

黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响*

茹 豪¹ 张建军¹ 李玉婷¹ 杨宗儒² 冯换成²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 吉县林业局, 临汾 042200)

摘要: 采用单重和多重分形方法分析晋西黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布特征、不同土地利用类型对土壤粒径分形参数的影响以及分形参数与土壤粒径分布之间的关系。结果表明:黄土高原不同地区的土壤粒径分布不同,采用激光法测定的土壤粒径分布在粉粒域和砂粒域内,需要通过优化来重新确定粘粒域、粉粒域和砂粒域3个尺度域的界线。通过测定得出研究流域内土壤粒径分布在20~100 μm较为狭窄的范围内,呈现明显的非均匀性,需要采用多重分形来表述其分布特征。粉粒域维数 D_{silt} 与粘粒和粉粒的体积分数呈极显著正相关关系($P<0.01$),而砂粒域维数 D_{sand} 与砂粒体积分数呈负相关关系且不显著,可以利用 D_{silt} 预测土壤质地的变化和不同土地利用类型遭受侵蚀的程度。不同土地利用类型对土壤粘粒、粉粒、砂粒的体积分数以及粉粒域维数 D_{silt} 、容量维数 D_0 、信息维数 D_1 和信息维数与容量维数的比值 D_1/D_0 有极显著影响($P<0.01$),对砂粒域维数 D_{sand} 有显著影响($P<0.05$),表明可用多重分形参数作为反映土地利用类型对土壤物理性质影响的指标。

关键词: 黄土高原 土地利用类型 土壤粒径分布 分形特征 土壤侵蚀

中图分类号: S151.9⁺5; S152.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0176-07

Fractal Features of Soil Particle Size Distributions and Its Effect on Soil Erosion of Loess Plateau

Ru Hao¹ Zhang Jianjun¹ Li Yuting¹ Yang Zongru² Feng Huancheng²

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Forestry Bureau of Ji County, Linfen 042200, China)

Abstract: Fractal theory was used as one of the methods to quantitatively analyze soil particle size distribution (PSD) because it can better describe soil physical properties. The single- and multi-fractal were used to analyze the features of the soil PSD, the effects of different land use types on fractal parameters and the relationship between fractal parameters and soil PSD. Results showed that soil PSD was diversity in different regions of the Loess Plateau. Soil particle size, which was measured by laser method, was mainly distributed in two power-law domains, named D_{silt} and D_{sand} . It was needed to redefine the domain boundary of D_{clay} , D_{silt} and D_{sand} . Soil particle size was distributed in range of 20~100 μm which was narrow and presented obvious heterogeneity, thus it was necessary to use multi-fractal method to describe soil particle distribution characteristics. The correlation analysis indicated that D_{silt} showed prominent positive correlation with content of clay and silt ($P<0.01$), D_{sand} showed negative correlation with sand content but not prominent. Consequently, D_{silt} can be used to predict the change of soil texture and soil erosion degree of different land use types. There was an extremely remarkable effect of land use types on clay, silt, sand content, D_{silt} , D_0 , D_1 and D_1/D_0 value ($P<0.01$), and remarkable effect on D_{sand} ($P<0.05$), which indicated that multi-fractal parameters can be the indexes to reflect effects on soil properties.

Key words: Loess Plateau Land use type Soil particle size distribution Fractal dimension characteristics Soil erosion

收稿日期: 2014-06-19 修回日期: 2014-08-10

* 国家林业公益性行业科研专项经费资助项目(201304308)

作者简介: 茹豪, 博士生, 主要从事水土保持与森林水文研究, E-mail: ruhao1987@163.com

通讯作者: 张建军, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持效益及森林水文研究, E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

引言

土壤粒径分布特征是最重要的土壤物理性质之一,它不仅与土体结构、成土过程关系密切,而且也影响着土壤水分的运动过程、土壤肥力状况及土壤侵蚀特征等^[1-3]。因此定量研究和描述土壤粒径分布特征是土壤物理学研究的重点之一。由于土壤颗粒具有不规则形状和自相似结构的特性,其分布呈现非均匀性,传统的土壤质地分类系统不能科学地反映土壤颗粒的分布特征。分形理论能够揭示物质局部的形态、结构、信息和功能等,可以表现出局部与整体的相似性,因此采用分形理论计算土壤粒径的分形维数可以间接反映土壤粒径分布的自相似性、差异性和土壤颗粒分布的均匀程度^[4-6],是描述土壤粒径分布的新途径。

研究人员最初采用单重分形理论研究土壤粒径的分布特征,指出分形维数可作为评价风蚀区土壤退化的指标^[7-9],但这种分形的局限性只能对土壤粒径分布进行整体性和平均性的描述^[10]。多重分形因能够科学描述土壤结构的局部异质性和非均匀性而备受关注^[11-15]。黄土丘陵沟壑地区在水力侵蚀作用下,抗蚀能力弱的土壤颗粒随水分运移,从而造成土壤粒径组成发生变化,而不同土地利用类型下土壤遭受侵蚀的程度不同^[16-19],因此,土壤的粒径分布特征可以反映不同土地利用类型对土壤侵蚀的防治作用。本文利用分形理论与方法定量分析黄土丘陵沟壑区土壤粒径的分布特征,探讨不同土地利用类型对土壤粒径分形参数的影响,以期黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用类型下土壤物理性质的研究提供基础科学资料,为该地区营造水土保持林提供理论支持。

1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域,属于晋西黄土梁状丘陵区。流域地理坐标 36°14' ~ 36°18'N,110°40' ~ 110°48'E,平均海拔高度 1 168 m,年均降水量 576 mm,6 ~ 9 月份降水占全年降水的 70% 左右,年均水面蒸发量 1 733 mm,年均气温 10℃,大于等于 10℃ 的积温 3 358℃,绝对最高气温 38.1℃,绝对最低气温 - 20.4℃,生长季昼夜温差 6 ~ 15℃,光照充足,多年平均日照时数为 2 565.8 h,无霜期平均为 172 d。流域大体上为自西向东走向,长约 14 km,面积 3 900 hm²。土壤为褐土,黄土母质。森林覆盖率为 79%。土地利用状况上游主要由辽东栎 (*Quercus wutaishanica*)、山杨 (*Populus davidiana*)、黑桦 (*Betula dahurica*)、丁香 (*Syringa*

oblata) 等组成的天然次生林,中游由刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 组成的人工林,下游为荒草地和农地。

2 研究方法

2.1 选择样地与样品采集

在研究流域内进行林分调查的基础上选择典型的刺槐林地、油松林地、侧柏林地、苹果林地、灌木林地、荒草地、农地作为研究样地,各样地的面积为 100 m²。流域土地利用类型分布及样地分布如图 1 所示。在各个样地内采用 5 点采样法,每个采样点距离中心采样点 3 m,取样点在样地的分布情况见图 2,采样深度 0 ~ 100 cm,每 10 cm 采集一个样品,将每层采集的样品分别混合装袋,土壤样品在室内摊开阴干,去根,过 2 mm 筛。

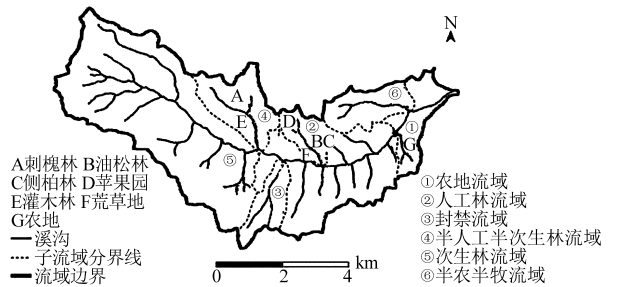


图 1 蔡家川流域土地利用类型分布及样地分布
Fig. 1 Distribution of land-use types and sample plot in Caijiachuan watershed

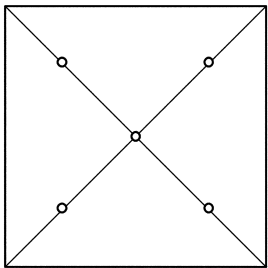


图 2 采样点分布
Fig. 2 Distribution of sampling points

2.2 土壤侵蚀量测定

在试验地内,选择坡面均一、能够代表试验地基本情况的地段安装试验装置(图 3),用 2 块长 2 m、宽 0.15 m 的钢板沿坡面方向嵌入土壤中形成冲刷槽,2 板间距 0.5 m,冲刷面 1 m²。使用容积为 200 L 的马里奥托瓶作为供水系统,以保证恒定的流速与流量。从马里奥托瓶流出的水用软管导入给水槽底部,使水流从给水槽底部上升,并溢流到试验区,这样可以保证溢流进入试验区水流的初速度为零,冲刷水流程经试验区后经集水槽汇入采样器,量取径流量,并进行采样,采样体积约 500 mL,在室内采用

过滤干燥法测定水样中的泥沙含量,用单位面积上单位体积冲刷水流的侵蚀量表示土壤抗冲性,单位为 $\text{g}/(\text{L}\cdot\text{m}^2)$ 。每组试验重复 5 次以消除误差。

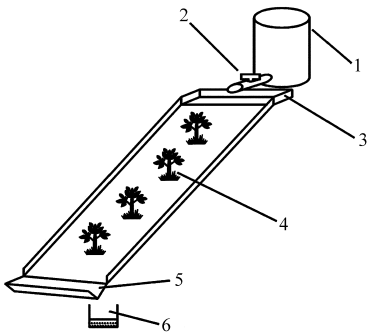


图 3 试验装置
Fig. 3 Sketch illustration of experiment

1. 供水箱 2. 阀门 3、5. 给水槽 4. 试验区 6. 水样

2.3 粒径分析与粒度分级

称取土样 5 g,加 30% 过氧化氢 (H_2O_2),在 72°C 下去除有机质,加盐酸 (HCl) 去除碳酸盐;加适量超纯水稀释后静置 5 min,除去上清液以除酸,反复操作至样品溶液 pH 值为 6.5 ~ 7;加入六偏磷酸钠 (NaHMP),超声处理 30 s 后用激光粒度仪 (Microtrace S3500 型) 测量土壤粒径的百分比^[20]。

土壤粒径分布分级根据美国制土壤质地分级标准,即粘粒 (粒径 $d < 0.002\text{ mm}$)、粉粒 ($0.002\text{ mm} < d < 0.05\text{ mm}$) 和砂砾 ($0.05\text{ mm} < d < 2\text{ mm}$)。在单重分形分析中,粒径设定为 $0 \sim 0.002\text{ mm}$ 、 $0.002 \sim 0.005\text{ mm}$ 、 $0.005 \sim 0.01\text{ mm}$ 、 $0.01 \sim 0.02\text{ mm}$ 、 $0.02 \sim 0.05\text{ mm}$ 、 $0.05 \sim 0.1\text{ mm}$ 、 $0.1 \sim 0.2\text{ mm}$ 、 $0.2 \sim 0.5\text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 1\text{ mm}$ 、 $1 \sim 2\text{ mm}$ 。在土壤粒径分布多重分形分析中,为更细致地反映土壤粒径分布,土壤颗粒粒径的分布范围为 $0.02 \sim 2\,000\text{ }\mu\text{m}$,按对数间隔分为 65 级。

2.4 土壤粒径单重分形参数

利用激光粒度仪可以准确、快速地获得土壤颗粒体积分布的数据^[4-5],因此本文采用土壤颗粒体积分形模型计算土壤单重分形维数 D 。计算式为

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

式中 V_{R_i} —— 粒径小于 R_i 的土壤颗粒总体积
 V_T ——土壤颗粒的总体积
 R_i ——某特定的粒径
 $R_{\max}$ ——土壤颗粒分级中最大粒径
 D ——土壤颗粒的体积分形维数

2.5 土壤粒径分布多重分形参数

在激光粒度仪测量区间 $I = [0.03, 2\,000]$ 内,划分为 64 个小区间 $I_i = [\varphi_i, \varphi_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, 64$,划分的取样间隔为粒径的对数等差递增值,

$\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$ 为常数,即第 1 个小区间的粒径分布范围 $I_1 = [0.03, 0.036]$,第 64 个小区间的粒径分布范围 $I_{64} = [1\,674, 2\,000]$ 。划分完 64 个小区间颗粒范围之后,需要做一个转换, $\varphi_j = \lg(\varphi_j/\varphi_1)$, $j = 1, 2, \dots, 65$,粒径分布范围被重新转换成算数递增的分布。由此构造一个新的无量纲区间 $J = [\lg(0.03/0.03), \lg(2\,000/0.02)] = [0, 5]$, J 被 2,4,8,16,32,64 等分后,区间大小 $\varepsilon = 5 \times 2^{-k}$ ($k = 1, 2, \dots, 6$),即 $\varepsilon = 2.5, 1.25, 0.625, 0.312, 0.156$ 和 0.078 ^[21]。 $\mu(\varepsilon)$ 为每个子区间土壤粒径分布的概率密度,即子区间 J_i 内所有的测量值 V_i 的加和,其中

$$V_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^{65} v_i}$$

利用 $\mu(\varepsilon)$ 构造一个配分函数组为

$$\mu_i(q, \varepsilon) = \frac{\mu_i(\varepsilon)^q}{\sum_{i=1}^N \mu_i(\varepsilon)^q} \tag{2}$$

式中 q ——实数
 $\mu_i(q, \varepsilon)$ ——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

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

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

利用式(3)得到的广义维数谱 $D(q)$ 能够详细地反映出土壤粒径分布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^[20]。

2.6 数据处理

数据处理与图表制作利用 Office Excel 2010 软件,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 PASW 18.0 统计软件。

3 结果与分析

3.1 土壤粒径分布特征分析

图 4 为流域内土壤质地分布图。由图 4 可以看出,研究流域内不同土地利用类型下的土壤质地为粉质壤土,粘粒体积分数变化范围为 2.16% ~ 5.81%,粉粒体积分数变化范围为 54.25% ~ 78.72%,砂粒体积分数变化范围为 21.28% ~ 53.24%。流域内土壤颗粒中粘粒体积分数较低,粉粒占主导地位。这种现象可能是黄土丘陵沟壑区严重的水土流失有关^[22-23],该区植被有效覆盖度较

低、地表糙率较小、短历时暴雨较多,从而导致土壤中细粒随径流流失,造成土壤颗粒粗化。

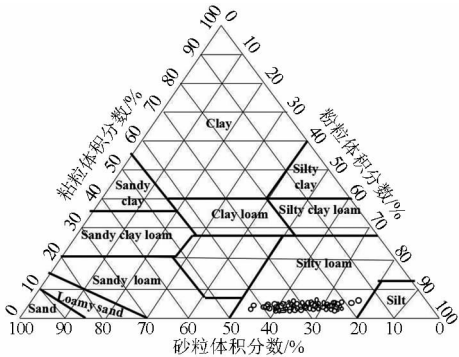


图 4 流域内土壤质地分布

Fig.4 Texture of analyzed soil samples in Caijiachuan watershed

图 5 为流域内 10 个随机土壤样本的土壤颗粒累积体积分数与土壤粒径间的关系。对土壤质地而言,质地均匀,则土壤颗粒绝大多数集中在相对狭窄的粒径范围内,土壤粒径分布曲线的异质性大。由图 5 可以看出研究流域内 80% 以上的土壤颗粒集中在 20 ~ 100 μm 这一狭窄的粒径范围内,不同粒径的土壤颗粒体积分数呈非均匀分布,说明流域内土壤粒径分布呈现出明显的异质性。

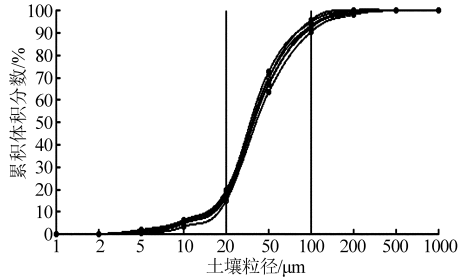


图 5 土壤样品粒径分布

Fig.5 Soil particle size distribution of soil samples

图 6 是 10 个随机样品土壤颗粒累积体积分数与土壤粒径双对数拟合曲线。研究表明,黄土粒径遵循粘粒域、粉粒域和砂粒域 3 个尺度域,由图 6 可以看出土壤粒径累积体积分数与粒径的双对数值在整体上不是线性关系,而是遵循 2 个尺度域,即粉粒域和砂粒域,本研究结果与一些学者的研究结果不一致^[21-24]。为了使粘粒域、粉粒域和砂粒域 3 个尺度域界线两侧线性拟合达到最优,经过调整后的粘粒域和粉粒域的界线介于 2.7 ~ 5.5 μm 之间,粉粒域和砂粒域的界线介于 103 ~ 121 μm 之间,以此算出粉粒域分形维数 D_{silt} 的平均值为 1.94, R^2 为 0.93,砂粒域分形维数 D_{sand} 的平均值为 2.91, R^2 为 0.82(表 1)。因此可以得出,黄土高原不同地区的土壤粒径分布不同。

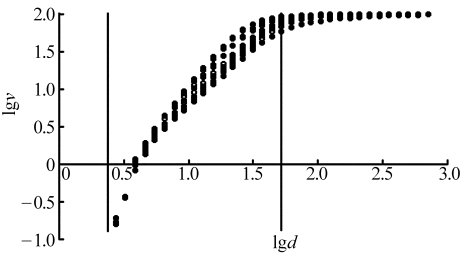


图 6 随机土壤样品累积体积分数 v 与粒径 d 的双对数曲线

Fig.6 Lg-lg plots of cumulative particle size distribution for randomly selected soil samples

表 1 土壤粒径单重与多重分形参数统计分析

Tab.1 Statistical analysis of soil fractal and multi-fractal parameters

参数	范围	平均值	变异系数/%	R^2
D_{silt}	1.89 ~ 1.98	1.94 ± 0.04	2.05	0.93
D_{sand}	2.83 ~ 2.95	2.91 ± 0.06	2.23	0.82
D_0	0.78 ~ 0.92	0.83 ± 0.03	3.14	0.90
D_1	0.79 ~ 0.84	0.81 ± 0.01	1.63	0.92
D_2	0.71 ~ 0.79	0.73 ± 0.01	2.28	0.91
D_1/D_0	0.87 ~ 0.95	0.93 ± 0.02	2.47	0.88

3.2 土壤粒径多重分形特征

表 1 为利用式(3)和式(4)计算出的所有样品的土壤粒径多重分形参数。其中容量维数 D_0 反映土壤粒径分布的基本信息,当 D_0 趋于 1 时,说明土壤粒径分布广,即各区间内土壤颗粒的体积百分比都不为 0,当 D_0 趋于 0 时,则说明各区间内土壤颗粒的体积百分比都为 0。信息维数 D_1 反映了土壤粒径分布的异质性, D_1 越大说明土壤粒径分布越宽,各区间内土壤颗粒的体积百分比在尺度上分布越均匀,分布的异质性越大,相反则异质性越小。

由表 1 可以看出,容量维数 D_0 的变化范围是 0.78 ~ 0.92, $D_0 < 1$ 表示土壤粒径分布在 0.03 ~ 2 000 μm 范围内有体积分数为零的分区。信息维数 D_1 较小,且只在 0.79 ~ 0.84 范围内变化,原因在于研究流域内土壤粘粒的体积分数较小(2.16% ~ 5.81%)。在不同类型土壤样品中当粘粒的体积分数变化范围较小时, D_1 变化范围也较小^[13,15]。 D_1/D_0 是衡量土壤粒径分布异质程度的指标, D_1/D_0 越接近于 1,表明土壤颗粒分布越集中。从表 1 可知 D_1/D_0 的平均值为 0.93,接近于 1,结合图 4 可以认为 80% 以上的土壤颗粒集中在 20 ~ 100 μm 范围内。

采用简单随机抽样方法(随机数表法)选取流域内 10 个土壤样品,计算出 $-10 \leq q \leq 10$ 范围内的广义维数谱 $D(q)$ (图 7)。由图 7 可见,当 $q > 0$ 时, $D(q)$ 的下降程度较小,当 $q < 0$ 时, $D(q)$ 的下降程度较大。 D_0 、 D_1 和 D_2 可以作为土壤粒径分布特征的

指标,能反映整体分形维数分布的不均匀程度。一般情况下有 $D_0 \geq D_1 \geq D_2$,且当土壤粒径表现为自相似或均匀分布时, $D_0 = D_1 = D_2$ ^[15]。研究流域内所有样品中 $D_0 > D_1 > D_2$,说明流域内土壤粒径分布是不均匀的,因此有必要对其进行多重分形分析。

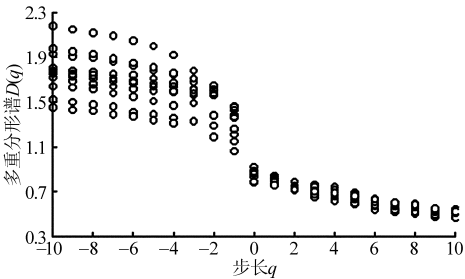


图 7 随机土壤样品粒径分布广义维数谱
Fig.7 Generalized dimensions spectra for soil particle size distribution of randomly selected soil samples

3.3 土壤粒径分形参数与土壤质地、土层深度、侵蚀量相关性分析

表 2 分析了单重与多重分形参数与土壤质地、土层深度和侵蚀量的相关性。从表 2 可以看出,砂粒体积分数越高, D_{silt} 越小,粘粒和粉粒体积分数越高, D_{silt} 越大。而 D_{sand} 与土壤颗粒体积分数关系不显著,因此可以认为利用 D_{silt} 可预测土壤质地的变化。本研究结果与前人研究一致^[24]。 D_0 与土壤质地的相关性不显著,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^[15]。 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($P < 0.01$),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 呈现明显的增加趋势,土壤粒径分布的异质性增加。因此当粘粒体积分数较高时,土壤粒径分布的非均匀性较大。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,土壤粒径分布的非均匀性明显增大^[21-22]。

土层深度与粘粒和粉粒体积分数呈极显著正相关($P < 0.01$),与砂粒体积分数成显著负相关($P < 0.05$)。说明随着土层深度的增加,粘粒和粉粒体积分数增加,砂粒体积分数减小。 D_{silt} 、 D_0 与土层深度均呈显著正相关($P < 0.05$),而 D_{sand} 与土层深度呈显著负相关($P < 0.05$)。其余分形参数与土层深度的相关性不显著。说明随着土层深度的增加, D_{silt} 、 D_0 增加,而 D_{sand} 减小。

侵蚀量与粘粒和粉粒体积分数呈显著负相关,与砂粒体积分数呈极显著正相关($P < 0.01$),说明随着粘粒和粉粒体积分数的增加,砂粒体积分数的减小,林地的侵蚀量越小。 D_{silt} 与侵蚀量呈显著负相关($P < 0.01$),而 D_{sand} 与侵蚀量相关性不显著,也说明可通过 D_{silt} 预测不同土地利用类型的侵蚀程度。

表 2 土壤粒径分形参数与土壤质地、土层深度及侵蚀量的相关系数

Tab.2 Correlation analysis between soil texture, soil depth, fractal and multi-fractal 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_1/D_0	土层深度	侵蚀量
粘粒体积分数	1									
粉粒体积分数	0.736 **	1								
砂粒体积分数	-0.813 **	-0.953 **	1							
D_{silt}	0.892 **	0.394 *	-0.384 *	1						
D_{sand}	0.041	0.216	-0.259	-0.285	1					
D_0	0.127	0.233	-0.293	0.062	-0.203	1				
D_1	0.689 **	0.561 **	-0.591 **	0.624 **	-0.368 *	0.506 **	1			
D_1/D_0	0.184	-0.002	-0.011	0.251	0.056	-0.855 **	0.048	1		
土层深度	0.724 **	0.593 **	-0.681 **	0.406 *	-0.358 *	0.215	0.329 *	0.026	1	
侵蚀量	-0.723 **	-0.901 **	0.574 **	-0.659 **	0.182	-0.117	-0.216	0.082	-0.897 **	1

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著。

3.4 土地利用类型对土壤粒径分形参数、侵蚀量的影响

通过方差分析可知,不同土地利用类型对粘粒、粉粒、砂粒的体积分数以及 D_{silt} 、 D_0 、 D_1 、 D_1/D_0 和侵蚀量均呈现出极显著影响($P < 0.01$) (表 3)。不同土地利用类型下的 D_{silt} 和粘粒体积分数从大到小依次为: 刺槐林、苹果林、油松林、草地、灌木林、农地、侧柏林。刺槐林、苹果林和油松林的 D_{silt} 比其他土地利用类型大,粘粒体积分数较高,侵蚀量也较小,

这是因为刺槐林和油松林能够降低风速,减小风和雨滴的动能,而苹果林则由于修筑梯田、加强人为管理等从而有效防止了土壤侵蚀,减缓了土壤细粒的流失。草地和灌木地由于没有高大的乔木层作为减少风力吹蚀和降雨侵蚀的缓冲层, D_{silt} 较刺槐林、苹果林和油松林低,侵蚀量也较大。农地位于沟谷内,地势平坦,地质疏松,短历时暴雨对其侵蚀严重,侵蚀量最大,因此 D_{silt} 较低。侧柏林位于迎风坡,且郁闭度及地表覆盖度低,受风力和

水力侵蚀严重,土壤细粒较少,土壤砂化严重, D_{silt} 最小。土地利用类型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^[17,25]。由此可以得出,黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型土壤的侵蚀、搬运和沉积过程不同,进而影响土壤粒径分布及分形参数。

表 3 土地利用类型对土壤粒径单重与多重分形参数的影响
Tab.3 Effect of land use types on capacity fractal and multi-fractal parameters

土地利 用类型	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_1/D_0	侵蚀量 /($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
刺槐林	5.32 ± 1.26 ^a	62.87 ± 3.02 ^b	31.81 ± 3.17 ^b	1.98 ± 0.02 ^a	2.93 ± 0.07 ^{ab}	0.92 ± 0.03 ^a	0.84 ± 0.01 ^a	0.91 ± 0.03 ^a	1.37 ± 0.23 ^a
油松林	4.38 ± 1.02 ^a	64.80 ± 3.42 ^a	30.83 ± 3.68 ^a	1.93 ± 0.03 ^a	2.94 ± 0.05 ^a	0.82 ± 0.03 ^a	0.80 ± 0.01 ^a	0.89 ± 0.03 ^b	1.44 ± 0.31 ^b
侧柏林	2.32 ± 1.46 ^c	64.86 ± 4.02 ^c	32.83 ± 4.36 ^a	1.89 ± 0.04 ^b	2.95 ± 0.06 ^{ab}	0.89 ± 0.02 ^b	0.81 ± 0.01 ^b	0.87 ± 0.02 ^{ab}	4.87 ± 0.75 ^c
苹果园	4.85 ± 1.37 ^a	65.42 ± 2.33 ^b	29.73 ± 2.51 ^c	1.96 ± 0.02 ^a	2.94 ± 0.05 ^a	0.89 ± 0.03 ^a	0.81 ± 0.01 ^a	0.90 ± 0.03 ^b	1.68 ± 0.43 ^{ab}
灌木林	3.25 ± 1.01 ^b	61.53 ± 2.56 ^b	35.22 ± 2.79 ^c	1.92 ± 0.03 ^b	2.94 ± 0.04 ^b	0.86 ± 0.02 ^b	0.82 ± 0.01 ^a	0.89 ± 0.03 ^b	3.27 ± 1.21 ^{bc}
草地	3.89 ± 1.07 ^b	65.22 ± 4.15 ^b	30.89 ± 4.26 ^a	1.93 ± 0.03 ^b	2.93 ± 0.06 ^b	0.91 ± 0.02 ^b	0.83 ± 0.01 ^a	0.90 ± 0.03 ^b	3.64 ± 1.32 ^{bc}
农地	3.16 ± 1.13 ^c	71.44 ± 2.22 ^c	25.40 ± 2.39 ^c	1.91 ± 0.04 ^b	2.95 ± 0.05 ^{ab}	0.78 ± 0.02 ^b	0.79 ± 0.01 ^b	0.88 ± 0.02 ^{ab}	33.21 ± 5.22 ^c
F 值	9.13 ^{**}	8.76 ^{**}	14.27 ^{**}	10.36 ^{**}	6.82 [*]	26.18 ^{**}	12.57 ^{**}	44.29 ^{**}	37.16 ^{**}

注:同列数值之后字母相同表示在 $P < 0.01$ 水平上差异不显著。

4 结论

- (1) 流域内的土壤粒径分布在粉粒域和砂粒域内,需要通过优化来重新确定粘粒域、粉粒域和砂粒域 3 个尺度域的边界。单重分形的方法不适合用来细致地分析黄土高原丘陵沟壑区土壤的粒径分布。
- (2) 流域内土壤样品粒径集中在 20 ~ 100 μm 较为狭窄的范围内,且所有土壤粒径的分布是不均匀的,表现出明显的分布异质性,需要采用多重分形来表述其分布特征。
- (3) 土壤样品中粘粒体积分数与 D_{silt} 呈极显著

正相关关系 ($P < 0.01$),粉粒体积分数与 D_{silt} 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$),而土壤砂粒体积分数与 D_{sand} 呈负相关关系且不显著,因此可以认为利用 D_{silt} 即可预测不同土地利用类型土壤质地的变化,在此基础上预判不同土地利用类型的侵蚀程度。

(4) 土地利用类型对土壤粘粒、粉粒、砂粒的体积分数以及 D_{silt} 、 D_0 、 D_1 和 D_1/D_0 有极显著影响 ($P < 0.01$),对 D_{sand} 有显著影响 ($P < 0.05$),因此可用多重分形参数作为反映土地利用类型对土壤物理性质影响的指标,但是其实用性需要进一步的研究。

参 考 文 献

1 Huang Guanhua, Zhang Renduo. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model[J]. Geoderma, 2005, 127(1-2): 52-61.

2 Hwang S II, Powers S E. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(4): 1103-1112.

3 Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3-4): 305-315.

4 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.

5 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(20): 1896-1899.

6 曾宪勤, 刘和平, 路炳军, 等. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报, 2008, 26(1): 65-70.

Zeng Xianqin, Liu Heping, Lu Bingjun, et al. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristic in the Beijing mountain[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(1): 65-70. (in Chinese)

7 Su Yongzhong, Zhao Halin, Zhang Tonghui, et al. Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland in northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75(1): 27-36.

8 Wang Xiaodan, Li Maihe, Liu Shuzhen, et al. Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China[J]. Geoderma, 2006, 134(1-2): 56-61.

9 Gao Guanglei, Ding Guodong, Wu Bin, et al. Fractal scaling of particle size distribution and relationships with topsoil properties affected by biological soil crusts[J]. PLoS ONE, 2014, 9(2): e88559.

10 Wu Q, Borkovec M, Sticher H. On particle-size distributions in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4): 883-890.

11 Martin M A, Rey J M, Taguas F J. An entropy-based heterogeneity index for mass-size distributions in earth science[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3-4): 221-228.

12 Miranda J G V, Montero E, Alvarez M C, et al. Multifractal characterization of saprolite particle-size distributions after topsoil

- removal[J]. *Geoderma*, 2006, 134(3-4): 373-385.
- 13 Montero E, Martin M A. Holder spectrum of dry grain volume-size distributions in soil[J]. *Geoderma*, 2003, 112(3): 197-204.
- 14 Moreno R G, Alvarez M C D, Requejo A S, et al. Multifractal analysis of soil surface roughness[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 512-520.
- 15 Posadas A N D, Gimenez D, Quiroz R, et al. Multifractal characterization of soil pore systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(5): 1361-1369.
- 16 Ahmadi A, Neyshabouri M R, Rouhipour H, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3-4): 305-311.
- 17 Bakker M M, Govers G, Kosmas C, et al. Soil erosion as a driver of land-use change [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 105(3): 467-481.
- 18 Covalada S, Gallardo J F, Garcia-Oliva F, et al. Land-use effects on the distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico) [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 186-194.
- 19 Szilassi P, Jordan G, van Rompaey A, et al. Impacts of historical land use changes on erosion and agricultural soil properties in the Kali Basin at Lake Balaton, Hungary[J]. *CATENA*, 2006, 68(2-3): 96-108.
- 20 白一茹, 汪有科. 黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 43-48.
Bai Yiru, Wang Youke. Monofractal and multifractal analysis on soil particle distribution in hilly and gully areas of the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 43-48. (in Chinese)
- 21 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 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. Relationship 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)
- 22 王德, 傅博杰, 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): 3081-3089.
Wang De, Fu Bojie, Chen Liding, et al. Fractal analysis on soil particle size distribution under different land-use types: a case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecology Sinica*, 2007, 27(7): 3081-3089. (in Chinese)
- 23 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成成分形分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 74-78.
Dang Yaai, Li Shiqing, Wang Guodong, et al. Fractal characteristics of soil particle composition for typical types of soil profile on Loess Plateau[J]. *Transaction of the CSAE*, 2009, 25(9): 74-78. (in Chinese)
- 24 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.
- 25 Bakker M M, Govers G, van Doorn A, et al. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: the importance of landscape pattern[J]. *Geomorphology*, 2008, 98(3-4): 213-226.

(上接第 154 页)

- 35 郑粉莉. 坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究[J]. *水土保持通报*, 1998, 18(6): 17-21.
Zheng Fenli. A study on rainfall erosion and runoff erosion [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, 18(6): 17-21. (in Chinese)
- 36 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D]. 杨凌: 中科院水利部水土保持研究所, 2012.
- 37 吴普特, 周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J]. *水土保持通报*, 1993, 13(3): 1-5.
Wu Pute, Zhou Peihua. Study on the relation between land slope and sheet flow erosion [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1993, 13(3): 1-5. (in Chinese)
- 38 耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 48-53.
Geng Xiaodong, Zheng Fenli, Liu Li. Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion process on purple soil hillslopes [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(6): 48-53. (in Chinese)
- 39 Bagarello V, Ferro V, Giordano G, et al. Effect of plot size on measured soil loss for two Italian experimental sites [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108(1): 18-27.
- 40 郑粉莉, 高学田. 坡面汇流汇沙与侵蚀-搬运-沉积过程[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 134-139.
Zheng Fenli, Gao Xuétian. Up-slope runoff and sediment and down-slope erosion-transport-deposition processes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 134-139. (in Chinese)
- 41 程琴娟, 蔡强国, 马文军. 我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性[J]. *地理研究*, 2008, 27(6): 1290-1298.
Cheng Qinjuan, Cai Qiangguo, Ma Wenjun. Study on sensitivity of soil surface crust formation in typical regions with serious soil and water loss, China [J]. *Geographical Research*, 2008, 27(6): 1290-1298. (in Chinese)
- 42 刘瑞. 我国四类典型土壤的表土结皮发育特征及区域差异研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- 43 和继军, 孙莉英, 蔡强国, 等. 坡面细沟发育特征及其对流速分布的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 862-870.
He Jijun, Sun Liying, Cai Qiangguo, et al. Characteristics of rill development on slope and theirs effects on flow velocity distribution [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 862-870. (in Chinese)