

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160060

演替和气候对阔叶红松林土壤有机碳密度的影响

郭鑫 吴鹏 韩威 李巧燕 杨蕾 安海龙 王襄平

(北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室)

摘要:东北阔叶红松林及其次生林是我国重要的森林碳库,土壤中储存着大量的有机碳。本研究调查了纬度梯度上的4个典型地点(长白山、蛟河、五营和胜山)不同演替阶段(杨桦林、硬阔叶林、红松近熟林和成熟林)的土壤有机碳密度(SOCD),并分析了总SOCD(0~60 cm)、表土层SOCD(0~20 cm)与演替、气候等因素的关系。结果表明:各研究地点的总SOCD、表土层SOCD和表土层占总SOCD的比例随演替的进展并没有一致的变化趋势。总SOCD与纬度、最冷月均温、年降水量和温暖指数无显著关系;表土层SOCD、表土层/总SOCD比例随纬度增加而显著降低,随最冷月均温升高而显著上升。多元分析表明,气候因子本身对表土层SOCD的解释力高于对总SOCD的解释力,演替阶段对3个SOCD变量的解释力均不显著,但演替阶段与温度指标(最冷月均温或温暖指数)的交互作用对总SOCD和表土层/总SOCD比例影响显著。此外,坡位对总SOCD和表层SOCD都有显著影响。研究表明,表土层SOCD可能主要受气候梯度和小地形影响;总SOCD的异质性较强、影响因素复杂,气候因子自身对总SOCD的影响较弱,群落特征(生活型、蓄积量)和小地形、以及演替与气候的交互作用对总SOCD的影响显著。

关键词:土壤有机碳密度;阔叶红松林;演替阶段;气候

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2016)07-0055-09

GUO Xin; WU Peng; HAN Wei; LI Qiao-yan; YANG Lei; AN Hai-long; WANG Xiang-ping. **The influence of succession stages and climate on soil organic carbon density of broad-leaved Korean pine forest.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)38(7) 55-63 [Ch, 40 ref.] Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

Broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest and its secondary forests are important forest carbon sinks in northeast China and store a large amount of organic carbon in the soil. In this study we measured soil organic carbon density (SOCD) for different succession stages of Broad-leaved Korean pine forest at four typical sites (Changbai Mountain, Jiaohe, Wuying and Shengshan). We analysed total SOCD (0-60 cm), SOCD at the depth of 0-20 cm (topsoil) and the ratio of topsoil to total SOCD (top/total ratio) in relation to abiotic and biotic factors. The results showed that total and topsoil SOCD, and top/total ratio, changed differently with forest succession in different sites. Total SOCD was not related to latitude and three key climatic indices: mean temperature of the coldest month (MTCM), annual precipitation (AP), and warmth index (WI), while topsoil SOCD and top/total ratio were negatively related to latitude and positively related to MTCM. Multivariate analyses showed that total SOCD was less affected by climate than topsoil SOCD. Succession stage itself was not significant in explaining the SOCD variables, but the interaction of succession stage with temperature indices (MTCM and WI) showed a significant role for total SOCD and top/total SOCD ratio. In addition, total and topsoil SOCD were also significantly affected by slope position. Our results showed that topsoil SOCD was affected by climate and local topography. Total SOCD, however, is affected by a number of factors together. In addition to the weak direct effect of climate, community structure (lifeform and stand volume), local topography and the

收稿日期:2016-03-02 修回日期:2016-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(31370620)。

第一作者:郭鑫。主要研究方向:森林土壤有机碳。Email:guoxin@bjfu.edu.cn 地址:100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者:王襄平,教授,博士生导师。主要研究方向:森林生态学。Email:wangxiangping@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

interaction of climate with succession stage also showed a significant effect on total SOCD.

Key words soil organic carbon density; broad-leaved Korean pine forest; succession stage; climate

在陆地生态系统中,森林生态系统包含45%的碳,并贡献将近一半的初级净生产力,在全球碳循环中扮演非常重要的角色^[1]。森林生态系统碳库包括植被、土壤和凋落物3个部分,土壤是其中最大的碳储存库。土壤碳储量约占世界陆地生态系统总碳库的73%,大约是植被和大气层的两倍多^[2-3],土壤有机碳库微小的变化都可能显著影响大气层中CO₂浓度^[4]。中国大气中CO₂浓度在1961—2005年间以每年 $1.43 \times 10^{-4}\%$ 速度增加^[5],气候也逐年变暖,从1961—2004年均温每年增加0.058℃^[6],可能导致土壤碳分解加快使森林从碳汇转变为碳源。土壤碳库影响因素的研究,是精确估算土壤碳储量及其分布、预测土壤碳与全球变化之间关系的关键^[2,7-8]。我国东北位于气候变暖敏感的中高纬度地区,其林地面积占全国的31.1%,是中国重要的碳储存库。目前关于东北森林植被碳库的研究较多^[9-11],关于土壤碳库的研究则相对较少,且已有研究主要涉及林型、林龄等因素对土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)的影响^[12-14]。在不同气候条件下系统研究演替对SOCD的影响还少有报道。

土壤有机碳的储存与分布受其他多种因素影响,例如气候、群落特征(林型、林龄、生物量等)、局域环境因子(坡位、坡向等)等^[15-22]。Wynn等^[23]认为国家尺度上土壤有机碳库的空间分布主要受气候条件的影响,湿冷的环境有利于土壤有机碳的积累。李克让等^[24]认为中国土壤有机碳储量的空间分布决定于气候条件影响的植物生产力和土壤有机质分解速率。Jobbagy等^[25]在全球尺度上的研究表明SOCD与年均温负相关,与年降水量正相关。Wang等^[26]在中国国家尺度上对SOCD与年均温、年降水关系的研究也得出相同的结论。但是周涛等^[27]发现在中国年均温小于10℃与10~20℃之间的地区,土壤有机碳储量与温度的相关性相反。可见气候如何影响SOCD尚无一致的结论。另有研究表明:随土壤深度增加气候的影响越来越弱^[25],表土层SOCD与气候的关系比深层土壤更显著^[28],所以不同深度SOCD的主要影响因素是否不同也有待研究。此外,以往的SOCD影响因素研究一般使用年均温,没有区分冬季温度和生长季温度,在寒冷的东北林区二者对SOCD的影响是否存在差异也少有研究。

阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林是中国东北东部

顶极森林植被群落,物种丰富、结构复杂、生物量高,在东北地区森林碳汇功能占有重要的地位。但由于长期的人为干扰形成了大量次生林,严重影响了生态系统的功能。森林生态系统的恢复和演替过程中,碳汇功能的变化已经成为生态研究的热点之一^[29-31]。随演替的进行,从先锋树种的杨(*Populus* spp.)桦(*Betula* spp.)林到顶极的红松林,一般来说植被生物量呈现上升趋势^[32],但土壤碳的变化趋势还不明确^[33-34],所以有必要系统研究阔叶红松林恢复演替过程中土壤有机碳储量的变化及其影响因素。此外,以往研究很少在纬度梯度上不同地点同时测定阔叶红松林不同演替阶段的SOCD,气候和演替对SOCD的交互作用也需要进一步研究。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况及样地设置

本研究沿纬度梯度在长白山、张广才岭的蛟河、小兴安岭的五营和胜山这4个阔叶红松林分布的典型地点设立样地(表1),北至小兴安岭与大兴安岭交界的黑河市胜山自然保护区(为红松分布的北界),南到长白山。研究地点纬度范围为42.06°~49.53°N,基本包含了中国境内红松的主要分布区。年降水量500~1000mm,年平均气温-2.9~2.7℃,最暖月(7月)平均温度在18℃以上,最冷月(1月)平均气温在-20℃左右。在每个地点选择红松林的4个演替阶段进行研究,分别为杨桦林、硬阔叶林、红松近熟林和红松成熟林,其中杨桦林主要树种为白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等;硬阔叶林主要树种为硬阔叶树,包括蒙古栎(*Quercus mongolica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、水曲柳(*Fraxinus manschurica*)等;红松近熟林和成熟林的建群种为红松,伴生有各种硬阔叶树种。

在每个地点按4个演替阶段选择气候、土壤和地形等立地条件相似的林分,每个演替阶段设置3个20m×50m样地作为重复。在样地中挖掘2个土壤剖面,该样地的土壤有机碳密度计为2个土壤剖面分析结果的平均值。剖面深度为1m,但有些样地土层较浅,1m以内即已达到母质层岩块,无法继续下挖。对每个剖面根据森林生态系统长期定位观测方法(LY/T1952—2011)调查土壤层次、厚度、颜色、湿度、质地、根量和侵入体等,并用100cm³环刀按0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、

80 ~ 100 cm 分层取样用于测定土壤密度、砾石含量以及含水率。每个层次另取约 300 g 土壤用于土壤有机碳(SOC)含量及其他化学性质分析。

在每个 20 m × 50 m 样地内,对样地内胸径大于 3 cm 的乔木进行每木检尺,记录树种、胸径、树高和冠幅等,并采用林业行业标准 LY/T 1353—1999 中的二元材积表计算林分蓄积量。根据样地内针叶树

种与阔叶树种的物种组成比例划分为阔叶林和针阔混交林这 2 种优势种生活型,用于比较二者 SOCD 的差异。环境因子调查包括经纬度、海拔、坡位、坡度、坡向等。其中坡位记载为 4 类,分别为上坡、中坡、下坡和平地;坡向转换为 9 个类别用于数据分析,分别为东、南、西、北、东南、东北、西南、西北和平地。

表 1 研究地点概况

Tab. 1 General information for the study sites

地点 Site	演替阶段 Succession stage	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	MTCM/°C	AP/mm	WI/(°C·month)	蓄积量 Volume/m ³
长白山 Mt. Changbai	BP	42°21'N	862	-14.4	831	47.6	284
	DBM	42°17'N	1 087	-15.3	880	41.2	369
	PKPM	42°19'N	1 088	-15.4	879	41.2	468
	PKM	42°24'N	780	-14.1	812	49.9	548
蛟河 Jiaohe	BP	43°58'N	469	-15.1	704	56.5	302
	DBM	43°58'N	466	-15.1	703	56.6	313
	PKPM	43°58'N	508	-15.3	711	55.4	301
	PKM	43°57'N	454	-15.1	701	56.9	343
五营 Wuying	BP	48°50'N	364	-20.8	510	51.7	232
	DBM	48°40'N	344	-20.7	507	52.3	214
	PKPM	48°60'N	406	-21.0	518	50.4	342
	PKM	48°50'N	352	-20.8	508	52.0	574
胜山 Shengshan	BP	49°30'N	456	-23.4	527	48.1	102
	DBM	49°30'N	556	-23.9	546	45.2	240
	PKPM	49°28'N	515	-23.7	538	46.4	275
	PKM	49°28'N	635	-24.2	562	42.9	414

注:BP 代表杨桦林,DBM 代表硬阔叶林,PKPM 代表红松近熟林,PKM 代表红松成熟林,MTCM 代表最冷月均温,AP 代表年降水量,WI 代表温暖指数。下同。Notes: BP, *Betula platyphylla* and *Populus daurica* mixed forest; DBM, deciduous broadleaf mixed forest; PKPM, *Pinus koraiensis* pre-mature forest; PKM, *Pinus koraiensis* mature forest; MTCM, mean temperature of the coldest month; AP, annual precipitation; WI, warmth index. The same below.

1.2 土壤有机碳密度的测定和计算

土壤环刀样在 105 °C 下烘干至恒质量测定土壤密度,再过 2 mm 筛测定大于 2 mm 砾石的含量。另取用于化学分析的土壤样品经风干磨细过筛以后,采用重铬酸钾容量法——外加加热法^[35]测定土壤剖面每层的土壤有机碳含量。

每个土壤剖面的有机碳密度采用分层法进行估算:

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^n C_i D_i E_i (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中:SOCD 为整个剖面的土壤有机碳密度,kg/m²; C_i 为第 i 层的土壤有机碳含量,g/kg; D_i 为土壤密度,g/cm³; E_i 为土层厚度,cm; G_i 为直径大于 2 mm 的石砾所占的百分比,%; n 为土层数。

一般研究中估算的是 1 m 深度的土壤碳密度,在本研究中,由于部分样地的剖面无法挖到 1 m 深

度,采用分层法能估算的 SOCD 最浅为 60 cm 深度。为了便于本研究内样地的比较,对所有样地统一采用 60 cm 估算土壤总 SOCD,以消除因土壤厚度不同的影响。每个样地分别计算表土层 SOCD(0 ~ 20 cm)和总 SOCD(0 ~ 60 cm),以及表土层 SOCD 和总 SOCD 的比值,用于分析表土层和总 SOCD 变化趋势的差异。

1.3 气候数据

采用 Wang 等^[36]利用国家气象台(站)数据建立的东北东部气候模型估算各样地的气候指标。各样地的气温、降水等气候指标推算方法:

$$T(P) = a + b \cdot \text{Lat} + c \cdot \text{Lon} + d \cdot \text{Alt} \quad (2)$$

式中:T(或 P)为 1—12 月的月平均温度(或月平均降水),a、b、c、d 为月平均温度(或月平均降水)计算方程的常数项,Lat、Lon 和 Alt 分别为样地的纬度、经度和海拔。

Wang 等^[36]对这些模型的验证结果表明,年均温预测的精度为 96%,年降水的预测精度为 79%,足以满足本研究的需要。根据推算得到的各月气温、降水指标,计算了每个样地的如下气候指标:最冷月均温 MTCM (mean temperature of the coldest month, MTCM, °C);反映冬季低温,年降水量 AP (annual precipitation, AP, mm),温暖指数 WI (warmth index, WI, (°C·month)),采用月平均气温高于 5 °C 的总和作为植物生长的热量条件。

1.4 统计分析

采用方差分析比较不同演替阶段、优势种生活型的 SOCD 的差异;运用一般线性模型分析群落特征、气候和局域环境等因素对表土层 SOCD(0 ~ 20 cm)、总 SOCD(0 ~ 60 cm)以及表土层占总 SOCD 比例的影响。统计分析运用 R 3.2.0 完成,作图运用 SigmaPlot12.5 完成。

2 结果与分析

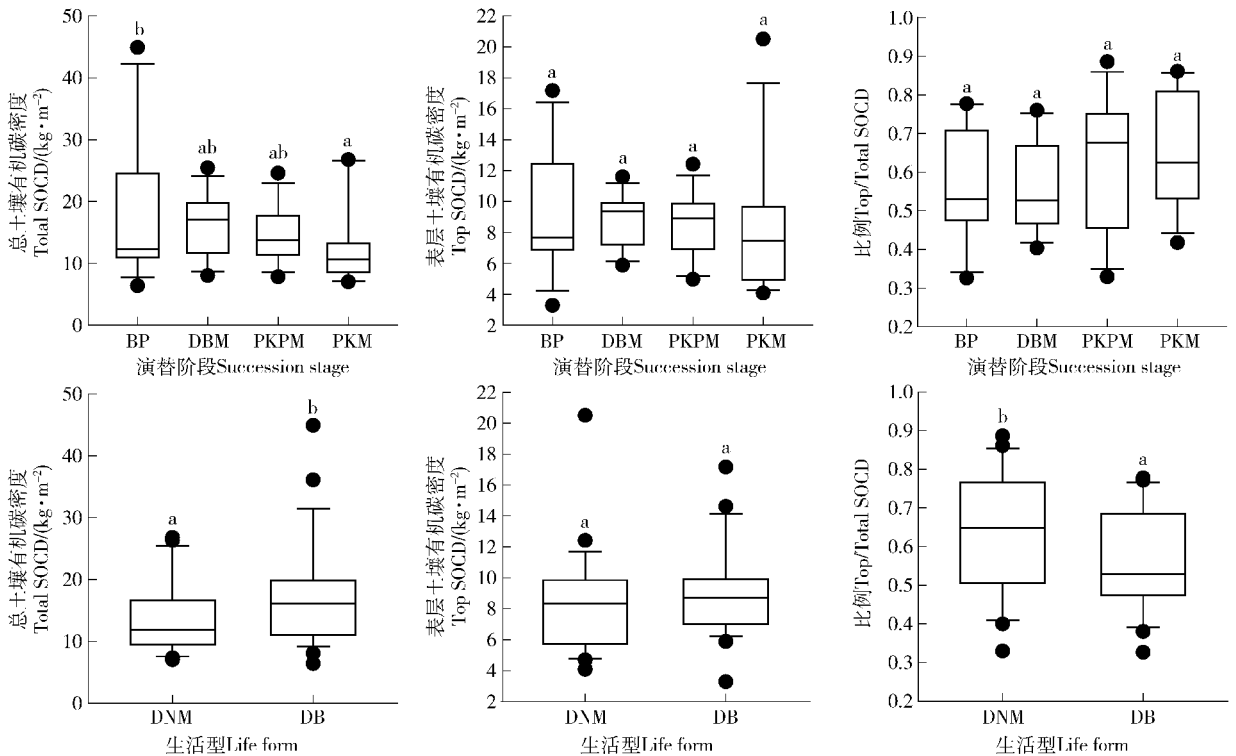
2.1 土壤有机碳密度在林型、地点之间的差异

本文研究了各研究地点 4 个演替阶段、2 种优势种生活型的土壤总 SOCD、表土层 SOCD 以及表土层占总 SOCD 比例。当 4 个地点的数据合并分析时(图 1),4 个演替阶段的总 SOCD 平均值从高到低为

杨桦林(18.1 kg/m²) > 硬阔叶林(16.6 kg/m²) > 红松近熟林(14.5 kg/m²) > 红松成熟林(12.8 kg/m²),其中杨桦林显著大于红松成熟林($P < 0.05$)。4 个演替阶段的表土层 SOCD、表土层占总 SOCD 比例在不同演替阶段之间均无显著差异。2 种优势种生活型中,阔叶林总 SOCD(17.3 kg/m²)显著大于针阔混交林(13.6 kg/m²),但阔叶林的表土层 SOCD 与针阔混交林无显著差异;阔叶林的表土层与总 SOCD 比例为 0.56,显著小于针阔混交林(0.64)。

各地点不同演替阶段和优势种生活型的比较见表 2。图 1 显示总 SOCD 随演替进展而降低,但具体到每个研究地点,总 SOCD 随演替的进展并没有一致的变化趋势,长白山红松成熟林的总 SOCD 均值最高(17.0 kg/m²),蛟河则是杨桦林最高(35.9 kg/m²),五营为红松成熟林最高(16.1 kg/m²),而胜山则硬阔叶林最高(20.2 kg/m²)。从各地点样地的总平均值来看,蛟河总 SOCD 平均值为(19.8 kg/m²)显著高于长白山、五营和胜山。从优势种生活型来看,蛟河和胜山阔叶林的总 SOCD 大于针阔混交林,但差异并不显著。

同总 SOCD 一样,4 个地点表土层 SOCD 随演替进展也没有一致趋势。蛟河各样地表土层 SOCD 平均值为 10.4 kg/m² 显著大于胜山 7.2 kg/m²,其余地



DNM. 针阔混交林; DB. 落叶阔叶林。各演替阶段缩写见表 1, 下同。Note: DNM, deciduous broadleaf and conifer mixed forest; DB, deciduous broadleaf forest. For abbreviations of the successional stages, see Table 1. The same below.

图 1 4 个地点所有样地的土壤有机碳密度在不同演替阶段、优势种生活型之间的比较

Fig. 1 Comparison of soil organic carbon density (SOCD) among different succession stages and life forms when plots from four sites were pooled together

表2 各地点不同演替阶段和优势种生活型土壤有机碳密度比较

Tab. 2 Comparison of soil organic carbon density among life forms and succession stages within each site

	地点 Site	演替阶段 Succession stage				优势种生活型 Life form		平均值 Mean
		BP	DBM	PKPM	PKM	DB	DNM	
总土壤有机碳密度 Total SOCD(0~60 cm)/(kg·m ⁻²)	长白山 Mt. Changbai	11.1 ^a	16.8 ^b	17.0 ^b	10.7 ^a	14.0 ^a	13.9 ^a	13.9 ^A
	蛟河 Jiaohe	35.9 ^b	15.4 ^a	12.0 ^a	15.9 ^a	25.6 ^a	13.9 ^a	19.8 ^B
	五营 Wuying	9.7 ^a	13.8 ^a	10.5 ^a	16.1 ^a	11.8 ^a	13.3 ^a	12.6 ^A
	胜山 Shengshan	15.5 ^b	20.2 ^b	18.5 ^b	8.3 ^a	17.9 ^a	13.4 ^a	15.6 ^A
表层土壤有机碳密度 Top SOCD(0~20 cm)/(kg·m ⁻²)	长白山 Mt. Changbai	8.4 ^a	8.8 ^a	10.2 ^a	7.8 ^a	8.6 ^a	9.0 ^a	8.8 ^{AB}
	蛟河 Jiaohe	15.2 ^b	8.2 ^a	9.4 ^a	8.8 ^a	11.6 ^a	9.0 ^a	10.4 ^B
	五营 Wuying	5.8 ^a	9.0 ^a	7.4 ^a	11.4 ^a	7.4 ^a	9.4 ^a	8.4 ^{AB}
	胜山 Shengshan	7.2 ^b	9.6 ^c	7.4 ^b	4.6 ^a	8.4 ^b	6.0 ^a	7.2 ^A
比例 Top/Total SOCD	长白山 Mt. Changbai	0.75 ^b	0.52 ^a	0.60 ^{ab}	0.76 ^b	0.64 ^a	0.68 ^a	0.66 ^B
	蛟河 Jiaohe	0.44 ^a	0.58 ^{ab}	0.79 ^b	0.62 ^{ab}	0.51 ^a	0.71 ^b	0.61 ^B
	五营 Wuying	0.58 ^a	0.67 ^a	0.70 ^a	0.67 ^a	0.63 ^a	0.69 ^a	0.66 ^B
	胜山 Shengshan	0.47 ^{ab}	0.48 ^{ab}	0.40 ^a	0.56 ^a	0.47 ^a	0.48 ^a	0.48 ^A

点间无显著差异。从优势种生活型比较,表土层 SOCD 阔叶林显著大于针阔混交林的仅有胜山。

表土层占总 SOCD 比例随演替进展也无明显趋势。长白山、蛟河、五营 3 个地点的表土层占总 SOCD 比例的均值都在 60% 以上,显著高于胜山。从优势种生活型来看,4 个地点针阔混交林的表土层占总 SOCD 比例均高于阔叶林,但只有蛟河达到显著水平($P < 0.05$)。

从表 2 的结果来看,图 1 中演替阶段之间差异并没有得到各个地点结果的充分支持,我们认为演替对 SOCD 并没有显著影响,后文的一般线性模型的结果也说明了这一点。

2.2 土壤有机碳密度与气候、小地形的关系

图 2 显示,总 SOCD 与纬度、最冷月均温、年降水、温暖指数均无显著相关性;表土层 SOCD 随纬度增加而显著下降,随最冷月均温、温暖指数、年降水增加而显著上升;表土层占总 SOCD 比例与纬度显著负相关,与最冷月均温成正相关关系。在表 3 中,坡位仅对总 SOCD 有显著解释力,坡度、坡向对各 SOCD 变量的影响都不显著。

2.3 气候、群落特征、小地形对土壤有机碳密度的综合作用

为研究不同因素对 SOCD 的综合作用大小,采用一般线性模型进行分析(表 4)。对总 SOCD,年降水量、优势种生活型、蓄积量和坡位分别显著解释 7.9%、4.9%、4.4% 和 9.7% 的变异,演替阶段与最冷月均温的交互项显著解释了 16.1% 的变异,演替阶段与温暖指数的交互项显著解释了 18.1% 的变异。表土层 SOCD 主要受最冷月均温的影响(解释

了 19.3% 的变异, $P = 0.001$),坡位也显著解释了 16.8% 的变异。对于表土层占总 SOCD 比例,最冷月均温显著解释了 14.6% 的变异,演替阶段和最冷月均温的交互项显著解释了 16.3% 的变异,演替阶段和温暖指数的交互项也显著解释了 24.5% 的变异。

3 讨论

3.1 演替阶段和优势种生活型对土壤有机碳密度的影响

我国东北东部森林土壤有机碳密度较高。李克让等^[24]认为中国陆地生态系统土壤碳密度平均为 9.17 kg/m²,解宪丽等^[37]研究表明中国森林 SOCD 均值为 11.59 kg/m²,刘世荣等^[16]估算中国各森林类型的 SOCD 平均值为 10.7 kg/m²,变化范围 4.4 ~ 26.4 kg/m²。本研究显示东北东部几个典型地点(长白山、蛟河、五营和胜山)森林总 SOCD 平均值为 12.6 ~ 19.8 kg/m²,李克让等^[24]估算东北地区森林 SOCD 平均值在 12 kg/m² 以上,其他研究结果的平均值也在 12 kg/m² 以上^[9-11,13,24,33-34,37],本文仅估算到土壤深度 60 cm 就已经高于中国森林 1 m 深度的 SOCD 平均值。东北森林的 SOCD 较高的原因可能与该地区气候寒冷,土壤有机质分解缓慢,地表凋落物层较厚有关^[24]。

阔叶红松林的演替阶段从早期的杨桦林到中期的硬阔叶林,再到后期的红松近熟林、成熟林,蓄积量、地上植被碳储量都呈增加趋势^[32],但本研究发 现长白山、蛟河、五营和胜山 4 个地点土壤有机碳(总 SOCD、表土层 SOCD 或表土层占总 SOCD 比

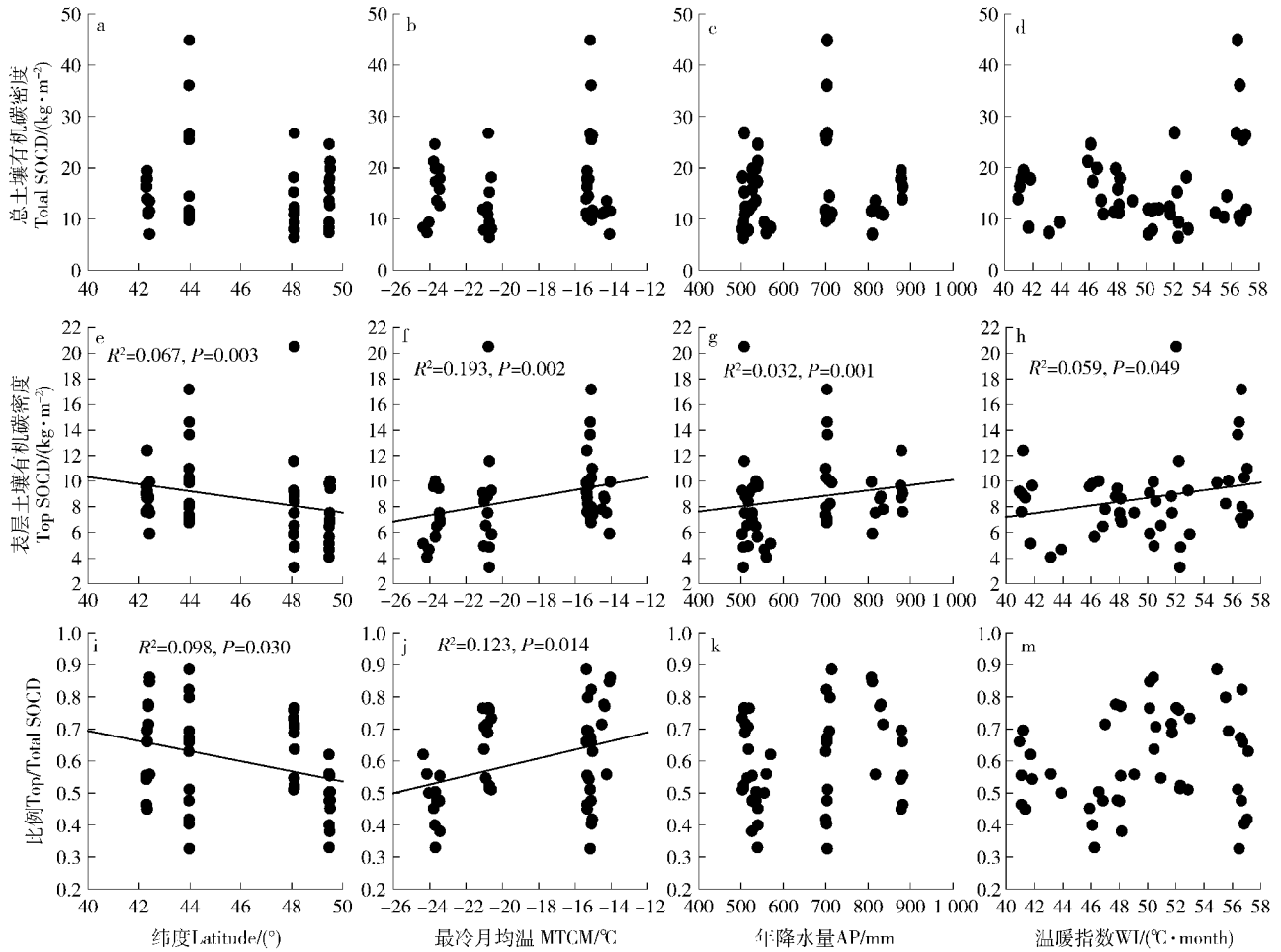


图2 48块样地的土壤有机碳密度与纬度、最冷月均温、年降水量和温暖指数的关系

Fig. 2 Changes of soil organic carbon density with latitude, MTCM, AP and WI in 48 plots

表3 各因子对土壤有机碳密度的解释力

Tab. 3 Explanatory power of each factor on soil organic carbon density

项目 Item	指标 Index	演替阶段 Succession stage	优势种生活型 Life form	蓄积量 Volume/m ³	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position
总土壤有机碳密度 Total SOC D (0 ~ 60 cm)	R ²	0.071	0.06	0.008	0.004	0.251	0.197
	P	0.349	0.094	0.542	0.669	0.147	0.021 *
表层土壤有机碳密度 Top SOC D (0 ~ 20 cm)	R ²	0.013	0.009	0.019	0.019	0.135	0.135
	P	0.905	0.512	0.344	0.349	0.349	0.637
比例 Top/Total SOC D	R ²	0.073	0.073	0.119	0.016	0.171	0.090
	P	0.336	0.064	0.017 *	0.389	0.446	0.240

注: * 为 $P < 0.05$ 水平上差异显著。Note: * means significant differences at the 0.05 level.

例)随演替进展并无一致的变化趋势(表2)。有研究发现:在相同的气候条件下,处于不同演替阶段的林型对凋落物产量和有机质分解速率存在显著影响,造成林型间 SOC D 差异较大^[16]。宋彦彦等^[34]研究表明长白山针阔混交人工林 SOC D 最小(12.37 kg/m²),杨树天然林最大(22.13 kg/m²),红松天然林 SOC D 则为 20.00 kg/m²。而杨金艳等^[33]在帽儿山的研究显示:杨桦林 SOC D 最低(9.37 kg/m²),硬阔叶林最高(22.01 kg/m²),红松人工林则为 16.2

kg/m²。这些不同地点的研究中, SOC D 在不同的演替阶段也没有表现出一致的变化趋势。刘世荣等^[16]认为中国不同森林类型之间土壤碳含量、碳储量的差异主要表现在土壤表土层。但本文的结果中,表土层 SOC D 在不同演替阶段、优势种生活型间也没表现出一致的变化趋势。这些比较说明, SOC D 的影响因素比较复杂、具有较强的异质性,可能使得不同研究得到的结果差异很大。所以在东北地区,仅考虑演替阶段或优势种生活型的影响并不能很好

表4 气候、群落特征、小地形对土壤有机碳密度(SOCD)影响的方差分析

Tab.4 ANOVA for the effects of climate, community characteristics and local topography on soil organic carbon density

项目 Item	df	总土壤有机碳密度		表层土壤有机碳密度		比例	
		Total SOCD (0~60 cm)		Top SOCD (0~20 cm)		Top/Total SOCD	
		SS%	P	SS%	P	SS%	P
MTCM	1	1.5	0.211	19.3	0.001**	14.6	0.002**
WI	1	2.2	0.132	2.2	0.226	1.0	0.352
AP	1	7.9	0.008**	2.0	0.243	2.3	0.172
优势种生活型 Life form	1	4.9	0.032*	1.2	0.370	2.9	0.125
演替阶段 Succession stage	2	1.5	0.463	2.1	0.481	0.2	0.906
蓄积量 Volume	1	4.4	0.040*	2.1	0.230	0.5	0.534
坡向 Slope aspect	8	12.1	0.174	18.7	0.166	12.4	0.275
坡位 Slope position	3	9.7	0.034*	16.8	0.022*	1.2	0.794
坡度 Slope	1	0.0	0.992	0.3	0.644	0.2	0.654
演替阶段和最冷月均温的交互作用 Succession stage; MTCM	3	16.1	0.005**	1.5	0.783	16.3	0.012*
演替阶段和温暖指数的交互作用 Succession stage; WI	3	18.1	0.003**	3.2	0.525	24.5	0.002**
演替阶段和年降水量的交互作用 Succession stage; AP	3	4.4	0.221	4.2	0.415	2.3	0.576
残差 Residuals	19	17.3		26.3		21.5	

注: * 为 $P < 0.05$ 水平上差异显著, ** 为 $P < 0.01$ 水平上差异极显著。Notes: * mean significant differences at $P < 0.05$ level, ** mean significant differences at $P < 0.01$ level.

的反映 SOCD 的变化趋势,还要考虑气候等其他因素的影响。

3.2 纬度和气候因素对土壤有机碳的影响

本研究发现气候对表土层 SOCD 的影响更显著。总 SOCD 随纬度、最冷月均温、年降水量和温暖指数增加无显著变化趋势,而表土层 SOCD 随纬度增加显著下降,随最冷月均温、年降水量和温暖指数上升而显著上升(图2)。在多元回归模型中(表4)温度指标和演替的交互项显著,说明不同演替阶段的总 SOCD 和温度指标的关系不同。本研究表明,气候因子与总 SOCD 的关系明显弱于与表土层 SOCD 的关系。Zhu 等^[28] 研究结果表明,长白山表土层 SOCD 与年均温或年降水的相关性比下层 SOCD 与之的相关性更密切。Jobbagy 等^[25] 在全球尺度上的研究结果也显示,气候因素对 SOCD 的影响随土壤深度增加而越来越弱。相对于总 SOCD,表土层 SOCD 与气候因子关系更显著的原因可能是:首先,表土层土壤有机碳主要来自植物残体和根系分泌物,更容易受到气候和凋落物产量变化的影响^[18]。另外东北森林凋落物产量与年均温显著正相关、与纬度显著负相关^[38],即东北林区水热条件较好的低纬度地区有更多的凋落物为表土层土壤提供碳源,因此与外界环境(气候因子、凋落物等)接

触紧密的表土层 SOCD 与纬度、温暖指数和最冷月均温等因子显著相关,并且随纬度增加而下降,随最冷月均温、年降水量和温暖指数上升而上升。其次,有研究表明:随土壤深度增加,气候因子对 SOCD 的影响而越来越弱,而土壤质地的影响越来越强^[25]。土壤有机碳含量与砂砾含量显著负相关^[8,18],较高的砂砾含量使土壤有机碳的吸收能力较差,从而造成深层土壤有机碳含量之间的差异。综上,气候因子对深层 SOCD 的影响减弱再加上其他因素的干扰,所以各气候因子与总 SOCD 的单变量关系不显著。

另外在以往关于温度对 SOCD 影响的研究中,一般用年均温,而没有区分冬季和生长季温度。本研究发现,最冷月均温对表土层 SOCD 以及表土层占总 SOCD 比例的解释力明显高于温暖指数,在考虑其他因素的共同影响时,最冷月均温仍能分别显著解释表土层 SOCD 和表土层占总 SOCD 比例 19.3% 和 14.6% 的变异(表4)。说明冬季和生长季温度对 SOCD 的影响是存在明显差异的。东北地区属于季风性气候,在纬度梯度上夏季温度差异较小而冬季温度差异很大^[39]。本研究的结果说明,可能是冬季温度的差异导致土壤呼吸、有机质分解速率不同,从而对土壤有机碳及其分布产生影响。已有

研究表明,冬季土壤呼吸在森林碳循环中有着重要的贡献^[40]。由于研究冬季和生长季温度对 SOCD 的影响还很少,本文的结果还有待在其他区域进一步验证,其形成机制是否可以用上述因素来解释,也需要结合土壤呼吸、有机质分解等方面的研究进一步探索。不过,大量研究已证实气候变暖的速率在冬季明显高于生长季,深入研究冬季和生长季温度对 SOCD 的影响差异,对于理解土壤碳库对于气候变化的响应,无疑有着重要的意义。

参 考 文 献

- [1] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, 320: 1444-1449.
- [2] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [3] SCHIPPER L A, BAISDEN W T, PARFITT R L, et al. Large losses of soil C and N from soil profiles under pasture in New Zealand during the past 20 years [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1138-1144.
- [4] JOHNSTON C A, GROFFMAN P, BRESHEARS D D, et al. Carbon cycling in soil [J]. *Front Ecol Environ*, 2004, 2(10): 522-528.
- [5] TIAN H, MELILLO J, LU C, et al. China's terrestrial carbon balance: contributions from multiple global change factors [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(1): 1007-1022.
- [6] WANG S, WANG Z, PIAO S, et al. Regional differences in the timing of recent air warming during the past four decades in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(19): 1968-1973.
- [7] CALLESEN I, LISKI J, RAULUND-RASMUSSEN K, et al. Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils—relationships with climate and texture class [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 358-370.
- [8] YANG Y, LI P, DING J, et al. Increased topsoil carbon stock across China's forests [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(8): 2687-2696.
- [9] 齐麟, 于大炮, 周旺明, 等. 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(10): 3065-3073.
- QI L, YU D P, ZHOU W M, et al. Impact of logging on carbon density of broadleaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10): 3065-3073.
- [10] 宋文艺, 蔡慧颖, 金光泽, 等. 黑龙江省不同地区红松人工林碳密度及其分配 [J]. *植物研究*, 2014, 34(5): 619-625.
- SONG W Y, CAI H Y, JIN G Z, et al. Carbon density and its distribution of *Pinus koraiensis* plantations in different regions of Heilongjiang Province [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2014, 34(5): 619-625.
- [11] 魏亚伟, 周旺明, 于大炮, 等. 我国东北天然林保护工程区森林植被的碳储量 [J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5696-5705.
- WEI Y W, ZHOU W M, YU D P, et al. Carbon storage of forest vegetation under the Natural Forest Protection Program in Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5696-5705.
- [12] LUAN J, LIU S, ZHU X, et al. Soil carbon stocks and fluxes in a warm-temperate oak chronosequence in China [J]. *Plant Soil*, 2011, 347(1-2): 243-253.
- [13] 魏亚伟, 于大炮, 王清君, 等. 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3333-3340.
- WEI Y W, YU D P, WANG Q J, et al. Soil organic carbon density and its influencing factors of major forest types in the forest region of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12): 3333-3340.
- [14] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 657-664.
- WU J G, ZHANG X Q, XU D Y. Changes in soil labile organic carbon under different land use in the liupan mountain forest zone [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(5): 657-664.
- [15] TRUMBORE S. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics [J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 399-411.
- [16] 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.
- LIU S R, WANG H, LUAN J W. 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.
- [17] 张城, 王绍强, 于贵瑞, 等. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析 [J]. *资源科学*, 2006, 28(2): 97-103.
- ZHANG C, WANG S Q, YU G R, et al. Soil organic carbon storage in typical forestland in east China [J]. *Resources Science*, 2006, 28(2): 97-103.
- [18] TIAN Q, HE H, CHENG W, et al. Factors controlling soil organic carbon stability along a temperate forest altitudinal gradient [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: e18783.
- [19] DENG L, WANG K, CHEN M, et al. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2013, 110: 1-7.
- [20] LAI Z, ZHANG Y, LIU J, et al. Fine-root distribution, production, decomposition, and effect on soil organic carbon of three revegetation shrub species in northwest China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 359: 381-388.
- [21] HU Y, SU Z, LI W, et al. Influence of tree species composition and community structure on carbon density in a subtropical forest [J]. *Plos One*, 2015, 10(8): e0136984.
- [22] CHEN L, HE Z, DU J, et al. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China [J]. *Catena*, 2016, 137: 37-43.
- [23] WYNN J G, BIRD M I, VELLEN L, et al. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(1): 630-637.
- [24] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量 [J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2003, 33(1): 72-80.
- LI K R, WANG S Q, CAO M K. China vegetation and soil carbon

- [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(1): 72-80.
- [25] JOBBAGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000, 2(10): 423-436.
- [26] WANG S Q, HUANG M, SHAO X, et al. Vertical distribution of soil organic carbon in China [J]. *Environmental Management*, 2004, 33(Suppl. 1): 200-209.
- [27] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响 [J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 727-734.
ZHOU T, SHI P J, WANG S Q. Impacts of climate change and human activities on soil carbon storage in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 727-734.
- [28] ZHU B, WANG X P, FANG J Y, et al. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China [J]. *Journal of Plant Research*, 2010, 123(4): 439-452.
- [29] CHAPIN III F S, ZAVALETA E S, EVINER V T, et al. Consequences of changing biodiversity [J]. *Nature*, 2000, 405: 234-242.
- [30] VITOUSEK P, MOONEY H, LUBCHENCO J, et al. Human domination of Earth's ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277: 494-499.
- [31] 丁圣彦, 宋永昌. 常绿阔叶林植被动态研究进展 [J]. *生态学报*, 2004, 24(8): 1769-1779.
DING S Y, SONG Y C. Research advances in vegetation dynamic of evergreen broad-leaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1769-1779.
- [32] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 小兴安岭7种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 140-158.
HU H Q, LUO B Z, WEI S J, et al. Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2015, 39(2): 140-158.
- [33] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量 [J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 83-90.
YANG J Y, WANG C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 83-90.
- [34] 宋彦彦, 史宝库, 张言, 等. 长白山8种林型土壤有机碳和全氮的质量分数及垂直分布特征 [J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(12): 94-97.
SONG Y Y, SHI B K, ZHANG Y, et al. Contents and vertical distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen of eight forest types in the Changbai Mountain [J]. *Journal of Northeast Forester University*, 2014, 42(12): 94-97.
- [35] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-34.
BAO S D. *Soil analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-34.
- [36] WANG X, TANG Z, FANG J. Climatic control on forests and tree species distribution in the forest region of northeast China [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48(7): 778-789.
- [37] 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 X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 687-699.
- [38] 张新平, 王襄平, 朱彪, 等. 我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1031-1040.
ZHANG X P, WANG X P, ZHU B, et al. Litter fall production in relation to environmental factors in northeast China's forests [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2008, 32(5): 1031-1040.
- [39] 方精云. 地理要素对我国温度分布影响的数量评价 [J]. *生态学报*, 1992, 12(2): 97-104.
FANG J Y. Study on geographic elements affecting temperature distribution in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12(2): 97-104.
- [40] SCHIMEL J P, FAHNESTOCK J, MICHAELSON G, et al. Cold-season production of CO₂ in arctic soils: can laboratory and field estimates be reconciled through a simple modeling approach [J]. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2006, 38(2): 249-256.

(责任编辑 赵勃
责任编辑 赵秀海)