文章编号:1000-7601(2020)01-0217-06 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.28

哈巴湖国家级自然保护区固沙林地土壤颗粒分形特征

何建龙[1],蒋 齐[1],吴旭东[1],王占军[1],尤万学[2],杨立瑾[2]

(1.宁夏农林科学院荒漠化治理研究所,宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室,宁夏 银川 750002;
2.宁夏哈巴湖国家级自然保护区管理局,宁夏 盐池 751500)

摘 要:为科学评价植被恢复促进沙漠化逆转对土壤质地的影响,以流动沙地(CK)、黑沙蒿林地(AF)、杨树林地(PF)及沙柳林地(SF)荒漠生态系统为研究对象,分析不同固沙林地土壤颗粒组成、土壤养分特征及其相关性。结果表明:固沙林地土壤颗粒组成主要以 50~250 μm 的细沙粒为主,AF 显著提高了 0~10 cm 土层土壤黏粉粒含量和土壤颗粒体积分形维数($P<0.01$),分形维数表现为 AF>PF>CK>SF,各固沙林地间分形维数差异极显著($P<0.01$);相关性分析表明,黏粉粒含量越高,分形维数越大,土壤物理稳定性越好;分形维数与土壤有机质、全氮和全磷含量极显著正相关,与细砂粒体积百分比极显著负相关,土壤颗粒分形维数 D 值每增加 1,土壤有机质、全氮和全磷含量分别增加 2.80、0.13 g·kg^{-1}和 0.10 g·kg^{-1}。分形维数可以作为表征人工林固沙后沙丘土壤质地变化和沙丘土壤环境演变的敏感性综合指标。

关键词:土壤颗粒;分形维数;固沙林地;哈巴湖自然保护区

中图分类号:S154.1;S152.4 **文献标志码**:A

Fractal characteristics of soil particles in sand-fixing forests of Habahu National Nature Reserve

HE Jianlong[1], JIANG Qi[1], WU Xudong[1], WANG Zhanjun[1], YOU Wanxue[2], YANG Lijin[2]

(1. *Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan, Ningxia* 750002, *China*;
2. *Ningxia Habahu National Nature Reserve Administration, Yanchi, Ningxia* 751500, *China*)

Abstract: In order to scientifically evaluate the impact of vegetation restoration on soil texture of desert soil reversal, 5 desert ecosystems including mobile sand dune (CK), *Artemisia ordosica* fixed sand (AF), *Populus simonii* fixed sand (PF), and *Salix cheilophila* fixed sand (SF), were studied. The soil particle composition, soil nutrient characteristics, and their correlations in different sand-fixing forests were analyzed. The results showed that the soil particle composition of the sand-fixing forests were mainly composed of 50~250 μm fine sands, and AF significantly increased the soil clay content and soil particle volume fractal dimension of 0~10 cm soil layer ($P<0.01$). The fractal dimension was ranked as AF>PF>CK>SF and the fractal dimension difference of each sand-fixing forest was extremely significant ($P<0.01$). Correlation analysis showed that the higher the clay particle content, the larger the fractal dimension and the better the soil physical stability. Fractal dimension was significantly positively correlated with soil organic matter, total nitrogen, and total phosphorus at 0.01 level, but significantly negatively correlated with fine sand volume percentage ($P<0.01$). Soil particle fractal dimension D increased by 1, soil organic matter, total nitrogen, and total phosphorus increased by 2.80, 0.13 g·kg^{-1}, and 0.10 g·kg^{-1}, respectively. Therefore, fractal dimension can be used as a comprehensive index to characterize the soil texture change of dune and sandstone soil environment after sand fixation in plantation.

收稿日期:2019-02-28 **修回日期**:2019-04-10

基金项目:世界银行贷款项目(NX-ZX-02);国家重点研发计划课题(2016YFC0400305)

作者简介:何建龙(1980-),男,内蒙古人,副研究员,主要从事退化生态恢复研究。E-mail: nxhmshjl@163.com

通信作者:蒋齐(1965-),男,研究员,硕士生导师,主要从事草地生态、资源与环境研究。E-mail: ycjqnx@163.com

Keywords: soil particles; fractal dimension; sand-fixing forests; soil environmental evolution indicator; Habahu National Nature Reserve

在区域气候暖干化、过牧、樵采等综合因素驱动下,干旱半干旱区出现不同程度的沙漠化,土壤氮(N)、磷(P)和钾(K)等土壤养分受到侵蚀,土壤肥力下降,从而影响区域生态系统稳定[1]。然而,土地沙漠化的核心问题仍然是土壤粗粒化过程[2],为此,土地沙化过程中土壤养分、质地及相互关系是干旱半干旱风沙区的重要研究内容。沙漠化区域土壤质地演进对区域生态系统功能和土地沙化程度具有重要的指示意义[3]。土壤粒径分布(Particle size distribution,PSD)是土壤水力特性、土壤水分运动、污染物运移和土壤侵蚀的重要影响因素之一,同时可以表征植被生产力及生态恢复进程,是土壤基本物理特征之一[4-5]。描述土壤粒径分布是理解和量化土壤结构和动态的重要途径。分形维数(Fractal dimension)是判断土壤质地的重要指标,能够定量描述土壤粒径分布的均匀性和土壤结构的空间变异,可反映土壤水分曲线特征、土壤肥力、土壤侵蚀和土壤退化程度,也可以间接反映自然环境变化和人类活动对土壤理化性质的影响,分形维数可作为评价土壤状况的综合指标[6]。激光衍射是一种用于测量土壤分形维数的技术,它是估算 PSD 的可靠方法,该方法允许量化和整合关于土壤测量的生物、化学和物理特征的信息[7]。因此,土壤分形维数为土壤质量评价和退化土壤恢复提供了重要的理论依据。

毛乌素沙地是受沙漠化影响最严重的地区之一,位于鄂尔多斯高原南部,占地面积约 400 万 hm^2,是中国农牧区的重要组成部分。毛乌素沙地的沙漠化主要表现在以前固定的沙丘转变为半固定和移动沙丘。植被覆盖损失和随后的沙漠化导致土壤理化性质的退化[8-9]。为了恢复土壤肥力和改变沙地面积,已经采用了许多手段和方法,例如引入机械沙障,生物土壤结皮和植树造林。大量研究表明[10-13],在旱区进行人工固沙造林,能够有效改善土壤结构,提高土壤肥力,局地生境逐步恢复,有效遏制沙漠化扩张。但退化生态系统全面恢复的根本是土壤生境的恢复,土壤质地及其稳定性是土地沙化的重要决定因子和指示器[12,14-15],土壤质地在土壤恢复中具有决定性作用,通过开展土壤质地对植树造林措施的响应研究,有助于解析沙漠化土地恢复过程中土壤物理稳定性的维持机制。

鉴于此,本文以宁夏盐池县哈巴湖国家级自然保护区固沙林地为研究对象,选取流动沙地(CK)、黑沙蒿林地、杨树林地及沙柳林地 4 种典型的固沙造林地,采用样方法对植物群落进行野外调查,采用土壤颗粒体积分形维数表征土壤质地演变,结合土壤养分测定,揭示固沙林地土壤颗粒组成及分形维数特征对土壤养分的影响规律,旨在研究沙质土地经过人工造林后的土壤质地演变及其稳定性维持机制,这对揭示沙漠化土地逆转过程中制定有效生物防沙措施具有重要的科学指导意义。

1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池县哈巴湖国家级自然保护区(106°53′~107°40′E,37°37′~38°03′N),海拔 1 300 m,总面积 8.4 万 hm^2,属荒漠-湿地生态系统类型的自然保护区。保护区处于黄土高原向鄂尔多斯台地过渡、半干旱区向干旱区过渡、草原区向荒漠过渡、农区向牧区过渡的交错地带,典型灌丛、草原、荒漠草原、草甸、湿地等多种植被类型在此交汇。保护区内大小湿地上百块,主要湿地有哈巴湖湿地、四儿滩湿地、高沙窝湿地、二道湖湿地、骆驼井湿地等。该区域属典型的中温带大陆性气候,年均温 7.5℃,年均降水量低于 300 mm,蒸发量大于 2 700 mm,年均无霜期 164 d,冬春风沙活动强烈。土壤类型以易沙化的淡灰钙土为主,土壤贫瘠、结构疏松、易遭风蚀。近年来保护区采取了机械沙障、生物土壤结皮和植树造林等生态恢复措施。造林树种主要以沙柳(*Salix cheilophila*)、杨树(*Populus*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)为主,伴生草本植物有沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、砂珍棘豆(*Oxytropis racemosa*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)、赖草(*Leymus secalinus*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

样地设置在保护区内几种典型的人工固沙林地,分别为沙柳固沙造林地(*Salix cheilophila* fixed sand,SF),杨树固沙造林地(*Populus simonii* fixed

sand,PF),黑沙蒿固沙造林地(*Artemisia ordosica* fixed sand,AF),以流动沙丘(mobile sand dune,CK)为对照,开展不同阶段固沙林地的土壤演变特征研究,各样地基本情况见表 1。每种类型样地面积均在 1 000 m^2以上,各样地地形与环境条件基本一致,每种类型样地设 6 个重复样区,面积 10 m×10 m,间距 100 m 左右,调查固沙林高度、密度及冠幅。在每个重复样区布设 6 个 1 m×1 m 的调查样方,用于调查样地内草本植物群落,调查样方中各种类植物的密度、高度和盖度。

2.2　土壤样品采集

于 2018 年 9 月,在每个调查样方内按照"S 形"用环刀法采集 0~10 cm 原状土样 5 个,各样方的重复土样均匀混合,四分法取样,所取土壤样品剔除可见的植物残体和石块后风干过 2 mm 筛备用,混合土样取 500 g 带回实验室进行相关指标测定。

2.3　分析方法

土壤有机质(SOM)含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法测定。

土壤颗粒体积分形维数:采用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪自动测定土壤粒径的体积百分比,根据美国农业部(US-AD)制土壤质地分级标准划分土壤质地:极粗砂粒(1 000~2 000 μm)、粗砂粒(500~1 000 μm)、中砂粒(250~500 μm)、细砂粒(100~250 μm)、极细砂粒(50~100 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒(<2 μm),以激光粒度分析仪所获得粒径体积数据为基础,根据 Tyler[16] 对土壤颗粒体积分形维数的概念及其计算公式推导,得到如下体积分形维数计算公式:

$$D = V_{(r<R)}/V_T = (R/\lambda_V)^{3-D}$$

式中,r 为土壤粒径(mm);V 为粒径小于 R 的全部土壤颗粒的总体积(%);R 为两筛分粒级 R_i 与 R_{i+1} 间粒径的平均值(mm);V_T 为土壤颗粒的总体积(%);λ_V 为在数值上等于激光粒度分析仪所获得的最大粒径数 RL(mm);D 为土壤颗粒的体积分形维数。

2.4　数据处理

采用 SAS 8.0 进行方差分析和 LSD 分析。

3　结果与分析

3.1　不同固沙林地土壤颗粒分布及其分形维数

从表 2 可以看出,通过不同固沙林地 0~10 cm 土层土壤颗粒组成对比发现,固沙造林地土壤颗粒组成主要以 50~250 μm 的细沙粒为主,方差分析结果显示,黑沙蒿固沙林地(AF)土壤黏粉粒组分体积百分比高于沙柳(SF)、杨树固沙林地(PF)及流动沙

表 1　样地植被特征

Table 1　Vegetation characteristics of sample plots

样地类型 Plot type	优势植物 Dominant plant	草本 Herbage		乔(灌)木 Arbor/shrub			盖度/% Coverage
		株高/cm Plant height	密度/(株·m^{-2}) Plant density /(plant·m^{-2})	株高/m Plant height	冠幅/m^2 Crown	密度/(株·100m^{-2}) Plant density /(plant·100m^{-2})	
CK	沙蓬 *Agriophyllum squarrosum*	6.0±0.15	3±0.07	-	-	-	2.0±0.05
SF	沙柳 *Salix cheilophila* 砂珍棘豆 *Oxytropis racemosa*	14.0±3.47	10±0.13	2.4±0.03	6.3±0.45	18±2.19	28.1±2.23
PF	杨树 *Populus* 柠条 *Caragana Korshinskii* 杨柴 *Hedysarum mongolicum* 黑沙蒿 *Artemisia ordosica* 沙蓬 *Agriophyllum squarrosum*	7.5±0.79	2±0.03	3.5±0.03	3.5±0.09	14±4.09	15.7±4.61
AF	黑沙蒿 *Artemisia ordosica* 猪毛蒿 *Artemisia scoparia* 唐松草 *Thalictrum aquilegifolium*	31.7±8.46	118±17.96	0.6±0.07	1.1±0.05	61±9.05	67.4±8.55

表 2　不同固沙样地土壤颗粒分布及其分形维数

Table 2　Distribution of soil particles and fractal dimensions in different sand-fixing sites

样地类型 Plot type	土壤颗粒分布 Soil particles/%				分形维数 Fractal dimension	R^2
	黏粒 Clay (< 2 μm)	粉粒 Silt (2~50 μm)	细砂粒 Fine sand (50~250 μm)	中砂粒 Medium sand (250~1 000 μm)		
CK	0 B	3.31±0.05B	96.69±0.04B	0 C	1.08±0.01C	0.88
SF	0 B	2.69±0.01C	97.31±0.01A	0 C	0.96±0.01D	0.89
PF	0 B	0.23±0.02D	97.21±0.08A	2.56±0.07A	1.23±0.02B	0.66
AF	22.03±0.30A	14.65±0.22A	63.21±0.39C	0.11±0.02B	2.62±0.01A	0.96

注:不同字母表示不同样地间差异极显著(P<0.01),下同。

Note: Different letters indicate extremely significant under different plot types (P<0.01); The same below.

丘(CK),且在 0.01 水平上存在极显著性差异,而 50~250 μm 细沙粒组分百分比极显著小于其他样地($P<0.01$),表明黑沙蒿固沙林地能有效提高土壤细颗粒物质,改善土壤质地,土质由沙土逐渐向沙壤土转变,土壤整体稳定性显著提高;同时,土壤被认为是一种具有分形特征的分散多孔介质,土壤分形维数是反映土壤结构几何形体的参数,运用回归分析法计算出了固沙林地土壤颗粒体积分形维数,结果显示,不同处理下土壤颗粒分形维数变化范围在 0.96~2.62,表现为:AF>PF>CK>SF,且不同固沙样地之间土壤颗粒分形维数差异极显著($P<0.01$)。

3.2 固沙林地土壤颗粒分形维数与土壤颗粒组成回归分析

通过线性回归和相关分析描述分形维数与土壤黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、细砂粒(50~250 μm)和中砂粒(250~1 000 μm)体积百分比之间的关系(图 1),结果显示土壤颗粒分形维数 D 值与土壤黏粒及粉粒组分百分比呈线性正相关($R^2=0.98$, $P<0.01$; $R^2=0.89$, $P<0.05$),D 值与 50~250 μm 土壤细砂粒组分百分比呈线性负相关($R^2=0.98$, $P<0.01$)。通过回归模型可以看出,土壤黏粒每增加 1%,土壤颗粒分形维数增大 0.07,土壤粉粒每增加 1%,土壤颗粒分形维数增大 0.11,土壤细砂粒每增加 50%,土壤颗粒分形维数减小 2.50,说明<50 μm 粒径物质百分比的增加和>50 μm 粒径物质百分比的降低共同决定了土壤颗粒分形维数的增大,50 μm 粒径物质百分比是反映固沙林地土壤颗粒分形维数的临界粒径。结合表 1 可以看出,黑沙蒿固沙林地植被盖度和黏粉粒组分百分比均高于其他样地,与流动沙丘相比,黑沙蒿固沙林地表的植被状况和土壤质地均会发生演变,从而利于流沙上植物的定居与恢复。

3.3 固沙林地土壤养分特征

通过不同固沙林地土壤养分含量差异性分析可以看出(图 2),人工林固沙措施对土壤养分作用明显,土壤有机质表现为黑沙蒿固沙林地最高,沙柳固沙林地次之,杨树固沙林地及流动沙丘最低,且黑沙蒿固沙林地及沙柳固沙林地与其他样地呈极显著差异性($P<0.01$);土壤全氮和全磷均表现为 AF>PF>SF>CK,且在 0.01 水平上呈极显著差异性。

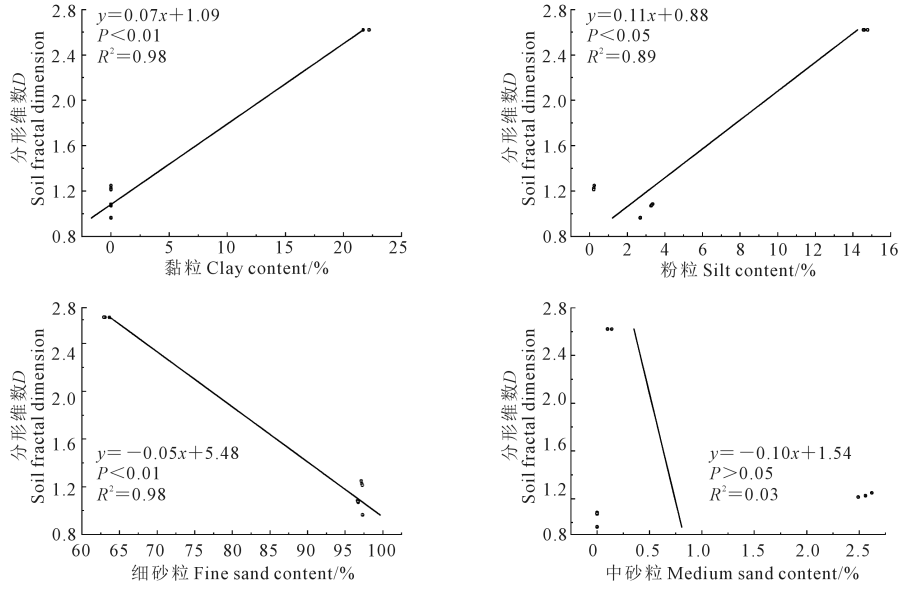


图 1 分形维数 D 值与不同土壤粒径体积百分数的关系

Fig.1 Relationship between fractal dimension D value and different soil particle size and volume percentage

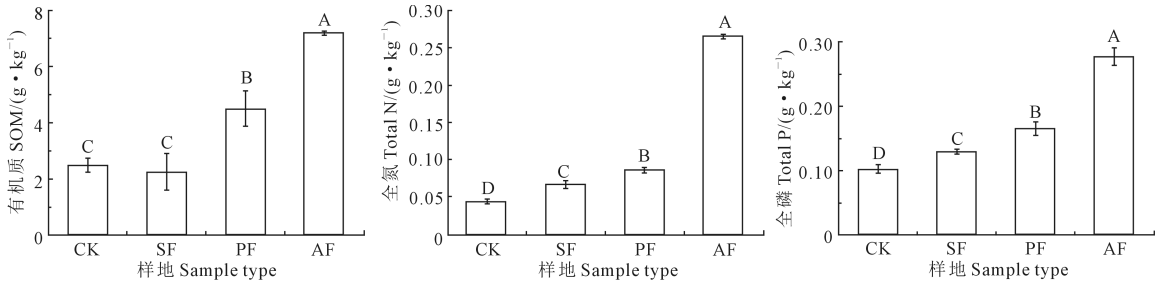


图 2 固沙林地土壤养分含量

Fig.2 Soil nutrient content of sand-fixing forest land

3.4　固沙林地分形维数与土壤性质间的关系

由表 3 可知,分形维数 D 值与土壤黏粒和粉粒体积百分比,以及有机质、全氮和全磷含量在 0.01 水平均呈现极显著正相关关系;分形维数 D 值与细砂粒体积百分比呈极显著负相关关系。土壤黏粒体积百分比与有机质、全氮和全磷含量在 0.01 水平呈现极显著正相关性,而土壤粉粒含量与有机质、全氮在 0.01 水平呈现极显著正相关性,与全磷含量极显著负相关,细砂粒含量与有机质、全氮和全磷含量在 0.01 水平呈现极显著负相关性。通过线性回归和相关分析描述分形维数与土壤有机质、全氮和全磷之间的关系(图 3),通过回归模型可以看出,土壤颗粒分形维数 D 值每增加 1,土壤有机质、全氮和全磷含量分别增加 2.80、0.13 g · kg^{-1} 和 0.10 g · kg^{-1}。以上分析表明,不同粒级土壤颗粒吸附土壤养分的能力存在差异,黏粒组分百分比含量越高,分形维数越大,吸附养分的表面积越大,养分积累更多。因此,分形维数可以作为表征人工林固沙后沙丘土壤质地变化和沙丘土壤环境演变的敏感性指标。

4　结　论

1)位于干旱半干旱区的哈巴湖国家级自然保护区固沙林地土壤质地主要以 50~250 μm 的细砂粒为主,黑沙蒿固沙林地土壤黏、粉粒组分极显著高于其他样地($P<0.01$),土壤颗粒分形维数表现为:AF(2.62)>PF(1.23)>CK(1.08)>SF(0.96),各固沙林地间分形维数差异极显著($P<0.01$),黏、粉粒含量越高,分形维数越大,土壤物理稳定性越好。

表 3　土壤颗粒分形维数与土壤性质的相关系数

Table 3　Correlation coefficients between fractal dimension of soil particles and soil properties

指标 Index	分形维数 Fractal dimension	黏粒 Clay (<2μm)	粉粒 Silt (2~50μm)	细砂粒 Fine sand (50~250μm)	中砂粒 Medium sand (250~1000μm)	有机质 SOM	全氮 Total N	全磷 Total P
分形维数 Fractal dimension	1							
黏粒 Clay(<2μm)	0.99**	1						
粉粒 Silt(2~50μm)	0.95**	0.98**	1					
细砂粒 Fine sand (50~250μm)	−0.99**	−1.00**	−0.98**	1				
中砂粒 Medium sand (250~1 000 μm)	−0.17	−0.29	−0.48	0.30	1			
有机质 SOM	0.93**	0.88**	0.78**	−0.88**	0.16	1		
全氮 Total N	0.99**	0.99**	0.93**	−0.98**	−0.16	0.93**	1	
全磷 Total P	0.96**	0.94**	−0.85**	−0.93**	0.01	0.96**	0.98**	1

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: ** indicates a significant correlation at the 0.01 level (both sides).

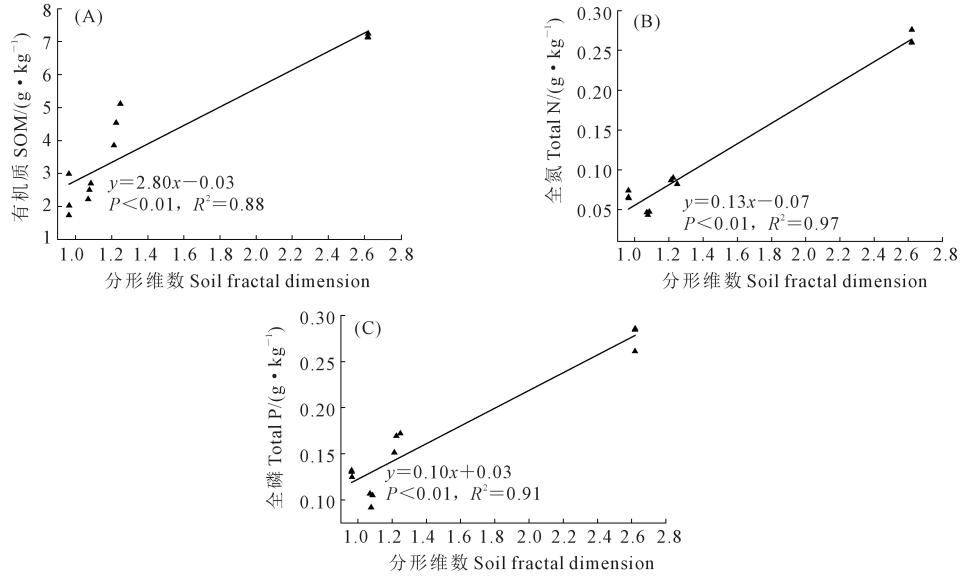


图 3　土壤颗粒分形维数与土壤理化性质的关系

Fig.3　Relationship between fractal dimension of soil particles and soil physical and chemical properties

2)分形维数与土壤黏粒和粉粒体积百分含量均呈极显著正相关关系;与细砂粒体积百分含量呈极显著负相关关系。土壤质地越粗分形维数越小,土壤质地越细分形维数越大,土壤粒径分布分形维数可以作为表征土壤结构的重要指标。

3)分形维数与土壤有机质、全氮和全磷含量在0.01水平极显著正相关,与细砂粒体积百分比呈极显著负相关($P<0.01$)。土壤颗粒分形维数 D 值每增加1,土壤有机质、全氮和全磷含量分别增加2.80、0.13 $g \cdot kg^{-1}$和0.10 $g \cdot kg^{-1}$。分形维数可以作为表征人工林固沙后沙丘土壤质地变化和沙丘土壤环境演变的敏感性指标。

5 讨 论

在干旱半干旱退化生态系统中,土壤性状对土壤生境演变过程非常敏感[17],土壤生境的恢复是生态系统全面恢复的根本[18]。土壤粒径分布分形维数在一定程度上可以表征土壤质地的均一程度,可以作为判断土壤质地差异的重要指标。哈巴湖国家级自然保护区黑沙蒿和沙柳固沙林地土壤颗粒体积分形维数较流动沙丘有显著提高,另外黑沙蒿人工固沙林地植被盖度最高,提高了地表覆盖度和粗糙度,降低地表风速、减少土壤风蚀作用明显加强[19-20]。本研究区域内土壤质地以细砂粒为主,土壤颗粒体积分形维数与黏粒及粉粒体积分数呈线性正相关,与细砂粒体积分数呈线性负相关,这与管光玉[21]、唐光木等[22]的研究结论相似。另外,杨培岭等[6]研究认为黏粒含量越高土壤颗粒质量分形维数就越大。土壤颗粒组成不仅影响土壤质地,而且还进一步影响土壤的理化性质,本研究研究表明,土壤分形维数及黏、粉粒含量均与土壤有机质、全氮含量具有极显著正相关关系,该结果与葛楠楠等[23]的研究结果相吻合,由于黏粒和粉粒比表面积比较大,具有较强的表面吸附能力,更易于吸附土壤有机质。地表植被的不断生长繁衍,增加了土壤中碳、氮的含量,再加上覆盖度较高的黑沙蒿林地大大减弱了地表风蚀作用,从而缓解了地表土壤中较细颗粒土壤的风蚀,土壤中有机碳、氮含量在很大程度上得到保护。另外,较小的黏粒、粉粒能与土壤中的有机养分黏结,并为其黏结作用提供良好的环境。

参 考 文 献:

[1] 李新荣,赵洋,回嵘,等.中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述[J].地理科学进展,2014,33(11):1435-1443.

[2] 陈小红,段争虎,谭明亮,等.沙漠化逆转过程中土壤颗粒分形维数的变化特征——以宁夏盐池县为例[J].干旱区研究,2010,27(2):297-302.

[3] 苏里坦,宋郁东,陶辉.不同风沙土壤颗粒的分形特征[J].土壤通报,2008,39(2):244-248.

[4] 张正偲,董治宝.土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(12):86-89.

[5] 齐雁冰,常庆瑞,惠泱河.人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征[J].土壤学报,2007,44(3):566-570.

[6] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[7] 李慧茹,刘博,王汝幸,等.土壤粒度组成分析方法对比[J].中国沙漠,2018,38(3):619-627.

[8] 张军红,吴波,贾子毅,等.毛乌素沙地油蒿植冠下生物结皮分布特征及其影响因素研究[J].林业科学研究,2010,23(6):866-871.

[9] 赵哈林,苏永中,张华,等.灌丛对流动沙地土壤特性和草本植物的影响[J].中国沙漠,2007,27(3):385-390.

[10] 刘任涛,柴永青,徐坤,等.荒漠草原区柠条人工固沙林生长过程中地表植被—土壤的变化[J].应用生态学报,2012,23(11):2955-2960.

[11] 杨文利,朱平宗,程洪,等.马尾松人工林地浅沟表层土壤颗粒的空间分布特征[J].水土保持学报,2018,32(4):158-162.

[12] 吴煜禾,张洪江,程金花,等.重庆四面山不同林地土壤颗粒特征及其与土壤侵蚀的关系[J].水土保持学报,2011,25(5):219-223.

[13] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115-120.

[14] 贾晓红,李新荣,张景光,等.沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析[J].生态学报,2006,26(9):2827-2833.

[15] 张军红,徐义萍,王文鑫.毛乌素沙地油蒿植冠下表层土壤粒径特征分析[J].中南林业科技大学学报,2018,38(6):36-40.

[16] Tyler, S W, Wheatcraft, S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56:362-369.

[17] 赵勇钢,赵世伟,曹丽花,等.半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J].农业工程学报,2008,24(6):14-20.

[18] 吴旭东,宋乃平,潘军.沙质草地生境中植物群落对土壤质地演进的响应[J].水土保持学报,2016,30(3):285-290.

[19] 丁勇,牛建明,杨持.沙质草原植物群落退化与沙化演替[J].生态学杂志,2006,25(9):1044-1051.

[20] 张秦岭,李占斌,徐国策,等.丹江鹦鹉沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J].水土保持学报,2013,27(2):244-249.

[21] 管光玉,范燕敏,武红旗,等.不同利用方式土壤颗粒分形特征及其与土壤有机碳库稳定性的关系[J].草地学报,2016,24(2):258-262.

[22] 唐光木,徐万里,周勃,等.耕作年限对棉田土壤颗粒及矿物结合态有机碳的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):238-241.

[23] 葛楠楠,石芸,杨宪龙,等.黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J].应用生态学报,2017,28(5):1626-1632.