

地形因子对思茅松人工林土壤有机碳储量的影响

贾呈鑫卓¹, 李帅锋^{1,2}, 苏建荣^{1,2*}

(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)

摘要: [目的]以思茅松人工中龄林为研究对象,探讨不同坡向、坡度和坡位对思茅松人工林 SOC 储量的影响,为精确评估思茅松人工林碳储量提供科学依据。[方法]对不同坡向、坡度和坡位不同土壤层次的 SOC 含量、全氮、土壤密度、C:N 和 SOC 储量进行 T 检验和单因素方差分析,对不同土层的 SOC 储量和全氮、土壤密度、C:N 之间进行 Pearson 相关分析。[结果]思茅松人工中龄林, SOC 含量、全氮和 C:N 随着土层加深而减少,土壤密度随着土层加深而增加。不同的坡向和坡度显著影响 SOC 储量大小,阳坡的 SOC 储量要显著高于阴坡,坡度为 20~30°的 SOC 储量要显著低于 10~20°和 0~10°,坡位对 SOC 储量大小无显著影响。在 0~100 cm 土层中,随着土层深度的增加,不同立地条件的思茅松人工中龄林的 SOC 储量呈减小趋势,不同坡向、坡位和坡度 0~20 cm 土层 SOC 储量均显著高于其它土层。坡向和坡度显著影响 0~20 cm 土层的 SOC 储量($P < 0.05$);坡位对各层 SOC 储量均无显著影响($P < 0.05$)。0~20 cm 土层中 SOC 储量和土壤密度呈极显著负相关,和坡向、坡度呈显著负相关关系;除 20~40 cm 土层外,其它土层的 SOC 储量与全氮之间呈极显著正相关;SOC 储量和坡位与 C:N 在任一土层均无显著相关关系。[结论]立地条件差异影响 SOC 储量的大小与分布,尤其是坡向和坡度的不同会造成思茅松人工中龄林 SOC 储量的差异。

关键词: 思茅松人工林;中龄林;土壤有机碳储量;地形因子

中图分类号:S791.259

文献标识码:A

Influence of Terrain Factors on Soil Organic Carbon Stock in *Pinus kesiya* var. *langbianensis* Plantation

JIA Chen-xin-zhuo¹, LI Shuai-feng^{1,2}, SU Jian-rong^{1,2}

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Pu'er Forest Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] Taking middle-aged *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantations as examples to study the influence of terrain factors on soil organic carbon (SOC) reserve in *P. kesiya* var. *langbianensis* plantations. [Method] The differences in SOC contents, total nitrogen, soil bulk density, C:N ratio and SOC reserve among different soil layers under different site conditions were analyzed using T test and single factor analysis of variance, and the Pearson correlation between SOC reserve and total nitrogen, bulk density, C:N ratio was evaluated. [Result] The results showed that the SOC content, total nitrogen and C:N ratio decreased with the soil depth, while the bulk density increased. The aspect and slope had a significant effect on SOC reserve. The effect was significantly higher in shady slope than in sunny slope and significantly lower in slope 20~30° than in slopes 10~20° and 0~10°. But the slope position has no significant effect on SOC reserve. For 0~100 cm soil layer, the SOC reserve showed a tendency of reduction with the soil depth at different site conditions of middle-aged *P. kesiya* var. *langbianensis*

收稿日期: 2015-12-25

基金项目: 林业公益性行业科研专项项目(201404211); 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(CAFYBB2014QA014)

作者简介: 贾呈鑫卓(1983—), 女, 河南人, 博士研究生, 主要研究方向: 种群生态学。

* 通讯作者: 苏建荣, 研究员, 博士生导师。邮箱 jianrongu@vip.sina.com

plantation. And the SOC reserve was significantly higher among 0–20 cm soil layer at different aspect, slope position and slope degree. But the aspect and slope degree had a significant impact on the SOC reserve of 0–20 cm ($P < 0.05$). For 0–20 cm soil layer, the SOC reserve showed a significant negative correlation with soil bulk density, aspect and slope. And there was significantly positive relation between SOC reserve and total nitrogen in all soil layers except 20–40 cm. There had no significant relationship between SOC reserve and slope position and C:N ratio in any soil layer. [Conclusion] The results suggested that the site conditions would influence the size and distribution of carbon storage, especially the aspect and slope would cause the difference of SOC storage in middle-aged *P. kesiya* var. *langbianensis* plantation.

Keywords: *Pinus kesiya* var. *langbianensis*; plantation; middle-aged forest; SOC stocks; terrain factors

森林土壤有机碳(SOC)是碳输入和输出的动态平衡结果,由植物、动物和微生物等各降解阶段的残留混合物组成^[1]。森林土壤有机碳库对全球碳平衡和减缓大气CO₂浓度上升具有不可替代的作用^[2],其变化及影响机制是全球碳循环研究中的热点。研究表明,土壤有机碳储量的多少受气候、植被、立地条件、土壤属性等多种因素的影响,尤其是立地条件可以通过地表土壤的微气候、植物生长、细根动态和地下碳输入、土壤微生物等影响SOC储量的大小与分布及其固碳功能^[3-4],从而影响SOC的输入和输出^[1,4]。坡向不同导致地面温度和水分状况的差异,而温度和降水对SOC储量分布和大小具有重要的影响^[5],进而影响土壤表层有机质的分解和微生物碳的矿化^[6],使不同坡向SOC储量积累产生差异;坡位可以影响地表径流、排水、土壤温度、土壤侵蚀和淋溶状况^[7];坡度则可以通过影响土壤侵蚀、土壤的通气^[8]、底物的组成和有效性^[9]、微生物量及活性^[10]来影响SOC储量的积累。

思茅松(*Pinus kesiya* var. *langbianensis* (A. Chev.) Gaussen)是云南省重要的材脂兼用树种^[11]和优良的高储量碳汇造林树种^[12]。近年来,对思茅松碳汇的研究主要集中在中、幼龄人工林的乔木层和SOC碳储量以及林分类型变化对思茅松人工林SOC储量分布的影响^[13-14]。研究表明立地条件对思茅松人工林的生长有显著的影响^[15],这会对精确估算思茅松人工林SOC储量的大小造成误差。Li等^[12]对思茅松人工林的研究表明中龄林之间SOC储量大小与分布均无显著差异。本研究在此基础上,通过对思茅松人工林中龄林SOC储量在不同坡向、坡度和坡位大小与分布的分析,旨在比较不同坡向、坡度和坡位对思茅松人工林SOC储量及其垂直分布的影响,为研究不同立地条件土壤有机碳储量垂直分布特征提供基础资料,为充分发挥思茅松人

工林的生态系统服务功能提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况与实验设计

试验地设置在云南省普洱市,地理位置为22°02′~24°50′N,99°09′~102°19′E,海拔在1100~1850 m,属于低纬度山地季风气候,干湿季分明,年均日照时数在2000 h左右,年均气温15.3~20.2℃,年均降雨量1600 mm左右,年均相对湿度79%;最冷月(1月)平均气温11.7℃,最热月(6月)平均气温21.9℃。土壤为砂岩发育的山地红壤,有较强的保水、保肥特性。

思茅松人工林造林前植被多为思茅松天然林,造林后3年内每年进行人工砍除灌木和杂草2次,造林4~7年内进行林内透光抚育,此后进行抚育择伐^[15,17]。研究区域的思茅松人工林多为中龄林,最早为1998年造林。2014年10月选择典型立地条件设置样地进行调查,分别按照坡向(阳坡和阴坡)、坡位(中坡和上坡)、坡度(0~10°、10~20°和20~30°)3种立地条件共建立20 m×20 m样地21块,记录每块样地的坡度、海拔、坡向、坡位、坡度、胸径、树高与林分密度等环境因子与林分因子(表1)。

1.2 数据收集

在每个样地的对角和样地中心大致均匀选取3个点挖取土壤剖面,按固定间距分4个土层,由上而下土层厚度依次为:0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm和60~100 cm,从上至下分层采集土壤样品,每层用内径3.6 cm土钻随机取1钻土,并用环刀进行土壤密度的取样,分别对每个剖面每层土样编号;将土样表面的植物残体及砾石去除,自然风干后,过2 mm(10目)土筛,然后取其中20 g左右过0.18 mm(80目)土筛,在65℃下烘干至恒定质量;称取其中0.05 g土样酸化处理后,在105℃下烘干3 h去除无

表1 样地概况

样地	坡向	坡位	坡度/(°)	胸径/cm	树高/m	林分密度/(株·hm ⁻²)	海拔/m	林龄/a
1	阳	中	7	14.50 ± 0.00	21.26 ± 0.75	850	1 650	10
2	阳	中	8	14.60 ± 0.00	19.67 ± 0.54	850	1 650	10
3	阳	中	8	14.50 ± 0.00	20.77 ± 0.48	1 025	1 650	10
4	阳	上	15	8.88 ± 0.27	12.99 ± 0.36	1 025	1 810	13
5	阳	上	12	8.89 ± 0.27	11.94 ± 0.33	1 325	1 820	13
6	阳	上	9	10.11 ± 0.33	12.56 ± 0.45	1 275	1 815	13
7	阴	中	8	11.20 ± 0.25	14.82 ± 0.35	1 000	1 650	11
8	阳	中	10	10.90 ± 0.26	13.81 ± 0.50	950	1 600	11
9	阳	中	10	11.45 ± 0.24	14.59 ± 0.28	900	1 600	11
10	阳	中	22	6.36 ± 0.12	9.44 ± 0.30	1 950	1 293	11
11	阳	中	24	6.41 ± 0.16	8.65 ± 0.26	2 400	1 293	11
12	阳	中	22	4.91 ± 0.12	8.83 ± 0.332	1 675	1 293	11
13	阳	上	10	7.58 ± 0.16	10.41 ± 0.47	2 250	1 365	11
14	阳	上	7	8.06 ± 0.22	11.56 ± 0.69	1 425	1 365	11
15	阳	上	8	8.33 ± 0.30	9.93 ± 0.64	1 250	1 365	11
16	阴	上	12	7.90 ± 0.25	10.22 ± 0.55	1 625	1 374	11
17	阴	上	14	10.13 ± 0.56	10.13 ± 0.56	1 400	1 373	11
18	阴	上	15	9.72 ± 0.44	9.72 ± 0.44	1 925	1 381	11
19	阴	中	11	14.29 ± 0.29	14.29 ± 0.29	1 667	1 215	13
20	阴	中	11	11.74 ± 0.31	11.74 ± 0.31	1 667	1 215	13
21	阴	中	11	13.96 ± 0.32	13.96 ± 2.36	1 667	1 215	13

机碳;土壤有机碳用重铬酸钾氧化外加热法(GB9834-88);土壤全氮采用凯氏定氮法(GB7173-87)^[14]。

SOC 储量采用单位面积上相同土壤质量的方法计算,以排除不同土壤质量对计算结果的影响^[16-17]。某一层土壤有机碳储量 SOC_i (t·hm⁻²)为:

$$SOC_i = C_i \times D_i \times (1 - G_i) \times h \times 0.1$$

式中, i 为土层代号, C_i 为SOC含量(g·kg⁻¹), D_i 为土壤密度(g·cm⁻³), G_i 为直径大于2mm的石砾所占的体积百分比(%), h 为土层厚度(cm)。0~100cm的土壤有机碳储量为0~20cm、20~40cm、40~60cm及60~100cm土层SOC储量的总和。

1.3 数据分析

对不同坡向、坡位下,不同土层的SOC含量、全氮、容重和C:N以及SOC储量进行T检验;对不同坡度下,不同土层的SOC含量、全氮、容重和C:N以及SOC储量进行单因素方差分析,并同时进行了LSD多重比较;对不同土层的SOC储量和全氮、容重、C:N之间进行Pearson相关分析。统计分析在Excel2010和SPSS18.0中完成。

2 结果与分析

2.1 不同坡向、坡度、坡位下土壤密度、SOC与全氮含量分布

思茅松人工中龄林不同坡向、坡位和坡度的SOC含量、土壤密度、全氮含量和C:N分析结果见表2。随着土层的加深,SOC含量、全氮含量以及C:N则逐渐降低,而土壤密度则增大。其中,0~20cm土层中阳坡SOC含量显著高于阴坡,超过阴坡SOC含量的两倍,而其它4个土层阴坡与阳坡的SOC含量则无显著差异;阴坡深层土壤密度显著高于阳坡,除0~20cm外,上坡林分的其它土层的土壤密度显著高于中坡。

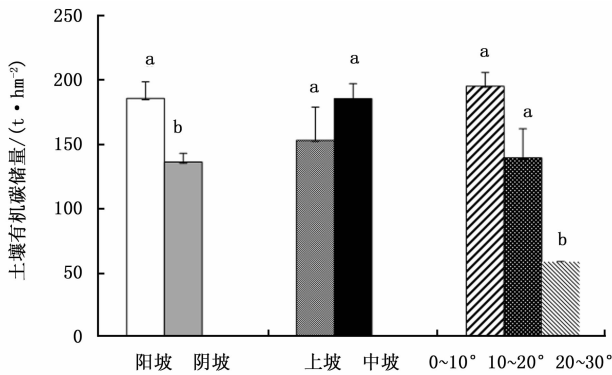
2.2 不同坡向、坡度和坡位下SOC的储量大小与分布

思茅松人工中龄林不同坡向、坡位和坡度0~100cm层中SOC储量结果分析见图1。结果显示,不同坡向和坡度显著影响SOC储量的大小($P < 0.05$),其中,阳坡的SOC储量大小(185.23 ± 12.87 t·hm⁻²)显著高于阴坡(135.78 ± 6.75 t·hm⁻²);不同坡度SOC储量大小顺序为:0~10°(194.80 ± 10.53 t·hm⁻²) > 10~20°(169.43 ± 22.70 t·hm⁻²) > 20~30°(58.32 ± 0.07 t·hm⁻²),0~10°的SOC储量几乎是20~30°的3.34倍;坡位对思茅松中龄林的SOC储量大小无显著影响。

表2 不同坡向、坡度和坡位的SOC含量、C:N和全氮含量

指标	土层/cm	坡向		坡位		坡度/(°)		
		阳坡	阴坡	上坡	中坡	0~10	10~20	20~30
SOC含量/(g·kg ⁻¹)	0~20	52.51±5.65a	25.33±2.59b	32.21±9.75a	53.33±5.46a	56.82±5.55a	37.57±8.70a	6.41±1.01b
	20~40	15.95±1.55a	11.61±0.74a	13.66±2.21a	15.73±1.60a	16.75±1.57a	14.81±2.17a	4.55±0.19b
	40~60	9.42±1.01a	7.22±0.67a	7.84±0.81a	9.46±1.12a	9.92±1.16a	8.33±0.87a	4.28±0.26b
	60~100	5.68±0.44a	5.27±0.40a	5.04±0.55a	5.82±0.45a	5.87±0.48a	5.79±0.46a	3.15±0.39b
土壤密度/(g·cm ⁻³)	0~20	1.04±0.03a	1.05±0.04a	1.12±0.05a	1.01±0.03a	1.00±0.03b	1.05±0.03b	1.32±0.04a
	20~40	1.13±0.03b	1.42±0.05a	1.31±0.06a	1.13±0.04b	1.10±0.037b	1.33±0.07a	1.33±0.01a
	40~60	1.24±0.04a	1.41±0.03a	1.43±0.06a	1.21±0.04b	1.23±0.05a	1.35±0.04a	1.37±0.31a
	60~100	1.26±0.03b	1.43±0.03a	1.42±0.05a	1.24±0.03b	1.24±0.04b	1.38±0.04a	1.41±0.04a
全氮/(g·kg ⁻¹)	0~20	13.34±1.59a	8.92±1.57a	12.36±2.31a	12.60±1.69a	15.41±1.61a	8.71±1.33b	1.63±0.21b
	20~40	8.94±1.11a	6.78±0.63a	7.33±0.51a	9.00±1.25a	10.26±1.16a	6.64±0.55b	1.06±0.06c
	40~60	6.83±0.82a	5.21±0.29a	5.97±0.37a	6.74±0.93a	7.80±0.86a	5.17±0.22a	0.85±0.05b
	60~100	5.00±0.53a	4.04±0.73a	4.80±0.55a	4.83±0.60a	5.63±0.54a	4.12±0.55ab	0.77±0.04b
C:N	0~20	7.53±1.99a	7.23±6.09a	12.17±5.01a	5.71±1.81a	7.23±2.33a	6.36±4.49a	12.24±9.51a
	20~40	3.70±0.94a	4.12±3.05a	6.42±2.51a	2.79±0.80a	3.35±1.03a	3.49±2.27a	7.67±3.34a
	40~60	2.88±0.74a	3.21±2.20a	5.17±1.97a	2.10±0.58a	2.68±0.85a	2.73±1.64a	5.36±2.8a
	60~100	2.45±0.60a	2.55±1.75a	4.10±1.53a	1.85±0.52a	2.30±0.70a	2.21±1.30a	4.33±1.68a

备注:不同小写字母表示同一土层相同立地条件内不同组别间具有显著差异($P < 0.05$)



注:不同的小写字母表示差异显著,相同字母的表示无显著性差异($P < 0.05$)。

图1 不同坡向、坡度和坡位0~100 cm 土层土壤SOC储量的比较

2.3 不同坡向、坡度和坡位SOC的垂直分布

在0~100 cm土层中,随着土层深度的增加,不同坡向、坡度和坡位的思茅松人工林SOC储量呈减小的趋势(结果分析见表3)。阳坡0~20 cm土层SOC储量显著高于其它3个土层,20~40、40~60和60~100 cm土层间SOC储量无显著差异;坡度0~10度和10~20度思茅松人工林在0~20 cm土层的SOC储量显著高于20~40、40~60和60~100 cm土层,20~40、40~60和60~100 cm之间无显著差异,20~30度0~20 cm土层SOC储量仅和40~60 cm土层的有显著差异,和其

他土层无显著差异;上坡和中坡均也表现为:0~20 cm土层SOC储量和其它土层间差异显著,20~40、40~60和60~100 cm土层SOC储量之间无显著差异。

坡向和坡度显著影响0~20 cm土层的SOC储量($P < 0.05$),其中0~20 cm土层阳坡的SOC储量(100.40 ± 9.85)t·hm⁻²要显著高于阴坡(52.44 ± 4.32)t·hm⁻²,其它土层之间无显著差异;而随着坡度的增加,0~20、20~40、40~60和60~100 cm土层的SOC储量则逐渐减少,排列顺序为:0~10° > 10~20° > 20~30°,尤其是在0~20 cm土层中,坡度0~10°的SOC储量超过坡度20~30°的6.36倍。坡位对各层SOC储量均无显著影响($P < 0.05$)。

2.4 影响SOC储量大小与分布的因子

土壤密度、全氮、C:N、坡向、坡位及坡度与SOC储量的Pearson相关关系结果见表4。土壤密度仅在0~20 cm土层中和SOC储量之间呈极显著负相关;除20~40 cm土层外,其他土层的全氮与SOC储量之间呈极显著正相关;C:N与SOC储量之间在任一土层均无显著相关关系;坡向和坡度仅在0~20 cm土层中和SOC储量之间呈显著负相关关系;坡位和SOC储量在任一土层均无显著相关关系。海拔与0~20和20~40 cm土层中的SOC储量显著相关,而与其它土层中的SOC储量相关不显著。

表3 不同坡向、坡度和坡位 SOC 储量大小的垂直分布

t · hm⁻²

土层/cm	坡向		坡位		坡度/(°)		
	阳坡	阴坡	上坡	中坡	0~10	10~20	20~30
0~20	100.4 ± 9.85Aa	52.44 ± 4.32Ba	68.47 ± 19.62Aa	100.38 ± 9.08Aa	106.9 ± 9.28Aa	77.89 ± 17.24Aa	16.81 ± 2.25Ba
20~40	34.1 ± 2.79Ab	33.04 ± 2.72Ab	34.34 ± 4.36Ab	33.75 ± 2.8Ab	35.43 ± 2.67Ab	37.88 ± 3.75Ab	12.14 ± 0.48Bab
40~60	22.3 ± 2.09Ab	20.13 ± 1.5 A b	21.84 ± 1.61Ab	21.93 ± 2.31Ab	23.28 ± 2.39Ab	21.95 ± 1.63Ab	11.71 ± 0.54Bb
60~100	28.43 ± 1.98Ab	30.18 ± 2.28Ab	28.07 ± 2.34Ab	29.01 ± 2.14Ab	29.19 ± 2.21Ab	31.71 ± 0.97Ab	17.66 ± 1.72Ba

注:不同的大写字母表示同一土层同一立地条件下不同组别间差异显著,相同的大写字母表示同一土层同一立地条件下不同组别间差异显著($P < 0.05$)。不同的小写字母表示同一列间差异显著,相同字母表示无显著性差异($P < 0.05$)。

表4 SOC 储量与土壤主要理化性质及地形因子的相关性分析

土壤层次/cm	土壤密度/(g · cm ⁻³)	全氮/(g · kg ⁻¹)	C:N	坡向	坡位	坡度/(°)	海拔/m
0~20	-0.704**	0.847**	-0.231	-0.376*	0.289	-0.437*	0.832**
20~40	-0.340	-0.02	0.456	-0.031	-0.02	-0.164	0.437*
40~60	-0.271	0.595**	0.124	-0.086	0.004	-0.199	0.294
60~100	-0.340	0.462**	0.098	0.693	0.044	-0.065	0.294

注: **表示 $P < 0.01$, * $P < 0.05$

3 结果和讨论

(1) 本研究表明,不同坡向、坡位、坡度思茅松人工中龄林 0~100 cm 土层中的 SOC 储量在 58.32~194.80 t · hm⁻² 之间,处于我国森林生态系统 SOC 储量的变化范围内(44~264 t · hm⁻²)^[18]。思茅松人工中龄林土壤的固碳能力较强,在 1 m 土壤坡面上 SOC 储量平均值为 176.24 t · hm⁻²,高于我国暖性针叶林的土壤碳储量平均水平(110.3 t · hm⁻²)^[19]、四川省的杉木(*Cunninghamia lanceolata* Hook)林(126.82 t · hm⁻²)、云南松(*Pinus yunnanensis* Franch)林(123.26 t · hm⁻²)和马尾松(*Pinus Massoniana* Lamb)林(102.69 t · hm⁻²)^[20]。其原因可能是,思茅松枝条 1 年生长两轮,加之分布区年均温和年降雨量较高、雨热同季,有利于生物量的积累,中龄林的乔木碳储量可达 31.64 t · hm⁻²^[12]。思茅松人工中龄林的凋落物输入量大,且优越的水热条件促进了凋落物的分解,提高了凋落物中氮元素的归还量^[21],含氮量高的有机质易被微生物分解,迁移、转化速度快^[22],因而思茅松人工中龄林 SOC 储量积累量较高。

(2) 思茅松人工中龄林的 SOC 储量集中分布在 0~20 cm 土层,随着土层加深而降低。这与李帅锋等^[14]、陈伟等^[13]和 Li^[12]的研究一致。该分布格局可能与凋落物和根系周转代谢以及土壤的温度、水分、养分和微生物的活动有关^[22-23]。思茅松人工中龄林土壤有机碳输入以凋落物为主,上层土壤形成了明显的有机质层,土壤疏松多孔,结腐殖质较多,全氮较高,土壤肥力高。土壤上层是细根主要分布

区。细根不仅能储存大量的有机碳,而且可以通过细根周转将死亡根系中的有机碳转移到土壤^[24],因此土壤表层 SOC 储量的积累量较高。

(3) 本研究表明,坡位对思茅松人工中龄林 SOC 储量没有显著影响;坡向显著影响 0~20 cm 土层中的 SOC 储量,但对其它各土层没有显著影响;坡度显著影响各土层的 SOC 储量。SOC 储量的差异是立地条件、经营措施、土壤微生物、根系输入等因素综合作用的结果^[25-26]。坡向和坡度通过水分、温度、凋落物、微生物和根系等产生的综合因素影响 SOC 储量^[4]。在 0~20 cm 土层中,阳坡的 SOC 储量显著高于阴坡,坡向越朝南 SOC 储量越大。这是因为阳坡光照充足,利于思茅松生长促进碳的积累,且阳坡的林下枯落物和腐殖质分解相对较快,土壤微生物数量增加,生命活动旺盛,加速了 SOC 的整合^[27]。就不同的坡度而言,坡度为 20~30°思茅松人工中龄林各土层的 SOC 储量显著低于 0~10°和 10~20°,但 0~10°与 10~20°坡度林地各土层的 SOC 储量间没有显著差异。坡度较大,水土流失相对强烈^[28],土壤有机质流失,细根趋向土壤养分丰富的缓坡,同时土壤表层积累的凋落物容易流失,因而坡度较大的思茅松人工中龄林 SOC 储量要小于坡度较小的林分。

4 结论

森林生态系统土壤碳储量的变化持续周期长,变化缓慢且涉及面广、时空尺度复杂,因此阐明立地条件对林下 SOC 储量的影响需要长期监测。立地条件差异不仅对思茅松人工林的生长产生重要影

响,同时和 SOC 储量的大小与分布也显著相关,尤其是坡向和坡度的不同会造成思茅松人工中龄林 SOC 储量的差异。本研究仅针对中龄林进行研究,而对其它不同龄级的人工林没有进行对比分析,同时也缺乏对思茅松人工林凋落物和根系生物量的监测,今后的研究应更加注重林龄、降水、温度以及凋落物量等因素的综合影响。

参考文献:

- [1] Vesterdal L, Clarke N, Sigurdsson B D, *et al.* Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, (309): 4–18.
- [2] Battle-Bayer L, Batjes N H, Bindraban P S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: a review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1): 47–58.
- [3] Groffmann P M, Zak D R, Christensen S, *et al.* Early spring nitrogen dynamics in a temperate forest landscape[J]. *Ecology*, 1993, 74(5):1579–1585.
- [4] Hansson K, Helmsaari H S, Sah S P, *et al.* Fine root production and turnover of tree and understorey vegetation in Scots pine, silver birch and Norway spruce stands in SW Sweden[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, (309): 58–65.
- [5] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Biogeochemistry: soil warming and organic carbon content [J]. *Nature*, 2000, 408(6814): 789–790.
- [6] Lamparter A, Bachmann J, Goebel M O, *et al.* Carbon mineralization in soil: Impact of wetting-drying, aggregation and water repellency[J]. *Geoderma*, 2009, 150(3): 324–333.
- [7] Hao Y, Lal R, Owens L B, *et al.* Effect of cropland management and slope position on soil organic carbon pool at the North Appalachian Experimental Watersheds [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 68(2): 133–142.
- [8] 谢锦升. 植被恢复对退化红壤易变碳及土壤呼吸的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [9] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, *et al.* Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12): 2195–2204.
- [10] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土活性有机碳空间分布及生物有效性[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2):59–63.
- [11] 李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 等. 2013 云南省思茅松林群落数量分类及物种多样性与自然环境的关系统[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(12):3152–3159.
- [12] Li S, Su J, Liu W, *et al.* Changes in Biomass Carbon and Soil Organic Carbon Stocks following the Conversion from a Secondary Coniferous Forest to a Pine Plantation[J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0135946.
- [13] 陈伟, 孟梦, 李江, 等. 思茅松人工林土壤有机碳库特征[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(2): 105–112.
- [14] 李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 等. 思茅松人工林土壤有机碳和氮储量变化[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(6):810–817.
- [15] 刘小菊, 苏静霞, 石亮. 思茅松人工林生长与立地条件的关系研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(18):142–145.
- [16] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(4): 529–538.
- [17] Wellock M L, LaPerle C M, Kiely G. What is the impact of afforestation on the carbon stocks of Irish mineral soils? [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(8): 1589–1596.
- [18] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437–5448.
- [19] 于振良. 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.
- [20] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1217–1225.
- [21] 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.
- [22] 徐侠, 陈月琴, 汪家社, 等. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 539–544.
- [23] Mueller K E, Eissenstat D M, Hobbie S E, *et al.* Tree species effects on coupled cycles of carbon, nitrogen, and acidity in mineral soils at a common garden experiment [J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1–3): 601–614.
- [24] Santantonio D, Hermann R K, Overton W S. Root biomass studies in forest ecosystems[J]. *Pedobiologia*, 1977, 17:1–31.
- [25] Poeplau C, Don A, Vesterdal L, *et al.* Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone-carbon response functions as a model approach[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2415–2427.
- [26] 宋娅丽, 康峰峰, 韩海荣, 等. 自然因子对中国森林土壤碳储量的影响分析[J]. *世界林业研究*, 2015, 28(3): 6–12.
- [27] White R E, Haigh R A, Macduff J H. Frequency distributions and spatially dependent variability of ammonium and nitrate concentrations in soil under grazed and ungrazed grassland[J]. *Fertilizer Research*, 1987, 11(3): 193–208.
- [28] Jiang Y J, Yuan D X, Zhang C, *et al.* Impact of land-use change on soil properties in a typical karst agricultural region of Southwest China: a case study of Xiaojiang watershed, Yunnan[J]. *Environmental Geology*, 2006, 50(6): 911–918.

(责任编辑:张玲)