

红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳组分变化

邓翠, 吕茂奎, 曾敏, 张康靖, 任寅榜, 聂阳意, 谢锦升

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 为了解土壤有机碳组分在植被恢复过程中的变化规律, 选取了红壤区本底条件基本一致的不同恢复年限马尾松林为研究对象, 以未治理的侵蚀裸地(CK1)和恢复后的次生林(CK2)为对照, 采用物理化学分组法, 将土壤有机碳分为由溶解性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POM)组成的活性碳库、物理保护态的团聚体与粉粒和黏粒组合成的缓效性碳库以及化学结构稳定的惰性碳库。结果表明: 在植被恢复过程中(0~30年)活性碳库储量及其分配比例在植被恢复7~10年显著提高($P < 0.05$), 并在植被恢复27~30年保持较稳定水平, 缓效性碳库储量及其分配比例在27~30年呈显著变化($P < 0.05$), 而活性碳库分配比例有所降低, 且POM、DOC与缓效性碳库均达显著相关($P < 0.01$), 说明活性碳库在恢复7~10年后逐渐向缓效性碳库转化; 惰性碳库储量随恢复年限不断增加, 但其分配比例保持较稳定水平。相关性分析显示, 恢复年限、不同组分与不同碳库均达显著相关($P < 0.01$), 且缓效性碳库随植被恢复最敏感, 说明在马尾松恢复过程中土壤有机碳以活性碳库积累逐渐转化为缓效性碳库积累为主, 进而影响惰性碳库的积累, 有利于土壤有机碳的长期保持。

关键词: 退化红壤; 植被恢复; 碳组分变化; 土壤有机碳库

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0178-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.029

Dynamics of Soil Organic Carbon Fractions with the Restoration Process of *Pinus massoniana* Plantation in Eroded Red Soil Region

DENG Cui, LÜ Maokui, ZENG Min, ZHANG Kangjing, REN Yinbang, NIE Yangyi, XIE Jinsheng

(1. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007;

2. School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: To study the variation of soil organic carbon in fractions with the restoration process, we selected the different ages of *Pinus massoniana* plantations as the research object and take the bare land (CK1) and secondary forest (CK2) as the control, which is basically consistent with the similar management histories in erosive red soil area. The physical and chemical fractionation method was applied, three pools were isolated in soil organic carbon. The active carbon was composed of dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic matter (POM); the slow carbon was composed of SOC bound to silt and clay and SOC attached to sand particles or occluded in aggregates; the passive carbon is a chemically recalcitrant fraction. The results showed that, in the process of vegetation restoration (0~30 years), the storage of active carbon and its distribution proportion in vegetation restoration was significantly improved in the recovery of 7~10 year ($P < 0.05$), its storage and distribution remained at a relatively stable level in the vegetation recovery of 27~30 year; the storage of slow carbon and its distribution was significant changes in the recovery of 27~30 year ($P < 0.05$). The distribution of active carbon pool was decreased, there was significantly correlated between active carbon pool (POM, DOC) and slow carbon pool ($P < 0.01$), indicating that the active carbon pool in the recovery gradually transformed to the slow carbon pool after 7~10 year; the stocks of recalcitrant carbon pool continued to increase along with the chronosequences, but its proportion remained relatively stable level. Correlation analysis showed that there was a significant correlation between the chronosequences and the factions with the pools ($P < 0.01$), at the same time, the slow carbon pool was the most sensitive in the process of vegetation, indicating that the soil organic carbon in activated carbon accumulation gradually transformed into slow carbon pools accumulation in *P. massoniana* recovery, thereby affecting the recalcitrant carbon

收稿日期: 2017-03-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(31370465); 973计划前期专项(2012CB722203)

第一作者: 邓翠(1992—), 女, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事侵蚀地生态恢复研究。E-mail: 1063893443@qq.com

通信作者: 谢锦升(1972—), 男, 福建上杭人, 教授, 博导, 主要从事侵蚀地生态恢复与全球气候变化研究。E-mail: jshxie@163.com

accumulation, which was good for the long-term preservation of soil organic carbon.

Keywords: erosive red soil; vegetation restoration; variation of SOC fractions; SOC pools

土壤有机碳是土壤的重要组成部分,不仅有利于维持土壤结构并减少水土流失^[1-2],同时在全球碳循环的变化中也发挥着重要的作用,成为当前研究热点^[3]。植被覆盖和土地利用不仅改变土壤有机碳含量^[4-5],同时也改变土壤有机碳的结构^[1,6]。为此,除了对土壤总有机碳进行研究^[4-7],多数研究者用不同分组方法对土壤有机碳进行隔离^[5-10],但目前国内研究仍集中于同性质质的土壤有机碳研究,如单纯考虑团聚体的变化或活性碳的变化^[2,5-6],较难从整体上把握土壤有机碳异质结构^[11],造成对土壤不同性质有机碳组分关系缺乏了解,限制了对土壤有机碳形成和积累的认识。鉴于土壤有机碳的物理化学异质性^[11],Zimmermann等^[12]近年来发展的物理化学分组法,把土壤有机碳库分为非稳定的溶解性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POM)和物理保护态的砂粒与团聚体(S+A)、有机碳与粉粒和黏粒组合(s+c)以及化学结构稳定的惰性碳(rSOC)5个组分,并把这5个组分归为活性碳库(DOC&POM)、缓效性碳库(S+A&s+c)、惰性碳库(rSOC),以期为模型赋值提供基础数据。该方法目前已应用于国外土地利用变化,如Poeplau等^[13]发现造林有利于稳定碳库转变为活性碳库,Wiesmeier等^[14]发现与草地和耕地系统相比,森林拥有较多的活性碳库,Trigalet等^[15]发现随着耕地撂荒的演替,活性碳库不断增加,而随着演替的进行,稳定性碳不断增加。

福建省长汀县历史上由于人为破坏导致土壤退化严重,上世纪80年代至今在当地政府的重视下,对该退化生态系统进行了大量的恢复和重建工作,并取得一定成效。过去研究对土壤总有机碳^[16,4]和活性碳研究^[5]有了一定认识,但保护性有机碳动态研究仍是该区的薄弱环节。植被恢复过程中保护性有机碳如何积累,这对于揭示固碳潜力较大的退化土壤碳积累具有重大意义^[16]。鉴于此,本研究采用时空代换法选取了本底较一致的不同恢复年限的马尾松人工林为研究对象,分析土壤有机碳组分在恢复过程中的变化趋势,探究不同有机碳组分的关系,揭示不同性质有机碳库的固碳机制,为水土保持生态恢复工作及其相应的林地碳汇评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

长汀县河田镇地处福建西南部(116°18′—116°31′E, 25°33′—25°48′N),海拔300~500 m,属中亚热

带季风气候区。年均气温17.5~18.8℃,年均降水量1737 mm,年均蒸发量1403 mm,年均无霜期260 d,平均日照时数1925 h,≥10℃积温为4100~4650℃。土壤为花岗岩发育的红壤,抗蚀能力弱。地带性植被(常绿阔叶林)破坏殆尽,现有植被主要以马尾松(*Pinus massoniana*)次生林和人工林为主。

本研究采用时空代换法,选取了土壤母岩和成土条件相同、地形及地表生态过程相似的6个不同恢复年限的以马尾松为主试验样地组成植被恢复年限序列。样地主要包括:(1)侵蚀裸地,作为植被恢复前的对照(CK1),土壤侵蚀度达强度以上,地表以疏松的马尾松小老头树及少量的芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)和野古草(*Arundinella setosa*)为主;(2)伯湖(恢复7年)和乌石寨(恢复8年),数据取平均值记为恢复7年,分别与2003和2004年开始治理,通过整地和施肥措施,补植水土保持林草,林下植被盖度接近100%,也促进了马尾松的生长;(3)石官凹(恢复10年)和游坊(恢复11年),数据取平均值记为恢复10年,数据取平均值记为恢复10年,分别于2000年和2001年对低效马尾松林进行改造治理,主要通过水平沟整地,结合施肥补植胡枝子(*Lespedeza bicolor*);(4)水东坊,恢复27年,于1984年通过水平沟整地,补植黑荆(*Acacia mearnsii*)并套种胡枝子,后黑荆死亡;(5)八十里河,恢复30年,于1981年治理,保留原有的马尾松,并在马尾松林下套种胡枝子、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*);(6)次生林,林龄约100年,作为恢复后的对照(CK2),主要树种为马尾松和木荷(*Schima superba*)混交。样地治理前的土壤侵蚀状况以及土壤有机质含量与侵蚀裸地基本一致,均为A层流失,B层出露,治理期间封禁管理,并适当施以肥料,样地基本情况见表1。

1.2 样地调查与样品采集

2011年7月在每块试验地设3个20 m×20 m标准地,分别进行本底和生物量调查。在每个标准地上用内径5 cm土钻按“S”形随机、等量、多点混合取样,取8~10个点,每个样地取3组0—10 cm和10—20 cm土层混合土样,带回室内,风干保存,用环刀法测土壤容重。2015年10月重新对该样品整理,过2 mm筛,风干后备用。

1.3 分组与测定

运用Zimmermann等^[12]物理化学分组方法,根据土壤周转时间不同把5个不同有机碳组分为活性碳库、缓效性碳库、惰性碳库^[14](图1)。分离出来的组分,在65

℃下烘干称重,研磨过孔径为 0.149 mm 筛后包样。

土壤有机碳及组分测定方法:(1)土壤总有机碳含量采用浓硫酸—重铬酸钾高温外加热氧化法测定;(2)可溶性有机碳含量用水浸提,总有机碳分析仪(TOC-VCPH, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定其浸提液;(3)其余组分 C 含量用 CN 元素分析仪(Elementar Vario EL III, Germany)测定,s+c 组分有机碳含量用差减法获得。

表 1 样地基本情况

样地	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向/ (°)	林分密度/ (株·hm ⁻²)	林下 覆盖度/%	平均 胸径/cm	平均 树高/m	凋落物输入量/ (t C·hm ⁻² ·a ⁻¹)
侵蚀裸地	315	12	NE35	611	45	4.30	3.10	0.19
伯湖	318	18	ES30	1358	92	7.60	5.41	1.20
乌石炭	378	22	SW20	1462	91	9.14	7.01	1.91
石官凹	314	15	SW20	1141	70	10.40	5.90	1.86
游坊	328	21	ES25	1558	80	7.50	5.70	1.45
水东坊	312	18	NE50	1192	95	16.90	14.30	3.23
八十里河	310	18	NE50	2237	97	16.90	14.30	2.90
次生林	321	10	WN10	475	95	47.50	18.97	—

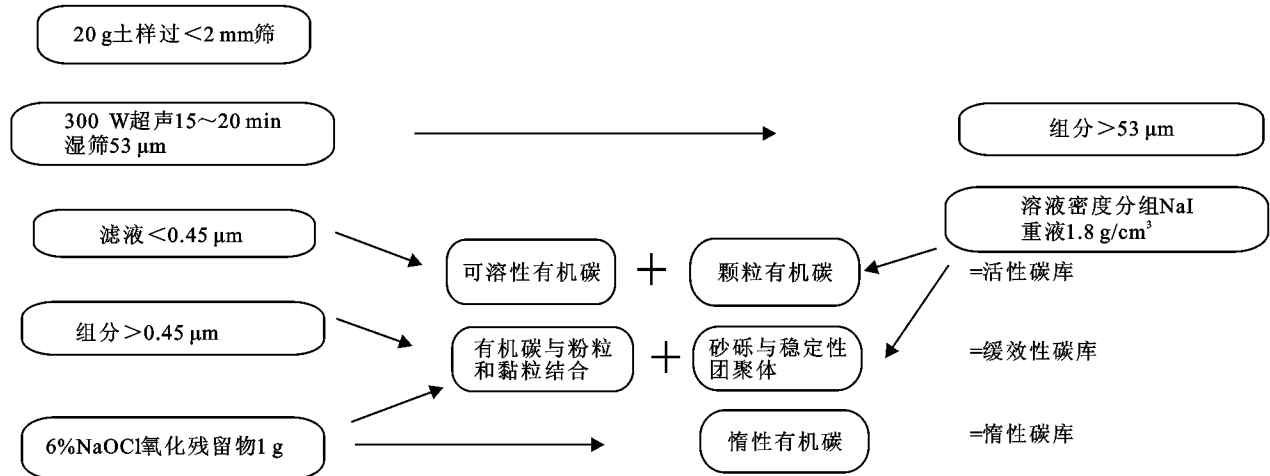


图 1 土壤样品分组流程

1.4 计算方法与统计分析

土壤有机碳储量分配比例计算:

$$P_i = \frac{SOCS_i}{SOCS} \times 100\%$$

式中: P_i 为 i 组分分配比例; $SOCS_i$ 为 i 组分土壤有机碳储量(t/hm^2); $SOCS$ 为土壤总有机碳储量(t/hm^2)。

土壤有机碳储量计算:

$$SOCS_i = C_i \times w_i \times \rho \times H \times 10$$

式中: $SOCS_i$ 为 i 组分土壤有机碳储量(t/hm^2); C_i 为被检测 i 组分有机碳含量(g/kg); w_i 为 i 组分占土壤重量比例; ρ 为土壤容重(g/cm^3); H 为土层厚度(m)。

以侵蚀裸地(CK1)为对照,敏感性指标^[13,17] = (变量最大值—变量最小值)/变量最小值

采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 软件对数据进行处理,单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 多重比较法对不同数据间进行差异性比较($P<0.05$), Pearson 进行相关分析,Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 植被恢复过程中土壤有机碳组分储量及其分配比例的变化

由表 2 可以看出,植被恢复 7~10 年两个土层可

溶性有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POM)储量显著提高($P<0.05$),恢复 10 年后不断下降,在恢复 27~30 年保持稳定水平且逐渐趋近于 CK2。DOC 和 POM 分配比例在恢复 7~10 年出现显著变动($P<0.05$),恢复 27~30 年后与 CK1 和 CK2 无显著差异,说明 DOC 和 POM 在恢复 27~30 年后保持较稳定的水平。砂砾和闭蓄态团聚体(S+A)和有机碳与粉粒和黏粒结合(s+c)储量在植被恢复 27~30 年才显著变化($P<0.05$),但仍低于恢复后的 CK2(表 2),说明 S+A 和 s+c 在恢复 27~30 年后仍处于不断增长趋势。S+A 和 s+c 组分分配比例在恢复 27~30 年显著增加后($P<0.05$),并保持在较稳定的水平。恢复 27~30 年 0—10 cm 土壤 s+c 分配比例为 20.27%~39.20%与恢复后的 CK2(28.63%)无显著差异,0—10 cm 土壤 S+A 组分分配比例总体与s+c变化趋势一致,10—20 cm 土层也具有相似规律。惰性碳(rSOC)储量随植被恢复年限的变化幅度较小,其分配比例在植被恢复过程中处于较稳定的水平(表 2)。土壤总有机碳储量总体随恢复年限的延长而增加,植被恢复初期显著高于 CK1($P<0.05$),恢复 27~30 年显著高于恢复 7~10 年的水平($P<0.05$),但显著

低于恢复后的 CK2($P<0.05$) (表 2),说明侵蚀地具 有较大的恢复潜力。

表 2 植被恢复过程中土壤有机碳组分储量及其分配比例

土层 深度/cm	恢复 年限/a	回收率/ %	可溶性有机碳		颗粒有机碳		砂粒和闭蓄态团聚体		有机碳与粉粒和粘粒结合		惰性碳		土壤总有 机碳储量/ (t·hm ⁻²)
			储量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	储量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	储量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	储量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	储量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	
0—10	CK1	93.80	0.01±0.00c	0.35c	0.61±0.11c	27.38b	0.33±0.09d	14.81c	0.61±0.07c	28.05ab	0.65±0.15d	29.42a	2.36±0.42d
	7	94.78	0.08±0.05b	1.10a	2.97±0.99b	44.00a	0.84±0.33d	13.80c	1.56±1.31bc	20.65b	1.38±0.51c	20.45b	7.20±1.95c
	10	96.17	0.08±0.04b	0.99a	2.95±1.05b	39.22a	1.58±0.70cd	20.67bc	1.37±0.42bc	18.78b	1.40±0.40c	20.35b	7.67±1.90c
	27	95.84	0.03±0.00bc	0.24c	2.08±0.71b	20.09b	4.85±0.81b	45.88a	2.16±0.78b	20.27b	1.41±0.06c	13.52b	10.99±1.41b
	30	96.98	0.05±0.00bc	0.38c	3.07±0.42b	24.98b	2.29±0.79c	18.47c	4.93±1.32a	39.20a	2.09±0.52b	16.69b	12.77±0.81b
	CK2	94.76	0.17±0.03a	0.80ab	4.47±0.91a	21.49b	6.23±1.95a	29.74b	5.85±0.56a	28.63ab	3.96±0.24a	19.34b	21.80±1.59a
10—20	CK1	94.74	0.01±0.00b	0.44b	0.28±0.18b	19.32ab	0.19±0.08b	13.91b	0.26±0.09b	24.49ab	0.63±0.49b	41.76a	1.45±0.79c
	7	94.53	0.03±0.03b	0.89a	1.10±0.59b	29.01a	0.49±0.22b	17.03b	0.65±0.48b	17.17b	1.31±0.66b	35.90a	3.76±1.46bc
	10	94.76	0.03±0.02b	0.96a	1.00±0.55b	28.86a	0.57±0.31b	16.70b	0.58±0.51b	15.36b	1.16±0.53b	38.11a	3.50±1.42bc
	27	95.43	0.01±0.00b	0.31b	0.41±0.07b	9.30b	2.36±1.00a	48.20a	0.93±0.50b	19.18ab	1.17±0.69b	23.00a	5.14±2.10b
	30	93.67	0.02±0.00b	0.53ab	0.61±0.20b	16.61ab	0.67±0.12b	19.03b	1.23±0.58b	33.17ab	1.10±0.24b	30.66a	3.86±0.83bc
	CK2	96.21	0.10±0.01a	0.94a	1.89±0.80a	17.18ab	2.06±1.18a	20.00b	3.82±1.85a	35.15a	2.86±0.51a	26.74a	11.20±2.47a

注:表中数字后小写字母表示同一土层中不同恢复年限间指标比较。下同。

2.2 植被恢复过程中土壤有机碳库的储量及其分配比例变化

根据土壤有机碳的三库模型结果发现,活性有机碳库储量在植被恢复初期(7~10 年)显著提高($P<0.05$),恢复至 27 年后趋于相对稳定的水平。缓效性碳库储量在植被恢复初期变化较小,而在植被恢复至 27~30 年显著增加($P<0.05$),但仍显著低于恢复后的 CK2(图 2),说明缓效性碳库的恢复需要相对更长的时间。惰性碳库储量随植被恢复年限的变化幅度较小,裸地 0—10 cm 和 10—20 cm 土层惰性碳库储量分别为 0.65 t/hm² 和 0.63 t/hm²,在植被恢复过程中 0—10 cm

和 10—20 cm 土层变化幅度分别为 1.38~2.09 t/hm² 和 1.10~1.71 t/hm²,显著低于恢复后 CK2 的 3.96 t/hm² 和 2.86 t/hm² ($P<0.05$),说明惰性碳库的恢复是一个更长期的过程。植被恢复过程中,土壤有机碳的 3 个分库储量占总碳储量的比例呈现交替变化的趋势。活性碳库分配比例在植被恢复初期(7~10 年)显著升高后不断下降且趋于稳定的趋势。缓效性碳库所占总碳储量在植被恢复 10 年内无显著变化,随后呈递增趋势并在植被恢复 27~30 年后趋于稳定。植被恢复过程中惰性碳的分配比例基本无显著变化,说明短期的植被恢复对土壤惰性碳库的积累影响较小。

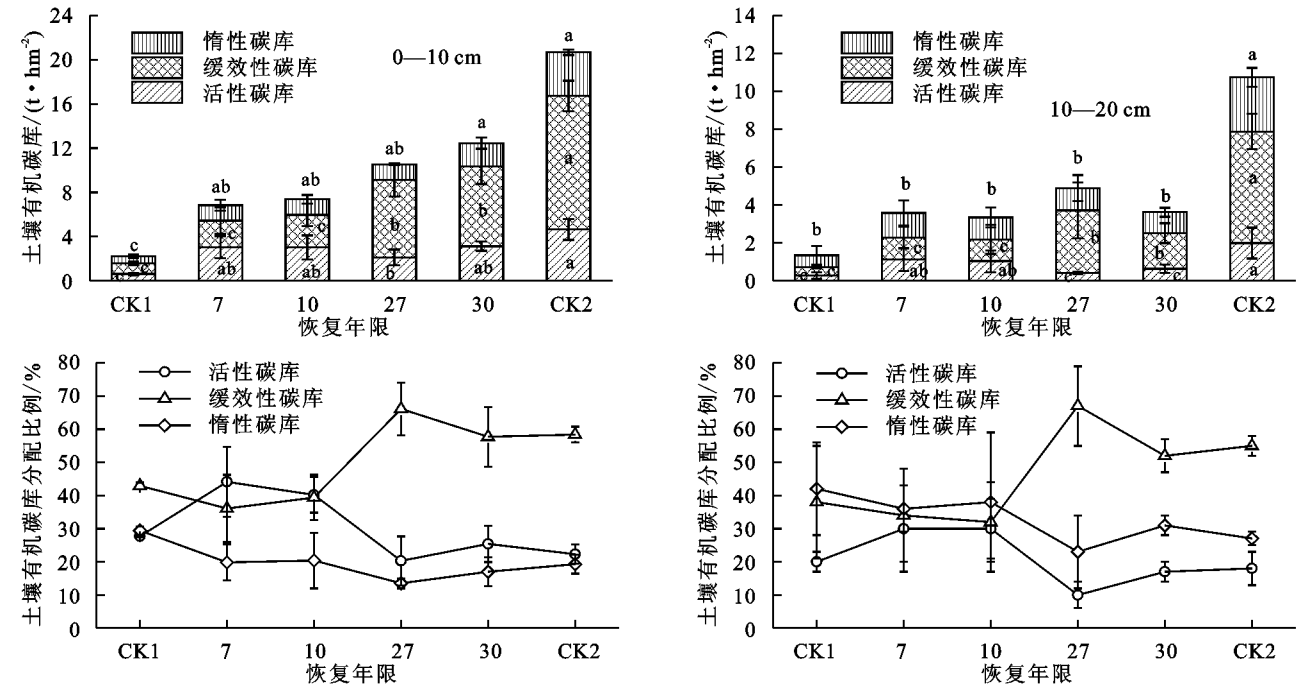


图 2 植被恢复过程中土壤活性碳库、缓效性碳库和惰性碳库有机碳储量及其分配比例

2.3 土壤有机碳库的影响因素及敏感性分析

相关性分析表明,土壤有机碳 3 个碳库储量均与恢

复年限及土壤有机碳组分均成显著正相关关系($P<0.01$)(表 3),说明恢复年限及各组分均对土壤活性碳

库、缓效性碳库和惰性碳库的积累有一定的影响。

植被恢复过程中表层土(0—20 cm)不同有机碳组分敏感性分析(表 4),缓效性碳在植被恢复过程中的变化的响应大于其他分库。不同组分的敏感性为缓效性碳库(3.80)>活性碳库(1.86)>惰性碳库(0.46)。由此可见,马尾松恢复过程中,缓效性碳库可以作为评估植被恢复对土壤有机碳库影响的良好指标。

表 3 土壤活性碳库、缓效性碳库和惰性碳库与恢复年限、有机碳组分的相关系数

项目	活性碳库	缓效性碳库	惰性碳库
年限	0.383**	0.771**	0.805**
DOC	0.813**	0.642**	0.725**
POM	0.999**	0.642**	0.585**
S+A	0.552**	0.900**	0.587**
s+c	0.612**	0.900**	0.799**
rSOC	0.593**	0.769**	—

注: ** 表示两个因素之间极显著相关($P<0.01$); $n=48$ 。

表 4 土壤活性碳库、缓效性碳库和惰性碳库随植被恢复变化的敏感性指标

土层深度/cm	土壤有机碳	活性碳库	缓效性碳库	惰性碳库
0—10	0.99	0.57	3.73	0.76
10—20	1.04	3.16	3.86	0.17
平均值	1.02	1.86	3.80	0.46

3 讨论

3.1 恢复年限对土壤有机碳库的影响

在不受人为干扰的情况下,森林演替过程中土壤有机质会随着时间推移逐渐积累,并逐渐达到饱和水平且趋于稳定^[18]。已有研究通过时空代换法来研究土壤有机碳随时间的变化,如周印东^[7]研究子午岭植被演替过程土壤有机碳的变化呈现稳定的趋势,张雪等^[8]研究长白山白桦林演替过程中土壤有机碳及其组分逐渐趋于稳定的规律。本研究中活性碳库储量在恢复 27~30 年达到稳定水平,而缓效性碳库和惰性碳库并未达到稳定水平,说明保护性碳达到稳定需要较长时间,不同林分类型有所差异。活性碳(DOC、POM)作为非保护性碳,具有较强的生物活性,主要来源于新鲜植物残体、根系凋落物等^[19];在植被恢复期间如施肥、整地等措施有利于刺激植被生长,增强生产力,增加了土壤有机质的输入,从而使土壤 POM 增加。因此,活性碳库更容易在较短时间内积累和恢复,这与吕茂奎等^[5]研究结果一致。缓效性碳库由闭蓄态团聚体以及有机碳(S+A)与黏粒、粉粒的结合体(s+c),是指土壤有机碳与无机结合部分,其主要通过无机胶体的胶结^[20-21]、黏粒的包裹、菌丝及根系的缠绕,对土壤有机碳具有物理保护作用^[1,21],这部分有机碳和土壤结构有很大关系,侵蚀植被恢复可以有效地改善土壤结构,提高土壤团聚体稳定性^[21]。

本研究发现,缓效性碳在恢复 27~30 年出现显著变化,一方面前期植被恢复使地力条件得到改善,减少了水土流失,为缓效性碳库恢复提供较好的环境;另一方面土壤有机质的积累为缓效性碳库的积累提供物质基础,而根系、菌丝及其分泌物等的增加利于为缓效性碳库的胶结提供吸存的场所,缓效性碳与恢复年限达到显著相关,说明恢复年限对缓效性碳库具有一定的影响。Trigalet 等^[15]研究耕地二次演替(耕地、草地、灌木、次生林)中发现 S+A 组分在 46 年才出现显著变化,与撂荒年限达到极显著相关。土壤惰性有机碳(rSOC)是土壤有机碳不易被氧化的部分,惰性碳库在植被恢复过程中并无显著变化,但随着恢复年限的增加不断积累的趋势。向慧敏^[10]研究针叶林演替后期(阔叶林)发现惰性碳占总有机碳的比例最高;陈小梅等^[9]发现森林演替后期(混交林、季风林)惰性有机碳持续积累,说明长期的植被恢复才足以使惰性碳库得到显著的提升,而本研究中只涉及到马尾松恢复过程,时间尺度较短,未来研究更应侧重马尾松演替之后缓效性碳库及惰性碳库的交互变化。此外,Trigalet 等^[15]在耕地演替系统中的研究发现惰性碳库在 10 年和 22 年出现较大变动,表明较为稳定的森林生态系统为惰性碳库的积累提供了更适宜的环境,利于土壤有机碳的积累。

3.2 土壤不同有机碳库的敏感性及其对植被恢复的响应

研究表明不同土壤有机碳库或组分敏感性表现为活性碳库或者 POM 对土地利用最敏感^[13,15,17],例如草地或耕地转换为森林之后增加了凋落物输入来源,导致活性碳库或者 POM 增加而较敏感,意味着森林生态系统有利于活性碳库的积累^[13-15]。本研究发现,缓效性碳库在植被恢复过程中表现最敏感,说明植被恢复对缓效性碳库影响最大,这和马尾松恢复年限及不同碳库之间相互影响有关。活性碳库分配比例在恢复 7~10 年出现显著变化,说明初期以活性碳恢复为主,缓效性碳分配比例在恢复 27~30 年才出现显著增加,而活性碳库分配比例在恢复 10 年之后不断降低,枯落物作为活性碳库重要来源,随着恢复年限不断增加(表 1),而活性碳库并未随着恢复年限的增加而增加;相关性分析表明,缓效性碳库与 POM、DOC 达到显著相关,推测这部分有机碳除了一部分供给微生物利用以外,较大一部分转为保护性碳的积累。这和吕茂奎等^[5]通过公式演算求证得出非保护性碳库向保护性碳库转化的结果较一致。惰性碳库分配比例在植被恢复过程中并未出现显著变化,但相关性分析表明惰性碳库与土壤不同组分之间达到显著相关,总体上各碳库之间存在一个活性碳库向非活性碳库转化的趋势,由于

惰性碳库是从粉粒与黏粒(s+c)中提取出来的,活性碳库和缓效性碳库的增加促进了惰性碳库的提高,但惰性碳库在本研究中变化不显著。活性碳库易受环境干扰因素,如火灾、物理和生物因素干扰等,不利于土壤有机碳长期存储^[14],本研究中土壤有机碳通过活性碳库主要逐渐转向缓效性碳库,并促进惰性碳库积累更有利于土壤有机碳的长期存储。因此,在红壤侵蚀区通过马尾松人工林恢复管理措施对土壤有机碳的长期稳定具有重要的意义。

4 结论

红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳组分储量总体上随恢复年限显著增加,且与恢复年限达到显著相关,说明土壤有机碳各组分储量受恢复年限影响,但不同组分各有差异。活性碳库储量及其分配比例在恢复7~10年(DOC,POM)显著增加,说明植被恢复初期以活性碳库积累为主,缓效性碳库分配比例在恢复10年后不断提高,而活性碳库分配比例不断下降意味着恢复初期活性碳库的积累导致缓效碳库储量在恢复27~30年出现显著变化,同时DOC和POM与缓效性碳库达到显著相关,缓效性碳库在植被恢复过程中响应最敏感,说明活性碳库很大部分被转化为缓效性碳库导致土壤有机碳增加。惰性碳库随植被恢复变化较缓,在本研究区需要一个更漫长的恢复时间。

参考文献:

- [1] 彭新华,张斌,赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报,2004,41(4):618-623.
- [2] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报,2008,28(2):702-709.
- [3] 潘根兴,周萍,李恋卿,等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报,2007,44(2):327-337.
- [4] 何圣嘉,谢锦升,曾宏达,等. 红壤侵蚀地马尾松林恢复后土壤有机碳库动态[J]. 生态学报,2013,33(10):2964-2973.
- [5] 吕茂奎,谢锦升,周艳翔,等. 红壤侵蚀地马尾松人工林恢复过程中土壤非保护性有机碳的变化[J]. 应用生态学报,2014,25(1):37-44.
- [6] 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):1183-1190.
- [7] 周印东. 子午岭植被演替过程中土壤有机碳积累与变化[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [8] 张雪,韩士杰,王树起,等. 长白山白桦林不同演替阶段土壤有机碳组分的变化[J]. 生态学杂志,2016,35(2):282-289.
- [9] 陈小梅,闫俊华,林媚珍,等. 南亚热带森林植被恢复演替中土壤有机碳组分及其稳定性[J]. 地球科学进展,2016,31(1):86-93.
- [10] 向慧敏. 南亚热带森林不同演替阶段与海拔高度下土壤有机碳组成及其稳定性[D]. 北京:中国科学院大学,2014.
- [11] Novara A, Gristina L, Kuzyakov Y, et al. Turnover and availability of soil organic carbon under different Mediterranean land-uses as estimated by ¹³C natural abundance[J]. European Journal of Soil Science,2013,64(4):466-475.
- [12] Zimmermann M, Leifeld A J, Schmidt A M W I, et al. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model[J]. European Journal of Soil Science,2007,58(3):658-667.
- [13] Poeplau C, Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe[J]. Geoderma,2013,192(1):189-201.
- [14] Wiesmeier M, Schad P, Lützw M V, et al. Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in southeast Germany (Bavaria)[J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2014,185(2):208-220.
- [15] Trigalet S. Changes in soil organic carbon pools along a chronosequence of land abandonment in southern Spain[J]. Geoderma,2016,268(1):14-21.
- [16] 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(6):53-59.
- [17] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征[J]. 生态学报,2015,35(11):3733-3742.
- [18] Castellano M J, Mueller K E, Olk D C, et al. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept[J]. Global Change Biology,2015,21(9):3200-3209.
- [19] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. Soil Science,2000,165(4):277-304.
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32(14):2099-2103.
- [21] Tisdall J M, Smith S E, Rengasamy P, et al. Aggregation of soil by fungal hyphae[J]. Soil Research,1997,35(1):55-60.