# 荒漠草原风蚀地表颗粒空间异质特征

丁延龙[1], 蒙仲举[1], 高 永[1], 娜仁格日勒[2], 黄 昕[1], 刘 斌[1]

(1. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;
2. 锡林郭勒盟镶黄旗国营苗圃, 内蒙古 锡林郭勒 013250)

**摘 要**: [目的] 研究希拉穆仁荒漠草原地区风蚀地表颗粒的空间异质特征,对研判风蚀地表退化程度,进而合理保护与利用该区草地资源提供支持。[方法] 利用数字图像处理技术,获取了希拉穆仁荒漠草原坡面表层土壤颗粒组成信息,结合经典统计学和地统计方法,研究易风蚀颗粒(<0.42 mm)、中等颗粒(0.42~0.84 mm)、不易风蚀颗粒(>0.84 mm)的空间分布格局。[结果] 荒漠草原地表颗粒含量组成表现为:不易风蚀颗粒>中等颗粒>易风蚀颗粒;颗粒变异系数变化范围为 11.23%~38.17%,属中等程度变异。3 种颗粒最优半方差函数模型分别为指数、球状、球状模型; Kriging 插值结果显示坡顶土壤颗粒组成最粗,自坡顶向下表现出变细的趋势;南坡与西南坡土壤粗化最严重,粗化程度由重到轻依次为:南(S)>西南(SW)>西北(NW)>西(W)>东南(SE)>北(N)>东北(NE)>东(E)。[结论] 研究区土壤颗粒具有强烈的空间自相关性,土壤颗粒组成空间变异性主要由结构性因素引起,人为干扰也产生了一定影响。

**关键词**: 数字图像处理; 土壤颗粒组成; 空间异质性; 荒漠草原

**文献标识码**: A **文章编号**: 1000-288X(2016)02-0059-06 **中图分类号**: P931.3

**文献参数**: 丁延龙, 蒙仲举, 高永, 等. 荒漠草原风蚀地表颗粒空间异质特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 59-64. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.012

# Heterogeneity of Soil Particles in Wind Erosion Surface of Desert Steppe

DING Yanlong[1], MENG Zhongju[1], GAO Yong[1], Narengerile[2], HUANG Xin[1], LIU Bin[1]

(1. *College of Ecological and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2. *Xianghua Banner Nursery Garden of Xilingol League, Xilingol, Inner Mongolia* 013250, *China*)

**Abstract**: [Objective] The spatial heterogeneity of wind-eroded surface particles in Xilamuren desert steppe area was studied to estimate the surface-erosion-caused degradation in order to guide the protection and utilization of grassland resources in this area. [Methods] Digital image processing technique was used to obtain the composition information of soil particles in a desert steppe slope. The spatial heterogeneity of three particles as highly erodible particles(<0.42 mm), semi-erodible particles(0.42~0.84 mm), and non-erodible particles(>0.84 mm) was analyzed with classical statistical and geostatistical methods. [Results] The results showed the percentage rank of the three kinds of soil particle was non-erodible particles>semi-erodible particles>highly erodible particles. The coefficients of the variation ranged from 11.23% to 38.17%, indicating that soil particles had a moderate degree of variability. The optimal semivariance models were exponential, spherical and spherical models respectively. The results of Kriging demonstrated that the most soil particle on the top of slope was coarse, and displayed an decreasing tread from the top to the bottom in the slope profile. The most severity of soil coarsening was found at the south and southwest of the slope, the rank of coarse degree was as follows: South > Southwest > Northwest > West > Southeast > North > Northeast > East. The results can provide reference to grassland desertification control in the future. [Objictive] Geostatistical analysis displayed strong spatial correlation, indicating that the spatial variability of soil particles was mainly caused by structural factors. Human activities also has its effect on it.

**Keywords**: **digital image processing ; soil particles composition; spatial heterogeneity; desert steppe**

**收稿日期**: 2015-04-02 **修回日期**: 2015-05-29

**资助项目**: 中国科学院西部之光项目"内蒙古中西部荒漠草原地表粗粒化过程研究"; 内蒙古农业大学优秀青年科学基金(2014XYQ-8)

**第一作者**: 丁延龙(1990—),男(汉族),安徽省亳州市人,硕士研究生,研究方向为荒漠化防治研究。E-mail: dingyanlong1990@126.com。

**通信作者**: 蒙仲举(1980—),男(汉族),内蒙古自治区呼和浩特市人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: mengzhongju@126.com。

土壤风蚀与地表粒度组成密切相关,土壤颗粒大小分布(soil particle size distribution, PSD)决定起动风速及其运动形式,最终影响风蚀强度[1-2]。土壤作为时空连续的变异体,具有高度的空间异质性[3],这一特性在荒漠灌丛和草原生态系统尤为典型[4]。地统计学作为一种研究土壤性质空间分布特征及其变异规律的有效方法,能够指示和表征不同生态过程持续的强度和扩展范围[5]。马风云等[6]采用地统计学的有关方法和理论,对沙坡头人工固沙植被土壤物理因子的空间异质性进行了研究;王利兵等[7]通过研究浑善达克沙地粒径变异性发现随机因素引起粉沙空间异质性;张保华等[8]对丘陵区各地形部位的土壤颗粒组成特征,发现明显地随高度降低粗粒物质减少、细粒物质增加的趋势。马黎春[9]对克拉玛依干旱生态农业区不同层次的土壤质地进行半方差分析,得出土壤颗粒的分布与研究区地质地貌的分布特点相一致;徐冰等[10]提出以土壤颗粒分形维数的空间变异性表示土壤质地的分布,可有效减少样品取样;王淮亮等[11]对戈壁灌丛堆周边地表土壤颗粒的空间异质特征研究发现:不同灌丛、不同粒径颗粒百分含量的空间异质性尺度不同。随着风沙地貌及地表风蚀过程研究的深入,遥感与数字图像技术被广泛应用到环境科学领域,关于环境因子、种群格局的定量化研究也取得了一些阶段性成果[12-14],但目前大多针对中、大尺度空间范围的地貌进行研究,而对于地表过程,尤其是风蚀地表的小尺度特征涉及较少。

位于内蒙古地区的希拉穆仁荒漠草原,生境恶劣,土壤风蚀严重,地表粗粒化明显,是京津沙尘天气的风沙源地之一[15-16]。土壤粗化是草场退化、沙化的主要表现形式之一[17-18]。本研究基于前期数字图像采集地表颗粒过程的基础上[19-20],以非接触不破坏地表的方式获取退化草原风蚀地表不可蚀颗粒含量,结合经典统计和地统计分析的方法,对退化草原侵蚀坡面风蚀地表进行分析,试图通过对土壤粗粒化空间模式(spatial pattern)的识别和描述,对引起空间模式的土壤风蚀空间过程(spatial process)予以分析解释,为科学评价草原风蚀荒漠化程度、准确预测潜在风蚀能力提供理论依据,丰富和完善土壤风蚀理论与技术体系。

# 1 研究区概况

研究区位于希拉穆仁荒漠草原,地理坐标位于41°12′—41°31′,111°00— 111°20′E。地势低缓起伏。长期的风蚀作用使其地貌多呈现浑圆丘陵波状,平均海拔1 600 m。属半干旱荒漠草原,年平均降水量为284 mm,潜在蒸发量高达2305 mm,降雨主要集中在7—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,其次为西风,>6 m/s的起沙风多年平均为59.5次/a,以西北风、北风最多[21];春秋季干旱多风,夏季雨量较充沛,冬季寒冷干燥。高处坡地土壤质地粗糙,含沙量大,易遭受风蚀。植被群落结构简单,以克氏针茅(*Stipa Krylovii*)+羊草(*Leymus chinense*)+冷蒿(*Artemisia frigida*)为主,植被盖度30%~50%,冬春季节地表裸露明显。

# 2 研究方法

## 2.1 地表颗粒采集

2.1.1 *样点布设* 试验于2014年的4月上旬进行,此时植被尚未返青,便于图像采集。采样地位于水利部水土保持试验中心围栏外东北方向一处天然坡面,平均坡度3.5%。坡面南部靠近一处旅游点,仅夏季旅游旺季存在一定人为扰动,其余时间基本无人为干扰。以坡顶为中心,分别在北(N)、西北(NW)、西(W)、西南(SW)、南(S)、东南(SE)、东(E)、东北(NE)8个方向布设样线,从坡顶向下沿样线间隔15 m布设样点,样点为1 m×1 m正方形网格,分别在网格对角线两端及中间选择3个拍摄区域,拍摄区域20 cm×30 cm。由于坡面不完全对称,各条样线取样点数目有所不同,但均从坡顶延伸至坡底,总计采样点88个,拍摄区域264个,基本覆盖整个坡面。

2.1.2 *数字图像采集* 在拍摄区域上平放标尺框,使用镊子小心清除框内地表上的杂物,使地表完全露出,此过程应保证地表不被扰动。考虑到太阳高度角的影响,用自制黑色遮光布遮挡使拍摄样方全部位于阴影中,保证整个样方内光照均匀;将定制好的矩形标尺框置于样点,框尺控制范围30 cm×20 cm,采用Canon Eos5 D-Mark Ⅱ数码相机架设三脚架进行拍摄,相机镜头垂直地面,距离地表74 cm,此时镜头视野刚好与框尺重合,每样地连续重复拍摄5张并编号备用。后期利用ERDAS Imagine 9.2软件,对图像进行分类、矢量化,获取颗粒对应的面积信息数据。

## 2.2 数字图像信息提取及数据处理

数字图像采集完成后采用ERDAS Image 9.2软件经过图像格式转换、分类、矢量化等过程获取每个颗粒的面积信息数据。Chepil[1]根据土壤的抗风蚀特性将土壤粒度分成3部分:>0.84 mm的为粗颗粒,不易被风蚀;0.84~0.42 mm的为中等颗粒,可被风蚀;<0.42 mm的为细颗粒,易风蚀。此次研究借助此标准进行粒度划分。试验中采用等效直径来

代表土壤颗粒粒径,不同等效直径大小的颗粒在数字图像上显示为不同数目的像元数。等效直径可通过公式(1)和表 1 进行计算得出[11]。

**表 1　土壤颗粒转换比例**

| 颗粒直径/mm | 颗粒面积/mm² | 单个像元尺寸(mm²/pixel) | 像元数/个 |
|---|---|---|---|
| <0.42 | <0.138 5 | | ≤40 |
| 0.42～0.84 | 0.138 5～0.553 9 | 0.00345 | 40～160 |
| >0.84 | >0.553 9 | | ≥160 |

$$D=2\times(S/\pi)^{1/2} \tag{1}$$

式中:$D$——图像中单个土壤颗粒的等效直径;$S$——图像中单个土壤颗粒的面积。

不同粒径的土壤颗粒其百分含量计算采用公式(2):

$$d(x)=\sum\frac{d(x)\text{占像元总数}}{\text{图像像元总数}}\times 100\% \tag{2}$$

式中:$d(x)$——某种粒径土壤颗粒在图像中的像元总数。

本研究前期[19]通过分析由数字图像处理技术和筛分法得到的地表颗粒信息,发现两种方法获取的 3 种径级颗粒百分含量之间存在较高的相关性,数字图像处理技术满足提取风蚀地表土壤颗粒信息的要求。数字图像处理技术提取得到相应粒级颗粒含量后,采用SPSS 17.0 软件进行描述性统计分析;使用GS+7.0软件进行半方差函数拟合,Surfer 8.0 软件进行 Kriging 插值并绘制地表土壤粒度组成空间分布格局图,Origin 8.0 绘制坡面不同方向地表颗粒百分含量图。

## 3　结果与分析

### 3.1　土壤颗粒百分含量的描述性统计特征

变异系数($C_v$)揭示了随机变量的离散程度,即土壤颗粒分布空间变异程度的大小。一般定义 $C_v<10\%$为弱变异性,$10\%<C_v<100\%$表示中等变异性,$C_v>100\%$为强变异性[22],对 3 种粒径颗粒百分含量均值进行了经典统计学分析(表 2)。由表 2 可以看出,长期的风蚀作用,坡面地表粗粒化严重,<0.42 mm 的细颗粒平均含量仅为 6.76%,>0.84 mm 的粗颗粒含量高达 75.97%。3 种颗粒的变异程度均表现为中等变异,在 5%的置信水平下,K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验结果显示 3 种径级颗粒百分含量均服从正态分布,为下一步半方差函数的计算排除了可能存在的比例效应[23]。

**表 2　颗粒的描述性统计**

| 颗粒直径/mm | 平均值/% | 最大值/% | 最小值/% | 标准差/% | 变异系数/% | 偏度 | 峰度 | $P_{K\text{-}S}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <0.42 | 6.76 | 13.47 | 1.93 | 2.58 | 38.17 | 0.134 | 0.457 | 0.624 |
| 0.42～0.84 | 17.27 | 32.27 | 3.44 | 6.09 | 35.26 | 0.262 | 0.276 | 0.313 |
| >0.84 | 75.97 | 94.63 | 55.13 | 8.53 | 11.23 | 0.176 | 0.329 | 0.72 |

### 3.2　土壤颗粒百分含量的空间变异特征

由表 3 可知,3 种颗粒半方差函数拟合结果显示决定系数 $R^2$ 均大于 0.8,3 种颗粒在该研究区域均存在较好的半方差结构,拟合结果具有较高的可靠性。<0.42 mm 的细颗粒的最优拟合模型为指数模型,0.42～0.84 mm 的中等颗粒和>0.84 mm 的粗颗粒的最优模型均为球状模型。块金值($C_o$)反映了随机部分引起的变异,即因为试验误差、采样尺度和系统属性本身变异特征等而引起的空间异质性;基台值($C_o+C$)指系统空间内总变异。块金值与基台值的比值$[C_o/(C_o+C)]$,又称块金效应,表示随机部分引起的空间变异程度占系统总空间变异程度的比例,当块金效应<25%时,系统具有强烈的空间自相关性;块金效应在 25%～5%之间时,系统具有中等强度空间自相关性;块金效应>75%时,系统表现出弱空间自相关性[24]。

3 种径级颗粒的块金效应均不超过 25%,表现出强烈的空间自相关性,说明 3 种颗粒的空间变异主要由结构性因素(气候、地形、母质等非人为因素)作用引起的,而随机性因素影响较小。

**表 3　3 种颗粒的半方差函数理论模型及相关参数**

| 颗粒直径/mm | 最优模型 $r(h)$ | 块金值 $C_o$ | 基台值 $(C_o+C)$ | 块金值/基台值 $[C_o/(C_o+C)]$/% | 变程 $A$/m | 决定系数 $R^2$ | 残差 RSS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <0.42 | 指数模型 | $6.0\times10^{-5}$ | $7.0\times10^{-4}$ | 8.571 | 70.2 | 0.908 | $1.399\times10^{-8}$ |
| 0.42～0.84 | 球状模型 | $7.0\times10^{-4}$ | 0.003 9 | 17.949 | 72.6 | 0.800 | $1.562\times10^{-6}$ |
| >0.84 | 球状模型 | 0.001 9 | 0.007 9 | 24.051 | 77.8 | 0.824 | $4.871\times10^{-6}$ |

### 3.3 土壤颗粒空间分布格局

3.3.1 坡面不同部位土壤颗粒空间分布 结合变异函数模型及趋势效应参数,利用 Surfer 8.0 软件进行空间插值分析,绘制地表颗粒空间分布格局图(图1),图中颜色越浅代表对应位置颗粒含量越多,反之颗粒含量越少。

从3种颗粒空间分布格局图来看,<0.42 mm的细颗粒和0.42~0.84 mm的中等颗粒在坡顶含量较低,从坡顶向下,含量增加。而>0.84 mm的粗颗粒空间分布与之相反,表现出坡顶含量高,自坡顶向下含量减少的趋势。同时3种颗粒的空间分布表现出较好互补性。分布图的中间部分,即坡顶部位闭合等值线分布较密,图的四周,即坡面的下方,闭合等值线变得较为稀疏。这说明坡顶颗粒组成随位置移动变化较快,而坡面下方颗粒组成变化较为缓慢,显示此处颗粒组成比较稳定。

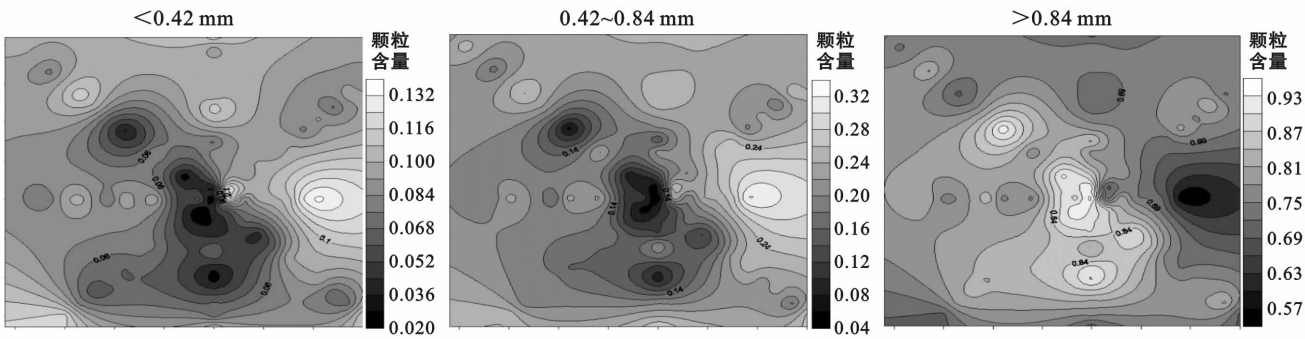



图1 土壤颗粒的空间分布格局

3.3.2 不同坡向土壤颗粒空间分布 各级粒径颗粒大致符合以西北—东南为对称线的空间分布状态,对称线下方,即西南方向,此部分<0.42 mm的细颗粒和0.42~0.84 mm的中等颗粒含量较低,而>0.84 mm的粗颗粒含量较高。对称线上方,即东北方向表现与之相反,为粗颗粒含量低,细颗粒和中等颗粒含量高。结合对坡面上8个方向的共计88个样点3种径级颗粒含量平均值的结果(图2),由图2可以看出,南坡>0.84 mm的粗颗粒平均含量最高,<0.42 mm的细颗粒平均含量最低,故该坡向颗粒组成最粗,其次是西南坡,西北坡颗粒组成稍细,但粗颗粒平均含量仍超过了75%。东坡颗粒组成最细,该方向<0.42 mm的细颗粒平均含量最高,而>0.84 mm的粗颗粒平均含量最低。整体来看,坡面上各方向颗粒组成规律从粗到细为:南(S)、西南(SW)、西北(NW)、西(W)、东南(SE)、北(N)、东北(NE)、东(E)。

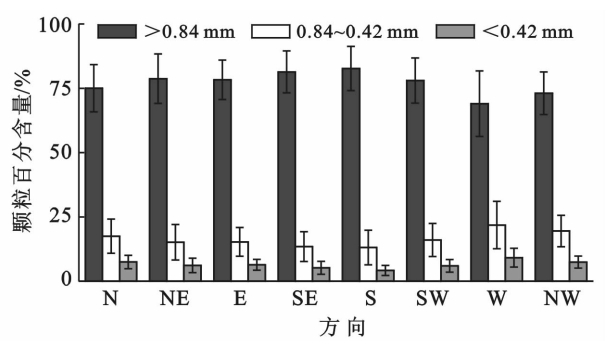



图2 坡面不同方向地表颗粒百分含量

## 4 结果讨论

就变异系数而言,研究区3种径级土壤颗粒分布属于中等程度变异,且变异系数均为较低水平,主要由空间自相关的结构性因素引起。土壤分布的空间异质性是由结构性因素和随机性因素联合作用的结果。研究区坡面表层各径级土壤颗粒块金值介于$6.0\times10^{-5}$~$1.9\times10^{-3}$之间,块金值均很小,表明采样误差和随机因素虽会引起变异,但误差很小,说明本试验能够说明土壤颗粒的空间分布情况[24]。同时3种径级颗粒的块金效应也较小,最高仅为24.051%,均表现为强烈的空间自相关性,这说明研究区土壤颗粒的空间变异由结构性因素引起,而随机性因素影响较小。希拉穆仁草原从2008年开始大规模的禁牧,羊群由过去的自由放牧改为舍饲圈养,牲畜数量的下降减少了的对草原的干预,牛羊的踩踏与觅食对土壤颗粒的空间变异影响很小,草原退化程度有所减轻[25]。采样尺度的不同会对变量空间变异性质产生一定的影响,冯娜娜等[26]对不同尺度下土壤颗粒组成的研究结果显示,较小尺度下的采样可以反映样地微地形与植被对土壤颗粒空间分布的影响。而本次研究通过微尺度范围内的采样(375 m×360 m),亦能够揭示坡面上土壤颗粒的空间变异细节。Kriging插值结果显示在整个坡面上,土壤粒度组成自坡顶向坡底有变细的趋势,说明坡顶常年遭受侵蚀,导致细颗粒被搬运的结果。空间格局图可以直观地了解土壤颗粒

的空间分布特征,土壤颗粒分布呈现条带状、斑块状等。坡顶表现出斑块状,坡面的中下部表现出条带状,但部分位置存在斑块状,这可能是由于坡顶土壤侵蚀强烈,存在较多的基岩出露,土壤颗粒分布的均一性破坏严重所致[27]。向下土壤颗粒分布的连续性较好,在坡底尤为明显,因为随着高度降低,土壤侵蚀的程度也随之减弱,上部的细颗粒逐步被风、水等外营力搬运到坡面下部,使得下部土壤层较厚,颗粒较细。这为植物生长提供了良好的养分和水分条件,同时植物具有很好的固土作用,可有效地防止细颗粒的流失,为更多细颗粒的聚集提供了条件[28]。在不同的方向上,土壤细颗粒最少的坡向为南坡和西南坡,这两个方向土壤被侵蚀最严重,而此处主风向为北风和西北风,这与前人研究的结果有所差异[29],希拉穆仁草原降水量仅为 284 mm,潜在蒸发量为 2 305 mm,干燥度高达 8.12,坡向对植被生长有较大的影响,南坡、西南坡由于所受太阳辐射量大,土温较高,土壤水分蒸发量大,水分条件差,不利于植被生长,从而导致地表颗粒组成较粗。尽管位于主风向的北坡和西北坡受风力吹蚀强度较大,但由于接受的太阳辐射相对较少,土壤水分条件稍好,从而有利于植被的生长[30],植被的作用减少了土壤侵蚀量,致使这两个方向土壤具有相对较强的抗蚀能力,细颗粒损失较少。在实地的调查中也发现相应的规律,即南坡、西南坡植被较稀疏低矮,而其余坡向植被分布较好[25]。另外由于当地近年来大力发展旅游业,游客增多会对原有的地表土壤造成一定扰动,南、西南这两个方向距离旅游点较近,游客的踩踏加重了南坡与西南坡的粗化程度,但就研究区内其他方向而言,尚未破坏原有的空间格局。因此在今后的草原荒漠化防治工作中,应结合坡面不同部位的退化情况,因地制宜,合理划分利用范围,实现精准牧业,为草地资源的可持续利用奠定基础。

本研究采用的数字图像技术,具有取样快速、不破坏原状地表的特点,其平均信息提取率达到 95.8%[11],可以较好地满足表征荒漠草原地区的地表粗粒化情况。但由于取样采用的相机分辨率有限,单个像元覆盖到的地表面积为 0.003 45 $mm^2$,相对应的颗粒直径约为 33.15 $\mu m$,因此针对坡底植被条件较好或者灌丛分布的地段,由植物拦截而在其下方积聚的黏粒难以捕捉,故在今后的研究中,应对设备进行改进,以实现更高的信息提取率。

## 5　结 论

(1) 希拉穆仁草原坡面地表土壤中>0.84 mm 的粗颗粒含量最多,0.42～0.84 mm 的中等颗粒次之,<0.42 mm 的细颗粒含量最少;3 种径级颗粒变异系数变化范围为 11.23%～38.17%,均属于中等程度变异。

(2) 小于 0.42 mm 的细颗粒、0.42～0.84 mm 的中等颗粒和>0.84 mm 的粗颗粒的的最优拟合模型分别为指数模型、球状模型、球状模型;3 种径级颗粒块金效应介于 8.571%～24.051%之间,研究区土壤颗粒具有强烈的空间自相关性,空间变异性主要由结构性因素引起。

(3) 坡顶土壤粒度组成最粗,退化最严重。自坡顶向下表现出变细的趋势;太阳辐射和人为干扰的双重作用导致南坡与西南坡土壤粗化最严重,粗化程度由重到轻依次为:南(S)>西南(SW)>西北(NW)>西(W)>东南(SE)>北(N)>东北 NE)>东(E)。

**致谢**　感谢水利部牧科所的工作人员以及内蒙古农业大学党晓宏、吴昊、王猛、贾旭、甄静平同学在野外采样过程中给予的帮助,同时感谢西北农林科技大学的安正锋同学在英文翻译方面的大力指导。

[ 参 考 文 献 ]

[1] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind(Ⅱ): Water-stable structure [J]. Soil Science,1953,76(5):389-400.

[2] 高君亮.风蚀地表土壤颗粒的图像表征及空间变异特征研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.

[3] 张泽,吕新,吕宁,等.基于 GIS,RS 的滴灌棉田土壤养分精确管理分区研究[J].农业机械学报,2014, 45(7):125-132.

[4] 王萍,王燕.民勤荒漠—绿洲过渡带不同下垫面条件的土壤风蚀特征[J].农业工程学报,2012,28(11):138-145.

[5] 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.

[6] 马风云,李新荣,张景光,等.沙坡头固沙植被若干土壤物理因子的空间异质性研究[J].中国沙漠,2005,25(2):65-73.

[7] 王利兵,胡小龙,余伟莅,等.沙粒粒径组成的空间异质性及其与灌丛大小和土壤风蚀相关性分析[J].干旱区地理,2006,29(5):688-693.

[8] 张保华,何毓蓉,徐佩,等.紫色丘陵区小流域侵蚀沉积断面构型及土壤颗粒分形特征[J].水土保持学报,2004,18(6):136-139.

[9] 马黎春,盛建东,蒋平安,等.克拉玛依干旱生态农业区土壤质地的空间异质性研究[J].干旱区地理,2006,29(1):109-114.

[10] 徐冰,陈亚新,郭克贞.半干旱草地土壤粒径分形维数

及空间变异特征[J]. 水利学报,2007,38(S1):691-695.
[11] 王淮亮,高君亮,原伟杰,等. 戈壁灌丛堆周边地表土壤颗粒的空间异质特征[J]. 植物生态学报,2013,37(5):464-473.
[12] Wu Zhijun, Huang Zhen, Hao Lijun. An image-shifting technique based on grey-scale classification for particle image velocimetry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002,38(06):567-575.
[13] Grasa G, Abanades J C. A calibration procedure to obtain solid concentrations from digital images of bulk powders [J]. Powder Technology, 2001,114(1):125-128.
[14] 朱元骏,邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2008,38(3):375-383.
[15] 赵羽,金争平等. 内蒙古土壤侵蚀研究[M]. 北京:科学出版社,1989.
[16] 张志刚,高庆先,矫梅燕,等. 影响北京地区沙尘天气的源地和传输路径分析[J]. 环境科学研究,2007,20(4):21-27.
[17] 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.
[18] 赵哈林,周瑞莲,苏永中,等. 我国北方半干旱地区土壤的沙漠化演变过程与机制[J]. 水土保持学报,2007,21(3):1-5.
[19] 高君亮,高永,虞毅,等. 基于数字图像处理技术的风蚀地表颗粒提取[J]. 水土保持通报,2011,31(6):139-142.
[20] 王鹿振,虞毅,高永,等. 用于沙粒粒级信息提取的数值影像采集条件研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2009,30(4):92-98.
[21] 张瑞强,高天明,郭建英. 内蒙古希拉穆仁草原风蚀水平观测研究[J]. 水土保持通报,2014,34(1):178-181.
[22] Goovaerts P. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science[J]. Geoderma, 2001,103(1):3-26.
[23] 李哈滨,王政权,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报,1998,9(6):93-99.
[24] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999:71-99.
[25] 李兰花. 希拉穆仁草原的退化机理及现状评价研究[D]. 内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.
[26] 冯娜娜,李廷轩,张锡洲,等. 不同尺度下低山茶园土壤颗粒组成空间变异性特征[J]. 水土保持学报,2006,20(3):123-128.
[27] 蒙仲举. 荒漠草原坡面侵蚀分异规律及防控措施研究[D]. 内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
[28] 曾辰. 水蚀风蚀交错带不同植被覆盖条件坡面土壤水分循环的试验研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2006.
[29] 李裕元,邵明安,陈洪松,等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 生态学报,2010,30(16):4306-4316.
[30] 陈浩,方海燕,蔡强国,等. 黄土丘陵沟壑区沟谷侵蚀演化的坡向差异:以晋西王家沟小流域为例[J]. 资源科学,2006,28(5):176-184.

(上接第58页)

[5] 徐红灯,席北斗,翟丽华. 沟渠沉积物对农田排水中氨氮的截留效应研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(5):1924-1928.
[6] 罗专溪,朱波,唐家良,等. 自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷污染的主要作用机制[J]. 环境科学学报,2009,29(3):561-568.
[7] 陆宏鑫,吕伟娅,严成银. 生态沟渠植物对农田排水中氮磷的截留和去除效应[J]. 江苏农业学报,2013,29(4):791-795.
[8] 郗敏,吕宪国. 沟渠对湿地生物地球化学循环影响初析:以三江平原湿地为例[J]. 水土保持通报,2006,26(5):43-45.
[9] 奚旦立,孙裕生. 环境监测[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
[10] Colvin T S, Rippke G R. Corn response to late spring nitrogen management in the Walnut Creek Watershed [J]. Agronomy Journal, 2005,97(4):1054-1061.
[11] USEPA. Methods for Chemical Analysis of Water and Waste Water[M]. EPA Environmental Monitoring and Support. Cincinnati, OH, USA, 1979.
[12] 胡宏祥,朱小红,黄界颖,等. 关于沟渠生态拦截氮磷的研究[J]. 水土保持学报, 2010,24(2):141-145.
[13] 余红兵,肖润林,杨知建,等. 灌溉和降雨条件下生态沟渠氮、磷输出特征研究[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(5):686-692.
[14] 余红兵,张树楠,肖润林,等. 沟渠水生植物资源化利用研究[J]. 草业学报, 2013, 22(6):143-149.