

不同林型土壤有机碳及腐殖质组成的分布特征

贾树海¹, 王薇薇², 张日升^{1,2}

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110000; 2. 辽宁省章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测站, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为探讨不同类型人工固沙林下土壤有机碳的差异, 以辽宁省章古台沙地 5 种林型下土壤为研究对象, 运用统计学的方法对 0—5, 5—10, 10—20, 20—40 cm 土层有机碳、全氮、腐殖质组分分布特征进行比较分析。结果表明: 在各林型 0—40 cm 土层上, 土壤有机碳含量变化特征为樟子松纯林(4.72 g/kg) > 怀槐樟子松(4.48 g/kg) > 榆树樟子松(4.38 g/kg) > 云杉樟子松(4.21 g/kg) > 杨树纯林(3.95 g/kg) > 对照(1.88 g/kg); 有机碳储量表现为怀槐樟子松(20.00 t/hm²) > 樟子松纯林(19.92 t/hm²) > 榆树樟子松(19.06 t/hm²) > 云杉樟子松(17.31 t/hm²) > 杨树纯林(16.61 t/hm²) > 对照(8.44 t/hm²); 经腐殖质组分分析发现土壤腐殖质碳含量表现为云杉樟子松(2.04 g/kg) > 榆树樟子松(1.93 g/kg) > 樟子松纯林(1.74 g/kg) > 杨树纯林(1.65 g/kg) > 怀槐樟子松(1.58 g/kg) > 对照(0.75 g/kg)。各林型土壤有机碳含量与全氮、腐殖质碳、胡敏酸、富里酸均呈极显著的正相关关系。

关键词: 土壤有机碳; 不同林型; 统计学; 风沙土; 腐殖质组分

中图分类号: S153.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0189-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.031

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Humus Composition in Different Forest Types

JIA Shuhai¹, WANG Weiwei², ZHANG Risheng^{1,2}

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110000; 2. The National

Positioning Observation Station of Horqin Sandy Land in Zhanggutai of Liaoning Province, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: In order to investigate the difference of artificial sand-fixation forest models on soil organic carbon (SOC), taking the soil as the research object under the 5 forest models in Zhanggutai sandy land of Liaoning province. We compared the distribution characteristics of SOC, nitrogen, and humus in 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm, and 20—40 cm soil layers through statistical methods. The results showed that the change of SOC content was as follows: *Pinus sylvestris* pure forest (4.72 g/kg) > Mixed forests of *Maackia amurensis* and *Pinus sylvestris* (4.48 g/kg) > Mixed forests of *Elm* and *Pinus sylvestris* (4.38 g/kg) > Mixed forests of *Spruce* and *Pinus sylvestris* (4.21 g/kg) > Poplar forests (3.95 g/kg) > CK (1.88 g/kg) in 0—40 cm soil layer; The comparison of organic carbon storage was expressed as: Mixed forests of *Maackia amurensis* and *Pinus sylvestris* (20.00 t/hm²) > *Pinus sylvestris* (19.92 t/hm²) > Mixed forests of *Spruce* and *Pinus sylvestris* (19.06 t/hm²) > Mixed forests of *Elm* and *Pinus sylvestris* (17.31 t/hm²) > Poplar forests (16.61 t/hm²) > CK (8.44 t/hm²); The analysis of humus components found that soil humus carbon content was expressed as: Mixed forests of *Spruce* and *Pinus sylvestris* (2.04 g/kg) > Mixed forests of *Elm* and *Pinus sylvestris* (1.93 g/kg) > *Pinus sylvestris* (1.74 g/kg) > Poplar forests (1.65 g/kg) > Mixed forests of *Maackia amurensis* and *Pinus sylvestris* (1.58 g/kg) > CK (0.75 g/kg). There were significant positive correlations between SOC and TN, HC, HA and FA.

Keywords: soil organic carbon; different forest models; statistics; sandy soil; humus component

土壤有机碳(氮)是判定土壤质量的重要指标之一,在反映土壤养分状况、保护森林土壤生态环境、促进森林生态系统的可持续发展方面有着重要作用^[1-2]。土壤腐殖质由胡敏酸、富里酸和胡敏素等组成,是土壤有机质的主体^[3]。窦森等^[4]研究表明,由

于腐殖质在土壤有机碳中不易被微生物分解,具有明显的微生物抗性,是有机碳库中比较稳定的组分,其含量和组成可以反映土壤结构的形成,研究土壤有机碳和腐殖质组分的变化特征对森林土壤碳平衡具有非常重要的作用^[3-5]。高杰等^[6]指出土壤有机碳含

量主要取决于植被枯枝落叶的归还量和分解速率,而植被类型、气候特点以及土壤性质的不同,均会导致土壤有机碳含量的差异;王迎菊等^[7]研究了人工防护林对风沙土有机碳的影响,指出樟子松(*Pinus sylvestris*)是我国三北地区主要优良造林树种之一,因其抗寒、耐旱、生长迅速的优势,多种植在土层贫瘠、水土流失多发、立地条件艰苦的地段;段海侠^[8]研究了樟子松固沙林地表环境要素变化的规律,表示风沙土的特征是成土常受到风蚀和沙压,很不稳定,随沙地的生物措施的实施,土壤有机质含量逐渐增加即增加肥力与水分,使植被逐步稳定生长,也能成为农林牧用地。

辽宁省章古台沙地于 20 世纪 50 年代引进了樟子松并取得了良好的防风固沙效果,国内大量学者都开展了该地区的生态环境效应以及气候和土壤水热状况的相关研究^[8]。然而缺乏对该地区造林后土壤有机碳和腐殖质的特征研究。因此,本文以林龄 7 年的樟子松纯林为对照,以相同的立地条件为前提,选取 5 种林型下土壤为研究对象,分析不同林型下土壤有机碳及其腐殖质组分的变化特征,探讨不同林型的土壤固碳能力,为章古台地区人工固沙林的合理经营和格局优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区在辽宁省章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测站(42°43'N,122°12'E)周围,位于辽宁省西北,彰武县北部,科尔沁沙地东南边缘。属于亚湿润干旱区,温带半干旱半湿润气候,年降水量在 450~550 mm 之间,多集中于 6—8 月份。年蒸发量为 1 200~

1 450 mm 之间,春季多大风,年平均风速 4.5 m/s,温差较大,年均温 5.7 ℃,平均最高温 35.2 ℃,平均最低温-29.5 ℃,平均海拔 226.5 m,土壤类型以风沙土为主,土壤质地为砂土,养分含量较低。地貌特征是坨甸相间、马蹄洼地纵横。土地利用以林地为主,且主要以人工樟子松纯林为主。

1.2 采样点地上植被情况

土壤样品取自辽宁省章古台沙地,该地区主要的优势树种为樟子松、云杉(*Spruce*)、怀槐(*Maackia amurensis*)、榆树(*Elm*)、杨树(*Poplar*)等。林下植被多为黄蒿(*Scoparia*)、赖草(*Leymus secalinus*)、蒺藜(*Puncture vine*)、苔草(*Carex lanceolata*)、狗尾巴草群落(*Setaria viridis*)等。各林型同为 1982 年种植,造林面积相同。

1.3 研究方法

于 2016 年 11 月初在研究区内完成植被情况调查和土壤样品采集工作,在所选定的 5 种林型中选取代表性的地段设置 100 m×100 m 的样地,进行地上植被调查,测量枯枝落叶量、树高、胸径等相关指标(表 1);土壤按“S”形布设 9 个采样点,去掉表面枯枝落叶后用土钻分别以 0—5,5—10,10—20,20—40 cm 的间距分层采集土壤样品,每 3 个采样点按相同土层土壤混合均匀为 1 个样本,存放于样品袋内密封,带回实验室风干、研磨、过筛处理后进行相关土壤理化和生物指标分析,每个样本 3 次重复。土壤样品理化分析方法参照《土壤调查实验室分析方法》^[9]:采用环刀法测量土壤容重,样品经元素分析仪(Element high TOC II,德国)测定土壤有机碳和全氮含量,重铬酸钾氧化法测定土壤腐殖质组分等。

表 1 土壤采样地不同林型林分基本特征

林分特征	对照	樟子松纯林	怀槐樟子松	榆树樟子松	云杉樟子松	杨树纯林
造林面积/hm ²	1	1	1	1	1	1
造林密度/(株·hm ⁻²)	910	320	670	550	530	430
草本盖度/%	90	80	85	87	86	88
平均树高/m	1.99	8.47	6.88/8.22	8.12/9.8	5.46/9.5	9.85
胸径/cm	7.41	18.52	4.59/13.88	6.04/15.83	4.69/17.2	18.91
枯枝落叶重量/(t·hm ⁻²)	2.51	3.66	4.07	3.94	3.16	4.51

1.4 土壤有机碳、全氮储量计算

土壤有机碳(氮)密度指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳(氮)储量,它以土地体积为基础,排除面积和深度的影响,所以是评价和衡量有机碳(氮)储量的重要指标^[10]。土壤碳储量为碳密度与其面积的乘积,本研究区 5 种林型面积同为 1 hm²。100 cm 的土层有机碳和全氮储量(t/hm²)均按:

$$SOCS=\sum_{i=1}^n C_i \times D_i \times E_i \times (1-G_i) \times 10 \quad (1)$$

式中:*i* 为土层代号;*C_i* 为 *i* 层有机碳(氮)含量(g/kg);

D_i 为该层土壤容重(g/cm³),*E_i* 为该层土层厚度;*G_i* 为直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%)。本研究区土壤样本无粒径大于 2 mm 的石砾,所以 *G_i*=0。

1.5 统计分析

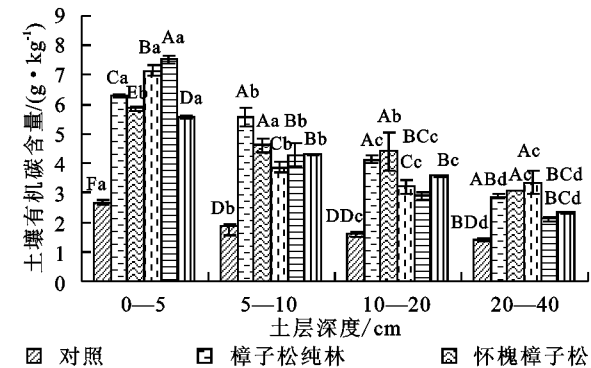
用 SPSS 17.0 进行数据处理分析,对不同营林方式、不同土层各指标进行单因素方差分析,Duncan 法进行多重比较不同林型、不同土层有机碳等指标的显著性差异(*P*<0.05),有机碳和全氮以及腐殖质组分相关关系用 Pearson 相关性分析法,逐步回归进行有

机碳和全氮和腐殖质碳的线性回归分析。图表中的结果均为 3 次重复的平均值;Excel 2010 制作图表。

2 结果与分析

2.1 不同林型土壤有机碳、全氮含量比较

在垂直剖面上,不同林型土壤有机碳和全氮含量变化总体表现为表层土壤有机碳和全氮含量最高(有



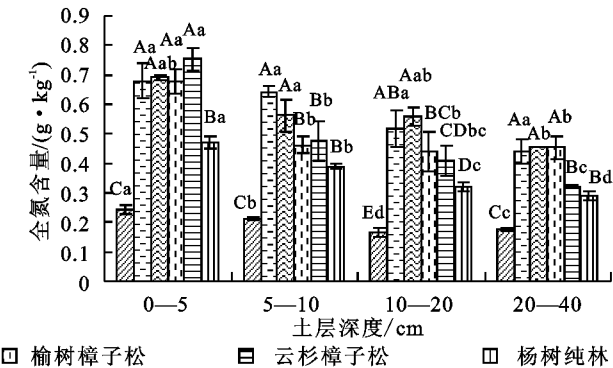
注:图柱上方不同大写字母表示同一土层不同林型土壤样本差异达 5% 显著水平,不同小写字母表示同一林型不同土层土壤样本差异达 5% 显著水平。下同。

图 1 不同林型土壤有机碳和全氮含量

在 0—5 cm 的土层上,土壤有机碳含量在 2.63~7.54 g/kg,表现为云杉樟子松>榆树樟子松>樟子松纯林>怀槐樟子松>杨树纯林,差异性显著($P<0.05$);在 5—10 cm 的土层上,土壤有机碳含量在 1.85~5.57 g/kg,表现为樟子松纯林>怀槐樟子松和杨树纯林>云杉樟子松>榆树樟子松,其中,樟子松纯林和怀槐樟子松土壤有机碳含量在该土层上高于杨树纯林和云杉樟子松、榆树樟子松,差异性显著($P<0.05$);在 10—20 cm 的土层上,土壤有机碳含量在 1.63~4.4 g/kg,表现为怀槐樟子松>樟子松纯林>杨树纯林>榆树樟子松>云杉樟子松,其中怀槐樟子松和樟子松纯林的林下土壤有机碳含量高于杨树纯林、云杉樟子松和榆树樟子松,差异性显著($P<0.05$);在 20—40 cm 的土层上,土壤有机碳含量在 1.42~3.33 g/kg,表现为榆树樟子松>怀槐樟子松>樟子松纯林>杨树纯林>云杉樟子松,其中榆树樟子松、怀槐樟子松和樟子松纯林的林下土壤有机碳含量明显高于杨树纯林、云杉樟子松,差异性显著($P<0.05$)。综合分析,0—40 cm 的土层上,土壤有机碳含量在 1.88~4.72 g/kg 之间,其中樟子松纯林模式下土壤有机碳含量(4.72 g/kg)最高(图 1),其次是怀槐樟子松(4.48 g/kg)、榆树樟子松(4.38 g/kg)、云杉樟子松(4.21 g/kg)、杨树纯林(3.95 g/kg)和对照组(1.88 g/kg)。其中,樟子松纯林模式下土壤有机碳含量在各土层深度分布较稳定,而榆树樟子松和云杉樟子松土壤有机碳含量在 10—40 cm 的土层上占有优势,但降幅较大,均达到 45% 以上。

从图 1 还可看出,不同林型的土壤全氮含量变化

机碳 7.54 g/kg,全氮 0.75 g/kg),占到整个土壤剖面的 40% 左右,差异性显著。随着土层深度的增加,土壤有机碳和全氮含量逐渐降低、差异性亦逐渐降低,且都高于对照的有机碳和全氮含量(图 1),各林型土壤成土母质相同,此时林型的不同对土壤有机碳含量的影响不大^[11]。



趋势总体与土壤有机碳含量相一致。在 0—5 cm 的土层上,土壤全氮含量在 0.24~0.75 g/kg,表现为云杉樟子松>怀槐樟子松>樟子松纯林>榆树樟子松>杨树纯林,其中,云杉樟子松、怀槐樟子松、樟子松纯林和榆树樟子松的林下土壤全氮含量差异不显著($P>0.05$),分布较均匀;在 5—10 cm 的土层上,土壤全氮含量在 0.21~0.64 g/kg,表现为樟子松纯林>怀槐樟子松>云杉樟子松>榆树樟子松>杨树纯林。另外,樟子松纯林、怀槐樟子松和云杉樟子松、榆树樟子松、杨树纯林的林下土壤全氮含量有着显著差异($P<0.05$);在 10—20 cm 的土层上,土壤全氮含量在 0.16~0.56 g/kg,表现为怀槐樟子松>樟子松纯林>榆树樟子松>云杉樟子松>杨树纯林,且各林型的林下土壤全氮含量有着显著差异($P<0.05$);在 20—40 cm 的土层上,土壤全氮含量范围在 0.18~0.45 g/kg,表现为怀槐樟子松=榆树樟子松>樟子松纯林>云杉樟子松>杨树纯林;怀槐樟子松、榆树樟子松和樟子松纯林的林下土壤全氮含量明显高于云杉樟子松和杨树纯林($P<0.05$)。综合分析,0—40 cm 土层上,樟子松纯林的林下土壤全氮含量(2.28 g/kg)最高且较稳定,其次是怀槐樟子松(2.27 g/kg)、榆树樟子松(2.03 g/kg)、云杉樟子松(1.96 g/kg)杨树纯林(0.29 g/kg)和对照(0.8 g/kg)。

2.2 不同林型土壤有机碳、全氮储量垂直分布特征

土壤有机碳含量及容重受植被类型、根系分布、凋落物分解程度以及人为干扰放牧等因素影响都在发生变化,土壤碳密度也呈现一定的差异^[12],表 2 为各林型的土壤容重。

表 2 不同林型下土壤容重

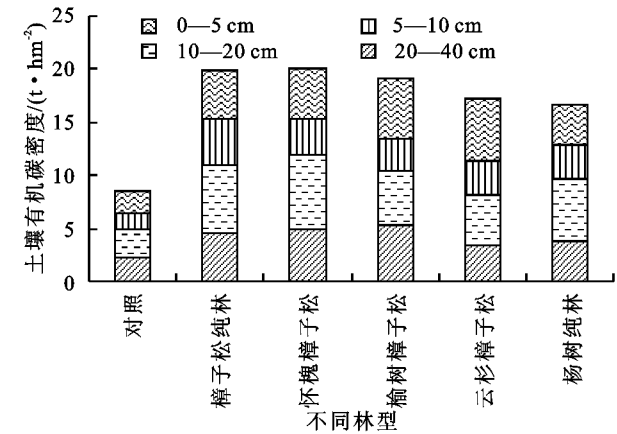
单位: g/cm³

土层深度/cm	对照	樟子松纯林	怀槐樟子松	榆树樟子松	云杉樟子松	杨树纯林
0—5	1.57+0.01Ad	1.47+0.02Bc	1.52+0.02ABc	1.55+0.01ABb	1.56+0.01ABc	1.31+0.10Cb
5—10	1.59Ac	1.53+0.03Bb	1.57+0.01Ab	1.57+0.02Ab	1.58+0.02Ab	1.57+0.03Aa
10—20	1.6+0.01ABb	1.57+0.01Ca	1.59+0.02ABab	1.6+0.01ABa	1.59+0.01ABb	1.61+0.01Aa
20—40	1.61+0.01Ba	1.58+0.02Ca	1.61+0.01Ba	1.61+0.01Ba	1.62+0.01Ba	1.64+0.01Aa

注:表中数字后不同大写字母表示同一土层不同林型土壤样本差异达 5% 显著水平,不同小写字母表示同一林型不同土层土壤样本差异达 5% 显著水平。下同。

土壤容重是衡量土壤孔隙度和紧密度的重要指标,其大小易受土壤质地、结构、根系密度、枯落物归还量、放牧践踏等影响^[13]。表 2 显示各林型土壤容重随着土层深度增加而增大,对照的各土层深度的土壤容重存在显著差异($P<0.05$),变化范围为 1.57~1.61 g/cm³,其余 5 种林型各土层土壤容重均低于对照,在 0—5 cm 土层上杨树纯林土壤容重最小,5—20 cm 土层上樟子松纯林土壤容重最小,各林型对各土层土壤容重的改善深度分别是对照 5 cm,樟子松纯林 40 cm,怀槐樟子松 20 cm,榆树樟子松 10 cm,云杉樟子松 20 cm,杨树纯林 10 cm。

从图 2 可以看出,不同林型下土壤有机碳储量变化趋势表现为怀槐樟子松(20 t/hm²)>樟子松纯林(19.92



不同林型下土壤全氮储量的变化趋势特征为怀槐樟子松(2.59 t/hm²)>樟子松纯林(2.47 t/hm²)>榆树樟子松(2.32 t/hm²)>云杉樟子松(2.13 t/hm²)>杨树纯林(1.60 t/hm²)>对照(0.91 t/hm²)(图 2)。这与土壤有机碳储量变化大致相同,其中,榆树樟子松在 20—40 cm 土层上全氮储量(0.73 t/hm²)高于上层土壤全氮储量(0.7 t/hm²),其原因有待进一步研究。

2.3 不同林型土壤腐殖质碳含量比较

土壤腐殖质碳是土壤有机碳的主体,对提高土壤肥力有重要作用,也是衡量土壤发育和结构稳定性的重要指标。其中胡敏酸最为活跃,对土壤结构的形成和养分的保护有着积极作用^[18]。图 3 显示云杉樟子松土壤腐殖质碳含量最高为 2.04 g/kg(富里酸 1.32 g/kg,胡敏酸 0.72 g/kg),是对照(富里酸 0.58 g/

t/hm²)>榆树樟子松(19.06 t/hm²)>云杉樟子松(17.31 t/hm²)>杨树纯林(16.61 t/hm²)>对照(8.44 t/hm²),造成 5 种林型下土壤有机碳储量差异的原因与植被类型、枯枝落叶量、土壤容重以及人为干扰紧密相关;基本符合王凯等、宋娅丽等的研究结论:阔叶林有机碳储量高于针叶林有机碳储量^[14-15],怀槐樟子松的有机碳储量高于樟子松纯林和云杉樟子松。其中,怀槐属于落叶阔叶林,云杉、樟子松属于针叶林,怀槐凋落物易于分解^[16-17]。表 1 中涉及各林型下枯枝落叶量为杨树纯林>怀槐樟子松>榆树樟子松>樟子松纯林>云杉樟子松>对照,为该结论提供了数据支持。在 10—20 cm 的土层上土壤有机碳储量均高于其他土层,占土壤全剖面有机碳储量的 26.71%~34.94%。

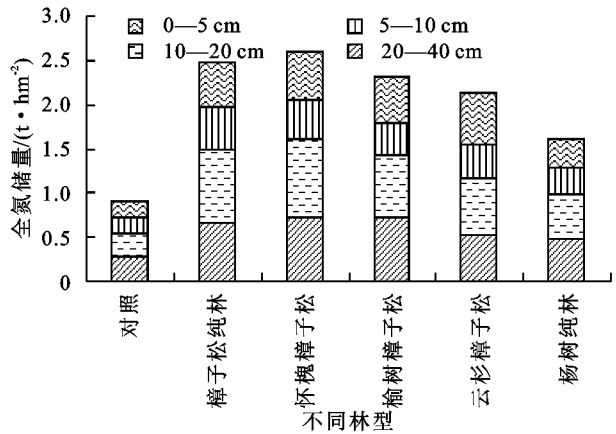


图 2 不同林型土壤有机碳、全氮储量

kg,胡敏酸 0.17 g/kg)的 3.2 倍,5 种林型土壤腐殖质碳含量变化趋势为云杉樟子松(2.04 g/kg)>榆树樟子松(1.93 g/kg)>樟子松纯林(1.74 g/kg)>杨树纯林(1.65 g/kg)>怀槐樟子松(1.58 g/kg)>对照(0.75 g/kg)。各个林型间腐殖质碳含量差异显著($P<0.05$),且土壤富里酸均高于胡敏酸。

2.4 不同林型土壤有机碳与腐殖质相关性分析

从表 3 可以看出,土壤胡敏酸占有有机碳的百分比大小为云杉樟子松(1.55)>榆树樟子松(1.51)>樟子松纯林(1.47)>杨树纯林(1.42)>怀槐樟子松(1.34)>对照(0.06)。土壤胡敏酸与富里酸之比能反映土壤腐殖物质聚合程度,比值越大土壤腐殖物质的聚合度也越高,质量越好^[19]。本研究土壤腐殖物质聚合程度表现为怀槐樟子松(3.95)>樟子松纯林(3.11)>榆树樟子松(2.97)>云杉樟子松(2.83)>对照(0.29)。

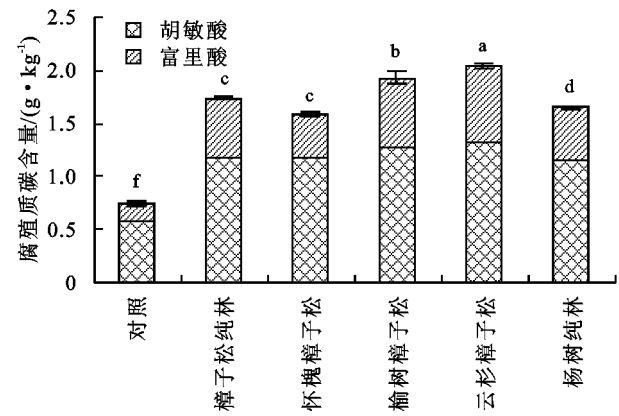


图 3 不同林型土壤腐殖质碳含量

表 3 不同林型土壤有机碳和腐殖质组分情况

林型	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	腐殖质碳/ (g·kg ⁻¹)	胡敏酸/ (g·kg ⁻¹)	富里酸/ (g·kg ⁻¹)	胡敏酸/ 有机碳	富里酸/ 有机碳	胡敏酸/ 富里酸
对照	2.63	0.24	0.75	0.17	0.58	0.06	0.22	0.29
樟子松纯林	6.30	0.68	1.74	0.56	1.18	1.47	0.47	3.11
怀槐樟子松	5.86	0.69	1.58	0.40	1.18	1.34	0.34	3.95
榆树樟子松	7.14	0.68	1.93	0.65	1.28	1.51	0.51	2.97
云杉樟子松	7.54	0.75	2.04	0.72	1.32	1.55	0.55	2.83
杨树纯林	5.57	0.47	1.65	0.49	1.16	1.42	0.42	0.42

表 4 土壤有机碳、全氮、腐殖质碳及其组分的相关性

项目	有机碳	全氮	腐殖质碳	胡敏酸	富里酸
有机碳	1				
全氮	0.939**	1			
腐殖质碳	0.993**	0.907*	1		
胡敏酸	0.967**	0.842*	0.971**	1	
富里酸	0.976**	0.921**	0.985**	0.915*	1

注: * 表示在 0.05 水平上差异显著; ** 表示在 0.01 水平上差异显著。

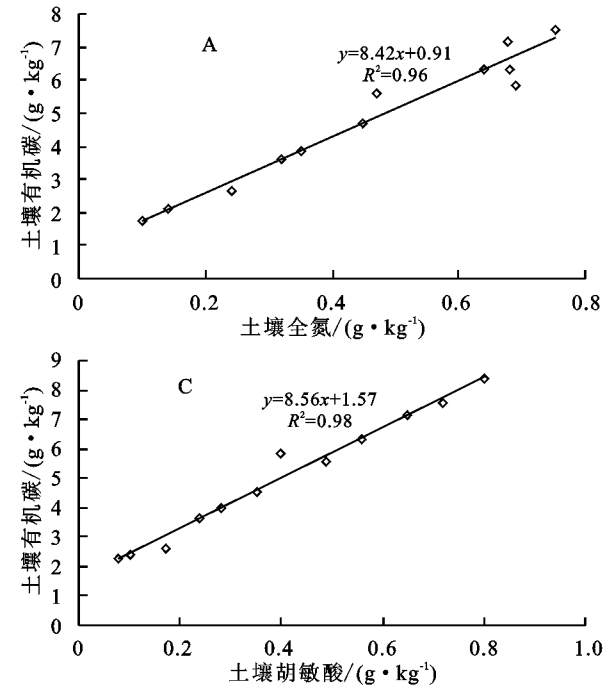
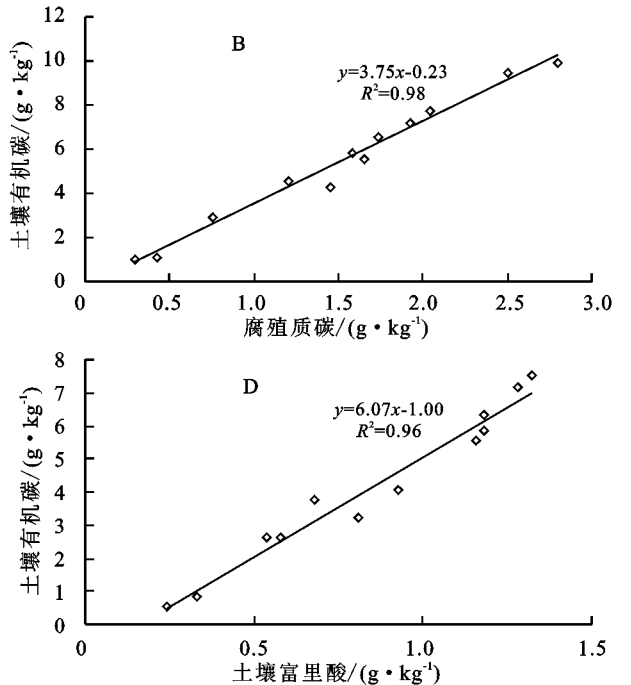


图 4 土壤有机碳/全氮与腐殖质组分回归关系

对不同林型下土壤有机碳、全氮和腐殖质碳,进行线性回归分析分别求得回归方程(表 5)。由表 5

对不同林型下土壤有机碳、全氮与土壤腐殖质组分进行相关性分析(表 4),土壤有机碳含量与全氮、腐殖质碳、胡敏酸、富里酸均呈极显著的正相关关系($P<0.01$),说明腐殖化程度越高对土壤有机碳稳定性越好;土壤全氮与腐殖质碳、胡敏酸呈显著正相关关系($P<0.05$),与富里酸呈极显著正相关关系($P<0.01$)。可见土壤全氮对土壤有机碳各组分的形成存在密切关系,对提高土壤肥力具有重要作用。腐殖质碳与胡敏酸、富里酸均呈极显著性正相关关系($P<0.01$),土壤腐殖质组分含量的高低取决于土壤有机碳含量,同时土壤腐殖质组分又可以指示土壤肥力以及土壤稳定性的变化情况。

土壤中氮的累积和消耗取决于土壤有机碳的积累和分解^[20],图 4 显示出了土壤有机碳与全氮分布规律具有极强的相似性,呈线性正相关关系($R^2=0.96, P<0.01$),土壤有机碳与腐殖质碳也表现一致规律,呈线性正相关关系($R^2=0.98, P<0.01$),土壤有机碳与土壤胡敏酸、富里酸均呈线性正相关关系($R^2=0.98, P<0.05; R^2=0.96, P<0.05$)。



可知,各林型土壤有机碳与全氮、腐殖质碳均呈较好的线性正相关关系($P<0.05$),腐殖质组分的稳定形

成对土壤的固碳能力的改善具有正面作用。

表 5 不同林型土壤有机碳与全氮/腐殖质碳的回归方程

样地	组分	回归方程	R^2	P
对照	有机碳与全氮	$y=12.13x-0.53$	0.75	0.01
	有机碳与腐殖质碳	$y=3.09x+0.27$	0.98	0.03
樟子松纯林	有机碳与全氮	$y=5.78x+1.45$	0.82	0.02
	有机碳与腐殖质碳	$y=3.09x+0.27$	0.98	0.03
怀槐樟子松	有机碳与全氮	$y=8.10x-0.12$	0.67	0.01
	有机碳与腐殖质碳	$y=3.70x+0.08$	0.99	0.01
榆树樟子松	有机碳与全氮	$y=12.76x-2.10$	0.74	<0.01
	有机碳与腐殖质碳	$y=3.69x+0.17$	0.99	0.02
云杉樟子松	有机碳与全氮	$y=12.39x-1.87$	0.95	0.01
	有机碳与腐殖质碳	$y=3.61x+0.14$	0.99	0.01
杨树纯林	有机碳与全氮	$y=15.97x-1.95$	0.91	0.02
	有机碳与腐殖质碳	$y=3.20x+0.45$	0.95	0.02

3 讨论

3.1 不同林型土壤有机碳氮含量差异原因分析

5 种林型的土壤有机碳、全氮含量均随着土层深度的增加而降低,降幅较大^[21],这与前人的研究结果一致。这种现象可能与枯枝落叶分解后的养分聚集于土壤表层,土壤表层的枯枝落叶量大(表 1),微生物可以分解的植物残体量丰厚,植物根系密度随着土层的增加而降低^[22]等有关。各林型之间的有机碳氮含量差异较为显著,考虑到植被类型不同,凋落物的残体分解速率不同,根系固碳能力的差异等都会影响碳源数量和质量。总体上土壤有机碳含量表现为樟子松纯林(4.72 g/kg) > 怀槐樟子松(4.48 g/kg) > 榆树樟子松(4.38 g/kg) > 云杉樟子松(4.21 g/kg) > 杨树纯林(3.95 g/kg) > 对照(1.88 g/kg)。纯针叶林方式土壤有机碳含量高于混交林(针阔混交林),这个结论不同于史学军^[23]的研究,可能是樟子松根系在深度土层分布发达,土壤固碳能力方面较其他树种占有优势地位,使得各土层有机碳含量较稳定。然而,樟子松分别与云杉、乡土树种怀槐、榆树混交后,对于土壤表层的有机碳氮的增加优于其他林型,混交林的群落结构相对复杂,有利于生物多样性增加^[24],落叶阔叶林的枯枝落叶归还量(杨树纯林 4.51 t/hm²)大于针叶林(樟子松纯林 3.66 t/hm²),加之混交林土壤微生物种类更具多样化及数量增加等,均有益于研究区林下土壤的养分积累和保持。这对附近农耕区的土壤耕层培肥改土,提高土壤肥力起到很大作用。

3.2 不同林型土壤有机碳全氮储量的影响因素分析

研究区不同林型在各土层上土壤有机碳储量的变化波动性较大,主要分布在 0—10 cm 土层,占整个剖面的 45% 左右,在 5—10, 10—20 cm 土层上降幅较大。有机碳储量除受土壤有机碳含量影响外,土壤容重、土层厚度、土壤性质等的多个因素同时制约着其大小^[25-27]。风沙土土壤容重大^[28],各林型土壤有机碳储量在 0—5 cm 土层所占比例最大且差异显著,

表明其该层土壤有机碳稳定性较差。该地区风大导致大量枯枝落叶不固定,而且采样值深秋少雨季,风沙土地的表水分易蒸发,凋落物无法充分分解,土壤从地上部分得到的有机碳补充少^[29]。砍伐、人为的放牧、收集松针等破坏地表植被的行为均会造成该地区水土流失加剧,土壤容重增大,土壤养分流失,表层土壤有机碳储量下降^[30-31];另外,沙地土壤孔隙大,渗透性好,植物根系分布较深^[32],造成土壤有机碳下移,所以在 10—20 cm 的土层上土壤有机碳氮储量的分布较稳定,这也是风沙地特有的有机碳分布特征之一。榆树樟子松在 20—40 cm 土层上全氮储量高于上层土壤全氮储量的现象,可能与榆树根系发达,固氮能力强有关^[33]。本研究的结果显示土壤有机碳、全氮储量均低于其他人关于林地类似研究,造成这种差异的原因可能包括科尔沁沙地的干旱少雨、多大风、温差大等独特的气候、树种、土壤类型以及研究尺度等^[34],因此,对小尺度不同营林方式土壤有机碳加以研究有着重要实际意义。

3.3 不同林型土壤腐殖质组分及与土壤有机碳氮的关系

土壤胡敏酸和富里酸是土壤腐殖质碳的重要组成部分,其含量及特性能反映出土壤腐殖质的特性及状态^[34]。5 种不同林型土壤腐殖质碳含量表现为云杉樟子松(2.04 g/kg)最高,富里酸占 65%,胡敏酸占 35%,其他林型土壤腐殖质组分均以富里酸为主,胡敏酸与富里酸比值小于 1,这与张晓曦等^[35]的研究结果基本一致。土壤胡敏酸占土壤有机碳的百分比则是土壤腐殖化程度,是衡量土壤腐殖质品质优劣的指标之一^[36]。土壤腐殖化程度最高为云杉樟子松(1.55),怀槐樟子松的土壤腐殖物质的聚合度(3.95)最优,分别是对照的 25.83 倍和 13.62 倍。这可能因为该模式属于针叶混交林对比针阔混交林下凋落物难分解,转化慢导致胡敏酸含量高于其他 4 种林型,土壤的腐殖质组分的构成受腐殖物质的形成和分解,不同林型下腐殖物质数量和质量的差异都会导致胡敏酸和富里酸含量的差异。

经统计学分析发现不同林型土壤有机碳与全氮、腐殖质碳、胡敏酸、富里酸均呈极显著的正相关关系($P < 0.01$),这与王鑫^[37]的研究结果类似,表明腐殖质组分深刻影响土壤有机碳、全氮含量。

4 结论

(1)研究区混交林更利于表层土壤有机碳/全氮含量的增加;

(2)混交林下的土壤有机碳储量(怀槐樟子松 20.0 t/hm²)明显优于樟子松纯林(19.92 t/hm²);

(3)混交林腐殖质组分更利于章古台沙地土壤腐

殖质的腐殖化度和聚合度的提高;

(4)土壤有机碳与全氮、腐殖质碳、胡敏酸、富里酸均呈极显著的正相关关系。

综上所述,混交林更利于研究区土壤有机碳氮的累积和腐殖质组分的稳定,选择最佳的混交林对当地的人工固沙林土壤固碳更有益。

参考文献:

- [1] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. 地理科学进展,2007,26(6):1-10.
- [2] 黄晓琼,辛存林,胡中民,等. 内蒙古森林生态系统碳储量及其空间分布[J]. 植物生态学报,2016,40(4):327-340.
- [3] 张晓曦,刘增文,郇焄皓,等. 内蒙半干旱低山区不同纯林土壤腐殖质分异特征及其与其他生物化学性质的关系[J]. 应用生态学报,2014,25(10):2819-2825.
- [4] 窦森,周桂玉,杨翔宇,等. 生物质碳及其与土壤腐殖质碳的关系[J]. 土壤学报,2012,49(4):796-802.
- [5] 范宁宁,马超,王树力. 不同经营类型红松林下土壤腐殖质的空间异质性[J]. 水土保持学报,2012,26(3):184-188.
- [6] 高杰,郭子健,刘艳红. 北京松山天然油松林土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 生态学杂志,2016,35(10):2707-2713.
- [7] 王迎菊,靳正忠,雷加强,等. 人工防护林对风沙土有机碳动力学的影响[J]. 干旱区研究,2017,34(3):495-503.
- [8] 段海侠. 樟子松固沙林地环境要素变化规律的研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- [9] 张甘霖,龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [10] 高亮,高永,王静,等. 土地覆盖类型对科尔沁沙地南缘土壤有机碳储量的影响[J]. 中国沙漠,2016,36(5):1357-1364.
- [11] 刘云霞,胡亚林,曾德慧,等. 科尔沁沙地草地营造樟子松人工林对土壤化学和生物学性状的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(4):814-820.
- [12] 黎英华,姚云峰,秦富仓,等. 不同类型土壤的有机碳密度特征[J]. 干旱区研究,2016,33(3):455-460.
- [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]. 生态学杂志,2013,24(12):3333-3340.
- [14] 王凯,宋立宁,张成龙,等. 科尔沁沙地典型林分土壤有机碳储量与根际效应的关系[J]. 水土保持学报,2013,27(6):221-225.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 尚雯,李玉强,王少昆,等. 科尔沁沙地流动沙丘造林后表层土壤有机碳和轻组有机碳的变化[J]. 应用生态学报,2011,22(8):2069-2074.
- [18] 窦森,李艳,关松,等. 腐殖物质特异性及其产生机制[J]. 土壤学报,2016,53(4):821-831.
- [19] 王鑫,王金成,刘建新. 不同恢复阶段人工沙棘林土壤腐殖质组成及性质[J]. 水土保持通报,2014,34(5):49-54.
- [20] Cong J, Wang X, Liu X, et al. The distribution variation and key influencing factors of soil organic carbon of natural deciduous broadleaf forests along the latitudinal gradient[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(5):333-339.
- [21] Liu Y, Li S, Sun X, et al. Variations of forest soil organic carbon and its influencing factors in east China[J]. Annals of Forest Science,2016,73(2):501-511.
- [22] 范志平,胡亚林,黎锦涛,等. 干湿交替对半干旱区沙地樟子松人工林土壤C和N矿化速率影响[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3360-3367.
- [23] 史学军. 中国东部典型区域土壤有机碳和土壤凋落物分解特征研究[D]. 南京:南京农业大学,2009.
- [24] 刘飞,杨柯,李括,等. 我国四种典型土类有机碳剖面分布特征[J]. 地学前缘,2011,18(6):20-26.
- [25] 孙清芳,贾立明,刘玉龙,等. 中国森林植被与土壤碳储量估算研究进展[J]. 环境化学,2016,35(8):1741-1744.
- [26] Paz C P, Goosem M, Bird M, et al. Soil types influence predictions of soil carbon stock recovery in tropical secondary forests[J]. Forest Ecology and Management,2016,376(9):74-83.
- [27] Lee Y L, Osumanu H A, Nik M, et al. Organic matter, carbon and humic acids in rehabilitated and secondary forest soils[J]. American Journal of Applied Sciences,2009,6(5):824-828.
- [28] 左小安,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地退化植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间异质性[J]. 环境科学,2009,30(8):2387-2393.
- [29] 张婧,左小安,吕朋,等. 科尔沁沙地草地植被对围封和放牧的响应[J]. 中国沙漠,2017,37(3):446-452.
- [30] 张建鹏,李玉强,赵学勇,等. 围封对沙漠化草地土壤理化性质和固碳潜力恢复的影响[J]. 中国沙漠,2017,37(3):491-499.
- [31] 赵哈林,周瑞莲,苏永中,等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳和全氮含量变化[J]. 生态学报,2008,28(3):976-982.
- [32] 蔡楚雄,贾玉华,郭成久. 科尔沁沙地南缘不同植被对土壤物理性质改良作用研究[J]. 水土保持研究,2017,24(2):49-54.
- [33] 赵玮,胡中民,杨浩,等. 浑善达克沙地榆树疏林和小叶杨人工林碳密度特征及其与林龄的关系[J]. 植物生态学报,2016,40(4):318-326.
- [34] 郭月峰,王娟,祁伟,等. 风沙土区黄柳根系及其碳储量分布特征[J]. 干旱区研究,2017,34(2):344-349.
- [35] 张晓曦,刘增文,朱博超,等. 半干旱黄土丘陵区纯林土壤腐殖质异化特征及与其他性质的关系[J]. 生态学报,2015,35(6):1779-1787.
- [36] 窦森,李凯,崔俊涛,等. 土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J]. 土壤学报,2008,45(6):1148-1158.
- [37] 王鑫. 子午岭人工油松林不同管理方式对土壤腐殖质性质及结合形态的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(2):232-236.