

衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复对土壤活性有机碳库的影响

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: 为了解植被恢复对土壤活性有机碳库的影响, 采用空间代替时间序列方法, 对衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复对土壤活性有机碳含量和分布进行研究。结果表明, 土壤有机碳(SOC)、微生物量碳(MBC)、水溶性有机碳(DOC)、轻组有机碳(LFOC)和易氧化碳(ROC)含量均以乔灌阶段最高($P<0.05$), 随土层加深显著减小($P<0.05$)。随恢复进程, MBC/SOC、DOC/SOC 和 ROC/SOC 显著增加($P<0.05$); 0~20 cm 土层, LFOC/SOC 随恢复显著增加($P<0.05$), 而 20~40 cm 土层, LFOC/SOC 的差异不明显($P>0.05$)。随土层加深, LFOC/SOC 显著减小($P<0.05$), DOC/SOC、MBC/SOC 和 ROC/SOC 逐渐增加($P>0.05$)。SOC、MBC、DOC、LFOC 和 ROC 间存在极显著正相关关系($P<0.01$)。各类活性有机碳库与土壤含水量(SWC)、全氮(TN)、碱解氮(AN)和速效磷(AP)呈显著或极显著正相关关系($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 与土壤容重(BD)呈极显著负相关关系。因此, 植被恢复在一定程度上可提高衡阳紫色土丘陵坡地土壤活性有机碳的形成和积累, 增加土壤碳储量。

关键词: 紫色土; 植被恢复; 活性有机碳库; 衡阳

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.013

Effect of Re-vegetation on Active Organic Carbon Pool of Purple Soils on Sloping-land in Hengyang, Hunan Province, China

CHEN Jing, YANG Ning*

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

Abstract: In order to understand the effect of re-vegetation on soil active organic carbon, the soil active organic carbon content and distribution in purple soils on sloping-land in Hengyang, Hunan Province, China were studied by using method of spatial series replace time series. The results showed that the content of soil organic carbon (SOC), microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC), light fraction organic carbon (LFOC) and readily oxidizable carbon (ROC) were the highest at arbor and frutex stage ($P<0.05$), and they significantly decreased with soil depth ($P<0.05$). The ratio of MBC/SOC, DOC/SOC and ROC/SOC significantly increased with the process of re-vegetation ($P<0.05$). In 0–20 cm soil layer, LFOC/SOC significantly increased with the process of re-vegetation ($P<0.05$), but that was not obvious change in 20–40 cm soil layer ($P>0.05$). Along soil depth, LFOC/SOC significantly decreased ($P<0.05$), DOC/SOC, MBC/SOC and ROC/SOC gradually increased ($P>0.05$). There were significant positive correlation among SOC, MBC, DOC, LFOC and ROC ($P<0.01$). All kinds of active organic carbon pool had significant positive correlations ($P<0.05$ or $P<0.01$) with soil water

收稿日期: 2016-04-05 接受日期: 2016-05-17

基金项目: 湖南省科技厅项目(S2006N332); 湖南省教育厅科学研究项目(13C247); 湖南省林业科技创新计划项目(XLK201341); 湖南省衡阳市农业科技支撑计划项目(2014KN27)资助

This work was supported by the Project of Hunan Provincial Science & Technology Department (Grant No. S2006N332), Scientific Research Project of the Education Department of Hunan Province (Grant No. 13C247), Forestry Scientific and Technical Innovation Program of Hunan Province (Grant No. XLK201341), and the Support Project of Agricultural Science and Technology in Hengyang City, Hunan Province (Grant No. 2014KN27).

作者简介: 陈璟(1966~), 男, 副教授, 主要从事园林植物、园林生态方面的研究与教学工作。E-mail: heshecheng2@sina.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yangning8787@sina.com

content (SWC), total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzed nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and significant negative correlations ($P < 0.01$) with bulk density (BD). Therefore, re-vegetation could enhance at certain degree formation and accumulation of soil active organic carbon and increased soil carbon storage in purple soils on sloping-land in Hengyang.

Key words: Purple soil; Re-vegetation; Labile organic carbon pool; Hengyang

土壤有机碳是土壤有机质的重要组成部分,对改善土壤物理特性,提高土壤质量,降低土壤养分流失,增加土壤有效养分含量具有重大的意义^[1]。土壤活性有机碳库是指土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解利用,对植物养分供应具有最直接作用的那部分有机碳^[2-3]。活性有机碳库一般占总有机碳的 7%~32%,它可以在土壤全碳变化之前反映土壤微小的变化,又直接参与土壤生物化学转化过程,同时,也是土壤微生物活动能源和土壤养分的驱动力,因而它对土壤 C 库平衡和土壤化学、生物化学肥力保持具有重大意义^[4-5]。土壤活性有机碳库主要包括水溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、易氧化碳(Readily oxidizable carbon, ROC)、微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、轻组(低密度)有机碳(Light fraction organic carbon, LFOC)^[6]。特定生态区域不同恢复阶段,土壤碳库及碳形态会达到稳定状态,因而,土壤碳素状态常可作为生态功能的标志或控制器^[7]。不同恢复阶段土壤由于承接凋落物和根系分泌物的类型不同,因而土壤的碳库特别是活性碳状况会存在差别。

衡阳紫色土丘陵坡地面积 $1.63 \times 10^5 \text{ hm}^2$,是湖南省生态环境最为恶劣的地区之一,也是中国南方极具代表性的生态灾害易发地区。由于紫色土极易水蚀,发育期短,地力差,常处于幼年阶段,加上颜色深、吸热性强,夏季地面温度高,蒸发量大,又因区域性水、热分布等不利环境影响和不合理的开发,致使该区域长期以来植被稀疏,水土流失和季节性旱灾严重,恶劣的生态环境严重制约着当地农村经济的发展,农民增收明显低于其他地区,甚至危及当地农民的生存。因此,该区域生态恢复与重建已成为农业生产环境改善,区域经济发展及人民脱贫致富的迫切要求^[8-9]。为了改善当地的生态环境,对土壤理化性质以及土壤水分已开展了大量的研究^[10-13],但植被恢复对紫色土活性有机碳库的影响尚未阐明。本文采用“空间序列代替时间序列”的方法^[14-15],研究不同植被恢复阶段的土壤活性碳含量与分布,揭示不同恢复阶段植被对土壤碳库的影

响,为评价该地区植被恢复对土壤有机碳的影响提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

湖南省衡阳市紫色土丘陵区域位于湖南省中南部,处于湘江中游($110^{\circ}32'16'' \sim 113^{\circ}16'32'' \text{ E}$, $26^{\circ}07'05'' \sim 27^{\circ}28'24'' \text{ N}$)。地貌类型以丘岗为主,呈网状集中分布于该区域中部海拔 60~200 m 的地带。属亚热带季风湿润气候,年平均气温 18°C ,极端最高气温 40.5°C ,极端最低气温 -7.9°C ,年平均降雨量 1325 mm,年平均蒸发量 1426.5 mm。平均相对湿度 80%,全年无霜期 286 d。

1.2 样地设置与采样

该区域植被演替过程为草本群落阶段→灌草群落阶段→灌丛群落阶段→乔灌群落阶段→乔木群落阶段^[15]。2013 年 10 月下旬,选择坡度、坡向、坡位和裸岩率等基本一致的坡中下部沿等高线有代表性的、按照植被恢复阶段按低到高顺序的样地(表 1),分别为:草本(Grassplot, GT)群落阶段[(狗尾草(*Setaria viridi*)群落];灌草(Frutex and grassplot, FG)群落阶段[紫薇(*Lagerstroemia indica*)-狗尾草群落];灌丛(Frutex, FX)群落阶段[牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)+刺槐(*Robinia pseudoacacia*)群落];乔灌(Arbor and frutex, AF)群落阶段[枫香(*Liquidambar formosana*)+苦楝(*Melia azedarach*)-牡荆群落],且每个样地的面积 $> 1 \text{ hm}^2$,群落演替初始均为撂荒地。在 4 个恢复阶段中,随机布置 3 个重复的 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的小样地,共 12 个,用直径为 2 cm 的土壤取样器采取 0~20 与 20~40 cm 层土各 3 份,每份土壤样品由对应的样地中随机采取 10 个土芯混合而成;每个恢复阶段样地计 6 个样品,共计 24 份土样;样品过 2 mm 筛后,除去石砾和根系,分为 2 份,1 份土壤自然风干,用于土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)、易氧化碳、轻组有机碳和土

表 1 样地概况

Table 1 Status of sampling sites

恢复阶段 Re-vegetation stage	草本群落 Grassplot community	灌草群落 Frutex and grassplot community	灌丛群落 Frutex community	乔灌群落 Arbor and frutex community
恢复年限 Re-vegetation years	2	5~8	20~25	≈50
坡度/坡向 Slope (°)/Aspect	30/SW	25/SW	25/SW	20/SW
海拔 Altitude (m)	115	125	120	125
盖度 Coverage (%)	40	50	75	90

壤理化性质的分析;另 1 份鲜土放于 4℃ 冰箱内,并在一周内完成水溶性有机碳和微生物量碳的测定。

1.3 样品分析

土壤理化性质按常规方法^[16]测定。土壤含水量 (Soil water content, SWC) 采用烘干法 (105℃, 12 h); 容重 (Bulk density, BD) 采用环刀法; 全氮 (Total nitrogen, TN) 采用半微量凯氏法; 碱解氮 (Alkali-hydrolyzed nitrogen, AN) 采用扩散吸收法; 速效磷 (Available phosphorus, AP) 采用 NaHCO₃ 提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法; 速效钾 (Available potassium, AK) 采用 NH₄Ac 浸提-原子吸收法; pH 值采用酸度计法 (土水比 1:1); SOC 采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[17]; DOC 采用稀盐溶液 0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄ 提取, 土水比 1:2.5, 振荡 30 min, 重铬酸钾氧化滴定法测定^[17]; ROC 采用高锰酸钾 (333 mmol L⁻¹) 氧化法测定^[18]; LFOC 采用相对密度分组法测定^[19]; MBC 测定采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法、重铬酸钾氧化滴定法测定 (转换系数 K 取 0.45)^[20]。

1.4 数据统计分析

所有数据均为 3 次重复的平均值。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, 采用 Pearson 相关系数分析不同因子间的相关系数。

2 结果和分析

2.1 不同恢复阶段土壤理化性质

从表 2 可知, 不同恢复阶段、土层之间的土壤理化性质存在显著差异。随恢复进程, 土壤含水量显著增加 ($P<0.05$), 容重显著减小 ($P<0.05$); 随土层加深, 土壤含水量显著减小 ($P<0.05$), 容重显著增加 ($P<0.05$)。相同土层乔灌群落的全氮、碱解氮和速

效磷含量显著高于其他恢复阶段 ($P<0.05$), 0~20 cm 土层, 草本群落、灌草群落和灌丛群落的全氮含量分别为乔灌群落的 80.00%、69.00% 和 78.00%; 20~40 cm 土层, 分别为 60.00%、87.50% 和 85.00%; 0~20 cm 土层, 乔灌群落的碱解氮含量分别为草本群落、灌草群落和灌丛群落的 1.53、1.25 和 1.34 倍, 20~40 cm 土层, 分别为 2.00、1.90 和 2.31 倍; 0~20 cm 土层, 草本群落、灌草群落和灌丛群落的速效磷含量分别为乔灌群落的 87.08%、90.83% 和 99.67%, 20~40 cm 土层, 分别为 80.46%、84.18% 和 91.00%。4 个恢复阶段的全氮、碱解氮和速效磷含量均随着土层加深而显著减小 ($P<0.05$)。由于衡阳紫色土含有丰富的正长石等矿物, 其风化后留了相当数量的钾, 因此紫色土钾的含量相对较高, 速效钾的含量在 129.16~140.07 mg kg⁻¹, 不同恢复阶段与土层之间差异变化不大。土壤 pH 值随恢复进行逐渐减小 ($P>0.05$), 随土层加深逐渐增大 ($P>0.05$)。

2.2 不同恢复阶段土壤活性有机碳库

由表 3 可见, 0~20 cm 土层的 SOC、MBC、DOC、LFOC 和 ROC 显著高于 20~40 cm 土层 ($P<0.05$)。虽然土壤活性有机碳随土层加深而减小的趋势一致, 但幅度不同, 在草本群落、灌草群落、灌丛群落和乔灌群落阶段, 20~40 cm 土层 SOC 分别比 0~20 cm 分别减少 25.63%、26.10%、13.49% 和 26.97%; MBC 分别减少 30.26%、28.60%、16.06% 和 33.76%; DOC 分别减少 20.11%、22.85%、22.48% 和 19.45%; LFOC 分别减少 47.05%、81.13%、81.63% 和 88.73%; ROC 分别减少 29.55%、29.98%、15.86% 和 28.96%。

0~20 cm 土层, SOC 以乔灌群落 > 灌草群落 > 草本群落 > 灌丛群落, 差异显著 ($P<0.05$), 乔灌群落的 SOC 含量分别为草本群落、灌草群落和灌丛群落的 1.50、1.31 和 1.68 倍。MBC 以乔灌群落 > 灌丛群落 > 灌草群落 > 草本群落, 差异显著 ($P<0.05$), 草本群落、灌草群落和灌丛群落的 MBC 分

表 2 不同恢复阶段土壤理化性质

Table 2 Soil physio-chemical properties at different re-vegetation stages					
	土层 Layer (cm)	草本群落 Grassplot community	灌草群落 Frutex and grassplot community	灌丛群落 Frutex community	乔灌群落 Arbor and frutex community
含水量 Soil water content (g kg ⁻¹)	0~20	123.09Da	184.00Ca	256.12Ba	329.47Aa
	20~40	100.04Db	154.09Cb	212.76Bb	287.94Ab
容重 Bulk density (g cm ⁻³)	0~20	1.43Ab	1.32Bb	1.17Cb	1.09Db
	20~40	1.58Aa	1.40Ba	1.23Ca	1.18Da
全氮 Total N (g kg ⁻¹)	0~20	0.80ABa	0.69Ba	0.78ABa	1.00Aa
	20~40	0.24Bb	0.35ABb	0.34ABb	0.40Ab
碱解氮 Available N (mg kg ⁻¹)	0~20	42.65Da	52.19Ca	48.43Ba	65.12Aa
	20~40	14.89Cb	15.65Bb	12.89Db	29.76Ab
速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	0~20	10.45Ba	10.90Ba	11.96ABa	12.00Aa
	20~40	7.78Bb	8.14ABb	8.80ABb	9.67Ab
速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	0~20	134.09Aa	138.76Aa	136.56Aa	140.07Aa
	20~40	129.16Aa	132.99Aa	138.80Aa	137.01Aa
pH	0~20	7.89Ab	7.57Ab	7.43Aa	7.23Aa
	20~40	8.07Aa	8.00Aa	7.99Aa	7.91Aa

同行数据后不同大写字母表示不同阶段差异显著, 同列不同小写字母表示不同土层差异显著($P<0.05$)。表 3,4 同。

Data followed different capital letters within line indicate significant difference among different re-vegetation stages at 0.05 level, and data followed different small letters within column indicate significant difference between soil layers at 0.05 level. The same is Tables 3 and 4.

表 3 土壤活性有机碳含量(mg kg⁻¹)

Table 3 Content of active organic carbon (mg kg ⁻¹)					
	土层 Layer (cm)	草本群落 Grassplot community	灌草群落 Frutex and grassplot community	灌丛群落 Frutex community	乔灌群落 Arbor and frutex community
SOC	0~20	13.81ABa	15.75Aa	12.31Ba	20.65Ca
	20~40	10.27Ab	11.64 Bb	10.65Ab	15.08Cb
MBC	0~20	4.56Aa	14.02Ba	16.50Ca	30.36Da
	20~40	3.18Ab	10.01Bb	13.85Cb	21.11Db
DOC	0~20	3.73Aa	7.09Ba	6.45Ca	11.98Da
	20~40	2.98Ab	5.47Bb	5.00Cb	9.65Db
LFOC	0~20	136.17Aa	442.89ABa	418.66ABa	991.20Ba
	20~40	72.10Ab	83.58Bb	76.89Cb	111.74Db
ROC	0~20	60.21Aa	68.99Ba	67.46Ba	106.35Ca
	20~40	42.42Ab	48.31Bb	56.76Cb	75.55Db

别为乔灌群落的 15.02%、46.18%和 54.35%。DOC 和 LFOC 均以乔灌群落>灌草群落>灌丛群落>草本群落, 差异显著($P<0.05$), 乔灌群落的 DOC 含量分别为草本群落、灌草群落和灌丛群落阶段的 3.21、1.69 和 1.86 倍, LFOC 分别为 7.28、2.24 和 2.37 倍。乔灌群落的 ROC 显著高于其他恢复阶段($P<0.05$), 草本群落、灌草群落和灌丛群落阶段的 ROC 含量分别为乔灌群落阶段的 56.53%、64.87%和 63.43%。

20~40 cm 土层, SOC 以乔灌群落>灌草群落>草本群落和灌丛群落, 差异显著($P<0.05$), 乔灌群落的 SOC 分别为草本群落、灌草群落和灌丛群落的 1.47、1.30 和 1.42 倍。MBC 和 ROC 以乔灌群落>灌丛群落>灌草群落>草本群落, 差异显著($P<0.05$), 草本群落、灌草群落和灌丛群落的 MBC

分别为乔灌群落的 15.06%、47.42%和 65.61%; ROC 分别为乔灌群落阶段的 56.15%、63.94%和 75.13%。DOC 和 LFOC 以乔灌群落>灌草群落>灌丛群落>草本群落, 差异显著($P<0.05$), 乔灌群落的 DOC 分别为草本群落、灌草群落和灌丛群落的 3.24、1.76 和 1.93 倍, 而 LFOC 分别为 1.55、1.34 和 1.45 倍。

2.3 土壤活性有机碳的分配比率

从表 4 可知, 随土层加深, DOC 分配比率逐渐上升($P>0.05$), 增加幅度为 0.02%~0.06%; MBC 与 ROC 的分配比率逐渐降低($P>0.05$), 降低幅度分别为 0.02%~0.07%与 0.14%~0.24%, 说明 0~20 cm 土层 C 积累略大于 20~40 cm 土层, 且 0~20 cm 土层较 20~40 cm 土层的 C 活性大, 稳定性差; 随土层

表 4 土壤活性有机碳的分配比率

Table 4 Ratio of active organic carbon to SOC

阶段 Stage	土层 Layer (cm)	MBC/SOC	DOC/SOC	LFOC/SOC	ROC/SOC
草本群落 Grassplot community	0~20	0.33Aa	0.27Aa	9.86Aa	4.36Aa
	20~40	0.31Aa	0.29Aa	7.02Ab	4.13Aa
灌草群落 Frutex and grassplot community	0~20	0.89Ba	0.45Ba	28.12Ba	4.38Aa
	20~40	0.86ABa	0.47Ba	7.18Ab	4.15Aa
灌丛群落 Frutex community	0~20	1.34BCa	0.54Ca	34.01Ca	5.48Ba
	20~40	1.30Ba	0.57Ca	7.22Ab	5.33Ba
乔灌群落 Arbor and frutex community	0~20	1.47Ca	0.58Da	48.00Da	5.15Ba
	20~40	1.40Ca	0.64Da	7.41Ab	5.01Ba

加深, LFOC 显著下降($P<0.05$), 草本群落、灌草群落、灌丛群落和乔灌群落阶段 20~40 cm 土层 LFOC 值分别为 0~20 cm 土层的 71.20%、25.53%、21.23% 和 15.44%。在 0~20 cm 土层, MBC、DOC 和 LFOC 分配比率均表现为乔灌群落>灌丛群落>灌草群落>草本群落($P<0.05$), ROC 的分配比率为灌丛群落($\approx$ 乔灌群落)>草本群落($\approx$ 灌草群落)($P<0.05$); 20~40 cm 土层, MBC 和 DOC 分配比率表现为随恢复进行而显著增加($P<0.05$), 而 LFOC 的分配比率差异不明显($P>0.05$), 灌丛群落和乔灌群落阶段的 ROC 分配比率显著高于草本群落和灌草群落($P<0.05$)。

2.4 土壤活性有机碳之间的相关性

由表 5 可知, SOC 与 MBC、DOC、LFOC 和 ROC 之间存在极显著正相关关系($P<0.01$); MBC、DOC、LFOC 和 ROC 两两间也存在极显著相关关系($P<0.01$)。这一方面说明了土壤活性有机碳很大程度依赖于土壤有机碳总贮量; 另一方面, 也说明了各类活性有机碳之间关系密切, 它们虽然表述和测定方法不同, 但都在一定程度上表征了土壤中活性较高部分的碳含量。

表 5 土壤各种形态有机碳之间的相关关系

Table 5 Correlations among different forms of SOC

有机碳 Organic carbon	SOC	MBC	DOC	LFOC
MBC	0.912**			
DOC	0.756**	0.814**		
LFOC	0.800**	0.903**	0.961**	
ROC	0.909**	0.880**	0.835**	0.886**

*, $P<0.05$; **, $P<0.01$.

2.5 土壤活性有机碳与理化性质的相关性

表 6 表明, SOC、MBC、DOC 和 LFOC 均与土

壤含水量、全氮和碱解氮呈极显著正相关关系($P<0.01$), 与土壤容重呈极显著负相关关系($P<0.01$), 与速效磷呈显著正相关关系($P<0.05$); 各类活性有机碳库与速效钾 pH 值相关性不明显($P<0.05$)。

表 6 土壤理化性质与土壤活性有机碳库的相关性

Table 6 Correlation between soil physio-chemical properties and active organic carbon pool

	SOC	MBC	DOC	LFOC
含水量 Soil water content	0.887**	0.901**	0.853**	0.812**
容重 Bulk density	-0.756**	-0.777**	-0.789**	-0.800**
全氮 Total N	0.991**	0.983**	0.845**	0.843**
碱解氮 Available N	0.888**	0.991**	0.916**	0.900**
速效磷 Available P	0.658*	0.663*	0.618*	0.589*
速效钾 Available K	0.227	0.245	0.231	0.286
pH	-0.210	-0.227	-0.198	-0.200

*, $P<0.05$; **, $P<0.01$.

3 讨论和结论

本研究表明, 0~20 cm 土层, SOC 含量以乔灌群落>灌草群落>草本群落>灌丛群落($P<0.05$)。Chaai 等^[21]的研究表明 SOC 含量主要取决于植物每年的归还量和分解速度, 归还量大、分解速度缓慢会造成 SOC 积累较多。由于乔灌群落阶段有较好的涵养水分能力、大量的凋落物和根系分泌物, 使得在 SOC 最高^[22]。草本群落和灌草群落阶段的 SOC 高于灌丛群落阶段, 可能一方面是草本群落和灌草群落阶段有较多的一年生草本植物覆盖, 相对稳定的土壤结构和微生物以及较高的同化输入作用; 另一方面是灌丛群落阶段为草本群落和灌草群落阶段向乔灌群落阶段的生态过渡区, 因此有相对较高的淋溶和淋失以及微生物受到较高的胁迫性, 二者共同作用使得灌丛群落的 SOC 含量显著低于其他恢复阶段($P<0.05$)^[23]。随着植被恢复的进程, MBC

含量显著增加($P<0.05$), 与李忠武等^[24]的研究结果相似。MBC 含量除了与 SOC 含量有关外, 还取决于群落内的微环境、凋落物量、植被的盖度与植物根系等因素^[25]。草本群落阶段, 植被盖度较低, 表土侵蚀严重, SOC 矿化加剧, 导致 MBC 低下, 随着植被恢复进程, 集中在表层的凋落物增多, 根系密度、根系生物量和分泌物增加, 促进了土壤微生物的生长与繁殖, 提高了 MBC 含量。DOC 含量以乔灌群落>灌草群落>灌丛群落>草本群落($P<0.05$), 与4个恢复阶段植物枯枝落叶和土壤有机质中腐殖质含量依次减小有关, 这与刘秉儒等^[26]的研究结果相似。LFOC 是介于植物残体和腐殖化有机质之间的有机质, 植物碎片、根系等是 LFOC 的重要组成部分。由于乔灌群落阶段较好的水热条件、丰富的微生物种类对枯枝落叶的分解作用明显, 使得乔灌群落阶段植物碎片、根系较多, 从而 LFOC 表现出乔灌群落>灌草群落($\approx$ 灌丛群落)>草本群落($P<0.05$), 与陈晓琳等^[27]的研究结果相似。表层土壤侵蚀的淋溶和淋失作用是 ROC 含量差异的决定性因素, 土壤侵蚀强度对 ROC 含量有重要影响。4个恢复阶段 ROC 的变化趋势与 LFOC 相同, 乔灌群落茂密的枝叶和林冠、以及深厚的枯枝落叶层, 对雨水有较好的消能作用和对径流的拦挡作用, 使得乔灌群落阶段的土壤侵蚀非常低, 草本群落由于植被盖度低, 土壤侵蚀严重, 灌草群落、灌丛群落介于草本群落与乔灌群落之间, 与李忠武等^[24]对红壤丘陵区不同地类活性有机碳的研究结果相似, 受土壤侵蚀的淋溶和淋失影响, ROC 含量在坡顶和坡地较高, 坡上与坡下较小。随着植被恢复进程, 植物根系逐渐向下扩展, 通过降水的淋溶作用使 20~40 cm 土层的活性有机碳的变化规律基本上与 0~20 cm 土层相似, 这与 Boone^[28]、刘守龙等^[29]的研究结果基本一致。

植物根系分布、凋落物数量和质量与活性有机碳的形成有直接关系^[30]。由于木本植物形成凋落物中木质素含量比草本植物高, 形成凋落物残体质量比草本植物好。本研究结果表明, 随着植被恢复进程, 土壤活性有机碳的分配比率显著增加($P<0.05$)(表 4), 与吴建国等^[31]的研究结果基本一致。同时, 木本植物的根系分布较草本植物要深, 而草本植物的根系大多分布于 0~20 cm 土层, 因此, 随着土层深度的增加, MBC 与 ROC 的分配比率逐渐降低($P>0.05$), LFOC 的分配比率显著下降

($P<0.05$)(表 4), 这与朱志建等^[32]的研究结果基本一致。但本研究中, 随着土层深度的增加, DOC 分配比率逐渐上升($P>0.05$), 与陈晓琳等^[27]对红壤的研究结果刚好相反, 可能有以下几方面的原因: (1) 紫色土是一种岩性土, 具有很大的垂直水分运动速率, DOC 随渗漏水垂直下渗而迁移, 部分累积于 20~40 cm 土层; (2) 随土层深度的增加, 土壤有机质降低, 提高了土壤中的粘土矿物, 易于 DOC 在 20~40 cm 土层被吸附而形成累积^[33~34]; (3) 随着土层深度的增加, 土壤 pH 值升高(表 2), 土壤有机质的溶解增加, 提高了 DOC 的产生量^[35~36]。

董扬红等^[37]的研究表明, SOC 与 MBC、LFOC、ROC 的相关系数分别为 0.594、0.734、0.980, 达极显著相关水平($P<0.01$), DOC 与 SOC 的相关系数为 0.340, 相关性不明显($P>0.05$)。李忠武等^[24]对红土荒地、松林、草坡地的活性有机碳分布特征进行研究, 结果表明 ROC 与 DOC、MBC 之间呈极显著正相关关系($P<0.01$), 但 DOC 与 MBC 的相关性不明显($P>0.05$)。本研究结果与他们的基本一致(表 5), 不同的是本研究中 DOC 与 SOC 的相关系数为 0.756 ($P<0.01$), DOC 与 MBC 的相关系数为 0.814 ($P<0.01$), 可能与衡阳紫色土丘陵坡地 DOC 含量($2.98\sim 11.98\text{ g kg}^{-1}$)(表 3)较高, 且变化幅度较大有关。

姜培坤^[38]对浙江省临安市玲珑山黄红壤不同林分土壤活性有机碳库进行研究, 结果表明各类活性有机碳库与全氮、碱解氮、速效磷和速效钾呈显著与极显著正相关关系($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。本研究结果与其相似, 不同的是本研究中土壤速效钾与各类活性有机碳库的相关性不明显(表 6), 可能与紫色土是富钾土壤, 且速效钾不同恢复阶段与土层间的变化不大(表 2)有关^[39]。这说明随着恢复进程, 土壤质量会得到不断改善(表 2), 土壤活性有机碳库不断累积与形成(表 3), 同时也提示我们在植被恢复中, 必须从生态重建的高度, 科学引入后续物种, 促进植物群落的拓殖与更替, 以加速区域生态恢复进程^[40]。

参考文献

- [1] CLEVELAND C C, NEMERGUT D R, SCHMIDT S K, et al. Increases in soil respiration following labile carbon additions linked to rapid shifts in soil microbial community composition [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 82(3): 229–240. doi: 10.1007/s10533-006-9065-z.
- [2] SHEN H, CAO Z H, HU Z Y. Characteristics and ecological effects of

- the active organic carbon in soil [J]. *Chin J Ecol*, 1999, 18(3): 32–38.
- 沈洪, 曹志宏, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应 [J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32–38.
- [3] 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]. *Ecol Environ Sci*, 2013, 22(2): 229–232.
- 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.
- [4] KENDRA K M, SARAH E H. Comparison of liable soil organic matter fractionation techniques [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 2004, 68(5): 1616–1625. doi: 10.2136/sssaj2004.1616.
- [5] YANG N, ZOU D S, YANG M Y, et al. The change of soil microbial biomass carbon and the relationship between it and soil physio-chemical factors in different restoration stages on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, 22(1): 25–30.
- 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微生物量碳的变化及其与土壤理化因子的关系 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(1): 25–30.
- [6] WANG J, XIE H T, ZHU P, et al. Cannotation and modern analysis method for active soil organic matter (carbon) [J]. *Chin J Ecol*, 2003, 22(6): 109–112.
- 王晶, 谢宏图, 朱平, 等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述 [J]. *生态学杂志*, 2003, 22(6): 109–112.
- [7] PAUL E A. Dynamics of soil organic matter in soils [J]. *Plant Soil*, 1984, 76(1): 275–285.
- [8] YANG N, ZOU D S, YANG M Y, et al. Relationships between vegetation characteristics and soil properties at different restoration stages on slope land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, south-central China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24(1): 90–96.
- 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植被特征与土壤性质的关系 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 90–96.
- [9] YANG N, ZOU D S, YANG M Y, et al. Changes of the soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, south-central China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(10): 2693–2701. doi: 10.5846/stxb201301030012.
- 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变 [J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2693–2701. doi: 10.5846/stxb201301030012.
- [10] YANG N, ZOU D S, YANG M Y, et al. Soil enzyme activities in different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, China [J]. *J Plant Nutri Fert*, 2013, 19(6): 1516–1524. doi: 10.11674/zwyf.2013.0629.
- 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酶活性特征研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1516–1524. doi: 10.11674/zwyf.2013.0629.
- [11] XIE T S, HE Y H. Research on the rule of soil erosion and allowable eroding amount in the purple soil upland of the middle part of Hunan Province [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2005, 12(1): 61–64. doi: 10.3969/j.issn.1005–3409.2005.01.025.
- 谢庭生, 何英豪. 湘中紫色土丘岗区水土流失规律及土壤容许侵蚀量的研究 [J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 61–64. doi: 10.3969/j.issn.1005–3409.2005.01.025.
- [12] LIU Z Y, YANG N. Effects of re-vegetation on soil enzyme activities and soil physio-chemical properties on sloping-land with purple soils in Hengyang City [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2015, 35(2): 20–26.
- 刘作云, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复对土壤酶活性及土壤理化性质的影响 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 20–26.
- [13] KMADA K, SATO O, OHSUMI Y, et al. Humus composition of mauntain soils in central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid [J]. *Soil Sci Plant Nutri*, 1967, 13(5): 151–158. doi: 10.1080/00380768.1967.10431990.
- [14] YANG N, CHEN J, YANG M Y, et al. Ramet population structures of *Sinarundinaria basihirsuta* on different canopy conditions of *Taiwania flousiana* forest in Leigong Mountain of Guizhou Province [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2013, 33(11): 2326–2331.
- 杨宁, 陈璟, 杨满元, 等. 贵州雷公山秃杉林不同林冠环境下箭竹分株种群结构特征 [J]. *西北植物学报*, 2013, 33(11): 2326–2331.
- [15] YANG N, FU M Y, YANG M Y, et al. Soil seed bank properties under different land-used models on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, south-central China [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2014, 34(11): 2324–2330. doi: 10.7606/j.issn.1000–4025.2014.11.2324.
- 杨宁, 付美云, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同土地利用模式下土壤种子库特征 [J]. *西北植物学报*, 2014, 34(11): 2324–2330. doi: 10.7606/j.issn.1000–4025.2014.11.2324.
- [16] BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 1–495.
- 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1–495.
- [17] WANG Q K, WANG S L, FENG Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 35(3): 513–518. doi: 10.3321/j.issn:1000–0933.2005.03.019.
- 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系 [J]. *生态学报*, 2005, 35(3): 513–518. doi: 10.3321/j.issn:1000–0933.2005.03.019.
- [18] SHEN H, CAO Z H, XU Z H. Effects of fertilization on different

- carbon and fractions and carbon pool management index in soils [J]. *Acta Pedol Sin*, 2000, 37(2): 166–173. doi: 10.3321/j.issn:0564-3929.2000.02.003.
- 沈洪, 曹志宏, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响 [J]. *土壤学报*, 2000, 37(2): 166–173. doi: 10.3321/j.issn:0564-3929.2000.02.003.
- [19] NI J Z, XU J M, XIE Z M. The size and characterization of biologically active organic carbon pool in soils [J]. *J Plant Nutri Fert*, 2001, 7(1): 56–63. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2001.01.009.
- 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤生物活性有机碳库及其表征指标的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 56–63. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2001.01.009.
- [20] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(6): 703–707. doi: 10.1016/0038-0717(87)90052-6.
- [21] CHAAI A, DEXTER M, PERRON K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation [J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35(9): 1231–1243. doi: 10.1016/S0038-0717(03)00186-X.
- [22] YANG N, ZOU D S, YANG M Y, et al. Dynamic changes of soil microbial biomass and soil nutrients along re-vegetation on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, south-central China [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, 50(12): 144–150. doi: 10.11707/j.1001-7488.20141220.
- 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物生物量与土壤养分演变 [J]. *林业科学*, 2014, 50(12): 144–150. doi: 10.11707/j.1001-7488.20141220.
- [23] YANG M Y, YANG N. Dynamic changes of soil biochemical intensity along re-vegetation on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, south-central China [J]. *Ecol Environ Sci*, 2015, 24(7): 1125–1127. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.007.
- 杨满元, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复过程中土壤生化强度变化 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(7): 1125–1127. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.007.
- [24] LI Z W, GUO W, SHEN W P, et al. Effect of land use type on the distribution of labile organic carbon and its relationship to herb biomass in red soil hilly region [J]. *J Hunan Univ (Nat Sci)*, 2013, 40(3): 76–82. doi: 10.3969/j.issn.1674-2974.2013.03.014.
- 李忠武, 郭旺, 申卫平, 等. 红壤丘陵区不同地类活性有机碳分布特征及与草本生物量关系 [J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2013, 40(3): 76–82. doi: 10.3969/j.issn.1674-2974.2013.03.014.
- [25] WANG D, GENG Z C, SHE D, et al. Vertical distribution of soil active carbon and soil organic carbon storage under different forest types in the Qinling Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(6): 1569–1577.
- 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1569–1577.
- [26] LIU B R, YANG Y, CHEN L. Distribution characteristics of soil labile organic carbon of four typical plant communities in desert steppe of Ningxia [J]. *Acta Agrest Sin*, 2014, 22(5): 986–990. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2014.05.012.
- 刘秉儒, 杨阳, 陈林. 宁夏荒漠草原 4 种典型植物群落土壤活性有机碳垂直分布特征 [J]. *草地学报*, 2014, 22(5): 986–990. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2014.05.012.
- [27] CHEN X L, LI Z W, WANG X Y, et al. Spatial distribution of topsoil labile organic carbon of *Pinus elliottii* ecosystem in the central subtropical region [J]. *Geogr Res*, 2011, 30(10): 1825–1834.
- 陈晓琳, 李忠武, 王晓燕, 等. 中亚热带红壤丘陵区松林生态系统表层土壤活性有机碳空间分异规律 [J]. *地理研究*, 2011, 30(10): 1825–1834.
- [28] BOONE R D. Light fraction soil organic matter: Origin and contribution to net nitrogen mineralization [J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, 26(11): 1459–1468. doi: 10.1016/0038-0717(94)90085-X.
- [29] LIU S L, SU Y R, HUANG D Y, et al. Response of cmic-to-corg to land use and fertilization in subtropical region of China [J]. *Sci Agri Sin*, 2006, 39(7): 1411–1418. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2006.07.016.
- 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 等. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1411–1418. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2006.07.016.
- [30] JOBBÁGY E G, JACKSON R B, et al. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecol Appl*, 2000, 10(2): 423–436. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2.
- [31] WU J G, ZHANG X Q, XU D Y. Changes in soil labile organic carbon under different land use in the Liupan Mountain Forest Zone [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2004, 28(5): 657–664.
- 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 657–664.
- [32] ZHU Z J, JIANG P K, XU Q F. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation [J]. *For Res*, 2006, 19(4): 523–526. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2006.04.022.
- 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较 [J]. *林业科学研究*, 2006, 19(4): 523–526. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2006.04.022.
- [33] YAN J H, ZHANG F H, TAN B, et al. Effects of reclamation history of deserted salinized farmlands on organic carbon composition and

- aggregate stability of the soils [J]. *Acta Pedol Sin*, 2013, 50(6): 116–122. doi: 10.11766/trxb201303080108.
- 闫靖华, 张凤华, 谭斌, 等. 不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 116–122. doi: 10.11766/trxb201303080108.
- [34] YAN H Q, YANG N. Variations of vegetation and soil properties in the process of natural re-vegetation on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. *J Hunan Ecol Sci*, 2015, 2(3): 12–17. doi: 10.3969/j.issn.1671-6361.2015.03.003.
- 颜衡祁, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地自然恢复过程中植被与土壤特性变化 [J]. *湖南生态科学学报*, 2015, 2(3): 12–17. doi: 10.3969/j.issn.1671-6361.2015.03.003.
- [35] SHENG H, ZHOU P, YUAN H, et al. Profile distribution characteristics of dissolved organic carbon in different types of subtropical paddy soils [J]. *Chin J Ecol*, 2013, 32(7): 1698–1702.
- 盛浩, 周萍, 袁红, 等. 亚热带不同稻田土壤溶解性有机碳的剖面分布特征 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(7): 1698–1702.
- [36] LIU C H, YANG N. Stability of plant communities in different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang City, Hunan Province [J]. *J Hunan Ecol Sci*, 2016, 3(1): 7–12.
- 刘朝辉, 杨宁. 湖南省衡阳市紫色土丘陵坡地不同恢复阶段植物群落稳定性 [J]. *湖南生态科学学报*, 2016, 3(1): 7–12.
- [37] DONG Y H, ZENG Q C, LI Y Y, et al. The characteristics of soil active organic carbon composition under different vegetation types on the Loess Plateau [J]. *Acta Agrest Sin*, 2015, 23(2): 277–284. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2015.02.010.
- 董扬红, 曾全超, 李娅芸, 等. 黄土高原不同植被类型土壤活性有机碳组分分布特征 [J]. *草地学报*, 2015, 23(2): 277–284. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2015.02.010.
- [38] JIANG P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, 41(1): 10–13.
- 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究 [J]. *林业科学*, 2005, 41(1): 10–13.
- [39] LIU Z Y, YANG N. Soil ecological stoichiometry properties of different re-vegetation stages on sloping-land of purple soil [J]. *Chin Agri Sci Bull*, 2015, 31(18): 163–167.
- 刘作云, 杨宁. 紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤生态化学计量特征 [J]. *中国农学通报*, 2015, 31(18): 163–167.
- [40] WEN D X, YANG N, YANG M Y. Effects of re-vegetation on soil microbial functional diversity in purple soils at different re-vegetation stages in Hengyang, Hunan Province, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27(8): 2645–2654.
- 文东新, 杨宁, 杨满元. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复对土壤微生物功能多样性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2645–2654.