

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

马成忠¹, 邓继峰^{1,2}, 丁国栋³, 邓 舸¹, 赵国平⁴, 张若菡⁵, 杨立新¹, 周永斌^{1,2}

(1. 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁辽河平原森林生态系统定位研究站,
辽宁 昌图 112500; 3. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 4. 陕西省治沙研究所,
陕西 榆林 719000; 5. 东京农业大学研究生院造园学专攻, 东京 1568502)

摘要: 探讨樟子松人工林林下土壤粒度特征随林分密度的变化及影响, 以陕西省榆林市珍稀沙生植物保护基地内 8 个密度梯度(925~2 700 株/hm²)的沙地樟子松人工林为研究对象, 分别采集 0—20, 20—40 cm 土层土壤样本, 测定土壤粒度组成, 计算并分析平均粒径、标准偏差、偏度、峰态值和分形维数。结果表明: 研究区各层土壤粒度组成以砂粒为主, 其次是粉粒、黏粒; 粒度特征整体呈现粒径较粗、分选较差、偏度正和峰态为中至窄的特点, 土壤分形维数分布于 1.422~2.084 之间; 樟子松林林下各层土壤平均粒径和分形维数均大于裸沙地, 且随着林分密度的增加, 平均粒径和分形维数均呈现递增趋势, 而樟子松林林下各层土壤偏度均小于裸沙地, 且随着林分密度的增加, 呈现递减趋势, 说明土壤细粒物质在樟子松林的长期保护下逐渐恢复, 并且表层土壤恢复速度大于下层土壤; 同时, 随林分密度的增大, 标准偏差和峰态值没有明显的规律, 土壤颗粒的粗细分配变化不稳定, 说明林分密度因素不足以致使土壤颗粒的粗细分配朝良好趋势发展。

关键词: 初植密度; 樟子松; 毛乌素沙地; 土壤粒度特征

中图分类号: S152.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)01-0230-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.038

Effects of Different Planting Densities of Mongolian Pine on the Soil Particle Size Characteristics in Southern Mu Us Desert

MA Chengzhong¹, DENG Jifeng^{1,2}, DING Guodong³, DENG Ge¹,

ZHAO Guoping⁴, ZHANG Ruohan⁵, YANG Lixin¹, ZHOU Yongbin^{1,2}

(1. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866; 2. Liaohu Plain Forest
Ecosystem Research Station, Changtu, Liaoning 112500; 3. College of Soil and Water Conservation,
Beijing Forestry University, Beijing 100083; 4. Shaanxi Sand Fixation Research Institution, Yulin,
Shaanxi 719000; 5. Graduate School of Landscape Architecture, Tokyo University of Agriculture, Tokyo 1568502)

Abstract: To reveal the effects of artificial Mongolian pine plantations on soil particle size parameters in southern Mu Us Desert, soil samples (taken as two layers 0—20 cm and 20—40 cm) under different plant densities (925—2 700 plants/hm²) as well as the bare sand land (control check) were selected in Yulin rare desert plant protection base of Shaanxi Province. Soil particle size parameters such as average particle size, standard deviation, skewness, kurtosis and fractal dimension were identified and calculated by using laser diffraction technique. The results showed that in the study area, majority of soil particle size was occupied by sand particles, followed by silt particles and then clay particles. Soil particle size parameters presented comparatively thick, poor sorting, positive skewness as well as middle or sharp kurtosis. Fractal dimension of soil was in range of 1.422 to 2.084. As affected by Mongolian pine plantations, the average particle size and fractal dimension values were continue to increase leading to constantly particle distribution optimization than that of bare sand land, especially in the top layer of soil profile, such effects were more obvious. Meanwhile, there were no obvious regularities in standard deviation and kurtosis along with the increase of stand density.

收稿日期: 2016-09-18

资助项目: 国家林业行业科研专项(201404303-05); 国家自然科学基金项目(41450007); 林业公益性行业科研专项(201304216)

第一作者: 马成忠(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态、森林经理研究。E-mail: syauemploy@163.com

通信作者: 邓继峰(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事森林生态与荒漠化防治研究。E-mail: dengjifeng1984@hotmail.com

And distribution of soil particles was not balance. The results indicated that stand density factor was not enough to cause the thickness distribution of soil particles toward the trend of balance.

Keywords: planting density; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; Mu Us Desert; soil particle size parameter

沙漠化已经成为当今世界一个重大的环境和社会经济问题,并威胁着人类的生存与发展^[1]。毛乌素沙地地处内蒙古自治区鄂尔多斯市的南部、陕西省榆林市的北部和宁夏回族自治区盐池县东北部,是我国四大沙地之一^[2-3]。历史上,毛乌素沙地曾经是草滩辽阔、广泽清流的优良牧场,后来由于不合理的乱垦滥伐、过度放牧、战乱以及气候变化等原因^[4],造成地面植被资源逐渐枯竭,草场退化,风沙逐渐侵蚀,水土流失加剧,生态系统恶化,导致毛乌素沙地成为我国荒漠化严重发展的地区^[5]。1949年后,毛乌素沙地生态环境状况引起了社会各界人士的广泛关注,对其风沙区治理也由此展开。自上世纪50年代开始,通过引水拉沙、引洪淤地、兴建防风林带等一系列的综合治理措施^[6],毛乌素沙地的荒漠化得到有效控制,600 hm²流沙地现已变为半固定或固定沙地。

目前,毛乌素沙地以沙地樟子松为建群种的植物固沙模式效果较好,凭借其成活率和保存率高,生长迅速,抗逆性强^[7],在固定流动沙地和改善生态环境方面的显著成效,广泛应用于毛乌素沙地的荒漠化治理。随着樟子松人工林对沙地的荒漠化治理的意义加深,人们对樟子松林各种性质的探索也逐渐深入,包含樟子松林的引种适宜性和建群后对当地环境改良问题^[8-9]。对于毛乌素沙地樟子松引种后的研究多集中在林分结构特征、降雨截留能力、蒸腾耗水特性及林下土壤理化性质等方面^[10-12],而对土壤的基本属性一粒度特征的影响却关注较少。由于土壤粒度特征是承载土壤物理及化学性质的载体,因此探究不同初植密度樟子松人工林与土壤粒度特征之间的关系,可通过土壤粒度演化特征对樟子松前期造林,后期经营管护提供切实的指导意义。鉴于此,本文通过对毛乌素沙地南缘陕西省榆林市珍稀沙生植物保护基地内的不同初植密度的樟子松人工林林下土壤进行研究,对比分析该地区各人工林林下土壤粒度组成及其平均粒径、标准偏差、偏度、峰态值和分形维数,探讨不同初植密度樟子松人工林对土壤粒度特征的影响,以期为我国干旱半干旱地区对该树种的造林决策,植被恢复、毛乌素地区土壤改良和荒漠化防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地南缘陕西省榆林市城北6 km的陕西省榆林市珍稀沙生植物保护基地(38°20'11" N, 109°42'54" E),海拔1 300 m,属温带半干

旱大陆性季风气候,年均气温为8.8℃,年平均降水量为358.1 mm,主要集中在7—9月,占年降水量的70%以上,且降水量年际变化较大^[13]。珍稀沙生植物保护基地始建于1957年,当时基地内林木覆盖率仅为1%左右,且地表覆盖流动沙地,植物种单一,只有沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng. Syst. Veg.)和沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)等灌木零星分布,未见高大乔木存在。经过近60年的飞播造林、良种引入等植被恢复建设,林木覆盖率已达32.5%左右,并将全部流动沙地改造为固定沙地。现在基地内主要乔木植物种除樟子松外,还包括油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière.)、旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)和刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)等林种^[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集、处理与分析 陕西省榆林市珍稀沙生植物保护基地内樟子松试验林始栽于1989年,为方便后期研究按照不同密度栽植,目前基地内樟子松林属于中龄林,林下各种土壤理化性质及土壤粒度参数相对稳定,为后期科研试验奠定了良好基础。

2013年6—7月,在陕西省榆林市珍稀沙生植物保护基地内选择8个不同初植密度的樟子松人工林样地(在相邻样地选择3次重复),共24块样地,样地大小为20 m×20 m,并在樟子松样地附近选择3块裸沙地(CK)作为对照。样地内部地势平坦,以消除微地貌和植被对土壤性状的影响。各样地林分密度分别为:1号样地(2 700±50)株/hm²,2号样地(2 250±25)株/hm²,3号样地(2 050±18)株/hm²,4号样地(1 475±10)株/hm²,5号样地(1 350±14)株/hm²,6号样地(1 300±38)株/hm²,7号样地(1 250±8)株/hm²和8号样地(925±15)株/hm²。按照“S”形采集A层(0—20 cm)和B层(20—40 cm)2个土层样品各3份(非林缘部位)。

将所有土样过2 mm土壤筛后,加入质量分数为30%的H₂O₂溶液去除样品中的有机质,再加入NaHMP溶液浸泡,最后,用超声波振荡30 s以破坏土粒的团聚结构,使土粒分散。将处理过的土样,利用MasterSizer 2000型土壤粒度分析仪,采用激光衍射技术测定土壤粒径分布,土壤粒径测定范围在0.02~2 000 μm,每例土样每层重复测定3次,取算术平均值,并计算黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)和极粗砂(1 000~2 000 μm)对应的体积分数,及累

积体积分数为 5%, 10%, 16%, 25%, 50%, 75%, 84%, 90%, 95% 所对应的沙粒粒径用以计算粒度参数^[14]。

1.2.2 粒度参数模型 根据伍登—温德华(1889, 1922)粒级标准, 利用克鲁宾(1934)对数转化法将实际土壤粒径转换为有利于计算 Φ 值^[15], 见公式(1):

$$\Phi = -1b d = -\ln d / \ln 2 = -3.322 \lg d \quad (1)$$

式中: $\lg$ 、 $\ln$ 、 $\lg$ 均为对数函数; d 为土壤颗粒直径(mm), 并用 Φ_5 、 Φ_{16} 、 Φ_{25} 、 Φ_{50} 、 Φ_{75} 、 Φ_{84} 和 Φ_{95} 分别代表体积分数为 5%、16%、25%、50%、75%、84% 和 95% 所对应的沙粒粒径^[15], 下同。

根据公式(1), 采用克伦拜因(1957)和福克(1955)法计算土壤粒度特征参数^[16], 见公式(2)~公式(5):

平均粒径: 平均粒径(d_0)是反映沙物质粒度的平均状况的参数^[16], 平均粒径越大, 表示细粒物质所占比重越大。计算公式为:

$$d_0 = \frac{1}{3}(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) \quad (2)$$

标准偏差: 标准偏差(σ_0)反映了沙物质粒度分布的分散程度^[16], 根据取值范围划分 7 个分选级别: 分选极好($\sigma_0 \leq 0.35$)、分选好($0.35 < \sigma_0 \leq 0.50$)、分选较好($0.50 < \sigma_0 \leq 0.71$)、分选中等($0.71 < \sigma_0 \leq 1.00$)、分选较差($1.00 < \sigma_0 \leq 2.00$)、分选差($2.00 < \sigma_0 \leq 4.00$)和分选极差($\sigma_0 > 4.00$)^[15], 7 个级别从比较集中过渡到比较分散。计算公式为:

$$\sigma_0 = \frac{1}{4}(\Phi_{50} - \Phi_{16}) + \frac{1}{6.6}(\Phi_{95} - \Phi_5) \quad (3)$$

偏度: 偏度(S_0)反映了沙物质粒度粗细分配的对称性^[16], 根据取值范围分 5 个偏度等级: 极负偏度($-1.0 \leq S_0 < -0.3$)、负偏度($-0.3 \leq S_0 < -0.1$)、近于对称($-0.1 \leq S_0 < 0.1$)、正偏度($0.1 \leq S_0 < 0.3$)和极正偏度($0.3 \leq S_0 \leq 1.0$)^[15], 5 个等级从细粒物质占比较大过渡到粗粒物质占比较大。计算公式为:

$$S_0 = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - \Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - \Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (4)$$

峰态值: 峰态值(K_0)反映了沙物质粒度分布的集中程度^[16], 根据取值范围分 6 个峰度等级: 很宽平($K_0 \leq 0.67$)、宽平($0.67 < K_0 \leq 0.90$)、中等($0.90 < K_0 \leq 1.11$)、尖窄($1.11 < K_0 \leq 1.56$)、很尖窄($1.56 < K_0 \leq 3.00$)和极尖窄($K_0 > 3.00$)^[15], 6 个等级从比较分散过渡到比较集中。计算公式为:

$$K_0 = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (5)$$

除此之外, 本文根据已掌握的数据进行分形维数的计算, 见公式(6)。分形维数可以实现复杂土壤结构特征的定量表达, 还可以有效指示土壤含水率、土壤肥力、土壤退化程度等土壤性质和特征^[17-19]。

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (6)$$

式中: D 为土壤体积分形维数; r 为土壤粒径(mm); R_i 为粒径等级 i 的土壤粒径(mm); $R_{\max}$ 为土壤粒径的极大值(mm); $V(r < R_i)$ 为土壤粒径小于 R 的土壤体积分数(%); V_T 为各粒径等级体积分数之和(%)^[20]。

1.2.3 数据分析处理 应用 Excel 2010 和 OriginLab、OriginPro 9.0 软件对各项参数进行计算和统计。

2 结果与分析

2.1 不同密度樟子松人工林土壤粒度组成

由表 1 可知, 研究区不同密度樟子松人工林林下各层土壤颗粒粒度组成均以砂粒为主, 其次是粉粒, 黏粒含量最低, 平均体积分数不足 4%。伴随着樟子松林密度的增大, 林下各层土壤中砂粒含量逐渐减小, 而黏粒、粉粒含量呈现增加的态势。土壤粒度的垂直分布可以看出, B 层土壤的砂粒含量占比较 A 层大, 而 A 层土壤的黏粒和粉粒占比较 B 层大, 这与裸沙地土壤粒度组成分布规律也是相同的。

林下土壤的粒度组成的区别主要缘于风力侵蚀作用对于沙物质的搬运和堆积作用。研究区气候干燥, 受频繁而强烈的侵蚀风影响, 土壤的细粒物质易在风沙流作用下被搬运而离开原位, 使得土壤中砂粒物质含量升高。而樟子松人工林林下各层土壤细粒物质含量所占比例明显高于裸沙地, 说明由于林木固土作用的存在, 沙物质的搬运与堆积作用发生改变, 土壤粒度朝细化方向发展, 且这种变化随樟子松林密度的增大变得更加明显。

2.2 不同密度樟子松人工林土壤粒度参数

2.2.1 不同密度樟子松人工林林下土壤粒径 由图 1 可知, 研究区内不同密度樟子松林林下各层土壤的平均粒径均大于裸沙地, 且随林分密度的增大, A、B 两层土壤的平均粒径均呈递增的趋势, 这与表 1 所得结论一致。整体来看, 各样地和裸沙地的平均粒径 A 层均大于 B 层。这表明随樟子松林营建, 土壤的细粒物质得以保存和恢复而使土壤结构细化, 樟子松对于土壤粒度组成的改良具有较为积极的促进作用。

2.2.2 不同密度樟子松人工林林下土壤标准偏差

由图 2 可知, 研究区不同密度樟子松林层土壤粒度分布较为集中, 按照福克的分选等级标准, 其分选状况介于中等和较差之间。在 A 层, 除 6、8 号样地土壤标准偏差值略小于裸沙地外, 其他样地土壤标准偏差值均大于裸沙地; 在 B 层, 除 5、7、8 号样地土壤标准偏差值略小于裸沙地外, 其他样地土壤标准偏差值均大于裸沙地。整体来看, 除 6 号样地土壤 A 层标准偏差略小于 B 层, 其他样地包括裸沙地在内土壤 A 层的标准偏差值均大于 B 层。由此可见大多数樟子

松林样地土壤粒度分选状况整体上不是很理想,而裸沙地土壤粒度分选状况要优于多数有林样地,也反映了土壤细化的过程中,在各种因素的影响下,土壤粒度变化的复杂性与差异性比较明显。

表 1 樟子松人工林样地土壤粒度体积分数组成 单位: %

样地号	层次	黏粒	粉粒	砂粒				
				极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
1	A	3.325±1.845	23.872±5.783	20.36±4.092	16.791±4.333	24.606±5.141	10.765±2.704	0.281±0.135
	B	3.536±2.471	19.203±4.387	21.238±5.351	32.872±7.140	18.015±3.265	5.136±2.372	0
2	A	1.342±1.321	24.910±5.344	13.635±2.039	34.711±8.176	22.285±4.563	3.116±1.676	0
	B	2.643±1.412	19.566±3.406	7.246±1.325	38.853±9.076	25.835±5.859	5.221±2.778	0.636±0.146
3	A	1.256±1.198	21.868±5.448	13.626±3.963	33.187±6.194	27.242±5.010	2.822±0.991	0
	B	1.440±3.806	18.325±3.817	7.229±2.015	33.184±5.506	30.198±6.192	9.623±2.702	0
4	A	1.160±0.976	21.776±7.987	13.782±3.006	22.413±6.342	29.167±5.822	11.701±3.475	0
	B	2.931±1.870	15.127±3.872	6.116±2.018	39.591±8.806	30.166±7.011	6.070±2.771	0
5	A	1.105±1.142	19.469±5.152	10.156±4.039	31.099±6.261	32.468±9.352	5.704±1.049	0
	B	2.286±1.322	14.044±4.329	5.757±2.054	51.323±11.754	25.926±8.259	0.664±0.448	0
6	A	1.749±0.686	16.463±6.108	7.141±3.049	47.012±12.437	25.323±8.309	2.312±1.772	0
	B	1.137±0.667	13.008±0.678	5.537±2.010	34.228±7.192	37.194±10.016	8.896±3.206	0
7	A	0.718±0.843	14.893±3.794	4.090±2.385	48.377±13.794	19.548±6.451	11.086±3.287	1.288±0.620
	B	1.558±0.336	8.411±3.128	4.085±1.267	51.117±12.328	33.051±8.530	1.778±0.798	0
8	A	2.127±1.152	13.142±4.429	6.093±2.373	50.211±10.523	28.428±7.465	0	0
	B	0.882±0.734	9.724±3.717	3.327±1.175	45.872±11.925	37.644±12.542	2.552±1.409	0
CK	A	1.178±0.765	11.317±2.755	4.62±2.535	34.046±9.343	39.957±10.702	8.882±2.020	0
	B	2.324±0.731	6.359±2.744	3.008±1.969	43.231±11.756	40.194±10.591	4.884±1.283	0

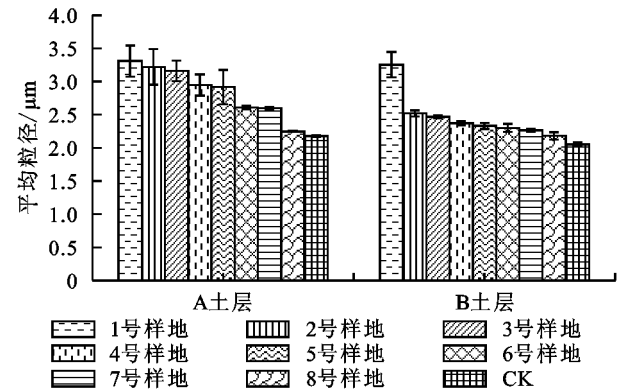


图 1 不同密度樟子松林林下土壤粒径

2.2.3 不同密度樟子松林林下土壤偏度 由图 3 可知,樟子松林和裸沙地的 A 层偏度差别非常大,其中 1 号样地和 2 号近于对称,3 号样地属于正偏度,其余样地属于极正偏度,且有林样地均比裸沙地的偏度值小;而 B 层偏度相对比较稳定,均属于正偏度,且有林样地均比裸沙地的偏度值小;整体来看,除 1,2,3 号样地土壤 A 层偏度值小于 B 层,其他样地包括裸沙地在内 A 层的偏度值均大于 B 层。由此可知,土壤中细粒物质含量随樟子松林初植密度的增大而不断增加,土壤 A 层比土壤 B 层细粒物质增加的幅度也较大。

2.2.4 不同密度樟子松林林下土壤峰态值 由图 4 可知,按照土壤粒度分布峰度等级标准,A 层 1,4,7 号样地为宽平,其余样地包括裸沙地均为中等,并且只有 3,8 号样地峰态值略大于裸沙地,其他样地均略小于裸沙地;而 B 层 2,3,4,6 号样地为中等,其余样地包括裸沙地在内均为尖窄,只有 7,8 号样地略大于

或等于裸沙地,其他样地均略小于裸沙地。整体来看,只有 3 号样地的 A 层土壤峰态值比 B 层略大,其余样地包括裸沙地在内 B 层土壤峰态值均大于 A 层。由此可知土壤不存在明显的优势粒径级别,而 B 层土壤比 A 层土壤更趋于集中。

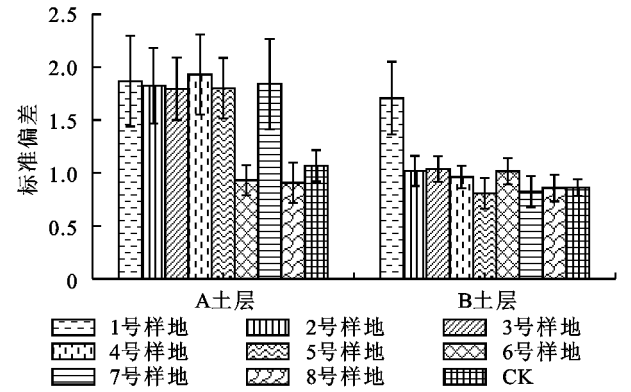


图 2 不同密度樟子松林林下土壤标准偏差

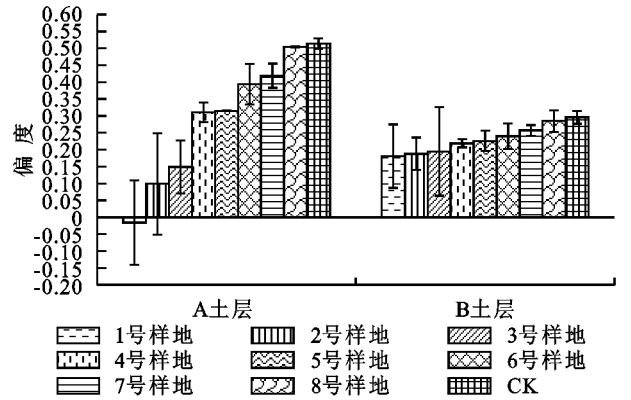


图 3 不同密度樟子松林林下土壤偏度

2.2.5 不同密度樟子松林林下土壤分形维数 研究区不同初植密度樟子松林 A、B 两层土壤粒度的分形维数见图 5。A、B 两层有林样地的分形维数均比裸沙地大,且两层分形维数随林分密度的增大呈现递增趋势,整体来看,各样地分形维数都是 B 层大于 A 层。由于分形维数与土壤中黏粒和粉粒含量呈显著的正相关关系,与砂粒含量呈负相关关系^[20],因此,研究区樟子松林样地表层分形维数增加说明土壤正经历细化的过程,尤其在 A 层,黏粒和粉粒的比重不断增加,土壤结构不断得到改善。

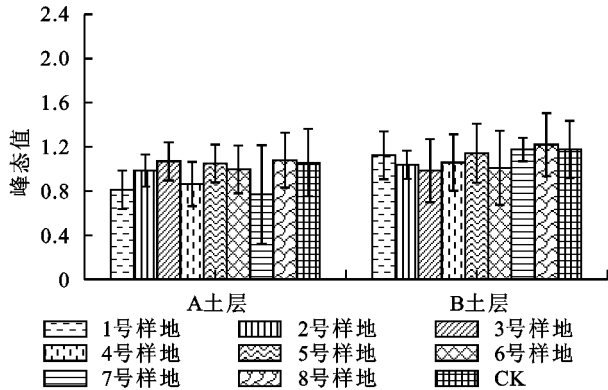


图 4 不同密度樟子松林林下土壤峰态值

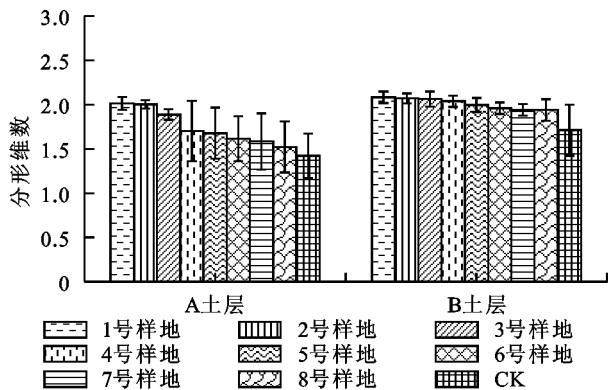


图 5 不同密度樟子松林林下土壤分型维数

3 讨论

平均粒径和偏度的变化是说明土壤粗细集中变化的过程。标准偏差和峰态值的变化是表征土壤粗细物质分散程度变化的过程,二者是两个相反的概念。土壤中细粒物质占比与分形维数之间存在正向相关关系,所以分形维数的变化亦可以说明土壤粗细变化的过程。分形维数作为评价土壤演变程度的综合指标,它的变化是在外界环境的影响下,土壤各类物理、化学作用的综合反映,而平均粒径、偏度、标准偏差和峰态值只是土壤粒度参数的单一指标^[20]。

沙漠地区的风蚀过程主要造成土壤表层细粒物质的损失。通过栽植樟子松林可增加地面粗糙程度,使流沙得以固定,细粒物质得以保存。同时,樟子松及其枯落物对降雨的拦截也会对粉粒和黏粒具有一定保存作用,因而造成了随樟子松林林分密度的增

大,平均粒径值增大,偏度值减小的趋势,并且土壤表层平均粒径值和偏度值变化的幅度大于土壤下层。土壤细粒物质越多,其内部的微小孔隙就会越多,土壤结构越复杂,樟子松的枯落物回归土壤形成腐殖质,樟子松根系对土壤物理结构的改良,都会导致土壤分形维数值的增大。黏粒、粉粒与砂粒的临界值是 $50 \mu\text{m}$,整体来看就是随着樟子松林林分密度的增大,粒径大于 $50 \mu\text{m}$ 的土壤颗粒减少,小于 $50 \mu\text{m}$ 的土壤颗粒增多的过程,至于按照从黏粒到极粗砂每级土壤颗粒占比的变化并不明显,因而通过公式(2)~公式(6)计算可知:平均粒径、偏度和分形维数随林分密度的变化呈现一定规律,而标准偏差及峰态值变化规律却不甚明显。

分形维数可以反映土壤的综合特征,却没有涉及到某一具体指标,对可能影响分型维数的土壤物理及化学性质的分析工作是下一步应该细化研究的方向。

4 结论

(1)研究区内不同密度樟子松林林下土壤粒度集中分布在砂粒上,其体积分数在 75%~90%之间,而其次是粉粒、黏粒。由于毛乌素地区土壤风化、侵蚀、搬运、沉积等作用,土壤中的细粒物质损失严重,研究区的粒度特征整体呈现粒径较粗、分选较差、偏度正和峰态中至窄的特点,土壤分形维数分布于 1.422~2.084 之间。

(2)从平均粒径、分形维数和偏度可以看出,樟子松林林下各层土壤平均粒径和分形维数均大于裸沙地,且随着林分密度的增加,均呈现递增趋势,而樟子松林林下各层土壤偏度均小于裸沙地,且随着林分密度的增加,呈现递减趋势,说明随着林分密度的增大,土壤细粒物质所占比重不断增加,土壤结构不断优化,即樟子松人工林对土壤具有改良作用。从土壤粒度的垂直分布来看,土壤上层的变化趋势要比土壤下层更加明显,说明接近表层的土壤在樟子松人工林及各种外界影响综合作用下呈现更加良好的发展趋势。

(3)标准偏差和峰态值没有明显的规律,即在外界影响的综合作用下,随林分密度的增大,土壤颗粒的粗细分配变化不稳定,说明林分密度因素不足以致使土壤颗粒的粗细分配朝良好趋势发展。

参考文献:

- [1] 聂浩刚,岳乐平,杨文,等. 呼伦贝尔草原沙漠化现状、发展态势与成因分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 635-639.
- [2] 张军红. 毛乌素沙地油蒿群落土壤水分分布与动态[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013: 1-102.
- [3] 王仁德, 吴晓旭. 毛乌素沙地治理的新模式水土保持研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 176-180.
- [4] Zhao S, Xia D S, Jin H L, et al. Long-term weakening of the East Asian summer and winter monsoons during the

- mid-to late Holocene recorded by aeolian deposits at the eastern edge of the Mu Us Desert[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2016, 457(10): 258-268.
- [5] 高国雄. 毛乌素沙地东南缘人工植被结构与生态功能研究[D]. 北京:北京林业大学, 2007: 1-165.
- [6] Liang P, Yang X P. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors[J]. Catena, 2016, 145(17): 321-333.
- [7] Xu M L, Zhu J J, Kang H Z, et al. Optimum conditions for pure culture of major ectomycorrhizal fungi obtained from *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in southeastern Keerqin sandy lands, China[J]. Journal of Forestry Research, 2008, 19(2): 113-118.
- [8] 罗玲, 廖超英. 榆林沙区不同立地条件引种樟子松生长特性的对比研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(3): 182-185, 204.
- [9] 赵晓彬, 刘光哲. 沙地樟子松引种栽培及造林技术研究综述[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(5): 86-89.
- [10] 代青格乐, 赵国平, 王新星, 等. 林分密度对毛乌素沙地樟子松人工林林分结构和林下植被的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 86-91.
- [11] 段民福, 廖超英, 孙长忠, 等. 毛乌素沙地樟子松人工林土壤物理性质的时空变异规律[J]. 西北农业学报, 2012, 21(3): 188-192.
- [12] 邓继峰. 毛乌素沙地南缘两种林分林木耗水规律及适宜密度研究[D]. 北京:北京林业大学, 2015: 1-132.
- [13] 侯瑞萍, 张克斌, 郝智如. 造林密度对樟子松人工林枯落物和土壤持水能力的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 624-630.
- [14] Zhang J H, Wu B, Li Y H, et al. Biological soil crust distribution in *Artemisia ordosica* communities along a grazing pressure gradient in Mu Us Sandy Land, Northern China[J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(2): 172-179.
- [15] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京:中国林业出版社, 2010.
- [16] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 413-419.
- [17] 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 120-125.
- [18] 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤颗粒粒径分布于土壤物理特性关系[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 44-50.
- [19] 郑子成, 李卫, 李廷轩, 等. 基于分形理论的设施土壤水分特征曲线研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 49-54.
- [20] Li Y, Li M, Si B C, et al. Relationship between volume-based and number-based fractal dimensions of soil particle size distributions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(33): 82-91.
- (上接第 229 页)
- [9] 陈登峰, 王秀茹, 杜韬. 东北黑土区覆膜滴灌下田间微气候和作物生长特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 296-317.
- [10] 廖荣伟, 刘晶淼, 安顺清. 基于微根管技术的玉米根系生长监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 156-161.
- [11] 孙仕军, 樊玉苗, 许志浩, 等. 东北雨养区地膜覆盖条件下种植密度对玉米田间土壤水分和产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 33(10): 2650-2655.
- [12] 杨国虎, 李新, 王承莲, 等. 种植密度影响玉米产量及部分产量相关性状的研究[J]. 西北农业学报, 2006, 15(5): 57-60.
- [13] 刘泉汝, 郎坤, 赵丹丹, 等. 秸秆覆盖和种植密度对夏玉米水分高效利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(12): 1089-1094.
- [14] Gan Y T, Siddique K H M. Ridge-furrow mulching systems-an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments[J]. Advances in Agronomy, 2013, 118: 429-476.
- [15] Ma Y, Song X F. Using stable isotopes to determine seasonal variations in water uptake of summer maize under different fertilization treatments[J]. Science of The Total Environment, 2016, 550(15): 471-483.