

## 不同施肥处理对油茶林土壤养分含量及植株生长的影响

杨艺薇<sup>1</sup>, 陈世通<sup>1</sup>, 董雨瑶<sup>2</sup>, 潘永柱<sup>1</sup>, 何晓菲<sup>3</sup>, 丁敏<sup>3</sup>, 罗乃康<sup>4</sup>

(1. 丽水市林业技术推广总站, 浙江 丽水 323000; 2. 丽水学院, 浙江 丽水 323000; 3. 丽水市森林资源和管理总站, 浙江 丽水 323000; 4. 青田县罗乃康家庭农场, 浙江 青田 323900)

**摘要:** 本研究以‘长林4号’油茶 *Camellia oleifera* ‘Changlin No. 4’ 为材料, 设置富氮复合肥(N:P:K=22:8:15)、富磷复合肥(N:P:K=8:22:15)、平衡复合肥(N:P:K=15:15:15) 3个施肥处理以及1个空白对照(CK), 研究不同施肥处理对油茶林土壤理化性质和植株生长的影响。结果表明, 各施肥处理提高了油茶林地的土壤含水率和土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量, 其中富磷复合肥对提高土壤养分含量的效果最好, 富氮复合肥效果次之; 3种施肥处理均有效增加了油茶植株的地径、株高和冠幅, 其中富氮复合肥处理增加地径效果最明显, 平衡复合肥处理对株高影响最大, 且不同处理间均达到显著性差异水平( $P < 0.05$ ); 各施肥处理对油茶细根生物量的增加均有显著的促进作用( $P < 0.05$ ), 并影响细根的空间分布, 其中, 以富磷复合肥处理的油茶林20~30 cm土层的细根生物量最大, 综合分析发现以平衡复合肥处理的油茶细根生物量最大。

**关键词:** 油茶; 施肥; 土壤养分状况; 细根; 空间分布

中图分类号: S714.8; S794.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2023)06-0010-013

## Effect of Different Fertilization Treatments on Soil Nutrient Content and Growth Traits of *Camellia oleifera* Stand

YANG Yiwei<sup>1</sup>, CHEN Shitong<sup>1</sup>, DONG Yuyao<sup>2</sup>, PAN Yongzhu<sup>1</sup>, HE Xiaofei<sup>3</sup>, DING Min<sup>3</sup>, LUO Naikang<sup>4</sup>

(1. Lishui Forestry Extension Station of Zhejiang, Lishui 323000, China; 2. Lishui University of Zhejiang, Lishui 323000, China; 3. Lishui Forest Resources Administration of Zhejiang, Lishui 323000, China; 4. Qingtian Luonaikang Family Farm of Zhejiang, Qingtian 323900, China)

**Abstract:** Sample plots were established for experiment on application in December 2021, July and December of 2022 of different compound fertilizers (N:P:K=22:8:15, N:P:K=8:22:15, N:P:K=15:15:15 and no fertilization as CK) in 6-year *Camellia oleifera* ‘Changlin No. 4’ demonstration base, in Qingtian, Zhejiang province. In March 2023, soil and fine root were sampled and determinations were carried out on growth traits of *C. oleifera* ‘Changlin No. 4’. The results indicated that various fertilization treatments could improve soil water content, SOM, SAN, and SAP<sub>h</sub> and SAP<sub>o</sub> content. Compound fertilizer with N:P:K=8:22:15 had the best effect on soil nutrient content, followed by compound fertilizer with N:P:K=22:8:15. Application of three fertilizers effectively increased the growth of ground diameter, height and crown width, especially compound fertilizer with N:P:K=22:8:15 for ground diameter, and that with N:P:K=15:15:15 for height growth, and there were significant difference among different treatments. Each fertilization treatment had evidently effect on increase of fine root biomass and effect on the spatial distribution of fine roots. The compound fertilizer with N:P:K=8:22:15 had the greatest impact on fine root biomass at depth of 20-30 cm.

**Key words:** *Camellia oleifera* ‘Changlin No. 4’; fertilization; soil nutrient status; fine root; spatial distribution

收稿日期: 2023-06-09; 修回日期: 2023-09-25

基金项目: 丽水市科技项目《油茶高效生态栽培技术推广》(项目编号: (2020) TPY07)

作者简介: 杨艺薇, 工程师, 从事森林培育、林业技术推广等工作; E-mail: 573507774@qq.com。通信作者: 丁敏, 高级工程师, 从事森林培育、林下种植等林业推广工作; E-mail: 1152065398@qq.com。

油茶 *Camellia oleifera* 属山茶科 Theaceae 山茶属 *Camellia* 常绿小乔木或灌木, 是世界四大木本油料作物之一, 也是中国特有的一种纯天然高级油料, 在我国已有 2 000 多年的栽培史和利用史<sup>[1-2]</sup>, 其种子可榨油(茶油), 素有“东方橄榄油”“油中珍品”之称。油茶原是南方山间野生树种, 现多为人工栽培, 主要分布于南方丘陵山区<sup>[3]</sup>。因其具有对气候适应性广、对土壤要求不高、价值高等优点而被人们逐渐重视, 油茶产业发展日益加快。近年来, 油茶在帮助农民增收、绿色扶贫、推动林业经济发展、增强生态系统稳定性等方面发挥了重要作用。

油茶在各生长阶段所需营养有所不同, 将氮、磷、钾等元素合理配比施肥才能达到高产优产的目标。近年来, 油茶施肥多集中在传统化肥和油茶专用肥上, 人们对于利用氮磷钾配方施肥能促进油茶植株生长和油茶果实品质等有较为清晰的认识, 但对于其他施肥类型缺少更加深入的研究<sup>[4]</sup>。目前, 对油茶施肥的研究多集中于对地上部分的影响, 对地下部分影响的研究相对较少。刘俊萍等研究了不同覆盖处理对油茶细根生长时空动态分布特征的影响, 以期完善高效栽培措施和促进增产<sup>[5]</sup>。研究发现不同品种的油茶细根生长指标的种间差异因土层而异<sup>[6]</sup>。肥料是植物获得营养元素的重要来源, 具有改善土壤性质、提高土壤肥力水平的作用。林地施肥可以有效提高土壤肥力, 改良土壤养分含量, 提高生物量的积累等, 是实现林地丰产的十分重要的技术措施<sup>[7]</sup>。

根系生长优劣是林木能否发挥高产优质能力的关键。根系可以分为粗根(直径  $> 2\text{ mm}$ )和细根(直径  $\leq 2\text{ mm}$ )两个径级<sup>[8]</sup>。林木细根主要分布于  $0 \sim 30\text{ cm}$  土层中, 在整个细根生物量中占比  $80\% \sim 90\%$ <sup>[9]</sup>。在根系中, 细根是对土壤资源有效性响应最活跃、最敏感的部分, 尽管它们只占植物总生物量的一小部分, 但在森林生态系统的碳和养分循环中起着至关重要的作用<sup>[10]</sup>。土壤空间异质性的存在及土壤理化性质影响着林木根系的空间分布特征, 而细根的空间分布格局对于植物的生长发育以及生产力十分重要<sup>[11]</sup>。因此, 通过研究油茶细根的空间分布情况, 可在一定程度上反映出油茶的生长状况。

本研究选择浙江省丽水市青田县油茶示范基地的油茶‘长林 4 号’*Camellia oleifera* ‘Changlin No. 4’为试验材料, 设计 3 种复合肥料配方和空白对照 4 个处理, 研究不同施肥处理对油茶林土壤理化性质、树体性状以及细根生物量指标的影响, 旨在为青田县当地的油茶生产选择可行性的经济、高效、科学的施肥配方提供参考依据, 实现减肥增效, 提高油茶产量和品质。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地基本概况

试验样地位于浙江省丽水市青田县山口镇油茶示范基地, 地理坐标为  $120^{\circ}29'\text{ E}$ ,  $28^{\circ}10'\text{ N}$ , 地处浙江东南部。气候属于亚热带季风气候, 四季分明, 温暖湿润, 年平均气温为  $18.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 无霜期为  $256\text{ d}$ , 年平均降水量为  $1\,800\text{ mm}$ 。试验地海拔为  $487\text{ m}$ , 地形地貌为山地, 土壤以花岗岩风化残坡积物母质白岩砂土、山地型黄壤为主, 土壤 pH 值为  $4.62 \sim 4.71$ 。

### 1.2 试验材料

供试验油茶林为‘长林 4 号’油茶林, 株龄为 6 年, 种植密度为  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , 林分正常管理, 油茶长势较为一致, 测得样株叶片平均叶绿素含量的相对值 (SPAD 值) 为 50.21。

### 1.3 试验设计

以 N、P、K 配比设计不同施肥配方, 试验设计 4 个处理: 富氮复合肥 (N:P:K = 22:8:15)、富磷复合肥 (N:P:K = 8:22:15)、平衡复合肥 (N:P:K = 15:15:15) 3 个肥料配方 (肥料总养分含量 45%, 生产厂家为湖北鄂中化工有限公司) 以及 1 个空白对照 (CK), 空白对照不施肥。每个处理设置 3 个重复小区, 每个小区面积为  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ , 各小区间设置  $3\text{ m}$  隔离带。试验于 2021 年开始, 2021 年 12 月上旬施一次肥, 施肥方式为沟施, 在树冠滴水线下两侧开沟, 复合肥施肥量为  $599.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 2022 年 7 月追肥一次, 复合肥施肥量为  $224.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 2022 年 12 月施一次肥, 沟施, 复合肥施肥量为  $599.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2023 年 3 月测量并采集样品。

#### 1.3.1 样品采集及处理

(1) 根样采集 采用根钻法<sup>[12]</sup>采集带根土团。土钻直径为  $50\text{ mm}$ , 在每个小区内随机选取 3 株长势相近、

无病虫害的油茶作为标准木，以标准木为中心，从树干基部开始，分别在距离树干 10 cm、20 cm、50 cm 以及 70 cm 处画出同心环，在每个环上任意选择 3 个样点，清除地表凋落物，用土钻在相应的点上分土层取样，土层深度分别为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm，将每个环上各层的土样混合，每株油茶取 12 个根样，4 个处理共计 432 个根样，分别装入自封袋中并编号。

带回实验室后，将土样在清水中浸泡 12 h 后再充分搅拌，使用筛孔尺寸为 2.00 mm、0.50 mm 和 0.25 mm 的筛网（新标准土壤筛 NY/T1121.19—2008，绍兴市上虞华丰五金仪器有限公司），采用套筛法在流水中冲洗，分离根系、土壤和其他杂质，用镊子(VETUS)等器具拣出所有根系。将洗净后的根系放入蒸发皿中，根据油茶根系的形态特征和分支结构，剔除其他植物的根系，再根据根系的外形、颜色、弹性、气味等特征区分活根和死根，挑出活根。利用游标卡尺测量活根直径，将直径≤2 mm 的细根测量后进行根系分级，分为两个径级：0~1 mm（径级Ⅰ）和>1~2 mm（径级Ⅱ）。将样品置于干燥阴凉的环境下自然风干至恒质量，利用电子天平称量其风干质量，精确到 0.000 1 g。

（2）土壤样品采集 用环刀法采集土样。在每个小区内随机采集 3 处 2 株油茶中间的土壤，分别取 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的土壤，3 个取样点同一深度采集的表层土混合形成一个土样，重复 3 次，共 24 个混合土样，装入自封袋后带回实验室。去除土壤中的植物残体以及石块，筛出 10~20 g 鲜土进行土壤含水率（Soil moisture content, SMC）的测定。剩余土样自然风干完全后，研磨过筛保存，用于测定土壤其他的理化性质。

1.3.2 土壤理化性质的测定 土壤 pH 值测定采用电位法（NY/T 1121.2—2006），土液比为 1:2.5；土壤有机碳（Soil organic carbon, SOC）含量测定采用重铬酸钾氧化-分光光度法（HJ 615—2011）测定，通过公式土壤有机质含量（g·kg<sup>-1</sup>）=土壤有机碳（g·kg<sup>-1</sup>）×1.724，可以计算得到土壤有机质（Soil organic matter, SOM）含量；土壤碱解氮（Soil alkali-hydrolysable nitrogen, SAN）含量测定采用碱解扩散法（DB51/T 1875—2014）；土壤有效磷（Soil available phosphorus, SAPho）含量测定采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法（Olsen 法）（NY/T 1121.7—2014）；土壤速效钾（Soil available potassium, SAPot）含量测定采用火焰光度计法（NY/T 889—2004）；土壤含水率测定采用烘干法。

1.3.3 油茶树体性状及根系的测定 在每个小区内随机选取 3 株长势相近、无病虫害且相对独立生长的油茶，测定油茶植的地径、株高、东西冠幅和南北冠幅，3 株取均值作为 1 重复。地径用胸径尺测量，树高、东西冠幅和南北冠幅用卷尺测量。

本实验所采用的细根指标为生物量（B），将细根分径级后风干，利用电子天平（精确到 0.000 1 g）分别测量干质量并计算细根生物量。细根生物量又称为现存量，泛指单位面积上所有生物有机体的干质量<sup>[13]</sup>。根据其定义，采用以下公式计算生物量（B），并将其单位换算成标准单位（kg·hm<sup>-2</sup>）<sup>[14]</sup>：

$$B = \frac{m \times 10^5}{\pi R^2}$$

式中，B 为细根的生物量（kg·hm<sup>-2</sup>），m 为平均每个土芯的根质量（g），R 为土钻的半径（cm）。

1.4 土壤养分分级标准

参照全国土壤养分含量分级标准，将 SOM、SAN、SAPho 和 SAPot 含量分为 6 级，分别为极高、高、中上、中、低和极低（见表 1）；pH 值可分为 7 级，分别为强酸、酸、弱酸、中性、弱碱、碱和强碱（见表 2）。

表 1 土壤养分分级标准  
Tab. 1 Standard for grading of soil nutrients

| 级别                           | 1 级  | 2 级      | 3 级      | 4 级     | 5 级    | 6 级 |
|------------------------------|------|----------|----------|---------|--------|-----|
| 丰缺                           | 极高   | 高        | 中上       | 中       | 低      | 极低  |
| SOM/（g·kg <sup>-1</sup> ）    | >40  | >30~40   | >20~30   | >10~20  | >6~10  | ≤6  |
| SAN/（mg·kg <sup>-1</sup> ）   | >150 | >120~150 | >90~120  | >60~90  | >30~60 | ≤30 |
| SAPho/（mg·kg <sup>-1</sup> ） | >40  | >20~40   | >10~20   | >5~10   | >3~5   | ≤3  |
| SAPot/（mg·kg <sup>-1</sup> ） | >200 | >150~200 | >100~150 | >50~100 | >30~50 | ≤30 |

| 表 2 pH 值分级<br>Tab. 2 Grading of pH |      |           |             |             |             |             |       |
|------------------------------------|------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| 分级                                 | 强酸   | 酸         | 弱酸          | 中性          | 弱碱          | 碱           | 强碱    |
| pH 值                               | <4.5 | 4.5 ~ 5.5 | > 5.5 ~ 6.5 | > 6.5 ~ 7.5 | > 7.5 ~ 8.5 | > 8.5 ~ 9.0 | > 9.0 |

1.5 数据处理

数据处理采用 Excel 软件, 数据分析利用 IBM SPSS Statistics19 进行方差分析, 使用 Duncan 法进行多重比较, 研究各因素产生影响的显著性, 显著性水平设定为  $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对油茶林土壤的影响

2.1.1 不同施肥处理对土壤 pH 值的影响 由图 1 可知, 4 种处理下的油茶林地土壤均为酸性, 施用肥料后的土壤 pH 值均比 CK 的 pH 值高, 其中, 施平衡复合肥后最高, 施富氮复合肥次之, 施富磷复合肥再次之, 但各处理间均无显著差异。

2.1.2 不同施肥处理对土壤养分含量的影响 如表 3 所示, 在富氮复合肥处理下, 与 CK 相比, SOM、SAN、SAPot 含量均有显著增加 ( $P<0.05$ ), SAPho 含量增加不显著, 仅增长 0.3%; 在富磷复合肥处理下, 与 CK 相比, SOM、SAN、SAPho、SAPot 含量均有显著增加 ( $P<0.05$ ), 其中 SAPho 含量增加最多, 增量达 196.3%;

在平衡复合肥处理下, 与 CK 相比, 除 SOM 含量增加不显著外, SAN、SAPho、SAPot 含量均有显著增加 ( $P<0.05$ )。

参照土壤养分分级标准, CK 的 SOM、SAN 和 SAPho 含量都处于中上水平, SAPot 含量则处于高水平; 施富氮复合肥后, 与 CK 相比, SOM、SAN 和 SAPot 含量都有提高, 其中, SOM 含量达到高水平, SAN 和 SAPot 含量达到极高水平; 施富磷复合肥后, SOM 含量达到高水平, SAN、SAPho 和 SAPot 含量达到极高水平; 施平衡复合肥后, SAN 和 SAPho 含量达到高水平, SAPot 含量达到极高水平。综上所述, 油茶林地土壤施富磷复合肥对提高该林地土壤养分含量的效果最好, 施富氮复合肥效果次之。

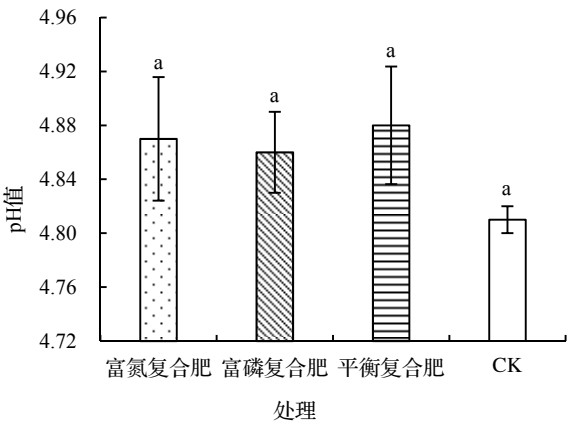


图 1 不同施肥处理下油茶林地的土壤 pH 值  
Fig. 1 Soil pH values under different fertilization treatments

| 表 3 不同施肥处理对油茶林地土壤养分含量的影响<br>Tab. 3 Effect of different fertilization treatments on soil nutrient content |  |   |   |   |
|--|--|---|---|---|
| 处理   | SOM/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | SAN/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | SAPho/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | SAPot/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
| 富氮复合肥  | 34.17±0.27a                            | 177.20±3.35a                            | 15.53±0.69c                               | 255.81±1.88b                              |
| 富磷复合肥  | 32.22±0.13b                            | 156.58±3.10b                            | 45.89±0.95a                               | 212.40±2.05c                              |
| 平衡复合肥  | 26.74±0.11c                            | 117.56±3.05c                            | 20.40±0.65b                               | 364.24±2.01a                              |
| CK   | 22.02±0.08c                            | 97.38±4.41d                             | 15.49±0.11c                               | 198.06±2.18d                              |

注: 不同字母表示不同施肥处理下的土壤养分含量差异显著 ( $P<0.05$ )。

2.1.3 不同施肥处理对土壤含水率的影响 如图 2 所示, 试验各处理土壤平均含水率变化范围在 21.89% ~ 28.84%。在土层深度为 0 ~ 10 cm 时 (图 2A), 各处理的土壤含水率排序为: 富磷复合肥处理 > 富氮复合肥处理 > 平衡复合肥处理 > CK。施肥处理对土壤含水率的影响显著, 各处理间均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。土层深度为 10 ~ 20 cm 时 (图 2B), 富磷复合肥处理的土壤含水率最高, 平衡复合肥处理次之, 富氮复合肥处理再次之。富氮复合肥处理与 CK 之间土壤含水率无显著差异, 其他各处理间的土壤含水率差异均达到显著水平 ( $P<0.05$ )。CK 的 0 ~ 10 cm 土层的土壤含水率比 10 ~ 20 cm 土层的土壤含水率低, 但仅相差 0.3%, 其他施肥处理二层土壤中的含水率则都表现相反。

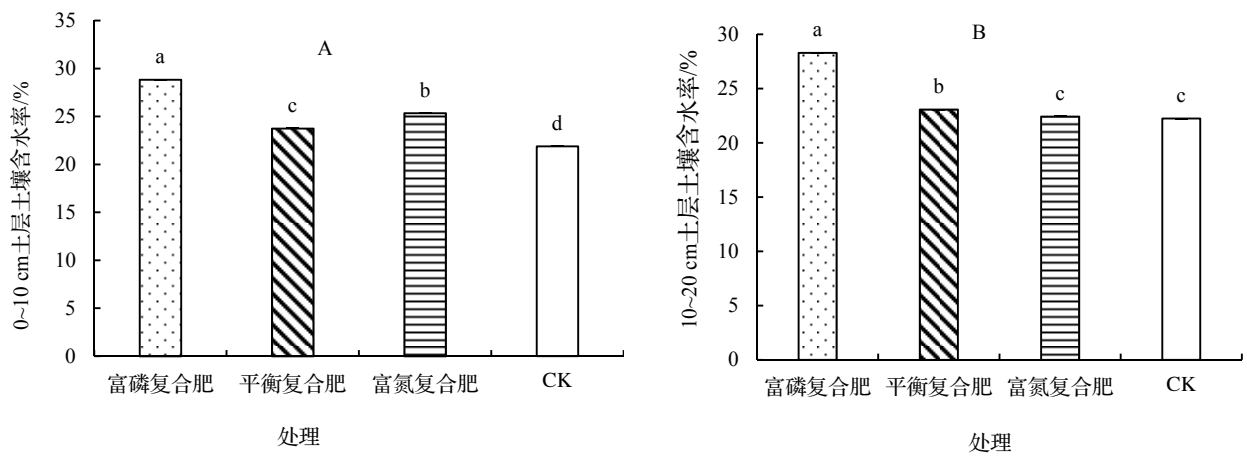


图 2 不同施肥处理下不同土层深度的土壤含水率

Fig. 2 Soil moisture content at different soil layers under different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对油茶林植株生长的影响

2.2.1 不同施肥处理对油茶林树体生长的影响 由表 4 可知,相较于 CK, 3 种施肥处理油茶的地径和株高均显著增加 ( $P < 0.05$ )。比较不同施肥处理油茶地径生长量的影响,施用富氮复合肥对地径生长量的影响最大,是 CK 的 1.48 倍,3 种施肥处理对地径的影响均达到显著性水平 ( $P < 0.05$ )。施平衡复合肥对株高的影响最明显,其次是富磷复合肥、富氮复合肥,各施肥处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。相较于 CK, 3 种施肥处理的东向西冠幅均显著增加 ( $P < 0.05$ ),冠幅大小顺序为富氮复合肥处理 > 平衡复合肥处理 > 富磷复合肥处理,平衡复合肥处理与富磷复合肥处理间、平衡复合肥与富氮复合肥处理间无显著差异,其余各施肥处理两两间均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。相比较于 CK,施平衡复合肥的植株南北向冠幅增加最明显,比 CK 高出 38.1%,施富磷复合肥次之,施富氮复合肥比 CK 的南北冠幅小。

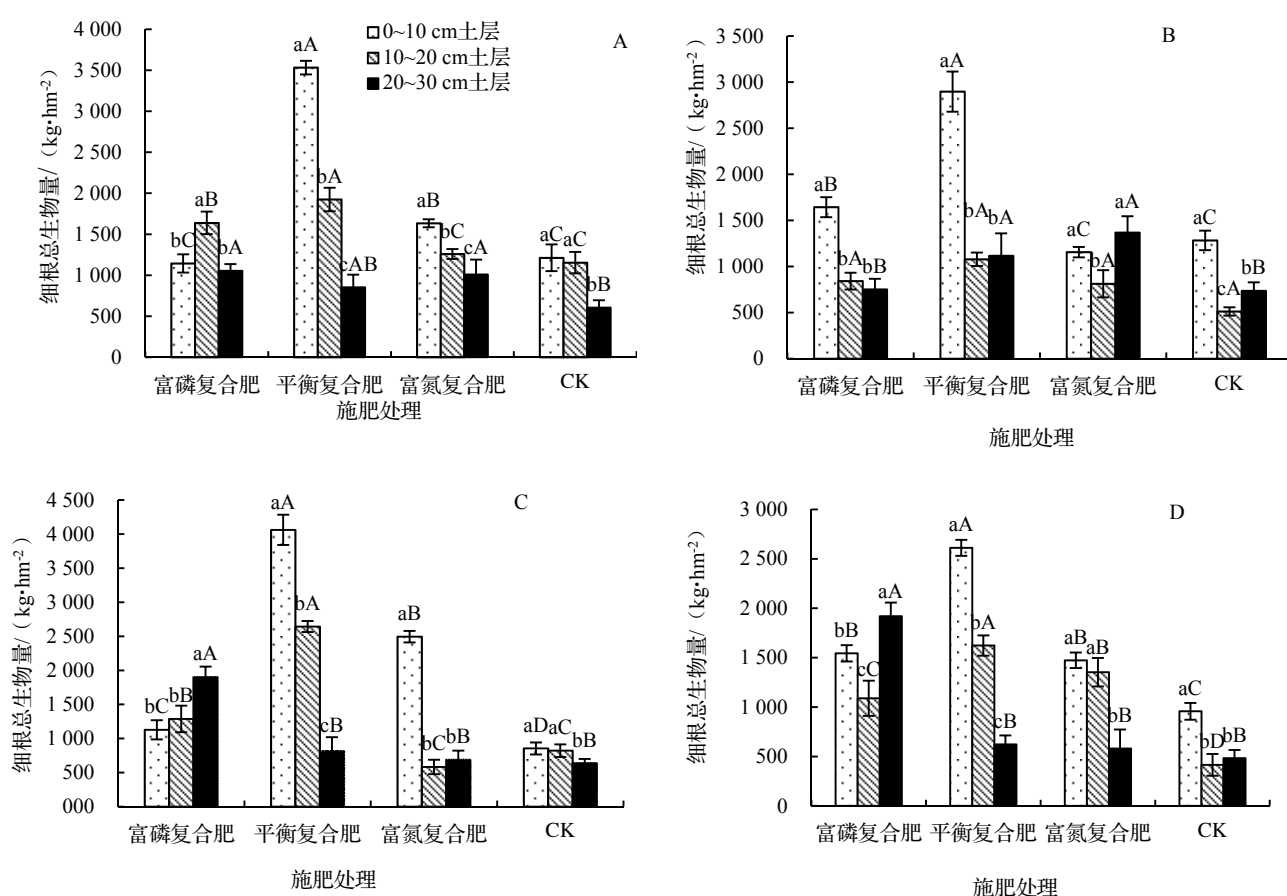
表 4 不同施肥处理对油茶生长的影响  
Tab. 4 Effect of different fertilization treatments on growth traits of *C. oleifera* ‘Changlin No 4’

| 施肥    | 地径/cm        | 株高/cm       | 冠幅/cm        |             |
|-------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|       |              |             | 东西           | 南北          |
| CK    | 8.5 ± 0.14d  | 220 ± 7.07d | 198 ± 2.83c  | 210 ± 7.07c |
| 富氮复合肥 | 12.6 ± 0.42a | 245 ± 5.66c | 270 ± 4.24a  | 196 ± 8.49c |
| 富磷复合肥 | 10.3 ± 0.28c | 260 ± 2.83b | 240 ± 7.07b  | 230 ± 5.66b |
| 平衡复合肥 | 11.7 ± 0.28b | 290 ± 2.83a | 255 ± 7.07ab | 290 ± 1.41a |

2.2.2 不同施肥处理对油茶根系空间分布的影响

2.2.2.1 不同施肥处理对油茶根系垂直分布的影响 由图 3 可知,平衡复合肥处理在 0 ~ 10 cm 土层的细根总生物量最大,与其他处理均差异显著 ( $P < 0.05$ )。富磷复合肥处理在 20 ~ 30 cm 土层的 50、70 cm 两个水平径向距离的细根总生物量最大,且与其他土层的细根总生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ); 在 10 ~ 20 cm 土层的 10、20、50 cm 三个水平径向距离的细根总生物量较大,仅小于平衡复合肥处理。富氮复合肥处理在 20 ~ 30 cm 土层的 20 cm 水平径向距离的细根总生物量最大,但与平衡复合肥处理间差距不显著。比较水平径向距离 10 cm 的细根总生物量 (图 3A),富氮复合肥处理、平衡复合肥处理以及 CK 的细根总生物量都随着土层深度的增加而减少,且富氮复合肥处理与平衡复合肥处理间各土层的细根总生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ),CK 的 10 ~ 20 cm 土层的细根总生物量与 20 ~ 30 cm 土层的细根总生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ); 富磷复合肥处理的细根总生物量随着土层深度的增加先增加后减少。比较水平径向距离 20 cm 的细根总生物量 (图 3B),富磷复合肥处理的细根总生物量随着土层深度的增加而减少,0 ~ 10 cm 土层的细根总生物量显著大于其它两个土层的细根总生物量 ( $P < 0.05$ ); 富氮复合肥处理、平衡复合肥处理以及 CK 的细根总生物量均随着土层深度的增加先减少后增加,且

富氮复合肥处理和 CK 的 10 ~ 20 cm 土层的细根总生物量显著小于其他两个土层的细根总生物量 ( $P < 0.05$ )。比较水平径向距离 50 cm 的细根总生物量 (图 3C), 平衡复合肥处理和 CK 的细根总生物量随着土层加深而减少, 其中平衡复合肥处理下各土层的细根总生物量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); 富氮复合肥处理的细根总生物量呈现先减后增的趋势, 0 ~ 10 cm 土层的细根总生物量显著大于 20 ~ 30 cm 土层的细根总生物量 ( $P < 0.05$ ); 而富磷复合肥处理下的细根总生物量随着土层加深而增加, 且 20 ~ 30 cm 土层的细根总生物量显著大于其它两个土层的细根总生物量 ( $P < 0.05$ )。在水平径向距离 70 cm 处 (图 3D), 平衡复合肥处理和富氮复合肥处理的细根总生物量随着土层深度的增加呈现下降的趋势, 富磷复合肥处理和 CK 的细根总生物量呈现先减少后增加的趋势, 其中, 富磷复合肥和平衡复合肥处理下各土层的细根总生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 富氮复合肥处理下 20 ~ 30 cm 土层的细根总生物量显著小于其他土层的细根总生物量 ( $P < 0.05$ ), CK 的 0 ~ 10 cm 土层的细根总生物量显著大于其他土层的细根总生物量 ( $P < 0.05$ )。



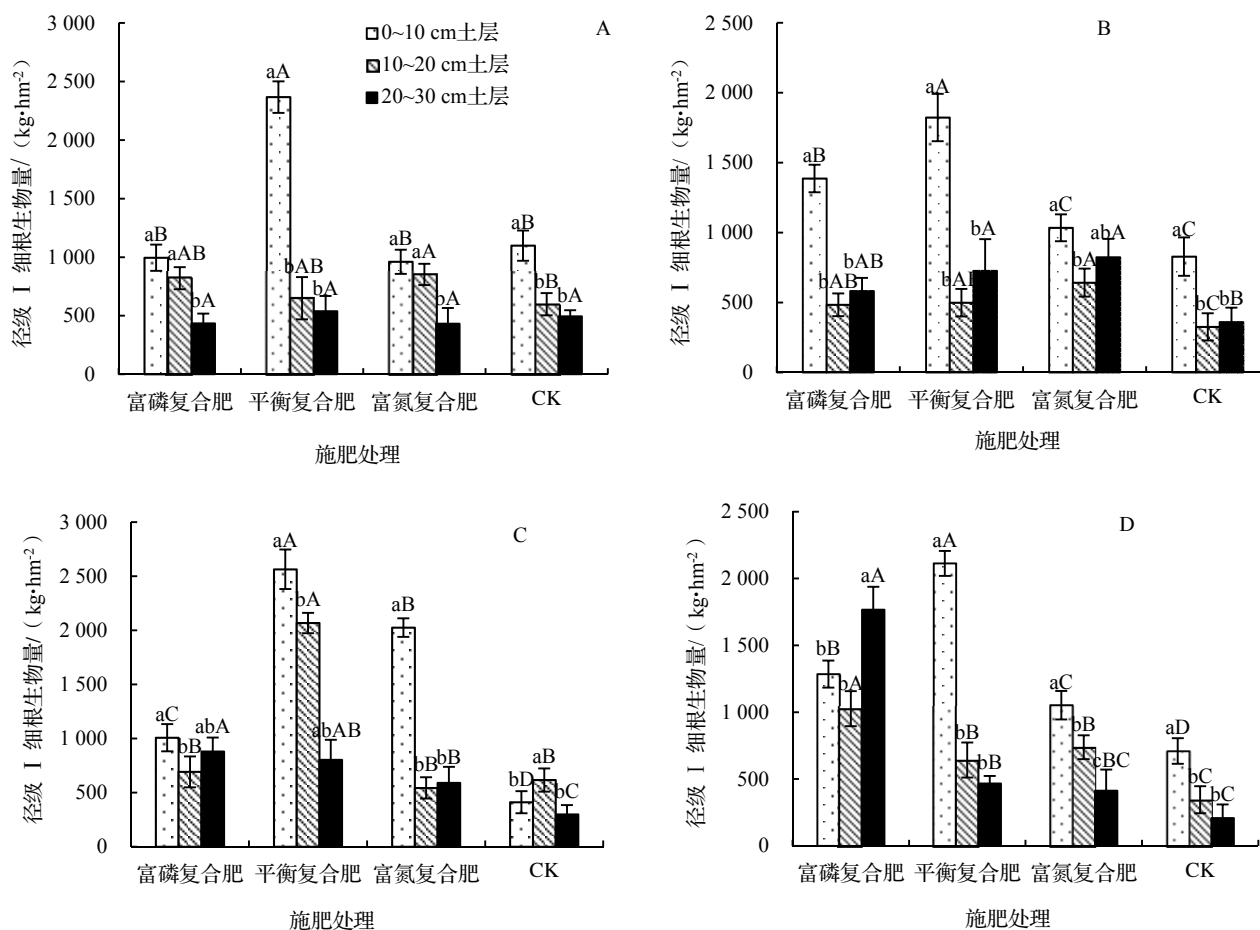
注: 含有不同小写字母表示相同施肥处理下不同土层细根总生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 含有不同大写字母表示相同土层下不同施肥处理的细根总生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。A、B、C、D 分别表示距离树干 10 cm、20 cm、50 cm 和 70 cm。

图 3 不同施肥处理下各土层细根总生物量

Fig. 3 Total fine root biomass at different soil layers under different fertilization treatments

2.2.2.2 不同施肥处理对各土层径级 I 细根生物量的影响 如图 4 所示, 在 0 ~ 10 cm 土层, 平衡复合肥处理的径级 I 细根生物量最大, 显著大于其他施肥处理的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ )。比较富磷复合肥处理和富氮复合肥处理的各水平距离的径级 I 细根生物量, 除 10 cm 水平径向距离的径级 I 细根生物量外, 其他水平距离的径级 I 细根生物量间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。各施肥处理的 10、20 cm 水平距离的径级 I 细根生物量无显著差异; 比较 50 cm 水平径向距离的径级 I 细根生物量, 除平衡复合肥处理外, 各处理间均无显著差异; 在

70 cm 水平径向距离, 各施肥处理的径级 I 细根生物量均显著大于 CK 的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ )。在 20 ~ 30 cm 土层中, 在水平径向距离为 10 cm 处, 各处理间的径级 I 细根生物量均无显著差异; 在水平径向距离为 20 cm 处, 各施肥间的径级 I 细根生物量均无显著差异, 其中平衡复合肥处理和富氮复合肥处理的径级 I 细根生物量显著大于 CK 的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ ); 在水平径向距离为 50 cm 处, 平衡复合肥处理的径级 I 细根生物量显著大于富氮复合肥处理的径级 I 细根生物量, 各施肥处理的径级 I 细根生物量显著大于 CK 的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ ); 在水平径向距离为 70 cm 处, 富磷复合肥处理下的径级 I 细根生物量显著大于其他处理的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ )。



注: 含有不同小写字母表示相同施肥处理下不同土层深度的径级 I 细根生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 含有不同大写字母表示相同土层深度下不同施肥处理的径级 I 细根生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。A、B、C、D 分别表示距离树干 10 cm、20 cm、50 cm 和 70 cm。

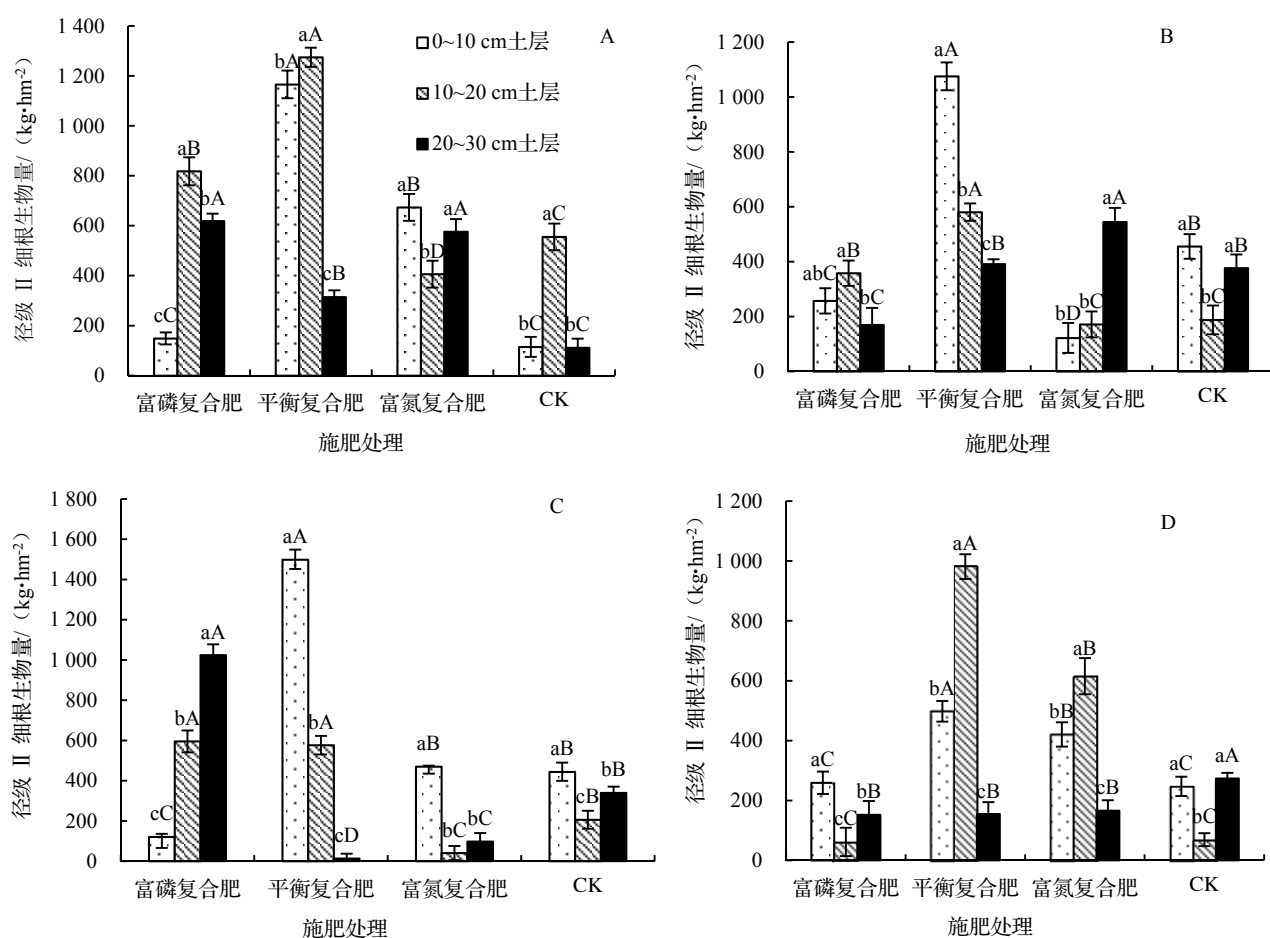
图 4 不同施肥处理下各土层径级 I 细根生物量

Fig. 4 Biomass diameter of fine root class I at different soil layers under different fertilization treatments

在水平径向距离 10 cm 处 (图 4A), 各施肥处理的径级 I 细根生物量均随着土层深度的增加而减小, 其中, 富磷复合肥处理和富氮复合肥处理都表现为 20 ~ 30 cm 土层的径级 I 细根生物量显著小于其他土层的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ ), 平衡复合肥处理和 CK 表现为 0 ~ 10 cm 土层的径级 I 细根生物量显著大于其他土层的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ )。在水平距离 20 cm 处 (图 4B), 各处理的径级 I 细根生物量均随着土层深度的增加呈现先减后增的趋势, 除富氮复合肥处理外, 其他处理 0 ~ 10 cm 土层的径级 I 细根生物量显著大于 10 ~ 30 cm 土层的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ ), 而 10 ~ 20 cm 土层的径级 I 细根生物量与 20 ~ 30 cm 土层的径级 I 细根生物量没有显著差异。在 50 cm 水平径向距离处 (图 4C), 各施肥处理 0 ~ 10 cm 土层和 10 ~ 20 cm 土

层的径级 I 细根生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 除 CK 外, 其他处理 10 ~ 20 cm 土层和 20 ~ 30 cm 土层的径级 I 细根生物量差异不显著; 富磷复合肥处理和富氮复合肥处理均表现为径级 I 细根生物量随着土层深度的增加先减少后增加, 平衡复合肥处理的径级 I 细根生物量随土层深度的增加而逐渐减少, 而 CK 的径级 I 细根生物量呈现先增加后减少的趋势。在 70 cm 水平径向距离处 (图 4D), 平衡复合肥处理、富氮复合肥处理及 CK 的径级 I 细根生物量随着土层深度的增加逐渐减小; 富磷复合肥处理 20 ~ 30 cm 土层的径级 I 细根生物量显著大于其他土层的径级 I 细根生物量 ( $P < 0.05$ ), 径级 I 细根生物量随着土层深度的增加呈现先减少后增加的趋势。

2.2.2.3 不同施肥处理对各土层径级 II 细根生物量的影响 如图 5 所示, 在 0 ~ 10 cm 土层, 施平衡复合肥对增加径级 II 细根生物量效果最显著, 与 CK 相比, 在 10 cm、20 cm、50 cm 和 70 cm 水平径向距离的径级 II 细根生物量分别增长 9.17 倍、1.36 倍、2.38 倍和 1.01 倍。在 10 ~ 20 cm 深的土层, 除水平距离 50 cm 外, 施平衡复合肥径级 II 细根生物量均比其他施肥处理的大, 且与其他处理均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。在 20 ~ 30 cm 土层, 10 cm 水平径向距离处, 富磷复合肥处理与富氮复合肥处理的径级 II 细根生物量均显著大于平衡复合肥处理的 ( $P < 0.05$ ), 各施肥处理的径级 II 细根生物量均显著大于 CK 的 ( $P < 0.05$ ); 在 20 cm 水平径向距离处, 富氮复合肥处理的径级 II 细根生物量显著大于其他处理的 ( $P < 0.05$ ); 在 50 cm 水平径向距离处, 富磷复合肥处理的径级 II 细根生物量显著大于其他处理的 ( $P < 0.05$ ), 平衡复合肥处理和富氮复合肥处理各自在 20 ~ 30 cm 和 10 ~ 20 cm 土层几乎没有径级 II 细根。



注: 含有不同小写字母表示相同施肥处理下不同土层深度的径级 II 细根生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 含有不同大写字母表示相同土层深度下不同施肥处理的径级 II 细根生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。A、B、C、D 分别表示距离树干 10 cm、20 cm、50 cm 和 70 cm。

图 5 不同施肥处理各土层径级 II 细根生物量

Fig. 5 Biomass diameter of fine root class II at different soil layers under different fertilization treatments

在水平径向距离 10 cm 处 (图 5A), 富氮复合肥处理下, 随着土层深度的增加, 径级 II 细根生物量先减少后增加; 其他处理的径级 II 细根生物量均随着土层深度的增加呈现先增加后减少的趋势, 且 10 ~ 20 cm 土层的径级 II 细根生物量显著大于其他土层的径级 II 细根生物量 ( $P < 0.05$ )。在水平径向距离 20 cm 处 (图 5B), 富磷复合肥处理的径级 II 细根生物量随土层深度的增加呈现先增加后减少的趋势, CK 则与之相反; 平衡复合肥处理的径级 II 细根生物量随土层深度的增加呈现逐渐减小的趋势, 富氮复合肥处理则与之相反。在水平径向距离 50 cm 处 (图 5C), 富氮复合肥处理和 CK 的径级 II 细根生物量均表现为随着土层深度的增加呈现先减少后增加的趋势; 富磷复合肥处理与平衡复合肥处理的径级 II 细根生物量的表现相反, 前者为随着土层深度的增加呈现逐渐增加的趋势, 后者表现为随着土层深度的增加呈现逐渐减小的趋势, 且各土层中的径级 II 细根生物量均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。在水平径向距离 70 cm 处 (图 5D), 富磷复合肥处理和 CK 的径级 II 细根生物量均表现为随着土层深度的增加呈现先减少后增加的趋势; 平衡复合肥处理和富氮复合肥处理各土层的径级 II 细根生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 随着土层深度的增加均呈现先增加后减少的趋势。

## 2.3 不同施肥处理对油茶根系水平分布的影响

### 2.3.1 对径级 I 细根生物量的影响

如图 6 所示, 各施肥处理在 0 ~ 30 cm 土层各水平距离的径级 I 细根生物量均比 CK 的径级 I 细根生物量大, 其中平衡复合肥处理的影响最大。富磷复合肥处理在水平径向距离 70 cm 处的径级 I 细根生物量比其他处理的径级 I 细根生物量大, 而在水平径向距离 50 cm 处, 富氮复合肥处理比富磷复合肥处理的径级 I 细根生物量大, 前者是后者的 1.23 倍。

比较 0 ~ 10 cm 土层中各水平距离的径级 I 细根生物量 (图 7A), 平衡复合肥处理的径级 I 细根生物量比其他处理大, 且差异显著 ( $P < 0.05$ ), 在 10 cm、20 cm、50 cm 和 70 cm 水平径向距离处的径级 I 细根生物量分别为  $2\,366.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $1\,822.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $2\,564.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $2\,113.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 其中富氮复合肥处理和富磷复合肥处理在整体上比 CK 的径级 I 细根生物量大。

在 10 ~ 20 cm 土层 (图 7B), 富磷复合肥处理在 70 cm 水平径向距离的径级 I 细根生物量最大, 且与其他施肥处理相比径级 I 细根生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其他各水平径向距离的径级 I 细根生物量由大到小依次是 10 cm、50 cm、20 cm 水平径向距离; 富氮复合肥处理在 10、20、70 cm 水平距离的径级 I 细根生物量都大于 CK 的径级 I 细根生物量, 径级 I 细根生物量按由大到小排列表现为 10 cm 水平径向距离 > 70 cm 水平径向距离 > 20 cm 水平径向距离。在 20 ~ 30 cm 土层 (图 7C), 富磷复合肥处理在 70 cm 水平距离处的径级 I 细根生物量最大, 是 CK 径级 I 细根生物量的 8.5 倍, 与其他各处理在 70 cm 水平距离处的径级 I 细根生物量均差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3.2 对径级 II 细根生物量的影响

在 0 ~ 10 cm 土层 (图 8A), 平衡复合肥处理的径级 II 细根在各试验水平距离上的生物量均大于 CK 的径级 II 细根生物量且两者间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 富氮复合肥处理径级 II 细根生物量整体上大于 CK 的径级 II 细根生物量, 富磷复合肥处理径级 II 细根生物量整体上小于 CK 的径级 II 细根生物量。在 0 ~ 10 cm 土层, 平衡复合肥处理的径级 II 细根生物量显著大于其他处理的径级 II 细根生物量 ( $P < 0.05$ )。在 10 ~ 20 cm 土层 (图 8B), 各施肥处理的径级 II 细根生物量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其中, 平衡复合肥处理对径级 II 细根生物量的影响最大; 富氮复合肥处理在 50 cm 水平径向距离的径级 II 细根生物量接近 0。在 20 ~ 30 cm 土层 (图 8C), 富磷复合肥处理在水平径向距离 10 cm 处达到最大径级 II 细根生物量, 为  $1\,024.19\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 在 70 cm 水平径向距离处, 3 种施肥处理的径级 II 细根生物量均小于 CK 的径级 II 细根生物量, 且与 CK 的径级 II 细根生物量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。平衡复合肥处理在 50 cm 水平径向距离处几乎无径级

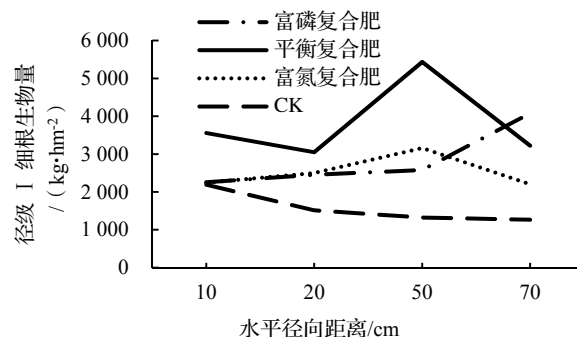
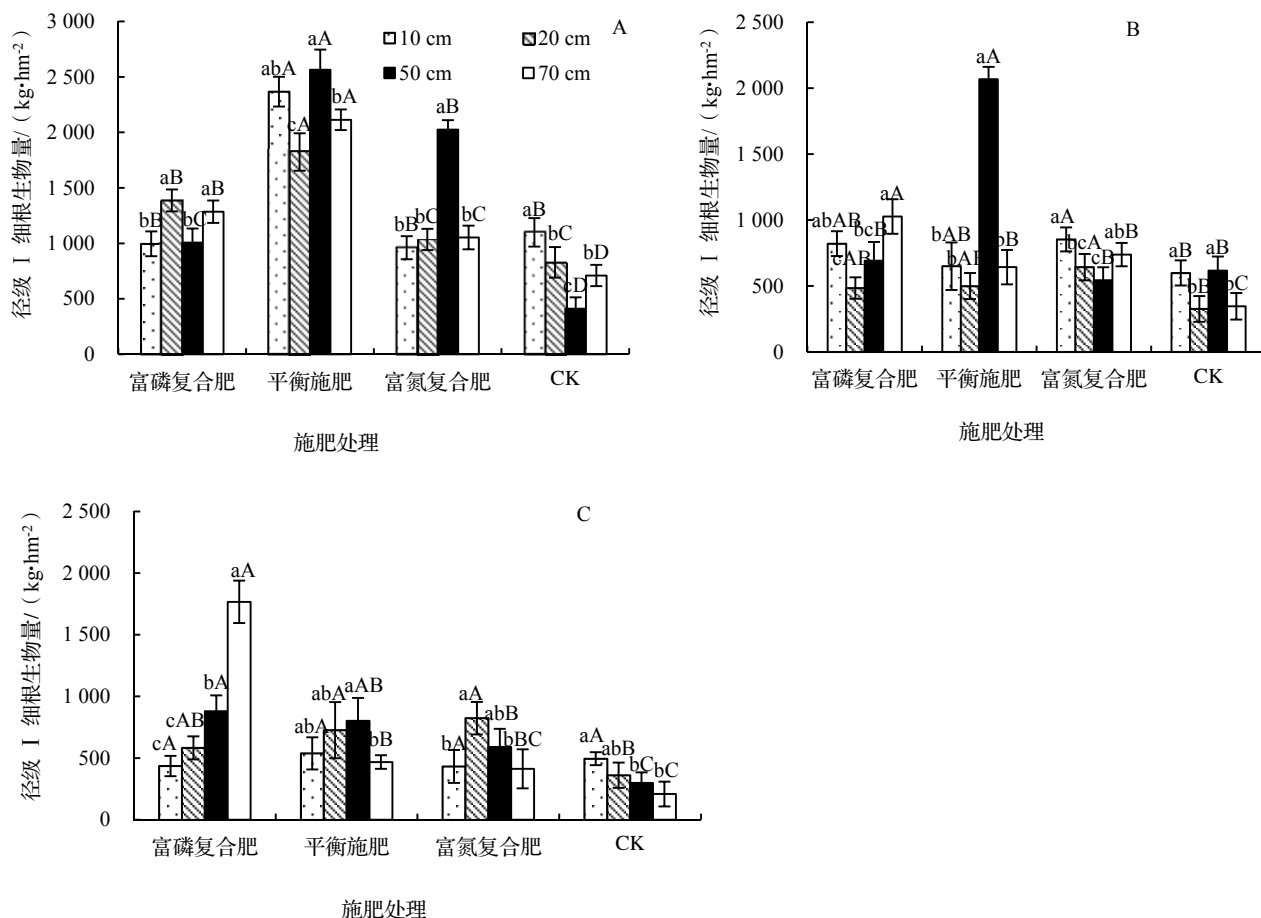


图 6 不同施肥处理 0 ~ 30 cm 土层各水平径向距离细根径级 I 生物量

Fig. 6 Biomass of fine root diameter class I at different soil layers of horizontal radial distance under different fertilization treatments

## II 的细根。

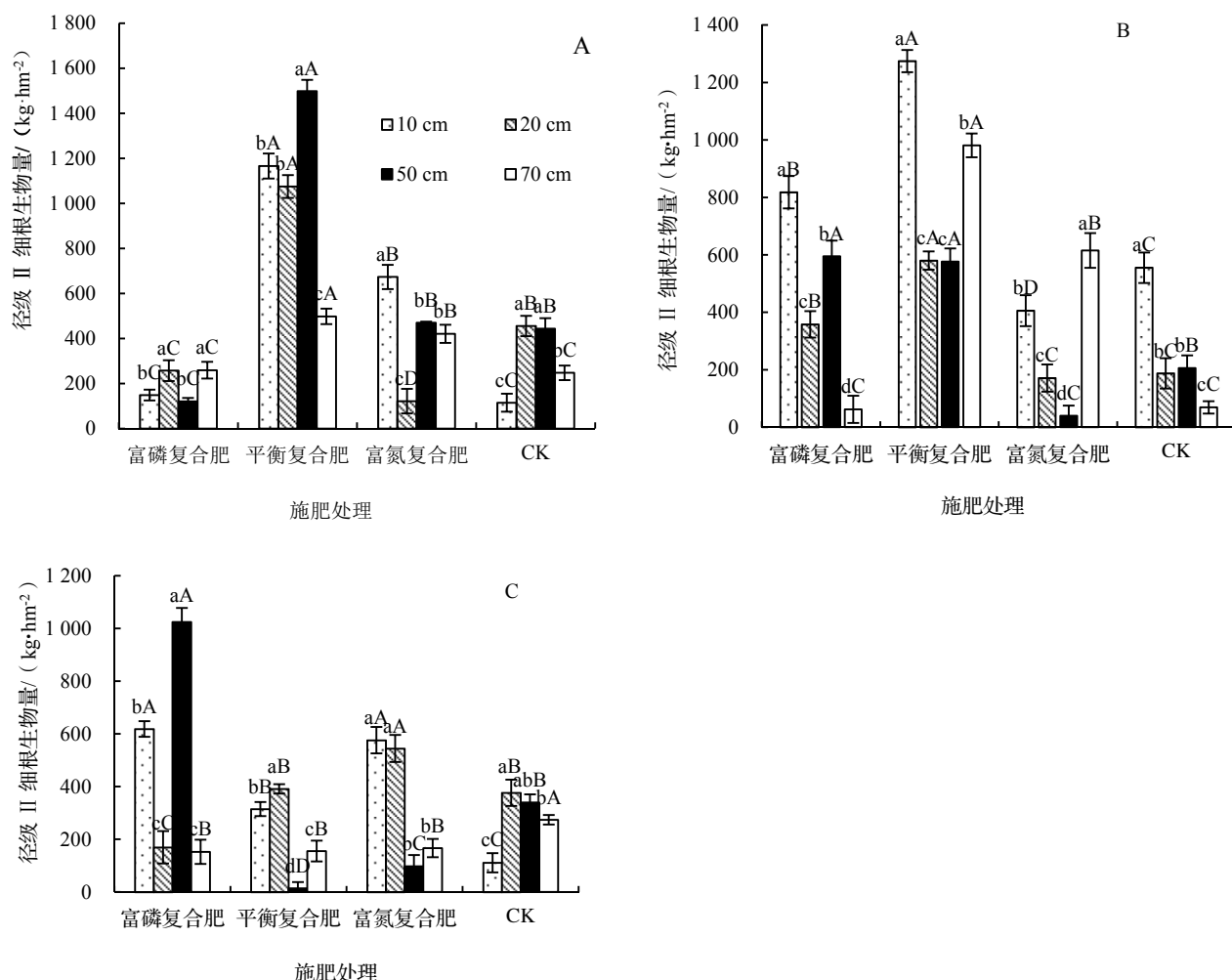


注: 含有不同小写字母表示相同施肥处理下不同水平径向距离的径级 I 细根生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 含有不同大写字母表示相同水平径向距离下不同施肥处理的径级 I 细根生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。A、B、C 分别表示 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层。

图 7 不同施肥处理各水平径向距离径级 I 细根生物量

Fig. 7 Biomass of fine root diameter class I at different soil layers of horizontal radial distance under different fertilization treatments

在 0~10 cm 土层 (图 8A), 富磷复合肥处理在水平距离 10 cm 和 50 cm、20 cm 和 70 cm 处的径级 II 细根生物量无显著差异, 其余两两水平距离的径级 II 细根生物量均有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 平衡复合肥处理在水平距离 10 cm 和 20 cm 处的径级 II 细根生物量差异不显著, 其余两两水平距离的径级 II 细根生物量均差异显著 ( $P < 0.05$ ); 富氮复合肥处理除水平距离 50 cm 和 70 cm 处的径级 II 细根生物量无显著差异外, 其余两两水平距离的径级 II 细根生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ); CK 在水平距离 20 cm 和 50 cm 处的径级 II 细根生物量差异不显著, 其余两两水平距离的径级 II 细根生物量均差异显著 ( $P < 0.05$ )。在 10~20 cm 土层 (图 8B), 富磷复合肥和富氮复合肥处理在各水平距离处的径级 II 细根生物量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 平衡复合肥处理和 CK 除水平距离 20 cm 和 50 cm 处的径级 II 细根生物量无显著差异外, 其余两两水平距离的径级 II 细根生物量均差异显著 ( $P < 0.05$ )。在 20~30 cm 土层 (图 8C), 富磷复合肥处理在水平距离 20 cm 和 70 cm 处的径级 II 细根生物量无显著差异, 其余两两水平距离的径级 II 细根生物量均有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 平衡复合肥处理在各水平距离处的径级 II 细根生物量均差异显著 ( $P < 0.05$ ); 富氮复合肥处理在水平距离 10 cm 和 20 cm 处、50 cm 和 70 cm 处的径级 II 细根生物量无显著差异, 其余两两水平距离的径级 II 细根生物量均有显著差异 ( $P < 0.05$ ); CK 在水平距离 20 cm 和 50 cm 处的径级 II 细根生物量差异不显著, 其余两两水平距离的径级 II 细根生物量均差异显著 ( $P < 0.05$ )。



注：含有不同小写字母表示相同施肥处理下不同水平径向距离的径级Ⅱ细根生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ )，含有不同大写字母表示相同水平径向距离下不同施肥处理的径级Ⅱ细根生物量之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。A、B、C 分别表示 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层。

图 8 不同施肥处理各水平径向距离径级Ⅱ细根生物量

Fig. 8 Biomass of fine root diameter class II at different soil layers of horizontal radial distance under different fertilization treatments

### 3 讨论

本试验研究发现，施肥可以提高油茶林土壤的 pH 值，但与对照土壤的 pH 值差异不显著。施肥可以有效提高油茶林的土壤肥力，不同施肥处理下 SOM、SAPot、SAPho、SAN 含量均有不同程度的提高，这与再吐尼古丽·库尔班等<sup>[15]</sup>的研究结果一致，施富磷复合肥可以明显提高 SAPho 含量，施富氮复合肥可以明显提高 SAN 含量。试验油茶林地 SAPot 含量丰富，土壤养分状况较好，施肥后多个养分含量等级提高。

施肥对树体生长具有促进作用，包括地径、株高和冠幅，总体而言，施平衡复合肥对树高生长的作用最明显，氮元素对地径的增粗作用较明显，磷元素对株高和冠幅的增加有明显作用。胡玉玲等<sup>[4]</sup>研究了施肥时间、施肥方法和养分配比 (N、P、K 配比) 对油茶树体和春梢生长的影响，结果表明磷肥对油茶株高生长影响最小，氮肥对油茶地径增长影响较小，与本试验结果存在差异，但施用复合肥比单因素施肥效果更显著。氮肥有助于提高油茶树高、冠幅、地径的生长，复合肥中氮元素配比高更能促进油茶生长。

施用肥料影响油茶植株根系的土壤水分分布，0~10 cm 土层的土壤含水率比 10~20 cm 土层的土壤含水率低。施肥可以提高土壤含水率，整体上以富磷复合肥施肥效果最好，富氮复合肥次之。王荣辉等<sup>[16]</sup>研究表明，

施用磷肥可以促进小麦 *Triticum aestivum* 根系发育, 显著促进冬小麦对水分的吸收。施富磷复合肥促进油茶根系生长, 使其对水分吸收增加。

众多研究表明, 因表层土具有适宜的水分、温度和养分, 油茶的细根主要分布于表层土中, 但细根的分布会随着土层垂直深度的增加而逐渐减少<sup>[17-18]</sup>。油茶根系为轴状根型深根性树种, 随着树龄的增长根系逐步深入, 但根系主要集中在 0~40 cm 土层, 其根系数量占总根系数量高达 98.7%, 植物的根长密度、根表面积和根系生物量等参数一般会随着土层深度的增加而下降<sup>[5]</sup>。袁军等<sup>[19]</sup>研究指出油茶根系主要集中在 0~40 cm 土层中, 水平方向上 5~10 年树龄的油茶根系主要分布于距树干基部 1 m 的范围内。楚旭等<sup>[20]</sup>发现活细根在 0~10 cm 土层内的生物量均显著高于 10~20 cm 土层内的生物量。本试验结果与之基本符合, 对照的细根在 0~10 cm 土层的生物量高于 10~20 cm 土层的生物量, 受不同施肥处理的影响, 细根的垂直分布有所差异, 但仅富磷复合肥处理 0~10 cm 土层中在 10 cm、50 cm 水平径向距离处的细根总生物量低于 10~20 cm 土层相同水平径向距离处的细根总生物量。细根生物量的垂直分布受到施肥影响, 其中影响最大的是平衡复合肥处理, 施平衡复合肥可以有效增加细根的生物量。富磷复合肥处理对 20~30 cm 土层中细根的生物量影响更大, 因施磷可以促进根系发育。整体而言, 径级 II 细根主要分布在 0~20 cm 土层中, 其径级 II 细根生物量与 20~30 cm 土层中的径级 II 细根生物量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。总的来看, 富磷复合肥处理和富氮复合肥处理与平衡复合肥处理相比, 在 20~30 cm 土层中径级 II 细根生物量的增加更明显。细根总生物量、径级 I 细根生物量和径级 II 细根生物量在不同施肥种类处理的差异整体上表现显著。本试验采用的根钻法取样因在取土团时有部分细根无法与土块分离, 且在细根分级中也有误差导致研究结果偏小<sup>[21]</sup>。因此, 改良细根研究的方法是该领域亟待解决的问题。

各施肥处理整体上均能增加水平距离的径级 I 细根生物量。关于细根生物量与距树干基部水平距离的关系目前主要有三种观点: 一是认为细根生物量随着水平距离的增加逐渐减少<sup>[22]</sup>, 本试验径级 I 细根生物量在对照组中的水平分布基本符合这一结论; 二是有学者认为森林中细根生物量分布与距树干水平距离无关<sup>[23]</sup>; 三是有学者认为细根生物量随着水平距离的增加而表现为先增加后减少<sup>[24]</sup>, 在本试验中, 富氮复合肥处理下径级 I 细根生物量水平分布基本符合这一结论。

## 4 结论

本试验研究不同施肥处理对油茶林土壤和植株生长的影响, 结果表明 3 种复合肥配方对油茶林土壤 pH 值影响不大, 施肥可以提高土壤各养分含量和含水率, 其中 SOM、SAN 和 SPho 含量显著增加, 富磷复合肥处理的土壤含水率最高。施肥处理均显著促进油茶植株生长, 其中富氮复合肥处理对地径生长的效果最显著, 平衡复合肥处理对株高的生长效果最显著。油茶细根中径级 I 细根生物量较径级 II 细根生物量更大, 在垂直方向上 0~10 cm 土层内的细根生物量显著高于 10~20 cm 土层内的细根生物量。各施肥处理对油茶细根生物量的增加具有促进作用, 并影响细根的空间分布, 富磷复合肥处理对油茶林土壤 20~30 cm 土层的细根生物量影响更大, 综合分析发现 3 种施肥配方中施平衡复合肥对油茶细根生物量增加效果最明显。

## 参考文献:

- [1] 杨慧琴, 姜佳艳, 胡玉玲, 等. 氨基酸肥与沼液配施对油茶果经济性状的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54 (03): 84-92.
- [2] 丁松, 潘鹏, 张邦文, 等. “十二五”期间我国油茶产业发展特征分析[J]. 福建林业科技, 2018, 45 (03): 116-120.
- [3] 杨柳. 中国油茶起源初探[J]. 中国农史, 1992 (03): 74-77, 95.
- [4] 胡玉玲, 姜佳艳, 王祖华, 等. 不同施肥技术对油茶树体和春梢生长的影响[J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2021, 42 (01): 127-134.
- [5] 刘俊萍, 左继林, 秦健, 等. 树盘覆盖对油茶细根生长动态和垂直分布的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39 (8): 41-47.
- [6] 刘俊萍, 刘刚, 游璐, 等. 不同品种油茶细根时空分布动态[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (12): 3927-3933.
- [7] 覃其云, 李春宁, 班华忠, 等. 配方施肥对马尾松人工林生长与针叶营养含量及其土壤肥力的影响[J]. 林业与环境科学, 2023, 39 (01): 127-134.

- [8] COPLEY J. Ecology goes underground[J]. Nature, 2000 (3): 452–454.
- [9] 董慧霞, 李贤伟. 不同草本层三倍体毛白杨细根及草根的空间分布及季节变化[J]. 河南农业科学, 2016, 45 (01): 108–113.
- [10] ZHOU G, MENG S, YU J, et al. Quantitative relationships between fine roots and stand characteristics[J]. Eu J ForRes, 2018, 137: 385–399.
- [11] 甘卓亭, 刘文兆. 渭北旱塬不同龄苹果细根空间分布特征[J]. 生态学报, 2008 (07): 3401–3407.
- [12] 张小全, 吴可红, MURACH D. 树木细根生产与周转研究方法评述[J]. 生态学报, 2000 (05): 875–883.
- [13] 钱文丽, 卢元, 王韶仲, 等. 混交对红松人工林细根生物量和空间分布的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44 (02): 1–5.
- [14] 邓建忠. 施肥对油茶生长结实和林下土壤的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [15] 再吐尼古丽·库尔班, 吐尔逊·吐尔洪, 山其米克, 等. 施肥对不同生育期甜高粱土壤养分含量的影响[J]. 草地学报, 2021, 29 (01): 103–113.
- [16] 王荣辉, 王朝辉, 李生秀, 等. 施磷量对旱地小麦氮磷钾和干物质积累及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29 (01): 115–121.
- [17] 郝丙青, 夏莹莹, 张乃燕, 等. 不同林龄岑溪软枝油茶细根生物量的分布特征及年内动态[J]. 广西林业科学, 2018, 47 (04): 415–420.
- [18] 程离, 陈银霞, 王振丽, 等. 不同砧穗组合油茶幼树细根时空分布动态[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42 (10): 57–64.
- [19] 袁军, 谭晓风, 袁德义, 等. 油茶根系分布规律调查研究[J]. 浙江林业科技, 2009, 29 (04): 30–32.
- [20] 楚旭, 邸雪颖, 张吉利, 等. 大兴安岭 2 种林分细根生物量分布特征及季节动态[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39 (5): 36–39.
- [21] 詹龙飞. 不同密度和配置杨树人工林细根空间分布及碳氮含量[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
- [22] YE M, XU H L, WANG X F, et al. Spatial distribution characteristics of root system of *Populus euphratica* in the Algan Transection of the Lower Tarim River[J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2011, 31 (4): 801–807.
- [23] CHEN G S, YANG Y S, HE Z M, et al. Effects of proximity of stems and tree diameters on fine root density in plantations[J]. Acta Ecol Sin, 2005, 25 (5): 1007–1011.
- [24] 木巴热克·阿尤普, 陈亚宁, 李卫红, 等. 极端干旱环境下的胡杨细根分布与土壤特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31 (06): 1449–1458.