

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.035.

贺俊. 毛乌素沙地樟子松人工林恢复过程中土壤粒径演变特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 110-114, 129.

HE Jun. Characteristics of Soil Particle Size Evolution During Restoration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation in Mu Us Sandy Land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 110-114, 129.

毛乌素沙地樟子松人工林恢复过程中 土壤粒径演变特征

贺俊

(国家能源集团 准能集团有限责任公司 环境保护部, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要: [目的] 研究土壤颗粒分形维数与樟子松人工林恢复时间的关系, 为评价毛乌素沙地植被恢复对土壤颗粒特征的影响提供数据支撑。[方法] 以自然荒草地为对照, 选择不同恢复年限樟子松人工林土壤为研究对象, 分析了不同林龄樟子松林下土壤基本理化性质、颗粒粒径含量和分形维数, 开展毛乌素沙地樟子松人工林恢复过程中土壤粒径演变特征研究。[结果] 3种不同林龄樟子松土壤中细砂粒含量最多, 极粗砂粒含量最少, 并且随着土层深度的增加细砂粒含量和粗砂粒含量呈增加的趋势, 而黏粒含量、粉粒含量以及极细砂粒含量呈现减少的趋势。随着土层深度的增加土壤中全氮、全磷、有机质以及土壤含水率均呈现减小的趋势。不同林龄下樟子松土壤颗粒分形维数范围为 2.27~2.71, 均值大小顺序表现为 50 a>60 a>40 a>CK; 全氮含量和土壤含水率的均值大小顺序均表现为 60 a>50 a>CK>40 a; 全磷含量和有机质含量的均值大小顺序均表现为 60 a>50 a>40 a>CK。全氮、全磷和土壤有机质含量与分形维数间呈正相关关系, 相关系数分别为 0.391, 0.418, 0.522。[结论] 樟子松人工林恢复显著影响土壤粒径和体积分形特征, 且在恢复时间为 50 a 时达到最大值。

关键词: 土壤颗粒分布特征; 土壤理化性质; 分形维数; 樟子松

中图分类号: S152.3; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0110-05

Characteristics of Soil Particle Size Evolution During Restoration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation in Mu Us Sandy Land

HE Jun

(Environmental Protection Department of Zhunmeng Group Limited
Liability Company, CHN Energy, Ordos, Inner Mongolia 010300, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to study the relationship between the fractal dimension of soil particles and the restoration time of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation and provide data support for evaluating the effects of vegetation restoration on soil particle characteristics in Mu Us Sandy Land. [Methods] This paper took the natural wasteland as a contrast, and selected the soil of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation with different restoration years as the object. The basic physical and chemical properties, particle size content and fractal dimension were analyzed, and the characteristics of soil particle size evolution during the restoration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Mu Us Sandy Land were studied. [Results] The content of fine sand is the most, and very coarse sand was the least in the soil of three different forest ages. With the increase of soil depth, the contents of fine sand and coarse sand increase, while the contents of clay, silt and very fine sand decrease. Meanwhile, with the increase of soil depth, total nitrogen, total phosphorus, organic matter and soil water content also show a decreasing trend. The fractal

收稿日期: 2022-05-24

修回日期: 2022-06-25

资助项目: 国能准能集团有限责任公司环境保护项目“大型露天煤矿排土场海绵土壤及土壤改良关键技术研究与应用”(SHGF-17-35)

第一作者: 贺俊(1984—), 男, 内蒙古准格尔旗人, 学士, 工程师, 主要从事矿山土地修复研究。E-mail: 84191978@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

dimensions of soil particles under different age range from 2.27 to 2.71, and the order of mean size is 50 a > 60 a > 40 a > CK. The average order of total nitrogen content and soil moisture content is 60 a > 50 a > CK > 40 a. The average order of total phosphorus content and organic matter content is 60 a > 50 a > 40 a > CK. The contents of total nitrogen, total phosphorus and soil organic matter are positively correlated with the fractal dimension, and the correlation coefficients are 0.391, 0.418 and 0.522, respectively. [Conclusion] The restoration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation significantly affects the fractal characteristics of soil particle size and the fractal dimension of soil particles, and the maximum recovery time is 50 years.

Keywords: soil particle distribution characteristics; soil physical and chemical properties; fractal dimension; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

土壤是人类赖以生存的物质,其组成结构不规则并具有一定的分形特征^[1]。土壤的水分状况、侵蚀退化程度都受其粒径分布的影响,土壤颗粒分形可以用来表征土壤的物理性质,是土壤的基本属性之一^[2]。土壤的颗粒组成与土壤母质的退化也有着密切的联系,其颗粒组成也在一定程度上决定其物理特性例如土壤的孔隙状况、通气、排水性能以及土壤的水土流失状况、侵蚀程度等^[3-4]。分形理论是一种非线性的科学理论,它能够根据物质的自相似性描述不规则物质内部的精细结构,进而来表征物质的某些特性^[5]。并且分形理论在描述土壤等不规则非均质并且具有自相似性特征的几何体方面有着独特的优势^[6]。土壤的分形特征往往可以表征土壤的通气性、透水性以及颗粒含量的分布、土壤的侵蚀状况等^[7]。因此利用分形维数来描述土壤的理化特性、土壤颗粒分布、土壤孔隙以及土壤的机械组成等方面^[8]。方肖晨等^[9]以伏牛山区迎河小流域为例,研究了土壤分形维数在不同土地利用类型中的差别,结果表明:林地的分形维数值大于草地与灌木地,在草地和灌木地土壤中黏粒含量低于林地中的黏粒含量。对比不同土地利用类型来看,林地对于土壤中黏粒含量的影响较大,而由于樟子松林下的灌草植被稀少,对于土壤颗粒的影响较小,植被较少的地区土壤颗粒受其恢复年限的影响较大。因此在本研究中所选取的研究地为不同林龄下的樟子松土壤颗粒,对于土壤结构的研究更具有实际意义。

我国毛乌素沙地水土流失状况和土壤侵蚀形势较为严重,该研究区内选种樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)来进行防治,其原因是樟子松耐干旱、对水分的需求量相对于其他植物较少,固沙模式好、生长迅速并且对于土壤的肥力状况要求不高、成活率较高等^[10-11]。不同林龄下樟子松土壤颗粒的特征中,颗粒分布受其恢复年限的影响,随着樟子松林龄的增长,其土壤颗粒的含量分布存在着一定的变化。为探究其变化本研究通过土壤颗粒机械组成的

体积分形维数来对该区域不同林龄下的土壤颗粒含量的变化特征、土壤物理性质进行研究^[12],进而来探究樟子松人工林恢复过程中土壤粒径演变特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

红石峡森林公园位于陕西省榆林市北约 5 km 处(109°42'25"E, 38°19'54"N),西邻榆靖高速、榆林机场、陕蒙高速公路和 210 国道,东邻红石峡水库。红石峡景区,总面积约 170 hm²,该区域属于干旱半干旱区,年均降水量在 400 mm 左右,水资源匮乏并且生态环境脆弱,易受到人为因素的破坏^[13]。园内现有天然以及人造林草的植物 65 科 300 多个沙旱生植物种,其植被覆盖率达 90% 以上。植物多以针叶林为主,其中樟子松林在该林分中所占的比例较大,是由于该区域的地理位置以及气候所致,符合樟子松的生长特性。气温四季差别明显,总的来说春季气温要大于秋季气温,一般在春季气温回升比较快,但不够稳定,有时可以瞬间降温至零下,秋季时期降温很明显,多高云,昼夜温差较大。

1.2.1 样品的采集与测定 在试验区内选择立地条件一致的 3 种不同林龄的樟子松(20 世纪 60 年代、70 年代、80 年代)林下的土壤,在选取的样地内采用对角线法,分别在距离地表 10, 20, 30, 40 cm 深度处采取土样,每个样点 3 次重复。将采集的土样于通风处晾干之后用 2 mm 孔径的筛子进行筛选。处理好后称取 0.5 g 的土样至锥形瓶中并用六偏磷酸钠浸泡 20 h,使土粒充分分散而不破坏其结构,然后使用马尔文激光粒度仪(输出的测量范围为 0.002~2 mm)进行测定,测得各粒径的体积百分含量。

有机质的测定采用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮的测定采用凯氏定氮法;全磷的测定采用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法;土壤含水量采用烘干法。

1.2.2 模型描述 该模型利用粒径分布与颗粒累积体积间的关系计算:

$$\frac{V(r < R)}{V_t} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: $V(r < R)$ 为粒径小于 R 的颗粒累积体积; V_t 为土壤各粒级的总体积; D 为土壤体积分形维数; R_i 为某粒级的平均值, 用某粒级的上限值和下限值求平均; R_{\max} 为所测粒径中最大的粒径, 本研究中最大粒径为 2 mm。

首先分别计算出 $\lg \frac{V(r < R)}{V_t}$ 与 $\lg \frac{R}{R_{\max}}$, 其次以 $\lg \frac{V(r < R)}{V_t}$ 为纵坐标, 以 $\lg \frac{R}{R_{\max}}$ 为横坐标作出直线图, 该直线的斜率为 $(3-D)$, 随之求出分形维数 D 。

1.2.3 数据处理 在计算不同林龄樟子松土壤体积分形维数时, 选取美国制进行分类将粒径分为 7 个级别: <0.002 mm, $0.002 \sim 0.05$ mm, $0.05 \sim 0.1$ mm, $0.1 \sim 0.25$ mm, $0.25 \sim 0.5$ mm, $0.5 \sim 1$ mm, $1 \sim 2$ mm^[14]。测定结果采用 Microsoft Excel 2010 软件统

计分析并作图, 分形维数与土壤各颗粒分布间的相关关系采用皮尔逊相关分析进行分析, 使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄下樟子松土壤粒径含量分布特征

由表 1 可知, 在不同林龄土壤中黏粒的体积含量为 $0 \sim 3.7\%$, 粉粒的体积含量为 $0.9\% \sim 24.4\%$, 极细砂粒的体积含量为 $1.9\% \sim 22.7\%$, 细砂粒的体积含量为 $27.1\% \sim 63.6\%$, 中砂粒的体积含量为 $13.8\% \sim 44.9\%$, 粗砂粒的体积含量为 $0.2\% \sim 8.3\%$, 极粗砂粒的体积含量为 $0 \sim 1.2\%$ 。对比同一年代不同深度土壤颗粒含量的分布可以看出: 随着土层深度的增加, 黏粒含量呈现出减少的趋势, 粉粒含量呈减少的趋势, 极细砂粒含量呈现减少的趋势, 细砂粒含量呈增加的趋势, 粗砂粒含量呈增加的趋势。

表 1 各龄级土壤中粒级壤颗粒体积与总体积百分比

龄级/a	土深/cm	黏粒	粉粒	极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	极粗砂粒
60	0—10	3.7±1.3	14.9±0.3	22.7±0.5	41.4±1.8	13.8±3.0	3.1±2.8	0.4±0.5
	10—20	0.7±0.3	3.1±0.7	1.9±1.3	47.7±1.0	44.9±0.6	1.7±2.1	0.0±0.0
	20—30	0.7±0.3	2.4±0.3	6.0±0.3	45.3±3.6	39.6±0.5	6.0±2.9	0.0±0.0
	30—40	0.4±0.3	2.0±0.7	3.0±0.5	48.4±0.7	41.5±0.8	4.6±0.6	0.0±0.0
50	0—10	2.7±1.7	24.4±1.1	18.7±1.7	27.1±1.0	21.3±2.9	4.6±0.2	1.2±1.8
	10—20	1.0±0.6	2.1±0.7	10.0±0.1	54.8±1.2	30.6±0.3	1.4±0.3	0.0±0.0
	20—30	0.2±0.0	1.1±0.2	9.4±2.0	63.6±1.8	25.6±3.8	0.2±0.2	0.0±0.0
	30—40	0.0±0.0	0.9±0.0	11.1±2.6	59.4±1.7	27.5±3.0	1.1±1.3	0.0±0.0
40	0—10	0.7±0.2	6.1±0.4	8.0±0.0	48.4±1.5	34.2±1.2	2.7±0.9	0.0±0.0
	10—20	0.1±0.1	1.2±0.3	4.5±1.9	49.8±0.2	40.9±2.2	3.5±0.2	0.0±0.0
	20—30	0.6±0.2	2.1±0.4	2.6±1.0	45.9±0.7	44.4±2.0	4.4±0.4	0.0±0.0
	30—40	0.4±0.1	1.8±0.1	6.4±0.1	49.2±0.5	38.5±0.4	3.8±0.8	0.0±0.0
CK	0—10	0.7±0.3	3.1±0.7	1.9±1.3	47.7±1.0	44.9±0.6	1.7±2.1	0.0±0.0
	10—20	0.4±0.4	2.6±1.3	4.2±1.6	44.5±2.7	41.9±4.3	6.5±1.7	0.0±0.0
	20—30	0.4±0.3	2.0±0.7	3.0±0.5	48.4±0.7	41.5±0.8	4.6±0.6	0.0±0.0
	30—40	0.5±0.3	1.3±0.7	4.2±1.7	43.9±0.7	41.8±1.3	8.3±0.7	0.0±0.0

2.2 不同林龄下樟子松土壤分形特征

对比同一年代土壤分形维数时, 结果表明随着土层深度的增加土壤分形维数呈逐渐减小的趋势, 并且 60 年生林下土壤 10 cm 深度处的分形维数值显著高于 20—40 cm 处的土壤分形维数值, 而 50 年生林下土壤 20—30 cm 深度处的分形维数值显著低于 10—20 cm, 0—10 cm, 30—40 cm 处的值, 40 年生和空白林下土壤的分形值差异不显著; 然而, 在对比不同年代土壤分形维数的结果表明: 50 年生樟子松林下土壤分形维数最大, 40 年生樟子松林下土壤分形维数最小, 60 年生土壤分形维数居中, 但三者的分形维数均高于空白值, 并且 40

年生和空白分形为数值显著低于 60 年生和 50 年生林下土壤分形值; 50 年生林下土壤分形值明显高于 60 年生、40 年生和空白的分形维数值(表 2)。

表 2 不同林龄樟子松土壤颗粒分形维数

土层深度/cm	60 a	50 a	40 a	CK
0—10	2.63±0.03aA	2.61±0.06aA	2.41±0.03bA	2.34±0.02bA
10—20	2.52±0.11aAB	2.39±0.08aB	2.43±0.33aA	2.27±0.15aA
20—30	2.35±0.05aB	2.22±0.01aC	2.31±0.05aA	2.29±0.08aA
30—40	2.37±0.09bB	2.71±0.01aA	2.29±0.02bA	2.27±0.10bA
平均值	2.47	2.48	2.36	2.29

注: 不同小写字母表示不同年代同一土层间土壤分形维数差异显著; 不同大写字母表示同一年代不同土层间土壤分形维数差异显著 ($p < 0.05$)。

2.3 不同林龄下樟子松土壤理化性质的变化规律

由表 3 可知,全氮含量和土壤含水率的均值大小表现为 60 a>50 a>CK>40 a;全磷含量和有机质含量的均值大小表现为 60 a>50 a>40 a>CK;并且随着土层深度的增加土壤中全氮、全磷、有机质以及土壤含水率均呈现减小的趋势。对比不同林龄土壤来看,随着植被林龄的增加,土壤表层营养及含水率呈现明显的升高趋势。

2.4 不同林龄下樟子松土壤粒径分布与理化性质的关系

为进一步研究不同林龄樟子松林下土壤分形维数与土壤理化性质的关系,对土壤全氮、全磷和土壤有机质进行了相关分析,结果如图 1 所示。全氮、全磷和土壤有机质含量与分形维数间的相关关系分别为 0.443,0.586,0.034,表明土壤全氮、全磷和有机质含量与分形维数呈显著的正相关关系($p<0.05$)。由 2.3 部分可知,50 a 林下土壤分形维数数值最大,并且林下土壤分形维数均大于 CK,说明植被恢复在一定

程度上有利于涵养土壤养分。

表 3 不同林龄樟子松林下土壤养分特征

龄级/a	土层深度/cm	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	含水率/%
60	0—10	0.36±0.13	0.04±0.01	0.49±0.23	0.07±0.01
	10—20	0.15±0.03	0.02±0.00	0.18±0.04	0.04±0.01
	20—30	0.09±0.01	0.02±0.01	0.09±0.00	0.05±0.02
	30—40	0.07±0.02	0.02±0.02	0.08±0.02	0.04±0.01
50	0—10	0.38±0.22	0.03±0.01	0.43±0.26	0.06±0.03
	10—20	0.14±0.09	0.02±0.00	0.16±0.11	0.04±0.01
	20—30	0.06±0.02	0.02±0.01	0.09±0.01	0.03±0.00
	30—40	0.06±0.00	0.02±0.02	0.10±0.02	0.04±0.01
40	0—10	0.13±0.05	0.01±0.00	0.24±0.16	0.04±0.02
	10—20	0.06±0.01	0.01±0.01	0.09±0.00	0.04±0.00
	20—30	0.04±0.01	0.01±0.01	0.06±0.00	0.03±0.00
	30—40	0.04±0.01	0.02±0.00	0.07±0.00	0.03±0.01
CK	0—10	0.15±0.07	0.01±0.00	0.14±0.08	0.04±0.02
	10—20	0.09±0.03	0.01±0.00	0.15±0.05	0.05±0.03
	20—30	0.06±0.02	0.01±0.00	0.05±0.02	0.06±0.03
	30—40	0.06±0.02	0.01±0.00	0.03±0.01	0.04±0.00

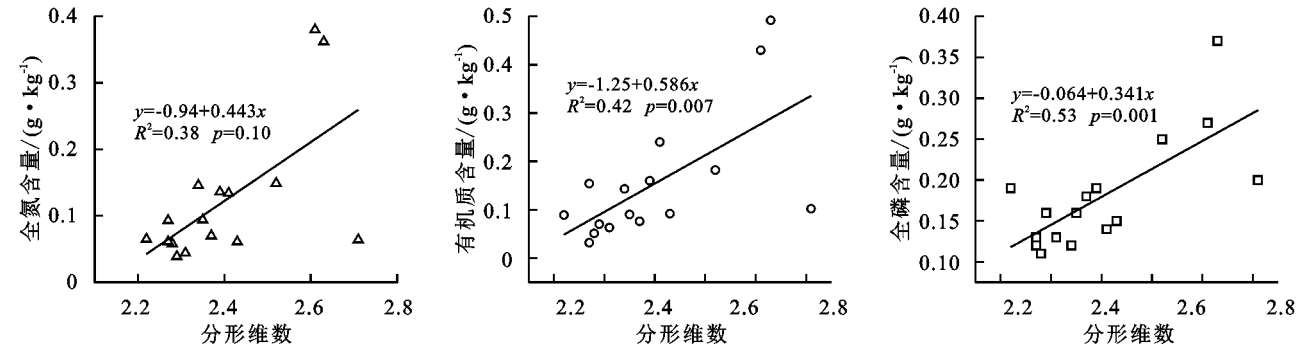


图 1 土壤中全氮、有机质、全磷含量与分形维数的相关关系

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文研究结果表明,该地区土壤性质与土壤中各粒径的含量有着密切的联系。由于该区域位于黄土高原北部,年均降水量较少、土壤的风化较难进行,所以土壤中砂粒居多。研究发现不同林龄樟子松人工林土壤中粉粒、黏粒和极细砂粒的含量随土层深度的增加而减少,粗砂粒含量随土层深度的增加而增加。肖冬冬等^[15]对西双版纳橡胶林土壤颗粒分形维数的研究结果表明,在较长的恢复年限中人为因素作用对于土壤颗粒风化速度的作用较为明显,土壤各颗粒含量较为均匀。但是,在人类活动较少的人工林中由于对土壤的扰动较小,因此土壤中各颗粒含量差别较大。而在本研究区内细砂粒含量和中砂粒含量多于粉粒和黏粒的含量,这是由于砂粒较粉粒和黏粒的风化较难进行。土壤的颗粒含量直接影响土壤的机械组成以及土壤的质地,并且其颗粒含量也是表征土壤状况的一个指标^[16]。倘

若砂粒的含量过高则会导致土壤的保水保肥性能下降;有研究表明,黏粒含量过高会导致土壤的通气性能下降,所以砂粒、粉粒、黏粒三者的含量要达到合适的比例,不宜过高或过低^[17]。在未来土壤的改良过程中,对于土壤中各粒径的百分含量进行探究,进而来探讨影响各粒径百分含量的影响因素,从而控制砂粒的含量,提高土壤中黏粒的含量,使三者的含量达到某一平衡点,土壤的利用率达到最高,进而从土壤的结构上来提高土壤的持水保肥性能。

在对比不同林龄下樟子松土壤颗粒的分形维数数值中,可以得出 50 a 生林下土壤的分形维数值高于 60 a 生、40 a 生以及空白对照林下土壤分形维数,但是 3 种不同林龄下土壤分形维数值均大于空白对照,表明樟子松对于土壤的改良以及土粒的固定是起到了一定的作用。而 50 a 生林下土壤分形为数值呈现最高是由于成熟林对于土壤的改良作用较中纯熟林的作用小,但是与幼林相比起作用更大,从而导致了这一现象。在研究结果中同时表明,土壤的分形维

数值随土层深度的增加逐渐减小的变化较为明显。其一由于随着土层深度的增加土壤黏粒含量减少,黏粒含量减少从而导致土壤分形维数值减小;其二是该区域的细砂粒和中砂粒较含量多是由于该区域的气候所致,该研究区内年降水量在 400 mm 以下,气温差较大,多风沙,并且该区域毗邻沙漠地区,风沙的转移作用也是导致砂粒含量较多的原因之一。

本研究对于土壤分形维数与各粒径含量分布间的关系表明:在 $p < 0.01$ 水平时,土壤体积分形维数与黏粒粉粒含量和极细砂粒含量呈现出极显著的正相关关系,与中砂粒含量呈现出极显著的负相关关系;并且随着黏粒、粉粒含量以及极细砂粒的增加土壤体积分形维数值呈现出逐渐增大的趋势,而中砂粒含量的增加使得土壤体积分形维数值呈现减小的趋势。这与祝忆伟等^[18]对不同林龄栓皮栎林土壤分形特征的研究结果基本一致。但是,甘凤玲等^[19]对于汶川地区不同植被下土壤特征分形维数研究的体积分形维数与黏粒含量间的相关性结论有所区别,这是研究区的选取差异较大,南北方土壤颗粒含量差异较大所造成的。南北方气候、地形差异较大从而导致土壤的性质差异较大。土壤分形维数值与土壤各粒径含量的百分比有着显著的关系,且黏粒和粉粒的含量越多,土壤体积分形维数值越大;若中砂粒含量越多,体积分形维数值越小;并且王卫华等^[20]对于土壤粒径分布与孔隙的单重分形的研究表明某区域质地的均匀程度也可用土壤的分形维数来进行描述,分形维数的变化趋势与土壤质地的均匀程度呈正相关的关系。罗雅曦等^[21]对腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成以及分形维数性质的影响因素分析中提及土粒对于孔隙的填充能力也可以土壤分形维数来进行表征。分形维数对土壤的物理特性,例如土壤的通气性、保水保肥的性能以及其抗蚀能力等均具有重要的参考意义^[22]。

本研究对分形维数与土壤理化性质的研究表明:土壤有机质、全氮、全磷的含量以及土壤含水率整体呈现出随土层深度的增加而减少,并且表层土壤的养分含量均高于深层土壤中的含量。

3.2 结论

(1) 3 种不同林龄樟子松土壤中细砂粒含量最多,极粗砂粒含量最少,并且随着土层深度的增加黏粒含量、粉粒含量以及极细砂粒含量呈现减少的趋势,而细砂粒含量和粗砂粒含量呈增加的趋势;在 0—40 cm 的土层范围内,不同林龄下樟子松土壤颗粒分形维数范围为 2.27~2.71,均值大小分别表现为 $50\text{ a} > 60\text{ a} > 40\text{ a} > \text{CK}$ 。

(2) 全氮含量和土壤含水率的均值大小表现为

$60\text{ a} > 50\text{ a} > \text{CK} > 40\text{ a}$;全磷含量和有机质含量的均值大小表现为 $60\text{ a} > 50\text{ a} > 40\text{ a} > \text{CK}$;并且随着土层深度的增加土壤中全氮、全磷、有机质以及土壤含水率均呈现减小的趋势。

(3) 全氮、全磷和土壤有机质含量与分形维数间的相关关系分别为 0.391, 0.418, 0.522, 表明土壤全氮、全磷和有机质含量与分形维数呈正相关关系。

参考文献:

- [1] 刘志强,高吉喜,田美荣,等.生态修复区植物群落土壤粒径的分维特征[J].生态学杂志,2017,36(2):303-308.
- [2] Paz-Ferreiro J, Vázquez E V, Miranda J G V. Assessing soil particle-size distribution on experimental plots with similar texture under different management systems using multifractal parameters[J].Geoderma,2010,160(1):47-56.
- [3] 阎欣,安慧.宁夏荒漠草原沙漠化过程中土壤粒径分形特征[J].应用生态学报,2017,28(10):3243-3250.
- [4] 高玉寒,姚云峰,李龙,等.赤峰市敖汉旗 4 种类型土壤机械组成及分形维数的垂直分布特征[J].江苏农业科学,2017,45(11):236-239.
- [5] 张彩红,茹豪,武秀娟,等.庞泉沟流域土壤粒径分形维数特征[J].东北林业大学学报,2017,45(11):83-88.
- [6] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.4 种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(6):1060-1068.
- [7] 郝伟华,刘任涛,赵娟,等.干旱风沙区柠条灌丛林地土壤重金属分布及其与土壤分形维数的关系[J].水土保持研究,2018,25(6):196-202.
- [8] 热依拉·木民,玉米提·哈力克,塔依尔江·艾山,等.基于分形维数的不同林龄新疆杨对土壤理化特性的影响分析[J].土壤通报,2018,49(2):313-319.
- [9] 方肖晨,王春红,张荣华,等.伏牛山区迎河小流域不同土地利用类型的土壤粒径分布特征[J].中国水土保持科学,2017,15(3):9-16.
- [10] 杨军怀,拓飞,齐海波,等.毛乌素沙地东南缘樟子松人工林土壤养分研究[J].河南科学,2019,37(1):78-85.
- [11] 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.
- [12] 张佳瑞,王金满,祝宇成,等.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228.
- [13] 田泽昊.榆林市水质污染现状及健康风险评价:以红石峡库区为例[D].西安:西北大学,2017.
- [14] 丁怡飞,曹永庆,姚小华,等.油茶间作不同绿肥的土壤分形及养分损耗特征[J].安徽农业大学学报,2018,45(5):867-871.
- [15] 肖冬冬,史正涛,刘新有,等.西双版纳橡胶林土壤颗粒体积分形维数特征[J].热带作物学报,2017,38(5):817-823.

(下转第 129 页)

- 土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
- [17] 童冉,陈庆标,周本智,等.毛竹和雷竹地下系统结构及生物力学性质[J].生态学报,2020,40(7):2242-2251.
- [18] 刘艳琦.5种植物两个生长期根系生物力学特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [19] 李宁,陈丽华,杨苑君,油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J].北京林业大学学报,2015,37(12):77-84.
- [20] 杨路,杜峰,秦晶晶,等.黄土区3种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J].水土保持研究,2022,29(1):295-300,310.
- [21] 徐文秀,杨玲,鲍玉海,等.大型水库消落带2种典型耐淹草本植物单根抗拉力学特性[J].水土保持研究,2020,27(5):259-264,272.
- [22] 刘亚斌,李淑霞,余冬梅,等.西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J].农业工程学报,2018,34(15):157-166.
- [23] 王月,杜峰,周敏,等.陕北林草混交根土复合体抗剪强度研究[J].水土保持研究,2018,25(2):213-219.
- [24] 刘国彬,蒋定生,朱显谟.黄土区草地根系生物力学特性研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):21-28.
- [25] 张玉,朱海丽,张珂,等.3种滨河植物单根抗拉特性与其微观结构关系[J].干旱区研究,2022,39(2):572-583.
- [26] 张乔艳,唐丽霞,廖华刚,等.多花木蓝根截面微观结构对其抗拉特性的影响[J].植物生态学报,2019,43(8):709-717.
- [27] 张乔艳,唐丽霞,潘露,等.基于根系化学组成的抗拉力学特性分析[J].南京林业大学学报:自然科学版,2020,44(1):186-192.
- [28] Hathaway R L, Penny D. Root strength in some *Populus* and *Salix* Clones[J]. New Zealand Journal of Botany, 1975,13:333-344.
- [29] 韩立亮,宋桂龙.护坡木本植物根系的力学特性及其与细胞壁成分的关系[J].北京林业大学学报,2015,37(11):120-127.
- [30] 赵丽兵,张宝贵.紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J].农业工程学报,2007,23(9):7-12.
- [31] 李长暄.林木单根力学性能及其影响因素研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [32] 张超波.林木根系固土护坡力学基础研究[D].北京:北京林业大学,2011.

(上接第114页)

- [16] 刘爽,王雅,刘海龙,等.晋西北不同土地恢复管理措施下土壤物理性状分析[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):235-244.
- [17] 邓继峰,丁国栋,李景浩,等.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[J].西北林学院学报,2017,32(3):35-40.
- [18] 祝忆伟,张志铭,赵勇,等.不同林龄栓皮栎林下土壤颗粒分形及养分特征研究[J].河南农业大学学报,2017,51(5):634-639.
- [19] 甘凤玲,王涛,何丙辉,等.汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征[J].水土保持研究,2018,25(1):84-91.
- [20] 王卫华,龙小军.土壤粒径分布单重分形与孔隙单重分形[J].中国土壤与肥料,2018(4):55-59.
- [21] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.
- [22] 房莉,余健,方凤满,等.高潜水位矿区不同土地利用方式下复垦土壤颗粒与分形特征[J].金属矿山,2019(3):182-188.

(上接第121页)

- [30] 郭少壮,白红英,孟清,等.1980—2015年秦岭地区景观格局变化及其对人为干扰的响应[J].应用生态学报,2018,29(12):4080-4088.
- [31] 车娜.吸取秦岭“大教训”,划好守牢生态红线[N].中国自然资源报,2020-4-28(2).
- [32] 陈子娟,周廷刚,李洪忠,等.粤港澳大湾区湿地生态风险评评估[J].水生态学杂志,2021,42(5):40-51.
- [33] 吴金鸿,杨涵,杨方社,等.额尔齐斯河流域湿地生态系统健康评价[J].干旱区资源与环境,2014,28(6):149-154.
- [34] 王鹏,赵微,柯新利.基于SRP模型的潜江市生态脆弱性评价及时空演变[J].水土保持研究,2021,28(5):347-354.
- [35] 甄江红,银山,刘果厚,等.草原文化遗址区景观格局变化及其生态风险评估:以元上都为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(12):159-165.