

DOI: 10.5846/stxb201707271358

江森华, 吕茂奎, 林伟盛, 谢锦升, 杨玉盛. 生态恢复对红壤侵蚀地土壤有机碳组成及稳定性的影响. 生态学报, 2018, 38(13): - .
Jiang M H, Lyu M K, Lin W S, Xie J S, Yang Y S. Effects of ecological restoration on soil organic carbon components and stability in a red soil erosion area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

生态恢复对红壤侵蚀地土壤有机碳组成及稳定性的影响

江森华^{1,2}, 吕茂奎², 林伟盛², 谢锦升^{2,*}, 杨玉盛²

1 闽江学院海洋学院地理科学系, 福州 350108

2 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要:为了研究红壤侵蚀区生态恢复过程中土壤有机碳的组成与动态变化,选择红壤侵蚀区生态恢复 10 a 和 30 a 的马尾松林为对象,以侵蚀裸地和次生林为对照,应用土壤有机碳物理分组方法,研究了侵蚀地植被恢复过程中表层土壤粗颗粒态有机碳(cPOC)、细颗粒态有机碳(fPOC)和矿质结合有机碳(MOC)含量及 POC/MOC 比值的变化。结果表明:生态恢复显著提高了土壤有机碳含量($P < 0.05$),土壤中不同组分有机碳含量也相应增加。生态恢复 10 a,土壤有机碳主要以 fPOC 形式积累,cPOC 和 MOC 没有显著变化,其中 0—10 cm 土层 POC 占总土壤有机碳(SOC)比例高达 64.1%,但稳定性较差。与恢复 10 a 相比,生态恢复至 30 a 时,0—10 cm 土壤 fPOC 含量相对不变,cPOC 和 MOC 含量均显著增加($P < 0.05$),10—20 cm 土壤 fPOC 和 MOC 增加量达到显著水平,而 cPOC 含量仍未显著增加,说明生态恢复过程中土壤固碳模式符合 SOC 饱和理论。生态恢复过程中土壤 POC/MOC 比值呈先升高后降低的趋势,且表层土壤大于亚表层土壤,说明随着生态恢复时间的增加,土壤有机碳稳定性逐渐提高,且亚表层土壤高于表层。因此,生态恢复对于侵蚀地碳固定的长期有效性具有重要意义。

关键词:颗粒态有机碳;矿物结合态有机碳;碳分配模式;稳定性

Effects of ecological restoration on soil organic carbon components and stability in a red soil erosion area

JIANG Miaohua^{1,2}, LYU Maokui², LIN Weisheng², XIE Jinsheng^{2,*}, YANG Yusheng²

1 Department of Geography, Ocean College, Minjiang University, Fuzhou 350108, China

2 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Composition and dynamics of soil organic carbon (SOC) are important indicators for soil restoration. However, little attention has been paid to SOC dynamics in red soil erosion areas. We conducted an investigation in the surface soil layers (0—10 and 10—20 cm) in *Pinus massoniana* woodlands with restoration histories of 10 and 30 years respectively. We studied the changes of the contents of soil organic carbon (SOC) fractions, coarse particulate organic carbon (cPOC), fine particulate organic carbon (fPOC), and mineral-associated organic carbon (MOC), as well as the POC/MOC ratios, to determine the effects of ecological restoration in both woodlands compared to bare land and secondary forest. Our results showed that the various types of soil organic carbon in both soil layers significantly increased with time of restoration ($P < 0.05$). In the stand with 10 years restoration, the soil fPOC increased significantly in the top soil (0—10 cm) which accounted for more than 64.1% of the total SOC content, indicating that the SOC mostly accumulated in the form of fPOC.

基金项目:国家自然科学基金(No. 31470501, 31370465); 973 前期项目(No. 2012CB722203); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划(2015)

收稿日期:2017-07-27; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jshxie@163.com

However, the soil cPOC and MOC had no significant changes. Compared to the stand with 10 years of restoration, in the *Pinus massoniana* woodland with 30 years of restoration, the soil cPOC and MOC increased significantly in the top layer (< 10 cm), but fPOC did not. The contents of fPOC and MOC also increased significantly in the 10—20 cm layer, but the cPOC contents did not. The results demonstrated that the patterns of SOC sequestration in the process of ecological restoration confirmed the SOC saturation theory. The soil POC/MOC ratio was higher in the top layer than in the deeper layer and initially increased with time of restoration, reaching its highest value in our study in the 10-year stand, then decreased rapidly. The results indicated that the SOC became more stable in subsoil than in topsoil with restoration time, which highlighted that ecological restoration plays a crucial role in long-term sequestration of SOC in red soil erosion areas.

Key Words: particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon; patterns of C distribution; stability

在全球气候变化背景下,如何恢复退化土壤的固碳能力是当代生态学和土壤学最关注的焦点问题和优先领域之一。通过造林、改善农林业的管理是增加退化土壤碳固定和减缓大气 CO₂ 浓度增加的重要方法^[1],具有成本低、潜力大和可持续性等优点。我国土壤退化严重,如何增加退化土壤的碳汇已成为我国亟待解决的重大战略性科学问题^[2]。南方红壤区是仅次于黄土高原的第二大侵蚀退化区,特别是花岗岩发育的红壤大面积严重退化,碳密度低,固碳潜力大^[2-3],因此增加侵蚀退化红壤的固碳能力对我国气候变化国际谈判具有重要意义。生态恢复的主要目标是恢复植被与土壤肥力,已有的研究大多关注红壤侵蚀地生态恢复对生物多样性、水土保持功能、土壤养分以及小气候的影响^[3]。土壤有机碳是表征土壤肥力的重要指标,近年来土壤有机碳稳定性的研究倍受关注^[4-5]。福建省长汀县是南方典型的红壤侵蚀区,自 20 世纪 80 年代至今,水土保持得到了当地政府的持续重视,该区先后对此类退化系统生态进行了大量的恢复与重建工作,“红色沙漠”已变成满山翠绿,极大地改善了当地生态环境^[2]。生态环境改善后,准确评价生态恢复对侵蚀红壤区土壤有机碳,尤其是土壤团聚体稳定过程中土壤中不同有机碳组分的动态变化,对于今后生态恢复工作具有重要的指导意义。

土壤有机质(SOM)是由不同分解阶段和不同周转速率的有机物组成。目前,多数研究采用物理分组法(如振荡分散或重液悬浮)分离出分布在团聚体间和团聚体内的有机质,用来解释不同 SOM 库与土壤结构之间的关系^[6],或解释土壤有机质稳定性和分解过程^[7-9]。按照粒径大小可将 SOM 分为颗粒态有机质(Particulate Organic Matter, POM, >53 μm)和矿质结合态有机质(Mineral-associated Organic Matter, MOM, < 53 μm)^[6]。其中,颗粒态有机碳(POC)通常由新近的未分解或半分解的动植物残体组成,其介于土壤“活性库”与“惰性库”之间有机质的“慢库”,对环境条件变化敏感^[10],而矿质结合态有机碳(MOC)是与粘粒和粉粒结合的那部分碳,其周转慢且稳定^[10-11]。通常利用 POC/MOC 值来反映土壤有机碳的质量和稳定程度^[12-14]。因此,本研究应用土壤有机碳物理分组方法,结合时空代换法,探讨红壤侵蚀地植被恢复过程马尾松林表层土壤不同组分有机碳含量及其分配比例的变化,揭示红壤侵蚀地马尾松恢复过程中土壤固碳机制的演变过程及长期有效性,以期今后侵蚀地生态恢复工作提供科学依据。

1 试验地概况

长汀县河田镇地处福建西南部汀江上游,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,年均降雨量、蒸发量分别为 1700 mm 和 1403 mm;年平均气温 17.5—19.2℃,平均无霜期为 260 d,平均日照时数为 1924.6 h,≥10℃积温为 4100—4650℃。该镇属长汀县最大的河谷盆地,四周被低山高丘所环抱,中部开阔;土壤主要为燕山运动早期形成的中粗粒花岗岩发育的红壤,可蚀性较高,原有地带性植被(常绿阔叶林)基本破坏殆尽,现有植被主要以马尾松(*Pinus massoniana*)次生林和人工林为主。花岗岩风化壳深厚(一般深度为 10 m,有的可厚达百米),降雨侵蚀力高,加之植被的大面积破坏使得河田镇成为全国水土流失最严重的地区之一,许多地方的表层土壤已被剥蚀殆尽,后期的植被恢复极为困难。

本研究选取的不同恢复年限样地土壤母岩一致,成土条件相同,地形条件及地表生态过程相似,所选样地治理前土壤侵蚀状况以及土壤有机质含量与侵蚀裸地(CT₁)基本一致。因此,不同恢复年限马尾松林土壤有机质的差异主要由植被恢复和治理措施引起的植物生长条件差异及土壤生态过程差异造成。试验地基本情况见表 1。

表 1 试验地概况

Table 1 The basic information of the study sites

试验地 Site	治理年限 Restoration years	基本情况 Basic information
I 侵蚀裸地 bare land	0 a	恢复前对照(CT ₁):土壤侵蚀一般达强度以上,表层土壤流失殆尽,B层出露,表层土壤(0—20 cm)有机质含量为 1.4—2.5 g/kg,地表植被以稀疏的马尾松小老头树(平均胸径 4.3—6.6 cm,平均树高 3.1—4.6 m)和少量芒萁(<i>Dicranopteris pedata</i>)、野古草(<i>Arundinella setosa</i>)为主;试验地海拔、坡度和坡向分别为 315 m、12°和 NE35°。
II 石官凹 Shiguanao	10 a	位于三洲桐坝流域,于 2001 年对原有低矮马尾松林进行小水平沟整地,补植胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>),后期封禁管护。经过 10 年封禁治理,林下植被盖度分别达到 85%以上,马尾松平均胸径和树高分别为 10.4 cm 和 7.5 m;试验地海拔分别为 314 m,坡度为 21°,坡向为 SW20°。
III 八十里河 Bashilihe	30 a	八十里河试验地位于八十里河流域,当地于 1981 对其进行小水平沟整地,保留原有的马尾松等乔木,并在马尾松林下套种胡枝子、紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)。经过 30 年的人工恢复,马尾松平均胸径和树高分别达到了 16.9 cm 和 14.3 m。林下植被覆盖度 90%以上;试验地海拔、坡度和坡向分别为 310 m、18°和 NE50°。
IV 次生林 secondary forest	70—110 a	恢复后对照(CT ₂):为马尾松、木荷针阔混交林,林龄估计约为 70—110 年(异林龄),马尾松的密度为 163 株/hm ² ,平均胸径和树高分别为 47.5 cm 和 19.0 m,林下植被种类丰富,盖度在 95%以上;试验地海拔、坡度和坡向分别为 321 m、10°和 WN10°。

2 研究方法

2.1 土样采集

于 2011 年 7 月在每个试验地设立 3 个 20 m×20 m 的标准地,分别进行本底和生物量调查。在每个标准地上用内径为 5 cm 的土钻按照 S 形随机、等量、多点混合的原则取样,取 8—10 个点,使每个样地有 3 组 0—10 cm 和 10—20 cm 土层混合土样。

2.2 土壤有机 C 含量测定

土壤有机 C 含量采用浓硫酸-重铬酸钾高温外加热氧化法,土壤全氮采用全自动凯氏定氮法,不同粒径土壤有机碳氮采用碳氮元素分析仪(Vario Max CNS,德国)测定。

2.3 物理分组

具体测定方法参照 Carter 等^[15]:称取经过 2 mm 筛的风干土样 20 g,放在 250 mL 的塑料瓶中,加入 100 mL 浓度为 5 g/L 的六偏磷酸钠((NaPO₃)₆)溶液,用往复震荡器震荡 2 h(90 r/min)。把分散液和土壤全部置于 53 μm 和 250 μm 套筛上,用细水流冲洗样品至沥滤液澄清(即不含细土颗粒为止),转移筛上土壤至预先称重的烧杯中,在 60℃ 下过夜烘干称量,根据筛网孔径大小分为粗颗粒态有机碳(coarse POC, cPOC, >250 μm)和细颗粒态有机碳(fine POC, fPOC, 53—250 μm),筛下土壤为矿质结合态有机碳(MOC, <53 μm)。根据各部分的重量计算出各组分占整个土壤样品质量的比例,通过分析烘干样品中有机碳含量,计算不同粒径土壤有机碳数量。

2.4 数据处理

文中各组分有机碳含量的净增加量为不同恢复年限下各组分含量减去相应对照(CT₁)的差值。所有数据处理和统计分析在 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件下进行,方差分析采用 LSD 法,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系,显著性水平设为 α=0.05,用 Excel 2007 软件作图。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳含量的变化

图 1 表明, 植被恢复过程中侵蚀地表层 (0—20 cm) 土壤有机碳含量显著增加, 其中以 0—10 cm 土层增加更显著。在植被恢复 10 a 时, 与对照 (CT₁) 相比, 0—10 cm 土壤有机碳含量极显著增加 ($P < 0.01$), 比 CT₁ 增加了 2.4 倍, 而 10—20 cm 土壤有机碳含量与 CT₁ 无显著差异; 植被恢复 30 a 后, 0—10 cm 土壤有机碳含量极显著高于 CT₁ 以及恢复 10 a 的治理措施样地; 而 10—20 cm 土层土壤有机碳含量极显著高于 CT₁, 但与恢复 10 a 的治理措施样地无显著差异。这说明植被恢复优先影响 0—10 cm 土层, 随着治理年限的增加, 才逐渐促进下层土壤有机碳的积累。植被恢复到 30 a 后, 土壤有机碳含量仍显著低于恢复后的对照 (CT₂), 说明侵蚀地仍有较大的固碳潜力。

3.2 土壤颗粒态有机碳含量的变化

植被恢复过程中, 土壤粗颗粒态有机碳 (cPOC) 和细颗粒态有机碳 (fPOC) 含量均递增趋势, 不同土层两个粒径 POC 含量差异显著 (图 2)。植被恢复 10 a 时, 0—10 cm 土层土壤有机碳主要以 fPOC 的形式积累, 两个土层 cPOC 含量并未显著增加。与植被恢复 10 a 相比, 恢复至 30 a 后, 0—10 cm 土层土壤 cPOC 含量的增加量明显高于 fPOC 组分, 也极显著高于植被恢复 10 a 时该组分的有机碳含量 ($P < 0.01$) (图 3); 然而, 10—20 cm 土层 fPOC 含量仍显著高于 10 a 的治理样地, 同时土壤 cPOC 含量仍没有得到显著提高, 说明植被恢复过程中土壤有机碳优先在 fPOC 中积累, 而且对亚表层土壤 cPOC 组分的影响仍需要更长的植被恢复过程。

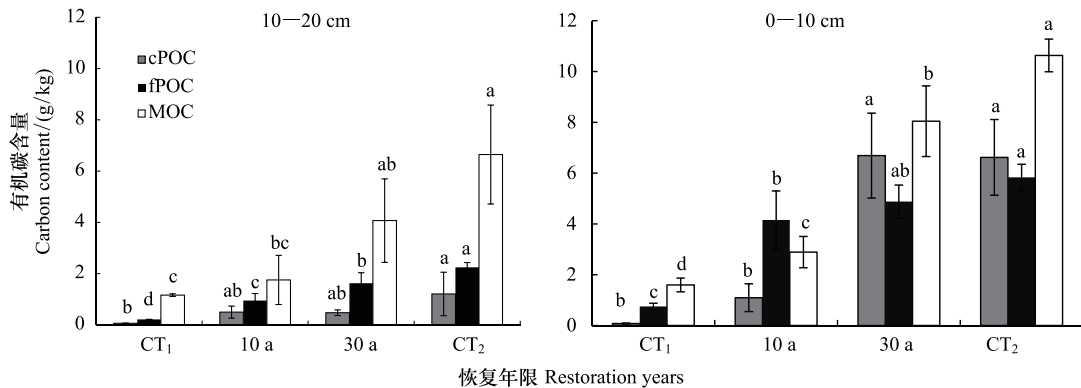


图 2 植被恢复过程中土壤不同组分的有机碳含量

Fig.2 The soil organic carbon content of different size fraction during the ecological restoration

图中 CT₁ 表示恢复前对照 (侵蚀裸地), CT₂ 表示恢复后对照 (次生林); cPOC, 粗颗粒态有机碳 coarse particulate organic carbon; fPOC, 细颗粒态有机碳 fine particulate organic carbon; MOC, 矿质结合有机碳 mineral associated organic carbon. 同一组分不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 图中数据为平均值±标准差 ($n=3$).

土壤 POC (cPOC+fPOC) 作为土壤有机碳的活性碳组分, 其占土壤有机碳的比例在一定程度上能够指示土壤有机碳的稳定性。由表 2 可以看出, 植被恢复 10 a, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 POC/SOC 分别为 64.1% 和 46.7%; 植被恢复至 30 a 后, 两个土层 POC/SOC 相对减小, 且逐渐接近于 CT₂。此外, cPOC/SOC 明显小于 fPOC/SOC, 随着恢复年限增加, cPOC/SOC 逐渐增加。

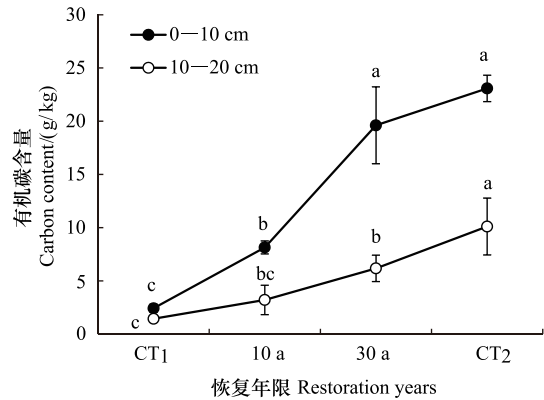


图 1 植被恢复过程中土壤有机碳含量的变化

Fig.1 The change of soil organic carbon content during the ecological restoration

图中 CT₁ 表示恢复前对照 (侵蚀裸地), CT₂ 表示恢复后对照 (次生林), 同一土层不同小写字母表示样地间差异显著 ($P < 0.05$), 图中数据为平均值±标准差 ($n=3$)

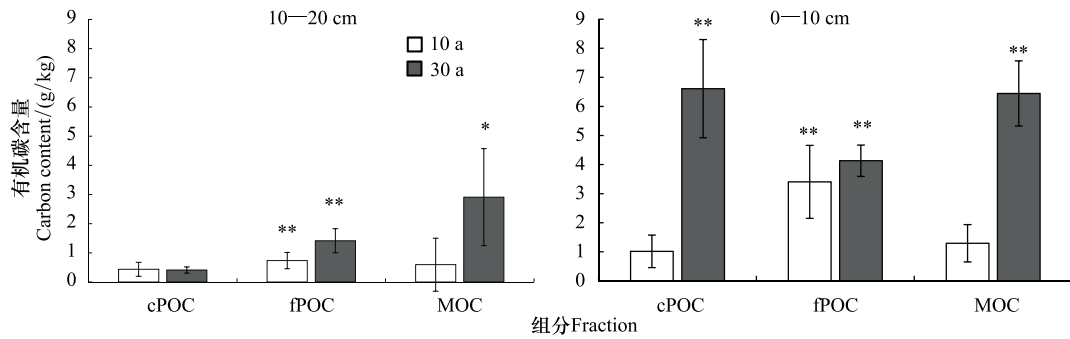


图3 植被恢复过程中土壤不同组分有机碳含量的净增加量

Fig.3 The net increase of different size soil organic carbon content during the ecological restoration

cPOC, 粗颗粒态有机碳 coarse particulate organic carbon; fPOC, 细颗粒态有机碳 fine particulate organic carbon; MOC, 矿质结合有机碳 mineral associated organic carbon. * 表示与对照间差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示与对照间极显著差异 ($P < 0.01$), 图中数据为平均值 \pm 标准差 ($n = 3$)

3.3 矿质结合态有机碳含量的变化

植被恢复过程中矿质结合态有机碳 (MOC) 也呈递增趋势 (图 2)。通过 10 年的恢复时期并未显著增加土壤 MOC 含量, 直到 30 a 时, 与 CT_1 相比 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤 MOC 含量的积累量均达到显著或极显著水平 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$) (图 3), 分别增加了 6.45 g/kg 和 2.91 g/kg。

由表 1 可知, 长期受到土壤侵蚀影响的 CT_1 土壤 MOC 含量占总有机碳比例的 65.7% 以上。通过植被恢复措施的治理, MOC/SOC 逐渐减小, 这是颗粒态有机碳含量优先增加所引起。植被恢复 10 a 倾向于增加 fPOC 含量, 在短期内难以快速提高土壤 MOC 含量, 因为这部分是土壤的惰性碳库。

表 2 植被恢复过程中各土层土壤不同组分有机碳分配比例

Table 2 The proportion of different size soil organic carbon content in each soil layer during the ecological restoration

恢复年限 Restoration years	土层深度 Soil layer/cm	cPOC/SOC /%	fPOC/SOC /%	MOC/SOC /%	POC/SOC /%
CT_1	0—10	3.4	30.9	65.7	34.3
	10—20	4.6	14.9	80.5	19.5
10 a	0—10	13.6	50.5	35.9	64.1
	10—20	15.5	31.1	53.3	46.7
30 a	0—10	33.9	25.1	41.1	58.9
	10—20	7.9	28.2	64.0	36.1
CT_2	0—10	28.5	25.3	46.2	53.8
	10—20	11.0	23.5	65.5	34.5

表中 CT_1 表示恢复前对照 (侵蚀裸地), CT_2 表示恢复后对照 (次生林); cPOC, 粗颗粒态有机碳 coarse particulate organic carbon; fPOC, 细颗粒态有机碳 fine particulate organic carbon; MOC, 矿质结合有机碳 mineral associated organic carbon.

3.4 POC/MOC 比值的变化

一般而言, POC/MOC 比值越大, 土壤有机质越不稳定。由图 4 表明, 植被恢复过程中 POC/MOC 比值呈先升高后降低趋势, 与 CT_1 相比, 植被恢复 10 a 和 30 a, 土壤 POC/MOC 比值均达到显著水平 ($P < 0.05$), 说明植被恢复初期土壤有机质稳定性相对较低。不同样地表层土壤 POC/MOC 比值均显著高于亚表层 ($P < 0.05$), 且 10—20 cm 土层 POC/MOC 比值均小于 1, 说明亚表层土壤有机质稳定性高于表层, 同时土壤 MOC 构成了亚表层土壤碳库的主要部分。

3.5 不同土壤有机碳组分与总有机碳含量的相关性

相关分析表明, 红壤侵蚀地植被恢复 10 a, 土壤 cPOC 和 MOC 与 SOC 相关性均不显著, 而 fPOC 与 SOC

极显著相关(表 3), 植被恢复 30 a 后, 土壤 POC 和 MOC 与 SOC 均达到极显著相关, 说明植被恢复初期(0—10 a), 主要以 fPOC 形式积累, 随后 fPOC 逐渐向 MOC 和 cPOC 转化。

4 讨论

4.1 植被恢复过程中土壤有机碳的分配模式

侵蚀退化地采取生态恢复措施后, 显著增加了土壤碳吸存^[16]。植被恢复过程中, 林地植被覆盖度明显增加, 马尾松的生长也得到促进(表 1), 一方面直接减少了土壤有机碳的流失, 另一方面则通过凋落物及死亡的根系的养分归还, 增加了土壤有机物质的输入量, 进而显著增加了土壤有机碳含量及储量^[2, 17]。因此, 随着植被恢复年限的增加, 土壤有机碳含量呈上升趋势。

依据土壤有机碳在土壤中的存在状态, 土壤有机碳分为颗粒有机碳和矿质结合态有机碳。植被恢复过程中, 土壤有机碳含量显著提高, 土壤中不同组分的有机碳含量也相应增加。侵蚀地植被恢复后, 林地覆盖度增加, 土壤有机质输入增加。有机碳在土壤不同组分中积累, 从而促使土壤有机碳含量增加。Guggenberger 等^[18]指出在合理的土地利用系统中土壤有机质增长主要表现在颗粒态有机质的变化上。土壤 POC 主要来源于新鲜植物残体的输入, 在植被恢复初期, 由于治理措施(如, 施肥、整地等)促进了马尾松和林下植被的快速生长^[19], 林地植被覆盖显著提高, 建立了凋落物和细根的物质循环途径, 凋落物归还量显著提高。此外, 由于细颗粒有机碳优先富集^[20], 因此, 土壤 fPOC 含量显著增加, 该组分占总有机碳的 50.5%, 这与相关研究相似, 即土壤 POC 含量占总碳 10% 以上, 而且可高达 30%—85%^[21-22]。另外, 根据 SOC 的饱和理论, 有机碳首先在细颗粒中累积, 当粘粒含量相对较低、有机质来源丰富、与粘粒结合的有机质量达到饱和时, 有机质开始转向粗颗粒中累积^[20], 因此植被恢复 10 a 并未显著增加土壤 cPOC 含量, 恢复至 30 a 后, 与恢复 10 a 相比, 土壤 fPOC 含量没有显著变化, 而土壤 cPOC 和 MOC 均显著增加。通过对 10—20 cm 土层 cPOC 和 MOC 含量的研究发现, 尽管植被恢复 30 a 之久, 土壤 cPOC 含量仍未显著增加, 而土壤 MOC 含量增加量已达到显著水平, 这也进一步证实了 SOC 的饱和理论^[20]。通过相关分析发现, 植被恢复 10 a, 土壤 cPOC 和 MOC 与 SOC 相关性均不显著, 而 fPOC 与 SOC 极显著相关(表 3), 植被恢复 30 a 后, 土壤 POC 和 MOC 与 SOC 均达到极显著相关, 这充分反应了植被恢复过程土壤有机碳在土壤中积累特征, 即植被恢复初期(0—10 a), 主要以 fPOC 形式积累, 随后 fPOC 逐渐向 MOC 和 cPOC 转化, 且 fPOC 含量处于相对稳定的水平, 最终不同组分有机碳的碳分

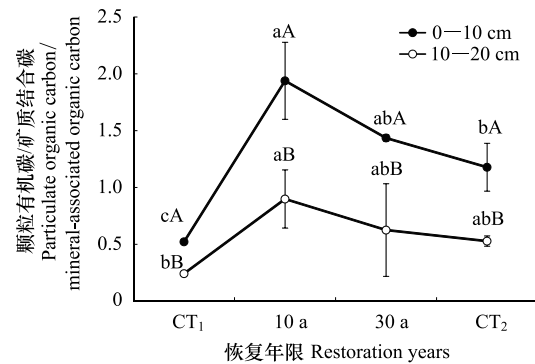


图 4 植被恢复过程中土壤 POC/MOC 比值的变化

Fig. 4 The change of the POC/MOC ratios during the ecological restoration

图中 CT₁ 表示恢复前对照(侵蚀裸地), CT₂ 表示恢复后对照(次生林); 同一土层不同小写字母表示样地间差异显著($P < 0.05$), 同一样地不同大写字母表示差异显著($P < 0.05$), 图中数据为平均值 \pm 标准差($n = 3$)

表 3 植被恢复过程中不同土壤有机碳组分与总有机碳含量的相关性

Table 3 The relationship between the different fraction content and total content of soil organic carbon during ecological restoration

颗粒有机碳 Particulate organic carbon	试验地 Site	r 值 r value	P 值 P value
cPOC	CT ₁	0.088	0.869
	10 a	0.663	0.152
	30 a	0.994 **	0.001
	CT ₂	0.972 **	0.000
fPOC	CT ₁	0.986 **	0.000
	10 a	0.945 **	0.004
	30 a	0.961 **	0.002
	CT ₂	0.959 **	0.002
MOC	CT ₁	0.977 **	0.001
	10 a	0.771	0.073
	30 a	0.948 **	0.004
	CT ₂	0.935 **	0.006

表中 CT₁ 表示恢复前对照(侵蚀裸地), CT₂ 表示恢复后对照(次生林); cPOC, 粗颗粒态有机碳 coarse particulate organic carbon; fPOC, 细颗粒态有机碳 fine particulate organic carbon; MOC, 矿质结合有机碳 mineral associated organic carbon.

配模式逐渐趋近于 CT_2 。

4.2 植被恢复过程中土壤有机碳的稳定性

POC 表征土壤中易被利用的活性有机碳,而 MOC 表征了土壤中相对稳定且周转期长的有机碳,因此 POC/MOC 比值在一定程度上反映了土壤有机质的稳定性^[12]。一般而言,POC/MOC 比值越大,土壤有机质活性较高,易受土壤侵蚀和矿化等影响。本研究中,植被恢复过程中 POC/MOC 值呈先升高后趋近于 CT_2 的趋势,唐光木等^[23]研究了新疆绿洲农田不同开垦年限土壤 POC/MOC 值同样也呈现先升高后降低的趋势。这是因为植被恢复初期(0—10 a)施肥^[24]、整地等治理措施使得土壤物理、化学和微生物学特性得到显著改善,植被快速生长,动植物残体和腐殖化物质显著增加,土壤 POC 含量显著提高,使得 POC/MOC 值增大。经过 30 a 的恢复期后,土壤 POC/MOC 值相对降低,趋近于相对稳定的生态系统 CT_2 ,因为长期生态恢复后土壤生物、化学、物理特性相对稳定,有机物的输入和输出之间达到相对平衡,非保护性颗粒态有机碳逐渐向稳定性矿质结合态有机碳转化,因此,POC/MOC 值呈现下降的趋势,土壤有机碳较稳定,不易被生物所利用。而且亚热带马尾松林土壤有机碳稳定性是最接近常绿阔叶林^[25],甚至比阔叶人工林土壤稳定性高^[26],说明在红壤侵蚀地上建植马尾松林对增加退化土壤碳固定和减缓大气 CO_2 浓度增加具有重要意义。

5 结论

侵蚀退化地生态恢复显著提高了土壤有机碳及不同组分有机碳含量。生态恢复 10 a,土壤有机碳主要以 fPOC 形式积累,但稳定性较差;随着生态恢复年限增加,表层土壤 fPOC 含量相对不变,cPOC 和 MOC 含量均显著增加,说明生态恢复过程中土壤固碳模式符合 SOC 饱和理论。生态恢复过程中土壤 POC/MOC 比值呈先升高后降低的趋势,说明随着生态恢复时间的增加,土壤有机碳稳定性逐渐提高。因此,生态恢复对于侵蚀地碳固定的长期有效性具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J. Land Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] 谢锦升, 杨玉盛, 谢明曙, 黄石德, 钟炳林, 岳辉. 植被恢复对侵蚀退化红壤碳吸存的影响. 水土保持学报, 2006, 20(6): 95-98, 123-123.
- [3] 刘苑秋. 亚热带红壤区生态退化及生态恢复研究综述. 南京林业大学学报, 2000, 24(S1): 53-58.
- [4] DeClercq T, Heiling M, Dercon G, Resch C, Aigner M, Mayer L, Mao Y L, Elsen A, Steier P, Leifeld J, Merckx R. Predicting soil organic matter stability in agricultural fields through carbon and nitrogen stable isotopes. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 88: 29-38.
- [5] Chen Z J, Geng S C, Zhang J H, Setälä H, Gu Y, Wang F, Zhang X, Wang X X, Han S J. Addition of nitrogen enhances stability of soil organic matter in a temperate forest. European Journal of Soil Science, 2017, 68(2): 189-199.
- [6] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.
- [7] Kantola I B, Masters M D, DeLucia E H. Soil particulate organic matter increases under perennial bioenergy crop agriculture. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 113: 184-191.
- [8] Rovira P, Jorba M, Romanyà J. Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(4): 355-369.
- [9] Zimmerman M, Leifeld J, Conen F, Bird M I, Meir P. Can composition and physical protection of soil organic matter explain soil respiration temperature sensitivity? Biogeochemistry, 2012, 107(1/3): 423-436.
- [10] Brandani C B, Abbruzzini T F, Conant R T, Cerri C E P. Soil organic and organomineral fractions as indicators of the effects of land management in conventional and organic sugar cane systems. Soil Research, 2017, 55(2): 145-161.
- [11] Lopez-Sangil L, Rovira P. Sequential chemical extractions of the mineral-associated soil organic matter: an integrated approach for the fractionation of organo-mineral complexes. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 62: 57-67.
- [12] Cheng S L, Fang H J, Zhu T H, Zheng J J, Yang X M, Zhang X P, Yu G R. Effects of soil erosion and deposition on soil organic carbon dynamics at a sloping field in Black Soil region, Northeast China. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(4): 521-529.

- [13] 吕茂奎, 谢锦升, 周艳翔, 曾宏达, 江军, 陈细香, 胥超, 陈坦, 付林池. 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. 应用生态学报, 2014, 25(1): 37-44.
- [14] 姬强, 孙汉印, 王勇, 刘帅, 王旭东. 土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对 4 种耕作措施的影响. 水土保持学报, 2012, 26(2): 132-137.
- [15] Rabbi S M F, Tighe M, Cowie A, Wilson B R, Schwenke G, Mcleod M, Badgery W, Baldock J. The relationships between land uses, soil management practices, and soil carbon fractions in South Eastern Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 41-52.
- [16] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 黄荣珍, 郑本暖. 封禁管理对严重退化群落养分循环与能量的影响. 山地学报, 2002, 20(3): 325-330.
- [17] 李国栋, 刘国群, 庄舜尧, 桂仁意. 不同种植年限下雷竹林土壤的有机质转化. 土壤通报, 2010, 41(4): 845-849.
- [18] Guggenberger G, Zech W. Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Región Huetar Norte, Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 1999, 124(1): 93-104.
- [19] 谢锦升, 陈光水, 何宗明, 杨玉盛, 吴大同. 退化红壤不同治理模式马尾松生长特点分析. 水土保持通报, 2001, 21(6): 24-27.
- [20] Carter M R. Soil quality for sustainable land management. *Agronomy Journal*, 2002, 94(1): 38-47.
- [21] Carter M R, Kunelius H T, Angers D A. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1194-1199.
- [22] Hurisso T T, Culman S W, Horwath W R, Wade J, Cass D, Beniston J W, Bowles T M, Grandy A S, Franzluebbers A J, Schipanski M E, Lucas S T, Ugarte C M. Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(5): 1352-1364.
- [23] 唐光木, 徐万里, 盛建东, 梁智, 周勃, 朱敏. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化. 土壤学报, 2010, 47(2): 279-285.
- [24] 刘中良, 宇万太, 周桦, 马强. 不同有机氮肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响. 土壤学报, 2011, 48(6): 1149-1157.
- [25] 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 李永夫, 林琳. 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性. 生态学报, 2013, 33(2): 416-424.
- [26] Wang H, Liu S R, Mo J M, Wang J X, Makeshin F, Wolff M. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree species in subtropical China. *Ecological Research*, 2010, 25(6): 1071-1079.