

# 基于土壤粒度参数的荒漠草原地表粗粒化过程

蒙仲举<sup>1</sup>, 王猛<sup>2</sup>, 高永<sup>1</sup>, 毛振华<sup>3</sup>, 汪季<sup>1</sup>, 陈士超<sup>1</sup>, 安正锋<sup>4</sup>

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 中央与地方共建风沙物理重点实验室, 呼和浩特 010018; 2. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 3. 鄂尔多斯市水土保持科学研究所, 内蒙古 鄂尔多斯市 017000; 4. 西北农林科技大学, 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 草原退化特征已由植被变化为主演变为土壤退化的阶段, 其植被覆盖变化可在一定程度上反映退化状况与过程, 探明荒漠草原不同退化阶段(覆盖度)地表风蚀状况, 对合理利用与保护草地资源意义重大。以希拉穆仁荒漠草原7个覆盖度(裸地, 5%, 20%, 40%, 60%, 80%和100%)下的表层土壤为研究对象, 利用激光衍射技术测量表层0—1 cm土壤粒度组成, 分析不同覆盖度下的平均粒径、标准偏差、偏度、峰态及分形维数等粒度参数变化情况以及颗粒频率分布。结果表明: (1) 土壤粒度组成均以沙粒和粉粒为主, 黏粒含量较低; 偏度可作为有效粒度参数指标。 (2) 随着盖度降低, 平均粒径数值越大, 分选性越好, 频率曲线由近于对称—正偏—极负偏转变, 峰态由尖锐变平缓, 分形维数先增加后降低。 (3) 粒径分布基本呈双峰分布, 盖度越小第二波峰滞后越明显, 且分布均匀程度越低, 易风蚀颗粒范围为144~869  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 粒度参数; 土壤; 植被盖度; 荒漠草原

**中图分类号:** S152.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)06-0022-07

## Soil Coarse Graining Process Based on Surface Grain Size Distribution in Xilamuren Desert Steppe

MENG Zhongju<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>2</sup>, GAO Yong<sup>1</sup>, MAO Zhenhua<sup>3</sup>,  
WANG Ji<sup>1</sup>, CHEN Shichao<sup>1</sup>, AN Zhengfeng<sup>4</sup>

(1. College of Desert Science and Engineer, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Erdos City Water Science Institute, Erdos, Inner Mongolia 017000, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Grassland degradation characteristics have been transformed by changes in vegetation primarily for soil degradation stage, to a certain extent, its vegetation change can reflect the status and process of degradation. The wind erosion situation of different degradation stage in Xilamuren desert grassland was studied, which is of great significance for protecting and utilizing grassland resources in this area properly. In this research, the top soils (0—1 cm) of 7 different types of vegetation coverage (0%, 5%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100%) were selected. In order to analyze the soil particle size characteristics in desert steppe, laser diffraction technique was used to identify the soil particle size distributions, and the particle size parameters such as the average particle size, standard deviation, skewness, kurtosis and fractal dimension were calculated. The results indicated that: (1) most topsoil particle sizes in desert steppe were mainly sand and silt, while the clay content was low; (2) With the decrease of the coverage, the average particle size became bigger, the sorting characteristics got better and the frequency curve changed by nearly symmetrical to positive skewness and partial negative skewness eventually, the kurtosis changed from the sharp to the flat, fractal dimension increased first and reduced later; (3) the particle size distribution was bimodal distribution, the smaller basic coverage was, the more obvious of the second wave lagged behind, and the lower level of uniform distribution was, the more coarse of particle size of the particles concentration was.

**Keywords:** granularity parameter; soil; vegetation coverage; desert steppe

收稿日期: 2016-11-01

修回日期: 2016-12-11

资助项目: 内蒙古农业大学优秀青年基金(2014XYQ-8); 中科院西部之光“内蒙古中西部沙化草原地表粗粒化过程研究”

第一作者: 蒙仲举(1980—), 男, 内蒙古自治区呼和浩特市人, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。

E-mail: mengzhongju@126.com

通信作者: 高永(1962—), 男, 内蒙古自治区包头市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 13948815709@163.com

希拉穆仁荒漠草原是我国北方重要的生态安全屏障,在维持自然生态系统格局、功能、过程方面具有特殊的生态学意义<sup>[1-2]</sup>。目前,旅游经济需求增加、人为活动频繁部分地段草原有向裸露化或荒漠化发展的趋势<sup>[3]</sup>,有研究表明荒漠草原退化特征已由植被特征变化的阶段演变至土壤退化的阶段<sup>[4-5]</sup>。植被与土壤之间息息相关<sup>[6]</sup>,随着植被退化的演替,土壤退化将越来越严重,崔向新、杜子涛学者研究表明特定区域特定时间段内草原植被覆盖变化能反映草原退化状况与过程<sup>[7-9]</sup>。荒漠草原区域土壤缺乏植被保护时,地表细粒物质首先被吹蚀,导致地表呈现出粗粒化现象,地表土壤颗粒粒度分布发生明显变化。而地表颗粒粒度组成是影响风蚀的主要因素之一,在很大程度上决定了土壤抗风蚀性的强弱,使得土壤级数分布成为土地风蚀和沙漠化程度判读的理想指标<sup>[10]</sup>。此外,利用分形维数等辅助研究土壤结构的方法也广泛应用于此<sup>[11]</sup>。但目前从粒度特征上揭示近自然状态下荒漠草原不同退化阶段的草原表层土壤风蚀特征方面的研究相对较少。

为此,本文以希拉穆仁草原为例,结合 TM 影像选取水利部水土保持生态监测中心试验样地,利用像元二分模型<sup>[12]</sup>估算植被盖度,结合实地观测设置样方,分析土壤表层(0—1 cm)的粒度特征,比较土壤粒度参数及分形维数等指标,从土壤粒度特征视角揭示近自然状态下荒漠草原不同植被盖度下表层土壤风蚀特征,以期为认识草原退化机理提供可靠的数据支持,为合理保护草原提供依据。

1 试验与方法

1.1 研究区概况

研究区位于希拉穆仁荒漠草原(41°12′—41°31′N, 111°00′—111°20′E),系阴山山地向内蒙古高原的过渡带,地形为低山丘陵类型,平均海拔 1 600 m,属于

中温带大陆性半干旱季风气候,年平均降水量为 284 mm,潜在蒸发量高达 2 305 mm,降雨主要集中在 7 月,8 月,9 月份;年均气温 2.5℃;年均风速 4.9 m/s,全年主风向以北风和西北风为主(图 1);主要分布有栗钙土和草甸土类,有 190 多种植物,草场主要群落结构为“克氏针茅(*Stipa krylovii*) + 羊草(*Leymus chinensis*) + 冷蒿(*Artemisia frigida*)”<sup>[13]</sup>。

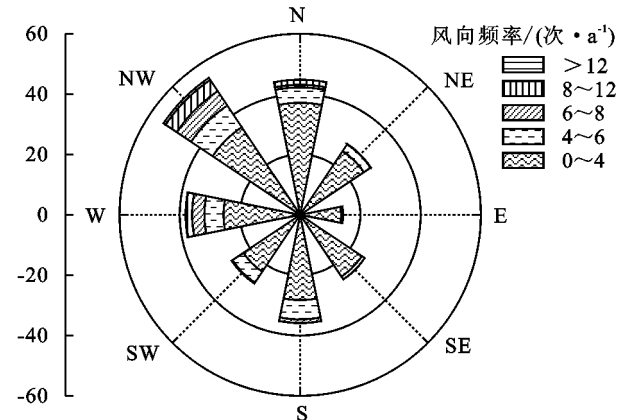


图 1 希拉穆仁荒漠草原风向玫瑰图

1.2 样地选择和样品采集

1.2.1 样方布设 结合希拉穆仁草原实际情况,将植被盖度分为 5 个等级,即 0 为裸地,1%~30%为低覆盖,31%~60%为中覆盖,61%~90%为中高覆盖,>90%为全覆盖区<sup>[14]</sup>。研究区大部分处于低覆盖的区域,该地区平均植被盖度为 22.93%,其中裸地占 7.90%,低覆盖约 56.79%,中覆盖占 23.51%,主要集中在西南部及中部的一些区域;中高覆盖占 6.68%,分布在西北部;全覆盖区占 5.12%。基于 NDVI 提取的希拉穆仁草原植被盖度区划图上,在不同等级盖范围内选取大致为裸地,5%,20%,40%,60%,80%和 100%5 种不同盖度的典型样地,随机布设 5 个 1 m×1 m 的样方调查。

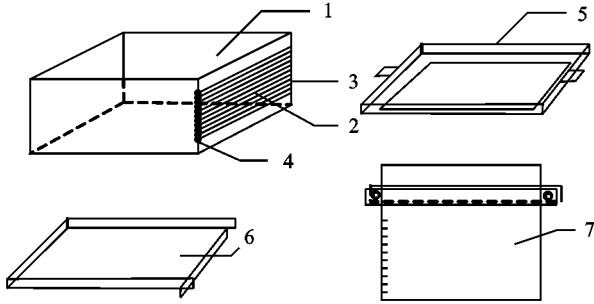
采样于 2014 年 7 月下旬进行,取样前一周内无大风和降水,测定不同盖度下植被群落结构的植物种、株密度、生物量及植被平均高度等关键指标。

表 1 试验区植被调查基本情况

盖度/%	主要植被	优势种	相对盖度/%	物种数/个	高度/cm	株密度/(株·m <sup>-2</sup> )	地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )
5	冷蒿+北点地梅	北点地梅	39.47	5.50	3.39	46.00	26.20
20	克氏针茅+冷蒿+亚洲百里香	冷蒿	20.29	10.00	8.65	52.00	47.88
40	克氏针茅+银灰旋花+狼毒	银灰旋花	23.26	12.00	12.47	100.00	123.44
60	克氏针茅+碱韭+银灰旋花	克氏针茅	49.18	10.00	15.80	165.50	254.24
80	克氏针茅+冷蒿+二裂委陵菜+狼毒	克氏针茅	21.98	14.00	17.17	590.00	328.16
100	羊草+克氏针茅+阿尔泰狗娃花+二裂委陵菜	羊草	71.07	12.00	35.56	694.00	673.30

注:冷蒿(*Artemisia frigida*),北点地梅(*Androsace septentrionalis* L.),克氏针茅(*Stipa krylovii*),百里香(*Thymus mongolicus* Ronn.),银灰旋花(*Convolvulus ammannii* Desr.),碱韭(*Allium polyrhizum*),赖草(*Leymus secalinus*),二裂委陵菜(*Potentilla bifurca* Linn.),阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*),狼毒(*Stellera chamaejasme* L.),羊草(*Leymus chinensis*)。

1.2.2 土样采集与测定 在植被测定时,同时使用分层取土器(图 2)<sup>[15]</sup>平行于地表采集深度 0—1 cm 的表层土样,当场装入塑料封口袋密封以备。7 个盖度样地分别有 5 个采样点,样点为 1 m×1 m 正方形,分别在正方形对角线两端及中间采集 3 个重复样。土样在水利部牧区水利科学研究所室内风干,将重复样混合后以四分法取对角线土约 150 g 装入塑料袋备测,共计 35 个土样。



1 代表取土器主体;2 代表刻度板;3 代表侧轴;4 代表开关;5 代表顶盖;6 代表簸箕;7 代表刮板。

图 2 分层取土器结构示意图

土壤粒度预处理和测量在内蒙古农业大学沙地生物资源保护与培育国家林业局重点开放性实验室完成。土样自然风干后首先使用最接近测量上限(3 500  $\mu\text{m}$ )的 6 目土壤筛去除粒径大于 3 350  $\mu\text{m}$  的粗颗粒,后分别称取 10 g 土样加入 50 ml 玻璃烧杯中,再加入 45 ml Ⅲ级超纯水和 1~2 滴 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液,静置 24 h 以去除土样中的有机质,用电热板加热烧杯,完全挥发反应剩余的  $\text{H}_2\text{O}_2$ 。随后加入 1~2 ml 10%  $\text{HCl}$  溶液以溶解样品中的碳酸盐类物质,再加入纯净水稀释直至 pH 值呈中性。

土壤粒度测量使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 3000 型激光粒度分析仪,每个样品重复测量 3 次。测量过程中使用超声震荡 10 s 以分散团聚体。测定完成后结果输出以美国制土壤粒径分级标准输出<sup>[16]</sup>:黏粒(<2  $\mu\text{m}$ ),粉粒(2~50  $\mu\text{m}$ ),极细沙(50~100  $\mu\text{m}$ ),细沙(100~250  $\mu\text{m}$ ),中沙(250~500  $\mu\text{m}$ ),粗沙(500~1 000  $\mu\text{m}$ ),极粗沙(1 000~2 000  $\mu\text{m}$ )和砾石(>2 000  $\mu\text{m}$ ),并同时输出土壤颗粒累积体积分数为 5%,10%,16%,25%,50%,75%,84%,90%,95% 所对应的颗粒直径以备粒度参数的计算。

### 1.3 研究方法

(1) 粒度参数模型。采用 Udden-Wenworth 粒度标准,根据 Kumdein 的算法进行对数转化,变为利于计算的  $\Phi$  值<sup>[17-18]</sup>,转换公式为:

$$\Phi = -\log_2 D \quad (1)$$

式中: $D$  表示土壤颗粒直径(mm);采用 Folk-Ward

的图解法<sup>[19]</sup>计算粒度参数,一平均粒径( $d_0$ ),标准偏差( $\sigma$ ),偏度( $SK$ )与峰态( $K_g$ )。参数计算公式如下:

平均粒径:

$$d_0 = \frac{1}{3} (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) \quad (2)$$

标准偏差:

$$\sigma_0 = \frac{(\Phi_{84} - \Phi_{16})}{4} + \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{6.6} \quad (3)$$

偏度:

$$SK = \frac{(\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50})}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{(\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50})}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (4)$$

峰态:

$$K_g = \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (5)$$

平均粒径  $d_0$  表征土壤粒度的平均分布情况。

标准偏差  $\sigma_0$  表示土壤颗粒分布的离散程度; $\sigma_0 < 0.35$ ,分选性极好; $0.35 < \sigma_0 \leq 0.50$ ,分选性好; $0.50 < \sigma_0 \leq 0.71$ ,分选性较好; $0.71 < \sigma_0 \leq 1.00$ ,分选性中等; $1.00 < \sigma_0 \leq 2.00$ ,分选性较差; $2.00 < \sigma_0 \leq 4.00$ ,分选性差; $\sigma_0 > 4.00$ ,分选性极差。

偏度  $SK$  反映土壤颗粒粒度频率曲线的对称性, $-1.0 \leq SK < -0.3$ ,极负偏; $-0.3 \leq SK < -0.1$ ,负偏; $-0.1 \leq SK < 0.1$ ,近于对称; $0.1 \leq SK < 0.3$ ,正偏; $0.3 \leq SK < 1.0$  极正偏。

峰态  $K_g$  是土壤颗粒粒度分布在平均粒度两侧集中程度的参数, $K_g \leq 0.67$ ,很宽平; $0.67 < K_g \leq 0.9$ ,宽平; $0.9 < K_g \leq 1.11$ ,中等; $1.11 < K_g \leq 1.56$ ,尖窄; $1.56 < K_g \leq 3.00$ ,很尖窄; $K_g > 3.00$ ,极尖窄。

分形维数  $D$  可以定量表明土壤的结构特征,计算方法为<sup>[20]</sup>:

分形维数:

$$\frac{V(r < R_i)}{V_t} = \left( \frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中: $D$  为土壤分形维数; $r$  为土壤颗粒直径(mm); $R_i$  为某一径级土壤颗粒直径(mm); $V(r < R_i)$  为小于  $R_i$  径级颗粒的土壤颗粒体积百分含量(%); $V_t$  为各径级颗粒总体积百分含量(%); $R_{\max}$  为最大颗粒直径(mm)。

(2) 土壤粒度累积频率间平均距离的计算。土壤粒度累积频率分布间平均距离  $d$  可反映样地间土壤质量差异状况,与土壤粒度累积频率曲线相互印证,可为土壤粗化判断提供佐证<sup>[21]</sup>。其计算公式为:

平均距离:

$$d = \sqrt{\sum (P - \bar{P})(K - 1)} \quad (7)$$

式中: $d$  为土壤粒度累积频率分布间平均距离; $P$  为某种盖度下土壤粒度累积频率; $\bar{P}$  为 7 种盖度下土壤粒度累积频率平均值; $K - 1$  为自由度, $K = 7$ 。

1.4 统计分析

采用 Excel 2003, Sigmplot 12.0 软件进行数据整理、计算分析、图表绘制,由 SAS 9.0 软件对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)、LSD 多重检验。

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖度土壤粒度组成特征

土壤粒度组成由表 2 可知,不同覆盖度土壤粒度组成均以沙粒和粉粒为主,沙粒平均体积百分含量(60.55%~75.33%)随着盖度增加而显著降低( $y_{沙粒} = -0.12x + 72.51, R^2 = 0.7427, n = 7, p = 0.0126$ ),裸地、5%盖度下沙粒含量较 20%~100%的沙粒含量达到显著差异( $p < 0.05$ )。对沙粒进一步分析,极细沙、细沙平均含量随着盖度的增加而显著增加( $y_{极细沙} = 0.14x + 10.52, R^2 = 0.967\ 0, n = 7, p < 0.000\ 1, y_{细沙} = 0.09x + 10.08, R^2 = 0.990\ 0, n = 7, p < 0.000\ 1$ ),粗沙、极粗沙平均含量随着盖度的增加而显著降低( $y_{粗沙} = -0.11x + 16.44, R^2 = 0.956\ 0, n = 7, p = 0.000\ 1, y_{极粗沙} = -0.25x + 25.67, R^2 = 0.889\ 9, n = 7, p = 0.001\ 4$ );中沙含量变化比较复杂,表现为先增高再降低然后再增高的趋势。黏粒、粉粒及两者含量之和的平均百分含量均随着盖度的增加而显著增大( $y_{黏粒} = 0.0028x + 0.0850, R^2 = 0.961\ 4, n = 7, p = 0.000\ 1, y_{粉粒} = 0.21x + 20.26, R^2 = 0.773\ 2, n = 7, p = 0.009\ 1, y_{黏粒+粉粒} = 0.21x + 20.35, R^2 = 0.777\ 6, n = 7, p = 0.008\ 7$ ),0.5%与 20%~100%之间达到极显著差异( $p < 0.01$ )。80%,100%表层砾石含量为零,其余 5 个覆盖度样地表层土壤砾石平均含量均显著升高( $p < 0.01$ ),同时彼此间达到极显著差异( $p > 0.01$ )。

表 2 不同覆盖度土壤粒度组成特征 %

覆盖度/%	黏粒	粉粒	沙粒					砾石
			极粗沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙	
裸地	0.07	14.25	8.92	9.73	7.85	17.00	31.83	10.35
5	0.11	19.48	12.04	11.21	12.28	16.83	21.76	6.29
20	0.16	31.10	13.96	11.75	10.44	13.05	16.44	3.10
40	0.18	32.73	16.13	13.52	9.39	11.33	14.18	2.54
60	0.23	33.14	18.62	15.27	9.39	9.65	12.17	1.53
80	0.34	34.95	22.42	17.40	10.35	8.90	5.64	0.00
100	0.35	39.10	23.26	19.29	11.04	5.69	1.27	0.00

2.2 土壤粒度参数

由表 3 可知研究区随着覆盖度的增加,其平均粒径总体呈增加趋势,按照 Folk-Ward 图解法划分标准,分别属于极粗沙—中粒—细沙—极细沙的转变,彼此间差异显著( $p < 0.01$ )。土壤标准偏差依次为

20% = 40% > 60% > 0% > 5% > 80% > 100%,即 100%盖度下分选性相比其他盖度下较差。0%,5%的偏度等级分别属于极负偏、负偏,20%,40%,60%属于正偏,80%,100%属于近于对称;裸地、5%峰均偏向粗粒度一侧,颗粒以粗组分为主,其中 0%样地颗粒组成更粗,土壤颗粒分布极不对称,总体偏向于粗颗粒的一侧。随着覆盖度的增加,覆盖度 80%,100%表层土壤中细粒物质如黏粒、粉粒和极细沙含量均较小盖度的样地有所增加,粗颗粒含量下降,颗粒组成复杂且向均匀化的方向发展,土壤粒度粗细分配近于对称。0%~60%盖度样地峰态均属中等分布,80%,100%样地分布尖窄,说明土壤颗粒分布较小覆盖度集中,由表 2 可知,覆盖度 80%,100%样地中黏粒、粉粒总含量较 0%~60%盖度含量有所增大,表明颗粒组成向细粒物质集中;表层土壤分形维数呈现先增加后减小的趋势(表 3),20%~40%盖度时的分形维数较大。

表 3 希拉穆仁荒漠草原表层土壤粒度参数

盖度/ %	平均 粒径 $d_0$	标准 偏差 $\sigma_0$	偏度 SK	峰态 $K_g$	分形 维数 $D$
裸地	1.10	2.33	-0.60	0.93	2.46
5	1.94	2.28	-0.23	0.90	2.45
20	2.66	2.57	0.18	0.93	2.51
40	2.89	2.57	0.12	0.99	2.52
60	2.87	2.47	0.12	1.06	2.50
80	3.40	2.17	0.02	1.32	2.43
100	3.70	1.90	-0.05	1.43	2.34

2.3 土壤颗粒粒度参数

分别以 7 个覆盖度每个取样点的粒度参数制作粒度参数散点图(图 3),在图中为了明显区分,将裸地及 5%盖度下的参数圈出,可直观地观察出裸地同其余覆盖度表土的粒度参数存在明显界限,除了峰态—标准偏差( $F$ )和峰态—分形维数( $J$ )外各粒度参数散点图均能对其进行明显的区分,在平均粒径—峰态、标准偏差—偏度散点图可对覆盖度 5%进行明显识别,其他散点图均无法严格区分。从粒度参数散点图中可以看出裸地各粒度参数分布范围最大,覆盖度 5%次之,其他覆盖度下粒度参数分布比较集中,且难以区分。整体来看,偏度可作为不同覆盖度下表土粒径的有效粒度参数指标。

2.4 土壤颗粒频率分布曲线

由图 4A 可以看出 7 个覆盖度样地粒径分布存在差异,基本呈双峰分布,裸地第一波峰在 75~80  $\mu\text{m}$  附近,5%~100%覆盖度在 55~70  $\mu\text{m}$  附近,波峰高度随地表裸露程度增大(覆盖度的降低)而依次

降低,裸地在  $310\text{ }\mu\text{m}$  附近有 1 个微隆的起伏;第 2 个波峰随着盖度的降低均有不同程度的滞后,盖度越小滞后越明显,分别为  $516\text{ }\mu\text{m}$ ,  $666\text{ }\mu\text{m}$ ,  $976\text{ }\mu\text{m}$ ,  $976$

$\mu\text{m}$ ,  $1\text{ }110\text{ }\mu\text{m}$ ,  $1\text{ }260\text{ }\mu\text{m}$ ,  $1\text{ }630\text{ }\mu\text{m}$ ;整体来看 80%, 100% 覆盖度差异相对较小,第 2 个波峰高度较小,随着覆盖度的降低差异逐渐增大。

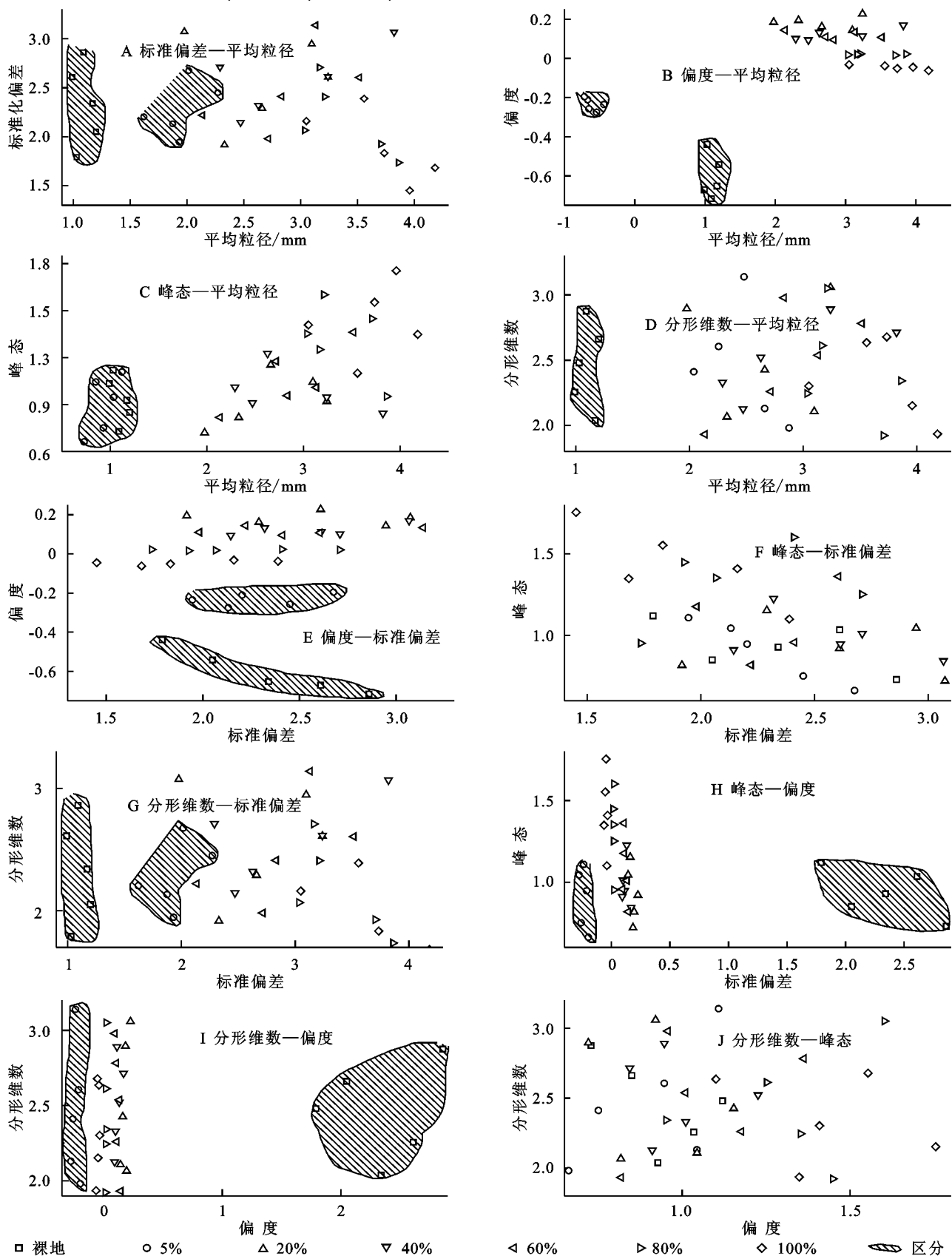


图3 粒度参数散点图

累积频率分布曲线越陡峻,颗粒分布越均匀。由图4B可知,随着盖度的减小,地表土分布均匀程度依次降低,且颗粒组成依次增粗,5%~80%介于裸地和100%之间,且80%与100%,20%~60%变化趋势较接近,5%、裸地之间差异明显。裸地、5%覆盖度表土累积分布曲线开始时变化较缓慢,分别在750  $\mu\text{m}$ 、400  $\mu\text{m}$ 后开始变陡,并迅速升高,说明颗粒多集中在大于750  $\mu\text{m}$ 、

400  $\mu\text{m}$ 范围内,20%~100%迅速升高粒径区段在25~150  $\mu\text{m}$ ;7个覆盖度下土壤粒度累积频率间平均距离(图4B)在粒径为144~869  $\mu\text{m}$ 区间内较大,由此可认为研究区易风蚀颗粒范围为144~869  $\mu\text{m}$ 。结合表3可知,颗粒分选性相对于覆盖度大的样地较好,颗粒均较粗且分选性较好。其分选性与盖度之间的关系也表明,植被覆盖较低的区域由于缺乏植被的庇护,风蚀较严重。

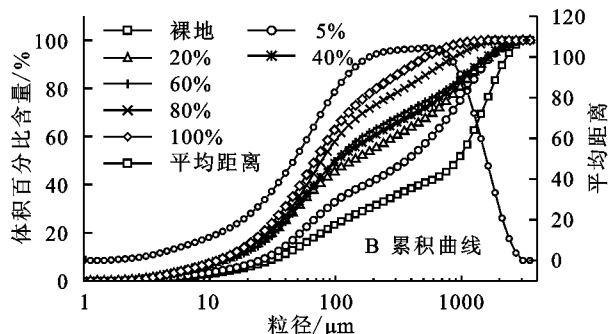
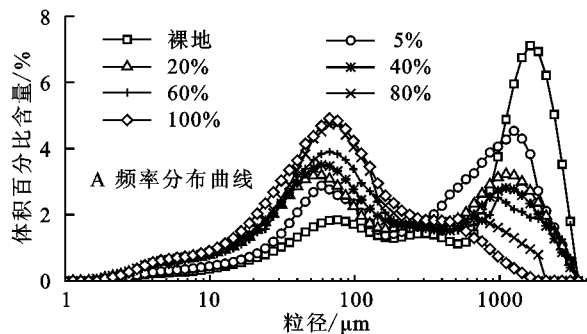


图4 土壤颗粒粒径频率分布曲线和累积曲线

### 3 讨论

荒漠草原在退化的过程中,草原植被覆盖变化可在一定程度上反映其退化状况与过程<sup>[10-12]</sup>。在本研究中随着盖度的降低,极细砂、细砂物质含量显著下降,粗砂、极粗砂含量显著增加,地表的粗粒化程度明显加大。在中盖度及高盖度覆盖区域,由于退化群落中建群种、优势种随着盖度的增加得以优先恢复,土壤结构得到明显优化。低覆盖区域草地缺少植物保护,以及裸地无植被保护,使得土壤中的细砂、粗砂等颗粒的含量与植被盖度之间的关系更密切。植被盖度由裸地增加到5%时,颗粒集中粒径由750  $\mu\text{m}$ 降到400  $\mu\text{m}$ ,20%到100%时则有150  $\mu\text{m}$ 减小到25  $\mu\text{m}$ ,植被覆盖对颗粒影响较大,且盖度越大,颗粒组成向细粒物质集中。有学者研究表明植被覆盖度越高风蚀越小,土壤风蚀率与植被盖度呈负指数关系<sup>[22-23]</sup>,且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<sup>[24]</sup>;Wolfe等研究认为植被覆盖能提高地表气-固界面空气动力学粗糙度、提高摩阻速度、分解风力以及阻挡输沙<sup>[25-28]</sup>;增加土壤抗蚀力,对地表土壤形成保护,减少风蚀<sup>[29-30]</sup>,使得地表细粒物质增多,盖度越大细粒物质越多。

随着分形学、数学的发展,分形理论被认定为定量描述机械组成的新方法,武生智研究表明:沙丘的沙粒级配粒径分布的分形维数为2.43~2.69,土壤中可蚀性颗粒越多,沙粒表面粗糙度越大,分形维数越大<sup>[31]</sup>。本文的研究结果为表层土壤分形维数随着盖度降低(退化程度增加),呈现先增加后减小的趋

势,20%~40%盖度时的分形维数较大。可能原因是20%~40%盖度是高盖度到低盖度变化的过渡区域,土壤的分选性最差,变化最为复杂。40%盖度时产生拐点,可在一定程度上认为此盖度约为研究区的有效防风最小盖度,与孙悦超<sup>[32]</sup>利用移动风洞测定阴山北麓草地有效防风蚀的最低盖度约50%相接近。

Skidmore等<sup>[33]</sup>认为,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;董治宝<sup>[34]</sup>通过风洞模拟试验发现,粒径0.4~0.075 mm为易蚀颗粒,0.09 mm者最易被风蚀;史培军<sup>[35]</sup>研究表明,粒径为0.08~0.25 mm的土壤颗粒最易遭受风蚀;刘大有研究表明风蚀颗粒运动以跃移为主,100~150  $\mu\text{m}$ 区间的颗粒是最易发生跃移的粒径范围<sup>[36]</sup>,李晓丽研究得到阴山北麓耕地在75~200  $\mu\text{m}$ 和250~425  $\mu\text{m}$ 区间为跃移主要发生范围<sup>[37]</sup>,而本研究得出跃移颗粒分布范围较大且较粗,这可能是本研究选的盖度梯度由裸地增加到100%,其梯度跨度较大,对风蚀颗粒的影响作用存在很大的差异;研究区处在荒漠草原区,多年平均>6 m/s的起沙风可达到56.8次/a,且整体土壤粒径较粗,刘大有、李晓丽等人研究的粒度组成较细的风沙土、农耕地,风蚀颗粒可能亦相对偏大<sup>[36-37]</sup>。

### 4 结论

(1) 随着盖度的降低,羊草、针茅等为主的植被类型演变为冷蒿为主的植被类型,高度、株密度、地上生物量依次降低;物种数在盖度80%时达到最大。

(2) 土壤粒度组成均表现为以沙粒和粉粒为主,黏粒含量较低;盖度降低,平均粒径增大,分选性越好,频率曲线由近于对称—正偏—极负偏转变,峰态

由尖锐变平缓,分形维数先增加后降低,20%~40%盖度时较大。偏度可作为不同覆盖度下表土粒径的有效粒度参数指标。

(3) 粒径分布基本呈双峰分布,植被盖度与第二波峰滞后性基本呈反比现象,且分布均匀程度越低,颗粒组成集中粒径越粗,易风蚀颗粒范围为144~869  $\mu\text{m}$ 。

#### 参考文献:

- [1] 内蒙古自治区构筑北方重要生态安全屏障规划纲要(2013—2020年)[Z]. [http://www.nmglyt.gov.cn/xxgk/gghj/jcgh/201508/t20150803\\_95411.html](http://www.nmglyt.gov.cn/xxgk/gghj/jcgh/201508/t20150803_95411.html).
- [2] 吴永胜,马万里,李浩,等. 内蒙古退化荒漠草原土壤细菌群落结构特征[J]. 生态学报,2010,30(23):6355-6362.
- [3] 吕桂芬,吴永胜,李浩,等. 荒漠草原不同退化阶段土壤微生物、土壤养分及酶活性的研究[J]. 中国沙漠,2010,30(1):104-109.
- [4] 闫玉春,唐海萍,张新时,等. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J]. 中国沙漠,2010,30(6):1263-1268.
- [5] 许中旗,李文华,闵庆文,等. 典型草原抗风蚀能力的试验研究[J]. 环境科学,2005,26(5):164-168.
- [6] 周华坤,赵新全,温军,等. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征[J]. 草业学报,2012,21(5):1-11.
- [7] 杜子涛,占玉林,王长耀. 基于NDVI序列影像的植被覆盖变化研究[J]. 遥感技术与应用,2008,23(1):47-50.
- [8] 崔向新. 希拉穆仁草原退化特征及其受损恢复机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [9] 吴波,苏志珠,杨晓晖,等. 荒漠化监测与评价指标体系框架[J]. 林业科学研究,2005,18(4):490-496.
- [10] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: Initiation of soil movement by wind I. soil structure[J]. Soil Science, 1952,75:473-483.
- [11] 贾晓红,李新荣,李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究,2007,26(3):518-525.
- [12] 包月梅,孙紫英,赵鹏武,等. 基于遥感数据的根河市火烧迹地植被覆盖度时空分析[J]. 东北林业大学学报,2015,43(11):62-69.
- [13] 李兰花. 希拉穆仁草原的退化机理及现状评价研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.
- [14] 谢贤健,韦方强. 泥石流频发区不同盖度草地土壤颗粒的分形特征[J]. 水土保持学报,2011,25(4):202-206.
- [15] 高永,虞毅,汪季,等. 一种可以分层采取土壤样品的取土器[P]. 呼和浩特:CN201926567U,2011-08-10.
- [16] 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.
- [17] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar; a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957,27(1):3-26.
- [18] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京:中国林业出版社,2010.
- [19] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京:地质出版社,1978.
- [20] 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.
- [21] Hupy J P. Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate [J]. Journal of Arid Environments, 2004,58(2):167-179.
- [22] 刘玉璋,董光荣,李长治. 影响土壤风蚀主要因素的风洞试验研究[J]. 中国沙漠,1992,12(4):41-49.
- [23] 海春兴,赵烨,马礼. 中国北方农牧交错区夏季土壤风蚀研究[J]. 干旱区资源与环境,2002,16(2):6-8.
- [24] 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.
- [25] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion [J]. Progress in Physical Geography, 1993,17(1):50-68.
- [26] Hupy J P. Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate [J]. Journal of Arid Environments, 2004,58(2):167-179.
- [27] Liu M X, Wang J A, Yan P, et al. Wind tunnel simulation of ridge-tillage effects on soil erosion from cropland[J]. Soil and Tillage Research, 2006,90(2):242-249.
- [28] 冯晓静,高焕文,王丽洁,等. 北京周边典型农田风蚀风洞试验与防治分析[J]. 农业机械学报,2008,39(7):64-67.
- [29] Siddoway F H, Chepil W S, Armbrust D V. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control[J]. Transactions of the ASAE, 1965,8:327-331.
- [30] Higgitt D. Soil erosion and soil problems[J]. Progress in Physical Geography, 1993,17:461-472.
- [31] 武生智,马崇武,苗天德. 沙粒级配和沙丘分布的分形分析[J]. 中国沙漠,1999,19(3):247-250.
- [32] 孙悦超,陈智,赵永来,等. 阴山北麓农牧交错区草地土壤风蚀测试[J]. 农业机械学报,2013,44(66):143-147.
- [33] Skidmore E L, Powers D H. Dry soil-aggregate stability: Energy-based index [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982,46:1274-1279.
- [34] 董治宝,李振山. 风成沙粒度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.
- [35] 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.
- [36] 刘大有,董飞,贺大良. 风沙二相流运动特点的分析[J]. 地理学报,1996,51(5):434-444.
- [37] 李晓丽,申向东. 裸露耕地土壤风蚀跃移颗粒分布特征的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(5):74-78.