

网络出版时间:2013-11-21 17:28
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20131121.1728.020.html>

亚热带红壤丘陵区 5 种人工林对土壤性质的影响

陈 璟,杨 宁

(湖南环境生物职业技术学院 园林学院,湖南 衡阳 421005)

[摘 要] **【目的】**探讨亚热带红壤丘陵区 5 种不同人工林对土壤性质的影响。**【方法】**以亚热带红壤丘陵区的纯杉木林(*Cunninghamia lanceolata*, CL)、杉木马尾松混交林(*Cunninghamia lanceolata*-*Pinus massoniana*, CLPM)、杉木樟树混交林(*Cunninghamia lanceolata*-*Cinnamomum camphora*, CLCC)、天然次生林(Natural secondary forest, NF)与纯马尾松林(*Pinus massoniana*, PM)作为研究对象,通过调查取样与实验分析相结合的方法,分析 5 种人工林地中不同土层(0~20、20~40 和 40~60 cm)土壤的理化性质、酶活性与微生物学性质的变化。**【结果】**(1)有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效钾(AK)、碱解氮(AN)含量在 NF 土壤中最,CLCC 土壤次之,CLPM、CL 和 PM 土壤较低;0~20 cm 土层 SOC、TN、AN、TP、TK 和 AK 含量显著高于 20~40 和 40~60 cm 土层,20~40 和 40~60 cm 土层间的土壤养分含量差异不显著;(2)脲酶(URE)、蔗糖酶(INV)和多酚氧化酶(PPO)活性以 NF 土壤最高,CLPM 和 CLCC 土壤次之,CL 和 PM 土壤最低;0~20 cm 土层 URE、INV 和 PPO 活性显著高于 20~40 和 40~60 cm 土层,20~40 和 40~60 cm 土层间土壤酶活性差异不显著;(3)NF 和 CLCC 土壤的微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)、土壤基础呼吸(SBR)、土壤有机碳(SOC)含量和土壤微生物对基质的利用效率高于其他树种的林下土壤。**【结论】**CLCC 较 CL、PM 和 CLPM 可明显改善土壤性质,是该地区理想的造林模式。

[关键词] 亚热带红壤丘陵区;人工林;土壤理化性质;土壤酶活性;基础呼吸;微生物生物量
[中图分类号] S714.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2013)12-0167-07

Effects of five plantations on soil properties in subtropical red soil hilly region

CHEN Jing, YANG Ning

(College of Landscape Architecture, Hunan Environmental-Biological Polytechnic College, Hengyang, Hunan 421005, China)

Abstract: **【Objective】** The purpose of this stud was to study effects of 5 plantations on soil properties in subtropical red soil hilly region. **【Method】** Taking five plantations lands (*Cunninghamia lanceolata* (CL), *C. lanceolata*-*Pinus massoniana* (CLPM), *C. lanceolata*-*C. camphora*(CLCC), natural secondary forest(NF) and *P. massoniana* (PM)) in subtropical red soil hilly region as test objects, soil samples from depths of 0—20, 20—40 and 40—60 cm were collected to study the effects of plantations on soil physio-chemical properties, enzyme activities and microbial properties through the combination of sample investigation and experimental analysis. **【Results】** (1) Contents of soil organic C(SOC), total N(TN), available N (AN), total P(TP), total K (TK) and available K (AK) in soil of NF were the highest, followed by CLCC, while those of CLPM, CL and PM were very low. Contents of SOC, TN, AN, TP, TK and AK at soil layer of 0—20 cm were higher than those at the soil layers of 20—40 and 40—60 cm ($P<0.05$). (2) Urease

(URE), invertase(INV) and polyphenol oxidase(PPO) activities of NF were the highest followed CLPM and CLCC, while those of CL and PM were the lowest. URE, INV and PPO activities at the soil layer of 0–20 cm were higher than those at the soil layer of 20–40 and 40–60 cm ($P < 0.05$). (3) Microbial biomass carbon(MBC), microbial biomass nitrogen(MBN), soil basal respiration(SBR), soil organic carbon(SOC), ratio of soil microbial carbon to organic carbon(MBC/SOC) and microbial efficiency in NF and CLCC were higher than other plantations. 【Conclusion】 CLCC significantly improved soil properties compared to CL, PM and CLPM and was ideal for this area.

Key words: subtropical hilly red soil region; plantation; soil physio-chemical properties; soil enzyme activity; basal respiration; microbial biomass

土壤酶是土壤中非常活跃的物质, 土壤中的一切生化反应与代谢活动都是在酶的参与下完成的; 土壤微生物生物量即活体的生物总量, 在生态系统物质循环和能量流动中起着重要的作用, 它既是土壤有机质和土壤养分转换和循环的动力, 又可作为土壤有效养分的储备库^[1], 土壤呼吸速率反映了有机质代谢强度与土壤微生物活性的高低^[2-3]。土壤微生物生物量与酶活性关系密切, 对环境响应敏感^[4-6]。土壤酶、微生物生物量、土壤呼吸在土壤质量表征中具有重要的作用^[7-9]。因此, 越来越多的学者采用土壤酶活性及微生物学性质指标来研究植被生长或物种演替对土壤的影响^[10-11]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)与马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方造林中广泛应用的树种, 在我国森林资源中占据着十分重要的地位。由于种种原因, 大面积经营杉木或马尾松纯木会造成地力衰退、生产力下降, 这严重地阻碍了杉木与马尾松人工林的持续生产与发展。国内外许多研究人员从生态系统养分循环、生物生产力、生态经济效益等角度对混交林进行了一系列的研究, 取得了很多积极的成果^[12-14]。虽然不同树种的混交可缓解单一树种长期种植对土壤的危害, 但这种作用取决于树种的组成^[15]。樟树(*Cinnamomum camphora*)是我国亚热带代表性常绿阔叶树种, 有报道指出樟树可在一定程度上提高土壤微生物活性^[16]。本试验针对亚热带红壤丘陵区, 研究 5 种不同人工林对土壤理化性质、酶活性及微生物学性质的影响, 旨在为不同林分管理及生态恢复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于湖南省长沙市南郊的天际岭国家森林公园(113°02′~01′E, 28°06′~07′N), 其地层主要

是第四纪更新世的冲积性网纹红土和砂砾, 属典型的红壤丘陵区, 地形以岗地为主; 海拔 46~116 m, 坡度 5°~25°, 属典型的亚热带湿润季风气候; 雨量充沛, 年平均降雨量 1 422 mm, 主要集中于 4~6 月; 年平均气温 17.2 °C, 1 月最冷(平均气温 4.7 °C, 极端最低温度 -11.3 °C), 7 月最热(平均气温 29.4 °C, 极端最高气温 40.6 °C); 无霜期为 270~300 d, 日照时数平均 1 677 h。园内小生境众多, 植物种类达到 2 200 余种, 植被以人工林为主。

1.2 试验方法

于 2010 年 3 月上旬, 选取位于阳坡且环境特征基本一致的纯杉木林(*C. lanceolata*, CL)、杉木马尾松混交林(*C. lanceolata*-*P. massoniana*, CLPM)、杉木樟树混交林(*C. lanceolata*-*C. camphora*, CLCC)、天然次生林(Natural secondary forest, NF)与纯马尾松林(*P. massoniana*, PM)等 5 种人工林设置试验处理, 各林型样地环境及林分特征如表 1 所示, 其中天然次生林为对照, 主要由檫木(*Sassafras tzumum*)、山矾(*Symplocas caudate*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)和马尾松组成。研究样地在人工林栽培前均为荒草地, 无农业措施等人为扰动。人工林下植被稀疏, 主要为肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)、淡竹叶(*Lophanthium gracile*)和五节芒(*Miscanthus floridulus*)。各林分处理分别设 3 个面积大于 1 hm² 的独立林分样地作为重复, 且在各重复样地内随机设 3 个 10 m×10 m 的样方(样方间距>10 m), 在每个样方内采取 5 点混合取样法分别取 0~20, 20~40 和 40~60 cm 土层土样, 去掉土壤中可见植物根系和残体, 将土样分为 2 部分: 一部分新鲜土样过孔径<2 mm 筛后置于 4 °C 冰箱中(保存时间不超过 4 d), 供测定生物学性质用; 另一部分土样风干后过筛, 供测定土壤化学性质用。

表 1 不同人工林地的林分特征

Table 1 Characteristics of different plantation lands

人工林 Plantation	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	林龄/年 Forest age	林分密度/(株·hm ⁻²) Forest density
纯杉木林 CL	10~15	N25°W~N35°W	15	1 600~2 000
杉木马尾松混交林 CLPM	10~15	N25°W~N35°W	14	1 600~2 000
杉木樟树混交林 CLCC	10~15	N25°W~N35°W	14	1 600~2 000
天然次生林 NF	10~15	N25°W~N35°W	>50	1 600~2 000
纯马尾松林 PM	10~15	N25°W~N35°W	15	1 600~2 000

1.3 测定项目及方法

土壤有机碳(Soil organic C,SOC)含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,全氮(Total N,TN)含量采用半微量凯氏法测定,全磷(Total P,TP)含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定,全钾(Total K,TK)含量采用 NaOH 熔融-原子吸收法测定,碱解氮(Available N,AN)含量采用扩散吸收法测定,速效钾(Available K,AK)含量采用 NH₄Ac 浸提-原子吸收法测定,pH 值采用电极电位法测定^[8,17-19]。求土壤碳/氮比(C/N),即 SOC(因变量)与 TN(自变量)进行回归分析所得方程的斜率。土壤基础呼吸(Soil base respiration,SBR)参考文献[20]的方法测定,通常采用土壤中氧气的吸收量或二氧化碳的释放量表示^[20]。脲酶(Urease,URE)活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定,蔗糖酶(Invertase,INV)活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,多酚氧化酶(Polyphenol oxidase,PPO)活性采用邻苯三酚比色法测定^[21]。土壤微生物量碳(Microbial biomass carbon,MBC)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定,转换系数 K 采用 0.45^[22];土壤微生物量氮(Microbial biomass nitrogen,MBN)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取-氮自动分析仪法测定,转换系数 K 采用 0.45^[23];代谢熵(*q*CO₂)按土壤基础呼吸 24 h 释放 CO₂ 量与微生物生物量碳的比值计。

1.4 数据分析

数据均采用“平均值±标准差”表示。采用 SPSS 13.0 软件进行数据处理与统计分析。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据间的差异,用 Pearson 分析法进行指标间的简单相关分析。

2 结果与分析

2.1 亚热带红壤丘陵区不同人工林地土壤理化性质的变化

在天然次生林、杉木樟树混交林中,凋落物输入量比杉木马尾松混交林、纯杉木林与纯马尾松林大,而杉木、马尾松等针叶林凋落物纤维素与半纤维素

含量较高,矿物质以及其他元素含量较低,凋落物难以分解,而树木生长又需要养分,因此杉木马尾松混交林、纯杉木林和纯马尾松林容易造成土壤退化;而在针阔混交林中,凋落物的多样性增加,加速了 SOC 的分解以及其他养分的矿化与积累,有利于土壤肥力的提高^[24-25]。

表 2 显示,在 0~20,20~40 和 40~60 cm 各土层中,天然次生林的 SOC、TN、AN、TP 和 TK 的总体含量最高,杉木樟树混交林的 AK 含量较高,杉木马尾松混交林、纯杉木林和纯马尾松林的土壤养分含量与天然次生林和杉木樟树混交林相比总体较低。在 5 种人工林地中,0~20 cm 土层的 SOC、TN、AN、TP、TK 和 AK 含量总体高于 20~40 和 40~60 cm 土层,而 20~40 cm 与 40~60 cm 土层的 SOC、TN、AN、TP、TK、AK 含量总体差异不明显。5 种人工林中,在 0~20 cm 土层,杉木樟树混交林的 pH 值最高;而在 20~40 和 40~60 cm 土层,天然次生林和杉木樟树混交林的 pH 值均明显高于杉木马尾松混交林、纯杉木林和纯马尾松林。0~20 cm 土层的 pH 值均明显低于 20~40 和 40~60 cm 土层。

综合上述结果可知,相对于纯杉木林、纯马尾松林和杉木马尾松混交林,天然次生林、杉木樟树混交林有利于加速 SOC 和其他养分的矿化,提高土壤中 SOC、TN、AN、TP、TK 和 AK 的含量,改善土壤理化性质,提高土壤肥力。

2.2 亚热带红壤丘陵区不同人工林地土壤酶活性的变化

土壤酶活性主要源于土壤微生物、植物根系与动植物残体的分解等^[26],其中 URE 可促进氮素转化为可供植物利用的有效态养分,提高氮素利用效率,加速土壤的氮素循环;INV 活性反映了 SOC 积累与分解转化的规律,与 CO₂ 释放有密切的关系,是表征土壤 C 素循环和土壤生化活性的重要酶类;PPO 参与土壤有机组分中芳香族化合物的转化作用,是腐殖化的一种媒介,土壤中的酚类物质在多酚氧化酶的作用下生成醌,醌与氨基酸等通过一系列

生物化学过程缩合成最初的胡敏素酸分子^[27]。

表 2 亚热带红壤丘陵区不同人工林地土壤的理化性质

Table 2 Soil physoco-chemical properties of different plantation lands in subtropical red soil hilly region								
人工林 Plantation	土层深度/ cm Depth	有机碳/ (g·kg ⁻¹) SOC	全氮/ (g·kg ⁻¹) TN	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹) AN	全磷/ (mg·kg ⁻¹) TP	全钾/ (g·kg ⁻¹) TK	速效钾/ (mg·kg ⁻¹) AK	pH
纯杉 木林 CL	0~20	2.90±0.27 Aa	0.23±0.01 Aa	26.66±1.12 Aa	83.00±1.98 Aa	7.54±0.13 Ba	21.43±0.66 ABa	4.59±0.04 Aa
	20~40	1.32±0.03 Ab	0.17±0.01 Ab	14.98±0.55 Ab	78.98±3.12 Aa	8.14±0.04 Ba	15.99±0.87 ABb	4.62±0.03 Ba
	40~60	1.24±0.05 Ab	0.15±0.00 Ab	12.87±0.76 Ab	76.98±2.99 Aa	8.22±0.08 Ba	14.87±0.86 ABb	4.65±0.03 Ca
杉木马尾 松混交林 CLPM	0~20	4.00±0.07 ABa	0.26±0.01 Aa	24.54±0.88 Aa	113.05±3.54 ABa	4.82±0.55 ABa	13.56±0.18 Aa	4.34±0.01 Ab
	20~40	2.29±0.23 ABb	0.20±0.01 Aab	11.87±0.69 Ab	100.00±1.65 Aa	4.83±0.00 ABa	8.40±0.76 Ab	4.77±0.02 Bb
	40~60	2.31±0.19 ABb	0.18±0.01 Ab	10.00±0.55 Ab	98.45±1.76 ABa	4.95±0.65 Aa	7.98±0.67 Ab	4.79±0.01 Cb
杉木樟树 混交林 CLCC	0~20	3.21±0.11 Aa	0.30±0.01 Aa	37.98±1.78 ABa	163.09±4.76 Ba	5.64±0.09 ABa	75.12±2.76 Ba	4.85±0.02 Ac
	20~40	1.54±0.09 Ab	0.17±0.01 Ab	27.87±1.09 ABab	87.98±2.65 Ab	5.98±0.34 ABa	53.87±2.98 Bab	4.86±0.01 Bc
	40~60	1.34±0.12 Ab	0.14±0.01 Ab	20.12±1.00 ABb	76.98±2.00 Ab	6.00±0.54 ABa	45.98±3.87 Bb	5.00±0.03 Cc
天然次 生林 NF	0~20	6.77±0.99 Ba	0.55±0.03 Ba	57.98±2.99 Ba	126.43±2.88 ABa	5.87±0.34 ABa	32.23±1.87 ABa	4.36±0.01 Aa
	20~40	3.43±0.45 Bb	0.43±0.05 Bb	41.00±2.87 Bb	147.44±4.76 Ba	9.43±0.34 Bb	21.32±2.76 ABab	4.82±0.01 Ba
	40~60	3.00±0.34 Bb	0.38±0.04 Bb	37.98±1.99 Bb	150.98±3.98 Ba	10.09±0.76 Bb	18.87±0.45 ABb	4.98±0.02 Ca
纯马 尾松林 PM	0~20	2.78±0.14 Aa	0.24±0.01 Aa	28.88±3.98 Aa	85.99±5.45 Aa	3.17±0.34 Aa	25.31±1.65 ABa	4.52±0.02 Ab
	20~40	2.12±0.05 ABab	0.16±0.01 Ab	20.98±3.89 ABb	72.45±5.00 Aa	3.90±0.35 Aa	13.32±0.98 ABb	4.58±0.01 Bb
	40~60	1.98±0.04 ABb	0.14±0.00 Ab	19.09±2.14 ABb	70.13±4.04 Aa	4.00±0.40 Aa	12.54±0.76 ABb	4.63±0.02 Cb

注:不同人工林地同一土层深度数据后标不同大写字母表示差异显著($P<0.05$),相同人工林地不同土层深度数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表 3,5 同。

Note:Different uppercase letters indicate significant difference among different plantation lands ($P<0.05$),and different lowercase letters indicate significant difference among different soil depths ($P<0.05$). The same as table 3 and table 5.

由表 3 可知,天然次生林的 URE、INV、PPO 等 3 种土壤酶活性总体最高,杉木马尾松混交林、纯马尾松林和杉木樟树混交林的土壤酶活性次之,纯杉木林的土壤酶活性较低($P<0.05$)。在同一人工林地中,0~20 cm 土层酶活性明显高于 20~40 和 40~60 cm 土层,20~40 与 40~60 cm 土层间土壤酶活性差异不显著($P>0.05$)。

相关分析(表 4)表明,URE、INV、PPO 3 种酶

活性之间呈显著或极显著正相关。在 0~20 cm 土层,URE、INV、PPO 与 SOC、TN、AN 呈显著或极显著正相关;在 20~40 和 40~60 cm 土层,除 INV 与 SOC 相关性不显著外,INV、PPO 与 SOC、TN、AN、TP 呈显著或极显著正相关。

综合上述结果可得,杉木樟树混交林的土壤酶活性总体高于杉木马尾松混交林、纯杉木林与纯马尾松林,但低于天然次生林。

表 3 亚热带红壤丘陵区不同人工林地土壤的酶活性

Table 3 Soil enzyme activities of different plantation lands in subtropical red soil hilly region				
人工林 Plantation	土层深度/cm Depth	脲酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹) URE	蔗糖酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹) INV	多酚氧化酶/ (mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹) PPO
纯杉木林 CL	0~20	0.153±0.009 Aa	2.23±0.13 Aa	142.87±3.65 Aa
	20~40	0.108±0.006 Ab	1.37±0.04 Aab	92.12±6.88 Aab
	40~60	0.095±0.007 Ab	1.09±0.11 Ab	43.09±4.12 Ab
杉木马尾松混交林 CLPM	0~20	0.157±0.008 Aa	2.89±0.08 ABa	223.76±10.87 ABa
	20~40	0.120±0.008 Ab	1.42±0.05 Aab	145.65±12.09 ABab
	40~60	0.107±0.007 Ab	0.98±0.06 Ab	98.13±6.09 ABb
杉木樟树混交林 CLCC	0~20	0.230±0.008 ABa	3.04±0.11 Ba	209.98±11.87 ABa
	20~40	0.165±0.012 Bab	1.63±0.02 Bab	154.56±10.00 ABab
	40~60	0.121±0.011 Ab	0.98±0.03 Ab	66.93±6.34 Ab
天然次生林 NF	0~20	0.298±0.012 Ba	3.26±0.03 Ba	315.15±14.43 Ba
	20~40	0.164±0.013 Bab	1.73±0.06 Bb	254.09±4.12 Bab
	40~60	0.100±0.012 Ab	1.23±0.09 Ab	198.45±6.98 Bb
纯马尾松林 PM	0~20	0.188±0.014 Aa	2.85±0.12 ABa	243.00±14.31 ABa
	20~40	0.156±0.016 Bab	1.38±0.15 Ab	153.98±12.98 ABab
	40~60	0.121±0.018 Ab	1.01±0.12 Ab	67.09±9.56 Ab

表 4 亚热带红壤丘陵区土壤酶活性与土壤理化指标的相关性

Table 4 Correlation coefficients between soil enzyme activities and physio-chemical properties in subtropical red soil hilly region

土层深度/cm Depth	指标 Index	蔗糖酶 INV	多酚氧化酶 PPO	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	碱解氮 AN	pH
0~20	脲酶 URE	0.731**	0.730**	0.657**	0.874**	0.552*	0.923**	-0.024
	蔗糖酶 INV		0.754**	0.558*	0.569*	0.590*	0.612*	-0.198
	多酚氧化酶 PPO			0.734**	0.749**	0.306	0.700**	-0.412
20~40	脲酶 URE	0.574*	0.576*	0.298	0.334	0.289	0.675**	0.298
	蔗糖酶 INV		0.568*	0.367	0.578*	0.576*	0.817**	0.300
	多酚氧化酶 PPO			0.679**	0.800**	0.815**	0.806**	0.324
40~60	脲酶 URE	0.551*	0.565*	0.312	0.300	0.296	0.640**	0.312
	蔗糖酶 INV		0.525*	0.300	0.565*	0.534*	0.813**	0.313
	多酚氧化酶 PPO			0.612**	0.765**	0.834**	0.820**	0.316

注:“*”表示相关性显著($P<0.05$),“**”表示相关性极显著($P<0.01$)。表 6 同。

Note: * and ** indicate significant relation ($P<0.05$) and extremely significant relation ($P<0.01$), respectively. The same for table 6.

2.3 亚热带红壤丘陵区不同人工林土壤微生物学性质的变化

由表 5 可知,在 0~20、20~40 和 40~60 cm 3 个土层中,SBR、MBC 与 MBN 均表现为在天然次生林中最高,杉木马尾松混交林与杉木樟树混交林居中,纯杉木林与纯马尾松林较低。

MBC/SOC 可用来表示土壤质量的变化过程,预测 SOC 的长期变化,表征土壤的退化和恢复情况,其比养分和微生物的变化更稳定。MBC/SOC 值较高意味着 SOC 活度较高,与 SOC 含量相比,其与土壤质量关系更为密切^[28]。由表 5 可知,3 个土层的 MBC/SOC 以杉木樟树混交林较高,杉木马尾松混交林和纯马尾松林较低,且明显低于其他 2 种人工林。纯马尾松林、杉木马尾松混交林的 SOC 含量较低,而杉木樟树混交林较高,以 0~20 cm 土层

中表现尤为明显。

qCO_2 是表征土壤微生物生物活性的一个敏感指标,反映了土壤微生物对基质的利用效率,其值越低表示土壤微生物对基质的利用效率越高^[1,23,29-30]。由表 5 可知, qCO_2 在天然次生林、杉木马尾松林混交林和杉木樟树混交林中较低,而在纯杉木林和纯马尾松林较高。在 0~40 cm 土层中,天然次生林的 MBC/MBN 明显高于其他人工林;而在 40~60 cm 土层,纯杉木林的 MBC/SOC 明显高于其他人工林。在 0~20 cm 土层中,土壤 C/N 以杉木马尾松混交林最高,其次为纯杉木林、杉木樟树混交林、天然次生林,纯马尾松林最低;在 20~40 和 40~60 cm 土层中,天然次生林、纯杉木林与杉木樟树混交林土壤 C/N 较低,而杉木马尾松混交林与纯马尾松林土壤 C/N 均较高。

表 5 亚热带红壤丘陵区不同人工林地土壤的微生物学性质

Table 5 Soil microbial properties of different plantation lands in subtropical red soil hilly region

人工林 Plantation	土层 深度/cm Depth	基础呼吸/ ($mg \cdot kg^{-1}$) SBR	微生物量碳/ ($mg \cdot kg^{-1}$) MBC	微生物量氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$) MBN	微生物量碳/ 有机碳/% MBC/SOC	代谢熵 qCO_2	微生物量碳/ 微生物量氮 MBC/MBN	碳/氮 C/N
纯杉 木林 CL	0~20	26.77±0.88 Aa	27.11±0.55 Aa	3.82±0.33 Aa	0.99±0.10 Aa	0.99±0.04 Aa	7.10±0.37 ABa	12.83±1.65ABa
	20~40	19.75±0.33 ABab	15.12±0.45 Ab	1.88±0.02 Aab	1.19±0.05 Ba	1.31±0.05 Bab	8.04±0.09 Aa	8.45±0.33 Ab
	40~60	13.66±0.24 Ab	14.87±0.78 Ab	1.00±0.43 Ab	2.11±0.07 Bb	1.43±0.04 Bb	14.87±1.65 Bb	7.98±0.05 Ab
杉木马尾 松混交林 CLPM	0~20	32.87±0.66 Aa	34.87±1.87 Aa	4.88±0.13 ABa	0.87±0.01 Aa	0.96±0.04 Aa	7.15±0.53 ABa	15.79±0.78 Ba
	20~40	15.12±0.87 Ab	16.43±0.98 Ab	2.44±0.18 Aab	0.62±0.07 Ab	0.91±0.03 Aa	6.73±0.43 Aa	14.32±0.88 Ba
	40~60	13.23±0.54 Ab	14.34±0.56 Ab	1.98±0.21 Ab	0.60±0.09 Ab	0.90±0.02 Aa	7.24±0.55 ABa	13.21±1.00 Ba
杉木樟树 混交林 CLCC	0~20	38.09±1.33 ABa	45.76±0.78 ABa	5.43±0.15 ABa	1.56±0.05 Ba	0.84±0.02 Aa	8.43±0.23 ABa	10.27±0.33 ABa
	20~40	19.67±0.67 ABb	20.32±0.87 ABb	2.98±0.32 ABb	1.41±0.04 Ba	0.97±0.03 Aa	6.82±0.32 Aa	9.88±0.98 Aa
	40~60	15.23±0.55 Ab	18.99±1.90 ABb	2.32±0.21 ABb	1.32±0.03 ABa	1.00±0.04 ABa	8.19±0.21 ABa	8.67±0.87 Aa
天然 次生林 NF	0~20	61.45±1.34 Ba	78.54±1.18 Ba	7.43±0.32 Ba	1.28±0.13 Ba	0.81±0.02 Aa	10.57±0.26 Ba	12.40±11.09 ABa
	20~40	32.14±0.99 Bb	39.09±0.89 Bb	4.12±0.04 Bb	1.34±0.19 Ba	0.85±0.03 Aa	9.49±0.11 Aa	7.88±0.98 Ab
	40~60	29.09±0.88 Bb	31.34±1.23 Bb	3.87±0.08 Bb	1.35±0.20 ABa	0.87±0.03 Aa	8.10±0.09 ABa	6.99±0.89 Ab
纯马 尾松林 PM	0~20	25.32±0.51 Aa	24.65±1.53 Aa	4.13±0.33 Aa	0.88±0.03 Aa	1.06±0.04 Aa	5.97±0.55 Aa	8.65±0.31 Aa
	20~40	13.76±1.00 Ab	13.32±0.87 Ab	2.09±0.17 Ab	0.65±0.02 Aa	1.07±0.01 Ba	6.37±0.33 Aa	14.12±1.21 Bb
	40~60	12.87±0.93 Ab	11.23±0.56 Ab	1.98±0.21 Ab	0.61±0.02 Aa	1.09±0.02 ABa	5.67±0.67 Aa	15.23±0.76 Bb

由表 6 可知,MBC、MBN、SBR 与 SOC、TN、AN 总体呈显著或极显著正相关,说明 MBC、MBN

和 SBR 可反映微生物群落的活性,受凋落与植物根系分泌物的影响较大,对 SOC、TN 和 AN 的输入较敏感^[15,31-32]。

综上所述,相对于纯杉木林和纯马尾松林,天然次生林和杉木樟树混交林在某种程度上益于土壤微

生物群落的生长,使得土壤微生物对基质的利用效率较高,而纯杉木林、纯马尾松林土壤微生物对基质的利用效率较低。因此,天然次生林、杉木樟树混交林土壤微生物活性较高,而纯杉木林、纯马尾松林与杉木马尾松混交林土壤微生物活性较低。

表 6 亚热带红壤丘陵区土壤微生物学性质与土壤理化性质的相关性

Table 6 Correlation coefficients between microbial and physio-chemical properties in subtropical red soil hilly region

土层深度/cm Depth	项目 Item	微生物量碳 MBC	微生物量氮 MBN	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	碱解氮 AN	pH
0~20	土壤基础呼吸 SBR	0.990**	0.931**	0.809**	0.900**	0.498	0.901**	-0.278
	微生物量碳 MBC		0.953**	0.848**	0.901**	0.543*	0.912**	-0.234
	微生物量氮 MBN			0.843**	0.915**	0.547*	0.882**	-0.229
20~40	土壤基础呼吸 SBR	0.943**	0.883**	0.347	0.816**	0.828**	0.765**	0.456
	微生物量碳 MBC		0.943**	0.567*	0.896**	0.912**	0.854**	0.584*
	微生物量氮 MBN			0.543*	0.786**	0.886**	0.824**	0.745**
40~60	土壤基础呼吸 SBR	0.934**	0.875**	0.323	0.843**	0.805**	0.777**	0.423
	微生物量碳 MBC		0.942**	0.572*	0.888**	0.900**	0.845**	0.548*
	微生物量氮 MBN			0.555*	0.768**	0.845**	0.854**	0.754**

3 结 论

本试验研究了亚热带红壤丘陵区 5 种不同人工林地土壤的理化性质、酶活性和微生物学性质,可得以下结论。

1) 相对于纯杉木林、纯马尾松林和杉木马尾松混交林而言,天然次生林、杉木樟树混交林有利于加速 SOC 与其他土壤养分的矿化,提高土壤中的 SOC、TN、AN、TP、TK 和 AK 含量,改善土壤的理化性质,提高土壤肥力。

2) 在 5 种人工林地中,天然次生林的土壤酶活性总体最高,杉木马尾松混交林、纯马尾松林和杉木樟树混交林的土壤酶活性次之,纯杉木林的土壤酶活性最低;在同一人工林地中,0~20 cm 土层酶活性显著高于 20~40 和 40~60 cm 土层。

3) 相对于纯杉木林、纯马尾松林和杉木马尾松混交林而言,天然次生林和杉木樟树混交林土壤的微生物活性较强,其林下土壤微生物对基质的利用效率较高。

总之,较之纯杉木林、纯马尾松林和杉木马尾松混交林,杉木樟树混交林在短期(14~15 年)对土壤的理化性质、酶活性和微生物学性质具有明显的改善作用。因此,杉木樟树混交林可作为亚热带红壤丘陵区植被恢复的林分类型,纯杉木林、纯马尾松林与杉木马尾松混交林不宜推荐。

[参考文献]

[1] 杨满元,杨 宁,郭 锐,等. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中

土壤微生物数量特征 [J]. 生态环境学报,2013,22(2):229-232.

Yang M Y, Yang N, Guo R, et al. Numerical properties of soil microbial population in re-vegetation stages on sloping land with purple soils in Hengyang [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(2): 229-232. (in Chinese)

[2] 黄懿梅,安韶山,刘连杰,等. 黄土丘陵区土壤呼吸对草地植被恢复的响应及其影响因素 [J]. 中国生态农业学报,2009,17(5):862-869.

Huang Y M, An S S, Liu L J, et al. Soil basal respiration response to grass vegetation restoration and its' affecting factors in the Loess Hilly-Gully Region [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2009, 17(5): 862-869. (in Chinese)

[3] 杨 宁,邹冬生,李建国,等. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地主要植物群落自然恢复演替进程中种群生态位动态 [J]. 水土保持通报,2010,30(4):87-93.

Yang N, Zou D S, Li J G, et al. Niche dynamics of main plant communities in natural restoration succession process on sloping land with purple soils in Hengyang Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 87-93. (in Chinese)

[4] Gu Y, Wang P, Kong C H. Urease, invertase, dehydrogenase and polyphenoloxidase activities in paddy soil influenced by allelopathic rice variety [J]. European Journal of Soil Biology, 2009(5/6): 436-441.

[5] 杨 宁,邹冬生,李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植被恢复模式建设 [J]. 草业科学,2010,27(10):10-16.

Yang N, Zou D S, Li J G. The vegetation restoration mode construction in sloping-land with purple soils in Hengyang basin [J]. Pratacultural Science, 2010, 27(10): 10-16. (in Chinese)

[6] 杨 宁,彭晚霞,邹冬生,等. 贵州喀斯特土石山区水土保持生态经济型植被恢复模式 [J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(S1):474-477.

Yang N, Peng W X, Zou D S, et al. Eco-economic vegetation

restoration model of soil and water conservation in the Karst Mountainous Earth-rock areas in Guizhou [J]. China Population Resources and Environment, 2011, 21 (S1.): 474-477. (in Chinese)

[7] Zhang Y, Wu N, Zhou G, et al. Changes in enzyme activities of spruce(*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Applied Soil Ecology, 2005, 30(3): 215-225.

[8] 杨 宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析 [J]. 农业现代化研究, 2012, 33(6): 757-761.
Yang N, Zou D S, Yang M Y, et al. Analysis on soil physio-chemical characteristics in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. Research of Agricultural Modernization, 2012, 33(6): 757-761. (in Chinese)

[9] Weigand S, Auerswald K, Beck T. Microbial biomass in agricultural topsoils after 6 years of bare fallow [J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19(2): 129-134.

[10] Jin K, Sleutel S, Buchan D, et al. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 115-120

[11] 陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等. 贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局 [J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2158-2165.
Chen Z Y, Yang N, Yao X M, et al. Life history and spatial distribution of a *Taiwania flousiana* population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2158-2165. (in Chinese)

[12] 冯宗炜, 陈楚莹. 一种高生产力和生态协调的亚热带针阔混交林-杉木火力楠混交林的研究 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1988, 12(3): 165-180.
Feng Z F, Chen C Y. A coniferous broad-leaved mixed-forest with higher productivity and ecological harmony in subtropics-study on mixed forest of *Cunningharnia lanceolata* and *Michelia macclurei* [J]. Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica, 1988, 12(3): 165-180. (in Chinese)

[13] 杨 宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 贵州雷公山秃杉的种群结构和空间分布格局 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(10): 2100-2105.
Yang N, Zou D S, Yang M Y, et al. Structure and spatial distribution pattern of *Taiwania flousiana* population in Leigong Mountain, Guizhou [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2011, 31(10): 2100-2105. (in Chinese)

[14] Parrotta J A. Productivity, nutrient cycling, and succession in single and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico [J]. Forest Ecology and Management, 1999, 124: 45-77.

[15] Augusto L, Ranger J, Binkley D, et al. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility [J]. Annals of Forest Science, 2002, 59(3): 233-253.

[16] 陈 璟, 杨 宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物特性 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 739-742.
Chen J, Yang N. Soil microbial properties under different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 739-742. (in Chinese)

[17] 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 assay on properties of agro-chemistry [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)

[18] 杨 宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地土壤水分变化动态研究 [J]. 水土保持研究, 2009, 16(6): 16-21.
Yang N, Zou D S, Li J G. Study on dynamic of water content on the sloping-land with purple soils in Hengyang basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(6): 16-21. (in Chinese)

[19] 陈 璟, 杨 宁. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复过程中土壤水文效应 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 590-597.
Chen J, Yang N. Soil hydrological function at different vegetation restoration stages in purple soil slopelands in Hengyang [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2013, 21(5): 590-597. (in Chinese)

[20] 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: 12-13, 106-108, 146-195.
Lu R K. Analyse method of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000: 12-13, 106-108, 146-195. (in Chinese)

[21] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1983: 182-226.
Guan S Y. Soil enzymes and research methods [M]. Beijing: Agriculture Press, 1983: 182-226. (in Chinese)

[22] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.

[23] Sparling G P, Gupta V S, Zhu G Y. Release of ninhydrin-reactive compounds during fumigation of soil to estimate microbial C and N [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(12): 1803-1805.

[24] 杨 宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地自然恢复灌丛阶段主要种群空间分布格局 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 996-1001.
Yang N, Zou D S, Li J G. Spatial pattern of main populations of the natural recovery shrub stage community in sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 996-1001. (in Chinese)

[25] 杨 宁, 邹冬生, 李建国. 衡阳盆地紫色土丘陵坡地植物群落数量分类及物种多样性研究 [J]. 农业现代化研究, 2009, 30(5): 615-619.
Yang N, Zou D S, Li J G. Study on numerical classification and species diversity of plant community in a sloping-land with purple soils in Hengyang Basin [J]. Research of Agricultural Modernization, 2009, 30(5): 615-619. (in Chinese)