

黄土丘陵区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征*

白一茹 汪有科

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 利用单重分形和多重分形方法定量分析黄土丘陵区土壤粒径分布(PSD)特征,同时分析土地利用方式对 PSD 分形参数的影响。结果表明:研究区 PSD 呈现出非均匀分布,具有多重分形特征,PSD 多重分形谱 $f(\alpha) - \alpha$ 为不对称的上凸曲线。容量维数 D_0 与土壤质地相关性不明显,信息维数 D_1 、关联维数 D_2 和多重分形谱宽 $\Delta\alpha$ 均与粘粒体积分数呈极显著正相关($P < 0.01$)。土地利用方式对粘粒、粉粒、砂粒体积分数和 D_{silt} 值有显著影响($P < 0.01$)。多重分形分析为详细描述 PSD 提供了精确的方法和途径。

关键词: 黄土丘陵区 土壤粒径分布 单重分形 多重分形

中图分类号: S152.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)05-0043-06

Monofractal and Multifractal Analysis on Soil Particle Distribution in Hilly and Gully Areas of the Loess Plateau

Bai Yiru Wang Youke

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

Abstract

Monofractal and multifractal analysis were combined to quantitatively investigate soil particle size distribution (PSD) in hilly and gully areas of the Loess Plateau, and the effect of land uses on PSD parameters was analyzed. The results indicated that the PSD showed heterogeneous distribution, had multifractal feature, and multifractal spectrum functions $f(\alpha) - \alpha$ were asymmetrical convex curve. There was no significant relationship between capacity dimension (D_0) and soil particle contents. Clay contents were positively correlated with the entropy dimension (D_1), correlation dimension (D_2) and the width of multifractal spectra $\Delta\alpha$ ($P < 0.01$). The clay contents, silt contents, sand contents and dimension of silt domain (D_{silt}) values were significantly influenced by land uses ($P < 0.01$). The multifractal analysis provided an accurate method to characterize the PSD.

Key words Hilly and gully areas of the Loess Plateau, Soil particle size distribution, Monofractal, Multifractal

引言

土壤粒径分布(PSD)反映了土壤风化成土过程,与土壤结构、水分运动过程及肥力密切相关,并直接影响土壤侵蚀与土地退化^[1~2]。定量描述和模拟 PSD 是土壤学研究的重点之一。由于 PSD 的不

均匀性,利用土壤质地分类系统已不能完整地反映 PSD 的特征。分形理论的创立和应用为定量描述 PSD 提供了新途径^[3],分形维数可以表征 PSD 的差异和自相似性,并反映其均匀程度^[4]。目前关于 PSD 分形特征的研究结果多是基于单重分形理论^[5~6],然而单重分形只能整体性和平均性地描述

收稿日期: 2011-10-26 修回日期: 2011-11-21

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA10A302-1)和国家科技支撑计划资助项目(2007BAD88B05)

作者简介: 白一茹,博士生,主要从事土壤水分与节水灌溉研究,E-mail:yr0823@163.com

通讯作者: 汪有科,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail:gjzwyk@vip.sina.com

PSD 特征,多重分形方法可以更为详细地反映 PSD 的局部异质性和非均匀性^[1,7]。Grout 等^[8]和 Posadas 等^[9]认为自然系统中 PSD 并不符合单重的原则,利用多重分形方法可以更为准确地分析 PSD 特征。王德等^[10]和董莉丽等^[11]研究黄土高原丘陵沟壑区 PSD 分形特征,发现容量维数(D_0)和信息维数(D_1)可以作为反映土壤物理性质和土壤质量的潜在性指标。管孝艳等^[12]研究得出土壤粒径分布的多重分形谱参数可以反映 PSD 的非均匀程度。

黄土丘陵区特殊地形和气候因素导致土壤侵蚀严重,进而影响 PSD,同时侵蚀过程中不同植被类型对 PSD 也会产生影响。本文利用单重分形与多重分形方法定量分析黄土丘陵区 PSD,同时探讨土地利用方式对 PSD 单重分形及多重分形参数的影响,为建立 PSD 模型提供数据支持。

1 研究区概况

陕北米脂地区(109.47°E,37.18°N)属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,该区域属于中温带半干旱性气候,全年降雨量不足,水土流失严重。昼夜温差大,温度变化范围为-25~38℃,多年平均气温8.5℃。日照时间8.35 h,风速1.19 m/s,相对湿度为60%,年平均降雨量400 mm左右,主要集中在7~9月份。土壤以黄土母质上发育的黄绵土为主,质地为粉壤土。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

试验选取陕北米脂县孟岔村流域4种不同土地利用方式的坡面,包括枣树林、苜蓿地、谷子地和柠条地,坡面坡度为20°,坡向为西南方向。其中枣树生长年限为12年,苜蓿为8年,柠条为20年。分别在4个坡面的上坡、中坡和下坡位进行土壤样品采集,每个坡位选取4个采样点,采样点总数为48。每个采样点采集表层10 cm深的土壤样品。

2.2 土壤样品测定

土样风干去除根系和枯落物后过2 mm筛。称取土样0.5 g,加入10 mL质量分数为30%的过氧化氢,在72℃的沙浴上加热使其充分反应以便有效地除去样品中的有机质,加10 mL质量分数为10%的盐酸并煮沸使其充分反应除去碳酸盐,之后加去离子水稀释并静置12 h,去除上清液,反复进行直至pH值为6.5~7.0,然后加入六偏磷酸钠,超声波处理30 s后用激光粒度仪 Mastersizer 2000 测量土壤粒径的体积分数。

PSD 分级根据美国制分类标准,即砂粒(粒径

0.05~2 mm)、粉粒(粒径0.002~0.05 mm)和粘粒(粒径0~0.002 mm)。在单重分形分析中,粒径设定为0~0.001 mm、0.001~0.002 mm、0.002~0.005 mm、0.005~0.01 mm、0.01~0.02 mm、0.02~0.05 mm、0.05~0.1 mm、0.1~0.2 mm、0.2~0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm。在 PSD 多重分形分析中,为更细致地反映 PSD,土壤颗粒粒径的分布范围为0.02~2 000 μm,按对数间隔分为100级。

2.3 土壤粒径分形原理

2.3.1 单重分形

由于利用激光粒度仪可以准确快速地获得土壤颗粒体积分布数据,故本文采用土壤颗粒体积分形模型来计算出土壤单重分形维数 $D^{[3-4]}$,公式为

$$\frac{V_R}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_V}\right)^{3-D}$$

式 中

λ_V ——土壤粒径分级中最大粒径

R ——某特定的粒径

V_R ——粒径小于 R 的土壤颗粒总体积

V_T ——土壤颗粒的总体积

D ——土壤颗粒的体积分形维数

2.3.2 多重分形

多重分形是通过一个谱函数来描述分形结构上不同的局域条件或分形结构在演化过程中不同层次所导致的特殊结构行为与特征,是从系统的局部出发来研究其整体的特征。

取激光粒度仪测量区间 $I = [0.02, 2\ 000]$,将其划分为100个小区间 $I_i = [\phi_i, \phi_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, 100$,划分时取样间隔为对数等差递增,用 v_i 表示粒径在子区间 I_i 内的土壤颗粒的体积分数,即 $v_1, v_2, \dots, v_{100}$, $\sum_{i=1}^{100} v_i = 100$, ϕ_i 为激光粒度仪测得的粒径。根据激光粒度仪划分区间的原理, $\lg(\phi_{i+1}/\phi_i)$ 为一个常数。为使用多重分形方法分析区间 I 的土壤颗粒粒径分布特征,须使各子区间长度一样,由此构造一个新的无量纲区间 $J = [\lg(0.02/0.02), \lg(2\ 000/0.02)] = [0, 5]$,则区间内共有100个等距离的子区间 J_i 。对土壤粒径分布进行多重分形分析,就是用尺度为 ε 的相等的“盒子”对整个土壤粒径分布跨度进行划分,所得盒子总数为 N 。在 J 中,有 $N(\varepsilon) = 2^k$ 个相同尺寸的小区间 $\varepsilon = 5 \times 2^{-k}$,为使最小的子区间中包含有测量值,本文 k 的取值范围为1~6。由此区间 J 被2、4、8、16、32和64等分,对应的区间大小依次为2.5、1.25、0.625、0.312、0.156和0.078^[8]。 $\mu_i(\varepsilon)$ 为每个子区间土壤粒径分布的概率密度,即子区间 J_i 内所有测量值 V_i 的加和,其中

$V_i = v_i / \sum_{i=1}^{100} v_i, i = 1, 2, \cdots, 100$ 。利用 $\mu_i(\varepsilon)$ 构造一个配分函数族为^[13]

$$u_i(q, \varepsilon) = \mu_i(\varepsilon)^q / \sum_{i=1}^N \mu_i(\varepsilon)^q \quad (2)$$

式中 q ——实数

$u_i(q, \varepsilon)$ ——第 i 个子区间 q 阶概率
则粒径分布多重分形的广义维数谱为

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg \left[\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon)^q \right]}{\lg \varepsilon} \quad (q \neq 1) \quad (3)$$

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon) \lg \mu_i(\varepsilon)}{\lg \varepsilon} \quad (q = 1) \quad (4)$$

粒径分布的多重分形奇异性指数为

$$\alpha(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(q, \varepsilon) \lg \mu_i(\varepsilon)}{\lg \varepsilon} \quad (5)$$

则相对于 $\alpha(q)$ 的粒径分布多重分形谱函数为

$$f(\alpha(q)) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(q, \varepsilon) \lg \mu_i(q, \varepsilon)}{\lg \varepsilon} \quad (6)$$

利用式(3)得到的广义维数谱 $D(q)$ 能够详细地反映土壤 PSD 的局部特征和非均匀性。当 $q = 0$ 、1、2 时,对应的 D_0 、 D_1 和 D_2 分别为容量维数、信息熵维数和关联维数。

奇异性指数 α 和多重分形谱函数 $f(\alpha)$ 能够表述粒径分布多重分形的局部特征。多重分形谱的谱宽 ($\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) 反映了整个分形结构上物理量概率测度分布的不均匀程度。 $\Delta\alpha$ 越大表示粒径分布越不均匀。

2.4 数据处理

方差分析采用多重比较检验中最小显著性差异 (LSD) 法,经典统计和相关性分析利用 SPSS 17.0 统计软件,图表制作利用 Office Excel 2003 软件。

3 结果与讨论

3.1 PSD 特征分析

研究区土壤质地均为粉壤土。粘粒体积分数变化范围为 4% ~ 11%,粉粒体积分数的变化范围为 52% ~ 78%,砂粒体积分数的变化范围为 12% ~ 43%。研究区土壤颗粒中粘粒体积分数较低,粉粒占主导地位,主要因为黄土丘陵区严重的植被退化和水土流失导致侵蚀程度增强,土壤颗粒呈粗化的趋势。

图 1 为研究区一个典型土壤样本的土壤颗粒体积分数与土壤粒径间的关系,可以看出 75% 以上的

土壤颗粒集中在狭窄的粒径范围内 (13 ~ 100 μm),不同粒径范围的土壤颗粒体积分数呈非均匀分布,说明米脂地区 PSD 表现出明显的非均匀特性。图 2 是 4 个随机样品土壤粒径累积体积分数与粒径双对数拟合曲线,可以看出土壤粒径累积体积分数与粒径之间在整体上并不是严格的线性关系,而是遵循 3 个尺度域,即粘粒域、粉粒域和砂粒域,这个结果与 Bitteli 等^[7] 研究结果相吻合。黄绵土粒径 3 个域的边界基本上接近粘粒、粉粒、砂粒界限,为了使边界两侧线性拟合达到最优,经过优化调整后,粘粒域与粉粒域的边界介于 1.2 ~ 1.6 μm 之间,粉粒域与砂粒域的边界介于 63 ~ 100 μm 之间,以此算出砂粒域的分形维数 D_{sand} 平均值为 2.83, R^2 为 0.87,粉粒域的分形维数 D_{silt} 平均值为 2.15, R^2 为 0.99 (表 1)。粘粒域的分形维数为负值,说明计算分形维数的方法不适合用来细致地分析黄土高原丘陵区土壤的粒径分布,这与王德等的研究结果一致^[10]。 D_{silt} 和 D_{sand} 的变异系数很小,表现为弱变异性,原因在于研究区土壤质地均为粉壤土。王国梁等^[14] 也认为土壤质地均一时, D 值变异系数小。

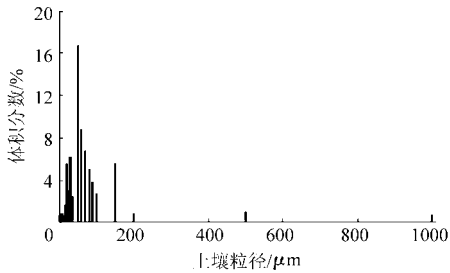


图 1 土壤粒径分布

Fig. 1 Map of the soil particle size distribution

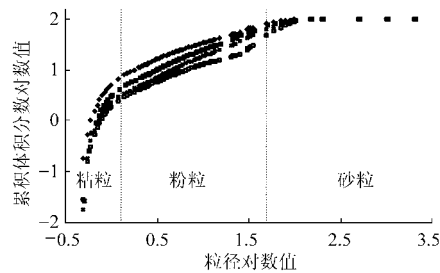


图 2 随机土壤样品累积体积分数与粒径的双对数曲线
Fig. 2 Log-log plots of cumulative particle size distribution for random selected soil samples

3.2 PSD 多重分形特征

Evertsz 和 Mandelbrot^[15] 指出, $\lg X$ 与 $\lg \varepsilon$ 是否呈线性是判断研究对象在研究尺度内是否具有多重分形特征的关键指标,如果不满足线性关系则不能进行多重分形分析。图 3 为典型土壤样本的函数 $X(q, \varepsilon)$ 与盒子尺度 ε 的双对数曲线。当 q 由 -10 向 10 逐渐变化时, $\lg X$ 与 $\lg \varepsilon$ 均表现出极显著线性

关系,其 R^2 均大于 0.95。这说明研究区的土壤样品具备多重分形特征,可以进行多重分形分析。

利用式(3)和式(4)计算出所有土壤样品 PSD 的多重分形参数。由表 1 可以看出, D_0 值变化范围是 0.81~0.91, D_0 接近于 1 说明 PSD 分布广, $D_0<1$ 表示 PSD 在 0.02~2 000 μm 范围内有体积分数为零的小区域。 D_1 较小且变化范围小(0.75~0.82),原因在于研究区土壤粘粒体积分数变化较小(4%~11%)。Montero 等^[1]和 Posadas 等^[9]分析不同类型土壤样品时都得出,当粘粒体积分数的变化范围较小时, D_1 变化范围也较小。 D_1/D_0 可以衡量 PSD 异质程度, D_1/D_0 越接近于 1 则表明颗粒分布越集中于密集区。从表 1 可知 D_1/D_0 均值为 0.93,接近于 1,结合图 1 可以看出,75% 以上的土壤颗粒集中在粒径范围为 13~100 μm 的密集区。

表 1 土壤粒径单重分形和多重分形参数经典统计分析

Tab.1 Classical statistic analysis of soil fractal and multifractal parameters					
参数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
D_{silt}	2.33	2.08	2.15	0.04	2.09
D_{sand}	2.92	2.64	2.83	0.06	2.25
D_0	0.91	0.81	0.84	0.03	3.24
D_1	0.82	0.75	0.79	0.01	1.53
D_2	0.76	0.68	0.72	0.01	2.08
D_1/D_0	0.97	0.87	0.93	0.02	2.57
$\alpha_{\min}$	0.57	0.48	0.53	0.03	5.01
$f(\alpha_{\min})$	0.28	0.04	0.19	0.07	40.96
$\alpha_{\max}$	2.52	2.01	2.24	0.19	8.60
$f(\alpha_{\max})$	0.38	0.26	0.33	0.04	10.82
$\Delta\alpha$	1.98	1.46	1.71	0.20	11.66
$f(\alpha_{\min})-f(\alpha_{\max})$	-0.03	-0.29	-0.14	0.08	58.58

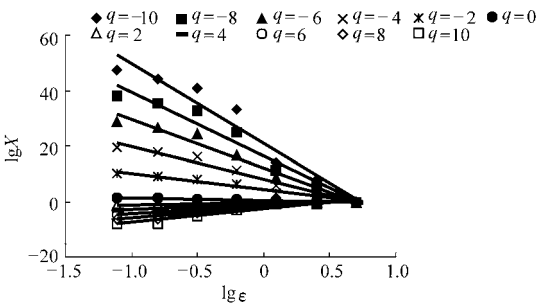


图 3 配分函数 X 与盒子尺度的双对数曲线
Fig.3 Log-log plots of the partition functions $X(q, \varepsilon)$ and measurement scales of the soil particle size

D_0 、 D_1 和 D_2 可以作为表征 PSD 特征的指标,反映整体分形结构上物理量概率测度分布的不均匀程度。Posadas 等^[9]认为 D_0 、 D_1 和 D_2 存在如下关系: $D_0 \geq D_1 \geq D_2$,且当物理量表现为自相似或均匀分布时,会出现 $D_0 = D_1 = D_2$ 。随机选取研究区内 8 个土壤样品,计算出 $-10 \leq q \leq 10$ 范围内步长为 1 的广

义维数谱 $D(q)$ (图 4)。可以看出随着 q 值的增加, $D(q)$ 表现为反 S 型递减函数。 $q>0$ 时不同土样 $D(q)$ 的递减程度较小, $q<0$ 时不同土样 $D(q)$ 的递减程度较大。图 4 中土壤样品均呈现 $D_0 > D_1 > D_2$,说明土壤粒径是非均匀分布,因此利用多重分形分析土壤的粒径分布是必要、合理的。

在多重分形谱计算过程中,对粒径分布区域进行了不同尺度的划分,因此多重分形谱可以反映出土壤颗粒空间分布的丰富信息,并可将其定量化。多重分形谱的形状和对称性能够反映粒径分布的异质性。图 5 中多重分形谱为不对称的上凸曲线,表明在土壤形成过程中经历过不同程度的局部叠加,导致了 PSD 非均匀性出现。而且多重分形谱表现出明显的不对称性,即谱左边口径与右边相差较大, Miranda 等^[16]认为左边口径与右边相差越大,土壤粒径分布的异质性越大。由图 4 和表 1 还可以看出,各土样的 $f(\alpha)$ 谱右边相比左边短很多,即 $\Delta f = f(\alpha_{\min}) - f(\alpha_{\max}) < 0$,多重分形谱呈右钩状,说明小概率子集占主要地位,反映了稀疏区域的分布比密集区域平均。

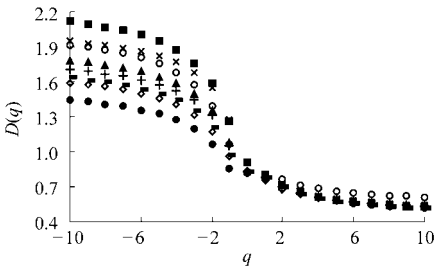


图 4 随机土壤样品粒径分布广义维数谱
Fig.4 Generalized dimensions spectra for soil particle size distribution of random selected soil samples

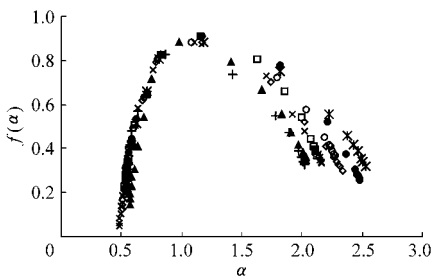


图 5 随机土壤样品粒径分布多重分形谱
Fig.5 Multifractal spectrum functions for soil particle size distribution of random selected soil samples

根据多重分形理论, $f(\alpha)$ 与 $D(q)$ 是相互关联的,多重分形谱谱高为 $f(\alpha)$ 的最大值,即 $q=0$ 时的分形维数 D_0 。多重分形谱谱宽 $\Delta\alpha$ 的大小反映了整个分形结构上物理量概率测度分布的非均匀程度。Takele 等^[17]研究认为, $\Delta\alpha$ 为 0 时,说明随着 q 的增加, $D(q)$ 不变,等于 D_0 ,而 $\Delta\alpha$ 越大表示粒径分布越不均匀,单重分形已无法描述出其分布特征,需要用

多重分形来描述。表 1 中 $\Delta\alpha$ 的变化范围为 1.46 ~ 1.98,而管孝艳等^[12]得出粉壤土 $\Delta\alpha$ 均值为 1.37, Miranda 等^[16]研究的均匀程度较高的土壤 $\Delta\alpha$ 均值仅为 0.61,这说明研究区土样表现出较高程度的非均匀性。

3.3 PSD分形参数与土壤质地相关分析

表 2 分析了单重分形与多重分形参数与土壤粘粒、粉粒和砂粒体积分数的相关性。结果表明,土壤砂粒体积分数越高, D_{silt} 值越小,粘粒和粉粒体积分数越高, D_{silt} 值越大,但 D_{sand} 与土壤颗粒体积分数关系不大,可以考虑利用 D_{silt} 值预测土壤质地的变化。这与 Bitteli 等^[7]的研究结果一致。 D_0 与土壤质地的相关性不明显。Posadas 等^[9]研究得出虽然粘粒体

积分数会影响多重分形参数与粘粒的相关性,但随着粘粒体积分数的增加, D_0 变化不明显。 D_1 与粘粒和粉粒体积分数呈显著正相关,与砂粒体积分数呈显著负相关($P<0.01$)。结果说明随着砂粒体积分数的减小,粘粒和粉粒体积分数的增加, D_1 随之增加的趋势明显,土壤粒径分布的异质性增加。 $\Delta\alpha$ 与粘粒体积分数呈显著正相关($P<0.01$)。根据多重分形理论,当 $\Delta\alpha$ 越大,土壤粒径分布越不均匀。因此当粘粒体积分数较高时,土壤粒径分布非均匀性较大。王德等^[10]和管孝艳等^[12]利用多重分形理论研究 PSD 都得出,土壤中的粘粒和砂粒体积分数对土壤的多重分形参数有明显影响,特别是当粘粒体积分数增加时,PSD 的非均匀性明显增大。

表 2 土壤粒径单重分形和多重分形参数与土壤质地的相关分析

Tab.2 Correlation analysis between soil texture, fractal and multifractal parameters

	粘粒 体积分数	粉粒 体积分数	砂粒 体积分数	D_{silt}	D_{sand}	D_0	D_1	D_2	D_1/D_0	$\Delta\alpha$
粘粒体积分数	1									
粉粒体积分数	0.755 **	1								
砂粒体积分数	-0.795 **	-0.998 **	1							
D_{silt}	0.847 **	0.339 *	-0.396 *	1						
D_{sand}	0.030	0.243	-0.227	-0.279	1					
D_0	0.165	0.278	-0.273	0.050	-0.211	1				
D_1	0.642 **	0.553 **	-0.574 **	0.569 **	-0.350 *	0.457 **	1			
D_2	0.493 **	0.221	-0.253	0.642 **	-0.584 **	0.202	0.878 **	1		
D_1/D_0	0.177	-0.001	-0.016	0.263	0.044	-0.865 **	0.050	0.266	1	
$\Delta\alpha$	0.524 **	0.416 *	-0.436 *	0.338 *	-0.298	0.146	0.433 **	0.154	-0.185	1

注: *、* * 表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下显著。

3.4 土地利用方式对土壤粒径分形参数的影响

通过方差分析可知,土地利用方式对粘粒、粉粒、砂粒体积分数和 D_{silt} 值均呈现出极显著影响($P<0.01$)(表 3)。不同土地利用方式下的 D_{silt} 值和粘粒体积分数从大到小依次为:枣树、谷子、柠条、苜蓿。枣树林的 D_{silt} 值最大,粘粒体积分数最高,因为枣树林木能够降低风速,减少风和雨滴的动能,从而防止土壤侵蚀,减缓土壤细粒的流失。同时从表 3 可以看出,土地利用方式对多重分形参数 D_0 、

D_1 、 D_1/D_0 和 $\Delta\alpha$ 均影响不显著。而 Paz-Ferreiro 等^[18]研究认为土地利用方式的变化会导致土壤粒径分布的变化,进而影响多重分形参数。分析原因可能是黄土丘陵区侵蚀和水土流失严重,表层土壤的侵蚀、搬运和沉积过程影响了 PSD,从而导致土地利用方式对 PSD 多重分形参数的影响不明显。董莉丽等^[11]研究发现在黄土高原安塞地区不同土地利用的 D_0 和 D_1 差别很小,仅用多重分形参数难以区分不同土地利用方式下土壤 PSD 的差异。

表 3 土地利用方式对土壤粒径单重分形与多重分形参数的影响

Tab.3 Effect of land use on capacity dimension D_0 , entropy dimension D_1 , D_1/D_0 and soil texture

分形参数	谷子	苜蓿	枣树	柠条	F
粘粒体积分数/%	5.73 ± 0.68 ^{ab}	4.57 ± 0.36 ^a	6.38 ± 1.67 ^a	5.40 ± 0.73 ^b	6.958 **
粉粒体积分数/%	69.70 ± 6.16 ^a	62.37 ± 5.24 ^b	67.65 ± 5.86 ^a	70.81 ± 5.59 ^a	5.286 **
砂粒体积分数/%	24.27 ± 6.78 ^b	33.06 ± 5.38 ^a	25.96 ± 7.23 ^b	23.78 ± 6.25 ^b	5.328 **
D_{silt}	2.15 ± 0.02 ^b	2.11 ± 0.03 ^c	2.19 ± 0.03 ^a	2.14 ± 0.05 ^b	10.368 **
D_{sand}	2.83 ± 0.07 ^a	2.84 ± 0.05 ^a	2.84 ± 0.06 ^a	2.82 ± 0.07 ^a	0.452
D_0	0.84 ± 0.03 ^a	0.84 ± 0.03 ^a	0.84 ± 0.03 ^a	0.83 ± 0.02 ^a	0.392
D_1	0.79 ± 0.01 ^{ab}	0.78 ± 0.01 ^b	0.79 ± 0.01 ^{ab}	0.79 ± 0.01 ^a	1.856
D_1/D_0	0.94 ± 0.03 ^{ab}	0.92 ± 0.02 ^b	0.94 ± 0.03 ^{ab}	0.95 ± 0.02 ^a	2.069
$\Delta\alpha$	2.21 ± 0.17 ^a	2.00 ± 0.30 ^a	2.09 ± 0.35 ^a	2.00 ± 0.32 ^a	0.976

注: * * 表示在 $P<0.01$ 水平下显著,同一行的不同字母表示存在显著差异。

4 结 论

(1) PSD 曲线变化幅度大,研究区域 PSD 表现出明显的非均匀特性。土壤粒径体积与粒径之间不是严格的线性关系,而是遵循 3 个尺度域,分别为粘粒域、粉粒域和砂粒域。

(2) PSD 广义维数 $D(q)$ 为典型反 S 型递减函数,多重分形谱 $f(\alpha) - \alpha$ 为不对称的上凸曲线。

$D_0 > D_1 > D_2$ 且 $\Delta\alpha$ 较大,表示粒径分布非均匀程度较高,需要用多重分形来描述其分布特征。

(3) 土壤粘粒、粉粒和砂粒体积分数与 D_{silt} 值有显著相关性 ($P < 0.05$),多重分形参数 D_1 、 D_2 和 $\Delta\alpha$ 均与粘粒体积分数呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。土地利用方式对土壤粘粒、粉粒、砂粒体积分数和 D_{silt} 值有极显著影响 ($P < 0.01$),而对多重分形参数 D_1 、 D_2 和 $\Delta\alpha$ 影响不明显。

参 考 文 献

- Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions [J]. Ecological Modeling, 2005, 182(3~4): 305~315.
- 刘继龙,马孝义,张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报,2010,41(1): 46~52.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 46~52. (in Chinese)
- 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.
- 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): 1 896~1 899.
Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Fractal features of soils characterized by particle weight distribution [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1 896~1 899. (in Chinese)
- 孟凤英,丁启朔,鹿飞,等. 冲击作用下粘性土壤破碎体的分形维数与影响因素[J]. 农业机械学报,2009,40(3): 108~111.
Meng Fengying, Ding Qishuo, Lu Fei, et al. Fragmentation fractal dimensions of cohesive soil under impact and its influencing factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 108~111. (in Chinese)
- 侯占峰,李林,陈智,等. 土壤表面分形表征效果对比[J]. 农业机械学报,2011,42(4): 39~42.
Hou Zhanfeng, Li Lin, Chen Zhi, et al. Effects comparison on fractal characterization for soil surface roughness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 39~42. (in Chinese)
- Bittelli M, Campbell G S, Flury M. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(4): 782~788.
- Grout H, Tarquis A M, Wiesner M R. Multifractal analysis of particle size distributions in soil [J]. Environment Science Technology, 1998, 32(9): 1 176~1 182.
- Posadas A N D, Giménez D, Bittelli M, et al. Multifractal characterization of soil particle-size distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(5): 1 361~1 367.
- 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): 3 081~3 089.
Wang De, Fu Bojie, Chen Liding, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land use types: a case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 3 081~3 089. (in Chinese)
- 董莉丽,郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布分形特征[J]. 土壤,2010,42(2): 302~308.
Dong Lili, Zheng Fenli. Fractal characteristics of soil particle size distributions in gully-hilly regions of the Loess Plateau, North of Shaanxi, China [J]. Soils, 2010, 42(2): 302~308. (in Chinese)
- 管孝艳,杨培岭,吕烨. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. 农业机械学报,2011,42(3): 44~50.
Guan Xiaoyan, Yang Peiling, Lü Ye. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 44~50. (in Chinese)
- 周炜星,吴韬,于遵宏. 多重分形奇异谱的几何特性 II. 配分函数法[J]. 华东理工大学学报,2000,26(4): 390~395.
Zhou Weixing, Wu Tao, Yu Zunhong. Geometrical characteristics of singularity spectra of multifractals II. Partition function definition [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2000, 26(4): 390~395. (in Chinese)
- 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.
Wang Guoliang, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 545~550. (in Chinese)

Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):46~52. (in Chinese)

6 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):81~86.

Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Multifractal study on spatial variability of soil water and salt and its scale effect [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 81~86. (in Chinese)

7 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8):11~16.

Hu Wei, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 11~16. (in Chinese)

8 李敏, 李毅, 曹伟, 等. 不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐的空间变异性分析[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1 210~1 218.

Li Min, Li Yi, Cao Wei, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content at different sampling grid scales under plastic mulch drip irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1 210~1 218. (in Chinese)

9 Zheng Z, Zhang F R, Ma F Y, et al. Spatiotemporal changes in soil salinity in a drip-irrigated field [J]. Geoderma, 2009, 149(3~4):243~248.

10 R  th B, Lennartz B. Spatial variability of soil properties and rice yield along two catenas in Southeast China [J]. Pedosphere, 2008, 18(4):409~420.

11 Douaik A, Meirvenne M V, Tóth T. Statistical methods for evaluating soil salinity spatial and temporal variability [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2007, 71(5):1 629~1 635.

12 陈翠英, 江永真, 袁朝春. 土壤特性空间变异性研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10):121~124.

Chen Cuiying, Jiang Yongzhen, Yuan Chaochun. Study on soil property spatial variability using R language [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):121~124. (in Chinese)

13 姜秋香, 付强, 王子龙. 改进的蚁群聚类在精准灌溉管理分区中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2):37~42.

Jiang Qiuxiang, Fu Qiang, Wang Zilong. Application of improved ant colony clustering method in the delineation of site-specified irrigation management zones[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 37~42. (in Chinese)

14 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 不同耕作年限水稻土土壤颗粒的体积分形特征研究[J]. 土壤, 2009, 41(3):396~401.

Ci En, Yang Linzhang, Cheng Yueqin, et al. Volume fractal property of soil particle size distribution of paddy soils cultivated for different years [J]. Soils, 2009, 41(3): 396~401. (in Chinese)

15 Meneveau C, Sreenivasan K R, Kailasnath P, et al. Joint multifractal measures: theory and application to turbulence [J]. Phys. Rev. A, 1990, 41(2):894~913.

16 Eghball B, Schepers J S, Negahban M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(2):339~346.

(上接第 48 页)

15 Evertsz C J G, Mandelbrot B B. Multifractal measures (appendix B) [M]//Peitgen H O, Jurgens H, Saupe D. Chaos and Fractals. New York: Springer-Verlag, 1992: 922~953.

16 Miranda J G V, Montero E, Alves M C, et al. Multifractal characterization of saprolite particle-size after topsoil removal [J]. Geoderma, 2006, 134(3~4): 373~385.

17 Takele B Zeleke, Bing C Si. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. Geoderma, 2006, 134(3~4): 440~452.

18 Paz-Ferreiro J, Vazquez E V, Miranda J G V. Assessing soil particle-size distribution on experimental plots with similar texture under different management systems using multifractal parameters [J]. Geoderma, 2010, 160(1): 47~56.