

# 乌兰布和沙漠东北缘5种土地利用类型土壤粒度特征

罗凤敏<sup>1</sup>, 高君亮<sup>1,2</sup>, 郝玉光<sup>1</sup>, 张格<sup>1</sup>, 王丽娜<sup>3</sup>, 辛智鸣<sup>1</sup>, 吕永军<sup>1</sup>, 刘芳<sup>1</sup>

(1. 国家林业局内蒙古磴口荒漠生态系统定位研究站/中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200;  
2. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 内蒙古自治区准格尔旗水土保持局, 内蒙古 薛家湾 017100)

**摘要:**研究荒漠化发生区域的土壤粒度特征,可为区域荒漠化防治及生态建设提供一定理论依据。通过野外调查、采样及室内分析,对乌兰布和沙漠东北缘5种不同土地利用类型(流动沙丘、草方格沙障固沙区、人工梭梭林、白刺群落和油蒿群落)的土壤粒度特征及分形维数进行了研究。结果表明:(1)5个样地土壤颗粒组成均以细沙为主,含量为66.49%~81.54%;粉沙含量最少,仅为0.58%~1.72%;不同粒级土壤颗粒百分含量由高到低为:细沙>中沙>极细沙>粗沙>粉沙。(2)5个样地土壤颗粒分形维数的差异极显著( $p<0.01$ ),油蒿群落(1.72)>白刺群落(1.56)>人工梭梭林(1.44)>流动沙丘(1.40)>草方格沙障(1.37);土壤颗粒分形维数与粉沙、极细沙百分含量呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与细沙百分含量呈显著负相关( $p<0.05$ ),与中沙和粗沙百分含量关系不显著( $p>0.05$ )。(3)天然植被生长区域,植被盖度较好,风沙土颗粒较细。因此,应加大对区域内天然植被的保护,防止土壤风蚀的发生与发展。

**关键词:**土壤粒度;分形维数;风蚀;荒漠化;乌兰布和沙漠

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0172-06

## Soil Grain Size Characteristics of Five Land Use Types in the Northeastern Margin of Ulan Buh Desert

LUO Fengmin<sup>1</sup>, GAO Junliang<sup>1,2</sup>, HAO Yuguang<sup>1</sup>,

ZHANG Ge<sup>1</sup>, WANG Lina<sup>3</sup>, XIN Zhiming<sup>1</sup>, LÜ Yongjun<sup>1</sup>, LIU Fang<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem Research Station, State Forestry Administration/ Experimental Center of Desert Forestry, CAF, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China; 2. Institute of Desertification Studies, CAF, Beijing 100091, China; 3. Soil and Water Conservation Bureau of Jungar Banner, Xuejiawan, Inner Mongolia 010425, China)

**Abstract:** Study of soil particle size characteristics in desertification area can provide certain theory basis for the regional desertification control and ecological construction. Study on soil grain size characteristics in five different land use types (mobile sand dunes, grass square barrier, *Haloxylon ammodendron*, *Nitraria tangutorum* community, *Artemisia ordosica* community) and fractal dimension in the northeastern margin of Ulan Buh Desert through the field sampling and laboratory experiments was carried out. The results showed that: (1) the content of fine sand was greater than else size fraction sand in the pilot site which was fluctuated between 66.49%~81.54%, and the content of fine sand was the lowest in the five sample plots(0.58%~1.72%). The contents of different size particles decreased in the order: fine sand>middle sand>mighty fine sand>coarse sand>silt sand; (2) the fractal dimensions of five sampling plots were significantly different ( $p<0.01$ ), and the fractal dimensions decreased in the order: *Artemisia ordosica* community sample area (1.72)> *Nitraria tangutorum* community sample area(1.56)>*Haloxylon ammodendron* sample area(1.44)>mobile sand dunes(1.40)>grass square barrier(1.37); the fractal dimension was positively correlated with the percentages of silt sand and mighty fine sand ( $p<0.01$ ), was negatively correlated with percentage of fine sand ( $p<0.05$ ), was not significantly correlated with percentage of middle sand and coarse sand ( $p>$

收稿日期:2016-07-25

修回日期:2016-09-12

资助项目:科技部“十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD16B0103);“内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站”运行补助(2015-LYPT-DW-024);国家林业局防沙治沙专题“乌兰布和沙漠东北部荒漠化定位监测”

第一作者:罗凤敏(1988—),女,内蒙古敖汉旗人,硕士,工程师,从事荒漠化防治研究。E-mail:lfm359541965@126.com

通信作者:郝玉光(1963—),男,内蒙古五原县人,博士,研究员,从事荒漠化防治研究。E-mail:hyuguang@163.com

0.05); (3) The areas growing natural vegetation are characterized as the good vegetation coverage and soil granule is finer, as a result, we should increase the protection of natural vegetation in order to prevent the occurrence and development of the soil wind erosion in this area.

**Keywords:** soil grain size; fractal dimension; wind erosion; desertification; Ulan Buh desert

土壤粒度特征是指不同粒级土壤颗粒质量占土壤总质量的比例<sup>[1]</sup>, 是反映土壤发育程度的标志之一, 其直接影响土壤松紧度、通透性和肥力<sup>[2]</sup>, 因此被众多研究者列为沙漠化监测与评价指标中的一项重要指标<sup>[3-4]</sup>; 土壤粒度特征还决定土壤颗粒力学特性及强度, 是土壤风蚀发生的主要决定性因子之一<sup>[5]</sup>, 是研究风蚀所必需的基本资料之一。随着分形学的发展, 分形理论的应用已成为定量描述土壤粒度特征的新方法<sup>[5-10]</sup>, 土壤颗粒分形维数可用来评价土壤结构和质地, 同时还可定量表征土地沙化程度及土壤粗粒化的演变特征<sup>[6-8]</sup>。因此可认为, 定量描述沙化地区不同土地利用类型土壤粒度特征对区域沙化发生程度的划分, 沙化土地治理效果的评价, 以及土壤风蚀监测与预防<sup>[11]</sup>均具有重要作用与指导意义。

乌兰布和沙漠地处我国荒漠化草原向草原化荒漠过渡的地带, 是沙漠化发展严重地区, 风沙活动是该区域沙漠化发生和发展的直接原因。沙漠东北缘的荒漠—绿洲过渡带更是阻挡风沙进入河套平原的一道绿色屏障, 对维持河套地区的生态安全具有重要意义。为了抑制风沙活动频发, 减轻区域沙漠化发展与扩大, 使沙漠化逆向发展, 保护和扩展区域内的天然沙生植物和人工种植防风固沙林是关键手段。基于此, 本文以受荒漠化影响的乌兰布和沙漠东北缘荒漠—绿洲过渡带为研究区, 选择防风固沙体系中5种不同利用类型的土地为样地, 分别为流动沙丘、草方格沙障固沙区、人工梭梭林(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bge.)、白刺群落(*Nitraria tangutorum* Bobr.)和油蒿群落(*Artemisia ordosica* Krasch.), 对从各个样地采集(0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm, 15—20 cm, 20—25 cm, 25—30 cm)的土壤样品进行筛分, 计算、分析土壤颗粒特征及其分形维数。旨在探讨荒漠化过程中土壤粒度特征的变化, 阐明荒漠化对土壤粒度特征的影响, 进而为该区域土地资源合理开发利用提供基础依据, 为该区域生态恢复重建和稳定的可持续发展提供科学数据。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北缘, 属温带大陆性气候, 据沙漠边缘的磴口县气象站 52 a 统计数据显

示<sup>[12]</sup>, 区域年均气温 7.8℃, 年均降水量 140.3 mm, 年均蒸发量 2 380.6 mm, 年均风速 3~3.7 m/s, 年均大风日数 12.5 d。地貌为固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘与丘间低地相间分布。天然植被以旱生、超旱生的荒漠植被为主, 如: 油蒿、白刺、籽蒿(*A. sphaerocephala* Krasch.)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus* Cheng f.)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum* (Bge.) maxim.)、梭梭等, 人工植被主要以新疆杨(*Populus alba* L. var. *pyramidalis* Bge.)、小叶杨(*P. simonii* Carr.)、二白杨(*P. gansuensis* C. Wang et H. L. Yang)等杨树为主。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集及处理 5个采样地位于沙漠和人工绿洲中间(40°20′47″—40°21′00″N, 106°49′45″—106°53′21″E)。从沙漠边缘到绿洲边缘依次为: 流动沙丘→草方格沙障固沙区→人工梭梭固沙林→白刺+油蒿群落。每个样地从南到北布设一条 300 m 长的样线, 样线上布设 15 个采样点, 每两个采样点的距离为 20 m。在每个采样点用直径 5 cm 的土钻取土壤样品, 深度为 30 cm, 分为 6 层(0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm, 15—20 cm, 20—25 cm, 25—30 cm)。

将土样带回实验室自然风干后, 去除杂质(昆虫尸体、动物粪便、植物叶、根茎等), 然后将每个土样一分为二, 对其中一份进行称重, 取 100±0.005 g 置入土壤筛中筛分, 并计算每个粒级土壤颗粒的百分含量。土壤筛的选择依据中国沙物质粒径划分标准<sup>[13]</sup>, 即: 砾石(>2 mm)、极粗沙(2~1 mm)、粗沙(1~0.5 mm)、中沙(0.5~0.25 mm)、细沙(0.25~0.1 mm)、极细沙(0.1~0.05 mm)、粉沙(<0.05 mm)。

1.2.2 土壤颗粒分形维数计算 土壤颗粒分形维数参考杨培岭等提出的模型进行计算<sup>[14]</sup>, 计算公式如下:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}$$

式中:  $\bar{d}_i$  表示两筛分粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间粒径平均值;  $d_{\max}$  表示最大粒级土粒平均直径;  $W(\delta < \bar{d}_i)$  表示小于  $\bar{d}_i$  的累积土粒质量;  $W_0$  表示土壤各粒级质量总和;  $\delta$  表示码尺。

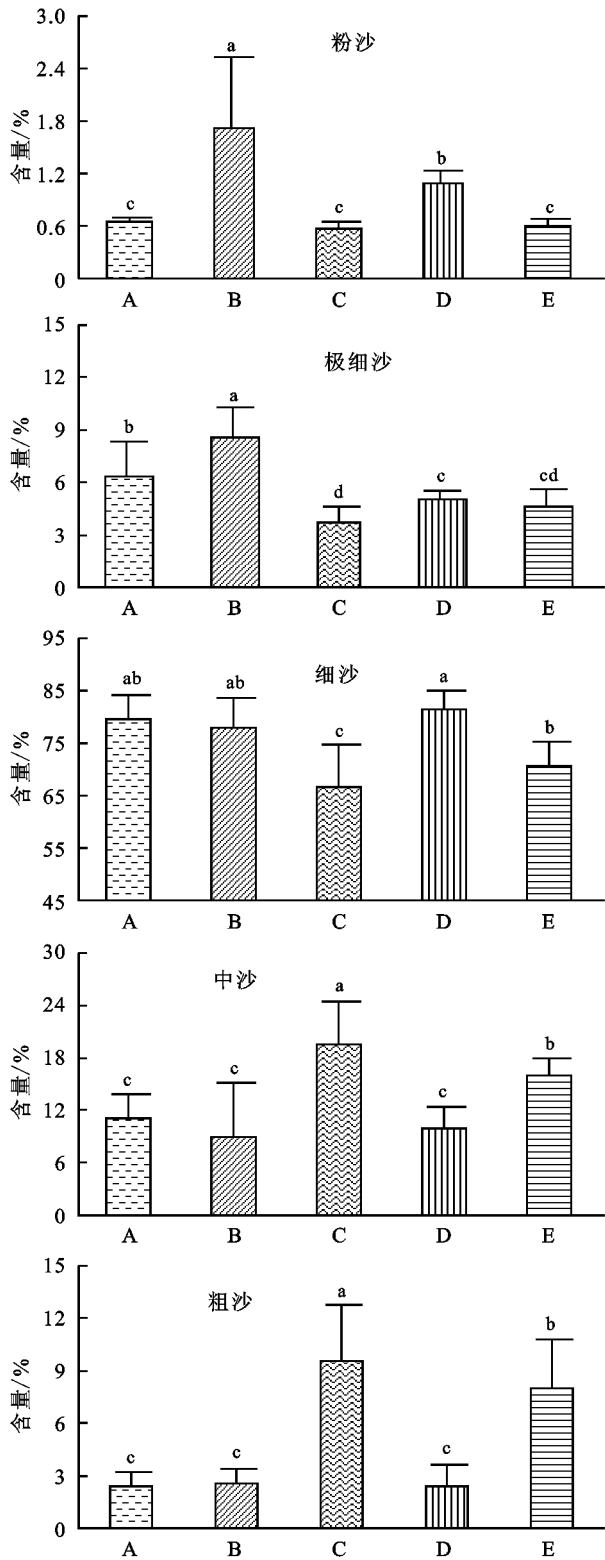
对各粒级土壤颗粒百分含量数据整理, 分别以  $\lg\left[\frac{W(\delta < d_i)}{W_0}\right]$ ,  $\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)$  为纵、横坐标作散点图并进行线性拟合, 拟合方程的斜率为 3-D, D 为土壤颗粒分形维数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用类型土壤粒度特征

在不同土地利用类型的地表,由于地表障碍物的覆盖度不同、高度不同,因此对过境风速的降低程度不同,所以不同样地地表土壤颗粒的分布特征会存在差异。通过比较5个样地不同粒级土壤颗粒百分含量可知(图1),5个样地0—30 cm深度的土样均以细沙含量最高,为66.49%~81.54%,粉沙含量最低,为0.58%~1.72%。各粒级土壤颗粒百分含量单因素方差分析结果表明,5个样地的粉沙、极细沙、细沙、中沙和粗沙的百分含量均存在极显著差异( $p<0.01$ )。粉沙含量从高到低为油蒿群落(1.72%)>白刺群落(1.08%)>人工梭梭林(0.66%)>流动沙丘(0.61%)>草方格沙障(0.58%);极细沙含量从高到低为油蒿群落(8.58%)>人工梭梭林(6.35%)>白刺群落(5.05%)>流动沙丘(4.62%)>草方格沙障(3.74%);细沙含量从高到低为白刺群落(81.54%)>人工梭梭林(79.53%)>油蒿群落(78.04%)>流动沙丘(70.79%)>草方格沙障(66.49%);中沙含量从高到低为草方格沙障(19.59%)>流动沙丘(16.05%)>人工梭梭林(11.09%)>白刺群落(10.01%)>油蒿群落(9.04%);粗沙含量从高到低为草方格沙障(9.54%)>流动沙丘(7.98%)>油蒿群落(2.56%)>人工梭梭林(2.38%)>白刺群落(2.35%)。地表植被可以降低风速,使得风沙流中携带的细颗粒物堆积,因此有植被覆盖地表的粉沙和极细沙含量较高。流动沙丘没有任何植被覆盖,风蚀最严重,因此粗粒含量则相对较高。草方格沙障固沙区由于铺设沙障时对地表扰动较大,破坏原有的土壤结构,故沙障障格内的粗粒含量也较高。

土地利用类型不同,地表覆盖状况也不同,进而使土壤颗粒各粒级的百分含量存在差异,这种差异主要表现在粉沙和极细沙的百分含量上。从总体上看,油蒿群落的粉沙、极细沙的百分含量均较大,其次为白刺群落、人工梭梭林,而流动沙丘和草方格沙障障格内相对较低。表明地表有植物生长的样地,因植物具有明显的防风固沙作用,进而使地表风蚀减轻,风蚀量减少;而且,由于植物的生长增大了地表粗糙度,降低了过境风速,将过境风沙流中的细粒物质拦截,增加了地表细粒物质的百分含量。其中,沙蒿样地由于其盖度较高,且油蒿枝条比较致密,因此其防护效益由于白刺群落和人工梭梭林,所以地表细颗粒物含量最高。



注: A 为人工梭梭林; B 为油蒿群落; C 为草方格沙障; D 为白刺群落; E 为流动沙丘。同一幅图中不同字母表示差异显著,  $\alpha=0.05$ , 下同。

图1 不同土地利用类型土壤粒度特征

### 2.2 不同土地利用类型土壤颗粒分形维数

研究表明,土壤颗粒的分布具有统计分形特征,分形维数可以反映粒径大小和分布的均匀程度,可用来表征不同土地利用类型的土壤粒度特征和沙漠化程度等<sup>[6-9]</sup>。图2显示5类样地的土壤颗粒分形维数存在极显著差异( $p$

$<0.01$ ),油蒿群落(1.72)>白刺群落(1.56)>人工梭梭林(1.44)>流动沙丘(1.40)>草方格沙障(1.37)。一般而言,沙物质分选性越好,其颗粒分形维数越大,反之越小,因此分形维数能很好地反映地表风蚀程度。由此可知,有植被覆盖的地表,分形维数较大,风蚀程度较小,因此植物措施具有很明显的防风固沙作用。

土壤颗粒分形维数可以定量评价脆弱生态环境条件下土壤演变规律,并对不同利用类型土地的风蚀程度进行评价,并且与风蚀程度成负相关关系<sup>[8-9,15]</sup>。由各样地土壤颗粒分形维数随采样深度的变化特征看出(图 3),随着采样深度增加,人工梭梭林的土壤颗粒分形维数呈逐渐减小趋势,但波动较小。油蒿群落的土壤颗粒分形维数呈波动变化趋势,并且表层(0—5 cm)的分形维数较大(1.94);草方格沙障障格内的土壤颗粒分形维数呈先降低后增加趋势,表层(0—5 cm)的最大(1.41);白刺群落的土壤颗粒分形维数呈先降低后增加趋势,25—30 cm 最大(1.61);流动沙丘土壤颗粒分形维数呈逐渐降低趋势,25—30 cm 土壤颗粒分形维数最大(1.44)。综合分析可知,每个采样层次各土地利用类型的分形维数整体由大到小依次为:油蒿群落>白刺群落>人工梭梭林>流动沙丘>草方格沙障。

2.3 分形维数与不同粒级土壤颗粒的关系

土壤颗粒分形维数能定量表达土壤结构特征,指示土壤退化程度等一系列土壤特征<sup>[16-18]</sup>。由图 4 可知,土壤颗粒分形维数与各粒级颗粒百分含量的关系差异较大,分形维数与粉沙、极细沙百分含量极显著正相关( $p<0.01$ ),与细沙百分含量显著负相关( $p<0.05$ ),但是与中沙和粗沙百分含量关系不显著( $p>0.05$ )。土壤颗粒分形维数越大,土壤所含的细粒物质(粉沙和极细沙)越多,反之则小。分形维数能很好地反映土壤颗粒物质的损失状况,从而可用来反映各类土地的风蚀程度。

以土壤颗粒分形维数为因变量(Y),不同粒级颗

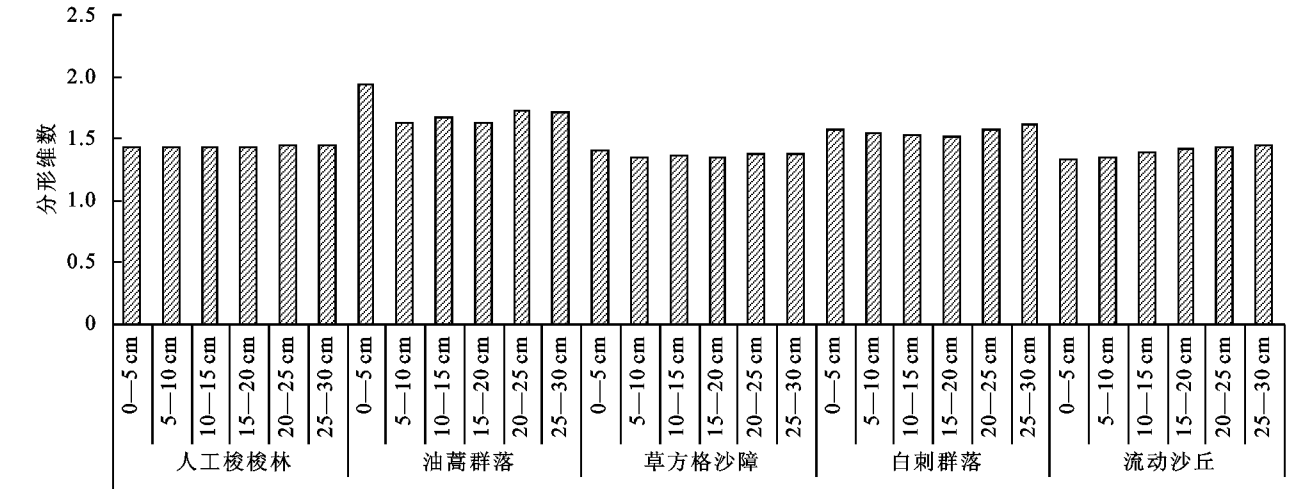


图 3 土壤颗粒分形维数与各粒级颗粒百分含量关系

粒的百分含量为自变量(X),采用逐步回归分析法(SPSS 17.0 软件),以 5%的可靠性作为变量入选和剔除临界值,建立土壤颗粒分形维数与不同粒级颗粒百分含量的多元线性模型,即:

$$Y=0.236X_1+0.014X_2-0.006 X_5+1.224(p<0.01)$$

式中:Y 表示土壤颗粒分形维数;X<sub>1</sub> 表示粉沙含量(%);X<sub>2</sub> 表示极细沙含量(%);X<sub>5</sub> 表示细沙含量%)。

通过方程可认为,决定土壤颗粒分形维数大小的主要是粉沙、极细沙的百分含量,其次为细沙的百分含量,其余 2 个粒级土壤颗粒的百分含量对分形维数影响程度相对较小。

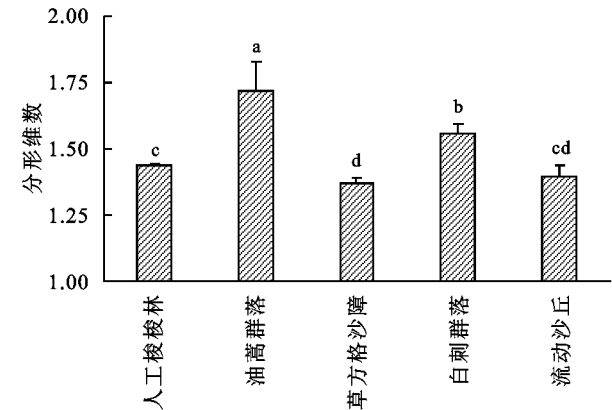


图 2 不同土地利用类型土壤颗粒分形维数随采样深度的变化

3 讨论

风蚀使土壤中细粒物质损失,这一过程对土壤理化性状具有重要影响,而土壤粒度特征就是土壤在长期风蚀及风选作用下形成的产物<sup>[16]</sup>。研究表明,我国主要沙漠(沙地)的沙物质大多为细沙(0.25~0.1 mm),占总量的 66.78%~99.38%,而粗沙及粉沙含量很低<sup>[19]</sup>。本研究结果表明,5 样地的土壤均以细沙含量最大,为 66.49%~81.54%,粉沙含量最低,为 0.58%~1.72%,研究结果与前人研究结果相似。

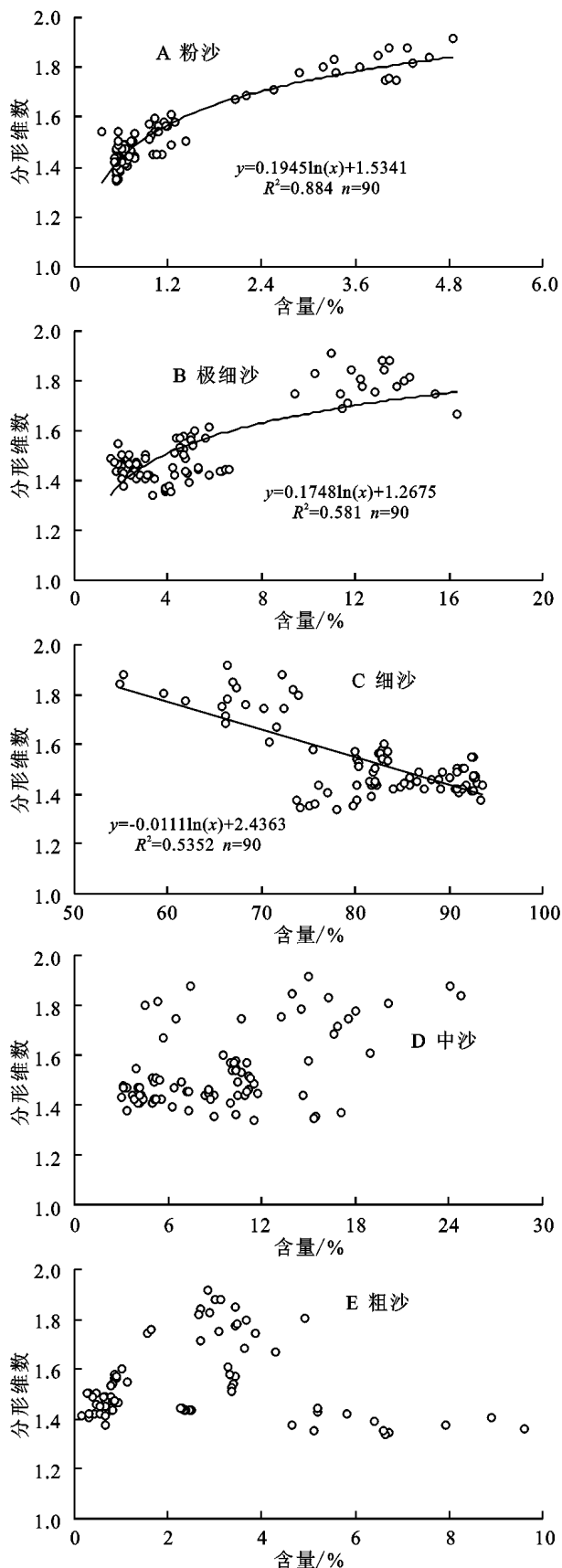


图4 不同土地利用类型土壤颗粒分形维数

自然状态下,土壤粒度特征不仅对土壤理化性质和生物学特性产生影响,且与植物生长所需的环境条件有密切关系。植物是影响沙堆形态和沉积物特点

的关键因子,不但能够降低风速,使风沙流中的沙物质沉积,还可使其下面的沙物质不被吹蚀。当外界条件一致时,植被不仅影响风沙流结构,它的残留物和根系还会改变风成沙理化性质,增强沙粒粘结性,使土壤有更好的稳定结构,抗蚀性增强<sup>[20-22]</sup>。研究表明,植被主要通过覆盖地表、分解风力及阻挡输沙来改变近地面流场,不同植被类型会导致沉积物组成产生差异<sup>[23]</sup>。本研究表明,有植被生长的样地上,油蒿群落防风固沙效果最好、其次为白刺群落。主要可能是因为油蒿群落覆盖度较高,枝条较致密,且呈丛生状,增大了地表粗糙度,当风沙流过境时,风速减弱,风沙流挟带物质沉降下来而增加了地表细粒物质含量;而白刺灌丛之间空隙较大,此外白刺灌丛植株密集程度较弱;人工梭梭林由于植株为行带式种植,带间及株间空地较大,此外植株下部的枝条较少,尽管其降低了风速,但是地表仍有一定风蚀。

土壤质地越细,土壤颗粒之间形成的微小孔隙越多,土壤结构就越复杂,分形维数越高<sup>[24]</sup>。分形维数可表征土壤质地的均匀程度;在沙化过程中,土壤颗粒分形维数可反映土壤细颗粒物质的损失情况,即分维数随着沙化程度增加而降低<sup>[6,25]</sup>。本研究中,5个样地的土壤颗粒分形维数存在极显著差异( $p<0.01$ ),油蒿群落>白刺群落>人工梭梭林>流动沙丘>草方格沙障。因此,认为生长植被的地表土壤风蚀相对较轻,而流动沙丘与沙障治理流沙区的风蚀相对较重。

## 4 结论

(1) 研究区土壤颗粒以细沙为主,约占 66.49%~81.54%,粉沙含量最低,为 0.58%~1.72%。

(2) 5个样地的土壤颗粒分形维数存在极显著差异( $p<0.01$ ),油蒿群落(1.72)>白刺群落(1.56)>人工梭梭林(1.44)>流动沙丘(1.40)>草方格沙障(1.37)。粉沙与极细沙的百分含量和分形维数呈极显著正相关关系( $p<0.01$ ),而细沙的百分含量和分形维数呈显著负相关关系( $p<0.05$ );其余粒级土壤颗粒的影响程度相对较小,未达到显著水平( $p>0.05$ )。

### 参考文献:

- [1] 刘建立,徐绍辉. 参数模型在壤土类土壤颗粒大小分布中的应用[J]. 土壤学报,2004,41(3):375-379.
- [2] 齐雁冰. 高寒地区荒漠化土壤发生特性及其形成演变研究:以沙珠玉和青海湖东岸为例[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [3] 左小安,赵学勇,赵哈林. 沙地退化植被恢复过程中灌木发育对草本植物和土壤的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(2):643-647.

- [4] 赵哈林, 刘新民, 李胜功. 科尔沁沙地脆弱生态环境的基本属性特征和成因分析[J]. 中国沙漠, 1998, 18(2): 10-16.
- [5] 高君亮, 高永, 罗凤敏, 等. 表土粒度特征对风蚀荒漠化的响应[J]. 科技导报, 2014(25): 20-25.
- [6] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 877-881.
- [7] 文海燕, 傅华, 赵哈林. 退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 55-59.
- [8] 齐雁冰, 常庆瑞, 惠洪河. 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): 566-569.
- [9] 高君亮, 李玉宝, 虞毅, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 220-223.
- [10] 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.
- [11] 王淮亮. 基于数字图像处理的风蚀地表颗粒特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [12] 高君亮, 郝玉光, 丁国栋, 等. 乌兰布和荒漠生态系统防风固沙功能价值初步评估[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 41-46.
- [13] 马玉明, 王林和, 姚云峰, 等. 风沙运动学[M]. 呼和浩特: 远方出版社, 2004.
- [14] 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.
- [15] 任雪, 褚贵新, 王国栋, 等. 准噶尔盆地南缘绿洲—沙漠过渡带“肥岛”形成过程中土壤颗粒的分形研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 298-304.
- [16] 张继义, 王娟, 赵哈林. 沙地植被恢复过程土壤颗粒组成变化及其空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 153-157.
- [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] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [20] 高亚军. 陕北农牧交错带土地荒漠化演化机制及土壤质量评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [21] 邹诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J]. 生态农业科学, 2008, 24(12): 424-427.
- [22] Langford R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, U. S. A[J]. Journal of Arid Environment, 2000, 46: 25-41.
- [23] 刘小平, 董治宝. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞试验研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 82-87.
- [24] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 221-226.
- [25] 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[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.

~~~~~  
(上接第 171 页)

- [11] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Soil carbon pool in China and its global significance [J]. Journal of Environmental Sciences, 1996, 2: 249-254.
- [12] Post W M, Izaurralde R C, Mann L K. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil[J]. Climatic Change, 2001, 51(1): 73-99.
- [13] 丁访军, 潘忠松, 周凤娇, 等. 黔中喀斯特地区 3 种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 161-164, 169.
- [14] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境, 2010, 19(4): 889-893.
- [15] 王文静, 王百田, 吕钊, 等. 山西太岳山不同林分土壤有机碳储量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 81-85.
- [16] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.