南油茶林地肥力和速效钾含量具有重要意义。该研究结果对筛选适合热带地区油茶的专用生物有机肥提供数据支撑, 为油茶生物有机肥的后续大规模应用奠定科学基础。

关键词: 油茶; 生物有机肥; 叶片养分; 土壤理化性质; 土壤酶活性

中图分类号: S794.4

文献标志码: A

Effects of Bio-organic Fertilizers on the Leaf Nutrients and Soil Properties of Oil-tea *Camellia* in Tropical Regions

MENG Qingchang^{1,2}, SONG Haoming^{1,2}, YANG Yujing^{1,2}, HU Haiyan^{1,2}, WU Wenqiang^{2,3}, HUANG Xiaolong^{2,3},
DING Yuanhao^{1,2}, HUANG Dongyi², WANG Jian^{1,2}, LAI Hanggui², LIAN Dongdi⁴, WANG Rizheng⁵,
LIU Jinping^{1,2*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China; 2. School of Breeding and Multiplication (Sanya Institute of Breeding and Multiplication) / Hainan Engineering Research Center for Tropical Oil-tea *Camellia*, Hainan University, Sanya, Hainan 572024, China; 3. School of Life and Health Sciences, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 4. Fujian Yinuo Biotechnology Co., Ltd., Wuping, Fujian 364300, China; 5. Hainan Chengmai Yuanzhen Ecological Leisure Agriculture Development Co., Ltd., Chengmai, Hainan 571921, China

Abstract: Reasonable fertilization is of great significance for increasing the yield of oil-tea *Camellia*, and the application of bio-organic fertilizers is superior to the current practice of using farm manure as the main fertilizer for oil-tea *Camellia* in many aspects. In order to develop and value the specialized bio-organic fertilizers suitable for the soil conditions of oil-tea *Camellia* plantations in tropical regions, the nutrient contents of oil-tea *Camellia* leaves, the physical and chemical properties, and enzyme activities of oil-tea *Camellia* forest soil were determined. The results showed that the application of bio-organic fertilizers and conventional compound fertilizer could significantly increase the water content, relative chlorophyll content (SPAD value), and nutrient elements of oil-tea *Camellia* leaves. The soil moisture

收稿日期 2025-05-08; 接受日期 2025-07-15

基金项目 国家重点研发计划项目(No. 2023YFD2200700); 海南省重点研发计划项目(No. ZDYF2023XDNY055); 海南省山柚(油茶)产业技术联盟项目(No. kjcgzh017)。

作者简介 蒙青长(1998—), 男, 硕士, 研究方向: 农艺与种业。*通信作者(Corresponding author): 刘进平(LIU Jinping), E-mail: liu3305602@163.com。

contents and field capacities of different fertilization treatments were higher than those without fertilization, but there were no significant differences in soil bulk density and porosity between the treatments and the control group. All four types of bio-organic fertilizers could increase the contents of soil organic matter, alkaline nitrogen, available phosphorus, available potassium, and soil enzyme activity in different soil layers. T₁ and T₄ bio-organic fertilizer improved the chemical properties of oil-tea *Camellia* soil more, which is of great significance for the targeted improvement of the fertility and available potassium content of Hainan oil-tea *Camellia* forest land. The results would provide data for screening specialized bio-organic fertilizers suitable for tropical oil-tea *Camellia*, laying a scientific foundation for the subsequent large-scale application of bio-organic fertilizers for tropical oil-tea *Camellia*.

Keywords: oil-tea *Camellia*; bio-organic fertilizer; leaf nutrient; soil physical and chemical property; soil enzyme activity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.11.013

油茶是山茶科 (Theaceae) 山茶属 (*Camellia* L.) 一类木本食用油料树种的总称, 是我国特有的木本油料树种, 与油橄榄、油棕、椰子并称为世界四大木本油料作物^[1]。茶籽油富含不饱和脂肪酸、维生素 E 和山茶甙等特定生理活性物质, 因此, 除食用和烹调功能外, 还具有极高的营养和医疗保健价值^[2]。海南本地茶油当地人称为“山柚油”, 品质更为优异, 医疗保健价值更高^[3-4]。

油茶为多年生经济树种, 常年要从土壤中吸收大量的养分和水分, 且油茶四季花果不离枝, 新梢和果实交替生长, 养分补充不足会直接影响油茶的生长及产量^[5]。合理施肥可将油茶平均产量提高 2~5 倍, 增产潜力巨大, 对于低产油茶林改造意义重大^[6]。目前, 油茶的施肥主要以农家肥为主。但农家肥易因抗生素超标而导致土壤污染, 也容易因发酵不充分, 将病菌带入油茶林导致油茶林病虫害发生。此外, 还容易导致油茶林区土壤板结, 土壤中氮、磷、钾平衡失调, 肥料利用率低, 加剧土壤酸化, 而生物有机肥则可改善土壤理化性状, 提高有机质含量和土壤肥力, 增强植物抗病、抗逆能力, 减少环境污染^[7-8]。

海南是中国重要的热带岛屿省份, 其土壤养分状况具有明显的地域特征^[9], 研制适合热带地区油茶林土壤状况的专用生物有机肥十分必要。本研究通过对海南油茶林施用试制的专用生物肥, 对油茶叶片养分含量、油茶林地土壤的理化性质和土壤酶活性等指标进行测定, 探讨不同生物有机肥对海南油茶林的影响, 以便筛选适合热带地区油茶的专用生物有机肥, 为油茶生物有机肥的大规模应用奠定科学基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于海南省澄迈县福山镇儒林农场

(19°89'N, 109°93'E), 海拔为 61 m, 年平均温度为 24.8 ℃, 年平均降水量为 2000 mm, 年平均日照时数为 1900 h。土壤为砖红壤, 土壤的基本理化性质如下: 0~20 cm 土层的 pH 为 4.50, 有机质含量为 1.58%, 碱解氮含量为 84.48 mg/kg, 速效磷含量为 1.85 mg/kg, 速效钾含量为 26.11 mg/kg; 20~40 cm 土层的 pH 为 4.45, 有机质含量为 1.59%, 碱解氮含量为 76.51 mg/kg, 速效磷含量为 1.81 mg/kg, 速效钾含量为 25.58 mg/kg。试验地油茶品种为侯臣 3 号, 行间距平均为 2 m×3 m, 树高平均为 3~4 m, 树龄 6 a。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验采用随机区组设计, 设置以下 6 种处理: (1) CK₁, 每株施用常规复合肥 (15% N+15% P₂O₅+15% K₂O) 1 kg; (2) CK₂, 不施肥; (3) T₁, 每株施用养分含量为“7.18% N+1.16% P₂O₅+0.48% K₂O+50.6%有机质”的生物有机肥 5 kg; (4) T₂, 每株施用养分含量为“2.83% N+1.07% P₂O₅+2.21% K₂O+36.1%有机质”的生物有机肥 5 kg; (5) T₃, 每株施用养分含量为“1.1% N+3.3% P₂O₅+2.8% K₂O+32%有机质”的生物有机肥 5 kg; (6) T₄, 每株施用养分含量为“1.15% N+3.16% P₂O₅+2.46% K₂O+32.25%有机质”的生物有机肥 5 kg。每种施肥处理设置 3 个重复小区, 每小区选择 20 株长势一致、无明显病虫害的油茶树。施肥时间为 2024 年 7 月上旬, 采用条状平行沟施肥, 于树冠滴水线靠外 10 cm 处开沟施肥, 沟深约 30 cm, 长为 50 cm 以上, 将肥料混合土壤均匀覆盖, 然后表面盖上土, 各处理插上地牌标记。施肥前后各处理管理措施保持一致。

1.2.2 样品采集与测定 于施肥后 5 个月 (2024 年 11 月下旬) 进行叶片采样。每小区随机选取 10 株油茶树为 1 个重复, 在每株油茶树的东、南、

西、北 4 个方向随机采集枝条上第 3、4 片当年生成熟无病害叶片，混合装入无菌塑料袋，采集 3 个重复叶片带回实验室，用去离子水清洗、擦干水分，置于 105 ℃ 烘箱烘烤 30 min 杀青后，再于 75 ℃ 烘干至恒重，计算叶片含水量。用粉碎机粉碎过筛，装入贴好标签的无菌封口袋，备用。分别于施肥前和施肥 5 个月后测定试验地油茶林的土壤相关理化性质。采用鲍士旦^[10]的方法测定叶片含水量、营养元素含量及土壤理化性质等相关指标。

采集 0~20 cm、20~40 cm 土层原状土，采用环刀法^[11]对土壤容重、田间持水量和孔隙度进行测定，每土层重复 3 次。用土钻采集至少 10 个样点的土样用于土壤化学性质及土壤酶活性测定。每层土壤混合后，将部分样品及时装入铝盒带回实验室，用于土壤含水量测定；其余部分用四分法取 1 kg 土样，标记好装入无菌采样袋带回实验室，自然风干处理后，过 1 mm 和 0.25 mm 尼龙筛，装入小无菌袋标记好后测定相关指标。采用朱丛飞等^[12]的方法用美能达 SPAD-502plus 叶绿

素仪测定叶片 SPAD 值，采用水浸提电位法^[13]测定土壤 pH，采用陈莹等^[14]的方法测定土壤酶活性。

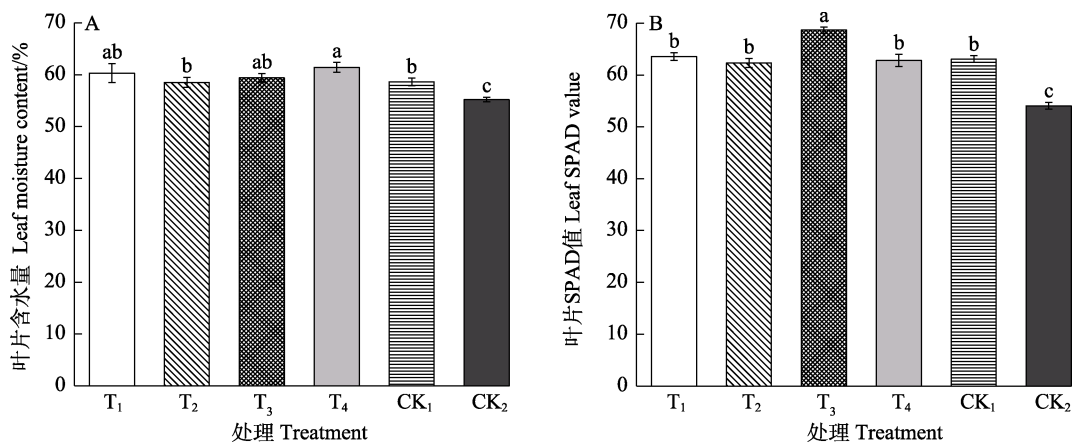
1.3 数据处理

采用 Excel 2010、SPSS Statistics 22.0 及 Origin 2024 软件进行数据处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对油茶叶片含水量和 SPAD 值的影响

由图 1A 可知，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高叶片含水量，增幅分别为 6.18%、9.24%、6.01%、7.53%、11.23%，其中，仅 T₄ 处理的叶片含水量显著高于 CK₁。由图 1B 可知，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高叶片 SPAD 值，增幅分别为 16.67%、17.54%、15.26%、26.97%、16.17%，其中，仅 T₃ 处理的叶片 SPAD 值显著高于 CK₁。总体而言，与 CK₂ 相比，施用生物有机肥及常规复合肥均可显著提高油茶叶片的含水量及 SPAD 值。



不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments (P<0.05).

图 1 不同施肥处理下油茶叶片含水量及 SPAD 值

Fig. 1 Leaf moisture content and SPAD value of oil-tea *Camellia* under different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对油茶叶片养分含量的影响

由表 1 可知，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高叶片氮元素含量，增幅分别为 17.44%、39.51%、24.34%、23.25%、21.53%，其中，仅 T₁ 处理显著高于 CK₁。与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₃、T₄ 处理能显著提高叶片磷元素含量，增幅分别为 11.94%、25.37%、34.33%、31.34%，其中，T₁、T₃、T₄ 处理的叶片磷元素含量显著高于

CK₁。与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高叶片钾元素含量，增幅分别为 23.93%、21.08%、15.38%、25.07%、18.80%，且各处理之间差异不显著。与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高叶片钙元素含量，增幅分别为 26.50%、38.75%、41.02%、59.83%、56.70%，其中，T₂、T₃、T₄ 处理的叶片钙元素含量显著高于 CK₁。与 CK₂ 相比，T₁、T₃、T₄ 处理

能显著提高叶片镁元素含量,增幅分别为 7.14%、14.29%、5.95%,其中,仅 T₃ 处理的叶片镁元素含量显著高于 CK₁。

由表 2 可知,T₁、T₃、T₄ 处理的叶片铁元素含量显著高于 CK₂,增幅分别为 37.38%、119.49%、126.64%,其中,T₃、T₄ 处理含量最高(二者之间差异不显著)。T₂、T₃、T₄ 处理的叶片锰元素含量显著高于 CK₂,增幅分别为 22.86%、20.0%、14.29%,而 CK₁ 则显著低于 CK₂。与 CK₂ 相比,CK₁、T₁、T₃、T₄ 处理显著提高叶片锌元素含量,增幅分别为 24.61%、20.53%、29.40%、63.58%,

其中,T₄ 处理显著高于其他处理。与 CK₂ 相比,CK₁、T₁、T₂、T₃ 处理均可显著提高叶片铜元素含量,增幅分别为 41.36%、87.62%、24.92%、29.49%,其中,T₁ 处理显著高于其他处理,T₂、T₃ 处理与 CK₁ 之间差异不显著;T₄ 处理显著低于 CK₁ 的叶片铜元素含量,但与 CK₂ 之间差异不显著。因此,除 CK₁ 处理的叶片锰元素含量显著低于 CK₂ 外,施用 4 种生物有机肥及常规复合肥均可不同程度地提高油茶叶片中的大、中、微量元素,但不同施肥处理在不同元素含量提高方面互有差异。

表 1 不同施肥处理下油茶叶片大、中量元素含量
Tab. 1 Contents of large and medium elements in leaves of oil-tea *Camellia* under different fertilization treatments

处理 Treatment	含量 Content/(g·kg ⁻¹)				
	氮 N	磷 P	钾 K	钙 Ca	镁 Mg
T ₁	15.36±0.39 ^a	0.84±0.02 ^b	4.25±0.10 ^a	5.07±0.30 ^{bc}	0.90±0.02 ^b
T ₂	13.69±0.31 ^b	0.71±0.02 ^{cd}	4.05±0.23 ^a	5.15±0.24 ^b	0.88±0.05 ^{bc}
T ₃	13.57±0.43 ^b	0.90±0.03 ^a	4.39±0.25 ^a	5.81±0.20 ^a	0.96±0.02 ^a
T ₄	13.38±0.46 ^b	0.88±0.01 ^{ab}	4.17±0.36 ^a	5.70±0.31 ^a	0.89±0.01 ^b
CK ₁	12.93±0.34 ^b	0.75±0.03 ^c	4.35±0.15 ^a	4.64±0.20 ^c	0.87±0.02 ^{bc}
CK ₂	11.01±0.50 ^c	0.67±0.02 ^d	3.51±0.30 ^b	3.71±0.24 ^d	0.84±0.01 ^c

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments (P<0.05).

表 2 不同施肥处理下油茶叶片微量元素含量
Tab. 2 Contents of trace elements in leaves of oil-tea *Camellia* under different fertilization treatments

处理 Treatment	含量 Content			
	铁 Fe/(mg·kg ⁻¹)	锰 Mn/(g·kg ⁻¹)	锌 Zn/(mg·kg ⁻¹)	铜 Cu/(mg·kg ⁻¹)
T ₁	28.41±1.80 ^b	0.36±0.01 ^b	8.57±0.50 ^{bc}	11.07±1.3 ^a
T ₂	23.78±1.50 ^{bc}	0.43±0.01 ^a	7.46±1.00 ^{cd}	7.37±0.24 ^{bc}
T ₃	45.39±2.70 ^a	0.42±0.01 ^a	9.20±0.60 ^b	7.64±0.33 ^{bc}
T ₄	46.87±3.00 ^a	0.40±0.02 ^a	11.65±0.77 ^a	6.94±0.25 ^{cd}
CK ₁	21.73±2.44 ^c	0.29±0.02 ^c	8.86±0.48 ^b	8.34±0.33 ^b
CK ₂	20.68±2.49 ^c	0.35±0.05 ^b	7.11±0.31 ^d	5.90±0.19 ^d

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments (P<0.05).

2.3 不同施肥处理对油茶林地不同土层土壤物理性质的影响

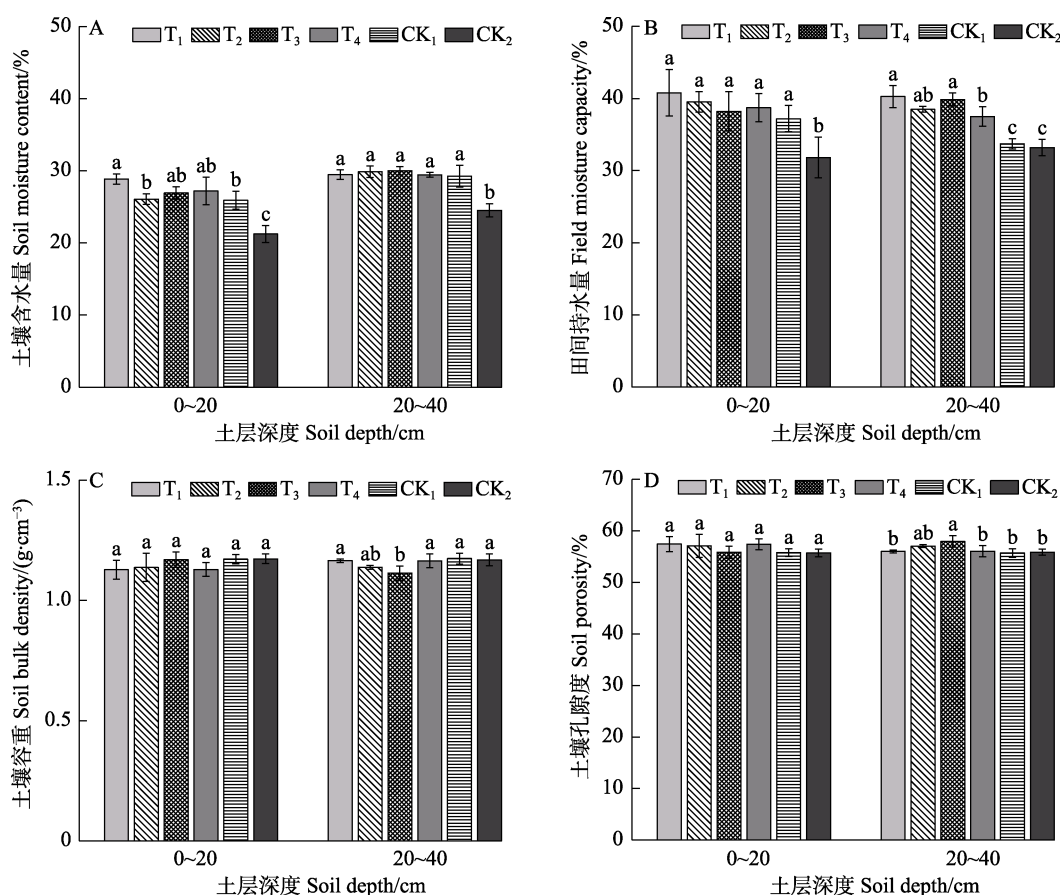
由图 2A 可知,在 0~20 cm 土层,与 CK₂ 相比,CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高土壤含水量,增幅分别为 22.08%、35.88%、26.18%、26.69%、28.06%,其中仅 T₁ 处理的土壤含水量显著高于 CK₁,而 T₂、T₃、T₄ 处理与 CK₁ 之间差异不显著。在 20~40 cm 土层,与 CK₂ 相比,CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高土壤含水量,

增幅分别为 19.28%、20.14%、21.73%、22.34%、20.02%,且各处理之间差异不显著。由图 2B 可知,在 0~20 cm 土层,与 CK₂ 相比,CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高田间持水量,增幅分别为 16.91%、28.19%、24.23%、20.11%、21.72%,且各处理之间差异不显著。在 20~40 cm 土层,与 CK₁ 和 CK₂ 相比,T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高田间持水量,与 CK₂ 相比,增幅分别为 21.27%、15.93%、20.03%、12.98%,其中,T₁、

T₃ 处理之间差异不显著且二者显著高于 T₄ 处理。在 0~20 cm 土层, 所有处理的土壤容重及土壤孔隙度均差异不显著。在 20~40 cm 土层, 与 CK₁ 和 CK₂ 相比, T₁、T₂、T₄ 处理与 CK₁、CK₂ 的土壤容重差异不显著, T₃ 处理则显著低于 CK₂ (图 2C)。在 20~40 cm 土层, 与 CK₂ 相比, 仅 T₃ 处理能够显著提高土壤孔隙度, 增幅为 3.75%, T₁、

T₂、T₄ 处理与 CK₁ 和 CK₂ 之间差异不显著(图 2D)。

因此, 不同施肥处理下油茶林地不同土层土壤的物理性状差异不显著。从土壤含水量和田间持水量来看, 各生物有机肥处理均高于 CK₂; 从土壤容重与孔隙度来看, 0~20 cm 土层各处理与对照之间差异不显著, 而在 20~40 cm 土层上只有 T₃ 处理效果最显著。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同施肥处理下油茶林地不同土层土壤物理性质

Fig. 2 Soil physical properties in different layers of oil-tea *Camellia* plantations under different fertilization treatments

2.4 不同施肥处理对油茶林地不同土层土壤化学性质的影响

由表 3 可知, 在 0~20 cm 土层, 与 CK₂ 相比, CK₁、T₂、T₃ 处理能显著提高土壤 pH, 其中, CK₁ 和 T₂ 处理的效果最好 (二者之间差异不显著), 但显著高于 T₃ 处理; 而 T₁、T₄ 处理则与 CK₂ 之间差异不显著。在 20~40 cm 土层, 与 CK₂ 相比, CK₁、T₂ 处理能显著提高土壤 pH, 其中 CK₁ 的土壤 pH 最高且显著高于其他处理, T₁、T₄ 处理之间差异不显著但显著低于 CK₂。

在 0~20 cm 土层, 与 CK₁ 和 CK₂ 相比, T₁、

T₂、T₄ 处理能显著提高土壤有机质含量, 与 CK₂ 相比, 增幅分别为 99.28%、55.80%、48.55%, 其中, T₁ 处理显著高于其他处理, T₂、T₄ 处理之间差异不显著。在 20~40 cm 土层, 与 CK₂ 相比, CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高土壤有机质含量, 增幅分别为 65.0%、102.0%、106.0%、25.0%、108.0%, 其中, T₁、T₂、T₄ 处理效果最好 (三者之间差异不显著), CK₁ 次之。

在 0~20 cm 土层, 与 CK₂ 相比, CK₁、T₁、T₃、T₄ 处理能显著提高土壤碱解氮含量, 增幅分别为 63.82%、62.53%、25.96%、35.70%, 其中,

CK₁ 和 T₁ 处理的效果最好（二者之间差异不显著），T₃、T₄ 处理次之。在 20~40 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₄ 处理能显著提高土壤碱解氮含量，增幅分别为 57.19%、46.58%、42.47%，且三者之间差异不显著，而 T₂、T₃ 处理则与 CK₂ 之间差异不显著。

在 0~20 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高土壤速效磷含量，增幅分别为 41.34%、154.19%、117.32%、48.04%、400.56%，其中，T₄ 处理显著高于其他处理，T₁、T₂ 处理之间差异不显著，T₃ 处理和 CK₁ 之间差异不显著，但 T₁、T₂ 处理显著高于 T₃ 处理和 CK₁。在 20~40 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高土壤速效磷含量，增幅

分别为 105.71%、157.86%、477.14%、80.0%、742.85%，其中，T₄ 处理效果最好，T₂ 处理次之。

在 0~20 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₄ 处理能显著提高土壤速效钾含量，增幅分别为 73.79%、126.80%、162.59%，其中 T₁、T₄ 处理的效果最好（二者之间差异不显著）。在 20~40 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₄ 处理能显著提高土壤速效钾含量，增幅分别为 84.24%、69.50%、50.81%、176.48%，其中 T₄ 处理效果最好。

总体来看，T₁、T₄ 处理的土壤 pH 较低，但仍然处于海南油茶的适宜 pH 范围内^[9]。不同生物有机肥和常规复合肥均能不同程度地提高土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾的含量，其中 T₁、T₄ 处理表现较好。

表 3 不同施肥处理下油茶林地不同土层土壤化学性质
Tab. 3 Soil chemical properties across different soil layers in oil-tea *Camellia* plantations under various fertilization treatments

土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	pH	含量 Content			
			有机质 Organic matter/%	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Rapidly available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Rapidly available potassium/(mg·kg ⁻¹)
0~20	T ₁	4.52±0.05 ^c	2.75±0.08 ^a	115.28±5.95 ^a	4.55±0.36 ^b	53.91±6.73 ^{ab}
	T ₂	4.96±0.04 ^a	2.15±0.15 ^b	73.73±4.22 ^c	3.89±0.30 ^b	34.46±6.64 ^{cd}
	T ₃	4.84±0.05 ^b	1.64±0.14 ^c	89.34±4.48 ^b	2.65±0.07 ^c	29.25±5.75 ^{cd}
	T ₄	4.59±0.07 ^c	2.05±0.14 ^b	96.25±3.15 ^b	8.96±0.68 ^a	62.41±8.71 ^a
	CK ₁	5.03±0.05 ^a	1.40±0.15 ^c	116.20±5.56 ^a	2.53±0.12 ^c	41.31±6.59 ^{bc}
	CK ₂	4.60±0.07 ^c	1.38±0.14 ^c	70.93±3.16 ^c	1.79±0.18 ^d	23.77±5.60 ^d
20~40	T ₁	4.56±0.05 ^d	2.02±0.13 ^a	101.27±6.65 ^a	3.61±0.44 ^c	34.73±5.35 ^b
	T ₂	4.92±0.05 ^b	2.06±0.11 ^a	75.37±5.95 ^b	8.08±0.47 ^b	30.90±5.75 ^b
	T ₃	4.67±0.04 ^c	1.25±0.12 ^c	78.40±6.68 ^b	2.52±0.43 ^d	28.71±3.42 ^{bc}
	T ₄	4.54±0.03 ^d	2.08±0.10 ^a	99.40±8.07 ^a	11.80±0.70 ^a	56.65±5.35 ^a
	CK ₁	5.25±0.04 ^a	1.65±0.10 ^b	109.67±8.81 ^a	2.88±0.37 ^{cd}	37.75±4.53 ^b
	CK ₂	4.66±0.02 ^c	1.00±0.11 ^d	69.77±6.35 ^b	1.40±0.22 ^c	20.49±2.07 ^c

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（*P*<0.05）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments (*P*<0.05).

2.5 不同施肥处理对油茶林地不同土层土壤酶活性的影响

由图 3A 可知，在 0~20 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高土壤过氧化氢酶活性，增幅分别为 31.76%、31.04%、19.98%、15.77%、30.70%，其中，CK₁ 与 T₁、T₄ 处理效果最好（三者之间差异不显著），T₂、T₃ 处理次之。在 20~40 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃ 处理能显著提高土壤过氧化氢酶活性，增幅分别为 45.85%、21.70%、13.90%、14.11%，

其中，CK₁ 处理效果最好，T₁ 处理次之。
由图 3B 可知，在 0~20 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高土壤酸性磷酸酶活性，增幅分别为 20.17%、95.34%、90.41%、27.57%、103.12%。其中，T₁、T₄ 处理效果最好（二者之间差异不显著），T₂ 处理次之。在 20~40 cm 土层，与 CK₂ 相比，CK₁、T₁、T₂、T₃、T₄ 处理均可显著提高土壤酸性磷酸酶活性，增幅分别为 24.0%、79.84%、82.82%、54.71%、87.66%。其中，T₁、T₂、T₄ 处理效果最好（三者

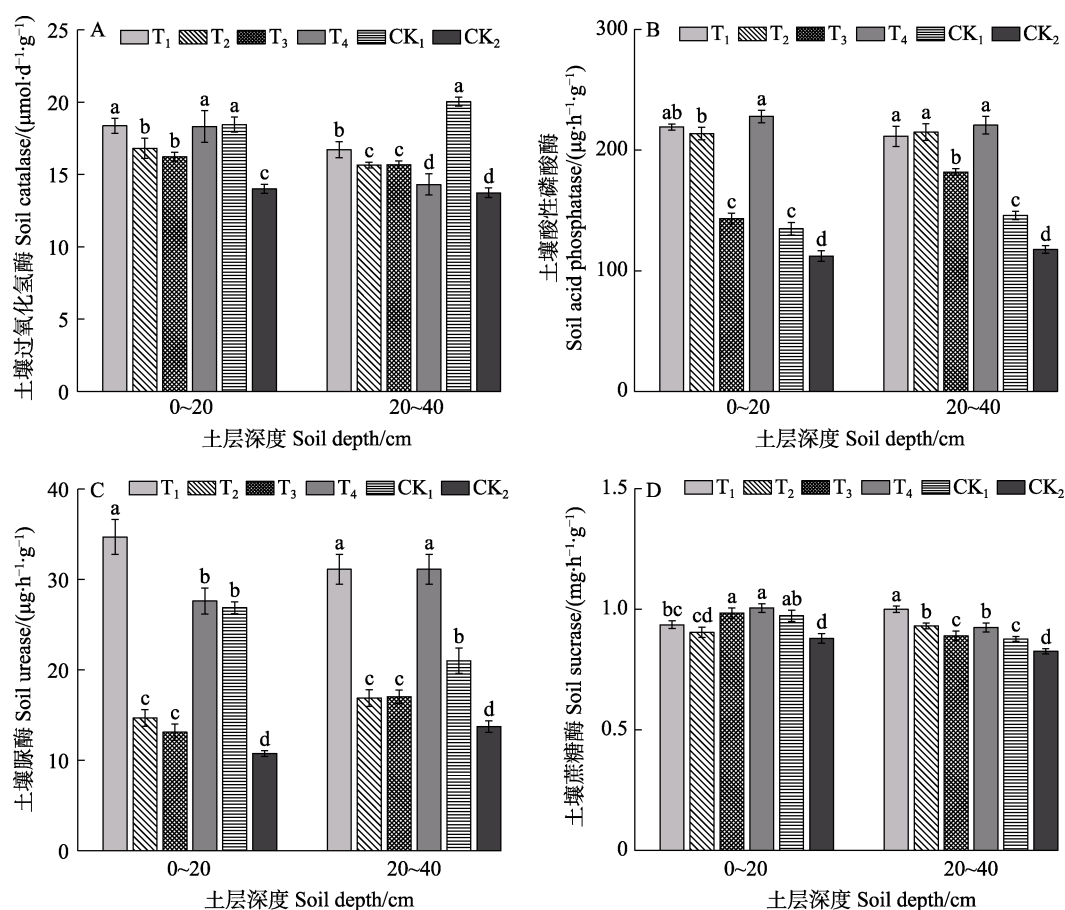
之间差异不显著), T_3 处理次之。

由图 3C 可知, 在 0~20 cm 土层, 与 CK_2 相比, CK_1 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 处理均可显著提高土壤脲酶活性, 增幅分别为 149.72%、222.49%、36.43%、21.93%、156.70%。其中, T_1 处理效果最好, CK_1 、 T_4 处理次之。在 20~40 cm 土层, 与 CK_2 相比, CK_1 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 处理均可显著提高土壤脲酶活性, 增幅分别为 53.10%、126.80%、23.10%、24.03%、126.80%。其中, T_1 、 T_4 处理效果最好(二者之间差异不显著), CK_1 次之。

由图 3D 可知, 在 0~20 cm 土层, 与 CK_2 相比, CK_1 、 T_1 、 T_3 、 T_4 处理能显著提高土壤蔗糖酶活性, 增幅分别为 10.67%、6.48%、11.91%、14.34%。其中, CK_1 、 T_3 、 T_4 处理效果最好(三

者之间差异不显著), T_1 处理次之。在 20~40 cm 土层, 与 CK_2 相比, CK_1 、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 处理均可显著提高土壤蔗糖酶活性, 增幅分别为 6.21%、21.07%、12.68%、7.76%、11.94%。其中, T_1 处理效果最好, T_2 、 T_4 处理次之。

总之, 施用生物有机肥均能不同程度地有效提高不同土层的土壤酶活性。综合来看, 在土壤过氧化氢酶活性提升效果方面, CK_1 最好, T_1 处理次之; 酸性磷酸酶活性提升效果以 T_1 、 T_4 处理最好, T_2 处理次之; 脲酶活性提升效果以 T_1 处理最好, T_4 处理次之; 蔗糖酶活性提升效果在 0~20 cm 土层以 CK_1 、 T_3 、 T_4 处理最好, T_1 处理次之, 在 20~40 cm 土层蔗糖酶活性提升效果则是以 T_1 处理最好, T_2 、 T_4 处理次之。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同施肥处理下油茶林地不同土层土壤酶活性

Fig. 3 Soil urease and sucrose activities in different soil layers of oil-tea *Camellia* forest under different fertilization treatments

3 讨论

3.1 施用生物有机肥对油茶叶片的影响

叶片营养状况能在一定程度上反映作物对土

壤养分的吸收状况, 通过植物叶片养分含量分析, 可以判断果树的果实和树体的营养丰缺情况^[15]。前人研究表明, 生物肥与有机肥对植物叶片

养分含量影响显著,有利于叶片的养分积累,可以提高叶片 SPAD 值和元素含量^[16-18]。在本研究中,施用不同的生物有机肥均能显著提高油茶叶片含水量、SPAD 值及元素含量。综合来说,叶片含水量增加以 T₁、T₃、T₄ 处理效果最好(三者之间差异不显著);叶片 SPAD 值提高以 T₃ 处理效果最好;叶片大量元素含量提升以 T₁、T₃、T₄ 处理效果最好,在叶片中、微量元素含量提升效果以 T₃、T₄ 处理效果最好, T₁ 处理次之,但在叶片铜元素含量上, T₁ 处理效果远高于其他处理。综上, T₃、T₄ 处理对叶片营养影响效果最大,提升叶片养分含量效果最好, T₁ 处理次之。常规复合肥处理的锰元素含量与其他处理组及不施肥处理明显要低,这可能与常规复合肥能够显著提高土壤 pH 相关^[19], pH 升高后引发土壤某种化学反应,减少了油茶林地锰元素交换态含量^[20],从而树体吸收的有效锰元素减少而导致叶片锰元素含量降低。

3.2 施用生物有机肥对油茶林地土壤理化性质的影响

多项研究表明,有机肥和生物肥可以改善土壤结构,提高土壤保水保肥能力,提高土壤有机质、土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量,同时提高土壤 pH,防止土壤酸化,从而改善土壤理化性质^[21-26]。本研究土壤初始肥力测定可知,试验所用油茶林地肥力不高,其中速效钾严重缺乏,这与付登强等^[9]对海南澄迈地区油茶林土壤养分含量的调查情况一致。施用生物有机肥显著提高土壤含水量与田间持水量,各处理土壤容重与孔隙度无显著差距。T₁、T₃ 处理对提升土壤含水量和田间持水量效果最好,除 T₁、T₄ 处理对提升 pH 效果不大外(pH 仍然在适合油茶生长的范围内),其他处理均能提高土壤 pH。施用生物有机肥提高了土壤有机质及碱解氮、有效磷、有效钾的含量,改善油茶林土壤的化学性质, T₁、T₄ 处理总体表现较好,说明 T₁ 和 T₄ 处理的生物有机肥可针对性地用于提高海南油茶林地肥力和速效钾含量。生物有机肥直接补充土壤中的营养元素,改善土壤物理化学性质和生物学活性,以及生物有机肥中有益微生物在土壤中的繁殖和转化都可能是导致施肥后提高土壤养分的原因。

3.3 施用生物有机肥对油茶林地土壤酶活性的影响

土壤酶活性能够反映土壤生物学活性,是衡

量土壤健康的重要指标^[27]。土壤酶对土壤有许多重要的作用,可提高土壤养分的转化和降解有害物质^[28],特别是过氧化氢酶可以清除有害的活性氧(ROS),从而保护细胞免受氧化损伤,有助于土壤微生物或植物根系的生长^[29]。本研究结果表明,施用生物有机肥能够提高土壤酶活性,与前人的研究结果一致^[30-33]。在提升土壤过氧化氢酶活性效果方面, T₁ 处理仅在 20~40 cm 土层次于 CK₁ 复合肥对照组;酸性磷酸酶活性提升以 T₁、T₄ 效果最好;脲酶活性提升以 T₁ 处理效果最好, T₄ 处理次之;蔗糖酶活性提升效果不同土层不太一致, 0~20 cm 土层以 CK₁、T₃、T₄ 处理效果最好, T₁ 处理次之, 20~40 cm 土层则是以 T₁ 处理效果最好, T₂、T₄ 处理次之。总体效果上, T₁ 处理对油茶土壤酶活性影响效果最好。

致谢:本研究过程得到海南大学热带农林学院林电教授和刘子凡教授的帮助和指导,在此一并致谢!

参考文献

- [1] 姚小华,王开良,罗细芳,任华东,龚榜初.我国油茶资源与技术现状及产业化发展对策[C]//中国粮油学会第三届学术年会论文选编,北京:中国粮油学会,2004: 289-294.
YAO X H, WANG K L, LUO X F, REN H D, GONG B C. The oil tea resources in China and its current technology situation and industrialization development strategies[C]//Selected Papers from the Third Academic Annual Conference of the China Grain and Oil Society, Beijing: China Grain and Oil Society, 2004: 289-294. (in Chinese)
- [2] LUAN F, ZENG J S, YANG Y, HE X R, WANG B J, GAO Y B, ZENG N. Recent advances in *Camellia oleifera* Abel a review of nutritional constituents biofunctional properties and potential industrial applications[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 75: 104242.
- [3] 郑道君,潘孝忠,张冬明,谢良商,曾建华,张治礼,叶航.海南油茶资源调查与分析[J].西北林学院学报,2016, 31(1): 130-135.
ZHENG D J, PAN X Z, ZHANG D M, XIE L S, ZENG J H, ZHANG Z L, YE H. Survey and analysis on tea-oil *Camellia* resource in Hainan[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(2): 130-135. (in Chinese)
- [4] 刘进平,周扬,胡海燕,吴文婧,胡新文,赖杭桂.热带油茶种质资源综述[J].热带林业,2022, 50(4): 70-76, 66.
LIU J P, ZHOU Y, HU H Y, WU W Q, HU X W, LAI H G. Germplasm resources of *Camellia* sp. in tropical area of

- China[J]. Tropical Forestry, 2022, 50(4): 70-76, 66. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] 付登强, 杨伟波, 陈良秋, 李艳, 蒋盛军. 油茶林养分管理研究进展[J]. 热带农业科学, 2013, 33(2): 17-21.
FU D Q, YANG W B, CHEN L Q, LI Y, JIANG S J. Research progress on oil *Camellia* nutrition management[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2013, 33(2): 17-21. (in Chinese)
- [7] 范丙全. 我国生物肥料研究与应用进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1602-1613.
FAN B Q. Advances in biofertilizer research and development in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1602-1613. (in Chinese)
- [8] 黄敦元, 彭飞, 余江帆, 兰萍, 谷平, 何波, 翟学昌. 生物菌肥的研究现状及其在油茶种植上的应用前景[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(3): 1076-1078.
HUANG D Y, PENG F, YU J F, LAN P, GU P, HE B, ZHAI X C. Research status of microbial fertilizer and its application prospect on plantation of *Camellia oleifera*[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2013, 41(3): 1076-1078. (in Chinese)
- [9] 付登强, 杨伟波, 陈良秋, 李艳, 刘立云. 海南油茶林土壤养分状况调查[J]. 热带农业科学, 2013, 33(7): 17-20, 29.
FU D Q, YANG W B, CHEN L Q, LI Y, LIU L Y. Soil nutrient status of oil *Camellia* forests in Hainan[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2013, 33(7): 17-20, 29. (in Chinese)
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil agro-chemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [11] 夏翩翩. 油茶林地两种新型生物肥施用效果研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
XIA P P. Study on application effect of two new biological fertilizers in *Camellia oleifera* forest[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021. (in Chinese)
- [12] 朱丛飞, 华思德, 冯杰, 罗汉东, 胡冬南, 张令, 郭晓敏, 牛德奎, 李碧霞. 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, LUO H D, HU D N, ZHANG L, GUO X M, NIU D K, LI B X. Fertilization on seedling growth of *Camellia oleifera* and nutrient content of plantation soil[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2017, 32(6): 613-618. (in Chinese)
- [13] 汪益民, 李梦妮, 马行聪, 陈红金, 彭丽媛, 秦华. 厨余垃圾有机肥对玉米生理生化特性及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(8): 249-255.
WANG Y M, LI M N, MA X C, CHEN H J, PENG L Y, QIN H. Effects of food waste compost on physiological and biochemical characteristics of maize and soil fertility[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(8): 249-255. (in Chinese)
- [14] 陈莹, 刘琼, 田春青, 郭海丽, 高圣钰, 牛红云, 刘丹. 生物肥与碳酰胺配施对大樱桃根际土壤微环境及单果重的影响[J]. 湖南林业科技, 2022, 49(3): 46-51.
CHEN Y, LIU Q, TIAN C Q, GUO H L, GAO S Y, NIU H Y, LIU D. Effects of bio-fertilizer co-applied with carbami, n microenvironment in rhizosphere soil and single fruit weight of *Prunus avium*[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2022, 49(3): 46-51. (in Chinese)
- [15] 闫帅, 宋良, 仇服春, 刘振杰, 徐锴, 袁继存, 程存刚, 张少瑜, 赵德英. 辽宁省‘南果梨’园土壤、叶片营养状况调查及施肥建议[J]. 中国果树, 2020(4): 109-111.
YAN S, SONG L, ZHANG F C, LIU Z J, XU K, YUAN J C, CHENG C G, ZHANG S Y, ZHAO D Y. Investigation on soil and leaf nutritional status of 'Nanguo Pear' orchard in Liaoning Province and fertilization suggestions[J]. China Fruits, 2020(4): 109-111. (in Chinese)
- [16] 胡娟, 邱慧珍, 张文明, 张春红. 微生物有机肥配施氮肥对烤烟 SPAD 值、烟叶酶活性及根系活力的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 620-623.
HU J, QIU H Z, ZHANG W M, ZHANG C H. Effects of combined application of bio-organic fertilizer and nitrogen fertilizer on SPAD value, enzyme activity, and root activity in flue-cured tobacco[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 620-623. (in Chinese)
- [17] 邓霏, 呼丽萍, 安小娟, 党佳丽, 颜凤霞, 张乐. 不同有机肥及施肥水平对大樱桃叶片养分的影响[J]. 现代园艺, 2024, 47(12): 1-3, 7.
DENG F, HU L P, AN X J, DANG J L, YAN F X, ZHANG L. The effects of different organic fertilizers and fertilization levels on the nutrients of cherry leaves[J]. Contemporary Horticulture, 2024, 47(12): 1-3, 7. (in Chinese)
- [18] 阮学瑞. 配施生物有机肥对浙江红花油茶生长与叶片养分的影响[J]. 林业勘察设计, 2022, 42(3): 42-44.
RUAN X R. The effect of applying bio-organic fertilizers on the growth and leaf nutrients of *Camellia chekiangoleosa* in Zhejiang[J]. Forestry Prospect and Design, 2022, 42(3): 42-44. (in Chinese)

- [19] 于方明, 漆培艺, 刘可慧, 周振明, 陈朝述, 唐舒婷, 李艺. 锰污染土壤石灰改良对油茶生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1882-1890.
- YU F M, QI P Y, LIU K H, ZHOU Z M, CHEN C S, TANG S T, LI Y. Effects of lime on the growth and antioxidant enzyme system of *Camellia oleifera* in manganese-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8): 1882-1890. (in Chinese)
- [20] 王陈丝丝, 马友华, 于倩倩, 王强, 李江霞. 钝化剂对农田土壤重金属形态与其稳定性影响研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(1): 172-177.
- WANG C S S, MA Y H, YU Q Q, WANG Q, LI J X. Effect of passivation agent on morphology and stability of heavy metals in cropland soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(1): 172-177. (in Chinese)
- [21] BANERJEE S, KIRKBY C A, SCHMUTTER D, BISSETT A, KIRKEGAARD J A, RICHARDSON A E. Network analysis reveals functional redundancy and keystone taxa amongst bacterial and fungal communities during organic matter decomposition in an arable soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 97: 188-198.
- [22] SHI R Y, LIU Z D, LI Y, JIANG T M, XU M G, LI J Y, XU R K. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application[J]. Soil Research, 2019, 185: 77-84.
- [23] 黄炳旭, 武莉琴, 陈虹宇, 李彦慧, 李红姣, 任士福. 生物有机肥施用量对木瓜杏果实品质及其栽培土壤肥力的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(1): 124-132.
- HUANG B X, WU L Q, CHEN H Y, LI Y H, LI H J, REN S F. Effects of bio organic fertilizer application on soil physical and chemical properties and fruit quality of 'mugua' apricot[J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(1): 124-132. (in Chinese)
- [24] 陈默涵, 何腾兵, 舒英格. 不同生物有机肥对春茶生长影响及其土壤改良效果分析[J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(2): 70-73, 94.
- CHEN M H, HE T B, SHU Y G. Effect of different bio-organic fertilizers on the growth of spring tea[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2018, 37(2): 70-73, 94. (in Chinese)
- [25] 耿赛攀, 马立锋, 杨向德, 方丽, 姜艳艳, 阮建云, 郑健. 有机肥替代化肥对茶园土壤质量及新梢养分吸收的影响[J]. 中国茶叶, 2021, 43(5): 52-57, 62.
- GENG S P, MA L F, YANG X D, FANG L, JIANG Y Y, RUAN J Y, ZHENG J. Effects of organic manure replacing chemical fertilizer on soil quality and chemical fertilizer on soil quality and young shoots nutrient uptake in tea plantation young shoots nutrient uptake in tea plantation[J]. China Tea, 2021, 43(5): 52-57, 62. (in Chinese)
- [26] BEI S, ZHANG Y L, LI T T, CHRISTIE P, LI X L, ZHANG J L. Response of the soil microbial community to different fertilizer inputs in a wheat-maize rotation on a calcareous soil[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2018, 260: 58-69.
- [27] WANG K, LIU F, CAI L. A name list of common agricultural phytopathogenic fungi in China[J]. Mycosystema, 2022, 41(3): 361-386.
- [28] MOORHEAD D L, RINKES Z L, SINSABAUGH R L, WEINTRAUB M N. Dynamic relationships between microbial biomass, respiration, inorganic nutrients and enzyme activities: informing enzyme-based decomposition models[J]. Front Microbiol, 2013, 4: 1-12.
- [29] HECTOR D A, ROANNA M, GENTA F A, MAURICIO R V S, ROD J D. Reactive oxygen species scavenging by catalase is important for female *Lutzomyia longipalpis* fecundity and mortality[J]. PLoS One, 2011, 6(3): 7486.
- [30] 杨德廉, 周昕, 李更新, 杜传印, 管恩森, 马凤静, 张彭, 刘振宇, 李祥英. 有机肥施用对烟田土壤酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(15): 60-67.
- YANG D L, ZHOU X, LI G X, DU C Y, GUAN E S, MA S J, ZHANG P, LIU Z Y, LI X Y. Organic fertilizers application improves soil enzyme activity in tobacco field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(15): 60-67. (in Chinese)
- [31] 冀妍丽, 王玉霞, 郭龙, 谷仙. 中药渣有机肥对作物生长、土壤化学性状及酶活性的 Meta 分析[J]. 北方园艺, 2024(4): 57-65.
- JI Y L, WANG Y X, GUO L, GU X. Meta-analysis of crop growth, soil chemical properties and enzyme activities induced by Chinese herb residue manure[J]. Northern Horticulture, 2024(4): 57-65. (in Chinese)
- [32] 陈俊朴. 有机肥配施化肥对茶园土壤有机碳、氮组分及相关酶活性的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2021.
- CHEN J P. Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on soil organic carbon, nitrogen components and related enzyme activities in tea garden[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [33] ZHU X Y, ZHAO P, WANG J, ZHANG Q Q, YU Y C, LIU M, JIN R, TANG Z H. Long-term stationary fertilization decreased soil health in field-grown sweetpotato by increasing soil-borne diseases or allelochemicals[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 203: 105658.