

思茅松人工林土壤有机碳和氮储量变化

李帅锋^{1,2}, 苏建荣^{1,2}, 刘万德^{1,2}, 郎学东^{1,2}, 黄小波¹,
贾呈鑫卓¹, 童清³, 唐红燕³

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224; 2. 国家林业局普洱森林生态系统定位研究站, 云南 昆明 650224;
3. 云南省普洱市林业科学研究所, 云南 普洱 665000)

摘要:以思茅松人工林中龄林、近熟林和过熟林及附近区域思茅松天然林和常绿阔叶林为研究对象,探讨造林对思茅松人工林土壤有机碳和氮储量大小与空间分布的影响。结果表明:各林地类型土壤有机碳、氮含量与C:N随着土层厚度增加而减少,过熟林土壤有机碳和氮含量随土层加深则显著高于其它林地类型,近熟林土壤表层有机碳和氮含量显著低于中龄林和过熟林。思茅松人工林乔木层碳储量随林龄增大而增加,过熟林乔木层碳储量最高。造林对思茅松人工林土壤有机碳储量的影响不显著,而土壤有机碳储量随林龄增大先减少后增加至过熟林恢复至常绿阔叶林和思茅松天然林水平,土壤有机碳与氮储量随土层加深而减少。与常绿阔叶林和思茅松天然林相比,思茅松人工林的中龄林与过熟林土壤有机碳和氮储量的年变化量高于近熟林,近熟林年变化量呈净减少;在思茅松天然林中,人工更新与在常绿阔叶林中造林相比,思茅松人工林可以累积更多的土壤有机碳和氮储量。此外,土壤含水量越大,土壤有机碳储量则越高。

关键词:常绿阔叶林;思茅松天然林;人工林;乔木层碳储量;造林

中图分类号:S714

文献标识码:A

Changes in Soil Organic Carbon and Nitrogen Stocks in *Pinus kesiya* var. *langbiannesis* Plantation

LI Shuai-feng^{1,2}, SU Jian-rong^{1,2}, LIU Wan-de^{1,2}, LANG Xue-dong^{1,2}, HUANG Xiao-bo¹, JIA Cheng-xin-zhuo¹,
TONG Qing³, TANG Hong-yan³

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. The Pu'er Forest Eco-system Research Station, State Forestry Bureau, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Forestry Research Institute of Pu'er Municipality, Pu'er 665000, Yunnan, China)

Abstract: Taking three stand age-class (immature forest, near-mature forest and over-mature forest) of *Pinus kesiya* var. *langbiannesis* plantation and nearby green broad-leaved forest, primary coniferous forest as contrast in Pu'er city, Yunnan province. We discussed that the impacts on afforestation for size and spatial distribution of soil organic carbon and nitrogen stocks of *Pinus kesiya* var. *langbiannesis* plantation. The results show that soil organic carbon content, nitrogen content and C:N gradually decreased with increase of soil layer thickness in different forest types. Soil organic carbon and nitrogen content in the over-mature forest were significantly higher than that of other forest types as the soil layer deepen and soil organic carbon and nitrogen content of topsoil in the near-mature forest is significantly lower than that immature forest and over-mature forest. Tree layer carbon stocks of *Pinus kesiya* var. *lang-*

收稿日期: 2015-07-18

基金项目: 云南省科技计划项目(2013RA004); 中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAF-YBB2014QA014 和 rirical2012001Z); 林业公益性行业科研专项项目(201404211)

作者简介: 李帅锋(1982—),男,河南郑县人,助理研究员。研究方向:群落生态学、生物多样性和森林碳循环。

* 通讯作者。

biannensis plantation increased with stand age development, moreover, tree layer carbon stocks in the over-mature forest was significantly higher than other forest types. Afforestation had no significant effect on soil nitrogen stocks, and the soil organic carbon stocks increased, then decreased and recovered the level of green broad-leaved forest and primary coniferous forest with the stand age development. Simultaneously, soil organic carbon and nitrogen stocks decreased with the increase of soil layers depth (0–60 cm). The relative Change rate of soil organic carbon and nitrogen stock of immature and over-mature forest were higher than near-mature forest with stand age development compared with the green broad-leaved and primary coniferous forest, and the relative change rate of soil organic carbon and nitrogen stock of near-mature forest had obviously net reduction. Artificial reforestation of primary coniferous forest can accumulate more soil organic carbon and nitrogen stocks than green broad-leaved forest. there were a significant and extremely significant positive correlation between soil moisture and soil organic carbon stocks in the different soil layer depth.

Key words: green broad-leaved forest; *Pinus kesiya* var. *langbiannensis* primary forest; plantation; tree layer carbon stocks; afforestation

森林生态系统的碳储量是全球碳平衡的重要组成部分,据估计,其生物量占森林生态系统地上碳储量的82%~86%,森林土壤则包含了全球土壤有机碳的70%~73%^[1],植被通过光合作用转化空气中的CO₂进行碳固定,同时以植物剩余物(凋落物和根)的碳输入影响土壤碳库^[2],对全球碳平衡起着巨大的贡献。土地利用变化通过改变土壤碳累积率和周转从而对全球碳循环有一个显著的影响^[3-4],目前已成为陆地生态系统研究的热点^[5-6],由于土地利用变化产生的干扰引起土壤碳分解的增加和流失,最快在20年内可流失50%^[7]。作为土地利用变化的重要类型之一,造林是生态系统碳平衡的关键组成部分,一方面可以积累地上碳库来增加陆地碳固定从而减少大气中的CO₂^[8],另一方面也可以改变土壤碳输入的质量、数量及其时空分布而影响土壤有机碳固定^[9-10]。以往大量研究集中在土壤碳的积累上,往往忽视土壤氮的动态变化以及碳氮比(C:N)之间的相互关系,土壤氮的变化决定了陆地生态系统的物质循环,是其碳固定的一个重要参数,C:N相互关系通过影响碳的累积决定了碳汇是否能够在陆地生态系统长期保持^[11-12]。

尽管造林对土壤有机碳和氮储量的影响没有形成一致的结论,但是从越来越多的研究可归纳造林对土壤碳累积的影响有4种主要观点^[3]:(1)造林可以增加土壤碳和氮储量^[3, 5, 13-14];(2)造林可以减少土壤碳和氮储量^[15-16];(3)造林对土壤碳和氮储量的影响可以忽略不计^[2],尤其是土壤矿质层中^[12];(4)造林的早期阶段土壤有机碳和氮储量明显减少,随后慢慢恢复到造林前的水平^[17]。影响土

壤碳和氮储量的原因主要是造林前的土地利用类型、土壤肥力、造林树种的选择、管理措施(整地、施肥、抚育等)的差异等^[10, 18]。

思茅松(*Pinus kesiya* Royle ex Gord var. *langbianensis* (A. Chev.) Gaussen)是以三针一束为主的松树,1年抽稍2次是它区别于其它松树的重要特征,主要分布在云南省哀牢山西坡以西的亚热带南部^[19],具有生长迅速、材质优良、松脂产量高等优良特点,是云南省重要的材脂兼用树种和主要造林树种。思茅松林分布面积占云南省林地面积的11%,拥有约1亿m³的蓄积量,在区域林业发展中占有举足轻重的地位,近年来,对思茅松碳汇能力的研究日渐增多,主要集中在中幼龄林的乔木层与土壤有机碳储量上^[16, 20],缺少对思茅松人工林的近熟林和过熟林的研究,同时,对于造林前的林地类型对思茅松人工林土壤有机碳与氮储量的变异与空间分布的影响还未展开探讨。思茅松天然林人工更新和季风常绿阔叶林的采伐迹地重新造林是当地思茅松人工林的主要造林方式,本研究主要是探讨造林对思茅松人工林土壤有机碳和氮储量大小与空间分布的影响,为思茅松高储量碳汇人工林的营造提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于云南省中南部普洱地区的景谷县和宁洱县(23°3′~23°29′ N, 100°27′~101°6′ E),海拔1 200~1 800 m,该地区地处哀牢山以西,为低纬度山地季风气候,年均气温17.6℃,最冷月(1月)平均气温11.4℃,最热月(7月)平均气温21.6℃,

$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 7 360.9 $^{\circ}\text{C}$, 年降水量 1 490 mm, 相对湿度 78%, 土壤为砂岩发育的山地红壤。

思茅松人工林与天然林在该区域分布较广, 是暖热性针叶林中喜暖热的偏湿类型, 思茅松在群落乔木层内优势地位明显, 该层内其它主要植物有红木荷 (*Schima wallichii* (DC.) Choisy)、华南石栎 (*Lithocarpus fenestratus* (Roxb.) Rehd)、茶梨 (*Anneslea fragrans* Wall)、小果栲 (*Castanopsis fleuryi* Hick. et A. Camus)、大叶栎 (*Quercus griffithii* Hook. f. et Thoms ex Miq.) 等; 灌木层主要组成植物有多花野牡丹 (*Melastoma affine* D. Don)、艾胶算盘子 (*Glochidion lanceolarium* (Roxb.) Voigt) 和黑面神 (*Breynia fruticosa* (Linn.) Hook. f.) 等; 草本层主要植物有紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophora* Spreng)、红球姜 (*Zingiber zerumbet* (L.) Smith)、羊耳菊 (*Inula cappa* (Buch.-Ham.) DC)、毛果珍珠茅 (*Scleria herbecarpa* Nees) 等; 藤本植物主要有白花酸藤子 (*Embelia ribes*

Burm. f.)、宿苞豆 (*Shutteria involucrata* (Wall.) Wight et Arn.)、滇南天门冬 (*Asparagus subscandens* Wang et S. C. Chen) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 于2013年10月在海拔1 500~1 800 m 范围内采用典型取样法设置样地, 根据造林前的林地类型选择分布在思茅松人工林附近区域的常绿阔叶林和思茅松天然林作为对照, 常绿阔叶林为季风常绿阔叶林次生林, 思茅松天然林为以思茅松为优势物种的天然林, 林龄约50年; 此外, 选择思茅松人工林中龄林(13年生)、近熟林(26年生)和过熟林(54年)为林龄序列进行研究^[21]。共计选择5个林地类型, 每个林地类型选择3个样地进行重复调查, 共计15个样地, 每个样地面积为20 m \times 20 m, 记录样地内胸径 ≥ 5 cm 的所有乔木的名称、胸径与树高等因子, 各林地类型林分概况见表1。

表1 样地林分概况

类型		胸径/cm	树高/m	密度/(株 \cdot hm $^{-2}$)	胸断面积/(m 2 \cdot hm $^{-2}$)
思茅松人工林	中龄林	12.50 \pm 0.53	9.36 \pm 0.82	1 200 \pm 156	15.30 \pm 1.24
	近熟林	19.84 \pm 1.51	16.77 \pm 0.21	816 \pm 227	26.21 \pm 3.42
	过熟林	30.41 \pm 2.42	17.93 \pm 1.89	508 \pm 104	37.39 \pm 2.50
思茅松天然林		10.67 \pm 0.51	10.50 \pm 0.27	1 667 \pm 273	19.75 \pm 1.61
季风常绿阔叶林次生林		12.30 \pm 0.47	10.85 \pm 0.34	1 425 \pm 388	22.52 \pm 1.25

1.2.2 乔木层碳储量计算 建立思茅松及其它阔叶树种不同构建组分的异速生长方程计算乔木层生物量, 乘以各自的含碳率计算乔木层碳储量, 其中, 思茅松异速生长方程通过对不同林龄筛选的标准木进行全挖法分根、干、枝、叶和果进行称质量, 选择样品返回实验室置于70 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至衡质量, 测定样品的含水量, 换算其干质量计算各自的生物量, 从而拟合思茅松生物量异速生长方程(表2); 其它阔叶树种的异速生长方程则参考党承林等^[22]的研究。思茅松不同构建组分的含碳率参考李江等^[23]的研究, 其它阔叶树种的含碳率则选择为0.5。

表2 思茅松各构件生物量异速生长方程与含碳率

物种	组分	异速生长方程	R 2	含碳率/%
思茅松	干	$y = 0.02D^{2.863}$	0.984	48.48
	枝	$y = 0.007D^{2.757}$	0.960	48.13
	叶	$y = 0.151\exp D^{0.175}$	0.902	47.27
	果	$y = -1.554 + 0.228D$	0.577	47.02
	根	$y = 0.01D^{2.543}$	0.973	46.80
阔叶树种	干	$y = 0.080 443D^{2.514 2}$	0.985	0.50
	枝	$y = 2.941 6E - 06(7.507 4 + D)^5$	0.951	0.50
	叶	$y = 0.844 24\exp(0.121 4 \times D) - 0.965$	0.938	0.50
	根	$y = 7.161 3E - 05(7.489 2 + D)^4$	0.985	0.50

1.2.3 土壤采样 在每个调查样方的四角和中心大致均匀选取5个点, 取样深度为100 cm, 按固定间距分4个土壤层取样, 由上而下土层厚度依次为: 0~20、20~40、40~60和60~100 cm, 再至下而上分层先用环刀法取土壤密度样, 再取土壤样品0.5 kg 以供室内分析, 以调查样方为单位分层组成混合样。各深度土样自然风干后粉碎过筛, 使土样充分混合, 并除去其中较大的树根和石头, 置于阴凉处并尽快运回实验室进行理化性质分析。

1.2.4 土壤理化性质分析 土壤理化性质测定内容包括pH值、有机碳、全氮、有效磷, 其中, 土壤pH值用电位法; 土壤有机碳用重铬酸钾氧化外加热法(GB 9834-88); 土壤全氮采用凯氏定氮法(GB 7173-87); 速效磷用碳酸氢钠浸提法^[5]。

1.3 数据处理

土壤有机碳和氮储量大小通过土壤密度、有机碳含量、全氮含量和土层厚度来计算, 见公式(1)和(2)。

$$SOC_{stock_i}(N_{stock_i}) = 0.1 \times C_i \times B_i \times D_i \quad (1)$$

$$SOC_{stock}(N_{stock}) = \sum SOC_{stock\ i}(N_{stock\ i}) \quad (2)$$

式中: $SOC_{stock\ i}$ 和 $N_{stock\ i}$ 分别为第*i*层土壤有机碳和氮储量($t \cdot hm^{-2}$), C_i 为第*i*层土壤有机碳或氮含量($g \cdot kg^{-1}$), B_i 、 D_i 分别为土壤密度($g \cdot cm^{-3}$)和土层厚度(cm)。土层0~100 cm的土壤有机碳和氮储量 $SOC_{stock}(N_{stock})$ 为土壤各层有机碳和氮储量之和。

不同土地利用类型土壤有机碳和氮储量年变化量通过公式(3)计算。

$$\Delta C_j = (C_{ej} - C_{cj})/a \quad (3)$$

式中: ΔC_j 为土壤有机碳和氮储量的年变化量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$), C_{ej} 为土地利用变化后的土壤有机碳和氮储量, C_{cj} 为土地利用变化前的土壤有机碳和氮储量, a 为人工林的林龄(a)。

对不同土壤层次的土壤密度、pH值、土壤有机碳和全氮含量及不同土地利用类型的土壤有机碳和氮储量进行单因素方差分析,同时进行LSD多重比较;对不同土层的土壤有机碳储量与土壤水分、pH值、土壤密度、全氮、有效磷及C:N之间进行Pearson

相关性分析,进行双侧显著性检验。数据分析均在Excel2007和SPSS17.0中完成,显著度 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤密度、C:N、有机碳与氮含量

5种林地类型的土壤密度、C:N、有机碳和氮含量见图1。随着土层的增加各类型的土壤密度也逐渐增大,而C:N、有机碳和氮含量则逐渐减小。同时,在4个土壤层次中,过熟林土壤密度均显著小于其它4个类型。在40~60、60~100 cm土层中,土壤密度的大小顺序为:思茅松天然林 > 常绿阔叶林 > 中龄林 > 近熟林 > 过熟林。在0~20 cm土层中,中龄林土壤的C:N最高,近熟林和过熟林最低;在20~40、40~60 cm土层中,各林地类型之间的差异不显著;在60~100 cm土层中,过熟林C:N最高。在人工林龄级序列中,近熟林土壤表层的土壤有机碳含量比中龄林和过熟林小,随着土层的加深,常绿阔叶林和思茅松天然林的土壤有机碳含量比人工林的低,同时,过熟林的土壤有机碳和氮含量则比其它林地类型的高。

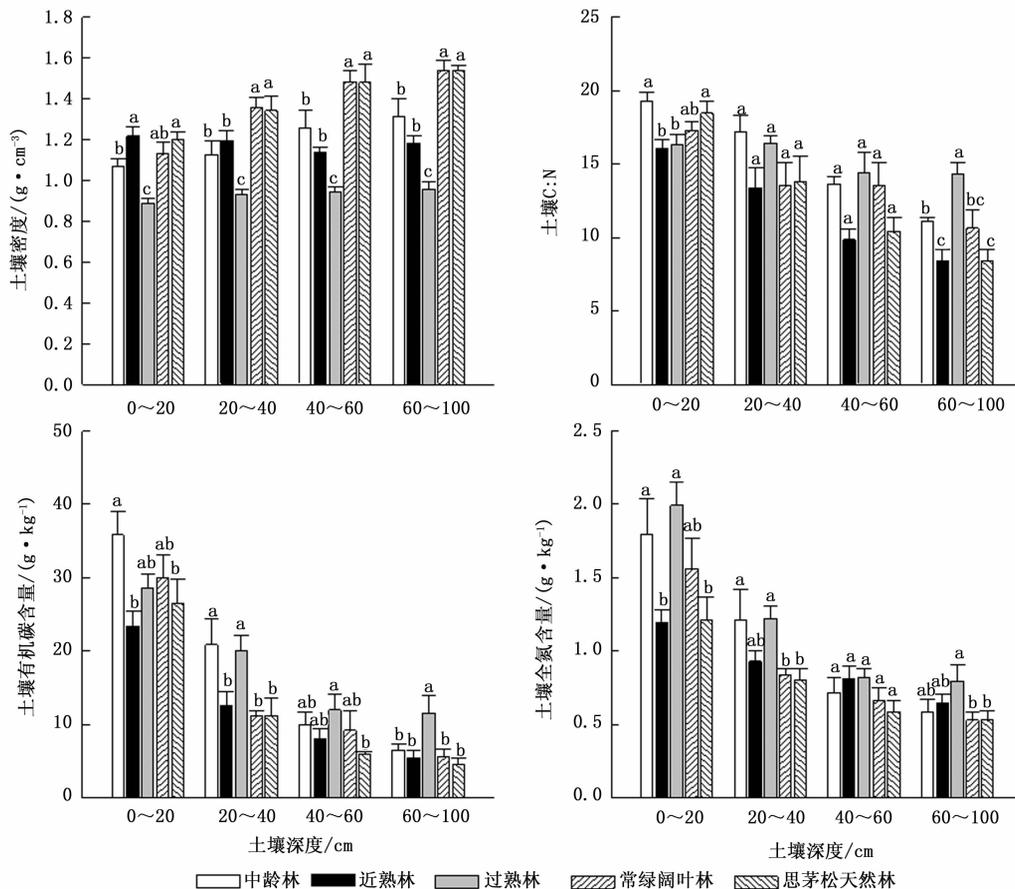


图1 不同林地类型不同土壤深度的土壤密度、C:N、有机碳和全氮含量

2.2 不同林地类型乔木层碳储量、土壤有机碳和氮储量

图2所示:单因素方差分析结果显示,随着林龄增大,乔木层碳储量也随着增加,中龄林($(27.78 \pm 1.4) t \cdot hm^{-2}$)与常绿阔叶林($(44.35 \pm 7.64) t \cdot hm^{-2}$)及近熟林($(70.48 \pm 2.23) t \cdot hm^{-2}$)与思茅松天然林之间($(128.31 \pm 15.13) t \cdot hm^{-2}$)的差异不

显著;中龄林土壤有机碳储量($(175.6 \pm 17.72) t \cdot hm^{-2}$)显著高于近熟林($(120.66 \pm 15.5) t \cdot hm^{-2}$),而这2个龄级段的土壤有机碳储量与过熟林、思茅松天然林和常绿阔叶林次生林之间差异不显著。随着龄级的增加,乔木层碳储量所占比例在增加,相应的土壤有机碳储量的比例在降低。5种林地类型的土壤氮储量之间的差异不显著。

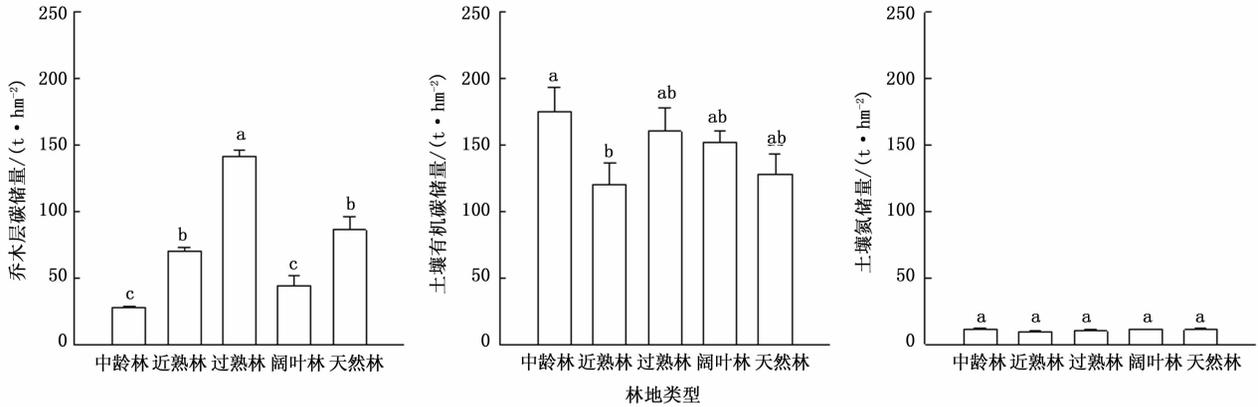


图2 不同林地类型乔木层碳储量、土壤有机碳和氮储量(0~100 cm 土层)分配

2.3 不同林地类型土壤有机碳与氮储量的垂直分布

从图3可以看出:在0~60 cm 土层中,随着土层深度的增加,不同林地类型的土壤有机碳与氮储量呈减小趋势,在60~100 cm 土层中又增大。思茅松人工林的中龄林、近熟林和过熟林及常绿阔叶林与思茅松天然林的土壤有机碳储量的最大值都出现在土层0~20 cm,分别为(71.61 ± 7.14)、(46.68 ± 3.88)、(57.2 ± 4.58)、(59.88 ± 5.3)、(53.08 ± 6.58) $t \cdot hm^{-2}$ 。20~40 cm 土层土壤有机碳储量最

大的是中龄林为(46.15 ± 6.31) $t \cdot hm^{-2}$,随着土壤的加深,土壤碳储量在逐渐减少,40~60 和 60~100 cm 土层土壤有机碳储量最大的分别是常绿阔叶林($(26.94 \pm 7.49) t \cdot hm^{-2}$)和过熟林($(43.35 \pm 6.86) t \cdot hm^{-2}$),最小的则分别是思茅松天然林($(17.50 \pm 1.02) t \cdot hm^{-2}$)和近熟林($(25.53 \pm 4.20) t \cdot hm^{-2}$)。在5个林地类型中,0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤氮储量最大的是中龄林,分别是(3.75 ± 0.52)、(2.67 ± 0.31) $t \cdot hm^{-2}$ 。

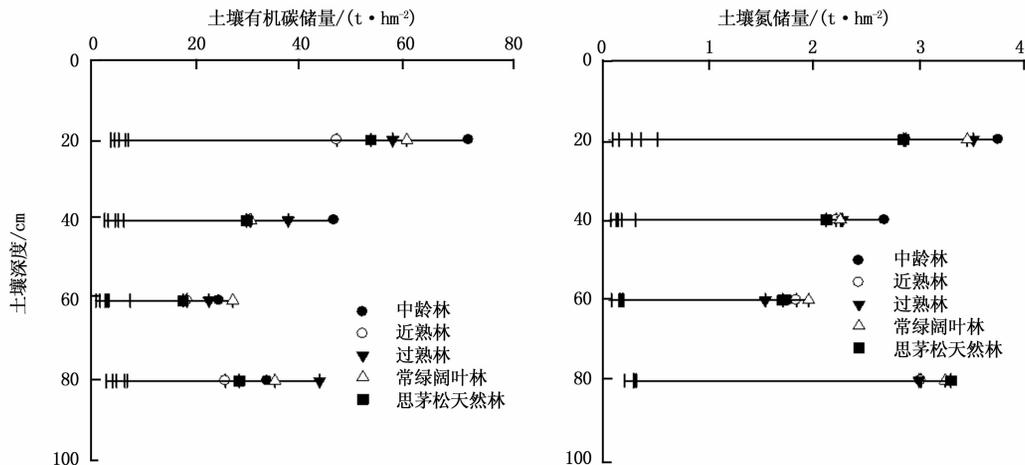


图3 不同林地类型土壤有机碳储量与氮储量

2.4 不同林地类型造林后人工林土壤有机碳与氮储量变化

常绿阔叶林造林与思茅松天然林人工更新后思茅松人工林土壤有机碳与氮储量的变化见图4。在0~20、0~60 cm的土层中,常绿阔叶林造林为思茅松人工林的过程中,随着林龄的增长土壤有机碳储量的年变化呈先增加后减少的趋势,其中,近熟林和过熟林阶段为负年变化量;思茅松天然林人工更新为人工林过程中,随着林龄的增长,土壤有机碳储量的年变化为先增加后减少再增加。在0~100 cm的土层中,土壤有机碳储量的年变化量呈现出相似的变化规律,即在中龄林阶段的年变化量为增加,近熟林阶段则减少,过熟林则增加;此外,与常绿阔叶

林相比,思茅松天然林人工更新的人工林可以积累更多的土壤有机碳储量。

在常绿阔叶林造林为人工林过程中,随着林龄的增加,在0~20 cm土层中,近熟林的土壤氮储量的年变化量为负值,在0~60、0~100 cm土层中,则随着林龄的增长,土壤氮储量的年变化量呈负增长;在思茅松天然林人工更新为人工林的过程中,随着林龄的增长,在0~20、0~60 cm,土层中,土壤氮储量的年变化量在增加,而在0~100 cm土层中,近熟林的土壤氮储量的年变化量是负值。相对于常绿阔叶林,思茅松天然林人工更新为人工林的过程可以累积更多的土壤氮储量。

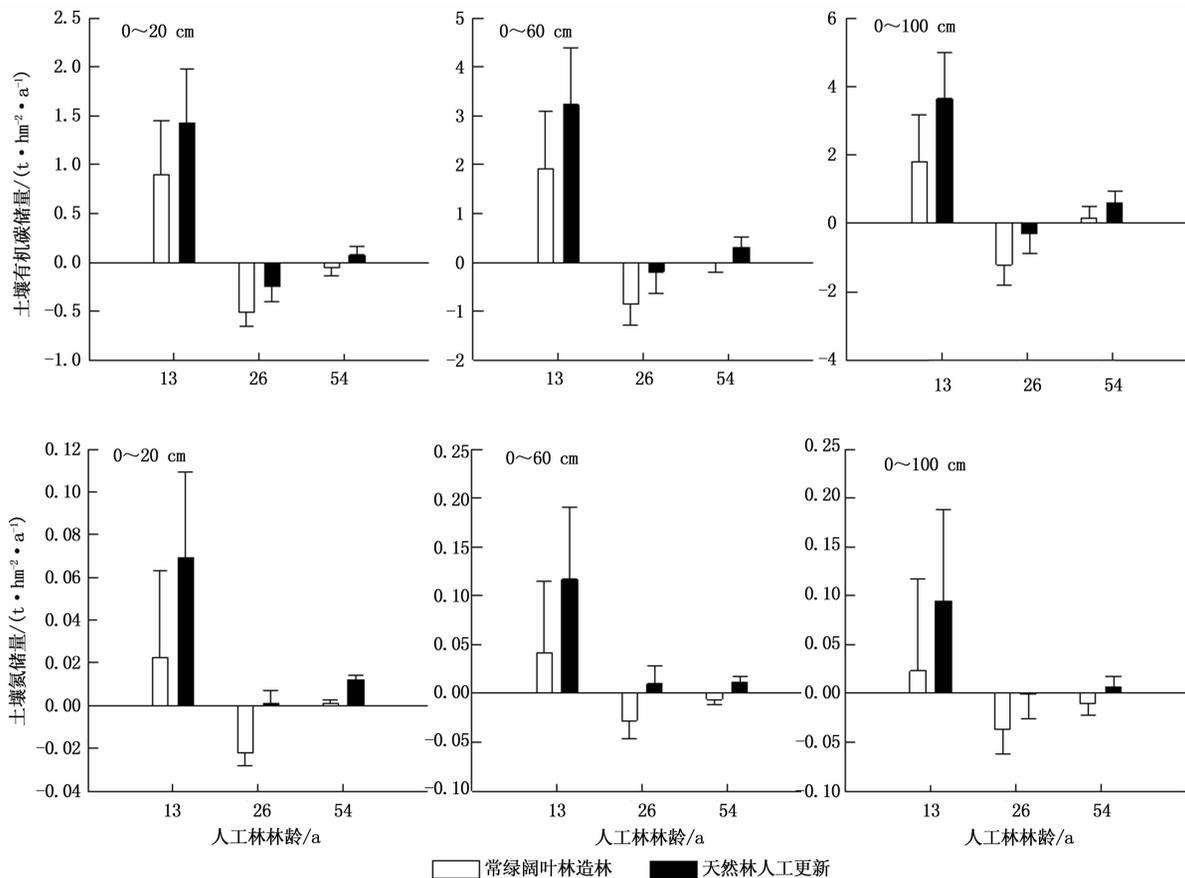


图4 不同林地类型造林后人工林土壤有机碳储量与氮储量的变化

2.5 土壤有机碳储量与土壤性质的相关关系

不同层次土壤含水量、土壤密度、pH值、全氮、有效磷及C:N与土壤有机碳储量进行Pearson相关分析,结果(表3)表明:除40~60 cm土层外,其它土层的土壤含水量与土壤有机碳储量之间呈显著或极显著正相关;除40~60 cm土层外,不同层次土壤的全氮含量与土壤有机碳储量之间存在极显著正

相关;除0~20 cm外,土壤C:N与土壤碳储量之间存在极显著正相关。

3 结论与讨论

3.1 土壤有机碳与氮储量的变化特征

研究表明:思茅松人工林的土壤有较强的固碳能力,其土壤有机碳储量(0~100 cm)为120.66

表3 土壤有机碳储量与土壤养分的相关性系数

土壤深度/cm	土壤含水量	土壤密度	pH 值	全氮	有效磷	C:N
0~20	0.607*	-0.372	-0.337	0.751**	0.025	0.454
20~40	0.567*	-0.460	-0.100	0.786**	0.158	0.871**
40~60	0.447	-0.089	-0.283	0.474	-0.243	0.876**
60~100	0.753**	-0.388	-0.402	0.745**	0.474	0.875**

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

~175.6 t · hm⁻², 其中, 近熟林土壤有机碳储量低于热带地区森林土壤碳储量的变化范围, 而中龄林和过熟林则高于其变化范围 (130 ~ 160 t · hm⁻²)^[24], 也明显比我国暖性针叶林的平均土壤碳储量水平 (110.30 t · hm⁻²) 高^[25], 与相近林龄级别相比, 也高于云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch) 人工林^[13], 中龄林也显著高于相似林龄的红锥 (*Castanopsis hystrix* Miq.) 林^[14]。思茅松人工林的土壤氮储量平均值为 10.5 t · hm⁻², 则低于云南松人工林^[13]。5 种林地类型的土壤有机碳和氮含量随着土层的加深而逐渐减少, 影响到土壤有机碳和氮储量的垂直分布, 土壤有机碳与氮储量主要集中分布在 0 ~ 20 cm 的土层中, 随着土层 (0 ~ 60 cm) 的加深而减少, 土壤有机碳和氮储量的垂直分布主要受凋落物分解有机质的输入与细根周转的影响^[13-14]。

思茅松天然林人工更新和常绿阔叶林林地上造林是普洱地区思茅松人工林造林的主要方式, 而随着人工林林龄的增长, 中龄林和近熟林的乔木层碳储量明显高于思茅松天然林和常绿阔叶林, 这是因为思茅松生长迅速, 拥有较强的固碳能力^[16], 可以作为云南省南亚热带营造高储量碳汇林的优良树种; 思茅松中龄林阶段的土壤碳储量明显高于近熟林和过熟林, 在近熟林阶段则显著减少, 到过熟林阶段则又恢复到常绿阔叶林和思茅松天然林的水平。本研究结论与我国亚热带其它人工林的土壤有机碳储量的变化规律差异较大, 如对云南松和红锥人工林的研究表明, 林龄增大则其土壤有机碳储量也随之增加^[13-14]。以往的研究发现, 在思茅松幼龄林阶段, 随着林龄的增加土壤有机碳储量随之减少^[16], 这是由于针叶树种比阔叶树种造林常常导致土壤有机碳储量的减少^[3], 从中龄林开始土壤有机碳储量开始升高, 到 13 年生思茅松人工林的土壤有机碳储量已显著大于对照的 25 年生思茅松天然林^[16], 与本研究结论一致。造林对思茅松中龄林、近熟林和过熟林的土壤氮储量的影响较小, 这是因为思茅松林生长接近成熟期, 地表凋落物的增加一定程度上阻碍了有机质的分解和养分的循环, 而凋落物分解

是森林土壤氮的主要来源^[13]。

3.2 影响土壤有机碳与氮储量变化的因素

中龄林和过熟林思茅松人工林相对于近熟林具有较高的土壤有机碳和氮年变化量, 尤其是中龄林, 其土壤有机碳年变化量分别为 (1.81 ± 1.36) t · hm⁻² · a⁻¹ 和 (3.64 ± 1.36) t · hm⁻² · a⁻¹, 思茅松天然林人工更新比常绿阔叶林造林为思茅松人工林的年变化量高。之所以得出这样的结论, 与思茅松的生物学特征及人工林的管理方式有极大相关, 林分类型的变化对土壤碳储量的动态变化有很强的影响^[3]。研究发现, 天然林转变为人工林可以减少土壤中 13% 的碳储量^[4], 随着林龄的增加至思茅松人工林中龄林阶段, 土壤碳储量则随之增加, 思茅松中龄林除了细根分解和凋落物以落叶等形式经分解增加土壤有机质含量外^[16], 管理措施是土壤有机碳储量累积量增加的主要原因, 此时思茅松人工林已进入抚育择伐阶段, 林分内伐去长势较差的个体为培育大径级的思茅松提供生长的空间, 电锯伐木是主要作业方式, 针叶树种采伐原木的过程能增加 18% 的土壤碳储量^[26], 主要是电锯截断原木时产生的锯末以及遗留在林内的枝叶等剩余物的分解; 此外, 计划烧除是普洱地区思茅松人工林常见的管理措施, 也成为思茅松中龄林土壤有机碳储量累积量增加的主要原因, 因为低强度计划烧除的林分土壤中比未进行计划烧除包含有更多有机碳含量^[27], 从而增加中龄林的土壤有机碳储量。

思茅松人工林近熟林和过熟林阶段则较少进行抚育择伐及计划烧除等管理措施, 此时, 凋落物分解与细根周转成为土壤有机碳储量的主要来源, 以松树为主的人工林凋落物量往往高于阔叶林, 而细根生物量小于阔叶林^[3, 28], 但近熟林土壤有机碳储量的年变化量急剧减少的原因可能与凋落物分解为土壤输入有机质减少有关, 由于枝叶是思茅松人工林凋落物的主要组成部分, 针叶富含单宁、蜡质和树脂而不易分解, 凋落物分解速率较低^[10], 导致更多的碳和氮累积在土壤有机质层上, 同时, 由于思茅松人工林凋落物中氮的归还量最高^[29], 较低的凋落物分

解率导致氮对土壤的输入降低。研究发现,土壤全氮含量及C:N与土壤有机碳储量呈显著或极显著正相关,因而,思茅松近熟林土壤有机碳与氮累积速率降低。与此对应的是,在过熟林阶段,由于大径级的思茅松个体的增加,其细根生物量与周转率增加更多,相对于凋落物分解成为对土壤有机质积累的主要来源,这是过熟林土壤有机碳储量累积率逐渐增加的主要原因,但是由于针叶树种的细根氮含量相对较低,C:N相对较高,因而死细根的分解率也相对较低^[3],导致过熟林土壤矿质层有机碳和氮的年变化量相对不高。

研究表明,在云南省亚热带区域,通过思茅松的造林可以影响到当地森林的生物量及土壤有机碳与氮储量的空间分布。人工林的抚育措施可以显著增加森林生态系统的生物量和土壤有机碳储量,尤其对土壤表层的影响最大,在全球气候变化研究背景下,思茅松造林可以作为增加森林碳汇应对CO₂排放的重要措施。此外,造林初期对土壤氮储量的影响需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] Six J, Callewaert P, Lenders S, *et al.* Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [2] Sartori F, Lal R, Ebinger M H, *et al.* Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon, USA[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007, 122(3): 325-339.
- [3] Li DJ, Niu SL, Luo YQ. Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis[J]. New Phytologist, 2012, 195(1): 172-181.
- [4] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, 8(4): 345-360.
- [5] Zeng X H, Zhang W J, Cao J S, *et al.* Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the "Beijing-Tianjin sandstorm source control" program in China[J]. Catena, 2014, 118: 186-194.
- [6] Assad E D, Pinto H S, Martins S C, *et al.* Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey[J]. Biogeosciences, 2013, 10(10): 6141-6160.
- [7] Lal R. Forest soils and carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [8] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009-1014.
- [9] Nave L E, Swanston C W, Mishra U, *et al.* Afforestation effects on soil carbon storage in the United states: A synthesis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(3): 1035-1047.
- [10] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, *et al.* Change in soil carbon following afforestation[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [11] Finzi A C, Moore D J P, Delucia E H, *et al.* Progressive nitrogen limitation of ecosystem processes under elevated CO₂ in a warm-temperate forest[J]. Ecology, 2006, 87(1): 15-25.
- [12] Yang Y H, Luo Y Q, Finzi A C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis[J]. New Phytologist, 2011, 190(4): 977-989.
- [13] 苗娟, 周传艳, 李世杰, 等. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 625-631.
- [14] 刘恩, 王晖, 刘世荣. 亚热带不同林龄红锥人工林碳储量与碳固定特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 335-340.
- [15] Blécourt Md, Brumme R, Xu J C, *et al.* Soil carbon stocks decrease following conversion of secondary forests to rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations[J]. Plos one, 2013, 8(7): e69357. doi: 10.1371/journal.pone.0069357
- [16] 陈伟, 孟梦, 李江, 等. 思茅松人工林土壤有机碳库特征[J]. 中国水土保持学报, 2014, 12(2): 105-112.
- [17] Mao R, Zeng D H, Hu YL, *et al.* Soil organic carbon and nitrogen stocks in an age-sequence of poplar stands planted on marginal agricultural land in Northeast China[J]. Plant and Soil, 2010, 332(1/2): 277-287.
- [18] Uri V, Varik M, Aosaar J, *et al.* Biomass production and carbon sequestration in a fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) forest chronosequence[J]. Forest Ecology and Management, 2012, 267: 117-126.
- [19] 李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 等. 思茅松天然群体种实表型变异[J]. 植物生态学报, 2013, 37(11): 998-1009.
- [20] 李江, 邱琼, 朱宏涛, 等. 思茅松中幼龄人工林的生物量碳密度及其动态变化[J]. 中国水土保持学报, 2011, 9(2): 106-111.
- [21] 罗云建, 王效科, 张小全, 等. 中国森林生态系统生物量及其分配研究[M]. 北京: 中国林业科学出版社, 2013.
- [22] 党承林, 吴兆录. 季风常绿阔叶林短刺栲群落的生物量研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 1992, 14(2): 95-117.
- [23] 李江, 翟明普, 朱宏涛, 等. 思茅松人工中幼林的含碳率研究[J]. 福建林业科技, 2009, 36(4): 12-15.
- [24] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Application, 2000, 10(2): 423-436.
- [25] 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.
- [26] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 140(2/3): 227-238.
- [27] Boerner R E J, Huang J J, Hart S C. Fire, thinning, and carbon economy: effects of fire and fire surrogate treatments on estimated carbon storage and sequestration rate[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(8/9): 3081-3097.
- [28] Cueva E, Brown S, Lugo A E. Above and belowground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest[J]. Plant and Soil, 1991, 135(2): 257-268.
- [29] 孟梦, 李江, 李莲芳, 等. 思茅松人工林凋落物量及其分解状况研究[J]. 西部林业科学, 2011, 40(2): 56-63.