

古尔班通古特沙漠南缘土壤风蚀与其抑制因子的空间变异性

哈妮帕·阿布拉别克¹, 苏里坦², 努尔模达·达拉拜³

(1. 新疆维吾尔自治区环境保护技术咨询中心, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要:对面积约 0.15 km² 的古尔班通古特沙漠南缘土壤风蚀强度与其抑制因子进行取样检测, 应用地统计学方法对取得数据进行了半方差函数分析。结果表明: 该研究区土壤风蚀强度与其抑制因子(植被盖度、土壤含水量)的实测数据均服从正态分布, 其中植被盖度变异函数曲线的理论模型符合指数模型, 而土壤含水量和土壤风蚀强度指数变异函数曲线的理论模型符合球状模型。通过对 2009 年 5 月监测资料的分析, 得出试验区植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数在空间上存在显著的变异性, 土壤风蚀强度与其抑制因子之间存在着较强的负相关性, 即土壤风蚀强度指数随着植被盖度和土壤含水量的增大(或减小)有减小(或增大)的趋势, 因此土壤风蚀强度对植被盖度和土壤含水量具有较强的空间依赖性。在风力空间差异不大的小尺度范围内, 干旱区土壤风蚀强度的大小主要取决于植被盖度和土壤含水量的大小。植被盖度与土壤湿度则是抑制土壤风蚀的主要因子, 也是保持古尔班通古特沙漠南缘沙面稳定的主导因子。

关键词:古尔班通古特沙漠南缘; 土壤风蚀强度; 抑制因子; 空间变异

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)04-0024-05

Temporal Variability of Sandy Soil Erosion and Its Inhibiting Factors in the South Kurbantonggut Desert

Hanipa · ABULABIEKE¹, Sulitan², Nuermoda · DALABAI³

(1. Xinjiang Technical Consulting Center of Environmental Protection, Urumqi 830011, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Sampling and testing were conducted on the sandy soil erosion intense and its inhibiting factors in the 3 408 km² of south Kurbantonggut desert, and semi-variograms function analysis was made afterwards on the data obtained by the application of geo-statistics. Results showed the data of the sandy soil erosion intense and its inhibiting factors for actual measurement submitted to the normal distribution. The variance curves of the soil water content and the sandy soil erosion displayed a spherical model, while the curve of the vegetation coverage exhibits an exponential in the area. Analysis of monitoring data from 2009 indicated that the vegetation coverage, soil water contents, and sandy soil erosion varied spatially in this area. The sandy soil erosion intense decreased (or increased) in the spatial scale, while that the vegetation coverage and the soil water contents increased (or decreased), the sandy soil erosion intense highly depended on the vegetation coverage and the soil water contents. Therefore, the vegetation coverage and the soil water contents are the key factors inhibiting sandy soil erosion intense, they are also the critical factors preserving stability of south Kurbantonggut desert.

Key words: South Kurbantonggut Desert; sandy soil erosion intense; inhibiting factors; spatial variation

收稿日期: 2010-04-02

资助项目: 国家自然科学基金(40601019)

作者简介: 哈妮帕(1968—), 女, 哈萨克族, 新疆乌鲁木齐人, 工程师, 主要从事环境保护方面的工作。E-mail: hanipa@126.com

通信作者: 苏里坦(1972—), 男, 新疆霍城县人, 副研究员, 博士, 主要从事水资源方面的研究。E-mail: sulitan@ms.xjb.ac.cn

土壤风蚀是干旱半干旱地区沙面活动与沙尘暴灾害的首要因素,也是干旱半干旱地区农牧业发展的限制因素之一^[1],土壤风蚀造成的荒漠化严重影响了荒漠化地区社会经济的正常持续发展,已成为世界上许多国家关注的生态环境问题。由于土壤风蚀给人类生活带来了灾难性的危害,使世界生态环境遭受严重破坏^[2-3]。在没有受人类活动等人为因素影响的古尔班通古特沙漠南缘沙面主要受风、植被、土壤湿度等自然因素的影响。其中风速是影响土壤风蚀量的主要因子,而土壤含水量与植被盖度则是抑制土壤风蚀的主要因子,也是保持沙面稳定的主要因素。沙面活动与稳定程度的大小直接取决于沙漠土壤表面风蚀强度的高低,而沙面风蚀强度的大小又取决于风速、植被盖度、土壤含水量等主要影响因素的大小与空间分布状况。由于土壤风蚀强度与其影响因子受土壤结构性与随机性因素的影响,具有较强的空间依赖性,即反映对环境资源的利用与适应关系。因此尺度依赖性使得土壤风蚀强度与其影响因子的分布格局表现为空间上的不确定性和复杂性。Kriging 方法称区域化变量线性无偏最优插值方法,是研究土壤空间变异特征的较好方法^[4-6]。本文利用地统计学原理对土壤风蚀强度与其影响因子进行了研究,旨在了解古尔班通古特沙漠南缘土壤风蚀与其抑制因子间的相互作用关系,揭示其空间分布规律,为该区域土壤风蚀治理提供科学的理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2009 年 5 月 22 日实施,试验点设在古尔班通古特沙漠南缘的一条典型的沙垄带,是一个倾向南北走向的半固定线形丘陵。沙垄地理坐标为 $44^{\circ}32'28''\text{N}$, $88^{\circ}06'39''\text{E}$,沙垄相对高程为 26 m 多(图 1),垄顶部为活动性最强的流动带,主要生长着短命植物和长营养期草本植物,春季是它们萌发的好季节,不过其植被盖度不到 5%,随着夏季的到来大部分短命植物开始衰退,土壤平均含水量仅仅为 1.6% 左右,土壤风蚀相对严重的部分;沙垄下坡是生长多种植被的固定沙地,主要生长有白梭梭为主的乔灌木和短命植物,其植被盖度约 30% 左右,土壤平均含水量保持在 4% 以上,沙面风蚀强度相对弱一些;而沙垄东西两坡中部占沙垄表面积的 55% 左右,主要生长着短命植物,也有少量的乔灌木和长营养期草本植物,植被总盖度在 10%~25%,土壤平均含水量为 3%~5%,是从流动沙面到固定沙面的半固定丘坡。

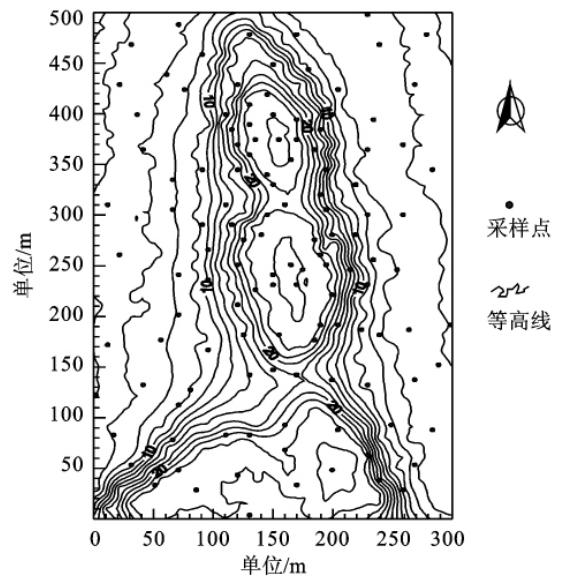


图 1 古尔班通古特沙漠南缘沙垄带样点分布图

1.2 土壤风蚀因素机理分析

抑制古尔班通古特沙漠南缘土壤风蚀的首要因素是植被与土壤湿度,植被一般以阻挡风力对地表土壤物质的直接作用、分散近地表风动量、截留部分被蚀物质等形式发挥着抑制风蚀、保护地表的作用^[7-8]。而导致土壤风蚀的主导因素是风。风蚀是指一定风速的气流作用于土壤或土壤母质,土壤颗粒发生位移造成土壤结构破坏、土壤物质损失的过程,它的实质是气流或气固两相对地物质的吹蚀和磨损过程。但在同等风力吹蚀下,因地表性质不同出现的风蚀量差别很大。原生草地由于有植被盖度的保护作用,表面结构力大,所以风蚀量相对小一些。固定沙地地表结皮厚,且有一定数量植被生长,其抗风蚀能力很强;半固定沙地与固定沙地相比,植被生长少,地表结皮质地较疏松,土壤层的保水能力稍差,沙面的抗风蚀能力较弱;而相比以上两种情形,流动沙地表面裸露,结皮质地疏松,沙面的抗风蚀能力很弱。土壤水分对起动风速影响的物理机制在于通过水分增加沙物质间的粘聚力,最终达到减少起沙数量和强度的目的,因此表层土壤水分是抑制土壤风蚀的主要因素,也是沙面处于相对稳定的重要因素^[9]。

1.3 观测项目及方法

(1) 土壤风蚀强度指数 SWEI。在试验区域内的 125 个点上取样,取样点是随机分布的,从丘陵不同位置 0—5 cm 的土样,运用土壤筛洗(全部土样通过 2 mm 的筛子)和吸管法定了各土样颗粒组成。土壤风蚀强度指数 $\text{SWEI} = \text{粗砂含量}(0.25 \sim 2 \text{ mm}) / \text{风蚀粒子含量}(0.01 \sim 0.1 \text{ mm})$,SWEI 物理意义是定量反映在风蚀过程中表土物质的损失程度,SWEI 值可定量反映土壤风蚀的空间分异规律,该值约大表

示土壤风蚀约强烈,反之,土壤风蚀约弱。

(2)植被盖度。在试验区域内的 125 个点上取样,以每个样点为中心,取 20 m×20 m 的调查样方,测定其植被盖度。在小范围(20 m×20 m)内用数码相机分段照相,然后在计算机上通过图形处理软件进行颜色分类与识别,进而计算出植被的盖度。

(3)土壤含水量。土壤含水量监测与植被盖度调查同期进行,土样采集为 0—20 cm 的地表土,在试验区域内的 125 个点上(在 0—20 cm 的地表土层内)用便携式 TDR 土壤水分测定仪测定土壤含水量,每个土样测定 3 个重复,取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 半方差函数分析

区域化变量 Z 是以空间点为 x 的三个直角坐标变量的随机场,观测前把 $Z(x)$ 看作是随机场,而观测后则被看作是一个三元实值函数或空间点函数。由于随机性因素(非区域性因素)的影响,植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度不仅是空间的函数^[10-11],也是时间的函数。结构性是指植被或土壤受区域化因素的影响程度,而随机性是指植被或土壤受非区域化因素的影响程度。变异函数是地统计学分析的主要内容,它既能描述区域化变量的空间结构性,也能描述其随机性^[12-13]。植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度 $Z(x)$ 是取样点 x 的函数,同样与 x 点相距 h 地点的样本记作 $Z(x+h)$, h 为位差;这样可以组成位差为 $Z(x)$ 的若干组数据。它与取样位置无关。

实际工作中,半方差的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (1)$$

式中: $\gamma(h)$ ——距离 h 的数据对数目。

观测点的分布是散乱的,对平稳区域化变量 $Z(x)$ 先算出每个观测点与其它观测点之间的距离 h_{is} ,若观测点有 $C_N^2 = N(N-1)/2$ 个,则有 h_{is} 个,然

后把观测点间距离分成 P 个级别,取其可能点数据对数 $(x_i, x_s) = (x_i, x_i + h_s)$,并算出该距离之平均距离 h_{is} 、点对数 $N(h_s)$ 和观测值平方和的平均值,则变异函数:

$$\gamma(h_s) = \frac{1}{2N(h_s)} \sum_{i=1}^N [Z(x_i + h_s) - Z(x_i)]^2$$

$$(s=1, 2, \dots, P) \quad (2)$$

这样就可得到 k 组数据 h_{is} 、 $N(h_s)$ 和 $\gamma(h_s)$,由此可以画出 $\gamma(h)-h$ 图。式(2)中 h_s 为第 s 级空间不同点之间的距离。在变异函数的计算中,并非每一个所计算的 h_s 值都对散点图中的一个点,在地质统计学中先确定一个“级别宽度”,然后将在这个“级别宽度”内的所有半方差按其数目求得一个对应的加权 $\gamma(h_s)$ 。步长选自“级别宽度”。本文中直接用 surfer 8.0 中的 variogram 菜单求出植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数的步长分别为 5.75, 5.25, 4.75 m。变异函数理论模型的检验通过了决定系数的综合指标检验。结合实测数据用式(2)得出了植被盖度、土壤含水量和土壤风蚀强度指数的半方差值(图 2)。

块金值与基台值之比表示随机性因素引起的空间变异质占系统变异的比值,若该比值高,则说明随机性因素引起的空间变异质程度起主要作用。反之,则说明结构性因素引起的空间变异质程度起主要作用。由此可见,块金值与基台值的比例可以表明系统变量的空间相关性的程度。如果比值小于 25%,说明系统具有强烈的空间相关性^[12-13];如果比值在 25%~75%之间,说明系统具有中等的空间相关性;如果比值大于 75%,说明系统具有较弱的空间相关性。由图 2 可见,植被盖度(图 2a)的块金值与基台值之比为 10.3%,其空间相关性较强;土壤含水量(图 2b)的块金值与基台值之比为 34.2%,其空间相关性属中等;而土壤风蚀强度指数(图 2c)的块金值与基台值之比为 11.2%,其空间相关性也较强。

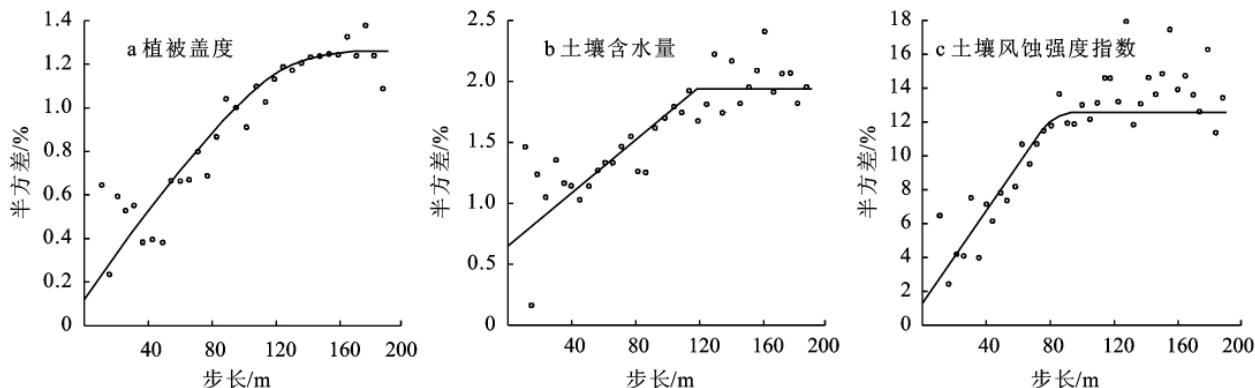


图 2 古尔班通古特沙漠南缘沙垄带土壤风蚀强度与其抑制因子的半方差图

比值 10.3% 意味着植被盖度受降雨等随机性因素的程度,同时说明了植被盖度受土壤含水量等结构性因素的影响较大(89.7%),即植被盖度与土壤含水量有着较大的空间相关性;比值 34.2% 意味着土壤含水量受风速等随机性因素影响的程度,受大气温湿度、地下水位等结构性因素的影响也较大(65.8%),即土壤含水量对风速等随机性因素与大气温湿度、地下水位等结构性因素均有适当的依赖性;比值 11.2% 意味着土壤风蚀强度指数受风速、土壤类型等随机性因素的程度,而土壤风蚀强度指数受植被盖度、土壤含水量等结构性因素的影响较大(88.8%),因此土壤风蚀强度指数对植被盖度、土壤含水量等结构性因素的依赖性较大,

表 1 有关土壤风蚀强度与其抑制因子的统计特征值

样本特性	样点数	最小值	最大值	中数	均值	方差	标准差	变异系数
植被盖度	125	0.20	33.0	4.90	8.92	1.86	1.36	0.51
土壤含水量	125	0.70	5.80	2.80	2.96	84.37	9.18	2.49
土壤风蚀强度指数	125	1.20	13.6	6.50	6.92	12.18	3.49	0.46

从表 1 可见,植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数的标准差分别为 1.36,9.18,3.49,导致土壤含水量标准差偏大的原因首先是土壤含水量受随机性因素的影响较大,其次是采样地的均匀性要比植被盖度与土壤风蚀强度指数的差一些,其随机性因素起着主导作用;与土壤含水量相比,植被盖度的标准差小的多,其原因是植被盖度受随机性因素的影响较小,而且采样地的均匀性也较好,其结构性因素起着主导作用,从而达到了较好的估计效果。而土壤风蚀强度指数的标准差偏小的原因与植被盖度的相似,只是介于以上两种之间。

2.3 土壤风蚀强度与其抑制因子的空间变异特征分析

块金值通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异,它一般是通过对半方差散点图的曲线拟合求得^[14]。由图 2 和表 2 可见,土壤含水量的块金值比较大,即变异函数原点处是间断型(有块金效应型);而植被盖度与土壤风蚀强度指数的块金值较

表 2 土壤风蚀强度与其抑制因子的时空变异参数

样品种类	块金值/% ²	结构方差/% ²	空间相关性/%	变程/ m	理论模型
植被盖度	0.13	1.13	10.3	165	指数模型*
土壤含水量	0.66	1.27	34.2	118	球状模型*
土壤风蚀强度指数	1.42	11.26	11.2	92	球状模型*

* 显著水平在< 0.01(I 值检验)。

2.4 变异函数模型的检验

理论变异函数模型是用加权多项式回归法拟合的,其最优性用交叉验证法、估计方差检验法和综合指标法等 3 种指标法检验,其中综合指标法是前两种检验法综合成一个统一的变异函数最优性指标,

$$I = (\overline{z^*} - \overline{z})^2 \times [P - 1/(\overline{z^*} - \overline{z})^2 s^* + (1 - P)] \quad (5)$$

它们之间的空间相关性较强。这些相关性也可以通过对比附图 1(a、b、c)之间的空间分布特征看出来。

2.2 土壤风蚀强度与其抑制因子的描述性统计

表 1 是有植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数的统计特征值。其均值分别为:8.92%、2.96%、6.92;而它们的变化范围分别为:0.20%~33.00%、0.70%~5.80%、1.20~13.60。可见,其测定值变化很大。而它们的变异系数分别为:0.51,2.49,0.46;其方差分别为:1.86,84.37,12.18,表明土壤含水量的均匀性要比植被盖度与土壤风蚀强度指数差的多,表 1 中的其它统计特征值都与均值有关,因此,这些统计值只能在一定程度上反映样本总体。

小,显然,其变异函数原点处趋向于一条直线,或说原点处有斜向切线存在,它反映了区域化变量有平均的连续性。变程 a 是反映变量的影响范围。而变程的变化意味着变量均匀性的强弱^[13-14],研究区植被盖度、土壤含水量和土壤风蚀强度指数的基台值均小于结构方差,因此所有变量的变异函数均满足二阶平稳假设。因此它们都是“可迁型”的。根据地质统计学的原理可知,该地区植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数的实测数据的分布都服从正态分布。其中植被盖度变异函数曲线的理论模型符合指数模型,而土壤含水量和土壤风蚀强度指数变异函数曲线的理论模型符合球状模型,它们的一般公式为^[13]:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C(1 - e^{-h}) & h < 1 \\ C_0 + C & h \geq 1 \end{cases} \quad (\text{球状模型}) \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-h}) \quad (\text{指数模型}) \quad (4)$$

式中:C₀——块金常数;C——拱高(结构方差);C₀+C——基台值;h——位差。

其中:I——综合检验指数;z,z*——样本变量的实测值与估计值;P——经验性参数;s*——变量的偏差比;当 $(\overline{z^*} - \overline{z})^2 < 100, P = 0.1$,否则 P=0.2。I 值越小表明变异函数确定的越好。这种方法的好处是可以同时检验变异函数计算的好坏与半方差图拟合的好坏。

表 3 土壤风蚀强度与其抑制因子变异函数模型的对比检验

样品种类	最小滞后距/m	$C_0(\%)^2$	$C(\%)^2$	a/m	$(z^*-z)^2$	$(z^*-z)^2_{s^*}$	P	I
植被盖度	5.75	0.13	1.13	165	0.53	0.95	0.1	0.479
土壤含水量	5.25	0.66	1.27	118	0.68	1.18	0.1	0.622
土壤风蚀强度指数	4.75	1.42	11.26	92	0.45	1.06	0.1	0.408

从表 1 和表 3 可见,综合检验指标 I 值与变异系数 C_v 具有相同的变化趋势,土壤含水量的 I 值和 C_v 值要大于植被盖度与土壤风蚀强度,这某种程度上说明了土壤含水量的空间变异性较强,相比植被盖度与土壤风蚀强度,土壤含水量变异函数的计算和半方差图的拟合相对差一些。因此检验指标 I 值综合的表明了模型所做的估计或模拟效果的好坏。变异系数越小, I 值也越小,模拟效果就越好。

2.5 Kriging 插值结果

附图 1a、1b、1c 分别为古尔班通古特沙漠南缘沙垄带土壤风蚀强度与其抑制因子分布特征的空间分级图。研究区植被盖度的变化范围在 0.20~33.00(%) 之间,平均值为 8.92%;土壤含水量的变化范围在 0.70~5.80 之间,平均值为 2.96,而土壤风蚀强度指数的变化范围在 1.20~13.60 之间,平均值为 6.92。

通过对古尔班通古特沙漠南缘沙垄带植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数监测资料的分析,得出该研究区土壤风蚀强度与其抑制因子在空间上存在显著的变异性,而且它们具有相似的变异特征。从附图 1 可见,该研究区土壤含水量越大,则植被盖度也越大,反之,越小,即它们之间存在着正相关性;土壤风蚀强度指数随植被盖度与土壤含水量的增大(或减小)有减小(或增大)的趋势,即土壤风蚀强度指数与它们之间存在着负相关性,因此土壤风蚀强度对植被盖度和土壤含水量具有较强的空间依赖性。

总之,从空间尺度上看,植被盖度从研究区的中部(沙垄顶部)向东北两侧(沙垄下坡)有逐渐增加的趋势。植被盖度在沙垄北坡要小于南坡,这是由于沙垄北坡是迎风面,受风的影响较大;土壤含水量也从研究区的中部向东北两侧有逐渐增加的趋势,即沙垄的相对高程越高,其土壤含水量越小,反之越大。土壤含水量在沙垄北坡要小于南坡,这同样是沙垄北坡受风的影响要比南坡较大的缘故。土壤含水量与植被盖度有相同的变化趋势;土壤风蚀强度指数从研究区的中部向东北两侧有逐渐减小的趋势,即沙垄的相对高程越高,其土壤风蚀强度指数越大,反之越小。由于沙垄北坡是迎风面,土壤风蚀强度指数在北坡要大于南坡。土壤风蚀强度指数与植被盖度、土壤含水量之间存在着较好的空间相关性。因此,在同等风力吹蚀下,干旱区土壤风蚀强度的大小主要取决于植被盖度和土壤含

水量的大小。土壤含水量与植被盖度则是抑制土壤风蚀的主要因子,也是保持沙面稳定的主要因素。

3 结论

通过对古尔班通古特沙漠南缘沙面稳定因子及其空间变异特征和 Kriging 插值结果的分析,可得出以下结论:古尔班通古特沙漠南缘沙垄带植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数的分布都具有明显的空间变异性,而且它们之间也存在着较好的空间相关性。半方差分析结果表明,该研究区植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数的实测数据的分布都服从正态分布。其中植被盖度变异函数曲线的理论模型符合指数模型,而土壤含水量和土壤风蚀强度指数变异函数曲线的理论模型符合球状模型。所有变量(植被盖度、土壤含水量、土壤风蚀强度指数)的基台值小于验前方差,因此它们的变异函数均满足二阶平稳假设,并且它们都具有变程和基台值,因此它们都是“可迁型”的。土壤风蚀强度指数随植被盖度与土壤含水量的增大(或减小)有减小(或增大)的趋势,即土壤风蚀强度指数与它们(植被盖度和土壤含水量)之间存在着较强的负相关性,因此土壤风蚀强度对植被盖度和土壤含水量具有较强的空间依赖性。在风速相近的小尺度范围内,干旱区土壤风蚀强度的大小主要取决于植被盖度和土壤含水量的大小。土壤含水量与植被盖度则是抑制土壤风蚀的主要因子,这也说明了在干旱区保持沙面稳定的众多因子中最具有决定性的因子是植被盖度和土壤含水量。

参考文献:

[1] Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet user needs [J]. Journal of Soil Water Conversation, 1991,46(9):107-108.

[2] 海春兴,付金生,王学萌. 气候和人类活动对河北坝上丰宁县土壤风蚀沙化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2003,17(1):69-75.

[3] 杭利军,童叔敏. 浅论干旱、半干旱地区土壤风蚀发生机理及防治措施[J]. 内蒙古林业科技,2003(2):49-51.

[4] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties [J]. Aduances in Agronomy,1985,38:44-94.

的发挥仍受地形的很大限制,强度和极强度侵蚀发生几率还是很大的。如附图 3 和图 2 所示。

4 结 论

以陕北丘陵沟壑区典型流域马家沟流域为例,在 2008 年流域土地利用数据基础上,结合地形地貌等要素,依据水利部部颁《土壤侵蚀分类标准》(SL 190—96)规程中侵蚀估算法,估算流域土壤侵蚀量,分析其空间分布特征,为相关部门进行生态环境建设提供决策依据。

退耕政策实施后的近 10 年来,马家沟流域土壤侵蚀模数估算值为 5 700 t/(km² · a)。该流域各侵蚀级别的面积占流域的分布比例呈正态分布,以中度侵蚀面积最广,为流域面积的 53.65%,其次是强度、轻度级别,分别为流域面积的 17.23%和 14.64%,然后是极强度、微度级别和剧烈侵蚀级别,占流域面积分别是 9.2%、4.16%和 1.12%。

整体上,侵蚀强度的分布仍受地形发育的影响。在上、中游各侵蚀强度级别的发生面积与全流域的分布非常相似,中游剧烈侵蚀面积稍有增加。而下游则与全流域分布格局差异很大,相对地说,微度和强度侵蚀比较集中,而轻度和剧烈侵蚀面积较少。

参考文献:

[1] 吴发启,赵晓光,刘秉正,等. 黄土高原沟壑区流域土壤侵蚀系统分析[J]. 西北林学院学报,1995,10(1):1-7.
[2] 李锐,上官周平,刘宝元,等. 近 60 年我国土壤侵蚀科学研究进展[J]. 中国水土保持科学,2009,7(5):1-6.

[3] 郑粉莉. 浅谈我国土壤侵蚀学科亟待加强的研究领域[J]. 水土保持研究,1999,6(2):26-31.
[4] 秦伟,朱清科,张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. 农业工程学报,2009,25(8):157-163.
[5] 张翼. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持学报,2001,15(2):121-124,128.
[6] 雷会珠,杨勤科,焦峰. 黄土高原丘陵沟壑区的土壤侵蚀与土地利用[J]. 水土保持研究,2000,7(2):48-51.
[7] 张鲁,周跃,张丽彤. 国内外土地利用与土壤侵蚀关系的研究现状与展望[J]. 水土保持研究,2008,15(3):43-48.
[8] 王思远,刘纪远,张增祥,等. 不同土地利用背景下土壤侵蚀空间分布规律研究[J]. 水土保持学报,2001,15(3):48-51.
[9] 李秀霞,倪晋仁. 土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析[J]. 地理科学进展,2009,28(2):161-166.
[10] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
[11] 李勇,张建辉,杨俊诚,等. 陕北黄土高原陡坡耕地土壤侵蚀变异的格局[J]. 水土保持学报,2000,14(4):17-21.
[12] 申圆圆,高苗苗. 陕北地区退耕还林之后知识援助的必要性研究:以安塞县为例[J]. 延安大学学报:社会科学版,2009,31(3):106-109.
[13] 姚鹤龄,史学建,王昌高,等. 基于 RS 与 GIS 的土壤侵蚀评价方法[J]. 中国水土保持,2005(5):42-43.
[14] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 山西水土保持科技,2000(2):14-16.
[15] 张晓萍,焦峰,李锐. 天山北麓中段土壤侵蚀影响因素及特征分析[J]. 西北农业大学学报,2000,28(5):42-48.

(上接第 28 页)

[5] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives [J]. Geoderm,1999,89:1-45.
[6] Fethi B J. Multivariate geostatistical design of groundwater monitoring networks[J]. J. Water Resources Planning and Management,1994,120(4):505.
[7] Chepil W S, Woodruff N P, Siddoway F H, et al. Vegetation and nonvegetative materials to control wind and water erosion [J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1963, 27(1):86-89.
[8] Stephen A W, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion [J]. Progress in Physical Geography,1993,17(1):50-68.
[9] 贺大良,申建友. 降水对起沙风速的影响[J]. 中国沙漠,1988,8(4):18-26.
[10] Li Habin. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,1998,9(6):651-657.
[11] 苏里坦,宋郁东,张展羽. 新疆渭干河流域地下水含盐量的时空变异特征[J]. 地理学报,2003,58(6):854-860.
[12] Hodgson D I F. The use of multiple linear regressions in simulating ground-water level responses[J]. Ground Water,1978:1694-1699.
[13] 侯景儒,尹镇南,李维朋,等. 实用地质统计学[M]. 北京:地质出版社,1998.
[14] 秦耀东. 土壤空间变异研究中的半方差问题[J]. 农业工程学报,1998,12(4):42-47.