

# 人工修复措施对严重退化红壤固碳效益的影响

黄荣珍<sup>1</sup>, 樊后保<sup>1</sup>, 李凤<sup>1</sup>, 肖龙<sup>2</sup>

(1. 南昌工程学院 生态环境系, 江西 南昌 330099; 2. 泰和县水土保持站, 江西 泰和 343700)

**摘要:** 固碳效益是侵蚀退化地水土保持效益的重要组成部分, 其对全面评价生态修复意义重大。从人工促进生态修复林分固碳功能出发, 以裸露地为对照, 不同人工修复措施林分为研究对象, 对其碳储量及固碳价值进行了研究。结果表明, 人工修复显著增加了植被碳库和土壤碳库的碳储量, 强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松植被碳库分别为 6.12, 6.83, 8.20 和 32.69 t/hm<sup>2</sup>, 其土壤碳库分别为裸露地的 1.16, 1.37, 1.60 和 2.71 倍, 固碳总价值分别比裸露地增加了 0.36, 0.60, 0.87 和 2.78 倍。

**关键词:** 退化红壤; 人工促进修复; 固碳效益

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0060-05

中图分类号: S727.22

## Effects of Human Induced Vegetation Rehabilitation on Carbon Fixation Benefit in Seriously Degraded Red Soil

HUANG Rong-zhen<sup>1</sup>, FAN Hou-bao<sup>1</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, XIAO Long<sup>2</sup>

(1. Department of Ecology & Environment, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China; 2. Taihe Station of Soil and Water Conservation, Taihe, Jiangxi 343700, China)

**Abstract:** Carbon fixation benefit is an important part of the soil and water conservation benefits on degraded land and has a great significance in comprehensive evaluation of ecological rehabilitation. Taking bare land as a contrast, different types of human induced vegetation are studied. According to the studies on carbon pool and carbon fixation value of them, there was an obvious increase in vegetation carbon pool and soil pool after human induced rehabilitation. Vegetation carbon pools in strong interfered *Pinus massoniana*, bamboo-bur+groove *Pinus massoniana*, glassed-bamboo-bur+groove *Pinus massoniana*, and bamboo-bur+groove *Pinus elliotti* were 6.12, 6.83, 8.20, and 32.69 t/hm<sup>2</sup>; soil carbon pools of them were 1.16, 1.37, 1.60, and 2.71 times those on bare land; and the total values of carbon fixation were 0.36, 0.60, 0.87, and 2.78 times those on bare land, respectively.

**Keywords:** degraded red soil; human-induced vegetation rehabilitation; carbon fixation benefit

全球气候变暖已经成为无可争议的事实, 造成气候变暖的主要原因是以二氧化碳为主的温室气体排放过多, 而降低大气中二氧化碳等温室气体的含量有两种办法: 一是直接的节能减排, 二是间接手段, 即通过生态手段吸附、固化大气中的二氧化碳。

在间接减排的各种努力中, 森林的经营与管理具有十分重要和不可替代的作用和地位。森林就像地球的“肺”, 在吸收二氧化碳、减缓全球气温上升方面发挥着举足轻重作用, 作为陆地生态系统的主体, 其

汇聚着全球植被碳库 86% 以上的碳及全球土壤碳库 73% 的碳<sup>[1-2]</sup>。江西省作为我国南方严重的红壤侵蚀区, 在侵蚀劣地生态修复方面开展了卓有成效的工作, 近几十年森林覆盖率大幅度提高, 但总体上依然暴露出林分质量偏低, 未能充分发挥当地丰富气候资源潜力的态势, 这与缺乏科学研究支持及由此带来的认识不足、资金缺位密切相关, 严重制约了广大水土流失地生态修复工作的深入开展。以往在进行生态修复效益评价时, 对其吸收二氧化碳、抑制气候变暖

收稿日期: 2009-10-24

修回日期: 2009-11-26

资助项目: 江西省教育厅科技项目“不同生态修复措施林分‘碳汇’功能及效益研究”(GJJ09372); 江西省教育厅科技项目“赣中南红壤旱坡地果园的可持续经营研究”[赣教技字(2007)341号]; 江西省水利厅科技项目“赣中南红壤侵蚀区生态修复技术及其综合效益研究”(200712)

作者简介: 黄荣珍(1975—), 男(汉族), 福建省莆田市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与生态修复方面研究。E-mail: Huangrz@nit.edu.cn。

通信作者: 樊后保(1965—), 男(汉族), 江西省修水县人, 教授, 博士生导师, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: hbfan@nit.edu.cn。

效益往往忽略或重视不够。本研究选择在井冈山水土保持科技示范园(水利部第一批水土保持科技示范园)设立实验地,以严重侵蚀红壤地不同人工修复措施林分为研究对象,对群落的乔木层、土壤层的碳储量及其“碳汇”价值进行探讨,以期对人工修复林分的“碳汇”效益有更深入的了解,为生态修复的生态补偿提供理论依据和基础数据,促进生态修复工作的深入开展。

## 1 研究区概况

试验地位于泰和县老虎山小流域内,地理位置为东经  $114^{\circ}52'$ — $114^{\circ}54'$ ,北纬  $26^{\circ}50'$ — $26^{\circ}51'$ ,属中亚热带季风气候,多年平均雨量为 1 363 mm。无霜期 288 d,平均气温为  $18.6^{\circ}\text{C}$ ,平均大于  $10^{\circ}\text{C}$  的积温为  $5\,918^{\circ}\text{C}$ ,极端最高、最低气温分别为  $40.4^{\circ}\text{C}$  和  $-6^{\circ}\text{C}$ 。老虎山小流域属平原面丘陵区,海拔在 80~200 m 之间,境内丘坡平缓,坡度多在  $5^{\circ}$  左右,土壤为第四纪红色粘土发育而成的红壤,厚度一般为 3~40 m。

试验地包括裸露地(植被恢复前的对照,用 CK 表示),以及在裸露地上治理恢复的强烈干扰马尾松(*Pinus massoniana*)林分(打松枝、耙松针,无任何抚育管理措施,用 A 表示),竹节沟马尾松林分(开挖水平竹节沟,用 B 表示),种草竹节沟马尾松林分(带状种草且开挖水平竹节沟,用 C 表示)和竹节沟湿地松(*Pinus ellioti*)林分(开挖水平竹节沟,用 D 表示),治理前均为 A 层土壤全部剥蚀, B 层出露,本底条件相似。

裸露地属强度土壤侵蚀, B 层出露,地表无任何草灌。马尾松和湿地松都是 1983 年同密度植苗造林治理形成的,竹节沟全部为 2000 年开挖完成。本试验于 2008 年 4 月进行每木调查和土壤样品的野外采样。调查强烈干扰马尾松平均树高 4.44 m、平均胸径 9.38 cm,密度 1 450 株/  $\text{hm}^2$ ,林地内除了少数的萌芽松苗外,没有灌木和草本;竹节沟马尾松平均树高 6.44 m、平均胸径 8.04 cm,密度 1 500 株/  $\text{hm}^2$ ,林地内偶见极少数的低矮草灌。种草竹节沟马尾松平均树高 5.68 m、平均胸径 8.85 cm,密度 1 525 株/  $\text{hm}^2$ ,草种为 2002 年播种的百喜草(*Paspalum notatum* Flugge),林地内现存极少数的低矮灌木,草本的覆盖率约为 40%。竹节沟湿地松平均树高 13.12 m、平均胸径 14.74 cm,密度 1 300 株/  $\text{hm}^2$ ,林地内现存少数的低矮草灌,草灌的覆盖率约为 30%。为研究方便,林地内的草灌由于量少微,且没有合适的方程供计算选择,故不计入生物量及固碳量。

## 2 研究方法

### 2.1 材积与林分固碳量计算方法

单株材积采用同位于泰和县、红壤侵蚀地上建立起来的二元材积方程<sup>[3]</sup>,标准地的材积采取每木调查法、计算单株材积的总和得到。

$$V_{\text{马}} = 2.32 \times 10^{-5} D^{2.0974} H^{1.1160} \quad (1)$$

$$V_{\text{湿}} = 3.7934 \times 10^{-5} D^{2.2274} H^{0.6887} \quad (2)$$

式中:  $V_{\text{马}}$ ,  $V_{\text{湿}}$ ——分别为马尾松、湿地松单株林木的树干材积( $\text{m}^3$ );  $D$ ——林木的胸径(cm);  $H$ ——林木的树高(m)。

根据研究,同地区和同年龄马尾松木材干物质密度  $346.6 \text{ kg/m}^3$ ,湿地松木材干物质密度  $298.9 \text{ kg/m}^3$ <sup>[3]</sup>;马尾松干、叶、枝、根分别占生物量干质量的比例为 65.1%, 11.8%, 10.5%, 12.6%<sup>[4]</sup>;含碳量分别为 51.614%, 44.617%, 47.563%, 50.737%<sup>[5]</sup>;湿地松干、叶、枝、根的比例分别为 63.8%, 11.2%, 12.9%, 12.1%<sup>[4]</sup>;含碳量分别为 54.786%, 59.33%, 5.59% 和 56.311%<sup>[6]</sup>。

### 2.2 土壤碳计算方法

土壤碳库储量计算采用的公式为:

$$\text{SOC} = d \times Q \times (1 - f) \times c \times 10^{-1}$$

式中: SOC——每一土层土壤碳库储量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $d$ ——每一土层厚度(cm);  $Q$ ——土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $f$ ——每一土层 > 2 mm 石砾含量(%);  $c$ ——每一土层深度有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ )。

土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化—外加热法测定。

### 2.3 固碳价值计算方法

目前对森林生态系统单位  $\text{CO}_2$  吸收功能经济价值的评估多采用碳税法和造林成本法。由于西方国家税收水平较高,造林成本法又难以反映人们的实际支付意愿,取 2 种计算方法的平均值更接近其实际价值,碳税法在计算中一般使用瑞典税率(150 美元/t),折合成人民币约为 1 245 元/ $\text{t}^{[7]}$ ,中国的造林成本一般采用 71.2 元/t,折合为 261.3 元/ $\text{t}^{[8]}$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同林分乔木层固碳量

从图 1 可以看出,强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松林分林木的固碳量分别为 6.12, 6.83, 8.20, 32.69  $\text{t}/\text{hm}^2$ ;以竹节沟湿地松最高,分别为强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松的 5.34, 4.48 和 3.99 倍,其中竹节沟马尾松和种草竹节沟马尾松比较接近,种草的

比没种草的高 19.96%, 同时两者分别比强烈干扰马尾松高 11.58% 和 33.85%。说明湿地松生长快、生物量大, 固定  $\text{CO}_2$  的能力强, 而两种开挖竹节沟的马尾松林均高于受到强烈扰动破坏林分, 这与竹节沟截短坡长、减缓坡度, 改变坡面小地形, 调控坡面径流、改善坡面水肥运动状况从而促进林木生长有关; 种草的优于没有种草的, 揭示了种草不仅可以增加地表覆盖, 直接减少径流和土壤冲刷, 亦可通过种草从而有利于乔木生长、更好保护地表, 起到间接的水土保持作用。

叶、枝、根的固碳量占总量的比例都在 33% (湿地松为 37%) 以上, 其重要性不可轻视, 因此, 森林被采伐利用时, 木材部分被制成家具或建筑物可以被“永久的”保存起来, 成为缓冲性质的林产品碳库, 对调节地球环境中碳周转速率和周转量具有重要的意义<sup>[9]</sup>; 采伐剩余物枝、叶、皮、根等应保留在林内地, 让其在自然状态下缓慢分解, 经由腐殖质的最后分解阶段常常需要很长的时间——有时达到几年或几十年<sup>[4]</sup>, 减缓  $\text{CO}_2$  排放。同时, 如果能够在采伐后及时完成  $\text{CO}_2$  更新过程, 所造成的  $\text{CO}_2$  的排放量不是很大。反之, 森林采伐后, 大量树根、叶、枝、皮等被移出林外作薪材, 或进行“炼山”, 这将导致大量的有机质在很短时间内迅速氧化分解, 尤其是土壤表层有机质在高温下迅速氧化, 将排放大量的  $\text{CO}_2$ <sup>[10]</sup>。

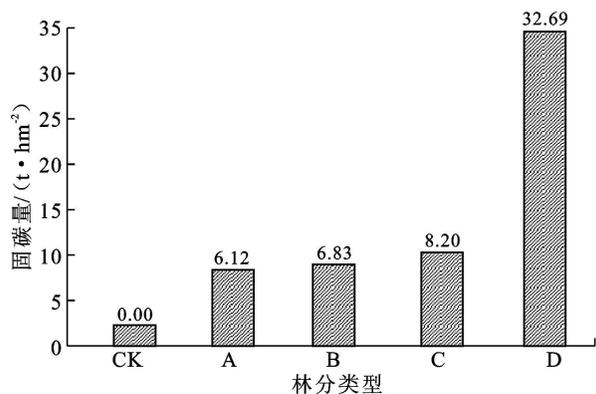


图 1 不同林分乔木层固碳量

注: 图中 CK 表示裸露地, A 表示强烈干扰马尾松林, B 表示竹节沟马尾松林, C 表示种草竹节沟马尾松林, D 表示竹节沟湿地松林。

### 3.2 土壤有机碳含量及其垂直分布

裸露地 80 cm 土层内土壤有机碳平均含量为 3.03 g/kg (图 2), 变幅在 2.5~3.3 g/kg 之间。人工修复后, 竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松林 80 cm 土层内土壤有机碳含量分别比裸露地高 48.68%, 92.20% 和 213.67%, 即使是强烈干扰

马尾松也比裸露地高 23.19%。人工修复后土壤有机碳含量的增加主要是由于植物凋落物分解输入和土壤侵蚀的减少。裸露地 0—80 cm 土层内土壤有机碳含量没有显著的垂直变化(图 2), 而人工修复后土壤有机碳含量垂直变化明显, 其中以竹节沟湿地松最为突出。4 种人工修复林分 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 土壤有机碳含量均显著高于裸露地的(图 2), 其中 0—10 cm 土层土壤有机碳含量修复最为明显, 竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松比裸露地增加了 1.89, 3.69 和 4.48 倍, 强烈干扰马尾松增加的相对较少, 仅有 1.47 倍, 这主要与植物凋落物和草本聚集在地表有关。在 20 cm 土层深度以下土壤有机碳含量下降速率变缓, 20—80 cm 仅竹节沟湿地松显著高于裸露的。40 cm 土层深度以下的土壤容重大, 养分贫乏, 根系数量少, 因此人工植被修复对底层土壤有机碳的影响较小。竹节沟湿地松在 40—80 cm 土层深度土壤有机碳含量与裸露地的仍有较大差异, 超出了其根系活跃的深度, 此问题有待于进一步研究。

种草竹节沟马尾松林地播种百喜草 6 a 后 0—10 cm 的土壤有机碳含量相比 10—20 cm 土层急剧增加(图 2), 增大了 1.36 倍, 20—80 cm 土层有机碳含量则与没种草的没有明显差异, 表明土壤有机碳的修复效果最主要体现在 0—10 cm 土层, 即侵蚀退化地种草治理可能在短时间内修复表层土壤有机碳含量。这主要是因为百喜草根系匍匐地表, 每到冬季百喜草茎叶及须根大量枯死, 为表层土壤补充了大量的有机物质, 而且百喜草的覆盖有效减少了土壤有机质的流失。

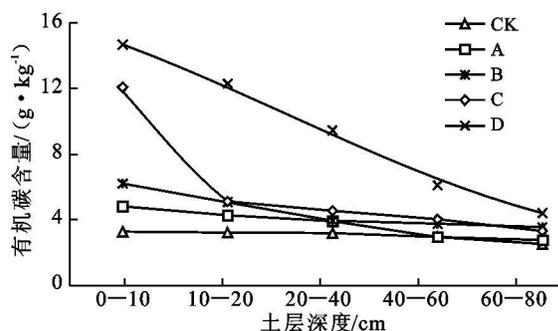


图 2 土壤有机碳垂直分布

### 3.3 不同林分土壤碳储量

土壤是仅次于海洋和地质库的碳储库, 全球土壤有机碳库约 1 500 Pg (1 Pg =  $10^{15}$  g), 大约分别是大气 (750 Pg) 和陆地生物 (550~570 Pg) 碳库的 2~3 倍, 在全球碳循环中起着至关重要的作用, 它的微小变化可能对大气  $\text{CO}_2$  浓度具有显著影响<sup>[11]</sup>。自然植被遭人为严重破坏时, 导致土壤有机碳的损失, 而

适当的管理和植被恢复可以使退化土壤重新吸存有有机碳, 成为缓和大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升的有效手段之一<sup>[12]</sup>。从表 1 可以看出, 不同人工修复林分土壤碳储量不同, 以裸露地最低, 分别为强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松的 86.31%, 72.75%, 62.46% 和 36.84%。主要是因为裸露地没有凋落物的归还与自肥作用, 且在长期的土壤侵蚀和矿化作用影响下, 土壤有机碳损失严重。修复为种草竹节沟马尾松林和竹节沟湿地松林后土壤有机碳储量显著增加, 0—80 cm 土层的碳储量分别为 49.060 和 83.170 t/hm<sup>2</sup>, 但仍明显低于我国亚热带常绿阔叶林(124 t/hm<sup>2</sup>) 和亚热带、热带常绿针叶林(95 t/hm<sup>2</sup>) 及亚热带、热带灌丛矮林(94.9

t/hm<sup>2</sup>)<sup>[13]</sup>, 也低于一些研究者估算的我国森林土壤的平均碳储量(115.90 或 193.55 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[13-14]</sup>, 以及世界土壤的平均碳储量(189.10 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[14]</sup>。

在 0—80 cm 土层内, 土壤有机碳储量均随着土壤深度增加而减少(表 1)。0—10 cm 土层土壤有机碳储量修复最明显, 强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松分别比裸露地分别增加了 0.41, 0.80, 2.33 和 3.19 倍。按相同的土层厚度计算, 人工修复后, 0—10 cm 土层土壤有机碳储量所占比重最大, 尤其是种草竹节沟马尾松 0—10 cm 土层的土壤有机碳储量占土壤有机碳总储量的 27.32%, 而裸露地 0—10cm 土层有机碳储量与其它层次的差异较小。

表 1 不同人工修复措施林分土壤碳储量

t/hm<sup>2</sup>

土层深度 / cm	裸露地 CK		强烈干扰马尾松 A		竹节沟马尾松 B		种草竹节沟马尾松 C		竹节沟湿地松 D	
	碳储量 / (t·hm <sup>-2</sup> )	比例 / %	碳储量 / (t·hm <sup>-2</sup> )	比例 / %	碳储量 / (t·hm <sup>-2</sup> )	比例 / %	碳储量 / (t·hm <sup>-2</sup> )	比例 / %	碳储量 / (t·hm <sup>-2</sup> )	比例 / %
0—10	4.025	13.13	5.659	15.94	7.242	17.19	13.402	27.32	16.859	20.27
10—20	4.056	13.24	5.325	15.00	6.134	14.56	6.090	12.41	14.379	17.29
20—40	7.964	25.99	9.896	27.87	9.715	23.07	10.880	22.18	24.850	29.88
40—60	7.668	25.02	7.372	20.76	9.447	22.43	10.102	20.59	15.616	18.78
60—80	6.930	22.61	7.253	20.43	9.581	22.75	8.585	17.50	11.466	13.79
合计	30.643	100.00	35.505	100.00	42.119	100.00	49.060	100.00	83.170	100.00

人工修复后, 0—20 cm 土层是土壤储存有机碳的主要层次, 如裸露地 0—20 cm 土层有机碳储量只占 0—80 cm 土层的 26.37%, 而强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松地则分别占 30.94%, 31.76%, 39.73% 和 37.56%, 分别比裸露地增加了 35.93%, 65.53%, 141.23% 和 286.58%; 而在 40 cm 土层深度以下, 每个层次土壤有机碳储量占总储量的比例相对稳定, 强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松地分别约为 20%, 22%, 19% 和 16% 左右, 因此, 上述措施对 40 cm 以下深度土壤有机碳储量的影响不明显。

### 3.4 不同林分固碳价值

不同林分固碳价值差异显著(表 2), 强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松林分的固碳价值分别为 3.14, 3.69, 4.31 和 8.73 万元/hm<sup>2</sup>, 比裸露地分别增加了 0.36, 0.60, 0.87 和 2.78 倍。人工修复的植被碳库中以强烈干扰马尾松最低, 竹节沟湿地松最高, 后者是前者的 5.34 倍, 竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松的植被碳库价值居中, 分别是竹节沟湿地松 20.90% 和 25.07%。以裸露地为对照, 强烈干扰马尾松、竹节沟马尾松、种草竹节沟马尾松和竹节沟湿地松林分增加的固碳价值分别为 0.83, 1.38, 2.00 和 6.42 万元/hm<sup>2</sup>。

表 2 不同林分固碳价值

类型	裸露地 CK		强烈干扰马尾松 A		竹节沟马尾松 B		种草竹节沟马尾松 C		竹节沟湿地松 D	
	固碳价值 / 万元	比例 / %	固碳价值 / 万元	比例 / %	固碳价值 / 万元	比例 / %	固碳价值 / 万元	比例 / %	固碳价值 / 万元	比例 / %
植被碳库	0	0	0.46	14.71	0.51	13.96	0.62	14.32	2.46	28.22
土壤碳库	2.31	100.00	2.67	85.29	3.17	86.04	3.69	85.68	6.26	71.78
合计	2.31	100.00	3.14	100.00	3.69	100.00	4.31	100.00	8.73	100.00

4 种人工修复林分中,除了竹节沟湿地松,另外 3 种林分土壤碳库价值所占比例俱在 85% 以上,显示了保护土壤碳库、提高其固碳能力的重要性。保护土壤碳库、提升其碳吸存能力,除了改变小地形、增加地表覆盖、避免径流破坏外,还需要栽植速生、乔灌木结合或种植凋落物量大的植物,以增加土壤的有机物质输入。在严重侵蚀退化的立地条件下,创造有利于苔藓、地衣等低等植物生存的微环境,促进微生物种群和数量的增加,加快生态系统正向演替的进程。

## 4 结论

(1) 人工修复明显增加了侵蚀退化地的有机质的恢复,固定了大量的 CO<sub>2</sub>,增加了碳汇,显示了其显著的固碳效益。在 4 种人工修复林分中,强烈干扰马尾松的固碳量最低,竹节沟湿地松的最高,其原因在于湿地松前期生长迅速、枝叶繁茂,而强烈干扰马尾松经常存在打枝、耙松针、人为践踏频繁、水土流失严重等障碍,生长严重不良。

(2) 土壤有机碳含量随着土层深度的增加而降低,裸露地土壤碳储量极低,有机碳的垂直分布也不明显。人工恢复显著增加了侵蚀退化地土壤有机碳含量和储量,尤其是 0—10 cm 土层土壤有机碳含量和储量受植被恢复影响最大,0—20 cm 土层是储存有机碳的主要层次,40 cm 以下深度土层有机碳受植被恢复的影响很小。

(3) 与同纬度的地带性植物群落相比,严重退化修复地上的植被碳库和土壤碳库都相差甚远,揭示其尚有很大的碳吸存潜力,但在侵蚀退化地上,各种营养元素含量极低,植被生长环境条件恶劣,依靠植物自身能力恢复速度十分缓慢,亟需外来进一步的人工干预,以加速其恢复的进程,此也将提供一个巨大的碳吸存空间,从而为延缓气候变暖做出积极贡献。

(4) 我国南方红壤严重侵蚀劣地普遍采用马尾松、湿地松两种先锋树种,本研究结果表明湿地松的固碳效益远大于马尾松,但其短期内并不能取代乡土

树种马尾松,作为外来树种,湿地松抗逆性不如前者,2008 年春的雨雪冻害致其大面积倒伏,要更大面积地推广种植,需要开展进一步的改良和研究。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, et al. The biota and the world carbon budget [J]. *Science*, 1978, 199: 141-146.
- [2] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [3] 李轩然,刘琪,陈永瑞,等. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1382-1388.
- [4] 李晓曼,康文星. 广州市城市森林生态系统碳汇功能研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2008, 28(1): 8-13.
- [5] 方晰,田大伦,胥灿辉. 马尾松人工生产与碳素动态[J]. *中南林学院学报*, 2003, 23(2): 11-15.
- [6] 方晰,田大伦,项文化,等. 不同密度湿地松人工林碳的积累与分配[J]. *浙江林学院学报*, 2003, 20(4): 374-379.
- [7] 宋离东,张江山. 福建省森林固定 CO<sub>2</sub> 价值评估[J]. *云南环境科学*, 2005, 24(3): 24-26.
- [8] 马娅,匡耀求,黄宁生,等. 森林固碳释氧价值动态变化及其与区域发展水平相关分析: 以广州市为例[J]. *林业经济问题*, 2008, 28(5): 692-696.
- [9] 徐德应,刘世荣. 温室效应、全球变暖与林业[J]. *世界林业研究*, 1992(1): 25-32.
- [10] 方晰,田大伦. 杉木人工林林地 CO<sub>2</sub> 释放量的研究[J]. *林业科学*, 1997, 33(2): 94-103.
- [11] Rosenzweig C, Hillel D. Soils and global climate change: Challenges and opportunities[J]. *Soil Science*, 2000, 165(1): 47-56.
- [12] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317-327.
- [13] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [14] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263: 185-190.