

水蚀风蚀交错带坡面土壤入渗特性的空间变异及其分形特征*

姜 娜^{1,2} 邵明安^{2,3†} 雷廷武^{1,2}

(1 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 研究在水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心陕北神木县六道沟流域进行。在一个自然完整坡面上网格布点, 采用双环定水头入渗法研究了坡面土壤的入渗特性, 在应用传统统计学方法的基础上, 将分形理论和地统计学方法结合起来对坡面土壤入渗特性的空间变异进行了研究。获得以下结论: (1) 稳定入渗率、平均入渗率和前 30 min 累积入渗量等三个参数的变异系数分别为 0.48、0.36 与 0.40, 在坡面上的变异程度属于中等变异性; (2) 三个参数的分维值 D 分别为 1.88、1.92 与 1.85, 样本之间土壤特性值的差异较小, 短距离的变异影响占主导地位; (3) 研究的土壤在一定的空间范围内具有分形特征。稳定入渗率、平均入渗率与前 30 min 累积入渗量的自相关范围分别为 20~120 m、20~140 m 与 40~100 m。

关键词 水蚀风蚀交错带; 稳定入渗率; 空间变异; 分形特征

中图分类号 S152

文献标识码 A

水蚀风蚀交错带地处黄土高原北部, 是黄土高原水土流失最严重的地区, 也是黄河中下游河道粗泥沙的主要来源区, 生态环境建设任务比较艰巨。坡面是水蚀风蚀交错带主要的地貌类型, 它综合了小气候、水文过程、地貌过程以及其他土壤物理属性, 对其土壤特性时空变异进行研究能够为预测较大尺度上的土壤特性时空变异提供重要的基础。本研究选取的典型自然坡面位于水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心, 在整个交错带中从环境背景、自然条件及人为活动等方面都有较好的代表性和典型性。对其土壤入渗特性及空间变异特性进行研究, 不仅对于揭示水蚀风蚀交错带土壤侵蚀过程、流域水文模型精度的提高以及水土保持措施的配置等有着重要意义, 而且可以为黄土高原水蚀风蚀交错带的农业生产、植被恢复和土地合理利用等提供一定的科学依据。

土壤特性空间变异的研究始于 20 世纪 60 年代。自 20 世纪 70 年代以来, 土壤特性空间变异一直是人们关注的研究热点。早期的研究方法基于传统统计学原理, 根据变异系数的大小确定土壤特性

变异程度的强弱, 但由于该方法假设样本之间是完全独立的并以服从正态分布为前提, 它只能在一定程度上反映样本总体, 而不能定量地描述土壤特性的随机性和不规则性。后来, 人们应用地统计学原理, 采用半方差函数来定量研究土壤特性的空间变异, 它克服了传统统计学方法的缺点, 是目前土壤特性空间变异研究的一种重要方法。分形理论于 20 世纪 70 年代中期由 Manderbrot B. B. 创立, Amstrong^[1] 和 Tyler 等^[2] 较早地将其理论及方法应用到土壤结构的空变异性研究中。分形作为一种新的概念和方法, 正在许多领域开展应用探索。自 20 世纪 80 年代初以来, 我国学者已在土壤物理性质和土壤的化学特性(尤其是土壤养分)空间变异等方面进行了大量研究, 并取得了许多重要的成果。目前的研究大多采用传统统计学和地统计学方法, 也有学者在研究中应用了分形理论, 但是把地统计学方法和分形理论结合起来, 对水蚀风蚀交错带土壤空变异性进行研究的报道还较为少见。本文在应用传统统计学方法的基础上, 把分形理论与地统计学原理结合起来, 根据野外试验, 对水蚀风蚀交错带土壤

* 国家杰出青年基金项目(40025106)、中国西部环境与生态科学重大研究计划(90102012)、国家自然科学基金项目(50479063)资助

† 通讯作者: 陕西杨陵西农路 26 号中科院水利部水土保持研究所国家重点实验室, 712100, 029-87012405, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 姜 娜(1976-), 女, 河南许昌人, 博士研究生, 主要专业方向为农业水土工程。E-mail: jiangna7689@163.com

收稿日期: 2004-10-18; 收到修改稿日期: 2005-04-22

入渗特性在坡面上的空间变异进行了分析和讨论,以期能为水蚀风蚀交错带的农业生产、植被恢复和土地合理利用提供一定的科学依据。

1 基本理论

1.1 半方差函数

半方差函数又称为半变异函数,它是描述土壤特性空间变异结构的关键函数。进行半方差分析时,必须以内蕴假设为前提,即假设某区域化变量 $Z(x)$ 的均值稳定,方差存在且有限,该值仅和间距有关,则半方差函数可定义为随机函数 $Z(x)$ 增量方差的一半^[3],其一般表达式为:

$$r(h) = \frac{1}{2} E \left\{ [Z(x) - Z(x+h)]^2 \right\} \quad (1)$$

实际计算则可采用(2)式:

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

式中, h 为样本间距,又称位差; $N(h)$ 是间距为 h 的样本对数。

1.2 分形维数

概括地说,分形或分数维就是没有特征尺度的自相似结构。分形维数 D 的大小是指事物复杂程度的一种量度。由于土壤组成结构的复杂性及土壤内诸因素局部的微观差异,往往使土壤的特性参数值呈现出不规则性和随机性,近似于随机分数维布朗运动^[4,5]。其一维形式的半方差函数为:

$$2r(h) = E \left\{ [Z(x) - Z(x+h)]^2 \right\} = h^{2H} \quad (3)$$

式中 $Z(x)$ 、 $Z(x+h)$ 分别为 x 、 $x+h$ 处的测定值, h 为间距, H 为幂指数;对于布朗运动,幂指数 H 为0.5,而对土壤特性变异, H 的取值范围为0~1.0,随着 H 的增加,土壤特性变异逐渐减弱。这些布朗运动的分形维数由式 $D=2-H$ 给出^[5]。

由式(2),将 $r(h)$ 和 h 绘在双对数坐标纸上, $\lg(r(h))$ 与 $\lg(h)$ 存在着线性关系,用最小二乘法进行线性回归,得到回归直线的斜率 m ,分形维数 D 可用下式估算^[6]:

$$D = \frac{1}{2}(4-m) \quad (4)$$

分维值 D 表征样本之间的结构性。 D 值越小,表示样本之间土壤特性的差异越大,即均一程度越差;相反, D 值越大,表示样本之间土壤特性值的差异越小,即均一性程度越好^[6]。

2 材料与方法

2.1 试验区概况

六道沟小流域位于陕北神木县城以西14 km,处在毛乌素沙地与黄土高原两大自然生态区之间的过渡地带,生态环境表现出很强的过渡特征;流域面积为6.886 km²,主沟长4.21 km,流向自南而北,流域海拔高度在1094~1274 m之间,相对高差129.1~192.9 m;流域内风沙地貌和流水侵蚀地貌交错分布,由于严重的土壤侵蚀作用,地形支离破碎,沟壑纵横,沟壑密度(长度大于100 m)为6.45 km km⁻²;流域属于典型的半干旱地区,年降水量为250~450 mm,其中6~9月份,降雨量占全年的77.4%,平均干燥度为1.8,年平均蒸发力785.4 mm;流域内大风、沙尘暴频繁,主要植被为半干旱草原,天然植被严重退化,有效植被面积仅为10.43%,生态环境脆弱。

本试验在流域内一个完整的自然典型坡面进行,坡向为北242°,坡长380 m,坡顶海拔1238 m,平均坡度约14°,自坡顶至坡脚土地利用类型依次为多年生荒草地、退耕荒草地和作物地。荒草以苜蓿和长芒草为主,作物主要为马铃薯和黑豆,主要土壤类型为黄绵土和红粘土^[7]。

2.2 试验方法

沿坡面分水岭及其南北两侧共选取北、中、南三条样带,间隔10 m;每条样带自坡顶到坡角隔20 m在较为平整地方选点,每条样带19个点,共57个入渗点。试验采用双环定水头入渗法,试验前将入渗点处杂草清除,不平之处略加整理,在内环及内外环之间放置一层杂草,内环直径为30 cm,外环直径60 cm,内外环高均为20 cm;试验前用土钻-烘干法每10 cm取样测入渗点初始含水量,取样深度至1 m,用环刀法测定表层土壤容重。

3 结果与讨论

3.1 土壤入渗特性的传统统计值

稳定入渗率、平均入渗率和前30 min累积入渗量等参数是描述土壤入渗性能的重要参数。表1是这3个参数的传统统计值,其均值分别为0.66 mm min⁻¹、1.26 mm min⁻¹与43.68 mm。3个参数的变异系数分别为0.48、0.36与0.40,均在0.1~1.0之间,表明土壤入渗特性在坡面上的空间变异程度属于中等。而从测定结果来看(图1~图3),这

3个参数的变化范围分别为0.25~1.66、0.30~2.20和15.63~94.15,测定值的差异较大;而表中其他统计值都与均值有关,因此,这些统计值只能在一定程

度上反映样本总体,而不能定量地刻画土壤特性的随机性和不规则性,要解释并进行量化,必须进一步进行空间变异结构分析。

表1 57个样点土壤入渗特性的传统统计特征值
Table 1 The statistical values of soil infiltration properties at the 57 sampling sites

参数 Parameters	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	峰态系数 Kurtosis	偏态系数 Skewness	变异系数 Coefficient of variation
稳定入渗率 Stable infiltration rate (mm min ⁻¹)	1.66	0.25	0.66	0.6	0.95	0.48
平均入渗率 Mean infiltration rate (mm min ⁻¹)	2.2	0.3	1.26	0.05	0.38	0.36
前30min累积入渗量 Cumulate infiltration capacity within the initial 30 min (mm)	94.15	15.63	43.68	-0.05	0.5	0.4

3.2 利用分形理论与地统计学原理相结合进行的空间变异结构分析

在一个连续的断面上,若某土壤特性变量随距离的增加呈单调递增(或递减),则该变量具有严格的空

间依赖性,对应的分维值 D 等于1;若某变量的值是不可预知的,随着距离增加,其分布点占满整个 $x-y$ 平面,那么这一变量在空间上是完全独立的,其对应的分维值 D 等于2。大部分土壤特性值可能介于上述两种情况之间,其对应的分维值 D 介于1~2之间^[4,5]。从图1~图3可以看出,三个入渗特性值的变化曲线是随机的、粗糙的,曲线的复杂程度并不随距离的变化而变化,它在统计意义上却存在着自相似。因此,可将其看作是分形曲线。

在地统计学中,半方差函数图集中体现了作为尺度函数的变量与尺度之间的依赖变化情况。若两相邻样本与两个远距离样本的实测值没有差别,那么在不同尺度上的半方差 $\gamma(h)$ 也就没有差别,其半方差图将是水平的,对应的分维值 D 等于2,表明

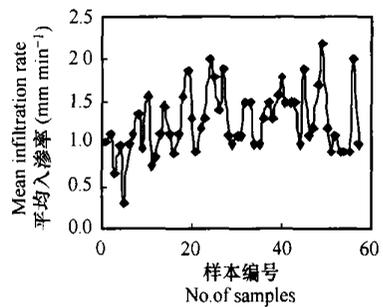


图2 各样点平均入渗率实测值
Fig 2 Measured values of mean infiltration rate

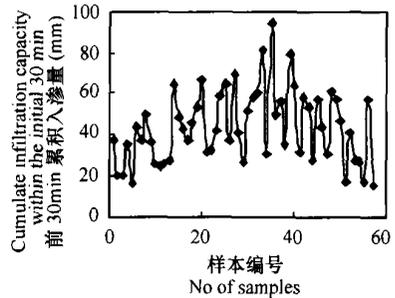


图3 各样点前30min累积入渗量实测值
Fig 3 Measured values of cumulate infiltration capacity within the initial 30min

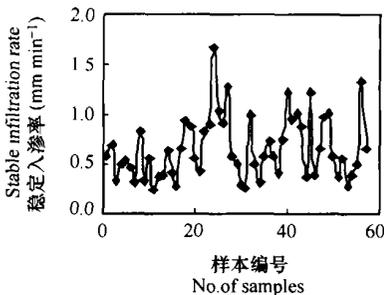


图1 各样点稳定入渗率实测值
Fig 1 Measured values of stable infiltration rate

该变量在连续尺度上是空间独立的;若半方差图是线性的,说明该变量具有统计自相似,即大尺度格局是小尺度格局的放大形式,分维值 D 不随尺度的变化而变化,可以说, D 是尺度的常数函数,说明变量是空间依赖的。

按式(2)可求得各个土壤入渗特性参数的半方差值,将一对数据的间距和半方差值点绘到双对数坐标纸上,得到半方差函数图如图4所示,间距 h

只计距离,方向是任意的。由图4可以看出,各参数的半方差值在一定范围内均随着间距的增加而逐渐增加,说明它们均存在空间变异结构;半方差与一定范围内的间距非常接近直线关系,用最小二乘法进行线性回归,得到回归直线的斜率 m ,由(4)式可以估算出各土壤入渗特性参数的分维值(见表2)。

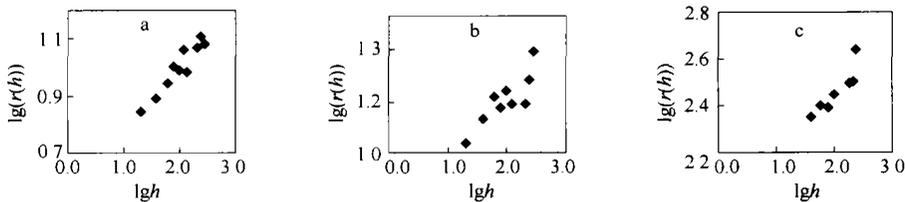
土壤并不是在所有标度范围内都具有自相似性的理想分形现象介质,分形规律只表现在某个范围内或呈多重分形特征,即其自相关性只在某个范围内出现。从图4可以看出,在一定范围内,稳定入渗率、平均入渗率和前30 min 累积入渗量这3个参数的半方差与间距的关系基本上符合分形规律,说明它们在各自的无标区内变化的复杂程度基本一致。求得它们的无标区分别为20~120 m、20~140 m与

40~100 m,也就是说,研究的土壤参数在此范围内具有自相似性。

表2 土壤入渗特性参数的分维值

Table 2 The fractal dimension of parameters of soil infiltration properties

土壤入渗特性参数 Parameters of infiltration property	分维值 Fractal dimension	复相关系数 Multiple correlation coefficient
稳定入渗率 Stable infiltration rate	1.88	0.95
平均入渗率 Mean infiltration rate	1.92	0.86
前30min 累积入渗量 Cumulate infiltration capacity within the initial 30min	1.85	0.91



a—稳定入渗率 Stable infiltration rate; b—平均入渗率 Mean infiltration rate; c—前30min 累积入渗量 Cumulate infiltration capacity within the initial 30 min.

图4 土壤3种入渗特性参数的半方差图

Fig. 4 Variograms of three infiltration parameters

稳定入渗率、平均入渗率和前30 min 累积入渗量这3个参数的分维值分别为1.88、1.92与1.85,平均入渗率的分维值略大于其他两个参数,3个分维值均大于1.5,即幂指数 $0 < H < 0.5$,表明随着间距的增加,稳定入渗率、平均入渗率和前30 min 累积入渗量各自的半方差之间是负相关,即将它们的半方差标准正态化以后,这些值的半方差并非单一的正值或负值;而且, D 值较大,说明短距离的变异影响占主导地位,采样间距可缩短一些。

4 结 论

1) 稳定入渗率、平均入渗率和前30 min 累积入渗量的变异系数分别为0.48、0.36与0.40,在坡面上的变异程度属于中等变异性。

2) 稳定入渗率、平均入渗率和前30 min 累积入渗量的分维值 D 分别为1.88、1.92与1.85,样本之间土壤特性值的差异较小,短距离的变异影响占主导地位,采样间距可缩短一些。

3) 土壤并非具有理想分形特征的介质,只在一定的空间范围内才具有分形特征。在本研究中,稳

定入渗率、平均入渗率与前30 min 累积入渗量的自相关范围分别为20~120 m、20~140 m与40~100 m。

参 考 文 献

- [1] Armstrong A C. On the fractal dimension of some transient soil properties. *Journal of Soil Science*, 1986, 37: 641~ 652
- [2] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53: 987~ 996
- [3] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988. 321~ 366. Lei Z D, Yang S X, Xie S C. eds. *Soil Water Dynamics (In Chinese)*. Beijing: Press of Tsinghua University, 1998. 321~ 366
- [4] Burrough P A. The Fractal dimensions of land scapes and other environmental data. *Nature*, 1981, 294: 240~ 242
- [5] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variability in soil variation. *Journal of Soil Science*. 1983, 34: 577~ 597
- [6] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征. *土壤学报*. 1998, 35(1): 10~ 15. Gong Y S, Liao C Z, Li B G. Fractal dimensions and spatial variability of soil water content and bulk density (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 10~ 15
- [7] 唐克丽, 侯庆春, 王斌科, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向. 中国科学院水利部西北水土

保持研究所集刊- 神木水蚀风蚀交错带生态环境整治技术及试验示范研究论文集. 1993, 12(18): 1~ 15. Tang K L, Hou Q C, Wang B K, *et al.* Environment background and administration way of windwater erosion crisscross region and Shenmu experimental area on

the Loess Plateau (In Chinese). Memoir of Northwestem Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Resources, 1993, 12(18): 1~ 15

FRACTAL DIMENSION AND SPATIAL VARIABILITY OF SOIL WATER INFILTRATION PROPERTIES ON NATURAL SLOPE IN A WATER-WIND EROSION INTERLACED REGION

Jiang Na^{1, 2} Shao Mingan^{2, 3†} Lei Tingwu^{1, 2}

(1 *Water Conservancy and Civil Engineering College of China Agricultural University, Beijing 100083, China*)

(2 *State Key laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

(3 *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research of CAS, Beijing 100101, China*)

Abstract The research on soil water infiltration is of great significance to the acquisition of a better knowledge of hydrological circulation of the watershed. A water-wind erosion interlaced region is a place where the most serious soil and water loss happens on the Loess Plateau, and any study on soil infiltration properties and on their spatial variability of this region will do help to expose process of the soil erosion and improve precision of the watershed hydrological model. Of a natural slope (380 m long) in the Liudaogou catchment, which is typical of the water-wind erosion interlaced region, stable infiltration rate, mean infiltration rate and cumulate infiltration capacity within the initial 30 min were measured with a double ring infiltrometer at 57 sampling sites, and the data were analyzed with both the traditional statistical method and the geostatistical method combined with the fractal theory. The results indicate: (1) the coefficient of variation of the above three parameters was respectively 0.48, 0.36 and 0.40 and the spatial variability was medium in degree; (2) the fractal dimension of the three parameters was 1.88, 1.92 and 1.85, respectively, which shows that the difference was rather small between soil samples in values of the soil infiltration properties; and (3) the soil was not a medium with significant theoretical fractal phenomenon, and fractal features existed only in a specific range of space, and the range of spatial autocorrelation for stable infiltration rate, mean infiltration rate and cumulate infiltration capacity within the initial 30 min was 20~ 120 m, 20~ 140 m and 40~ 100 m, respectively.

Key words Water-wind erosion interlaced region; Stable infiltration rate; Spatial variability; Fractal characteristics