

DOI: 10.5846/stxb210808161750

张岩松,雷泽勇,于东伟,于德良,周晏平.沙质草地营造樟子松林后土壤容重的变化及其影响因子.生态学报,2019,39(19): - .
Zhang Y S, Lei Z Y, Yu D W, Yu D L, Zhou Y P.Changes in soil bulk density and its influencing factors after sandy grassland afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*.Acta Ecologica Sinica,2019,39(19): - .

沙质草地营造樟子松林后土壤容重的变化及其影响因子

张岩松,雷泽勇*,于东伟,于德良,周晏平

辽宁工程技术大学环境科学与工程学院,阜新 123000

摘要:采用野外调查和室内试验相结合,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 块樟子松人工固沙林样地(以临近的 7 块天然草地为对照)为研究对象,研究了沙质草地营造樟子松人工林后不同生长阶段 0—100 cm 土层土壤容重的变化及其影响因子。结果表明:天然沙质草地营造樟子松人工固沙林后,不同生长阶段樟子松林在 0—10 cm 土层土壤容重变化的变异系数为 78%,其他土层变异系数范围为 1.08%—4.35%。随着樟子松人工林林龄的增加,土壤容重变化量在 0—20 cm 和 60—100 cm 层逐渐降低,在 20—60 cm 层先降低,到 37 年左右后逐渐升高,过熟林较成熟林显著增大。林龄对不同土层容重变化的决定系数由大到小依次为 40—60、60—80、20—40、10—20、0—10、80—100 cm 层。土壤容重变化在 60—80 cm 层与土壤粗颗粒(粒径>0.05 mm)含量、在 0—10、20—40 cm 和 60—80 cm 层与土壤全氮含量、在 0—10、20—60 cm 和 80—100 cm 层与土壤全磷含量、在 20—40 cm 和 80—100 cm 层与土壤全钾含量显著负相关,且土壤全氮和全磷含量对土壤容重的影响效果随土层深度的增加逐渐降低,土壤容重变化在 10—20 cm 层与土壤含水率、在 20—40 cm 层与土壤有机碳含量呈显著的正相关。总体上,沙质草地营造樟子松人工林可以改善土壤结构,提高土壤质量,建议采取封育禁牧等营林措施增加樟子松林下枯落物积累,提高土壤养分含量,同时对 37 年樟子松人工林逐渐进行更新。

关键词:科尔沁沙地;草地造林;樟子松;土壤容重

Changes in soil bulk density and its influencing factors after sandy grassland afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

ZHANG Yansong, LEI Zeyong*, YU Dongwei, YU Deliang, ZHOU Yanping

School of Environmental and Since Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract: Using a combination of field surveys and laboratory analysis, in the Zhanggutai area of Liaoning province, 20 forest plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different growth stages (including young forests, mid-aged forests, mature forests, and over-mature forests) and 7 neighboring control grasslands were selected. In this paper, the changes in soil bulk density and its influencing factors were studied in the 0—100 cm soil layer of different growth stages after sandy grassland afforestation with *P. sylvestris* var. *mongolica*. The results showed that after sandy grassland afforestation, the variance coefficient of soil bulk density was 78% in the 0—10 cm soil layer and the variance coefficient in other soil layers ranged from 1.08% to 4.35%. As the stand age increased, the magnitude of soil bulk density decreased gradually in 0—20 and 60—100 cm soil layers, however, the magnitude decreased firstly and then increased after 37 years in 20—60 cm soil layers, and the magnitude in over-mature forests was significantly higher than that in mature forests. In different soil layers, the coefficients of determination of stand ages for the magnitude of soil bulk density in decreasing order were 40—60, 60—

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31570709)

收稿日期:2018-08-16; 网络出版日期:2019-00-00

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

80, 20—40, 10—20, 0—10, and 80—100 cm soil layers. The coarse-textured soil (particle size > 0.05 mm) in the 60—80 cm soil layer; soil total nitrogen content in 0—10, 20—40, and 60—80 cm soil layers; soil total phosphorus content in 0—10, 20—60, and 80—100 cm soil layers; and soil total potassium content in 20—40 and 80—100 cm soil layers were significantly negatively correlated with soil bulk density, and the impact of soil total nitrogen and soil total phosphorus content on soil bulk density changes gradually decreased as the soil layer depth increased. However, soil moisture in the 10—20 cm soil layer and soil organic carbon content in the 20—40 cm soil layer were significantly positively correlated with soil bulk density. On the whole, sandy grassland afforestation with *P. sylvestris* var. *mongolica* can improve soil structure and quality. It is suggested that enclosure and grazing prohibition are effective to increase leaf litter accumulation and improve soil nutrient content in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations. In addition, 37 year old *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations need to be regenerated gradually.

Key Words: Horqin sandy land; grassland afforestation; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; soil bulk density

土壤容重是指一定容积内(包括土壤孔隙)的土壤重量,是土壤重要的物理性质之一。土壤容重的变化与土壤孔隙度密切相关,直接影响土壤透气性、入渗性能、持水能力和溶质迁移潜力等^[1-2],对植物根系的生长和作物产量也会产生间接影响^[3]。土地利用和土地覆盖变化(LUCC, Land-Use and Land-Cover Change)是人类干预土壤容重较为重要和直接的活动。通过改变土地利用方式,可以改变土壤营养循环强度、总量及路径,从而改变土壤供应作物的营养水平,进而导致土壤肥力状况发生变化^[4]。不同土地利用方式对土壤物理性质的影响已逐渐被重视,许多学者研究表明,土地利用变化对土壤容重产生影响。例如,泰山山前平原荒地转变为农田和林地使土壤容重显著降低^[5];纳板河流域自然林转变为农业用地后土壤容重升高但不显著^[6];东北黑土区裸地转变为农田和自然草地后土壤容重均有不同程度降低^[7]。此外,在土地利用方式转变过程中不同土地利用方式对土壤物理性质的影响还决定于土地利用方式转变的时间长短^[8]。目前,土地利用变化对土壤容重影响的研究主要集中于农业用地,对草地造林后土壤容重的影响研究比较缺乏,而且土壤容重变异特征的影响因素尚不明确。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)天然分布于我国大兴安岭北部山地和呼伦贝尔沙地草原,具有耐寒,耐旱,耐贫瘠和较速生等优良特性。自20世纪50年代在我国辽宁省章古台地区成功引种以来,樟子松作为优良的固沙造林树种被迅速引种栽植^[9]。以往有关樟子松人工固沙林的研究主要集中在樟子松林营建与管理^[10-11]、衰退机制以及樟子松林的适应性研究等方面^[12-14],而对于干旱半干旱区沙质草地营造樟子松林对土壤质量的影响,特别是对土壤容重的影响鲜见报道,胡亚林等^[15]对沙质退化草地造林的研究发现,32年樟子松林地相较于沙质草地在0—10 cm土层土壤容重下降了4.93%,现有研究限制了对干旱半干旱地区沙质草地造林生态学效应的全面认识。因此,本文以沙质草地转变的樟子松人工林作为研究样地,选择邻近草地作为对照,旨在明确沙质草地转变为樟子松林后土壤容重的变化及其影响因子,为沙地造林后土壤质量演变的研究提供科学支撑。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地设立在中国东北科尔沁沙地的辽宁省固沙造林研究所章古台试验林场内(图1, 42°39'—42°43'N, 122°23'—122°33'E),该地为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。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^[9]。营建樟子松固沙林前为沙质固定草地。

1.2 试验地选择与土壤样品的采集

试验标准地的选取遵循以下原则:(1)标准地要尽可能覆盖樟子松固沙林不同的林分年龄;(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,每个样地的面积为 20 m×20 m,对林地内樟子松进行每木检尺,得到林分基本情况(表 1)并选定平均木。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。

在 2017 年和 2018 年的 5 月期间进行土壤采样,分别在林地距离平均木 1 m 的位置和草地中心挖土壤剖面,用环刀 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 层的原状土用于测定土壤含水率和土壤容重,并在选定样地内(林地和草地)随机选取 6 个样点,分别钻取上述固定土层的土壤混合均匀,带回实验室。土样自然风干后挑除石块和植物残体等杂物,过筛后置于密封袋内用于测定土壤理化特性值。

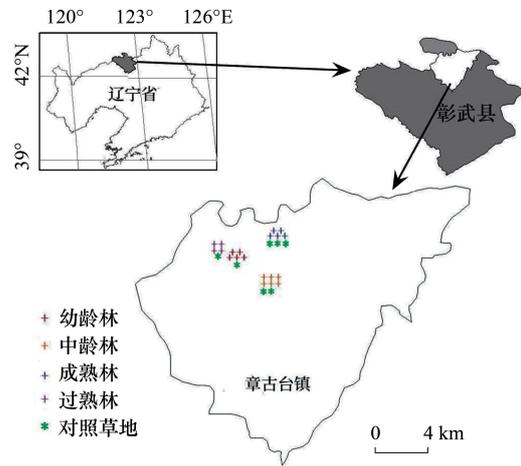


图 1 研究区地理位置图

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

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(W, Water content)采用烘干法,土壤机械组成采用激光粒度分析仪测定,土壤有机碳(SOC, Soil organic carbon)含量采用重铬酸钾容量法-外加加热法,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^[16]。

1.4 计算与数据处理

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 为草地造林某土壤理化因子 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, ΔX_i 为草地造林某土壤理化因子 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; P_i 为草地造林某土壤理化因子 i 的相对变化率。

将土壤容重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, 得出土壤容重相对变化率回归方程:

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

式中, P_{BD} 为草地造林土壤容重的相对变化率; β_0 为常数; P_i 为草地造林某土壤理化因子 i 的相对变化率; β_i 为草地造林某土壤理化因子 i 的回归系数。

那么, 土壤容重则可以表示为:

$$BD = \frac{\beta_i BD_0}{X_0} X_i + BD_0 (1 + \beta_0 - \beta_i)$$

可见, 土壤容重相对变化率与其影响因子相对变化率的正负效应和土壤容重与其相应的因子正负效应相同, 但系数大小存在差异。

1.5 统计分析

运用 SPSS 20.0 软件对上述计算的数据进行统计分析, 不同土层的土壤容重变化量采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 进行差异性分析, 运用最小显著差异法 (LSD) 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理化因子变化率对土壤容重变化率影响的模型。选择与土壤容重变化可能相关的 8 个土壤理化因子: 土壤含水率 (W)、粒径 < 0.05 mm 的土壤细颗粒 (Fs, Fine soil)、粒径 > 0.05 mm 的土壤粗颗粒 (Cs, Coarse soil)、土壤有机碳 (SOC)、土壤全氮 (TN)、土壤全磷 (TP)、土壤全钾 (TK)、土壤 pH 值 (pH) 的相对变化率为自变量, 土壤容重 (BD) 的相对变化率为因变量, 运用逐步回归分析对自变量进行删选, 满足允许水平 $P < 0.05$ 的变量进入模型。

2 结果与分析

2.1 樟子松人工林土壤容重变化量垂直分布

由表 2 可以看出, 和天然沙质草地相比, 营造樟子松人工固沙林后土壤容重在 0—100 cm 土层随着土层深度的增加没有呈现一致的趋势和规律。土壤容重的变化在幼龄林的不同土层之间出现最大的变异, 其中 0—10、10—80、80—100 cm 三个层次间存在显著差异 ($P < 0.05$), 土壤容重变化量在 0—10 cm 最大, 在 10—80 cm 的各层次间无显著差异, 而在 80—100 cm 最小, 变化随深度的增加而减小, 在 0—100 cm 土层增加约 0.10 g/cm³ 左右。中龄林在 0—10 cm 土层减小, 10—20 cm 土层跟草地基本一致, 20—100 cm 土层增大, 但不同土层间土壤容重变化量无显著差异。成熟林在 10—20 cm 和 60—80 cm 土层增大, 其余土层减小, 0—10 cm 土层的变化最小且显著低于 10—40 cm 和 60—80 cm 土层, 10—100 cm 土层各层次间的变化无显著差异。过熟

林在 0—10 cm 土层和天然沙质草地基本一致,10—20 cm 土层减小,其他土层增大,土壤容重的变化在 20—60 cm 土层显著高于除 80—100 cm 以外其他土层,而在 0—20 cm 和 60—100 cm 土层间无显著差异。

表 2 不同龄组土壤容重变化量垂直分布

Table 2 Vertical distribution of soil bulk density variation in different age groups

土层 Soil layer/cm	土壤容重变化量 Soil bulk density variation/(g/cm ³)				变异系数/% Coefficient of 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	0.14±0.01a	-0.05±0.04a	-0.10±0.04b	0.00±0.01c	72.88
10—20	0.09±0.00b	0.00±0.02a	0.01±0.02a	-0.01±0.01c	2.14
20—40	0.08±0.00b	0.02±0.03a	-0.02±0.03a	0.07±0.01a	1.19
40—60	0.11±0.01b	0.02±0.03a	-0.05±0.03ab	0.05±0.01ab	2.01
60—80	0.11±0.01b	0.01±0.02a	0.02±0.02a	0.01±0.01c	1.08
80—100	0.06±0.01c	0.01±0.02a	-0.05±0.02ab	0.02±0.01bc	4.35

不同小写字母表示相同龄组不同土层间差异显著($P<0.05$)

由表 2 可以看出,和天然沙质草地相比,营造樟子松人工固沙林后土壤容重在 0—100 cm 土层随着土层深度的增加逐渐发生变化。土壤容重的变化在幼龄林的不同土层之间出现最大的变异,其中 0—10、10—80 cm 和 80—100 cm 3 个层次间存在显著差异($P<0.05$),土壤容重变化量在 0—10 cm 最大,在 10—80 cm 的各层次间无显著差异,而在 80—100 cm 最小,变化随深度的增加而减小,在 0—100 cm 土层增加约 0.10 g/cm³ 左右。中龄林在 0—10 cm 土层减小,10—20 cm 土层跟草地基本一致,20—100 cm 土层增大,但不同土层间土壤容重变化量无显著差异。成熟林在 10—20 cm 和 60—80 cm 土层增大,其余土层减小,0—10 cm 土层的变化最小且显著低于 10—40 cm 和 60—80 cm 土层,10—100 cm 土层各层次间的变化无显著差异。过熟林在 0—10 cm 土层和天然沙质草地基本一致,10—20 cm 土层减小,其他土层增大,土壤容重的变化在 20—60 cm 土层显著高于除 80—100 cm 以外其他土层,而在 0—20 cm 和 60—100 cm 土层间无显著差异。

2.2 影响土壤容重变化的理化因子

天然沙质草地营造樟子松林后,土壤容重变化受诸多土壤因子影响且不同土层影响因子存在差异。从表 3 可以看出,在樟子松林地土壤中,0—10 cm 土层土壤全磷和全氮分别与土壤容重变化呈显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)的负相关,其中全磷的影响大于全氮的影响;10—20 cm 土层土壤容重变化仅与土壤含水率显著正相关,而其他土层土壤含水率对土壤容重变化的影响不显著;20—40 cm 土层土壤容重变化与土壤有机碳正相关,而与全氮、全磷、全钾负相关,其中全钾的影响效果显著而其他因子极显著;40—60 cm 土层土壤容重变化仅与全磷呈极显著负相关;60—80 cm 土层土壤容重变化与土壤粗颗粒和土壤全氮显著负相关;80—100 cm 土层土壤全钾和全磷分别与土壤容重变化呈显著和极显著的负相关。从不同土层土壤容重变化的回归分析可以看出,除土壤有机碳外,土壤养分元素与土壤容重变化均呈负相关关系,其中土壤全氮和全磷回归系数绝对值随土层深度的增加逐渐减小,说明其对土壤容重变化的影响效果逐渐降低,但土壤全钾对土壤容重变化的影响并不符合上述规律。

2.3 林龄对土壤容重变化的影响

天然沙质草地转变为樟子松人工固沙林后,不同林龄的土壤容重变化的垂直分布存在差异(表 2),为进一步分析不同土层土壤容重变化与樟子松林林龄的关系,将二者进行回归分析,结果表明:在整个 1 m 的深度内,土壤容重的变化均受林龄的显著影响(图 2)。在樟子松林不同生长阶段,土壤容重变化在 20—60 cm 土层随林龄的增加表现为先降低后升高,尤其是过熟林,土壤容重变化在 20—60 cm 土层比成熟林有显著升高,在 20—40 cm 土层,37 年生樟子松土壤容重变化量最小,其值为-0.01 g/cm³,在 40—60 cm 土层,39 年生樟子松土壤容重变化量最小,其值为-0.04 g/cm³,其余土层土壤容重变化与林龄呈显著的负相关,其关系可以用线性关系式来表示,土壤容重平均年代际变化速率分别为 0.034、0.019、0.020 g/cm³ 和 0.014 g/cm³。按照拟

合方程的决定系数来看,林分生长对不同土壤层次容重变化的贡献率由大到小的依次为 40—60、60—80、20—40、10—20、0—10、80—100 cm 层。

表 3 土壤容重变化率影响因子的回归分析(只列出显著相关的土壤因子)

Table 3 Regression analysis of influencing factors of soil bulk density change rate(Only significant related soil factors were retained)

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	TP	-0.228	0.089	0.021	0.360
	TN	-0.082	0.027	0.008	
10—20	W	0.027	0.012	0.035	0.400
20—40	TK	-0.091	0.036	0.025	0.762
	TN	-0.035	0.011	0.005	
	SOC	-0.026	0.008	0.006	
40—60	TP	-0.007	0.002	0.002	0.489
	TP	-0.005	0.002	0.009	
60—80	Cs	-0.569	0.217	0.018	0.498
	TN	-0.020	0.009	0.031	
80—100	TK	-0.117	0.045	0.020	0.612
	TP	-0.004	0.001	<0.001	

Cs; 土壤粗颗粒 Coarse soil; W; 土壤含水率 Water content; SOC; 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN; 土壤全氮 Total nitrogen; TP; 土壤全磷 Total phosphorus; TK; 土壤全钾 Total potassium

3 讨论

3.1 土壤理化因子对土壤容重变化的影响

樟子松人工林土壤容重变化受诸多土壤因子影响。土壤的持水和导水能力与土壤容重密切相关^[17],干旱半干旱地区土壤水分条件直接决定植物的生长状况^[18]。一般认为,樟子松固沙林土壤容重与土壤含水率呈负相关关系^[19-20];而与多数研究结果相反,本研究发现樟子松人工林土壤容重只在 10—20 cm 土层与土壤含水率正相关,在其他土层均不相关,原因在于沙地土壤粗颗粒含量大,土壤保水性差,土壤含水率低,但营造樟子松人工固沙林后,随着林木的生长,有效降低了地表风蚀,加快了土壤细颗粒沉积和土壤成土过程^[21-22],地表沉积的土壤细小颗粒在降雨淋溶作用下向下层缓慢运移、填充土壤孔隙^[23],导致 10—20 cm 层土壤容重增加,同时细颗粒含量的增加使得该层土壤保水性能提高,相应提高了该层的土壤含水率,因此土壤容重与土壤含水率正相关。大量研究表明,土壤质地与土壤有机碳含量对土壤容重影响显著^[24-25],通常作为预测变量建立土壤传递函数估算土壤容重^[26],我们研究发现土壤有机碳只在 20—40 cm 土层与土壤容重正相关,土壤质地中的粗颗粒含量仅仅在 60—80 cm 土层与土壤容重负相关,其他土层土壤有机碳和土壤质地对土壤容重无显著影响,因此这种传递函数并不能准确预测研究地区所有土层的土壤容重。Kaur 等^[27]对包含沙土的 12 种土壤容重估算模型进行对比研究,发现利用包含土壤质地和土壤有机碳含量的土壤传递函数估算土壤容重同样不适用于干旱半干旱区沙地。韩光中等^[28]对上述 12 种类型土壤分别建立了最优容重传递函数,他们认为干旱地区土壤容重仅与土壤深度显著相关。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^[29],在 20—40 cm 层,含有土壤有机碳的细小颗粒向下运移,增加土壤容重的同时也使土壤有机碳含量升高。随着樟子松林木的发育,林木根系生长需要吸收土壤有机碳,而林木根系也会促进土壤微团聚体的形成使土壤粗颗粒含量升高,改善土壤结构使土壤容重减小^[30],因此,总体来说,土壤有机碳的增加可以明显改良土壤结构状况并促进土壤容重降低^[17,31]。

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^[32]。天然沙质草地转变为樟子松人工固沙林,土壤容重的变化必然伴随着土壤养分的重新分配。氮素是植物生命活

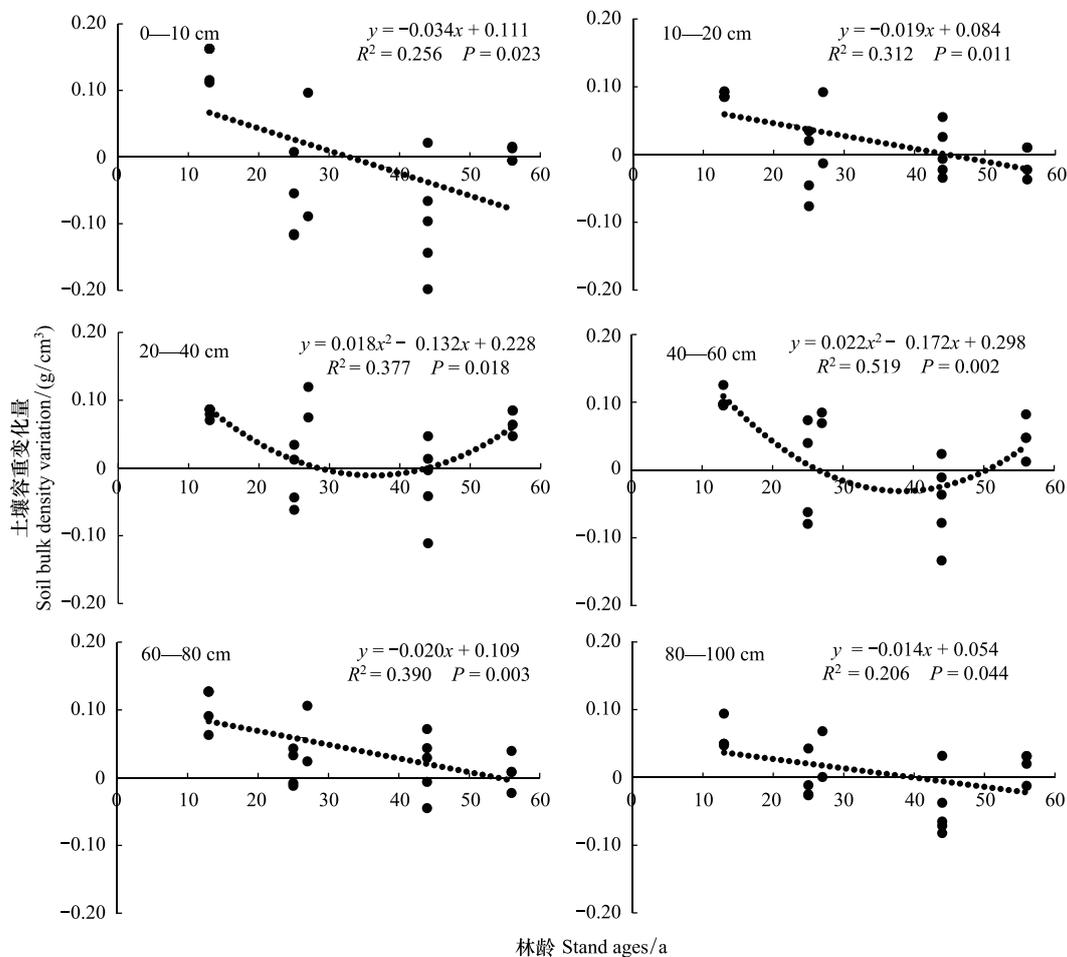


图2 不同土层土壤容重变化量与林龄的关系

Fig.2 Relationship between soil bulk density variation and forest ages in different soil layers

动的主要限制元素之一,而磷素被认为是干旱半干旱区生态系统的限制性养分因子^[33]。本研究发现,土壤全氮在0—10、20—40 cm和60—80 cm土层与土壤容重负相关,土壤全磷在0—10、20—60 cm和80—100 cm土层与土壤容重负相关,对土壤容重变化的影响效果均随着土层深度的增加逐渐降低;土壤钾的含量主要与土壤类型及形成母质类型有关,土壤全钾在20—40 cm和80—100 cm土层与土壤容重负相关。造林初期樟子松林木个体生长所需养分含量高于原天然草地,土壤养分含量及土壤微生物量明显降低^[34],土壤容重增大;随着樟子松人工林林龄的增加,林地地表枯落物积累量增加,养分通过枯落物分解、细根脱落和根系分泌物等途径归还土壤,土壤生物和微生物活动加剧,土壤生物化学反应增强,土壤结构得到改善,土壤容重减小。森林生态系统土壤养分主要来源于枯落物分解归还^[35],这一过程发生在土壤表层,降水淋溶使其分解的养分向下层运移,所以土壤全氮和全磷对土壤容重变化的影响效果均随着土层深度的增加逐渐降低。然而,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^[36],所以未出现上述现象。土壤pH与土壤容重并无显著相关关系,这可能与干旱半干旱地区气候条件有关^[37]。

3.2 沙质草地营造樟子松林不同生长阶段土壤容重变化

沙质草地转变为樟子松人工林后,林分不同生长阶段的土壤容重垂直变化存在差异。天然草地造林的初始阶段,由于人为活动的作用使得天然草地土壤结构遭到破坏,土壤紧实度增加,樟子松的生长有效地降低了林间风速,空气中的细颗粒物逐渐沉积充填林地土壤孔隙使其减小^[38-39],此外樟子松根系的发育可能也会挤压土壤颗粒使土壤孔隙减小,在这些因子的综合作用下,樟子松幼龄林的林地土壤容重显著地大于临近的对

照草地;随着樟子松的生长,林地地表枯落物积累量增加并逐渐分解,樟子松根系的发育使其对土壤结构的改良效果显著,土壤生物和微生物活动加剧促进土壤容重逐渐减小,樟子松中龄林土壤容重在 0—10 cm 土层已小于天然草地,在 10—20 cm 土层与天然草地土壤容重基本一致,其他土层略高于天然草地土壤容重,但各土层之间无显著差异;而到樟子松成熟林时,土壤容重在大部分层次小于对照草地。另一方面,该地区的樟子松人工林在林龄 30—35 年后开始衰退^[40],樟子松发生衰退后,根系生物量虽然明显减少^[13],但却产生大量根孔,也会导致土壤容重减小。樟子松过熟林中,随着林木地上地下的生长减弱,土壤容重增加,土壤容重变化量随土层深度的增加先升高后降低,樟子松细中根主要集中分布在 50 cm 以上土层^[41],衰退过程使原根区下半部分根系死亡产生大量根孔,而上半部分土壤细小颗粒在降水淋溶作用下向下运移填充土壤孔隙,20—60 cm 土层土壤容重明显高于天然草地。

沙质草地营造樟子松人工林不同土层土壤容重变化随林龄的增加存在差异。樟子松林在 20—60 cm 土层土壤容重变化量随林龄的增加先降低后升高,土壤细小颗粒在降水淋溶作用下向下运移填充根系生物量减少产生的根孔,同时也会使土壤有机碳含量升高,而对于土壤养分而言,死亡的樟子松根系中保留大量养分且腐解过程比较缓慢,抑制土壤养分循环过程,土壤养分含量降低,这些因子综合作用使得土壤容重变化量又升高;除 20—60 cm 土层外,樟子松人工林在其他土层土壤容重变化量随林龄的增加逐渐降低,枯落物的分解和根系作用加速植物—枯落物—土壤系统间的养分循环过程,生物化学反应的发生有利于改良土壤结构,土壤容重减小。此外,在 0—10 cm 土层和 80—100 cm 土层拟合方程的决定系数(0.256 和 0.206)和其他土层相比较小,0—10 cm 土层土壤容重变化还受气候条件、地形地貌、人为活动等其他因素影响^[42-43],而在 80—100 cm 土层,不同林龄樟子松林木根系分布虽然较少,但引起的土壤养分循环过程是该层次土壤容重变化的主要原因,根系变化引起的全磷和全钾的波动导致土壤容重反向的变化(表 3)。

沙质草地营造樟子松林土壤容重在 0—10 cm 土层的变化最为明显(变异系数为 78%)。这与有些学者的研究结果基本一致,苏芳莉等^[41]研究认为,樟子松造林后对不同层次的土壤尤其表层土壤具有明显的改良作用,李少华等^[39]对沙区人工柠条林的研究发现,随深度增加各土层改良效果存在时间上的滞后性,林地土壤 0—5 cm 土层恢复最快,但土壤养分表聚性的现象不是从造林初期就显现,胡亚林等^[15]认为林地凋落物覆盖有利于改善 0—10 cm 表层土壤容重,同时树木根系生长对土壤容重也会产生影响。

4 结论

天然沙质草地营造樟子松人工固沙林后,在樟子松不同生长发育阶段,0—10 cm 土层土壤容重变化的变异系数为 78%,其他土层变异系数范围为 1.08%—4.35%。土壤容重变化在 60—80 cm 层与土壤粗颗粒(粒径 >0.05 mm)含量、在 0—10、20—40 cm 和 60—80 cm 层与土壤全氮含量、在 0—10、20—60 cm 和 80—100 cm 层与土壤全磷含量、在 20—40 cm 和 80—100 cm 层与土壤全钾含量显著负相关,且土壤全氮和全磷含量对土壤容重的影响效果随土层深度的增加逐渐降低,土壤容重变化在 10—20 cm 层与土壤含水率、在 20—40 cm 层与土壤有机碳含量呈显著的正相关。因此,可采取封育禁牧措施,保证樟子松林下枯落物的积累,提高土壤养分含量,降低土壤容重,改善土壤结构。随着樟子松林龄的增加,土壤容重变化量在 0—20 cm 和 60—100 cm 层逐渐降低,在 20—60 cm 层先降低,到 37 年左右后升高,表明樟子松林的衰退对土壤结构的影响明显,建议对 37 年后的樟子松林逐渐更新。

参考文献 (References):

- [1] Keller T, Håkansson I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 398-406.
- [2] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义. *生态学报*, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [3] Reichert J M, Suzuki L E A S, Reinert D J, Horn R, Håkansson I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(2): 242-254.
- [4] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 全国明, 毛丹娟, 秦钟. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响. *生态学报*, 2009, 29(8):

- 4112-4118.
- [5] 王修康, 戚兴超, 刘艳丽, 刘之广, 宋付朋, 李成亮. 泰山山前平原三种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响. 自然资源学报, 2018, 33(1): 63-74.
- [6] 谢瑾, 李朝丽, 李永梅, 郭芳芳. 纳板河流域不同土地利用类型土壤质量评价. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3169-3176.
- [7] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 郝翔翔, 江恒, 刘元明. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193, 199-199.
- [8] Zeng X H, Zhang W J, Cao J S, Liu X P, Shen H T, Zhao X. Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the "Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control" program in China. CATENA, 2014, 118: 186-194.
- [9] 朱教君, 康宏樟, 许美玲. 科尔沁沙地南缘樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 人工林天然更新障碍. 生态学报, 2007, 27(10): 4086-4095.
- [10] 姜凤岐, 曾德慧, 于占源. 从恢复生态学视角透析防护林衰退及其防治对策: 以章古台地区樟子松林为例. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2229-2235.
- [11] 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. 生态学杂志, 2005, 24(7): 799-806.
- [12] 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.
- [13] 吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹, 薛杨, 邱素芬. 樟子松人工固沙林衰退的规律和原因. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2225-2228.
- [14] Zheng X, Zhu J J, Yan Q L, Song L N. Effects of land use changes on the groundwater table and the decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in southern Horqin Sandy Land, Northeast China. Agricultural Water Management, 2012, 109: 94-106.
- [15] 胡亚林, 曾德慧, 范志平, 艾桂艳. 半干旱区沙质退化草地造林对土壤质量的影响. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2391-2397.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
- [17] Ilek A, Kucza J, Szostek M. The effect of the bulk density and the decomposition index of organic matter on the water storage capacity of the surface layers of forest soils. Geoderma, 2017, 285: 27-34.
- [18] 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.
- [19] 段民福, 廖超英, 孙长忠, 李陆平. 毛乌素沙地樟子松人工林土壤物理性质的时空变异规律. 西北农业学报, 2012, 21(3): 189-192.
- [20] 王彦武, 廖超英, 徐恒. 毛乌素沙地固沙林土壤物理性状研究. 西北林学院学报, 2008, 23(3): 36-39.
- [21] 常海军, 陈昕. 半干旱荒漠草原带沙化草地封禁治理效果研究. 中国沙漠, 2007, 27(2): 206-209.
- [22] 关其格, 浩必斯嘎拉图, 杨越, 韩永娇, 武智勇, 宋双双, 赵瑞. 毛乌素沙地南缘人工恢复植被对沙地土壤理化性质的影响. 安徽农业科学, 2013, 41(34): 13217-13220.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Périé C, Ouimet R. Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. Canadian Journal of Soil Science, 2008, 88(3): 315-325.
- [26] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. Geoderma, 2008, 145(3/4): 295-302.
- [27] Kaur R, Kumar S, Gungur 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.
- [28] 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.
- [29] 赵哈哈, 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.
- [30] 刘乃君. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质的影响. 土壤通报, 2008, 39(6): 1480-1482.
- [31] Céspedes-Payret C, Bazzoni B, Gutiérrez O, Panario D. Soil organic carbon vs. Bulk density following temperate grassland afforestation. Environmental Processes, 2017, 4(1): 75-92.
- [32] 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.
- [33] 周全来, 蒋德明. 沙地土壤磷循环研究. 生态学杂志, 2009, 28(10): 2117-2122.
- [34] 刘云霞, 胡亚林, 曾德慧, 范志平, 赵琼. 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. 应用生态学报, 2010, 21(4): 814-820.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 邓继峰, 丁国栋, 魏亚伟, 赵国平, 张若涵, 邓舸, 周永斌, 殷有. 毛乌素沙地南缘樟子松人工林土壤理化性质差异及其与林分生长的关系. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 160-166.
- [38] 蒋德明, 曹成有, 李雪华, 周全来, 李明. 科尔沁沙地植被恢复及其对土壤的改良效应. 生态环境学报, 2008, 17(3): 1135-1139.
- [39] 李少华, 王学全, 包岩峰. 高寒沙区人工柠条林对土壤养分影响的时效性. 东北林业大学学报, 2015, 43(11): 70-74.
- [40] 宋立宁, 朱教君, 郑晓. 基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3249-3256.
- [41] 苏芳莉, 刘明国, 郭成久, 张清. 沙地樟子松根系垂直分布特征及对土壤的影响. 中国水土保持, 2006, (1): 20-22.
- [42] 乔宇鑫, 朱华忠, 钟华平, 伍兆文, 孟雷, 周李磊. 内蒙古地区草地表层土壤容重空间格局分析. 草地学报, 2016, 24(4): 793-801.
- [43] 沈奕彤, 郭成久, 金珊, 董爽. 土壤容重对黑土坡面养分流失的影响. 水土保持学报, 2016, 30(1): 26-30.