

DOI: 10.5846/stxb201710121830

徐英明, 虞依娜, 李鑫, 李昊, 何明威, 林森. 南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳积累与碳汇功能研究. 生态学报, 2019, 39(1): - .
Xu Y M, Yu Y N, Li X, Li H, He M W, Lin S. Soil carbon accumulation and carbon sinks under different afforestation patterns in Chinese subtropical forests. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳积累与碳汇功能研究

徐英明¹, 虞依娜^{1,*}, 李鑫¹, 李昊¹, 何明威¹, 林森²

¹ 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

² 广东省梅州市五华县林业局, 梅州 514400

摘要: 碳汇林能够固定大气二氧化碳, 在缓解全球变暖中起着重要的作用, 研究南亚热带地区不同造林模式碳汇林土壤碳的累积, 有助于为不同造林模式的碳汇林土壤碳汇功能评价提供科学依据。采用单因素随机区组设计, 对立地条件基本一致的研究区采用新造林(I)、封山育林(II)和补植套种(III)3种造林模式进行碳汇造林, 从而研究不同造林模式土壤碳积累与碳汇功能。结果表明: 碳汇造林5年期间, 土壤全碳含量差异显著, 不同造林模式0—20 cm 土壤层碳含量差异显著 ($P < 0.05$), 其变化幅度最大, 介于 $(-0.861 \pm 1.893) - (3.021 \pm 1.577)$ g C/kg 之间。经过接近5年的碳汇造林, 不同造林模式0—60 cm 土壤层碳储量变化量介于 $(-2.233 \pm 3.540) - (8.670 \pm 2.342)$ Mg C hm^{-2} 之间, 其中新造林(I)与补植套种(III)土壤碳储量变化量差异极显著 ($P < 0.01$); 碳汇造林5年, 土壤碳储量显著增加, 各造林模式土壤碳汇量由大到小依次为 $\text{III} > \text{II} > \text{I}$, 封山育林(II)和补植套种(III)的土壤碳汇效益显著。采取新造林模式的初始5年, 不利于土壤的碳积累, 而采取补植套种模式既有利于土壤碳固定, 也有利于土壤碳的积累。

关键词: 南亚热带; 造林模式; 碳汇林; 土壤全碳; 积累

Soil carbon accumulation and carbon sinks under different afforestation patterns in Chinese subtropical forests

XU Yingming¹, YU Yina^{1,*}, LI Xin¹, LI Hao¹, HE Mingwei¹, LIN Sen²

¹ College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

² Wuhua County Forestry Bureau, Meizhou 514400, China

Abstract: Carbon sink forests can fix atmospheric carbon dioxide and they play an important role in mitigating global warming. Research on the accumulation of soil carbon in carbon sink forests grown using different afforestation models in the South Asian subtropical region will contribute to our understanding of carbon sequestration by carbon sink forests. A single-factor randomized block design was used to investigate carbon sinks and three afforestation models. These were new afforestation (I), closed mountain afforestation (II), and replanting (III). Soil carbon accumulation and carbon sink function were also investigated. The results showed that the soil total carbon content was significantly different before and after the five-year study period. The soil carbon content in the 0 - 20 cm soil layer varied significantly among the afforestation models ($P < 0.05$), and the largest variation range was -0.861 ± 1.893 g C/kg to 3.021 ± 1.577 g C/kg. The multiple comparisons of soil organic carbon content showed that the soil organic carbon content in the 0 - 20 cm layer for the afforestation model was significantly different ($P < 0.05$) from the other two models. In 2016, after nearly five years of

基金项目: 广东省林业科技创新专项资金项目(2015KJCX028); 国家自然科学基金青年项目(31100402)

收稿日期: 2017-10-12; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 369055807@qq.com

carbon sinking and afforestation, there were significant differences in the soil organic carbon contents between the different afforestation models ($P < 0.05$), especially in the topsoil. The soil carbon stocks in the 0 - 60 cm soil layer ranged between -2.233 ± 3.540 and $8.670 \pm 2.342 \text{ Mg C hm}^{-2}$ for the different afforestation models and the difference in soil carbon stocks between new afforestation (I) and replanting (III) was extremely significant ($P < 0.01$) after the carbon sink trees had been allowed to grow for 5 years. The soil carbon stocks also increased significantly. Between 2012 and 2016, the soil carbon sinks of the various afforestation models were ranked as follows: $\text{III} > \text{II} > \text{I}$, and the soils after closed mountain afforestation (II) and replanting (III) were significantly better carbon sinks than after model I. The afforestation model has significant effects on soil organic carbon accumulation and carbon sequestration in carbon sink forests. The main differences are caused by root decomposition, litter, and precipitation. The adoption of new afforestation models for the first five years does not improve soil organic carbon. Furthermore, accumulation and fixation do not improve organic carbon levels. Adopting a closed mountain afforestation model does improve soil organic carbon fixation, but does not increase the accumulation of organic carbon. However, the replanting model (III) improves both soil carbon fixation and soil carbon accumulation.

Key Words: subtropical; afforestation pattern; carbon sequestration forest; soil carbon; accumulation

工业革命以后,由于化石燃料的大量使用和土地利用方式的变化,大气中 CO_2 快速升高^[1],大气 CO_2 的吸收与固定是缓解全球变暖的有效途径之一^[2-4]。土壤碳库作为陆地生态系统中重要的碳库之一,在缓解全球气候变化,特别是全球气候变暖方面发挥着重要作用^[5-6]。造林和再造林是固定吸收大气 CO_2 重要途径^[7-9],森林成长过程中,树木的生长与土壤有机碳储量的增加,能够有效固定大气中的 CO_2 ,是陆地生态系统重要的碳汇^[10]。同时,土壤碳周转速率慢,受各种干扰影响小,因此通过造林提高大气 CO_2 在土壤中的吸收,最后转化为稳定的腐殖质,从长远来看,对缓解全球气候变化意义重大^[11]。

碳汇造林是指在确定了基线情景的土地上,以增加碳汇为主要目的,采取一种或几种有别于基线情景的经营管理措施,并对造林及其林分生长过程实施碳汇计量和监测而开展的有特殊要求的营造林活动,具有严格的方法学和技术支持^[12-14]。REDD+(Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation)(减少森林砍伐与森林退化引起的碳排放)在 2009 年哥本哈根 COP15 大会后被列入世界森林减排范畴,成为今后最具潜力的森林增汇减排措施,受到国内外学者的广泛关注^[15-16]。不少学者研究了造林后土壤碳的变化,如刘延惠等^[17]研究了宁夏六盘山华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林土壤全碳含量变化,结果表明造林后土壤碳含量呈现先下降后上升的变化过程,其对造林干扰的敏感程度随土层加深而减弱;Paul 等^[18]统计分析了世界范围内 43 个课题涉及的 204 块样地,结果表明造林后初始 5 年的土壤碳储量约下降 3.64%,之后土壤碳储量逐年增大。也有学者对不同造林模式的人工林生物量和碳储量进行了研究,发现造林模式对人工林碳储量有重要影响^[9,19]。李铁华等^[20]曾对湖南溆浦马尾松人工林封育后的效果进行分析,结果表明封育后,土壤有机质含量有显著提高;胡庭兴等^[21]通过总结四川柏木低效防护林改造的成果得到,在补植混交后,土壤有机质含量由 1.47% 增加到 2.47%。然而,对于不同造林模式(如:新造林、封山育林、补植套种)碳汇林土壤碳累积与碳汇功能方面的研究而尚不多见。

本研究选择立地条件(土壤、气候、地貌等)基本相同的宜林山地为造林点,通过监测新造林(I)、封山育林(II)、补植套种(III)3 种造林模式土壤全碳的变化,研究不同造林模式碳汇林土壤碳的积累与碳汇功能,以为碳汇林增汇提供理论依据,进而为碳汇林造林模式的选择与土壤固碳能力的研究提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于广东省梅州市五华县,属中低纬度亚热带季风性湿润气候,年均气温 21.2°C , 年均降水 1519.7 mm,蒸发量 1844.8 mm,冬春季节蒸发量多,占年蒸发量的 36.4%。年均雷暴天数 77 d,无霜期 330 d。

调查点植被属南亚热带常绿阔叶林,主要树种以杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、木荷(*Schima superba*)、枫香(*Liquidambar formosana*)和马尾松(*Pinus masoniana*)为主。

研究区碳汇林距五华县林业局约 15 km,碳汇造林集中在 2012 年,区内造林树种为马尾松和木荷,以幼林和中龄为主,碳汇造林年限为 5 年。植物垂直分布不明显,灌草层数量多,但结构亦较为单一。研究区土壤主要以赤红壤为主,石块较多,大多呈团粒状,本土类有机质和氮素缺乏,但磷、钾、钙元素较多,由于颜色较深,吸热强,散热快,吸湿性小,因此易受干旱和水土流失,作为广东省水土流失最严重的地区之一,水土流失面积达 965.22 km²[22]。

2 研究方法

2.1 碳汇造林基线情景确定

碳汇造林是林业碳汇 CCER(核证自愿减排量)项目的类型之一,是以增加碳汇为目的,实施碳汇计量和监测而开展的有特殊要求的营造林活动[5],通常要求每隔 4—5 年进行一次碳汇量的监测和核证,如果不计成本的话,可每年都监测。其中碳汇造林开展之前需要进行基线情景确定,基线情景指能合理的代表在没有开展碳汇造林项目活动时历史的和现在的地表植被、土地利用、人为活动和碳库的状况[8]。本研究在 2012 年碳汇造林开展前,根据研究地林业局资料记载,选取 2012 年之前 5 年就是宜林荒山,并有少量的次生林为研究点,可保守的假定 2012 年之前 5 年研究地土壤碳、枯落物和枯死木 3 个碳库处于稳定或退化状态,其碳储量变化为零,因此在对基线碳储量变化进行计量时,2012 年实测土壤碳储量数据即为碳汇造林土壤全碳基线数据。

2.2 碳汇造林试验设计

2012 年对确定了基线情景的研究点进行碳汇造林,并在研究区内实施不同的造林模式,分别为新造林(I)、封山育林(II)和补植套种(III)。新造林即对确定了项目活动基线的研究地,采用带状清理方式,以种植穴为带状从山顶到山脚清除小范围植被,重新进行造林。封山育林即对确定了碳汇项目基线的研究地,利用森林的自我更新能力,除定期实行适当的人为育林外,其他时间禁止放牧、垦荒、砍柴等人为活动的破坏,并纳入碳汇林管护范围。补植套种即选取确定了碳汇项目基线的研究地,对老龄枯死树木采伐后,进行施肥补植。3 种模式主要造林树种为木荷和马尾松。按国家林业局文件[14]《造林项目碳汇计量与监测指南》,在每个造林模式下设置 3 个重复 20 m×20 m 的样方,共 9 个样方,作为固定样地进行长期定位观测研究土壤碳的持续变化,样地基本概况参见表 1。

表 1 样地基本概况
Table 1 Basic information of sampling plots

造林模式 Afforestation patterns type	树种 Varieties of trees	地理坐标 Position	海拔/m Elevation	坡向 Aspect	坡度/(度) Slope	造林密度 Planting density/ (株/hm ²)	土壤类型 Soil
I	马尾松、木荷	23°57'49" N 115°39'57"E	154	东南	31	89	赤红壤
II	马尾松、木荷	23°57'21"N 115°40'14"E	163	东南	28	/	赤红壤
III	马尾松、木荷	23°57'47"N 115°39'35"E	160	东南	26	54	赤红壤

2.3 土壤样品采集与处理

本研究分别于造林前(2012 年)和造林后(2016 年)进行土壤采样与处理。每个 20 m×20 m 的样方内按照“品”字型采样法选择 3 个采样点,除去地表凋落物后进行采样,采样深度为 60 cm。每个采样点按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 层采集土壤样品。每层取环刀一个、小铝盒一个计算土壤含水率与容重[23-24]。最后每层取土样 500 g 左右,共计 81 个土壤带回实验室。将采集回来的土壤样品自然风干后用木棍压碎,先过 10 目(2 mm 筛孔),以四分法取适量样品磨细过 60 目(0.2 mm 筛孔)或 100 目(0.15 mm 筛孔)测定土壤全碳含量。

2.4 土壤全碳含量的测定和碳储量的计算

土壤全碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定^[25]。采用下式计算土壤单位面积碳储量^[26]：

$$\text{土壤碳储量: } T(\text{Mg C hm}^{-2}) = \sum 0.1 E_i \times D_i \times C_i (1 - G_i)$$

式中, E_i 代表第 i 层土层厚度 (cm); D_i 代表第 i 层土壤容重 (g/cm^3); C_i 代表第 i 层土壤全碳含量 (g C/kg); G_i 代表第 i 层直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比 (%); 0.1 为单位换算系数。

2.5 数据统计分析

应用 SPSS 22.0 统计分析软件, 采用独立样本 t 检验分析造林前后土壤全碳含量和碳储量的差异性, 采用单因素方差分析法分析不同造林模式变化量组合之间的全碳含量和碳储量差异显著性, 并进行多重比较, 研究不同造林模式对 2012—2016 年土壤全碳含量和碳储量的影响。最后运用 GraphPad Prism 7.0 成图, 文中图表数据为平均值 $\pm$ 标准差。

3 结果与分析

3.1 不同造林模式碳汇林土壤全碳含量分析

土壤容重结果表明: 造林前后土壤容重均呈现出随土层深度增加而增加, 造林前 (2012 年) 与造林后 (2016 年), 3 种造林模式土壤容重无显著差异 ($P > 0.05$), 然而造林后土壤容重相比造林前总体上降低, 说明碳汇造林改善了土壤物理性状 (表 2)。

表 2 各造林模式对土壤容重的影响^a

Table 2 Effect of afforestation patterns on soil bulk density

Patterns	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
I	1.274 $\pm$ 0.271a	1.408 $\pm$ 0.159a	1.484 $\pm$ 0.072a	1.251 $\pm$ 0.029a	1.294 $\pm$ 0.145a	1.350 $\pm$ 0.109a
II	1.288 $\pm$ 0.075a	1.318 $\pm$ 0.024a	1.319 $\pm$ 0.083a	1.302 $\pm$ 0.173a	1.295 $\pm$ 0.144a	1.460 $\pm$ 0.025a
III	1.280 $\pm$ 0.045a	1.395 $\pm$ 0.051a	1.404 $\pm$ 0.041a	1.229 $\pm$ 0.015a	1.317 $\pm$ 0.051a	1.324 $\pm$ 0.055a

^a各造林模式的样本数为 27。下同各年份同一列不同小写字母表示不同造林模式间差异显著 ($P < 0.05$)

表 3 各造林模式对土壤碳含量的影响

Table 3 Effect of afforestation patterns on soil carbon content

	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
I	4.742 $\pm$ 1.776Aa	2.350 $\pm$ 0.565Ba	1.407 $\pm$ 0.201Ba	3.881 $\pm$ 2.009Aa	2.178 $\pm$ 0.887Ba	1.179 $\pm$ 0.111Ba
II	3.036 $\pm$ 0.631Aa	2.059 $\pm$ 0.763Ba	2.140 $\pm$ 1.256Ba	5.041 $\pm$ 1.828Ab	3.492 $\pm$ 1.586Ba	4.455 $\pm$ 3.600BCb
III	4.575 $\pm$ 0.964Aa	3.650 $\pm$ 0.801Ba	2.745 $\pm$ 0.663Ba	7.596 $\pm$ 2.189Ac	6.279 $\pm$ 2.014Bb	4.702 $\pm$ 1.605Bb

各年份同一行不同大写字母表示不同土壤层间差异显著 ($P < 0.05$); 各年份同一列不同小写字母表示不同造林模式间差异显著 ($P < 0.05$)

造林前后全碳含量结果分析: 2012 年, 3 种造林模式土壤全碳含量与土壤容重, 不同造林模式之间土壤全碳含量无显著差异, 且表现为随土层深度增加而降低。各造林模式 0—20 cm 土层土壤全碳含量最高, 介于 (3.036 $\pm$ 0.631)—(4.742 $\pm$ 1.776) g C/kg 之间, 分别是 20—40 cm 层 1.253—2.018 倍和 40—60 cm 层的 1.419—3.370 倍。经过接近 5 年碳汇造林, 2016 年 3 种模式之间土壤全碳含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 尤其表层土差异更为显著。通过对造林前后土壤碳含量统计分析表明, 造林前后土壤碳含量差异显著 ($P < 0.05$), 说明碳汇造林对土壤碳含量产生较大影响 (表 3)。

2012—2016 年, 3 种造林模式全碳含量累计变化量结果表明: 2012—2016 年间, 0—20 cm 土层中模式 III 土壤全碳含量增加最多, 为 3.021 g C/kg , 而模式 I 减少了 0.861 g C/kg , 减少最多; 20—40 cm 层中依然模式 III 增加最多, 为 2.629 g C/kg , I 模式减少了 0.172 g C/kg ; 40—60 cm 层中, 模式 II 土壤全碳含量增加最多, 为 2.315 g C/kg , 模式 I 减少最多, 为 0.228 g C/kg 。3 种造林模式 3 个土层土壤碳含量变化量的多重比较结果表明: 模式 I 与模式 III 差异极显著 ($P < 0.01$), 而模式 I 与模式 II 土壤全碳含量变化量差异显著 ($P < 0.05$), 模式 II 与模式 III 土壤全碳含量变化量差异较显著 ($P < 0.05$)。说明模式 I 碳含量出现负增长, 下降最多, 而模式 III 下土壤碳含量

增加最多, 模式 III 表现出明显的碳汇效应(表 4)。

表 4 不同造林模式 2012—2016 年土壤碳含量变化量
Table 4 The changes of soil carbon concentration in different afforestation patterns from 2012 to 2016

造林模式 Afforestation Patterns	土壤碳含量变化量 The change of soil organic carbon content in different soil layer/(g C/kg)		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
I	-0.861±1.893a	-0.172±0.726a	-0.228±0.156a
II	2.005±1.230b	1.433±1.175a	2.315±2.428b
III	3.021±1.577c	2.629±1.408b	1.957±1.134c

同一列不同小写字母表示不同造林模式间差异显著 ($P < 0.05$)

3.2 不同造林模式碳汇林土壤碳储量分析

造林前后碳储量结果分析: 2012 年 3 种造林模式土壤碳储量随土层深度的增加而减少, 3 种造林模式 (0—60 cm) 土壤碳储量由大到小依次为补植套种 (III) > 新造林 (I) > 封山育林 (II), 统计分析表明不同造林模式造林前 (2012 年) 土壤碳储量差异不显著 ($P > 0.05$)。而碳汇造林 5 年后 (2016 年), 3 种造林模式 (0—60 cm) 土壤碳储量由大到小依次为补植套种 (III) > 封山育林 (II) > 新造林 (I), 3 种造林模式土壤碳储量差异显著 ($P < 0.05$) (表 5)。

表 5 各造林模式对土壤碳储量的影响
Table 5 Effects of afforestation patterns on soil carbon storage

造林模式 Afforestation patterns	2012 年各土层土壤碳储量 Soil carbon storage in different soil layer in 2012/(Mg C hm ⁻²)				2016 年各土层土壤碳储量 Soil carbon storage in different soil layer in 2016/(Mg C hm ⁻²)			
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	总和 Total	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	总和 Total
I	12.167±4.167Aa	5.077±1.914Ba	3.328±0.564Ba	20.572±3.822a	9.934±2.913Aa	5.604±0.139Ba	3.207±0.561Ba	18.746±2.784a
II	7.860±1.898Ab	5.393±1.900Ba	5.462±1.213Bb	18.715±1.147a	15.026±7.199Ab	9.728±3.843BCb	6.576±3.594Cb	31.331±3.487b
III	9.948±2.448Ac	8.514±2.052Ab	6.428±1.736Bb	24.889±1.445b	18.618±2.235ACc	16.737±2.452ABc	12.626±1.237Bc	47.982±2.502c

各年份同一行不同大写字母表示不同土壤层间差异显著 ($P < 0.05$); 各年份同一列不同小写字母表示不同造林模式间差异显著 ($P < 0.05$)

2012—2016 年 3 种造林模式碳储量累计变化量结果表明: 2012—2016 年间, 模式 I 0—60 cm 土壤碳储量减少了 1.826 Mg C hm⁻²。模式 III 0—60 cm 土壤碳储量增加, 且增加最多, 为 23.093 Mg C hm⁻², 说明补植套种 (III) 模式有利于碳汇林生态系统土壤有机碳储量增加。不同造林模式土壤碳储量变化量多重比较结果表明: 新造林 (I) 模式与补植套种 (III) 模式土壤碳储量变化量差异极显著 ($P < 0.01$), 新造林 (I) 模式与封山育林 (II) 模式土壤碳储量变化量差异显著 ($P < 0.05$), 而封山育林 (II) 模式与补植套种 (III) 模式土壤碳储量变化量差异不显著 ($P > 0.05$)。各造林模式土壤碳储量变化量呈现出补植套种 (III) > 封山育林 (II) > 新造林 (I) (图 1)。

4 结论与讨论

(1) 造林前后土壤碳储量差异显著 ($P < 0.05$), 且土壤碳储量在 0—20 cm 土层最高, 随土层加深而减少。郑顺安等^[27]的研究表明, 森林凋落物的分解、对大气中含碳气体的吸收、大气含碳物质的沉降及岩石的风化

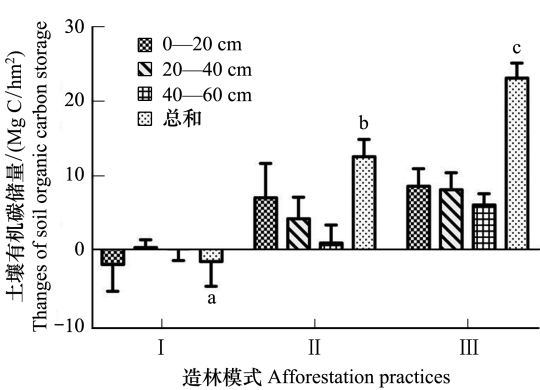


图 1 不同造林模式土壤碳储量的变化情况

Fig.1 The changes of soil carbon storage in different afforestation patterns

图中不同小写字母表示不同造林模式间差异显著 $P < 0.05$

是森林土壤中碳素的重要来源,其中凋落物是森林土壤中碳的主要来源。土壤表层有机物质的积累主要依赖凋落物的分解,凋落物主要集中在土壤表层,而中下层土壤不能直接接收地表植物残体,主要依靠上层的淋溶下移和地下部分植物残体分解,导致土壤层有机质含量自上而下依次减小。植物根系也主要集中在土壤表层,其垂直分布直接影响送到土壤各层次的碳及养分含量^[28-29]。邓坤枚等^[30]研究表明,云南松成熟林的根系生物量以 0—30 cm 土层最多,占总根系生物量的 93.7%,且大多数是粗根;<2 mm 细根 0—30 cm 土层生物量占 0—85 cm 土层总细根生物量的 73.5%;另外,树木的生长需要根系从深层土壤中吸收养分。因此,表层土壤碳的积累大于消耗,而深层土壤碳消耗大于积累。因此碳汇造林后由于林间枯落物增加以及根系的发展,使土壤全碳增加,且随土层加深而减少,本研究得出造林前后各土层土壤碳储量依次呈现出 A 层> B 层> C 层,正说明说明造林模式对表层土壤碳储量影响最大。

(2)3 种造林模式之间土壤碳储量差异显著,模式 I 起初几年土壤碳储量有一定下降,而模式 II 与模式 III 土壤碳汇效益显著。3 种造林模式土壤碳储量变化量由大到小依次为补植套种(III)>封山育林(II)>新造林(I),其中模式 I 与模式 III 土壤碳储量变化量差异极显著($P<0.01$),模式 I 与模式 II 土壤碳储量变化量差异显著($P<0.05$),而模式 II 与模式 III 土壤碳储量变化量差异不显著($P>0.05$)。造成这种差异可能是凋落物在不同造林模式下分布差异形成的。枯落物及植被根系是土壤—植被系统碳循环最重要的联结库,其对土壤的结构和理化功能都可能施加重要的影响^[31-32],一般认为,枯落物以及根系的发展可以有效地减少或防止土壤的碳流失^[33]。对土壤理化性质和活性也具有重要的调节作用^[34],并有利于土壤有机质的形成^[35]。同时有研究指出,森林凋落物现存量的变化对土壤碳储量影响很大^[33],龚伟等^[36]曾通过研究发现,凋落物以及植被根系的输入能够增加土壤碳生物活性,使土壤碳矿化速率增加,进而增大土壤碳储量。本研究 3 种造林模式下,新造林(I)模式造林后 0—20 cm 土层土壤碳储量减少了 $2.233 \text{ Mg C hm}^{-2}$,说明这种模式下枯落物呈现减少趋势,主要是由于大多处于幼林,枯落物较少,根系发展不成熟;封山育林(II)模式造林后 0—20 cm 土层土壤碳储量增加了 $7.143 \text{ Mg C hm}^{-2}$,说明这种模式下枯落物呈增长趋势,主要是由于没有人为干扰,使枯落物留存较多,根系发展较为稳定。而补植套种(III)模式造林后 0—20 cm 土层土壤碳储量增加最多,为 $8.670 \text{ Mg C hm}^{-2}$,说明这种模式下最利于枯落物的增加,该模式在不破坏原有林木的基础上对林分进行施肥补植,一方面原有地块枯落物留存下来,另一方面新造树木又补给了枯落物,发展了根系,3 种造林模式下枯落物量与根系发展能力由大到小依次为补植套种(III)>封山育林(II)>新造林(I),这与 3 种造林模式土壤全碳的变化规律一致。

新造林(I)模式土壤碳储量减少,可能与降水造成的土壤侵蚀有关,土壤侵蚀使地表枯落物流失以及损害了根系发展,该研究点地处亚热带,属亚热带季风气候,降雨较多且持续时间长,这样就极易造成水土流失,从而土壤碳流失^[10,37]。根据五华县政府网站公布以及杨永欢等研究^[38],五华县解放前水土流失就非常严重,1950 年普查,全县水土流失面积为 681.1 km^2 ,其中面状流失为 408.7 km^2 ,沟状流失为 204.3 km^2 ,崩岗流失为 68.1 km^2 。1999 年省水利厅利用卫星遥感测得五华县水土流失面积为 541.6 km^2 ,其中面状流失为 210.56 km^2 ,沟状流失为 141.02 km^2 ,崩岗为 22117 个,流失面积为 190.02 km^2 ,土壤侵蚀模数每年为 5110 t/km^2 ,而近几年五华县水土流失面积 965.22 km^2 ,占梅州的 1/3,五华水土流失依然严重。本研究中新造林(I)模式是将原有植被砍伐重新造林,这样造成了土壤层的松动,在五华水土流失严重的环境下,极易造成水土流失,使土壤碳流失^[39-40]。而补植套种(III),在原有林木的基础上对林分进行施肥补植,一方面,通过改变林分密度和结构,从而改变植被竞争,为土壤微生物活动提供条件,分解凋落物改变土壤有机质及养分,另一方面由于对原林木不进行砍伐,树木碳储量固定较为稳定,不利于在降雨作用下造成水土流失,因此碳储量增加最多^[40]。而封山育林(II)不对其进行砍伐以及人为的扰动,使得原来有林地土壤碳贮藏稳定,然而缺少林分空间层次从而这种造林模式对土壤碳储量影响变动不大,增量也不显著^[20,41]。

(3)应该加强造林模式多样化的研究,筛选不同的造林模式,以提高碳汇林的碳汇功能。本文研究得出碳汇造林 5 年的数据显示,封山育林(II)5 年间增加了 $12.616 \text{ Mg C hm}^{-2}$,补植套种(III)增加了 23.093 Mg C

hm^{-2} ,而李开志对四川不同改造措施马尾松低效林土壤碳进行研究显示^[26],5年间全砍重造林增加了 $15.937 \text{ Mg C hm}^{-2}$,补植混交增加了 $5.510 \text{ Mg C hm}^{-2}$,封山育林增加了 $4.431 \text{ Mg C hm}^{-2}$ 。本文碳汇造林补植套种模式(III)的碳储量是马尾松改造林的4.191倍,因此,不仅需要加强碳汇造林技术研究,更应该研究碳汇造林模式,使造林更加优化,达到更好的碳汇效益,从而减缓 CO_2 的排放,缓解全球变暖。

参考文献(References):

- [1] Pope J. How can global warming be traced to CO_2 ? Scientific American, 2006, 295(6): 124-124.
- [2] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [3] Caldeira K, Duffy P B. The role of the southern ocean in uptake and storage of anthropogenic carbon dioxide. Science, 2000, 287(5453): 620-622.
- [4] Norby R J, Luo Y Q. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in a multi-factor world. New Phytologist, 2004, 162(2): 281-293.
- [5] 李怒云,冯晓明,陆霖. 中国林业应对气候变化碳管理之路. 世界林业研究, 2013, 26(2): 1-7.
- [6] 李翀,周国模,施拥军,周宇峰,张宇鹏,沈利芬,范叶青,沈振明. 不同经营措施对毛竹林土壤有机碳的影响. 林业科学, 2015, 51(4): 26-35.
- [7] 张小全,李怒云,武曙红. 中国实施清洁发展机制造林和再造林项目的可行性和潜力. 林业科学, 2005, 41(5): 139-143.
- [8] 武曙红,张小全,李俊清. CDM造林或再造林项目的基线问题. 林业科学, 2006, 42(4): 112-116.
- [9] Wang H, Liu S R, Wang J X, Shi Z M, Lu L H, Zeng J, Ming A G, Tang J X, Yu H L. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 4-13.
- [10] 史军,刘纪远,高志强,崔林丽. 造林对土壤碳储量影响的研究. 生态学杂志, 2005, 24(4): 410-416.
- [11] 孙鹏鹤,宋冰,董福刚. 造林对土壤碳储量影响的研究. 科研, 2015, (21): 93-93.
- [12] 陈先刚,赵晓惠,陆梅. 造林再造林项目碳汇能力有效性判别. 东北林业大学学报, 2009, 37(10): 99-101.
- [13] 李少柯. 关于建立健全碳汇林业支持政策的思考. 林业经济, 2013, (7): 66-68.
- [14] 国家林业局应对气候变化和节能减排工作领导小组办公室. 造林项目碳汇计量与监测指南. 北京:中国林业出版社, 2008.
- [15] 李翀,周国模,施拥军,周宇峰,徐林,范叶青,沈振明,李少虹,吕玉龙. 不同经营措施对毛竹林生态系统净碳汇能力的影响. 林业科学, 2017, 53(2): 1-9.
- [16] 盛济川,周慧. 减少砍伐和退化所致排放量(REDD+)机制国内外研究新进展. 阅江学刊, 2014, (1): 25-32.
- [17] 刘延惠,王彦辉,于澎涛,熊伟,郝佳,张晓蓓,徐丽宏. 六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量. 林业科学, 2012, 48(12): 1-9.
- [18] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [19] 刘恩,刘世荣. 南亚热带老排人工林碳贮量及其分配特征. 生态学报, 2012, 32(16): 5103-5109.
- [20] 李铁华,项文化,徐国祯,喻勋林,罗中太,杨万里. 封山育林对林木生长的影响及其生态效益分析. 中南林学院学报, 2005, 25(5): 28-32.
- [21] 胡庭兴. 低效林恢复与重建. 北京: 华文出版社, 2002.
- [22] 王晓丽,王媛,石洪华,彭士涛,宫立鹏,覃雪波. 山东省长岛县南长山岛黑松和刺槐人工林的碳储量. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1263-1268.
- [23] 刘成杰. 基于典型样地的山东省森林碳储量及碳密度研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [24] 漆良华,范少辉,杜满义,石雷,岳祥华,毛超. 湘中丘陵区毛竹纯林、毛竹-杉木混交林土壤有机碳垂直分布与季节动态. 林业科学, 2013, 49(3): 17-24.
- [25] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [26] 李开志. 不同改造措施对马尾松低效林有机碳储量的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [27] 郑顺安,常庆瑞. 黄土高原不同类型人工林对土壤肥力的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 119-123.
- [28] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [29] 常宗强,冯起,司建华,李建林,苏永红. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量. 生态学杂志, 2008, 27(5): 681-688.
- [30] 邓坤枚,罗天祥,张林,王学云,李长会. 云南松林的根系生物量及其分布规律的研究. 应用生态学报, 2005, (1): 21-24.

- [31] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 苏冬雪, 安静, 郑广宇, 祖元刚. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异. 生态学报, 2012, 32(3): 833-843.
- [32] 杨万勤, 张健, 胡庭兴, 孙辉. 森林土壤生态学. 成都: 四川科学技术出版社, 2006.
- [33] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 冯兆忠, 张红星, 徐永荣. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量. 生态学报, 2005, 25(12): 3146-3154.
- [34] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, 2002, 38(3): 14-19.
- [35] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 何宗明, 谢锦升, 陈光水. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. 生态学报, 2004, 24(2): 359-367.
- [36] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 宫渊波, 冉华. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化. 生态学报, 2008, 28(6): 2536-2545.
- [37] 徐嘉. 南亚热带两种人工林土壤碳过程对减少降雨的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [38] 杨永欢. 五华县水土流失现状及保护对策. 广东水利水电, 2011, (4): 69-71.
- [39] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, Xie J S, Lin P. Soil C and N pools in Chinese fir and evergreen broadleaf forests and their changes with slash burning in mid-subtropical China. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 56-63.
- [40] 马长顺, 王雨朦. 不同经营方式对人工林土壤化学性质的影响. 森林工程, 2014, 30(1): 30-35.
- [41] 曹军, 张懿铨, 刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. 地理研究, 2002, 21(5): 551-560.