

DOI: 10.5846/stxb201406271326

唐朋辉, 党坤良, 王连贺, 马俊. 秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度影响因素. 生态学报, 2016, 36(4): - .

Tang P H, Dang K L, Wang L H, Ma J. Factors affecting soil organic carbon density in *Betula albo-sinensis* forests on the southern slope of the Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度影响因素

唐朋辉, 党坤良*, 王连贺, 马 俊

西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

摘要:以秦岭南坡红桦林为研究对象, 利用标准地调查法获得林分、地形、土壤相关数据, 分析红桦林土壤有机碳密度 (Soil organic carbon density, SOCD) 分异特征及其与林分因子和地形因子间的关系。结果表明: 秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度总体均值为 $(69.02 \pm 12.90) \text{ t/hm}^2$, 原始红桦林土壤有机碳密度均值为 $(76.21 \pm 10.83) \text{ t/hm}^2$, 次生红桦林为 $(65.24 \pm 12.32) \text{ t/hm}^2$, 原始红桦林土壤有机碳密度比次生红桦林高 16.81%, t -检验结果显示两者存在显著差异; 在不同林区间, 红桦林土壤有机碳密度亦存在显著差异 ($P < 0.05$)。从地形因子看, 红桦林土壤有机碳密度在不同坡位和坡向间未表现出显著差异, 而海拔和坡度对红桦林土壤有机碳密度有较为显著的影响。土壤有机碳密度与海拔、林龄、乔木生物量和草本生物量呈显著正相关, 与坡度和林分密度呈显著负相关; 主成分分析表明: 特征值大于 1 的四个主成分对土壤有机碳密度的方差累积贡献率为 85.62%, 海拔、坡度、林分密度和郁闭度是影响秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度的主要因子; 通过逐步回归分析得到利用海拔、坡度、林龄、林分密度、乔木生物量和草本生物量估算红桦林土壤有机碳密度的模型: $\text{SOCD} = 0.015E - 0.332G - 0.026FD + 0.304SA + 0.105BA + 21.673BH + 36.358$ 。

关键词: 秦岭南坡; 红桦林; 土壤有机碳密度; 地形因子; 林分因子

Factors affecting soil organic carbon density in *Betula albo-sinensis* forests on the southern slope of the Qinling Mountains

TANG Penghui, DANG Kunliang*, WANG Lianhe, MA Jun

College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Soil organic carbon, the main part of the terrestrial ecosystem carbon pool, is an essential component of the terrestrial carbon cycle, and one of the most important components of research on global change. Accurate estimation of soil organic carbon storage is important for determining the role that soil organic carbon plays in the terrestrial ecosystem carbon cycle, and thus in changes in the global environment. Forest soil organic carbon storage changes according to topography and forest conditions; therefore, research on forest organic carbon in a variety of such conditions is essential to determine the relationship between soil organic carbon storage, and factors related to topography and forest conditions. *Betula albo-sinensis* forest is one of the principal forest types in the Qinling Mountains. This study aimed to analyze the distribution patterns of soil organic carbon density (SOCD), and to reveal the relationship between soil organic carbon density and factors influencing *Betula albo-sinensis* forest on the southern slopes of the Qinling Mountains. We investigated topographical, stand, and soil factors of 122 plots, each of which was $20 \times 30 \text{ m}$. Inventory data (i.e., elevation, gradient, slope position, slope aspect, canopy density, plant cover, biomass, mean height, and mean diameter at breast height) of *Betula albo-sinensis* individuals in each plot were measured and recorded. Soil samples were tested for SOCD, moisture density, and

基金项目: 林业公益性行业科研专项项目 (201204502)

收稿日期: 2014-06-27; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dangkl@126.com

bulk density. Results indicated that the average SOCD was $69.02 \pm 12.90 \text{ t/hm}^2$. In virgin forest, the average SOCD was $76.21 \pm 10.83 \text{ t/hm}^2$, in secondary forest, $65.24 \pm 12.32 \text{ t/hm}^2$. The difference in average SOCD between them was significant. The average SOCD decreased with soil depth increasing, and the average SOCD for soil layers A-C was 31.52 ± 6.57 , 27.18 ± 6.49 , and $10.32 \pm 2.65 \text{ t/hm}^2$, respectively. The average SOCD (t/hm^2) differed by forest region (Xunyangba = 58.80 ± 10.29 , Huoditang = 67.95 ± 10.25 , Huangbaiyuan = 69.63 ± 12.78 , and Guanyinshan = 75.82 ± 12.30). One-way ANOVA analysis showed that differences in average SOCD were significant for the four forest regions and soil layers, but not significant for slope positions. Differences in SOCD between shady and sunny slopes were insignificant, based on *t*-tests. Correlation analysis showed that SOCD was positively correlated with elevation, stand age, arbor biomass, and herb biomass, but negatively correlated with surface gradient and forest density. Principal component analysis showed that elevation and gradient were the first principal components affecting SOCD. Canopy density and forest density were the second principal components, stand age the third, and arbor biomass and herb biomass the fourth. These four principal components accounted for 85.62% of the variance of SOCD. Stepwise regression analysis showed that the effect of different factors on soil organic carbon density was unclear. However, stand age, elevation, gradient, arbor biomass, and herb biomass were the predominant factors affecting SOCD.

Key Words: south slope of Qinling Mountains; *Betula albo-sinensis* forest; soil organic carbon density; topographical factors; forest factors

全球尺度上的研究表明,土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库。提高土壤碳库储量估算的准确性,对正确评价土壤在陆地生态系统碳循环、全球碳循环以及全球环境变化中的作用具有重要意义^[1-5]。森林作为陆地生态系统的主体,是陆地上最大的碳储库和碳吸收汇^[6]。森林植被碳储量约占全球植被碳储量的 77%,森林土壤碳储量约占全球土壤碳储量的 39%^[7]。森林土壤有机碳库在维持森林立地生产力以及全球碳平衡过程中起着重要的作用^[8-9]。因而森林土壤有机碳储量及其影响因素的研究已成为全球有机碳循环研究的热点^[10-11]。地形和植被对森林土壤有机碳有着显著的影响作用,研究不同地形条件和植被条件下的森林土壤有机碳是预测和分析全球碳循环的重要组成部分^[12-16]。

秦岭林区森林有机碳储量和有机碳密度及其分布特征已有学者进行过研究^[17-21],但研究地点主要集中在秦岭中段南坡的火地塘林区,其研究区域不仅较小,而且研究对象多处于低山区域,且在已有研究中,很少涉及森林土壤有机碳密度与地形因子和林分因子间的相互影响关系。关于秦岭南坡中山及亚高山区域森林土壤有机碳密度的研究尚缺乏报道,特别是对秦岭林区大空间尺度森林有机碳密度的研究更少,这对准确估算秦岭林区森林土壤有机碳密度带来一定的局限性。红桦林主要分布在秦岭林区中山和亚高山海拔区域,是构成秦岭山地森林垂直带谱分布之一,其分布面积不仅较大,而且分布较广。研究秦岭林区红桦林土壤有机碳密度不仅能深入了解秦岭林区森林土壤碳储存能力,而且对准确估算秦岭林区森林土壤有机碳密度具有重要意义。本研究以秦岭南坡红桦林为研究对象,通过大尺度野外调查,估算红桦林土壤有机碳密度,比较原始红桦林和次生红桦林土壤有机碳密度差异,分析地形因子和林分因子对红桦林土壤有机碳密度的影响,探索影响红桦林土壤有机碳密度的主要因子,建立红桦林土壤有机碳密度的估算模型,以期为秦岭林区红桦林土壤碳库科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西秦岭山地南部,地理位置为 $33^\circ 25' - 33^\circ 54' \text{ N}$, $107^\circ 31' - 108^\circ 41' \text{ E}$;海拔 732—3071 m;年平均气温 $8.0 - 11.5^\circ \text{C}$,极端高温 $37.6 - 41.3^\circ \text{C}$,极端低温 $-21.7 - -25.1^\circ \text{C}$;年降水总量 800—1200 mm,全年降水日数 93—140 d;无霜期 187—210 d,植物生长期 130—206 d。研究区土壤类型主要为棕色森林土,平

均土层厚度 60—100 cm,成土母岩主要为花岗岩、片麻岩、变质砂岩等。研究区植被属典型山地温带落叶阔叶林,主要成林树种有锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、红桦 (*Betula albo-senesis*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、华山松 (*Pinus armandii*)、巴山冷杉 (*Abies fargesii*) 和太白红杉 (*Larix chinensis*) 等^[22]。红桦林主要分布在秦岭林区中山和亚高山区域,绝大部分森林为天然次生林,仅在高海拔人烟稀少和交通不便地区分布部分原始林。

1.2 研究方法

1.2.1 标准地设置

在秦岭南坡红桦林分布较广、面积较大的不同林区,选取最具有代表性的林分作为调查研究对象,所选林分既有天然次生林也有原始林,各林区概况见表 1。按照不同地形条件(海拔、坡向、坡位、坡度)和林分条件(林龄、林分密度、林分郁闭度)设置调查标准地,标准地面积为 20 m×30 m,在每个标准地的四个角及中心共布设 5 个土壤取样点;为比较不同林区红桦林土壤层有机碳密度差异,并满足统计学样本数量要求,在调查的四个林区共设置研究标准地 122 块,其中宁东旬阳坝林区 24 块其中原始林 6 块、宁陕火地塘林区 30 块其中原始林 10 块、太白黄柏塬林区 30 块其中原始林 10 块、佛坪观音山林区 38 块其中原始林 16 块。共挖掘土壤剖面 610 个,研究样地的分布见图 1。

1.2.2 标准地调查

利用 GPS 确定每个标准地的位置,用海拔仪和罗盘仪测定每块标准地的海拔、坡度、坡位、坡向等地形因子,对标准地内的林木进行每木检尺,并通过标准地内的林木株数计算林分密度;测定标准地内各乔木的冠幅,并计算林分郁闭度;用生长锥测定标准地内胸径最大的 10% 林木的年龄,取其平均值作为林分年龄^[23-24];在每个标准地四角和中心共布设 5 块 2 m×2 m 小样方,调查灌木层和草本层的盖度及种类;将样方内所有灌木、草本连根挖出,分别称量灌木根、枝干和叶鲜重,以及草本地表和地下鲜重;枯落物全部收集并称鲜重,分别取样 200 g 左右带回实验室在 85 ℃ 烘干后,进行生物量的测定。利用样地调查资料及陈存根等^[25]建立的相应生物量模型估算每个标准地内乔木层的生物量。

1.2.3 立地因子划分

按照《西北主要树种培育技术》^[26]立地因子等级划分方法,并结合本研究野外调查实际,本文立地因子的划分如下:坡位按下坡位(地形图上距离坡顶大于 2/3 处及其以下的坡面)、中坡位(上坡位与下坡位之间的坡面部分)、上坡位(地形图上距离坡顶 1/3 处及其以上的坡面)划分为三个等级;坡向分为阴坡(西北、正北、东北、正东)和阳坡(东南、正南、西南、正西)两个等级。

1.2.4 土壤有机碳密度计算

土壤碳密度的计算:按照土壤自然发生过程分 A(腐殖质层)、B(淀积层)、C(母质层)三个层次,分层分别取样,并测定各土层厚度;用环刀法测土壤容重;土样风干后筛选出其中的植物根,大于 2 mm 的砾石,用容积法测定植物根和砾石的体积含量^[27];风干土样磨碎后过 200 目筛,用德国 Elementar 公司的 Liquic TOC II 型总有机碳分析仪测定土壤有机碳,土壤各层碳密度计算公式如下:

$$SOCD = \sum_{i=1}^n (\rho_i \times (1 - \theta_i) \times c_i \times d_i \div 10) \quad (1)$$

式中,SOCD 为整个土壤剖面的土壤有机碳密度(t/hm²), $n=3$, ρ_i 为第 i 层的土壤平均容重(g/cm³), θ_i 为第 i 层>2 mm 的石砾含量(%), c_i 为第 i 层的土壤有机碳含量(g/kg), d_i 为第 i 层的土壤厚度(cm)。各层土壤有



图 1 陕西秦岭南坡地理区域范围及调查标准地布设示意图

Fig. 1 Southern slope of Qinling Mountains in Shaanxi and standard layout diagram of *Betula albo-sinensis* forest

表 1 研究区域概况
Table 1 Study region condition

研究区域 Study Region	样本数 Sample number	气候概况 Climate condition			林分状况 Forest condition			土壤概况 Soil condition		地形概况 Topographic condition		
		年均降水量 Average precipitation/ (mm)	年均气温 Average temperature/ (°C)	林分年龄 Stand age/ (a)	林分密度 Forest density/ (trees/hm ²)	郁闭度 Canopy density	平均 树种组成 Species composition	土壤类型 Soil type	土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	土层厚度 Soil layer thickness/ (cm)	平均海拔 Average elevation/ (m)	平均坡度 Average gradient/ (°)
宁陕火地塘林区 Huoditang Forest Region	30	900—1190	8.0—10.0	15—46	750—1200	0.40—0.90	8 桦+1 华+1 杂	棕色森林土	0.27—1.23	37.1—69.0	1810—2180	8—38
宁东旬阳坝林区 Xunyangba Forest Region	24	810—1200	7.0—11.0	18—56	720—900	0.40—0.85	9 桦+1 杂	棕色森林土	0.31—1.01	37.2—73.5	1830—2365	3—36
太白黄柏塬林区 Huangbaiyuan Forest Region	30	800—1029	9.0—12.5	19—61	800—1100	0.40—0.85	8 桦+1 松+1 杂	棕色森林土	0.34—1.17	40.6—70.1	1870—2500	3—32
佛坪观音山林区 Guanyinshan Forest Region	38	938—1129	11.4—13.0	30—69	720—1150	0.35—0.75	8 桦+1 云+1 杂	棕色森林土	0.32—1.05	46.1—77.2	1764—2323	2—36

机碳密度之和即为总土壤有机碳密度。每个样地 5 个样点土壤有机碳密度的平均值为样地土壤总有机碳密度。

1.2.5 数据分析

实验数据采用 EXCEL 和 SPSS18.0 进行统计分析,采用独立样本 t -检验比较原始红桦林和次生红桦林及不同坡向土壤有机碳密度的差异;用 one-way ANOVA 分析不同林区、不同土层和不同坡位红桦林土壤有机碳密度的差异;用简单相关和偏相关分析海拔、坡度和林分因子与红桦林土壤有机碳密度间的关系;对影响秦岭红桦林土壤有机碳密度的地形因子和林分因子进行主成分分析和逐步回归分析,寻找影响土壤有机碳密度的主要因子。

2 结果与分析

2.1 秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度分异特征

通过测定和计算,秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度(Soil organic carbon density, SOCD)总体均值为 $(69.02 \pm 12.90) \text{ t/hm}^2$,最大值为 104.73 t/hm^2 ,最小值为 42.36 t/hm^2 ,变异系数为 17.52%。在不同土层,红桦林土壤 A 层有机碳密度均值为 $(31.52 \pm 6.57) \text{ t/hm}^2$,占红桦林土壤总有机碳密度的 45.67%,B 层为 $(27.18 \pm 6.49) \text{ t/hm}^2$,占红桦林土壤总有机碳密度的 39.38%,C 层为 $(10.32 \pm 2.65) \text{ t/hm}^2$,占红桦林土壤总有机碳密度的 14.95%;方差分析表明:红桦林不同土层有机碳密度间存在显著差异($P < 0.05$)。在不同林区,红桦林土壤有机碳密度差异较大(表 2),顺序依次为佛坪观音山林区 $(75.82 \pm 12.30) \text{ t/hm}^2$,太白黄柏塬林区 $(69.63 \pm 12.78) \text{ t/hm}^2$,宁陕火地塘林区 $(67.95 \pm 10.25) \text{ t/hm}^2$,宁东旬阳坝林区 $(58.80 \pm 10.29) \text{ t/hm}^2$;方差分析结果表明:秦岭南坡不同林区红桦林土壤有机碳密度间存在显著差异($P < 0.05$)(表 2)。在不同龄级红桦林中,原始林土壤有机碳密度均值为 $(76.21 \pm 10.83) \text{ t/hm}^2$,次生林土壤有机碳密度均值为 $(65.24 \pm 12.32) \text{ t/hm}^2$,原始红桦林土壤有机碳密度比次生红桦林高 16.81%; t -检验结果表明:原始红桦林土壤有机碳密度与次生红桦林土壤有机碳密度间存在显著差异($P < 0.05$)(表 3)。

表 2 不同林区及不同土层的红桦林土壤有机碳密度分异特征(t/hm^2)

Table 2 Soil organic carbon density of *Betula albo-sinensis* forest in different region and laye(t/hm^2)

研究区域 Study region	样本数 Sample number	A 层 A layer	B 层 B layer	C 层 C layer	总量 Total
宁东旬阳坝林区 Xunyangba forest region (Ningdong)	24	$27.29 \pm 7.04\text{b}$	$21.04 \pm 4.27\text{c}$	$10.47 \pm 2.93\text{bc}$	$58.80 \pm 10.29\text{c}$
宁陕火地塘林区 Huoditang forest region (Ningshan)	30	$31.69 \pm 5.11\text{a}$	$27.19 \pm 5.40\text{b}$	$9.07 \pm 2.11\text{c}$	$67.95 \pm 10.25\text{b}$
太白黄柏塬林区 Huangbaiyuan forest region (Taibai)	30	$31.82 \pm 6.47\text{a}$	$27.81 \pm 6.32\text{ab}$	$10.90 \pm 2.44\text{ab}$	$69.63 \pm 12.78\text{b}$
佛坪观音山林区 Guanyinshan forest region (Foping)	38	$33.83 \pm 6.33\text{a}$	$30.54 \pm 6.00\text{a}$	$11.46 \pm 2.61\text{a}$	$75.82 \pm 12.30\text{a}$
均值 Average		$31.52 \pm 6.57\text{A}$	$27.18 \pm 6.49\text{B}$	$10.32 \pm 2.65\text{C}$	69.02 ± 12.90

表中数据为“平均值 $\pm$ 标准差”,同列数据后不同小写字母表示林区间差异显著($P < 0.05$)均值行不同大写字母表示土层间差异显著($P < 0.05$),下表同。

表 3 原始红桦林和次生红桦林土壤有机碳密度(t/hm^2)

Table 3 Soil organic carbon density in virgin forest and secondary forest(t/hm^2)

森林类型 Forest type	样本数 Sample number	A 层 Layer A	B 层 Layer B	C 层 Layer C	总体 Total
原始红桦林 Virgin forest of <i>Betula albo-sinensis</i>	42	$34.89 \pm 5.00\text{a}$	$30.73 \pm 5.02\text{a}$	$10.58 \pm 2.96\text{a}$	$76.21 \pm 10.83\text{a}$
次生红桦林 Secondary forest of <i>Betula albo-sinensis</i>	80	$29.75 \pm 6.63\text{b}$	$25.31 \pm 6.42\text{b}$	$10.17 \pm 2.49\text{b}$	$65.24 \pm 12.32\text{b}$

2.2 影响红桦林土壤有机碳密度的因素分析

2.2.1 坡向和坡位对红桦林土壤有机碳密度的影响

统计结果表明:阴坡红桦林土壤有机碳密度平均值为 $(70.59 \pm 11.91) \text{ t/hm}^2$, 阳坡为 $(66.90 \pm 13.96) \text{ t/hm}^2$; t -检验结果表明:红桦林土壤有机碳密度在不同坡向间不存在显著差异 ($p > 0.05$) (表 4)。从不同坡位来看,红桦林土壤有机碳密度在上坡位平均值为 $(68.02 \pm 12.98) \text{ t/hm}^2$, 中坡位为 $(69.51 \pm 14.51) \text{ t/hm}^2$, 下坡位为 $(69.76 \pm 10.66) \text{ t/hm}^2$; 方差分析结果表明:红桦林土壤有机碳密度在不同坡位间亦不存在显著差异 ($P > 0.05$) (表 4), 红桦林土壤有机碳密度在不同坡向和坡位未表现出差异可能与红桦林多分布在地形条件较为平缓的地段有关。

表 4 红桦林土壤有机碳密度不同坡向和坡位的分异特征

Table 4 Soil organic carbon density in different slope aspect and slope position

土层 Layer		坡向 Slope aspect		坡位 slope position		
		阴坡 Shady slope	阳坡 Sunny slope	上坡位 Top slope	中坡位 Middle slope	下坡位 Bottom slope
样本数 Sample number		50	72	46	43	33
土壤有机碳密度	A 层 Layer A	32.58±5.92a	30.10±7.18a	30.79±6.75a	31.52±7.12a	32.56±5.55a
Soil organic carbon density/ (t/hm^2)	B 层 Layer B	27.88±5.91b	26.22±7.15b	26.59±6.64b	27.64±7.17b	27.39±5.40b
	C 层 Layer C	10.12±2.89c	10.58±2.30c	10.64±2.62c	10.36±2.58c	9.81±2.90c
总和 Total		70.59±11.91	66.90±13.96	68.02±12.98	69.51±14.51	69.76±10.66

2.2.2 海拔和坡度对红桦林土壤有机碳密度的影响

海拔和坡度的变化会对土壤有机碳密度产生明显影响,在秦岭南坡红桦林分布的海拔范围内,土壤有机碳密度随海拔升高逐渐增大;简单相关分析结果表明:红桦林土壤有机碳密度与海拔存在显著的正相关性, Pearson 相关系数为 0.382;红桦林土壤有机碳密度与坡度存在显著负相关性, Pearson 相关系数为 -0.184 (表 5)。偏相关分析可以消除其他变量的影响,真实地反映两个变量间相关的性质和密切程度^[28],为进一步分析红桦林土壤有机碳密度与海拔和坡度间的关系,对影响红桦林土壤有机碳密度的因子进行偏相关分析,结果表明:在控制其他因子后,海拔和坡度与红桦林有机碳密度间相关性仍然显著,其偏相关系数分别为 0.217, -0.349 (表 5)。

2.2.3 林分因子对红桦林土壤有机碳密度的影响

林分因子对森林土壤碳密度亦会产生显著影响。红桦林土壤有机碳密度随林龄、乔木生物量、灌木生物量、草本生物量和枯落物量的增加逐渐增大,随郁闭度和林分密度的增大而逐渐减小;简单相关分析结果表明:红桦林土壤有机碳密度与林龄、乔木生物量、草本生物量和枯落物量呈显著正相关,其 Pearson 相关系数分别为 0.573, 0.374, 0.205, 0.212;与郁闭度、林分密度呈显著负相关,其 Pearson 相关系数分别为 -0.206, -0.571;与灌木生物量间的相关关系不显著 (表 6)。为进一步研究红桦林土壤有机碳密度与林分因子间的关系,对影响红桦林土壤有机碳密度的因子进行偏相关分析,结果表明:在排除其他因子影响后,红桦林土壤有机碳密度与林龄、乔木生物量和草本生物量间仍然呈显著正相关,其偏相关系数分别为 0.300, 0.340, 0.245;与林分密度呈显著负相关,其偏相关系数为 -0.346 (表 6)。

2.3 影响红桦林土壤有机碳密度因子的主成分分析

森林生态系统中的各环境因子不仅单独影响土壤有机碳密度变化,而且存在交互作用,为降低各因子间

表 5 红桦林土壤有机碳密度与海拔和坡度的 Pearson 相关系数及偏相关系数

Table 5 Pearson correlation and partial correlation between elevation, gradient and soil organic carbon density

因子 Factor	Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient	偏相关系数 Partial correlation coefficient
海拔 Elevation (m)	0.382 **	0.217 *
坡度 Gradient (°)	-0.184 *	-0.349 **

*, $P < 0.05$, **, $P < 0.01$.

表 6 红桦林土壤有机碳密度与林分因子的 Pearson 相关系数及偏相关系数

项目 Category	林龄 Stand age/ (a)	郁闭度 Canopy density	林分密度 Forest density/ (trees/hm ²)	乔木生物量 Arbor biomass/ (t/hm ²)	灌木生物量 Shrub biomass/ (kg/m ²)	草本生物量 Herb biomass/ (kg/m ²)	枯落物量 Litter biomass/ (kg/m ²)
Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient	0.573 **	-0.206 *	-0.571 **	0.374 **	0.148	0.205 *	0.212 *
偏相关系数 Partial correlation coefficient	0.300 **	-0.071	-0.346 **	0.340 **	0.118	0.245 **	0.097

*, $P<0.05$, **, $P<0.01$.

多重共线性的影响,明确各因子的影响程度,对影响红桦林土壤有机碳密度的 11 个因子(其中对坡向和坡位进行量化处理,分别以坡向与正北之间的夹角以及坡位距坡顶距离占坡面长度的百分数作为坡向和坡位的值)进行标准化处理后(为消除量纲的影响)做主成分分析,结果表明:所有主成分中特征值大于 1 的主成分有 4 个,其方差累积贡献率为 85.62%,能反映不同因子对红桦林土壤有机碳密度影响效应的绝大部分信息,为了更清楚地解释各变量在各主成分上的载荷意义,对主成分载荷做方差最大化正交旋转,旋转后得到主成分在各变量上的载荷(表 7)。

在第一主成分中海拔和坡度的载荷较高,海拔对降雨量^[29]和气温的影响会影响蒸发量和土壤温度^[30],坡度会影响土壤水分和养分的分配^[28],因此第一主成分可认为是土壤水分和养分对土壤有机碳影响效应的反映;第二主成分中郁闭度和林分密度载荷较高,郁闭度和林分密度通过影响林下光照对土壤温度产生影响,因此可认为第二主成分是土壤温度对土壤有机碳影响效应的反映;第三主成分中林龄载荷较高,林龄越大,森林土壤有机碳积累时间越长,因此可认为第三主成分是碳积累时间对土壤有机碳影响效应的反映,第四主成分中乔木生物量和草本生物量载荷较高,植物残体的分解和根系分泌物是土壤碳的主要来源^[31],因此第四主成分可认为是土壤有机碳来源对土壤有机碳影响效应的反映。四个主成分中第一和第二主成分反映的信息量占总信息量的 59.12%,所以可认为海拔、坡度、林分密度和郁闭度是影响红桦林土壤有机碳密度的主要因子。

2.4 影响红桦林土壤有机碳密度因子的逐步回归

在自然条件下,森林生态系统中影响红桦林土壤有机碳密度的因子发生着复杂变化,且交互在一起制约着红桦林土壤有机碳密度,仅仅分析其中单个因子的影响规律,并不能完全弄清不同因子对红桦林土壤有机碳密度的控制机制。因此对主成分分析得到的影响红桦林土壤碳密度的主要因子进行逐步回归分析,通过 t 检验和 F 检验,得到红桦林土壤有机碳密度($SOCD$)关于海拔(Elevation, E)、坡度(Gradient, G)、林龄(Stand age, SA)、林分密度(Forest density, FD)、乔木生物量(Arbor biomass, BA)和草本生物量(Herb biomass, BH)的

表 7 地形因子和林分因子主成分载荷矩阵、特征值及贡献率

Table 7 The principle component loading matrix, eigenvalue, contribution rate for topographical and forest factors

因子 Factor	主成分 Component			
	1	2	3	4
海拔 Elevation(m)	0.909	-0.390	-0.077	0.049
坡度 Gradient	0.849	0.236	-0.024	-0.094
坡向 Slope aspect	-0.287	0.046	0.059	0.040
坡位 Slope position	0.008	0.023	0.072	-0.015
林龄 Stand age(a)	-0.159	-0.232	0.805	0.051
郁闭度 Canopy density	-0.636	0.909	0.072	0.099
林分密度 Forest density/ (trees hm ⁻²)	-0.728	0.930	-0.068	-0.309
乔木生物量 Arbor biomass/ (t/hm ²)	0.051	0.012	0.092	0.846
灌木生物量 Shrub biomass/ (kg hm ⁻²)	-0.263	0.055	-0.048	0.524
草本生物量 Herb biomass/ (kg hm ⁻²)	0.090	0.240	0.672	0.890
枯落物量 Litter biomass/ (kg hm ⁻²)	-0.174	-0.145	0.061	0.075
贡献率 Contribution rate/(%)	37.15	21.97	17.52	8.98
累积贡献率 Accumulative contribution rate/(%)	37.15	59.12	76.64	85.62

六个回归模型(表 8),且各模型均达到极显著水平($P<0.01$)。

表 8 红桦林土壤有机碳密度影响因子的逐步回归分析
Table 8 The stepwise regression analysis for main influencing factors of SOCD

因子 Factor	模型 Model					
	I	II	III	IV	V	VI
常数项 Constant term	44.474	81.206	89.600	75.891	43.998	36.358
林龄 Stand age(a)	0.632	0.410	0.402	0.360	0.290	0.304
林分密度 Forest density(trees hm ⁻²)		-0.030	-0.032	-0.029	-0.028	-0.026
坡度 Gradient			-0.296	-0.343	-0.354	-0.332
乔木生物量 Arbor biomass(t hm ⁻²)				0.102	0.104	0.105
海拔 Elevation(m)					0.015	0.105
草本生物量 Herb biomass(kg hm ⁻²)						21.673
F 值 F value	58.567	43.590	35.235	33.401	29.623	26.609
多元相关系数(R) Multiple correlation coefficient	0.573	0.650	0.687	0.730	0.749	0.762

上述研究结果表明:不同因子对红桦林土壤有机碳密度的影响并不完全相同,从回归方程中各因子的系数可看出,红桦林土壤有机碳密度与林龄、乔木生物量、海拔和草本生物量正相关,与林分密度和坡度负相关,与偏相关分析的结果一致。通过比较各回归方程的多元相关系数,第六个回归方程的多元相关系数最大,更能准确反映环境因子对红桦林土壤有机碳密度的影响,方程包含了林龄、林分密度、坡度、乔木生物量、海拔和草本生物量六个因子,表明红桦林土壤有机碳密度是不同因子综合影响的结果。

3 讨论

秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度总体均值为(69.02±12.90) t/hm²,高于侯琳等^[32]估算的秦岭火地塘油松天然次生林土壤有机碳密度(60.49 t/hm²)。在自然条件下,特定气候区域内的植被类型决定着归还土壤的凋落物和根系分泌物的数量和质量及腐殖质的形成与分解活跃机制,植被类型的差异会导致土壤剖面有机碳分布格局的差异^[33-34],秦岭南坡红桦林森林类型与油松林的差异是导致其土壤有机碳密度产生差异的主要原因。秦岭南坡原始红桦林的土壤有机碳密度显著高于次生红桦林,与齐光等对大兴安岭兴安落叶松林的研究结果一致^[29],说明秦岭南坡次生红桦林土壤碳储能力还有巨大的潜力可挖,可采取科学合理的森林经营措施,促进其演替进程,进一步增强其土壤的碳储能力。

研究表明,陆地土壤有机碳密度一般随降水量增加而增加,在降水量相同的条件下,温度越高土壤有机碳含量越低,温度和降水的综合作用决定了陆地土壤碳含量分布的地理地带性特征^[30,35],根据董立民^[35]等对秦岭林区年降水量随海拔的变化规律的研究,秦岭南坡红桦林分布的海拔区间年降雨量基本无显著差异,因此温度成为影响红桦林土壤有机碳密度的主要因素。而黄湘等对塔里木河怪柳群落土壤碳通量的研究发现,较高的气温造就较高的土壤温度会降低土壤有机质储量,加快土壤养分矿化,从而导致土壤贫瘠化,而随海拔升高气温降低,土壤温度也随之降低,有利于土壤有机碳的积累^[36]。杜有新等对庐山森林土壤有机碳的研究亦表明随海拔升高土壤有机碳逐渐增加^[31]。秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度与海拔呈显著正相关,反映了海拔通过影响林内温度而对土壤有机碳密度产生的影响。侯琳等^[32]对火地塘油松林土壤碳的研究发现,坡度平缓地区土层较厚,灌草种类比较丰富,有利于水肥蓄积,而坡度较陡的地区土层薄而贫瘠,林下植被以灌木为主,灌草种类丰富度低,土壤有机碳密度较低,这也是秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度与坡度间表现出显著的负相关性的主要原因。

森林土壤有机碳主要来源于植物、动物、微生物残体和根系分泌物,并处于不断分解与形成的动态过程,因此森林土壤有机碳是森林生态系统在特定条件下的动态平衡值^[37-39]。不同的植被和气候条件下,森林土

壤有机碳的积累量也会存在很大差异^[40]。森林土壤表层的动植物残体分解和根系分泌物量是土壤有机碳的主要来源,乔木、灌木和草本的生物量主要影响根系分泌物量,而郁闭度和林分密度通过影响林下光照,控制着动植物残体的分解,秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度与乔木生物量和草本生物量呈显著正相关,与郁闭度、林分密度呈显著负相关,在一定程度上体现了上述研究结论。秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度与林龄呈显著正相关,其主要原因是随林龄增大,植被通过根系向土壤输入的有机碳积累量增多,刘恩等^[41]对亚热带不同林龄红锥人工林土壤碳储量的研究得出基本一致的结论。偏相关分析结果表明:在排除其他因子的影响后,秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度与海拔、林龄、乔木生物量和草本生物量呈显著正相关,与坡度和林分密度呈显著负相关,与其他因子间的相关关系不显著,其原因可能是影响秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度的各因子间存在相关关系,其他因子对土壤碳密度的影响主要通过这几个因子来体现。

4 结论

通过估算秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度,分析地形因子和林分因子对红桦林土壤有机碳密度的影响,主要得出以下结论:

秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度为 $(69.02 \pm 12.90) \text{ t/hm}^2$,原始红桦林土壤有机碳密度 $((76.21 \pm 10.83) \text{ t/hm}^2)$ 高出次生红桦林 $((65.24 \pm 12.32) \text{ t/hm}^2)$ 16.81%,表明次生红桦林土壤的碳储能力还可以进一步提高。

秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度与海拔、林龄、乔木生物量和草本生物量呈显著正相关,与坡度和林分密度呈显著负相关;在影响红桦林土壤碳密度的地形因子和林分因子中海拔、坡度、林分密度和郁闭度是影响红桦林土壤有机碳密度的主要因子;红桦林土壤有机碳密度与其主要影响因子间的关系可以用回归方程: $\text{SOCD} = 0.015E - 0.332G - 0.026FD + 0.304SA + 0.105BA + 21.673BH + 36.358$

表达,该方程可作为估算秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度的参考模型。

参考文献 (References):

- [1] 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. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [2] IPCC. Land Use, Land-Use Change and Forestry. Special Report, Inter-Governmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [3] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, King A W, Dale V H, DeAngelis D L. The global carbon cycle. American Scientist, 1990, 78: 310-326.
- [4] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163.
- [5] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [6] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.
- [7] Lal R, Kimble J, Levine E, Whitman C. World soils and greenhouse effect: an overview // Kimble J M, Levine E R, Stewart B A, Lal R. Soils and Global Change, 1995: 1-25.
- [8] Wang H, Hall C A S. Modeling the effects of Hurricane Hugo on spatial and temporal variation in primary productivity and soil carbon and nitrogen in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. Plant and Soil, 2004, 263(1/2): 69-84.
- [9] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/3): 242-258.
- [10] 潘根兴,周萍,李恋卿,张旭辉. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
- [11] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究, 1999, 18(4): 349-356.
- [12] Hontoria C, Rodriguez-Murillo J C, Saa A. Relationships between soil organic carbon and site characteristics in peninsular Spain. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3): 614-621.
- [13] 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.
- [14] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3/4): 184-194.
- [15] Prichard S J, Peterson D L, Hammer R D. Carbon distribution in subalpine forests and meadows of the Olympic Mountains, Washington. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1834-1845.
- [16] Tan Z X, Lal R, Smeck N E, Calhoun F G. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. Geoderma, 2004, 121(3/

- 4): 187-195.
- [17] 刘华, 雷瑞德. 秦岭火地塘林区主要森林类型碳储量和碳密度估算. 中国农学通报, 2005, 21(3): 138-142.
- [18] 马明, 王得祥, 刘玉民. 秦岭天然华山松林碳素空间分布规律及其动态变化. 林业资源管理, 2008, (5): 75-78.
- [19] 侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 尚廉斌, 赵辉. 秦岭火地塘林区油松群落乔木层的碳密度. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 23-24.
- [20] 马明, 王得祥, 刘玉民. 秦岭火地塘林区天然油松林碳素空间分布规律. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 114-118.
- [21] 邓蕾, 上官周平. 秦岭宁陕县森林植被碳储量与碳密度特征. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2310-2320.
- [22] 沈彪. 秦岭中段南坡油松林和锐齿栎林生态系统碳密度研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [23] Zhang J, Ge Y, Chang J, Jiang B, Jiang H, Peng C H, Zhu J R, Yuan W G, Qi L Z, Yu S Q. Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, subtropical China. Forest Ecology and Management, 2007, 245(1/3): 64-75.
- [24] 张远东, 刘彦春, 刘世荣, 张笑鹤. 基于年轮分析的不同恢复途径下森林乔木层生物量和蓄积量的动态变化. 植物生态学报, 2012, 36(2): 117-125.
- [25] 陈存根, 彭涛. 秦岭火地塘林区主要森林类型的现存量和生产力. 西北林学院学报, 1996, 11(S1): 92-102.
- [26] 罗伟祥, 刘广全, 李嘉珏. 西北主要树种培育技术. 北京: 中国林业出版社, 2007: 238-245.
- [27] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 徐丽宏, 熊伟, 郭浩. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响. 生态学报, 2008, 28(12): 6090-6098.
- [28] 李兴欢, 刘瑞鹏, 毛子军, 宋媛, 刘林馨, 孙涛. 小兴安岭红松直径向变化及其对气象因子的响应. 生态学报, 2014, 34(7): 1653-1644.
- [29] 齐光, 王庆礼, 王新闯, 齐麟, 王庆伟, 叶雨静, 代力民. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳贮量. 应用生态学报, 2011, 22(2): 273-279.
- [30] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. 土壤学报, 2004, 41(5): 687-699.
- [31] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 黄良, 韩世明, 徐雪峰, 丁园. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1675-1681.
- [32] 侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 赵辉. 秦岭火地塘天然次生油松林土壤有机碳的特征. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(8): 156-160.
- [33] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
- [34] 陈步峰, 潘永军, 史欣, 肖以华, 徐猛. 广州市典型森林土壤有机碳密度及储量生态特征. 东北林业大学学报, 2010, 38(4): 59-65.
- [35] 董立民, 刘淑明, 辛继红. 秦岭火地塘林场气候要素随海拔高度的变化. 水土保持通报, 1995, 15(3): 16-19, 27-27.
- [36] 黄湘, 陈亚宁, 李卫红, 刘加珍, 陈亚鹏. 塔里木河中下游怪柳群落土壤碳通量及其影响因子分析. 环境科学, 2006, 27(10): 1934-1940.
- [37] 黄湘, 李卫红, 陈亚宁, 马建新. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子[J]. 生态学报, 2007, 27(05): 1951-1959.
- [38] 刘艳, 查同刚, 付汝军. 百花山典型林分土壤有机碳储量及垂直分布特征[J]. 西北农业学报, 2012, 21(3): 182-187.
- [39] 何志斌, 赵文智, 刘鸽, 苏永中. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素. 生态学报, 2006, 26(8): 2572-2577.
- [40] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 万长贵. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素. 生态学报, 2004, 24(3): 469-476.
- [41] 刘恩, 王晖, 刘世荣. 南亚热带不同林龄红锥人工林碳贮量与碳固定特征. 应用生态学报, 2012, 23(2): 335-340.