

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180138

沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤有机碳含量特征

任悦^{1,2} 高广磊^{1,2} 丁国栋^{1,2} 张英¹ 朴起亨³ 郭米山^{1,2} 曹红雨^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083;

2. 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 宁夏 盐池 751500; 3. 韩国国立山林科学院, 韩国 首尔 130-712)

摘要:【目的】有机碳在生态系统物质循环和全球碳循环中扮演着重要的角色, 沙地樟子松是我国北方风沙区农田防护林和防风固沙林的重要造林树种之一, 通过对不同生物气候带沙地樟子松人工林叶片、枯落物、土壤有机碳含量及相关性的分析, 阐明沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤连续体有机碳分布特征。【方法】本研究以呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地中龄、近熟和成熟 3 个龄组沙地樟子松人工林为研究对象。在测定叶片、枯落物和土壤有机碳含量的基础上, 采用单因素方差分析和 LSD 多重比较法分析不同地区和龄组叶片、枯落物和土壤有机碳含量的差异性, 采用双因素方差分析气候带和林龄对有机碳含量影响的显著性, 并采用 Pearson 相关系数分析不同生物气候带叶片、枯落物和土壤有机碳含量相关性。【结果】(1) 研究区沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤有机碳含量分别在 604.06 ~ 675.69 g/kg、343.02 ~ 538.51 g/kg 和 0.72 ~ 11.73 g/kg 之间; (2) 随着林龄的增加, 沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤有机碳含量均呈现先增加后减小的趋势, 即近熟林 > 中龄林 > 成熟林; (3) 气候带和林龄对沙地樟子松人工林叶片有机碳含量影响不显著 ($P > 0.05$), 对枯落物和土壤有机碳含量影响差异显著 ($P < 0.05$), 且不同组分有机碳含量呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系。【结论】沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤连续体中存在有机碳的运输和转换。沙地樟子松能够通过自身结构与功能适应环境变化, 其叶片表现出较高的环境适应能力。研究结果有助于进一步揭示沙地樟子松人工林碳循环过程, 并为沙地樟子松人工林经营管理提供理论支撑。

关键词: 沙地樟子松; 叶片; 枯落物; 土壤; 有机碳含量

中图分类号: S718.55⁺4.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2018)07-0036-09

引文格式: 任悦, 高广磊, 丁国栋, 等. 沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤有机碳含量特征[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(7): 36-44. Ren Yue, Gao Guanglei, Ding Guodong, et al. Characteristics of organic carbon content of leaf-litter-soil system in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(7): 36-44.

Characteristics of organic carbon content of leaf-litter-soil system in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations

Ren Yue^{1,2} Gao Guanglei^{1,2} Ding Guodong^{1,2} Zhang Ying¹ Park Kihyung³ Guo Mishan^{1,2} Cao Hongyu^{1,2}

(1. School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert, Yanchi 751500, Ningxia, China; 3. Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea)

Abstract: [Objective] Organic carbon plays an important role in the ecological system material cycle and global carbon cycle. *Pinus sylvestris* var. *mongolica* is one of the most important afforestation tree species for farmland protection and windbreak shelterbelts in northern China. By analyzing the leaf, litter, and soil organic carbon content of *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations in different bioclimatic

收稿日期: 2018-04-19 修回日期: 2018-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31600583), 中央高校基本科研业务费专项(2017PT03, 2015ZCQ-SB-02)。

第一作者: 任悦。主要研究方向: 荒漠化防治。Email: renyue2017@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 高广磊, 博士, 副教授。主要研究方向: 荒漠化生态学。Email: gaoguanglei@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

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

zones, the distribution characteristics of organic carbon in leaf-litter-soil system of *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations were explored. [**Method**] Three age groups of *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations (middle-aged, near-mature, and mature) in the Hulunbuir, Horqin, and Mu Us Sandy Land were studied. Based on the determination of organic carbon content in leaf, litter, and soil, the difference of organic carbon content of leaf, litter, and soil in different regions with different ages was analyzed by one-way ANOVA and LSD multiple comparison method. The significant influence of climate zone and forest age on organic carbon content was analyzed by two-way ANOVA method. Person correlation was used to analyze the correlation between leaf, litter, and soil organic carbon content in different bioclimatic zones. [**Result**] (1) The organic carbon contents in leaf, litter, and soil at the different age groups were in the range of 604.06 – 675.69, 343.02 – 538.51, and 0.72 – 11.73 g/kg, respectively. (2) With the increase of forest age, the organic carbon contents of leaf, litter, and soil increased firstly and then decreased in each sandy land (near-mature forest > middle-aged forest > mature forest). (3) The climate zone and forest age had no significant effect on the content of organic carbon in the leaf of *P. sylvestris* var. *mongolica*, while had significant effect on the litter and soil organic carbon at $P < 0.05$ level. Also, there were significant ($P < 0.05$) or extremely significant ($P < 0.01$) positive correlations among the organic carbon contents of leaf, litter, and soil. [**Conclusion**] There is organic carbon transport and conversion in the leaf-litter-soil system of *P. sylvestris* var. *mongolica*. *P. sylvestris* var. *mongolica* adapts to environmental changes by adjusting its structure and function. In particular, it's worth mentioning that the leaf has a high environmental adaptability. The study is conducive to a better understanding of carbon cycling in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations, which also provide theoretical support for *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation management.

Key words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; leaf; litter; soil; organic carbon content

碳是构成植物体干物质的核心元素,有机碳是植物体和土壤重要的组成部分,在生态系统物质循环、能量流动和全球碳循环过程中发挥着重要的作用^[1]。在森林生态系统中,植物—枯落物—土壤连续体是记录生态系统碳循环过程的重要载体^[2]。其中,土壤是森林植被生长的基质,其为森林植被的生长发育提供了必需的营养物质;植物体通过叶片的光合作用将大气中的无机碳固定,并以枯落物分解和根系分泌的方式将有机碳周转至土壤碳库^[3]。枯落物是植物与土壤碳交换的重要枢纽,其分解过程直接影响了土壤中有机碳的积累^[4]。因此,系统地分析森林生态系统叶片—枯落物—土壤连续体有机碳含量特征,有助于进一步揭示森林生态系统碳元素的循环过程。

在森林生态系统碳循环研究早期,国内外学者聚焦热点地区,针对不同海拔、不同林龄典型林分叶片、枯落物和土壤有机碳含量开展了大量基础性研究工作。赵维俊等人^[5]对青海云杉(*Picea crassifolia*)林叶片—枯落物—土壤的有机碳含量进行了研究,发现随着海拔梯度的增加,不同组分有机碳含量表现出不同的变化规律。陆媛等人^[6]对黄土高原辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林植物和土壤有机碳含量进行了研究,发现林龄对叶片有机碳含

量没有显著影响,但对枯落物和土壤有机碳含量有显著影响。近年来,国内外学者关注的热点逐渐转向区域和全球等大尺度研究,并取得了一定的研究进展。已有的研究表明,针叶树种碳含量高于阔叶树种,且不同气候带植物碳含量差异不显著^[7]。相关研究结果为揭示陆地生态系统碳过程及其对全球气候变化的响应提供了重要支撑^[8-10]。土壤养分供应量、植物养分需求量、枯落物养分归还量及光照、温度和水分等气候因素各自变化又相互影响,导致叶片—枯落物—土壤连续体有机碳含量具有明显的时空变化^[2]。因此,研究不同生物气候带下森林生态系统叶片—枯落物—土壤连续体有机碳特征对分析植物、枯落物和土壤有机碳供求关系具有重要的意义。

沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)原产于我国大兴安岭和呼伦贝尔红花尔基地区,具有耐旱、耐寒、耐瘠薄、适应性强等优点,在水分条件较差、养分贫瘠的风沙土上依然生长良好^[11]。自20世纪50年代在科尔沁沙地南部章古台地区成功引种栽植以来,沙地樟子松人工林迅速发展,在干旱、半干旱和亚湿润干旱区的新疆、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西和辽宁等地都已营建了大面积的沙地樟子松人工林^[12],已经成为我国“三北”地区防沙治沙重要的乔木造林树种之一^[13]。鉴于此,本研究以亚湿润干

旱区呼伦贝尔沙地、半干旱区科尔沁和毛乌素沙地不同龄组沙地樟子松人工林为研究对象,分析沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤有机碳含量及其相关性,以期阐明沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤连续体有机碳含量分布特征,并为深入理解沙地樟子松人工林碳循环和沙地樟子松人工林经营管理提供参考。

1 研究区概况

研究区分别位于红花尔基樟子松国家森林公园、章古台沙地森林公园和红石峡沙地植物园,代表了不同生物气候带的沙地樟子松人工林生态系统。

红花尔基樟子松国家森林公园(47°05' N、115°31' E)地处亚湿润干旱区的呼伦贝尔沙地东南部,海拔606 m,属中温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年均气温-0.3℃,年均降水量约359.4 mm,年均蒸发量1 148.5 mm,年均日照时数为2 558.6 h。土壤为栗钙沙土,是发育在砂质母质上的幼年土壤,有机质含量为6.57 g/kg,全氮含量为3.24 g/kg,pH值为6.75。优势灌木种主要有沙蒿(*Artemisia desertorum*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、羊草(*Leymus chinensis*)、针茅(*Stipa*

capillata)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)等。

章古台沙地森林公园(42°23' N、122°22' E)地处半干旱区的科尔沁沙地东南部,海拔226 m,属中温带亚湿润大陆性季风气候,干旱多风,光照充足,昼夜温差大。年均气温8℃,年均降水量526.5 mm,年均蒸发量1 932.7 mm左右,年均日照时数为2 615.2 h。土壤主要为流动风沙土和生草风沙土,是发育在沙性母质上的幼年土,土壤养分含量较低,有机质含量为1.70 g/kg,全氮含量为0.98 g/kg,pH值为6.87。优势灌木种主要有沙蒿、胡枝子、寸苔草(*Cares duriuscula*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等。

红石峡沙地植物园(38°26' N、109°12' E)地处半干旱区的毛乌素沙地东南部,海拔1 080 m,属暖温带大陆性季风气候,光照充足,热量充足,冬季寒冷。年均气温9.1℃,年均降水量385.5 mm,年均蒸发量为2 502 mm左右,年均日照时数为2 914 h。土壤以非地带性风沙土为主,地表土层结构疏松,保水性差,土壤肥力较低,有机质含量为3.87 g/kg,全氮含量为0.18 g/kg,pH值为8.9。优势灌木种主要有沙蒿、寸苔草、冰草(*Agropyron oristatum*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、蒺藜(*Tribulus terrestris*)等。

表1 研究样地概况

Tab.1 Sample area survey

地区 Area	林型 Forest type	林龄 Age/a	平均树高 Average tree height/m	平均胸径 Average DBH/cm	林分密度/(株·hm ⁻²) Forest density/ (plant·ha ⁻¹)	郁闭度 Canopy density
呼伦贝尔沙地红花尔基樟子松国家森林公园 National forest park of <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in Honghuaerji Region of Hulunbuir Sandyland	人工林 Plantation	24	11.98 ± 1.62	14.66 ± 3.40	1 650	0.75
		33	12.63 ± 1.71	18.36 ± 2.42	1 650	0.82
		42	13.40 ± 2.36	22.74 ± 1.98	1 650	0.71
科尔沁沙地章古台沙地森林公园 Zhanggutai sand forest park in Horqin Sandyland	人工林 Plantation	26	10.26 ± 1.47	16.93 ± 2.81	2 500	0.72
		33	10.61 ± 1.03	14.06 ± 2.44	2 500	0.75
		43	11.12 ± 1.74	21.07 ± 1.02	1 650	0.68
毛乌素沙地红石峡沙地植物园 Hongshixia sandy botanical garden in Mu Us Sandyland	人工林 Plantation	26	12.48 ± 3.69	11.76 ± 3.72	1 650	0.79
		32	13.95 ± 2.38	13.58 ± 3.44	1 650	0.86
		43	14.14 ± 1.84	14.92 ± 3.52	1 650	0.73

2 研究方法

2.1 样品采集与分析

2017年7—8月,在植物生长旺盛期开展野外调查和样品采集工作。在呼伦贝尔沙地红花尔基樟子松国家森林公园、科尔沁沙地章古台沙地森林公园和毛乌素沙地红石峡沙地植物园选取立地条件、大小相似的不同龄组(中林龄、近熟林和成熟林)沙地樟子松人工林,分别设置3个20 m × 20 m的样

方,样方间隔小于2 km。对样方内的树木进行每木检尺,测定胸径、树高和冠幅等指标,并在每个样方中按5点法布设5个1 m × 1 m的小样方展开植被调查,样地基本情况见表1。在林分内选择3株标准木,利用高枝剪在树冠东南西北4个方向按上中下3个部位采集叶片样品,在标准木周围收集枯落物样品,分别将叶片、枯落物样品混匀后装入自封袋。在树冠投影下去除表面枯落物后挖取土壤剖面,按梅花形对0~20 cm的土壤进行5点取样,并

设置3个重复,将土样充分混匀后装入自封袋。将叶片、枯落物和土壤样品带回实验室,叶片在105℃下杀青1h,在80℃下烘干至恒质量;枯落物在80℃下烘干至恒质量。叶片及枯落物冷却后粉碎、过100目筛,用于测定有机碳含量。土壤样品在通风良好的地方进行风干、研磨、过100目筛,用于测定有机碳含量。植物叶片、枯落物和土壤有机碳含量均采用重铬酸钾—稀释热法进行测定^[14]。

2.2 数据分析

应用SPSS 17.0对数据进行统计分析,所有统计数据以平均值及标准误差表示。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)中的最小显著差异(LSD)法对不同地区相同龄组和相同地区不同龄组沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤的有机碳含量进行差异性检验($\alpha = 0.05$),采用双因素方差分析法(Two-way ANOVA)分析气候带、林龄对沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤有机碳含量的影响($\alpha = 0.05$),并采用Pearson相关系数分析沙地樟子松叶片、枯落物和土壤有机碳含量相关性。

3 结果与分析

3.1 沙地樟子松人工林叶片有机碳含量特征

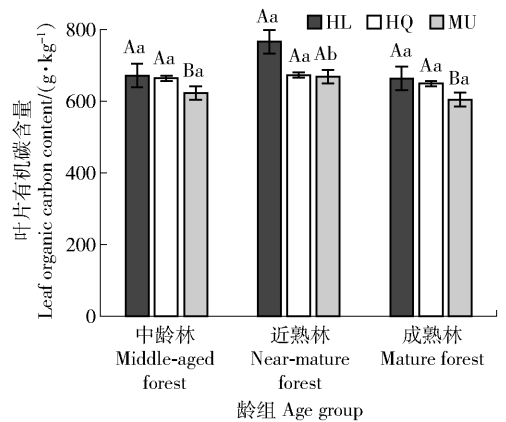
呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松中龄林、近熟林和成熟林叶片有机碳含量区间为604.06~675.69 g/kg,且随着林龄的增加叶片有机碳含量先增加后减小(图1)。毛乌素沙地中龄林、成熟林叶片有机碳含量显著低于呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地($P < 0.05$),而近熟林叶片有机碳含量与呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地无显著差异($P > 0.05$)。毛乌素沙地樟子松近熟林叶片有机碳含量显著高于中龄林、成熟林($P < 0.05$),其余沙地叶片有机碳含量在不同林龄间无显著差异($P > 0.05$)。

3.2 沙地樟子松人工林枯落物有机碳含量特征

呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松中龄、近熟和成熟人工林枯落物有机碳含量区间为343.02~514.49 g/kg。随着林龄的增加,枯落物有机碳含量呈先增加后减小的变化趋势(图2)。呼伦贝尔沙地3个龄组沙地樟子松枯落物有机碳含量显著高于科尔沁沙地和毛乌素沙地($P < 0.05$)。呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地近熟林枯落物有机碳含量显著高于毛乌素沙地($P < 0.05$),其余沙地枯落物有机碳含量在不同林龄间无显著差异($P > 0.05$)。

3.3 沙地樟子松人工林土壤有机碳含量特征

呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松中龄林、近熟林和成熟林土壤有机碳含量区间为0.72~11.73 g/kg。随着林龄的增加,土壤有机碳



HL, 呼伦贝尔沙地红花尔基樟子松国家森林公园; HQ, 科尔沁沙地章古台沙地森林公园; MU, 毛乌素沙地红石峡沙地植物园。不同大写字母表示同一林龄不同沙地间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一沙地不同林龄间差异显著($P < 0.05$)。下同。HL, national forest park of *P. sylvestris* var. *mongolica* in Honghuaerji Region of Hulunbuir Sandyland; HQ, Zhanggutai sand forest park in Horqin Sandyland; MU, Hongshixia sandy botanical garden in Mu Us Sandyland. Different capital letters indicate significant difference between different sandyland on the same forest ages at $P < 0.05$ level, different lowercase letters indicate significant difference between different forest ages on the same sandy land. The same below.

图1 沙地樟子松人工林叶片有机碳含量

Fig. 1 Organic carbon content of leaf in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations

含量呈先增加后减小的变化趋势(图3)。毛乌素沙地中龄林、成熟林土壤有机碳含量显著低于呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地($P < 0.05$),3个地区沙地近熟林土壤有机碳含量均存在显著差异($P < 0.05$)。呼伦贝尔沙地3个龄组土壤有机碳含量均存在显著差异($P < 0.05$),毛乌素沙地成熟林土壤有机碳含量显著低于中龄林、近熟林($P < 0.05$)。

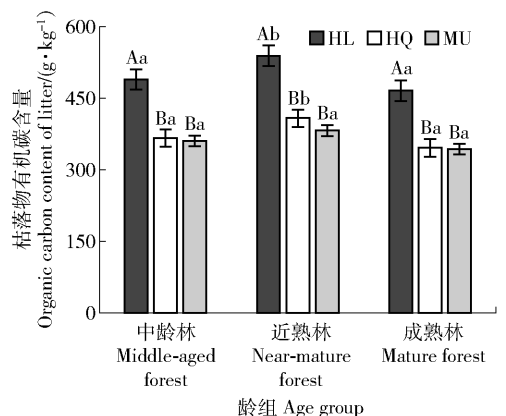


图2 沙地樟子松人工林枯落物有机碳含量

Fig. 2 Organic carbon content of litter in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations

3.4 不同沙地樟子松叶片、枯落物、土壤有机碳含量特征

从表2、3可以看出,沙地樟子松人工林有机碳含量均表现为叶片>枯落物>土壤。气候带和林龄

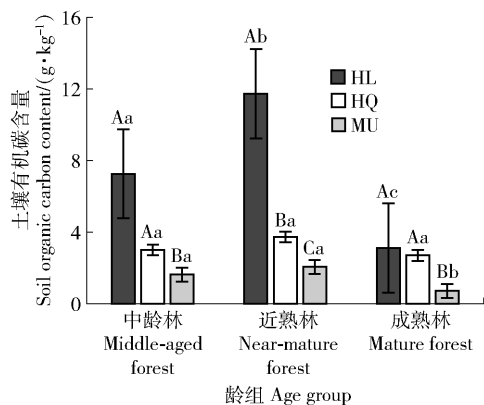


图3 沙地樟子松人工林土壤有机碳含量

Fig. 3 Organic carbon content of soil in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations

对沙地樟子松人工林叶片有机碳含量无显著影响 ($P > 0.05$), 而对枯落物和土壤有机碳含量存在显著影响 ($P < 0.05$)。不同生物气候带沙地樟子松人工林叶片有机碳含量无显著差异 ($P > 0.05$), 亚湿润干旱区沙地樟子松人工林枯落物和土壤有机碳含量与半干旱区存在显著差异 ($P < 0.05$)。不同龄组沙地樟子松人工林叶片有机碳含量无显著差异 ($P > 0.05$), 3个龄组沙地樟子松人工林枯落物和土壤有机碳含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。相关性分析结果表明(表4), 不同生物气候带沙地樟子松叶片与枯落物、叶片与土壤有机碳含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 枯落物与土壤有机碳含量呈极显著正相关关系。

表2 双因素无重复实验方差分析

Tab. 2 Variance analysis of two factors without repeat experiment

组分 Component	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of square	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
叶片 Leaf	地区 Area	2 453.66	1 226.83	5.94	0.06
	龄组 Age group	1 729.52	864.761	4.12	0.10
	误差 Error	826.04	206.51		
	总计 Total	3 857 684.65			
枯落物 Litter	地区 Area	192.16	96.08	15.04	0.00
	龄组 Age group	1 456.70	728.35	114.00	0.00
	误差 Error	268.33	6.39		
	总计 Total	76 505.01			
土壤 Soil	地区 Area	1.86	0.93	27.74	0.00
	龄组 Age group	0.94	0.47	13.81	0.00
	误差 Error	0.89	0.03		
	总计 Total	9.14			

注:表中 $P < 0.05$, 代表该因素对有机碳含量存在显著影响。Notes: P value in the table is less than 0.05, indicating that the factor has significant influence on organic carbon content.

表3 沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤有机碳含量

Tab. 3 Organic carbon content of leaf-litter-soil in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantationsg·kg⁻¹

项目 Item	有机碳含量 Organic carbon content		
	叶片 Leaf	枯落物 Litter	土壤 Soil
呼伦贝尔沙地红花尔基樟子松国家森林公园 National forest park of <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in Honghuaerji Region of Hulunbuir Sandyland	669.84 ± 6.62A	489.65 ± 37.33A	7.37 ± 4.31A
科尔沁沙地章古台沙地森林公园 Zhanggutai sand forest park in Horqin Sandyland	661.57 ± 12.30A	373.20 ± 31.76B	3.15 ± 0.53AB
毛乌素沙地红石峡沙地植物园 Hongshixia sandy botanical garden in Mu Us Sandyland	631.42 ± 32.90A	361.74 ± 19.60B	1.47 ± 0.68C
中龄林 Middle-aged forest	652.24 ± 26.26a	405.13 ± 72.80a	3.96 ± 2.93a
近熟林 Near-mature forest	672.18 ± 3.93a	434.83 ± 70.18b	5.86 ± 5.16b
成熟林 Mature forest	638.40 ± 30.57a	384.63 ± 69.91c	2.18 ± 1.28c
均值 Mean	654.27 ± 20.22	410.86 ± 75.38	4.00 ± 3.04

注:表中不同大写字母表示同一组分不同地区差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一组分不同林龄差异显著 ($P < 0.05$)。Notes: different capital letters indicate significant differences between different sandy lands on the same component at $P < 0.05$ level. Different lowercase letters indicate significant difference between different forest ages on the same component at $P < 0.05$ level.

表4 叶片、枯落物、土壤有机碳含量的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between carbon content in leaf, litter and soil

项目 Item	叶片与枯落物	叶片与土壤	枯落物与土壤
	Leaf and litter	Leaf and soil	Litter and soil
有机碳含量 Organic carbon content	0.745 *	0.689 *	0.859 **

注: *表示相关性显著 ($P < 0.05$), **表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。Notes: * indicates significant correlation at $P < 0.05$ level, ** indicates extremely significant correlation at $P < 0.01$ level.

4 讨 论

4.1 沙地樟子松人工林叶片、枯落物、土壤有机碳含量特征

呼伦贝尔沙地红花尔基樟子松国家森林公园、科尔沁沙地章古台沙地森林公园和毛乌素沙地红石峡沙地植物园沙地樟子松人工林叶片有机碳平均含量分别为 669.82、661.57 和 631.42 g/kg, 均明显高于 Elser 等^[15] 对全球 492 种陆生植物研究所得的叶片有机碳平均含量 464 g/kg, 也高于姜沛沛等^[16] 对子午岭油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林研究所得的叶片有机碳平均含量 526.2 g/kg。这与针叶树种叶片含碳率较高以及沙地樟子松生长环境有关^[17]。沙地樟子松是一种耐寒植物, 长期生活在干旱的条件下, 气孔导度较低, 叶片有机碳得到积累, 说明沙地樟子松叶片合成有机碳水平较高, 储碳能力较强。不同地区沙地樟子松人工林枯落物有机碳平均含量分别为 489.65、370.20 和 361.74 g/kg。科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松人工林枯落物有机碳含量低于长白山温带针阔混交林枯落物有机碳含量 496.8 g/kg^[18], 呼伦贝尔沙地樟子松人工林枯落物有机碳含量高于陕西省森林枯落物有机碳平均含量 367.40 g/kg^[19]。这是因为研究区水、热、光照等环境因素存在差异, 导致枯落物的分解程度不同, 说明呼伦贝尔沙地樟子松枯落物质量优于科尔沁和毛乌素沙地。不同地区沙地樟子松人工林土壤有机碳平均含量分别为 7.37、3.15 和 1.47 g/kg, 远低于全国土壤有机碳含量平均值 24.56 g/kg^[20]。这是因为风沙土养分贫瘠^[21], 且针叶枯落物分解后形成的酸性环境抑制了微生物的活动, 不利于土壤有机碳的积累^[22]。

4.2 林龄对沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤有机碳含量的影响

研究区沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤有机碳含量均随着林龄的增加呈先增加后减少的变化趋势, 即近熟林 > 中龄林 > 成熟林。这与沙地樟子松的生长规律有密切关系, 主要是因为中龄沙地樟子松人工林处于迅速生长阶段, 叶片通过光合作用合成的碳多用于自身的生长, 并且林分郁闭度较

低, 地表枯落物积累较少。同时, 沙地樟子松地表枯落物、根系分泌物及根系分解是土壤有机碳的主要来源, 沙地樟子松人工林内枯落物量及枯落物养分关系到林地土壤养分的补给状况, 从而直接影响了土壤有机碳含量^[23]。因此, 中龄林阶段沙地樟子松叶片、枯落物和土壤有机碳含量较低。随着林龄的增加, 沙地樟子松进入近熟林阶段, 此时的林木处于生长旺盛期, 不断地合成与积累干物质, 且林分郁闭度增加, 开始出现明显的自然疏枝现象, 地表枯落物积累增多, 再加上林内光照强度较弱, 降低了枯落物的分解^[26]。因此, 近熟林阶段沙地樟子松叶片、枯落物和土壤有机碳含量增加。当沙地樟子松进入成熟林阶段时, 林木生长变得缓慢, 机能逐渐减弱, 自然疏枝现象严重, 林分出现了林窗, 枯落物的分解量大于积累量。因此, 成熟林阶段沙地樟子松叶片、枯落物和土壤的有机碳含量显著降低。研究结果与云南松 (*Pinus yunnanensis*) 和锐齿栎 (*Quercus alienensis* var. *acuteserrata*) 林分有机碳含量随林龄的变化规律存在差异^[27-28], 与胡杨 (*Populus euphratica*) 叶片变化规律一致^[29]。这可能与林木生长所处的环境有关, 云南松和锐齿栎生长于湿润区, 气候条件适宜, 林木生长受环境因素的影响较小。而胡杨生长在干旱区, 干旱区气候条件恶劣, 当生长到成熟林阶段, 林木的生理机能逐渐减弱, 使林木的生长和生存都受到了一定的威胁。

4.3 沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤连续体有机碳特征

研究区沙地樟子松人工林叶片有机碳含量差异不大。这主要是因为碳是构成植物体的骨架元素, 不直接参与植物各种生产活动。同时, 沙地樟子松能够通过调节自身结构与功能适应变化的环境, 使得叶片有机碳含量保持稳定, 在一定程度上体现了沙地樟子松人工林的内稳态机制。沙地樟子松人工林枯落物和土壤有机碳含量在不同地区存在显著差异 ($P < 0.05$)。这是因为枯落物的分解受气候因素的影响较大^[23], 而不同生物气候带的水热条件存在较大差异, 使得沙地樟子松枯落物分解速率和程度有很大区别, 进而导致枯落物养分归还程度不同。因此, 亚湿润干旱区生长的沙地樟子松人工林枯落

物有机碳含量与半干旱区的存在显著差异 ($P < 0.05$), 而两个半干旱区沙地樟子松人工林枯落物有机碳含量无显著差异 ($P > 0.05$)。同时, 土壤肥力存在一定的空间异质性, 土壤有机碳作为土壤肥力的重要组成之一, 其含量也受到了极大影响^[24]。因此, 生长在不同生物气候带的沙地樟子松人工林土壤有机碳含量有显著差异 ($P < 0.05$)。我国东北地区气候较为寒冷湿润, 植被生长茂盛, 地表枯落物积累较多, 再加上地表经常滞水, 枯落物的分解程度较低, 土壤表层腐殖质积累过程明显^[25]。因此, 3个地区沙地樟子松人工林枯落物和土壤有机碳含量表现为呼伦贝尔沙地 > 科尔沁沙地 > 毛乌素沙地。

研究区沙地樟子松人工林有机碳含量均表现为叶片 > 枯落物 > 土壤, 这是由沙地樟子松生长养分的需求量、枯落物养分的归还量和土壤为其生长提供的养分动态变化导致的^[2]。叶片在衰老和脱落前生长速率变缓, 光合作用强度减弱, 合成的有机碳含量减少, 且枯落物分解了粗脂肪、可溶性糖与单宁, 有机碳含量显著下降^[26]。因此, 导致了沙地樟子松人工林叶片 > 枯落物 > 土壤的有机碳分配格局。不同生物气候带沙地樟子松叶片—枯落物—土壤有机碳含量呈显著正相关关系, 说明在叶片—枯落物—土壤连续体中有机碳含量存在复杂且紧密的联系, 在一定程度上体现了沙地樟子松较强的环境适应能力。同时, 也说明沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤连续体中存在有机碳的运输和转换^[30]。沙地樟子松在调节沙地生态系统稳定性上发挥着重要的作用, 土壤是沙地樟子松营养元素的主要来源。沙地樟子松从土壤中吸收营养元素以供生长发育, 通过叶片的光合作用不断的合成与积累有机碳, 并将有机碳固定在体内, 为其生长提供了基础的物质和能量。枯落物是植物养分循环的关键枢纽, 沙地樟子松枯落物经过微生物分解和雨水淋溶等作用, 将有机碳重新释放到土壤中。枯落物的数量、质量及分解程度直接影响土壤有机碳含量^[20], 土壤有机碳含量越高植物新陈代谢越旺盛^[31], 进一步证实了亚湿润干旱区沙地樟子松长势较优于半干旱地区。

5 结 论

呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地中龄、近熟和成熟 3 个龄组沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤有机碳含量分别为 604.06 ~ 675.69 g/kg、343.02 ~ 538.51 g/kg 和 0.72 ~ 11.73 g/kg。随着林龄的增加, 研究区沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤有机碳含量均先增加后减小, 即近熟林 > 中龄

林 > 成熟林。其中, 气候带和林龄对沙地樟子松人工林叶片有机碳含量的影响不显著 ($P > 0.05$), 而对枯落物和土壤有机碳含量影响显著 ($P < 0.05$)。不同生物气候带下沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤 3 个组分间有机碳含量存在显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系, 表明沙地樟子松人工林叶片、枯落物和土壤间存在有机碳的运输和转换。不同生物气候带沙地樟子松人工林枯落物和土壤有机碳含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 而叶片有机碳含量保持稳定, 表明沙地樟子松能通过调节自身结构与功能适应变化的环境。为了减少沙地森林生态系统有机碳的损失, 建议加强沙地樟子松林的经营与管护, 特别是对成熟林的管护, 减少人类活动造成的破坏作用, 加强对沙地樟子松林枯落物和表层土壤的保护, 以减少有机碳的损失。

参 考 文 献

- [1] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39: 153-170.
- [2] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
Wang W Q, Xu L L, Zeng C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among living plant-litter-soil systems in estuarine wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [3] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究 [J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 133-142.
Yang J J, Zhang X R, Ma L S, et al. Ecological stoichiometric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 133-142.
- [4] Reeder J D. Theoretical ecosystem ecology: understanding element cycles [J]. Quarterly Review of Biology, 1998, 163(97): 421-423.
- [5] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 477-489.
Zhao W J, Liu X D, Jin M, et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 477-489.
- [6] 陆媛, 陈云明, 曹扬, 等. 黄土高原子午岭辽东栎林植物和土壤碳氮磷化学计量学特征 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 196-201.
Lu Y, Chen Y M, Cao Y, et al. C, N and P stoichiometric characteristics of plants and soil in *Quercus liaotungensis* forest on Ziwuling Mountain of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 196-201.
- [7] 郑帷婕, 包维楷, 辜彬, 等. 陆生高等植物碳含量及其特点

- [J]. 生态学杂志, 2007, 26(3): 307-313.
- Zheng W J, Bao W K, Gu B, et al. Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(3): 307-313.
- [8] Gorissen A, Tietema A, Joosten N N, et al. Climate change affects carbon allocation to the soil in shrublands [J]. Ecosystems, 2004, 7(6): 650-661.
- [9] 郭广芬, 张称意, 徐影. 气候变化对陆地生态系统土壤有机碳储量变化的影响 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(4): 435-442.
- Guo G F, Zhang C Y, Xu Y. Effects of climate change on soil organic carbon storage in terrestrial ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(4): 435-442.
- [10] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 175-188.
- Xu X F, Tian H Q, Wan S Q. Climate warming impacts on carbon cycling in terrestrial ecosystems [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 175-188.
- [11] 王继和, 满多清, 刘虎俊. 樟子松在甘肃干旱区的适应性及发展潜力研究 [J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 390-394.
- Wang J H, Man D Q, Liu H J. Adaptability and developing potential of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Gansu arid area [J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(4): 390-394.
- [12] 李蒙蒙, 丁国栋, 高广磊, 等. 樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 在中国北方 10 省(区)引种的适宜性 [J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1021-1028.
- Li M M, Ding G D, Gao G L, et al. Introduction suitability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in 10 northern provinces of China [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1021-1028.
- [13] 康宏樟, 朱教君, 许美玲. 沙地樟子松人工林营林技术研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 799-806.
- Kang H Z, Zhu J J, Xu M L. Silviculture of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantations on sandy land [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 799-806.
- [14] 郭旭欣. 容量法测定土壤有机质 2 种加热方法比较研究 [J]. 现代农业科技, 2016(9): 206.
- Guo X X. Comparison of two heating methods for measuring soil organic matter by volumetric method [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(9): 206.
- [15] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. Nature, 2000, 408: 578.
- [16] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6188-6197.
- Jiang P P, Cao Y, Chen Y M, et al. Variation of C, N, and P stoichiometry in plant tissue, litter, and soil during stand development in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [17] 马钦彦, 陈遐林. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5): 96-100.
- Ma Q Y, Chen X L. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5): 96-100.
- [18] 王晶苑, 王绍强, 李勿兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的 C:N:P 化学计量学特征 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- Wang J Y, Wang S Q, Li R L, et al. C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(6): 587-595.
- [19] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林群落乔灌木叶片和凋落物 C、N、P 生态化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 365-372.
- Jiang P P, Cao Y, Chen Y M. C, N, P stoichiometric characteristics of tree, shrub, herb leaves and litter in forest community of Shanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 365-372.
- [20] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响 [J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2411-2416.
- Wang W Q, Zeng C S, Zhong C Q, et al. Effect of human disturbance on ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in Minjiang River Estuarine Wetland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [21] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施 [J]. 林业科学, 2001, 37(2): 131-138.
- Jiao S R. Report on the causes of the early decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* shelterbelt and its preventative and control measures in Zhang Gutai of Liaoning Province [J]. Science Silvae Sinica, 2001, 37(2): 131-138.
- [22] 张浩, 庄雪影. 华南 4 种乡土阔叶树种枯落叶分解能力 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2395-2403.
- Zhang H, Zhuang X Y. The leaf litter decomposition of four native broad-leaved tree species in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2395-2403.
- [23] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 99-105.
- [24] 杜改俊, 李艳红, 张小萌, 等. 艾比湖湿地典型植物群落土壤养分和盐分的空间异质性 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1302-1309.
- Du G J, Li Y H, Zhang X M, et al. Spatial heterogeneity of the soil nutrient and salinity of the type in Ebinur Lake Wetland [J]. Ecology and Environment, 2015, 24(8): 1302-1309.
- [25] 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.
- Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 533-544.
- [26] 杨曾奖, 曾杰, 徐大平, 等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素 [J]. 生态环境学报, 2007, 16(2): 649-654.
- Yang Z J, Zeng J, Xu D P, et al. The processes and dominant factors of forest litter decomposition: a review [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 649-654.

- [27] 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 J, Zhou C Y, Li S J, 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.
- [28] 侯浩, 张宋智, 关晋宏, 等. 小陇山不同林龄锐齿栎林土壤有机碳和全氮积累特征 [J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8025-8033.
Hou H, Zhang S Z, Guan J H, et al. Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Quercus aliensis* var. *acuteserrata* forests at different age stages in the Xiaolongshan Mountains, Gansu Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8025-8033.
- [29] 史军辉, 马学喜, 刘茂秀, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)枝叶根化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 109-115.
Shi J H, Ma X X, Liu M X, et al. Stoichiometric characteristics of branch, leaf, root in *Populus euphratica* with different forest age [J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1):109-115.
- [30] Vergutz L, Manzoni S, Porporato A, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants [J]. Ecological Monographs, 2012, 82(2): 205-220.
- [31] Mcgroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios [J]. Ecology, 2004, 85(9): 2390-2401.

(责任编辑 范娟 赵勃
责任编辑 孙向阳)