

不同有机肥处理对紫色土油茶林土壤微生物碳源利用的影响

费裕翀¹, 刘 丽¹, 陈 钢¹, 张元明², 陈世品¹, 兰思仁¹, 王 迪¹, 曹光球^{1*}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省宁化县林业局, 福建 宁化 365400)

摘 要: 微生物群落碳代谢功能多样性对土壤管理具有重要指示作用, 以福建省宁化县紫色土水土侵蚀区油茶人工林不同坡位土壤为研究对象, 采用 Biolog 技术对天然有机物料有机肥 (T1)、有机无机复合肥 (T2)、禽畜粪便有机 (T3) 共 3 种有机肥处理以及不施肥处理 (CK) 下的土壤微生物碳源利用能力进行了研究。研究结果显示: T1、T2、T3 处理下不同坡位土壤的吸光值平均颜色变化率 (AWCD) 相比于施肥前都有所增加, 而 CK 处理土壤 AWCD 值无显著变化, 不同处理下土壤 AWCD 值提高的大小顺序表现为 T2>T1>T3>CK; Shannon 多样性指数、Simpson 优势度指数以及 McIntosh 优势度指数大小顺序均表现为 T2>T1>T3>CK; 相同处理下不同坡位土壤 AWCD 值、Shannon 多样性指数、Simpson 优势度指数以及 McIntosh 均匀度指数大小顺序总体呈现下坡 > 中坡 > 上坡; Shannon 指数与土壤容重和自然含水率呈极显著或显著负相关, 与 pH 值、全碳和全氮含量呈极显著或显著正相关; McIntosh 指数与土壤容重、自然含水率、pH 值、全碳和全氮含量呈极显著或显著正相关; 氨基酸类是各处理后土壤微生物利用的主要碳源类型, 主成分分析表明 T1、T2、T3 处理下土壤微生物对 6 类碳源利用能力相比于对照具有较大差异, T1 和 T3 处理对于 6 类碳源的利用具有相似性, T2 处理与 T3 处理之间对于 6 类碳源利用差异主要在于碳水化合物类碳源。综上, 有机无机复合肥的施入更有利于紫色土丘陵区油茶人工林土壤微生物碳源利用能力的提高, 以上结论可为制定紫色土丘陵区合理施肥制度的设置、农业优化管理措施提供依据。

关键词: 有机肥; 油茶; 紫色土; 土壤微生物; 碳源利用能力; Biolog

紫色土是以中生代紫色岩层为母岩母质发育形成的一类土壤, 主要分布于我国四川、云南、广西、广东、福建等南方省区, 面积约有 2 000 万 hm^2 ^[1]。紫色土具有矿质养分丰富、风化成土快、自然肥力高等特点, 是我国所特有的一类具有重要农业潜力的土壤资源^[2]。然而紫色土风化作用弱, 土质普遍偏轻, 加之地形、降水等自然环境因素综合影响, 紫色土区森林生态系统的稳定性和抗逆性相对较弱, 具有明显的脆弱性。近年来紫色土丘陵区植被遭到大量破坏, 土地利用强度不断加强, 导致紫色土退化现象普遍发生, 土壤质量下降, 严重制约了紫色土丘陵区农业的持续发展^[3-5]。因此加强紫色土土壤防护与改良的研究对于实现农业的可持续发展显得尤为重要。

目前紫色土区主要采用改土培肥、保护性耕作

和多元化种植等土壤管理技术, 其中施肥作为提高土壤质量和可持续发展能力的重要管理措施, 通过提高土壤肥力, 增强了紫色土对于环境变化和人为干扰的抗逆性, 使其不易产生退化现象^[2], 是防治紫色土退化的关键技术之一。土壤微生物作为土壤生态系统的重要组成部分, 直接参与土壤结构的形成、养分循环和能量流动, 对于土壤正常功能的维持具有重要意义^[6]。由于土壤微生物对于自然或人为扰动所引起的土壤质量变化较为敏感, 长期以来微生物学指标被广泛运用于土壤质量的评价^[7-8], 施肥作为农业生产中的重要一环, 不同施肥措施所造成的土壤理化性质差异势必对紫色土区土壤微生物产生重要影响。当前研究表明, 不同的施肥措施对于土壤微生物数量、群落结构影响差异显著, 长期施用氮肥降低了土壤的微生物活性, 对于甲烷氧化菌有着抑制作用^[9-10], 施用有机肥使得土壤中微生物群落碳源利用率明显增强, 有益于提升土壤肥力和微生物区系的稳定^[11-12], 但土壤中的微生物数量也并非随着有机肥施用量的增加而无限增长^[13]。可见, 施肥处理对土壤微生物量、微生物群落结构和代谢功能多样性的影响较为复杂, 研究结

收稿日期: 2019-08-07; 录用日期: 2019-10-26

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划项目 (2014BAD15B01); 福建农林大学科技创新专项基金 (KFA18140A); 福建农林大学科技创新专项基金 (CXZX2018140)。

作者简介: 费裕翀 (1993-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向为自然资源管理。E-mail: 877546370@qq.com。

通讯作者: 曹光球, E-mail: cncgq@126.com。

果不尽一致, 因此为防治紫色土土壤退化, 提高土地生产力, 保障我国南方紫色丘陵区农业的持续发展, 制定合理的施肥制度显得十分必要。

油茶 (*Camellia oleifera*) 是中国特有的一种天然高级油料, 世界四大木本油料之一, 广泛种植于中国南方亚热带地区的高山及丘陵地带。目前已有较多关于施肥对土壤微生物碳源利用能力影响的研究报道, 但此类研究对象主要为农田土壤^[14-16], 而关于施肥对紫色土丘陵区土壤的影响, 特别是关于土壤微生物碳源利用能力的研究鲜见报道。因此, 本试验以福建省宁化县紫色土区油茶人工林为研究对象, 运用 Biolog 技术, 通过研究不同有机肥施入前后, 不同坡位油茶人工林土壤微生物碳源利用能力的影响, 揭示不同施肥处理对于紫色土的改良效果, 从而为维护和提升紫色土质量, 防治紫色土退化提供理论依据。

1. 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于福建省三明市宁化县淮土镇 (116°25'42" ~ 116°25'45"E, 26°14'28" ~ 26°14'33"N), 属于中亚热带气候, 平均气温 17.5℃, 极端最高温度为 38.3℃, 最低气温 -8.3℃, 年日照总数为 1 900 h, 平均年降水量为 1 633.6 mm, 年均陆面蒸发量 710 ~ 750 mm, 水面蒸发 890 mm, 相对湿度 81%, 无霜期 214 ~ 218 d。淮土镇地形地貌属丘陵地带, 海拔 300 ~ 400 m。试验样地坡向东南, 坡度 25 ~ 30°, 土壤为酸性紫色页岩土。样地林分为 25 年生油茶林, 平均树高为 2.39 m, 平均地径为 7.72 cm, 林分密度为 1 475 n · hm⁻²。灌木层伴生种主要有满山红 (*Rhododen-*

dron mariesii)、榿木 (*Loropetalum chinense*)、菝葜 (*Smilax china*) 等, 草本层伴生种主要有芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 和五节芒 (*Miscanthus floridulus*) 等。

1.2 试验设计

试验设置 3 个施有机肥处理和 1 个对照不施肥处理, 有机肥处理分别为天然有机物料有机肥 (记为 T1, 5 kg · 株⁻¹, 有机质占 60%, 氮磷钾含量共占 6%)、有机无机复合肥 (记为 T2, 2.5 kg · 株⁻¹, 有机质占 45%, 氮磷钾含量共占 5%)、禽畜粪便有机肥 (记为 T3, 5 kg · 株⁻¹, 有机质占 20%, 氮含量占 12%, 磷含量占 3%, 钾含量占 3%) 以及不施肥对照 (记为 CK), 每个处理设 3 个重复。于 2017 年 9 月, 在宁化县国有生态林场油茶人工林中, 采用随机区组法设置 12 块 20 m × 20 m 立地条件及林分生长基本一致的方形小区作为试验区, 每个小区之间间隔 10 m。施肥方式采用环施法, 沿树冠正投影外缘挖取深度 30 cm 左右, 宽 30 cm 的弧形施肥沟或圆形沟后施入相对应量的肥料。

据试验地地形条件, 将 1 个坡面分为上坡位、中坡位和下坡位, 坡位之间海拔相差约 10 m。分别于施肥前和施肥后 1 年 (2018 年 9 月) 进行土壤样品采集, 采用随机取样法在每个样地的每个坡位随机挖取 3 个土壤剖面, 采用环刀取土层深度 0 ~ 10 cm 的原状土壤用于测定土壤物理特性, 同时采集约 2 kg 土壤。将每个处理不同样地同一坡位土壤样品充分混合后成 1 个待测土样, 剔除石砾和植物残根等杂物后将每个处理不同样地的同一坡位土壤混合制样并分为 2 份, 1 份装入无菌袋带回实验室, -80℃ 冰箱保存, 1 份用于测定土壤理化性质。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

处理	坡位	容重 (g · cm ⁻³)	pH 值	全氮 (g · kg ⁻¹)	全钾 (g · kg ⁻¹)	全磷 (g · kg ⁻¹)
CK	上坡	0.78 ± 0.06	4.79 ± 0.04	1.05 ± 0.04	36.68 ± 1.82	1.35 ± 0.08
	中坡	0.76 ± 0.15	4.93 ± 0.08	1.07 ± 0.05	38.50 ± 1.49	1.44 ± 0.11
	下坡	0.73 ± 0.03	4.97 ± 0.09	1.11 ± 0.02	39.65 ± 1.39	1.51 ± 0.04
T1	上坡	0.72 ± 0.01	4.77 ± 0.05	1.01 ± 0.01	38.07 ± 1.17	1.43 ± 0.06
	中坡	0.71 ± 0.01	4.89 ± 0.06	1.05 ± 0.01	38.70 ± 1.00	1.45 ± 0.05
	下坡	0.69 ± 0.00	4.94 ± 0.10	1.08 ± 0.09	39.27 ± 1.06	1.46 ± 0.05
T2	上坡	0.72 ± 0.01	4.83 ± 0.07	1.04 ± 0.24	38.90 ± 1.59	1.66 ± 0.07
	中坡	0.70 ± 0.01	4.86 ± 0.04	1.17 ± 0.07	39.13 ± 2.07	1.66 ± 0.06
	下坡	0.68 ± 0.02	4.96 ± 0.03	1.29 ± 0.21	40.14 ± 1.87	1.72 ± 0.03
T3	上坡	0.71 ± 0.01	4.87 ± 0.11	1.06 ± 0.01	38.94 ± 1.58	1.22 ± 0.09
	中坡	0.69 ± 0.06	5.02 ± 0.16	1.13 ± 0.04	39.53 ± 2.24	1.24 ± 0.08
	下坡	0.68 ± 0.01	5.13 ± 0.11	1.20 ± 0.02	39.74 ± 3.44	1.29 ± 0.08

注: 表中数值为 3 个重复的平均值 ± 标准误。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤微生物群落碳源代谢利用测定

采用 Biolog-Eco 微平板法。在超净工作台上称取 10 g 土样, 放入 100 mL 已灭菌的 0.9% 生理盐水中, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 震荡 40 min, 稀释 1 000 倍, 制成初始土壤菌悬液备用。静置 10 min 后取 150 μL 菌悬液接种到 Biolog-Eco 板 (ECO Micro Plate, 美国) 中, 放入 28℃ 的恒温培养箱中连续培养 7 d, 每隔 24 h 读取 590 nm 波长处的吸光值, 每个土样重复 3 次。

1.3.2 土壤理化性质分析

土壤 pH 值测定水土比为 2.5:1; 土壤全碳和全氮含量采用土壤全碳全氮分析仪 (Vario Max, 德国); 全磷含量采用碱熔-钼锑抗比色法测定; 土壤全钾含量采用碱熔-火焰光度法测定, 以上方法参考文献 [17]。

1.4 数据处理与分析

微平板孔中溶液吸光值平均颜色变化率 (AWCD) 用于描述土壤微生物代谢活性, 以评价微生物群落对碳源的利用程度, 计算公式如下 [18]:

$$\text{AWCD} = \sum (C_i - R_i) / n$$

式中, i 表示微孔中的第 i 个碳源, C_i 为第 i 孔培养基孔的吸光值, R_i 为对照孔的吸光值, $n=31$, 为 Biolog-Eco 板的碳源种类数目。采用 Simpson、Shannon 和 McIntosh 3 个指数表征土壤微生物群落碳代谢功能多样性, 其中 Shannon 指数 H 反映用于评估物种的丰富度, 利用公式 (1) 计算; Simpson 指数 D 用于评估某些最常见种的优势度, 利用公式 (2) 计算; McIntosh 指数 U 反映土壤中微生物群落均匀度, 利用公式 (3) 计算。根据相关文献提供的方法, 公式如下 [19-21]:

$$H = -\sum p_i (\ln p_i) \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n (P_i)^2 \quad (2)$$

$$U = \sqrt{\sum n_i^2} \quad (3)$$

式中, P_i 为第 i 孔的相对吸光度与整个平板相对吸光值总和的比率; n_i 为第 i 孔的相对吸光值。

试验数据采用 Excel 2003 进行数据处理和制图, 使用 SPSS 23.0 进行方差分析、相关性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物群落颜色变化率

平均颜色变化率 (AWCD) 反映着土壤中微生物群落代谢活性, 是评价土壤微生物群落碳源利用能力的重要指标。图 1、2 分别代表了施肥前和不同施肥处理后, 不同坡位土壤 AWCD 值随时间的变化。由图 1、2 可知, 施肥前和不同施肥处理后, 不同处理下不同坡位的 AWCD 值始终呈现下坡 > 中坡 > 上坡。

从图 2 中可以看出, T1、T2 和 T3 处理下 AWCD 值变化基本一致, 均表现出在开始的 24 h 或 48 h 内快速升高, 随后经过持续 24 h 的缓慢升高阶段后快速升高直到试验结束。在微生物培养 120 h 时, T1、T2 和 T3 处理后不同坡位土壤 AWCD 值相比于施肥前都有所增加, 而 CK 处理的土壤 AWCD 值无显著变化。其中, 施肥后 T2 处理下的土壤 AWCD 值相比施肥前增长值最高, 上坡、中坡和下坡施肥后相比于施肥前分别增加了 8.12%、5.50% 和 10.60%; T1 处理下的上坡、中坡和下坡土壤 AWCD 值施肥后相比施肥前分别增加了 7.28%、9.10% 和 6.34%; T3 处理下的上坡、中坡和下坡土壤 AWCD 值施肥后相比施肥前分别增加了 1.28%、1.69% 和 1.98%。施肥后, 不同处理土壤 AWCD 值提高的大小顺序为 T2>T1>T3>CK。

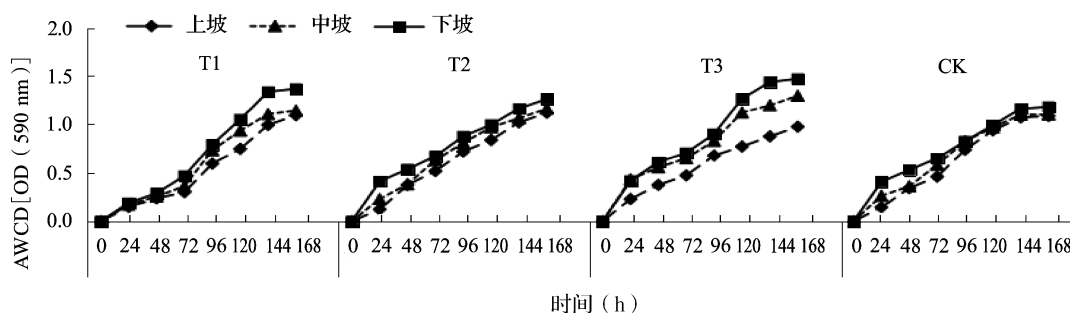


图 1 施肥前 4 种处理下不同坡位土壤 AWCD 值随时间的变化

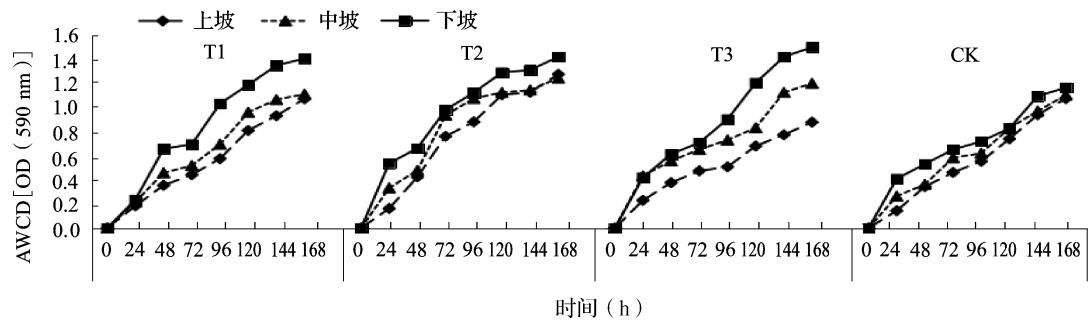


图2 施肥后4种处理下不同坡位土壤 AWCD 值随时间的变化

2.2 微生物碳代谢功能多样性指数

表2列出了采用培养120 h时的数据所计算的土壤微生物Shannon指数、Simpson指数与McIntosh指数。Shannon多样性指数能够体现微生物群落中物种的变化度，是目前应用最为广泛的群落多样性指数之一。Shannon指数越高，代表土壤微生物群落碳代谢功能多样性就越高，相反，则土壤微生物群落碳代谢功能多样性也较低。如表2所示，不同施肥处理后土壤微生物群落Shannon多样性指数在上坡位土壤的大小顺序表现为T2>T1>T3>CK；在中坡位土壤表现为T2>T1>T3>CK；在下坡位土壤表现为T2>T1>T3>CK。可知施肥后T2处理下的土壤微生物群落物种较其它3种处理类型丰富，且经多重比较分析表明，不同施肥处理下3个坡位的土壤的Shannon指数均具有显著差异。

表2 不同施肥处理下不同坡位紫色土油茶林土壤微生物群落功能的多样性指数

坡位	处理	Shannon	Simpson	McIntosh
上坡	T1	2.68 ± 0.03b	0.94 ± 0.00a	5.33 ± 0.07b
	T2	2.75 ± 0.16a	0.95 ± 0.00a	5.51 ± 0.40a
	T3	2.63 ± 0.04c	0.91 ± 0.00a	5.23 ± 0.03c
	CK	2.30 ± 0.06d	0.89 ± 0.02a	5.14 ± 0.08d
中坡	T1	2.75 ± 0.05b	0.94 ± 0.02b	5.39 ± 0.10b
	T2	2.81 ± 0.07a	0.95 ± 0.01a	5.63 ± 0.27a
	T3	2.66 ± 0.03c	0.92 ± 0.01c	5.30 ± 0.01c
	CK	2.65 ± 0.02d	0.91 ± 0.01a	5.27 ± 0.21d
下坡	T1	2.83 ± 0.08b	0.95 ± 0.00b	5.66 ± 0.22b
	T2	3.08 ± 0.08a	0.96 ± 0.00a	5.91 ± 0.27a
	T3	2.79 ± 0.00c	0.93 ± 0.00ab	5.50 ± 0.17c
	CK	2.76 ± 0.02d	0.91 ± 0.01ab	5.41 ± 0.07d

注：不同小写字母表示同一坡位下不同处理之间差异显著，(P<0.05)。

Simpson优势度指数可以用来反映最常见物种的优势度。不同施肥处理后土壤微生物群落Simpson优势度指数在上坡位土壤的大小顺序表现为T2>T1>T3>CK；在中坡位土壤表现为T2>T1>T3>CK；在下坡位土壤表现为T2>T1>T3>CK。可知施肥后T2处理下的土壤微生物群落优势度指数最高。经多重比较分析表明，4种处理上坡位土壤的Simpson指数之间差异不显著；中坡位土壤T2处理与CK处理下土壤Simpson指数差异不显著，T1处理、T3处理与T2处理、CK处理之间差异显著；下坡位T1处理与T2处理之间的Simpson指数差异显著，T3处理、CK处理与T1处理、T2处理之间的差异均不显著。

McIntosh指数可以用来反映碳源利用种类数的不同，并能区分不同利用程度。不同施肥处理后土壤微生物群落McIntosh均匀度指数在上坡位土壤的大小顺序表现为T2>T1>T3>CK；中坡位土壤表现为T2>T1>T3>CK；在下坡位土壤表现为T2>T1>T3>CK。表明T2处理下土壤微生物种类较为丰富，碳源利用程度也较高。相同处理下不同坡位土壤微生物Shannon多样性指数、Simpson优势度指数以及McIntosh均匀度指数大小顺序总体呈现出下坡>中坡>上坡的趋势。

2.3 微生物碳源利用变化

生态板的31类碳源由多聚物、碳水化合物、酚酸类、氨基酸类、胺类、羧酸类6大类组成。从图3可以看出，不同处理土壤微生物对不同碳源具有不同的利用率：施肥前T1处理下土壤微生物对碳源的利用情况表现为：羧酸类>胺类>酚酸类>氨基酸类>碳水化合物>多聚物；T2处理下土壤微生物对碳源的利用情况表现为：氨基酸类>胺类>酚酸类>碳水化合物>多

聚物>羧酸类; T3 处理下土壤微生物对碳源的利用情况表现为: 氨基酸类>羧酸类>多聚物>胺类>酚酸类>碳水化合物, 但施肥前不同处理的土壤微生物碳源利用率之间基本不具有显著差异。从图 4 可以看出, 施肥后 T1 处理下土壤微生物对碳源的利用情况表现为: 氨基酸类>羧酸类>多聚物>胺类>酚酸类>碳水化合物; T2 处理下土壤微生物对碳源的利用情况表现为: 氨基酸类>胺类>羧酸类>多聚物>酚酸类>碳水化合物; T3 处理下土壤微生物对碳源的利用情况表现为: 氨基酸类>胺类>羧酸类>多聚物>酚酸

类>碳水化合物。氨基酸类碳源是各处理下土壤微生物利用的主要碳源。施肥处理后多聚物、碳水化合物、酚酸、羧酸类碳源利用率的大小趋势表现为: T2>T1>T3>CK; 氨基酸类碳源利用率的大小趋势表现为: T3>T2>T1>CK; 胺类碳源利用率的大小趋势表现为: T2>T3>T1>CK。相较于施肥前, 施肥后 3 种施肥处理土壤微生物对于碳源利用能力明显增强, 除 T1 和 T3 处理土壤微生物对于碳水化合物类碳源利用率与对照组相比差异未达到显著水平, 其他类型碳源利用均显著高于对照。

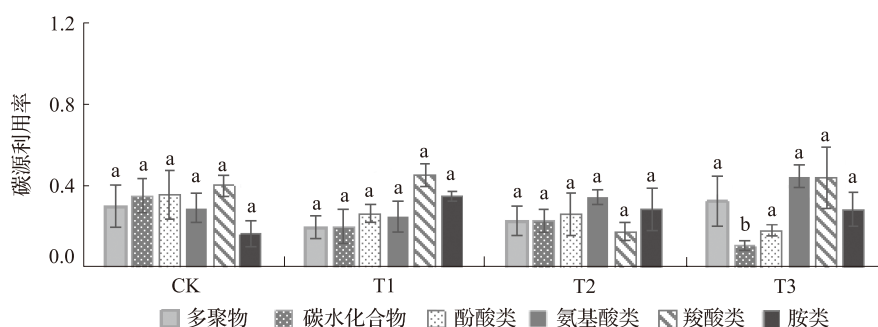


图 3 施肥前不同施肥处理对紫色土土壤 6 类碳源利用变化

注: 不同小写字母表述不同处理之间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

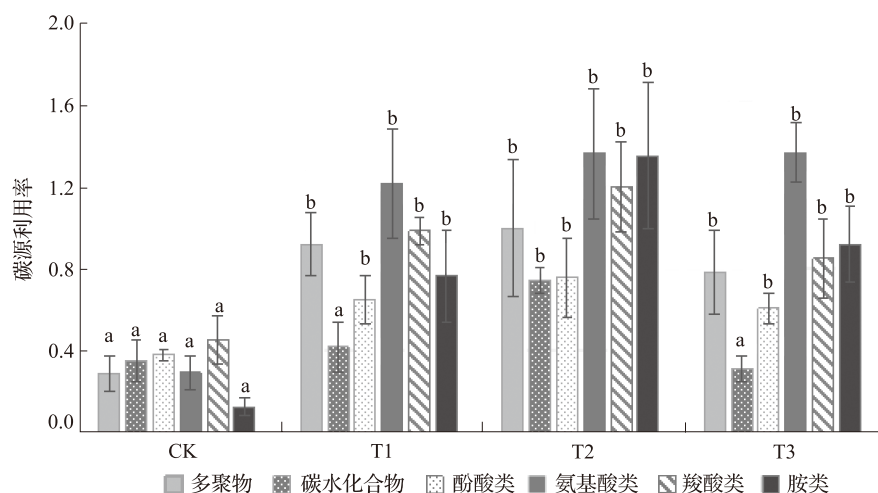


图 4 施肥后不同施肥处理对紫色土土壤 6 类碳源利用变化

2.4 主成分分析

利用培养 120 h 的 6 类碳源的 AWCD 数据进行主成分分析 (Principal component analysis, PCA) [22], 得到施肥处理后土壤微生物碳源利用能力的主成分得分, 结果见图 5。根据提取后主成分特征根大于 1 的原则, 共提取了 2 个主成分, 其中第 1 主成分的

方差贡献率为 58.61%, 第 2 主成分为 21.80%, 累计贡献率达 80.41%。4 种施肥处理在主成分轴上的分布和微生物对碳源底物的利用能力相关。与 PC1 轴相关性较大的碳源底物为氨基酸类、胺类、多聚物、羧酸类和酚酸类, 与 PC2 轴相关性较大的碳源底物为碳水化合物, 分析可知不同施肥处理在 PC 轴上

出现了明显的分异。整体而言 3 种施肥处理与对照相比分异较大,表现出微生物对碳源利用能力的增强,其中 T1 和 T3 处理与对照在 PC1 轴上产生分异,T1 和 T3 距离较近,表明 T1 和 T3 处理与对照相比在氨基酸类、胺类、多聚物、羧酸类和酚酸类碳源利用上差异显著,T1 和 T3 之间差异较小。此外 T1 和 T3 处理主要分布于 PC2 轴负方向,T2 处理主要分布在 PC2 轴正方向,表明 T2 处理与 T1 和 T3 对于碳源的利用差异主要在于碳水化合物,T2 处理微生物对于碳水化合物的利用能力强于 T1 和 T3 处理。

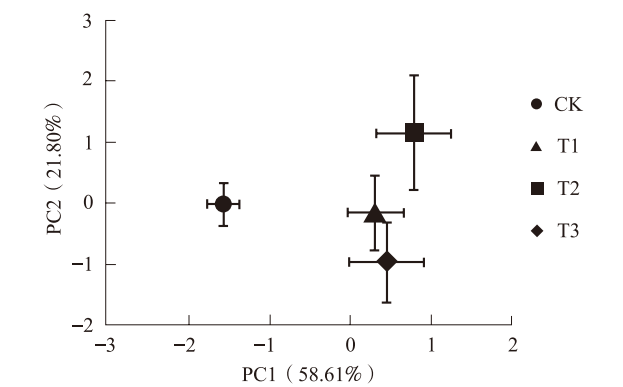


图 5 不同施肥处理后土壤微生物碳源利用类型的主成分分析

2.5 土壤微生物碳代谢功能多样性指数与土壤理化性质相关性分析

由表 3 可以看出,相关性分析表明土壤微生物群落碳代谢功能多样性指数与土壤理化性质的相关性表现为: Shannon 指数与土壤容重显著负相关,与自然含水率呈极显著负相关,与 pH 值呈显著正相关,与全碳和全氮含量呈极显著正相关;土壤理化性质与 Simpson 指数的相关性均未达到显著水平; McIntosh 指数与土壤容重、自然含水率、pH 值和全碳含量呈极显著正相关,与土壤全氮含量呈显著正相关。

表 3 不同处理下土壤微生物碳功能多样性指数与土壤理化性质相关性分析

相关性	Shannon	Simpson	McIntosh
容重	-0.468*	0.346	0.943**
自然含水率	-0.763**	0.072	0.912**
pH 值	0.479*	0.185	0.880**
全碳	0.819**	0.286	0.905**
全氮	0.804**	0.279	0.502*
全磷	0.323	-0.217	0.037
全钾	0.073	0.245	0.235

注: * 表示在 0.05 水平上的相关性显著, ** 表示在 0.01 水平上的相关性极显著。

3 结论与讨论

土壤微生物群落活性及多样性均受气候条件^[23]、土壤特征状况^[24]、地下植被^[25]以及人为活动^[26]的影响,是评价土壤生态系统的质量和水平的重要指标之一,人为施肥必然导致土壤理化性质发生改变,进而引起土壤微生物碳源利用能力的变化。本研究结果显示,天然有机物料有机肥、有机无机复合肥、禽畜粪便有机肥 3 种有机肥施肥处理均可提高土壤微生物活性,AWCD 值、Shannon 多样性指数、Simpson 优势度指数以及 McIntosh 优势度指数大小顺序均表现为 T2>T1>T3>CK。大量研究表明,厩肥、绿肥等有机肥施入有利于提升土壤微生物的多样性及活性^[27-28],与本文研究结果基本一致。由于有机肥的施入大量增加了土壤中有机的含量,改善了土壤性状,为土壤微生物提供了有利的生境条件,使其数量和群落多样性均有所上升。此外有机肥使得土壤中可利用的碳源种类趋于多元,微生物所利用的碳源种类越多,其新陈代谢水平越强。

有机肥施入对于土壤微生物多样性和活性影响的研究普遍表现为正向效益,而有机无机复合肥的施入效果在许多研究中结论不一,邢鹏飞等^[29]关于黄河冲积平原玉米-小麦轮作土壤施肥的研究发现,土壤微生物群落多样性在有机无机复合肥施入后并未产生显著提升,而 Luo 等^[30]对牧场土壤施肥的研究则发现,有机肥和无机肥的配合施入对于提升土壤养分状况和维持土壤微生物活性效果最佳,结合以上研究的土壤养分数据,推测本试验研究区域为紫色土丘陵区,氮、磷等土壤养分含量处于较低水平,而无机肥的施入能够快速提升土壤养分含量,从而促进土壤微生物大量增殖,这可能是导致本研究中有机无机复合肥在 3 种有机肥施肥处理中效果最佳的原因。不同坡位之间的微生物群落碳源利用能力差异同样与土壤养分密切相关。由于紫色土区油茶林生长不良,林下植被发育较差,导致水流失较严重,降雨冲刷使得坡面土壤养分再分配,坡顶养分随地表径流在坡底富集,从而导致下坡位土壤肥沃,土壤养分优于上坡位和中坡位,因而不同坡位土壤的 AWCD 值、Shannon 多样性指数、Simpson 优势度指数以及 McIntosh 优势度指数大小顺序均表现为下坡>中坡>上坡。

通过土壤微生物群落碳代谢功能多样性指数与

土壤理化性质相关性分析表明,土壤容重、自然含水率、pH 值、全碳和全氮含量是影响土壤微生物多样性指数的重要因素。pH 值对土壤微生物利用碳源能力具有重要影响,Staddon 等^[31]的研究发现 pH 值是影响土壤微生物群落碳代谢功能多样性指数的重要环境因子,多样性指数随 pH 值增加而降低。本试验研究区域土壤为酸性土壤,土壤多样性指数与 pH 值均呈正相关,可见本研究区土壤酸化现象的减弱可为更多类群土壤微生物提供适宜的生境。紫色土氮含量普遍较为缺乏,土壤有机碳和全碳含量以及 C/N 均是影响土壤微生物群落碳代谢功能多样性指数的重要环境因子。徐华勤等^[32]对长期施肥下茶园土壤微生物群落功能多样性的研究表明,有机物与无机肥配合施入提高了土壤有机碳含量,调节了土壤 C/N,微生物活性较高,与本文研究相一致。对于不同施肥处理下碳源利用差异而言,主成分分析表明 T1、T2、T3 处理下土壤微生物对 6 类碳源利用能力相比于对照有着较大提升,其中天然物料有机作物肥和禽畜粪有机肥对于 6 类碳源的利用具有相似性,而有机无机复合肥与两者处理之间对于 6 类碳源利用差异主要在于对于碳水化合物的利用。侯晓杰等^[33]对黄土性母质的玉米连作土壤施肥研究发现,糖类和氨基酸类碳源是土壤微生物利用的主要碳源,并且是不同施肥之间的主要区分碳源,宋贤冲等^[34]研究则表明在我国亚热带地区阔叶林中,碳水化合物类和胺类是土壤微生物的主要碳源。可见不同地区由于土壤生境的差异,土壤微生物群落组成同样也有所差异,不同的微生物类群对于土壤碳源种类具有不同的偏好,但就本研究结果表明,有机无机复合肥处理下各类碳源的利用能力均较高。

综上,有机无机复合肥的施入更有利于紫色丘陵区油茶人工林土壤微生物活性的提高。但本试验所采用的 Biolog 技术由于只能培养快速生长型或嗜营养型的微生物类群,难以真实全面地反映研究区土壤微生物群落结构,且测试板碳源的选择也具有人为倾向,具有一定的局限性^[35]。今后的研究需要结合现代分子生物技术,加强对紫色土丘陵区土壤微生物进行研究,为紫色土丘陵区的生态治理和农业可持续发展提供进一步参考。

参考文献:

[1] 辛景树. 耕地质量演变趋势研究: 国家级耕地土壤监测数据整编 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.

- [2] 何毓蓉. 中国紫色土. 下篇 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 何毓蓉, 黄成敏. 四川紫色土退化及其防治 [J]. 山地学报, 1993, 11 (4): 209-215.
- [4] 黄成敏, 何毓蓉, 文安邦. 四川紫色土退化的分类与分区 [J]. 山地研究, 1993, 11 (4): 201-208.
- [5] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤微生物群落多样性的变化 [J]. 林业科学, 2016, 52 (8): 146-156.
- [6] Zhong W H, Gu T, Wang W, et al. The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity [J]. Plant and Soil, 2010, 326 (1-2): 511-522.
- [7] Turco R F, Kennedy A C, Jawson M D. Microbial indicators of soil quality [J]. Sssa Special Publication, 1994, 35: 73-90.
- [8] 唐海明, 肖小平, 李微艳, 等. 长期施肥对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. 生态环境学报, 2016, 25 (3): 402-408.
- [9] Zheng Y, Zhang L M, Zheng Y M, et al. Abundance and community composition of methanotrophs in a Chinese paddy soil under long-term fertilization practices [J]. Journal of Soils and Sediments, 2008, 8 (6): 406-414.
- [10] Fauci M F, Dick R P. Soil microbial dynamics: short and long-term effects of inorganic and organic nitrogen [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58 (3): 801.
- [11] 张瑞, 张贵龙, 陈冬青, 等. 不同施肥对农田土壤微生物功能多样性的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29 (2): 133-139.
- [12] 刘振香, 刘鹏, 贾绪存, 等. 不同水肥处理对夏玉米田土壤微生物特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (1): 113-121.
- [13] 谭周进, 周卫军, 张杨珠, 等. 不同施肥制度对稻田土壤微生物的影响研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13 (3): 430-435.
- [14] 王俊华, 尹睿, 张华勇, 等. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响 [J]. 生态环境, 2007, (1): 191-196.
- [15] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (4): 459-465.
- [16] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46 (5): 950-960.
- [17] 国家林业局. 森林土壤分析方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [18] Benizri E, Amiaud B. Relationship between plants and soil microbial communities in fertilized grasslands [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37 (11): 2055-2064.
- [19] Verstraete W, Voets J P. Soil microbial and biochemical characteristics in relation to soil management and fertility [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1977, 9 (4): 253-258.
- [20] 车明轩, 宫渊波, Khan M N, 等. 不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30 (2): 131-135.
- [21] Buyer J S, Kaufman D D. Microbial diversity in the rhizosphere of corn grown under conventional and low-input systems [J].

- Applied Soil Ecology, 1997, 5 (1): 21–27.
- [22] Preston–Mafham J, Boddy L, Randerson P F. Analysis of microbial community functional diversity using sole–carbon–source utilization profiles—a critique [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, 42 (1): 1–14.
- [23] 王苑. 气候变化条件背景下土壤微生物群落对干旱和大气 CO₂ 倍增的响应 [D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [24] 何钢, 袁德义, 刘贤桂. 油茶低产林土壤改良对土壤养分及土壤酶活的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31 (3): 76–80.
- [25] 毕江涛, 荷达汗, 沙月霞, 等. 草原不同植被类型土壤微生物功能多样性 [J]. 干旱区农业研究, 2009, 27 (5): 149–155.
- [26] 周小倩. 黑龙江省不同经度耕作生态系统土壤微生物群落结构研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2016.
- [27] Dick R P. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1992, 40: 25–36.
- [28] Zhu H P, Yao H Y, Zhang Y Y. Effect of fertilizer system on soil microbial ecology [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34 (2): 140–142.
- [29] 邢鹏飞, 武晓森, 高圣超, 等. 不同施肥处理对玉米–小麦轮作土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. 微生物学杂志, 2016, 36 (1): 22–29.
- [30] Luo X Q, Hao X H, Chen T, et al. Effects of long-term different fertilization on microbial community functional diversity in paddy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (2): 740–748.
- [31] Staddon W J, Trevors J T, Duchesne L C, et al. Soil microbial diversity and community structure across a climatic gradient in western Canada [J]. Biodiversity and Conservation, 1998, 7 (8): 1081–1092.
- [32] 徐华勤, 肖润林, 邹冬生, 等. 长期施肥对茶园土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. 生态学报, 2007, (8): 3355–3361.
- [33] 侯晓杰, 汪景宽, 李世朋. 不同施肥处理与地膜覆盖对土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. 生态学报, 2007, (2): 655–661.
- [34] 宋贤冲, 曹继钊, 唐健, 等. 猫儿山常绿阔叶林不同土层土壤微生物群落功能多样性 [J]. 生态科学, 2015, 34 (6): 93–99.
- [35] 李春格, 李晓鸣, 王敬国. 大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响 [J]. 生态学报, 2006, (4): 1144–1150.

Effects of different organic fertilizer treatments on carbon source utilization of soil microbial communities of *Camellia oleifera* plantation in purple soil area

FEI Yu-chong¹, LIU Li¹, CHEN Gang¹, ZHANG Yuan-ming², CHEN Shi-pin¹, LAN Si-ren¹, WANG Di¹, CAO Guang-qiu^{1*}
(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350002; 2. Forestry Bureau of Ninghua County, Fujian Province, Ninghua Fujian 365400)

Abstract: Diversity of carbon metabolism function in microbial community is an important indicator of soil management. In this study, soil samples from *Camellia oleifera* plantation at different slope positions in purple soil erosion area in Ninghua county, Fujian province were taken as research objects. Biolog technology was used to study the carbon source utilization capacity of soil microorganisms under three organic fertilizer treatments including natural organic material organic fertilizer (T1), organic-inorganic compound fertilizer (T2) and livestock manure organic fertilizer (T3) and no fertilization treatment (CK). The results are as follows: Average rate of color change of absorption value (AWCD) of soil at different slope positions under T1, T2 and T3 treatments increased compared with those before fertilization, while AWCD values of soil under CK treatments did not change significantly. The order of AWCD increase under different treatments showed as: T2>T1>T3>CK; The order of Shannon diversity index, Simpson dominance index and McIntosh dominance index was T2>T1>T3>CK; Under the same treatment, AWCD values, Shannon diversity index, Simpson dominance index and McIntosh evenness index of different slope positions presented a trend of lower slope>middle slope>upper slope. Shannon index had extremely significant or significant negative correlation with soil bulk density and natural water content, and extremely significant or significant positive correlation with pH value, the content of total carbon and total nitrogen. The McIntosh index was extremely significant or significant positively correlated with soil bulk density, natural moisture content, pH value, the content of total carbon and total nitrogen. Amino acids were the main carbon sources used by soil microorganisms under different fertilization treatments. Principal component analysis showed that soil microorganisms under T1, T2 and T3 treatment had significantly different utilization of 6 types of carbon sources, compared with CK treatment. T1 and T3 treatment had similar utilization of 6 types of carbon sources; and compared with T1 and T3, the difference between T2 treatment and their utilization of 6 types of carbon sources was mainly the utilization of carbohydrates. In conclusion, the application of organic-inorganic compound fertilizer is most conducive to the improvement of soil microbial activity of *Camellia oleifera* plantation in purple hilly area. The above conclusions can provide a basis for in depth research on the establishment of rational fertilization system and agricultural optimization management in purple hilly area.

Key words: organic fertilizer; *Camellia oleifera*; purple soil; soil microorganism; carbon source utilization capacity; biolog