

表土粒度特征对风蚀荒漠化的响应

高君亮^{1,2}, 高永³, 罗凤敏¹, 党晓宏³, 冯伟², 蒙仲举³

1. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 巴彦淖尔 015200

2. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

3. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019

摘要 为了阐明风蚀对表土粒度特征的影响, 采用时空替代法选择毛乌素沙地5种不同利用类型的土地(草地、新垦耕地、7~8年耕地、>20年耕地、沙丘), 以其表层土壤(0~1、1~2、2~3、3~4、4~5 cm)为研究对象, 通过野外实地采样和室内实验相结合的方法进行土壤机械组成与土壤颗粒分形分析。结果表明: 1) 5个样地表层土壤机械组成均以细沙质量分数最高, 为62.52%~80.40%, 粗沙质量分数最低, 仅为0.16%~0.43%, 不同粒级土壤颗粒的质量分数高低排序为: 细沙>中沙>极细沙+粉沙>粗沙, 说明研究区土壤基质组成以细沙为主, 沙物质分选好; 2) 5个样地不同采样深度上的粗沙和中沙质量分数从大到小为0~1 cm>1~2 cm>2~3 cm>3~4 cm>4~5 cm; 细沙质量分数各层次之间差异不显著($P=0.4558$), 以0~1 cm层的质量分数最低; 极细沙+粉沙的质量分数0~1 cm和1~2 cm层显著低于其他3层($P=0.0126$), 表明从草地到沙丘的演化是一个主要以极细沙+粉沙质量分数减少的风蚀荒漠化过程; 3) 土壤颗粒分形维数与极细沙+粉沙的质量分数呈极显著正相关关系, $D=0.3661\ln x+1.3409$ ($P<0.0001$)。5个样地的土壤颗粒分形维数存在极显著差异($P<0.0001$), 从大到小依次为: 草地(2.579)、新垦耕地(2.479)、7~8年耕地(2.361)、>20年耕地(2.100)、沙丘(1.716)。因此认为土壤颗粒分形维数可替代土壤机械组成来表征土地风蚀荒漠化的程度。

关键词 机械组成; 分形维数; 表层土壤; 风蚀; 毛乌素沙地

中图分类号 S152.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.25.002

Response of Surface Soil Grain Size Characteristics to Wind Erosion Desertification

GAO Junliang^{1,2}, GAO Yong³, LUO Fengmin¹, DANG Xiaohong³, FENG Wei², MENG Zhongju³

1. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Bayannur 015200, China

2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3. College of Ecology and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China

Abstract To illustrate the effect of wind erosion on the grain size characteristics of the surface soil, five different land use types of Mu Us sandy land were chosen by a space-time substitution method. The soil mechanical composition and fractal dimension of top soil (0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 cm) were analyzed through field sampling and laboratory experiments. The results show that the mass fraction of fine sand was the highest compared with that of other types of sand, and the mass fraction of coarse sand was the lowest among the five sample plots. The mass fraction of soil grains with different size fraction was in the following order: fine sand, middle sand, extremely fine sand+ silt sand, coarse sand, indicating fine sand is the main element in soil matrix composition in the studied area, and the sand has good sorting. The mass fraction of coarse sand and middle sand from high to low at different sampling depths was in the following order: 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 cm. The mass fraction of fine sand did not have significant difference at different sampling depths ($P=0.4558$), but the minimum content of it appeared at 0-1 cm. The mass fraction of extremely fine sand + silt sand at 0-1 cm and 1-2 cm was significantly lower than that at the other three layers ($P=0.0126$). It indicates that the evolution process

收稿日期: 2014-05-23; 修回日期: 2014-06-24

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20131515120017); 国家自然科学基金项目(41301303)

作者简介: 高君亮, 博士研究生, 研究方向为荒漠化防治, 电子信箱: gaojunliang1985@163.com; 高永(通信作者), 教授, 研究方向为荒漠化防治, 电子信箱: 13948815709@163.com

引用格式: 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, 32(25): 20-25.

from grasslands to sand dunes is a wind erosion desertification process, and the mass fraction of extremely fine sand + silt sand has been reduced. There was a highly significantly positive correlation between the fractal dimension and the mass fraction of the extremely fine sand + silt sand ($P < 0.0001$). The fractal dimension of the five sampling plots has highly significant differences ($P < 0.0001$), and the order is the grassland (2.579), the newly cultivated land (2.479), 7-8 a farmland (2.361), >20 a farmland (2.100), and sand dune (1.716). Therefore, the fractal dimension could replace the soil mechanical composition to represent the degree of land desertification.

Keywords mechanical composition; fractal dimension; surface soil; wind erosion; Mu Us sandy land

风蚀是指一定风速的气流作用于土壤或土壤母质,使土壤颗粒发生位移造成土壤结构破坏、土壤物质损失的作用^[1]。风蚀贯穿于土地沙化的全过程,在大风吹扬下,土壤中的细粒物质极易被吹蚀,相应砂粒和石砾部分的比例增加,这就是土地沙漠化过程中地表粗质化、砾质化的必然性。国内外众多的研究表明,在诸多的土壤性质中,机械组成作为重要的物理性质,是影响土壤风蚀的主要因素之一。Chepil^[2-4]对影响风蚀的土壤性质进行了一系列实验,结果表明,土壤可蚀性明显受土壤中细粉粒的含量影响,且粒径为0.005~0.01 mm的粉砂土具有最大的团聚度和抗风蚀性。Skidmore等^[5]把土壤颗粒按粒度结构分为两大类:粒径>0.84 mm的为非可蚀性颗粒,粒径≤0.84 mm的为可蚀性颗粒。朱震达等^[6]认为土壤性质的差异会影响土壤风蚀的强度,而风蚀作用的结果也会改变土壤粒度的组成。陈广庭^[7]研究表明,土粒起动风速大小与土壤团聚体平均直径和粒度组合之间存在着重要的关系。董治宝等^[8]通过风洞模拟实验发现,风成沙的风蚀可蚀性随土壤粒度的变化而服从分段函数,粒径为0.09 mm者最易被风蚀。风成沙颗粒按可蚀性可以分为3种类型:粒径>0.7 mm和<0.05 mm的为难蚀颗粒;粒径0.7~0.4 mm、0.075~0.05 mm的为较难蚀颗粒;粒径0.4~0.075 mm为易蚀颗粒。史培军^[9]研究表明,土壤颗粒组成是决定土壤抗蚀性的重要因素,粒径在0.08~0.25 mm之间的土壤颗粒最易遭受风蚀。因此,土壤机械组成在反映土壤风蚀方面是一个重要指标,是研究土壤风蚀必需的基本资料之一。

尽管研究者对风蚀荒漠化发生区域的土壤粒度特征进行了大量研究(野外测定、风洞模拟等),并取得了一系列的成果,但是采用空间代替时间的方法对不同土地利用类型表土机械组成进行对比的研究还相对较少。本研究以受风蚀影响较严重的毛乌素沙地为研究区,采用时空替代法选择5种不同土地利用类型的样地(草地、新垦耕地、7~8年耕地、>20年耕地、沙丘),5个样地分别代表风蚀荒漠化不同程度时的地表。对各样地表层(0~5 cm)土壤机械组成的变化特征进行分析,在此基础上计算并分析土壤颗粒分形维数变化特征,旨在探讨风蚀荒漠化过程中表层土壤粒径的分布与变化特征,进而阐明风蚀荒漠化对土壤机械组成的影响,以期为区域土壤风蚀防治和生态建设提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地腹地的S313道和S215道交汇处,地理坐标为38°55'19" N, 109°12'46" E,行政区划隶属内蒙古鄂尔多斯市乌审旗图克镇。该地区属温带大陆性半干旱气候,年均气温6.5℃,年降水量360 mm,多集中在7—9月,年蒸发量2300 mm。风大沙多,年均风速3.3 m/s,年大风扬沙日数40~50 d,且多集中在冬春季节。研究区内地形以流动、固定、半固定沙丘及丘间滩地为主;植被主要有沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang.), 乌柳(*Salix cheilophila* Schneid.), 旱柳(*Salix matsudana* Koidz.), 柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.), 油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.), 芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin.ex Steud.), 芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski.), 牛心朴子(*Cynanchum komarovii* Al. Iljinski.)等;土壤类型主要有梁地上的栗钙土或淡栗钙土,沙地上的风沙土,滩地上的草甸土、盐碱土与沼泽潜育土。

1.2 研究方法

1.2.1 野外取样

采用时空替代法,按不同土地利用类型选择草地、新开垦耕地、耕作7~8年的耕地、耕作20年以上的耕地和沙丘,5个样地分别代表风蚀荒漠化不同程度时期的土地类型。在每个样地上按照“品”字形选择3个采样点,每2个采样点间距离10 m,用分层取土器分5层采样,每层深度1 cm^[10],并记录样地的基本概况。

1.2.2 样品分析

将采集的土壤样品在实验室阴干后,过2 mm土壤筛剔除植物根系等杂物,然后按照四分法对每个土样称取(100±0.005) g,置入土壤筛中用ZBSX-92A型震击式标准振筛机震荡5 min,最后对每一粒级的土壤颗粒称重并计算其百分含量。土壤筛按照中国沙物质的粒径划分标准^[11]选取,即:砾石(>2.00 mm)、极粗沙(2.00~1.00 mm)、粗沙(1.00~0.50 mm)、中沙(0.50~0.25 mm)、细沙(0.25~0.10 mm)、极细沙(0.10~0.05 mm)、粉沙(<0.05 mm)。

1.2.3 土壤颗粒分形维数的计算

土壤颗粒分形维数按照杨培岭等^[12]提出的用粒径的重量分布表征的土壤分形模型来计算。即

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0} \quad (1)$$

式中, \bar{d}_i 为两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间粒径的平均值, \bar{d}_{\max} 为最大粒级土粒的平均直径, $W(\delta < \bar{d}_i)$ 为小于 \bar{d}_i 的累积土粒质量, W_0 为土壤各粒级质量的总和, δ 为码尺。

对土壤各粒级的含量进行整理, 分别以 $\lg\left[\frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}\right]$ 和 $\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)$ 为纵坐标和横坐标作图, 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 不同样地表层(0~5 cm)土壤机械组成

图1为5样地不同粒级土壤颗粒的质量分数, 由图可看出, 5个样地表层(0~5 cm)土壤机械组成均以细沙质量分数最多, 为62.52%~80.40%, 粗沙质量分数最少, 仅为0.16%~0.43%, 沙物质分选较好。朱震达^[13]根据中国主要沙漠(或沙地)风成沙机械组成分析, 发现沙物质大多为粒径0.25~0.10 mm的细沙, 平均约占沙物质总量的66.78%, 最高可达99.38%。粗沙和粉沙含量很低, 分选良好。本研究结果与朱震达的研究结果相似。

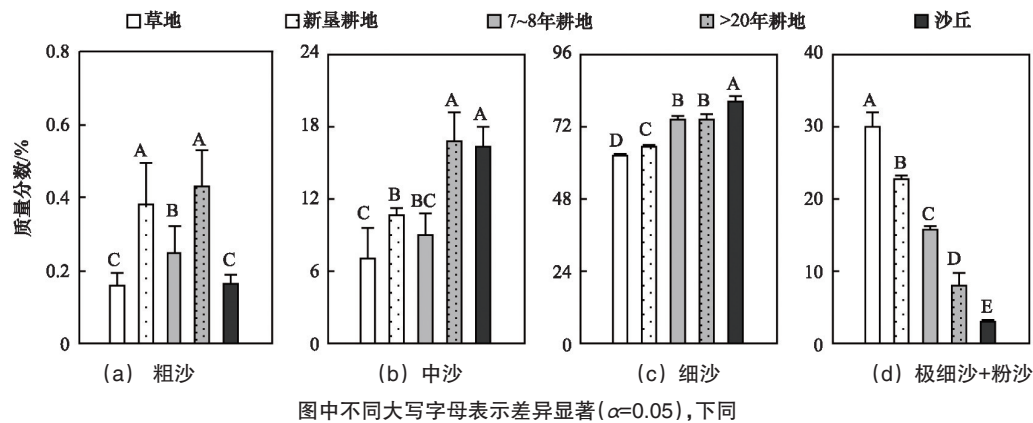


图1 5样地不同粒级土壤颗粒质量分数

Fig. 1 Mass fraction of soil particles with different size fraction in five sample plots

经SAS 9.0软件对5个样地粗沙、中沙、细沙、极细沙+粉沙的质量分数进行单因素方差分析, 结果表明, 不同样地粗沙、中沙、细沙、极细沙+粉沙的质量分数之间存在极显著差异 ($P < 0.0001$)。其中, 以极细沙+粉沙含量变化最为明显, 从草地 (29.96%) → 新垦耕地 (22.68%) → 7~8年耕地 (15.81%) → >20年耕地 (7.89%) → 沙丘 (2.88%) 表现出大幅度降低的趋势。细沙含量从草地 (65.52%) → 新垦耕地 (65.69%) → 7~8年耕地 (74.60%) → >20年耕地 (74.57%) → 沙丘 (80.40%) 表现出整体增加的趋势, 其中, 7~8年耕地和>20年耕地之间无显著差异。中沙含量从草地 → 新垦耕地 → 7~8年耕地 → >20年耕地 → 沙丘也表现整体增加的趋势。粗沙含量变化波动较大。上述结果表明, 由草地向沙丘的演变过程中(即风蚀荒漠化过程), 表层土壤各粒级颗粒的质量分数都在发生不同程度的变化, 但主要表现在极细沙+粉沙质量分数的变化上。

将0~5 cm的土壤层进一步细化为5个层次(每层1 cm), 以便更加清晰地反映从地表(0 cm)到地下5 cm这一空间中土壤机械组成的变化情况。图2表明, 草地、新垦耕地、7~8年耕地和>20年耕地的粗沙含量从地表到地下5 cm整体表现为下降的趋势, 下降趋势可拟合为 $y = ax + b$ (y 为粗沙质量分数, x 为采样深度, a 、 b 为常数, 其中 a 为 $-0.061 \sim -0.020$, b 为 $0.216 \sim 0.615$) 的回归方程, 且粗沙质量分数与采样深度之间

为极显著负相关关系 ($R = -0.876 \sim -0.981$, $P < 0.0001$)。中沙含量也表现下降的趋势, 同样可用上述回归方程表示(参数 a 为 $-0.443 \sim -1.551$, b 为 $11.694 \sim 20.630$), 其质量分数与采样深度之间也存在极显著负相关关系 ($R = -0.861 \sim -0.999$, $P < 0.0001$)。极细沙+粉沙质量分数随采样深度的增加则表现出逐渐增加的趋势, 同样可用上述回归方程表示(参数 a 为 $0.235 \sim 1.242$, b 为 $5.097 \sim 26.234$), 且质量分数与采样深度之间存在极显著正相关关系 ($R = 0.831 \sim 0.979$, $P < 0.0001$)。然而, 沙丘样地上的粗沙、中沙和细沙含量均与上述4个样地的不同, 粗沙含量整体为波动变化, 中沙含量整体为增加的趋势 ($R = 0.803$), 极细沙+粉沙含量为逐渐减少的趋势 ($R = 0.821$)。5个样地的细沙含量从地表向地下整体上均没有较大的波动和变化, 变化趋势比较平稳, 尤其以草地和新垦耕地的最为典型。

应用SAS 9.0软件对5个样地5个取样层次上粗沙、中沙、细沙、极细沙+粉沙的质量分数进行单因素方差分析。结果表明, 不同采样深度上的粗沙质量分数存在极显著差异 ($P = 0.0013$), 从大到小为 $0 \sim 1$ cm $> 1 \sim 2$ cm $> 2 \sim 3$ cm $> 3 \sim 4$ cm $> 4 \sim 5$ cm, 且 $0 \sim 1$ cm 层的显著大于其余4层; 中沙同粗沙分布规律相同, 但这种差异未达到显著水平 ($P = 0.1252$); 细沙质量分数 $0 \sim 1$ cm 层最低, 但是5层间的差异也未达到显著水平 ($P = 0.4558$); 极细沙+粉沙的质量分数存在显著差异 ($P = 0.0126$), $0 \sim 1$ cm 和 $1 \sim 2$ cm 层的显著低于其他3层的。

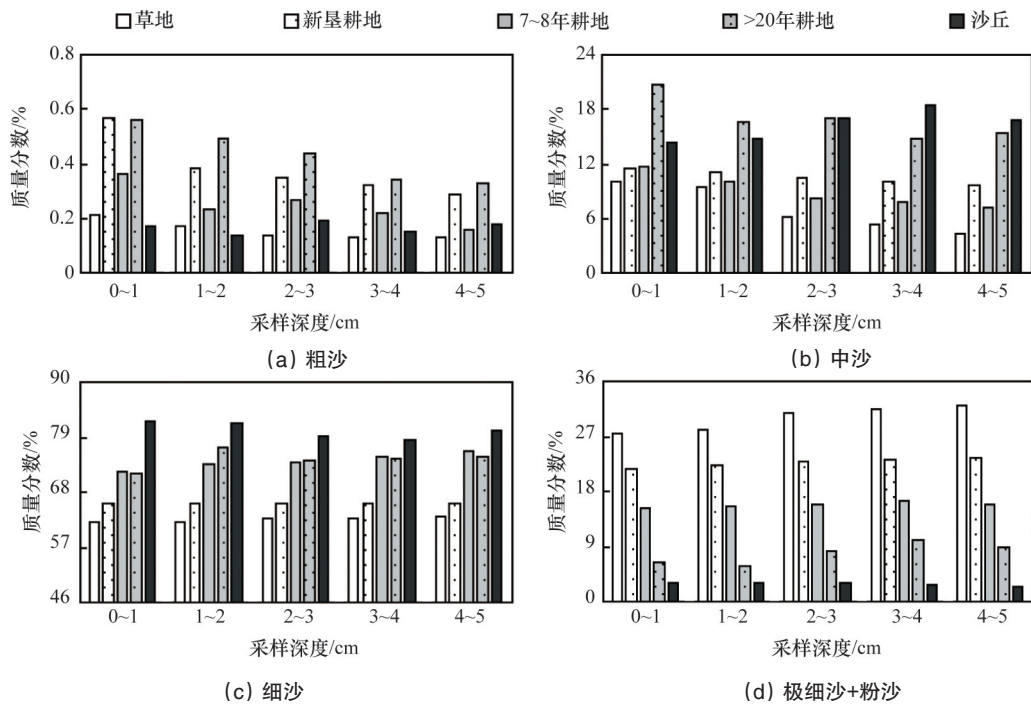


图2 不同粒级土壤颗粒质量分数随采样深度的变化

Fig. 2 Variation of mass fraction of soil particles with different size fraction with sampling depths

风蚀使表层土壤中细颗粒物被吹蚀,长期吹蚀致使可利用的土地逐步转变为流动沙地,这一过程必然对土壤理化性状产生深刻的影响。其中,土壤机械组成特征就是土壤经受长期风蚀和风速作用的最终结果。因此,土壤机械组成可很好地表征风蚀荒漠化的程度^[14]。本研究结果表明,从草地→新垦耕地→7~8年耕地→>20年耕地→沙丘的过程其实就是一个主要以极细沙+粉沙质量分数减少的风蚀荒漠化过程。究其原因,草地被人为开垦变为耕地后,经过反复的耕作使原本比较紧实的土壤表面结构遭到破坏;另外,天然植被也遭破坏,植被盖度降低,地表粗糙度减小,使土壤抵抗风蚀的能力降低,风蚀作用使地表极细沙和粉沙被吹蚀后随气流远距离输送,从而使土壤中极细沙和粉沙含量显著减少,粗粒物质含量相对增加。5个样地不同采样深度上的粗沙和中沙质量分数从大到小为0~1 cm>1~2 cm>2~3 cm>3~4 cm>4~5 cm;细沙质量分数在0~1 cm层最低;0~1 cm和1~2 cm层极细沙+粉沙的质量分数显著低于其他3层的($P=0.0126$)。在土地沙化过程中,土壤基质的颗粒组成变化总是从土壤最外层开始,由浅入深、由表及里的界面过程^[14]。草地被开垦为耕地后,由于多年反复耕作,不断把地表以下的细颗粒翻移到地表,而恰恰风蚀直接作用的就是最表层的土壤颗粒,使地表土壤中的细颗粒物容易被吹失,导致最上层土壤极细沙+粉沙和粗沙的质量分数显著高于其他层。据此认为,人为开垦活动使草地的潜在可风蚀性增加。

2.2 不同样地表层(0~5 cm)土壤颗粒分形维数

土壤作为由不同大小颗粒组成、具有不规则形状和自相

似结构的介质,是一种具有一定分形特征的系统。因此,分形理论已成为学者们当前定量描述土壤机械组成的新方法,且该理论在土壤风蚀及风沙物理研究的宏观领域也得到了具体的应用,为风沙运动的研究提供新的思路。有研究结果认为,土壤颗粒分形维数能很好地反映土壤颗粒物的损失状况,从而可以作为评价(衡量)土地沙质荒漠化程度的定量指标之一^[15,16]。图3表明(图中不同大写字母表示在0.01水平差异显著),5类样地的土壤颗粒分形维数存在极显著差异($P<0.0001$),其值从大到小依次为:草地(2.579)、新垦耕地(2.479)、7~8年耕地(2.361)、>20年耕地(2.100)、沙丘(1.716)。表明草地经人为开垦为耕地,最终演变为沙丘的过程中,分形维数一直在减小。

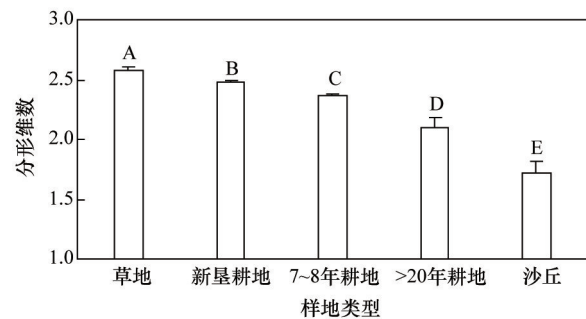


图3 5样地表层土壤颗粒分形维数

Fig. 3 Fractal dimension of soil particles of five sample plots

土壤质地越粗,就越不易形成良好的结构,分形维数也较小;土壤质地越细,由于小土粒多,形成的微小孔隙也越多,结构也就越复杂,分形维数也越高^[16]。由土壤颗粒分形维数的计算过程可知,分形维数与土壤颗粒各粒级的质量分数均有关。对分形维数和各粒级土壤颗粒质量分数进行相关分析可知,分形维数与各粒级颗粒组分间关系差异较大。其中,分形维数与极细沙+粉沙质量分数呈极显著正相关关系($R=0.989, P<0.0001$),可用拟合方程 $D=0.3661\ln x+1.3409$ (D 为分形维数, x 为极细沙+粉沙质量分数)表示。由此说明极细沙+粉沙质量分数高的土壤分形维数大,反之则小。由图3可以看出,草地演变为沙丘的过程中,极细沙+粉沙的质量分数逐渐减少,分形维数减小,风蚀程度增加,反过来可以证明,正是由于风蚀程度的不断增加,致使从草地到沙丘的演化过程中,分形维数一直在减小。因此可认为,土壤颗粒分形维数能够很好地反映风蚀荒漠化过程中土壤颗粒物质的

损失状况,能够反映土壤风蚀程度以及预测其发展方向。

由图4可以看出,除沙丘样地外($R=0.500$),其余4个样地的土壤颗粒分形维数均随采样深度整体上表现为增加的趋势,且达到极显著水平($R=0.857\sim 0.991, P<0.01$)。分形维数的这种变化趋势正好与上述的极细沙+粉沙质量分数的变化趋势一致。因此,尝试用极细沙+粉沙质量分数与土壤颗粒分形维数所拟合的方程($D=0.3661\ln x+1.3409$)预测研究区不同样地的土壤颗粒分形维数。回归模型预测值与杨培岭法计算值的比较可从图4中清晰地反映出来,预测值与计算值之间差异不显著($P=0.8497$),二者最大差值仅为0.065。由此可以认为,用极细沙+粉沙质量分数与土壤颗粒分形维数建立的回归方程模型能够较好地反映研究区各类样地的土壤颗粒分形维数,今后在该地区的研究中可以选择用该模型计算不同样地的土壤颗粒分形维数来说明不同样地的风蚀程度。

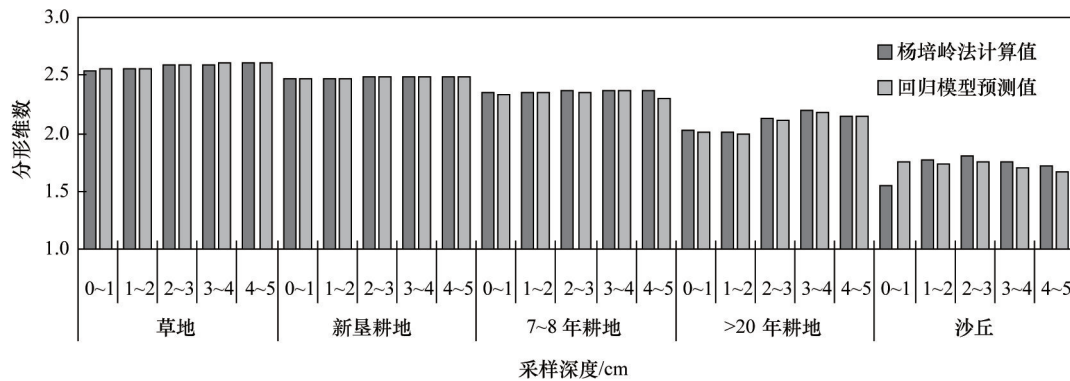


图4 土壤颗粒分形维数随采样深度的变化

Fig. 4 Variation of fractal dimension with sampling depths

3 讨论

以风蚀为主的荒漠化过程,其实质是土壤粗粒化和养分贫瘠化的演变过程。土壤分形维数可以表征土壤粒径的大小组成,能够很好地反映土壤颗粒物质的损失状况,而且还能反映土壤质地的均一程度^[17-19]。5类样地的土壤颗粒分形维数存在极显著差异($P<0.0001$),从大到小为:草地(2.579)、新垦耕地(2.479)、7~8年耕地(2.361)、>20年耕地(2.100)、沙丘(1.716)。风蚀荒漠化的直接产物沙丘土壤的分形维数远小于草地的。由此表明,分形维数可以定量地表征风蚀荒漠化过程中(草地→耕地→沙丘)土壤粗粒化的演变特征和变化规律,即风蚀荒漠化过程中土壤中极细沙和粉沙质量分数逐渐减少这一变化趋势。相反,荒漠化逆转过程中(沙丘→耕地→草地)土壤分形维数是增加的。因为在荒漠化逆转过程中,随着沙丘的固定,恢复的植被覆盖地表面,增加了下垫面粗糙度,降低了过境风速,使风沙流中的细颗粒物沉积,增加地表细颗粒物质的含量,继而增加了土壤的分形维数。

因此本研究认为,土壤颗粒分形维数可以作为评价风蚀荒漠化程度的一个综合指标,它可以替代土壤不同粒级颗粒组成表征土地荒漠化的程度。

另外,大多数相关研究结果表明,土壤颗粒分形维数与土壤有机质含量之间存在极显著正相关关系,说明土壤分形维数可以表征土壤养分状况^[16-20]。依据该理论可初步推断本研究中5类样地的土壤有机质含量从大到小为:草地、新垦耕地、7~8年耕地、>20年耕地、沙丘,表明草地的结构和肥力优于耕地和沙丘,但这仅仅是一个通过经验模式推测的结果。为了验证这个推测,将在下一步的研究中对上述不同样地各层土壤样品进行养分指标测定。

4 结论

1) 5个样地表层(0~5 cm)土壤机械组成均以细沙含量最多,为62.52%~80.40%;粗沙含量最少,仅为0.16%~0.43%,沙物质分选好。不同粒级土壤颗粒按质量分数排序为:细沙

>中沙>极细沙+粉沙>粗沙。说明研究区土壤基质组成以细沙为主。

2) 5个样地不同采样深度上的粗沙和中沙质量分数从大到小为0~1 cm>1~2 cm>2~3 cm>3~4 cm>4~5 cm;细沙质量分数各层次之间差异不显著($P=0.4558$),以0~1 cm层最低;极细沙+粉沙的质量分数0~1 cm和1~2 cm层显著低于其他3层($P=0.0126$)。由此表明,从草地→耕地→沙丘的过程是一个主要以极细沙+粉沙质量分数减少的风蚀荒漠化过程。

3) 土壤颗粒分形维数与极细沙+粉沙质量分数呈极显著正相关关系($P<0.0001$),可用回归方程 $D=0.3661\ln x+1.3409$ 表示两者之间的关系,而且用该回归方程预测的分形维数值与杨培岭法计算的分形维数值之间并无显著差异($P=0.8497$),最大差值仅为0.065。5个样地的分形维数值存在极显著差异($P<0.0001$),从大到小为:草地(2.579)、新垦耕地(2.479)、7~8年耕地(2.361)、>20年耕地(2.100)、沙丘(1.716)。因此认为土壤颗粒分形维数可以替代土壤不同粒径颗粒组成表征土地荒漠化程度。

参考文献(References)

- [1] 李玉宝. 干旱半干旱区土壤风蚀评价方法[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 14(2): 48-52.
Li Yubao. Soil erosion assessment for arid and semiarid areas[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 14(2): 48-52.
- [2] Chepil W S. Proper ties of soil which influence wind erosion: I. The governing principle of surface roughness[J]. Soil Science, 1950, 69: 149-162.
- [3] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodi-ability of soil by wind: II. Water stable structure[J]. Soil Science, 1953, 76: 389-399.
- [4] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodi-ability of soil by wind: IV. Sand silt and clay[J]. Soil Science, 1955, 80: 155-162.
- [5] Skidmore E L, Powers D H. Dry soil-aggregate stability: Energy-based index[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46: 1274-1279.
- [6] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 96-106.
Zhu Zhenda, Chen Zhiping, Wu Zheng, et al. Aeolian geomorphology research of Taklimakan desert[M]. Beijing: Science Press, 1981: 96-106.
- [7] 陈广庭. 北京平原土壤机械组成和抗风蚀能力的分析[J]. 干旱区资源与环境, 1991, 5(1): 103-113.
Chen Guangting. Analyses of mechanical composition and resistance to wind erosion of soil in Beijing plain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1991, 5(1): 103-113.
- [8] 董治宝, 李振山. 风成沙粒特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 1-6.
Dong Zhibao, Li Zhenshan. Wind erodibility of aeolian sand as influenced by grain-size parameters[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(4): 1-6.
- [9] 史培军. 中国土壤风蚀研究的现状与展望[R]. 北京: 第十二届国际水土保持大会, 2002.
Shi Peijun. Present situation and forecast of soil wind erosion research in Chinese[R]. Beijing: The 12th International Water and Soil Conservation Conference, 2002.
- [10] 高永, 虞毅, 汪季, 等. 一种可以分层采取土壤样品的取土器: 中国, ZL 2010 2 0633704.X[P]. 2014-05-23.
Gao Yong, Yu Yi, Wang Ji, et al. The layered soil sampler: China, ZL 2010 2 0633704.X[P]. 2014-05-23.
- [11] 马世威, 马玉明, 姚洪林, 等. 沙漠学[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1998.
Ma Shiwei, Ma Yuming, Yao Honglin, et al. Eremology[M]. Hohhot: Inner Mongolia People Press, 1998.
- [12] 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.
Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Fractal features of soils characterized by mass grain size distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [13] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论(修订版)[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
Zhu Zhenda, Wu Zheng, Liu Shu, et al. Chinese introduction to desert (Revised edition)[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [14] 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.
Zhang Jiye, Wang Juan, Zhao Halin. Changes in soil particles fraction and its spatial variation characteristics in restoration processes of sandy desertification land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 153-157.
- [15] 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.
Jia Xiaohong, Li Xinrong, Zhang Jingguang, et al. Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammopiptanthus mongolicus* shrub[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2827-2833.
- [16] 张世榕, 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.
Zhang Shirong, Deng Liangji, Zhou Qian, et al. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(2): 221-226.
- [17] 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.
Su Yongzhong, Zhao Halin. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 71-74.
- [18] 章予舒, 谢高地, 肖玉. 弃耕农田土壤分形特征研究——以内蒙古自治区伊金霍洛旗为例[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 42-44.
Zhang Yushu, Xie Gaodi, Xiao Yu. Research on soil fractal feature of abandoned farmland: A case study from Yijinhuoluo County, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 42-44.
- [19] 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.
Zhao Wenzhi, Liu Zhimin, Cheng Guodong. Fractal dimension of soil particle for sand desertification[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 877-881.
- [20] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 163-167.
Wu Chengzhen, Hong Wei. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 163-167.

(责任编辑 王媛媛)