

DOI: 10.5846/stxb201607301560

朱丽琴, 黄荣珍, 段洪浪, 贾龙, 王赫, 黄诗华, 易志强, 张文锋. 红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响. 生态学报, 2017, 37(1): - .

Zhu L Q, Huang R Z, Duan H L, Jia L, Wang H, Huang S H, Yi Z Q, Zhang W F. Effects of artificially restored forests on soil organic carbon and active organic carbon in eroded red soil. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响

朱丽琴, 黄荣珍*, 段洪浪, 贾 龙, 王 赫, 黄诗华, 易志强, 张文锋

南昌工程学院, 江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室, 南昌 330099

摘要: 土壤有机碳尤其是活性有机碳可快速反映土壤肥力和土壤质量的恢复程度。研究了南方红壤侵蚀地 3 种典型人工恢复林(马尾松与阔叶复层林(*Pinus massoniana*-broadleaved multiple layer forest (PB))、木荷×马尾松混交林(*Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest (SP))、阔叶混交林(broad-leaved mixed forest (BF)))土壤(0—60 cm)总有机碳和不同活性有机碳的垂直分布特征及其差异。结果表明:不同恢复林分土壤总有机碳(SOC)含量和有机碳储量均表现为 PB>SP>BF,均随土层深度的增加而逐渐降低;土壤表层有机碳富集系数为 0.49—0.55,表明表层土壤具有较高的有机碳恢复水平和保持强度。不同林分土壤易氧化有机碳(ROC)、水溶性有机碳(DOC)和微生物量碳(MBC)含量变化范围为 0.92—9.17 g/kg, 535.89—800.46 mg/kg 和 27.24—261.31 mg/kg,且均随土层深度的增加而降低,土壤活性有机碳含量总体以 BF 较高。土壤活性有机碳分配比例以 ROC/SOC 最高,DOC/SOC 次之,MBC/SOC 最低,且随土层深度的增加,ROC/SOC 的值呈逐渐减低趋势,DOC/SOC 的值却呈逐渐升高趋势,MBC/SOC(微生物熵)则变化规律不明显;不同林分间土壤活性有机碳分配比例以 BF 最高,表明阔叶混交林更有利于活性碳的积累。因此,对于退化红壤地森林恢复初期,可适当密植和立体种植,以提高土壤碳储量和土壤肥力,并在马尾松等先锋树种林分中补植阔叶树种,以增加土壤活性有机碳含量,从而有利于退化生态系统土壤速效养分和土壤功能的快速恢复。

关键词: 人工恢复林;总有机碳;活性有机碳;红壤

Effects of artificially restored forests on soil organic carbon and active organic carbon in eroded red soil

ZHU Liqin, HUANG Rongzhen*, DUAN Honglang, JIA Long, WANG He, HUANG Shihua, YI Zhiqiang, ZHANG Wenfeng

Nanchang Institute of Technology/Jiangxi Key Laboratory of Degraded Ecosystem Restoration and Watershed Ecohydrology, Nanchang 330099, China

Abstract: Measuring soil organic carbon (SOC), especially active organic carbon, can be used to quickly evaluate the recovery of soil fertility and quality. Therefore, we performed field and laboratory experiments to investigate the vertical distribution of total and active organic carbon in different layers (0—60 cm) of eroded red soil in three typical artificially restored forests, i.e., *Pinus massoniana*-broadleaved multiple layer forest (PB), *Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest (SP), and broad-leaved mixed forest (BF). The SOC and organic carbon storage in the different stands decreased with increasing soil depth and were ranked as follows: PB > SP > BF. The accumulation coefficients of surface SOC ranged from 0.49 to 0.55, which indicated that the surface soil had a high capacity to recover and maintain organic carbon. Soil readily oxidized organic carbon (ROC), dissolved organic carbon (DOC), and microbial biomass carbon (MBC) were

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160179);江西省自然科学基金项目(20151BAB204033);江西省水利厅科技项目(KT201546);江西省高校“十二五”水土保持与荒漠化防治重点学科培育基金项目

收稿日期:2016-07-30; 修订日期:2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangrz@nit.edu.cn

calculated as 0.92—9.17 g/kg, 535.89—800.46 mg/kg, and 27.24—261.31 mg/kg, respectively, exhibiting reductions with the increasing soil depth. The content of active organic carbon was generally higher in the BF; and ROC constituted the largest proportion of active organic carbon (i.e., ROC/SOC), followed by DOC (i.e., DOC/SOC), whereas MBC accounted for the smallest proportion (i.e., MBC/SOC). As soil depth increased, ROC/SOC and DOC/SOC exhibited decreasing and increasing trends, respectively, whereas MBC/SOC (microorganism entropy) varied erratically. The allocation to ROC/SOC was higher in the BF than in the other two forest types, which suggested that broad-leaved mixed forest is prone to the accumulation of active organic carbon. Therefore, we could develop dense planting and stereoscopic planting techniques to use at early stages of forest restoration, in order to improve the carbon density and fertility of degraded red soil, and broad-leaved species could be planted into pioneer coniferous forests, such as those dominated by *Pinus massoniana*, in order to increase the ROC/SOC content and, therefore, facilitate the recovery of available nutrients and soil function.

Key Words: artificially restored forest; total organic carbon; active organic carbon; red soil

我国南方红壤丘陵区土地总面积为 118 万 km², 自然环境的脆弱性与长期人为破坏的叠加, 导致土壤侵蚀严重, 成为我国仅次于黄土高原的严重流失区域之一, 出现了“红色沙漠”、“光板地”、“白沙岗”等景观, 严重威胁着区域经济和社会的可持续发展。为了控制水土流失, 改善当地民众生存生活环境, 我国自 20 世纪 80 年代进行了以造林种草为主的大规模生态恢复工程, 并取得了卓越的成效。随之而起, 退化地森林恢复后生态系统功能尤其是土壤有机碳库变化的研究逐渐成为人们关注的热点。事实上, 森林植被恢复过程是与土壤环境相适应的过程^[1], 其主要表现在植物凋落物腐化后归还土壤、根系生长及土壤微生物活动等向土壤提供新的碳源, 而土壤有机碳含量的增加可以促进团聚体形成, 增加土壤孔隙, 改善土壤结构; 同时, 改变土壤胶体状况, 增强土壤吸附作用, 改善土壤持水性能和肥力状况, 促进生物多样性的形成。土壤环境在得到相应改善的同时, 反过来又促进了植被的生长。

长期以来, 衡量土壤肥力状况的主要指标除了氮、磷、钾等因素就是土壤有机质, 其中由人为因素或其它干扰所引起的土壤性质变化, 土壤有机质含量需要几年、几十年甚至上百年才能够表现出来, 而土壤活性有机碳作为土壤中最活跃、周转最快、对环境变化最敏感的有机碳组分, 周转期仅为 0.14—2.5 年, 比土壤有机质能够更快地作出响应^[2]。同时, 土壤活性有机碳组分与土壤全氮、全磷、全钾含量呈显著正相关, 能够在一定程度上指示土壤养分的供应水平和肥力的高低^[3]。因在土壤中能直接参与生物化学的转化过程, 快速地反映土壤质量变化, 其对土壤养分循环及其生物有效性等具有非常重要的作用。近年来, 国内外学者有关土壤活性有机碳的研究多集中在土地利用方式、土壤类型、林分结构等方面^[4-7], 而对于红壤侵蚀劣地森林恢复后土壤活性有机碳的研究甚少, 对于其变化机理和主要影响因素缺乏应有的了解。本文以南方红壤侵蚀地典型人工恢复林(马尾松与阔叶复层林、木荷×马尾松混交林和阔叶混交林)为研究对象, 选取了易氧化有机碳、水溶性有机碳和微生物量碳等三种主要活性有机碳指标, 研究其土壤总有机碳和活性有机碳的分布特征及差异, 探求有利于退化地活性有机碳快速恢复的植物种类或林分类型, 为南方红壤侵蚀区地力恢复、植物类型选择和优化配置实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验地设置

1.1.1 试验地概况

试验地设在中国科学院江西省千烟洲红壤丘陵综合开发试验站(简称千烟洲站), 位于泰和县灌溪镇(115°04'13"E, 26°44'48"N), 站区总面积为 204 hm², 属典型红壤丘陵地貌, 海拔高度在 100 m 左右, 相对高差在 20—50 m。土壤成土母质大多为红色砂岩、泥岩及砂砾岩等, 土壤类型主要为红壤。该区光能充足, 雨量

丰沛,四季分明,年均气温为 17.9℃,年均降水量为 1489 mm,年太阳辐射量为 4349 MJ/m²,年均日照为 1406 h,无霜期为 323 d,属典型亚热带湿润季风气候。千烟洲站的原生植被以中亚热带常绿阔叶林为主,由于人类长期开发和破坏,其原生植被遭到严重破坏,在建站初期已退化为灌草丛,且多处出现不同程度的水土流失,现土地利用类型以人工林为主,部分为农田。各试验地基本情况见表 1。

马尾松与阔叶复层林(*Pinus massoniana*-broadleaved multiple layer forest (PB)):主要乔木树种为马尾松(*Pinus massoniana*)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、三角槭(*Acer buergerianum*)、白栎(*Quercus fabri*)。林下植被主要有三叶赤楠(*Syzygium grijsii*)、乌饭树(*Vaccinium bracteatum*)、欒木(*Loropetalum Chinese*)、秤星树(*Llex asprella*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile Brongn*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、菰蔸(*Smilacis Chinae Rhizoma*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)等。

木荷×马尾松混交林(*Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest (SP)):主要乔木树种为木荷(*Schima superba*)和马尾松。林下植被主要有黄瑞木、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、白栎、欒木、含笑(*Michelia figo*)、六月雪(*Serissa japonica*)、淡竹叶、麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、海金沙(*Lygodium japonicum*)、金银花(*Lonicera Japonica*)、狗脊蕨、鳞毛蕨(*Dryopteris*)、铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris*)、乌蕨(*Stenoloma chusanum Ching*)、羊角藤(*Morinda umbellata Linn*)等。

阔叶混交林(broad-leaved mixed forest (BF)):主要乔木树种为樟树(*Cinnamomum camphora*)、枫香、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、厚朴(*Magnolia officinalis*)、青冈栎。林下植被主要有黄瑞木、石斑木(*Rhaphirolepis indica*)、香椿(*Toona sinensis*)、秤星树、三叶赤楠、深山含笑(*Michelia maudiae*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)、欒木、朱砂根(*Ardisia crenata*)、麦冬、淡竹叶、芒萁、狗脊蕨、鳞毛蕨、铁线蕨等。

表 1 试验地概况
Table 1 General information of the experimental sites

人工恢复林 artificially restored forest	土壤类型 Soil type	母质类型 Parent material types	栽植时间 Planting time/a	坡度 Slop/(°)	坡向 Aspect	保留密度 Reserved density/ (株/hm ²)	平均树	林下植被层生物量/ 凋落物现存量			乔木 郁闭度 Tree crown density/%	灌木层 盖度 Shrub coverage/%
							高/平均 胸径	Undergrowth biomass/ Litter standing crop/(kg/hm ²)				
							Average tree height/m/ Average DBH/cm	地上 生物量 Aboveground biomass	地下 生物量 Underground biomass	凋落物量 Litter amount		
马尾松与阔叶复层林 (<i>Pinus massoniana</i> - broadleaved multiple layer forest (PB))	红壤	红砂岩	1984	15	南向	1025 (马尾松) 850 (阔叶乔木)	18.9/18.0 (马尾松) 10.4/8.0 (阔叶乔木)	1107.77	1175.82	6588.34	75	60
木荷×马尾松混交林 (<i>Schima superba</i> - <i>Pinus massoniana</i> mixed forest (SP))	红壤	红砂岩	1984	15	西北向	1027 (木荷) 753 (马尾松)	20.2/15.6 (木荷) 22.0/19.8 (马尾松)	638.99	958.99	7819.79	85	15
阔叶混交林 (broad-leaved mixed forest (BF))	红壤	红砂岩	1984	20	北向	889	18.9/15.8	1372.01	1111.03	4517.59	90	45

1.1.2 试验地设置

在红壤退化地选取马尾松与阔叶复层林、木荷×马尾松混交林和阔叶混交林 3 种典型人工恢复林分,每种林分分别设立 3 块 20 m×20 m 固定标准地,共 9 块。

1.2 土壤采集与测定方法

1.2.1 供试土壤

2014 年 4 月,在每个标准地内按“S”型布设 5 个取样点,每个取样点挖土壤剖面,用自封袋按 0—10 cm、

10—20、20—40、40—60 cm 4 个层次取样,将 5 个取样点相同层次土壤样品混合均匀后,在室内捡去植物残体及根系等杂物,过 2 mm 筛,用四分法分成两份,其中一份鲜土保存在 4℃ 冰箱中,用于水溶性有机碳、微生物量碳的测定,另一份风干研磨过筛,用于总有机碳、易氧化有机碳的测定。

1.2.2 测定方法

土壤总有机碳(SOC)采用 $K_2Cr_2O_7$ 氧化—外加热法测定^[8]。土壤易氧化有机碳(ROC)采用 $KMnO_4$ 氧化比色法测定^[9]。土壤水溶性有机碳(DOC)的测定是根据 Chantigny^[10] 等方法,稍作修改:首先称取鲜土 10 g (过 2 mm 筛),按土水比 1:10 加入 100 ml 去离子水,封口后在 25℃ 恒温振荡器上以 200 r/min 振荡 30 min,然后用中速定量滤纸过滤,滤液以 4000 r/min 离心 10 min,取上清液用 0.45 μm 滤膜进行抽滤,最后用总有机碳/总氮分析仪(multi N/C 3100)测定滤液相应浓度。土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提法测定^[11],然后用总有机碳/总氮分析仪(multi N/C 3100)测定浸提液有机碳浓度。

1.3 土壤有机碳储量计算^[12]

$$SOC_s = \sum_{i=1}^n (C_i \times \rho_i \times T_i) \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中, SOC_s 为特定深度下的土壤有机碳储量(t/hm^2); C_i 为第 i 层的土壤有机碳含量(g/kg); ρ_i 为第 i 层的土壤容重(g/cm^3); T_i 为第 i 层的土壤厚度(cm); n 为土层数。

1.4 数据处理

试验数据为各重复实测值的平均值,数据采用 Microsoft Excel (2003) 进行统计、分析,用 SigmaPlot 10 进行制图,用 SPSS 19.0 进行方差分析,显著性水平设定为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 不同人工恢复林土壤总有机碳含量与储量垂直分布特征

土壤有机碳在土壤垂直剖面上的分布影响着土壤碳的动态,不同的恢复林分,其分布格局存在一定差异。由图 1 可以看出,土壤 SOC 含量表现为 $PB > SP > BF$; 在 0—10 cm 土层, PB 土壤 SOC 含量 (17.53 g/kg) 显著高于 BF (14.0 g/kg); 在 10—20 cm 土层, PB 土壤 SOC 含量 (11.11 g/kg) 分别是 SP 和 BF 的 1.36 和 1.58 倍,显著高于其他两种林分; 在 20—40 cm 土层,各恢复林分间土壤 SOC 含量差异显著,其值在 4.87—8.03 g/kg 之间; 在 40—60 cm 土层, PB、SP 土壤 SOC 含量与 BF 间均存在显著性差异,且 BF 土壤 SOC 含量最低,为 3.49 g/kg 。大多数研究显示针叶林的土壤有机碳含量一般要低于混交林或阔叶林^[13-14],然而本研究中以马尾松为优势树种的马尾松与阔叶复层林土壤有机碳含量却最高,主要原因可能是相对于 SP、PB 样地保留密度、灌木层盖度更高,其林下植被地上生物量和地下生物量分别是 SP 的 1.73 倍和 1.23 倍 (见表 1)。已有研究表明林分密度和植被覆盖度的不同会引起凋落物量的差异,从而对土壤有机质产生显著影响^[15-16],覃勇荣等^[17]研究也发现土壤有机质与植被覆盖度呈显著正相关; BF 和 PB 两者林下植被地上生物量和地下生物量数值相近,但 PB 样地保留密度却远大于 BF,是 BF 的 2.11 倍,且凋落物量是其 1.46 倍,凋落物是森林土壤有机质的主要来源之一,下渗的水分可将地上凋落物中可溶性物质带入地下,供植物根系吸收,加快凋落物的分解,直接促进了有机碳的增长^[15]。土壤有机碳含量从某种意义上反映了植物群落在时间上的演替和在空间上的分布,由于不同恢复林分间树种组成、地表植被、生物量的差异,随着恢复年限的延长,植物生产力、凋落物归还量以及土壤生物等不断发生改变,进而导致土壤有机碳含量存在明显差异。

各恢复林分 0—60 cm 土层土壤有机碳含量加权平均值在 6.20—9.22 g/kg 之间。PB、SP 和 BF 土壤 0—10、10—20、20—40 cm 和 40—60 cm 的 SOC 比值分别为 1:0.63:0.46:0.33、1:0.51:0.41:0.33 和 1:0.50:0.35:0.25,该比值可反映 SOC 的集中趋势,说明表层土壤聚集有机碳能力更强;随着土层深度的增加,土壤 SOC 含量逐渐降低,且 0—10 cm 土层的土壤 SOC 含量是 40—60 cm 土层的 3.01—4.02 倍,同时各恢复林分之间的差异也逐渐减小。土壤 SOC 含量随土层深度增加而降低,这与有机碳源在不同土层间的输入量有关,凋落物经微生物分解

转化后所形成的有机物质率先进入表层土壤,且从植物根系尤其是细根在土壤剖面的垂直分布上来看,同样以表层居多^[18],从而使得土壤表层的有机碳含量要明显高于下层土壤;而深层土壤有机碳主要取决于深根性植物的生长以及上层土壤有机碳向下迁移的状况,同时也受到微生物和生物扰动作用的影响。

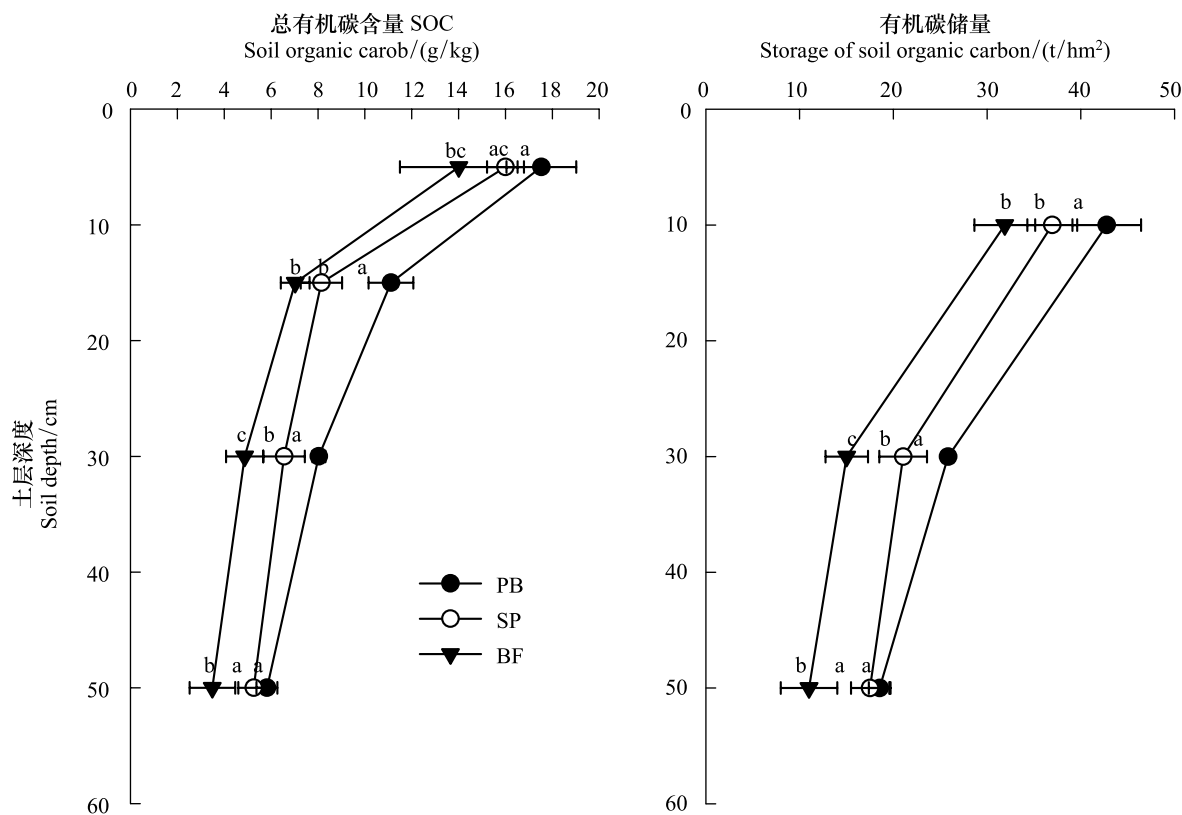


图1 不同人工恢复林土壤总有机碳和储量的分布

Fig.1 Distribution of SOC and storage in different artificially restored forests

PB:马尾松与阔叶复层林 *Pinus massoniana*-broadleaved multiple layer forest; SP:木荷×马尾松混交林 *Schima superba*-*Pinus massoniana* mixed forest; BF:阔叶混交林 broad-leaved mixed forest; 不同小写字母表示不同人工恢复林间差异显著 ($P < 0.05$)

土壤有机碳储量的大小在不同程度上反映了森林生态系统截留碳的能力。由图1可见,土壤有机碳储量的变化规律与土壤总有机碳相似,即不同恢复林分的土壤有机碳储量在同一土层中均表现为PB>SP>BF。在0—20 cm土层,PB土壤有机碳储量显著高于其他两种林分,比SP高15.72%,比BF高34.15%;在20—40 cm土层,各林分土壤有机碳储量差异显著,PB土壤有机碳储量比SP高22.76%,SP比BF高39.96%;在40—60 cm土层,PB、SP与BF存在显著性差异,分别比BF高68.42%和59.07%。

各恢复林分0—60 cm土层土壤有机碳储量在57.94—87.17 t/hm²之间,其中PB储量最高,为87.17 t/hm²,其次是SP,为75.54 t/hm²,BF最低,仅57.94 t/hm²。从各恢复林分在不同土层深度的土壤有机碳储量变化来看,自上而下呈明显下降趋势,且20—40 cm土层的土壤有机碳储量比0—20 cm土层下降了39.60%—52.84%,40—60 cm土层比20—40 cm土层下降了16.72%—28.17%,表明土壤有机碳储量在0—10 cm和10—20 cm土层间变化幅度最大,超高10 cm深度下降的幅度在逐渐减小,主要是因为土壤有机碳储量除了受到有机碳含量高低制约外,还与土壤容重有关,后者随土层深度增加而增大。分析土壤有机碳储量剖面分布可发现,0—40 cm土层的土壤有机碳储量占整个0—60 cm土层的76.80%—80.98%,说明不同恢复林分对0—40 cm土层的土壤有机碳储量有显著影响。某一层土壤的有机碳储量与整个土层的有机碳储量比值称为有机碳富集系数,该系数反映了土壤对有机碳保持的强度^[12]。PB、SP和BF土壤表层有机碳富集系数分别为0.49、0.49和0.55,表明阔叶混交林有利于表层有机碳的保持。

2.2 不同人工恢复林土壤活性有机碳垂直分布特征

土壤易氧化有机碳在有机碳组分中周转最快^[19],可在土壤全碳变化前反映土壤碳的微小变化,常作为土壤有机碳动态的敏感性指标^[20]。由图 2 可看出,BF 土壤 ROC 含量显著高于其他两种恢复林分,其 0—10、10—20、20—40 和 40—60 cm 土层的 ROC 含量分别为 9.17、4.32、2.74 g/kg 和 1.39 g/kg,是 PB 的 2.53、2.09、2.09 和 1.51 倍,是 SP 的 1.97、2.21、1.88 和 1.31 倍,而 PB 与 SP 差异不显著。随着土层深度的加深,各林分土壤 ROC 含量均呈逐渐降低的趋势,且不同土层间差异较明显,PB、SP 和 BF 表层(0—10 cm)土壤 ROC 含量分别是底层(40—60 cm)的 3.94、4.41 和 6.62 倍。

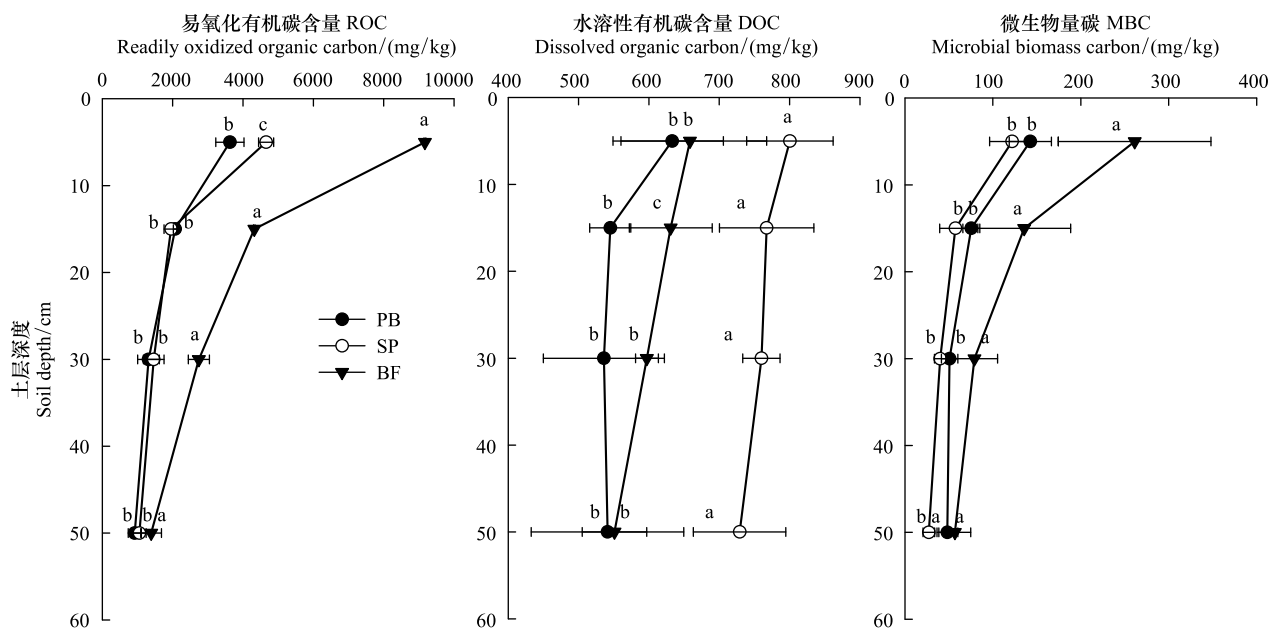


图 2 不同人工恢复林土壤活性有机碳的分布

Fig.2 Distribution of soil active organic carbon in different artificially restored forests

土壤水溶性有机碳是指土壤样品在室温及天然 pH 条件下能溶于水相且通过 0.45 μm 微孔滤膜的有机组分^[21],是微生物自身生长及生物分解过程中的主要物质和能量来源^[22],Yano 等^[23]研究发现在森林土壤中,土壤微生物可直接吸收和利用的 DOC 约有 12.1%—40.3%。在自然状态下,土壤 DOC 迁移性较强,因此能直接影响生态系统中土壤营养元素的有效性及流动性。由图 2 可看出,不同恢复林分同一土层土壤 DOC 含量大小顺序均表现为 SP>BF>PB,且 SP 土壤 DOC 含量显著高于其他两种林分,在不同土层(自上而下)分别是 PB 的 1.26、1.41、1.42 和 1.35 倍,是 BF 的 1.22、1.22、1.27 和 1.32 倍,而 PB 与 SP 差异不显著。随着土层深度的增加,各恢复林分土壤 DOC 含量大致呈下降的趋势,但各土层间下降幅度不大,PB、SP 和 BF 0—60 cm 土层土壤 DOC 含量变化范围分别为 535.89—632.96 mg/kg、728.94—800.46 mg/kg 和 550.93—658.18 mg/kg,其底层(40—60 cm)比表层(0—10 cm)DOC 含量分别下降了 14.52%、8.93%和 16.29%。这与靳世蕊^[24]研究的绥化地区森林土壤 DOC 平均含量为 297.6 mg/kg 相差较大,可能是由于该区处于亚热带湿润季风气候区,年均气温高、降雨量大,有机质分解和淋溶作用更强烈;同时,土壤团聚体易受到破坏,使其包裹的小分子物质发生解聚,也促进了水溶性有机碳的释放。

土壤微生物作为分解者,是土壤生态系统最为活跃、极为重要的部分,它对合成土壤腐殖质,增加土壤有机物质,改善土壤物理结构,促进土壤物质循环和能量转化具有重要作用。而土壤微生物量碳是土壤中细菌、真菌及微动物体内所含的有机碳,是反映土壤微生物活性强弱和有机质分解过程的重要生物学指标,可表征土壤质量的总体状况。由图 2 可看出,不同恢复林分同一土层土壤 MBC 含量大小顺序均表现为 BF>PB>SP,且 BF 土壤 MBC 含量显著高于其他两种林分,在 0—10、10—20、20—40 cm 和 40—60 cm 土层分别为 261.

31、135.72、79.02 mg/kg 和 56.74 mg/kg,是 PB 的 1.83、1.80、1.55 和 1.17 倍,是 SP 的 2.14、2.36、1.97 和 2.08 倍,而 PB 与 SP 差异不显著。本研究中 MBC 含量变化范围在 27.24—261.31 mg/kg 之间,与何友军等^[25]研究的湖南省不同林地土壤 MBC 含量相比,不到其 1/3;赵彤等^[26]研究的黄土丘陵区人工乔木林土壤 MBC 含量下限为 267.76 mg/kg,表明研究区红壤退化地各恢复林分土壤 MBC 含量偏低。该试验地在恢复前原生植被被完全破坏,水土流失严重,表土冲刷殆尽,导致有机营养物质大量流失,严重影响微生物的生存和繁殖,经过 30 年的恢复,虽然森林覆盖率有了大幅度提高,水土流失得到有效控制,土壤结构得到一定程度的改善,但与侵蚀退化前的原生植被(中亚热带常绿阔叶林)下的土壤相比,其土壤结构和功能仍然存在巨大的差距,要达到亚热带地带性森林的土壤功能还需要一个漫长的过程,需要后续进一步的管护。各恢复林分土壤 MBC 含量在土壤剖面中的变化趋势与 ROC 和 DOC 相同,即随土层深度的增加而降低,其中 10—20 cm 土层 MBC 含量比 0—10 cm 土层下降了 47.05%—52.88%,20—40 cm 土层比 10—20 cm 土层下降了 30.22%—41.78%,40—60 cm 土层比 20—40 cm 土层下降了 4.93%—32.05%,表明土壤 MBC 含量下降幅度也在逐渐减小。

土壤活性有机碳含量总体以 BF 较高、PB 较低,后者枯落物层中含有大量马尾松针叶,而针叶中因含较多树脂和蜡质等物质,分解相对缓慢,致使有机碳的补给缓慢;而前者枯落物层分解较快,新鲜有机物质的输入能够刺激细菌、真菌和多糖的产生,使土壤颗粒间的凝聚力增加^[27],从而为土壤微生物创造更有利的繁殖场所和条件,微生物的生长又促进根系的代谢和分泌,使有机碳的输入量增大,便于活性碳的积累。由研究结果也可看出,土壤活性有机碳组分含量与 SOC 含量在不同恢复林分间的分布规律并不一致,主要是因为活性有机碳含量除了依赖于 SOC 含量外,还取决于林地自身的微环境,包括凋落物的数量和质量、根系状况及土壤理化性质等。各恢复林分土壤 ROC、DOC 和 MBC 含量均随土层深度的增加而降低,且以 0—10 cm 土层含量最高,这与土壤总有机碳随土层深度的变化趋势相同,均存在表聚现象。在土壤上层,凋落物集中、植物细根分布较多,光照更加充足,通气状况更加理想,微环境更加适宜好氧微生物的生长,随着土层的加深,土壤容重增加,有机质含量下降,地下生物量也逐渐减小,致使上层土壤的活性有机碳含量大大高于下层土壤。

不同活性有机碳组分在土壤剖面中垂直递减的幅度不尽相同,PB、SP 和 BF 40—60 cm 土层 ROC 含量比 0—10 cm 土层分别下降了 74.64%、77.35% 和 84.89%,DOC 含量分别下降了 14.52%、8.93% 和 16.29%,MBC 含量分别下降了 66.09%、77.65% 和 78.29%,而三种林分土壤 SOC 含量在 40—60 cm 土层比 0—10 cm 土层分别下降了 66.81%、67.15% 和 75.10%,可见 ROC 和 MBC 两种活性有机碳含量下降幅度较 SOC 更大,DOC 含量在土壤垂直剖面上的变化幅度则较小,这与土壤 SOC 含量在土壤剖面的垂直变化有关。此外,DOC 含量除了取决于 SOC 含量,还受土壤黏粒吸附作用的影响,下层土壤黏粒含量较高,吸附作用较强,对有机碳具有更好的保护作用。

2.3 不同人工恢复林土壤活性有机碳占总有机碳的比例

土壤活性有机碳占总有机碳的比例比土壤活性有机碳含量更能反映土壤有机碳库的活性状况。从图 3 可看出,土壤 ROC 分配比例最高,变化范围为 15.81%—65.50%,且随着土层深度的增加,ROC/SOC 的值呈逐渐降低趋势;三种恢复林分的土壤 ROC 分配比例以 BF 最高,在 0—10、10—20、20—40 和 40—60 cm 土层分别为 65.50%、61.54%、56.26% 和 39.83%,是 SP 相应土层的 2.25、2.57、2.52 和 1.14 倍,是 PB 的 3.17、3.30、3.45 和 2.52 倍。

土壤 DOC 分配比例变化范围为 3.61%—15.79%,与 Yano 等^[23]研究的 12.1%—40.3%、吴萍萍^[28]等研究的 0.23%—0.39% 的结果不一致。在 Yano 等^[23]研究中,研究对象为天然再生混合阔叶林,经过长期定量施肥等管理,土壤性状得到很大改善,而本试验地恢复期间并未施肥、疏枝,在前期仅以砍伐灌木和杂草等方式进行抚育管理。在吴萍萍^[28]等研究中,土壤类型为白土,该区域白土表层土壤粘粒含量少,底层粘化现象明显,加之土壤养分含量较低,有机质匮乏,致使活性有机碳分配比例整体偏低。DOC/SOC 的值随土层深度的增加而升高,这可能是由于 DOC 随土壤水分的下渗而向下层土壤淋溶、迁移的缘故,同时也说明深层土壤有机碳较上层土壤受到更好的保护、稳定性更强。

土壤 MBC 分配比例也称微生物熵,可表征有机碳对微生物量碳的转化效率,是评价土壤有机碳动态和质量的有效指标。微生物熵越大,说明微生物对土壤碳库的利用效率越高,可更好的改善土壤的质量状况^[29]。供试土壤的微生物熵值较低,变化范围仅为 0.52%—1.93%,远小于肖烨^[29]等研究的 1.27%—5.94%,主要是该侵蚀地在前期恢复中,地上植物生长较快,使地上生物量迅速增加,且消耗了土壤中大量碳、氮等元素,造成了在恢复 30 年时微生物熵的值仍然偏低。事实上,微生物熵的变化也是植物群落结构与土壤性质综合影响的结果^[30],随着恢复年限的延长,其值将会保持在一个相对较稳定的水平。随着土层深度的增加,微生物熵在 SP 中呈降低趋势,在 PB 和 BF 中变化规律不明显,但总体呈下降趋势,这与王棣等^[31]研究的秦岭典型林分 MBC 含量在土壤剖面上的变化相似。从不同恢复林分来看,BF 微生物熵仍然大于其他两种林分,在不同土层分别是 SP 的 2.45—3.14 倍,是 PB 的 1.96—2.85 倍,表明阔叶混交林更有利于土壤微生物量碳的积累。

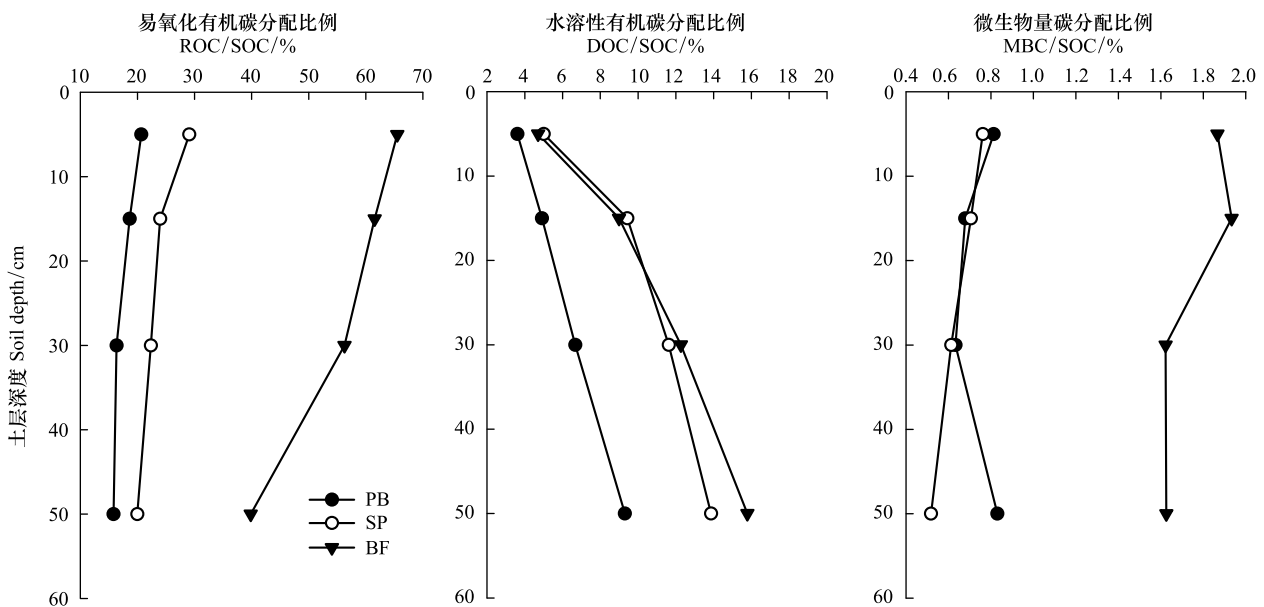


图 3 不同人工恢复林土壤活性有机碳组分占总有机碳的比例

Fig.3 Percentages of soil active organic carbon components to total organic carbon in different artificially restored forests

本研究中土壤不同活性有机碳组分分配比例以 ROC/SOC 最高,这与肖烨^[29]等研究的易氧化有机碳占总有机碳的比例大于水溶性碳和微生物量碳的结果一致。土壤 ROC/SOC 和 MBC/SOC 的值在 3 种恢复林分中均以 BF 最高,且 BF 土壤 ROC/SOC 的值在 0—10 cm 土层达到 65.5%,远远高于其他两种林分,说明阔叶混交林土壤有机碳的活性更强,被氧化和矿化的潜力也更大;而 BF 土壤 DOC/SOC 的值在 0—10 和 10—20 cm 土层略低于 SP,但在 20—40 和 40—60 cm 土层比后者增加的更快,表明阔叶混交林可以提高土壤有机碳的活性,更有利于活性碳的积累,从而为生物体供应更多的有效碳。

从不同土层土壤活性有机碳占总有机碳比例的变化趋势来看,与活性有机碳含量变化趋势并不一致,说明土壤活性有机碳分配比例对不同恢复林分并没有较大的敏感性,从而也证明了活性有机碳具有复杂多变性,其中的变化过程还需做更深入的研究。在森林恢复过程中,随着归还土壤的物质增多,土壤有机碳在增加,其活性成分和非活性成分均有不同程度的增加。但从土壤活性有机碳的分配比例来看,活性碳只是土壤总有机碳的一部分,用于满足植被自身生长外,还有相当一部分碳是以非活性的形态作为潜在物质储存在土壤中。由于土壤有机碳及其组分的影响因素众多,在一定条件下,土壤非活性有机碳与活性有机碳可能会相互转变。

3 结论

红壤侵蚀地经过 30 年的森林恢复,虽然林木的生长逐渐趋于成熟,但土壤有机碳水平依然较低、有机碳

的恢复主要集中在 0—20 cm 表层,显示出土壤养分恢复缓慢,要达到亚热带地带性森林的土壤肥力和功能还需要一个漫长的过程,需要加强后续的管理和维护。在不同的人工恢复林中,马尾松与阔叶复层林土壤碳储量更高,而阔叶混交林则更有利于土壤活性碳的积累,因此,对于红壤侵蚀退化地森林恢复初期,可适当密植和立体种植,以提高土壤碳储量和土地肥力,并在马尾松等先锋树种林分中补植阔叶树种,以增加土壤活性有机碳含量,从而有利于土壤速效养分和土壤功能的快速恢复。

参考文献 (References):

- [1] 赵世伟. 黄土高原子午岭植被恢复下土壤有机碳—结构—水分环境演变特征[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2012.
- [2] Laik R, Kumar K, Das D K, Chaturvedi O P. Labile soil organic matter pools in a calciorient after 18 years of afforestation by different plantations. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2): 71-78.
- [3] Scott E E, Rothstein D E. The dynamic exchange of dissolved organic matter percolating through six diverse soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69(1): 83-92.
- [4] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2011, 17(4): 1658-1670.
- [5] Billings S A. Soil organic matter dynamics and land use change at a grassland/forest ecotone. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(38): 2934-2943.
- [6] 张宏, 黄懿梅, 安韶山, 邢肖毅. 黄土高原森林带植被群落下土壤活性有机碳研究. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 65-70, 77-77.
- [7] 孙伟军, 方晰, 项文化, 张仕吉, 李胜蓝. 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征. *生态学报*, 2013, 33(24): 7765-7773.
- [8] 国家林业局. LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [9] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, 155-166(1): 399-402.
- [10] Chantigny M H, Curtin D, Beare M H, Greenfield L G. Influence of temperature on water-extractable organic matter and ammonium production in mineral soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(2): 517-524.
- [11] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法. 北京: 科学出版社, 2008.
- [12] 兰宇, Asshraf M I, 韩晓日, 杨劲峰, 吴正超, 王月, 李娜. 长期施肥对棕壤有机碳储量及固碳速率的影响. *环境科学学报*, 2016, 36(1): 264-270.
- [13] 赵山山. 温带森林土壤有机碳特征初步研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [14] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 李金海, 张国桢, 刘松. 北京山地针叶林与阔叶林土壤活性有机碳库的研究. *北京林业大学学报*, 2009, 31(5): 19-24.
- [15] 张海东, 于东升, 王宁, 史学正, 宋正姗, 顾成军. 植被恢复过程中侵蚀红壤有机质变化研究. *土壤*, 2013, 45(5): 856-861.
- [16] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1): 241-257.
- [17] 覃勇荣, 王燕, 刘旭辉, 徐金强. 马尾松对喀斯特石漠化地区土壤有机质的影响. *中国农学通报*, 2009, 25(5): 104-109.
- [18] 苏纪帅, 程积民, 高阳, 仇智虎, 曹怀清. 宁夏大罗山 4 种主要植被类型的细根生物量. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 626-632.
- [19] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, Yang X D, Sha L Q. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1923-1928.
- [20] 林晓东, 漆智平, 唐树梅, 孟磊. 海南人工林地、人工草地土壤易氧化有机碳和轻组碳含量初探. *热带作物学报*, 2012, 33(1): 171-177.
- [21] 李洁, 盛浩, 周萍, 张杨珠. 湘东丘陵区不同类型土壤活性碳组分的剖面分布与差异. *生态环境学报*, 2013, 22(11): 1780-1784.
- [22] 陈晓琳. 中亚热带红壤丘陵区土地利用方式和景观位置对活性有机碳的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [23] Yano Y, McDowell W H, Kinner N. Quantification of biodegradable dissolved organic carbon in soil solution with flow-through bioreactors. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(6): 1556-1564.
- [24] 靳世蕊. 利用方式对土壤水溶性有机物紫外光谱特性影响评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [25] 何友军, 王清奎, 汪思龙, 于小军. 杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2292-2296.
- [26] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 黄懿梅, 安韶山. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响. *生态学报*, 2013, 33(18): 5615-5622.
- [27] Erktan A, Cécillon L, Graf F, Roumet C, Legout C, Rey F. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant and Soil*, 2016, 398(1/2): 121-137.
- [28] 吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 白土活性有机碳组分对不同施肥措施的响应. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3474-3479.
- [29] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异. *生态学报*, 2015, 35(23): 7625-7633.
- [30] 杨宁, 邹冬升, 杨满元, 雷玉兰, 林仲桂, 付美云, 宋光桃. 紫色土丘陵坡地植被恢复过程中土壤微生物生物量碳、微生物熵的变化. *水土保持通报*, 2014, 34(5): 39-43.
- [31] 王棣, 耿增超, 余雕, 和文祥, 侯琳. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1569-1577.