

# 长白山东部 4 种林分类型土壤有机碳及养分特征研究

刘玲, 王海燕, 戴伟, 杨晓娟, 李旭

(北京林业大学 水土保持学院, 教育部 水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 以长白山东部长白落叶松天然林、长白落叶松人工林、天然阔叶混交林、天然针阔混交林 4 种林分类型为研究对象, 对比分析了土壤有机碳(SOC)的垂直分布特征, 以及与土壤理化性质的相关性。结果表明, 4 种林分下土壤有机碳含量及其差异程度随土壤深度增加均呈现逐渐减小的趋势。0—60 cm 土层土壤有机碳含量大小依次为天然针阔混交林(33.64±17.48 g/kg) > 长白落叶松天然林(25.30±15.09 g/kg) > 天然阔叶混交林(22.13±13.74 g/kg) > 长白落叶松人工林(19.23±12.35 g/kg); 天然针阔混交林 0—60 cm 土壤有机碳密度为 21.44±8.31 kg/m<sup>2</sup>, 显著高于其他 3 种林分类型, 长白落叶松人工林最小, 为 14.29±1.59 kg/m<sup>2</sup>。对不同土层土壤有机碳和土壤理化性质进行相关分析, 结果表明, 整个土壤剖面有机碳含量与自然含水率、全 N、全 P、全 K、速效 K 均呈极显著或显著正相关, 与土壤密度呈极显著负相关; 不同林分类型土壤有机碳含量和碳密度与全 N 均呈显著或极显著正相关, 与土壤理化性质相关性存在较大差异。

**关键词:** 土壤有机碳; 林分类型; 土壤性质; 逐步回归分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0079-07

中图分类号: S714

## Characteristics of Soil Organic Carbon and Nutrients Under Four Forest Stands in Eastern Part of Changbai Mountains

LIU Ling, WANG Hai-yan, DAI Wei, YANG Xiao-juan, LI Xu

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Soil organic carbon(SOC) and its correlations with soil properties were studied under the four stand types of *Larix olgensis* natural forest, *Larix olgensis* plantation, natural mixed broad-leaved forest, and natural mixed coniferous and broad-leaved forest in the eastern part of Changbai Mountains. Results showed that the SOC contents had significant differences among different soil layers under the four stand types. The SOC content gradually decreased with the increase of soil depth, and SOC was mainly distributed in the top-soil (0—20 cm). The average SOC content under the stand types followed the order of natural mixed coniferous and broad-leaved forest(33.64±17.48 g/kg) > *Larix olgensis* natural forest(25.30±15.09 g/kg) > natural mixed broad-leaved forest(22.13±13.74 g/kg) > *Larix olgensis* plantation (19.23±12.35 g/kg). The SOC density in 0—60 cm layer under natural mixed coniferous and broad-leaved forest was 21.44±8.31 kg/m<sup>2</sup>, higher than that under the other three stand types. In different soil layers, the correlations between the SOC density and soil physiochemical properties were different. The SOC content had significant negative correlations with soil bulk density, but positive correlations with soil moisture, soil total N and P, and available K. For different stand types, SOC had positive correlations with soil total N, but had great differences in correlation with soil properties.

**Keywords:** soil organic carbon; stand type; soil property; stepwise regression analysis

收稿日期: 2012-06-06

修回日期: 2012-07-25

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目“天然森林和草地土壤碳储量及时空格局”(2011CB403201); 国家林业局公益性行业科研项目“我国典型森林类型健康经营关键技术研究”(20100400201)

作者简介: 刘玲(1988—), 女(满族), 河北省承德市丰宁满族自治县人, 硕士, 研究方向为土壤学、植物营养学。E-mail: liuling830@foxmail.com。

通信作者: 王海燕(1972—), 女(汉族), 湖北省浠水县人, 副教授、博士, 研究方向为土壤学、植物营养学。E-mail: haiyanwang72@yahoo.com.cn。

土壤有机碳是陆地生态系统碳循环过程中最大的有机碳库,全球的碳储量大约为  $1.0 \times 10^8$  Pg,其中约 1 500 Pg 是以有机质形态储存于土壤中,全球土壤有机碳库储量约为大气碳库的 2 倍,是陆地生物量碳的 2.5 倍<sup>[1-2]</sup>。森林生态系统,不仅本身维持着约占全球 86% 以上的植被碳库,同时也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的 73%)<sup>[3]</sup>。因而,森林生态系统土壤碳平衡在全球碳循环中起着不可替代的作用。受植被类型、气候特点以及土壤性质的影响,不同森林类型土壤有机碳存在较大的差异<sup>[4]</sup>。关于不同国家或区域尺度的森林生态系统的植被层或土壤有机碳储量方面的研究较多<sup>[5-7]</sup>,但数据来源、估算方法和估算结果存在较大差异。要更精准地评价各森林类型土壤碳汇功能,必须通过样地实测获得更多的基础数据。近年来,对各种林分类型土壤有机碳库及其参与生态系统物质能量循环的研究逐渐增加,研究证明森林生态系统中土壤碳循环与土壤理化性质密切相关,土壤碳、氮表现出相互耦合作用<sup>[8-9]</sup>。研究土壤有机质与养分过程对于生态系统中碳氮利用、贮存和转移有重要意义。

东北是中国的主要林区,森林面积占全国的 31.4%,在我国碳汇计量和生态环境建设中起举足轻重的作用。目前,对于东北林区土壤碳研究主要集中在利用土壤普查数据对土壤表层碳储量的估计<sup>[10-11]</sup>,而基于森林生态系统功能过程、从林分类型角度研究土壤碳储量的报道较少。本文以长白山东部中低丘陵区 4 种林分类型为对象,研究土壤有机碳含量及碳密度的分配特征,对比分析不同植被覆盖条件下,土壤理化性质对土壤有机碳的影响,为该地区森林生态系统的碳汇功能及土壤养分状况的评价乃至合理经营提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清林业局金仓林场,地理坐标为  $130^{\circ}23' - 130^{\circ}37' E$ ,  $43^{\circ}18' - 43^{\circ}24' N$ ,林区属长白山系中低丘陵区,海拔为 360~1 477 m,北部地区地形较陡,南部地区较缓,北部地区林相较纯,南部

地区地类较为复杂,林相相对杂乱。该区域地处北温带季风区,属大陆性季风气候。年均气温为  $3.9^{\circ}C$ ,全年日照时数为 2 351 h,年平均降水量为 547 mm,主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 59%。山地土壤类型以暗棕壤为主,成土母质主要为花岗岩、片麻岩以及玄武岩的残积物和坡积物,部分地区为洪积物和冲积物,土壤垂直变化明显。林区内有丰富的植物种类和资源优势,植被类型主要有针叶林、针阔混交林和阔叶混交林。林相整齐,植物种类丰富,主要有长白落叶松 (*Larix olgensis*)、云杉 (*Picea koraiensis*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、色木槭 (*Acer mono*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、椴树 (*Tilia amurensis*) 等。灌木有胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、刺五加 (*Acanthopanax senticosus*)、毛榛 (*Corylus mandshurica*)、蓝果忍冬 (*Lonicera caerulea*)、绢毛绣线菊 (*Spiraea sericea*)、瘤枝卫矛 (*Euonymus verrucosus*)、野山楂 (*Crataegus cuneata*)、小叶鼠李 (*Rhamnus parvifolia*)、刺玫蔷薇 (*Rosa davurica*) 等。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置与土样采集

通过对金仓林场的调查和研究,从植被生长以及林地群落保存、演替及稳定的角度,于 2011 年 8 月,分别选择长白落叶松天然林、长白落叶松人工林、天然阔叶混交林、天然针阔混交林 4 种代表性林分类型为研究对象,每种林分类型分别设置 4 块典型样地。样地设置时,为避免受环境因素的影响,所选样地土壤母质相同,环境条件大体相似。样地特征如表 1 所示。设置标准样地的面积为  $0.025 \text{ hm}^2$ ,每块样地内挖取一个典型土壤剖面,记录剖面形态特征,按每 20 cm 在剖面上分层用环刀法采样测定土壤密度和含水量。然后,在样地内以 S 形随机布设 5~7 个采样点,用土钻取样,按 0—20,20—40 和 40—60 cm 这 3 个层次采集各层土壤的混合样 1 000 g 左右。混合土样经风干、磨细、过筛(2,1 和 0.25 mm 土壤筛),用于测定土壤化学性质。

表 1 金仓林场样地基本情况

林分类型	海拔/m	坡度/(°)	林龄/a	树高/m	胸径/cm	郁闭度	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	土壤 类型
长白落叶松天然林	706~757	3~27	31~46	4.1~27.6	5.8~28.7	0.60~0.95	640~1 320	暗棕壤
长白落叶松人工林	690~727	5~30	38~49	5.1~27.5	5.2~37.2	0.55~0.85	360~1 120	暗棕壤
天然阔叶混交林	562~779	9~27	26~43	4.4~24.7	5.0~45.3	0.85~0.98	800~1 880	暗棕壤
天然针阔混交林	729~793	4~17	35~41	4.2~24.4	5.0~48.3	0.75~0.90	520~1 640	暗棕壤

## 2.2 测定方法

环刀取样测定土壤密度及自然含水量;土壤 pH 值采用酸度计法(水土比为 2.5:1);土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法;全 N 采用硫酸—高氯酸消煮—凯氏定氮法;全 P 用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法;全 K 用氢氟酸—高氯酸消煮—火焰光度计法;土壤有效 P 用氟化铵—盐酸—钼锑抗比色法;土壤速效 K 用中性乙酸铵浸提—火焰光度计法<sup>[12]</sup>。

## 2.3 数据处理与统计分析

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量,某一土层  $i$  的有机碳密度(SOCD <sub>$i$</sub> , kg/m<sup>2</sup>)计算公式为:

$$\text{SOCD}_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中: $C_i$ ——土壤有机碳含量(g/kg);  $D_i$ ——土壤密度(g/cm<sup>3</sup>);  $E_i$ ——土层厚度(cm);  $G_i$ ——直径 > 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%)。

如果某一土壤剖面由  $k$  层组成,那么该剖面的有机碳密度(SOCD <sub>$k$</sub> , kg/m<sup>2</sup>)为:

$$\text{SOCD}_k = \sum_{i=1}^k \text{SOCD}_i = \sum_{i=1}^k C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (2)$$

数据采用 SPSS 17.0 软件,通过方差分析研究不同林分类型不同土壤深度对土壤有机碳含量及密度

的影响,并在差异显著时进行多重比较( $p < 0.05$ , LSD,  $t$  检验)。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤有机碳含量及有机碳密度

3.1.1 土壤有机碳含量分布特征 植被类型、气候特点和土地利用的差异,均会影响土壤有机碳的输入和输出,从而导致土层内有机碳含量的大小及分布存在差异。

通过对每种林分类型 4 块样地土壤有机碳的测定,得到各林分类型土壤有机碳含量。从土壤有机碳含量的剖面分布可以看出,不同林分类型和不同土层深度的有机碳含量存在较大差异(表 2)。0—60 cm 土壤有机碳含量大小依次为天然针阔混交林 > 长白落叶松天然林 > 天然阔叶混交林 > 长白落叶松人工林,差异显著( $p < 0.05$ ),其中针阔混交林的有机碳含量最高,为 33.64 ± 17.48 g/kg,天然落叶松林次之,落叶松人工林有机碳含量最小,为 19.23 ± 12.35 g/kg。就整个土壤剖面而言,4 种林分类型土壤有机碳含量由于林地群落结构与组成不同,在植被—土壤系统综合作用下,立地环境产生较大差异,相应的土壤有机碳状况存在差异。

表 2 不同林分类型土壤有机碳含量

土层/ cm	长白落叶松天然林		长白落叶松人工林		天然阔叶混交林		天然针阔混交林	
	有机碳含量/ (g · kg <sup>-1</sup> )	变异系 数/%	有机碳含量/ (g · kg <sup>-1</sup> )	变异系 数/%	有机碳含量/ (g · kg <sup>-1</sup> )	变异系 数/%	有机碳含量/ (g · kg <sup>-1</sup> )	变异系 数/%
0—20	41.87 ± 12.37Aa	29.54	32.95 ± 12.64Aa	38.36	37.53 ± 10.52Aa	28.03	48.87 ± 13.85Aa	28.34
20—40	20.03 ± 8.30Bb	41.44	14.80 ± 2.55Bb	17.23	19.22 ± 4.73Bb	24.61	33.56 ± 7.84Aab	23.36
40—60	14.01 ± 6.35Ab	45.32	9.94 ± 1.03Ab	10.36	11.64 ± 4.95Ab	42.31	18.47 ± 8.38Ab	45.37
0—60	25.30 ± 15.09AB	59.64	19.23 ± 12.35B	65.00	22.13 ± 13.74AB	62.08	33.64 ± 17.48A	51.96

注:表中数据为平均值 ± 标准差;不同大写字母表示不同林分类型 Turkey 差异显著( $p < 0.05$ ),小写字母表示不同土层间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

对不同林分类型同一土层有机碳含量进行比较,在 0—20, 20—40, 40—60 cm 土层中,土壤有机碳含量同样表现为天然针阔混交林 > 长白落叶松天然林 > 天然阔叶混交林 > 长白落叶松人工林;不同林分类型在 0—20 和 40—60 cm 土层中有机碳含量差异不显著,而 20—40 cm 土层土壤有机碳含量差异显著。

不同林分类型土壤有机碳含量存在较大的差异,但从土壤有机碳含量的空间变化特征来看,均表现为随土壤深度的增加而降低的趋势。0—20 cm 土层的有机碳含量最高,为 32.95 ~ 48.87 g/kg,分别是 20—40 cm 土层的 1.5 ~ 2.5 倍和 40—60 cm 土层的 2.0 ~ 3.5 倍。方差分析结果表明,4 种林分类型不同层次土壤有机碳含量都呈极显著差异( $n = 16, p <$

0.01),长白落叶松天然林、长白落叶松人工林、天然阔叶混交林土壤有机碳含量在 0—20 和 20—40 cm 土层之间差异较大,但随着土壤深度的增加变化逐渐平缓,并在 20—60 cm 变化不显著;天然针阔混交林土壤有机碳含量在各土层变化均有显著差异。长白落叶松人工林在 0—60 cm 土层有机碳含量的变异性最大,达到 65.00%,天然针阔混交林有机碳含量的变异性最小,为 51.96%。

4 种林分类型不同土层有机碳含量变异情况各不相同,长白落叶松天然林随土层深度增加变异系数增大,天然阔叶混交林和天然针阔混交林为 20—40 cm 土层变异最小,而长白落叶松人工林为表层土壤有机碳含量变幅最大。这可能与不同森林群落植被根系

分布情况、地表凋落物的数量和分解状况有关。不同林分类型不同土层有机碳含量的变异系数均在 10%~90%，属于中等变异。

3.1.2 土壤有机碳密度分布特征 土壤有机碳密度均呈现出随土壤深度的增加而降低的趋势(表 3)，不同林分类型 0—60 cm 的土壤有机碳密度大小依次为

天然针阔混交林>长白落叶松天然林>天然阔叶混交林>长白落叶松人工林，变异系数也呈现相同的大小顺序，其中天然针阔混交林的土壤有机碳密度显著高于其他 3 种林分类型，为  $25.47 \pm 10.83 \text{ kg/m}^2$ ，变异系数为 42.52%；天然阔叶混交林最小，为  $14.20 \pm 0.83 \text{ kg/m}^2$ ，变异系数为 11.12%。

表 3 不同林分类型土壤有机碳密度

土壤深度/cm	长白落叶松天然林		长白落叶松人工林		天然阔叶混交林		天然针阔混交林	
	有机碳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	变异系数/%	有机碳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	变异系数/%	有机碳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	变异系数/%	有机碳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	变异系数/%
0—20	$8.32 \pm 2.20$ Aa	26.44	$6.88 \pm 1.65$ Aa	23.98	$7.78 \pm 0.89$ Aa	11.41	$12.27 \pm 4.27$ Aa	34.80
20—40	$5.00 \pm 2.05$ Bab	41.00	$4.56 \pm 0.97$ Bb	21.27	$4.32 \pm 0.15$ Bb	3.47	$8.46 \pm 4.87$ Aa	57.56
40—60	$2.70 \pm 0.78$ Ab	28.89	$2.09 \pm 0.12$ Ac	5.74	$2.10 \pm 0.81$ Ac	38.57	$4.74 \pm 2.43$ Ab	51.26
0—60	$16.03 \pm 4.91$ B	30.63	$14.29 \pm 1.59$ B	11.12	$14.30 \pm 0.83$ B	0.85	$25.47 \pm 10.83$ A	42.52

土壤有机碳密度垂直分布特征与有机碳含量随深度的变化相似，均表现为随土壤深度增加而减小，但土层间变化差异有所不同，原因是土壤有机碳密度与土壤密度有关。不同林分类型土层中植被根系密度不同，土壤孔隙状况和土壤密度也相应有所差异。0—20 cm 土层的有机碳密度最高，与土壤有机碳含量变化特征一致。不同林分类型间土壤有机碳密度在 0—20 cm 土层中表现为天然针阔混交林>长白落叶松天然林>天然阔叶混交林>长白落叶松人工林，但差异不显著。除天然针阔混交林外，其他 3 种林分类型 0—20 cm 土层有机碳密度显著高于 20—40 和 40—60 cm。

4 种林分类型土壤有机碳密度在各土层的分布比例不同，主要分布于浅层土壤中，0—40 cm 土层中有机碳密度分别占整个剖面的 80% 以上。由此可见，土壤有机碳主要集中在浅层，其中 0—20 cm 土层

的贡献最大，这主要是由于表层土壤覆盖大量森林凋落物，且根系密度较大，凋落物的数量和分解过程对表层土壤碳累积有直接的影响，凋落物淋洗水输入的有机碳量和凋落物分解都可以有效补给表土碳元素。

### 3.2 土壤有机碳与土壤性质的相关性分析

3.2.1 不同土层土壤有机碳与土壤性质的相关性分析 对土壤有机碳含量、有机碳密度和土壤部分理化性质进行了相关性分析(表 4)。从整个土壤剖面来看，土壤有机碳含量与自然含水率、全 N、全 K、速效 K 均呈极显著或显著正相关，其中与全氮量的相关系数最大，为 0.741，与有效 P 相关性不显著；土壤有机碳含量与土壤密度呈极显著负相关( $r = -0.618, p < 0.01$ )，与 pH 值呈显著负相关( $r = -0.327, p < 0.05$ )。土壤有机碳密度与土壤理化性质表现为一致的相关关系，此外还与土壤全 P 显著相关。

表 4 不同土层土壤有机碳与土壤性质的相关系数( $n=16$ )

土层/cm	土壤有机碳	土壤性质							
		土壤密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土壤含水量/%	pH 值	全 N/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全 P/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全 K/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效 P/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效 K/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
0—20	含量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	-0.501*	0.747**	-0.287	0.925**	0.208	0.485	-0.484	-0.070
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	-0.066	0.454	-0.435	0.753**	0.014	0.488	-0.539*	0.124
20—40	含量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.106	0.555*	-0.238	0.465*	0.286	0.253	-0.482	0.244
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	0.226	0.489	0.022	0.364*	0.218	0.002	-0.544*	0.222
40—60	含量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.090	0.176	-0.253	0.869**	-0.178	-0.213	0.032	-0.044
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	0.266	0.388	-0.246	0.912**	-0.259	-0.281	-0.068	-0.006
0—60	含量/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	-0.618**	0.632**	-0.327*	0.741**	0.226	0.456**	-0.188	0.334*
	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	-0.399**	0.479**	-0.317*	0.705**	0.273*	0.356*	-0.235	0.392**

注：\* 表示相关性显著( $p < 0.05$ )；\*\* 表示相关性极显著( $p < 0.01$ )。下同。

不同土层土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关性存在一定的差异。在 0—20 cm 土层，土壤有机

碳含量与土壤密度呈显著负相关，与土壤自然含水率和全 N 呈极显著正相关；在 20—40 cm 土层，其与土

壤自然含水量和全 N 呈显著正相关;在 40—60 cm 土层,土壤有机碳含量仅与全 N 呈极显著正相关。而土壤有机碳密度与土壤理化性质的相关性仅表现为在 0—20 和 20—40 cm 土层与土壤全 N 呈极显著和显著正相关关系,相关系数分别为 0.753 和 0.364,与有效 P 呈显著负相关;在 40—60 cm 土层土壤有机碳密度与全 N 呈极显著正相关。

3.2.2 不同林分类型土壤有机碳与土壤性质的相关性分析 不同林分类型由于植被覆盖状况、林分结构等差异导致林地土壤理化性质的变化,从而影响土壤

有机碳含量及其变异性。长白落叶松天然林土壤有机碳含量和有机碳密度与土壤密度呈极显著负相关,与全 N 呈极显著正相关,相关系数分别为 0.919 和 0.951;长白落叶松人工林土壤有机碳含量仅与土壤密度呈显著负相关,土壤有机碳密度与土壤密度呈极显著负相关,与速效 K 显著正相关;天然阔叶混交林有机碳含量和有机碳密度与土壤全 N、速效 K 呈极显著正相关,与土壤密度呈显著负相关,与全 P 也有显著正相关关系;天然针阔混交林土壤有机碳含量和有机碳密度与全 N 呈极显著正相关(表 5)。

表 5 不同林分类型土壤有机碳与土壤性质的相关系数( $n=12$ )

林分类型	土壤有机碳	土壤性质							
		土壤密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土壤含 水量/%	pH 值	全 N/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全 P/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全 K/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效 P/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效 K/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
长白落叶松 天然林	含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.798**	0.061	0.039	0.919**	0.004	0.125	-0.324	0.396
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	-0.847**	0.049	0.016	0.951**	0.013	0.181	-0.422	0.369
长白落叶松 人工林	含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.512*	0.039	-0.208	0.329	0.206	0.347	0.252	0.427
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	-0.761**	0.099	0.017	0.182	0.405	0.528	0.040	0.649*
天然阔叶 混交林	含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.713**	0.461	-0.667*	0.868**	0.690*	0.531	0.391	0.823**
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	-0.850**	0.442	-0.737**	0.967**	0.704*	0.615*	0.551	0.764**
天然针阔 混交林	含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.316	0.477	-0.178	0.820**	0.369	0.479	-0.080	0.528
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	-0.277	0.530	-0.035	0.871**	0.315	0.415	-0.087	0.478

相关分析反映出土壤有机碳与土壤各理化性质间存在密切联系,土壤理化性质可通过影响凋落物分解、微生物活动和有机碳的矿化速率、有机碳组分来间接影响土壤有机碳密度<sup>[13]</sup>,尤其是土壤氮素的富集可促进林下植被生物量的积累和凋落物的生成,从而有利于土壤有机碳的积累。

### 3.3 土壤有机碳与土壤性质的回归分析

利用回归分析可以研究变量之间变动比例关系,并建立经验性的回归方程。因此,用逐步回归分析法建立土壤有机碳和土壤性质指标间的回归方程,找出对土壤有机碳有显著影响的土壤因子;利用比较标准化回归系数法,从影响因素中挑选出对其贡献大的变量,确定主导因子。土壤有机碳含量与土壤性质的标准多元回归方程为:

$$Y = -9.131 + 10.123X_1 + 1.207X_2 + 0.123X_3 \quad (3)$$

式中:Y——土壤有机碳含量( $\text{g}/\text{kg}$ );  $X_1$ ——土壤全 N( $\text{g}/\text{kg}$ );  $X_2$ ——土壤含水量(%);  $X_3$ ——土壤速效 K( $\text{mg}/\text{kg}$ )。回归分析结果表明,每个变量的显著水平都 $<0.001$ ,回归关系极显著,可以选作控制土壤有机碳主要变异的土壤性质因子。该方程在  $p < 0.05$  时,多元回归决定系数  $R^2 = 0.8604$ ,可以反映出

土壤有机碳和土壤性质的关系。

由多元回归方程可以看出,对土壤有机碳含量影响最大的为土壤全 N,在一定程度上,土壤氮素水平会影响土壤中有有机碳的含量。土壤中碳和氮的相互关系取决于土壤微生物的活性影响,氮素的增加可以提高土壤微生物的活性,从而加速土壤有机质的分解<sup>[14]</sup>。本研究对不同林分类型土壤有机碳含量和全 N 进行回归分析(图 1),分别得到一元线性和三次多项式拟合模型,说明土壤碳素含量与氮素积累有直接联系,两者相互促进、相互制约,具有较好的耦合关系。

## 4 结论与讨论

目前国内关于森林土壤有机碳相关研究较多,但其结果存在一定的差异。李克让等<sup>[15]</sup>估算落叶针叶林地土壤有机碳储量为  $270 \text{ t}/\text{hm}^2$ ,落叶阔叶林地为  $180.4 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。张城等<sup>[16]</sup>对东部地区不同土壤和林分类型土壤有机碳储量进行了计算,得到长白山地区 3 种土壤类型、4 种植被类型土壤有机碳密度在  $14.44 \sim 24.41 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。本研究结果表明,长白山东部 4 种林分类型土壤有机碳密度为  $14.20 \sim 25.47 \text{ kg}/\text{m}^2$ ,大于全国土壤有机碳密度平均值,而低于周玉荣等<sup>[5]</sup>

的研究结果,产生这种差异的主要原因是研究方法、研究尺度、区域气候、林分状况、土壤类型等因素存在

较大差异。因此,对不同林分类型土壤有机碳密度加以研究十分必要。

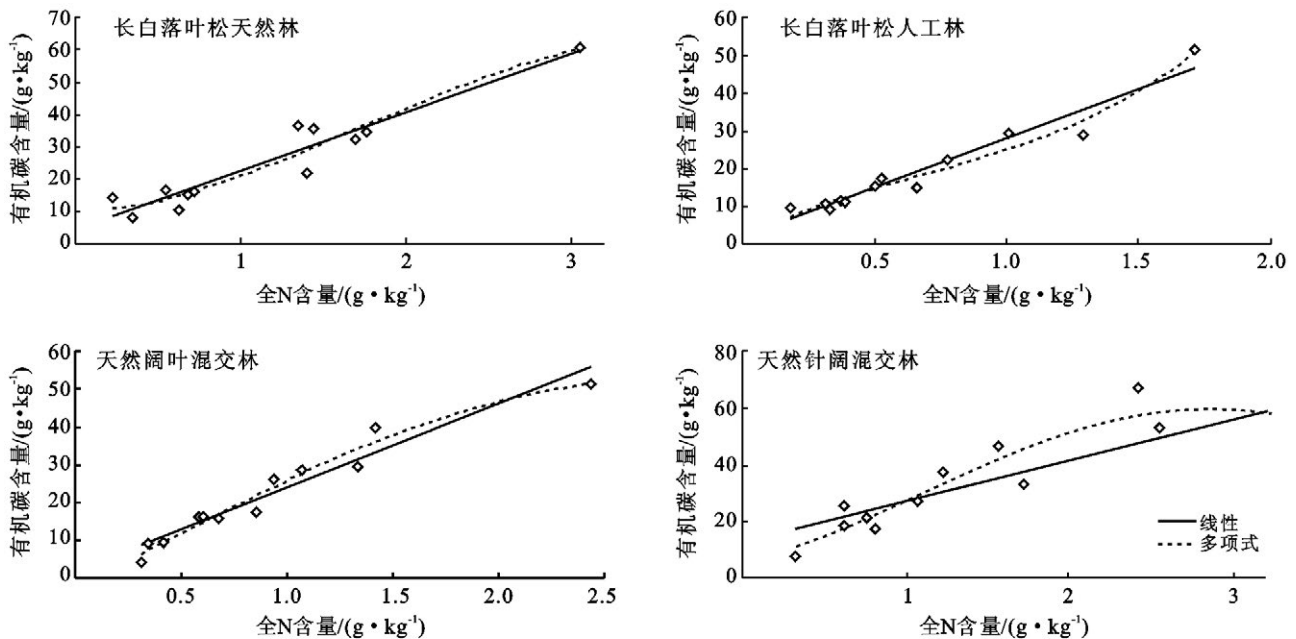


图 1 不同林分类型土壤有机碳含量与土壤全 N 回归分析

4 种林分类型土壤有机碳含量与有机碳密度表现出相似的规律,从大到小依次为天然针阔混交林>长白落叶松天然林>天然阔叶混交林>长白落叶人工林,其中针阔混交林土壤有机碳密度明显较高,其平均碳密度分别是另外 3 种林分类型的 1.5~1.8 倍。4 种林分类型土壤有机碳密度和土壤有机碳含量均随土壤深度的增加而减少,4 种林分类型 0—40 cm 土层中有机碳密度分别占整个剖面的 80% 以上。土壤有机碳含量和有机碳密度随土壤深度的增加而降低的垂直分布特征,与许多研究结果一致<sup>[17-18]</sup>。长白落叶松人工林 0—20 cm 土壤有机碳密度最小( $6.88 \pm 1.65 \text{ kg/m}^2$ ),其垂直变化幅度为 69.62%,这与其表层土壤遭受人为干扰较频繁以及土壤表层碳积累较少有关<sup>[17]</sup>。地表枯枝落叶腐殖质化过程受到多种因素的影响,如林地温度、水分、植物、微生物、人为活动及各种因素的相互作用,在众多影响因子中人为活动对其有较大影响。天然林一般是自然恢复起来的,已形成较为稳定的群落结构,并且人类对其土壤的扰动较小,而长白落叶松人工林,林下植被较少,群落结构单一,对土壤的扰动较大,从而使得天然林有机碳含量大于人工林。可见,保护和恢复好天然林,减少人为干扰和破坏,对森林土壤有机碳研究具有重要的意义。

森林所承受的人为干扰程度不同,其土壤有机碳

密度亦不同,对于研究区的长白落叶松天然林和天然针阔混交林来说,两者起源时间基本一致,但由于长白落叶松天然林受到的人为干扰较严重,地表有机质累积量以及土壤有机碳密度均小于天然针阔混交林。另外,由于混交林比纯林具有较高生产力导致其土壤碳贮量比纯林高,这与其他学者的研究结果一致<sup>[19]</sup>。也有研究发现土壤有机碳密度随土壤深度增加而增大<sup>[13]</sup>,这主要是由于有机碳密度的计算还与土壤密度和石砾含量有关;林地土壤 pH 值、黏粒组成等因素也会导致地上植被生长情况不同,从而间接影响土壤有机碳含量的空间结构特征<sup>[20-21]</sup>。

相关性分析得出,整个土壤剖面土壤有机碳含量与土壤含水量、全 N、全 P、全 K、速效 K 均呈极显著或显著正相关,其中与全 N 的相关系数最大,土壤有机碳含量与土壤密度呈极显著负相关。在不同土层,土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关性存在一定的差异,但都与土壤全 N 呈显著或极显著正相关。土壤肥力与土壤有机质含量呈显著正相关关系;随土壤有机碳含量增加,土壤密度、pH 值降低<sup>[22]</sup>,另外,土壤持水性能、土壤质地、温度等也是影响土壤有机碳分布的重要因素<sup>[23]</sup>。4 种林分类型土壤有机质和全 N 表现出显著的相关性,说明土壤氮素积累与有机物质的输入密切相关。

逐步多元回归分析结果表明,对土壤有机碳含量贡献较大的变量为土壤全 N、土壤含水量和土壤速效

K含量。建立的最优回归方程,其回归关系极显著。4种林分类型土壤有机碳含量与全N的耦合方程表明,土壤有机碳含量与全N呈极显著相关,这与前人的研究结论相同<sup>[8,24]</sup>,拟合的一元线性和三次多项式回归方程的精度基本在90%以上。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil [J]. *Nature*, 1990,348(15):232-234.
- [2] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 1991, 351(6324): 304-306.
- [3] Houghton R A. Land-use change and the carbon cycle [J]. *Global Change Biology*, 1995,1(4):275-287.
- [4] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*,2000,55(5):533-544.
- [5] 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.
- [6] Bernoux M, Conceicao S, Volkoff B. Brazil's soil carbon stock [J]. *Soil Science*, 2002,33(1):77-93.
- [7] Schwartz D, Namri M. Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo [J]. *Global and Planetary Change*, 2002,33(1/2):77-93.
- [8] 杜满意,范少辉,漆良华,等. 不同类型毛竹林土壤碳、氮特征及其耦合关系[J]. *水土保持学报*,2010,24(4):198-202.
- [9] Tatenno M, Chapin III F S. The logic of carbon and nitrogen interactions in terrestrial ecosystems [J]. *The American Naturalist*, 1997,149(4):723-744.
- [10] 李忠,孙波,林心雄. 我国东部土壤有机的密度及转化的控制因素[J]. *地理科学*,2001,21(4):301-307.
- [11] 孙维侠,史学正,于东升,等. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究[J]. *土壤学报*,2004,41(2):298-301.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [13] 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):2875-2882.
- [14] 张社奇,王国栋,田鹏,等. 黄土高原刺槐林地土壤微生物的分布特征[J]. *水土保持学报*,2004,18(6):128-132.
- [15] 李克让,王绍强,曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学*,2003,33(1):72-80.
- [16] 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.
- [17] 方精云,刘国华,朱彪,等. 北京东灵山三种温带森林生态系统的碳循环[J]. *中国科学:D辑*,2006,36(6):533-543.
- [18] 陈亮中,谢宝元,肖文发,等. 三峡库区主要森林植被类型土壤有机碳贮量研究[J]. *长江流域资源与环境*,2007,16(5):640-640.
- [19] 何志斌,赵文智,刘鹤,等. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素[J]. *生态学报*,2006,26(8):2572-2577.
- [20] Christian P G, Michael G R, Robert M H, et al. Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates [J]. *Soil Science Society American Journal*, 2001,65(4):1272-1279.
- [21] 徐尚平,陶澍,曹军. 内蒙古土壤 pH 值、黏粒和有机质含量的空间结构特征[J]. *土壤通报*,2001,32(4):145-148.
- [22] Aerts R. Climate leaf litter chemistry and litter decomposition in terrestrial ecosystem: A triangular relationship [J]. *Oikos*, 1997,79(3):439-449.
- [23] Luo Yiqi, Su Bo, Currie W S, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide [J]. *Bioscience*, 2004,54(8):731-739.
- [24] 吴志祥,谢贵水,陶忠良,等. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征[J]. *生态环境学报*,2009,18(4):1484-1491.