

# 南方红壤严重侵蚀地不同恢复年限马尾松人工林生态系统碳储量特征

刘政, 许文斌, 田地, 葛志强, 刘骏, 胡亚林

(福建农林大学 林学院 森林生态—稳定同位素中心, 福建 福州 350002)

**摘要:** [目的] 研究南方红壤侵蚀地不同恢复年限植被生态系统碳库储量, 为该地区马尾松人工林制定合理的森林经营方式提供理论支持。[方法] 以福建省长汀县河田镇裸地、不同恢复年限(10, 20, 30 a 生)马尾松人工林和天然次生林为研究对象, 测定不同恢复阶段林地植被和土壤碳库储量。[结果] 马尾松人工林植被恢复能够显著提高植被和土壤碳库储量。10 a, 20 a, 30 a 生马尾松人工林与裸地相比生态系统碳库储量分别增加 2.80, 3.54, 8.56 倍, 但依然低于天然次生林; 马尾松人工林植被恢复能够显著提高表层(0—10 cm)土壤碳库储量, 而对深层土壤碳库储量影响不显著; 不同恢复阶段植被和土壤碳库增加速率不同, 呈现非线性增加。[结论] 南方红壤严重侵蚀地植被恢复能够增加生态系统碳库储量, 但该地区土壤碳库的恢复是长期的缓慢过程。今后应加强南方红壤地区森林植被的保护, 避免植被过度干扰和破坏而引起严重土壤侵蚀。

**关键词:** 红壤侵蚀区; 植被恢复; 土壤碳储量; 马尾松林; 恢复阶段

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2019)01-0037-06

**中图分类号:** S157.1, S714.4

**文献参数:** 刘政, 许文斌, 田地, 等. 南方红壤严重侵蚀地不同恢复年限马尾松人工林生态系统碳储量特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 37-42. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.006; Liu Zheng, Xu Wenbin, Tian Di, et al. Characteristics of ecosystem carbon stocks in *Pinus massoniana* plantations with different restoration age on severely eroded red soils in Southern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 37-42.

## Characteristics of Ecosystem Carbon Stocks in *Pinus Massoniana* Plantations with Different Restoration Age on Severely Eroded Red Soils in Southern China

Liu Zheng, Xu Wenbin, Tian Di, Ge Zhiqiang, Liu Jun, Hu Yalin

(Forest Ecology and Stable Isotope Centre, College of Forestry,

Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract:** [Objective] To study the impacts of vegetation restoration stage on ecosystem carbon stocks of red soil regions in Southern China, in order to provide theoretical support for establishing reasonable forest management mode in *Pinus massoniana* plantation. [Methods] We studied the changes of carbon stocks in plant and soil pools in bare land, *Pinus massoniana* plantations with different age (10, 20 and 30 years old), and natural secondary forests in Hetian Town, Changting County in Fujian Province. [Results] The restoration of *P. massoniana* plantations could significantly improve the ecosystem carbon stocks. Compared with bare land, the carbon stocks in 0—10, 20—30, and 30 years old *P. massoniana* plantations was increased by 2.80, 3.54 and 8.56 times, respectively, but still lower than that in natural secondary forest. The restoration of *P. massoniana* plantations could increase carbon stocks in the surface (0—10 cm) soil, but had no significant effect on the carbon stocks of deep soil. The increase rate of soil carbon storcks was different at different vegetation restoration stages, showing a non-linear increase. [Conclusion] Vegetation restoration on the eroded red soils could improve ecosystem carbon stocks in Southern China, but soil C restoration in this

收稿日期: 2018-06-08

修回日期: 2018-09-23

资助项目: 福建省科技计划对外合作项目“杉木和闽楠苗木 P 养分高效承载技术研发与示范”(201710001); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划(KLa16056A); 国家重点实验室开放基金课题(Y20160022)

第一作者: 刘政(1993—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 硕士研究生。主要从事水土流失区植被恢复方面研究。E-mail: 2571610774@qq.com。

通讯作者: 胡亚林(1979—), 男(汉族), 辽宁省沈阳市人, 博士, 研究员, 博士生导师。主要从事森林生态和水土保持研究。E-mail: huyl@iaec.ac.cn。

region was a long-term and slow process. Thus, we should pay more attention to protect natural vegetation and avoid soil erosion induced by the vegetation deterioration.

**Keywords:** red soil erosion region; vegetation restoration; soil carbon storage; *Pinus massoniana* plantation; restoration stage

土壤侵蚀是当今世界上最严重的环境问题之一,全球范围内约  $1.09 \times 10^7 \text{ km}^2$  土地受到不同原因的土壤侵蚀<sup>[1]</sup>,每年导致  $4.00 \times 10^9$  至  $6.00 \times 10^9 \text{ t}$  土壤有机碳损失<sup>[2]</sup>。中国已成为世界上土壤侵蚀最严重的国家之一,土壤侵蚀区面积达  $3.56 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,每年大约  $5.50 \times 10^9 \text{ t}$  土壤被侵蚀而流失<sup>[3]</sup>。中国南方红壤丘陵区面积达  $1.18 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,其中水土流失区约占南方红壤丘陵区面积的 15%<sup>[4]</sup>,成为仅次于黄土高原的中国第二大水土流失区。因此,开展南方红壤侵蚀地区植被恢复对生态系统影响研究具有重要价值。

植被恢复能够减少地表径流、提高土壤水分入渗能力,从而成为水土流失治理重要措施之一<sup>[1]</sup>。近 30 a 以来,在南方红壤水土流失区开展了大规模的植被恢复,例如长汀县植被覆盖度由 1975 年 30.83% 提升为 2013 年 60.34%<sup>[5]</sup>。近年来,研究人员针对中国南方红壤丘陵区植被恢复对生态系统碳库储量,尤其是土壤有机碳库储量影响开展了一系列研究。例如,Xie 等<sup>[6]</sup>研究发现中国南方红壤严重水土流失地植被恢复 24 a 后马尾松(*Pinus massoniana*)人工林生态系统碳库储量是裸地的 10 倍,累积速率达每年  $4.88 \text{ mg}/\text{hm}^2$ 。刘翥等<sup>[7]</sup>研究表明植被恢复能够提高土壤可溶性有机质含量和化学稳定性,有助于土壤有机碳积累。然而,Dou 等<sup>[8]</sup>研究表明长汀红壤侵蚀区马尾松植被恢复 10 a 后显著增加了土壤中凋落物来源新有机碳输入,但土壤有机碳含量并未显著提高。同样,Gong 等<sup>[9]</sup>研究认为南方红壤植被恢复过程中由于土壤 N、P 养分的限制,植被恢复早期土壤有机碳积累是非常缓慢的过程。土壤侵蚀地植被恢复过程中生态系统碳储量变化受恢复年限、土壤侵蚀强度、植被类型、地形和气候等多种因素的影响<sup>[10-11]</sup>。虽然,针对南方红壤植被恢复对土壤有机碳储量影响开展了大量研究,但针对植被不同恢复阶段对生态系统碳储量,尤其 1 m 深度土壤碳储量影响的研究未见报道。

中国南方汀江流域水土流失面积  $1.20 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,其中强度侵蚀区面积占 22.69%<sup>[10]</sup>。福建长汀县位于汀江流域上游,属于典型的花岗岩发育红壤严重土壤侵蚀地区<sup>[6]</sup>。本文以长汀河田地区未恢复裸地(BL),10,20,30 a 生马尾松人工林(PM<sub>10</sub>,PM<sub>20</sub>,PM<sub>30</sub>)以及地带性天然次生林(NF)为研究对象,研

究南方红壤严重侵蚀地不同恢复年龄马尾松人工林植被碳库和土壤(0—10,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm)碳库储量特征。旨在为科学评价中国南方红壤严重侵蚀区马尾松人工林植被恢复的固碳潜力提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究地区位于福建省长汀县河田镇(北纬  $25^{\circ}33' - 25^{\circ}48'$ ,东经  $116^{\circ}18' - 116^{\circ}31'$ ),地形为河谷盆地,海拔 300~500 m。该地区气候类型属中亚热带季风气候区,年均降水量约为 1 737 mm,年均气温  $18.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均无霜期为 260 d,平均日照时数  $1 925 \text{ h}$ <sup>[6]</sup>。土壤为中粗粒花岗岩发育的红壤,抗侵蚀能力低。由于长期人为干扰,带性常绿阔叶林植被基本破坏,导致严重土壤侵蚀和土地退化;20 世纪 80 年代,长汀地区陆续开始大规模水土流失地植被治理,形成以马尾松(*Pinus massoniana*)人工林为主的不同恢复阶段的植被。

### 1.2 样地设置

2017 年 5 月份,在长汀县河田镇选择海拔、坡度和坡向等立地条件基本一致的裸地(BL),10 a 生马尾松人工林(PM<sub>10</sub>),20 a 生马尾松人工林(PM<sub>20</sub>),30 a 生马尾松人工林(PM<sub>30</sub>)以及地带性天然次生林(NF)这 5 种类型森林。裸地为未进行植被恢复的严重土壤侵蚀地,由于长期水土流失土壤腐殖质聚积(A)层基本流失,过渡(B)发生层暴露,地表基本裸漏,尚有马尾松小老头树以及少量铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)和野古草(*Arundinella anomala*)稀疏存在。地带性天然次生林为原始常绿阔叶林次生演替而形成的针阔混交植物群落,主要以木荷(*Schima superba*)和马尾松为优势种,林下植被以黄楠(*Machilus grijsii*)、梅叶冬青(*Ilex asprella* var. *asprella*)、小蜡(*Ligustrum sinense*)、油茶(*Camellia oleifera*)、黄栀子(*Gardenia jasminoides*)、石斑木(*Raphiolepis indica*)等灌木为主,草本主要为铁芒萁。不同恢复年龄马尾松人工林下植被主要以铁芒萁为主。

### 1.3 样品采集与分析

首先,在不同类型森林设置 3 块重复样地,距离 1 km 以上。然而,在每个样地设置 1 块  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  调查样方,采用每木检尺方法测量树高、胸径(DBH),

1.3 m) 和林分密度(表 1)。在每个样方内随机选择 3~5 棵树木,用高枝剪采集树冠中上部树枝,将树枝和树叶分开,并分别混合为 1 个植物样品;同时,利用树木生长锥钻取 3~5 个树芯样品,并混合为 1 个混合样。采用样方框法调查凋落物层和林下植被层生物量,即在每个样方内设置 3 个 1 m × 1 m 样方框,将样方框内林下植被和凋落物分别全部收集用于生物量测定。本研究未进行天然次生林地上生物量调查,相关数据引用 Xie 等<sup>[6]</sup>在该样地已报道研究结果。植物样品带回实验室后在 65 °C 烘箱中烘干 72 h

至恒重,称重,粉碎,用于植物碳含量测定。

在每个样方内挖 1 m 深土壤剖面,按 0—10, 10—20, 20—30, 30—50, 50—70, 70—100 cm 分层采集土壤样品,同时采集不同层次根系样品用于根系 C 含量测定。同时,采用环刀法测定各土层土壤容重。土壤样品立即带回实验室,手捡法挑出植物残体和石砾,室温条件下自然风干,采用球磨机(JXFSTPRP-64, 上海净信)进行粉碎。采用元素分析仪(vario ISOTOPE cube, 艾力蒙塔, 德国)测定植物和土壤样品 C 含量。

表 1 研究区样地位置和林分概况

样地	地理位置	海拔/m	胸径/cm	树高/m	林木密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )
裸地	116°27'19—21"E, 25°37'13—16"N	395.32	22.33	2.02	800
10 a 人工林	116°28'52—56"E, 25°39'40—42"N	349.72	23.51	6.92	2 967
20 a 人工林	116°23'04—14"E, 25°40'24—30"N	320.79	27.31	7.71	2 667
30 a 人工林	116°25'29—40"E, 25°38'23—28"N	301.74	32.83	16.72	3 000
次生林	116°27'38—39"E, 25°37'52—54"N	327.58	54.65	19.25	1 433

## 1.4 数据计算与统计分析

植被碳库储量采用方程(1)计算:

$$P_{Ci} = P_{Ccon} \times B_i \times D \quad (1)$$

式中:  $P_{Ci}$ ——树木各器官(叶、枝、干、根)碳储量(mg/hm<sup>2</sup>);  $P_{Ccon}$ ——树木各器官(叶、枝、干、根)碳含量(g/kg);  $B_i$ ——树木各器官生物量(kg/m<sup>2</sup>)(根据各林分树高、胸径和马尾松异速生长方程<sup>[12]</sup>估算),  $D$ ——林分密度(株/hm<sup>2</sup>)。

凋落物和林下植被碳库储量,根据采用样方框法实际测定单位面积生物量和植物碳含量进行计算。

土壤碳库储量采用方程(2)计算:

$$S_{Cstock} = S_{Ccon} \times B_D \times H \quad (2)$$

式中:  $S_{Cstock}$ ——土壤碳储量(mg/hm<sup>2</sup>);  $S_{Ccon}$ ——土壤碳含量(g/kg);  $B_D$ ——土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);  $H$ ——土层厚度(cm)。

采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析。首先,对数据进行方差齐次性和正态分布检验,如果数据非齐次性进行对数转换。随后,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同恢复阶段植物碳库,不同土层土壤碳含量和碳库储量差异显著性( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复年限马尾松人工林植被碳库储量分配特征

马尾松人工林植被恢复显著提高植物碳库储量,并随着植被恢复年龄增加,植被碳库储量呈现逐渐增加趋势(表 2)。与裸地(2.48 mg/hm<sup>2</sup>)相比,30 a 生

马尾松人工林(79.39 mg/hm<sup>2</sup>)植被碳储量增加 31 倍( $p < 0.001$ ),平均每年增加 2.56 mg/hm<sup>2</sup>。马尾松人工林恢复的 0~10, 20~30 a 期间,植被碳储量增加速率为 2.06 mg/(hm<sup>2</sup>·a), 4.71 mg/(hm<sup>2</sup>·a), 而 10~20 a 期间植被碳储量增加速率仅为每年 0.92 mg/hm<sup>2</sup>。与 10 a 生马尾松人工林相比,20 a 马尾松人工林凋落物( $p = 0.003$ )和林下植被( $p < 0.001$ )碳储量显著增加,而树干、树枝、树叶和树根各器官植物碳储量差异均不显著( $p > 0.05$ )。

不同恢复阶段马尾松人工林植被碳储量均主要分配在树干,分别占植被碳储量 45%, 58%, 60% 和 68%。随着马尾松植被恢复年限的增加,树干碳储量占植被总碳储量的比例逐渐增加,而树叶和树枝碳储量占植被总碳储量比例逐渐降低,分别由 14% 和 13% 减少为 6% 和 10%。

### 2.2 植被不同恢复阶段土壤碳库储量特征

植被恢复时间和土层深度对土壤碳含量影响存在显著的交互性效应( $p < 0.05$ , 表 3)。与严重侵蚀裸地相比,不同恢复年限马尾松人工林 0—10 cm 深度土壤碳含量均显著提高,但是 10 a 生和 20 a 生马尾松人工林土壤碳含量差异不显著( $p = 0.99$ )。0—10 cm 土层,裸地、10 a 和 20 a 生马尾松人工林土壤碳含量均显著低于天然次生林( $p < 0.05$ ),而 30 a 马尾松人工林土壤碳含量与天然林相比差异不显著( $p = 0.95$ )。在 10—20, 20—30, 30—50, 50—70, 70—100 cm 土层,裸地和不同恢复年限马尾松人工林土壤碳含量差异均不显著,但显著低于天然次生林土壤碳含量。

表 2 不同恢复年限马尾松人工林各器官碳库储量动态特征

mg/hm<sup>2</sup>

样地	各器官碳库储量							植被总计
	树干	树枝	树叶	树根	乔木层总计	凋落物	林下植被	
裸地	1.12 <sup>a</sup> (0.23)	0.31 <sup>a</sup> (0.05)	0.35 <sup>a</sup> (0.06)	0.23 <sup>a</sup> (0.04)	2.02 <sup>a</sup> (0.38)	0.42 <sup>a</sup> (0.01)	0.05 <sup>a</sup> (0.00)	2.48 <sup>a</sup> (0.37)
10 a 人工林	13.49 <sup>b</sup> (0.30)	2.67 <sup>b</sup> (0.07)	2.27 <sup>b</sup> (0.08)	2.41 <sup>b</sup> (0.05)	20.85 <sup>b</sup> (0.48)	1.83 <sup>b</sup> (0.10)	0.44 <sup>b</sup> (0.00)	23.12 <sup>b</sup> (0.57)
20 a 人工林	19.24 <sup>b</sup> (2.71)	3.43 <sup>b</sup> (0.36)	2.60 <sup>b</sup> (0.20)	3.37 <sup>b</sup> (0.43)	28.65 <sup>b</sup> (3.70)	2.73 <sup>c</sup> (0.03)	0.93 <sup>d</sup> (0.02)	32.30 <sup>b</sup> (3.69)
30 a 人工林	54.11 <sup>c</sup> (8.01)	7.74 <sup>c</sup> (0.84)	4.75 <sup>c</sup> (0.35)	8.59 <sup>c</sup> (1.15)	75.19 <sup>c</sup> (10.31)	3.57 <sup>d</sup> (0.29)	0.63 <sup>c</sup> (0.02)	79.39 <sup>c</sup> (10.07)

注:表中数值为平均值( $n=3$ ),括号内数值为标准误(SE);同列不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。下同。

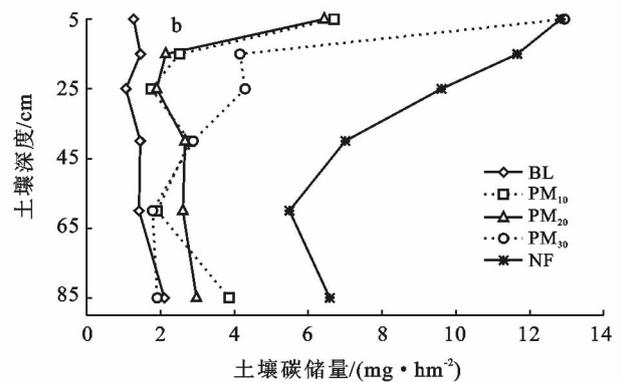
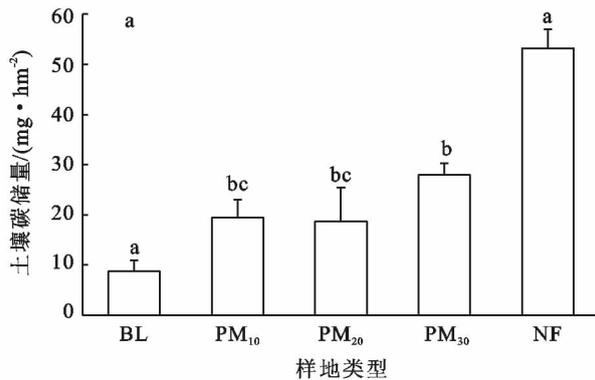
表 3 天然次生林和不同恢复年限马尾松人工林不同土层土壤碳含量特征

g/kg

样地	不同土层土壤碳含量					
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—70 cm	70—100 cm
裸地	1.24 <sup>a</sup> (0.31)	1.44 <sup>a</sup> (0.47)	1.09 <sup>a</sup> (0.21)	0.66 <sup>a</sup> (0.36)	0.64 <sup>a</sup> (0.43)	0.60 <sup>a</sup> (0.59)
10 a 人工林	6.33 <sup>b</sup> (1.09)	2.36 <sup>a</sup> (0.73)	1.34 <sup>a</sup> (0.38)	1.24 <sup>a</sup> (0.62)	0.84 <sup>a</sup> (0.42)	1.17 <sup>ab</sup> (1.08)
20 a 人工林	6.14 <sup>b</sup> (1.64)	1.95 <sup>a</sup> (0.91)	1.74 <sup>a</sup> (2.10)	1.17 <sup>a</sup> (1.47)	1.09 <sup>a</sup> (1.30)	0.90 <sup>a</sup> (1.37)
30 a 人工林	12.00 <sup>c</sup> (2.18)	3.30 <sup>a</sup> (0.67)	2.36 <sup>a</sup> (2.59)	1.24 <sup>a</sup> (0.78)	0.76 <sup>a</sup> (0.39)	0.53 <sup>a</sup> (0.26)
次生林	13.13 <sup>c</sup> (0.24)	9.67 <sup>b</sup> (1.57)	5.41 <sup>b</sup> (3.08)	2.64 <sup>b</sup> (0.89)	2.10 <sup>b</sup> (0.38)	1.70 <sup>b</sup> (0.55)

南方红壤严重侵蚀地,植被恢复能够增加土壤碳储量。与裸地(8.74 mg/hm<sup>2</sup>)相比,30 a 生马尾松人工林(27.95 mg/hm<sup>2</sup>) 1 m 土壤碳储量显著提高( $p=0.007$ ),平均增加速率为每年 0.64 mg/hm<sup>2</sup>(图 1a)。然而,30 a 生马尾松人工林土壤碳储量依然显著低于天然次生林(53.18 mg/hm<sup>2</sup>, $p=0.001$ )。进一步分析发现,在南方红壤严重侵蚀地马尾松林植被恢复过程

中,仅 0—10 cm 表层土壤碳储量显著增加( $p<0.05$ ),而深层土壤碳储量增加并不显著(图 1b)。在 0—10 cm 土层,30 a 生马尾松人工林(12.94 mg/hm<sup>2</sup>)与天然次生林(12.84 mg/hm<sup>2</sup>)相比土壤碳储量差异不显著( $p=0.95$ )。然而,10—20,20—30,30—50,50—70,70—100 cm 土层,不同恢复年限马尾松人工林土壤碳储量依然显著低于天然次生林。



注:BL为裸地;PM<sub>10</sub>,PM<sub>20</sub>和PM<sub>30</sub>分别为10 a生、20 a生和30 a生马尾松人工林;NF为天然次生林。直方柱上方不同小写字母表示样地间差异水平显著( $p<0.05$ )。

图 1 天然次生林和马尾松人工林土壤碳库储量和垂直分配特征

### 2.3 不同恢复阶段植被生态系统碳库储量

植被恢复能够显著提高生态系统碳库储量(图 2)。与裸地(11.23 mg/hm<sup>2</sup>)相比,10 a(42.63 mg/hm<sup>2</sup>),20 a(51.01 mg/hm<sup>2</sup>)和30 a(107.34 mg/hm<sup>2</sup>)生马尾松人工林生态系统碳库储量分别增加2.80,3.54,8.56倍。裸地土壤碳库占生态系统总碳库储量76%,而随着马尾松人工林恢复年龄增加,植被碳库储量占生态系统碳库储量比例逐渐提高,土壤碳库所占比例逐渐降低;30 a生马尾松人工林土壤碳库储量仅占生态系统碳库储量26%。与30 a生马尾松人工

林相比,天然次生林土壤碳库提高了90%,而植被碳库仅提高了24%。

## 3 讨论与结论

土壤侵蚀与植被恢复过程能够显著影响生态系统结构、过程和生态服务功能<sup>[2,10]</sup>。南方红壤地区由于长期严重水土流失,该地区生态系统地表基本呈现裸露状态,地上植被和土壤碳储量非常低<sup>[6,13]</sup>。因此,土壤侵蚀地区植被恢复十分必要。土壤侵蚀地植被恢复是提高生态系统碳储量重要措施,估计全球退

化土壤植被恢复每年能够固持碳大约  $3.00 \times 10^{14} \sim 8.00 \times 10^{14}$  g, 进而能够有效缓解由于大气  $\text{CO}_2$  增加导致的全球气候变化等问题<sup>[2]</sup>。本研究发现, 南方红壤侵蚀区马尾松人工林植被恢复能够显著提高生态系统碳库储量, 30 a 生马尾松林生态系统碳储量提高 8.56 倍。Xie 等<sup>[6]</sup>研究发现, 长汀地区 24 a 生马尾松人工林生态系统碳储量比未治理裸地提高约 10 倍。同样, 蓝良就<sup>[14]</sup>研究发现, 南方红壤未治理侵蚀地生态系统碳储量为  $19.12 \text{ mg/hm}^2$ , 而乔、灌、草不同治理模式生态系统碳储量显著提高。虽然南方红壤水土侵蚀区马尾松人工林植被恢复能够提高生态系统碳库储量, 但 30 a 生马尾松人工林生态系统碳储量依然显著低于天然次生林。曹小玉等<sup>[15]</sup>报道, 在南方红壤非侵蚀地营造 11, 23, 32 a 生马尾松人工林生态系统碳储量分别能够达到 120.47, 161.18, 187.29  $\text{mg/hm}^2$ , 明显高于本研究不同恢复年限马尾松人工林生态系统碳库储量。可见, 虽然南方红壤侵蚀地植被恢复能够提高生态系统碳储量, 但依低于健康生态系统碳储量。本研究结果表明, 一方面南方红壤水土流失区恢复的马尾松林生态系统依然存在较大的碳增汇潜力; 另一方面, 生态系统碳储量恢复往往需要长期过程, 应该加强南方红壤地区天然林保护, 避免过度人为干扰导致造成严重土壤侵蚀。

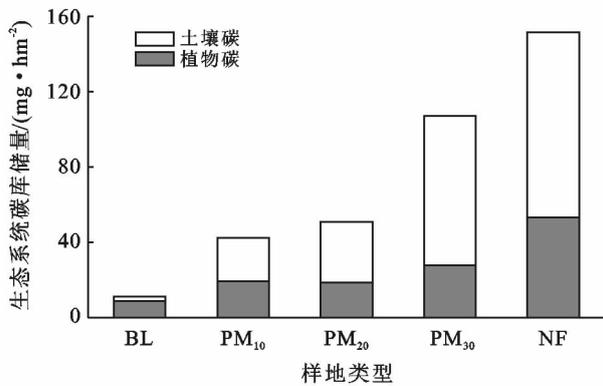


图 2 不同恢复年限马尾松林和天然次生林生态系统碳库储量特征

南方红壤侵蚀地植被恢复生态系统碳储量提高主要是地上植被碳储量快速增加。本研究发现, 随着马尾松人工林年龄增加, 植被碳库储量占生态系统碳储量比例不断提高。同时, 增加的植被碳库主要存在树干, 其次为树根和树枝, 而林下植被碳储量增加最少。该结果与以往研究结果基本一致, 树干和地下根系是植物碳主要存储库<sup>[6, 14-15]</sup>。南方红壤严重水土流失地区, 马尾松林植被恢复生态系统土壤养分依然贫瘠, 林下植物群落结构单一, 以芒萁等草本植物为

主<sup>[16]</sup>。由于林下灌木等植被稀疏, 恢复过程中马尾松人工林林下植被碳储量增加较小。江军<sup>[16]</sup>研究发现, 30 a 生马尾松人工林林下芒萁的生物量甚至低于 10 a 马尾松人工林。此外, 本研究发现随着马尾松人工林年龄的增加, 树干碳库储量占植被碳储量比例逐渐增加。该研究结果与曹小玉等<sup>[15]</sup>不同, 他们发现幼龄马尾松人工林树干碳储量占乔木层总碳储量 70%, 而成熟林树干碳储量所占比例下降为 60%。其原因可能是本研究马尾松人工林土壤养分比较贫瘠, 导致地上冠层生物量相对较少, 且并没有随着林分年龄增加而不断增加。

在植被恢复过程中, 随着植被碳库储量不断提高, 土壤碳库储量也逐渐增加。同样, 周国模等<sup>[17]</sup>研究发现侵蚀红壤随着植被恢复时间的增加, 土壤总有机碳和各类活性碳含量均逐渐提高。原因包括: 一方面由于植被恢复能够减少土壤侵蚀和养分流失; 另一方面, 植被恢复能够提高地上/地下凋落物和根系分泌物输入, 进而增加土壤有机碳库储量和碳周转速率<sup>[2, 7, 18]</sup>。红壤侵蚀地植被恢复过程中土壤生物数量和活性逐渐增加<sup>[17, 19]</sup>, 进而能够加快凋落物分解及其土壤有机碳累积。Dou 等<sup>[8]</sup>研究认为南方红壤侵蚀地区植被恢复提高土壤有机碳主要是由于地上生物量输入增加和较慢的土壤老碳分解。吕茂奎等<sup>[20]</sup>研究表明, 南方红壤侵蚀地植被恢复过程中非保护性土壤有机碳能够逐渐向保护性有机碳转化。

以往有关南方红壤水土流失区植被恢复对土壤有机碳储量影响主要关注表层土壤<sup>[21]</sup>, 但实际上深层土壤依然存储较多的土壤有机碳。本研究发现, 马尾松人工林恢复过程中仅表层 (0—10 cm) 土壤碳储量显著增加, 而深层土壤碳含量和储量增加不显著。同样, 谢锦升等<sup>[18]</sup>研究发现红壤侵蚀地不同恢复措施对 40 cm 以下土壤有机碳储量影响不大。Wang 等<sup>[22]</sup>采用  $^{13}\text{C}$  稳定同位素技术研究中国亚热带地区人工林对土壤新、老有机碳周转影响, 发现南方红壤区 20 a 生马尾松林土壤新有机碳累积量不大, 且土壤有机碳累积主要来源于地上凋落物输入, 因而主要提高表层土壤碳含量。张浩等<sup>[23]</sup>研究发现, 红壤侵蚀地植被恢复显著降低表层 (0—10 cm) 土壤有机碳矿化速率常数 ( $k$  值), 而对深层 (60—80 cm) 土壤矿化速率常数影响不显著。王征等<sup>[21]</sup>研究发现, 黄土丘陵区植被恢复能够显著提高深层 (>50 cm) 土壤有机碳储量, 主要由于该地区恢复植被为刺槐林, 其根系随恢复年龄增加而显著提高。

此外, 本研究发现马尾松人工林植被和土壤碳储量在不同恢复阶段增加速率存在差异。马尾松人工

林恢复 0—10 a 和 20—30 a 阶段,植被和表层土壤碳库储量快速增加。然而,10—20 a 恢复阶段,植被和土壤碳库储量增加速率较低。可见,土壤侵蚀区植被恢复过程中生态系统碳储量恢复并非线性增加。江军<sup>[16]</sup>研究表明,南方红壤侵蚀地区植被恢复过程中林下芒萁对土壤有机碳产生重要影响,恢复初期芒萁生物量增加很快,随后由于林分郁闭度增加,芒萁生物量呈现下降趋势,导致土壤有机碳累积速率发生改变。此外,长汀严重侵蚀地区植被治理初期常进行整地、施肥等人为促进措施,从而可能快速减少水土流失,并促进植被生长和生态系统碳储量提高。在马尾松人工林植被恢复后期,随着土壤有机碳和养分累积,土壤生物数量和活性不断提高,进而加快树木生长和土壤碳循环速率<sup>[18-19]</sup>。

综上所述表明,南方红壤侵蚀区马尾松人工林植被恢复能够有效提高植被、土壤碳库储量,进而增加生态系统碳库储量。然而,与地带性天然林相比,马尾松人工林碳储量依然较低,严重土壤侵蚀地植被恢复恢复往往是缓慢的长期过程。其次,马尾松人工林植被恢复过程中地上植被恢复较快,而土壤碳库增加速率相对较慢,且仅土壤表层碳储量增加。此外,马尾松不同恢复阶段植被和土壤碳库储量的恢复速率存在差异,并非线性增加。今后有必要进一步深入研究南方红壤侵蚀地植被恢复不同阶段对深层土壤碳储量影响研究,保护南方红壤地区森林生态系统尤为重要,应该减少植被破坏,避免发生严重土壤侵蚀问题。

#### [参 考 文 献]

- [1] Zuazo V H D, Martinez J R F, Raya A M, et al. Benefits of plant strips for sustainable mountain agriculture [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28 (4): 497-505.
- [2] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. *Environment International*, 2013, 29(4): 437-450.
- [3] Wen Dazhong, Pimentel D. *Agriculture in China: Water and energy resources* [M]. Beltsville: Ideals Press, Md, USA, 1998.
- [4] 梁音,张斌潘,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 22-27.
- [5] 徐凯健,曾宏达,任婕,等.亚热带典型红壤侵蚀区人类活动对植被覆盖度及景观格局的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(21): 6960-6968.
- [6] Xie Jinsheng, Guo Jianfen, Yang Zhijie, 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.
- [7] 刘翥,杨玉盛,司友涛,等.植被恢复对侵蚀红壤可溶性有机质含量及光谱学特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(11): 1174-1183.
- [8] Dou Xiaolin, Deng Qi, Li Ming, et al. Reforestation of *Pinus massoniana* alters soil organic carbon and nitrogen dynamics in eroded soil in South China [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 52(2): 154-160.
- [9] Gong Xia, Liu Yuanqiu, Li Qinglin, et al. Sub-tropic degraded red soil restoration: Is soil organic carbon build-up limited by nutrients supply [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300(4): 77-87.
- [10] 窦晓琳,李铭,王伟波,等.福建红壤区不同侵蚀强度马尾松林地土壤营养元素变化特征[J]. *植物科学学报*, 2012, 30(2): 161-168.
- [11] 翁伯琦,郑祥洲,丁洪,等.植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3610-3616.
- [12] Xiang Wenhua, Liu Shaohui, Deng Xiangwen, et al. General allometric equations and biomass allocation of *Pinus massoniana* trees on a regional scale in Southern China [J]. *Ecological Research*, 2011, 26(4): 697-711.
- [13] 胥超,谢锦升,曾宏达,等.自然恢复和人工促进恢复对侵蚀退化生态系统碳贮量的影响比较[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2014, 9(1): 53-60.
- [14] 蓝良就.闽西侵蚀退化红壤生态恢复研究[D].福州:福建农林大学,2012.
- [15] 曹小玉,杨文龙,刘悦翠.马尾松林生态系统碳贮量研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(5): 45-49, 145.
- [16] 江军.侵蚀红壤区植被恢复过程中芒萁对土壤有机碳库的影响[D].福州:福建师范大学,2013.
- [17] 姜培坤,周国模.侵蚀型红壤植被恢复后土壤微生物量碳、氮的演变[J]. *水土保持学报*, 2013, 17(1): 112-114, 127.
- [18] 谢锦升,杨玉盛,解明曙,等.植被恢复对侵蚀退化红壤碳吸存的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 95-98, 123.
- [19] 李辉信,刘满强,胡锋,等.不同植被恢复方式下红壤线虫数量特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(11): 1882-1889.
- [20] 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.
- [21] 王征,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [22] Wang Shaoqiang, Liu Jiyan, Zhang Cheng, et al. Effects of afforestation on soil carbon turnover in China's subtropical region [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(1): 118-134.
- [23] 张浩,吕茂奎,江军,等.侵蚀红壤区植被恢复对表层与深层土壤有机碳矿化的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 244-249, 314.