

樟树人工林对湘东退化红壤性质及微生物碳源利用的影响

张杰, 张海燕, 赵皎, 金晓芳, 龚磊, 李凤, 金志农

(南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西省樟树繁育与开发利用工程研究中心, 南昌 330099)

摘要: 通过对湘东红壤丘陵区樟树(*Cinnamomum camphora*)人工林林下与林间土壤进行配对采样与分析, 研究樟树人工林对退化红壤性质及微生物碳源利用的影响。结果表明: 与林间土壤相比, 林下土壤的 pH 增加 0.95 个单位, 全磷、全钾和含水量分别提高 14.8%, 16.8% 和 45.6%, 容重降低 8.1%, 均达到显著水平。樟树人工林显著增加林下土壤微生物的平均颜色变化率(average well color development, AWCD), 林间土壤微生物对碳水化合物、氨基酸、羧酸、聚合物和酚酸类碳源的利用强度依次仅相当于林下土壤微生物的 27.6%, 19.2%, 23.4%, 47.1% 和 3.5%, 但二者对胺类碳源的利用没有明显变化。樟树人工林显著增加林下土壤微生物的丰富度指数、多样性指数、优势度指数和均匀度指数。主成分分析发现, 樟树人工林改变土壤微生物的碳源利用模式; 相关性分析表明, 樟林恢复后土壤理化性质的改善是造成微生物碳源利用能力和多样性指数提升的主要原因, 而土壤 pH 是其中的首要驱动因素。综上, 樟树人工林有助于提高湘东退化红壤的微生物生态功能, 樟树是进行退化红壤生态修复和重建的适宜树种。

关键词: 樟树人工林; 植被恢复; 退化红壤; 土壤微生物; 碳源利用

中图分类号: S718.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0333-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.048

Effects of *Cinnamomum Camphora* Plantations on Properties of Degraded Red Soil and Utilization of Microbial Carbon Sources in Eastern Hu'nan

ZHANG Jie, ZHANG Haiyan, ZHAO Jiao, JIN Xiaofang, GONG Lei, LI Feng, JIN Zhinong

(College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Jiangxi Provincial Engineering Research Center for Seed-breeding and Utilization of Camphor Trees, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099)

Abstract: In order to study the effects of *Cinnamomum camphora* plantations on properties of degraded red soil and utilization of microbial carbon sources in eastern Hu'nan, forest soil and non-forest soil samples were paired sampled and analyzed. The results showed that the pH in forest soil was significantly increased by 0.95 units compared with non-forest soil, and the total phosphorus, total potassium and water contents were significantly increased by 14.8%, 16.8% and 45.6%, respectively. But the soil bulk density was significantly decreased by 8.1%. The average well color development (AWCD) of soil microorganisms was significantly increased by long-term *Cinnamomum camphora* restoration. Furthermore, the microbial metabolic intensities of carbohydrates, amino acids, carboxylic acids, polymers and phenolic compounds in non-forest soil were only 27.6%, 19.2%, 23.4%, 47.1% and 3.5% of those in forest soil, respectively. In addition, soil microbial functional diversity indexes were significantly increased by long-term *Cinnamomum camphora* restoration. Principal component analysis (PCA) showed that *Cinnamomum camphora* plantations changed the carbon sources utilization pattern of soil microbial community. Correlation analysis showed that the improved soil physical and chemical properties after *Cinnamomum camphora* restoration were reasons for the improvement of microbial carbon sources utilization capacity and functional diversity indexes, and among which, soil pH was the primary driving factor. In conclusion, *Cinnamomum camphora* plantations could improve the microbial ecological function of degraded red soil in eastern Hu'nan, and *Cinnamomum camphora* is a suitable tree species for ecological restoration and reconstruction of degraded red soil.

Keywords: *Cinnamomum camphora* plantation; vegetation restoration; degraded red soil; soil microorganism; carbon source utilization

南方红壤丘陵区水热资源丰富,动植物种类繁多,生产潜力巨大,是我国重要的农林牧业生产基地^[1]。然而,由于社会经济快速发展、生态环境保护意识不强等原因,南方红壤丘陵区的自然植被频繁遭到破坏,导致地表裸露面积扩大、土壤侵蚀退化加剧,严重限制红壤资源的高效利用,也对区域生态系统的稳定性造成不利影响^[2-3]。

植被恢复是防治土壤退化、改善脆弱生境的有效措施^[4]。不同的植被恢复类型^[5]、恢复技术^[6]和恢复进程^[7]会对土壤产生不同的恢复效果。有研究^[4]发现,枫树(*Liquidambar formosana*)等自然恢复植被虽然比板栗(*Castanea mollissima*)等人工恢复植被更有利于提高湘南红壤丘陵区的土壤肥力,但枫树却显著降低土壤 pH,长期种植会加剧红壤酸化;Wu 等^[8]报道,原产美国东南部的湿地松(*Pinus elliottii*)因具有良好的适应性和抗逆性,被广泛引入中国南方红壤丘陵区种植,但随着湿地松林龄延长土壤肥力逐渐降低,进而驱动土壤微生物群落组成产生分异,导致微生物功能多样性衰退。可见,利用植被恢复的方法改良退化土壤应充分考虑“土壤—植物—微生物”系统的长期综合效应。

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,它们在土壤结构的形成、有机质的分解、转化与固定、养分的生物地球化学循环中都发挥重要作用^[9]。土壤微生物的碳源利用特征是衡量土壤质量变化的敏感指标,常采用 Biolog 微孔板技术进行测定^[10-11],研究植被恢复对土壤微生物碳源利用的影响,对选择合适的植被类型进行生态修复和重建具有重要意义^[12]。樟树(*Cinnamomum camphora*),又称香樟、樟木、乌樟等,属樟科常绿大乔木,是我国南方退化红壤进行人工植被恢复的常用树种。然而,目前关于樟树人工林对退化红壤肥力质量及微生物群落影响的研究较少,退化红壤采用樟树种植进行治理的长期综合效应有待全面评估。为此,本研究在湘东红壤丘陵区选择长达 20 年以上的典型樟树人工林作为研究对象,采用 Biolog 微孔板技术,配对比较同一微地貌单元内樟树林下与林间土壤的微生物碳源利用特征,以期为我国南方退化红壤的科学治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省株洲市茶陵县火田镇(26°30′—27°07′N,113°20′—113°65′E),地处湘赣边界,年平均气温 17.9 °C,7 月最热,平均气温 29.2 °C,1 月最冷,平均气温 5.9 °C,≥10 °C 积温为 5 509 °C,无霜期 294 d,年降水量 1 370.2 mm,降水主要集中在 4—8 月,属典型的亚热带湿润季风气候。上世纪 80 年代,由于不合理的

开发利用,导致当地较多原生林被砍伐;90 年代初,当地先后进行了几次人工造林,樟树是主要的栽培树种,造林后任其自然生长,无人扰动和破坏;目前经过 20 多年的生长,樟林长势良好。

1.2 研究方法

于 2016 年 11 月 5—18 日在火田镇的五门村(26°56′54″N,113°43′23″E)、贝水村(26°59′23″N,113°42′31″E)、庙贝村(26°57′10″N,113°42′25″E)和新华村(26°59′03″N,113°41′53″E)选择典型樟树人工林进行土壤样品采集,采样时分樟树林下(种植樟树且被树冠覆盖区域)和相邻的樟树林间(未种植樟树且地表基本裸露区域)2 个部位进行,并一一配对编号。采样时用内径 3 cm 土钻在每块样地(>30 m²)中按“五点法”采集 0—20 cm 的表层土壤,而后混合制得该样地土样。五门村、贝水村、庙贝村和新华村分别采集 15, 11, 17, 13 块样地,共获得 56 对配对样品。将采集的土样装入无菌袋并置于保鲜箱中,尽快带回实验室内拣除杂物,而后过 2 mm 筛分作 2 份:一份风干后用于测定土壤常规性质;另一份保存于 4 °C 冰箱中用于土壤微生物的 Biolog 分析。土壤常规性质的测定参照鲁如坤^[13]的方法进行。土壤 pH 采用电位法测定(水:土为 2.5:1),有机碳采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定;全氮采用凯氏定氮法测定;全磷采用碳酸钠熔融法测定;全钾采用氢氧化钠熔融法测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵法测定;含水量采用铝盒法测定;容重采用环刀法测定。

土壤微生物的 Biolog 分析采用 Biolog Eco 板(Biolog Inc., USA)进行^[9]。操作步骤为:将相当于 5 g 干土的新鲜土样加入到 45 mL 预先灭菌的 0.85%(w/v)的 NaCl 溶液中,在室温下 200 r/min 振荡 30 min,而后静置 10 min。在无菌操作台中吸取上清液 1 mL 并用灭菌 NaCl 溶液进一步稀释 10 倍,而后用 8 道枪吸取最终稀释液加入到 Biolog Eco 板上,每孔加 150 μL。将接种好的 Biolog Eco 板放在 25 °C 的培养箱中培养,每隔 24 h 用读板仪(Bio-Tek Instrument Inc., USA)读取 590 nm 波长处的吸光值,连续 7 天。

1.3 数据统计

56 对土壤样品的物理、化学和生物学性质采用配对两处理 *t* 检验(双尾)来判断差异显著性,6 类碳源的利用强度采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、Duncan 多重比较来判断差异显著性,采用主成分分析来揭示土壤微生物碳源利用模式变化,采用简单相关分析来反映碳源利用能力、功能多样性指数与土壤理化性质的相关性。所有试验数据用 Excel 2013 进行处理,上述 *t* 检验、单因素方差分析、Duncan 多重比较、主成分分析和简

单相关分析采用 PASW Statistics 18.0 软件完成, Origin 8.5 软件作图。

涉及到 Biolog 分析的相关计算公式为^[9]:

平均颜色变化率 (average well color development, AWCD) 反映微生物整体碳源利用能力:

$$AWCD = \frac{\sum OD_i}{31}$$

丰富度指数 (S): 指有颜色变化的孔目数。

Shannon-Wiener 多样性指数 (H'): $H' = -\sum p_i \ln p_i$

Shannon-Wiener 均匀度指数 (E): $E = \frac{H'}{\ln S}$

Simpson 优势度指数 (D): $D = 1 - \sum (p_i)^2$

式中: OD_i 为第 i 孔的吸光值减去对照孔的吸光值,

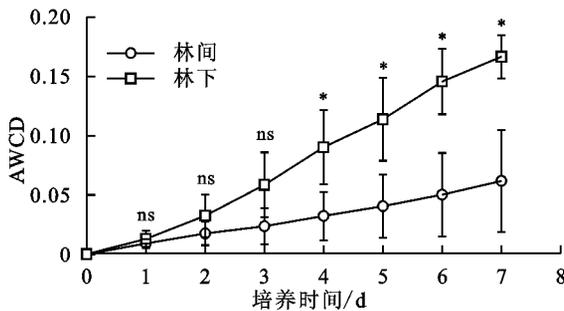
表 1 樟树人工林对土壤理化性质的影响

处理	pH	有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全钾/ ($g \cdot kg^{-1}$)	CEC/ ($cmol^+ \cdot kg^{-1}$)	含水量/ %	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)
林间	4.07b	11.85a	1.19a	0.39b	10.22b	15.83a	18.42b	1.40a
林下	5.02a	11.52a	1.02b	0.45a	11.94a	16.77a	26.82a	1.29b

注: 同一列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 樟树人工林对土壤微生物碳源利用能力的影响

随着培养时间的延长, 樟树林下和林间土壤微生物的 AWCD 均逐渐增加, 但林下土壤的上升趋势明显快于林间土壤 (图 1)。自培养第 4 天起, 林下土壤的 AWCD 显著高于林间土壤; 培养结束时, 林下土壤的 AWCD 达到 0.167, 而林间土壤仅为 0.062, 前者比后者提高了 169.4%。



注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; ns 表示差异不显著。下同。

图 1 樟树人工林对土壤微生物 AWCD 的影响

Biolog Eco 板的 31 种碳源可以分为 6 类: 碳水化合物类 (10 种)、氨基酸类 (6 种)、羧酸类 (7 种)、聚合物类 (4 种)、酚酸类 (2 种) 和胺类 (2 种)。随培养时间延长, 林下土壤微生物对除胺类外的另 5 类碳源的利用强度均呈快速上升趋势, 而林间土壤微生物对各类碳源的利用强度增加缓慢 (图 2)。林下土壤微生物对碳水化合物、氨基酸、羧酸、聚合物和酚酸类碳源的利用强度分别从培养第 3, 3, 2, 6, 2 天起显著高于林间土壤, 直至培养结束; 但林下和林间土壤微生物对胺类碳源的利用强度始终无显著差异。培养结束时, 林下土壤微生物对 6 类碳源的利用强弱顺序

即相对吸光值; 31 为 Biolog Eco 板上供试碳源的种类数; p_i 为第 i 孔相对吸光值与整个平板相对吸光值总和的比率。

2 结果与分析

2.1 樟树人工林对土壤理化性质的影响

人工樟林恢复后, 与林间土壤相比, 林下土壤的 pH 提升了 0.95 个单位 ($P < 0.05$), 表明种植樟树有利于改善红壤酸性; 林下土壤的全磷、全钾含量比林间土壤分别提高 14.8% 和 16.8%, 含水量提高 45.6%, 土壤容重降低 8.1%, 均达到显著水平, 但林下土壤的全氮含量有所降低。樟树人工林对土壤有机碳和 CEC 的影响尚不显著 (表 1)。

为: 羧酸 (a) > 氨基酸 (b) > 聚合物 (bc) > 碳水化合物 (c) > 酚酸 (cd) > 胺类 (d) (注: 不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著, 下同), 而林间土壤微生物对 6 类碳源的利用强弱顺序为: 羧酸 (a) > 聚合物 (ab) > 氨基酸 (ab) > 碳水化合物 (ab) > 胺类 (b) > 酚酸 (b), 可见种植樟树使得土壤微生物对不同类碳源的利用偏好发生转变。至培养结束时, 林间土壤微生物对碳水化合物、氨基酸、羧酸、聚合物、酚酸和胺类的利用强度依次相当于林下土壤微生物的 27.6%, 19.2%, 23.4%, 47.1%, 3.5% 和 111.1%。

2.3 樟树人工林对土壤微生物碳源利用模式的影响

为了探明樟树林下和林间土壤微生物碳源利用的模式差异及演变趋势, 对 2 种土壤所有培养时间的 31 种碳源数据进行主成分分析, 基于特征值 > 1 的原则, 共提取了 6 个主成分, 总贡献率达到 87.24%, 可以解释大部分的变异。其中, 前 3 个主成分 (PC1、PC2、PC3) 的方差贡献率分别为 40.75%, 13.11% 和 12.96%, 其余主成分贡献率均 < 10%, 因此选择前 3 个主成分的得分值绘图 (图 3), PC1、PC2 和 PC3 分别构成 x 、 y 和 z 轴。在培养前期, 林下和林间土壤样点虽然主要集中在 yz 平面上, 但二者有较明显的界限, 随着培养时间的延长, 林下土壤样点主要沿 x 轴方向离散, 而林间土壤样点主要沿 z 轴方向离散, 林下样点和林间样点逐渐区分为 2 个明显不同的类别, 说明樟树人工林改变了土壤微生物的碳源利用模式。

31 种碳源在提取的主成分上具有载荷值, 其绝对值越大表明碳源对主成分的影响越大 (表 2)。以载荷值的绝对值 > 0.5 为判定标准, 对第 1 主成分影响较大的碳

源共 20 种,其中碳水化合物类和氨基酸类各 6 种、羧酸类 5 种、酚酸类 2 种、聚合物类 1 种;对第 2 主成分影响较大的碳源共 8 种,其中碳水化合物类 3 种、氨基酸类 2 种、酚酸类、聚合物类和胺类各 1 种;对第 3 主成分影响

较大的碳源共 8 种,其中碳水化合物类 3 种、氨基酸类和羧酸类各 2 种、聚合物类 1 种。可见,人工樟林恢复后土壤微生物对上述碳源利用偏好的改变是导致其碳源利用模式变化的主要原因。

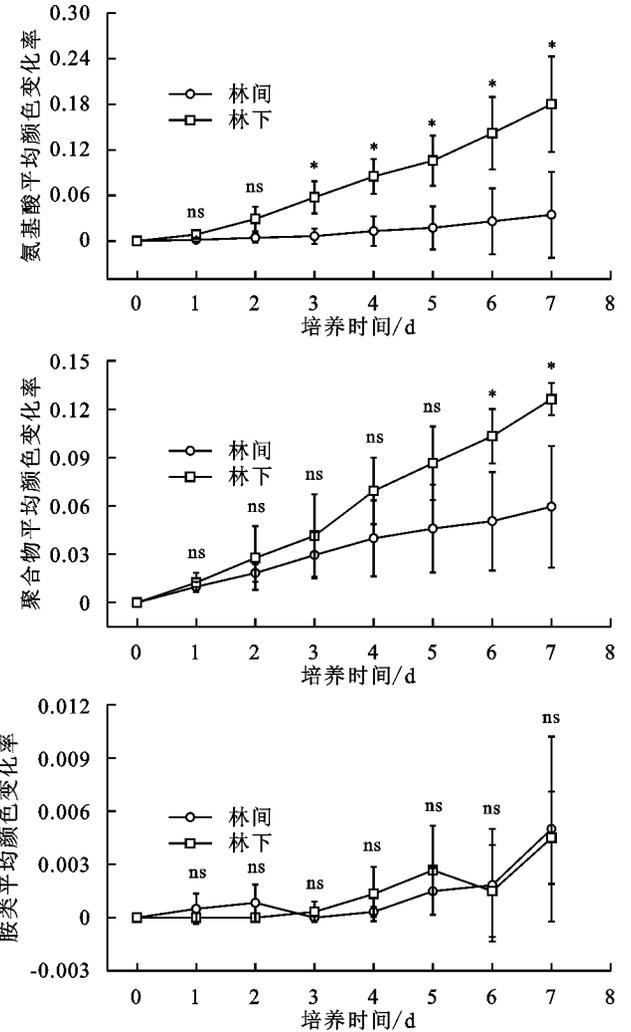
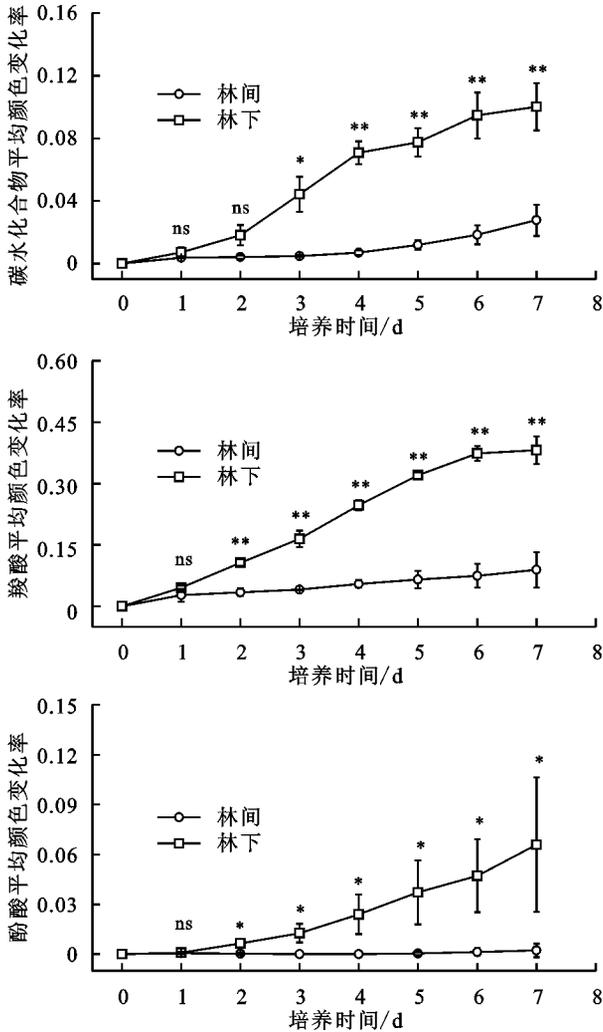


图 2 樟树人工林对土壤微生物 6 类碳源利用能力的影响

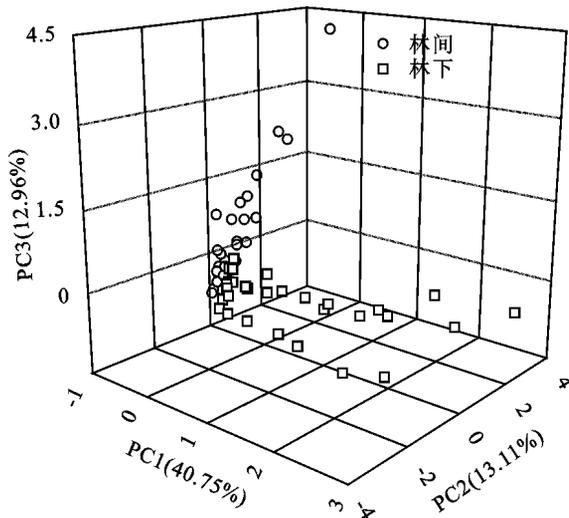


图 3 土壤微生物碳源利用模式变化

2.4 樟树人工林对土壤微生物功能多样性的影响

土壤微生物功能多样性指数均在培养第 1 天急剧上升,而后趋于稳定(图 4)。从第 2 天起,林下土

壤微生物的丰富度指数(除第 4,5 天)和多样性指数显著高于林间土壤;从第 3 天起,林下土壤微生物的优势度指数和均匀度指数显著高于林间土壤。可见,樟树人工林提高了退化红壤的微生物功能多样性。

2.5 土壤微生物碳源利用特征与土壤理化性质的相关性分析

相关性分析(表 3)表明,土壤 pH、全磷、全钾、CEC 和含水量均与微生物碳源利用能力和多样性指数呈正相关关系,其中,土壤 pH 与 AWCD、碳水化合物、氨基酸、酚酸、多样性指数、优势度指数和均匀度指数呈(极)显著正相关,土壤全磷仅与碳水化合物呈极显著正相关,土壤全钾与碳水化合物、氨基酸、多样性指数和均匀度指数呈(极)显著正相关,CEC 与 AWCD、羧酸和胺类呈显著正相关,含水量与碳水化合物、氨基酸和多样性指数呈(极)显著正相关;而土壤有机碳、全氮和容重均与微生物碳源利用能力

和多样性指数呈负相关关系,其中,土壤有机碳仅与胺类呈显著负相关,土壤全氮与碳水化合物和均匀度指数呈(极)显著负相关,土壤容重仅与碳水化合物呈显著负相关。

表 2 31 种碳源的主成分载荷值

碳源编号	碳源名称	碳源类型	主成分					
			PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
A2	β-甲基-D-葡萄糖苷	碳水化合物	0.368	0.686*	-0.233	-0.314	0.253	0.034
A3	D-半乳糖酸-γ-内脂	碳水化合物	0.096	0.445	0.757*	0.023	0.277	-0.004
A4	L-精氨酸	氨基酸类	0.779*	-0.062	0.514*	0.069	-0.240	-0.073
B1	丙酮酸甲酯	羧酸类	0.646*	0.009	0.523*	0.207	-0.051	-0.048
B2	D-木糖	碳水化合物	0.547*	0.500*	-0.510*	0.303	-0.093	0.012
B3	D-半乳糖醛酸	羧酸类	0.869*	0.262	-0.139	0.202	0.106	0.083
B4	L-天门冬酰胺	氨基酸类	0.858*	0.060	-0.359	0.244	-0.130	0.043
C1	吐温 40	聚合物	0.960*	0.141	-0.036	-0.051	0.163	-0.038
C2	i-赤藻糖醇	碳水化合物	0.569*	-0.649*	0.142	-0.417	-0.022	0.044
C3	2-羟基苯甲酸	酚酸类	0.546*	0.744*	0.037	-0.128	0.160	-0.228
C4	L-苯基丙氨酸	氨基酸类	0.863*	0.051	-0.045	-0.405	0.190	-0.129
D1	吐温 80	聚合物	0.295	-0.183	0.148	0.718*	0.549*	-0.003
D2	D-甘露醇	碳水化合物	0.924*	-0.138	-0.230	0.125	-0.032	0.037
D3	4-羟基苯甲酸	酚酸类	0.882*	0.296	-0.254	0.059	0.049	0.011
D4	L-丝氨酸	氨基酸类	0.621*	-0.647*	0.166	-0.376	0.005	0.022
E1	α-环式糊精	聚合物	-0.062	0.194	0.751*	0.370	-0.047	0.270
E2	N-乙酰-D-葡萄糖胺	碳水化合物	0.824*	-0.093	-0.176	0.373	-0.151	0.000
E3	γ-羟基丁酸	羧酸类	0.707*	0.314	-0.349	-0.328	0.140	0.098
E4	L-苏氨酸	氨基酸类	0.775*	0.013	0.501*	0.048	-0.240	-0.152
F1	肝糖	聚合物	-0.126	0.569*	0.281	-0.398	0.226	0.431
F2	D-葡萄糖胺酸	羧酸类	0.766*	0.141	0.509*	-0.158	-0.038	-0.200
F3	衣康酸	羧酸类	-0.144	-0.202	0.121	0.394	0.838*	-0.060
F4	甘氨酸-L-谷氨酸	氨基酸类	0.677*	-0.558*	0.138	-0.313	0.034	0.070
G1	D-纤维二糖	碳水化合物	0.041	0.207	0.713*	0.196	-0.299	-0.375
G2	α-D-葡萄糖-1-磷酸	碳水化合物	-0.311	0.184	0.472	-0.175	-0.112	0.611*
G3	α-丁酮酸	羧酸类	0.953*	-0.014	-0.184	0.019	-0.010	0.113
G4	苯乙胺	胺类	0.405	-0.521*	0.190	0.112	0.590*	0.127
H1	α-D-乳糖	碳水化合物	0.835*	-0.235	0.116	0.156	-0.237	0.240
H2	D,L-α-磷酸甘油	碳水化合物	0.623*	-0.191	0.036	-0.510*	0.051	0.118
H3	D-苹果酸	羧酸类	0.379	-0.006	-0.186	0.686*	-0.329	0.365
H4	腐胺	胺类	0.122	0.485	0.248	-0.122	-0.009	0.026

注: * 表示碳源在该主成分上载荷值的绝对值>0.5。

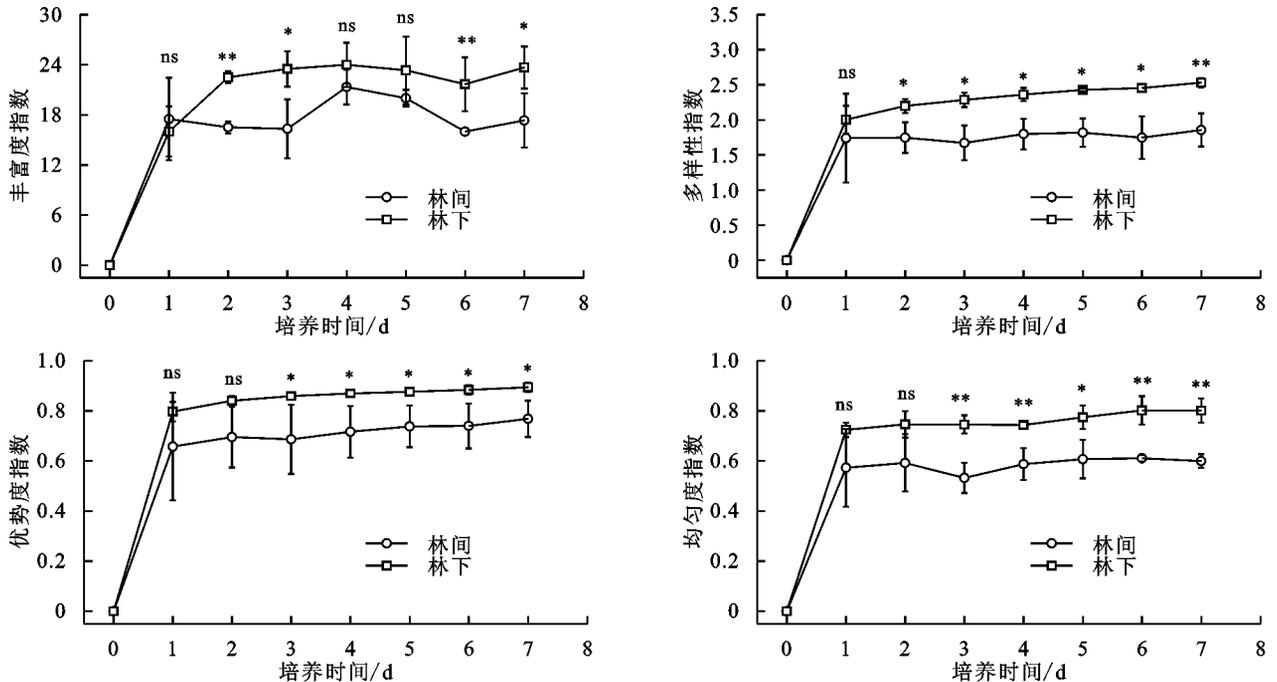


图 4 樟树人工林对土壤微生物功能多样性的影响

表 3 土壤微生物碳源利用特征与土壤理化性质的相关系数

项目	pH	有机碳	全氮	全磷	全钾	CEC	含水量	容重
AWCD	0.803*	-0.634	-0.638	0.457	0.655	0.831*	0.723	-0.451
碳水化合物	0.974**	-0.160	-0.931**	0.928**	0.990**	0.456	0.937**	-0.857*
氨基酸	0.886*	-0.496	-0.785	0.654	0.811*	0.731	0.848*	-0.633
羧酸	0.448	-0.767	-0.263	0.022	0.250	0.830*	0.385	-0.074
聚合物	0.711	-0.505	-0.440	0.270	0.443	0.756	0.465	-0.133
酚酸	0.855*	-0.294	-0.684	0.646	0.751	0.472	0.663	-0.673
胺类	0.296	-0.840*	-0.054	0.052	0.239	0.850*	0.578	-0.122
丰富度指数	0.506	-0.795	-0.158	0.226	0.408	0.767	0.617	-0.399
多样性指数	0.927**	-0.350	-0.732	0.700	0.814*	0.639	0.812*	-0.599
优势度指数	0.879*	-0.147	-0.751	0.640	0.723	0.533	0.652	-0.395
均匀度指数	0.948**	-0.185	-0.812*	0.771	0.850*	0.525	0.789	-0.613

注: * 表示相关性达显著水平($P < 0.05$); ** 表示各相关性达显著水平($P < 0.01$)。

3 讨论

植被恢复是治理退化生态系统的有效措施,其最直观的是改变土壤理化性质,进而影响土壤肥力质量。李静鹏等^[14]研究发现,稀树灌丛相较于阔叶林或针叶林更利于维持择伐初期赤红壤的土壤肥力,其原因是稀树灌丛生物量小,从土壤中吸收的养分少,而且能够较多的归还土壤,而后两者生物量大,从土壤中吸收的养分远大于归还的养分,尤其是针叶林的凋落物含有大量不易分解的单宁、树脂和蜡质^[15],更不利于养分归还。而张璐等^[4]研究发现,红壤荒丘经过长达 31 年的封山育林,土壤肥力为乔木大于灌木和草本植被。可见,植被恢复对土壤肥力的影响,受植被类型^[5,16]和恢复年限^[7-8]等多种因素的作用,需要针对性的探明。本研究发现经过 20 年以上的人工樟林恢复,林下土壤的全磷和全钾含量显著增加,土壤酸度和容重明显降低,土壤含水量也有所改善,虽然土壤全氮出现下降,但总体来看土壤的综合质量得到提高。其原因可能是亚热带红壤丘陵区地形复杂、坡度较大、降雨多且集中,合理的植被恢复措施虽然在初期可能加快土壤养分消耗,但长远来看仍可明显降低土壤侵蚀强度^[17],减少养分流失,因此有利于保蓄土壤养分;另外,植被冠层覆盖、根系生长和凋落物归还也有利于改善土壤物理性状。然而,本研究未发现樟树人工林对土壤的速效氮、磷、钾养分产生显著影响(数据未列出),这可能与樟树的“生长吸收—凋落归还”以及土壤的“全量养分—速效养分”这 2 组动态平衡有关,这需要将来持续观测探明。

本研究发现,湘东丘陵退化红壤种植樟树后,林下土壤微生物的 AWCD 和功能多样性指数相对于林间土壤显著提高,说明人工樟林恢复增强了土壤微生物的代谢活性,加快了土壤中有机物质的周转^[9],促进了土壤微生物群落的正向演替,有利于维持红壤生态系统的稳定^[17]。土壤微生物的碳源利用特征首先取决于“植物生长状况”。植被恢复尤其是达到

一定林龄后会将大量的植物凋落物、根系分泌物和脱落物归还土壤,为土壤微生物提供丰富的碳源^[18],如植物凋落物中含有大量的 D—木糖和 D—甘露醇等碳水化合物,它们是构成半纤维素的重要单体,而根系分泌物中则含有大量的 γ —羟基丁酸和 D—苹果酸等羧酸类碳源^[19]。不同的植被恢复类型^[20-21]、同一植被的不同生长阶段^[8],以及来自植物体不同部位^[19]的各类碳源通过选择性刺激作用增强土壤微生物对某些碳源的代谢偏好,引起微生物碳源利用能力和功能多样性的变化,最终导致微生物碳源利用模式产生明显分异。

植被恢复还通过改变土壤性质影响微生物碳源利用特征。土壤微生物对环境变化极其敏感,土壤性质的微小变化可能会引起微生物的剧烈反应^[22]。有研究^[23-24]表明,合理的植被恢复措施可以通过保蓄土壤养分改善土壤微生物状况,本研究也发现,人工樟林恢复后土壤全磷、全钾和 CEC 等肥力因子与土壤微生物碳源利用能力、功能多样性指数整体上呈正相关关系,这可能是因为全面均衡的土壤养分促进了微生物的生长繁殖^[25]。然而,本研究中土壤有机碳和全氮整体上与土壤微生物碳源利用状况呈负相关关系,韩冬雪等^[26]和安韶山等^[12]的研究也有类似现象,其原因有待进一步探明。本研究还发现,土壤 pH 与较多的微生物指标呈(极)显著正相关,是驱动微生物碳源利用的首要因素,其原因是当土壤酸性很强时,土壤微生物以近似“休眠”的低活性状态抵抗严重的土壤酸化^[27];而经过 20 年以上的人工樟林恢复,林下土壤 pH 显著提高,各种微生物类群的生命活动得到恢复,因而其碳源利用能力和功能多样性指数明显改善^[9]。此外,樟树种植也增加了林下土壤的含水量,降低了土壤容重,为土壤微生物群落的发展提供了更为有利的生存空间。

Biolog 微孔板技术是目前研究土壤微生物碳源利用特征的常规方法之一,具有操作简便、灵敏度高和分

辨力强等优点。在以往的研究中,大多采用 Biolog 微孔板在 25 °C 下培养 72 h 或 96 h 的数据进行分析,虽然数据处理较为简便、高效,通常也能反映出不同处理在关键时期的区别,但偶尔会忽视某些关键信息甚至导致错误的结论^[28]。本研究采用全培养期的数据进行分析,可以全面了解各类碳源代谢和多样性指数的发展趋势,以及微生物碳源利用模式的演变规律,从而更清晰、准确地揭示林下土壤与林间土壤的碳源利用特征差异。当然,Biolog Eco 板技术自身也存在一定缺陷,它只能表征土壤中可供培养且生长快速的部分细菌种群,无法获取难以培养或生长缓慢的微生物类群的相关信息;而且,土壤微生物极其复杂,微生物群落多样性除功能多样性外,还包括结构多样性和遗传多样性等,这些指标也各具独特的生态学意义。因此,将来还需结合磷脂脂肪酸分析(phospholipid fatty acid analysis)、高通量测序技术(high-throughput sequencing technology)等多种手段,更为彻底地揭示樟树人工林对湘东丘陵区退化红壤性质及微生物群落影响,以为我国南方退化红壤生态系统的修复与重建提供更加丰富的理论依据。

4 结论

(1)湘东红壤丘陵区经长达 20 年以上的人工樟林恢复,与林间土壤相比,林下土壤的 pH 增加 0.95 个单位,全磷、全钾和含水量分别提高了 14.8%、16.8% 和 45.6%,容重降低 8.1%,均达到显著水平,但土壤全氮含量有所下降。总体来看,樟树人工林改善了退化红壤的理化性质。

(2)樟树人工林显著增加土壤微生物的 AWCD,林间土壤微生物对碳水化合物、氨基酸、羧酸、聚合物和酚酸类碳源的利用强度依次仅相当于林下土壤微生物的 27.6%、19.2%、23.4%、47.1% 和 3.5%,但二者对胺类碳源的利用强度没有明显差异。

(3)樟树人工林显著增加土壤微生物碳源利用的丰富度指数、多样性指数、优势度指数和均匀度指数。

(4)主成分分析表明,樟树人工林改变了土壤微生物的碳源利用模式,林下样点和林间样点随培养时间的延长分异日趋明显。

(5)相关性分析表明,人工樟林恢复后土壤理化性质的改善是造成微生物碳源利用能力和多样性指数提升的主要原因,而土壤 pH 是其中的首要驱动因素。

参考文献:

[1] 黄国勤,赵其国.红壤生态学[J].生态学报,2014,34(18):5173-5181.
[2] 梁音,张斌,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):22-27.

[3] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
[4] 张璐,文石林,蔡泽江,等.湘南红壤丘陵区不同植被类型下土壤肥力特征[J].生态学报,2014,34(14):3996-4005.
[5] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2014,28(2):79-84.
[6] 满秀玲,孟庆峰,刘文勇.鸡西矿区采石废弃地植被恢复技术[J].中国水土保持科学,2009,7(6):104-109.
[7] 张艳,赵廷宁,史常青,等.坡面植被恢复过程中植被与土壤特征评价[J].农业工程学报,2013,29(3):124-131.
[8] Wu Z Y, Haack S E, Lin W X, et al. Soil microbial community structure and metabolic activity of *Pinus liottii* plantations across different stand ages in a subtropical area[J]. PloS One, 2015, 10(8):1-11.
[9] Liu J, Liu M, Wu M, et al. Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(5):1853-1864.
[10] Gomez E, Garland J L. Effects of tillage and fertilization on physiological profiles of soil microbial communities[J]. Applied Soil Ecology, 2012, 61(5):327-332.
[11] Rincon-Florez V A, Dang Y P, Crawford M H, et al. Occasional tillage has no effect on soil microbial biomass, activity and composition in Vertisols under long-term no-till[J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52:191-202.
[12] 安韶山,李国辉,陈利顶.宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性[J].生态学报,2011,31(18):5225-5234.
[13] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
[14] 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等.不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J].生态学报,2014,34(9):2297-2307.
[15] 陈法霖,郑华,阳柏苏,等.中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响[J].生态学报,2011,31(11):3027-3035.
[16] 邓欢,张斌,王会利,等.侵蚀红壤区不同人工植被恢复下的土壤肥力比较[J].中国农业科技导报,2007,9(3):79-85.
[17] Yin R, Deng H, Wang H L, et al. Vegetation type affects soil enzyme activities and microbial functional diversity following re-vegetation of a severely eroded red soil in subtropical China[J]. Catena, 2014, 115(3):96-103.
[18] Salles J F, Veen J A V, Elsas J D V. Multivariate analyses of Burkholderia species in soil: Effect of crop and land use history[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, 70(7):4012-4020.
[19] 孔滨,杨秀娟. Biolog 生态板的应用原理及碳源构成[J].绿色科技,2011(7):231-234.

- [7] 张晓晓,殷小琳,李红丽,等. NaCl 胁迫对不同白榆品系生物量及光合作用的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7258-7265.
- [8] 慕德宇. 离体培养条件下 12 个白榆优良无性系氯化钠盐分抗性筛选的研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2013, 48(3): 19-23.
- [9] 刘炳响,王志刚,杨敏生,等. 模拟盐胁迫对白榆种子发芽、出苗及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 39-46.
- [10] 刘炳响,王志刚,梁海永,等. 盐胁迫对不同生境白榆生理特性与耐盐性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1481-1489.
- [11] 苏丹,殷小琳,董智,等. 白榆无性系生长特性及离子分布对 NaCl 胁迫的响应[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(5): 48-57.
- [12] Batkhuu N, Enkhchimeg T, Jamsran T. Salt tolerance of *Ulmus pumila* L. seedlings from geographically different seed sources[C]// XXIV IUFRO World Congress Sustaining Forests, Sustaining People: The Role of Research. 2014.
- [13] Mu D, Zwiazek J J, Li Z, et al. Genotypic variation in salt tolerance of *Ulmus pumila*, plants obtained by shoot micropropagation[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(8): 1-16.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 12-21.
- [15] 郑青松,王仁雷,刘友良. 钙对盐胁迫下棉苗离子吸收分配的影响[J]. 植物生理学报, 2001, 27(4): 325-330.
- [16] 孙涛. 小麦 CIPK 基因家族鉴定与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [17] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. [J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59(1): 651-681.
- [18] 刘正祥,张华新,杨秀艳,等. NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长和阳离子吸收、运输与分配特性[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 326-336.
- [19] 杨秀艳,张华新,张丽,等. NaCl 胁迫对唐古特白刺幼苗生长及离子吸收、运输与分配的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(9): 165-171.
- [20] 王磊,隆小华,孟宪法,等. 水杨酸对 NaCl 胁迫下菊芋幼苗光合作用及离子吸收的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1901-1907.
- [21] Kopittke P M. Interactions between Ca, Mg, Na and K: Alleviation of toxicity in saline solutions[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1/2): 353-362.
- [22] 陆嘉惠,吕新,梁永超,等. 新疆张果甘草幼苗耐盐性及对 NaCl 胁迫的离子响应[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 839-850.
- [23] 鲁彦君. 两种非泌盐红树离子平衡调控机理与耐盐性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [24] Zhang J L, Flowers T J, Wang S M. Differentiation of low-affinity Na⁺, uptake pathways and kinetics of the effects of K⁺, on Na⁺, uptake in the halophyte *Suaeda maritima*[J]. Plant and Soil, 2013, 368(1/2): 629-640.
- [25] 宁建凤,郑青松,杨少海,等. 高盐胁迫对罗布麻生长及离子平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 325-330.
- [26] Grattan S R, Grieve C M. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments[M]. New York: Pessaraki Med. Handbook of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker, 1999: 203-229.

(上接第 339 页)

- [20] 杜毅飞,方凯凯,王志康,等. 生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4260-4267.
- [21] 戴雅婷,侯向阳,闫志坚,等. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物群落功能多样性研究[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 56-65.
- [22] Govaerts B, Mezzalama M, Unno Y, et al. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 37(1/2): 18-30.
- [23] 郑华,欧阳志云,赵同谦,等. 不同森林恢复类型对土壤生物学特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(1): 36-43.
- [24] 朱平,陈仁升,宋耀选,等. 祁连山不同植被类型土壤微生物群落多样性差异[J]. 草业学报, 2015, 24(6): 75-84.
- [25] 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: 511-522.
- [26] 韩冬雪,王宁,王楠楠,等. 不同海拔红松林土壤微生物功能多样性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3649-3656.
- [27] Lennon J T, Jones S E. Microbial seed banks: The ecological and evolutionary implications of dormancy[J]. Nature Reviews Microbiology, 2011, 9(2): 119-130.
- [28] 唐宏亮,郭秋换,张春潮,等. 磷供应对玉米根际微生物碳源利用和功能多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1312-1319.