

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

王 德¹, 傅伯杰^{1,*}, 陈利顶¹, 赵文武², 汪亚峰¹

(¹ 城市与区域生态国家重点实验室, 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085 ² 北京师范大学资源学院资源管理研究所, 北京 100875)

摘要 土壤粒径分布影响土壤的水力特性、土壤肥力状况以及土壤侵蚀等, 是重要土壤物理特性之一。在水蚀严重的黄土丘陵沟壑区, 不同的土地利用类型对水土流失的阻截作用不同, 因而进一步导致其土壤粒径分布的差异。对不同土地利用类型下土壤粒径分布的分形和多重分形分析发现, 黄绵土土壤粒径分布包含有 3 个无标度区间, 分别为粘粒域、粉粒域和砂粒域; 土壤粒径分布的分形维数 D 、粉粒域维数 D_{silt} 、砂粒域维数 D_{sand} 、信息维数 D_1 、信息维数/容量维数 D_1/D_0 与土壤细颗粒含量和有机质含量成显著的正相关关系; 土地利用对分形维数 D 、粉粒域维数 D_{silt} 、砂粒域维数 D_{sand} 、容量维数 D_0 、信息维数 D_1 、信息维数/容量维数比值 D_1/D_0 的影响较显著。这表明这些分形和多重分形参数可以作为反映土壤物理性质和土壤质量的潜在性指标, 其实用性有待进一步探讨。

关键词 土壤粒径分布; 土地利用; 分形特征; 多重分形; 土壤侵蚀

文章编号 1000-0933 (2007)07-3081-09 中图分类号 T941, Q149 文献标识码 A

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

WANG De¹, FU Bo-Jie^{1,*}, CHEN Li-Ding¹, ZHAO Wen-Wu², WANG Ya-Feng¹

¹ State Key Lab. of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

² College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (7) 3081 ~ 3089.

Abstract : Soil particle-size distribution (PSD) is one of the most important physical attributes due to its strong influence on soil properties related to water movement, productivity and soil erosion. The fractal and multifractal measures were useful tools in identifying soil PSD with different taxonomy. Land-use type, as one of important factors to affect soil PSD, was paid little attention in the previous research. In this paper, Tyler and Wheatcraft power law and multifractal Rényi dimension were applied to characterize PSD in soils with the same taxonomy and different land-use types. Then the effects of land use on the fractal and multifractal parameters were analyzed. The study was conducted on the loess hilly areas of the Loess Plateau in China, of which the environment is characterized by hilly terrain with an altitude between 997 and 1731m, and semi-arid climate with a mean annual rainfall of 505mm and temperature of 8.6°C. A Calcic Cambisols soil was sampled from five land use types : woodland, shrub land, grassland, terrace farmland and abandoned slope farmland with planted trees (ASFP). The soil PSDs were obtained by laser diffraction technique using a Longbench Mastersizer2000. The result showed that : (1) fractal and multifractal parameters reflect different aspect of soil PSDs. There existed three power-law

基金项目 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目 (40621061) 国家自然科学基金面上基金资助项目 (40570319)

收稿日期 2007-01-22 ; 修订日期 2007-05-10

作者简介 王德 (1977 ~), 男, 山东威海人, 博士生, 主要从事景观生态研究. E-mail : geowd@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : bfu@rcees.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40621061, 30570319)

Received date 2007-01-22 ; Accepted date 2007-05-10

Biography WANG De, Ph. D. candidate, mainly engaged in landscape ecology. E-mail : geowd@163.com

domains, namely D_{sand} , D_{silt} , D_{clay} in all PSDs and can be ranked as $D_{sand} > D_{silt} > D_{clay}$. The boundaries of three domains were close to the soil textural classification boundaries. ϕ) fractal dimension ϕ), dimension of silt domain ϕ_{silt}), dimension of sand domain ϕ_{sand}), entropy dimension ϕ_1) and entropy dimension/capacity dimension ratio ϕ_1/D_0) were significantly positively correlated with finer particle content. thus they could be potential parameters to reflect soil physical properties influenced by land use. ξ) D , D_{silt} , D_{sand} , D_0 , D_1 and D_1/D_0 were correlated with soil organic matter and were influenced by land use, providing potential indicator of soil quality influenced by land use. More significant result is required in the future study to test the applicability of fractal and multifractal parameters in characterizing land use effect on soil PSDs.

Key Words : soil particle-size distributions ; land use ; fractal characteristics ; multifractal characteristics ; soil erosion

土壤粒径分布 (Particle Size Distribution,简称 PSD) 因为影响土壤的水力特性、土壤肥力状况以及土壤侵蚀等,是重要土壤物理特性之一^[1~3]。分形理论的运用是表征 PSD 的主要进展之一^[4],20 世纪末的研究多集中在对不同土壤的单一分形的研究上^[5~11],近期的研究主要侧重于两个方面:一是同种土壤不同土地利用类型 PSD 的单一分形研究,如 SU 等^[2]、胡云锋等^[3]、Wang 等^[4]探讨了风蚀区土壤的分形维数对土地利用变化的影响,提出分维数可作为土壤退化的指标;二是不同土壤类型 PSD 的多重分形研究,如 Martin 等^[5,16]、Posadas 等^[7]、Montero 等^[8,18]等对不同土壤的 PSD 进行多重分形分析,提出多重分形参数可以用来反映不同土壤 PSD 的更为细致的信息。

在水蚀严重地区,土壤中细颗粒物伴随着养分容易受水蚀而发生流失,而不同的土地利用类型对水土流失的阻截作用不同^[6,21],从这个意义上说,土壤粒径分布特征可以反映土地利用对侵蚀的影响。本研究采用激光粒度仪获得土壤粒径分布数据,首先运用分形和多重分形的方法探讨了采样区域黄绵土的土壤粒径分布特征,随后探讨了土地利用对分形维数及多重分形参数的影响,并对分形与多重分形参数的指示作用进行对比。PSD 分形采用 Tyler 和 Wheatcraft 的方法^[6],多重分形采用 Rényi 信息熵的方法^[8,20,19]。土壤有机质作为土壤质量的最佳指标之一,被用来作为比较的参照。

1 研究区概况

研究区位于安塞县境内 (36°31' ~ 37°20'N,108°52' ~ 109°26'E) 的两个小流域 (伏南沟和县南沟) 图 1),安塞县地处陕北黄土高原丘陵沟壑区,海拔 997 ~ 1731m,地形破碎,水土流失面积占全县总面积的 94%,土壤侵蚀模数达 12000t/(km²·a)。属中温带大陆性半干旱季风气候,年均降水量为 505.3mm,降水年际变化较大,且年内分配不均,主要集中在 7 ~ 9 月份,约占全年降雨的 63%,年均气温 8.6℃。土壤以黄绵土为主,约占总面积的 95% 左右^[2],土壤质地属于粉质壤土 图 2)。

2 研究方法

2.1 采样与分析方法

采样点的分布如图 1,共 70 个土壤样品采自 5 种土地利用类型:林地、灌木地、草地、梯田、退耕还林地。其中林地样品 13 个,灌木地 11 个,草地 12 个,梯田 15 个,退耕还林地 (a) 19 个。采样覆盖面积 50km²,采样深度 0 ~ 15cm。在每一样地,采用 5 点采样法 (间隔 2m) 采集样品、混合装袋。土样在室内摊开阴干,过 2mm 筛,去根。

粒径分析 称取土样 0.5g,加 30% 过氧化氢 (H₂O₂),在 72℃ 下去除有机质,加盐酸 (HCl) 去除碳酸盐;加超纯水稀释,静置,除上清液以除酸,反复静置除酸直至 pH 为 6.5 ~ 7,然后加入六偏磷酸钠 (NaHMP),超声 30s 后用激光粒度仪 Mastersizer 2000 测量土壤粒径的体积百分比。

粒度分级 研究区内黄绵土的粒径分布范围为 0.3 ~ 1500μm,激光粒度仪提供的是连续的体积百分比-粒径数据,为更细致地反映 PSD 并方便与以往的研究进行比较,PSD 分形分析中,土壤粒径在 0 ~ 2000μm 范围内按对数间隔被划分为 64 级,而在 PSD 多重分形分析中,0.3 ~ 1500μm 范围内的土壤粒径按对数间隔被

划分为 64 级。

有机质测定 采用重铬酸钾氧化-外加热法^[3]。

2.2 土壤粒径分形原理

土壤粒径分布遵循自相似原理,由大于某一粒径 R_i ($R_i > R_{i+1}, i = 1, 2, 3, \cdots$) 的土粒构成的体积 $V \{ > R_i \}$ 可由公式表出^[6,24] :

$$V \{ > R_i \} = C_v \left[- \left(R_i / \lambda_v \right)^{3-D} \right] \tag{1}$$

式中, R_i 是特征尺度, C_v, λ_v 是描述颗粒形状、尺度的常数。

当 $R_i = 0$ 时, (1) 式变为计算全部土壤颗粒总体积 V_T , 即 $V \{ > R_i \} = V_T = C_v$

当 $R_i = R_{\max}$ ($R_{\max}$ 为最大粒径, 这里为 $2000 \mu\text{m}$) 时, $\lambda_v = R_{\max}$

因此有 :

$$\frac{V \{ > R_i \}}{V_T} = 1 - \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \tag{2}$$

调整 (2) 式可得 :

$$\frac{V \{ < R_i \}}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \tag{3}$$

对上式两边取对数, 即得 :

$$\log \left[\frac{V \{ < R_i \}}{V_T} \right] = (3-D) \log \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right) \tag{4}$$

土壤粒径体积分布的分形维数即为 $\frac{V \{ < R_i \}}{V_T}$ 和

$\left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)$ 的对数线性回归拟合方程的斜率 $(3-D)$ 。

2.3 多重分形原理

多重分形是定义在分形结构上的有无穷多个标度指数所组成的一个集合, 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的结构行为与特征, 是从系统的局部出发来研究其整体的特征, 并借助统计物理学的方法来讨论特征参量的概率测度的分布规律。

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 , 由每个盒子的概率测度 (即体积百分比) $\mu_i(\varepsilon)$ 、尺度 ε 和给定的参数 q , 可以计算出 Rényi 信息熵 $D(q)$ 。Rényi 信息熵的计算公式为^[5,25]

$$D(q) \approx \frac{1}{q-1} \times \frac{\log \left[\sum_{i=1}^N \mu_i(\varepsilon)^q \right]}{\log \varepsilon} \tag{5} \quad (q \neq 1)$$

$$D_1 \approx \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i(\varepsilon) \log \mu_i(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \tag{6} \quad (q = 1)$$

Rényi 信息熵 D_q 当参量 q 在区间 $[-\infty, +\infty]$ 内是一个单调递减的谱形。 q 是从不同层次上提取系统信息的参量。用于多重分形分析的数据一般是归一化的概率 (probability) 分布数据或浓度 (density or concentration) 数据, q 从不同层次上扫描不同浓度的区域^[6,27,31]。当 $q > 1$ 时, 大浓度或高聚集度的信息被放大, 当 $q < -1$ 时, 小浓度或低聚集度的信息被放大。当 $q = 0$ 时, Rényi 信息熵 D_q 就是容量维数 D_0 , 也就是经

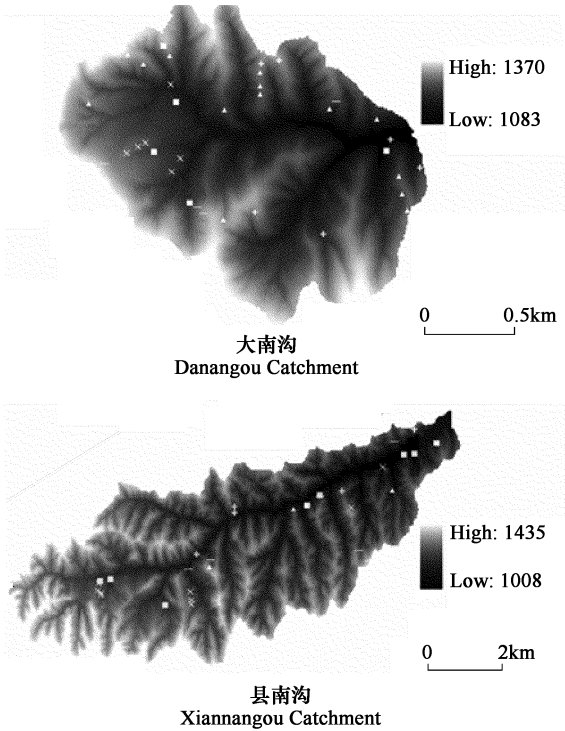


图 1 研究区示意及样点分布图

Fig. 1 Study area and soil sample sites

■ 林地 woodland ; — 灌木 shrub land ; △ 退耕还林地 (a) ASFP (abandoned slope farmland with planted trees) ; × 梯田 terrace ; + 草地 grassland

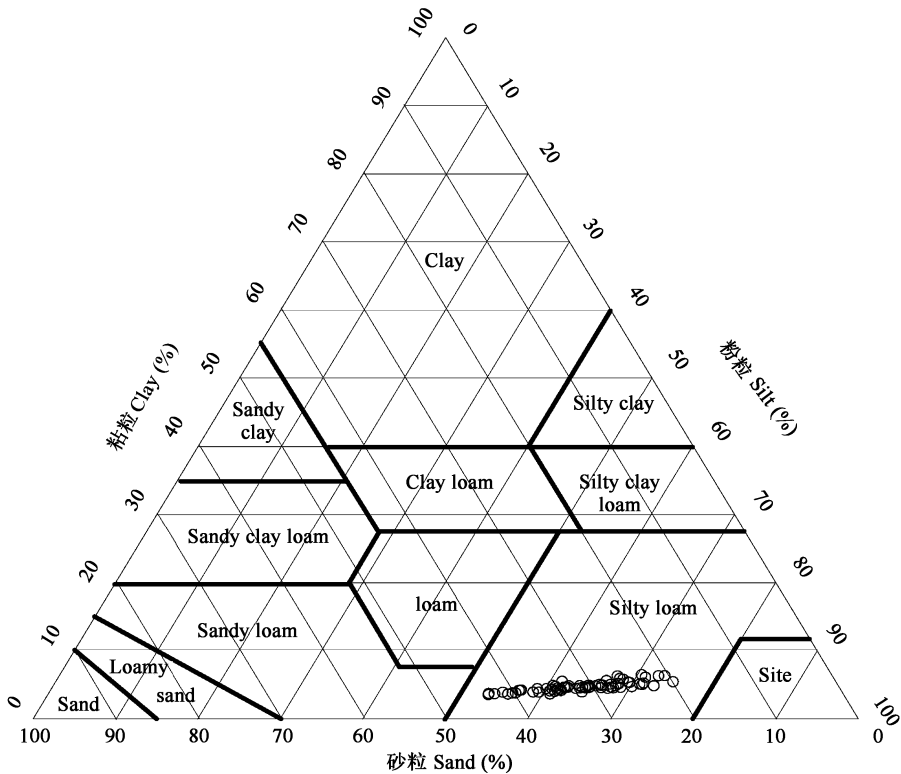


图2 采样点土壤质地
Fig.2 Texture of analyzed soil samples

典分形维数,也叫计盒维数 (box-counting dimension),它提供研究一个分布的最基本信息,当 $q = 1$ 时,Rényi 信息熵 D_q 就是信息维 D_1 [8],是与香农多样性相联系的维数,提供分布的不规律程度 (均匀度或异质性) 的信息;当 $q = 2$ 时,Rényi 信息熵 D_q 就是关联维数 D_2 ,是与 Simpson 多样性指数相关的维数,提供分布聚集程度的信息。当 D_q 随 q 变化的谱线为直线时,即 $D_0 = D_1 = D_2 = D_3$,系统分布遵循单一维数,并且该分布是一个均匀分布 [7]。

在多重分形分析中,粒径分布范围 $(\mu\text{m}) I = [0.3, 1500]$,划分为 64 个小区域 $I_i = [\phi_i, \phi_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, 64$,划分时取样间隔为对数等差递增, $\log (\phi_{i+1}/\phi_i)$ 是一个常数,也就是说,第 1 个小区域的粒径分布范围 $I_1 = [0.3, 0.343]$,第 64 个小区域的粒径分布范围 $I_{64} = [313.1, 1500]$,这种划分方法既充分利用了激光粒度仪提供粒度连续数据的优势,也遵循了土壤粒径分布规律,比算数等差递增划分的方法更客观。划分完 64 个小区域粒径范围之后,需要做一个转换, $\varphi_j = \log (\phi_j/\phi_1)$, $j = 1, 2, \dots, 65$,这样粒径分布范围被重新转换成算数递增的分布 [9,3]。经过转换之后的无量纲分布范围 $J = [0, 3.70]$, J 被 2,4,8,16,32,64 等分后,格子大小 $\varepsilon = 3.70 \times 2^{-k}$ ($k = 1, 2, 3, \dots, 6$),即 $\varepsilon = 1.85, 0.925, 0.463, 0.23, 0.12, 0.06$ 。

对土壤质地而言,质地越均匀,说明绝大多数的颗粒集中在越狭窄的粒径范围内,土壤粒径分布曲线的异质性越大 而对于土壤粒径分布曲线而言,分布越均匀,

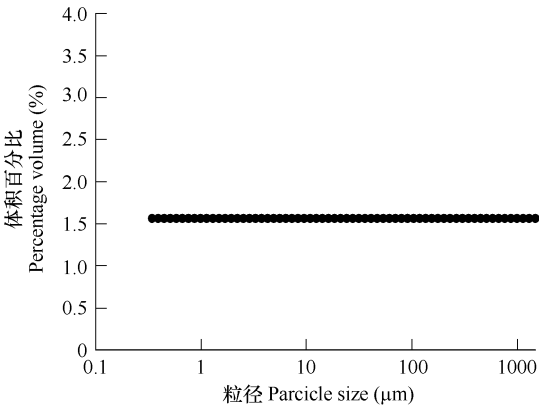


图3 异质性最大的土壤粒径分布
Fig.3 Example for most heterogeneous soil PSD

则说明各个分级内颗粒体积百分比数值越趋向于一致,土壤颗粒分布的异质程度越大(图3)

3 结果与讨论

3.1 土壤粒径体积分布的分形与多重分形特征

利用4)式计算得出土壤粒径体积分形维数 D ,其值在2.17~2.32之间,拟合的决定系数 R^2 介于0.67~0.76。图5是64分级的累积体积百分比与粒径的双对数拟合曲线,可以看出,所有土壤粒径体积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,分别为粘粒域、粉粒域和砂粒域,这个结果与Bitteli等的一致^[1]。黄绵土粒径3个域的边界基本上接近粘粒、粉粒、砂粒的界限(美制),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2.0~3.7 μm 之间,粉粒域与砂粒域的边界介于54.7~93.9 μm 之间,由此为边界计算出砂粒域的分维数 D_{sand} 平均值为2.95(0.94< R^2 <0.98,, p <0.001),粉粒域的分维数 D_{silt} 平均值为1.82(0.95< R^2 <0.99, p <0.001)。粘粒域的分维数是负值,这在理论上难以解释,可能是由于以下两个原因:一是由于激光法测得的粘粒含量会比真实值偏低,粉粒含量会比真实值偏高^[6],用降低了的粘粒和升高了的粉粒含量计算分形维数时可能会导致粘粒域出现负值的情况;二是由于计算分形维数的Tyler和Wheatcraft方法不适合用来细致地分析黄绵土的粒径分布,通常用Tyler和Wheatcraft方法计算分形维数的粒径的数据最多只有8个点或9个点,虽然由这几个点计算的分形维数不会出现负值的情况,但是很难代表真实的土壤粒径分布,用它计算的结果不能反映真实的情况。因此很多学者推荐多重分形来取代Tyler和Wheatcraft的分形方法^[1,17]。

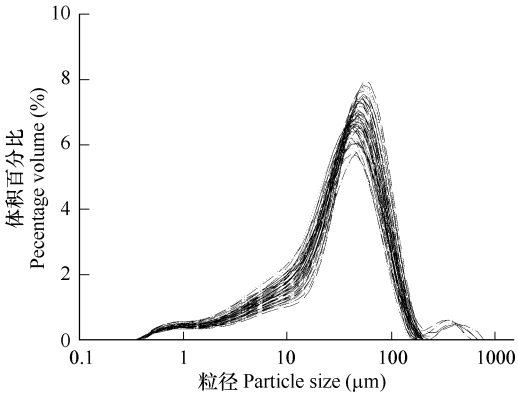


图4 70个土壤样品粒径分布的体积百分比
Fig. 4 Particle size versus percentage volume of the 70 soil samples

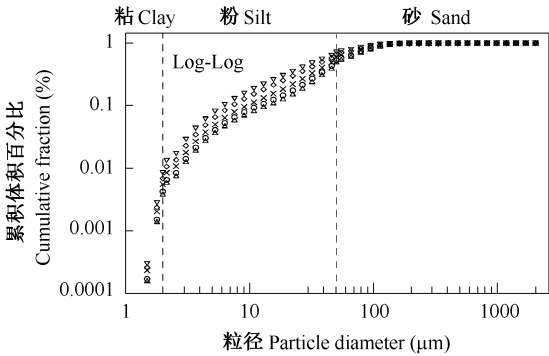


图5 随机样品体积百分比与粒径的双对数曲线
Fig. 5 Log-log plots of particle size distributions for random selected soil samples

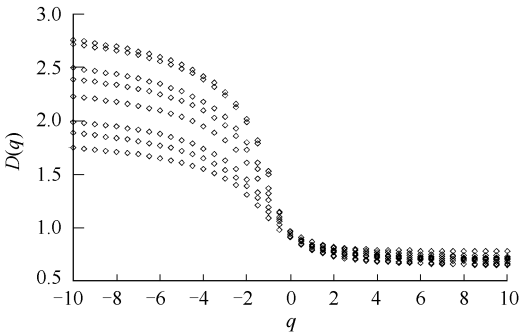


图6 随机土壤样品粒径分布 Rényi 谱
Fig. 6 Multifractal Rényi spectra D_q - q curves of random selected soil samples

利用5)、6)两式计算出 $-10 \leq q \leq 10$ 范围内在增量为0.5的多重分形谱 $D(q)$,如图3所示。所有样品多重分形维数的决定系数 $R^2 > 0.85$ ($-10 \leq q \leq 10$), $p < 0.001$ 。当 $q = 0$ 和 $q = 1$ 时, R^2 有最大值1,随着 q 值向两侧的增大和减小, R^2 呈减小趋势。容量维 D_0 取值范围介于0.91~0.97($R^2 > 0.995$),信息维 D_1 取值范围介于0.77~0.91($R^2 > 0.97$)。由此可以看出,所有的分形和多重分形参数在计算上是可信的。所有样品中都有 $D_0 > D_1 > D_2$,说明所有土壤粒径不是均匀分布^[7],对其进行多重分形分析是有必要的。

3.2 土地利用对土壤粒径分形与多重分形参数的影响

由表1可以看出,土地利用对分形维数 D 有显著的影响。林地的 D 值最高(2.28),粘粒含量最高,砂粒含量最低,而退耕还林地的 D 值最低,粘粒含量最低,砂粒含量很高。分维数 D 依次为林地>梯田>草地>

灌木地 > 退耕还林地,这一次序同样适用于粘粒含量,而砂粒含量遵循相反的次序。这说明分形维数 D 与粘粒含量成正比,而与砂粒含量成反比 (表 2)。

土地利用对粉粒域分形维数 D_{silt} 和砂粒域维数 D_{sand} 的影响也分别在 0.01 和 0.05 的水平上显著 (表 1)。 D_{silt} 遵循着与 D 和粘粒含量几乎相同的次序 林地. > 梯田 > 草地 > 退耕还林地 > 灌木地。这可以解释为 林地土壤粉粒域中的细颗粒含量大于灌木地和退耕还林地。不同于 D 和 D_{silt} ,砂粒域维数 D_{sand} 的最大值出现在梯田,接下来是林地、草地、灌木地和退耕还林地。 D_{sand} 最高值、 D 和 D_{silt} 次高值出现在梯田,表明梯田砂粒域中细颗粒含量较其它类型高,这在一定程度上说明了长期耕作对土壤粗颗粒具有细化的作用。 D_{sand} 的最低值、 D 和 D_{silt} 的次低值出现在灌木地,说明灌木地中砂粒域、粉粒域和整个粒径分布中细颗粒含量都低,侵蚀较严重。而赵护兵等^[2]、刘卉芳等^[3]的小区试验结果为 土壤侵蚀量坡耕地 > 草地 > 林地 > 灌木地,灌木地的侵蚀量最小,这可能是因为在实际中,灌木地作为水保效果较好地土地利用方式,由于人为因素影响而较多的分布在易发生侵蚀的部位,侵蚀较严重,否则其位置就会被其它农用地所取代,而小区试验一般是在其它情况不变的情况下,来比较不同土地利用方式的水保效果,灌木地的侵蚀量自然会很小。

表 1 分形和多重分形参数以及土壤质地与有机质含量的平均值、标准偏差及单因素方差分析^a

Table 1 Means, ANOVA result of soil texture, fractal and multifractal parameters and soil texture and soil organic matter (SOM)^a

土地利用 Land use	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	粘粒 Clay (%)	D	D_{silt}	D_{sand}	D_0	D_1	D_1/D_0	土壤有机质 SOM (g/kg)
林地 Woodland	28.12 a	66.54 a	5.35 a	2.28 a	1.86 a	2.95ab	0.94 a	0.84a	0.90a	13.29a
灌木地 Shrub land	31.92 b	63.42 cd	4.66 b	2.22 cd	1.80b	2.95 b	0.92b	0.81 cd	0.87b	7.40 b
退耕还林地 ASFPb	36.26 b	59.52 d	4.22 b	2.21d	1.80b	2.94b	0.92 b	0.80 d	0.87 b	5.28 c
梯田 Terrace	27.32b	67.20b	5.49 a	2.26 ab	1.82b	2.96 a	0.92b	0.83b	0.90a	6.17bc
草地 Grassland	29.56 b	65.67 bc	4.77 ab	2.24bc	1.81b	2.95 ab	0.92b	0.82bc	0.88 ab	7.60b
F value	9.00 **	8.81 **	13.58 **	14.23 **	10.24 **	6.07 *	5.74 *	25.06 **	10.25 **	46.19 **

^a字母相同表示在 $p < 0.01$ 水平上差异不显著 Means within a column that share the same letters are not significantly different at $p < 0.01$ ASFP = abandoned slope farmland with planted trees 表示在 0.05 水平上显著 Significant at $p < 0.05$; * * 表示在 0.01 水平上显著 Significant at the 0.01 level

容量维 D_0 ,也称为计盒维数,提供土壤 PSD 的基本信息, $D_0 = 1$ 说明各尺度上各个分区域的体积百分比都不为零,而 $D_0 = 0$ 则说明各尺度上各个分区域的体积百分比都为零。在本研究中,各个土壤样品的粒径分布都是连续的 (图 4),并且分析的上下限定在 $0.3 \sim 1500 \mu\text{m}$,那么 D_0 值越大就代表土壤粒径分布的范围越宽 D_0 值越小就代表土壤粒径分布的越集中。由表 1 得出,林地土壤的 D_0 值最大,因此其分布范围也最宽,其余土地利用类型的 D_0 值相近,表明其分布范围相差不大。

信息维 D_1 为衡量土壤 PSD 的异质性提供了工具。 D_1 值越大说明土壤粒径分布范围越宽,且各分区域的体积百分比在各尺度上成均匀分布,即分布的异质性越大 D_1 越小说明分布范围越窄,各分区域的体积百分比的分布越不规则,即分布的异质性越小。所有样品中 D_1 随粘粒含量升高而升高 (表 1)。土地利用对 D_1 有显著的影响 (表 2)。 D_1 值依次为林地 > 梯田 > 草地 > 灌木地 > 退耕还林地,这与 D 和 D_{silt} 呈现相同的趋势。

由于 D_0 可用来衡量粒径分布的跨度, D_1 综合衡量分布跨度及分布的异质程度,因此有学者建议用 D_1/D_0 来衡量分布的异质程度^[7]。 D_1/D_0 与粘粒含量成正比,与粗颗粒含量成反比 (表 1),说明 PSD 的异质性也随细颗粒含量的增加而增加。梯田和林地土壤的 PSD 异质性相对较高,而退耕还林地的较低。

从以上的结果和讨论可以发现,几乎所有的分形和多重分形参数几乎都遵循这一次序 林地/梯田 > 草地 > 灌木地 > 退耕还林地,这与不同土地利用类型侵蚀强度的排序大体一致。这些相同的趋势可做以下解释：

土地利用通过冠层截留、降低降雨侵蚀力和水流输移能力来影响水土流失^{〔4〕},不同土地利用类型对侵蚀的抑制作用是不同的,林地的这种能力强,因此土层中细颗粒含量较多,而刚退耕而人工种植的地尚未成林,再加上人为干扰(植树),因此对侵蚀的抑制作用相对较弱,土壤细颗粒物质流失较严重。

表2 分形和多重分形参数、土壤质地、土壤有机质含量的相关分析

Table 2	Correlation analysis between soil texture, fractal and multifractal parameters and soil texture and soil organic matter (OM)								
	粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	D	D_{silt}	D_{sand}	D_0	D_1	D_1/D_0
粉粒 Silt	0.78 **								
砂粒 Sand	-0.79 **	-0.99 **							
D	0.99 **	0.83 **	-0.84 **						
D_{silt}	0.82 **	0.29 *	-0.30 *	0.76 **					
D_{sand}	0.66 **	0.98 **	-0.97 **	0.73 **	-				
D_0	-	-0.37 **	0.33 **	-	0.46 **	-0.54 **			
D_1	0.88 **	0.66 **	-0.7 **	0.92 **	0.80 **	0.51 **	0.35 *		
D_1/D_0	0.9 **	0.92 **	-0.94 **	0.89 **	0.47 **	0.89 **	-0.37 *	0.74 **	
SOM	0.51 **	0.30 *	-0.33 **	0.57 **	0.62 **	-	0.47 **	0.70 **	0.41 **

* 表示在 0.05 水平上显著 Significant at $p < 0.05$; * * 表示在 0.01 水平上显著 Significant at $p < 0.01$; - 表示无显著性 correlation was not significant at $p < 0.05$

3.3 土壤粒径分形与多重分形参数与土壤有机质含量的关系

如表 1 所示,土壤有机质 (OM) 含量排序为林地 > 草地 > 灌木地 > 梯田 > 退耕还林地。土壤有机质 (OM) 含量与 D_1 , D , D_{silt} 和 D_1/D_0 成显著的正相关 (表 2), 这可以做如下解释: 土壤的细颗粒物质有利于有机质在土壤中存留^{〔4,35〕}, 因此土壤有机质含量与细颗粒含量成很好的正相关关系 (表 2) 梯田中 SOM 含量低是由于作物秸秆被收割作为薪柴或牲畜饲料^{〔6〕}。土壤有机质是土壤质量评价的重要指标^{〔7,38〕}, SOM 含量与 D_1 , D , D_{silt} 和 D_1/D_0 的相关关系使得这些分形参数可能作为反映土壤质量的潜在指标。并且,分形和多重分形参数与土壤有机质的相关性要普遍高于土壤质地与有机质的相关性,所以土壤粒径分形和多重分形参数比质地更适宜来反映土壤质量。并且,信息维 D_1 区分土地利用影响的能力 ($F=25.06$) 仅次于土壤有机质 ($F=46.19$), 高于分形维数 D ($F=14.23$)、粘粒含量 ($F=13.58$)、 D_1/D_0 ($F=10.25$) 和 D_{silt} ($F=10.24$) (表 1)。

4 结论

黄绵土土壤粒径分布遵循 3 个尺度域; 土壤粒径的分形和多重分形参数 D , D_{silt} , D_{sand} , D_1 和 D_1/D_0 是从土壤粒径数据衍生出来,与土壤细颗粒成显著正相关,而与粗颗粒成负相关,由此可以用这些分形参数来反映土壤物理性质; 土地利用对所有 6 个分形参数 (D , D_{silt} , D_{sand} , D_0 , D_1 和 D_1/D_0) 有显著影响,因此可用这些参数来反映土地利用对土壤物理性质的影响。 D_1 , D , D_{silt} 和 D_1/D_0 与有机质含量成显著的正相关,因此这些参数可以作为反映土壤质量的潜在的物理性质指标,其实用性有待进一步探讨。

References :

〔1〕 Giménez D, Perfect E, Rawls W J, *et al.* Fractal models for predicting soil hydraulic properties : a review. *Eng. Geol.*, 1997, 48 :161 — 183.

〔2〕 Huang G H, Zhang R D. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, 2005, 127 :52 — 61.

〔3〕 Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions. *Ecological Modelling*, 2005, 182 :305 — 315.

〔4〕 Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research : a review. *Soil & Tillage Research*, 1995, 36 (-2) :1 — 20.

〔5〕 Turcotte D L. Fractals and fragmentation. *Geophys. Res.*, 1986, 91 (2) :1921 — 1926.

〔6〕 Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions : analysis and limitations. *Soil Sci. Am.*, 1992, 56 :362 — 369.

〔7〕 Wu Q, Borkovec M, Sticher H. On particle-size distribution in soils. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1993, 57 :883 — 890.

〔8〕 Bittelli M, Campbell G S, Flury M. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1999,

63 :782 — 788.

[9] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal character token by particle-mass distribution. Chinese Sci. Bull. , 1993, 38 :1896 — 1899.

[10] Huang G H, Zhan W H. Fractal property of soil particale size distribution and its application. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (4) :490 — 497.

[11] Millan H, Gonzalez-Posada M, Aguilar M, *et al.* On the fractal scaling of soil data Particle-size distributions. Geoderma, 2003, 117 :117 — 128.

[12] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, *et al.* Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland in northern China. Soil & Tillage Research, 2004, 75 :27 — 36.

[13] Hu Y F, Liu J Y, Zhuang D F, *et al.* Fractal dimension of soil particle size distribution under different land use / land coverage. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (4) , 336 — 339.

[14] Wang X D, Li M H, Liu S Z, *et al.* Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China. Geoderma, 2005, 134 (1-2) :56 — 61.

[15] Martín M A, Rey J M, Taguas F J. An entropy-based parametrization of soil texture via fractal modelling of particle-size distribution. Proc. R. Soc. Lond. Ser. A, 2001, 457 :937 — 947.

[16] Martín M A, Rey J M, Taguas F J. An entropy-based heterogeneity index for mass-size distributions in Earth science. Ecological Modelling, 2005, 182 :221 — 228.

[17] Posadas A, Gimenez D, Bittelli M, *et al.* Multifractal characterization of soil particle-size distributions. Soil Sci. Soc. Am. , 2001, 65 :1361 — 1367.

[18] Montero E, Martín M A. Hölder spectrum of dry grain volume-size distributions in soil. Geoderma, 2003, 112 (0) :197 — 204.

[19] Wang D, Fu B J, Zhao W W, *et al.* Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China. CATENA, 2007, doi :10. 1016/j. catena. 2007. 03. 019

[20] Martínez-Casasnovas J A, Sánchez-Bosch I. Impact assessment of changes in land use/conservation practices on soil erosion in the Penedès-Anoia vineyard region (NE Spain). Soil & Tillage Research, 2000, 57 :101 — 106

[21] Basic F, Kisić I, Mesic M, *et al.* Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia. Soil & Tillage Research, 2004, 78 :197 — 206.

[22] Wang F, Li R, Wen Z M, *et al.* Problems and proposals on policy of converting cropland into forest and grassland : a case study Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Social Science Edition). 2003, 3 (1) :60 — 65.

[23] Nelson D W, Sommers L E. A rapid and accurate method for estimating organic carbon in soil Proceedings of the Indiana Academy of Science, 1975, 84, 456 — 462.

[24] Katz A J, Thompson A H. Fractal Sandstone Pores :Implications for Conductivity and Pore Formation. Physical Review Letters, 1985, 54 (2) : 1325 ~ 1328.

[25] Rényi. A Probability theory Nortn Lolland, Amsterdam, 1970

[26] Chhabra A B, Jensen R V. Direct determination of the f (k) singularity spectrum. Phys Rev Lett, 1989, 62 :1327 — 1330.

[27] Kravchenko A, Boast C W, Bullock D G. Multifractal analysis of soil spatial variability. Agron, 1999, 91, 1033 — 1041.

[28] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication. Univ of Illinois Press, Chicago, IL, 1949.

[29] Martín M A, Montero E. Laser diffraction and multifractal analysis for the characterization of dry soil volume-size distributions. Soil & Tillage Research, 2002, 64 :113 — 123.

[30] Konert M, Vandenberghé J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis : a solution for the underestimation of the clay fraction. Sedimentology, 1997, 44 :523 — 535.

[31] Grout H, Tarquis A M, Wiesner M R. Multifractal analysis of particle size distributions in soil. Environ. Sci. Technol. , 1998, 32 :1176 — 1182.

[32] Zhao H B, Liu G B, Cao Q Y, *et al.* Influence of Different Land Use Types on Soil Erosion and Nutrition Care Effect in Loess Hilly Region. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (1) :20 — 24.

[33] Liu H F, Zhu Q K, Cao Q Y, *et al.* Effects of different land uses and land mulching modes on runoff and silt generations on Loess Slopes. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23 (4) :137 — 141.

[34] Lobe I, Amenlung W, Du Preez C C. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soils of the South African Highveld.

Eur. J. Soil. Sci. , 2001, 52 :93 — 101.

[5] Fullen M A, Booth C A, Brandsma R T. Long-term effects of grass ley set-aside on erosion rates and soil organic matter on sandy soils in east Shropshire, UK. Soil & Tillage Research, 2006, 89 (1) :122 — 128.

[6] Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al.* Analysis on soil nutrient characteristics for sustainable land use in Danangou catchment of the Loess Plateau, China. Catena, 2003, 54 :17 — 29.

[7] Dumanski J, Pieri C. Land quality indicators :research plan. Agriculture Ecosystems and Environment, 2000, 81 :93 — 102.

[8] Liu G B, Xu M X, Li R, *et al.* Assessment of a small catchment on the Loess Plateau, in Regional Water and Soil Assessment for Managing Sustainable Agriculture in China and Australia, edited by T. R McVicar *et al.* ACIAR Monograph No. 84, 2002. 139 — 154.

参考文献：

[9] 杨培岭, 罗远培. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38 (10) :1896 ~ 1899.

[0] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用. 土壤学报, 2002, 39 (4) :490 ~ 497.

[3] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方, 曹红霞, 闫慧敏. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征. 土壤学报, 2005, 42 (1) :336 ~ 339.

[2] 王飞, 李锐, 温仲明, 等. 退耕还林 (草) 政策问题与建议——陕西省安塞县退耕还林 (草) 试点调查分析. 西北农林科技大学学报, 2003, 3 (1) :60 ~ 65.

[2] 赵护兵, 刘国彬, 曹清玉, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式水土流失及养分保蓄效应研究. 水土保持学报, 2006, 20 (1) :20 ~ 24.

[3] 刘卉芳, 朱清科, 孙中峰, 等. 黄土坡面不同土地利用与覆盖方式的产流产沙效应. 干旱地区农业研究, 2005, 23 (1) :137 ~ 141.