

DOI: 10.5846/stxb210905090945

雷泽勇^{1,*}, 于东伟¹, 周凤艳¹, 张岩松^{2,3}, 李尧¹, 白津宁¹. 樟子松人工林营建对土壤颗粒组成变化的影响. 生态学报, 2020, 40(15): 5367-5376.

Lei Z Y, Yu D W, Zhou F Y, Zhang Y S, Li Y, Bai J N. Effects of afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on change of soil particle size distribution in sandy land. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5367-5376.

樟子松人工林营建对土壤颗粒组成变化的影响

雷泽勇^{1,*}, 于东伟¹, 周凤艳¹, 张岩松^{2,3}, 李尧¹, 白津宁¹

1 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000

2 中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地实验站, 沈阳 110016

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 植被恢复是退化生态系统的主要恢复措施, 也是人类改善区域生态环境较为重要和直接的活动。目前, 针对不同植被恢复方式对干旱半干旱地区土壤理化性质及生物特征开展了大量研究。然而, 关于科尔沁沙地樟子松人工林营建对土壤颗粒组成变化的影响却鲜有报道。因此, 以辽宁省章古台地区不同生长阶段(包括幼龄林、中龄林、成熟林和过熟林)的 20 块樟子松人工林样地为研究对象(以临近的 7 块天然草地为对照), 研究了沙地樟子松人工林营建对 0—100 cm 土层土壤颗粒组成变化的影响。结果表明: 沙质草地营建樟子松人工林后, 不同土层土壤细颗粒(<0.05 mm)含量均呈增加趋势, 并且在 0—10 cm 层增加趋势明显, 随土层深度增加土壤细颗粒增加量逐渐降低(除幼龄林外), 但樟子松林地土壤颗粒组成仍以砂粒为主, 土壤粘粒和粉粒含量极低(仅占 5%左右)。随着樟子松人工林林龄的增加, 土壤细颗粒变化量在 0—10 cm 层逐渐升高, 而在 10—100 cm 层并无显著变化趋势。土壤细颗粒含量的变化在 10—100 cm 层与土壤含水量呈显著正相关, 在 0—10、20—40 cm 和 80—100 cm 层与土壤全钾极显著负相关, 在 20—60 cm 层与土壤有机碳呈显著正相关, 在 10—40 cm 和 80—100 cm 层分别与土壤全磷呈显著正相关和负相关。综上所述, 樟子松人工林营建可有效提高土壤细颗粒含量且在土壤表层效果明显, 但短期内并不会使土壤颗粒组成发生显著变化, 樟子松林改善土壤颗粒组成的同时也会使其他土壤因子发生相应的变化。

关键词: 科尔沁沙地; 草地造林; 樟子松; 土壤颗粒组成

Effects of afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on change of soil particle size distribution in sandy land

LEI Zeyong^{1,*}, YU Dongwei¹, ZHOU Fengyan¹, ZHANG Yansong^{2,3}, LI Yao¹, BAI Jinning¹

1 College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2 Daqinggou Ecological Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Vegetation restoration is main restoration measure of the degraded ecosystem, and it is also an important and direct activity for human to improve regional ecological environment. At present, a lot of studies have been carried out on soil physical and chemical properties and biological characteristics in arid and semi-arid areas according to different vegetation restoration methods. However, there are few reports on the effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation construction on the changes of soil particle composition in Horqin sandy land. Therefore, 20 plots of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation at different growth stages (including young, middle-aged, mature, and over-mature forests) in Zhanggutai area of Liaoning Province were used as the research objects and 7 adjacent natural grasslands were used as control in this paper. The effects of construction of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on soil particle composition in

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570709)

收稿日期: 2019-05-09; 网络出版日期: 2020-05-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zeyonglei@163.com

0—100 cm soil layer in sandy land were studied. The results showed that after afforestation in sandy grassland, the content of fine soil particles (<0.05 mm) in different soil layers increased and had a significant increasing trend in 0—10 cm layer. The fine soil particles variation decreased gradually with the increase of soil depth (except for young forest), but the composition of soil particles in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest was still sand. The content of soil clay and silt was very low (only about 5%). The fine soil particles variation increased gradually with the increase of stand age in 0—10 cm soil layer, where there was no significant change in 10—100 cm soil layers. The change of fine soil particle content was positively correlated with soil water content in 10—100 cm soil layers, negatively correlated with soil total potassium in 0—10, 20—40 and 80—100 cm soil layers, and positively correlated with soil organic carbon in 20—60 cm soil layer. There was positive correlation between fine soil particle content and soil total phosphorus in 10—40 cm soil layer and negative correlation in 80—100 cm soil layer. Therefore the construction of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation can effectively increase the content of fine soil particles in soil and has significant effect on the surface soil layer. However, in the short term, the composition of soil particles would not change significantly. The improvement of soil particle composition in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation would also change other soil factors accordingly.

Key Words: Horqin Sandy Land; grassland afforestation; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; soil particle size distribution (PSD)

土壤是由各级不同大小的颗粒堆积组成的混合物^[1],是维系陆地生态系统发生和发展的物质基础^[2]。土壤固相中矿物颗粒的大小及组成比例被称之为土壤颗粒组成(PSD, Soil particle size distribution)^[3],是重要的土壤物理特性参数,对植物生长所依赖的土壤环境条件产生直接影响。土壤颗粒组成作为土壤的内在属性,其差异构成了不同的土壤质地类型,进而影响着土壤水分运输、溶质迁移和土壤侵蚀等过程^[4],也用于土壤分类和评估土壤结构及土壤水力特征等土壤性质。土地沙漠化是全球干旱、半干旱地区最严重的土地退化类型之一^[5-6],以风蚀为主要特征的土地沙漠化其实质是土壤颗粒的粗粒化以及养分贫瘠化^[7]。因此,对沙漠化严重地区的土壤颗粒组成进行研究十分必要。

科尔沁沙地是我国土地沙漠化最严重的地区之一,处于北方典型的干旱半干旱农牧交错带^[5]。近年来,由于气候变化和土地利用方式的快速转换^[8],科尔沁沙地植被发生退化,以风蚀为主要特征的土地沙漠化导致该区域生态环境极其脆弱^[9]。植被恢复是沙漠化逆转的重要措施,充分利用土壤—植物复合系统的生态功能来改善区域生态环境,促进土壤结构改善、土壤肥力增加以及生物多样性的恢复^[10]。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是科尔沁沙地植被恢复的主要树种之一,具有耐寒,耐旱,耐贫瘠和较速生等优良特性,有关樟子松人工林营建对土壤颗粒组成影响的研究已有报道。苏敏等^[4]研究表明,呼伦贝尔沙地营建樟子松人工林可以促进土壤细颗粒含量增加,土壤粉粒含量随着林龄的增加而升高;Deng等^[3]研究认为,毛乌素沙地营建樟子松林使土壤粘粒和粉粒含量增加,林分密度增加将使植被恢复效果更加明显;黄刚^[11]等研究发现,科尔沁沙地樟子松林的降尘截留作用虽然可使土壤细颗粒含量增加,但是并未对土壤机械组成产生显著影响,研究区土壤仍以砂粒为主。以往研究由于受林龄和土壤剖面深度的限制,使得营建樟子松人工林后土壤颗粒组成变化的演变机制尚不明确。鉴于此,本文以 13—56 年樟子松人工林地作为研究样地,采用空间序列替代时间序列的方法,并选择临近沙质草地作为对照,旨在探究退化沙质草地营建樟子松人工林后土壤颗粒组成的变化,从而为该区域植被恢复提供科学支撑和技术支持。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地设立在科尔沁沙地南缘的辽宁省沙地治理与利用研究所章古台试验林场内($42^{\circ}39'—42^{\circ}43'N$, $122^{\circ}23'—122^{\circ}33'E$,图 1),属于中国北方典型草原与农地交错地带,海拔高度平均为 225 m。地处中温带,大

陆性季风气候,年均气温 4.6—6.3℃,年均降水量 500 mm 左右。年平均风速 4.5 m/s,春季多大风、扬沙天气。土壤类型主要为风沙土和流动风沙土,pH 值 6.7 左右^[12]。代表性植物有中华委陵菜 (*Potentilla anserina*)、中华隐子草 (*Cleistogenes chinensis*)、山杏 (*Armeniaca sibirica*)、兴安胡枝子 (*Lespedeza daurica*) 等^[13]。营建樟子松固沙林前为固定沙质草地。

1.2 试验地选择与土壤样品的采集

试验标准地的选取原则:(1)标准地要尽可能覆盖樟子松人工林不同的生长阶段;(2)标准地间的距离不少于 50 m,避免紧靠道边、农田,排除混交林;(3)标准地生境条件基本一致,依据以上原则,设立幼龄林(5 块)、中龄林(6 块)、成熟林(5 块)和过熟林(4 块)调查样地 20 块(表 1)及各林龄临近的对照草地 7 块,我们假定各林龄林分临近的对照草地值为各测定因子的起始值。

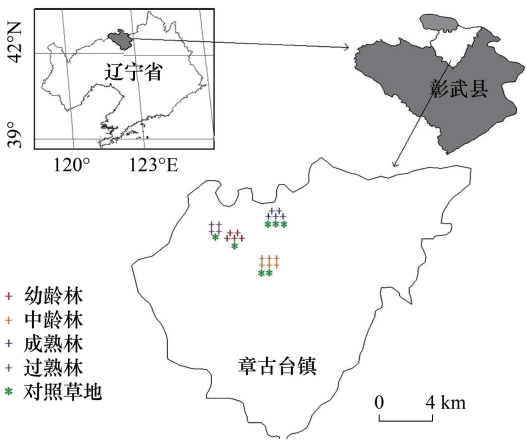


图 1 研究区地理位置图
Fig.1 Location map of the study area

表 1 樟子松人工林样地基本情况

Table 1 The basic conditions of sampling plots of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation

样地编号 Plot number	林龄 Stand ages /a	林分密度 Stand density /(株/hm ²)	平均树高 Average tree height/m	胸径 Diameter at breast height/cm
1	13	975	3.36	7.17
2	13	1625	3.66	7.27
3	13	1175	3.44	6.67
4	13	625	3.33	7.43
5	13	1425	3.82	7.36
6	25	1075	8.01	12.40
7	25	1175	7.80	13.09
8	25	500	7.40	15.79
9	25	1725	6.73	11.23
10	27	1250	10.23	14.79
11	27	775	7.55	14.51
12	44	475	9.81	21.09
13	44	400	9.45	20.67
14	44	450	10.34	21.84
15	44	450	10.45	21.83
16	44	450	9.70	21.89
17	56	400	12.91	22.22
18	56	300	12.43	23.65
19	56	525	12.27	20.48
20	56	450	13.38	21.80

在 2017 年和 2018 年的 5 月期间进行土壤样品采集,分别在选取的樟子松林地及相应对照草地设立标准地,标准地面积为 20 m×20 m,对樟子松林地进行林分调查计算林分的树高、胸径平均值,依据平均值找到林分对应的平均木,在距离平均木 1 m 的处挖取长、宽、深各 1 m 土壤剖面,将剖面的土层分成 6 层,每层有固定深度(0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm),每层用内径 70 mm、高 52 mm 的圆形钢质环刀取样,重复 3 次,取样后立即密封,用于测定土壤含水率和土壤容重,在对照草地中心挖取土壤剖面并进行同样

深度的对照取样。此外,在各个标准地内(林地和草地)随机选取 6 个样点,每个样点用 1 m 长的土钻按上述固定深度分层取样,为了减少样品数量,将不同样点相同层次的 6 个样品混合成一个样品。所有的样品带回实验室处理,测定土壤理化特性值。

1.3 土壤理化因子测定方法

土壤容重(BD, Bulk density)及土壤含水率(SW, Soil water content)采用烘干法,土壤颗粒组成采用筛分法结合激光粒度分析仪(LA—300 HORIBA)测定,土壤有机碳(SOC, Soil organic carbon)含量采用重铬酸钾容量法—外加热法,土壤全氮(TN, Total nitrogen)含量采用半微量开氏法,土壤全磷(TP, Total phosphorus)含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法,土壤全钾(TK, Total potassium)含量采用 NaOH 熔融—火焰光度法,土壤 pH 值采用电位法,详见土壤农业化学分析常规方法^[14]。

1.4 计算与数据处理

以往研究认为沙地土壤颗粒组成临界粒径为 0.05 mm^[15-16],即粒径<0.05 mm 的土壤颗粒含量越高则土壤越细,反之越粗。因此,本文将粒径<0.05 mm 的土壤颗粒称为土壤细颗粒(FP, Fine particle)。按下式计算土壤细颗粒含量:

$$FP = C + S$$

式中,FP 为土壤细颗粒百分含量;C 为土壤粘粒(Clay)百分含量;S 为土壤粉粒(Silt)百分含量。

按下式计算土壤理化因子变化量:

$$\Delta X_i = X_i - X_0$$

式中, ΔX_i 为营建樟子松林后某土壤理化因子*i*的变化量; X_i 为樟子松林地某土壤理化因子*i*的测定值; X_0 为相应对照草地某土壤理化因子*i*的测定值。

按下式计算土壤理化因子相对变化率:

$$P_i = \frac{\Delta X_i}{X_0}$$

式中, P_i 为营建樟子松林后某土壤理化因子*i*的相对变化率; ΔX_i 为营建樟子松林后某土壤理化因子*i*的变化量; X_0 为相应对照草地某土壤理化因子*i*的测定值。

以 FP 相对变化率作为因变量,其他影响因子相对变化率作为自变量进行逐步回归分析,同时排除各影响因子间共线性关系,得出土壤细颗粒相对变化率回归方程:

$$P_{FP} = \beta_0 + \beta_i P_i$$

式中, P_{FP} 为营建樟子松林后土壤细颗粒的相对变化率; β_0 为常数; P_i 为营建樟子松林后某土壤理化因子*i*的相对变化率; β_i 为营建樟子松林后某土壤理化因子*i*的回归系数。

1.5 统计分析

运用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,对樟子松林地及对照草地土壤颗粒组成进行 T 检验,对土壤细颗粒变化量采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)进行差异性分析,运用最小二乘法(LSD, Least square deviation)检验方法进行多重比较分析,显著水平为 $\alpha=0.05$ 。利用逐步回归分析建立土壤细颗粒含量变化预测模型(样本数 $n=20$),分析土壤细颗粒变化的相关土壤因子。

2 结果与分析

2.1 沙质草地营建樟子松人工林后土壤颗粒组成的变化

将不同生长阶段的樟子松林地与对照草地土壤颗粒组成(0—100 cm)进行比较,以明确科尔沁沙地樟子松人工林营建对土壤颗粒组成产生的影响。从图 2 可以看出,樟子松林地及对照草地土壤颗粒组成均以细砂为主(分别占 84.37%—86.97%和 74.51%—83.72%),中砂和极细砂次之,而土壤粘粒和粉粒含量极低(仅 5%左右)。随着樟子松林木的生长发育土壤颗粒组成变化明显。相较于对照草地,樟子松幼龄林地土壤粘粒、

粉粒、中砂含量显著增加,极细砂和细砂含量显著降低($P<0.05$);中龄林地土壤颗粒组成并无显著变化;成熟林地土壤粉粒含量显著增加,土壤极细砂含量显著减少;过熟林地土壤粉粒含量显著升高,土壤细砂含量显著降低。总体而言,沙质草地营建樟子松人工林后土壤粘粒、粉粒及中砂含量升高,而极细砂和细砂含量降低。

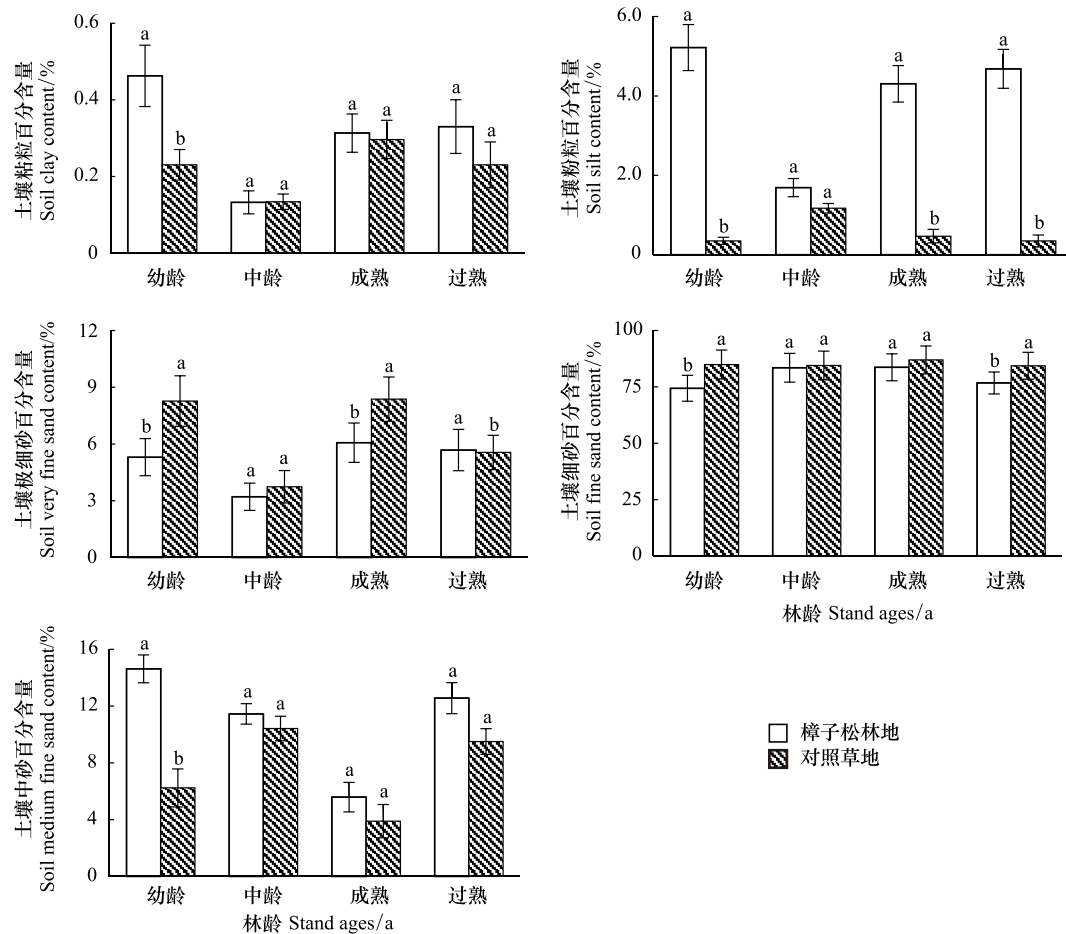


图2 樟子松林地及对照草地土壤颗粒组成差异

Fig.2 Differences of soil particle size distribution between *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations and controlled grassland

不同小写字母表示林分样地与对照草地差异显著($P<0.05$)

2.2 营建樟子松人工林后土壤细颗粒的垂直变化

樟子松人工林营建后林木的生长对土壤细颗粒垂直分布有显著的影响。由表2可以看出,沙质草地营造樟子松人工林后,不同生长阶段樟子松林的FP含量总体均呈升高趋势,但在不同土层FP含量的变化存在差异。樟子松幼龄林不同土层间FP的增加量无显著差异,其增加幅度为3.78%—6.67%,表明营建樟子松人工林初期可有效促进土壤不同深度FP积累;中龄林林地FP变化量在0—10 cm层显著高于80—100 cm层,但二者均与其他层FP变化量无显著差异;成熟林林地FP增加量随土层深度增加而逐渐降低,FP变化量在0—10 cm层显著高于20—100 cm层,而在20—100 cm层间无显著差异;过熟林林地FP增加量在0—10 cm层最大且差异明显,在10—100 cm层间无显著差异。沙质草地营建樟子松林后FP含量增加,除樟子松幼龄林外,FP增加量随土层深度增加而逐渐降低,表层FP增加量含量高于深层。

2.3 不同林龄樟子松林地土壤细颗粒含量变化特征

沙质草地营建樟子松人工林以改善区域生态环境,而对土壤性质的改良是一个长期的过程,樟子松林木不同生长阶段对FP含量的影响存在差异(表2)。本研究发现,在0—10 cm层,樟子松过熟林FP变化量高于成熟林,并且显著高于樟子松幼龄林和中龄林($P<0.05$);在10—100 cm层,樟子松幼龄林FP变化量均显著

高于中龄林而与过熟林无显著差异,相较于樟子松成熟林,仅在 60—80 cm 层差异明显。此外,樟子松中龄林 FP 变化量在不同土层均最小。随着樟子松人工林林龄的增加,FP 变化量在 0—10 cm 层逐渐升高且呈显著正相关,而在 10—100 cm 层并未呈现显著相关关系(图 3)。综上研究,樟子松中龄林 FP 变化量最小,随着樟子松林林龄的增加,FP 变化量在 0—10 cm 层逐渐升高,而在 10 cm 以下并无显著关系。

表 2 不同龄组土壤细颗粒含量变化量垂直分布
Table 2 Vertical distribution of soil fine particle variation in different age groups

土层 Soil layer/cm	土壤细颗粒含量变化量 Soil fine particle variation/%			
	幼龄林 Young forests	中龄林 Mid-aged forests	成熟林 Mature forests	过熟林 Over-mature forests
0—10	5.10±1.79Ba	2.17±1.54Ba	6.90±1.21ABa	10.46±1.15Aa
10—20	5.26±1.49Aa	0.17±0.67Bab	5.27±0.35Aab	4.43±0.38Ab
20—40	4.34±0.90Aa	-0.28±0.73Bab	4.21±0.37Abc	3.86±0.61Ab
40—60	6.67±2.33Aa	0.01±0.41Bab	3.94±0.76ABbc	3.86±0.42ABb
60—80	5.62±1.65Aa	0.45±0.39Bab	2.62±0.74Bc	3.22±0.33ABb
80—100	3.78±0.87Aa	-0.51±0.52Bb	2.42±1.09Ac	3.79±0.44Ab

不同大写字母表示相同土层不同龄组间差异显著,不同小写字母表示相同龄组不同土层间差异显著 ($P<0.05$)

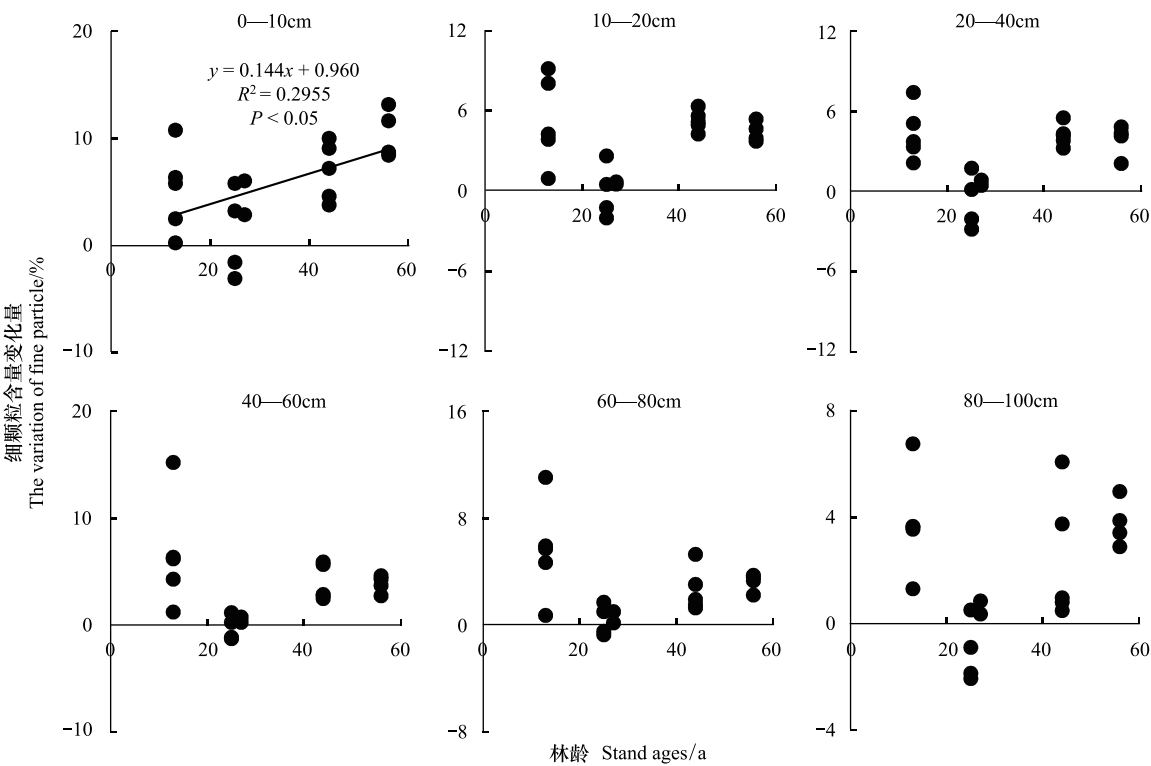


图 3 不同土层土壤细颗粒含量变化量与林龄的关系
Fig.3 Relationship between soil fine particle and stand ages in different soil layers

2.4 樟子松林土壤细颗粒含量变化与其他土壤因子关系

沙质草地营造樟子松林后,土壤 FP 含量变化与诸多土壤因子相关且不同土层其相关因子存在差异。从表 3 可以看出,在 0—10 cm 层,樟子松林地 FP 的变化仅与 TK 呈极显著负相关;在 10—20 cm 层,FP 与 TP 显著正相关,而与 SW 极显著正相关;在 20—40 cm 层,FP 与 TP 显著正相关,而与 SOC 和 SW 极显著正相关,但与 TK 却呈极显著负相关;在 40—60 cm 层,FP 与 SOC 和 SW 显著正相关;在 60—80 cm 层,FP 仅与 SW 极显著正相关;在 80—100 cm 层,FP 与 SW 极显著正相关,与 TP 显著正相关,与 TK 极显著负相关。此外,樟子松

林地 FP 的变化与 BD、TN 和 pH 值并无显著相关关系。综上所述,除 0—10 cm 层外,FP 的变化均与 SW 呈显著或极显著正相关关系;在 20—60 cm 层,SOC 与 FP 变化的相关性随土层深度的增加而逐渐降低。TP 与 FP 变化在 10—40 cm 层呈正相关,而在 60—80 cm 层呈负相关,说明 TP 在不同土层与 FP 的变化关系不同。FP 的变化与 TK 在 0—10 cm、20—40 cm 和 80—100 cm 层极显著负相关。

表 3 土壤细颗粒含量变化相关土壤因子的回归分析
Table 3 Regression analysis of related soil factors of fine particle change

土层 Soil layer/cm	预测变量 Predictive variable	系数估计值 Estimates	标准误差 Standard error	<i>P</i>	<i>R</i> ²
0—10	TK	-12.45	2.63	<0.001	0.600
10—20	SW	6.00	1.75	0.003	0.412
	TP	1.41	0.58	0.025	
	TK	-9.84	3.18	0.008	
20—40	SOC	4.15	0.68	<0.001	0.808
	SW	2.02	0.47	0.001	
	TP	1.36	0.53	0.022	
40—60	SOC	3.12	1.37	0.036	0.515
	SW	1.80	0.75	0.028	
60—80	SW	4.19	1.16	0.002	0.630
80—100	TK	-37.04	10.80	0.004	0.714
	SW	4.94	1.43	0.004	
	TP	-0.54	0.19	0.013	

TK:土壤全钾 Total potassium;SW:土壤含水率 Soil water content;TP:土壤全磷 Total phosphorus;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon,表中仅列出显著相关的土壤因子($P<0.05$),按系数估计值值从大到小排列

3 讨论

3.1 营建樟子松人工林对土壤颗粒组成变化的影响

研究区所在的科尔沁沙地位于我国北方典型的农牧交错带,是我国沙漠化最为严重的地区之一^[17],已退化为由不同沙漠化程度的群落斑块镶嵌组成的高度异质性的斑块景观格局,原生植被中的乔木层已基本消失,草本层也急剧退化,物种组成减少,群落盖度和生物量下降,生态功能降低^[1]。由于气候干燥,风力侵蚀作用频繁而强烈,土壤细颗粒在风沙流作用下离开原来位置,使得土壤中粗粒物质相对增加,土壤颗粒粗化。本研究发现,营建樟子松人工林后土壤粘粒、粉粒及中砂含量升高,而极细砂和细砂含量降低,土壤颗粒组成呈细化趋势,但土壤颗粒仍以砂粒为主,这与李蒙蒙等^[18]研究结果一致。尽管植被固沙成果显著,但营建人工植被对土壤颗粒组成的影响有限,如曹成有等^[19]研究发现,科尔沁沙地营建小叶锦鸡儿((*Caragana microphylla*))人工林后土壤细砂(0.10—0.25 mm)含量仍然达到 80% 以上;蔡楚雄等^[20]研究发现,樟子松林地土壤颗粒的粒径主要集中在 0.2—0.3 mm 之间。

3.2 营建樟子松人工林土壤细颗粒垂直变化及相关土壤因子

干旱半干旱沙漠化区域植被具有保育土壤、遏制沙漠化发生发展的生态服务功能。本研究发现,沙质草地营造樟子松林后,幼龄时期不同土层 FP 含量均有一定的增加,中龄期开始 FP 的增加量随土层深度增加而逐渐降低,表层的 FP 增加量显著高于深层。樟子松人工林的营建可以有效降低林间风速,降低了土壤风蚀,使樟子松人工林地表细粒物质得以保留^[21-22]。此外,樟子松的叶片对大气降尘具有吸附截留的作用,细颗粒物直接沉降或在降水作用下在地表沉积^[23],然后在降水淋溶作用下沿沙质土壤的大孔隙向下缓慢运移填充土壤孔隙^[24],然而,不同土层 FP 的增加导致沙质土壤孔隙逐渐减小,减缓细粒物质的运移,导致 FP 增加量随土层深度增加而逐渐降低,表层的 FP 增加量显著高于深层。

在干旱半干旱地区,土壤水分不仅直接决定植物的生长状况^[25],而且土壤水分还决定了的 FP 垂直分布。在降雨的过程中,FP 随着雨水逐渐向下运移,土壤垂直方向 SW 的大小决定了 FP 的含量,土壤 SW 越高则 FP 也越多,而 FP 含量的升高也使土壤的保水能力增强^[26-27],所以 FP 的含量也影响着 SW 的变化。本研究同样发现,FP 变化与 SW 在 10—40 cm 和 60—100 cm 层极显著正相关,在 40—60 cm 层显著正相关,但在表层(0—10 cm)并未呈现显著相关关系,这可能由表层 FP 变化受到的影响因子较多引起的。一般认为,土壤颗粒组成的改善可以优化土壤结构从而降低土壤容重,但本研究发现,樟子松人工林地 BD 与 FP 相关性不显著,Kaur 等^[28]同样发现干旱半干旱区沙地土壤颗粒组成与土壤容重并无相关关系,这可能与研究区的土壤质地有关,韩光中等^[29]认为干旱地区土壤容重仅与土壤深度显著相关。

植物残体是土壤有机碳最重要的来源,表层土壤有机碳主要来源于地上凋落物和分布于表层的细根,而深层土壤有机碳则主要来源于根系脱落物和根系分泌物^[30-31]。本研究发现,樟子松林地 FP 与 SOC 分别在 20—40 cm 和 40—60 cm 层呈极显著和显著正相关,这与颜安等^[32]和佟小刚^[33]等研究结果基本一致。马建业等^[34]研究认为,沙地植被恢复过程中 FP 均有明显的固碳效果。在沙地樟子松人工林,林木细根主要集中在 40 cm 以上土层^[35]。在林木生长过程中,根系脱落物及根系分泌物在土壤中快速分解转化形成土壤腐殖质^[36-37],促进土壤有机质的积累和土壤颗粒的细化。在科尔沁沙地,土壤有机碳和全氮主要分布于土壤粘粉粒中^[38],但本研究并未发现 FP 与 TN 的显著相关关系,李尝君等^[39]同样认为不同植被恢复程度的沙地土壤全氮含量无明显变化。

森林生态系统养分主要分布于土壤组分、植物组分和枯落物组分中,其中养分贮量最高的是土壤^[40]。相较于沙质草地,樟子松林木个体的生长发育消耗的养分增加,土壤养分含量明显降低;然而,森林生态系统土壤养分主要来源于土壤表层枯落物分解归还^[41]。随着樟子松人工林林龄的增加,地表枯落物的积累不仅可有效增加地表粗糙度,提高樟子松林土壤抗风蚀能力,增强地表土壤稳定性,樟子松枯落物分解还可以改善土壤理化性质,使土壤颗粒存在细致化趋势^[3]。土壤表层枯落物分解产生的养分在降水淋溶作用下向深层土壤运移,随着植被恢复年限的增加,土壤养分表聚性越来越明显,并且随土壤剖面深度的增加植被恢复效果存在滞后性^[42]。表聚效应的结果表现为土壤上层养分富集,而土壤下层养分贫乏,所以 FP 与 TP 在 10—40 cm 层呈正相关关系,在 80—100 cm 层呈负相关关系,但是 FP 与 TK 在 0—10 cm、20—40 cm 和 80—100 cm 层均呈极显著负相关。土壤中钾元素主要以速效钾的形式参与反应,土壤速效钾移动性和溶解性较好^[43]。樟子松枯落物的分解产生腐殖酸,腐殖酸可使土壤中部分非交换性钾释放,土壤交换性钾的含量增加^[44],不仅供应樟子松林木的生长消耗,还有一部分交换性钾转移到土壤溶液中,以水溶性钾的形式随降水淋失,使得 TK 含量降低。

3.3 不同林龄樟子松人工林土壤细颗粒含量变化特征

沙质草地营造樟子松人工林后,林地的 FP 变化量随林龄的增加存在差异。在 0—10 cm 层,樟子松林 FP 变化量与林龄呈显著的正相关关系($P < 0.05$)。华瑞等^[45]的研究同样表明,表层土壤细颗粒含量与植物群落生长年限存在正相关关系。在樟子松人工林表层土壤细颗粒含量的增加是由细粒物质的沉积和土壤养分的表聚效应共同作用引起的。姚姣转等^[46]研究发现,在植物群落演替过程中,植物的根系及枯落物等形成的土壤结皮具有抗风蚀等作用,改变土壤的结构,利于土壤中养分的富集,颗粒存在细致化趋势。陈小红等^[47]研究认为,土壤沙漠化逆转的实质是土壤细粒化伴随着土壤养分富集。在 10—100 cm 层,FP 的变化与林龄并无显著关系。刘志强等^[48]对不同植物群落下的土壤粒径分布特征进行研究,同样发现植被恢复对表层土壤改良效果较好,而对深层土壤的改良效果不及表层明显。樟子松中龄林 FP 变化量最小,这与樟子松中龄林的对照草地 FP 含量较高有关,该沙质草地在营建樟子松林前 FP 含量高于其他草地,导致樟子松人工林的营建对其土壤颗粒组成的改良效果较小,说明沙地植被恢复过程中,土壤条件越差则植被改良效果越明显。

4 结论

沙质草地营建樟子松人工林后,不同土层土壤细颗粒含量均呈增加趋势,在 0—10 cm 层增加趋势明显且

随土层深度增加土壤细颗粒增加量逐渐降低(除幼龄林外),但樟子松林地土壤颗粒组成仍以砂粒为主,土壤粘粒和粉粒含量极低。随着樟子松人工林林龄的增加,土壤细颗粒变化量在 0—10 cm 层逐渐升高,而在 10—100 cm 层并无显著变化趋势。土壤细颗粒含量的变化在 10—100 cm 层与土壤含水量呈显著正相关,在 0—10、20—40 cm 和 80—100 cm 层与土壤全钾极显著负相关,在 20—60 cm 层与土壤有机碳显著正相关,在 10—40 cm 和 80—100 cm 层分别与土壤全磷呈显著正相关和负相关。综上所述,在樟子松人工林营建后可采取封育禁牧措施,保证樟子松林下枯落物的积累,减少樟子松人工林地表风蚀作用,提高樟子松林保水能力,同时促进养分循环加快成土过程,可以增加土壤细颗粒含量,提高土壤质量。

参考文献(References):

- [1] 张继义,赵哈林.退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤—植被系统稳定性的影响.生态环境学报,2009,18(4):1395-1401.
- [2] 邓继峰,丁国栋,李景浩,邓舸,张若菡,周永斌,殷有.基于3种不同土壤粒径分级制度的毛乌素沙地樟子松林地土壤体积分形维数差异研究.西北林学院学报,2017,32(3):35-40.
- [3] Deng J F, Li J H, Deng G, Zhu H Y, Zhang R H. Fractal scaling of particle-size distribution and associations with soil properties of Mongolian pine plantations in the Mu Us Desert, China. Scientific Reports, 2017, 7(1): 6742.
- [4] 苏敏,丁国栋,高广磊,张英,郭米山.呼伦贝尔沙地樟子松人工林土壤颗粒多重分形特征.干旱区资源与环境,2018,32(11):129-135.
- [5] Duan H C, Wang T, Xue X, Liu S L, Guo J. Dynamics of aeolian desertification and its driving forces in the Horqin Sandy Land, Northern China. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(10): 6083-6096.
- [6] Han Z W, Wang T, Yan C Z, Liu Y B, Liu L C, Li A M, Du H Q. Change trends for desertified lands in the Horqin Sandy Land at the beginning of the twenty-first century. Environmental Earth Sciences, 2010, 59(8): 1749-1757.
- [7] 苏永中,赵哈林.科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征.生态学报,2004,24(1):71-74.
- [8] Zhang G L, Dong J W, Xiao X M, Hu Z M, Sheldon S. Effectiveness of ecological restoration projects in Horqin Sandy Land, China based on SPOT-VGT NDVI data. Ecological Engineering, 2012, 38(1): 20-29.
- [9] 左小安,赵哈林,赵学勇,郭铁瑞,张铜会,罗亚勇,苏娜,冯静.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.环境科学,2009,30(8):2387-2393.
- [10] 胡斌,段昌群,王震洪,张世彪,赵联春.植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响.土壤学报,2002,39(4):604-608.
- [11] 黄刚,赵学勇,苏延桂,岳广阳.科尔沁沙地樟子松人工林对微环境改良效果的评价.干旱区研究,2008,25(2):212-218.
- [12] 王凯,雷虹,夏扬,于国庆.杨树幼苗非结构性碳水化合物对增加降水和氮添加的响应.应用生态学报,2017,28(2):399-407.
- [13] 朱教君,曾德慧,康宏樟,吴祥云,范志平.沙地樟子松人工林衰退机制.北京:中国林业出版社,2005.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版).北京:中国农业出版社,2005:25-114.
- [15] 贾晓红,李新荣,李元寿.干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征.地理研究,2007,26(3):518-525.
- [16] 蒙仲举,任晓萌,高永. PLA 平铺沙障对沙丘土壤颗粒分形特征的影响.土壤通报,2014,45(3):613-617.
- [17] 王永芳,张继权,马齐云,朱萌.21世纪初科尔沁沙地沙漠化对区域气候变化的响应.农业工程学报,2016,32(S2):177-185.
- [18] 李蒙蒙,丁国栋,高广磊,赵媛媛,于明含,王德英.樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)在中国北方10省(区)引种的适宜性.中国沙漠,2016,36(4):1021-1028.
- [19] 曹成有,蒋德明,全贵静,耿莉,崔振波,骆永明.科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化.水土保持学报,2004,18(6):108-111.
- [20] 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.水土保持研究,2017,24(2):49-54.
- [21] 蒋德明,曹成有,押田敏雄,李雪华,李明.科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工林防风固沙及改良土壤效应研究.干旱区研究,2008,25(5):653-658.
- [22] 马成忠,邓继峰,丁国栋,邓舸,赵国平,张若菡,杨立新,周永斌.不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响.水土保持学报,2017,31(1):230-235.
- [23] Bowman R A, Vigil M F, Nielsen D C, Anderson R L. Soil organic matter changes in intensively cropped Dryland systems. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(1): 186-191.
- [24] 曹成有,蒋德明,全贵静,耿莉,崔振波,骆永明.科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化.水土保持学报,2004,18(6):108-111,131-131.
- [25] 阿拉木萨,蒋德明,李雪华,骆永明.科尔沁沙地典型人工植被区土壤水分动态研究.干旱区研究,2007,24(5):604-609.

- [26] 马增辉, 韩霁昌, 张瑞庆. 不同混合比例的砒砂岩与沙复配土壤中粉粒和黏粒的运移规律. 安徽农业科学, 2015, 43(18): 110-112, 254-254.
- [27] An N, Tang C S, Xu S K, Gong X P, Shi B, Inyang H I. Effects of soil characteristics on moisture evaporation. Engineering Geology, 2018, 239: 126-135.
- [28] Kaur R, Kumar S, Gurung H P. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. Australian Journal of Soil Research, 2002, 40(5): 847-858.
- [29] 韩光中, 王德彩, 谢贤健. 中国主要土壤类型的土壤容重传递函数研究. 土壤学报, 2016, 53(1): 93-102.
- [30] Jobbágy 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.
- [31] Phillips D A, Fox T C, Six J, Philips D A, Fox T C. Root exudation (net efflux of amino acids) may increase rhizodeposition under elevated CO₂. Global Change Biology, 2010, 12(3): 561-567.
- [32] 颜安, 李周晶, 武红旗, 温鹏飞. 不同耕作年限对耕地土壤质地和有机碳垂直分布的影响. 水土保持学报, 2017, 31(1): 291-295.
- [33] 佟小刚, 韩新辉, 李娇, 杨云芬, 王健. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤颗粒结合态碳库分异特征. 农业工程学报, 2016, 32(21): 170-176.
- [34] 马建业, 佟小刚, 李占斌, 付广军, 李娇, 哈斯尔. 毛乌素沙地沙漠化逆转过程土壤颗粒固碳效应. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3487-3494.
- [35] 孟鹏, 张柏习, 王曼. 科尔沁沙地赤松和樟子松根系生物量分配与构型特征. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2935-2941.
- [36] Fisher M J, Rao I M, Ayarza M A, Lascano C E, Sanz J I, Thomas R J, Vera R R. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. Nature, 1994, 371(6494): 236-238.
- [37] Nepstad D C, de Carvalho C R, Davidson E A, Jipp P H, Lefebvre P A, Negreiros G H, da Silva E D, Stone T A, Trumbore S E, Vieira S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. Nature, 1994, 372(6507): 666-669.
- [38] 赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 李玉强. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳和全氮含量变化. 生态学报, 2008, 28(3): 976-982.
- [39] 李尝君, 曾凡江, 郭京衡, 热甫开提, 刘波. 植被恢复程度与沙地土壤性质——以塔克拉玛干沙漠南缘为例. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1061-1067.
- [40] 刘增文, 王乃江, 李雅素, 吕月玲. 森林生态系统稳定性的养分原理. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(12): 129-134.
- [41] Rubino D L, McCarthy B C. Evaluation of coarse woody debris and forest vegetation across topographic gradients in a southern Ohio forest. Forest Ecology and Management, 2003, 183(1/3): 221-238.
- [42] 李少华, 王学全, 包岩峰, 尹书乐. 不同类型植被对高寒沙区土壤改良效果的差异分析. 土壤通报, 2016, 47(1): 60-64.
- [43] 刘继红, 程道全, 陈杰. 土壤速效钾空间模拟的技术方法研究. 土壤通报, 2012, 43(5): 1215-1220.
- [44] 杜振宇, 王清华, 刘方春, 马丙尧. 腐殖酸对钾在褐土中迁移和转化的影响. 土壤, 2012, 44(5): 822-826.
- [45] 华瑞. 黄土丘陵区不同退耕年限林草地土壤结构及大孔隙研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [46] 姚姣转, 刘廷玺, 童新, 王天帅, 王海燕. 科尔沁沙地沙丘-草甸相间地土壤颗粒的分形特征. 中国沙漠, 2016, 36(2): 433-440.
- [47] 陈小红, 段争虎, 谭明亮, 张瑞君. 沙漠化逆转过程中土壤颗粒分布及其养分含量的变化特征——以宁夏盐池县为例. 土壤通报, 2010, 41(6): 1412-1417.
- [48] 刘志强, 高吉喜, 田美荣, 栗忠飞, 王亚萍, 童明坤. 生态修复区植物群落土壤粒径的分维特征. 生态学杂志, 2017, 36(2): 303-308.