

亚热带红壤区自然恢复草地转换为人工林后对土壤团聚体有机碳周转的影响

李燕燕^{1,2}, 刘亮英¹, 张志坚³, 吴春生^{1,2}, 刘苑秋², 樊后保²

(1. 江西农业大学园林与艺术学院, 南昌 330045;

2. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 南昌 330099; 3. 宜春市林业科学研究所, 江西 宜春 336000)

摘要: 选择江西泰和红壤退化区 25 年的自然恢复草地和 2 种恢复林地, 测定了土壤团聚体有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$, 探讨了森林恢复过程有机碳在团聚体中的分配和周转特征。结果表明: 3 种植被恢复模式土壤大团聚比例最高, 微团聚比例最低, 木荷林 0—20 cm 土层大团聚体比例平均值高于马尾松林和草地; 木荷林表层土各粒径团聚体有机碳含量均显著高于草地, 表层土粉黏粒 ($< 53 \mu\text{m}$) 有机碳含量最高, 其有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 最低; 草地表层土团聚体中有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值比全土降低幅度最大, 阔叶林中居中; 3 种植被恢复模式下土壤大团聚体总有机碳储量最大, 其次是粉黏粒, 最小的是微团聚体, 来自人工林的新碳主要分布在土壤表层大团聚体中; 马尾松林和木荷林表层土团聚体中有机碳的周转时间为 41~53 年, 低于 10—20 cm 土层, 2 种林分粉黏粒中有机碳的周转时间最短, 微团聚体中有机碳周转时间最长。研究表明以常绿阔叶树木荷直接进行植被恢复能够有效提升土壤地力, 不仅提高了全土中的有机碳含量, 也增加了团聚体中的有机碳含量; 而以先锋树种马尾松进行的植被恢复效果弱于木荷林, 应当采取一定营林措施促进马尾松林的恢复效果。

关键词: 植被恢复; 人工林; 有机碳周转; 红壤退化草地

中图分类号: S714.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0080-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.014

Effects of Conversion of Degraded Grassland into Plantations on Organic Carbon Turnover of Soil Aggregate in Subtropical Red Soil Area

LI Yanyan^{1,2}, LIU Liangying², ZHANG Zhijian³, WU Chunsheng^{1,2}, LIU Yuanqiu², FAN Houbao²

(1. College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045;

2. Institute of Ecology and Environmental Sciences, Nanchang Institute of Technology,

Nanchang 330099; 3. Yichun City Forestry Research Institute, Yichun, Jiangxi 336000)

Abstract: In this study, two stands and natural grassland were selected in Taihe Red soil degraded area of Jiangxi Province to research the distributions and turnover characteristics of organic carbon in soil aggregates. The results showed that the proportion of macroaggregates was the largest and that of microaggregates was the lowest. The content of organic carbon of all aggregates was higher in the Schima plantation than that of the grassland. The organic carbon in soil silt ($< 53 \mu\text{m}$) was the highest. The $\delta^{13}\text{C}$ value of soil aggregate in the surface soil had the highest decrease in grassland compared with the original soil, and moderate in broad-leaved forest. The turnover time of soil organic carbon in surface layer in coniferous forest was 41 ~ 53 years, lower than that in 10—20 cm soil layer. The turnover time of organic carbon in the clay particle of the two plantation was the shortest and that in the macroaggregate was the longest. The results also showed that vegetation restoration from evergreen broad-leaved Schima superba in the red soil region could effectively enhance soil fertility thus not only increasing the organic carbon content in the original soil, but also increasing the organic carbon content in the aggregate. However, the vegetation restoration effect of Pinus massoniana plantation was weaker than that of broad-leaved forest. So some measures should be taken to promote the restoration of coniferous forest.

Keywords: vegetation restoration; plantation; organic carbon turnover; red soil degraded grassland

收稿日期: 2018-08-14

资助项目: 江西省科技厅青年基金项目(20171BAB214007); 江西省教育厅科技项目(GJJ170977); 赣鄱英才“555”工程领军人才培养计划项目

第一作者: 李燕燕(1979—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事植被恢复与碳循环研究。E-mail: yyli79@126.com

通信作者: 刘苑秋(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事植被恢复与重建、土壤有机碳研究。E-mail: liuyq404@163.com

植被恢复(森林恢复)已成为退化生态系统改造的重要措施之一,一方面通过凋落物和根系的作用增加土壤养分和有机碳的输入,改善土壤微生物群落结构,另一方面通过改良土壤结构,提高土壤团聚体的稳定性,增强了土壤抗蚀性,防止土壤退化^[1]。随着植被恢复对土壤团聚体及其有机碳研究的深入,传统的试验方法受到了局限,稳定性同位素技术以其对碳元素迁移很好的指示作用成为研究有机碳变化过程的有效手段之一。在植被类型(C₃—C₄)转换以后,C₃和C₄植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的自然丰度差异为评估土壤有机质周转提供了基础,通过土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化可以计算来源于新碳和旧碳的比例,进而了解植被转换后土壤新碳和旧碳碳库状况^[2-3]。土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 与有机碳的输入和土壤结构有关联,因此有必要通过土壤团聚体有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 估算不同粒径碳库的周转时间,评估和预测土地利用变化对土壤有机碳库的变化,尤其需要了解特定环境下土壤有机碳的稳定性^[4-5]。因此了解红壤退化区植被覆盖变化后土壤团聚体有机碳的周转有助于深层次认识植被转换后土壤有机碳的输入和分解。

亚热带红壤区是我国侵蚀退化最严重的区域之一,植被恢复与重建是恢复退化红壤生态系统的重要措施^[6],也成为许多学者关注的对象。在红壤退化区的植被恢复过程中,多位学者对土壤有机碳进行了相对深入的研究,主要集中在碳库、碳吸存以及有机碳与团聚体关系方面^[7-9],而通过稳定性碳同位素方法进行土壤团聚体有机碳周转研究的报道较少。大多数地区把森林(C₃)砍伐后的土地用作种植农作物(以C₄为主),利用¹³C自然丰度进行的研究主要是C₃植被转变为C₄植被后土壤有机碳周转特征^[3]。本研究中的森林恢复过程伴随着C₃植被到C₄植被的反向转变,因此通过测定林地和草地土壤各粒径团聚体有机碳¹³C,获得土壤团聚体有机碳的周转特征,为合理评估亚热带红壤区植被恢复对土壤结构和功能的影响提供一定理论价值。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省中部泰和县石山乡的狗丝茅岭,北纬26°44′,东经115°04′,在吉泰盆地中部,由于

该区域为石山、螺溪、南溪三乡的接合部,附近村民长期在此进行过度放牧、樵采和挖蕈等活动,因此形成了以狗茅根(*Cynodon dactylon*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、丝茅(*Imperata koenigii*)、野古草(*Arunfinella anomala*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)为主的C₄植被,故当地俗称为“狗丝茅岭”。

该试验区属亚热带季风湿润性气候,年平均气温18.6℃,绝对最低气温-6℃,绝对最高气温41.5℃,1月平均气温6.0℃,7月平均气温29.7℃,≥10℃活动积温5921℃;全年无霜期始于2月中旬,终于11月下旬,共298d。雨量丰富,年降水量1726mm,4—6月约占全年降水量的44%,伏秋高温而干旱。

1991年江西农业大学与泰和县林业局合作选用先锋树种马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、湿地松(*Pinus elliottii* Englem)、常绿阔叶树木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ)、落叶阔叶树枫香(*Liquidambar fomesana* Hance)等树种(C₃植物)造林,以绿化荒山、重建森林、恢复退化的生态系统为目标,建立了植被恢复类型多样化的试验基地,为长期研究需要,人工重建森林之初随机留取几处草地作为对照。目前人工林植被覆盖度达0.9以上,林相结构完整,森林小气候已形成。

试验区属于典型的红壤低丘岗地,试验点内最高海拔为131.3m,最低海拔为74.7m,相对高差为56.6m,总体条件比较均匀一致,土壤成土母质是第四纪红黏土。人工重建森林前,由于长期水土流失严重,土壤表层几乎没有腐殖质,有机质含量极低,石砾含量较多,仅为6.5g/kg,pH为4.9。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2015年8月选择自然恢复草地和人工重建的2种森林类型为样地。森林类型选取了马尾松纯林和木荷纯林,以自然恢复草地作为对照区。每个类型选取3个样地,每个样地内设置20m×20m样方,共9个样方。样地基本情况见表1。

1.2.2 样品采集和测定 在草地和人工林样地内按“S”形布设采样点,每个样地5个采样点。挖剖面前先把土壤表面的植被和枯落物清除,采样深度分0—10,10—20cm2个土层,采集过程中保持原状土壤结构,分别装入不锈钢盒中,每个样点土样采集0.5kg。

表1 样地基本情况

立地类型	林分密度/(株·hm ⁻²)	胸径/cm	树高/m	郁闭度/%	植被 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	容重/(g·cm ⁻³)	pH
对照草地	0				-16.07	1.50	4.8
马尾松林	2333	11.46	8.56	0.82	-31.09	1.37	4.6
木荷林	2175	10.77	8.11	0.92	-30.50	1.40	4.6

在实验室内将原状土沿自然结构轻轻剥开,将原

状土剥成直径为>8mm的小土块,剔除根系和小石

块后平摊在通风透气处,自然风干。采用湿分法进行团聚体的分离:100 g 风干土放在套筛(从上到下依次为 2 000,250,53 μm)最上层,然后套筛放入已注水的团聚体分析仪中,浸泡 5 min 后振荡 30 min(振荡频率为 30 次/min),最后将留在各级筛子上的团聚体洗入铝盒中静置,倒出上部清液,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重,称重,重复 3 次,计算各级团聚体含量百分数。

土壤各级团聚体磨碎过 0.25 mm 筛,样品送至中国科学院地理科学与资源研究所用 MAT-253 稳定同位素质谱仪测定有机碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

1.2.3 碳库计算 各粒级团聚体有机碳库(t/hm^2)=该粒级团聚体中有机碳含量(g/kg) \times 该团聚体的百分含量($\%$) \times 土壤容重(g/cm^3) \times 土层厚度(cm) $\times 10$

各粒级团聚体新碳碳库(t/hm^2)=该粒级团聚体有机碳库(t/hm^2) \times 该粒级团聚体新碳比例($\%$)

根据植物和土壤各粒级团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 比例计算来源于新碳的比例^[3]:

$$N_{\text{cd}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{new}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{old}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{biomass}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{old}}}$$

式中: N_{cd} 为土壤有机碳来源于林分的比例($\%$); $\delta^{13}\text{C}_{\text{new}}$ 为林地土壤不同粒径团聚体有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ ($\%$); $\delta^{13}\text{C}_{\text{old}}$ 为林地恢复前草地土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ ($\%$); $\delta^{13}\text{C}_{\text{biomass}}$ 为恢复林植被的 $\delta^{13}\text{C}$ ($\%$)。

土壤有机碳的周转时间用其存留时间(t, a)表示:

$$t = \frac{1}{k}, \quad k = -\frac{\ln(1 - N_{\text{cd}})}{25}$$

式中: k 为有机碳一级分解常数;25 为马尾松林和木

荷林的造林时间(a)。

1.2.4 数据处理 利用 Excel 软件对数据进行初步处理,采用 SPSS 17.0 软件进行不同处理团聚体粒径分布和有机碳含量的显著性检验;采用 Origin 4.5 软件对有机碳周转时间和储量进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式团聚体粒径分布

从表 2 可以看出,3 种植被恢复模式团聚体比例随粒径减小呈现先减少后略有增加的趋势。草地和人工林表层土壤大团聚体($>250 \mu\text{m}$)的比例均达到了 87% 以上,微团聚体(53~250 μm)所占比例最小,只有 2.70%~6.06%,3 种植被覆盖模式同一粒径团聚体间没有明显差异;在 10~20 cm 土层不同粒径团聚体呈显著性差异,具体表现为草地 $<53 \mu\text{m}$ 粒径团聚体比例显著高于马尾松林和木荷林,木荷林 $>2000 \mu\text{m}$ 粒径团聚体比例显著高于马尾松林和草地,木荷林微团聚体含量则显著低于马尾松林和草地。

对不同土层深度而言,草地和马尾松林 10~20 cm 土层 $>2000 \mu\text{m}$ 粒径团聚体比例小于表层,而 250~200, $<53 \mu\text{m}$ 的粒径团聚体比例却大于表层,木荷林中 10~20 cm 土层 $>2000 \mu\text{m}$ 高于土壤表层。有研究^[10]表明,粒径大于 250 μm 的水稳性团聚体含量对土壤的抗侵蚀性能有重要影响。结果表明南方退化红壤区无人干扰的植被覆盖下土壤水稳定性大团聚体较高,可以有效降低土壤的侵蚀程度,提高土壤的保水保土功能。

表 2 不同植被恢复类型土壤团聚体粒径分布

单位: %

恢复类型	0-10 cm 土层				10-20 cm 土层			
	$<53 \mu\text{m}$	53~250 μm	250~2000 μm	$>2000 \mu\text{m}$	$<53 \mu\text{m}$	53~250 μm	250~2000 μm	$>2000 \mu\text{m}$
草地	6.68 \pm 1.66a	4.87 \pm 1.45a	26.41 \pm 2.36a	62.05 \pm 3.45a	15.95 \pm 3.79a	5.30 \pm 0.75 a	33.61 \pm 6.98b	45.15 \pm 6.44b
马尾松林	6.02 \pm 0.97a	5.96 \pm 2.02a	26.31 \pm 1.81a	61.71 \pm 3.18a	10.67 \pm 1.93b	6.06 \pm 1.53a	37.64 \pm 3.50a	45.63 \pm 2.53b
木荷林	5.38 \pm 1.33a	4.75 \pm 1.75a	28.18 \pm 3.52a	61.69 \pm 1.64a	7.46 \pm 1.89 b	2.71 \pm 1.15b	25.84 \pm 4.10b	63.99 \pm 3.58a

注:表中数据为平均值 \pm 标准差;同列不同字母表示不同恢复类型间存在显著性差异($P<0.05$)。下同。

2.2 不同植被恢复模式团聚体有机碳含量

经过 25 年的森林恢复后,林地不仅增加了土壤全土有机碳含量,也增加了团聚体中有机碳的含量(表 3)。有研究^[11]表明,土壤有机碳是团聚体重要的胶结剂,可以提高土壤大团聚体的数量,有利于大团聚体的形成。木荷林表层土各粒径团聚体有机碳含量均显著高于草地,粒径从小到大分别是草地表层土团聚体有机碳含量的 2.11,1.69,2.15,2.20 倍,在马尾松林中土壤表层团聚体有机碳含量与草地没有显著差别。原因可能是木荷的凋落物分解速率较快,能更快地增加土壤中的有机碳,维持微生物存活所需要的能量,而马尾松角质层发达,含有较多的木质素、纤

维素、单宁等物质,阻碍了微生物的分解,松针分解缓慢,很难迅速进入土壤形成土壤有机质^[12-13]。

木荷林和马尾松林 10~20 cm 土层土壤团聚体有机碳含量与表层土相比均有所减少,但仍然大于对照草地有机碳含量,而且有机碳含量随粒径增大呈现先减少后增加的趋势,最低值分别出现在 53~250,250~2000 μm 粒径中。在 10~20 cm 土层,马尾松林、木荷林和对照草地不同粒径团聚体有机碳含量没有明显差异,表明草地转变为人工林 25 年后,凋落物分解新形成的有机碳首先进入土壤表层,为微生物生长繁殖提供了大量能源,提高表层土壤微生物活性,增强团聚体内部之间的黏结力,进而促进微粒有机质的形成^[14]。

表 3 团聚体不同粒径中有机碳含量

单位:g/kg

土层深度/cm	植被类型	<53 μm	53~250 μm	250~2000 μm	>2000 μm	全土
0-10	草地	11.27±2.32a	7.03±2.75a	7.20±1.57a	7.83±2.52a	10.59±3.51
	马尾松林	13.86±1.29a	8.07±2.33a	8.70±2.56a	9.50±1.70a	12.49±1.81
	木荷林	23.87±3.72a	11.87±2.35a	15.50±0.72a	17.23±3.25a	20.22±1.57
10-20	草地	3.15±1.22a	2.47±0.56a	3.13±0.53a	3.70±0.14a	3.43±0.96
	马尾松林	4.26±1.63ab	2.70±0.14b	3.91±0.81ab	6.06±0.98a	5.76±1.06
	木荷林	9.60±0.71a	8.65±1.47a	7.21±1.21a	8.95±2.20a	9.99±0.90

2.3 不同植被恢复模式团聚体有机碳周转特征

草地转变为人工林后,所有粒径有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 均有所减少,但各粒径有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 之间并没有明显差异,其中粉黏粒有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 最低,微团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 最高(表 4),表明来源于森林的新碳逐渐代替来源于草地的旧碳,10-20 cm 土层团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 均高于表土层。3 种植物恢复模式的土壤各粒径团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 之间没有显著差异,草地各粒径团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 均显著高于木荷林,与马尾松林则没有明显差异。草地表层土团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -18.87% ~ -17.45% ,

其与全土相比降低幅度高达 4.0% ~ 5.5% ,粉黏粒 (<53 μm) 有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 最接近原土;木荷林表层土团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -21.82% ~ -20.41% ,与原土相比降低幅度只有 1.3% ~ 1.8% ;马尾松林表层土团聚体中 <53, 250~2 000 μm 粒径的有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值略低于原土,其余 2 个粒径的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则略高于原土。3 种植物恢复模式 10-20 cm 土层团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 都低于表土,与原土 $\delta^{13}\text{C}$ 相比,其 $\delta^{13}\text{C}$ 降低幅度为 0.09% ~ 3.3% ,表明人工林中凋落物分解后形成的有机碳仍然主要影响着土壤表层。

表 4 团聚体不同粒径有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值

单位:%

土层深度/cm	植被类型	<53 μm	53~250 μm	250~2000 μm	>2000 μm	全土
0-10	草地	-17.45±1.93a	-18.60±1.35a	-18.87±0.68a	-17.64±0.35a	-13.38±1.79
	马尾松林	-21.49±0.76a	-19.97±0.43a	-21.43±0.94a	-20.69±2.53a	-21.38±0.49
	木荷林	-21.82±1.48a	-20.31±1.60a	-20.41±1.05a	-20.44±1.30a	-19.00±1.21
10-20	草地	-16.99±0.83a	-16.73±0.48a	-16.63±1.12a	-16.78±0.85a	-14.18±1.46
	马尾松林	-21.01±0.36a	-19.75±1.65a	-20.98±1.51a	-20.41±3.25a	-19.66±1.08
	木荷林	-19.10±1.69a	-17.77±0.46a	-18.09±0.89a	-18.12±1.29a	-15.26±0.54

根据凋落物、不同粒径团聚体有机碳和草地有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 关系和植被转换年限计算有机碳的周转时间。2 种人工林土壤表层团聚体有机碳的周转时间为 41~53 年,马尾松林 10-20 cm 土层团聚体有机

碳周转时间为 48~62 年,微团聚体的周转时间最长;而木荷林 10-20 cm 土层各粒径团聚体有机碳周转时间是表土层的 1.59~2.13 倍,其中微团聚体有机碳的周转时间最长,达到了 104 年(图 1)。

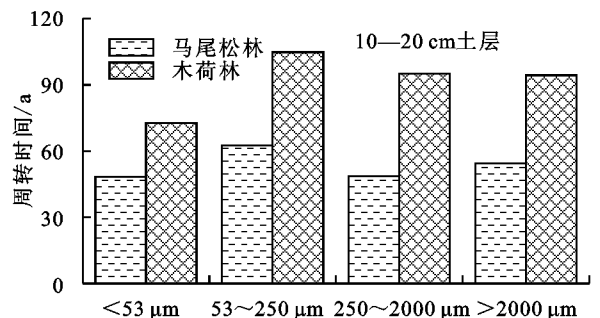
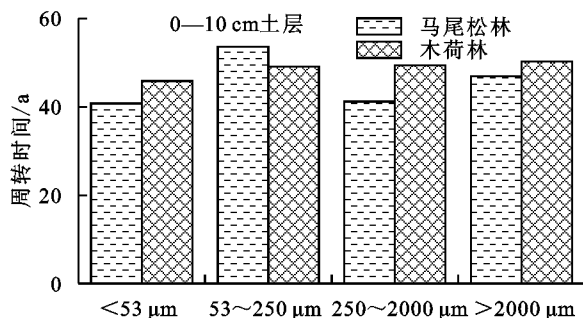


图 1 土壤团聚体有机碳周转时间

2.4 不同植被恢复模式对团聚体有机碳储量的影响

草地转变为木荷林 25 年后增加了土壤各粒径团聚体有机碳储量(图 2)。木荷林表层土团聚体有机碳储量按粒径从小到大增加幅度依次为 11%, 26%, 61%, 82%, 10-20 cm 土层增加幅度依次为 44%, 81%, 52%, 288%;而马尾松林中表层土仅增加了微团聚体(53~250 μm) 有机碳的储量, 10-20 cm 土层中,除粉黏粒外其余粒径有机碳储量增加幅度分别为 14%, 8%, 69%。本研究中恢复 25 年的马尾松林和木荷林大团聚体有机碳储量分别高于福建长汀地区

马尾松人工林和针阔混交次生林^[9],可能与植被恢复前土地退化程度相关,福建长汀红壤区森林恢复前地表覆盖率极低,近乎裸地,其有机碳初期含量极低。

从有机碳储量在团聚体中的分配来看,有机碳主要储存在大团聚体(>250 μm)中,比例在 82.6%~89.0%。草地和马尾松林表土大团聚体有机碳储量相当,只有木荷林的 54%。微团聚体有机碳储量最小,比例只有 2.7%~8.0%。马尾松林微团聚体碳储量高于草地和木荷林。相应地来源于新碳(森林)的碳储量在大团聚体中最大,木荷林大团聚体新碳储

量是马尾松林的 1.7 倍(图 3)。可以看出,草地转换为人工林后新的有机碳主要储存在大团聚体中,本地

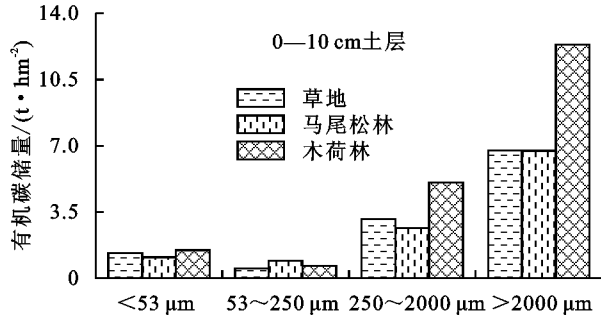


图 2 土壤团聚体有机碳储量

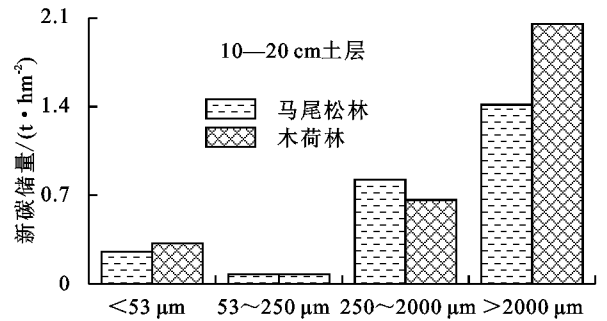
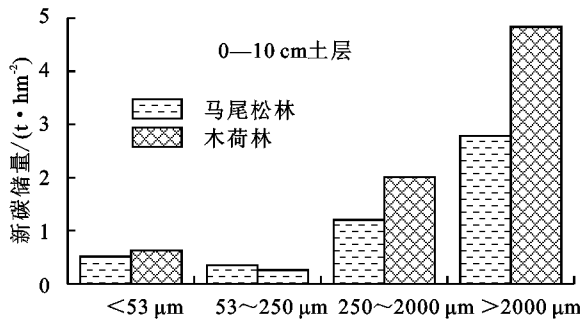
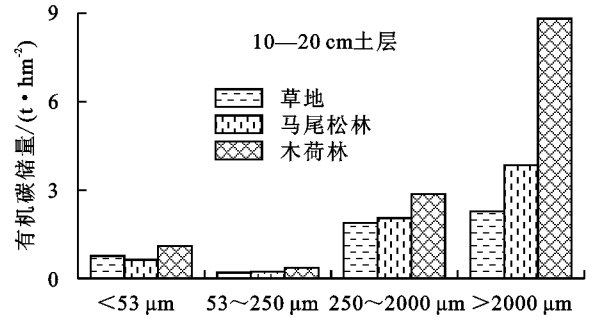


图 3 不同森林土壤团聚体新碳储量

3 讨论

3.1 人工恢复林对土壤团聚体碳输入的影响

植被类型转换后,根据团聚体有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 可以判断不同粒径团聚体对新碳的固持和保护作用。Verchot 等^[15]对土壤有机碳去向的研究结果表明,铁铝土的大团聚体中新碳含量更多,在红沙土中更多的新碳则在中等粒径团聚体中,不同类型土壤团聚体的形成机制不同。本研究中,马尾松林和木荷林表土团聚体有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}$ 随团聚粒径增大均呈现出先减小再增大的趋势,表明草地转变为人工林后来自林分的有机碳主要存在于粉黏粒和大团聚体中,部分支持了大粒径团聚体的形成先于小团聚体。3 个植被恢复模式土壤粉黏粒中有机碳含量高及其 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负,原因可能是构成红壤的母岩矿物类型主要为蛭石、铁铝氧化物、高岭石,铁铝氧化物和黏土矿物具有较大的比表面积,对可溶性有机物和疏水性有机碳都具有很强的吸附能力,导致较多的新碳在粉黏粒中。刘满强等^[16]、Chorover 等^[17]也发现在酸性土壤中,铁铝氧化物对土壤有机碳的固持能力要强于蒙脱石与伊利石。

已有研究^[18]表明,造林树种对土壤有机碳的恢复产生重要影响,尽管不同特性树种形成的人工林对土壤有机碳储量变化存在争议,多数观点认为针叶树造成碳库减少,而阔叶树造林增加土壤碳库,本研究结果与此观点一致,这种差异主要由生物量分配策略和凋落物质量差异引起的。与对照草地相比,木荷林土壤团聚体各粒

径有机碳储量均有不小的增幅,其中新碳的储量也高于马尾松林;而马尾松林中土壤团聚体大部分粒径有机碳储量出现下降的情况下,37%~46%的总碳来源于马尾松林新碳。这可能与针叶林和阔叶林对水土流失的控制程度有关,在马尾松人工林新碳进入土壤团聚体的过程可能伴随着更多的老碳分解加快而损失,而在阔叶林中土壤新碳增加,部分老碳却得到了保护,从而增加了土壤总有机碳储量。

3.2 植被类型转换对团聚有机碳周转的影响

各粒径团聚体对有机碳的保护程度不同,导致有机碳在其中平均存留时间存在差异。土壤团聚体有机碳周转不仅受到气候因素、植被群落因素的影响,也受到土壤特性的影响^[18]。根据土壤大团聚体先形成的机制,小粒径团聚体包裹在大团聚体中,受到更多的物理化学保护,稳定性更高,因此小粒径团聚体中的有机碳周转时间更长,大团聚体的周转决定着微团聚体中有机碳的稳定性^[19]。已有研究^[1-2]显示, C_3 植被转变为 C_4 植被后团聚体周转时间随粒径减少而增大,粉黏粒中有机碳的周转时间超过 100 年,大团聚体有机碳的周转时间不到 30 年。本研究中的马尾松林和木荷林土壤也显示微团聚体中有机碳的周转时间最长,粉黏粒中有机碳的周转时间最短,有机碳周转时间并没有随粒径减小变长,从粉黏粒有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负可以看出,红壤中新碳先进入粉黏粒,这些新碳在进入土壤初期经常是不稳定的。而在热带巴拿马地区,森林转变为草地 90 年后,表土团聚体有机

碳的周转时间在 69~93 年,大团聚体中有机碳周转时间较长,微团聚体中的周转时间最短,进一步分离出的矿物结合碳有机碳的周转时间最长,可见进行团聚体分离时应结合其他方法,才能更深入地了解团聚体内部各组分的周转时间^[20]。本研究中草地转换为人工林后表土各粒径团聚体有机碳存留时间均低于上述研究区域,可能是气候条件和土壤特性导致的。在今后的研究中应结合不同方法进行团聚体分离,了解不同粒径团聚体中微生物状况,从而更深入地了解红壤植被转换对团聚体有机碳的周转及其影响因素。

4 结论

(1)3种植被恢复模式土壤大团聚比例最高,微团聚体比例最低,木荷林 0—20 cm 土层大团聚体比例平均值高于马尾松林和草地;木荷林表层土各粒径团聚体有机碳含量均显著高于草地,3种植被恢复模式表层土粉黏粒(<53 μm)有机碳含量最高,其有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 最低;与全土相比,草地表层土团聚体中有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低幅度最大,木荷林居中。

(2)3种植被恢复模式下土壤大团聚体总有机碳储量最大,其次是粉黏粒,最小的是微团聚体,来自人工林的新碳主要分布在土壤表层大团聚体中;马尾松林和木荷林表层土团聚体中有机碳的周转时间为 41~53 年,低于 10—20 cm 土层,2种林分粉黏粒中有机碳的周转时间最短,微团聚体中有机碳周转时间最长。

参考文献:

- [1] Huang L, Shao Q, Liu J. Forest restoration to achieve both ecological and economic progress, Poyang Lake basin [J]. *China Ecological Engineering*, 2012, 44: 53-60.
- [2] Liao J D, Boutton T W, Jastrow J D. Organic matter turn over in soil physical fractions following woody invasion of grassland: Evidence from natural ^{13}C and ^{15}N [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 3197-3210.
- [3] Novara A, Gristina L, Kuzyakov Y, et al. Turnover and availability of soil organic carbon under different mediterranean land-uses [J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64: 466-475.
- [4] Bai E, Boutton T W, Liu F, et al. Spatial variation of soil $\delta^{13}\text{C}$ and its relation to carbon input and soil texture in a subtropical lowland woodland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44: 102-112.
- [5] Deneff K, Zotarelli L, Boddey R M, et al. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two oxisols [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1165-1172.
- [6] 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.
- [7] Liu Y Q, Wei X H, Guo X M, et al. The long-term effects of reforestation on soil microbial biomass carbon in sub-tropic severe red soil degradation areas [J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 285: 77-84.
- [8] Xie J S, Guo J F, Yang Z J, et al. Rapid accumulation of carbon on severely eroded red soils through afforestation in subtropical China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 53-59.
- [9] 孙杰,田浩,范跃新,等.长汀红壤侵蚀退化地植被恢复对土壤团聚体有机碳含量及分布的影响[J].*福建师范大学学报(自然科学版)*,2017,33(3):87-95.
- [10] 李勇.黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M].北京:科学出版社,1995.
- [11] 窦森,李凯.土壤团聚体中有机质研究进展[J].*土壤学报*,2010,48(2):412-418.
- [12] 张庆费,徐绒娣.浙江天童常绿阔叶林演替过程的凋落物现存量[J].*生态学杂志*,1999,18(2):17-21.
- [13] 陆晓辉,丁贵杰,陆德辉.人工调控措施下马尾松凋落叶化学质量变化及与分解速率的关系[J].*生态学报*,2017,37(7):2325-2333.
- [14] 顾鑫,安婷婷,李双异,等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响[J].*水土保持学报*,2014,28(2):243-248.
- [15] Verchot L V, Dutaour L, Shepherd K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils [J]. *Geoderma*, 2011, 161: 182-193.
- [16] 刘满强,胡锋,陈小云.土壤有机碳稳定机制研究进展[J].*生态学报*,2007,27(6):2642-2651.
- [17] Chorover J, Amistadi M K. Reaction of forest floor organic matter at goethite, birnessite and smectite surfaces [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(1): 95-109.
- [18] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20: 3544-3556.
- [19] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 4-9.
- [20] Schwendenmann L, Pendall E. Effects of forest conversion into grassland on soil aggregate structure and carbon storage in Panama: Evidence from soil carbon fractionation and stable isotopes [J]. *Plant and Soil*, 2006, 288: 217-232.