

文章编号: 1008-2786-(2017)3-300-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000225

# 天山雪岭云杉林土壤有机碳密度空间分异 及其与森林发育的关系

王慧杰<sup>1,2</sup> 常顺利<sup>1\*</sup> 张毓涛<sup>3</sup> 李翔<sup>3</sup> 韩燕梁<sup>3</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆巴音郭楞蒙古自治州环境保护局, 新疆 库尔勒市 841000; 3. 新疆林科院 森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063)

**摘 要:** 森林土壤在组分和结构上存在比较明显的空间分异现象是导致森林土壤有机碳库估算存在较大不确定性的主要因素之一, 森林发育阶段(林龄)也可能是影响森林土壤有机碳库估算不确定性的主要因素之一。本研究在天山北坡西、中、东三段的云杉林分别按林龄设置系列样地并分层采集土样, 探讨了天山北坡雪岭云杉林土壤有机碳密度的空间分异规律, 并试图从森林发育的角度分析产生该空间分异规律的原因。研究结果表明: ①天山雪岭云杉林 0~60 cm 深度的土壤剖面上平均总土壤有机碳密度为  $30.77 \pm 13.46 \text{ kg/m}^2$ , 天山西、中、东三段雪岭云杉森林总土壤有机碳密度的分布规律为中部( $40.54 \pm 11.33 \text{ kg/m}^2$ ) > 西部( $29.61 \pm 14.94 \text{ kg/m}^2$ ) > 东部( $22.16 \pm 5.88 \text{ kg/m}^2$ ), 且中部与东、西两部差异显著( $p < 0.05$ ); ②在 0~60 cm 深度的土壤剖面上, 西、中、东三段雪岭云杉林不同林龄的土壤有机碳密度均呈随着剖面深度增加而减少的趋势, 表层(0~20 cm)土壤有机碳密度占总剖面土壤有机碳 64.87%。③随着龄林的增长, 土壤有机碳密度整体呈现出双峰曲线, 不同林龄土壤有机碳密度排序为: 过熟林( $37.02 \pm 17.19 \text{ kg/m}^2$ ) > 中龄林( $33.58 \pm 14.53 \text{ kg/m}^2$ ) > 近熟林( $29.12 \pm 15.77 \text{ kg/m}^2$ ) > 成熟林( $27.02 \pm 7.62 \text{ kg/m}^2$ ) > 幼龄林( $27.10 \pm 9.81 \text{ kg/m}^2$ ), 各龄林土壤有机碳密度差异不显著。④通过多因素方差分析可知, 土壤有机碳密度的空间分异主要受到地段和土层条件影响, 林龄对土壤有机碳密度的影响不大。本研究可为天山森林土壤有机碳储量的估算提供数据参考, 同时为更深入地了解天山林区土壤有机碳分布规律及其影响因素提供必要的基础。

**关键词:** 土壤有机碳密度; 空间分异; 林龄; 雪岭云杉; 天山

**中图分类号:** S714.2

**文献标志码:** A

森林是陆地生态系统最重要的碳库, 森林土壤中的碳占全球土壤有机碳的 73%, 在全球碳循环中起着重要作用<sup>[1]</sup>。森林土壤有机碳库贮量的微小变化, 都可显著地引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的改变<sup>[2]</sup>。因此, 对森林土壤中有有机碳库的动态变化及影响因素的研究成为一项重要的基础性工作<sup>[3]</sup>。近年来,

国内外学者对不同森林类型的土壤碳密度进行了大量的研究, 主要集中在碳储量的估算方面<sup>[4-7]</sup>。但通常由于林地结构较复杂, 水平和垂直的空间分异较明显, 导致对森林土壤有机碳库的估算存在较大的不确定性<sup>[8]</sup>。

天山雪岭云杉是天山山地森林中的优势种, 对

收稿日期(Received date): 2015-10-15; 改回日期(Accepted date): 2017-04-14。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(U1503187); 十二五"农村领域国家科技计划课题(2015BAD07B03-03); 新疆自治区科技支撑计划项目(201331125)。[National Natural Science Foundation of China (U1503187); National Science & Technology Pillar Program during the 12th Five-year Plan Period(2015BAD07B03-03); Science & Technology Pillar Program of Xinjiang Uighur Autonomous Region, China (201331125).]

作者简介(Biography): 王慧杰(1990-), 女, 新疆库尔勒人, 硕士研究生, 主要研究方向: 森林生态 [Wang Huijie (1990-), female, born in Urumqi of Xinjiang Province, M. Sc. candidate, research on forest ecology] E-mail: 844291154@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 常顺利, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 森林生态学 [Chang Shunli, male, Ph. D., associate professor, research on forest ecology] E-mail: ecocs1@163.com

整个天山森林生态系统的水源涵养、水土保持等生态系统功能的形成与维护具有极其重要的作用<sup>[9]</sup>。目前有关天山土壤碳的研究大多集中在相近的海拔范围内或相似的环境条件中<sup>[10-11]</sup>,或只是对某一地点的不同海拔高度<sup>[12-13]</sup>进行研究,缺乏在较大的水平尺度上的雪岭云杉土壤有机碳空间分布进行研究,并且在不同的发育阶段,森林的结构和功能呈现出不同的特点,森林土壤有机碳库的贮量和组分构成也可能存在一定的差异,因此林分的年龄可能是影响森林土壤有机碳库估算不确定性的的重要因素之一。由于天山山脉横跨经度范围大,雪岭云杉在整个水平尺度上存在一定的水热差异,因而了解天山三段的不同林龄土壤有机碳密度变化规律有重要的科学意义。

本文通过对我国新疆境内天山山脉西、中、东三段不同林龄阶段设置样方,分层进行采集土壤,探讨其土壤有机碳空间分布规律及其与森林发育的关系,以期为天山林区土壤有机碳储量的估算提供数据参考,同时为更深入了解天山林区土壤有机碳分布规律及其影响因素提供重要的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

天山是横亘在欧亚大陆腹地的一条巨大山脉,在我国新疆境内连绵 1 760 km,并在中山带形成了带状分布的雪岭云杉森林。根据雪岭云杉森林长势、地形地貌、气候条件的不同和传统习惯的区分方法,把天山分为西天山、中天山和东天山三段进行研究,各段天山概况如表 1 所示。气象数据来源于

2013 年天山西、中、东部三个气象站数据。

天山林区以雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)纯林为主,林缘、林窗及林下的灌木主要有栒子(*Cotoneaster melanocarpus*)、小檗(*Berberis heteropoda*及*B. nummularia*)、蔷薇(*Rosa spinosissima*)、绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、方枝柏(*Juniperus pseudosabina*)、锦鸡儿(*Caragana leucophloea*)、忍冬(*Lonicera hispidula*)等,林下草本植物主要有老鹳草(*Geranium rotundifolium*)、羽衣草(*Alchemilla tianschanica*)、羊角芹(*Aegopodium podagraria*)等<sup>[15]</sup>。云杉林下土壤为山地灰褐色森林土,其凋落物是土壤腐殖质的主要来源<sup>[14]</sup>。

1.2 样地的布设、调查与土样采集方法

对天山西、中、东三部雪岭云杉森林分别进行全面踏查,用生长锥钻取接近样地平均胸径的标准株的树木年轮,通过判读树木年轮来确定该样地的年龄。龄组划分依据《主要树种龄级与龄组划分》和《新疆森林》<sup>[14]</sup>划分标准将雪岭云杉森林划分为五个等级,幼龄林(<60 a)、中龄林(61-100 a)、近熟林(101-120 a)、成熟林(121-160 a)、过熟林(>160 a)。

选取雪岭云杉五种林龄为研究对象。在 3 个研究区中每种林龄布设 3 个 20×20 m 的样地,共计 45 个样地。对每个样地进行每木检尺(表 2)。

2013 年 7 月中旬至下旬采集土样,每个林龄设置 3 个重复样地,每个样地挖取两个 60 cm 的土壤剖面,按照 0-20 cm、20-40 cm、40-60 cm 三个层次采集土壤样品,再将各样地两个剖面同层样品混合后,用四分法取样带回实验室,风干后过 2 mm 筛,采用重铬酸钾氧化-外加热法<sup>[16-17]</sup>测定土壤有机碳质量分数。

表 1 研究区基本概况  
Tab. 1 Brief information of study area

研究区 Study area	采样区 Site	土壤类型 Soil type	地理坐标 Geographic coordinates	平均气温 Average air temperature	森林分布的海拔限 Altitude limits of forest distribution	年均降水 Average precipitation	无霜期 Frost free period
天山西 West	昭苏林场 Zhaosu forest farm	淋溶灰褐色森林土 <sup>[14]</sup>	E80°48′-80°57′ N42°41′-42°44′	3.5℃	1650m-2800 m	720.5mm	120 d
天山中部 Middle	板房沟林场 Nanshan forest farm	灰褐色森林土	E87°07′-87°28′ N43°14′-43°26′	4.0℃	1800m-2800 m	572.7 mm	140d
天山东部 East	哈密林场 Hami forest farm	碳酸盐灰褐色森林土 (剖面旱化)	E93°37′-93°41′ N43°9′-43°13′	1.2℃	2100m-2800 m	512.4mm	156 d

表2 五种不同林龄样地基本概况

Tab. 2 General site conditions at the five different age plantations

林型 Forest stands	平均胸径 cm Mean DBH ( cm)			平均树高 m Mean height ( m)			林分密度 株/400m <sup>2</sup> Stand density ( tress/400m <sup>2</sup> )		
	西部 West	中部 Middle	东部 East	西部 West	中部 Middle	东部 East	西部 West	中部 Middle	东部 East
幼龄林 Juvenile	12. 94	11. 7	12. 65	11. 19	11. 87	10. 69	80	84	75
中龄林 Medium	22. 6	17. 6	17. 1	18. 34	14. 27	11. 93	38	80	50
近熟林 Near mature	28. 77	22. 83	16. 84	19. 54	15. 13	13. 02	17	63	42
成熟林 Mature	51. 58	41. 77	22. 44	23. 58	16. 63	16. 6	11	24	33
过熟林 Over mature	65. 91	58. 43	21. 75	32. 31	17. 53	16. 79	11	14	40

1.3 土壤有机碳密度的计算方法

某一土层  $i$  的有机碳密度  $SOCD_i$  采用式 1 计算。

$$SOCD_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中  $SOCD_i$  为第  $k$  层土壤有机碳密度(  $\text{kg}/\text{m}^2$ )  $i$  为土壤层次  $C_i$  为第  $i$  层土壤有机碳质量分数(  $\text{g}/\text{kg}$ ) ,  $D_i$  为第  $i$  层土壤容重(  $\text{g}/\text{cm}^3$ )  $E_i$  为第  $i$  层土层厚度(  $\text{cm}$ )  $G_i$  为第  $i$  层土层中直径大于 2 mm 石砾所占体积百分比( %)

如果某一土壤剖面由  $k$  层组成 ,那么该剖面的有机碳密度采用式 2 计算。

$$SOCD_k = \sum_{i=1}^k SOCD_i = \sum_{i=1}^k C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (2)$$

1.4 数据分析方法

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据处理、单因素和多因素方差分析 ,并用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 天山森林土壤有机碳密度在空间上的分异

三段天山土壤有机碳密度均随着剖面深度的增加数值减小( 图 1) 。天山西部由表层至深层土壤有机碳密度依次为:  $20.91 \pm 13.53$  ,  $4.86 \pm 3.27$  ,  $3.83 \pm 2.53 \text{ kg}/\text{m}^2$ ; 天山中部依次为:  $20.38 \pm 4.50$  ,  $12.83 \pm 5.63$  ,  $7.33 \pm 3.91 \text{ kg}/\text{m}^2$ ; 东部依次为:  $16.33 \pm 6.41$  ,  $3.23 \pm 2.21$  ,  $2.59 \pm 1.72$ ; 天山西部表层( 0 - 20 cm) 土壤有机碳高于天山中部和东部 ,而天山中部中层( 20 - 40 cm) 和底层( 40 - 60 cm) 土壤有机碳密度则远远高于西部和东部。

天山 0 - 60 cm 剖面上总土壤有机碳密度西、中、东三段 SOCD 分别为:  $29.61 \pm 14.94$ 、 $40.54 \pm$

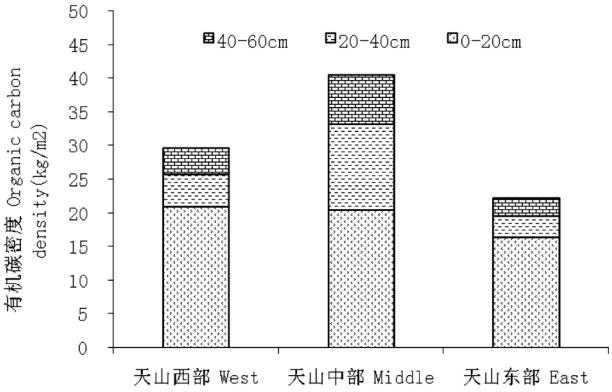


图1 天山三段不同土层土壤有机碳密度  
Fig. 1 Three different soil organic carbon density

$11.33$ 、 $22.16 \pm 5.88 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。中部天山的 SOCD 显著高于天山西、东两部(  $P < 0.05$ ) ,而西、东两地之间差异不显著(  $P > 0.05$ ) 。

若不考虑天山地段之间的差异 ,天山森林 0 - 60 cm 剖面上的平均土壤有机碳密度为  $30.77 \pm 13.46 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。由表层至底层土壤有机碳密度依次为: 0 - 20 cm 为  $19.21 \pm 9.06 \text{ kg}/\text{m}^2$ ; 20 - 40 cm 为  $6.97 \pm 5.75 \text{ kg}/\text{m}^2$ ; 40 - 60 cm 为  $4.58 \pm 3.45 \text{ kg}/\text{m}^2$ ; 表层土( 0 - 20 cm) 的有机碳密度占全剖面所含的有机碳密度的 62. 43%; 深层土( 40 - 60 cm) 有机碳密度仅占全剖面所含的有机碳密度的 37. 57%。可见土壤表层有机碳密度占全剖面的比例超过一半以上。

2.2 土壤有机碳密度随林龄和土层的变化情况

经测定 ,天山三段各龄组不同土层土壤有机碳密度如表 3。

由表可知 ,天山三段各龄组土壤有机碳密度均随着土层深度的增加而减小 ,表层土壤( 0 - 20 cm) 和中层( 20 - 40 cm) 与底层( 40 - 60 cm) 土壤差异显著(  $P < 0.05$ ) 。天山西部和中部三个土层不同龄

表 3 雪岭云杉森林 SOCD 随林龄的变化情况

Tab. 3 *Picea schrenkiana* forest SOCD changes with age

地区	剖面	幼林龄	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
Study area	Profile depth	Juvenile	Medium	Near mature	Mature	Over mature
天山西部	0-20cm	12.68 ± 6.19a	19.87 ± 7.93a	22.99 ± 14.74a	16.32 ± 3.87a	32.71 ± 24.44a
	20-40cm	5.60 ± 4.20a	4.74 ± 1.58a	7.51 ± 5.63a	3.31 ± 1.31a	3.16 ± 1.50a
	40-60cm	1.87 ± 0.27a	3.88 ± 3.33a	5.62 ± 1.31a	3.70 ± 3.41a	4.10 ± 3.07a
	whole	20.14 ± 4.17a	28.49 ± 4.98a	36.11 ± 5.91a	23.33 ± 4.76a	39.97 ± 12.19a
天山中部	0-20cm	17.89 ± 3.31a	23.87 ± 7.03a	17.46 ± 4.82a	21.26 ± 3.47a	21.44 ± 1.62a
	20-40cm	12.46 ± 3.74a	13.53 ± 9.21a	11.51 ± 8.09a	10.56 ± 3.42a	16.08 ± 4.35a
	40-60cm	7.64 ± 1.99a	9.16 ± 5.91a	5.69 ± 1.96a	3.91 ± 2.12a	10.23 ± 4.50a
	whole	37.99 ± 2.81a	46.56 ± 5.54a	34.66 ± 4.61a	35.74 ± 3.86a	47.75 ± 4.00a
天山东部	0-20cm	15.46 ± 2.98a	19.02 ± 1.56a	13.03 ± 6.96a	14.93 ± 10.86a	19.23 ± 8.12a
	20-40cm	2.70 ± 1.16a	4.30 ± 1.05a	1.58 ± 0.58a	5.35 ± 4.08b	2.23 ± 0.45ab
	40-60cm	5.01 ± 2.46a	2.36 ± 1.67b	1.98 ± 0.49b	1.71 ± 0.36b	1.89 ± 0.35b
	whole	23.18 ± 4.10a	25.68 ± 5.22a	16.59 ± 4.29a	22.00 ± 5.41a	23.35 ± 6.92a
平均	0-20cm	15.34 ± 4.43a	20.92 ± 5.80a	17.83 ± 9.53a	17.50 ± 6.68a	24.46 ± 14.34b
	20-40cm	6.92 ± 5.20a	7.53 ± 6.51a	6.86 ± 6.57a	6.41 ± 4.24a	7.16 ± 7.09a
	40-60cm	4.84 ± 2.96a	5.13 ± 4.66a	4.43 ± 2.20a	3.11 ± 2.27a	5.41 ± 4.63a
	whole	27.10 ± 9.81a	33.58 ± 14.53a	29.12 ± 15.77a	27.02 ± 7.62a	37.02 ± 17.19a

注: 不同小写字母表示同一土壤剖面不同林龄间差异显著 (P < 0.05)

组之间差异均不显著,但天山东部 20-40 cm 土层成熟林和其它龄组差异显著。40-60 cm 土层幼龄林与其它龄组差异显著。

天山西、中、东三段 0-60 cm 总土壤有机碳密度随着林龄的增加均呈现出先增加再减少再增加的趋势,但是天山三段变化趋势不一致。天山西部幼龄林土壤有机碳密度最低(20.14 ± 4.17 kg/m<sup>2</sup>) 过熟林最高(39.97 ± 12.19 kg/m<sup>2</sup>);天山中部近熟林土壤有机碳密度最低34.66 ± 4.61 kg/m<sup>2</sup>,过熟林最高47.75 ± 4.00 kg/m<sup>2</sup>;天山东部近熟林最低16.59 ± 4.29 kg/m<sup>2</sup>,中龄林最高25.68 ± 5.22 kg/m<sup>2</sup>。

若不考虑地段因素,天山森林土壤有机碳密度由幼林龄至过熟林土壤有机碳密度依次为:27.10 ± 9.81,33.58 ± 14.53,29.12 ± 15.77,27.02 ± 7.62,37.02 ± 17.19 kg/m<sup>2</sup>。呈现出先增加再降低再增加的变化趋势,波峰位于近熟林和过熟林,波谷位于成熟林。

3 讨论与结论

3.1 天山森林土壤有机碳密度

本研究中,天山森林土壤的平均碳储量为

30.77 ± 13.46 kg/m<sup>2</sup>,大于东北近天然落叶松云冷杉林(29.40 ± 7.30 kg/m<sup>2</sup>)<sup>[18]</sup>和广西桂林杉木林(19.60 ± 4.93 kg/m<sup>2</sup>)<sup>[19]</sup>。森林土壤碳储量与植被类型、当地气候条件等因素关系密切。天山属于我国西北干旱区,降雨量较少,气温高,有利于土壤碳素的积累<sup>[20]</sup>,并且有研究表明,树种多样性越高,分解速率加快,意味着碳释放到空气的碳比例较高,进入土壤的碳比例减少<sup>[21-23]</sup>。天山乔木主要是以雪岭云杉为主,云杉林下土壤呼吸较弱<sup>[24]</sup>,凋落物破碎化后更多的累积到土壤中,形成碳汇,从而导致雪岭云杉土壤有机碳密度高于其它地区。天山西、中、东三段 0-10 cm 土壤有机碳密度占 0-60 cm 总有机碳密度的 70.63%、50.28%、73.71%,表层土为森林土壤碳库的主体,这与前人在其他区域的研究结果一致<sup>[25-27]</sup>。这主要是由于土壤有机碳主要决定于植被的归还量和分解速率。地表上的枯落物和植物根系分解所形成的有机碳首先进入土壤表层,再经表层往下进入更深层次的土壤中,因此,天山云杉森林土壤有机碳密度在不同地区和不同林组中均呈现由表层向下递减的特征。

3.2 影响土壤有机碳空间分异的因素

天山云杉森林土壤有机碳密度主要受到地段、林

表 4 天山森林土壤有机碳密度的整体变异来源分析

Tab.4 Analysis of the whole source of variation in forest soil organic carbon density of the Tianshan

参数 Parameter	变异来源 Source of variation	自由度 df	离差平方和 SS	均方 MS	F	Sig.
土壤有机碳密度	地段	2	284.831	142.416	12.894	0.000
	林龄	4	77.184	19.296	1.747	0.161
	土层	2	1846.700	923.350	83.599	0.000
	误差	36	397.621	11.045		
	总计	45	7340.042			

龄及土层等因子的影响,使得空间分布上存在较大的差异。有研究表明不同地段区代表了不同气候条件,不同气候条件决定着归还土壤的凋落物和根系分泌物的数量和质量以及腐殖质的形成与分解的活跃机制,从而导致土壤剖面有机碳分布格局的差异<sup>[28-29]</sup>。林龄的变化对森林生态系统群落结构、物种组成、物种丰富度、生物量的积累以及碳分配会产生巨大的影响,进而影响森林生态系统土壤碳库变化和碳吸存能力<sup>[30-31]</sup>。凋落物主要集中在表层土壤,分解的凋落物只有很小的一部分进入到深层土壤,植物根系也主要集中在土壤表层,因此土壤的垂直结构直接影响输送到土壤各层次的碳及养分含量<sup>[3,32]</sup>。因此天山森林土壤有机碳总密度的变化与地段、林龄及土层具有一定的相关性。通过三因素方差分析可知(表4),影响天山森林土壤有机碳密度的因素主要是地段和土层条件,并且达到极显著水平( $P < 0.01$ ),而林龄对天山森林土壤有机碳密度影响不显著。这与以往学者对土壤有机碳随林龄变化研究结果一致<sup>[33-35]</sup>。

3.3 土壤有机碳密度随林龄的变化趋势

以往对土壤有机碳随林龄的变化规律的研究众说纷纭,有的认为:土壤有机碳密度随林龄的增大呈现出先减少再增加的趋势<sup>[36-37]</sup>;有的认为:土壤有机碳密度随着林龄的增大而增加<sup>[38-39]</sup>。因此林龄对土壤有机碳密度的影响机理目前尚未定论,可能是因为各研究的地域差异、树种、林龄不一致,从而导致研究结果不同。本研究表明,天山森林土壤有机碳密度随着森林的发育呈现先增加再减少再增加的趋势。但天山北坡整体上不同发育阶段森林土壤有机碳密度维持稳定,并不会随着雪岭云杉森林不同发育阶段的变化而出现显著性波动。

地表凋落物是土壤有机碳输入的主要来源,且会对土壤温度和湿度等产生影响<sup>[40]</sup>。而土壤呼吸

是土壤有机碳输出的主要形式,主要受土壤温度、湿度等的影响,因此凋落物的数量和质量对土壤碳循环有显著作用<sup>[41-42]</sup>。本研究中地表凋落物厚度随林龄的增加表现为先增加后减少,而王洪岩等对兴安落叶松的研究同样发现,地表凋落物量与林龄表现显著的二次曲线相关,前37年上升而后开始下降<sup>[43]</sup>。已有的研究认为,凋落物的增加不仅可以增加有机碳的输入,同时会增强土壤呼吸,在近熟林土壤呼吸随着凋落物的增加而增强<sup>[42,44]</sup>。因为雪岭云杉幼龄林凋落物数量少,有机碳输入少,而凋落物厚度小,表层土壤透气性好,土壤呼吸作用强,因此幼龄林有机碳含量低;随着林龄的增大,土壤凋落物增加,进入土壤中的枯枝落叶逐渐增多,而土壤呼吸作用增强,两者共同作用,最终使得不同林龄土壤有机碳密度不同,但各林龄之间土壤有机碳密度差异不显著。

3.4 结论

综上所述,天山森林0-60 cm剖面的土壤有机碳密度呈现出一定的地域差异性,这种差异主要受地域和土层的影响,而林龄并不是导致此差异的显著因素。

参考文献 (References)

[1] SEDJO R A. The carbon cycle and global forest ecosystem [J]. Water Air & Soil Pollution, 1993, 70(1-4): 295-307

[2] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON P A. Carbon pools and flux of global forest ecosystem [J]. Science, 1994, 263: 185-190

[3] JOBBAGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Applications, 2002, 10(2): 423-436

[4] YANG Y S, GUO J F, CHENG H, et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China [J]. Plant and Soil, 2009, 323(1/2): 153-162

[5] 刘世荣, 王晖, 梁军伟. 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 [LIU ShiR-

- rong, WANG Hui, LUAN Junwei. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5437–5448.]
- [6] 彭守璋, 赵传燕, 郝祥霖, 等. 祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1689–1694 [PENG Shouzhong, ZHAO Chuanyan, Zheng Xianglin, et al. Spatial distribution characteristics of the biomass and carbon storage of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forests in Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2011, 22(7): 1689–1694]
- [7] 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): 1217–1226 [HUANG Congde, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al. Spatial distribution characteristics of forest soil organic carbon stock in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica 2009, 29(3): 1217–1226]
- [8] FALKOWSKI P, SCHOLERS R J, BOYLE E. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system [J]. Science, 2000, 290(5490): 291–296
- [9] 刘贵峰, 臧润国, 郭仲军, 等. 不同经度雪岭云杉群落物种丰富度随海拔梯度变化 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1407–1413 [LIU Guifeng, ZANG Runguo, GUO Zhongjun, et al. Species richness patterns of *Picea schrenkianavar. tianschanica* communities along an altitudinal gradient at different longitudes in Xinjiang of Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1407–1413]
- [10] 包艳丽, 牛树奎, 张国林. 雪岭云杉林碳储量研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 113–118 [BAO Yanli, NIU Shukui, ZHANG Guolin. Study on carbon storage in the forest of *Picea schrenkiana* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment. 2009, 23(9): 113–118]
- [11] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 伊犁河谷不同植被带下土壤有机碳分布 [J]. 地理学报, 2010, 65(5): 605–602 [YANG Yuhai, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Soil organic carbon distribution of different vegetation types in the Ili River Valley [J]. Acta Geographica Sinica 2010, 65(5): 605–602]
- [12] 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 等. 雪岭云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素 [J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1626–1634 [AMINEM Eli, CHANG Shunli, ZHANG Yutao, et al. Altitudinal distribution rule of *Picea schrenkiana* forest's soil organic carbon and its influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica 2014, 34(7): 1626–1634]
- [13] 孙慧兰, 李卫红, 杨余辉, 等. 伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布 [J]. 地理科学, 2012, 32(5): 603–609 [SUN Huilan, LI Weihong, YANG Yuhui, et al. Soil organic carbon changing with altitudes on the Ili mountainous region [J]. Scientia Geographica Sinica 2012, 32(5): 603–609]
- [14] 陆平, 严庚雪. 新疆森林 [M]. 新疆: 人民出版社, 1989, 82–112 [LU Ping, YAN Gengxue. Xinjiang forest [M]. 1989, People's Publishing House, 82–112]
- [15] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性 [J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7842–7451. [QIU Y, CHANG S L, ZHANG Y T, et al. Biomass estimation modeling and adaptability analysis of organ allocation in six common shrub species in Tianshan Mountains forests [J]. China Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7842–7851.]
- [16] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 等. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 166–167 [LIU Guangsong, JIANG Nenghui, ZHANG Liandi, et al. Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles [J]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 166–167]
- [17] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. LY/T1237–1999. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算 [S]. 1999. 北京: 国家林业局. [ZHANG Wanru, YANG Guangyin, TU Xinnan, et al. LY/T1237–1999. Determination of organic matter in forest soil and calculation of carbon-nitrogen ratio [S]. Beijing: State Forestry Administration, 1999.]
- [18] 王海燕, 雷相东, 张会儒, 等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(3): 11–16 [WANG Haiyan, LEI Xiangdong, ZHANG Huiru, et al. Soil organic carbon in semi-natural mixed larch-spruce-fir stands of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University 2009, 31(3): 11–16]
- [19] 马姜明, 梁士楚, 杨栋林, 等. 桂北地区桉树林及其他三种森林类型土壤有机碳含量及密度特征 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1282–1287 [MA Jiangming, LIANG Shichu, YANG Donglin, et al. Characteristics of content and density of soil organic carbon in *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* forest and the other three forest types in northern Guangxi [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(8): 1282–1287]
- [20] 缪琦, 史学正, 于东升, 王洪杰, 任红艳, 孙维侠, 赵永存. 气候因子对森林土壤有机碳影响的幅度效应研究 [J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 270–278 [MIAO Qi, SHI Xuezheng, YU Dongsheng, et al. Scale effect of climatic factors on forest soil organic carbon [J]. Acta Pedologica Sinica 2010, 47(2): 270–278]
- [21] 杨克凤, 张鑫童, 汪大林, 等. 马鬃岭自然保护区土壤碳蓄积的研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2372–2375 [YANG Kefeng, ZHANG Xintong, WANG Dalin, et al. Studies on soil organic carbon storage in Mazongling natural conservation zone [J]. Ecology and Environmental Sciences. 2010, 19(10): 2372–2375]
- [22] 王文静, 王百田, 吕钊, 等. 山西太岳山不同林分土壤有机碳储量研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 81–86 [WANG Wenjing, WANG Baitian, LV Zhao, et al. Soil organic carbon reserve of different forests in Taiyue mountain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment 2013, 27(1): 81–86]
- [23] 宋媛, 赵溪竹, 毛子军, 等. 小兴安岭4种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 [J]. 生态学报, 2013, 33(2): 0443–0453 [SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al. SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing'an Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(2): 0443–0453]
- [24] 周玉荣, 于正良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518–522 [ZHOU Yurong, YU Zhengliang, ZHAO Shidong. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. Acta Phytocologica Sinica 2000, 24(5): 518–522]

- [25] 王渊刚, 罗格平, 冯异星, 等. 天山北麓不同土地覆被下土壤有机碳垂直分布特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 913–918 [WANG Yuangang, LUO Geping, FENG Yixing et al. Vertical distribution of soil organic carbon in different land cover types in northern piedmont of the Tianshan Mountains [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(5): 913–918]
- [26] 李彦华, 张文辉, 申家朋, 等. 甘肃黄土丘陵区侧柏人工幼林的碳密度及分配特征[J]. 林业科学, 2015, 51(6): 1–8 [LI Yanhua, ZHANG Wenhui, SHEN Jiapeng et al. Carbon density and its allocation characteristics of young plantation of *Platycladus orientalis* in the hilly loess region of Gansu province, China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(6): 1–8]
- [27] 韩营营, 黄唯, 孙涛, 等. 不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1460–1469 [HAN Yingying, HUANG Wei, SUN Tao, et al. Soil organic carbon stocks and fluxes in different age stands of secondary *Betula platyphylla* in Xiaoxing'an Mountain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1460–1469]
- [28] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687–699 [XIE Xianli, SUN Bo, ZHOU Huizhen, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 687–699]
- [29] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 黄土高原森林草原区土壤有机碳库研究[J]. 草业科学, 2010, 27(2): 18–23. [YANG Xiaomei, CHENG Jimin, MENG Lei, et al. Study on soil organic carbon pool at forest-steppe zone of loess plateau [J]. Pratacultural Science]
- [30] FELDPAUSCH T, RONDON M, FERNANDES E, et al. Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia [J]. Ecological Applications, 2004, 14(4): S164–S176.
- [31] KOVEL C G F D, MIERLO A. E M V, WILMS Y J O, et al. Carbon and nitrogen in soil and vegetation at sites differing in successional age [J]. Plant Ecology, 2000, 149(1): 43–50.
- [32] 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. [MIAO Juan, ZHOU Chuanyan, LI Shijie, et al. Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Pinus yunnanensis* forests at different age stages [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 625–631]
- [33] 曹小玉, 李际平, 张彩彩, 等. 不同龄组杉木林土壤有机碳和理化性质的变化特征及其通径分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 200–206 [CAO Xiaoyu, LI Jiping, ZHANG Caicai, et al. Variation of contents of organic carbon and physico-chemical properties of soil and path analysis for their relations in different age-group Chinese fir plantation [J]. Journal of Soil and water conservation, 2014, 28(4): 200–206]
- [34] 齐光, 王庆礼, 王新闯, 等. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林土壤有机碳贮量[J]. 应用生态学报, 2013, 24: 273–279 [QI Guang, WANG Qingli, WANG Xinchuang, et al. Soil organic carbon storage in different aged *Larix gmelinii* plantations in Great Xing'an Mountains of Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24: 273–279]
- [35] 张治, 钟全林, 程栋梁, 等. 闽西北地区不同龄组常绿阔叶混交林生态系统碳储量结构特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 203–210 [ZHANG Zhi, ZHONG Quanlin, CHEN Dongliang, et al. The Structure characteristics of carbon storage of ecosystem of ever-green broad-leaved mixed forest with different forest ages in the north-west of Fujian province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(2): 203–210]
- [36] 王丹, 王兵, 戴伟, 李萍, 胡文, 郭浩. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. 林业科学研究, 2009, 22(5): 667–671 [WANG Dan, WANG Bin, DAI Wei, et al. The variation characteristics of soil organic carbon and its influence factor in different developing stages of Chinese fir plantations [J]. Forest Research, 2009, 22(5): 667–671]
- [37] 王琼芳. 陕西松类土壤固碳特征及影响因素分析[D]. 西北农业大学, 2013, 12–18 [WANG Qiongfang. The soil carbon sequestration characteristics of pine forest and influence factors analysis in shanxi [D]. Northwest Agriculture and technology University, 2013, 12–18]
- [38] 秦晓佳, 丁贵杰. 不同林龄马尾松人工林土壤有机碳特征及其与养分的关系[J]. 浙江林业科技, 2012, 32(2): 12–17 [QIN Xiao, Dingguijie. Characteristics of soil organic carbon and its relationship with Nutrients in different aged *Pinus massoniana* plantation stands [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2012, 32(2): 12–17]
- [39] 肖欣, 王雄涛, 欧阳勋志. 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 1–8 [XIAO Xin, WANG Xiongtao, OUYANG Xunzhi. The characteristic of soil organic carbon and relationship of it and the litter quality in *Pinus massoniana* plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(4): 1–8]
- [40] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1075–1081 [WANG Qingkui. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input [J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 1075–1081]
- [41] 窦晓琳. 森林恢复对土壤有机碳氮循环的影响[D]. 中国科学院大学, 2014, 25–33 [DOU Xiaolin. Impacts of forest restoration on soil organic carbon and nitrogen dynamic [J]. University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 25–33]
- [42] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 689–704 [WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al. Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: A review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(4): 689–704]
- [43] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等. 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[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 833–843 [WANG Hongyan, WANG Wenjie, QIU Ling, et al. Differences in biomass litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in *Larix gmelinii* plantations in North-

east China [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2012 32(3): 833–843]  
[44] RAICH J W, NADELHOFFER K J. Belowground carbon allocation

in forest ecosystems: global trends [J]. *Ecology*, 1989, 70: 1346–1354

## Spatial Variation of the Density of SOC of *Picea Schrenkiana* Forest and Relationships with Forest Development

WANG Huijie<sup>1 2</sup>, CHANG Shunli<sup>1\*</sup>, ZHANG Yutao<sup>3</sup>, LI Xiang<sup>3</sup>, HAN Yanliang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. General Mongolian autonomous prefecture of the environmental protection agency, Kuala 841000, China;

3. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China)

**Abstract:** There is a distinguish spatial variation in composition and structure of forest soil, which is one of the main factors leading to the uncertainty of estimation of soil organic carbon pools in forest. Additional forest stages may also be one of the important factors affecting the forest soil organic carbon pool estimation uncertainty. Soil samples were collected from a series of plots which set by forest ages of *Picea schrenkiana* forest on north slope of west, middle and east areas of Tianshan Mountains. We tried to discuss the spatial variation of the density of SOC of *Picea schrenkiana* forest and attempted to analyze the reason why the spatial variation was presented from the perspective of forest development. The results showed that: (1) The average total soil organic density of standard profile at the depth 0 to 60 cm in Tianshan forest was  $30.77 \pm 13.46 \text{ kg/m}^2$ , and the distribution of the total SOC density of three areas of Tianshan Mountains was middle area > west area > east area. In addition, there was a significant difference between east area and west areas ( $p < 0.05$ ); (2) The SOC density at a depth of 0–60 cm standard soil profile mainly presented a decreasing trend with increasing of profile depth. It had obvious surface assembly that the SOC density of surface soil (0–20 cm) accounted for 64.87% of the total profile SOC, and maintained significant difference between surface's and SOC of two soil layers (20–40 cm, 40–60 cm). (3) With a increase of the age plantation, density of SOC presented a bimodal curve as the forest age increased, whose peaks appeared at middle-aged forest and at over-mature forest, the order of SOC density of different age plantation was: over mature ( $37.02 \pm 17.19 \text{ kg/m}^2$ ) > medium ( $33.58 \pm 14.53 \text{ kg/m}^2$ ) > near mature ( $29.12 \pm 15.77 \text{ kg/m}^2$ ) > mature ( $27.02 \pm 7.62 \text{ kg/m}^2$ ) > juvenile ( $27.10 \pm 9.81 \text{ kg/m}^2$ ), no significant difference among all age plantation SOC. It indicated that SOC reserve of the north of Tianshan Mountains remained stable as a whole. By multi-factor analysis of variance, it showed that the spatial differentiation of SOC density mainly was affected by the location and soil conditions, while the influence of forest age on SOC density was not significant. This research can provide a data reference for the estimation of Tianshan forest SOC reserves, at the same time, provide important theoretical basis for more in-depth understanding of Tianshan forest SOC distribution and influencing factors.

**Key words:** soil organic carbon density; spatial variation; age plantations; *Picea Schrenkiana*; Tianshan Mountains