

毛乌素沙地西南缘不同土地利用类型 土壤颗粒分形特征

董智今¹, 展秀丽¹, 丁小花²

(1.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为揭示毛乌素沙地西南缘农田、荒地、草地、灌丛沙堆和林地等土地利用类型的土壤分形特征与防风固沙效果的关系,采用野外取样与室内粒度分析相结合的方法,分析了该区 5 种土地利用类型的土壤颗粒粒径分布、分形维数以及土层深度与分形维数间关系。结果表明:(1) 草地、灌丛沙堆以及林地的土壤粒度组成以极细沙、细沙和中砂为主,耕地和荒地则以粉粒和细砂为主;(2) 研究区不同土地利用方式的土壤粒径分布和分形维数差异明显,荒地>农田>灌丛沙堆>草地>林地,随土层深度增加,林地分形维数值减小,草地分形维数值增大,荒地、农田和灌丛沙堆分形维数值变化不大;(3) 分形维数与<100 μm 和>100 μm 粒径含量分别呈显著正相关和负相关,其大小由<100 μm 的极细砂粒和粉粒含量决定。研究区内 5 种土地利用类型土壤颗粒粒径分布与分形维数差异显著,这综合反映出在不同植被效应与人为耕作后,土壤的颗粒组成会发生明显变化。研究结果可为毛乌素沙地西南缘防沙治沙以及土壤恢复提供理论依据。

关键词:土壤颗粒; 分形维数; 防沙治沙; 毛乌素沙地西南缘

中图分类号:S151.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0043-06

Fractal Features of Soil Particles Under Different Land Uses in the Southwestern Edge of the Mu Us Sandy Land

DONG Zhijin¹, ZHAN Xiuli¹, DING Xiaohua²

(1.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to reveal the relationship between fractal features of soil particles and the effect of erosion control and sand fixation in land use types such as farmland, wasteland, grassland, scrub sand pile and forest land in the Mu Us sandy land, a method combining field sampling and indoor analysis was used to analyze the distribution of the size of soil particle, fractal dimension and the relationship between soil depth and fractal dimension for five land use types in this region. The results show that: (1) the particle size compositions of the soils in grassland, scrub sands and woodland are dominated by very fine sand, fine sand and middle sand, while particle size compositions in arable land and wasteland was dominated by silt and fine sand; (2) the soil particle size distribution and fractal dimension of the different land uses in the studied area differed significantly, with the order: wasteland>farmland>scrub sand pile>grassland>woodland; with the increase of soil depth, the fractal dimension value of woodland decreases, that of grassland increases, and that of wasteland, farmland and scrub sand pile does not change much; (3) the fractal dimension has highly and significantly positive correlation with <100 μm grain size content and negative correlation with >100 μm grain size content, the size of which is determined by the <100 μm very fine sand and fine silt contents. In conclusion, the distributions of the sizes of soil particles and fractal dimension of the five land use types in the studied region have significant distinction, which mirrors the changes of the particle composition caused by different types of vegetation effects and human regulation of tillage. It can also be a reflection of the soil degradation in

收稿日期:2021-05-04

修回日期:2021-05-25

资助项目:宁夏自然科学基金(2021AAC03048);国家自然科学基金(42161013);宁夏大学研究生创新项目(GIP20200049)

第一作者:董智今(1997—),女,河南洛阳市人,硕士,主要从事防沙治沙与生态恢复研究。E-mail:dzj327805@163.com

通信作者:展秀丽(1983—),女,甘肃省靖远县人,博士,副教授,从事荒漠化防治研究。E-mail:zhanxiuli@mail.bnu.edu.cn

southwestern edge of Mu Us sandy land, and provide theoretical evidence for soil restoration.

Keywords: soil particles; fractal dimension; sand-control; Mu Us sandy land

土壤粒径分布(PSD)是土壤的重要物理特性之一,不仅影响着土壤水分、养分的转运与截留,还影响着土壤的生产力、土壤侵蚀程度以及当地的生态恢复状况^[1-4]。因此,定量描述土壤 PSD 是解释和理解土壤结构及其特性的重要内容^[5-7]。分形维数理论与其模型已经在土壤学领域被广泛应用,既可以描述土壤的特性,也能在一定的时空尺度内,量化的表征土地沙化程度,以及土壤粗粒化的演变特征^[8-12],同时也可以定量的描述旱区农牧交错带不同土地利用类型下的土壤粒径分布的均匀程度,以及土壤结构空间上的变异性^[13-14],还能够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,例如土壤的肥力,土壤的侵蚀状况,土壤退化程度等,是评价土壤状况的综合指标^[15-16],也为土壤恢复提供了重要理论依据。

土壤粒度是研究土地沙漠化及其成因的主要指标之一。Tyler 和 Wheat craft 最先提出土壤粒度质量与分形维数的关系;W. S. Chepil 分析了土壤可蚀性受土壤中细粉粒的含量影响且分析了不同粒径土壤与风力的相关性;在中国西北部,有关土壤粒度的研究主要集中在黄土和沙漠分布区,对民勤绿洲、艾比湖、毛乌素沙地、北方农牧交错带等区域的沉积物开展了土壤粒度研究^[17-23];王国玲等在鄂尔多斯高原的农牧交错带研究发现当地表沉积物类型不同时,表层土壤分形维数与粒级含量相关性有着明显差异^[17];淮态等研究发现分形维数与土壤细颗粒物质呈显著正相关,与粗颗粒物质呈显著负相关^[20];罗凤敏等研究发现乌兰布和沙漠东北缘 5 种不同立地土壤粒径以细沙为主,不同立地土壤分形维数差异极显著^[24];杜海燕等研究阿拉尔垦区绿洲化过程中土壤粒径时发现,0.05 mm 是土壤粒径与分形维数关系的临界粒径^[25];一些学者研究了浑善达克沙地 3 种不同灌木覆盖下的沙地,其分形维数要高于裸沙地,土壤结构与肥力较裸沙地也有明显改善^[26-29];王燕等发现在阴山北麓中部的农牧交错区,不同管理方式下土壤颗粒组成以粉粒细粒为主^[30];陈新闻等发现在乌兰布和沙漠沿黄段,耕地、草地和林地 3 种土地利用类型对土壤粒径分布与分形维数影响明显^[31]。

宁夏盐池县位于毛乌素沙地西南缘,在空间上属于我国北方旱区农牧交错带,多年来,一直是国家和宁夏回族自治区生态治理的重点区域,研究区内灌丛沙堆面积较大且未受人为干扰,其余样地土壤类型均为灰钙土且主要的土壤侵蚀过程为风力侵蚀。近年

来,该地区防沙治沙工作取得重大效果,本文选择 5 种不同土地利用类型为研究对象,计算、分析土壤颗粒特征及其单分形维数,旨在探讨荒漠化治理与生态恢复过程中土壤粒度特征的变化,阐明不同土地利用类型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,同时为为该区域生态恢复与可持续发展提供科学数据。

1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区中东部,盐池县高沙窝镇和杨柳堡地区(37°48'N,107°17'E)。北侧与毛乌素沙漠相连,南侧为黄土高原,是典型的干旱草原向荒漠草原的过渡地带。研究区是典型的中温带大陆性气候,降雨集中在 7—9 月,降雨量年际变化大,多年平均降水量 280 mm,蒸发量为 1 517.8 mm,年均气温 8.3℃,气温日较差 21.7℃,日照时数 3 054 h,有效积温(>10℃) 3 146.2℃,无霜期 150 d,辐射量 5 885.8 MJ/m²。

研究区地带性土壤以灰钙土为主,非地带性土壤主要有风沙土和草甸土,土壤结构松散,肥力较低。研究区为典型的农牧交错地带,区域耕地表土层干燥疏松,长时间裸露于地表,风蚀程度较高,再加上长时间的耕作灌溉,使得土壤侵蚀严重。区域内牧业发达,过度放牧使得草地退化严重。研究区植被类型以草甸、沙地植被和荒漠植被为主,群落中常见植物种类以旱生和中旱生类型为主,主要优势植物种有中亚白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

样地设置在毛乌素沙地西南缘,宁夏盐池县高沙窝镇和杨柳堡区,选取 5 种不同土地利用类型,各样地基本情况见表 1,包括:农田(NT);林地(LD);灌丛沙堆(GC)的上(GC-S)、中(GC-Z)、下(GC-X)部分;草地(CD);弃耕地(HD)。

2.2 土壤样品采集

2019 年 10 月,在研究区内选取农田、弃耕地、草地、林地、灌丛沙堆,5 种具有代表性的采样地,每个采样点土壤剖面深度为 30 cm,分 5 层(0—5,5—10,10—15,15—20,20—25,25—30 cm)采样,其中,对

农田、弃耕地、草地、林地的每个样地采用“S”型路线取三次重复进行混合,对灌丛沙堆的每个样地在顶部、中部、底部 3 个位置每个取三次重复进行混合,然后将每个采样地 3 个采样点同一层次的土样混合装袋并进行编号。

2.3 分析方法

土壤粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer

3000 激光粒度仪测定。每个样品重复测定 3 次,取平均值作为该样品的最终测定结果,单位以体积百分比表示,重复性误差 $\leq \pm 0.5\%$,准确性误差 $\leq \pm 1\%$ 。根据美国农业部(USAD)制土壤质地分级标准划分土壤质地划分为: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($<2 \mu\text{m}$)共 6 个等级^[28]。

表 1 各样地基本情况

样地类型	地理坐标		海拔	主要植被类型	植被盖度/%
	东经	北纬			
灌丛沙堆	107°38′43.18″	37°93′40.47″	1307.0 m	灌木	70~80
林地	107°40′67.55″	37°86′31.94″	1359.6 m	灌木林地,柠条林,林间草本	95
草地	107°09′91.42″	37°96′01.63″	1430.0 m	草本	90
农田	107°30′66.48″	37°83′23.38″	1413.1 m	留茬玉米地	85
弃耕地	107°39′91.52″	37°88′04.71″	1322.0 m	杂草	90~100

以激光粒度分析仪所获得粒径体积数据为基础,根据 Tyler 等^[23]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:

$$\frac{V_{(r<R)}}{VT} = (\frac{R}{R_{\max}})^{3-D}$$

(1)

式(1)两边同时取对数可得土壤分形维数的计算公式:

$$\lg(\frac{V_{(r<R)}}{VT}) = (3-D)\lg(\frac{R}{R_{\max}})$$

(2)

式中: V 为小于粒径 R 的土壤总体积(%); VT 为测定的土壤总体积(%); R 为两筛分粒级 R_i 与 R_{i+1} 间粒径的平均值(mm); R_{\max} 为土壤粒径分级中最大粒径,本研究中土壤最大粒径为 1 000 μm ; D 为土壤颗粒的体积分形维数,式(2)左边为纵坐标,右边为横坐标线性回归拟合方程,求出斜率值,3 与直线斜率值的差值即为土壤分形维数 D 值。

2.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析, Pearson 相关系数进行相关性分析($\alpha=0.05$), Origin 2018 作图。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型的土壤粒径分布

由表 2 可知,GC-S,GC-X 中极细砂粒体积含量最大,分别为 38.25%和 36.45%,粉粒,细砂粒次之,粗砂粒含量最少,GC-Z 以细砂粒体积含量最大,为 34.2%,粉粒,极细砂粒次之,黏粒与中砂粒体积含量最少,但相较于 GC-S 和 GC-X,GC-Z 的土壤粒径分布更均匀,且粗颗粒体积含量更多,整体而言,GC 上中下三部分土壤粒径分布差异较小。LD 土壤粒径组成以细砂粒体积含量最大,为 57.34%,极细砂粒体积含量次之,为 30.04%,黏粒与粗砂粒体积含量最少,粒径组成以细颗粒为主,且粒径组成均匀度差。CD 土壤粒径组成以细砂粒体积含量最大,为 50.19%,极细砂粒次之,为 22.17%,含有较少的黏粒和粉粒,粗砂粒含量极少或没有。NT 土壤粒径组成以粉粒体积含量最大,为 34.18%,其次是细砂粒 31.94%,粒径组成更多的集中在粉粒,极细砂粒和细砂粒,相加所占比达 92.98%,黏粒含量高于中砂粒,粗砂粒极少或无。HD 土壤粒径组成以粉粒体积含量最大,为 45.10%,极细砂粒次之,粗砂粒极少或无。

表 2 样地土壤粒径组成和土壤颗粒分形维数

土地利用类型	样地名称	取样深度/cm	土壤粒径组成的体积百分含量/%						分形维数 D	相关系数 R^2
			黏粒	粉粒	极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒		
灌丛沙堆	GC-S	0—30	2.28	33.07	38.25	24.18	2.06	0.16	2.62	0.97
	GC-Z	0—30	3.06	29.87	28.67	34.20	4.17	0.03	2.55	0.99
	GC-X	0—30	2.12	31.20	36.45	27.09	2.66	0.22	2.59	0.98
林地	LD	0—30	0.65	5.72	30.04	57.34	6.25	0.01	1.83	0.98
农田	NT	0—30	4.61	34.18	26.86	31.94	2.40	0.03	2.62	0.99
草地	CD	0—30	2.48	18.76	22.17	50.19	6.36	0.04	2.30	0.98
弃耕地	HD	0—30	4.10	45.10	27.53	21.07	2.06	0.13	2.72	0.99

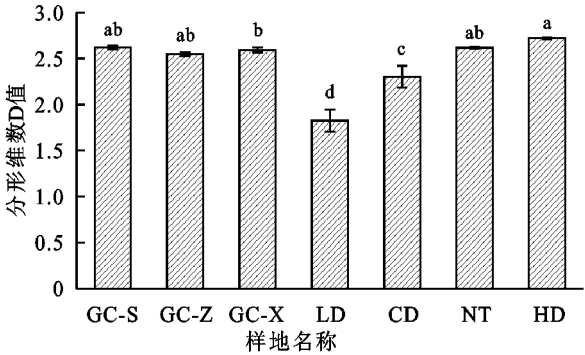
3.2 不同土地利用类型的土壤颗粒分形特征

3.2.1 不同土地利用类型土壤颗粒分形维数的差异
由图 1 可知,研究区内,不同土地利用类型下分形维数存在差异。高植被覆盖度条件下的 GC 上中下 3 部分,土壤颗粒分形维数在 2.55—2.62,质地更细的 GC-S 的分形维数值更大,砂粒含量更多的 GC-Z 分形维数值最小;灌木林地,柠条林,林带间草本覆盖的 LD,其土壤颗粒砂粒体积含量高达 93.64%,分形维数为 1.83,是 5 种土地类型中分形维数值最小的;CD 土壤颗粒分形维数为 2.30;NT 玉米留茬地,分形维数为 2.62;HD 土壤颗粒组成以粉粒、极细砂粒为主,质地更细,其分形维数为 2.72,为 5 种土地类型中分形维数最大的。

综上 5 种不同土地利用类型下,GC-S,GC-Z 和 NT 差异不显著,其余各土地利用类型存在显著差异,HD 平均分形维数最大(2.72),LD 最小(1.83),分形维数呈现 HD>NT=GC-S>GC-X>GC-Z>CD>LD 的趋势。分形维数的大小反映了土壤中细粒物质含量的多寡,LD 土壤中细粒物质含量少,其分形维数也小;而荒地,耕地和灌丛沙堆上部粉粒与黏粒含量较多,故其分形维数值更大。

3.2.2 不同土地利用类型土壤颗粒分形维数垂直分布差异
由图 2 可知,在土壤粒径的垂直分布上,GC 表现为随着土层深度的增加,各级粒径体积含量与分形维数值变化不大,剖面整体 $D>2.5$,最大值均出现在剖面表层 0—5 cm 处,其原因为表层受风化侵蚀严

重,含有更多的细质颗粒物;LD 中黏粒,粉粒与极细砂粒体积含量都表现为随着土层深度的增加而明显减少,细砂粒与中砂粒体积含量增加,体现在分形维数上则是随着土层深度的增加,分形维数值降低明显,剖面整体 $D<2.2$,底层土壤粒径组成单一且以粗质粒径为主,在 25—30 cm 处达最小值 1.42;CD 则与 LD 相反,表现为随着土层深度的增加,黏粒、粉粒与极细砂粒体积含量增加,细砂粒与中砂粒体积含量降低,分形维数随土层深度增加而变大,表明 CD 土层越深细质颗粒越多,土壤颗粒组成越复杂,但是表层由于植被覆盖较低,风化作用明显,粗质颗粒多;NT 与 HD 土壤粒径表现为随着土层深度的增加,各粒径体积含量变与,分形维数值变化不大,由于受人为耕地活动的影响,剖面中黏粒和粉粒体积含量多,土壤粒径组成复杂,剖面整体 $D<2.59$ 。



注:不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同土地利用类型分形维数值

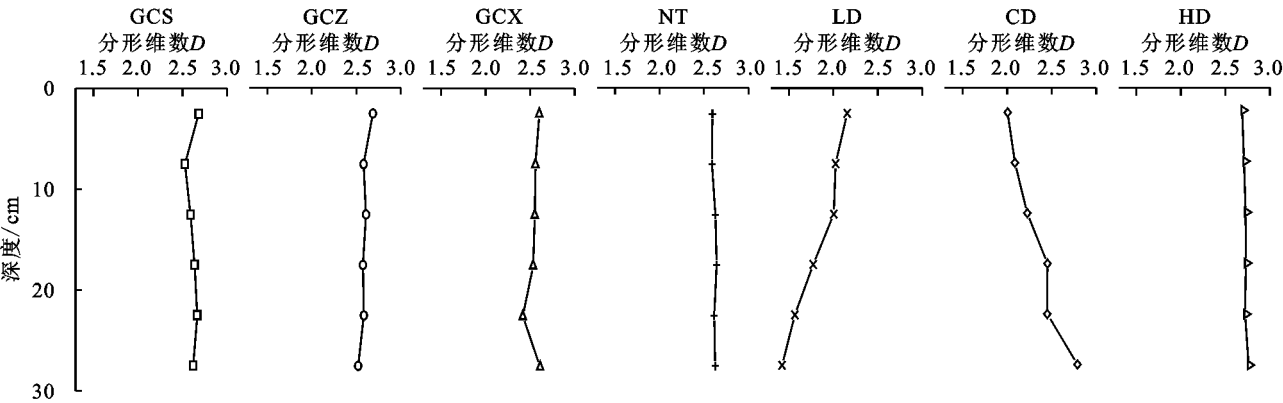


图 2 不同土地利用类型土壤颗粒分形维数垂直分布

3.3 土壤粒径与分形维数的关系

3.3.1 表层土壤颗粒分形维数与粒径含量的关系
由于土壤风蚀主要发生在土壤表层,故仅对 5 种土地利用类型 0—5 cm 土壤粒径体积百分含量与分形维数进行回归分析,其结果(图 3)。由图可知,5 种土地利用类型的分形维数与土壤黏粒含量、粉粒含量均成极显著正相关($p<0.01$),与砂粒含量呈极显著负相关($p<0.01$),这一结果与其他地区的研究结果一

致^[25]。显然,土壤颗粒的粒径组成不同,会导致土壤颗粒分形维数发生明显变化,土壤中细小物质比例越高,分形维数愈大,且细小物质如黏粒、粉粒占的比例越大,对分形维数的影响也越大。分形维数与 3 组土壤粒径的相关系数 R^2 整体上呈粉粒>砂粒>黏粒的变化趋势,这表明粉粒含量对分形维数的影响具有决定作用。

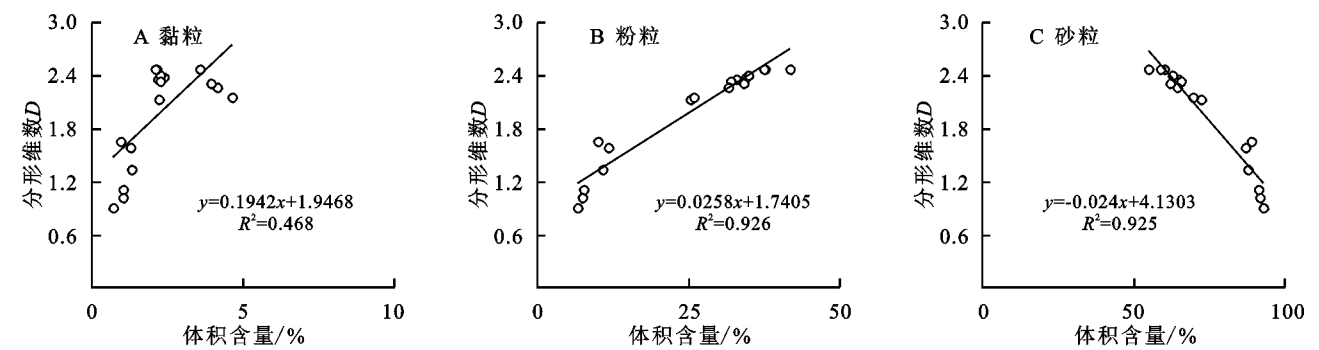


图3 土地表层黏粒、粉粒和砂粒体积含量与分形维数相关关系

3.3.2 土壤颗粒分形维数与粒径分布的关系 为探究毛乌素沙地西南缘风沙土颗粒分形维数的临界粒径,分析了土壤表层分形维数与6个土壤粒径分布的相关性。由表3可知,分形维数与500~1 000 μm 粒径含量无明显相关性,与<100 μm 粒径的粉砂、黏粒体积含量呈极显著线性正相关,粉砂、黏粒体积含量越高,分形维数越大;与100~250 μm,250~500 μm 细砂、中砂含量呈极显著负相关,细砂、中砂含量越高,分形维数越小;但与250~500 μm 粒径体积含量呈不显著线性负相关,相关系数0.488 2,所以100 μm 成为土壤颗粒体积含量与分形维数正负相关的分界,是反应研究区域土壤颗粒分形维数的临界粒径,决定不同土地利用类型下土壤颗粒分形维数的粒径分布为<100 μm 的黏粒,粉粒,极细砂粒含量,同时该粒径体积含量的大小也反应了不同土地利用类型的防止风蚀和拦截细粒物质的效果。

表3 土壤分形维数D与土壤粒径含量d的线性回归关系		
粒径	回归方程	R ²
<2 μm	$D=0.1975d+1.6822$	0.4549
2~50 μm	$D=0.0370d+1.3990$	0.7304
50~100 μm	$D=0.0412d+1.1950$	0.8653
100~250 μm	$D=-0.0329d+3.6383$	0.8229
250~500 μm	$D=-0.0246d+2.3892$	0.4882
500~1000 μm	$D=-0.0214d+2.1913$	0.0101

4 讨论

分形维数对细颗粒含量的变化最为敏感,由此可以将土壤颗粒分形维数作为评价毛乌素沙地西南缘土壤结构、肥力状况及土壤退化程度的指标之一。研究表明,土壤分形维数与土壤颗粒组成密切相关^[29],且分形维数随土壤质地由粗到细,呈现由小到大的变化趋势^[30]。我国主要的沙漠(沙地),其沙物质大多为细砂(0.1~0.25 mm),占总量的66.78%~99.38%,粗砂及粉砂含量很低^[6],本研究中,林地、草地和自然条件下形成的高覆盖灌丛沙堆均以极细砂粒和细砂粒为主,而在人为耕作管理下的农田,以及杂草高度覆盖的荒地则

以粉粒,细砂为主,粒径特征体现在分形维数上则呈现:荒地>农田>灌丛沙堆>草地>林地,这反映了不同土地利用方式导致土壤质地的变化,使得分形维数因此而变化,研究结果与前人研究相似。

林地、草地与自然形成的高覆盖度灌丛沙堆土壤颗粒含量与分形维数的差异,可归因于研究区域作为国家生态治理重点地区,防风治沙与生态修复取得了重大效果,植被能够通过覆盖地表、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^[24],防护林中的林地可以有效提高地表粗糙度,而且林草可以拦截风沙流中的细粒物质使之沉积于地表。研究区内,林地土壤表层可以截留下风沙中的细颗粒物质,但其深层土壤颗粒仍以粗粒为主,呈现出随土层深度增加,分形维数减小的情况;草地为典型荒漠草原,受风蚀影响,表层土壤中细粒物质损失,分形维数小,深层土壤受风蚀影响较小,分形维数值大;农田为荞麦翻耕地,植被覆盖度较林草更高,且在人为耕作管理情况下,土壤结构得到改善,土体颗粒粒径组成复杂,分形维数值大;弃耕地前期人为干预明显,现阶段已形成全面杂草覆盖,高植被覆盖下土壤结构发育完整,其粉粒,极细砂粒含量也更多,分形维数值也大。罗凤敏等^[24]、陈新闯等^[31]的研究证实,在沙漠地区,特别是农牧交错生态治理区,林地植被下土壤分形维数会增大,其原因是林草植被有效地拦截了因风蚀过程中的细颗粒物质,导致林地表面细粒化程度加强,土壤分形维数在表层值最高。这从另一方面也表明,植树造林后,林草下细粒物质会增加,土壤颗粒粒径分布、土壤质地与分形维数也随之发生变化,因而,生长植被的地表土壤风蚀相对较轻。

土壤颗粒粒径组成是决定土壤抗蚀性的重要因素^[27-29],不同土地利用方式体现了干扰对土壤粒径分布的改变^[23]。对于风蚀而言,损失的是易蚀或可蚀部分^[9],细沙与极细沙是极易被吹蚀的部分,而粉砂则具有最大的团聚度和抗风蚀度,土壤中粉砂的比率越大,砂的比率越小,则风蚀度越低^[25]。本研究中粒

径分布与分形维数的相关性也说明, $>100\ \mu\text{m}$ 的沙粒与分形维数呈负相关, 且分形维数与粉砂, 极细砂粒的含量的相关性最大, 因此, $100\ \mu\text{m}$ 可以用做表征研究区域的分形维数的临界粒径, 研究区域的分形维数主要受 $<100\ \mu\text{m}$ 的粉砂与极细砂粒决定。

5 结论

(1) 土地利用方式对毛乌素沙地西南缘土壤颗粒组成、分布影响明显。草地, 高覆盖度灌丛沙堆以及林地的土壤粒度组成以细沙和中砂为主, 耕地和荒地则以粉粒和极细砂为主。

(2) 5 种土地利用类型土壤颗粒分形特征差异明显, 其分形维数呈现荒地 $>$ 农田 $>$ 灌丛沙堆 $>$ 草地 $>$ 林地的趋势; 土壤垂直分布上, 林地土壤颗粒的分形维数随土层深度的增加而减小, 草地则随深度的增加而增加, 灌丛沙堆、农田与荒地变化幅度不明显。

(3) 不同土地利用类型的土壤颗粒分形维数的大小与土壤质地的细粒化变化相一致, 决定土壤颗粒分形维数的粒径分布为 $<100\ \mu\text{m}$ 的黏粒, 粉粒和极细砂极细砂粒含量, 表明可反映该区域土壤颗粒分形维数的临界粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Gimenez D, Perfect E, Rawls W J, et al. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review[J]. Engineering Geology, 1997, 48(3/4): 161-183.
- [3] Yu B. Comments on "Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory"[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(2): 632-632.
- [4] Zhao C, Jia X, Zhang C. Particle size distribution of soils(0—500 cm) in the Loess Plateau, China[J]. Geoderma Regional, 2016, 7(3): 251-258.
- [5] Kravchenko A N, Boast C W, Bullock D G. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(6): 1033-1041.
- [6] 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.
- [7] Ghanbarian B, Daigle H. Fractal dimension of soil fragment mass-size distribution: A critical analysis[J]. Geoderma, 2015, 245: 98-103.
- [8] Turcotte D L. Fractal and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91: 1921-1926.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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.
- [13] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 36(1/2): 1-20.
- [14] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- [15] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析: 以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [16] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 等. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 134-138.
- [17] 王国玲, 苏志珠, 毛丽, 等. 中国北方农牧交错带鄂尔多斯高原段土壤表层粒度特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 183-190.
- [18] 刘树林, 王涛, 屈建军. 浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 611-616.
- [19] 郭挺, 徐先英, 柴成武, 等. 民勤绿洲—荒漠过渡带微区土壤水分及粒度特征研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(5): 157-163.
- [20] 淮态, 庞奖励, 文青, 等. 不同土地利用方式下土壤粒径分布的分维特征[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 24(2): 41-44.
- [21] Chepil W S. Properties of soil which influence wind erosion: I. The governing principle of surface roughness[J]. Soil Science, 1950, 69(2): 149-162.
- [22] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind[J]. Soil Science, 1953, 75(6): 473-480.
- [23] 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(2): 362-369.
- [24] 罗凤敏, 高君亮, 郝玉光, 等. 乌兰布和沙漠东北缘 5 种土地利用类型土壤粒度特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 172-177.
- [25] 杜海燕, 周智彬, 刘凤山, 等. 绿洲化过程中阿拉尔垦区土壤粒径分形变化特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 615-622.

- [J]. Ecological Engineering, 2013, 56: 5-13.
- [9] 张鹏云, 刘铭庭. 中国怪柳属植物研究简史[J]. 干旱区研究, 1988, 5(3): 20-26.
- [10] 屈艳萍, 康绍忠, 夏桂敏, 等. 甘肃石羊河流域人工种植长穗怪柳树干液流量变化规律研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(11): 2259-2265.
- [11] 于军, 姜喜, 白宝伟, 等. 长穗怪柳种子形态特征与萌发特性研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(7): 3911-3920.
- [12] 徐高兴, 王立, 徐先英, 等. 民勤绿洲边缘地下水埋深对怪柳灌丛生长及物种多样性的影响[J]. 草原与草坪, 2017, 37(2): 49-56.
- [13] 韩福贵, 魏林源, 王理德, 等. 民勤退耕地物种多样性与土壤养分及其相关性分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(6): 109-114.
- [14] 徐先英, 严平, 郭树江, 等. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 141-145.
- [15] 韩福贵, 孙涛, 郭树江, 等. 干旱荒漠区不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤呼吸特征及其影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(5): 1-7.
- [16] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法: α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [17] 陈慧, 郝慧荣, 熊君, 等. 地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2755-2759.
- [18] 岳静, 郝敏, 张灵菲, 等. 物种多样性—生态系统功能关系的影响因素[J]. 草业科学, 2011, 28(4): 532-535.
- [19] 张元恺, 张杰, 姚泽. 民勤沙区绿洲—荒漠过渡带典型植被群落物种多样性特征分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(28): 1-7.
- [20] 刘发民, 张应华, 仵彦卿. 黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J]. 干旱区研究, 2002, 19(1): 27-31.
- [21] 王玉辉, 周广胜. 内蒙古羊草草原植物群落地上初级生产力时间动态对降水变化的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1140-1145.
- [22] 常兆丰, 赵明, 韩福贵. 民勤沙区几种荒漠植物群落的现实生态位研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(1): 165-173.
- [23] 鲁延芳, 占玉芳, 钱万建, 等. 河西走廊中部人工沙漠植被典型群落物种的多样性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 14-18.
- [24] 孟明. 宁夏中部干旱带荒漠草原土壤水分与生物多样性的相关关系[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [25] 濮阳雪华, 王春春, 苟清平, 等. 陕北黄土区植被群落特征与土壤水分关系研究[J]. 草业学报, 2019, 28(11): 184-191.
- [26] 刘旻霞, 王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 259-265.
- [27] 王永健, 陶建平, 张炜银, 等. 四川茂县土地岭大熊猫走廊带植被恢复格局及其与干扰的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3525-3532.
- [28] Yoshihara Y, Tatsuno Y, Miyasaka K, et al. Can complementarity in water use help explain diversity-productivity relationships in semi-arid grasslands? [J]. Journal of Arid Environments, 2019, 173, 103994. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.103994>.
- [29] Zelnik I, Carni A. Plant species diversity and composition of wet grasslands in relation to environmental factors [J]. Biodiversity and Conservation, 2013, 22: 2179-2192.
- [30] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 等. 养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 167-177.
- [31] 黄德青, 于兰, 张耀生, 等. 祁连山北坡天然草地地上生物量及其与土壤水分关系的比较研究[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 20-27.
- [32] 张雪妮, 李岩, 何学敏, 等. 水盐变化对荒漠植物功能多样性与物种多样性关系的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2354-2360.

(上接第48页)

- [26] 董雪, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 浑善达克沙地3种灌木土壤分形特征与养分关系[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 172-181.
- [27] 王小丹, 刘刚才, 刘淑珍, 等. 西藏高原干旱半干旱区土壤分形特征及其应用[J]. 山地学报, 2003, 23(1): 58-63.
- [28] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [29] 任婷婷, 王瑄, 陈雯静, 等. 不同土地利用类型土壤颗粒分形特征与黏粒含量的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(2): 202-207.
- [30] 王燕, 蒙仲举, 斯庆毕力格, 等. 基于多重分形的半干旱区农田表层土壤粒径分布特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(4): 826-831.
- [31] 陈新闻, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同土地利用类型对土壤分形特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 169-173.