

不同氮磷钾配比复合肥对热区油茶叶片 营养和土壤性状的影响

宋灏明^{1,2#}, 蒙青长^{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 571700 中国; 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 中国; 3. 海南大学 生命健康学院, 海南 海口 570228 中国;
4. 福建以诺生物科技有限公司, 福建 武平 364300 中国; 5. 海南澄迈原真生态休闲农业开发有限公司, 海南 澄迈 571921 中国)

摘 要: 油茶为多年生木本油料树种, 合理施肥对于油茶增产意义重大, 其中合理的氮磷钾配比可提供均衡营养, 对于提高油茶的生长和产量至关重要。为研制适合热区油茶林土壤状况的专用复合肥, 采用 4 种权威的氮、磷、钾施肥配比施肥, 然后对‘侯臣 3 号’(*C. vietnamensis* ‘Houchen 3’)油茶叶片养分含量、油茶林地土壤的理化性质和土壤酶活等指标进行测定, 探讨不同氮磷钾配比对海南油茶林的影响。结果表明, 施用不同氮磷钾配比复合肥均可显著提高油茶叶片的营养元素, 以及油茶林土壤的理化性质和土壤酶活等指标。在提高叶片养分及土壤营养和生物活性方面, C(N:P:K = 1:2:2)和 D(N:P:K = 10:6:8)氮磷钾配比总体上对热区油茶效果最好, 特别是 C 处理和 D 处理对土壤速效钾的含量促进效果最大, 分别在 0~20 和 20~40 cm 土层比不施肥(CK2)对照提高了 92.68% 和 116.17%, 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。本研究对进一步筛选适合热区油茶的专用复合肥提供了数据, 并为油茶专用复合肥的后续研究奠定科学基础。

关键词: 油茶; 侯臣 3 号; 氮磷钾配比; 叶片养分; 土壤理化性质; 土壤酶活

中图分类号: S794.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2026)03-0355-09

宋灏明, 蒙青长, 杨玉靖, 等. 不同氮磷钾配比复合肥对热区油茶叶片营养和土壤性状的影响[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(3): 355–363. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250083 CSTR: 32425.

14.j.cnki.rdswwb.20250083



油茶是山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia* L.)油用物种的统称, 是中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]。油茶籽油富含不饱和脂肪酸、维生素 E 和山茶甙等生理活性物质, 特别是油茶籽油的不饱和脂肪酸含量高达 90% 以上, 有“东方橄榄油”的美称。除食用和烹调功能外, 油茶籽油及其副产品在日用化工、医药和农业上都具有重要的用途^[2]。海南本地油茶籽油当地人称为“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, 且油茶四季花果不

离枝, 有“抱子怀胎”的特点(花果同期), 常年都要从土壤中吸收大量的养分和水分, 因此对油茶林进行合理施肥, 补充土壤养分消耗, 是改良土壤、提高肥力、增加油茶结实量、达到高产与稳产的重要措施^[5-6]。施肥效果受多种因素影响, 其中氮磷钾配比是关键因素之一。合理的氮磷钾配比可提供均衡营养, 对于提高油茶的生长速率和产量至关重要。在有关不同氮、磷、钾施肥配比对油茶生长和产量影响方面, 前人进行过大量的研究^[7-19], 但尚未见热区油茶这方面的研究。鉴于油茶树体对氮、磷、钾大量矿质元素的吸收和积累具有一定的



收稿日期: 2025-06-18

修回日期: 2025-07-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2200700); 海南省重点研发计划项目(ZDYF2023XDNY055); 海南省山柚(油茶)产业技术联盟项目(kjcgzh017)

***第一作者:** 宋灏明(2000—), 男, 海南大学热带农林学院 2023 级硕士研究生。E-mail: shm20000618@163.com

***通信作者:** 刘进平(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 作物学。E-mail: liu3305602@163.com

规律性^[20-21],本研究探讨了4种权威的氮、磷、钾施肥配比^[22-25]对热区油茶叶片养分含量和土壤性状的影响,为进一步筛选和研制适合热区油茶林土壤状况的专用复合肥打下基础。

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的偃林农场(19°89' N, 109°93' E),海拔70 m,气候为湿润的亚热带季风气候,阳光充足,年平均温度为24.8 °C,年平均降水量为2 000 m。油茶林试验地土壤以酸性砖红壤为主。试验地土壤有机质含量为1.5%,碱解氮含量为70~80 mg·g⁻¹,速效磷含量为2.0~2.5 mg·g⁻¹,速效钾含量50~60 mg·g⁻¹。

1.2 试验材料与设计 试验材料选择为长势基本一致且无明显病害的六年生油茶树,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。以施用常规复合肥(中化山东肥业有限公司生产的中化复合肥,N:P:K=15:15:15)(CK1)和不施肥(CK2)为对照,根据文献设计4个配比处理。配比 A:N:P:K=0.33:0.59:1.33^[22]; 配比 B:N:P:K=3.96:1.48:10.11^[23]; 配比 C:N:P:K=1:2:2^[24]; 配比 D:N:P:K=10:6:8^[25]。每种施肥处理分为3个重复小区,每个小区有20株长势一致、无明显病虫害的油茶树,每种施肥处理一共有60株树。施用量为每株1 kg,施肥时间为2024年6月下旬。采用条状平行沟施肥,所有施肥处理为南北两条平行沟,于树冠滴水线靠外10 cm处开沟施肥,沟深为30 cm左右,长为50 cm以上,肥料混合土壤均匀覆盖,表面盖上土,各处理插上地牌标记,地牌插在施肥坑边缘上,以便采样避开施肥坑,区组以及处理间均设有隔离株。施肥前后各处理的管理措施一致。

1.3 样品采集与测定 叶片采样于施肥后5个月(2024年11月下旬)进行。每个小区随机抽取10株树为一个重复,在每株树的东南西北各个方向上随机采集枝条上第3、4片当年生成熟无病害叶片,混合装入无菌塑料袋,采3个重复带回实验室用去离子水清洗擦干水分,放于烘箱105 °C烘烤30 min杀青后,再将温度调整到75 °C烘干至恒重,计算叶片含水量后用粉碎机粉碎过筛,装入贴好标签的无菌封口袋备用,采用王会利等^[13]方法测定叶片营养元素含量等相关指标。

分别于施肥前和施肥5个月后(2024年11月

下旬)测定试验地油茶林的土壤相关理化性质。采用环刀法取0~20、20~40 cm土样,每层重复3次,采取至少10个采样点的土样,每层土壤混合后,将部分样品及时装入铝盒带回去测定土壤含水量,其余部分用四分法取1 kg标记好装入无菌采样袋,带回实验室进行自然风干处理,过1.00 mm和0.25 mm尼龙筛,装入小无菌袋标记好后测定。采用朱丛飞等^[15]、彭江涛等^[26]、庞圣江等^[27]方法测定土壤理化性质,采用陈莹等^[28]方法测定土壤酶活性。

1.4 数据处理 采用Microsoft Excel 2010、SPSS Statistics v22.0及Origin 2024进行数据处理和绘图制作。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷钾配比施肥处理对油茶叶片大中量元素含量的影响 施肥后,叶片中的氮元素,与不施肥(CK2)处理相比,A、B、C、D、CK1处理叶片中的氮元素含量显著提高,分别提高了31.1%、22.41%、40.7%、50.79%、36.41%,其中D处理叶片中的氮元素含量显著高于CK1处理,提高了10.54%(表1)。由表1可知,对于磷元素,A、B、C、D、CK1处理叶片中的磷元素含量显著高于不施肥(CK2)处理,分别提高了18.57%、20%、52.85%、47.14%、22.86%。与CK1处理相比,C、D处理叶片中的磷元素含量显著提高,分别提高了24.42%、19.77%,其中C处理显著高于其他所有处理。对于钾元素,与不施肥(CK2)处理相比,A、B、C、D、CK1处理叶片中的钾元素含量显著提高,分别提高了4.37%、9.43%、3.68%、3.22%、2.76%,其中B处理叶片中的钾元素含量显著高于CK1处理,提高了6.49%。对于钙元素,A、B、C、D、CK1处理叶片中的钙元素含量显著高于不施肥(CK2)处理,分别提高了57.75%、48.64%、16.47%、26.16%、9.3%。与CK1处理相比,A、B、C、D处理叶片中的钙元素含量显著提高,分别提高了44.32%、35.99%、6.56%、15.42%,其中A处理显著高于其他所有处理。对于镁元素,A、B、C、D、CK1处理叶片中的镁元素含量显著高于不施肥(CK2)处理,分别提高了20%、17.5%、18.75%、16.25%、16.25%,其中A、B、C、D、CK1处理之间无显著性差异。总体上,与不施肥(CK2)处理相比,4种不同配比

表 1 不同氮磷钾配比复合肥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 with compound fertilizers at different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium

处理 Treatment	氮/(g·kg ⁻¹) N	磷/(g·kg ⁻¹) P	钾/(g·kg ⁻¹) K	钙/(g·kg ⁻¹) Ca	镁/(g·kg ⁻¹) Mg
A	(14.04±0.17) ^c	(0.83±0.01) ^c	(4.54±0.21) ^b	(8.14±0.19) ^a	(0.96±0.03) ^a
B	(13.11±0.34) ^d	(0.84±0.01) ^c	(4.76±0.18) ^a	(7.67±0.17) ^b	(0.94±0.01) ^a
C	(15.07±0.77) ^b	(1.07±0.03) ^a	(4.51±0.17) ^b	(6.01±0.03) ^d	(0.95±0.04) ^a
D	(16.15±0.02) ^a	(1.03±0.01) ^b	(4.49±0.23) ^b	(6.51±0.19) ^c	(0.93±0.02) ^a
CK1	(14.61±0.44) ^{bc}	(0.86±0.02) ^c	(4.47±0.31) ^b	(5.64±0.06) ^e	(0.93±0.01) ^a
CK2	(10.71±0.43) ^e	(0.70±0.02) ^d	(4.35±0.33) ^c	(5.16±0.15) ^f	(0.80±0.03) ^b

注: 表中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 下同。

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences ($P < 0.05$), similarly hereinafter.

和常规复合肥(CK1)处理都可显著提升油茶叶片大中量元素含量。

2.2 不同氮磷钾配比施肥处理对油茶叶片微量元素含量的影响 施肥后, 叶片中的铁元素, A、B、C、D 处理叶片中的铁元素含量显著高于不施肥(CK2)处理, 分别提高了 49.31%、7.86%、7.88%、10.99%, 其中只有 A 处理叶片中的铁元素含量显著高于 CK1 处理, 提高了 49.31%(表 2)。由表 2 可知, 对于锰元素, 与不施肥(CK2)处理相比, A、B、C、D、CK1 处理叶片中的锰元素含量显著提高, 分别提高了 42.86%、19.05%、38.09%、47.62%、19.05%。与 CK1 处理相比, A、C、D 处理叶片中的锰元素含量显著提高, 分别提高了 20.00%、16.00%、24.00%, 其中 A、C、D 处理之间无显著差异。对于锌元素, A、C 处理叶片中的锌元素含量显著高于不施肥(CK2)处理, 分别提高了 30.31%、63.56%; 与 CK1 处理相比, A、C 处理叶片中的锌元素含量

同样显著提高, 分别提高了 20.90%、52.07%。对于铜元素, 与不施肥(CK2)处理相比, B、C 处理叶片中的铜元素含量显著提高, 分别提高了 16.96%、137.60%, 其中 C 处理叶片中的铜元素含量显著高于包括 CK1 在内的其他处理。总体上, 与不施肥(CK2)处理相比, C 处理相对于其他处理在显著提升油茶叶片微量元素含量上更有优势。

2.3 不同氮磷钾配比施肥处理对油茶林地土壤物理性质的影响 施肥后, 各配比施肥处理对油茶林地土壤含水率有不同的影响(图 1-A)。在 0~20 cm 土层, 与不施肥(CK2)处理相比, D 处理土壤含水率显著提高, 与 CK1 处理相比, 各处理土壤含水率之间无显著差异。在 20~40 cm 土层, 与不施肥(CK2)处理相比, A、D、CK1 处理土壤含水率显著提高, 与 CK1 处理相比, 各处理土壤含水率之间无显著差异。其中 D 处理在不同土层土壤含水率都显著提高。不同配比施肥处理同样对不同土

表 2 不同氮磷钾配比复合肥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 with compound fertilizers at different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium

处理 Treatment	铁/(mg·g ⁻¹) Fe	锰/(g·kg ⁻¹) Mn	锌/(mg·g ⁻¹) Zn	铜/(mg·g ⁻¹) Cu
A	(66.46±4.0) ^a	(0.30±0.02) ^a	(6.71±0.18) ^b	(5.74±0.44) ^{bc}
B	(48.01±1.0) ^b	(0.25±0.01) ^b	(5.36±0.16) ^c	(6.62±0.63) ^b
C	(48.02±1.0) ^b	(0.29±0.02) ^a	(8.44±0.40) ^a	(11.69±1.25) ^a
D	(49.40±0.6) ^b	(0.31±0.02) ^a	(5.38±0.25) ^c	(5.88±0.13) ^{bc}
CK1	(47.43±1.2) ^{bc}	(0.25±0.01) ^b	(5.55±0.28) ^c	(5.66±0.34) ^{bc}
CK2	(44.51±1.2) ^c	(0.21±0.01) ^c	(5.16±0.16) ^c	(4.92±0.34) ^c

层的土壤田间持水量有不同的影响(图 1-B)。在 0~20 cm 土层,与不施肥(CK2)处理相比,D 处理土壤含水率显著提高,与 CK1 处理相比,各处理田间持水量之间无显著差异。其中 D 处理在不同土

层田间持水量都显著提高。由图 1-C 和图 1-D 可知,不同处理两个土层的土壤容重和土壤孔隙度之间无显著性差异。说明不同施肥处理对土壤容重和土壤孔隙度影响不大。

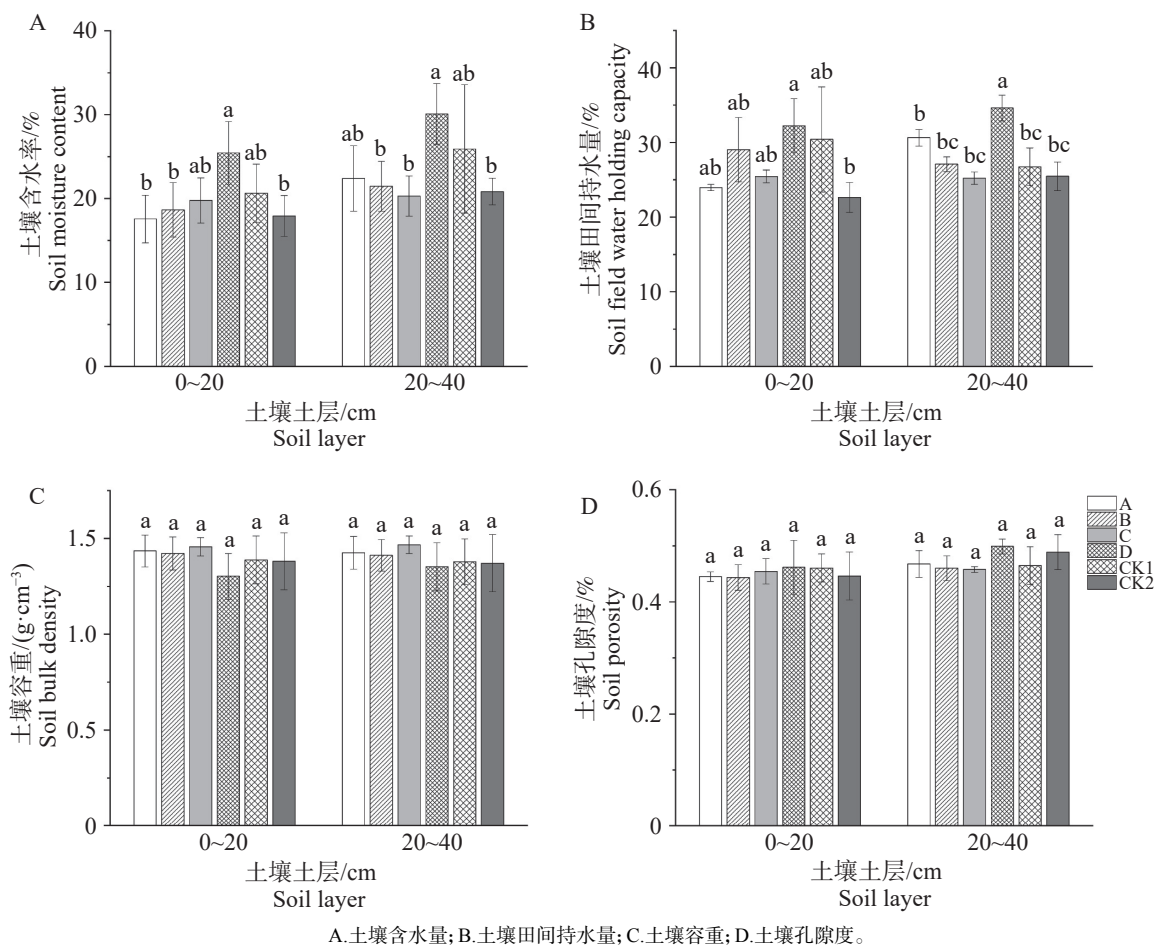


图 1 不同氮磷钾配比复合肥料处理下油茶林地不同土层的物理性质

Fig. 1 Soil physical properties in different layers of oil-tea *Camellia* plantations under different fertilization treatments with compound fertilizers at different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium

2.4 不同氮磷钾配比施肥处理对油茶林地土壤 pH 和养分含量的影响 由表 3 可知,施肥后,0~20 cm 土层的 pH 普遍高于 20~40 cm 土层,在 0~20 cm 土层,与不施肥(CK2)处理相比,A、B、C、D、CK1 处理土壤 pH 显著提高;与 CK1 处理相比,A、C、D 处理土壤 pH 显著提高。有机质含量方面,在 0~20 cm 土层,与不施肥(CK2)处理相比,B、C、D、CK1 处理的土壤有机质含量显著提高,分别提高了 14.13%、11.29%、12.11%、15.40%、7.60%;其中 B、D 与 CK1 处理显著高于其他处理,三者之间无显著差异。在 20~40 cm 土层,与不施肥(CK2)处理相比,D、CK1 处理土壤有机质含量

显著提高,分别提高了 12.66%、21.33%,D 处理与 CK1 之间无显著差异。在碱解氮方面,在 0~20 cm 土层,A、B、C、D、CK1 处理土壤碱解氮显著高于不施肥(CK2)处理,分别提高了 22.30%、35.90%、17.71%、52.67%、26.48%,其中只有 D 处理土壤碱解氮显著高于 CK1 处理,提高了 20.70%。在 20~40 cm 土层,与不施肥(CK2)处理相比,A、C、D、CK1 处理土壤碱解氮显著提高,分别提高了 40.33%、42.67%、86.05%、46.79%,同样只有 D 处理土壤碱解氮显著高于 CK1 处理,提高了 26.73%。在速效磷方面,在 0~20 cm 土层,A、B、C、D、CK1 处理土壤速效磷显著高于不施肥(CK2)处理,分别提高

了 69.04%、56.67%、317.14%、179.04%、68.09%；C、D 处理土壤速效磷显著高于 CK1 处理，分别提高了 148.15%、66.00%，其中 C 显著高于 D 处理。在 20~40 cm 土层，与不施肥(CK2)处理相比，A、B、C、D、CK1 处理土壤速效磷显著提高，分别提高了 100.52%、109.25%、295.78%、115.78%、104.21%，其中只有 C 处理土壤速效磷显著高于 CK1 处理，提高了 98.91%。在速效钾方面，在 0~20 cm 土层，A、B、C、D、CK1 处理土壤速效钾显著高于不施肥(CK2)处理，分别提高了 48.78%、71.95%、92.68%、59.75%、31.70%，其中 B、C、D 处理土壤速效钾显著高

于 CK1 处理，分别提高了 30.55%、46.29%、21.29%，C 处理显著高于其他处理。在 20~40 cm 土层，与不施肥(CK2)处理相比，A、C、D、CK1 处理土壤速效钾显著提高，分别提高了 40.62%、84.37%、89.06%、116.17%、45.31%，其中 B、C、D 处理土壤速效钾显著高于 CK1 处理，分别提高了 26.88%、30.10%、58.66%，D 处理显著高于其他处理。总体来说，与不施肥(CK2)处理相比，4 种不同配比和常规复合肥(CK1)处理总体上都可提升油茶林地不同土层的 pH 和土壤养分含量，其中 C、D 处理对于提高土壤养分含量较其他处理更有优势。

表 3 不同氮磷钾配比复合肥施肥处理下油茶林地土壤化学性质

Tab. 3 Soil chemical properties in oil-tea *Camellia* plantations under various fertilization treatments with compound fertilizers at different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	pH	有机质/% Organic matter	碱解氮/(mg·g ⁻¹) Alkali-hydrolyzable nitrogen	速效磷/(mg·g ⁻¹) Available phosphorus	速效钾/(mg·g ⁻¹) Available potassium
0~20	A	(5.55±0.06) ^{ab}	(1.73±0.06) ^{bc}	(89.77±3.51) ^{bc}	(3.55±0.31) ^c	(122.05±12.55) ^{bc}
	B	(5.42±0.03) ^b	(2.02±0.08) ^a	(99.74±4.01) ^b	(3.29±0.30) ^c	(141.70±19.08) ^{ab}
	C	(5.46±0.07) ^{ab}	(1.77±0.03) ^b	(86.40±9.61) ^c	(8.76±0.05) ^a	(158.28±8.70) ^a
	D	(5.62±0.18) ^a	(1.93±0.02) ^a	(112.06±7.45) ^a	(5.86±0.61) ^b	(131.84±10.77) ^b
	CK1	(5.24±0.01) ^c	(2.02±0.15) ^a	(92.84±3.53) ^{bc}	(3.53±0.12) ^c	(108.63±5.88) ^c
	CK2	(4.87±0.38) ^d	(1.63±0.07) ^c	(73.40±7.97) ^d	(2.10±0.18) ^d	(82.84±6.58) ^d
20~40	A	(5.41±0.06) ^a	(1.61±0.10) ^{bc}	(74.73±7.16) ^b	(3.81±0.42) ^{bc}	(90.01±18.58) ^c
	B	(5.23±0.12) ^b	(1.51±0.02) ^c	(57.52±22.15) ^{bc}	(3.08±0.41) ^{bc}	(118.64±7.66) ^b
	C	(5.40±0.05) ^a	(1.52±0.05) ^c	(75.97±4.68) ^b	(7.52±0.33) ^a	(121.75±1.05) ^b
	D	(5.39±0.06) ^a	(1.69±0.03) ^{ab}	(99.07±3.93) ^a	(4.10±0.62) ^{bc}	(147.82±8.88) ^a
	CK1	(5.16±0.13) ^b	(1.82±0.02) ^a	(78.17±3.85) ^b	(3.88±0.37) ^{bc}	(93.01±3.84) ^c
	CK2	(4.86±0.06) ^b	(1.50±0.17) ^c	(53.25±18.18) ^c	(1.90±0.22) ^d	(64.82±2.58) ^d

2.5 不同氮磷钾配比施肥处理对油茶林地土壤酶活性的影响 由表 4 可得，施肥后，在过氧化氢酶方面，在 0~20 cm 土层，与不施肥(CK2)处理相比，A、C、D 处理过氧化氢酶活性显著提高，分别提高了 33.33%、50.00%、33.33%，其中只有 C 处理过氧化氢酶活性显著高于 CK1 处理，提高了 20.00%。在 20~40 cm 土层，B、C、D、CK1 处理过氧化氢酶活性显著高于不施肥(CK2)处理，分别提高了 26.88%、30.10%、58.66%、25.00%，也只有 C 处理过氧化氢酶活性显著高于 CK1 处理，提高了 13.33%。在酸性磷酸酶方面，在 0~20 cm 土

层，与不施肥(CK2)处理相比，A、C、CK1 处理酸性磷酸酶活性显著提高，分别提高了 96.02%、105.29%、68.87%，除 D 处理酸性磷酸酶活性显著低于 CK1 处理，其余处理与 CK1 处理无显著差异。在脲酶方面，在 0~20 cm 土层，B、C 处理脲酶活性显著高于不施肥(CK2)处理，分别提高了 66.67%、100.29%；同样 B、C 处理脲酶活性显著高于 CK1 处理，分别提高了 53.84%、84.61%。在 20~40 cm 土层，同样是 B、C 处理脲酶活性显著高于不施肥(CK2)处理和 CK1 处理。在蔗糖酶方面，在 0~20 cm 土层，A、C 处理蔗糖酶活性显著高于不施

肥(CK2)处理,分别提高了 11.22%、12.24%,但 A、C 处理与 CK1 处理相比无显著差异。在 20~40 cm 土层, A、C 处理蔗糖酶活性显著高于不施

肥(CK2)处理和 CK1 处理。由上可知,与不施肥(CK2)处理相比,各处理均可显著提高不同土层的过氧化氢酶、酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性。

表 4 不同氮磷钾配比复合肥施肥处理下油茶林地土壤酶活性

Tab. 4 Soil urease and sucrose activities in different soil depths of oil-tea *Camellia* plantation under different fertilization treatments with compound fertilizers at different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	过氧化氢酶/($\mu\text{mol}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Catalase	酸性磷酸酶/($\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Acid phosphatase	脲酶/($\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Urease	蔗糖酶/($\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Sucrase
0~20	A	(16.93±1.43) ^{ab}	(296.90±33.03) ^a	(14.26±1.22) ^{bc}	(1.09±0.01) ^a
	B	(14.59±3.75) ^{bc}	(205.29±20.21) ^{bc}	(20.14±6.88) ^{ab}	(1.04±0.06) ^{ab}
	C	(18.96±0.86) ^a	(309.57±59.45) ^a	(24.37±2.89) ^a	(1.10±0.05) ^a
	D	(16.39±0.89) ^{ab}	(171.05±7.35) ^c	(10.91±1.84) ^c	(1.01±0.08) ^{ab}
	CK1	(15.18±1.46) ^{bc}	(255.27±35.47) ^{ab}	(13.32±2.46) ^c	(1.03±0.08) ^{ab}
	CK2	(12.37±1.24) ^c	(151.24±18.12) ^c	(12.26±2.23) ^c	(0.98±0.03) ^b
20~40	A	(14.00±1.11) ^{dc}	(293.90±41.29) ^a	(11.15±2.83) ^{bc}	(1.13±0.02) ^a
	B	(17.28±0.76) ^{ab}	(244.88±39.16) ^{bc}	(22.81±0.84) ^{ab}	(1.03±0.05) ^{ab}
	C	(17.97±0.37) ^a	(281.42±36.35) ^a	(23.29±1.83) ^a	(1.10±0.02) ^a
	D	(14.34±0.51) ^{cd}	(191.52±7.76) ^c	(11.55±1.87) ^c	(1.02±0.07) ^{ab}
	CK1	(15.88±1.46) ^{bc}	(280.03±31.51) ^{ab}	(14.75±2.03) ^c	(1.04±0.09) ^{ab}
	CK2	(12.42±1.15) ^e	(184.96±15.48) ^c	(9.78±1.45) ^c	(0.99±0.02) ^b

3 讨论

氮、磷、钾是植物生长必不可少的营养元素。前人的研究表明,氮肥可以促进油茶树高、冠幅、地径等营养生长指标增长,钾肥有利于提高油茶果实的含油率、出籽率等品质指标,磷肥可促进油茶花芽分化和根系的伸长生长和活力^[29]。合理的肥料比例在促进油茶树体快速生长的同时,也能达到显著增产效果;氮、磷、钾之间具有一定的配合效应,且远高于各自单因素的累加效应^[30]。

叶片是植物养分含量的贮藏器官之一,其营养含量可以在一定程度上反映树体的营养水平,并对作物生长发育有重要影响^[31]。本研究结果表明,不同氮磷钾配比施肥对热区油茶叶片营养和土壤性状具有较大的促进作用。其中 D 处理(N:P:K = 10:6:8)对油茶叶片氮元素含量促进效果最大,分别比不施肥(CK2)对照和施用常规复合肥(CK1)对照提高了 50.79% 和 10.54%。C 处理(N:P:K = 1:2:2)对提高叶片磷元素含量效果最大,分别比不施肥(CK2)对照和施用常规复合肥(CK1)

对照提高了 52.85% 和 24.42%。B 处理(N:P:K = 3.96:1.48:10.11)可显著提高叶片钾元素的含量,分别比不施肥(CK2)对照和施用常规复合肥(CK1)对照提高了 9.43% 和 6.49%。氮、磷、钾之间存在复杂的交互作用,适当的配比可能有利于提高植株对特定营养元素的吸收和利用^[13]。

植物氮、磷、钾等矿质营养主要来自土壤,而施肥能增加土壤养分含量,促进植物养分吸收和生长发育^[32]。在提高土壤有机质含量方面,本研究结果表明, D 处理(N:P:K = 10:6:8)效果较好,在 0~20 和 20~40 cm 土层与不施肥(CK2)对照相比分别提高了 15.4% 和 12.66%,但与常规复合肥(CK1)对照之间无显著差异。在碱解氮方面, D 处理(N:P:K = 10:6:8)在 0~20 和 20~40 cm 土层的土壤碱解氮含量提高效果最好,显著高于不施肥(CK2)对照和施用常规复合肥(CK1)对照,在 0~20 cm 土层分别提高了 52.67% 和 20.7%,在 20~40 cm 土层分别提高了 46.79% 和 26.73%。在速效磷方面, C 处理(N:P:K = 1:2:2)和 D 处理(N:P:K = 10:6:8)在 0~20 cm 土层土壤速效磷含

量显著高于不施肥(CK2)对照,分别提高了317.14%和179.04%,C处理(N:P:K=1:2:2)和D处理(N:P:K=10:6:8)同样显著高于施用常规复合肥(CK1)对照,分别提高了148.15%、66.00%;在20~40 cm土层,C处理(N:P:K=1:2:2)和D处理(N:P:K=10:6:8)分别比不施肥(CK2)对照提高了295.78%、115.78%;但只有C处理(N:P:K=1:2:2)土壤速效磷显著高于施用常规复合肥(CK1)对照,提高了98.91%。C处理(N:P:K=1:2:2)和D处理(N:P:K=10:6:8)对土壤速效钾的含量促进效果最大,在0~20 cm土层显著高于不施肥(CK2)和施用常规复合肥(CK1)对照,分别提高了92.68%和46.29%,在20~40 cm土层则D处理显著高于不施肥(CK2)和施用常规复合肥(CK1)对照,分别提高了116.17%和58.66%。D处理(N:P:K=10:6:8)对于改善土壤的含水量和田间持水量方面效果也最好。付登强等^[33]对海南油茶林土壤养分含量的调查结果表明,油茶林地肥力不高,其中速效钾严重缺乏。C处理(N:P:K=1:2:2)、D处理(N:P:K=10:6:8)中氮、磷、钾配比可有效提高油茶林地土壤养分,特别是土壤钾的含量,因此可针对性地改善海南油茶林地土壤缺钾问题。前人研究表明,适当的施肥比例能提高油茶林地土壤中的氮、磷、钾等营养元素和有机质含量^[15]。不同氮、磷、钾比例施肥处理会显著影响土壤养分特征,既可能通过直接作用(如酸化作用),也可能通过间接作用(影响土壤酶活性或根际微生物群落的生长和营养反应等),从而改变土壤的物理和化学性质来实现^[34]。

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^[35]。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^[36],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^[37]。本研究结果表明,C处理(N:P:K=1:2:2)氮磷钾配比在提高过氧化氢酶、酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性方面表现最好。

总之,从提高叶片养分及土壤营养和生物活性方面,C处理(N:P:K=1:2:2)、D处理(N:P:K=10:6:8)中氮、磷、钾比对热区油茶效果最好,这为筛选适合热区油茶的专用复合肥提供了依据,

未来将深入研究这些氮磷钾比对油茶产量的影响。

致谢:感谢海南大学热带农林学院林电教授和刘子凡教授给予的指导和帮助!

参考文献:

- [1] 姚小华,王开良,罗细芳,等.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集(下册).烟台:中国粮油学会,2004:289-294.
- [2] Luan F, Zeng J S, Yang Y, et al. Recent advances in *Camellia oleifera* Abel: a review of nutritional constituents, biofunctional properties, and potential industrial applications [J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 75: 104242. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104242>
- [3] 郑道君,潘孝忠,张冬明,等.海南油茶资源调查与分析[J].*西北林学院学报*,2016,31(1):130-135. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7461.2016.01.24>
- [4] 刘进平,周扬,胡海燕,等.热带油茶种质资源综述[J].*热带林业*,2022,50(4):70-76. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0938.2022.04.015>
- [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. <https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.07.001>
- [6] 付登强,杨伟波,陈良秋,等.油茶林养分管理研究进展[J].*热带农业科学*,2013,33(2):17-21. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-2196.2013.02.005>
- [7] 潘晓杰,侯红波,廖芳,等.配方施肥对油茶中幼林营养生长的影响[J].*中南林学院学报*,2003,23(2):82-84. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-923X.2003.02.012>
- [8] 胡冬南,游美红,袁生贵,等.不同配方施肥对幼龄油茶的影响[J].*西北林学院学报*,2005,20(1):94-97. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7461.2005.01.025>
- [9] 陈永忠,彭邵锋,王湘南,等.油茶高产栽培系列技术研究——配方施肥试验[J].*林业科学研究*,2007,20(5):650-655. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1498.2007.05.010>
- [10] 汪洪丽,郭晓敏,赵中华.油茶生长量、产量与平衡施肥的研究[J].*江西林业科技*,2007(6):73-75. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2505.2007.06.026>
- [11] 杨柳平,魏美华.幼龄油茶配方施肥对结实率的影响[J].*安徽农学通报*,2011,17(5):69-70. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7731.2011.05.030>
- [12] 胡冬南,涂淑萍,刘亮英,等.氮、磷、钾和灌水用量对油茶春梢生长的影响[J].*林业科学*,2015,51(4):148-155. <https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20150419>
- [13] 王会利,覃其云,曹继钊,等.不同肥料养分配比对油茶叶片营养和生理特性的影响[J].*广西林业科学*,2015,44(4):412-415. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1126.2015.04.017>
- [14] 杨金亮,辜云杰,殷国兰,等.油茶配方施肥研究[J].*四川林业科技*,2016,37(2):76-79. <https://doi.org/10.16779/j.cnki.1003-5508.2016.02.015>

- [15] 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. <https://doi.org/10.19303/j.issn.1008-0384.2017.06.008>
- [16] 李甜江, 胡志芳, 戴益源, 等. 配方施肥对凤庆红花油茶幼林林分土壤的影响[J]. *西部林业科学*, 2018, 47(1): 86–91. <https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx1972.2018.01.015>
- [17] 李乾华. 不同配方施肥对幼龄油茶的影响分析[J]. *南方农业*, 2019, 13(20): 33–35. <https://doi.org/10.19415/j.cnki.1673-890x.2019.20.019>
- [18] 袁小军, 周幼成, 吴喜昌, 等. 氮磷钾配比施肥对油茶花芽生长及分化的影响[J]. *经济林研究*, 2019, 37(3): 1–8. <https://doi.org/10.14067/j.cnki.1003-8981.2019.03.001>
- [19] 罗帅, 钟秋平, 葛晓宁, 等. 不同氮、磷、钾施肥对比对油茶花芽分化的影响[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(2): 131–138. <https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.2019.02.019>
- [20] 曹永庆, 任华东, 林萍, 等. 油茶树体对氮磷钾元素年吸收和积累规律的研究[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(4): 442–448. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1498.2012.04.006>
- [21] 戚嘉敏, 张鹏, 奚如春. 油茶树体氮磷钾养分的年动态变化[J]. *经济林研究*, 2017, 35(3): 121–126. <https://doi.org/10.14067/j.cnki.1003-8981.2017.03.017>
- [22] 谭云峰. 油茶高效栽培技术与加工[M]. 长沙: 湖南科学出版社, 2016: 288.
- [23] 何方, 姚小华. 中国油茶栽培[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013: 307.
- [24] 唐光旭, 张永生, 唐丽湘, 等. 油茶栽培肥力配比的试验研究[J]. *经济林研究*, 1998, 16(4): 20–22.
- [25] 彭阳生, 奚如春. 油茶栽培及茶籽油制取[M]. 北京: 金盾出版社, 2010: 341.
- [26] 彭江涛, 周国英, 蒋越西, 等. 生物复合肥对油茶苗木生长及土壤微生态的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 137–142. <https://doi.org/10.11838/sfsc.1673-6257.20448>
- [27] 庞圣江, 张培, 杨保国, 等. 生物菌肥与化肥配施对土沉香生长及土壤养分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(3): 101–106. <https://doi.org/10.11838/sfsc.1673-6257.19370>
- [28] 陈莹, 刘琼, 田春青, 等. 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. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-5710.2022.03.009>
- [29] 李安亮, 陈永忠, 王瑞. 油茶施肥技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(31): 36–40. <https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb15040095>
- [30] 唐炜, 刘豪健, 陈隆升, 等. 油茶林高效施肥技术[J]. *湖南林业科技*, 2017, 44(3): 105–108. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-5710.2017.03.019>
- [31] 郑绍傑, 金友帆, 董琼, 等. 氮磷钾不同配比施肥对树番茄幼苗生长及叶片养分含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(7): 108–122. <https://doi.org/10.11838/sfsc.1673-6257.23499>
- [32] 向云西, 陈胜魁, 潘萍, 等. 马尾松叶片-凋落物-土壤的碳氮磷化学计量特征[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(2): 120–126. <https://doi.org/10.13324/j.cnki.jfcf.2019.02.002>
- [33] 付登强, 杨伟波, 陈良秋, 等. 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. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-2196.2013.07.005>
- [34] Liu J T, Zhou L, Wang D N, et al. The effect of balanced N, P and K fertilization on fine root traits and soil properties in *Sapindus mukorossi* [J]. *Forests*, 2024, 15(1): 94. <https://doi.org/10.3390/f15010094>
- [35] 王科, 刘芳, 蔡磊. 中国农业植物病原菌物常见种属名录[J]. *菌物学报*, 2022, 41(3): 361–386. <https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.210483>
- [36] Moorhead D L, Rinkes Z L, Sinsabaugh R L, et al. Dynamic relationships between microbial biomass, respiration, inorganic nutrients and enzyme activities: informing enzyme-based decomposition models [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 223. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00223>
- [37] Diaz-Albiter H, Mitford R, Genta F A, et al. Reactive oxygen species scavenging by catalase is important for female *Lutzomyia longipalpis* fecundity and mortality [J]. *PLoS One*, 2011, 6(3): e17486. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017486>

Effects of compound fertilizers at different NPK ratios on the leaf nutrients and soil properties in oil-tea *Camellia* plantations in the tropical regions

Song Haoming^{1,2#}, Meng Qingchang^{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 Jian², Lai Hanguai²,
Lian Dongdi⁴, Wang Rizheng⁵, Liu Jinping^{1,2*}

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571700, China; 2. Nanfan School/Sanya Nanfan Institute, 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: Oil-tea *Camellia* is a perennial woody oil tree species, and reasonable fertilizer application is of great significance for increasing the oil-tea yield. Compound fertilizer at a reasonable ratio of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) can provide balanced nutrition, which is crucial for improving the growth and yield of oil-tea *Camellia*. In order to develop a specialized compound fertilizer suitable for the soil conditions of oil-tea *Camellia* plantations in tropical areas, compound fertilizers at four authoritative ratios of nitrogen, phosphorus and potassium were applied to a plantation of oil-tea *Camellia vietnamensis* 'Houchen 3', and the leaf nutrient contents, the soil physical and chemical properties, and the enzyme activities in the oil-tea plantation were determined. The results showed that the application of compound fertilizers at different NPK ratios can significantly improve the nutritional elements of oil-tea *Camellia* leaves, as well as the soil physical and chemical properties and soil enzyme activity in the oil-tea plantation. In terms of improving leaf nutrients, soil nutrients and biological activity, the C (N:P:K = 1:2:2) and D (N:P:K = 10:6:8) treatments largely have the best effect on oil-tea *Camellia* in the tropical regions, and had the greatest promoting effect especially on the content of available potassium in soil, with an increase of 92.68% and 116.17% in the 0~20 and 20~40 cm soil layers, respectively, compared to the control without fertilization (CK2), which is of great significance for targeted improvement of soil fertility and available potassium content in Hainan oil-tea *Camellia* plantations. These results provide data for screening specialized compound fertilizers suitable for oil-tea *Camellia* in the tropical regions, laying a scientific foundation for further research of specialized compound fertilizers for oil-tea *Camellia* in the tropical regions.

Keywords: oil-tea *Camellia*; *Camellia vietnamensis* 'Houchen 3'; nitrogen, phosphorus and potassium ratio; leaf nutrients; soil physical and chemical properties; soil enzyme activity

(责任编辑:张 瑁)